

## 水銀マテリアルフローにおける貿易不整合の影響評価

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

### 1. 背景・目的

水銀が人の健康や環境に悪影響を及ぼすことから、2017年8月に「水銀に関する水俣条約」が発効され水銀の採掘から貿易、使用、排出、放出、廃棄等に至るライフサイクル全体の包括的規制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<sup>(1)(2)</sup>。マテリアルフローを推計する際に用いるデータには貿易統計が利用される。貿易統計には輸出国が報告した輸出統計と輸入国が報告した輸入統計の2つが存在する。しかし、輸出統計の報告値と輸入統計の報告値が一致しない不整合問題が存在し<sup>(3)</sup>、使用するデータによって得られるマテリアルフローに不確実性が生じる。この不整合問題によりマテリアルフロー推計の信頼性が下がることによって、不適切な規制管理政策を立てる危険性がある。

本研究では、水銀生産大国であるインドネシアを対象地域として水銀マテリアルフローを推計し、貿易データの不整合問題が与える不確実性を評価する。

### 2. 水銀の動的マテリアルフロー影響分析方法

本研究では、貿易統計を対象地域であるインドネシアが報告した値(以下、インドネシア報告)とインドネシアの貿易相手国が報告した値(以下、相手国報告)のそれぞれでマテリアルフローを推計し、各フローの差の絶対値の合計値から影響を評価する。貿易データはUN Comtrade<sup>(4)</sup>を使用し、対象年度は1989年-2018年、産業分野は19分野であり、各産業で使用される水銀量を7つのライフステージと3つの環境系に分配した。本研究で用いるマテリアルフローのシステム境界と対象を Fig. 1, Tab. 1 にそれぞれ示す。

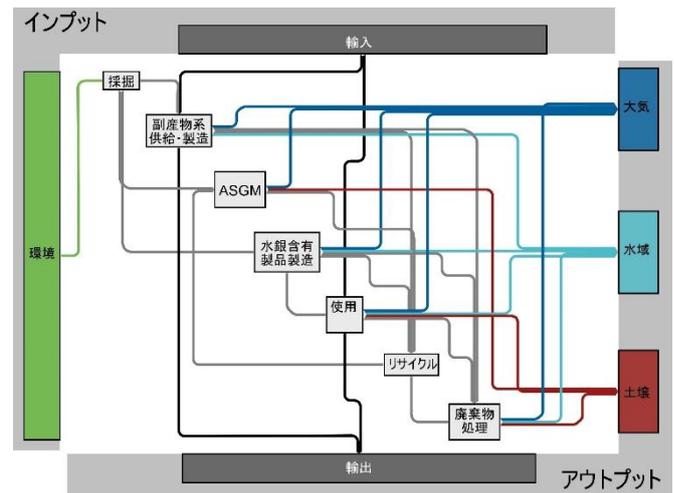


Fig. 1 System boundary of Material Flow

Tab. 1 Target of Material Flow

対象	概要
環境メディア	大気, 水域, 土壌
ライフ	採掘, 副産物系供給・製造
ステージ	小規模人力金採掘(ASGM) 水銀含有製品製造, 使用 リサイクル, 廃棄物処理
産業	エネルギー, 非鉄精錬 ASGM, 水銀含有製品
エネルギー	石油, 石炭, 地熱, 天然ガス
非鉄精錬	アルミニウム, 銅
ASGM	Whole Amalgamation(WA) Concentrate Amalgamation(CA)
水銀含有製品	サーモスタット, 圧力計, 温度計 計測機器, 分光計, 電球, 電池(二酸化マンガン, 水銀, 酸化銀, 亜鉛) 歯科用アマルガム

キーワード マテリアルフロー分析, 水銀, 水俣条約, 物質収支, 貿易統計, 貿易不整合

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

マテリアルバランスの推計式は式(1)に示す。

$$\sum_i MF_{ij,t} = \sum_j MF_{ij,t} \quad (1)$$

ここで、 $MF$ は水銀量、添え字の  $i$  は環境を含む発生ライフステージ、 $j$  は環境を含む集中ライフステージ、 $t$  は年を示している。

マテリアルフローの推計方法は既存研究<sup>(1)(2)</sup>を参考に以下のように行う。インドネシア国内の産業に使用される水銀量を推計し、算出された水銀量に分配係数を乗算し、各ライフステージ、環境系への分配量を求める。これを式(2)より推計する。

$$MF_{ij,t} = \sum_k ((AR_{k,t} \times IF_k) \times DF_{ij,k}) \quad (2)$$

$AR$  は年間活動量、 $IF$  は製品一単位の水銀使用量、 $DF$  は分配係数、添字の  $k$  は産業の種類。

また、本研究では水銀含有製品の寿命を考慮し、ワイブル分布を用いて水銀含有製品の廃棄量を式(3)より推計する。

$$MF_{ij,t} = \sum_k \sum_x \left[ (MF_{ij,k,t-x}) \left\{ \frac{m_k}{\mu_k^{m_k}} x^{m_k-1} e^{-\left(\frac{x}{\mu_k}\right)^{m_k}} \right\} \right] \quad (3)$$

