

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 4 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2012

課題番号：22404013

研究課題名（和文） インドネシアの金採掘が盛んな地域における水銀汚染の実態調査

研究課題名（英文） Investigation of Mercury Contamination in the Intensive Artisanal and Small-scale Gold Mining Area in Indonesia

研究代表者

井上 隆信 (INOUE TAKANOBU)

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00184755

研究成果の概要（和文）：

インドネシアで小規模な金採掘が盛んな 9 州 10 地区で調査を実施した。この中で、中央スラウェシ州のパル市のポボヤ地区が、水銀汚染の影響が最も懸念される地区であったため、重点的に調査を実施した。大気中の水銀濃度は高濃度であり、水銀排水が流入するパル湾は漁業が盛んであることから、住民の健康影響が懸念される状況であった。中央カリマンタン州の湖で実施したコアサンプル中の年代測定と水銀濃度の関係から、1983 年以降水銀濃度が上昇していることが分かった。また、年間の総排出量は、UNEP(国連環境計画)公表されている値よりも非常に多いと推計できた。

研究成果の概要（英文）：

Mercury contamination caused by Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM) was investigated at 10 districts in 9 provinces of Indonesia, in which small scale gold mining activities have conducted intensively. Investigation was carried out at Pobaya mining area in Palu city of Central Sulawesi province because Pobaya mining area was thought to be the worst contaminated area due to the concentrated mining facilities. The health of the people was at risk because of extremely high concentration of gaseous mercury in addition to the fishery activities in the Palu bay into which waste water contaminated by mercury from ASGM flew. The dating of the core samples of the sediments obtained from a lake in the central Kalimantan revealed that the mercury contamination in the sediments had increased since 1983. The total amount of mercury emission to the environment estimated was much larger than that reported by UNEP

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011 年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2012 年度	3,700,000	1,110,000	4,810,000
年度			
年度			
総計	13,000,000	3,900,000	16,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木環境システム

キーワード：水銀、環境汚染、インドネシア、小規模金採掘、

1. 研究開始当初の背景

国連環境計画 (UNEP) は 2005 年に水銀に

関する Decision 23/9IV を採択し、各国政府機関ならびに NGO 等関連組織に対して環境へ

の水銀放出量と健康リスクの削減を求めた。しかしながら、インドネシアでは、河川底質や岩石中の金採掘が活発に行われている。採取した金は、水銀を用いてアマルガムを形成させた後、熱して水銀を蒸発させることで精製している。この精製時に、水銀は処理されることなく大気中に放出され、かつ、高濃度の水銀排水も直接河川に排出されている。今までのインドネシアカリマンタン島の中央カリマンタン州での研究により、底質、河川水、魚等から比較的高濃度の水銀が検出されており、このまま水銀の大気や水系への排出が続けば、生態濃縮を経た食物への蓄積、ひいては住民の健康影響が懸念される状況を明らかにしてきた。一方、この研究の実施過程で中央カリマンタン州以外にもインドネシアでは金採掘が盛んな地域が多数存在していることがわかり、インドネシアの各地の大学から調査の要望が寄せられている。これらのことから、インドネシアの他の水銀汚染が懸念される地域において、大気、水系の水銀濃度を調査し、早急に結果を出す必要がある。

2. 研究の目的

インドネシアでは金採掘に伴い多量の水銀が使用されている。中央カリマンタン州とともに金採掘が活発なアチェ州、西カリマンタン州、北スラウェシ州、中央スラウェシ州等において、インドネシアの工科系でトップのBandung 工科大と地元の大学の協力のもとに大気・河川水、底質、魚試料の水銀濃度を測定し、環境中の動態解析調査を実施する。これらの結果をもとに、地域住民の健康への影響が懸念される状況であるかどうかについて結果を出し、懸念される場合は、各地の大学を通して地方政府に働きかけを行う。また、地球規模での海洋の水銀蓄積や越境大気汚染としての水銀が注目されているが、これら金採掘が活発な地域からの大気及び海洋への水銀排出負荷量を推計する。

3. 研究の方法

インドネシアの各大学からの地域の情報や統計資料から金採掘の盛んな地域を抽出して、大気、河川水、底質、魚試料の水銀濃度の実態調査を広範囲に実施し、水銀汚染が懸念される流域を抽出する。抽出した流域において、2011年度から詳細な環境中の水銀動態解析調査を実施するとともに、三日月湖で底質のコアサンプルを採取し汚染の履歴を明らかにする。また、環境中での水銀の分布から主な移動経路を明らかにし、移動量を推計する。

