

大学のブロンズ鑄造工房における鉛ヒューム曝露対策

榊原 洋子¹⁾ 遠藤 透²⁾ 久永 直見³⁾

1. はじめに

鑄造作業における粉じん暴露の問題は古くから知られており、鑄造作業の一部については労働安全衛生法の特定粉じん作業として取扱われている。また、金属原料を高温で熔解する作業においては、溶けた金属の液面からヒュームになって空气中に揮散し、気道から吸入された銅、亜鉛、マンガンなどが、数時間後に発熱や悪寒、頭痛、関節痛などの症状を生じさせることがあり、これを金属熱と呼ぶ。また、産業現場においては、カドミウムや鉛による重篤な健康障害の事例はよく知られている¹⁾が、鑄造に関する技術書²⁾等で安全対策の章に作業者の金属ヒューム曝露対策についての記載はほとんどない。

鉛は、比較的低濃度であっても長期間曝露の場合、慢性中毒を発生させる。その症状としては、中枢および末梢の神経障害、貧血、腹部の痙攣、腎臓障害などがある。神経障害の中でも、伸筋麻痺、特に手関節の伸展ができなくなって生ずる下垂手は、鉛中毒を疑わせる特徴的な症状とされる。現在、鉛は、発がん物質第2群B（証拠が十分ではないが、ヒトに対しておそらく発がん性がある）に分類されていることにも留意すべきである。わが国においては、特に原料中の鉛が10%以上の場合、労働安全衛生法、鉛中毒予防規則（以下、鉛則）において、特段の注意を払うための措置等が示されている。

本報告は、法的には鉛作業でない本学のブロンズ鑄造工房に関して、衛生管理者が巡視により鉛ヒューム発生のおそれを指摘したことから、空气中の鉛濃度について作業環境測定¹⁾を行ったところ、改善を要する「第3管理区分」¹⁾と判定されたことを受けて、鉛曝露に関するリスクアセスメントを実施し、曝露低減対策を講じ

た取り組みを紹介し、その成果と今後の課題について論ずることを目的とする。

2. ブロンズ鑄造原料と鉛則

ブロンズとは、鑄物用青銅合金の通称であり、その地金の金属組成は日本工業規格（JIS）で規定されている。JISでは鑄物用青銅合金地金を5種類に分けており、銅と錫を主とする合金であるが、他に、亜鉛、鉛等を含み、種類により成分比率は若干異なる。本学のブロンズ鑄造では、従来JIS記号でBC6と表される地金（鉛含有量4～6%）を使っていた。その理由は、製品の硬さや脆さ・均質性を求める工業的な使用目的とは異なり、作品の色や光沢や表面質感といった美術的な仕上がりや細かな造形作業のしやすさを重視するからであり、本学の鑄造作業（教員）が、自ら学んだ伝統的な材料や手法を基本とした経験による選択であった。美術鑄造の専門書の鑄物合金の説明に「芸大合金として推奨」という表記が示すよう¹⁾に、経験的選択は伝統的に受け継がれてきた。

鉛則では、第1条で「鉛10%以上含有を鉛合金」と定義し、第9条では、鉛合金製品の製造における鑄造作業には局排設置の義務を課している。その除じん装置は「ろ過方式」と規定している（第26条）ものの、溶融するつぼ容積が50L以下の場合には「除じん装置を設けないことができる」（第27条）との除外規定もある。

ブロンズ鑄造の場合、地金の成分比率は若干異なるもののJIS規格の青銅原料は全て鉛成分10%未満であるため、法的には鉛則の適用対象ではない。

3. 鑄造作業手順と金属ヒューム曝露の可能性

熔解炉で1100～1200℃の高熱により熔解されたブロンズ（銅の融点は1084℃、鉛327℃）は、数人の連携作業でつぼごと取り出され、ある

¹⁾ 愛知教育大学理科教育講座

²⁾ 愛知教育大学美術教育講座

³⁾ 愛知教育大学保健環境センター
（平成21年1月21日受理）

いはとりべに移されて、石膏で成型した鑄型に注ぎ込まれる（図1～3）。この作業を鑄込みとよぶ。鑄込みは、速やかに行うことが必要だが、鑄型は、ほこりなどが入らないように小さく作られた注湯口を上面にして、その全体を細かな砂に埋められている。鑄込み作業は熔解炉から数m以内の場所で行われている。そして、これらの鑄造作業は、年間20回程の頻度で行われている。



