

東日本大震災後の

災害環境研究の成果

独立行政法人

国立環境研究所 2013. 3



宮城県沿岸部一次仮置場にて（木くず仮置場での発熱部捜索）▲

災害廃棄物：仮置場火災対応

被災地では、復旧作業等に伴って災害廃棄物の仮置場が被災各地に多数設置され、岩手・宮城・福島3県の沿岸市町村では一時最大300カ所を超える仮置場が設置されました。集積された災害廃棄物は混合廃棄物状態の場合が多く、仮置場に十分な広さの面積を確保できない地区では一時20mを超える集積高さの仮置場もありました。災害廃棄物の仮置場では、これまで数十カ所で火災が確認されました。火災は発災2ヵ月後の平成23年5月頃から始まり、夏から秋にかけてピークを迎えました。その後、冬になって発生件数が減少し、翌24年度は多くの仮置場で火災予防対策が講じられたこともあって件数は前年度比で少なくなりましたが、一部で火災が見られました。

国環研では、これまでの研究で実施してきた産業廃棄物の不法投棄現場・不適正処分場での無炎燃焼火災の現場踏査の経験や、その発生メカニズム推定に関する知見を最大限活用しながら、現場自治体や環境省等からの協力要請を受け仮置場の様々な火災現場を調査して事例を蓄積するとともに、被災各地の100カ所を超える仮置場に足を運び、管理状況の確認や技術的な助言指導を精力的に行ってきました。これらの現地活動と並行して、仮置場での可燃性廃棄物の火災予防対策に関する技術レポートを数次にわたり策定・改訂し、国環研HPに掲載しました。これらのレポートは、環境省の通知等に反映されるとともに、関係自治体・処理事業者・環境省現地支援チーム等多数の関係者に活用され、仮置場での火災防止に貢献しました。これらの知見は、除染現場での除染廃棄物の仮置場管理にも活用されています。

▼宮城県沿岸部一次仮置場にて（混合廃棄物層火災現場での温度と一酸化炭素濃度の測定 白い煙は無炎燃焼の煙）





宮城県沿岸部一次仮置場にて（混合廃棄物層内の温度と一酸化炭素濃度測定 火災延焼状況の調査）▲

▼宮城県沿岸部一次仮置場にて（混合廃棄物層内の温度と一酸化炭素濃度測定）






仮置き場近隣河川での採水



石巻市雲雀野地区の二次処理場内での大気試料捕集

津波堆積物による大気・環境水への影響調査



東北地方太平洋沖地震直後の津波被災地では、肺炎などの健康被害が心配されました。被災地には津波堆積物が散乱しましたが、その中には海底に沈んでいた化学物質や、津波によってまき散らされた化学物質などが含まれていたと考えられます。この津波堆積物が乾燥して風に舞うと、人々が吸いこむことになります。また、被災地では懸命な復興作業が続けられていますが、復興作業の過程では、震災がれきの撤去、一次仮置き、二次処理（仕分け、焼却処理）などが行われていることから、それぞれの過程における環境影響について調査しておく必要があります。国環研では、被災後から現在に至るまで、継続的に被災地の大気や水などを捕集し続け、その化学成分や毒性を測定しています。

▼試料の抽出開始



▲試料の精製と調整



海岸地形変化の測量▲



◀ 海浜試料の採取

津波災害による 沿岸域生態系への影響調査

海岸域は、砂浜海岸、岩礁帯、干潟や塩性湿地など、狭い空間スケール内に多様な生息環境が隣接しているため、高い生物多様性を有しています。東北地方太平洋沖地震による津波災害は、東北地方沿岸域の生態系を広域かつ大規模な影響を与えました。

国環研では、東北地方の海岸砂丘植生、干潟の底生生物相、沿岸域での二枚貝に関する調査を震災前から行っており、津波災害の沿岸域生態系への影響および回復メカニズムの解明に向けて、震災直後から継続的に現地調査を実施しています。



海浜環境の計測▲

二枚貝の採取▶



漂着油の採取▲





▲大船渡湾における現場調査



▲国立環境研究所における炭化水素の分析

津波による東北地方太平洋沿岸海底の 石油・炭化水素汚染実態把握調査

東日本大震災により発生した大津波により東北地方太平洋沿岸地方の臨海部に在った石油タンクが破損または流失し、一部の湾には大量の石油が流出しました。

国立環境研究所では関係自治体や地方環境研究所、東北大学、環境省の協力を得て調査を行い、東北地方太平洋沿岸海域全体と石油が流出した気仙沼湾、大船渡湾の底質の炭化水素の汚染状況把握のために調査を行ってきました。

その結果、高濃度の炭化水素による汚染状況が明らかとなり、流出した石油に含まれる炭化水素のみならず、津波により発生した火災により発生したと思われる高分子の多環芳香族炭化水素（PAH）による

高濃度汚染も確認されました。一方、当初は高濃度で検出された石油に含まれている炭化水素については、時間の経過と共に分解（自然浄化）が進行していることがわかりました。

今後、さらに詳細な汚染の分布状況を調べると共に、多種多様な炭化水素の消長と底質環境の回復状況を評価していきたいと考えています。

国立環境研究所 東日本大震災後の災害環境研究の成果

目次

はじめに	1
概要	3
第1章 震災後の国立環境研究所の取組について	
1.1 震災直後の初動（震災後～平成23年初夏）	11
1.2 放射性物質・災害環境研究への初期の取組（平成23年初夏～平成23年度末）	12
1.3 放射性物質・災害環境研究の展開（平成24年度～）	14
第2章 津波・地震による災害環境問題への対応	
2.1 主要な成果	17
2.2 災害廃棄物の処理処分に関する調査研究活動	17
2.2.1 はじめに	17
2.2.2 震災対応ネットワークによる経験知の集約と被災地への発信	18
2.2.3 現場重視の調査研究による新たな知見の集積と現場への還元	19
2.2.4 災害廃棄物に関する今後の取組	23
2.3 環境と健康への津波の影響とその定量的把握	24
2.3.1 津波堆積物による大気・環境水への影響調査	24
2.3.2 大津波による沿岸・海浜生態系の攪乱と回復について	28
2.3.3 津波による流出石油と炭化水素による沿岸域底質汚染の実態	32
第2章参考文献	35
第3章 放射能汚染廃棄物の処理処分等に関する研究	
3.1 はじめに	37
3.1.1 放射能汚染と廃棄物問題の全体像	37
3.1.2 研究活動の基本方針	38
3.1.3 主要な成果	39
3.2 成果の概要	41
3.2.1 廃棄物中の放射性セシウムの基礎物性・挙動メカニズムの解明	41
3.2.2 処理処分における放射性セシウム制御技術の開発・評価	48
3.2.3 処理施設での放射性セシウムの蓄積挙動の解明と管理技術の確立	50
3.2.4 廃棄物中の放射能物質の測定分析・モニタリング手法の確立	54
3.2.5 放射性セシウムを含む焼却灰等の空間的・時間的特性の把握	57

3.3 今後の取組	62
第3章参考文献	63

第4章 環境中での放射性物質の動態解明と影響評価

4.1 主要な成果	65
4.2 成果の概要	65
4.2.1 大気中の放射性物質の組成や時間変化の把握	65
4.2.2 森から湖へ、放射性セシウムはどのように動いているのか	68
4.2.3 大気シミュレーションによって明らかになった放射性物質の動きと沈着	73
4.2.4 陸域環境における放射性物質の動きと将来の予測	77
4.2.5 シミュレーションで予測する海洋の放射性物質の行方は？生態系への影響は？	80
4.2.6 家庭における被ばく経路と被ばく量の把握	83
4.2.7 一般公衆の追加被ばく線量推定モデルの構築と追加被ばく線量の推定	84
4.3 今後の取り組み	87
第4章参考文献	88

第5章 安全・安心な社会創造に向けて

5.1 震災復興のまちづくりへの貢献、低炭素社会シナリオへの取組	91
5.2 成果の概要	91
5.2.1 環境復興都市づくりへの取組	91
5.2.2 安全・安心な社会の形成に向けて	95
5.3 学術的、行政的貢献と今後の課題	96
5.3.1 被災地都市復興を取り巻く状況	96
5.3.2 環境復興都市づくりへの取組	97
5.3.3 持続可能な社会シナリオへの取組	97
第5章参考文献	98

第6章 災害環境研究の今後の展望

6.1 「災害環境研究の俯瞰」の方向性の継続と更なる前進	99
6.1.1 「災害環境研究の俯瞰」の背景と現時点での評価	99
6.1.2 「災害環境研究の俯瞰」において示された教訓の現時点での評価	100
6.2 研究の進展に伴う研究成果の普及と環境政策への貢献等の態勢整備	101
6.3 更なる災害環境研究の展開体制の整備	102
6.3.1 総合的な災害環境研究を一体的に進めるための基盤の整備	103
6.3.2 福島県環境創造センター（仮称）における研究との連携	104
6.4 国環研からのメッセージ	105

資料：執筆者，研究体制・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 107

はじめに

国立環境研究所は、東日本大震災（2011年3月11日）の直後から、大震災に対応する研究活動を始めました。この2年間、大震災による環境汚染への対応と復興に、研究を通して取り組んできました。本冊子「東日本大震災後の災害環境研究の成果」は、その研究活動から得られた成果を中間的に要約したものです。研究はまだ引き続き展開しています。

取り組んだ研究活動は、環境の汚染の観測と実態把握、汚染物質による健康と生態系への影響、汚染物質の挙動解明、廃棄物の処理・処分へ各種技術開発と対策、各種行政施策への提言、地域社会の再生と創造のための手法の提案など、さまざまな側面にわたります。平常時でも人の周りの環境には、いろいろな要素が複雑に関係しています。環境の一部分のみの解析では、環境の変化が人と社会へどのように影響するか判断できず、適切な対応策を打ち出せない場合があります。また部分的な対応策では、環境全体を安全で安心なものにはできません。災害時には、特に、環境の全体的な把握が必要となります。

国立環境研究所には、研究所が果たすべき役割を宣言した憲章があります。その冒頭に、「国立環境研究所は、今も未来も人びとが、健やかに暮らせる環境を、守り育てるための研究によって、広く社会に貢献します、・・・」と宣言しています。この守り育てべき「健やかに暮らせる環境」は、平常時と災害時ではまったくその対象と方法が異なります。したがって、災害時の研究の様相は平常時と比べ大きく異なることとなります。災害時ゆえ特に研究対象とすべきものがあります。災害時には迅速な測定や解析が求められることがあります。災害時ゆえに緊急な対策に役立つ研究を行わなければならないこともあります。あるいは、とりあえず取ることでできた非常に少ない観測データから、科学的な判断を求められることもあります。さらに重要なことの一つに、災害時には、科学研究と社会との間に特別な緊張関係が生まれることです。社会は安心であるかどうかの情報を緊急に必要とします。研究者は科学的な検証を経た確実さを求めます。災害という緊急状況の中で、研究機関は、科学的信頼性を確保しつつ、研究から得られた知見を分かりやすく速やかに社会へ伝えなければなりません。

本冊子に示しているように、この2年の間に多くの研究成果が得られました。しかし、さまざまな知見は現段階での取りまとめであり、まだ研究途上のものもあります。被災した環境と社会は日々変化していきます。得られた研究の成果を、普遍性の観点からあとから修正しなければならないこともあるかもしれません。

避難先からまだ自宅へ戻れない被災者の方々がおられます。また、かつての産業が崩壊したままで生業に戻れない方々がおられる地域があります。被災地の復興と新しい社会環境の創造は道半ばです。国立環境研究所は、「健やかに暮らせる環境」のため、環境研究の中核機関としての役割を確実に果たすべく活動を続けてまいります。

本冊子を通して、多くの方々に、国立環境研究所の災害環境研究の成果をご理解いただければと考えております。また、災害時の環境に関わる研究課題は多岐にわたります。さまざまな分野の方々と広く連携していく必要があります。改めて皆様のご協力をお願い申し上げます。

2013年3月

大垣 眞一郎

(独) 国立環境研究所 理事長

概 要

1. はじめに

国立環境研究所は幅広い分野の環境研究を総合的に実施している中核的機関です。東日本大震災からの復興と環境創造に役立つ科学的知見や、災害環境問題に関する情報発信を積極的に行うとともに、このことによる政策貢献を行っています。

本文書『国立環境研究所 東日本大震災後の災害環境研究と成果』は、震災直後から国立環境研究所（以下、「国環研」という。）が取り組んできた災害環境問題の解決に向けた全所的な研究、技術開発、調査について、主要な取組と研究成果をとりまとめたものです。

①初動の緊急対応、②震災からの復興への取組、③環境の実態把握と影響評価への取組、④安全・安心な社会の創造への取組に加えて、今後の中長期的取組についても紹介しています。

2. 東日本大震災後の取組

(1) 震災直後の初動（震災後～平成 23 年初夏）

激甚な被災からの復旧・復興に貢献すべきとの判断から、東日本大震災復旧・復興貢献本部（本部長：理事長）を3月29日に設置し、当面の方針として、三本の柱（①災害廃棄物対策、②地元との協働、③適時適切な情報提供）を設定しました。それまでの環境研究の知見や国環研ならではのネットワークを活かすとともに、所員の専門性を一つにまとめて研究面、技術面からの被災地支援を行いました。

(2) 放射性物質・災害環境研究への初期の取組（平成 23 年初夏～平成 23 年度末）

福島県内外の環境に広がった放射性物質による環境汚染などの環境問題に対して、災害・放射能と環境に関する研究を一体的に推進し、研究所として総合力を発揮して対応するため、貢献本部長（理事長）をリーダーとする「放射性物質・災害環境研究チーム」を設置し、廃棄物関係グループと多媒体での環境動態解明グループを二本柱に、全所的に取組を推進する体制を確立しました。また、「災害環境研究」の全体像の包括的整理と、分野ごとに解明・解決すべき課題を整理した「災害環境研究の俯瞰」を平成 24 年 4 月に公表しました。

(3) 放射性物質・災害環境研究の本格化（平成 24 年度～）

平成 23 年度第 3 次補正予算でスタートした放射性物質汚染廃棄物の処理と多媒体での放射性物質の環境動態解明を柱に、被災地の汚染回復、環境創造などに貢献していこうという「放射性物質・災害環境研究」の成果が、環境省の「災害廃棄物安全評価検討会」、「環境回復検討会」などに逐次提供、活用されました。一方、国民への情報発信に努め、福島市での「復旧・復興ワークショップ」、東京・京都での「大震災と環境再生～災害に立ち向かう環境研究の最前線～」をテーマにした公開シンポジウムを開催しました。

平成 24 年 7 月に閣議決定された「福島復興再生基本方針」においては、国環研の廃棄物研究や環境動態解明研究の取組が明記されるとともに、福島県の福島県環境創造センター

(仮称) が国のサポートの下で運営される研究開発拠点として位置づけられ、汚染環境の回復と安心して暮らせる環境の創造に向けた、持続可能な研究体制の構築が求められています。

3. 災害・放射能汚染廃棄物への取組

東日本大震災は被災地各地に大量の災害廃棄物をもたらし、さらに、東京電力株式会社福島第一原子力発電所（以下、「福島第一原発」という。）の事故により放出された放射性物質に汚染された廃棄物や土壌等が広域かつ大量に発生しました。これまで蓄積してきた資源循環・廃棄物研究分野の知見・経験・ネットワークをベースに、これら災害廃棄物と放射性汚染廃棄物の処理処分に関する研究を迅速かつ適切に推進しました。その結果の概要は以下の通りです。

(1) 災害廃棄物の処理処分への取組

- 1) 震災直後に「震災対応ネットワーク」を立ち上げ、被災地で発生する様々な技術的課題に対応した各種技術レポートを作成・提供し、環境省の通知等にも活用されるなど、現場での災害廃棄物・生活廃棄物対応に多大な貢献を果たしました（2.2.2 参照）。
- 2) 海水被り廃木材の焼却処理の安全性確認、津波堆積物の化学性状把握、仮置場での火災発生防止策等の緊急的調査研究、現地調査や技術的助言・指導を精力的に行いました。これらの成果は環境省の通知・指針等にも反映されました（2.2.3 参照）。

(2) 放射能汚染廃棄物の処理処分への取組

- 1) 廃棄物の種類により放射性セシウムの溶出特性が大きく異なり、それが放射性セシウムの化学形態の違いによること、埋立時に使用する土壌等の種類により焼却灰からの溶出液中の放射性セシウムの吸着性能が大きく異なることなどを明らかにしました（3.2.1 参照）。
- 2) 草木類等の腐敗性廃棄物の仮置保管の際に積み上げる山の高さや設置面積、離間距離等の制限などの火災予防措置が必要であることが分かりました。また、溶出性が高く放射性セシウム濃度の高い焼却飛灰の洗浄技術について、放射性セシウムを90%以上除去して溶出性と濃度を低減できる洗浄条件などに関する知見が得られました（3.2.2 参照）。
- 3) 温度が高い焼却炉内等では放射性セシウムが耐火物に蓄積することで空間線量が高い場所と付着灰のセシウム濃度が高い場所が異なり、耐火物中に放射性セシウムが浸透蓄積していることが分かりました。また、廃棄物を埋め立てる際、涵養量や溶出濃度によって放射性セシウム浸出水のピーク濃度や時期が異なり、溶出性の高い焼却飛灰の埋立時は上部遮水層を設置し降雨浸透水と飛灰を接触させないことが必要であることなどを明らかにしました（3.2.3 参照）。
- 4) 各機関と連携して廃棄物等の放射能調査・測定に関する暫定マニュアルを早期に策定・公表し、国のガイドラインのベースとして活用されました。また、焼却施設の排ガス試料採取方法に関する技術的課題への対応策や焼却灰の採取試料の代表性等について検証しました（3.2.4 参照）。
- 5) 一般廃棄物焼却施設の焼却灰等の放射性セシウム濃度が初夏や秋に上昇する等の季節変動を示しつつ減少していること、地域全体に沈着した放射性セシウム量の焼却ごみへの移

行率が一般廃棄物焼却施設の多くで1%未満であり、人口密度が高い地域ほど焼却ごみ移行率が高い傾向があることなどがわかりました（3.3.5 参照）。

4. 環境の実態把握と影響評価

東日本大震災に伴う福島第一原発の事故により放出された放射性物質による環境汚染へ対処するために、事故直後から環境中の放射性物質の実態を把握し、その動態を解明し、更に今後の動向を予測することを目的とした研究を実施し、次のような主要な成果が得られました。

- 1) 事故直後から大気中の放射性核種を測定し、核種構成や粒径分布などを明らかにしました。（4.2.1 参照）
- 2) 筑波山や霞ヶ浦において放射性物質の動態の計測を事故直後から開始し、森林・湖沼・河川などにおける放射性物質の蓄積・循環・移動の過程を把握し、森林除染等の対策検討に貢献しました。（4.2.2 参照）
- 3) 大気シミュレーションモデルを用いて、放射性物質の大気中での広がりや地表面への沈着量分布をいち早く明らかにし、社会に発信し、行政に貢献しました。（4.2.3 参照）
- 4) 放射性物質の広域的な環境動態モデルの構築を進め、将来予測を含む環境シミュレーションを開始しました。（4.2.4, 4.2.5 参照）
- 5) 家庭内の様々な被ばく経路毎に被ばく量を測定し、ヒトへの被ばく総量を把握しました。（4.2.6, 4.2.7 参照）

5. 安全・安心な社会の創造

東日本大震災後の地域の復旧・復興の過程で、基幹的なライフラインや住宅の復旧整備が急速に進められています。社会環境システム研究センターでは、環境都市研究の一環として開発してきた地理情報システムを活用した環境都市の評価システムを被災地都市に適用するとともに、環境未来都市として選定された福島県新地町と協定（平成25年3月13日）を結び、協力体制を築く予定です。同時に、原発事故後のエネルギー需給や温暖化対策の見直しが進められていることから、日本のエネルギー需給や低炭素社会シナリオの再検討を開始しました。得られた結果の概要は以下の通りです。

- 1) 復興都市づくりの計画に対して地域エネルギーシステムの分野から貢献するため、地理情報を活用した計画評価システムを構築しました。（5.2.1 参照）
- 2) 福島県北部および宮城県南部の沿岸域9市町を対象としてケーススタディを行い、この地域の民生需要と賦存エネルギー量を比較した結果、十分な資源が存在しており、循環・再生可能エネルギーの活用により効率の高い都市再生が可能になることがわかりました。（5.2.1 参照）
- 3) 大震災・原発事故後のエネルギーと温暖化対策について、統合評価モデルにより、原発比率ごとの、GDP、家計消費支出、温室効果ガス排出量への影響を推計しました。（5.2.2 参照）

6. 津波・地震による環境、健康、生物・生態系への影響評価

東北地方太平洋沖地震が引き起こした津波は、化学物質等を含んだ海底堆積物を被災地に拡散させました。また、地震動は地形変化を起こし、人と生物の生息環境を変化させました。こうした災害に起因する様々な環境変化が環境、人の健康、生物・生態系にもらした影響を調査するとともに、評価する研究を実施し、次のような主要な成果を得ました。

- 1) 被災直後から継続的に被災地の津波堆積物の大気・環境水への影響調査を行い、化学物質等の環境・健康影響についての情報発信を行っています。(2.3.1 参照)
- 2) 津波によって大きな攪乱を受けた後の沿岸・海浜生態系は、津波攪乱前に設置された人工構造物の影響と新たな環境変化の影響を受けており、その再生については継続的な観測が必要なことがわかりました。(2.3.2 参照)
- 3) 津波により流出した重油、海底堆積物、炎上軽質油に起因する多環状芳香族炭化水素が混合して海底に沈降し、底質環境への影響を今後も注視していく必要があることがわかりました。(2.3.3 参照)

7. 今後の中長期的取組

(1) 災害・放射能汚染廃棄物への取組

図に示す研究構成を基本として、中長期的な視点から、災害・放射能汚染廃棄物に関する研究をさらに深化させ、従来研究の学術的基盤強化にフィードバックさせるとともに、災害と環境に関する新たな学術体系の構築にも取り組んでいきます。

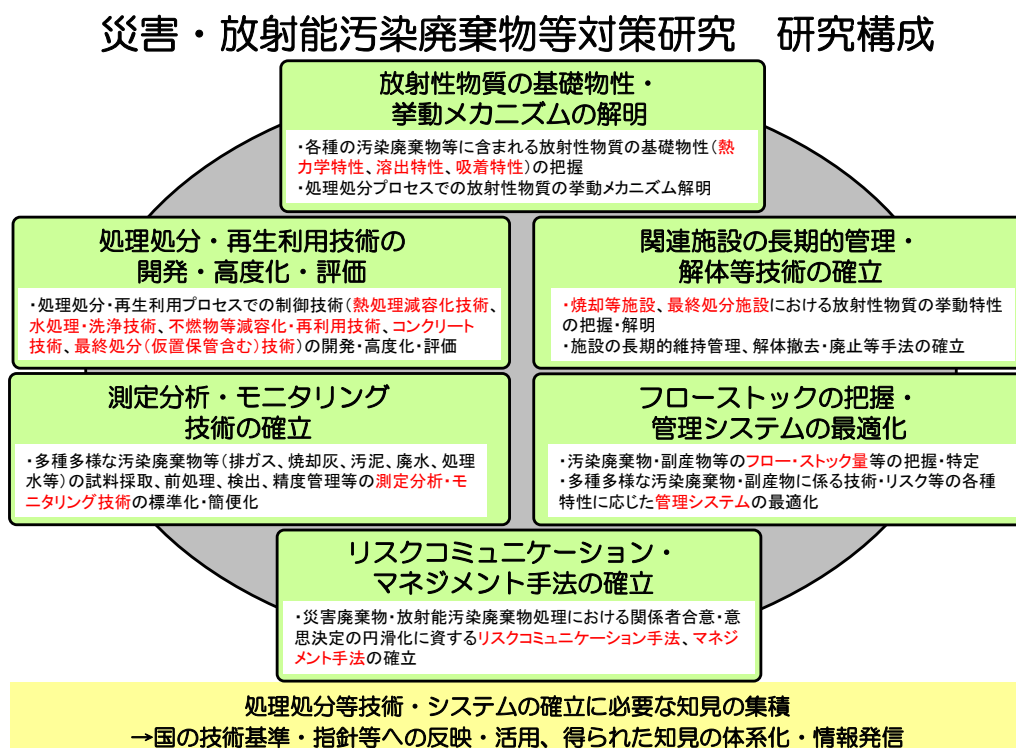


図-1 災害・放射能汚染廃棄物への取組

(2) 環境の実態把握と影響評価 ～放射能物質の動きと生物への影響～

図に示す①環境動態計測、②環境モデリング、③ヒト曝露解析、④生物・生態系影響調査を総合的に実施し、汚染された地域の環境を回復し、安全・安心に生活できる環境を取り戻すための科学的情報をさらに蓄積、発信していきます。

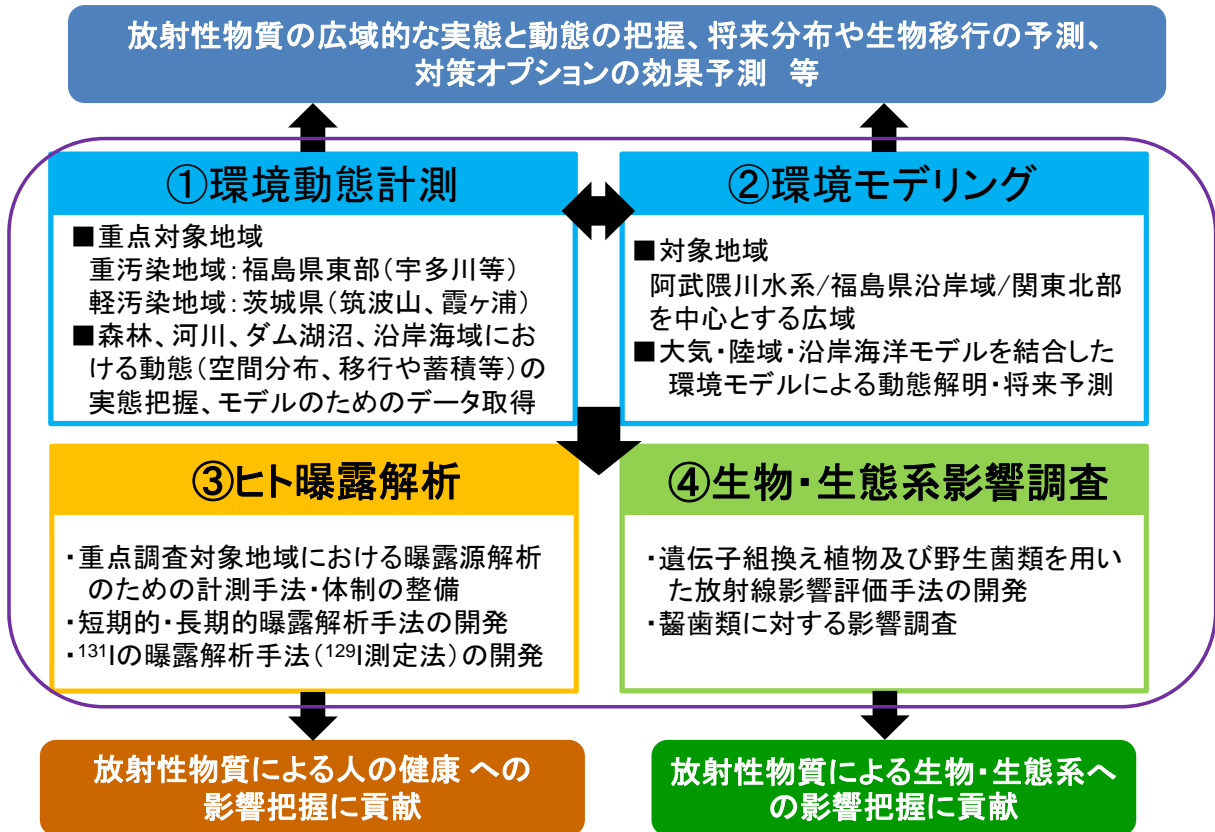


図-2 「環境中での放射性物質の動態解明と影響評価」研究の概要

(3) 安全・安心な社会創造 ～幅広い環境科学の統合による持続可能な社会形成～

安全・安心な社会づくりに向けて、地球規模の環境問題、自然災害、産業や国民生活などの幅広い分野において、環境面からの検討が必要です。こうした視点から考慮すべきリスクである地球規模リスク、社会リスク、環境および災害時リスクへの対応を進め、安全・安心な持続可能な社会形成への取組を推進します。

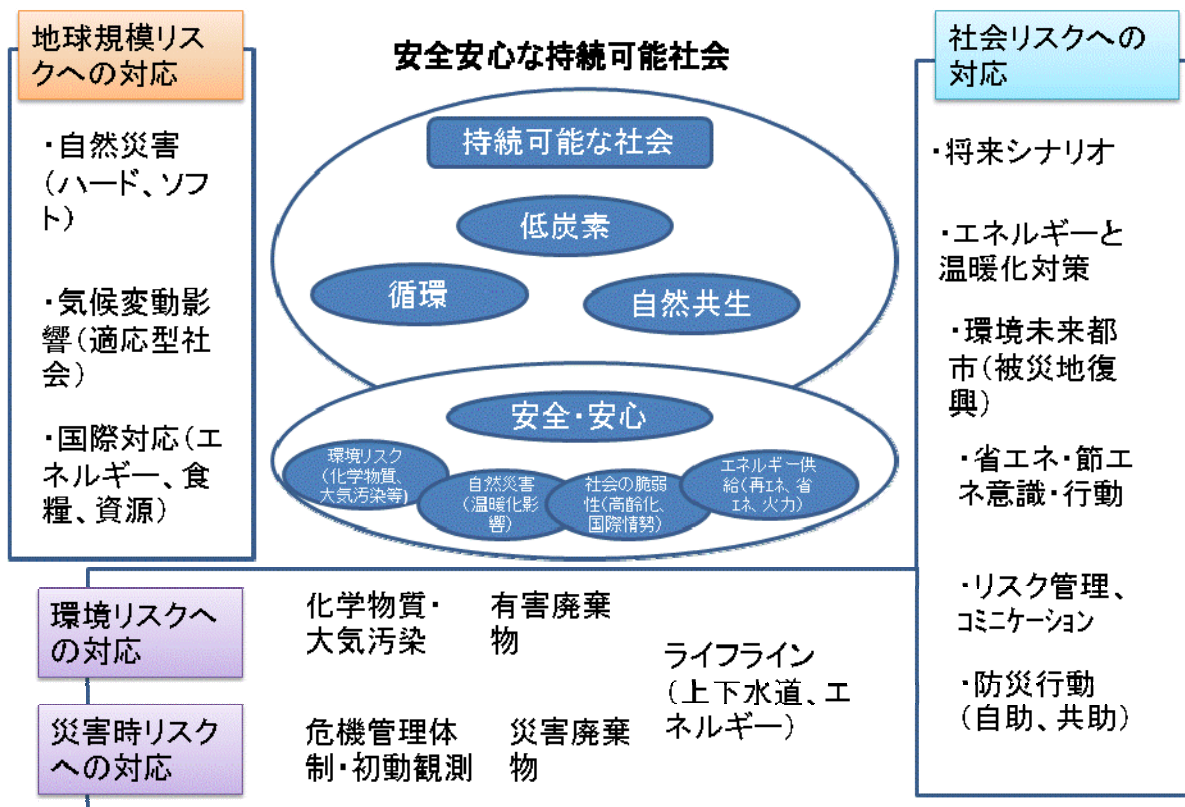


図-3 安心・安全な持続可能社会

8. 災害環境研究の今後の展望

(1) 「災害環境研究の俯瞰」の方向性の継続と更なる前進

東日本大震災直後の初動以来の国環研の経験と、放射性物質による環境汚染に関する研究などの災害環境研究に取り組んだ1年間の蓄積を踏まえた「災害環境研究の俯瞰」は、今でもその内容の先進性と合理性を失ってはいません。当時の実経験と臨場感を踏まえて「今後の教訓」として集約して記述された6つの課題については、今後ともそれらを活かして国環研としてのガバナンスや研究活動等に取り組めます。

(2) 研究の進展に伴う研究成果の普及と環境政策への貢献等の態勢整備

東日本大震災の被災地の復興は、国を挙げての重要かつ緊急な課題です。国環研も、がれき処理や放射性物質の環境動態などの災害環境研究の成果を、得られ次第タイムリーに提供して環境政策に貢献して参りました。また、所の一般公開、シンポジウムなどの節目ごとに成果や課題をとりまとめて、成果の普及と所の活動紹介を図って参りました。

研究がさらに進行することに伴い、その新しい成果が被災地の復興と環境創造として結実するように、災害環境研究による環境政策への貢献、より幅広い対象への研究成果の普及、及び、それらを実現するための態勢整備に取り組めます。

(3) 更なる災害環境研究の展開体制の整備

東日本大震災から2年が経過し、緊急時対応として開始した災害環境研究も持続可能な定常時対応に移行する時期になってきました。そのため、独立行政法人が行う研究の制度的裏付けである中期目標、中期計画、運営費交付金等において他の研究と同じように位置づけを明確にし、それを踏まえた態勢の整備を進めなければならないと考えます。

また、設立準備中である福島県環境創造センター（仮称）と、福島県南相馬市の国環研実験室で行われる活動と、つくばの本構で行われる調査・研究・環境情報の提供等の活動とを密接に連携させて、災害環境研究という集合の力を一体的かつ最大限に発揮できる態勢を整備したいと考えています。

9. 国環研からのメッセージ

国環研が展開してきた災害環境研究の概要と展望を御紹介しましたが、東日本大震災を契機とした調査、研究、技術開発は、国、地方公共団体、他の研究・技術開発法人、大学、企業、民間団体など、様々な主体において懸命に進められています。

国環研としては「災害環境研究の俯瞰」で整理した幅広い分野の研究を、自ら行うことのみならず、様々な主体によって推進して頂けることを期待していますし、連携していきたいと考えています。

本文書は、まず第一歩として国環研の研究成果等に限ってとりまとめたものですが、環境大臣から頂いた中期目標にある、環境研究の中核的機関たるべしという言葉に鑑み、様々な主体の取組や研究成果を俯瞰して御紹介できる機会を作るなど、災害環境研究の成果がいち早く復旧・復興・環境創造に活用されるように務めたいと考えます。

今後とも、国環研が進める災害環境研究のみならず、様々な主体が進める幅広い取組と国環研が連携して進める災害環境研究についてもご期待を頂ければ幸いです。

第1章 震災後の国立環境研究所の取組について

1.1 震災直後の初動（震災後～平成23年初夏）

東日本大震災は、東北地方を始め東日本各地に未曾有の被害をもたらしました。つくば市は震度6弱で、国環研自身もライフラインの停止や建物の損壊などの被災を受けたため、直ちに災害対策本部を設置し所内の機能復旧を進めました。被災後2週間で、電気・水の供給は再開しましたが、暖房や実験用の集中蒸気供給系等は未復旧のままでした。しかし、国環研として一刻も早く、激甚な被災地の復旧・復興に貢献するステージに移行すべきとの判断から、理事長（本部長）以下主要幹部で構成する東日本大震災復旧・復興貢献本部を3月29日に設置し、所員の専門性を一つにまとめて支援活動を進めることとしました。

貢献本部では、貢献活動の当面の方針として、三本の柱（①災害廃棄物対策、②地元との協働、③適時適切な情報提供）を設定しました。特に災害廃棄物については、震災1週間後には、所内外の専門家等で構成する「震災対応ネットワーク」を立ち上げ、現場で発生する様々な課題に対して、関連学会とも連携して知のネットワークを活用した支援をスタートさせました。4月1日には、理事長他が環境大臣と面会し、こうした研究所の取組状況を説明し、大臣からは、環境省と連携を密にして環境研究により貢献するよう、要請を受けました。

災害廃棄物については、3月下旬以降、震災対応ネットワークを活用して様々な技術情報を逐次発信するとともに、4月からは廃棄物資源循環学会とも連携して現地専門家派遣を開始し、現場への技術的助言を行う一方、海水を被った廃木材の焼却処理の安全性の確認や津波堆積物の化学性状把握など、緊急的な調査研究を実施しました。また、放射性物質に汚染された廃棄物の処理に関しては、基礎的な知見不足を打開すべく、廃棄物中の放射性物質の挙動等に関する調査研究に着手するとともに、5月からは環境省の「災害廃棄物安全評価検討会」に参画し、得られた知見を速やかに提供していきました。

被害状況が判明するにつれて、他の分野でも地元ニーズに応えるべく可能な貢献活動を模索していきました。宮城県からの協力要請を受けて、津波堆積物からの飛散粉じんの実態調査を行ったのはその一例です。また、化学物質等で培った実測とモデルによる動態解明の手法を放射性物質にもいち早く適用し、例えば、4月に設置された厚生労働省の「水道水における放射性物質対策検討会」に参画して初期の大気シミュレーション結果を提供し、水道水の汚染対策にも活用されました。そのほか、津波による沿岸生態系への影響把握など被災地の環境影響に関する初動的な調査研究を進めました。

こうした取組を支えたのが、これまでの環境研究の知見や国環研ならではのネットワークを活かし、研究面でできる限りの被災地支援をしていこうという、当時からそして現在に至る強い思いでした。ただ、特に初期においては、どのような研究でどのように貢献していくかの道筋が必ずしも自明でなく、研究者がそれぞれ取組を模索している状態でした。そうした状況が所内でも十分共有されていませんでしたし、さらに被災地の方々にとっては研究者の興味本位で調査していると受け止められないか、暫定的な調査結果が風評被害を加速することにならないかといったことも議論になりました。このため、貢献本部の下に事務局的功能を持つ貢献室

を設置することとしました。貢献室では、所内の貢献活動を収集・集約し、必要な調整を行うとともに、国環研のHPに「東日本大震災のページ」を設けて外部へ情報発信していきました。

また、予算を捻出して所内公募研究制度により震災対応型研究を募集し、事前評価を経て採択することで貢献活動を支援するとともに、所内セミナーを複数回開催して具体的な活動情報や現地状況の認識の共有を図りました。

全般的取組	
平成 23 年	
3 月 11 日	東日本大震災 震災 1 週間後に、震災対応ネットワーク（廃棄物・し尿）を立ち上げ、技術情報を逐次発信。現地調査等を通じ現場の課題解決を支援
3 月 29 日	東日本大震災復旧・復興貢献本部を設置
4 月 6 日	東日本大震災復旧・復興貢献室を設置
4 月 13 日	災害廃棄物緊急研究プログラムの立ち上げ
4 月～	所内の情報と認識の共有を進めるため、貢献本部企画セミナー開催
4 月 14 日	第 1 回セミナー「災害廃棄物に関する緊急報告」
5 月 25 日	第 2 回セミナー「被災地調査・災害廃棄物に関する活動報告」
8 月 11 日	第 3 回セミナー「環境中の放射性物質とそれにより汚染された廃棄物に関する研究報告」
4 月 26 日	所内公募型研究「震災対応型研究」の設置。6 課題を採択
成果活用・情報発信	
平成 23 年	
3 月 31 日	国環研HPに「大震災関連ページ」を設け、国環研の取組状況や情報源情報などの情報提供を開始
4 月～	大気シミュレーション結果が厚生労働省の水道水の放射性物質汚染対策検討に活用
5 月～	放射性物質汚染廃棄物処理に関する環境省の「災害廃棄物安全評価検討会」に参画。得られた知見を即時提供
6 月	研究所公開シンポジウム 2011 で緊急報告(6 月 18 日東京, 6 月 25 日京都)

1.2 放射性物質・災害環境研究への初期の取組（平成 23 年初夏～平成 23 年度末）

福島県内外に広がる放射性物質が大きな社会問題となっていき、国でもその対処のための法的枠組みの検討が進められ、8 月末には放射性物質汚染対処特別措置法（以下、「特措法」という）が制定されました。

こうした社会の変化と動きに対応して、国環研においても、7 月から、災害・放射能と環境

に関する研究を一体的に推進しようという構想の検討を本格的に進め、必要な予算・人員の要求を行いました。「災害環境研究」への展開を視野に入れつつ、放射性物質汚染廃棄物の処理と多媒体での放射性物質の環境動態解明を柱に、被災地の汚染回復、環境創造などに貢献しているというものです。その結果、まず、11月末に成立した第3次補正予算により「放射性物質・災害と環境に関する研究」（2億円）が予算化され、企画競争入札を経て環境省からの受託研究を開始することになりました。また、特措法に基づく基本方針（11月11日閣議決定）においても、国環研の取組が位置づけられることとなりました。

これを受け、研究所としての総合力を発揮して対応すべく、貢献本部長（理事長）をリーダーとする「放射性物質・災害環境研究チーム」を設置し、廃棄物関係グループと多媒体での環境動態解明グループを二本柱に、全所的に取組を推進する体制としました。

また、放射性物質に汚染された環境試料等を所内に持ち込んで行う研究が活発化することから、こうした震災放射線研究のための研究環境整備を10月から段階的に進めました。ハード面では震災放射線研究を行うエリアを特定・整備し、特別な管理を行うこととしました。ソフト面では、新たに安全管理のための規程やマニュアルを策定し、震災放射線研究安全委員会により研究計画の審査等を行う体制を整備しました。

廃棄物関係では、災害廃棄物について、7月から10月にかけて環境省が編成する被災自治体巡回チームに参画するとともに、現場自治体や環境省とも連携して仮置場の現場調査を多数行い、火災予防に関する助言指導を精力的に実施しました。また、放射性物質に汚染された廃棄物については、処理処分過程での放射性物質の挙動や制御技術等に関する各種調査研究を緊急的に実施しました。得られた成果は速やかに環境省検討会に提供し、環境省の各種通知に引用・反映されるとともに、特措法に基づく処理基準やガイドライン策定に活用されました。また、特措法全面施行（平成24年1月1日）に先立ち、得られた知見を体系的に整理した技術資料をとりまとめ、12月に公表しました。

一方、環境動態関係では、放射性物質による環境汚染の実態を把握し、動態を解明して将来予測することを目指して、重汚染汚染の福島県東部と軽汚染地域の筑波山・霞ヶ浦流域圏における放射性物質の実態と動きを解明するための環境動態計測、並びに、広域スケールでの大気・陸域・沿岸域における放射性物質の動きを予測する多媒体環境モデリングを統合した研究を開始しました。

2月からは、福島県が設置した環境創造戦略拠点基本構想検討委員会に参画し、福島県環境創造センター（仮称）構想の検討への協力を開始しました。

また、「災害環境研究」の全体像を包括的に整理すべく、2月から若手作業チームを編成して検討を進めました。その成果は、解明・解決すべき環境の課題を分野ごとに整理した「災害環境研究の俯瞰」としてとりまとめ、平成24年4月に公表しています。

	全般的取組	注：【 】内は国等の取組
平成23年 7月～	災害・放射能と環境に関する研究の一体的推進構想について検討開始	

7月～9月	夏季節電要請に環境研究機関として率先して対応。節電対策本部を設置して節電計画を実行するとともに、研究課題の一つとしての取組も実施
7月～10月	災害廃棄物処理に関する環境省被災自治体巡回チームへの参画
8月25日	「東京電力福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気中での挙動に関するシミュレーションの結果について」プレス発表
8月30日	【放射性物質汚染対処特措法の制定・公布】
9月	【平成24年度予算概算要求において、国環研に「放射性物質・災害環境研究センター（仮称）」を設置することを要求】
10月～	震災放射線研究のための基盤整備
11月11日	【特措法基本方針が閣議決定。国環研の名称・取組が明記される】
12月	「放射性物質・災害環境研究チーム」（廃棄物関係グループ、多媒体での動態解明グループ）の設置による全所的な研究推進体制の整備 第3次補正予算による受託研究「放射性物質・災害と環境に関する研究」（2億円）開始
平成24年	
2月18日～	福島県の環境創造戦略拠点基本構想検討委員会に参画、福島県環境創造センター（仮称）構想の検討に協力
2月～	災害環境研究作業チームにより「災害環境研究の俯瞰」の作成。とりまとめ、公表（4月）
主な成果活用・情報発信	
平成23年	
8月	大気シミュレーション結果が、食品中のモニタリング検査計画策定に活用
9月～	特措法に基づく処理基準等（12/14 公布）や、特定廃棄物等の処理方法を具体的に説明する「廃棄物関係ガイドライン」（12/27 公表）の原案作成に協力
12月2日	得られた知見を集約した技術資料「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」（第一版）を公表
平成24年	
1月1日	【放射性物質汚染対処特措法の全面施行】
2月15日	地方環境研究所との交流シンポジウム「災害と環境」開催
3月26日	技術資料「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」（第二版）を公表（第二版追補版：4月16日に公表）

1.3 放射性物質・災害環境研究の展開（平成 24 年度～）

平成 23 年度第 3 次補正予算でスタートした「放射性物質・災害と環境に関する研究」は、24 年度からは本予算で措置されることとなりました。廃棄物関係や多媒体での動態解明に加えて、人への被ばく量調査や生物・生態系への影響評価も研究テーマに加わり、環境省からの受託研究費 7 億円及び運営費交付金 3 億円により、研究展開を図りました。

