

(資料 1 4) 平成 2 0 年度終了特別研究の実施状況及びその評価

1. 都市大気環境中における微小粒子・二次生成物質の影響評価と予測
2. 湿地生態系の時空間的不均一性と生物多様性の保全に関する研究
3. 中長期を対象とした持続可能な社会シナリオの構築に関する研究
4. 省エネルギー型水・炭素循環処理システムの開発
5. 侵入生物・組換え生物による遺伝的多様性影響評価に関する研究
6. 残留性有機汚染物質の多次元分離分析法の開発に関する研究
7. 化学物質の動態解明のための同位体計測技術に関する研究

## 1. 都市大気環境中における微小粒子・二次生成物質の影響評価と予測

課題代表者 小林 伸治（社会環境システム研究領域）

### 1) 研究の概要

DPF付の最新ディーゼル車の排出ガス性能評価を行い、NO<sub>2</sub>の排出量が従来車よりも増加していることを明らかにした。2007年夏に、関東地域を対象にフィード観測を行い、有機二次粒子（以下、SOA）を中心とする二次粒子等の濃度や成分を解析し、その動態や発生源寄与などを明らかにした。得られたデータを用いて、都市大気汚染モデルを検証した。人口動態統計に基づく死亡データをもとに、疫学的な見知から微小粒子や二次生成成分との関連性を検討して、二次粒子の健康影響を予測した。さらに、都内の幹線道路沿道等を歩行しながらPM濃度と微小粒子数を測定し、幹線道路沿道住民等の交通環境における高曝露群の曝露実態の解明を行った。

### 2) 研究期間

平成18～20年度（3年間）

### 3) 研究成果

#### （1）研究目的

ディーゼル車に対する厳しい排出ガス規制導入により、将来、DEP等の一次排出粒子の排出量は大幅な低減が見込まれているが、その一方で、大気中における光化学反応で生成される微小な二次生成粒子の寄与が高まる傾向がある。また、今後、ディーゼル車に対する排ガス触媒や地球温暖化対策としてのバイオ燃料の採用等、自動車排出ガスの質が大きく変化し、都市における大気汚染の構造が大きく変化することが予想される。本研究では、都市圏における微小粒子、二次生成汚染物質を対象にその動態、生成要因の解明と曝露モニタリング、リスク評価等を行い、今後、自動車等の技術変革により起こりうる都市の環境問題を未然に予測し、中長期的な環境政策立案に資することとする。

#### （2）研究目的・目標の達成度

本研究では、次世代のディーゼル車からの汚染物質の排出特性等、発生源に関する課題を明確にするとともに、エアロゾル質量分析計（以下、AMS）や<sup>14</sup>C分析などの最新手法を適用したフィールド観測を行い、有機二次粒子（以下、SOA）を中心とする二次生成粒子の濃度や成分を解析し、その動態や発生源寄与などを明らかにした。さらに、得られた観測データを用いて、改良したSOA生成モデルや化学輸送モデル（都市大気汚染モデル）を検証した。

健康影響評価については、「医療機関への受診・入院と二次生成大気汚染の短期的関連性についての調査等をもとに、疫学的見地から大都市圏における二次生成大気汚染（二次粒子+オゾン等）の健康影響を予測する」という計画であったが、データ入手の問題から解析が困難であることが判明したため、代替として大都市圏を含む全国20地域における人口動態統計に基づく死亡データにより解析を行い、大都市域およびその周辺地域で微小粒子状物質への曝露と死亡リスクとの関連性を見いだした。また、都内の幹線道路沿道等を歩行しながらPM濃度やナノ粒子を含む微小粒子数を測定して、沿道および後背地域歩行中の高濃度曝露の実態を明らかにした。

SOAの予測精度や二次粒子の健康影響評価等については、課題が残されているが、SOA生成モデルやインベントリの改良すべき点、生物起源粒子の寄与率を明らかにするなど、課題解決に向けた

糸口を把握することができたことから、概ね、当初の目的を達成できたものとする。

### (3) 本研究で得られた成果

#### サブテーマ(1) 都市圏における二次生成汚染物質の発生源から環境中における計測と動態解明

- ・ 今後、普及が予想されるDPF(Diesel Particulate Filter)や触媒等の排気後処理装置付最新ディーゼル車から排出される大気汚染物質の排出特性を実使用条件で評価し、粒子状物質は大幅に低減する一方、NO<sub>2</sub>の排出量の増加やコールドスタート時の排出寄与が大きくなるなど、新たな課題があることを明らかにした。
- ・ 最新ディーゼル車について、経年劣化を調べ、車種によっては、1年程度で排気後処理装置が劣化し、排出量が大幅に増加する可能性があり、改善の余地があることを明らかにした。
- ・ 道路沿道と一般環境において、ナノ粒子を含む微小粒子の粒径分布や個数濃度、粒径毎組成の長期観測を行い、自動車から排出されるナノ粒子の大気環境中における挙動を把握した。自動車から排出される粒径が20nm付近に個数濃度のピークを有するナノ粒子は、主にエンジンオイルの成分から構成された半揮発性の粒子であり、道路沿道では高濃度で存在するが、一般環境に移流拡散していく過程で揮発し、消滅していくことなど、これまで十分把握されていなかった自動車由来のナノ粒子の挙動を明らかにすることができた。
- ・ 2007年夏期に関東地域を対象として、二次生成粒子や生物起源粒子の動態、生成要因、寄与率等を把握するとともに、化学輸送モデルの予測精度を検証することを目的としたフィールド観測を実施した。この観測では、AMSや<sup>14</sup>C分析などの最新手法を適用し、SOAや生物起源粒子の挙動を高時間分解で把握することができた。
- ・ 炭素分析やAMSによる測定結果から、粒子中の炭素成分は、有機炭素の割合が多く、その中でも、SOAと考えられる含酸素有機エアロゾルの寄与が日中に増加し、70~80%を占めることを明らかにした。
- ・ フィールド観測で採取された大気中試料(PM<sub>2.1</sub>)の総炭素(TC)中の<sup>14</sup>C分析を実施し、生物由来のカーボンの比率pMC(%モダンカーボン)を求めた。その結果、騎西、前橋では、pMCが約40~60%と粒子中炭素に占める生物由来の寄与が大きく、人為発生源の活動量が低下する夜間に、pMCが上昇する傾向があることを明らかにした。
- ・ フィールド観測で得られた粒子成分分析結果を用いてケミカルマスバランス法(CMB法)による発生源推定を行い、一次発生源やSOAの寄与率を推定した。その結果、一次発生源の寄与は前橋が28%、騎西が50.5%であり、最も寄与の大きい発生源は前橋では自動車で12%、騎西では野焼きで27%であった。また、SOAの寄与率は前橋で14%、騎西で8%であった。
- ・ CMBにより推定した排出源寄与率を用いて、生物由来の炭素の寄与を推定した。その結果、全炭素の40~60%が生物起源であり、<sup>14</sup>C測定の結果と良く一致した。元素炭素の85%は化石燃料起源であるが、有機炭素については化石燃料起源よりも生物起源の寄与が高いことが示唆された。

#### サブテーマ(2) 都市における二次生成大気汚染のモデル化と将来予測

- ・ 化学輸送モデルのPM<sub>2.5</sub>成分に対する予測性能を関東の広域4地点(前橋、騎西、粕江、つくば)で評価した結果、①二次無機成分の平均濃度は4地点において比較的良く再現された、②一次排出物(元素炭素エアロゾル(EC)、一次有機エアロゾル(POA))は、郊外で過小評価が見られ、一次排出される気体成分(NO<sub>x</sub>など)と同様の傾向であった、③有機炭素エアロゾル(OC)は全地点で顕著に過小評価していた。SOA生成モデルとして、最新の実験結果を基に光化学反応を精緻に計算するメカニカルモデルを導入することにより、従来のモデルと比較して、SOA

の予測精度が2倍程度向上し、その結果、OCの予測精度も40-80%向上した。

- ・ 化学輸送モデルによる一次粒子の発生源寄与率を、前橋においてCMBと比較した結果、①自動車排ガスはECの主要な発生源であり、その寄与率はCMBで72%、化学輸送モデルで67%とほぼ一致すること、②OCについても、自動車排ガスが主要な発生源ではあるものの(CMBで33%、化学輸送モデルで54%)、野焼きが自動車排ガスと同程度の寄与を持つこと(CMBで37%、化学輸送モデルで22%)、などが明らかになった。
- ・ 人為起源SOA(ASOA)と生物起源SOA(BSOA)の濃度を計算し、pMC測定とレセプターモデルを基にした推計結果と比較したところ、①モデル計算されたASOAはオゾンとともに日中に増大しており、ASOAの推計結果とよく似た経時変動を示すことから、光化学生成がASOAの主要な生成源であること、②調理などCMBで考慮していない生物起源POAが無視できると仮定すると、BSOAは一日を通してASOAよりも高濃度であると観測値から推計されるが、モデルでも同様な特徴を示すことから、内陸部でBSOAが重要な寄与を持つこと、③SOAメカニカルモデルを使用しても、観測から推計されたSOA濃度を5-10倍過小評価しており、モデル化されていない揮発性有機化合物(VOC)からのSOA生成が重要であること、などが示された。
- ・ 自動車から排出されたNO<sub>x</sub>や微小粒子への曝露量を評価するために、沿道建物状況や道路構造による影響を考慮して汚染濃度の空間分布を計算できる、半解析半数値型の沿道拡散モデルを風洞実験データをもとに開発し、フィールド観測データにより検証した。

### サブテーマ(3) 都市環境における大気汚染高レベル曝露と健康影響予測

- ・ 大都市圏を含む全国20地域における人口動態統計に基づく死亡データにより解析を行い、大都市域およびその周辺地域で微小粒子状物質への曝露と死亡リスクとの関連性が見いだされた。特に、呼吸器系疾患や心疾患による死亡リスクとの関連性がみとめられた。しかしながら、微小粒子の構成成分や社会経済的要因など種々の要因が微小粒子状物質への曝露による死亡リスクに関する地域差に関わっている可能性が示唆され、二次生成大気汚染レベルと直接に関連づけることは困難であった。
- ・ 二次生成粒子の健康リスクを検討するために、サブテーマ(2)で開発されたモデルによって推計された日別成分濃度と日死亡率との関連性をケースクロスオーバー解析によって検討した。その結果、大都市域とその周辺地域の一部でOC濃度と全死亡(事故を除くすべての死亡)や循環器系疾患による死亡との関連性を示す地域があった。微小粒子状物質濃度(総量)と死亡との関連性とは異なる傾向を示す地域が存在していた。
- ・ さらに、二次生成に関わる推計成分濃度との関連性を示す地域が認められ、このことから、微小粒子状物質全体の健康リスクの評価にあたっては、二次生成寄与を考慮する必要性を示すものと考えられた。
- ・ 東京都内の幹線道路周辺において、歩行時の窒素酸化物濃度、微小粒子状物質濃度、超微小粒子濃度(個数濃度)の連続測定を夏期と冬期に実施した。その結果、沿道歩行時の曝露濃度と後背地濃度との差は日平均値レベルでは大きくないものの、数秒から数十秒の単位では沿道歩行時の窒素酸化物、微小粒子、超微小粒子への曝露濃度はそれぞれの平均濃度の数十倍にも達する場合があった。
- ・ 窒素酸化物濃度と超微小粒子個数濃度との相関は高く、共通の発生源を持つことが示唆された。これら高濃度曝露が生ずる事例を検討したところ、排出ガス量の大きい車両が歩道脇を通過した場合や停車中に側を歩行した場合、および渋滞時に風下側を歩行した場合にみとめられることを明らかにした。また、交差点での信号待ち時の曝露の寄与も大きいことが示された。

