

200840043A

厚生労働科学研究費補助金
厚生労働科学特別研究事業

火葬場における有害化学物質の
排出実態調査および抑制対策に関する研究

平成20年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 武田 信生 (立命館大学)

平成21 (2009) 年 3月

厚生労働科学研究費補助金

厚生労働科学特別研究事業

火葬場における有害化学物質の
排出実態調査および抑制対策に関する研究

平成20年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 武田 信生 (立命館大学)

平成21 (2009) 年 3月

目次

I .	総括研究報告	1
	火葬場における有害化学物質の排出実態調査および抑制対策に関する研究 武田信生	
II .	分担研究報告	33
1.	火葬場から排出されるダイオキシン類等の実態調査	35
	武田信生、大下和徹	
	資料1 ダイオキシン類の毒性等価係数	
	資料2 各種の毒性等価係数を用いた毒性等量値の相関	
2.	火葬場から排出される水銀をはじめとする重金属等の実態調査	81
	武田信生、高岡昌輝	
3.	火葬場から排出される水銀排出起源に関する調査	117
	森澤眞輔、森田章介、米田稔、中山亜紀	
	資料1 大阪歯科大学 医の倫理委員会に提出した研究計画書	
	資料2 大阪歯科大学 医の倫理委員会に提出した研究等審査申請書	
	資料3 大阪歯科大学 医の倫理委員会 承認証	
	資料4 患者への説明文章	
	資料5 同意書	
III .	研究成果の刊行に関する一覧表	145
IV .	研究成果の刊行物・別刷	147
	謝辞	161

厚生労働科学研究費補助金

厚生労働科学特別研究事業

火葬場における有害化学物質の
排出実態調査および抑制対策に関する研究

I. 総括研究報告

研究代表者 武田 信生 (立命館大学)

平成21 (2009) 年 3月

厚生労働科学研究費補助金（厚生労働科学特別研究事業）
総括研究報告書
火葬炉における有害化学物質の排出実態調査および抑制対策に関する研究

研究代表者 武田信生 立命館大学エコテクノロジー研究センター センター長

研究要旨

本研究の目的は、火葬場から排出される有害物質の濃度、排出量、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20年度は、対象施設として、平成19年度までの4施設に加え、さらに7箇所の火葬炉を選定し、排ガス中のダイオキシン類や水銀などについて測定を行い、火葬場のデータを収集した。また、残骨灰および集じん灰中についてもダイオキシン類の濃度や、水銀を含む重金属などの溶出量、含有量に関する調査を行った。また火葬炉から排出される水銀の排出量をできるだけ正確に見積もるため、その排出起源に関する調査も実施した。

本研究の結果、まず、排ガス中ダイオキシン類濃度は、 O_2 12%換算濃度の算術平均では $1.2 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり、本研究と平成19年度の結果を合わせると（計11施設）火葬炉における排出原単位は、算術平均で $1,600 \text{ ng-TEQ}/\text{人}$ と見積もられた。この値は1999年の調査結果に比較して約2/5となったことから、「ダイオキシン類削減対策指針」による効果がうかがえた。一方、集じん灰中ダイオキシン類濃度は、毒性等量で $0.014 \sim 5.0 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{g}$ であった。ダイオキシン類濃度が高い火葬炉は、熱交換器を用いた冷却方式を有するものに限られたことから、熱交換器部分での再合成が生じている可能性が示唆された。

水銀濃度実態調査では、JIS法により測定した排ガス中水銀濃度は、 O_2 12%換算で、 $<0.010 \sim 0.135 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり、廃棄物焼却炉の自主目標値の値を大きく超えるケースもあった。これら排ガス中水銀はバグフィルターでは除去しにくいことが推測され、活性炭吸着等の対策を検討する必要性が示唆された。この測定結果を基にした水銀の排出量平均値は、 $37.8 \sim 73.8 \text{ mg}/\text{人}$ の範囲にあり。過去調査とほぼ同様の範囲であった。水銀挙動の調査結果は、過去の調査事例と同様の傾向であり、いくつかの火葬で、歯科アマルガム由来と考えられる Hg^0 の高濃度ピークが見られ、排出濃度としても廃棄物焼却炉の自主目標値の値を大きく超えていた。灰中の重金属等の挙動に関しては、特に六価クロムに関して、全てのサンプルの溶出量が、基準の10～1,800倍の濃度であった。灰中の六価クロムの由来としては、ステンレス架台や、炉内耐火物中のクロムの可能性があるが、炉内材のクロムフリー化対策によっても、依然として溶出量が高い可能性もあり、今後、バグフィルター等による集じんにより炉外への排出を抑制し、別途灰の処理を検討することも視野にいたした調査が必要であると考えられた。

水銀排出起源に関する調査においては、9検体のアマルガム充填物の採取、ヒアリング、および治療時のデータが得られた。アマルガム充填物の重量は $56 \sim 231 \text{ mg}$ （算術平均 116 mg ）であったが、経過年数とともに重量は減少する傾向がわずかに見られた。また、アマルガム由来の蒸気水銀についてのヒトのPBPKモデルを構築した。モデルの検証を行った結果、実測データをよく表現しており、モデルの妥当性が確認された。次年度は、このモデルを用いて、歯科用アマルガム由来の水銀について健康リスク評価を行う予定である。

分担研究者	森澤眞輔	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻	教授
	森田章介	大阪歯科大学口腔外科学第一講座	教授
	米田 稔	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻	教授
	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
	中山亜紀	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻	助教
	大下和徹	京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻	助教

