

災害環境研究プログラム

(課題解決型研究プログラム)

Environmental Emergency Research Program

平成28～令和2年度
FY2016～2020

NIES



国立研究開発法人 国立環境研究所

NATIONAL INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL STUDIES

<https://www.nies.go.jp/>

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第151号

NIES Research Project Report, No.151

SR - 151 - 2024

災害環境研究プログラム

(課題解決型研究プログラム)

Environmental Emergency Research Program

平成28～令和2年度
FY2016～2020

「災害環境研究研究プログラム」

(期間：平成 28～令和 2 年度)

プログラム総括：大原利眞

執筆者：

「環境回復研究プログラム」

プログラムリーダー：林 誠二

「環境回復研究 (1)」

執筆者：蛭江美孝、遠藤和人、倉持秀敏、山田一夫、山本貴士、山田正人

「環境回復研究 (2)」

執筆者：渡邊未来、越川昌美、辻 英樹、石井弓美子、森野 悠、仁科一哉、東 博紀、今泉圭隆、
玉置雅紀、大沼 学、堀口敏宏、吉岡明良、深澤圭太、高木麻衣、田中 敦、林 誠二

「環境創生研究プログラム」

プログラムリーダー：藤田壮

執筆者：五味 馨、辻 岳史、戸川卓哉、平野勇二郎、中村省吾、大場 真

「災害環境マネジメント研究プログラム」

プログラムリーダー：大迫政浩

執筆者：山田正人、肴倉宏史、遠藤和人、蛭江美孝、多島 良、石垣智基、鈴木規之、小山陽介、
今泉圭隆、中島大介、高澤嘉一、中山祥嗣、高木麻衣、牧 秀明、金谷 弦、大迫政浩

編 者：吉岡明良、戸川卓哉、小山陽介、林誠二

序

本報告書は、平成 28 年度～令和 2 年度の 5 年間にわたって実施した「災害環境研究プログラム」研究成果を取りまとめたものです。国立環境研究所では、長年にわたり培ってきた環境研究の蓄積をもとに、平成 23 年 3 月の東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故の発生直後から、国や地方自治体、多くの研究機関等と連携・協働して、様々な被災地支援の災害環境研究を行ってきました。その取り組みは、がれき等の災害廃棄物や放射性物質に汚染された廃棄物の処理処分、放射性物質の環境動態や生物・生態系影響、地震・津波による環境変化・影響、被災地の復興まちづくりと地域環境の創生など広範に及んでいます。平成 25 年 3 月には第三期中期計画を改訂し、「東日本大震災等の災害と環境に関する研究として、放射性物質に汚染された廃棄物等の処理処分技術・システムの確立や、放射性物質の環境動態解明、被ばく量の評価、生物・生態系への影響評価、災害後の地域環境の再生・創造等に関する調査・研究を、研究体制を整備して総合的・一体的に推進するとともに、福島県等他の機関との連携を図りつつ実施する」ことを明記し、3つの研究プログラムを編成してこれらを推進しました。そして、平成 28 年 4 月からは、被災地に根ざした調査研究を力強く継続的に進めるため、福島県三春町に整備された福島県環境創造センターの研究棟内に開設した福島支部を拠点として、福島県や日本原子力研究開発機構（JAEA）をはじめとする関連機関、様々な関係者と力を合わせて、被災地の環境回復と環境創生に向けた災害環境研究に取り組んでまいりました。令和 3 年 4 月からは名称を福島支部から福島地域協働研究拠点と改めて、地域の様々な関係者との一層の関係構築を図りつつ福島の環境復興や将来の大規模災害への環境面からの備えのためにより直接的な貢献を果たせるよう取り組んでいます。

本報告書では、主として第四期中長期計画に災害環境研究が明記された平成 28 年度～令和 2 年度の 5 年間の成果をとりまとめています。災害環境研究は事故直後から継続的に実施してきた研究であるため、平成 27 年度以前の成果も含んでいます。本報告書の成果は、被災地の環境回復と復興、さらには国内外で頻発している自然災害の備えに役立つものと確信しています。

最後に、本研究を実施するにあたり、環境省、福島県等の地方自治体、JAEA 等の研究機関や大学、民間機関をはじめ、多くの方々にご協力とご支援をいただきました。ここに深く感謝いたします。

令和6年12月

国立研究開発法人 国立環境研究所
理事長 木本昌秀

目 次

I 災害環境研究プログラムの全体概要	1
II 環境回復研究プログラム (1)	3
1 研究の概要	3
2 研究の成果	3
2.1 放射性物質を含む廃棄物等の減容化技術の開発・高度化	3
2.1.1 熱的減容化技術の開発	3
2.1.2 セメント技術適用	7
2.1.3 飛灰洗浄・クロマトグラフ濃縮と安定化	9
2.2 資源循環・廃棄物処理過程におけるフロー・ストックの適正化技術と管理手法の確立	12
2.2.1 フロー・ストックのリスク評価と管理システム開発	12
2.2.2 測定モニタリング管理手法開発	15
2.3 低汚染廃棄物等の最終処分及び除去土壌等の中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理手法の開発・提案	18
2.3.1 低汚染廃棄物等の最終処分技術開発と長期管理手法	18
2.3.2 除去土壌等の保管や中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理	20
2.3.3 コンクリート技術を適用した処分場施設の適正化	23
2.3.4 汚染廃棄物長期管理のための水処理技術の開発	25
2.3.5 県外処分技術開発戦略	27
2.4 まとめ	32
III 環境回復研究プログラム (2)	33
1 研究の概要	33
2 研究の成果	34
2.1 多媒体環境における放射性物質の動態解明及び将来予測	34
2.1.1 多媒体環境における放射性物質の動態解明	34
2.1.1.1 山菜への放射性セシウム移行特性	34
2.1.1.2 森林河川における溶存態セシウム ¹³⁷ 濃度形成機構について	35
2.1.1.3 ダム湖における放射性セシウムの挙動について	36
2.1.1.4 河川における溶存態放射性セシウム濃度の規定要因	38
2.1.1.5 淡水生態系における放射性セシウム移行特性	38
2.1.2 多媒体環境における放射性物質の将来予測	41
2.1.2.1 大気モデルを用いた初期動態と中長期動態の推計	41
2.1.2.2 森林内の放射性Cs動態予測：樹種や森林管理に着目して	44
2.1.2.3 流域モデルによる陸域での放射性物質の中長期予測	45
2.1.2.4 沿岸域・閉鎖性水域における放射性セシウムの動態予測	47
2.2 環境放射線と人為的攪乱による生物・生態系影響に関する研究	48
2.2.1 低線量放射線による生物影響	48
2.2.1.1 DNA損傷モニタリング細胞を用いた低線量放射線による突然変異の評価	48
2.2.1.2 アカネズミを対象とする雄性生殖器の被ばく影響評価	50
2.2.1.3 震災・原発事故後の福島第一原発周辺の潮間帯における無脊椎動物の群集及び個体群レベルの変化	52

2.2.1.4	陸域生態系モニタリングにおけるデータ公開・評価	55
2.3	生活圏における人への曝露量評価	59
2.3.1	大気中の放射性セシウム濃度とその変動要因解析	59
2.3.2	避難指示解除区域の室内環境への影響	60
2.3.3	曝露モデルと大気拡散モデルを用いた事故後初期の甲状腺被ばく線量推計	62
2.3.4	自家採取食物摂取による内部被ばく線量推計に関する研究	64
2.4	まとめ	60
IV	環境創生研究プログラム	66
1	研究の概要	66
2	研究の成果	67
2.1	環境創生の地域情報システムの開発 (PJ1)	67
2.1.1	地域環境情報データベースの構築	67
2.1.2	地域統合評価モデルの開発	68
2.1.3	環境回復・創生におけるコミュニティ・ガバナンス	72
2.1.4	福島原発事故発生後の森林資源をめぐるコミュニティ・ガバナンスに関する実証的研究	75
2.1.5	環境創生に向けた社会コミュニケーション手法に関する研究	76
2.2	環境創生の地域シナリオ解析モデルの開発 (PJ2)	79
2.2.1	地域特性に応じたエネルギーシステムの計画プロセス	79
2.2.2	地域バイオマス資源を活用した森林復興シミュレーション	84
2.3	参加型の環境創生手法の開発と実装 (PJ3)	91
2.3.1	環境情報技術による社会コミュニケーション手法	91
2.3.2	地域エネルギーデータの解析と応用事例	95
2.4	まとめ	99
V	災害環境マネジメント研究プログラム	100
1	研究の概要	100
2	研究の成果	102
2.1	災害時の資源循環・廃棄物マネジメント強靱化戦略の確立	102
2.1.1	手選別技術の最適化に関する研究	102
2.1.2	災害廃棄物利活用に向けた評価技術の開発	104
2.1.3	災害時の生活排水分散処理システムに関する研究	106
2.1.4	災害廃棄物処理に係るマネジメント手法・ツールの開発	107
2.1.5	熱帯アジアにおける都市水害未然防止のための廃棄物適正管理に関する検討	109
2.2	災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究	112
2.2.1	災害時のリスク管理手法に関する研究	112
2.2.2	災害時の環境調査のための分析・調査手法に関する研究	114
2.2.2.1	災害時の環境調査のための網羅分析手法の研究	114
2.2.2.2	災害時の環境調査手法に関する研究	116
2.2.3	災害時の陸域での環境調査と曝露・疫学に関する研究	118
2.2.3.1	2016年熊本地震による地下水、環境水質汚染に関する研究	118
2.2.3.2	災害疫学に関するツールの整備	120

2.2.4	災害時の海域での環境調査と影響に関する研究	120
2.2.4.1	三陸沿岸内湾の底質の石油・炭化水素汚染	120
2.2.4.2	干潟生態系への震災影響と回復	121
2.3	災害環境研究ネットワーク拠点の構築	123
2.3.1	災害環境分野に関する情報プラットフォームの設計・開発	123
2.3.2	災害環境分野における人材育成システムの設計・開発	125
2.4	まとめ	128

[資料編]

1	研究の組織と研究課題の構成	130
1.1	研究の組織	123
1.2	研究課題と担当者	123
2	研究成果発表一覧	135
2.1	誌上发表	135
2.2	口頭発表	150

I 災害と環境に関する研究の全体概要

福島復興再生基本方針（平成24年7月13日閣議決定）及び推進戦略等に基づき、災害と環境に関する研究（災害環境研究プログラム）を推進した。具体的には、平成28年度に福島県環境創造センター内に開設した国環研福島支部を災害環境研究活動の拠点として、「環境創造センター中長期取組方針」（平成27年2月策定、平成31年2月改定 環境創造センター）に則り、福島県及び日本原子力研究開発機構（JAEA: Japan Atomic Energy Agency）とそれぞれの強みを活かした適切な役割分担のもと連携するとともに、他の国内外の関係機関・研究ステークホルダー等とも連携し、国環研がこれまで実施してきた災害環境研究の3つの研究プログラムである「環境回復研究」、「環境創生研究」及び「災害環境マネジメント研究」を更に継続・発展させた（図1）。

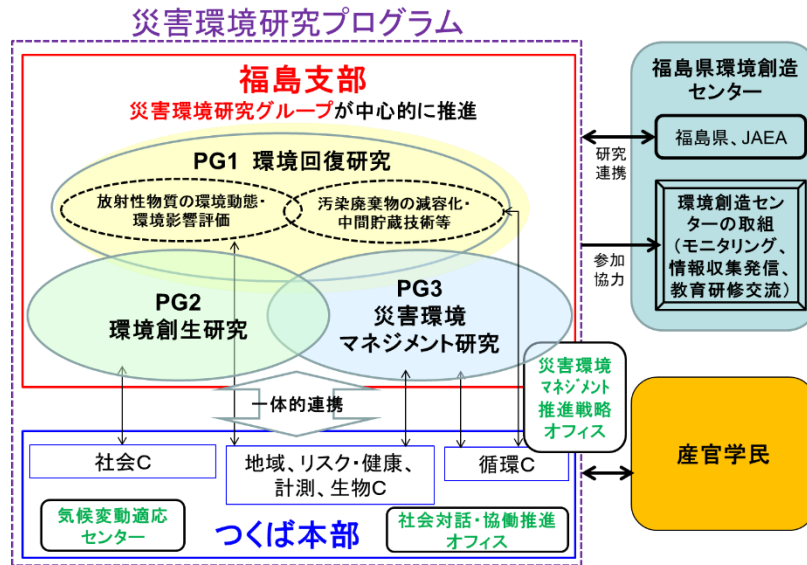


図1 災害環境県境研究プログラムの全体構成

環境回復研究プログラム（PG1）では、東日本大震災に伴う原子力災害からの環境回復を進める上で、放射性物質に汚染された廃棄物等の適切な保管・中間貯蔵及びこれらの減容・再生利用・処分に関する技術システムの構築、並びに、様々な環境中における放射性物質の長期的な動態把握と環境影響評価が重要な課題となった。そこで、以下の2つの研究に取り組んだ。

- ・放射性物質に汚染された廃棄物等の減容化・中間貯蔵技術等の確立（環境回復研究プログラム（1））

国の喫緊の最重要課題である中間貯蔵と県外最終処分に向けた減容化技術等の研究開発に取り組むとともに、指定廃棄物等の処理処分に係る技術的課題解決のための研究開発を進めた。

- ・放射性物質の環境動態・環境影響評価と環境保全手法の構築（環境回復研究プログラム（2））

森林・水域等の環境中に残存している放射性物質の環境動態に関する長期的観点からの調査・研究と、帰還地域における長期的環境影響評価及び、生活者の安全安心な生活基盤確保のための生活環境リスク管理手法の構築、生態系サービスを含めた生態系アセスメントを実施した。

環境創生研究プログラム（PG2）では、福島県の浜通り地域を対象として自治体等官民関係主体と連携して進めてきた復興まちづくり研究を発展させて、持続可能な地域の実現に資する地域の環境資源、エネルギー資源を活用した環境創生の未来シナリオとモデル事業の設計手法を開発した。技術と社会制度を組み合わせたシナリオを構築してその実現による環境面、社会経済面での効果を評価するとともに、社会モニタリングシステムの開発・構築を通じてその検証を進め、持続可能な地域社会を目指した体系的な施策を提案した。

災害マネジメント研究プログラム（PG3）では、災害廃棄物処理システムの統合的マネジメント手法や体系的な人材育成システムを開発・活用し、化学物質対策や原発災害への対応力に関する検証研究や地方環境研究機関等とのモニタリング・ネットワーク構築を進め、災害環境研究の国内・国際ネットワーク拠点の形成を目指した。

II 環境回復研究プログラム(1)

1 研究の概要

国の喫緊の最重要課題である中間貯蔵と県外最終処分に向けた減容化技術等の研究開発に取り組むとともに、指定廃棄物等の処理処分に係る技術的課題解決のための研究開発を進める。

具体的には以下の3つの課題に取り組む。

- (1) 放射性物質を含む廃棄物等の減容化技術（熱的減容化技術とセメント技術適用）の開発・高度化。
- (2) 資源循環・廃棄物処理過程におけるフロー・ストックの適正化技術と管理手法の確立（フロー・ストックのリスク評価と管理システム開発、測定モニタリング管理手法開発）。
- (3) 低汚染廃棄物等の最終処分及び除去土壌等の中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理手法の開発・提案。

(1)については、対策地域内の仮設中間処理や中間貯蔵における焼成や溶融等の熱的減容化プロセス等における放射性セシウムの挙動を解明し、中間貯蔵で必要となる熱的減容化技術と県外最終処分に向けての高濃縮物の廃棄体作製等に関する技術開発に取り組むとともに、汚染廃棄物を取り扱う中間処理施設等の適正な維持管理及び解体手法を提示する。

(2)については、放射性物質による汚染地域で発生する廃棄物・副産物の処理処分や再生利用で流通するフロー・ストックの定量化とデータベース化、及びリスクに応じた保管、処理、処分の方法、再生利用の用途を合理的に選択する手法を構築する。また、事故由来放射性物質の測定モニタリング手法の開発と検証及び福島第一原発近傍の廃棄物管理で必要となる放射性セシウム以外の α 線、 β 線核種の評価方法を構築する。

(3)については、汚染廃棄物が埋め立てられた最終処分場の長期管理、除染で発生する除去土壌等の仮置場での保管や搬出、中間貯蔵の方法や貯蔵後の長期管理等に関する技術を開発・提案する。また、除去土壌等の有効利用を目的とした品質評価や管理方法、汚染廃棄物の貯蔵や処分に用いられるコンクリートの耐久性維持管理について検討するとともに、埋立地浸出水中の放射性セシウムを極低濃度域で連続的にモニタリングするシステムを開発する。

2 研究の成果

2.1 放射性物質を含む廃棄物等の減容化技術の開発・高度化

2.1.1 熱的減容化技術の開発

(1) 目的と経緯

2012年1月から放射性物質により汚染された土壌等の除染の措置が進められ、除染特別区域では、除染作業で発生した除染廃棄物や家屋解体等の廃棄物のうち、可燃物は仮設焼却施設において焼却により減容化されている。除染廃棄物等の焼却処理では、残渣として燃え殻（主灰）と排ガスに含まれる細かい灰（ばいじん、飛灰）が排出され、それらは中間貯蔵施設にて処理・保管される。もし、他の減容化技術を用いて放射性セシウムが高度に分離され、浄化物が土木資材等へ利用できれば、処理・保管する容量を劇的に低減させることができる。例えば、熱的減容化技術の一つであるシャフト式ガス化溶融技術は、廃棄物の可燃分を熱源として利用し、灰分を高温下で液状に溶融することができる。溶融炉の炉底に滞留する溶融物を急冷することでスラグと呼ばれるガラス状の固体が得られ、土木資材やセメント原料として利用することも可能である。そこで、除染廃棄物をガス化溶融する施設を調査し、スラグと残渣である飛灰について放射性セシウムの挙動を明らかにするとともに、スラグ中の放射性セシウム濃度の更なる低減化を目的に、放射性物質の汚染という点において制約がなくなるクリアランスレベル（放射性セシウム濃度が100 Bq/kg以下）とする減容化法を検討し、実施施設にてその有用性を検証した。さらに、スラグの安全性の評価として溶出試験を行い、放射性セシウムの溶出率を把握するとともに、低溶出率を確保するための溶融条件を検討した。

(2) 方法

除染廃棄物をシャフト式ガス化熔融炉にて処理している施設（処理能力：80t/日）において、まず、通常運転時におけるスラグ及び飛灰を採取し、それらの放射性セシウム濃度をゲルマニウム半導体検出器にて測定した。廃棄物等の高温処理下における放射性セシウムの挙動に関するこれまでの研究から1-4)、熔融炉へ塩素（Cl）分を添加すると塩化セシウム（CsCl）のガスとして放射性セシウムの揮発が促進されることが予想されることから、スラグからより多くの放射性セシウムを揮発除去させるために、揮発促進剤として塩化カルシウム（CaCl₂）及び廃ポリ塩化ビニル管（廃PVC管）を添加した処理運転も行った。各運転条件におけるスラグ及び飛灰の放射性セシウム濃度を測定し、次式を用いてスラグ及び飛灰への放射性セシウムの分配率を計算するとともに、添加剤が放射性セシウム濃度や分配率へ与える影響を考察した。なお、CaCl₂及び廃PVC管の添加量は、Cl含有量をベースに、最高でそれぞれ4.21%と4.63%とした。

$$\text{スラグへの放射性セシウム分配率} = \frac{(\text{スラグの発生量}) \times (\text{スラグ中の放射性セシウム濃度})}{[(\text{スラグの発生量}) \times (\text{スラグ中の放射性セシウム濃度}) + (\text{熔融飛灰の発生量}) \times (\text{熔融飛灰中の放射性セシウム濃度})]} \quad (1)$$

$$\text{熔融飛灰への放射性セシウム分配率} = \frac{(\text{熔融飛灰の発生量}) \times (\text{熔融飛灰中の放射性セシウム濃度})}{[(\text{スラグの発生量}) \times (\text{スラグ中の放射性セシウム濃度}) + (\text{熔融飛灰の発生量}) \times (\text{熔融飛灰中の放射性セシウム濃度})]} \quad (2)$$

また、スラグからの放射性セシウムの溶出試験については、ISOカラム試験を参考にスラグをカラム（50mm内径、高さ100mm）内に隙間なく充填し、純水をポンプでカラムの上部から下部にかけて流れるように送り、試験開始から64日まで、ある期間ごとにカラム内を通過した純水を回収した。回収した純水中の放射性セシウムをエムポアセシウムラドディスクに濃縮してゲルマニウム半導体検出器にて、ディスク中の放射性セシウム濃度を測定した。得られた濃度を純水中の放射性セシウム濃度へ換算し、試験前のスラグ中の放射性セシウム濃度と比較して、溶出率を決定した。

(3) 結果と考察

スラグと飛灰に対する放射性セシウム濃度を図II-1に、スラグと飛灰への放射性セシウムの分配率を図II-2に示す。添加剤を投入しない通常運転では、スラグと飛灰の放射性セシウムの濃度差は100倍以上あり、ガス化熔融処理は、基本的に放射性セシウムを揮発させ、飛灰に濃縮させる機能を有することが分かった。また、スラグと飛灰への分配率を比較すると、通常運転でも放射性セシウムの98.4%は飛灰へ分配されることが明らかになった。次に、CaCl₂を添加した場合には、図II-1及び図II-2のように、添加量が増加するにつれ、飛灰中の放射性セシウム濃度が高くなり、飛灰への分配率も増加する傾向が得られた。ガス状の放射性セシウムは排ガスの冷却過程において飛灰表面に凝結されることから、飛灰中の放射性セシウム濃度及び飛灰への分配率の増加から放射性セシウムの揮発が促進されたと判断される。飛灰への分配率は最大で99.8%に達した。通常運転時における飛灰への分配率との差は1.4%しかないが、スラグ中の放射性セシウム濃度レベルは一桁低くなり、スラグに対する浄化効果（放射性セシウム濃度の低減化）は極めて大きいことがわかった。また、本試験で得られたスラグ中の放射性セシウム濃度はクリアランス以下であり、放射性セシウム濃度に関しては規制なく土木資材等として利用できる可能性を示した。一方、廃PVC管を添加した場合には、CaCl₂の場合に比べてスラグ中の放射性セシウム濃度は劇的に低下しなかった。そこで、高温下における添加剤の挙動が異なると考え、熱重量・質量分析計を用いて高温時におけるPVC管とCaCl₂に対するClの放出挙動を観察した。その結果、PVC管は300℃～400℃付近でClがガス状物質として完全に揮発することがわかった。排ガスは熔融炉の下部から上部へ流れているため、炉内上部から廃PVC管が投入された場合には、速やかにガス状のClが廃PVC管から放出され、Cl分は炉内下部にある熔融部まで到達できないと予想された。したがって、廃PVC管はCl分を熔融炉内へ投入する添加剤としては不十分と判断された。一方、CaCl₂は高沸点を有し、1100～1200℃からClの揮発開始が観察されることから、熔融炉内の熔融部までClが存在できると予想される。放射性セシウムの揮発促進では、Cl分が熔融部まで到達することが重要であると考えられた。また、CaCl₂の添加が効果的であったが、少量の添加で十分な効果が得られることもわかった。そこで、熱力学平衡計算を用いてCaCl₂の添加効果を解析したところ、CaCl₂の添加はCsClガスの生

成には極めて有用であるものの、添加量が多すぎると逆に CsCl ガスの生成には不利であることが示唆され、CaCl₂の少量添加が効果的であることが理論的にも裏付けられた。

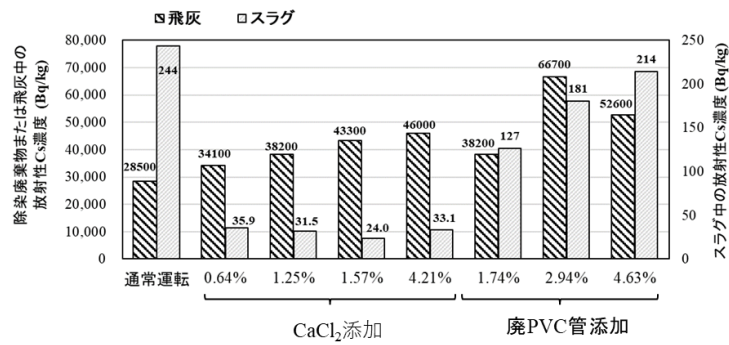


図 II-1 除染廃棄物のガス化溶融処理におけるスラグ及び飛灰中の放射性セシウム濃度

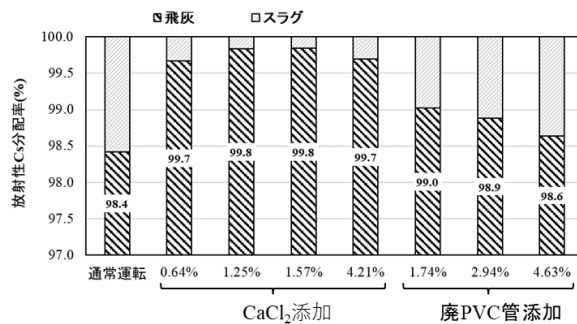


図 II-2 除染廃棄物のガス化溶融処理における放射性セシウムのスラグ及び飛灰への分配率

スラグからの放射性セシウムの溶出性を評価した溶出試験結果 (Cs-137の累積溶出率) を図II-3に示す。検出限界未満のものについては検出限界を溶出濃度とした場合の溶出率とし、グラフでは点線で示した。図より、1日目の溶出率が最も高く、一部例外はあるものの2日目以降は溶出率が徐々に減少する傾向であった。図II-4にスラグの塩基度 (CaO/SiO₂) と64日目までの累積溶出率の関係を示す。塩基度が高いほど累積溶出率が高くなる傾向であった。スラグの塩基度が高くなると溶出液のpHが高くなるため、スラグ表面に形成したSiOH層のSi-O結合がOH-によって切断されて溶解し、セシウムと同じアルカリ金属が溶出し易くなることが知られている5)。本試験でもSiの溶出率は塩基度に比例しており、類似の現象が起り、放射性セシウムの溶出率が塩基度と共に高くなったと推察される。これらの結果から放射性セシウムを含むスラグの再生利用を考慮する際には、スラグの塩基度を低く制御することが重要で、除染廃棄物をガス化溶融する際にも例えば塩基度が0.9程度(本研究の最低塩基度付近)になるように運転することが望ましいと考えられる。

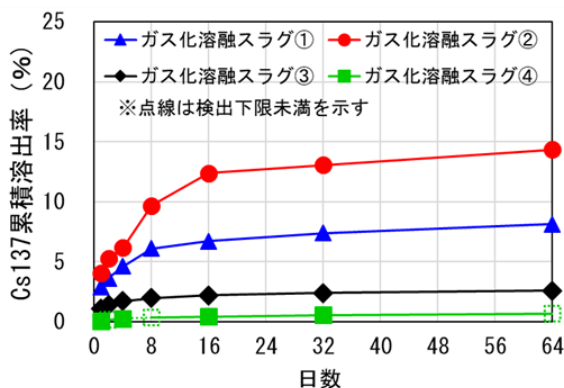


図 II-3 ガス化溶融スラグのCs-137の累積溶出率と試験日数の関係

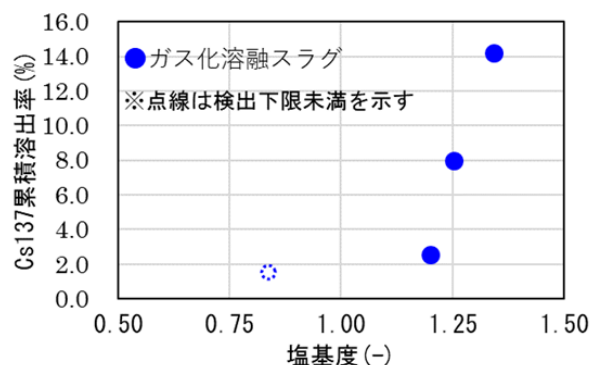


図 II-4 ガス化溶融スラグのCs-137累積溶出率とスラグの塩基度の関係

引用文献

- 1) Fujiwara H., Kuramochi H., Nomura K., Maeseto T., Osako M. (2017) Behavior of radioactive cesium during incineration of radioactively contaminated wastes from decontamination activities in Fukushima. *J. Environ. Radioactivity*, 178-179, 290-296.
- 2) 藤原大, 倉持秀敏, 武田尚弘, 小倉正裕, 大迫政浩 (2018) 加熱化学処理による焼却主ばいからの放射性セシウム除去および除去メカニズムの推定. *環境放射能除染学会誌*, 6(1), 3-16.
- 3) Fujiwara H., Kuramochi H., Maeseto T., Nomura K., Takeuchi Y., Kawamoto K., Yamasaki S., Kokubun K., Osako M. (2018) Influence of the type of furnace on behavior of radioactive cesium in municipal solid waste thermal treatment. *Waste Management*, 81, 41-52.
- 4) Yui K., Kuramochi H., Osako M. (2018) Understanding the Behavior of Radioactive Cesium during the Incineration of Contaminated Municipal Solid Waste and Sewage Sludge by Thermodynamic Equilibrium Calculation. *ACS Omega*, 3, 15086-15099.
- 5) 釜田陽介, 佐藤淳, 上林史朗, 阿部清一 (2015) 廃棄物熔融スラグからの鉛溶出挙動に及ぼすスラグ組成の影響. *廃棄物資源循環学会論文誌*, 26, 49-60.

2.1.2 セメント技術適用

(1) 目的と経緯

福島県飯館村において行われた飯館村蕨平地区における仮設資材化実証事業³⁾において、熱処理により最大約 10 万 Bq/kg の焼却灰や土壌が最大でも 100Bq/kg 未満に、すなわち除染効率 99.9% 程度で除染されることが示されている²⁾。除染後は、骨材として使用できる焼成物が得られる。この除染機構は、アルミノケイ酸塩に固定されている Cs を、多量の Ca 及び Cl を添加することで塩化揮発させていると推定された。単純に考えれば、Ca がより多くある場合に、より Cs 除去効率が高まる可能性が考えられた。Ca が最大量含有される素材としてポルトランドセメントがあり、主成分鉱物相はケイ酸三石灰、ケイ酸二石灰、アルミン酸三石灰である。ポルトランドセメントは骨材よりも高付加価値の資材として使用できるうえ、すでに放射能汚染した焼却灰のセメント固型化施設で使用されている。

飯館村で用いられた回転式資材化炉を想定すると、成分調整することでポルトランドセメントの製造は可能と考えられ、さらに、Cs を吸着したアルミノケイ酸塩が多量の Ca が添加された系ではケイ酸 Ca とアルミン酸 Ca に分解し塩化揮発しやすくなるとの推定のもと、より高効率な除染の可能性を、除染機構の解明、及び除染後の生成物のポルトランドセメントとしての性能評価とともに試みた^{3,4)}。

なお、熱処理の目的が放射性セシウム除去であるため、放射能濃度の低下が議論される場合も多いが、物質質量としては ppm オーダーの安定 Cs が主体であり、物質質量としては極めてわずかな Cs-134 と Cs-137 が含有されるため、放射性セシウム除去は物理化学的挙動がほぼ同一の安定セシウムの除去と同時に進行される点に注意が必要である。

(2) 方法

セシウム除去の最適条件とセシウム除去機構の解析には、実際に汚染した宅地土壌、ため池堆積物、焼却残渣を用いて、均熱体が径 50 mm 長さ 120 mm の回転式電気炉を用いた焼成を行った。放射性セシウムは 1,000~10,000 Bq/kg、安定セシウムは 5 ppm 程度であった。機構解析ではポルーサイト (アルミノケイ酸 Cs、 $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$) を用いた。ポルトランドセメントとしての性能評価のためには、放射性セシウムを含まないが全体の化学組成を模擬した土壌を用いて、径 370 mm 長さ 3,200 mm の内燃式ロータリーキルンを用いた焼成を、温度 1450°C、原料送入手量 30kg/h の条件で行った。安定セシウム濃度は 200 ppm に調整した。

(3) 結果と考察

試験の実施に先立ち、先に述べたアルミノケイ酸塩から Ca 添加によりセシウムが除去される気候を文献情報により調べた。図 II-5 に、熱処理時の化学組成調整後の Ca(Si+Al) モル比と処理後のセシウム残存率の関係を示す。予想通り、Ca をより多く添加することで、セシウムが処理対象物に残存する割合は対数的に減少することが分かる。

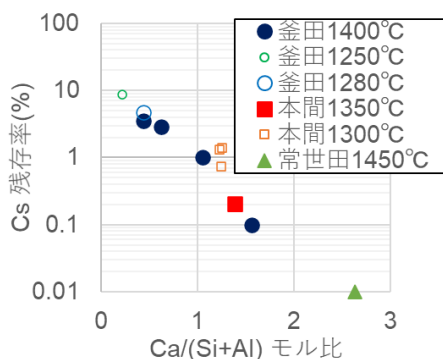


図 II-5 熱処理時の化学組成調整後の Ca(Si+Al) モル比と処理後の Cs 残存率の関係⁴⁾

セシウム除去の最適条件の検討は、焼成温度、Ca/Si 比、Cl 添加量について行った。図 II-6 に焼成温度とアルカリ元素の除去率の関係を示す。Cl は Cl/K モル比が 1.0 となるように添加した。温度が高くなるに従い、残存率は低下し、 $\text{Na} > \text{K} > \text{Cs}$ の順に残存率は低下することが分かる。処理対象物の種類の影響も Na や K では認められるが、セシウムでは定量下限未満となったこともあり差は明確ではない。なお、1450°C ではポルトランドセメントとして適する鉱物組成となった。

図 II-7 に Cl 添加量と元素残存率の関係を示す。ここでは Cl 添加量の指標として K に対する Cl のモル比を示したが、これは、セシウムが K より塩化揮発しやすいことは分かっているため、K が揮発するのに十分な Cl を添加することでセシウムの高効率な揮発を考えたためである。Cl/K モル比が大きくなると Na と K の残存率は顕著に低下した。

セシウムが揮発しにくいと予想される Ca/Si モル比が 2.2 と低い場合、Ca/Si モル比が 3.0 でも焼成温度が 1400°C と

低い場合には、Cl/K モル比がある程度高い方がセシウム残存率は低下し、セシウムはKよりも揮発しやすいため、Cl/K モル比は0.2においてもセシウム残存率は検出下限未満となった。また、Cl無添加の場合においても、Ca/Si モル比が3.0と高く、温度も1450°Cと高温では、セシウム残存率は検出限界以下となり、この場合は塩化揮発ではなく、単にセシウムはおそらくは酸化セシウムとしてほぼ全量が揮発し、より揮発しにくいNaとKにおいても相当量が揮発したことが分かった。

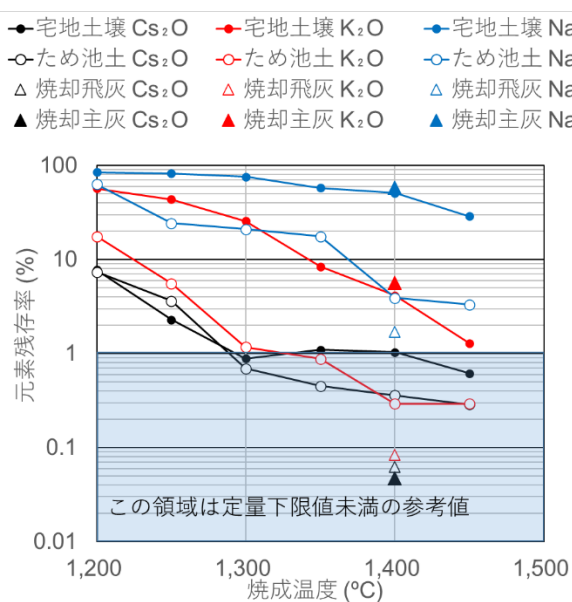


図 II-6 焼成温度とセシウム残存率の関係⁴⁾

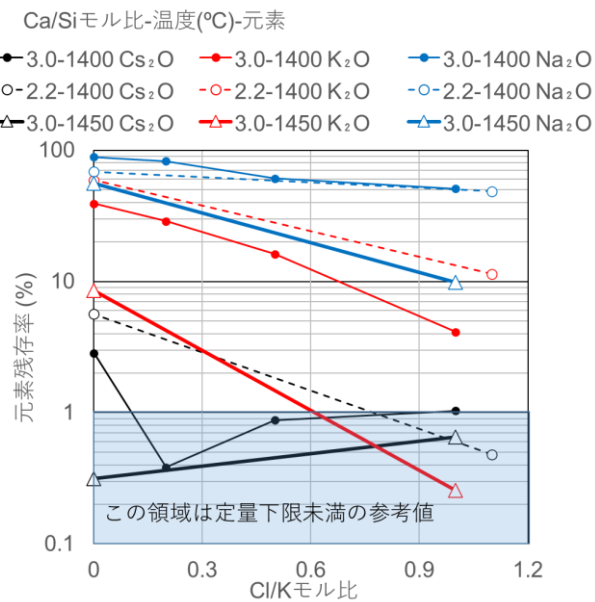


図 II-7 Cl/K モル比とセシウム残存率の関係⁴⁾

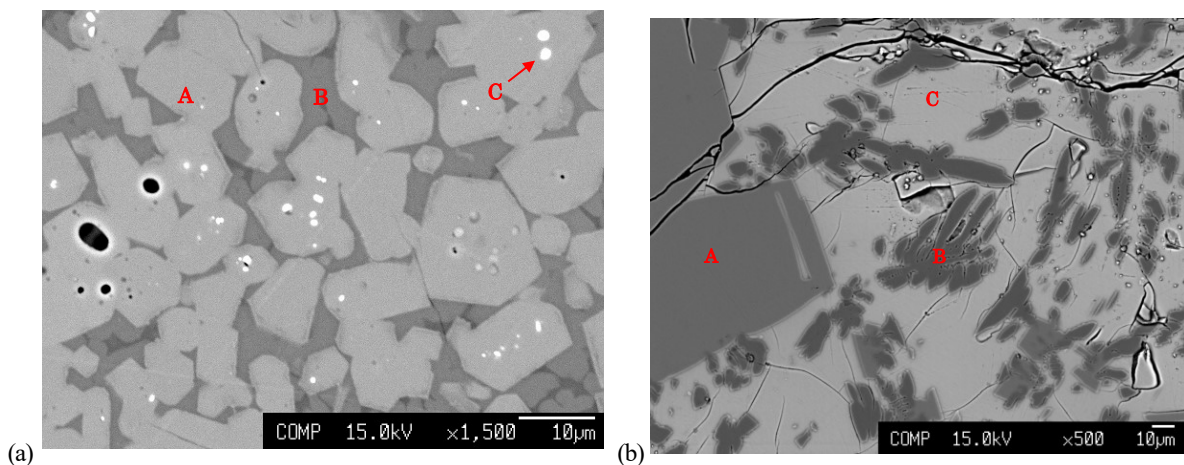


図 II-8 ポルーサイトの焼成後の組織（反射電子像） (a) Cs/Si 比=3.4、Cl/Cs 比=0、 (b) Cs/Si 比=3.4、Cl/Cs 比=5

ポルーサイトを用いた実験では、焼成温度を1450°Cとし、Ca/Siモル比を1.0~3.4、Cl/Csモル比を0~1で変動させた。Ca/Siモル比が高まるほどCsは揮発しやすく、Ca/Siモル比が3.4ではCl/Csモル比が0ではCs残存率は5%であったが、Cl/Csモル比を0.8とすることでCs残存率は0.1%となった。なお、Ca/Siモル比をこれ以上高くすると、系内には酸化Caが残存するのみで他の相と反応しないので、Ca/Siモル比を過剰に高くする意味はない。このほか、Ca/Siモル比とCl/Csモル比の変化により、鉱物組成がどのように変化するかをXRDにより詳細に検討し、Ca/Siモル比が1.0の場合は、Cl添加で非晶質化することが分かった。図II-8に焼成後の組織の反射電子像を示す。(a)のポルトランドセメント組成でCl/Csモル比を0とした場合には、ケイ酸Ca粒子内(aの点)に少量ながらセシウムが残存していること

が分かる (c の点)。酸化セシウムとして大半は揮発したものの、ケイ酸 Ca 粒子内に封じ込められたものと推定できる。(b) は、Cl/Cs モル比を 5 と過剰にした場合であるが、c で示す Cl 含有相が生成し、(a) とは全く鉱物組成が異なることが分かる。このマトリックス相は、 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{O}_{32}\text{Cl}_2$ と同定されており、高温では液相を形成していたものと推定され、この相にはアルカリが固溶しやすく、セシウム揮発が阻害される可能性も考えられる。つまり、セシウム揮発には、Ca/Si モル比と Cl/Cs モル比に最適値があるということになる。

模擬土壌から数 100kg 単位のポルトランドセメントを製造する検討では、原料中 200ppm のセシウムは、定量下限値 30ppb を下回り残存率は 0.1%未満となった。また、セメントとしての性能は JIS R5210 の規定を満足し、市販されている一般的セメントと比較しても同等の性能であった。

引用文献

- 1) 環境省、蕨平地区仮設資材化施設、放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト
- 2) http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/iitate/materials_warabidaira.html (2021 年 9 月 13 日閲覧)
- 3) 環境省、飯館村蕨平地区仮設資材化施設 実証事業の結果概要、放射性物質汚染廃棄物処理情報サイト
- 4) http://shiteihaiki.env.go.jp/initiatives_fukushima/waste_disposal/iitate/pdf/materials_warabidaira_result_1801.pdf (2021 年 9 月 13 日閲覧)
- 5) 常世田和彦、山田一夫、本間健一、市村高央、石田泰之、高野博幸、万福裕造、大迫政浩 (2018) 焼成技術を活用した汚染土壌の再利用に関する研究. 環境放射能除染学会誌、vol. 6, pp.63-72
- 6) Kazuo YAMADA, Kazuhiko TOKOYODA and Masahiro OSAKO (2018) Experimental Study on the Mechanism of Cs Removal from Contaminated Soil and Incineration Ash by Pyroprocessing, Global Environmental Research, 24, 159-172

2.1.3 飛灰洗浄・クロマトグラフ濃縮と安定化

(1) 目的と経緯

2011 年 11 月に閣議決定された基本方針において、除去土壌については、技術の進展を踏まえつつ、保管又は処分の際に可能な限り減容化を図るとされており¹⁾、前項で述べた熱処理の減容率は 1/10 に留まるため、その後工程として、セシウムが濃縮した熱処理後の飛灰からセシウムをさらに洗浄・濃縮する手法を検討した。

焼却飛灰の灰洗浄・濃縮技術については、すでに国立環境研究所でも検討が行われてきたが²⁾、濃縮物の線量率が高くなりすぎることを考慮した検討であり、最大濃縮を目指したものではなかった。さらに、飛灰の洗浄・濃縮後は、処分のために安定化が必要であり、安定化の手法も処分量に影響する。

そこで、熱処理として熔融法を想定し、熔融飛灰を洗浄した際の溶液組成を仮定し、イオンクロマトグラフを適用し、液相から連続的にセシウムを選択吸着することで濃縮し、その後、ジオポリマー化³⁾やリン酸ガラス化⁴⁾することで到達可能な減容化の程度を検討し、さらに、安定化体からの溶出特性についても消化した。なお、溶液からのセシウム吸着は、環境中では粘土鉱物により、また、汚染水処理ではゼオライト、結晶性ケイチタン酸、フェロシアン化遷移金属塩が用いられるが、これらのセシウム吸着は中性分子の吸着とは異なる機構、すなわちイオン交換で起きる。よって、すでに確立しているイオン交換理論をセシウムのイオン吸着に応用し、任意の溶液からセシウム吸着量を推定する方法も提示することとした。

(2) 方法

表II-1 に示す水溶性成分を持つ一般廃棄物焼却処分のための灰溶融施設から溶融飛灰を検討対象とした。なお、イオン交換反応の議論には、溶液濃度ではなく、溶液中のイオン濃度比と、イオン交換体である吸着剤に対するイオンの量が吸着量の決定因子となり、セシウムイオンの濃度、あるいはあるセシウムイオン濃度の溶液と吸着剤の液固比、あるいはこれらの要因で大きく変化するいわゆる分配係数（溶媒抽出で定義されている分配係数ではなく、放射性廃棄物分野において使用されている通称）は副次的な要因あるいは指標に過ぎないことには注意が必要である。

表 II-1 熱処理飛灰の可溶性イオン濃度の例

Ion	Cs ⁺	Na ⁺	K ⁺	Rb ⁺	Ca ²⁺	Sr ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	OH ⁻
% by mass	0.00106	17.99	9.72	0.014	1.40	0.0035	30.0	4.67	0.43
mol/kg	0.00008	7.83	2.49	0.000164	0.35	0.0004	8.46	0.73	0.25
対 Cs 比	1.00	97,900	31,100	2.05	4,380	5.00	-	-	-

が吸着量の決定因子となり、セシウムイオンの濃度、あるいはあるセシウムイオン濃度の溶液と吸着剤の液固比、あるいはこれらの要因で大きく変化するいわゆる分配係数（溶媒抽出で定義されている分配係数ではなく、放射性廃棄物分野において使用されている通称）は副次的な要因あるいは指標に過ぎないことには注意が必要である。

イオン交換体としては、各種の遷移金属のフェロシアン化物を用いた。フェロシアンイオンは焼成すること減容化できるため、セシウム吸着後に加熱分解した。ジオポリマー化は、セシウム吸着した吸着剤をメタカオリンと混合し400°Cで3時間加熱し、メタカオリン1に対し、水ガラス1.5、水0.4を加え、混合後1日放置し、ジオポリマー効果体を得た。さらに、50°Cで2週間加熱養生した。厚さ1cmの円盤状試験体を水中に浸漬し、漏出試験を行った。リン酸ガラス化の場合、セシウム吸着した吸着剤を400°Cで3時間焼成し、85%リン酸を添加後1日放置し、150°Cで3時間焼成することでオルトリン酸・焼成物混合体とし、さらに1100°Cで5時間焼成することで、セシウム含有リン酸同鉄ガラスとした。これらの試験ではCs-137を標識として添加し、γ線をNaI検出器で評価し、セシウムの気散、溶出を測定した。

(3) 結果と考察

イオン交換の原理から、イオン交換体Xへのセシウム吸着量（[X-Cs]）は、Xの基本特性であるイオン交換容量（CEC）とセシウムと競争吸着するNa⁺、K⁺、Rb⁺に対するそれぞれのイオン選択係数（ $K_{Cs/Na, K, Rb}$ ）及び、それぞれのイオン濃度により以下の式（1）で記述できる。なお、慣用的に用いられている分配係数との関係は別法にて例示した⁵⁾。

$$[X-Cs] = \frac{CEC}{1 + \frac{([Na^+]/[Cs^+])}{K_{Cs/Na}} + \frac{([K^+]/[Cs^+])}{K_{Cs/K}} + \frac{([Rb^+]/[Cs^+])}{K_{Cs/Rb}}} \quad (1)$$

表 II-2 各種フェロシアン化遷移金属塩のイオン交換容量とKに対するCsイオン選択係数（Cs/K濃度が1/30,000の場合）⁴⁾

遷移金属	Fe(CN) ₆ ⁴⁻ 1mol 当たりの CEC	K _{Cs/K}
Mn ²⁺	0.83 eq	3900
Fe ³⁺	0.53 eq	7500
Co ²⁺	0.99 eq	50000
Ni ²⁺	1.04 eq	48000
Cu ²⁺	1.55 eq	46000
Zn ²⁺	1.77 eq	2900

よって、合成吸着剤の性能評価は、CECとイオン選択係数により行った。なお、イオン選択性が生じる原因については、イオンの溶媒和によるエネルギーの安定化の程度と、吸着状態におけるイオンの水和度を決定するイオン吸着サイトの寸法により決定される。アルカリイオンの水和エネルギーは相対的に、Na>K>Rb>Csであり、水和イオン半径も同じ順となる。しばしば、吸着サイトの寸法がセシウムのイオン半径と一致することが重要とされるが（黒雲母風化物のヴァーミキュライトのフレイドエッジサイトなど）、本質は、吸着状態と溶液中での水和状態でのエネルギー差がイオン種類によりどのように変わるかであり、かつ、吸着サイトの柔軟性である。

合成した各種フェロシアン化物のCECとKに対するセシウムのイオン選択整数を表II-2に示す。この数値は、Cs/Kモル濃度比が1/30,000の場合のものであり、濃度比が異なると値は変化し得る。特徴として、CECとK_{Cs/K}は、遷移金属の種類により大きく異なる。フェロシアン化物としてよく知られたプルシアンブルー（フェロシアン化鉄）は、一連のフェロシアン化遷移金属塩としては、イオン交換容量もセシウムイオン選択係数も小さく、最大減容化には適さない。CECとK_{Cs/K}の関係から、Cu塩が最適と考えられる。

また、フェロシアン化遷移金属塩は酸化されやすく、セシウム吸着後、酸化によりいったん吸着されたセシウムはフェロシアン化遷移金属塩の酸化分解により放出されることに注意が必要である。ただし、Co塩は酸化されても安定なフェロシアン化物構造を維持するため、酸化抵抗性がある。また、フェロシアン化遷移金属塩は極めて微細な粒子であ

り、何らかの物質に担持しないとカラム充填することができない。そこでフェロシアン化 Cu をポリビニルアルコール (PVA) に担持した。PVA により酸化抵抗性も付与できる。

PVA 担持フェロシアン化 Cu ($\text{KCu}_{1.5}\text{Fe}(\text{CN})_6$) は、 $\text{CEC} = 1.94 \text{ eq/kg}$ 、 $\text{K}_{\text{Cs/Na}} = 150,000$ 、 $\text{K}_{\text{Cs/K}} = 14,000$ 、 $\text{K}_{\text{Cs/Rb}} = 176$ であった。表II-1 に示す、イオン濃度モル比では、 $\text{Na/Cs} = 97,9000$ 、 $\text{K/Cs} = 31,100$ 、 $\text{Rb/Cs} = 2.05$ であることから、イオン選択係数との比較から、この組成の飛灰においては主には K の影響を受けることになる。これらの数値から、任意の液相濃度と液固比条件でセシウム吸着量を予測することができる。なお、あるイオン組成と液固比で測定したセシウムの液固間でいわゆる分配係数はその条件においてのみ適用できるものであり、減容化を考えると膨大な量の溶液を少量の吸着剤 (イオン選択性が高い高性能の吸着剤により最大減容化しようとする、例えば 1 L の溶液に 1~100 mg の吸着剤を添加) することになり、実験も容易ではない。

流速を変化させたカラム試験 ($\text{NaCl} = 3 \text{ M}$ 、 $\text{KCl} = 0.9 \text{ M}$ 、 $\text{CsCl} = 0.02 \text{ M}$ 、測定時間短縮のため、現実の K/Cs 比 30,000 よりもセシウム濃度は 667 倍高い) によると、線速度 20 cm/h 以下では、破過容量は吸着容量の 50% まで一定で吸着平衡となり、使用した吸着剤の吸着速度を表す指標を得た。ここで使用したカラムは断面積 0.636 cm^2 、長さ 3.2 cm と小型のものであるため、現実の施設ではスケールアップした実験を行い、吸着塔の縦横比、多段化、処理水の線速度などを求めることになる。

過熱過程でのセシウム揮発は、 400°C までの吸着剤焼成・分解過程でも、 1100°C までのリン酸ガラス化の過程でも、 900°C までのメタカオリン過熱過程でも、検出されなかった。

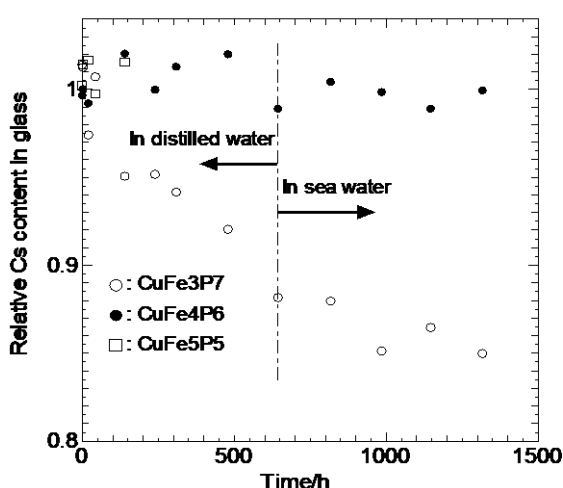


図 II-9 Cs 吸着したフェロシアン化 Cu のリン酸ガラス固化体からの水および海水への Cs 溶脱挙動 (凡例の数字はモル比) ⁹⁾

汚染廃棄物のかさ密度を 1.2 g/cm^3 、セシウム含有量 3 ppm、Cs-137 濃度 100 kBq/kg とすると、理想的に全セシウムが吸着剤に移行したとすると、吸着材中のセシウム濃度は 67 g/kg となる。これをジオポリマー化すると、セシウム濃度は $15,800 \text{ ppm}$ 、比重 1.77、減容率は $1/9,300$ 、非放射能は 530 MBq/kg となる。これをリン酸ガラス化すると、セシウム濃度は $74,00 \text{ ppm}$ 、比重 3.1、減容率は $1/64,000$ 、非放射能は 2.5 GBq/kg となる。最大濃縮した場合、100 万 t の廃棄物が 13 m^3 (ワンボックスカー 2 台) 減容化できる。

リン酸ガラス固化体からの溶出挙動を図 II-9 に示す。フェロシアン化 Cu とリン酸ガラスの比率を最適化することで、純水中でも海水中でも顕著なセシウム漏洩は認められなかった。ジオポリマーでは純水へも一定量が溶脱し、海水では海水中の K イオンなどのイオン交換により連続的に溶出したが、溶出は拡散則に従い、ジオポリマーの組成最適化により、厚さ 20 cm の固化体からは、15 年で 10% の漏洩と評価できた。

熱処理後の飛灰からセシウムを洗浄溶脱させ、PVA 担持したフェロシアン化 Cu によりイオン吸着し、リン酸ガラス固化した組み合わせの場合の特徴を列挙する。

- ・ 減容化度が 6 万分の 1 と非常に高い。
- ・ 熱処理を前工程に持つので、処理対象物の種類を選ばず、土壌、焼却灰などどんなものにも適用できる。
- ・ 洗浄・濃縮・固化に使用する装置に特殊なものはない。
- ・ 最終安定化体に有機物や水を含まないので放射線分解による水素ガス発生の問題がない。

引用文献

- 1) 環境省、中間貯蔵情報サイト <http://josen.env.go.jp/chukanchozou/facility/recycling/> (2021年9月21日閲覧)
- 2) 飛灰洗浄技術研究会、飛灰洗浄技術に関する技術資料(施設性能・設計に係る指針)、独立行政法人国立環境研究所、2014 https://www.nies.go.jp/fukushima/pdf/flyashwash_2014.6.pdf (2021年9月21日閲覧)
- 3) Tsuneki Ichikawa, Sadayuki Watanabe, Hiroyuki, Arai, Kazuko Haga, Kazuo Yamada, Metakaolin-based geopolymer for immobilizing concentrated Cs generated by volume reduction of ¹³⁷Cs-contaminated waste, J. Soc. For Remediation of Radioactive Contamination in the Environment, 8, 3-16, 2020.
- 4) Tsuneki Ichikawa, Kazuo Yamada, Ryota Iwai, Yukihiro Kanazawa, Ion Chromatographic Decontamination of ¹³⁷Cs-enriched Fly Ash Using Poly(vinyl alcohol)-bound Copper Ferrocyanide as Cs Adsorbent, J. Soc. For Remediation of Radioactive Contamination in the Environment, 8, 55-66, 2020.
- 5) 市川恒樹、山田一夫、岩井良太、金澤幸広、リン酸銅鉄ガラスを最終廃棄物とする放射性セシウム汚染廃棄物の6万分の1減容化プロセス. 第9回環境放射能除染研究発表会, 同予稿集, 9, 1B12, 2020.

2.2 資源循環・廃棄物処理過程におけるフロー・ストックの適正化技術と管理手法の確立

2.2.1 フロー・ストックのリスク評価と管理システム開発

(1) 目的と経緯

福島原発事故由来の放射性物質の非制御な拡散により地上にあった様々なものが広範囲に汚染された。これらが廃棄物となった際に処理処分の過程で生ずる健康リスクをできるだけ低減し、無用な風評被害を防止する必要がある。原発事故後に福島県内で発生した廃棄物・副産物が、処理処分や再生利用のために流通するフロー・ストックを、行政報告を用いてデータベース化し、廃棄物や建造物の表面汚染密度の調査データ等を用いて廃棄物・副産物とともに移動する放射性セシウム量に換算する手法を構築した。また、被曝リスクに応じた保管、処理、処分、再生利用の用途と技術を選択するため、廃棄物等に係る放射性セシウムのマクロなフロー分析モデル及び簡易被ばく線量評価ツールを用い、福島県内の線量が低い地域における木くず処理などの事例について、有効利用に伴う放射性セシウムフローの計算と追加的被ばく線量の評価を行った。

(2) 方法

廃棄物移動量の推計には2011年度から2015年度までの福島県における産業廃棄物管理票交付状況報告書及び電子マニフェスト登録等状況報告書に記載されている情報(以下、マニフェストデータ)を用いた。マニフェストデータの「事業所の名称」の分析、排出される木くずの割合、ならびに代表的な建築構造物設計図の分析により、木材・コンクリート等の建設系産業廃棄物の種類毎に屋外及び建屋外部部材の廃棄後の移動量を推計した^{1,2)}。

廃棄物にともない移動する放射性セシウム量は発生地の空間線量率より推定した。福島県内で建造物や道路等構造物の表面汚染密度を測定する調査を行い、部材の種類と水平(屋根等)・垂直(外壁等)の設置方向毎に空間線量率との関係を求めた^{3,4)}。また帰還困難区域内において未除染の建造物外面の表面汚染密度を2年3ヶ月間測定し、降水による洗い流し等による表面汚染密度の時間経過による低下、すなわち環境減衰を、現地で測定した降水量との関係として求めた^{5,6)}。この環境減衰と物理減衰により測定時の表面汚染密度を、廃棄物が発生した各年の年度末時点の値に補正した。

建造物については、それぞれの解体工事で排出される木くずの割合より、木造と非木造(主にRC造と推定)を識別した。これらについて、部材の種類毎に、建築構造物設計図の分析結果より求めた屋外及び建屋外部部材の割合を乗じて、外部材の排出量を求めた。これに、建築構造物設計図の分析より求めた外部へ露出する表面積と重量の比を乗じて、外部露出表面積を求めた。部材としての水平・垂直の設置方向毎に、求められた外部露出表面積に、発生地の空間線量率で推定され、発生時期で補正した表面汚染密度を乗じて、放射性セシウムの移動量を求めた。構造物について

は、設置方向は考えずに、先の調査や産業廃棄物処理施設で採取した試料について廃棄物の種類ごとに露出表面積の重量比を求め、発生地空間線量率で推定され、発生時期で補正した表面汚染密度を乗じて、放射性セシウムの移動量を求めた。

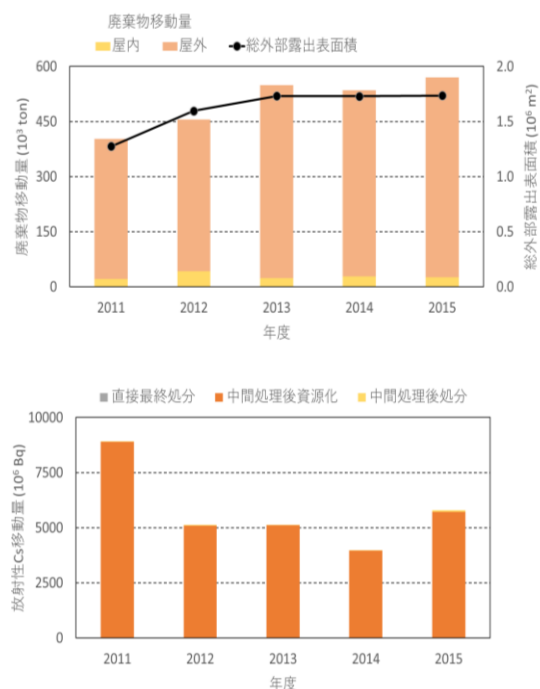
第3期中期計画において構築した廃棄物等に係る放射性セシウムのマクロなフロー分析モデル及び簡易被ばく線量評価ツールを用い、福島県内の線量が低い地域における木くず処理、バイオマス発電、汚泥処理、エコリサイクル製品製造、再生路盤材製造を事例とし、廃棄物等の有効利用に伴う放射性セシウムフローの計算と追加的被ばく線量の評価を行った。放射性セシウムフロー分析モデル⁷⁾は、橋本ら⁸⁾による日本の物質循環を推計するための物質フロー・ストックモデルにおける廃棄物処理プロセスモデルをベースとし、人工圏における放射性セシウムのフロー分析へ拡張したものである。このモデルはプロセスにおける物品と放射性セシウムの分配率パラメータと産物の各仕向け先へのフロー制御パラメータを格納し、廃棄物等の発生量や素材、製品の需要量及びそれらに含まれる放射性セシウム量（総量）を外生的に与えることで、連続する処理プロセスを通じた廃棄物等と放射性セシウムのフロー量及び各プロセスの投入物と産物の放射性セシウム濃度を計算できる。簡易被ばく線量評価ツールは、廃棄物等の処理・有効利用に関する既存の被ばく線量評価事例について、個別の評価事例ごとに単位濃度あたりの被ばく線量、線量換算係数、及び評価モデルやパラメータ等のその他の情報をデータベース化し、これを元に廃棄物等の処理・有効利用の一連のプロセス、作業における追加的被ばく線量を簡易的に評価できるようにしたものである。

各事例について扱われる物品とプロセスフローの情報を文献やヒアリングから整理し、フロー分析モデルの物品やプロセスの詳細化や追加を行った。また、モデルへの入力データとして、各事例について物品の放射性セシウム濃度や物品及び放射性セシウムの分配率や産物のフロー制御パラメータを文献やヒアリング等をもとに作成した。これらのデータをフロー分析モデルへ組み込み、対象とした物品及び放射性セシウムのフローを計算した。それらの比から各プロセスの投入物と産物の放射性セシウム濃度を計算し、これを入力値として簡易被ばく線量評価ツールによる各プロセスにおける追加的被ばく線量の簡易評価を行った。

(3) 結果と考察

建設系産業廃棄物のうち、コンクリートがらの処理・処分に伴う放射性セシウムの移動量を推計した。結果を図II-10に示す。2015年度では、マニフェストデータで特定された総工事件数8,133件のうち1,824件がコンクリートがらが発生する工事であった。移動量569,867トンのうち、屋外に設置されていた部材に由来するものが543,513トンであり、総露出表面積は1,734,649m²と推計された。この表面積と発生地空間線量率を用いて推定した放射性セシウムの処理処分に伴う移動量は約5.8GBqであり、ほとんどが中間処理後再生利用（骨材化）されていた。

評価結果の例として、福島県内の木くず処理の事例についての結果を図II-11に示す。この事例は、ある木くず処理施設における木くず（解体廃棄物）からのボード用木材チップ製造についての計算を行ったものであり、施設における調査結果をふまえて設定した放射性セシウム濃度が29Bq/kgの木くずを10万トン処理した場合のフローを計算している。また、物品及び放射性セシウムの分配率パラメータはプロセス各所における調査結果をふまえて設定している。物品及び放射性セシウムのフロー（左図）については、この事例では、投入された木くずは98%が製品（ボー



図II-10 建設系廃棄物の処理に伴う放射性セシウム移動量の推計結果（コンクリートがら）

ド用チップ)として施設外へ搬出されると計算された。これに対し、含有されていた放射性セシウムは総量の65%程度が製品へ移行し、35%程度はダスト等へ移行すると計算された。この結果をもとに計算した物品の放射性セシウム濃度を用いて各プロセスにおける作業者の追加的被ばく線量を簡易計算したところ(右図)、作業時間あたりの被ばく線量は0.0006~0.002 μ Sv/h程度と計算された。計算の元になった調査が行われた木くず処理施設ではバックグラウンド空間線量率が0.08 μ Sv/h程度(調査当時)であり、木くず処理における作業者の追加的な被ばく線量はバックグラウンドと比較して小さいと考えられた。なお、他の事例についても、バークを用いたバイオマス発電における焼却灰の運搬作業を除けば、作業者の追加的な被ばく線量はバックグラウンドと比較して小さいと考えられた。

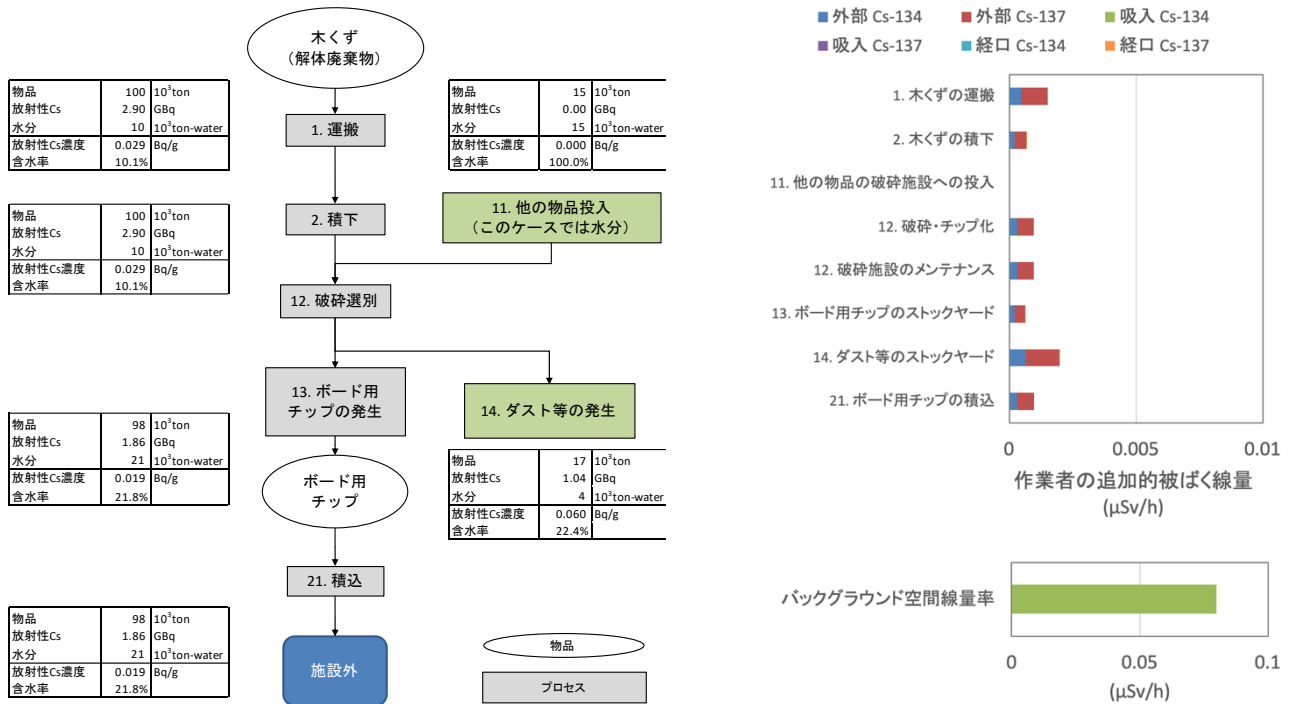


図 11 福島県内の木くず処理に伴う放射性セシウムのフローと追加的被ばく線量の簡易計算結果

引用文献

- 1) 山田正人, 吉田博文, 立尾浩一 (2017) 福島県における原発事故後の産業廃棄物の流れ. 第 6 回環境放射能除染学会研究発表会, 同要旨集, p.69
- 2) 山田正人, 立尾浩一, 吉田博文 (2020) 福島県で発生した産業廃棄物の処理処分に伴う放射性セシウムの移動量の推定. 第 9 回環境放射能除染学会研究発表会, 同要旨集, p.45
- 3) 山田正人, 石垣智基, 高田光康, 金松雅俊, 立尾浩一 (2015) 空間線量率と家屋等外面の表面汚染密度の関係について. 第 4 回環境放射能除染学会研究発表会, 同要旨集, p.76
- 4) 山田正人, 石垣智基, 高田光康, 立尾浩一 (2016) 空間線量率と家屋等外面の表面汚染密度の関係について (第 2 報). 第 5 回環境放射能除染研究発表会, 要旨集, p.78
- 5) 山田正人, 新井裕之, 立尾浩一, 大塚弘幸, 吉田博文 (2018) 建造物等の表面汚染の時間変化について. 第 7 回環境放射能除染研究発表会, 要旨集, p.65
- 6) 山田正人, 新井裕之, 立尾浩一, 米田修, 吉田博文 (2019) 建造物等の表面汚染の時間変化について (第 2 報). 第 8 回環境放射能除染研究発表会, 要旨集, p.54
- 7) 国立研究開発法人国立環境研究所 (2017) 災害と環境に関する研究, 国立環境研究所研究プロジェクト報告第 122 号, SR-122-2016, pp. 21-22

- 8) 橋本征二, 稲葉陸太, 加用千裕, 高木重定, 田崎智宏, 南斉規介, 藤井崇, 藤井実, 森口祐一, 吉川実, 大迫政浩 (2012) 日本の物質フロー・ストックモデルの構築とその適用, 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会講演論文集, 17-18.

2.2.2 測定モニタリング管理手法開発

(1) 目的と経緯

放射性物質汚染廃棄物を適切に管理し、その処理を円滑に進めるには、放射能（放射性セシウム）濃度を正確に把握することが重要である。放射性物質汚染廃棄物や処理物の組成は複雑かつ不均一であるため、その測定においては、適切な測定方法を選択し適用することが必要である。従って本課題においては、これら試料に対応した適切な放射性セシウム濃度測定方法の開発とそのバリデーション、また福島第一原発近傍での除染作業や中間貯蔵施設の運用開始を見据え、放射性セシウム以外の核種の評価方法について検討することを目的として研究を実施した。具体的には、環境省ガイドライン等の放射性セシウム濃度測定方法について、分析精度管理上のデータ取得を含めたバリデーションを実施した。また、新たな測定ニーズが見込まれる試料、例えば放射能量は小さいものの重量当たりの表面積が大きい放射能濃度が高い廃棄物（以下、低密度汚染廃棄物という。）の汚染状態の評価方法についても検討した。

(2) 方法

(1) 排水中の放射性セシウム濃度測定に係るクロスチェック

除染作業や減容化等の過程で発生する排水中の放射性セシウム濃度の測定について、環境省ガイドラインの測定方法（以下、GL法という。）¹⁾で測定した場合に、どの程度の精度が担保されているかよく分かっていない。以前、我々は焼却灰等の固体試料の放射性セシウム濃度測定の精度をクロスチェックにより検討し、GL法が十分な精度を有していることを確認した²⁾。今中長期研究においては、排水中の放射性セシウム濃度の測定方法バリデーションを目的として、これにならってクロスチェックを行い、測定精度を確認した。

クロスチェックは、2017～18年度に国立環境研究所を含む分析機関6機関の参加を得て実施した。配付試料として、焼却対象物や焼却主灰、飛灰の溶出操作により、放射性セシウム濃度の異なる3試料を調製した（L1、L2、L3）。Cs-137のおよその濃度範囲は、L1が1～10 Bq/L、L2が15～25 Bq/L、L3が1,600～1,900 Bq/Lであった。浮遊物、沈殿物はL1、L2で多く、L1は着色していた。各試料約2Lをポリビンに充填し、参加機関に送付した。配付試料は、各機関において測定容器に移し替え、ゲルマニウム半導体検出器を用いるガンマ線スペクトロメトリーによりCs-134、Cs-137濃度を測定した³⁾。測定に先立っての前処理（ろ過、ゲル化剤による懸濁態の固定化）や濃縮操作（加熱濃縮や吸着材による濃縮）の実施は、測定機関の任意とした。測定は都度試料を入れ替えて3回実施した。測定結果は、2018年1月1日12時に減衰補正を行い、有効数字3桁で報告した。

(2) 低密度汚染廃棄物の汚染状態の評価

低密度汚染廃棄物の管理・処理方法を検討する上で、その汚染状態を把握することは重要である。よって本課題では、低密度汚染廃棄物の汚染状態について、放射線量を可視化するイメージングプレート（IP）⁴⁾や微小領域の形態観察や元素組成の分析が可能な走査型電子顕微鏡（SEM-EDS）を用いて評価を行った。

低密度汚染廃棄物として、芝生養生シートや空気浄化用フィルターを対象とした。IPを用いた観察では、試料を概ねA4サイズに切り出してポリ袋に入れ、密封β線源と共にラップで養生したIP（GEヘルスケアBAS IP SR 2040E）に載せてカセット内で数時間露光した。露光後にIPをリーダー（GEヘルスケアTyphoon FLA 7000）を用いて測定し、放射線量の分布を得た。SEM-EDSを用いた観察では、IP観察により放射性セシウム含有粒子が多いと判断された部位を数mm角の大きさで切り出し、カーボン両面テープを用いてアルミニウム製試料台に貼り付けた。これをSEM-EDS（日本電子JSM-7800F/Oxford Instruments X MAX 50）を用い、粒子の付着の様態と粒子に含まれる元素について観察した。

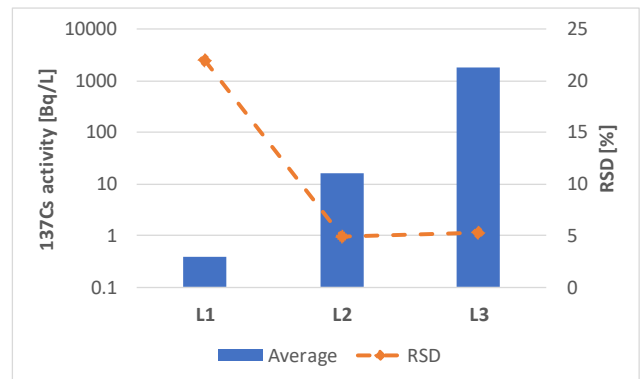
(3) 結果と考察

(1) 排水中の放射性セシウム濃度測定に係るクロスチェック

各機関で実施した前処理操作について、2機関はゲル化剤を用いており、また1機関では試料をろ過後、溶存態の放射性セシウムを吸着材に吸着して測定していた。各機関で使用したGe半導体検出器のメーカーは、Aが4機関、Bが2機関であった。測定時間は、低濃度であるL1では43,200~300,000秒、L2とL3では2,000~43,200秒の範囲であった。

L1の¹³⁴Cs濃度は0.1 Bq/Lを下回る低濃度であり、3機関が不検出と回答した。検出できた機関は吸着材による濃縮か、10万秒を超える長時間測定を行っており、何らかの対応が必要であった。相対標準偏差で示したCs-137濃度の室内測定精度は、L1では1.5~24%（中央値5.8%）、L2では0.34~5.7%（中央値0.96%）、L3では0.33~0.86%（中央値0.33%）であった。L1では室内測定精度は良くなかったが、L2とL3では良好な精度で測定できていた。Cs-137濃度の測定結果は、L1では0.302~0.565 Bq/L（平均値0.442 Bq/L）、L2では15.5~17.7 Bq/L（平均値16.3 Bq/L）、L3では1,680~1,900 Bq/L（平均値1,760 Bq/L）であった。相対標準偏差で示した室内測定精度はL1では20%、L2では4.6%、L3では4.4%であり、低濃度であるL1を除いて良好な精度で測定できていた（図II-12）。

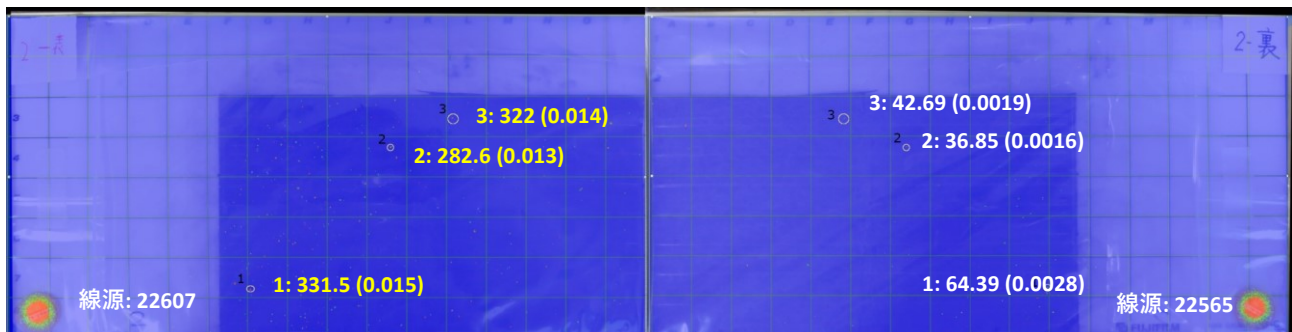
公共の水域の放射性セシウムの濃度限度は、Cs-134が60 Bq/L、Cs-137が90 Bq/Lである。事故後10年以上が経過してCs-134の物理減衰が進んだことから排水の放射性セシウム濃度の管理ではCs-137濃度を考慮すれば良く、Cs-137濃度限度の10分の1程度まではGL法の測定精度は十分であることが示された。



図II-12 配付試料中Cs-137濃度の測定結果と室内測定精度

(2) 低密度汚染廃棄物の汚染状態の評価

IPによる観察により、低密度汚染廃棄物の汚染は表面に一樣に分布しているのではなく、放射線量の高い部位が点状に分布（以下、ホットスポットという。）していることが分かった。図II-13に空気浄化用フィルター試料の観察例を示すが、3個のホットスポットを確認した。試料両面のIPによる測定では、屋外側と屋内側でホットスポットの信号強度は異なり、屋内側の信号強度は10分の1程度であった、β線は透過力が弱く試料自体により遮蔽される。屋外側をIPに接して露光した場合にホットスポットの信号強度が強い、即ち試料による遮蔽がないことから、ホットスポットは試料の屋外側に付着して留まり、内部まで進入しないことが示された。また、多くの試料で放射性セシウムの分布は一樣でないことを確認した。このことから、低密度汚染廃棄物の高濃度の部位と低濃度の部位を分離することで、処理を必要とする廃棄物量を削減できる可能性がある。但し、一部の試料では放射性セシウムを含む粉じんが実験操作中に脱落したことから、この種の廃棄物では取扱の際の内部被ばく対策が必要と考えられた。

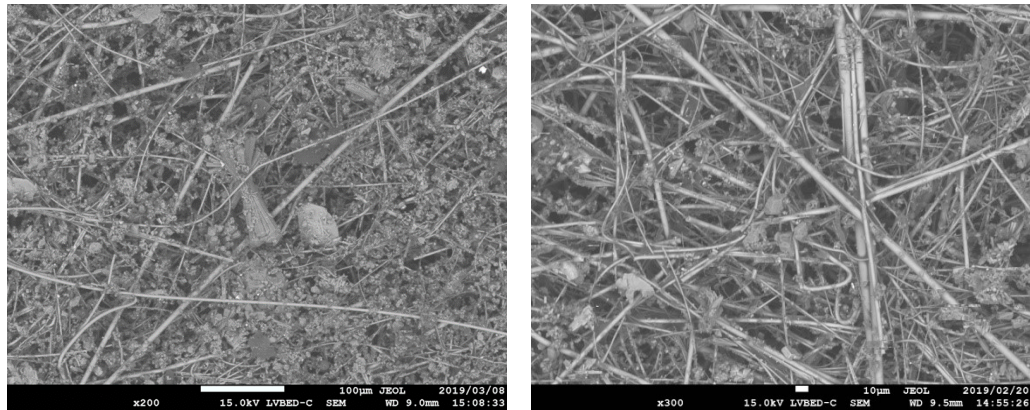


図II-13 低密度汚染廃棄物のIPによる放射線量観察結果

左:屋外側、右:屋内側。数値はホットスポット信号強度。カッコ内は線源の信号強度で除して規格化した信号強。

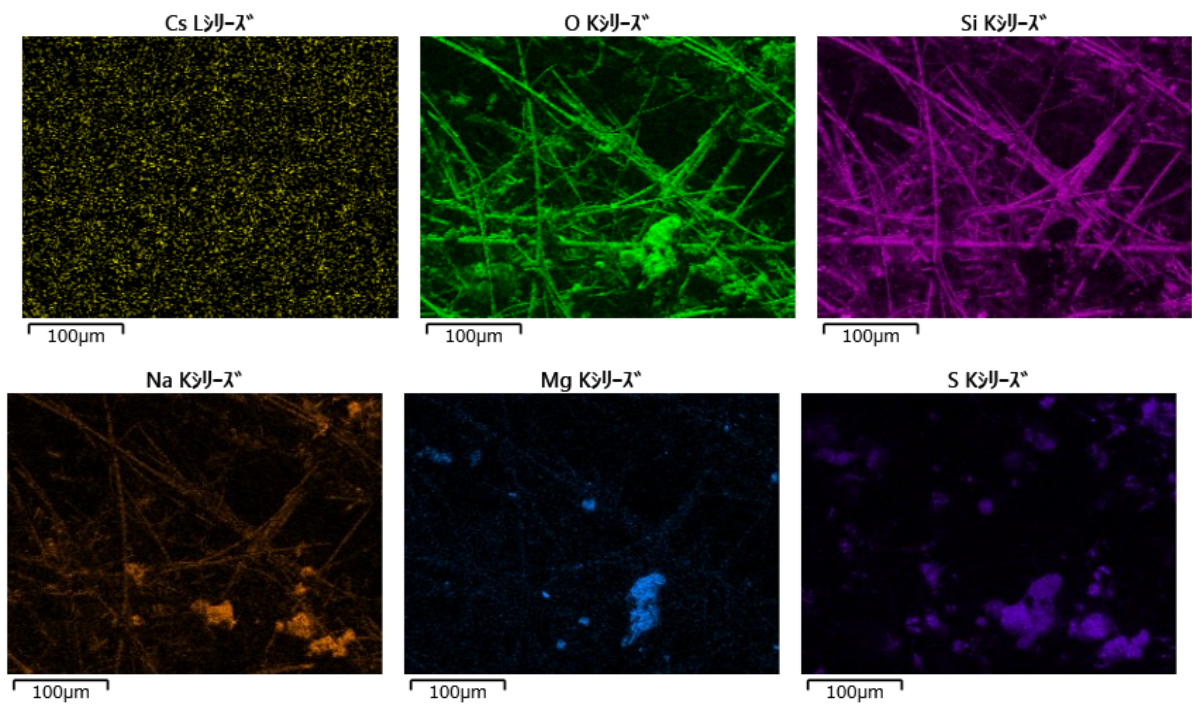
SEM-EDSによる観察例を図II-14に示す。図II-14は図II-13と同じ試料のSEM画像であるが、ホットスポットの多い部位（図II-14左）は少ない部位（図II-14右）に比べて粒子の付着量が多い傾向にあることが分かった。EDS分析によ

る元素マッピング結果を図II-15に示す。EDS分析の感度の制約から放射性セシウム含有粒子の付着状況の直接的な把握には至らなかったが、付着した粒子の元素組成から土壌鉱物、塩化物や硫酸塩などの塩類、酸化鉄などの粒子が多い傾向が示された。



図II-14 低密度汚染廃棄物試料のSEM画像

右：ホットスポットの多い部位（200倍）、左：ホットスポットの少ない部位（300倍）。



図II-15 低密度汚染廃棄物のSEM-EDSによる元素マッピング結果

試料は図II-14右と同一。左上よりセシウム、酸素、ケイ素、ナトリウム、マグネシウム、硫黄のマッピング結果。

引用文献

- 1) 環境省(2013)廃棄物関係ガイドライン 第5部 放射能濃度等測定方法ガイドライン, 平成25年3月第2版.
- 2) 鈴木剛, 滝上英孝, 竹内幸生, 山本貴士, 田野崎隆雄, 貴田晶子, 酒井伸一, 大迫政浩(2013)廃棄物関連試料の放射性セシウム分析に係る試験所間比較: 土壌, 飛灰, 主灰及び溶融スラグを対象として. 分析化学, 62(6), 485-497.
- 3) 文部科学省(1992)放射能測定法シリーズ7ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー(平成4年改訂).
- 4) 細井雄一(2001)IPによる放射線イメージングの特徴と応用例. 日本写真学会誌, 64(2), 133-142.

