

フィリピンを対象とした水銀の動的マテリアルフロー分析

広島大学 学生会員 ○中野 友弘
 広島大学 正会員 布施 正暁
 広島大学 学生会員 野口 寛貴

1. 背景・目的

水銀は、常温（20℃前後）で液体である唯一の金属であり、様々な金属と混和し、アマルガムという合金を生成するという特徴から、発展途上国を中心に広い用途で用いられている。しかし、2017年に水銀及び水銀化合物の人為的な排出から人の健康及び環境を保護することを目的とした「水銀に関する水俣条約」が発効したこともあり、全世界で水銀の環境への排出量を削減する取り組みが始まっている。水銀の排出を規制、管理するための政策を検討するためには水銀のマテリアルフローを明らかにする必要がある¹⁾²⁾。しかし、水銀のマテリアルフローの把握には以下の理由で困難が伴う。

まず、マテリアルフローの把握に必要な情報が十分に揃っていないことが理由の一つである。水銀の動的マテリアルフロー分析は近年注目され始めたため、既存研究やマテリアルフローの推計に必要な統計資料が十分に揃っていない。

また、水銀のマテリアルフローが不確実性を多分に含んでいることも理由に挙げられる。途上国では、人力小規模金採鉱（以下、ASGM）に水銀が使用される。ASGMは水銀と金鉱石から金アマルガムを生成することで金を精錬する産業であるが、その作業はて作用で行われることが多く、規模が零細であるため、正確な統計上の情報が得られないことが多い³⁾。このASGMが水銀の排出経路を特定するうえで大きな問題になっている⁴⁾。

本研究ではマテリアルフロー分析の手法を用いて、ASGMが盛んにおこなわれているフィリピンの水銀マテリアルフローを推計し、その不確実性を評価する。

2. 水銀の動的マテリアルフロー分析

本研究で用いる分析手法は既存研究¹⁾で中国を対象に使用されたものである。まず、フィリピン国内の産業に使用される水銀量を式(1)より推計する。

$$U_{it} = AR_{it} \times IF_{it} \quad (1)$$

ここで、 U_{it} は t 年の産業 i の水銀使用量、 AR_{it} は t 年の産業 i の年間活動量、 IF_{it} は t 年の産業 i の年間活動量一単位の水銀使用量である。次に式(2)より水銀環境排出量を推計する。

$$E_{jt} = \sum_{i=1}^n (DF_{ijt} \times AR_{it} \times IF_{it}) \quad (2)$$

ここで、 E_{jt} は t 年に環境メディア j へ排出される水銀の量、 DF_{ijt} は t 年に産業 i の製品がライフステージ及び環境メディア j に移行する割合である。対象年度は2001年-2017年、対象産業は19分類であり、各産業で使用される水銀量を8つのライフステージと3つの環境メディアに分類した。Fig. 1に本研究における水銀マテリアルフローのシステム境界を示す。