A. 研究目的

わが国の火葬率は、平成19年度で約99.9%であり¹⁾、かつ死亡人口が年々増加していることから²⁾、火葬数は増大傾向にある。火葬場から排出される排ガスや集じん灰、残骨灰等は、宗教上の観点から大気汚染防止法や廃棄物処理法などの対象外であるが、安全・安心な火葬を続けていくためには、火葬炉から排出される有害物質に関する実態調査およびその排出抑制対策が必要となる。

従来、国内外を問わず、火葬場から排出される排ガス、集じん灰や残骨灰等の実態についてはほとんど調査されてこなかったが、平成9・10年度厚生科学研究事業において、研究代表者らは、火葬場から排出されるダイオキシン類の実態調査を行った³⁾、⁴⁾。これらの調査では、全国の火葬場から27施設を選定し、ダイオキシン類の排出濃度を測定し実態を明らかにした。その結果、火葬炉排ガス中ダイオキシン類の毒性等量の算術平均値は2.9 ng TEQ-WHO₉₈/m³_Nであることを示し、また、排出原単位として、1回の火葬において排出されるダイオキシン類の量(算術平均値4,800 ng TEQ-WHO₉₈/人)を明らかにし、これら調査結果および統計値から火葬炉からのダイオキシン類排出量を算定した⁴⁾。これらにより、平成12年には火葬炉からの「ダイオキシン類排出抑制対策指針」(以下、削減対策指針)⁵⁾が定められたうえ、排出原単位は、日本におけるダイオキシン類の排出インベントリーの算出に用いられている⁶⁾。

「ダイオキシン類対策特別措置法」の効果によってわが国全体のダイオキシン類排出量は急減したが、10年前に求めた排出原単位を用いている火葬炉からの排出量だけはむしろ増加傾向を示している⁶⁾。しかし、現実には、削減対策指針後、火葬炉からのダイオキシン類排出量は、燃焼管理、排ガス処理の高度化により、減少しているものと推測される。削減対策指針の効果を検証し、最新の排出量を見積るためには、再度実態調査を実施し排出原単位の見直しが必要である。

また、水銀についてはUNEPの世界水銀アセスメントが公表されており、人の健康と環境に害を及ぼす水銀によるリスク軽減の取り組みが提言されてきている。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1999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⁷⁾。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⁸⁾、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。

さらに、火葬炉から排出される灰中に六価クロムが多量に含まれるとの新聞報道があったこと⁹⁾、や一部の調査では灰中の六価クロムの原因として火葬炉内で棺を載せるステンレス製架台が考えられるとの報告がある¹⁰⁾、また、六価クロムだけでなく、棺、副葬品によっては、前述した水銀をはじめとする重金属、フッ素、ホウ素などの物質も基準を超過する可能性がある。しかし、これらに関しては、現在のところ知見が乏しく、実態はほぼ把握されていない。したがって、早急な実測データの収集による実態解明と、その対策の検討が求められている。

そこで、研究代表者らは、平成19年度厚生労働科学特別研究事業において、4施設の火葬炉を選定し、排ガス中のダイオキシン類や水銀などについて測定を行い、火葬場のデータを収集した(以下、2007調査)。また、残骨灰および集じん灰中についてもダイオキシン類の濃度や、水銀を含む重金属などの溶出量、含有量に関する調査を行った。その結果、火葬炉における排ガス中ダイオキシン類の濃度は、O₂12%換算濃度の算術平均で0.42 ng TEQ-WHO₉₈/m³_Nであることがわかった。また、臭素化ダイオキシン類は、塩素化ダイオキシン類に比較してその寄与は十分低いことが確認された。これらの調査結果から、ダイオキシン類の排出原単位の算術平均値は1,000 ng TEQ-WHO₉₈/人であり、10年前の調査結果に比較して、約1/5となっており削減対策指針による削減効果がうかがえた。排ガス中の水銀に関しては、JIS法における排ガス中水銀測定ではその大部分が定量下限値以下となった。また、過去調査事例と同様に、歯科アマルガム由来によるHg⁰のピークが確認され、排出への寄与が大きいことが確認された。残骨灰および集じん灰の重金属などの溶出量、含有量に関しては、全てのサンプルで六価クロムの溶出量が、基準の180～1200倍であり、含有量に関しても基準超過するケースが見られたことから、残骨灰、集じん灰に関しては、まず六価クロムに対する対策が必要であると考えられた¹¹⁾。

このように、研究代表者らは、火葬炉排ガス中のダイオキシン類や水銀、灰中の重金属等の実態について、2007年調査を中心に調査してきたが、これまでの研究は4施設のみにおけるデータであり、日本全国の火葬炉における有害物質の排出状況をより正確に把握しようとするならば、できるだけ多くの施設の実測データを得ることが必要であり、その結果から問題となるものについて対策を検討しなければならない。

以上のような背景の下で、本研究では、2007調査における4施設での結果に加え、新たに7施設の火葬炉を選定し、以下の①～②の実態調査を行って火葬場から排出される有害物質の濃度、排出量、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を第一の目的とした。