$m$  はワイブル係数、 $\mu$  は平均製品寿命、 $x$  は経過年数を示している。

### 3. 水銀マテリアルフロー影響評価結果

Fig. 2 に 1 年ごとの各フローの水銀量の差を絶対値で算出し、その合計値を推計した結果を示す。

Fig.2 が示すように、1989 年から 1997 年までは、水銀量の合計誤差は 1000Mg 未満であったが、1999 年から 2018 年にかけて 2016 年、2017 年を除いて 1000Mg 以上であり、1999 年、2000 年、2005 年、2006 年、2010 年、2013 年は差が 3000Mg 以上と影響が大きく、最大の影響量は 2010 年の 7600Mg であった。

特に影響の大きかった 2010 年におけるインドネシア報告と相手国報告のマテリアルフロー推計結果のフローごとの差を Fig. 3 に示す。

Fig. 3 が示すように、貿易不整合の影響が特に大きかったフローは、採掘から水銀含有製品が 1300Mg、水銀含有製品から使用が 1300Mg、ASGM からリサイクルが 770Mg、採掘から ASGM が 690Mg、環境から採掘が 660Mg、リサイクルから ASGM が 630Mg、ASGM から土壌が 390Mg、ストック量が 550Mg であった。2010 年における貿易不整合の影響は、ASGM と水銀含有製品に関するフローに

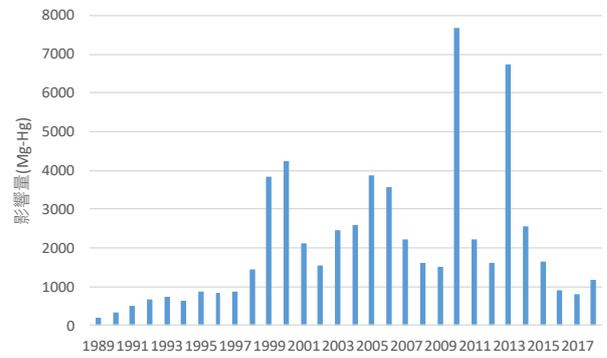


Fig. 2 Gap Evaluation

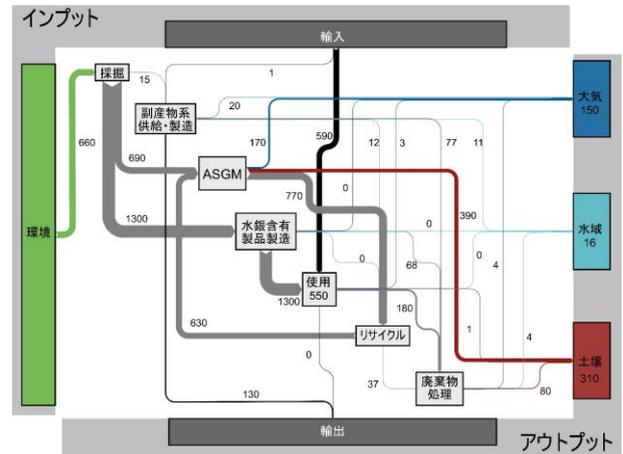


Fig. 3 Gap Evaluation in 2010 (Mg-Hg)

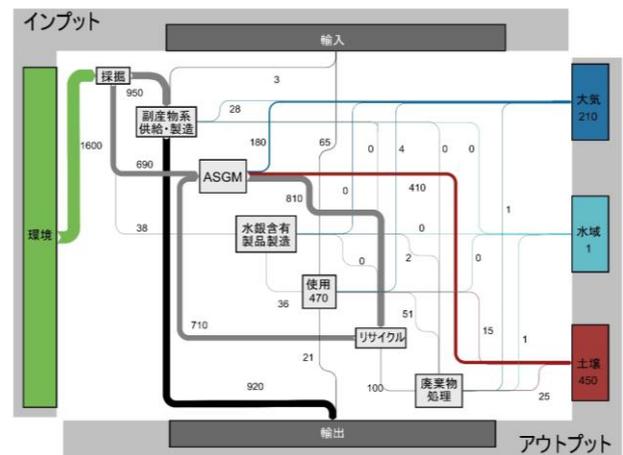


Fig. 4 Material Flow (Indonesia /Mg-Hg/2010)