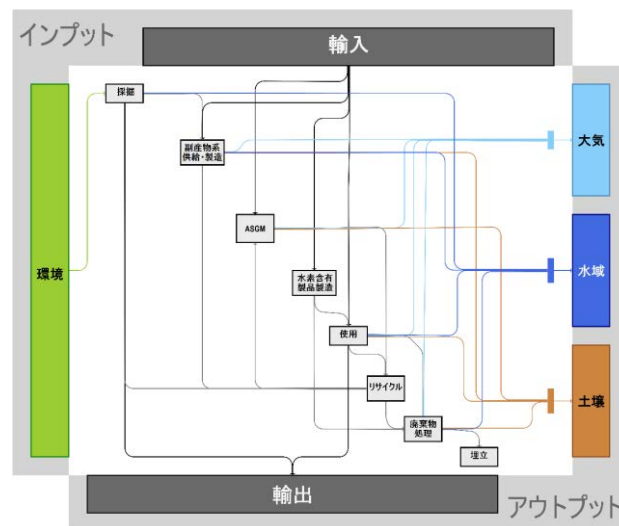


Fig. 1 水銀マテリアルフローのシステム境界

キーワード 動的マテリアルフロー分析、水銀、水俣条約、ASGM、環境汚染、物質収支

連絡先 〒739-8527 広島県東広島市鏡山一丁目4番1号

T E L 082-424-7505

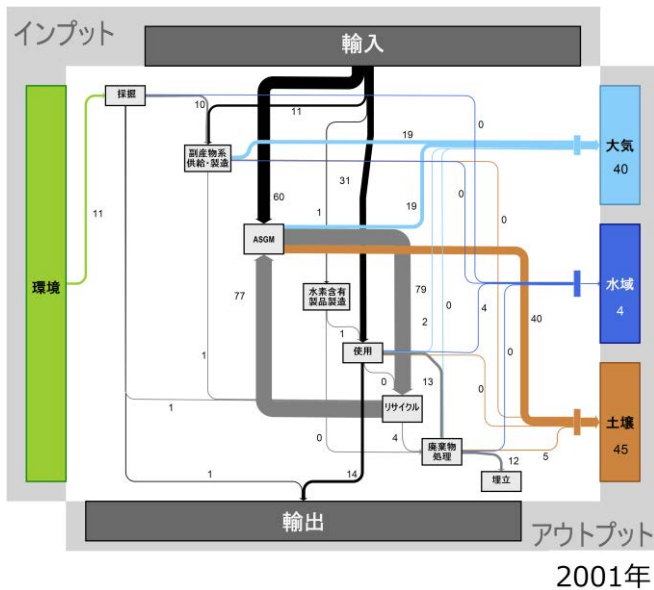


Fig. 2 水銀動的マテリアルフロー分析(2001)

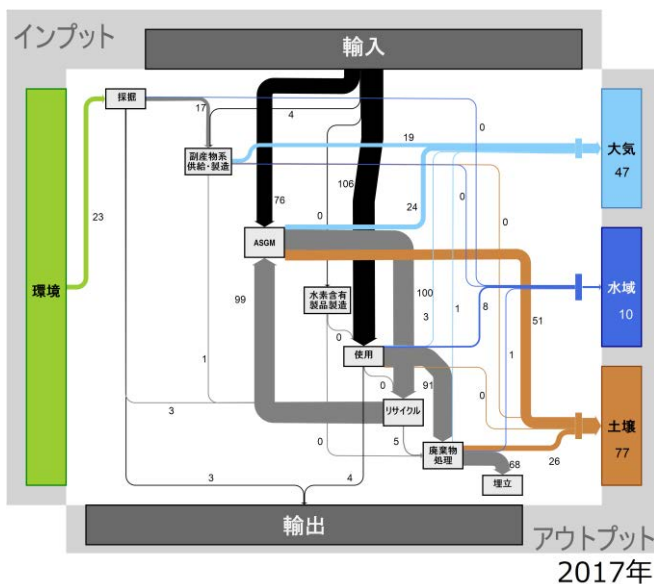


Fig. 3 水銀動的マテリアルフロー分析(2017)