#### (4) 社会・行政に対する貢献度、科学技術・学術に対する貢献度

- ・ 現在、環境省中央環境審議会において、微小粒子状物質 (PM2.5) の環境基準の設定に向けて様々な検討が進められている。本研究で得られた結果は、学術的な貢献はもとより、今後の PM2.5 の行政施策を進める上で貴重なデータを提供するものであり、広く社会に貢献すると考えられる。以下に、主な成果を示す。
- ・ 今後普及が予測される排気後処理付ディーゼル車からのNO<sub>2</sub>排出量が増加していることやコールドスタート時の排出量増加が懸念されるなどの課題やそのメカニズムを明らかにしたことは、今後の環境行政に役に立つばかりでなく、科学技術・学術的な面でも貢献できたものと考えられる。なお、本研究で得られた排出係数に関するデータは、環境省からの要請により、自動車排出原単位の作成に提供され、将来の自動車排出量推計に役立っている。
- ・ 最新手法を用いて、微小粒子の組成や生物起源粒子の寄与などを高時間分解で明らかにしたフィールド観測結果は、より複雑になる都市の大気環境を理解する上で有用であり、学術的な貢献に加えて、PM2.5 に対する対策を検討する上でも有用である。特に、フィールド観測で得られた高時間分解の粒子組成データは、環境省からの要請により、環境省が開発を進めている化学輸送モデルの検証データとして提供され、モデル開発に役立っている。
- ・ <sup>14</sup>C測定とCMBを組み合わせた発生源解析、フィールド観測結果やレセプターモデルとの比較による化学輸送モデルの改良などの手法研究は、微小粒子に関する汚染動態や発生源寄与率の把握、対策効果の評価、将来予測などに関する学術的な進歩と行政的なニーズに貢献する。
- ・ 二次生成粒子の健康リスク評価は、微小粒子状物質の環境基準設定における重要な観点の一つであるとともに、今後の排出規制のシナリオ作りにおいても貴重な資料となる。
- ・ 道路沿道における大気汚染濃度の空間分布を計算する局地汚染モデルは、環境省が実施している局地的大気汚染の健康影響に関する疫学研究における自動車排出ガスへの曝露量推定モデルとして使用されている。また、沿道歩行時の NO<sub>x</sub> および微小粒子等への曝露実態の解明は、同疫学研究における自動車排出ガスへの曝露量推定モデルの妥当性評価において、高濃度曝露の影響を見積もるために役立つと考えられる。

#### 4) 評価結果 (総合評価)

|               | 5 | 4    | 3 | 2 | 1 | 合計   |
|---------------|---|------|---|---|---|------|
| 年度評価          |   | 9    |   |   |   | 9    |
| (平成 21 年 4 月) |   | 100% |   |   |   | 100% |

注) 上段：評価人数、下段 [%]

年度評価基準 (5：大変優れている、4：優れている、3：普通、2：やや劣る、1：劣る)  
外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 4.0 点

#### 5) 評価結果の概要

##### [現状評価]

ディーゼル車の排気特性や道路周辺での影響を明らかにして企業へフィードバックした点は高く評価できる。2次粒子に着目し、フィールド観測結果とモデルによる起源同定やバリデーションを定量的に行い、人為および生物起源有機粒子の識別など新規な事象を明らかにしたことは評価できる。また、二次粒子が健康に対して何らかの影響を及ぼしている可能性を示唆した点は、今後の対策を立てる上で社会的貢献度は高い。しかしながら、各研究課題の目的とその達成度の関係が不明確であった。

[今後への期待, 要望]

本研究で明確にされた今後の課題や、2次粒子の組成解析などの最前線の研究を意識した一層の掘下げに取り組むことが望まれる。また、近年のオキシダントの濃度上昇メカニズムについても研究を進めていただきたい。なお、健康影響予測については、複雑な要因が絡んでいると考えられるので、慎重に対応していただきたい。

6) 対処方針

本研究では、様々な成分の高時間分解フィールド観測、それらを用いたレセプターモデルやマルチスケール化学輸送モデルの改良などの各種技術開発を進めると共に、それらを総合することによって関東地域におけるPM2.5の動態と発生源寄与を把握することができたが、PM2.5等による大気汚染のメカニズムは極めて複雑であり、その将来予測も含めて、幾つか重要な今後の課題があることを明らかにした。それらの重要な課題に引続き取組んで研究を発展させ、PM2.5や、オキシダント対策などの社会ニーズに的確に答えられるようにしていきたい。また、越境汚染の影響の検討は、今後もアジア自然共生研究プログラムの中核プロジェクトにおける検討と連携して進め、近年の光化学オキシダントの上昇については、さらに地域汚染に関してインベントリーの改良やモデルシミュレーションによるメカニズム検討などを行っていきたい。

健康影響予測については、モデルによる曝露予測に基づく健康影響評価（疫学）という観点で検討を行い、その可能性を示すことができたので、モデルによる曝露推定精度、影響データの制約、複雑な要因などの課題に今後も慎重に取組んでゆきたい。

自動車の排気特性やその影響については、実験施設や沿道観測地点を生かして今後も検討を続けてゆきたい。

## 2. 湿地生態系の時空間的不均一性と生物多様性の保全に関する研究

課題代表者 竹中 明夫（生物圏環境研究領域）

### 1) 研究の概要

デジタル航空写真を撮影し、渡良瀬遊水地の植生のタイプ分け・植生の高さの推定、3月の火入れ時の植物の燃え残りの空間分布などを推定した。

航空写真撮影地において植生調査を行い、航空写真から求めたデータを説明変数として、絶滅危惧植物の分布予測モデルの開発を行った。また、地盤高、植生高、植生タイプなどの情報から湿地性の鳥類の分布密度を推定するモデルを開発した。

航空写真から得た河川の屈曲様式データからの瀬淵分布の推定および水生生物相の推定を試みた。

### 2) 研究期間

平成18～20年度（3年間）

### 3) 研究成果

#### (1) 研究目的

本研究ではリモートセンシングと地上での調査を有機的に関連させ、踏査が困難な広い湿地で絶滅危惧植物・湿地性鳥類等の分布と存続の条件を推定するツールを提供する。湿地生態系は、水質浄化などの重要な機能を持つとともに、特有の生物相から構成され、生物多様性の観点からも価値が高い。しかしながら地球レベルでその減少や環境の悪化が進んでおり、湿地の保全は国際的な急務である。一般に生態系は不均一性をはらんでおり、その効果的な保全を進めるには、十分な解像度の時空間情報を得ることが不可欠である。本研究課題は、湿地を対象に、洪水や火入れなど定期的・確率的に生じる攪乱の効果も含め、地形・植生の時空間的な不均一性を効率的に把握すること、そしてそこに生育する生物の分布および存続に必要な条件を推定する統計モデルを開発することを目的とする。

#### (2) 研究目的・目標の達成度

##### (サブテーマ1)

デジタル航空写真から、地上解像度50cmという高解像度で火入れによる攪乱の強度と面的な広がりや植生高の空間的な不均一性を広域推定する事に成功した。航空写真で推定した草本群落の植生高と、地上での群落構造の測定結果との対応関係を解析した結果、航空写真の立体視から求めた高さは、群落内で葉群がもっとも密な高さによく一致することが明らかとなった。早春の野焼き後の群落高さから、火入れの燃え残りの範囲を知ることができるが、燃え残りの場所や面積は年ごとに変動することが明らかになった。

主要な植生タイプであるオギ群落、ヨシ群落および両種が混在した群落の空間的な分布を、地上解像度20cmで正答率73%（4種類の植生区分）で推定することができた。分類では夏期の植生高が特に有効な情報であることが判明した。

空撮画像から導かれた情報は、植物や鳥の分布予測モデルのパラメータとして有効であった。分布推定を行った12種の植物すべてで、単純なロジスティック回帰モデルに比べ、空間構造（なんらかの理由で近くの点での分布確率に正の相関があること）を考慮したCARモデルの予測精度は著しく高く、このモデルが分布予測のために有効な手法であることが明らかになった。また、

すべての種で分布に影響を与える要因についての回帰係数の推定値がモデルによって変化し、空間構造を考慮することが、これらの推定にも重要であることが明らかになった。

分布推定をおこなった12種中、7種で群落高が種の分布予測に有効な情報であり、航空写真から求めた群落高が、草本種の分布推定に十分な推定精度を持っていると考えられた。また、3月に全域で行われる野焼き後の、春先の明るい環境を利用することで存続している植物種は、葉の展開が早い傾向があり、これらの分布の推定には5月の撮影画像ですでに緑になっているかどうかという情報が有効であった。

### (サブテーマ2)

野外での継続調査の結果、絶滅危惧種イヌセンブリは体サイズに関わらず2年目に必ず開花し、厳密な二年草という稀な生活史を持っている可能性が高いことが明らかになった。また、発芽試験により、イヌセンブリは草丈の低い草地のように明るい環境で春先に発芽すること、遷移が進んで他種に被陰されるようになると種子は土壤中で休眠すること（シードバンクの形成）が示唆された。

調査地でのイヌセンブリの個体数は安定しており、遷移の進行によって衰退する傾向は認められなかった。しかし、過去には人為的な攪乱などによってより広い範囲でチガヤ草原があったことが示唆されており、ここを生育場所とするイヌセンブリにとって、生育可能な環境が徐々に狭まっている可能性がある。過去の航空写真などを用いて過去のチガヤ草原の面積の推移を推測すること、また、今後も数年間隔で航空写真による群落高マップの作成を行い、チガヤ草原の面積が減少傾向にないかどうかを把握することが、イヌセンブリのほかヒメナエ・タチスミレ等の希少種を含んだチガヤ群落の保全に必要と考えられる。

マイクロサテライトマーカーはまだ開発途中の段階であるが、厳密な二年草という生活史特性を持つイヌセンブリは、長い間攪乱がなかった場合には、異なる系統が隔年で繁殖し、時間的に遺伝的な分化が生じる可能性がある。これを利用して、過去に個体群が受けた攪乱の歴史を2年間にわたる遺伝構造の調査から推定できる可能性が明らかになった。

### (サブテーマ3)

#### ・鳥類

2006-2008年の5-6月の調査期間中に、サンカノゴイ、オオタカ、サシバ、オオセッカの4種の絶滅危惧種を含む43種類を確認した。繁殖している鳥種のうち、個体数が多かったのはオオヨシキリ、ムクドリ、ハシボソガラス、コヨシキリ、ヒバリ、ホオジロ、セッカなどであった。出現した種の分布パターンを解析したところ、草地種、ヨシ・灌木帯の種、林縁種などのグループ分けをすることができた。

