

令和 5 年 5 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K17922

研究課題名（和文）小規模金採掘（ASGM）実施国への不適切な水銀貿易の検出法の開発

研究課題名（英文）Developing a method for detecting improper mercury trade flow into countries that have artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities

研究代表者

CHENG YINGCHAO（程英超）（CHENG, YINGCHAO）

京都大学・工学研究科・特定研究員

研究者番号：40885836

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：1995～2018年の231国・地域における水銀流通収支を算出した。39の小規模金採掘（ASGM）実施国をリスト化し、2010～2018年のASGM用途の水銀使用量を推計した。水俣条約の批准・加入状況及び国家行動計画の提出状況を収集した。

以上から、ASGM実施国を介した不適切な水銀貿易の検出・判定手法を開発し、2010～2018年のASGM実施国に適用した。一部の国・地域では不適切な貿易の存在が示唆された。成果は国際学会発表6件、国際学術論文誌2報として公表された。目的以上の成果として、国際学会の主催、水俣条約事務局および環境省への成果提供、および研究成果発信コンテンツの作成を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、本手法により不適切な水銀貿易の検出・判定が可能である。手法開発の過程でより詳細な水銀排出量を含むASGMの「採掘活動量」に関わるデータベースを使用することが可能である。また、国際学会の開催により、水銀の課題に関する議論の場を提供することが出来た。

社会的意義は、水銀流通の把握や水銀管理の改善に役立てることが可能である。また、水俣条約事務局等で作成を進める報告書への知見を提供できた。そして、水銀に関する問題や課題をわかりやすく伝える情報発信用コンテンツを作成できた。

研究成果の概要（英文）：Mercury distribution balance was calculated for 231 countries/regions from 1995 through 2018. Thirty-nine small-scale gold mining (ASGM) implementing countries were listed, and the amount of mercury used for ASGM purposes was estimated from 2010 to 2018. The status of ratification and accession to the Minamata Convention and submission of National Action Plans for those countries were collected.

Based on the above, a method to detect and determine inappropriate mercury trade through ASGM-implementing countries was developed and applied to ASGM countries in 2010-2018. The presence of inappropriate trade was suggested in some countries/regions. The results were published in six international conference presentations and two international academic journals. Beyond the objectives, we hosted an international academic conference, provided the results to the Secretariat of the Minamata Convention and the Ministry of the Environment, and created content for disseminating research results.

研究分野：環境:循環型社会システム関連

キーワード：水銀 小規模金採掘（ASGM） 水銀貿易 検出法 水俣条約

1. 研究開始当初の背景

水銀に関する水俣条約が2017年に発行され、水銀および水銀を使用した製品の製造・輸出入が禁止されたが、水銀の主用途で排出源である小規模金採掘(ASGM)の活動は規制されていない。この不整合はASGMへの水銀供給がより不適切、違法性の高い貿易により行われる土壌を生み、国際的な水銀管理を阻害する懸念がある。水銀の国際流通に対する監視の強化が必要であるが、約5000以上も分類がある貿易商品からASGMへの違法性の高い貿易を検出する方法論は存在しない。そこで本研究では、国際貿易を通じた水銀国間移動量(水銀フロー)を1995年から2018年までの時系列で同定し、ASGM実施国の水銀含有製品の輸入に関する貿易情報の不安定性(国間流通量の不一致、貿易価格の相違、時系列変化の異常、条約発行後の急激な変化)に着目した不適切な水銀貿易の検出手法を開発する。

2. 研究の目的

本研究は、ASGM実施国を介した不適切な水銀貿易の検出手法・判定手法の確立することを目的とする。この目的の達成に向けて、水銀の貿易に伴う国間移動量(水銀の国際フロー)を時系列で解明するためのモデル開発とデータ収集に取り組み、水銀の国際フローデータベースを整備する。そのデータを活用して不適切な水銀貿易の存在(有無)、関係する国・地域、貿易品目の検出と判定手法を構築し、貿易品目の中から最もASGMに転用されている可能性の高い水銀フロー(国、品目)を選出する。これらの成果をもとに、WTO(世界貿易機構)や国内財務省を含む貿易監督機関に対し、積極的に情報発信をすることで、監視や規制立案の科学的支援を目指す。

