

11. 放射能等の測定モニタリング手法

11.1 はじめに

原発事故由来の放射性物質に汚染された廃棄物や福島県内の災害廃棄物の処理処分を、施設の作業従事者や周辺住民の被ばくを最小限に抑えつつ円滑に進める上で、廃棄物や処理施設の放射能を測定し、そのレベルに応じた対応や処理処分の方法を選択する必要があります。本章では、廃棄物の放射能等の測定モニタリング手法について概説します。

11.2 放射能濃度等測定方法ガイドライン

指定廃棄物等の保管や特定一般・特定産業廃棄物処理施設の維持管理に係る空間線量率、放射能濃度の測定・方法は、環境省の「廃棄物関係ガイドライン」の「第5部 放射能濃度等測定方法ガイドライン」にまとめられており(以下、ガイドラインと呼びます)、平成23年12月に第1版が発出され、平成25年3月には第2版に改訂されました^[1,2]。ガイドラインの構成は、測定機器(第1章)、空間線量率の測定方法(第2章)、排ガス(第3章)や粉じん(第4章)、排水及び公共の水域の水(第5章)、周縁地下水(第6章)、燃え殻・ばいじん・排水汚泥・溶融スラグ・溶融飛灰の採取及び測定方法(第7章)、溶出量の測定方法(第8章)となっています。以下に、各測定対象についての測定方法を概説します。

(1) 空間線量率

空間線量率の測定は、廃棄物等の保管や運搬、廃棄物処理施設の維持管理の際に周辺環境への影響がないことを確認するために実施します。ここでは、廃棄物等の保管に係る空間線量率の測定について記します。測定の時期は保管の開始前(搬入前)、開始後(搬入中及び搬入後)とします。測定地点は敷地境界線の4点とバックグラウンド地点の5地点とします。測定高さは地上1mとし、測定場所は周囲1m以内に木や建築物がない場所とします。測定機器は1年以内に校正されたシンチレーション式サーベイメータを使用します。機器の時定数は十分長い時間(例えば30秒以上)とし、時定数の3倍程度の時間経過して数値が安定した後、5回数値を読み取りその平均値を測定結果とします。

(2) 排ガス

試料採取位置は最終排出口と同一組成のガスが採取できる排出口とします。試料採取はJIS Z 8808「排ガス中のダスト濃度の測定方法」に準拠し、円筒ろ紙(または円形ろ紙)による吸着捕集と吸収瓶による液体捕集を用い等速吸引により採取します。採取量は3000Lを目安とします(15L/分×240分)。試料採取後の円筒ろ紙はブランクのろ紙と合わせて裁断・混合してU8容器に充填します。また、吸収瓶中のドレン洗浄液は2Lマリネリ容器に充填します。測定は捕集部(ろ紙部、ドレン部)ごとに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により行います。検出下限値は捕集部ごとに¹³⁴Cs、¹³⁷Cs共に2Bq/m³(N)としています。

(3) 粉じん

開放型の破砕施設では、破砕施設の敷地境界の2点(風上側、風下側)でハイボリウムエアサンプラーにより試料を採取します。試料採取量は15 m³とします(500 L/分×30分)。密閉型の破砕施設では、排ガスと同様に、JIS Z 8808に準拠して試料を採取します。採取した試料の調製、測定は排ガスと同様に捕集部ごとに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により行いますが、開放型の破砕施設はろ紙部のみの測定となります。検出下限値は捕集部ごとに¹³⁴Cs、¹³⁷Cs共に2 Bq/m³(N)としています。

(4) 排水及び公共の水域の水

排水口において、ひしゃく等の採水器具を使用して採取します。採取量は2 Lとします。公共の水域の水は排水中の放射性セシウム濃度が濃度限度(¹³⁴Cs: 60 Bq/L、¹³⁷Cs: 90 Bq/L)を超過した場合に採取・測定します。排水はU8容器に、公共の水域の水は2 Lマリネリ容器充填し、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により測定します。検出下限値は¹³⁴Cs、¹³⁷Cs共に排水では10~20 Bq/L、公共の水域の水では1~2 Bq/Lとしています。

(5) 周縁地下水

地下水の流向が分かっている場合は保管場所等の下流側、不明な場合は最も近い観測井や井戸の水を、ベラー等の採取器具を使用して採取します。採取量は2 Lとします。試料は2 Lマリネリ容器に充填し、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により測定します。検出下限値は¹³⁴Cs、¹³⁷Cs共に1~2 Bq/Lとしています。

(6) 燃え殻、ばいじん、排水汚泥、溶融スラグ、溶融飛灰

試料の採取は代表性に配慮して行い、採取器具としてインクリメントスコップ等を使用します。堆積した試料の場合は、離れた4カ所以上から採取します。コンベア等を流れている試料の場合は、1ロットが流れている間に一定時間間隔に4回以上採取します。採取試料は全部を1つの容器に入れ混合し、最終的に500 g~1 kg程度とします。試料は適宜粉碎を行った後に均一化してU8容器に充填し、ゲルマニウム半導体検出器またはNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータによるガンマ線スペクトロメトリーにより測定します。検出下限値は¹³⁴Cs、¹³⁷Cs共に10~30 Bq/kgとしています。

(7) 溶出量

溶出量試験はJIS K 0058-1「スラグ類の化学物質試験方法—第1部：溶出量試験方法」に準拠して行います。一定量の有姿試料に対して10倍量の溶媒(水)を添加し、毎分200回

転で6時間攪拌して放射性物質を溶出させます。10～30分静置後に溶媒を抜き取り、必要に応じて遠心分離を行った後に、メンブランフィルター(孔径0.45 μm)でろ過して検液とします。検液はU8容器に充填し、ゲルマニウム半導体検出器またはNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータによるガンマ線スペクトロメトリーにより測定します。検出下限値は¹³⁴Cs、¹³⁷Cs共に10～20 Bq/Lとしています。

(8) 第2版での主な改訂点について

上述の通り、ガイドラインは平成25年3月に第2版に改訂されました。主な改訂内容について以下に記します。

- 放射能濃度の測定機器について、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータを追加。この機器はNaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータよりもエネルギー分解能に優れています¹³⁾。
- 空間線量計について、校正方法(JIS Z 4511、Z 4333に準拠して行う)、校正が困難な場合の措置(校正済みの空間線量率と測定値を比較して誤差が20%を下回る場合には測定値を補正して使用できる)を追加。
- 搬入後の空間線量率の測定結果の評価について、バックグラウンド測定値と「おおむね同程度」と曖昧な表現であったものが、「バックグラウンド測定値の平均値+バックグラウンド測定値の標準偏差の3倍以内」と、より明確な表現に改めました。
- 排ガスの採取方法について、排ガス温度が高い場合や採取口が小さい場合を考慮してJIS Z 8808に定める2形捕集装置の使用、排ガス中の水分量が多くドレン量が2Lを超える場合の加熱濃縮による対処、排ガスの温度が低い場合や水分飽和の排ガスにも対応できるよう有機製ろ紙の使用に関する事項を追加。2形捕集装置の導入に係る検討においては、(一社)廃棄物資源循環学会の平成23年度環境省受託業務「廃棄物関連試料の放射能分析方法に関する調査委託業務」の成果を参照しています¹⁴⁾。
- 周縁地下水の測定結果の評価について、異常値でないこと」と表現が曖昧であったものが、「異常値でないこと(検出下限値以下であること等)」と改めました。
- 燃え殻、ばいじん、排水汚泥、溶融スラグ、溶融飛灰の採取方法について、以下の補足を追加。①4カ所以上または4回以上採取する根拠としてJIS K 0060「産業廃棄物のサンプリング方法」を引用。②1カ所あたりの試料採取量はJIS K 0060に準拠して、粉状、塊状の試料の場合は最大粒度に基づいて規定される体積以上を目安とし、汚泥は100 mL以上の容器等で採取したものを1試料の目安とする。試料採取数に係る検討においては、(一社)廃棄物資源循環学会の平成23年度環境省受託業務「廃棄物関連試料の放射能分析方法に関する調査委託業務」の成果を参照しています¹⁴⁾。
- 燃え殻、ばいじん、排水汚泥、溶融スラグ、溶融飛灰の測定方法について、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータを追加。

- 溶出量の測定方法について、NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータを追加。但し、シンチレーションスペクトロメータを適用できるのは、「雨水その他の水が浸入した場合に溶出する事故由来放射性物質の量が少ない特定廃棄物の要件」(平成 24 年 1 月 13 日環境省告示第 3 号)の試験方法に限定されます。
- 放射能濃度の測定条件について、(目標値である)検出下限値が達成されない場合には条件を変更して再度測定を行うが、測定値が得られた場合にはこの検出下限値を適用しないとの補足が追加されました。これは、主に焼却灰試料で、コンプトン散乱により検出下限値が下がらないものの、放射性セシウム自体は検出されているというケースを想定したものです。
- 放射能濃度の単位を求める際のガス体積の補正について、排ガス及び密閉型破碎施設の粉じんは体積の補正は標準状態(0℃、101.3 kPa)、乾きガス、開放型破碎施設の粉じんは 20℃、101.3 kPa、湿りガスとしました。

11.3 廃棄物等の放射能調査・測定暫定マニュアルとその改訂

廃棄物等の放射能濃度の測定モニタリングに関して、環境省のガイドラインに先行して廃棄物等の調査・測定法研究会により「廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル」(以下、暫定マニュアルと呼びます)が平成 23 年 11 月に作成・発出されています⁵⁾。暫定マニュアルでは、廃棄物等に係る放射能の調査、測定分析およびそれに付随する試料の取り扱いや安全管理の方法を適用範囲としています。測定項目は¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、¹³¹I です(概ね 10 万 Bq/kg 以下、¹³¹I は検出の可能性がない場合は省略可)。測定対象は排ガス、灰・汚泥、廃水・浸出水、受入廃棄物、土壌及び施設内での作業環境です。測定法は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です。

