

	平均値	最小値	最大値	標準偏差
NOx(ppm)	72	1	290	55
SOx(ppm)	8.5	0.005	120	13
ばいじん(g/m ³ N)	0.044	0.0009	1.1	0.09
HCl(mg/m ³ N)	29	0.6	600	58
CO(ppm)	71	0	1500	163
排ガス温度(°C)	215	7	900	139
ダイオキシン類(ng-TEQ/m ³ N)	1.08	0	21	2.71

付図-12 排ガス濃度の頻度分布及び平均濃度

第7章 おわりに

A. 総括

本研究は、安全・安心な火葬を続けていくため、火葬場から排出される有害物質の実態を明らかにし、その排出抑制策を検討することを目的とした。具体的には、延べ11箇所の火葬場での実態調査、水銀の由来とされる歯科充填物の調査とその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、全国の火葬場に対する最新のアンケート結果を過去のアンケート結果との比較を実施した。

以下にそれぞれについて得られた知見を総括する。

1. ダイオキシン類

第2章では、まず、本研究で選定した火葬場における、大気排出分としての排ガス中ダイオキシン類濃度は、 O_2 12%換算濃度で $0.00018 \sim 11 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{m}^3_{\text{N}}$ の範囲であり、毒性等量の算術平均では、 $0.93 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。これらの結果と、各火葬施設の排ガス処理設備の関連性から、排ガス中ダイオキシン類濃度の低減には、少なくとも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。

また、ダイオキシン類の除去挙動に関しては、熱交換器でダイオキシン類の再合成が確認された。再合成されたダイオキシン類は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、セーフティネットとして触媒装置や、活性炭吸着設備を設置することが重要であると考えられた。

一方、残骨灰中のダイオキシン類濃度は、非常に低く、環境に与える影響は大きくない。しかし、集じん灰中のダイオキシン類は、熱交換器が設置された火葬炉で、ダイオキシン類の再合成により、その濃度が $5.0 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{g}$ 以上と高くなった。したがって、熱交換器の導入には注意が必要であるとともに、集じん灰の適切な管理が求められよう。

次に、これまでの調査結果から、火葬場から大気へのダイオキシン類の排出原単位を求めたところ、加重平均を考慮した場合、幾何～算術平均値は $1,000 \sim 2,390 \text{ ng TEQ-WHO}_{06}/\text{体}$ と算出された。この値は、1999年の調査による排出原単位の約57%程度まで削減された上、諸外国の排出原単位に比較して低い範囲にあり、「ダイオキシン類削減対策指針」による効果がうかがえた。さらに、この値を用いて、平成20年度の火葬場から大気へのダイオキシン類排出インベントリーを試算した結果、現在の報告値： $2.2 \sim 4.9 \text{ g TEQ-WHO}_{06}/\text{年}$ に比較して、 $1.2 \sim 2.8 \text{ g TEQ-WHO}_{06}/\text{年}$ まで低減されている結果となった。我が国全体の大気へのダイオキシン類排出インベントリーに対する、火葬炉の寄与は、概ね $0.54 \sim 1.3\%$

程度と試算され、10年前の前提による試算結果に比べ低減されていた。しかし、火葬数が多いため、欧米諸国と同レベルまでには低減されておらず、火葬数は今後も増加する傾向が予測されることから、排出原単位を下げるのが重要であると考えられる。そのためには、排ガス処理の未整備な火葬場に対する集じん機、高度排ガス処理設備の導入が重要となろう。

一方、火葬灰へのダイオキシン類の排出原単位を加重平均により求めた結果、148～185 ng TEQ-WHO₀₆/体と算出され、平成20年度の火葬灰へのダイオキシン類排出インベントリーは、0.17～0.23 g TEQ-WHO₀₆/年と見積もられた。これらの値は、大気へのダイオキシン類排出原単位、およびインベントリーの10%程度であることが明らかとなった。

最後に、火葬場から大気へのダイオキシン類排出インベントリーの将来予測を実施した。1999年時点での予測では2020年で2.7～6.0 ng TEQ-WHO₀₆/年、2040年で3.2～7.0 ng TEQ-WHO₀₆/年と試算されていたが、本研究結果からは、今後、死亡者数が増加したとしても、現状を維持すれば、「ダイオキシン類削減対策指針」により、2020年で1.4～3.4 ng TEQ-WHO₀₆/年、2040年で1.7～4.0 ng TEQ-WHO₀₆/年程度までの増加に抑えられると試算された。

上記の予測結果は現在の排出原単位が維持されることを前提とした結果であり、今後、バグフィルターや高度排ガス処理設備が整備され、大気への排出原単位が減少することで、大気への排出インベントリーは更に低く抑えることができると考えられる。また、これにともなって灰への排出原単位も変化する。今後、これらの値は、全国的な統計値とともに定期的に見直していく必要があると考えられる。

2. 水銀

第3章においては、まず、JIS法により7施設、14件の火葬を対象に測定した排ガス中水銀濃度は、O₂12%換算で、<0.010 mg/m³_N～0.135 mg/m³_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。14検体中11検体の実測値は定量下限値以下となったため、正確な水銀濃度、および排出量の見積のためには、定量下限値をさらに低くできるような方法を検討する必要がある。

水銀挙動の調査では、延べ9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、約2検体/5検体の割合で、歯科アマルガム由来と考えられる高濃度のHg⁰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。歯科アマルガムを有する火葬対象者は、今後死亡者増加とともに2020年頃にピークを迎える予測があるため、活性炭吸着などの排出抑制対策の必要性が改めて示唆された。