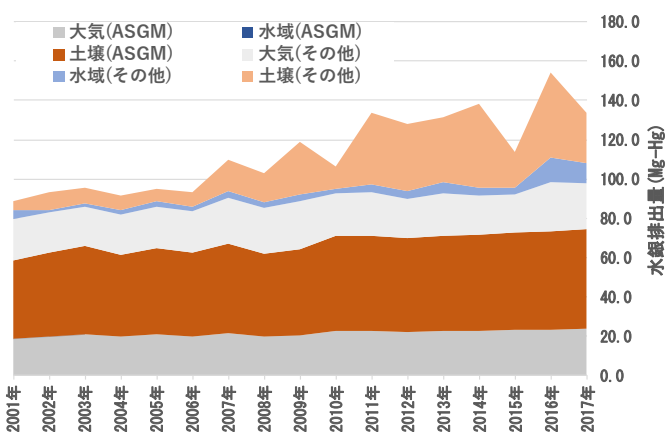


Fig. 4 水銀環境排出量の動的変化

Fig. 2, Fig. 3 の通り、フィリピンにおいては ASGM からの水銀排出が大きな割合を示している。

また、Fig. 4 より ASGM を含めたフィリピンの水銀排出量が増加傾向にあることも明らかになった。2001 年に水銀環境排出量は 88Mg であったが、これが 2009 年には 118Mg, 2017 年には 133Mg となっている。2001 年から 2017 年にかけてフィリピンの GDP は 763 億 USD から 3136 億 USD まで伸びていることを考えると今後も経済発展が見込まれるフィリピンの水銀排出量は増加していくと考えることができる。

3. 動的マテリアルフロー分析に対する不確実性評価

本研究では、モンテカルロ・シミュレーションを用いて水銀の動的マテリアルフロー推計結果の不確実性を評価した。モンテカルロ・シミュレーションは、モデルに使用する変数に確率分布を仮定し、シミュレーションを繰り返すことで結果の分布を明らかにする手法である。タイを対象とした水銀マテリアルフローの研究とその不確実性評価を行った Manaporn⁵⁾の研究と同様に 10,000 回シミュレーションを試行し不確実性を評価した。

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に不確実性評価の結果を示す。Fig. 5, Fig. 6 からわかるように、大気、土壌への水銀排出量には推計結果に大きなばらつきがある。大気では 40Mg から 95Mg, 土壌では 66Mg から 191Mg と最大値が最小値の 2 倍から 3 倍の値となっている。

これだけ大きなばらつきが生じる原因は ASGM にある。水銀の動的マテリアルフロー分析で使用した変数が結果の不確実性に与える影響を寄与率として確認すると、Fig. 8, Fig. 9 から確認できる通り、ASGM の原単位が大気においては寄与率 93%, 土壌においては寄与率 98% となり最も大きな影響を与えている。ASGM に 80Mg から 100Mg という大量の水銀が使用されていること、また、ASGM の実態が詳細に把握されていないため、単位重量あたりの金を生産するのにどの程度水銀が使用されるか正確に把握できていないことが原因である。

また、Fig. 6 からわかる通り水域に排出される水銀量の推計結果にもばらつきが確認できる。水域に排出される水銀量のばらつきに対して影響が大きい変数は、Fig. 10 からわかるとおり、圧力計の原単位 (寄与率 76%), 電池の原単位 (寄与率 14%) の 2 つが主なものだった。これは、フィリピンに輸入される水銀含有製品のうち、圧力計と電池の輸入量が最も大きいためである。

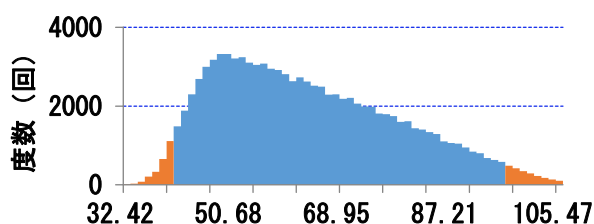


Fig. 5 水銀大気排出量 (単位 : Mg-Hg/2017)

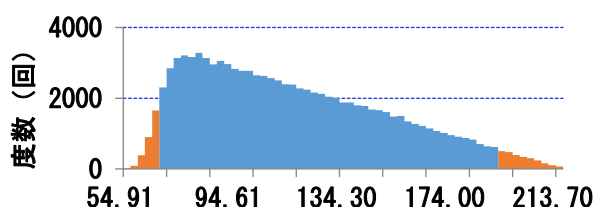


Fig. 6 水銀土壌排出量 (単位 : Mg-Hg/2017)

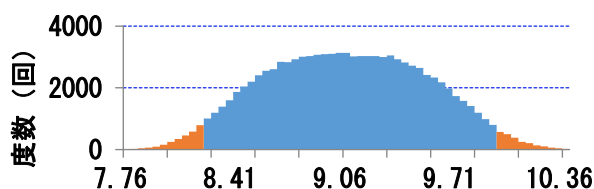


Fig. 7 水銀水域排出量 (単位 : Mg-Hg/2017)

