様式Ｆ－１９

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 30 日現在

機関番号：２３２０１
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2011～2012
課題番号：２３７１００１６
研究課題名（和文）　インドネシアにおける金精錬所から多量に発生する水銀の大気拡散と住民の暴露
研究課題名（英文）　Estimation of mercury emission from small-scale gold mining in Indonesia
研究代表者
芹川 裕加　（SERIKAWA YUKA）
富山県立大学・工学部・研究員
研究者番号：５０５９８９７７

研究成果の概要（和文）：
インドネシア中央スラウェシ州パル市では日中と夜間で風向きが変わり、金精錬所の風下に当たる地点で水銀濃度が高くなっていた。この水銀の実測値と気象データを用いて大気拡散シミュレーションを実施したところ実測値とほぼ同様な空間分布を再現することができた。この結果、年間約 53 トンもの水銀が金精錬所から大気中へ放出されていると推測された。パル市では年間約 180 トンもの水銀が水系や土壌、大気等の環境中へ排出されていると見積もられているが、そのうちの約 30%が大気に放出されていると推算された。

研究成果の概要（英文）：
In Palu City, Central Sulawesi, Indonesia, the wind direction alters in the nighttime and in the daytime every day. High concentration of gaseous mercury was observed at the leeward. According to the atmospheric dispersion model, the emission of gaseous mercury from the artisanal and small-scale gold mining (ASGM) in Palu city to the atmosphere was estimated to be 53 tons per year. Although it has been reported that in the ASGM of Palu city 180 tons of mercury per year is released into environment, such as river, soil and atmosphere, about 30% of them is emitted into the atmosphere.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2011 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：複合新領域
科研費の分科・細目：環境学・環境動態解析
キーワード：水銀、シミュレーション、金精錬、インドネシア

１．研究開始当初の背景

インドネシアでは金の採取と精錬に伴い、大量の水銀が使用されている。中央スラウェシ州パル市の北東に位置する Poboya と呼ばれる小規模な金精錬所が集中している地区では年間約 180 トンもの水銀が水系や土壌、大気等の環境中へ処理されることなく排出されていると見積もられている。このように金精錬所の存在は近隣住民に健康被害を生じかねない状況であるにもかかわらず、これまでに周辺地域の大気中水銀の現状は把握されてこなかった。

２．研究の目的

そこで本研究では、中央スラウェシ州パル市の金精錬所周辺において大気中水銀濃度を測定し周辺地域の水銀濃度の把握を行い、さらに、このある時点の水銀実測値と気象デ

ータをもとに大気拡散シミュレーションを実施することにより金精錬所から大気への水銀放出量を推定することを目的とした。また、金精錬所の増加に伴う水銀濃度の将来予測も実施し住民への健康影響も推定した。

３．研究の方法

（１）大気中水銀濃度の実測値の取得

2011 年 10 月 23～24 日金精錬所（Poboya 地区）周辺の 13 地点に、当研究室で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 24 時間設置し、大気中水銀濃度の空間分布を求めた。測定地点は図１の A～L 地点である。さらに水銀濃度を連続で測定する水銀モニター（日本サーモ UT-3000）を 2012 年 4 月 22 日～5 月 7 日に Tadulako 大学に設置し、約 10 分毎にデータを取得することで水銀の経時変化を求めた。また、Tadulako 大学において風向と風速の測定を行った。測定には Onset 社製の風向と風速のスマートセンサーを使用しマイクロステーションロガーに接続しデータを記録した。

（２）大気拡散シミュレーション

流体解析ソフトウエア Phoenics（英国 CHAM 社）を使用し、Poboya 地区から放出される水銀量を水銀濃度の実測値と気象データから推算した。本解析では 3 次元直交座標系を用い、X 方向を東西に 14km、Y 方向を南北に 18km、Z 方向を高度 5km として解析を行った。X、Y 方向は図 1 に示した範囲を解析領域として設定した。水銀の発生源は（X, Y, Z）＝（8.2km, 6.6km, 150m）地点からそれぞれ X 方向に 1km、Y 方向に 1km の広がりをもつ正方形として仮定し、その面積は 1.0km^2 を擁しているとした。そして、水銀は大気中に 0.1m/s のスピードで Z 方向（鉛直上向き）に放出されていると仮定して計算を行った。さらに X-Y 面は実際の標高を基に凹凸をつけた。定常状態において質量保存方程式と運動方程式に基づき、乱流モデルには標準 KE-EP モデルを使用し計算を行った。なお、温度は 25℃で一定とし、計算格子数は約 63,100 である。