排ガス中水銀の除去挙動としては、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。歯科アマルガムに由来する高濃度の Hg^0 ピークも比較的濃度に抑えられることが確認された。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、逆に水銀が脱着し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。最終的に、パイロット実験の結果も考慮すると、排ガス中水銀の除去には、バグフィルターの後段に、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。

一方、残骨灰、および集じん灰中の水銀の土壌汚染対策法に基づいた19号含有量、溶出量については、集じん灰の溶出量が基準値を超える場合があり、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。

次に、これまでの調査結果から、大気への水銀排出原単位を求めたところ、JIS法での結果を基にすると、 $30.8\text{mg}/\text{体} \sim 70.0\text{mg}/\text{体}$ であり。連続分析計の結果を基にすると、 $31.4 \sim 36.9\text{mg}/\text{体}$ と算出され、過去の調査とほぼ同様の範囲であった。イギリスの水銀排出量規制値は $37.5\text{mg}/\text{体}$ であり、場合によっては超えることがある。これを低減していくには、さらなる水銀の高度除去が必要であり、歯科アマルガム由来の高濃度ピークに対し、水銀吸着用の活性炭で対応すること、バグフィルター集じん灰中の水銀の脱着に対し、定期的なバグフィルターの清掃により対応することが必要と考えられた。灰への水銀排出原単位は、大気への排出原単位に比較し十分に低いことが予想された。

3. クロム（六価クロム）

第3章において、火葬排ガス中のクロムに関しては、実測により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。また熱交換器部分で、排ガス中のクロムが増加する現象が認められ、熱交換器部分に過去に堆積したばいじん、および熱交換器の材質であるステンレスが剥離して濃度が上昇し、集じん灰へのクロムの供給源となっている可能性が示唆された。したがってダイオキシン類と同様に、クロムの観点からも熱交換器の導入には注意する必要がある。

一方、残骨灰、および集じん灰中の六価クロムの土壌汚染対策法に基づいた19号含有量、溶出量については、19号含有量についていくつかのサンプルでのみ基準値を超過するケースが見られたが、溶出量では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。19号含有量と溶出量の対応から、ほとんどのサンプルで含有量として定量された六価クロムの大部分が溶出量試験で溶出していることが明らかとなった。

次に、これまでの調査結果から、六価クロムの大気への排出原単位を詳細に見積もった結果、バグフィルターを有する比較的新しい炉では $0.15 \sim 20\text{mg}/\text{体}$ 、集じん機を有しない旧型の炉では、 $46 \sim 230\text{mg}/\text{体}$ と見積もられた。また他の燃焼発生源とクロムの排出係数を

比較した結果、集じん機がない場合、都市ごみ、下水汚泥焼却炉よりも、排出原単位は高くなる傾向にあり、火葬には特有のクロム源が存在することが示唆された。

最後に、クロムの由来調査として、火葬炉におけるクロムのマスバランスを文献調査により検討するとともに、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、炉内のステンレス架台をクロム源とした場合、マスバランスが整合し、温度が800°C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。また、火葬灰のキャラクタリゼーションの一つとして、XAFSによる灰中のクロムの化学形態を推定した結果、全ての灰でメタルとしてのクロムが含まれるとともに、六価クロムが生成していることが確認できた。

以上から、灰中の六価クロムの由来としては、ステンレス架台の影響が高いと推測された。しかし、火葬炉内部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報告があり、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場外への排出を抑制し、別途灰は、熔融処理や不溶化処理を検討する必要があると考えられた。

4. フッ素、ホウ素、カドミウム

第3章では、残骨灰、および集じん灰について、フッ素、ホウ素、カドミウムの土壤汚染対策法に基づいた19号含有量、溶出量試験も実施した。その結果、集じん灰中のフッ素、カドミウムについて、集じん灰で溶出量を超過するケースがいくつか見られたため、集じん灰中のフッ素、カドミウムに留意する必要がある。

5. 歯科アマルガムの調査と、無機水銀の健康リスク評価

第4章では、まず、火葬場において排ガス中水銀の由来とされる歯科アマルガムの調査として、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を行った。その結果、24検体のアマルガム充填物について、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 μ g/dayの割合で減少していることが明らかとなった。この結果と、歯科治療歴の統計から我が国の火葬場からの水銀排出量を予測した結果、27kgHg/年と予測された。一方、本研究での火葬排ガス中水銀のデータを用いて水銀排出量を算出した結果、43kgHg/年と算出され、概ねこれらの整合性を確認できた。これまでに歯科治療歴から推測した値は、1,670～2,380kg/年とされており、大きな差があったが、この原因は、本研究での結果より、水銀の初期充填量が海外より低い結果であったこと、および経年変化による、アマルガム中水銀の減少を考慮していなかったことによると考えられた。

次に、歯科アマルガムの口腔内の水銀減少が予想されたため、無機水銀の体内動態を評価するPBPKモデルを構築し、人における体内動態を評価した。5つのコンパートメントのPBPKモデルにおいて、ラットで求められた移動係数から推定した値などを用いることで、血中濃度や尿中排泄濃度の再現性という点で比較的信頼性の高いPBPKモデルを作成することができた。さらにこのモデルを用いて、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。その結果、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。

6. 火葬場における低煙突からの有害物質拡散シミュレーション

第5章では、火葬場特有の低煙突構造について、ダイオキシン類、水銀、クロムの調査データを用いて、その排出拡散をMETI-LISモデルを基本としてシミュレートした。その結果、火葬場の現状としては、低煙突であるがゆえに拡散が十分とならないため、煙突高さを高くすることで、ダイオキシン類、水銀、六価クロムの着地濃度の全体的な低減が可能であることが、火葬場の拡散シミュレーションにより示唆された。

