

図 C. 3. 3 集じん灰中ダイオキシン類濃度の異性体分布

可能性が確認された。したがって、排ガスの急冷や低温での集じんを徹底する必要があると考えられる。

以上より、残骨灰のダイオキシン類濃度は低く、環境に与える影響は大きくないといえるが、集じん灰にはごみ焼却飛灰と比較しても同レベルであるため、排ガスの急冷や低温での集じんを徹底し、再合成を抑制しつつ、濃度の高いものに関しては別途処理を検討する必要があるだろう。

4. 残骨灰、集じん灰中の臭素化ダイオキシン類濃度

残骨灰中の臭素化ダイオキシン類は、表C.1より、施設Dで0.0038ng/gであり、その他は検出下限値以下(N.D.)であった。表B.4.6より、灰中の臭素化ダイオキシン類が、定量下限値と同レベルで検出されたとしても0.1 ng/gであり、塩素化ダイオキシン類と同様に、残骨灰中の臭素化ダイオキシン類に関してもその濃度は非常に低いと考えられた。

また、集じん灰に関しては、0.068～0.072 ng/gであり、同じ集じん灰中の塩素化ダイオキシン類と比較して、1/10000～1/1000のレベルであった。松本らは、都市ごみ焼却飛灰(BF灰)中のPBDDs/DFsを測定し、その濃度が0.0030～0.12ng/gであり非常に低い値であったと報告しており、この値と比較すると、火葬炉集じん灰中のPBDDs/DFsに関しては、都市ごみ焼却飛灰と同程度であると考えられる。

以上より、残骨灰、集じん灰中の臭素化ダイオキシン類濃度は低く、その影響は少ないと考えられた。

5. 火葬炉からのダイオキシン類の総排出量

今回の測定データより、火葬炉からのダイオキシン類排出量を推定した。推定の方法は、以下の(C.5.1)式により御遺体一体あたりのダイオキシン類排出量を算出した。なお乾き排ガス量は酸素12%換算した値を用いた。

$$\begin{aligned} & \text{一体あたりのダイオキシン類排出量(ng-TEQ/人)} = \\ & \text{ダイオキシン類毒性等量(ng-TEQ/m}^3_{\text{N}}) \times \text{乾き排ガス量(m}^3_{\text{N}}/\text{h)} \times \text{火葬時間(h/人)} \end{aligned} \quad (\text{C.5.1})$$

推定の結果を、表C.5.1に示した。今回の測定結果からは0.096～3,800ng-TEQ/人の範囲でダイオキシン類が排出されていることがわかった。算術平均値は1,000ng-TEQ/人、幾何平均は120ng-TEQ/人、中央値は240ng-TEQ/人となった。

平成9・10年度に実施した厚生科学研究における調査結果では、算術平均値は4,000ng-

表 C. 5. 1 ダイオキシン類の排出原単位試算結果

項目		測定時間	ダイオキシン類 毒性等量	O ₂ を考慮した 乾き排ガス量	ダイオキシン類 排出原単位
		分	ng-TEQ/m ³ _N	m ³ _N /h	ng-TEQ/人
A	A-1	42	0.11	3200	234
	A-2	46	0.00012	1000	0.096
B	B-1	68	0.0059	2100	14
	B-2	61	0.014	2900	41
C	C-1	71	1.2	1800	2600
	C-2	66	0.72	1700	1300
D	D-1	90	1.18	2200	3800
	D-2	71	0.096	2100	240
最大値					3800
最小値					0.096
中央値					240
算術平均値					1000
幾何平均値					120

TEQ/人、幾何平均値は1,800ng-TEQ/人、中央値は1,700ng-TEQ/人と算出されている、ただしこれらの値は、I-TEFを用いておりco-PCBsの結果も含まれていない値であることから、WHO1998-TEFを用いるとともにco-PCBsを含めた値で算出すると、算術平均値は4,800ng-TEQ/人、幾何平均値は2,200ng-TEQ/人、中央値は1,900ng-TEQ/人と算出される。これらの値と本研究での値を比較すると、現状は、約10年前の排出原単位よりも、算術平均値で約1/5、幾何平均値で約1/20、中央値で約1/8まで低減され、「ダイオキシン類排出抑制ガイドライン」により、適切に施設が運営されるとともに、燃焼・排ガス設備の高度化がなされてきた効果がうかがえた。

平成17年度の火葬炉の排出インベントリーは2.4～5.3g-TEQ/年⁶⁾で報告されているが、本研究結果のデータと平成17年度(2005年)の火葬件数の実績1,112,178体/年⁷⁾とを合わせ、幾何平均～算術平均の範囲で表すと、ダイオキシン類は、0.13～1.1g-TEQ/年まで低減されている結果となった。平成17年度の一般廃棄物焼却炉からの排出インベントリーは、62g-TEQ/年まで低減されており、火葬炉からの排出インベントリーの相対的な寄与はその3.8～8.5%まで増加していたが⁶⁾、本研究の結果から求めた相対的な寄与は0.2～1.8%程度であることが分かった。

次に、火葬場から排出されるダイオキシン類は火葬件数によるため、将来的な死亡者数の増加に伴い増加することを見込むため、排出インベントリーの将来推計を行った。将来的な火葬数は、火葬率と将来の死亡者数から求めるが、将来の死亡者数は、厚生労働省、国立社会保障・人口問題研究所の、日本の将来人口推計を用いた¹⁹⁾。推計方法は、人口変動要因である出生、死亡、国際人口移動について仮定を設け将来の人口を、コー