3. 研究の方法

違法な水銀の国間貿易の存在を検出するために、本研究ではASGM実施国における不適切な水銀フローの存在を検出する手法を開発した。具体的には、対象国内における水銀管理に関する国家行動計画を考慮し、ASGM活動に用いられた水銀量と国内で入手可能な水銀総量を比較した。その結果から、水俣条約発効後に水銀量の需要と供給に大きな変化がみられた対象国をスクリーニングし、不適切な水銀フローの検出手法を開発した。

ASGM活動に用いられた水銀量の推計(2010~2018年)は、以下の式で行った。

$$\text{ASGM活動に用いられた水銀量}(I) = \text{ASGMによる金生産量} \times \text{Hg:Au比}$$

まず、UNEPが報告しているGlobal Mercury Assessment (UNEP, 2019a)から、アフリカ、アジア、中南米、およびオセアニアにおいてASGM活動を行っている国を選択した。「ASGMによる金生産量」は、Metals Focus (2020)の推定値から算出した。「Hg:Au比」は、アマルガム化する際に用いられた水銀と金の比を推定したもので、本研究では主にYoshimura et al. (2021)の値を用いた。

ASGM実施国内で入手可能な水銀総量の推計(2010~2018年)は、OECDのライフサイクルアセスメントの手引き (OECD, 2008)に従い、以下の式で行った。

$$\text{ASGM実施国内で入手可能な水銀総量}(A) = \text{水銀生産量} + \text{水銀輸入量} - \text{水銀輸出量}$$

右辺の各水銀量は、水銀含有製品の量に水銀含有量を乗じて計算した(Nakajima et al., 2018)。水銀含有製品は、Base pour l'Analyse du Commerce International (BACI) database (CEPII 2017)を調査し、112品目(鉱石・化石燃料、原材料、部品・最終製品)を選定した。また、各国の入手可能な水銀総量とともに、貿易による水銀フローについても算出した。不適切な水銀フローの検出のために、以下の式で対象国jにおける水銀フローの差(G)を計算した。

$$G_j = I_j - A_j$$

$I > A$ のとき、ASGM活動に用いられた水銀量は国内で入手可能な水銀総量よりも多いことを示し、報告されている統計データに矛盾がある可能性がある。つまり、不適切な水銀フローの存在が示唆される。

各国の水銀管理状況を、以下のように評価した。水銀関連製品の貿易量は国によって異なるため、Gの結果だけでは特定の国の水銀管理状況の質や量を判断することは困難である。そこで、2010年から2018年までの平均値を用い、正規化された水銀フローの差(normG)を以下の式で算出した。

$$\text{normG} = G/A$$

閾値を 1.2 と設定し、normG > 1.2 や極端に高い場合、統計情報の不整合や水銀管理状況が適切でないと判断される。

2017 年の水俣条約発効以降における世界の水銀貿易の変化を評価するため、BACI データベース(CEPII 2017)に基づき、水銀関連製品の輸出入の貿易フローを分析した。112 種類の水銀関連商品を鉱石や化石燃料、原材料、部品/製品のいずれかのカテゴリーに分類し、2010 年から 2016 年の各カテゴリーでの平均的な水銀取引量と 2017 年の量を算出し、水俣条約が水銀の総取引量に与えた影響を評価した。また、各商品の 2017 年における変化率も算出し、最も流動性の高い商品に埋め込まれた水銀に注目し、その変化を分析した。水銀に関する世界貿易の変化は、消滅「Disappeared」、新たに登場した「Newly emerged」、著しく増加した「Significantly increased」、著しく減少した「Significantly decreased」の 4 つのカテゴリーに分類される。これらの分析を通じて、水俣条約が世界の水銀貿易に与えた影響と、水銀貿易の抑制に対する水俣条約の効果について評価した。

4. 研究成果

(1) アフリカ、アジア、中南米、オセアニアにおける ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量のギャップ