4. 研究成果

調査は、継続して実施している中央カリマ

ンタン州タカラシ地区、マカウイ地区の他、アチェ州チャランジャ地区(2010年7月29-30日)、ブンクル州ラボン地区(2011年3月6-8日)、西カリマンタン州ガバン地区(2011年3月11-12日)、北スラウェシ州タラワン地区とボランマンゴンドウ地区(2011年10月31日-11月2日)、中央スラウェシ州パル市ポボヤ地区(2010年8月2-4日、10月28-29日)、パプア州ティミカ地区(2011年9月19-23日)、南東スラウェシ州ボンバナ地区(2012年9月23-26日)の8州10地区で実施した。ポボヤ地区については、2011年、2012年度も数回調査を実施している。

タカラシ地区、ガバン地区では、河川の底泥をポンプでくみ上げ樋上を流下させることにより、比重の大きい金を樋にひいたムシロにひっかけることにより選別をしている(図1)。その後、パンを用いてさらに比重による選別を進めた後、水銀を添加し、金をアマルガムとして抽出している。マカウイ地区、チャランジャ地区、ラボン地区、タラワン地区、ボランマンゴンドウ地区、ポボヤ地区、ボンバナ地区では、現地でゴロンドンと呼ばれる回転ドラムに金鉱石を、水と水銀とともに投入し、金鉱石を粉碎しながら抽出を行っている(図2)。比重による選別を行わず金鉱石全量に水銀を加えるため水銀の使用量が多い。ティミカでは、上流にある金の精錬会社 Freeport 社からの排水中に含まれる金が河川敷に堆積しており、住民は簡易な樋を使って比重選別を行っている(図3)。その後砂



図1 タカラシの砂金採取



図2 ゴロンドンを用いた金鉱石からの金の採取



図3 ティミカ地区における砂金の採取

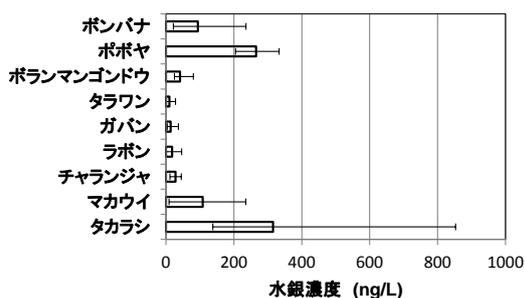


図4 調査地区の河川水中の平均濃度と最小値、最大値

金を街の中心部にあるゴールドショップと呼ばれる精錬所に持込み水銀による精錬を行っていた。いずれのプロセスでも最終的には金とアマルガムを形成した水銀をバーナーで加熱し大気に水銀を蒸発させることによって精錬を行う。なお、ティミカ地区では、河川も Freeport 社の敷地内であり、河川水の採水許可が下りずに、調査ができなかった。

図4には、各地区の河川水中の水銀濃度の平均値を最小値、最大値とともに示した。タカラシ地区、次いでポボヤ地区で高濃度であった。日本の環境基準は 500ng/L、インドネシアの環境基準は 1000ng/L であり、河川水の濃度はインドネシアの環境基準以下であった。ただし、排水が流入する小河川では、ボンバナ地区では 7400ng/L の濃度を観測する等各地で高濃度であった。

パル市のポボヤ地区の排水は全てパル湾に流入しており、パル湾は閉鎖的な湾で漁業が盛んに行われている。パル湾の魚中の濃度は、最高値が 0.22mg/kg であり、分析した3種類 21 個体中 2 個体で 0.2mg/kg 以上であった。EPA の摂食の目安が 0.3mg/kg であり、これよりは低いものの湾内へ水銀が蓄積されている現状から考えて懸念される状況であった。