2.3 低汚染廃棄物等の最終処分及び除去土壌等の中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理手法の開発・提案

2.3.1 低汚染廃棄物等の最終処分技術開発と長期管理手法

(1) 目的と経緯

特定一般廃棄物や特定産業廃棄物のうち、煤じん等の放射性セシウムの溶出性が大きい廃棄物を埋立処分した場合、埋立終了後に遮水性の覆土を設置する必要がある。遮水性の覆土は、中間覆土として処分場内に設置する場合と、最終覆土として処分場の地表面に設置する場合があるが、最終覆土を遮水性のキャッピングとする場合、降雨強度の影響を大きく受けつつ、植生の根や日射等による劣化が懸念される。また、最終処分場の沈下の影響を最も大きく受けるのも最終覆土であるため、材料としては膨潤性を有するベントナイトを用いたキャッピングが有効と考えられる。ただし、ベントナイト混合土のような厚みが30~50cm程度ある場合、最終覆土の層厚が厚くなり、埋立廃棄物容量が少なくなることが懸念されるため、ベントナイトシート(ジオシンセティッククレイライナー:GCL)を用いたキャッピング工法について検討することとした。GCLを用いた透水係数等の室内試験は数多くあるが、実大規模での実験結果は少なく、GCLの面的な遮水性を評価した事例が少ないことから、ベンチスケールの屋外実験を実施し、室内試験結果相当の遮水性が長期にわたって期待できるか検討した。

(2) 方法

茨城県美浦村に図II-16に示す涵養量実証試験サイトを構築し、全部で7つの試験工区を設置した。各工区は図II-17に示す通り、底部に排水層(碎石)を敷設し、その上に遮水層、最上部には通常最終処分場と同様の厚さ50cmの覆土を設置した。覆土には茨城県産のまさ土を用いた。1つの工区の平面的な寸法は幅2m×長さ8mとした。7つの工区に敷設した遮水層の種類を表II-3に示す。遮水層を通過して底部に浸透した水量(涵養量)を測定するため、碎石層の上流部と下流部を隔離し、それぞれに排水用の塩化ビニル製排水管を設置した。さらに、遮水層を通過せずに遮水層上部に沿って流れる浸透水の水量を測定するため、中間排水管も設置した。それぞれの排水管の末端では、転倒樹流量計を用いて流量の測定を連続的に実施した。各工区は下流に向かって2%の勾配を持っているため、降雨強度によっては覆土を浸透しきれない表流水が存在する可能性があるため、U字側溝を設置して表流水も集めて流量測定を行った。



図 II-16 涵養量実証試験サイトの空中写真

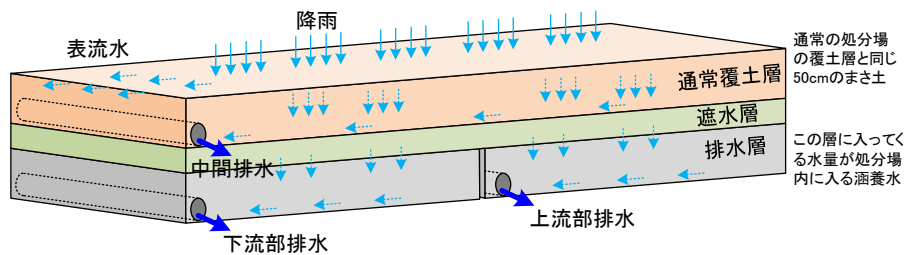


図 II-17 各工区の模擬図

表 II-3 各工区に設置した遮水層の種類

番号・名称	覆土種類	遮水層種類	遮水層厚さ
No.1・対照区	まさ土	なし	—
No.2・浸食防止区	まさ土＋砕石層	なし	—
No.3・砕石ベント区	まさ土	砕石ベントナイト (25 mm 以下粒径)	200 mm
No.4・GCL シートなし区	まさ土	GCL (粒状ベントナイト・不織布型)	6 mm
No.5・GCL シートあり区	まさ土	GCL (粒状ベントナイト・HDPE 型)	3.5 mm
No.6・高分子ポリマー区	まさ土	高分子ポリマーシート (不織布型)	数 mm
No.7・GCL 粉体区	まさ土	GCL (粉体ベントナイト・織布/不織布型)	3 mm

(3) 結果と考察

測定された排水量の内、遮水層上部で排除された中間排水量について図II-18に示す。中間排水は、処分場内に浸透せずに排除された水量であることから、この水量が大きいほど遮水性能を発揮していることになる。対照区や浸食防止区では、遮水層が無いため、中間排水層が殆ど認められないことが分かる。砕石ベントナイト区では、ベントナイト層自体が膨潤したことにより覆土に緩みが生じたため表面排水量が少なく、覆土内に多くの雨水が浸入したものの、遮水機能によって中間排水されたと推察され、最も多い中間排水量約 450 mm が観測された。これ以外にも表面排水も排除された水量となるので、全体の水収支を計算すると図II-19になる。遮水層の無い No.1 対照区や No.2 浸食防止区では約 40%の雨水が覆土下に浸透したことになり、No.3 砕石ベントナイト区や No.7 GCL 粉体区ではほぼ浸透量がゼロとなった。No.6 の高分子ポリマー区は、ポリマーが膨潤するまでは、ほぼ全量の雨水を遮水可能であるが膨潤後にはポリマーの透水係数分の浸透を許容してしまうため約 15%の浸透水量となっている。

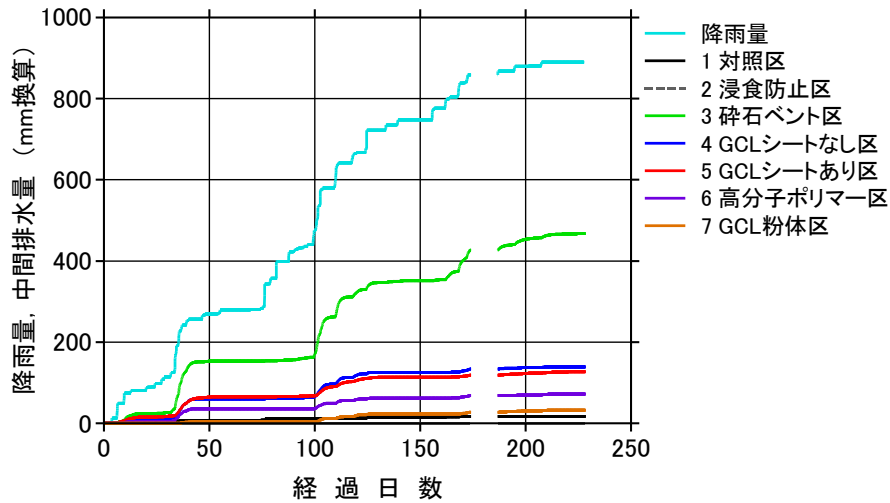


図 II-18 累積降雨量と累積中間排水量の経時変化

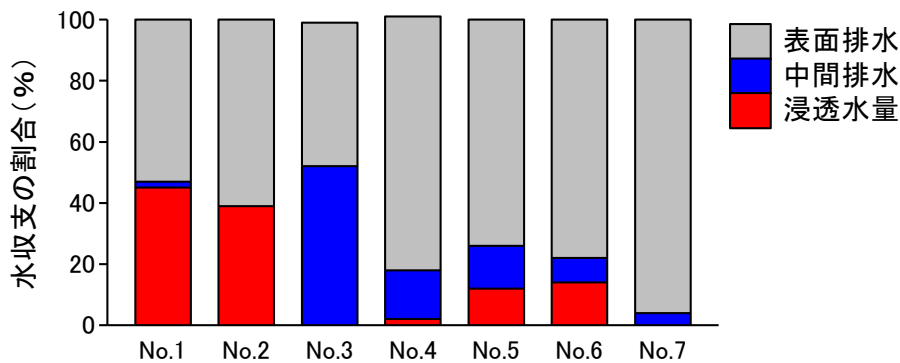


図 II-19 各工区における水收支の割合

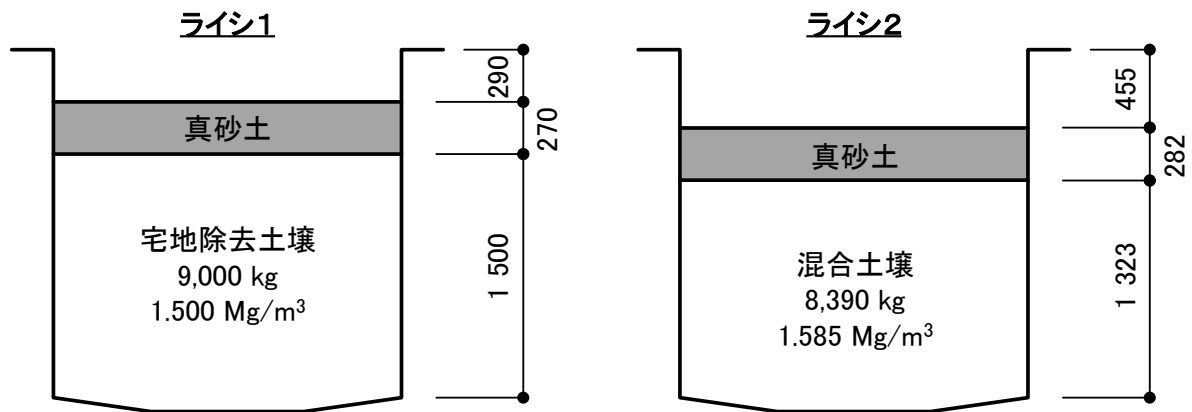
2.3.2 除去土壌等の保管や中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理

(1) 目的と経緯

除去土壌は表層 5 cm をはぎ取った土壌であることから、農業分野で言われる A 層に相当し、比較的有機物がリッチな土壌で構成されている。そのため、土壌貯蔵や有効利用した際、それら有機物分がどのような振る舞いをみせるか評価しておくことが重要である。これは土壌貯蔵施設の水処理施設の設計等にも活用できる基本的データと考えられる。これまで、除染仮置場等では集排水管があり、仮置場内に浸透した雨水の観測結果は数多く存在するが、仮置場では除去土壌がフレコンに入っているため、除去土壌を直接浸透した浸透水の水質についてはあまり知見が少ないのが現状である。また、有機物等を対象にした土壌浸透試験を行う場合、酸素消費や温度が重要であるため小型のカラム試験では実大規模の水質挙動を評価することが難しい。そのため、福島支部が所有する中型のライシメーター試験装置 (2 基) を用いて、土壌貯蔵時や有効利用時の浸透水水質を予測することを目的としている。

(2) 方法

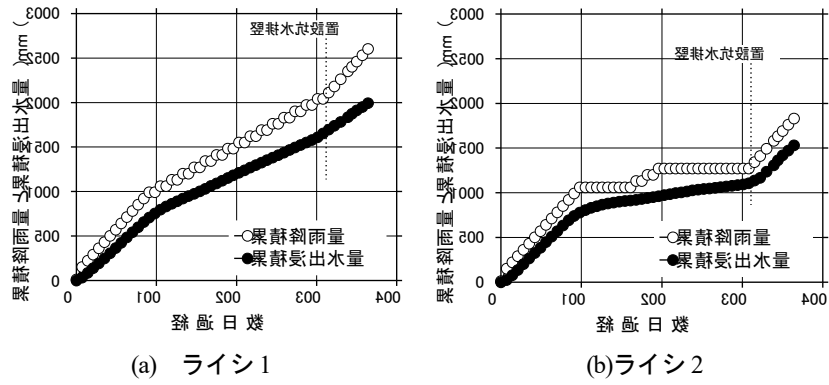
ライシメーター試験装置に除去土壌を充填し、10 mm/日の人工降雨を与えて浸出水のBODやCOD、放射性Cs濃度等の観測を実施した。ライシメーター試験装置の概略を図II-20に示す。開口部は1辺2 mの正方形であり、深さも2 mの構造となっている。ライシ1には福島県内の宅地除染より得られた宅地除去土壌を、ライシ2には農業用溜池除染から出た除去土壌と宅地除去土壌を乾燥重量比で5:1になるように混合した混合土壌を充填した。混合土壌作成時に溜池除染の除去土壌のトリータビリティを得るため、改質剤として半水石膏を乾燥重量比で3%添加している。ライシ1、ライシ2それぞれの放射能セシウム濃度(Cs-134+Cs-137)は、湿潤ベースで1,784 Bq/kg、2,667 Bq/kg、JIS強熱減量値はそれぞれ5.8%、7.1%であった。なお、ライシ1、ライシ2共に透水係数が小さかったことから、約300日経過後に直径76 mmの竖排水坑を開削し、珪砂3号(D20=1.38 mm、クレーガーによる透水係数推定値は 9.0×10^{-1} cm/s)を充填した。



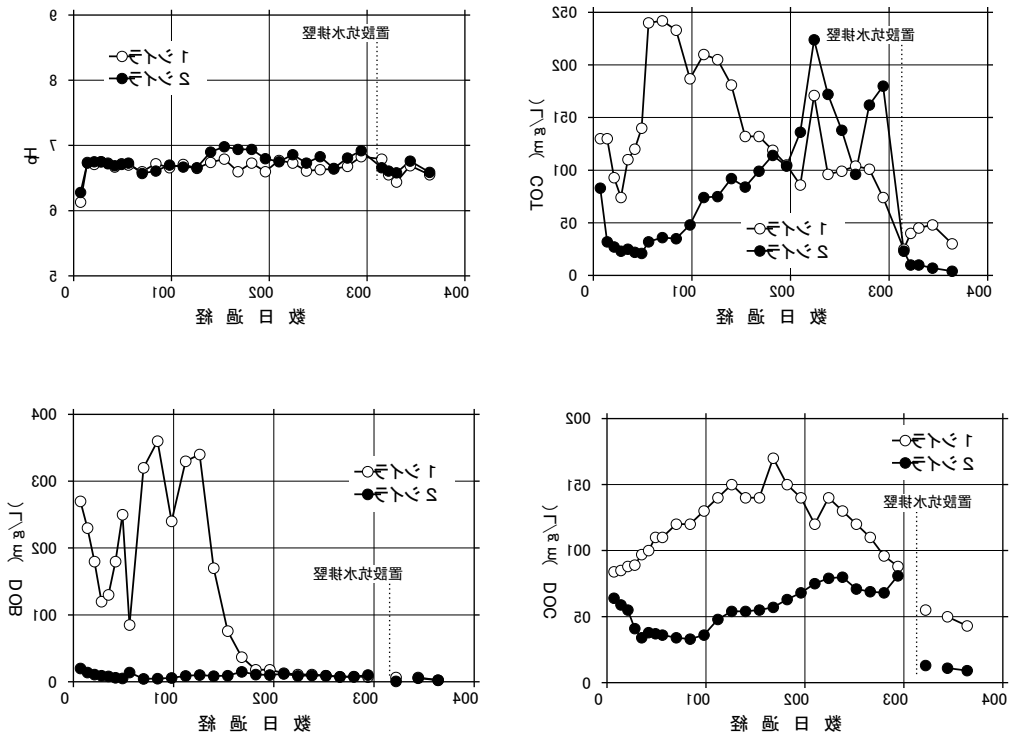
図II-20 ライシメーター試験装置の断面図と充填除去土壌の重量と湿潤密度

(3) 結果と考察

それぞれのライシメーターにおける水収支の経時変化(降雨量換算)を図II-21に示す。約1年間の実験で降雨量1800~2600 mmを与え、約9割が排水された。ライシ2の降雨水量がライシ1に比較して少ないのは、実験途中で閉塞し、排水されなくなったため、一時的に降雨を停止したことが理由である。浸出水水質のうち有機汚濁成分等について図II-22に示す。pHは両ライシメーターで弱酸性を示しており、日本の一般的な浸透水のpHの範囲であった。TOC、BOD、COD共に宅除去土壌の方が大きく、それぞれの最大値は250 mg/L、350 mg/L、170 mg/L程度であった。溜池除染の方が有機物が多く、溜池除染物のJIS強熱減量が16.4%あるにもかかわらず、浸出水濃度としては宅地の方が高い結果となった。特にBODについては顕著な違いがあり、ライシ1のBODが数百 mg/Lのオーダーとなっている。これは、宅地除染した土壌には草本類の根が大量に含まれており、それがBOD成分となったためと考えられる。BODは約150日を境にして急減少しているが、この150日は浸透間隙水量(PVF)が約1の時であり、全ての間隙が洗い出された時点でBOD成分が消失したと判断される。ライシ2では、BODが低い、TOCが徐々に増加しており、同時にCODも微増している。このことから、混合土壌からの浸出水の有機汚濁成分のほとんどはCOD成分であると判断される。

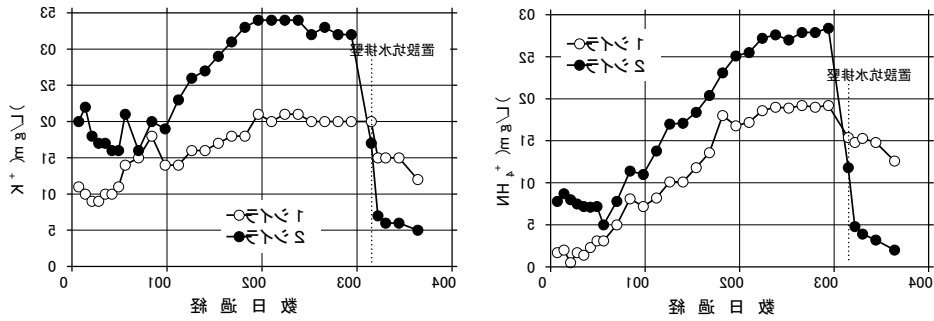


図II-21 水収支の経時変化 (降雨量換算)



図II-22 浸出水水質の変化 (有機汚濁成分等)

放射性セシウムの溶出を促進させると考えられるカリウムとアンモニア態窒素の濃度変化を図II-23に示す。全ての観測データで経時的に増加する傾向が確認された。どちらのイオンも $1 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ を超えると放射性セシウムの溶出が促進されると言われている。ライシ2の最大値はカリウムで $8.7 \times 10^{-4} \text{ mol/L}$ 、アンモニア態窒素で $1.6 \times 10^{-3} \text{ mol/L}$ 程度となったが、放射性セシウムが浸出水から検出されることはなかった (定量下限値 0.5 Bq/L)。多少の溶出があったとしても、周辺土壤に吸着されるため、浸出水としては検出されなかったと考えられる。



図Ⅱ-23 浸出水水質の変化（カリウムとアンモニア態窒素）

2.3.3 コンクリート技術を適用した処分場施設の適正化

(1) 目的と経緯

放射性セシウムに汚染した廃棄物やその減容化・安定化体を処分する施設の候補として、廃掃法に定められている鉄筋コンクリート製の遮断型相当の最終処分施設がある。この施設には遮断の機能が求められ、遮水性能が重要である。遮水性能という観点ではひび割れを制御することが重要であり、ひび割れの原因に対する対策が必要である。コンクリートのひび割れは、結合材であるセメントの発熱による温度応力とコンクリートの乾燥収縮によるコンクリートの変形が鉄筋や構造により拘束され発生するもの、アルカリ骨材反応（ASR）に代表されるコンクリート内部の膨張によるもの、コンクリートと反応性塩（焼却飛灰中の CaCl_2 や石膏）の接触による表面劣化などがある。このうち、ASRによる膨張反応の長期的抑制はコンクリート工学上も未解決の課題であり（一般の土木構造物や建築物では影響がない程度に抑制できるとされているが、遮断機能を長期間にわたり求めることができるかどうかは分かっていない）、特別な検討が必要である。また、セメント硬化体にはセシウム吸着能力はないことが分かっており、コンクリートが遮水性能を有しているとしても、コンクリート中のセシウムの移動予測は重要である。

これらの背景から国立環境研究所では「汚染廃棄物等最終処分場へのセメント・コンクリート技術適用に関する研究会」を設け、関連情報を技術資料として公開したり。その後も、ASRについては従来の促進膨張試験方法の欠点を修正する方策を検討し、国際学術団体 RILEM の試験規準として発行した²⁾。さらに、試験法の有効性と長期予測のモデル化について研究を継続しているので³⁾、その内容を説明する。

コンクリート中のセシウムの移動予測については、文部科学省英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業⁴⁾においてセシウムとストロンチウムのコンクリート中の移動に関する基礎実験を行い、事業全体として、コンクリート中の空隙の水と固相の間のイオンの総合作用に関する熱力学的相平衡と Nemst-Plank 式に基づく多種イオンの移動を錬成させた Reaction Transport モデルの開発を行っている。この事業において、コンクリート中へのセシウム移動に関して、コンクリートの中性化（大気中の炭酸ガスによる炭酸化）により、コンクリートのセシウム吸着能力が高まり、セシウムの内部浸透が抑制される可能性があるため、その状況について説明する。

(2) 方法

ASR 研究については、九州大学並びに港湾空港技術研究所と連携し、実施した。研究は、室内の促進膨張試験と暴露試験の比較を行い、室内試験結果から長期屋外暴露条件での膨張予測をするというものである。アルカリ反応性骨材を用いてコンクリートを作製し、室内試験では $7.5 \times 7.5 \times 25$ cm 角柱試験体を 20、40、60°C で促進膨張させ、一方、より大型な $40 \times 40 \times 60$ cm ブロック試験体を異なる環境（那覇年平均気温 22°C、福岡同 18°C、紋別同 6°C）に暴露し、変形を計測した。膨張モデル³⁾を用い、促進試験から気温変化と降雨を考慮して暴露ブロックの膨張挙動を予測した。

コンクリートは骨材をセメントペーストで結合したものであるが、移動は主にセメントペースト中で起きると考えられているので、セメントペーストを作製し、表面部分 3.5mm を促進中性化し、試験体に対し、10 倍質量の 1M の CsCl 溶液に 7 日間浸漬し、セシウムの浸透プロファイル電子線微小分析（EPMA）により評価した。

(3) 結果と考察

ASR に関して、各地に暴露したブロックの膨張と計算結果を図II-24に示す。図中のプロットが計測結果であり、線が予測結果である。約3年にわたる計測で、膨張率変化が大きくなっているのが夏場であり、停滞しているのが冬場である。平均気温が低い紋別の膨張率が低く、平均気温が高い沖縄では膨張率は最大となっている。この状況をモデルはうまく再現できている。

現在のコンクリートの JIS A5308 にも ASR 抑制対策は記載してあるが、その抑制対策の有効期間は示されていない。長期間にわたり遮断機能が求められる処分施設において、その機能の妨げとなる ASR によるひび割れ発生をこのモデルを使用することで、室内試験から長期的な挙動を推定することができ、実際の処分施設建設時においてなされる ASR 抑制対策の有効性を定量的に、例えばひび割れが発生する膨張率 0.05% に達する材齢として評価することができる。

セメントペーストへのセシウム浸透評価の結果を図II-25に示す。未炭酸化セメントペースト（青）では表面部分のみ 0.2mol% 程度の濃縮が認められたが、それより深い部分では拡散プロファイルが検出され、EPMA 分析結果からは浸透深さは 9mm 程度と読み取れる。表層部分のセシウム濃縮はセメントペーストから Ca が溶脱し、その代わりにアルカリオンが吸着したものと推定できる。炭酸化すると（赤）、再表面は 0.4mol% まで濃度が増加し、その後、炭酸化領域ではおよそ 0.2mol% の濃度となり、それ以降では拡散プロファイルを示し、11~12mm まで浸透した。この条件では、炭酸化部分での吸着が著しかったものの、移動の観点では、炭酸化部分の移動速度は相当に早く、吸着による遅延効果は認められず、炭酸化したほうがより奥まで浸透した。一方塩素については、未炭酸化ペーストでは、セシウムとは異なり表層部分の濃度が低下したが、セシウムよりも相当に高濃度のプロファイルをもって 12mm 程度まで浸透した。炭酸化すると、Cl の濃度は未炭酸化の 0.3~0.4mol% から 0.03mol% 程度まで低下し、浸透深さは 16mm 以深となった。これは Cl の結合層である鉱物

（Friedel 氏塩）の炭酸化による分解、もしくは層間の Cl が炭酸イオンに交換したためと考えられる。浸透深さが炭酸化により増加したのはセシウムと同様であるが、これは、セメント水和物であるケイ酸 Ca 水和物の微細粒子が構成する複雑で屈曲した空隙構造が、連続したものに变化したものと推定できる。

このように、健全なコンクリートの空隙にはセメント由来の K がセシウムの数 100 倍程度存在するため固液間の分配比で 1 未満とセシウム吸着能力は小さい。しかし、炭酸化することで、アルミノケイ酸水和物が生成し、アルカリ吸着能を示すようになり、セシウム選択性も高くなる。1M という濃厚溶液状態では、吸着の効果も限定的であるが、実際の廃棄物からのセシウム濃度を考慮して今後、浸透試算をさらに行う必要がある。また、本評価は骨材が存在しないペーストに対するものであり、コンクリートでは状況が異なる可能性もある。コンクリート内部において、骨材中に粘土鉱物が存在する場合、セシウム吸着が起きる可能性もある。文科省英知事業として、2020~2022 年度の「合理的な処分のための実機環境を考慮した汚染鉄筋コンクリート長期状態変化の定量評価」（代表：東京大学丸山一平教授）に参画し、北海道大学とともにコンクリートへの低濃度領域でのセシウム浸透実験について、Cs-137 を使用して現在も継続中である。

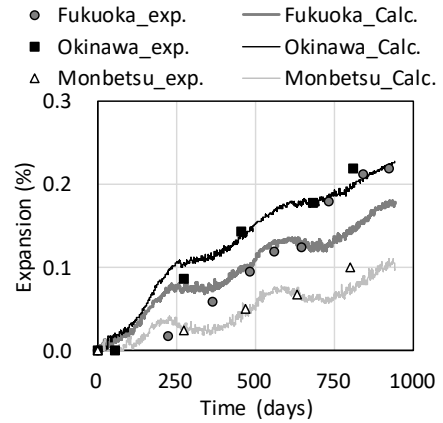


図 II-24 各地に暴露したブロックの膨張予測

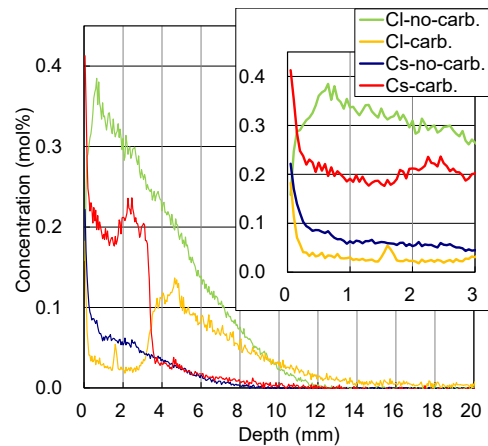


図 II-25 健全、及び炭酸化セメントペーストへの Cs 浸透 (CsCl-1M 溶液、7 日浸漬)⁵⁾

引用文献

- 1) 国立環境研究所、汚染焼却飛灰廃棄物等の最終処分場（遮断型構造）に用いるコンクリートに関する技術資料（第二報）
<https://www.nies.go.jp/whatsnew/2014/20141203/20141203.html>（2021年9月21日閲覧）
- 2) K. Yamada, Y. Kawabata, M. R. de Rooij, B. M. Pedersen, R. Brueckner, J. H. Ideker, Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-3 13: application of alkali-wrapping for concrete prism testing 4 to assess the expansion potential of alkali-silica reaction, *Materials and Structures*, 2021 (in print).
- 3) Kawabata Y., Yamada K., Ogawa S., Sagawa Y., Numerical simulation of the expansion behavior of filed-exposed concrete blocks based on a modified concrete prism test. *International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS2019)*, PRO128, 230-238, 2019
- 4) 名古屋大学, 放射性物質によるコンクリート汚染の機構解明と汚染分布推定に関する研究, 平成31年度文部科学省国家課題対応型研究開発推進事業英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業成果報告書, 2020, 128p.
- 5) Kazuko Haga, Sadayuki Watanabe, Kazuo Yamada (2019) Quantification of interaction between alkali metal ions and C-(A)S-H/cement paste for a wide range of ion concentrations. *15th International Congress on the Chemistry of Cement, Prague*, 339.
- 6) 山田一夫、大迫政浩、処分施設コンクリートへのCs浸透の試算、第10回環境放射能除染研究発表会、S3-2, 2021.

2.3.4 汚染廃棄物長期管理のための水処理技術の開発

(1) 目的と経緯

通常、埋立処分場には、雨水が廃棄物層を通過してしみ出てきた水（浸出水）を処理する施設が併設されているが、原発事故後、一部の処分場では浸出水中に放射性セシウムが検出された。特措法では、廃棄物層への雨水の浸透を減らしたり、放射性セシウムの浸出水への移行を防いだりする埋立方法が定められているが、現場では、万が一に備えて対策を準備したいというニーズが存在する。実際、最終処分場において埋め立てられた飛灰等からの放射性セシウムの溶出については、条件によって様々ではあるものの、埋立高さ3m、厚さ50cmの土壌層を設置した場合、ピーク濃度が検出されるのは、土壌層直下でも数十年後、既存の廃棄物層を通過した後の集水管到達点においてはさらに数十年後であることが試算されており¹⁾、現時点で放射性セシウムが検出されていないことは将来を保証しない。

そこで、万が一、最終処分場において水溶性の放射性セシウムが溶出した場合を想定し、浸出水中の放射性セシウムを低濃度域で連続的にモニタリングする装置を開発し、アラートシステムを構築することを目的として検討を行った。

(2) 方法

(1) モニタリング装置

本装置は、NaI (TI) シンチレーション式放射能測定装置のマリネリ容器に吸着剤を充填し、測定対象とする浸出水を通水させることで、浸出水中の放射性セシウムを吸着剤に蓄積し、これを測定することで、低濃度放射性セシウム測定を現地において実質的に連続でモニタリングするものである。

基本原理については既に開発済みで²⁾、浸出水中の放射性セシウムの濃度上昇の兆しを見つけるためのモニタリングシステムとして設計・製作を行った。装置の外観を図II-26に示す。



図II-26 装置の概観

(2) 実証試験

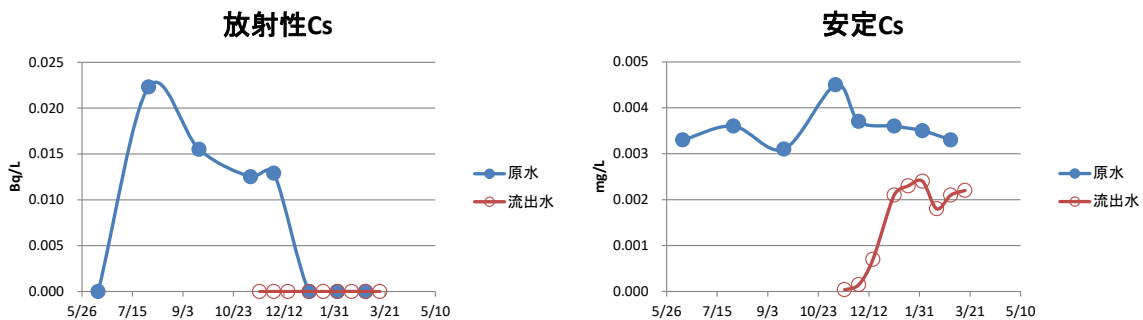
福島県内の一般廃棄物処分場内の浸出水処理施設において、上記のモニタリング装置を設置し、実証試験を行った。当該施設の検水を約18L採水し、2L程度まで濃縮してからゲルマニウム検出器で分析したところ、0.010～0.020 mBq/Lで検出された。モニタリング装置に充填する吸着剤としては、ゼオライトやプルシアンブルー（粒状）などが考えられるが、ゼオライトでは分配係数からみてモニタリング装置で検出できるレベル（数十 Bq）まで吸着・濃縮ができないと考えられたため、充填吸着剤はプルシアンブルーとした。

モニタリング装置に導入する原水は、浸出水処理施設の中和槽から採水した。通水は約70L/日で連続的に行った。測定は上述の通り、約10倍濃縮してからゲルマニウム検出器で分析した。また同時に、ICPを用いて安定セシウムの濃度も測定した。

(3) 結果と考察

(1) モニタリング装置における放射性セシウムの捕捉

原水及び処理水の放射能濃度及び安定セシウム濃度の推移を図II-27に示す。試験開始前の原水の放射能濃度は0.015～0.020 mBq/L程度であったが、試験開始後は濃縮しても検出できないレベルとなり、試験終了時まで不検出が続いた。流出水では、原水に放射能濃度が検出された試験初期を含めて常に不検出であり、原水中の極低濃度の放射性セシウムを十分に捕捉できたと考えられる。安定セシウム濃度を見ると、試験開始時に原水で0.004 mg/L程度検出されていたものが、流出水では0.00004 mg/Lであり、99%の捕捉率が得られたものの、その後、徐々に捕捉率が低下し、試験後期には30%台の捕捉率となった。



図II-27 原水及び流出水中の放射能濃度および安定セシウム濃度の推移

(2) モニタリング装置による測定

本モニタリング装置では、吸着剤の放射能濃度と通水量を記録しており、通水開始時と終了時の吸着剤の放射能濃度の差を通水量で除すことにより、期間中の平均濃度を極低濃度で算出できる。例えば、0.02Bq/Lの検水を1,000L通水す

ると 20Bq が吸着剤に吸着される。安定的に評価可能な放射能濃度の差は 50～60Bq であり、この差を出すためには、2～3m³を通水する必要がある。1日約 70L、1ヶ月で 2m³程度を通水でき、この間、連続的に採水していることから、調査期間を漏らすことなく反映することが可能である。

今回の実証試験においては、試験中期には原水の放射能濃度が不検出となっていたが、初期の 3 週間程度は 0.01 Bq/L 超であり、モニタリング装置で捕捉できていたものと考えられる。試験終了後に吸着剤の放射能濃度をゲルマニウム検出器で測定した結果、通水による放射能濃度の増加分は約 30Bq であった。試験開始直後から流入水の放射能濃度は変動が大きく、相当程度低濃度であった可能性がある。また、安定セシウムとの競合があり、元素としてのセシウムは吸着限界に近づいていたことがわかった。

本研究では、浸出水処理施設において放射性セシウムが検出されるという万が一の事態に迅速に対応するため、通常の分析では不検出となるレベルで放射性セシウムを連続的に検出し、濃度上昇の兆しを見つけるためのモニタリング装置の実証試験を行った。原水及びモニタリング装置流出水の放射性セシウム及び安定セシウムの測定結果から、極低濃度の放射性セシウムであっても、本モニタリング装置において吸着・検出できる可能性が見いだされた。一方で、設置場所の空間線量率の揺らぎが測定に大きな影響を与えることから、低濃度の放射性セシウムを検出する上では、オフセットによるバックグラウンドノイズの除去が重要であることなどが明らかとなった。

引用文献

- 1) 山田正人、遠藤和人、石森洋行、大迫政浩（2013）最終処分過程における挙動と制御、日廃振センター情報、12（4）、18-21.
- 2) 特開 2014-085163 「排水中の放射性セシウムの濃度を実質上連続的に測定する方法および装置」

2.3.5 県外処分技術開発戦略

(1) 目的と経緯

現在、環境省が中心となり、放射性物質汚染対処特措法に基づき帰還困難区域を除く地域の除染と事故由来の放射性物質で汚染された廃棄物（汚染廃棄物）の処理が進んでいる。環境省が示した「中間貯蔵除去土壤等の減容・再生利用技術開発戦略 工程表¹⁾」によると、減容・再生利用技術の開発及び再生利用の推進と並行し県外最終処分の方向性を検討し、2024 年度までに戦略目標が設定される。その際、減容化・再生利用等と県外最終処分は相互に関係するため、本来は全体を考慮したうえで、最終処分シナリオを設定すべきものである。そこで、目指すべき県外最終処分とそこに至る道筋が、後世から見て、また原子力と共に歩んできた人類が直面した全世界的課題として、技術的にも社会的にも合理的なものとなされるためには、中長期的にどのような技術課題があるのかを整理し、具体的技術開発戦略を設定し、同時に社会的合意形成を達成するためにどのようなプロセスが妥当であるのかを検討していくことが重要である。このような考えから、専門性を有し、かつ中立的な立場にある「一般社団法人環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会」（通称：環境放射能除染学会）において、先の問題意識に沿った検討を行い、県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方を取りまとめるための研究会「県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方に関する研究会」が設置された。本項ではその概要を説明する。

(2) 方法

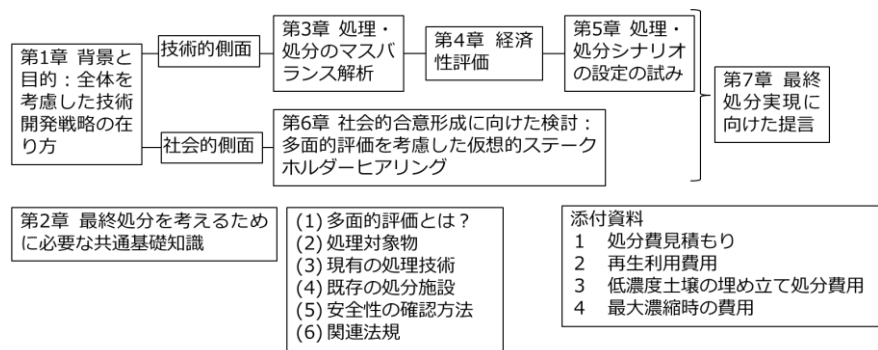
前記研究会の活動方針を以下に列挙する。

- ・ 県外最終処分の出口からのアプローチと、これまでの技術開発の流れからのアプローチの両側から検討する。
- ・ 検討する技術は、熱的減容化、灰洗浄吸着濃縮、安定化などを主体とするが、除染から最終処分の全体を俯瞰し、適宜必要な技術とそれに伴う課題、関連法規なども柔軟に検討範囲とする。
- ・ 処理・処分過程のマスバランス解析を行い、合わせて経済性評価も行う。
- ・ 社会的合意形成に求められる要件に関し、ステークホルダーヒアリングを実施する。
- ・ この際、技術論に加え、経済性、環境など多面的評価を考慮する。
- ・ 処理・処分技術検討に必要な情報を整理し、将来の国民全体及び全世界的課題としての議論に資するために、技術的に考え得る他の選択肢も含めて幅広に提示し、処理・処分シナリオの例を提示する。

研究会の成果は、報告書として環境放射能除染学会ホームページに初版が2020年11月に、2021年9月にはVer.2が公開された²⁾。また、第9回、及び第10回環境放射能除染研究発表会の企画セッションパネル討論^{3,4)}として公開し、さらに意見交換がなされ、その概要報告が学会誌に掲載される予定である。

(3) 結果と考察

研究会の活動報告書の概要を図II-28に示す。活動は、技術的側面と社会的側面に分けて行われ、これらの活動内容を理解するための基盤知識についても取りまとめられ、関心を持つ読者の学習の手引きとした。以下、技術的側面を中心に説明する。第2章において、現在の処分対象物と現有の各種技術の把握を行った。それをもと



図II-28 県外最終処分技術開発戦略研究会報告書の概要²⁾

に、第3章においては、処理・処分のマスバランス計算を行い、重要と考えられる因子に関しては感度解析も行った。そのうえで、文献情報から、処理・処分の各工程の単価を調査し、第3章の結果と合わせて、代表的と考えられる3ケースについて試算を行った。第3章、第4章では、現在進行中の事業の枠内で検討を進めたが、後世への説明責任と社会的合意形成に向けては、より広い技術的観点から情報整理が必要と考え、処理・処分工程で考慮すべき要因と選択肢を網羅的に整理し、特徴ある想定シナリオとして3つの経済性評価とともに提示した。

図II-29にマスバランス計算の一例を示す。ここでは、すでに稼働している熱処理を前提とし、その後の熱処理飛灰の洗浄、吸着、安定化を経て廃棄する安定化体を示している。その後の、除染処理済み物の再利用と安定化体の処分費用も計算し経済性を試算した。

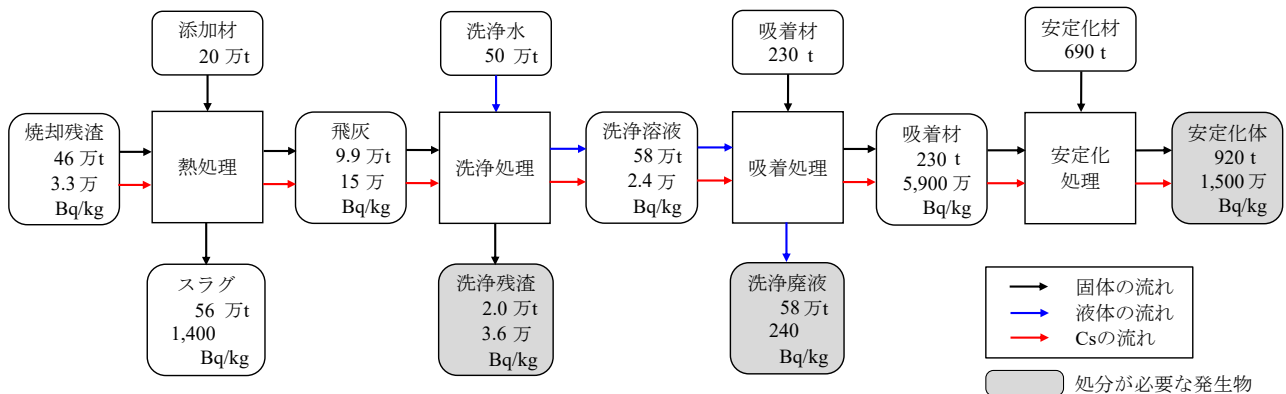


図 II-29 マスバランスのフローと計算結果の一例²⁾

図II-30に処理による生成物体積のまとめを示す。焼却残渣は熱処理により約 1/5 に減容化されるが、その後の洗浄・濃縮処理により、さらに 1/5 に減容化できる。洗浄残渣を再度熱処理工程に回すとすると、安定化体はケース 1-1 では 840 m³に、ケース 1-2 では 110 m³と、元の 38 万 m³からそれぞれ、1/452、1/3,450 となる。

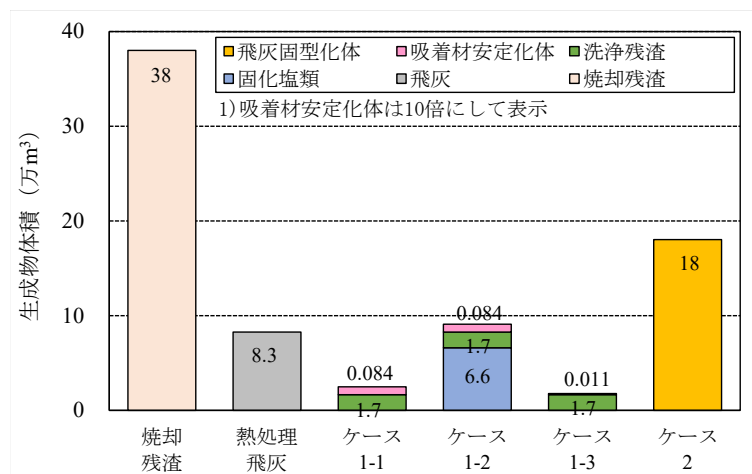


図 II-30 処理による生成物体積のまとめ（スラグと廃液は除く）²⁾

ケース 1 は熱処理飛灰の灰洗浄・濃縮とセメント固型化 1-1 が基準で、1-2 は処理水の蒸発乾固、1-3 は高性能吸着材使用）、ケース 2 は熱処理飛灰の直接セメント固型化。

図II-31にこの結果と調査した各工程の単価をもとに、種々のケースの経済性を試算した。ここでは処理済み物の再生利用費用も考慮した。ケース 1-1 は焼却残渣を熱処理し、さらに洗浄・濃縮し、セメント固型化して遮断型相当の処分施設に処分する。1-2 では、洗浄廃液の放流が困難な場合を想定し蒸発乾固する。1-3 ではより高性能な吸着剤を使用する。ケース 2 は熱処理飛灰を直接セメント固型化し、管理型相当の処分施設において処分する。ケース 3 は高濃度土壌も熱処理し、さらに洗浄・濃縮後、セメント固型化して遮断型相当の処分施設に処分する。全体の事業費はケース 1～3 で 1 兆 3400 億～1 兆 3700 億円と大きな差はなく、低濃度土壌の再生利用費が 8300 億円と 6 割を占めた。焼却残渣について、熱処理は前提としており、その後、さらなる減容化を行っても行わなくても費用はあまり変わらない結果となった。技術の確度の観点からはケース 2 の試算がより確からしい。

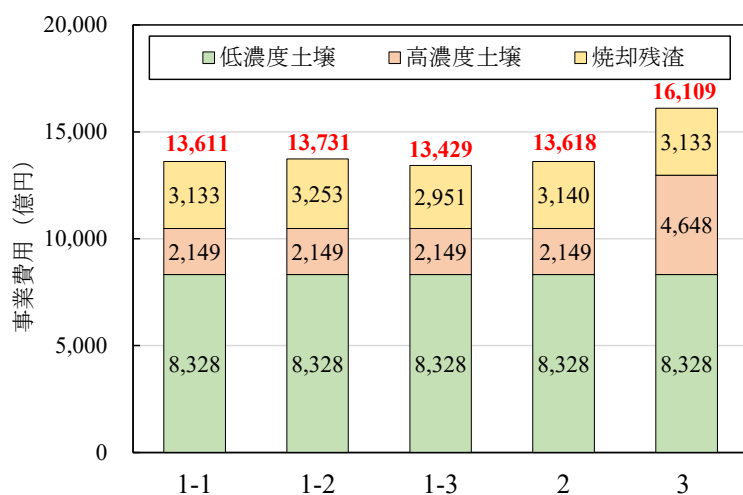


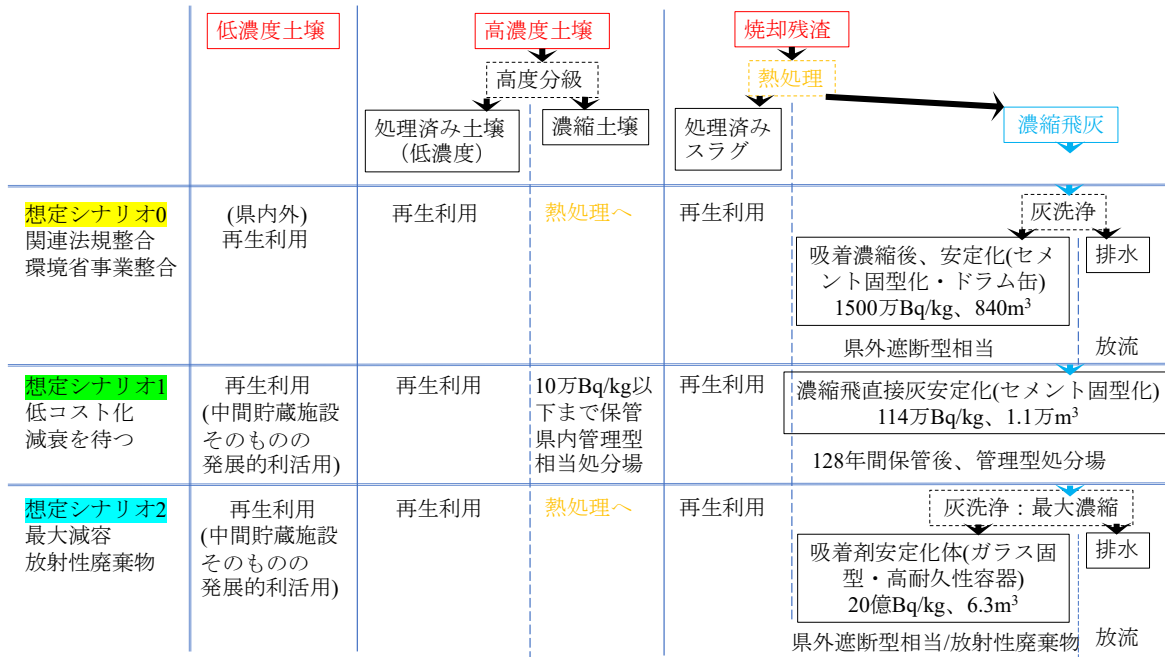
図 II-31 各種処理・処分ケースによる経済性の試算結果²⁾
 ケース 1、2 は図 II-G と同じ。ケース 3 は高濃度土壌も熱処理し、洗浄・濃縮を想定。

さらに第 5 章では、特徴ある想定シナリオとして、表 II-4 に示すように、前記ケース 3 を想定シナリオ A としたほか、費用を最小化する可能性を考えた想定シナリオ B、汚染廃棄物を再濃縮する想定シナリオ C を考慮した。想定シナリオ B では、想定シナリオ A で費用が最大であった低濃度土壌の再利用を中間貯蔵施設内で行うことで、費用削減を図った。想定シナリオ C では、熱処理飛灰と高濃度土壌の双方を文献情報から 6 万分の 1 減容化することとした。

2021 年度には、この 3 種類の想定シナリオの内容について精査を行い、一部修正を加えるとともに経済性の試算も行った。想定シナリオ B は想定シナリオ A の 1/3 となった。想定シナリオ C は他よりも少量ではあるが高濃度の安定化体が発生する。かつその処理に要する費用は不明であり、費用比較は難しい。

ここで重要なのは、熱処理後の放射性物質の濃縮の有無と濃縮度合い、さらに処理済み物の再生利用方法を考えると、実に多様な考慮事項が存在することを認識することである。学会活動報告で示したうに、さらに最終処分においては管理期間の考え方の整理と安定化体の特性と処分施設への要求特性の明確化も課題として残っており、今後も継続した検討が必要である

表II-4 特徴ある3種類の想定シナリオ



引用文献

- 1) 環境省、中間貯蔵施設について
http://josen.env.go.jp/chukanchozou/action/briefing_session/pdf/dojyou_cyuukan.pdf (2021年9月21日閲覧)
- 2) 県外最終処分に向けた技術開発戦略の在り方に関する研究会、活動報告書 Ver.2、環境放射能とその除染・中間貯蔵および環境再生のための学会、2021
http://khjosen.org/images/SRRCE_Report_ver2_20210914.pdf (2021年9月21日閲覧)
- 3) 環境放射能除染学会「県外最終技術開発戦略の在り方研究会」第二回成果報告～最終処分実現に向けた技術合理性のあるシナリオと社会合意形成～、第9回環境放射能除染研究発表会、企画セッション2、2020.
- 4) 県外最終処分技術戦略研究会 成果についての特別企画セッション、第10回環境放射能除染研究発表会、企画セッション2、2021.

2.4 まとめ

「放射性物質を含む廃棄物等の減容化技術の開発・高度」については、減容化技術の開発において、除染廃棄物をガス化熔融する施設を調査し、放射性セシウムの挙動を明らかにするとともに、スラグ中の放射性セシウム濃度の更なる低減化法を開発し、実機にてその有用性を検証した。また、スラグからの放射性セシウムの低溶出性を確保する運転条件を提示した。

セメント技術適用において、焼却灰や土壌等の化学組成を調整し、1450°Cで焼成することで、放射性セシウムを検出限界以下に除去でき、JIS規格の性能を満足するポルトランドセメントにすることができることを、放射性セシウム揮発機構解析とともに示した。

飛灰洗浄・クロマトグラフ濃縮と安定化では熱処理飛灰から放射性セシウムを溶出させ、フェロシアン化銅を吸着材としたイオンクロマトグラフにより放射性セシウムを濃縮し、さらにリン酸金属ガラス化することで6万分の1の濃縮が可能なことを示した。

「資源循環・廃棄物処理過程におけるフロー・ストックの適正化技術と管理手法の確立」については、フロー・ストックのリスク評価と管理システム開発では建設系産業廃棄物の処理処分に伴う放射性セシウムの移動量を推計する手法を構築した。福島県内の線量が低い地域における木くず処理等を事例とし、廃棄物等の有効利用に伴う放射性セシウムフローの計算と追加的被ばく線量の評価を行った。

また、測定モニタリング管理手法開発では、排水中放射性Cs濃度測定に係るクロスチェックを行い、環境省ガイドライン法の測定精度は公共の水域の放射性セシウムの濃度限度の10分の1程度までは十分であることを示した。低密度汚染廃棄物の汚染状態についてIPやSEM-EDXを用いて評価し、放射線量の高い部位が点状に分布し、その部位には多くの粒子が付着していることを明らかにした。

「低汚染廃棄物等の最終処分及び除去土壌等の中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理手法の開発・提案」については、低汚染廃棄物等の最終処分技術開発と長期管理手法では、特定一般廃棄物の煤じん等埋立処分領域に求められる遮水性覆土について、各種のジオシンセティッククレイライナーを用いた実証試験による面的な遮水性を確認した結果、室内試験結果の約1/10以上の性能を確保できることがわかった。

除去土壌等の保管や中間貯蔵プロセスの適正化と長期管理では、福島県内の除去土壌（宅地除染とため池除染）を用いた中型ライシメーター試験を実施した結果、浸透水には有機汚濁成分や比較的高濃度のカリウムやアンモニア態窒素が含まれる可能性が示唆されたが、放射性セシウムが浸透水で検出されることはなかった。

コンクリート技術を適用した処分場施設の適正化では、最終処分場施設コンクリートの耐久性確保のため、アルカリ骨材反応による長期的ひび割れ評価試験方法を開発した。また、コンクリート中の物質移動に影響する炭酸化等の効果をイメージングプレートを用いた実験から明確化した。

汚染廃棄物長期管理のための水処理技術の開発では、最終処分場において水溶性の放射性セシウムが溶出するという万が一の事態に迅速に対応するため、浸出水中の低濃度域の放射性セシウムを検出するシステムを開発し、連続的にモニタリング可能なことを実証的に示すとともに、オフセットによるバックグラウンドノイズの除去などの対策が重要であることなどを明らかにした。

県外処分技術開発戦略では、環境放射能除染学会の県外最終処分技術戦略研究会に参画し、各処理・処分工程のマスバランス計算と経済性調査を行い、特徴ある3種類の処理・処分の想定シナリオを廃棄物量、放射能濃度、経済性等を相互比較した。

Ⅲ 環境回復研究プログラム(2)

1 研究の概要

東日本大震災に伴う原子力災害からの環境回復を進める上で、様々な環境中における放射性物質の長期的な動態把握と環境影響評価が重要な課題である。そこで、森林・水域等の環境中に残存している放射性物質の環境動態に関する長期的観点からの調査・研究と、帰還地域における長期的環境影響評価及び、生活者の安全安心な生活基盤確保のための生活環境リスク管理手法の構築、生態系サービスを含めた生態系アセスメントを実施した(図1)。

本研究プログラムにおいて、以下の3つの課題に取り組んだ。

- 1) 環境動態計測とモデリングによる多媒体環境における放射性物質の動態解明及び将来予測。
- 2) 環境放射線と人為的攪乱による生物・生態系への影響評価(生態系・景観変化の実態把握と放射線等の生物影響評価)。
- 3) 生活圏における人への被ばく線量と化学物質曝露の評価。

1) については、主に福島県浜通り北部地方において、放射能汚染の状況が異なる複数の河川流域を対象とした放射性セシウム動態計測と水生生物調査等を実施し、調査・実験データの解析に基づく放射性セシウムの移動・集積や生物移行に係る機構解明や将来予測を行う。また、大気における事故直後の放射性物質動態と再飛散推計の精緻化、流域詳細モデルと陸域広域モデルの構築、及び沿岸海域・閉鎖性水域における放射性セシウムの長期動態予測を行う。さらに、動態計測による測定データや解析結果に基づいた各種シナリオの構築・適用により、放射性物質動態に係る再現計算や将来予測を試みた。

2) については、帰還困難区域内外における現地調査、野生生物あるいは実験生物を用いた実証実験及びこれらデータを用いた数値モデルの開発により、放射線等による直接的あるいは間接的な生物・生態系影響の把握を試みた。

3) については、モニタリングとモデリングを組み合わせることにより、放射性物質による被ばく線量を推計・予測するとともに、放射性物質以外のリスク要因も考慮した総合的な健康リスク評価を行った。

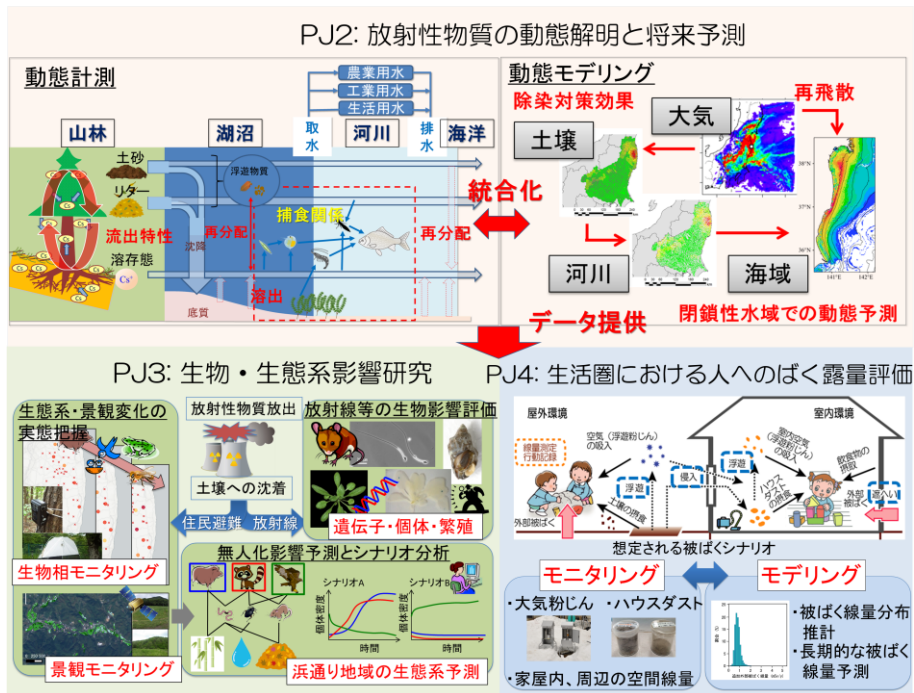


図1 研究プログラムの構成と概要

2 研究の成果

2.1 多媒体環境における放射性物質の動態解明及び将来予測

2.1.1 多媒体環境における放射性物質の動態解明

2.1.1.1 山菜への放射性セシウム移行特性

(1) 目的と経緯

福島第一原発事故から 10 年余りが経過し、栽培作物では食品中の放射性セシウム濃度の出荷制限の基準値（100 Bq/kg）を超える事例は無くなってきているが、野生の山菜では基準値を超えるものが見つかっている。これは山林の大部分が除染されていないことに加え、特定の山菜が放射性セシウムを高濃度に蓄積するためである¹⁾。栽培作物では、表土の除染や圃場へのカリウム添加が放射性セシウムの吸収抑制に有効であることが分かっているが、野生の山菜に対して同様の方法を実施・検証した例はない。野生の山菜に対する放射性セシウムの取り込み抑制手法を検討するためには、供給源がどこかを明らかにする必要がある。本研究では、放射性セシウムを特に高濃度に蓄積する山菜であるコシアブラを対象に、福島県内の里山において、野生の山菜の放射性セシウム濃度と、生育地の土壌の層別放射性セシウム量を比較することにより、山菜の放射性セシウム供給源を推定することを目的とする。

(2) 方法

福島県内 4 地域において各地域で 3 本ずつコシアブラ幼樹を選び、2019 年及び 2020 年の春期に新芽を採取した。また、幼樹の周囲 3 地点の土壌を、L 層（落葉層）、FH 層（腐植層）、A 層（鉍質土層の最表層）の上部 0~5cm 深、5~10cm 深、の 4 深度から採取した。L 層及び FH 層試料は、風乾後に裁断して 4 mm 目の篩を全通させた。A 層試料は、風乾後に 2 mm 目の篩を通し、篩上に残った根や小石を取り除いた。新芽および土壌の放射性セシウム濃度をゲルマニウム半導体検出器で測定した。

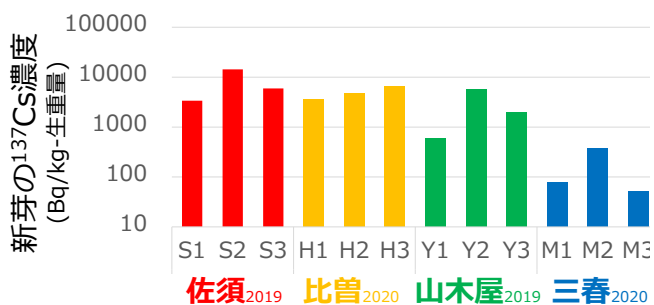


図2 コシアブラ新芽の¹³⁷Cs濃度

(3) 結果と考察

コシアブラ新芽の¹³⁷Cs濃度は、地域間では約 100 倍、同じ地域内でも約 10 倍の違いがあった（図 2）。新芽の¹³⁷Cs濃度は、土壌の FH 層の¹³⁷Cs蓄積量と正の相関を示したが、A 層との関係は見られなかった（図 1）。このことから、コシアブラは地表に近い¹³⁷Csを吸収していることが示唆された。

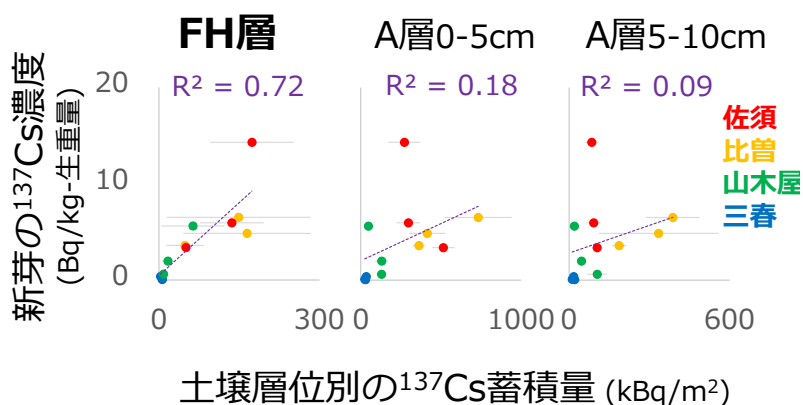


図3 新芽の¹³⁷Cs濃度と土壌層別別の¹³⁷Cs蓄積量の関係

引用文献

- 1) 村松康行, 杉山翠, 大野剛, 佐藤睦人, 佐藤守; 林産物への放射性セシウムの移行について, 日本土壌肥科学雑誌, 85, (2), p. 117-120, 2014.

2.1.1.2 森林河川における溶存態セシウム¹³⁷濃度形成機構について

(1) 背景と目的

福島原発事故後の水界生態系の長期的な汚染については、森林リターに由来する溶存放射性セシウムの影響が懸念されているが、リターがどのようにその流出プロセスに寄与し、河川水中での濃度形成に影響を及ぼすかは十分に理解されていない。そこで、福島原発事故によって重篤な汚染を生じた森林河川流域を対象として、平水時並びに降雨流出時における水文・水質観測を実施し、リターを由来とする溶存態有機炭素（DOC）やカリウムイオン（ K^+ ）と溶存態¹³⁷Csの関係性を解析することで、溶存態放射性セシウム濃度形成に及ぼすリターの影響を評価した。

(2) 方法

福島県南相馬市の太田川森林集水域（流域面積:21.0 km²、標高:160-720 m、流域内平均¹³⁷Cs沈着量:1.9 MBq/m²、流域の99.2%が森林）において、2014年4月から2018年3月の間に月1~2回の定期採水と、2016年8月に連続して襲来した3つの台風によって発生した降雨流出時に連続採水を行った。現場では、河川の流心近傍において水20-40 Lをバケツで汲み、これをカートリッジフィルター式装置に通水して、固液分離・溶存態¹³⁷Cs濃縮を行い、濃縮処理後の検体をゲルマニウム半導体検出装置に供して溶存態¹³⁷Cs濃度を算定した。同じく採取した河川水を現地で孔径0.45 μ mのメンブレンフィルターでろ過後、ろ液試料を冷蔵状態で実験室に持ち帰り、DOC濃度と K^+ を含む無機イオンの測定を行った。

(3) 結果と考察

平水時の溶存態¹³⁷Cs濃度は、夏季に濃度上昇する周年変動を繰り返しながら低下していく傾向を示した。4年間全体ならびに各年度において溶存態¹³⁷Cs濃度と有意な正の相関を示したのはDOCならびに K^+ 濃度だけであったが、それぞれに対する溶存態¹³⁷Cs濃度の傾きは、DOC濃度に対しては年々低下したのに対して K^+ 濃度に対してはそれに比べて顕著な変化は見られなかった（図4）。

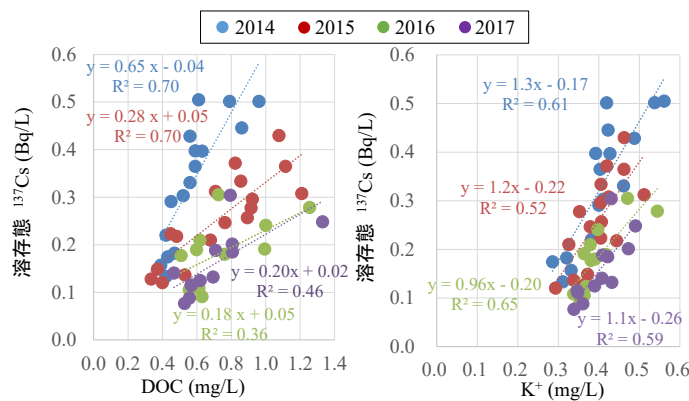


図4 平水時河川における溶存態¹³⁷CsとDOC、 K^+ との関係

観測期間全体、前半及び後半を対象として、DOCと K^+ を説明変数、溶存態¹³⁷Cs濃度を目的変数として重回帰分析を行ったところ、 K^+ のみがいずれの期間でも有意であったのに対して、DOCは前半のみ有意となった。これらの結果から、平水時の河川水における溶存態放射性セシウム濃度の形成には、リターからの放射性セシウムの溶脱（直接影響）とリターから溶脱した K^+ による河床あるいは河岸土壌からのセシウムの脱着（間接影響）、それぞれの寄与が想定されるが、事故からの時間経過に伴い K^+ による間接影響が支配的になっていることが示唆された。

3つの台風によって生じたそれぞれの降雨流出時の河川水中の溶存態¹³⁷Cs濃度は、いずれも直前の平水時の濃度に比べ増加する結果となったが、最初の台風と比べ2番目、3番目では河川流量ピーク時に顕著な増加を示さなかった(図5)。

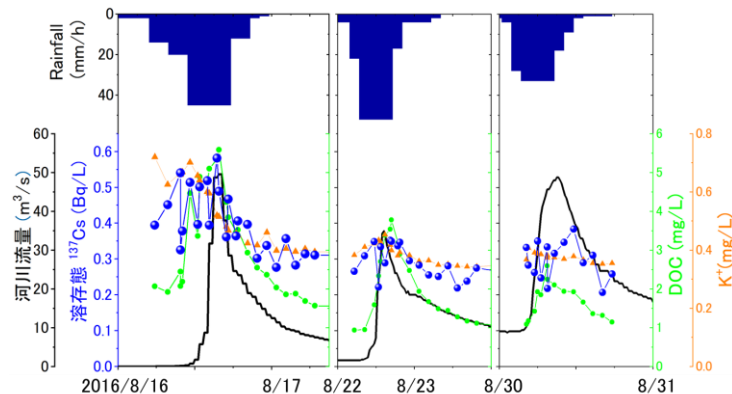


図5 出水時河川における溶存態¹³⁷CsとDOC、K⁺濃度変化

3つの降雨流出時の全採水試料を対象としたDOC濃度と溶存態¹³⁷Cs濃度の関係は、有意な正の相関($r=0.74$, $p<0.01$)を示したが、平水時に比べて傾きは低下した。これは、高濃度(10~20mg/L)のDOCを含む一方で溶存態¹³⁷Cs濃度は検出下限値(0.55Bq/L)以下である表層土壌間隙水が、降雨の直接流出過程においてリター溶脱成分に混合したためである。それにもかかわらず有意な正の相関関係を維持していたのは、リターからの溶脱成分による河川水中の溶存態¹³⁷Cs濃度形成への直接的な寄与を強く示唆している。ただし、このような直接的な寄与は降雨流出時に須らく生じるわけではなく、先行無降雨時における微生物分解に伴う溶脱ポテンシャルの増加が重要な役割を果たしていることを、3つの連続して発生した降雨流出イベント間での河川水中の溶存態¹³⁷Cs濃度変動の差異は示唆している。

2.1.1.3 ダム湖における放射性セシウムの挙動について

(1) 背景と目的

福島県においては河川上流域に90を超えるダムが建設されており、福島原発事故によって汚染された森林を主体とする集水域から放射性セシウムが、ダム湖に流入し続けている。水環境における中長期的な放射能汚染の推移を明らかにするためには、河川流域における放射性セシウムの移行過程や淡水生態系への放射性セシウムの移行に対するダム湖の具体的な関与を把握することは重要な課題である。本研究は、観測結果に基づくダム湖における¹³⁷Csの収支計算から、放射性セシウムの挙動に及ぼすダム湖の役割と影響を明らかにするとともに、魚類への放射性セシウム移行において重要な経路の一つである、水からプランクトンへの¹³⁷Cs移行の実態を明らかにすることを目的として実施し、その主たる成果をここに報告する。

(2) 方法

(1) ダム湖における¹³⁷Cs収支

上流域に松ヶ房ダム(福島県相馬市)を有する宇多川を対象として、ダム湖流入近傍とダム放流水、河川下流点を対象として、2014年から水文自動連続観測と定期採水(月1~2回)、降雨流出時採水を開始した。採取試料水については、専用のカートリッジフィルタ装置を用いて採水後速やかに固液分離・濃縮処理を行い、ゲルマニウム半導体検出器によって懸濁態(Bq/kg-SS, SS:浮遊性懸濁物質)ならびに溶存態の¹³⁷Cs濃度(Bq/L)を測定した。ダム湖への懸濁態¹³⁷Cs流入量は、測定結果を用いて推定した年流出率をダム湖流域¹³⁷Cs平均沈着量に乗じて年間流入量が算定された。同じく溶存態流入量は、流入水測定結果から推定した環境半減期を基に作成した¹³⁷Cs濃度推定式とダム湖流入水量データを用いて年単位で算定された。ダム放流¹³⁷Cs量についても、懸濁態、溶存態ともに放流水測定結果を基にそれぞれ同様に作成した濃度推定式とダム放流水量データを用いて年単位で算定した。

(2) ダム湖におけるプランクトンへの放射性セシウム移行

福島県南相馬市横川ダム湖における溶存態 ¹³⁷Cs 濃度と動物・植物プランクトン中の ¹³⁷Cs 濃度変動に関する調査を行った。横川ダム湖では 2014 年 8 月～2017 年 5 月の期間において、四半期に 1 度の計 12 回にわたり、流入部・湖心部・堤体付近の 3 地点において定点観測を行った。湖水については、表層水をカートリッジフィルタ装置 1) を用いて採水後速やかに固液分離及び溶存態 ¹³⁷Cs の濃縮処理を行い、ゲルマニウム半導体検出器によって溶存態の ¹³⁷Cs 濃度を測定した。動物・植物プランクトンは、それぞれ孔径 41μm 及び 200μm のナイロンネットを繰り返し鉛直曳きして、のべ 101～102 m³分の湖水を濾し、回収された水に含まれる ¹³⁷Cs 量から各プランクトン湿重量あたりの ¹³⁷Cs 濃度を求めた。以上の結果から、各プランクトンの ¹³⁷Cs 濃縮係数を「プランクトン湿重量あたりの ¹³⁷Cs 濃度(Bq/kg) / 湖水表層の溶存態 ¹³⁷Cs 濃度(Bq/kg)」によって評価した。また、検鏡によりプランクトンの種組成を観測した。

(3) 結果と考察

(1) ダム湖における ¹³⁷Cs 収支

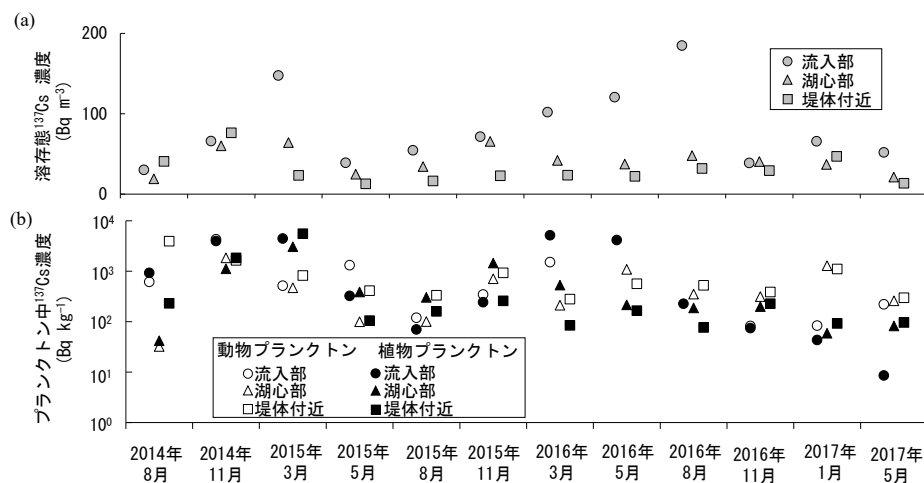
懸濁態 ¹³⁷Cs に関しては、SS をダム湖底に貯留することでダム湖流域から下流区間への移動を年間当たり 84%以上低減したことが推定され、ダム湖における放射性セシウムの高い貯留機能が確認された(表III-1)。さらに、下流域での洪水氾濫抑止を目的とした放流量制御により、この機能をより効果的に発揮できる可能性が示唆された。一方、溶存態 ¹³⁷Cs の収支に関しては、放流量が流入量を上回る傾向にあり(表III-1)、湖底貯留分からの溶出によって溶存態が生成されていることが示唆された。このように、溶存放射性セシウムを生成するダムの負の役割は、ダム湖ならびに下流水域の淡水生態系の長期的な汚染に寄与する可能性がある。本研究の詳細は Hayashi et al.(2020)¹⁾を参照されたい。

表III-1 松ヶ房ダム湖における ¹³⁷Cs 年間収支算定結果

Year	懸濁態			溶存態		
	流入 (10 ⁹ Bq)	放流 (10 ⁹ Bq)	貯留率 (%)	流入 (10 ⁶ Bq)	放流 (10 ⁶ Bq)	放流/流入 (-)
2014	6.4	0.33	95	564	537	0.95
2015	44	2.8	94	481	545	1.13
2016	8.6	0.89	90	324	349	1.08
2017	2.1	0.32	84	169	319	1.89

(2) ダム湖におけるプランクトンへの放射性セシウム移行

湖水の溶存態 ¹³⁷Cs 濃度は、3 地点ともに流入河川と同様に夏に高く、冬に低くなる季節変動を示した。一方でプランクトン中の ¹³⁷Cs 濃度は顕著な季節変動は見られなかった(図 6)。プランクトンの種組成は、植物プランクトンは全期間を通して渦鞭毛藻類の Peridinium 属が卓越し、動物プランクトンは Bosmina・Daphnia 属, Calanoida 目等、様々な種の共存が確認されたが、季節変動の傾向は観測されなかった。プランクトンの湿重量あたり ¹³⁷Cs 濃度は、植物プランクトンで 8.6～5,600 Bq/kg、動物プランクトンで 32～4,300 Bq/kg で両者の範囲に違いは見られなかった。ただしプランクトン試料の一部では土粒子等の夾雑物の混入により、プランクトンの ¹³⁷Cs 濃度が過大評価されている可能性があった。そこで、プランクトンには土粒子等に含まれる AI が移行しない特性を利用し、プランクトン試料及び底質の AI 濃度を測定し、純度 95%以上の検体を判定した。この検体に限って ¹³⁷Cs 移行係数を計算すると植物プランクトンは 53-710 (幾何平均値 340)、動物プランクトンは 400-5,700 (幾何平均値 1,700)であり、本調査地の周辺湖沼における動物・植物プランクトンの濃縮係数の報告値(130-2,400)と同じオーダーであった。この値は海水に生息するプランクトンの ¹³⁷Cs 濃縮係数(100-101)に比べて大きく、魚類と同様に生理特性による Cs の排出しにくさの違いがあることが示唆された。本研究の詳細は Tsuji et al. (2020)²⁾を参照されたい。



引用文献

- 1) Hayashi S., Tsuji H. (2020) Role and effect of a dam on migration of radioactive cesium in a river catchment after the Fukushima accident, *Global Environmental Research*, 24,105-113.
- 2) Tsuji, H., Nakagawa, M., Iijima, K., Funaki, H., Yoshimura, K., Sakuma, K., Hayashi, S. (2020) Dynamics of ¹³⁷Cs in Water and Phyto- and Zooplankton in Dam Lake Affected by Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, *Global Environmental Research*, 24,115-127.

