

令和2年度戦略的研究開発課題(SⅡ-6)の公募方針

1. プロジェクト名：

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

2. 研究プロジェクトリーダー：

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授 高岡昌輝

3. 研究予算：

年間総額1億円以内

※予算規模は、直接経費及び間接経費、税込み。なお、委託の消費税は、総額（直接経費＋間接経費等）に掛かる。

4. 研究期間：

3年間（令和2～4年度）

※研究2年目に中間評価を行う。

5. プロジェクトの概要

(1) 背景と目的

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、採掘から貿易、使用、排出、放出、廃棄等に至る水銀の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。世界水銀アセスメント2013によると、歴史的にみて環境サンプル中水銀濃度は、現状では上昇傾向にある。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・放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ることで対策を講じていくことが求められている。

これらの対策の有効性を評価するには、ベースラインシナリオ（現状）と対策効果を盛り込んだ「介入シナリオ」が必要であるが、介入シナリオには将来の社会変化を考慮したものでなければならない。自然環境中の水銀動態は長期的な気候変動を含む様々な外的要因によって影響を受けるとともに、社会における水銀利用の動向や水銀が天然資源の不純物として存在することから他資源の採掘や利用・廃棄といった人為的活動（これを以下、人為的活動と呼ぶ）下における水銀挙動も気候変動対策により影響を受け、水銀のマテリアルフローや自然環境への排出挙動が変化することが想定される。また、水銀は残留性有機汚染物質（POPs）とは異なり、元素であることから分解による無害化ができない。したがって、最終的な水銀の処分を含む管理が必要となり、これを怠ると二次的な汚染を引き

起こす可能性があり、長期での管理が求められる。

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、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が、2023年までに条約の有効性評価をする必要がある。先行するPOPsに関するストックホルム条約を参考にすると、全球的なモニタリングデータを評価していくことが考えられるが、水銀のような微量地球環境汚染物質の挙動は全球において様々な反応が関与することから、複雑さゆえに個別の対策の総合的な効果を定量的に把握・評価することが難しい。そのため、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・利用していくことが望まれる。しかし、利用可能なモデルは、現在の環境実態を描写するもので、未来の事象の予測を行うためには、将来に向けて変化していく要素（技術の変化など）をパラメータとして加えていくことが必要である。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推定曝露量がどの程度変化し、推移するのか見極めることも必要となる。

したがって、本研究では、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を目的とする。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・評価すること、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すること、さらに、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とが本研究の目的である。

（2）研究概要

本研究では、まず、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、水銀の排出・放出・管理で将来予測に必要な基礎的な情報を整理・評価する。この基礎情報を利用して、現状及び長期での気候変動による自然環境・社会の変化を考慮した複数の介入シナリオを定量的に描くと共に分析のためのグローバル・シナリオモデルの設計に取り組む。さらに複数シナリオから推計された水銀排出量等をインプットデータとして用いて全球モデルによりヒト健康に関する環境や海産物中のメチル水銀濃度を再現するためのモデルを作成し、計算する。最終的に、作成した一連の評価モデルにより、ヒトへの曝露量及びその推移を予測し、水俣条約の有効性評価に資する情報を整理する。

水銀に関する水俣条約の締約国会議（COP）において、本条約の有効性評価に関する枠組みが検討されており、本研究での介入シナリオの策定や数理モデルの作成は、条約の有効性評価に対し強力なエビデンスを提供できるポテンシャルを持ち、日本が条約のイニシアティブをとることに貢献する。

具体的には次の3つの研究テーマを設定・連携し、実施する。

- 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』：現状の水銀制御・管理技術の整理を行うとともに、将来技術及び水銀廃棄物の最終処分に対する調査を行い、将来技術・対策、排出係数等のシナリオ分析の基礎情報とする。また、各種モデルにより計算された環境中水銀濃度によるヒト健康へのリスクの変動・推移を予測する。さらに本研究全体で得られた成果を水俣条約の有効性向上に資する施策へ反映できるように基礎情報として整理する。
- ② 『有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発』：気候変動に関する研究分野で用いられている統合評価モデル、および産業エコロジー研究分野で用いられている物質フロー・サプライチェーン分析モデルで培われたモデル設計・シナリオ分析の知見を活かして、水俣条約の有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発およびその適用を進める。
- 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』：水銀同位体を用いた海中水銀の形態変化速度を把握する手法開発、メチル水銀の生成および消失に関するプロセスと速度定数、そして生物移行に関する実験的・観測的研究を実施する。また、計測結果や既存データを考慮した水銀の全球モデルの改良と精緻化により、環境及び海産物中のメチル水銀濃度の中長期予測を実施する。

