

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：15301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17895

研究課題名（和文）水俣条約の有効性評価に資する人為的活動下での水銀排出動態に関する研究

研究課題名（英文）The response of anthropogenic mercury release to the Minamata Convention on Mercury

研究代表者

哈 布尔（Habuer, .）

岡山大学・環境生命自然科学学域・助教

研究者番号：80749060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、特に人為的水銀排出が多い中国を対象にすべての人為的水銀発生源の定量評価及び特定分野（採掘・燃焼部門）の詳細解析を行った。また、水俣条約を履行する為の対策プロセス等の導入に伴う環境への影響を定量化した。中国、マレーシアと日本を対象に、すべての人為的排出源からの水銀排出による環境影響だけではなく、個別の排出源による環境影響も明らかにした。最後に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いた。特にマレーシアと中国のシナリオごとの水銀削減ポテンシャルを評価した。将来の研究では、これらの排出制御措置を適用するための経済的・社会的および技術的な側面からの評価が必要である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

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、早い段階で条約の有効性評価を実施する必要がある。本研究でのアウトプットは、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。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。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。得られた本研究の成果には学術的な貢献が期待できるとともに、廃棄物管理、環境負荷低減と循環型社会創生への社会的効果が大きい。

研究成果の概要（英文）：In this study, we quantitatively assessed all anthropogenic mercury sources and detailed analysis of specific sectors (mining and combustion) in the target country. This is the first attempt to provide a systematic evaluation of the effectiveness of the Minamata Convention on Mercury (MCM) based on hypothetical expectations. We also quantified the environmental impact targeting China, Malaysia, and Japan. Finally, we quantitatively depicted future mercury emission reduction scenarios with response to MCM. Future research needs to assess these emission control measures from economic, social, and technical perspectives. As the MCM moves into the implementation phase, further information from scientific data and studies is critically needed to support decision-making and management. The results of this study can provide such information, facilitating the creation of strategic management policies for mercury as the MCM is implemented.

研究分野：環境影響評価学

キーワード：水銀 水俣条約 環境影響評価 物質フロー分析 シナリオ評価 水銀排出動態

## 1. 研究開始当初の背景

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から人の健康及び自然環境を保護することを目的とし、採掘から貿易、使用、排出、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。締約国において、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。これらの対策の有効性を評価するには、現状(条約発効後)と過去(条約発効前)の水銀挙動の変化を考慮したものでなければならない。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下における水銀挙動が政策により影響を受け、水銀の物質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。日本国政府の主導で採択された水俣条約では、締約国会議(COP)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も、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、早い段階で条約の有効性評価をする必要がある。そのため、人為的活動下での挙動を定量的に把握し、ライフサイクルアセスメント(LCA)の観点から水銀排出による環境影響評価が条約の有効性評価に貢献することが望まれる。したがって、地球規模の水銀および水銀化合物による汚染や、それによって引き起す健康、および環境被害を防ぐため、二次的な汚染を引き起こす可能性がある最終的な水銀の処分を含む戦略的かつ長期的管理が求められる。

## 2. 研究の目的

水俣条約の発効に伴い、特定分野での水銀の使用禁止・制限や輸出入禁止等により世界の水銀挙動が大きく変動することが見込まれる。急速な工業発展に伴ったアジア圏における大気への水銀排出量は世界全体の約40%を占めており、水銀の使用と排出が圧倒的に多いアジア諸国、特に発展途上国に対して、水銀挙動により水銀管理政策への新たな挑戦が求められている。そこで、社会システムにおける水銀排出の物質フロー及びその排出による環境影響分析が喫緊の課題である。一方、日本国内では「水銀による環境汚染の防止に関する法律」及び「廃棄物処理法施行令改正」により廃水銀及び水銀含有産業廃棄物等の貯蔵・処理に関する法整備は整っているものの、実際の最終処分体制はまだ整備されていないため、二次汚染を引き起こす可能性がある。そこで、本研究の目的を次のように設定する。