2.1.1.4 河川における溶解態放射性セシウム濃度の規定要因

(1) 研究の目的・対象地と方法

本研究では、生物に移行しやすい化学形態である溶解態放射性セシウムの濃度が河川において何によって規定されるかを明らかにするため、東日本7県における64河川の計66地点を対象に水中の溶解態¹³⁷Cs濃度を測定し、河川の水質や流域の地質との関係について検討した。溶解態¹³⁷Cs濃度に対しては塩分濃度・流況・季節変動が影響することが既知であることから、これらの影響を排除して地域的な要因を抽出するため、対象地点を非感潮域に限定し、2017年の8～9月（年間で最も高濃度の時期）の平水時に採水を行った。河川水は流心付近から20～100Lをポンプ等でくみ上げ、速やかにカートリッジフィルタ装置に通水して固液分離・溶解態¹³⁷Cs濃縮を行い、濃縮処理後の検体をゲルマニウム半導体検出装置に供して溶解態¹³⁷Cs濃度を算定した。また水質項目として、現地にて水温・pH値・電気伝導度を測定するとともに、水試料の一部を0.45μm精度でろ過し、イオンクロマトグラフィによって陽イオン濃度（Ca²⁺、K⁺、Mg²⁺、Na⁺、NH₄⁺）及び陰イオン濃度（Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、PO₄³⁻、SO₄²⁻）、全有機体炭素計によって溶解有機物濃度を測定した。さらに地域的な要因を検討するために、流域の土地利用の割合及び土壌組成との相関を調べた。また、溶解態¹³⁷Cs濃度を形成する複合的な要因を明らかにするため、基準化溶解態¹³⁷Cs濃度（後述）を目的変数とし、土地利用・土壌組成を説明変数とする重回帰式（GISモデル）、及び水質項目を説明変数とする重回帰式（水質モデル）を、赤池情報量基準の値が最小となるよう同定した。

(2) 結果と考察

河川水中の溶存態 ^{137}Cs 濃度は $0.4\text{--}120\text{Bq m}^{-3}$ であり、各採水地点の集水域における ^{137}Cs 沈着量の平均値に対して有意な正の相関 ($r = 0.69$) が得られた。そこで、この濃度を集水域の平均 ^{137}Cs 沈着量で除して基準化したところ、その値 ($4.5 \times 10^{-6}\text{--}2.2 \times 10^{-3}\text{ m}^{-1}$) は集水域内における森林の占める割合に対して有意な負の相関 ($r = -0.63$)、建物用地の占める割合に対して有意な正の相関 ($r = 0.82$) を持つことがわかった (図 7)。また水質項目では水温、電気伝導度、 K^+ 濃度、溶存有機物濃度に対して有意な正の相関が見られた。

同定した重回帰式に関しては、GIS モデルでは、建物用地の割合が最も説明力のある変数として選択され、基準化溶存態 ^{137}Cs 濃度の観測値を幅広い範囲で再現することができた (決定係数: 0.61)。一方、水質モデルでは電気伝導度が最も説明力があつたものの、モデル計算値は都市域の溶存態 ^{137}Cs 濃度を過小評価した (決定係数: 0.54)。したがって特に都市河川における溶存態 ^{137}Cs 濃度の形成要因は共存溶存物質の影響のみでは説明できず、都市域に特有の溶存態 ^{137}Cs の発生源が濃度形成に寄与していることが示唆された (図 8)。本研究の詳細は Tsuji et al. (2019)¹⁾ を参照されたい。

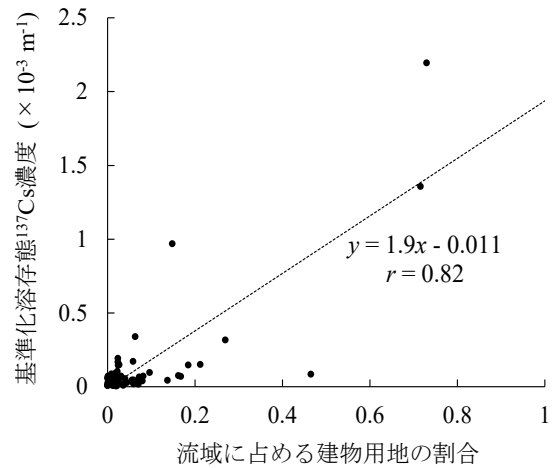


図 7 建物用地と基準化溶存態 ^{137}Cs 濃度の関係

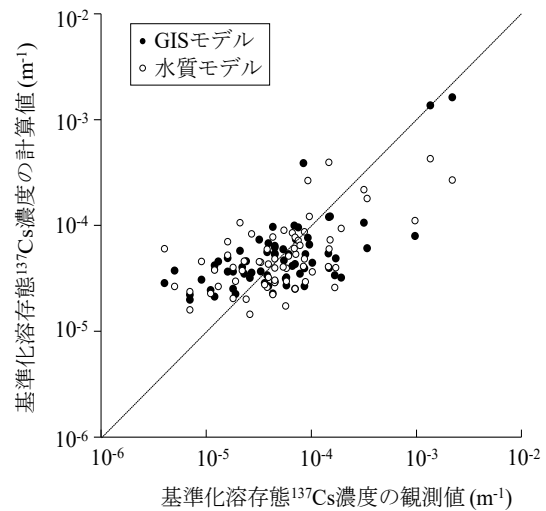


図 8 各モデルによる基準化溶存態 ^{137}Cs 濃度の再現性

引用文献

- 1) Tsuji, H., Ishii, Y., Shin, M., Taniguchi, K., Arai, H., Kurihara, M., Yasutaka, T., Kuramoto, T., Nakanishi, T., Lee, S., Shinano, T., Onda, Y., Hayashi, S. (2019) Factors controlling dissolved ^{137}Cs concentrations in east Japanese Rivers. Sci. Total Environ., 697, 134093.

2.1.1.5 淡水生態系における放射性セシウム移行特性

(1) 目的と経緯

東日本大震災に伴う福島第一原発の事故後、淡水魚では海水魚に比べ放射性セシウムによる汚染が長期化しており、事故後10年を経過した2021年時点でも一部地域で出荷制限の基準値である100Bq/kgを超過するものが見られる。淡水魚の放射性セシウム濃度は、魚種によって大きく異なり、同じ魚種のなかでも地域間、個体間で非常にばらつきが大きく「安定的に基準値を下回る」と判断することが難しいことが、出荷制限の解除が遅れる原因の一つになっている。

魚のセシウム濃度を生息環境の水のセシウム濃度で割った移行係数は、水の放射性セシウム濃度から魚の放射性セシウム濃度を予測し、放射線被ばくリスクの評価などに広く用いられてきた重要な指標である¹⁾。チェルノブイリ事故後の多くの研究により、水質や魚の生態的特性などの様々な要因が移行係数に影響を与えるため、魚の移行係数の値は大きくばらつくことが報告されてきた²⁾。本研究では、福島県内の淡水魚の放射性セシウムモニタリングデータを用いて、水質や魚の生態的特性など既存研究で報告された移行係数に影響を与える要因のうち、福島県内の淡水魚の移行係数のばらつきに影響を与える要因について相対的な重要性を調べた。また、湖と川という異なった生態系においては、淡水魚の生息場所の水質や魚が餌とする生物も異なるため、湖と川において生態系が移行係数に影響を与える要因の違いを比較した。

(2) 方法

移行係数の計算には、福島県の3つの湖沼（はやま湖、猪苗代湖、秋元湖）と5つの河川（宇多川、真野川、新田川、太田川、阿武隈川）で行われている環境省の水生生物モニタリングの2013～2017年のデータを用いた。水質は、魚を採取した地点で同時に測定された懸濁物質濃度（SS）、全有機炭素濃度（TOC）、塩分濃度、pH、水温を用いた。魚の生態的特性として、魚のサイズ（平均重量）、魚の食性（アユは藻類食、ワカサギはプランクトン食、ヤマメ、イワナ、オオクチバス、コクチバス、ナマズ、アメリカナマズ、ウナギは魚食魚、その他の魚はすべて雑食魚に分類）、魚の生息場所（遊泳魚、底生遊泳魚、底生魚に分類）を用いた。移行係数を目的変数とし、魚の生態的特性と水質を説明変数として、川と湖においてそれぞれ別の線形モデルによる解析を行い、これらの要因の相対的な重要性を評価した。

(3) 結果と考察³⁾

福島県内の淡水魚の放射性セシウム移行係数は、30～25,000の範囲にあり、これまでにチェルノブイリ事故後の研究などで報告されている移行係数とほぼ同程度だった。また、海水魚で報告されている100以下程度の移行係数と比べ、福島においても淡水魚の移行係数は大幅に高いことが確認された。湖と川の生態系間で比較すると、移行係数に影響を与える要因が湖と川で大きく異なっていた（図9）。

湖と川のどちらにおいても、大きい魚ほど放射性セシウム濃度が高くなる「サイズ効果」の影響が最も強いと推測された。一方で、魚が何を食べているかという食性による影響は、湖だけで検出された。魚の移行係数を食性間で比べると、湖にいるヤマメ・イワナ・コクチバスといった他の小魚を食べる傾向のある魚食魚の移行係数が高かった（図10）。このような魚食傾向の強い魚は、他の魚を食べることで生物濃縮が起こり、セシウム濃度が高くなっている可能性がある。

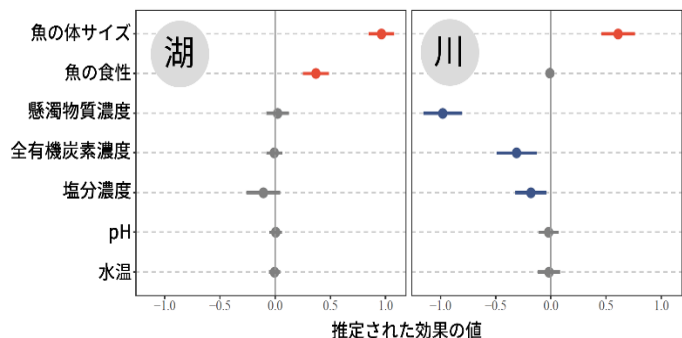


図9 淡水魚の放射性セシウム移行係数に影響を与える要因。一般化線形モデルによる推定値と95%信頼区間を示し、赤は有意に正の影響、青は有意に負の影響が見られたことを示している。

水質の影響は川だけで確認され、川で懸濁物質濃度 (SS) や全有機炭素濃度 (TOC) が高いほど、淡水魚へ放射性セシウムが小さかった。懸濁物質濃度や全有機炭素濃度が川に比べ比較的低い湖では、水質の影響は検出されなかったと考えられる。懸濁物質濃度や全有機炭素濃度は、水中の細かな無機物や有機物などの量を反映し、放射性セシウムはこれらに強く吸着するため魚への放射性セシウムの移行を阻害する可能性が考えられるが、より詳細なメカニズムの解明が必要である。

本研究において、福島での淡水魚の放射性セシウム移行係数に影響を与える要因は、チェルノブイリ事故後の研究等で報告された要因と矛盾しないことが明らかになった。一方で、湖と川という異なった生息環境では、移行係数に影響を与える要因が異なることから、生態系を考慮することで、魚の放射性セシウム濃度をより精度を高く予測できると考えられる。

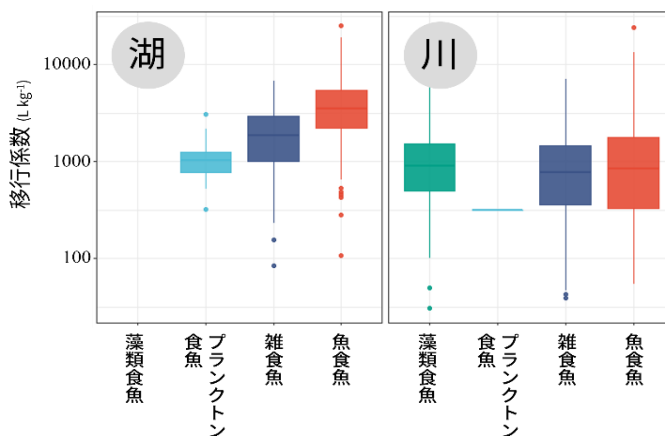


図 10 湖と河川における淡水魚の放射性セシウム移行係数。箱ひげ図の中央の線は中央値、箱の上端と下端は 25%点と 75%点、ひげの上端と下端は 5%点と 95%点、点は外れ値を表す。

引用文献

- Howard, B.J., Beresford, N.A., Copplestone, D., Telleria, D., Proehl, G., Fesenko, S., Jeffree, R.A., Yankovich, T.L., Brown, J.E., Higley, K., Johansen, M.P., Mulye, H., Vandenhove, H., Gashchak, S., Wood, M.D., Takata, H., Andersson, P., Dale, P., Ryan, J., Bollhoefer, A., Doering, C., Barnett, C.L., Wells, C., 2012. The IAEA handbook on radionuclide transfer to wildlife. J. Environ. Radioact.
- Rowan, D.J., Rasmussen, J.B., 1994. Bioaccumulation of Radiocesium by fish: the influence of physicochemical factors and trophic structure. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 51, 2388–2410.
- Ishii Y., Matsuzaki S., Hayashi S. (2020) Different factors determine ^{137}Cs concentration factors of freshwater fish and aquatic organisms in lake and river ecosystems. Journal of Environmental Radioactivity, 213.

2. 1. 2 多媒体環境における放射性物質の将来予測

2. 1. 2. 1 大気モデルを用いた初期動態と中長期動態の推計

(1) 目的と経緯

福島第一原発の事故によって、大量の放射性物質が大気中に放出され、大気環境にも重大な汚染を引き起こした。これまでに放射性物質の大気動態や大気環境への影響を評価するために、観測データと大気シミュレーションを統合した解析が多数実施され、実態解明に貢献してきた。一方で、本プロジェクト開始時には、事故後初期の大気濃度の観測データが不足していたことから、被ばく線量の推計を含む健康リスク評価や、大気拡散予測モデリングの検証・高精度化が課題として残されていた。ただ 2015 年以降、大気中微粒子 (SPM) の常時監視モニタリングで利用されるテープろ紙を活用した 100 地点以上における 1 時間ごとの ^{137}Cs の大気濃度実測データが利用可能になり、詳細な放射性物質の大気動態が明らかとなったことから、ここ 5 年間で大気シミュレーション研究は大きく進展した。我々のグループでも、本プロジェクトなどを通じて、SPM テープろ紙の観測データを活用することで、放射性物質のプルーム解析、3 回の事後評価モデル相互比較と 1 回の予測モデル相互比較、ソースターム解析、マルチモデルアンサンブルとデータ同化に基づくバイアス補正と、被ばく量推計に取り組んできた。これらの研究の内、本稿では第一回のモデル相互比較の事後解析、及び高空間分解能の大気シミュレーション結果を報告する。

(2) 方法

我々のグループでの大気シミュレーションには、気象モデル WRF (Weather Research and Forecast) と化学輸送モデル CMAQ (Community Multiscale Air Quality) をオフライン結合したシステムを用いた。前節に記載したモデル相互比較プロジェクトの内、第一回のモデル相互比較においては、計算データ提出後に SPM テープろ紙による ^{137}Cs 大気濃度データが利用可能となった。そこで、我々のグループでモデル計算結果を再解析して、大気濃度と沈着量の再現性における整合性を評価した。参加した7モデル (M1 ~ M7) の詳細は Kitayama ら(2018)¹⁾を参照されたい。また、第一回のモデル相互比較では気象解析データとして気象庁の Mesoscale model (MSM) のデータを利用していたが、その後、気象庁の非静力学モデル (NHM) に局所アンサンブルカルマンフィルタ (LETKF) に基づくデータ同化システムを結合した NHM-LETKF に基づく気象場が 3km メッシュ、及び 1km メッシュで作成された。そこで、第二回・第三回のモデル相互比較では NHM-LETKF に基づく気象解析データを利用した。ソースタームとして、第一回では Terada ら(2012)²⁾、第二回・第三回では Katata ら(2015)³⁾を利用した。

(3) 結果と考察

(1) モデル相互比較解析

福島第一原発事故起原の ^{137}Cs プルームとして、Nakajima ら(2017)⁴⁾らは大気濃度の時空間分布を基に、2011年3月12日-13日 (プルーム1、以下 P1)、3月15日-16日 (P2、P3、P4)、3月18日-19日 (P5、P6)、3月20日-21日 (P7、P8、P9) に東北地方南部あるいは関東地方に到達した9つの事例を特定した。内陸部の広範囲を覆う P2、P3、P8 に対してはいずれのモデルも比較的良好に実測値を再現していたのに対して、沿岸部で局所的に通過する P4、P5、P6 では全体的に再現性が低かった。また、プルームごとに最も再現性の良いモデルは異なる一方で、7モデルのアンサンブル平均は概ねいずれのプルームにおいても平均以上の実測再現性を示していた。平均的な ^{137}Cs 大気濃度と沈着量の再現性を比較した結果を図11に示す。M1やM5が平均的な ^{137}Cs 大気濃度を最も良好に再現していたのに対して、M7やM3が ^{137}Cs 沈着量を最も良好に再現していた。このように、 ^{137}Cs 大気濃度場と沈着場においても、最適なモデル設定は異なる一方で、アンサンブル平均は大気濃度・沈着量とも良好に再現していた。このことから、点源放出プルームのシミュレーションや、濃度場と沈着場の整合的な再現において、アンサンブル平均を活用した解析が有用であることが示された。なお、この後、Goto ら(2020)⁵⁾はマルチモデルアンサンブルデータと最小分散推定法に基づくデータ同化を活用して、アンサンブル中央値よりも顕著に ^{137}Cs 大気濃度場のスコアを向上させることに成功した。今後も、整合的な ^{137}Cs 濃度場・沈着場の再現において、マルチモデルアンサンブルのデータ同化を活用することが望まれる。

(2) 高解像度シミュレーション

周囲が複雑地形に囲まれた福島第一原発からのプルームに対する数値シミュレーションにおいては、地形を解像するために空間解像度の高いシミュレーションが好ましい。そこで、第三回の大気モデル相互比較プロジェクトでは、空間解像度を従前の 3km から 1km まで細かくした数値モデリングを実施した。その結果、平均的に沈着場や原発近傍でのプルームの再現性が向上し、図12に例示した通り我々のグループの計算結果においても3月15日の関東西部・北部や3月20日の福島県中通りへのプルームを適切に再現可能となった。一方で例えば、3月20日の原発北西方向に流れたプルームでは、原発近傍の観測地点 (原発から北北西に約 22km の南相馬市原町) において、プルーム幅の広い 3km メッシュ計算ではプルーム通過を再現するのに対して、1km メッシュ計算では計算されるプルーム幅が狭いためプルーム通過を再現できなかった。今後、放射性プルームの予測モデリングなど安全側の評価が求められる場合においては、あえて低い空間解像度でシミュレーションを実施することも有効と考えられる。

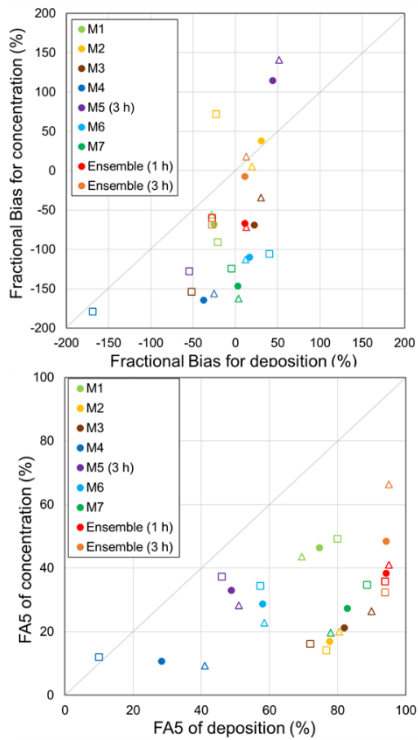


図 11 ^{137}Cs の大気沈着量 (横軸) と大気濃度 (縦軸) に対する 7 モデル (M1 ~ M7) とアンサンブル平均の再現性指標 (上図はバイアス割合、下図はモデルが実測値を factor 5 以内で再現した割合)。●は全域、△が東北、□が関東の全地点平均を表す。

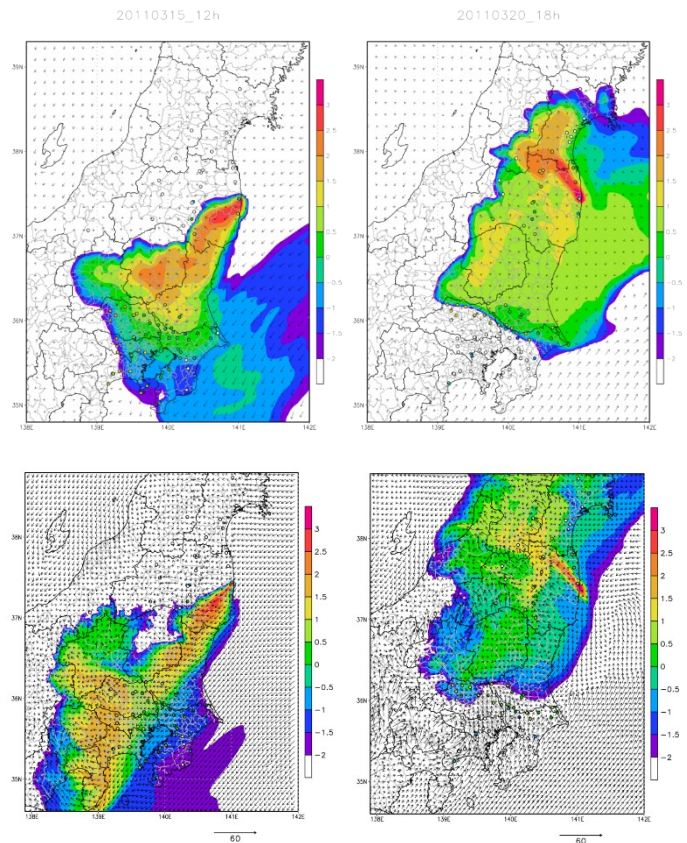


図 12 3km メッシュ (上、Sato ら, 2018)、及び 1km メッシュ (下、Sato ら, 2020) にて WRF-CMAQ で計算された 2021 年 3 月 15 日 12 時 (左) と 3 月 20 日 18 時 (右) の ^{137}Cs の大気濃度

引用文献

- 1) Kitayama K. et al. (2018) Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 123 (14), 7754-7770.
- 2) Terada H. et al. (2012) Journal of Environmental Radioactivity, 112, 141-154.
- 3) Katata G. (2015) Atmospheric Chemistry and Physics, 15, 1029-1070.
- 4) Goto D., et al. (2020) Atmospheric Chemistry and Physics, 20, 3589-3607
- 5) Nakajima T. et al. (2017) Progress in Earth and Planetary Science, 4, 2.

2.1.2.2 森林内の放射性 Cs 動態予測：樹種や森林管理に着目して

(1) 背景と目的

福島原発事故から 10 年が経過したが、 ^{137}Cs の土壌や樹木への残留性が高いため、森林生態系の汚染は今後も続くと考えられる。汚染された森林の大半は人工林や二次林であり、森林の生態系サービスを維持するためには森林管理が必要である。したがって、森林管理の観点から生態系や放射線のリスクを理解するためには、10 年単位で ^{137}Cs のシミュレーションを行うことが重要である。

(2) 材料と方法

森林生態系における ^{137}Cs の動態をシミュレートできる放射生態系モデル「FoRothCs」を開発した。このモデルは、もともと針葉樹人工林用に開発されたもので、近似バイズ計算手法を用いて、観測データセットの要約統計量に近づけることによって、パラメータの調整を行っている¹⁾。また福島県の二次林でよく見られるコナラの ^{137}Cs 動態をシミュレーションするために、針葉樹に加えて FoRothCs に落葉樹のスキームを開発した。針葉樹種の場合と同様に、近似バイズ計算手法を用いて Cs の移行に関するパラメータを推定した。事故後 50 年の ^{137}Cs の動態をシミュレーションするために、モデル間比較研究 (CsMIP) で開発されたシナリオ²⁾を使用した。

(3) 結果と考察

シミュレーションでは、土壌からの ^{137}Cs 移行によって、新しく植えられた直後の幹の組織中の ^{137}Cs 濃度は低いが、植栽後はバイオマスが小さいため、幹の比較的濃度が上がりやすい。植樹された葉の ^{137}Cs 濃度は、事故前に生育していた樹木よりも低く推移するが、これは事故直後の直接沈着の影響が無いためである (図 13)。一方、リター層の

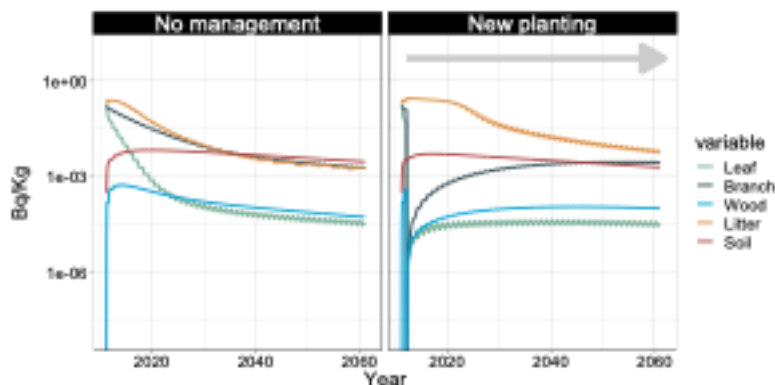


図 13 異なる森林管理下における樹木の ^{137}Cs 濃度。植栽シナリオは 2012 年 2 月に伐採し 3 月に植栽。

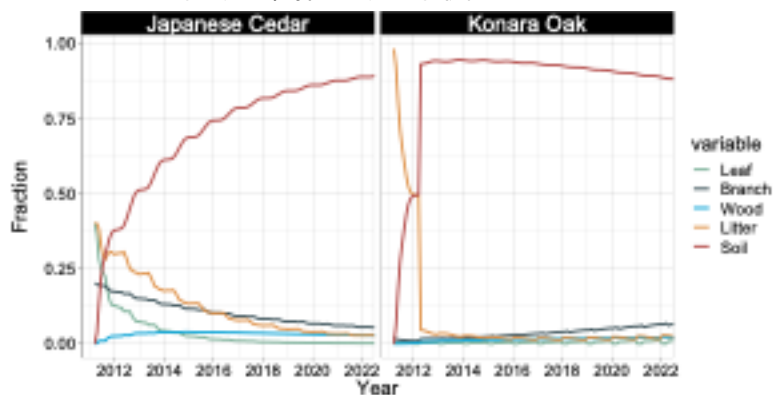


図 14 スギ林とコナラ林における ^{137}Cs インベントリーの分布割合。

^{137}Cs 濃度は、「管理なし」の場合よりも高くなっている。これは、伐採により ^{137}Cs 濃度の低い新規リターフォールが減少したこと (樹木のバイオマスが伐採前のレベルまで増加するには時間がかかる) に加えて、リター層での ^{137}Cs の微生物による上昇移動が生じたことによるものである。ただしリター層の ^{137}Cs 濃度は増加しているが、インベントリーそのものは大きく減少している。次に植生に着目して、常緑針葉樹林 (スギ) と落葉広葉樹林 (コナラ) における、それぞれの ^{137}Cs のインベントリー挙動を評価した。インベントリー変化は植生間で大きく異なる。事故当時にコナラ林の林冠には葉がなかったために直接沈着が無かったこと、また広葉樹のリターの分解が早く、非常に早く ^{137}Cs が土壌に移行している (図 14)。この結果は除染等管理の適切なタイミングに植生を考慮する必要を示唆している。

引用文献

- 1) Nishina K., Hashimoto S., Imamura N., Ohashi S., Komatsu M., Kaneko S., Hayashi S. (2018) Calibration of forest ^{137}Cs cycling model "FoRothCs" via approximate Bayesian computation based on 6-year observations from plantation forests in Fukushima. J. Environ. Radioact., 193–194, 82-90.
- 2) Hashimoto S., Tanaka T., Komatsu M., Gonze M. A., Sakashita W., Kurikami H., Nishina K. Ota M., Ohashi S., Calmon P., Coppin F., Imamura N., Hayashi S., Hirai K., Hurtevent P., Koarashi J., Manaka T., Miura S., Shinomiya Y., Shaw G., & Thiry, Y. (2021) Dynamics of radiocaesium within forests in Fukushima—results and analysis of a model inter-comparison. J. Environ. Radioact., 238, 106721.

2.1.2.3 流域モデルによる陸域での放射性物質の中長期予測

(1) 目的と経緯

福島第一原発の事故によって陸域に沈着した ^{137}Cs の多くが森林域に留まることが明らかになり、その関心は河川・湖沼を経由した流出挙動などに移っている。河川・湖沼中の ^{137}Cs は溶存態と懸濁態に大別され、有機物に吸着した ^{137}Cs の有機物分解に伴う溶出や夏場の底質からの ^{137}Cs の溶出が重要な因子であるという報告や、土壌中の ^{137}Cs を溶存態・可逆的吸着態・不可逆的吸着態の3つの形態でモデル化することで土壌鉛直分布の再現性が向上するという報告¹⁾があり、挙動や形態変化の複雑なプロセスが指摘されている。また、中流域に存在するダム湖が森林域からの ^{137}Cs 流出量を低減する機能を有することも注目されている。そこで、本研究では、松ヶ房ダムを有する宇多川流域（図15）を対象に、多媒体環境動態モデル G-CIEMS を利用して新たなプロセスを考慮した ^{137}Cs 中長期挙動予測を実施した。

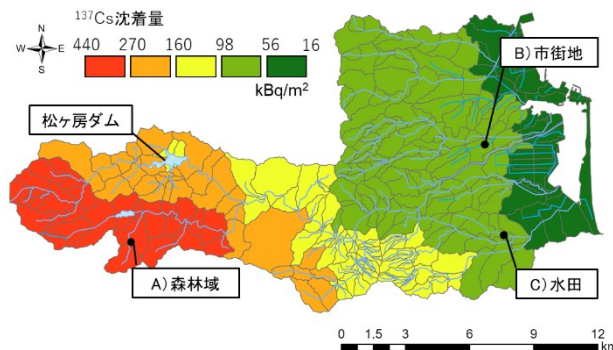


図15 対象地域（宇多川及び周辺部）の計算対象流域と河道・湖沼、各流域への ^{137}Cs 初期沈着量

(2) 方法

G-CIEMS で新たなプロセス等を考慮するために、1) 数値地図（国土基本情報）などを参考に松ヶ房ダムを含む宇多川流域（松川浦流入河川含む）のGIS地理データ（307箇所の流域ポリゴン・河道ポリゴンなど）、2) 国土数値情報の土地利用情報と植生図から各流域の水田、畑地、落葉広葉樹、針葉樹、建物用地等の土地利用区分ごとの面積、3) 第4次航空機モニタリングの測定結果から各流域や河道・湖沼への初期沈着量、4) 初期沈着時の針葉樹樹幹部の ^{137}Cs 補足率、5) ^{137}Cs の3形態（溶存態、可逆的吸着態、不可逆的吸着態）間の吸脱着速度・初期存在比、6) 可逆的吸着態の脱着速度の温度依存性、などのデータ構築・条件設定を実施した。また、月別の環境条件として、下水汚泥中の ^{137}Cs 濃度の時系列変化の解析結果から建物用地の土壌流出、USLE 式の係数 R 及び宇多川上流部での調査結果²⁾から森林域の土壌流出、代掻き時の流出を考慮した水田の土壌流出などの速度を設定した。なお、係数 R については 2011 年 3 月

～2013年12月までのアメダス再解析メッシュデータから算出し、2012年と2013年の条件を繰り返すことで中長期の条件を設定した。

(3) 結果と考察

初期沈着量から各媒体の初期濃度を算出し、2011年3月12日から2021年12月31日まで¹³⁷Csの挙動を計算した。環境条件を月別に設定したため、結果の解析も月別のフラックス（¹³⁷Cs移動量）を基本とした。松ヶ房ダムの流入フラックスは初期沈着として湖面に直接沈着した¹³⁷Csの寄与が大きかった。また、ダムへの流入フラックスに対して流出フラックスは1%程度以下であり、多くが底質に移行したと予測された（図16）。河川を流下するフラックスの経年変化や溶存態・吸着態の寄与割合は土地利用区分の違いなどを反映する結果となった（図17）。図15、図17で示したA、B、C地点の河道から流下した¹³⁷Csの平均年間流出率（各集水域への初期沈着量に対する年間流出量の割合）はそれぞれ0.034%、0.77%、0.49%であった。3つの化学形態と吸脱着速度の季節変動（温度依存性）を考慮することで、溶存態と吸着態の挙動を独立に計算することが可能になり、より実態を反映した予測が可能になると期待できる。ただし、根拠が乏しい状況で設定したパラメータが一部に存在するため、今後注意深く設定条件の精査をしていく必要がある。

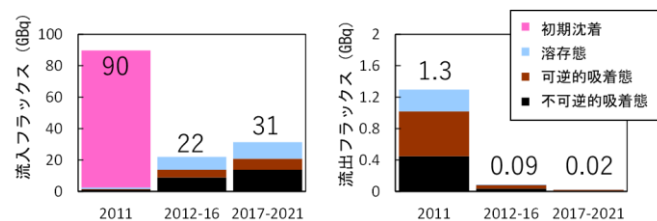


図16 期間別の松ヶ房ダムの¹³⁷Csの流入（左）と流出（右）フラックス（数値は総量）

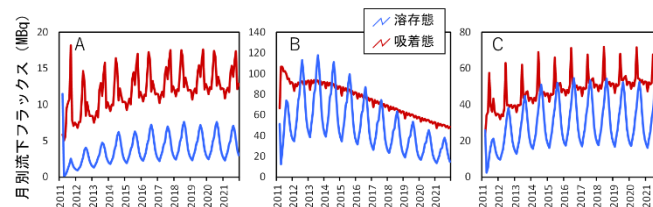


図17 月別の¹³⁷Cs流下フラックス（横メモリ：各年1月、A～C：図1の地点に対応）

引用文献

- 1) Kurikami H., Malins A., Takeishi M., Saito K., Iijima K. (2017) Coupling the advection-dispersion equation with fully kinetic reversible/irreversible sorption terms to model radiocesium soil profiles in Fukushima Prefecture. *Journal of Environmental Radioactivity*, 171, 99-109.
- 2) Nishikiori T., Ito S., Tsuji H., Yasutaka T., Hayashi S. (2015) Influence of Forest Floor Covering on Radiocesium Wash-off Associated with Forest Soil Erosion. *Journal of the Japanese Forest Society*, 97(1), 63-69.

2.1.2.4 沿岸域・閉鎖性水域における放射性セシウムの動態予測

(1) 目的と経緯

福島県相馬市の松川浦（図 18）は、2011 年の福島第一原子力発電所事故で漏出した ^{137}Cs によって海底が汚染された閉鎖性海域の一つである。松川浦は北部の水路を通じて太平洋と繋がっているが、水域面積 6.5 km^2 に対して水路の幅は 60m 程度と非常に狭く、閉鎖性はかなり強い。また、水深は航路用の濤を除く大部分が 1m 程度と浅く、干潟が広範囲に分布している。主な流入河川は二級河川の宇多川と 3 つの小河川（小泉川、梅川、日下石川）であり、閉鎖性が強い極浅海の松川浦では、今後の陸域からの ^{137}Cs の流入とさらなる海底への堆積が懸念される。

本研究では、先行研究¹⁾において東日本太平洋沿岸域を対象に開発した3次元海洋流動・ ^{137}Cs 動態モデルを用いて、事故後約5年間（2011年3月12日～2015年12月31日）における松川浦の ^{137}Cs の動態シミュレーションを実施するとともに、その結果を踏まえて ^{137}Cs 海底堆積の将来変化を議論した。

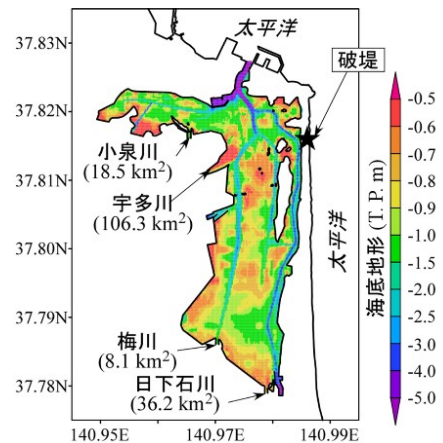


図 18 松川浦の概要・海底地形

(2) 方法

松川浦全域を解析対象領域とし、水平解像度は 15m 、鉛直層は海水で 20 層（層厚 $0.10\sim 1.5\text{m}$ ）、海底で 40 層（層厚 $0.001\sim 2.0\text{m}$ ）の格子分割を行った。松川浦の海底地形（図 18）については、濤ではナローマルチビーム（SONIC2024）、それ以外ではサイドスキャンソナー（LOWRANCE）を用いて測深を行い、それに基づいて作成した。松川浦への ^{137}Cs の流入経路として、事故後初期の大気からの沈着と太平洋からの侵入、及び長期にわたる河川からの流入の 3 つを考慮した。

(3) 結果と考察

大気からの沈着量には大気モデルによる再現結果²⁾を、太平洋からの侵入には先行研究¹⁾で再現した海水中の ^{137}Cs 濃度を入力データとして使用した。なお、東日本大震災の津波によって東側の砂嘴の一部が崩壊した（図 18）ため、2011 年 10 月の仮復旧に至るまでの期間はそこでの太平洋との海水交換も考慮した。河川からの流入については、宇多川では福島県の流量観測値と国立環境研究所の SS 濃度及び ^{137}Cs 濃度の観測値を用いて L-Q 式を作成し、対象期間の 1 時間ごとの流入量を算定した。観測値がない他の小河川では、宇多川の流量に流域面積比を乗じたものを当該河川の流量とし、それに宇多川で作成した L-Q 式を適用して SS と ^{137}Cs の流出量を算定した。

本モデルによる海底土 ^{137}Cs 濃度の計算結果は、現地で観測された時空間分布の特徴を概ね再現した（図 19）。海底土 ^{137}Cs を起源別に解析したところ、事故後約年を経過した 2015 年末でさえ、堆積量の 75%が事故後数ヶ月の大気沈着または太平洋からの侵入によるものであり、河川からの流入成分はわずか 13%と算定された（図 20）。また、海底土 ^{137}Cs の変動は、河川が出水する度に増加するものの、事故後初期を除くそれ以降の期間では、風波や潮流による海底擾乱による巻き上げと外洋との海水交換による減少の方が卓越しており、松川浦の海底土 ^{137}Cs は長期的には減少傾向であることを示した。この傾向は今後も続き、河川からの流入した ^{137}Cs が松川浦に蓄積される可能性は低いと考えられた。

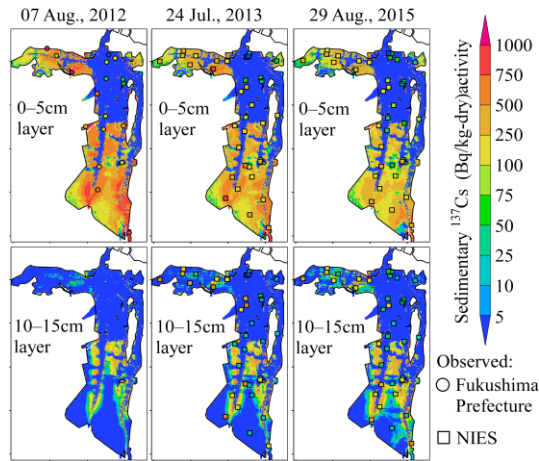


図 19 海底土 ^{137}Cs の計算値と観測値の比較

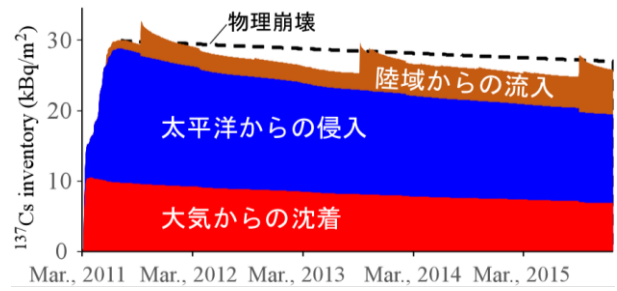


図 20 松川浦における流入起源別の海底土 ^{137}Cs の推移

引用文献

- 1) Higashi H., Morino Y., Furuichi N., Ohara T. (2015) Ocean dynamic processes causing spatially heterogeneous distribution of sedimentary caesium-137 massively released from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Biogeosciences, 12, 7107-7128.
- 2) Morino Y., Ohara T., Nishizawa M. (2011) Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011, Geophys. Res. Lett., 38, L00G11.

2. 2 環境放射線と人為的攪乱による生物・生態系影響に関する研究

2. 2. 1 低線量放射線による生物影響

2. 2. 1. 1 DNA 損傷モニタリング細胞を用いた低線量放射線による突然変異の評価

(1) 目的と経緯

福島第一原発事故後、比較的放射線量の高い地域においていくつかの生物で形態異常が報告されているが¹⁾、低線量放射線が形態異常を引き起こしたという直接的な証拠は得られていない。これまでに我々は放射線により生じる DNA 損傷のうち二本鎖損傷の修復を視覚的に観察することができる植物を開発し、室内実験から、i) この植物により線量依存的な DNA 損傷の増加を検出できること、ii) DNA 損傷のほとんどは外部被ばくにより生じていること、を示した。一方で、この植物は遺伝子組換え技術により作られているため、野外における DNA 損傷量の評価には、カルタヘナ法による規制があるという課題があった。そこで、本研究ではこの植物より自律的な増殖が困難な培養細胞を確立し、福島県の帰還困難区域の放射線により DNA 損傷及び遺伝子変異が増加しているのかについて評価を行った。

(2) 方法

(1) 培養細胞の確立

開発した植物からの培養細胞の確立は播種後 10 日目の胚軸を用いて行った。その際に用いた培地 (CIM 培地) は、Valvekens et al. (1988)²⁾に従って作成した。確立した培養細胞は 4 週間おきに新しい CIM 培地に移植して維持した。また野外における放射線ばく露の際にも CIM 培地に移植した培養細胞を用いた。

(2) 野外における放射線ばく露と DNA 修復量の定量及び全ゲノム解析

低線量放射線ばく露は福島県浪江町 (0.6~6.6 μ Sv/h) 及び大熊町 (7.7~18.0 μ Sv/h) にて培養細胞をシャーレごと約 30 日間埋設することにより行った。また対照地域として三春町 (0.1 μ Sv/h) 及びつくば市 (0.1 μ Sv/h) においても同じ実験を行った。ばく露後、GUS 染色により DNA 修復の定量を行った。また、大熊町、三春町及びつくば市の培養細胞からゲノム DNA を単離し、ハイスループットシーケンサー (MiSeq) による全ゲノム解析を行った。

(3) 結果と考察

野外での培養による培養細胞を用いた積算被ばく線量 340 μ Gy ~ 11,000 μ Gy と DNA の傷の数 (修復量) との関係プロットした。その結果、高い線量域でばつぎが見られたものの、被ばく線量と DNA の傷の数との間に高い相関が見られた ($R=0.75$; 図 21)。このことは少なくとも 11,000 μ Gy (空間線量率 16 μ Sv) までの放射線ばく露により生じた DNA の傷は速やかに修復されることを示唆する。

高線量地域 (大熊町) 及び対照地域 (三春町及びつくば市) で生育させた培養細胞の全ゲノム配列を決定した。その結果、得られた配列はリファレンスゲノム (115 M 塩基対) の 99.8 \pm 0.002 % をカバーしており、またカバー深度も 50 回以上読めたものが 90% 以上を占めており、質・量ともに解析に足りるデータを得ることができた。これら

のデータと既存のシロイヌナズナ全ゲノム配列との比較を行い、DNA 変異のうち一塩基多型 (SNV) 及び塩基欠損 (InDel) 数を検出した。その結果、SNV 及び InDel 数はそれぞれ 12,000 個及び 4,000 個程度検出されたが、三春町、つくば市または大熊町で培養した細胞との間に有意な差は見られなかった (図 22)。また、SNV のうち放射線により起きやすいとされる塩基骨格の変化を伴うトランスポージョン変異 (A \leftrightarrow T, A \leftrightarrow C, G \leftrightarrow T, G \leftrightarrow C) の割合について調べた。その結果、すべての実験区におけるトランスポージョン変異の割合は 50% 程度であり、地点間で違いは見られなかった (図 23)。本研究により、培養細胞を用いた DNA 修復量の評価及び全ゲノム解析により、少なくとも空間線量率 18 μ Sv までは突然変異の増加は認められないことが明らかになった。この結果を空間線量率マップ (第 11 次航空機モニタリング) に当てはめると、帰還困難区域のうち 99.5% がこれを下回っていたため、現在の空間線量率では突然変異の増加はほぼ見られないと予測された。

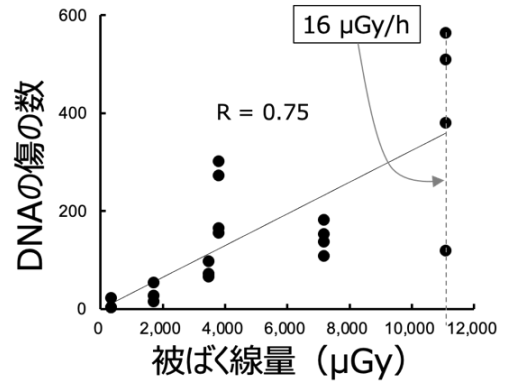


図 21 被ばく線量と DNA の傷の数との関係

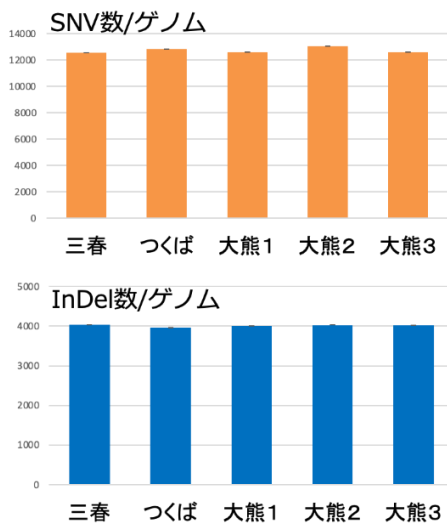


図 22 ゲノムあたりの SNV 数及び InDel 数の比較

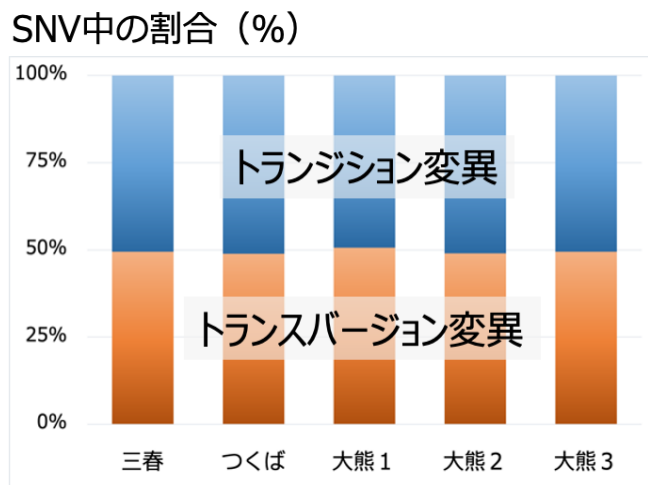


図 23 SNV 中のトランスポージョン変異の割合の比較

引用文献

- 1) Tamaoki M. (2016) Studies on radiation effects from the Fukushima Nuclear accident on wild organisms and ecosystems. GER 20: 73–82.
- 2) Valvekens D., Van Montagu M., Van Lijsebettens M. (1988) *Agrobacterium tumefaciens*-mediated transformation of *Arabidopsis thaliana* root explants by using kanamycin selection. Proc. Natl. Acad. Sci. USA 85: 5536-5540.

2.2.1.2 アカネズミを対象とする雄性生殖器の被ばく影響評価

(1) 目的と経緯

福島第一原発事故後30日間において、森林性齧歯類は3.9 mGy/dayの線量率で被ばくを受けていたと推定されている¹⁾。この線量率をICRPの誘導考慮参考レベル²⁾に照合すると、繁殖能力の低下が生じる可能性がある線量率となる。その後、帰還困難区域に分布する森林性齧歯類の一種であるアカネズミの被ばく量を推定したところ、2012年～2016年の被ばく量は0.20～0.55 mGy/dayと推定された³⁾。これは、繁殖能力の低下が起こるレベル(1.0mGy/day)以下ではあるが、ICRPの誘導考慮参考レベルで「何らかの影響がある」とされる0.1mGy/day以上の被ばくが継続していることを示す結果となっている。このような低線量放射線による森林性齧歯類の繁殖能力への影響に関しては情報が少ない。そこで、2013年～2014年の繁殖期に福島県内の帰還困難区域で捕獲したアカネズミ(*Apodemus speciosus*)を対象に精子や精巣の状態を観察し、現在の被ばく量による繁殖能力への影響を評価・検討した。

(2) 方法

(1) 対象動物

森林性齧歯類の中で、アカネズミ(*Apodemus speciosus*)を対象動物とした(図24)。2013年及び2014年に福島県の帰還困難区域、青森県及び富山県で捕獲したアカネズミの中から、性成熟に達しているとされる体重30g以上のオス個体を選択した。なお、福島県の帰還困難区域に分布しているアカネズミの2013年における総被ばく量(外部被ばく量と内部被ばく量の合計)は0.303 mGy/day、2014年における総被ばく量は0.302 mGy/dayと推定されている。



図24 対象動物に選定したアカネズミ
(*Apodemus speciosus*)

(2) 雄性生殖器への影響評価

評価指標は、1.精巣におけるアポトーシスの発生状況(TUNEL染色)、2.奇形精子の割合(位相差顕微鏡による観察)、3.精巣の酸化ストレスレベルの評価(8-OHdGに対する免疫染色)とした(図25)。評価対象としたオスの個体数を表III-2に示した⁴⁾。

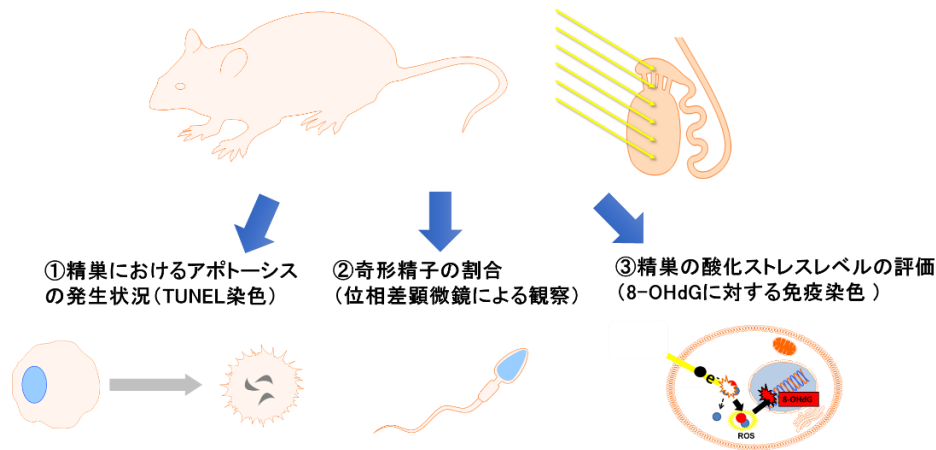


図 25 雄性生殖器官への被ばく影響評価する際に採用した指標

表Ⅲ-2 雄性生殖器官への被ばく影響を評価する際に使用したアカネズミの年別及び地域別個体

	①アポトーシス			②奇形精子			③酸化ストレス		
	福島	青森	富山	福島	青森	富山	福島	青森	富山
2013	16	25	17	19	27	20	20	10	10
2014	12	5	6	18	5	8	17	5	6

(3) 結果と考察

帰還困難区域に分布するアカネズミについては、「何らかの影響がある」とされる0.1mGy/day以上の被ばくが持続していることが確認されている³⁾。しかしながら、対照地域(青森県、富山県)のサンプルと福島のサンプルを比較して結果では、アポトーシスを起こした細胞数と奇形精子の出現割合に有意差はなかった(図26、27)⁴⁾。したがって、報告されている被ばく量は、帰還困難区域に分布するアカネズミの精子形成には大きな影響を与えていないと考えられる。

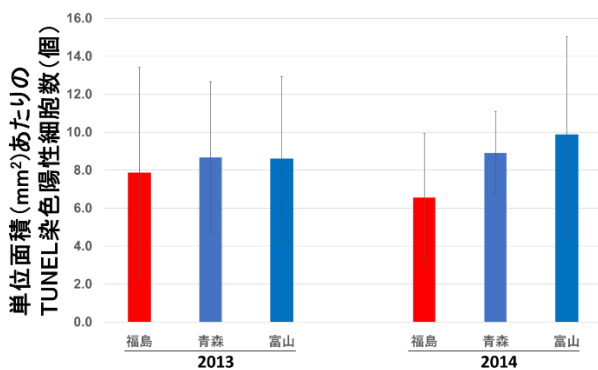


図 26 各地域の精巣におけるアポトーシスを起こした細胞数 (TUNEL 染色陽性)

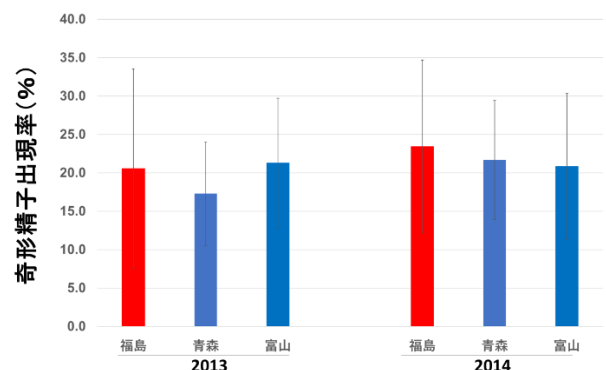


図 27 各地域の奇形精子出現率 (位相差顕微鏡による観察)

8-OHdGの免疫染色の結果では(図28)、帰還困難区域に分布するアカネズミの精巣で8-OHdG陽性を示す細胞の数が、対照地域よりも多くなる傾向が観察された。現在、抗酸化関連遺伝子の発現レベルも含め詳細な評価を実施中である。

以上のことから、福島第一原発事故直後では、帰還困難区域に分布するアカネズミにおいて、繁殖能力の低下が起っていた可能性が高かった。しかし、「何らかの影響がある」とされる0.1mGy/day以上の被ばくが持続しているにも

関わらず、帰還困難区域に分布するアカネズミのオスにおいては、現状で顕著な繁殖能力の低下は発生していないことが示唆された。

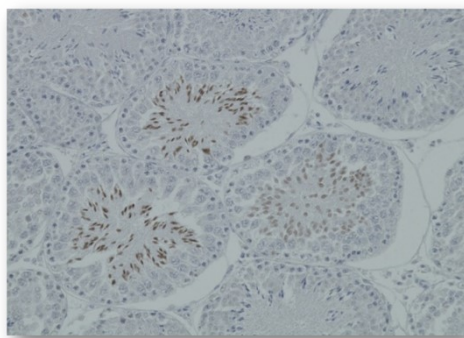


図 28 8-OHdG を対象とする免疫染色結果. 茶色に染色された細胞が 8-OHdG 陽性細胞

引用文献

- 1) Garnier-Laplace J, Beaugelin-Seiller K, Hinton TG (2011) Fukushima wildlife dose reconstruction signals ecological consequences. *Environ Sci Technol* 45:5077–5078
- 2) ICRP (2008) Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants, ICRP publication 108. *Ann ICRP* 38(4–6):1–242. (August–December 2008)
- 3) Onuma M., Endoh D., Ishiniwa H., Tamaoki M. (2020) Estimation of Dose Rate for the Large Japanese Field Mouse (*Apodemus speciosus*) Distributed in the “Difficult-to-Return Zone” in Fukushima Prefecture. In: Fukumoto M. (eds) *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8218-5_2
- 4) Okano T, Ishiniwa H, Onuma M et al (2016) Effects of environmental radiation on testes and spermatogenesis in wild large Japanese field mice (*Apodemus speciosus*) from Fukushima. *Sci Rep.* 23 6:23601

2.2.1.3 震災・原発事故後の福島第一原発周辺の潮間帯における無脊椎動物の群集及び個体群レベルの変化

(1) 目的と経緯

2011年3月の東日本大震災及び福島第一原子力発電所(1F)事故の9ヶ月後、2011年12月に1Fの半径20km圏内(警戒区域;当時)に放射線医学総合研究所ならびに福島県と共同で立ち入り、16地点で潮間帯調査を実施した結果、潮間帯無脊椎動物が顕著に低密度であることがわかった。そのため、2012年4月に再び放射線医学総合研究所ならびに福島県と共同で1Fの半径20km圏内(警戒区域;当時)の10地点において潮間帯調査を実施するとともに、比較のために千葉県、茨城県、宮城県及び岩手県の潮間帯33地点においても同様の調査を行った。その結果、潮間帯の無脊椎動物の種数と個体数密度が1F近傍、特に南側で有意に低く、また、1Fを含む、広野町～双葉町の約30kmの範囲で肉食性巻貝のイボニシが全く採集されないことが明らかとなった¹⁾。そこで、潮間帯無脊椎動物(ここでは付着生物)群集とイボニシ個体群に着目し、種数や個体数密度などについてその後の経年変化を調べた。

(2) 方法

2013～2016年の5～6月に福島県、宮城県及び茨城県の潮間帯7定点(福島県富岡町富岡漁港、大熊町夫沢、双葉町久保谷地、南相馬市小高区浦尻、宮城県石巻市渡波、茨城県神栖市波崎海水浴場、日立市久慈浜海水浴場)において50cm方形枠を用いた付着生物調査(潮間帯下部、中央部及び上部にて)を行い、種組成と種別の個体数密度及び重量

密度を調べた。また、2012～2017年の4月に福島県浜通りの15定点（福島県楡葉町山田浜、下繁岡、波倉、富岡町毛萱、富岡漁港、大熊町小入野、夫沢、双葉町久保谷地、双葉海水浴場、浪江町請戸漁港、棚塩本町、南相馬市小高区浦尻、角部内、村上）でイボニシの棲息状況調査を行うとともに、7～9月に福島県浜通りの9定点（楡葉町波倉、富岡町毛萱と富岡漁港、大熊町小入野と夫沢、双葉町久保谷地と双葉海水浴場、浪江町棚塩本町、南相馬市小高区浦尻）と茨城県ひたちなか市平磯（対照地点）でイボニシの産卵状況調査を行った。また、2017年4月～2019年5月まで福島県大熊町夫沢と富岡町富岡漁港、並びに茨城県平磯（対照地点）でイボニシを毎月採集（大熊町夫沢ではレイシガイも採集し、成熟状況を組織学的に評価し、生殖周期を調べた。

(3) 結果と考察

福島県、宮城県及び茨城県の潮間帯7定点における付着生物の種数は2015年まで1F南側の定点（大熊町夫沢と富岡町富岡漁港）で低い傾向もしくは有意に低い状況が続く（図29）、一方、個体数密度は2015年まで1F南側の定点（大熊町夫沢と富岡町富岡漁港）で有意に低い状況もしくは低い傾向が続いた（図30）。いずれもその傾向が不明瞭になったのは、震災・原発事故から5年が経過した2016年であった²⁾。また、2012～2017年の福島県浜通り15定点におけるイボニシの棲息密度の経年変化を図31に示す。

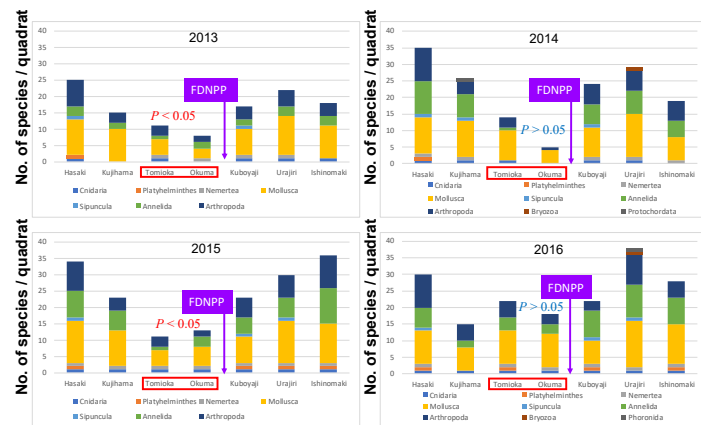


図29 付着生物の種数の経年変化²⁾



図30 付着生物の個体数密度の経年変化²⁾

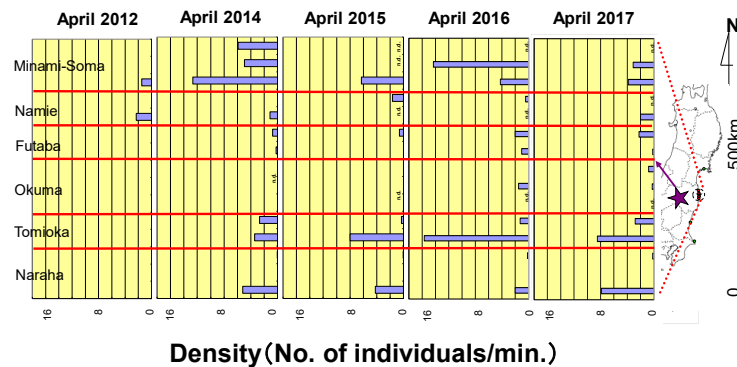


図 31 イボニシ棲息密度の経年変化²⁾

年々、南相馬市から浪江町、双葉町へと、また、楡葉町から、富岡町、大熊町へとイボニシの密度が徐々に増加していくようにみられた。すなわち、浜通りの北部と南部から中央部の双葉町や大熊町へ年々、徐々に棲息域を拡大していったとみられる。イボニシは孵化後2ヶ月程度をベリジャー幼生として過ごすと考えられていることから、震災・原発事故後にイボニシの空白地帯となった場所へ周辺海域から幼生の加入・着底が生じたと推察される。しかし、産卵は、1F 近傍では2016年まで観察されず、2017年でもなお、対照地点（茨城県平磯）と比較して低水準であった（表III-3）²⁾。

表 III-3 イボニシによる産卵の経年変化²⁾

Location	Distance from FDNPP (km)	2013	2014	2015	2016	2017
Minami-Soma A (Urajiri)	17.5	++	+++	-	+++	+++
Futaba B (Beach)	3.5	-	-	++	-	+++
Futaba A (Kuboyaji)	1.5	-	-	-	-	+
Okuma (Ottozawa)	1.2	-	-	-	-	++
Okuma (Koirino)	3.6	-	-	-	-	++
Tomioka B (Fishing port)	9.5	-	-	-	-	-
Tomioka A (Kegaya)	10.5	-	+	-	n.s.	n.s.

+++: > 100 cm² of the total areas where egg capsules were spawned

++: 5-100 cm² of the total areas where egg capsules were spawned

+: < 5 cm² of the total areas where egg capsules were spawned

-: no egg capsules observed

n.s.: not surveyed

The names of locations are expressed as in Horiguchi et al. (2016)¹⁾.

2012年3月から2015年4月まで1F専用港湾の底質被覆工事が断続的に行われ、この工事完了後に1F近傍地点における潮間帯無脊椎動物の棲息や密度増加が観察されていることから、当該工事の影響を検証する必要がある²⁾。2017年4月～2019年5月まで福島県大熊町夫沢と富岡町富岡漁港、及び茨城県平磯（対照地点）で毎月採集されたイボニシとレイシガイの成熟状況を組織学的に評価し、生殖周期を調べた結果、大熊町夫沢のイボニシとレイシガイにおいて、ほぼ周年性成熟が継続する通年成熟現象が観察された（図32）。なお、イボニシの方がレイシガイより顕著であり、両種とも雌の方が雄より顕著であった。イボニシは年1回、夏季に成熟・産卵することが知られており、対照の平磯ではそのように観察されたため、大熊町夫沢のイボニシにおける通年成熟現象は奇異である。また、大熊町夫沢では通年成熟現象が2年間に亘り観察されたことから、一時的な現象ではなく、地点特異的な表現型応答（site-specific phenotypic response）とみられる。今後、その原因と機構を究明するとともに個体群レベルの影響評価も必要である³⁾。

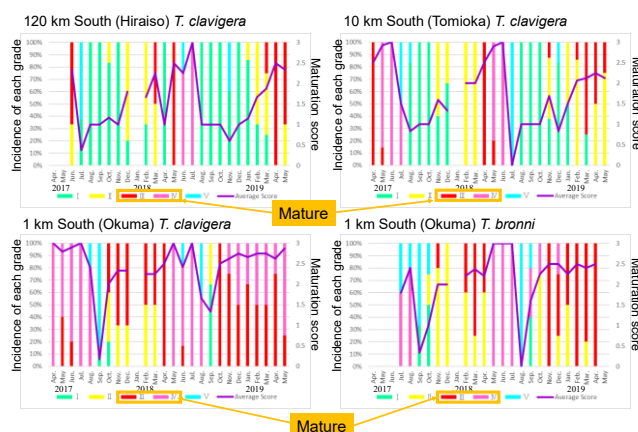


図 32 卵巢の発達段階（グレード）別の構成割合と成熟度スコアの経月変化³⁾

引用文献

- 1) Horiguchi, T., Yoshii, H., Mizuno, S., Shiraishi, H.: Decline in intertidal biota after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami and the Fukushima nuclear disaster: field observations. Scientific Reports, 6, 20416, 2016.
- 2) Horiguchi, T., Kodama, K., Kume, G., Kang, I.J.: Chapter 6, Delayed Recovery from Declines in the Population Densities and Species Richness of Intertidal Invertebrates Near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In: Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems, Long-Term Study on the Fukushima Nuclear Accident. (ed. Fukumoto, M.) Springer, Tokyo, Japan, pp.65-88, 2019.
- 3) Horiguchi, T., Kawamura, K., Ohta, Y.: Consecutive sexual maturation observed in a rock shell population in the vicinity of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Japan. Scientific Reports, 11, 560, 2021.