ガイドライン第 1 版と暫定マニュアルは同時期に発出され、どちらも廃棄物関連試料を対象とした調査・測定法であったため、分析従事者や廃棄物処理施設管理者等から、両者の相違点やどちらを参照すべきかという質問が多く寄せられました。現状の整理では、ガイドラインは公定法として上位に位置するものであり、暫定マニュアルはその解説やより先駆的な内容、また調査・研究事例を紹介するものとして位置付けられます⁶⁾。両者の相違点について、表 11.1 に示します。

ガイドラインの改訂を踏まえ、現在、廃棄物資源循環学会により暫定マニュアルの改訂作業も進められており、近日中に新たなマニュアルとして発出される予定です。主な改訂点について以下に示します。

- ① 適用範囲については、ガイドラインと整合をとるため¹³⁴Cs、¹³⁷Cs に限定しました。但し、¹³¹I については「医療用途での使用があるために医療系廃棄物を対象とした際に検出することがあり得る」旨の注記として残しています。
- ② 作業従事者の安全の確保、試料の採取や取扱、サーバイメータやγ線スペクトル測定機

器の解説、放射能濃度や線量測定における精度管理について、「共通的事項」としてまとめ記載しました。作業安全の確保や試料取扱方法については、改正電離則や除染電離則を参照して改訂を行っています。測定機器については、暫定マニュアルで記載のなかった NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータやサーベイメータを追加し、また精度管理についても、実際に試験所内で適切な精度管理を行えるよう、それぞれ詳細な解説を加えています。

- ③ 各測定対象は、「個別的事項」として各節に記載しました。改訂にあたっては、ガイドラインと整合するように項立ての整理を行い、ガイドラインにあって現行の暫定マニュアルにない「空間線量率」、「粉じん」、「公共の水域の水」、「周縁地下水」、「溶出量」について、ガイドラインの記載内容に準じて新たなマニュアルに追加しました。また、暫定マニュアルにあってガイドラインにない「受入廃棄物」と「土壌」は、環境省の広域処理ガイドライン⁷⁾及び「除染関係ガイドライン」⁸⁾を参照するものとして、新たなマニュアルからは割愛しています。
- ④ 個別的事項の各節において、当該対象の測定が必要となる根拠(法令や通知)や測定操作のフロー、測定方法の原理や妥当性について、「測定の概要」に記載しました。
- ⑤ 「排ガス」では、採取方法はろ紙によるろ過捕集及び吸収瓶による液体捕集としたこと、2形捕集装置や円形ろ紙、有機性のろ紙はマニュアルに記載された条件で適用可能であること、ドレン部の液量が2Lを超えた場合の試料の扱い、ろ紙部をU8容器に充填する際の留意点等について改訂しました。
- ⑥ 「排水、公共用水域の水」では、試料採取量を2Lとすることや、使用する測定容器、γ線スペクトロメトリーでの検出下限値をガイドラインに合わせて改訂しました。
- ⑦ 「廃棄物(灰、汚泥、廃稲わら、廃堆肥等)」では、試料の採取箇所数や1箇所当たりの採取量を明記し、測定機器に NaI(Tl)、LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータの追加を追加しています。
- ⑧ ガイドラインより進んだ内容や調査・研究事例、例えば現場での放射能濃度スクリーニング方法や放射性ストロンチウムの測定方法の検討について、マニュアル本編とは別に附属書として記載する予定です。

表 11.1 暫定マニュアルとガイドラインの主な相違点

	暫定マニュアル	ガイドライン
測定項目	放射性セシウム及び放射性ヨウ素	放射性セシウム
測定対象	排ガス(4章)、灰・汚泥(5章)、廃水・浸出水(6章)、受入廃棄物(7章)、 <u>土壌</u> (8章)、 <u>作業環境</u> (9章)、一般環境の空間線量(第10章)	空間線量率(2章)、排ガス(3章)、 <u>粉じん</u> (4章)、排水及び <u>公共の水域の水</u> (5章)、 <u>周縁地下水</u> (6章)、燃え殻・ばいじん・排水汚泥・溶融スラグ・溶融飛灰(7章)、 <u>溶出量</u> (8章)
排ガスの採取方法	ろ紙によるろ過捕集+吸収瓶による液体捕集+ <u>活性炭による吸着捕集</u>	ろ紙によるろ過捕集+吸収瓶による液体捕集
固体試料の採取箇所数	4カ所	4カ所以上
固体試料の1箇所当たりの採取量	規定なし	JIS K 0060「産業廃棄物のサンプリング方法」に準拠 100 mL(排水汚泥)
水試料の採取量	500 mL程度(検出下限濃度を低くする場合は2 L)	2 L
水試料の調製方法	浮遊物質を除いて測定する場合 1 µm または 0.45 µm 孔径相当のメンブレンフィルターでろ過	規定なし
放射能濃度の測定機器	ゲルマニウム半導体検出器	ゲルマニウム半導体検出器、 <u>NaI(Tl)シンチレーションスペクトロメータ</u> 、 <u>LaBr₃(Ce)シンチレーションスペクトロメータ</u>

※下線部は一方の調査・測定法にあって他方ないもの。

引用文献

- [1] 環境省：廃棄物関係ガイドライン第2版、平成25年3月
- [2] 前原裕治：放射能濃度等測定ガイドライン第2版の概要および改訂内容、廃棄物資源循環学会誌、24(4)、248-252 (2013)
- [3] 厚生労働省：水道水等の放射能測定マニュアル、平成23年10月
- [4] 滝上英孝、大迫政浩：廃棄物関連試料の放射能分析に関する(一社)廃棄物資源循環学会の取り組み、廃棄物資源循環学会誌、24(4)、239-247 (2013)
- [5] 廃棄物等の調査・測定法研究会：廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル、平成23年11月
- [6] 山本貴士：「廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル」について、廃棄物資源循環学会誌、24(4)、253-257 (2013)
- [7] 環境省：災害廃棄物の広域処理の推進について（東日本大震災により生じた災害廃棄物の広域処理の推進に係るガイドライン）、平成23年8月（平成24年1月一部改正）
- [8] 環境省：除染関係ガイドライン第2版、平成25年5月

12. 放射性物質を含む焼却灰等の空間的・時間的特性

12.1 はじめに

福島第一原子力発電所の事故に伴って放出された放射性物質に由来して、東日本の広範囲地域において放射性セシウムを高濃度で含む焼却灰等が発生しています。その処分方法については通知が発出され、具体的な処分方法についても検討されてきましたが、今後放射性セシウムを高濃度で含む焼却灰等の処分を円滑に進めていくためには、焼却灰等の放射性セシウム含有レベルや発生量についてその空間的な分布や推移の見通しを示しておくことが重要です。ここでは、そのための知見として、放射性セシウムの焼却灰等中濃度や焼却ごみへの移行に関して基礎情報の整備と空間的・時間的な傾向の分析を行いました。

12.2 基礎情報の収集整備

焼却灰等の放射性セシウム濃度等の空間的・時間的特性に関する基礎情報として、東日本の16都県（岩手、宮城、秋田、山形、福島、茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京、神奈川県、新潟、山梨、長野、静岡）の一般廃棄物焼却施設について下記のデータを収集整備しました。各データの詳細は表12.1の通りです。

表 12.1 放射性物質を含む焼却灰等の空間的・時間的特性に関する基礎情報

データ	情報源・データ収集方法	詳細
(1) 焼却灰等の放射性セシウム濃度（月別）	地方自治体による報告値を各地方自治体ウェブサイトより収集（一部環境省とりまとめデータリを活用）	焼却飛灰、焼却主灰、焼却混合灰、溶融飛灰、溶融スラグ、その他発生物の別にデータ整備
(2) 焼却処理量、焼却灰等発生量	廃棄物・3R 研究財団ごみ焼却施設台帳（平成 21 年度版）、環境省一般廃棄物処理実態調査（平成 21 年度）、環境省（廃棄物・リサイクル対策部廃棄物対策課）提供データ	
(3) 設備仕様等	環境省一般廃棄物処理実態調査（平成 21 年度）、廃棄物・3R 研究財団ごみ焼却施設台帳	施設種類（焼却、ガス化溶融等）、処理方式（ストーカ、流動床等）、灰溶融の有無等
(4) 各施設のごみ収集対象区域	地方自治体ウェブサイト等の情報（焼却施設情報、地区ごとのごみ収集情報、清掃事業概要等）、地方自治体へのヒアリングより空間情報として整理。	

また、空間線量率および放射性セシウムの土壌濃度データは文部科学省の航空機モニタリングデータ（2011年11月5日換算値）を用いました。ただし、2011年3月16日頃および21日頃に降雨による放射性セシウムの大きな沈着があった²⁾ことをふまえ、データ分析にはCs-134およびCs-137の自然減衰のみを考慮して2011年3月22日時点の値に換算した値を用いました。また、データの集計や分析には、日本ESRI社製地理情報システムソフトウェアArcGISを用いました。

12.3 一般廃棄物焼却施設における焼却灰等の放射性セシウム濃度の推移

図12.1および図12.2に東日本16都県の一般廃棄物焼却施設における焼却灰等の放射性セシウム濃度測定値（Cs-134とCs-137の合計）の推移をまとめました。図には、施設ごとの焼却飛灰・溶融飛灰、焼却主灰・溶融スラグの濃度について、月ごとの測定値をプロットしてその推移を示しています。放射性セシウム濃度が比較的高い8都県（岩手、福島、茨城、栃木、群馬、埼玉、千葉、東京）については2011年7月から2012年9月、その他の8県については2011年7月から2012年3月までの推移をまとめました。同一月に複数回または複数の炉の測定値があった施設についてはその単純平均値をプロットしています。また、欠損値（ウェブサイトで測定値が報告されていない月や不検出であった月）は推移の傾向が見やすいように補間してプロットしています。焼却飛灰・溶融飛灰のデータは、施設によって測定対象が原灰と処理灰（薬剤処理、セメント固化など）で異なります。

