

200942027A

厚生労働科学研究費補助金
健康安全・危機管理対策総合研究事業

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21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22 (2010) 年 3月

厚生労働科学研究費補助金

健康安全・危機管理対策総合研究事業

**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21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22 (2010) 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	63
1.	火葬場から排出されるダイオキシン類等の実態調査	65
	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	115
	武田信生、高岡昌輝、大下和徹	
3.	火葬場から排出される水銀排出起源に関する調査	175
	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	
	資料6 採取したアマルガム充填物の表面拡大写真	
4.	火葬場における低煙突が拡散に与える影響に関する調査	209
	武田信生、高岡昌輝、大下和徹	
	資料1 モデル火葬場A、Bにおける水銀、六価クロムの 煙突からの拡散シミュレーション結果(煙突高さの影響)	
5.	火葬場の実態に関するアンケート調査	229
	武田信生、高岡昌輝、大下和徹	
	資料1 厚生労働省健康局生活衛生課：火葬場から排出される 有害化学物質に関するアンケート調査結果(グラフ集)	
III .	研究成果の刊行に関する一覧表	265
IV .	研究成果の刊行物・別刷	267
	謝辞	295

厚生労働科学研究費補助金
健康安全・危機管理対策総合研究事業

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22 (2010) 年 3月

厚生労働科学研究費補助金（健康安全・危機管理対策総合研究事業）
総括研究報告書
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

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

平成21年度において、本研究の主たる目的は、火葬場から排出される有害物質の排出状況や、排ガス処理での除去効果について、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。そのため、述べ4箇所の火葬場における実態調査と、水銀の由来とされる歯科充填物中の水銀の調査、およびヒトに対する健康リスク評価を実施するとともに、火葬場特有の低煙突における排ガス拡散シミュレーションを実施した。

まず、排ガス処理プロセスにおけるダイオキシン類の挙動に関しては、熱交換器でのダイオキシン類の再合成が確認され、この場合バグフィルターでの除去がほとんどできなかったことから、熱交換器を用いる場合は、触媒装置等を設置することが重要であることが考えられた。また、熱交換器のない設備ではバグフィルターにてダイオキシン類は毒性当量として、58%以上除去され、触媒装置においても90%以上除去された。大気へのダイオキシン類の排出原単位は、本研究および2007～2008年の調査結果から、加重平均を考慮した場合、算術平均値は2,390 ng TEQ-WHO₀₆/体と算出された。この値は、従来の排出原単位の約57%まで削減され、「ダイオキシン類削減対策指針」による効果がうかがえた。

排ガス中水銀は、触媒装置、あるいは活性炭吸着設備にて70%以上の除去率が見込めることが示された。一方、バグフィルターでは、堆積した集じん灰により水銀が除去されるケースと、増加するケースがみられ、安定性に欠けることが示唆された。したがって、排ガス中水銀の除去には、バグフィルターの後段に、触媒装置、あるいは活性炭吸着設備を設置することが望ましいと考えられた。ただし、触媒装置は、水銀により、活性低下が懸念されるため、水銀除去には、パイロット実験結果からも、活性炭吸着設備が最も望ましい。

排ガス中クロムに関しては、バグフィルターにてばいじんとともに高度に除去され、少なくとも75%以上の除去率が見込めることがわかった。一方、灰中の六価クロムに関しては、特に溶出量で1検体を除く全てのサンプルで基準の1.4～1,800倍の濃度が検出された。そこで、ステンレスを混合した模擬火葬灰の加熱実験を実施した結果、温度が800℃程度の火葬で、灰中の六価クロムは、溶出基準を超過することが確認された。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が酸化されることによるものと予想されたが、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くなる可能性もあり、今後、バグフィルター等による集じんをしっかりと行い火葬炉外への排出を抑制し、別途灰の処理を検討することが必要であると考えられた。

24検体のアマルガム充填物の採取、ヒアリング、分析により、経年にもなうアマルガム充填物の重量減少傾向から、イギリスよりも日本の方がアマルガム処置歯あたりの水銀量は少なく、91mg/本程度であることと、経過年数とともに口腔内アマルガム中の水銀が5.5 μg/day程度の割合で減少していることが明らかとなった。

無機水銀の体内動態を評価するPBPKモデルを構築し、歯科治療用の水銀アマルガムからの曝露に起因する尿中排泄量を評価した結果、WHOが人体に悪影響を及ぼす指標よりも少ないことが分かり、腎障害を懸念するレベルではないことが推定された。

火葬場の拡散シミュレーションにおいて、火葬場建物のダウンウォッシュ等の影響を考慮した場合、考慮しない場合に比較して、火葬場の新旧にかかわらず、最大着地濃度が高くなるとともに、出現地点も火葬場近傍になることが明らかとなった。また、煙突に遮蔽物が存在する場合においても、排ガスの拡散が妨げられ、最大着地濃度を高くする効果が認められた。これら、種々のケースを相対的に評価した結果から、実火葬場における煙突はできるだけ高くし、煙突遮蔽物も可能な限り設置しないほうが望ましいと考えられた。

分担研究者	森澤真輔	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⁾。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ガイドライン」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⁷⁾。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。「ダイオキシン類排出抑制ガイドライン」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19-20年度厚生労働科学特別研究事業において、11施設の火葬場を選定し、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、2008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、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、 O_2 12%換算濃度で4.7~540 ng/m³_N、毒性等量で0.000053~11 ng TEQ-WHO₀₆/m³_Nの範囲であり、算術平均では0.88 ng TEQ-WHO₀₆/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1,600 ng TEQ-WHO₀₆/人であり、10年前の調査結果に比較して、約2/5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の高濃度ピークがいくつかの検体で確認され、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)、12)}。