2. 2. 1. 4 陸域生態系モニタリングにおけるデータ公開・評価

(1) 目的と経緯

空間線量の低下に伴い、近い将来住民が元の居住地に帰還が進みつつあるが、そのような場所は営農等の人間活動が長期間制限されていたため、生態系が変化していることが予想される。本サブテーマでは避難指示区域とその周辺の陸域の生態系モニタリングを通して放射線の間接影響としての避難指示とその解除が生物・生態系に及ぼす影響を検討し、帰還住民の「安全・安心」に資する基礎情報を提供し、自然共生を視野に入れた復興シナリオの策定ならびにその実施に貢献することを目的とする。本サブテーマは国立環境研究所プロジェクト報告第 122 号 (SR-122-2016) で述べた飛翔性昆虫類の評価、哺乳類のデータ公開、市民協働型の鳥類のデータ整備等の第三期計画の成果を引き継ぎそれらのデータの公開・更新を進めるとともに、避難指示によって減少してしまった水田の環境指標生物であるカエル類のデータペーパー整備・公開を行った。一方、Tamaoki ら(2016)^{d)}がレビューした福島第一原発事故の生物影響に関する先行研究では、解析に用いられたデータが公開されていない場合も多く、また、事故前のデータを用いた研究も極めて限られていた。原発事故の影響評価におけるデータの利用可能性に係る問題点を抽出するため、オープンな生物分布データベースに登録された福島第一原子力発電所周辺のデータを原発事故前後で比較するとともに、全国の原発周辺の生物・生態系モニタリングサイトについても整理した。加えて、現状では避難指示区域のような立入制限がある地域でも有効な自動撮影によるモニタリング手法の発展に資する研究も実施した。

(2) 方法

カエル類はオスの鳴き声から種を判別することが可能なため、録音装置（IC レコーダー）を野外に設置して鳴き声を録音することで分布データを収集した。調査は 2014 年から開始され、避難指示区域内及びその周辺の公共用地（小中学校や集会所等）52 地点（2015 年以降は最大 57 地点）にて毎年 5 月中旬から 7 月中旬にかけて録音装置を設置した。録音装置はタイマー機能によって毎日 20:00 以降 10 分間録音するように設定した。得られた 10 分間の音声ファイルは 20 秒ごとの短いファイル（セグメント）に分割した。全てのセグメントを確認することは困難であったため、原則として各年 1 地点あたり約 4 日分、1 日当たり 4 セグメント分のデータを抽出して音声確認作業を行い、出現したカエル類の種名を記録した。音声確認作業では、まず、生物の野外調査経験があるがカエルの専門家ではない研究者あるいはその協力者が確認し、判別が容易なニホンアマガエルとウシガエル以外のカエルの音声が聞こえた場合はカエルの調査経験がある専門家に聞き取り作業を依頼する形をとった。ただし、一部のファイルに関しては、最初からカエルの専門家が確認作業を行った。

福島第一原子力発電所周辺の公開生物分布データについて事故前後で比較を行うため、世界最大規模の生物分布データベースである GBIF に登録されている生物分布記録（オカレンス）を、2014 年時点での避難指示区域を内包する長方形の空間範囲で抽出した。抽出したデータは時系列で推移を確認するとともに、主要なデータセットや対象分類群について概観した。また、全国規模の生物・生態系モニタリングプロジェクトである「モニタリングサイト 1000」事業のサイトのうち、全国の原発 20-30km 圏内に含まれているものを抽出し、モニタリング対象としている生態系・分類群等を確認した。同様に、原発周辺の日本長期生態学研究ネットワーク JaLTER のサイトについても確認した。

また、イノシシのような密度推定の方法が十分に発展していない哺乳類に関して、自動撮影による一定空間範囲内の撮影頻度は対象生物の密度と移動速度（滞在時間）によって決まるという理論のもと、自動撮影カメラから密度を推定する手法を開発した。推定法の妥当性はシミュレーション及び野外におけるトランセクト調査データとの比較により検証された。

さらに、避難指示区域内など立入りが容易ではない場所での水生昆虫調査に資するため、赤トンボ類の自動撮影装置を開発することにした。哺乳類の調査で用いられる一般的な自動撮影カメラは体温を感知する仕組みのため、変温動物には有効でない可能性がある。一方、赤トンボ類は棒の先に止まる性質があるため、棒の先に止まった際の影を感知する光センサーを用いた装置を開発し、実際に赤トンボ類の撮影が可能か検証した。

(3) 結果と考察

2014-2015 年のカエル類の整備済データに関して、データペーパーとして公開した²⁾。2014 年は 1,059、2015 年は 903 のセグメントについて音声確認作業が行われ、8 種（ニホンアマガエル、シュレーゲルアオガエル、ダルマガエル、ウシガエル、ツチガエル、モリアオガエル、タゴガエル、カジカガエル）が確認された。ニホンアマガエルとシュレーゲルアオガエル及びダルマガエルの記録が比較的多かった（図 33）。ニホンアマガエルとシュレーゲルアオガエルは、水田がほとんどない避難指示区域内でも半数以上の地点で出現していた。一方で、水田への依存度が高い種と考えられているダルマガエルは避難指示区域内の出現地点が限られていることが見て取れたが、そもそも避難指示区域外でも記録がある地点は比較的少なかった。避難指示区域辺縁の市町村においては区域外であっても水田稲作が再開されていない場合があることも関係しているかもしれない。ただし、これらの種の分布に避難指示がどの程度関係しているのかは、統計処理等によってデータの持つ不確実性を十分に考慮した上で解釈する必要がある。

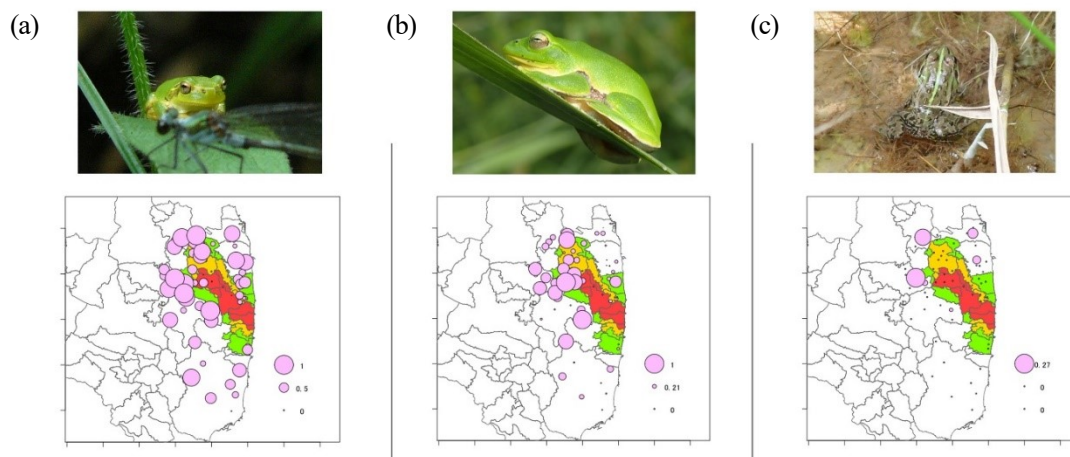


図 33 2014-2015 年のデータに基づく (a) ニホンアマガエル、(b) シュレーゲルアオガエル、(c) ダルマガエルの分布バブルチャート。各調査地点に描画された円の大きさは、出現頻度（不確実なデータは出現していないとみなした上で、2 年分の全確認済みセグメントのうち、記録があったセグメントの割合）に対応。市町村境界は国土交通省提供の国土数値情報（行政区画データ）による。赤、黄色、緑の地域はそれぞれ当時の帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域に対応

GBIF に登録されていた福島第一原子力発電所周辺のおカレンスは図 34a のようになっており、原発事故以降は国立環境研究所の本サブテーマによるモニタリングデータが大部分を占めていた³⁾。記録がある生物分類群の内訳は、震災後は鳥類が主であり、震災前はモクレン綱（いわゆる双子葉植物）、鳥類が多かった。震災前から継続されている調査に基づくデータセットは環境省による水鳥（ガン・カモ類）調査等に限定されていた。全国の原発に関しては、モニタリングサイト 1000 事業サイトは図 34b のように分布しており、一部の原発では 20km 圏内（福島第一原子力発電所事故では事故後直後に避難指示が出された範囲）にサイトがない場合もあった。多くのサイトは鳥類を対象としているものであった。また、この事業のサイトには研究機関主体のものと市民ボランティア主体のものが含まれるが、多くは市民ボランティアによるものであり、原発周辺のサイトも市民ボランティアによる寄与が大きい。JaLTER のサイトの位置は概ねモニタリングサイト 1,000 のサイトと重複しており、空間分布という点ではモニタリングサイト 1,000 を補完するものではなかった。これらの結果は、鳥類以外の利用可能な公開データ及びモニタリング体制は限られていることを示していた。また、原発事故後の福島では研究機関によるデータ収集・公開が主となっているが、全国の事故が起きていない原発周辺の利用可能な生物分布データに関しては、市民ボランティアが重要な役割を果たしていることが示唆された。将来の万が一に備えて生物分布データの利用可能性を高めるには、平時の市民参加モニタリングと研究機関による非常時のモニタリングを適切に統合させる体制や技術の構築・改善が望ましいと考えられる。

自動撮影による新しい密度推定手法は、シミュレーションによって密度を偏りなく推定可能なこと、従来のライントランセクト法と高い相関をもつことが検証された⁴⁾。この新手法は REST 法と名付けられ、この手法を応用した密度推定値は福島県イノシシ管理計画（第 3 期）にも参考値として掲載された。

また、赤トンボ類の自動撮影装置は研究所内の設置実験によって精度よく省電力でアキアカネ等の赤トンボ類を自動撮影可能なことが検証され⁵⁾、福島県農業総合センターの研究者らの協力の下、福島県内の営農再開水田等でもデータを取得している。

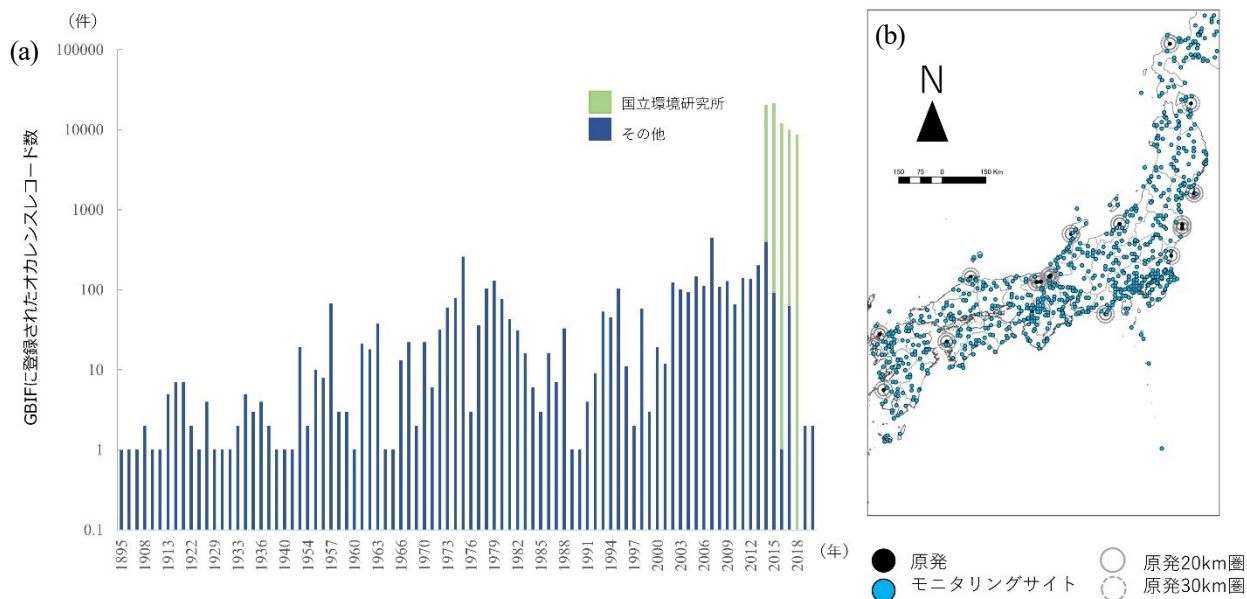


図 34 (a) 福島第一原子力発電所周辺の GBIF 登録データの年推移 (2020 年 6 月 30 日時点)、(b) 日本全国の原子力発電所と「モニタリングサイト 1000」事業のサイトの位置. Yoshioka et al.³⁾を改変。背景地図は国土地理院によるもの

引用文献

- 1) Tamaoki, M (2016). Studies on radiation effects from the Fukushima nuclear accident on wild organisms and ecosystems. *Global Environmental Research*, 20, 73-82.
- 2) Yoshioka A., Matsushima N., Jingu S., Kumada N., Yokota R., Totsu K., Fukasawa K. (2020) Acoustic monitoring data of anuran species inside and outside the evacuation zone of the Fukushima Daiichi power plant accident. *Ecological Research*, 35, 765-772
- 3) Yoshioka A., Kumada N., Ogawa Y., Fukasawa K. (2016). Overview of open biodiversity data around the Fukushima disaster area and the nuclear power plants in Japan. *Global Environmental Research*, 24, 95-104.
- 4) Nakashima Y., Fukasawa K., Samejima H. (2018) Estimating animal density without individual recognition using information derivable exclusively from camera traps. *Journal of Applied Ecology*, 55, 735-744
- 5) Yoshioka A., Shimizu A., Oguma H., Kumada N., Fukasawa K., Jingu S., Kadoya T. (2020) Development of a camera trap for perching dragonflies: a new tool for freshwater environmental assessment. *PeerJ*, 8, e9681

2.3 生活圏における人への曝露量評価

2.3.1 大気中の放射性セシウム濃度とその変動要因解析

(1) 目的と経緯

生活圏における原発事故由来の放射性物質による人への曝露について、曝露経路ごとの曝露量を、実測とモデルの両面から算定することを目指した。本研究では、住民が多くの時間を過ごす屋内環境について着目している。屋内の空間線量特性とハウスダストの摂食による内部被ばく等について 2.3.2 に、高濃度の放射性セシウムが検出される山菜の自家採取による内部被ばくについて 2.3.4 に記述している。事故初期に放出された放射性核種は、大気を通して拡散・沈着している。吸入被ばくにつながる大気中の放射性セシウムの挙動について 2.3.1 に記述するとともに、事故初期の放射性ヨウ素等の短寿命放射性核種による被ばく推定について、2.3.3 に記述している。大気中の放射性セシウム濃度は、発生源や放出量に関する情報や、室内汚染との関連を調べる上での情報源となる。ここでは、2012 年から行った大気中放射性セシウム濃度の変化と、数次にわたって見られた濃度変動の要因について述べる。

(2) 方法

大気試料は、福島県飯館村内の 2 ヶ所で、2012 年から採取を開始し、現在に至っている。福島県飯館村は、2017 年 3 月まで全村に避難指示が出ていた。2021 年現在、1 つの自治区でまだ避難指示が解除されていない。全量大気は、ハイボリウムエアサンプラ（柴田科学、HV-RW など）によって捕集した。ゲルマニウムガンマ線スペクトロメータによる放射性物質に加え、可溶性イオン成分や元素組成などについても測定している。

(3) 結果と考察

2012 年から観測を開始した福島県飯館村大気中の放射性セシウムの濃度は、観測当初の 0.01 Bq/m^3 から本研究期間の終了時の 2021 年 3 月にかけて漸減している。図 35 は対数軸で濃度表示しているため、やや読み取りにくい点があるが、観測期間中に数度の濃度上昇を示していた。ここでは、濃度上昇等の特徴的事象に (1) ~ (7) の数字を付記した¹⁾。

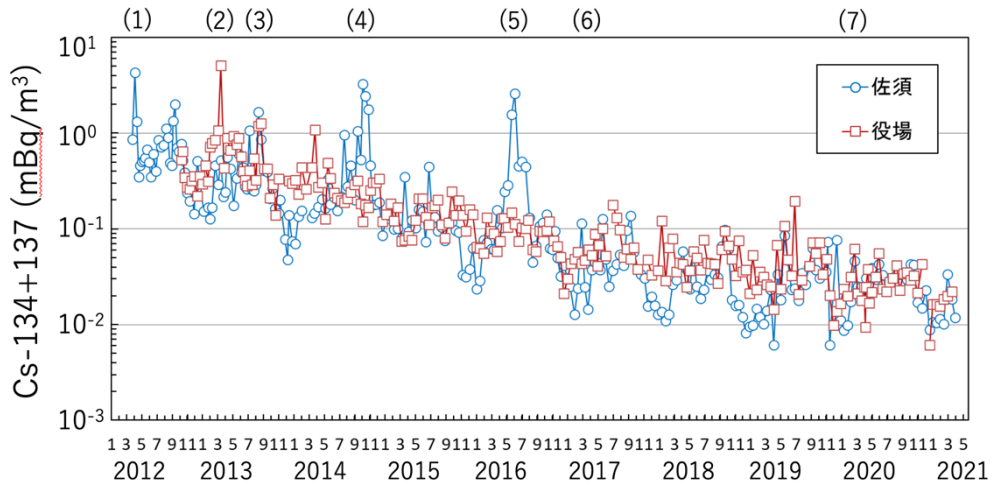


図 35 飯舘村大気中放射性セシウムの経時変化

((1) ~ (7) の数字は本文中に記した濃度変動要因の事象を示す)

2012年4月の(1)は、土壌成分の元素濃度も高く、低気圧の通過による土壌の巻き上げの影響と判断した。2013年3月の(2)は、可溶性カルシウム濃度が高く、役場敷地の敷石除染による粉じんの飛散によるものと判断した。2013年8月には両地点で濃度が上昇しており、(3)の時期に宮城県丸森町でも濃度上昇が報告されている²⁾。福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋のがれき撤去作業(7/26~8/23)と同時期であり³⁾、ここから飛散した放射性セシウムを検出した可能性が高い。(4)、(5)では、佐須地区のみでピークが検出されている。2014年から2016年にかけて、村内各地で農地除染が行われており、大気粉じん採取装置周辺も除染作業による土壌の飛散や大型ダンプカーの通行による道路粉じんの巻き上げが認められた。このような局所的な発生源がある場合、もう1地点での濃度増加は認められない。また、大気中濃度の代わりに、粉じん中濃度を利用することも有効である(図は省略)。(4)、(5)の場合、土壌巻き上げによる粉じん量が多くなったために大気中濃度が上昇しており、粉じん中濃度でのピークは目立たない。(6)に示した2017年4月には、浪江町十万山で大規模な山火事が発生した⁴⁾。この時期には約30km離れた村内観測地点で、大気中放射性セシウム濃度の増加は認められなかった。(7)の2020年4月には、村内の数ヶ所で試験的な河川敷等の野焼きが行われている。この時期を含む試料で、大気中の放射性セシウム濃度の増加は認められなかった。

観測期間を通して、冬場の大気中・粉じん中放射性セシウム濃度が低くなっている。降雪の多い飯舘村では、積雪によって地表面が覆われるため、土壌巻き上げ量が少なくなることと、遠方の汚染レベル低い地域から発生した大気粉じんの割合が増えることが濃度低下の理由になる。冬場を除いて計算すると、大気粉じん中放射性セシウムの環境半減期は、1.8年程度と推定された。

一般的に屋外大気よりも屋内大気の方が放射性物質の濃度は低いが、屋内でも屋外と同濃度の空気を呼吸するとしたとしても、吸入による放射性セシウムによる預託実効線量⁵⁾は、2020年時点で年間1nSvを下回ると計算された。

2.3.2 避難指示解除区域の室内環境への影響

(1) 目的と経緯

事故による避難指示解除の過程で、農地、宅地等の除染が行われ、屋内外の空間放射線量率は低下した。室内の空間放射線量率は、周辺地形や建物構造等による影響を受けることが予想される。これについて、実測による評価を行った。

事故由来の放射性セシウムの一部は室内にも侵入している。室内環境調査の過程で、家庭から回収された掃除機ダストには、高い濃度の放射性セシウムが含まれていた⁶⁾。その濃度は、経時的に減少しているが、福島県では、事故時に換算すると10万Bq/kgを超えるものがあった。曝露経路の1つであるダストの摂食による内部被ばく線量についても検討を行った。

一方、イメージングプレート（IP）によるダストの観測では、放射性物質を濃集する粒子が見いだされている。放射性物質は様な分布をしておらず、放射能の高い粒子が混在しているため、均質なばく露とは体内動態・被ばく量が異なってくる⁹⁾。粒子体の吸入被ばくを見積もるためにも、ダストが存在する場での現場測定により、放射性物質の分布の把握を試みた。この観測とあわせて、室内清掃活動による除染効果についても検討を行った。

(2) 方法

空間線量率の方向分布は、鉛製コリメータ（特注品、11 mm 鉛厚さ）に NaI 型サーベイメータ（日立、TCS-172）のプローブを収めて測定した。Cs-137 の照射線量率標準密封線源（ 2.3×10^8 C/kg/h）を用いて、家屋による遮へい効果を住民とともに確認しながら測定を行った。室内ダストは、掃除機にたまったダストの提供を受けた。IP（GE ヘルスケア、BAS MS）での半定量は、既知放射能の線源を用いて得た感度曲線を利用した。飯館村居宅において、現場 IP 露光と実験室内での読み出しを行った。

(3) 結果と考察

屋内の空間線量分布は、比高（1階・2階の別、床から高さ）や壁面からの距離など、空間分布を持つことが多かった。福島県内山間部の居宅では、裏山の斜面が迫っているケースや、スギなどの丈の高い屋敷林で囲まれているケースがよく見られる。コリメータを用いた方向別観測では、裏山の斜面（特に未除染の場合）からの寄与が大きかった。

一方、照射点線源を用いた観測では、事故由来のバックグラウンドを差し引くことで、住宅による遮へい効果を実験的に見積もるのに有効であった。図 36 に、飯館村内の木造家屋で、点線源を用いて遮へい効果を評価した例を示す。

ガンマ線の吸収や散乱体が少ない屋外観測でのガンマ線減衰（■）と、住宅の天井や壁面（ガラス窓）を通した減衰（●◆）には、大きな差がなかった。一方、線源を地表面に設置し、床下を通過したガンマ線の減衰（◇）は、他に比べて大きかった。これは、ガンマ線が床材を斜めに通過するため、直角に入射するよりも遮へい距離が長くなったことによる。床面直近の空間線量率よりも、やや高い位置の空間線量率が高くなることは、これによって説明される。また、部材による遮へい効果に大小あるが、平均することで木造家屋の遮蔽係数（0.4）⁷⁾に近いものとなる。

屋内の空間線量の高さ分布があることは、このような入射角度や、裏山などの放射線源からの直射、散乱 X 線の影響などの効果の総和となっている。これらの結果、居宅周辺環境、居宅床面積の大きさや、居宅内での行動様式によって被ばく線量が異なってくる。

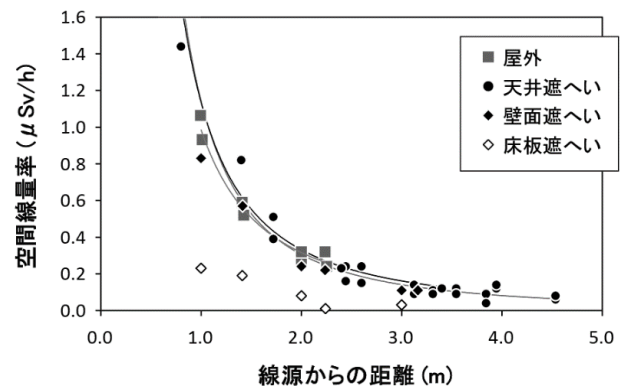


図 36 照射線源を利用した居宅の遮へい効果の観測例

室内ダストの放射性セシウムの経年変化を図 37 に示す。避難指示解除後の 2019～20 年にかけて、毎月の採取観測を行っている。参照のために示した茨城県つくば市（高層階居住。軽度の事故由来汚染

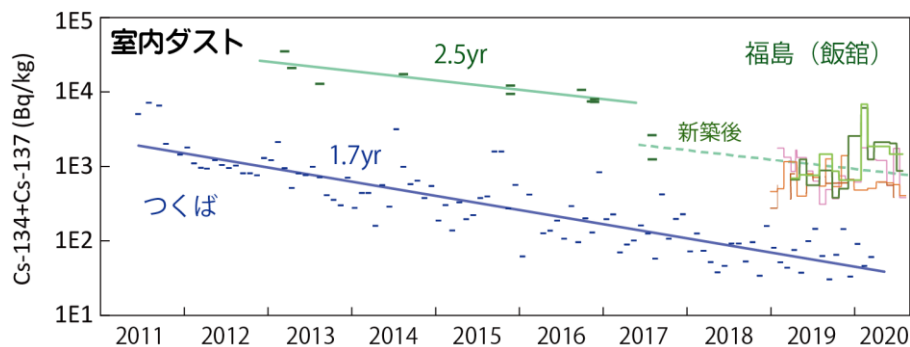


図 37 室内ダスト中放射性セシウムの経年変化（福島県飯舘村及び茨城県つくば市）

あり) の居宅では、環境半減期 1.7 年の経時的な濃度減少に加えて、突発的に高濃度を示すことが何度もあった。室内に残留していた放射性物質が、大掃除等の活動により、生活の場に移動したものと推定した。飯舘村でも、経時的な濃度減少が認められたが、その半減期はつくばよりも長かった。日常的な清掃が、結果的に除染につながったと解釈できる。また、避難指示解除後は、調査したすべての居宅が新築されている。新築前後の放射性セシウムの濃度の大きな減少は、天井裏などに残留した高濃度の放射性セシウム源がなくなり、いわば事故前の状況に戻ったことによると考えた。その後も、放射性セシウムの濃度は突発的に上がることがあった。土壌の巻き込みや、薪ストーブの使用によって生じた灰や揮散した放射性セシウムの付着などの要因が想定される。これについては、元素組成等の解析を進めているところである。

2 室内ダスト中の放射性セシウムの突発的な濃度増加の一因に、天井裏などに残った初期沈着物質の混入が想定される。これを検証するために、居宅内での現場 IP 測定を行った。半定量した粒子態の放射性物質の分布を図 38 に示した。その結果、天井裏など、通常のコleaning活動の手が及ばない箇所に放射性物質が残留していることが確認された。その放射能（スミア法で 4 mBq/cm²程度）、IP 法ともに、事前の予想を下回っており、初期沈着の影響は小さいことが示された。清掃活動に伴う吸入被ばく及び放射性物質の拡散、付着についても調査した。蛍光剤を付着させた人工ダストを天井に散布し、模擬清掃活動したところ、衣類への蛍光粒子の付着（放射性 Cs は 1 Bq 程度）、ダストへの粒子の混入が確認された。

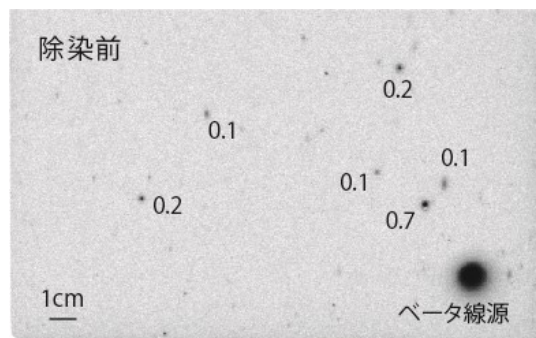


図 38 天井裏での放射性物質の現場観測例（付記した数値は半定 22 量した放射能）

この程度であれば、大掃除の際はマスク着用と通常の洗濯により、追加被ばく線量は 1μSv/年以下となり、日常生活を超える被ばくのおそれはなかった。

2.3.3 曝露モデルと大気拡散モデルを用いた事故後初期の甲状腺被ばく線量推計

(1) 目的と経緯

原発事故による健康リスクについては、WHOやUNSCEAR（原子放射線の影響に関する国連科学委員会）による評価が行われているが、事故後初期の実測データの不足から、初期被ばくに伴うリスクの評価に必要な被ばく線量の推計結果は不確実性が大きく、その改善が懸案課題とされている。一方、全国各地にある大気常時監視局の粒子状放射性物質（SPM）ろ紙試料を用いた、東日本 101 か所の放射性セシウムの 1 時間ごと濃度が測定されている⁸⁾。この事故直後の大気中放射性セシウム濃度データを使って、大気輸送沈着モデル（ATDM）を検証・改良し、この ATDM と内部被ばく線量推定モデルを結合することにより、事故後初期の¹³¹Iによる呼吸由来の内部被ばく線量（甲状腺等価線量）の精緻化を目指した。

(2) 方法

甲状腺被ばく線量は、大気中¹³¹I濃度 (Bq/m³)、呼吸率(m³/h)、ICRPの甲状腺等価線量係数 (Sv/Bq)、曝露時間 (h) から算出した。2011年3月12日から23日までの積算線量を推計した。大気中¹³¹I濃度は、1時間ごとのSPM中の¹³⁷Cs実測結果⁸⁾と、既往の¹³¹I実測データ等の解析に基づいて設定した¹³¹I/¹³⁷Cs比を用いて算出した。デフォルトの設定として、¹³¹I/¹³⁷Cs比=10、¹³¹Iガス/粒子比=1、屋内濃度/屋外濃度=1とした。また、感度解析として、¹³¹I/¹³⁷Cs比および¹³¹Iガス/粒子比をプルームごとの既往の実測データに基づき設定した解析も行った。推計は、1) SPM観測地点における推計(101地点ごと)、2) 代表的な避難シナリオ⁹⁾ごとの推計、3) 市町村や避難指示区域ごとの線量分布推計の3種類実施した。2)と3)では、SPM観測地点の¹³⁷Cs実測値で補正した大気輸送モデル¹⁰⁾と、既往の¹³¹Iデータに基づき推計した¹³¹I濃度の時空間分布を用いた。

(3) 結果と考察

図39に、SPM観測地点における推計結果(99地点、○)と、SPM観測地点の¹³⁷Cs実測値で補正した大気輸送モデル2)に基づき推計した結果(1kmメッシュ)を示す(1歳児の推計)。SPM観測地点では、福島県浜通りの4地点を除き4.3mSv以下であった。相馬局、原町局、双葉局、楡葉局の推計値は、それぞれ9、19、160、66mSvとなった。さらに、3/12に北方向へ流れたプルーム(放射性物質の流れ)の¹³¹I/¹³⁷Cs比は、ベースケースの“10”よりも高い可能性があり、感度解析を行った結果(Pケース)、2倍程度高くなる可能性が示された(図40、1歳児)。

18の避難シナリオのうち、本推計で最も高かった2つのシナリオの結果を示す(図41、1歳児)。シナリオ4(図中左)では12日の双葉町での曝露が主で、12日夜に避難を開始しているため、12日以降の曝露を回避できていたと考えられる。シナリオ9(図中右)では、15日昼に避難を開始しているため、15日までの南相馬市20km圏内での曝露が主となっていた。どちらのシナリオも、12日の北方向の、¹³¹I/¹³⁷Cs比の高いプルームの影響を受けている可能性がある(図41のPケース)。1,2の推計ともに、¹³¹I/¹³⁷Cs比や¹³¹Iの形態、大気輸送モデルなどでの不確かさがまだ存在するため、今後さらなる検証・検討が必要である。

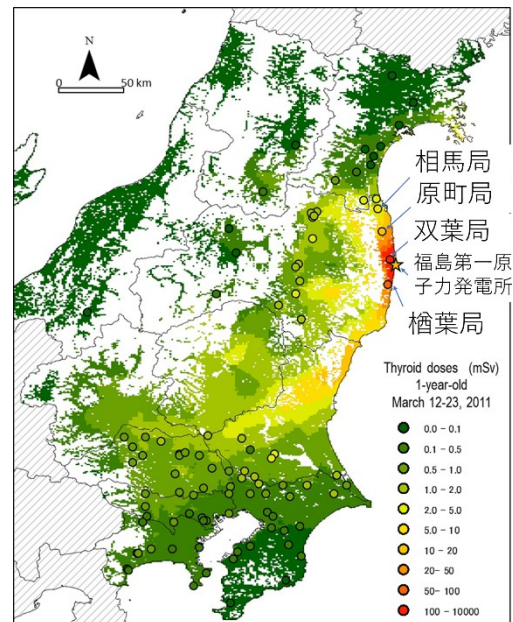


図39 推計甲状腺等価線量
(1歳児、2011年3月12-23日積算)

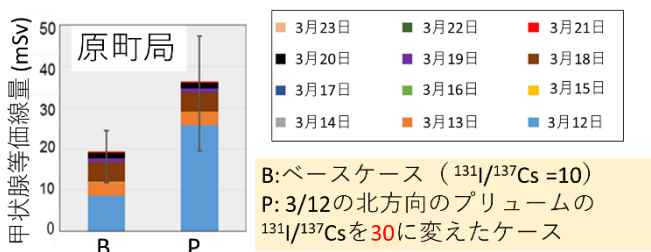


図40 日ごとの甲状腺等価線量(原町局の例)
(1歳児)

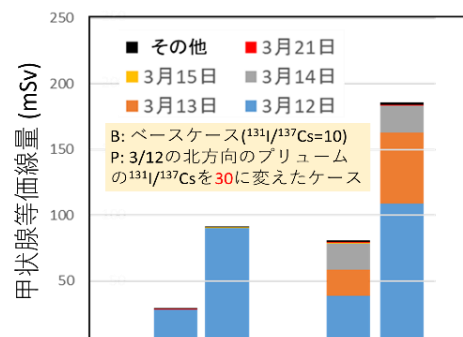


図41 日ごとの甲状腺等価線量(原町局の例) 日別内訳(1歳児)

2.3.4 自家採取食物摂取による内部被ばく線量推計に関する研究

(1) 目的と経緯

自家採取食物とは、市場に流通する食品以外に、山や川で自ら採取して食べる林産物や水産物（きのこ、山菜、淡水魚、ジビエなど）を指す。里山地域を中心として、地元の山や川から自らきのこや山菜を食することが日常であり、楽しみであったが、原発事故により、原発付近の地域において、林産物は放射性物質で汚染されてしまい、きのこや山菜、淡水魚の出荷規制は現在も続いている状態である。山林内は生活圏を除いて除染対象外であり、今後特に対策を講じなければ、きのこや山菜中の放射性物質汚染も続いてしまう可能性もある。本研究では、主に山菜類の摂取にともなう放射性物質による内部被ばく線量を推計するための1つのパラメータとして、調理に伴う低減率の情報を取得した。

(2) 方法

消費量が多いと予想され、食品の基準である 100 Bq/kg を 2020 年時点でも超える個体が比較的多い、フキノトウ、タラノメ、コシアブラ、ワラビを対象とした。それぞれの山菜の一般的な調理法、前処理法を採用した。調理には、通常一般家庭で利用することを想定し、水は水道水を、鍋は汎用のステンレス製鍋、ポウルはプラスチック製の鍋を使用した。茹で、浸水の個液比（重量）は、1:約 20 とした。

(3) 結果と考察

フキノトウ、タラノメ、コシアブラでは、1-2 分間茹でた後に浸水させることで、放射性セシウムが調理前の半分以下に低減すること、さらに、浸水時間が長いほど低減率が大きいことが分かった（図 42）。ワラビは、重曹を用いたあく抜きにより、調理前の 1 割以下にまで低減した。まだ例数が少ないが、山菜の種類よりも調理法の違いの方が、低減率への影響が大きかった。山菜類の内部被ばく線量推計においては、調理による低減効果の考慮が必要であり、様々な調理法による低減率データベースが必要となると考えられる。今後はさらにデータを蓄積していく予定である。

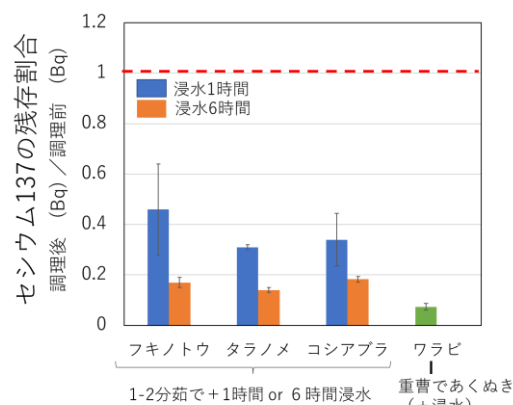


図 42 調理による山菜中の放射性セシウムの低減効果

引用文献

- 1) 土井妙子・高木麻衣・田中敦・菅野宗夫・土器屋有紀子・田尾陽一・榎本和義 (2019): つくばと飯館における福島第一原発事故由来の放射性セシウムの濃度の変化と高濃度現象の要因, *Radioisotopes*, 68, 83-104.
- 2) Steinhauser, G. et al. (2015): Post-accident sporadic releases of airborne radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant site, *Environ. Sci. Technol.*, 49, 14028-4035.
- 3) 原子力規制庁 (2014): 3号機ガレキ撤去作業に伴う放射性物質の飛散量の評価について, 特定原子力施設監視・評価検討会 (第28回), <https://www.nsr.go.jp/data/000051154.pdf> (2021年9月21日閲覧)。
- 4) 浪江町 (2017): 十万山国有林野火災, 広報なみえ, 618, 8. <https://www.town.namie.fukushima.jp/uploaded/attachment/7292.pdf> (2021年9月21日閲覧)。
- 5) ICRP (1996): ICRP Publication 72: Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides Part 5, *Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, Annals of the ICRP Volume 26/1*, Elsevier, pp.94.
- 6) Takagi, M. et al. (2019): Estimation of the radiation dose via indoor dust in the Ibaraki and Chiba prefectures, 150-200 km south from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Chemosphere*, 236, 124778.

- 7) IAEA (2000): Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency and response during a radiological emergency, IAEA-TECDOC 1162.
- 8) Tsuruta H. et al. (2018) Time-series analysis of atmospheric radiocesium at two SPM monitoring sites near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant just after the Fukushima accident on March 11, 2011. *Geochem. J.* 52, 103–121.
- 9) Kim E. et al. (2016) Estimation of early internal doses to Fukushima residents after the nuclear disaster based on the atmospheric dispersion simulation. *Radat. Prot. Dosim.* 171, 398-404
- 10) Goto D. et al., 2020, *Atmos. Chem. Phys.* 20, 3589-3607, Goto D., Morino Y., Ohara T., Uchida J., Nakajima T., Application of linear minimum variance estimation to the ensemble of atmospheric radioactive Cs-137 using multi-model simulations and observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 3589-3607

2.4 まとめ

放射性物質の動態解明及び将来予測については、現象解明・予測研究とそれに基づく中長期的なモニタリングプランの提案、避難指示解除区域を主とした生活環境リスク管理手法の構築と、段階的かつ複層的に取り組んできた。その結果、森林—ダム湖—河川を一体とした生物利用性セシウムの動態と生態系移行研究にいち早く取り組み、汚染されたリター層（有機物堆積層）の具体的な役割や広域での淡水魚汚染特性を明示出来た。これら科学的知見を活用した具体的な汚染軽減策の検討と実証が次期中長期における課題と考えている。また、モデリング研究においても、大気モデルについてはマルチモデル計算やデータ同化などで事故後初期の放射性物質の動態把握に貢献した。次期計画において、高空間解像度の輸送モデリングの精度向上や生物粒子の排出実態把握など課題が残されており、課題解決のためのモデル改良・解析が必要である。また、利用性が高い閉鎖性水域を対象とした ^{137}Cs 動態モデルの開発と将来予測については当初の計画どおりに進捗し、国際学術誌や国際学会にて発表するなどの成果を上げた。台風や爆弾低気圧の通過など極端事象発生時の再現性の向上については今後の課題である。

また、生物相モニタリングについては8年分のデータを蓄積し、さらに継続的にデータを得るための体制が整ったため、今後を着実なデータ収集が期待できる。一方で、これらのデータを用いた生物相変化の予測に関する研究が進んでいないため、次期中期計画の早い段階で個体群動態モデルの構築を進める必要がある。生物への放射線影響については、アカネズミやイボニシへの繁殖影響や DNA 損傷モニタリング植物の開発など大きな成果を挙げたが、年々空間線量率が減少しているため、その影響も見られにくくなると予想される。そのため、イノシシや山菜などの野生食品中の放射性セシウム蓄積の原因究明に関与する研究など、地域住民に研究成果を感じられるような方向にシフトしていく必要がある。

さらに、人への曝露量評価については、地元住民や地元 NPO 法人、村役場との協働体制が構築され、大気や室内環境、山菜やキノコの放射性セシウムの調査を円滑に進めることができ、住民の安心・安全な生活に資する貴重なデータを得ることができた。これらデータを具体的な生活環境リスク管理手法の構築につなげていくことが今後の課題である。

IV 環境創生研究プログラム

1 研究の概要

福島県浜通り地域を中心に福島県を対象とした復興まちづくり支援研究を展開するとともに、生活や環境面での復興の効果等を定量化し、持続可能な地域社会を目指した体系的な施策を提案する。

具体的には以下の3つの課題に取り組む。

PJ1 環境創生の地域情報システムの開発

復興の進捗と地域の発展ポテンシャルを県レベルからサイト・スケールで把握するデータベースを開発と、データベース情報を基にした将来推計を行う分析モデルの開発と適用による将来の復興目標の設計とそこへ到達するシナリオの構築を行うとともに、データベース情報とモデル分析結果を地域の住民、事業者、地方公共団体の担当者や地域主体に提示できる情報インターフェースを開発する。また、構築したシナリオを社会実装するための基礎的な知見を得るために、コミュニティ・ガバナンスに関する実証研究を実施する。これらを通じて、地方自治体を対象とした、環境に配慮した復興と長期的に持続可能な発展を目指すための計画および施策体系の定量的な策定手法の提案と、実現に向けた社会実装に貢献する。

PJ2 環境創生の地域シナリオ解析モデルの開発

自然エネルギーや熱電エネルギー併給システム、コミュニティ・エネルギーマネジメントシステム等に関する要素技術のインベントリに基づき、地域特性に応じた適正な技術・施策を同定可能な「技術・施策アセスメントシステム」を開発するとともに、復興自治体の拠点事業の計画検討への適用を通じてその有効性の検証と利便性の向上を進める。特に、福島県奥会津地域を対象に、地域バイオマス資源のポテンシャルに関するシミュレーションを実施し、バイオマス事業の検討可能性を検討する。これらを通じて、被災地における持続的な復興ロードマップを計画できる拠点展開型のアセスメントシステムを構築し、福島県における自治体の環境配慮型の地域復興計画策定等に貢献する。

PJ3 参加型の環境創生手法の開発と実装

これまで新地町で展開してきた情報通信技術（ICT）を用いた双方向型の「地域環境情報システム」を元に、生活環境情報を蓄積して地域の生活環境に関する情報発信を可能とするシステムへ改良・開発を進めるとともに、システムを用いたステークホルダー間における社会コミュニケーション・協働の方法を確立する。これらを通じて、情報通信技術を活用した地域特性や多様な住民ニーズに応じた望ましい生活環境づくり支援に貢献するとともに、地域の居住性評価と安全・安心の提供、コミュニティの絆づくりに貢献する。

福島県の浜通り地域を対象として実施してきたまちづくり支援研究を発展させて、環境配慮型の地域復興に資する地域の環境資源、エネルギー資源を活用した環境創生のモデル事業の設計手法を開発する。技術と社会制度を組み合わせたシナリオを構築してその実現による環境面、社会経済面での効果を評価するとともに、社会モニタリングシステムの開発・構築を通じてその検証を進め、持続可能な地域社会を目指した体系的な施策を提案する。これらを通じて、多角的観点から持続可能な復興地域の将来目標・ロードマップを定量的に提案し、またその社会実装を通じて科学面から復興に貢献する。

2 研究の成果

2.1 環境創生の地域情報システムの開発 (PJ1)

2.1.1 地域環境情報データベースの構築

(1) 目的と経緯

原子力災害の被災地及び福島県内の環境・経済・社会の現状を評価し、またプログラム内における様々な分析の基盤とするため、浜通り地域を中心とした地域の空間情報を収集・整備して地域環境情報データベースを構築する。同地域における空間情報データベースの構築は第3期に開始し、エネルギー需要量などを収集してきたが、第4期ではより新しい情報を継続して収集するとともに、復興の進展や SDGs (Sustainable Development Goals: 持続可能な開発目標)、気候変動適応などのより新しい課題に対応するための情報を追加した。

(2) 方法

公開されている各分野の情報として、地形(標高・河川・湖沼)、土地利用、植生、道路・線路、行政界、人口、世帯数、従業者数、事業所数、市町村内総生産、製造品出荷額、建物ストック、自動車登録台数、避難指示区域図、バイオマスストック、生物多様性指数、風力/太陽光発電ポテンシャル、部門別エネルギー消費量、再生可能エネルギー発電所などの収集を継続する。これに加え、避難指示解除区域の居住(帰還)人口、経済活動・施設等の再開状況、交通状況、気候変動影響予測の情報などを把握するための情報を収集・整備する。まず人口について、特に実際に避難指示の解除された地域での居住者数(多くは帰還)の回復が復興の進展において重要と考えられることから、公開されている一般的な統計調査(国勢調査、住民基本台帳)のほか、携帯電話位置情報に基づく統計(モバイル空間統計)や、域内に避難指示の解除された区域を有する市町村が公開している避難と居住の状況に関する情報を収集し分析した。公共施設、商業施設、工場等を含む、経済活動・施設等の再開状況については、経済センサス等の公開情報に加え WEB サイト、新聞記事などから各種の施設や事業の開始・再開に係る情報を収集した。分類や開始時期に加え、可能な限り住所を取得することで地図表示も可能とした。交通については対象地域での一般的な交通統計が限られていることから、モバイル空間統計から交通 OD (origin and destination: 出発地と到着地) を調査した。これにより、例えば国勢調査の就業地・通学地集計よりも細かい空間解像度(市町村内を避難地域とそれ以外で区別)、時間解像度(平日・休日)で対象地域における人の動きを把握した。気候変動影響予測については福島県による影響予測報告書(福島県 2016)に掲載されている予測結果のデータについて同県関係者から提供を受けた。また、収集した地域空間データや、他のプログラムやプロジェクトの成果も含む分析結果を可視化し、ステークホルダーとのコミュニケーションを促進するための装置として、福島県全域を含む立体白地図へ地理情報を投影するプロジェクションマッピングシステムを開発し、福島支部への見学者に対するアウトリーチ等に活用するとともに、2020年8月から福島県環境創造センター内の広報交流展示施設であるコミュタン福島で常設展示を開始した。

(3) 結果と考察

収集・整備した情報の例として事業拠点の再開状況を図 4-1 に示す。また情報を活用した分析の例として避難指示の解除された地域における居住率(地域内に実際に居住している人口の、同じ地域内に住民登録のある人口に対する割合)を市町村別・時系列に比較したものを図 4-2 に示す。避難指示の解除された地域(大熊町・双葉町を除く)の2021年4月時点での居住者は住民登録数の7%~84%であった。また、解除後の居住者割合の回復の早さの差異について地域間の簡単な比較により、避難指示の解除の遅さ、原子力発電所からの近さ、同一市町村内の帰還困難区域の面積の割合が居住者回復の遅さに繋がることが示唆された。

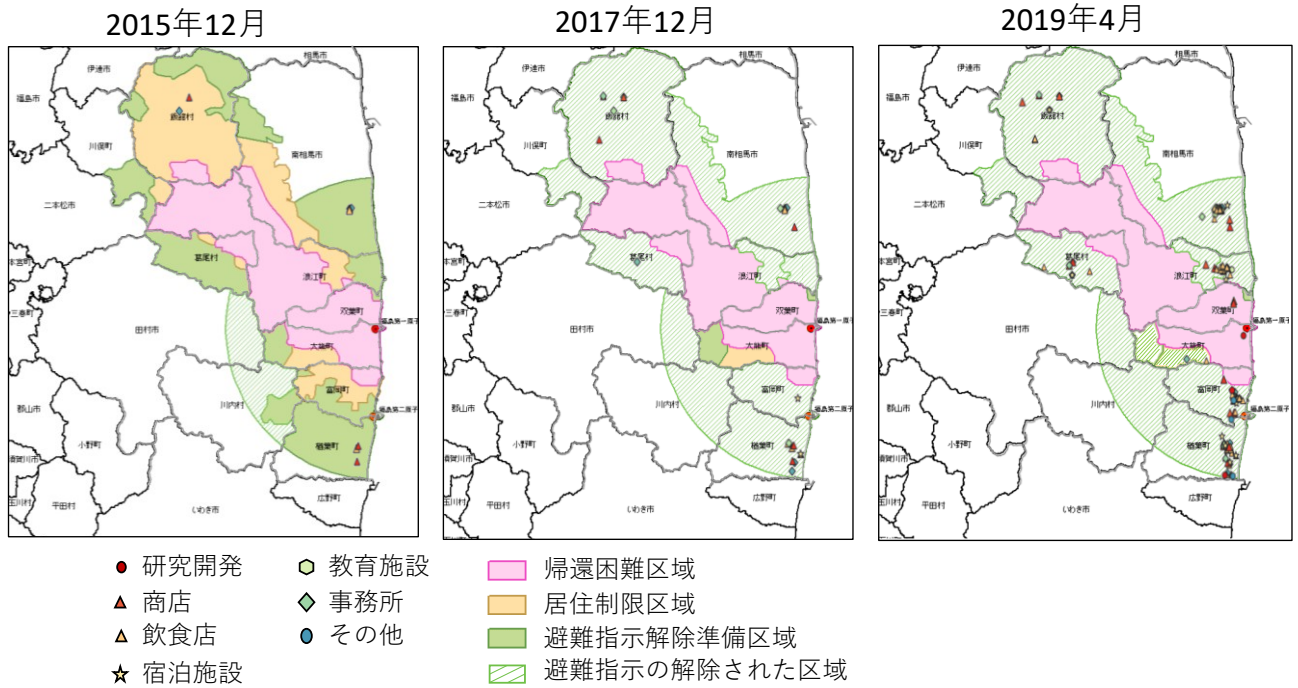


図 4-1 避難指示の出された区域での事業所再開状況

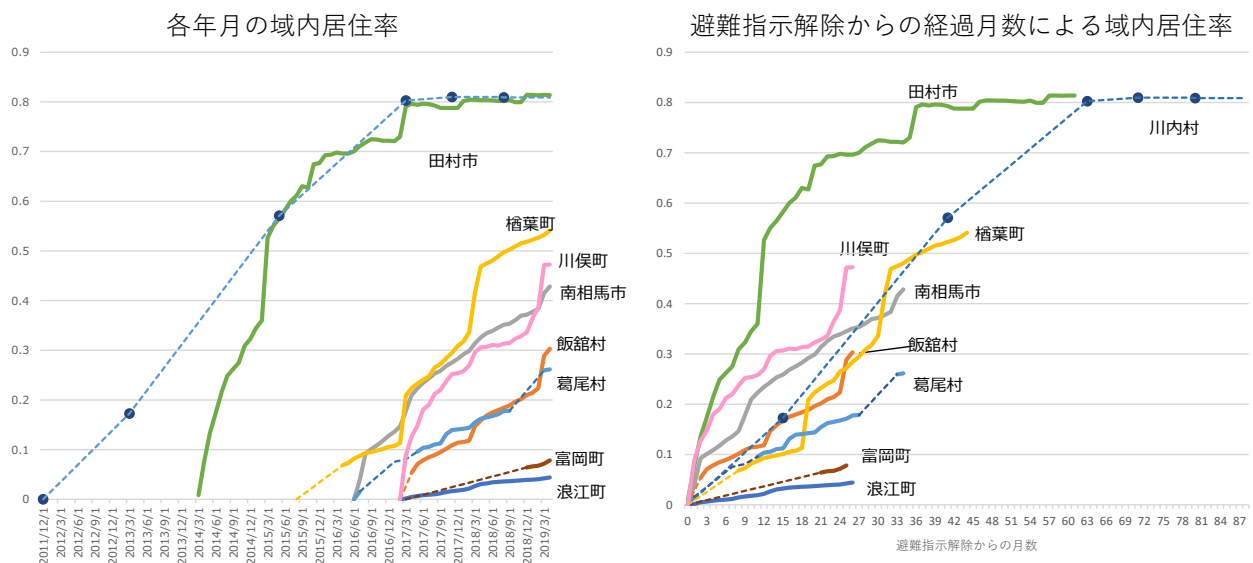


図 4-2 避難指示の解除された区域での域内居住率 (Gomi 2020) ^{1,2)}

2.1.2 地域統合評価モデルの開発

(1) 目的と経緯

福島県浜通り地域を中心とする地方自治体におけるマクロ（市町村）単位での人口・経済・産業構造・エネルギー需給等の長期的変化の推計と地域の将来の復興目標実現に必要な技術・施策の組み合わせを分析する「地域統合評価モデル」を開発し、福島県を対象としてモデルを実装する。加えて、地域空間データベースと地域統合評価モデルを活用して福島県内の地域・自治体において将来の復興目標や持続可能社会に向けた目標等の設計、目標へ到達するシナリオ、達成のための技術・施策のロードマップ構築手法の開発を行う。

(2) 方法

地域統合評価モデルのフレームワークとして、社会経済マクロモデル、空間・土地利用モデル、分野別要素モデル群の三段階の構造を開発した（図 4-3）。地域エネルギー、地域交通、資源循環と産業連携システムなどの分野のモデルを連携することで、人口・経済、社会基盤、交通、エネルギー等の課題を統合的に分析する手法を開発する。空間・土地利用モデルを中間に置くことで、脱炭素対策の中でも人口や土地利用の空間分布がその導入可能性や効果に影響するもの（熱電併給の地域エネルギー事業、公共交通機関やシェアリング交通など地域内交通構造に関する対策、森林等の吸収源対策など）をマクロ的な整合性を図りつつ評価することができる。一方、地方行政の政策策定において、こうした詳細な評価を行うことは、特に小規模な地方公共団体においては、資源の制約から困難が予想される。そこで特に詳細な空間情報が必要とされていた建物ストックや交通について、収集した詳細情報からパラメタリゼーションを行い、推計されたパラメーターをあてはめることで、国内の地方自治体であればいずれの地域でも入手可能な情報でモデルを構築できるようにした。さらに、地域統合評価モデルの分析対象を拡張するにあたり、SDGs や地域循環共生圏のように複数の地域課題を同時解決する観点で必要な技術・施策を分析する手法を開発する。そこで SDGs の指標群とモデルの入出力との対応を図り、モデルを活用した将来シナリオ構築において SDGs 指標と関連付けた。また地域循環共生圏構築については、係る様々な活動を統一的・包括的に捉えるため、地域資源、地域主体、取り組み、指標等の関連する要素を定義付け、構造化して図示する手法を開発した（図 4-4）。以上により、地域の復興と持続可能な開発に関する将来ビジョンを定量的に構築し、必要な施策・技術とその効果を評価する手法を開発した。また 2020 年 10 月の日本政府によるカーボン・ニュートラル宣言や多くの地方公共団体によるゼロカーボン宣言を受けて、これまでに開発した手法を地域の脱炭素社会ビジョン構築の観点から整理して脱炭素ビジョン策定のための基礎的な手順と定量化の方法論を開発した。

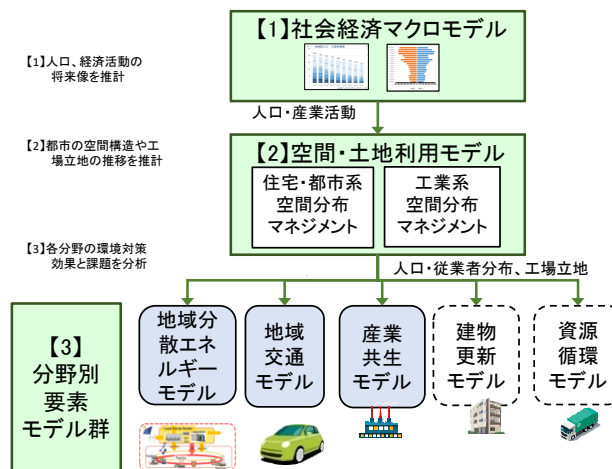


図 4-3 多分野のモデルを連携させて分析を行う地域統合評価モデルのフレームワーク（五味ら 2016）³⁾

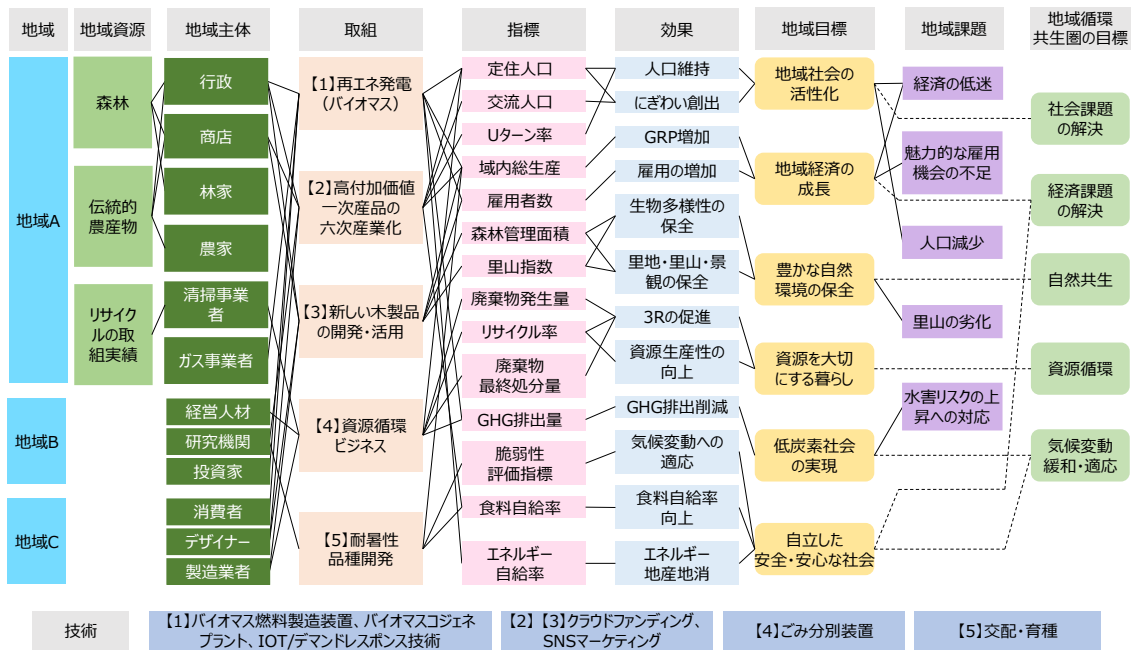


図 4-4 地域循環共生圏構築に係る活動の構造化 (五味ら 2020) 4

開発した手法の適用例として、空間分布を考慮した低炭素技術（熱電併給の地域エネルギー事業、地域交通事業としてのカーシェアリング）を導入する将来シナリオを、郡山市を対象として構築した。2050年を目標年として、現状と同じ人口分布が継続した場合（BAU）、建物の更新に際して人口が市街化区域全体に集約する場合（集約 α ）、同市の都市計画に示された拠点に集約する場合（集約 $\beta-1$ ）、さらに少数の拠点に強度に集約する場合（集約 $\beta-2$ ）の4つのシナリオを構築し、それぞれのシナリオで上記の低炭素技術が導入可能となる建物や人口を推計した。また、複数の地域課題を解決するシナリオの例として、福島県新地町において「新地町未来ビジョン検討会」を同町、東京大学、民間のエネルギー事業者等と開催し、同町の中長期的な課題を整理し、これに対する取り組み候補を挙げ、人口維持、経済生産、雇用確保、脱炭素の各観点から取り組みの貢献度を分析した。最後に脱炭素社会ビジョンの策定手法について、ゼロカーボンビジョンの作成に取り組んでいた福島県大熊町に協力して同手法を提供し、開発したモデルを用いて脱炭素将来像の定量化を行った。

(3) 結果と考察

図 4-5 に郡山市での将来シナリオの結果を示す。地域エネルギー事業、地域交通事業ともに集約度が高いほど対象の割合が増加する傾向がある。ただし地域交通事業においては $\beta-1$ のほうが $\beta-2$ よりもわずかだが割合が高い。これはより少数の拠点に集約した結果、集約対象とならなかった地区の居住者で対象外となる人口があることを示す。一般にコンパクトシティ化による集約強度の増大はこうした事業の導入可能性を高めるほか、社会基盤整備の効率化などメリットがあるものと考えられているが、この結果からは集約拠点以外の地域への配慮の必要性も示唆される。

新地町での検討会ではシミュレーションと参加者での議論を反復することにより7分野での取り組みが発案された。それぞれの取り組みの内容は以下の通りである。1) 「産業・商業」は町内商業の立地推進や魅力の向上により町民の町内での購買を増加させ、地域経済の好循環をつくり出す。2) 「観光」は観光周遊ネットワークの形成、観光案内等の担い手育成、組織強化、地域協働の促進、さらに新地駅前地域エネルギー施設を活用したエネルギー観光の強化により観光客数・宿泊数の増加と飲食・商業等の売上増加を目指す。3) 「健康・福祉」では ICT を活用した高齢者の見守り、健康づくりポイントの拡大・拡充などにより健康寿命を延ばし、また歩くライフスタイルへの転換も促す。4) 「子育て・教育」では学校内外での社会教育で地域人材育成により町内出身者の定住意向の向上を図りつつ、町民の（生涯）学習機会の拡大や ICT を活用した子どもの見守りも行う。5) 「まちづくり」では空き家など既存住宅ストック

クの住宅としての活用や新たな交流拠点としての整備により定住人口と交流人口の増加を図る。また防災・減災に配慮した地域拠点の形成も行う。6) 「地域交通」ではデマンド交通のサービス拡充（買い物、図書館利用代行等）、自動車・自転車シェアリングの導入により、高齢者のモビリティや社会サービスの供給を維持し、徒歩・自転車・公共交通の利用を拡大する。7) 「エネルギー」ではスマート化による情報共有、再生可能エネルギーの展開、電気自動車（EV）の導入などにより省エネルギーと再生可能エネルギーの地産地消を進める。各々の取り組みの内容を地域統合評価モデルのパラメーターに翻訳し、2050年時点での将来像を定量化し、なりゆきシナリオに対する改善を分析した。図4-6に新地町での将来シナリオによる各取組の4指標への貢献度を推計した結果を示す。

整備した脱炭素ビジョン策定のための基礎的な手順と定量化の方法論をマニュアルの形にまとめ、「地域における『脱炭素社会ビジョン』策定の手順」として国立環境研究所 WEB サイトにて公開した。同マニュアルより手順概要を図示したものを図4-7に示す。また大熊町でこれを実践し分析した結果のうち、同町のゼロカーボンビジョンに掲載されたエネルギー消費量、町内での再生可能エネルギーによる発電量、実質CO2排出量を図4-8に示す。2050年よりも早期に実質ゼロを達成するシナリオを含め4通りのシナリオが作成され、これを実現するために必要な事業が同定された。

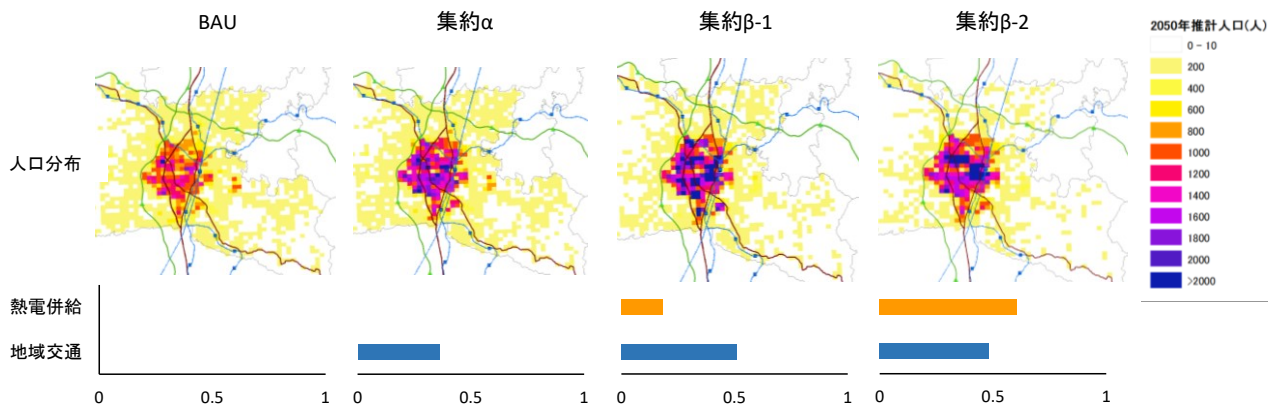


図4-5 2050年の郡山市における異なるシナリオにおける空間分布と熱電供給事業および地域交通事業の対象となる床面積および人口の割合(五味ら 2017)⁵⁾

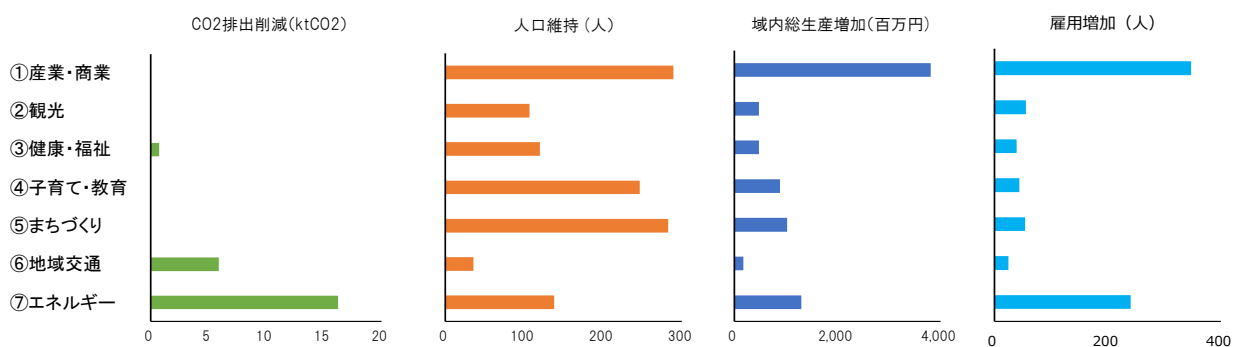


図4-6 2050年の新地町における7分野の取組の各々による4つの指標のなりゆきシナリオに対する改善量

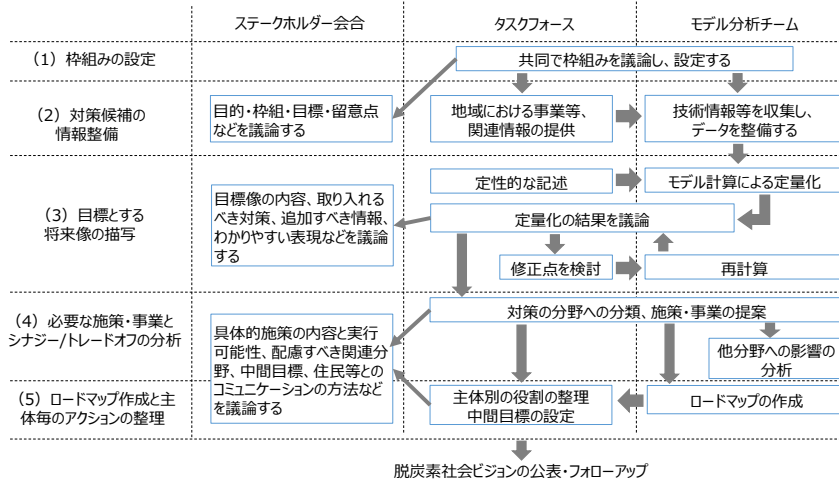


図 4-7 地域における脱炭素社会ビジョン構築の手順の概要（五味ら 2021）⁶⁾

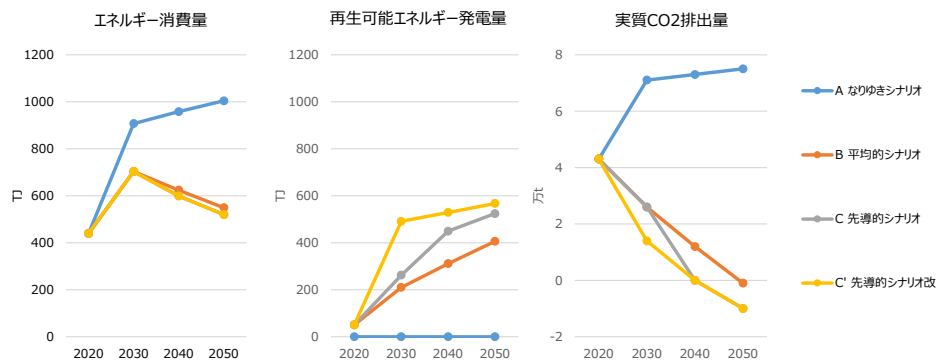


図 4-8 大熊町における 4 つのシナリオでのエネルギー消費量・町内での再生可能エネルギー供給量・実質 CO2 排出量 (大熊町 2021)⁷⁾

2.1.3 環境回復・創生におけるコミュニティ・ガバナンス

(1) 目的と経緯

2011 年 8 月 30 日に放射性物質汚染対処特措法が公布された。本法律に基づいて、放射線量が $0.23 \mu\text{Sv/h}$ 以上の地域を含む 8 県 104 市町村は汚染状況重点調査地域に指定された。この地域では、住民が居住を継続することが可能であるが、放射性物質による汚染の影響が及んだ。このため、政府は地域固有の事情や住民ニーズを把握している市町村が除染を行うことが効果的と判断し（原子力災害対策本部「市町村による除染実施ガイドライン」p.1）、市町村が除染の方針、実施区域、実施手法等を定めた除染実施計画を策定した上で、除染を実施することを義務付けた。とはいえ、市町村行政や住民にとって除染や除去土壌の保管は未経験の課題であった。そのため、市町村行政を含む地域の諸団体はこれらの課題に取り組むにあたって、相互に連携しながら合意形成が重ねられた。本研究では、汚染状況重点調査地域における行政と住民のコミュニケーションに焦点をあてて、各地域の除染や除去土壌の保管にかかる合意形成の成否を規定した要因を探索することを目的とした研究を実施した。

(2) 方法

汚染状況重点調査地域に指定され、市町村行政と住民が連携して除染を進めた福島県三春町と郡山市を対象として、事例研究を実施した。方法は定性的な社会調査を採用し、地域資料の収集と分析（具体的には、新聞記事、行政計画、議会議事録、自治体広報誌、地域住民組織が発行する広報誌など）と、除染や除去土壌の保管に関わった団体（市町村行政、地域住民組織など）へのインタビュー調査を実施した。郡山市では、市内の地区レベルの除染に係るステークホ

ルダによる連携の実態と課題を明らかにするため、市内の複数地区において連合町内会・自治会へのインタビュー調査を実施した。本稿では、郡山市の事例研究の結果を示す。

(3) 結果と考察

汚染状況重点調査地域の指定市町村が直面した課題として、除去土壌を保管する仮置場の確保が挙げられる。除去土壌を保管する方法として、公有地や民有地に設置した仮置場に除去土壌を集約して保管する方法と、除染を実施した場所の地上あるいは地下に除去土壌を現場保管する方法がある。福島県によると、福島県内の汚染状況重点調査地域 52 市町村では 1,016 箇所、仮置場が設置され、190,722 箇所、除去土壌の現場保管がなされた（福島県資料「市町村が設置する仮置場等の状況」令和元年 12 月 31 日時点）。なお、市町村における除去土壌の保管方法は、市町村行政と住民とのコミュニケーションを経て決定された。除染実施計画の策定段階で住民とコミュニケーションをとらなかった市町村において、仮置場設置の局面で住民の反対がみられ、仮置場の用地が確保できない事例もあった（磯野 2015: 233-234）⁸⁾。

図 4-9 は、郡山市の除染にかかる政策過程を示している。郡山市は人口 335,444 名（2010 年国勢調査）を有し、福島県における商工業の中心都市である。2011 年の事故発生直後の空間放射線量は 2.14 μ Sv/h であった（測定地点は郡山市役所、2011 年 4 月 1 日・福島県東北地方環境放射能測定結果）。郡山市が策定した除染実施計画では住宅 49,141 戸、農地 1,508ha 等が除染対象に設定された。

郡山市では、主に除去土壌を現場保管する方法が採用された。市が現場保管を採用した背景には以下の二点が挙げられる。第一に、土地（用地）不足である。市では市街化が進んでいたことから未利用地が少なく、市内の除染作業で発生する大量の除去土壌を保管できる規模の仮置場の用地を確保することが困難であった。第二に、原発事故発生直後の仮置場の設置をめぐる行政の住民説明会での経験である。郡山市行政は原発事故直後の 2011 年 4 月 27 日～5 月 2 日にかけて、他市町村にさきがけて市内の保育所・幼稚園・小中学校の校庭・園庭の表土除去を実施した（図 4-9 の赤枠で示した箇所）。市行政は当初、校庭・園庭の除去土壌を市内の一般廃棄物最終処分場に搬入する予定であった。しかし、4 月 27 日に開催した住民説明会にて、最終処分場の周辺住民から反対の意思を示され、除去土壌の最終処分場への搬入を凍結した（『福島民友』2011.4.26/2011.4.27）。

事例	施策	2011年度 上半期 (4月-9月)	2011年度 下半期 (10月-2012年3月)	2012年度	2013年度	2014年度 以降	
郡山市	除染実施計画策定	除染実施計画 (12.27)	除染実施計画2版 (2012.1.9)	除染実施計画3版 (2013.1.7)	除染実施計画4版 (2014.3.28)	除染実施計画5版 (2016.3.11) 除染実施計画6版 (2017.3.13)	
	除染実施(行政)	校庭・園庭の表土除去 (4月-5月)		面的モデル除染 (2020.2-8)	面的除染(生活圏) (2012.10-)		
	除染実施(地域)	各地区住民による自主的除染	各地区住民による自主的除染 (2011.10.21/線量低減化活動支援事業)				
	除染をめぐる行政-住民コミュニケーション	校庭・園庭の除去土壌の埋立・仮置場に関する住民説明会 (4.28)	除染マニュアル・線量低減化事業説明会 (10.20) 除染実施計画説明会 (12.21)	放射線・除染講習会 (2011.1.14-2012.10.16)	面的モデル除染説明会 (5.19)	面的除染に関する地区別説明会 (2012.10-) ※工区ごとに実施	

図 4-9 郡山市の除染に係る政策過程

出典：Fukushima Action Research on Effective Decontamination Operation (2013)⁹⁾p.20 図 2-1-3 を参照して筆者作成

リスク研究者の P. Slovic はリスク認知の心理的因子として、「未知であること」と「恐ろしさを感じる」との二つの因子があると指摘している（Slovic 1987）¹⁰⁾。市行政が住民説明会を開催した 2011 年 4 月末の時点では、放射性物質

を含む除去土壌がもたらす被ばくのリスクは住民にとって未知のものであり、恐ろしいものとして認識されていたと推察される。住民説明会を機に、市行政は仮置場の設置に向けた行政と住民の調整には困難が伴うことを認識した（2018年7月6日に実施した市原子力災害対策直轄室へのインタビュー調査より）。市行政は住民説明会が開催された2011年4月以降、除去土壌は主として現地保管する方針を定め、除染を進めた。

郡山市では市行政が除染のマニュアル（『郡山市放射性物質除染マニュアル（2011年10月1日策定）』）を整備する前から、町内会・自治会などの地域住民組織が自主的に除染を実施した。福島県は2011年8月2日に線量低減化活動支援事業実施要領を施行し、地域住民組織による自主的な除染活動に補助金を交付した。郡山市では2011～2013年度にかけて、同事業に延べ919団体が申請した。そして、市行政は2012年10月より高線量地区から面的除染（住宅・道路などの生活圏の一定範囲内をくまなく除染すること）を実施していった。自主的除染と面的除染に伴う除去土壌の発生を受けて、郡山市行政は現場保管の方針を維持しつつ、地域住民組織と連携しながら、仮置場の設置を進めた。本研究では、郡山市の各地区における仮置場の設置に地域住民組織が果たした役割に焦点をあてて、仮置場を設置した地区と設置できなかった地区の差異を分析した。

表4-1は郡山市内3地区における仮置場設置の結果と、仮置場設置への地域住民組織の関わりを示している。3地区の空間放射線量は同程度であった。A地区とC地区には農地が多く、住民に占める農業従事者の割合が高くなっていた。他方でB地区は住宅地開発が進んでおり住民に占める農業従事者の割合は低くなっていた。A地区とB地区では仮置場が設置された。他方でC地区では、仮置場候補地周辺の住民から反対があがり、設置されなかった。

本研究では、地域住民組織の構成と仮置場候補地の土地所有状況に着目した。郡山市の各地区には、複数の隣組等から構成される町内会・自治会・行政区などの地域住民組織（以下「単位組織」という。）、単位組織の連合体である連合町内会などの地域住民組織（以下「連合組織」という。）がみられ、地域住民組織は多層的に構成されている。線量低減化活動支援事業の実施にあたって、各地区では事業を申請するか否かを検討し、事業を実施する場合には時期・範囲などを調整する必要が生じた。しかし、その調整主体はA地区とB地区では連合組織、C地区では単位組織と異なった。仮置場候補地の地権者は、A地区とB地区が集落組織（集落の共有地を管理する組織）、C地区が市であった。

以上が、仮置場設置における候補地の地権者や周辺住民との交渉主体の各地区の差異に反映された。A地区とB地区では、連合組織のリーダーを介して交渉が行われた一方で、C地区では、市担当課が交渉を行った。C地区では、仮置場の設置に関して住民間で賛否が分かれた際に、意見を調整する主体がおらず、設置には至らなかった。

表4-1 郡山市内各地区の仮置場設置に対する地域住民組織の関わり

観察項目	A地区	B地区	C地区
調査対象者	区長会	町会連合会	区長等連絡協議会
地区の空間放射線量	0.65～1.06 μ Sv/h	0.83 μ Sv/h	0.65 μ Sv/h
地区類型（農業地域類型）	平地農業地域 中間農業地域	都市的地域 ※旧住宅地	平地農業地域
線量低減化活動支援事業の調整主体	連合組織	連合組織	単位組織
仮置場候補地の地権者	集落組織	集落組織＋地域住民	市（元財産区有地）
仮置場候補地の地権者との交渉	連合組織のリーダーが交渉	連合組織のリーダーが交渉	市担当課が交渉
仮置場の設置	設置	設置	設置できず

出典：各地区の連合組織へのインタビュー調査の結果をもとに筆者作成

注：地区の空間線量は2011年8月の自動車走行サーベイモニタリング調査結果に基づく

分析結果は、仮置場の設置に関する合意形成に向けて、地権者や周辺住民との交渉を誰が担うのかという点が重要になることを示唆している。本稿で紹介した郡山市の事例分析の結果は、地域の土地所有状況や地権者の顔を熟知する地

域住民組織のリーダーによる交渉が機能したことを示している。特に単位組織の除染実施や仮置場設置に係る意向をまとめ、地権者との利害調整を担う連合組織の役割が重要であったことが示唆された。先述のとおり、政府は地域固有の事情や住民ニーズを把握している市町村が除染を行うことが効果的と判断したが、除染や除去土壌の保管に係る合意形成をまとめるには市町村行政職員の力だけではなく、地域住民組織を担うリーダーの力が求められることが示唆された。

本稿のまとめにかえて、環境回復・創生におけるコミュニティ・ガバナンスにかかる今後の研究課題を以下に示す。政府は 2021 年度までに仮置場に保管された除去土壌の搬出を完了する方針である。仮置場は市町村有地や民有地に設置されているため、原状復帰後、地域社会においていかに仮置場のあった土地を利活用するかという課題が残されている。さらに、中間貯蔵施設で保管される除去土壌は、2045 年 3 月までに福島県外で最終処分を行うことになっているが、県外最終処分の候補地は未定である。以上を踏まえると、今後も地域社会の除染や除去土壌の保管にかかる行政と住民のコミュニケーションに関する研究、除去土壌の保管に係る地域社会内外のステークホルダーの利害調整に焦点をあてたコミュニティ・ガバナンスの形成に関する研究を積み重ねる必要がある。なお、本稿の詳細については、Tsuji et al. (2021)¹¹⁾、もしくは辻 (近刊)¹²⁾を参照されたい。

2.1.4 福島原発事故発生後の森林資源をめぐるコミュニティ・ガバナンスに関する実証的研究

(1) 目的と経緯

福島原発事故に伴う放射能汚染の被害を受け、避難指示区域の指定を受けた福島県内 12 市町村（以下「旧避難指示区域」という。）では、事故発生後、森林資源の管理と利活用に係る困難な状況に直面している。その反面、事故発生後の森林資源の管理と利活用にかかる期待は大きい。福島県は事故後に木質バイオマス安定供給指針を示すとともに、間伐等の森林整備と放射性物質対策を一体的に行うふくしま森林再生事業を展開し、同事業で産出される木材の利活用先として木質バイオマス発電施設を位置付けた。さらに、政府が固定価格買取制度の対象を拡大したことに伴い、間伐材を活用したバイオマス発電事業を計画する事業者が県内に台頭している。森林資源の管理と利活用に関する制度の変化、新たなステークホルダーの台頭により、従来の森林資源にかかるコミュニティ・ガバナンスは再構築を迫られている。本研究の目的は、旧避難指示区域における原発事故前後の森林資源の管理と利活用にかかるコミュニティ・ガバナンスの実態と、森林資源の管理と利活用にかかるステークホルダーの課題認識・ニーズを明らかにすることである。

(2) 方法

2020 年 6 月 16 日に「蕨平地区木質バイオマス発電所整備計画」が公表され、村内・村外の間伐材・未利用材・木質チップを燃料とする木質バイオマス発電所の整備を進めている福島県飯舘村を対象として、木質バイオマスのエネルギー利用に関する地域資料の分析（同村において 2011 年 3 月 11 日～2019 年 3 月 31 日に発行された地域資料（新聞記事、村広報、村議会広報、村議会議事録、村行政・村議会が省庁等に提出した要望書・提案書・協定書等））、村行政担当者へのインタビュー調査を実施し、木質バイオマス発電事業の実施にかかる村内の政策過程を分析した。

加えて、福島第一原発事故の発生後に木質バイオマス発電施設の整備計画を立案したものの、住民等による反対運動が発生し、計画を中止した福島県塙町と、計画中止を求める住民訴訟が発生した田村市を対象として、地域資料の分析及び政策担当者（市町村農林担当課）へのインタビュー調査を実施し、木質バイオマス発電事業にかかるコンフリクトの発生要因を探索した。本研究ではこれら定性的データを、キングダムの政策の窓モデルにおける政策形成過程における三つの流れ（1）問題を認識する流れ、2）政策をつくり磨き上げる流れ、3）政治の流れ）（Kingdon 1984=2017）¹³⁾の分析枠組みを援用して、事例対象地域における「木質バイオマス利用」にかかる政策形成過程を分析した。

(3) 結果と考察

飯舘村では、復興計画 [第 3 版]（平成 25 年 6 月改訂）に「木質バイオマス利用の考え方（案）」が明記された。しかし、復興計画 [第 5 版]（平成 27 年 6 月改訂）では、木質バイオマス利用に関する記述はほとんどみられなくなった。このトーンダウンの背景には、2012 年度～2013 年度に実施された「いいたて まていな森林再生整備調査」に

より、技術的要因（木材・チップの確保）による事業の実現可能性が見込めないことが明らかになり、問題を認識する流れが変化したことで、前項で示したうちの 2) 政策をつくり磨き上げる流れが途絶え、木質バイオマス事業の政策アジェンダ設定が見送られたことがあった。しかしながら、政策企業家（Policy Entrepreneurs）が地域住民と村行政、中央省庁等のステークホルダーを媒介する役割を果たした結果、1) ～3) の流れが結合し、木質バイオマス事業の政策アジェンダが設定された。

埴町・田村市では、行政庁内において水面下で検討されていた木質バイオマス事業計画が、地域住民に公表されるにあたって市町村行政による政策手続きの正当性が損なわれた結果、3) 政治の流れが活発化し、住民等による反対運動が活発化し、木質バイオマス発電事業にかかるコンフリクトが発生した。分析結果は、科学的不確実性を伴う政策決定におけるステークホルダー間の利害調整において、相互の信頼を醸成するために政策手続きの正当性が担保される必要があることが示唆された。またステークホルダー相互を媒介し、利害調整を支援する政策企業家（Policy Entrepreneurs）の役割の重要性が示唆された。なお、本稿の詳細については、Tsuji (2021)¹⁴⁾を参照されたい。

2.1.5 環境創生に向けた社会コミュニケーション手法に関する研究

(1) 目的と経緯

日本政府が 2016 年 12 月に発表した SDGs 実施指針では、地方自治体が SDGs 達成に中核的な役割を果たすことが期待されている。地方自治体は SDGs の推進に向けて、政策の受益者・参画者である住民の関心や課題認識を把握して政策立案する必要がある。その方法として、地域政策への住民の関心・課題認識に係る情報をボトムアップに収集する参加型ワークショップが提案されている（阿部 2017）¹⁵⁾。本研究は、郡山市で参加型ワークショップを企画・運営し、SDGs の推進に向けて市民が抱える地域課題を分析することを通じて、同市における SDGs にかかる同市の体制づくりとステークホルダー連携を研究的側面から支援・貢献することを目的として実施した。

(2) 方法

2018 年に郡山市政策開発課、特定非営利活動法人うつくしま NPO ネットワーク、国立環境研究所の三者共催により「SDGs から郡山の未来を考えるワークショップ（以下「WS」という。）」を計 3 回開催した。WS には郡山市各課から 8（市民生活、環境、農林、産業観光、建設交通、保健福祉、教育）、公益法人・独立行政法人から 2、県内・市内企業から 3、NPO から 1、公募から 1 の計 15 組織・13～21 名が参加し、官民の幅広いステークホルダーより参加者が構成された。参加者は毎回、3 つのグループに分かれワークを実施した。第 1 回（9 月 20 日）では参加者に郡山市の地域課題を挙げていただいた。第 2 回（10 月 19 日）では、SDGs の観点から参加者自身（家族・勤務先・地域を含む）が日常的にどのような活動をしているかを挙げていただいた。第 3 回（11 月 27 日）では、SDGs の観点から、郡山市の地域課題を解決するための活動のアイデアを挙げていただいた。以上計 3 回の WS におけるグループワークの発言記録、WS 実施後に参加者に依頼した事後レポート（N=11）を通じて、ステークホルダーの地域づくりに関する関心・課題認識に関する定性的なデータを収集・分析した。

(3) 結果と考察

第 3 回 WS における各グループの発言記録から、90 の地域課題解決のアイデアを抽出した。SDGs の 169 ターゲットを参照して、90 のアイデアに関連する SDGs の目標を 17 目標ごとに特定し、関連する SDGs の目標が類似するアイデアを集約した。結果、参加者から提案されたアイデアから、8 分野（「1.健康・福祉」「2.労働環境」「3.環境教育」「4.身近な環境」「5.気候・エネルギー」「6.交通整備」「7.圏域の活性化」「8.連携」）を抽出した。

さらに提案されたアイデアの数を、ロゴ・文字・線のサイズで図示した（図 4-10）。参加者が挙げた郡山市の地域課題解決にむけたアイデアの総数の上位 3 分野は「1.健康・福祉」「5.気候・エネルギー」「7.圏域の活性化」であった。8 分野と SDGs の 17 目標の関連については、複数分野と関連する目標（8.経済成長と雇用・11.持続可能な都市づくり）がある一方、関連が特定分野に限定される目標（5.ジェンダー・14.海洋資源）も確認された。



図 4-10 第 3 回 WS (2019/11/7) で参加者から提案された郡山市の地域課題解決に向けたアイデアの分析結果

事後レポートでは、第 3 回 WS の分析から抽出された 8 分野のうち参加者が最も重視する分野を質問するとともに、今後の郡山市における SDGs にかかる政策・活動に対する意見を自由記述で尋ねた。結果、最も多くの参加者が重視していたのは「8. 連携」であった（11 名中 5 名）。自由記述では、SDGs が郡山市の様々なステークホルダーを繋ぐツールとなることへの期待、SDGs の達成に向けて様々なステークホルダーが協力して、各々の専門知識や資源を活用する必要性等が指摘された。本研究では、環境に配慮した持続可能な地域づくりに対する諸主体のニーズを収集・分析するツールとしての、住民参加型ワークショップの意義が示唆された。また、住民参加型ワークショップが、ステークホルダーが環境に配慮した持続可能な地域づくりを学習する契機となりうることも示唆された。なお、本稿の詳細については、Tusji et al. (2019)¹⁰を参照されたい。

引用文献

- 1) 福島県 (2016) 福島県の気候変動と影響の予測。
- 2) Kei Gomi (2020) Impact of TEPCO Nuclear Accident and Associated Evacuation to the Demography in Fukushima, *Global Environmental Research*, 24(2), 217-226.
- 3) 五味馨, 藤田壮, 増井利彦, 藤井実, 芦名秀一, 大場真, 戸川卓哉 (2016) モデル連携による総合的な環境対策分析フレームワークの開発. 第 44 回環境システム研究論文発表会講演集, 315-320.
- 4) 五味馨, 藤田壮, 越智雄輝, 小川祐貴, 大場真, 戸川卓哉 (2020) 地域循環共生圏による持続可能な発展の研究と基礎的な分析枠組みの提案. 土木学会論文集 G(環境), 76 (6), II_249-II_260.
- 5) 五味馨, 藤田壮, 岡島優人, 越智雄輝, 文屋信太郎, 牧誠也, DOU YI, 井上剛, 古明地哲夫, 大島英幹 (2017) 将来空間分布の影響を考慮した低炭素対策の導入可能性評価手法の開発. 土木学会論文集 G (環境), 73 (6), II_343-II_352
- 6) 五味馨, 大場真 (2021) 地域における「脱炭素社会ビジョン」策定の手順[Ver.1.0]、国立環境研究所福島支部。
- 7) 大熊町 (2021) 大熊町ゼロカーボンビジョン。
- 8) 磯野弥生 (2015) 除染と「健康に生きる権利」、除本理史・渡辺淑彦編『原発災害はなぜ不均等な復興をもたらすのか——福島事故から「人間の復興」、地域再生へ』ミネルヴァ書房, pp.227-247.
- 9) Fukushima Action Research on Effective Decontamination Operation [FAIRDO] (2013) 「除染」の取り組みから見えてきた課題——安全・安心、暮らしとコミュニティの再生をめざして (第二次報告), 公益財団法人地球環境戦略研究機関 (IGES) .