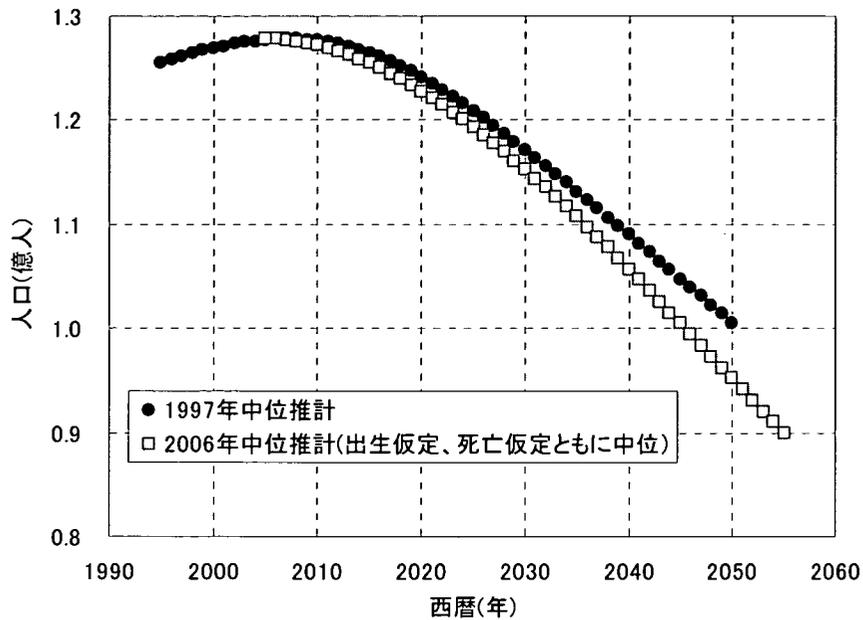


図 C. 5. 1 我が国における将来人口推計

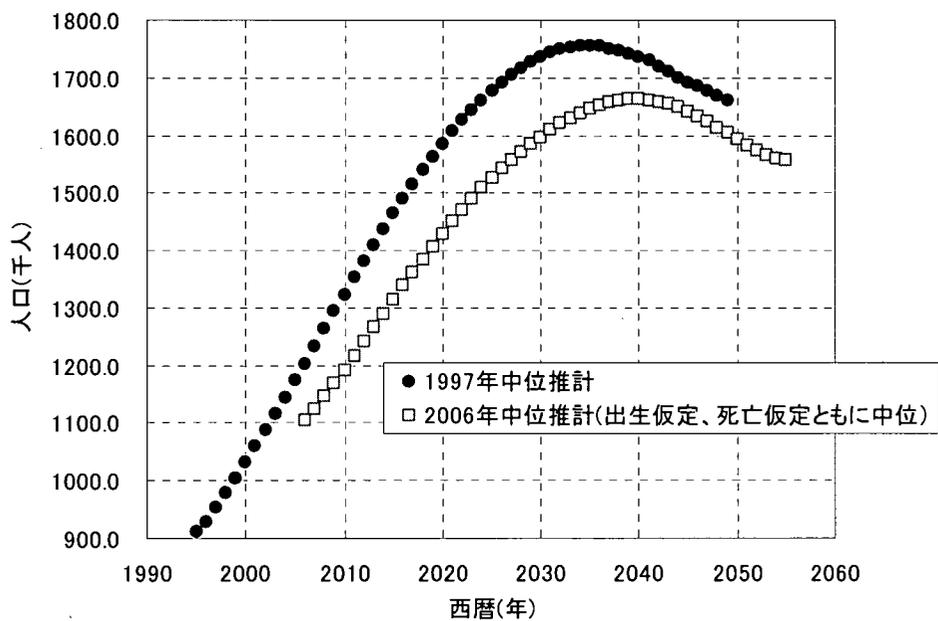


図 C. 5. 2 我が国における将来死亡者数推計

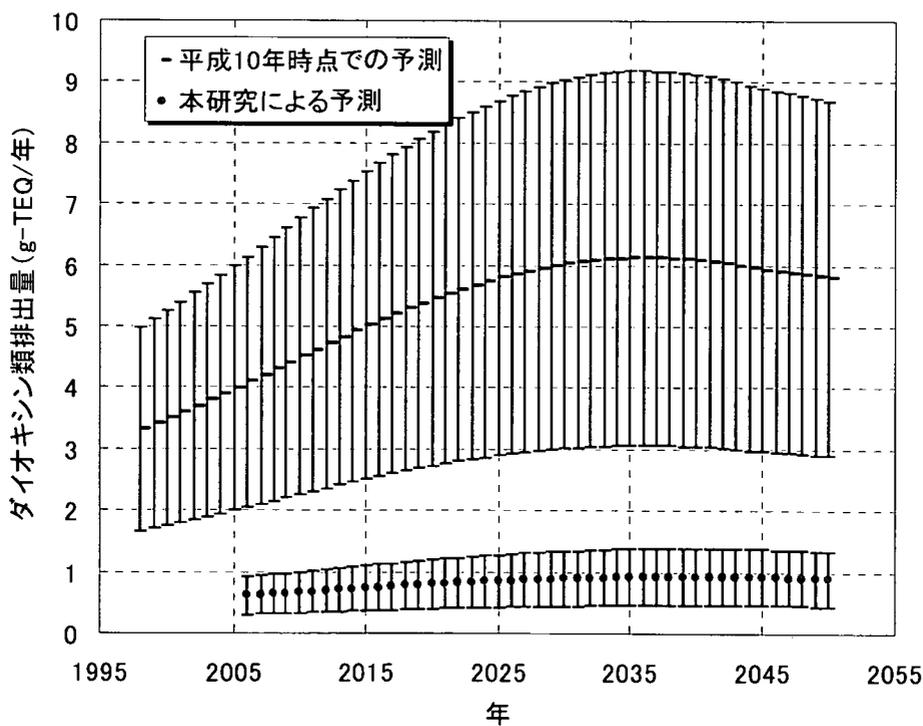
ホート要因法により推計するものである。平成9・10年度に実施した厚生科学研究において、1997年の将来人口中位推計を用い、ダイオキシン類排出インベントリーの将来予測がなされているが⁴⁾、本研究では、最新の2006年の将来人口推計(出生：中位仮定、死亡：中位仮定)を用いた¹⁹⁾。図C.5.1に、1997年、2006年の前提に基づき試算された日本の将来人口、図C.5.2に日本の死亡者数の予測を示した。2006年推計に基づけば、日本の将来人口は、2005年に既に1億2777万人でピークに達しており、現在は長期の減少過