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、2008年調査を中心に調査してきたが、これまでの研究は11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における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排出抑制対策を検討しなければならない。また、これまでの研究は、特に排ガスについては、煙突出口における実測が主であり、集じん機や、高度排ガス処理設備でのダイオキシン類、水銀等重金属の除去効果は明らかとなっておらず、効果的な対策を検討するには、これら排ガス処理プロセスによる除去効果の現状を明らかにしておく必要がある。また、問題となっている灰中の六価クロムについても、灰のみならず、火葬炉からの大気への排出量や、その由来等を明らかにし、効果

的な対策を検討する必要がある。

以上のような背景の下で、本研究では、2007 調査、2008 調査における 11 施設での結果に加え、新たに3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、排出形態やその排ガス処理での除去効果について、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¹³⁾。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¹⁴⁾)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。

最後に、火葬場における煙突は、住民への配慮や、景観上の問題等から、やむを得ず煙突高さは低く設定されているケースが多く¹⁵⁾、排出された有害化学物質について、この火葬場特有の低煙突について拡散の評価が十分できていない状況にあることから、④に示す調査を行って、火葬場からの有害物質の排出、およびその拡散に関連して、火葬場特有の低煙突の影響をシミュレーションにより推定し、抑制対策を検討することを第三の目的とした。

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3箇所の火葬場を選定し、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、2008 年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。また、火葬炉の排ガス処理における熱交換器、集じん機、触媒装置、活性炭吸着設備等の前後でのダイオキシン類濃度を測定し、それらの除去効果を明らかにし、排出抑制対策を検討した。

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4施設の火葬炉を対象に、排ガス中の水銀とクロム、および灰中の水銀、六価クロムについて調査を行い、実態を明らかにするとともに排出抑制対策を検討した。

具体的には、3施設の火葬場において、水銀、クロムを対象に排ガスとして排出濃度や、各排ガス処理プロセスでの除去効果を、また、灰として、主にその元素組成や、土壤汚染対策法に基づいた含有量、溶出量について調査を行い、実態を明らかにするとともに、クロムに関しては、その由来の調査も実施し、排出抑制対策について検討した。さらに、別途1施設においては、パイロット式活性炭吸着実験装置を用いて、排ガス中の水銀の活性炭による除去効果を検討した。

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採取・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21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さらに収集し、その中の水銀を分析し、充填材の経年変化を整理するとともに、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、健康リスク評価を行った。

④ 火葬場における低煙突が拡散に与える影響に関する調査

火葬場からの有害物質の排出、およびその拡散に関連し、火葬場特有の低煙突の影響をシミュレーションにより推定した。具体的には、新型、旧型のモデル火葬場を、これまで蓄積してきた実測データ、および文献等から想定し、設定ケース毎のシミュレーション結果を比較することにより、煙突高さ、火葬場構造物の影響、煙突上部における遮蔽物の有無が、ダイオキシン類、水銀、六価クロムの地表面等における濃度分布、最大着地濃度等に与える影響を明らかにした。

なお、補足として、2009年に厚生労働省が実施した火葬場における構造や有害物質の排出状況などのアンケート¹⁰⁾について、10年前に実施されたアンケート結果と比較し、近年の火葬場の動向についても考察した。以下にそれぞれの研究方法、研究結果について述べるが、アンケート結果に関する部分は、補足的に実施したものであり、本総括報告書からは割愛する。詳細は、**分担研究報告5**を参照されたい。

B. 研究方法

本年度の研究は、まず、ダイオキシン類、水銀、クロムについて火葬場における実態調査を実施した。また、歯科アマルガムを歯科患者から採取し・ヒアリング、分析を行うとともに、それに由来する無機水銀の健康リスク評価を実施した。次に、火葬場特有の低煙突構造が周辺環境に与える影響を明らかにするため、煙突からの拡散シミュレーションを実施した。

1. 実態調査対象施設

本年度の調査対象とした火葬場は延べ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～C、および施設A'で記述する。

施設A～Cでは、排ガス、および灰中のダイオキシン類、水銀、クロム濃度、およびその挙動について調査し、施設A'では、パイロット式の活性炭吸着実験装置を用い、排ガス中水銀の除去実験を実施した。施設Aと施設A'は同一の火葬場に設置された別の方式の火葬炉施設である。

まず、施設A～Cでは、3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は、排気系列が1炉1系列であり、施設B、Cは2炉1系列であった。排ガス冷却方式は、施設Bのみ熱交換器が導入されていたが、その他は空気混合方式であった。集じん機は、全てに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A'は、主燃焼室1室に対し、再燃焼室1室を有し、排気方式は排風機による強制排気方式、排気系列が1炉1系列であったが、集じん機が設置されていない施設であった。

施設を選定するにあたって、本年度は、排ガス処理プロセスにおけるダイオキシン類、水銀、クロムの除去効果を明らかにすることを目的の一つとしているため、特に施設A～Cに関しては、集じん機や、触媒装置、活性炭吸着設備が設置されているような、ダイオキシン類対策指針後に新設・改造された施設を選定した。結果として、選定した3施設の全てが平成14年以降に新設された施設であった。

表B.1 対象とした火葬炉

火葬炉	施設A	施設A'	施設B	施設C
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	なし	バグフィルター	バグフィルター
集じん機後段の高度排ガス処理	触媒装置	なし	触媒装置	活性炭吸着設備
排ガス冷却方式	空気混合	空気混合	熱交換器+空気混合	空気混合
排気方式(炉:系列)	強制(1:1)	強制(1:1)	強制(2:1)	強制(2:1)
燃料	天然ガス	灯油	都市ガス 13A	都市ガス 13A

