

Environment Research and Technology Development Fund

環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

SII-6 水俣条約の有効性評価に資するグローバル水銀挙動の  
モデル化及び介入シナリオ策定  
(JPMEERF20S20600)

令和2年度～令和4年度

Intervention Scenarios and Global Mercury Modelling for Effectiveness Evaluation of the Minamata  
Convention on Mercury

〈戦略研究プロジェクト代表機関〉  
国立大学法人京都大学

令和5年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	1
2. 研究開発目的	2
3. 研究目標	2
4. 研究開発内容	3
5. 研究成果	5
5-1. 成果の概要	5
5-2. 環境政策等への貢献	11
5-3. 研究目標の達成状況	14
6. 研究成果の発表状況	17
6-1. 査読付き論文	17
6-2. 知的財産権	18
6-3. その他発表件数	18
7. 国際共同研究等の状況	18
8. 研究者略歴	19
II. 英文Abstract	20

## I. 成果の概要

プロジェクト名 SII-6 水俣条約の有効性評価に資するグローバル水銀挙動のモデル化及び介入シナリオ策定

プロジェクトリーダー 高岡 昌輝 (国立大学法人京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻教授)

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

研究経費

(千円)

	契約額
令和2年度合計額	97,374
テーマ1	34,957
テーマ2	30,880
テーマ3	31,537
令和3年度合計額	97,002
テーマ1	34,931
テーマ2	30,537
テーマ3	31,534
令和4年度合計額	96,989
テーマ1	34,918
テーマ2	30,534
テーマ3	31,537
<b>合計額</b>	<b>291,365</b>

### 研究体制

(テーマ1) 人為的活動下での水銀制御・管理技術と健康リスク予測に関する研究 (国立大学法人京都大学) (JPMEERF20S20610)

(テーマ2) 有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発 (国立開発法人 国立環境研究所) (JPMEERF20S20620)

(テーマ3) 全球モデルを利用した水銀の生物蓄積及び生物曝露評価手法に関する研究 (国立開発法人 国立環境研究所) (JPMEERF20S20630)

本研究のキーワード 水銀に関する水俣条約、排出削減、シナリオ分析、環境動態、健康リスク、廃棄物管理、将来推計、有効性評価、気候目標、海産物中メチル水銀濃度

### 1. はじめに (研究背景等)

2017年8月に発効した水俣条約は、水銀及びその化合物の人為的な排出及び放出から人の健康及び環境を保護することを目的とし、水銀の採掘から貿易、使用、排出、放出、廃棄等に至るライフサイクル全体を包括的に規制する国際条約である。全世界において、水俣条約の着実な履行のためには、製品中の脱水銀化や製造プロセスの転換、より高度な排出制御技術の適用等、様々な技術及び制度を複数組み合わせ合わせて対策を講じていくことが求められている。水俣条約では、締約国会議が条約の有効性評価を行

う旨規定されており、条約の有効性評価のあり方について、日本が主導的に議論をリードする科学的エビデンスを示すことが期待される。現在、有効性評価の枠組みは定まりつつあるが、どのように有効性評価を行うかについてはまだ定まっていない。グローバルなモニタリング等を行い、実態把握に努めるとともに、自然環境下・人為的活動下での挙動を定量的に表現でき、将来予測や対策効果の定量的評価に使えるモデルを開発して利用していくことが望まれている。最終的には、介入シナリオを考慮したモデル計算により得られる環境中水銀濃度によりもたらされるリスク量がどの程度変化し、推移するのを見極めることが期待されている。

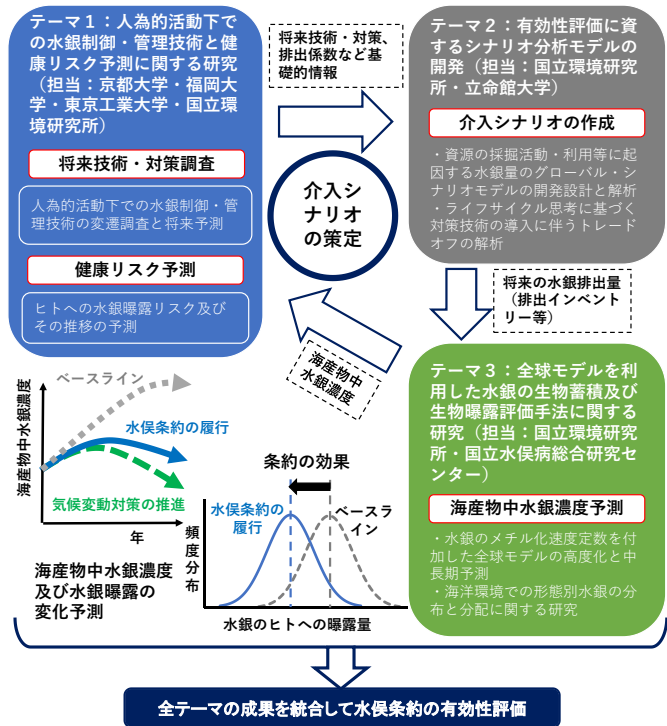


図1 本研究開発内容とテーマ間の連携の概要

2. 研究開発目的

水俣条約の有効性評価に資する科学的情報を提供することが目的で、ベースラインシナリオと介入シナリオにおける対策を評価可能な一連のモデルを作成することを目標とする。そのため、本研究課題では図1に示すように3つのテーマを設定し、これらを連携させて介入シナリオ策定、モデル開発を行う。具体的には今後の気候変動の影響などを考慮して水銀制御・管理技術を整理・評価し、人為的活動下でのグローバル・シナリオモデルを構築して介入シナリオを策定し、全球における水銀動態モデルを用いて海産物中のメチル水銀濃度を計算し、ヒトへの曝露量及びその推移を予測する。これらを統合して、最終的に水俣条約の有効性を評価する。

3. 研究目標

<p>プロジェクト全体目標</p>	<p>本プロジェクト全体では、水俣条約の有効性評価に資するためベースラインシナリオと介入シナリオにおける対策を評価可能な一連のモデルを作成することが目標である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 現状から将来にわたる水銀制御・管理技術の整理・評価を行い、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等に技術的基礎情報を提供する。</li> <li>▶ 人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行および気候変動対策の双方を想定した複数の介入シナリオを策定し、中長期の水銀排出シナリオを定量的に描く。</li> <li>▶ 水銀の全球モデルを用いて、複数の介入シナリオに応じた環境と海産物中のメチル水銀濃度を予測し、条約の中長期的効果を評価する。</li> </ul> <p>以上により、ヒトへの曝露量及びその推移の予測を行い、最終的に、本プロジェクト全体の成果を取りまとめることで、環境省向けに、締約国会議の各種議論の材料となるように、水俣条約の有効性評価の枠組み策定に向けたオピニオンペーパーを作成・発信する。</p>
-------------------	---

<p>テーマ 1</p>	<p>人為的活動下での水銀制御・管理技術と健康リスク予測に関する研究</p>
--------------	--

テーマリーダー/ 所属機関	高岡昌輝/国立大学法人京都大学
目標	<p>本研究では、介入シナリオの根拠となる人為的活動下での水銀制御・管理技術の状況を把握し、規制対象5発生源を含む主要発生源における水銀の排出・管理で将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報を整理・評価する。その基礎情報をSII-6-2に提示して、介入シナリオの策定に貢献する。また、水銀の最終的なシンクとなる最終処分施設における水銀廃棄物の長期管理手法を複数の加速試験及び模擬埋立実験等で検討し、最終処分施設からの漏洩する水銀量等の情報をサブテーマ2のリスクの将来予測に提示する。</p> <p>サブテーマ2では、SII-6-3から得られた情報を元に水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を可視化する。そしてサブテーマ1からの情報を考慮して水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクとその地域性や将来変動性を可視化する。</p> <p>最終的に、本プロジェクト全体の成果を水俣条約の有効性評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ反映できるように、技術的基礎情報として整理し、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等のアップデートへ貢献する。</p>

テーマ2	有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発
テーマリーダー/ 所属機関	中島謙一/国立開発法人国立環境研究所
目標	<p>人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルを開発した上で、国・地域別の将来の水銀排出シナリオを定量的に描く。加えて、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無を同定する。</p>

テーマ3	全球モデルを利用した水銀の生物蓄積及び生物曝露評価手法に関する研究
テーマリーダー/ 所属機関	武内章記/国立開発法人国立環境研究所
目標	<p>戦略的研究開発課題SII-6の研究テーマ1とテーマ2と連携し、将来の複数の水銀排出シナリオから、海洋環境中におけるメチル水銀濃度分布と全球含有量、そして将来の海産物中のメチル水銀濃度を予測し、地球規模の水銀汚染問題解決のために発効された水俣条約の有効性評価に資する生物蓄積及び生物曝露評価手法を提示する。</p>

#### 4. 研究開発内容

##### 【テーマ1】人為的活動下での水銀制御・管理技術と健康リスク予測に関する研究

サブテーマ1では、規制対象5発生源及び鉄鋼、バイオマス等の主要排出源について、様々な文献を調査するとともに業界団体、企業に対してヒアリングを実施し、水銀制御技術の現状整理及び将来予測に関する情報を収集した。日本における水俣条約に基づいた規制後の最新の水銀排出施設データを環境省より入手して解析した。これらの情報から排出係数、将来技術導入シナリオを作成してSII-6-2へ提供した。将来の水銀排出抑制技術として、これら発生源に導入が見込まれる二酸化炭素回収技術について2つの実施での調査、ラボ実験を行い、水銀挙動を明らかにした。また、活性炭系の高機能水銀除去

剤を開発し、添着活性炭繊維を用いた実証試験を実施した。最終処分施設における水銀廃棄物の長期管理手法の検討においては、3種の固化体（改質硫黄固化体、エポキシ樹脂固化体、低アルカリセメント固化体）を作成し、最終処分模擬環境下及び加速溶出試験（pH、酸化・還元、無機塩、有機酸、温度、微生物の影響を検討）を実施し、水銀挙動を把握した。