また、研究代表者らは、2005年に1ヶ所の火葬炉において排ガス中水銀濃度の調査を行った結果、歯科医療に使用されたアマルガムに由来する無機水銀の排出が確認され、日本における火葬炉からの水銀排出量として57.0 kg/年が推測された。しかし、この値は、アマルガムの歯科統計・工業統計からの水銀排出量推測値に比較し、1/40～1/30倍であり、大きな隔たりがあった¹²⁾。この原因としては、口腔内アマルガムの時間経過に伴う減少と、初期に充填されたアマルガム中水銀量の過大評価(イギリスの原単位による¹³⁾)の可能性が考えられたが詳細は不明である。また、アマルガムが口腔内で減少していく場合には体内に移行することが懸念されるため、人体への健康リスクを評価する必要がある。

そこで、本研究は、火葬炉からの水銀の排出量をより正確に見積るため、③に示す水銀排出起源に関する調査を行って、火葬炉からの水銀排出量推計値を見直すとともに、水銀による人体への健康リスクを評価することを第二の目的とした。

①. 火葬場から排出されるダイオキシン類等の実態調査

火葬場から排出されるダイオキシン類について測定を行い、データを収集することで、現状のわが国の火葬場からのダイオキシン類排出量を見直し、削減対策指針の効果を検証した。具体的には、対象施設として7箇所の火葬炉(2007調査とは別の施設)を選定し、排ガスについては排ガスサンプリングを行い、そのダイオキシン類濃度を調べ、2007調査の結果も加えて、得られた統計値を用いて、最新の排出原単位を明らかにした。また、排出原単位は、削減対策指針以前のデータとの比較を行って、削減対策指針の効果を検証した。同時に、ガスサンプル以外の残骨灰および集じん灰についても実態調査を行った。

②. 火葬場から排出される水銀をはじめとする重金属等の実態調査

これまでの調査に加え、延べ8施設の火葬炉を対象に、排ガス中水銀、および灰中の重金属、フッ素、ホウ素について調査を行い、実態を明らかにした。

具体的には、まず、7施設の火葬炉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、6施設の火葬炉において形態別湿式連続分析計を用いて火葬中の水銀の排出挙動を調査した。最後に、6施設の火葬炉から得られた残骨灰、集じん灰を対象に、その中の水銀、六価クロム、フッ素、およびホウ素に、カドミウムを加え、土壤汚染対策法に基づいた溶出試験、含有量試験により安全性を評価した。

③. 火葬場から排出される水銀排出起源に関する調査

過去に充填された水銀アマルガム充填材中の水銀を分析し、水銀アマルガム充填材の経年変化を明らかにすることによって排出量推計値を見直すとともに、水銀による人体への健康リスクを評価することを目指した。平成20年度は、歯科患者からの充填物の採取およびヒアリングデータを収集し、整理するとともに、水銀の人体への健康リスクを評価するため、体内動態評価モデルを作成した。

B. 研究方法

1. 実態調査対象施設

本研究で調査対象とした火葬場は8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～Hで記述する。8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A～Cは、排気系列が2炉1系列であり、施設Dは3炉1系列、施設E～Hは1炉1系列であった。集じん機は、施設A～Cにはバグフィルターが設置され、それぞれの後段に触媒装置、あるいは活性炭吸着設備が設置されていた。施設Dでは電気集じん機、施設Fではスクリーンが設置されており。施設E、施設G、および施設Hはともに集じん機が設置されていなかった。

2. 実態調査の測定項目および測定方法

本研究では、主として施設A～Gの7箇所火葬場を対象に、1箇所火葬場につき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、火葬場のスケジュールにより、施設E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で行った。具体的には、排気塔出口の前段にある測定孔、あるいは測定孔が無い場合は、排気塔出口から煙道に直接サンプリングチューブを挿入し実施した。また施設Hでは後述する排ガス中の水銀連続分析を中心に実施した。

測定項目、および測定方法の一覧を表B.2、表B.3に示した。排ガス測定に関しては、ダイオキシン類、水銀以外に、ばいじん、一酸化炭素、二酸化炭素、酸素、窒素酸化物の濃度を測定した。排ガス中のダイオキシン類の測定は、JIS K 0311に準拠し行った。水銀はJIS K0222に基づいて測定した(以下、JIS法)。サンプリング時間は一火葬工程の燃焼時間の内、主燃焼バーナの点火時から、消火時までとし統一した。施設A～Dでは、排気系列が2炉1系列、あるいは3炉1系列となっているが、この場合、2炉以上は同時に稼働させず、1炉のみの稼働とした。一酸化炭素、酸素、二酸化炭素、窒素酸化物は連続分析計により測定した。また、あらかじめ、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、排ガス温度を熱電対により測定した。

また、詳細な水銀排出挙動調査を施設A～D、および施設G、Hで形態別水銀湿式連続分析計(日本インスツルメンツ社製のMS-1A+DM-6B)を用いて、 Hg^0 濃度および Hg^{2+} 濃度を連続測定した。施設A～D、および施設Gにおいては、上記のJIS法による水銀測定と同じ箇所で行い、1箇所火葬場につき2回測定を行い、計10件の火葬に