放射性物質に汚染された廃棄物については、廃棄物中の放射性物質の熱挙動や溶出・吸脱着特性に応じた処理処分技術や管理システムの確立に必要な知見の集積を進めるとともに、得られた知見をもとに環境省関係部署や自治体等への技術的助言を行っています。また、23 年度に策定した技術資料をよりわかりやすくスライド形式で紹介した概要版を 7 月に、その英語版を 11 月にそれぞれ作成、公表するとともに、25 年 1 月には災害・放射能汚染廃棄物等に関する Q & A 集を公表し、国や関係自治体・事業者など各方面で活用されています。

また、多媒体中での放射性物質の環境動態解明については、従来からフィールド調査の対象としていた筑波山からの放射性物質流出状況調査の成果を、環境省の環境回復検討会に提供し、「今後の森林除染のあり方に関する当面の整理について」のとりまとめに活用されました。これは、より効果的・効率的な除染を進めていく上での貢献の一例です。現在は、筑波山よりも汚染レベルの高い福島県下の河川流域も含めて調査を進めています。こうしたフィールド調査を円滑に進めるための現地拠点として、11 月には南相馬市の協力を得て現地実験室を設置しました。

国環研では、これまでも様々な機関と連携して研究を進めるとともに、取組状況や成果の国民への情報発信に努めています。5 月には、環境放射能除染学会と共同で「復旧・復興ワークショップ」を福島市で開催し、6 月には「大震災と環境再生～災害に立ち向かう環境研究の最前線～」をテーマに、研究所の公開シンポジウムを東京と京都で開催しました。また、7 月には、環境放射線に関する研究を行っている主要機関の研究代表者に呼びかけて、情報共有と連携を強化するための連絡会議を開催しました。このほか、研究成果の学会発表をはじめ、研究所ホームページやマスメディアを通じた情報発信を積極的に進めています。

平成 24 年 7 月に閣議決定された「福島復興再生基本方針」においては、国環研の廃棄物研究や環境動態解明研究の取組が明記されるとともに、福島県の福島県環境創造センター（仮称）が国のサポートの下で運営される研究開発拠点として位置づけられました。同センターについては、構想の検討段階から協力を行ってきましたが、10 月にはその基本構想がとりまとめられ、汚染環境の回復と安心して暮らせる環境の創造に向けて、国環研とのさらに強固な連携の下で取組が進められるよう、持続可能な研究体制の構築が求められているところです。

	全般的取組	注：【 】内は国等の取組
平成 24 年 6 月～ 6 月 23 日	平成 24 年度「放射性物質・災害と環境に関する研究」（受託研究費 7 億円，運営費交付金 3 億円）により本格的に研究開始	【原子力規制委員会設置法の成立に伴い、環境基本法等が改正。放射

7月12日	性物質による環境汚染の対処が環境政策の範疇に】 環境放射線研究に関する主要機関の研究代表者に呼びかけ、連絡会議を開催
7月13日	【「福島復興再生基本方針」が閣議決定。国環研の廃棄物研究、動態解明研究が明記されるとともに、福島県の設置する研究開発拠点として、環境創造センター（仮称）が位置づけられる】
8月	【H25 予算概算要求で、放射性物質・災害と環境に関する研究による復興支援のための国環研職員の人員増を要求】
10月	【福島県環境創造センター（仮称）基本構想とりまとめ、公表】
11月	南相馬市にフィールド調査用実験室を設置
主な成果活用・情報発信	
平成 24 年	
5月19日	福島市において、環境放射能除染学会と共催で「復旧・復興ワークショップ」を開催
6月	研究所公開シンポジウム 2012「大震災と環境再生～災害に立ち向かう環境研究の最前線～」開催（6月15日東京、6月22日京都）
7月26日	技術資料「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」をスライド形式でわかりやすく紹介した概要版（日本語版）を公表
9月	筑波山からの放射性物質流出状況調査の成果を、環境省の環境回復検討会に提供し、「今後の森林除染のあり方に関する当面の整理について」のとりまとめに活用
11月14日	「災害と環境」をテーマとした環境研究シンポジウムを13研究機関共同で開催（事務局：国立環境研究所）
11月29日	技術資料「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」概要版（英語版）を公表
12月20日	技術資料「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」(第三版)を公表
平成 25 年	
1月11日	「災害・放射能汚染廃棄物等に関するQ&A集」を公表
2月14日	地方環境研究所との交流シンポジウム開催。放射性物質による環境汚染に対する取組状況を報告
2月18日	放射能汚染ジョイントセミナー「生活環境から放射能汚染を考える」を研究機関、学会、NPO 法人と共催

第2章 津波・地震による災害環境問題への対応

2.1 主要な成果

東北地方太平洋沖地震は津波堆積物を含む災害廃棄物を広域かつ大量にもたらすとともに、人と生物の生息環境も大きく変化させました。災害廃棄物の処理処分に震災直後から取り組むとともに、地震・津波災害に起因する様々な環境変化に対して、環境・健康への影響や生物・生態系への影響を評価する研究を実施し、次のような主要な成果を得ました。

＜災害廃棄物の処理処分にに関する調査研究＞

- ① 震災直後に「震災対応ネットワーク」を立ち上げ、被災地で発生する様々な技術的課題に対応した各種技術レポートを作成・提供し、環境省の通知等にも活用されるなど、現場での災害廃棄物・生活廃棄物対応に多大な貢献を果たしました（2.2.2 参照）。
- ② 海水被り廃木材の焼却処理の安全性確認、津波堆積物の化学性状把握、仮置場での火災発生防止策等の緊急的調査研究、現地調査や技術的助言を精力的に行いました。これらの成果は環境省の通知・指針等にも反映されました（2.2.3 参照）。

＜環境と健康への津波の影響とその定量的把握＞

- ③ 被災直後から継続的に被災地の津波堆積物の大気・環境水への影響調査を行い、化学物質等の環境・健康影響についての情報発信を行っています。
- ④ 津波によって大きな攪乱を受けた後の沿岸・海浜生態系は、津波攪乱前に設置された人工構造物の影響と新たな環境変化の影響を受けており、その再生については継続的な観測が必要なことがわかりました。
- ⑤ 津波により流出した重油、海底堆積物、炎上軽質油に起因する PAH が混合して海底に沈降し、底質環境への影響を今後も今後も注視していく必要があることがわかりました。

2.2 災害廃棄物の処理処分にに関する調査研究活動

2.2.1 はじめに

平成 23 年 3 月に発生した東日本大震災は被災地に大量の災害廃棄物をもたらし、その処理処분이危急の課題となっています。国の集計（平成 25 年 1 月末現在）によると、災害廃棄物の推計量は東北 3 県（岩手・宮城・福島）の沿岸 37 市町村合計で 1,628 万トンで、この数値は、全国で 1 年間に発生する一般廃棄物量（4,536 万トン：平成 22 年度）の約 36%に相当します。その多くは津波により海水を被り、また、津波堆積物（海底から打ち上げられた土砂や泥等）も 3 県で約 1,000 万トンあると推計されています。

国環研（資源循環・廃棄物研究センター）は、資源循環・廃棄物分野における廃棄物の適正処理やリサイクルの問題など多様な課題に総合的に取り組んできました。今般の災害廃棄物の問題にも、これまで培ってきた豊富な知見や専門性、専門家のネットワークを最大限活用し、環境省等とも連携して、被災地における災害廃棄物の適切な処理処分の推進に貢献してきまし

た。具体的には、各種技術レポートの作成・提供、緊急的な調査研究の実施、現地調査や助言指導、国の検討会等への参画など、精力的な活動を行ってきました。これらの調査研究や活動の成果は環境省の各種通知・指針等にも反映されています。これまでの活動・成果の概要を以下に紹介いたします。

2.2.2 震災対応ネットワークによる経験知の集約と被災地への発信

地震や津波により発生した大量かつ多種多様な災害廃棄物は、震災が発生し日が経つにつれて様々な技術的課題が出てきました。しかし、被災地の現場では基礎情報や知見・データ等が絶対的に不足し、自治体等関係者及び環境省がその対応に苦慮していました。

そこで、国環研では、震災1週間後に、全国の大学、国及び地方の研究機関、自治体、関連団体、民間等の知識・技能を有する100名を超える有識者から構成される「震災対応ネットワーク」を立ち上げました。資源循環・廃棄物研究センターが窓口となり、現場で発生する様々な技術的課題に関する環境省等からの照会事項をネットワークに送付して、国環研研究者を含むネットワーク参加者らが持つ知見・情報・データ・コメント等を募り、これらの知見等を集約・整理して国環研で技術レポートとしてとりまとめました。作成した技術レポートは、順次環境省に送付するとともに同省を通じて被災地域自治体等に提供され、現地での課題対応に活用いただきました。

作成・発出した技術レポートは、災害廃棄物・生活廃棄物処理に関する多岐にわたる課題について、平成23年3月下旬から5月までを中心にこれまでに15報を超え（表2.1）、その一部は環境省の事務連絡・通知等にも活用されるなど、現場での災害廃棄物対応に多大な貢献を果たしました。なお、これらの技術レポートは国環研ホームページで公表しております¹⁾。

表 2.1 被災自治体等向けに作成した災害廃棄物等処理に関する技術レポートの例

・水産廃棄物の処理方法について（第二報）（H23.3.27 発出）
・塩分を含んだ廃棄物の処理方法について（第三報）（H23.3.30 発出）
・仮置場の設置と留意事項（第一報）（H23.4.1 発出）
・津波がもたらしたヘドロへの対応について（第一報）（H23.4.1 発出）
・PCB含有廃棄物について（第一報：改訂版）（H23.4.1 発出）
・災害廃棄物の重量容積変換について（第一報）（H23.4.1 発出）
・下水の処理方法について（第一報）（H23.4.5 発出）
・津波堆積物への対応について（第二報）（H23.4.6 発出）
・災害廃棄物の野焼きについて（第一報）（H23.4.12 発出）
・仮置場の可燃性廃棄物の火災予防（第一報）（H23.5.18 発出）
・津波被災地域において浄化槽を撤去する際の汚泥の処理方法について（第一報）（H23.5.30 発出）
・廃石膏ボードの取り扱いについて（H23.6.24 発出）
・災害廃棄物の発生原単位について（第一報）（H23.6.28 発出）
・仮置場の可燃性廃棄物の火災予防（第二報）（H23.9.19 発出）
・仮置場の可燃性廃棄物の火災予防（第二報補遺）（H23.12.22 発出）

2.2.3 現場重視の調査研究による新たな知見の集積と現場への還元

被災地での災害廃棄物の実態が徐々に明らかになるにつれて、これまでの知見ではカバーできない技術的課題への対応が必要となってきました。特に今回の大震災では、大規模かつ広範囲の津波により海水を被ったがれきが大量に発生したこと、津波により海底から大量の土砂や泥（津波堆積物）が陸上に打ち上げられたこと、津波被害により多量の混合廃棄物が発生し分別されないまま仮置場に搬入されて高く山積みされた堆積廃棄物が各地に置かれる状況が長期間続いたことなど、これまでの震災では経験したことのない状況が発生し、これらの災害廃棄物の処理に際して様々な懸念・問題が生じました。

そこで国環研では、震災発生約3週間後の平成23年4月初め頃から、関係学会等とも連携しつつ現地調査を開始して、災害廃棄物の実態把握と並行して各種調査研究を緊急的に実施し、新たな科学的知見を集積してきました。得られた成果は環境省や被災自治体に提供し、各種指針や通知等に反映されるとともに、現場での適正処理・管理に活用されました。ここでは、それらの取組・成果事例をいくつかご紹介いたします。

(1) 海水被り廃木材の焼却処理の安全性の確認²⁾

被災地で発生した廃棄物の多くは木くず等の可燃性廃棄物で、通常は焼却処理が行われます。焼却処理は木くずなどの災害廃棄物を減量化するために有効な方法であり、また、災害廃棄物には腐敗物や汚泥も入っていることから、衛生上の観点（病原菌や感染性生物の無害化や有機物の分解）からも重要な処理方法ですが、今回の震災廃棄物は津波（海水）を被っているという点がこれまでにない特徴であり、この影響を十分留意した上で処理を行う必要があります。木材中の塩分（塩素濃度）を測定してみると、多くの木材は0.1%前後でしたが、流木の枝や合板で3%を示すものがありました（ちなみに海水中の塩素濃度は約1.9%）。このような津波を被った塩分の高い（塩素を多く含む）木材等の廃棄物を焼却する場合に、塩素に由来する有害物質である塩化水素やダイオキシン類が多く発生しないのか、また、排ガスの処理工程において、それら有害物質が適切に処理できるのかという点についての強い懸念がありました。

そこで、震災3週間後の平成23年4月初旬に被災地の現地調査を行い、自治体等関係者の許可を得て様々な廃木材（生木、柱や梁、合板といった木くず）を採取して（**図 2.1**）、所内の熱処理実験プラントを用いてそれらを試験焼却し、ダイオキシン類や塩化水素の挙動を調査しました。この熱処理実験プラントは実際の産業廃棄物の焼却炉を模して設計されたものです。



図 2.5 技術レポート「仮置場の可燃性廃棄物の火災予防（第二報）」
（国立環境研究所取り纏め：平成23年9月19日）¹²⁾抜粋

試験焼却量は1時間あたり2～3kgで、燃焼炉（一次・二次燃焼炉）における燃焼温度や二次燃焼炉におけるガス滞留時間は廃棄物処理法に基づく廃棄物焼却施設の構造基準や維持管理基準にしたがって設定しています。排ガスや灰の試料採取は色々な箇所で行えるので、有害物質の低減や物質収支の詳細な解析が可能です。試験では、採取した廃木材を一旦破碎してペレット状に成形して燃焼試験に用いました（プラントの構成は図2.2、燃焼試験の様子は図2.3参照）。試験の結果、海水被り廃木材の焼却時の各処理過程と排ガス中の塩化水素やダイオキシン類濃度は通常の都市ごみの焼却と同等レベル以下であり、燃焼温度の管理をして、従来の排ガス処理をすれば、安全に焼却処理できることが実証的に確認できました。これは実験プラントでの結果ですが、自治体の協力のもと、実際の焼却施設での実証試験も実施し、実施設でも焼却等での熱処理減容化の進展に貢献することができました。

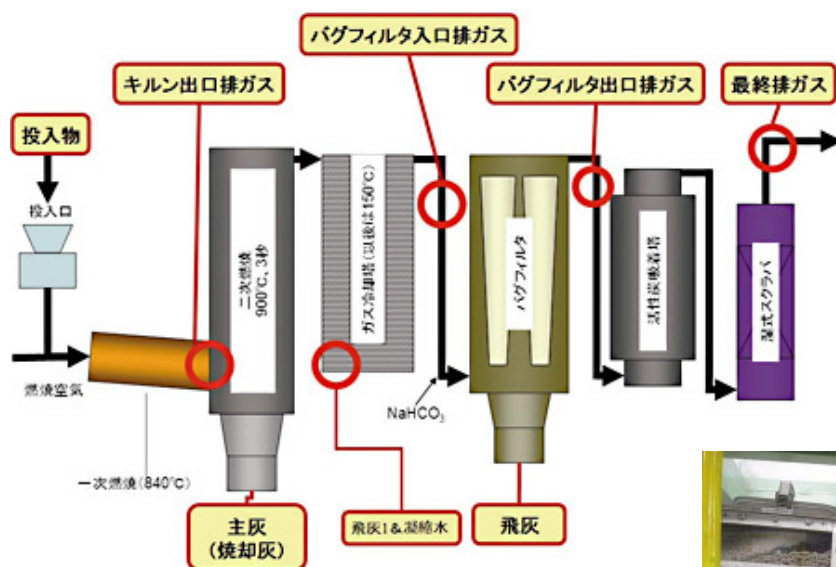


図 2.2 熱処理プラントの概略図
(排ガスや灰試料の採取ポイントを明示)

図 2.3 燃焼試験の様子
(試料投入ピットと一次燃焼炉
[ロータリーキルン])



(2) 津波堆積物の化学性状の把握とその汚染可能性分類手法の提案^{3)~11)}

津波堆積物の処理は災害が来きとともに被災地における大きな課題となっています。津波堆積物は被災した事業所等に由来した有害物質を含んでいる可能性もあり、適切な有効利用や処理処分を行っていくためにはその化学性状を把握することが必要です。

国環研では、廃棄物資源循環学会等と連携して、被災地各地の津波堆積物の化学性状調査を行うとともに、地域ごとの津波堆積物の汚染可能性を分類（ゾーニング）する手法の検討を行いました。この成果は廃棄物資源循環学会「津波堆積物処理指針（案）」や環境省「東日本大震災津波堆積物処理指針」の策定に活かされ、被災地各地における津波堆積物の安全かつ効率的な処理処分・再生利用に活用されています。

a) 試料採取と化学性状分析

被災地各地（約 60 地点）で津波堆積物の試料採取を行い、油分、重金属類、残留性有機汚染物質（ダイオキシン類、PCB、POPs 農薬類等）の分析を行いました。その結果、一部の地点で油分や重金属類が基準値等を超える濃度で検出されましたが、その他の多くの地点では特段の高濃度汚染は確認されませんでした。

b) 津波堆積物の化学性状と土地利用・施設立地

地理情報システム（GIS）を用いて津波浸水域の土地利用や施設立地状況を整理し、津波堆積物の化学性状との関係を考察しました。油分や重金属類が高濃度で検出された地点はどれも工場地区や検出された物質に関連する施設（廃油処理施設や化学工業事業所）の付近であることがわかりました。一方、施設が立地しない地域では特段の汚染が見つかっていないこともわかりました。この結果より、大きく被災した施設周辺では詳細な分析調査による汚染有無の把握が必要と考えられましたが、施設が立地しない地域（特に住宅地や農地）については津波堆積物が有害物質により高濃度に汚染している可能性は低いと考えられました。

c) 汚染可能性の分類(ゾーニング)手法の検討

詳細な化学分析は多くの費用、労力、時間を要するため、多くの地点について実施することは容易ではありません。また、今回の調査結果から基準値等を超える汚染場所は大きく被災した事業所等の周辺に限られると考えられ、必ずしも全ての地域を詳細に分析調査する必要はないと考えられました。

そこで、化学性状調査結果と土地利用・関連施設立地との関係の考察に基づいて、地域ごとに津波堆積物の汚染可能性レベルを分類（ゾーニング）する手法の枠組み（案）を提示しました（図 2.4）。

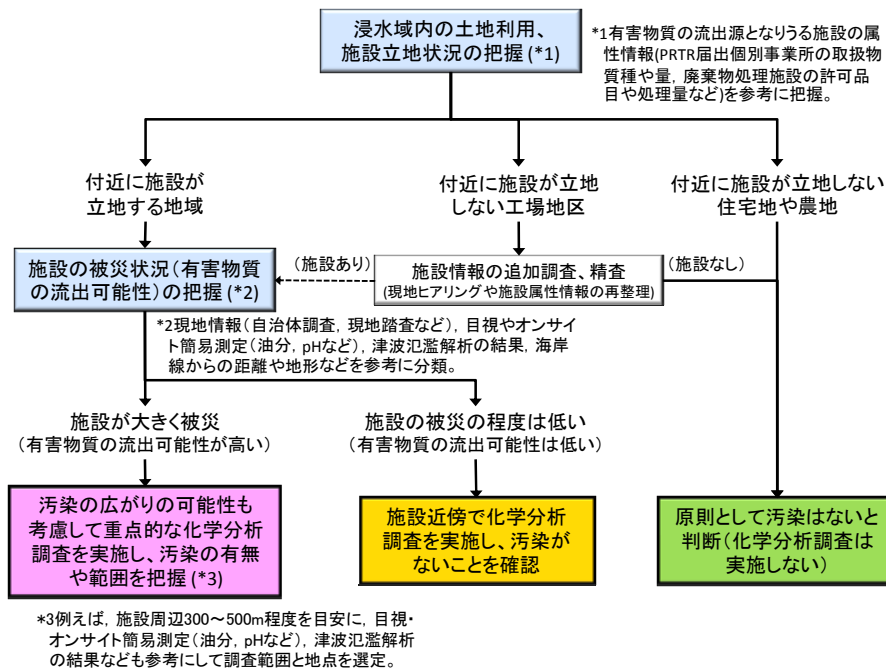


図 2.4 津波堆積物の化学性状把握に向けたゾーニングの流れ(案)

有害物質の排出源となりうる施設の立地有無や土地利用状況、施設の被災状況の把握などに基づいて地域ごとに汚染可能性のレベルを分類し、それに応じて化学分析調査の実施有無や頻度を変えることで、分析調査のための限られた費用や労力を有効に活用して効率的な化学性状調査が可能になると考えられます。

このようなゾーニングを行うには、施設の立地状況や化学物質の取り扱い状況に関する情報が必要です。日本ではそれらの情報はある程度存在していますが、将来に向けた備えとして情報の集約・整理や補強を行い、必要な時には速やかに利用できるように準備しておく必要があると考えられます。

(3) 仮置場における火災発生防止策の提案と指導^{12~14)}

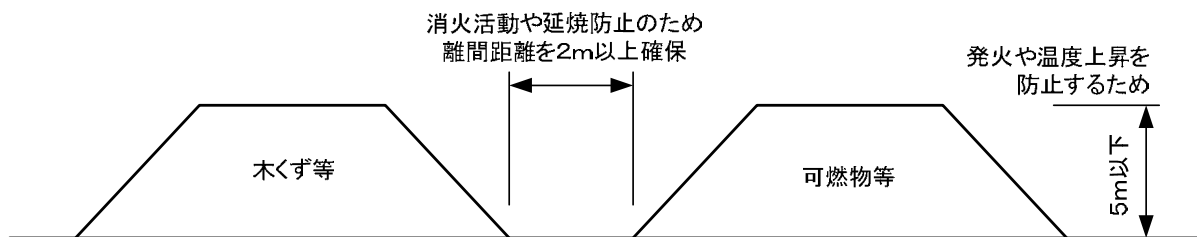
動線確保や復旧作業に伴って被災地では災害廃棄物の仮置場が被災各地に設置されました。例えば岩手・宮城・福島の被災3県の沿岸市町村では一時最大300カ所を超える仮置場が設置されました（その後処理の進捗に伴い徐々に解消され、平成25年1月末時点で約200カ所まで減少）。集積された災害廃棄物は混合廃棄物状態である場合が多く、仮置場に十分な広さの面積を確保できない地区では一時20mを超える集積高さとなっている仮置場もありました。災害廃棄物の仮置場では、今日に至るまで数十カ所で火災が確認されており、報告されていない小火も合わせると、さらに多くの仮置場で火災が発生したものと考えられます。平成23年度は火災が5月頃から始まり、8~10月にピークを迎えて、冬季になるにしたがってその件数は減少傾向でした。平成24年度は多くの仮置場で火災予防対策が講じられ、火災発生件数は少なくなりましたが、夏から秋を中心に、そして冬になっても火災が散見されました。

国環研では、これまで実施してきた産業廃棄物の不法投棄や不適正処分場における無炎燃焼火災事例調査とメカニズム推定に関する経験・知見を最大限活用しながら、現場自治体や環境省等からの協力要請を受けて災害廃棄物の様々な火災現場を調査して事例を蓄積するとともに、被災各地の100カ所を超える仮置場に足を運び、現地調査と技術的助言指導等を精力的に実施してきました。これらの活動を通じて、仮置場の可燃性廃棄物の火災予防対策に関する技術レポートを数次にわたり策定・改訂し、環境省に提供するとともに研究所ホームページに掲載しました。これらの技術レポートは、環境省が発出する自治体向け事務連絡に反映され、関係自治体・処理事業者・環境省現地支援チーム等多数の関係者に活用され、仮置場での火災防止に貢献しました。これらの知見や活動は、除染現場の仮置場管理にも活用しています。ここでは、これまでの活動・経験・知見を通じて得られた、仮置場の可燃性廃棄物の火災防止のための維持管理方策のポイントを紹介します（**図 2.5**）

- 仮置場に積み上げられる可燃性廃棄物は、高さ5メートル以下、一山あたりの設置面積を200平方メートル以下にする。また、積み上げられる山と山との離間距離は2メートル以上とすること。

 - 5メートルを超過すると、内部の発熱速度 > 表面からの放熱速度となり、蓄熱が促進される危険性があるため。
 - 堆積高さ、設置面積、離間距離を適切に管理することで、火災発生時の消火活動が容易になるため。
- 積み上げられた山の上で作業する重機の活動範囲を日単位で変更すること(毎日同じ場所に乘らない)。
- 数週間に1度は仮置場の堆積物の切り返しを行い、積み上げたままの状態では長期放置しないようにすること。
- ガスボンベ、ライター、灯油缶、バイク等の燃料を含む危険物や、電化製品、バッテリー、電池等の火花を散らす廃棄物の混在を避ける。また、これらを含む可能性のある家電・電子機器等の保管場所と可燃性廃棄物を近接させない。
- 降雨が繰り返されることによって、廃棄物層内の温度が上昇することが懸念されるため、降雨が多い時期には特に注意が必要。
- 積み上げられた堆積廃棄物の深層温度は、気温よりも1～2か月遅れで上昇することから、8月を過ぎても少なくとも10月下旬程度までは注意が必要である。
- 火災予防のモニタリング

 - 最低でも1週間に1度程度は仮置場の山を巡回視察すること。
 - 表層から1メートル程度の深さの温度が摂氏75度を超過していたら危険信号
 - 表層から1メートル程度の深さの一酸化炭素濃度が50 ppmvを超過していたら危険信号
 - 堆積物から出てくる水蒸気が芳香系の揮発臭がある場合は危険信号
 - モニタリングは法曹部、小段部分を重点的に調査すること。
- 散水による火災防止効果を過度に期待せず、蓄熱しない環境(高さ制限等)や危険物の混入を避ける対策を実施すること。



理想的な仮置場の廃棄物堆積状況

図 2.5 技術レポート「仮置場の可燃性廃棄物の火災予防（第二報）」
 (国立環境研究所取り纏め：平成 23 年 9 月 19 日) ¹²⁾ 抜粋

2.2.4 災害廃棄物に関する今後の取組

(1) 現下の災害廃棄物処理への継続的な貢献

災害廃棄物については、平成 25 年度中の処理完了に向けて、関係自治体や国等の取組により順次処理が進められています。国環研としては引き続き、残された仮置場での火災予防対応について必要な現地調査や行政支援を行うとともに、解体や処理作業時における石綿の適正管理手法の確立に関する研究などを実施します。また、災害廃棄物処理残渣の復興資材としてのリサイクルが課題になっています。再生利用時における環境安全性評価手法を確立し適用することで、安全かつ効率的な災害廃棄物の利活用の促進に貢献していきます。

(2) 将来の大規模災害対策に向けた貢献

今後、東海・東南海地震や首都圏の直下型地震などによる大規模災害の発生が懸念されています。将来の大規模災害に備えて、今回の経験に関する記録を残し、体系的に整理しておくことは非常に重要と考えます。災害マネジメントシステムの構築の観点で考えると、今回の大震災の教訓を可能な限り新たなルールやマニュアル、レポートとして文書化・電子化し、「形式知」として残しておく必要があります。環境省では現在、平成10年に策定された「震災廃棄物対策指針」の改訂が進められていますが、国環研としても、関係機関と連携しながらこれらの「形式知」の体系化への取組に貢献したいと考えています。

また、今回の東日本大震災において、阪神・淡路大震災の前例が必ずしも参考にならなかったように、次に経験する大規模災害は全く異なる様相を見せ、東日本大震災での経験・知見では適切に対処できない事態に陥る可能性もあります。その際に大切になるのが、経験則に基づく「暗黙知」です。暗黙知は経験に裏付けられた人々の能力に依存することから、今回の震災対応を通じて様々な主体の人々が得た多くの経験・知識・能力を継承していく仕組みづくりが重要となります。

そして、次の災害時には、それらの形式知と暗黙知を「実践知」として融合させ、状況に応じて柔軟かつ機動的に対応できるマネジメント力を備えたシステムづくりが必要になると考えられます。このような問題認識のもとで、災害廃棄物を切り口とした災害時マネジメントシステムの実践的研究の展開も模索していきたいと思えます。

2.3 環境と健康への津波の影響とその定量的把握

2.3.1 津波堆積物による大気・環境水への影響調査

(1) 化学物質などによる長期的環境・健康影響の可能性

東北地方太平洋沖地震直後の津波被災地では、肺炎などの健康被害が心配されました。被災地には津波堆積物が散乱しましたが、その中には海底に沈んでいた化学物質や、津波によってまき散らされた化学物質などが含まれていたと考えられます。この津波堆積物が乾燥して風に舞うと、人々が吸いこむことになります。また、被災地では懸命な復興作業が続けられていますが、復興作業の過程では、震災がれきの撤去、一次仮置き、二次処理（仕分け、焼却処理）などが行われていることから、それぞれの過程における環境影響について調査しておく必要があります。国環研では、被災後から現在に至るまで、継続的に被災地の大気や水などを捕集し続け、その化学成分や毒性を測定しています。

(2) 屋外大気環境と避難所内空気環境

気仙沼市2地点、南三陸町1地点と石巻市3地点の避難所内（平成23年8月解散まで）とその近くで、震災発生直後から平成23年度末まで調査を行いました。避難所内では、室内粉じん濃度を測定しました。また、避難所内のハウスダスト（ほこり）の採取を行い、重金属などの分析を行いました。避難所の近くでは、大気捕集も実施しました。捕集した大気に関しては、粉じん濃度、重金属測定および炭素組成分析を行いました。

避難所内室内粉じん（ほこり）量は調査開始時点の5月に高く、その後減少しました。避難所の清掃による効果に加え、屋外の大気粉じん減少の効果も影響していると考えられます。すべて、健康被害を引き起こす可能性は低いと考えられました。この結果に基づいて、避難所内で使用する適切なマスクの選定について助言を行いました。

室内粉じんの性状は避難所によって異なり、避難所の設置条件や利用状況に影響されることが考えられます。鉛やカドミウムなどの高い地点がありました。震災の影響ではなく、避難所内の塗装はく離片由来である可能性が示唆されています。居住用に設計されていない建物を避難所に使用することの問題点などが見えてきました。

大気粉じん量はほぼ平常通りでした。粒径の小さい粉じんが多く観測されており、発生源から遠い地点にも粉じんが到達している可能性があります。土壌（津波堆積物を含む）や海塩由来の元素が多く検出されただけでなく、時間の経過とともに減少している（図 2.6）ことから、震災直後には巻き上げられた土壌（津波堆積物）が飛散しており、がれきの撤去とともに大気中の濃度が減少したものと思われます。大気中の有害重金属濃度はいずれも環境基準値以下でした。また元素状炭素（EC）と有機性炭素（OC）の比率を測定した結果、ECの寄与が大きく、自動車排気（トラックなど）の影響や燃焼由来の成分の影響が示唆される地点もありました。

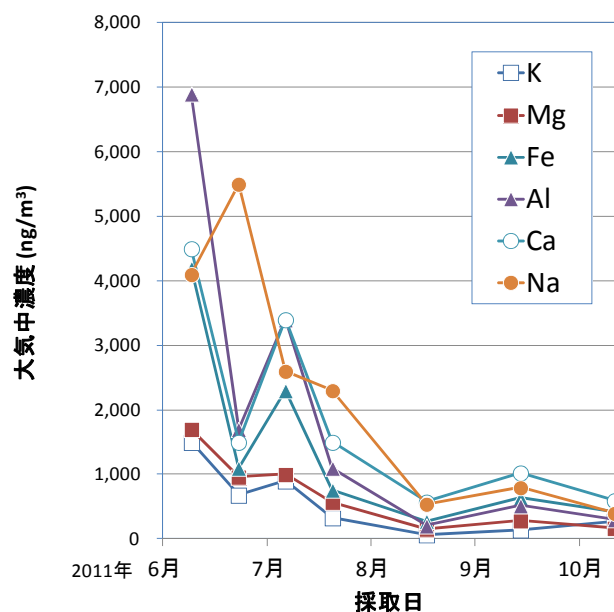


図 2.6 大気浮遊粉じん中の無機元素濃度の経時的推移（石巻市 B 地点）

大気の生物影響試験（バイオアッセイ）では、「生体異物センサー」と呼ばれる AhR 及び CAR の二種の受容体との結合活性を調べました（図 2.7）。これら受容体結合活性は、薬物代謝酵素遺伝子の転写活性化を促し、免疫抑制、発がん、催奇形性など様々な毒性影響を引き起こすことが懸念される汚染物質の指標です。空気体積当たりの AhR 活性は気仙沼と石巻市 1 地点が高い傾向を示したのに対し、CAR 活性は 5 地点ともほとんど差は認められませんでした。粉じん重量当たりの AhR 活性は、震災廃棄物を積載したトラックが頻繁に往来する気仙沼の採取地点

と、比較的付近の自動車の往来が多い石巻市1地点の1調査地点が比較的高い傾向を示しました。いずれも復興に伴う自動車排ガス中の多環芳香族炭化水素類（PAHs）などの影響を受けたものと推測され、津波堆積物の飛散の影響は大きくないと考えられました。

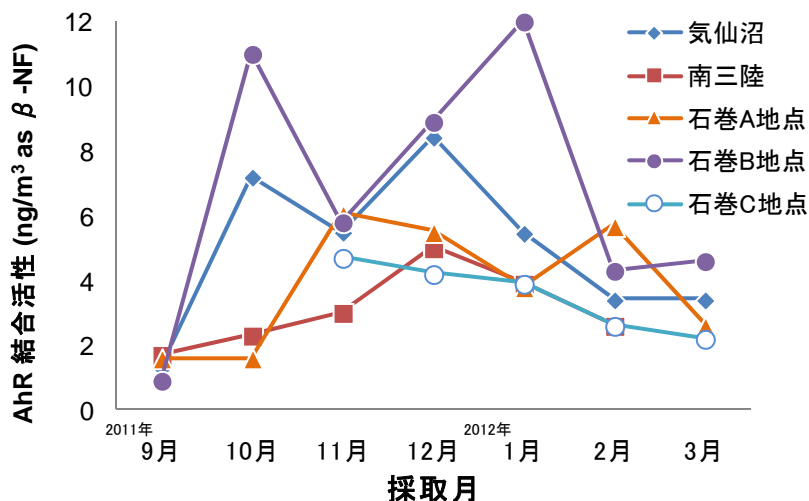


図 2.7 宮城県内 5 地点の大気浮遊粉じんの AhR 結合活性

(3) 震災廃棄物仮置き場や中間処理場周辺の環境

平成 24 年 4 月からは、石巻市内の復旧・復興過程における津波汚泥の巻き上げや災害廃棄物の焼却などによる大気粉じんの動態を調査する目的で、震災廃棄物の分別・焼却施設が設置された雲雀野を基点に、複数の調査地点（二次処理場、住宅地、対照地）を設定して大気試料の捕集を行っています。また、石巻市、気仙沼市の震災がれき仮置き場周辺の環境水についても、平成 23 年 7 月から平成 24 年 11 月まで調査しました。仮置き場からの浸出水が流れ込む環境水からは、多環芳香族炭化水素類やプラスチック可塑剤、界面活性剤が検出されました。バイオアッセイを用いた環境調査を定期的実施したところ（図 2.8）、石巻市の場合、AhR 活性及び CAR 活性は調査開始時の平成 23 年 7 月でもっとも高く、9-10 月まで順次減少傾向にあり、その後 12 月までは増加傾向を示し、その後平成 24 年 9 月まではほぼ同程度の活性で推移しました。一方、気仙沼市では、調査を開始した平成 23 年 9 月は、仮置き場からの AhR 活性物質の流出は認められませんでした。3 月以降の排水路環境水の活性は、明らかに仮置き場からの流出が認められました。ここでは 3 月頃から可燃物廃棄物の分別作業が進められ、分別された大量の津波汚泥が仮置き場に土壘状に堆積されるようになり、そこからの浸出水が排水に流入したものと推測されます。CAR 活性物質についても同様に分別された津波汚泥の堆積の影響が考えられます。

石巻市内の被災住居内から採取した津波堆積物の活性について、株化正常ヒト気道上皮細胞を用いて試験したところ、細胞傷害性は強くはありませんが、炎症反応に関わる接着分子（ICAM-1）やサイトカイン等の炎症性タンパクの発現を顕著に誘導すること、その活性は対照とした国環研内の土よりも強いことが明らかになりました（図 2.9）。

また、津波堆積物から水に溶出する成分のみを用いた検討においても、炎症性タンパクの発

現亢進活性が観察されています。これに対し、有機溶媒抽出物は、いずれも細胞傷害性を認めず、炎症性タンパクの発現も一部の試料で増加傾向が観察されただけでした。これらのことから、石巻市内の津波堆積物は一般の土壌に比べ、気道上皮細胞の炎症性タンパクを誘導する活性が強く、その活性には主に水に溶ける成分に由来する可能性が考えられます。

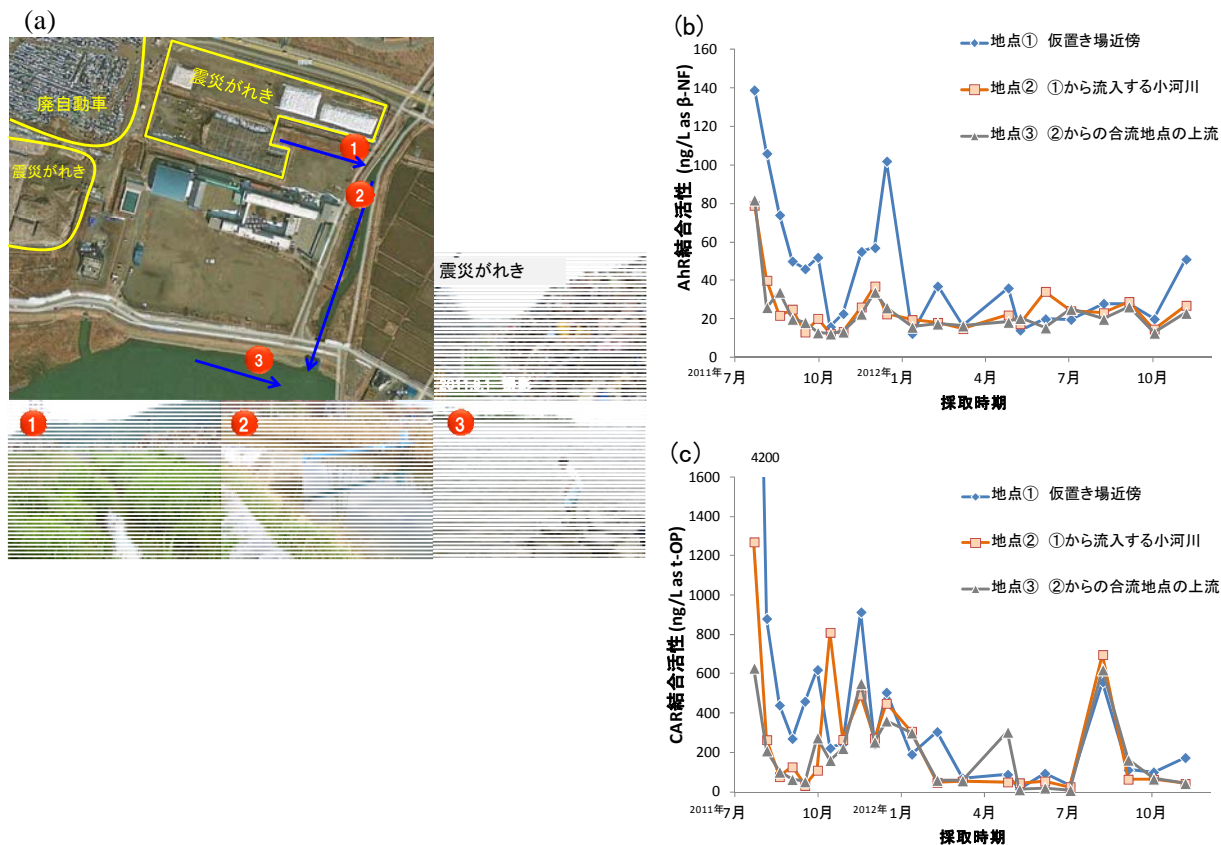


図 2.8 石巻市内の震災がれき仮置き場周辺の環境水における受容体結合活性の推移
(a) 環境水の採取地点 (b)AhR 結合活性 (c)CAR 結合活性

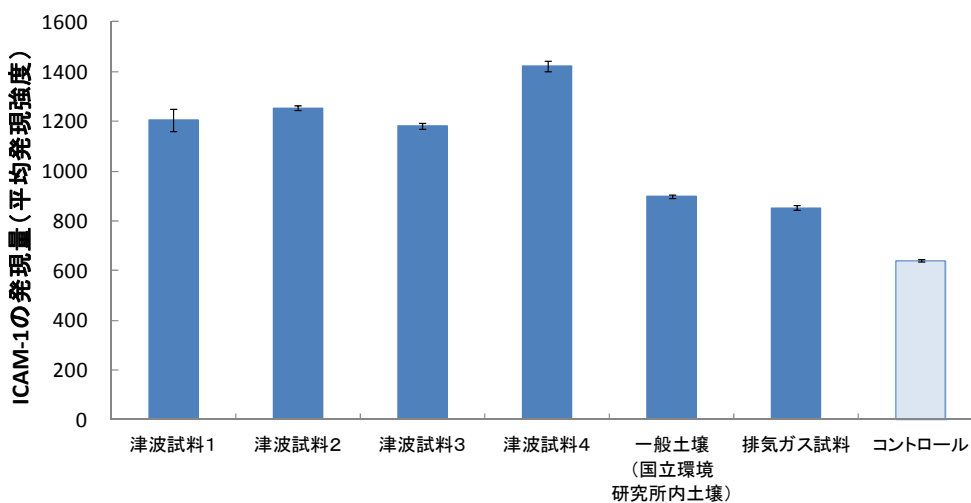


図 2.9 石巻市内の津波堆積物試料および一般土壌（つくば市国立環境研究所内）の 24 時間曝露がヒト気道上皮細胞（BEAS-2B）の ICAM-1 の発現に及ぼす影響

石巻市内の高校における微生物調査では、捕獲したイエバエ中からサルモネラおよび緑膿菌が検出されましたが、頻度・量ともに多くはありませんでした。また、学校裏の仮置き場に近づくにつれ、クラドスポリウムなどの真菌類が増加する傾向が見られました。いずれも校舎内の濃度は、建築学会による設計・維持管理規準以下で、秋季にはハエの発生は沈静化しました。

(4) 屋外大気環境の経時的調査の継続について

平成 24 年 4 月以降、震災廃棄物の分別・焼却施設が設置された二次処理場を基点に複数の調査地点を設定して大気調査を継続しています。大気中の粉塵濃度は二次処理場内で最も高く、次いでそこから北北西へ 2.5 km 離れた住宅地周辺となっています。二次処理場では分別作業が本格化し、また焼却炉が完成した 8 月以降、高濃度の粉塵濃度が観測されているため、周辺環境での調査を引き続き行っていきます。

石巻市内の調査は、震災からの復興過程での環境汚染や健康被害がないかを調べるため、今後も継続して行っていきます。今回の調査を通じて得られた知識が、今後の復興と将来の災害時の対策に役立てられればと願っています。

2.3.2 大津波による沿岸・海浜生態系の攪乱と回復について

(1) はじめに

海岸域は、砂浜海岸、岩礁帯、干潟や塩性湿地など、狭い空間スケール内に多様な生息環境が隣接しているため、高い生物多様性を有しています。東日本大震災に伴う大津波は、東北地方沿岸域の生態系を広域かつ大規模に攪乱しました。しかし、巨大津波は発生頻度が非常に低いため、その影響を調べた研究は、ほとんどありません。津波による生態系影響に係る知見は、2004 年に発生したスマトラ沖津波以降に蓄積され始めた程度であり、現地観測に基づく影響評価事例は多くありません^{13~16)}。

国環研では、東北地方の海岸砂丘植生および干潟の底生生物相に関する調査を震災前から行っており、津波直後から生態系への影響および回復メカニズムの解明に向けて、継続的に現地調査を実施しています。日本沿岸の生物相や生息環境に津波がもたらした影響を調べることで、攪乱の生態影響を推定するための非常に重要な基礎情報を得ることが出来ます。この節では、砂浜海岸に発達する海浜植生と汽水域に発達する潟湖干潟を例に、津波がもたらした生態系攪乱に関する研究成果を紹介します。

(2) 津波による海岸砂丘植生への生態影響

植生への影響調査は、青森県南部から岩手県北部にかけての、護岸の設置状況や海浜植物群落の発達度合いが異なる 4 つの海岸で行いました (図 2.10)。津波前の調査は 2003 年 8 月に行い、調査域内に特徴的な植生のタイプを抽出する目的で、任意で設定した調査方形区内 (草本植生は 1 m²、低木植生は 6 m² 程度) に出現する各種の被度、すなわち植被率 (+~5 までの 6 段階の階級で示す) を計測しました。調査範囲は波打ち際から海岸マツ林の前面まで (50-100 m 程度) としました。津波後の調査は 2011 年 8 月に、過去と同一の調査区で実施しました。岩手県中南部から宮城県にかけての海岸では、地盤沈下に伴い砂浜自体が消失してしまった場所が多いのですが、航空写真を判読した結果、本研究を行った 4 海岸では地形への影響はそれほど