サブテーマ2では、水銀曝露による健康リスクの推移を予測するために、水銀曝露による健康アウトカム及び曝露経路についての既往の研究知見の集約、優先的に評価すべき曝露シナリオと健康アウトカムの範囲の選定、SII-6-3における水銀全球モデルの計算結果に基づく水銀曝露量の計算を行った。水銀廃棄物の最終処分施設からの漏洩・拡散といったケースにおける健康リスクの地域性及び将来変動性の予測においては、主要パラメータについて文献調査やサブテーマ1の結果より最終処分施設からの水銀の環境漏出シナリオを作成し、モデル計算を行い環境への影響評価を行った。また、水銀廃棄物最終処分を円滑に進める一助として、市民認知のためのWebアンケートを実施した。

### 【テーマ2】有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発

サブテーマ1では、主たる研究開発項目として、人為起源による大気への水銀排出量の推計のためのグローバル・シナリオモデルの設計・開発に取り組んだ。水銀の排出削減には、水銀の排出源でのBAT/BEPの導入に加え、脱炭素対策の一環としての石炭消費量の削減や製鉄等の工業プロセスの脱炭素化なども原燃料起源の水銀排出の削減に貢献することが期待できる。本研究では、パリ協定で合意した2℃目標及びグラスゴー気候合意で注目された1.5℃目標の実現にむけた気候変動対策に伴う水銀排出削減の共便益効果を含めて削減効果の定量化に取り組んだ。

サブテーマ2では、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無について、ライフサイクル思考に基づき定量評価に取り組んだ。まず水銀排出量との関連性が高い製錬プロセスとして、プレコンシューマー型産業であるASGM、鉄鋼製錬、銅製錬を対象として対策技術の影響を定量化した。また、水銀を含有するポストコンシューマー製品の代表として照明機器を選定した評価も行う。さらには水銀含有一般廃棄物（乾電池、照明）の処理への水銀対策の導入による効果と副次的影響、そして回収水銀の処理についても検討を行った。

加えて、2022年3月に開催された「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議第2部」（COP4.2）にて、議長国であるインドネシア政府の主導により、水銀の違法貿易を防止するための国際協調を強化することを目的とした「パリ宣言」が表明されたことを受けて、本サブテーマでは、水銀の排出管理を実現するための監視・規制立案の科学的支援を目指し、水銀の不適切な貿易・使用の検出方法の開発設計に取り組んだ。

### 【テーマ3】全球モデルを利用した水銀の生物蓄積及び生物曝露評価手法に関する研究

将来の栄養段階毎の海産物中のメチル水銀濃度を予測することを目標に、海洋観測、実験的研究、そして、モデル研究を推進した。海洋環境の観測的研究では、人為的に排出される水銀量が比較的大きいとされているアジアの風下に位置しているながら、地球規模で俯瞰してデータが不足している北太平洋西部海域を調査対象域と設定し、海水中に存在する主要な4つ化学形態別水銀（ガス状の金属水銀とジメチル水銀、溶存態の無機水銀とモノメチル水銀）濃度の実態把握と、モデル推定値の検証用データの蓄積を図った。また、サイズ別のプランクトン中のメチル水銀濃度の実態把握と、モデル推定値の検証用データの蓄積も実施した。実験的な研究では、既存の水銀の全球モデルでは考慮していない気候変動や水環境変化による海水中のメチル水銀の生物移行への影響を把握するために、3種類の系統別植物プランクトン（珪藻、緑藻、クリプト藻）へのモノメチル水銀の分配に関する知見の取得と、海水中のメチル水銀の形態変化速度に関する実験的な研究を実施した。モデル研究では、将来の大気と海洋環境の水銀濃度予測のために、新たに気候データや海流データ、生物データ、そして大気反応物質濃度データの気候変動シナリオを考慮したモデル入力ファイルを作成し、テーマ2で作成された4つ人為由来水銀排出シナリオ（リファレンス、段階的削減、2050年最大削減、究極削減）を加えた8つの環境中水銀含有量予測シミュレーションを実施した。4つの人為由来水銀のシナリオ下での将来の海洋環境中のモノメチル水銀濃度から、栄養段階毎に魚類中のメチル水銀濃度が上昇する食物網蓄積係数（TMF）用い

て、異なる栄養段階の海産物中のメチル水銀濃度を予測した。その結果から、将来の脱水銀社会形成にむけた取組の評価に加えて、テーマ1へ、ヒトへのメチル水銀曝露量とその推移予測のための将来の海産物中メチル水銀濃度予測データを提供した。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

本研究においては、現状から将来にわたる水銀制御・管理技術の整理・評価を行い、人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計のためグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行及び気候変動対策の双方を想定した複数の介入シナリオ（リファレンス、段階的削減、最大削減、究極削減）を策定し、中長期の水銀排出量推移を定量的に描いた。また、水銀のグローバルモデルを改良して、複数の介入シナリオに応じた環境と海産物中のメチル水銀濃度を計算できるようにし、ヒトへの曝露量及びその推移の予測を行った。このほか、今後の大気への水銀排出抑制技術の検討・評価、将来的な環境動態モデルの精緻化のため海洋中での水銀の動態に関する調査・実験及び最終的な水銀の行先となる水銀廃棄物の適正な長期管理手法に関する実験的検討を行った。以下に、主要な成果をまとめる。

#### 1) 2050年に向けた複数の介入シナリオ下での水銀排出量の推移

IPCC第5次評価報告書以降に世界のモデル比較プロジェクトで用いられている共通社会経済シナリオ(Shared Socioeconomic Pathway, SSP)をもとにSSP2(中庸)に相当する活動量を整備した上で、ベースラインとなるシナリオ(リファレンス(REF))を含めて、将来の社会変化を想定した複数の水銀排出シナリオの作成を行った。具体的には、削減対策シナリオとして、水銀対策を想定した3種類のシナリオ(a-1. 段階的削減: エキスパートジャッジに基づく削減シナリオ、a-2. 2050年最大削減達成: 現状で実装されている最高レベルの技術に、2050年に全ての国・地域が到達することを想定した削減シナリオ(2050年に究極削減シナリオを達成すると想定)、a-3. 究極削減: 現存技術による究極的な削減シナリオ)を設定した。段階的削減においては、2050年までのより詳細な技術導入率を推計するため、業界団体や企業に対するヒアリング調査、最新のデータベース、論文等を調査して各国あるいは地域の水銀排出レベルの将来的な変化を推計した。このシナリオが現行の水俣条約評価シナリオとなる。

水銀対策の導入により、追加的な対策を講じない場合(Ref\_FIX; 4.1千トン(2050年))と比較して、大幅な水銀排出削減が見込めるが、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度(2.1千トン)に留まることから、人為起源による水銀の大気排出の最小化のためには、最大限の水銀対策の即時導入が求められることが明らかとなった(図2i)。また、脱炭素対策の共便益効果により、相当量の削減が可能であることが示された(図2ii)。但し、脱炭素対策としてバイオマス発電が増加する場合、発電方式及びバイオマス種によっては、水銀排出量を増大させる可能性があるため、注意が必要であることが示された。

また、図3iに、水銀削減シナリオごとの水銀排出量の推移と排出源内訳(セクター別内訳と国・地域別内訳)を示した。水銀対策による削減効果は、追加的な対策を講じない場合(Ref\_FIX; 4.1千トン(2050年))と比較して、大幅な水銀排出削減が見込めるが、a-1. 段階的削減シナリオでは、2015年以降の経済成長に伴う排出増を相殺する程度(2.1千トン)に留まることから、人為起源による水銀の大気排出の最小化のためには、最大限の水銀対策の即時導入が求められることが明らかとなった。追加的な対策を講じない場合は、産業部門別の排出源として、鉱工業部門(ASGM:2倍、他金属鉱業:2.6倍、セメント産業:1.7倍)や発電部門(2倍)における顕著な増大、そして、国・地域別の排出源として、アフリカ地域(4.5倍)・中国(1.7倍)・インド(2.8倍)などを中心に増大が示された。一方、現状で実装されている最高レベルの技術に2050年に全ての国・地域が到達することを想定した場合には、より多くの削減が期待できることが示された。加えて、排出傾向と削減効果には地域偏在性があり、国・地域別に排出量が残存する部門の特徴が異なることが判明した(図3ii)。ASGM対策や金属鉱業部門への水銀対策、更には、脱炭素対策に伴う共便益により、大幅な削減効果が期待できるが、依然として、一部の国・地域やASGMを含む特定の排出源において、排出量が高い水準に留まるという結果が得られた。