また、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。

本研究での火葬場の拡散シミュレーションでは、幾つかの仮定を含むものの、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。

7. 火葬場の実態に関する統計とその比較

第6章では2009年に厚生労働省が実施したアンケート調査結果を整理し、全国の火葬場の最新の状況把握を行うとともに、1999調査結果と比較した。

まず、火葬場の規模は、10年前に比較して、火葬数の増加とともに、大きくなりつつあり、副葬品の制限率も上昇傾向にあった。また、古い施設は閉鎖されるとともに、平成12年のダイオキシン類削減対策指針以降、全体の1/3の施設が、新設、あるいは改修された上で、運営されていると考えられた。

次に、炉（主燃焼室）に関しては、台車式が主流であり、多くの施設で台車にステンレス架台、キャストブル耐火物が使用されている状況にあった。また、10年前よりも、主燃焼室でのセラミックファイバーの利用率や、温度管理を徹底する割合が増加し、燃料にお

いても重油から、灯油、都市ガスへの転換など、高度化が進んでいると考えられた。

再燃焼室に関しては、10年前に比較し、主燃焼室毎に再燃焼室1室が設置される割合が増加し、多くの施設で再燃焼バーナーによる予熱と再燃焼、温度管理がなされており、ダイオキシン類削減対策指針の効果が伺えた。

また、排ガス処理に関しては、10年前に比較し、強制排気方式の採用や、排ガス冷却装置、集じん機の設置割合、集じん機の清掃頻度、排ガス測定頻度等、ダイオキシン類削減対策指針の効果により、ある程度の高度化が進んでいると考えられた。その一方で、触媒装置をはじめとする高度排ガス処理の設置件数は低く、火葬炉の低煙突構造もそれほど変化していないことが明らかとなった。

火葬排ガスの組成に関しては、10年前に比較し、最も大きな変化は、CO濃度の低減であり、適切な燃焼管理がなされるようになった効果によるものと考えられた。

最後に火葬灰に関しては、その発生量は火葬件数とともに増加傾向にあることが示唆され、その処理は多くが委託されているものの、処理されていない場合もあることがわかった。灰中のクロム、ダイオキシン類はあまり測定されていないが、六価クロムの溶出量に関しては、多くの灰で、土壤汚染対策法に基づく溶出量基準を超過する傾向があるとともに、ダイオキシン類についても集じん灰については高い値を示すケースが見受けられた。

B. 火葬場からの有害物質排出抑制に関する対応策

本研究で得られた成果を、火葬場からのダイオキシン類、水銀、六価クロムを中心とした有害物質の排出抑制に関する対応策として以下にとりまとめた。

1. ダイオキシン類抑制対策

現在の“火葬場から排出されるダイオキシン類削減対策指針”を遵守すること。

(1) 測定

- ・ 1年に1回以上、排ガス、および集じん灰について定期的に測定し、その結果を記録すること。

(2) 設備対策

- ・ 集じん機を設置すること。バグフィルター等の集じん効率の高いものが望ましい。
- ・ 排ガス冷却方式としては、空気混合による冷却方式が望ましい。
- ・ 熱交換器による冷却方式は、火葬炉設備をコンパクトにでき、維持管理費を低減できる利点がある反面、ダイオキシン類の再合成を生じる可能性が高いことから、温度管理の徹底等、再合成を避ける工夫が必要である。
- ・ 熱交換器を設置する場合は、触媒装置、活性炭吸着設備を設置することが望ましい。

(3) 運転対策

- ・ 主燃焼炉、再燃焼炉において、できるだけ完全燃焼を心がけること。CO濃度を低下させること。
- ・ 熱交換器を設置している場合は、適切な温度管理により、300－400℃域のダイオキシン類再合成温度域を速やかに降温させること。
- ・ 熱交換器を設置している場合は、内部の定期的な清掃を実施し、灰の蓄積等を防止すること。
- ・ 活性炭吸着設備を設置している場合は、定期的な活性炭の破過状況の点検と交換を実施し、性能が維持されるよう努めること。
- ・ 触媒装置を設置している場合は、触媒活性が発揮できるよう、できるだけ適切な温度に維持することが望ましい。
- ・ 集じん灰は残骨灰と分別し、適正に処理すること。ただし残骨灰に六価クロム等重金属が多く含まれ、処理を必要とする場合はこの限りではない。

2. 水銀の排出抑制対策

(1) 測定

- ・ 御遺体により、排ガス中水銀の濃度が高い場合と、低い場合がある。地域性にも依存する可能性があるため、複数の火葬について分析し、高濃度水銀排出の発生頻度等をあらかじめ調査すること。
- ・ 測定は、JIS K 0222 に準拠した方法で実施するとともに、乾き排ガス量も測定し、排出原単位(一体あたりの排出量)を求めておくほうが望ましい。
- ・ 高濃度水銀排出の発生頻度が高く、かつ、排ガス中の水銀濃度が高い場合においては、下記の対策をとること。

(2) 設備対策

- ・ 触媒装置でも一定の水銀除去効果があるが、活性炭吸着設備を設置することが望ましい。

(3) 運転対策

- ・ バグフィルター等、ろ過式集じん機を設置している場合は、できるだけ1日1回、バグフィルターからの集じん灰の搬出を心がけること。
- ・ 活性炭吸着設備を設置している場合は、定期的な活性炭の破過状況の点検と交換を実施し、性能が維持されるよう努めること。

