

焼却施設における重金属の物質フロー推計モデルと排出削減への応用

環境学部環境学科 門 木 秀 幸*、崎 野 奈 央*、成 岡 朋 弘**

* 公立鳥取環境大学環境学部

** 鳥取県衛生環境研究所

1. 研究背景

水銀に関する水俣条約が 2013 年に採択され、2017 年 8 月に発効[1]されたことを受けて、我が国では水銀による環境の汚染の防止に関する法律（平成 27 年法律第 42 号）、大気汚染防止法の一部を改正する法律（平成 27 年法律第 41 号）、廃棄物処理法施行令の一部を改正する政令（平成 27 年政令第 376 号）が公布され、水銀の管理に関する規制が強化されてきた。大気汚染防止法では、水銀の排出基準が規定され、対象施設は、石炭火力発電所産業用石炭燃焼ボイラー、非鉄金属（銅、鉛、亜鉛及び工業金）製造に用いられる精錬及び焙焼の工程、廃棄物の焼却設備、セメントクリンカーの製造設備である。この内、国内の水銀の大気への排出の約 3 割は廃棄物焼却施設が由来している[2]とされている。焼却施設内で処理される水銀は、組成が複雑であり多様である一般廃棄物に由来することから、その各組成の水銀含有量や寄与割合、排ガス処理工程での水銀の分配について把握することが、施設の適正管理のために重要と考えられる。また、一般廃棄物の焼却処理における重要な重金属として鉛が挙げられる。鉛は、はんだ材料等として様々な製品に利用されるとともに、一般廃棄物の焼却残渣（ばいじん、焼却灰、落じん灰）から高頻度に検出[3,4]される重金属である。焼却処理から発生するばいじんはそのままでは埋立処分できず、薬剤等により鉛等を不溶化してから処分しなければならない。また、焼却灰中にも鉛が残留し、焼却灰を土木資材等にリサイクルする上での課題となることから、焼却処理過程における鉛の削減が求められる。

そこで、本研究では、一般廃棄物焼却施設 1 施設を対象とし、施設に搬入される水銀及び鉛量（入口側）と、施設から排出される水銀及び鉛量（排出側）について調査し、一般廃棄物焼却施設における水銀のマテリアルフローの推計について検討を行った。具体的には、入口側は、ごみ質調査、各組成の水銀含有量・水銀寄与率・その他の水銀起源を調査した。排出側は、焼却残渣中の水銀含有量調査・排ガスの水銀濃度分析・排出先への水銀分配割合の推計を行った。

2. 調査方法

2.1 水銀フローの推計

入口側の調査として、一般廃棄物焼却施設に搬入される可燃ごみ中の水銀含有量を調査した。「一般廃棄物処理事業に対する指導に伴う留意事項について（昭和 52 年、環整 95 号）」に基づいて行った。まず、ごみピットから約 500kg のごみを採取し、四分法により縮分した後、組成分類項目として「紙・布類」、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」、「木・竹・わら類」、「厨芥類」、「不燃物類」、「その他」の 6 項目に分別した。水銀含有量は、底質調査方法(平成 24 年)における水銀分析方法のうち、硝酸一過マンガン酸カリウム還流分解法により行った。各ごみ組成の水銀含有量と可燃ごみに占める割合か

ら水銀の寄与割合を算出した。

出口側の水銀については、まず焼却施設から排出された焼却残渣（焼却灰、落じん灰、固化灰）の水銀含有量を底質調査方法により分析した。落じん灰は、一定期間（令和元年6月6日～令和2年2月26日）に搬出された落じん灰の実績と、その間に搬出された焼却灰の実績から、落じん灰と焼却灰の排出量の比率を算出し、各月の焼却灰の排出量から各月の落じん灰の搬出量を推計した。排ガスの水銀濃度データ（測定方法：環境省告示第94号）は施設設置者から提供を受けた。