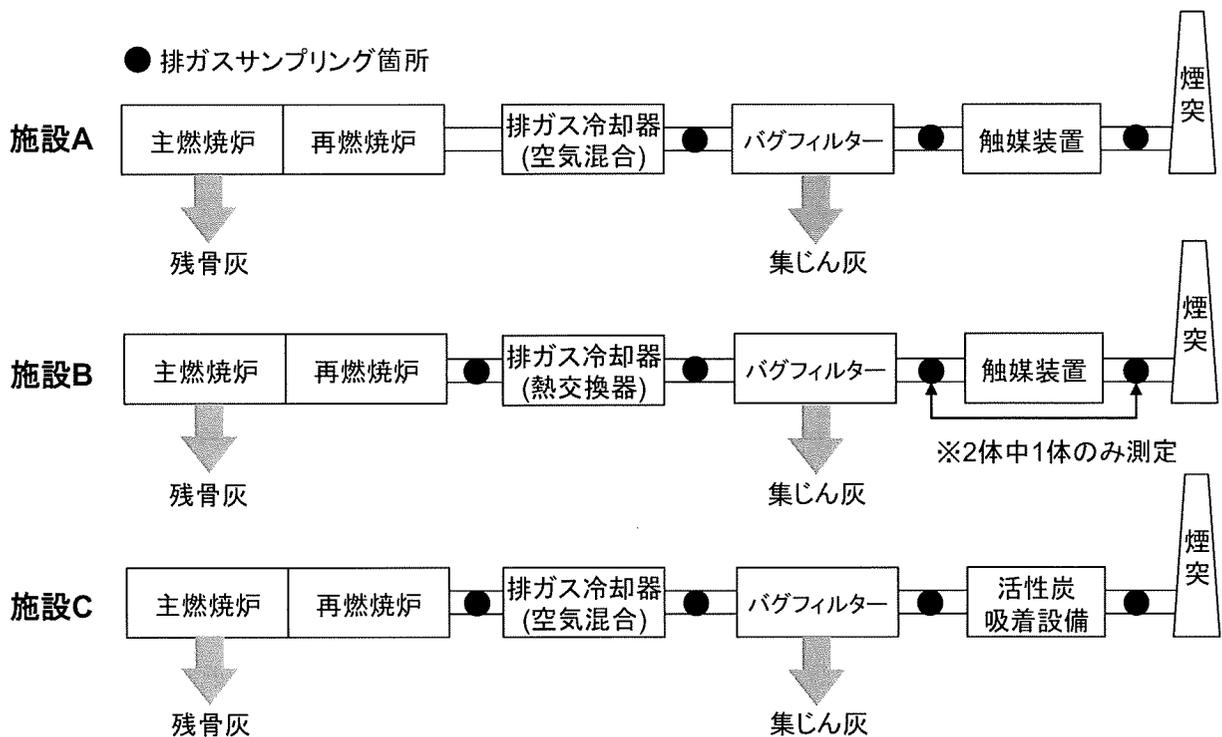
2. 実態調査の測定項目および測定方法

(1) 排ガス中ダイオキシン類、クロムの挙動調査

排ガス中のダイオキシン類、クロムの挙動の調査に関しては、3箇所の火葬場を対象に、1箇所の火葬場につき施設Aでは1体、施設B、Cでは各2体、計5体の火葬に対し、サンプリングを行った。排ガスサンプリングの対象となった火葬について表B.2.1に詳細を示した。施設B、Cにおける各2回のサンプリングは、同一日に実施した。排ガス中ダイオキシン類、クロムのサンプリング箇所を3施設の火葬場のフロー図とともに、図B.2.1に示した。

表B.2.1 排ガス中ダイオキシン類、およびクロムの調査対象

火葬炉	施設A		施設B		施設C	
	A-1	B-1	B-2	C-1	C-2	
実験番号	A-1	B-1	B-2	C-1	C-2	
火葬日	2009/9/8	2009/11/12	2009/11/12	2009/12/4	2009/12/4	
火葬開始時間	14:24	11:22	14:20	11:15	15:24	
火葬終了時間	15:26	12:07	15:05	12:40	16:25	
火葬時間	1:02	0:45	0:45	1:25	1:01	
火葬遺体数	1	1	1	1	1	
年齢	97歳	86歳	58歳	52歳	69歳	
性別	女性	女性	女性	男性	男性	



図B.2.1 各火葬場のフローと排ガス中ダイオキシン類、クロムのサンプリング箇所

全ての火葬場で、少なくともバグフィルターの前後段、煙突の前段（触媒装置、あるいは活性炭吸着設備の後段）でサンプリングを行うとともに、施設B、Cでは再燃焼炉の後段（排ガス冷却器入口）でサンプリングを行った。なお、施設Bにおけるバグフィルター後段（触媒装置入口）、煙突の前段（触媒装置出口）の2箇所は、サンプリングの都合により2体の火葬のうち最初の1体のみでの測定とした。具体的な実施は、各サンプリングポイントにおける測定孔にサンプリングチューブを挿入し実施した。測定孔がない場合は工事を行って増設した。

測定項目、および測定方法の一覧を表B.2.2に示した。本調査においては、排ガス中のダイオキシン類、およびクロム以外に、ばいじん、一酸化炭素、酸素の濃度を測定した。排ガス中のダイオキシン類の測定は、JIS K 0311「排ガス中のダイオキシン類の測定方法」に準拠し行った。排ガス中のクロムの測定は、公定法がないため、JIS Z 8808におけるばいじんの測定と同様に、円筒ろ紙に、排ガス試料を採取した後、ろ紙を過塩素酸・硝酸による酸分解を実施して、ろ過した液をICP発光分析することにより実施した。