焼却飛灰・溶融飛灰、焼却主灰・溶融スラグのいずれについても、放射性セシウム濃度は2011年7月から2012年3月頃にかけて全体的に低下している傾向があることがわかります。しかしながら、焼却灰等の放射性セシウム濃度は多くの施設で再び上昇しており、2012年5月頃に再びピークが見られます。また、施設によっては2011年の9月頃にも放射性セシウム濃度のピークが見られる場合があります（この変動を読み取りやすいように、2012年9月までのデータを整理した8都県の焼却飛灰・溶融飛灰のデータを例として、2011年7月の濃度を1として放射性セシウム濃度を相対的に表わしたものを図10.3に示しました）。このデータから、焼却灰等の放射性セシウム濃度には季節変動があり、初夏と秋に上昇する可能性があると考えられます。

この原因としては、初夏や秋には剪定枝や雑草などの草木類の排出量が増加し、草木類やこれに付着した土に含まれて放射性セシウムの混入量が増えたことが可能性として挙げられます。このように、焼却灰等の放射性セシウム濃度は一旦低下しても再び上昇することが十分考えられることから、濃度レベルによっては定期的・長期的なモニタリングが重要と考えられます。

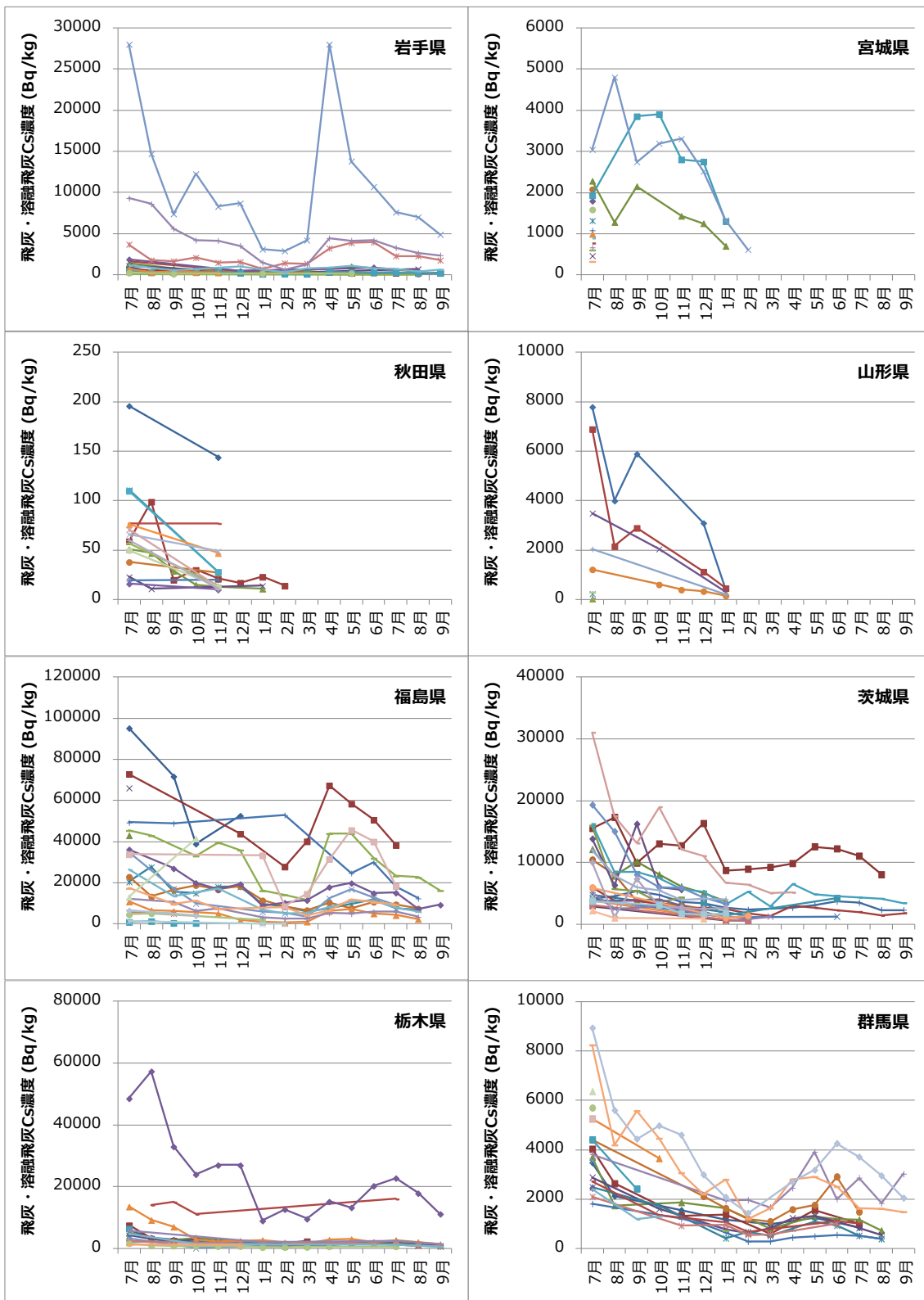


図 12.1 一般廃棄物焼却施設における焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度 (Cs-134 と Cs-137 の合計) の推移

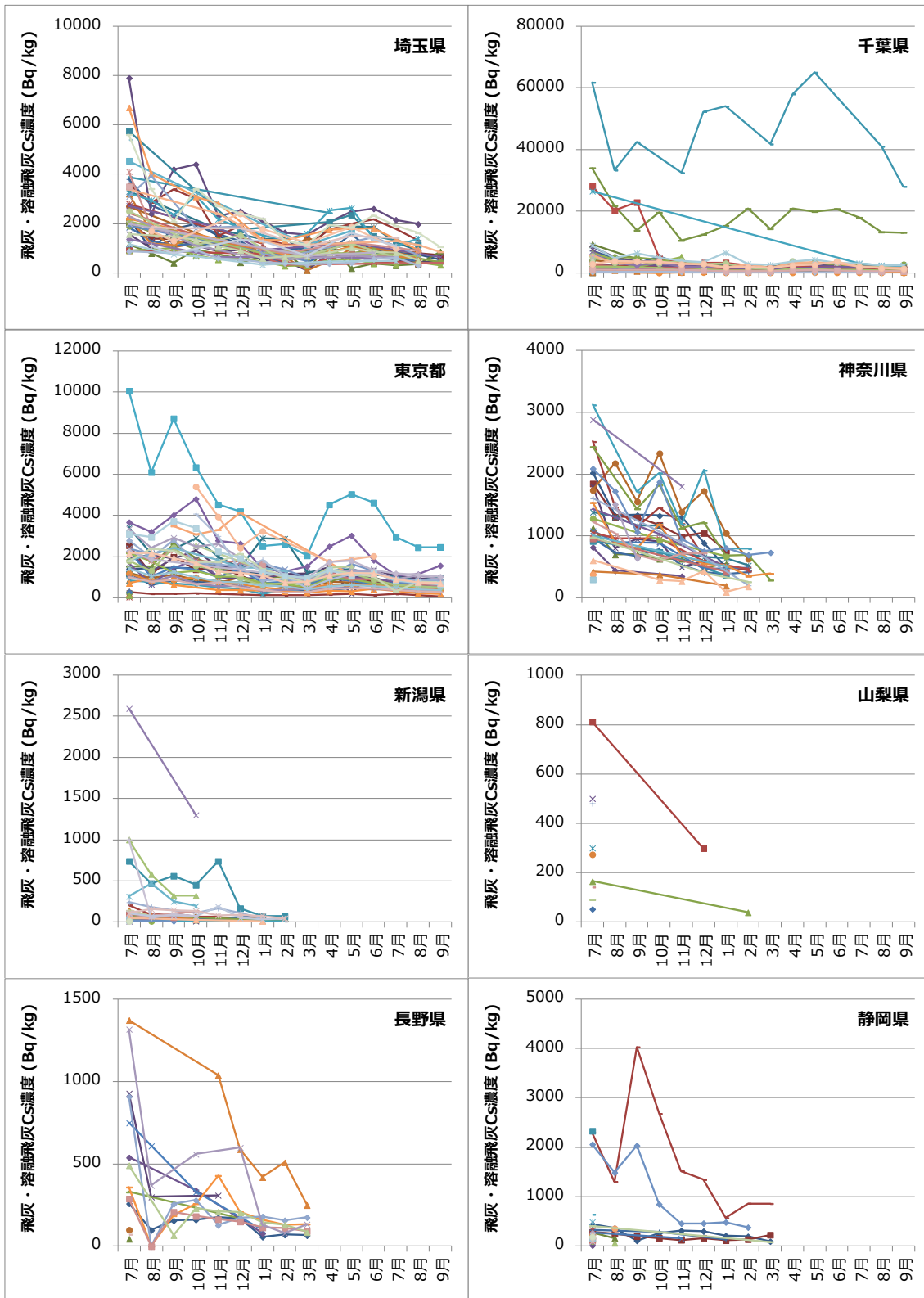


図 12.1 (つづき) 一般廃棄物焼却施設における焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度 (Cs-134 と Cs-137 の合計) の推移