地域レベルでは、2010 年から 2018 年にかけて中南米とオセアニアにおいて ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量が同等で、毎年約 1,000 トンの水銀が消費された(図 1)。アフリカは 2016 年までは同等だったが、その後 ASGM 水銀利用量が増加し、水銀見かけ消費量が減少した。しかし、アジアは異なり、ASGM 水銀利用量は 375-530 トンで安定しており、ピークは 2011 年に発生し、水銀見かけ消費量は 2011 年に急激に減少し、その後増加した。2018 年には、アジアで 6,000 トン以上の水銀が消費された。

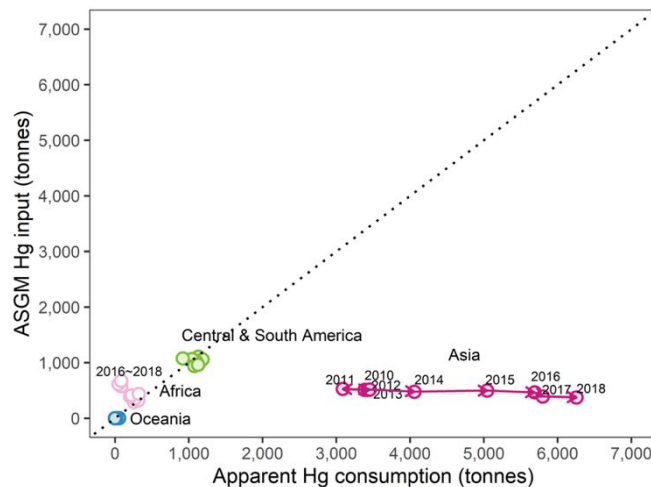


図 1. アフリカ、アジア、中南米、オセアニアにおける水銀見かけ消費量と小規模金採掘 (ASGM) 水銀利用量。

(2) 国別レベルでのギャップと水銀管理に関する措置

各地域の ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量の差は図 2 に示されている (アフリカ、一部アジア、中南米: 図 2a, b1, c)。南アフリカ共和国とコンゴ民主共和国 (DR コンゴ) のみ、ASGM 水銀利用量が水銀見かけ消費量より低いことが示された。アフリカ諸国 (DR コンゴと南アフリカを除く) の ASGM によって適用された水銀量は一般的に高く、報告されていない水銀が流入している可能性がある。アフリカ諸国は水俣条約 (Minamata Convention, MC) の締約国であり、多くの国が国家行動計画 (NAP) を提出しているが、最も大きな不整合を示したスーダンが MC の締約国ではなく、NAP も提出していない。

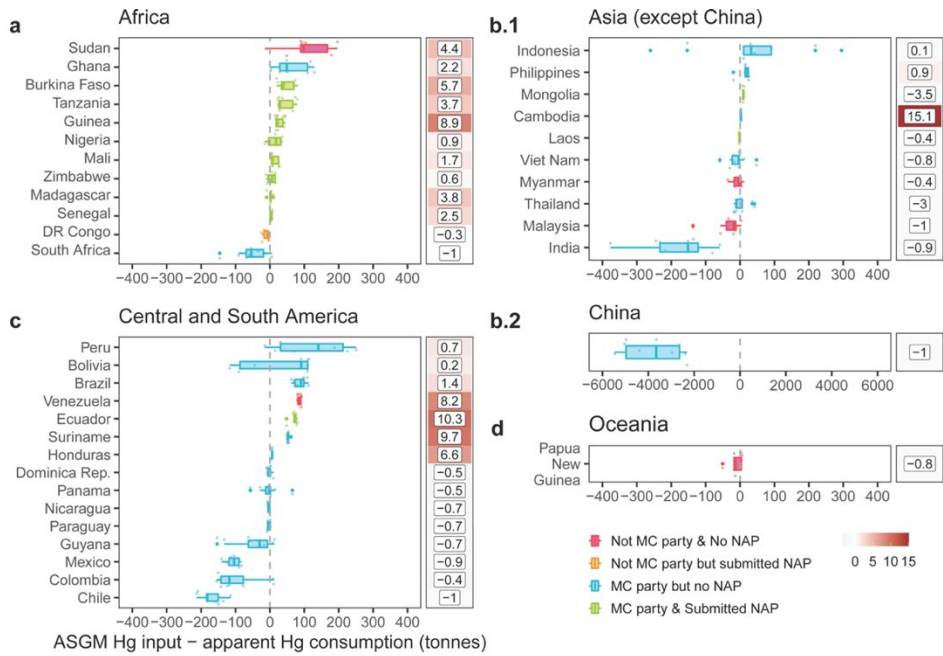


図 2 . 各国の ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量のギャップ（単位：トン）を示す。加盟国かどうか、NAP への参加に基づいて分類し、各地域の中央値に基づいて国が降順にランク付けされる。各国の箱ひげ図には、中央値に加えて、各年の ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量の差がドットで示される。各グラフ右側のカラーバーには、平均正規化ギャップ（normG）が表示される。