程に入っている。死亡者数は、2006年の110万人から一貫して増加を続け、2020年の142.9万人を経て、2040年にはピークの166.3万人に達する。1997年推計と比較すると、将来人口は2006年推計の方が長期の減少過程で大きく減少する傾向であるが、死亡者数の増加は1997年の予測よりも緩やかであった。これは、2006年推計では、設定条件として、出生率などが1997年推計よりも低くなっていることを示唆している。

死亡者数の予測データ、火葬率、およびダイオキシン類排出量原単位 (ng-TEQ/人) を掛け合わせ、火葬場から排出される将来排出量を求めた。火葬率は、2006年で99.7%であったことから、この値を一律で用いた。

図C.5.3に、ダイオキシン類の排出インベントリーの将来排出量を、平成9・10年度に実施した厚生科学研究での結果と比較する形で示した。図から、これまでの予測では2020年で3.5～7.5ng-TEQ/年、2040年で3.8～8.3 ng-TEQ/年と試算されていたが、今後、死亡者数が増加したとしても、「ダイオキシン類排出抑制ガイドライン」による対策により、2020年で0.17～1.4 ng-TEQ/年、2040年で0.20～1.7 ng-TEQ/年程度までの増加に抑えられると試算された。

ただし、本研究での結果は4箇所調査の結果に依存しているため、今後、より多くの火葬場での調査を行って、より正確な排出量原単位、排出インベントリーを算出していく必要がある。



図C.5.3 我が国における火葬炉からのダイオキシン類排出インベントリーの将来推計

D. 結論

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・ 火葬炉における排ガス中ダイオキシン類の濃度は、酸素 12% 換算濃度で 4.7～75ng/m³_N、毒性等量で 0.00012～1.2ng-TEQ/m³_N の範囲であり、毒性等量の算術平均では 0.42ng-TEQ/m³_N であった。これらは、排出抑制ガイドラインにおける新設炉、既設炉における指針値を下回っていた。
- ・ 排ガス中の臭素化ダイオキシン類は、1施設で 0.031～0.045ng/m³_N で、同施設の塩素化ダイオキシン類に比較して 1/1000～1/200 程度の値であり、塩素化ダイオキシン類に比較してその寄与は十分に低いものと考えられた。
- ・ 残骨灰中のダイオキシン類の濃度範囲は、実測濃度で 0.012～0.184ng/g、毒性等量で 0.00000061～0.0038ng-TEQ/g であり。この値は非常に低いといえ、環境に与える影響は大きくないといえる。一方、集じん灰は、実測濃度で 71～530ng/g、毒性等量で 1.6～15ng-TEQ/g であり、異性体のパターンから再合成が生じていることが示唆された。したがって、排ガスの急冷や低温での集じんを徹底し、再合成を抑制しつつ、濃度の高いものに関しては別途処理を検討する必要がある。
- ・ 残骨灰中の臭素化ダイオキシン類は、1施設で 0.0038ng/g であり、その他は検出下限値以下 (N.D.) であった。一方、集じん灰に関しては、0.068～0.072 ng/g であり、同じ集じん灰中の塩素化ダイオキシン類に比較して 1/1000 以下であった。以上より、残骨灰、集じん灰中の臭素化ダイオキシン類濃度は低く、その影響は少ないと考えられた。
- ・ 本研究の調査結果から、ダイオキシン類の排出原単位の算術平均値は 1,000ng-TEQ/人 であり、10 年前の調査結果に比較して、約 1/5 となっており「ダイオキシン類排出抑制ガイドライン」による効果がうかがえた。
- ・ 平成 17 年度の火葬炉からの排出インベントリーを試算した結果、現在の報告値 : 2.4～5.3g-TEQ/年に比較して、0.13～1.1g-TEQ/年まで低減されている結果となった。また将来予測では、死亡者数が増加したとしても、2020 年で 0.17～1.4 ng-TEQ/年、2040 年で 0.20～1.7 ng-TEQ/年程度までの増加に抑えられると試算された。ただし、本研究での結果は 4 箇所調査の結果に依存しているため、より多くの火葬場での調査を行って、排出インベントリーの精度を高める必要がある。

E. 研究発表

該当なし

F. 知的財産権の出願・登録状況

該当なし

【参考文献】

- 1) 厚生労働省統計表データベースシステム：衛生行政報告例（旧 厚生省報告例（衛生関係））表 埋葬及び火葬の死体・死胎数並びに改葬数 <http://www.dbtk.mhlw.go.jp/toukei/index.html> (2008.3.21情報取得)
- 2) 厚生労働省大臣官房統計情報部：平成19年人口動態統計の年間推計、第1表—人口動態総覧の年次推移 <http://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/suikei07/index.html> (2008.3.21 情報取得)
- 3) 武田信生（主任研究者）：火葬場から排出されるダイオキシン類の実態調査、平成9年度厚生科学研究費補助金（厚生科学特別研究事業）報告書（1998）
- 4) 武田信生（主任研究者）：火葬場からのダイオキシン類の排出抑制対策の検討、平成10年度厚生科学研究費補助金（厚生科学特別研究事業）報告書（1999）
- 5) 火葬場から排出されるダイオキシン削減対策検討会：火葬場から排出されるダイオキシン削減対策指針（2000）
- 6) 環境省：ダイオキシン類の排出量の目録（排出インベントリー）、p.2、p.8（2006）
- 7) S.Eguchi, N.Takeda, S.Sakai: PCDDs/PCDFs Emissions from a Crematory, *Organohalogen Compounds*, Vol.27, pp.127-132 (1996)
- 8) N.Takeda, M.Takaoka, T.Fujiwara, H.Takeyama, S.Eguchi: PCDDs/DFs emissions from crematories in Japan, *Chemosphere*, Vol.40, No.6, pp. 575-586 (2000)
- 9) N.Takeda, M.Takaoka, T.Fujiwara, H.Takeyama, S.Eguchi: Measures to prevent emissions of PCDDs/DFs and Co-planner PCBs from crematories in Japan, *Chemosphere*, Vol.43, Nos.4-7, pp.763-771 (2001)
- 10) The Working Group of Subcommittee Air/Technology of the Federal Government Federal States Pollution Control Committee, Germany: Determination of Requirements to Limit Emissions of Dioxins and Furans, pp.127-132 (1994)
- 11) O.Hutzinger, H. Fiedler: From Source to Exposure: Some Open Questions, *Chemosphere*, Vol.27, Nos.1-3, pp.121-129 (1993)
- 12) 環境省水・大気環境局総務課ダイオキシン対策室：ポリブロモジベンゾ-パラ-ジオ