2.2 鉛フローの推計

入口側の調査として、一般廃棄物焼却施設に搬入される可燃ごみ中の鉛含有量を水銀と同様に環整95号により行った。分析は、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」については、ケルダールフラスコによる硫酸-硝酸分解法により、その他の5組成は底質調査方法(平成24年)による王水分解法により行った。各ごみ質の水銀含有量と各組成の可燃ごみに占める割合から鉛の寄与割合を算出した。

出口側の鉛については、水銀と同様に焼却施設から排出された焼却残渣（焼却灰、落じん灰、固化灰）の鉛含有量を底質調査方法により分析した。排ガスの鉛濃度は、バグフィルターによる鉛の除去率が99%以上であることが報告[5-8]されていることから、本研究では考慮しないこととした。

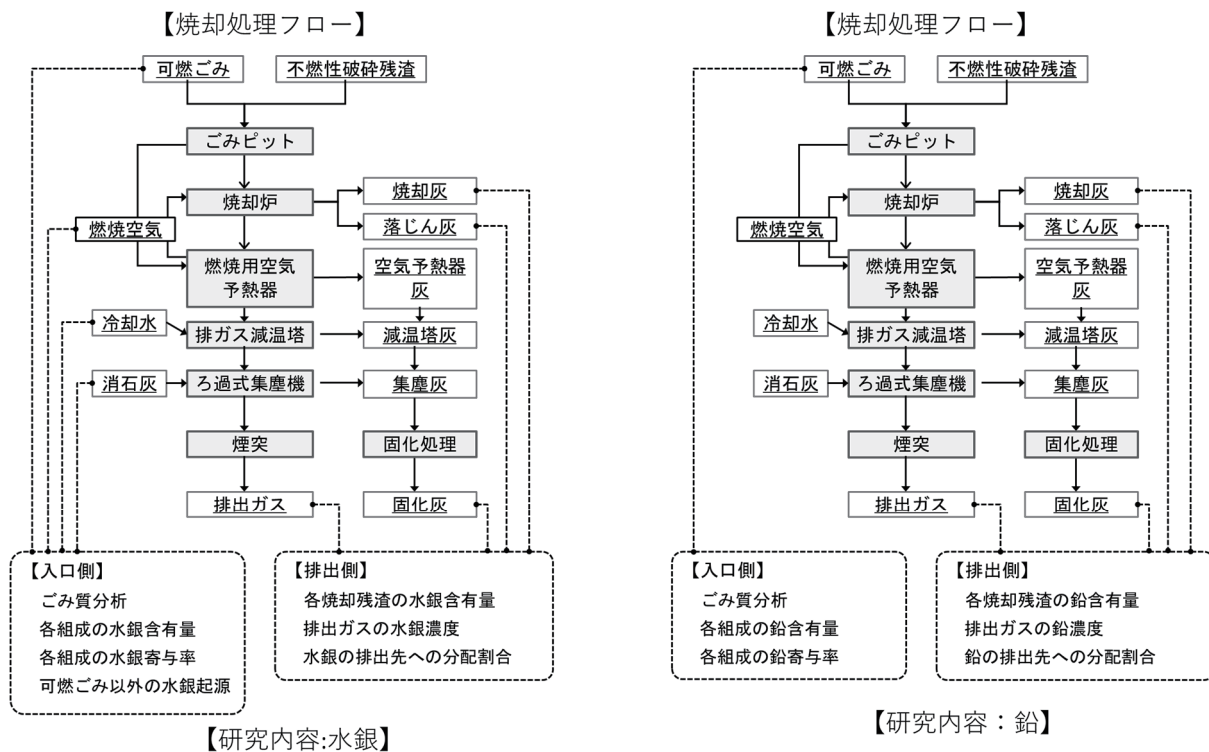


図1 研究内容

3 結果

本研究の調査期間は平成31年4月から令和2年3月の1年間とした。この間の焼却処理量は、3.14

×10⁴t-wet であった。

3.1 水銀フローの推計結果

表1に各組成の水銀含有量及び年間水銀量を示す。水銀含有量は、乾燥ベースでは「その他」が最も高く 0.197mg/kg-dry、次いで「木・竹・わら類」が 0.052mg/kg-dry であった。湿潤ベースでは「その他」が 0.0823mg/kg-wet と最も高く、次いで「木・竹・わら類」が 0.0232mg/kg-wet であった。しかしながら、一般的に家庭にも存在する水銀含有製品には、体温計、電池等が上げられるが、これらが混入する可能性のある「不燃物類」は、乾燥ベース、湿潤ベースとも水銀の含有量は最も低値であった。年間の水銀量を推計すると、最も量が多かったのは、「その他」で 169g、「木・竹・わら類」が 146g であった。また、別途行ったごみ以外の水銀起源の調査の結果から、ごみ以外の起源として、冷却水が 35.8g/年、薬剤が 0.617g/年、燃焼空気が 12.9g/年という結果が得られた。以上の結果から、入口側の全水銀量に対する各水銀起源の寄与率は、「その他」が 26.3%、「木・竹・わら類」が 22.7%、「紙・布類」が 22.3%、厨芥類は 12.0%、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」が 8.60%「不燃物類」は 0.416%の順となった。可燃ごみ以外の起源（冷却水、薬剤、燃焼空気の合計）は 7.68%となった。年間では、ごみ中の水銀量は 593g/年、ごみ以外の起源も含めると 643g/年と見積もられた。