(3) 水俣条約発効後のグローバル貿易における水銀フローの変化

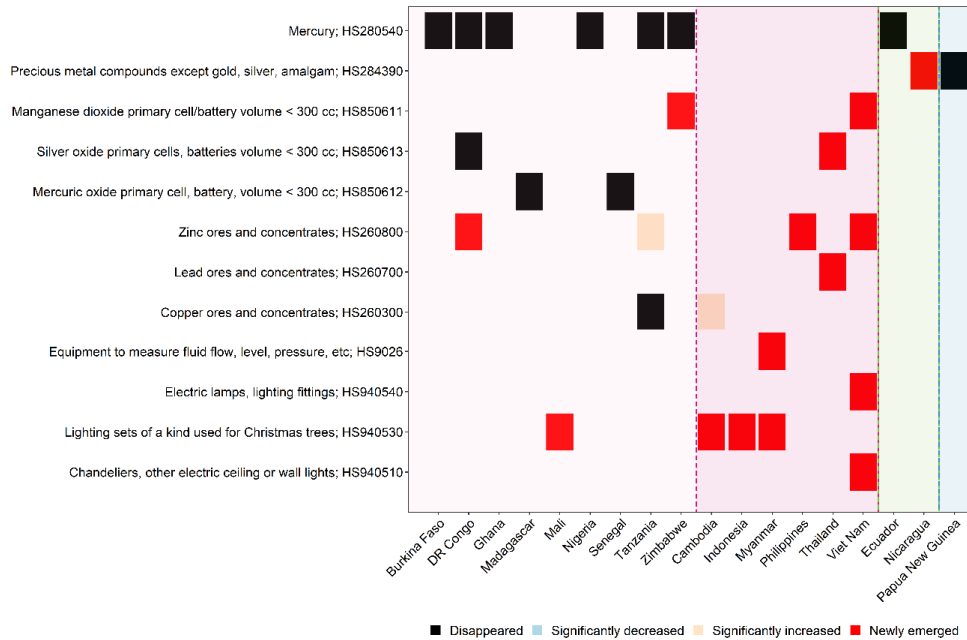


図 3 . 2010 年から 2017 年の水銀含有量が 1 ppm 以上の商品の輸入変化。商品は水銀含有量の降順に表示される。「Disappeared」は、2010 年から 2016 年までの平均量が> 0 で、2017 年に 0 に減少した商品を示す。「Significantly decreased」と「Significantly increased」の閾値は 1% と 99% のパーセンタイルで、より重要でない貿易フローを除外するため、商品に含まれる Hg の平均量の閾値は>0.1 トンに設定された。「Newly emerged」は、2010 年から 2016 年までの平均が 0 だったか、2017 年の水銀量が 2010 年から 2016 年までの平均水銀量の 5 倍以上である商品を表す。スーダンはデータがないため含まれていない。ハーモナイズドシステム（HS）コードは、世界関税機関（<http://www.wcoomd.org/>）によって示される。

ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量のギャップは、水銀の輸出入が関係している。MC 発効後、金属水銀貿易は MC 加盟国で消滅し、水銀の総量は減少する可能性がある。MC 加盟国では最終製品中の水銀の貿易フローが段階的に廃止され、鉱石や化石燃料は MC に含まれない。MC 発効後、

水銀含有量が1ppm以上の商品の貿易フローは大きく変化し、アフリカの6つの国とエクアドル、パプアニューギニアから金属水銀の輸入が消滅した。しかし、アジアでは新たな貿易フローが生じ、輸出においても変化が見られた。

