



図1-9 実験に用いたデンタルシュミレータ

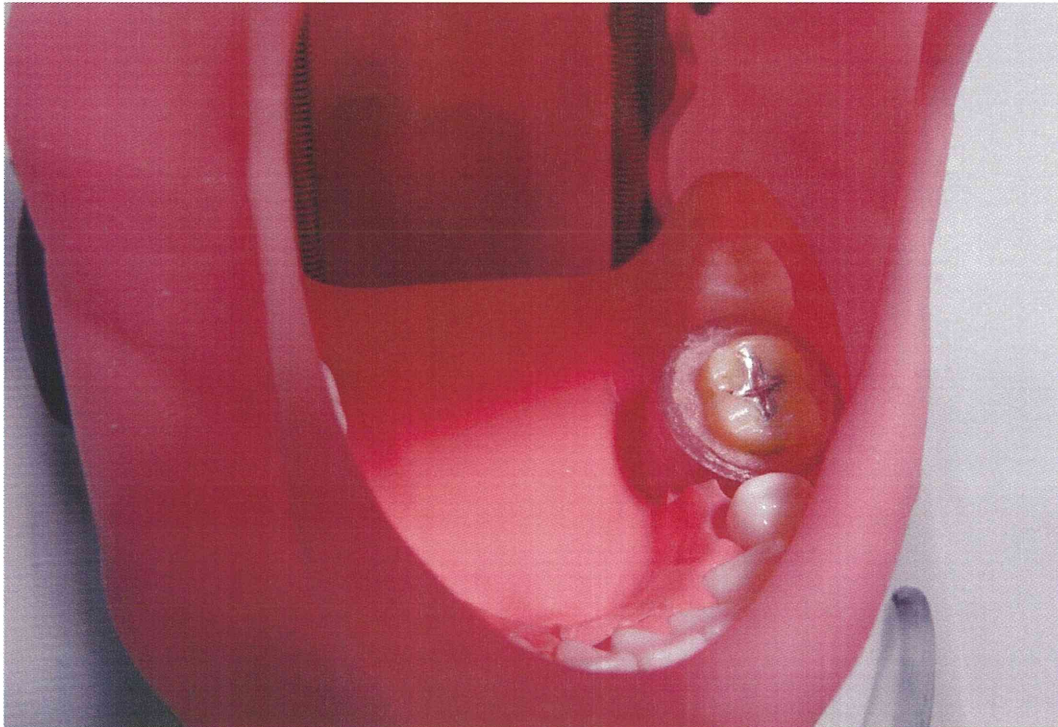


図1-10 頬粘膜ボックスフルカバーと顎模型を装着したデンタルシュミレータ

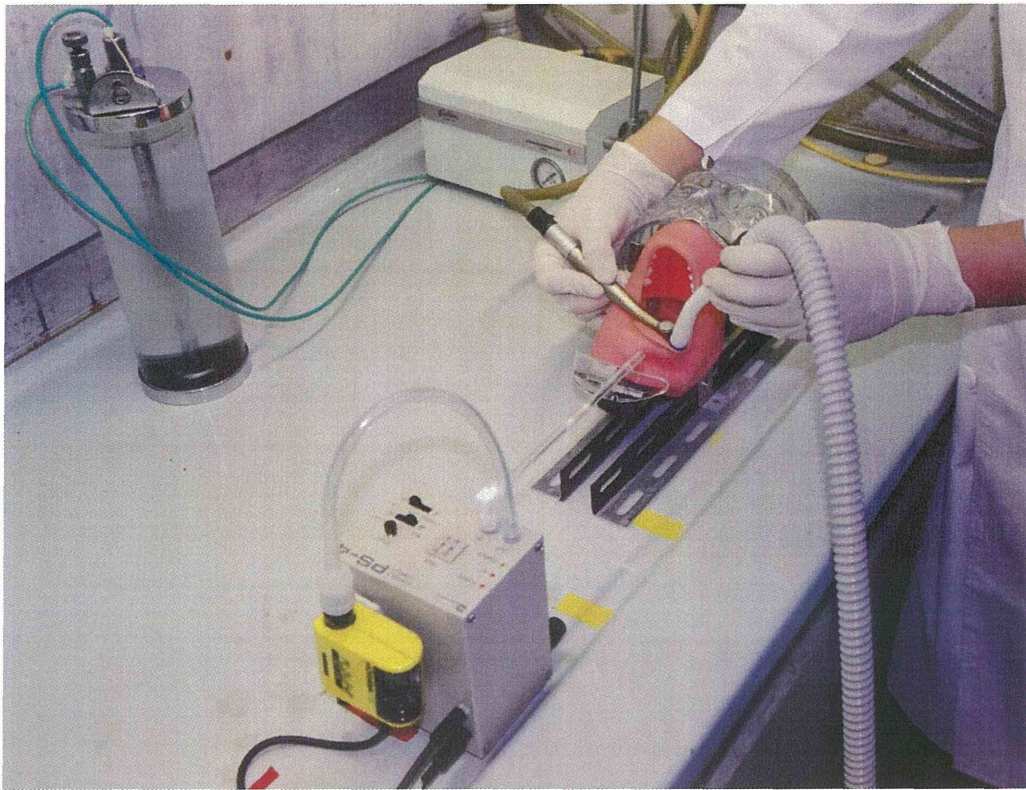


図 1-11 充填されたアマルガムの除去

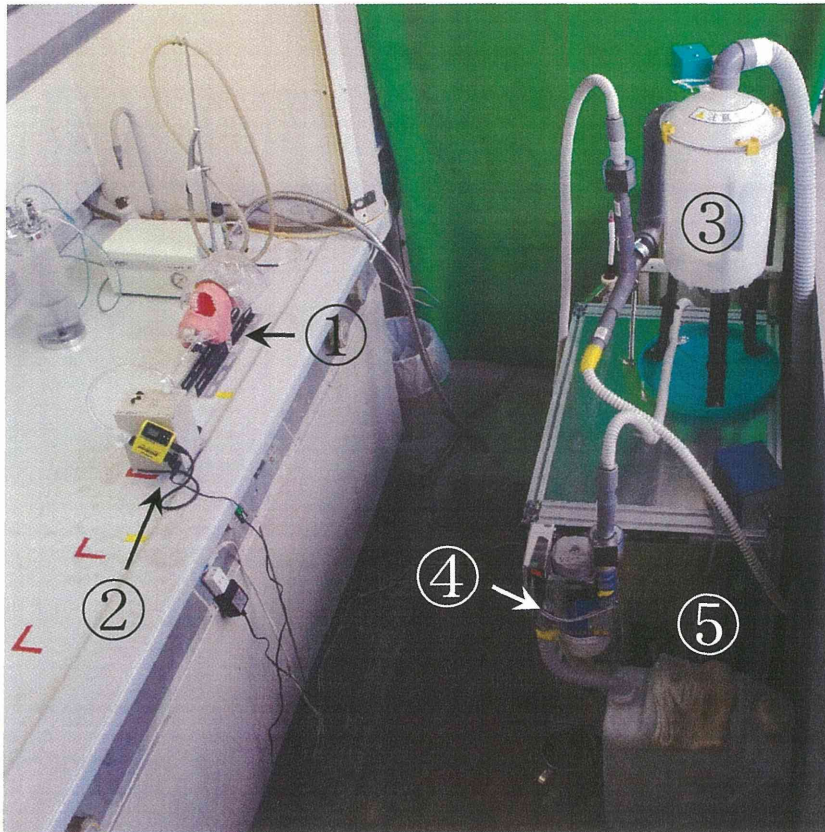


図 1-12 実験装置の全景 ①デンタルシュミレーター、②気体吸引用ポンプ、
③気液分離器、④アマルガムセパレータ、⑤バキューム装置本体

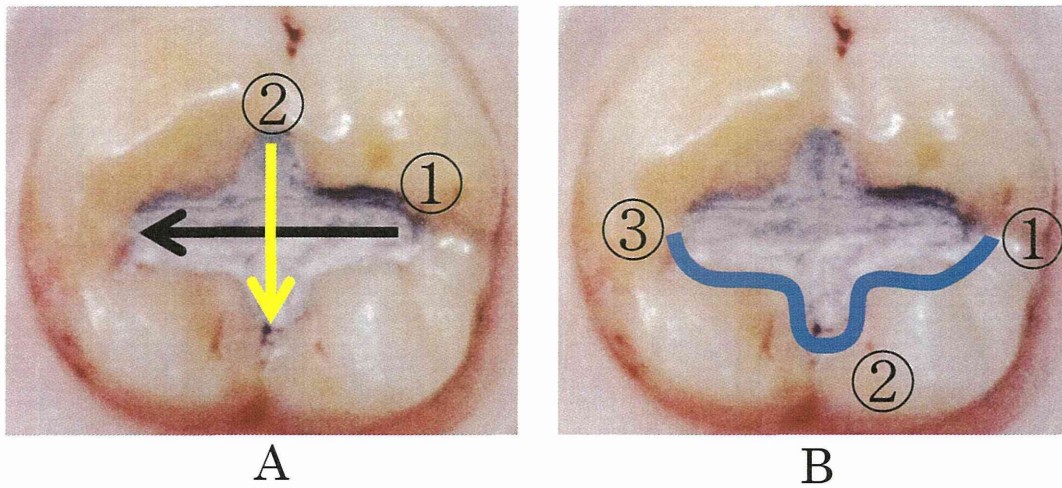


図1-13 アマルガム除去法 A：粉碎法、B：一塊法

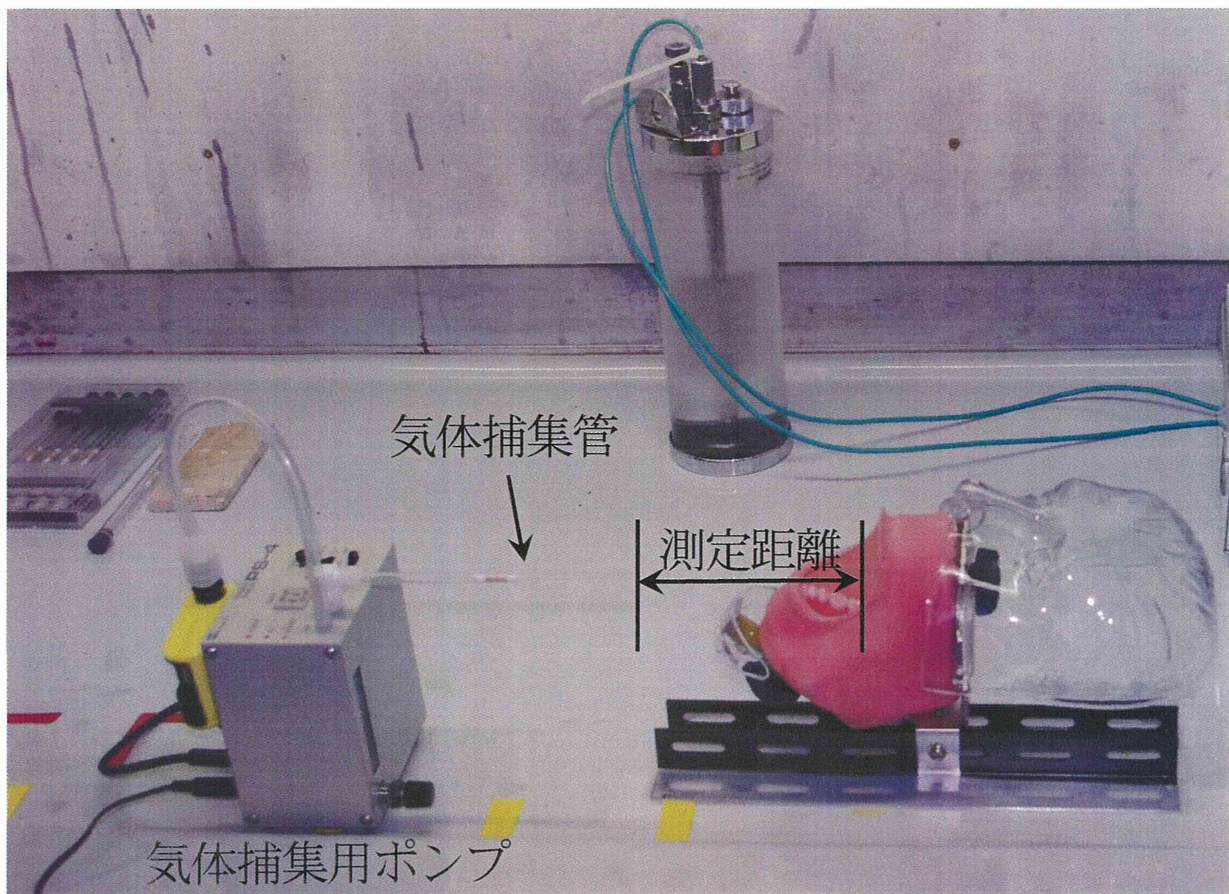


図1-14 水銀捕集装置の全景