遊水地内の種数を決める要因を解析するために、調査地点の周囲の環境条件を説明変数とする統計モデルを作成した。生物多様性センターが作成した自然環境GISの植生図から得た情報を説明変数として種数を推定する統計モデルを求めたところ、地盤高が低くて、起伏に富んでいて灌木林がある場所で繁殖鳥種数が多くなるという結果がえられた。これは、灌木が含まれることで林縁種が多くなることや、地盤高が低い場所は開水面に生息する種が多くなることなどを反映していると考えられる。

多くの調査地点で記録され、遊水地を特徴付けている湿地性鳥類（オオヨシキリ、コヨシキリ）、草原性鳥類（セッカ、ヒバリ）、灌木林性鳥類（ホオジロ、ウグイス）の6種の密度分布を予測する統計モデルを作成した。植生図から読み取った情報のほか、空撮データから得られた情報も組込んだ。いずれの種でも既存の植生図のみから得られる情報に群落高など航空写真から得られ

た情報を組み込むことで密度分布の推定が向上した。たとえば、オオヨシキリ、コヨシキリ、セッカではヨシがあるかどうか分布を決める要因になるので、湿地植生にオギ、ヨシのいずれが含まれているかの情報が密度分布を推定するのに重要となることを示している。また、コヨシキリでは空中写真から得られる情報だけでモデルが構築できることもわかった。さらに、オオヨシキリ以外の種では、野焼きの状態を変数として加えることでモデルの説明力が上昇した。

・ 河川の構造と水生生物相

緩流蛇行河川の典型例として、北海道北部の宗谷丘陵を蛇行して流れる狩別川本流とその5つの支流を選定した。現地調査では、河道特性（勾配と河道幅）を計測するとともに、相対的に水深が浅く流れの速い「瀬」と深く流れの遅い「淵」とを、その成因を考慮しながら特定した。

航空機観測では、測量用デジタルカメラを用いて地上分解能約10cmにて分光観測した。河道内の任意地点が、屈曲の外側（攻撃部）、内側（滑走部）およびそれらの移行部のどれに相当するかを求めた。このデータから屈曲を成因とした淵の存在を推定したところ、現地調査によって把握できた542個の淵のうち、42%では正しく推定でき、これらは屈曲を成因としたものと考えられる。このほか、倒流木に起因したものが36%、河床材の違いに由来したものが2%、成因が特定できなかったものが20%を占めていた。リモートセンシングデータに基づいて信頼性の高い瀬淵分布推定を行うためには、屈曲特性以外の特徴量にも着目する必要があると言える。

水生生物相を予測する統計モデルでは、リモートセンシングによって定量可能な変数である標高、河道屈曲率、河道外の倒流木、河畔林は、淡水魚類の14のモデルのうちわずか4つのモデル（29%）でしか採用されず、底生生物では66のモデルのうち9つのモデル（14%）とさらに採用される頻度は低かった。淡水魚類の分布予測モデルでもっとも採用される頻度の高かった変数は「支流名」であった。これは本研究で考慮されていない要因が支流ごとに異なり、それによって魚類の生息状況が規定されていた可能性を示唆する。

(3) 社会・行政に対する貢献度、科学技術・学術に対する貢献度

生物の分布予測における統計モデルの利用頻度は高い。統計モデルによる予測において、精度向上とバイアスのない環境要因の効果の推定を行うためには、空間構造の考慮が有効であることを示したことは、今後の国内での分布予測を行う際に参考事例となる。

野焼きは湿地のみにとどまらず草原の維持のために日本各地で行われておる。秋吉台や久住高原など、希少種の多様性が高いことで著名な地区もそうした場所の例である。渡良瀬遊水地で行った群落高の推定と、展葉時期の違いを利用した撮影は、このような他の野焼きによって維持されている草原での希少種の分布予測にも応用可能である。

大面積での調査が現実的ではない生物や環境要素の分布確率を遠隔的に知る手法は、これまでいろいろ開発されてきた。本課題では、これまでもっぱら森林の林冠に対して用いられてきた高さ推定が、草本群落においても十分な精度で可能であり、これが希少植物および鳥類の分布の推定に有用であることを示した。「高さが推定できるツールの提供」に止まらず、それを使って生物の分布が推定できることまでを示したことの意義は大きい。空中写真等のデータを用いて面的なラフな個体群動態を把握することは、湿地性生物の保全に大いに寄与すると考えられる。

4) 評価結果（総合評価）

|           | 5 | 4     | 3     | 2 | 1 | 合計   |
|-----------|---|-------|-------|---|---|------|
| 年度評価      |   | 8     | 1     |   |   | 9    |
| （平成21年4月） |   | 88.9% | 11.1% |   |   | 100% |

注) 上段：評価人数、下段 [%]

年度評価基準 (5：大変優れている、4：優れている、3：普通、2：やや劣る、1：劣る)

外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 3.9点

## 5) 評価結果の概要

### [現状評価]

リモートセンシングにより植生分布を把握する有効な手法の開発や、鳥類の生息条件に関する類型化は評価できる。観察範囲の拡張や観察手法の効率化、アジアや地球規模の観測データ共有は地球環境政策にとって重要であり、本課題の達成度、貢献度はおおむね良好と判断できる。

ただ、予算規模の割に論文数や新規性のある成果が乏しい。また、試行的な面が多く、一般的な応用には若干不安が残るため今後の検証が必要である。河川の瀬淵構造の推定に対しては、河川工学の成果などを取り入れる必要がある。

### [今後への期待、要望]

論文による成果の速やかな公表に期待する。また、衛星データの応用や河川工学との結びつけが望まれる。季節、気象、流量など条件の異なる流域にも適用できるモデル作りに展開するよう期待する。

## 6) 対処方針

論文の公表に関しては、データの集積を待つ解析を進めてきたため、すでに投稿したものは少ないが、数件の論文を投稿準備中であり、これらの公表に向けて鋭意努力する。

衛星データの利用に関しては、広域化の点では有効だが、解像度の点では航空写真に利があり、それぞれの特徴を生かしてリンクする方向を検討したい。

河川工学の成果の活用や、他流域への適用という点に関しては、河床変動モデルなどを利用した砂礫堆の分布様式と計算結果とリモートセンシングからの推定を照らし合わせる、河道特性の異なる他河川を対象に解析を試みるなど、積極的に行っていく。

本研究の新規性に関しては、デジタル航空撮影により草本群落が高い精度で推定できる可能性を示したこと、それが希少植物種や鳥類の生息確率の推定に有効な要因であることを示した点が第一に挙げられると考えている。手法の一般化については一層の努力を行う。

### 3. 中長期を対象とした持続可能な社会シナリオの構築に関する研究

課題代表者 日引 聡（社会環境システム研究領域）

#### 1) 研究の概要

- (1) 持続可能発展指標のレビューと指標開発のためのフレームワークの構築。
- (2) 国際環境条約のデータベースの構築と、目的規定に関して、気候変動枠組条約と他の条約との比較分析を実施。
- (3) 国レベルの排出モデル開発と貿易自由化や経済発展が排出に及ぼす影響の推定。
- (4) 世界、日本、地方別に経済と環境を統合した応用一般均衡モデルの開発と、それらを用いた、各領域を対象としたビジョン・シナリオの定量化の実施
- (5) 将来の環境ビジョンを検討し、日本・アジアを対象にビジョン・シナリオを試作。

#### 2) 研究期間

平成18～20年度（3年間）

#### 3) 研究成果

##### (1) 研究目的

様々な環境問題の解決策を検討する上で、環境問題はもとより、エネルギーや食料等の安全保障、国際貿易、社会経済活動などさまざまな観点から、将来にわたる長期的な持続可能な社会のビジョンを検討し、こうした社会を実現するシナリオを検討することは、将来の政策的な対応を議論する上で重要な意義を持つ。しかし、総合的な観点から将来のビジョン・シナリオを描く研究はほとんど見られない。本研究の目的は、(1) 持続可能な社会構築に向けて将来のビジョン・シナリオを検討する上で、着目すべき指標のあり方を検討し、指標開発の枠組みを明らかにし、(2) 持続可能な社会像を定量的、定性的に描くとともに、それを達成するための道筋や課題を、国際的な視点を踏まえて、環境及び社会経済の側面から整合的に明らかにすることにある。

##### (2) 研究目的・目標の達成度

###### (1) 指標開発に関する研究

本研究では、既存の持続可能な発展指標をレビューし、その特徴や問題点を明らかにするとともに、専門家に対するインタビューやワークショップの開催を通して、今後の持続可能な発展に求められる社会要素を整理した新たな指標の枠組みを提示し、概ね研究の目的を達成できたものと考えられる。

###### (2) ビジョン・シナリオ構築に関する研究

本研究では、環境条約に関するデータベースの構築、統合モデルの開発、貿易を考慮した排出モデルの開発、ビジョン・シナリオの作成を実施した。各サブテーマからの知見をお互いにより連携させ、より詳細なビジョン・シナリオ作成の余地は残されているが、おおむね研究の目的を達成できたものと考えられる。

##### (3) 成果の概要（社会・行政に対する貢献、科学技術に対する学術的な貢献も含む）

###### (1) 指標開発に関する研究

###### ① 指標レビュー

- (a) 26の国等が策定した1528の指標をレビューし、これらを「貧困」、「労働」、「気候変動」、

「物質利用」、国の経済力」などの 77 項目に分類・整理した。これにより持続可能な発展に求められる社会要素を環境分野に限らず幅広く抽出できた。成果はデータベースとして公表 (<http://www.nies.go.jp/sdi-db/>) し、学術的な貢献も果たした。

- (b) 先進的な指標が確認できた。例えば、労働については失業率の指標が多かったが、長期失業率のように単なる格差ではなく、格差の固定化といった視点を捉えた指標が存在した。また、死亡・健康については、平均寿命や特定の疾病に係る指標が多かったが、健康へ満足度といった主観的要素を取り入れた指標が存在した。
- (c) 一方で、指標開発における共通的な課題を抽出した。主なものとして、(1) 質的発展の状況をどう計測するか、(2) 発展における事象間のトレードオフや国外へのリーケージをどう把握するか、(3) 将来世代・時間軸をどう考慮するか、(4) 生活実感との乖離をどのように埋めるかなどといった点を指摘できた。

## ② 指標の枠組みの策定

- (a) 新たな指標開発の上で基礎となる枠組を策定した。そこでは、「環境」、「経済」、「社会」の 3 分野要素をベースに、各分野要素の関連を示す分野要素を配置提示することで、分野間のつながりをより強調した。また、個人の生活基盤として持続可能性に係わる要素と、さらにそれを支える国（社会）全体の基盤についての持続可能性に係わる要素の階層性を表現切り分けることにした。
- (b) 各分野の専門家を招聘したワークショップを開催し、三角形ごとに持続可能な発展の上で重要な事項を選定し、持続可能発展指標として重要と考えられるいくつかの指標候補を整理した。