3. 六価クロム排出抑制対策

(1) 測定

- ・ 年1回以上、集じん灰、および残骨灰について、土壤汚染対策法に基づいた溶出試験、含有量試験により評価し、結果を記録すること。

(2) 設備対策

- ・ 集じん機を設置すること。バグフィルター等の集じん効率の高いものが望ましい。
- ・ 排ガス冷却方式としては、熱交換器による冷却方式は、火葬炉設備をコンパクトにでき、維持管理費を低減できる利点がある反面、集じん灰へのクロムの供給源になっている可能性もあるため、空気混合方式が望ましい。
- ・ クロム源と考えられるステンレス架台は、多くの火葬場で使用されており、設備・運転計画に支障がない範囲で、クロムを多く含まない架台を用いることが望ましい。

(3) 運転対策

- ・ 熱交換器を設置している場合は、内部の定期的な清掃を実施し、灰の蓄積等に防止すること。
- ・ 熱交換器に加え、バグフィルター等、ろ過式集じん機を設置している場合は、できるだけ1日1回、バグフィルターからの集じん灰の搬出を心がけること。
- ・ 残骨灰、集じん灰が六価クロムを多く含む場合、これらを埋葬、保管、処分等の目的で、直接、地中に埋設すると、地下水汚染や土壤汚染が懸念される。この観点から、これらの灰については、適切に熔融処理、不溶化処理等をした上で、適切に処分・管理すること。

4. 有害物質排出抑制に関する全般的な対策

(1) 設備対策

- ・ 有害物質の拡散を促すため、煙突、排気塔はできるだけ高くするほうが望ましい。
- ・ 有害物質の拡散を妨げないため、煙突、排気塔には、雨よけ等の遮蔽物の設置をできる限り避けること。

(2) 運転対策

- ・ 副葬品については、できるだけ御遺族の理解を得て制限することが望ましい。

II 研究成果の刊行に関する一覧表

1. 書籍

該当なし

2. 雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
武田信生 高岡昌輝 大下和徹	火葬炉から排出される有害物質の実態調査とその抑制対策	環境工学研究論文集	Vol.45	259-270	2008
M. Takaoka K. Oshita N. Takeda S. Morisawa	Mercury emission from crematory in Japan	Proceeding of the 9th International Conference on Mercury as a Global Pollutant	CD-ROM	S17-12	2009
M. Takaoka N. Takeda K. Oshita S. Eguchi	PCDDs/DFs and PBDDs/DFs Emissions from Crematory	Organohalogen Compounds	Vol.71	848-853	2009
武田信生 高岡昌輝 大下和徹 江口正司	火葬場から排出される六価クロムの実態と由来の調査および排出抑制対策	環境工学研究論文集	Vol.46	377-388	2009
M. Takaoka K. Oshita N. Takeda S. Morisawa	Mercury emission from crematory in Japan	Atmospheric Chemistry and Physics	Vol.10	3665-3671	2010

III. 研究成果の刊行物・別刷

1. 武田信生、高岡昌輝、大下和徹：火葬炉から排出される有害物質の実態調査とその抑制対策、環境工学研究論文集、Vol.45, pp.259-270 (2008)
2. M. Takaoka, N. Takeda, K. Oshita, S.Eguchi, PCDDs/DFs and PBDDs/DFs Emissions from Crematory, *Organohalogen Compounds*, Vol.71, pp.848-853, 2009.
3. M. Takaoka, K. Oshita, N. Takeda and S. Morisawa: Mercury emission from crematory in Japan, *Proceeding of the 9th International Conference on Mercury as a Global Pollutant*, CD-ROM, S17-12 (2009)
4. 武田信生、高岡昌輝、大下和徹、江口正司：火葬場から排出される六価クロムの実態と由来の調査および排出抑制対策、環境工学研究論文集、Vol.46, pp. 377-388 (2009)
5. M. Takaoka, K. Oshita, N. Takeda, and S. Morisawa: Mercury emission from crematory in Japan, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Vol.10, pp.3665–3671 (2010)

火葬炉から排出される有害物質の実態調査とその抑制対策

武田 信生¹・高岡 昌輝^{2*}・大下 和徹²

¹立命館大学エコ・テクノロジー研究センター (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

* E-mail: takaoka@environ.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

火葬場から排出される有害物質の実態を調査し、排出抑制策を検討することを目的とし、4箇所の火葬炉にて、排ガスや灰中の塩素化・臭素化ダイオキシン類、水銀、六価クロムなどの測定を行った。

その結果、排ガス中ダイオキシン類は、算術平均で $0.42\text{ng-TEQ}/\text{m}^3$ (O_2 12%換算)であり、この結果から、排出インベントリーは最大 $1.1\text{g-TEQ}/\text{年}$ と試算され、現在の試算値の1/5程度まで低減されていると推定された。排ガス中水銀は、JIS法ではほとんどが定量下限以下であったが、形態別水銀連続分析では過去の調査と同様に歯科アマルガム由来と考えられる Hg^0 が大きな寄与を占めることが確認された。灰中の重金属は、全試料で六価クロムの溶出量が、土壤環境基準の180~1200倍となり対策が必要であると考えられた。

Key Words : crematorium, dioxin, mercury, emission control, hexavalent chromium compounds

1. 研究目的

わが国の火葬率は平成18年度で約99.7%であり、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、著者らは、火葬場から排出されるダイオキシン類実態調査を行った^{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 $2.9\text{ng-TEQ}/\text{m}^3$ 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 $4,800\text{ng-TEQ}/\text{人}$)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⁶⁾。「火葬炉からの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、現在では燃焼過程から排出される臭素化ダイオキシン類が新たな問題とされており、副葬品や棺などが同時に燃焼される火葬炉において、臭素化物の寄与についても調査しておく必要がある。