(3) 成果目標

1) 全体目標

- 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、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。
- グローバル・シナリオモデルを開発し、気候変動による自然環境・社会の変化を考慮した複数の介入シナリオを策定して水銀削減対策を描く。
- 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。
- 以上により、ヒトへの曝露量及びその推移の予測を行い、水俣条約の有効性評価のための対策の意義や検討に資する科学的知見を提供する。得られた結果を整理して締約国会議の各種議論の材料として提供する。

2) 個別目標

- 人為的活動下での水銀制御技術の現状整理と将来予測及び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
- ヒトへの推定曝露量とその推移の予測
- 世界全体での水銀動態把握のためのグローバル・シナリオモデルを開発して、国・地域別の将来の水銀排出削減シナリオを作成

- 水俣条約履行による製品代替及び製造プロセスの対策導入に伴うトレードオフの同定
- 海洋環境での溶存無機水銀からメチル水銀への形態変化と生物移行（分配）に関する詳細な知見の取得
- 水銀の全球モデルの改良と精緻化を行い、環境と海産物中のメチル水銀濃度の中長期予測

6. プロジェクトの研究テーマ構成及びサブテーマ構成

本プロジェクトは、以下の3つのテーマ構成により、適宜、テーマの下にサブテーマを設けて、各テーマ及びサブテーマ研究者が一体的に研究を実施する。全体構成及びテーマ・サブテーマ間の関係については、概要資料も参照のこと。

URL : <http://www.erca.go.jp/suishinhi/koubo/>

研究提案の公募は、テーマ1からテーマ3の【公募】サブテーマについて行う。

(留意事項)

- サブテーマのうち、各テーマの「【総括】サブテーマ(1)」は、テーマリーダーが担当し、テーマの総括を行うため公募は行わない。
- テーマリーダーが担当する【総括】サブテーマ(1)は各テーマ全体の総括班として機能し、サブテーマ間の研究調整・進捗管理を担当する。
- 研究提案は、【総括】サブテーマ及びその他の【公募】サブテーマと研究内容が連携するものであることが必要である。
- 各サブテーマのリーダーは、研究プロジェクトリーダー及びテーマリーダーの指示の下で、他テーマ、サブテーマの研究者と緊密に連携し、一つの研究プロジェクトを構成する研究活動として研究を実施する。このため、各テーマリーダーとサブテーマ研究者で構成する研究会議に積極的に参加することが求められる。
- サブテーマリーダーは、応募したサブテーマの内容及びヒアリング等の審査過程での連絡・対応について総括的な責任を持つ。
- 研究提案を行う申請者は、研究提案の提出前にテーマリーダーに連絡をして提案内容（申請書）についてテーマに相応しい内容かどうか事前に確認することが出来る（公募切の1週間前まで（厳守））。確認のあった提案内容（申請書）について、テーマリーダーはプロジェクトリーダーと相談の上、申請者にコメントを回答する。テーマリーダーの連絡先については、環境省大臣官房環境保健部水銀対策推進室（ehs@env.go.jp）までメールにて問い合わせること。

各テーマ及び公募するサブテーマの構成

テーマ名 及び テーマリーダーの担当するサブテーマ	公募を行うサブテーマ
------------------------------	------------

<p>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</p> <p>サブテーマ(1)：人為的活動下での水銀制御・管理技術の変遷調査と将来予測</p>	<p>サブテーマ(2)：ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測</p>
<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</p> <p>サブテーマ(1)：資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析</p>	<p>サブテーマ(2)：ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析</p>
<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</p> <p>サブテーマ(1)：水銀のメチル化速度定数を付加した全球モデルの高度化と中長期予測</p>	<p>サブテーマ(2)：海洋環境での形態別水銀の分布と分配に関する研究</p>

(1) 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

テーマリーダー：高岡昌輝（京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 教授）

① 成果目標

- 人為的活動下での水銀制御技術の整理と将来予測
- 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
- ヒトへの推定水銀曝露量及びその推移の予測

② 研究概要

人為的活動下での水銀制御・管理技術の状況を把握し、水銀の排出・放出・管理に対して将来予測に必要な基礎的な情報を整理する。また、各種モデルにより計算された環境中水銀濃度によるヒト健康へのリスクの変動・推移を予測する。さらに本研究全体で得られた成果を水俣条約の有効性向上に資する施策へ反映できるように基礎情報として整理する。