現状(条約発効後)と過去(条約発効前)の人為的活動下での水銀挙動の定量的評価

ライフサイクル思考に基づく人為的水銀排出による環境影響分析

水俣条約の履行を含む将来の水銀排出削減シナリオの定量的評価

## 3. 研究の方法

(1) 現状(条約発効後)と過去(条約発効前)の人為的活動下での水銀挙動の定量的評価

資源の採掘活動に起因する水銀量等を含めて、中国、マレーシアと日本の水銀の動態(フロー・ストック・排出など)を把握する。さらに、水銀動態に関する物質フロー情報を整備する。アジアおよび対象国らに対する水銀に関する物質フローは構築されたものの、現状(条約発効後)と過去(条約発効前)の水銀挙動の変化を比較していない。そこで、水俣条約発効前と後の人為的活動下での水銀排出源の同定と水銀排出量の定量化を行う。水俣条約の影響を踏まえたターゲット国における水銀の物質フローを構築・比較し、今後の水銀の管理方策に資することを目指す。

(2) ライフサイクル思考に基づく人為的活動下での水銀排出による環境影響分析

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の導入に伴う環境への影響を未然に把握すると共にその影響を定量化し、条約前の環境影響との比較を行う。水銀排出による環境影響分析を行うことで今後の水銀汚染防止及び管理方策に資することを目的とする。

(3) 将来の水銀排出削減シナリオの定量的評価

本目標では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き、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。人為的排出源からの水銀制御技術の整理を行うとともに、新たな制御技術に関する基礎的情報を取得する。最後に、産業エコロジー研究分野で用いられている物質フロー・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を行う。

## 4. 研究成果

(1) 現状(条約発効後)と過去(条約発効前)の人為的活動下での水銀挙動の定量的評価

水俣条約の有効性を評価するのに、現状(条約発効後)と過去(条約発効前)の人為的活動下での水銀挙動を定量的分析しなければならない。本研究では、特に人為的水銀排出が多い中国を対象にすべての人為的水銀発生源の定量評価(文献 )及び特定分野(採掘・燃焼部門)(文献 )のみの詳細解析を行った。さらに、本研究の成果をデータベースとして整理し、オープンアクセスジャーナルに発表(文献 )したことで多くの研究者や政策決定者らの参考になれる。

この研究は、2016 年から 2019 年における中国の水銀インプット・アウトプットを 5 つの発生源カテゴリー（採掘・燃焼、二次金属製造、鉱物製造、意図的添加商品、廃棄物処理）ごとに定量化し、水俣条約で求められている加速シナリオ/技術転換による水銀の社会と自然環境での分布に及ぼす影響をマテリアルフロー分析にて明らかにした。自然環境への水銀排出は水俣条約後に劇的に減少し、加速シナリオ/技術転換を考慮した場合、2019 年では約 840 トンの水銀が自然環境へ排出する。これは 2016 年（1,063 トン）の 21% 未満であることをわかった。加速シナリオ/技術転換を適用することで自然環境への総放出量は減少し、大気へ排出だけで 2018 年は 53 トン、2019 年は 58 トン削減できる。大気への排出は加速シナリオ/技術転換に対して最も敏感で、次に陸地と水圏への排出があげられる。これらの研究は仮説的な期待に基づいて水俣条約の有効性を体系的に評価した初試みといえる。水俣条約の実行段階に移行するにつれて、水銀管理の意思決定をサポートするために、科学的エビデンス（データ）の揭示や研究者らからの知見が求められている。本研究の結果はそのような情報・知見・データを提供することができ、水銀の戦略的管理政策に資する。本研究の成果から水俣条約の成功するポイントは技術イノベーション・システム変革・それらの加速（図 1）であることが明らかといえる。