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残骨灰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や⁹⁾、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。

以上のような背景の下で、本研究では、火葬炉における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、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を目的とした。具体的には、対象施設として代表的な4箇所の火葬炉を選定し、排ガスについては、塩素化ダイオキシン類、臭素化ダイオキシン類、水銀濃度測定を行い、現状の火葬場からの排出実態を明らかにした。また、ガスサンプル以外の残骨灰、集じん灰については、水銀、六価クロム、フッ素、ホウ素における、含有量および溶出量を調べ、基準値との比較を行った。

2. 研究方法

(1) 対象施設

本研究で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-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。

施設を選定するにあたっては、現在の全国の火葬炉数や形式を基に決定すべきであるが、現在公表されていて本研究にて入手できた全国の火葬炉のデータは平成11年の厚生省調査⁹⁾によるものであり、他の報告においても¹¹⁾、この調査を最新として引用している。しかし、これは9年前のデータであり、「火葬炉からのダイオキシン類排出抑制ガイドライン」を受けて新設、改造、廃止が進められてきた火葬炉の現状を反映しているとは言い難い。そこで、施設の選定は、その規模(1施設あたりの炉数)や主燃焼室に対する再燃焼室の比について、平成11年の厚生省調査⁹⁾から平均的な位置づけにあるものを選定すること、「火葬炉からのダイオキシン類排出抑制ガイドライン」を反映していると考えられる集じん機やその後段の高度排ガス処理を有する比較的新しい施設と、反映していないと想定される古い施設とを選定すること、以上の2つの観点により行った。これにより、火葬炉からの有害物質排出傾向の大枠を現状に即した形で把握できると考えられる。

表-1 対象とした火葬炉と測定条件

火葬炉	施設A		施設B		施設C		施設D	
	再燃焼炉	有	有	有	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

(2) サンプリング、測定項目、および測定方法

4箇所火葬場を対象に、1箇所火葬場で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-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。

排ガスのサンプリング時間は一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。

全ての火葬場で、2回目の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、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。

測定項目、および測定方法の一覧を表-2に示す。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」に準拠し行い、臭素化ダイオキシン類の測定は、環境省の暫定調査方法に準拠して行った¹²⁾。また、上記以外に、ばいじん、一酸化炭素、酸素、窒素酸化物の濃度を測定した。一酸化炭素、酸素、窒素酸化物は連続分析計により測定した。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、排ガス温度を測定し、排ガス流量(湿り、乾き)を求めた。

排ガス中の水銀はJIS K0222に基づいて測定した。

また、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(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MS-1A+DM-6B)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4月17日までの約10週間にわたり計44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。形態別水銀連続測定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、金属状(0価)と2価の水銀に分けることができ、検出下限は0.1μg/m³_Nである^{13)、14)}。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。また、水銀の連続分析中は、同時に同様のサンプリング箇所におけるO₂濃度を連続分析した。

また、残骨灰と集じん灰の固体サンプルに対しては、ダイオキシン類については、環境省告示80号に基づく方法で、臭素化ダイオキシン類の測定は、環境省の暫定調査方法に準拠して行った¹²⁾。また、残骨灰・集じん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、水銀、六価クロム、フッ素、ホウ素については、土壤環境基準に基づいた試験を行った。具体的には、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。

表-2 測定項目、および方法

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)
	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
	臭素化ダイオキシン類	環境省暫定調査方法 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 形態別水銀連続分析装置((日本インスツルメンツ社: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
	臭素化ダイオキシン類	環境省暫定調査方法 ガスクロマトグラフ-質量分析法
	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		

3. 結果, および考察

(1) ばいじん, CO, NOx

排ガス組成の測定結果を表-3に示した。まず, ばいじん濃度は, 集じん機が設置されている施設A, Bにおいては, $0.03\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下であり低く保たれていたが, 集じん機のない施設Cでは, $0.14\sim 0.17\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり, 比較的高い値を示した。ただし, 施設Dにおいても集じん機は設置されていなかったが, $0.041\sim 0.064\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり, 比較的低い値を示した。したがって, ばいじん濃度に関しては, 集じん機がなくても炉構造などにより変化してくるものと推測された。またCOに関しては, 施設A, およびBでは $30\sim 120\text{ppm}$ であり, 施設C, および施設Dにおいては $64\sim 360\text{ppm}$ であって, 施設AおよびBの方が全体的に低い傾向であった。COに関しては, 炉構造に加えて, 御遺体の状況や燃焼状況が大きく影響するものと考えられるが, 表-1より施設A, およびBでは燃料として都市ガスが, 施設C, Dでは灯油が使用されており, 液体燃料よりも気体燃料のほうが燃料由来のCOが生成しにくいことが一つの理由として考えられた。NOxに関しては, すべての施設で $50\sim 130\text{ppm}$ であり大きな差は見られなかった。

(2) ダイオキシン類, 臭素化ダイオキシン類

ダイオキシン類, および臭素化ダイオキシン類に関連する分析結果を表-3に示した。

a) 排ガス中ダイオキシン類濃度

表-3より各施設における, 排ガス中のダイオキシン類濃度は, 酸素12%換算濃度で $4.7\sim 75\text{ng}/\text{m}^3_{\text{N}}$, 毒性等量で $0.00012\sim 1.2\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ の範囲であった。それぞれ算術平均では $28\text{ng}/\text{m}^3_{\text{N}}$, $0.42\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ となり, 平成9・10年度における筆者らの調査結果($2.9\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$)⁹⁾と比較すると1/5以下に低減される結果となった。