４．研究成果

（１）大気中水銀濃度の実測値

2011 年 10 月 23～24 日にパッシブサンプラーにより測定した大気中水銀濃度の結果を図１に示す。北を 0 度とすると Poboya 地区から約 140 度の St.K と約 320 度の St.D の方向において水銀濃度が高くなった。パル市の風は日中（北西から）と夜間（南東から）で風向きが変わり、それぞれの風下に当たる地点で水銀濃度が高くなっていると考えられる。

また、Tadulako 大学に設置した水銀モニターの結果では図２に示すように Poboya 地区の方角（約 150 度）から風が吹く夜間には水銀濃度が最高 1,630ng/m^3 と高い値を観測した。一方、風向きが逆である日中は平均 4.6ng/m^3 と夜間の 1/350 程度の低い水銀濃度であった。なお、汚染のない地域の大気中水銀濃度は 1～3ng/m^3 と報告されている。

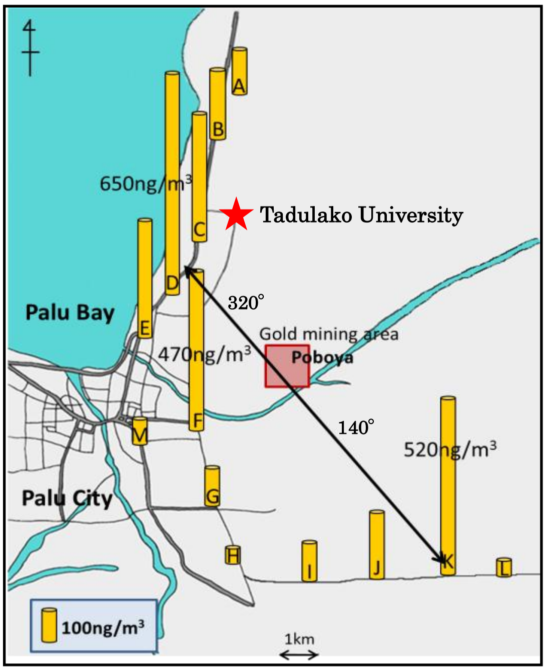

図１　パル市における水銀の空間分布

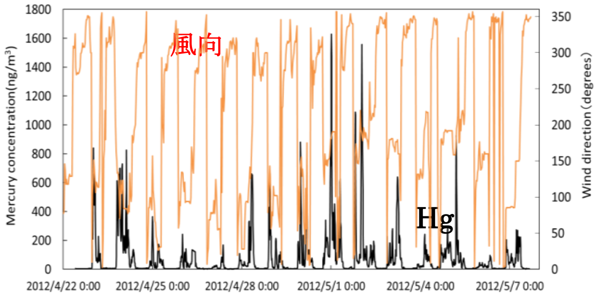

図２　Tadulako 大学における水銀濃度と風向

（２）大気拡散シミュレーション

パッシブサンプラーでは 24 時間の平均濃度が得られるが、パル市では風向が日中と夜間で明瞭に異なり風上側にはほとんど水銀が拡散しない。このことから、図１に示した測定地点 I、J、K、L においてはパッシブサンプラーで得られた水銀濃度は主に北西から風が吹く日中の濃度を反映していると考えられる。そこで日中（09:20～20:20）の平均風向、平均風速のデータを Phoenics に入力し Poboya 地区からの水銀放出量（1 時間当

たり 3.60kg、4.50kg、7.20kg、8.10kg)、を変化させて各地点における水銀濃度を求めた。パッシブサンプラーを設置した 24 時間中 11 時間が日中の風向であり、他の 13 時間は水銀濃度が 0ng/m^3 として濃度換算を行った。その結果、水銀放出量を 7.20kg/hr と仮定した時が最も実測値と一致していた。