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B、Cでは、排気系列が2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炉のみでの稼働とした。酸素は連続分析計により測定した。また、あらかじめ、各サンプリングポイントにおける排ガス温度を熱電対により測定するとともに、排ガス中水分、流速を測定し、排ガス流量（湿り、乾き）を求めた。

表B.2.2 排ガス測定方法の一覧

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)
	O ₂	JIS K 0301 ジルコニア方式(連続分析)
	水銀	形態別連続湿式連続分析(MS-1A+DM-6B)
	クロム	ばいじん濃度測定方法と同様にサンプリングし、円筒ろ紙を硝酸・過塩素酸で酸分解し、ICP発光分析
	ダイオキシン類	JIS K 0311 ガスクロマトグラフ質量分析法

(2) 排ガス中水銀の挙動調査

施設A～Cの3施設を対象に、形態別水銀湿式連続分析計を用いて、それぞれHg⁰濃度およびHg²⁺濃度を連続測定した。サンプリング箇所を、3施設の火葬場のフロー、および実験期間、検体数とともに図B.2.2に示した。

施設Aでは、バグフィルター前、バグフィルター後において2009年9月8日～9月17日の期間、計4検体分の測定を実施し、バグフィルターによる水銀の挙動を調査した。その

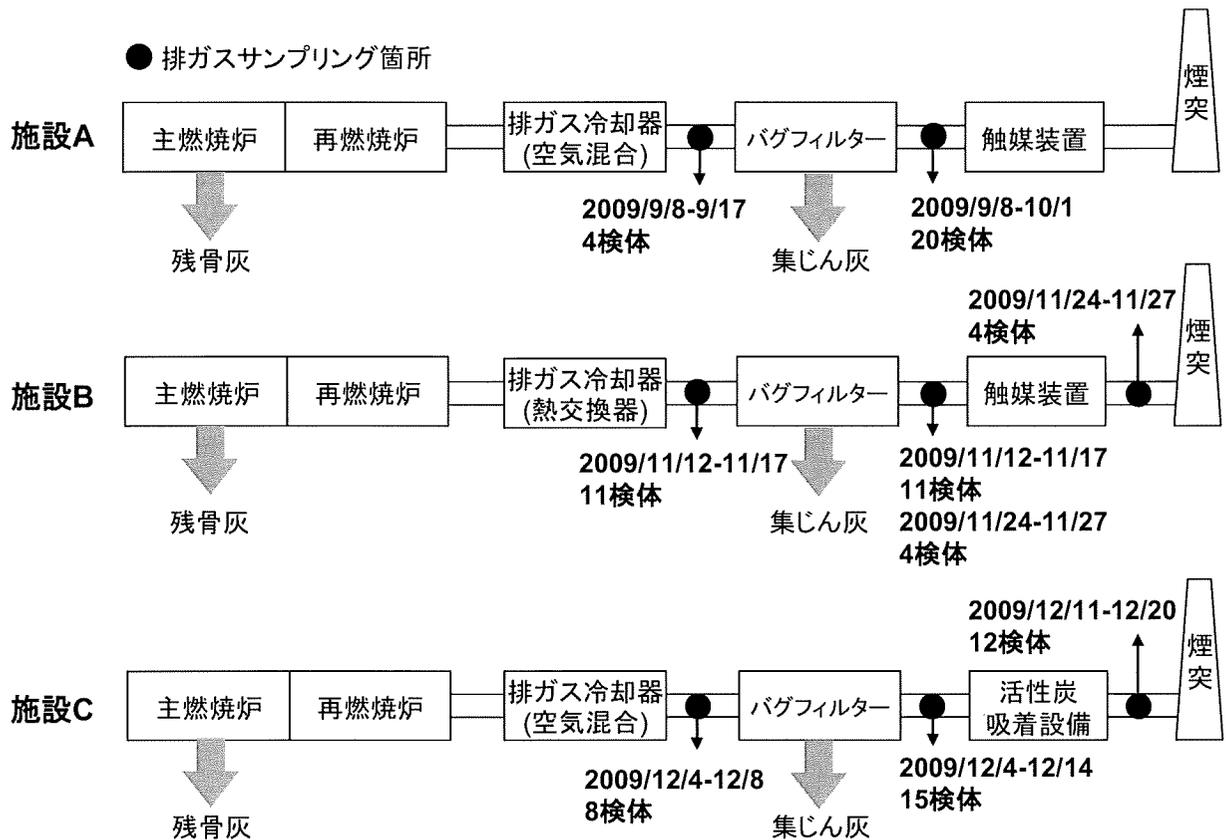


図 B.2.2 各火葬場のフローと排ガス中水銀サンプリング箇所、検体数、および期間

後、2009年9月18日～10月1日の期間において、バグフィルター後のみ、計16検体分の排ガス中水銀濃度を連続分析した。

施設Bでは、バグフィルター前、バグフィルター後、触媒装置後の3箇所では排ガス水銀濃度を連続分析した。まず、2009年11月12日～11月17日では、バグフィルター前後において、計11検体分の測定を実施し、バグフィルターによる水銀の挙動を調査した。その後、2009年11月24日～11月27日に、触媒装置の前後において、計4検体分の測定を実施し、触媒装置による水銀の挙動を調査した。