見られませんでした（図 2.10）。

大須賀海岸を除く 3 海岸では、大規模な緑地の消失が見られました。一般に、東北地方の海岸砂丘には、波打ち際から内陸へ向かってほぼ一定の配列で植生が成立しています。津波前後で植生の比較を行った結果、ハマニンニク、コウボウムギやハマニガナなど、特に海岸砂丘前面に生育する植物が津波による砂の持ち去りの影響を受け、減少していました。人工構造物が無く、海浜植物群落が非常に良く発達していた大須賀海岸では、津波の前後で種組成に大きな変化はありませんでした。一方、海岸堤防のある 3 海岸では、津波後にヘラオオバコ、オオマトヨイグサ、ヨモギやエノコログサといった人為改変地で良くみられる非海浜性植物が侵入し、種組成が大きく変化していました（図 2.11）。人工構造物が無く自然が良く残された砂浜海岸では海浜植物が海岸全体に密に生育しているため、砂の持ち去りや堆砂に対する耐性が高いこと、また植生が破壊された場合にも、周辺に残存個体群が存在するためその回復が比較的早いことが示唆されます。一方、海岸堤防等の海岸整備がされている海岸では、海浜植生の分布が堤防の海側に限定され、また、植生もまばらで裸地も多かったため、砂の持ち去りへの物理的耐性が低く、津波によって多くの植生が流失したと考えられます。これらの海岸では、津波により広大な裸地（空白の生息地）が生じ、津波で内陸から運ばれてきた種子が侵入・生育したため、

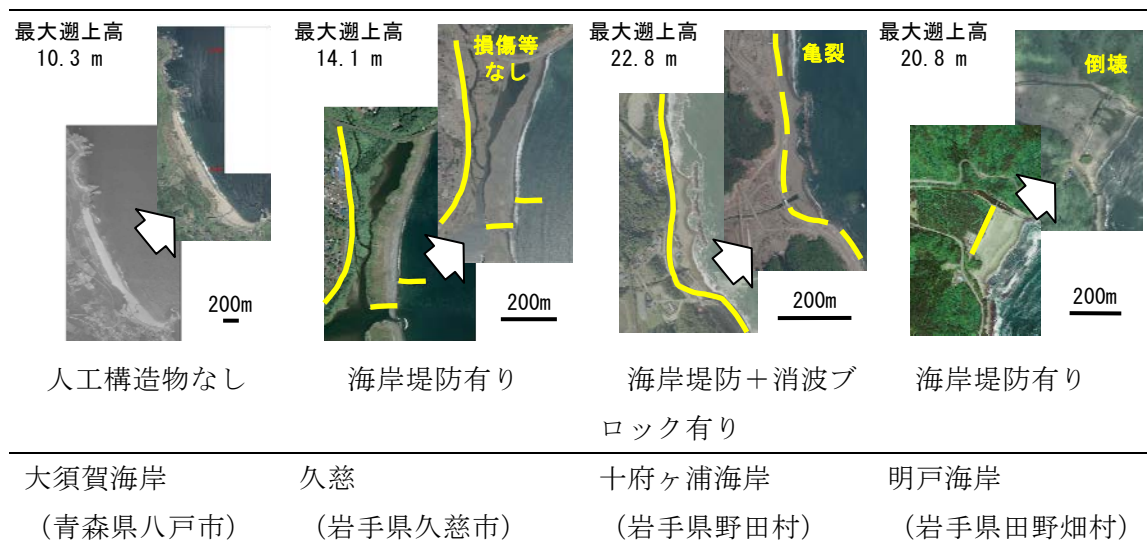


図 2.10 各調査海岸の津波前後での地形および緑地の変化（黄線は海岸堤防）

一時的な非海浜性植物の優占現象が引き起こされました¹⁷⁾。スマトラ沖津波の事例でも、人為的影響の強い海岸、すなわち観光客による踏圧が強く、海岸整備が進むリゾート海岸において、より多くの非海浜性植物が侵入する傾向が見られたことから¹⁸⁾、津波後における植生の初期動態は気候帯や種構成に関わらず共通であることが示唆されます。つまり、津波により海浜植生が流失すると、陸域から侵入した非海浜性植物が生育し、一時的に砂浜の植生が大きく変化します。このような現象は、人為攪乱で海浜植物群落が貧弱化した海岸において、より顕著であることが示唆されており、今後さらに検証が必要です。

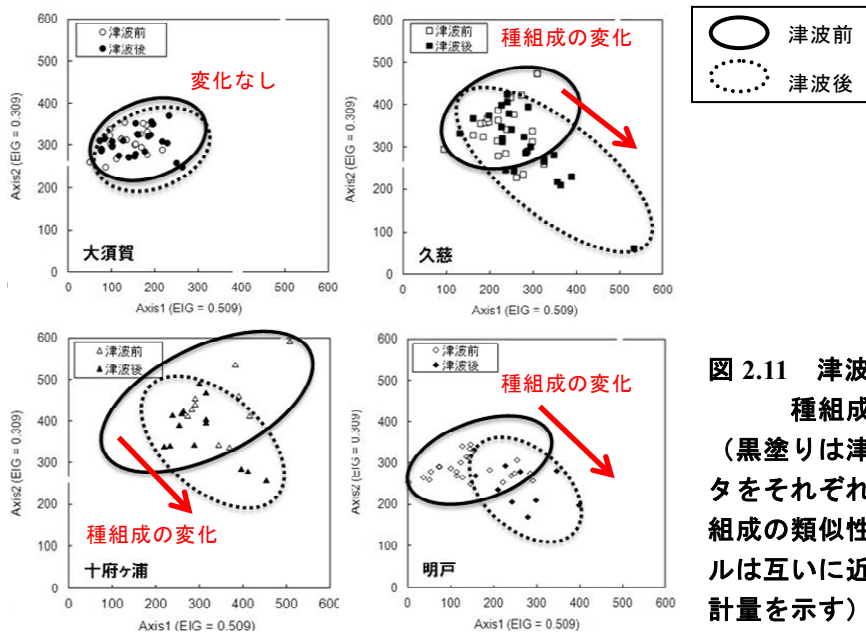


図 2.11 津波がもたらした海岸砂丘植生の種組成変化

(黒塗りは津波前、白抜きは津波後のデータをそれぞれ示す。プロット間の距離は種組成の類似性を示し、類似性の高いサンプルは互いに近い位置に配置される。2 軸は統計量を示す)

(3) 津波による干潟生態系への影響

蒲生潟は、宮城県の仙台市北部を流れる七北田川の旧河道部に袋状に形成された、奥行き約 800m、幅約 250m の汽水性潟湖です (図 2.12)。震災時に、仙台市沿岸部は 7m を超える高さの津波に襲われました。潟の西側に設置されていた防潮堤 (高さ約 4m) は数カ所で破断・倒壊しました。津波により蒲生潟の海側砂嘴はほぼ流失しましたが、震災後 2 ヶ月で漂砂が堆積し、6 月には袋状の潟湖地形が回復しました。しかし、潟奥部海側のかつて潟湖であった一帯は漂砂で埋まり、陸地へと変化しました。また、潟周辺に密生していたヨシはそのほとんどが流され、裸地干潟となりました。流失を免れたヨシも一部に残っていますが、草丈の小型化や密度の低下が認められています。

津波により、蒲生潟の環境はどのように変化したのでしょうか。津波前の蒲生潟では有機汚濁が進行しており、潟中央部～奥部の広範囲に軟泥 (ヘドロ) が厚く堆積していました。しかし、軟泥は津波で持ち去られ、漂砂が海から流入・堆積したため、底質は潟全域で著しく砂質化しました¹⁹⁾。2011 年 4 月～8 月に、二枚貝やゴカイ、ヨコエビといった底生動物 (ベントス) の分布調査を行った結果、2004 年以降に確認された 79 種のうち 47 種が絶滅に近い状態であると判定されました¹⁹⁾。一方、一部のゴカイ類とヨコエビ類は、潟全域で生息密度が著しく増加していました。彼らは、津波で生じた空白地、すなわち他のベントスが生息していない底土、に真っ先に定着し、急速に個体群を回復したと考えられます。また、底生動物の生息にとって不適なヘドロが流失し、底質環境が著しく改善したことも、これらの種の爆発的増殖を促した要因の一つと考えられます。攪乱後に特定の種が爆発的に増殖する現象は、油流出事故後の沿岸域などで報告されていますが²⁰⁾、津波後の干潟でも同様の現象が生じていることを確認出来ました。

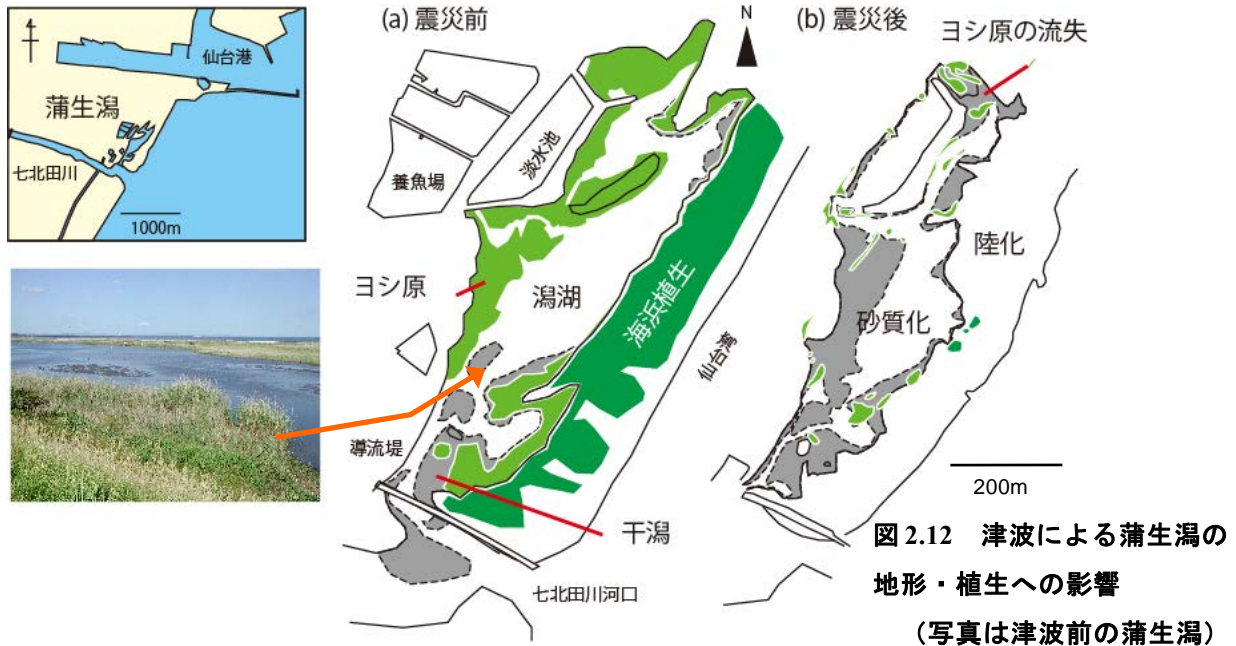


図 2.12 津波による蒲生潟の地形・植生への影響
(写真は津波前の蒲生潟)

2012年の春には、絶滅状態にあった二枚貝の新規加入が多数確認されました。隣接水域に残っていた親個体群から、潮の流れに乗って浮遊幼生が運ばれてきたと考えられます。一方、一部の種では2012年夏の時点でも生息が確認されていません。このように、本研究により津波後の個体群回復速度には底生動物種間で大きな違いがあることが明らかになりましたが、これにはそれぞれの種が有する生活史の違いなど、様々な要因が関与していると考えています。現在、蒲生潟は生態系回復の初期段階にあり、今後時間が経つにつれ、底生動物の種数や個体数は徐々に回復していくと予想しています。しかし、そのためには、蒲生潟という生息場所とその環境が、長期的に安定して維持されなくてはなりません。

(4) 被災地の沿岸・海岸生態系回復に向けた課題

津波による攪乱を受けた沿岸域は、今後、津波前の状態へと戻っていくのでしょうか。それとも、生育・生息環境の変化により津波前とは大きく異なる姿へと変貌を遂げてしまうのでしょうか。現地調査の結果、津波による環境改変が大きい海岸では、非海浜性の植物種が侵入・優占していることがわかりました。しかし、非海浜性の植物にとって海岸は不適な生育場所であるため、彼らは本来の生育地とは違う場所で一時的に優占しているにすぎないと考えられます。一般に、海浜植物の種子は海流に乗って広域に分散します²¹⁾。また、干潟に生きる底生動物の多くは、生活史の一時期を浮遊幼生として過ごします。そのため、ある地域の個体群が消滅しても、他の生育・生息地からの種子や浮遊幼生の供給が保たれている限り、個体群は徐々に回復に向かうと考えられます。被災地の生物群集が回復するためには、新規加入個体の供給源となりうる個体群の保全が重要な鍵となるでしょう。また、個体群の回復が極めて遅い種一ひとたび個体群が消滅すると回復が困難な種一については、現存する生息地を保全する、すなわち残存個体群をこれ以上減らさないことが重要です。植物の場合には、特に絶滅の危険性が高いと考えられる種について、株分けによる繁殖や移植といった積極的な対応を行う必要もあるでしょう。

被災した地域では防災復旧工事が進み始めています。しかし、干潟や海岸砂丘は海域と陸域の移行帯に位置するため、少しの環境改変がハビタット（生物の生育・生息地）の質やハビタット間の結びつきを改変し、群集の存続にとって危機的なインパクトを与える可能性があります。復興に向けて、護岸や都市計画の見直しなど生活基盤の整備が重要なことはもちろんですが、生物多様性や生態系機能の回復も考慮に入れた復興計画の策定が望まれます。生態学的な視点から、海岸の復旧計画（防潮堤や護岸の設置場所や規模）は、海岸域の生物群集にとって最低限必要とされる生育・生息空間を、分断・破壊しないような形で行われることが望ましいと考えます。そのためにも、地域の生物相や各種の生育・生息環境に関する継続的な観測が必要です。

2.3.3 津波による流出石油と炭化水素による沿岸域底質汚染の実態

(1) はじめに

2011年3月11日の東日本大震災発生時に大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、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よる油流出が生じ、気仙沼湾では流出した燃料油が海面で炎上しました。環境省では、がれきや化学物質の海洋への流出状況を把握するべく2011年の6～12月の間に青森県から福島県にかけて太平洋沿岸海域における緊急モニタリング調査を行い²²⁾、東北大学大学院と宮城県保健環境研究センターは、震災後半年間停止していた宮城県沿岸部における公共用水域常時監視点における自主調査を2011年の5～9月にそれぞれ実施しました²³⁾（以上、図2.13）。

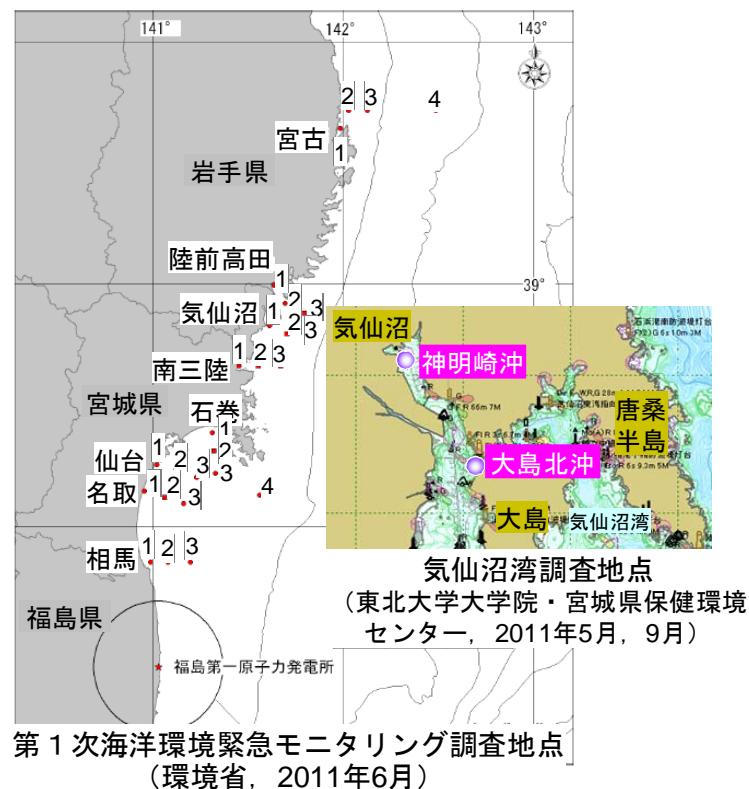


図 2.13 東北地方太平洋沿岸海域における底質中の石油・芳香族炭化水素調査地点

以上の被災地沿岸海域での調査において国環研では、震災の影響を評価するための化学物質としての炭化水素類の選定と提案、採取された底質試料の分析を行ってきました。また前項 2.2.2 で述べたように、仙台港の南側に位置する蒲生干潟の生物相の調査を行い¹⁹⁾、火災が生じた付近の石油コンビナートから流出した油の漂着状況も併せて調べました。さらに 2012 年 5 月からは、東日本大震災で最も大量の重油が海域に流出した気仙沼湾で詳細な調査を開始しました。大震災（津波）により臨海部の施設から流出した石油と、津波火災により発生したと思われる高分子の多環芳香族炭化水素（PAH）による底質の汚染とその消失の割合を把握するための一連の調査研究を行った結果についてご紹介します^{24,25)}。

(2) 東北地方太平洋沿岸津波被災地海域底質中の炭化水素汚染の分布と消長

環境省による海洋環境緊急モニタリング調査では、宮古、陸前高田、南三陸町、石巻沖合の底質から比較的高い芳香族炭化水素が検出されました（図 2.14 左上）。また石油に由来すると思われるナフタレン、フェナントレン、硫黄を含むジベンゾチオフェン等の比較的低分子の芳香族炭化水素のアルキル基置換体も高濃度で検出されました（図 2.14 左下）。環境省で調査を行った気仙沼-1~3（湾内の大島南西側~沖合）では芳香族炭化水素がほとんど検出されなかったのですが、東北大学大学院と宮城県保健環境センターが調査を行った湾奥部と大島の北側の底質からは、発がん性が指摘されているベンゾ(a)ピレンを含む米国環境保護庁（USEPA）指定の 16 種の PAH の総計で最大 30,000 ng/g 乾重近くもの極めて高濃度の芳香族炭化水素が検出されました（図 2.14 右 ※左のグラフより縦軸の数字が 2 桁高くなっている）。また、石油由来と思われる上記のアルキル基を有する芳香族炭化水素がそれ以上の高濃度で検出されました。気仙沼湾では海岸部に敷設された船舶燃料用の多くの A 重油タンクが津波で流され、約 13,000 m³ もの重油が流出した上に海上で引火し、火災が発生したため主に燃焼により生成するとされる比較的高分子の PAH が大量に海底に沈降したものとされます。このように気仙沼湾内の場所ごとの底質中の芳香族炭化水素濃度の著しい差は、流出油と火災で発生した PAH が津波により巻き上げられた海底の堆積物と混合し、それが引き波と共に主に大島の北側と東側を通過・沈降したことにより生じたと推定されます。さらにこの炭化水素を含んだ津波堆積物が、気仙沼湾沖合の東側に位置し、環境省が調査を行った陸前高田沖にまで移流・沈降した結果、比較的高濃度の芳香族炭化水素が検出されたのではないかと考えています。

仙台湾に面する蒲生干潟の堆積物からも芳香族炭化水素が検出され、その濃度は陸前高田沖と同等でしたが、組成が非常に異なり、それぞれの炭化水素の由来が異なることが示されました（データ非表示）。

また、気仙沼湾では震災発生から 2 ヶ月半後の 2011 年 5 月での調査で、湾奥部と大島北沖では底質中から最大 700,000 ng/g にも達する非常に高濃度の脂肪族炭化水素のアルカンが検出され、その炭素数の分布パターンが A 重油のものとはほぼ一致することから、通常は水に沈むことはなく、溶けることもないアルカンが、津波により巻き上げられた大量の粒度の細かい堆積物と津波の猛烈な攪乱エネルギーで混合し、海底に沈降するという通常有り得ない現象が起こったことが示されました。しかしながら震災後半年経った 2011 年 9 月時の調査では、アルカン類は大幅に消失しており、5 月時と比べて 90%以上減少していました（以上、図 2.15）。

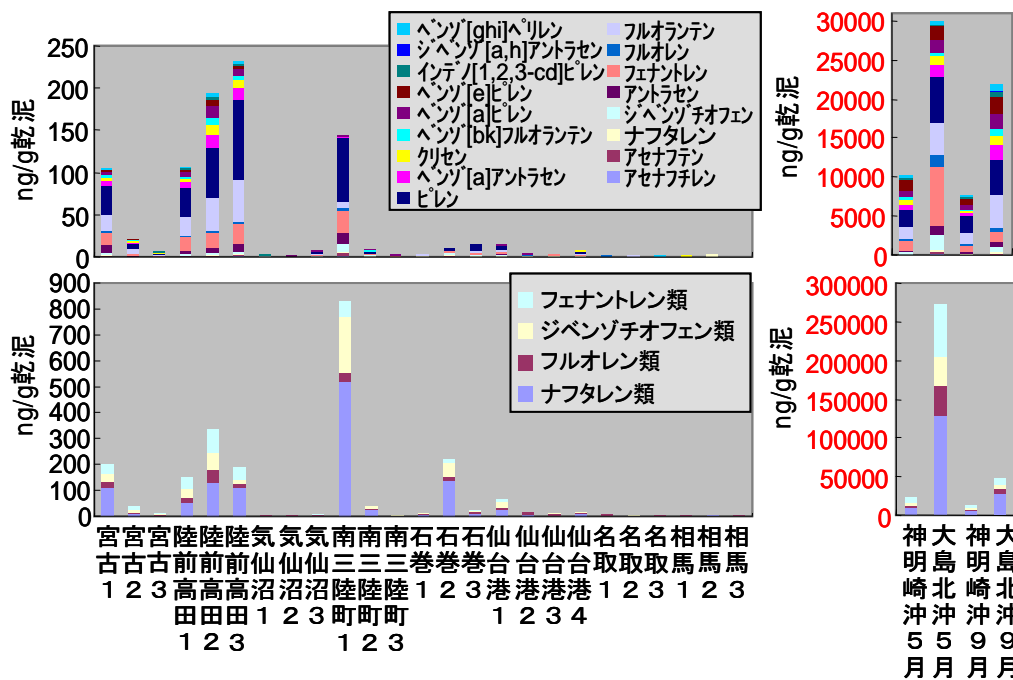


図 2.14 東北地方太平洋沿岸海域における底質中から検出された芳香族炭化水素濃度分布
 左図：環境省・海洋環境緊急モニタリング調査（2011年6月）
 右図：東北大学大学院と宮城県保健環境センターによる気仙沼湾調査（2011年5月と9月）
 （上二つのグラフは燃焼由来の高分子 PAH を含むもの、下二つのグラフは石油起源と考えられるアルキル基を含む芳香族炭化水素）

また同様の傾向はアルキル基を含んだ石油由来の芳香族炭化水素についても見られ、アルカンほどではないものの最初の調査に比べて明らかな減少が気仙沼ならず他の地点でも観られました。しかしベンゾ(a)ピレン等の燃焼由来と考えられる高分子の PAH の減少は余り観られませんでした（図 2.14 右上）。このことから石油由来のアルカンと芳香族炭化水素は底質中で比較的速やかに分解されるのに対し、燃焼由来の高分子の PAH はその難分解性から環境中での残留性が懸念されます。

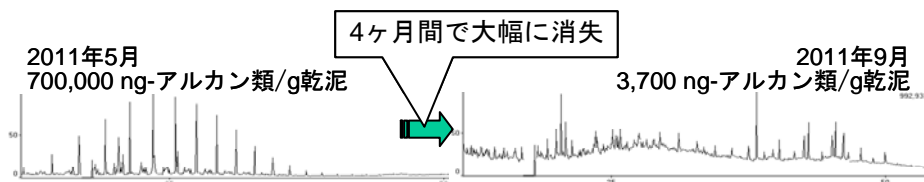


図 2.15 気仙沼湾奥部・大島北沖の底質中から高濃度で検出された脂肪族炭化水素（アルカン・パラフィン類）とその消失

(3) まとめと今後の監視の必要性

今回、東日本大震災後に観測された炭化水素による底質汚染は、津波により倒壊・流失した臨海部の重油タンクから大量の重油が流出し、津波により巻き上げられた海底堆積物と混合し

て海底に沈降するという前代未聞の事例と考えられます。さらに海面に漂っている軽質油が炎上して火災を発生させ、元々石油にはほとんど含まれていない高分子の PAH が大量に発生し、津波堆積物と共に海底に沈降したことも注目される事例と言えます。幸いなことに石油そのものに由来する炭化水素は比較的易分解性で、底質中でも消失しつつあることが確認されています。しかし、燃焼由来と考えられる高分子の PAH は難分解性であり、今回、相当の高濃度の汚染が場所によっては確認されたために、今後も監視を継続していく必要があります。

第 2 章参考文献

- 1) 滝上英孝, 渡部真文, 倉持秀敏, 大迫政浩 (2012) 津波を被った震災廃棄物の焼却とダイオキシン類等の制御. 第 21 回環境化学討論会, 同要旨集, 144-145.
- 2) Takigami H., Oguchi M., Asari M., Yoshioka T., Osako M., Sakai S. (2012) Occurrence of persistent organic pollutants in tsunami sediment left from the Great East Japan earthquake. 32nd International Symposium on Halogenated Persistent Organic Pollutants, Abstracts B1C.103.
- 3) 滝上英孝, 小口正弘, 浅利美鈴, 吉岡敏明, 大迫政浩, 酒井伸一 (2012) 津波堆積物の化学性状と対策. 安全工学シンポジウム 2012—リスクへの対応と安全・安心—, 同予稿集, 62-65.
- 4) 滝上英孝, 小口正弘, 浅利美鈴, 吉岡敏明, 大迫政浩, 酒井伸一 (2012) 東日本大震災により生じた津波堆積物の化学性状の解析. 第 21 回環境化学討論会, 同要旨集, 134-135.
- 5) 滝上英孝 (2012) 廃棄物資源循環学会における津波堆積物の性状調査と適正処理手法の検討. 東北大学大学院環境科学研究科震災フォーラム第 6 回, 要旨なし.
- 6) 滝上英孝, 小口正弘, 大迫政浩, 平山修久, 吉岡敏明, 浅利美鈴, 酒井伸一 (2011) 東日本大震災により生じた津波堆積物の性状とその処理について. 環境衛生工学研究, 25(4):5-13.
- 7) 小口正弘, 大迫政浩, 滝上英孝, 東博紀, 遠藤和人, 水谷千亜紀 (2012) 津波堆積物の化学性状把握に向けた土地利用・施設立地情報の活用. 廃棄物資源循環学会誌, 23(1), 60-71.
- 8) 東博紀, 小口正弘, 遠藤和人, 水谷千亜紀 (2012) 津波氾濫解析を応用した津波堆積物の化学物質汚染の空間分布早期推定に関する考察. 土木学会論文集 B1 (水工学論文集), 68(4), I_1519-I_1524.
- 9) 小口正弘, 滝上英孝, 遠藤和人, 大迫政浩 (2013) 東日本大震災で生じた津波堆積物中の化学物質. 安全工学, 52(1).
- 10) Higashi H., Oguchi M., Endo K., Mizutani C. (2012) A numerical determination method for spatial distribution of chemical pollution in tsunami deposit - A case study of the Great East Japan Earthquake -. 18th Congress of the Asia and Pacific Division of the International Association for Hydro-Environment Engineering and Research 2012, Abstracts, PS4-13.
- 11) 遠藤和人, 高田光康, 山田正人 (2011) 災害廃棄物仮置場における堆積廃棄物の安全性評価. 第 22 回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 153-154.
- 12) 遠藤和人, 山田正人 (2012) 災害廃棄物の仮置場における火災予防対策. 都市清掃, 65(306), 113-117.
- 13) Dahdouh-Guebas F, Koedam N (2006). Science 311:37.
- 14) Whanpetch N, Nakaoka M, Mukai H, Suzuki T, Nojima S, Kawai T, Aryuthaka C (2010). Est Coast Shelf Sci 87:246–252.
- 15) Lomovasky BJ, Firstater FN, Salazar AG, Mendo J, Iribarne OO (2011). J Sea Res 65:205–212.

- 16) Jaramillo E, Dugan JE, Hubbard DM, Melnick D, Manzano M, Duarte C, Campos C, Sanchez R (2012). PLoS One 7:e35348.
- 17) Hayasaka D, Shimada N, Konno H, Sudayama H, Kawanishi M, Uchida T, Goka K (2012). Ecol Eng 44:227–232.
- 18) Hayasaka D, Fujiwara K, Box EO 2009. Appl Veg Sci 12:211–224.
- 19) 金谷弦, 鈴木孝男, 牧秀明, 中村泰男, 宮島祐一, 菊地永祐 (2012) .日本ベントス学会誌 67:20-32.
- 20) Grassle JF, Grassle JP (1974). J Mar Res 32:253–284.
- 21) Ridley HN (1930). The dispersal of plants throughout the world. L. Reeve & Co., Ltd., Ashford.
- 22) 被災地の海洋環境のモニタリング調査結果の公表について（環境省） .
<http://www.env.go.jp/water/kaiyo/monitoring.html>
- 23) 丸尾千佳子, 佐々木久雄, 千葉信男, 福地信一, 相川良雄, 西村修 (2011) 東日本大震災後の沿岸海域環境調査報告. 第 14 回水環境学会シンポジウム, 同要旨集, 225–226.
- 24) 牧秀明, 金谷弦, 中村泰男, 福地信一, 田中伸幸, 丸尾知佳子, 佐々木久雄, 千葉信男, 西村修 (2012) 津波による東北地方太平洋沿岸海域底質中の石油類汚染. 2012 年度海洋学会春季大会, 同予稿集, 22.
- 25) 牧秀明 (2012) 津波による東北地方太平洋沿岸海域底質の石油汚染. 日本マリンエンジニアリング学会 (JIME) 海洋環境研究委員会 第 1 回研究会, 同予稿集, 1–11.

第3章 放射能汚染廃棄物の処理処分等に関する研究

3.1 はじめに

3.1.1 放射能汚染と廃棄物問題の全体像

図 3.1 は、放射性物質（放射性セシウム）に汚染された様々な廃棄物の発生と処理処分過程での放射性セシウムの移行を模式的に示したものです。原発事故に伴い放出された放射性は広域に移流拡散し、降雨に伴って地上に降下沈着しました。平成 23 年 5 月に国環研が行った大気シミュレーション結果やその後国が行った航空機モニタリングの地図データなどで、福島県内をはじめとして周辺に広く放射性物質が分布し、関東でも一部地域に相対的に高い線量の地域が分布するなど、東日本の広範囲に汚染が広がったことが明らかとなりました。これらの地域では、放射性セシウムを含む一般廃棄物が焼却施設で焼却・減容され、もとの廃棄物より放射性濃度の高い焼却灰が発生します。これは、日常生活の中で、放射性セシウムを含む土壌が付いた雑草の除去や、放射性セシウムが付いた樹木等の剪定などで生じた草木類のごみが主な原因だと考えられています。

また、下水道や上水道では、放射性セシウムが付着した土壌粒子が下水処理過程や浄水過程に流入することで、汚泥への放射性セシウム濃集がみられます。農村部では、降下物の付着による放射性セシウムを含む稲わらや堆肥も発生しています。さらに、福島県を中心とした除染活動に伴い、多量の除去土壌や除染廃棄物が発生しています。また、警戒区域や計画的避難区域等の再編・解除等で社会生活・日常生活が再開されるにつれて、その地域で残されている放射能汚染された震災・津波廃棄物も多く発生しています。

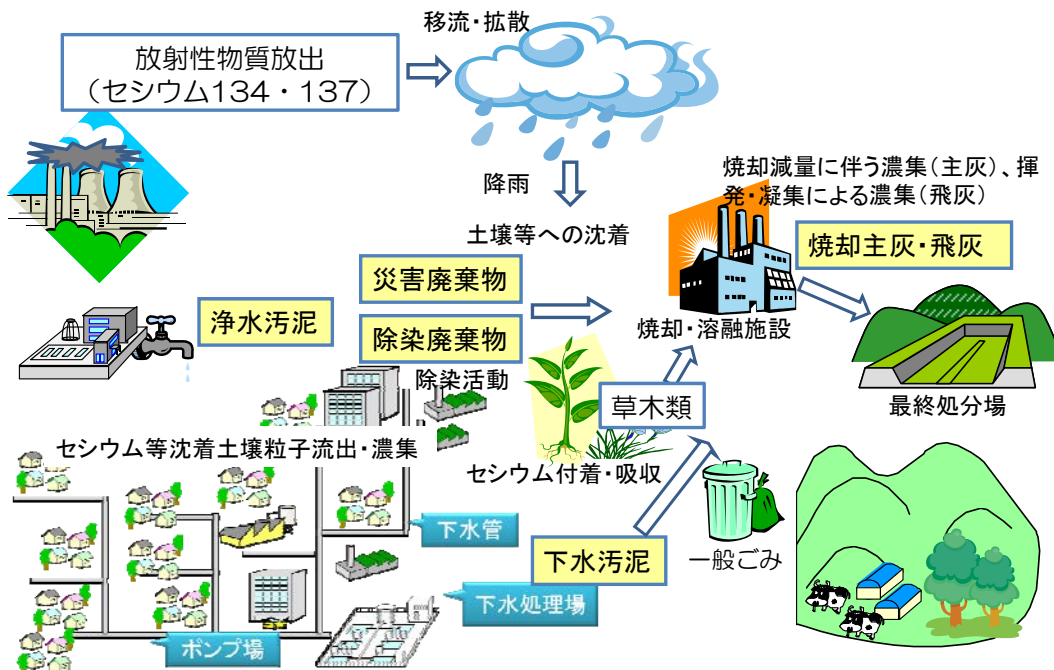


図 3.1 放射性物質に汚染された様々な廃棄物と処理処分過程での放射性セシウムの移行（模式図）

このように、福島県をはじめとして東北・関東の各地では、いろいろな場所で多種多量かつ多量の放射能汚染廃棄物が発生しており、今後も当分の間発生し続けます。廃棄物の処理は、発生から分別・保管～収集運搬～中間処理（焼却・破碎・洗浄等による減容化・濃集・分離）～再生利用～最終処分と様々な工程（プロセス）が必要ですが、以上のように、各プロセスで前例の全くなかった様々な課題に直面しています。これらの廃棄物の処理処分が滞ると、除染活動や復興、通常的生活活動・産業活動に大きな支障を来すことになります。

3.1.2 研究活動の基本方針

(1) 資源循環・廃棄物管理研究の知見・経験・ネットワークの活用

放射能汚染廃棄物が多種多量かつ広範囲にわたり発生する事態への対処は、我が国において、また世界においても過去経験したことがありません。問題発生当初は、その適正な処理処分に必要となる基礎データや科学的知見が極めて不足している状況にありました。

このような放射能汚染廃棄物の諸問題に対処していくためには、汚染のもととなる放射性物質（その大部分が放射性セシウム）の特性やそれによる被ばく影響、放射線管理などに関する知識が当然必要になります。しかし、最も重要なのは、多様な性状をもつ廃棄物の適正処理に様々な技術を適切に応用していくための経験とノウハウであり、廃棄物処理処分に関する広範かつ深い知識・経験・知見が基盤として必要不可欠です。今回は地震・津波により大量の災害廃棄物（震災廃棄物・津波堆積物等）が発生し、その多くが放射能汚染されたことから、今回の災害廃棄物の特性・特徴を適切に把握しておく必要があります。さらに、これら廃棄物を取り巻く環境は現場によって千差万別であり、現場感を持って対処しなければなりません。

国環研は、資源循環・廃棄物分野に関する多様な課題に総合的に取り組む研究機関として、廃棄物にまつわる困難な問題（ダイオキシン・重金属対策、最終処分場対策、不法投棄対策等）に対して現場重視の研究活動を積み重ねてきました。今般の放射能汚染廃棄物問題においても、これまで培ってきた知見や経験、また専門家のネットワーク等をフル活用して、様々な課題の解決に取り組んでいます。

(2) 現場重視の活動による課題の的確な把握と成果の提供・発信^{1)~6)}

処理処分の現場で発生している技術的課題を的確に把握するため、環境省や関係自治体からの協力依頼等を受けて、あるいは互いに連携して、東北・関東各地の各種施設（一時保管・仮置場、焼却・破碎施設、最終処分場等）の現地調査を多数実施しております。その際の現場関係者への助言や意見交換等を通じて現場で発生する様々な技術的課題を把握して、その要因解明や対策提示に必要な調査研究を企画・実施し、課題解決のための知見の集積を進めています。

調査研究で得られた成果・知見は、環境省災害廃棄物安全評価検討会¹⁾（平成23年5月～：国環研から理事長（座長）及び資源循環・廃棄物研究センター長（委員）が参画）や環境省関係部署、関係自治体等に随時提供し、環境省の各種通知、特措法処理基準や関係ガイドライン²⁾に適宜反映されるなど、放射能汚染廃棄物の適正な処理処分に大きく貢献しています。また、得られた知見・成果は、公開シンポジウムや関係学会等で随時発表するとともに、国環研の技術資料「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」³⁾として体系的に整理しとりまと

め、同資料を分かりやすく紹介した概要版⁴⁾⁵⁾やQ&A集⁶⁾(図3.2)とともに研究所ホームページ上で公開し、国や関係自治体、関係事業者など各方面の方々にご活用いただいています(図3.3)。

技術資料等の作成・公表

- 「放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分」(技術資料)
 - 第一版(H23年12月2日公開)
 - 第二版(H24年3月26日公開) 同追補版(H24年4月16日公開)
 - 第三版(H24年12月20日公開)
- 「放射性物質を含む廃棄物の適正な処理処分」(技術資料概要版)
 - 日本語版(H24年7月25日公開) 英語版(H24年11月29日公開)
- 「災害・放射能汚染廃棄物等に関するQ&A集」(H25年1月11日公開)

図 3.2 これまで作成・公表した放射能汚染廃棄物関係の技術資料・Q & A 集

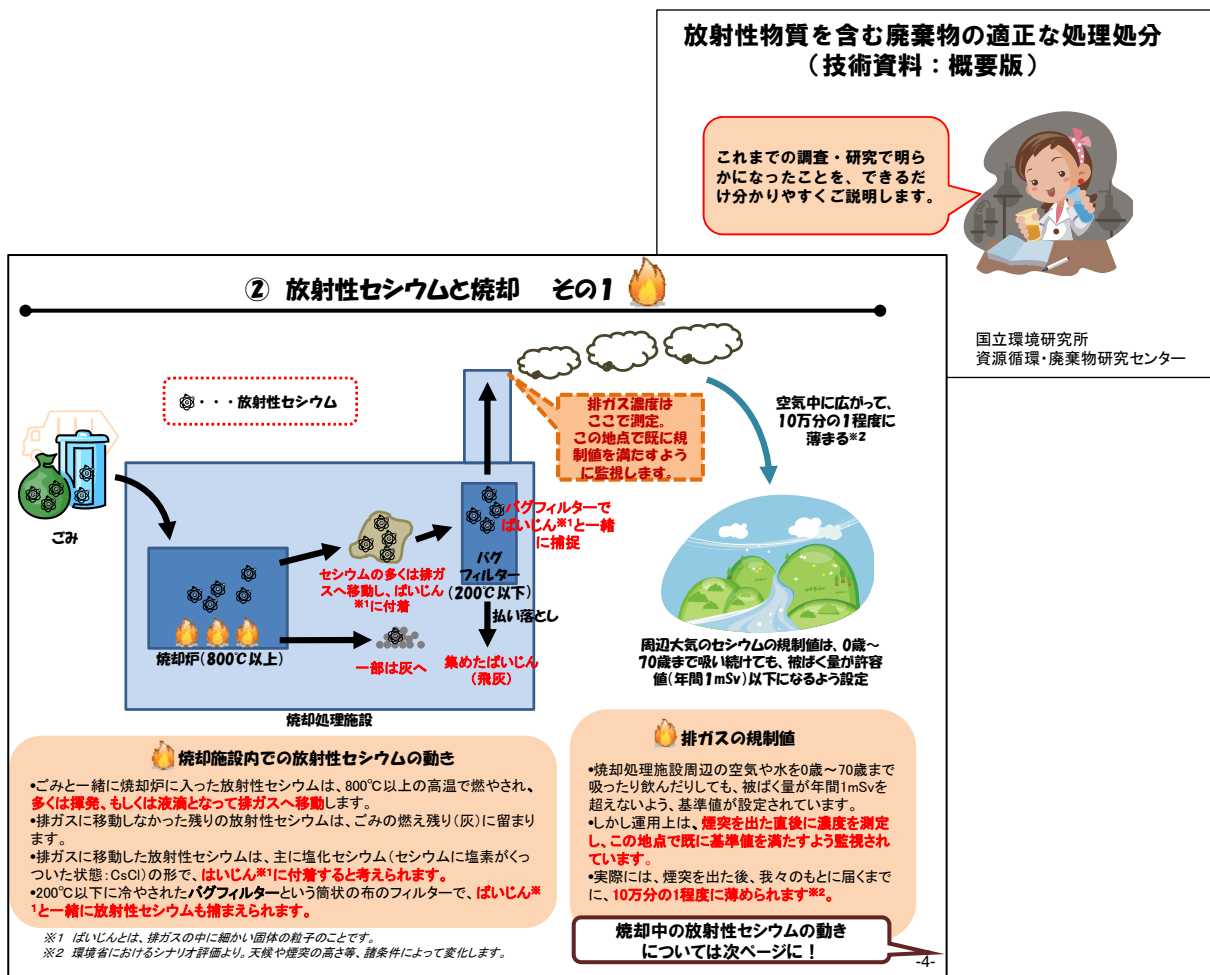


図 3.3 放射性物質を含む廃棄物の適正な処理処分 (技術資料概要版：日本語版)⁴⁾

3.1.3 主要な成果

これまでの研究活動を通じて、多岐にわたって様々な成果が得られました。主要な成果のポイントは以下のとおりです。具体的な成果概要は3.2をご参照ください。

<廃棄物中の放射性セシウムの基礎物性・挙動メカニズムの解明>

- ① 溶出試験や熱力学平衡計算結果から、廃棄物の種類によって放射性セシウムの溶出特性が大きく異なること（一般廃棄物焼却飛灰：易溶出性、下水汚泥焼却灰・土壌等：難溶出性）、それが放射性セシウムの化学形態の違いによることを明らかにしました（**3.2.1(1)(2)**参照）。
- ② 吸着試験結果から、埋立時に使用する土壌等の種類により焼却灰からの溶出液中の放射性セシウムの吸着性能が大きく異なる（特にベントナイトの吸着性能が高い）こと、溶出液中の共存イオン濃度が高いと吸着性能が低下することを明らかにしました（**3.2.1(3)**参照）。

<処理処分における放射性セシウム制御技術の開発・評価>

- ③ 草木類等の腐敗性廃棄物の仮置保管について、積み上げる山の高さや設置面積、離間距離等の制限などの火災予防措置が必要であることを明らかにしました（**3.2.2(1)**参照）。
- ④ 溶出性が高く放射性セシウム濃度の高い焼却飛灰の洗浄技術について、ベンチスケールでの実証試験により、放射性セシウムを90%以上除去して溶出性と濃度を低減できる洗浄条件などに関する知見を得ることができました（**3.2.2(2)**参照）。

<処理施設での放射性セシウムの蓄積挙動の解明と管理技術の確立>

- ⑤ 既存焼却施設での実態調査から、温度が高い焼却炉内等では放射性セシウムが耐火物に蓄積することで空間線量が高い場所と付着灰のセシウム濃度が高い場所が異なり、耐火物中に放射性セシウムが浸透蓄積していることを明らかにしました（**3.2.3(1)**参照）。
- ⑥ 数値解析結果から、廃棄物を埋め立てる際、涵養量や溶出濃度によって放射性セシウム浸出水のピーク濃度や時期が異なること、溶出性の高い焼却飛灰の埋立時は上部遮水層を設置して降雨浸透水と飛灰を接触させないことの必要性を明らかにしました（**3.2.3(2)**参照）。

<廃棄物中の放射能物質の測定分析・モニタリング手法の確立>

- ⑦ 各機関と連携して廃棄物等の放射能調査・測定に関する暫定マニュアルを早期に策定・公表し、国のガイドラインのベースとして活用されました（**3.2.4(1)**参照）。
- ⑧ 焼却施設の排ガス試料採取方法について、ろ紙を排気ダクトの外に設置する形式や円形ろ紙使用に関する技術的課題への対応策を明らかにするとともに、焼却施設で生じる焼却灰の採取試料の代表性等について検証し、国のガイドラインの規定内容の妥当性を確認しました（**3.2.4(2)**参照）。

<放射性セシウムを含む焼却灰等の空間的・時間的特性の把握>

- ⑨ 東日本各都県の一般廃棄物焼却施設データから、焼却灰等の放射性セシウム濃度が初夏や秋に上昇する等の季節変動を示しつつ減少していることが確認されました（**3.2.5(1)**参照）。
- ⑩ 地域全体に沈着した放射性セシウム量の焼却ごみへの移行率は、一般廃棄物焼却施設の多くで1%未満であること、人口密度が高い地域ほど焼却ごみ移行率が高い傾向があることがわかりました（**3.2.5(2)(3)**参照）。
- ⑪ ごみから焼却飛灰への放射性セシウムの濃縮率が、焼却施設の種類により異なることがわかりました（**3.2.5(4)**参照）。