図 12.2 一般廃棄物焼却施設における焼却主灰・溶融スラグの放射性セシウム濃度 (Cs-134 と Cs-137 の合計) の推移

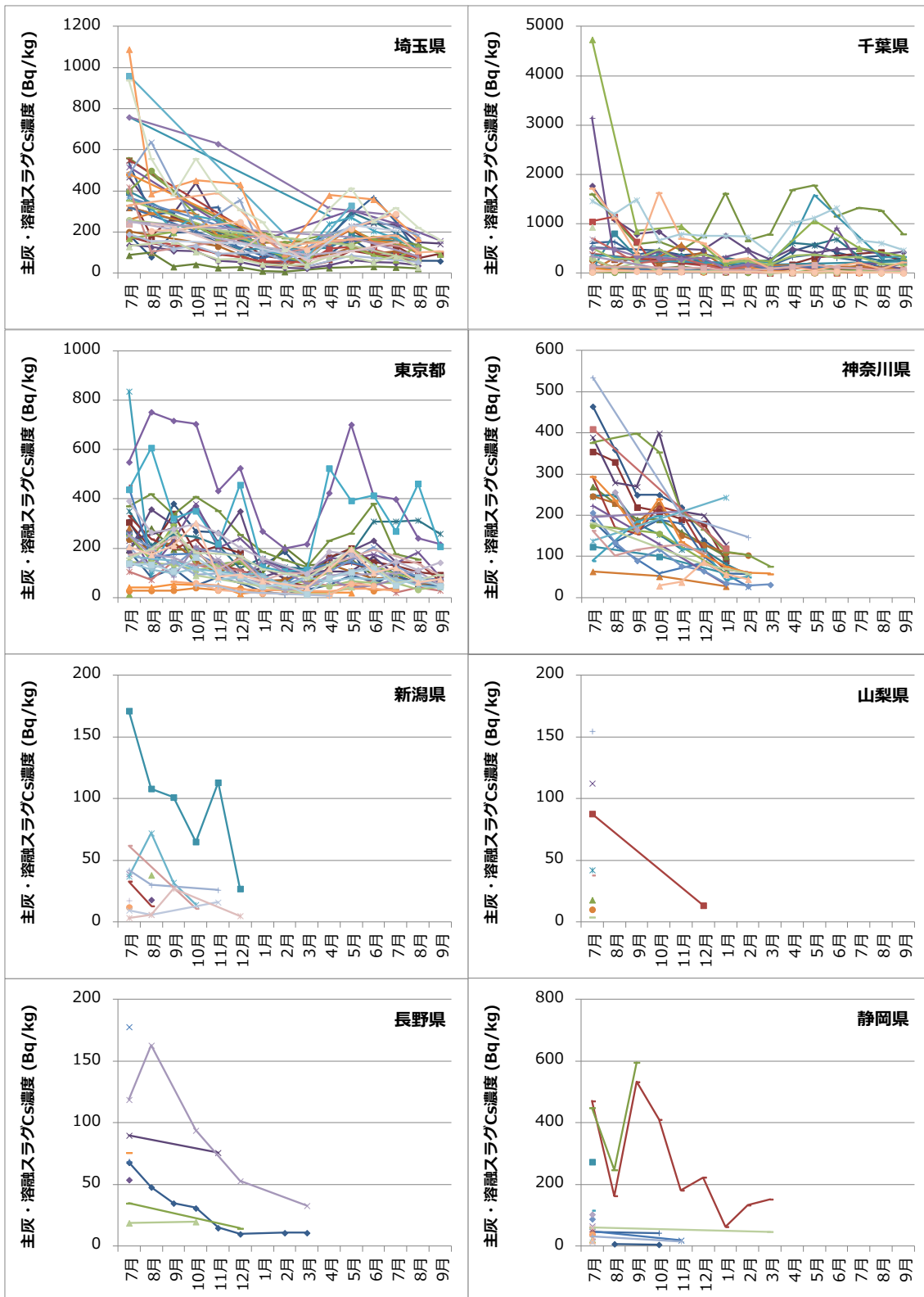


図 12.2 (つづき) 一般廃棄物焼却施設における焼却主灰・溶融スラグの放射性セシウム濃度 (Cs-134 と Cs-137 の合計) の推移

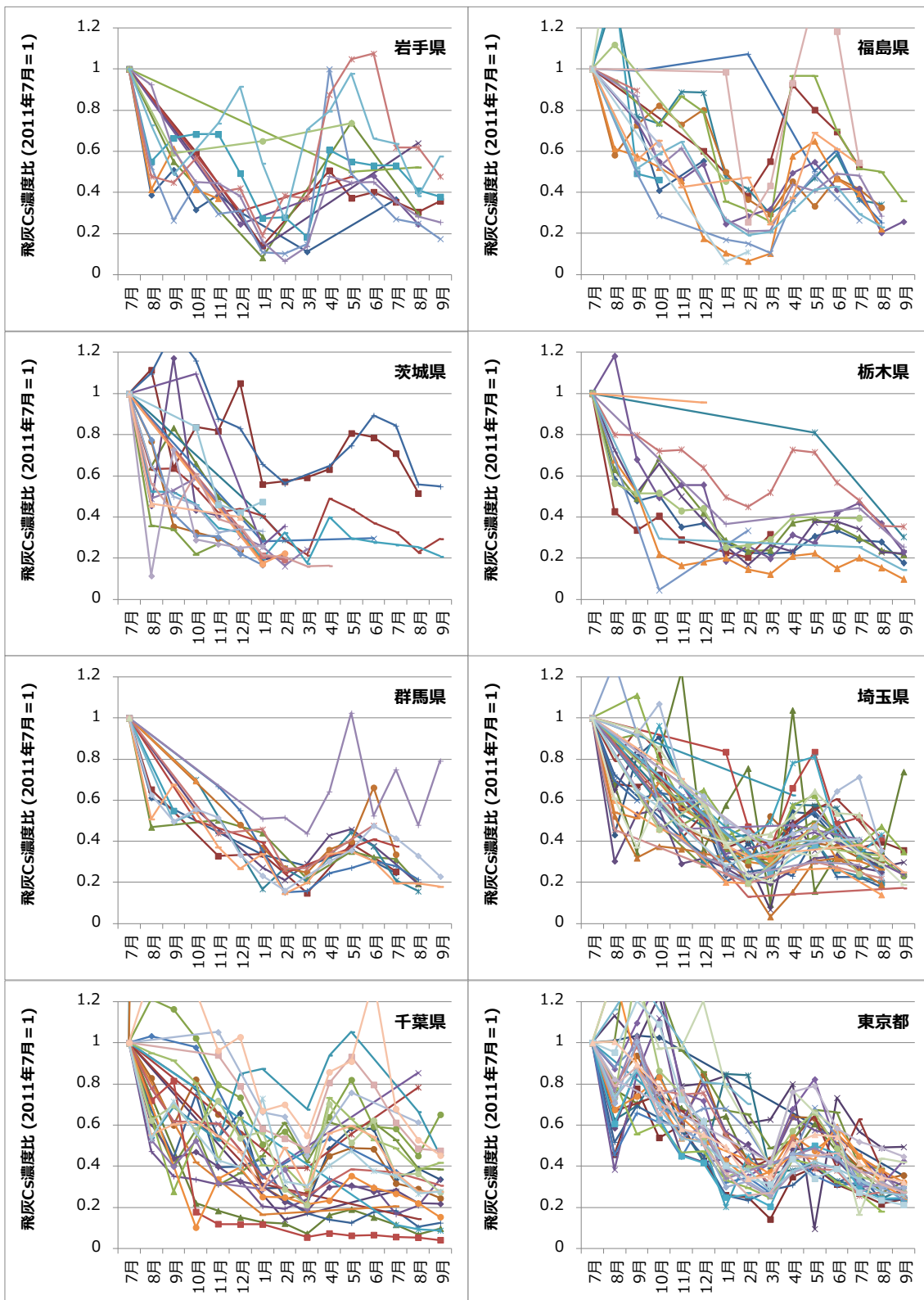


図 12.3 一般廃棄物焼却施設における焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度 (Cs-134 と Cs-137 の合計) の推移 (2011 年 7 月を 1 とした値)

12.4 焼却灰等の放射性セシウム濃度の空間分布

図 12.4 に、東日本の一般廃棄物焼却施設における焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度レベル（7月測定値、Cs-134 と Cs-137 の合計）と発生量の空間分布を示します。円の色が放射性セシウム濃度、円の大きさが焼却飛灰・溶融飛灰の月間発生量（年間発生量を 12 で割った値）を示しています。なお、混合灰の測定値しか報告されていない施設については図に含まれていません。

2011 年 7 月時点では、福島県内に加えて岩手県一関周辺、栃木県那須周辺、千葉県東葛地域などの施設において放射性セシウム 8,000Bq/kg を超える飛灰（赤、橙、または黄色の円）が月間 50～250 トン程度の量で生じていたことがわかります。一方、特に関東地方においては、8,000Bq/kg は超えていないものの、放射性セシウム濃度が数千 Bq/kg（緑色の円）が月間数百トンの量で発生していた施設も多く存在することがわかります。これらの施設で生じた放射性セシウム濃度が 8,000Bq/kg を超えない飛灰は特定一般廃棄物として既に処分されたものもあると考えられますが、適切な処分がなされているかを把握しておくことも放射性物質の管理の面から重要であると考えられます。