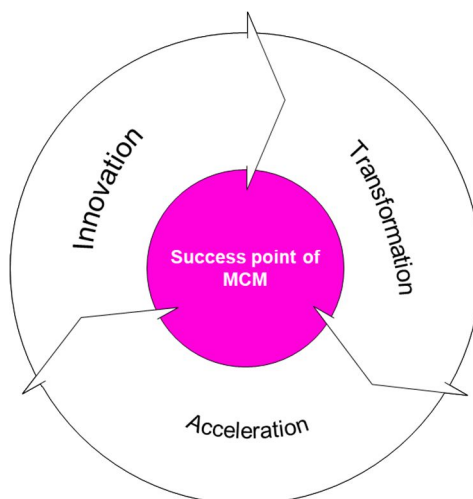


図 1 Success point of MCM 【文献】

#### <引用文献>

- Habuer, Takaoka M., Fujiwara T.: Identification and Quantification of Mercury Releases in China. Proc. the 30th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, 515-516 (2019)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Substance Flow Analysis of Mercury in China. Proc. the 6th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, 1-4 (2020)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: The Response of Anthropogenic Mercury Release in China to the Minamata Convention on Mercury: A Hypothetical Expectation. Journal of Cleaner Production 323, 129089 (2021)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Quantification of Anthropogenic Mercury Releases by Category in China in Response to Minamata Convention on Mercury. Proc. the 7th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, 1-2 (2021)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Anthropogenic Mercury Release Flow in China. Chemical Engineering Transaction, 83, 7-13 (2021)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Anthropogenic Mercury Inputs and Outputs in China in Response to the Minamata Convention on Mercury. Proc. the 32nd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, 453-454 (2021)
- Habuer, T. Fujiwara, M. Takaoka: Potential Mercury Distributions to Different Sinks in China in Response to the Minamata Convention on Mercury. 第 17 回日本 LCA 学会研究発表会論文集, 2-E2-01 (2022)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: An Expected Anthropogenic Mercury Release from Extraction and Combustion of Natural Resources in China. Proc. the 8th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, 175-176 (2022)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Developing a Dataset for the Expected Anthropogenic Mercury Release in China in Response to the Minamata Convention on Mercury. Data in Brief 42, 108280 (2022)

#### (2) ライフサイクル思考に基づく人為的活動下での水銀排出による環境影響

本研究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の導入に伴う環境への影響を定量化した。中国（文献 ）、マレーシア（文献 ）と日本（文献 ）を対象に、すべての人為的排出源からの水銀排出による環境影響（文献 ）だけでなく、個別の排出源、例えば中国における廃棄物処理部門（文献 ）及び日本におけるセメント製造部門（文献 ）の水銀排出による環境影響も明らかにした。

中国は人為的水銀排出量が最も多い国である。水銀排出により人間の健康および生態系への保全は脅かされている。水俣条約の発効以来、締約国は水銀管理対策のためにいくつかの具体的かつ効果的な行動をとらなければならない。先進的水銀除去装置(ACR)を適用することで、現行の技術(BAU)と比べて大気中の排出が 80% 削減できることが本研究（文献 ）で明らかになって

いる。さらに、人為的排出による人間と生態系への影響及び技術移転によって避けられたネガティブ影響も評価された(文献 )。しかし、これらの研究での排出物質すべてを金属水銀と仮説し評価したものを再検討する必要がある。大気圏・水圏・土壌圏での水銀存在形態は異なるため、存在形態別の評価が必要である。そこで、大気圏・水圏・土壌圏での水銀存在形態別の環境影響評価も行った(文献 - )。2019 年において、中国の廃棄物処理部門からの水銀排出は中国全体の人為的水銀排出量 15% を