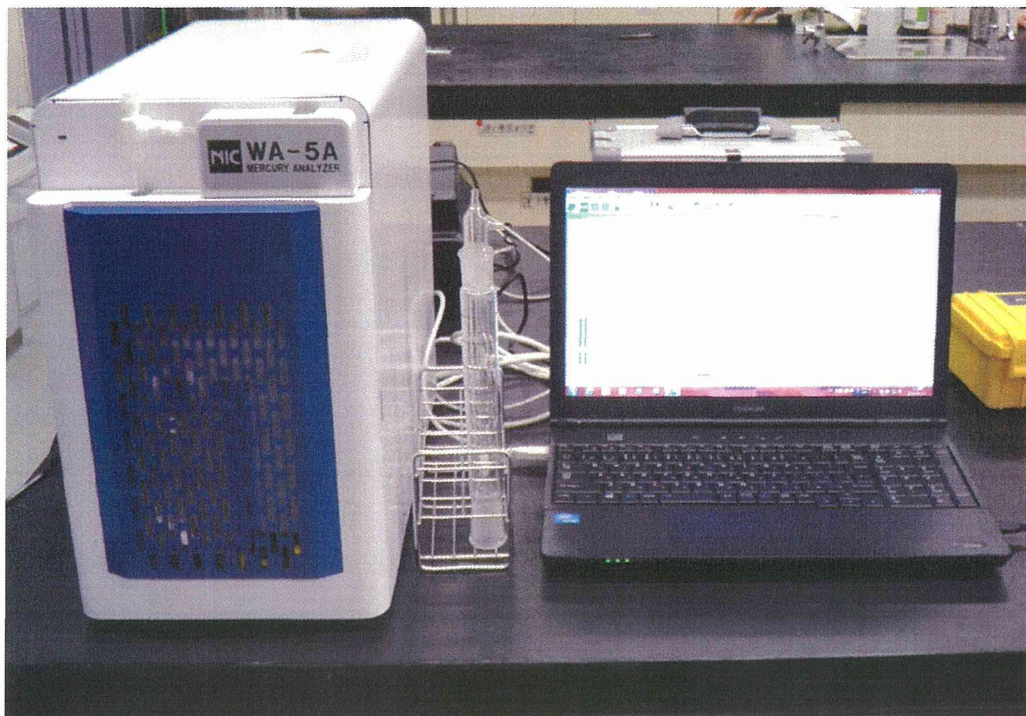


図 1-15 水銀測定装置

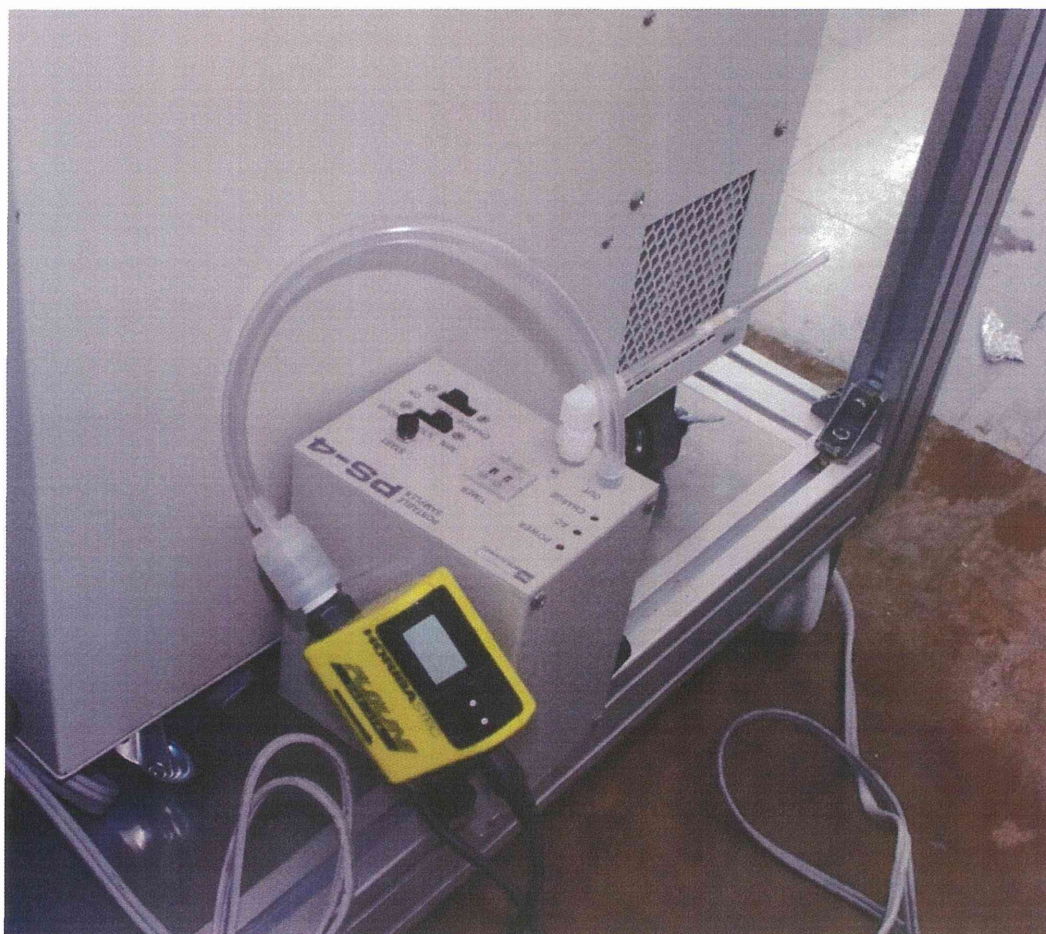


図 1-16 バキューム装置本体排気部からの水銀測定

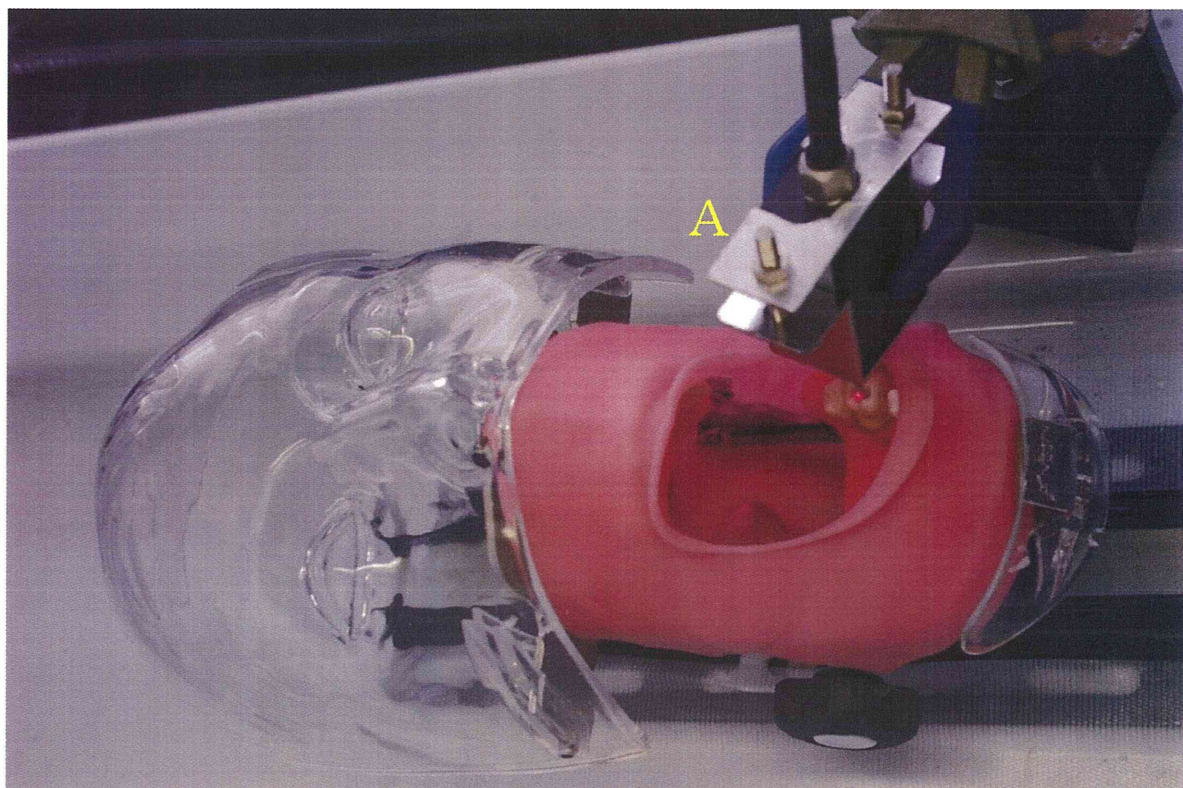


図 1-17 アマルガム除去時の表面温度測定 A:放射温度計

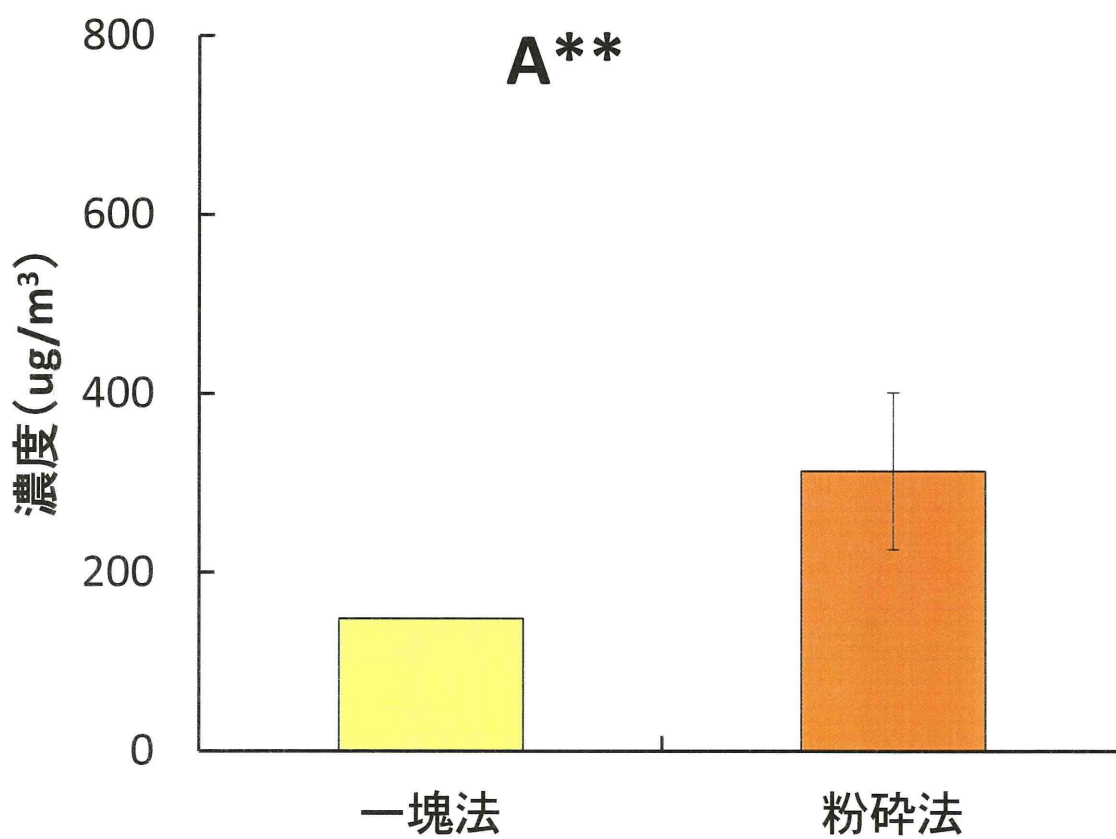


図 1-18 除去法による放出水銀蒸気への影響

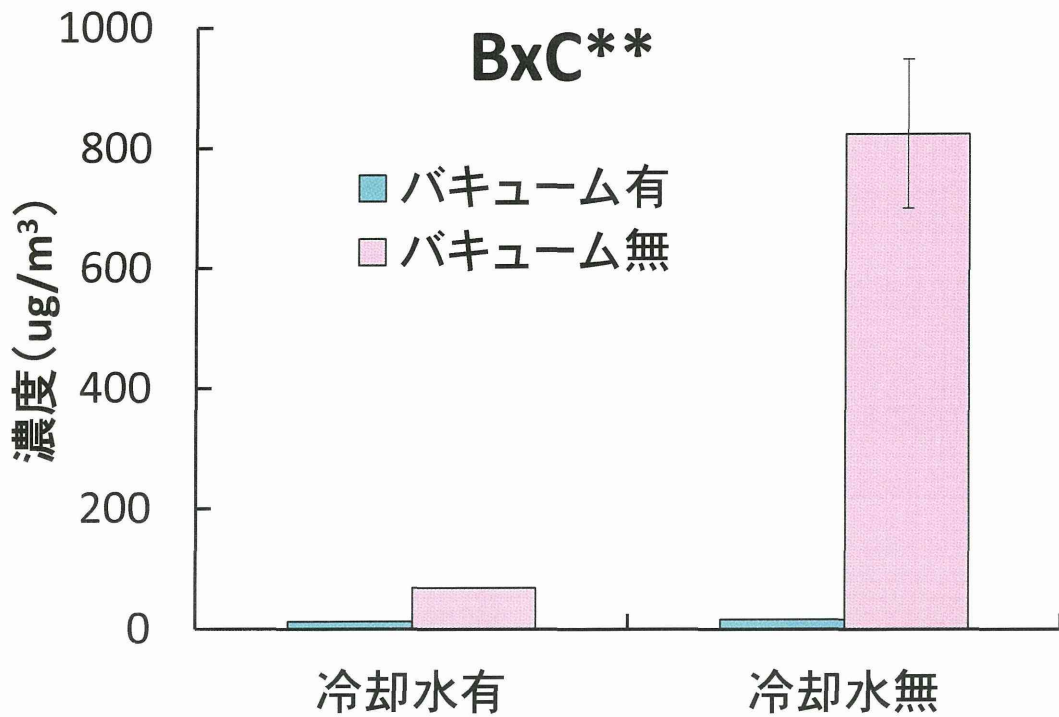


図1-19 冷却水およびバキュームの有無による放出水銀蒸気への影響

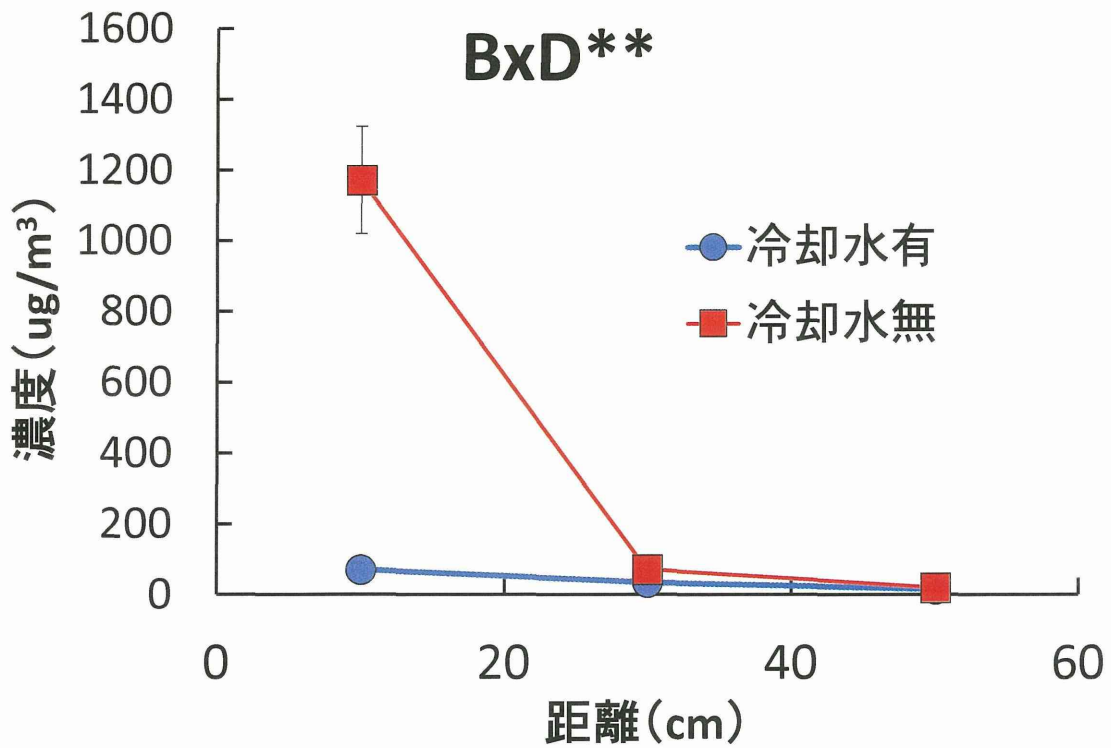