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		施設E		施設F		施設G		施設H	
	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有	有
再燃焼室	1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
集じん機	1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
集じん機後段の排ガス処理	1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
排ガス冷却方式	1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
排気方式 (炉:系列)	1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
燃料	1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1		1:1	
実驗番号	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2	E-1	E-2	F-1	F-2	G-1	G-2		
火葬日	2008/11/12	2008/11/12	2008/11/21	2008/11/21	2008/11/25	2008/11/28	2008/11/28	2008/11/28	2008/11/11	2008/11/12	2008/11/13	2008/11/13	2008/12/2	2008/12/2		
火葬開始時間	10:25	13:59	11:00	14:15	13:23	15:13	11:25	14:40	12:49	12:29	12:37	14:23	12:00	14:21		
火葬終了時間	11:23	14:56	12:06	15:14	14:11	16:21	12:29	15:25	13:49	13:32	13:36	15:27	13:25	15:25		
火葬時間	0:58	0:57	1:06	0:59	0:48	1:08	1:04	0:45	1:00	1:03	0:59	1:04	1:25	1:04		
火葬遺体数	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
年齢	64歳	75歳	91歳	79歳	98歳	85歳	66歳	80歳	75歳	88歳	93歳	91歳	60歳	67歳		
性別	女性	女性	女性	女性	女性	女性	男性	女性	女性	男性	男性	女性	男性	男性		

※火葬44件について測定、詳細は表C.5に記載

表 B.2 各施設における測定項目

火葬炉	施設A	施設B	施設C	施設D	施設E	施設F	施設G	施設H
排ガス中ダイオキシン類濃度 水銀濃度測定(JIS)	2検体	2検体	2検体	2検体	2検体	2検体	2検体	—
排ガス中 形態別水銀連続分析	2検体	2検体	2検体	2検体	—	—	2検体	44検体
灰中ダイオキシン類濃度 重金属、フッ素、ホウ素含有量・溶出量調査	残骨灰 集じん灰	残骨灰 集じん灰	残骨灰 集じん灰	—	残骨灰	残骨灰 集じん灰	残骨灰	—

表 B.3 測定方法

対象	測定項目	測定方法
排ガス	排ガス温度	JIS Z 8808 熱電対による連続測定
	排ガス流速	JIS Z 8808 ピトー管法
	水分	JIS Z 8808 吸収法
	ばいじん濃度	JIS Z 8808 円形ろ紙または円筒ろ紙法
	CO	JIS K 0098 赤外線吸収法(連続分析)
	CO ₂	JIS K 0304 赤外線吸収法(連続分析)
	O ₂	JIS K 0301 ジルコニア方式(連続分析)
	NO _x	JIS K 0104 化学発光方式(連続分析)
	ダイオキシン類	JIS K 0311 ガスクロマトグラフ-質量分析法
水銀	JIS K 0222 過マンガン酸カリウムによる測定 形態別連続湿式連続分析(MS-1A +DM-6B)	
残骨灰、 集じん灰	ダイオキシン類	環境省告示80号に規定される方法
	水銀	環境省告示18、19号に規定される溶出量試験、含有量試験
	六価クロム	
	フッ素	
	ホウ素	
	カドミウム	

ついて行った(表 B.1)。施設Hにおいては、2008年1月31日から4月17日の約80日間について44件の火葬について、排気塔出口前においてHg⁰濃度およびHg²⁺濃度を連続測定した。

施設D、Hを除く全ての火葬場で、2回目の排ガスサンプリング終了の約1時間後に、残骨灰を採取し、さらに、施設A～C、施設Fでは集じん灰を採取した。これらの固体サンプルを対象に、ダイオキシン類濃度を環境省告示80号に基づいて行った。また、水銀、六価クロム、フッ素、ホウ素、およびカドミウムについて、土壌対策基本法の環境省告示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。

3. アマルガム充填物の採取、ヒアリング、および治療時のデータ収集

大阪歯科大学において、歯科患者からのアマルガム充填物の採取と、ヒアリング、および治療時のデータ収集を実施した。対象は、要抜去と診断された歯科用アマルガム充填歯を有する患者で、説明文章(分担研究報告書3 資料4)により研究の主旨を説明し、同意書(分担研究報告書3 資料5)に了解を得られた方のみについて実施した。

ヒアリング、および治療時のデータ収集を実施した項目について表B.4に示した。表に示すように、調査項目は、年齢、性別、充填されていた歯種、充填部位、充填時期、および重量である。このうち、年齢、性別、および充填時期についてヒアリングを実施し、充填されていた歯種、および充填部位は治療時に目視にてデータを得た。重量については、抜去した歯から歯科用タービン、および歯科用バーを用いてアマルガム充填物を採取し、電子天秤にて重量測定した。図B.1にアマルガム充填物の採取フローを示した。

4. 歯科用アマルガムに由来する蒸気水銀の体内動態評価モデルの構築

歯科用アマルガムに由来する無機水銀の人体への健康リスクを評価するため、体内動態評価モデルを作成した。本研究では、Farrisらが構築した、ラットにおけるメチル水銀のPBPKモデル(生理学的薬物動態モデル)¹⁴⁾を援用した。PBPKモデルはコンパートメントモデルの一種であり、体内に入った化学物質が、どのように吸収され、各臓器に分布・蓄積・排泄されていくかを予測する計算モデルである。