施設Cでは、バグフィルター前、バグフィルター後、活性炭吸着設備後の3箇所では排ガス水銀濃度を連続分析した。まず、2009年12月4日～12月8日の期間に、バグフィルター前後において、計8検体分の測定を実施し、その後、2009年12月11日～12月14日に、活性炭吸着設備の前後に置いて、計5検体分の測定を実施した。2009年12月9日～2009年12月11日には、バグフィルター後のみで、2検体の測定を実施した。さらに、2009年12月14日～12月20日の期間に活性炭吸着設備後のみで、7検体について、施設Cからの水銀排出濃度を測定した。

具体的な実施は、各サンプリングポイントにおける測定孔にサンプリングチューブを挿入し実施した。測定口がない場合は工事を行って増設した。施設B、Cでは、排気系列が2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。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、施設により10m以内に設置できる場合は、そのラインを加熱導管により180°Cに加熱したが、施設の都合上、サンプリングライン10m以上とせざるを得ない場合は、装置に近い部分の10mについて加熱導管を用いて180°Cに加熱した。

連続測定は、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)を用いた。形態別水銀湿式連続測定装置の写真および前処理フローを図B.2.3および図B.2.4に示す。この装置は、北米で広く用いられている Ontario Hydro Method をベースとして開発されたものであり、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): Hg^0 と2価の水銀: Hg^{2+} 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^{17), 18)}。

なお、測定結果を解析するにあたっては、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測定時間とした。また、施設間の比較を実施するため、測定値を O_2 12% 換算したが、酸素濃度は各施設に付属した O_2 濃度計の値を用いるか、付属していない場合は、連続測定開始日に、後述する排ガス中クロムの調査を実施しており、その際に同時に測定した O_2 濃度を用いた。

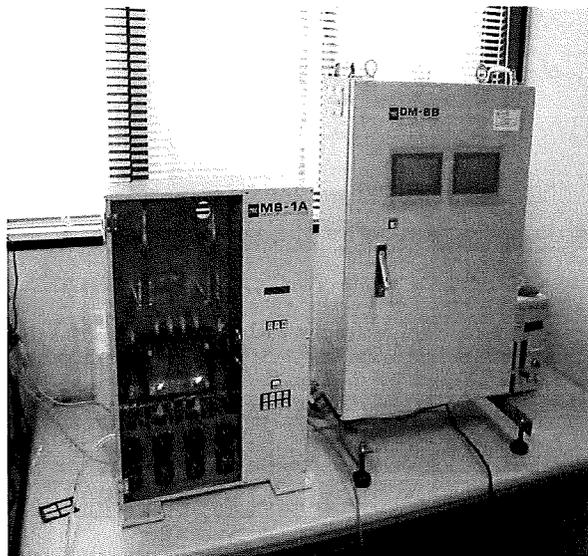


図 B.2.3 形態別水銀湿式連続分析計

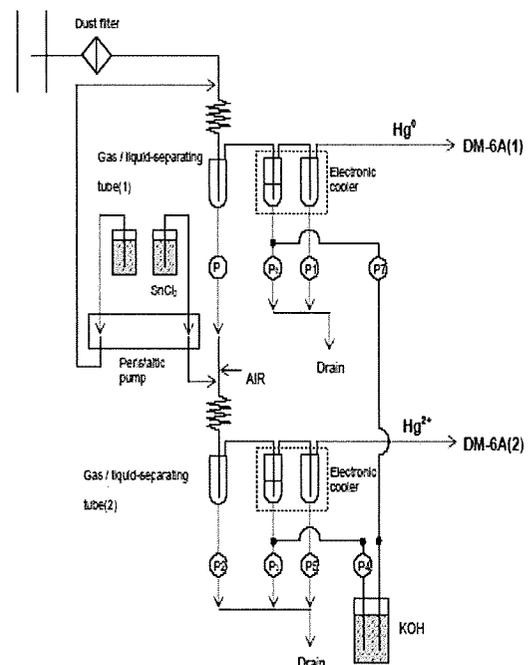
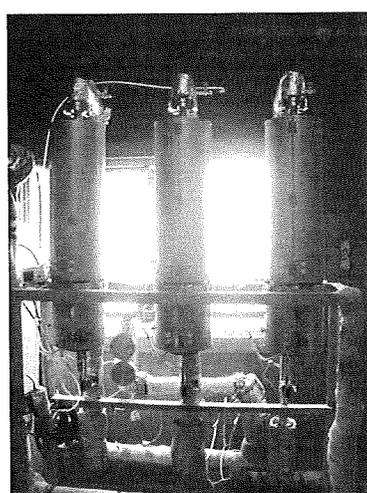