## (2) ビジョン・シナリオ構築に関する研究

### ① 持続可能な世界を実現するための国際協調枠組み構築に関する研究

- (a) 国際環境条約データベースを構築した。この成果は、国立環境研究所 HP 上で公開を予定している。このデータベースは、初学者から、特定の環境条約について詳細に比較分析をしたい専門家や行政官に至るまで、幅広いニーズに応えることができると期待される。
- (b) 整備したデータベースを用い、目的規定につき、気候変動枠組条約と他の条約との比較分析を行った。その結果、同条約第 2 条は他の国際環境条約には見られない目的条項であり、各国に対する約束に直結しないが、単なる理念にはとどまらず、各国の約束を議論する上での制約としての役割が条約交渉時に期待されており、制度の実効性を規律する重要な要因となることがわかった。

### ② 貿易の自由化と環境に関する研究

- (a) 貿易の自由化は、先進国では、汚染物質排出量を減少させる効果を持つが、発展途上国では、むしろ増加させる効果がある。
- (b) Pollution Heaven 効果が要素賦存効果を上回ることが、上記の主要因である。
- (c) SO<sub>2</sub> と CO<sub>2</sub> について、環境クズネッツ仮説は成立する。SO<sub>2</sub> については、転換点となる一人当たり所得は、\$14,045~24,616 であり、CO<sub>2</sub> については、\$24,732~\$29,678 であると推定される。
- (d) オスロ議定書、ヘルシンキ議定書は有効に汚染物質削減効果をもっていた。しかし、京都議定書と水と健康に関する議定書 (Protocol on Water and Health) については、有意な削減効果は認められなかった。
- (e) 開発されたモデルを用いて、貿易自由化を促進することによる将来 (2050 年) の二酸化炭素排出量を変化を地域別に計算したところ、アジア、ヨーロッパ、北アメリカなどでは、排出量を削減するが、アフリカや身なりアメリカでは、排出量が増加することがわかった。

### ③ 統合評価モデルを用いた持続可能な社会ビジョン・シナリオの定量化研究

国や地方、世界を対象とした環境と経済を統合するようなモデルを開発し、将来の持続可能な社会の実現可能性について評価した。なお、持続可能な社会の実現に向けてはフォアキャストではなく、バックキャストが重要となるが、今回の定量化においては、持続可能な社会に向けて最適な経路を示すバックキャストのアプローチではなく、探索的に明らかにした。

#### (a) 日本を対象としたビジョン・シナリオの定量化

日本を対象に持続可能な社会を評価するために、経済活動と環境負荷及び環境保全活動を内生化した応用一般均衡モデルを開発した。また、開発したモデルを用いて、低炭素社会、循環型社会、自然共生社会、快適生活環境社会の見地から目指すべき 2050 年の環境像と社会・経済活動について、定量的に明らかにした。モノの消費を志向する社会では、環境負荷は大きくなり、消費構造の変化も持続可能な社会の構築には重要であることがわかる。

#### (b) 世界を対象としたビジョン・シナリオの定量化

日本を対象とした分析を世界に拡張するための世界モデル開発とシナリオの定量化を行った。世界モデルは、AIM/CGE [Global] をベースに、鉄や紙などを独立した部門として取り上げている。本モデルを用いた分析から、低炭素社会、循環型社会、自然共生社会を世界規模で両立させる姿を描くことは可能であるが、その実現にはエネルギー効率の改善や建設物の長寿命化など様々な対策を同時に導入する必要があることが明らかとなった。

#### (c) 地域を対象としたビジョン・シナリオの定量化

国レベルのビジョン・シナリオと整合的な地方レベルのビジョン・シナリオを定量化するためのツール開発を行った。市区町村では、データの制約から CGE モデルを直接構築することは困難である。そこで、都道府県を対象とした CGE モデルを開発し、その結果をメッシュデータにダウンスケールするための手法を開発し、茨城県を対象に水質や二酸化炭素排出量を対象に分析を行い、住民行動（太陽光発電の導入や浄化槽の設置等）により 2030 年のこれらの環境負荷が BaU と比較して 10%以上低減することを示した。

### ④ 持続可能な社会のビジョン・シナリオ作成研究

#### (将来の環境ビジョンの検討)

- (a) 日本の 2050 年までの環境・資源面の諸問題とその原因となる社会経済的背景のメカニズムの全体像およびその因果関係を整理した。
- (b) 気候変動と、近隣諸国の越境汚染、地域環境問題、資源・食糧問題、自然・生態系などに関しては、全てのグループが将来の問題化の可能性を指摘したが、健康影響についての見解は一致しなかった。また、人間活動に関しては、経済活動や人口の動向、価値意識は全てのグループが指摘したが、国際情勢や技術革新、産業動向、利便性や豊かさへの欲求などについては、見解は一致しなかった。
- (c) 全てのグループが指摘した問題や活動については、多くの指標やモデルに共通で盛り込まれやすいが、指摘にばらつきが出た問題や活動については、指標リストから漏れるおそれがあると考えられるため、網羅的な指標やモデルを作成する際には、特に留意してチェックする必要があると考えられる。

#### (日本・アジアを対象にしたビジョン・シナリオ作成)

- (a) 日本を対象にした持続可能な社会を描くため、有識者ヒアリングに基づいたデータを分析し、2050 年頃の望ましい環境像について定性的な記述を行った。既存のまたは近い将来に実用化される対策をいかに普及させるかについて、消費者の行動様式やビジネス・政府の行動原理についての分析が必要である。自然共生社会に関しては、それぞれの地域の実情に応じたゾーニングを行うことが有効だが日本ではあまり研究が進んでいないため、シナリオを描き、

ゾーニングの意味づけを示すことも重要である。これらの観点を踏まえながら、各分野のビジョン・シナリオ作りを行った。

- (b) 日本を対象に行った分析をアジアに適用させながら、サブ2、サブ3、サブ4で得られた結果を反映させてアジアを対象としたビジョン・シナリオ作りの論点を取り上げた。低炭素社会では、経済発展とエネルギーのデカップリングをいち早く実現させるシナリオ作り、循環型社会では、経済社会の循環だけでなく自然を含めた循環を踏まえたシナリオ作りが重要である。自然共生社会では積極的なゾーニングでバイオマス生産地と自然保護地域の区分を早めに決めることが有効な国土利用に貢献する可能性がある。いずれの分野においても、地域の実情に応じたビジョンを想定し、先進国が歩んできたのとは異なる道筋を leap frog によって実現するのに役立つシナリオ作りが重要なことがわかった。

#### 4) 評価結果（総合評価）

|           | 5     | 4     | 3     | 2 | 1 | 合計   |
|-----------|-------|-------|-------|---|---|------|
| 年度評価      | 1     | 4     | 2     |   |   | 7    |
| （平成21年4月） | 14.3% | 57.1% | 28.6% |   |   | 100% |

注) 上段：評価人数、下段 [%]

年度評価基準（5：大変優れている、4：優れている、3：普通、2：やや劣る、1：劣る）

外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 3.9点

#### 5) 評価結果の概要

[現状評価]

環境問題を俯瞰的に捉えて、持続可能な社会のシナリオを描く目的に資するモデルを開発し、環境省の超長期ビジョン策定に貢献した点は意欲的なものであり高く評価される。特に持続可能性の指標の提案は広範なデータベースに基づいて、支配的な要素を多面的な観点から抽出したもので高く評価できる。

しかし将来ビジョン策定に達するための道筋や課題が、研究の理論的な背景や基盤がやや不明確なため、分り難い。

[今後への期待, 要望]

持続可能性指標が恣意的にならず、客観性を裏付けるための努力を今後期待する。持続可能な社会は、枠組みで示されたように、資源・エネルギー、人のすべてが、世界の動向と連動して動きつつ、かつ地域（田舎でもいい）の協力なしに持続（自立）できないことは明らかであり、やはりある程度全体像（世界、日本、地域）が見えてきて初めて、シナリオの構築に迎えると思います。今後、多くの査読付論文を發表することを期待する。

#### 6) 対処方針

本研究の目的は日本のシナリオを検討することであるが、ご指摘のとおり世界や地域との関連を全く意識しないシナリオの記述は不可能で、研究実施過程のなかで常に頭を悩ませてきた。世界一國一地域という入れ子構造をもったシナリオ作成を意識して、茨城県を対象事例に地域モデル・シナリオの構築を試みているが、さらなる検討が必要と考えている。また今回の発表には含めなかったが、指標の客観性をより確保する試みとして、持続可能性指標の類型化や必要要件の検討なども進めている。いただいたご指摘に応えられるよう、本研究の成果を査読付論文として發表し、関連研究の提案をしていきたい。

## 4. 省エネルギー型水・炭素循環処理システムの開発

課題代表者 珠坪 一晃（水圏環境研究領域）

### 1) 研究の概要

日常生活と産業活動の結果、多量に排出される低有機物濃度排水（食品製造排水、都市下水）の省・創エネルギー処理を目指した嫌気排水処理技術の開発を行った。具体的には、生物膜メタン発酵法における菌体滞留時間の維持や排水循環条件の最適化を図り、有機物濃度 0.3-0.8 gCOD/l（既存技術下限値の 1/3-1/5）、水温 10-20℃（既存技術 30-35℃）の産業排水処理に対応可能なグラニユール汚泥床法を開発した。また、開発途上国にも展開可能な嫌気性処理と無曝気型の好気性処理を組み合わせた排水システムによる実下水処理実証試験を通年でを行い、その排水処理性能（嫌気処理性能と水温との関連）と省エネルギー効果（既存処理法に対し 7 割削減）を明らかにした。

### 2) 研究期間

平成 18～20 年度（3 年間）

### 3) 研究成果

#### (1) 研究目的

日常生活や産業活動の結果、多量に排出される有機性排水は、有機物濃度が低く（0.3-1.0 gCOD/l）、気温の変化に応じて常温（10-25℃）で排出される。これらの排水の大部分は、好気性微生物処理（活性汚泥法等）が施されているが、処理に伴う電力消費は莫大（都市下水処理=国内総電力消費の 0.6-0.7%）であり、除去有機物の 4-5 割程度が余剰汚泥（産業廃棄物）に姿を変えている。それ故、既存の排水処理システムの運転維持の結果、多量の化石燃料由来 CO<sub>2</sub>（800-1,500 万 t CO<sub>2</sub>/年）が排出されており、水処理に伴うエネルギーの削減は急務である。

他方、アジア諸国において政府開発援助等により好気性微生物処理が導入されているが、運転関わるエネルギー消費が多く（=維持費用大）、高度な維持管理技術が必要であることなどから、普及には至っていない。即ち、処理に伴うエネルギー消費が少ない（維持管理費用が安い）適切な排水処理技術の開発が求められている。以上の様な背景から本研究提案では、低濃度有機性排水の無加温処理に対応した省・創エネルギー型のメタン発酵排水処理技術の基礎を確立することを目的とする。

#### (2) 研究の目的・目標に対する達成度

本研究で開発あるいは技術の最適化を図ったメタン発酵処理技術（グラニユール汚泥床、UASB 法）は、多量に排出され今まで好気性微生物処理の範疇（メタン発酵処理が未適用）であった低濃度有機性排水の（0.3-0.8 gCOD/L）、常温域（10-20℃）での省・創エネ処理の実現化につながるものである。