3.2 成果の概要

3.2.1 廃棄物中の放射性セシウムの基礎物性・挙動メカニズムの解明

本研究では、各種の放射能汚染廃棄物について、実験的及び理論的手法等を用いて、廃棄物に含まれる放射性セシウムの基礎物性（熱力学特性、溶出特性、吸着特性）の把握に必要なデータ等を集積し、安全かつ効率的な処理処分の基盤となる放射性物質の挙動メカニズムの解明に向けた調査研究を実施しています。

放射能汚染廃棄物の処理に関する各種基準を設定し、また、設定した基準の合理性や処理の安全性についての理解を得るためには、その根拠、特に、廃棄物中の放射性セシウムの基礎物性や挙動に関する科学的データ・知見が必要となります。しかし、今般の放射能汚染廃棄物問題が発生した当初は、それらの基礎的なデータ・知見が非常に不足している状況にありました。

国環研では、これらの基礎的知見を得ることに重点を置いて緊急的な調査研究を進め、得られた成果は環境省災害廃棄物安全評価検討会に順次速やかに提供しました。これらの成果は環境省の各種通知等に引用・反映されるとともに、特措法に基づく処理基準検討の際の根拠として活用されました。ここでは、それらの成果例を中心に紹介いたします。

(1) 焼却時における放射性セシウムの物性・熱力学挙動の把握

a) 焼却過程での放射性セシウムの化学形態^{7),8)}

原発事故によって放出された放射性物質によりがれきを含む廃棄物が広範囲に汚染され、それらを焼却した場合に、放射性物質、特に、放射性セシウム（Cs）が焼却灰に濃縮されていることが明らかになりました。汚染廃棄物を適正に焼却処理するには、処理過程におけるセシウムの挙動を把握する必要があります。そこで、汚染廃棄物の燃焼系に対して熱力学平衡計算を適用し、その適用性を評価しつつ、セシウムの挙動に関する考察を行いました。

具体的には、熱力学平衡計算ソフト（FACTSage (Ver.6.2)）を用いて、都市ごみ、下水汚泥、廃木材及び草の燃焼系の平衡状態、つまり、燃焼温度における最終的に安定な化学組成を計算し、燃焼温度に対するセシウム化合物の状態と濃度を整理し、セシウムの挙動を考察しました。しかし、研究当初はセシウム化合物に関する熱力学データが十分ではなかったため、セシウムの代わりにセシウムと同族の金属であるカリウム（K）について整理し、カリウムをセシウムに置き換えてセシウムの挙動を考察しました。その計算結果の一部を図 3.4 に示します。廃棄物の種類によって、生成される化学種とその割合が異なることがわかりました。特に通常の焼却温度付近（850℃）に着目すると、都市ごみの焼却では塩化カリウム（KCl）ガスが多く生成され、一部固体のアルミナシリケート（ KAlSi_2O_6 ）が生成されます。一方、下水汚泥の焼却では塩化カリウムガスはほとんど生成せずに固体の KAlSi_2O_6 のみが生成することがわかります。カリウムをセシウムに置き換えると、下水汚泥の焼却ではセシウムは固体のアルミナシリケート（ $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ ）として灰に残存すると予想され、都市ごみの焼却では塩化セシウム（ CsCl ）ガスが主成分であり、残りが固体の $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ と予想されます。後者では、ガス化した塩化セシウムはその後の冷却過程で飛灰上に凝結・吸着すると考えられます。塩化セシウムが水に溶けやすいこと、また、 $\text{CsAlSi}_2\text{O}_6$ が水にほとんど溶けないことから、都市ごみの焼却ではセシウムの飛灰への濃縮率が高く飛灰からのセシウムの溶出性が高い一方で、都市ごみの主灰や下水汚

泥の溶出性が低いと推察されます。これは、実際の都市ごみ焼却灰の放射性セシウム濃度や溶出率データの傾向と一致しており、焼却過程でのセシウムの挙動解析に本解析方法が有効であることを示すことができました。

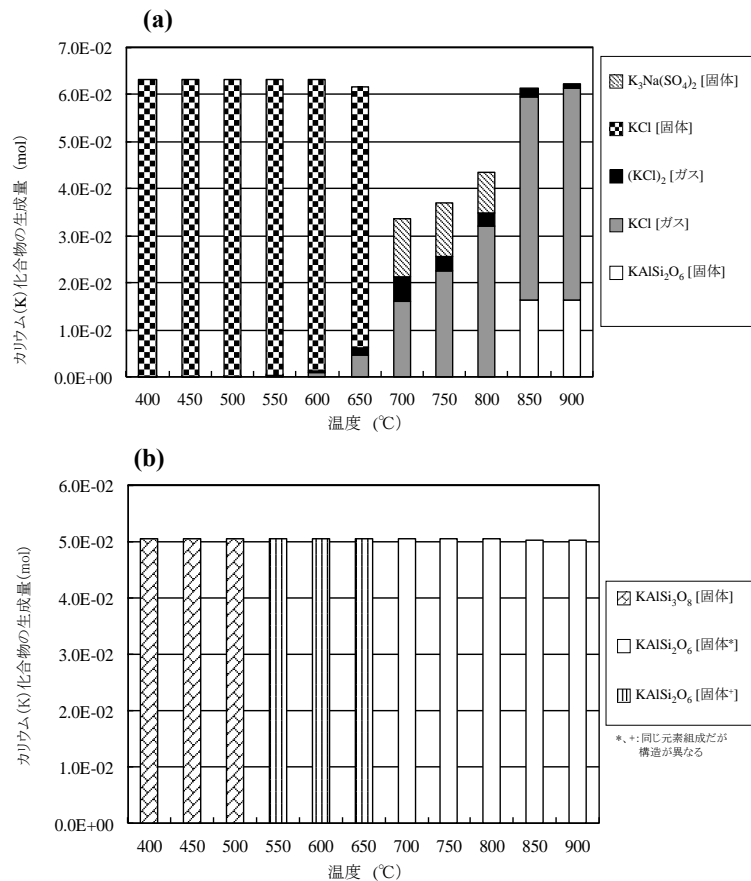


図 3.4 都市ごみ(a)と下水汚泥(b)の焼却系に対する平衡計算結果（カリウム(K)化合物について）

その後、Kの挙動を参考にセシウム化合物の熱力学データを整備し、上記と同様の平衡計算を行ったところ、都市ごみの放射性セシウムの移行率や灰からの溶出性を説明できることを確認しました。この平衡計算を用いると、汚染バイオマスなど都市ごみ以外の各種廃棄物の燃焼挙動が予測可能となります。図 3.5 は計算結果の一例ですが、廃棄物の種類によって生成する塩化セシウムガスと固体 ($CsAlSi_2O_6$) の割合が大きく異なります。これは、廃棄物を構成する元素バランスの違いが焼却時のセシウム挙動に影響することを示しており、別の見方をすれば、投入する廃棄物の種類や混合率を変えて元素組成比を制御することで、セシウムの固体-ガス間の分配性、さらにはセシウムの溶出性も制御できる可能性も示唆しています。

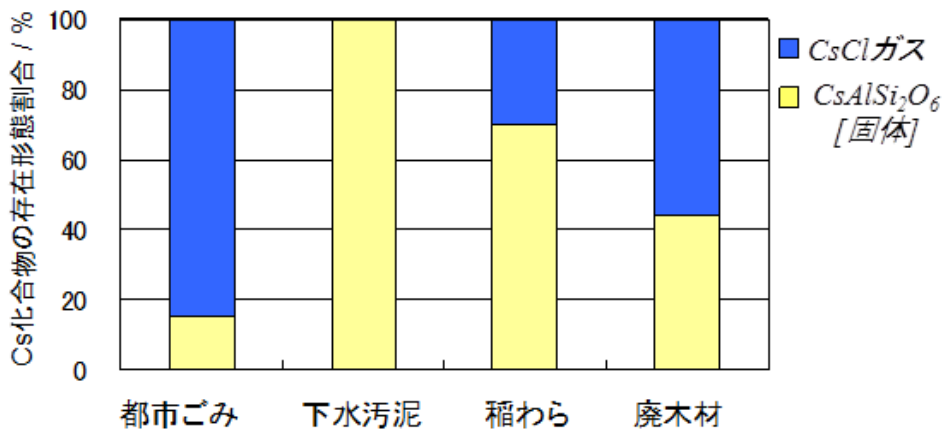


図 3.5 各種焼却物と 850°Cにおけるセシウム化合物の存在

現在、実際の焼却過程をより反映させたマルチゾーン平衡計算モデルを開発しており、これまでの検討でアルカリ金属の挙動を良好に再現することが確認できています。また、様々なタイプの焼却施設における都市ごみの焼却・溶出基礎データを収集しつつ、廃棄物系バイオマスの室内燃焼実験を行っています。これらの取組を通じて、各種廃棄物の熱処理過程での放射性セシウムの挙動解析や予測、放射性セシウムの分配性・溶出性の制御可能性の検討を進める予定です。

b) バグフィルターにおけるガス状の放射性セシウムの存在可能性⁹⁾

セシウムは原子番号 55 のアルカリ金属で、極めて反応性に富み、大気中では金属単体では存在せず、塩化セシウム等のセシウム化合物と存在していると考えられます。セシウム化合物の沸点（塩化セシウムの沸点は約 1,300°C）は高いものの、800~850°C、あるいはそれ以上の炉内では放射性セシウムの一部は揮発したり液化して排ガスに移行し、残りは主灰中に残留すると考えられます。また、排ガス中に移行した放射性セシウムは排ガスの冷却過程で凝縮し、約 200°C以下のバグフィルター付近では主に塩化セシウムの形態でばいじんに吸着していると考えられます。

環境省などの調査結果は、バグフィルターにおいて放射性セシウムのガス態は定量可能な範囲で存在しないことを示しています。放射性セシウムを含むばいじんの平均粒径は数十 μm といわれており、バグフィルターではサブミクロンメータ（1/10 ミクロンオーダー）の粒子をカットできることから、バグフィルターの性能が発揮されていれば、十分に放射性セシウムを除去できるといえます。

さらに、セシウム化合物の揮発のしやすさ、つまり、飽和蒸気圧を把握することにより、約 200°C以下で制御されているバグフィルター付近での放射性セシウム化合物のガス量を推定しました。その結果、セシウム化合物の中で最も飽和蒸気圧が高く、存在量が多いと予想される塩化セシウムに着目すると、バグフィルター温度付近での放射性セシウムの蒸気圧はダイオキシン類と比べて 9~11 桁程度も低く、放射性セシウムが凝縮してばいじんに吸着する性質はダ

イオキシソ類よりもはるかに強いことがわかります（図 3.6）。なお、この推定で用いた推定式の特性上、飽和蒸気圧の実測値はさらに低いと予想され、また、実際の排ガスプロセスでは飽和蒸気圧（最大揮発量）には達していないと考えられます。以上のことから、バグフィルターにおいて排ガス中の放射性セシウムガスを検出することが極めて困難であると推察できます。

(2) 廃棄物中の放射性セシウムの溶出挙動の把握¹⁰⁾

仮置保管あるいは埋立処分される廃棄物には、一般廃棄物焼却主灰、一般廃棄物焼却飛灰、下水汚泥焼却灰、浄水発生土、災害廃棄物などがあります。これらの廃棄物や土壌などが放射性物質に汚染されている場合には、その放射能濃度だけではなく溶出性にも着目し、それぞれの特性に応じた適切な管理・対策を講じることが重要となります。

そこで、これら各種の放射能汚染廃棄物や土壌の溶出挙動を把握するため、各種の溶出試験を実施しました。その結果を以下紹介いたします。

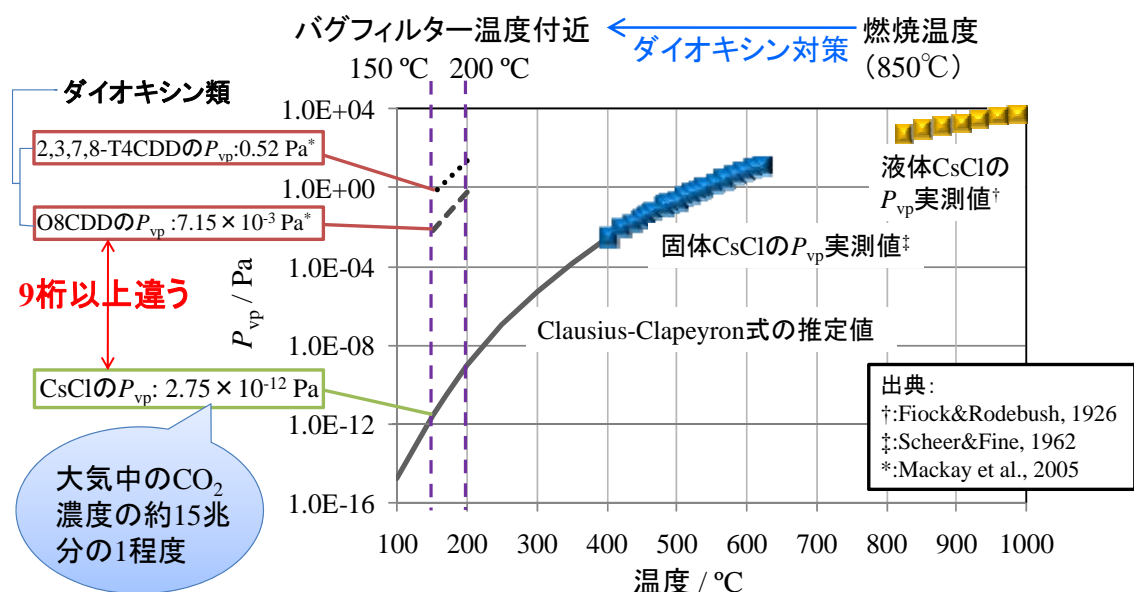


図 3.6 塩化セシウム (CsCl) の飽和蒸気圧の推定結果 (ダイオキシソ類との比較)

a) 廃棄物種類による溶出特性の違いの把握

試料を有姿のまま、10倍量の純水とともに容器に入れ、上部の液相部分をプロペラで6時間攪拌する有姿攪拌試験 (JIS K0058-1) により、各種廃棄物試料の評価を行いました。

結果を総括したものを図 3.7 に示します。一般廃棄物焼却飛灰はセメントによる固化処理の有無によらず、他の試料と比べて溶出率が高い (64~89%) ことがわかりました。そのため、固体中の放射能濃度が高い場合は、高濃度で溶出する可能性が高いと考えられます。なお、焼却飛灰は重金属溶出抑制の面からセメント固化等 (粒径数 mm 程度以下に団粒化する場合が多い) が義務化されていますが、有姿攪拌試験の結果では、団粒化では溶出抑制の効果は見られなかった一方、成形固化物した場合は溶出率が1割程度の結果となり、成形固化が溶出抑制に有効である可能性が示唆されました。また、一般廃棄物焼却主灰の場合、溶出液の放射能濃度は低く、溶出率は確認できたもので5.6%という結果でした。一方、下水汚泥焼却灰、浄水発生

土、土壌、災害廃棄物、及び産業廃棄物の安定品目等は、放射能濃度が高い場合であっても溶出液にはほとんど検出されず、溶出率は非常に低い傾向にあることがわかりました。

この結果を踏まえると、溶出性の高い一般廃棄物焼却飛灰については、雨水や地下水と接触すれば放射性セシウムが速やかに溶出する可能性が高いことから、雨水等から隔離保管するなどの対策が必要と考えられます。また、溶出性の低い廃棄物や土壌については、もし雨水等に接触しても直ちに高濃度で溶出する危険性は低いと考えられます。

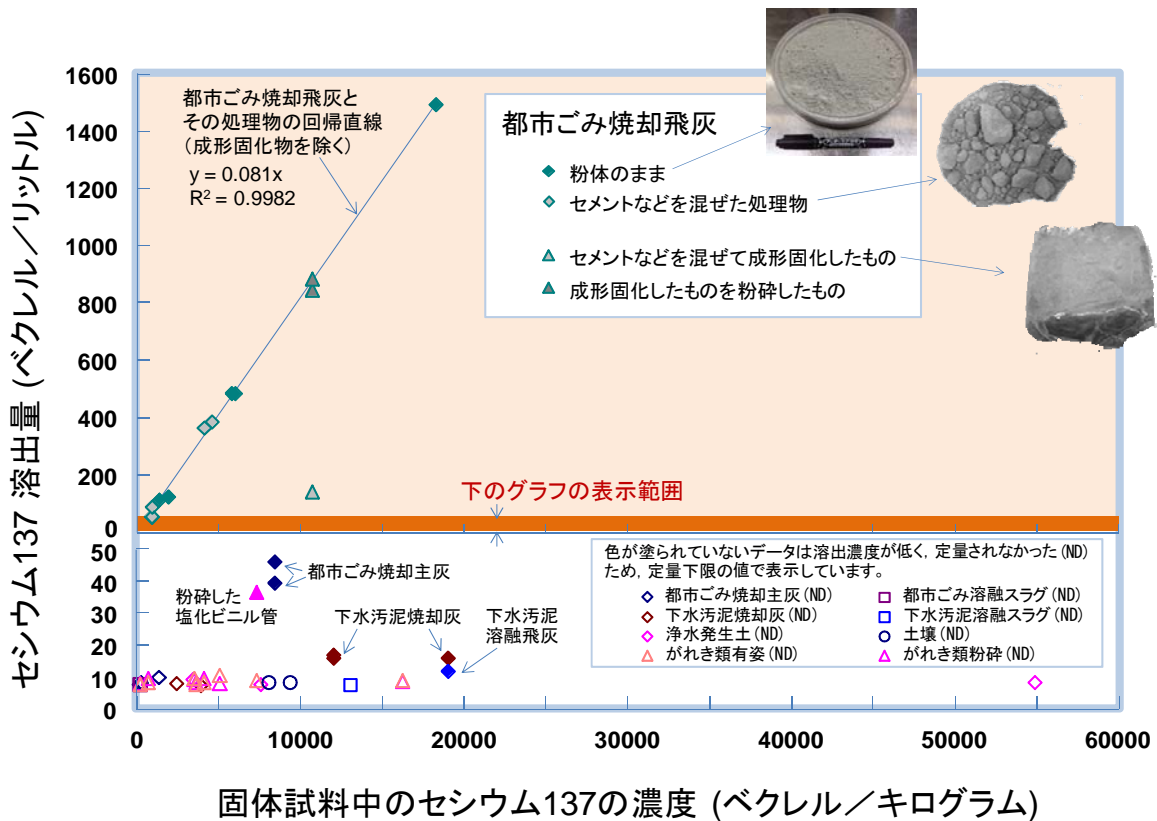


図 3.7 固体試料中セシウム 137 濃度と有姿攪拌試験でのセシウム 137 溶出量の関係

b) 溶出特性の違いをもたらす放射性セシウム存在形態の差異の考察

上記の有姿攪拌試験で明らかとなった溶出特性の差異の要因として放射性セシウム等の化合物の形態の差異について考察するため、抽出能力の異なる溶媒で試料を逐次抽出する試験（逐次抽出試験）を行いました。試料は、一般廃棄物焼却主灰・飛灰、下水汚泥焼却灰、浄水発生土、土壌を用いました。

その結果、一般廃棄物焼却飛灰には水溶性画分（一般には塩化物等と推測される）やイオン交換態（他の陽イオンを含む水溶液と接触した場合に陽イオンの種類や濃度の組合せによっては固相から置換して溶出する場合がある）が非常に多いことがわかりました。また、一般廃棄物焼却主灰と下水汚泥焼却灰については酸化物態及び残留物態とされる画分で9割前後、浄水発生土や土壌は残留物態のみで約9割を占め、いずれも非常に溶出しにくい性質を持っていることがわかりました（図 3.8）。さらに、別途実施したシリアルバッチ試験と累積バッチ試験の結果から、焼却飛灰が水と接触すると初期に高濃度で溶出し、また、その水が下方に移動す

るなどしてさらに飛灰と接触すると、より高濃度となる可能性が示唆されました。これらの結果から、焼却飛灰を埋立処分する際、雨水等からの隔離保管が必要であり、また、もし水と接触した場合を想定して焼却飛灰の下層には放射性セシウムを吸着させる材料の敷設が必要と考えられます。

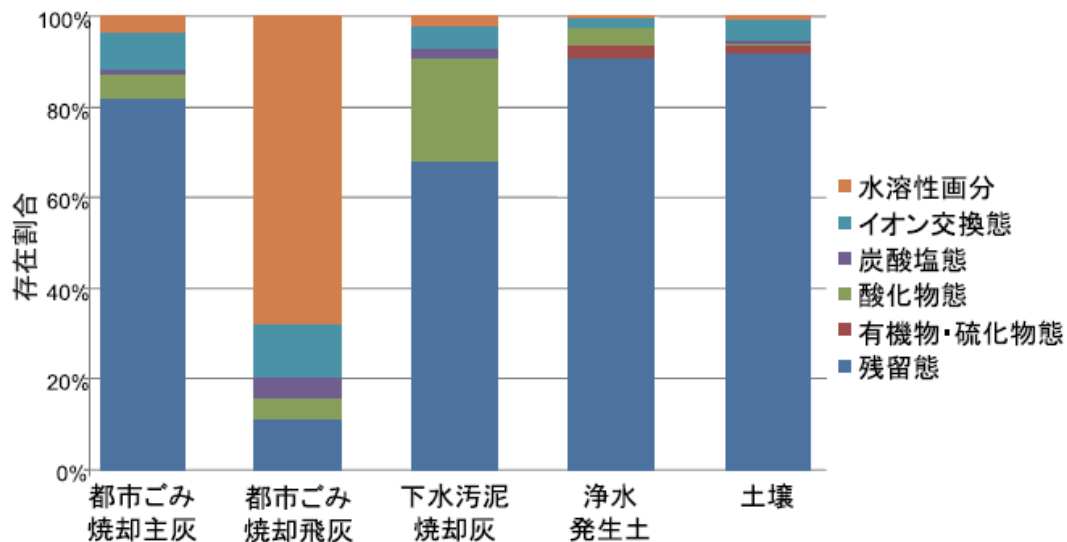


図 3.8 逐次抽出試験によるセシウム 137 濃度の存在形態推定結果 (凡例の下にあるものほど水に溶出しにくいと考えられる)

(3) 放射性セシウムの土壌等への吸脱着挙動の把握¹⁰⁾

上記(2)の結果にあるように、一般廃棄物焼却飛灰は放射性セシウムの溶出率が非常に高いことから、安全・安心な埋立処分のためには、放射性セシウム濃度等に応じて、①降雨を遮断する、②土壌等の吸着層を設置する、③埋立場所を制限し降雨接触面積を減らす、④放射性セシウムの溶出を抑制させるといった工夫が必要となります。焼却飛灰の下に土壌を敷設した場合、焼却灰から溶出した放射性セシウムは土壌層に吸着し、その移動速度は遅くなります。放射性セシウムには時間の経過とともに自身の濃度が減少する自然減衰があるため、移動速度が遅くなれば、放射性セシウムの濃度低下につながります。このため、埋立処分では溶出する放射性セシウムを所定濃度まで自然減衰できるような土壌吸着層の設計が重要であり、放射性セシウムの土壌等への吸着性を把握する必要があります。放射性セシウムの土壌吸着性が著しく高いことは、チェルノブイリ原発事故後の土壌調査結果や数多くの吸着実験から明らかにされていますが、その一方で、環境中の pH や共存イオンにより吸着性は大きく変化することも知られています (吸着する瞬間の pH や共存イオンであり、吸着後の環境変化ではない)。よって、埋立地の環境条件を考慮した上での性能評価が重要になります。特に、焼却灰の直下に敷設される土壌は、焼却灰から溶出する高濃度のアルカリと電解質に曝されることから、処分場内の環境を想定した放射性セシウムの吸着実験が必要です。

そこで、福島第一原発事故後の一般廃棄物焼却施設から採取した飛灰を用いて模擬的な溶出液を作成し、その溶出液中の放射性セシウムに対する土壌等の吸着量や分配係数を評価しました。その結果例を以下紹介いたします。

a) 各種土壌等の吸着能力の違い

東日本にある焼却施設から固化処理前の飛灰を採取し、液固比 10、6 時間 120 rpm 水平振とうの条件で溶出液を作製し、その溶出液に蒸留水や少量の塩酸を追加し、条件を整えたものを吸着実験の供与液として用いました。吸着実験に用いた試料は、蒸留水で洗浄した珪砂 5 号、茨城真砂土、埼玉土壌、ベントナイト、粉末ゼオライト、顆粒ゼオライトです (図 3.9)。

珪砂5号 CEC = 0.7 cmol/kg  ✓石英を主成分とする標準砂 ✓0.4-0.6 mmの均一粒径	茨城真砂土 CEC = 4.1 cmol/kg  ✓花崗岩などが風化した土 ✓細粒分(<75um) = 7%	粉末ゼオライト CEC = 130 cmol/kg  ✓天然のゼオライト ✓0.2 mm以下の粒径
埼玉土壌 CEC = 6.3 cmol/kg  ✓実覆土に用いられた土 ✓細粒分(<75um) = 20%	ベントナイト CEC = 66 cmol/kg  ✓ワイミング産Na ⁺ ベントナイト ✓難透水性材料として利用	顆粒ゼオライト CEC = 140 cmol/kg  ✓天然のゼオライト ✓1.4-4.0 mmの粒径

図 3.9 吸着性評価の対象試料土壌等

試験結果を図 3.10 に示します。飛灰溶出液中の放射性セシウムに対する吸着材の吸着特性を示しています。横軸に平衡濃度、縦軸に吸着量で整理したときのプロットの線形勾配を分配係数と呼び、その値が大きいほど放射性セシウムに対する吸着性が高いことを意味します。飛灰溶出液中の放射性セシウムに対する吸着性は、珪砂 5 号<茨城真砂土<埼玉土壌<ベントナイト<顆粒ゼオライト<粉末ゼオライトの順に大きいことがわかりました。特にゼオライトの分配係数はベントナイトの約 10 倍であり、極めて高い吸着性をもつことがわかります。一方、別の実験で、共存イオンによるセシウムの吸着阻害や、セシウム吸着に伴う共存イオンの吸脱着挙動を調べたところ、供与液中の共存イオン濃度が高くなるほど、放射性セシウムの分配係数が低下することが明らかとなり、具体的には供与液中のカリウムや安定セシウムが吸着阻害に寄与したものと考えられました

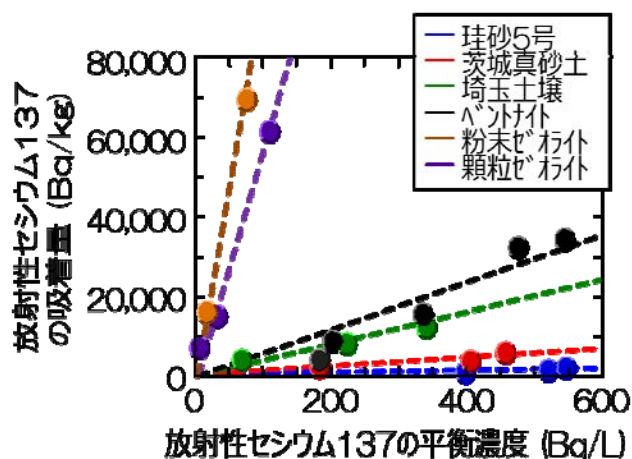


図 3.10 平衡濃度と吸着量の関係

3.2.2 処理処分における放射性セシウム制御技術の開発・評価

本研究では、3.2.1 で得られた基礎物性・挙動メカニズムに関する知見を踏まえつつ、現地調査とともに室内実験、実証試験及び理論的検討等を通じて、廃棄物等の持つ様々な特性（発生起源、廃棄物種類、可燃性、放射性セシウム濃度、溶出性等）の違いに応じた、安全かつ効率的な処理処分の制御技術の開発・評価を実施しています。

いずれの研究課題も現在進行形であり、得られた成果は順次技術資料や関連学会等を通じて情報発信しております。ここでは、国の検討会や成果の一部をトピックス的に紹介いたします。

(1) 仮置保管での制御技術¹¹⁾

a) 腐敗性廃棄物の火災予防・沈下防止対策技術

放射性セシウムの影響を受けている地域では、都市ごみ焼却灰の放射性セシウム濃度抑制の目的で草木や剪定枝を通常ごみと分けて収集し、焼却施設の敷地内等で一時保管している自治体が少なからずあります。これら草木や剪定枝等の可燃性廃棄物は腐敗しやすいため、例えば地震や津波で発生した木くずなどの可燃性廃棄物よりも、仮置場での火災発生のリスクがより高くなる懸念があります。

そこで、災害廃棄物仮置場で得られた経験・知見をベースに、草木類の仮置場での多数の現地踏査も踏まえ、仮置場に積み上げられる腐敗性廃棄物の高さを2m以下、一山当たりの設置面積を100m²以下、積み上げられる山と山との離間距離を2m以上とするなど、腐敗性廃棄物の火災予防対策を技術レポートとして補遺的に整理し公表しました（詳細は技術レポート「仮置場の可燃性廃棄物の火災予防（第二報補遺）」（国立環境研究所取り纏め：平成23年12月22日）参照）。このレポートは環境省通知として関係自治体に提供されるとともに、特措法に基づく環境省ガイドラインに活用されました。

また、各地で行われている除染作業では、除去土壌とともに樹木の剪定枝や落葉などの除染廃棄物が多量に発生し、仮置場で一時保管されますが、時間の経過とともに、腐敗による沈下や発熱による火災の懸念等の課題が生じてきました。このため、除染廃棄物の仮置場を巡回し、保管方法の改善指導を行うとともに、適正な仮置方法の具体策に関する技術提案を行いました（**図 3.11**、**図 3.12**）。それらは、環境省ガイドライン改訂案に反映され、現場での除染廃棄物の適正保管の推進に貢献することができました。



図 3.11 除染廃棄物の仮置場巡回による火災危険度診断や仮置方法の技術提案

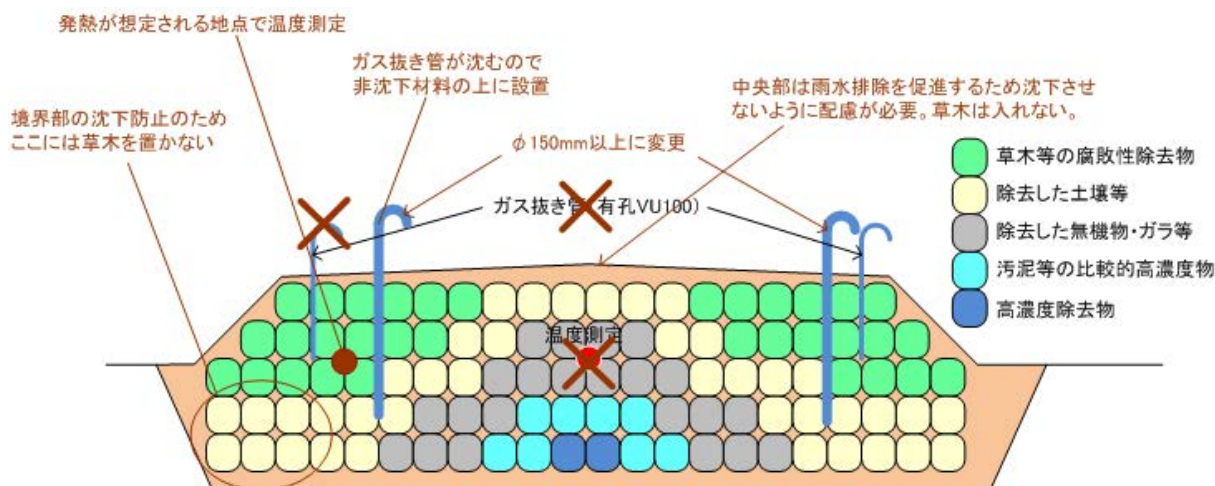


図 3.12 除染廃棄物の仮置保管方法に係る技術的助言

(2) 洗浄分離過程での制御技術

放射性セシウムを含む焼却飛灰は特に溶出性が高く、放射性セシウム濃度が 8,000Bq/kg を超えるものは放射性物質汚染特措法に基づく指定廃棄物に指定され、放射性物質の溶出を抑制するため、環境大臣が定める方法により固形化（セメント固化）した上で、管理型処分場において①隔離層設置による埋立、②耐久性容器による埋立、もしくは③屋根付き処分場に埋め立てるなど、溶出防止対策を施して処分することが基準で定められています。しかし、溶出防止対策を施した埋立処分は進んでおらず、焼却飛灰はフレキシブルコンテナに詰めた状態でごみ焼却施設等において一時保管されているのが現状です。現在、国において指定廃棄物の最終処分場の設置等に向けた検討等が行われておりますが、焼却飛灰量の増大に伴い一時保管場所の確保場所がひっ迫している施設等もあり、一時保管の時期が長期化によりごみ処理の継続自体が困難な状況になることも懸念されています。

国環研では、水への溶出性の高いという焼却飛灰の特性を活用し、埋立処分の前に焼却飛灰を洗浄処理して、飛灰中の放射性セシウムを指定廃棄物の指定レベル（8,000Bq/kg）よりも十分に低い濃度レベルまで洗い流し、埋立処分後に水に接触した場合の溶出性を低減することで、通常管理型処分場での埋立に近い簡易な方法で処分することを可能とする対策技術の確立に向けた研究を実施しています。

まず予備的実験として、重金属や塩類除去・回収のための従来技術である飛灰洗浄技術をベースとした飛灰からのセシウムの溶出（洗浄）、紺青（プルシアンブルー）等の吸着剤を用いたセシウム除去に関する基礎研究を行いました。その結果、効率的な洗浄条件や吸着除去の方法が明らかとなりました。しかし、得られた知見をもとに実規模の施設にスケールアップするためには、放射性セシウムに焦点を当てた処理システム全体の最適化と放射線防護の観点での実証試験が必要となります。

そこで、飛灰洗浄処理技術の最適な運転条件とシステム構成の確立を目指し、大学や企業等とも連携して、飛灰洗浄技術のベンチスケールでの実証試験を現在実施しています。ベンチ試験の全体処理工程フローの概要を図 3.13 に示します。これまでの試験で、飛灰中の放射性セシ

ウムを 90%以上除去するための必要水量や溶解時間など、水洗浄条件に関する知見を得るとともに、溶出した放射性セシウムを吸着剤に高濃度化することで、保管スペースを確保しつつ、放射能汚染物質を管理しやすくするためのノウハウなど、スケールアップ施設の設計基盤の確立を図っています。

今後は、得られた試験データを分析し、飛灰洗浄技術の技術要件や被ばく管理手法、中間貯蔵や最終処分への輸送安全性・効率性も見据えた二次廃棄物の放射性セシウム濃度制御、保管方法などに関する有用な知見としてとりまとめ、成果を国や自治体等に提供・発信することで、焼却飛灰の処理推進への貢献を果たしていきたいと考えています。

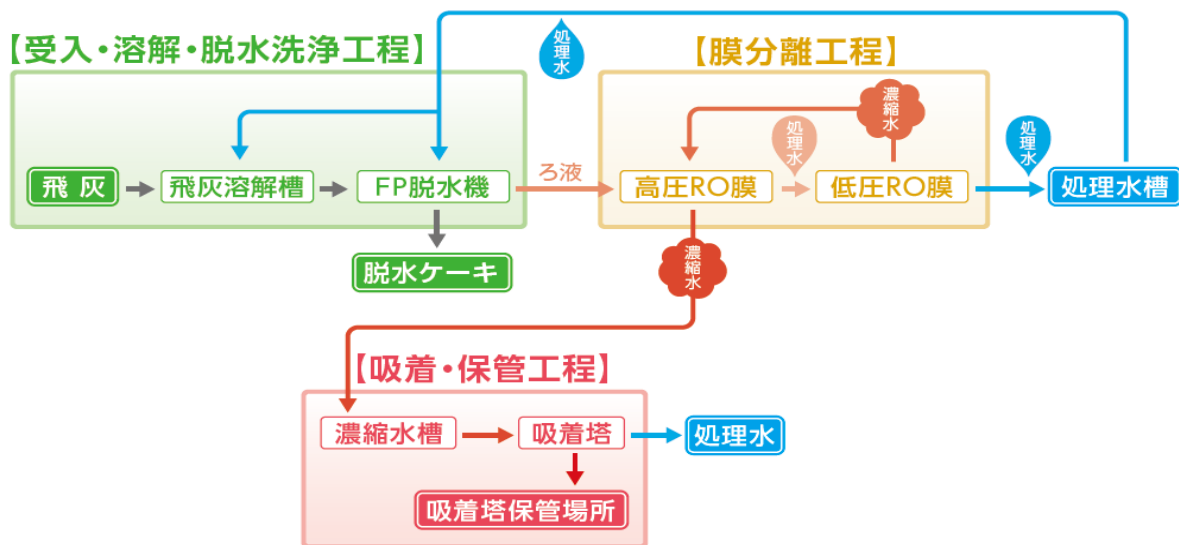


図 3.13 飛灰洗浄技術ベンチ試験での全体工程フロー概要

3.2.3 処理施設での放射性セシウムの蓄積挙動の解明と管理技術の確立

(1) 焼却施設での蓄積挙動解明・モデル化

さまざまな廃棄物が投入される焼却施設において、放射性セシウムが設備材料等に蓄積していくことが予想され、このことは施設内の作業空間において、また定常的な設備点検時において、さらには長期的に施設の更新時等において十分に留意しなければならない問題になります。これに備えるために、焼却施設の実態調査をしつつ、放射性セシウムの蓄積挙動を解明し、またモデル化を行ってあらかじめ予測評価することが重要となります。

そこで、焼却施設内の各放射性セシウム量等の実態データを蓄積するため、既存施設における空間線量と付着灰の放射性セシウムの実態調査を行うとともに、実施内にある気孔率等の異なる耐火物試料を採取し、炉内→炉壁にいくつか分割して放射性セシウムを測定し、炉内耐火物への放射性セシウムの蓄積・浸透特性の把握を進めています。

既存焼却施設内での調査結果の一例を図 3.14 に示します。耐火物表面の付着灰の放射性セシウム濃度が低いにもかかわらず、耐火物がある場所（高温になる炉内など）の空間線量が無い場合の 4-5 倍高いことから、放射性セシウムが耐火物へ蓄積し、空間線量を劇的に高めることがわかっています。一方、温度が低く耐火物がない場所では、放射性セシウムが蓄積されない

ことで空間線量は低くなります。ただし、付着灰中の放射性セシウム濃度は高くなり、作業上注意が必要です。

また、小規模加熱装置を用い、耐火物試料へのセシウムの供給と分布の測定から、媒体中へのセシウムの移行・濃縮率等を模擬実験系で求めるとともに、耐火材厚さ方向のセシウム濃度勾配の時経変化等を予測すべく、焼却炉内耐火物へのセシウム蓄積量を推算するシミュレーションモデルを構築しています。

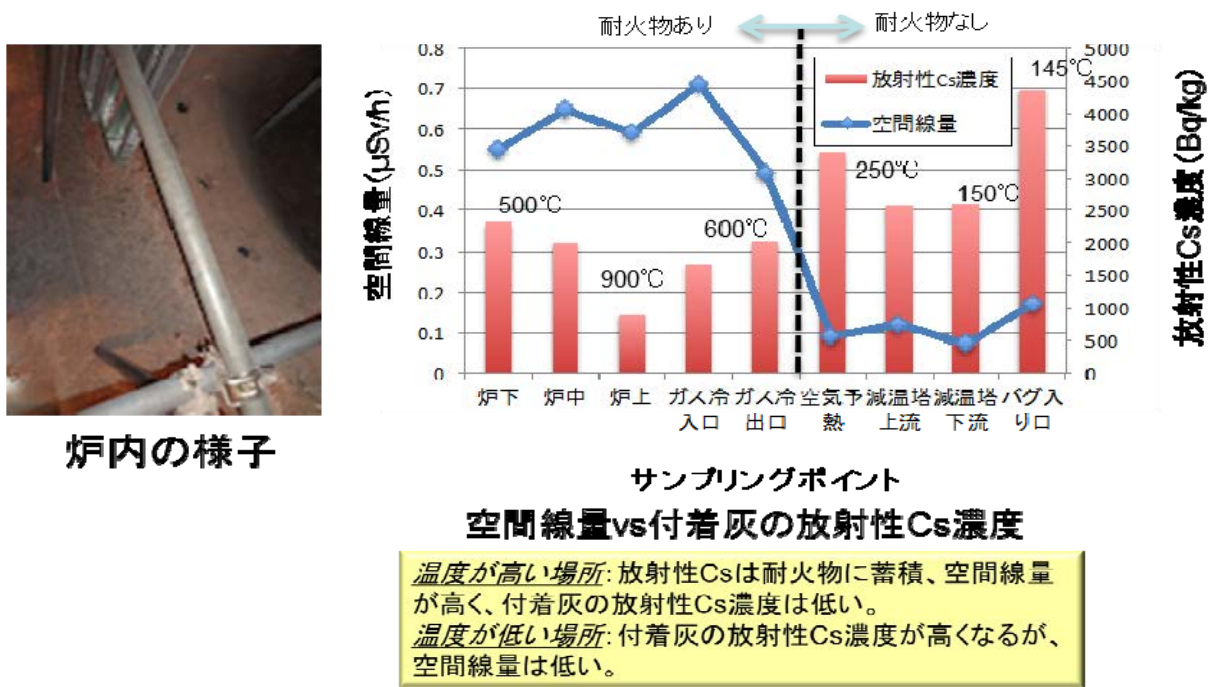


図 3.14 既存焼却施設内の空間線量と付着灰の放射性 Cs の実態調査の結果例

(2) 最終処分場での放射性セシウムの埋立内挙動、浸出水影響評価と制御^{12),13)}

放射性物質に汚染された廃棄物（焼却灰等含む）の埋立は濃度により分類されており、その値は、作業者の被曝線量率から求められた 8,000Bq/kg（廃棄物中に含まれる放射性セシウム濃度：以下、固体濃度とする）が採用されています。これまで、重金属やその他の有害物質の埋立に対しては、固体濃度ではなく、処分場から発生する浸出水に対する影響という観点から、溶出試験によって制御されてきました。放射性セシウムの場合、埋立後の地域住民に対する被曝線量を十分に低くしなければならないことから、固体濃度による規制も必要ですが、放射性物質を含む浸出水が発生した場合に、既存の水処理施設では十分な対応が取れないことから、被曝量と同時に、浸出水への影響も考える必要があります。

そこで、3.2.1 で得られた知見等も利用し、放射性セシウムを含む廃棄物を埋め立てた場合における、廃棄物からの放射性セシウムの溶出量を考慮した浸出水への影響評価を数値モデル解析（シミュレーション）により行い、その結果を踏まえ、埋立時における放射性セシウムの制御手法について考察しました。数値モデル解析で想定した埋立方法と設定した各種条件を図 3.15 に示します。

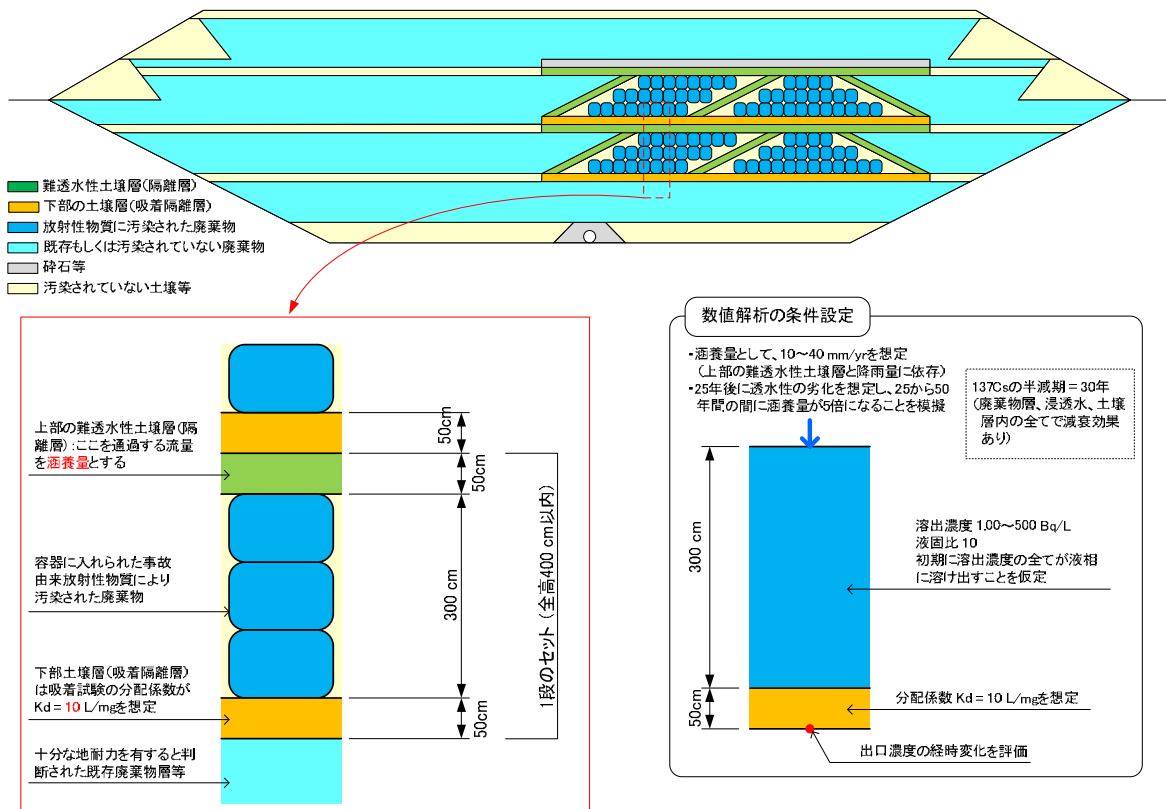


図 3.15 数値モデル解析で想定した埋立方法と条件設定

解析結果は、上図に示される下部吸着層下端のセシウム 137 の濃度変化によって評価しました。図 3.16 は涵養量毎のセシウム 137 濃度の経時変化についての計算結果です。下部吸着層を通過するセシウム 137 のトラベルタイム（通過するのに要する時間）と半減期の影響涵養量の増加により、ピーク濃度が上昇することがわかります。