2回の測定で, ともに約 $0.1\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以下で, 低い値を示していたのは, 施設Aと施設Bであった。これらの施設は平成14年以降に運用開始され, 比較的新しく, 集じん機としてバグフィルターが設置された上に, 施設Aでは触媒装置, 施設B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。平成12年に提示された「火葬炉からのダイオキシン類排出抑制ガイドライン」の新設炉における指針値は $1.0\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり⁹⁾, その値を下回った。一方, $1.0\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 以上の比較的高い値が現れたのは, 施設Cと施設Dであり, これらの施設は比較的古く, 昭和50年代に運用開始され, 集じん機が設置されていなかった。ただし, 「火葬炉からのダイオキシン類

排出抑制ガイドライン」の既設炉における指針値は $5.0\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であり⁹⁾, その値は下回っていた。

施設Dの2回目では, $0.096\text{ng-TEQ}/\text{m}^3_{\text{N}}$ 程度に抑えられ, 1回目と大きく濃度が異なる結果となっており, 同じ炉構造であっても御遺体や副葬品により燃焼条件がかなり異なってくることを示唆された。

b) 排ガス中臭素化ダイオキシン類濃度

臭素化ダイオキシン類は, 表-3より, 施設Dで $0.031\sim 0.045\text{ng}/\text{m}^3_{\text{N}}$ で, 同施設の塩素化ダイオキシン類と比較して1/1000~1/200程度の値であり, これらは, 主として4臭素化物であるTeBDFs由来であった。また, 他施設では全て検出下限値以下(N.D.)であった。したがって, 塩素化ダイオキシン類と比較し, 臭素化ダイオキシン類の寄与は十分に低いものと考えられた。

c) 残骨灰, 集じん灰中ダイオキシン類濃度

表-3より, 残骨灰中のダイオキシン類の濃度範囲は, 実測濃度で $0.012\sim 0.184\text{ng}/\text{g}$, 毒性等量で $0.00000061\sim 0.0038\text{ng-TEQ}/\text{g}$ であった。この値は非常に低いといえる。

次に, 集じん灰は施設Aにおいて, 実測濃度で $530\text{ng}/\text{g}$, 毒性等量で $15\text{ng-TEQ}/\text{g}$, 施設Bにおいて実測濃度で $71\text{ng}/\text{g}$, 毒性等量で $1.6\text{ng-TEQ}/\text{g}$ であった。平成9・10年度における筆者らの調査結果では, 集じん灰中ダイオキシン類の毒性等量は算術平均で $21\text{ng-TEQ}/\text{g}$, 中央値で $8.4\text{ng-TEQ}/\text{g}$ であり, 都市ごみ焼却炉飛灰と同レベルの濃度が検出されていた⁹⁾。サンプル数が2検体でありはつきりとは言えないが, 10年前のデータと比較すると, 排ガス中ダイオキシン類は大きく低減されているものの, 集じん灰中のダイオキシン類は排ガスほどの低減はされていないと考えられる。

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, 集じん灰は, 10年前の調査結果や都市ごみ焼却飛灰と比較しても依然として同レベルであるため, 濃度の高いものに関しては別途処理を検討するなどの対策が必要であろう。

d) 残骨灰, 集じん灰中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-3より, 施設Dで $0.0038\text{ng}/\text{g}$ であり, その他は検出下限値以下(N.D.)であった。また, 集じん灰は, $0.068\sim 0.072\text{ng}/\text{g}$ であり, 塩素化ダイオキシン類と比較して, 1/1000~1/1000のレベルであった。

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。

e) 火葬炉からのダイオキシン類総排出量

排ガス中ダイオキシン類の測定結果より, 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(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O₂12%換算した値を用いた。

$$\begin{aligned} & \text{一体あたりのダイオキシン類排出量 (ng-TEQ/人)} \\ & = \text{ダイオキシン類毒性等量 (ng-TEQ/m}^3\text{)} \\ & \times \text{乾き排ガス量 (m}^3\text{/h)} \times \text{火葬時間 (h/人)} \quad (1) \end{aligned}$$

推定の結果を、表-4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/人となった。

平成9・10年度の厚生科学研究における調査結果を基にすると、算術平均値は4,800ng-TEQ/人と算出される⁹⁾。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まで低減されていると推定された。

平成17年度の火葬炉からのダイオキシン類排出インベントリーは2.4～5.3g-TEQ/年⁹⁾で報告されているが、本研究結果と平成17年度(2005年)の火葬件数の実績1,112,178体/年⁹⁾とをかけ合わせ、幾何平均～算術平均の範囲で表すと、ダイオキシン類排出インベントリーは0.13～1.1g-TEQ/年まで低減されている結果となった。

これらの結果は、「火葬炉からの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を示唆すると考えられるが、今後、より多くの火葬場での調査を行って、排出量原単位、排出インベントリーの検証を行っていく必要がある。

表-4 ダイオキシン類の排出原単位推定結果

項目	測定時間	ダイオキシン類毒性等量	乾き排ガス量(O ₂ 12%換算)	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	

(3) 水銀

a) 排ガス中水銀濃度

各施設における、水銀濃度測定結果を表-5に示す。定量下限値(<6.0μg/m³_N)を超えたものについては施設Aの1件(8.0μg/m³_N)だけであった。水銀濃度は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考えられる。仮に、施設Dのように、施設Aの約2倍の時間を要していれば、濃度はおおよそ半分となり、定量下限値を下回る。本測定はJIS法にしたがって行っているが、今後、火葬炉において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考えられる。

