

労災疾病臨床研究事業費補助金

溶接作業者の溶接ヒュームばく露
(個人ばく露と生体内ばく露) と健康影響の
関係に関する疫学的研究

令和4年度 総括・分担研究報告書

研究代表者
辻 真弓

令和5(2023)年3月

目 次

I. 総括研究報告

- 溶接作業者の溶接ヒュームばく露（個人ばく露と生体内ばく露）と健康影響の関
係に関する疫学的研究 ----- 1
研究代表者：産業医科大学 医学部 衛生学 教授 辻 真弓

II. 分担研究報告

1. 本調査の実際と結果 ----- 6
研究代表者：産業医科大学 医学部 衛生学 教授 辻 真弓
2. 溶接作業従事者の健康影響に関する検討：血中・尿中の金属濃度等の比較 ----- 47
研究分担者：鹿児島大学大学院医歯学総合研究科疫学・予防医学 教授 郡山千早
3. ヒューム曝露による血清サイトカインおよびケモカイン量の変化 ----- 67
研究分担者：広島大学大学院統合生命科学研究科 生命医科学プログラム 准教授 石原 康宏
4. ヒューム曝露による経皮曝露および肌状態への影響 ----- 79
研究協力者：大阪大学大学院薬学研究科先端化粧品科学共同研究講座 特任助教 河野 まおり

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 91

溶接作業者の溶接ヒュームばく露（個人ばく露と生体内ばく露）と健康影響の関係に関する疫学的研究

研究代表者 辻 真弓 産業医科大学 医学部 衛生学 教授

研究要旨

職場における化学物質のリスクを検討するには化学物質の有害性を知る必要がある。一般的に溶接ヒュームに多く含有される化学組成は鉄、ケイ素、マンガンの酸化物であり、その他、アルミニウム、カドミウム、クロム、チタン、鉛、ニッケル等、様々な物質が含まれている。溶接ヒュームは、発がん性（IARC グループ 1）、神経機能障害、呼吸器系障害などの有害性が知られている。しかしながら日本において溶接ヒューム作業に従事する労働者の生体試料を用いた疫学研究は行われていない。したがって我々は、溶接ヒュームばく露の健康影響と環境中溶接ヒューム濃度並びに生体試料中の溶接ヒューム関連化学物質濃度の関係を明らかにすることを目的として疫学調査を行うこととした。令和 2 年度（2020 年度）のパイロット調査と令和 3 年度（2021 年度）の本調査から得られた知見をもとに、令和 4 年度（2022 年度）は全国 3 か所の事業所にて本調査を行った。前年度と同様、新型コロナウイルス感染症流行状況下であったため、感染防止対策を徹底した上で調査を実施した。

質問票調査、呼吸機能検査、神経学的検査、生体試料（血液・尿）採取、作業環境測定（H, I は未測定）、個人サンプラーを用いた測定およびフィットテスト（溶接作業従事者を対象）を一連の調査として事業所 G（前年度未報告分）、H, I, J にて行った。

個人サンプラー 吸入性マンガン（時間加重平均濃度）0.05mg/m³以上の割合：事業所 G は 81.3%（16 名中 13 名）、事業所 H は 100%（10 名全員）、事業所 I は 87.5%（16 名中 14 名）、事業所 J は 0%（2 名中 0 名）であった。

フィットテスト：1 回目 PASS 割合：事業所 G は 62.5%（16 名中 10 名）、事業所 H は 60.0%（10 名中 6 名）、事業所 I は 75.0%（16 名中 12 名）、事業所 J は 50.0%（2 名中 1 名）であった。

質問票、呼吸機能検査、神経学的検査で統計学的に差がみられた項目：事業所 H はヒュームばく露（溶接作業従事者）群の方がコントロール群と比較して WAIS-IV のワーキングメモリー値が低かった（ $p < 0.005$ ）。

事業所 I はヒュームばく露群の方がコントロール群と比較してタッピング回数が少なかった（ $p < 0.005$ ）。

血中・尿中の金属濃度測定：ヒュームばく露群では、血中 Mn と Pb 濃度、尿中 Mn と Cr 濃度が高い値を示し、事業所と喫煙習慣を考慮した上でもヒュームばく露群では高いことが示された。ヒュームばく露群において、フィットテスト不合格者と合格者の金属濃度の比較を行った結果、不合格者は血中 Mn 濃度が有意に高い結果を示しており、防護具を正しく装着することによるヒュームばく露の予防効果が確認された。