次に、涵養量毎のセシウム 137 のピーク濃度と溶出濃度の関係を図 3.17 に示します。本解析条件下では溶出濃度とピーク濃度は線形関係にあることがわかります。浸出水のピーク濃度を濃度限度である 90 Bq/L 以下にするためには、涵養量が 10→50 mm/yr の時、溶出濃度が 433 Bq/L 以下であればよく、以下同様に、20→100 mm/yr では 182 Bq/L、40→200 mm/yr では 94 Bq/L 以下という計算結果が得られました。

無機主体の廃棄物を埋め立てている処分場では中間覆土が設置されていないケースがありますが、中間覆土が無ければ吸着層の効果を得ることができないため、高い濃度のセシウム 137 が浸出水中に溶け出すことが考えられます。吸着現象は、物質の移動を見かけ上、遅延させる効果があるため、吸着したものが全て脱着（吸着していたものが剥がれ出る）したとしても、時間遅れによる半減期が有効に働くこととなります。中間覆土が無い場合や、スラグや粗砂を用いている場合には、その遅延効果が生じないため、半減期の短いセシウム 134 の影響も考慮する必要があります。溶出性の高い一般廃棄物焼却飛灰を埋め立てた最終処分場では、たとえ 8,000 Bq/kg 以下であったとしても上部遮水層（キャッピング）を設置して、降雨浸透水と埋立飛灰を接触させないように心掛けることが重要です。

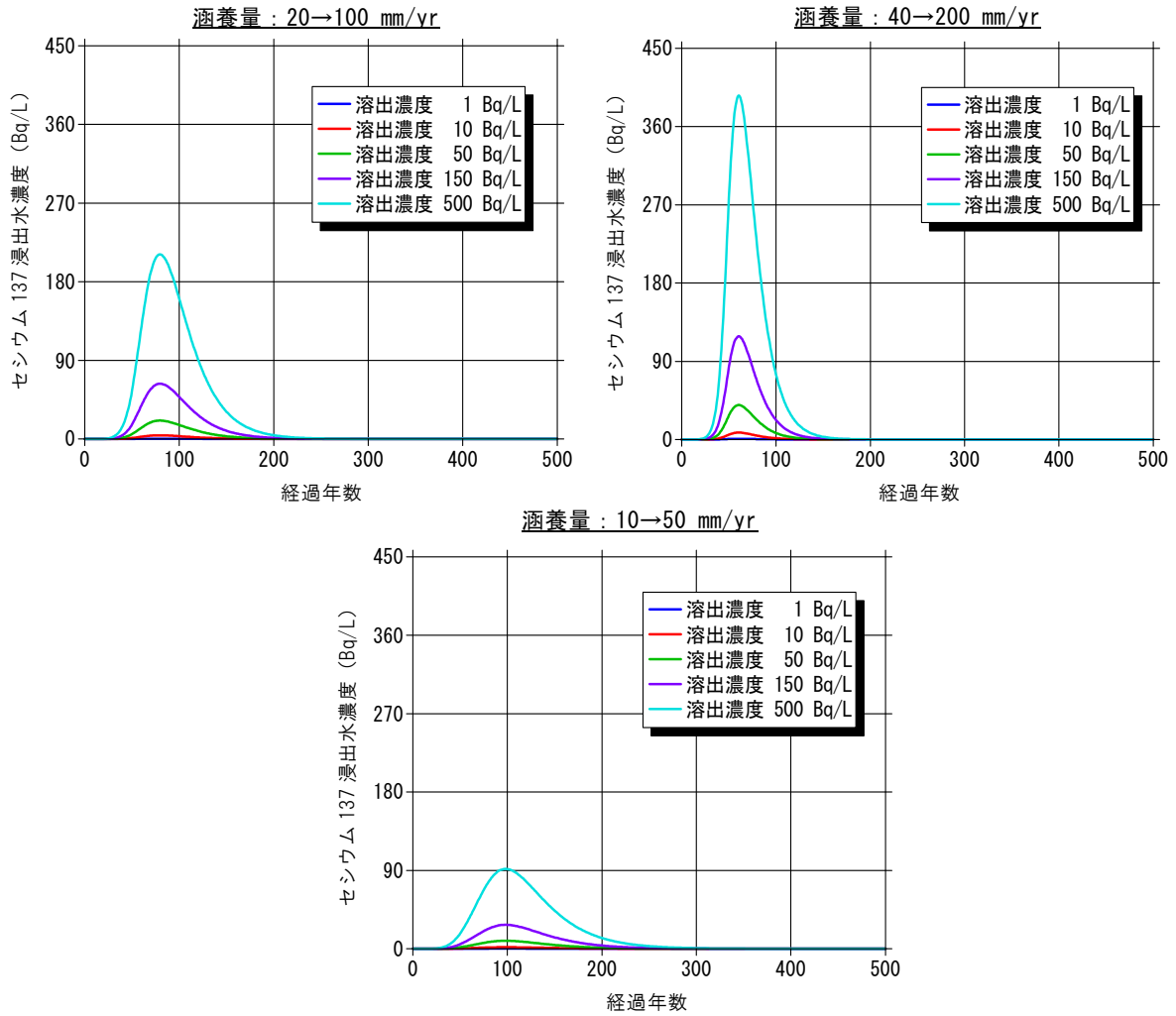


図 3.16 涵養量の違いによるセシウム 137 の浸出水濃度変化

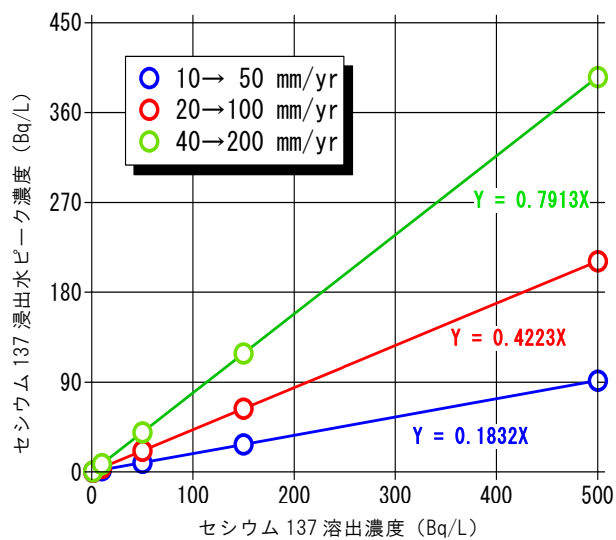


図 3.17 涵養量毎の浸出水ピーク濃度

3.2.1 で紹介した各種焼却灰やその固化体の溶出・吸着試験で得られた結果と、上記の数値埋立モデルによる解析結果をもとに、埋立時における放射性セシウムの具体的な封じ込め技術を提案しました。その成果は、環境省災害廃棄物安全評価検討会に提供され、放射性物質汚染対処特措法に基づく処理基準設定やガイドライン策定の際の基盤的知見として活用されました。また、この解析モデルをもとに海面処分場における特定一般廃棄物、特定産業廃棄物、広域処理災害廃棄物焼却灰の埋立における安全性評価手法を開発し、自治体での個別評価に活用されました。

3.2.4 廃棄物中の放射能物質の測定分析・モニタリング手法の確立

(1) 廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアルの策定・公表¹⁴⁾

放射能汚染廃棄物の安全・安心な処理を進める上で、放射能濃度や放射線量を正確に測定・把握し、その濃度に応じた対応が求められます。しかし、当初は廃棄物関連試料の放射能の測定法が十分に整備されておらず、また体系的な整理もなされていませんでした。

そこで、公的機関、民間機関の有識者・技術者の有志メンバーで研究会を立ち上げ、国のガイドラインに先立って、平成23年11月に「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」）をとりまとめ公表しました¹⁴⁾。この暫定マニュアルは環境省災害廃棄物安全評価検討会に提供され、特措法に基づく環境省ガイドラインのベースとして活用されました。

(2) 測定分析・モニタリング手法の標準化・簡便化

上記の暫定マニュアル作成の過程や議論等を通じて、また、現場での測定分析の実態把握を通じて、試料の採取方法や分析精度管理など多くの課題があることが確認されたことから、これらの課題を解決するため、廃棄物資源循環学会とも連携し、線量や放射能濃度の測定分析・モニタリング手法の標準化・簡便化に向けた各種調査研究を鋭意実施しております。これらの調査研究で得られた成果は、暫定マニュアルや環境省ガイドラインの改訂時に本成果を先駆的な調査・研究事例として反映する予定です。ここでは、焼却排ガスのサンプル採取方法や焼却灰の放射能濃度のばらつき調査に関する成果例を紹介します。

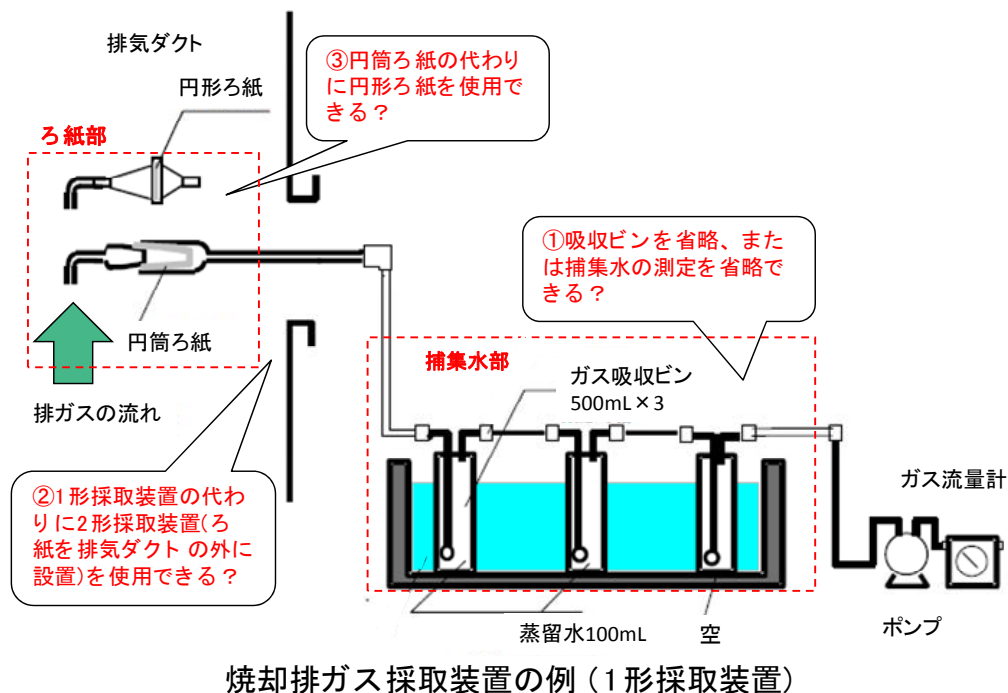
a) 焼却排ガスの試料採取方法の検討¹⁵⁾

上記の暫定マニュアルでは、焼却排ガス中放射性物質の分析のための試料採取において、**図3.18**に示す採取装置が定められていますが、暫定マニュアル策定の過程で次のような点が技術的課題として挙げられました。

- ①放射性セシウム分析において採取装置から吸収ビンを省略する、あるいは捕集水(ドレン水)の測定を省略することは可能か。その場合、どのような条件下で省略が可能か。
- ②1形採取装置(ダスト捕集部を煙道内に挿入するタイプの装置)の代わりに2形採取装置(ダスト捕集部を煙道外に置くタイプの装置)を使用することは可能か。
- ③円筒ろ紙の代わりに円形ろ紙を使用することは可能か。

これらの課題に関しては各々メリット、デメリットがあり、例えば、課題①については、吸収ビン省略することで、試料採取や測定が容易になる、捕集水を測定する必要がなくなるので検出下限を低くできるメリットがあります。一方で、ろ紙が破損した場合に測定自体不可能になるデメリットがあります。これらの課題について実証的に検討する必要があります。

そこで、関東地方の一般廃棄物焼却施設で、焼却炉集じん機（バグフィルター）の入口と出口、灰溶解炉集じん機の入口と出口、煙突の5カ所で排ガス試料を採取し、採取管部（2形採取装置のみ）、ろ紙部、捕集水部毎に放射性セシウムを測定しました（**図 3.18**）。



焼却排ガス採取装置の例（1形採取装置）

図 3.18 焼却排ガス装置の例及び採取に関する技術的課題

その結果、焼却炉と熔融炉の集じん機入口排ガスのみ放射性セシウムが検出されました（**表 3.1**）。上に示した課題①について、焼却炉集じん機入口では捕集水部は不検出でしたが、捕集水部の検出下限（核種毎に 5 Bq/m^3 ）は排ガス濃度の 8%程度に相当します。吸収ビンや捕集水測定の省略について今回の結果から判断するのは困難で、今後も測定事例を重ねて判断する必要があります。課題②については1形と2形で測定結果に差はなく、2形の使用は問題ないことが分かりました。ただし、焼却炉集じん機入口では採取管部の濃度割合は約 19%であり、採取管に付着したダストを入念に水洗して測定する必要があります。課題③については、円筒ろ紙、円形ろ紙いずれも不検出であり、今回の結果からは判断できませんでしたが、煙突などばいじん量が低い場合には円形ろ紙が使用できると考えられました。

現在進められているガイドラインや暫定マニュアル改定には、調査事例とともに本研究の成果が反映される見込みです。

表 3.1 焼却炉と溶融炉の集じん機入口出口等での排ガス中放射性セシウム濃度

採取ポイント	ろ紙	採取装置	採取管部		ろ紙部		捕集水部	
			Cs-134 (Bq/m ³)	Cs-137 (Bq/m ³)	Cs-134 (Bq/m ³)	Cs-137 (Bq/m ³)	Cs-134 (Bq/m ³)	Cs-137 (Bq/m ³)
焼却炉	円筒ろ紙	1形	—	—	58.5	75.7	<5	<5
集じん機入口	円筒ろ紙	2形	9.3	12.8	41.9	53.1	<5	<5
焼却炉	円筒ろ紙	1形	—	—	<0.1	<0.1	<0.2	<0.2
集じん機出口	円筒ろ紙	2形	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.2	<0.2
溶融炉	円筒ろ紙	1形	—	—	648	824	<2	<2
集じん機入口	円筒ろ紙	2形	10	14.7	685	845	<2	<2
溶融炉	円筒ろ紙	1形	—	—	<0.1	<0.1	<0.2	<0.2
集じん機出口	円筒ろ紙	2形	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.2	<0.2
煙突	円筒ろ紙	1形	—	—	<0.1	<0.1	<0.2	<0.2

b) 焼却灰の放射能濃度のばらつき調査¹⁶⁾

焼却施設で生じる焼却灰の時系列的な放射性物質濃度の変動特性や、廃棄物の性状と放射性物質濃度のばらつきを実測することにより把握し、焼却灰の性状が時間的に変動する場合や不均一で大量の廃棄物が生じる場合の、試料採取と放射能分析におけるロット管理の考え方について検討しました。

具体的には、一般廃棄物の焼却施設において時系列的に生じる飛灰（インクリメント試料数 14）および主灰（インクリメント試料数 22）を対象試料（1ロット）として、代表性のあるインクリメント試料の取り方（採取数）について検証を行いました。インクリメント試料については Ge 半導体検出器による測定を行い（図 3.19）、試料のランダムな組み合わせによる分析想定値の算出を行いました。インクリメント数毎に全ての考えられる組合せを抽出し、平均、

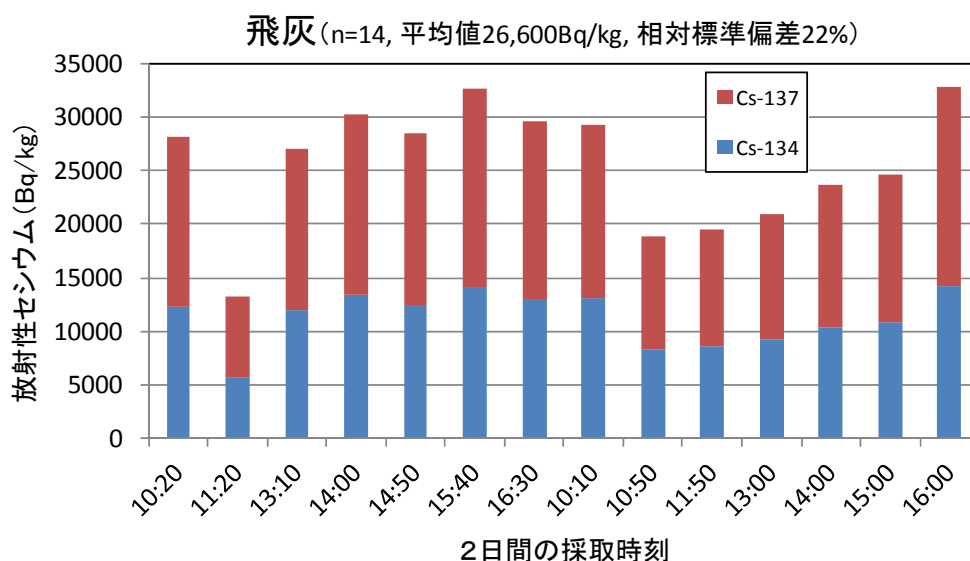


図 3.19 焼却灰（飛灰）インクリメント試料の Ge 半導体検出器による測定結果

標準偏差、変動係数の計算を実施しました。結果を表 3.2 に示します。その結果、飛灰および主灰ともに 1 ロット中からのインクリメント数を増やすことで、変動係数は減少しました。変動係数が 10% を下回る採取インクリメント数は、主灰で 5 インクリメント、飛灰で 4 インクリメントであり、環境省測定ガイドラインの記載事項（インクリメント数 4 以上とする条件）を支持する解析結果が得られました。

表 3.2 インクリメント試料のランダムな組み合わせによる分析想定値試算結果

飛灰(n = 14)				
インクリメント数	組み合わせ(通り)	平均(Bq/kg)	標準偏差(Bq/kg)	相対標準偏差(%)
2	91	25,647	3,797	15
3	364		2,956	12
4	1,001		2,439	10
5	2,002		2,069	8
6	3,003		1,780	7
主灰(n = 22)				
インクリメント数	組み合わせ(通り)	平均(Bq/kg)	標準偏差(Bq/kg)	相対標準偏差(%)
2	231	3,037	463	15
3	1,540		368	12
4	7,315		310	10
5	26,334		269	9
6	74,613		239	8

3.2.5 放射性セシウムを含む焼却灰等の空間的・時間的特性の把握^{17)~19)}

東日本の広範囲において放射性セシウムを高濃度で含む一般廃棄物焼却灰が発生しています。その処理方法については特措法に基づく処理基準やガイドラインが定められ、それらに基づき徐々に保管・中間処理・最終処分が進んでいますが、今後放射性セシウムを高濃度で含む焼却灰の処分を円滑に進めていくためには焼却灰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。

そのための基礎的知見を得るため、一般廃棄物焼却灰の放射性セシウム濃度の推移や焼却施設の属性に関して基礎データを収集整備し、汚染レベルや環境から焼却ごみへのセシウム移行傾向の推移や地域、施設による特徴を分析しました。その結果事例をいくつか紹介いたします。

(1) 焼却灰の放射性セシウム濃度の傾向

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(セシウム 134 とセシウム 137 の合計)の推移をまとめました(図 3.20 に一部の県の例を示します)。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平成 23 年 7 月から 24 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、平成 24 年春頃に再びピークが見られます(ここでは示しませんが、図 3.20 とは別の県や施設では平成 24 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)。

これらのデータから、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。

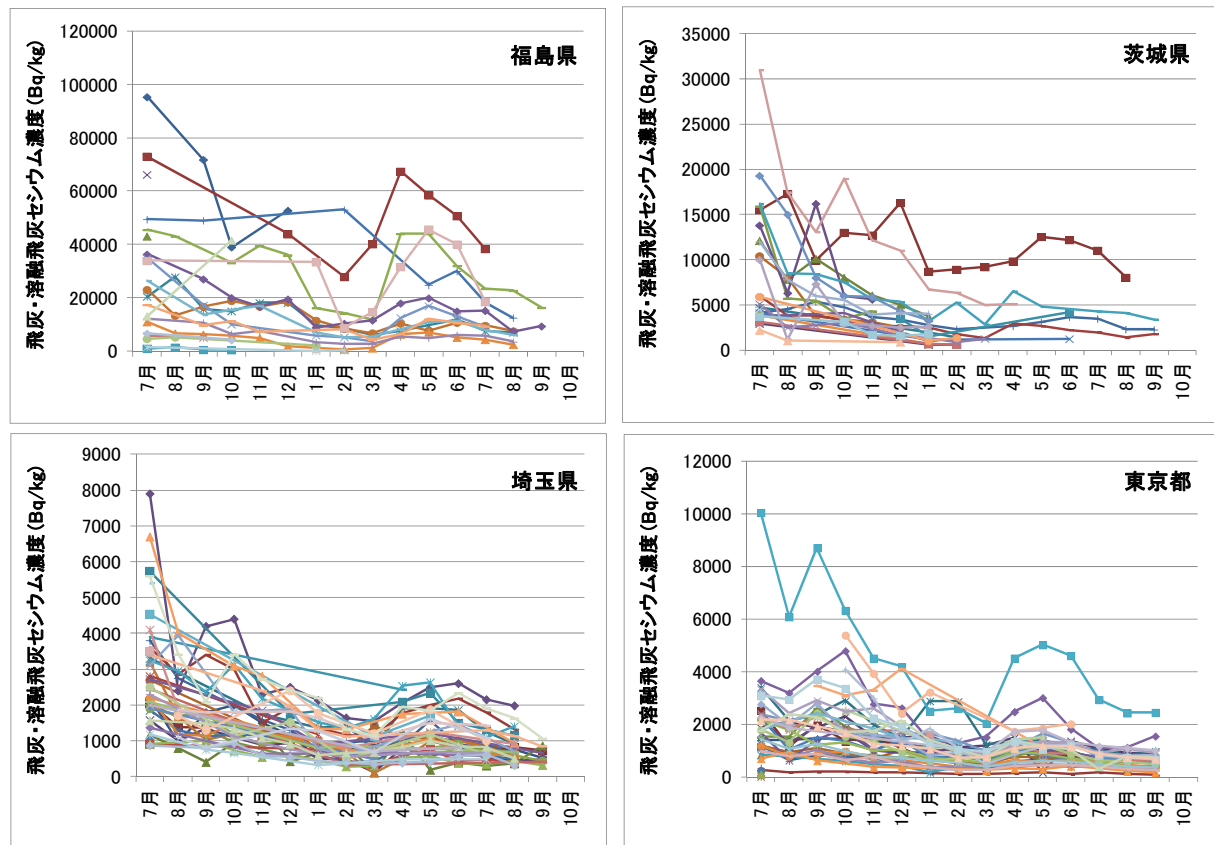


図 3.20 一般廃棄物焼却施設焼却飛灰・溶融飛灰の放射性セシウム濃度（セシウム 134 とセシウム 137 の合計）の推移（福島県・茨城県・埼玉県・東京都の例）（各グラフで縦軸の数値が異なることに注意）

(2) 焼却ごみの放射性セシウム濃度の傾向

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。

施設ごとの焼却灰等の放射性セシウム濃度、焼却灰等発生量及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。

$$\text{焼却ごみセシウム濃度(Bq/kg)} = \frac{\sum_i \text{焼却灰等}i\text{のセシウム濃度(Bq/kg)} \times \text{焼却灰等}i\text{の発生量(kg/年)}}{\text{焼却灰処理量(kg/年)}}$$

i は焼却飛灰、焼却主灰、混合灰、熔融飛灰、熔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、ガス化熔融施設や灰熔融併設焼却施設については熔融飛灰と熔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 3.21 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（平成 23 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）上においては平成 23 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。

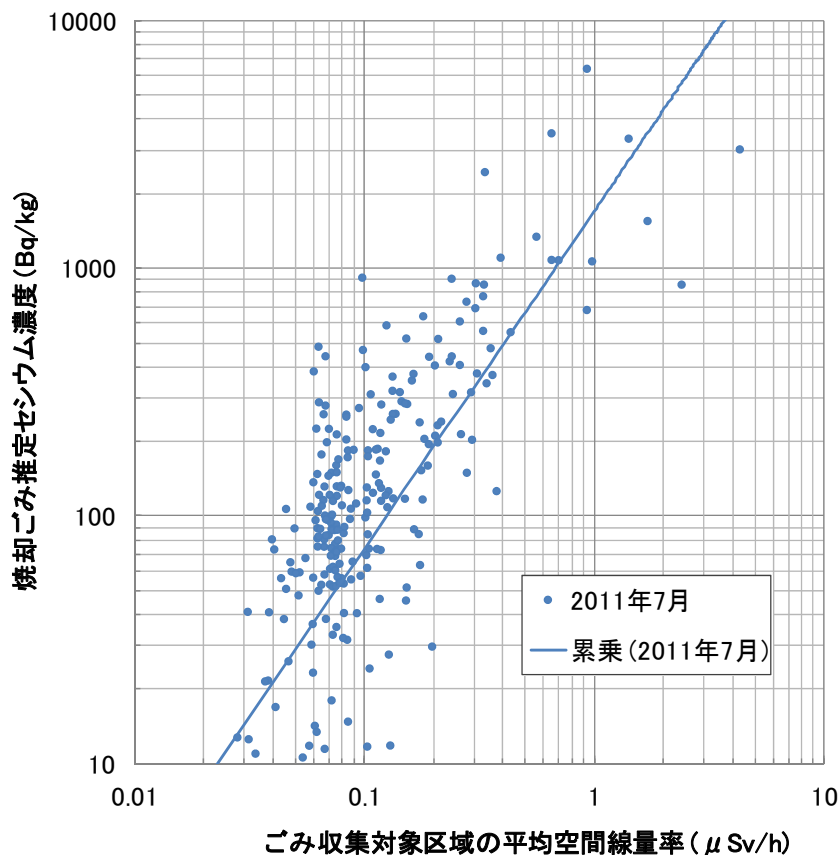


図 3.21 焼却ごみの推定放射性セシウム濃度（平成 23 年 7 月時点、セシウム 134 とセシウム 137 の合計）と空間線量率の関係

(3) 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。

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

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 3.22 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% (平成23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。

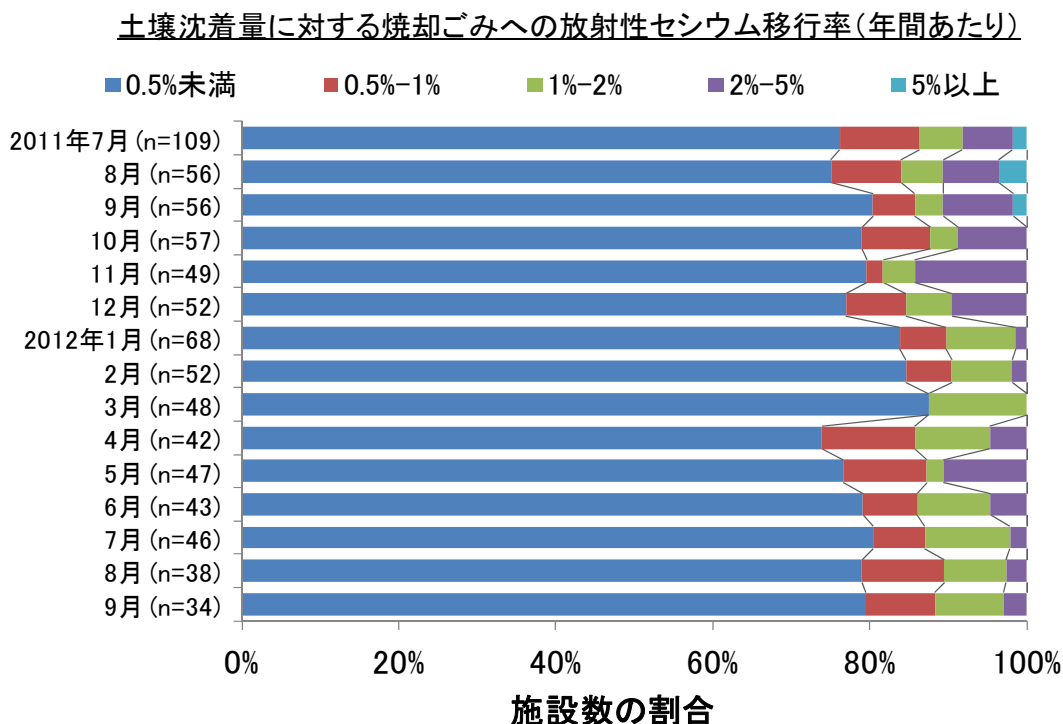


図 3.22 土壌沈着量に対する焼却ごみへの放射性セシウム移行率の分布

また、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（図は省略）。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。

(4) 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・溶融飛灰のデータをもとにその傾向を考察しました。

図 3.23 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。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。

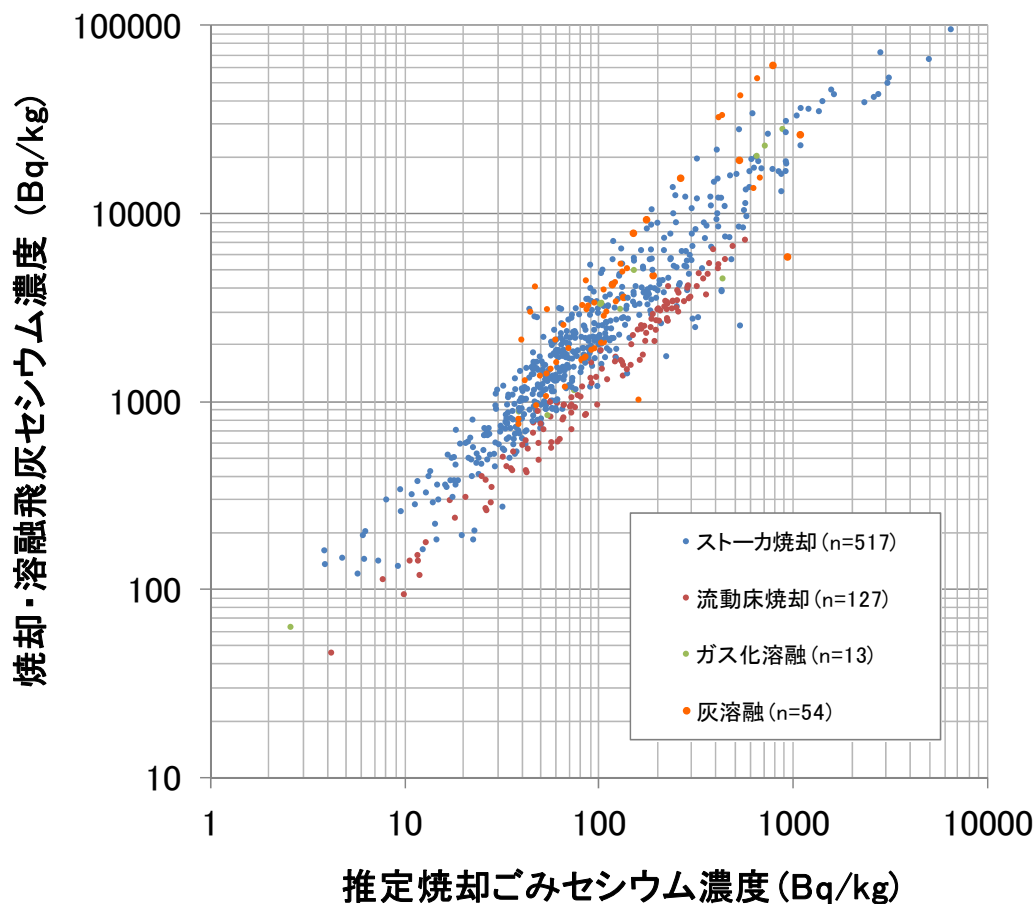


図 3.23 放射性セシウムの推定焼却ごみ濃度と焼却・溶融飛灰濃度の関係

3.3 今後の取組

現在国環研では、資源循環・廃棄物研究センター内の各研究室メンバーが組織横断的なプロジェクトチームに参画して調査研究を進めています。プロジェクトチームは専門性に応じて研究班を構成するとともに、出口指向の研究プロジェクトを各種設定し、行政（国・関係自治体）や外部機関（研究機関・関連学会・大学・廃棄物等関連団体・民間企業等）、関係研究者と連携しつつ、機動的に調査研究や行政政策支援活動を展開しています。具体的には、図 3.24 のような研究構成のもとで出口指向のプロジェクト研究を設定し、放射能汚染廃棄物の処理処分・再生利用全体を通じた体系的かつ有機的な連携の下で研究展開を図っています。

今後は、これまでと同様、現場重視という視点を常に持ちつつ、3.1.3 で示した研究構成を基本として、放射能汚染廃棄物処理における各工程で必要とされる知見の集積を引き続き進めるとともに、得られた知見の一般化・体系化にも取り組んでいきます。また、成果の情報提供・情報発信を通じて、各地の処理処分・再生利用が全体として円滑に進んでいくよう、できる限りの貢献を果たしていく所存です。

さらには、中長期的な視点から、災害・放射能汚染廃棄物に関する研究の深化を従来研究の学術的基盤強化にフィードバックさせるとともに、災害と環境に関する新たな学術体系の構築にも取り組んでいきたいと考えています。

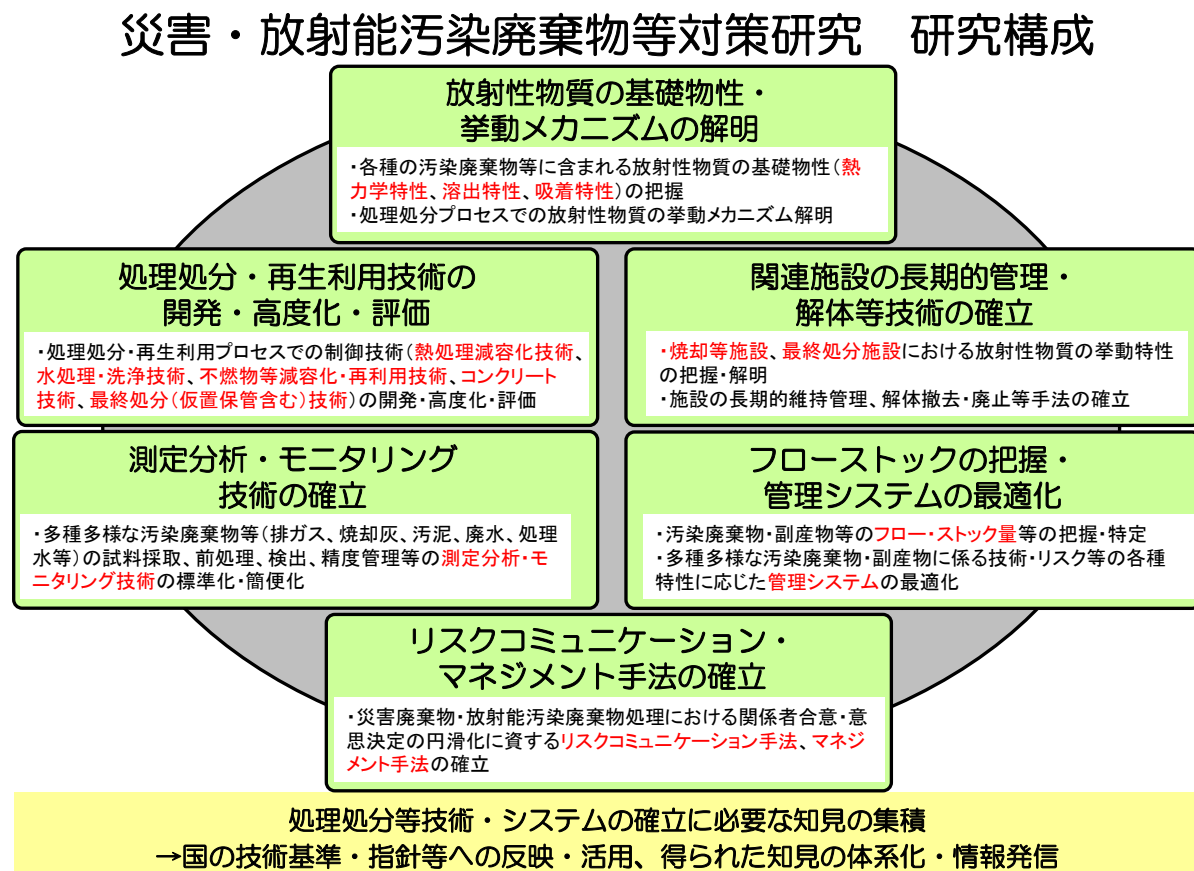


図 3.24 災害・放射能汚染廃棄物等対策研究 研究構成

第3章参考文献

- 1) 環境省災害廃棄物安全評価検討会 同検討会資料
http://www.env.go.jp/jishin/index.html#haikihyouka_kentokai
- 2) 環境省 廃棄物関係ガイドライン, <http://www.env.go.jp/jishin/rmp.html>
- 3) 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター (2012) 放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分 (技術資料: 第三版), 2012年12月20日, http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r3_121220.pdf
- 4) 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター (2012) 放射性物質を含む廃棄物の適正な処理処分 (技術資料: 概要版), 2012年7月26日, http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_publicver_120725ss.pdf
- 5) 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター (2012) 放射性物質を含む廃棄物の適正な処理処分 (技術資料: 概要版) (英語バージョン), 2012年11月29日,
http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_publicver_e_121128.pdf
- 6) 国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター (2013) 放射性物質を含む廃棄物に関する Q&A~入門編~, 2013年1月11日, http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_QandA_130111.pdf
- 7) Kuramochi H., Osako M. (2012) Behavior of radioactive cesium during incineration of municipal wastes contaminated by radioactive fallout from the Fukushima Nuclear Accident. 4th EuCheMS Chemistry Congress, Chemicke Listy, 106(S), s636.
- 8) 倉持秀敏, 大迫政浩 (2012) 焼却処理過程における放射性セシウムの挙動解析のためのマルチゾーン平衡計算の開発. 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同予稿集, 405-406.
- 9) 倉持秀敏, 大迫政浩 (2012) 汚染廃棄物の焼却処理過程における放射性 Cs の挙動解析を目的とした物性調査と熱力学平衡計算. 分離技術会年会 2012, 同予稿集.
- 10) 石森洋行, 肴倉宏史, 蛭江美孝, 遠藤和人, 山田正人, 大迫政浩 (2012) 福島第一原発事故後に発生した一般廃棄物焼却灰からの放射性セシウムの溶出特性と土壌等への吸着効果. 都市清掃, 65 (307), 285-289.
- 11) 加藤利崇, 水谷敦司, 川島哲文, 白井克巳, 遠藤和人 (2012) 腐敗性廃棄物(草木類)の減容化と保管時温度変化に関する検討(速報). 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, 講演論文集, 127-128.
- 12) 山田正人, 遠藤和人 (2012) 一時保管と最終処分. 都市清掃, 65 (305), 28-34.
- 13) 遠藤和人, 石森洋行, 山田正人, 大迫政浩, 細野賢一 (2012) 放射能汚染焼却灰の埋立における隔離層の役割. 第33回全国都市清掃研究・事例発表会, 第33回全国都市清掃研究・事例発表会講演論文集, 312-314.
- 14) 廃棄物等の放射能調査・測定法研究会 (2011) 廃棄物等の放射能調査・測定法暫定マニュアル,
http://www.nies.go.jp/shinsai/radsurvey_111111.pdf
- 15) 山本貴士, 田野崎隆雄, 竹内幸生, 鈴木剛, 滝上英孝, 大迫政浩, 酒井伸一 (2012) 焼却排ガス中の放射性セシウム測定における試料採取方法の検討, 第1回環境放射能除染研究発表会, 同要旨集, pp71.
- 16) 滝上英孝, 山本貴士, 鈴木剛, 竹内幸生, 田野崎隆雄, 大迫政浩, 酒井伸一(*1)(*1 京都大学) (2012) 焼却灰の放射能測定値のばらつきと試料代表性に配慮したサンプリング方法の検討. 第1回環境放射能除染研究発表会, 同要旨集, 155.
- 17) 小口正弘, 森朋子, 大迫政浩, 山田正人 (2012) 一般廃棄物焼却灰の放射性セシウム汚染の経時変化と地域的特性の分析. 第1回環境放射能除染研究発表会, 同要旨集, 69.
- 18) 小口正弘, 森朋子, 大迫政浩, 森口祐一, 山田正人 (2012) 一般廃棄物焼却処理への放射性物質の移行と焼却灰への濃縮に関する傾向の分析. 第23回廃棄物資源循環学会研究発表会, 同講演論文集, 165-166.

- 19) Mori T, Oguchi M., Osako M., Yamada M. (2012) Flow and stock study of radioactive cesium and its impact on waste treatment systems. The 23rd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, Proceedings, 649-650.