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あり、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とならない。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、<9.0～<54μg/m³_Nとなった。

表-5 排ガス中水銀濃度測定結果(JIS法)

単位	測定時間	実測濃度	O ₂ 12%換算濃度	
		分	μg/m ³ _N	μg/m ³ _N
A	A-1	42	8.0	23
	A-2	46	<6.0	<54
B	B-1	68	<6.0	<42
	B-2	61	<6.0	<30
C	C-1	71	<6.0	<21
	C-2	66	<6.0	<23
D	D-1	90	<6.0	<9.0
	D-2	71	<6.0	<9.0
最大値			8.0	<54
最小値			<6.0	<9.0
中央値			6.0	23
算術平均値			6.3	26
幾何平均値			6.2	22

※中央値、算術平均値、幾何平均値は、定量限界以下の値は、定量限界値として算出。

表-6 形態別水銀連続測定結果のまとめ
火葬件数：44件（男性24件、女性20件）

	火葬時間 (分)	年齢 (歳)	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 (%)
算術平均値	84	81	2.6	0.4	3.0	66
標準偏差	12	10	12	0.7	12	31
最大値	107	99	83	2.7	83	100
最小値	60	52	0.0	0.0	0.0	0.0
中央値	83	82	0.4	0.1	0.8	75
3月5日 男性	97	77	5.4	0.4	5.7	94
3月22日 女性	78	66	83	1.5	84	98

b) 連続分析による排ガス中水銀濃度

形態別水銀連続分析装置による測定結果は、合計44件の火葬について得られ、御遺体の年齢分布は52歳～99歳、男性24検体、女性20検体であった。測定結果のまとめを表-6に示す。

44件の平均は総濃度で $3.0\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。この値は、上記の調査結果から、JIS法では $<6.0\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であったこととも合致する。

また、燃焼時間におけるO₂連続分析計における酸素濃度は平均で約18%程度であったことから、O₂12%換算濃度値は約3倍の値、つまり $9\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。この値は2005年度の別の火葬炉での調査結果¹⁵⁾では $29.2\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であったことから約1/3の濃度であった。また、都市ごみ焼却炉煙突排ガスと比べると同程度かやや高い値であるといえる¹⁶⁾。

しかし、調査で得られた平均水銀濃度： $3.0\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ (O₂12%換算濃度：約 $9\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$)は、3月22日のきわめて大きな水銀排出濃度($83\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$)の影響を大きく受けている。表-6に3月22日の結果を追記した。このデータは、O₂12%換算しなくとも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 $30\sim 50\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ を超えていた¹⁷⁾。この検体を除く総水銀濃度は、 $0.1\sim 5.7\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ であった。この3月22日のデータについて経時変化を、図-1(a)に示す。特徴としては火葬開始後約10～20分に0価水銀(Hg⁰)の大きなピークが現れ、最大 $2,500\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ まで達していた。また、2番目に高い濃度を示した3月5日の経時変化を同じく図-1(b)に示す。なお、このデータについても表-6に追記した。図より水銀濃度の最大値は1/10程度であるが、図-1(a)とほぼ同様の推移を示している。この水銀の由来は歯科充填材中の水銀アマルガムによるものと推測され、火葬開始後約10～20分程度で高濃度水銀が出始めるのが特徴であるとされる^{18), 19)}。

ここで、1体あたりの総水銀排出量： M_{T-Hg} ($\mu\text{g}/\text{人}$)に対する、ピーク時の総水銀排出量： MP_{T-Hg} ($\mu\text{g}/\text{人}$)の寄与率： $D(\%)$ を図-1(a), (b)のケースにおいて以下の