精錬の最終段階では、金と水銀のアマルガムをバーナーで熱して水銀を蒸発させている。このため、大気中の水銀濃度が高くなる。

表1 大気中の水銀濃度

地点	大気中水銀濃度 (ng/m ³)
タカラシ	730
マカウイ	34,000
ラボン	1,740
ポボヤ	47,000
タラワン	2,600
ティミカ	11

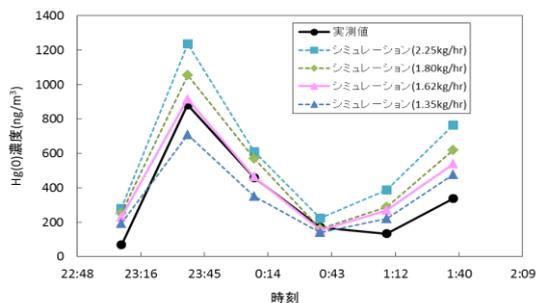


図5 2012年4月29～30日のHg(0)放出量の違いによるHg(0)濃度の変化

大気中の Hg(0)濃度を独自に開発したパッシブサンプラーとアクティブサンプラーを使って多点同時測定を行った。各地点の大気中の水銀濃度の最大値は表1のようであった。このように、WHO のガイドラインである 1,000ng/m³を超える高い Hg(0)がいくつかの地点で観測された。特に金鉱石全量に対して水銀を添加するゴロンドンを用いるプロセスでは周辺の濃度が高かった。大気中 Hg(0)濃度が高かったインドネシア中央スラウェシ州ポボヤ地区が含まれるパル市では、水銀モニターを設置し、水銀濃度の連続測定を実施した。

次に流体解析ソフトウェア Phoenics を使用し水銀の拡散シミュレーションを行うことによって、大気への水銀放出量の推定を行った。水銀の放出量を変化させながら、実測の経時変化を再現した結果の一例を図5に示す。この例では 1.62kg/h の放出量を与えると実測値によく合った。また、空間分布に関しても良く再現することができた。時間帯によって風向、風速が異なり、操業形態も異なるので、一日を5つの時間区分に分け、それぞれの時間帯に異なる放出量を与えることによって年間の水銀放出量を推定した。この計算結果から、Palu 市では年間約 53 トンもの水銀が大気中へ放出されていると推定された。

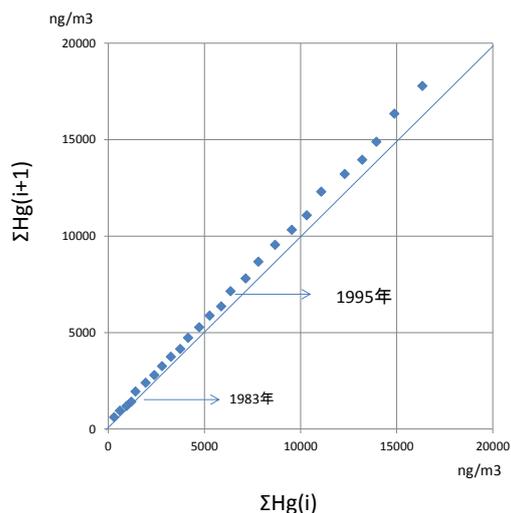


図 6 Tilap 湖堆積物中の水銀沈着量推移解析曲線

中央カリマンタン州のタカラシ地区の河川が流入するルンガン川流域の湖沼 (Tilap 湖) において、堆積物のコア試料中の水銀濃度の累積値 $\Sigma\text{Hg}(i)$ と $\Sigma\text{Hg}(i+1)$ を X 軸、Y 軸に分布させる。深度毎すなわち年度毎の沈着量に変化がなければ $y = x$ の直線状を推移するが沈着量が増加すればこのラインからずれていく。このことを利用して金採掘による汚染史の解明を行った。その結果を図 6 に示した。金採掘による水銀汚染が激しくなるのは、1995 年くらいからであるが、この流域で小規模金採掘が始まったのは、1983 年頃と推定された。

Tilap 湖の魚類の水銀濃度については、中型の肉食魚である Tapah と Baug は、日本の魚類の摂取に関する厚労省の勧告で規定されている濃度 (0.4mg/kg) と同程度であり、カジキやマグロに匹敵するものである。中央カリマンタン州では大部分の住民が河川のそばで生活しており、主要な蛋白源はこれら淡水魚から摂取している。その摂取回数は週に 1 回以上であり、その結果は毛髪中水銀濃度として表れており、平均で 6.4g/kg、中には 94g/kg という高濃度の女性も存在した。

次に Tilap 湖の魚類中の水銀濃度の計測値と周辺住民の毛髪濃度から水銀暴露によるリスクを計算した。水銀暴露によるヒトへのリスクについては、まず最初にハザード比 (HQ) を用いて評価した。魚類の 1 日摂取量は 100g とした。その結果、Tilap 湖で取れた魚の 5 種のうち 3 種が $\text{HQ} > 1$ でリスクありの範疇にはいった。この 3 種のうち最も HQ 比の高かった Baug を用いて水銀暴露による重篤な症状の発症率を推定した。中央カリマンタンの漁民を想定し、Baug を毎日 200g、1 年間摂取するというシナリオで計算すると発