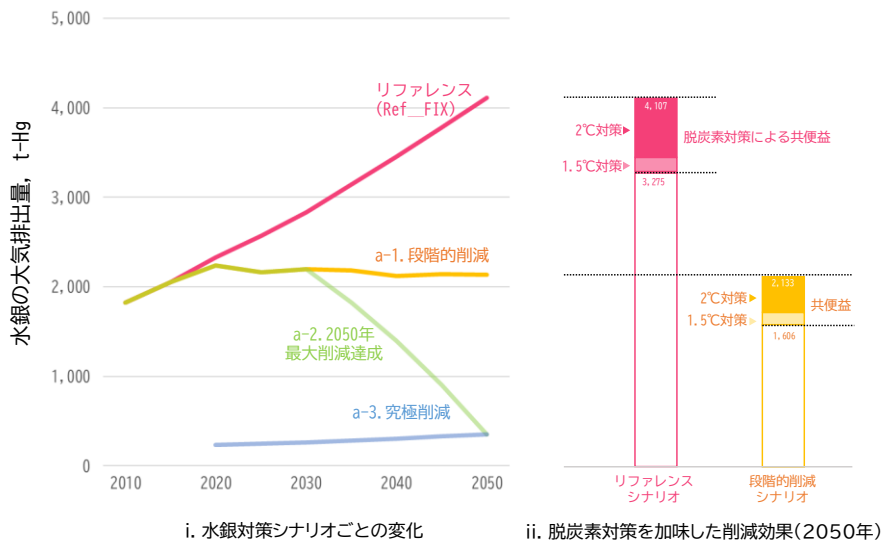


図2 2050年までの水銀排出量の変化と脱炭素対策による共便益効果（総排出量）

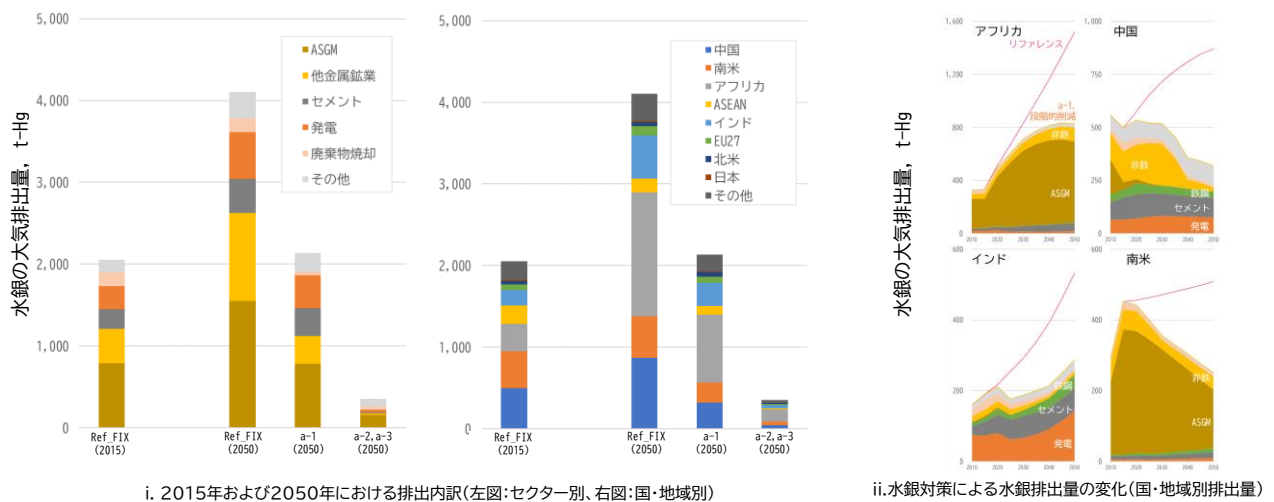


図3 水銀対策による2050年までの水銀排出量の変化

一方、2050年におけるa-2. 2050年最大削減達成シナリオ及び、a-3. 究極削減シナリオで想定される人為起源による水銀の大気排出量は約0.35千トンであり、同年のリファレンスシナリオと比較して約3.8千トン、2015年の水銀排出量と比較した場合でも約1.7千トンの削減が見込める。全ての産業部門そして国・地域において、大幅な削減が期待できるという結果が得られた。このことは、日本を含めて各国において、依然として大きな削減ポテンシャルがあることを示唆していると言える。今後、水銀排出の最小化に向けて、中国や南米・アフリカ諸国を対象に、排出量が残存する部門へ更なる対策の強化が不可欠であると言える。具体的には、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的ではない地域では、脱炭素対策によるHg削減が、ASGMや非鉄金属由来の排出が支配的な地域では、除去対策によるHg削減が効果的であると考えられる。

## 2) 零細・小規模金採掘（ASGM）への対策評価

零細・小規模金採掘（ASGM）は、水銀の最大の使途、且つ、排出源であり、集中的な対策が必要である。条約上、ASGMにおける水銀使用を削減し、可能な場合には廃絶することが指向されている。水銀の排出量あるいは使用量の削減・廃絶が期待される3種類の対策（排出抑制：蒸留器による回収、使



用抑制：精鉱法への転換、使用廃絶：青化法への転換)について、導入効果と共に、生じ得る副次的影響を解析した結果、蒸留器・精鉱法の併用や青化法への転換により大気水銀排出量を大幅に削減できる一方、回収された廃水銀の適正管理にかかる膨大なコスト及びシアン化水素による新たな健康被害のリスクが生じる可能性が示唆された(図4)。蒸留器による回収廃水銀の2050年までの累積隔離管理コストを新たに算定したところ、最も厳しい廃棄物水銀管理ガイドラインをASGM従事国に適用した場合、蒸留器による回収水銀の廃棄物管理コストは、グローバルスケールにおいて2050年には最大で1660万ドル、2050年までの累積では1.68億ドルに達すると推定された。これは、地球環境ファシリティによる過去20年の累積ASGMファンド(5億ドル)の約33%に相当することから、排出削減と共に、廃水銀の適正管理を実現する為には追加的な予算措置などを含めた検討が必要であることがわかった。

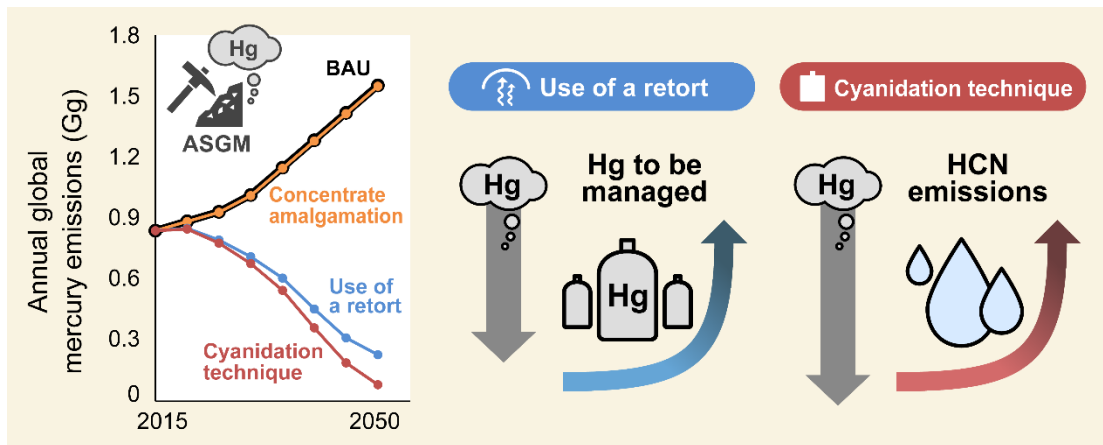


図4 ASGMにおける水銀排出低減に伴う副次的影響を踏まえたトレードオフの概要

加えて、水銀の違法貿易への対処を支援すべく、i. 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合、ii. 二国間貿易における報告値の不整合に着目した2種類の検出手法の開発を達成した。本手法を、貿易の監視・管理ツールや通知・情報共有システムの開発に組み込むことで、水銀の違法貿易の調査を支援することが期待できる。図5に、i. 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合に着目した解析結果を示した。解析の結果中南米・アフリカ、アジアの一部の国において、水銀の消費・使用に係わる報告値に顕著な不整合を検出した。また、ii二国間貿易を対象とする解析では、先行調査により不適切な流通への関与が指摘される国を含む複数の国・地域において、報告値間の不整合を検出した。

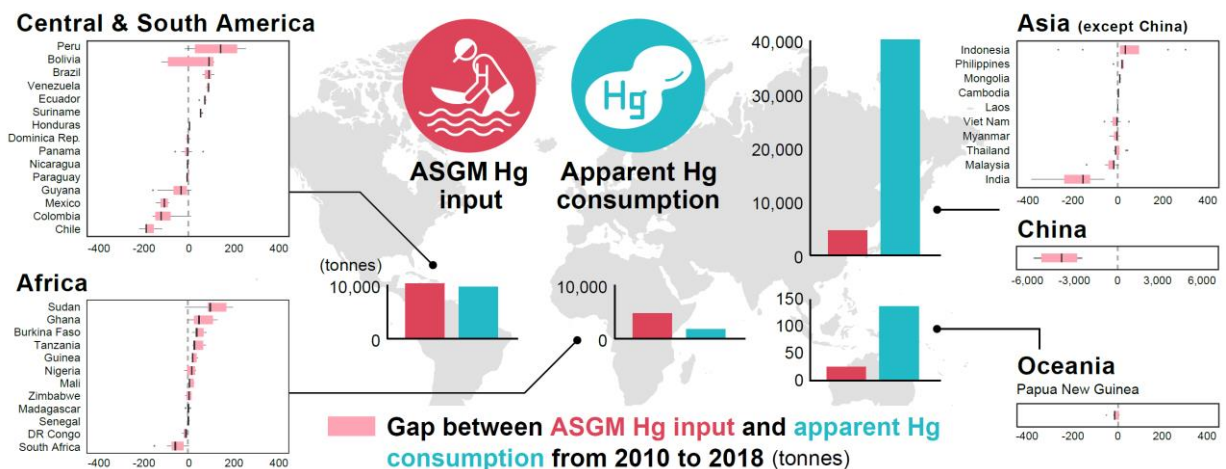


図5 国・地域別の水銀の見掛け消費量と金生産に伴う水銀利用量の不整合

### 3) 将来の地球環境における水銀と生物中メチル水銀濃度の推移

将来の地球環境の水銀含有量と生物中の形態別水銀濃度は、改良した水銀の全球モデルで計算した。

2050年までの気候変動による水銀循環への影響は比較的小さいことを確認し、将来の気候シナリオを中庸（ssp245）に固定し、テーマ2で作成された将来の人為由来水銀排出シナリオデータを使用して、将来の水銀排出削減対策を実施することによって、大気環境と海洋表層の水銀濃度が削減する可能性を予測した。しかしながら、対策の程度によって異なる大気境界層と海洋表層の総水銀存在量の傾向を示す可能性があり、緩やかに削減対策を実施する段階的削減シナリオでは、2050年に総水銀存在量の増加が止まる程度になる可能性を予測した（図6）。そして、全球モデルの結果と食物網蓄積係数を掛け合わせて、比較的一般的な浮魚、底生魚、そして外洋回遊魚の将来予測を行い、ヒラメやオヒョウが含まれる底生魚のモデル予測濃度は実測値に対して過大となっているが、目標としていた実測値との誤差が10倍未満になることが確認できた（図6）。海産物中の実測値には比較的大きな濃度変動が知られており、いずれの人為由来水銀排出シナリオでも、将来の海産物中水銀濃度は、2010年の変動幅を超えることはなかった（図6）。