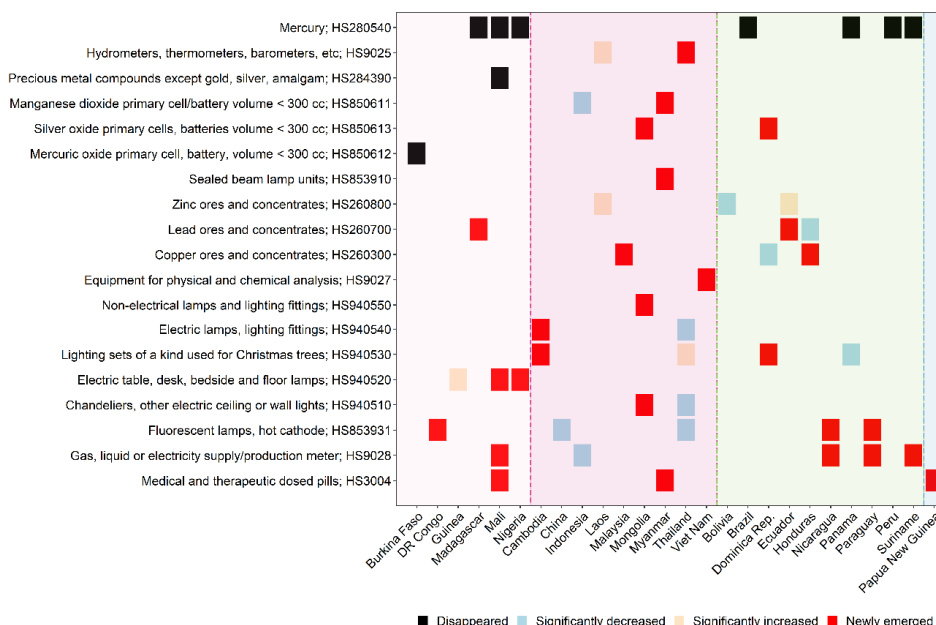


図4. 2010年から2017年のデータに基づく、水銀含有量が1 ppm以上の商品の輸出変化。

・地域レベルでの不整合

ASGM 水銀利用量と水銀見かけ消費量のギャップにより、地域ごとの水銀取引データに不整合があることがわかった。中南米やアフリカでも同様の不整合が報告され、報告漏れや商品の誤表示、密輸などが原因とされる。これらの問題はグローバルな水銀管理を妨げる可能性がある。また、フィリピン、ドイツ、メキシコなどでも不適切な水銀取引が報告されており、非公式な貿易フローは貿易統計に含まれないため、ASGM 国で広く存在する可能性がある。短期的に水銀使用が減少すると、報告漏れやデータの誤報告が増えることが示唆される。

・国レベルにおける不整合と水銀管理の脆弱性

各国のギャップの原因は、水銀生産量や ASGM 活動による需要、グローバルな水銀貿易、水銀管理・制御に依存する。現在、MC に加盟、受諾、承認、または加盟している国は 137 개국であり、18 개국が NAP を提出している。ASGM 活動を行っている 80 개국のうち、39 개국が調査され、33 개국が MC の加盟国であり、12 개국が NAP を提出している。水銀需要が減少しない限り、MC 加盟国であるアーティザナルマイニングの国々に水銀が流れることが少なくなるため、2017 年に特定したギャップはさらに広がる可能性がある。塩化ビニルの製造における水銀需要と ASGM 業界における水銀需要は、継続的な問題であることが示されている。

・水俣条約による水銀関連の貿易流の管理の効果

MC は水銀貿易を変え、水銀管理の効果を示した。NAP を提出した国では金属水銀の取引が消滅したが、アジアでは水銀貿易が続いていた。水銀添加製品の製造と貿易の停止だけでなく、効率的な水銀排出制御と NAP の実行も必要である。処理技術の改善も必要で、使用済み電池、ランプ、腕時計の回収、水銀を含む廃棄物の処理およびリサイクルが必要である。MC は水銀管理の出発点であり、鉱石や化石燃料中の水銀の流れも考慮する必要がある。