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目的に、水銀に関する水俣条約が2017年8月に発効したことにより、人為的な水銀の排出・放出・利用は厳しく制限されることになった。水銀含有製品や水銀を利用した産業プロセスは順次転換されていき、水銀利用が最小化される。しかしながら、石炭や非鉄金属鉱石などの天然資源には不純物として水銀が含まれることから我々の社会への水銀の流入を止めることは困難である。

水俣条約においては、大気への排出量の多い排出源に対して規制をかけている。今後とも我々の社会に流入された水銀の自然環境への排出・放出制御が重要となる。大気や水へ

の制御技術については、必ずしも水銀だけに特化したものが用いられているわけではなく、他の環境負荷物質の制御とともにコベネフィットな観点から用いられているものもあり、現状の排出源での技術の整理・評価が必要である。さらには、今後の気候変動対策として、石炭火力発電所等で二酸化炭素回収技術の導入などが想定される。このような新しいプロセスや技術などにより水銀の大気への排出係数は変化することが考えられるが、現状ではそれを予測する情報は極めて限られている。また、一方で、利用されなくなった水銀や排ガスや排水から除去された水銀は、有害廃棄物として扱われる。水銀はPOPsとは異なり、分解できないことから最終的な管理が必要で、処分・管理施設の設置がいずれの国においても重要となる。つまり、環境中へ水銀の排出・放出削減及び使用の削減は、人為的な水銀廃棄物の最終的な適正管理により完結する。処分する水銀廃棄物の長期安定性を見通すための管理手法が必要となるが、これまで実績がないことから加速環境や模擬環境下での実験により水銀廃棄物からの水銀挙動に関する知見を蓄積することが求められている。したがって、サブテーマ(1)においては、まず、人為的活動下における水銀制御技術に関する調査を行い、将来予測に必要な基礎的情報（排出係数等）を整理する。次に、水銀廃棄物の最終処分に関する実験的検討から長期管理手法としての知見を集積する。これらサブテーマ(1)から抽出・整理された技術に関する基礎的情報を、テーマ2への入力データとする。また、水銀廃棄物の最終処分における水銀挙動に関するデータは、サブテーマ(2)の推定曝露量推計モデルのデータとする。

サブテーマ(2)では、ヒトへの水銀曝露リスクの推移を予測することを目的とする。水俣条約の目的を鑑みると、その有効性を評価する上で主要なアウトカムの一つは、ヒト健康への影響である。ヒト健康への影響を考慮する上では、まず、テーマ3の全球モデルから得られるメチル水銀を含む海産物の摂取による曝露量の予測が対策効果を論じる上で重要である。水銀の曝露リスク予測にあたっては、既往の水銀の用量反応関係の知見を集約し、存在形態別および曝露経路別のリスク計算を実施する。一方で、水銀廃棄物は最終処分施設で処分・管理せねばならず、その処分・管理環境は世界における地域や気象条件が異なり、今後の気候変動によっても影響を受けて処分施設周辺環境での水銀曝露リスクも変動することから予測が必要である。

最終的に、本研究全体から得られた成果を、水俣条約の有効性評価枠組み策定や同条約の有効性向上に資する施策へ反映できるように基礎情報として整理する。

③ 【総括】 サブテーマ(1)：人為的活動下での水銀制御・管理技術の変遷調査と将来予測

イ) 人為的排出・放出源からの水銀制御技術の整理を行うとともに将来の社会動向の変化を予測して、新たな制御技術に関する基礎的情報を取得する。

ロ) 最終処分施設における水銀廃棄物からの水銀分配挙動に関する知見を集積し、長期管理手法を開発し、水銀廃棄物管理由来のリスク予測のためのデータを取得する。

ハ) 本研究全体の成果を有効性評価枠組み策定や有効性向上に資する施策へ反映できるよ

うに基礎情報として整理する。

④ 【公募】サブテーマ

➤ 【公募】サブテーマ(2)：ヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測

イ) テーマ3の全球モデルで計算された各地域での海産物中の水銀濃度から推定曝露量を求めて存在形態別及び曝露形態別のリスク計算を行い、健康リスクの推移を予測する。

ロ) 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ついて健康リスクの地域性及び将来変動性を予測する。

(2) 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：中島謙一（国立環境研究所 資源循環・廃棄物研究センター 主任研究員）