また夜間（20:20～9:20）については表 1 に示す 4 つの時間区分（20:20～23:30、23:30～05:00、05:00～07:00、07:00～09:20）それぞれにおいて計算を行い、各測定地点（St.A～H）の水銀濃度を図 3 に示す実測値と一致するように水銀の放出量を変化させた。そして 24 時間の内それぞれの風が吹いていた時間の割合から夜間の平均濃度を求めた。その結果、それぞれの時間帯における水銀放出量を表 1 に示す値と仮定すると、図 3 に示すようにパッシブサンプラーの実測値と各測定地点の水銀濃度の推算値はほぼ一致した。この 10 月 23～24 日の水銀放出量が 1 年間続いたと仮定すれば、Poboya 地区からの大気への水銀放出量は年間約 53 トンにも上る。Poboya 地区で年間 180 トンもの水銀が水系や土壌、大気などの環境中へ排出されていると見積もられているが、そのうちの 30%が大気へ排出されていることになる。

今後さらに金精錬活動が活発化した場合水銀放出量が増加するとことが予想される。そこで水銀放出量が増加した場合の将来予測として大気中水銀濃度の推定を行った。

水銀放出量が 2.25kg/hr から 3.60kg/hr に増えた場合は Tadulako 大学で観測される水銀濃度の推定値は風向が 151.4 度、風速が 1.30m/s の時には約 900 ng/m^3 から 1,400 ng/m^3 と 500 ng/m^3 以上増加するとことが予想される。このときの拡散状況の比較を図 4 に示す。標高 90m における水銀濃度の比較であり、茶色の部分は標高 90m 以上の地点を表す。1,000 ng/m^3 を超える地点がより広範囲に広がっている。さらに、風向 318.8 度、風速 2.60m/s の時に水銀放出量が 7.2 kg/hr から 8.1kg/hr に増えた場合は図 1 の K 地点

表 1　それぞれの時間帯における水銀放出量

	平均風速 (m/s)	平均風向 (度)	水銀放出量 (kg/hr)
10/23 09:20-10/23 20:20	2.60	318.8	7.2
10/23 20:20-10/23 23:30	1.07	124.6	6.3
10/23 23:30-10/24 05:00	0.51	64.6	4.5
10/24 05:00-10/24 07:00	0.62	124.1	3.6
10/24 07:00-10/24 09:20	1.75	143.8	6.3