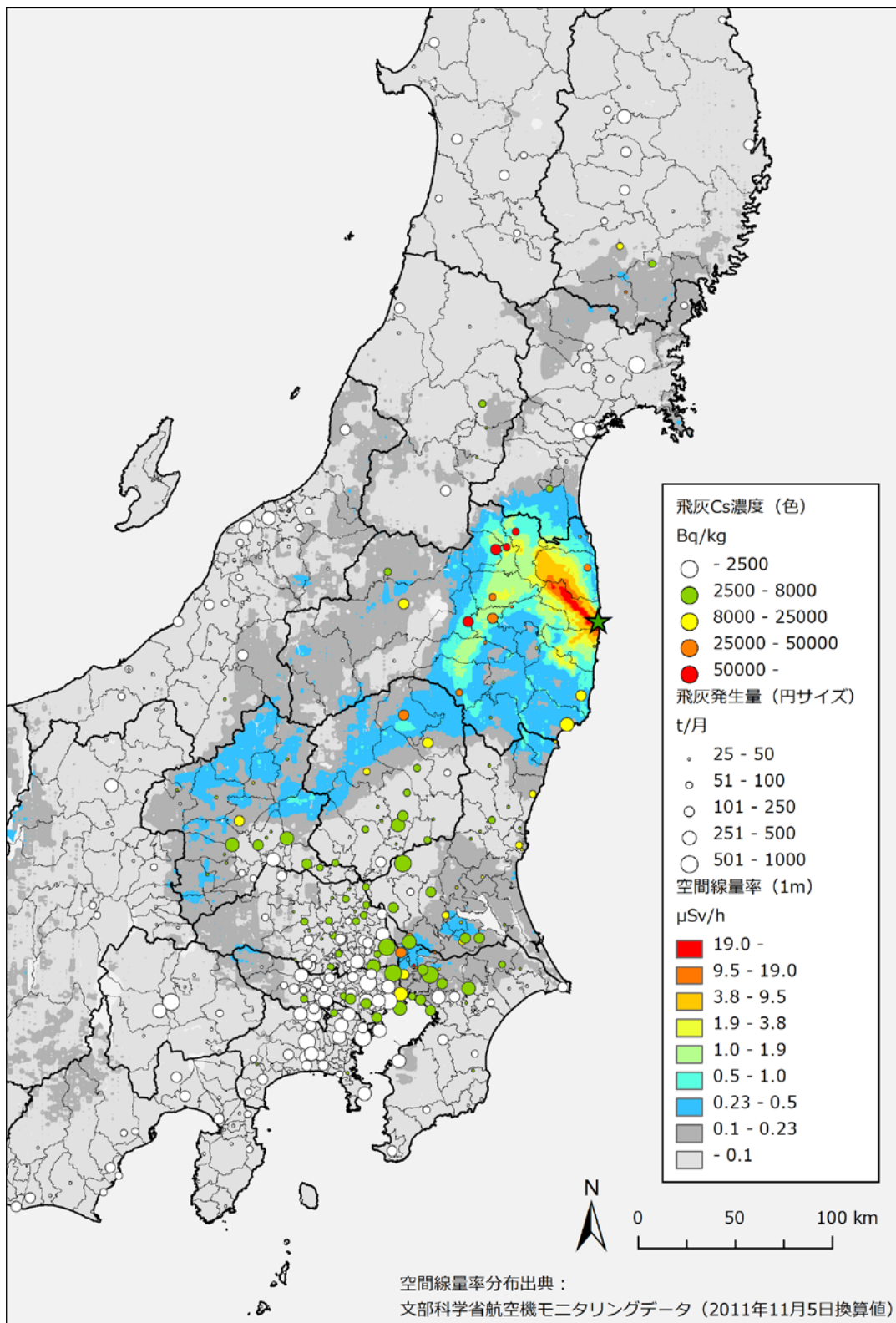


図 12.4 焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度レベルと発生量の空間分布
(濃度は2011年7月測定値、Cs-134とCs-137の合計)

12.5 放射性セシウムで汚染された焼却灰等の施設・地域特性

図 12.4 に示した飛灰の放射性セシウム濃度と空間線量率の分布状況を見ると、焼却灰等の放射性セシウム濃度と空間線量率の間には一定の相関があることが予想されます。そこで、図 12.5 に施設ごとのごみ収集対象区域の平均空間線量率と飛灰の放射性セシウム濃度の関係を示します。ごみ収集対象区域の平均空間線量率は、文部科学省航空機モニタリングに基づいて作成されたメッシュデータを用い、中心点がごみ収集対象区域に含まれるメッシュの空間線量率を単純平均したものを用いています。なお、空間線量率の値はバックグラウンドである自然放射線量の値を差し引いていません。

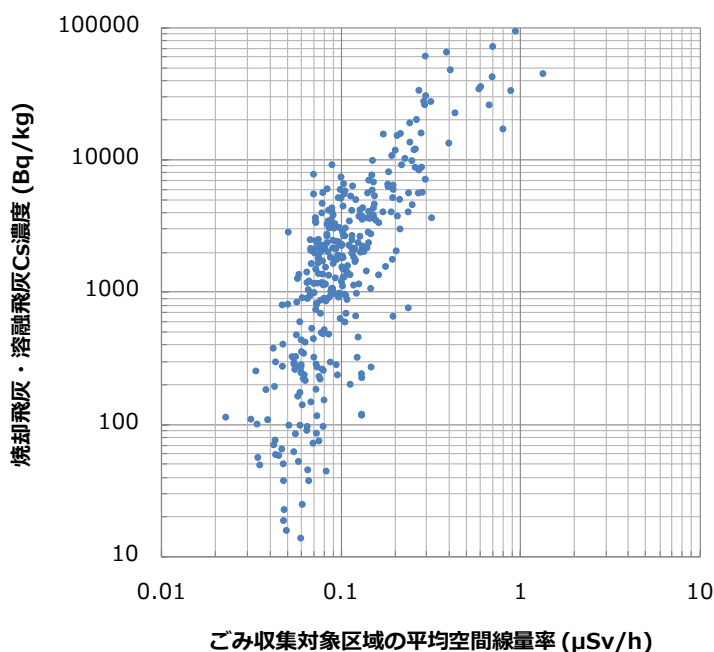


図 12.5 焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度
(2011年7月測定値、Cs-134とCs-137の合計)と空間線量率の関係

この図より、焼却飛灰や溶融飛灰の放射性セシウム濃度は施設のごみ収集対象区域の空間線量率と一定の正の相関があることがわかります。その一方で、空間線量率のレベルが同程度であっても焼却飛灰や溶融飛灰の放射性セシウム濃度は施設によって大きくばらついており、1桁から2桁程度異なっている場合があることがわかります。

焼却飛灰や溶融飛灰の放射性セシウム濃度は、焼却前のごみの放射性セシウム濃度と焼却による飛灰への濃縮倍率で決まると考えられますので、施設によるこれらの違いが飛灰の放射性セシウム濃度の違いに影響していると考えられます。そこで、放射性セシウムの焼却ごみ濃度や濃縮倍率について推定を行い、地域や施設ごとの特性を分析しました。

12.6 焼却ごみの放射性セシウム濃度の傾向

(1) 焼却ごみの放射性セシウム濃度の推定

施設ごとの焼却灰等の放射性セシウム濃度、焼却灰等発生量および焼却処理量データを用いて、下記の式より各施設における焼却ごみの放射性セシウム濃度を推定しました。

$$\text{焼却ごみ Cs 濃度(Bq/kg)} = \frac{\sum_i \text{焼却灰等 } i \text{ の Cs 濃度(Bq/kg)} \times \text{焼却灰等 } i \text{ の発生量(kg/年)}}{\text{焼却処理量(kg/年)}}$$

i は焼却飛灰、焼却主灰、混合灰、溶融飛灰、溶融スラグ等の発生物の種類を示しており、基本的に焼却施設については焼却飛灰と焼却主灰、または混合灰のデータ、ガス化溶融施設や灰溶融併設焼却施設については溶融飛灰と溶融スラグのデータを用いて推定を行っています。

なお、この推計値は主に剪定枝や雑草などの草木類やこれに付着した土に含まれていると考えられる放射性セシウムの量を焼却ごみ全体の量で平均化した値となっており、家庭ごみ全体が放射性セシウムに汚染されていることを示しているわけではありません。言い換えれば、草木類や土に比較的高濃度で含まれていた放射性セシウムはその他の家庭ごみ等で薄められており、この推計値はその薄められたときの焼却ごみ全体の平均濃度を示しているということになります。

図 12.6 に推定した焼却ごみの放射性セシウム濃度の推移を 2012 年 9 月までのデータを整理した 8 都県について示します。焼却ごみの推定放射性セシウム濃度は 2011 年 9 月頃や 2012 年 5 月頃にピークが見られ、これが焼却灰等の放射性セシウム濃度の季節変動につながっていると考えられます。ただし、同じ季節について 2011 年と 2012 年を比較すると、一部の施設を除けば 2012 年の方が低い濃度を示していることから、焼却ごみの放射性セシウム濃度は季節変動によって低下と上昇を繰り返しながら徐々に低下していると予想されます。この全体的な低下傾向は Cs-134 の自然減衰や生活圏における放射性セシウムを含む草木類や土壌の除去、移動（意図的および非意図的な除染活動）によるものである可能性が考えられます。

図 12.7 に推定した焼却ごみの放射性セシウム濃度と施設のごみ収集対象区域の平均空間線量率の関係の例（2011 年 7 月の例）を示します。図より、焼却ごみの放射性セシウム濃度も空間線量率と一定の相関があり、単純な回帰曲線（累乗関数）上においては 2011 年 7 月時点で平均空間線量率が $0.1 \mu\text{Sv/h}$ の地域で 70Bq/kg 程度、 $0.5 \mu\text{Sv/h}$ で 700Bq/kg 程度、 $1 \mu\text{Sv/h}$ で $2,000\text{Bq/kg}$ 程度と試算されました。ただし、飛灰の場合と同様に、空間線量率のレベルが同程度であっても焼却ごみの放射性セシウム濃度は施設によって 1 桁強異なっている場合があり、一般廃棄物焼却処理への放射性セシウムの移行挙動は施設（地域）によって異なっていると考えられます。