第4章 環境中での放射性物質の動態解明と影響評価

4.1 主要な成果

東日本大震災に伴う福島第一原発の事故により放出された放射性物質による環境汚染へ対処するために、事故直後から環境中の放射性物質の実態を把握し、その動態を解明し、更に今後の動向を予測することを目的とした研究を実施し、次のような主要な成果が得られました。

- ① 事故直後から大気中の放射性核種を測定し、核種構成や粒径分布などを明らかにしました。
- ② 筑波山や霞ヶ浦において放射性物質の動態の計測を事故直後から開始し、森林・湖沼・河川などにおける放射性物質の蓄積・循環・移動の過程を把握し、森林除染等の対策検討に貢献しました。
- ③ 大気シミュレーションモデルを用いて、放射性物質の大気中での広がりや地表面への沈着量分布をいち早く明らかにし、社会に発信し、行政に貢献しました。
- ④ 放射性物質の広域的な環境動態モデルの構築を進め、将来予測を含む環境シミュレーションを開始しました。
- ⑤ 家庭内の様々な被ばく経路毎に被ばく量を測定し、ヒトへの被ばく総量を把握しました。

4.2 成果の概要

4.2.1 大気中の放射性物質の組成や時間変化の把握

(1) 観測のスタート

2011年3月11日の震災によって、国立環境研究所も大きな被害を受け、構内は停電が続いていました。その間にも福島第一原発の原子炉が損傷し、大気中に放射性物質が放出されていることが、報道や各地に設けられた空間線量計の値からわかってきました。国環研には貝などの環境試料を、将来の環境問題に備えて長期冷凍保存するタイムカプセル棟という施設があります。停電が続けば、貴重な試料が溶けてダメになってしまいます。そのため、タイムカプセル棟の電気を他の建物に先がけて復帰しました。私たちはこれまで放射性物質のモニタリングは業務としていませんでした。しかし、放射性物質が迫りつつある状況の中で、何とか現在使える設備を利用して大気中の放射性物質を観測しようと考えました。

利用したものはダイオキシンなどの大気汚染物質を捕集するためのハイボリュームエアサンプラーです。今回放出された放射性物質には、揮発性のある放射性ヨウ素が多く含まれることが考えられましたので、粒子状物質を捕集するための石英ろ紙の後段に、揮発性化学物質を捕集するための活性炭素繊維フェルトをつけ、大気試料のサンプリングを開始しました。3月15日の午後2時半のことでした。

(2) 大気中の放射性物質の組成変化と粒径分布

その当時、大気中にどれくらいの放射性物質が飛来しているかわからなかったため、最初の

試料採取時間は3時間としました。構内の放射性物質の測定施設は停電から復旧しておらず、同じつくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）で測定していただきました。その後も KEK とは共同研究が続き、観測結果はいち早く KEK のホームページを通じて公開されました。図 4.1 に 1)2011 年 3 月 15 日の最初の測定、2)3 月 18～20 日、3)3 月 20～22 日にかけて採取した大気試料中の放射性核種の割合を示します。原子炉から多量の放射性物質が放出された直後の 15 日の試料では、I-131 に加えて凡例に示した Cs-137 などの 8 種類の放射性核種が検出されていました。I-131 の放射能は 33Bq/m^3 で、ガス態（活性炭素繊維フェルトに捕集された部分）の割合は 30% でした。その後の 18～20 日では、I-131 の放射能は 0.5Bq/m^3 に下がった一方、ガス態の割合は 80% に上昇していました。この時期の大気中放射性核種は、ほとんどが I-131 であり、揮発性の低い放射性セシウムなどの核種の占める割合は低い状態でした。再び原子炉から放射性物質が多量に放出された 20 日～22 日の試料では、I-131 の放射能は 23Bq/m^3 に上昇し、核種の割合も 15 日の状態に近づいていました。

1)は、いったん北から関東地方へ流れた放射性物質を含む大気が、風向きが南東に変化したことで福島県に大きな放射性物質の沈着を起こした時のものです。3)では、放射性物質を含む大気がつくばを超えて関東南部に流れ込み、降雨があった場所にホットスポットを作り出した時のものです。その後、大気中の放射性物質の濃度は急速に減少しました。4 月 15 日から 4 月 17 日まで、及び 5 月 30 日から 6 月 1 日までの期間に採取した大気試料中の I-131 は、それぞれ 0.006Bq/m^3 、 0.0006Bq/m^3 と初期観測値の 10 万分の 1 ほどに減少していました。

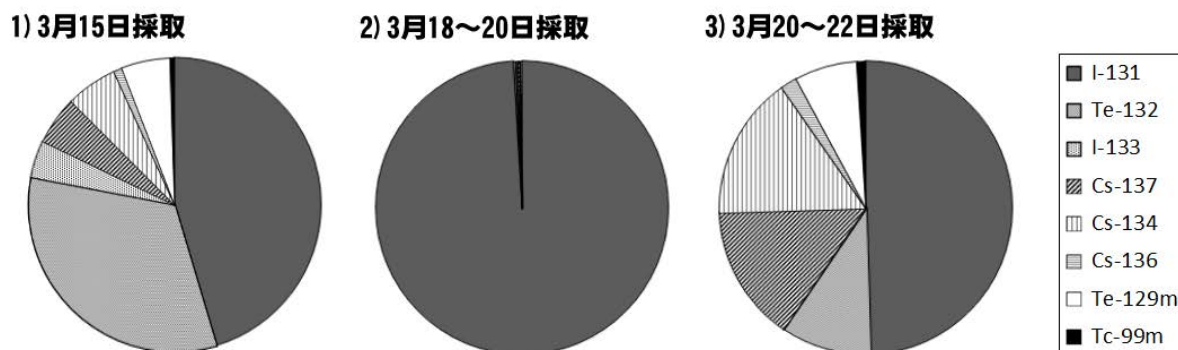


図 4.1 つくばで採取した大気試料中の放射性核種の割合

大気中の放射性ヨウ素の、粒子態とガス態の割合が時間とともに変化することがわかりました。それでは、放射性セシウムと放射性ヨウ素の大気中での挙動は同じなのでしょうか。また、小さい粒子は人の体内に取り込まれやすいことが知られており、粒径分布は初期被ばくに対して有用な情報を与えます。そこで、大気中の放射性物質の粒径分布を観測しました。図 4.2 に、2011 年 4 月 14～21 日にかけて地上 1m の高さで採取した放射性物質の粒径分布の測定結果を示します。この時期には、研究所内の放射性物質測定装置が稼働しており、測定は自前で実施しています。

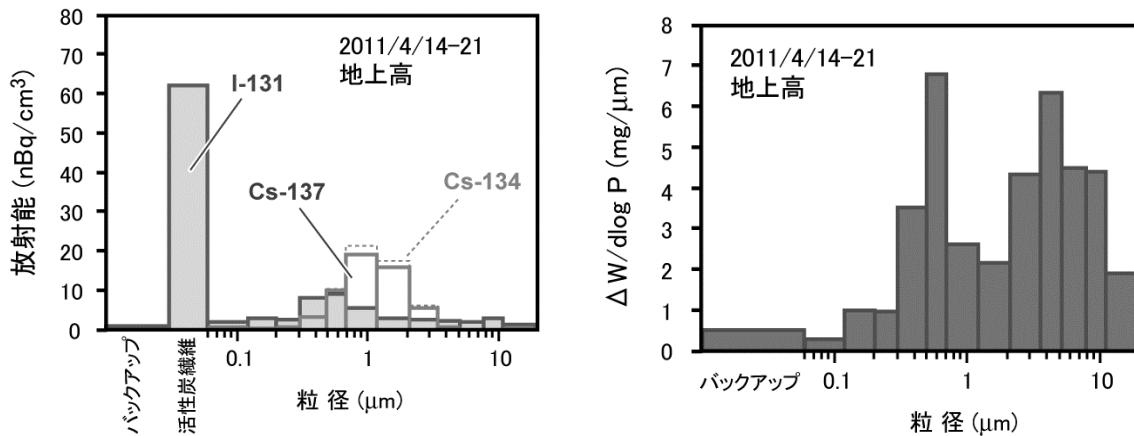


図 4.2 つくばで採取した大気試料中の放射性核種の粒径分布
(左：放射能の粒径分布，右：粒子状物質量の粒径分布)

I-131 (図 4.2 左図灰色塗り) は活性炭素繊維に捕集されるガス態が多く、また、粒径 $0.5\mu\text{m}$ 程度の微小粒子に多く含まれていました。一方、Cs-137 (実線) と Cs-134 (破線) は、物理化学的性質が等しいので全く同じ粒径分布を示していました。ガス態では全く存在せず、 $1\mu\text{m}$ 程度の粒径にピークを持っています。粒子状物質の質量 (図 4.2 右図) は、もう少し大きい数ミクロンのところにピークがありました。このことから 3 つのことが示唆されます。①放射性ヨウ素とセシウムの大気中での輸送挙動は異なっている、②重量と放射能の分布が異なる理由により放射性セシウムは大気粉じん粒子に一樣に分布しておらず特定の粒径に分布している、③地上高で測定したにもかかわらず、放射性セシウムは粒径の大きい土壌粒子の巻き上げによる寄与は小さい。2011 年 4 月の観測以後は、大気中の放射性物質の濃度が下がったため、放射能の粒径分布を求めることは難しくなりました。しかし、いったん土壌に沈着した放射性セシウムが巻き上がって移動したり、人がこれを吸入する影響は検討する必要があると考えています。

(3) おわりに

事故時に大気中に放出された放射性物質は気塊となって移動します。観測地点を気塊が通り過ぎてしまえば、濃度は著しく減少します。今回の観測 (3 月 15 日午後から) では、残念ながら最大濃度を持つ気団を取り逃してしまっています。大地震による被災や停電といった不測の事態にも左右されない不断の観測態勢と情報発信態勢を整えておくことが、緊急時の対応として極めて重要であることが教訓となりました。一方、揮発性物質を採取できるサンプラーを利用したことで、粒子用フィルターを抜けてしまう揮発性の放射性ヨウ素を捕捉できました。この点は、今回の観測の大きな長所であり、ヨウ素の全量と化学形態を明らかにする上で重要な情報が得られたと考えています。

4.2.2 森から湖へ、放射性セシウムはどのように動いているのか

(1) はじめに

福島第一原発事故によって飛散した放射性セシウムは、森林率（県土面積に占める森林面積の割合）が高い、福島県や宮城県、群馬県等南東北ならびに北関東地方各県に大量に沈着したと推定されています（日本国土への総沈着量の90%以上）。放射性セシウムの森林への沈着状況や生態系内での挙動を明らかにすることは、森林周縁を生活圏とする住民の健康影響や、生態系への影響、木材や特用林産物（きのこやたけのこ等）の生産への影響を正確に評価し、適切な除染を行っていくうえで、極めて重要な課題となっています。また、森林も含め陸域に沈着した放射性セシウムは、降雨流出によって河川を經由してダムや自然湖沼、海域へと移動し、再集積します。このメカニズムによるホットスポットの形成が懸念されています。なかでも、農地、森林や海洋とくらべると、陸水域では、十分な放射性物質のモニタリングや研究が行われていません。特に、湖沼は、飲料水や漁獲物などの自然の恵み（生態系サービス）を提供する重要な生態系であり、放射性物質の動態を把握する必要があります。

国環研では、原発事故以前より茨城県筑波山に森林試験流域を設け、森林生態系における窒素飽和現象の解明を目的に詳細な野外調査を行い、窒素の 대기降下物経由での流入量や生態系内での動き、流域からの流出量を定量的に評価していました。また、霞ヶ浦（西浦）についても、これまでに、霞ヶ浦の水質や生物の長期モニタリングを30年間にわたり継続してきました。これにより、様々なデータや研究成果を蓄積するとともに、調査に関するノウハウを確立してきました。

国環研では、このように観測体制が整備された筑波山森林試験流域と霞ヶ浦を対象として、いち早く調査に着手しました。筑波山（森林）に関しては、放射性セシウムがどのように沈着し、それが生態系内でどう動いているのか、さらには、森林からどの程度流出しているのかを明らかにすることを試みました。それによっておそらく長期にわたる汚染状態がどのように推移していくかを解明できる手がかりを掴みたいと考えました。また、霞ヶ浦（湖沼）に関しては、放射性セシウムの水生生物への移行過程に関する基礎データの収集とその動態の把握を目的として、2011年7月から調査を開始しました。霞ヶ浦は、福島原発に最も近い大型湖沼（国内で2番目に大きい）であり、流域面積（2156.7km²）が非常に大きい特徴をもち、湖沼生態系における放射性物質の動態を把握する上で、重要なモニタリングサイトといえます。

(2) 研究成果の概要

a) 放射性セシウムは溶存態で森林へ沈着した

筑波山の南東斜面に位置し、スギとヒノキの人工林が全体の約75%を占める試験流域（面積67.5ha）を対象に、放射性セシウムについて、森林生態系への沈着と蓄積、生態系内での挙動を把握する調査と、森林からの流出量を定量評価する調査をそれぞれ実施しました。具体的な調査結果として、事故直後の 대기降下物経由での土壌表面へのセシウム137初期沈着量に関しては、事故前の3月上旬に交換設置したバルク式の採雨器（流域内の6地点）を4月下旬に回収し測定したところ、流域平均で11.7kBq/m²となりました。図4.3は、林外雨として流域内の裸地や落葉広葉樹林地（事故発生時には展葉していなかったため裸地に相当）で、林内雨とし

てスギやヒノキの樹冠直下で、それぞれ採取、測定されたセシウム 137 の初期沈着量を示しています。林外雨に比べて林内雨による地表面への放射性セシウムの沈着量は小さく、雨水に含まれている濃度も小さいことが確認されました。これにより、降下時に、スギやヒノキの樹冠部分への放射性セシウムの吸着や収着が生じたことが推察されました。また、雨水中のセシウム 137 濃度は、全地点平均で 75Bq/L であり、孔径 0.45 μ m のフィルターろ過による懸濁態と溶存態の分離測定から、いずれの地点でも全量の 80%以上が溶存態の形で沈着したことが分かりました。

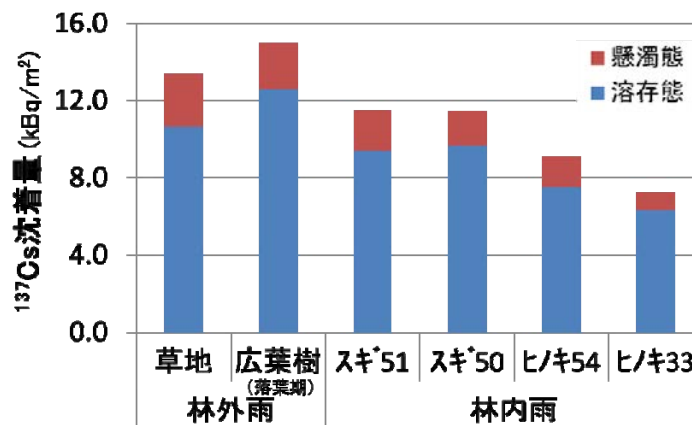


図 4.3 筑波山試験流域への事故後 47 日間の降水経由でのセシウム 137 沈着量 (横軸の樹種名に付記した数字は事故発生時の林齢を表示)

b) 洗い出しによって樹冠から林地表面への供給が継続した

次に、初期沈着時の吸着ないしは収着や、根からの吸収によって汚染された樹冠部での放射性セシウムの動態を把握するため、林内雨（落葉広葉樹も含む）とリター（落葉落枝：林内雨採取地点近傍にリタートラップを設置）の回収を、月 1 回の頻度で行いました（現在も継続中）。調査結果の一つとして、図 4.4 は、スギ 50 年生林でのセシウム 137 の林内雨とリターフォールによる沈着負荷量を経月での累積値として示しました。事故後 1 年間の樹冠部から土壌表面へのセシウム 137 の移動量は、地表面への初期流入量の 6 割程度となり、その大部分が樹冠へ

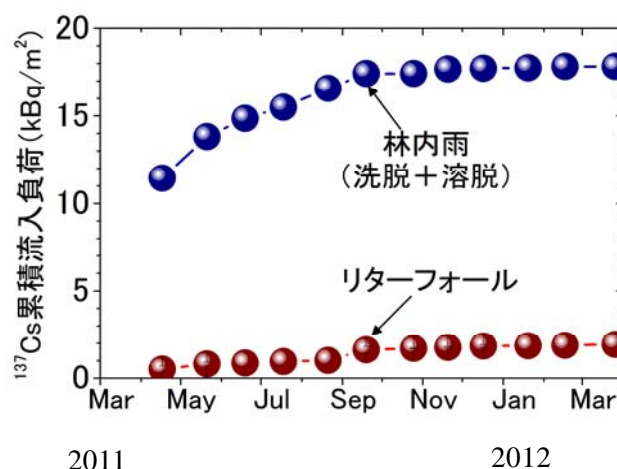


図 4.4 スギ 50 年生林地表面への事故後 1 年間の林内雨とリターフォールによるセシウム 137 累積沈着負荷経月変化

の吸着分が降雨によって洗い出され、林内雨として移動したものでした。

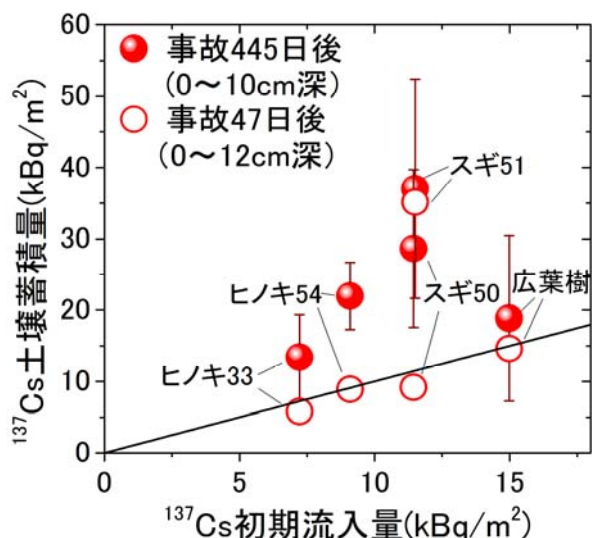


図 4.5 事故 1 年 3 か月後の森林土壌表層へのセシウム 137 蓄積状況

(事故 445 日(1 年 3 か月)後の値として、それぞれ林内雨採取地点近傍 5 か所で採取した土壌コア試料測定値の平均値と標準偏差を表示。事故 47 日後の値として、同地点で採取した土壌コア 1 試料の測定値を参考値として表示。図中の樹種名に付記した数字は事故発生時の林齢を表示)

c)事故後 1 年間で土壌蓄積量はさらに増加した

土壌への蓄積を調べるために、事故から 47 日後と 445 日後に、それぞれ林内雨採取地点近傍において、コアサンプラーを用いて 20cm 深さまで不攪乱で土壌試料を採取しました。リター層を含む表層から 2cm ごとに切断し、それぞれの放射性セシウム濃度を測定しました。その結果、放射性セシウムは、事故直後のみならず 1 年 3 か月を経過した後でも、表層から 6cm 深までに全蓄積量の 75~95%が存在し、鉛直下方への移動が極めて小さいことが確認されました。また、各地点の林内雨による初期流入量と事故 47 日後と同 445 日後、それぞれ 10cm 深さまでのセシウム 137 蓄積量を比較したところ (図 4.5)、上述の樹冠からの林内雨やリターフォールによる負荷に対応して、初期沈着時よりも蓄積量が増加していました。これら樹冠経由での増加分を含め、リター層に存在する放射性セシウムの多くは、粘土粒子に強く結合しているものと比べてはるかに動きやすいことが想定されます。リター層に存在する放射性セシウムは、森林生態系内での移行や系外への流出に大きな役割を果たす可能性が高いことから、放射性セシウムの土壌への蓄積状況について、今後もその推移を捉えていく必要があると考えています。

d) 森林域からの流出：顕著ではないが土壌有機物が関与している

森林からの放射性セシウムの流出割合や、上述の蓄積状況を鑑み、放射性セシウムの流出に対するリター等粒状態の有機物 (POM : Particulate Organic Matter) の寄与等を明らかにすることを目的に、降雨流出時を中心に渓流水採取を行いました。採取した渓流水は、一部をそのまま遠心分離機による固液分離を行いました。残りについては、篩目 1mm、250 μ m、63 μ m の 3 つのふるいを用いた分級操作に供した後、ふるい分けられた各試料について遠心分離機による

固液分離を行いました。それぞれ抽出した固相部分の放射性セシウム濃度を測定しました。併せて、試料水中に溶存する放射性セシウムについても、セシウム選択性ディスクによる濃縮操作を行った後、測定しました。また、各試料とも浮遊性懸濁物質（SS：Suspended Solid）濃度と粒度分布、有機物含有量の指標である強熱減量の測定も行いました。採取したすべての渓流水のSS濃度と放射性セシウム濃度に相関関係は見られず、単位SS重量当たりのセシウム137含有量の平均値は860Bq/kgとなりました。事故以前の降雨時流出調査結果を基に作成した流出水量とSS流出フラックスの関係式（L-Q式）に、事故直後からの流出水量の連続観測値を入力することで総SS流出量を推定し、それに上述のセシウム137含有量平均値を乗じることで、事故後1年間のセシウム137流出量を算定しました。算定値は単位面積当たり0.04kBq/m²となり、上述の初期流入量に基づいた流出率は約0.3%でした。また、渓流水中の溶存態のセシウム137濃度は検出下限値（0.02Bq/L）未満であり、溶存態のセシウム137の年間流出率は0.1%に満たないことが分かりました。これらの値は、年単位で見た場合に森林からの放射性セシウムの流出が極めて限定的であることを意味しています。一方で、森林からの浮遊性懸濁物質の流出量は、通常年間数回程度生じる大規模降雨流出に依存します。このため、蓄積量に比して極めて限定的であっても、下流水域にとっては少なくないかもしれない浮遊性懸濁物質に吸着した放射性セシウムが一時的に流入し、場への集積と水生生物への移行に影響を及ぼすことが懸念されます。

図4.6は、分級操作後の各SS画分について、有機物含有量（強熱減量）に対する単位重量当たりのセシウム137含有量の関係性を示しています。最も小さい画分（63μm未満）では、有意な相関は見られませんでした。それより大きな2画分では有機物含有量の増加とセシウム含有量の増加に有意な正の相関が確認できました。前者は、腐植等を由来とする土壌有機物を多く含むものの、微細な無機土粒子（シルト成分や粘土成分）が主なセシウムの吸着サイトとして作用しているのに対して、後者は無機粒子（砂成分）ではなく、主に分解過程にあるリターがセシウムの流出に直接寄与していることが強く示唆されました。

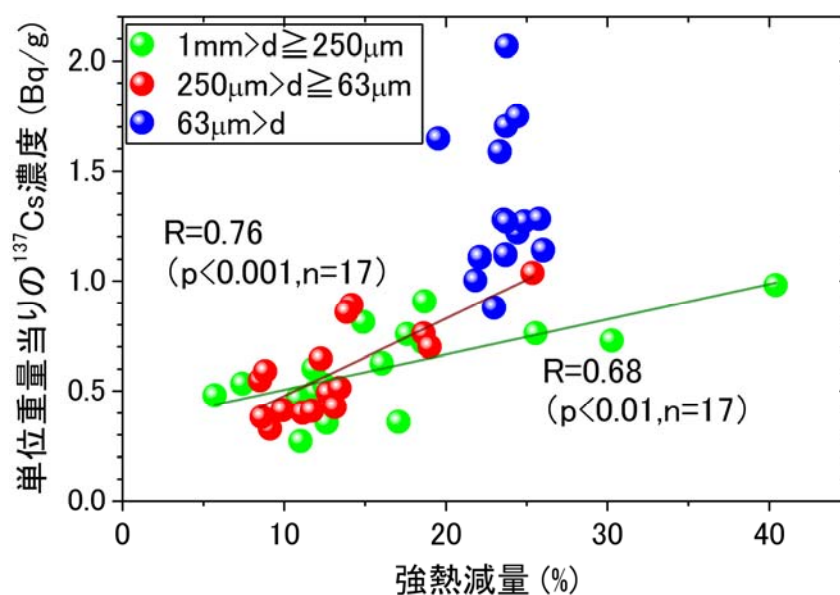


図 4.6 浮遊性土砂粒径(d)の画分毎に含まれるセシウム137濃度と有機物含有量(強熱減量)の関係

森林から流出される POM は下流水域で水生生物の餌として利用されることから、そこに吸着している放射性セシウムは微細な無機粒子に吸着している場合に比べ、水生生物への移行が生じやすいと考えられます。今後の取組として、POM を介した放射性セシウム流出量の定量評価と、POM 摂食生物を源とする食物網を考慮した、水生生物の汚染実態に関する調査が必要であると考えています。

e) 摂食機能が水生生物への移行・蓄積に影響している

霞ヶ浦における調査では、湖水や湖泥に加えて、プランクトン、底生動物（巻貝・二枚貝・甲殻類）、魚類、抽水植物を定期的に採集し、放射性セシウムの測定を進めています。これまでの調査から、セシウム 137 濃度のトレンドが、分類群によって、大きく異なることがわかってきました。底生動物の結果を紹介します。清明川河口および花室川河口付近の湖岸のヒメタニシ（巻貝）とカワヒバリガイ（二枚貝）のセシウム 137 濃度はいずれも、2011 年 7 月以降、減少しています（図 4.7）。しかし、ゼロにはなっていません。現在でも 10~30Bq/kg を推移しています。いずれの地点でも、ヒメタニシのほうがカワヒバリガイと比べてやや高い値を示しています（図 4.7）。二枚貝が、湖水をろ過して餌をたべる濾過摂食者であるのに対し、巻貝は主に付着藻類を捕食する藻類食者であることから、底生動物のなかでも、食性によって放射性物質の移行・蓄積・排出過程が異なることが示唆されます。また湖水のセシウム 137 濃度が、2011 年 7 月に 0.15Bq/L あったものが 2012 年 9 月には 0.05Bq/L と減少しているにもかかわらず、底生動物のセシウム 137 濃度が一定に推移しているのは、餌を通じた放射性物質の移行が依然として続いていることを示しているかもしれません。

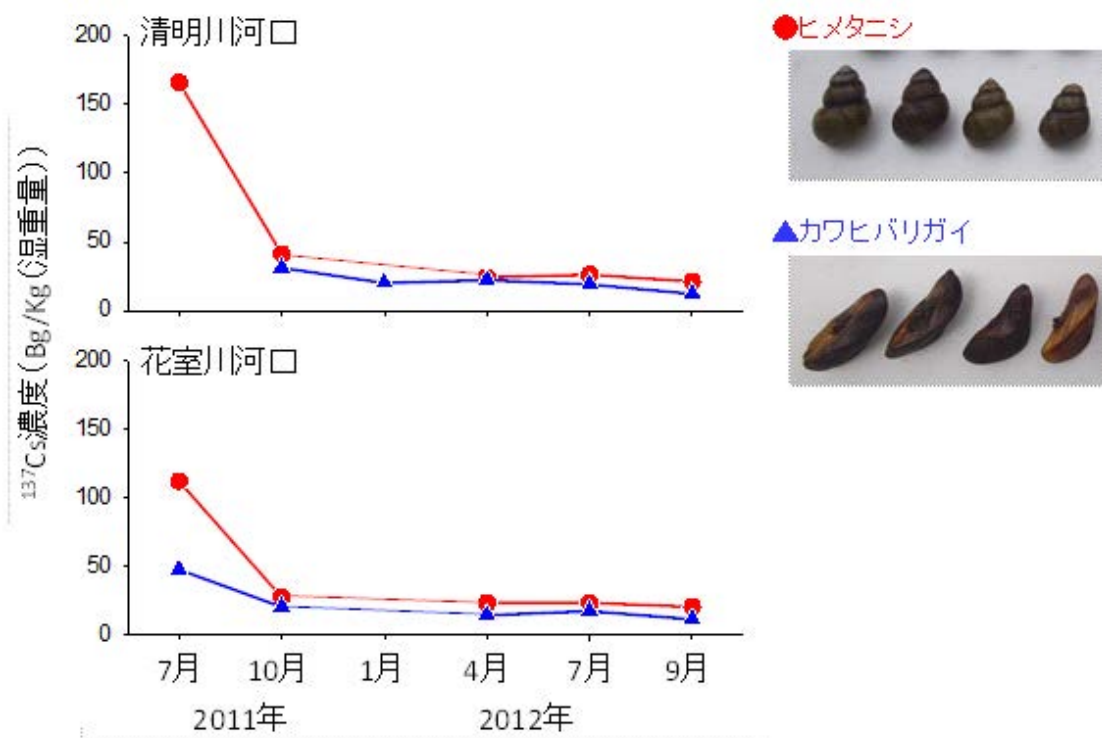


図 4.7 清明川河口および花室川河口付近の湖岸におけるヒメタニシ（巻貝）とカワヒバリガイ（二枚貝）のセシウム 137 の濃度変化

(3) 学術的な貢献

現在、我々が直面している放射性物質による環境汚染の実態と今後の推移を明らかにしていく取組において、チェルノブイリ原子力発電所の事故によって生じた環境汚染の実態と比較し、汚染現象における普遍性を確認しつつ、日本の風土から生じる固有性を見出すことは非常に重要であると考えています。その観点から、本研究において、日本固有種に近いスギやヒノキの常緑針葉樹林生態系を対象に、原発事故による放射性セシウムの初期沈着からその後の生態系内や、系外への動きを観測した（している）データは、学術的に非常に有用かつ貴重なものと考えております。また、学術講演会（3回）や国際学術誌気塊（1編）などにも発表しました。

(4) 社会的な貢献

原発事故によって最も放射能汚染を被った福島県の森林率は、70%を超えています。大量に沈着した放射性セシウムを広範囲にわたる森林からどのように除去していくのかを定める方針が必要とされていました。筑波山の森林流域を対象とした本調査結果、特に放射性セシウムの流出源としての森林の実態を示す調査結果を、環境省「森林除染に関する意見交換」や同「環境回復検討会」に提示することによって、環境省における森林除染の方針を取りまとめた「今後の森林除染の在り方に関する当面の整理について」の作成に貢献しました。また、一般市民の方に向けた学会セミナーや研究報告会を通じて、森林域における放射性物質の挙動や霞ヶ浦の水質・生物の汚染実態に係る科学的な情報を社会に発信しました。

(5) おわりに

チェルノブイリ等、過去の事例を踏まえると、今回の事故によって森林生態系に大量に沈着した放射性セシウムは、沈着直後から数年間は生態系内において大きく動くことが予想されます。森林施業を含めた効率的かつ効果的な除染を今後進めていく上で、生態系内での挙動に関する速やかなデータの集積が必要であり、当面、集中的な調査を行う必要があると言えます。淡水生態系は、もともと多種多様な分類群が含まれ、複雑な食物網を形成しています。この点が、今後の推移の予測を困難にしています。今後は、生物の炭素と窒素の中の「同位体比」という化学的特徴を一つの手がかりに、生物間の食性や栄養段階の違いと放射能物質濃度や濃度の変化パターンにどのような関係があるか分析を進める予定です。また、今後、どれくらいでバックグラウンドに戻るのか、その回復過程を明らかにすることが重要です。水産物では、ウナギやフナ類などで出荷制限が続いている状況です（2013年2月15日現在）。漁業の持続と水産物の安全・安心を早期に回復させるためにも、生物と生態系の長期モニタリングに基づいた研究が必要です。

4.2.3 大気シミュレーションによって明らかになった放射性物質の動きと沈着

(1) はじめに

東日本大震災に起因する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、様々な形で深刻な環境影響を及ぼしています。放射性物質の大気中での広がりや地表への沈着を正確に把握することは、以下の点から重要です。

- ・放射性物質を含む空気を吸入することによる内部被ばく量を評価するためには、放出直後の大気中の広がりを把握する必要があります。
- ・陸上や海上での放射能汚染の現状を把握し、将来動向を予測するためには、大気中の放射性物質が、いつ、どこに沈着したのかを正確に把握する必要があります。

放射性物質の大気中での挙動を把握するためには、大気シミュレーションモデルが有効です。国環研では事故前から大気汚染物質を対象としたシミュレーションを実施し、多くの研究成果をあげてきました。そこで、事故直後から、このシミュレーションモデルを使って放射性物質の大気中の挙動を解析し、その結果を国や地方自治体に提供し、また、社会へ発信しました。

(2) わかったこと

a) 放射性物質の大気中の広がり と 地表への沈着を明らかにしました

福島第一原発から大量の放射性物質が大気中に放出された約2ヵ月間の放射性物質の広がり と 沈着の状態を、地形や気象の地域的な変化を考慮した大気シミュレーションによって、世界で初めて明らかにし、世界に発信しました¹⁾ (図4.8)。

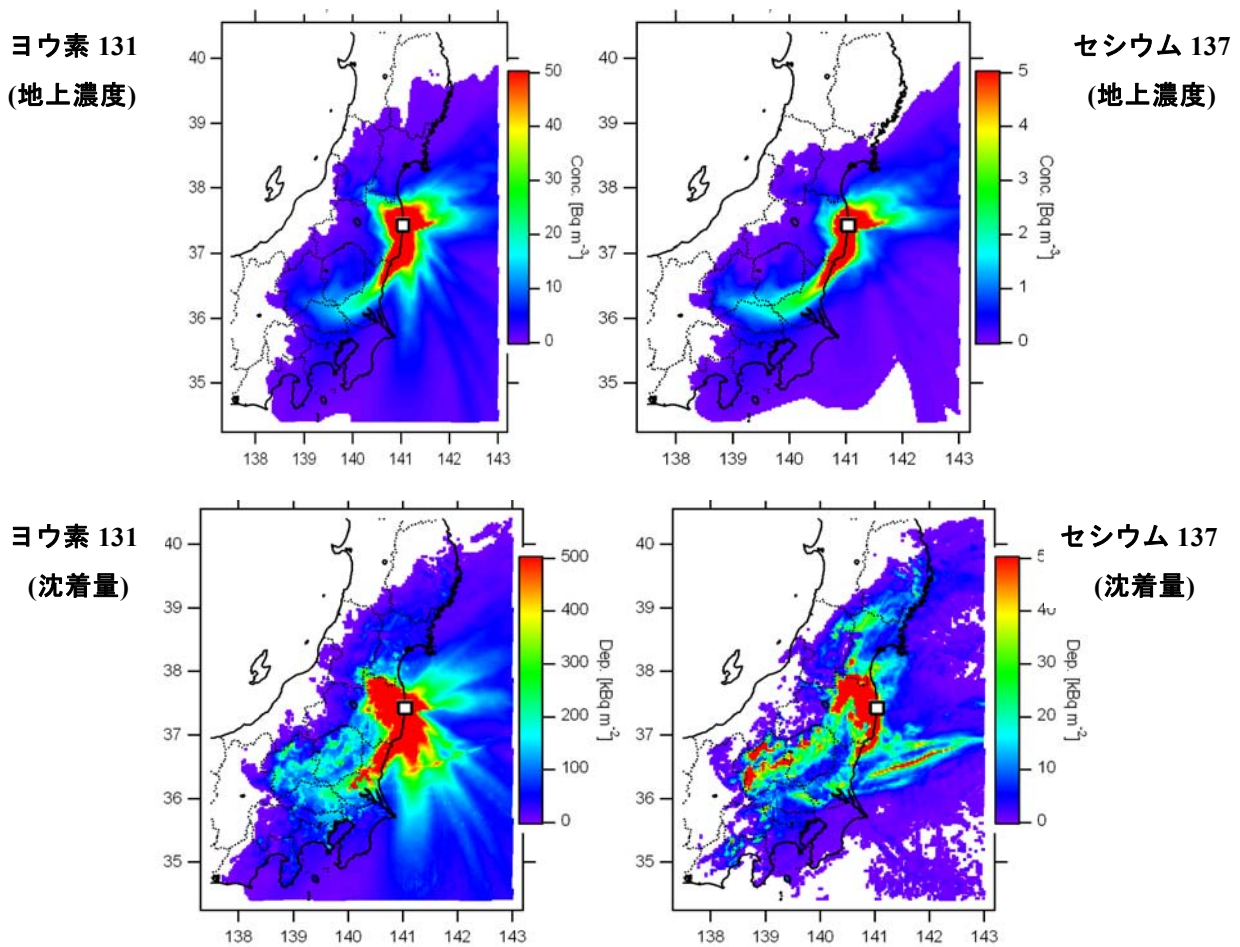


図 4.8 ヨウ素 131 (左図) とセシウム 137 (右図) の地上近くの大気中の平均濃度 (上図) と地上への積算沈着量 (下図)。計算期間は 2011 年 3 月 11 日～4 月 30 日。

この成果は、文部科学省の航空機モニタリングによる東日本を対象とした測定結果²⁾が発表された2011年12月16日までは広域的な汚染状況を把握する唯一の情報源であったことから、国や地方自治体における汚染対策の検討に使われるとともに、科学誌やマスコミ等を通じて科学的な情報を社会に発信しました。

b) ホットスポットの生成には風と降水の影響が大きかった

シミュレーション結果をもとに、各地に出現したセシウム137のホットスポットの生成原因について解析したところ、①事故直後、低気圧が福島付近を通過して風が陸方向に吹き、雨・雪が降った3月15-16日と3月20-23日に多くのホットスポットが作られたこと(図4.9)、②ヨウ素131とセシウム137の沈着量分布は大きく異なること(両物質の化学形態が異なることによる沈着過程の違いのため)、③大気中に放出されたヨウ素131とセシウム137のうち、それぞれ12%と26%が東日本の陸上に沈着したことなどが明らかとなりました。

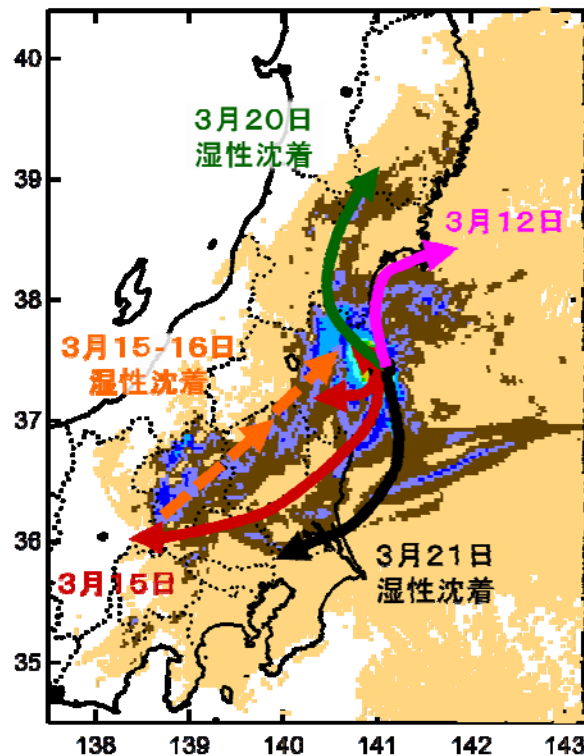


図 4.9 陸上に大きな影響を与えた大気中の放射性物質の移動経路とセシウム137のホットスポット地域。大気シミュレーション結果に基づく結果。

c) シミュレーションは実測された沈着量分布をほぼ再現するが不確かさは大きい

シミュレーション計算されたヨウ素131とセシウム137の大気中濃度と沈着量の結果を、文部科学省等によって実際に測定されたデータと比較することによって、計算結果は沈着量分布の特徴を良く再現することを確認するとともに、計算結果の不確かさが偏り15%、誤差75%であることを把握しました³⁾(図4.10)。また、様々な放出量の推計結果を使ってセシウム137

の沈着量分布をシミュレーション計算し、文部科学省の航空機測定結果と比較したところ、地域スケールの測定データに基づく推計放出量を使用した場合が、最も測定結果を再現することがわかりました。

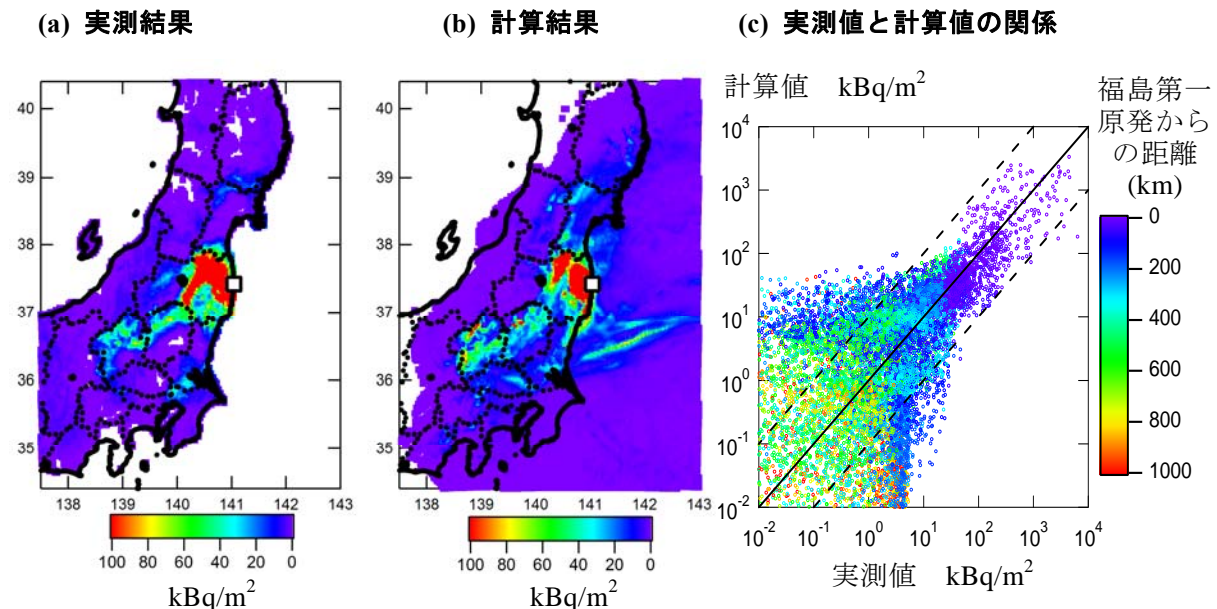


図 4.10 セシウム 137 積算沈着量の実測結果（文部科学省の航空機モニタリング；左図）、シミュレーション計算結果（中央図）、及びに実測値と計算値の関係（右図）。

(3) どのように役立ったか

a) 学術的には

地形や気象の地域的な変化を考慮した大気シミュレーションによって、大気中の放射性物質の広がりや沈着量分布、大気中に放出された放射性物質の東日本地域での収支（放出量、領域外への移動、及び沈着量のバランス）、ホットスポットの生成要因などを明らかにするとともに、計算結果の不確かさや放出量の妥当性を評価することにより、放射性物質の大気環境中での挙動に関する多くの科学的な結果を得ました。そして、世界で最初に国際学術誌に発表した研究結果¹⁾は、科学誌 *Nature*⁴⁾に取りあげられるなど国内外に大きな反響を呼びました。また、学術講演会⁵⁾や国内雑誌⁶⁾などにも発表しました。

b) 社会的には

本研究のシミュレーション結果は、広域的な放射能汚染に対処するために、国や地上自治体における対策の検討に使われるとともに、多くの国民に科学的な情報を提供しました。例えば、国に対しては、厚生労働省「水道水における放射性物質対策検討会」における大気シミュレーションモデル結果の早い時期（平成 23 年 4 月）での活用⁷⁾、厚生労働省・文部科学省・環境省と関係する専門家の連携による「食品中の放射性物質のモニタリング計画策定のための航空機モニタリング・WSPEEDI・国立環境研究所モデルによる沈着量分布の同時発信」⁸⁾や文部科学省の「航空機モニタリング検討委員会」⁹⁾での活用などが挙げられます。また、日本学術会議東日本大震災復興支援委員会の提言「学術からの提言—今、復興の力強い歩みを—」¹⁰⁾の作成

にも貢献しました。更に、テレビ、新聞、雑誌等、講演会などを通して、放射能汚染に関する科学的な情報を社会に発信しました。

(4) 大気シミュレーションの今後の課題

現在、シミュレーションや観測によって事故後の放射性物質の大気中での挙動が少しずつ明らかになってきましたが、未だに、放出量、気象状態、大気中での形態、沈着過程など不明な点が多いのが現状です。ここでは、放射性物質の大気シミュレーションに関係する主要な課題を整理します。

- ① 放射性物質の放出量やその時間変化に関する不確かさは依然として非常に大きいと考えられます。今後、観測データの発掘・活用、推計手法の改良、原子炉内解析とモデル推計の連携などによって、放出データの不確かさを減らしていくことが重要です。
- ② 大気中の放射性物質の形態に関する知見が少なく、沈着過程のモデル化の障害となっています。ガスと粒子の存在比率、反応メカニズム、粒径分布等に関する科学的理解が必要であり、特に、初期内部被ばくが懸念されるヨウ素 131 に関する知見が重要です。
- ③ 拡散・沈着過程を再現するためには、気象のできるだけ正確な再現と沈着モデルの改良が重要です。気象の再現のためには、事故直後の福島第一原発周辺での気象データの収集・整備、モデル再現性の検証、データ同化を含めたモデル改良などを進める必要があります。また、沈着モデルに関しては、モデルの相互比較と感度解析、雲モデルの改良、沈着過程解明のための観測などを進める必要があります。
- ④ 福島第一原発周辺の地形によって放射性物質が複雑に拡散すること、初期の拡散がその後の広域的な動きに大きな影響を及ぼすこと、原発周辺の被ばく量を正確に評価する必要があることなどから、原発周辺の地形などを考慮してモデルを精緻化することが重要です。
- ⑤ 地表面や植生からの再飛散を考慮する必要があります。黄砂用モデル等を活用し、観測・実験と連携して再飛散モデルを開発することが求められています。
- ⑥ 関連機関が協力して、モデルの相互比較や複数のモデル実験を実施し、モデルの不確かさを把握し、減らすことも重要な課題です。

4.2.4 陸域環境における放射性物質の動きと将来の予測

(1) はじめに

環境は大気、水（河川、湖沼や海洋）、土壌、底質（水域の底泥）、また森林や植生などのさまざまな「環境媒体」で構成されています。大気中に放出された放射性物質は、現在までに大気から地表の土壌、水また底質、森林などの環境媒体に移行しました。それでは、これまで地表面や森林などに移行した放射性物質はこれからどこへ行くのでしょうか。

この研究では、地表の環境媒体を汚染した放射性物質が、こののち長期間にわたりどのよう

に推移し、どこに行くのかを予測する数理モデルの開発を進めています。これまで放射性物質の地上や流域での動態を再現するモデル研究はほとんどなく、この研究では私たちがこれまで進めてきた多媒体モデルを応用することによって初期的な結果を得たので報告します。

(2) 研究の概要

a) 現時点では放射性物質の大部分は土壌や表面植生に存在

本研究では、**図 4.11** の左下に示す福島県の太平洋沿岸、阿武隈川流域と関東北部、利根川、荒川水系までを含めた 15 水系を対象として放射性物質の環境動態を計算しました。その結果、**図 4.11** の右下に示すように、地表に存在する放射性セシウム137の大部分は土壌（表面植生を含む）中に存在し、残りの大部分は河川・湖沼底質に存在することが推定されました。

推定計算を行うにあたっては、これまで国環研で研究を進めてきた G-CIEMS という多媒体モデル¹¹⁾を応用して進めました。G-CIEMS 多媒体モデルは、河川の流域（例えば阿武隈川水系、利根川水系のような）ごとの川の流れ、各河川の集水域内の土壌中の挙動、それと大気との物質交換などによって、環境中の汚染物質がどのような環境挙動をたどるかを記述するモデルです。土壌からの汚染物質の流出とその河川への流入、河川の流れに乗った物質の輸送、土壌や河川表面と大気との物質交換などを計算します。ここでの 15 水系はさらに合計 3,532 個の、一つの面積がおよそ 10km²の小流域という単位に分割され、水系内における輸送や濃度の分布を再現出来るようにしています。**図 4.11** の左にモデル計算の概要と計算対象とした水系を示し、右に結果を示しました。セシウム 137 は大気、河川水、河川底質、土壌などの環境媒体のうち、大部分は土壌（森林などの植生を含め）に存在し、残りの大部分は河川底質に存在することが推定されました。土壌中に現存するセシウム 137 が今後の放射性物質の推移に大きな影響を持つこととなります。