図1



図2



図3

聞き取りと観察により、金属ヒュームの高濃度曝露の可能性がある場所は、熔解時の上昇気流のおこる炉上部、および鑄込み作業を行う注湯口周辺と判断した。

4. 安全衛生対策と有効性の評価

安全衛生委員会では、衛生管理者巡視により指摘された事項について、作業者の鉛ヒューム曝露低減策の検討を重ねた。面談等による聞き取り調査や特殊健康診断では、鉛による健康被害は認められなかったが、初めての作業環境測定において空气中鉛濃度が管理濃度を越える第3管理区分であったことから、低減策を講じることが必要と考えた。

予算や時間的な課題も考慮して、以下のような比較的安価な対策を順次実施し、その有効性を中央労働災害防止協会・中部安全衛生サービスセンター（以下、中災防）による作業環境測定の結果などにより評価した。

(1) 呼吸保護具

当初、一部の作業者は、自主的にバンダナ等で口鼻を覆っていたが、多くの作業者は何もつけていなかった。そこで、担当教員は、作業者が防じんマスクを使えるようにした。

(2) 原材料の変更

最初の作業環境測定で管理区分3となったことを受けて、まず鑄造原料として用いていたBC6（鉛含有量4～6%）から、鉛含有量の少ないBC3（0.3%以下）に変更し、作業場の鉛ヒューム発生低減を試みた。有害性の少ない物質への転換は、一般に、有害物に対する根源的安全衛生対策とされている。

しかし、作業環境測定の結果は、依然として改善を要する〔第3管理区分〕となり、気中鉛濃度の低減策としての有効性を示すことができなかった。この結果については、溶解炉の壁や底、坩堝に残留していたBC6によるものではないかという見解もあるが、関係者間で解釈に異なる部分があり、合金熔解時のヒューム発生メカニズムに関する再考察を要する課題として残った。

(3) 作業場の整理：作業動線の確認

本学の鑄金工房は、陶芸工房、ガラス工芸工房と並んでいるが、隣の工房とは隔壁の上部で通じており、換気扇も設置されていて密閉性には乏しい。当該作業場は鑄物が固まったあとの鑄型の解体、作品の研磨作業や溶接などの作業もできる多目的作業場として使用されている。

当初、本学の鑄造工房には、大きさの異なる3つの熔解炉があり、一度に熔解させる原材料

の量に応じて使いわけていたが、使用頻度が低く旧式のコークス炉である一番大型の炉を廃棄し、50L以下の熔解炉2基にすることで、より機能的な作業動線を確保し、局所排気装置の設置をやすくした。(図4)

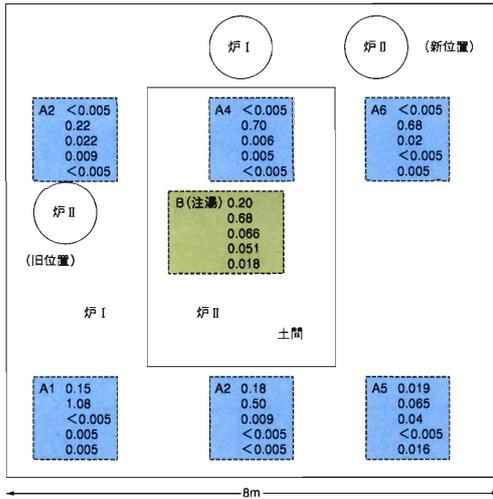


図4

(4) 局所排気装置の検討と評価

1) 他大学の対応状況

鑄造作業を行っている複数の大学に金属ヒューム対策等を照会したところ、3大学から回答を得た。2大学ではキャノピー型局所排気装置を設けていたが、設計等の問題があり、十分な効果が得られていなかった。1大学では局所排気装置が設置されていなかった。聞き取り調査によれば、美術系教育機関のほとんどの鑄造作業所は、産業衛生的に必要な対策が十分には講じられておらず、本学の対策経験は、同様の工房を持つ大学の作業環境改善に役立つものであると思われた。

2) 局所排気装置のタイプ (キャノピー型・プッシュプル型・リングタイプ型) の検討

キャノピー型：先述の大学でも設置されていた、熔解炉の上部で上昇気流を捉える一般的な形である。ただし、それらの大学においては、高額な、大掛かりな設備であるにもかかわらず、捕集効果は充分とはいえず、さらに作業動線にも問題があり、管理者、安全衛生担当者、及び作業者のいずれにも不満足な状況にあった。