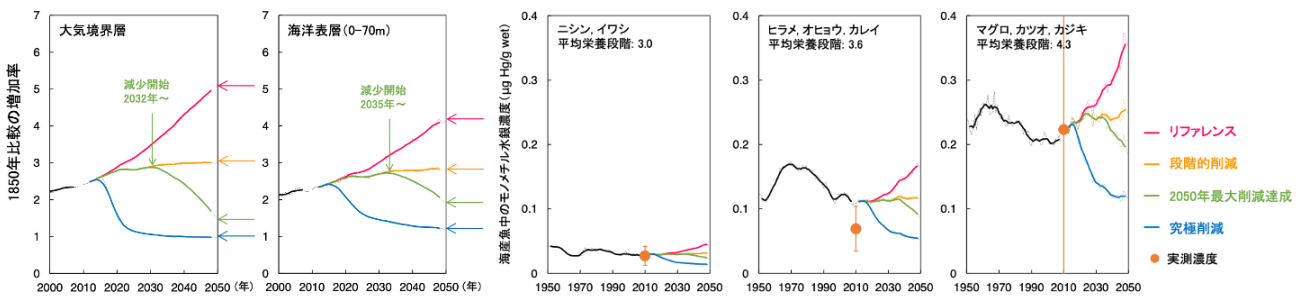


図6 大気境界層のガス状総水銀と、海洋表層（0-70m）の溶存態総水銀の全球存在量の増加率予測結果と、浮魚、底生魚、外洋回遊魚中の平均モノメチル水銀濃度予測の推移と、2010年実測値との比較。

#### 4) 水銀摂取による健康リスクの推移予測

メチル水銀の曝露による健康アウトカム（「胎児期の曝露による小児の神経発達への影響」と「心疾患死亡」）を選定し、対象となる人口規模の面から現代の水銀曝露の主要な経路として「市場を経由した魚介類の摂取による健康リスク」を優先的に評価すべき曝露シナリオとした。海産物中メチル水銀濃度の重み付け全球平均濃度の計算値と、実測濃度の全球平均値を比較し、モデル推定濃度はおおむね実測濃度に近い値となった。平均週間摂取量の上位国は海産物への依存度が高く、赤道付近の小島嶼開発途上国で特に大きくなる傾向がみられた。WHO耐用週間摂取量（毛髪中水銀濃度換算2.5 μg/g）の超過人口の推移予測については、最大削減のための対策をとった場合、2035年までは横ばい状況が続くものの、2035年以降は減少に転じ、2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差は-約550万人/年であった（図7）。

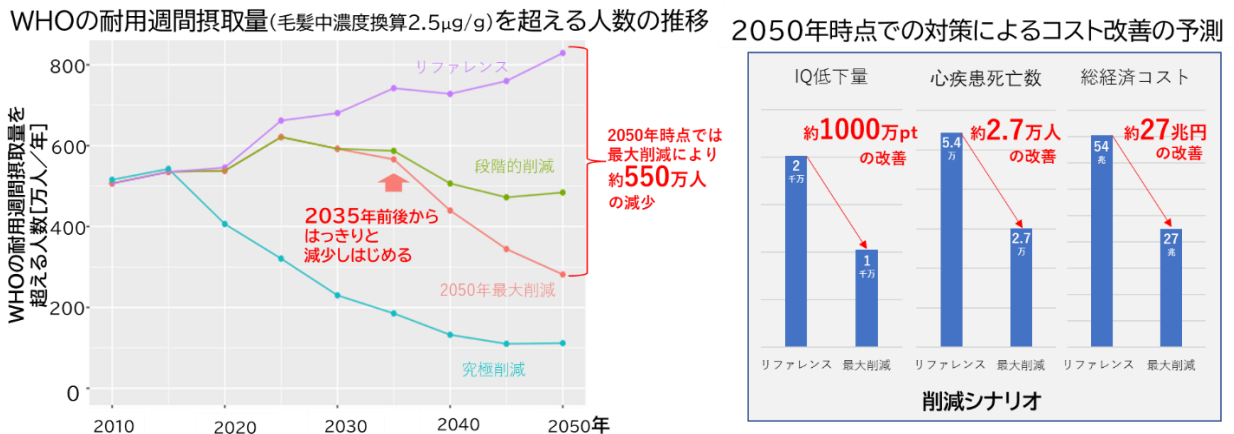


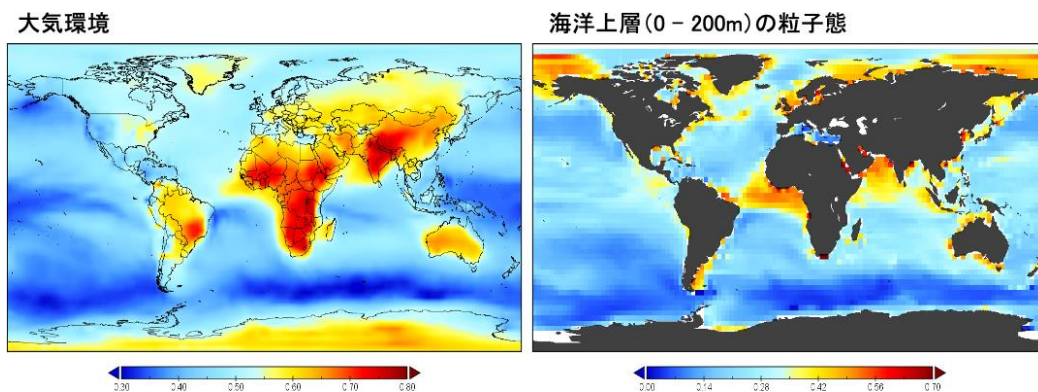
図7 各シナリオにおけるWHOの耐用週間摂取量超過人口の推移と経済的損失予測。

魚介類摂取経路でのメチル水銀による健康リスクについて、最大削減のための対策をとった場合に

は2050年時点でのリファレンスシナリオとの結果の差はIQ低下量において約-1000万ポイント、心疾患死亡数において、-27000人/年となった。最大削減シナリオに準ずる対策を行うことにより、長期的には大きな効果が見込めることが一貫して示され、経済的損失も27兆円/年の削減効果があることがわかった。また対策の効果が現れるまでにはタイムラグがあることから、できるだけ早期から対策を行うことが重要であることが示唆された。

### 5) 全球モデルを用いた大気と海洋生物中水銀モニタリング指針

段階的削減シナリオでは、2050年の全球大気と海洋環境の全球水銀量の増加が止まる程度になる可能性を予測し、全球の海産物中メチル水銀濃度は、2010年の実測値の誤差範囲に収まる予測に留まったが、比較的水銀排出量の多い地域や、その地域の風下の海域で環境モニタリングをすることによって条約の有効性評価が可能となるように、段階的削減シナリオと2050年最大削減シナリオの予測結果を比較して、その減少率の空間分布を解析した。大気の水銀モニタリングでは、**図8**に示した濃度の減少率が高い暖色系の色の地域が、排出削減量の比較的多い地域（アフリカ、南米、東アジア、南アジア、西アジアと中東）となる可能性が高く、これらの地域が有効性評価における大気水銀モニタリングの重要地域であることが示唆された。また、海域では、大西洋とインド洋の赤道周辺と北極海で、削減対策を強化して人為由来水銀の排出量を削減することによって濃度減少幅が大きくなる可能性がある（**図8**）。濃度減少率の比較的大きい海域は、条約の対策によってプランクトン中のメチル水銀濃度が低下する可能性があることから、それらを食べる魚の水銀モニタリングの重要海域であると考えられる。



**図8** 2050年の大気境界層の平均ガス状金属水銀濃度と、海洋上層（0-200m）の粒子状有機物中モノメチル水銀濃度の段階的削減シナリオと2050年最大削減達成シナリオを比較した場合の減少率分布

### 6) 今後の大気への水銀排出抑制技術の検討・評価

より一層の大気への水銀排出抑制が必要であることから、排出源によらず、広く利用可能な技術として、添着活性炭の開発に取組み、市販の活性炭の3倍以上の吸着能をもつCaCl<sub>2</sub>担持活性炭を開発した。また、水銀吸着層においては排ガスの通風抵抗が問題となることから活性炭繊維に注目し、ヨウ化カリウムを添着したユニットを開発し、都市ごみ焼却施設のバグフィルタの後段に設置し、実証試験を行い、除去効果を確認した。一般的な廃棄物焼却施設であれば5年以上の耐用が見込めた。今後の気候変動対策として導入が期待されているCO<sub>2</sub>分離回収（CC）設備について、ラボ実験と2カ所の実プラントで水銀挙動を調査した。その結果、CC設備の前に設置される排ガス処理装置や前処理設備において水銀濃度が低減されていれば、水銀の化学形態にかかわらずCC設備において51%（イベント3回の算術平均除去率）の更なる水銀除去が共便益として期待できた。今後の各種排出源における導入及び評価が期待される。