血清サイトカインおよびケモカイン量の測定：パイロット調査および本調査を実施したすべての事業所（10 事業所 A～J）の従業員（コントロール群 129 検体、ヒュームばく露群 105 検体）の検体を一昨年度に手法として確立した LEGENDplex によりサイトカイン 13 種（IL-1 β 、IFN- α 2、IFN- γ 、TNF- α 、IL-6、IL-10、IL-12p70、IL-17A、IL-18、IL-23、IL-33）の定量を行った。コントロール群とヒュームばく露群の血清中サイトカイン濃度を比較すると、IL-1 β 、TNF α 、IL-10、IL-12p70、IL-17A および IL-33 のコントロール群の血清中濃度は、すべてヒュームばく露群のそれと比較して高いという結果が得られた。

経皮曝露および肌状態への影響：2 か所の事業所（事業所 H, I）の従業員と工場非関連者 5 名（医師および大学職員）の肌測定を行い、比較検討した。頸部の色味については、従業員は工場非関連者と比較して明るさの値が低く、赤みの値が高かった。弾力性については、従業員は工場非関連者と比較して表皮層の弾力性と戻り率がともに高く、真皮側は伸びやすくハリがないという結果であった。また、溶接作業所の大気環境にばく露した皮膚モデルを用いた網羅的な遺伝子変動を解析した結果、最も変動が大きかった遺伝子は MMP-9 であった。ヒュームばく露により MMP 発現量の誘導を介した真皮コラーゲン量の減少やハリ・弾力が低下することが示唆された。

分担研究者

矢寺 和博 (産業医科大学 医学部 呼吸器内科学 教授)
郡山 千早 (鹿児島大学大学院医歯学総合研究科疫学・予防医学 教授)
樺田 尚樹 (産業医科大学 産業保健学部 産業・地域看護学 教授)
上野 晋 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業性中毒学 教授)
保利 一 (産業医科大学 名誉教授)
山元 恵 (国立水俣病総合研究センター 国際・総合研究部長)
石原 康宏 (広島大学 大学院統合生命科学研究科 生命医科学プログラム 准教授)
垣内 紀亮 (産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学 非常勤助教)
一瀬 豊日 (産業医科大学 進路指導部 准教授)

研究協力者

河野まおり (大阪大学 大学院薬学研究科 先端化粧品科学共同研究講座)
北川 恭子 (産業医科大学 医学部 衛生学)
桑村 真美 (産業医科大学 医学部 衛生学)
安村 美子 (産業医科大学 医学部 衛生学)
後藤 元秀 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業性中毒学)
石塚 恒年 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業性中毒学)
長谷川 渉 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業性中毒学)
櫻木 俊秀 (産業医科大学 医学部 衛生学)

A. 研究目的

溶接ヒュームばく露の健康影響と溶接ヒューム濃度並びに生体試料中の溶接ヒューム関連化学物質濃度の関係を明らかにすることを目的として疫学調査を行う。令和2(2020)年度と令和3(2021)年度のパイロット調査と本調査で得られた知見を踏まえ、最終年度の令和4(2022)年度は、全国3か所の事業所にて本調査を行った。前年度と同様、新型コロナウイルス感染症流行状況下であったため、感染防止対策を徹底した上で調査を実施した。

B. 研究方法

① 対象事業所 G, H, I, J

事業所 G(溶接作業従事者 16 名, コントロール 16 名)^{※1}
事業所 H(溶接作業従事者 10 名, コントロール 10 名)
事業所 I(溶接作業従事者 16 名, コントロール 16 名)

事業所 J(溶接作業従事者 2 名, コントロール 20 名)

測定項目: 質問票調査、呼吸機能検査、神経学的検査、生体試料(血液・尿)採取、溶接ヒューム濃度測定(作業環境測定(H, Iは未測定)、個人サンプラーを用いた測定およびフィットテスト(溶接作業従事者を対象))を実施した。^{※1}前年度実施

②血中・尿中の金属濃度等の比較(事業所 G, H, I, J)