プッシュプル型：おおがかりな工事を必要とせず、比較的小規模の作業場において有効な排気装置で、近年さまざまな作業現場に用いられている。

興研(株)の協力を得て、プッシュプル型の局所排気装置を実際に臨時的に設置(図2

のるつぼ取り出し作業者の背後に対になって立っている)し、その効果を検証した。しかし、本件のような高温熔解炉からの上昇気流は非常に強く、水平方向の送気と吸気ではヒュームを十分に捕集できなかった。

リングタイプ型：メーカー技術者との議論により、作業者の呼吸域に有害物が来る前に発生源付近で捕捉する点においてはメリットがある一方、装置の回りに大きめなリングフードを取り付けるため、作業性を損なう、また装置の構造上付けにくいというデメリットもあることが指摘され、さらに炉の周りにフード、ダクトがつくと、作業に不慣れた学生に対する新たな危険因子となる可能性も指摘された。加えて、排気風量については、上昇する気流を無理やり曲げて吸引するため、排気ファンのスペックを上げる必要も出てくるとの見解が示された。

保健環境センター関係者で3タイプのメリット・デメリットを比較した結果、熔解炉の上部で上昇気流を捉えるキャノピー型の局所排気装置に決定し、他大学の事例を参考にしつつ、効率的な換気装置デザインを行った。

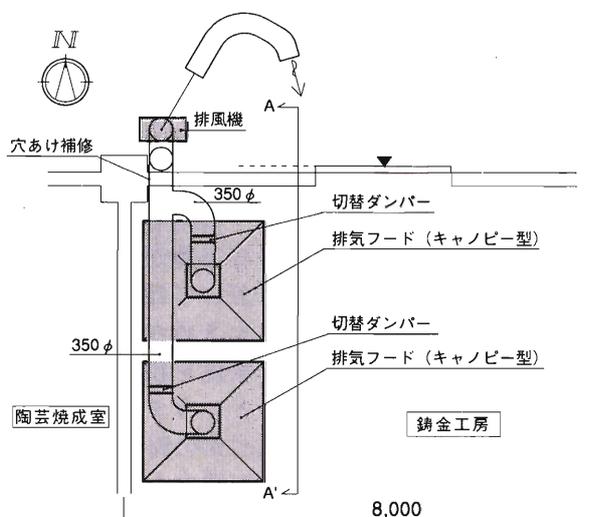
3) デザインと作業管理

局所排気装置設置に当たって、費用-効果を最大にするデザインを安全衛生担当者、設計者、及び作業員で協議した結果、以下のようになった。

第一には、2基の炉のそれぞれの上部にフードを設置し、1台の排風機をダンパーの切り替えで共有する形にしてコストを抑えた。第二には、フードの縁に幅10cmの耐熱幕を下げて、捕集能力を高めた。第三には、炉内攪拌作業やるつぼを取り出す作業を勘案して、フードの高さを決め、支柱の本数を減らし、上部から吊り下げの方法を採用した。(図5~7)

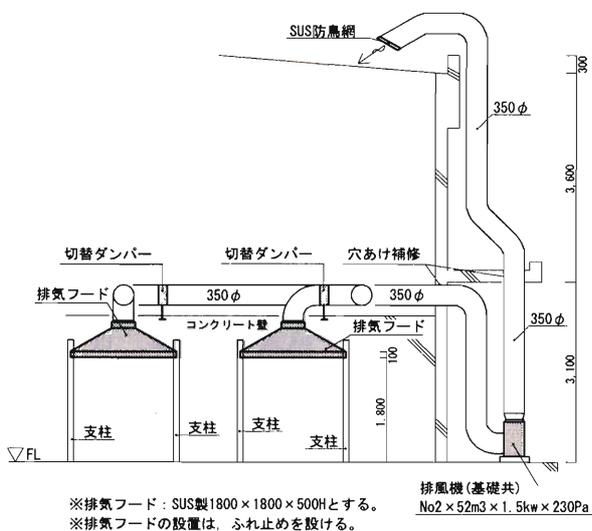


図5



美術第三実習棟鑄金工房ダクト図

図 6



美術第三実習棟鑄金工房ダクトA-A' 断面図

図 7

4) 効果

局所排気装置が上昇気流を効果的に捉えているためか、作業員からは「息苦しくない、熱風を吸い込む状況も緩和された」という感想を得た。局所排気装置設置後の作業環境測定では、その効果を確認できた。(図8～9)