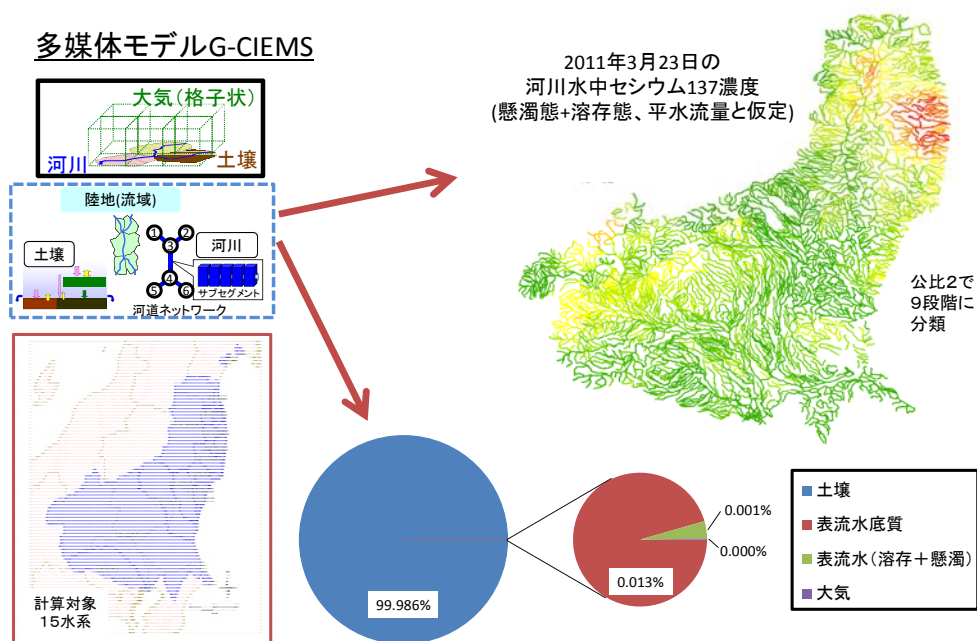


図 4.11 モデルの計算領域（左）と河川水中の濃度予測の結果（右上）、および計算領域中の土壌、底質、河川・湖沼水と大気中の存在割合（右下）

b) 地表に存在する放射性物質は今後長期間にわたり少しずつ流出

地表面に存在する放射性物質は、放射性崩壊とともに降雨による浸食や河川の流れによって地表面から徐々に下流に移動すると考えられます。土壌中の放射性セシウムが今後どのように流出するかを予測した結果を図 4.12 に示します。

セシウム 137 は約 30 年の半減期で減少しますが、実際にはこれに地表面からの流出等により移動が加わるため、放射性崩壊よりわずかに早い速度で減少することが予測されました。流出による放射性物質の移動は放射性崩壊に比べて非常に大きくはないという予測となりましたが、一方、土壌中に存在する放射性物質の総量は河川や湖沼などに存在する放射性物質に比べて非常に大きいため、このような小さい流出量でも我々に密接な関連を持つ河川や湖沼での放射性物質の量に大きな影響を与える可能性が推測されます。

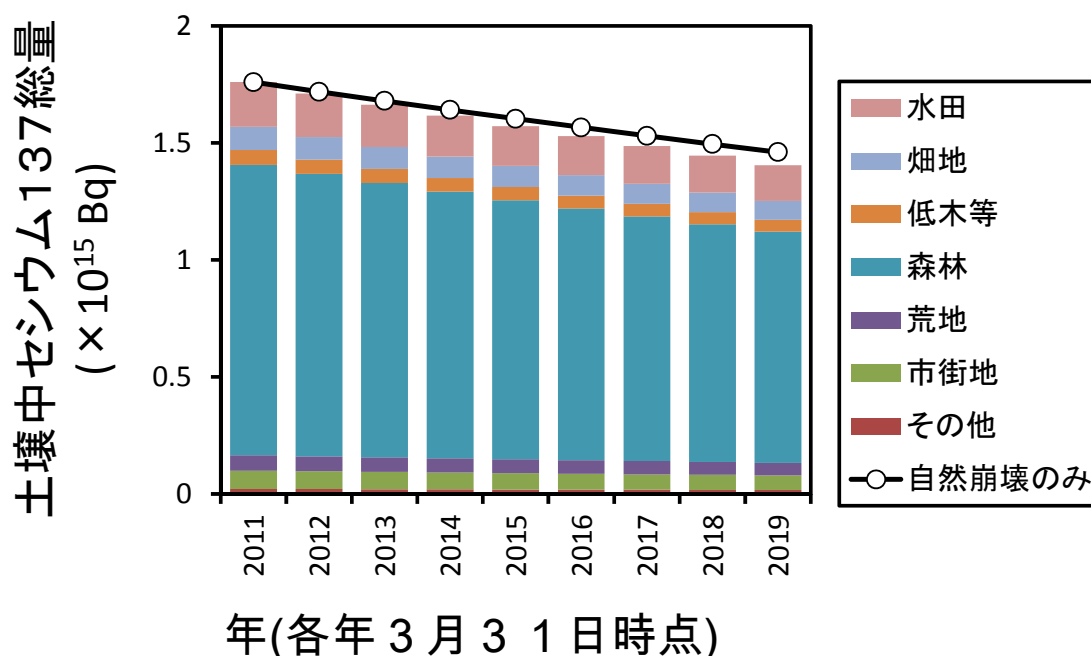


図 4.12 水系領域の土壌中のセシウム 137 の今後の推移の予測

(折れ線は放射性崩壊のみによる推移を示し、棒グラフは流出現象を加味した本シミュレーションでの予測結果を示す)

(3) シミュレーション結果の意義と今後の展望

現在は各地で除染活動が進められており、これによって除染された地域の放射性物質の存在量は低下することになります。除染活動は本来その地域の被ばく量の低下を目指すものですが、同時に地表面の存在量を減少させることにより下流側の環境汚染全体を改善する効果もあると考えられます。モデル予測によって放射性物質の長期間での動態予測が可能となれば、今後の被ばく量の推移や環境負荷の低減、それらへの除染活動の効果などを予測し、それに基づく除染や環境管理のあり方を考えていくことが可能になると考えています。

現時点でのモデル推定にはまだ大きな不確実性があります。今後さらに新たな観測値や設定

データの検討、モデル構造の改良を進めて、信頼できる予測を得られるモデルの構築を目指していきます。また、さらには今後のさまざまな環境汚染の事態に対応できるような応用力のある科学的手法として確立すべく研究を進めていきたいと考えています。

4.2.5 シミュレーションで予測する海洋の放射性物質の行方は？生態系への影響は？

(1) はじめに

福島第一原発事故によって放出された放射性物質は、東日本太平洋沿岸域の広域にわたって、海洋環境・生態系にも深刻な影響をもたらしました。事故発生後1ヶ月ほど経た2011年4月に茨城県沖で漁獲されたコウナゴ（イカナゴ）より高濃度の放射性物質が検出された問題は報道でも大きく採り上げられました¹²⁾。その後、比較的浅いところに生息している浮魚・稚魚からは2011年秋以降放射性物質の検出は概ねなくなりましたが、それに代わって海底に生息している底魚や貝・甲殻類などから暫定規制値を超える放射性物質が検出されるようになりました¹³⁾。この事実は、水中の沈降や生態系食物連鎖を介して、放射性物質が浅いところから深いところに次第に移っていることを示唆しています。

海洋に放出された放射性物質は現在どうなっているのか？海洋環境・生態系（とくに我々が食する水産生物）への影響は？将来はどうなるのか？これらの関心・疑問に対して科学的知見を供することを目的として、国環研では海洋流動・生態系シミュレーションモデルを活用した放射性物質の動態予測を行っています。

(2) 研究の概要

a) シミュレーションモデルの概要

私たちはこれまで閉鎖性海域（東京湾や伊勢・三河湾など）を対象として、赤潮や貧酸素水塊などの富栄養化現象を予測する数理モデルの開発に取り組んできました¹⁴⁾。本シミュレーションモデルは気象、陸域・河川からの水・物質流入、外洋などの初期・境界条件を設定することによって、対象海域における3次元流れや各種物質の輸送拡散、生態系を介した生成・消滅などの動態を評価することが可能な構造になっています。

b) 東日本太平洋沖における放射性物質の拡散・沈降シミュレーション

福島第一原発から放出された放射性物質ヨウ素131とセシウム137について、東日本太平洋沖を対象として事故発生から約4ヵ月間の海洋拡散と沈降状況のシミュレーションを行いました。本計算では4.2.3に記述されている大気シミュレーションによって算定された大気から海洋へのヨウ素131とセシウム137の沈着量¹⁾を考慮しています。シミュレーション結果と文部科学省の現地観測データ¹⁵⁾を比較したところ、海水中における放射性物質の沈降速度を1m/dayに設定したときの計算値は観測値を良好に再現することが分かりました(図4.13)。また、関東地方に多くのホットスポットを形成した3月15-16日と3月20-23日には、大気からの沈着によって広範囲、とくに福島沖から茨城沖の沿岸域で海洋表層の放射性物質濃度が顕著に上昇したこと(図4.14)が本シミュレーションによって示されました。

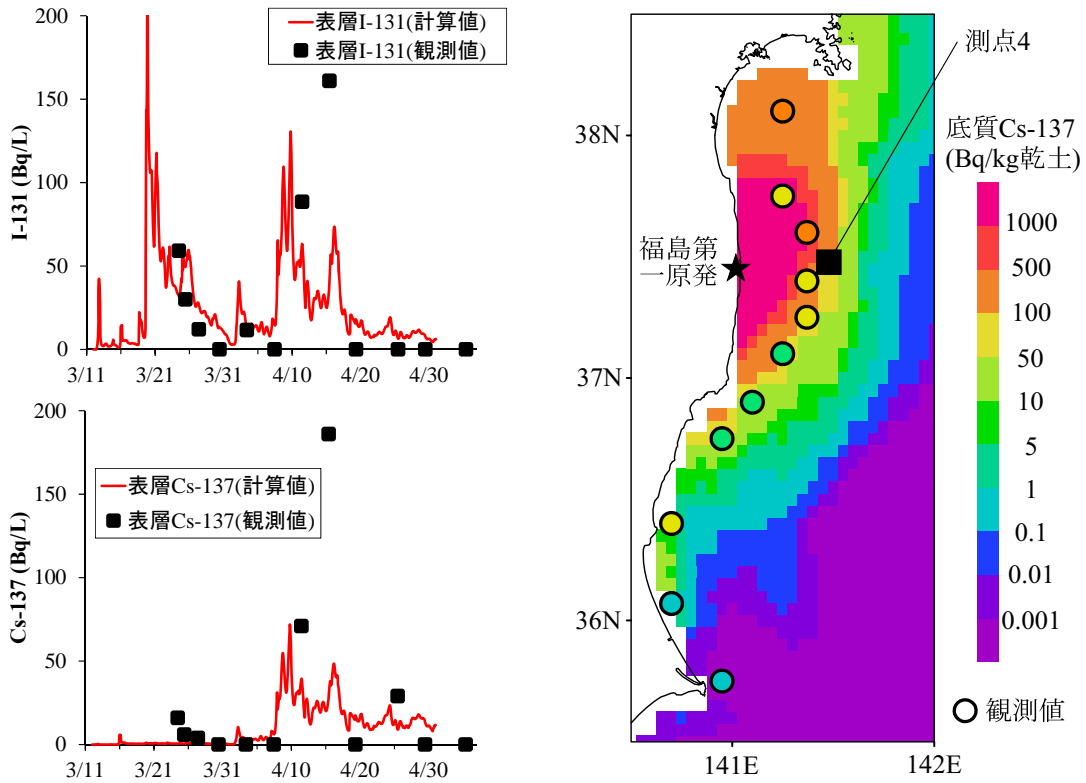


図 4.13 計算値と文部科学省(2013)の海域モニタリングデータの比較
 (左図はモニタリング測点 4 における海洋表層のヨウ素 131(上)とセシウム 137(下)、右図は 2011 年 5 月における海底土のセシウム 137)

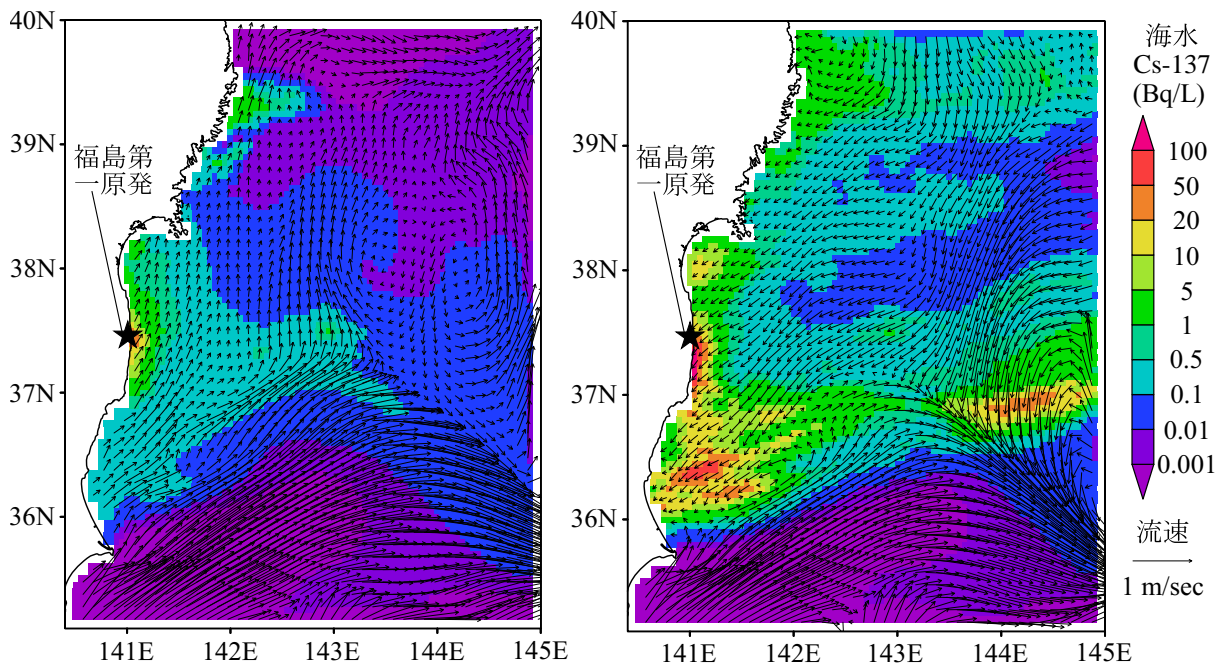


図 4.14 2011 年 3 月 20 日 18 時(左)と同 21 日 9 時(右)の海面におけるセシウム 137 濃度の比較

c) 二枚貝による放射性物質の取込・蓄積シミュレーション

本シミュレーションモデルには、伊勢・三河湾のアサリを対象として開発された二枚貝の個体数・個体成長を予測するモデルが組込まれています¹⁴⁾。それを活用して福島県沿岸域における二枚貝(ムラサキガイ、ムラサキインコガイなど)のセシウム 137 の取込・蓄積シミュレーションを行いました。現時点でのモデル構造にはいまだ大きな不確実性がありますが、b)で得られた海中のセシウム 137 を使ってシミュレーションを行ったところ、ムラサキガイの生物学的半減期は 26 日と算定されました。この結果は他種の二枚貝の実測データから推定される値¹⁶⁾ (エゾアワビやウバガイ：50～100 日)よりも短い傾向になりましたが、いずれにしてもこれらの種では、海水・底質中のセシウム 137 が高濃度で存在しない限り、長期間にわたってセシウム 137 が高濃度蓄積されることはないと推定されました。

(3) 学術的な貢献

福島第一原発事故によって海洋拡散した放射性物質は、海水の表層・中層では現在ほとんど検出されなくなっていますが、海底堆積物には依然として残留しています。しかし、放射性物質の海底堆積量やその分布はいまだ正確には明らかにされていません。そのような背景で、本研究の海洋流動・放射性物質の拡散・沈降シミュレーションは、東日本沿岸域における海底堆積量をできるだけ高精度に推定することを試みた数少ない研究です。

(4) 社会的な貢献

事故後 2 年が経過した現在でも東日本太平洋沿岸域では多数の底層・海底に生息する生物種で放射性物質の高濃度検出が続いています。とりわけ海洋生態系への影響とそれが我々に供するサービスの劣化・安全性への不安の解消は喫緊の課題になっており、その対策を講じるためにも海洋における放射性物質の動態に関する科学的解明が求められています。本研究の成果は、河川経由で流入した放射性物質が考慮されていないなどの問題が残されているため、いまだ不確実な点が残されている再現・予測結果と言わざるを得ませんが、東日本太平洋沿岸域における放射性物質の動態解明に向けた重要な科学的知見を提供するものと考えられます。

(5) おわりに

現在、多くの機関・研究者がモデルシミュレーションや現場観測によって海洋における放射性物質の動態を考究し、その挙動が次第に明らかになりつつありますが、いまだ不確実な点が多く残されています。

海洋流動については、東日本太平洋沖は流れが速い黒潮と親潮がぶつかって複雑に混合する海域であるため、世界的にも予測が難しい場所の一つとして認識されています。シミュレーション条件やモデルを少し変えるだけで再現・予測結果が大きく変わるため、本モデルで得られた結果についてもどこまで信頼性・不確実性があるかを具体的に明らかにする必要があります。それについては多機関の研究者が参画するモデル相互比較において情報交換等を行い、現在検討しているところです。

放射性物質が海底に沈降・堆積するプロセスについては、生態系の複雑な食物網も関与して

いるため、上記の流動過程よりも未解明な点が多く、学界でも主要な課題となっています。とりわけ底魚については、現在でも暫定規制値を超える高濃度の放射性物質が検出されており、放射性物質の体内濃度が現在増えているのか減っているのかも明らかになっていません。複雑な海洋生態系が関与した放射性物質の動態を将来予測するためには、長期間の継続的な監視とモデルシミュレーションを連携した基礎研究が必要不可欠であると考えられます。

4.2.6 家庭における被ばく経路と被ばく量の把握

(1) はじめに

環境中に放出された放射性物質は、土壌－植物－家畜や水－魚などの経路を通じて人への被ばくをもたらすおそれがあります。そのため、環境中の放射性物質の動態解明に加えて、人への被ばくという観点からも、放射性物質の観測とモデル解析の両面を連携させた研究を進めることにしました。放射性物質による広域環境汚染は、日本がはじめて経験する事例です。福島第一原発から遠く離れた地点からも農作物から放射性セシウムが検出されたことは記憶に残っているかと思います。放射性物質によるばく露に対する社会的関心は全国に及んでいます。

人が放射性物質や放射線にさらされる経路は多数あります。土壌などに蓄積した放射性セシウムから放出されるガンマ線による外部被ばくと、室内外の空気を吸い込むことによる内部被ばく、水・食品を摂取することや土壌・室内ダストを意図せず食べてしまうことによる内部被ばくについて、モデル計算を進めています。また、ご家庭に調査協力をいただき、外部被ばく線量、内部被ばく源の実測も行っています。

(2) 家庭における被ばく経路と室内ダスト中の放射性セシウム

2011年の5月以降、関東地方（千葉県・茨城県）の家庭から得た食事試料中の放射性セシウムの濃度は、1Bq/kgを下回ることがほとんどです。土壌から作物への放射性セシウムの移行割合が低く、また食品に対する放射性物質の検査により基準を超える食品が市場に出まわることが避けられた結果、食品を通しての放射性セシウムによる内部被ばくは低く抑えられています。モデル計算からも内部被ばく量は年間 0.1mSv 以下（福島市での中央値）と推定されました。モデル計算による被ばく推定計算を精度よく行うには、地域や各媒体中の放射能の分布や、土壌粒子の室内への入り込み割合などのパラメータに関する情報を必要とします。

なかでも室内ダスト中の放射能についてはデータが不足しており、床を這い歩きする赤ちゃんとの距離が近く、口に入ってしまうことから重要です。そこで室内ダストの詳細な実測を行いました。室内ダストの採集は、掃除機にたまったゴミを利用できます。常総生協などの協力もいただいた結果、千葉県・茨城県のご家庭のダスト中放射能分布や粒径特性などのさまざまなデータを得ることができました。ダスト中の放射性セシウムは、高い家庭では1万 Bq/kg を超えており、平均でも 1000Bq/kg を超えていました。おそらく、屋内にあるもっとも高い放射能を持つ物質と言えます。とは言うものの、掃除を繰り返すことで、放射能が下がることが期待されます。図 4.15 は、協力家庭のダスト中の放射能の経時変化を示したものです。協力家庭 1 では震災後、換気を控えていました。6月に換気を再開したところ、ダスト中の放射性セシウムが高く検出され、10月にかけて急激に減少していました。その後は、協力家庭 2 を含め、大

きな減少は見られません。高い放射能を持つ初期のダストはすみやかに取り除けるが、その後はなんらかの室内への供給が続き、掃除による除染と追いかけてっこをしているように見られます。放射能は高いものの、室内ダストを食べてしまうことによる被ばく量（放射能濃度と食べる量の積）は、食事からよりもさらに小さいこともわかりました。家庭での追加被ばく量は、外部被ばくによるものが9割以上を占めています。生活する地域の土壌の除染や、屋外の滞在時間の制御が、総被ばく量を抑える上で重要です。さらには、屋外土壌が屋内ダストの汚染源の1つであることから、放射線量の高い地域ほど、こまめに清掃をすることによって、屋内の放射性物質の除去にもつながり、安心した生活をする上で有効だと考えます。

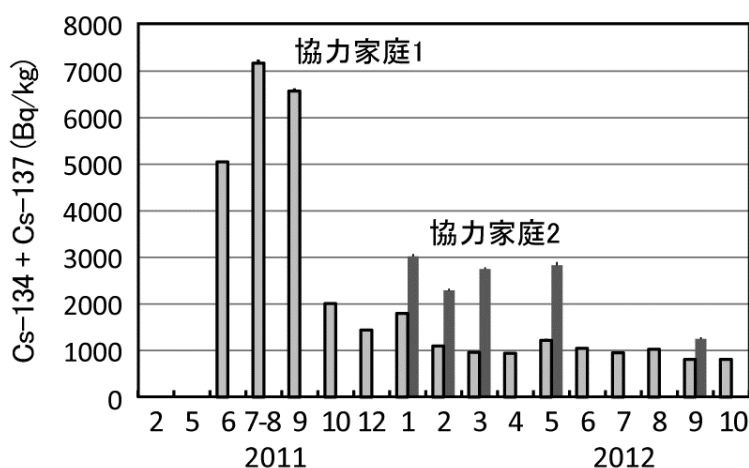


図 4.15 協力家庭のダスト中の放射性セシウムの経時変化

(3) おわりに

2011年4月ごろの食事試料の測定では、現在問題となっている放射性セシウムに加えて、放射性ヨウ素も検出されていました。事故によって放出された放射性ヨウ素の多くは半減期が短く（例えばI-131の半減期は8日）、間もなく環境試料や人体からは検出されなくなっています。情報が得られなくなってしまったからこそなおさら、事故直後の放射性ヨウ素の分布の再現や被ばくの解明が重要な研究課題と言えます。

この点については、I-131と同時に放出された長寿命のI-129（半減期1570万年）を、加速器質量分析計という特殊な装置を利用して分析することで、環境中から消えてしまった短寿命の放射性ヨウ素の分布を再現する試みとして研究を進めています。

4.2.7 一般公衆の追加被ばく線量推定モデルの構築と追加被ばく線量の推定

(1) 一般公衆の追加被ばく線量推定

家庭訪問による個別の調査に加え、被ばく量推定モデルを構築することにより、福島県のみならず東日本の一般公衆の追加被ばく線量を推定するとともに、将来の追加被ばく線量の予測を目指しています。これまでに次のような成果が得られています。ただし、これらの結果は暫定的なもので、今後モデルやデータの検証を行っていく予定です。

- ① 放射性セシウムによる追加外部被ばく線量および追加内部被ばく線量推定のための被ばく線量推定モデルを構築しました。
- ② 被ばく線量推定モデルを用いて、東日本全域の一般公衆の放射性セシウムによる震災後 1 年の追加外部被ばく線量および追加内部被ばく線量の推定を行いました。

(2) 被ばく線量推定モデルの構築

外部被ばく線量の推計には、屋外線量率、屋外滞在時間、屋内線量率、屋内滞在時間を用いて計算しました。屋外線量率は、文部科学省が行った第 4 次航空機モニタリング調査における放射性セシウム土壌沈着量の結果²⁾より、物理的減衰を考慮して推定しました。屋内線量率は、屋外線量率に、建物による遮蔽係数を掛け合わせました。

内部被ばく線量は、食事・水道水と、非意図的摂取経路である土壌・ハウスダスト・屋外空気・屋内空気を想定し（**図 4.16**）、各放射性セシウム濃度、各摂食量および吸入量^{17, 18)}、実効線量係数¹⁹⁾を用いて計算しました。食品、水道水の放射性セシウム濃度データは、厚生労働省が各機関や自治体などから収集したものを、その他は土壌の放射性セシウム沈着量のデータ²⁾を用い、各種パラメータを設定してモデル計算を行いました。いくつかのパラメータについては、**4.2.6**の実測データに基づき設定しました。

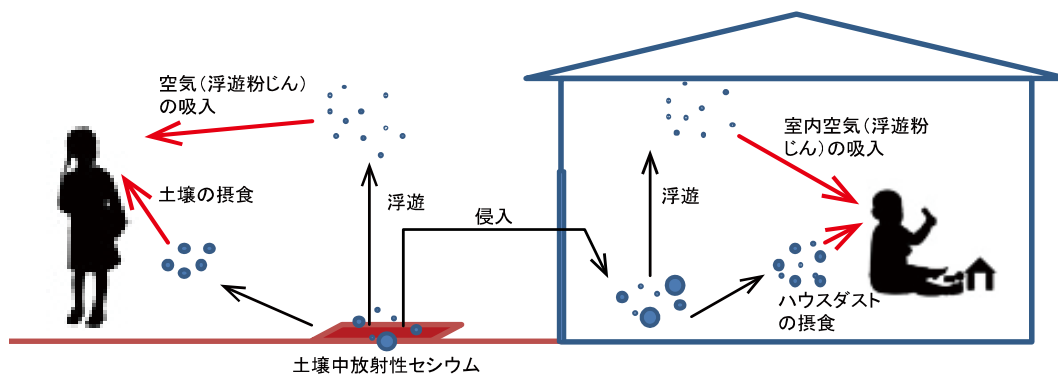


図 4.16 放射性セシウムの非意図的摂取経路

(3) 追加被ばく線量分布の推定（暫定結果）

上記で構築したモデルを用いて、福島県およびホットスポットを含む場所は市町村ごと、福島県以外は都道府県ごとに、0 歳、1-6 歳、7-15 歳、16 歳以上の 4 つの年齢群に分けて、震災後 1 年間の追加被ばく線量の推定を行いました。暫定的な結果ですが、追加外部被ばく線量は、関東地方のホットスポットといわれる地域（某市）で、ほとんど（95%以上）の人が年間 1 mSv を超えないという結果になりました（**図 4.17**）。また、単純には比較できませんが、外部被ばく線量が内部被ばく線量を大きく上回っていました。

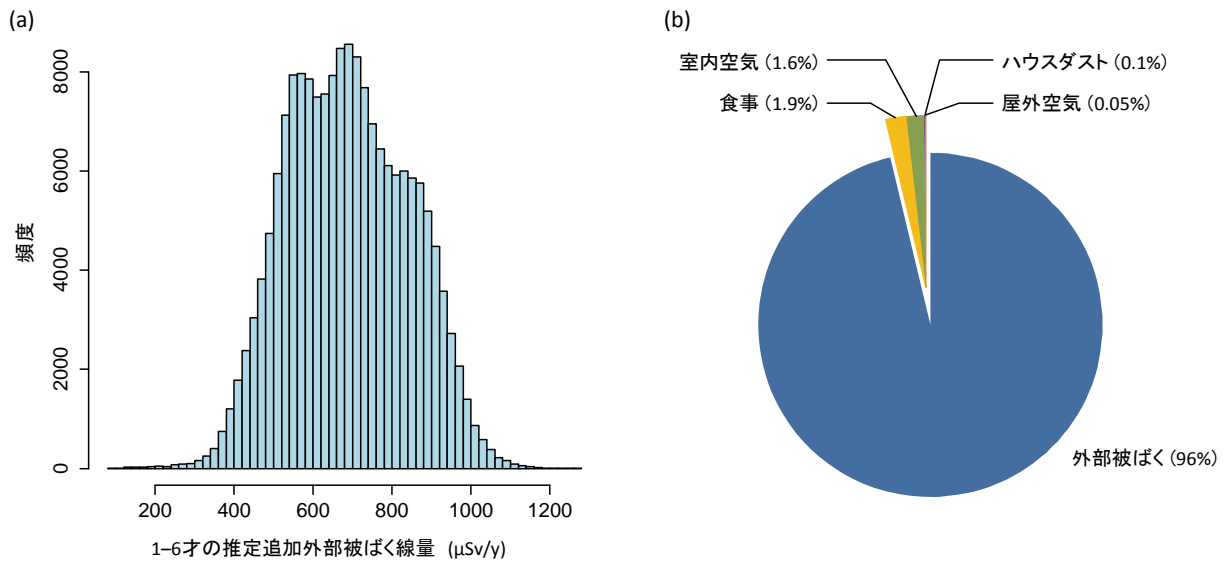


図 4.17 関東地方のホットスポット（某市）での震災後 1 年間の 1-6 歳の推定追加外部被ばく線量分布 (a) と中央値における追加被ばく線量の内訳 (b)（暫定結果）

(4) 家庭における調査（ケーススタディ）の実測値との比較

モデル推定値と 4.2.6 で行われた、ホットスポット某市のケーススタディにおける追加被ばく線量実測値と比較することによって、モデルの確からしさの検証を行いました（図 4.18）。外部被ばく線量については、4 名の実測値とモデル推定値とは同程度の値でしたが、内部被ばく線量は、モデル推定値は実測値よりも大きくなりました。ケーススタディでは室内空気と屋外大気からの被ばく線量を考慮していませんので、その分はモデル推定値が大きくなります。さらに食事経由の被ばく線量も過大推定されていました。今回のモデル計算では食品別の放射性セシウム濃度と食品群別摂取量の積で算出する方法を用いましたが、用いた食品中放射性セシウムの濃度はほとんど検出限界値以下であり、その検出限界値が大きい（数 Bq/kg から数十 Bq/kg）ため、十分なデータに基づく推定ができていないのが現状です。

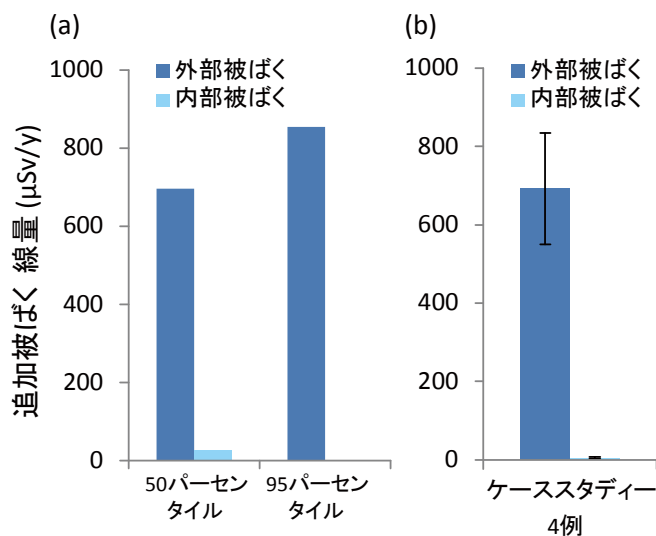


図 4.18 モデル推定値 (a) とケーススタディの実測値 (b) との比較（某市）（暫定結果）

(5) 今後の課題と取り組み

今後の取り組みの中で、以下の課題があげられます。第一はモデルの見直しです。建物による遮蔽係数や、土壌中放射性セシウム濃度から浮遊粉塵中濃度への換算係数などのパラメータを、実測データに基づき再検証する必要があります。第二はモデルの検証です。まだモデルの検証が不十分ですので、実測値とモデル結果の比較検証を、他地域、より多くの人を対象に行う必要があります。将来的には、構築したモデルを用いて、将来の追加被ばく線量も推定できるようにしたいと考えています。また、4.2.4節の環境多媒体モデルからの結果や、放射性ヨウ素（I-131）の分布再現結果などを取り入れ、さらに精度のよい予測を目指す予定です。

4.3 今後の取り組み

原発事故によって放出された放射性物質は、水、土壌や生物などの様々な環境中を移動・蓄積し、人や生態系への長期的な影響が懸念されています。今後、汚染された地域の環境を回復し、安全・安心に生活できる環境を取り戻すためには、放射性物質の環境中の動きを解明・予測し、影響を把握して、これらの科学的情報をもとに、より効率的・合理的な対策を進めていくことが不可欠です。そのために、4.2で紹介した研究を継続・発展させ、放射性物質による環境汚染の実態を把握し、動態を解明して将来予測する研究を実施します。更に、放射性物質による人への被ばく量や生物・生態系に対する影響を把握する研究にも取り組みます。研究テーマ毎には以下に示す展開を予定していますが、それぞれの研究成果を統合して環境中における放射性物質の動態とその影響の全体像を示したいと考えています。（図 4.19 参照）

① 環境動態計測

環境中における放射性物質の分布、移行や蓄積等の動態に関する実態を把握するとともに、「②環境モデリング」を構築するための測定データを取得するために、森林、河川、湖沼、沿岸海域等を対象とした、放射性物質の調査・解析を進めます。（4.2.2 参照）

② 環境モデリング

放射性物質の環境中の動きを把握するために、「①環境動態計測」によるデータを活用して、大気・陸域・海洋を対象とした環境シミュレーションモデルの構築を進めています。また、モデルを使用して、陸域から沿岸海域までの環境における長期間の汚染予測、対策効果の評価などを進めます。（4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 参照）

③ ヒト曝露解析

原子力発電所事故によって放出された放射性物質のヒトへの曝露に関する測定（4.2.6 参照）及びモデリングによる解析（4.2.7 参照）を進めます。

④ 生物・生態系影響調査

環境中に放出された放射性物質による生物・生態系に対する放射線影響等を把握するために、植物・ほ乳類・菌類を対象とした野外調査等を実施します。

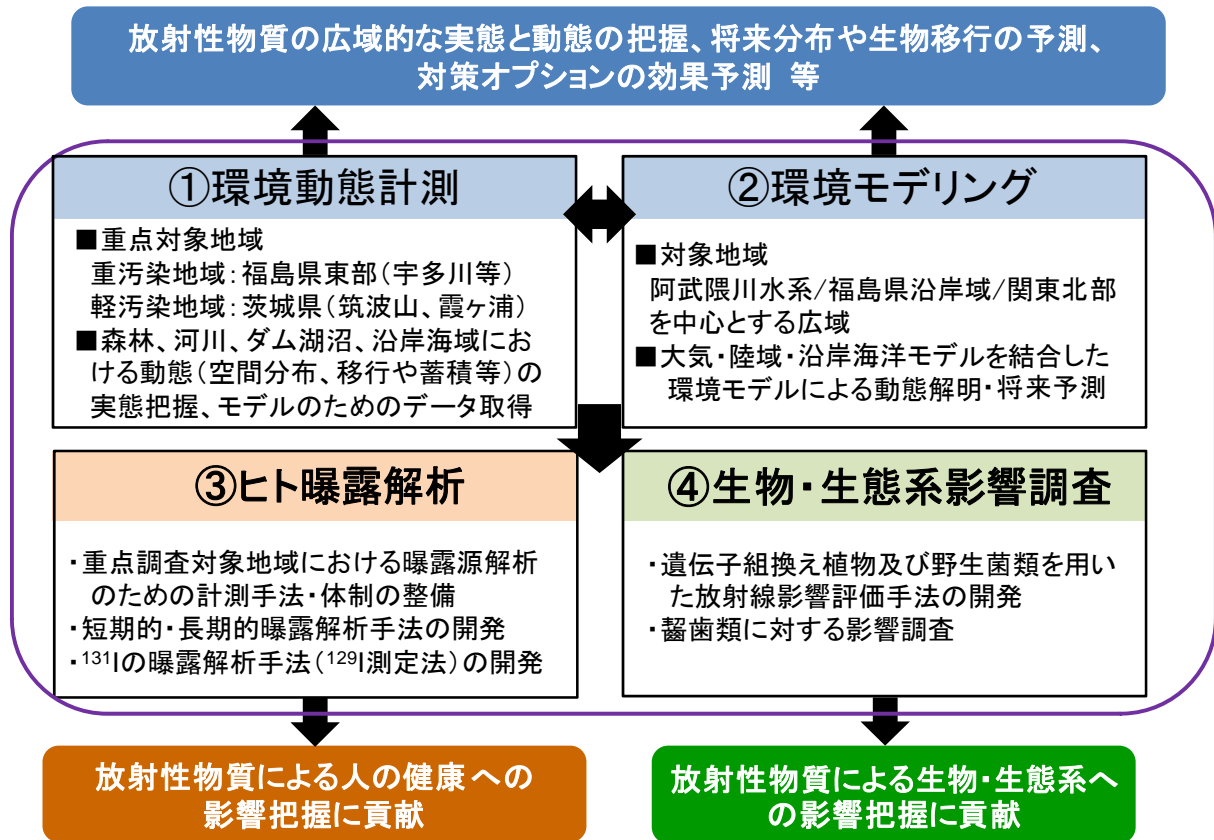


図 4.19 「環境中での放射性物質の動態解明と影響評価」研究の概要

第 4 章参考文献

- 1) Morino, Y., T. Ohara and M. Nishizawa: Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March 2011. *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G11, doi:10.1029/2011GL048689, 2011.
- 2) 文部科学省：文部科学省による第4次航空機モニタリングの測定結果について。
http://radioactivity.mext.go.jp/ja/1910/2011/12/1910_1216.pdf.
- 3) Morino, Y., T. Ohara, M. Watanabe, S. Hayashi, and M. Nishizawa: Episode Analysis of Deposition of Radiocesium from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, *Environ. Sci. Technol.*, dx.doi.org/10.1021/es304620x, in press.
- 4) Nature | Research Highlights: Where the radiation went, *Nature*, 477, 9 (01 September 2011) doi:10.1038/477009a <http://www.nature.com/nature/journal/v477/n7362/full/477009a.html>.
- 5) 大原利眞, 森野悠, 西澤匡人：放射性物質の大気中の輸送と数値シミュレーション, 第52回大気環境学会年会シンポジウム, 長崎大学, 平成23年9月15日.
- 6) 大原利眞, 森野悠, 田中敦 (2011)：福島第一原子力発電所から放出された放射性物質の大気中の挙動, *保健医療科学*, 60, 292-299.
- 7) 厚生労働省・水道水における放射性物質対策検討会. 水道水における放射性物質対策中間取りまとめ. 平成23年6月.
<http://www.mhlw.go.jp/stf/shingi/2r9852000001g9fq-att/2r9852000001g9jp.pdf>

- 8) 厚生労働省 医薬食品局食品安全部：食品中の放射性物質のモニタリング計画策定のための環境モニタリングデータ等の提供について（東京電力福島原子力発電所事故関連），平成23年8月30日報道発表資料。 <http://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000001nif2.html>
- 9) 独立行政法人 日本原子力研究開発機構：広域環境モニタリングのための航空機を用いた放射性物質拡散状況調査報告書、平成 24 年 6 月。
- 10) 日本学術会議 東日本大震災復興支援委員会放射能対策分科会：放射能対策の新たな一歩を踏み出すために―事実の科学的探索に基づく行動を―，平成 24 年 4 月 9 日。
- 11) 鈴木規之，村澤香織，松橋啓介，南齋規介ほか (2005) 全国河川の河道構造データに基づく化学物質の GIS 河川動態モデル (G-CIEMS) の開発と空間分布評価の試み、環境化学, 15(2), 385-395.
- 12) 水産庁 (2011) 水産復興マスタープラン，平成 23 年 6 月 28 日策定。
- 13) 水産庁 (2013) 水産庁ホームページ「水産物の放射性物質調査結果について」，<http://www.jfa.maff.go.jp/j/housyanou/kekka.html> (参照 2013-01-21)。
- 14) 東博紀，越川海，村上正吾，木幡邦男 (2011) 長期シミュレーションによる 1990 年代の伊勢湾のアサリ資源量変動に関する考察、土木学会論文集 B2(海岸工学), 67(2), I_1046-I_1050.
- 15) 文部科学省 (2013) 文部科学省ホームページ「文部科学省による海域モニタリングの結果」，<http://radioactivity.mext.go.jp/ja/list/238/list-1.html> (参照 2013-01-21)。
- 16) 農林水産省 (2013) 農林水産省ホームページ「農林水産技術会議 3-(6) 水産生物が取り込んだ放射性セシウムの排出を早める畜養技術の開発」http://www.s.affrc.go.jp/docs/nogyo_gizyutu/pdf/3_6.pdf (参照 2013-01-21)。
- 17) 厚生労働省 (2011) 食品中の放射性物質の調査。
- 18) US EPA (2007) 曝露係数ハンドブック
- 19) ICRP (1996) Publication 72

第5章 安全・安心な社会創造に向けて

5.1 震災復興のまちづくりへの貢献、低炭素社会シナリオへの取組

東日本大震災後の地域の復旧・復興の過程で、基幹的なライフラインや住宅の復旧整備が急速に進められています。社会環境システム研究センターでは、環境都市研究の一環として開発してきた地理情報システムを活用した環境都市の評価システムを被災地都市に適用するとともに、環境未来都市として選定された新地町と協定（平成25年3月13日）を結び、協力体制を築く予定です。同時に、原発事故後のエネルギー需給や温暖化対策の見直しが進められていることから、日本のエネルギー需給や低炭素社会シナリオの再検討を開始しました。得られた結果の概要は以下の通りです。

- ① 復興都市づくりの計画に対して地域エネルギーシステムの分野から貢献するため、地理情報システムを活用した計画評価システムを構築しました。
- ② 福島県北部および宮城県南部の沿岸域9市町を対象としてケーススタディを行い、この地域の民生需要と賦存エネルギー量を比較した結果、十分な資源が存在しており、循環・再生可能エネルギーの活用により効率の高い都市再生が可能になることがわかりました。
- ③ 大震災・原発事故後のエネルギーと温暖化対策について、統合評価モデルにより、原発比率ごとの、GDP、家計消費支出、温室効果ガス排出量への影響を推計しました。

5.2 成果の概要

5.2.1 環境復興都市づくりへの取組

(1) 震災復興のまちづくり支援システムの構築

東日本大震災では、1万5千人以上の死者を出すとともに、津波被害を受けた沿岸部を中心に、住宅やインフラなどの都市ストックが根幹から失われ、大きな被害を受けた集落が多く発生しました。大震災後の地域の復旧・復興の過程で、基幹的なライフラインや住宅の復旧整備が急速に進められていますが、地域の雇用や経済再生の遅れが重要な課題となっています。多くの被災自治体では住宅移転などの検討も進み、復旧段階から復興段階に入りつつありますが、その一方で、原発事故の影響を受ける避難区域における除染作業の推進と、それに伴う避難区域の見直しなど、復興整備は大きな課題として残されています。こうした地域でも、復旧事業による地域経済効果が一段落する近い将来の時期に、地域での雇用を創出する活動の源となる産業システムの再生を、高齢化が進む地域的制約と資源の希少化や低炭素化などの地球的制約のもとで実現するための具体的な道筋についての検討が緊急課題となっています。

今回の大震災はその規模が過去の災害をはるかに上回る深刻さと影響の広さを持ち、これは個別の復旧だけではなく地域の面的な復興が必要となります。同時に、日本全体がすでに直面している高齢化や地域産業の転換等の課題を、復興を通じて解決する方策を計画することが求められます。

都市や地域の緊急の復旧活動と連動しつつ、中長期的な地域の活性化につなげる「地域の復興力」を上乘せる復興シナリオづくりが、重要な課題となります。

未曾有の被害をもたらした東日本大震災からの復興には、これまでの災害復興とは比較にならないほどの長い時間と労力を要することが予想されますが、経済成長が見込めない人口減少下において外部のみに依存したプロセスでは、地域・都市の復興を持続的に推進していくことは困難であり、復興プロセス自体が、地域の特性と地域資源を効率的に活用する内生的な復興のための仕組みを持つことが不可欠となります（図 5.1）。