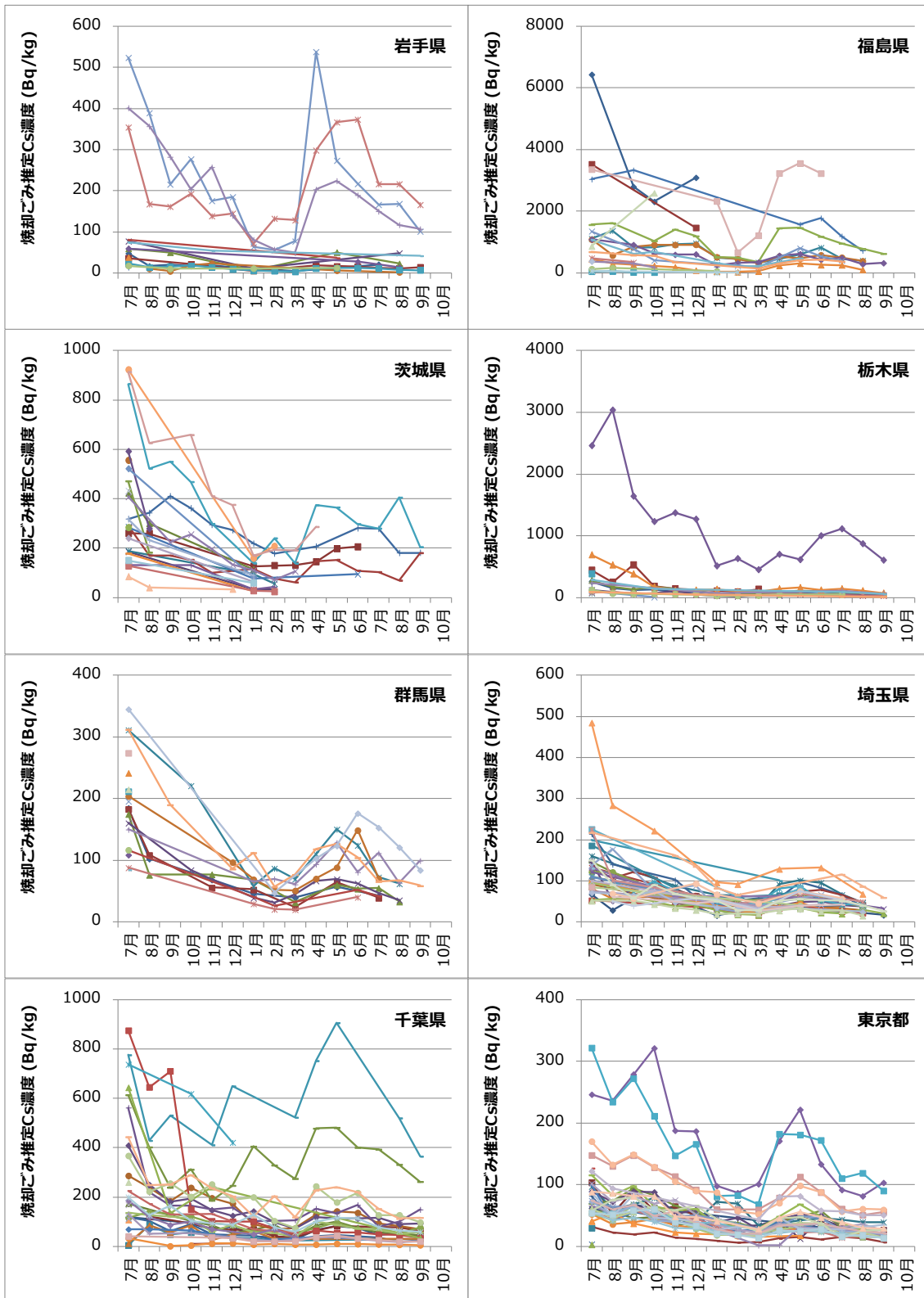


図 12.6 一般廃棄物焼却施設における焼却ごみの推定放射性セシウム濃度 (Cs-134 と Cs-137 の合計) の推移

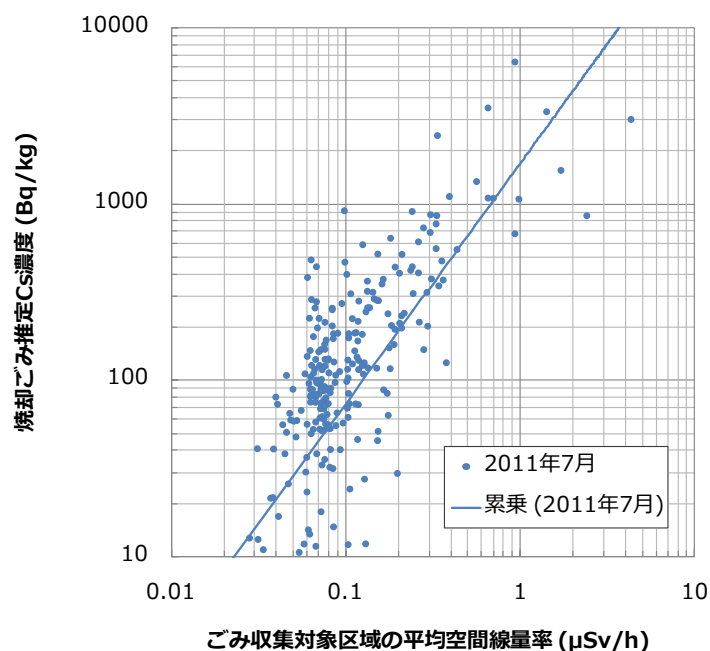


図 12.7 焼却ごみの推定放射性セシウム濃度（2011年7月推定値、Cs-134 と Cs-137 の合計）と空間線量率の関係

(2) 焼却ごみへの放射性セシウム移行率の推定

一般廃棄物焼却処理への放射性セシウム移行挙動の施設（地域）による違いを考察するため、放射性セシウムの焼却ごみ濃度（推定値）と土壌沈着量から放射性セシウムの焼却ごみへの移行率を計算し、その傾向を考察しました。各施設の放射性セシウムの焼却ごみ移行率は下記の式で年間あたりの値として計算しました。

$$\text{焼却ごみ Cs 移行率} = \frac{\text{焼却ごみ Cs 濃度(Bq/kg)} \times \text{年間焼却処理量(kg/年)}}{\text{ごみ収集対象区域の土壌 Cs 濃度(Bq/m}^2\text{)} \times \text{面積(m}^2\text{)}}$$

ごみ収集対象区域の土壌放射性セシウム濃度には、文部科学省航空機モニタリングに基づいて作成されたメッシュデータから中心点がごみ収集対象区域に含まれるメッシュのデータを単純平均したものをを用いています。

図 12.8 に土壌沈着量に対する焼却ごみへの放射性セシウム移行率の分布を示します。放射性セシウムの移行率は施設によって大きく異なっており、この違いが施設（地域）による焼却ごみの放射性セシウム濃度の違いの 1 つの影響要因であると考えられます。

年間あたりで焼却ごみへ移行する放射性セシウムは 8 割以上の施設において土壌沈着量

の1%未満であり、最も高い施設でも8%（2011年7月時点）と推定されました。また、各施設のごみ収集対象区域への放射性セシウムの総沈着量（＝土壌濃度×面積）で加重平均した年間あたりの移行率は0.1%未満であり、一般廃棄物焼却処理への放射性セシウムの移行量は沈着量に比して決して多くはないことがわかります。

全体的な傾向として、2011年8月から9月頃に焼却ごみへの放射性セシウム移行率が高い施設の割合が増えており、冬季はその割合が低下している様子が見られます。また、2012年5月頃に再度ピークが見られ、その後はまた減少傾向が見られます。この変動は焼却ごみに含まれる放射性セシウムの主な由来と考えられている剪定枝や雑草などの草木類およびこれに付着した土の排出量の季節変動によるものである可能性があります。ただし、これを裏付けるデータは得られていないため、継続的なデータ蓄積とともに草木類排出に関する情報収集も望まれます。

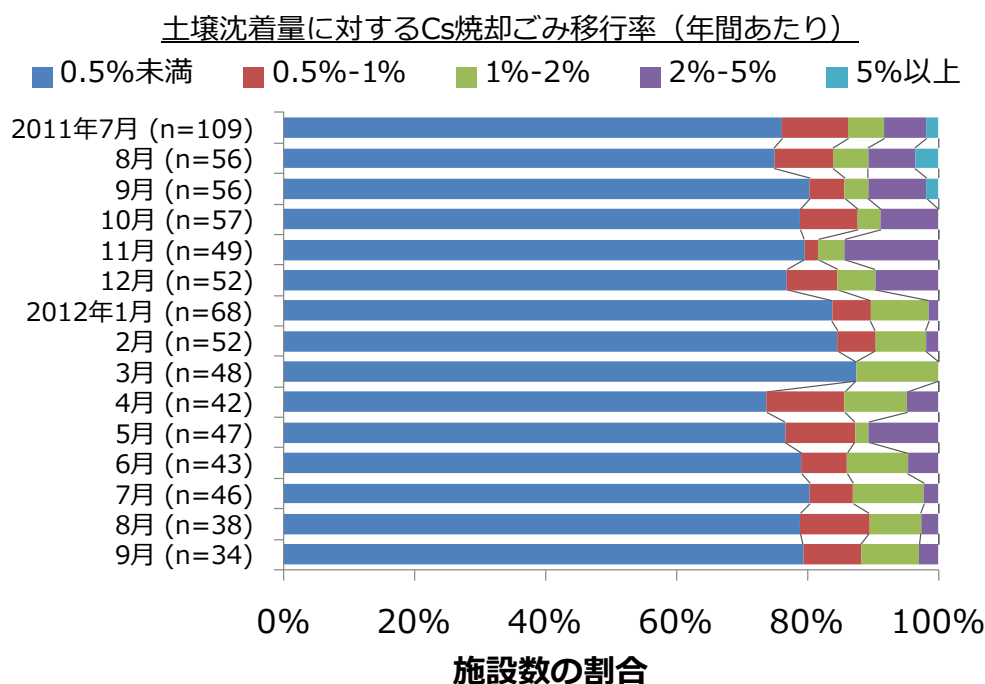


図 12.8 土壌沈着量に対する焼却ごみへの放射性セシウム移行率の分布

焼却ごみに含まれる放射性セシウムの主な由来が草木類およびこれに付着した土だとすれば、放射性セシウムの焼却ごみへの移行率は草木類排出に係る地域的な特性に影響されると考えられます。例えば草木類の排出量は住宅の密集度や土地利用状況に関する可能性があります。そこで、例として施設のごみ収集対象区域の人口密度（平成17年国勢調査データより算出）と放射性セシウムの焼却ごみ移行率の関係を見てみました。

図 12.9 に放射性セシウムの焼却ごみ移行率とごみ処理区域の人口密度の関係（2011年7

月の例) を示します。この図より、放射性セシウムの焼却ごみ移行率は人口密度が大きい地域ほど高い傾向があることがわかります。この結果は、人口密度が高い地域ほど沈着した放射性セシウムを含む草木類や土壌が除去、移動されている割合が高いという可能性を示していると言えます。一方、人口密度が低い地域では日常生活に直接関係しない森林等の土地も多く、沈着した放射性セシウムの大部分がそのまま残されているのではないかと推測ができます。なお、人口密度が低い地域 (2,000 人/km² 程度以下) では焼却ごみ移行率は施設 (地域) によって数桁と大きく異なっています。これに対し、人口密度が 5,000 人/km² 程度を超える地域では焼却ごみ移行率がそれほど大きくは異ならない傾向があり、放射性セシウムの焼却ごみ移行率は高くても数%で頭打ちになっていると考えられます。