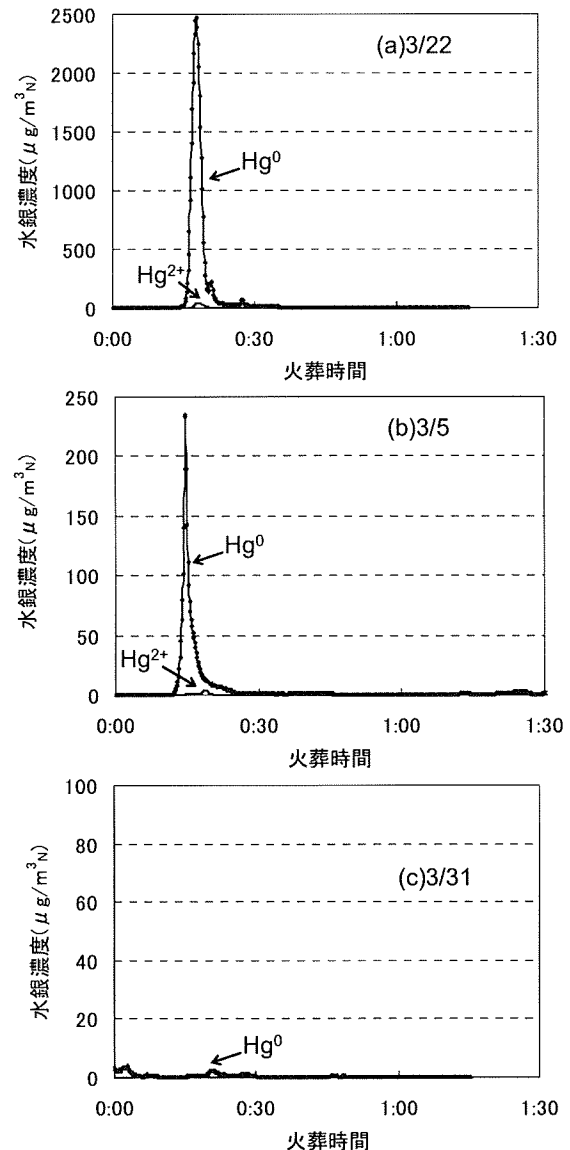


図-1 3/22, 3/5, および3/31における水銀濃度の経時変化

(2)～(4)式にて算出した。

$$M_{T-Hg} = \sum_{i=0}^{t_c} (C_{T-Hg}(i) \cdot \Delta t) \cdot Q \quad (2)$$

$$MP_{T-Hg} = \sum_{i=tp1}^{tp2} (C_{T-Hg}(i) \cdot \Delta t) \cdot Q \quad (3)$$

$$D = \frac{MP_{T-Hg}}{M_{T-Hg}} \cdot 100 \quad (4)$$

$C_{T-Hg}(t)$: 時間 t における排ガス中水銀濃度,

Q : 排ガス流量 (m^3_N/h),

Δt : 微小時間 (h), tc : 火葬時間 (h),

$tp1$: ピーク開始時間 (h), $tp2$: ピーク終了時間 (h)

その結果, 図-1(a), (b)のピークにおける寄与率は99%, および86%であり, ピークの寄与がそのほとんどを占め, 総水銀排出量の観点からもピーク由来の水銀が大きく影響していた。

このような特徴的な変化を示したものは, 14 検体/44 検体であった。図-1(c)に, 大きなピークが見られなかった3月31日のデータを示す。30 検体/44 検体はこのような傾向であり, 火葬炉からの水銀排出トレンドは大きなピークの有無により2つに分けることができた。2005年の調査事例¹⁹⁾でも同様にピークの有無により2つのパターンを示していたが, ピークの出現頻度を比較すると, 本研究は約1/2から1/3へ減少していた。

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3つのことが考えられる。一つ目は, 御遺体のアマルガム含有量が低かったことである。これは, 施設Dを管轄とする地方自治体住民の歯科治療やアマルガム使用状況などに左右されるが, 本調査では不明である。二つ目は, 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, 施設Dにおける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。本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たこともあったが, それほど高い濃度ではなく ($5\text{--}数十 \mu\text{g}/m^3_N$) 程度が1分程度続く程度であったため, 吸着損失の影響はそれほど大きくないと考えられる。

三つ目は, 平均濃度は火葬時間および排ガス流量に左右される。過去に調査した施設では平均火葬時間が約1時間程度であったことから¹⁹⁾, 表-6より, 本施設では約1.5倍かかっていることになる。したがって, 総排出量 (濃度 × 排ガス量 × 火葬時間) が同程度

であっても, 火葬時間が長ければ濃度が低くなるということが一因であるといえる。

c) 連続分析による水銀形態について

火葬排ガス中水銀の形態として, 0 価水銀濃度, 2 価水銀濃度, 総水銀に占める 0 価水銀の割合を求めた結果を表-6に示す。0 価水銀の平均濃度は $2.5 \mu\text{g}/m^3_N$, 2 価水銀の平均濃度は $0.4 \mu\text{g}/m^3_N$ であった。それぞれの平均濃度を比較すると 0 価の割合は 80%を超えるが, これは, 3月22日のデータの影響が極めて大きいことによる。しかし, それぞれの日における総水銀に占める 0 価水銀の平均割合は 65.8%であったことから, 3月22日のデータがなくとも平均的に水銀の形態は 0 価の水銀が主であることがわかった。歯科充填材の水銀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, 表-6における3月5日, 3月22日のデータから 0 価水銀が圧倒的に大きいことが明らかであり, 問題となるような排出濃度である場合は 0 価水銀が主たる形態であるといえる。

d) 残骨灰, 集じん灰における水銀溶出量, 含有量

表-7に各施設における残骨灰および集じん灰中水銀の溶出・含有量結果を示した。まず, 水銀の溶出量は, 残骨灰はすべて $0.0005 \text{mg}/\text{L}$ 未満であり, 土壤環境基準 ($0.0005 \text{mg}/\text{L}$) を下回っていたが, 集じん灰は $0.090 \text{mg}/\text{L}$, $0.0027 \text{mg}/\text{L}$ と上回っていた。特にA集じん灰については基準の180倍であった。

次に含有量であるが, ここでいう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。水銀の残骨灰中の含有量は, すべて $0.05 \text{mg}/\text{kg}$ 未満であった。集じん灰中の水銀含有量はそれぞれ, 2.2, $6.2 \text{mg}/\text{kg}$ であった。土壤汚染対策法における含有量基準は $15 \text{mg}/\text{kg}$ であることから, 残骨灰については問題ないと考えられる。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過する場合もあり得る濃度であった。

以上のことから, 特に集じん灰における水銀の溶出量に関して, 留意する必要があることが示唆された。

表-7 残骨灰, 集じん灰中水銀の含有量, 溶出量試験結果

	含有量(mg/kg)		溶出量(mg/L)	
	残骨灰	集じん灰	残骨灰	集じん灰
A	<0.05	2.2	<0.0005	0.090
B	<0.05	6.2	<0.0005	0.0027
C	<0.05	—	<0.0005	—
D	<0.05	—	<0.0005	—

※水銀の土壤環境基準

含有量: $15 \text{mg}/\text{kg}$, 溶出量: $0.0005 \text{mg}/\text{L}$

「土壤汚染対策法施行規則」

環境省令第29号(平成14年)