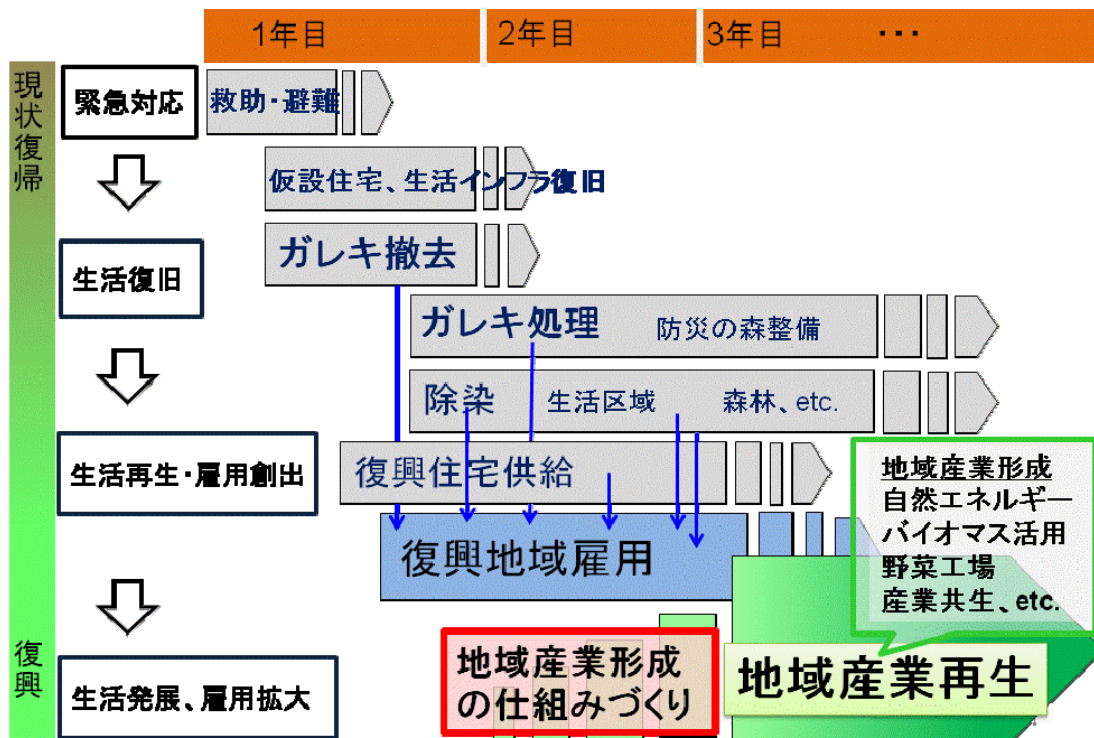


図 5.1 復興都市づくりの課題と展開

既に多くの復興自治体では新しいエネルギーシステムを整備するという国家的な命題への対応を、復興まちづくりで先導的に実現する試みが始まっています。その一方で、自治体は可能な限り早期に復興のめどを立てるといった地域の要請に直面しています。その状況からは、復興事業に対する個別の事業ごとに検討を優先せざるを得ない状況にあります。複数の事業を横断的に連携して推進することによる事業間の相乗的な効果（統合効果）や、事業効率の改善などの効果（地域効果）などは総論として自治体担当者やおよび専門家の間で議論されても、多くの場合、横断的な取り組みの効果を客観的に数字で算定することが容易ではないために先送りになる場合もあります。また計画にかかる時間と労力が限られることから、地域の特性を十分に検討した上で事業選定や立地選定が行われていない計画も見られます。このような計画は、構想から計画が立てられた後の事業推進の段階に至って再計画を余儀なくされるため、早急に計画の方法論を提供することが必要です。

(2) 復興都市づくりへの地域エネルギー計画支援モデルの構築

早期の事業実現をめざす復興計画において、事業実現までの期間をできるだけ短縮しつつ、統合的、分野横断的な計画を立案・実現するには、その統合効果や地域効果を客観的、定量的に把握する手法の提供・活用が、関係主体間の合意形成には不可欠となります。社会環境システム研究センターでは「地方公共団体実行計画（区域施策編）策定マニュアルに関する低炭素化手法の検討」¹⁾での成果をもとに、復興都市の計画づくりを地域エネルギーシステムの分野から支援するための計画評価システムを構築しました（図 5.2）。

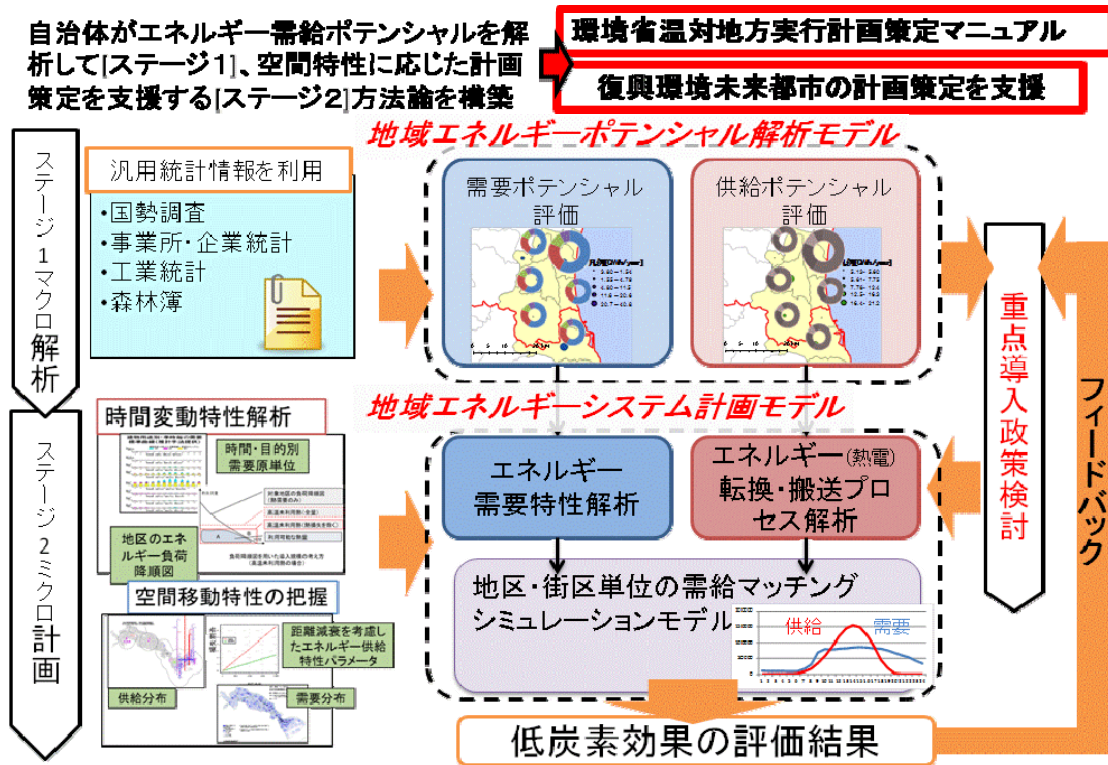


図 5.2 復興都市づくりへの地域エネルギー計画支援モデル

地域エネルギーシステムの技術と対策が効果を発現するためには、地域に環境資源が賦存していることが重要となります。たとえば、風力発電やメガソーラーなどの大規模技術の導入は、系統への接続性が課題となります。一方で、スマートコミュニティの形成のように都市や地区・街区のスケールの総合的な低炭素対策を導入する際には、社会経済の状況、および都市開発や社会資本更新の状況を考慮する必要があります。これらの条件によって対策導入による CO2 削減の効果が異なるため、都市や地域特性に応じた削減効果の策定によってはじめて、削減目標の設定、個別対策の技術間の相乗効果の同定が可能になります。さらに個別の技術導入に加えて追加的に行うべき面的対策や都市の空間更新の事業の将来像を描くことや、そこへ到達するロードマップの作成に向けても都市特性を考慮した算定プロセスが必要です。低炭素都市、環境都市の総合的な取り組みを評価するため、導入施策のスケールの設定に選択肢を与えつつ、地区・街区及び都市のスケールでの施策を導入することによる個別の技術導入に加えて上乗せ効果、複合効果、相乗効果についてその効果を評価することを想定しました。

地域の復興に際しては市民の意向を反映する参加型のまちづくりであることや、公共事業や補助金のみに頼らない自律的なまちづくりであるとともに、地域特性を反映し、地域の持つ環境資源を積極的に地域経済に取り込み、地域の産業と経済を活性化することの重要性が指摘されています。復興まちづくりの検討を進める自治体に対して、統計情報やデータを活用して地域特性を客観的に把握するとともに、事業を実施する際の様々な制約条件を推計します。地域条件を配慮した適正な事業を選定して、その効果をあらかじめ算定できるように以下の機能を持つモデルを構築しています。

(3) 復興都市でのケーススタディ

福島県および宮城県の境界部に属する9市町を対象として研究を進めている例を紹介します²⁾ (図 5.3 参照)。この圏域の総人口は26万人、総面積は約10,000km²で森林が約50%、農地が約32%を占め、約10%が建物・道路等の都市的な用途に用いられています。大震災では全壊の住宅が7000棟に達して、地域全体の約9%の土地が津波による浸水を受けています。

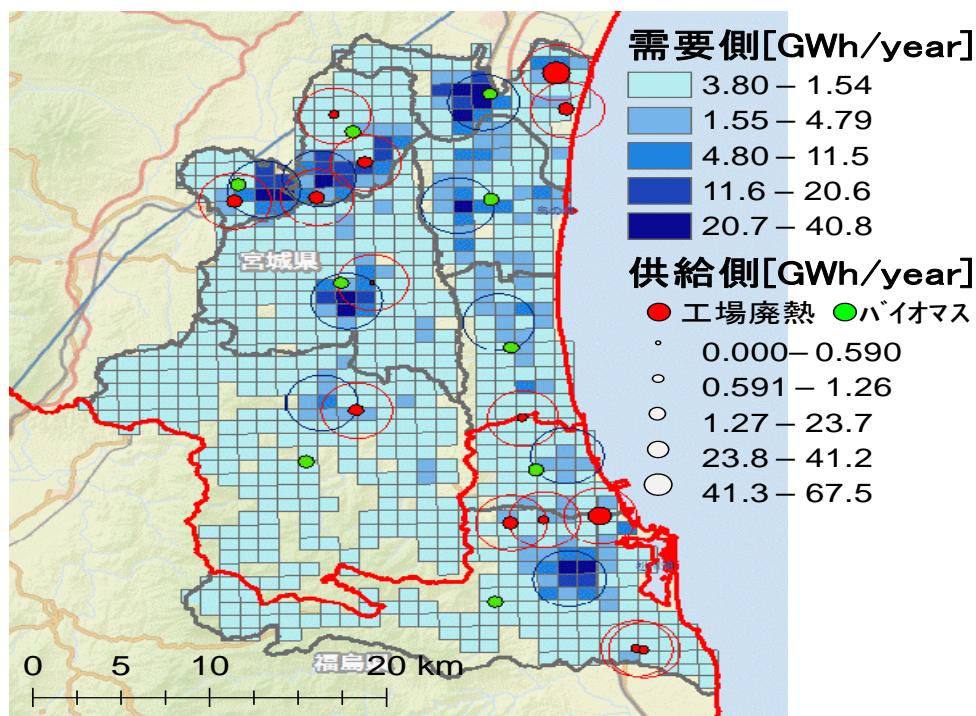


図 5.3 エネルギー需給マッチングマップ

地域のエネルギー需要については、1km四方ごと、民生（業務・商業・住宅）ごとに推計します。エネルギー供給については工場廃熱・太陽光発電・バイオマスについての立地ポテンシャルを算定しました。太陽光発電については年間時別日射量データベースと地域内の建物形状データに基づきパネル設置可能面積、電力転換効率等の技術係数を考慮して算出しています。木質バイオマスエネルギーについては、未利用資源系バイオマス（木質系、農業残渣、草本系）と廃棄物資源系バイオマス（木質系、家畜糞尿・汚泥、食品系）の有効利用可能量を算定しま

した。

こうして算定した、エネルギーの需要と供給のポテンシャルを比較すると、対象地域全体のエネルギー需要量に対して、工場排熱は 18%、太陽光発電システムは 35%、バイオマスは 9% の供給ポテンシャルを有していることが明らかになりました。森林面積割合が高い地域であることからバイオマス利用が有望であるとともに、沿岸域ですでに稼働を再開している工場群の排熱利用のポテンシャルの大きさが分かります。ただし、こうした熱源となりうる産業施設群と遠距離の復興都市の再生が進む場合はエネルギーの有効利用が難しくなることも予想されます。個別の自治体ごとに、需給バランスを見ると自治体間の格差が大きいことも明らかになりました。環境資源を活用した実現可能性の高い施策を実施することによって、有意な化石燃料起源エネルギー供給量の削減が可能となることが分かりました。ケーススタディから東北地方には民生の需要部門と比較した結果、十分な環境資源が賦存しており、循環・再生可能エネルギーの活用により、エネルギー効率の高い都市が構築出来ることが分かりました。

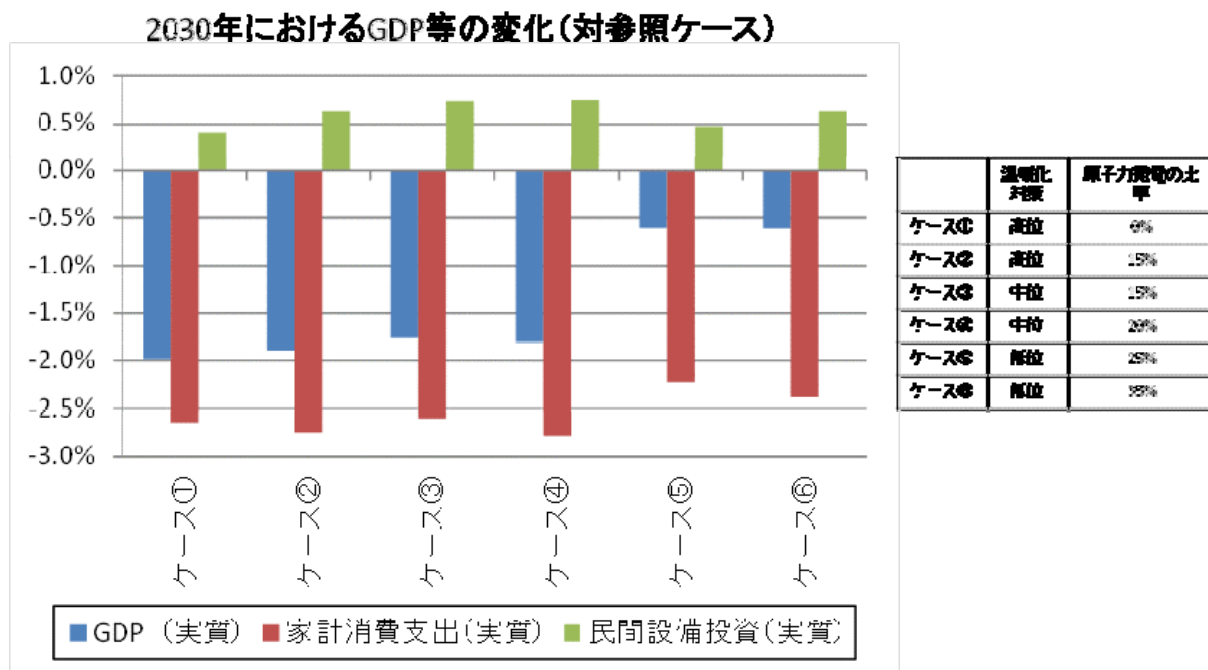
5.2.2 安全・安心な社会の形成に向けて

大震災と原発事故を経験して、人々がより「安全・安心」な社会を希求するようになりました。これまで環境面における「安全・安心」は化学物質汚染等による公害から人の健康・生活を護ることが中心でしたが、さらに突発的に発生する大規模環境災害などから人々を護る「安全・安心な社会」が、「低炭素社会」、「循環型社会」、「自然共生社会」を支える基盤として重要性が増してきました。大震災後の安全・安心な社会の形成に向けて、従来の研究成果も踏まえながら、以下の課題について調査研究を開始しました。

- ①大震災後・原発事故後のエネルギーと温暖化対策
- ②持続可能社会の将来シナリオの再検討

(1) 大震災・原発事故後のエネルギーと温暖化対策

3.11 の大震災発生後に東電管内で実施された計画停電や夏季の電力使用制限は、電力が人間活動や生活の欠かせない基盤となっており、その安定供給の必要性を再認識させました。温暖化問題を総合的に検討するために開発してきた統合評価モデルを用いて、2030 年におけるエネルギー構成（発電電力量と電源構成）と地球温暖化対策について試算しました。図 5.4 は、2030 年において電力使用量における原発比率（0、15、20、25、35%）と温暖化対策の強度（低位、中位、高位）を組み合わせ、GDP（実質）及び家計消費支出（実質）を推計した結果です。原発比率が低く、再エネ・火力の比率が高いほど電力価格が高くなり、また温室効果ガス排出量が多いほど限界削減費用が高くなるため、エネルギー価格の上昇を通じて生産額や GDP の減少や家計消費の減少を招くことがわかりました。また温室効果ガス排出量の推計からは、2030 年までに原発によるエネルギー供給が減少すると、火力、再エネ、省エネ・節電に頼らざるを得ず、温室効果ガス排出量の大幅な削減が困難な状況となることもわかりました。



**図 5.4 原発比率と温暖化対策強度による GDP，家計消費支出，民間設備投資の変化
(対参照ケース、2030年)**

(2) 持続可能社会の将来シナリオの再検討

温暖化問題解決のためには、気温上昇を産業革命前に比して2℃未満におさえる必要があります。2050年に90年比で世界の温室効果ガスを50%削減する必要があります。その時、日本は80%削減する必要があります。低炭素社会実現の将来シナリオについて統合評価モデルを開発、適用して構築してきました³⁾。2050年の低炭素社会を見通すには、まず温室効果ガス排出削減80%が達成できるかどうか問題となります。原発事故後の日本のエネルギー需給の見直しが政府で進められており、低炭素社会の在り方も再検討が進められていますが、こうした状況変化を踏まえ、原発比率を変えた場合の種々のエネルギーミックスとCO₂排出量を試算しました。その結果、2030年時点の原発比率が異なっても、2050年にはいずれのケースでも低炭素社会の目標であるCO₂排出量の80%削減に到達する経路がありますが、再生可能エネルギーや省エネ・節電への依存度が大きくなり、また2030年ごろから本格的な導入が想定される二酸化炭素の回収・貯留(CCS)といった技術をフルに活用する必要があることがわかりました⁴⁾。

5.3 学術的、行政的貢献と今後の課題

5.3.1 被災地都市復興を取り巻く状況

東日本大震災の復興に関する国の基本方針である、「東日本大震災復興基本法」の中でも、単なる復旧ではなく、21世紀半ばの日本のあるべき姿を示す復興を目指すことが謳われています。具体的な課題に対し、少子高齢化、人口の減少、国境を越えた社会経済活動の進展への対応、食料問題、電力その他のエネルギーの利用の制約、環境への負荷及び地球温暖化問題等の人類

共通の課題の解決に資するための先導的な施策に取り組むことなどが明記されています。これらの理念の具体化に向けては、復興庁などを通じた国の支援のもとで自治体の策定する「復興基本計画」に委ねられてきましたが、実際には各自治体は被災直後の復旧作業に追われ、計画策定・実施に十分な人員と時間を割けないという課題が生じています。その状況を踏まえて、政府は「新成長戦略」の21の国家戦略プロジェクトの一つである「環境未来都市」構想として、6か所の復興自治体を指定しました。具体的には、岩手県大船渡市・陸前高田市・住田町、釜石市、宮城県岩沼市、宮城県東松島市、福島県南相馬市、福島県新地町です。環境未来都市の各自治体に対して助言を行うとともに、計画推進体制を整備して、資金提供、規制・制度改革の調整等を行う支援を実施しています。「環境未来都市」構想は、震災復興を直接的な目的とはしていませんが、都市の再生と成長エンジンとして、環境や高齢化対応、経済・社会の活性化という人類共通の普遍的課題について問題認識の共有、課題設定の普遍化、解決の枠組みを考えることを目指しており、「東日本大震災復興」への貢献が期待されています。

5.3.2 環境復興都市づくりへの取組

従来開発してきた環境都市システム評価モデルは、環境省の「地方公共団体実行計画（区域施策編）策定マニュアル」にも活用されてきました。この評価モデルを用いて復興まちづくり、特に被災地の環境未来都市を中心として地域エネルギーシステムや低炭素化の計画策定の支援など貢献してきました。今後は、再生可能エネルギーを中心とした地域環境資源を活用し、都市や地区・街区スケールで総合的な環境対策や低炭素対策の導入効果評価を進めるとともに、とくに被災地の環境未来都市である新地町とは緊密な協力関係も構築しながら進めていく予定です。

5.3.3 持続可能な社会シナリオへの取組

これまで温暖化問題の解決や低炭素社会の実現に資する統合評価モデルの開発・応用研究を実施し、日本の低炭素社会シナリオ2050の開発や政府の中期目標の検討に研究成果を提供してきました。大震災・原発事故後の日本のエネルギー政策の在り方を検討するために、政府は2011年10月にエネルギー環境会議を設置し、基本方針（中間的な整理）を提示したのち、12月に3つの審議会・委員会に重要事項の選択肢を検討するように指示しました。中央環境審議会地球環境部会がエネルギーミックスを考慮した温暖化対策の選択肢を担当しました。統合評価モデルを活用し、エネルギーミックスと温暖化対策の多様な組合せの効果や経済影響を推計し、結果を地球環境部会やそのもとに設置された2013年以降の対策・施策小委員会に提供するなど、貢献しました⁵⁾。

従来進めてきた低炭素社会シナリオ検討においては、日本の環境・社会・経済の基盤として安全・安心は明示的に考慮してきませんでした。今後は、安全・安心な持続可能な社会づくりに向けて、例えば、地球規模の気候変動の影響、自然災害、産業や国民生活などの幅広い分野における検討を踏まえた将来シナリオの研究を進める予定です。

第5章参考文献

- 1) 環境省(2012)：地方公共団体実行計画（区域施策編）策定マニュアルに関する低炭素化手法の検討.
- 2) 藤田壮, 戸川卓哉, 藤井実ほか(2012)：復興まちづくりを支援する地域エネルギー計画評価システム（投稿中）.
- 3) 藤野純一ほか(2007)：低炭素社会に向けた12の方策, 日刊工業新聞社.
- 4) 芦名秀一(2012)：これからの日本の電力供給の姿とは（ポスター発表）, 国立環境研究所公開シンポジウム2012.
- 5) 中央環境審議会地球環境部会(2012)：2013年以降の対策・施策に関する報告書（地球温暖化対策の選択肢の原案について）.

第6章 災害環境研究の今後の展望

6.1 「災害環境研究の俯瞰」の方向性の継続と更なる前進

東日本大震災直後の初動以来の国立環境研究所の経験と、放射性物質による環境汚染に関する研究などの災害環境研究に取り組んだ1年間の蓄積を踏まえた「災害環境研究の俯瞰」は、今でもその内容の先進性と合理性を失ってはおりません。

当時の実経験と臨場感を踏まえて「今後の教訓」として集約して記述された6つの課題については、今後ともそれらを活かして研究所としてのガバナンスや研究活動等に取り組んで参ります。

6.1.1 「災害環境研究の俯瞰」の背景と現時点での評価

東日本大震災においては、かつて経験したことがない地震・大津波により人にも町にも財産にも動植物にも自然にも極めて激甚な被害が生じたことが、大震災直後から明らかになって参りました。

大量のがれき（災害廃棄物）は海水によって塩分を含み、海底の泥をかぶり、工場の油や水産物などの処理を急ぐべきものも多く、アスベストなどの有害な物質も心配しなければならないものでもありました。

国環研は国の研究所の中では唯一廃棄物分野の研究や技術開発に正面から取り組んでいる機関です。従って、まず廃棄物関係の研究者等が大震災直後から多くの技術的、科学的な問題解決に果敢に取り組み、活躍することになりました。その中には、これまで地道に積み重ねてきた研究成果だけでなく、実際に国環研において実験してデータをとってこそ初めて説得力を持ち現場に生かされたことも多く含まれます。例えば、塩水かぶりのがれきを一般廃棄物処理施設で焼却したら排ガス中のダイオキシンによる問題が生じないか、という疑問に対する「心配なし」という、データに基づく技術的見解を国環研が出すことで、その後のがれき処理を安心感をもって円滑に進める一助になりました。

その後、福島第一原子力発電所から広く拡散した放射性物質による環境汚染という、人の生命、財産、自然環境に対する未曾有の危機に対する対応は、国環研をあげて取り組むべき緊急課題となりました。

環境中に放出された放射性物質は大気中でどう広がり沈降するのでしょうか。土の粒子に吸着したら水中であるいは水の流れに乗ってどのように動くのでしょうか。植物の葉の上に降ったものや土壌に吸着されたものはどう移動するのでしょうか。生物の食物連鎖ピラミッドでどのように遷移するのでしょうか。そのような幅広い分野にわたる研究や調査を統合して行えたのは、大気も水も土壌も生物も化学物質も、数理モデルによるシミュレーションも扱う国環研ならではの総合力の故です。

「災害環境研究の俯瞰」（平成24年4月国立環境研究所。以下「俯瞰」という。）は、国環研が、理事長によるトップダウンのリーダーシップにより、東日本大震災から1年を経過した時

点でとりまとめたものです。

今では相当違和感がなくなっている「災害環境研究」という単語自体が、「俯瞰」の刊行を契機として普通の言葉として普及するようになったものです。

「俯瞰」は、大震災直後の初動以来の国環研の経験と、放射性物質・災害環境研究に取り組んだ1年間の蓄積を踏まえて作成されておりました、今でもその内容の先進性と合理性を失ってはおりません。

6.1.2 「災害環境研究の俯瞰」において示された教訓の現時点での評価

「俯瞰」において「今後の教訓」として集約して記述された6つの課題は、現実に直面した課題や克服した問題を踏まえてとりまとめられたものでありますから、当時の経験、困難などに立脚した臨場感がある現実的なものであります。従って、今後とも国環研としてのガバナンスや研究活動等においては、それらの教訓を活かして取り組んでいくべきものです。

この「今後の教訓」の要点を参考として下の①から⑥に示します。

- ① 災害環境研究は、発災直後から状況把握を開始して、問題化する可能性のある被害やそれらの予防策を立案して実行するという、時系列的な状況変化に応じた展開をしていく必要がある。実施した対処法や対策法の効果を定期的に検証して最善な方法を模索する必要がある。
- ② 災害環境研究には平常時の観測も重要であるし、災害発生・救命救助・ライフライン復旧・復興の各過程で想定される環境問題に対応するための長期・継続した調査が必要である。国環研は国、自治体、地方環境研究所等と協力して、それらの観測、長期的な環境調査を行う。
- ③ 今回の震災廃棄物問題や放射能汚染問題についての対応を踏まえ、平常時から国環研の基本理念に沿った研究活動を進めて、非常時には利用可能な資源を把握し準備を整えておき、現場の状況に合わせて柔軟な対応策を作成できるようにする。
- ④ 災害環境は複雑で複合した事象でありすべての事象が繋がっている。科学・技術のあらゆる分野に関係する。そこで日頃から学術・科学の様々な分野を超えた連携関係、国・地方の行政、民間企業・団体との連携関係などを構築し、災害時に科学・技術の実務的適用を有効に行えるようにする。
- ⑤ 災害環境の状況と復旧・復興過程、環境創造の展開を記録し保存することは重要であり、また、進めている震災関連の研究の記録は今後の環境創造と将来への備えのための重要な記録となる。これらの記録は適切な時機に適切な形で国内外に公表する。国環研は研究成果を世界に発信し、各国の研究者とも連携しながら災害環境研究を続けていく。
- ⑥ 予測していないことが起こるのが災害であり、既存のマニュアルや技術だけではなく各専門分野、各階層でのリーダーシップが必要となる。国環研は現場を意識した最先端の環境研

究を遂行し、日本・世界をリードする環境研究者を育成し、将来の災害時の環境問題解決に貢献する。

これらに加えて、「災害環境研究の俯瞰」を刊行した後に重要性が特に浮き彫りになってきたのが、災害環境研究と社会とのコミュニケーションのあり方です。次節 6.2 で詳細は述べますが、ここに、教訓①～⑥に新たに加えるべき教訓として、次の⑦を追加します。

- ⑦ 個人、地域そして社会の「リスク」に対する考え方が幅広く、発信される情報に対する科学的理解度も異なる状況下では、研究推進能力とともに正確で迅速な情報をどのように真摯に提供するかを常に考え、自己検証力の確保と、誤解されないコミュニケーション能力の育成が必要である。

6.2 研究の進展に伴う研究成果の普及と環境政策への貢献等の態勢整備

東日本大震災の被災地の復興は、国を挙げての重要かつ緊急な課題です。国立環境研究所も、がれき処理や放射性物質の環境動態などの災害環境研究の成果を、得られ次第タイムリーに提供して環境政策に貢献して参りました。また、所の一般公開、シンポジウムなどの節目ごとに成果や課題をとりまとめて、成果の普及と所の活動紹介を図って参りました。

研究がさらに進行することに伴い、その新しい成果が被災地の復興と環境創造として結実するように、災害環境研究による環境政策への貢献、より幅広い対象への研究成果の普及、及び、それらを実現するための態勢整備に取り組んで参ります。

東日本大震災を契機として国環研が着手した又は従来の研究スコープを拡張・発展させて取り組んだ数多くの研究課題について、それぞれ大震災後 2 年間に着実に研究を進展させてきた成果があります。その概要を本書の第 2 章から第 5 章までにとりまとめて記述してあります。

また、国環研の災害環境研究の遂行体制を創造、強化、充実してきた経緯は第 1 章に記述したとおりです。

昨年末には、福島県南相馬市の協力を得て、放射性物質による環境汚染に関するフィールド調査を効率的に進めるための実験室を同市内に設置することができました。40 m²という限られた床面積ではありますが、福島県において採取した環境試料を分析するための前処理操作を可能とする設備を整えることができました。

災害環境研究の中でも、特に、放射性物質についての、環境汚染、環境中での挙動、生物・生態系や人の健康への影響に関する研究や、放射性物質により汚染されたがれき処理や除染物の処理に関する研究、環境汚染対策を適正かつ迅速に講じて将来の環境を創造することを目指す研究などは、東日本大震災以前の環境研究の成果を応用しながら、さらに新たにかかりのエネルギーを注ぎ込んで取り組みはじめた研究テーマです。（これらの研究を、国環研では「震災放射線研究」と表現しています。）

震災放射線研究は、放射性物質による環境汚染に対して有効、適切な対策手段を講ずるうえで欠かせないものになっていますので、その研究成果は部分的であっても早期に社会還元することが必要となっています。

震災放射線研究をはじめとする災害環境研究に対する社会的な関心は非常に高く、東日本大震災後に国環研が公開で行った主催又は共催のシンポジウム、研究所の一般公開などの様々な一般向けのイベントにおいては、常に、国環研が行っている災害環境研究を紹介してほしい、それらの研究成果の説明や展開について知りたいという方々が多く、講演においてもパネルセッションにおいても活発な質疑応答が行われました。

災害環境研究の成果、とりわけ震災放射線研究の成果が被災地の速やかな復興に活用され、さらに新たな環境の創造に寄与するものとなることを期待し、また、国環研に対する社会の期待に応えるために、今後とも積極的に公表、公開していく方針です。

一方で、災害環境研究の中には、例えば、除染事業により発生した指定廃棄物の処理技術や除染効果の予測方法に関する研究、あるいは自然環境中で生きている生物における放射性物質の存在の程度を調査して解析する研究など、環境安全性に関する人々の幅広い関心の対象となっている分野のものが多くあります。

これらの研究成果の公表が、無用の誤解と混乱を招くことなく、国環研の公表が人々の安心感を高めることに繋がれば、人々に復興や新たな環境創造に向けた更なる取り組みの意欲を増進できるという期待感があります。

一方で、災害時には、情報の伝達が思い通りに出来なくなり、あるいは、被災情報などが同時に極めて多量・多様にもたらされ、さらに時には相反する情報が錯綜することまであります。こうして災害時には情報そのものが誤解と混乱を生じさせる原因となってしまうことも想定されます。

そのため、日頃から、災害環境研究の成果の公表についても、公表しようとする内容の科学的な確かさや、逆に未だ不確かな点などの限界などを正しく表現することなどの基本的な姿勢に加えて、リスクコミュニケーションの観点からも検討を深めておき、きちんとした対応をすることを心がけます。

6.3 更なる災害環境研究の展開体制の整備

東日本大震災から2年が経過し、緊急時対応として開始した災害環境研究も持続可能な定常時対応に移行する時期になってきました。そのため、独立行政法人が行う研究の制度的裏付けである中期目標、中期計画、運営費交付金等において他の研究と同じように位置づけを明確にし、それを踏まえた態勢の整備を進めなければならないと考えます。

また、設立準備中である福島県環境創造センター（仮称）と、福島県南相馬市の国環研実験室で行われる活動と、つくばの本構で行われる調査・研究・環境情報の提供等の活動とを密接に連携させて、災害環境研究という集合の力を一体的かつ最大限に発揮できる態勢を整備したいと考えています。

6.3.1 総合的な災害環境研究を一体的に進めるための基盤の整備

国環研が社会の要請に応じて、また、環境政策に貢献することができるように災害環境研究を進めるためには、瞬発力のみならず持続力が必要とされる段階を迎えました。

緊急時対応としてできることをできる限りやるという段階から、すべきことを体系的に構築して、短時間でやるべき事も環境観測等の長期間かけてやるべき事も総合的に一体的に実行していくという、持続可能な定常時対応に移行する段階になっています。従って、災害環境研究についても、国環研が行ってきている他の研究と同じく、様々な面で位置づけを明確化する必要があります。

具体的には、研究開発を担っている国の独立行政法人において制度上必要である中期目標、中期計画、運営費交付金等における位置づけと、それを踏まえた態勢の整備などが必要となります。

東日本大震災直後の緊急時対応としては、国環研理事長が環境大臣からの直接の要請に基づき短期集中的かつ強力な研究対応を行うことが出来ました。中期計画には直接的かつ明確には書かれていないことではあっても、所内の役職員それぞれがそれぞれの立場で時間とエフォートを投入し、被災地の現場での調査や、所内での研究エリアの設定や、震災放射線研究のために必要となる設備や装置の整備や、調査研究において環境中の放射性物質を取り扱うことに伴う健康管理の強化などの研究実施態勢整備を進めました。

これらの対応の中には法令等による規制がなく、所独自のアイデアで制度化して臨機応変に取り組んできたものもあります。

平成 24 年 8 月の「環境省独立行政法人評価委員会国立環境研究所部会」による、国環研の平成 23 年度の業務実績評価書（以下「環境省評価委員会評価書」と言います。）では「東日本大震災に対応した災害環境研究や放射性物質の汚染による新たな環境問題については、現実の課題に対して臨機応変に対応し、適切に対応を取っていると評価でき、今後もこれらの分野の研究の中心的存在となることが期待される。」という評価を頂きました。

一方、環境基本法の改正が行われ、放射性物質やそれに汚染されたものであることを理由に環境問題、環境汚染から除外される、ということではなく、国環研が対応すべき環境研究の範囲には環境中の放射性物質に関することが含まれることが明確化されました。

また、緊急の対応として出来る範囲で最大限の資源を投入して開始した東日本大震災大震災を契機とした災害環境研究でしたが、それらが長期にわたるようになってきていることに起因して態勢の見直しが喫緊の課題となっています。

独立行政法人である国環研の業績を厳しく見つめて公平に評価して下さっている上記の環境省評価委員会評価書でも、「震災被害を受けながら、第 3 期中期計画の初年度として着実に成果を挙げつつ、同時に東日本大震災に対応した災害環境研究や原発事故に伴う放射性物質の汚染による新たな環境問題に対して、理事長の指揮の下、その総合力を発揮して適切に、臨機応変に対応し、限られた人材の中で必要とされる調査研究を進め、政策への反映、国民への情報提供においてその役割を十分に果たした。放射能汚染の影響評価が国環研の重要な研究課題の一つとなったことを受けて、予算面でも、人員面でも、応分の増額・増員があつてしかるべきではないだろうか。」と書かれています。

確かに、放射性物質による新たな環境問題もあり、災害環境研究を緊急的臨時的なものではなくて定常的で持続可能なものとして推進できるようにしておかなければならないのです。

そうすることによって、大震災前に国環研自身が計画していた様々な研究の実施が阻害されないようになる条件を整えることが出来ます。

なお、現状では、国環研が災害環境研究として行っている研究のうち、廃棄物関係のものについては研究事業費が運営費交付金として手当てされ、国環研が組織の任務として行うことが明確になっています。しかし、放射性物質の環境中での挙動や生物・生態系への影響、人の健康への影響などを総合的に研究し、環境問題全体を見る大きな見方で災害環境研究全体を研究することについての運営費交付金の手当ては今後の課題となっています。

また、上記の様に環境省評価委員会評価書に書かれている「人員面での応分の増員」も今後の課題ですので、そのように高い評価を下さったことに感謝しつつ、これからも質の高い災害環境研究を定常的に推進できる組織体制が実現できるように、日々励んでいきたいと考えています。

6.3.2 福島県環境創造センター（仮称）における研究との連携

国環研は、放射性物質が環境中でどのように存在し移動するか、放射性物質による環境汚染の状況はどうか、人や生物への影響はどうか、環境リスクの程度はどうかなど、幅広い分野の研究を総合的に進め、がれき処理や放射性物質の環境からの除去というような対応措置の研究、将来を見越した環境創造に関する研究などとあわせて、災害環境研究として一体的に展開しています。

今後とも、災害環境研究の一層の進展に伴い、より幅広い対象への研究成果の普及を図り、それらの成果を現実に活かすためにも、災害環境研究の総合性一体性を確保して研究を推進することが必要です。

一方、福島県には、平成 23 年度政府補正予算で福島県環境創造センター（仮称）を創設する基金が国から予算措置されています。

そして、福島県における同センターの整備に関する検討の過程では、国環研と密接に連携して研究を行う態勢を整備することの必要性が議論され、平成 24 年度政府補正予算（案）には同センターに国環研の研究拠点を追加するための基金の増額が盛り込まれています。

このようなことから、設立準備が進められている福島県環境創造センター（仮称）と、福島県南相馬市の国環研実験室で行われる調査・研究・環境情報の提供等の活動と、つくばの本構で行われる活動とを密接に連携させて、災害環境研究という集合の力を最大限に発揮できる態勢を整備する必要があります。

さらに、復興は未来における新しい社会につながるものでなければなりません。低炭素社会・循環型社会・自然共生社会の樹立につながる研究の展開を図っていききたいと考えています。

今後とも、国環研は、震災放射線研究をはじめとして、災害環境研究については、福島県環境創造センター（仮称）における研究の実施などを含めて、制度的な基盤整備、研究実務面での態勢整備などを的確に進め、調査研究を積極的に推進して参ります。

6.4 国環研からのメッセージ

国環研が展開してきた災害環境研究の概要と展望を御紹介しましたが、東日本大震災を契機とした調査、研究、技術開発は、国、地方公共団体、他の研究・技術開発法人、大学、企業、民間団体など、様々な主体において懸命に進められています。

国環研としては「災害環境研究の俯瞰」で整理した幅広い分野の研究を、自ら行うことのみならず、様々な主体によって推進して頂けることを期待していますし、連携していきたいと考えています。

本冊子は、まず第一歩として国環研の研究成果等に限ってとりまとめたものですが、環境大臣から頂いた中期目標にある、環境研究の中核的機関たるべしという言葉に鑑み、様々な主体の取組や研究成果を俯瞰して御紹介できる機会を作るなど、災害環境研究の成果がいち早く復旧・復興・環境創造に活用されるように務めたいと考えます。

今後とも、国環研が進める災害環境研究のみならず、様々な主体が進める幅広い取組と国環研が連携して進める災害環境研究についてもご期待を頂ければ幸いです。

資料

I. 執筆者

- 第1章 徳田博保・滝村朗・佐治光（企画部）
- 第2章 大迫正浩・松崎裕司（資源循環・廃棄物研究センター）、
中島大介（環境リスク研究センター）、牧秀明・金谷弦（地域環境研究センター）、
早坂大亮（生物・生態系研究センター）、中山祥嗣（環境健康研究センター）
- 第3章 大迫正浩・松崎裕司（資源循環・廃棄物研究センター）
- 第4章 鈴木規之・今泉圭隆（環境リスク研究センター）、
大原利眞・水落元之・林誠二・森野悠・東博紀（地域環境研究センター）、
松崎慎一郎（生物・生態系環境研究センター）、
田中敦・高木麻衣（環境計測研究センター）、中山祥嗣（環境健康研究センター）
- 第5章 原澤英夫・藤田壮・藤井実・戸川卓哉・藤野純一・芦名秀一（社会環境システム研究センター）
- 第6章 住明正・鏑木儀郎（理事）

II. 災害環境研究の体制

理事長を本部長とする東日本大震災復旧・復興貢献本部のもとに、『放射性物質・災害環境研究チーム』を設置し、廃棄物関係グループと多媒体での環境動態解明グループを二本柱に、全所的に取組を推進する体制をとっています。

1. 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

研究代表者 大迫政浩

研究調整 松崎裕司、大塚康治、高田光康

基礎挙動・物性班

資源循環・廃棄物研究センター 倉持秀敏、肴倉宏史、遠藤和人、石森洋行

中間処理技術班

資源循環・廃棄物研究センター 大迫政浩、川本克也、倉持秀敏、山田正人、
蛭江美孝、山田一夫、水原詞治、福島正明

再生利用技術班

資源循環・廃棄物研究センター 大迫政浩、肴倉宏史、遠藤和人、山田一夫

最終処分技術班

資源循環・廃棄物研究センター 山田正人、遠藤和人、石垣智基、蛭江美孝、

肴倉宏史、山田一夫、石森洋行、佐藤昌宏、
小保方聡

測定分析モニタリング班

資源循環・廃棄物研究センター 滝上英孝、山本貴士、鈴木剛、竹内幸生、
田野崎隆雄

フロー・ストック管理班

資源循環・廃棄物研究センター 山田正人、小口正弘、高田光康、大塚康治、
石垣智基、遠藤和人、小保方聡

リスクミ・制度・マネジメント班

資源循環・廃棄物研究センター 大迫政浩、滝上英孝、田崎智宏、大塚康治、
秋山貴、多島良、佐野和美、森朋子

外部連携機関

震災対応ネットワーク（地方環境研究機関、大学機関、行政、民間企業等の専門家
との知的ネットワーク）、一般社団法人廃棄物資源循環学会、環境放射能除染学会、
社団法人日本環境衛生施設工業会、独立行政法人日本原子力研究開発機構、独立行
政法人原子力安全基盤機構、独立行政法人産業技術総合研究所、独立行政法人放射
線医学総合研究所、国立保健医療科学院、北海道大学、東京大学、京都大学、福岡
大学、九州大学 等

2. 多媒体環境での放射性物質の実態把握・動態解明

研究代表者 大原利眞

研究調整 水落元之

環境動態計測班

環境リスク研究センター 堀口敏宏、児玉圭太、漆谷博志

地域環境研究センター 林誠二、越川昌美、渡邊未来、錦織達啓、渡邊圭司、
埴由紀子、北島順子、今井章雄、小松一弘、高津文
人、佐藤貴之

環境計測研究センター 田中敦、荒巻能史

生物・生態系環境研究センター

野原精一、松崎慎一郎、上野隆平、佐竹潔、中川恵、
吉葉めぐみ

多媒体環境モデリング班

環境リスク研究センター 鈴木規之、今泉圭隆、松島野枝

地域環境研究センター 森野悠、五藤大輔、東博紀、古市尚基

ヒト曝露解析班

環境健康研究センター 中山祥嗣、新田裕史、竹内文乃

環境計測研究センター 田中敦、高木麻衣

生物・生態系影響調査班

生物・生態系環境研究センター

玉置雅紀、高村典子、大沼学、中嶋信美、角谷拓、
東典子、石井弓美子、岡野司、青野光子

測定・分析班

環境計測研究センター 柴田康行、田中敦、刈部甚一、高木麻衣

外部連携機関

広島大学、千葉大学、福島大学、京都大学、奥羽大学、金沢大学、東京海洋大学、
東京大学、筑波大学、国立科学博物館、福島県内水面水産試験所、
福島県水産試験所相馬支場、茨城県水産試験場内水面支場、茨城県水産試験場
福島県鳥獣保護センター、山階鳥類研究所、日本原子力研究開発研究機構、
Scottish Universities Environmental Research Centre (SUERC)

3. 安全・安心な社会の創造

社会環境システム研究センター 原澤英夫、藤田壮、藤井実、戸川卓哉、
芦名秀一、松橋啓介、藤野純一

4. 津波・地震災害対応

津波堆積物処理・処分

資源循環・廃棄物研究センター 大迫政浩（研究代表）

環境・健康への影響

環境健康研究センター 新田裕史、中山祥嗣、小池英子

環境リスク研究センター 中島大介、白石不二雄

環境計測研究センター 田邊潔、伏見暁洋

資源循環・廃棄物研究センター 滝上英孝、鈴木剛

生物・生態系への影響

地域環境研究センター 牧秀明、金谷弦、中村泰男

生物・生態系研究センター 早坂大亮、山田勝雅

環境計測研究センター 武内章記

外部連携機関

東北大学、宮城教育大、岩手県立大学、鹿児島大学、宮城県環境生活部、
宮城県保健福祉部、宮城県教育庁、宮城県東部保健福祉事務所、
宮城県保健環境センター、気仙沼市、南三陸町、石巻市

なお、本文書は「2013年3月版」である。今後も、復興の進展と研究の展開に応じた俯瞰を試みつつ災害環境研究を推進し、その成果を新たな地域の環境創造に結実させていく予定です。

2013年3月

独立行政法人国立環境研究所

本文書に関する連絡先：

『東日本大震災後の災害環境研究の成果』

とりまとめグループ

代表 村上 正吾（審議役）

独立行政法人国立環境研究所

〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2

e-mail : murakami@nies.go.jp