また、結果は示していませんが、放射性セシウムの焼却ごみ移行率は土地利用区分における建物用地面積の割合 (国土数値情報平成 18 年土地利用細分メッシュデータより算出) や住宅種別世帯数の割合 (平成 17 年国勢調査データより算出) とも相関が見られました。しかし、これらの指標は人口密度とも高い相関があり相互に関係していることから、放射性セシウムの焼却ごみへの移行率は人口密度のみでもある程度説明可能と考えられました。

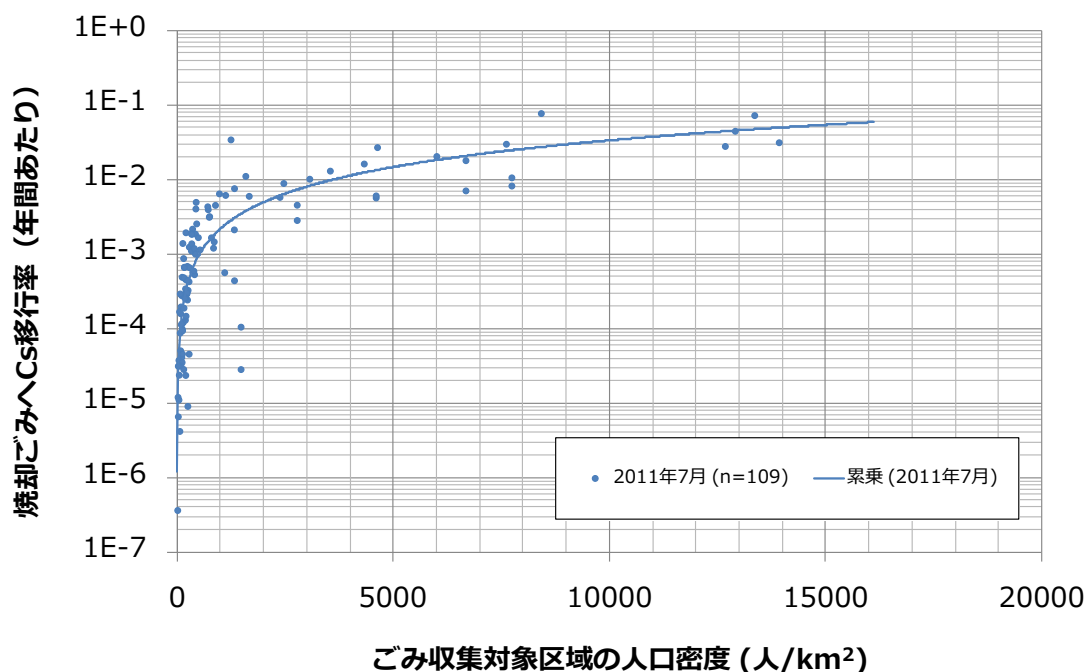


図 12.9 土壌沈着量に対する焼却ごみへの放射性セシウム移行率と人口密度の関係

12.7 焼却灰等への放射性セシウム濃縮傾向

焼却灰等の放射性セシウム濃度に影響するもう 1 つの要因である放射性セシウムの焼却灰等への濃縮倍率について、焼却飛灰・熔融飛灰のデータをもとにその傾向を考察しました。

図 12.10 は放射性セシウムの焼却ごみ濃度（前節で推定）と焼却飛灰・溶融飛灰濃度の関係を施設の処理方式別に示したものです。図ではある施設・ある月の測定値を 1 データとしてプロットしています。横軸（焼却ごみ濃度）に対する縦軸（飛灰濃度）の比が焼却飛灰・溶融飛灰への放射性セシウム濃縮倍率を示します。

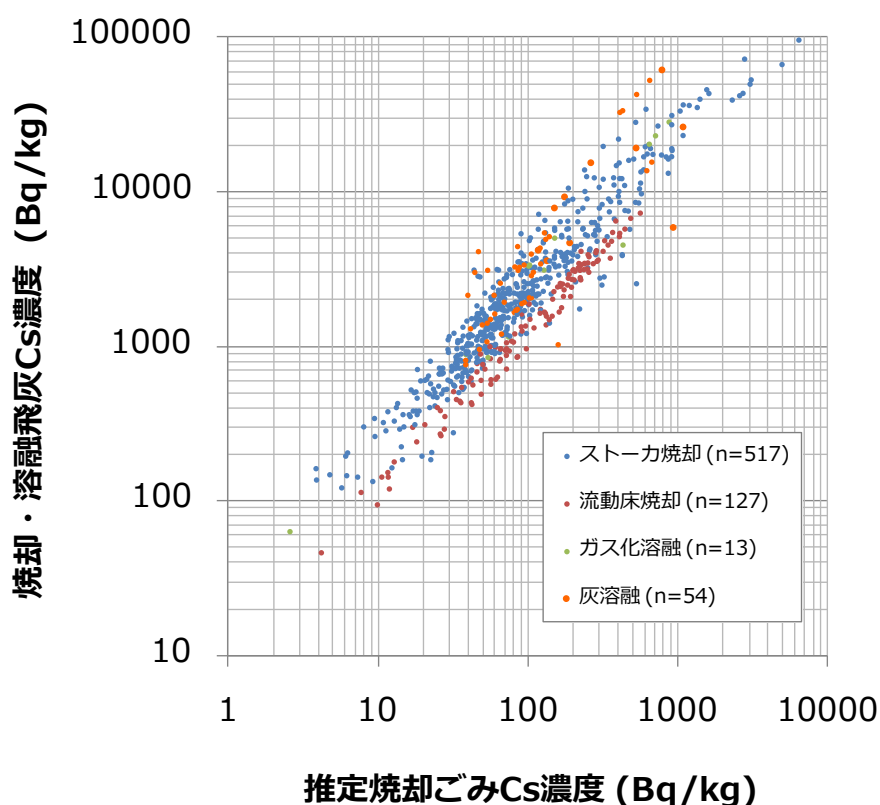


図 12.10 放射性セシウムの推定焼却ごみ濃度と焼却・溶融飛灰濃度の関係

飛灰への放射性セシウム濃縮倍率は流動床式焼却施設では明らかに低く、灰溶融併設焼却施設では全体的に高い傾向があり、ストーカ式焼却施設およびガス化溶融施設はその中間に位置していることが見て取れます。

飛灰への放射性セシウム濃縮倍率の分布を処理方式別にヒストグラムで表したものを図 12.11 に示します。流動床式焼却施設における飛灰への放射性セシウム濃縮倍率は大半のデータが 10～15 倍程度であり、施設によるばらつきは非常に小さいことがわかります。一方、灰溶融併設焼却施設における飛灰への放射性セシウム濃縮倍率は 20～40 倍程度のデータが多いですが、さらに高い濃縮倍率を示すデータがあるなど全体的に高い傾向があります。ストーカ式焼却施設における飛灰への放射性セシウム濃縮倍率は 20 倍程度を中心に流動床式焼却施設と灰溶融併設焼却施設の中間に位置する分布を示しています。ガス化溶融施設はデータ数が少なく傾向を読むことは難しいものの、ストーカ式焼却施設と比べて明らか

な違いは見られません。

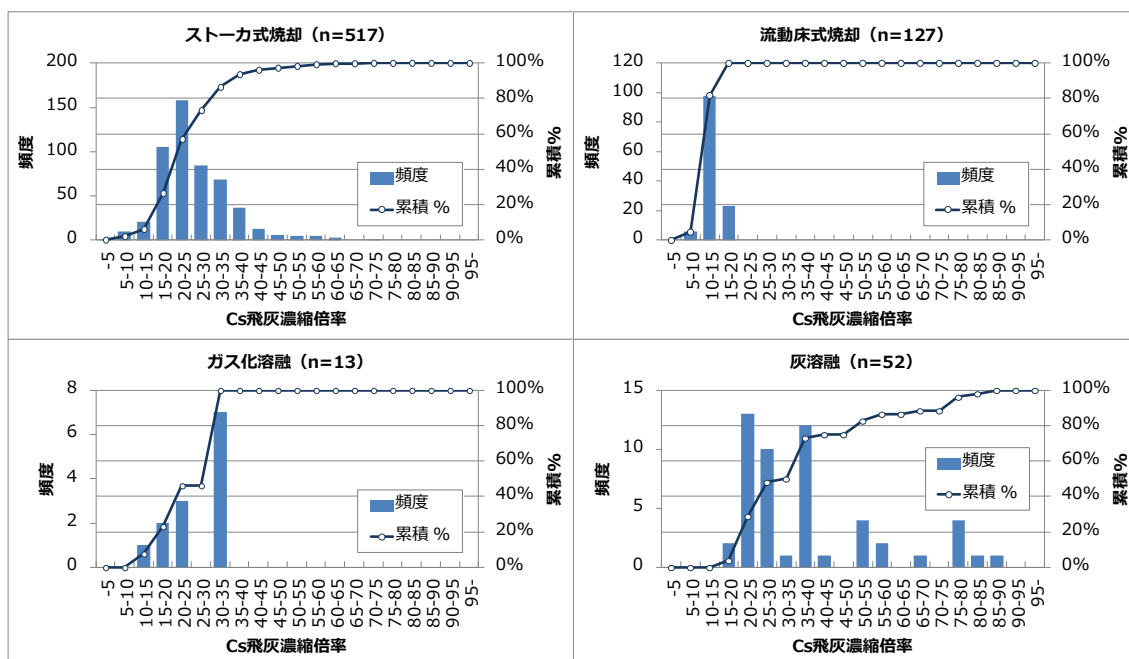


図 12.11 焼却・溶融飛灰への放射性セシウム濃縮倍率の分布（処理方式別）

まとめると、飛灰への放射性セシウム濃縮倍率は灰溶融併設施設、ストーカ式焼却施設およびガス化溶融施設、流動床式焼却施設の順に高い傾向にあることがわかります。また、この濃縮倍率データを用いれば、飛灰の放射性セシウム濃度から焼却ごみの放射性セシウム濃度をおよそ推定できると考えられます。特に流動床式焼却施設は施設による濃縮倍率の違いが小さいことから、焼却ごみの放射性セシウム濃度を比較的精度よく推定できると考えられます。