図1-20 冷却水の有無および測定距離の違いによる放出水銀蒸気への影響

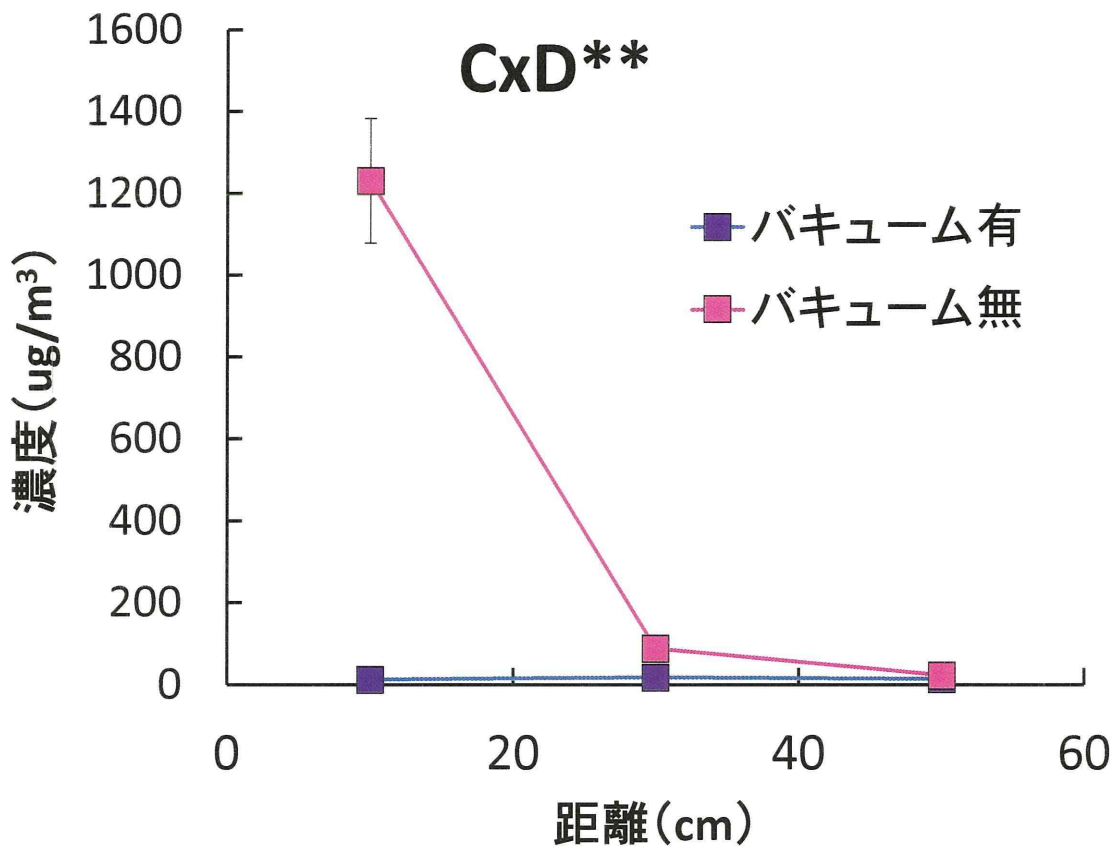


図 1-21 バキュームの有無および測定距離の違いによる放出水銀蒸気への影響

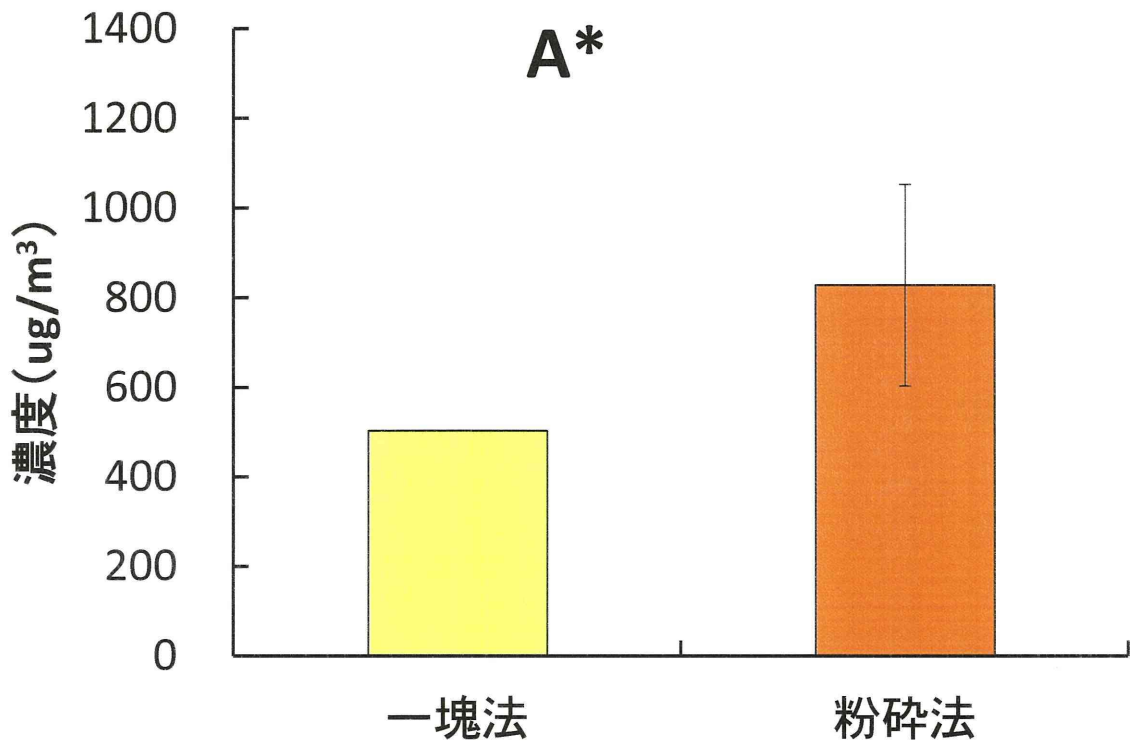


図 1-22 除去法による排気装置からの水銀蒸気への影響

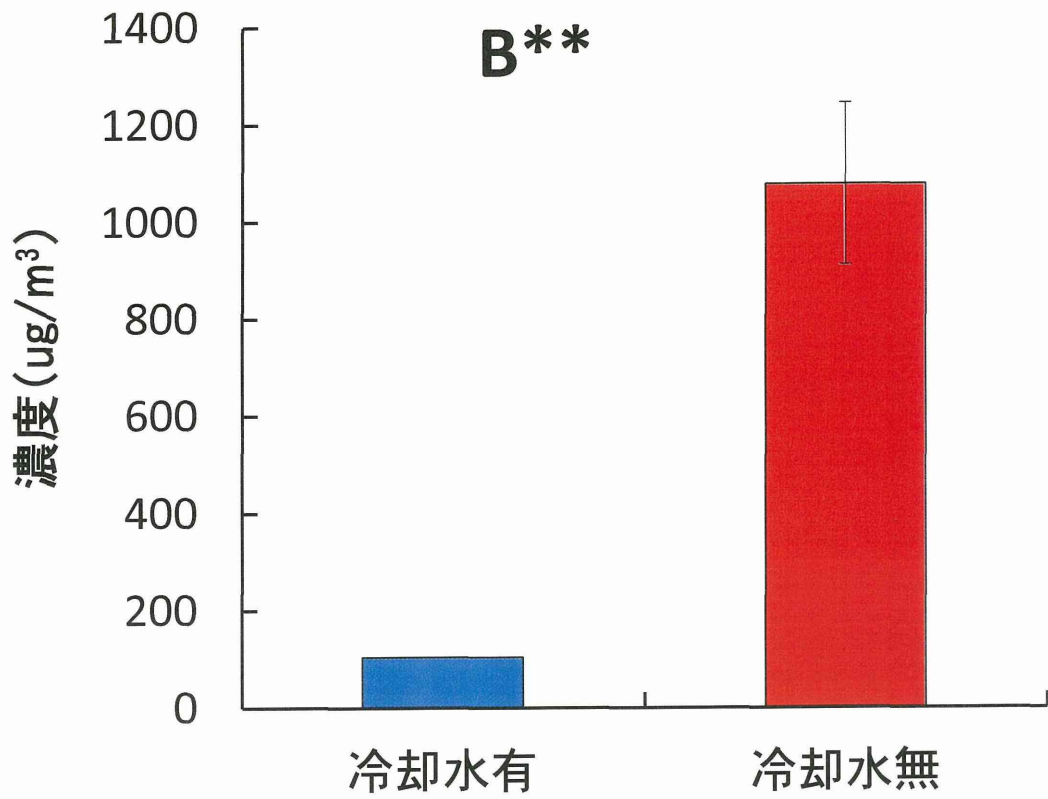


図 1-23 冷却水の有無に排気装置からの水銀蒸気への影響

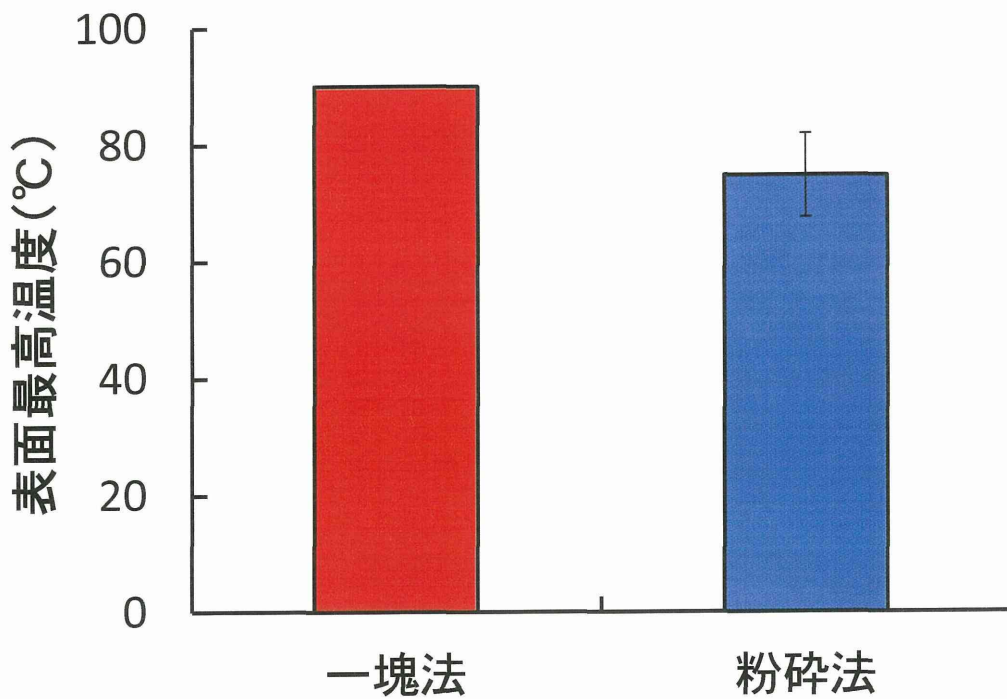


図 1-24 除去法がアマルガムの表面到達最高温度に及ぼす影響

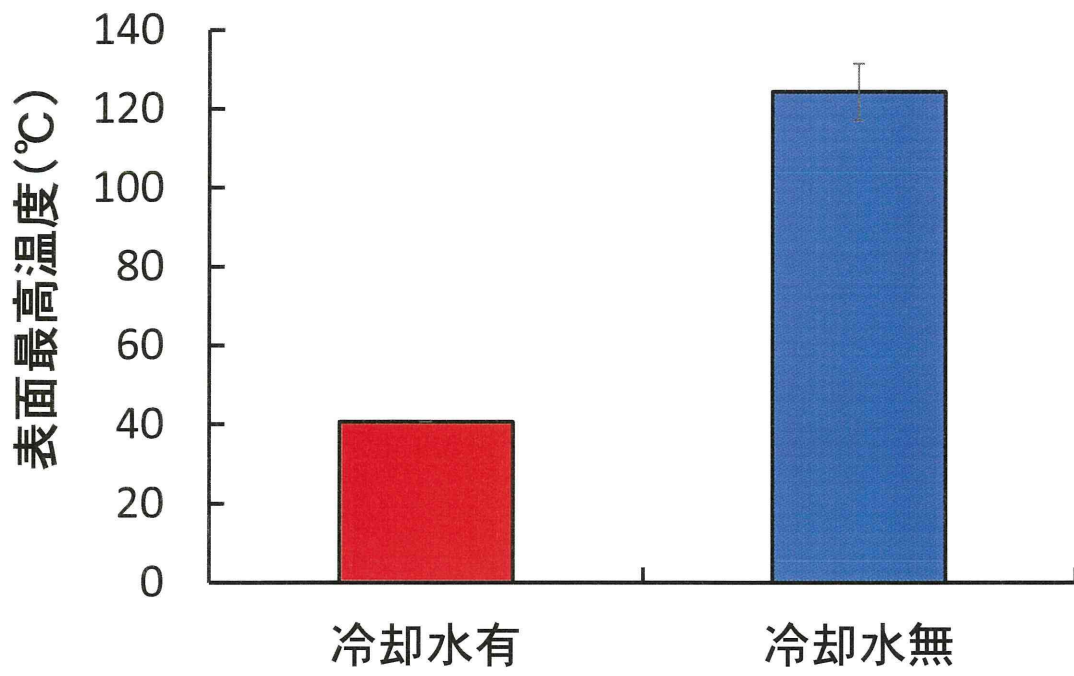


図 1-25 冷却水の有無が除去アマルガムの表面到達最高温度に及ぼす影響