表1 各組成の水銀含有量及び年間水銀量

組成分類項目	水銀含有量		水分 %	全体に対する水分割合 %	水銀量 g/年
	mg/kg-wet	mg/kg-dry			
紙・布類	0.0169	0.0240	29.7	9.56	143
ビニール・合成樹脂等	0.0128	0.0152	16.0	2.76	55.3
木・竹・わら類	0.0232	0.0518	55.1	6.83	146
厨芥類	0.0120	0.0267	54.9	18.4	77.3
不燃物類	0.00262	0.00310	15.6	0.290	2.67
その他	0.0823	0.197	58.2	1.68	169
計				39.5	593

表2に焼却残渣及び排ガスとしての年間水銀排出量及び各排出先への分配割合を示す。年間水銀排出量は、焼却灰として排出される水銀が 1.58g/年、落じんとして排出される水銀が 1.66g/年、固化灰（ばいじんを薬剤処理したもの）として排出される水銀が 9.67×10^3 g/年、排出ガスとして排出させる水銀が 958g/年となった。それぞれの水銀の分配割合を見ると、固化灰の分配割合が 91%、排出ガスが 9.01%であること、また、焼却灰と落じん灰中の水銀への分配が 0.1%に満たないことから、廃棄物焼却工程では 99%以上の水銀が燃焼ガス側に移行することが確認され、約 9 割がバグフィルター等の排ガス処理工程で除去され、約 1 割が排ガスとして環境中に排出されることが確認された。

表 2 各排出先の水銀量及び分配割合

	水銀量	割合
	g/年	%
焼却灰	1.58	0.0149
落じん灰	1.66	0.0156
固化灰	9.67×10^3	91.0
排出ガス	958	9.01
合計	1.06×10^4	

以上の結果から、排出側の水銀量は 1.06×10^4 g/年と推計された。入口側の水銀量が 643g/年であったことから、入口側の水銀量は排出側の水銀量の約 1/17 しかなく、収支が整合しなかった。この原因としては、ごみ中の水銀含有量の分析方法の不十分さか、あるいはごみ組成の不均一さのいずれかが要因と考えられる。