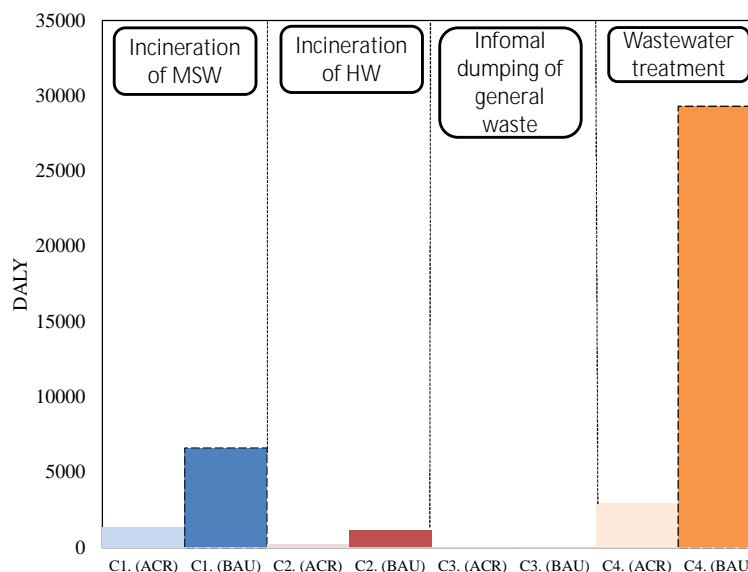


図 2 エンドポイントにおける人間健康への被害【文献 】

占め(文献 ) ネガティブ影響は主に都市ごみ (MSW) 焼却による大気中への水銀排出、そして污水处理における水と土壌への放出に起因していることが分かった(文献 )。例えば、中国の廃棄物処理部門をケーススタディとした研究では、ライフサイクル影響評価 (LCIA) における人間健康への被害指標の人為的水銀排出への適用可能性を検討した。具体的には、予想される技術革新を考慮したサブ部門ごとの水銀排出による人間健康への被害を評価した。結果として、2020 年における中国で予想される技術革新に基づく廃棄物処理部門からの水銀排出による潜在的な人間健康への被害はシナリオ BAU における下水処理により人間健康被害は最も多く (29300 DALY) 続いてシナリオ BAU における MSW 焼却による被害 (6630 DALY) であることが分かった (図 2)。インフォーマルダンプングと医療廃棄物 (HW) 焼却からのインパクトは相対的に低かった。

#### < 参考文献 >

- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Environmental Impact Analysis of Anthropogenic Mercury Releases in China. Proc. the 31st Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, 457-458 (2020)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Environmental Impact of Anthropogenic Mercury Release in China, Chemical Engineering Transactions, 89, 301-306 (2021)
- Habuer, Abdul Hamid M.N.F.b., Fujiwara T.: Life Cycle Impact Analysis of Anthropogenic Mercury Release in Malaysia, Chemical Engineering Transactions, 89, 265-270 (2021)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Life Cycle Impact Assessment on Time-series Total Mercury Release in China. Proc. the 33rd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, 509-510 (2022)
- Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.: Toxicity Potentials of Mercury Emission and Release: A Case Study in Waste Treatment Sector in China. Proc. The 34th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management, 509-510(2023)
- Habuer: Toxicity and Damage Potentials of Atmospheric Mercury Emission from the Cement Industry in Japan, Chemical Engineering Transactions, 114, under review (2024)
- 哈布尔, 藤原健史: ライフサイクル影響評価における人間健康への被害指標の人為的水銀排出への適用可能性. 第 19 回日本 LCA 学会研究発表会論文集, 2-E3-02 (2024)

#### (3) 将来の水銀排出削減シナリオの定量的評価

本研究では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いた。特にマレーシア(文献 )と中国(文献 )のシナリオごとの水銀削減ポテンシャルを評価した。マレーシアにおける人為的な水銀排出の潜在的な削減および環境負荷の軽減を、3 つの排出制御 (EC) シナリオの下で推定した。大気中に排出される水銀のほとんどは、カテゴリーC1 (採掘・燃焼) からのものである (図 3)。複合汚染物質制御措置は、社会的および経済的状况を考慮すると、利用可能な最良の技術であり、大気中の水銀排出を 80%削減できることが分かった。この措置を適用することで、EC 措置がない場合と比較して環境負荷を最大 77%削減することができ、人間の健康に対する被害は 3,730 障害調整生命年 (DALY) 減少し、これはマラリアによる健康