### 7) 水銀の全球モデル精緻化のための高感度水銀分析

比較的人為的に排出される水銀量が多いと考えられている東アジア地域の風下に位置する北太平洋西



部海域を調査対象域として、海水中に存在する主要な4つの水銀の化学形態とプランクトン中のメチル水銀濃度を高感度に定量する分析技術を確立し、目標としていた300個以上のサンプルを分析して、分布に関する知見を得た。東経155度の海域で赤道から北緯40度までの海水中の形態別水銀濃度分布では、いずれの化学形態も表層ではその濃度は低く、深海でそれらの濃度が高くなる傾向があった（図9）。濃度範囲は、平均で約0.01pMから0.76pMの範囲であり、これまでに他の海域で調査されて報告されている水銀濃度範囲と近似していた。本研究で調査した北太平洋西部海域の特徴としては、一番多く存在している水銀の形態は溶存態の無機水銀で、その次に多く存在しているのがガス状の金属水銀であった。また、溶存態で生物に蓄積することが知られており、水俣病の原因物質であるモノメチル水銀よりも、北太平洋西部の海水中にはガス状のジメチル水銀の方が多く分布しているという知見を得た。海水中のプランクトンは海洋生態系の食物網の底辺に位置しており、海洋環境における水銀循環においては、海水中で生成されたメチル水銀の生物移行の入り口として知られているが、北太平洋西部海域の高緯度に生息する動物プランクトンの方が、熱帯・亜熱帯の低緯度に生息している動物プランクトンよりも最大で約16倍もメチル水銀濃度が高い知見が得られた。

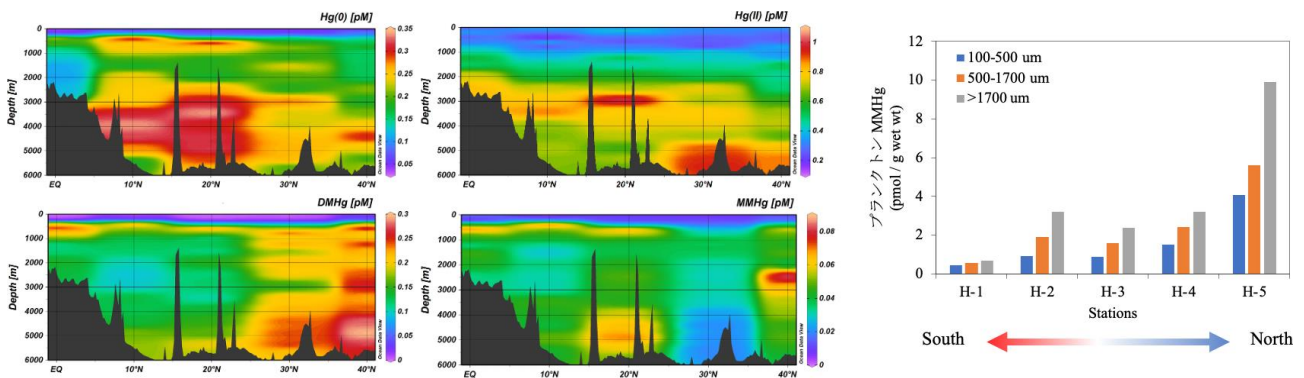


図9 東経155度の海域で赤道から北緯40度までのガス状の金属水銀（左図左上：Hg0）、溶存態無機水銀（左図右上：Hg(II)）、ガス状のジメチル水銀（左図左下：DMHg）、溶存態のモノメチル水銀（左図右下：MMHg）の鉛直分布と海洋上層中のプランクトン中のモノメチル水銀濃度分布（右図）。

## 8）気候変動や水環境変化による海水中のメチル水銀動態への影響

気候変動や水環境変化による海水中のメチル水銀動態への影響を把握するために、目標としていた3種類の系統の外洋海洋環境に生息するプランクトン（珪藻、緑藻、クリプト藻）へのモノメチル水銀の取込み量に関する実験を実施した。生息海水温の違いによってモノメチル水銀の取込み量が変化する珪藻と、クリプト藻と緑藻のように取込み量に海水温依存がない系統種が存在するという知見を得た（図10）。

珪藻は、海水温が2℃から5℃に上昇した場合にモノメチル水銀分配係数が1.1～1.7倍に、2℃から10℃に上昇した場合には1.6～2.1倍となったが、クリプト藻や緑藻では、水温変化に対するモノメチル水銀分配係数の変化は、珪藻に比べて小さかった。本研究で対象とした藻類種の分布域を考慮すると、珪藻種が優占する高緯度の亜寒帯や寒帯の海域においては、海洋生態系内の水銀循環に対する気候変動の影響が大きくなるため、生物へ移行したモノメチル水銀濃度から水俣条約の有効性評価を行う海域としては、気候変動の影響が小さい中緯度～低緯度の海域の生物種が有効である可能性が示唆された。また水銀に関する水俣条約の実施によって、海水中に存在するモノメチル水銀量が減少しても、水温が増加することによって、生物相に取り込まれるメチル水銀量が増える可能性を示唆する知見も得た。海洋生物に移行するモノメチル水銀濃度の形態変化に関する知見の蓄積のために、目標としていた30サンプル以上の実海水試料を用いて、その形態変化速度に関する実験を実施した。北太平洋西部海域においては、その大部分を占める深海で、モノメチル水銀が分解されてガス状の金属水銀が生成される過程が観測された。調査した海域では、24時間の反応培養実験で添加したモノメチル水銀安定同位体トレーサー約30pgが、深海水で最大約16%が金属水銀に形態変化したことを観測した（図10）。ガス状の金属水銀は海洋表層から大気へ移動されることから、地球規模の水銀循環において、重要な大気への排

出インベントリーの1つとして考えられている。今後、他の海域でも同様の現象が起きているのか、調査して、水銀の全球モデルに反映させる必要が考えられる。

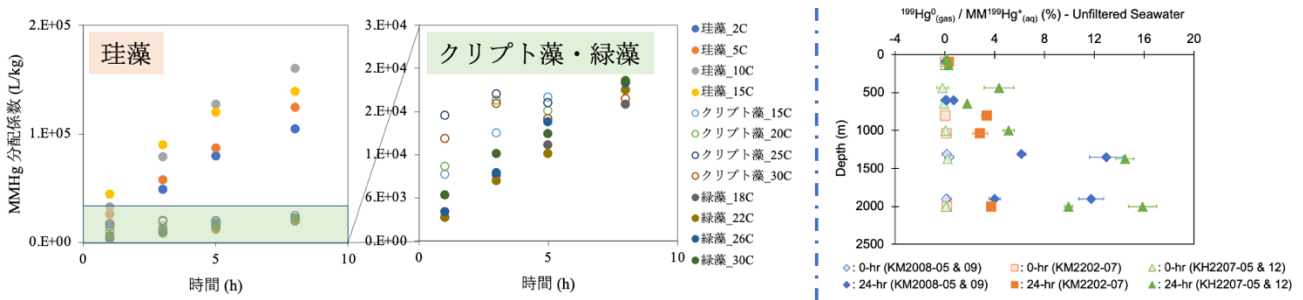


図10 異なる海水温での系統別プランクトン中のMMHg分配係数の変化（左・中央図）と北太平洋西部海域でのモノメチル水銀安定同位体トレーサーから生成されたガス状金属水銀割合の鉛直分布（右図）

7) 水銀の適正処理・処分・管理

最終的な水銀のシンクとしては水銀廃棄物の管理が不可欠であることから、水銀廃棄物の長期管理手法としての知見を集積することを目的に、水銀固化体の模擬埋立実験や加速溶出試験等を行った。水銀廃棄物固化体は改質硫黄固化体、エポキシ樹脂固化体、低アルカリセメント固化体が評価された。実埋立環境を再現するために、模擬埋立実験槽（充填物：燃え殻＋汚泥堆肥、燃え殻のみ）を用いた長期的な実験結果では、全ての固化体から水銀が系外へ流出する可能性は低かった（表1）。さらに、水銀固化体の安定性について、pH、酸化還元、無機塩、有機酸、温度、微生物といった因子の影響を連続バッチ式溶出試験や上向流カラム通水試験で評価した。その結果、改質硫黄固化体とエポキシ樹脂固化体は、低アルカリセメント固化体より多くの因子に対して水銀安定性が高いことが示されたが、アルカリ、酸化、Na<sub>2</sub>Sは水銀溶出に大きく影響を与え、避ける必要があった。また、エポキシ樹脂コーティングによる固化体の補強と水銀封じ込めはいずれの固型化法においても有効な追加対策として確認された。また、不確実性を組み込んだモデルによる最終処分施設からの水銀漏洩による水銀曝露量の推移及びその変動性の推定結果より、今後の気候変動等による地域性の違いが水銀溶出に与える影響は大きくないことがわかった。以上より、水銀の長期安定的な集中隔離は可能であること、余剰水銀の純度、製造した硫化物、固化体、埋立環境の事前確認及びモニタリングは必須であることが示された。

表1 水銀廃棄物固化体の埋立処分時の水銀流出性からみた評価

廃棄物	水銀固化体	埋立構造	埋立実験槽		タンクリーチング	溶出試験	総合評価
			浸出水への流出特性	大気拡散			
混合廃棄物	改質硫黄	準好気性	◎	○（低下傾向）	◎	◎	◎
		嫌気性	○（ブランクと類似）	◎			
	エポキシ樹脂	準好気性	◎	○（低下傾向）	◎	○	○
		嫌気性	○（ブランクと類似）	△（やや高い）			
焼却残渣	低アルカリセメント	準好気性	◎	○（低下傾向）	△	△	△
		改質硫黄	◎	○（ブランクと類似）	◎	◎	◎
		エポキシ樹脂	準好気性	—	—	◎	○
		低アルカリセメント	◎	○（ブランクと類似）	○（環境基準以下）	△	○

5-2. 環境政策等への貢献

<行政等が既に活用した成果>

1) 大気排出抑制対策及び未知排出源からの水銀排出量推計・将来対策への貢献

環境省令和3年度第1回水銀大気排出抑制対策検討会（2021年8月2日）にて、水俣条約の有効性評価

に向けた水銀大気排出制御技術の現状整理とそこから見えた課題を、令和4年度第1回水銀大気排出抑制対策調査検討会において、大気排出に係る調査結果及び2050年に向けた水銀排出量試算結果や全球モデルによる将来の全球大気環境等の水銀量のシミュレーション結果を提示した。これらの成果は大気汚染防止法5年後見直しに向けた検討や2050年に向けた水銀排出抑制対策の検討（例えば、バイオマス燃焼の寄与、測定方法の見直し等など）に貢献した。