- 10) Slovic, P. (1987) Perception of risk. *Science*, 236, pp.280-285.
- 11) Takashi Tsuji., Shogo Nakamura., Makoto Ooba. (2021) Community Governance in Decontamination Policy after the Fukushima Nuclear Accident: Two Case Studies from the Naka-dori Region, Fukushima, Japan. *Global Environmental Research*, 24(2), 243-251.
- 12) 辻岳史 (近刊) 除染事業および除去土壌の保管に係る地域社会の対応——福島県郡山市を事例として, 国立研究開発法人国立環境研究所福島地域協働研究拠点発行『災害環境研究の今』3.
- 13) Kingdon, John W., 1984, *Agendas, Alternatives and Public Policies*, London: Pearson Education Inc. (=2017, 笠京子訳『アジェンダ・選択肢・公共政策——政策はどのように決まるのか』勁草書房.)
- 14) Takashi Tsuji. (2021) Policy Process for Municipal Woody Biomass Power Generation Projects after the Fukushima Nuclear Accident, 5th International Conference on Public Policy (virtual participation) , Abstracts.
- 15) 阿部直也(2017)ボトムアップ・アプローチによる SDGs への挑戦——人々を中心に据えた SDGs 達成へ向けた課題, 蟹江憲史編著, 持続可能な開発目標とは何か——2030年へ向けた変革のアジェンダ, ミネルヴァ書房, pp.230-266.
- 16) Takashi Tsuji., Kei Gomi, Yujiro Hirano and Makoto Ooba. (2019): Designing a Participatory Workshop to Implement the Sustainable Development Goals (SDGs) in Local Communities: A Case Study of Koriyama City, Fukushima, Japan, 19th European Roundtable for Sustainable Consumption and Production, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.

2.2 環境創生の地域シナリオ解析モデルの開発 (PJ2)

2.2.1 地域特性に応じたエネルギーシステムの計画プロセス

(1) 目的と経緯

地球環境問題を背景として再生可能エネルギーへの注目が高まり、さらに東日本大震災によって大規模集中型の電源システムの脆弱性が明らかになったことで、全国各地で再生可能エネルギーを活用した自立分散型のエネルギーシステムの導入を促進する気運が高まっている¹⁷⁾。また、近年多発する豪雨・豪雪などの異常気象はその傾向に拍車をかけている。これは、本格的な復興期を迎えつつある福島県浜通り地域においても大きな関心事となっている。

しかしながら、資源やエネルギーに関する技術や政策はこれまで、国やグローバルスケールにおける課題とされ、地域における生活や生産の場においては変更することのできない所与の条件として認識されてきた。その結果、供給と需要との間に大きなスケールギャップが生じ、様々な弊害が引き起こされてきた。例えば、地方部では、ガス管等のエネルギー供給システムの整備が十分ではないため、都市部と比較して全般的にエネルギー価格が高く設定される傾向があるが、地域社会がそのような状況を打開するために有効な対策を実施することはできなかった。特に暖房・給湯需要の大きい寒冷地域では光熱費が家計の負担となるとともに、建物の空調・給湯設備や断熱性能の不備とも相まって住民の生活の質を低下させる原因の一つともなっている。

一方、第5次環境基本計画においては、地域資源を活用しながら自立・分散型の社会を形成しつつ、地域の特性に応じて資源を補完し支え合うことにより、地域の活力が最大限に発揮されることを目指す地域循環共生圏という考え方が提唱されており、再生可能エネルギーの導入は地域循環共生圏を実現するための具体的な取り組みの一つとされている。

そのような中、地方都市を対象とした持続可能な地域づくりに関連する既往研究は、集落スケールと単一から複数自治体程度を対象とした地域スケールにおいてそれぞれ展開されてきた。集落スケールにおいては、特定のエネルギー事業に着目し、その効果を検証する視点からの研究が進められている。一方、地域スケールにおいてはバイオマスなどの資源に着目した地域循環効果に関する研究がある。しかしながら、各スケールにおいて研究がバラレルに進められてきたため、集落スケールのエネルギーシステムの選択が地域スケールの資源循環に与える影響等、スケール間を横断する視点からの検討は十分に実施されていない。

本研究では、福島県内の自治体を対象とし、集落単位での、地域資源を活用した次世代のエネルギーシステムへの転換可能性を検討する。その上で、それらが導入された場合、地域の資源需給バランスや環境・経済・社会の各側面に与える影響について考察する。

(2) 方法

(1) 計画プロセスモデルの構築

代替的なエネルギーシステムの導入効果を検討するためには、大枠の方針ごとに具体的なシステム設計とその運用が最適化された状態で比較評価する必要がある。本研究では計画プロセスモデルを構築し、設計と運用に掛かるコストが最小化された状態を特定する。その基本構造を図4-11に示す。

エネルギーシステムは外部から供給される系統電力や燃料（ガス、灯油、バイオマス系資源等）を需要側で利用できる電力、冷暖房、給湯に変換するシステムである。まず、エネルギーシステムの検討フレームワークを設定する。これは候補となり得る全てのエネルギーシステムを含んだ一般構造を示すもので、ここでは既往研究¹⁸⁾に従い「スーパーストラクチャー」と呼ぶこととする。スーパーストラクチャーは、システムを構成する候補機器を表すサブシステムと、その間のエネルギーの潜在的な流れ（入出力関係）により表現する。

その上で、燃料消費量などフローの値と設備容量などのストックの値を組み合わせたコスト関数を最小化するシステム構成とその季節・時間別の運用計画を同時に特定する。なお、燃料消費量は、建物のエネルギー需要に機器のエネルギー転換効率を乗じることで算定する。目的に応じて、スーパーストラクチャーの中から、サブシステムを選択するとともに、選択された機器の中から季節・時間ごとに、運用する機器や運用する入出力レベルを決定する。このため、一度でも運用する必要のある機器は、設計段階で選択されている必要があり、機器の容量は年間最大出力値以上である必要がある。

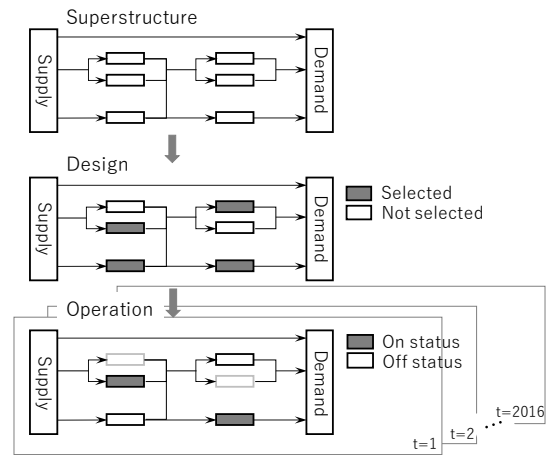


図 4-11 計画プロセスモデルの基本構造

ただし、本研究では、年間 8,760 時間を対象とした解析を実施すると、計算負荷が大きくなるため、各月より 1 週間分のデータを抜き出し 2,016 時間を対象とした計算を実施した。また、対象集落に属する建物に同じタイプのエネルギーシステムが導入されるものと仮定している。

(2) 対象地域と分析枠組みの設定

本研究では、ケーススタディエリアとして、福島県・新地町における駅周辺地区、及び奥会津地域の三島町の中心地区を対象とする。

a) 新地町

東日本大震災による津波被害を受けた福島県新地町の新地駅周辺地区の復興まちづくりを対象としてケーススタディを実施する。新地駅周辺地区は住宅地、商業用地、植物工場用地より構成されている。ここでは、新地駅周辺地区において復興計画に従ってまちづくりが実施された場合における、当該地区へのエネルギー供給システムを検討するとともに、エネルギー供給システムデザインの観点から望ましい空間利用計画を提言することを目的として検討を実施した。なお、新地町は同県の北部・宮城県との県境に位置する、人口約 8,000 人の自治体である。東日本大震災による被災地域であり、津波により全体の 24%の土地が浸水している。復興においては、津波被災地域である新地駅周辺の復興計画の具体化、及び町内に建設された LNG 基地より得られる天然ガスを地域で利用する計画の立案は課題の一つとなっていた。新地駅周辺地区は、LNG 基地が立地する相馬中核工業団地に対して、約 4km 北側に位置している。本研究では天然ガスを活用したコージェネレーションシステムにより新地駅周辺地区へのエネルギー供給を実施するケース、及びその比較対象としてヒートポンプ、ガスボイラー等のケーススタディエリアにおける標準的なシステムによるエネルギー供給を実施するケースを検討した。

b) 三島町

2015 年の国勢調査によると三島町の人口は 1,792 人であり、高齢化率は既に 49%に達している（日本全国の平均は 26.6%）。主産業は建設業と町内にある東北電力の水力発電所（最大出力 94,000kW）に関連した電力関連産業であり、農林業、観光業がそれに続いている。面積は 1,518 km²であり、その約 8 割が森林に覆われている。そのため、木質バイオマス資源をエネルギーとして有効活用することによる地域振興が政策課題となっているが、現状では、一部の公共施設・住宅等でのペレットストーブや薪ストーブなどの導入に限定されている。対象は町役場、県立病院、会津宮下駅、福祉施設等の施設が立地し、町の中心機能を担っている中心地区（宮下地区）とする。福祉施設には太陽光発電設備が導入されている。建物における住宅の比率は小さいが、町内で最大の人口規模である。定住促進を目的とした単身世帯向けの住宅が整備されている。

本研究では、中山間地域における資源の賦存状況及び技術進歩の状況を考慮して、現況で普及しているエネルギーシステムとバイオマス関連技術と太陽光発電システムを組み合わせた3ケースの代替的なエネルギーシステムの導入効果について評価する。以下にその概要を示す。

ケース1：従来型システム

冷房はルームエアコン、暖房は灯油ストーブ、給湯はガス給湯器により供給する。供給源は系統電力、灯油、LPG（液化プロパンガス）である。アンケート調査によると現状の対象地域で最も普及しているエネルギー機器に基づくシステム構成である。

ケース2：太陽光発電+全電化システム

系統電力と太陽電池からの電力により全てのエネルギーを供給する。冷暖房と給湯はルームエアコンとヒートポンプ給湯器を利用する。また、蓄電池と蓄熱槽の設置を可能とする。前述のように太陽光パネルの設置最大面積は建物屋根面積とする。近年、対象地域においても全電化住宅が建設されており、今後のエネルギーシステム転換の方向性の一つと考えられる。

ケース3：太陽光発電+バイオマス熱供給システム

ケース2と同様に系統電力と太陽電池を導入するものの、バイオマスペレットを燃料とするストーブとボイラーにより暖房と給湯をそれぞれ供給する。なお、ストーブとボイラーは各需要家が設置するものとし、熱導管の敷設は必要ないものと設定とする。既に対象地域において一部の建物に導入されている太陽光発電、バイオマス熱供給システムが集落全体に展開する想定である。

ケース4：バイオマスコージェネレーションシステム

BCHPにより必要な電力を発電するとともに、その排熱を冷暖房や給湯に活用する。そのため、地域熱導管が必要となる。BCHPは欧州を中心に開発が進められている10～数100kWクラスの機器を想定している。国内における導入事例が限定的であるBCHPが実装される先進的な想定である。

(3) 結果と考察

(1) 新地町における検討結果

エネルギー事業を実施するケースでは、設備投資コストが1.6億～3.8億円程度となっている。そのため、一般的なエネルギー価格の設定の下では、事業者の収支は赤字となる結果となった。しかしながら、環境的な観点からは便益が得られる点等を考慮すると、社会的なメリットが発生する可能性があるため、事業実施に向けて関連するオプションについて検討した。その結果、需要家の便益を損なわない範囲で販売価格等を調整し、さらに環境負荷の削減効果等を総合的に考慮することで、事業収支の改善可能性があることが分かった。また、エネルギー負荷密度を単純に高めるという方法では事業効率の改善に寄与しない可能性がある一方、電熱や季節別の需給バランスを考慮して、システムの適正な複合化により、事業収支が改善できる可能性があることが示された。

(2) 三島町における検討結果

a) システム設計と運用計画

各ケースにおけるシステム設計の結果は以下のようになっている。まず、ケース2と3における太陽電池の容量について確認する。ケース2では、設置可能面積（建物の屋根部分の面積）の60%程度に相当する容量の太陽電池が選定された。一方、ケース3では、暖房・給湯需要を電力ではなくペレットで賄うため、電力需要が縮小することから、太陽

電池の容量はケース 2 よりも若干小さくなって
いる。次に、ケース 3 におけるペレットストー
ブの設備容量は3,853kWであり、冬季（1月）の
暖房需要ピークに相当するため、それに基づい
た容量が選定されていることが示唆される。

次に、システムがどのように運用されている
かを確認するため、時間別と月別でのエネルギ
ー需給バランスを調べた。その結果、ケース 2
とケース 3 の電力需給からは、太陽光発電の季
節変動や日変動が大きく、特に冬季の発電量は
限定的であることが分かった。さらに、ケース 2
の給湯の時間別需給バランスからは、ヒートポ
ンプ給湯器は、料金の安い夜間電力を用いて運
転されていることが分かった。また、ケース 3
の給湯の時間別需給バランスからはピーク需要
よりも小さい 475kW のバイオマスボイラーによ
る定格運転が実施され需要の低下する時間帯は
貯湯槽で温水を蓄えておき、夕方のピーク時間
帯にそれが消費されていることが分かった。同
様に、ケース 4 の結果からは、BCHP は年間を通
じて 870kW で定常運転しつつ、需要が低下する
夜間の余剰電力の一部を蓄電池に蓄えて、電力
の不足する昼間の需要ピーク時に利用するシ
ステムとなっていることが分かった。このよう
に、いずれのケースにおいても合理的なシステ
ムデザインと運転計画が導出されていることが
確認できる。

b) システム導入効果

ケースごとの地区全体のエネルギーコストの
推計結果を図 4-12 に示す。ケース 1 では設備費
も含めて 3 億円程度のエネルギーコストがかか
る。ケース 2 と 3 ではそれに対して 2 割程度のエ
ネルギーコストの削減効果が得られる結果とな
った。一方、ケース 4 では 34%コストが増加す
る結果になった。

次に、経済循環効果について検討する。ケ
ース 1 と 2 では、大部分が地域外に流出して
いると考えられる。コストのうち地域内の
経済循環に寄与する可能性の高い費目（人
件費、メンテナンス費、ペレット料金、
チップ料金）はケース 3 では 52 百万円、
ケース 4 では 175 百万円となる。三島町
の総生産 6,100 百万円と比較して、ケ
ース 3 では 1%、ケース 4 では 3%程
度に留まっている。このことから、地域
経済の活性化にインパクトを与えるた
めには、中心地区の取り組みを周辺に
波及させていくことの重要性が示唆さ
れる。

また、CO₂排出量と削減結果をまとめた
結果を図 4-13 に示す。ケース 2 と 3
ではケース 1 に対して 28~43%の CO₂
排出量が削減される。ケース 4 では化石
燃料起源のエネルギーを使用しないため
CO₂排出量は 0 となる。世界銀行報告書
の CO₂ 取り引き価格である 4,355~8,710
円/ton-CO₂（40~80 ドル/ton-CO₂）
を用いて、CO₂削減効果を経済価値に
転換す

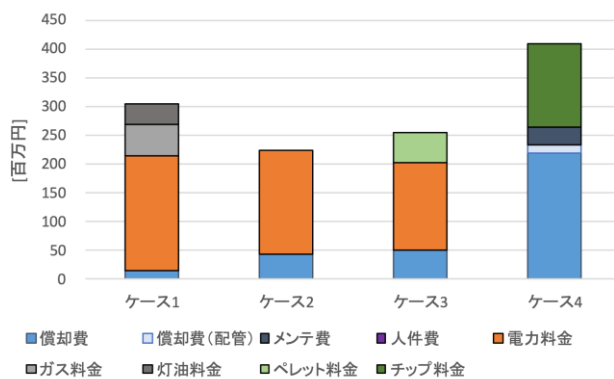


図4-12 コスト評価結果

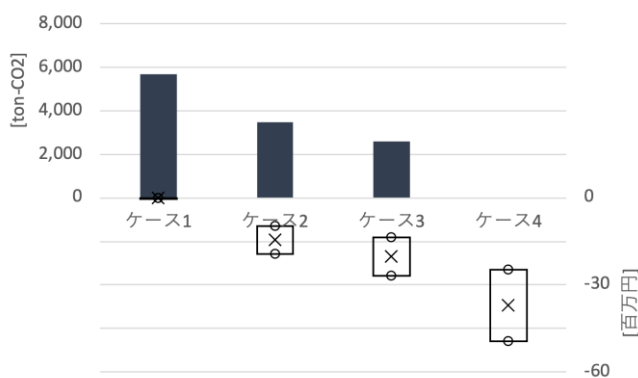


図4-13 CO₂排出量の評価結果

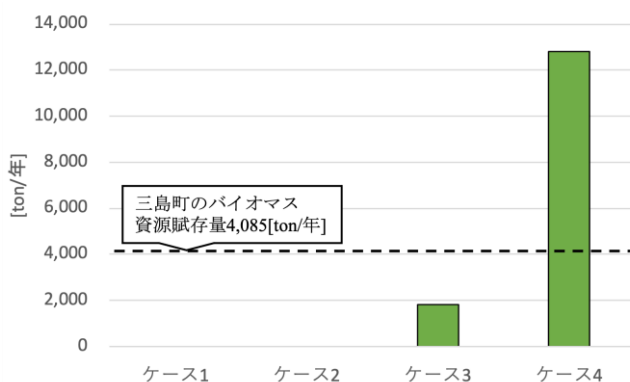


図4-14 バイオマス資源消費量の評価結果

ると6~47百万円となる。いずれのケースにおいても、直接的なエネルギーコスト増減効果と比較して10~40%程度の値となっており、エネルギーシステムの選定において環境的価値を考慮することの重要性が確認できる。

次に、バイオマス資源の消費量を検討する。ここでは、素材となる木質バイオマス資源量で統一的に評価する。ペレット、チップともに生材に相当する含水率50%の木質バイオマス資源から生産されるものと想定し、 $1\text{kg} = 2.33\text{kWh}$ として単位換算して評価した。結果を三島町のバイオマス資源の賦存量とともに図4-14に示す。バイオマス資源消費量はケース3では、三島町の賦存量と4割程度であり、ケース4ではそれを大きく超える結果となった。ただし、いずれのケースにおいても奥会津地域全体のバイオマス資源賦存量48,736 ton/年と比較すると小さな値となる。このことから、バイオマスのエネルギー利用により、三島町や奥会津地域の林業の活性化にも寄与しうるものと考えられる。

現状の社会経済状況下においては、コージェネレーションシステムによる地域エネルギーシステムの導入はコストが増加してしまうため導入が困難であることが分かった。これは、地域エネルギーシステムへの初期投資コストが大きいためである。ただし、地域エネルギーシステムに適した小規模のエネルギー供給に関連する技術開発も活発に進んでいる。特に、バイオマス・コージェネレーションシステムに関しては、10kWクラスの小型の機器が開発されており、既に欧州を中心に導入が進んでいる。また、日本国内においても、バイオマス発電に関する要素技術の観点からの検討が進められてきた。柳田他¹⁹⁾では、出力規模ごとにバイオマス発電事業において損益分岐点と原料調達価格との関係が分析されている。その結果、FITによる比較的高い買い取り価格を前提とした場合においても、発電単独の場合は、5MW以上でないと採算がとれないことが示されている。笹内²⁰⁾では、木質バイオマス発電における代表的な発電方式である蒸気タービン発電、ガス化発電、ORC (Organic Rankine Cycle) 発電についての技術的特徴を整理した上で、方式ごとの小規模事業における採算性を検討している。2MW程度の小規模発電事業においては、蒸気タービン方式ではコストが高く事業が成立しないことを示す一方、ガス化発電、ORC 発電において熱を併給することにより採算性が大幅に向上し、事業としても成立する可能性があることを指摘している。以上のように地域資源を活用し地域経済にも寄与しうる分散型エネルギーシステムを実現するための技術が整備されつつある。ただし、新地町では1100kWのCHP、三島町では870kWのBCHPが導入されており、上記の基準値2MWと比較して半分程度の規模となっている。また、熱の利用効率も必ずしも高いものとはなっていない。この点からも、需要規模の拡大と熱利用効率の向上が課題であることが分かる。

以上より、地域エネルギーの実装には、コージェネレーションによりエネルギーの利用効率を高めることがポイントとなるが、熱エネルギーは輸送に制約があるため、需要家を集約するなど地域づくりと一体となった取り組みが必要になる。こうしたエネルギー事業と地域づくりが一体となった取り組みの先進事例においては、その多くはトップダウン・プロセスではなく、地域社会の多様なステークホルダーによる共創的なプロセスに基づいていることが指摘されている。筆者らが調査を行った環境先進都市である岩手県紫波町の事例研究においても、2000年頃に始まった資源循環に関する萌芽的な取り組みが、多様なステークホルダーを巻き込んだ空間整備を含む様々な活動へと展開するなど、共創のプロセスの特徴が見られた。一方で、このような複雑な問題に対して一般的に適用可能な設計スキームは十分に整理されてこなかったため、各取り組みは局所的な経験に依存する傾向がある。本研究においても、トップダウンにより分散型エネルギーシステムをデザインする方法を検討してきた。これを補完する形で、持続可能な地域社会をボトムアップでデザインするための枠組みの構築が今後の課題である。

また、地域社会の中にエネルギー供給システムを構築することで雇用の安定化に寄与することや、災害時におけるエネルギー供給の継続可能性を高め地域の安心安全性を向上させることなど、分散型システムの導入に伴う様々な社会的影響も指摘されている¹⁷⁾。そのため、環境・経済・社会にわたる多面的観点から、地域固有の条件にマッチしたシステムを共創のプロセスにより構築することにより、大規模システムに対抗しうる機能を実現することが重要となる。

2.2.2 地域バイオマス資源を活用した森林復興シミュレーション

(1) 目的と経緯

日本における人工林の劣化が指摘されて久しいが、これは、中山間地域における深刻な人口減少と地域産業の衰退と相まって進展したことは明確である。一方で再生可能エネルギーの固定買い取り価格制度は、未利用材等の木質バイオマスによる発電事業への注目を集めた。需要と供給のニーズが一致し、森林問題を一举に解決する万能薬と捉えられ、さらに木質バイオマスの利用促進は、気候変動問題における森林吸収源対策や化石燃料代替への転換策を兼ねている。しかし、固定買い取り価格制度の利用を前提とした大型バイオマス発電所は、一基につき年間数万トンの木質バイオマスを必要とするため、地域資源でのみこれを賄うためには、計画的な森林伐採による持続可能な燃料供給なしでは成立しない。

本研究では日本全体における森林問題の解決に資するよう、森林資源量査定、バイオマス利活用効果の定量的評価と、課題の整理を行った。さらに、放射線災害を受けた森林の利活用についても、方法論の整備にあたった。本研究プロジェクトの対象地域である福島県も豊かな森林資源を持つ地域であるが、一方、福島第一原子力発電所事故によって被害を受けた過去を持ち、一般的な課題に加え特殊な課題がそれに加わる。はじめに森林資源の把握について述べ、その後、森林生長量予測を含むバイオマス利活用統合モデル(Biomass Integrated Model: BaIM)について述べる。このモデルは実効炭素蓄積速度評価を行うことができる。このモデルを利用して、福島県奥会津地域にて、バイオマス事業の可能性を検討した。

(2) 方法

(1) 木質バイオマスのポテンシャル評価

いわゆる民有林は、都道府県により森林に関する台帳（森林簿）と、森林計画図を GIS 化した地理情報と紐付けがされ、木質バイオマスにかかる情報が整備されている。林種、樹種、林齢などの広域の森林の情報収集には、まずこれが基本的な情報となる。しかし、現地調査により、必ずしもこれらの情報源が正確な森林構成、地理情報を保持しているわけではなく、また前述した間伐など森林施業の履歴も必ずしも紐付けされている状況ではないことが分かった（著者ら現地調査より）。

衛星あるいは航空機からリモートセンシングにより、森林の画像判別などを行って林相、樹種などの情報を取得する技術開発が進んでいる。本プロジェクトでも研究対象地域（奥会津地域）で実施をしており、一定の成果を上げた。しかし、画像分類が抱える判定誤差が避けられないという問題だけでなく、林齢等の情報を画像のみから解析することが難しく、林分材積(蓄積量)を直接推定することができないという欠点がある。

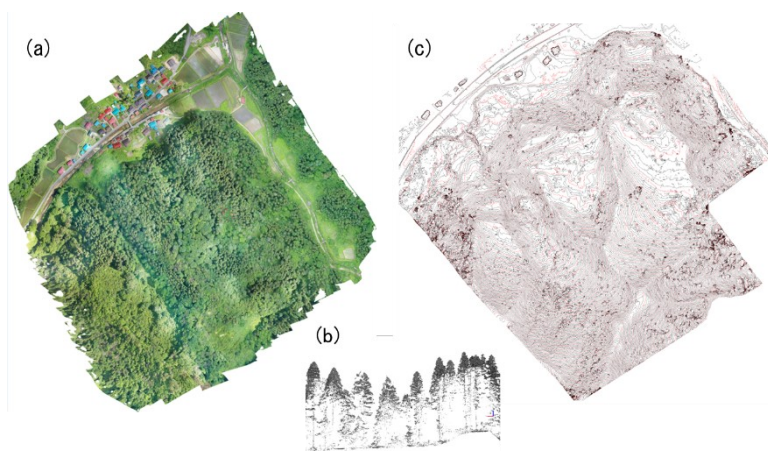


図 4-15 福島県大沼郡三島町浅岐地区の計測例（2019 年 7 月）(a) 空中写真からのオルソモザイク画像 (b) レーザー計測点群例(横断面) (c) レーザー計測データからの標高データの推定

本プロジェクトと並行して福島県補助を受け（令和2年度地域復興実用化開発等促進事業）、広域での計測が可能なドローンによる森林レーザー計測技術と、収集したクラウドデータを機械学習によって樹木個体レベルのデータに変換する技術を開発した。この技術は、未だ放射線量の高い被災森林において、リモートセンシングながら毎木調査に近いデータを一日に1ha程度取得可能である。本技術は未だ開発段階であるが、今後樹木個体ごとに蓄積、生長量をモニタリングし、森林管理収穫計画に役立てるシステムが普及することが見込まれた（図4-15）。

この調査方法は立ち入りが困難な地域、例えば原子力災害被害を受けた森林でも実施が可能であり、今後期待されている福島県浜通り地域における森林の環境再生や地域資源利用などに有効であると考えられた。

(2) バイオマス利用による地域炭素収支の推定

社会全体の脱炭素だけではなく、森林の適切な管理や地域における循環促進など、木質バイオマスのエネルギー利用は波及効果が高いとされている。年度ごとに公表される『日本国温室効果ガスインベントリ報告書』は、森林の吸収やHWP (Harvested Woody Products)による炭素貯留を含み、自然生態系の社会的利用を考慮する仕組みとなっている。またカーボンフットプリントは、木材製品を利用する際の製造工程や輸送などの炭素放出をライフサイクルアセスメントの観点から評価され、製品の全寿命における炭素収支を明らかにしている。

本研究では、中山間地域にバイオマスエネルギーシステムを設置した際の脱炭素推進という観点から、エネルギー利用や輸送・製造工程も含めたカーボンフットプリントに近い手法を用いて、生態系と社会との全体における炭素収支を評価した。社会-生態システムにおける炭素収支は、生態系だけでなく、森林資源を社会でどのように利用するかにより決まる。そして社会活動は炭素収支というよりはむしろ、別の尺度である経済収支によっても決まる。そして、その結果は社会経済へと遡って間接的に影響する。この目的のために、生態系、林業、バイオマス利用過程それぞれのモデルを統合したバイオマス利活用統合モデル (Biomass Integrated Model: BaIM) を開発し、定量的炭素収支のための指標ESR (Effective Sequestration Rate) を提案した。

a) 炭素収支におけるシステム境界と考慮する要素

生態-社会システムの炭素収支の計算は広範囲にかつ多岐にわたる要素が含まれることになる。本研究では、森林資源利用促進による化石燃料由来炭素排出抑制効果を、次の4要素に限定して推定することとした。

- 1: 木材をチップ化などして焼却しエネルギー化することで化石燃料消費時の炭素排出を抑制する効果
- 2: 建築材で利用することにより炭素が長期にわたって貯留する効果
- 3: 建築材で利用することによりコンクリート利用を代替でき、コンクリート生産時の炭素排出を抑制する効果
- 4: 建築で利用された廃材をエネルギーとして利用することで、化石燃料消費時の炭素排出を抑制する効果

この算定には、システム境界で吸収された炭素だけでなく(2)、バイオマスが代替利用されることで排出が妨げられた炭素も入る(1、3、4)。この算定では吸収された炭素を蓄積(2)とカウントした上で、さらに代替利用による炭素排出抑制(3)もカウントされる。1~4の製品化や輸送に必要な化石燃料消費はシステム境界から排出されるものとする。この炭素収支計算の全体イメージとしては、システム境界における森林・木材が関係した炭素の収支に、化石燃料の代替による正の効果と化石燃料消費による排出で調整したものとなる。

この仮想的なシステムの境界は社会まで拡大されるが、地理的なバウンダリーというより、社会活動が及ぶ範囲となる(図4-16)。つまり、ある地域のバイオマスが別の地域で消費される場合は、バイオマスが消費される場面にまでバウンダリーを拡大する。仮想システムにおける炭素収支は、ある年 t における、森林における吸収源 F_t 、森林施業による放出 E_{W_t} 、エネルギー利用 $S_{offset,t}$ 、建築貯留 $S_{stock,t}$ により

$$ESR = F_t - E_{W_t} + S_{offset,t} + S_{stock,t}$$

と定義し、Effective Sequestration Rate (ES)とした。各項は以下で説明するモデルを使用する。

b) 森林生態系モデル BGC-ES

日本国内における林業施業の影響評価を主な目的として、森林物質循環モデル BGC-ES (Bio-GeoChemical model for evaluation of Ecosystem Services; Ooba et al., 2010)²⁴⁾が開発されている。国内の主要樹種をサポートし（スギ、ヒノキ他）、林業施業が行われた場合の物質循環に与える影響を評価できる。前述の森林資源ポテンシャル調査の林種や樹種、林齢の情報を活用し、森林動態をより詳細にシミュレーションすることができる。BGC-ES は日ベースで水循環、年ベースで炭素 (C) と窒素 (N) の循環を推定した。

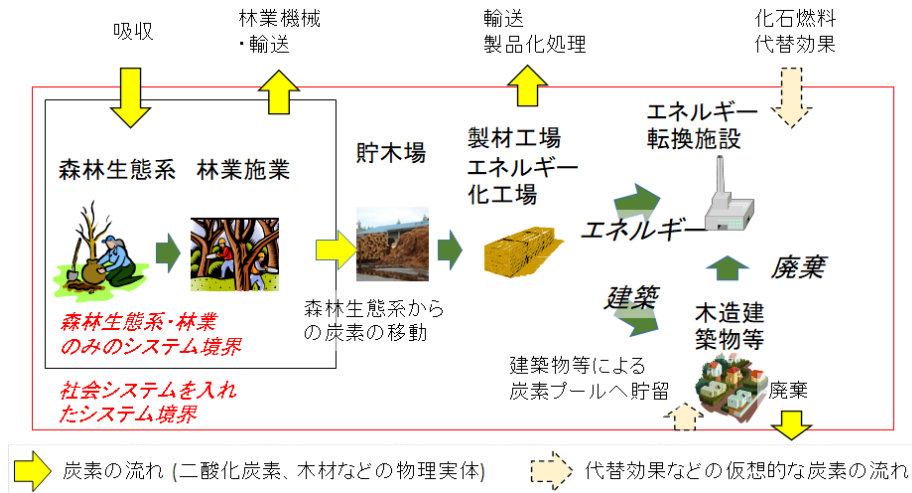


図 4-16 仮想-生態-社会システムにおける森林資源利用促進による化石燃料由来炭素排出抑制効果を含む炭素収支

c) バイオマス利活用コストモデル

木材の伐採から輸送までのプロセスごと（伐採、玉切り、土場搬出、製材所等までの輸送、製品化）の労働力、コスト、二酸化炭素排出量を推定するモデルである（Ooba et al., 2012）²³⁾。本研究では土場搬出までの二酸化炭素排出量 E_{Wt} を計算した。

d) 仮想システム炭素収支モデル

カーボンフットプリントと同様の考え方で、仮想システムにおける、森林資源利用促進による化石燃料由来炭素排出抑制効果を推定する方法を提案した（大場，2018）²²⁾。

伐出された一部の材がボイラーや発電所などでエネルギーとして利用されるとする。このシステムにおける炭素収支 S_{offset} は

$$S_{offset} = r_e (s_e - E_c) H_t$$

ここで H_t は年間の素材生産量 ($m^3 y^{-1}$, E_{Wt} と比例) である。エネルギー代替効果は以下のように考える。ある量の木材を消費すると、相当する発熱量を得るために必要な化石燃料の燃焼を代替したことになる ($s_e \text{ kg-C } m^3$)。 r_e はエネルギー向けに消費される木材の割合、 E_c はチップ化と消費地への輸送にかかる炭素放出（代表値として $16.36 \text{ kg-C } m^3$ と仮定）である。エネルギー転換は熱や電気となるが、この構成割合は本研究では考慮していない。

木材が建築物等によって炭素貯留プールを $P_{stock,t}$ (kg-C)、年間の製材生産量 L_t ($m^3 y^{-1}$) として

$$L_t = (1 - r_e) n H_t, I_{stock,t} = c_c \rho_{dw} L_t, O_{stock,t} = r_r P_{stock,t-1}$$

ここで n は収穫材から製材への歩留まり (0.6)、 c_c は木材の炭素含有量 (0.5) である。 r_r はプールでの回転率 (0.05)、プールされている炭素が年間どの割合で廃棄されるか表現するが、ここでは一律の方法を採用した。このプロセスで化石燃料使用量による炭素放出を E_b とした ($42.5 \text{ kg-C } m^3$)。木造建築のコンクリート代替として、床面積あたり節約したコンクリートの量 $308 \text{ kg } m^2$ と仮定して、木材 $1m^3$ あたり $s_c = 43.58 \text{ (kg-C}/m^3)$ とした。

炭素貯留プールの収支 (kg-C) は

$$P_{\text{stock } t} = P_{\text{stock } t-1} + I_{\text{stock } t} - O_{\text{stock } t}$$

さらに廃棄された建材の放出を考え、このシステムにおける炭素収支 $S_{\text{stock } t}$ は

$$S_{\text{stock } t} = I_{\text{stock } t} - O_{\text{stock } t} + (S_c - E_b) L_t + S_e r_e O_{\text{stock } t} / c_e \rho_{dw}$$

最後の項は廃棄が適正利用される割合 r_e として（シナリオにより変化）、これはエネルギー利用されたこととして、化石燃料代替効果を考慮している。なお、建築時にも燃料由来排出が発生するが建築構造によってかなり変化するため、補修や解体・廃棄時とあわせて ESR から除外した（木造か、コンクリート造かによらず同じとして、その代替効果はないと想定した）。

(3) シナリオ・研究対象地

研究対象地としては、国立環境研究所が連携協定を結んでいる福島県大沼郡三島町を含む奥会津五町村（柳津町、金山町、昭和村、只見町）を対象とした。地勢や研究経緯などの情報は大場（2019）²¹等で報告した。三島町では小型の熱電併給型の木質バイオマスエネルギーユニットの導入が官民連携で検討されている。本研究では、この構想を考慮して、五町村における民有林のスギ林（約 36,000 ha）を利用することを前提に評価を実施した。

モデルによる炭素収支の評価には、森林管理のシナリオと効果測定のための仮定が必要である。森林をどのように施業してゆくかという森林管理シナリオは、大きく分けて現状維持と間伐の増加、長伐期施業あるなしの組み合わせとした。間伐の割合は 4 段階に設定した（表 4-2）。材の利用方法は、伐採される場所や材の品質によって細かい設定が必要となるが、ここでは最大の効果を検討するため、全量をエネルギー、あるいは建築に振り分けた場合を計算した（表 4-3）。

表 4-2 森林管理シナリオ

シナリオ名	施業面積 (全森林-%/年)	伐期 (年)	間伐タイミング(齢)	
成り行き	BAU	0.36	40	15, 20, 25, 30
増産施業	PPa	1	40	同上
	PPb	1.5		
	PPc	2		
	PPd	2.5		
長伐期施業	PLa	1	80	15, 25, 35, 45, 55
	PLb	1.5		
	PLc	2		
	PLd	2.5		

表 4-3 木質バイオマス利活用方法と ESR の算定方法

利用方法	説明	ESR
森林管理	森林と森林施業のみの収支	$F_t - E_{W_t}$
オフセット	収穫材をエネルギーとしてのみ利用	$F_t - E_{W_t} + S_{\text{offset } t}$
ストック	収穫材を建築としてのみ利用	$F_t - E_{W_t} + S_{\text{stock } t} (r_e = 0)$
カスケード	上記に加え廃材をエネルギー利用する	$F_t - E_{W_t} + S_{\text{stock } t} (r_e = 0.01 \text{ 程度})$

(3) 結果と考察

(1) 森林吸収

森林生態系の炭素収支と森林管理シナリオによる作業の効果のみの ESR、表 4-3 の「森林管理」に相当する評価を最初に行った（結果は省略する。詳しくは大場, 2018）²²。森林生態系の炭素収支には植物の純総生産、リター分解、土

壤呼吸、人間活動による引き去り（収穫）があり、単位はkgC/hayとなる。森林管理の「成り行き」シナリオ（表4-2）以外は、継続的な森林管理により森林蓄積は減少するが、ESRは2050から60年までに回復する。PLcやPLdシナリオのような炭素収支から見た強度の生態系へのかく乱と抜き去り（収穫）があったとしても、適正に再造林すればESRは正のある値に回復することが示された。成り行きシナリオは森林施業をほとんどしないことと、林齢のゆがんだ構成のためESRは次第に減少してゆく。この結果は国内森林で共通であると考えられる。

森林施業を推進するシナリオ（増産、長伐期）において、収穫材積は2015～2035年に増加する。PPbとPLbシナリオでは54,000あるいは79,000m³/yであり、これは成り行きシナリオ（13,000m³/y）の4～6倍である。収穫する時間間隔（伐期）は各シナリオPLcとPLdで1/0.02=50年（2% case）と1/0.025=40年（2.5% case）となり、これは40年が標準的な伐期である施業体系の最大の収穫量と言える。また長伐期施業のPLbシナリオでは安定した収穫が見られた。これ以上の施業の強さでは持続的な収穫が困難であると考えられる。

(2) バイオマス生産可能量と価格

バイオマス利活用コストモデルにより計算されたバイオマス生産価格は6,000円/m³を超え、施業が進んでいないためシナリオごとの差はなかった（図4-17）。エネルギー向けバイオマスチップはトン12,000円が上限価格とされるが、丸太の重量密度を546.4kg/m³と仮定すると、6,600円/m³が上限となる。伐採や造林が進んだ2060年代には、6,600円/m³以下の材はPPbシナリオで15,000m³/y、PLbでは110,000m³/yが生産可能である。これは先ほどの密度を使うと年間約6万トンとなる。

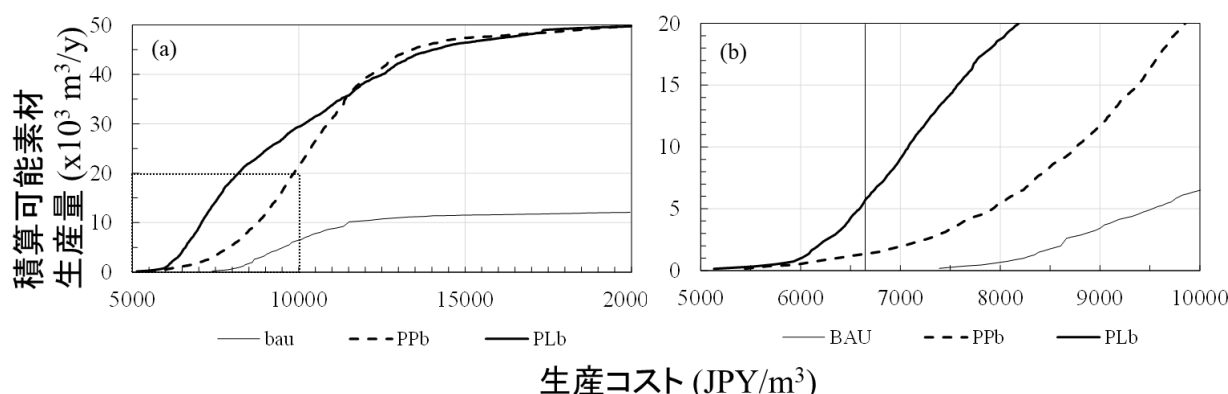


図4-17 1m³コスト別の生産可能な累積素材材積

(3) 地域仮想システムにおける炭素収支 ESR

収穫した木材を人間活動で使用した場合の脱炭素効果を推定するために、本研究で導入したESRを推定した（図4-18 (a)）。まず森林管理のみの効果では、森林管理の強度が高くなるほど、初期に森林へのかく乱が強くなるため、ESRはマイナスへ大きく振れるが、その後強度が高いほど、プラスへ大きく振れる。

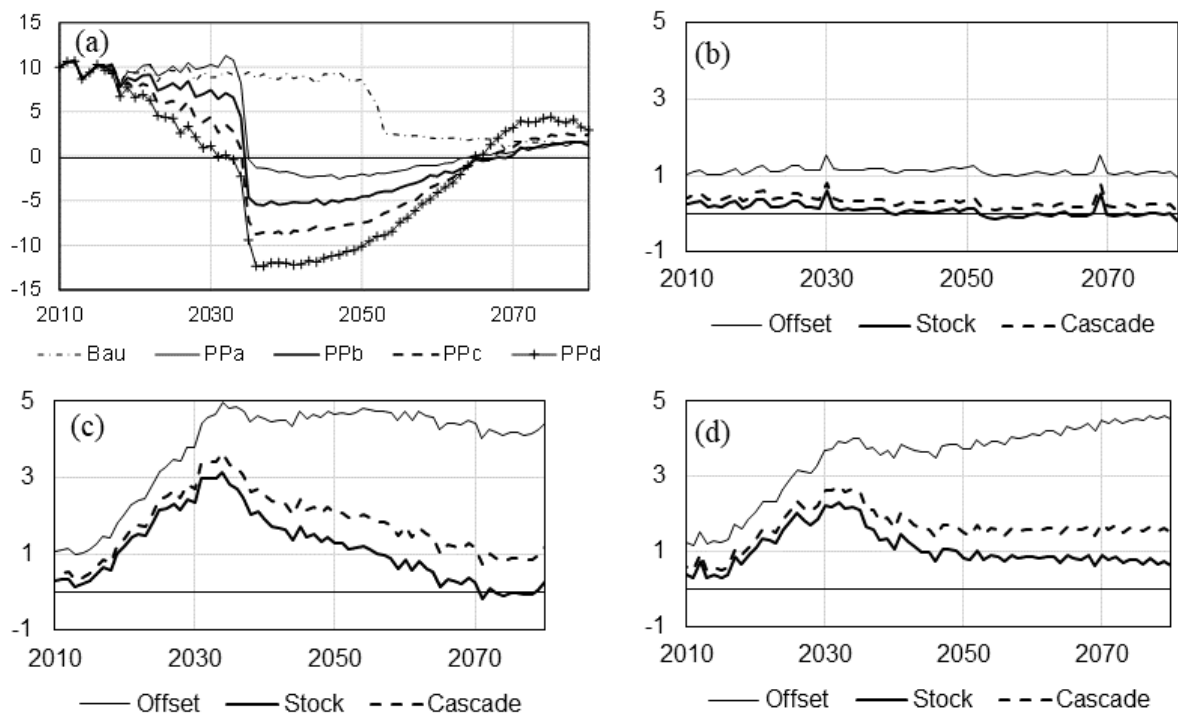


図 4-18 ESR(Gg-C/y)の推移森林管理のみの効果
各効果と(a)との差(b) BAU シナリオ(c) PPb(生産増産)シナリオ (d) PLb(長伐期施業)シナリオ

次に「成り行き」シナリオで、バイオマス利用による各効果を検証(図 4-18 (b))すると、エネルギー(オフセット効果)で利用すると ESR が最も高かった。建築利用(ストック)はほぼ ESR が 0 に近づいていき、建築による炭素プールが平衡となった。建築廃材を利用するカスケードではそれより ESR は若干高かった。図 4-18 は年代により森林管理による ESR が大きく異なるため(図 4-18 (a))、エネルギー利用などの効果を理解しやすくするために差を取っている。

森林管理を行った場合の持続可能な収穫が期待されるシナリオ PPb、PLb においても同様の傾向が見られた(図 4-18 (c)、(d))。エネルギー利用による ESR が最も高く、建築プールが平衡になるに従って次第に減少する。シナリオのピークのずれは、PPb の方が若干生産量が多いためより速く建築プールが平衡に達するためである。

引用文献

- 1) 中田俊彦:被災地域における自律・分散型エネルギーシステムの構築:地域社会をデザインするには(特集 東日本大震災と原発事故(シリーズ15)被災地域コミュニティの復興と再生),環境と公害,Vol. 44, No. 3, pp. 34-40, 2015.
- 2) 横山良平:分散型エネルギーシステムの最適設計—設計と運用の階層的關係を考慮したアプローチを中心として—,Proceedings of the Twenty-Sixth RAMP Symposium, pp. 85-98, 2014.
- 3) 柳田高志,吉田貴紘,久保山裕史,陣川雅樹:再生可能エネルギー固定価格買取制度を利用した木質バイオマス発電事業における原料調達価格と損益分岐点の關係,日本エネルギー学会誌,Vol. 94, No. 3, pp. 311-320, 2015.
- 4) 笹内謙一:固定価格買取制度下における小規模バイオマス発電の技術選択(<特集>日本のバイオマス固定価格買い取り制度の現状と展望),日本エネルギー学会誌,Vol. 94, No. 11, pp. 1188-1193, 2015.
- 5) 大場真 奥会津地域における木質バイオマス利活用研究:地域を見直し持続可能な社会への変革を目指して。(2019) 災害環境研究の今,2, 12-15.

- 6) 大場真. 「物質循環モデルと森林施業影響」 柴田英昭編『森林と物質循環（森林科学シリーズ第8巻）』, (2018) pp.149-197. 共立出版
- 7) Ooba M., Fujita T., Mizuochi M., Machimura T., Matsui T. Sustainable use of regional wood biomass in Kushida River Basin, Japan. (2012) Waste and Biomass Valorization, 3: 425-433.
- 8) Ooba M, Wang Q, Murakami S, Kohata K, Biogeochemical model (BGC-ES) and its basin-level application for evaluating ecosystem services under forest management practices. (2010) Ecological Modelling, 221, 1979-1994.

2.3 参加型の環境創生手法の開発と実装 (PJ3)

2.3.1 環境情報技術による社会コミュニケーション手法

(1) 目的と経緯

東日本大震災は人口減少社会における大規模災害であった。過去の多くの災害では復興まちづくりの過程において居住・生活圏の再建や市街化とともに都市機能が回復した。一方で、東日本大震災では若い世代を中心とした人口流出が生じ、被災地域の過疎化や高齢化、地域コミュニティの衰退など問題が顕在化した。こうした中で、震災復興と地域再生の過程において、地方自治体や地域住民、地域企業、教育・研究機関等の種々のステークホルダーが密接に連携し、地域住民の将来にわたっての安全・安心の提供と生活環境の向上を実現するために、社会コミュニケーションを円滑に行う方法を確立することが求められている。そこで本研究では、情報通信技術 (ICT) を活用した双方向型の地域情報ネットワークの形成とコミュニケーションインターフェースの開発及びその機能性と利用性向上を目的とした。このシステム開発により地域データの取得・解析、地域コミュニティ活性化、地域の省エネルギー行動などを支援し地域環境創生に貢献するとともに、より汎用的な地域住民の環境行動解析とモデル化の研究に結びつけ、地域条件が異なる種々の地域へ水平展開する方策についても検討した。

(2) 方法

被災地域における復興まちづくり支援の一環として、社会コミュニケーション支援、省エネルギー行動の促進、地域防災やまちづくりに関する情報発信を目的とした地域 ICT システム「くらしアシストシステム」の開発と社会実証実験を行う。この地域 ICT システムは、ユーザ側からは専用のタブレット端末やネットワーク接続した PC、スマートフォン等を介して、自治体からの連絡やユーザ間でのコミュニケーションなど双方向的な情報の発受信が可能である。また、このシステムから取得した地域情報データを解析し、復興まちづくり支援や地域活性化に貢献する。

(3) 結果と考察

双方向型情報ネットワークシステムによる地域 ICT システム「くらしアシストシステム」を開発し、福島県新地町の約 100 世帯に導入して社会実証実験を実施した。開発したシステムの画面表示の例を図 4-19 に示す。このシステムの利用性向上に向けて、導入世帯の個別訪問、講習会、意見交換会などを頻繁に行い (図 4-20)、住民と直接的なコミュニケーションをしながら技術開発を進めた。「くらしアシストシステム」を活用してエネルギー消費の見える化を行い省エネルギー行動に結びつけるため、システム導入住宅では電力計測機を設置し (図 4-21)、住宅内の電力消費量をリアルタイムで見える化している。その際、各住宅における計測データをクラウドサーバに蓄積し、情報を一括管理することにより、例えば省エネランキングの表示や節電メッセージ送信などの機能を実装した。

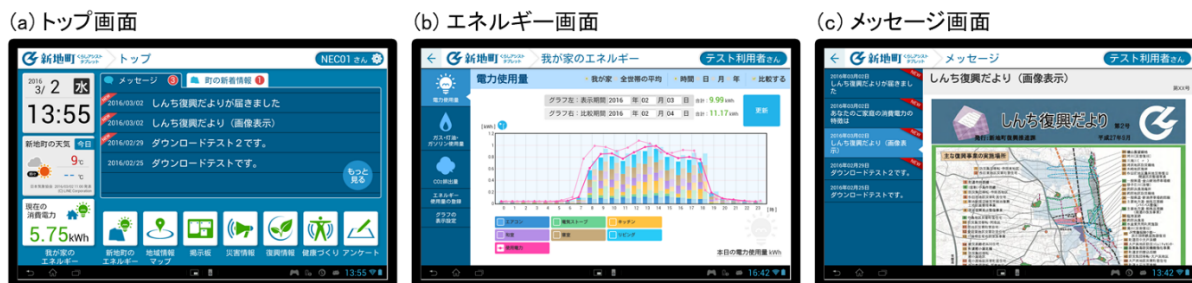


図 4-19 くらしアシストシステムの画面表示例

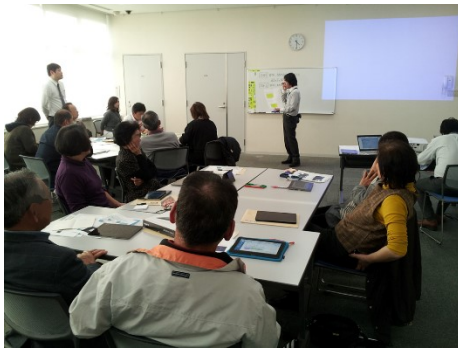


図 4-20 住民向け講習会の様子



図 4-21 各住戸に設置した電力計測器

この情報システムにより得られた電力消費データの解析結果の例を紹介する。ここでは 2014 年 6 月～2017 年 1 月のデータを用い、月別及び時刻別の平均電力消費量を算出した。各住宅データを世帯人員数別に集計した結果を図 4-22 に示す。この結果、1～2 人世帯を除けば、世帯人員数が多い世帯ほど電力消費量が多く、概ね電力消費量は世帯人員数に比例する結果となった。一方、1～2 人世帯は世帯人員数と比例せず、世帯当たりの電力消費量が 3～4 人世帯より若干多いという結果となった。この理由として、新地町の地域条件では 1～2 人世帯は高齢世帯が多く、日中の在宅率が高いことが考えられる。図 4-22 (a) から月別変動パターンでは冷房・暖房が必要となる夏季・冬季の電力消費量が多く、中間季は少ない傾向となった。冷房期と比較して暖房期が長いことも、東北地域の住宅における一般的な季節変化パターンの特徴である。このデータにはガス・灯油が含まれておらず、電力のみでの比較でも冬季のピークは夏季のピークを上回る結果となった。また、図 4-22 (b) の時刻別変動パターンから、住宅における活動時間帯である朝 6 時頃と 18 時頃にピークが生じていることも読み取れる。

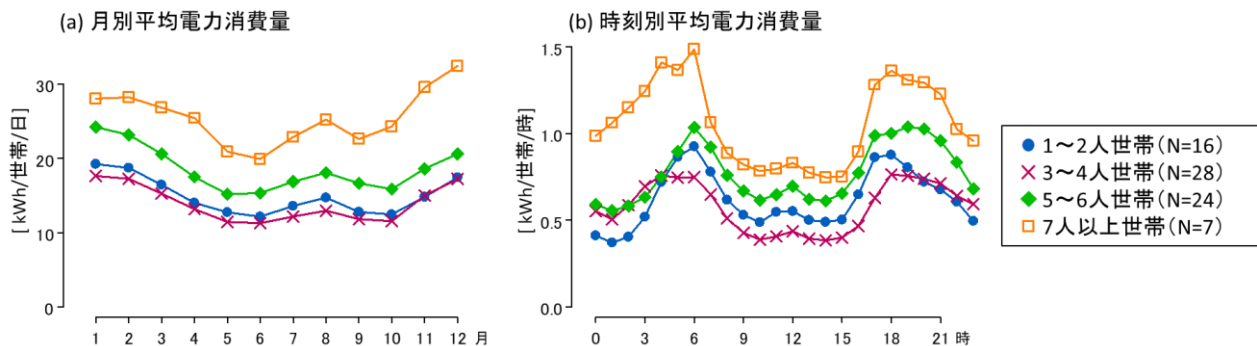


図 4-22 世帯人員数別の電力消費量

システム導入住宅では主要な家電製品と住宅設備の保有状況をアンケートにより把握した。そこで、住宅のエネルギー消費量のうち比較的大きな割合を占める暖房・給湯に着目し、その電気利用の有無に基づいて集計した結果を図 4-23 に示す。なお、アンケートでは機器の設備保有状況は把握しているが、使用状況は把握できていない。特に、暖房については複数の機器を保有しているケースが多いが、これは冷房に用いるルームエアコンが暖房の機能も有しているためである。このため、灯油やガスによる燃焼式の暖房も保有している世帯においても多くはルームエアコンを保有しているが、暖房期にもルームエアコンを利用しているかはアンケートでは不明である。このため、暖房は「燃焼式あり」と「電気式のみ」に分けて集計した。この結果から、給湯における電力利用の有無は全体への寄与が大きいことが分かる。特に図 4-23 (b) の時刻別変動パターンから、電気式の給湯を利用する世帯において深夜～早朝にピークが生じており、ガス・灯油を利用する世帯との差異は明確に生じた。これは、電気式の給湯設備では深夜電力を利用して得られた温水が貯湯槽に蓄えられた後、生活時間帯に使用されているためである。

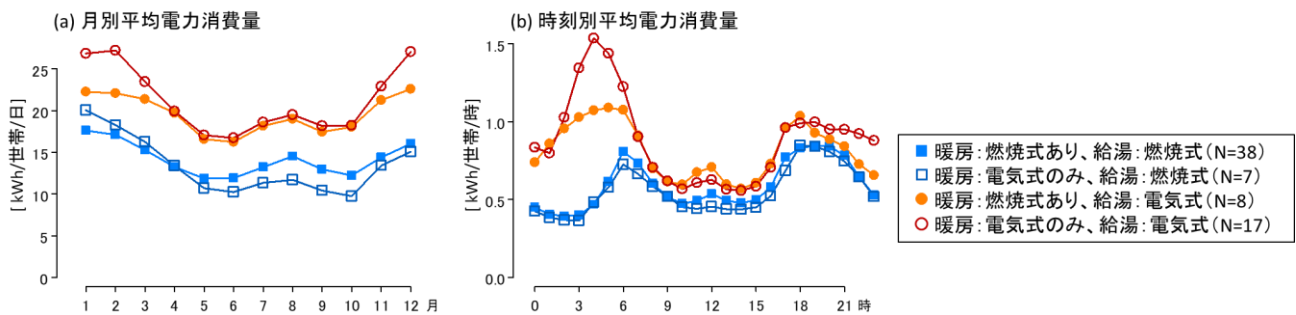


図 4-23 温熱機器別の電力消費量

次に平日・休日別に集計した結果を図 4-24 に示した。図 4-24 では月別変動パターンは省略し、時刻別平均値のみを図化した(図 4-25 も同様)。この結果、平日は朝 6 時頃に大きなピークが生じ、9 時頃までに急激に減少しているが、休日は全体として緩やかであることが分かる。また、日中は休日の方が大きく、夜間はほぼ同程度となった。

夏季、冬季、中間季に分けて季節別に集計した結果を図 4-25 に示した。この結果、冬季は朝方に大きなピークが生じるが、夏季は中間季と同程度であり、起床時の暖房の立ち上げに伴い大きな暖房負荷が生じていることが読み取れる。他も夏季の朝方以外は夏季・冬季はいずれも中間季よりも大きく、冷房負荷と暖房負荷がいずれも発生していることが読み取れる。

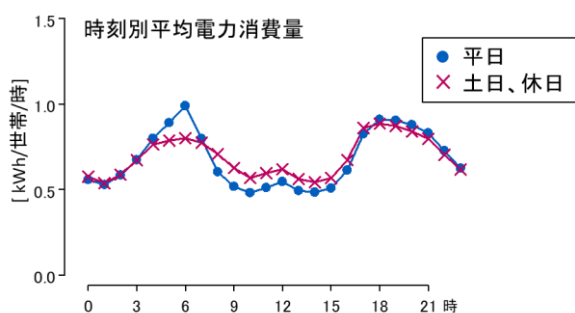


図 4-24 平日・休日別の電力消費量

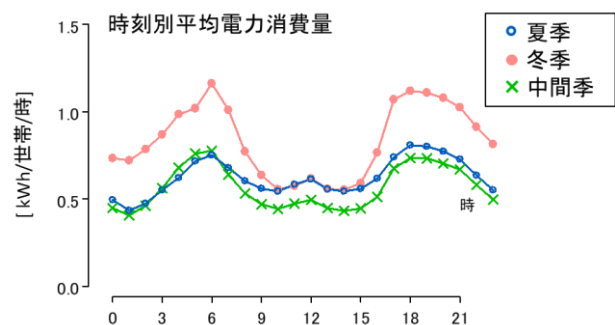


図 4-25 季節別の電力消費量

さらに、電力消費量の計測データを用いて気温と電力消費の関係を分析した。ここでは季節変化パターンに基づいて夏季・冬季の季節変動成分とベース需要に分離し、季節変動成分と気温の関係を図化した(図 4-26)。ここではこの回帰式の傾きを気温感応度と呼ぶ。図 4-26 (a) より世帯人員数別に見ると、電力消費が多い 7 人以上世帯において(図 4-22 参照)、夏季・冬季とも特に気温感応度が大きいという結果となった。また、図 4-22 では 1~2 人世帯と比較し 3~4 人世帯の方が電力消費が若干少ない傾向が生じているが、特に夏季の気温感応度に違いが生じていることから、日中在宅者の有無が気温の影響を受けやすい夏季日中の冷房消費に影響している可能性が高い。図 4-26 (b) より暖房・給湯の方式別にみると、暖房・給湯がいずれも電気式である世帯において特に冬季の負の気温感応度が大きく生じた。一方、給湯は電気式、暖房は燃焼式ありの世帯において通年の電力消費量は大きい(図 4-23 参照)、これは本研究の方法では季節変動成分ではなくベース需要に反映される分が多くなることや、夏季において冷房と給湯で相殺される効果が生じることから、必ずしも大きな差異にはならなかった。

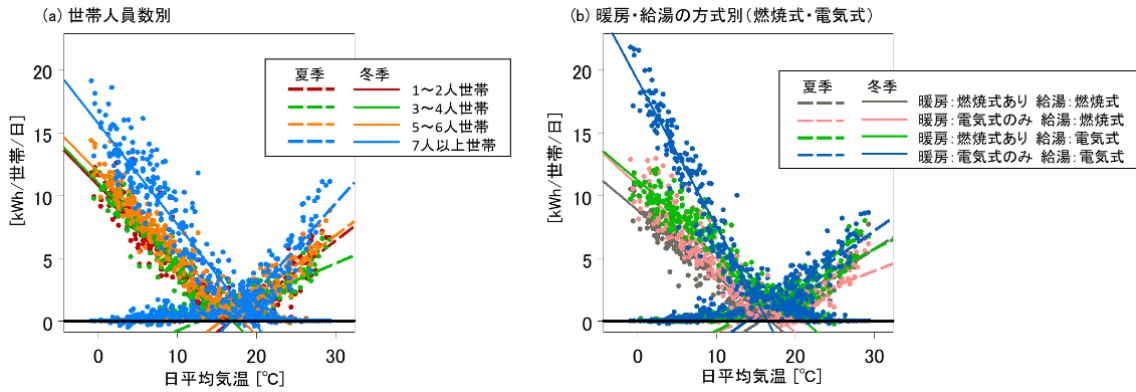


図 4-26 電力消費の季節変動成分と気温の関係

地域住民の省エネルギー行動支援と地域コミュニティ活性化を両立する方策として、「くらしアシストシステム」の機能を用いた省エネキャンペーンを実施した。この省エネキャンペーンは住民の経済的インセンティブの付与や省エネ情報提供の省エネルギー行動への波及効果を実証するため、条件を変えながら6回実施した。自宅の電力消費状況を見える化することに加え、他世帯との比較によるランキング情報の提供や、節電率の上位世帯に地元の商店街で使えるクーポン券の配布、「新地省エネかわら版」と称する紙ベースのアドバイスレポートの配布など、さまざまな方策により省エネ効果を比較した。これまでの6回の省エネキャンペーンについて、キャンペーン前後の電力消費量と比較した結果を図4-27に示す。この図では各キャンペーン期間と前後2週間をプロットした。実際には気温条件の変化などを含むため対等に比較することは難しいが、大まかな傾向としては第1回の省エネ効果が最大であり、徐々に効果が減退している傾向が読み取れる。このことから、目新しさやそれによる面白さが省エネ促進要因となるが、一方で継続することの難しさを示唆する結果であると言える。なお、第4回のキャンペーンは明らかに増加傾向が大きいが、これはキャンペーン期間が年末年始にかかっており、普段とは異なる生活パターンであったことから、他と比較することは難しい。省エネ促進要因については今後検討事例を増やし、知見を一般化する必要がある。

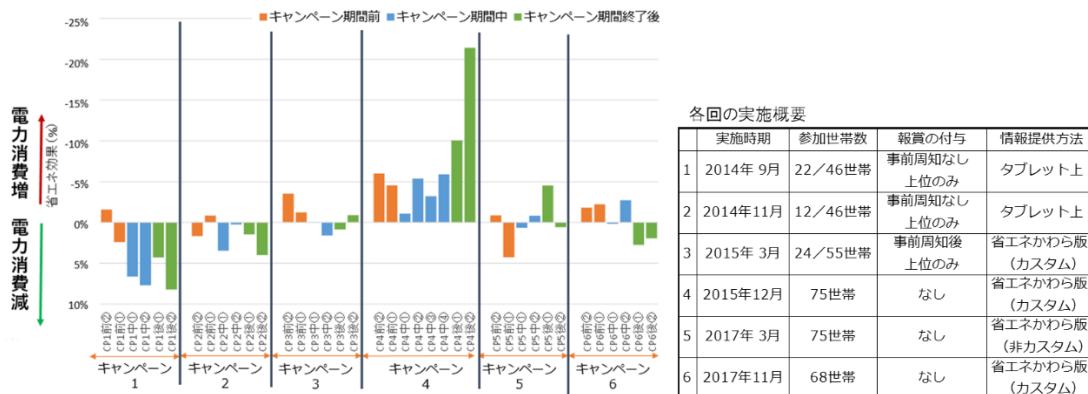


図 4-27 第1回～第6回省エネキャンペーンの節電効果

こうした一連の社会実証実験の結果をフィードバックするため、住民向け成果報告会と省エネアドバイスレポートとして参加世帯への情報発信を行った(図4-28、図4-29)。



図 4-28 住民向け成果報告会

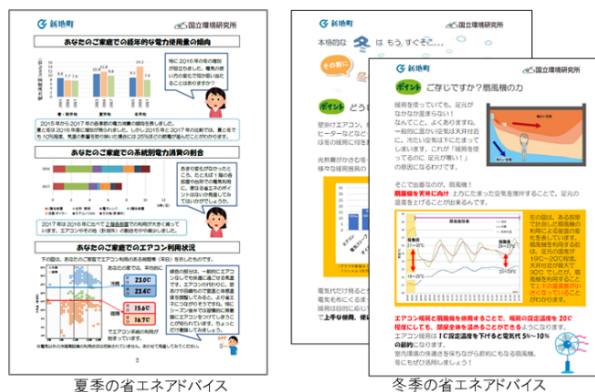


図 4-29 省エネアドバイスレポートの例

また、本システムの水平展開として、福島県三島町の協力のもと、2017 年からシステム導入を開始した。導入先は当時新築された若者向け定住促進住宅を始めとする約 20 戸である。三島町は新地町と比較して冬期はより寒冷な豪雪地域に位置しており、寒冷中山間地域におけるエネルギー消費パターンデータの収集と合わせて、省エネアドバイスの実施や情報発信等、新地町にて蓄積したコミュニケーション手法の精緻化を進めた。

2.3.2 地域エネルギーデータの解析と応用事例

(1) 目的と経緯

新地町では東日本大震災による甚大な被害を受けた後、復興まちづくりの一環として、拠点地域において情報通信技術とコージェネレーションシステムを結び付けた地域熱供給システムを導入した。この事業においてエネルギー供給拠点となる新地エネルギーセンターは 2018 年 11 月に完成した。新地エネルギーセンターは天然ガスコージェネレーションシステムや蓄電池、排熱投入型吸収式冷温水器、太陽光発電パネル等を導入し、新地駅周辺施設へ電力と熱を供給する地域エネルギー供給施設である。また、災害により系統電力が停電した場合も周辺建物に一定の電力供給を維持できるため、地域の防災拠点としての役割も果たす。周辺地域へのエネルギー供給は 2019 年 3 月に開始した。国立環境研究所はこの地域エネルギー供給システムを運営するために設立された新地スマートエナジー株式会社と協力し、システム設計・計画や省エネルギー・CO₂削減効果などを検討するとともに、他地域への展開に向けた計画のための技術開発を行った。

(2) 方法

新地エネルギーセンターのエネルギー需給データを用いて設備運用の評価と高効率化に向けた検討を行った。ただし、段階的な需要側の各施設の建設に先行してエネルギー供給を開始したため、当初は計画通りの需要家が揃っていなかったことに加え、その後は COVID-19 の影響による需要低下も生じている。ここでは比較的一般性のある結果として COVID-19 の影響が含まれない 2019 年 6～12 月のデータの分析事例を紹介するが、この段階ではまだ建設中の施設もあるため、あくまで暫定的な評価結果である。

また、新地エネルギーセンターにおいて検討した結果に基づき、知見を他地域へコンサルティングするためのツールを開発した。このツールでは電力制御、省エネルギー、再生可能エネルギー利用率、経済性などの目的評価指数に対し、地域エネルギーの最適化を行うマネジメントシステムをベースとし、他地域での活用を想定した汎用性の向上や入出力インターフェースの整備、利用マニュアル作成などを行い、実用的なコンサルティングシステムとして整備したものである。

(3) 結果と考察

まず盛夏期にあたる8月における時刻別平均の電力、冷熱、温熱の供給実績を図4-30に示す。8月は、冷水は熱量ベースで381GJ、温水は222GJを需要側の施設に供給しており、冷房のための冷熱供給が多いが、供給エリアにはホテル・温浴施設もあるため給湯用の温熱も一定の需要があった。コージェネレーションシステムは夜間も稼働台数制御により出力を調整しながら、基本的に24時間運転を行った。電力供給は太陽光発電と合わせて、地域の電力需要の半分程度を分散型電源で賄っていた。冷熱供給は、需要全体の6割以上をコージェネレーションの排熱を利用したジェネリックにより供給していた。一方、温熱供給はコージェネレーションの排熱とボイラーで対応した。

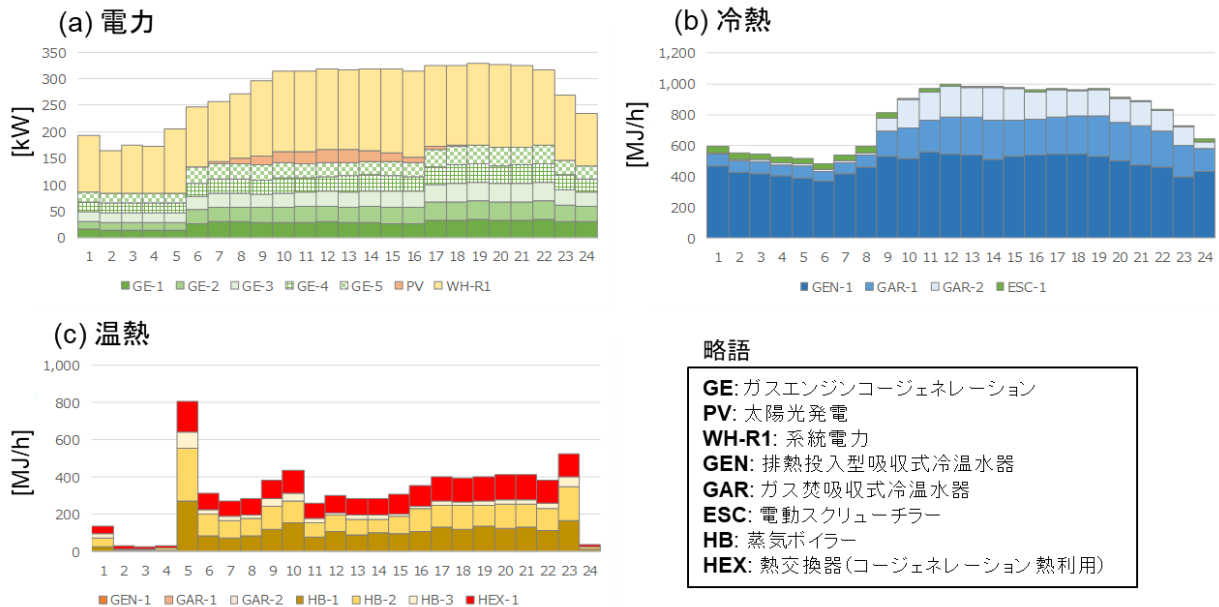


図 4-30 8月の時刻別平均エネルギー供給状況

次に冬季の例として12月の供給実績を図4-31に示す。12月は冷水の供給実績は1GJ程度であり、非常に少ないため図は省略する。一方、温水は877GJであり、夏季と比較し大幅に増加している。これは、冬季に暖房需要が発生することと、給水温度の低下により給湯用の熱需要が増えることの両方の影響によるものである。なお、省エネルギー診断を実施した結果に基づき、2019年11月からは深夜電力の時間帯はコージェネレーションシステムの運転を停止した運用に変更している。

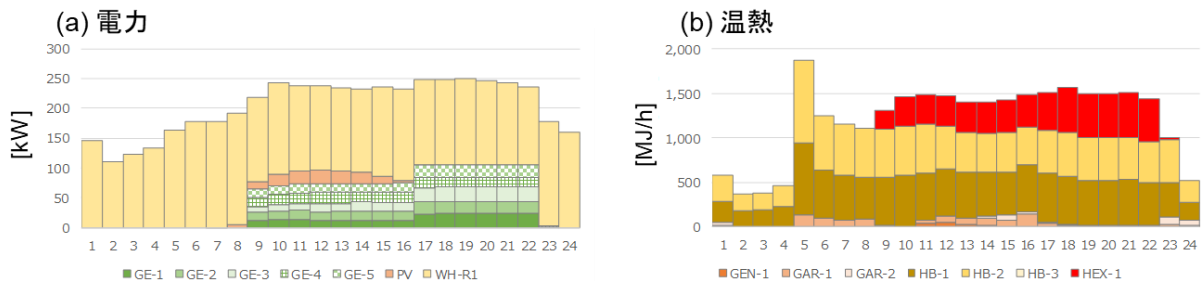


図 4-31 12月の時刻別平均エネルギー供給状況

7か月間のコージェネレーション運用実績を図4-32に示す。実績では、5基のコージェネレーションは、夏季の間は80~100MWh/月程度の発電を行っていた。11月以降は、コージェネレーションの運用方法を変更し、発電量は夏季の半分程度の40MWh/月程度であった。図4-32では5機のコージェネレーション機器はほぼ均等に運用されているが、こ

これはメンテナンスの時期を合わせるため、同等の利用率になるように制御されているためである。このため、実際には稼働台数制御により負荷調整しているため常に同時に稼働しているわけではないが、平均化するとほぼ同等の利用率になる。コージェネレーションによる排熱利用状況を図4-33に示す。排熱利用率は各月とも80~90%程度であり、発電の排熱が熱供給に有効に熱利用されていることを確認した。コージェネレーションの総合効率を算出したところ、平均では約70%程度の安定した値となり、特に12月は約75%の良好な運転状況であった。

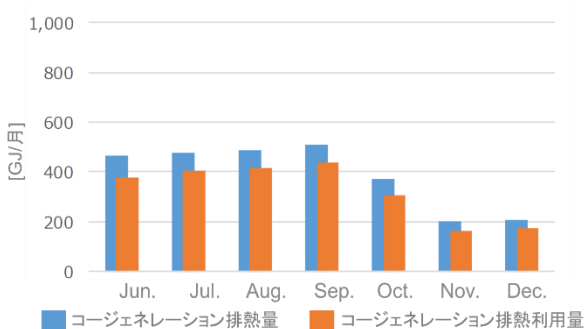
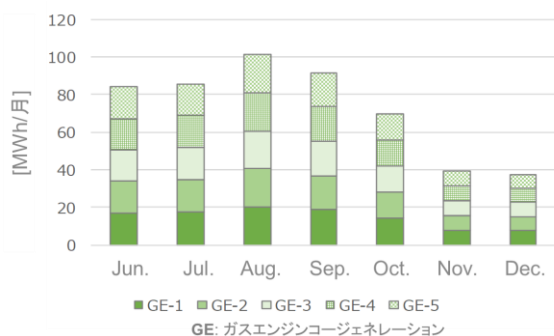


図 4-32 コージェネレーションシステムの発電状況

図 4-33 コージェネレーションシステムの排熱利用状況

新地町において蓄積した知見を他地域へ展開するためのコンサルティングツールを開発した。このツールは、気候条件が異なる様々な地域において、エネルギー需要量に対して、再生可能エネルギー（太陽光発電、風力発電）やコージェネレーションなどの地域エネルギー供給、地域での電力融通を前提としたディマンドレスポンスやEV充放電、蓄電池制御などのエネルギー需給制御を最適に行った場合の効果について算定する。これにより、地域における複数の導入モデルを相互に比較することで、対象地域において、地域新電力や地域エネルギーサービス事業などの導入の最適化や、省エネ・環境性や経済的な効果について把握することが可能となる。

このツールの計算フローを図4-34に示す。まず、対象となる地域の条件として、想定する建物の用途別床面積を設定するとともに、導入する技術等について検討ケース設定を行う。その条件を前提として、エネルギー需要量を想定し、導入する地域エネルギー供給システムならびに再生可能エネルギーの効果算定する。その結果を踏まえて、EVなどのモビリティを活用した充電、蓄電池充放電、地域電力利用などのスマート化・電力制御メニューを検討し、地域における最適エネルギーシステム導入による効果を算定する。

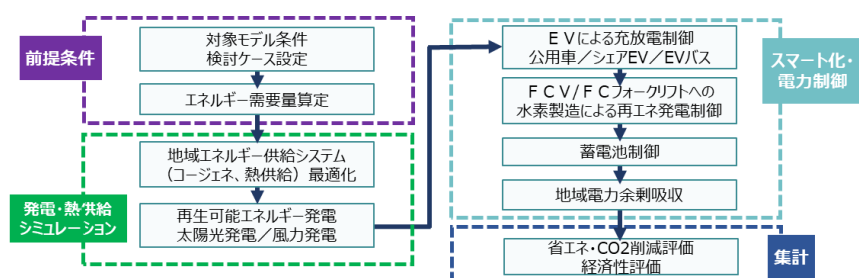


図 4-34 計算フロー

ここでは評価事例として、従来設備、分散型地域エネルギー供給、再エネ導入及び電力小売事業（地域新電力）導入、EV等モビリティ導入、蓄電池最適制御導入の検討ケースにおいて算定した結果を紹介する。

- (1) 従来設備（比較基準）：従来通りの設備構成及びエネルギー利用形態とする。

- (2) 分散型地域エネルギー供給：「(1) 従来設備 (比較基準)」の設定に対し、対象エリア中心に地域エネルギー供給拠点としてエネルギーセンターを設置する。エネルギーセンターはコージェネレーションシステムを利用し、供給エリア内を熱導管・自営線でネットワーク化し、冷暖房・給湯の冷温熱ならびに電力を供給する。
- (3) (2) +再エネ導入+電力小売事業 (地域新電力)：「(2) 分散型地域エネルギー供給」の設定に対し、太陽光発電・風力発電などの再生可能エネルギーを導入する。また、地域新電力会社を設立し、卸取引市場で調達した電力および地域内の再生可能エネルギーで発電した電力を、自営線による供給エリアの範囲外にも託送により供給する。
- (4) (3) +EV等モビリティ導入：「(3) (2) +再エネ導入+電力小売事業 (地域新電力)」の設定に加え、地域の公用車にEVを導入するほか、シェアEVやEVバスを導入する。
- (5) (4) +蓄電池最適制御：「(4) (3) +EV等モバイル導入」の設定に対し、太陽光発電・風力発電などの再生可能エネルギーの余剰電力を定置型蓄電池に蓄電し、地域内電力が不足する際に放電する制御を行う。

