

36. 関東地方における水銀の発生量の推計

ESTIMATE OF MERCURY EMISSION IN KANTO REGION

津崎昌東* 朝倉一雄*

Masaharu TSUZAKI, Kazuo ASAKURA

ABSTRACT; Mercury emission in Kanto region is estimated in this study. Fossil fuel consumption facilities, waste incinerator, lime manufacturing plant and ships are selected as mercury emission sources. Emission intensities of these facilities are evaluated. As a result the mercury emission from all sources in 2000 in Kanto region is 1.5t/y. Emissions by source categories are estimated as :

- power generator : 67kg/y
- waste incinerator : 697kg/y
- lime manufacturing plant : 44kg/y
- ship : 33kg/y
- coal consumption facility : 264kg/y,
- hazardous waste incinerator : 10kg/y,
- sewage plant : 413kg/y

KEYWORDS; mercury, emission, Kanto region,

1. はじめに

水銀は食物連鎖を通して人の健康に影響を及ぼす環境汚染物質であるとの認識が、欧米を中心として高まってきている。大気中に放出された水銀は遠隔地に輸送されて沈着すると考えられており、例えば米国に沈着する水銀の20%以上がアジア起源であるとの報告もある(Seigneur et al., 2004)。このため、世界各国において水銀の大気中への発生量の把握が急がれている。水銀の人為発生源としては化石燃料の燃焼やごみ焼却、鋳工業における製造、原料加工の過程での発生、水銀を使用する製品からの発生がある。全球の人為発生量は約 2000 t/y と推計されており、地域別の発生量ではアジアが最も多く、およそ50%がアジアで発生していると考えられている(北極域監視計画, 2001)。

わが国では、水銀は大気汚染防止法の優先取り組み物質に指定され、現在、全国でモニタリングが行われている。また、2001年に施行された「特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律」に基づくPRTR制度の対象物質であり、さまざまな事業者から環境中への発生量の届け出が行われている。しかし、PRTR制度による届け出は一定の規模以上の事業者に限られているため、発生量の小さな発生源の把握は困難な状況である。そこで本研究では、関東地方における水銀の大気中への人為発生源を調査対象として、水銀の発生源となりうる事業活動等を整理してそれぞれの施設における排出単位を設定し、発生量の推計を試みた。

* (財)電力中央研究所 大気環境領域 Atmospheric Environment Sector, Central Research Institute of Electric Power Industry, Abiko-shi Chiba, Japan 270-1194

2. 調査結果

2.1 米国における水銀発生量の把握状況

EPA は米国内における水銀の発生源、業種(発生プロセス)を選定し、大気への発生量を推計している(EPA, 1997)。表1にEPAの推計結果を示す。表1より米国の年間の水銀発生量は143.7 tで、発生源別に見ると発電、工業用のボイラーによる発生量が最も多く、5割以上を占めていることが分かる。ボイラーからの発生は化石燃料の燃焼によるものと考えられる。そのほか、一般ごみ焼却が19%、医療廃棄物焼却が10%となっている。一方、製造プロセスにおける発生としては塩基アルカリ製造業、セメント業の発生が多く、いずれも数パーセントを占

表1 アメリカ国内の水銀発生量(1994～1995年)

発生源	年間水銀発生量* (t/y)	発生割合 (%)
点発生源		
発電用ボイラー	47.1	32.8
工業用ボイラー	25.8	18.0
一般廃棄物焼却	26.9	18.7
医療廃棄物焼却	14.6	10.2
その他の燃焼起源 (汚泥焼却、火葬等)	10.8	7.5
塩基アルカリ製造	6.5	4.5
セメント業	4.4	3.1
製紙パルプ業	1.7	1.2
鉛精錬	0.1	0.1
地熱発電	1.2	0.8
その他 (蛍光灯リサイクル等)	1.5	1.0
面発生源		
電灯破損	1.4	1.0
研究用途	1.0	0.7
歯科	0.6	0.4
埋め立て	0.1	0.1
合計	143.7	100.0