キシシ及びポリブロモジベンゾフランの暫定調査方法 (2007)

- 13) 環境省令第15号：ダイオキシン類対策特別措置法施行規則の一部を改正する省令 (2007)
- 14) 江原信夫、藤田健司、河上勇、八木美雄、酒井伸一：ダイオキシン類縁化合物の抑制効果の実証的確認、第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.742-744 (2002)
- 15) ごみ処理に係るダイオキシン削減対策検討会：ごみ処理に係るダイオキシン類発生防止ガイドラインーダイオキシン類削減プログラムー (1997)
- 16) S. Sakai, M. Hiraoka, N. Takeda and K. Shiozaki :Behavior of coplanar PCBs and PCNs in oxidative conditions of municipal waste incineration, *Chemosphere*, Vol. 32, No.1, pp.79-88 (1996)
- 17) V. Pekárek, R. Grabic, S. Marklund, M. Punochá and J. Ullrich: Effects of oxygen on formation of PCB and PCDD/F on extracted fly ash in the presence of carbon and cupric salt, *Chemosphere*, Vol.43, Nos. 4-7, pp.777-782 (2001)
- 18) 松本暁洋、芝川重博、貴田晶子、酒井伸一：ダイオキシン類の削減対策とその類縁化合物排出に関する調査研究、第13回廃棄物学会研究発表会講演論文集、pp.748-750 (2002)
- 19) 国立社会保障・人口問題研究所：日本の将来推計人口 (平成18年12月推計)(2006)

分担研究報告書 2

火葬場からの
水銀排出実態調査

分担研究者

高岡昌輝（京都大学）

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）

分担研究報告書

火葬場からの水銀排出実態調査

分担研究者 高岡昌輝 京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 准教授

研究要旨

本研究の目的は、火葬場から排出される水銀の濃度、総量、排出形態について、その実態を明らかにし、排出抑制策を検討することにある。平成19年度は、対象施設として代表的な4箇所の火葬炉を選定し、排ガス、残骨灰および飛灰中の水銀について測定を行い、データを収集した。その結果、排ガスにおいては、1サンプルのみ $0.008 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ を示し、他は定量下限値（ $< 0.006 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ ）となった。また飛灰中水銀について、含有量については土壤汚染対策法の基準以下であったが、溶出量は基準値を超えており、取扱いに注意が必要であることがわかった。残骨灰については問題なかった。水銀挙動の調査では、1か所の施設において連続分析計を用いて経時変化を測定した。その結果、挙動については過去の調査事例と同様の傾向であり、歯科アマルガム由来による発生が大きな寄与を占めることが確認された。また、今回の水銀測定において、JIS法では定量下限値以下のデータが多かったため、サンプリングを含む分析方法の検討も必要であることがわかった。

A. 研究目的

様々な発生源から環境大気中に排出された水銀は、各媒体で様々な変質を受け、やがて有機水銀として生物濃縮される。WHOは2003年に週許容摂取量を見直し、日本においても食品安全添加物委員会が2005年に従来の基準 $3.4 \mu\text{g}$ から $2.0 \mu\text{g}$ への見直しを行っている。このような動きとともに環境媒体中に存在する水銀を削減しようとする動きが国連環境計画などによりはじまっている。

水銀は様々な発生源から排出されていることが知られているが、火葬炉からの水銀排出実態に関するデータは極めて少ない。世界的にはイギリスにおいて研究が進んでおり、イギリスの火葬場では2020年までに1995年の水銀排出量の1.67倍になり、2035年にピークを迎えると見積もられ、2020年にはイギリス全体の大気への水銀排出量の11-35%の寄与をもつとして規制的な対策を打ち出している²⁾。また、スウェーデンにおいても人為的発生源のうち1995年時点で火葬炉からの排出が最も寄与が高いと見積もられ³⁾、世界的には重要な水銀の人為排出源として認知されており、日本における火葬炉からの水銀排出量を測定し、将来動向を推定することは極めて重要なことといえる。

日本は、御遺体の99.8%が火葬されており、火葬数は110万人を超え、世界一の火葬大国となっている⁴⁾。過去に、日本では吉田らが火葬炉からの水銀排出を問題視し、その放出量を推定している⁵⁾。彼らは火葬場周辺の大気中水銀濃度を測定し、それらが一般大気中の水銀濃度と同等であることを報告した。また、水銀を含有するアマルガム処置歯数から、調査した火葬場では26g/日の排出を推算した。その後2005年に著者らが1施設において調査を行った⁶⁾。その結果燃焼時間中の平均水銀濃度はバグフィルタ出口で Hg^0 及び Hg^{2+} は共に同程度で、総水銀濃度は $4.3\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。燃焼開始およそ10分後に Hg^0 のピークが観測され、その値は $1.5\sim 573.9\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ で、歯科用アマルガム由来であることが推測された。平均水銀排出量(バグフィルタ出口)は $51.8\text{mg}/\text{人}$ で標準偏差は $54.1\text{mg}/\text{人}$ であった。年間死者数を110万人とすると、 $57.0\text{kg}/\text{年}$ が推測された。

しかしながら、上記の研究は1施設における詳細なデータであり、日本全国の火葬炉からの水銀排出実態をより正確に把握しようとするならば、多くの施設における実測データが必要である。そこで、まず第一に4施設を対象に水銀の排出濃度をJIS法により測定し、各施設における水銀排出実態を明らかにした。次に、水銀排出挙動についてもこれまでの結果と比較し、新たな傾向があるかどうかを確認するため、1施設において連続分析計を用いて火葬中の水銀の挙動を調査した。