(5) 個人サンプラーによる鉛曝露濃度測定と評価

作業環境測定の結果は改善されたが、原料の熔融状況を確認する攪拌作業では、局所排気装置と発生源の空間に作業員の頭部が近づき、攪拌より上昇気流が乱れて局排の捕集も不安定になることが予想された。また次に高濃度での曝露が懸念される鑄込み作業については、そもそも作業場所の固定化が困難で局所排気装置の設

気中鉛濃度の変化

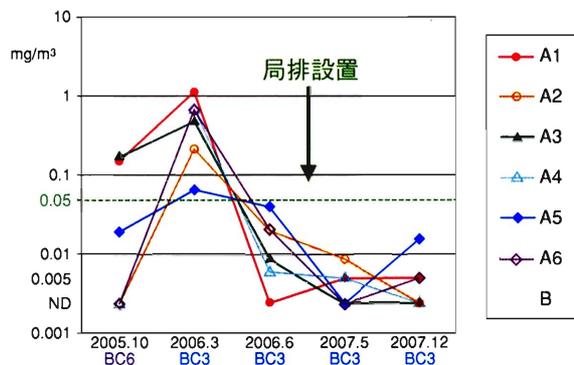


図 8

作業環境測定結果の推移

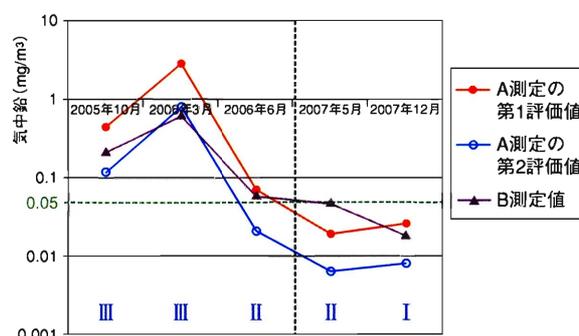


図 9

置が難しい。

そこで、次の段階として、作業場を動きまわる作業員の呼吸域の鉛濃度を直接測定することでリスクを評価することとした。中災防の協力を得て2007年5月の作業環境測定時には、個人サンプラーを作業員に付けてもらい(図10:作業上衣の襟元にガラスウールろ紙チューブ、腰にポンプ)、呼吸気中の鉛を測定してみたところ、 $0.047\text{mg}/\text{m}^3$ の鉛を確認した。わが国の法定の鉛の管理濃度は $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 、日本産業衛生学会が勧告する鉛の許容濃度は $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ であり、測定結果は許容範囲を超えてはいないと考えられた。

(6) 鉛チェッカーによる呈色反応

鉛があると黄色から赤紫色を呈するスプレー式の鉛チェッカー(サンハヤト社製)を用いて、作業後の手の汚染状況を現場で目視確認した。(図11及び12)

従来の測定方法は、リアルタイムに結果を知ることができないことから、作業員は鉛ヒュームの曝露を実感しにくかった。しかし、赤紫色に染まる自分の手を自分の目で確認した作業員は、鑄造作業による鉛ヒュームの発生や吸入を



図10



図11 鉛チェッカー呈色反応



図12 手、指の鉛汚染確認

*鉛チェッカーの信頼度：共晶はんだ（通常鉛を30～40%含む）に触れた手にスプレーした場合に赤紫色を呈する（メーカー）、0.1ppm鉛標準液に触れた手には呈色反応（中災防）。

実感し、保護マスク装着の徹底、作業後の手洗い等の徹底、作業衣の着替えと洗濯の重要性を認識できた。そこにいた全員が同時にできるこの鉛汚染の確認点検は、作業者が安全衛生担当者の説明に納得するための重要なプロセスとな

り、リスクに関する作業者と管理者のコミュニケーションが促進されたと考察される。

(7) 砂の鉛汚染の分析と評価

局所排気装置の設置により、A測定については大幅に改善されたが、最も高濃度の曝露が懸念される場所とタイミングで行うB測定の結果は充分とはいえず、作業及び作業環境全体を再検討した。

作業状況を撮影した写真に砂などの粉じんが舞う状況が確認されたことと、実際には作業をしていない立会人の手も鉛チェッカーで陽性を示したことから、砂の鉛汚染を推測し、土間、およびフードに堆積した砂を採取し分析した(表)。

表 堆積じんおよび砂中の鉛分析結果

サンプル	砂 1 g中の鉛量 (mg)	
	学内分析	中災防分析
フード上の堆積砂	0.57	1.38
鑄型の周辺上層砂	0.11	0.17
鑄型使用済み砂	0.1	-