同メタン発酵排水処理技術は、無曝気型の好気性処理法（DHS）との組み合わせにより、排水の放流基準を満たすことが可能であり、曝気動力のゼロ化、余剰汚泥の大幅削減などにより、都市下水の無加温処理において現状の好気処理法と比較してエネルギー消費 7 割削減を実現した。以上の理由により、概ね当初の研究目的を達成できたものとする。

#### (3) 研究成果の概要と社会・行政、科学技術・学術に対する貢献度

### 【サブテーマ 1】 生物膜メタン発酵法による低濃度産業排水の無加温処理技術の開発

生物膜メタン発酵法（グラニューール汚泥床法）による低濃度産業排水処理技術の開発（水温や有機物濃度低下の影響評価と、技術の最適化）を行った。

- ・ グラニューール状生物膜汚泥を植種し、適切な排水流動条件と有機物負荷を付与することで、低水温・低有機物濃度条件下でも長い汚泥（微生物）滞留時間と高濃度汚泥（微生物）保持が可能であった。その結果、低濃度排水（0.3-0.8 gCOD/l）の無加温条件下（20℃）における高速（処理時間 1~1.5 時間）・高効率処理（有機物除去率 80-95%、メタン転換率 40-60%）を実現した。
- ・ 生物膜汚泥の植種、排水循環付与によるガス分離促進等による汚泥滞留時間の維持により、増殖速度が遅く集積化が困難であった低温対応のメタン生成細菌等（*Methanospirillum*属細菌）を集積化でき、10℃という低水温下においても安定した排水処理性能を発揮した。また低温度での運転に伴い、保持汚泥の 15-20℃でのH<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>利用メタン生成細菌の特異的な活性増加を確認した。
- ・ 極低濃度（0.3-0.4 gCOD/l）の有機性排水処理では、間欠的な処理水循環（微生物活性維持と生成ガス分離を両立：特開 2008-036529）と、流入水の ORP 制御により有機物除去効率を飛躍的に向上（COD 除去率 60%→90%以上）出来ることが明らかになった。
- ・ 開発したグラニューール汚泥床法と無曝気型の好気性ろ床との組み合わせにより、実低濃度産業排水（精製糖排水：0.4-0.5 gCOD/l）の 20℃条件下における連続処理試験を行った結果、処理時間 3 時間（嫌気 2 時間、好気 1 時間）で、既存好気処理システムと同等の水質を確保出来た。
- ・ 現在、低濃度食品製造排水処理（4,000 m<sup>3</sup>/day規模）への開発技術（グラニューール汚泥床）導入に関する検討が行われている。本研究をベースにした技術の導入が図られれば、低濃度産業排水処理分野での技術普及と省エネルギー化が期待出来る。

### 【サブテーマ 2】 嫌気性処理と無曝気型の好気性処理の組み合わせによる都市下水の実証処理試験（下水の無加温嫌気処理特性評価）

都市下水の省エネ処理技術の開発を目標として、回分培養試験と実証プラント嫌気槽における保持汚泥特性評価により固形性有機物の低温条件における嫌気分解特性を評価した。また実証処理試験における省エネルギー効果を試算した。

- ・ 都市下水に含まれる固形性有機物の嫌気分解特性の評価により、水温 20℃程度までは分解活性が維持されるが、水温が 15℃程度に低下すると活性の著しい低下が見られ、低温下で固形性有機物の分解が律速となることが分かった。また、バクテロイデス-フラボバクテリウム類に属する細菌が主要な酸生成細菌として検出された。
- ・ 嫌気性処理（UASB）と無曝気型の好気性処理（DHS）の組み合わせによる都市下水の実証処理試験を鹿児島県霧島市において行った（処理時間：前段 9.6 時間、後段 2.5 時間）。冬期間（水温 16-18℃）における嫌気槽の安定運転のためには、鉄塩の添加等による保持汚泥沈降性の改善（汚泥量増加による汚泥負荷の低減）が有効であり、汚泥沈降性向上後は常時安定したメタン生成能と処理水質を維持した。
- ・ 後段好気処理（DHS）を含めた水質は、年間を通じて安定しており、既存好気性処理と同等の排水処理性能を発揮した。
- ・ 同メタン発酵排水処理技術は、無曝気型の好気性処理法（DHS）との組み合わせにより、排水の放流基準を満たすことが可能であり、曝気動力のゼロ化、余剰汚泥の大幅削減などにより、都市下水の無加温処理において、小規模好気性下水処理施設（処理量 10,000 m<sup>3</sup>/日）と比較してエネルギー消費 7 割削減を実現した。

- ・ 当該技術は、消費エネルギーが少なく、運転管理も比較的容易なため、開発途上国への技術普及が期待できる。

#### 4) 評価結果（総合評価）

|               | 5    | 4 | 3 | 2 | 1 | 合計   |
|---------------|------|---|---|---|---|------|
| 年度評価          | 9    |   |   |   |   | 9    |
| （平成 21 年 4 月） | 100% |   |   |   |   | 100% |

注） 上段：評価人数、下段 [%]

年度評価基準（5：大変優れている、4：優れている、3：普通、2：やや劣る、1：劣る）  
外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 5.0 点

#### 5) 評価結果の概要

[現状評価]

基礎的研究から外部資金を使った共同実用化研究、特許の取得を含めて、低温・低濃度での嫌気処理をテーマとして極めて理想的な形で排水処理システム技術が確立された成果であり、高く評価できる。いろいろな工夫をすることで、好気処理と同程度の処理能力を発揮できるシステムが開発できたことは高く評価できる。低温クラスター水素資化菌の発見など、学問的に興味深い知見も得られている。発生したメタンの処理も考慮されている点も優れている。

[今後への期待、要望]

今後、メタンとしての回収と利用まで改良が加えられれば、より現実的な炭素循環システムの開発に発展するであろう。維持管理、建設費のコストダウンなど、総合的なコスト評価が欲しい。ただ、このような技術開発は、国環研としてどのように位置づけるのか、今後もこのような技術開発を続けるのか、検討を要するのでは？

アジアへの適用では、溶存メタンの処理に好気処理をするよりも、むしろ人工湿地などで仕上げ処理をしたほうが効率および経済性がよいといえる。技術移転については、特に初期投資および運転費用などの経済条件が一層重要ですので、この観点から更なる研究連携が展開できると期待します。

#### 6) 対処方針

本研究課題では、日常生活や産業活動の結果多量に排出される低温(10-25℃)・低有機物濃度排水に対応可能な嫌気処理(メタン発酵)技術の開発に取り組み、好気処理と同程度の水質を確保しつつ、処理に関わるエネルギーを7割以上削減出来る水処理技術の基礎を確立することが出来た。今後は、嫌気処理の結果生じるメタンガスの効率的な回収と利用方法の検討を継続的に行い、炭素資源循環型の処理技術の確立を目指したいと考えている。開発した排水処理技術では、維持管理に関わる費用(エネルギー)は、好気処理に対して大幅に削減出来るものの、建設費は1-2割程度高くなるという試算である。今後は、開発途上国の研究機関とも連携し、より低コストで実現的な仕上げ処理法の検討も含め、技術の最適化に関する研究を推進していく予定である。

## 5. 侵入生物・組換え生物による遺伝的多様性影響評価に関する研究

課題代表者 中嶋 信美（生物圏環境研究領域）

### 1) 研究の概要

在来生物の遺伝的多様性に影響を与える可能性がある外来生物として、遺伝子組換え(GM) セイヨウアブラナ、輸入昆虫や寄生ダニ類及び移殖淡水魚について、在来生物との遺伝的相互作用の実態把握をおこなった。その結果

- (1) 一般環境での GM セイヨウアブラナは輸送こぼれ落ち種子し、国道 51 号線では生育数は減少傾向にある。
- (2) クワガタムシ、クロマルハナバチおよびオイカワの ESU を明らかにした。
- (3) 外来ナミハダニの薬剤感受性変異を見いだした。
- (4) 淡水魚では有用魚放流による同種内外来遺伝子の浸透が在来遺伝子との混在を広域で生じていた。

### 2) 研究期間

平成 18～20 年度（3 年間）

### 3) 研究成果

#### (1) 研究目的

本研究では、現在は「カルタヘナ法」や「外来生物法」の規制対象外となっているが、今後在来生物の遺伝的多様性に影響を与える可能性が高い侵入生物である、遺伝子組換え農作物、輸入昆虫や寄生ダニ類及び移殖淡水魚について、その遺伝的・生態的特性を調べ、在来生物との遺伝的相互作用の実態把握をおこなう。これらの侵入生物の繁殖実態を調査し、侵入生物に由来する外来遺伝子が在来生物集団へ浸透するプロセスを明らかにすることにより、それらの遺伝的多様性への影響を調査する。

#### (2) 研究成果

サブテーマ 1 遺伝子組換え (GM) 植物が在来植物へ与える影響に関する研究

##### ①研究目的・目標の達成度

・輸入されているセイヨウアブラナ (*Brassica napus* L) の種子に混在する除草剤耐性遺伝子組換えセイヨウアブラナ (以下 GM セイヨウアブラナ) が一般環境中に生育しているかどうかの調査をおこない、遺伝子組換え植物の拡散状態の現状把握を行うことを目的として、関東地方の幹線道路沿いに生育している GM セイヨウアブラナの生育調査を行った。

・鹿島港から成田方面への種子輸送ルートである国道 51 号線の香取市佐原ー成田間 20km について徒歩による全個体調査を 4 年間おこなった結果、2005 年が 2,162 個体、2006 年 4,066 個体、2007 年 278 個体、2008 年は 390 個体生育していた。そのうち、GM セイヨウアブラナは 2005 年が 35 個体、2006 年 8 個体、2007 年 5 個体、2008 年は 1 個体であった。組換え体の個体数は減少傾向にあるが、出現率 (生育していた全個体数に対する割合) では顕著な傾向は認められなかった。

・これらの植物は鹿島港から成田方面へ向かう車線側に多く生育していたこと、周辺にはセイヨウアブラナの群落はみられないこと、生育している場所が毎年変化することから、これらの植物は輸送種子のこぼれ落ちに由来すると結論づけた。

・一般環境中におけるナタネ類の交雑実態を把握するために、在来アブラナとカラシナが混生して

いる場所を2カ所選定し、両種個体群の空間分布を3年間調査した。その結果、原因は不明であるが、両調査地とも個体数の著しい減少がみられた。また、両種の境界付近には雑種とおもわれる個体が出現していた。これらの個体を対象にフローサイトメトリーによる核DNA量解析を行った結果、推定両親種の中間的なDNA量を示す個体が複数観察されたことから、一般環境中で実際に種間交雑が起こっている可能性が高い。今後は現在開発中の両親種特異的分子マーカーによる雑種性の検定が課題である。