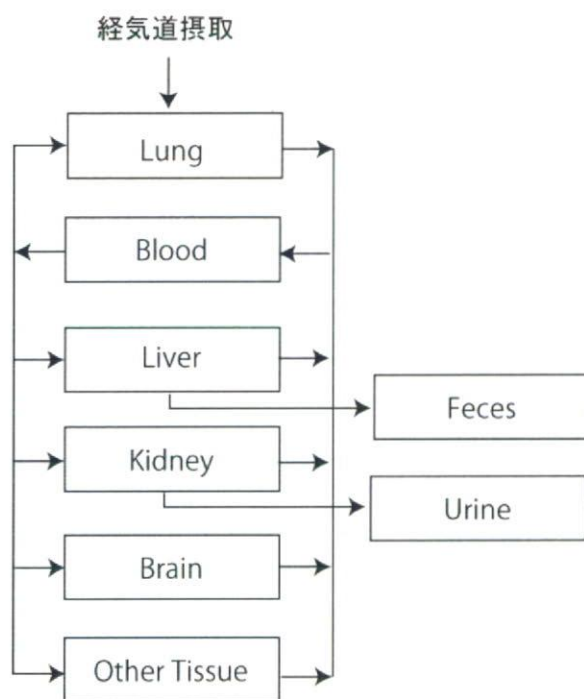
表B.4 ヒアリング、および治療時データ収集の実施項目

	調査項目	調査方法
1	年齢	ヒアリング
2	性別	ヒアリング
3	充填されていた歯種	治療時目視
4	充填部位	治療時目視
5	充填時期	ヒアリング
6	重量	採取後電子天秤で測定



図B.1 歯科アマルガム充填物の採取フロー

モデルの構造を図B.2に示す。このモデルでは、人体を6つのコンパートメントから成立していると考え、それぞれが血流で結ばれる構造とした。



図B.2 PBPKモデルの構造

(倫理面への配慮)

本研究のうち、火葬炉の実態調査に関しては、火葬現場での測定を伴う研究であり、火葬される遺体や遺族の尊厳を尊重し、慎重な対応により、調査を行った。

また、アマルガム充填物の採取、ヒアリング、および治療時のデータ収集については、ヒトの組織を対象としたものであるため、大阪歯科大学医の倫理委員会の承認を得た上で実施した。具体的な調査は、要抜去と診断された歯科用アマルガム充填物を有する患者で、説明文章(分担研究報告書3 資料4)により研究の主旨を説明し、同意書(分担研究報告書3 資料5)に了解を得られた方のみについて実施した。

C. 研究結果、および考察

1. ダイオキシン類等の実態調査

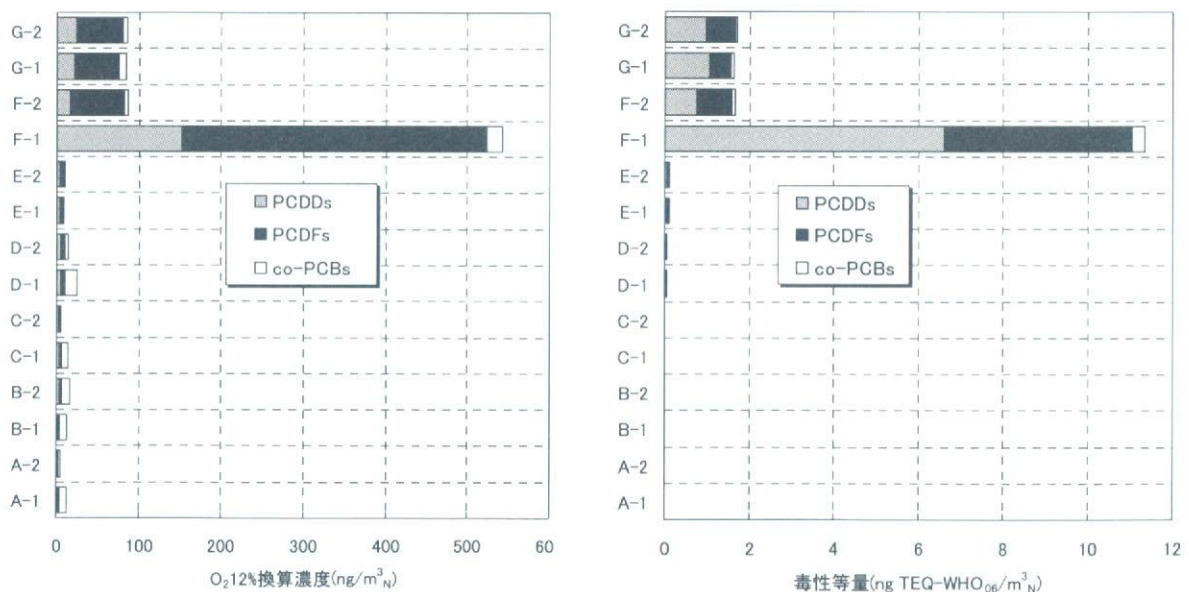
ダイオキシン類と関連項目の調査結果一覧を表C.1に示した。

1.1 排ガス中のダイオキシン類濃度

各施設における、ダイオキシン類濃度と、その毒性等量を図C.1に示す。排ガス中のダイオキシン類濃度は、O₂ 12%換算濃度で5.3～540 ng/m³_N、毒性等量で0.00018～11 ng TEQ-WHO₀₆/m³_Nの範囲であった。

2回の測定で、ともに約0.1 ng TEQ-WHO₀₆/m³_N以下で、低い値を示していたのは、施設A～Dであった。施設A～Cは削減対策指針後に設置された比較的新しい施設であり、集じん機としてバグフィルターが設置された上、施設A、Bでは触媒装置、施設Cでは活性炭吸着設備が設置されていることによるものと考えられた。また、施設Dは削減対策指針前に設置されたものであるが、ダイオキシン類濃度は低く抑えられており、電気集じん機の集じん効果によるものと考えられた。