症率は 1000 人に 1 人という非常に高い確率になった。

2013 年の秋には、水銀に関する条約の採択・署名のための外交会議が開催される。この条約では、「小規模金採掘 (ASGM) が実施されている締約国はその使用や環境中への放出を削減、可能であれば廃絶するための行動を行う。」とされている。インドネシアの小規模金採掘においても、条約に基づき、速やかに対策を構築し、環境中の水銀濃度を削減していく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Serikawa Yuka, Rosana Elvince, Kawakami Tomonori, Kunori Noriyasu, Noto Yuji, Inoue Takanobu, Nagafuchi Osamu, Miyake Takayuki, Mercury Contamination in the Atmosphere of Aceh Province, Indonesia, 査読有, Journal of Ecotechnology Research, 17, 2013, (印刷中)
- ② 芹川裕加, 川上智規, 渡辺幸一, 山岳地における降水中水銀の測定法と水銀と同期するカルシウムや硫酸の長距離輸送、査読有、土木学会論文集 G(環境)、48 巻、2012、735-740
- ③ 井上隆信、水銀の広域汚染-インドネシアを中心として-、査読無、環境技術、2012、402-407
- ④ 芹川裕加, 川上智規, Basir Cyio, Istrun Nur, Rosana Elvince, 井上隆信、インドネシア中央スラウェシ州 Palu 市における金精錬所からの大気への水銀の放出と拡散、査読有、環境科学会誌、24 巻、2011、269-274
- ⑤ Iqbal Rofiq and Inoue Takanobu, Mercury Pollution in Java Island: Past and Present, 査読有, Journal of Ecotechnology Research, 16, 2011, 51-57

[学会発表] (計 19 件)

- ① Kawakami Tomonori, Serikawa Yuka, Motoyama Ayuri, Inoue Takanobu, Nagafuchi Osamu, Rosana Elvince, Spatial Distribution of Gaseous Mercury in the Atmosphere around Artisanal Small-Scale Gold Mining in Indonesia, AGENDA FIRST ANNUAL MEETING ALPI, 2012 年 8 月 31 日、インドネシア バンドン
- ② 木下弾, 永淵修, 菱田尚子, 尾坂兼一, 三宅隆之, Rosana Elvince, 井上隆信, 川上智規、環境中水銀の生態系への濃縮とその評価、第 46 回水環境学会年会、2012 年 3 月 16 日、東京

③ Serikawa Yuka, Inoue Takanobu, Kawakami Tomonori, Cyio Basir, Nur Isrun, Elvince Rosana, Emission and Dispersion of Gaseous Mercury from Artisanal Small-Scale Gold Mining Plants in the Poboya Area of Palu City, Central Sulawesi, Indonesia, 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, 2011年7月28日、カナダ ハリファックス

④ Elvince Rosana, Inoue Takanobu, Kawakami Tomonori, Nagafuchi Osamu, A Study Comparison of Mercury Pollution in Indonesia, 第45回日本水環境学会年会, 2011年3月19日、札幌市

⑤木下弾、永淵修、Rosana Elvince、井上隆信、川上智規、Ardianor、インドネシア中央カリマンタンにおける住民の毛髪中水銀濃度と魚介類摂取量の関係とリスク評価、第45回日本水環境学会年会, 2011年3月18日、札幌市

⑥R. Elvince, T. Inoue, Ardianor, S. Gumiri, S. Dohaong, T.Kawakami, O. Nagafuchi, Y. Komai, Mercury pollution in Katigan River and its tributaries associated with gold mining activity in Central Kalimantan, Indonesia, IWA World World Water Congress and Exhibition, 2010年9月20日、カナダ モントリオール

⑦R. Elvince, T. Inoue, K. Yokota, Ardianor, S. Gumiri, S. Dohaong, T.Kawakami, O. Nagafuchi, Mercury Investigation in river

water and sediment from Barito River, Central Kalimantan, Indonesia, 14th IWA international specialist conference on diffuse pollution, 2010年9月13日、カナダ ケベック

[その他]
ホームページ等
なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

井上 隆信 (INOUE TAKANOBU)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：00184755

(2)研究分担者

永淵 修 (NAGAFUCHI OSAMU)
滋賀県立大学・環境科学部・教授
研究者番号：30383483
川上 智規 (KAWAKAMI TOMONORI)
富山県立大学・工学部・教授
研究者番号：10249146
横田 久里子 (YOKOTA KURIKO)
豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：60383486

(3)連携研究者

なし