3.2 水銀含有量に関する分析方法の検討結果

ごみ中の水銀含有量の分析方法が不十分かどうか確認するために、同時に採取したごみに対して、底質調査方法による水銀分析の他に加熱気化原子吸光法による分析を行い比較した。この結果を、表 3 に示す。ここで、底質調査方法（硝酸-過マンガン酸カリウム還流分解法）による分解方法は、一定量の湿試料を還流冷却器付分解フラスコに入れ、硝酸及び過マンガン酸カリウムを添加し、煮沸して有機物を分解した後、原子吸光法により定量する方法である。また、底質調査方法に規定がない加熱気化原子吸光法は、固体試料を直接、加熱分解し、気化した水銀を捕集・分析する方法である。表 3 の結果から、この 2 つの方法では、分析値に大きな差がないことが確認された。このことから水銀の物質収支が合わないのは、分析方法の問題ではないと考えられた。

表 3 ごみ中の水銀含有量に関する分析方法の比較（試料採取：令和 2 年 11 月 11 日）

	水銀分析結果 mg/kg		ごみ組成 % (湿潤ベース)	水分 %
	底質調査方法	加熱気化原子吸光法		
紙・布類	0.03	N.D.	25.8	22.1
ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類	0.02	0.02	13.2	13.2
木・竹・ワラ類	0.06	0.02	8.1	35.4
厨芥類	N.D.	0.04	48.3	50.4
不燃物類	N.D.	N.D.	1.9	15.7
その他	0.07	0.1	2.7	32.8

3.3 鉛フローの推計結果

各組成の鉛含有量及び年間鉛量の結果を表 4 に示す。乾燥ベースでは、最も含有量が高かったのは「その他」で 12.6mg/kg-dry、次に「不燃物類」の 7.66mg/kg-dry、「木・竹・わら類」の 3.06mg/kg-

dry、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」の2.97mg/kg-dryが続いた。湿潤ベースでは、「不燃物類」の6.46mg/kg-wetが最も含有量が高く、次に「その他」の5.25mg/kg-wet、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」2.49mg/kg-wet、「木・竹・わら類」の1.37mg/kg-wetが続いた。年間の鉛量に換算すると、最も多かったのは、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」の 1.08×10^4 g/年と「その他」 1.08×10^4 g/年であり、次に、「木・竹・わら類」が 8.62×10^3 g/年であった。入口側の鉛の年間総量は 4.42×10^4 g/年と見積もられた。鉛の寄与率に換算すると、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」の24.4%と「その他」の24.4%が最も高く、次いで、「木・竹・わら類」が19.5%、「不燃物類」は14.9%、「紙・布類」が14.2%、「厨芥類」が2.61%となった。

表4 各組成の鉛含有量及び年間鉛量

組成分類項目	鉛含有量		水分 %	全体に対する水分の割合 %	鉛量 g/年
	mg/kg-wet	mg/kg-dry			
紙・布類	0.738	1.05	29.7	9.56	6.26×10^3
ビニール・合成樹脂等	2.49	2.97	16.0	2.76	1.08×10^4
木・竹・わら類	1.37	3.06	55.1	6.83	8.62×10^3
厨芥類	0.180	0.40	54.9	18.4	1.16×10^3
不燃物類	6.46	7.66	15.6	0.290	6.60×10^3
その他	5.25	12.6	58.2	1.68	1.08×10^4
計				39.5	4.42×10^4

次に、表5に焼却残渣としての年間鉛排出量及び各排出先への分配割合を示す。なお、各焼却残渣中の鉛含有量の分析結果は、落じん灰： 1.03×10^4 mg/kg、固化灰：744mg/kg、焼却灰：229mg/kgであった。年間鉛排出量は、焼却灰が 4.79×10^5 g/年、落じん灰が 8.70×10^5 g/年、固化灰が 9.75×10^5 g/年であった。焼却灰への分配割合は20.6%、落じん灰への分配割合は37.4%、固化灰への分配割合は42.0%であった。以上から年間の鉛排出量の約80%が、落じんと固化灰に分配し、排出されることが確認された。

表5 各排出先の鉛量及び分配割合

	鉛量	割合
	g/年	%
焼却灰	4.79×10^5	20.6
落じん灰	8.70×10^5	37.4
固化灰	9.75×10^5	42.0
合計	2.32×10^6	