*発生量が0.1t/yに満たないもの、発生量が不明なものを除外

めている。また、電灯破損や研究用途など面発生源からの発生が合計で2%程度ある。

表2 PRTR データに基づく日本全国の業種別水銀発生量 (2001年度)

2.2 日本における水銀の発生源の把握状況

日本ではPRTR制度によって一定規模以上の事業者(国、地方自治体を含む)からの水銀排出量の届け出が行われている。表2に平成13年度のPRTRデータに基づく全国の業種別の水銀発生量を示す。表2より、大気への水銀の発生が最も多いのは下水道業であり、全体の70%を占めている。その外は一般廃棄物処理業、産業廃棄物処理業、非鉄金属製造業からの発生である。PRTRデータには、水銀の主要な発生源のひとつと考えられる化石燃料の燃焼による発生が含まれていない。また、全国の発生量は0.33 t/yであり、米国と比べても非常に小さい値となっている。これは、水銀は工業原料や燃料等に微量しか含まれていないため、PRTR制度の届け出の対象とならない、水銀の取扱量が規定値以下(2001年時点では水銀取扱量が5 t以下で材料等の水銀含有率が1%以下)の事業者が多いためと考えられる。

業種	排出量(kg/y)			
	大気	公共水域	土壌	埋め立て
金属工業	0	0	0	0
原油・天然ガス鉱業	0	0	0	0
パルプ・紙	0	0	0	0
紙加工品製造業	0	0	0	0
化学工業	0	0	0	0
非鉄金属製造業	2	15	0	4000
電気機械器具製造業	0	0	0	0
輸送用機械器具製造業	0	0	0	0
その他製造業	0	0	0	0
電気業	0	0	0	0
下水道業	228	299	0	0
鉄スクラップ卸売業	0	0	0	0
一般廃棄物処理	49	1	0	0
産業廃棄物処分	47	6	0	12
合計	326	321	0	4012

2.3 調査範囲および調査対象施設

人口密集地であり、また、臨海部に工業地帯を有する関東地方について水銀の人為発生源を調査し、個々の施設における発生量を推計した。調査の範囲は東京湾を中心として、領域の南西端を東経139.25°、北緯35.17°、北東端を東経140.37°、北緯36°とする東西約90km、南北約100kmの範囲とした。調査範囲には茨城県、埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県が含まれる。調査は施設単位で行うこととし、一般家庭からの発生や埋立地といった面発生源は除外した。なお、発生量の推計は2000年を基準として行った。

水銀の発生源となる施設として、まず、EPAが推計を行った固定発生源の発生プロセス、施設のうち、調査対象範囲内に該当施設のあるものを選定した。また、石炭を工業原材料として使用する施設を調査

対象とした。さらに、PRTR データに基づいて、下水道事業を調査対象とした。加えて、化石燃料を使用し、環境対策が進んでいないと考えられる船舶を調査対象とした。

選定した施設は 1) 発電施設、2) 石炭利用施設(原材料として利用)、3) 一般廃棄物焼却施設、4) 医療廃棄物焼却施設、5) セメント製造施設、6) 下水処理施設、7) 船舶である。

2.4 各施設の水銀発生量の推計

(A) 発電施設

発電施設には、一般家庭や工業地域に電力を供給する大規模な施設と、比較的小規模な自家発電施設を含む。発電施設で燃焼する化石燃料には水銀が含まれており、そのうち一部が大気に放出されと考えられる。

石炭火力発電の排出原単位は $4.43 \mu\text{g/kWh}$ とした(伊藤ら, 2002)。石油火力発電については、石油中の水銀濃度を 0.02ppm 、燃焼時に排出される水銀の割合(排出割合)を 50%、石油の比重を 0.9 と仮定し、経済産業省資料(経済産業省, 2002)より燃料消費率を $0.21\sim 0.27\text{kL/kWh}$ として、以下のように算出した。

$$(0.21\sim 0.27\text{kL/kWh}) \times 0.9(\text{比重}) \times 0.02(\text{濃度 ppm}) \times 0.5(\text{排出割合}) = 1.8\sim 2.4 \div 2.0(\mu\text{g/kWh})$$