B. 研究方法

1. 水銀排出濃度実態調査

1.1 対象施設

本年度の調査対象とした火葬場は4施設であり、その火葬場の一覧を表B.1に示した。以下施設名については、施設A、施設B、施設C、および施設Dで記述する。4施設の全てが、主燃焼室1室に対し、再燃焼室1室を有しており、排気方式も排風機による強制排気方式であるが、施設D以外は、排気系列が2炉1系列となっている。集じん機は、施設A、および施設Bがバグフィルターであり、それぞれの後段に触媒装置、活性炭吸着設備を有している。施設C、施設Dではともに集じん機を有しない。

1.2 測定項目および測定方法

4箇所の火葬場を対象に、1箇所の火葬場で2回の排ガスサンプリングを行った。排ガスサンプリングは基本的に同一日に実施したが、火葬場の火葬スケジュールや天候により、施設C、施設Dでは2日に分けて1回ずつサンプリングを行った(表B.1)。排ガスサンプリングは、全ての火葬場で排風機の後段、排気塔の前段にある測定孔にて行った。

水銀はJIS K0222に基づいて測定した。サンプリング時間は一工程の燃焼時間の内、主

表 B.1 対象とした火葬炉と測定対象

火葬炉	施設A		施設B		施設C		施設D	
再燃焼炉	有		有		有		有	
主燃焼室：再燃焼室	1:1		1:1		1:1		1:1	
集じん機	バグフィルター		バグフィルター		なし		なし	
集じん機後段の排ガス処理	触媒装置		活性炭吸着設備		なし		なし	
排気方式（炉：系列）	強制（2:1）		強制（2:1）		強制（2:1）		強制（1:1）	
燃料	都市ガス 13A		都市ガス 13A		灯油		灯油	
実験番号	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2
火葬日	2008/2/27	2008/2/27	2008/2/28	2008/2/28	2008/3/11	2008/3/12	2008/3/13	2008/3/17
火葬開始時間	11:17	13:30	11:02	13:11	12:57	13:20	12:35	13:37
火葬終了時間	11:59	14:16	12:10	14:12	14:08	14:26	14:05	14:48
火葬時間	0:42	0:46	1:08	1:01	1:11	1:06	1:30	1:11
火葬遺体数	1	1	1	1	1	1	1	1
年齢	81歳	83歳	69歳	87歳	84歳	65歳	74歳	90歳
性別	女性	男性	男性	男性	女性	男性	女性	女性

燃焼バーナの点火時から、消火時までとし統一した。施設Dを除く全ての火葬場では、排気系列が2炉1系列となっているが、2炉同時に稼働させず、どちらか一方の炉のみの稼働とした。また同時に、サンプリングポイントにおける排ガス中水分、流速を測定し、排ガス流量（湿り、乾き）を求めるとともに、排ガス温度を測定時間中連続的に熱電対により測定した。

また全ての火葬場で、2回目の排ガスサンプリング終了の約1時間後に、残骨灰（収骨後に残った灰の一部）を採取し、さらに、施設A、施設Bでは集じん灰（集じん機で捕集された灰）を採取した。これらの固体サンプルに対しては、環境省告示18号に基づく溶出量試験と環境省告示19号に基づく含有量試験を行い、溶出量および含有量を評価した。

2. 水銀挙動調査

2.1 施設

詳細な水銀排出挙動調査は施設Dで行った。水銀連続分析計を用いて排気塔出口前においてHg⁰濃度およびHg²⁺濃度を2008年1月31日から2月22日までの8件の火葬について測定した。排気塔出口前から水銀連続分析計までのサンプリングラインはおおよそ20m程度あったが、後半部分の10mについては加熱導管を用いて180℃に加熱した。

2.2 測定方法

基本測定については、湿式の形態別水銀連続測定装置（日本インスツルメンツ社製のMS-1A +DM-6B）を用いて、上記の現場に設置した。形態別水銀連続測定装置の写真お

よび前処理フローを図B.1および図B.2に示す。フローに示されているように、排ガスはKCl溶液に水銀が溶解するかどうかにより、金属状(0価)と2価の水銀に分けられるもので、最終的な検出方法は原子吸光法で検出下限は $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ である。