① 成果目標

- 世界全体での水銀の動態（フロー・ストック・排出など）の把握の為のグローバル・シナリオモデルの開発
- 国・地域別の将来の水銀排出削減シナリオの作成
- 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の同定

② 研究概要

本テーマでは、気候変動に関する研究分野で用いられている統合評価モデル、および産業エコロジー研究分野で用いられている物質フロー・サプライチェーン分析モデルで培われたモデル設計・シナリオ分析の知見を活かして、水俣条約の有効性評価に資するシナリオ分析モデルの開発およびその適用を進める。

水俣条約の履行により、水銀の採掘量や使用量の削減、水銀による環境汚染の防止等が期待されている。しかし、アジア・アフリカ地域での急速な人口増加や経済発展に伴って、各国・各地域の経済活動を支える鉱石（鉄鉱石、銅鉱石など）や石炭など水銀を含有する鉱物資源の利用拡大に起因する水銀排出量の増加が依然として懸念される。また、履行の為の対策技術の導入等が、負の側面として、他資源の利用やその利用に起因する他の課題を誘発する可能性も懸念される。

そこで、サブテーマ(1)では、資源の採掘活動に起因する水銀量等を含めて、世界全体での現状の水銀の動態（フロー・ストック・排出など）の把握および水俣条約の履行を含む将来の複数の社会経済シナリオ条件の下での水銀の動態の変化の把握を念頭に、グローバル・シナリオモデルの設計を実施する。また、同モデルを適用することにより、気候変動枠組み条約パリ協定で定められた2℃目標を達成しつつ、同時に水俣条約に基づいた水銀排出削減にむけた国・地域別の水銀排出削減シナリオを定量的に描く。

加えて、サブテーマ(2)では、ライフサイクル思考を適用することで、水俣条約を履行する為の対策プロセス等(小規模金鉱山における抽出プロセス転換、塩ビ等の製造業におけるプロセス転換、照明器具の転換など)の導入に伴うトレードオフの有無を未然に把握すると共に市場への影響を定量化する。

以上のテーマで研究を実施することで、世界全体を対象として国・地域別の水銀の動態(フロー・ストック・排出など)の将来推計を可能とするシナリオ分析モデルを提供すると共に、有効性評価に資する定量的・定性的な学術的知見の提供が可能となる。将来の水銀排出シナリオの定量化は、入力データとして、テーマ 1(およびサブテーマ(2))から提供される技術情報等を踏まえて解析を実施する。また、出力データとして得られる将来の水銀排出量(水銀排出インベントリ)情報を解析用の基礎データとしてテーマ 3 に提供する。

③ 【総括】サブテーマ(1)：資源の採掘活動・利用等に起因する水銀量のグローバル・シナリオモデルの開発設計と解析

イ) 世界全体での水銀の動態(フロー・ストック・排出など)の把握の為のグローバル・シナリオモデルを開発する。

ロ) 水銀動態に関する物質フロー・サプライチェーン情報を整備する。

ハ) 気候変動枠組み条約及び水俣条約の履行を含む将来の水銀排出削減シナリオを定量的に描く。

④ 【公募】サブテーマ

➤ 【公募】サブテーマ(2)：ライフサイクル思考に基づく対策技術の導入に伴うトレードオフの解析

イ) 水俣条約を履行する為の製品・製造プロセスにおける対策等を抽出・整理する。

ロ) 対策プロセス等のインベントリデータ(プロセス情報、環境負荷情報など)を整備する。

ハ) 対策プロセス等の導入による影響を評価することでトレードオフの有無を同定し、市場への影響を定量化する。

(3) 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：武内章記(国立環境研究所 環境計測研究センター 主任研究員)

① 成果目標

- 水銀同位体を用いた水銀のメチル化速度把握手法の開発
- 海洋環境における無機水銀からメチル水銀への形態変化速度、形態別水銀の鉛直分布、そしてメチル水銀の生物移行(分配)に関する詳細な知見の取得
- 水俣条約の中長期的効果が予測可能な水銀の全球モデルの開発

② 研究概要

2017年に発効された水銀に関する水俣条約では、2023年までに条約の有効性を評価する必要がある。特に、人為的に排出された水銀の海洋環境への影響は一際大きいと考えられており、中長期的に海洋環境の水銀濃度と、生物相のメチル水銀濃度が、有効性評価に向けた様々な対策によってどの程度減少するのか、そして人為的活動による地球規模の水銀汚染と、それにより引き起こされる健康と環境被害を防止するという条約の目的が果たされているかを評価する手法の確立が求められている。こうした要求に応えるように、複数の水銀の全球規模の動態モデルの開発が進められているが、いずれも不確実なパラメータが多く、特に海洋環境中と生物相内のメチル水銀濃度の分布や全球含有量の現状を再現できていない。