*学内分析：各サンプル 1 gを 1 N-HNO³ 20ml で攪拌溶解，ろ過し，ろ液を原子吸光法で測定 (2007.12.6)

中災防による分析：原子吸光法で測定 (2007.12.22)

この結果により、作業場の砂の鉛汚染が明らかになった。鑄造作業と、仕上げ作業が同室で行われているため、グラインダ等の粉じんが砂に入り込んだ可能性は高い。また、この作業所の鑄物砂は生型用の山砂のため、粒子が細かく、作業者が歩き回ること舞い上がりやすい。フード上の堆積じんは舞い上がった粉じんによるものか、局所排気装置で捕集しきれなかった金属ヒュームが時間をかけて積もったのかははっきりしないが、鉛を含む粉じんがフードよりも高い位置にあがった後に落下するプロセスの存在が明らかになった。このことにより、この作業場を使用する他の作業においても、粉じんや鉛に対する防御について注意が必要と判断された。

5. 総括的考察

本件のブロンズ鑄造工房における鉛ヒューム曝露は、関係者が協力した労働衛生対策により

一定程度低減されたと判断される。機能性を重視して設計した局排の設置により、約一時間必要な高温溶解作業における溶解炉からの多量の金属ヒュームを含む上昇気流を効率的に捕集することで、鉛ヒュームの作業場全域への拡散を減らしたことが作業環境測定の結果に示された。また、上昇気流を的確に捉えることで、同時に熱気の拡散防止にもなり、高温作業としての負担軽減にも効果を得た。さらに、局排を設置する際、作業全体を点検し、作業動線を考慮しつつ機械道具類も整理したことで、作業をしやすくすることもできた。

保護マスク装着の徹底、作業後の手洗い等の徹底、作業衣の着替えと洗濯などは、当然の注意事項であるにもかかわらず、口頭で呼びかけるだけではなかなか重要性を理解されにくいのが、個人サンプラーによる鉛曝露濃度測定の結果を示したことで、作業員自身の吸気中に一定量の鉛が存在しているという認識が深まり、また鉛チェッカーにより作業後の汚染状況をその場で実感した経験は、上記のような注意事項の徹底に寄与したものと考えられる。このことは見落とされがちだが、作業員自身の安全衛生意識の有無が安全衛生対策の効果に強く反映されるため、作業改善、作業環境改善を図るには、リスクについて安全衛生担当者が理解しているだけでは不十分で、関連する全ての立場でリスクを理解し、協力することが必要なことを示している。

次に、残された安全衛生上の課題について述べる。

第1の課題は、気中の遊離ケイ酸を含む粉じんと鉛以外の金属ヒュームに関するリスクアセスメントである。鑄造作業所では、本件のように細かな鑄物砂で敷きつめられているため、作業場を歩き回る作業では粉じんが浮遊している様子がしばしば観察される。我々はまだ、この粉じんの遊離ケイ酸については確認していない。さらに、今回、この砂及びフード堆積物を分析した結果、鉛含有が判明したが、鉛と同じく材料中に含まれる銅、錫、亜鉛などの金属ヒュームについては、今後詳細なリスクアセスメントを実施する必要がある。ただし、鑄造作品制作には鑄造作業以外の作業が存在し、たとえばその他の金属加工作業をも平行して行うことを前提に設計された教育研究施設であることから、鑄造工房の作業全体、もしくは美術系工房の作業全体を見渡して合理的で快適な作業環境の確立を考案していく必要がある。

第2は、鉛中毒予防規則では鉛10%以上含有

を鉛合金と定義し、鑄造の場合の規制対象としていることの妥当性に関わる課題である。今回、鉛1%以下のブロンズでも局所排気装置がなければ第3管理区分となったことは、鉛含有量が少なくても安全とはいえないことを示している。このような結果になる理由の解明は、より有効な安全衛生対策に結びつく可能性があると考えられる。

材料に添付された成分表の組成率から換算したところ、鉛の含有量を10分の1以下にしても期待したような鉛ヒュームの発生抑制効果を得られなかった今回の事例は、その要因として鉛含有量の多い材料の残留影響が考えられると同時に、鉛の融点を越えた温度状態におかれた場合の気化や溶解温度と合金中の各金属の融点、及び各成分金属の状態変化に伴う挙動についての考察を加える必要があると思われる。具体的には溶融原料組成についての検討、高温融解中金属構成系による挙動特性とヒューム発生への影響についての検討、さらに温度上昇時のヒューム発生状況のみならず、温度降下による金属固化にともなうエネルギー変換とヒューム発生への影響を検討すべきであろう。