3. 第2章 排水中の水銀濃度について

第2章 排水中の水銀濃度について

1. 緒言

「水銀に関する水俣条約」¹⁾は2013年10月に署名・採択され、2016年中の発効が見込まれている。これに先駆け、我が国としての歯科用アマルガムへの対応が問われている。

我が国では、現在のアマルガムの使用頻度は極めて低いが、過去において頻用された材料であり、現在も口腔内に充填されている例は極めて多い。アマルガム充填歯では二次齲蝕の発生²⁾、アレルギーの懸念³⁾、審美的な要求等の理由により、充填物の除去が不可欠になる。しかしながら、除去時の患者や術者に対する水銀汚染、大気中や排水中への環境汚染について臨床を模した条件下で総合的に評価した研究はほとんどない。アマルガム充填物の除去に伴う水銀による人体および環境への影響を総合的に評価することはきわめて重要である。

本研究では、アマルガム除去時の環境に対する水銀汚染を調べる目的で、可及的に臨床を模した実験条件（除去法、冷却水の有無、吸引（バキューム）の有無、排水システム）を組合せ、アマルガム除去作業中の口腔内洗

浄水中ならびに直後の吸引装置洗浄水中の水銀量を測定した。これより排水中への水銀量抑制のための条件を見出し、充填されたアマルガムの除去に対するガイドライン策定へのエビデンスを与えることを目的とする。

2. 実験材料および方法

実験に使用した材料を表2-1に示す。アマルガム充填用として、ヒト抜去歯のうち第二大臼歯と第三大臼歯を用いた。抜去歯は本学生命歯学部倫理審査委員会の承認（NDU-T2013-17）を得て使用した。

実験に使用した器械・器具を表2-2に、実験条件を表2-3に示す。実験方法のフローチャートを図1-1に示す。

抜去歯の咬頭頂にユーティリティーワックス（ジーシー）を付与し、咬合面を一定の位置に保持し、歯根を常温重合レジン（オストロンII、ジーシー）にて包埋（図1-1、1-2）し、重合終了後、水道水中に保管した。その後、複製窩洞形成器（日本歯科大学接着歯科学講座、図1-5）を用いて、近遠心径7.5mm、頬舌径5.0mm、深さ2mmの十字型窩洞をマスター窩洞（図1-4）として、各抜去歯に十字型窩洞を形成した（図1-6）。その後、窩洞内

に業者指定の条件で練和したアマルガム（ロジックスピル1 プラスレギュラー、SDI）を充填し（図 1-6）、37℃水中に7日間保存した。試料作製中に、窩洞形成後、アマルガム充填直後、アマルガム充填物除去前後に試料の重量を測定した。

作製した試料を下顎模型（顎模型 D51FE-500A-QF、ニッシン）の左側第一大臼歯部に固定し（図 1-8）、頬粘膜を模したゴムカバー（頬粘膜ボックスフルカバーSPMⅢ、ニッシン）を装着したファントム（Simple Manikin Ⅲ、ニッシン）内に設置し、実験に供した（図 1-11）。