なお、小規模施設では燃料を混合して用いる場合があること、環境対策が進んでいない可能性があることから、排出原単位を石炭と同じ $4.43 \mu\text{g/kWh}$ とした。

資料(経済産業省, 2002, プロジェクトニュース社, 2004)に基づいて各発電施設の使用燃料、発電量を把握した。一部小規模施設については発電実績が明確でないため、施設の年間稼働率を 60% と仮定し、定格発電能力から発電量を推計した。また、出力が小さい(下位 10% 以下)小規模施設については除外した。この結果、発電施設全体の年間の発電量は $1.44 \times 10^7 \text{ MWh}$ となった。

設定した排出原単位と上記資料等で得た発電量を掛けることによって、各施設からの水銀の発生量を推計した。この結果、発電施設からの発生量の合計は 67kg/y となった。

(B) 石炭利用施設

石炭利用施設は、発電施設以外で、石炭を工業原材料等として用いる施設をさす。本研究では、石炭コークスの製造施設、高炉施設、鉄鉱石の焼結施設を調査対象とした。石炭には水銀が含まれており、そのうち一部が大気に放出されと考えられる。

石炭利用施設で用いられる石炭にはさまざまな産地、品質のものがあ、石炭中に含まれる水銀の濃度も異なっていると考えられるが、本研究では米国、日本などの火力発電所用石炭の調査事例(伊藤ら, 2002)を基に 0.05mg/kg と仮定した。鉄鋼各社の資料によると、石炭コークス製造施設および焼結施設には排ガス処理設備として電気集塵機および脱硫装置を備えていることが多く、一方、高炉施設は電気集塵機、ベンチュリースクラバなどを備えていることが多い。そこで、横山らの報告(横山, 2002)を基に、電気集塵機および脱硫装置を備える施設における排出割合を 30%、それ以外の施設の排出割合を 70% と仮定した。

鉱業便覧(経済産業調査会, 2001)、石炭年鑑(テックスレポート, 2004)、石油等消費動態月報(経済産業省, 2000)、コークスノート(日本エネルギー学会, 2004)により、各施設の石炭消費量を算出し、上で設定した石炭中の水銀濃度と排出割合を掛けることによって、各施設の水銀の発生量を推計した。この結果、石炭利用施設からの発生量の合計は 264kg/y となった。

(C) 一般廃棄物焼却施設

一般廃棄物中に含まれる生ごみや電池、蛍光灯などには水銀が含まれている。また、ごみの燃焼過程で石油等の化石燃料が用いられるため、一般廃棄物焼却施設から水銀が放出されると考えられる。本研究では主に自治体が運営する大規模な施設を調査対象とした。

表 3 一般廃棄物焼却施設の排出原単位の設定値

環境対策設備	排ガス中水銀濃度 (mg/m ³)	水銀排出源単位* (g/t-ごみ)
バグフィルター(BF)	0.005	0.025
電気集塵機(EP)	0.03	0.15
マルチサイクロン(MC)	0.04	0.2
EP+BF	0.005	0.025
MC+EP	0.02	0.1

*ごみ1tあたりの排ガス量を5000m³と仮定

一般廃棄物焼却施設から発生する水銀の量は、施設の環境対策設備によって大きく異なる。そこで、谷川、浦野の報告(谷川、浦野、1998)、東京都の実測値(東京都二十三区清掃一部事務組合、2000)を基に、環境対策別の排ガス中の水銀濃度を仮定し、また、単位ごみあたりの発生ガス量を5000m³/tとして(環境省、2001)、排出原単位を表3のように設定した。