一方、1.0 ng TEQ-WHO₀₆/m³_N以上の高い値が現れたのは、施設Fと施設Gであり、これらは削減対策指針前に設置された比較的古い施設である。これらの施設には、集じん機が設置されていないか、設置されていてもスクリーン式であり、前述のばいじん濃度の測定結果よりあまり集じん効果が認められないものであった。特に施設Fでの1回目では、11 ng TEQ-WHO₀₆/m³_Nであり本調査での最大値を示し、既設炉の指針値(5 ng TEQ-WHO₀₆/m³_N)を上回っていた。表C.1から、施設Fの1回目での排ガス組成(ばい



図C.1 各施設における排ガス中ダイオキシン類の濃度と毒性等量

表C.1 測定結果一覧

項目	火葬時間	排ガス温度	排ガス流量		ダイオキシン類				ばいじん				CO ₂	NO _x	CO	O ₂			
			排ガス		排ガス		残骨灰		集じん灰		ばいじん	CO					NO _x	CO ₂	O ₂
			湿り	乾き	実測濃度	O ₂ 12%換算濃度	毒性等量	実測濃度	毒性等量	実測濃度									
単位	分	°C	m ³ /h	m ³ /h	ng/m ³	ng/m ³	ng/m ³ N	ng TEQ-WHO ₀₆ /m ³	ng/g	ng TEQ-WHO ₀₆ /g	ng/g	ng TEQ-WHO ₀₆ /g	g/m ³	ppm	ppm	%	%		
A	A-1	58	144	9,540	9,160	1.62	0.011	12.2	0.042	2.40	0.042	313	5.0	<0.008	26	86	0.8	19.8	
	A-2	57	147	8,010	7,780	0.945	0.00018	5.29						<0.006	56	110	1.2	19.4	
B	B-1	66	86	14,300	13,900	1.88	0.0036	12.1	0.00055	0.115	0.00055	9.12	0.10	<0.007	<4	97	0.8	19.6	
	B-2	59				2.79	0.010	16.8						<0.006	<3	120	0.9	19.5	
C	C-1	48	88	14,600	14,200	3.01	0.025	14.1	0	0.0291	0	0.61	0.005	<20	120	1.5	19.1		
	C-2	68				1.18	0.0037	5.54					0.005	33	100	1.4	19.1		
D	D-1	64	166	11,500	11,200	5.52	0.062	25.4					0.032	<8	110	1.3	19.0		
	D-2	45	144	10,200	9,880	2.57	0.059	13.6					0.032	32	100	1.1	19.3		
E	E-1	60	290	4,760	4,560	3.01	0.089	9.35	0.00067	0.118	0.00067			0.13	<30	110	2.3	18.1	
	E-2	63	296	3,770	3,590	3.28	0.10	9.57					0.16	<10	130	2.4	17.9		
F	F-1	59	247	3,890	3,700	2.18	11	5.39	0.0000035	0.0209	0.0000035	1.09	0.014	0.15	180	84	2.5	17.4	
	F-2	64	230	5,150	4,860	2.77	1.7	86.2						0.10	<40	93	2.0	18.1	
G	G-1	84	400	4,440	4,130	48.9	1.6	84.4	0.0044	0.31	0.0044			0.19	270	82	3.8	15.8	
	G-2	64				41.6	1.7	85.2						0.17	77	110	1.9	16.6	
最大値		84	400	14,600	14,200	218	11	539	0.042	2.40	0.042	313	5.0	0.19	270	130	3.8	19.8	
最小値		45	86	3,770	3,590	0.945	0.00018	5.29	0	0.0209	0	1.09	0.014	0.005	<3	82	0.8	15.8	
中央値		62	166	8,010	7,780	3.01	0.061	13.9	0.00061	0.117	0.00061	22.9	0.36	0.032	31	105	1.5	19.1	
算術平均値		61	203	8,200	7,905	25.8	1.2	65.6	0.0079	0.498	0.0079	90.0	1.4	0.072	56	104	1.7	18.5	
幾何平均値		61	182	7,270	6,970	5.80	0.061	22.9	0.00047	0.135	0.00047	18.4	0.26	0.030	27	103	1.5	18.4	

残骨灰のダイオキシン類毒性当量の幾何平均値は施設Cを除いた値
 定量下限値以下の値については、定量下限値とみなし、中央値、算術平均値、幾何平均値を算出
 ばいじん、CO、NO_xについてはO₂12%換算値

じん、CO、NOx)は、施設Gの1回目と大差はなく、燃烧状態が極端に悪いとは考えにくい。可能性としては集じん機での *de novo* 合成によるものと推測される。