再燃焼炉の着火と同時に連続分析計の測定を開始し、主燃焼炉の着火から主燃焼炉の消火までを濃度測定時間とした。

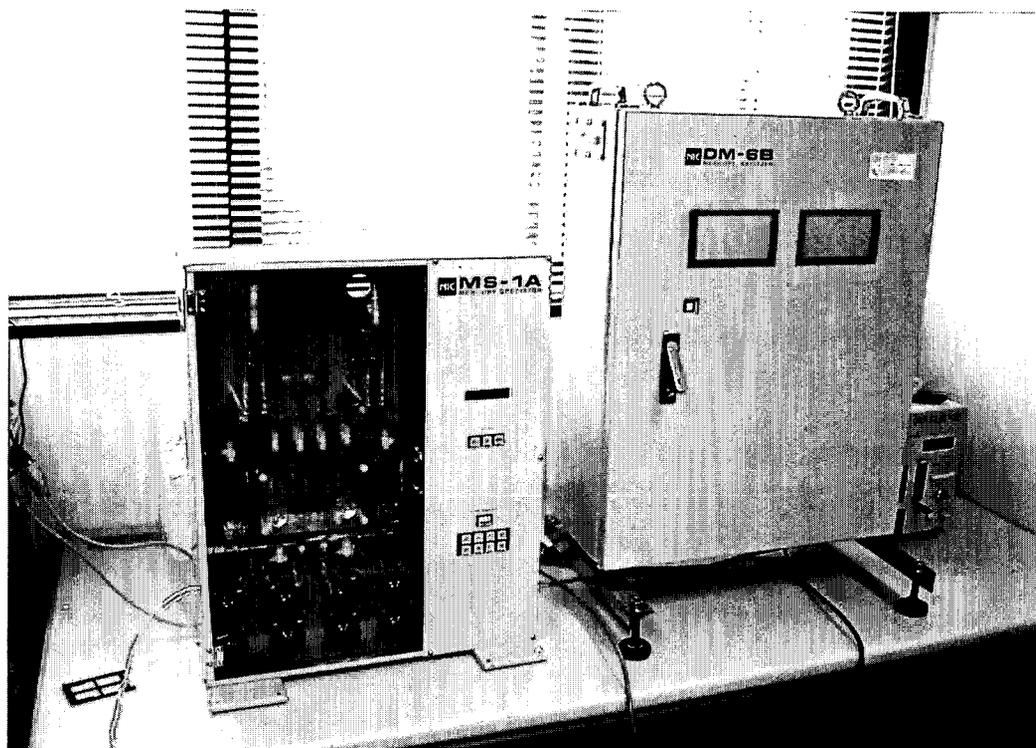


図 B. 1 湿式形態別水銀連続分析計

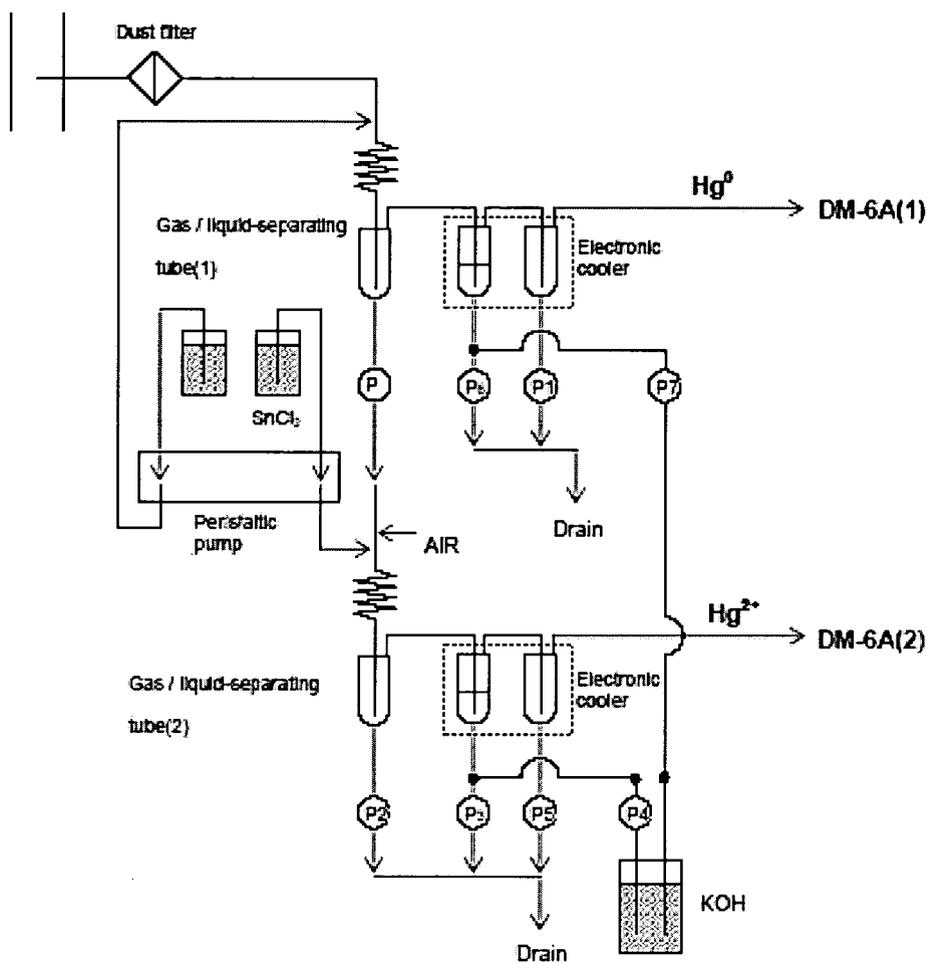


図 B. 2 形態別水銀連続分析計の前処理部フロー

C. 研究結果、および考察

1. 各施設における水銀濃度調査

1.1 排ガス中の水銀濃度

各施設における、水銀濃度測定結果を表C.1に示す。定量下限値 ($< 0.006\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) を超えたものについては施設Aの1件 ($0.008\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) だけであった。水銀濃度はもちろん被火葬物中に含まれる水銀に大きく依存するが、火葬時間にも依存する。すなわち、今回の測定時間は1火葬あたりとしている（主燃焼室の着火から消火まで）ので、A-1の条件はもっとも短い時間（38分）であったことも影響していると思われる。もし、施設Dのように火葬に長時間かかり、例えば2倍の時間がかかったとすれば、濃度はおおよそ半分となり、定量下限値を下回る。つまり、今後、水銀についてガイドライン等の行政指導する場合はサンプリングを含めた分析方法・結果の示し方についても言及する必要があると思われる。

火葬炉は特に熱交換器などをもたず、空気吹き込みによる排ガス冷却を行っている施設がほとんどで、その影響で各施設により排ガス以外の空気による希釈効果が異なる。そのため、酸素換算を行わないと施設間の濃度の比較は公平でない。O₂12%換算濃度とした場合、各施設の酸素濃度によりその値は大きく異なった。定量下限値以下の議論であるため、あまり意味をなさないが、 $<0.009 \sim <0.054 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ となった。

表 C. 1 各施設における水銀濃度測定結果

	水銀実測濃度 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	O ₂ 12%換算 ($\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	排ガス流量 ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{hr}$)	O ₂ 濃度 (%)	時間 (分)	排出量 ($\text{mg}/\text{人}$)
A-1	0.008	0.023	9210	17.9	38	47
A-2	<0.006	<0.054	9210	20	42	<39
B-1	<0.006	<0.042	14600	19.7	66	<96
B-2	<0.006	<0.030	14600	19.2	54	<79
C-1	<0.006	<0.021	6210	18.4	66	<41
C-2	<0.006	<0.023	6210	18.6	58	<36
D-1	<0.006	<0.009	3250	15	81	<26
D-2	<0.006	<0.009	3250	15.2	71	<23

1.2 残骨灰、集じん灰中の水銀濃度

残骨灰は4施設全て、集じん灰は施設A、施設Bにおいて採取し、測定した。表C.2に各施設における残骨灰および集じん中水銀の溶出・含有量結果を示した。まず、水銀の残骨灰中の水銀含有量は、すべて $0.05\text{mg}/\text{kg}$ 未満であった。ただし、この含有量は土壤汚染対策法で規定されている方法によるもので1N塩酸により溶出する量を示している。集