装置全景を図 1-12 に示す。アマルガム充填物の除去はドラフト装置内で行い、除去中は排気装置を稼働させず、除去後にチャンバー内を換気するため、排気装置を5分間稼働させた。また、術者は実験中、直結式小型吸収缶（CA-710/ME、水銀用）を取り付けた防毒マスク（GM78S、シゲマツ）を装着し極力防毒に努めた。

エアタービン（ツインパワータービン、モリタ）にフィッシャータイプのカーバイドバー（FG 699、松風）を装着し、アマルガム充填物の除去を行った。除去は一塊法（アマル

ガムにはバーを接触させず、充填物の周囲の歯質のみを切削して、スプーンエクスカーバーにて一塊にして除去する方法）と粉砕法⁴⁾（充填物を十字形に切削し、小さな切削片に粉砕して除去する方法）の二条件で行った。タービンからの冷却水の有無、口腔内バキュームの有無による影響を調べた。排水システムの条件として、通常気液分離器（70 分離器、東京技研）あるいはアマルガムセパレーター（コンビセパレーターCAS1、DÜRR DENTAL）を用いた。各条件により充填物を除去後、患者の口腔内含嗽を模し、100ml の超純水で口腔内を洗浄しながら吸引して得られた水（以下、口腔内洗浄水）とその直後に 500ml の水で吸引装置内部を洗浄した水（以下、吸引装置洗浄水）をポリエチレン広口瓶に採取し測定試料とした（図 2-2）。それぞれ採取した水量を測定した。さらに装置内を洗浄する目的で 1,000ml の超純水を吸引させた。

金箔による水銀の蒸着と原子吸光分析による高感度の水銀測定装置（WA-5A、日本インストルメント）を用いて、還元気化法にて口腔内洗浄水中ならびに吸引装置洗浄水中の水銀濃度を測定した。各瓶に採取した洗浄水の上澄みを 20ml 採り 64%硫酸（和光純薬）を 1

ml 入れて準備し、測定直前に 10%塩化第一スズ溶液（関東化学）を 1ml 加え、水銀濃度を測定した。測定は採取した日のうちに行った。

繰り返し 5 回の測定値より、四元配置分散分析（A：除去法、B：冷却水の有無、C：バキュームの有無、D：排水システム）を行い、有意差の認められた場合は、Tukey の多重比較を行った。

粉碎法で除去し、アマルガムセパレーターないし気液分離器を通した場合の口腔内洗浄水中に排出したアマルガムの形状を観察するために、スライドグラス上に水をスポイトで 5 滴滴下し、60℃の恒温槽中に 2 時間放置した。スライドグラス上に残留したアマルガムの形状をデジタルマイクروسコープ（VHX-2000、キーエンス）にて観察した。

粉碎法で除去し、気液分離器を使用した口腔洗浄水の採取直後と 3 週間静置後の上澄みの水銀濃度を測定した。

3. 結果

(1) 口腔内洗浄水中の水銀濃度について

繰り返し 5 回の測定値について四元配置分散分析を行った結果、主効果 B、C、D と交互作用 A×B、A×D、B×C、B×D に高度な有意差 ($p < 0.01$) が、主効果 A に有意差 ($p < 0.05$) が認められた。除去法では一塊法 ($21,083 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも粉碎法 ($19,415 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低く（図 2-3）、冷却水の有無では冷却水無 ($21,999 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも冷却水有 ($18,499 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低かった（図 2-4）。また、バキュームの有無ではバキューム有 ($23114 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりもバキューム無 ($17,384 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低く、排水システムでは気液分離器 ($30,483 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりもアマルガムセパレーター ($10,316 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低かった（図 2-5）。

高度の有意差が認められた交互作用 A×B、A×D、B×C、B×D をグラフ化し、図 2-6～2-9 に示す。図 2-6 より一塊法で除去する場合、水銀濃度は冷却水無 ($24,206 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも冷却水有 ($17,961 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低く、粉碎法で除去する場合は冷却水の有無に差が認められなかった ($19,037$ と $19,793 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。図 2-7 より、気液分離器を用いた場合には一塊法で $29,598 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、粉碎法で $30,767 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と極めて高かったが、アマルガムセパレーターを用いた場合には一塊法で $12,568 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、粉

砕法で $8,063 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と低かった。図 2-8 よりバキューム有では、水銀濃度は冷却水無 ($26,333 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも冷却水有 ($19,896 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低く、バキューム無では冷却水の有無に差は認められなかった ($17,102$ と $17,666 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。図 2-9 より気液分離器を使用した場合、水銀濃度は冷却水無 ($33,467 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも冷却水有 ($26,898 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低かった。アマルガムセパレーターを用いた場合、冷却水の有無に差は認められず ($10,100$ と $10,532 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、水銀濃度は気液分離器を使用した場の $1/3$ 程度であった。

(2) 吸引装置洗浄水中の水銀濃度

繰り返し 5 回の測定値について四元配置分散分析を行った結果、主効果のすべてと交互作用 A×D に高度な有意差 ($p < 0.01$) が、交互作用 A×B、B×C、C×D に有意差 ($p < 0.05$) が認められた。除去法では一塊法 ($12,093 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも粉碎法 ($10,282 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低く (図 2-10)、冷却水の有無では冷却水無 ($12,718 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも冷却水有 ($9,658 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低かった (図 2-11)。また、バキュームの有無ではバキューム有 ($12,580 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりもバキューム無 ($9,796 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低く、排水システムではアマルガムセパレー

ター ($13,908 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりも気液分離器 ($8,467 \mu\text{g}/\text{m}^3$) で低かった (図 2-12)。

交互作用 A×B、A×D、B×C、B×D をグラフ化し、図 2-13~2-16 に示す。図 2-13 より水銀濃度は粉碎法・冷却水有で最も低かった ($9,356 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。図 2-14 より一塊法で気液分離器から採取した水で最も低かった。図 2-15 より冷却水有、バキューム無で最も低かった。図 2-16 よりバキューム無で気液分離器を使用で最も低かった。

(3) 口腔内洗浄水中のアマルガム

形状と大きさ

粉碎法で除去し、アマルガムセパレーターを通して得られた口腔内洗浄水中のアマルガムのデジタルマイクロスコープによる観察所見を図 2-17 に、気液分離器を通したものの観察所見を図 2-18 に示す。アマルガムセパレーターを通した排水中には約 $17 \mu\text{m}$ の微細な削片が認められた。これに対し、気液分離器を通した排水中にはアマルガムセパレーターを通した後よりも大きな削片 ($60 \mu\text{m}$ 以上) あるいはいくつかが集めた状態で観察された。

(4) 口腔内洗浄水の 3 週間静置後

の水銀濃度

粉碎法で除去し、気液分離器を通して得られた口腔内洗浄水の採取直後と3週間静置後の水銀濃度を測定した結果を表2-4に示す。採取直後では $31,411\mu\text{g}/\text{m}^3$ （冷却水有・気液分離器）～ $7,058\mu\text{g}/\text{m}^3$ （冷却水無・セパレーター）の高濃度であったが、3週間後では $1,509\mu\text{g}/\text{m}^3$ （冷却水無・気液分離器）～ $572\mu\text{g}/\text{m}^3$ （冷却水無・セパレーター）に低下した。

4. 考 察

本研究は、可及的に臨床を模した実験条件を組合せ、アマルガム除去作業中の口腔内洗浄水中ならびに直後の吸引装置洗浄水中の水銀濃度を測定し、排水中への水銀量抑制のための条件を見出すことを目的として行われた。

臨床の間ではアマルガム除去の際には口腔内にラバーダムを装着させるよう指導しているが⁵⁾、本実験ではラバーダムを使用しなかった。しかしながら、ラバーダムを用いても削片はバキュームで吸引するため、排水中へのアマルガムの流出量は今回のラバーダムを用いず口腔内を洗浄した水をバキュームした水銀濃度と同等と考えられる。