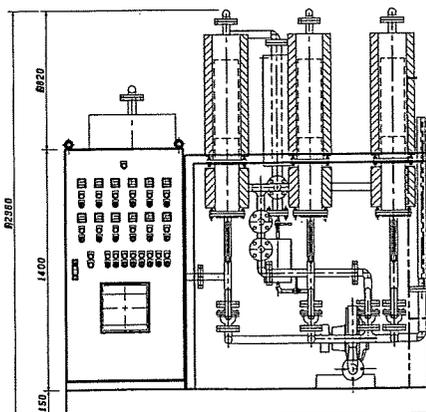
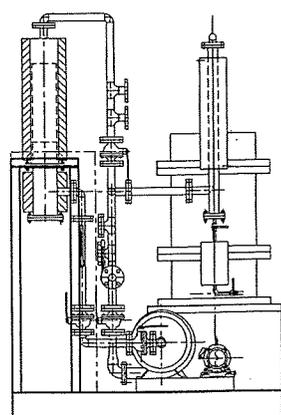
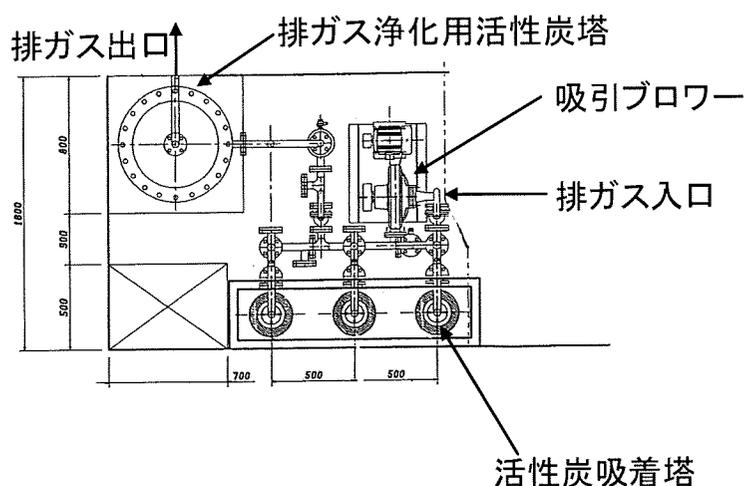
図 B.2.4 形態別水銀湿式連続分析計の前処理部フロー

(3) パイロット式活性炭吸着塔による水銀除去実験

集じん機や、高度排ガス処理設備を有しない、比較的古い施設：Aにて排ガスラインを分岐し、パイロット式の活性炭吸着塔を設置した(図B.2.5)。本吸着塔にて、吸着塔前後の排ガス中水銀を、2台の湿式形態別水銀連続測定装置を用いて測定し、活性炭吸着塔による水銀除去効果を調査した。実験期間は46日間連続で実施し、その間、計33体の火葬が行われた。活性炭吸着塔は3系列(No.1～3)に分かれており、各系列に異なる4種類の活性炭を充填し、ある一定期間ごとに系列を変えて活性炭種類による水銀除去効果を測定した。充填活性炭には、薬品処理炭(MA-G)、石炭系活性炭(PG-1Z)、ヤシガラ活性炭(PG-1A)、バイオ炭(下水汚泥より作成)を用いた。活性炭吸着塔はヒーターで保温を行い、吸着反応塔壁面温度を薬品処理炭では55℃、石炭系活性炭では180℃あるいは250℃、ヤシガラ活性炭では180℃、バイオ炭では250℃に保った。実験中の実際の活性炭層温度については火葬炉の主燃焼炉に着火した後15-20分後の値を記録した。表B.2.3に、実験条件として、各火葬に対する活性炭種類、保温温度、活性炭層の温度を示した。



正面写真



図B.2.5 パイロット式活性炭吸着実験装置

表 B.2.3 実験条件と活性炭層の温度

日時	No.1	No.2	No.3	使用系列	活性炭
3月5日	47.3	79.8	97.0	No.1(55°C)	薬品処理炭
3月7日	45.0	78.3	93.7		
3月9日	78.4	77.7	96.3		
3月10日	79.5	78.5	96.2	No.3(250°C)	バイオ炭
3月11日	78.1	76.9	95.7	No.1(180°C)	石炭系
3月13日	78.4	77.3	96.3		
3月14日	81.2	80.5	99.4		
3月16日	80.1	79.9	98.5	No.2 (180°C)	ヤシガラ炭
3月17日	78.8	76.1	96.5		
3月18日	79.9	77.0	97.5		
3月19日	79.2	78.4	73.5	No.1(180°C)	石炭系
3月20日	79.4	80.5	97.9		
3月21日	79.2	80.5	98.4		
3月22日	80.2	79.8	98.4		
3月23日	80.5	76.5	95.0		
3月24日	113.0	78.0	97.0		
3月25日	113.9	84.4	103.0		
3月28日	111.7	77.2	97.7	No.1(250°C)	石炭系
3月29日	111.3	77.2	95.8		
3月30日	115.5	82.5	100.3		
3月31日	114.5	79.3	98.8		
4月1日	113.2	79.4	99.2		
4月2日	113.0	80.1	99.0		
4月5日	113.3	78.7	97.6		
4月6日	114.5	81.8	99.8	No.2(180°C)	ヤシガラ炭
4月10日	118.8	81.3	101.3		
4月11日	114.9	78.2	99.0		
4月12日	113.7	78.4	98.7	No.3(250°C)	バイオ炭
4月13日	114.9	78.1	100.6		
4月14日	116.8	80.8	101.0		
4月15日	114.6	78.9	100.0		
4月16日	114.8	80.8	101.1		
4月17日	112.5	82.3	100.1		

(4) 灰中のダイオキシン類、および水銀、六価クロムの調査

施設A～Cの火葬場で、表B.2.1に示した火葬に関して、ダイオキシン類、クロムに関する排ガスサンプリングが終了した約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、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中のダイオキシン類濃度は環境省告示80号に基づいて行った。

また、灰中の水銀、六価クロムに関しては、残骨灰については廃棄物ではなく、必ずしも最終保管場所が周辺環境への影響を考慮されているかどうかはわからないため、土壤汚染対策法に基づいた溶出試験、含有量試験で評価した。具体的には、採取した火葬灰に対して、土壤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。全ての溶出量試験においては検液のpHを測定した。

また、あらかじめサンプリングした試料の元素分析を行い、キャラクタリゼーションを実施した。元素組成は主たる元素については、蛍光X線分析、重金属についてはICP発光分析、および水銀については、加熱気化法により測定した。特に火葬灰中のクロムについては、その形態を推定するために、X線吸収微細構造(XAFS)を測定した。