②社会・行政に対する貢献度、科学技術・学術に対する貢献度（環境問題の解明・解決を含む）

・GMセイヨウアブラナの一般環境中での生育を確認し、その由来がこぼれ落ち種子によるものであることを明らかにした。その結果は新聞を始めとする各種メディアに取り上げられ、結果として2007年、2008年とこぼれ落ちナタネの出現数が減少するのに貢献したのではないかと考えられる。さらに四日市市周辺ではこぼれ落ちGMナタネの出現数が増加しているという報告もあるため、本研究と同様の研究を同市周辺で展開する必要がある。

### サブテーマ2 導入昆虫類がもたらす遺伝的攪乱に関する研究

①研究目的・目標の達成度

・クロマルハナバチの地域個体群におけるアロザウム対立遺伝子頻度、核DNAマイクロサテライト遺伝子座対立遺伝子頻度およびミトコンドリアDNAチトクロムオキシダーゼ遺伝子領域(mtDNA-CO)の1000塩基配列変異を解析した。その結果、日本列島のクロマルハナバチは大陸産個体群を起源として17万年前までに日本列島に渡り、その後大陸から孤立して独自の遺伝子組成を持つ集団に分化していることが明らかとなった。また日本列島内においても対立遺伝子頻度およびハプロタイプ頻度に地理的傾向があることが示された。

・ヒラタクワガタについては、日本列島、朝鮮半島、中国、東南アジア諸国のサンプルを入手して、アロザウム変異およびmtDNA-CO遺伝子2,000塩基を解析した。アロザウムについては明確な地理的変異は認められなかったが、mtDNAについては高い多様性が検出され、遺伝子系統樹を構築出来た。それに基づけば日本列島のヒラタクワガタ個体群は中国を起源として約150万年かけて島ごとに分化を果たしたことが示された。さらに東南アジア地域における遺伝的分化プロセスも明らかとなり、スンダランド大陸が列島として分化した地史的順序も明らかとなった。

・日本各地、オランダおよび中国よりナミハダニ地域個体群を採集してmtDNA-CO遺伝子1,000塩基配列変異を解析した。その結果、形態的には変異のない地域個体群においても著しい塩基配列変異が存在することが明らかとなった。また、薬剤感受性にも変異が認められることが明らかとなった。

②社会・行政に対する貢献度、科学技術・学術に対する貢献度（環境問題の解明・解決を含む）

・クロマルハナバチおよびヒラタクワガタのESUが明らかになり、地域個体群保全のための基礎データを提供した。

・ナミハダニの外国産個体群が侵入した場合、防除上の障害が生じる可能性があること示した。

### サブテーマ3 淡水魚の地域集団外からの移殖に関する研究

①研究目的・目標の達成度

・地域外移殖で惹起された淡水魚の同種内外来による外来遺伝子浸透確認とその実態調査、本来の地域集団の系統的単位(ESUに相当)解析、浸透を促す要因解析を目標とした。浸透を促す要因の解明に未達成の課題があるものの、全般的には以下のように目標が達成された。

・オイカワ・モツゴにおいて地域集団への外来遺伝子浸透が確認された。

・オイカワについて、関東地方調査河川すべてで外来の琵琶湖系統が確認され、また自然分布域河

川では関東系統が確認された。したがって、関東地方の多くの河川で琵琶湖系統・関東系統の混在が確認された。

・オイカワでは、関東地方河川で採集された琵琶湖由来以外の遺伝子は全て単系統であると解釈され、関東地方水系の系統的単位は全域で単一と評価された。

・琵琶湖産アユに代表される有用魚の放流量は調査河川で 1950 年代以降数十年間は増加しつづけ、特に少ない河川は認められなかった。したがって、オイカワ琵琶湖由来遺伝子の浸透瀬度との関連は認められなかった。頻度の低い 1 河川では河川構造物が少なかったため、その存在の関与が疑われたが、明確な結論に達する前に調査河川標本数を増やす必要が認められた。

②社会・行政に対する貢献度、科学技術・学術に対する貢献度（環境問題の解明・解決を含む）

・国外からの外来生物問題に比べて解明の遅れている同種内外来について淡水魚の現状解明に貢献した。

・国内の地域固有系統分布を解明し、淡水生物相の国内遺伝子地図改訂に貢献した。

#### 4) 評価結果（総合評価）

|               | 5 | 4    | 3 | 2 | 1 | 合計   |
|---------------|---|------|---|---|---|------|
| 年度評価          |   | 10   |   |   |   | 10   |
| （平成 21 年 4 月） |   | 100% |   |   |   | 100% |

注) 上段：評価人数、下段 [%]

年度評価基準（5：大変優れている、4：優れている、3：普通、2：やや劣る、1：劣る）

外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 4.0 点

#### 5) 評価結果の概要

[現状評価]

遺伝子を用いて集団内多様性の解析が進められ、国外（域外）から持ち込まれた生物（遺伝子）の影響が推定できるようになるなど実態解明が期待通りに進み、また、社会への説明責任も果たされており高く評価できる。

現時点では現状把握にとどまっていること、また、遺伝的リスクという言葉が生態系機能、多様性のどちらで使われているのか明確でないことが本課題において弱い部分である。

[今後への期待、要望]

時間スケールや進化スケールを入れるためにも長期的スパンで研究を継続することが必要不可欠であり、生態系影響評価まで発展させ、国民の GMO 理解増進、インベダーモニタリングシステムの開発、行政による対策への貢献などにつなげることに期待する。その際、多様性と固有性を考慮した生物多様性の変化の予測およびリスク低減を含めた保全の施策に反映させる結論と提言をまとめていただきたい。

#### 6) 対処方針

本研究では「法規制対象外であるが、今後問題となりそうな外来生物」に焦点を絞って、その遺伝的攪乱リスクの評価を目標に研究をスタートさせた。3 年間という短い期間ではリスク評価にはほど遠く、生物地理的な現状把握が精一杯であった。しかしながら、3 年間の研究で技術的な問題点の解決と研究のやり方が確立できた。従って、今後、種数やフィールドあるいは調査時間を広げることで、一層の成果が挙がるものと思われる。また、外来種や遺伝子組換え生物の生物多様性影響評価研究は国立環境研究所以外の研究機関ではあまり取り組んでいないことから、国立環境研究所の特色ある研究として、ご指摘の点に配慮しながら、より長期的な視点で研究を進めて行く所存

である。

## 6. 残留性有機汚染物質の多次元分離分析法の開発に関する研究

課題代表者 橋本 俊次（化学環境研究領域）

### 1) 研究の概要

多次元ガスクロマトグラフと高分解能飛行時間型質量分析計を組み合わせを中心とする多次元分離分析法を開発し、各種媒体中のダイオキシン類をはじめとする POPs 類の高精度・高感度・迅速・多成分同時分析を実現した。

また、大気粒子中 n-アルカンや PAH とその類縁体等各種炭化水素定量の高感度化、フルオロテロマーアルコール類の多成分同時測定、水酸化 PCB 異性体の高分離分析法の開発など、これまで困難であった分析を可能にした。

### 2) 研究期間

平成18～20年度（3年間）

### 3) 研究成果

#### (1) 研究目的

本研究では、残留性有機汚染物質（POPs）の分析に対する高いニーズに応えるために、特に注目される以下の化合物群を対象に高精度・高感度・迅速・多成分同時分析法を開発することを目的とした。

- ①媒体や化合物毎に前処理操作が異なることや多数の工程と高度な技術を要する等の分析法上の課題を解決するため、POPs の迅速・高精度・高感度分析法を開発する。
- ②広範な汚染が見いだされているパーフルオロオクタンスルホン酸（PFOS）やパーフルオロオクタノ酸（PFOA）の環境挙動の解明のために必要な関連化合物や前駆体を包含したパーフルオロ化合物（PFCs）の多成分分析法を開発する。
- ③PCBs の代謝物である水酸化 PCBs（HO-PCBs）による人や他の生物への影響の解明と環境濃度を正確に把握するため、多数存在する HO-PCBs 異性体の超高度分離分析法を開発する。

#### (2) 研究成果

##### ①POPs 類の迅速分析法の開発

GC×GC-HRTOFMS から得られるデータを効率よく定量解析するためのソフトウェアが存在しなかったため、何段階ものデータ変換と汎用性の高い表計算ソフトウェア（Microsoft Excel）で動作するマクロプログラムの作成により、任意の質量イオンの定量を可能にした。これにより、以降の研究を進めることができた。

##### 1.1 GC×GC-HRTOFMS による一般廃棄物却施設排ガス及び飛灰中のダイオキシン類の直接定量

GC×GC-HRTOFMS による排ガスおよび飛灰抽出液の直接測定では、前処理を省略したダイオキシン類の同定と定量が可能であることを確認した。この時の装置検出下限は 2,3,7,8-TCDD で 0.3pg（S/N=3）程度であった。従来法では一回の測定で全ての TEF 保有異性体を他の異性体より分離・定量することは不可能であったが、GC×GC の超高分離により、それが可能になり、一回の測定で正確な TEQ が決定できることが分かった。精密な前処理と二重収束型質量分析計測定を行う公定法との比較でも、ほとんどの TEF 異性体の定量値の差は 50-150%以内に収まったが、幾つかの異性体については、公定法値を下回った。比較した公定法の測定値には、異性体分離が不十分なものも含まれていたことから、本方法により夾雑物の影響が除かれたことが予想された。

## 1.2 TD-GC×GC-HRTOFMSによる大気中 POPs の迅速・高感度測定

公定法では、ハイボリウムエアサンプラーによる約 1,000m<sup>3</sup>の捕集が必要な大気試料中のPCBsおよびその他のPOPsについて、TD-GC×GC-HRTOFMSによる少量（数m<sup>3</sup>）大気捕集試料の直接定量の可能性について検討を行った。マイクロポンプにより2日間で3~4 m<sup>3</sup>の屋外大気をTenax TAを充填した吸着管に捕集し、加熱脱着によりGC×GC-HRTOFMSに導入し、測定を行った。この方法では、溶媒による試料の抽出と前処理を一切省略した。GC×GCにより大量の炭化水素成分を分離したことで、PCBs, HCHs, HCB, クロルデン, ヘプタクロール, ノナクロールなどが定量可能になった。試料における検出下限は、およそ1~20pg/m<sup>3</sup>であった。

## 1.3 SBSE-TD-GC×GC-HRTOFMSによる河川水中の POPs 類の迅速・高感度測定

河川水等水質試料中のPOPs分析の迅速化・高感度化についても検討した。関東各地から採取した河川水を50ml×6に分取し、ポリジメチルシロキサンを材質とした直径3mm長さ10mmの攪拌子（スターバー）を入れ4時間抽出（SBSE : Stir Bar Sorptive Extraction）後、攪拌子をGC×GC-HRTOFMSにより測定した。抽出前に<sup>13</sup>Cラベル体を添加し、各化合物濃度は同位体希釈法で算出した。この方法で、HCHs, HCB, クロルデン, ディルドリン, o, p-/p, p-DDEなどを検出した。試料における検出下限は、10~500pg/Lであった。試料により結果にバラツキが見られたが、比較的高濃度な試料においては、公定法による結果と良く一致することを確認した。この方法により、20Lの採水が必要な従来法に比べ約400分の1の試料量でPOPsの測定を可能にした。