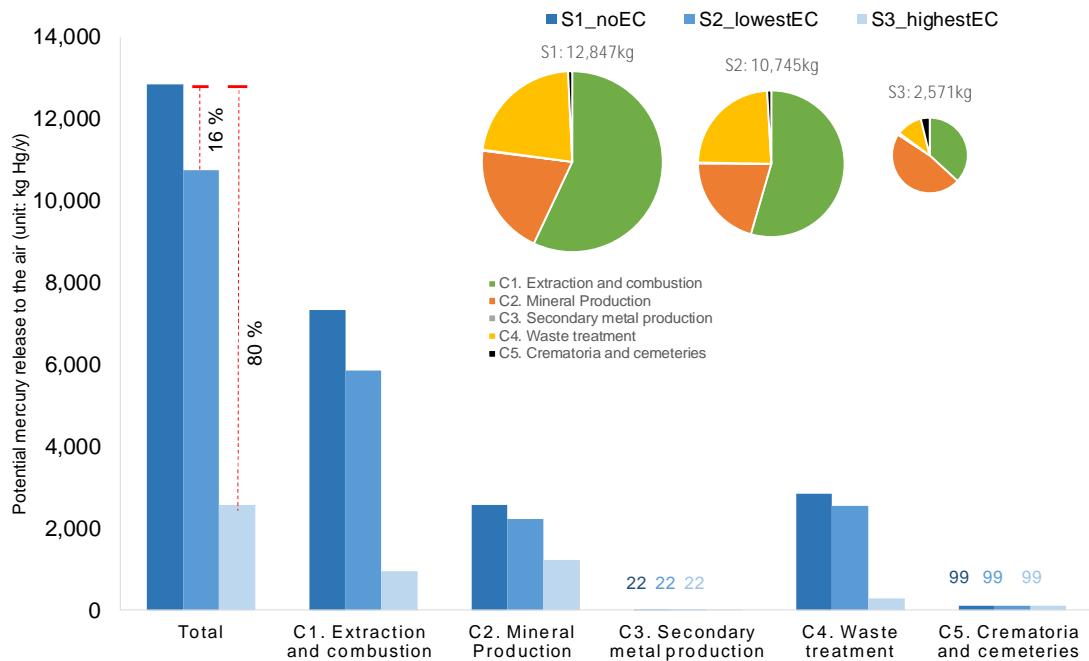


図 3 Potential mercury release to the air in Malaysia in 2019 under three scenarios (文献 )

影響の 0.011%、交通事故の影響の 0.005%に相当する(図 4)。生態系の多様性に対する被害の減少は 0.16 種/年と算定された。本研究は、水銀排出による人間の健康への環境負荷が、生態系の多様性への負荷よりもはるかに大きいことが分かった。この研究は、意思決定者がさまざまな EC 措置の使用によってもたらされる変化の大きさを把握するのに役立ち、適切な EC 措置の選択を支援する。将来の研究では、これらの EC 措置を適用するための経済的・社会的および技術的な側面からの評価が必要である。

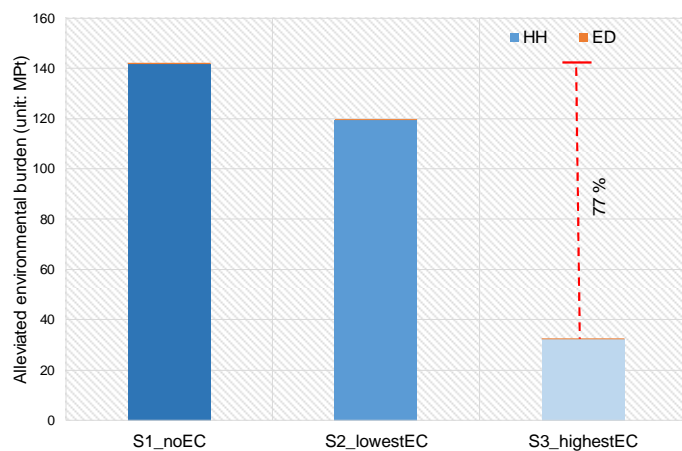


図 4 The alleviated environmental burden reflected in the damage categories human health (HH) and ecosystem diversity (ED) (文献 )