以上から、排出側の鉛の年間排出量は 2.32×10^6 g/年と推定された。入口側の年間鉛量が 4.42×10^4 g/年であったことから、入口側の鉛量が排出側の約1/53程度しかなく収支が整合しなかった。この原

因としては、ごみ中の鉛分析における試料の不均一性、すなわち分析資料の代表性の問題が考えられた。

4. まとめ

本研究により、入口側としてごみ組成毎の水銀及び鉛の寄与割合を明らかにした。水銀起源の寄与率は、「その他」が26.3%、「木・竹・わら類」が22.7%、「紙・布類」が22.3%、「厨芥類」は12.0%の順であった。鉛については、「ビニール・合成樹脂・ゴム・皮革類」が24.4%、「その他」が24.4%、「木・竹・わら類」が19.5%であった。排出側については、水銀は99%以上が、燃焼ガスに移行し、約90%が排ガス処理工程で捕集され。約10%は排ガスとして排出されることが確認された。鉛については、落じん灰と固化灰にそれぞれ約4割が分配し、両方を合わせると約80%となる。鉛は水銀よりも揮発しにくいことから、排ガス中に移行する量が水銀よりも少ない。一方、ごみ中の金属類等の比重の大きいものは、火格子の間隙から落下して落じん灰となる。鉛はこのような比重の大きい成分として落じん灰側にも移行しやすいと考えられた。

本研究では、鉛及び水銀ともに入口側と排出側とで収支が整合せず、入口側が少なく見積もられた。この原因としては、ごみ自体が極めて不均一であることから、ごみの分析を行う上で採取した分析試料がごみ全体を代表できていないためと考えられる。こうした分析精度の向上は今後の課題として残された。一方、排出側については、焼却残さ等の品質は比較的均一であると考えられる。本研究により、排ガス処理工程における鉛、水銀の分配が明らかにされた。特に、水銀については、全体の約10%が排ガスとして排出されることから、排ガスの排出基準の順守のためには、ごみ中の水銀の含有量を制御することが重要であり、ごみの分別等の取組みの徹底が重要と考えられた。

(本研究報告は、公立鳥取環境大学環境学部の崎野奈央の卒業論文の内容を含むものである)

参考文献

- [1] 環境省：水銀に関する水俣条約の概要、[https:// www.env.go.jp/chemi/tmms/convention.html](https://www.env.go.jp/chemi/tmms/convention.html)、2020年4月1日閲覧
- [2] 環境省：2016年度版環境省大気排出インベントリー、<http://www.env.go.jp/air/suigin/inventory.html>、2020年4月30日閲覧
- [3] 山本浩、横山隆、大下和徹、高岡昌輝、武田信生：一般廃棄物焼却プロセスにおける有価金属の落じん灰への移行挙動の解明、廃棄物学会論文誌、Vol.18、No.5、pp.314-324、2007
- [4] 成岡朋弘、門木秀幸：一般廃棄物焼却残渣中の金属成分の変化、鳥取県衛生環境研究所報、Vol.56、pp.46-47、2015
- [5] 白石幸弘、秩父薫雅、河端博昭：都市ごみ焼却排ガスの総合処理技術、粉体工学会誌、Vol.31、No.6、pp.430-435、1994
- [6] 渡辺信久、井上三郎、福永勲：都市ごみ焼却処理場での鉛のマスバランス、生活衛生、Vol.44、No.4、pp.171-174、2000

- [7] 塩田憲司、今井玄哉、水野忠雄、大下和徹、高岡昌輝：都市ごみ焼却施設からの微小粒子上物質の排出実態把握、廃棄物資源循環学会研究発表会講演集、C2-8 Poster2、2012
- [8] 貴田晶子、酒井伸一、芝川重博、松本暁洋：一般廃棄物焼却炉のダイオキシン類対策に伴う重金属類の排出抑制効果に関する研究、環境化学、Vol.13、No.1、pp.51-67、2013