## 1.4 TD-GC-MSによる大気ナノ粒子の測定

加熱脱着専用装置や小型の磁場型質量分析計の導入、選択イオン検出（SIM）法の適用などによりTD-GC-MSを高感度化するとともに、対象成分を拡張した。その結果、PAHsと17 $\alpha$  (H), 21 $\beta$  (H)-hopaneの定量下限値は4~17 pg, n-アルカンは13~39 pgとなり、n-アルカンに関してはGC-QMS法に比べ二桁程度高感度化された。本手法により極微量（約20  $\mu$ g）の粒子標準試料（SRM 1649a, 1650b, 2975）中のPAHsを定量したところ、保証値と概ねよく一致した。このTD-GC-MSを沿道大気中の粒径別試料に適用したところ、粒径32 nm以下の粒子からも対象成分を初めて検出・定量した。

## 1.5 TD-GC×GC-MSによる沿道大気粒子中 PAHs の定量

TD-GC×GC/MSによる沿道大気中粒子の分析では、脂肪族炭化水素、含酸素脂肪族炭化水素、芳香族炭化水素、含酸素芳香族炭化水素、含窒素芳香族炭化水素、PAHs, oxy-PAHs, 複素環化合物など様々な化合物群が同定でき、PAHsについては定量を行った。TD-GC×GC-QMSとTD-GC×GC-HRTOFMSにより、沿道大気総粒子中のPAHsを定量し、従来法（超音波抽出（USE）-HPLC）と比較した。TD-GC×GC-QMSとTD-GC×GC-HRTOFMSでは、それぞれ、USE-HPLC法の約1/40, 約1/350の試料量でPAHsを検出・定量でき、その値はUSE-HPLC法とほぼ等しかった。このことからTD-GC×GC-MSによって迅速・超高感度にPAHsを定量できることが示された。

以上のように、種々の媒体において、ダイオキシン類やPCB, その他のPOPsの分析法開発により、公定法などの従来法では数日以上かかる前処理が全く省略でき、大幅な時短と使用試薬や溶媒の節約を可能にした。また、加熱脱着装置による試料の全量注入により実用感度の大幅な向上も達成できた。

## ②PFCs とその分解生成物の多成分高精度分析法の開発

環境中へのフッ素化アルキル化合物（PFAS）の排出源を探る試みとして、傘や衣類などの市販製品に含まれる化合物の同定を行った。メタノールと酢酸エチルを用いた溶媒抽出試験を行ったところ、テロマーアルコール類を検出するとともに相対的に高濃度のN-メチルパーフルオロオクタンスルホンアミドエタノール（ $\sim 170 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ）の存在を確認した。製品の使用に伴う大気中へのフッ素化アルキル化合物の排出を想定しTD-GC-MSによる製品の直接分析の検討も行った。製品使用温度（室温+数十 $^{\circ}\text{C}$ ）において一部の衣類からは、アミドエタノール類やテロマーアルコール類など数種の化合物の気化8:2FTOH（ $0.011\sim 0.035 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ）とNMeFOSE（ $0.006\sim 0.022 \mu\text{g}/\text{m}^2$ ）を確認した。その濃度は、溶媒抽出濃度の1/10程度であった。

このTD-GC-MSによるPFASなどの高感度測定は、今後のPFCs全体の発生源や環境挙動を解明するための研究にも貢献するものと期待される。

## ③H0-PCBsの異性体分離分析法の開発

GCによる水酸化PCBの測定では、感度が100~1,000倍向上することから誘導体化としてメトキシ化を採用した。また、誘導体化試薬として、異性体による反応率の差が小さいトリメチルシリル-ジアゾメタン（TMS-DAM）を使用した。入手した137種のH0-PCB標準品を誘導体化し、GC×GC-HRTOFMSによるモノメトキシPCBsの測定条件の最適化を図った。異性体成分の分離度とカラムブリードの少なさ（イオン化された成分が全て検出器に到達するTOFMSにおいて、イオン負荷に弱いマルチチャンネルプレート（MCP）検出器を保護する必要があるため）から、一次元目カラムには、PCBsの測定で多く用いられるHT-8よりもDB-5ms系カラムを採用した。最終的に、底質試料の前処理液から152本を越えるメトキシPCBsのピークを確認した。

これにより、従来よりも多くのH0-PCBs異性体の定量精度が向上するものと期待でき、環境中や生体中動態の研究の進展に貢献することが期待される。

### （3）研究の達成度

本研究では、残留性有機汚染物質について、それぞれのニーズに応じた分析法の開発を目指した。ダイオキシン類、PCBs、その他のPOPs、PAHsについては、超高分離・高精度・高感度・迅速・多成分同時分析法を、PFCsについては高感度・多成分同時分析法を、H0-PCBsについては超高分離・多成分同時分析法を開発することにより、研究の目的をほぼ達成したと考える。

### （4）学術的価値

本研究で開発した方法は、バイオアッセイなどの他の迅速分析法とは異なり、異性体などの個々の物質濃度も正確に測定できることから、化合物（異性体）組成を基にした発生源推定や動態解析にも使用できるなど、残留性有機汚染物質に対する幅広い研究に貢献することが期待される。また、前処理を省略することで、試料中の（GCで測定可能な）化学物質情報を測定対象物質に限らず広く採取し、デジタルデータとして保存できるため、貴重な試料を対象とした様々な化学的解析に威力を発揮する重要なツールになる可能性がある。など、本研究で開発した分析法の応用範囲は環境分野にとどまらず、多方面の研究に貢献することを期待する。

### （5）行政貢献

前処理を全く省略しながら、多種類の化学物質を一度の測定で分離定量できるこの分析法は、必要試料量の大幅な削減、分析の劇的な迅速・省力化を可能にすることから、経費と時間の削減には直接寄与するはずである。これにより、汚染物質のきめの細かい行政的監視や迅速な対策やモニタ

リング・調査に掛かる費用の削減に貢献するものと期待される。

#### 4) 評価結果 (総合評価)

|               | 5   | 4   | 3 | 2 | 1 | 合計   |
|---------------|-----|-----|---|---|---|------|
| 年度評価          | 1   | 9   |   |   |   | 10   |
| (平成 21 年 4 月) | 10% | 90% |   |   |   | 100% |

注) 上段: 評価人数、下段 [%]

年度評価基準 (5: 大変優れている、4: 優れている、3: 普通、2: やや劣る、1: 劣る)  
外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 4.1 点

#### 5) 評価結果の概要

##### [現状評価]

本研究は基本的な分析技術開発として目標達成に向けて着実な成果を上げており高く評価される。GCxGC/HRTOFMS 複合システムを試作し、これを試料全量導入可能な加熱脱着装置と結合して、迅速・高感度な多成分同時分析装置を開発した成果は高く評価できる。しかし、現状では、解析には専用のソフトが必要であるため、この手法の普及は直ぐには難しいと考えられる。また、新しい発見や政策立案に向けた提言には必ずしもつながっていない。

##### [今後への期待, 要望]

開発したソフトの普及についての検討が必要である。大量のデータ処理を要するため、測定目的に応じた検索・解析ソフトの開発が、その開発体制の整備も含め、今後の普及にとっての課題であると思われる。分析コストの削減についても定量的に検討してもらいたい。

今後は、対象物質の拡大や生体材料への応用など、分野に応じた具体的な応用法の提案、実用化などを見据え、研究を発展させることが望まれる。

#### 6) 対処方針

本研究では、GCxGC/HRTOFMS を中心とした分析法の開発により、残留性有機汚染物質について、前処理を全く省いた分析の可能性を示すことができた。今後は、対象とする試料媒体の種類を増やし、定量の実用化を進めることで、公定法の置き換えを提案することなどを目指したい。

そのためには、実用的なデータ解析ソフトウェアの開発は不可欠であると考えるが、同時に、ダイナミックレンジの拡張などを含めた、ハードウェアによる解決法も検討していく予定である。

また、将来的には、迅速・高分離・高精度・多成分同時分析という本研究のコンセプトを発展させ、本法で分析困難な極性物質をも対象とした新しい分析法の開発も行い、各分野に貢献したいと考える。

## 7. 化学物質の動態解明のための同位体計測技術に関する研究

課題代表者 瀬山 春彦（化学環境研究領域）

### 1) 研究の概要

金属元素の同位体存在度および有機化合物の放射性炭素同位体比の精密計測技術の開発、改良を行い、高精度な同位体分析法や化合物選択的な放射性炭素同位体分析システムを確立した。さらに、本研究で完成された同位体分析技術を応用して、室内の埃（室内塵）や空気など実際の環境試料中に含まれる鉛やアルデヒド類の分析を行い、測定された同位体存在度からこれら有害物質の発生源推定など動態解析を行った。

### 2) 研究期間

平成18～20年度（3年間）

### 3) 研究成果

#### (1) 研究目的

我々が暮らしている環境中には、多種多様な化学物質が存在しており、直接あるいは間接に我々の健康や生活に影響を与えている。有害な化学物質の環境中における濃度レベルを下げ、長期にわたる安全で快適な生活環境を保持していくためには、問題となる有害物質の主要な発生源を明らかにし、環境中への放出を抑制する方策をとる必要がある。しかしながら、有害な化学物質の中にはその発生源が明確なものもある一方、天然の発生源と人間活動に伴う人為的発生源が考えられたり、複数の発生源が想定され、主要な発生源が分からない化学物質もある。そこで本研究では、発生源により元素の同位体存在度のパターンが異なることを利用した化学物質の発生源推定方法の確立を目的として、元素の精密かつ化合物選択的な同位体計測技術の開発、改良を行い、実際の環境分析にその方法を応用することを目指す。

#### (2) 研究成果

##### [サブテーマ 1] 金属元素の同位体計測に関する研究

環境中の有害元素、鉛の発生源の推定に資するために、同位体測定用誘導結合プラズマ質量分析装置（MC-ICPMS）を用いて、鉛の安定同位体比を正確、かつ精密に測定するための計測手法の確立を行った。

#### 1.1 分析試料前処理法の検討

鉛同位体測定を行う試料として、多種多様な環境標準物質（動植物、食品などの生物試料、土壌・堆積物などの地質試料、大気粉塵、室内塵、自動車排出粒子などの粒子状試料、焼却灰などの廃棄物試料、尿、毛髪の生体試料及び水試料）を用いた。

分析試料分解法として、酸分解とアルカリ融解法を検討した結果、難分解性鉱物や炭素粒子を含む焼却灰、粉塵と一部の土壌試料については、マイクロ波加熱を用いる酸分解とクリーンルームでの試料処理によって鉛を抽出するスキームを確立した。また、実用的な鉛分離法として、陰イオン交換法、キレート樹脂法、クラウンエーテル法の3方法について検討を行い、生物試料と毛髪などの生体試料、水試料についてはキレート樹脂法、地質試料、粒子状試料、廃棄物試料については陰イオン交換法、尿についてはクラウンエーテル法を適用するスキームを確立した。