必要な計算条件を入力した後に得られる計算結果の例を図 4-35 に示す。各々検討ケースは (1) の従来設備に対する省エネ率と CO₂ 削減効果で示した。機器の効率やエネルギー消費原単位、CO₂ 排出原単位などの各種のパラメーターは一般的な値を用いているが詳細はここでは省略する。図 4-35 から、この例では再生可能エネルギー導入による削減幅が非常に大きいという結果になった。ただし、この結果は対象地域の需要施設や導入する技術に依存するため、これはあくまで一例である。今後、評価事例を増やし知見を一般化するとともに、この評価ツールの実利用により現実的な地域エネルギー事業の普及に貢献していくことが重要である。

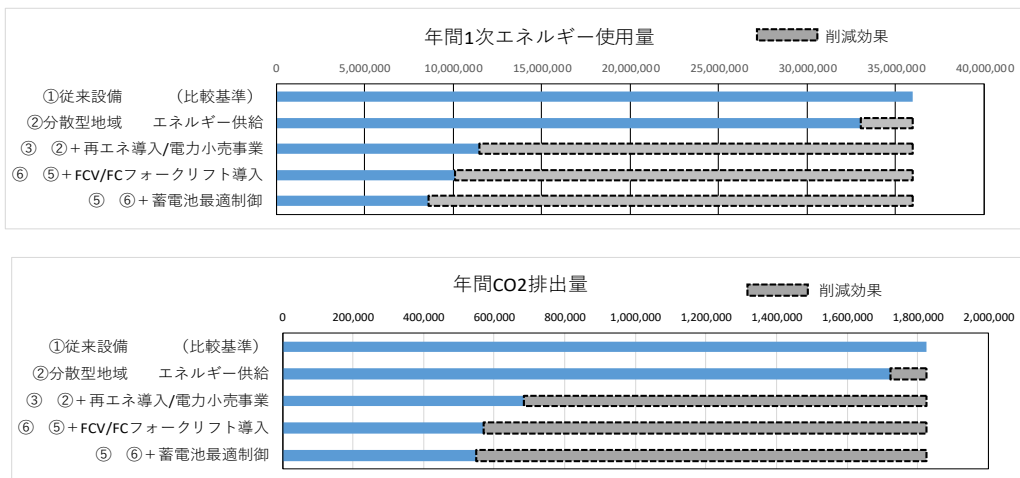


図 4-35 計算結果の例

2.4 まとめ

本研究では、震災からの復興から環境回復、さらには SDGs への取組や地域循環共生圏の構築を通じて持続的な発展を目指す地方自治体、事業者、住民の将来ビジョン構築やそこに至る技術選定と施策の策定に有用な情報を提供するため、福島県内の環境・社会情報、環境技術・社会技術、さらに震災・原子力災害からの復興の状況等に関する情報のデータベース（地域データベース）を構築した。データベースについてはこれを地域住民等に分かりやすく提示するため三次元地図へのプロジェクションマッピングシステムを開発し福島県環境創造センターにおいて常設展示を開始した。低炭素や資源循環・自然共生等の環境成長の目標の達成に加え、高齢化や人口維持・産業振興等の社会面の目標を達成するための技術・施策を分析するモデル（地域統合評価モデル；福島 AIM）の開発を進め、その適用を通じて実用性と信頼性を高めた。地域統合評価モデルの適用においては県内の地域、自治体等の単位で適用し、環境・経済・社会の各側面に目標を設定して持続可能な将来シナリオとそこへ至るロードマップを構築した。さらに、社会コミュニケーション手法に関する研究として、持続可能な地域の将来シナリオづくりへの地域住民の参加型手法の開発のため、郡山市において SDGs を活用した地域課題解決策を発想する住民参加型ワークショップ等を実践した。

一方、新地町や三島町における地域エネルギー事業の導入事例を対象とした検討を実施した結果、エネルギー事業単独の経済事業性については、様々な補助制度を活用しても赤字という結果が示された。そのため、地域特性に応じた適切な分散型エネルギーシステムを選択するとともに、それを核として周辺地区の地域づくりに取り組むなど、持続可能な地域社会を総合的にデザインするための枠組みが必要であることが示された。また、本研究が示したように、エネルギー事業向けに利用可能な森林資源は現状ではまだ小さい。三島町の主要地区である宮下地区での、エネルギーシステムの導入について 2.1.1 で検証し、本研究で示した周辺町村森林含め年間約 6 万トンという数値は決して大きい値ではない。三島町では 2020 年 1 月に「地域循環共生圏推進協議会」を設立し、町内での主力地域資源である森林資源による木質バイオマスのエネルギー転換を最初の目的として活動・調整を開始している。経済性、資源量共に困難な木質バイオマス利用であるが、本研究が示したように、より統合的に評価を行うと、域内の炭素収支は劇的に改善される。それだけでなく木質バイオマスによる再生可能エネルギーは、地域に存在する未使用の地域資源を活用する波及効果は、例えば林業を含めた広い雇用創出、環境観光需要の促進だけでなく、環境的な効果、災害防止、景観美化、生物多様性なども見込むことができる。将来的研究の方向性として、これらの波及効果をより包括的に評価する手法を開発し、地域の脱炭素を理論的に支える必要がある。

さらに、震災復興及びその後の地域環境創造の過程において、生活者への安全・安心の提供や復興コミュニティの活性化を支援し、生活環境の向上を実現する地域情報ネットワークの構築と、その活用による地域環境情報の取得・解析を目的とした研究を実施した。まず、環境情報技術による社会コミュニケーション手法を構築するため、双方向型地域 ICT システム「くらしアシストシステム」を開発し、福島県新地町及び三島町において社会実証実験を行った。このシステムを活用して得られた住宅の電力消費データを解析し、対象地域の家庭における電力消費実態を把握した。また、このシステムの機能を活用し、地域コミュニティにおける省エネキャンペーン実施や省エネアドバイスレポート配布、住民向け成果報告会開催などの地域活性化と省エネルギー行動支援を両立する各種の取り組みを実践した。次に新地駅周辺地域における地域エネルギー事業におけるエネルギー需給データを活用し、まず供給施設である新地エネルギーセンターの運用状況を評価した。次にこのデータを活用し、地域エネルギー事業の他地域への展開を支援するためのコンサルティングツールを開発した。

V 災害環境マネジメント研究プログラム

1 研究の概要

東日本大震災から10年半が経過した。大地震とそれに伴う大津波は多くの犠牲者をもたらし、生活の基盤を破壊した。膨大な災害がれきの発生や燃料タンクの倒壊と火災に伴う有害物質の生成、被災した事業所からの化学物質の漏洩など、環境や健康への影響が懸念される様々な問題が起こり、災害が環境リスクと極めて関係が深いことが改めて認識された。

国立環境研究所は、東日本大震災が発生した直後から、時々刻々と生じる環境問題の実態を適切に把握し、これまで蓄積してきた科学的、技術的知見を活かして、対処方法を行政や産業界とともに模索し、被災地の復旧、復興に貢献してきた。そして同時に、災害によってどのように環境問題が生じ、どのように対処していくことがもっとも適切かを、研究を通して記録し検証してきた。将来の自然災害に備えて、実際に災害が起こった後の対処方法だけでなく、災害時の影響軽減や早期回復のために平時からどのようなシステムづくりを行っておくべきかという視点を重視して研究を進めてきた。すなわち、平時から災害時までどのように継ぎ目なく対応していくかが重要であると考えている。

以上のようなこれまでの流れの中で、第4期中長期計画（2016～2020年度）においては「災害環境研究プログラム」の中で「災害環境マネジメント研究プログラム」を推進した。その目的は、将来の災害に備えた環境マネジメントシステムを構築することである。すなわち、災害廃棄物処理システムの統合的マネジメント手法や体系的な人材育成システムを開発・活用し、化学物質対策等も含めた対応力に関する検証研究や地方環境研究機関等とのモニタリングネットワーク構築を進め、災害環境研究の国内・国際ネットワーク拠点の形成を目指した。

図5-1に研究プログラムの研究構成を示す。三つのプロジェクトから構成され、一つ目は、災害時の資源循環・廃棄物マネジメントの強靱化に関する研究であり、災害廃棄物問題に関する技術的な対策の高度化や対応する組織マネジメントの在り方などを検討した。二つ目は、災害に伴う環境・健康リスク管理戦略に関する研究であり、災害時の化学物質の漏洩等に伴う汚染問題に着目して、汚染や影響のメカニズム解明やモニタリングシステム等の開発を行った。そして三つ目は、各種対策を支える情報や人材の基盤づくりに関する研究であり、災害廃棄物対策を中心に情報プラットフォームの整備や人材育成手法の開発などを進めた。

以下、研究成果を紹介する。



図5-1 本研究プログラムのプロジェクト構成

将来の災害に備えた災害レジリエントな社会環境システムの構築に向けた技術システムの提示を行い、社会の環境防災力・減災力の向上に資するために、三つのプロジェクトにおいて、以下のような研究を実施した。

プロジェクト1については、まず、災害廃棄物の特性や建設資材としての適用性に基づいて再生利用率の高い災害廃棄物処理技術を実証実験や実験的アプローチにより開発するとともに、自立型浄化槽システムの開発と、し尿・汚泥輸送ネットワークモデルの構築を行った。具体的には、木くず等有機物含有量評価方法、仮置場管理方策、災害復興時における資材利用のあり方、及び手選別技術の仕様を検討した。また、浄化槽の効果的な利用方法と迅速な被害状況把握システムを検討した。これらを通じて、将来の大規模災害に備えた、災害廃棄物の実効性のある処理計画の策定や技術システムの確立等に資する知見の提供を目指した。つぎに、市町村における災害廃棄物の効果的な処理計画策定プロセスの検討、地方公共団体における水害廃棄物適正管理の標準化を検討した。具体的には、市町村における災害廃棄物への対応力の評価手法を開発し、計画策定手法の高度化を図るとともに社会実装を試みた。また、アジア地域において、地方公共団体向け水害廃棄物適正管理のための指針を提示し、都市排水機能維持のための廃棄物投棄防止・適正回収に関する教育プログラムの開発と、その成果普及のためのワークショップを開催した。対応力向上に資する災害廃棄物処理計画策定プロセスと緊急時の環境アセスメントのあり方を提示し、我が国における標準的な災害廃棄物対応システムを検討した。これらを通じて、災害対策に関する経験・技術的蓄積を、我が国の次世代のみならずアジア都市に継承、移転し、未然防止・被害軽減に寄与するとともに環境省や市町村との協働により災害廃棄物対応力の向上を目指した。

プロジェクト2については、災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略の確立に向けて、緊急時における化学物質の管理目標値データベースの構築と緊急時の簡易・迅速測定手法やサンプリング手法の開発を進めた。具体的には、大気・水についての化学物質の管理目標対象と目標値を確定し、調査手法との連携を検討した。また、管理目標と対応する調査分析手法及び支援体制を有機的に構成した実行可能な災害対応の仕組みを、試行的実施等を踏まえて提案することを試みた。これらを通じて、災害時の有害物質等への緊急時対応の実行可能かつ有効な手法を提言することにより、災害環境に対応する行政や社会づくりに貢献することを目指した。

プロジェクト3については、参画型研修手法とその評価手法を開発し、情報基盤システムの開発・運用を検討した。具体的には、災害廃棄物分野に関する体系的な人材育成プログラムを開発し、実践を通じて改善することを進めた。また、災害廃棄物分野の情報プラットフォームを構築し、実務との連携による高度化を行った。これらを通じて、将来の災害に備えた環境省災害廃棄物対策支援チーム D.Waste-Net の活動や環境施策へ貢献することを目指した。

2 研究の成果

2.1 災害時の資源循環・廃棄物マネジメント強靱化戦略の確立

2.1.1 手選別技術の最適化に関する研究

(1) 目的と経緯

災害廃棄物の再生利用の観点から、出口利用先の要件を満たす適正な選別技術を選択する必要がある。近年、大量処理や高精度選別の設備が開発されているが、手選別は災害廃棄物処理の初動や大型選別機器を常備できない小規模自治体、山間部など地理的に導入困難な地域において、重要な技術と認識されている。また一般的には、廃棄物処理施設において有価物の回収や忌避物の除去の工程で導入されている。古くから廃棄物手選別は行われているが、現場合わせやノウハウに頼った設計の下、実施されているのが実情である。多様化する製品、頻発する災害は災害廃棄物処理を複雑化させており、手選別作業の効率的かつ安全を考慮した、作業環境設計が求められている。以上のような経緯より本研究は、科学的根拠に基づいた手選別作業環境設計に資する基礎的因子を検討することを目的とした。

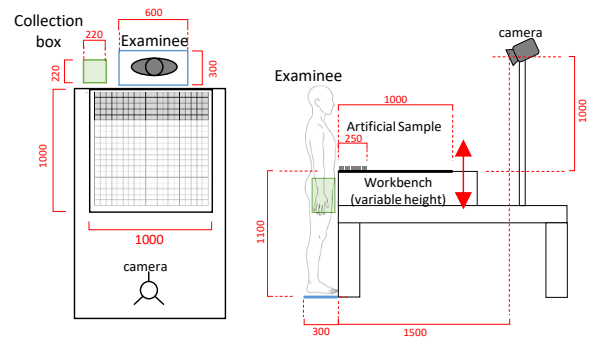


図 5-2 手選別実験概要

(2) 方法

(1) 実手選別作業現場での作業効率に係る因子調査

災害廃棄物としてプラスチック類を中心とする軽量廃棄物と木柱やがれき類が中心の重量廃棄物をそれぞれ手選別する状況を想定し、実際の産業廃棄物処理施設において手選別作業風景のモニタリング調査及び分析を行った。また、平成 30 年 7 月豪雨による災害廃棄物の中間処理施設での手選別作業環境についても情報収集を行った。



図 5-3 実験の様子

表 5-1 手選別作業に係る因子と評価項目

対象物因子	色、大きさ、形状、種類、質感
作業環境因子	選別品目数、明るさ、作業高さ、作業面積（作業者からの距離、廃棄物の移動速度速度）
評価項目	選別効率（単位時間当たりの目的物回収数）、作業精度、視線移動距離、作業手移動距離、

(2) 手選別作業効率に係る因子の解明

図 5-2 に示す室内実験設備を設置した。図 5-3 に示すように被験者の前に作業場（100cm×100cm、高さ可変）を設け、作業場に種々の選別対象物および環境条件を設定した。（1）で得られた現場情報より、表 5-1 に示す「対象物因子」と「作業環境因子」をそれぞれ設定し、各因子と評価項目との関係を明らかにする実験を行った。

(3) 結果と考察

(1) 実手選別作業現場での作業効率に係る因子調査

図 5.4 にベルトコンベアーを使った実廃棄物の選別作業における各作業者の選別物役割をまとめた。上流から順に体積の大きいものを回収し、下流では特定の品目ではなく状況によりランダムで回収する傾向が見られた。また作業員間で回収物を下流から上流へ受け渡す、臨機応変な対応が作業効率向上に寄与することが確認された。岡山県災害廃棄物中間処

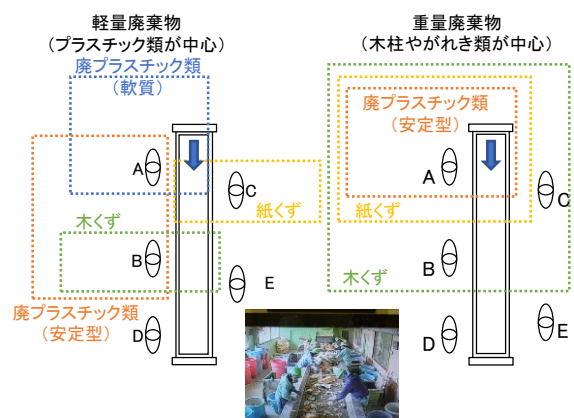


図 5-4 人員配置と選別物の関係

理における手選別において、作業者の身長差（150～180cm）及び目的物ごとのコンベアーの速度の違いなどが見られた。

(2) 手選別作業効率に関する因子の解明

1) 対象物因子

色条件は、災害廃棄物の処理現場においては灰色を基調とする環境になる傾向があり、灰色系の若干の違い（作業場の色との色差 $\pm 2.35 \sim 10.83$ ）の影響と、視認性・誘目性が高い黄色系が視線に及ぼす影響を調べた。色差 ± 2.35 以下の灰色系同士の区別は困難であり、その際の作業環境の明るさが関係することが示された。また視認性・誘目性の高い色が入ることで視線移動範囲が有意に変わることが示された（図 5-5）。

形状については種類との相関が強く、両因子を含めて対象物を判断していると推察された。大きさについては、10cmを基準に大小を分け実験を行ったが、選別効率に顕著な差は見られなかった。（1）での検討より、対象物が重なることによって検索が妨げられないように、大型シートのようなものを前処理で除去するべきであるといえる。

災害廃棄物を対象とする場合に安全のため手袋やマスクといった感覚情報を遮断する装備が用いられている。したがって、作業者が質感として得られる情報は視覚によるところが大きくなることが実験及びヒアリングで確認した。特に凹凸などの表面形状や全体形状（実験では3cm直方体を使用した）が材質により変形しているが質感因子として被験者は判断していた。

2) 作業環境因子

作業品目数、複数品目数（3 または 5 品目）を回収する方が単一品目を回収するより回収効率が 2 倍高いことがわかった。これは、単一品目回収では被験者が目的物を検索したのに対し、複数品目回収では手に取ってからどの目的物かを判断するという違いに起因しており、作業指示や役割分担が選別効率に影響するといえた。

作業場の高さは、作業者の肘頭高程度（100cm 程度）が身体に負荷が少なく、効率的な作業が可能であることがわかった。作業台が高い場合（肩峰高程度 120cm）では前者に比べ 40%程度選別効率が低下することがわかった。

作業面積として、作業者から 75cm 以上離れる（背面握り軸距離程度）と作業効率が 60%程度低下する（図 5-6）。また、視認性が良く目的物が容易に判別しやすかつ目的物が十分存在する状況においては、コンベアー速度 8～16m/min では作業者から 20～30cm 距離のものが回収され、一方 4～5.3 m/min では 20～50cm 距離まで回収範囲が広がる（図 5-7）。

本研究により、災害廃棄物の作業環境設計に資する人間工学的基礎情報を得ることができた。今後、実際の廃棄物での実証を行うとともに、近年注目される画像認識技術への応用も視野に入れている。

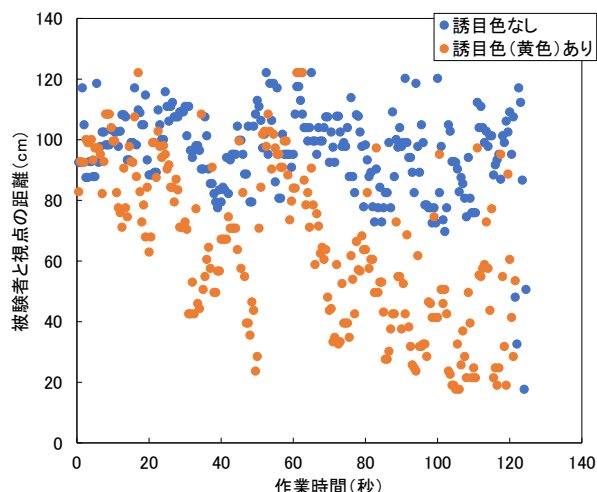


図 5-5 誘目色による視線移動範囲の拡大

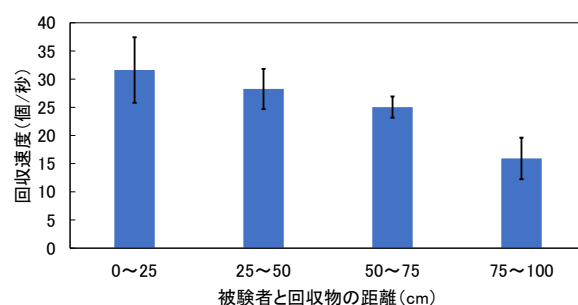


図 5-6 手選別動作と距離の関係

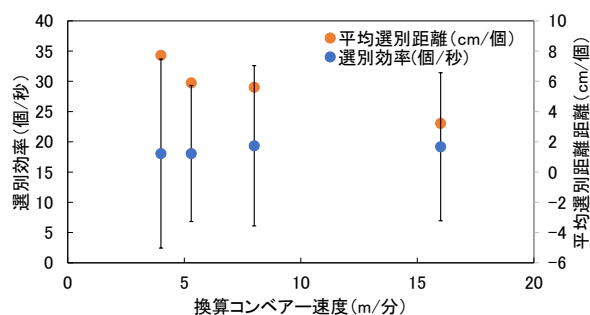


図 5-7 コンベアー速度と選別効率の関係

2.1.2 災害廃棄物利活用に向けた評価技術の開発

(1) 目的と経緯

災害廃棄物は土砂類やコンクリートがらなど、建設工事で利活用可能なものを多く含む。しかしながら、発生過程で混入した木片やプラスチック等の異物が残っていたり、様々な有害物質を含んだりしている可能性がある。また、「廃棄物」であったという理由から、必ずしも利活用が円滑に進まない場合がある。これらの課題を解決するには、災害廃棄物から再生された建設資材が、必要な品質基準を満足することを確認する工程が必要となる。特に、土砂類（分別土砂）中の有害物質に関しては、雨水等によって溶出することによる周辺環境への汚染の可能性を払拭することが重要である。そこで本研究では、分別土砂の環境安全性を評価する技術の開発を行った。

(2) 方法

(1) 試料

津波災害で大量に発生する津波堆積物を想定し、河口部と港湾部から浚渫された土砂を用いた。試料の物理特性を表 5-2 に示す。乾湿サイクル試験でのみ、東日本大震災で発生した実際の津波堆積物を用いた。堆積物が含有する黄鉄鉱（図 5-8）は砒素や鉛を含んでおり、海水由来のふっ素やほう素なども溶出する可能性がある。

(2) 締め固めた供試体の拡散溶出試験による評価

US EPA Method1315 Compacted Granular Leach Test (CGLT) を適用した。試料は容器に充填し（図 5-9）、上方のバルク液相を定期的に純水に入れ替えることにより、土粒子の間隙を通して拡散溶出する有害物質のフラックスを評価する方法である。

(3) 有害物質を溶出する材料の分配係数取得法開発

有害物質の地盤中の挙動は、通常、移流分散解析が適用されるが、解析に必要なパラメータである分配係数を取得するための吸着試験は、自身から有害物質を溶出する材料には適用できない。そのような材料についても、液固比バッチ試験の適用によって分配係数を取得する方法を開発した。

(4) 二次汚染された材料の分配係数取得法開発

津波堆積物のように発生過程でも二次的に汚染を受けた可能性のある材料について、元々の分配係数等の吸着パラメータと二次汚染による影響を評価できる方法として、ステップバッチ試験を開発した。

(5) 環境暴露試験による長期安定性評価スキームの開発

長期的な劣化因子の一つである乾湿繰り返し条件の影響を評価するための乾湿サイクル試験を開発するとともに、津波堆積物中の有害物質挙動への影響を評価した。上記で開発した分配係数取得法を組み合わせ、長期安定性評価の流れ（図 5-10）を構築した。

表 5-2 試料の物理特性

試料名	河川堆積物	海底堆積物	模擬津波堆積物
土質	礫質砂 (SG)	粘土 (CH)	細粒分質礫質砂(SFG)
含水比 [%]	0.4	乾燥処理	0.3
乾燥密度 [g/cm ³]	2.633	2.716	2.651

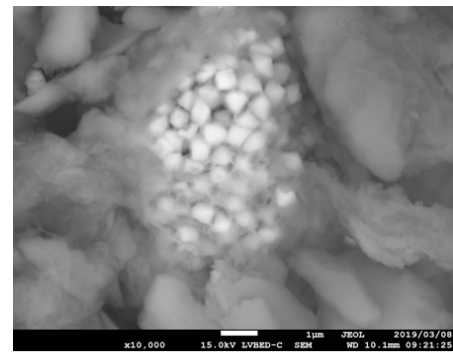


図 5-8 津波堆積物中の黄鉄鉱

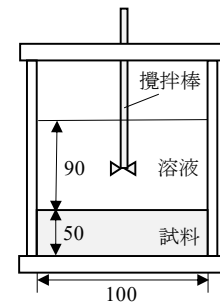


図 5-9 CGLT 試験装置

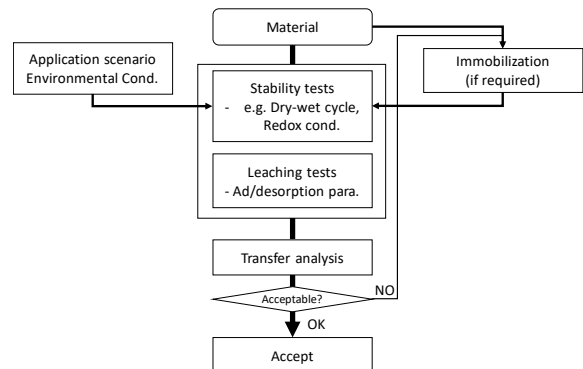


図 5-10 環境暴露試験による長期安定性評価の流れ

(3) 結果と考察

(1) 締め固めた供試体の拡散溶出試験による評価

CGLT による評価の結果、砒素等の有害物質を含め多くの物質が粒子間隙を拡散移動することによる溶出フラックス勾配（両軸対数で-0.5）を描いた（図 5-11）。また、河川堆積物と海底堆積物とを 9:1 または 8:2 に配合したところ、元素によっては溶出フラックスが増加または減少する場合があることが観察された。

(2) 有害物質を溶出する材料の分配係数取得法開発

自ら有害物質を溶出する材料に対しては、純水を用いて液固比（L/kg）を変えた溶出試験を行い、溶出濃度 C (mg/L) に液固比を乗じて溶出量 M_L (mg/kg) を求め、 C と M_L の関係を描くことにより、その勾配から分配係数 K_d を求める方法を開発した（図 5-12）。また、このとき Y 切片は吸脱着反応に関与している物質の総量を表すこととなる。津波堆積物模擬試料を用いて液固比バッチ試験を行い、各パラメータを得て、移流分散解析を行った。さらに、カラム通水試験を行い、パラメータの妥当性を検証した。

(3) 二次汚染された材料の分配係数取得法開発

材料によっては、元々保有している有害物質に加えて、新たに有害物質によって汚染される可能性も考えられる。そのような場合の汚染物質の量と分配係数を取得するための、シリアルバッチ試験による解析方法を開発した。図 5-13 では、元々の保有量は吸着等温線の Y 切片によって表され、さらに、液相を交換することで分配係数が徐々に大きくなる変化を捉えることができた。

(4) 環境暴露試験による長期安定性評価スキームの開発

分別土砂が盛土等に使用された際に、表層において降雨と乾燥が繰り返されることで劣化（例：図 5-14）し有害物質の溶出が促進される可能性がある。そこで、乾燥は 20°C または 40°C で 18 時間、水添加は含水比 18% で 6 時間とし、これを 30 回繰り返す乾湿サイクル試験を開発した。乾湿サイクル試験後に、上述の液固比バッチ試験を適用し、分配係数や吸脱着関与量の変化を評価した。以上によって取得したパラメータを用いて移流分散解析を行うことにより、盛土等に使用される分別土砂の環境安全性を事前評価する手法を確立した。

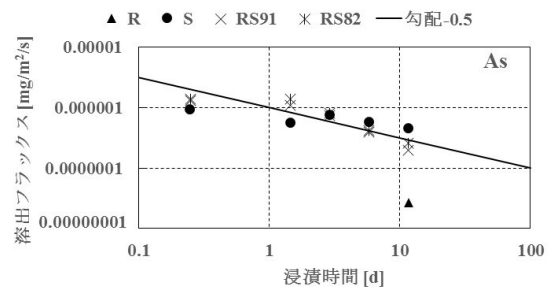


図 5-11 拡散溶出試験による砒素溶出フラックス

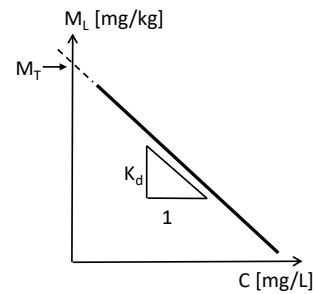


図 5-12 液固比バッチ試験における液相濃度と吸着量の関係の概念図

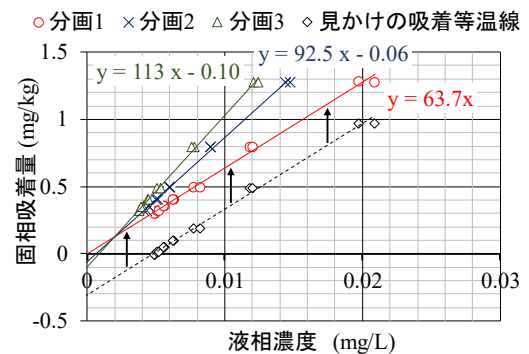


図 5-13 シリアルバッチ試験による二次汚染の評価

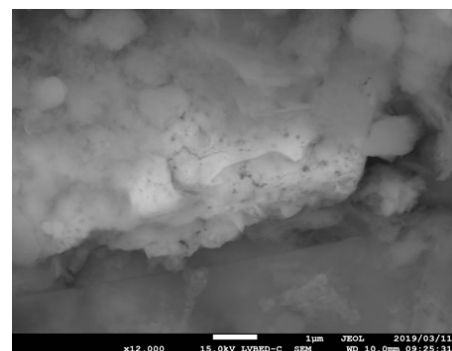


図 5-14 乾湿サイクル試験後の黄鉄鉱の劣化

2.1.3 災害時の生活排水分散処理システムに関する研究

(1) 目的と経緯

東日本大震災による排水処理施設の被災から生じた水洗トイレの使用制限は、避難者、被災者にとって大きなストレスとなり、また、衛生面からもその対策が必要となった。一方、災害によってし尿処理施設が停止した場合、避難所の浄化槽汚泥や周辺の仮設トイレのし尿・汚泥は、周辺施設での受入を調整し、輸送することとなる。ただし、各施設で受け入れられる量には制約があるため、近隣他県の施設へ移送する必要性も想定される。災害時の対応については、平時において、想像力を最大限に働かせ、適切な災害時の協力協定などを進めておくことが重要であり、それを支える研究の観点からも、災害研究として被災前にシミュレーション用のモデルを作成し、平時から具体的な検討を重ねておくことが肝要である。これについては、し尿処理における震災直後の短期的な対策として、混合整数計画法（MILP：Mixed Integer Linear Programming）を用いることで中継基地を導入した広域的輸送計画モデルの提案を行ってきた。本研究では、こうした提案を具体的にしていこうと、既存の地域防災計画におけるし尿処理対策の現状を調査するとともに、広域自治体、基礎自治体へのヒアリングを通じて、課題の整理を行った。

また、環境省の調査によれば、東日本大震災における浄化槽被害は少なく、浄化槽が地震に強いことが改めて示されたが、浄化槽本体あるいは管きよの破損により衛生的な処理が不能となり、汚水を排出することができない建築物もあった。そこで本研究では、東日本大震災における浄化槽の被害・復旧状況等を踏まえ、ハード面でのアプローチとして、浄化槽の耐震構造・施工方法に関する実験・調査研究を行い、耐震型浄化槽の構造・施工方法の確立および従来基準の無かった浄化槽の耐震評価基準の策定を目的として検討を実施した。

(2) 方法

(1) 災害時のし尿・汚泥の輸送・処理に関する研究

3つの広域自治体及び4つの基礎自治体について、それぞれ、調査シートを基にヒアリングを行った。広域自治体向けには、広域的な課題への対応、基礎自治体間の調整等について、基礎自治体向けには、必要トイレ数の想定や備蓄の過不足、仮設トイレの設置に伴うし尿輸送・処理計画など、より具体的な項目を盛り込んで調査を実施した。

(2) 浄化槽の耐震性評価

浄化槽に作用する地震時土圧を算出するため、構造物と地盤を一体としてモデル化した2次元FEMモデルを用い、地盤要素に慣性力を静的に作用させて地盤変位や地盤内応力を求める応答震度法により解析を行った。解析ソフトはSoilPlus（伊藤忠テクノソリューションズ）を用いた。地盤物性値は線形とし、地盤せん断波速度Vsを変化させた。構造物（浄化槽）はFRP製の5人槽を想定した。

また、構造物と地盤を一体としてモデル化した3次元FEMモデルを用い、地盤要素に慣性力を静的に作用させて地盤変位や地盤内応力を求める応答震度法により解析を行った。動的FEM解析では、ここまで実施した2次元静的FEM解析と同一の解析モデルを使用した。

(3) 結果と考察

(1) 災害時のし尿・汚泥の輸送・処理に関する研究

アンケート解析の結果、独自の災害時情報システムを整備して被害状況を迅速に把握できるような計画がなされているケースもあったが、し尿を広域処理するための情報活用、拠点指定などを計画しているケースは見られなかった。これらの仕組みによって、仮設トイレの設置等については情報集約・対応の迅速化が期待されるが、仮設トイレ等からのし尿の収集・運搬については、具体的な計画づくりが今後の課題になっていると考えられた。災害用トイレの備蓄・運用については、基本的に基礎自治体が備蓄し、不足分は広域自治体が補うという考え方が一般的であり、自治体間の差異は見受けられなかった。ただし、どのケースでも供与やあっせんの明確な基準は定められていなかった。

災害用トイレの設置基準については、どの基礎自治体も阪神・淡路大震災の記録や地域防災計画の被害想定を元に設置基準を設けていたが、被害が収まった後に回収したトイレを保管する場所の確保も困難になるのではないかとのコメ

ントもあったことから、初動時のみならず、収束期を見据えた計画が必要であると考えられた。なお、時間軸ごとに設置基準を設定していたのは一部の基礎自治体のみであり、実際には収集が困難となる可能性がある。し尿の問題は震災直後から生じる重要課題であるが、特に仮設トイレ設置後の収集・処理の計画が抜け落ちやすく、ボトルネックになる可能性が示唆された。し尿・汚泥の輸送対策については、広域自治体と各基礎自治体との間で協定が締結されており、さらに域内の関係団体・機関と基礎自治体又は広域自治体との間でも協定が締結されていた。具体的にし尿収集車両の台数や輸送回数を考慮して想定輸送量を算出しているケースもあったが、実際の輸送まで考慮してされていないケースや、そもそも輸送量を算定していないケースも見られ、緊急時にはし尿収集車が不足することが懸念された。

このように、多くの自治体で災害時のトイレ問題（仮設トイレ等の設置）については対策がなされているものの、し尿の収集・処理など設置後の運用については具体化されていないケースが散見されたことから、災害廃棄物対策指針で示されたし尿発生量（1.7L/人・日）の精査や必要となる収集運搬車両数等の算定方法の確立などが重要になると考えられた。

(2) 浄化槽の耐震性評価

浄化槽を剛体として2次元静的FEM解析により地震時土圧を算出した結果、浄化槽端部から側方境界までの距離Hの違いによる若干の差は見られたものの、地盤の堅さの違いによる差はほとんど見られなかった。本解析で得られた地震時増分土圧の値は、最大で27kN/m²であった。浄化槽は実際には剛性を有しており、これを考慮すれば土圧値は小さくなることが考えられ、浄化槽を剛体としたケースは大きめの土圧を評価するものと考えられる。2次元解析の結果からパラメータを絞り込み、構造物と地盤を一体としてモデル化した3次元FEMモデルを用い、地盤要素に慣性力を静的に作用させて地盤変位や地盤内応力を求める応答震度法により解析を行った。その結果、地盤剛性（地盤せん断波速度）の違いにより土圧値の差が生じ、地盤剛性が小さいほど土圧値が増加する傾向が見られた。また、地盤の固いVs150のケースで最大7.7kN/m²程度、軟らかいVs50のケースでも最大16kN/m²程度であり、2次元解析の結果よりもやや小さい土圧値を示した。また、浄化槽端部で土圧が大きくなる傾向が見られたが、これは、構造物の剛性が大きいために、端部において土圧反力に応力集中が生じるためと考えられる。浄化槽の剛性を考慮した場合、2次元解析と3次元解析を比較すれば、ほぼ同じか3次元解析がやや小さい土圧値を示した。また、地盤剛性（地盤せん断波速度）の違いにより土圧値の差が生じ、地盤剛性が小さいほど土圧値が増加する傾向がある。

地盤非線形及び震度の深度分布を考慮した静的FEM解析では、土圧の深度分布を算出できた。一次元地盤応答解析結果によれば、告示波（極めて稀に発生する地震動）を用いた場合で、地表面での震度は2次元及び3次元の解析で用いた一様震度よりも小さい結果となった。

さらに、地震動の増幅・減衰等を考慮するため、動的FEM解析を行った結果、地盤非線形と震度の深度分布を考慮した静的FEM解析の結果と比較すると、告示波（極めて稀に発生する地震動）に対して、動的FEMのほうがやや小さい土圧値となった。

今回の解析結果から、地震時の浄化槽への加重分布を概ね把握することができた。今後は、これらの数値から適切な評価試験、解析方法に繋げることが重要である。通常、浄化槽の強度試験では、浄化槽を水中に沈めることによる耐圧性評価が用いられる。地震によって増加する圧力を試験条件に反映することで、簡易に評価が可能となる可能性がある。

2.1.4 災害廃棄物処理に係るマネジメント手法・ツールの開発

(1) 目的と経緯

災害廃棄物処理を円滑に進めるためには、時々刻々と変化する災害廃棄物処理業務に対して必要な人員・予算・資機材・施設・情報を割り当てて対処する処理業務マネジメントが必要になる。また、災害時のマネジメントを円滑に行うためには、平時からの事前準備としての災害廃棄物対策を着実に進める対策マネジメントも必要になる。これまで、業務マネジメントについては、災害廃棄物処理業務の体系や中小規模自治体における実態を解明するとともに、業務マネジメントの重要な要素である発生量推計について現状と今後の展開を整理してきた。本研究では、平時に行う対策マネジメントツールの開発を進めた。

(2) 方法

対策マネジメントを実施するためには、災害廃棄物対策の実施を通して得べきアウトプットと、最終目標状態としてのアウトカムの想定が必要である。このために、まず、人口規模と災害廃棄物処理量の観点で偏らないように抽出した近年の災害廃棄物処理事例 8 件における災害廃棄物処理業務の実施実態を調査し、市町村にとって優先度の高い災害廃棄物処理業務を明らかにし、対策マネジメントの目標を設定した。さらに、目標の達成状況を評価し、対策マネジメントが実施できるような指標体系を論理整合的に設定した。そのうえで、災害廃棄物対策マネジメントの観点でこれら指標群に妥当性があるかを検証するため、1) 各アウトプット目標と指標の論理的なつながりを定性的に記述する、2) 指標群とアウトカム目標との内容的整合を分析する、3) 指標群により測りたい概念が測定できているか分析する、の 3 つの検討を行った。2) と 3) については、三重県、兵庫県、宮崎県の 3 県の市町村において、提案指標群を用いた試行的評価を依頼し（表 5-3）、評価のプロセスやアウトプットに関する認識をアンケート調査により把握し、統計分析を行った。

表 5-3 指標を用いた評価試行への協力状況

県	基礎自治体数	ツール試行件数	アンケート回答数	検討対象件数
三重県	29	17	19	16
兵庫県	41	22	27	22
宮崎県	26	18	19	16
合計	96	57	65	54

(3) 結果と考察

災害廃棄物処理事例の調査から、災害廃棄物の排出方法に係る広報、資金を得るための国庫補助申請関連業務と、各種事案処理（収集、解体撤去、保管・分別、処理処分）を実行する際に必要な庶務財務（発注、契約、支払に係る事務）業務は、基本的には被災市町村が対応している実態や、外部応援や民間委託による資源の手配、差配ができるような資源確保と全体管理（プロジェクト・マネジメント）に向けた事前準備が重要であることなどが示唆された。この点をふまえ、アウトカム目標を「発災時に初動対応と処理事業のマネジメントができること」、アウトプット目標を「1. 廃棄物処理システムへの被害を最小化する」「2. 市民の災害廃棄物対応力を高める」「3. 災害廃棄物処理に必要な資源を確保する」「4. 被災状況に応じて計画的に災害廃棄物に対応できる」「5. 脆弱性を克服できる環境をつくる」の 5 目標としたうえで、平時の対策システムと災害時の処理システムとの関係性を図 5-15 の通り整理した。

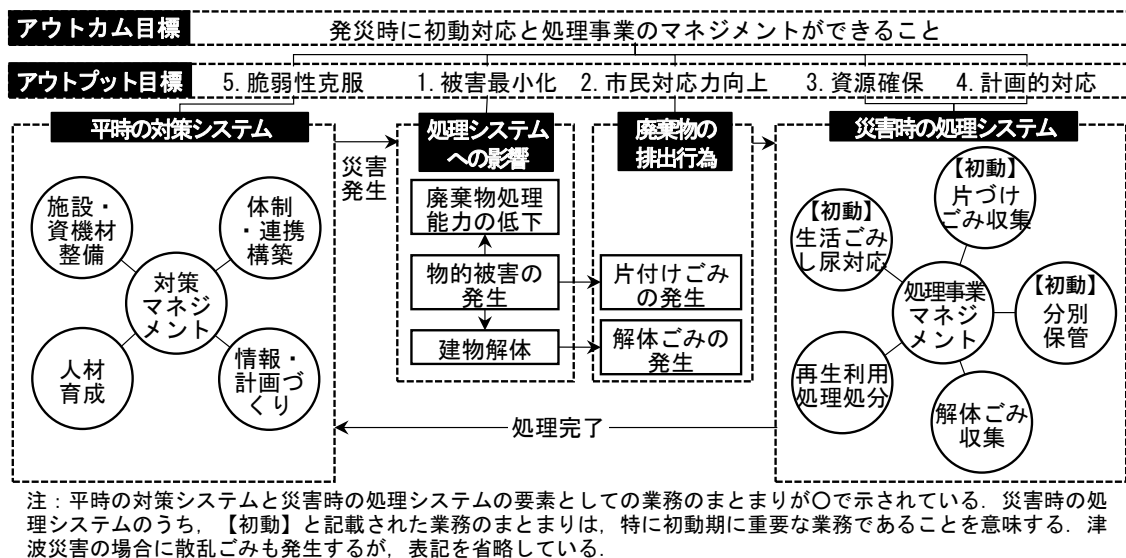


図 5-15 災害廃棄物対策マネジメントの枠組み【図の出典：多島・森嶋（2011）¹⁾】

この目標の達成状況を評価するための指標体系を構築した。具体的には、5 つのアウトプット目標の下に、13 の個別目標、29 の評価指標を設定した。指標は、生活ごみ・し尿への対応、片付けごみ収集、分別保管、処理処分、処理業

務のマネジメント、対策のマネジメントに関する内容であり、アウトカム目標である「発災時に初動対応と処理事業マネジメントができること」を評価する指標が重点的に設定されたことが確認された。また、本指標を用いた評価を試行した結果、災害廃棄物処理計画を持つグループ（n=36）の評価値の平均は2.55、持たないグループ（n=18）は2.09と両軍の間に統計的に有意な差が見られ（対応のない t 検定、有意水準 1%）、実際に初動対応と処理事業のマネジメントの能力が高いと想定される群が高い評価値が得られていたことから、実態を反映した評価が可能な指標体系となっていると示唆された。すなわち、内的整合性と外部基準（災害廃棄物処理計画の策定状況）との整合性が担保されていることから、一定の妥当性のある評価指標であると考えられた。

この指標体系を用い、オンラインで利用可能なマネジメントツールとして「災害廃棄物対策マネジメントツール：Sai-hai」を開発した。Sai-hai では、上述の評価指標を用いて災害廃棄物への対応力を自己評価し、アウトプット目標ごとに現状を理解することができる（図 5-16）。ユーザーごとに評価結果がデータベースに保存されるため、継続的に利用することで、組織の弱点に応じた災害廃棄物対策の計画、災害廃棄物対策を実施したことによる対応力の向上の評価、組織の現状に関する後任者への引継ぎが容易に実施でき、対策マネジメントを効果的・効率的に進めることが可能となる。また、評価を通じて明らかとなった組織の弱点に対応した災害廃棄物対策が計画できるよう、既往文献等から抽出した災害廃棄物対策事例を整理したデータベース（図 5-17）も備えており、対策レポートを出力することが可能である。

(2) 仮置場候補地リストで各候補地の特徴が整理され、優先順位が判断できるようになっていますか？

各仮置場候補地の特徴が体系的に把握されていて、発災後には被災状況を踏まえて迅速に適地を選定できるか、考えてください。また、情報が定期的に更新されているかも重要な観点です。

【評価の観点】

はい a) 各候補地の基本情報が整理されている（例：位置、土地管理者、面積、地形形状、接道の良さ、地面の状態（舗装済みか否か）、周辺の住家の有無、災害時の他の用途、使用可能期間の制限）

いいえ b) 候補地について現地確認が行われている

いいえ c) 各候補地でどのように災害廃棄物を配置するかのレイアウトが検討されている

はい d) 仮置場候補地リストが毎年確認・更新されている

【評定の考え方】

- 上記a)~d)に自身の状況があてはまるか確認し、その理由を「根拠」に書いておきましょう。

評価の参考情報

- 災害廃棄物対策指針（技術資料18-3：仮置場の確保と配置計画にあたっての留意事項）
- 災害廃棄物処理計画
- 地域防災計画

評価 3 [自動算出 3]

根拠 仮置場候補地のリストは保有しており、関係各課に毎年照会し、必要に応じて更新している。標準的なレイアウトはあるが、各候補地については想定されていない。

評価を中断する

図 5-16 Sai-hai の評価画面

選択	対策名	対応する目標	対策の種類	対策の主体	対象災害	実施時期	選択回数
<input type="checkbox"/>	【事例】1,000m ² より広い公有地から仮置場候補地を体系的に選ぶ	計 2-1. 仮置場の確保	情報	全市区町村	全災害	(未指定)	1
<input type="checkbox"/>	【事例】一部事務組合構成自治体同市で初期期における連携体制を検討する	計 2-2. 協力体制の確保 計 3-2. 計画やルール策定	庁内組織協定	全市区町村	全災害	(未指定)	1
<input type="checkbox"/>	【事例】し尿処理に関して平時・災害時に対応すべき事項と役割分担を確認する	計 3-2. 計画やルール策定	庁内組織	全市区町村	全災害	(未指定)	3
<input type="checkbox"/>	【事例】し尿発生量・処理量の推移の試算	計 2-2. 協力体制の確保	情報	全市区町村	全災害	(未指定)	0

図 5-17 Sai-hai の対策データベース

2.1.5 熱帯アジアにおける都市水害未然防止のための廃棄物適正管理に関する検討

(1) 目的と経緯

アジアの都市においては、自然災害や大規模疫病の流行など、突発的な廃棄物量の増大に伴って都市機能が著しく低下することが報告されている。本課題では、我が国の災害廃棄物ならびに腐敗性廃棄物管理の経験と技術・システム移

転の方法論の構築を目的とした検討を行った。アジア地域に対応した災害廃棄物管理システムを構築し、国内外における自然災害・家畜伝染病の大規模流行に起因する廃棄物の適正な管理方策を提示した。また、災害廃棄物管理に関する我が国の経験を、アジア地域で頻発する自然災害時における廃棄物の適正管理に生かすための現地適合理化に向けた情報提供を行った。さらに、アジア都市を対象として水害廃棄物の管理実態の把握や、排出量推計の精緻化により、廃棄物管理の水害に対する脆弱性を評価する手法の開発を進めた。

(2) 方法

水害が頻発するアジアの都市を対象として、排水機能の低下要因の解析と冠水・浸水に伴い発生する水害廃棄物の管理実態に関する現地調査を行った。排水路の閉塞について、マンホール等の路面排水口や水門における堆積物の組成や堆積速度に関する現地調査を実施した。堆積物の発生源である廃棄物投棄行動の解析と、廃棄物の適正収集による効果を検証するための数理モデルを構築し、排水機能の低下要因の解析と冠水・浸水被害の拡大に対する影響を評価した。

水害に対するアジア都市の廃棄物管理計画の脆弱性を評価する手法の開発を進めた。水害の発生回避・被害軽減を目的とした、廃棄物の投棄防止・適正回収の促進について、市民・自治体向けの教育・周知を支援するツールを開発した。現地自治体の実務担当者との意見交換やワークショップなどによる情報共有を通じて、水害廃棄物管理計画の立案に向けた指針を発信した。特に、堆積物の発生源である水路周辺の集落を対象とした調査を行い、廃棄物投棄行動の解析と、主体的な廃棄物収集の収集効率化に関する取り組みを進めた。

(3) 結果と考察

アジア地域に対応した災害廃棄物管理システムの構築については、風水害に対するアジア都市の廃棄物管理計画の脆弱性を評価する手法の開発を進めた。タイ・バンコクにおいて発行した水害廃棄物管理ガイドラインを用いて、水害時の廃棄物管理の効率化や事前準備の促進について、タイ国内での啓発や普及に用いられるよう自治体職員と共同での取り組みを進めた。水害時の廃棄物発生状況として、浸水や水流により廃棄物化した家具・家電や破壊された構造物由来の廃棄物と、浸水期間中の生活廃棄物や浸水の影響で収集が遅延した地域の生活廃棄物が共存していることが示された。すなわち、水害時の廃棄物の収集・運搬計画と浸水地域を想定した収集ルートや仮置き場の設置等の準備の必要性が示された。これらの結果を踏まえて、アジア太平洋地域に適用可能な汎用ガイドライン（図 5-18）を執筆し公開した。

水害が頻発するアジア都市における排水機能の低下要因の解明を目的として、水路への廃棄物投棄、マンホール等の路面排水口や水門における堆積物の組成や堆積速度に関する現地調査を実施した。また、水害の発生回避・被害軽減を目的とした、廃棄物の投棄防止・適正回収の促進について、実態把握のための調査を開始した。タイ・バンコクでは、閉塞物の主要組成として木材片が確認されたが、その主な発生源は水路周辺の不法占拠建築物からの流出であると考えられた。また、路上清掃・落葉に伴う自然木由来の植物葉・枝なども多数確認されたが、これは都市や時季による差異があることが示された。また家庭ごみ由来のプラスチック類も主要組成として確認された。その他の発生源として、建設解体廃棄物の投棄や不適正な放置による流出も要因として挙げられた。ベトナム・フエでも同様に、自然木由来の植物葉・枝と、生活者の投棄に起因するプラスチック類や生ごみが閉塞要因としてあげられた。いずれの都市においても、生活系廃棄物は収集作業者に手渡すか、収集用投棄エリアに運搬するというルールは定められているが、その他の行動として、収集サービスを見越して道路脇に放置する、水路に投棄する、裏庭等で焼却する等の行為が

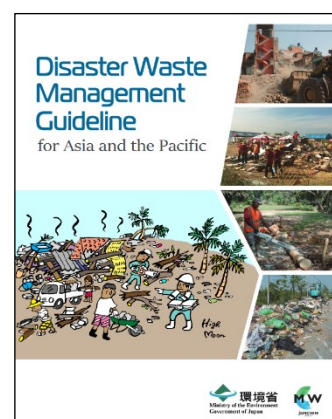


図 5-18 アジア太平洋災害廃棄物管理ガイドライン（表紙）<https://www.env.go.jp/press/files/jp/110165.pdf>



行われていることが明らかにされた。また、粗大ごみについては資源回収業者に販売するというルートがあるが、それが適正に扱われているかどうかの実態は行政では把握していないことが問題として挙げられた。

水路への廃棄物投棄に関する周辺住民の行動分析を行い、廃棄物投棄が水害発生に与える影響や、廃棄物の適正排出に関する周知が、廃棄物投棄の抑制に効果的であることが示唆された。水路脇の居住者のうち、実際に意図的かつ継続的に水路への廃棄物投棄を行っているのはごく少数の居住者であり、それらの環境影響や水害を引き起こす要因となっていることに関する知識の欠如が背景にあることが考えられた。生活ごみや粗大ごみの投棄防止に関する啓発動画（図 5-19）を作成し、コミュニティ内の周知と SNS 上での拡散を通じた住民意識の改善に取り組んだ。また、建設工事由来で発生する木材の水路投棄についても、同様の啓発動画を作成した。また、自治体内における廃棄物管理の実務担当者に対する能力開発ワークショップを開催し、生

図 5-19 水路へのごみ投棄防止に関する啓発動画

https://youtu.be/gw_xghsNU0



図 5-20 集落でのワークショップ

活ごみの適正収集やコミュニティとの協力に基づく水路内廃棄物の削減に向けた取り組みの強化を推進した。集落の住民の行動変容にあたっては、環境意識と行動実践の間に相関が見られる一方で、水路の実態に関するファクトに対しての受容性が欠けるなどの問題点があり、適正収集の推進にあたって行政との間の意思疎通を困難にしている一因であることが推測された。住民の行動変容及び定着に際しては、水路周辺の集落におけるワークショップ（図 5-20）や住民参加型の廃棄物管理の推進に向けた取り組みの実施効果の検証が不可欠である。科学的な情報の共有だけでなく、行政組織や都市の受益者との共感を醸成するプログラムの開発が求められた。

こうした廃棄物投棄行動の改善と、廃棄物の適正収集による効果を検証するための数理モデルを構築した。水路中で主要な閉塞物として確認された木材、ペットボトル、発泡スチロールについて水門での閉塞機構を明らかにし、流速、形状、密度等のパラメータが決定要因であることを明らかにし、これらを実験的に取得することで、水門の閉塞による排水路水位の上昇と氾濫水の発生・拡大を表現可能な数理モデルに発展させた（図 5-21）。都市内排水路閉塞の発生と成長のメカニズムとして、高密度のがれき類、木材等の水路混入と水路の流速が、閉塞に大きな影響を与えることを示した。これらを踏まえ、浸水被害軽減に向けた水路の適切な清掃頻度および底質除去の必要性について自治体への提言を行った（図 5-22）。

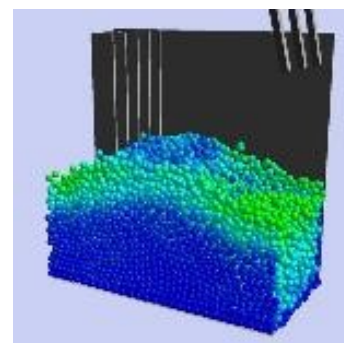


図 5-21 数理モデルで表現される水路閉塞の一例

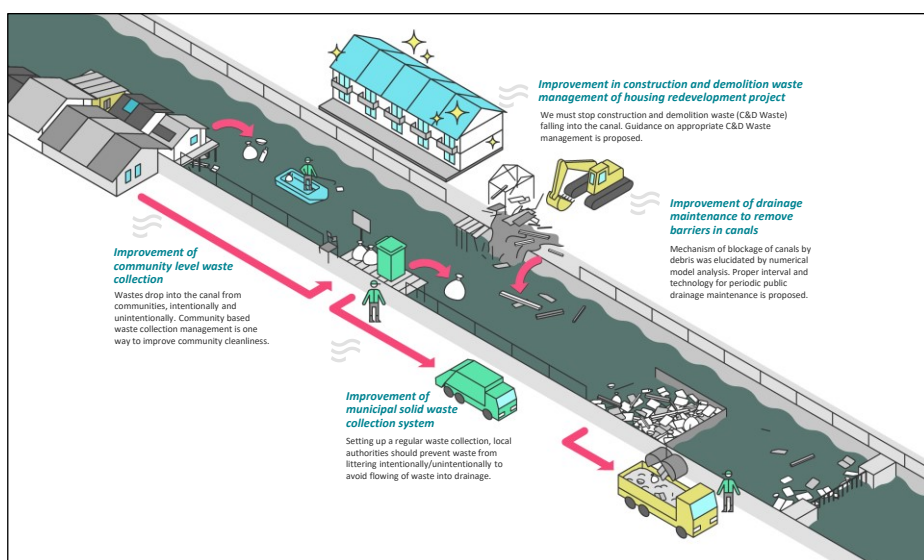


図 5-22 都市浸水水害を軽減するための適切な水路・廃棄物管理の提言

引用文献

- 1) 多島良、森嶋順子 (2021) 災害廃棄物対策のマネジメントに向けた基礎自治体向け評価ツールの開発. 土木学会論文集 G (環境システム研究論文集), 受理済み

2.2 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

2.2.1 災害時のリスク管理手法に関する研究

(1) 目的と経緯

災害時には、平時の想定とは異なる有害物質の放出、想定を上回る量での環境中へと放出される可能性があり、状況に応じた環境・健康のリスク管理が必要となる。このような状況に、適切かつ迅速に対応するためには、災害や事故の発生時に、放出される可能性のある物質の把握、一般環境中に放出された場合の環境・健康へのリスク要因の把握、およびこれらのリスク要因に対するリスク管理手法の整理をしておくことが重要である。本研究では、国内で流通している化学物質を中心とした緊急時における優先評価物質の選定、過去に発生した化学物質放出事故に関する情報の収集と放出事故のシナリオ整理、及びこれらのデータベース化を進めており、本節ではこれらの研究内容について説明する。

(2) 方法

緊急時における優先評価物質の選定では、既存の毒性判断値、及び国内における化学物質の存在量の2点に着目した。毒性判断値を影響に関する指標、存在量をばく露に関する指標と考え、存在量を毒性判断値で除した値をリスク指標と定義し、ここで定義した簡易的なリスク指標により物質の優先順位付けを行った。優先順位付けの対象は、国内における化学物質の存在量に関する情報が入手可能であった工業用途物質、農業用途物質（農薬）の2つのグループとした。工業用途の物質の存在量については、化審法対象物質の製造輸入数量情報、及びPRTR届出対象物質に関する一部自治体における取扱量情報を参照し、農薬についてはWebkis-Plusにて公開されている原体別出荷量を参照した。毒性値については、それぞれ、米国エネルギー省による防護措置規準（PAC）、一日摂取許容量（ADI）を参照した。これらの情報源から懸念物質をリストアップし、得られた情報に個別判断を加えることで、優先評価物質リストを作成した。

化学物質放出事故に関する情報の収集では、事故に関連した取扱物質や事故による生成物質、それらの環境中への放出状況、事故後の推移などを調査するため、当該事業者へアンケート調査票を配布し、webアンケートを実施、その回

答結果の解析を行った。なお、事例の選定においては、化学工業を営む事業所において発生した事例や、近年発生した事例を中心に200件を選定した。

事故に伴う事業所等からの化学物質の放出による一般環境のリスクを考えるためには、化学物質の放出後、曝露に至るまでの環境中の物質挙動を整理しておくことが有用と考えられる。そのため、起こりうる様々なケースを網羅することを念頭に、事故事例に関するアンケート回答等を参考に、環境中の物質挙動と想定される対応を整理した。

(3) 結果と考察

工業用途物質については、製造輸入数量または取扱量のある物質から約300物質、製造輸入数量等が非公表の物質から約230物質の優先評価物質リストを作成し、それぞれリスク指標と毒性判断値により優先順位付けを行った。リスク指標の上位にきた物質グループとして、無機物としては、アンモニアや硫黄化合物、シアナミド、三塩化シラン、オキシ塩化リン等であった。有機物としては、製造輸入数量も大きく、毒性も比較的強い物質として、イソシアネート類（ポリメチレンポリフェニルポリイソシアネート、3-イソシアナトメチル-3,5,5-トリメチルシクロヘキシルイソシアネート、ジシクロヘキシルメタンジイソシアネート）、製造量が強く効いているものとして、アルコール類（ジヒドロキシベンゼン、ブタンジオール、ジエチレングリコール）やパラホルムアルデヒド、毒性が比較的強く効いているものとして、硫黄を含む脂肪族化合物（二硫化アルキル、メタンスルホニルクロリド、 β -メルカプトプロピオン酸）や、塩素を含む芳香族化合物（フェニルクロルホーマート、キシリレンジクロライド）、アミン類（N,N,N-トリ-アルキルアミン、モノアルキルアミン）等であった。製造量不明物質のうち、毒性値の高い物質は、無機化合物としては、アルシン、フッ化カルボニル、クロルスルホン酸、三酸化ヒ素等であり、有機化合物としては、イソシアネート類（フェニルイソシアネート、シクロヘキシルイソシアネート、ジイソシアナトトルエン、2-イソシアナトエチル=メタクリラート）やニトリル類（マロンニトリル、メタクリロニトリル、アセトアルデヒドシアンヒドリン）、その他複数のハロゲン化脂肪族化合物が挙げられた。

農薬については251物質についてリスク指標を算出した。上位20物質の農薬の分類としては、殺虫剤に分類されるものが10物質と最も多く、うち有機リン系殺虫剤が6物質であった。殺虫剤以外の農薬として、除草剤が7種、殺菌剤が3種であった。

化学物質放出事故に関する情報の収集では、63件のアンケート回答が得られた。事故の分類としては、火災・爆発を伴うものが36件、流出・漏洩に該当するものが27件であった。物質の放出時間については、1日以上事例は3件のみで、多くは1日以内であり、1日以内の事例の約4割（29件）は、放出時間が10分以内であった。事故に係る取扱物質の名称については、59件の事例（91物質）で回答があり、事故による生成物質の名称は、推定によるものも含めて12件の事例（15物質）で回答が得られた。取扱・生成物質のうち、90物質に関して放出先に関する回答があり、57物質は敷地内に留まったとの回答であった。敷地外の放出先に関しては、大気が20物質、水域が9物質、敷地外への飛散（土壌等）は8物質との回答であった。放出量に関しては、32物質について回答があり、100kg～1tの放出が最も多く（12物質）、次に多いのは1kg未満（7物質）で、1t以上の放出も3物質で回答があった。環境中の濃度測定の実施内容については、13件の事例で回答が得られた。なお、濃度測定の方法は2種類に大別できると考えられ、取扱物質等に関して日常的に測定している方法により分析を実施する場合と、環境基準の設定項目に対し分析を実施する場合が見られた。後者は3件の事例が該当し、いずれも火災事故におけるもので、火災事故では、放出物質の特定が困難であることから、環境基準の設定物質に対し、網羅的な分析が実施されたものと考えられた。

放出事故のシナリオ整理では、図5-23に示すように事故発生後の環境中の物質挙動と想定対応を整理した。起こり得る状況に応じて様々な対応が想定されるが、ここでは、これらの対応を「把握」と「低減」の2つに大別し、さらに、それぞれの対応について、「媒体」に対して行うものと「媒体間移動」に対して行うものに別けて整理した。曝露に至るまでの放出シナリオは、放出形態や事業所の立地状況により異なり、対応も放出形態や対象物質により異なるものの、このように放出後に起こり得るシナリオと、把握と低減に関する対応を網羅的に整理しておくことで、過去事例において実施された（されなかった）措置やその理由を検討することが可能になると考えられた。なお、過去事例において取

りうる措置が実施されない場合については、対応に人を割けない、測定の義務が無い、物資が無いなど様々な理由が考えられたが、事故の規模や状況に応じた環境測定等の対応主体の整理により、今後の発災時における適切な対応に繋げることができると考えられた。

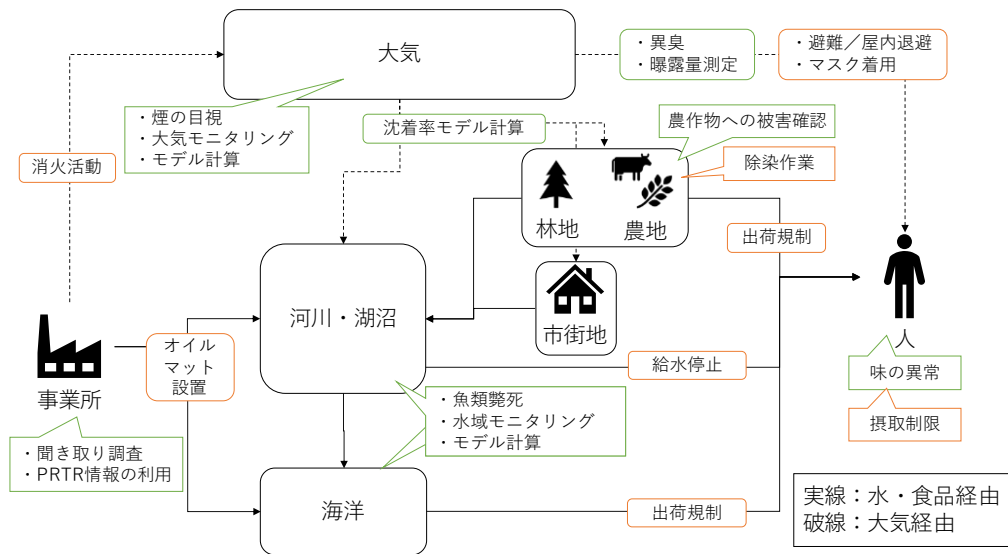


図 5-23 一般環境への放出後の放出シナリオおよび対応の整理（緑：把握、橙：低減）

2.2.2 災害時の環境調査のための分析・調査手法に関する研究

2.2.2.1 災害時の環境調査のための網羅分析手法の研究

(1) 目的と経緯

災害・事故に伴う化学物質の流出や拡散事例に環境保全の観点から対処する体系的な研究領域は確立されていない。何が起きたかを迅速に把握し、リスク懸念を具体的に明らかにすることが重要であり、緊急時に測定対象とすべき物質とその迅速な分析手法の開発が求められる。そこで本課題では、緊急時環境調査において、中揮発性物質群を網羅的に把握し得るスクリーニング段階及び精密分析段階の分析技術の確立を目的とした。

(2) 方法

本課題では、中揮発性物質の迅速スクリーニング法として、GCMS を用いる自動同定定量システム (AIQS) について主に検討した。AIQS は、装置の状態を常に一定に保つことにより、データベース化した質量スペクトル、保持時間及び検量線から同定定量をソフトウェア上で簡易に行う方法であり、緊急時に有用と期待されている。この方法には異なる方式のソフト・データベースが存在しており、本課題ではこの共通化と汎用化を中心に緊急時のスクリーニングに関し、(1) 災害時用自動同定定量システム (AIQS) への物質データ採取及び収載、(2) AIQS の汎用化に向けた検討、(3) 高精度同定法の検討、(4) 緊急時環境調査における技術的支援及び体制の構築、及び (5) 事故・災害時における暫定的出動と AIQS の適用、の 5 項目を実施した。

(3) 結果と考察

(1) 災害時用自動同定定量システム (AIQS) への物質データ採取および収載

課題 2.2.1 と連携し、生産輸入量、毒性情報等を考慮し、約 3,000 物質を事故・災害時における懸念物質としてリストアップした。これをもとに、揮発性等の物性情報を考慮し GC/MS での測定可能性のあるものを選び出した。これらに加え、PRTR 物質や、環境汚染・有害性が懸念される入手困難物質なども選定に加え、本課題の測定対象候補物質とし

て選定した。このうち約 300 物質を測定に供し、相対保持時間、検出強度及び検量線情報についてデータを採取、うち同定定量可能な 147 物質を AIQS データベースに追加収録した。

(2) AIQS の汎用化に向けた検討

1) AIQS 測定条件の共通化に関する検討

装置非依存型 AIQS (MI-AIQS) を作成するため、測定条件の共通化を検討した。キャリアガスの制御方式は、各社の装置で共通に利用可能な流量一定方式とし、相対保持時間制を採用することとした。両者にはわずかに違いがあり、その誤差を検証した結果、実用上はほとんど問題なく共用できると判断した。測定ファイルの互換性については、クロマトグラムの共通フォーマットである AIA 形式に変換することで互換性を担保することとした。続いて質量分析計のチューニング法について検討した。AIQS では質量分析計を常に一定の質量スペクトルを生じる状態にチューニングする必要があったが、実際に測定した DFTPP のスペクトルから、定量結果を補正するための換算式を導出した。これにより、AIQS による定量の汎用化が可能となった。

2) MI-AIQS 及びブラウザ版 AIQS の作成

AIQS については、そのソフトやデータベースを最新の状態に保つため、インターネット上で作動するウェブ版 AIQS の開発を目標としている。これまでに、その第一段階である MI-AIQS を開発し、続いてブラウザ版の MI-AIQS を開発した。MI-AIQS では、既存 AIQS と同様に保持指標を算出するための炭素数 9~33 のアルカン混合溶液の測定データ、性能評価標準混合溶液の測定データを読み込ませてまず装置が規定された状態にあるかの判定を行う。合格判定が出た場合には規定の内標準を添加した試料溶液を測定し、同定定量を行う手順である。続いてこれをブラウザ上で作動させるブラウザ版 AIQS を開発した (図 5-24)。ブラウザ版では、災害時においてサー



図 5-24 ブラウザ版 MI-AIQS

バーや通信回線の負荷を軽減する必要があること、AIQS を保有せず、その操作に不慣れなユーザーが使用できる可能性があること等を考慮に入れ、重要な機能に絞り込み、また操作手順が判りやすいような工夫を施した。これらのソフトウェアは地方環境研究所 41 機関に配布し、操作法の研修を実施するとともに、不具合の抽出、改善提案等を取り纏め、順次バージョンアップを進めた。

(3) 高精度同定法の検討

AIQS は四重極質量分析計を用いたスキャン分析による質量スペクトルで物質を同定し、マスキングで定量を行うシステムである。ピーク分離が不十分なスキャン分析では、誤同定が生じる可能性が否定できないことから、その正確性を確認した。試料には、2019 年度に発生した雑品スクラップ集積場火災における消火排水を試料とし、AIQS による同定結果を GC-QToFMS を用いた精密質量で検証した。その結果、汚染の激しい消火排水においては、AIQS で高い確度として同定された物質であっても、質量誤差が 50 ppm を上回る物質が見られ、精密質量測定などによる確定試験を行うことが望ましいことを示した。

(4) 緊急時環境調査における技術的支援および体制の構築

緊急時の環境調査における技術的支援として、災害時環境調査手法研修会として揮発性有機溶媒（VOC）版 AIQS-DB の使用法（共催：名古屋市環境調査センター）、水濁事故を想定した迅速前処理カートリッジによる有機汚染分析法（共催：広島県保健環境センター）及び土壌汚染調査のための前処理法（共催：福岡県保健環境研究所）に関する研修を開催し、地環研等から延べ79機関86名の参加を得た。また、開発したMI-AIQSの使用法に関して地方環境研究所を対象に研修会を2回開催し（図5-25）、20機関から参加を得た。さらに環境省環境調査研修所においてもAIQS使用法に関する研修を実施し、その支援を行った。その他、発災時に現地を支援し得るポータルサイトの構築を目指し、これに必要な内容について、アンケート・ヒアリングによるニーズ整理を行った。



図5-25 MI-AIQS研修会テキスト

(5) 事故・災害時における暫定的出動とAIQSの適用

2016年4月に発生した熊本地震における河川水及び地下水汚染調査、2019年の常総市雑品スクラップ火災（図5-26）、同年の佐賀県における油流出事故（図5-27）の際に現地調査に赴き、環境モニタリングを実施した。熊本地震では、河川水や地下水の発災直後及び追跡調査を行い、受容体結合活性やエンドトキシン濃度等が地震直後に比べて沈静化していくことを確認した。常総市雑品スクラップ



図5-26 常総市火災現場



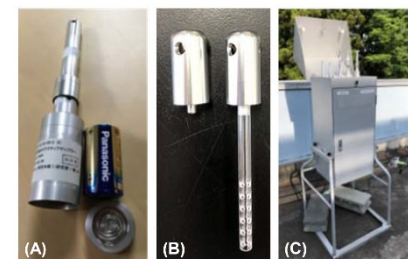
図5-27 佐賀油流出現場

火災では、現場付近の消化排水中に多種の化学物質が存在することを認めたが、周辺の河川水においては火災の影響による汚染は検出されなかった。佐賀の油流出事故では、工場から流出した油のAIQS測定から鉍物油のプロファイルが観測されたが、有害物質は検出されなかった。また重油・灯油のマーカとなるクマリンはAIQS-GCに収載されていないため、標準物質を用いて遡及分析を行ったところ、不検出であることを確認した。

2.2.2.2 災害時の環境調査手法に関する研究

(1) 目的と経緯

災害・事故で発生した火災や化学物質の漏洩による周辺環境の汚染の程度と範囲の把握、その後の環境回復の状況を中長期にわたって監視することは、住民の安全で安心な生活を保証するためにも不可欠である。しかしながら、半揮発性で残留性もある化学物質の測定において、大気の捕集に一般的に用いられるハイボリウムエアサンプラー（HV）などのアクティブエアサンプラーは、大型ゆえ設置場所や外部電源の確保が問題となるうえに台数を確保することも困難である。一方で、個人暴露計測や長期観測に用いられるパッシブエアサンプラー（PAS）は、接触した空気量（通気量）を知ることができず、大気中濃度換算や定量的な議論が難しいといった問題がある。そこで本テーマでは、災害・事故後の残留物質の中長期的な監視や大気経路での曝露を考慮した効率的・網羅的・低コスト、かつ面的な展開も可能とする大気中化学物質のサンプリング法を開発することを目的として、簡易なファンにより通気する構造のセミアクティブエアサンプラー（SAAS）を用いたサンプリング手法の開発を行った。ここでは、これまで開発してきたSAASを用いて採取した大気試料の精密質量網羅分析データと2つのソフトウェア「分子組成式に相当する同位体精密マスペクトルの抽出を行うComEX」と「塩素、



(A) セミアクティブエアサンプラー (B) PDMSをコーティングした石英捕集管 (C) サンプリング風景

図5-28 SAASの概要

臭素などの質量欠損（整数質量と精密質量の差）を利用したマススペクトル抽出が可能な「MDF」を活用し、微量有機塩素系化合物のデータ抽出についてその結果を報告する。

(2) 方法

SAASには、内部に小型のファンが付いており、平均流速 0.486 L/min にてサンプリングが可能である。試料の測定は、迅速かつ高感度化が期待できる加熱脱着法による全量導入を想定し、SAASの捕集材としては、水分の影響を受けにくく、加熱脱着導入による耐久性や使用実績があるポリジメチルシロキサン（PDMS）を評価した。捕集剤として、表面にPDMSをコーティングしたSAAS用の石英捕集管（内径 4 mm、外径 6 mm、長さ 60 mm、拡散捕集面積 880 mm²）を独自に設計した他、市販の攪拌子（膜厚 1 mm、長さ 20 mm、液相量 126 μL）も検討した。また捕集効率の比較のため、従来のミニポンプ（0.1 L/min）と Tenax TA 樹脂を用いたサンプリングも実施した。サンプリングは、研究所の屋上で 2 週間行い、サンプリング後の試料は、前処理せず加熱脱着装置を用いて全量導入を行った。

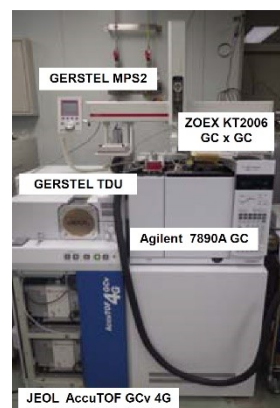


図 5-29 熱脱着 GCxGC-HRToFMS

(3) 結果と考察

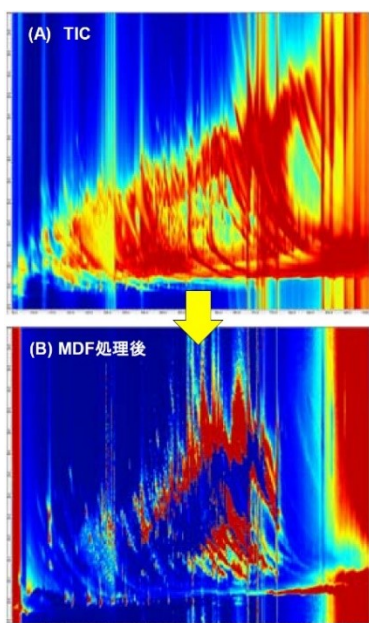


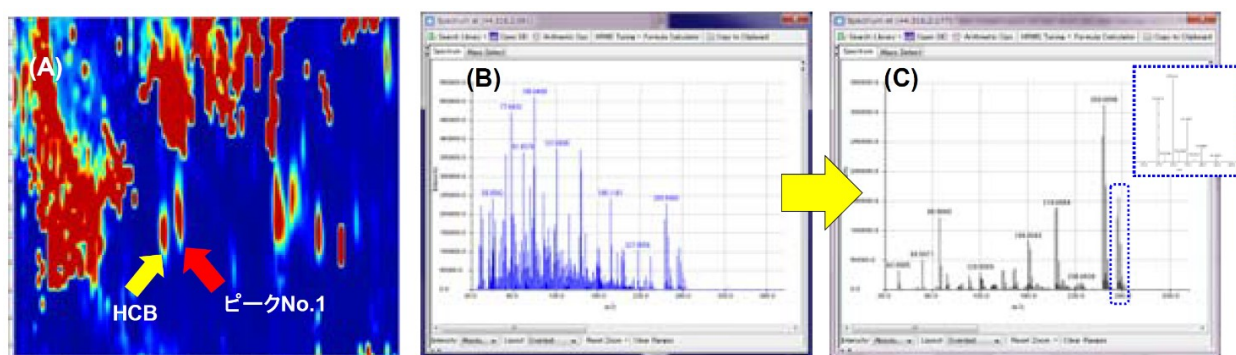
図 5-30 捕集した大気試料の 2D map

GC×GC - HRToFMS により、様々な捕集剤を用いてサンプリングを行った試料を測定して比較を行った結果、最も広範囲にわたって化合物が溶出していた Tenax TA のデータを用いて MDF の評価を行った。図 5-30 に、トータルイオンクロマトグラム（TIC）と MDF を 0.2 と設定して処理を行ったデータを示す（赤：強度が高い、青：強度が低い）。TIC 上では、膨大なマトリックスにより個々のピークを確認することは難しかったが、MDF を用いて設定範囲外のマススペクトルが除去されたことにより、マトリックスが減り、その中に HCB を含む複数のピークが確認できた（図 5-31 (A)）。HCB の隣に検出されたピークに対し、まずは TIC 上でマススペクトルを採取し（図 5-31 (B)）、ライブラリーサーチを行ったところ、ヒット率が 700 未満であり同定が難しかったが、MDF 処理後のデータ上でマススペクトルを採取し（図 5-31 (C)）、ライブラリーサーチを行ったところ、ヒット率が 891 と大幅に向上し、ジメトキシテトラクロロベンゼン（C₈H₆Cl₄O₂）と推測された。分子イオンと想定される m/z 273.9128 についてマスマエラーを確認したところ、2.04 ppm と良好であった。さらに分子イオンの同位体パターンを理論パターンと比較したところ、良好な一致が確認できた。よって、MDF を用いて精密質量網