水銀は、水環境中で起こる様々な生物地球化学的・物理化学的な反応によって、水俣病の原因となったメチル水銀に形態変化をすることが知られている。そしてメチル水銀は、人為的に排出される無機水銀と比較して、毒性と生物濃縮性がより高いことでも知られている。既存の全球モデルの問題は、こうしたメチル水銀の生成および消失プロセスと速度に関するインプットデータが不足しているのと同時に、水と生物のような異なる媒体間でのメチル水銀の分配に関する情報が不足していることである。そこで本研究テーマでは、水俣条約の中長期的な効果を予測するために、最新の形態別水銀分析技術を用いて、生成及び消失速度とプロセス、そして異なる媒体間での分配に関する詳細な知見を取得し、既存の全球モデルを、条約の有効性評価に利用可能なモデルへと発展させることを目的とする。

サブテーマ(1)では、環境中のメチル水銀の分布と全球含有量の現状と、過去150年の排出インベントリデータに基づいた長期変動を再現するために、水銀同位体をトレーサーとした形態別水銀分析技術を確立し、西部北太平洋海水を用いて、全球モデルで利用可能な海水中水銀のメチル化速度を実測し、その変動要因を把握する。また、これまでに報告されているメチル水銀の実測値とモデル計算値との相互比較から、利用可能な補正係数を抽出し、モデル構造の改良とその適用性を検証する。

サブテーマ(2)では、全球モデルの検証と、魚や海産物中のメチル水銀濃度を再現するために、高感度な形態別水銀分析手法を用いて、水銀調査が未実施の西部北太平洋海域の海水中の溶存無機水銀とメチル水銀の濃度分布を明らかにすると同時に、実験的・観測的研究から海水中での形態別水銀の挙動を明らかにして、共存するプランクトンへのメチル水銀の移行(分配)の定量化を図る。サブテーマ(1)とは西部北太平洋海域の水質データを共有し、溶存水銀からメチル水銀への形態変化速度に関する知見取得に協力する。また、形態別水銀の分布とメチル水銀の生物移行特性に関する観測・実験結果をサブテーマ(1)の全球モデルのインプット・検証用データとして提供し、メチル水銀の分布と生物移行・蓄積に関する動態再現に協力する。

以上のテーマで研究を推進することによって、海洋環境中に存在するメチル水銀の動態に関する詳細な知見を取得・集約し、全球モデルの精緻化と、生物蓄積及び生物曝露評価手

法の確立を実現する。本研究で開発するモデルでは、中長期的なメチル水銀の全球規模の分布と含有量を再現することを目標としており、テーマ 2 から提供される将来の排出インベントリーデータを用いて、メチル水銀の全球含有量の将来予測を行い、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予測を実施し、テーマ 1 のサブテーマ(2)のヒトへの水銀曝露リスク及びその推移の予測に協力する。

③ **【総括】サブテーマ(1)：水銀のメチル化速度定数を付加した全球モデルの高度化と中長期予測**

- イ) 水銀同位体を用いた水銀メチル化速度定数を計測する技術確立。
- ロ) 西部北太平洋の海水試料を用いた無機水銀からメチル水銀への形態変化速度の実測。
- ハ) モデル検証に必要なデータベース更新と、利用可能な補正係数の抽出と適用性の検討。
- ニ) 全球モデルによる環境中のメチル水銀の分布と全球含有量の現状再現。
- ホ) 過去 150 年の排出インベントリーデータと、将来の気候データと排出インベントリーを用いたメチル水銀の分布と含有量の将来予測。

④ **【公募】サブテーマ**

➤ **【公募】サブテーマ(2)：海洋環境での形態別水銀の分布と分配に関する研究**

- イ) 全球モデルの精緻化と検証のために、水銀調査が未実施の西部北太平洋海域の海水中の溶存無機水銀とメチル水銀の濃度分布の把握。
- ロ) 全球モデルでのメチル水銀の生物移行・蓄積に関する動態を再現するために、実験的・観測的に海水中での形態別水銀の挙動を明らかにし、共存するプランクトンへのメチル水銀の移行（分配）の定量化。