以上の火葬灰の分析方法について、具体的な測定対象と、測定項目、分析方法を、表B.2.4、表B.2.5に示す。

表B.2.4 灰中ダイオキシン類、水銀、クロムを主たる対象とした分析対象と分析項目

火葬場	施設A	施設B	施設C
灰中ダイオキシン類濃度の調査	残骨灰 集じん灰	残骨灰 集じん灰	残骨灰 集じん灰
灰中の元素組成分析(XRF、ICP、Hg)	残骨灰	残骨灰 集じん灰	残骨灰 集じん灰
灰中六価クロム含有量・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
灰中水銀含有量・溶出量調査	集じん灰	集じん灰	集じん灰
灰中のCrの形態推定(XAFS)	残骨灰	残骨灰 集じん灰	残骨灰 集じん灰

表B.2.5 灰中ダイオキシン類、水銀、クロムを主たる対象とした分析方法

残骨灰、 集じん灰	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	溶出量試験では検液のpHも測定
	全クロム	酸分解－フッ酸処理＋ICP発光分析 (Thermo Electron社製:ICP IRIS Intrepid Duo)
	全水銀	加熱気化法(日本インスツルメンツ社製:マーキュリー/SP-3D)
	その他灰中元素	蛍光X線分析(リガク製:ZSX PrimusII)、 ICP発光分析(Thermo Electron社製:ICP IRIS Intrepid Duo)
	灰中クロムの形態	XAFS測定(SPring-8:BL01B1、およびPhoton Factory:BL-12C)
	ダイオキシン類	環境省告示80号に規定される方法

最後に、火葬灰中のクロム源を探索するため、クロム源としてステンレス粉を加えた模擬灰を作成し、管状炉で加熱実験を行い、土壤汚染対策法に基づいた溶出試験、含有量試験を実施するとともに、Crの形態変化をXAFS測定にて評価した。実験条件、および実験装置図を表B.2.6、図B.2.6に示す。

表B.2.6 模擬火葬灰加熱実験条件

項目	内容
模擬灰ベース組成	SiO ₂ :40.4wt%、Al ₂ O ₃ :19.2wt%、CaO:40.4wt% 混合物
クロム源	ステンレス粉(SUS303L)
模擬灰クロム濃度	Crとして1wt%
加熱温度	700°C、800°C、1000°C
加熱時間	60min
雰囲気ガス	O ₂ :10% /N ₂ ベース
ガス流量	50mL/min

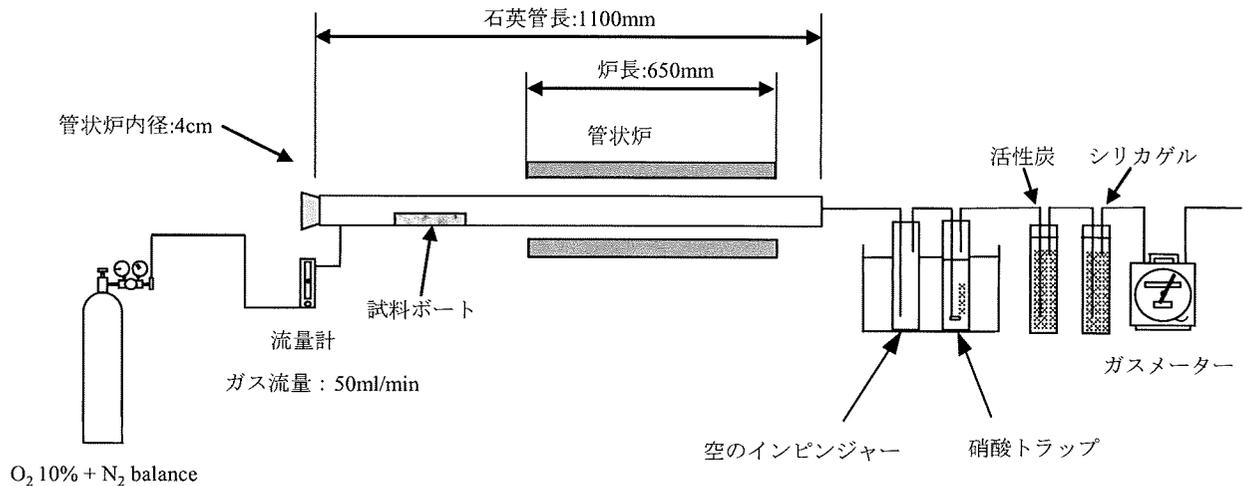


図 B.2.6 模擬火葬灰加熱実験装置

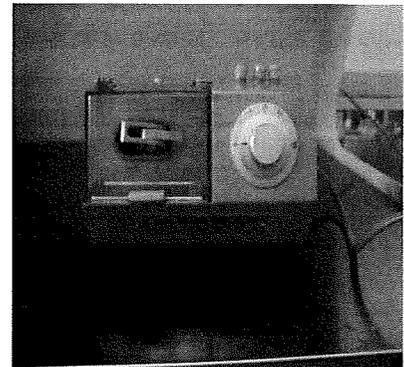
3. アマルガム充填物の採取、ヒアリング、および治療時のデータ収集

(1) アマルガム作成および、その水銀濃度測定

実際のアマルガム充填物を採取、分析する前に、あらかじめ、アマルガムを作成し、その中の水銀濃度を測定するとともに、アマルガム充填練習用の歯のモデルに実際にアマルガムを充填し、初期充填量を測定した。