熔融中の鉛ヒュームの発生は、鉛自体の融点(327℃)をはるかに超える温度(1000~1200℃)で熱せられていることによる。融点の高い金属(銅の融点:1083℃)成分比率が増えれば、完全融解に多くのエネルギーが必要となり、より高い熔融温度が要求されることが考えられる。BC6からBC3への変更は、鉛の含有量が低減しても銅の含有量が増加したことで熔融温度や時間に影響を与え、融点の低い金属である鉛はさらに気中へ飛び出しやすい条件となった可能性がある。

溶解温度よりも融点が高い鉛の気中濃度が、温度上昇により著しく高まることは、田中ら⁵¹⁾(1979)の熔融金属における蒸気圧から換算した気中飽和鉛量[Cu-Pb 5%,熔融温度1000℃の場合: $2.7 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$, Cu-Pb 5%,1200℃: $2.6 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$ Cu-Pb 2%,1200℃: $1.0 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$]による検討結果とも合致している⁵¹⁾。

また、るつぼを傾けて小さな注湯口に注ぎいれる短時間の鑄込み作業によって発生する鉛ヒュームのリスクは、実際に作業環境測定を行うことで改めて強く認識した事実であった。鑄込み作業場所の気中鉛が、著者らの推測を越えた濃度であったことは非常に興味深く、再検討を要する課題となった。

一般に青銅は凝固偏析傾向が強く、鉛は偏析しやすいとされる。銅と鉛の合金の特性の一つ

として、「完全な液相の状態では、組成の異なる2つの液相に分かれる組成区域の存在する」こと、及び「凝固終了後も銅と鉛の相互間に固溶度がほとんどなく2相に分かれている」こと、「954℃以下になると銅のほとんどが凝固して鉛濃度の高い液相が残り」、さらに「温度が降下し326℃になると鉛も凝固して液相がなくなる」ことが知られている¹⁾。

高温液状の金属が室温環境下でゆっくり固化していく場合、融点の低い鉛は比較的長く存在するであろうし、鉛などのわずかな成分は不純物としてクラスターをつくりながら表出する可能性がある。また、冷却されて固化しようとする金属が凝固熱を発生すれば、その周辺の液状金属はその熱エネルギーを得て再び高温になる可能性もある。鑄込み作業での高温熔解材料と鑄型の接触時の温度差は1000℃を越えているであろうが、そのとき、急激に冷やされて固化する銅から発生した凝固熱エネルギーを融点の低い鉛原子が瞬時に得たとしたらどのような挙動を示すのかは明確ではない。

つまり、合金鑄造における少量含有金属のリスクアセスメントには、依然多くの課題が残っていると考えられる。鉛以外でも同様にエネルギー変換を含めた検討も加えるべきであろうと考える。

本件は、同様の工房を設置する大学等に参考になる好事例と思われ、これまでに、労働安全衛生改善事例として大学等環境安全協議会実務者連絡会プロジェクト発行事例集に収載（榊原2007.3）、日本産業衛生学会東海地方学会での報告（久永2007.11）など行ってきたが、今後、より広く産業界に役立てられるよう積極的に公表していきたいと考えている。

6. 謝辞

本件鑄造作業所の鉛暴露対策におきまして、局所排気装置の機能性の検討への有益な助言と多大なご協力をいただきました株式会社興研執行浩介氏、ならびに作業改善及び局所排気装置の設置にご尽力いただきました愛知教育大学財務部施設課の岩佐智氏、加藤政義氏、渋谷省一氏および課員のみなさまに厚くお礼申し上げます。

- * 作業環境測定とは、職場における労働者の健康保持を目的に、事業者が定期的に行うべき有害な業務を行う作業場の有害物質の気中濃度測定をいう。
- * A測定とは、有害物質の気中濃度の平均的な分布を知るために行い、B測定とは有害物質の発生源に近接した作業位置における最高濃度を知るために行う。作業環境測定結果をそのつど作業環境評価基準にしたがって、第1管理区分、第2管理区分、または第3管理区分に区分することにより作業環境の管理の状態を評価する。

文 献

1. 産業医学，野村茂，朝倉書店，1974年
2. 産業医学100話，野村茂，労働科学研究所出版部，2004年
3. 技能指導鑄造法，池田薫男，技能教育研究会編，工学図書株式会社，1964年（初版）
4. 美術鑄物の手法，鹿取一男，アグネ株式会社，pp.170-174,1983年
5. 田中茂，他，産業医学21巻pp.82-83，1979年