## 2) 水銀マテリアルフローの精緻化への貢献

環境省の水銀マテリアルフローに関する研究会において、本研究の過程で入手した各国の水銀マテリアルフローに関する文献情報、検討した関連プロセスごとの水銀物質収支に関する情報、及び、プロセスごとの水銀物質収支の差の改善案を提供し、水銀マテリアルフローデータの改善に貢献した。特にバイオマス燃焼に関するデータを提供し、マテリアルフロー作成に採用され、バイオマス燃焼からの水銀排出量推計に貢献した。

## 3) 水銀廃棄物の適正処理への貢献

環境省環境再生・資源循環局廃棄物規制課へ適宜、水銀廃棄物の長期安定性評価の最新情報を提供し、今後の水銀廃棄物、特に廃金属水銀等の処理・処分・管理及び水銀廃棄物ガイドライン改訂に向けた施策策定に貢献した。

## 4) UNEP Global Mercury Partnershipへの知見提供

UNEP Global Mercury Partnershipへの知見提供を行った。知見の一部は、UNEP Global Mercury Partnership Advisory Group Thirteenth meetingの報告書（Report on activities undertaken within the United Nations Environment Programme Global Mercury Partnership, p.12）を通じて、共有されている。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

#### 1) 水銀排出施設における大気排出の実態調査

より詳細な実態解明のためには、排ガス処理装置（可能であれば、単位操作ごと）の入口における水銀濃度測定も併せて実施することが欠かせないことが本研究で明らかとなった。事業者負担もあるため、毎年の更新は難しいとしても、水俣条約の有効性評価に対して強力な科学的エビデンスを提供するためにも、排ガス処理施設の入口における水銀濃度測定及び活動量の更新も併せて実施することが重要である。また、CCUS設備の導入によって、水銀大気排出抑制の共便益効果が期待できる

#### 2) 水俣条約の有効性評価の枠組み・指標の設計に対する支援

本課題により得られた水銀の使用・貿易に関する研究成果及び人為起源による水銀の大気排出とその将来シナリオに関する研究成果をもとに、環境省を通じて、条約事務局等で作成を進める報告書（Plan for the report on Trade, Supply, and Demand of Mercury、及び、Plan for “Emissions and Releases Data Summary” to inform the Effectiveness Evaluation of the Minamata Convention）への知見の提供を果たした。

開発した水銀の全球モデルによる将来シミュレーション結果は、中長期的な人為由来水銀の排出量変動と環境中水銀量を関連付けた結果であり、対策によって、全球規模の大気と海洋環境中の水銀濃度の減少が可能であることが確認できたことによって水俣条約の有効性評価の枠組み設計と指標を議論する情報として活用が見込まれる。また、開発した将来の水銀排出シナリオ間での将来の環境中水銀濃度の地理的差異の分布は、水銀の排出削減効果が高く、環境モニタリングの重要地域を示したのと同時に、条約の有効性を評価するための戦略的な全球水銀モニタリング指針について議論する情報として活用が見込まれる。

#### 3) 水銀排出を含む人為的水銀サイクルの管理を実現する為の監視・規制立案に対する支援

小規模金採掘(ASGM)実施国を介した不適切な水銀フローの検出・判定手法を開発した。加えて、ASGMにおける水銀対策（排出抑制：蒸留器による回収、使用抑制：精鉱法への転換、使用廃絶：青化法への転換）について、導入効果と共に、生じ得る副次的影響を可視化した。一連の成果については、環境省及び水俣条約事務局の協力のもと、Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining（Date :

October 30, 2022, Venue : Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)) を開催した。国際連合（水銀に関する水俣条約事務局の行政官）、環境省、チリ、カナダからの有識者を含め15名の発表者のほか、TAUWやEPA(アメリカ合衆国環境保護庁)、台湾、日本国内等からオンサイト及びオンラインで計38名が視聴参加し、水銀の使用・貿易、そして環境汚染等の課題に関する活発な情報交換が行われた。また、会議を通じて、条約事務局等で作成を進める上述の報告書への更なる知見の提供を果たした。

また、これらのASGM問題や不適切な水銀の流通・使用に関する研究成果に関して、成果発信のコンテンツとして、サイエンスアニメーションを活用した動画やインフォグラフィックスを作成した。加えて、より詳細な水銀排出量を含むLCIデータベースの整備を行った。これにより、ライフサイクル評価において水銀量を明確に踏まえたインベントリー分析が可能となる。また関連技術に関わるTMR係数データについても整備を行っており、水銀排出係数、二酸化炭素排出係数だけでなく、採掘活動量という視点から資源効率を評価することが可能となった。製品製造や利用に伴ってライフサイクルを通じた水銀の排出源の把握、対策を講じるべきホットスポットなどの検出に貢献可能である。

#### 4) 全球規模での健康リスクの推移

排出削減対策の実施により、2050年時点での健康リスクの程度には大きな違いが生じることが本研究で示された。水銀の排出削減を実施した場合、全ての影響指標（IQ低下量や心疾患死亡数）において2035年前後から健康リスクが大幅に低下し、水銀による経済損失が減少する。無対策のケースと比較した場合、最大削減シナリオでは27兆円／年の経済損失が防止されると期待される。ただし対策の影響が現れるまでにはタイムラグがあり、早期からの対策を行うことが効果的である。

#### 5) 水銀廃棄物の適正処分・長期管理手法

現在の水銀廃棄物ガイドラインに規定された「改質硫黄固化体」に加え、新たな手法で作成したエポキシ樹脂固化体、従来型のセメント固化体の埋立処分において水銀流出は極めて小さく、水銀廃棄物固化体中の水銀の流出リスクを回避した長期に亘る埋立処分が可能であると推測される。また、今回用いた固化体で硫化水銀の配合率が高かったエポキシ樹脂固化体を採用することで、水銀処分量の増大が見込める。水銀廃棄物は、熱やアルカリ条件に弱いことは既に知られているが、本研究により酸化及び $\text{Na}_2\text{S}$ 条件でも水銀溶出濃度が高くなることが実験的に明らかとなった。埋立処分場内の適正な環境維持に注意が必要である。固化体の粉碎試料において、溶出濃度が高い傾向が見られることから、劣化や地震等によって水銀廃棄物（固型化物）が崩壊しないような対策、措置が取られることが望ましい。水銀廃棄物ガイドラインに別の固型化方法を追加する場合、硫化処理が適切であるかの判定が環告13号溶出試験では不十分である可能性があり、留意が必要である。水銀廃棄物ガイドラインの中間処理が適切であるかをヘッドスペース試験で判定する際、連続水銀測定装置で高値となった場合には水銀以外の成分を検出している可能性があるため別の方法で確認することが望ましい。このように、これらの成果は水銀廃棄物ガイドラインやバーゼル条約の水銀廃棄物の環境上適正な管理のガイドラインを改訂する際に有用と考えられる。

#### 6) 水銀の埋立処分に伴う健康リスクの地域依存性

気候変動に伴う降水条件の変化は埋立地からの水銀排出量に影響を与えるが、局所的な水銀汚染に伴う健康リスクに与える影響は限定的である。一方、水銀のメチル化反応や生物濃縮の強さなど環境的変動性が大きいパラメータはその不確実性が大きいため、その結果として推定される健康リスク（水銀曝露量）には大きな地域的変動性が現れない。これは水銀の埋立処分に伴う健康リスクが地域に強く依存せずに通ずることを意味しており、日本での埋立処分対策が他の地域（東南アジア等）でも共通して有効な効果をもたらすことが期待される。つまり日本での対策を国際的に共有することが重要である。

#### 7) 市民的認知から捉えた水銀の安定化処理やモニタリングのあり方

水銀の埋立処分における安全性は、不溶化処理が最も信頼され、物理的封入や埋立地からの漏出防止対策、モニタリング体制などは相対的に信頼性が低い傾向にある。不溶化処理では水銀の化学的形態や鉱物学的形態を変化させる不溶化処理への信頼性が高く、セメント固化やガラス化、樹脂封入などの物理的不溶化への信頼性は相対的に低い。不溶化処理で担保されるべき安全期間（年数）が1000年以上



であれば、不溶化処理として十分との肯定的な態度変化が最も大きく現れる。水銀漏出を検知するモニタリングにおいて、1日1回以上の頻度を望むケースが最も多く、モニタリングを終了する条件としては「100年間の未検知」で肯定的な態度変化が最も大きく現れる。高頻度かつ長期間のモニタリングを望む傾向が強いため、合意形成にはこの点での認知的安全性をいかに保障していくかが重要である。

### 5-3. 研究目標の達成状況

プロジェクト全体目標	目標の達成状況
<p>本プロジェクト全体では、水俣条約の有効性評価に資するためベースラインシナリオと介入シナリオにおける対策を評価可能な一連のモデルを作成することが目標である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 現状から将来にわたる水銀制御・管理技術の整理・評価を行い、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等に技術的基礎情報を提供する。（小目標1）</li> <li>➤ 人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為にグローバル・シナリオモデルを開発し、水俣条約の履行および気候変動対策の双方を想定した複数の介入シナリオを策定し、中長期の水銀排出シナリオを定量的に描く。（小目標2）</li> <li>➤ 水銀の全球モデルを用いて、複数の介入シナリオに応じた環境と海産物中のメチル水銀濃度を予測し、条約の中長期的効果を評価する。（小目標3）</li> </ul> <p>以上により、ヒトへの曝露量及びその推移の予測を行い、最終的に、本プロジェクト全体の成果を取りまとめることで、環境省向けに、締約国会議の各種議論の材料となるように、水俣条約の有効性評価の枠組み策定に向けたオピニオンペーパーを作成・発信する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>3つのテーマを連携させて、ベースラインシナリオと介入シナリオにおける対策を評価可能な一連のモデルを作成することができた。</p> <p>水銀大気排出抑制（<u>バイオマス燃焼の排出係数、CC装置での除去率、新規除去技術開発</u>）・水銀管理技術（<u>水銀廃棄物長期安全管理技術の詳細</u>）を整理・提供した（小目標1に対応）</p> <p>この開発モデルにより、4つの介入シナリオにおける2050年までの水銀大気排出量を計算し、各種排出対策を評価した（小目標2に対応）。さらに大気境界層中水銀濃度及び海産物中メチル水銀濃度、健康リスクの推移を計算し、各種対策を評価した（小目標3に対応）。<u>水俣条約で想定される排出削減の対策を講じたとしても、大気境界層中水銀濃度は経済成長分を相殺するにとどまり、現状維持となることが定量的に明らかにした</u>ことは大きな成果である（小目標2、3に対応）。また、<u>気候変動対策の多くが水銀排出削減対策とも共便益をもたらすが、バイオマス燃焼などトレードオフになることも示された</u>ことは興味深い知見である（小目標2に対応）。</p> <p>水銀の排出削減対策の実施により、2050年時点での健康リスクの程度には大きな違いが生じ、早期の対策が効果的であることを明らかにした（小目標3に対応）。これらの成果より、有効性評価のための<u>気候変動を考慮した戦略的モニタリング指針</u>を提示した（小目標3に対応）。</p> <p>これらの成果に関して、国内においては水銀セミナーを実施し、NHKに取り上げられるとともに、国際的なASGMワークショップ及び国際会議での水銀廃棄物の特別セッション等を行い、情報を発信した。最終的に3テーマ合同でオピニオンペーパーを作成し、環境省に提出している。</p>