・データ不整合検出の重要性

本研究では、ASGM 実施国における水銀データの不整合を検出する方法を確立した。利用可能な水銀の最大量を比較基準として使用し、すべてのルートからの水銀が関与しているため、誤った、不法な、違法な取引流を含む。この方法により、水銀管理におけるリスクが高い国を検出し、監視と具体的な措置を適用することができる。データの不整合を監視することにより、規制が必要な国の範囲を狭めることができ、非公式な取引や不法な取引の存在を特定することができる。また、貿易データの変化やその理由を分析することにより、潜在的に問題のある取引流を特定し、特定の地域、国、および商品に対して水銀管理問題を洗練させることができる。

1.Cheng, Y.et al.(2022). Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity. *Resour Conserv Recycl*, 185,106461; 2.Cheng, Y. et al.(2023). A review of gold production, mercury consumption and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM). *Resour. Policy*

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Cheng Yingchao, Nakajima Kenichi, Nansai Keisuke, Seccatore Jacopo, Veiga Marcello M., Takaoka Masaki	4. 巻 185
2. 論文標題 Examining the inconsistency of mercury flow in post-Minamata Convention global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 106461 ~ 106461
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2022.106461	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 該当する

1. 著者名 Cheng Yingchao, Watari Takuma, Seccatore Jacopo, Nakajima Kenichi, Nansai Keisuke, Takaoka Masaki	4. 巻 81
2. 論文標題 A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Resources Policy	6. 最初と最後の頁 103370 ~ 103370
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resourpol.2023.103370	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 該当する

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Cheng Y., Nakajima K., Nansai K.
2. 発表標題 Global mercury trade and use for artisanal and small-scale gold mining (ASGM)
3. 学会等名 International Industrial Ecology Day 2021 (2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Cheng Y., Nakajima K., Nansai K., Jacopo S.
2. 発表標題 Detection of improper mercury flow to countries with artisanal and small-scale gold mining (ASGM) activities
3. 学会等名 icRS 2021 International Conference on Resource Sustainability (Virtual) (2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年 ~ 2022年

1. 発表者名 Cheng Y., Nakajima K., Nansai K.
2. 発表標題 Evaluation of improper mercury trade flow to the artisanal and small-scale gold mining (ASGM) sector
3. 学会等名 World Resources Forum (2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 Cheng, Y., Watari, T., Nakajima, K., Nansai, K.; Seccatore, J., Veiga M.M.
2. 発表標題 Gold production and mercury consumption from artisanal and small-scale mining
3. 学会等名 EcoBalance 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Cheng, Y., Nakajima, K., Nansai, K., Seccatore, J., Veiga, M.M., Takaoka, M.
2. 発表標題 Inconsistencies of mercury flow in global trade concerning artisanal and small-scale gold mining activity
3. 学会等名 Partner Event of EcoBalance 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Cheng, Y., Watari, T., Seccatore, J., Nakajima, K., Nansai, K.
2. 発表標題 A Comprehensive Review on Gold Production, Mercury Consumption and Emission in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)
3. 学会等名 ICMGP Mercury as a global pollutant (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 程英超, 中島謙一
2. 発表標題 黄金の輝きの影 - 金の採掘と水銀の不適切な流通
3. 学会等名 国立環境研究所公開シンポジウム2022
4. 発表年 2022年～2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>サイエンスアニメーション New Method for Evaluating Illegal and Informal Mercury Trading https://mfi.nies.go.jp/movie/NIESN_1_13_Video_Aug_23_2022.mp4</p> <p>Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining https://www.ecobalanceconference.org/conference/2022/pdf/Hglegacy_20220908_1.pdf</p> <p>零細および小規模金採掘における水銀に関する国際的な情報交換を行うイベント開催について（報告） https://www.nies.go.jp/whatsnew/20221129/20221129.html</p> <p>Report of an event for international information exchange concerning artisanal and small-scale gold mining (ASGM) https://www.nies.go.jp/whatsnew/20221129-e/20221129-e.html</p>

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
研究協力者	中島 謙一 (Nakajima Kenichi)		
研究協力者	南齋 規介 (Nansai Keisuke)		
研究協力者	布施 正暁 (Fuse Masaaki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	高岡 昌輝 (Takaoka Masaki)		

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 Partner Event of EcoBalance 2022: Mercury Legacy in Artisanal and Small-Scale Gold Mining	開催年 2022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			
チリ	Adolfo Ibanez University			
カナダ	University of British Columbia			