環境省のWebサイトをより各施設におけるごみの焼却量、環境対策設備を抽出し、表3に示す排出原単位を掛けることによって水銀の発生量を推計した。この結果、一般廃棄物焼却施設からの発生量の合計は697kg/yとなった。

(D) 医療廃棄物焼却施設

医療廃棄物には、体温計など水銀が使われている機材や薬品など、一般廃棄物と比べて水銀濃度が高いごみが含まれていることから、一般廃棄物とは別に推計を行う必要があると考えられる。医療廃棄物は院内で処理されるものが多かったが、近年は感染性廃棄物(特別管理産業廃棄物)として処理業者に委託するケースが多い。本研究では、感染性廃棄物の焼却処理施設を調査対象とした。

安田の報告(安田、2000)によれば、医療廃棄物処理施設からの排ガス中の水銀濃度は0.041～0.064mg/m³(平均0.0578mg/m³)であった。そこで単位ごみあたりの排ガス量を5000m³/tとして、排出原単位を以下のように設定した。

$$0.0578 \text{ mg/m}^3 \times 5000 \text{ m}^3/\text{t} = 0.29 \div 0.3 \text{ g/t}$$

各都県が公表している産廃処理業者の資料から、感染性廃棄物の焼却処理を行っている事業者を抽出し、届け出られている焼却能力の50%の焼却量があったものと仮定して、各施設の焼却量を算出し、上で設定した排出原単位を掛けることによって水銀の発生量を推計した。この結果、医療廃棄物焼却施設からの発生量の合計は10.0kg/yとなった。

(E) セメント製造施設

セメント製造施設では原材料として石灰石、粘土、珪石を用い、これらを1000℃以上で熱加工してクリンカを製造し、これを破碎、加工してセメントとする。水銀は主に石灰石に含まれており、熱加工の過程で一部が大気へ放出されると考えられる。また、加熱のために燃焼される化石燃料からも水銀が放出されると考えられる。

セメント年鑑(セメント新聞社、2004)を基に、単位クリンカ量あたりの石灰石消費量を1092kg/tとし、石灰石中の水銀濃度は0.03mg/kgと仮定した。また、燃焼する化石燃料は石炭と仮定して、セメント生産量あたりの石炭消費量を104.6kg/t、水銀濃度を0.05mg/kgとした。セメント製造施設の環境対策設備は電気集塵機、バグフィルタであるが、脱硫装置は使用されていない。原材料に石灰が含まれているため、バグフィルタ等でも脱硫効果が認められるが、通常の液噴霧による脱硫比べると水銀の除去能力は劣ると考えられるため、水銀の排出割合は前述の脱硫装置ありの場合(30%)と無しの場合(70%)

の中間である 50%を仮定した。これらの条件から、水銀の排出原単位を 16.4mg/t-クリンカ(石灰石より発生)、2.6 mg/t-セメント(燃料より発生)と設定した。

セメント年鑑(セメント新聞社、2004)から各施設のクリンカ、セメント製造量を抽出し、上で設定した排出原単位を掛けることによって、水銀の発生量を推計した。この結果、セメント製造施設からの発生量の合計は 44kg/y となった。

(F) 下水処理施設

下水処理の過程で発生する下水汚泥中には水銀が含まれており、これを焼却処理する際に一部が大気に放出されると考えられる。PRTR データでは、東京都の下水処理施設から水銀の排出が届け出られているが、東京都以外の県では届け出が無い。そこで本研究では、東京都の PRTR データを基に排出原単位を設定し、対象範囲の下水汚泥焼却処理施設からの水銀発生量を推計した。

PRTR データを基に、汚泥の焼却処理量と水銀の排出量(届け出量)の関係をみると、処理量が比較的小さい流域下水道では排出原単位が 0.05g/t, 処理量が多い公共下水道では排出原単位が 0.4g/t となった。

下水道年鑑(水道産業新聞社、2001)および各施設へのヒアリングなどにより、各施設の汚泥焼却量、流域下水道、公共下水道の区分を抽出し、上で設定した排出原単位を掛けることによって、水銀の発生量を推計した。この結果、下水処理施設からの発生量の合計は 413kg/y となった。