#### <引用文献>

- Habuer, Fujiwara T.: Reduction Potential of Anthropogenic Mercury Release in Malaysia, Chemical Engineering Transactions, 97, 205-210 (2022)
- Habuer, Takeshi Fujiwara, Masaki Takaoka: Managerial Implication of Mercury Release: A Case Study in Waste Treatment Sector in China. Proc. the 9th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management, 1-2 (2023)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.	4. 巻 42
2. 論文標題 Developing a Dataset for the Expected Anthropogenic Mercury Release in China in Response to the Minamata Convention on Mercury	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Data in Brief	6. 最初と最後の頁 108280
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.dib.2022.108280	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Habuer, Fujiwara T.	4. 巻 97
2. 論文標題 Reduction Potential of Anthropogenic Mercury Release in Malaysia	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Transactions	6. 最初と最後の頁 205-210
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3303/CET2297035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.	4. 巻 83
2. 論文標題 Anthropogenic Mercury Release Flow in China	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Transaction	6. 最初と最後の頁 7-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.	4. 巻 89
2. 論文標題 Environmental Impact of Anthropogenic Mercury Release in China	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Transactions	6. 最初と最後の頁 301-306
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1．著者名 Habuer, Abdul Hamid M.N.F.b., Fujiwara T.	4．巻 89
2．論文標題 Life Cycle Impact Analysis of Anthropogenic Mercury Release in Malaysia	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Chemical Engineering Transactions	6．最初と最後の頁 265-270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3303/CET218904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1．著者名 Habuer, Fujiwara T., Takaoka M.	4．巻 323
2．論文標題 The response of anthropogenic mercury release in China to the Minamata Convention on Mercury: A hypothetical expectation	5．発行年 2021年
3．雑誌名 Journal of Cleaner Production	6．最初と最後の頁 129089 ~ 129089
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jclepro.2021.129089	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 9件）

1．発表者名 哈布尔
2．発表標題 ライフサイクル影響評価における人間健康への被害指標の人為的水銀排出への適用可能性
3．学会等名 第19回日本LCA学会研究発表会
4．発表年 2024年

1．発表者名 Habuer
2．発表標題 Life Cycle Impact Assessment of Atmospheric Mercury Emission from the Cement Industry in Japan
3．学会等名 The 10th International Conference on Low Carbon Asia（国際学会）
4．発表年 2024年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 Toxicity Potentials of Mercury Emission and Release: A Case Study in Waste Treatment Sector in China
3 . 学会等名 The 34th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 Managerial Implication of Mercury Release: A Case Study in Waste Treatment Sector in China
3 . 学会等名 The 9th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management ( 国際学会 )
4 . 発表年 2023年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 An Expected Anthropogenic Mercury Release from Extraction and Combustion of Natural Resources in China
3 . 学会等名 The 8th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 Life Cycle Impact Assessment of Anthropogenic Mercury Release in China
3 . 学会等名 International Conference on Mercury as a Global Pollutant 2022 ( 国際学会 )
4 . 発表年 2022年



1．発表者名 Habuer
2．発表標題 Reduction Potential of Anthropogenic Mercury Release in Malaysia
3．学会等名 The 8th International Conference on Low Carbon Asia ( 国際学会 )
4．発表年 2022年

1．発表者名 Habuer
2．発表標題 Potential Mercury Distributions to Different Sinks in China in Response to the Minamata Convention on Mercury
3．学会等名 第17回日本LCA学会研究発表会
4．発表年 2022年

1．発表者名 Habuer
2．発表標題 Life Cycle Impact Assessment on Time-series Total Mercury Release in China
3．学会等名 The 33rd Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management
4．発表年 2022年

1．発表者名 Habuer
2．発表標題 Quantification of anthropogenic mercury releases by category in China in response to Minamata Convention on Mercury
3．学会等名 The 7th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management ( 国際学会 )
4．発表年 2021年

1 . 発表者名 Abdul Hamid M.N.F.b.
2 . 発表標題 Environmental Impact Analysis of Mercury Release in Malaysia
3 . 学会等名 The 7th 3R International Scientific Conference on Material Cycles and Waste Management ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 Environmental Impact of Anthropogenic Mercury Release in China
3 . 学会等名 The 7th International Conference on Low Carbon Asia ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 Life cycle impact analysis of anthropogenic mercury release in Malaysia
3 . 学会等名 The 7th International Conference on Low Carbon Asia ( 招待講演 ) ( 国際学会 )
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 Habuer
2 . 発表標題 Anthropogenic mercury inputs and outputs in China in response to the Minamata Convention on Mercury
3 . 学会等名 The 32th Annual Conference of Japan Society of Material Cycles and Waste Management
4 . 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 The 9th International Conference on Low Carbon Asia	開催年 2023年～2023年
---	--------------------

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------