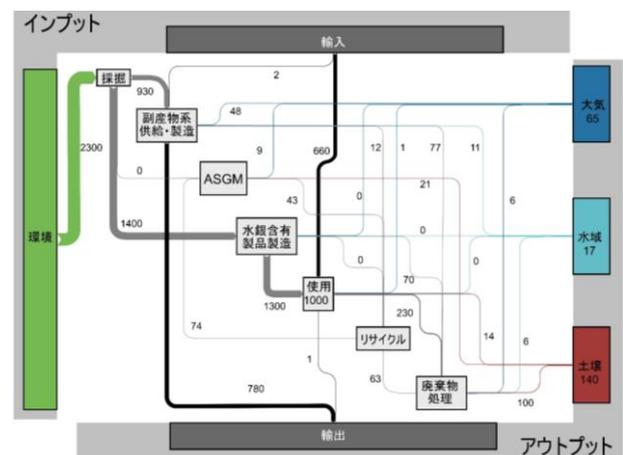


Fig. 5 Material Flow (Partner country/Mg-Hg/2010)

大きく見られた。2010年におけるインドネシア報告と相手国報告の水銀マテリアルフロー推計結果を Fig. 4, Fig. 5 にそれぞれ示す。

Fig. 4 が示すように、2010年におけるインドネシア報告の水銀マテリアルフローは環境からインドネシアに流入した水銀量は 1600Mg、輸入から流入した水銀量は 68Mg であった。一方で、インドネシアから環境に排出された水銀量は、大気は 210Mg、水域は 1Mg、土壌は 450Mg であった。輸出によってインドネシアから排出した水銀は 940Mg であった。ライフステージごとに見ていくと、副産物系供給・製造は採掘、輸入から 950Mg の水銀が流入し、920Mg が輸出によってインドネシアから排出された。ASGM は、採掘から 690Mg の水銀が流入し、環境排出は、大気は 180Mg、土壌は 410Mg であった。また、流入したうち 810Mg がリサイクルへ移動し、710Mg が再び ASGM で使用されている。水銀含有製品製造は、採掘から 38Mg 流入され、使用へ 36Mg 排出される。また、使用では 470Mg ストックされ 51Mg が廃棄物処理へ排出されている。

また、Fig. 5 が示すように、2010年における相手国報告の水銀マテリアルフローは環境からインドネシアに流入した水銀量は 2300Mg、輸入から流入した水銀量は 660Mg であった。一方で、インドネシアから環境に排出された水銀量は、大気は 65Mg、水域は 17Mg、土壌は 140Mg であった。輸出によってインドネシアから排出した水銀は 780Mg であった。ライフステージごとに見ていくと、副産物系供給・製造は採掘、輸入から 930Mg の水銀が流入し、780Mg が輸出によってインドネシアから排出された。ASGM は、環境排出は、大気は 9Mg、土壌は 21Mg であった。また、43Mg がリサイクルへ移動し、74Mg が再び ASGM で使用されている。水銀含有製品製造は、採掘から 1400Mg 流入され、使用へ 1300Mg 排出された。また、使用では 1000Mg ストックされ 230Mg が廃棄物処理へ排出された。

Fig. 4 と Fig. 5 を比較すると不整合問題によってシステム間の移動や環境排出量の結果に大きく影響していることがわかる。Fig. 4 が示すインドネシア報告の水銀マテリアルフロー推計結果では、ASGM に関するシステム間の移動、環境排出、非意図系である副産物供給・製造に関するシステム間の移動で水銀が多く移動している。一方で、Fig. 5 が示す相手国報告の水銀マテリアルフロー推計結果では、水銀含有製品製造に関

するシステム間の移動、環境排出、非意図系である副産物供給・製造に関するシステム間の移動で水銀が多く移動している。

このように、貿易不整合問題が原因で採用するデータが異なることにより水銀マテリアルフロー推計結果に大きく影響を与えていることがわかる。

#### 4. 結論

本研究では、インドネシアにおける水銀マテリアルフローをインドネシア報告と相手国報告でそれぞれ行い、貿易不整合がどの程度推計結果に影響を与えているか検証した。その結果、多くの年で 1000Mg 以上の影響が見られ、最大で 7000Mg 以上の大きな誤差が生まれたことが明らかになった。これにより、貿易統計の不整合問題が水銀マテリアルフローに大きく影響を及ぼしていることを把握した。そのため、不整合問題を解決することが、より信頼性の高い水銀マテリアルフロー分析を行う上で活用していく必要がある。

#### 参考文献

- (1) Yan Lin et al: Material Flow for the Intentional Use of Mercury in China, *Environ. Sci. Technol.* 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) 小坂浩之: 貿易統計の活用に関する基礎的分析, 海上技術安全研究所報告 14 巻第 4 号特集号, 2016.
- (4) UN Comtrade <<https://comtrade.un.org/data/>>(最終検索: 2019年11月19日).
- (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.
- (6) Laura: Anthropogenic Mercury Flows in India and Impact of Emission Controls, *Environ. Sci. Technol.* 47, 8015-8113, (2013)