(G) 船舶

船舶は主に重油を燃料として航行する。また、船舶には環境対策設備がほとんどないため、燃料重油中の水銀の大部分が大気に放出されると考えられる。

船舶に用いられる燃料は A 重油、C 重油であるが、これらの重油中の水銀濃度に関するデータは少ない。水銀等の問題調査報告書(石油産業活性化センター、2003)などによると、重油はナフサと製造工程が近い。ナフサの水銀濃度は 15ppb、40ppb などと報告されており、さらに、石油コークス(重油質をさらに分留して得られる成分)では水銀濃度 50ppb と報告されている。これらのデータより、本研究では、船舶の燃料重油中の水銀を 50ppb と仮定し、全量が大気中に放出されとした。

港湾統計資料(国土交通省、2000~2001)などから東京湾内の船舶の航行量、航行速度、船舶種別、機関種別のデータを抽出し、窒素酸化物総量規制マニュアル(公害研究対策センター、2000)の手法を基に、船舶の水銀発生量を推計した。この結果、船舶からの水銀発生量は 33kg/y となった。

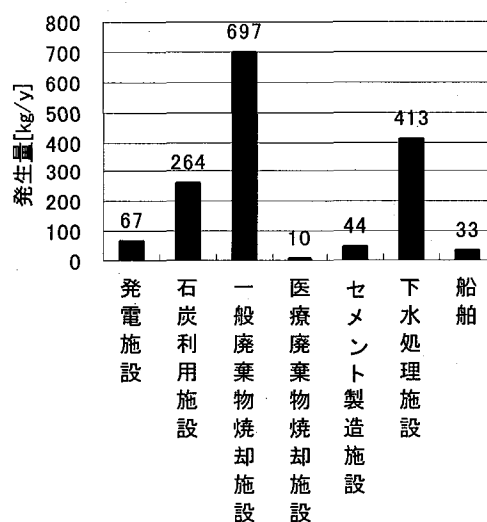


図1 施設種類別の水銀発生量の推計値

3. まとめ

図1に発生源の種類別の水銀発生量推計値を示す。また、図2に発生施設の分布を示す。今回調査を行った施設からの水銀の発生量は 1529kg/y であった。PRTR データに基づく全国の発生量は 326kg/y であり、本研究の結果は関東地方のみでこれを大きく上回っている。

発電施設は今回調査対象とした施設のうち数は最も多いが、個々の施設の発生量は小さく、東京湾岸に比較的規模の大きな施設が数箇所存在している。発生量は 67kg/y であった。石炭利用施設からの発生量は 264kg/y であり、東京湾岸に大規模な施設が存在する。一般廃棄物焼却施設の発生量は最も多く、697kg/y であった。個々の施設の発生量は比較的小さいものの、調査範囲全体に多数分布しており、大気中の水銀濃度に大きな影響を与えているものと推測される。ただし、近年では、ダイオキシン対策の必要性から、一般廃棄物焼却施設では環境対策設備の更新が進んでおり、ほとんどの施設がバグフィルタを備えるようになってきているため、発生量は少なくなっていると考えられる。医療廃棄物焼却施設の発生量は本研究では 10kg/y と少ないが、医療廃棄物の排出、処理量の実態には不明な点が多く、実際の発生量はより多い可能性がある。セメント製造施設の発生量は 44kg/y であり、施設の数はいくつか少ないが、セメント原材料、熱源(化石燃料)の両方に水銀が含まれており、消費量も多いため、施設あたりの発生量は多いと評価された。下水処理施設の発生量は 423kg/y であり、一般廃棄物焼却施設について発生量が多かった。下水処理、一般廃棄物焼却から発生する水銀はいずれも排泄物や生ごみといった人間の生活で発生する廃棄物が主要な流入源となっている。したがって、廃棄物由来の水銀発生量が多いことは、食物や一般環境中に広く分布している水銀が食物連鎖などによって濃縮され、それが廃棄物に混入していることを示唆している。船舶の発生量推計では、燃料中の水銀量や排出源単位を比較的保守的に設定したが、発生量は 33kg/y であった。