羅分析データを処理し、ノンターゲット解析を行うことにより、塩素や臭素を

含む化合物を効率よく見つけ出すことが可能であることが示唆された。次に、ComEX によるターゲット化合物の抽出効率を評価するため、まず複数の有機ハロゲン化合物を含む混合標準溶液（ES5521 (CIL)、0.5-100 pg/μL）を用いて解析を行った。具体的には、ComEX を用いて 5 塩素化ビフェニル（C₁₂H₅Cl₅）を抽出したデータの 2D map と、5 塩素化ビフェニルの分子イオン（m/z 323.8834）を中心に ±0.05 で描いたマスキロマトグラムを比較したところ、5 pg/μL 以上であれば、同位体パターンのチェックを行っても抽出ができたが、0.5、1 pg/μL では、TIC 上ではピークが検出できていたものの、同位体パターンが崩れており、ComEX 処理後のデータではピークが消えていた。よって、5 pg/μL 未満が予想される試料については、選択性は落ちるものの、同位体パターンのチェックを OFF にすることが推奨された。次に、SAAS (Twister) で捕集した大気の 2D map (TIC) と、ComEX で 4 塩素化ビフェニルを抽出したデータの 2D map、ComEX 処理後のマススペクトルを図 5-32 に示す。本システムでは、試料の全量導入が可能であり、本 1 データ当たり

に想定される 4 塩素化ビフェニルの量は 5 pg 以上だった。そこで同位体パターンのチェックを ON にして ComEX 処理



(A) 前図(B)の一部を拡大した2D map、(B) TIC上でのピークNo.1のマススペクトル、(C) MDF処理後のデータ上でのピークNo.1のマススペクトル

図 5-31 MDF 処理によるマススペクトルの変化

を行った結果、TIC 上では、炭化水素系のマトリックスが山のように溶出していたが、ComEX 処理後は、高選択的に 4 塩素化ビフェニルのみを抽出することが可能であった。よって、ComEX を用いることにより、精密質量網羅分析データから、ターゲット化合物を高選択的に検出できることが明らかとなった。

セミアクティブエアサンプラーと網羅分析手法による災害・事故発生時に環境中に残留する化学物質のモニタリング手法開発において、精密質量網羅分析データから効率よく化合物を抽出する方法について、独自に開発した2つのソフトウェア MDF（塩素や臭素を含まない化合物のマススペクトルを除去することが可能）と ComEX（化合物の組成式を入力すると、相当する同位体精密マススペクトルの抽出を行う）を用いて検討を行った。その結果、MDF は、複雑なマトリックスを持つ網羅分析データから有機ハロゲン化合物を効率よく探し出すための主に定性解析に有用である可能性が示唆された。一方、ComEX は非常に広範囲の精密質量情報を持つ網羅分析データから、PCB など主に分子イオンが検出される化合物について、高選択的に抽出する、すなわちターゲット化合物の定量解析に有用であることがわかった。なお、ここで使用したソフトウェアは、国立環境研究所のホームページ上から誰でも無料でダウンロードすることが可能となっている。

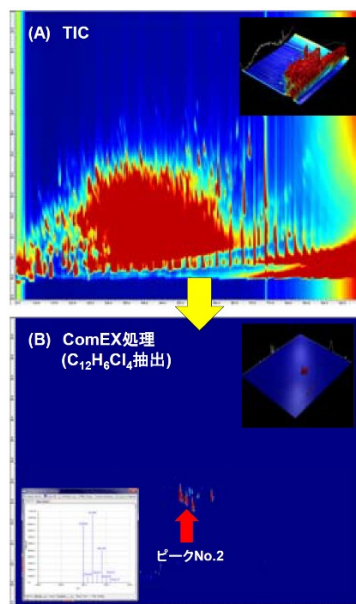


図 5-32 SAAS で採取した大気試料の 2D map と 3D view

2.2.3 災害時の陸域での環境調査と曝露・疫学に関する研究

2.2.3.1 2016 年熊本地震による地下水、環境水質汚染に関する研究

(1) 目的と経緯

東日本大震災や 2016 年熊本地震後には、地下水の流れが変化したことによる井戸枯れや湧水量の減少、水の濁り、津波による塩水化が見られた。特に熊本県熊本市では、地下水が貴重な水資源となっており、全ての飲用水を地下水に依存している。しかしながら、2016 年 4 月に段階的に発生した地震の影響で下水管が破損し、汚水による地下水汚染の可能性が懸念された。本研究では陸域での環境調査や曝露調査のケーススタディとして、熊本市において地下水と河川水を経時的に採水し、バイオアッセイ等様々な水質の季節変動を調べ、下水マーカである医薬品類を用いて地下水への下水の寄与を調べた。これにより、地下水における下水以外の汚染源のバイオアッセイへの寄与や季節変動を調べ、熊本市の地下水のバイオアッセイ結果の変動要因を推定した。

本稿では検出頻度の最も大きかった CAR 活性とエンドトキシンに絞って報告する。CAR 活性はノニルフェノールといった内分泌かく乱物質等、薬物代謝系に関連する様々な物質が応答を示す。エンドトキシンはグラム陰性菌の細胞壁に由来し細胞分裂や死滅時に水中へ放出されるもので、吸引すると発熱、下痢、呼吸器障害などを引き起こす。

(2) 方法

国立環境研究所と熊本県立大学の共同で、2016年5月、8月、11月、2017年2月、5月、8月、11月に水位観測井戸や民間の井戸など計19地点の地下水、2017年5月～12月の毎月に市内を流れる主要河川である白川の3地点と湧水2地点、2017年10月に下水処理場流入水（1時間ごとに24時間採水し、12時間ごとにコンポジット）を採取した。国立環境研究所にて既報に従い酵母アッセイ¹⁾とエンドトキシン濃度²⁾を測定した。医薬品類は、熊本県立大学で固相抽出（Oasis HLB, Waters）後、HPLC（Ultimate 3000, ThermoFisher Scientific, MA）-MS/MS（TSQ Quantum Access MAX, ThermoFisher Scientific, MA）にて測定した。

(3) 結果と考察

2016年5月（地震直後）の地下水中のCAR活性やエンドトキシンは概して高く、時間とともに減少傾向にあった（図5-33）。CAR活性は地震後半年から1年程度で一定濃度に収束し、エンドトキシンは地震後半年程度で一定濃度に収束していたが、減少傾向は単調ではなく、地震から10ヶ月後の2017年2月にCAR活性が最大となる地点が存在した。全国の河川水中濃度（国環研内部データ）と比べ、地下水中のCAR活性の最大値は同程度、エンドトキシン濃度は1オーダー程度低かった。データは示していないが、河川水中のCAR活性は一部の試料でしか検出されず、季節変動の把握は不可能であった。河川水中のエンドトキシン濃度はやや変動があるものの、季節的な変動は特に見られなかった。

バイオアッセイと医薬品類の濃度比を用いた起源解析も行った。医薬品のカルバマゼピン(CBZ)は地下水中で分解しにくい下水マーカー³⁾であり、地下水中の半減期が5～10年程度と長い⁴⁾ため、CBZを分母にしてバイオアッセイ結果の比をとると、下水の寄与を推定することができる。流入下水2試料では、CAR/CBZが16及び24、エンドトキシン/CBZが115及び166であった。熊本市の地下水中の同比率の時間経過を図5-34に示す。CAR/CBZは、地震直後に流入下水中の比を大きく超える地点が大部分であった。これは、地震直後は通常の下水とは異なるCAR活性物質が存在したことを示唆する。つまり、地震直後は下水とは異なる汚染源・汚染経路が存在したか、下水の組成が通常と異なっていた可能性がある。また、2地点を除いてCAR/CBZが2016年11月以降は流入下水と同オーダーまで低下し、以降はほぼ一定であったことから、汚染水塊が地下でとどまっている（この場合、CAR/CBZはCARの減衰により低下し続けるはずである）のではなく、地下水が流れている上で下水による汚染が現在も起こっていると考えられる。

エンドトキシン/CBZは一部の地点で流入下水と同オーダーである一方、大部分の地点では流入下水より1オーダー以上低かった。前者の地点では、下水由来の有機物などを起源としてエンドトキシン産生微生物が増加している可能性がある。後者の地点では、下水の混入等に由来するエンドトキシンが地中ですみやかに減衰したと考えられた。

さらに、汚染された地下水や環境水のばく露シナリオとエンドトキシン曝露について検討した。エンドトキシンは吸入曝露が問題となるため、高圧洗浄や洗車時などの細かい水滴の吸引について、水中のエンドトキシン濃度とエアロゾル吸引量からモンテカルロ法を用いて曝露量を推計した。発熱に関する無影響量を超える確率は河川水を用いた場合に1.2%、地下水を用いた場合に0.01%となり、汚染された河川水を使用する場合はマスクを適切に着用し、長時間の作業は避けるのが望ましいと考えられた。

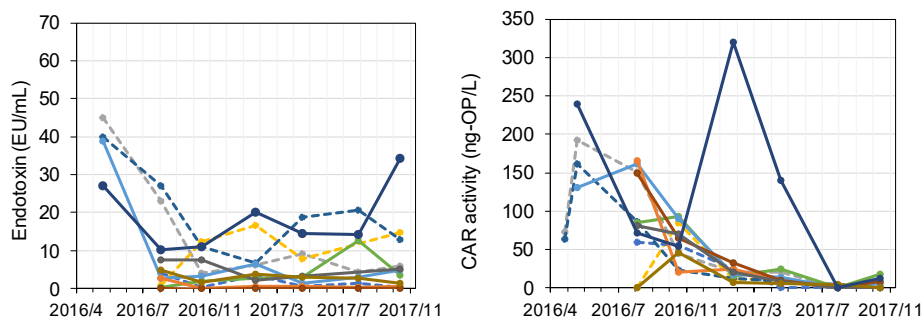


図5-33 水位観測井戸における左) CAR活性及び右) エンドトキシン濃度の時間変化

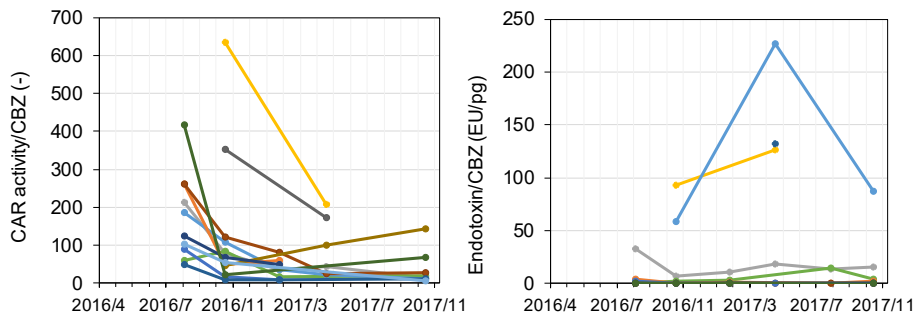


図 5-34 熊本市地下水における左) CAR 活性/CBZ 濃度比及び右) エンドトキシン濃度/CBZ 濃度比の時間変化

2.2.3.2 災害疫学に関するツールの整備

(1) 目的と経緯

災害時には、化学物質が放出・生成することがあり、被災者や住民に加え、災害時に対応する人（First Responder：医療関係者、消防士、警察、行政職員、ボランティアなど）たちの化学物質等のばく露を評価すること、健康を守ることが必要である。我が国においては、災害時の救助活動に対しては、災害急性期に活動できる機動性を持ったトレーニングを受けた医療チーム（DMAT）などがある一方、災害対応する人や住民の中長期における化学物質のばく露や健康影響を管理する仕組みは整備されていない。米国では、国立衛生研究所（NIH）が Disaster Research Response（DR2）program を立ち上げ、災害時のばく露評価や疫学調査のツール（生体試料採取、データベース、質問票など）を整備している⁵⁾。また、過去の災害事例や今後起こりうる災害シナリオを基に、First Responder 向けの机上訓練やシミュレーション、新しいツールの情報共有などを主導している。我が国でも、環境疫学体制やツールを整備する第一歩として、DR2プログラムのツールデータベースに掲載されているツールのうち、日本に適用可能ないくつかのツールについて日本語版作成を検討した。

実施内容

2020年10月時点で、DR2のツールデータベースには約540件のツール情報が収集されている。全ツールについて、名称、概要、キーワードの和訳に加え、日本語版の可能性を検討するため、日本語版の有無、著作権、内容の客観性などを整理した。そのうち、災害対応者の研究登録を行う Rapid Acquisition of Pre- and Post- Incident Disaster Data（RAPIDD）Studyの調査票の日本語版を可搬型のデバイスで入力可能なアプリを開発した。さらに、化学物質の急性影響に関わるインタビューに利用可能な調査票（Assessment of Chemical Exposures ToolKit）⁶⁾、浸水被害後に問題となる建物内のダンプネスやカビ発生による呼吸器への影響に関するガイドラインやチェックリスト（NIOSH Alert）⁷⁾の日本語版を作成した。いずれも、現時点で未公表であるが、今後日本の行政や災害対応者が使用できるように整備する予定である。

2.2.4 災害時の海域での環境調査と影響に関する研究

2.2.4.1 三陸沿岸内湾の底質の石油・炭化水素汚染

(1) 目的と経緯

東日本大震災発生時に津波による甚大な被害を受けた岩手県、宮城県、福島県沿岸部では、船舶燃料油タンクの損壊、石油コンビナートの火災、火力発電所の重油タンクの破損等に起因する油流出が生じ、気仙沼湾では流出した燃料油が湾上で炎上した。私たちは2012年より大船渡湾と気仙沼湾、2014年より志津川湾内における底質中の多環芳香族炭化水素（PAH）のモニタリング調査を行ってきたが、ここでは震災直後から2018年までの8年間に渡る底質中のPAHの時空間分布の変化と、気仙沼湾における柱状採泥試料内のPAHと放射性セシウム¹³⁷Csの鉛直分布について述べる。

(2) 方法

大船渡湾内 6 地点、気仙沼湾内 4 地点、志津川湾内 3 地点において、船上からエクスマンバージ採泥器、あるいは柱状採泥器を用いて海底堆積物を採取した。PAH は牧 (2015) ⁸⁾ に従って抽出・前処理を行い、質量分析器付きガスクロマトグラフィー (GC-MS) により定性・定量を行った。分析対象物として、米国環境保護庁 (USEPA) 優先 16 種の PAH の他にベンゾ (e) ピレン、石油由来の PAH としてジベンゾチオフェンとナフタレン、フルオレン、フェナンスレンのアルキル基置換体も併せて測定した。¹³⁷Cs はゲルマニウム検出器により測定した。

(3) 結果と考察

調査開始時の各 PAH の合計濃度は、大船渡湾 (2012 年時) で 6,120~62,960 ng/g 乾泥、気仙沼湾 (2011 年時) で 17,990~262,100 ng/g 乾泥、志津川湾 (2014 年時) で 6,260~101,500 ng/g 乾泥であったのが、2018 年時点では大船渡湾で 330~4,670 ng/g 乾泥、気仙沼湾で 650~20,900 ng/g 乾泥、志津川湾で 140~1,970 ng/g 乾泥と、各湾において年を経るにつれて確実に減少していき、震災後最大濃度の 2~6%程度まで濃度が低下していた (図 5-35 左)。大船渡湾と気仙沼湾では、津波により倒壊・流出した石油タンクがあった湾奥部よりも、湾口部で濃度の高い傾向が見られた。気仙沼湾では港付近と大島北部で石油由来のアルキル基付 PAH の割合が高く、大島東側から湾口部にかけては燃焼由来と思われるアルキル基を持たない USEPA 16 PAH の割合が高かった。2012 年に気仙沼湾で採取した柱状採泥試料中の PAH と ¹³⁷Cs の鉛直分布を検討したところ (図 5-35 右)、PAH よりも ¹³⁷Cs のピークが底泥中の浅い箇所に見られた。津波襲来直後にタンクから流出した油や海面火災により生成した PAH は、巻き上げられた底泥と共に比較的短時間で海底に沈降堆積したと推定された。一方、¹³⁷Cs は震災発生後に数日経って福島第一原発の事故が発生し、大気経路で気仙沼湾周辺流域に降下し、降雨時に土砂が湾内に流入して海底に沈降するという一連の過程を経たために、底泥内の浅い層にピークが形成されたものと推測された。

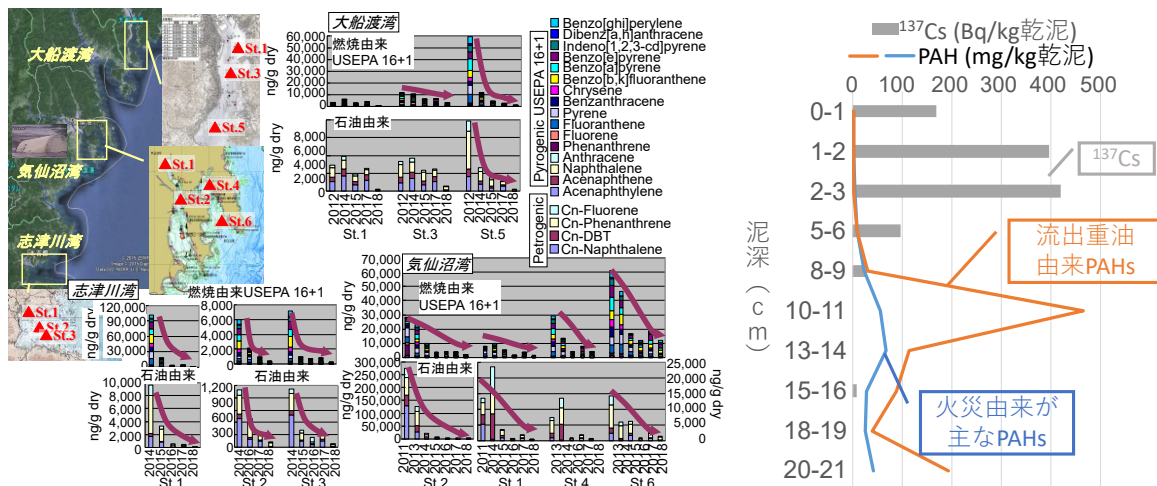


図 5-35 東日本大震災後の三陸内湾における底質中の多環芳香族炭化水素 (PAH) の濃度と組成の時空間分布の経年変化 (左) 及び気仙沼湾底泥中の PAH と放射性セシウム (¹³⁷Cs) の鉛直分布 (右)

2.2.4.2 干潟生態系への震災影響と回復

(1) 目的と経緯

津波は、沿岸生態系を大規模かつ広域的に攪乱する。東日本大震災により宮城県仙台市沿岸部は 7m を超える津波に襲われ、七北田川の河口に位置する蒲生干潟も大きく攪乱された。2011 年以降、私たちは蒲生干潟で年に 1 回の多定点調査 (底質及び大型底生動物) と GPS による植生帯のトレースを行ってきた。本稿では、震災前後の詳細なデータが得られている蒲生干潟を、巨大災害が干潟生態系におよぼした影響を評価し、そこからの回復 (遷移) 過程をモニタリングするモデルサイトと位置づけ、震災後 10 年間での海岸生態系の変化を紹介する。

(2) 結果と考察

2011年夏の調査で、ヨシ原や植生の消失、底質の砂質化が確認された（金谷ら 2012）⁹⁾。裸地となった砂嘴上では海浜植生が 2014 年以降急速に分布を拡大した（図 5-36）。また、震災前には見られなかった塩生植物ハママツナが、潮間帯上部に繁茂するようになった。これは、ヨシの流失でできた空白地が、競争劣位種であるハママツナの生息適地となったためと考えられた。2011 年以降、潟内には徐々に泥が堆積し、有機物量も増加傾向にあったが、2016 年に台風や津波による砂の流入が生じるなど、潟の地形と底質は震災後も変化し続けている。津波によって、底生動物の多くが一時的に見られなくなった。一方、優占種の密度は、底質改善により震災前より増加した（Kanaya et al. 2015）¹⁰⁾。優占種の変遷は、震災前は河川改修による塩分変化を反映し、震災時の変化は底質改変と関連づけられた。興味深いことに、2018～2020 年には底生動物の密度が顕著に低下した。この要因は定かでは無いが、砂流入や導流堤工事に伴う底土有機物の低下が影響した可能性がある。

東北地方の干潟では、復旧工事による底生動物群集への影響が報告されている（金谷ら 2019）¹¹⁾。震災後 10 年が経つが、干潟に暮らす生物達は回復の途中であるとする報告もなされている（Miura et al. 2019）¹²⁾。蒲生潟での研究を続けていくことで、巨大災害やその後の人為的環境変化に対して干潟の生きものたちがどのように応答するのかを定量的に評価することができ、保全策の検討に資することができると考えている。

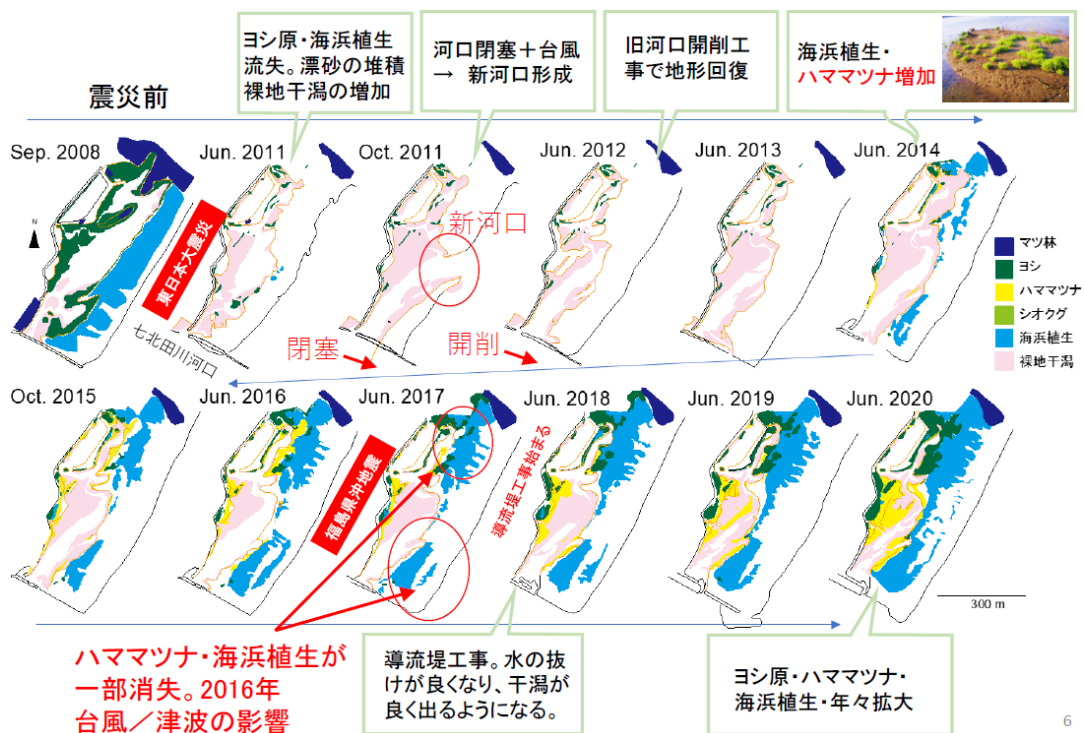


図 5-36 宮城県蒲生干潟における東日本大震災後の地形・植生の変化

引用文献

- 1) Kamata et al., 2018, Agonistic effects of diverse xenobiotics on the constitutive androstane receptor as detected in a recombinant yeast-cell assay *Toxicology in Vitro*, 46, 335–349
- 2) 白石ら、2016、エンドトキシンアッセイを用いた災害時の環境モニタリング—東日本大震災後の被災地大気粉じん中のエンドトキシン濃度—環境化学討論会要旨 1A-05
- 3) Kuroda et al., 2012, Assessment of Groundwater Pollution in Tokyo Using PPCPs as Sewage Markers, *Environmental Science and Technology*, 46, 1455–1464
- 4) Drewes et al., 2003, Fate of pharmaceuticals during ground water recharge, *Ground Water Monitoring and Remediation*, 23, 64–72
- 5) National Institute of Environmental Health Sciences, Disaster Research Response Program, <https://www.niehs.nih.gov/research/programs/disaster/index.cfm>
- 6) ATSDR, Assessment of Chemical Exposure (ACE) program, <https://www.atsdr.cdc.gov/ntsip/ace.html>
- 7) CDC, 2012, NIOSH Alert, <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2013-102/>
- 8) 牧秀明 (2015) 「石油・炭化水素」海洋観測ガイドライン、第十巻、Chap.2 バックグラウンド汚染日本海洋学会編、G1002JP:1–14
- 9) 金谷弦、鈴木孝男、牧秀明、中村泰男、宮島祐一、菊地永祐 (2012) 2011 年巨大津波が宮城県蒲生潟の地形、植生および底生動物相に及ぼした影響. *日本ベントス学会誌* 67: 20–32.
- 10) Kanaya G, Suzuki T, Kikuchi E (2015) Impacts of the 2011 tsunami on sediment characteristics and macrozoobenthic assemblages in a shallow eutrophic lagoon, Sendai Bay, Japan. *PLOS ONE* 10: e0135125.
- 11) 金谷弦、多留聖典、柚原剛、海上智央、三浦収、中井静子、伊藤萌、鈴木孝男 (2019) 福島県いわき市鮫川干潟における大型底生動物の多様性—東日本大震災後の状況と復旧工事による影響—. *日本ベントス学会誌* 73: 84–101.
- 12) Miura O, Kanaya G, Nakai S, Itoh H, Chiba S (2019) Prevalence and species richness of trematode parasites only partially recovers after the 2011 Tohoku, Japan, earthquake tsunami. *International Journal for Parasitology* 49: 1023–1028.

2.3 災害環境研究ネットワーク拠点の構築

2.3.1 災害環境分野に関する情報プラットフォームの設計・開発

(1) 目的と経緯

過去の経験と一般化された科学的知見を体系的に活用しながら災害廃棄物の対策や処理にあたるよう、災害廃棄物処理に関わる主体による平時の対策と災害時の対応に参考になる情報（経験談、行政資料、実績データ、学習素材等）を発信する「災害廃棄物情報プラットフォーム」（以下「情報 PF」という。）を運営してきた。本研究では、災害廃棄物処理に係る法制度の整備や自治体における認知が進む中で、災害廃棄物への対応に関するニーズの変化に対応する必要があるとの考えから、情報 PF において今後どのようなコンテンツを提供するべきかを把握したうえで、その整備を進めた。

(2) 方法

2017 年 4～5 月にかけて、全国自治体を対象に「災害廃棄物情報プラットフォームに関するアンケート調査」（以下「アンケート調査」という。）を実施した。情報 PF の認知度を尋ねる設問の他、コンテンツの有用性の評価（5 段階評価）、情報 PF への掲載を希望する情報（自由記述）、災害廃棄物対応に関して困っていること（自由記述）等を尋ねた。その結果、932 件の回答が得られた。このうち、「災害廃棄物対応に関して困っていること」の回答結果（n=181）

をテキストマイニングにより整理し、回答の全体傾向を把握するとともに、情報 PF による対応可能性について考察した。

また、上記により把握したニーズに対応するために、災害廃棄物処理計画（以下「処理計画」という。）の検索システム、仮置場配置図作成支援ツールのプロトタイプを作成した。処理計画検索システムは、処理計画の作成や改定といった災害廃棄物対策を実施する際に、自らの自治体にとって参考になる計画とその具体的箇所を検索するシステムであり、その設計にあたっては人口規模別に既存の処理計画をレビューし、その基本的な構造（構成）を整理したうえで、災害廃棄物対策指針と関連付けて検索できるように想定される検索キーワードを整理した。そのうえで、処理計画データベースの構築、検索システムのフロント画面を設計・開発した。仮置場配置図作成支援ツールは、設定した仮置場面積に対して仮置場の場内配置の参考例を出力するツールである。2017年九州北部豪雨等の過去の災害事例における仮置場の運営実態調査結果に基づいて、場内の動線、災害廃棄物の品目ごとの配置面積、配置順等を設計し、オンラインで活用できるプログラムを開発した。

(3) 結果と考察

アンケート調査では、情報 PF で掲載を希望する情報について 75 件の回答が得られた。このうち、11 件（15%）は調査実施時点で掲載されている情報であり、情報アクセス性の向上が課題であることが示唆された。また、調査実施時点で未掲載の情報としては、研修に関する資料（11 件）、仮置場の設計・設置に関する情報（7 件）、協定・連携に関する情報（7 件）のニーズが高かった。災害廃棄物対応に関して困っていることについては 181 件の回答が得られた。その回答を分類した結果を図 5-37 に示す。7 つの大項目と各項目について課題の種類を示す中項目で分類することができた。大項目では、「仮置場」「処理計画」「人材育成」に係る意見がそれぞれ 64 件（35%）、47 件（26%）、30 件（17%）と多かった。「仮置場」の関連では、仮置場候補地の適地がない、あるいは選定の方法や住民や関係者との調整をどのようにして行うのかわからないという意見が 53 件と多かった。仮置場候補地を選定しておくことの必要性を認識しているものの、実質的に困難に直面していることが明確になった。また、仮置場への便乗ごみの持ち込みにどのように対応するとよいかといった仮置場の運営管理に関わるニーズも見られた。「処理計画」の関連では、災害想定が難しい、推計が難しい、処理フローの作成が容易でなく時間がかかっているといった技術的な課題や、知識の不足、計画策定に係る時間や職員の不足も課題として指摘された。「人材育成」の関連では、災害廃棄物処理に係る知識や人材が不足し、かつ人員削減により担当する職員が不足している意見が見られた。この他、効果的な図上演習の方法が不明である等の意見もあった。

仮置場	処理計画	人材育成	連携	全般	処理処分	法制度
(64)	(47)	(30)	(21)	(20)	(18)	(8)
確保・選定 (53)	策定方法 (26)	不足 (11)	他自治体との連携 (4)	情報PF (11)	中間処理 (9)	補助金 (4)
運営管理 (10)	不足 (14)	組織 (9)	市内での連携 (4)	知識不足 (6)	収集・連携 (7)	災害廃棄物の定義 (3)
	市町村への 策定支援 (3)	方法論 (6)	民間との連携 (4)	リソース不足 (2)	最終処分 (2)	災害廃棄物 対策指針 (1)
			協定 (3)	イメージ不足 (1)		
			組との連携 (2)			
			県との連携 (2)			

図 5-37 設問「災害廃棄物対応に関して困っていること」への回答結果の概要

以上をふまえ、災害廃棄物対策を促進するうえで、1) 処理計画の情報ニーズへの対応、2) 仮置場の情報ニーズへの対応、3) 人材育成に関する情報ニーズへの対応が特に求められていることが示唆された。このため、処理計画策定の要点や技術的事項をまとめた資料の掲載や処理計画で必要な項目（仮置場に関する記載など）に絞って効率的に参照できる検索システムの開発を進め、仮置場の設計を支援するツールを開発し、人材育成のガイドや実務資料の開発を進めることとした（人材育成のガイドについては、2.3.2 において詳述）。

処理計画検索システムは、あらかじめ設定されたキーワードへの該当性から検索結果を得る絞り込み機能と、利用者が任意に入力した言葉への該当性から検索結果を返す検索機能により、効果的に処理計画の情報を活用できるように設計した。例えば、検索機能を用いて「自動車」について記載のある処理計画のページを検索した結果は図 5-38 の通りである。該当する記述がある処理計画の名称と、記載のある計画内の見出し及び該当箇所へのリンクが表示される。仮

置場配置図作成支援ツールは、長辺と短辺を任意の長さに設定することで、図 5-39 のような矩形の仮置場配置計画が出力される。プロトタイプでは、水害時の初動対応期に排出される災害廃棄物が適正に保管され、場内を安全に通行・運営することができると考えられる配置計画を作図できる。今後、出力される配置計画の妥当性を確認するとともに、ツールの有効活用方法を検討の上、一般公開する予定である。

自治体番号	都道府県	市区町村	処理計画名称	目次内容	ページ番号	pdf_no	URL
1100	北海道	札幌市	札幌市災害廃棄物処理計画	(4) 廃家電、小型家電、廃自動車等	114	118	http://dwasteinfo.nies.go.jp
1204	北海道	旭川市	旭川市災害廃棄物処理計画	第12節 廃自動車	52	58	http://dwasteinfo.nies.go.jp
1224	北海道	千歳市	千歳市災害廃棄物処理計画	第9節 廃自動車などの取扱いに配慮が必要となる災害廃棄物の処理	98	103	http://dwasteinfo.nies.go.jp
1231	北海道	恵庭市	恵庭市災害廃棄物処理計画	3 廃自動車	69	75	http://dwasteinfo.nies.go.jp
1933	北海道	西いぶり広域連合	西いぶり広域連合災害廃棄物処理計画	3 自動車	72	76	http://dwasteinfo.nies.go.jp
4209	宮城県	多賀城市	多賀城市災害廃棄物処理計画	7 被災自動車	46	50	http://dwasteinfo.nies.go.jp
13118	東京都	荒川区	荒川区災害廃棄物処理方針	(9) 被災自動車・オートバイの取扱い	32	36	http://dwasteinfo.nies.go.jp
13209	東京都	町田市	町田市災害廃棄物処理計画	3 廃自動車(資源循環班)	44	50	http://dwasteinfo.nies.go.jp
14212	神奈川県	厚木市	厚木市災害廃棄物処理計画	3 廃自動車等	60	62	http://dwasteinfo.nies.go.jp
20205	長野県	飯田市	飯田市災害廃棄物処理計画	6 被災自動車の取扱い	58	62	http://dwasteinfo.nies.go.jp
22000	静岡県	静岡市	静岡市災害廃棄物処理計画	参No5 被災自動車・被災船舶の対応マニュアル	47	1	http://dwasteinfo.nies.go.jp
22203	静岡県	沼津市	沼津市災害廃棄物処理計画	(6) 被災自動車・船舶等	47	50	http://dwasteinfo.nies.go.jp
22206	静岡県	三島市	三島市災害廃棄物処理計画	(8) 被災自動車等の撤去	70	74	http://dwasteinfo.nies.go.jp

図 5-38 災害廃棄物処理計画検索システムの出力結果例（「自動車」で検索）

災害廃棄物処理 仮置場配置計画

【仮置場名称】 NIES仮置場
 【住所】 NIES
 【敷地面積】 50000㎡ 【災害の種類】 水害 【配置パターン】 辺のみ配置

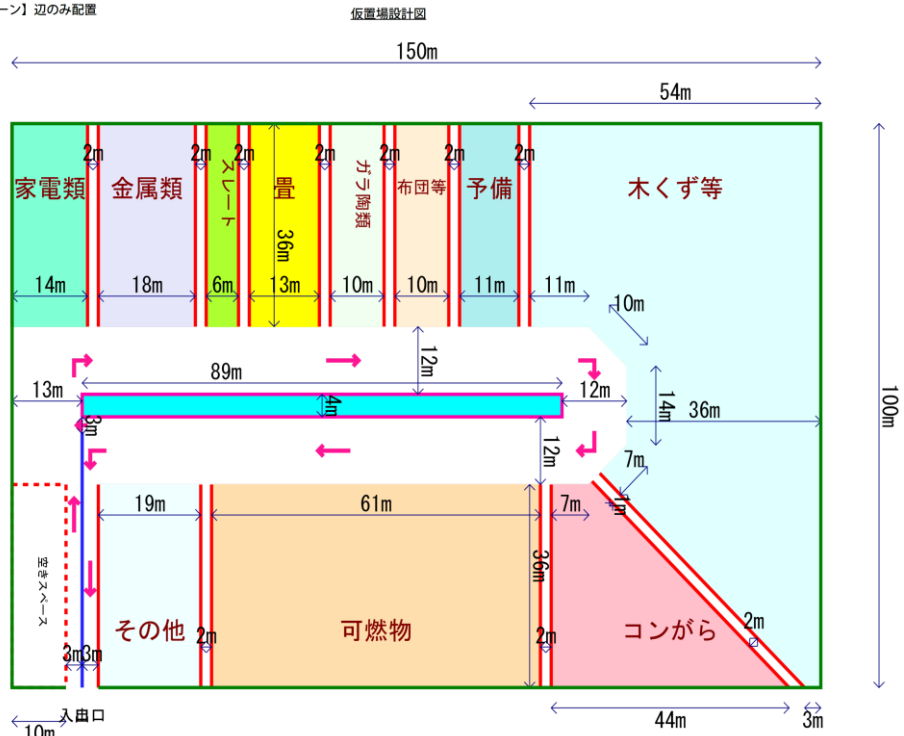


図 5-39 仮置場配置図作成ツール（プロトタイプ）の出力結果例

2.3.2 災害環境分野における人材育成システムの設計・開発

(1) 目的と経緯

災害廃棄物は、市町村において普段処理している一般廃棄物と内容・性状・排出の様子が大きく異なる。このため、初動期から処理を円滑に進めるためには、平時から人材育成を進め、対応にあたる人材の知識や能力を醸成することが重要である。人材育成の手法として、従来は講義形式のセミナーが中心であったが、近年では実際の災害対応で必要となる情報の収集と処理（判断、意思決定）を仮想災害状況で行う対応型図上演習が注目されている。しかし、その効果について体系的に整理されないまま自治体等で取り組みが進み、効果的・効率的な人材育成が図られていない状況も生じている。本研究では、2017 年度に実施された対応型図上演習の効果について、個人能力の向上の視点から詳細に検討することを通し、災害廃棄物分野における対応型図上演習が個人能力に与える効果を明らかにした。そのうえで、対応型図上演習を実施するための要点をガイドブックとして取りまとめた。

(2) 方法

兵庫県環境整備課との協働で企画し、2017年10月から11月にかけて兵庫県下の市町村を対象に実施した対応型図上演習を対象とし、演習参加者（市町村職員）を対象としたプレポストテスト法により研修前後の個人能力の変化を測定した。本図上演習では、災害廃棄物対応の要点である初動対応、特に、一次仮置場（初動期において災害廃棄物を一時的に保管し、簡易な選別を行う場所）の設置・運営管理に焦点を当て、仮置場の設置・運営にかかるイメージの醸成を図り、「仮置場候補地の選定」「運営手順の整理」「仮置場管理に係る広報」の重要性について認識を高めてもらうことを狙った。そのために、研修第1部において講義とワークショップにより初動対応と仮置場の設置・運営管理に係る基本的事項を学び、研修第2部において対応型図上演習を行うこととした。対応型図上演習では、参加者は仮想都市の廃棄物担当職員としてグループに分かれ、震度7の地震が発生した後2～3日と5～7日に発生する災害廃棄物処理に係る典型課題（片付けごみが道路脇に多量に出された状況など）への対応を検討し、問い合わせや指示を出す（対応票を用いてやり取りする）作業を行った。プレポストテストに加え、これら演習における対応の質の評価を併用することで、演習中に行われた作業とその帰結として得られた効果を有機的に結び付けて分析し、効果とその要因に関する妥当性の高い結果を得ることを目指した。対応の質の評価は、表5-4に示すルールにより行った。

表5-4 対応の質の評価基準表
【表の出典：多島ら（2019）】¹⁾

基準	評価
全ての行動要件を満たしている	甲
状況把握と、応急対応の一部を実施	乙
応急対応のみ要件を全て満たしている	丙1
状況把握のみ実施、または、応急対応の一部のみ実施	丙2
全ての行動要件を満たしていない	丁

(3) 結果と考察

図上演習に参加した29名の市町職員のうち、管理職（副課長、課長補佐、係長、副作業長）は8名（28%）、担当（主査、主事、主任等）は21名（72%）であった。また、事前取組（=関連情報の収集、処理計画の策定、研修の開催、仮置場候補地のリスト化、庁内調整のいずれか）を実施したことがあるのは22名（76%）、兵庫県が主催した過去の災害廃棄物対策研修に参加したことがあったのは4名（14%）であった。参加者は、A-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2の6グループに分かれて模擬災害対応を行った。

模擬災害対応の質の評価結果を表5-5に示す。全体としては甲が0%、乙が13%、丙1が14%、丙2が47%、丁が27%を占めていた。すなわち、全ての状況付与について、実際の災害時に起こすべき行動の一部しか実施できていなかったといえる。乙と丙1を足した27%については、ある程度は状況に対応できていたと評価できるが、丙1については状況確認を省いた対応であり、実際の災害対応においては状況に適さない誤った判断に至る可能性がある点に注意が必要である。丙2と丁を足した74%については、基本的には状況を改善する道筋すらついて

表5-5 参加者による模擬災害対応の質の評価結果
【表の出典：多島ら（2019）】¹⁾

	甲	乙	丙1	丙2	丁	合計
A-1(n=12)	0%	8%	25%	33%	33%	100%*
A-2(n=11)	0%	18%	9%	55%	18%	100%
B-1(n=10)	0%	0%	10%	50%	40%	100%
B-2(n=10)	0%	20%	0%	70%	10%	100%
C-1(n=11)	0%	9%	18%	45%	27%	100%*
C-2(n=10)	0%	20%	20%	30%	30%	100%
全体(n=64)	0%	13%	14%	47%	27%	100%*

*行の数値を合算すると100%にならないが、各項目で整数値を得る際に四捨五入した為であり、誤表記ではない

いないと評価される。前者（乙+丙1）と後者（丙2+丁）のそれぞれについてやり取りされた票数の平均値を求めると、6.0と3.4であった。このため、付与された状況に対してある程度適切に対応し、議論を深めるためには、1つの状況付与に対してコントローラーと3往復（=6シート）程度のやり取りを想定すべきであると示唆される。このことは、コントローラーと2往復（=4シート）程度のやり取りしか行わない場合は、複数主体とやり取りがある場合に各主体と1回のやり取りになる（1往復のやり取りを2つの主体で行うと4シートになる）、もしくは、単一主体と2回のやり取りになるため、必然的に対応の質が低くなりがちであるが、6シートあれば、複数主体とやり取りしても状況確認と応

急対応の2回のやり取りができる（1往復目のやり取りで状況を確認したあとに、2つの主体と1往復ずつやり取りを行える）ため、質の高い対応が取れる可能性が高まるためであると理解できる。本演習では60分で24枚のシートがやり取りされていたが、同程度のやり取りの速さを想定すると、60分当たり4つの状況付与に絞ることが状況付与への対応の質を高めると考えられる。

プレポストテストの結果を図5-40に示す。対応のあるt検定（片側、 $\alpha=0.05$ ）で研修前後における回答結果の差を検定したところ、理解や対応可能性を尋ねた項目については、すべての項目で演習後の評価が高まっていた。理解を尋ねた設問については、演習後に平均評点が3（＝「どちらとも言えない」）よりも高くなり、理解が醸成された状態に至ったと評価できる。対応可能な程度を尋ねた設問については、演習後に評点の上昇が認められるものの、演習後も平均評点が3を超えず、本演習だけでは実際の災害対応ができるほどにはスキルが醸成されなかったことが示唆される。また、イメージ醸成の効果を検討するため、図5-40の項目のうち初動期の理解に係る項目（初動期の状況を理解、初動期の業務を理解）の評点の算術平均である「初動イメージ度」を分析したところ、全体として平均点が2.54から3.25に上昇しており、演習前後で統計的に有意な差があった（ $\alpha=0.001$ ）。効果量は0.98と高い値を示した。状況付与のやり取りとしても、片付けごみや生活ごみの課題、仮置場の設置・運営に係る諸課題、主体間連携を求める課題など、初動期における災害廃棄物処理に係る典型的な課題が付与されており、表5-5に示したようにこれらの課題が簡単には解決されない様子も体験できている。このため、災害廃棄物に係る対応型図上演習は、適切に状況付与を設計することで、参加者のイメージ醸成に効果的であることが示唆される。同様に、対応スキルの向上の観点からも分析した結果、対応スキルの向上には模擬災害対応だけでは十分ではないが、処理計画の策定等の事前準備の取組がない場合でも、講義等により関連する知識を模擬災害対応の前にインプットすることで効果が得られることも示唆された。これらの効果を得るうえで重要となる、対応型図上演習の特徴の理解、設計手順、実施の方法や体制については災害廃棄物に関する研修ガイドブック3：対応型図上演習編として取りまとめ、公開した（図5-41）。

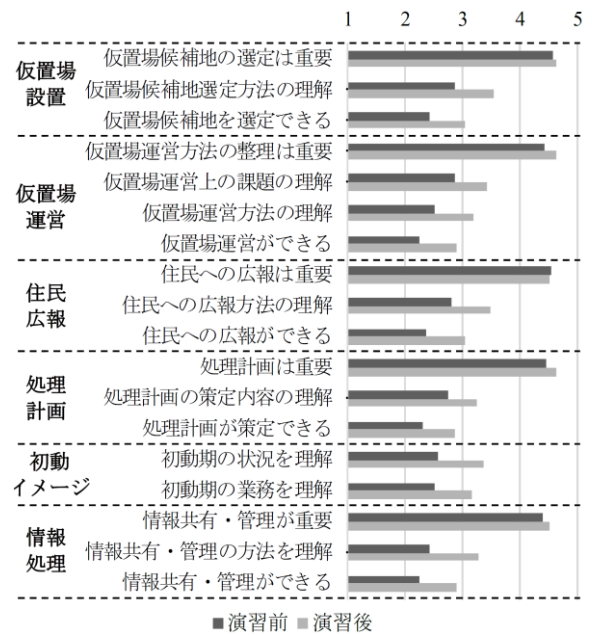


図5-40 図上演習による能力（自己評価）の変化【図の出典：多島ら（2019）】¹⁾



図5-41 災害廃棄物に関する研修ガイドブック3：対応型図上演習編のイメージ

これらの効果を得るうえで重要となる、対応型図上演習の特徴の理解、設計手順、実施の方法や体制については災害廃棄物に関する研修ガイドブック3：対応型図上演習編として取りまとめ、公開した（図5-41）。

引用文献

- 1) 多島良、森朋子、夏目吉行、大迫政浩(2019)災害廃棄物処理に係る対応型図上演習の効果とその要因。地域安全学会論文集、(34)、1-10

2.4 まとめ

将来の災害に備えた災害レジリエントな社会環境システムの構築に向けた技術システムの提示を行い、社会の環境防災力・減災力の向上に資するために、三つのプロジェクトにおいて、以下のような研究を実施し、成果が得られた。

プロジェクト1については、まず、災害廃棄物の特性や建設資材としての適用性に基づいて再生利用率の高い災害廃棄物処理技術を実証実験や実験的アプローチにより開発するとともに、自立型浄化槽システムの開発と、し尿・汚泥輸送ネットワークモデルの構築を行い、将来の大規模災害に備えた、災害廃棄物の実効性のある処理計画の策定や技術システムの確立等に資する知見を提供した。つぎに、市町村における災害廃棄物の効果的な処理計画策定プロセスの検討、地方公共団体における水害廃棄物適正管理の標準化を検討し、災害対策に関する経験・技術的蓄積を、我が国の次世代のみならずアジア都市に継承、移転し、未然防止・被害軽減に寄与するとともに環境省や市町村との協働により災害廃棄物対応力の向上に貢献した。

プロジェクト2については、災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略の確立に向けて、緊急時における化学物質の管理目標値データベースの構築と緊急時の簡易・迅速測定手法やサンプリング手法の開発を進め、災害時の有害物質等への緊急時対応の実行可能かつ有効な手法を提言することにより、災害環境に対応する行政や社会づくりに貢献した。

プロジェクト3については、参画型研修手法とその評価手法を開発し、情報基盤システムの開発・運用を検討し、将来の災害に備えた環境省災害廃棄物対策支援チーム D.Waste-Net の活動や環境施策へ貢献した。

最後に、東日本大震災以降も毎年のように自然災害は発生している。いつどこで私たちが災害に見舞われてもおかしくない状況といえる。そのような中、本研究プログラムでは、研究を通して得た知見を目の前の災害への対処に活かしていくことも重視してきた。研究の成果は被災した地域の環境回復に活かされてこそ価値がある。同時に、実践的な取り組みを通じて得た反省や教訓からも新たな気づきが得られ、研究の質をさらに高めていくことにつながる。私たちはこのような研究の進め方を「アクションリサーチ」と呼び、災害研究への取り組み方の姿勢として重視した。研究の仕事は多種多様な事象を一般化していくことであるが、災害の現場を目の当たりにして思うのは、研究者が貢献するには厳しすぎる様々な現実が存在するという点である。そのギャップを埋めていくには、私たち自身が現場のリアリティから目をそらさず、実用的にも価値のある研究の知見を提供し、将来の災害環境リスクへの備えをしていくべきである。そのような思いを本研究プログラムに関わったメンバが共有できたことも、大きな成果であったように思う。

[資料]

1 研究の組織と研究課題の構成

1.1 研究の組織

[A 研究担当者]

代表者：

福島支部
フェロー
研究グループ長

大原利眞 (PG 総括)
林誠二 (PG1 リーダー、PG1PJ2 リーダー)

構成者：

福島支部
汚染廃棄物管理研究室

遠藤和人
山田一夫
飯野成憲
中村公亮
三浦拓也
MO Jialin (莫嘉麟)
常世田和彦*)
新井裕之
宮北憲治*)
玉置雅紀 (PG1PJ3 リーダー)

環境影響評価研究室

黒田啓介*)
吉岡明良
石井弓美子
辻英樹
高木麻衣
境優
伊藤祥子*)
尾崎宏和*)
武地誠一
JO Jaeick
竹田稔真
大場 真
平野勇二郎
五味 馨
戸川卓哉
中村省吾
辻岳 史
LUBASHEVSKIY VASIL*)

地域環境創生研究室

環境リスク・健康研究センター
センター長

鈴木規之

曝露影響計測研究室	中島 大介
リスク管理戦略研究室	今泉圭隆 小山陽介
生態系影響評価研究室	堀口敏弘 児玉圭太
曝露動態研究室	中山祥嗣 (PG1PJ4 リーダー) MA Chaochen 櫻井正彦*)
エコチル調査コアセンター	中山 祥嗣
地域環境研究センター	
大気環境モデリング研究室	森野悠
海洋環境研究室	東博紀
土壌環境研究室	越川昌美 仁科一哉 渡邊未来
生物・生態系環境研究センター	
センター長	山野博哉
生物多様性評価・予測研究室	深澤圭太 寺田佐恵子*) 小川結衣 三島啓雄*)
	津田直会 栢島野枝*)
生物多様性保全計画研究室	熊田那央 小熊宏之 吉田勝彦
生態系機能評価研究室	野原精一 山田ひとみ*)
環境ストレス機構研究室	青野光子
生態リスク評価・対策研究室	大沼学 中村織江*)
	羽賀淳
生物多様性資源保全研究推進室	松崎慎一郎 中川恵
環境計測研究センター	
基盤計測化学研究室	田中敦 柴田康行*) 神田裕子 苅部甚一 樋渡武彦*)
応用計測化学研究室	高澤 嘉一

資源循環・廃棄物研究センター

センター長

大迫政浩

大塚康治

副センター長

寺園 淳

循環型社会システム研究室

多島 良

森 朋子

鈴木 薫

基盤技術・物質管理研究室

倉持秀敏

山本貴士

鈴木剛

小口正弘

由井和子

有馬謙一

野田康一*

ZHANG Zhenyi (章真怡) *

伊藤浩平*

高橋勇介

WU Jiang (呉江)

藤原大*

高田恭子

千村和彦

循環利用・適正処理処分技術研究室

肴倉宏史

石森洋行

竹崎聡*

中川美加子

国際廃棄物管理技術研究室

山田正人 (PGIPJ1 リーダー)

石垣 智基

蛭江美孝

小林拓郎

北村洋樹

HU Yong (胡勇)

災害環境マネジメント戦略連携オフィス

宗 清生

川畑 隆常

森嶋 順子

社会環境システム研究センター

亀山康子

藤田 壮

統合環境経済研究室

増井利彦

広域影響・対策モデル研究

芦名秀一

地域環境影響評価研究室

一ノ瀬俊明

環境社会イノベーション研究室	藤井 実 牧 誠也 DOU YI*)
環境政策研究室	松橋啓介 森 保文 根本 和宜*)
気候変動適応センター	脇岡 靖明 須賀 伸介

(注) 所属・役職は令和2年度10月31日時点のもの。また、*)印は過去に所属していた職員等を示す。

1.2 研究課題と担当者

環境回復研究プログラム

プロジェクト1 放射性物質汚染管理システムの開発

遠藤和人・山田一夫・飯野成憲・中村公亮・三浦拓也・MO Jialin・常世田和彦・新井裕之・宮北憲治・大迫政浩・倉持秀敏・山本貴士・鈴木剛・小口正弘・由井和子・有馬謙一・野田康一・ZHANG Zhenyi・伊藤浩平・高橋勇介・WU Jiang・藤原大・高田恭子・千村和彦・肴倉宏史・石森洋行・竹崎聡・中川美加子・山田正人・蛭江美孝・小林拓郎・北村洋樹・HU Yong

プロジェクト2 多媒体環境における放射性物質の動態解明及び将来予測

大原利真・林誠二・黒田啓介・石井弓美子・辻英樹・境優・伊藤祥子・尾崎宏和・武地誠一・JO Jaeick・竹田稔真・鈴木規之・今泉圭隆・森野悠・東博紀・越川昌美・仁科一哉・渡邊未来・松崎慎一郎・中川恵

プロジェクト3 環境放射線と人為的攪乱による生物・生態系影響に関する研究

玉置雅紀・吉岡明良・堀口敏弘・児玉圭太・山野博哉・深澤圭太・寺田佐恵子・小川結衣・三島啓雄・津田直会・栢島野枝・熊田那央・小熊宏之・吉田勝彦・野原精一・山田ひとみ・青野光子・大沼学・中村織江・羽賀淳

プロジェクト4 生活圏における人への曝露量評価

高木麻衣・中山祥嗣・MA Chaochen・櫻井正彦・田中敦・柴田康行・神田裕子・苅部甚一・樋渡武彦

環境創生研究プログラム

プロジェクト1 環境創生の地域情報システムの開発

藤田 壮, 五味 馨, 増井 利彦, 藤井 実, 芦名 秀一

プロジェクト2 環境創生の地域シナリオ解析モデルの開発

大場 真, 戸川 卓哉, 須賀 伸介, 脇岡 靖明, 松橋 啓介, DOU YI, 平野 勇二郎, 辻 岳史

プロジェクト3 参加型の環境創生手法の開発と実装

平野 勇二郎, 中村 省吾, 亀山 康子, 森 保文, 一ノ瀬 俊明, 根本 和宜, 牧 誠也, LUBASHEVSKIY VASILY

災害環境マネジメント研究プログラム

プロジェクト1 災害時の資源循環・廃棄物マネジメント強靱化戦略の確立

大迫 政浩・山田 正人・遠藤 和人・肴倉 宏史・蛭江 美孝・石垣 智基・山本 貴士・多島 良・山田 一夫・宮北 憲治・落合 知・尾形 有香・上島 雅人・鈴木 隆央・Naka Kishimoto Angelica Mariko・飯野 成憲

プロジェクト2 災害に伴う環境・健康のリスク管理戦略に関する研究

鈴木 規之・小山 陽介・黒田 啓介・中島 大介・今泉 圭隆・高澤 嘉一・中山 祥嗣・牧 秀明・金谷 弦・伊藤 萌・高木 麻衣

プロジェクト3 災害環境研究ネットワーク拠点の構築

多島 良・大迫 政浩・大塚 康治・宗 清生・川畑 隆常・鈴木 薫・森 朋子・森嶋 順子

(注) *客員研究員、**協力研究者

2 研究成果発表一覧

2.1 誌上発表

<雑誌>

発表者・(刊年)・題目・掲載誌・巻(号)・頁

環境回復研究プログラム(環境回復-1)

有馬謙一, 山田一夫, 大迫政浩, 保高徹生, 芳賀和子 (2019) 福島第一原子力発電所事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合的比較(第1報) 焼却残渣の熱処理・灰洗浄を含む減容化プロセスの定量的評価方法の開発. 環境放射能除染学会誌, 7 (4), 241-252

有馬謙一, 大迫政浩, 保高徹生, 篠崎剛史 (2020) 福島第一原発事故由来の放射性セシウムによる汚染物の処理・処分方法の総合的比較(第2報)-焼却残渣に対する減容化プロセス5 CASEの比較-. 環境放射能除染学会誌, 7 (4), 241-252

Duque-Redondo E., Yamada K., Lopez-Arbeloa I., Manzano H. (2018) Cs-137 immobilization in C-S-H gel nanopores. Phys. Chem. Chem. Phys.,

Duque-Redondo E., Yamada K., Manzano H. (2021) Cs retention and diffusion in C-S-H at different Ca/Si ratio. Cement and Concrete Research, 140, 106294

Endo K. (2017) Engineering Aspects for Landfilling Radioactively Contaminated Wastes Derived from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. Global Environmental Research, 20 (1-2), 101-109

遠藤和人 (2017) 雑草類が混入した土壌からの水質汚濁成分等の流出挙動に関するライシメーター試験. 第12回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 21-26

遠藤和人 (2019) 放射性物質汚染廃棄物の最終処分の現状と今後の展開. 廃棄物資源循環学会誌, 30 (1), 39-48

遠藤和人, 尾形有香 (2021) 最終処分場からの PFASs, PCNs の長期的な排出予測に向けて. 廃棄物資源循環学会誌, 32 (1), 50-62

Fujiwara H., Kuramochi H., Nomura K., Maeseto T., Osako M. (2017) Behavior of radioactive cesium during incineration of radioactively contaminated wastes from decontamination activities in Fukushima. Journal of Environmental Radioactivity, 178-179, 290-296

藤原大, 倉持秀敏, 竹田尚弘, 小倉正裕, 大迫政浩 (2018) 加熱化学処理法による焼却主灰からの放射性セシウム除去および除去メカニズムの推定. 環境放射能除染学会誌, 6 (1), 3-16

Fujiwara H., Kuramochi H., Maeseto T., Nomura K., Takeuchi Y., Kawamoto K., Yamasaki S., Kokubu K., Osako M. (2018) Influence of the type of furnace on behavior of radioactive cesium in municipal solid waste thermal treatment. Waste Management, 81, 41-52

広野真一, 山田一夫, 佐藤友美, 鳥居和之 (2016) 我が国の代表的な反応性骨材と ASR の発生に関するデータ整理. コンクリート工学年次論文集, 38 (1), 1047-1052

Hu Y., Ma H., Shi C., Kobayashi T., Xu K-Q. (2021) Nutrient augmentation enhances biogas production from sorghum mono-digestion. Waste Management, 119, 63-71

Ichikawa T., Yamada K., Osako M. (2017) Estimation of the Time of Cesium Leaking by Moisture Absorption of Radiologically Contaminated Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash. Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment, 5 (3), 201-214

市川恒樹, 山田一夫, 大迫政浩, 芳賀和子 (2017) 界面合成法で作成した高耐アルカリ性フェロシアン化ニッケルの生成・分解およびセシウム吸着機構. 環境放射能除染学会誌, 5 (3), 215-225

Ichikawa T., Yamada K., Osako M., Haga K. (2018) Super volume reduction of ¹³⁷Cs-contaminated solid waste by ion chromatographic elimination of Cs from ¹³⁷Cs-enriched dust generated by pyroprocessing decontamination. J. Soc. Remed. Radioact. Contami.Envion., 6 (2), 73-80

Ichikawa T., Wabatane S., Arai H., Haga K., Yamada K. (2020) Metakaolin-based Geopolymer for Immobilizing Concentrated Cs

Generated by Volume Reduction of 137Cs-contaminated Waste. Journal of the Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment, 8 (1), 3-16

Ichikawa T., Yamada M., Iwai R., Kanazawa Y. (2020) Ion chromatographic decontamination of 137Cs-enriched fly ash using poly(vinyl alcohol)-bound copper ferrocyanide as Cs adsorbent. J. Society for Remediation of Radioactive Contamination in the Environment, 8 (2), 55-66

五十嵐豪, 山田一夫, 小川彰一 (2016) ゲルフルオレッセンス法による ASR ゲルの観察条件に関する一考察. コンクリート工学年次論文集, 38 (1), 1035-1040

飯野翔太, 高橋克行, 庄司貴, 鹿島勇治, 小山陽介, 山本貴士, 大迫政浩 (2018) 焼却炉排ガス中の放射性セシウム濃度測定方法の粒子個数濃度測定による検証. 廃棄物資源循環学会論文誌, 29, 175-183

石森洋行, 遠藤和人, 山田正人, 大迫政浩 (2017) 廃棄物埋立地における放射性セシウムに対する土壌吸脱着特性とその影響因子. 廃棄物資源循環学会論文誌, 28, 39-49

石森洋行, 遠藤和人, 皆瀬慎, 氏家伸介, 山田正人 (2021) 放射能汚染飛灰埋立地を模擬した屋外土槽実験～3年間の継続観測からみた雨水浸透挙動, セシウム溶出, 及びベントナイト隔離層の長期性能～. 第14回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 14, 173-176

岩崎宏和, 小暮敏博, 齊藤進, 久岡夏樹, 遠藤和人, 江藤隆, 落修一 (2017) 下水汚泥中の放射性セシウムの存在形態調査について. 下水道協会誌, 54 (657), 44-47

川端雄一郎, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴 (2016) アルカリラッピングしたコンクリートの促進膨張試験に基づく野外暴露コンクリートの ASR 膨張挙動の予測. セメント・コンクリート論文集, 69, 496-503

Kawabata Y., Yamada K. (2017) The mechanism of limited inhibition by fly ash on expansion due to alkali-silica reaction at the pessimum proportion. Cement and Concrete Research, 92, 1-15

Kawabata Y., Yamada K., Ogawa S. (2017) Modeling of environmental conditions and their impact on the expansion of concrete affected by the alkali-silica reaction. Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures, 163-175

Kawabata Y., Yamada K., Igarashi G., Sagawa Y. (2018) Effects of soak solution type on alkali release from volcanic aggregates - Is alkali release really responsible for accelerating ASR expansion? -. Journal of Advanced Concrete Technology, 16, 61-74

Kawabata Y., Yamada K. (2018) Alkali-Wrapped Concrete Prism Test (AW-CPT) - New Testing Protocol Toward a Performance Test against Alkali-Silica Reaction-. Journal of Advanced Concrete Technology, 16, 441-460

Kawabata Y., Dunant C., Yamada K., Scrivener K. (2019) Impact of temperature on expansive behavior of concrete with a highly reactive andesite due to the alkali-silica reaction. Cement and Concrete Research, 125, 105888

Kawabata Y., Yamada K., Ogawa S., Sagawa Y. (2021) Mechanisms of internal swelling reactions: Recent advances and future research needs. Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations, 2599-2607

Kawabata Y., Dunant C., Yamada K., Kawakami T. (2021) Influence of temperature on expansion and microstructural damage due to alkali-silica reaction and numerical modeling. First Book of Proceedings of the 16th ICAAR, LNEC, 225-236

Kawabata Y., Yamada K., Ogawa S., Sagawa Y. (2021) Environmental impacts on ASR expansions -modeling, field exposure and alkali-wrapped concrete prism test. First Book of Proceedings of the 16th ICAAR, LNEC, 213-224

川上隆, 山田一夫, 佐川庸貴, 五十嵐豪 (2020) 水セメント比が ASR 膨張およびアルカリシリカゲルの蓄積に及ぼす影響. 第8回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム論文集, <論文賞受賞>

Kawakami T., Sagawa Y., Kawabata Y., Yamada K., Ogawa S. (2021) A study on ASR expansion behavior of concrete exposed to natural environment for 5 years: Experimental and numerical approaches. Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations, 2637-2643

Kobayashi T., Kuramochi H., Xu K-Q., Aizawa T. (2020) Bioremediation and removal of radiocesium in anaerobic digestion of biomass crops: Effect of crop type on partitioning of cesium. Biotechnology Reports, 28, e00561

小寺周, 丸山一平, 小川彰一, 山田一夫 (2017) アルカリシリカ反応の環境湿度依存性に関する基礎的検討. コンクリー

ト工学年次論文集, 39 (1), 919-924

Kuramochi H., Fujiwara H., Yui K. (2017) Behavior of Radioactive Cesium during Thermal Treatment of Radioactively Contaminated Wastes in the Aftermath of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Global Environmental Research*, 20 (1&2), 91-100

倉持秀敏 (2018) 汚染廃棄物の熱処理研究分野における今後の展開と本学会への期待. *環境放射能除染学会誌*, 6 (3), 125-126

倉持秀敏 (2018) 受賞のことは. *環境放射能除染学会誌*, 6 (3), 211

倉持秀敏 (2019) 熱的減容化の現状と今後の展開. *廃棄物資源循環学会誌*, 30 (1), 31-38

蔵重勲, 山田一夫, 小川彰一 (2016) 非破壊透気試験等を用いたコンクリート品質管理の可能性検討 - 指定廃棄物の最終処分に向けて-. *セメント・コンクリート論文集*, 69, 287-294

宮原要, 大原利眞 (2017) 福島環境回復に向けた取り組み 第1回 環境回復に関する取り組みの進展. *日本原子力学会誌*, 59 (5), 44-48

宮里心一, 小川彰一, 山田一夫 (2016) 複種塩類による高濃度水溶液中における鉄筋コンクリートの腐食評価. *セメント・コンクリート論文集*, 69, 455-462

Mo J., Endo K. (2020) Compressibility and compressive strength of the modified removed soil from decontamination projects in Fukushima. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 8 (5), 176-181

森寛晃, 山田一夫, 岩城一郎, 長瀧重義 (2018) 放射性物質に汚染された焼却飛灰等の保管に用いるコンクリート容器の耐久性実証試験と技術要件. *コンクリート工学*, 56 (4), 296-303

Noda K., Kuramochi H., Yui K., Ito K., Yoshimoto N., Yoshimoto Y., Nagata T., Koshida H., Suzuki H., Takaoka M., Osako M. (2020) Behavior of radioactive cesium during direct melting treatment of decontamination waste with and without Cl-containing additives. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 186-195

小田聡, 田中暁大, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴 (2016) 促進コンクリートプリズム試験及び屋外暴露試験による ASR 膨張挙動の違いに関する研究. *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集*, 16, 61-66

小川彰一, 渡邊禎之, 柴田真仁, 山田一夫, 川端雄一郎 (2016) DEF 膨張と水和生成物に関する研究. *コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集*, 16, 91-96

大迫政浩 (2016) 放射性物質による環境汚染と対策の現状 除去土壌等の減容化・再生利用に向けて. *環境浄化技術*, 15 (6), 7-10

大迫政浩 (2017) 1F 事故による環境回復に伴う廃棄物の管理と除去土壌の減容・再生利用の取り組み 30 年後の絵姿を描くための技術開発を - 除去土壌は 2 千分の 1 まで減容化濃縮. *日本原子力学会誌 ATOMO*, 59 (8), 12-12

大迫政浩, 倉持秀敏, 遠藤和人 (2017) 福島環境回復に向けた取組み 第 5 回 放射性物質を含む廃棄物等の総合的管理. *日本原子力学会誌 ATOMO*, 59 (9), 41-45

大澤紀久, 山田一夫, 竹内幸生, 五十嵐豪 (2018) イメージングプレートを用いた Cs-137 と Sr-90 の判別定量の基礎実験. *コンクリート工学年次論文報告集*, 40, 63-68

坂本浩幸, 赤木洋介, 山田一夫, 舘幸男, 福田大祐, 石松宏一, 松田樹也, 斎藤希, 上村実也, 浪平隆男, 重石光弘 (2018) パルスパワー技術によるコンクリート瓦礫の除染・再利用に関する研究. *日本原子力学会和文論文誌*, 17 (2), 57-66

庄司貴, 飯野翔太, 高橋克行, 鹿島勇治, 小山陽介, 山本貴士, 大迫政浩 (2019) 放射性物質汚染廃棄物焼却施設における排ガス中微小粒子の粒子個数濃度測定によるバグフィルタ部分集じん率の評価. *廃棄物資源循環学会論文誌*, 30, 1-13

鈴木隆央, 藤原大, 竹内幸生, 千村和彦, 山本貴士, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2018) 稲わらの放射性セシウム濃度測定における測定誤差に関する検討. *環境放射能除染学会誌*, 6 (1), 25-35

Tachikawa H., Haga K., Yamada K. (2017) Mechanism of K⁺, Cs⁺ ion exchange in nickel ferrocyanide: A density functional theory study. *Computational and Theoretical Chemistry*, 1115, 175-178

- Tachikawa H., Haga K., Wabatane S., Yamada K. (2020) Local Structures and Electronic States of C-S-H-Sodium-H₂O Interface: NMR and DFT Studies. *The Journal of Physical Chemistry C*, 124 (10), 5672-5680
- 竹田尚弘, 小倉正裕, 藤原大, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2016) 加熱化学処理法による土壌・粘土鉱物からのセシウム揮発除去と揮発メカニズムの推定. *環境放射能除染学会誌*, 4 (4), 303-312
- 竹崎聡, 遠藤和人, 勝見武 (2020) 廃棄物最終処分場における覆土から水平排水材に流亡する土粒子量の予測. *地盤工学ジャーナル*, 15 (1), 131-144
- 俵積田新也, 山田一夫, 小川彰一, 佐川庸貴 (2020) 3年間の暴露試験に基づくアルカリ溶脱と ASR 膨張の関係性の検討. *コンクリート工学年次論文集*, 42 (1), 743-748
- 常世田和彦, 山田一夫, 本間健一, 市村高央, 石田泰之, 高野博幸, 万福裕造, 大迫政浩 (2018) 焼成技術を活用した汚染土壌の再利用に関する研究. *環境放射能除染学会誌*, 6, 63-72
- 山田一夫, 川端雄一郎, 小川彰一, 丸山一平 (2015) 原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察. *セメント・コンクリート論文集*, 68, 457-464
- 山田一夫 (2016) 最近の ASR 研究の進展 —いま研究者が何を考え、どのような方向に進むのか—. *セメント・コンクリート*, (837), 6-13
- 山田一夫, 山本貴士, 佐川庸貴, 上田尚史, 久保善司, 小川彰一 (2017) 委員会報告 性能規定に基づく ASR 制御型設計・維持管理シナリオに関する研究委員会. *コンクリート工学年次論文集*, 39 (1), 9-18
- Yamada K., Kawabata Y., Ogawa S., Haga K., Sagawa Y., Ochiai T. (*1Port and Airport Research Institute, *2Taiheiyo Consultant, *3Kyushu Univ, *4MRI (2017) Importance of alkali-wrapping for CPT. Swelling Concrete in Dams and Hydraulic Structures, 68-79
- 山田一夫, 大迫政浩 (2019) 放射能汚染した廃棄物処分におけるコンクリートのアルカリ骨材反応の抑制の意義. *環境放射能除染学会誌*, 7 (2), 77-86
- 山田一夫, 大迫政浩 (2020) 福島第一原子力発電所事故由来の汚染廃棄物の処理・処分にかかわるコンクリート技術の適用. *コンクリート工学*, 58 (9), 773-777
- 山田一夫 (2020) 巻頭言 正義と科学. *環境放射能除染学会誌*, 8 (3), 109-110
- Yamada K., Kiran R., Maruyama I., Tomita S. (2020) Impact of concrete characteristics of the Cs transfer in concrete. *コンクリート工学年次論文集*, 42 (1), 419-424
- 山田一夫, 有馬謙一, 大迫政浩, 遠藤和人 (2020) 県外最終処分に向けた技術シナリオの検討 環境放射能除染学会での研究会活動. *日本原子力学会誌アトモス*, 62 (10), 551-554
- Yamada K., Yamamoto T., Kawabata Y., Sagawa Y., Ueda Y., Kubo Y., Ogawa S. (2021) Performance based design and maintenance strategy with controlling ASR. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*, 2579-2587
- Yamada K., Kawabata Y., Ogawa S., Sagawa Y. (2021) A method keeping total alkali content and maximizing water supply for concrete prism test of potential expansion by ASR. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations*, 2608-2612
- Yamada K., Kawabata Y., Kawakami T., Sagawa Y., Ogawa S. (2021) AW-CPT as an ideal laboratory potential expansion test for ASR with constant alkali content and maximized water supply and the design of an alkali solution for wrapping. *First Book of Proceedings of the 16th ICAAR, LNEC*, 877-886
- Yamada K., Kawabata Y., Kawakami T., Sagawa Y. (2021) Determining the pH of concrete pore water for alkali-wrapping considering alkali dissolution from aggregate. *First Book of Proceedings of the 16th ICAAR, LNEC*, 867-876
- 山本貴士, 竹内幸生, 田野崎隆雄, 鈴木剛, 金松雅俊, 高田光康, 白石不二雄, 大迫政浩 (2017) 福島第一原子力発電所近傍における解体工事従事者の外部被ばく量の評価. *保健物理*, 52 (4), 259-264
- Yui K., Kuramochi H., Osako M. (2018) Understanding the Behavior of Radioactive Cesium during the Incineration of Contaminated Municipal Solid Waste and Sewage Sludge by Thermodynamic Equilibrium Calculation. *ACS Omega*, 3 (11), 15086-15099

由井和子, 竹内幸生, 山本貴士, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2020) 廃棄物焼却におけるストロンチウムの挙動と溶出特性. 環境放射能除染学会誌, 8 (3), 133-146

Yui K., Kuramochi H., Osako M. (2021) Measurement and modeling of heavy metal behaviors during the incineration of RDF in a pilot-scale kiln incinerator-Part 1: Modeling using multizonal thermodynamic equilibrium calculation. *Process Safety and Environmental Protection*, 150, 373-384

環境回復研究プログラム (環境回復-2)

Evrard O., Durand R., Nakao A., Lacey P.J., Lefevre I., Wakiyama Y., Asanuma-Brice C., Cerdan O., Hayashi S. (2020) Impact of the 2019 typhoons on sediment source contributions and radiocesium concentrations in rivers draining the Fukushima radioactive plume, Japan. *Comptes Rendus Geosciences*, 352 (3), 199-211

古市尚基, 東博紀, 杉松宏一, 大村智宏, 越川海, 長谷川徹, 山田東也, 南部亮元, 埴山秀樹 (2019) 海底混合層内の懸濁粒子動態. 沿岸海洋研究, 57 (1), 21-30

Goto D., Morino Y., Ohara T., Sekiyama T.T., UCHIDA J., Nakajima T. (2020) Application of linear minimum variance estimation to the multi-model ensemble of atmospheric radioactive Cs-137 with observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20, 3589-3607

Hashimoto S., Imamura N., Kaneko S., Komatsu M., Matsuura T., Nishina K., Ohashi S. (2020) New predictions of ¹³⁷Cs dynamics in forests after the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*, 10 (29)

Hashimoto S., Imamura N., Kawanishi A., Komatsu M., Ohashi S., Nishina K., Kaneko S., Shaw G., Thiry Y. (2020) A dataset of ¹³⁷Cs activity concentration and inventory in forests contaminated by the Fukushima accident. *Scientific data*, 7 (431)

Hayashi S. (2016) Migration and accumulation of radioactive cesium in the upstream region of river watersheds affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident: A review. *Global Environmental Research*, 20 (1&2), 45-53

林誠二 (2017) 水環境における放射能汚染の現状と環境回復に向けた取組. 環境と測定技術, 44 (12), 3-9

Hayashi S., Tsuji H. (2021) Role and Effect of a Dam on Migration of Radioactive Cesium in a River Catchment after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Global Environmental Research*, 24 (2), 105-113

東博紀, 秋山千亜紀, 渡辺均, 丹下仁 (2018) 東日本大震災前後における宮城県と福島県中通り・浜通り地方の水質汚濁負荷発生量の変化. 土木学会論文集 B1(水工学), 74 (4), I_541-I_546

Huon S., Hayashi S., Lacey J.P., Tsuji H., Onda Y., Evrard O. (2018) Source dynamics of radiocesium-contaminated particulate matter deposited in an agricultural water reservoir after the Fukushima nuclear accident. *Science of the Total Environment*, 612, 1079-1090

飯島和毅, 林誠二, 鶴田忠彦 (2017) 福島県の環境回復に向けた取り組み 第8回 森林・流域圏内のセシウムの動態. 日本原子力学会誌, 59 (12), 44-48

Imaizumi Y., Kuroda K., Hayashi S., Suzuki N. (2016) Analysis of Temporal Changes in Terrestrial Cesium-137 Using Publicly Available Monitoring Data in Japan. *Global Environmental Research*, 20 (1-2), 59-66

Ishii Y., Matsuzaki S., Hayashi S. (2020) Different factors determine ¹³⁷Cs concentration factors of freshwater fish and aquatic organisms in lake and river ecosystems. *Journal of Environmental Radioactivity* Volume , March 2020, 106102, 213

Ishii Y., Matsuzaki S., Hayashi S. (2020) Data on ¹³⁷Cs concentration factor of freshwater fish and aquatic organisms in lake and river ecosystems. *Data in Brief*, 28

Iwasaki T., Sekiyama T., Nakajima T., Watanabe A., Suzuki Y., Kondo H., Morino Y., Terada H., Nagai H., Takigawa M., Yamazawa H., Quelo D., Mathieu A. (2019) Intercomparison of numerical atmospheric dispersion prediction models for emergency response to emissions of radionuclides with limited source information in the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *Atmospheric Environment*, 214, 116830

Jaegler H., Pointurier F., Diez-Fernandez S., Gourgiotis A., Isnard H., Hayashi S., Tsuji H., Onda Y., Hubert A., Lacey J.P., Evrard O. (2019) Reconstruction of uranium and plutonium isotopic signatures in sediment accumulated in the Mano Dam reservoir, Japan, before and after the Fukushima nuclear accident. *Chemosphere*,

Kitayama K., Morino Y., Takigawa M., Nakajima T., Hayami H., Nagai H., Terada H., Saito K., Shimbori T., Kajino M., Sekiyama