100mlの水を用いた口腔内洗浄水の収量は、冷却水有・アマルガムセパレーター使用で約

96%、気液分離器使用で約87%、冷却水無・アマルガムセパレーター使用で約96%、気液分離器使用で約85%であった。アマルガムの除去時間は一塊法で平均32.4秒、粉碎法で21.4秒であった。この間のエアタービンからの排水量を測定した結果、それぞれ約7.3gと4.8gであったが、水の収量は冷却水の有無に関係しなかった。収量は排水システムによる違いが認められ、気液分離器ではアマルガムセパレーターより低かった。これは、気液分離器は7リットルの容量があり遠心力により内壁に付着した水滴が回収しきれないことによると考えられる。これに対し、500mlで吸引装置を洗浄した水の収量はアマルガムセパレーターで約97%、気液分離器で約96%であり両者に差が認められなかったのは、回収しきれない水分量が500mlに対し少量であることによると考えられる。

平成15年の日本歯科医学会からの諮問書に対する日本歯科医学会医療環境問題検討臨時委員会の平成18年の答申書では、排水および大気中水銀を測定した報告は国内ではみられないが、日本におけるアマルガムの使用は極めて少なく、水環境への汚染は減少していると考えられる、としている⁶⁾。排水中の水

銀に関して、各種アマルガムセパレーターの大きさ、配管、性能、コスト、メンテナンスなどをまとめた報告が 2003 年に米国にみられる⁷⁾。また、チェアサイドの排水タンクと保管用タンク中の総水銀量とメチル水銀を測定した研究では、総水銀量はチェアサイドでの水は 45, 182.1 $\mu\text{g}/\ell$ 、250 ガロンの貯蔵用タンクの水を攪拌した試料では 13, 439.1 $\mu\text{g}/\ell$ 、デンタルバキュームシステムの貯蔵タンクの水では 5, 350.7 $\mu\text{g}/\ell$ であったと報告している⁸⁾。これらの値は、実験条件は異なるが、今回我々の得た結果の 1, 000 倍も高濃度である。また、ppb レベルのメチル水銀量は、海水中、雨水中、湖水中の 1, 000 倍になると報告している⁹⁾。これらの報告から、アメリカでは成形歯冠修復材料としてアマルガムが多用されていることが窺える。一方、日本におけるアマルガム修復は 2011 年では診療件数 100 件当たり約 0.27 回であり⁹⁾、アマルガム修復・除去操作における水銀暴露の危険性は極めて低いと考えてよいであろう。

今回は採水した日のうちに、上澄みを探り水銀濃度を測定したが、その中には浮遊物を有する場合もあったが、硫酸を加えることによりそれらは溶解した。浮遊物を有する水は

一昼夜経過するとその重みで底に沈殿した。採取直後と 3 週間静置後の上澄みの水銀濃度を測定した結果、3 週間静置後では水銀濃度は採取直後に最も高濃度の冷却水無・気液分離器使用の条件でさえ、1, 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ に低下した (表 2-4)。東京都下水道局下水排除基準 (東京都 23 区内)¹⁰⁾ によると総水銀量は 0.005mg/L (5, 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 以下とされている。3 週間経過した水の上澄みではこの基準よりはるかに低かった。それどころか、厚生労働省の水質基準項目と基準値¹¹⁾によると水道水中の水銀およびその化合物の濃度の基準値は 0.0005mg/L (500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 以下とされており、3 週間後の上澄みの水銀濃度はこれよりわずかに高い程度を示したのみであった。このことから、臨床の現場ではトラップの清掃を定期的に行えば、下水道に排出する水銀量は全く問題がないと考えられる。

一方で、アマルガムを含んだ水の水銀濃度が経時的にどのように変化していくか今後調べていく必要があるだろう。

5. 結 論

アマルガム除去時の環境に対する水銀汚染を調べるために、可及的に臨床を模した実験

系を組み立てた。アマルガム充填物除去時の口腔洗浄水中ならびに吸引装置洗浄水中の水銀濃度を測定した結果、以下のことが明らかになった。

1) 除去法では、一塊法より我が国で行われている粉碎法で低かった。

2) 冷却水の有無では、冷却水無より冷却水有で低かった。

3) バキュームの有無では、バキューム有よりバキューム無の方が低かった。これはバキュームを用いることにより、アマルガム除去作業中に周囲にアマルガムが飛散することなく吸引出来ていることを意味している。

4) 排水システムでは気液分離器よりもアマルガムセパレーターを使用した方が水銀濃度は低かった。これは、排水中のアマルガム削片の形状・大きさからも明らかである。

5) 採水直後での排水中の水銀濃度は高かったが、3週間静置後では、上水道の基準値 ($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$) よりわずかに高い程度まで減少した。

以上より、アマルガム充填物除去は粉碎法で行い、冷却水を用い、アマルガムセパレーターを使用する条件で、排水中への水銀排出量が低くなることが明らかになった。さらに、

排水を静置することにより排水基準 ($5,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) より大きく下回ったことから、トラップを定期的に清掃すれば環境汚染に対して問題ないと考えられる。

6. 文 献

- 1) Minamata Conversation of Mercury, 外務省 -http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/page3_000477.html
- 2) 中島早苗, 須賀昭一: アマルガム充填窩洞の二次齲蝕のマイクロラジオグラフィーによる研究, 歯学, 70 (5): 777-803, 1983.
- 3) Danny Steinberg: 口の中に潜む恐怖 アマルガム水銀中毒からの生還, マキノ出版, 東京, 2002.
- 4) 千田 彰, 寺下正道, 田上順次, 片山 直編: 保存クリニカルガイド (Clinical Guide, Operative Dentistry), 第1版, p. 271, 医歯薬出版, 東京, 2003.
- 5) 平井義人, 寺中敏夫, 寺下正道, 千田 彰編: 保存修復学 (Operative Dentistry) 第5版, p. 206-221, 医歯薬出版, 東京, 2007.

- 6) 日本歯科医学会医療環境問題検討臨時委員会, 答申書, 2006 www.jads.jp/news/060210.pdf
- 7) Mcmanus KR, Fan PL: Purchasing, installing and operating dental amalgam separators, JADA, 134:1054-1065, 2003.
- 8) Stone ME, Cohen ME, Liang L, Pang P: Determination of methyl mercury in dental-unit wastewater, Dent. Mater, 19: 675-679, 2003.
- 9) 厚生労働省 社会医療診療行為別調査, <http://www.mhlw.go.jp/toukei/list/26-19.html>
- 10) 東京都下水道局ホームページ 下水排除基準 (東京都 23 区内) 総水銀 www.gesui.metro.tokyo.jp/osigoto/kisei/3kiyun.htm
- 11) 厚生労働省ホームページ 水質基準項目と基準値 (51 項目) 水銀およびその化合物 <http://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html>

表 2-1 実験に使用した材料

材 料	部位または製品名	製造元
ヒト抜去歯	上下顎 第二, 第三大臼歯	当講座保管
常温重合レジン	オストロンII	ジーシー
アマルガム	ロジックピル1プラスギュー	SDI

表 2-2 実験に使用した器械, 器具

	型 式	製造元
複製窩洞形成器		日本歯科大学 接着歯科学講座
下顎模型	顎模型D51FE-500A-QF	ニッシン
ゴムカバー	頬粘膜ホックカバー-SPMⅢ	ニッシン
エアタービン	ツインパワータービン	モリタ
カーバイドバー	FG 699	松風
分離器	7ℓ 分離器	東京技研
アマルガムセパレーター	コンビセパレーターCAS1	DÜRRDENTAL
水銀測定装置	WA-5A	日本イシクル
デジタルマイクロスコープ	VHX-2000	キーエンス

表 2-3 実験条件

実験条件		
除去法	一塊法*	粉碎法**
冷却水	有り	無し
吸引 (バキューム)	有り	無し
排水システム	回転分離器	アマルガムセパレーター



図 2-1 実験のフローチャート