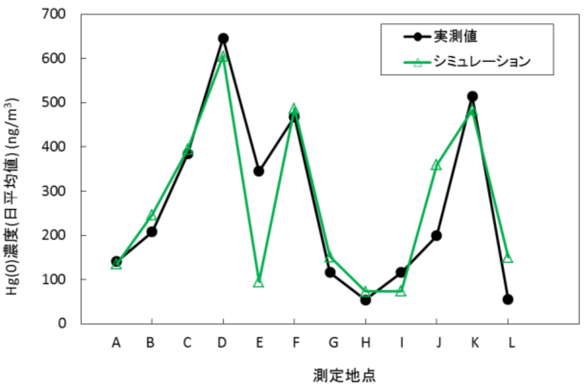

図 3　パッシブサンプラーによる実測値とシミュレーション結果

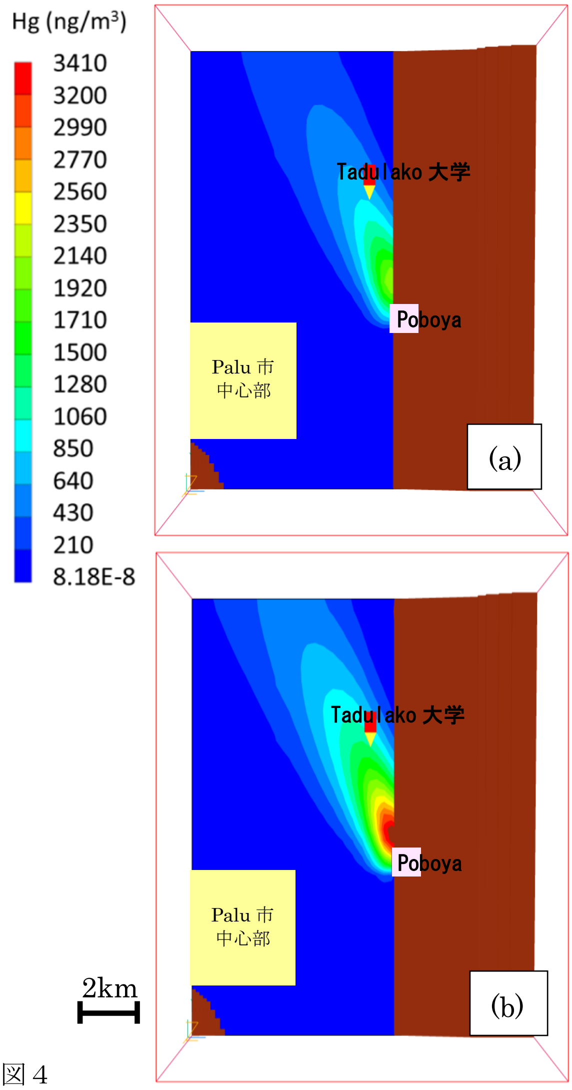

図 4

水銀放出量の違いによる大気拡散シミュレーション（風向 151.4 度、風速 1.30m/s）

(a)水銀放出量 2.25kg/hr　(b)水銀放出量 3.60kg/hr

における水銀濃度は110 ng/m^{3}以上増加することが予想される。周辺住民はWHOのガイドライン（1,000 ng/m^3）を超える高い水銀濃度の空間での生活を余儀なくされ、呼吸により吸入された水銀の健康影響がより懸念される。

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３件）

① Serikawa Y., R. Elvince, T. Kawakami, N. Kunori, Y. Noto, T. Inoue, O. Nagafuchi, T. Miyake; Mercury Contamination in the Atmosphere of Aceh Province, Indonesia, Journal of Ecotechnology Research, 印刷中(2013) ,（査読有）
② BASIR-CYIO Muhammad, HASANAH Uswah, NUR Isrun, SERIKAWA Yuka; Gold Mining Activities and Its Impacts on Land Degradation in Central Sulawesi Indonesia, Journal of Ecotechnology Research, Vol.16, No.3-4 (2012), 79-83（査読有）
③ 芹川裕加, 川上智規, Basir Cyio, Nur Isurun, Rosana Elvince, 井上隆信; インドネシア中央スラウェシ州パル市における金精錬所からの大気への水銀の放出と拡散, 環境科学会誌, Vol.24, No.4 (2011), 269-274（査読有）

〔学会発表〕（計３件）

① SERIKAWA Yuka, KAWAKAMI Tomonori, BASIR Cyio, ISRUN A.Muh.Nur, NAGAFUCHI Osamu, MIYAKE Takayuki; Estimation of mercury emission from small-scale gold mining in Palu City, Central Sulawesi, Indonesia,7th International Forum On Ecotechnology, 2012.12.15, 高岡（富山県）
② Yuka Serikawa, Tomonori Kawakam, Basir Cyio, Isrun Nur, Rosana Elvince, Takanobu Inoue; Emission and dispersion of gaseous mercury from artisanal small-scale gold mining plants in the Poboya area of Palu City, Central Sulawesi, Indonesia, The 10th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, 2011.7.28, Halifax (Canada)
③ KAWAKAMI Tomonori, SERIKAWA Yuka, INOUE Takanobu, ROSANA Elvince, NAGAFUCHI Osamu, HASANAH Uswah, NUR Isrun and BASIR-CYIO Muhammad; Spatial distribution of atmospheric mercury in Palu City, Central Sulawesi, Indonesia, International Symposium on Challenges to Global Issues “Environmental pollution and degradation in Indonesia”, 2011.9.17, Palu (Indonesia)

６．研究組織
(1)研究代表者

芹川　裕加（SERIKAWA YUKA）
富山県立大学・工学部・研究員
研究者番号：50598977