じん中の水銀含有量は、2.2、6.2mg/kgであった。土壤汚染汚染対策法における含有量基準は15mg/kgであることから、残骨灰については全く問題はない。集じん灰については基準値以下であったが施設によっては超える場合もありうる濃度であった。

溶出量についても、残骨灰すべては0.0005mg/L未満であり、土壤環境基準（0.0005mg/L）を下回っていたが、集じん灰は0.090mg/L、0.0027mg/Lと上回っていた。特にAについては基準の180倍であった。これは含有量の違いからも容易に推測できることであるが、溶出したA、BのサンプルについてはBの方が含有量が大きく、含有量と溶出量の間には必ずしも比例関係があるわけではなかった。

表 C.2 各施設における残骨灰
および集じん灰（飛灰）中水銀の溶出・含有量結果

	溶出量(環境省告示 18号試験) (mg/L)		含有量(環境省告示 19号試験) (mg/kg)	
	残骨灰	飛灰	残骨灰	飛灰
	A	<0.0005	0.090	<0.05
B	<0.0005	0.0027	<0.05	6.2
C	<0.0005	-	<0.05	-
D	<0.0005	-	<0.05	-

1.3 排出される水銀量およびその推定

水銀実測濃度に燃焼時間中の排ガス流量と火葬時間(min)をかけることによって、排出される総水銀量を算定した。表 C.1 に示す。水銀濃度自体が定量下限値以下であったため、正確な推定はできないが、その範囲は<23mg/人~<96mg/人となった。過去の研究事例では、水銀排出量は51.8mg/人と見積もられていることから、オーダーの違いはないと考えられる。ただ、唯一濃度が測定できた A-1 でも 47 mg/人となったことから、今回はやや低かったのではないかと推測された。

イギリスでは火葬場からの水銀排出量が規制されようとしているが、規制値案は水銀排出量 150mg/4人(37.5mg/人)である⁷⁾。今回測定した検体では明らかに超えていないといえるのは3検体だけであった。

排ガス中水銀測定におけるJIS法ではばいじん中の水銀濃度は対象としておらず、ガス状の水銀のみを対象としている。本測定ではばいじん濃度および集じん灰中水銀濃度をそれぞれ測定していることから、どの程度集じん灰へ移行しているかを推測してみた。施設 C、D における排ガス中ばいじん測定結果より、おおよそ排ガス 1m³_N あたり 50mg の

ばいじんがあると仮定し、排ガス量と火葬時間をかけると、施設A、Bではそれぞれ1mg/人、4.5 mg/人と計算された。したがって、集じん灰へ移行は大きくないことがわかった。ただし、この結果は集じん灰中水銀濃度を土壤汚染対策法の含有量で計算したものであることに注意せねばならない。排ガス中水銀についても定量下限値以下であるため、結論めいたことはいえないが、ごみ焼却施設の排ガスなどと比べるとバグフィルターによる水銀除去効率がやや低いのではないかと推測された。

2. 水銀挙動調査

上記の調査では、各施設における水銀排出実態をJIS法により調査した。しかしながら、JIS法は火葬時間中の平均水銀濃度を表わすだけでその経時変化を知ることはできない。そこで、1施設において連続分析計を用いて水銀排出挙動の経時変化を調査し、過去の研究事例と比較し、新たな傾向があるかどうかを確認した。施設Dにおいて、1月31日～2月22日までの8件の結果について報告する。表C.3に各火葬に関する時刻およびご遺体の年齢・性別を記す。

表C.3 火葬状況

	再燃焼炉 着火時刻	主燃焼炉着火 時刻	再燃焼炉消火 時刻	主燃焼炉消火 時刻	年齢、 性別
1月31日	12:50	13:40	-	15:20	64、女
2月2日	12:40	13:36	14:23	15:03	89、男
2月5日	13:40	14:26	14:56	15:51	69、男
2月6日	13:41	14:28	15:07	15:59	82、女
2月11日	12:57	14:04	14:47	15:18	90、女
2月16日	13:34	14:33	14:53	16:05	73、女
2月20日	12:38	13:15	14:03	15:00	61、男
2月22日	12:10	13:03	14:07	14:50	81、女

2.1 排ガス中水銀濃度

表C.4に水銀連続分析計による測定結果を示す。連続計のデータは負の値をすべて0に直し、補正した。8回の平均濃度は総濃度で $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。結果は酸素換算されていないが、燃焼時間における連続計における酸素濃度は約18%程度であったことから、 O_2 12%換算濃度値は約3倍の値、つまり $4.5\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。総濃度 $1.5\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ は、2005年