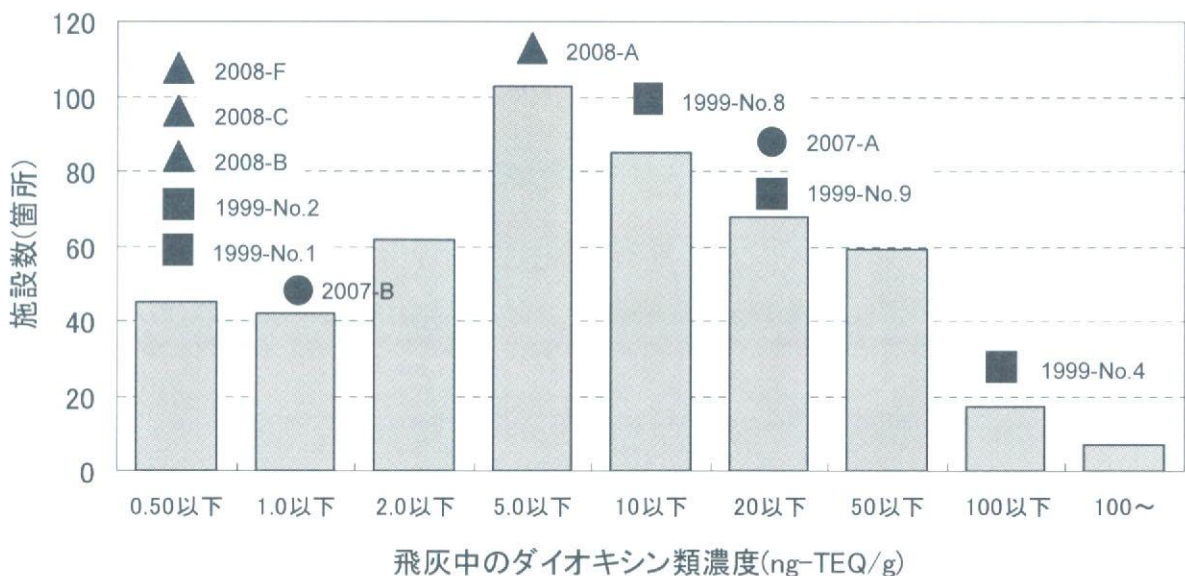
以上の結果からは、ダイオキシン類排出抑制のために、バグフィルターあるいは電気集じん機の設置により集じん効率を確保することの重要性が確認された。しかし、施設Eでは、削減対策指針前に設置された比較的古い施設であるが、0.089~0.10 ng TEQ-WHO₀₆/m³_N程度に抑えられ、ほぼ同様の構造であった施設Gと大きく濃度が異なる結果となっており、御遺体や副葬品により燃烧条件がかなり異なってくる場合もあることが示唆された。

1.2 残骨灰、集じん灰中のダイオキシン類濃度

残骨灰中のダイオキシン類の濃度範囲は、実測濃度で0.0209~2.40 ng/g、毒性等量で0~0.042 ng TEQ-WHO₀₆/gであった。これらの値は非常に低いといえ残骨灰中のダイオキシン類に関しては問題ないと言える。なお、この傾向は、2007調査結果¹¹⁾と同様であった。

次に、集じん灰中のダイオキシン類の濃度範囲は、実測濃度で1.09~313 ng/g、毒性等量で0.014~5.0 ng TEQ-WHO₀₆/gであった。

図C.2に平成8年度に厚生省が実施したごみ焼却施設の飛灰中ダイオキシン類毒性等量の度数分布¹⁵⁾を示し、本研究の結果(2008)が対応する濃度範囲にプロットし、比較を行った。また、2007調査結果¹¹⁾、および1999調査結果⁴⁾についても、WHO2006-TEFにより換算し、対応する濃度範囲にプロットした。ただし、ごみ焼却飛灰の毒性等量



図C.2 都市ごみ焼却施設における
飛灰中ダイオキシン類濃度度数分布と本研究の比較

はPCDDs/DFsのみを対象にしていることや、毒性等価係数としてI-TEFを用いており、本研究における毒性等量に比較し10～20%程度、値が低く見積もられている。したがって厳密な比較はできないが、本研究における集じん灰中ダイオキシン類濃度は、都市ごみ焼却飛灰の濃度範囲にあり、施設B、C、Fは0.5 ng TEQ-WHO₀₆/g以下の比較的低い範囲、施設Aに関しては2.0～5.0 ng TEQ-WHO₀₆/gで、比較的高い濃度範囲に位置しているといえる。1999-No.4のような50～100 ng TEQ-WHO₀₆/g程度の非常に高い濃度は発現されていないが、依然として、2007-A、2008-Aのように5.0 ng TEQ-WHO₀₆/g以上を示し、都市ごみ焼却施設の飛灰中ダイオキシン類の基準である3.0 ng TEQ-WHO₀₆/gをオーバーする集じん灰が見受けられている。2007-A、2008-Aに関しては、2007調査結果¹¹⁾、および表C.1より、CO濃度は比較的低いレベルで保たれていたことから、火葬中における燃焼状態は良好に保たれていたと考えられる。これら2つの施設は、ともに再燃焼後の排ガスの冷却に、熱交換器を用いた冷却方式が採用されており、2007～2008年の調査で他9ヶ所の火葬炉は全て空気混合による冷却方式であった。したがって、この熱交換器において、ダイオキシン類が再合成されたことによるものと推測された。詳細には熱交換器部分の温度の確認等検討しなければならないが、熱交換器を用いた冷却方式を採用する場合には、灰中のダイオキシン類濃度に注意する必要があると考えられる。

1.3 火葬炉からのダイオキシン類の排出量

ここでは、本研究での測定データ(2008)、および2007調査結果¹¹⁾(2007)も含め、計11施設、22検体分の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.1)式により1検体あたりのダイオキシン類排出量を算出した。なおダイオキシン類毒性等量はWHO2006-TEFを用いたO₂12%換算値を用い、乾き排ガス量についてもO₂12%換算した値を用いた。

$$\begin{aligned} & \text{一検体あたりのダイオキシン類排出量 (ng TEQ-WHO}_{06}\text{/人)} = \\ & \text{ダイオキシン類毒性等量 (ng TEQ-WHO}_{06}\text{/m}^3\text{N}) \times \text{乾き排ガス量 (m}^3\text{N/h)} \\ & \times \text{火葬時間 (h/人)} \end{aligned} \tag{C.1}$$