テーマ1 目標	目標の達成状況
<p>本研究では、介入シナリオの根拠となる人為的活動下での水銀制御・管理技術の状況を把握し、規制対象5発生源を含む主要発生源における水銀の排出・管理で将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報を整理・評価する。その基礎情報をSII-6-2に提示して、介入シナリオの策定に貢献する。また、水銀の最終的なシンクとなる最終処分施設における水銀廃棄物の長期管理手法を複数の加速試験及び模擬埋立実験等で検討し、最終処分施設からの漏洩する水銀量等の情報をサブテーマ2のリスクの将来予測に提示する。</p> <p>サブテーマ2では、SII-6-3から得られた情報を元に水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測し、気候変動や人為的対策に伴う水銀曝露の時間的・空間的・シナリオ的推移を可視化する。そしてサブテーマ1からの情報を考慮して水銀廃棄物の最終処分施設からの環境漏洩を経て水銀曝露に至る健康リスクとその地域性や将来変動性を可視化する。</p> <p>最終的に、本プロジェクト全体の成果を水俣条約の有効性評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ反映できるように、技術的基礎情報として整理し、国内の施策や水俣条約やバーゼル条約でのガイドライン等のアップデートへ貢献する。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u></p> <p>当初の計画通り、主要発生源における将来予測に必要な対策・技術・排出係数等の基礎的情報をSII-6-2に提供し、SII-6-3から提供される全球モデルでのメチル水銀予測データをもとに、水銀曝露に伴う健康リスクとその推移を予測できた。また、テーマ1内においてもサブテーマ1からサブテーマ2へ安定化処理した水銀に関する研究成果を提供し、サブテーマ2でのモデル検証につなげている。</p> <p><u>当初の目標に加え、規制対象外のバイオマス燃焼に関する知見もSII-6-2に提示し、テーマ2での主要成果の一つであるバイオマス燃焼の水銀排出におけるトレードオフ効果を見出すことに成功した。また、当初計画から拡張して実際のCO<sub>2</sub>回収設備での水銀挙動を調査したこと、新規水銀除去技術の実証試験も併せて実施し、実用化に目途をつけた。これらは当初の目標を上回る成果である。併せて、水銀の長期安定性評価に関し、特に水銀廃棄物の中間処理（硫化・固型化）とその確認方法に今後検討すべき課題を見出し、整理した。これらの成果は水銀廃棄物ガイドラインやバーゼル条約水銀廃棄物の環境上適正な管理のガイドラインにおいても有効活用されることが期待される。</u></p> <p>水銀の排出削減対策の実施により、2050年時点での健康リスクの程度には大きな違いが生じることを示した。水銀の排出削減を実施した場合、全ての影響指標（IQ低下量や心疾患死亡数）において2035年前後から健康リスクが大幅に低下し、水銀による経済損失が減少する。無対策のケースと比較した場合、最大削減シナリオでは27兆円/年の経済損失が防止される。ただし対策の影響が現れるまでにはタイムラグがあり、早期からの対策を行うことが効果的であることを示した。これらは水俣条約の有評価枠組みの策定や有効性向上に資する施策へ直接的に活用できる知見であり、総括して当初の目標を上回る研究成果を達成した。</p>
テーマ2 目標	目標の達成状況

<p>人為的起源による大気への水銀排出量の将来推計の為のグローバル・シナリオモデルを開発した上で、国・地域別の将来の水銀排出シナリオを定量的に描く。加えて、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴うトレードオフの有無を同定する。</p>	<p><u>目標を大きく上回る成果をあげた。</u></p> <p>目標であるシナリオモデルの設計・開発、シナリオの定量化を達成した。<u>成果である対策シナリオごとの削減量、残存する排出源(国・地域、セクター)に関する情報は、人為起源による水銀の大気排出の最小化に資する知見である。</u>また、併せて、対策導入に伴うトレードオフの有無と影響の同定を達成した。これは、<u>水銀の排出抑制・使用抑制・使用廃絶を含む対策技術により生じる影響の未然把握と事前対処を支援する知見である。</u></p> <p>加えて、<u>当初の目標を超える成果として、「第4回水銀に関する水俣条約締約国会議」(特に、COP4.2における水銀の違法貿易に関する「バリ宣言」)</u>を背景に、<u>不適切な水銀の使用・貿易の検出手法の開発やASGM対策コストの試算を達成し、水俣条約事務局や環境省への情報提供を果たすとともに、主催した国際セミナー(Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining)を通じて国際社会への情報発信を達成した。</u></p> <p>&lt;効率化&gt;</p> <p>入力情報となる技術情報(主に、テーマ1やテーマ2サブテーマ2)や出力情報となる推計結果(主に、テーマ3)の<u>共有用データフォーマットを作成することで、効率的な情報共有を実現した。</u>また、Web会議ツールを活用により、意思疎通を深める短時間・高頻度な運営を心がけた。副次的に、予算の効率的運用につながった。</p> <p>研究成果の発信のために、サイエンスアニメーションやインフォグラフィックスを活用することで、効果的、且つ、効率的な情報発信に繋がった。</p> <p>(例.)<a href="https://mfi.nies.go.jp/movie/NIESN_1_13_Video_Aug_23_2022.mp4">https://mfi.nies.go.jp/movie/NIESN_1_13_Video_Aug_23_2022.mp4</a></p>
---	---

テーマ3目標	目標の達成状況
<p>戦略的研究開発課題SII-6の研究テーマ1とテーマ2と連携し、将来の複数の水銀排出シナリオから、海洋環境中におけるメチル水銀濃度分布と全球含有量、そして将来の海産物中のメチル水銀濃度を予測し、地球規模の水銀汚染問題解決のために発効された水俣条約の有効性評価に資する生物蓄積及び生物曝露評価手法を提示する。</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u></p> <p>将来の気候変動シナリオとテーマ2で作成された4つの将来の人為由来水銀の排出シナリオの合計8つのシナリオを用いて、将来の大気と海水中の全球水銀量を予測し、海洋魚の水銀濃度の予測ができた。海洋魚の水銀濃度予測を海産物中の水銀濃度予測として、テーマ1のヒトへのメチル水銀曝露量とその推移予測に資する課題へデータ提</p>

	<p>供をすることができた。これらに加えて、将来の環境及び生物中の水銀濃度の分布を提示することによって、条約の有効性評価に資する環境モニタリング計画の立案に向けての科学的知見を提供することができた。</p>
--	---

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

#### <件数>

21件

#### <主な査読付き論文>

##### 【テーマ1】

- 1) F. Takahashi: Global Environmental Research, 24, 1, 45-52 (2020) Cognitive aversion of mercury scaled by pairwise comparison method with Thurstone's law of comparative judgement.
- 2) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: Chem. Eng. Trans., 89 (2021) Environmental impact of anthropogenic mercury release in China (IF=0.760).
- 3) Habuer, T.Fujiwara and M.Takaoka: J. Clean. Prod., 129089, 323 (2021) The response of anthropogenic mercury release in China to the Minamata Convention on Mercury: A hypothetical expectation (IF=9.297)
- 4) M. Takaoka, Y. Cheng, K. Oshita, T. Watanabe, S. Eguchi: Process Safety and Environmental Protection, 148 (2021) Mercury removal from the flue gases of crematoria via pre-injection of lime and activated carbon into a fabric filter (IF=4.966).
- 5) Y. Cheng, Y. Asaoka, Y. Hachiya, N. Moriuchi, K. Shiota, K. Oshita, M. Takaoka: J. Hazard. Mater., 423 (2022) Mercury emission profile for the torrefaction of sewage sludge at a full-scale plant and application of polymer sorbent, (IF=14.224)
- 6) 山田裕史、松浦雄之介、高岡昌輝、日下部武敏、吉川正晃：環境衛生工学研究、36、1（2022）、活性炭素繊維を用いた廃棄物焼却炉排ガスからの水銀除去
- 7) M. Takaoka, T. Kusakabe, K. Shiota, O. Hirata, K. Kawase, R. Yanase, and K. Nitta: Journal of Material Cycles and Waste Management, (2023) Microscopic synchrotron X-ray analysis of mercury waste in simulated landfill experiments (IF=3.579)
- 8) F. Takahashi: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) The impact of cognitive aversion toward mercury on public attitude toward the construction of mercury wastes landfill site (IF=3.579)
- 9) F.Takahashi, A.Sano, R.Yanase, A.Matsuyama, M.Takaoka: J. Mater. Cycles Waste Manage., Accepted (2023) 100-year simulation of mercury emissions from landfilled stabilized mercury waste (IF=3.579)