## 1.2 MC-ICPMSによる鉛同位体測定

MC-ICPMS を用いた鉛同位体検出法として、チャンネルترون検出器を用いたイオン計数法とファラデーカップ検出器を用いたイオン電流測定法を比較検討した。前者は感度に優れているが、測定精度は後者が勝るため、わずかな鉛同位体比の変動を正確に計測するためには、ファラデーカップ検出器を用いた測定が必要であった。また、微量の試料を高精度で分析するため、MC-ICPMS にマイクロフローネブライザーと加熱脱溶媒装置を組み合わせた試料導入系を装着し、最終的に 10 ng 程度の鉛量で環境試料の同位体変動を論じるだけの測定が可能となった。典型的な同位体比測定精度は、Pb-207/Pb-206 で 0.015 %、Pb-206/Pb-204 で 0.08 %であった（20 ng の鉛を用いた測定での標準偏差の 2 倍）。また、通常導入系を用いた四重極型 ICPMS (ICP-QMS) での測定における典型的な必要鉛量は 50 ng 程度であるため、同位体比計測精度 (ICP-QMS : 0.2~0.8 %程度) だけでなく、検出感度においても MC-ICPMS は ICP-QMS と同程度かそれ以上の分析性能を持つと結論された。

MC-ICPMS により測定された環境標準物質の鉛同位体比の比較から、様々な環境試料中の鉛の同位体比は、有鉛ガソリンの影響を受けた都市域の試料や国産鉛の影響が強い石炭飛灰など幅広い分布を持っていることが明らかとなった。

### [サブテーマ 2] 有機化合物の放射性炭素同位体計測に関する研究

放射性炭素をトレーサーとして個別の有機化合物の動態を明らかにするためには、微量の炭素量 (10  $\mu\text{g}$ ) での測定を確立する必要がある。本研究では主に加速器の機械的側面を改良することで、微量で放射性炭素存在比を高精度に測定する方法を確立するとともに、空気中のアルデヒド類の放射性炭素存在比測定法を開発した。

## 2.1 加速器質量分析装置の改良

加速器質量分析装置 (AMS) では、固体炭素 (グラファイト) をセシウムイオンでスパッタリングすることによって、負の炭素イオン (-1 価) を生成する。そこでスパッタリングの効率化による大電流の炭素イオン発生を目指して、①セシウムリザーバーと供給パイプのヒーターに安定化電源、可変抵抗器を導入し、その温度制御を高精度化するとともに、②セシウム供給パイプの位置を調整、最適化した (イオン源におけるセシウム供給系の改良)。その結果、AMS の通常運転でイオン源から供給可能な炭素ビーム量を約 10 倍にすることに成功し、10  $\mu\text{g}$  炭素の測定でも、発生するビーム量は 6~8  $\mu\text{A}$  と大幅に増加した。

AMSでは、イオン源で生成した負の炭素ビームを加速電圧ターミナル部で正の炭素ビーム (+4 価) に荷電変換することで、2段階の加速を行う。荷電変換の効率は、5 MV程度で最大となることが知られているが、設置されているペルトロン型静電加速器 (米国NEC社製 15SDH-2) の安定に維持できる電圧は 4.5 MV程度であった。そこで、荷電変換部でのトランスミッション効率を向上させるため、加速管を支える構造を従来のルーサイト板から、新設計のアルミ製スパークギャップに変更し、加速電圧の安定化を行った。その結果、加速管を導体とする放電の減少によって、到達可能なターミナル電圧が 5 MV程度まで上昇し、4.7 MVでの通常運転が可能となり、 $^{12}\text{C}$ イオンビーム透過率が従来の 54 %程度から約 66 %に改善した。

これらの AMS における改良の結果、10  $\mu\text{g}$  炭素における測定精度を 1 %以下にするという目標を達成した。この成果は、放射性炭素同位体比測定において、世界の第一線級に肩を並べるものである。

## 2.2 空気中のアルデヒドの放射性炭素測定

室内空気や大気中の汚染物質であり、発がん性のあるホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの起源をAMSによる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 測定によって解析するための試料の前処理法を検討、確立した。空気試料中に含まれる多種多様な含炭素有機化合物のなかから微量のアルデヒド類 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ オーダー) を単離するために、①空気の大量サンプリング、②アルデヒド選択的吸着剤 (2,4-ジニトロフェニルヒドラジン、DNPH) による固相捕集、③分取液体クロマトグラフィー (PLC) による分離、④分取キャピラリーガスクロマトグラフィー (PCGC) による精製の4段階についてそれぞれ条件検討し、システムとして確立した。通常のAMS分析に必要な炭素量とわが国の典型的な室内空気中アルデヒド濃度から想定すると、分析には24時間の空気サンプリング (10 L/min) が必要で、本クロマトグラフシステムにより分離、精製したホルムアルデヒド、アセトアルデヒドの純度はそれぞれ98%、93%、回収率はどちらも概ね>90%であり、AMSによる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 測定に十分なものであった。

### 〔サブテーマ 3〕 室内環境中の有害金属とアルデヒドの動態解明

#### 3.1 室内空気中のアルデヒドの発生源解析

サブテーマ (2) で確立した空気中アルデヒド類の分離・精製法とAMSによる $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ 測定を適用し、室内空気中のアルデヒドの発生源に関する検討を行った。首都圏の一般家庭から室内空気をサンプリングし、ホルムアルデヒド、アセトアルデヒドをそれぞれPLC/PCGCによって分離精製、AMSにより $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ を測定した。その結果、ホルムアルデヒドの80%以上が接着剤、防腐剤など化石燃料由来であるのに対し、アセトアルデヒドは化石燃料由来と現生生物由来 (木材などからの寄与) が平均的には3:7の割合であった。本結果から、室内空気中アルデヒド類による発がんリスクを軽減するためには、これまでの対策の主体であった接着剤などの人工化学物質使用量の低減化だけでなく、建材としての木材などからの放散も減じなければならないことが明らかになった。

#### 3.2 血中鉛の起源推定

サブテーマ (1) で確立した鉛同位体測定手法を応用して、日本人小児の鉛暴露源を調べることを目標に、小児2名の血液中鉛同位体比 ( $\text{Pb-207}/\text{Pb-206}$ 、 $\text{Pb-208}/\text{Pb-206}$ ) と各小児の家庭及びその周辺から採取した室内塵、室外ダスト、土壌、食物の鉛同位体比を、MC-ICPMSによって測定し比較検討した。その結果、2名中1名の小児は血中鉛同位体比が室内塵の同位体比に最も近く、もう1名の血中鉛同位体比は土壌・室内塵と食物の中間の値であった。これらの結果は、日本人小児の鉛摂取源として、これまで食物が主であると考えられてきたが、実は室内塵や土壌の寄与も大きい場合があることを示している。低レベル鉛曝露による小児の認知機能発達への影響が明らかとなり、リスク評価がなされている今、本研究結果は食品中許容量の策定などの際、重要な情報となる。

#### 3.3 室内塵のキャラクタリゼーション

わが国における室内塵の組成に関する最も基礎的な情報を得る目的で、首都圏の一般家庭から収集した掃除機ごみを元に、粒径2mm以下を室内塵とし、さらに粒径分画して分画毎のPb等重金属類濃度を測定した。その結果、Pb, Cd, Zn, Sn, Sbなどは地殻存在度に比して10倍以上室内塵中に濃縮していること、微小粒径室内塵の方が重金属類濃度が高いこと、などの基礎的情報が得られた。

室内塵中の有害物質含有粒子特定法の例として、顕微蛍光X線法や粉末X線回折法を用いて、高濃度の鉛が検出された一般家庭の室内塵の中から鉛を含有している粒子の特定を行った。顕微蛍光X線分析法による室内塵粒子ごとの元素マッピングからは、鉛を高濃度に含有している薄片状物質が発見され、この物質は鉛以外にもCr, Mo, Baなどを含有していることが確認された。さらに、

粉末X線回折分析から、この物質はクロム酸鉛や硫酸バリウムなどの顔料から構成されていることが明らかとなり、剥離した塗料片と推定された。その他の室内塵試料の分析においても、多元素濃度データを基に因子分析を行った結果、室内塵中 Pb は Ba, Cr, S などと関連を持ちつつ存在しており、鉛の起源の一つとして塗料が想定された。室内における鉛汚染の原因物質として、塗料以外にも電気製品に使用されているハンダなどが考えられる。この様に、複数の汚染源が推定される室内塵試料の中から、特定の鉛含有粒子を探しだすのに、顕微蛍光X線測定とX線回折法を組み合わせた分析が利用可能で、鉛以外の元素についても汚染原因解明に有効な方法であることが示唆された。

#### 4) 評価結果（総合評価）

|               | 5 | 4   | 3   | 2 | 1 | 合計   |
|---------------|---|-----|-----|---|---|------|
| 年度評価          |   | 6   | 4   |   |   | 10   |
| （平成 21 年 4 月） |   | 60% | 40% |   |   | 100% |

注) 上段：評価人数、下段 [%]

年度評価基準（5：大変優れている、4：優れている、3：普通、2：やや劣る、1：劣る）  
外部研究評価委員会による事後評価の平均評点 3.6 点

#### 5) 評価結果の概要

##### [現状評価]

汚染源の解明手法の一つとして、技術面での開発の目的は十分に果たされた。また、同位体比によって、化学物質等の環境動態や発生源についての情報を明らかにすることを確認したことは意義がある。この手法によりアセトアルデヒドとホルムアルデヒドの起源について、化石燃料由来だけではないということを示し、発生源の特定とリスクへの考え方に新しい視点を与えた。しかしながら、現実的にどんな環境リスクの解析・解決のために使えるのか、それに見合う分析法（検出レベルや検出法等）となっているのか、生体濃縮などがあるかどうかなど今後に残された課題もある。

##### [今後への期待、要望]

本手法は様々な応用が考えられるので、他の技術や分析手法も併用し、ほかの有害元素にも拡大しつつ、生態学的な視点を取り入れて研究の応用と展開を図って欲しい。よりニーズの高い応用分野をターゲットとして技術開発した方がよかったかもしれない。

物質によっては長期的影響が問題となる環境リスク分野において、有効な手法となる可能性は十分にある。

#### 6) 対処方針

有害物質の環境中における動態解明や発生源推定の方法の一つとして、同位体分析は有効な手段である。この特別研究では、有機物の放射性炭素から、無機元素の安定同位体まで、いろいろな環境試料に応用できる、試料前処理法を含めた高精度な同位体計測システムの確立を目指した。残念ながら、環境中にある無機、有機有害化学物質は多数で、その全てをカバーできる普遍的な同位体分析手法を作り上げることは困難であるが、本研究で確立した鉛やアルデヒドの同位体分析技術は、今後、水銀などの有害金属の同位体分析や多環芳香族炭化水素などの有害有機物の放射性炭素測定に応用できるので、他の微量分析法や状態分析法などと組み合わせることにより、こうした有害物質の起源推定と環境中におけるその濃度低減対策に役立てて行く予定である。また、多種多様な環境試料について、この同位体分析手法を応用して行く中で、同位体の生物濃縮などについて解明を進めるとともに、さらに高度な同位体計測技術が蓄積されることにより、将来問題となってくる有

害物質の環境問題解決、リスク低減へも貢献できるものと考えている。