本実験では歯科用アマルガムミキサーD型(松風社製、図B.3.1)を用いて、歯科用の充填剤として広く知られている銀スズアマルガムを作成した。作成方法は、練和用キネの入ったカプセルに、パウダー状の合金(松風スフェリカル-D/ 歯科用銀スズアマルガム用合金)と金属水銀(松風歯科用水銀)を入れ、振動数2800～3400回/分のミキサーで約15秒攪拌した。表B.3.1にこれら銀スズアマルガムの原料の組成、図B.3.2にその写真を示す。図B.3.2のようにスフェリカル-Dと金属水銀は計量器(ディスペンサー)付きのびんに入っており、所定の割合で銀スズアマルガムを作成することができる。

生成直後のアマルガムはペースト状であり、5～10分で硬化する。本実験では、アマルガム生成後24時間以上経過させ、十分に硬化させた後のアマルガムを乳鉢で粉碎し、水銀含有量測定用のサンプルとした。作成したアマルガム中の水銀含有量は蛍光管中水銀測定装置、マー



図B.3.1 アマルガムミキサー



図B.3.2 銀スズアマルガム原料

表B.3.1 銀スズアマルガム原料の組成

		組成(%)
松風歯科用水銀	Hg	99.9
松風スフェリカル-D	Ag	59.5
	Sn	27.5
	Cu	13.0

キュリーTM-3A(日本インスツルメンツ社製)を用いて、加熱気化冷原子吸光法により測定した。測定は作成した銀スズアマルガム3サンプルに対しそれぞれ3回測定を行った。また、アマルガム充填練習用の歯のモデル(咬合面充填用)に、別途作成したアマルガムを充填し、歯1本あたりに充填されるアマルガム量を調べた。この調査は4回実施した。

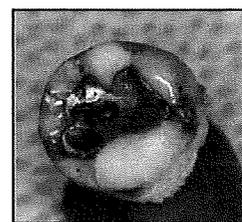
(2) アマルガム充填物の採取、ヒアリング、および治療時のデータ収集

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.3.2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.3.3にアマルガム充填物の採取フローを示した。アマルガム充填物は、デジタルマイクロスコープ:VHX-900(KEYENCE社製)を用いてその表面を観察した後、乳鉢を用いて粉碎し、蛍光管中水銀測定装置:マーキュリー/TM-3A(日本インスツルメンツ社製)を用いて水銀濃度を測定した。

表B.3.2 ヒアリング、および治療時データ収集の実施項目

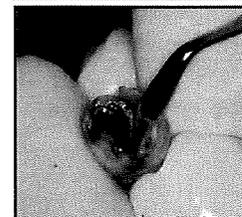
	調査項目	調査方法
1	年齢	ヒアリング
2	性別	ヒアリング
3	充填されていた歯種	治療時目視
4	充填部位	治療時目視
5	充填時期	ヒアリング
6	重量	採取後電子天秤で測定



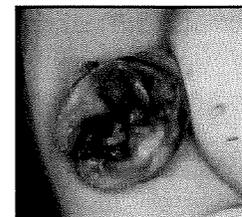
① 歯科アマルガム充填された下顎智歯 (約15年経過)



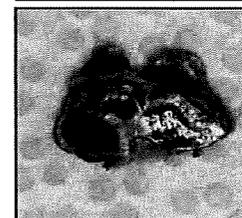
② 歯科用タービンで歯科アマルガムを削出



③ 歯科用バーでアマルガムを摘出



④ 残った歯(上) 摘出された歯科アマルガム(下)



図B.3.3 歯科アマルガム充填物の採取フロー

(3) 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)¹⁹⁾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。モデルの構造を図 B.3.4 に示す。このモデルでは、人体を5つのコンパートメントから成立している構造とした。

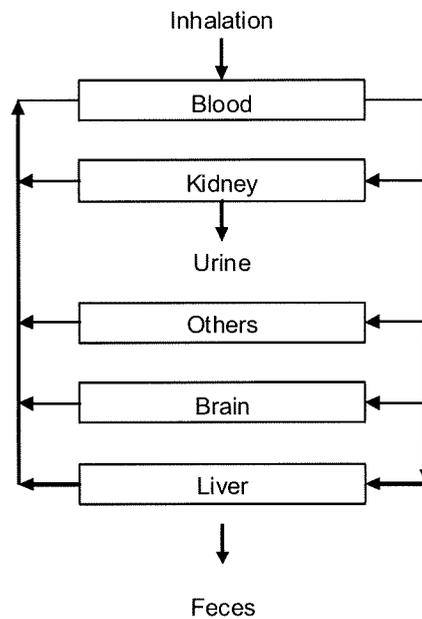


図 B.3.4 PBPK モデルの構造

それぞれのコンパートメントにおいて、水銀についての質量保存則を適用することにより、以下の (B.3.1) 式～(B.3.5) 式に示す方程式群が得られる。

$$\text{Kidney} : V_{ki} \frac{dC_{ki}}{dt} = Q_{ki} \left(C_{bl} - \frac{C_{ki}}{P_{ki}} \right) - K_{ku} C_{ki} V_{ki} - K_{bu} C_{bl} \quad (\text{B.3.1})$$

$$\text{Liver} : V_{li} \frac{dC_{li}}{dt} = Q_{li} \left(C_{bl} - \frac{C_{li}}{P_{li}} \right) - K_{lf} C_{li} V_{li} \quad (\text{B.3.2})$$

$$\text{Others} : V_{ot} \frac{dC_{ot}}{dt} = Q_{ot} \left(C_{bl} - \frac{C_{ot}}{P_{ot}} \right) \quad (\text{B.3.3})$$

$$\text{Brain} : V_{br} \frac{dC_{br}}{dt} = Q_{br} \left(C_{bl} - \frac{C_{br}}{P_{br}} \right) \quad (\text{B.3.4})$$