焼却飛灰・溶融飛灰への放射性セシウム濃縮倍率は、焼却処理量に対する飛灰発生量の割合（飛灰発生率）と放射性セシウムの飛灰への分配率で決まると考えられます。そこで、処理方式別にこれらの傾向を考察しました。

(1) 施設の処理方式による飛灰発生率の傾向

図 12.12 に処理方式別の飛灰発生率の分布（ヒストグラム）を示します。流動床式焼却施設は他の処理方式に比べて飛灰発生率が高い傾向が見られます。流動床式焼却施設では焼却灰が基本的に全て飛灰として回収され、炉下に残るのは不燃物のみであることから、焼却処理量に対して発生する飛灰の割合が高いこの傾向は妥当と考えられます。一方、灰溶融併設焼却施設では他の処理方式に比べて飛灰発生率が低い傾向が見られます。溶融処理物（焼却飛灰や焼却主灰）の主要成分のうち溶融飛灰へ移行するのは Na や K などの揮発成分が主

であり、SiやAlはほぼ熔融スラグへ分配することから、飛灰発生率が低い傾向があることは妥当と考えられます。焼却灰が焼却飛灰と焼却主灰に分かれて排出されるストーカ式焼却施設の飛灰発生率は、全体的な傾向として流動床式焼却施設と灰熔融併設焼却施設の間に位置しています。また、ガス化熔融施設における飛灰発生率はストーカ式焼却施設と同程度の分布となっています。

飛灰発生率が高いほど飛灰へ分配した放射性セシウムが希釈され、飛灰発生率が低いほど濃縮される方向に影響しますので、飛灰発生率の点においては飛灰への放射性セシウム濃縮倍率が低いという傾向と整合しています。

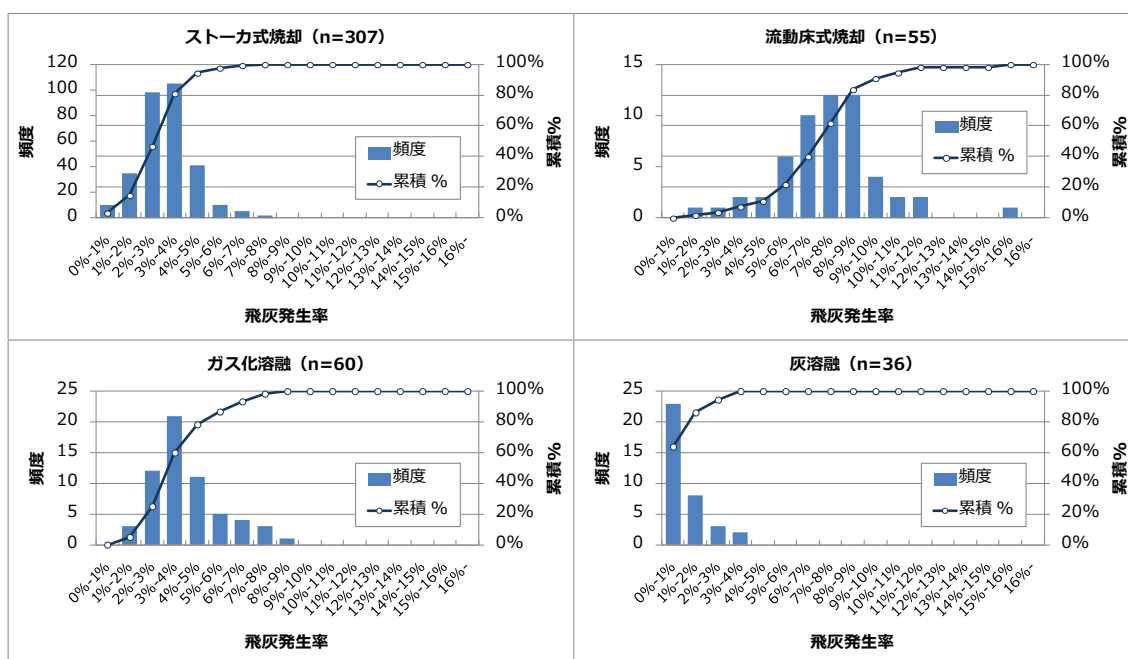


図 12.12 焼却処理量に対する飛灰発生率の分布（処理方式別）

(2) 施設の処理方式による飛灰への放射性セシウム分配率の傾向

図 12.13 に処理方式別の飛灰へのセシウム分配率の分布（ヒストグラム）を示します。飛灰への放射性セシウム分配率は下記の式で計算しました。なお、図ではある施設・ある月の測定値を 1 データとして数えています。

$$\text{飛灰への Cs 分配率} = \frac{\text{飛灰 Cs 濃度(Bq/kg)} \times \text{飛灰発生量(kg/年)}}{\text{焼却ごみ推定 Cs 濃度(Bq/kg)} \times \text{焼却処理量(kg/年)}}$$

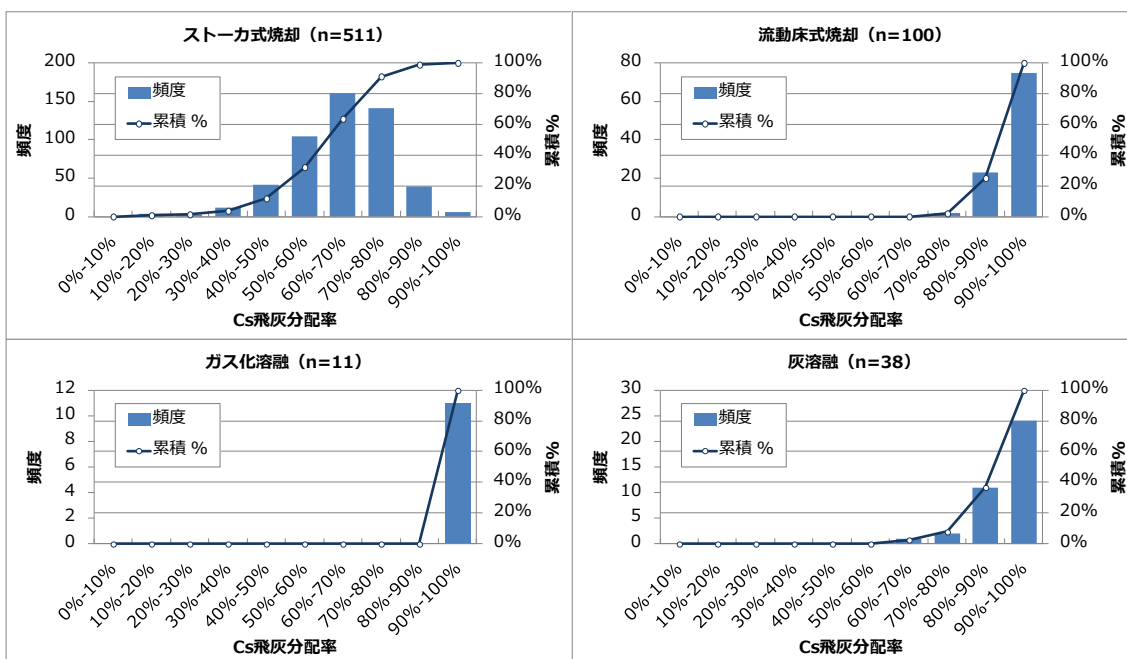


図 12.13 焼却ごみに含まれる放射性セシウムの飛灰への分配率の分布（処理方式別）

流動床式焼却施設、灰溶融併設焼却施設では飛灰への放射性セシウムの分配率が多く of 施設で 90%以上となっています。ガス化溶融施設はデータ数が少なく傾向を見出すことは困難ではありますが、得られた 11 データは全て 90%以上となっています。これらの処理方式について、施設による飛灰への放射性セシウム分配率の違いはせいぜい±20%程度であることから、飛灰への放射性セシウムの分配率の違いだけによって放射性セシウムの濃縮倍率に数倍程度の大きな差が現れることはないことがわかります。したがって、流動床式焼却施設、灰溶融併設施設、ガス化溶融施設では、放射性セシウムの飛灰分配率の影響はそれほど小さくなく、飛灰への放射性セシウム濃縮倍率はほぼ施設の飛灰発生率によって決定されていると考えられます。実際に、飛灰発生率の高い傾向のある流動床式焼却施設は飛灰への放射性セシウム濃縮倍率が低く、飛灰発生率の低い傾向のある灰溶融併設焼却施設は濃縮倍率が高い傾向となっており、飛灰発生率で濃縮倍率の傾向をおよそ説明できる結果となっています。

一方、ストーカ式焼却施設については、飛灰への放射性セシウム分配率が 20%からほぼ 100%まで広い範囲の値を取っており（すなわち施設によって 5 倍程度異なる）、焼却ごみに含まれる放射性セシウムの飛灰と主灰への分配挙動が施設によって大きく異なっていることがわかります。先に示したように、ストーカ式焼却施設では飛灰への放射性セシウム分配率も施設によって大きく異なっていることから、放射性セシウム濃縮倍率は飛灰発生率と飛灰への放射性セシウム分配率の両方に影響されていると考えられます。

参考文献

- 1) 環境省 (2011) 16 都県の一般廃棄物焼却施設における焼却灰の放射性セシウム濃度測定結果一覧、<http://www.env.go.jp/jishin/attach/waste-radioCs-16pref-result20110829.pdf>、2011 年 11 月 22 日閲覧
- 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, *Geophysical Research Letters*, 38, L00G11