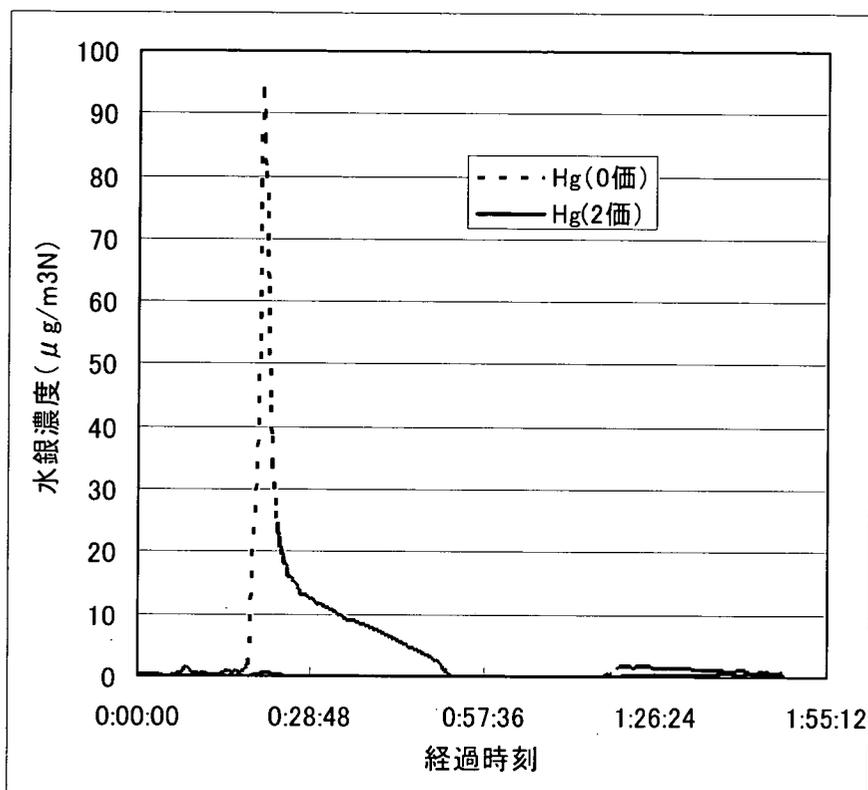
表 C. 4 火葬排ガス中水銀濃度結果

	Hg ⁰ 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	Hg ²⁺ 濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	総水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	Hg ⁰ の割合 (%)
1月31日	4.6	0.1	4.7	98
2月2日	0.6	0.3	0.9	67
2月5日	1.2	1.5	2.7	44
2月6日	0.6	0.5	1.1	55
2月11日	0.9	0.3	1.2	75
2月16日	0.3	<0.1	0.4	75
2月20日	0.6	<0.1	0.7	86
2月22日	0.3	<0.1	0.4	75
平均	1.1	0.4	1.5	72

度の別の施設の調査では $4.3\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であったことから約1/3の濃度であった⁶⁾。また上記の実態調査結果からすると、JIS法では $<6\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であったこととも合致する。都市ごみ焼却炉排ガスと比べると同程度であるといえる⁷⁾。

今回の排ガス中水銀濃度が他施設よりも低かった理由としては2つのことが考えられる。一つは、排ガスサンプリングにおいて損失があった可能性がある。これはサンプリングの位置等の制約から加熱導管が10mでは不足したこと、今回の排ガスはスが多かったことから、吸着等の損失が想定された。しかし、サンプリングラインにおいて吸着損失がある場合、次の測定時に温度の高い排ガスが導入された際に、ピークを生じることがしばしば認められる。今回の測定では再燃焼炉着火から主燃焼炉着火までの期間にピークが認められなかったことから、この損失はそれほど大きくないと考えられる。

もう一つは、平均濃度は火葬時間および排ガス流量に左右される。今回の8回の測定では、歯科アマルガム由来の水銀排出が明確に認められたのは、1月31日の火葬のみであった。その結果を図C.1に示す。瞬間最大濃度は $95\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であったが、総水銀濃度は $4.7\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。過去に調査した施設では火葬時間が約1時間程度であったことから、本施設では約2倍かかっていることになる。したがって、総排出量（濃度×排ガス流量×火葬時間）が同じであっても、火葬時間が長ければ濃度が低くなることが一因であるといえる。各施設における水銀実態調査においては定量下限値が $6\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下であったことから、図C.1のような場合（ $4.7\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ）であってもJIS法では定量下限値と表現されることになり、この点は今後の検討課題となろう。



図C.1 施設Dにおける1月31日の水銀濃度の経時変化

また、このアマルガム由来の水銀排出は1月31日のサンプル以外では、2月16日および2月22日でもピークは小さいながらほぼ10-20分後にピークが出現する傾向があった。したがって、3/8の確率であり、過去の研究事例(1/2)との比較ではやや出現頻度は低かった。

2.2 水銀形態について

火葬排ガス中総水銀に占める0価水銀の割合を求めた結果を表C.4に示す。2月16日、2月20日、2月22日の2価水銀については平均濃度が $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 未満であったため、計算上は $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ とした。0価水銀の割合は44-98%で平均では72%となった。つまり、0価水銀の方が多かった。過去の研究事例でもこの割合はかなりばらついているが、歯科アマルガム由来と考えられる大きなピークが認められる場合は、0価水銀が圧倒的に大きいことから、高排出濃度である場合は0価水銀の形態であるといえる。排ガス中の水銀は一般に0価水銀であると除去しにくい⁸⁾。これは、実態調査における水銀排出量において述べたようにバグフィルターでの除去効率が低い傾向があることと合致している。

2.3 排出される水銀量およびその推定

上記の実態調査と同様に計算した結果を表C.5に示す。排出水銀量の範囲は、2.0mg/人～25mg/人となり、過去の研究事例と比べると低かった。ここで、排出量と年齢との関係を見てみると、2月20日の火葬のように低い事例もあるが、1月31日、2月5日の事例では年齢が60歳代であった。これは、歯科アマルガムの治療歴からの推測では、45歳～70歳くらいまでの年代がもっともアマルガムを保持していると考えられる⁶⁾ことと合致している。

表 C. 5 施設 D における水銀排出量

	総水銀濃度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	排ガス流量 ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{hr}$)	火葬時 間 (分)	排出量 (mg/人)
1月31日	4.7	3250	100	25
2月2日	0.9	3250	87	4.2
2月5日	2.7	3250	85	12
2月6日	1.1	3250	91	5.4
2月11日	1.2	3250	74	4.8
2月16日	0.4	3250	92	2.0
2月20日	0.7	3250	105	4.0
2月22日	0.4	3250	107	2.3
平均	1.5			7.6

D. おわりに

本研究では火葬炉からの水銀排出濃度および総量と水銀排出挙動を調査した。以下に得られた知見を示す。

- ・ 4施設における水銀濃度実態調査では、排ガスにおいては、1サンプルのみ $0.008 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ を示し、他の多くは定量下限値 ($< 0.006 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$) となった。
- ・ 集じん灰中水銀について、含有量については土壤汚染対策法の基準以下であったが、溶出量は基準値を超えており、取扱いに注意が必要であることがわかった。残骨灰については問題なかった。
- ・ 水銀挙動の調査では、1か所の施設において連続分析計を用いて経時変化を測定した。その結果、挙動については過去の調査事例と同様の傾向であり、歯科アマルガム由来による発生が大きな寄与を占めることが確認された。 Hg^0 と Hg^{2+} の占める割合は Hg^0 の方が大きかった。