推定の結果を、表 C.2 に示した。

2007 調査、2008 の調査結果からは 0.041 ~ 16,000 ng TEQ-WHO₀₆/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。この排出原単位の算術平均値は 1,600 ng TEQ-WHO₀₆/人、幾何平均は 110 ng TEQ-WHO₀₆/人となった。

1999 調査結果から得られている排出原単位³⁾を、WHO2006-TEF を用いて換算すると、算術平均値は 4,200 ng TEQ-WHO₀₆/人、幾何平均値は 1,900 ng TEQ-WHO₀₆/人と算出される。これらの値と、2007 調査、本研究の調査結果からの値を比較すると、現状は、約 10 年前の排出原単位よりも、算術平均値で約 2/5、幾何平均値で約 1/20 まで低減されていた。

以上より、火葬炉において、本研究におけるダイオキシン類排出原単位と、削減対策指針前の国内のダイオキシン類排出原単位との比較から、削減対策指針により、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。

表 C.2 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	O ₂ を考慮した	ダイオキシン類	
		毒性等量	乾き排ガス量	排出原単位	
	分	ng TEQ-WHO ₀₆ /m ³ _N	m ³ _N /h	ng TEQ-WHO ₀₆ /人	
2007-A	A-1	42	0.10	3200	210
	A-2	46	0.00005	1000	0.041
2007-B	B-1	68	0.0059	2100	14
	B-2	61	0.012	2900	35
2007-C	C-1	71	1.1	1800	2300
	C-2	66	0.62	1700	1100
2007-D	D-1	90	1.05	2200	3400
	D-2	71	0.084	2100	210
2008-A	A-1	58	0.011	1200	13
	A-2	57	0.00018	1400	0.240
2008-B	B-1	66	0.0036	2200	8.6
	B-2	59	0.010	2300	23
2008-C	C-1	48	0.025	3000	60
	C-2	68	0.0037	3000	13
2008-D	D-1	64	0.062	2500	170
	D-2	45	0.059	1900	83
2008-E	E-1	60	0.089	1500	130
	E-2	63	0.10	1200	130
2008-F	F-1	59	11	1500	16000
	F-2	64	1.7	1600	2800
2008-G	G-1	84	1.6	2400	5300
	G-2	64	1.7	2000	3700
最大値					16000
最小値					0.041
中央値					130
算術平均値					1600
幾何平均値					110

2. 水銀をはじめとする重金属等の実態調査

2.1 排ガス中水銀の排出濃度調査

各施設における、水銀濃度および関連項目の測定結果を表C.3に示す。実測濃度について、定量下限値 (< 0.006 mg/m³_N) を超えたものはA-2(0.024 mg/m³_N)、C-2(0.007 mg/m³_N)、D-1(0.020 mg/m³_N)であった。水銀濃度の範囲としては、<0.006 mg/m³_N ~0.024 mg/m³_Nであった。また、O₂ 12%換算濃度とした場合の水銀濃度は、<0.010 ~0.135 mg/m³_Nとなった。これらの値は、国内の都市ごみ焼却炉で、各自治体が独自に設定する自主目標値や現実的な要求値としての30 ~ 50μg/m³_Nを超える場合もある範囲にあった¹⁶⁾。

特に、バグフィルターを有する施設Aや施設Cにおいても、比較的高濃度の水銀排出が見られたが、これまでの調査事例では通常のバグフィルターでは水銀の除去は不可能である¹⁷⁾。したがって、水銀除去には活性炭吸着技術などを用いたさらなる処理

表 C.3 水銀濃度 (JIS 法)、および関連項目の測定結果

項目	火葬時間	排ガス温度	排ガス流量		ばいじん	水銀		O ₂	
			湿り	乾き		実測	O ₂ 12%換算		
単位	分	°C	m ³ _N /h	m ³ _N /h	g/m ³ _N	mg/m ³ _N	mg/m ³ _N	%	
A	A-1	58	144	9,540	9,160	<0.008	<0.006	<0.045	19.8
	A-2	57	147	8,010	7,780	<0.006	0.024	0.135	19.4
B	B-1	66	86	14,300	13,900	<0.007	<0.006	<0.039	19.6
	B-2	59				<0.006	<0.006	<0.036	19.5
C	C-1	48	88	14,600	14,200	0.005	<0.006	<0.028	19.1
	C-2	68				0.005	0.007	0.033	19.1
D	D-1	64	166	11,500	11,200	0.032	0.020	0.090	19.0
	D-2	45	144	10,200	9,880	0.032	<0.006	<0.032	19.3
E	E-1	60	290	4,760	4,560	0.130	<0.006	<0.019	18.1
	E-2	63	296	3,770	3,590	0.160	<0.006	<0.017	17.9
F	F-1	59	247	3,890	3,700	0.150	<0.006	<0.015	17.4
	F-2	64	230	5,150	4,860	0.100	<0.006	<0.019	18.1
G	G-1	84	400	4,440	4,130	0.190	<0.006	<0.010	15.8
	G-2	64				0.170	<0.006	<0.012	16.6
最大値	84	400	14,600	14,200	0.190	0.024	0.135	19.8	
最小値	45	86	3,770	3,590	0.005	<0.006	<0.010	15.8	
中央値	62	166	8,010	7,780	0.032	0.006	0.030	19.1	
算術平均値	61	203	8,200	7,910	0.072	0.0084	0.038	18.5	
幾何平均値	61	182	7,270	6,970	0.030	0.0073	0.029	18.4	

※定量下限値以下の値については、定量下限値とみなし、中央値、算術平均値、幾何平均値を算出

※ばいじんについてはO₂12%換算値