- T.T., Didier D., Mathieu A., Quelo D., Ohara T., Tsuruta H., Oura Y., Ebihara M., Moriguchi Y., Shibata T. (2018) Atmospheric Modeling of ¹³⁷Cs Plumes From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant-Evaluation of the Model Intercomparison Data of the Science Council of Japan. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123 (14), 7754-7770
- Komatsu M., Nishina K., Hashimoto S. (2019) Extensive analysis of radiocesium concentrations in wild mushrooms in eastern Japan affected by the Fukushima nuclear accident: Use of open accessible monitoring data. *Environmental Pollution*, 255 (2)
- Koshikawa-K.M., Watanabe Mirai., Tamaoki M., Ito S., Takamatsu T., Murata T., Saito T., Hayashi S. (2019) Comparison of 0.1 M Stable CsCl and 1 M NH₄NO₃ as an Extraction Reagent to Evaluate Cs-137 Mobility in Soils. *Analytical Sciences*, 35 (2), 153-158
- Kurihara M., Yasutaka T., Aono T., Ashikawa N., Ebina H., Iijima T., Ishimaru K., Kanai R., Karube Z., Konnai Y., Kubota T., Maehara Y., Maeyama T., Okizawa Y., Ota H., Otosaka S., Sakaguchi A., Tagomori H., Taniguchi K., Tomita M., Tsukada H., Hayashi S., Lee S., Miyazu S., Shin M., Nakanishi T., Nishikiori T., Onda Y., Shinano T., Tsuji H. (2019) Repeatability and reproducibility of measurements of low dissolved radiocesium concentrations in freshwater using different pre-concentration methods. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1-9
- Li X., Sun S., Hu X., Huang H., Li H., Morino Y., Wang S., Yang X., Shi J., Fang S. (2019) Source inversion of both long- and short-lived radionuclide releases from the Fukushima Daiichi nuclear accident using on-site gamma dose rates. *Journal of Hazardous Materials*, 379, 120770
- Matsuzaki S., Tanaka A., Kohzu A., Suzuki K., Komatsu K., Shinohara R., Nakagawa M., Nohara S., Ueno R., Satake K., Hayashi S. (2021) Seasonal dynamics of the activities of dissolved ¹³⁷Cs and the ¹³⁷Cs of fish in a shallow, hypereutrophic lake: Links to bottom-water oxygen concentrations. *Science of The Total Environment*, 761, 143257
- Morino Y., Ohara T. (2017) Atmospheric modeling of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Global Environmental Research*, 20, 23-31
- Nishikiori T., Watanabe Mirai., Koshikawa-K.M., Watanabe K., Yamamura S., Hayashi S. (2019) ¹³⁷Cs transfer from canopies onto forest floors at Mount Tsukuba in the four years following the Fukushima nuclear accident. *Science of the Total Environment*, 659, 783-789
- Nishina K., Hashimoto S., Imamura N., Ohashi S., Komatsu M., Kaneko S., Hayashi S. (2018) Calibration of forest ¹³⁷Cs cycling model "FoRothCs" via approximate Bayesian computation based on 6-year observations from plantation forests in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*, 193-194, 82-90
- Ohara T., Miyahara K. (2016) An Overview of Progress in Environmental Research on Radioactive Materials Derived from the Fukushima Nuclear Accident. *Global Environmental Research*, 20 (1&2), 3-13
- Ozaki H., Yoshimura K., Asaoka Y. (*1Japan Atomic Energy Agency, (*2Nihon University), Hayashi S. (2021) Antimony from brake dust to the combined sewer collection system via road effluent under rainy conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193 (369)
- 斎藤梨絵, 石井弓美子, 根本唯, 熊田礼子, 中村匡聡, 相馬理央, 大町仁志, 玉置雅紀 (2020) メタバーコーディングに基づくイノシシの食性解析: 植物性食物の推定における再現性と動物性食物の推定における効果的な解析対象種 DNA の抑制方法の検討. *日本生態学会誌*, 70, 163-176
- Sakuma K., Tsuji H., Hayashi S., Funaki H., Malins A., Yoshimura K., Kitamura A., Iijima K., Hosomi M. (2018) Applicability of Kd for modelling dissolved ¹³⁷Cs concentrations in Fukushima river water: Case study of the upstream Ota River. *Journal of Environmental Radioactivity*, 184-185, 53-62
- 佐竹潔, 上野隆平, 松崎慎一郎, 田中敦, 高津文人, 中川恵, 野原精一 (2016) 福島原発事故から2年後の霞ヶ浦におけるユスリカ幼虫の放射性セシウム ¹³⁷(¹³⁷Cs)の濃度と移行状況. *陸水学雑誌*, 77 (2), 137-143
- Sato Y., Takigawa M., Sekiyama T.T., Kajino M., Terada H., Nagai H., Kondo H., Uchida J., Goto D., Quelo D., Mathieu A., Querel A., Fang S., Morino Y., Von Schoenberg P., Grahn H., Brannstrom N., Hirao S., Tsuruta H., Yamazawa H., Nakajima T. (2018) Model Intercomparison of Atmospheric ¹³⁷Cs From the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident: Simulations Based on Identical Input Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123
- Sato Y., Sekiyama T.T., Fang S., Kajino M., Querel A., Quelo D., Kondo H., Terada H., Kadowaki M., Takigawa M., Morino Y.,

- Uchida J., Goto D., Yamazawa H. (2020) A model intercomparison of atmospheric ¹³⁷Cs concentrations from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, phase III: Simulation with an identical source term and meteorological field at 1-km resolution. *Atmospheric Environment: X*, 7 (100086)
- 武地誠一, 辻英樹, 越川昌美, 伊藤祥子, 舟木泰智, 林誠二 (2020) 森林河川の懸濁物質・ダム湖の底質における生物利用性放射性セシウム量の評価. *陸水学雑誌*,
- Tsuji H., Ishii Y., Shin M., Taniguchi K., Arai H., Kurihara M., Yasutaka T., Kuramoto T., Nakanishi T., Lee S., Shinano T., Onda Y., Hayashi S. (2019) Factors controlling dissolved ¹³⁷Cs concentrations in east Japanese Rivers. *Science of The Total Environment*, 697
- Tsuji H., Nakagawa M., Iijima K., Funaki H., Yoshimura K., Sakuma K., Hayashi S. (2020) Dynamics of ¹³⁷Cs in Water and Phyto- and Zooplankton in a Reservoir Affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Global Environmental Research*, 24 (2), 115-127
- 鶴田治雄, 大浦泰嗣, 海老原充, 森口祐一, 大原利眞, 中島映至 (2017) 東電福島第一原子力発電所事故直後の東日本における放射性セシウムの時空間分布—大気環境常時測定局の SPM 計の使用済みテープレコーダ紙分析データの解析—. *エアロゾル研究*, 32 (4), 244-254
- Tsuruta H., Oura Y., Ebihara M., Moriguchi Y., Ohara T., Nakajima T. (2018) Time-series analysis of atmospheric radiocesium at two SPM monitoring sites near the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant just after the Fukushima accident on March 11, 2011. *Geochemical Journal*, 52, 103-121
- 鶴田忠彦, 新里忠史, 中西貴宏, 土肥輝美, 中間茂雄, 舟木泰智, 御園生敏治, 大山卓也, 操上広志, 林誠二, 齊藤宏, 北村哲浩, 飯島和毅 (2017) 福島における放射性セシウムの環境動態研究の現状—根拠となる科学的知見の明示をより意識した情報発信の一環として—. *JAEA-Review*, 18, 1-86
- 和田敏裕, 山川宇宙, 小牧弘季, 寺本航, 高崎和義, 舟木優斗, 佐藤太津真, 早乙女忠弘, 川田暁, 石井弓美子, 林誠二, 斎藤梨絵, 須田真人, 金指努, 津田吉晃 (2021) 原発事故後の福島県浜通り河川で採取されたエゾウグイ. *福島大学地域創造*, 32 (2), 233-239
- Yasutaka T., Miyazu S., Tsuji H., Arita K., Hayashi S., Takahashi A., Kawamoto T., Aoyama M. (2016) Development of a copper-substituted, Prussian blue-impregnated, nonwoven cartridge filter to rapidly measure radiocesium concentration in seawater. *Journal of Nuclear Science and Technology*,
- Anderson D., Beresford N.A., Ishiniwa H., Onuma M., Nanba K., Hinton T.G. (2021) Radiocesium concentration ratios and radiation dose to wild rodents in Fukushima Prefecture. *Journal of Environmental Radioactivity*, 226 (106457)
- Dainese M., Martin E.A., Aizen M.A., Albrecht M., Bartomeus I., Bommarco R., Carvalheiro L.G., Kramer R.C., Gagic V., Garibaldi L.A., Ghazoul J., Grab H., Jonsson M., Karp D.S., Kennedy C.M., Kleijn D., Kremen C., Landis D.A., Letourneau D.K., Marini L., Poveda K., Rader R., Smith H.G., Tschartke T., Andersson G.S., Badenhausser I., Baensch S., Bezerra A.D.M., Bianchi F.J.J.A., Boreux V., Bretagnolle V., Lopez B.C., Cavigliasso P., Cetkovic A., Chacoff N.P., Classen A., Cusser S., Silva F.D.da.S., Groot G.A.de., Dudenhofer J.H., Ekroos J., Fijen T., Franck P., Freitas F.D.da.S., Garratt M.P.D., Gratton C., Hipolito J., Holzschuh A., Hunt L., Iverson A.L., Jha S., Keasar T., Kim T.N., Kishinevsky M., Klatt B.K., Klein A.M., Krishnan S., Larsen A.E., Lavigne C., Liere H., Maas B., Mallinger R.E., Pachon E.M., Salinas A.M., Meehan T.D., Mitchell M.G.E., Molina G.A.R., Nesper M., Nilsson L., O'Rourke M.B., Peters M.K., Plecas M., Potts S.G., Ramos D.de.L., Rosenheim J.A., Rundlof M., Rusch A., Saez A., Schepher J., Schleuning M., Schmack J.M., Sciligo A.R., Seymour C., Stanley D.A., Stewart R., Stout J.C., Sutter L., Takada M.B., Taki H., Tamburini G., Tschumi M., Viana B.F., Westphal C., Willcox B.K., Wratten S.D., Yoshioka A., Trello C.Z., Zhang W., Zou Y., Dewenter I.S. (2019) A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science Advances*, 5 (10)
- Fukasawa K., Mishima Y., Yoshioka A., Kumada N., Totsu K., Osawa T. (2016) Mammal assemblages recorded by camera traps inside and outside the evacuation zone of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Ecological Research*, 31 (4), 493
- 深澤圭太, 三島啓雄, 熊田那央, 竹中明夫, 吉岡明良, 勝又聖乃, 羽賀淳, 久保雄広, 玉置雅紀 (2017) バードデータチャレンジ: 録音音声の種判別における野鳥愛好家・研究者協働の試みとその課題. *Bird Research*, 13, A15-A28
- 深澤圭太 (2017) 「生物」「生命」を研究・育成する施設から読者の皆さんへのメッセージ: 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター[Vol.3]. *生物の科学 遺伝*, 71 (5), 492
- Fukasawa K., Mishima Y., Yoshioka A., Kumada N., Totsu K. (2017) Acoustic monitoring data of avian species inside and outside the

evacuation zone of the Fukushima Daiichi power plant accident. *Ecological Research*, 32 (6), 769

Fukasawa K., Osada Y., Iijima H. (2020) Is harvest size a valid indirect measure of abundance for evaluating the population size of game animals using harvest-based estimation?. *Wildlife Biology*, 2020 (4), wlb.00708

堀口敏宏 (2016) 東日本大震災及び福島原発事故後の東日本沿岸における潮間帯生物の種数と棲息密度. 「福島第一原発事故による周辺生物への影響に関する研究会」報告書, KURRI-EKR-15, 21-32

Horiguchi T., Kodama K., Aramaki T., Miyata Y., Nagao S. (2018) Radiocesium in seawater, sediments, and marine megabenthic species in coastal waters off Fukushima in 2012-2016, after the 2011 nuclear disaster. *Marine Environmental Research*, (137), 206-224

Horiguchi T., Kawamura K., Ohta Y. (2021) Consecutive sexual maturation observed in a rock shell population in the vicinity of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, Japan. *Scientific Reports*, 11 (560)

Ishiniwa H., Okano T., Yoshioka A., Tamaoki M., Yokohata Y., Shindo J., Azuma N., Nakajima N., Onuma M. (2019) Concentration of radioactive materials in small mammals collected from a restricted area in Fukushima, Japan since 2012. *Ecological Research*, 2019;34, 7

伊東憲正, 吉岡明良, 深澤圭太, 熊田那央, 三島啓雄, 玉置雅紀 (2017) 福島県の被災地における興味深いハナアブ科とムシヒキアブ科の記録について. *はなあぶ*, 43, 1-3

伊東憲正, 吉岡明良, 深澤圭太, 熊田那央, 三島啓雄, 玉置雅紀 (2017) 福島県の被災地における興味深いミズアブ科, ハナアブ科およびムシヒキアブ科の記録について. *はなあぶ*, 44, 112-115

伊東憲正, 雛倉正人, 吉岡明良, 玉置雅紀, 深澤圭太, 熊田那央, 小川結衣, 大内博文 (2020) 福島の避難指示が解除された地域とその周辺における興味深いハムシ科, ゾウムシ科, ミズアブ科およびムシヒキアブ科の記録について. *InsecTOHOKU*, 52, 14-16

JO Jaeick, 吉岡明良, 大内博文 (2020) 田村市船引町で採集されたマルガタゲンゴロウの記録. *InsecTOHOKU*, 52, 23

JO Jaeick, 吉岡明良, 大内博文 (2020) 福島県南相馬市におけるキゴシジガバチの記録. *月刊むし*, 598, 49-50

Kakiuchi K., Asakawa M., Ishiniwa H., Tamaoki M., Onuma M. (2021) Temporal changes in the parasite fauna of the large Japanese field mouse *Apodemus speciosus* in the radioactive contaminated zone of Fukushima. *Japanese Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 26 (1), 1-5

Karp D.S., Chaplin-Kramer R., Meehan T.D., Martin E.A., DeClerck F., Grab H., Gratton C., Hunt L., Larsen A.E., Martinez-Salinas A., O'Rourke M.E., Rusch A., Poveda K., Jonsson M., Rosenheim J.A., Schellhorn N.A., Tschamtk T., Wratten S.D., Zhang W., L.Iverson A., Adler L.S., Albrecht M., Alignier A., Angelella G.M., Anjum M.Z., Avelino J., Batary P., Baveco J.M., Bianch F.J.J.A., Birkhofer K., Bohnenblust E.W., Bommarco R., Brewer M.J., Caballero-Lopez B., Carriere Y., Carvalheiro L.G., Cayuela L., Centrella M., Cetkovic A., Henri D.C., Chabert A., Costamagna A.C., Aldo De la Mora., Joop de Kraker., Desneux N., Diehl E., Dikotter T., Dormann C.F., Eckberg J.O., Entling M.H., Fiedler D., Franck P., Frank van Veen F.J., Frank T., Gagic V., Garratt M.P.D., Getachew A., Gonthier D.J., Goodell P.B., Graziosi I., Groves R.L., Gurr G.M., Hajian-Forooshani Z., Heimpel G.E., Herrmann J.D., Huseth A.S., Inclan D.J., Ingrao A.J., Iv P., Jacot K., Johnson G.A., Jones L., Kaiser M., Kaser J.M., Keasar T., Kim T.N., Kishnevsky M., Landis D.A., Lavandero B., Lavigne C., Ralec A.L., Lemessa D., Letourneau D.K., Liere H., Lu Y., Lubin Y., Luttermoser T., Maas B., Mace K., Madeira F., Mader V., Cortesero A.M., Marini L., Martinez E., Martinson H.M., Menozzi P., Mitchell M.G.E., Miyashita T., Molina G.A.R., Molina-Montenegro M.A., O'Neal M.E., Opatovsky I., Ortiz-Martinez S., Nash M., Ostman O., Ouin A., Pak D. (2018) Crop pests and predators exhibit inconsistent responses to surrounding landscape composition. *PNAS*, 115 (33), E7863-E7870

児玉圭太, 堀口敏宏 (2016) 東日本大震災・原発事故後の福島県沿岸域における底棲魚介類の群集構造. 「福島第一原発事故による周辺生物への影響に関する研究会」報告書, KURRI-EKR-15, 33-36

Matsunami M., Endo D., Saitou N., Suzuki H., Onuma M. (2018) Draft genome sequence of Japanese wood mouse, *Apodemus speciosus*. *Data in Brief*, 16, 43-46

Matsushima N., Ihara S., Inaba O., Horiguchi T. (2021) Assessing the impact of large-scale farmland abandonment on the habitat distributions of frog species after the Fukushima nuclear accident. *Oecologia*,

大沼学 (2017) 鳥インフルエンザウイルスはどのようにして国内へ侵入するのか. *電気評論*, 102 (9), 54-55

Osawa T., Yamasaki K., Tabuchi K., Yoshioka A., Ishigooka Y., Sudo S., Takada M. (2018) Climate-mediated population dynamics enhance distribution range expansion in a rice pest insect. *Basic and Applied Ecology*, 30, 41-51

Osawa T., Yamasaki K., Tabuchi K., Yoshioka A., Takada M. (2018) Detecting crucial dispersal pathways using a virtual ecology approach: A case study of the mirid bug *Stenotus rubrovittatus*. *Ambio*, 47, 806-815

Tamaoki M. (2016) Studies on radiation effects from the Fukushima nuclear accident on wild organisms and ecosystems.. *Global Environmental Research*, 20 (1 & 2), 73-82

玉置雅紀 (2021) 野生生物はどのような影響を受けたのか?. *現代化学* 5, (602), 56-60

Yoshioka A., Fukasawa K., Mishima Y., Sasaki K., Kadoya T. (2017) Ecological dissimilarity among land-use/land-cover types improves a heterogeneity index for predicting biodiversity in agricultural landscapes. *Ambio*, 46 (8), 894-906

Yoshioka A., Matsushima N., Jingu S., Kumada N., Yokota R., Totsu K., Fukasawa K. (2020) Acoustic monitoring data of anuran species inside and outside the evacuation zone of the Fukushima Daiichi power plant accident. *Ecological Research*, 35, 765-772

Yoshioka A., Shimizu A., Oguma H., Kumada N., Fukasawa K., Jingu S., Kadoya T. (2020) Development of a camera trap for perching dragonflies: a new tool for freshwater environmental assessment. *PeerJ*, 8, e9681

吉岡明良 (2020) 被災地の飛翔性昆虫はいま. *グリーン・パワー*, (7), 10-11

土井妙子, 高木麻衣, 田中敦, 菅野宗夫, 土器屋由紀子, 田尾陽一, 榎本和義 (2019) つくばと飯館における福島第一原発事故由来の大気中放射性セシウム濃度の変化と高濃度現象の要因. *RADIOISOTOPES*, 3 (68), 83-104

Takagi M., Tanaka A., Nakayama S.F. (2019) Estimation of the radiation dose via indoor dust in the Ibaraki and Chiba prefectures, 150-200km south from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Chemosphere*, 236 (124778)

Takagi M., Ohara T., Goto D., Morino Y., Nakayama S.F., Uchida J., Sekiyama T.T., Ebihara M., Oura Y., Nakajima T., Tsuruta H., Moriguchi Y. (2020) Reassessment of early ¹³¹I inhalation doses by the Fukushima nuclear accident based on atmospheric ¹³⁷Cs and ¹³¹I/¹³⁷Cs observation data and multi-ensemble of atmospheric transport and deposition models. *Journal of Environmental Radioactivity*, 218 (106233)

環境創生研究プログラム

朝日ちさと, 伊藤泰志, 中尾豊, 本田智則, 平野勇二郎 (2019) 特集総括 環境と経済の統合の進展 —環境・経済・社会の包括的枠組みにおける環境経済学の展開. *環境情報科学*, 48 (1), 73-77

浅野敏久, 森保文, 前田恭伸, 犬塚裕雅 (2020) 瀬戸内海流域住民の環境保全と市民活動についての意識. *水資源・環境研究*, 33 (1), 7-14

Yu B., Wei Y. M., Gomi K., Matsuoka Y. (2018) Future scenarios for energy consumption and carbon emissions due to demographic transitions in Chinese households. *Nature Energy*, 3, 109-118

Dou Y., Fujii M., Fujita T., Gomi K., Maki S., Tanikawa H. (2017) Potential of Waste Heat Exchange Considering Industrial Location Changes: A Case of Shinchi-Soma Region in Fukushima, Japan. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. G (Environmental Research)*,

Fang K., Zhang Q., Long Y., Yoshida Y., Sun L., Zhang H., Dou Y., Li S. (2019) How can China achieve its Intended Nationally Determined Contributions by 2030? A multi-criteria allocation of China's carbon emission allowance. *Applied Energy*, 241, 380-389

藤田壮, SUN LU, 五味馨, 牧誠也, 平野勇二郎 (2019) 地域特性とニーズを活用する SDGs 指標構築と政策連携 : 福島県新地町での社会実装研究. *環境システム研究論文発表会講演集 / 土木学会環境システム委員会 編*, 47, 17-22

五味馨, 藤田壮, 岡島優人, 越智雄輝, 文屋信太郎, 牧誠也, DOU YI, 井上剛, 古明地哲夫, 大島英幹 (2017) 将来空間分布の影響を考慮した低炭素対策の導入可能性評価手法の開発. *土木学会論文集 G (環境)*, 73 (6), II_343-II_352

五味馨, 藤田壮, 越智雄輝, 小川祐貴, 大場真, 戸川卓哉 (2020) 地域循環共生圏による持続可能な発展の研究と基礎的な分析枠組みの提案. *土木学会論文集 G (環境)*, 76 (6), II_249-II_260

Hirano Y., Ihara T., Yoshida Y. (2016) Estimating Residential CO₂ Emissions based on Daily Activities and Consideration of Methods

to Reduce Emissions. *Building and Environment*, 103, 1-8

Hirano Y., Yoshida Y. (2016) Assessing the effects of CO2 reduction strategies on heat islands in urban areas. *Sustainable Cities and Society*, 26, 383-392

平野勇二郎, 五味馨, 戸川卓哉, 中村省吾, 大場真, 藤田壮 (2017) 震災復興から環境創生へつなぐ分野横断型復興まちづくり支援. *環境情報科学*, 46 (1), 47-52

平野勇二郎, 井原智彦, 戸川卓哉, 五味馨, 奥岡桂次郎, 小林元 (2017) 家庭における直接・間接 CO2 推計に基づく低炭素型ライフスタイルの検討. *環境科学会誌*, 30 (4), 261-273

Hirano Y., Gomi K., Nakamura S., Yoshida Y., Narumi D., Fujita T. (2017) Analysis of the impact of regional temperature pattern on the energy consumption in the commercial sector in Japan. *Energy and Buildings*, 149, 160-170

平野勇二郎, 中村省吾 (2017) 情報通信技術を活用した地域密着型の省エネルギー行動支援. *電気評論*, 102 (10), 44-45

平野勇二郎, 中村省吾, 藤田壮 (2018) 福島県新地町における戸建住宅の電力消費モニタリングに基づく家庭用エネルギー消費実態の解析. *スマートグリッド*, 59 (10), 23-27

平野勇二郎, 五味馨, 戸川卓哉, 有賀 敏典, 松橋啓介, 藤田壮 (2018) 都市域の交通による CO2 排出量と市街地密度の関係の分析. *土木学会論文集 G (環境)*, 74 (6), II_183-II_191

Hirano Y., Ihara T., Gomi K., Fujita T. (2019) Simulation-Based Evaluation of the Effect of Green Roofs in Office Building Districts on Mitigating the Urban Heat Island Effect and Reducing CO2 Emissions. *Sustainability*, 11 (7)

平野勇二郎, 安達健一, 藤田壮 (2019) 福島県新地駅周辺地域における地域分散型エネルギーマネジメントシステム構築とその計画・評価手法の開発. *スマートグリッド*, 60 (14), 24-29

平野勇二郎, 杉村乾, 中尾豊, 富所弘充, 本田智則 (2019) 新たなフェーズを迎える福島の復興-震災復興から持続可能な地域環境の創造へ. *環境情報科学*, 48 (4), 49-52

Hirano Y., Ihara T., Hara M., Honjo K. (2020) Estimation of Direct and Indirect Household CO2 Emissions in 49 Japanese Cities with Consideration of Regional Conditions. *Sustainability*, 12 (11)

一ノ瀬俊明 (2018) 地理学のアウトリーチへの提言 —行政支援にもとづく事例と展望—. *E-journal GEO*, 13 (1), 229-235

Long Y., Yoshida Y., Zhang R., Sun L., Dou Y. (2018) Policy implications from revealing consumption-based carbon footprint of major economic sectors in Japan. *Energy Policy*, 119, 339-348

Lubashevskiy V., Hirano Y. (2018) Prediction of Power Supply Demand: Consumption Pattern Modeling. *International Journal of Advances in Science, Engineering and Technology*, 6 (3), 61-66

Mori Y., Asano T., Maeda Y. (2019) Are Social Network Services Effective for Recruiting Volunteers?. *Environmental science*, 32 (6), 204-213

Mori Y., Asano T., Maeda Y. (2019) What Prompts Volunteer Activity - Choice or Coincidence? Impact of Perceived Cost - Benefit and Information Source on Participation. *The Nonprofit Review - The Journal of the Japan NPO Research Association*, 19 (1&2), 101-109

盛岡通, 森保文 (2018) 持続可能性に向けた手法 (座長総括) . *環境共生*, 32, 65-66

Nemoto K., Inuzuka H., Nakamura S., Mori Y. (2017) Supply Chain Analysis for Determining the Requirements for Continuous Woody Biomass Energy Utilization Systems: Comparison of the Actual Management Conditions in Japan. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 8 (1), 203-209

根本和宜, 中村省吾, 森保文 (2017) 家庭向け木質バイオマス燃焼機器の普及と燃料消費量. *林業経済研究*, 63 (3), 82-91

Oba M., Hayashi K., Suzuki T., Li R. (2015) Analysis of urban ecosystem services considering conservation priority. *International Journal of Environmental and Rural Development*, 6 (2), 66-72

Oba M., Fujii M., Hayashi K. (2016) Geospatial distribution of ecosystem services and biomass energy potential in eastern Japan.

Journal of Cleaner Production, 130, 35-44

大場真 (2017) 地球温暖化の影響予測と適応策検討:適応研究への AI 活用の可能性. 月刊ビジネスアイ エネコ, 50 (9), 24-26

大場真 (2018) 地域資源を活かした地域環境創生—奥会津地域での取り組みを例に—. 環境共生, 33, 39-43

大塚彩美, 平野勇二郎, 鳴海大典 (2017) 省エネルギー行動の背景にある価値観・意識に関する研究. 日本建築学会環境系論文集, 82 (739), 811-820

大塚彩美, 平野勇二郎, 鳴海大典 (2018) 電力消費量に影響を与える住生活に関連するライフスタイル要因 — HEMS を標準設置した全電化集合住宅を対象として —. 日本建築学会環境系論文集, 83 (751), 781-790

杉村乾, 中尾豊, 平野勇二郎, 横田樹広 (2020) 気候変動・温暖化問題への関心-意識をより高め、行動へと移させるためには何が必要か?. 環境情報科学, 49 (2), 70-72

Sun L., Li H., Dong L., Fang K., Ren J., Geng Y., Fujii M., Zhang W., Zhang N., Liu Z. (2016) Eco-benefits assessment on urban industrial symbiosis based on material flows analysis and emergy evaluation approach: A case of Liuzhou city, China. Resources, Conservation and Recycling, 06 (007) <Most cited Paper Award 2019 for RCR awarded>

Sun L., Fujii M., Li Z., Dong H., Geng Y., Liu Z., Fujita T., Yu X., Zhang Y. (2020) Energy-saving and carbon emission reduction effect of urban-industrial symbiosis implementation with feasibility analysis in the city. Technological Forecasting & Social Change, 151

Sun L., Liu W., Li Z., Cai B., Fujii M., Luo X., Chen W., Geng Y., Fujita T., Le Y. (2021) Spatial and structural characteristics of CO2 emissions in East Asian megacities and its indication for low-carbon city development. Applied Energy, 284

戸川卓哉, 中村省吾, 大場真 (2017) 環境創生につながる復興まちづくりに向けて. 環境管理, 53 (3), 9-13

戸川卓哉, DOU YI, 大場真, 根本和宜, 中村省吾, 藤井実 (2017) 中山間地域における分散型エネルギーシステムのデザインと導入基準. 土木学会論文集 G (環境), 73 (5), I_107-I_119

戸川卓哉, 加藤博和, 林良嗣, 森田紘圭, 河村幸宏 (2017) CO2 排出量・市街地維持費用・QOL の 3 指標による集約型都市構造の評価. 地球環境, 22 (2), 121-130

戸川卓哉, 藤井実, 平野勇二郎, 大西悟 (2017) 低炭素社会に対応したエネルギー・資源循環システムのデザイン. 地球環境, 22 (2), 137-144

戸川卓哉, 中村省吾, 大場真, 根本和宜, 寶毅, 藤井実 (2020) 中山間地域における集落構造を考慮した分散型エネルギーシステム的设计-バイオマス・太陽光を中心とした地域循環共生圏の構築に向けて-. 土木学会論文集 G (環境), 76 (4), 72-83

辻岳史, 多島良, 中村省吾, 大場真 (2017) 混住地域における放射線災害からの地域環境創生に関する論点整理-福島県三春町を事例として-. 地域安全学会梗概集, (41), 87-90

辻岳史 (2018) 地域社会学が活写する長期的な社会過程としての復興 (地域社会学学会大 43 回大会・自由報告部会 2-1 印象記). 地域社会学会会報, 209, 5-7

辻岳史, 中村省吾, 多島良, 大場真 (2018) 地域社会の放射性物質対策におけるステークホルダー連携—福島県三春町を事例として—. 第 4 回震災問題研究交流会研究報告書, 4, 50-55

辻岳史, 戸川卓哉, 大場真 (2020) 中小規模市町村の気候変動対策に係る基盤と推進体制: こおりやま広域連携中枢都市圏を事例として. 環境情報科学学術研究論文集, 34, 234-239

Tsuji T., Kuroda Y. (2020) The Disaster/Reconstruction Process: a Case Study of Onagawa Town. In: Urano M.監修, Comprehensive Research on Local Contexts of Disaster Recovery: Grants-in-Aid for Science Research: Scientific Research (A) 19H00613 2019 Annual Report, Institute for Sustainable Community and Risk Management, 1-17

Tsuji T., Nakamura S., Ooba M. (2021) Community Governance in Decontamination Policy after the Fukushima Nuclear Accident: Two Case Studies from the Naka-dori Region, Fukushima, Japan. Global Environmental Research, 24 (2), 243-251

辻岳史 (2021) 小林秀行著『初動期大規模災害復興の実証的研究』(東信堂 2020 年). 地域社会学会年報, 33, 81-82

Wenjing L., Sun L., Li Z., Fujii M., Yong G., Liang D., Fujita T. (2020) Trends and future challenges in hydrogen production and storage research. *Environmental Science and Pollution Research*, 1, 1-13

巖網林, 高山範理, 伊藤泰志, 平野勇二郎, 本田智則, 杉村乾 (2017) 特集総括 震災レジリエンスと環境共生 -人口減少社会における復興とは-. *環境情報科学*, 46 (1), 79-84

前田恭伸, 森保文, 浅野敏久, 犬塚裕雅 (2021) 市民活動のためのボランティア募集と ICT 利用についての実態調査. *エコミュージアム研究*, (25), 80-86

災害環境マネジメント研究プログラム

阿部博和, 松政正俊, 木下今日子, 鈴木孝男, 金谷弦 (2020) 宮古湾津軽石川河口干潟における 2018 年干潟ベントス調査の報告 (東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査の補足調査). *みちのくベントス*, 4, 12-21

阿部博和, 松政正俊, 木下今日子, 鈴木孝男, 金谷弦 (2020) 広田湾小友浦における 2018 年干潟ベントス調査の報告 (東北地方太平洋沿岸地域生態系監視調査の補足調査). *みちのくベントス*, 4, 22-31

Duque-Redondo E., Yamada K., Lopez-Arbeloa I., Manzano H. (2018) Cs-137 immobilization in C-S-H gel nanopores. *Phys. Chem. Chem. Phys*

遠藤和人, 山田正人, 宗清生 (2017) 熊本地震と災害廃棄物処理の初動～東日本大震災から得られた教訓の活用～. *消防防災の科学*, 127 (冬季), 21-24

遠藤和人 (2017) 災害廃棄物由来の分別土試験盛土の観察結果. *地盤工学会誌*, 65 (9), 8-11

橋本俊次, 高澤嘉一, 家田曜世 (2021) 災害・事故発生時に環境に残留する化学物質への対策実施と継続監視のためのモニタリング手法開発. *環境と測定技術*, 48 (2), 27-34

家田曜世, 高澤嘉一, 橋本俊次 (2021) セミアクティブエアサンプリング/熱脱着分析を用いた環境残留性有機汚染物質の網羅的モニタリング手法の開発. *分析化学*, 70 (6), 397-402

石森洋行, 唐佳潔, 肴倉宏史 (2019) 廃棄物・副産物等からの浸出水濃度予測に及ぼす固液脱着モデルの影響. 第 13 回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 13, 207-214

Kanaya G., Uehara T., Kikuchi E. (2016) Effects of sedimentary sulfide on community structure, population dynamics, and colonization depth of macrozoobenthos in organic-rich estuarine sediments. *Marine Pollution Bulletin*, 109, 393-401

金谷弦, 柚原剛, 青木美鈴, 森敬介, 鈴木孝男 (2018) 松島湾櫃ヶ浦干潟 (宮城県利府町) の大型底生動物相—2017 年 10 月の定性調査. *みちのくベントス*, 2, 43-48

Kanaya G., Niiyama T., Tanimura A., Kimura T., Toyohara H., Tosuji H., Sato M. (2018) Spatial and interspecific variation in the food sources of sympatric estuarine nereidid polychaetes: stable isotopic and enzymatic approaches. *Marine Biology*, 165, 101 (Manuscript No.)

金谷弦, 多留聖典, 柚原剛, 海上智央, 三浦収, 中井静子, 伊藤 萌, 鈴木孝男 (2019) 福島県いわき市鮫川干潟における大型底生動物の多様性—東日本大震災後の状況と復旧工事による影響—. *日本ベントス学会誌*, 73, 84-101

金谷弦, 上村了美, 鈴木孝男, 五十嵐健志 (2020) 同所的に生息するウミニナ *Batillaria multiformis* とホソウミニナ *B. attramentaria* の個体群構造と潮位分布における経年変化-陸奥湾芦崎干潟での事例. *日本ベントス学会誌*, 75, 43-53

金谷弦, 多留聖典, 久保弘文, 阿部博和, 磯村尚子, 海上智央, 伊藤萌, 福森啓晶, 青木美鈴, 鈴木孝男 (2021) みちのくベントス調査隊、南の島へ行く-2019 年 10 月沖縄島羽地内海のベントス相調査結果 (予報) -. *みちのくベントス*, 5, 41-51

Katsumi T., Okawara M., Kawashima M., Endo K., Sakanakura H., Iwashita S., Takai A., Inui T. (2017) Soils recovered from disaster debris - characterization and utilization -. *Journal of JSCE*, 5, 145-156

川畑隆常・資源循環・廃棄物研究センター (2020) 災害廃棄物情報プラットフォームの構築と運営. 地域防災データ総覧 災害廃棄物対策に関する実務資料集編, 15-26

Kobayashi J., Kuroda K., Miyamoto C., Uchiyama Y., Sankoda K., Nakajima D. (2021) Evaluating sewer exfiltration in groundwater

- by pharmaceutical tracers after the 2016 Kumamoto earthquakes, Japan. *Journal of Hazardous Materials*, 411, 125183
- 小山陽介, 鈴木規之 (2019) 災害・事故における化学物質汚染の管理対象物質の考察. *環境化学*, 29 (3), 95-105
- 牧秀明, 金谷弦 (2016) 東日本大震災による三陸沿岸の底質の炭化水素による汚染と分析. *日本マリンエンジニアリング学会誌 Journal of the JIME*, 51 (6), 75-82
- Maki H. (2020) *Petroleum and Hydrocarbons. Guideline of Ocean Observations*, 10 (G1002EN), 001-019
- Miura O., Kanaya G., Nakai S., ITO H., Chiba S. (2019) Prevalence and species richness of trematode parasites only partially recovers after the 2011 Tohoku, Japan, earthquake tsunami. *International Journal for Parasitology*, 49, 1023-1028
- 森朋子, 大迫政浩, 中山育美 (2020) 災害廃棄物に対する市民の共助促進を目的としたワークショップの実践と効果の検証. *環境教育*, 30 (1), 68 -73
- Mori T., Tajima R. (2021) Strategy to Promote Residents' Behaviors for Appropriate Disaster Waste Management. *Global Environmental Research*, 24 (2), 267-274
- 森嶋順子, 多島良 (2021) 住民に向けた災害廃棄物の広報の現状と展望. *都市清掃*, 74 (362), 312-317
- 中島大介 (2017) 東日本大震災後の復興過程における環境中化学物質調査結果と今後の課題. *化学物質と環境*, 141, 6-7
- 中島大介, 小山陽介, 中山祥嗣 (2018) 災害時における化学物質等のモニタリング. *環境と測定技術*, 45 (8), 8-12
- 中島大介, 鈴木剛, 中山祥嗣, 白石不二雄, 新田裕史, 小山陽介, 柳下真由子, 宮脇崇, 中島寛則, 木村淳子, 門上希和夫 (2019) 自動同定定量システム (AIQS) を活用した災害時の環境モニタリング～東日本大震災での活用と技術的展開～. *環境化学*, 29 (3), 129-137
- 中島大介, 中山崇, 大曲遼, 宮脇崇, 門上希和夫 (2020) 事故・災害時における化学物質漏洩を想定した環境モニタリング手法の開発と地方環境研究所への実装を目指して. *全国環境研会誌*, 45 (4), 153-158
- Nakamura M., Ikeda Y., Matsumoto A., Maki H., Arakawa H. (2018) Distribution of hydrocarbons in seabed sediments derived from tsunamis spilled oil in Kesennuma Bay, Japan. *Marine Pollution Bulletin*, 128, 115-125
- 大迫政浩 (2016) 災害廃棄物対策への対応力向上に向けた連携体制と人材づくり. *月刊廃棄物* 9 2016, 42 (9), 1
- 大迫政浩, 多島良, 森保文, 森朋子 (2018) 第 1 回 自治体職員を対象とした人材育成のあり方. *季刊 環境技術会誌*, (173), 46-50
- 大迫政浩 (2019) 災害廃棄物、放射能汚染廃棄物問題から平成の時代を振り返る. *生活と環境* 2019 年 1 月号, 64 (1), 25-30
- 大迫政浩, 多島良, 森 朋子 (2019) 第 2 回 人材育成事例～廃棄物処理施設の官民連携事業も含めて～. *季刊 環境技術会誌*, (174), 25-28
- 大迫政浩 (2019) 豪雨災害における災害廃棄物対策の現状と課題. *水環境学会誌*, 42(A) (9), 322-326
- 大迫政浩 (2019) 2018 年西日本豪雨の被災地から見た廃棄物処理施設の役割 (前編) 避難所としての機能. *季刊 環境技術会誌*, (177), 22-25
- 大迫政浩 (2019) これからは市民へのアプローチが重要. *月刊廃棄物*, 46 (588), 21
- 大迫政浩 (2020) 激甚化、日常化する自然災害と災害廃棄物マネジメント. *環境新聞*
- 大迫政浩 (2020) 2018 年西日本豪雨の被災地から見た廃棄物処理施設の役割 (後編) 災害廃棄物の仮置き場での混合廃棄物対策. *季刊 環境技術会誌*, (178), 29-33
- 大迫政浩 (2020) 廃棄物・リサイクル分野における適応策の背景と意義. *生活と環境*, 65 (3), 10-14
- 大迫政浩 (2020) 災害廃棄物対策のイノベーション. *季刊 環境技術会誌*, (180), 26-29
- 大迫政浩 (2021) 一般社団法人廃棄物資源循環学会 災害廃棄物対策の歩みと学会としての貢献. *東日本大震災からの十年とこれから*, 136-137

斎藤梨絵, 大町仁志, 根本唯, 大迫政浩 (2019) イノシン体内に含まれる放射性セシウム量推定方法の検討 - 体組織別調査と焼却残渣調査の実施. 環境放射能除染学会誌, 7 (3), 165-173

肴倉宏史 (2016) 土を活かす総合マネジメントに向けて. 土木学会誌, 101 (7), 34-37

肴倉宏史 (2017) 産業副産物・災害廃棄物の地盤工学的利用 7. 災害廃棄物. 地盤工学会誌, 65 (9), 32-39

Sakanakura H., Ito K., Tang J., Nakagawa M., Ishimori H. (2021) Determining Adsorption Parameters of Potentially Contaminant-Releasing Materials Using Batch Tests with Differing Liquid-Solid Ratios. *Materials*, 14, 2534

鈴木規之 (2019) 水災害・事故時における化学物質のリスクの評価・管理の現状と今後. 水環境学会誌, 42 (9), 317-321

鈴木孝男, 金谷弦, 多留聖典, 海上智央, 柚原剛, 山下友美, 青木美鈴 (2018) 松川浦宇多川湿地のベントス相. *みちのくベントス*, 2, 2-8

多島良, 高田光康, 森朋子, 夏目吉行, 菅範昭 (2017) 災害廃棄物処理フローの図上演習—兵庫県における実践—. 都市清掃, 70 (337), 255-261

多島良, 平山修久, 高田光康, 宗清生, 大迫政浩 (2018) 災害対応マネジメントの観点からみた災害廃棄物発生量推計方法の現状と展望. 廃棄物資源循環学会論文誌, 29, 104-118

多島良, 大迫政浩, 宗清生, 森 朋子 (2019) 近年の災害経験を踏まえた災害廃棄物対策のポイント. 月間廃棄物, 45 (2), 4-9

多島良, 森 朋子, 夏目吉行, 大迫政浩 (2019) 災害廃棄物処理に係る対応型図上演習の効果とその要因. 地域安全学会論文集, (34), 1-10

多島良 (2019) 近年の災害における災害廃棄物処理について. 都市清掃, 72 (351), 8-12

多島良 (2020) 民間企業と災害廃棄物処理の関わり. RMFOCUS, (72), 17-21

多島良, 森嶋順子 (2021) 片付けごみを仮置場以外で排出する要因の検討: 平成 30 年 7 月豪雨の倉敷市の事例より. 廃棄物資源循環学会論文誌, 32, 31-42

Tajima R., Osako M. (2021) Overview of the Environmental Emergency Management Studies in National Institute for Environmental Studies (NIES). *Global Environmental Research*, 24 (2), 253-260

Yamakita T., Yamada K., Yokooka H., Kanaya G. (2020) Traits database of tidal flat macrobenthos along the Northwest Pacific coast of Japan. *Ecological Research*, 35, 1062-1072

山本貴士 (2020) アスベスト廃棄物処理の現状と今後の展望. 廃棄物資源循環学会誌, 31, 352-357

Yoshino K., Mori K., Kanaya G., Kojima S., Henmi Y., Matsuyama A., Yamamoto M. (2020) Food sources are more important than biomagnification on mercury bioaccumulation in marine fishes. *Environmental Pollution*, 262, 113982

Yuhara T., Yokooka H., Kanaya G., Tanaka M., Unagami T., Yokoyama K., Taru M. (2021) Importance of two river mouths in the southern Izu Peninsula of Japan as habitats for endangered macrobenthic species. *Aquatic Animals*, AA2021, AA2021-5-(13p.)

<書籍等>

発表者・(刊年)・題目・出版社・総頁数

環境回復研究プログラム (環境回復-2)

Nakajima T., Ohara T., Uematsu M., Onda Y. (2019) —. Nakajima T., Ohara T., Uematsu M., Onda Y. eds., *Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster: Dispersion, Monitoring, Mitigation and Lessons Learned*, Cambridge University Press, 354p

環境創生研究プログラム

中村省吾, 森保文, 根本和宜, 犬塚裕雅 (2020) —. 中村省吾, 森保文, 根本和宜, 犬塚裕雅編著, 木質バイオマス導入で迷わないための地図-川上から川下までの事例集-, 株式会社日進堂印刷所, 125p

環境回復研究プログラム（環境回復-1）

鈴木和将, 由井和子, 倉持秀敏 (2017) 第 18 章 排ガス制御のための湿式スクラバー. 住明正,原澤英夫監訳, 環境のための数学・統計学ハンドブック, 朝倉書店, 526-551

Yamada K., Miyagawa T. (2017) 13 Japan, China and South-East Asia. In: Ian Sims, Alan Poole 編, Alkali-Aggregate Reaction in Concrete: A World Review, CRC Press, 539-568

由井和子, 倉持秀敏 (2017) 第 16 章 排ガスの制御. 住明正,原澤英夫監訳, 環境のための数学・統計学ハンドブック, 朝倉書店, 453-493

環境回復研究プログラム（環境回復-2）

Hashimoto S., Komatsu M., Imamura N., Ohashi S., Kato H., Nishina K., Tagami K., Uchida S., Shaw G., Wood M., Beresford N., Howard B., Fesenko S., Thiry Y. (2020) FOREST ECOSYSTEMS. In: International Atomic Energy Agency 著, Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, International Atomic Energy Agency, 129-168

Morino Y., Takigawa M., Nakamura H. (2019) 3.2 Estimating the distribution of radiocesium deposition. In: T. Nakajima, T. Ohara, M. Uematsu, & Y. Ondaeds., Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster: Dispersion, Monitoring, Mitigation and Lessons Learned, Cambridge Environmental Chemistry Series, ページ番号なし

Nakamura H., Morino Y., Takigawa M. (2019) 3.1 The atmospheric transport process for radioactive materials and effects of meteorological conditions. 3.4 Possible accident scenarios for different seasons or different power plants?. In: T. Nakajima, T. Ohara, M. Uematsu, & Y. Onda eds., Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster: Dispersion, Monitoring, Mitigation and Lessons Learned, Cambridge Environmental Chemistry Series, ページ番号なし ページ番号なし

Ohara T. (2019) The need for interdisciplinary research. Overview of the Fukushima accident. Preface. In: Nakajima, T., Ohara, T., Uematsu, M., Onda, Y.編, Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster: Dispersion, Monitoring, Mitigation and Lessons Learned, Cambridge University Press, 262-267 5-10 xix-xxi

Onda Y., Hayashi S., Nagao S., Ishii Y., Tsuji H., Taniguchi K., Nishina K., Suzuki K., Watanabe S., Prohl G., Boyer P., Laurent G.-S. (2020) Catchment and Rivers. In: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY 著, Environmental Transfer of Radionuclides in Japan following the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY,, 179-218

Takigawa M., Morino Y., Nakamura H. (2019) 3.5 Factors contributing to uncertainty of atmospheric diffusion models. In: T. Nakajima, T. Ohara, M. Uematsu, & Y. Ondaeds., Environmental Contamination from the Fukushima Nuclear Disaster: Dispersion, Monitoring, Mitigation and Lessons Learned, Cambridge Environmental Chemistry Series, ページ番号なし

深澤圭太, 岡田尚 (2017) 無人化地域のグリーンインフラ. グリーンインフラ研究会・三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング・日経コンストラクション編, 決定版! グリーンインフラ, 日経 BP 社, 333-342

Horiguchi T., Kodama K., Kume G., Kang I.J. (2019) Delayed Recovery from Declines in the Population Densities and Species Richness of Intertidal Invertebrates Near Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. In: Manabu Fukumotoed., Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems, Long-Term Study on the Fukushima Nuclear Accident, Springer, 65-88

Onuma M., Endoh D. , Ishiniwa H. , Tamaoki M. (2020) Estimation of Dose Rate for the Large Japanese Field Mouse (*Apodemus speciosus*) Distributed in the Difficult-to-Return Zone in Fukushima Prefecture. In: Fukumoto M.ed., Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems, Springer, 17-30

吉岡明良 (2019) コラム 11 日本の河原に生息する陸生昆虫. 応用生態工学会編, 河道内氾濫原の保全と再生, 技報堂出版株式会社, 189-193

大原利真 (2019) 大気輸送沈着・ばく露評価統合モデルを用いた事故初期の甲状腺被ばく線量推計と課題. 安村誠司編

著, 福島原発事故における公衆衛生課題とその対応-甲状腺検査と保健活動-, 日本公衆衛生協会, 28-35

環境創生研究プログラム

Dong L., Dou Y. (2016) 区域生態工業発展支持低炭和諧社会構建: 日本環境創生模式与实践及对我国的启示. In: Xue J., Zhao Z., Dai Y., Wang B., Sun Y., Guo L. 編, 低炭經濟藍皮書: 中国低炭經濟發展報告 (2016), 社会科学文献出版社 (中国), 168-182 <In Chinese>

Hirano Y., Nakamura S., Gomi K., Togawa T., Fujita T., Oba M. (2018) Introduction of low-carbon community energy systems by combining information networks and cogeneration-type district heating and cooling systems. In: Chaouki Ghenai and Tareq Salameh 編, Sustainable Air Conditioning Systems, IntechOpen, 99-120

Hirano Y., Fujita T. (2021) An Estimation of Air-Conditioning Energy-Saving Effects Through Urban Thermal Mitigation. In: Napoleon Enteria, Matteos Santamouris, Ursula Eickereds., Urban Heat Island (UHI) Mitigation, Springer, 61-106

一ノ瀬俊明 (2019) 地域戦略における環境共生の視点. 「明日の地域をみつける」編集委員会編著, 明日の地域をみつける 一信州大学 地域戦略プロフェッショナル・ゼミ 4年間の軌跡, 第一企画, 255-264

黒田由彦, 辻岳史 (2019) 女川町の復興と原発——原発と地域社会. 吉野英岐・加藤眞義 編, 震災復興と展望——持続可能な地域社会をめざして (シリーズ 被災地から未来を考える (3)), 有斐閣, 212-248 <地域社会学会第 14 回 (2020 年度) 地域社会学会賞 (共同研究部門) 受賞>

大場真 (2018) 物質循環モデルと森林施業影響. 柴田 英昭編, 森林と物質循環(森林科学シリーズ第 8 巻), 共立出版, 149-197

大塚彩美, 平野勇二郎, 中村省吾, 藤田壮 (2020) 産業創出を核とした復興まちづくり-福島県相馬郡新地町を事例として. 吉原直樹・山川充夫・清水亮・松本行真編著, 東日本大震災と<自立・支援>の生活記録, 六花出版, 115-147

災害環境マネジメント研究プログラム

Sakai S., Yoshioka T., Tsukiji M., Okayama T., Watanabe K., Ishigaki T., Tajima R., Suzuki S., Takai A., Kaji M., Tomoda K., Asari M. (2018) —. the Ministry of the Environment, Japaned., Disaster Waste Management Guideline for Asia and the Pacific, the Ministry of the Environment, Japan, 26p

Yap C.K., Kanaya G., Cheng W.H. (2018) Chapter 3 Effects of tsunamis on sediment characteristics and contamination levels: A review of the 2004 and 2011 giant earthquakes. In: Yap C.K. ed., Sediment Watch: Monitoring, Ecological Risk Assessment and Environmental Management, Nova Science Publishers, 57-76

Yap C.K., Chelvan N., Wong K.W., Cheng W.H., Thomas F.B.E., Kanaya G., Bakhtiari A.R., Al-Shami S.A., Nulit R., Shohaimi S. (2018) Chapter 5 Ecological risk assessment of heavy metals in surface mangrove sediments collected from the Sepang River estuary, Peninsular Malays. In: Yap C.K. ed., Sediment Watch: Monitoring, Ecological Risk Assessment and Environmental Management, Nova Science Publishers, 93-124

鈴木孝男, 木村妙子, 古賀庸憲, 多留聖典, 浜口昌巳, 逸見泰久, 金谷弦, 岸本和雄, 仲岡雅裕 (2019) 2. 干潟生態系. 環境省自然環境局生物多様性センター著, モニタリングサイト 1000 沿岸域調査 (磯・干潟・アマモ場・藻場) 2008-2016 年度とりまとめ報告書, 環境省自然環境局生物多様性センター, 59-136

占部城太郎, 鈴木孝男, 牧野渡, 大槻朝, 金谷弦, 中川雅博, 竹本徳子, 秦範子, 柚原剛 (2018) —. 占部城太郎編, 三井物産環境基金 2015-2017 年度最終報告書「東日本大震災後の干潟生物群集の形成過程: その人為的影響と生態系機能の活用」, 東北大学大学院生命科学研究科群集生態分野, 27p

2.2 口頭発表

発表者・(暦年)・題目・学会等名称・予稿集名・頁

環境回復研究プログラム (環境回復-1)

有馬謙一, 山田一夫, 遠藤和人, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2018) 福島第一原発事故由来の放射性物質による汚染物の処理. 第 24 回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 同予稿集, 67-70

- 有馬謙一, 山田正人, 倉持秀敏, 大迫政浩, 保高徹生, 芳賀和子 (2019) 最終処分に向けた熱処理を含む減容化プロセスの検討. 環境放射能除染学会, 第8回環境放射能除染研究発表会 要旨集, 63 <優秀ポスター発表賞受賞>
- 有馬謙一, 山田一夫, 大迫政浩, 保高徹生, 芳賀和子 (2019) 福島第一原発事故由来の放射性物質に汚染された焼却残渣の減容化処理プロセスの検討. 第30回廃棄物資源循環学会研究発表会, 講演原稿 2019, 323-324
- 有馬謙一, 大迫政浩, 保高徹生, 芳賀和子 (2019) 福島第一原発事故由来の放射性物質に汚染された焼却残渣の減容化プロセスの検討. 第25回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 同講演要旨集, 33-36
- 有馬謙一, 大迫政浩, 保高徹生, 篠崎剛史 (2020) 焼却残渣を対象とした減容化プロセス 5 CASE の比較. 第9回環境放射能除染学会, 同予稿集, S1-1
- 有馬謙一, 大迫政浩, 保高徹生, 篠崎剛史 (2020) 放射性物質に汚染された焼却残渣の減容化プロセスの比較. 第31回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, F2-1-O
- 有馬謙一, 大迫政浩, 保高徹生, 篠崎剛史 (2020) 福島第一原発事故由来の放射性物質に汚染された焼却残渣の減容化プロセス 5 CASE の比較. 第26回流動化・粒子プロセッシングシンポジウム, 同予稿集, (G5)
- Duque-Redondo E., Yamada K., Manzano H. (2019) Radionuclides immobilization in cement matrix: capacity of C-(A)S-H to retain Cs. 15th International Congress on the Chemistry of Cement, Abstracts, 95
- 遠藤和人, 石森洋行 (2016) 汚染飛灰からの放射性セシウム溶出特性に関するバッチとカラム溶出試験結果の比較. 第51回地盤工学研究発表会, 同予稿集, 2215-2216
- Endo K., Ishimori H., Sato M., Yamada M. (2016) Transition of Waste Solidification for Landfilling in Japan. The 9th Intercontinental Landfill Research Symposium, Abstracts, 116-117
- 遠藤和人 (2017) 環境中における事故由来の放射性物質汚染廃棄物の総合的な管理. 日本原子力学会 2017 年春の年会バックエンド部会セッション, 同予稿集
- 遠藤和人 (2018) 放射能汚染廃棄物等の処理・処分への対応. 地盤技術フォーラム 2018 セミナー, なし
- 遠藤和人, 新井裕之, 宮田彰, 中村謙治 (2020) ヒ素含有廃石膏ボードのハンドヘルド XRF を用いた判定について. 第31回廃棄物資源循環学会発表会, 同予稿集, 179-180
- 江藤淳二, 五十嵐豪, 小川彰一, 渋谷和俊, 丸山一平, 山田一夫, 滝沢真之 (2018) コンクリート構造物の ASR 診断方法に関する評価. 日本保全学会講演会, 日本保全学会講演要旨集, 18, F-2-2-3
- 江藤淳二, 小川彰一, 渋谷和俊, 寺本篤史, 五十嵐豪, 丸山一平, 山田一夫 (2018) 原子力施設の新しい ASR 対策の考え方の提案 その 6 統括と今後課題. 2018 年度日本建築学会大会 (仙台), 同予稿集, 1081-1082
- 江藤淳二, 小川彰一, 渋谷和俊, 五十嵐豪, 丸山一平, 山田一夫 (2019) ASR ポテンシャル評価のための診断方法の検討. 日本原子力学会秋の大会, 同講演要旨, 3O03
- Eto J., Ogawa S., Shibuya K., Igarashi G., Teramoto A., Maruyama I., Yamada K., Kawabata Y. (2021) Research on a new approach assessing ASR of concrete structures for nuclear facilities. 10th International Conference on Bridge Maintenance, Safety, Management, Bridge Maintenance, Safety, Management, Life-Cycle Sustainability and Innovations, 565
- 江藤淳二, 落合孝正, 滝沢真之, 小川彰一, 渋谷和俊, 丸山一平, 山田一夫, 五十嵐豪 (2018) ASR ポテンシャル評価のための促進膨張試験の検討. 日本原子力学会 2018 秋の大会, 同予稿集, 3O12
- 江藤淳二, 落合孝正, 小川彰一, 渋谷和俊, 丸山一平, 山田一夫, 滝沢真之 (2017) ASR ポテンシャル評価のため骨材試験フローに関する検討. 日本原子力学会秋の大会, 同予稿集, 1C08
- 江藤淳二, 落合孝正, 小川彰一, 渋谷和俊, 丸山一平, 山田一夫, 滝沢真之 (2017) ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法に関する評価. 日本保全学会第14回学術講演会, 同要旨集, 14, 15-20
- 藤原大, 倉持秀敏, 野村和孝, 前背戸智晴, 大迫政浩 (2016) 除染廃棄物焼却時の放射性セシウムの挙動 - 都市ごみ焼却との比較 -. 平成 28 年度廃棄物資源循環学会 春の研究発表会, なし
- 藤原大, 倉持秀敏, 野村和孝, 前背戸智晴, 大迫政浩 (2016) 除染廃棄物の焼却減容化施設における放射性セシウムの挙

動調査. 第 5 回環境放射能除染研究発表会, 同予稿集, 34

藤原大, 倉持秀敏, 野村和孝, 前背戸智晴, 大迫政浩 (2016) 除染廃棄物等焼却施設における放射性 Cs の焼却残渣への移行・溶出挙動調査. 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 365-366

藤原大, 倉持秀敏, 小倉正裕, 竹田尚弘, 大迫政浩 (2016) 加熱化学処理による除染廃棄物等焼却残渣からの放射性セシウム除去. 第 24 回衛生工学シンポジウム一般研究発表, 同予稿集, 1, 17

藤原大, 倉持秀敏, 野村和孝, 前背戸智晴, 大迫政浩 (2016) 除染廃棄物焼却時の放射性セシウムの挙動. 廃棄物資源循環学会 平成 28 年度 関東支部講演会・研究発表会, なし <優秀ポスター賞受賞>

藤原大, 倉持秀敏, 小倉正裕, 竹田尚弘, 大迫政浩 (2017) 加熱化学処理による焼却灰からの放射性セシウム除去技術の高度化. 平成 29 年度廃棄物資源循環学会 春の研究発表会, なし

藤原大, 倉持秀敏, 前背戸智晴, 伊藤浩平, 大迫政浩 (2017) 仮設焼却施設における放射性 Cs の焼却残渣への移行・溶出挙動調査 ～廃棄物種類の違い～. 第 6 回環境放射能除染研究発表会, 同予稿集, 68

Fujiwara H., Kuramochi H., Nomura K., Maeseto T., Osako M. (2017) Incineration of Disaster Waste Contaminated by Radiocesium in Fukushima. Sardinia 2017 / Sixteenth International Waste Management and Landfill Symposium, Proceedings

藤原大, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2017) 放射能を濃集する焼却主灰粒子の EBSD による結晶相解析. 第 28 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 355-356 <優秀ポスター賞受賞>

藤原大, 倉持秀敏, 森重敦, 羽染久, 大迫政浩 (2018) 焼却主灰における放射能汚染粒子の EBSD による鉱物相解析. 第 7 回環境放射能除染研究発表会, 同予稿集, 69

その他 186 件

環境回復研究プログラム (環境回復-2)

舟木優斗, 和田敏裕, 石井弓美子, 林誠二, 難波謙二, 佐藤太津真, 寺本航 (2021) 太田川水系における河川とダム湖のヤマメの ^{137}Cs 濃度の減少傾向. 2020 年度 ERAN 年次報告会, なし

古市尚基, 東博紀, 杉松宏一, 大村智宏, 越川海, 長谷川徹, 山田東也, 南部亮元, 帰山秀樹 (2018) 海底混合層近傍の懸濁粒子動態. 沿岸海洋シンポジウム, なし

Goto D., Morino Y., Ohara T., Sekiyama T.T., Uchida J., Nakajima T. (2019) Development of multi-model ensemble method for radionuclides released from Fukushima nuclear accident. 2019 American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, -

橋本昌司, 金子真司, 小松雅史, 松浦俊也, 仁科一哉, 大橋伸太 (2017) 森林内における放射性セシウム動態のデータベース構築. 第 128 回日本森林学会大会, 第 128 回日本森林学会大会学術講演集, 168

橋本昌司, 今村直広, 金子真司, 小松雅史, 松浦俊也, 仁科一哉, 大橋伸太 (2020) 森林内における ^{137}Cs 動態のモデル解析. 第 131 回日本森林学会大会, 予稿集

林誠二, 辻英樹, 錦織達啓, 伊藤祥子 (2016) 高線量地域の森林域における溶存態セシウム ^{137}Cs 流出特性. 第 50 回日本水環境学会, 同予稿集, 284

林誠二, 辻英樹, 伊藤祥子, 石井弓美子, 仁科一哉 (2017) 森林河川における溶存態放射性 Cs の生成機構について. 第 51 回日本水環境学会年会, 予稿集, 261

Hayashi S., Tsuji H., Ito S., Ishii Y., Nishina K. (2017) Mechanisms controlling the generation of dissolved radioactive Cs in a highly contaminated mountain river system in Fukushima. 4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, Abstracts, 417-418

林誠二 (2017) 被災地における放射性物質による環境汚染の現状と環境回復に向けた取組. 日本水環境学会東北支部講演会, なし

Hayashi S., Tsuji N., Ishii Y., Ohara T. (2017) Current status of radioactive environmental pollution in Fukushima. The 14th International Symposium on Persistent Toxic Substances, -

Hayashi S., Tsuji N., Ishii Y. (2017) River database: Difficulties in Cs sampling in river water. 2017 Interim Meeting of MODARIA II WG4, Subgroup 2 (Fukushima Parameter Datasets) Meeting, -

林誠二 (2017) はやま湖への放射性セシウムの流入と蓄積状況について. 第 3 回福島大学環境放射能研究所研究活動懇談会, なし

林誠二 (2017) 福島第一原発事故による山林の放射能汚染の実態と除染について. 第 3 回飯舘村除染検証委員会, なし

林誠二, 石井弓美子 (2017) 淡水中の放射性セシウムの生物・植物への移行について. 環境水等の放射性セシウムモニタリングコンソーシアム第 3 回研究会, なし

東博紀, 秋山千亜紀, 渡辺均, 丹下仁 (2018) 東日本大震災前後における宮城県と福島県中通り・浜通り地方の水質汚濁負荷発生量の変化. 第 62 回水工学講演会, 土木学会論文集 B1(水工学), 74(4), I_541-I_546

Higashi H., Arita K., Hayashi S. (2018) Fate of sedimentary radiocesium in semi-enclosed coastal area: a numerical case study of Matsukawaura Lagoon, Japan. AOGS 15th annual meeting, Abstracts, OS09-A020

保坂健太郎, 山本航平, 糟谷大河, 南京沃, 石井弓美子 (2021) 地下生菌 (トリュフ類) と小動物を介した森林内の放射性セシウムの動態把握. 2020 年度 ERAN 年次報告会, なし

今泉圭隆, 黒田啓介, 櫻井健郎, 鈴木規之, 林誠二, 大原利眞 (2016) 下水汚泥中放射性セシウム濃度の経年変動解析に基づく都市域でのセシウム動態把握. 第 25 回環境化学討論会, 同要旨集, P-142

Imaizumi Y., Kuroda K., Morino Y., Hayashi S., Suzuki N., Ohara T. (2016) Temporal-spatial fate of cesium-137 in terrestrial environment around Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: a challenge for daily simulation. SETAC Europe 26th Annual Meeting, 同予稿集, 215

今泉圭隆 (2017) Temporal-spatial fate of cesium-137 in terrestrial environment around Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: a challenge for daily simulation. The 1st KICT-NIES International Symposium, なし, 11-24

今泉圭隆 (2019) Application of a multimedia environmental fate model for radionuclide in terrestrial and river water environment. The 2nd KICT-NIES International Symposium, なし

石井弓美子, 仁科一哉, 林誠二 (2017) 福島県の湖と河川における淡水魚の放射性セシウム減衰の比較. 日本生態学会第 64 回全国大会, 同予稿集

Ishii Y., Matsuzaki S., Nishina K., Hayashi S. (2017) Radiocesium accumulation in freshwater fish and aquatic organisms in Fukushima lakes and rivers. 4th International Conference on Radioecology & Environmental Radioactivity, Abstracts, 423-424

石井弓美子, 松崎慎一郎, 林誠二 (2018) 湖沼と河川における水生生物食物網構造と放射性セシウム動態. 日本生態学会第 65 回全国大会, 同予稿集

石井弓美子, 松崎慎一郎, 林誠二 (2018) 河川と湖における水生生物への放射性セシウム移行. 応用生態工学会仙台東北地域研究発表会, 応用生態工学会仙台 東北地域研究発表会・シンポジウム講演集, 1

石井弓美子, 松崎慎一郎, 林誠二 (2018) 福島県の河川・湖沼における魚への放射性セシウム移行. 第 4 回福島大学環境放射能研究所成果報告会, 第 4 回福島大学環境放射能研究所成果報告会要旨集, 47

石井弓美子, 林誠二, 松崎慎一郎 (2019) 水生昆虫の食性と放射性セシウム濃度 (Radiocesium activity concentration of aquatic insects and their functional feeding habit). 第 66 回 日本生態学会大会, 同予稿集

石井弓美子, 和田敏裕, 須田真人, 古田悠真, 寺本航, 早乙女忠弘, 中久保泰起, 鷹崎和義, 林誠二, 斎藤梨絵, 難波謙二 (2019) 太田川における水生昆虫への放射性セシウム移行. 第 5 回福島大学環境放射能研究所成果報告会, 同予稿集, 54

石井弓美子 (2019) 福島県の河川と湖沼における ^{137}Cs の淡水生態系への移行. 平成 30 年度野生動植物への放射線影響調査研究報告会, 同予稿集

石井弓美子, JO Jaeick, 今藤夏子, 玉置雅紀, 中嶋信美, 金指努, 和田敏裕, 難波謙二, 寺本航, 早乙女忠弘, 斎藤梨絵, 林誠二 (2020) DNA バーコーディングによるヤマメの食性解析と放射性 Cs 移行. 日本生態学会第 67 回全国大会, 同予稿集

その他 135 件

環境創生研究プログラム

五味馨 (2019) ブータンにおける炭素中立シナリオの定量的検討. 日本ブータン学会第 3 回大会, 同予稿集, 3-4

Gomi K., Ochi Y., Ito A., Ishikawa T., Nishioka S. (2019) Development of carbon neutral scenario in Bhutan towards 2050 with socio-economic development and forest carbon sink change. International Conference on Urban Development and Wellbeing, Abstracts, 32-33

五味馨 (2019) 東京電力福島第一原子力発電所事故後の避難地域における人口動態. 日本人口学会第 71 回大会, なし

五味馨 (2020) 「地域循環共生圏」の理念を活用した持続可能な地域づくりを支援する研究の課題. 第 31 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 第 31 回廃棄物資源循環学会研究発表会廃棄物計画研究部会企画セッション(G7)予稿集

平野勇二郎, 井原智彦, 中村省吾, 藤田壮 (2018) 地域エネルギー事業への展開に向けた住宅の電力消費データ解析. 環境情報科学センター第 15 回環境情報科学ポスターセッション, 環境情報科学, 48(1), 119 <理事長賞受賞>

平野勇二郎, 一ノ瀬俊明 (2018) 環境情報データベースを活用した福島県の温熱環境評価. 第 27 回地理情報システム学会学術研究発表大会, なし

平野勇二郎, 中村省吾, LUBASHEVSKIYVASILY, 藤田壮 (2019) 福島県新地町における電力消費量の気温感応度解析と要因分析. 第 35 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 同講演論文集, 55-56

Hirano Y., Nakamura S., Lubashevskiy V., Fujita T. (2019) A Case Study of Recovery-related Town Development and Electricity Monitoring Using Environmental Information Technology. Sustainable Built Environment Conference 2019 (SBE19), Abstracts, 1076-1079

Hirano Y. (2019) Development of a Local ICT System and Its Application to Residential Electricity Monitoring in Shinchi Town, Fukushima Prefecture. Sustainable Built Environment Conference 2019 (SBE19), Abstracts, 3

平野勇二郎, 安達健一, 藤田壮, 五味馨, 牧誠也 (2019) 地域分散型エネルギーマネジメントシステムを導入した復興まちづくり計画・評価手法-福島県新地駅周辺地域の事例-. 第 47 回環境システム研究論文発表会, 同講演集, 7-11

中村省吾, 森保文, 根本 和宜, 大場真 (2019) 中山間地域における森林所有と環境意識の関係. 日本森林学会第 130 回大会, 同学術講演集, 190

中村省吾, 大場真, 森保文, 根本和宜 (2020) 福島県奥会津地域における木質バイオマス利用の現状. 第 131 回日本森林学会大会, 学術講演集, (T1-3), 101

中村省吾, 森保文, 大場真, 根本和宜 (2021) 中山間地域における森林所有と環境意識の関係その 2. 第 16 回バイオマス科学会議, 第 16 回バイオマス科学会議発表論文集, 11-12

大場真, 戸川卓哉, 中村省吾 (2018) 生態系モデルを用いた木質バイオマス生産シミュレーション. 第 129 回日本森林学会大会, 同学術講演集, 101

大場真, ESTOQUERONALD CANERO, 吉岡明良, 林希一郎 (2018) セマンティック統合モデルソフトを利用した生態系サービス評価: 気候変動による影響. 第 65 回日本生態学会, なし

大場真, 藤井実, 戸川卓哉, 中村省吾, 根本和宜, DOU YI, 辻岳史 (2018) 木質バイオマス利活用促進に伴う上流から下流までの炭素蓄積に関するシミュレーション. 日本エネルギー学会第 13 回バイオマス科学会議, 同学術講演集, 15-16

大場真 (2018) 地域資源を活かした地域環境創生-奥会津地域での取り組みを例に. 第 21 回 (2018 年度) 地域シンポジウム, 同予稿集, 25-29

Oba M., Togawa T., Nakamura N., Nemoto K., Fujii M. (2018) Mitigation effects of woody biomass usage in eco and social systems. Grand Renewable Energy 2018 - International Conference and Exhibition, Program, 109

Oba M., Togawa T., Nakamura S., Nemoto K., Fujii M. (2018) Boundary problems of woody biomass usage: A temporal eco-socio-system approach. The 13th Biennial International Conference on EcoBalance, Abstracts, 59

大場真 (2018) 環境に配慮した地域創生をめざして～福島県内自治体との連携研究. 第 16 回 環境研究シンポジウム
スマート社会と環境 豊かな暮らしと環境への配慮の両立を目指して, 同予稿集, 75

大場真, 戸川卓哉, 中村省吾, 根本 和宜, DOU YI, 藤井実 (2019) 地域循環共生圏の原動力としての地域エネルギー拠点
とその効果推定. 第 14 回バイオマス科学会議, 第 14 回バイオマス科学会議 発表論文集, 147-148

Ooba M., Togawa T., Nakamura S. (2019) Balancing the trade-off between promoting renewable energy and protecting ecosystem
services under climate change. The 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems,
SDEWES 2019, Abstracts

大場真, 中村省吾, 戸川卓哉 (2020) マルチドメイン問題としての中山間地への再エネ導入. 第 131 回日本森林学会大会,
同予稿集

戸川卓哉, 大場真, 根本 和宜, 中村省吾 (2018) 地域特性を考慮したバイオマスエネルギーシステムのデザインと導入
基準. 日本エネルギー学会第 13 回バイオマス科学会議, 第 13 回バイオマス科学会議発表論文集, 43-44

戸川卓哉, 大西悟, 福島秀哉 (2020) パターン・ランゲージによる環境・まちづくり先進都市に見られる共創的プロセス
の記述. 第 62 回土木計画学研究発表会・秋大会, 土木計画学研究・講演集, 62

Tsuji T., Nakamura S., Tajima R., Ooba M. (2018) Policy Networks in the Local Community before and after the Fukushima Nuclear
Accident: A Case Study of Miharu Town. The 4th World Social Science Forum, -

辻岳史, 五味馨 (2019) SDGs, 地域循環共生圏, 再生可能エネルギーによるガバナンスの再構築 東日本大震災後の持続可
能な将来ビジョン. 環境経済・政策学会 2019 年大会, なし

Tsuji T., Gomi K., Hirano Y., Oba M. (2019) Designing a Participatory Workshop to Implement the Sustainable Development Goals
(SDGs) in Local Communities: A Case Study of Koriyama City, Fukushima, Japan. 19th European Roundtable for Sustainable
Consumption and Production, -

Tsuji T., Nakamura S., Tajima R., Oba M. (2019) Community Governance in Decontamination Programs after the Fukushima Nuclear
Accident: Two Case Studies from the Naka-dori Region, Fukushima, Japan. 7th International Symposium on Environmental Sociology
in East Asia, Abstracts, 33-34

辻岳史, 戸川卓哉, 大場真 (2020) 中小規模市町村の気候変動対策に係る基盤と推進体制: こおりやま広域連携中枢都市
圏を事例として. 2020 年度環境情報科学研究発表大会 (オンライン開催), なし

その他 111 件

災害環境マネジメント研究プログラム

浅利美鈴, 多島良, 奥田哲士, 切川卓也 (2016) 広島土砂災害 (平成 26 年 8 月) の処理プロセスの特徴及び律速点の考
察. 第 27 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 141-142

遠藤和人, 新井裕之, 宮田彰, 中村謙治 (2020) ヒ素含有廃石膏ボードのハンドヘルド XRF を用いた判定について. 第
31 回廃棄物資源循環学会発表会, 同予稿集, 179-180

平山修久, 多島良, 森朋子 (2017) 災害廃棄物の処理実行計画に求められる要素に関する考察. 第 38 回全国都市清掃研
究・事例発表会, 同予稿集, 333-335

家田曜世, 高澤嘉一, 橋本俊次 (2020) セミアクティブエアサンプラーと網羅分析手法による災害・事故発生時に環境中
に残留する化学物質のモニタリング手法開発-データ抽出方法の検討-. 日本分析化学会第 69 年会, 同予稿集, 395

今泉圭隆 (2017) Temporal-spatial fate of cesium-137 in terrestrial environment around Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: a
challenge for daily simulation. The 1st KICT-NIES International Symposium, 11-24

今泉圭隆 (2019) Application of a multimedia environmental fate model for radionuclide in terrestrial and river water environment.
The 2nd KICT-NIES International Symposium

今泉圭隆, 鈴木規之, 小山陽介, 小口正弘 (2019) 災害・事故時のリスク管理に関する情報の構造化と情報基盤システム
構築の検討. 2019 年度第 32 回日本リスク学会年次大会, 同講演論文集, 32, 63-67

- Ishigaki T. (2017) Sustainable Waste Management in Japan. Seminar on Enhance Networking on Sustainable Urban Development
- Ishigaki T. (2018) Introduction of the issue in "waste in canals" and the APN project. "No waste in canals" Capacity development training for BMA decision-makers
- Ishigaki T. (2018) Introduction of the issue in "waste in canals" and the APN project. Seminar on "No waste in canals" Research findings in Hue city
- Ishigaki T., Suzuki S., Soeda S., Higashinakagawa S. (2019) Development of Criteria for Classification of Disaster Waste in Asia and the Pacific. The 18th Expert Meeting on Solid Waste Management in Asia and Pacific Islands
- Ishigaki T. (2019) Urban Flood caused by Inappropriate Waste Management in Asia: Adaptation to Climate Change. 4th International Forum on Sustainable Future in Asia
- 石垣智基 (2020) 環境中に放出されたプラスチックと廃棄物管理・資源循環分野の対応. 第35回全国環境研究所交流シンポジウム
- Ishigaki T. (2020) Handling/managing hazardous waste. Series of Lectures on Disaster Waste Management
- 石森洋行, 唐佳潔, 肴倉宏史 (2019) 廃棄物・副産物等からの浸出水濃度予測に及ぼす固液脱着モデルの影響. 第13回環境地盤工学シンポジウム, 第13回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, 13, 207-214
- 伊藤萌, 金谷弦, 三浦収, 中井静子 (2019) ウミユナ類巻貝3種の濾過能力と水温の関係. 2019年日本ベントス学会・日本プランクトン学会合同大会, 同予稿集, 58
- Ito H., Kanaya G., Miura O., Nakai S., Kobayashi G., Kojima S. (2019) Phylogeographic variation of the Asian horn snail *Batillaria attramentaria* (Mollusca, Gastropoda) along the Japanese coast. The Fourth Asian Marine Biology Symposium (AMBS), Abstracts, 78
- 伊藤萌, 小島茂明, 金谷弦, 木下今日子, 阿部博和, 松政正俊 (2018) 震災後出現したホソウミナ新興個体群の遺伝的構造. 平成30年度東北マリンサイエンス拠点形成事業全体会議, 同予稿集
- 金谷弦 (2016) 震災の干潟の生き物へのインパクトと復旧工事の影響. 第63回海岸工学講演会
- 金谷弦 (2017) 干潟にはまろうー泥に魅せられた研究者が語る生態学よもやま話. 宮城県仙台第三高等学校 第2回理科講演会
- 金谷弦 (2018) 干潟にはまろうー泥に魅せられた研究者が語る生態学研究よもやま話. 北海道高等学校教育研究大会第55回大会, 同予稿集
- 金谷弦, 多留聖典, 柚原剛, 海上智央, 三浦収, 中井静子, 伊藤萌, 鈴木孝男 (2019) 福島県いわき市鮫川河口のベントス多様性ー震災後の変遷、復旧工事の影響とその保全ー. 日本生態学会第66回全国大会, 同予稿集
- 金谷弦 (2019) 干潟すごいぞベントスすごいぞ. 干潟のセミナーー南三陸海岸の”いま”を見つめようー
- 金谷弦, 伊藤萌, 三浦収, 中井静子 (2019) ホソウミナのいなくなった震災後の干潟で何が起こっていたのか?ー密度操作実験による検証ー. 2019年日本ベントス・プランクトン学会合同大会, 同予稿集, 82
- Kanaya G., Kishimoto K., Henmi Y., Hamaguchi M., Koga T., Kimura T., Taru M., Suzuki T., Nakamoka M., Aoki M. (2019) Spatiotemporal variation in the macrozoobenthic biodiversity and community structure in Japanese tidal flats: Analyses based on data from the Monitoring Sites 1000 Project. The Fourth Asian Marine Biology Symposium (AMBS), Abstracts, 75
- 金谷弦 (2020) 東日本グリーン復興モニタリングプロジェクト 干潟のいきものたちの10年. アースウォッチ・スペシャルトーク
- 金谷弦, 鈴木孝男, 菊地永祐 (2021) 宮城県蒲生干潟における東日本大震災後10年間の地形・植生・底質環境の経年変化. 日本生態学会第68回全国大会, 同予稿集
- 金谷弦 (2021) 蒲生干潟における環境・植生・底生動物のうつりかわり-震災後10年間の変化. 東日本大震災からの再生ー沿岸環境の変化10年と今後の課題ー, 2
- 加藤雅文, 海上智央, 青木美鈴, 多留聖典, 鈴木孝男, 荒井美穂子, 金谷弦 (2018) 七尾湾海岸の干潟ベントス相調査. 第

63 回水族館技術者研究会, 同予稿集

北崎結子, 淵上一朗, 小林 淳, 黒田啓介 (2017) 熊本・阿蘇地域における熊本地震前後の水質比較—白川および湧水を例として—. 第 51 回日本水環境学会年会, 同予稿集, 1-C-15-2

その他 164 件

国立環境研究所研究プロジェクト報告 第 151 号
NIES Research Project Report, No.151

(SR-151-2024)

災害環境マネジメント研究プログラム
(課題解決型研究プログラム)
平成 28～令和 2 年度
Environmental Emergency Research Program
FY2016～2020

令和 6 年 12 月発行

編 集 国立環境研究所 編集分科会
発 行 国立研究開発法人 国立環境研究所
〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16 番 2
E-mail : pub@nies.go.jp

Published by the National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506 Japan
December 2024

無断転載を禁じます

国立環境研究所の刊行物は以下の URL からご覧いただけます。

<https://www.nies.go.jp/kanko/index.html>