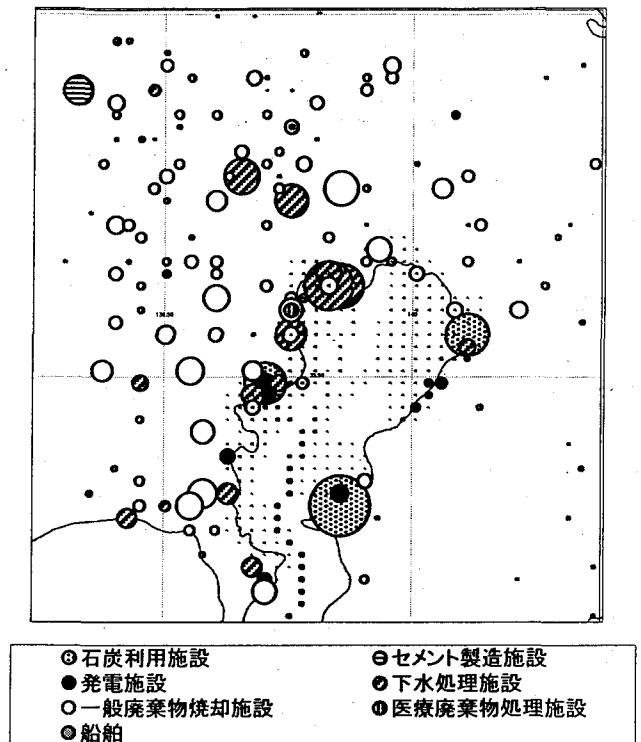


図2 水銀発生施設の分布

参考文献

- Seigneur, C., Vijayaraghavan, K., Lohman, K., Karamchandani, P., Scott, C. (2004) Global source attribution for mercury deposition in the United States, Environ. Sci. Technol., 38, 555-569
 北極域監視計画(Arctic Monitoring and Assessment Program) (2001) 1995 Global Anthropogenic Mercury Emissions: Spatial Data Distribution and Mapping Project
 EPA (1997) Mercury Study Report to Congress, EPA-452/R-97-003
 伊藤茂男, 横山隆壽, 朝倉一雄(2002) 石炭火力発電所の微量物質排出量実態調査, 電力中央研究所報告
 経済産業省資源エネルギー庁編(2002) 平成13年度 電力需給の概要
 プロジェクトニュース社(2004) 産業界と自家発電・PPS2003年版
 横山隆壽, 朝倉一雄, 関照雄(1989) 石炭火力発電所排煙中微量物質の挙動調査, 電力中央研究所報告
 経済産業調査会編(2001) 鉱業便覧平成12年版
 テックスレポート(2004) 石炭年鑑2004
 経済産業省経済産業政策局(2000) 石油等消費動態月報
 日本エネルギー学会編(2004) コークスノート2004年版
 谷川昇, 浦野鉦平(1998) 都市ごみ焼却に伴う大気環境への水銀の排出量と排出削減量, 廃棄物学会論文誌, 9(5), 181-187
 環境省(2001) ダイオキシン類の排出量の目録(インベントリ)
 東京都二十三区清掃一部事務組合(1999~2001) 事業概要平成11~13年版
 安田憲二(2000) 医療廃棄物焼却炉からの水銀排出抑制に関する研究, 医療廃棄物研究, 13, 11-13
 水道産業新聞社(2001) 下水道年鑑2001年版
 石油産業活性化センター(2003) 水銀等の問題調査報告書(平成14年度石油環境対策基盤等整備事業)
 公害研究対策センター(2000) 窒素酸化物総量規制マニュアル新版
 国土交通省総合政策局情報管理部(2000~2001) 港湾統計年報