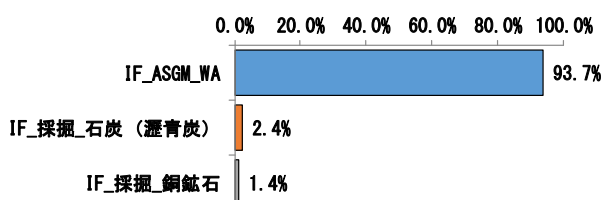


Fig. 8 水銀大気排出量への係数の寄与率 (2017)

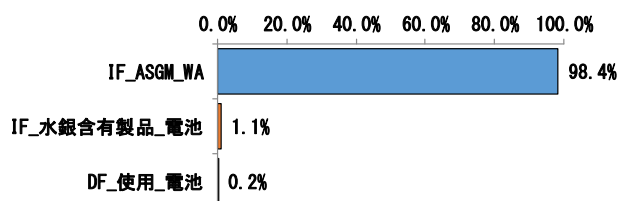


Fig. 9 水銀土壌排出量への係数の寄与率 (2017)

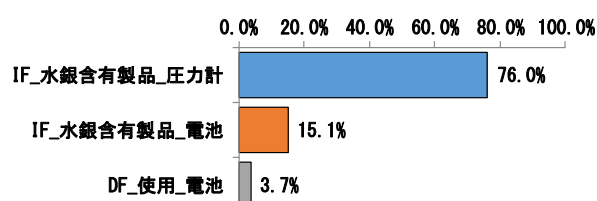


Fig. 10 水銀水域排出量への係数の寄与率 (2017)

4. 結論

本研究では、フィリピンにおける水銀の動的マテリアルフロー分析を行いフィリピン国内の産業における水銀のマテリアルフローを推計した。その結果フィリピンでは ASGM から排出される水銀量の割合が最も大きく 2017 年では全体の 55%, 2001 年には全体の 66%を占めていることが確認できた。加えて、フィリピンにおける水銀排出量は 2001 年から 2017 年の間、増加傾向にあることを確認することができた。

また、ASGM は水銀排出量の推計結果の不確実性に大きな影響を与えていることが明らかになった。大気においては ASGM の寄与率が 93%, 土壌においては ASGM の寄与率が 98%である。これは、ASGM に使用される水銀量が他の産業に比べて大きいことと、ASGM の実態が把握できていないことが原因である。

本研究によりフィリピンにおいて ASGM が水銀マテリアルフローへ与える影響力の大きさを環境排出量と不確実性へ与える影響の大きさという観点から確認することができた。水俣条約の締約国の一つであるフィリピンでは水銀のフローを正確に把握し、適切な水銀管理や水銀規制政策を実施していく必要がある。そのために ASGM の実態を正確に把握していくことが必要になることが本研究より明らかになった。

参考文献

- 1) Yan Lin et al: Material Flow for the Intentional Use of Mercury in China, Environmental Science & Technology, 50, pp.2337-2344, 2016.
- 2) Didem Civancik et al: Substance flow analysis of mercury in Turkey for policy decision support, Environ Sci Pollut Res, 25, pp.2996-3008, 2018.
- 3) UNEP: Global mercury supply, trade and demand, 2017.
- 4) Patricio C. Vela' squez-Lo'pez ea al: Mercury balance in amalgamation in artisanal and small-scale gold mining: identifying strategies for reducing environmental pollution in Portovelo-Zaruma, Ecuador, Journal of Cleaner Production, 18, pp.226-232, 2010.
- 5) Manaporn, Suphaphat, Ruth Scheidegger.: Modeling Mercury Flows in Thailand on the Basis of Mathematical Material Flow Analysis, CSAWAC 44 (1) 1-106 , Vol. 44, No. 1, 2016.