##### 【テーマ2】

- 1) M. Fuse, H. Oda, H. Noguchi, K. Nakajima (2022) Detecting Illegal Intercountry Trade of Mercury Using Discrepancies in Mirrored trade Data. Environmental Science & Technology, 56, 13565-13572 (IF= 11.357)
- 2) Y. Cheng, K. Nakajima, K. Nansai, J. Seccatore, M. M, Veiga, M. Takaoka (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. Resources, Conservation & Recycling, 185, 106461 (IF=13.716)
- 3) Y. Cheng, T. Watari, J. Seccatore, K. Nakajima, K. Nansai, M. Takaoka (2023) A review of gold

production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM).  
Resources Policy, 81, 103370Y. (IF= 8.222)

- 4) S. Kosai, K. Nakajima, E. Yamasue (2023) Mercury Mitigation in Artisanal and Small-scale Gold Mining: Cyanide Emissions and the Need for Retorted Mercury Management as Unintended consequences, Resources, Conservation and Recycling, 188, 106708 (IF= 13.716)

### 【テーマ3】

- 1) 丸本幸治、武内章記、多田雄哉：地球化学会誌、印刷中、（総説）海洋における水銀の濃度分布と動態
- 2) 多田雄哉、丸本幸治：地球化学会誌、印刷中、（総説）海洋における水銀の形態変化と微生物群の関わり

## 6-2. 知的財産権

### 【テーマ1】

- 1) 鮫島良二、三宅伴憲：株式会社プランテック、吉川正晃：大阪瓦斯株式会社、高岡昌輝、日下部武敏：国立大学法人京都大学；「バグフィルタ、添着活性炭素繊維ユニットを再生する方法及び排ガス処理システム」、特許第7007653号、令和3年6月3日
- 2) 坪井裕基：東ソー株式会社、高岡昌輝、日下部武敏：国立大学法人京都大学；「水銀処理剤」、特開2022-46931（特願2020-152579）、令和4年3月24日

### 【テーマ2】

「特に記載すべき事項はない。」

### 【テーマ3】

「特に記載すべき事項はない。」

## 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表（査読なし）	13件
口頭発表（学会等）	83件
「国民との科学・技術対話」の実施	27件
マスコミ等への公表・報道等	7件
本研究費の研究成果による受賞	3件
その他の成果発表	4件

## 7. 国際共同研究等の状況

研究交流と連携強化を目的とし、国際連合(Eisaku Toda, Secretariat of the Minamata Convention on Mercury, Senior Programme Officer)や環境省の行政官に加えて、海外研究機関に所属する下記の3名を招聘し、Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining（Date : October 30, 2022, Venue : Fukuoka Convention Center (Fukuoka, Japan) + Online (Zoom)) を開催した(図11)。

Marcello M. Veiga	University of British Columbia	Professor Emeritus
-------------------	--------------------------------	--------------------

Jacopo Seccatore	Universidad Adolfo Ibáñez	Professor
Tatiane Marin	Universidad Adolfo Ibáñez	Post-doctoral senior researcher

共同研究を通じて、以下の共同執筆論文等に関する研究成果を得られた。

- Y. Cheng, K. Nakajima, K. Nansai, J. Seccatore, M. M. Veiga, M. Takaoka (2022) Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. *Resources, Conservation & Recycling*, 185, 106461 (IF=13.716)
- Y. Cheng, T. Watari, J. Seccatore, K. Nakajima, K. Nansai, M. Takaoka (2023) A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resources Policy*, 81, 103370Y. (IF= 8.222)

Partner Events of EcoBalance 2022

## Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining

**FREE EVENT!**

**Date**  
October 30, 2022

**Venue**  
Fukuoka Convention Center,  
Fukuoka, Japan

**Contact**  
ecobalance@ilcaj.org  
<https://www.ecobalanceconference.org/conference/2022/index.html>

Organized by Material Cycles Division, National Institute for Environmental Studies  
Co-organized by Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University

### Speakers and Topics

- Inconsistencies of mercury flow in global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity  
**Yingchao Cheng** National Institute for Environmental Studies
- Exploring illegal trade of mercury from discrepancy with trade statistics  
**Masaaki Fuse** Hiroshima University
- Monitoring Artisanal and Small-Scale Gold Mining using Satellite Images  
**Kazuyo Hirose** Japan Space Systems
- Tailings management as a key challenge to curb mercury dissemination in and around ASGM sites  
**Satoshi Murao** Daiichi Institute of Technology
- Human health risk assessment of mercury vapor around ASGM area - perspective from field measurement  
**Koyomi Nakazawa** Toyama Prefectural University
- Mercury mitigation in artisanal and small-scale gold mining: cyanide emissions and the need for reformed mercury management as unintended consequences  
**Shoki Kosai** Ritsumeikan University
- Mercury use related to ASGM and its reduction by novel refining process  
**Akhiro Yoshimura** Chiba University

### Discussants

- Tatiane Marin**  
Post-doctoral senior researcher, Adolfo Ibañez University
- Jacopo Seccatore**  
Professor, Adolfo Ibañez University
- Eisaku Toda**  
Senior Programme Officer, Secretariat of the Minamata Convention on Mercury, UN
- Marcello M. Veiga**  
Professor Emeritus, University of British Columbia
- Hitoshi Yoshizaki**  
Deputy Director, Ministry of the Environment, Japan

図11 Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining

## 8. 研究者略歴

プロジェクトリーダー

高岡 昌輝

京都大学工学部卒業、博士(工学)、現在、京都大学大学院工学研究科教授

テームリーダー

1) 高岡 昌輝

京都大学工学部卒業、博士(工学)、京都大学工学部助手、現在、京都大学大学院工学研究科教授

2) 中島 謙一

筑波大学大学院工学研究科 博士課程修了、博士(工学)、東北大学大学院環境科学研究科助教等を経て、国立環境研究所に入所、現在、国立環境研究所資源循環領域主幹研究員。

3) 武内 章記

米国ワシントン州立大学理学部卒業、Ph. D、現在国立環境研究所環境リスク・健康領域主任研究員

## II. 英文Abstract

### **Intervention Scenarios and Global Mercury Modeling for Effectiveness Evaluation of the Minamata Convention on Mercury**

Principal Investigator: Masaki TAKAOKA

Institution: C cluster, Kyotodaigaku-katsura, Nishikyo-ku, Kyoto City, JAPAN

Tel: 075-383-3335 / Fax: 075-383-3338

E-mail: takaoka.masaki.4w@kyoto-u.ac.jp

Cooperated by: National Institute of Environmental Studies, Fukuoka University, Tokyo Institute of Technology, Ritsumeikan University, National Institute for Minamata Disease

[Abstract]

**Key Words:** Minamata convention on mercury, Emission reduction, Scenario analysis, Mercury biogeochemical cycling, Health risk, Waste management, Future projections, Effectiveness evaluation, Climate targets/goals, Methylmercury in marine products

For appropriate implementation of the Minamata Convention on Mercury around the world, measures that combine various technologies and systems, such as the conversion of industrial processes and application of advanced emission control technologies, are necessary. The objective of this study was to develop a model that can quantitatively express the behaviors of mercury in natural environments and under the influence of anthropogenic activities for use in future projection and quantitative evaluation of the effectiveness of countermeasures, thereby providing a scientific basis for effectiveness evaluation of the Minamata Convention.

This study introduces a global scenario model for estimating anthropogenic emissions of mercury into the atmosphere. The findings indicate that significant reductions in mercury emissions can be expected with the implementation of various measures compared to the reference scenario without additional measures. In the “Step-wise reduction” scenario, the implemented mercury removal measures only offset the increase in emissions associated with economic growth since 2015. We further analyzed the co-benefit and tradeoff effects of reduced or increased mercury emissions caused by deep decarbonization measures aimed toward the global carbon-neutrality target. Such decarbonization measures will provide a large co-benefit of mercury mitigation. However, bioenergy with carbon capture and storage triggers a tradeoff effect of higher mercury emissions. Thus, mercury removal measures must be implemented to further reduce mercury emissions. In this study, as possible future mercury emission control technologies, we examined mercury behavior in carbon capture devices and developed activated carbon-based high-performance adsorbents.

The mercury emission results were used as input data for a global mercury biogeochemical model. The model calculation results suggest that mercury concentrations in the atmosphere and seawater will not decrease in the “Step-wise reduction” scenario. In the “Maximum reduction by 2050” scenario, mercury concentrations in the environment will decrease after 2032. Global mercury emission to the air is dominated by re-emission and re-mobilization associated with biogeochemical cycles, and thus our results suggest that the timing of environmental mercury reduction can be expected to occur later than the reduction in anthropogenic mercury emission.

We investigated health risks of mercury exposure through the consumption of seafood sold in markets. Model calculations showed that the maximum reduction scenario was expected to prevent economic losses of 27 trillion yen/year compared to the reference scenario without additional measures. However, a time lag exists before the impact of countermeasures becomes apparent. Measures to reduce mercury emissions must be strengthened and introduced immediately.

From the results of biogeochemical model calculations, we propose new monitoring locations based on comparison of the reference scenario without additional measures with the “Maximum reduction by 2050” scenario.

The largest source of mercury to the air is artisanal small-scale gold mining (ASGM). In this study, data-driven approaches to exposing illegal and informal trade and use of mercury were developed to reduce emissions from ASGM. In addition, application of the retort and cyanidation methods in ASGM was evaluated, suggesting that financial mechanisms must be considered to effectively manage waste mercury. As mercury waste management is essential to the final sink of mercury, we conducted simulated landfill experiments using lab-scale lysimeters and accelerated leaching tests to establish long-term management methods for waste consisting of mercury. The results indicated that the possibility of mercury leaching from solidified mercury waste was low, and therefore mercury waste must be safely stored and disposed of.

Thus, this study produced results that will support effectiveness evaluation of the Minamata Convention. We hope that these results will be effectively used in the future development of domestic and international mercury guidelines.