溶接作業に伴うヒュームばく露によって、生体内の金属濃度に及ぼす影響を評価するために、ヒュームばく露(溶接作業従事者)群と同事業所に所属するコントロール群を対象として、血液中および尿中の金属濃度(カドミウム、ニッケル、マンガン、クロム、および鉛)の測定を行った。本研究で検討した血中・尿中の金属は以下の5つ(血液:カドミウム、ニッケル、マンガン、クロム、および鉛、尿:カドミウム、マンガン、クロム)である。いずれも週後半(木または金曜)の午後に採取した生体試料を用いた。個人サンプラーを用いた測定結果を用い、溶接作業従事者へのヒュームばく露状況の評価を行い、生体試料中の濃度との関連を解析した。4つの事業所を対象とし、ヒュームばく露群44名(男性43名)、コントロール群62名(男性61名)について、生体試料中の金属濃度の測定を行った。

③血清サイトカインおよびケモカイン量の変化(事業所 A~J)

1. 溶接工場内PM2.5のサンプリング(事業所 H, I)
石英フィルターを装着したハイボリウムエアサンプラー(HV-500R、柴田科学)を使用した。
2. 大気中微粒子濃度の測定(事業所 H, I)
パーティクルカウンター(KC-51、リオン)を用いて測定した。
3. PM2.5に含まれる重金属の定量(事業所 H, I)
いであ株式会社に委託し、ICP-MSを用いて行った。
4. ヒト血清検体(事業所 A~J)
ヒト血清は産業医科大学医学部衛生学講座より提供を受け、測定まで-80℃で保存した。フローサイトメーターを用いた血清中炎症性分子の網羅的解析は、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex) with Filter Plate (Bio Legend, 740808) および LEGENDplex Human Proinflammatory Chemokine Panel (13-plex) with Filter Plate (Bio Legend, 740984) を使用した。
尚、検出限界以下であった場合、キットマニユ

アルに記載されている検出限界地の 1/2 を便宜上用いて平均値を算出し、また統計解析を行った。

④経皮曝露および肌状態への影響(事業所 H, I)

1. ヒト肌測定試験

色差計(CM-700d、コニカミノルタ製)を用いて頬部、頸部の肌の明るさ、赤味、黄味を評価した。キュートメーター(MPA580D: Courage+Khazaka)を用いて頸部の弾力性を評価した。

2. 表皮モデルを用いた肌影響への検討

2-1. ネブライザーによる気相ばく露

アクリルチャンバー内で PM2.5 懸濁液を皮膚モデルの角質層側に超音波式ネブライザーを用いてばく露した。

2-2. 細胞生存率の測定

Cell Counting Kit-8(CCK-8、DOJIN)を用いた WST-8 法および LDH 法で算出した。

2-3. DNA アレイによる包括的な遺伝子変動解析
Maxwell RSC simply RNATissue Kit(Promega)を用いて mRNA を抽出し、ClariomS human array(ThermoFisher)による解析を行った。

(倫理面への配慮)

産業医科大学倫理委員会および鹿児島大学医学部倫理委員会、広島大学倫理委員会承認を得て行われている。

C. 研究結果

①本調査の実際と結果(事業所 G, H, I, J)

事業所 G (溶接作業従事者 16 名、コントロール 16 名)の作業環境測定(粉じん)結果は第 2 管理区分、フィットテスト 1 回目 PASS の割合は 62.5% (16 名中 10 名)であった。個人ばく露濃度測定は吸入性粉じん(8 時間加重平均濃度)は、16 名のうち 9 名が 1 mg/m³ (日本産業衛生学会の(第 2 種粉じん: 酸化鉄)許容濃度)以上、吸入性マンガ(時間加重平均濃度)は 16 名のうち 13 名が 0.05 mg/m³ (溶接ヒュームの気中濃度の基準値)を超え、吸入性マンガ(8 時間加重平均濃度)は 16 名のうち 13 名が 0.02 mg/m³ (ACGIH の TLV-TWA(ばく露限界値))を超えていた。ヒュームばく露群とコントロール群の間で疲労の蓄積点数および各種神経学的検査の結果に有意差は認めなかった。

事業所 H (溶接作業従事者 10 名(うち男性 9 名)、コントロール 10 名(うち男性 9 名))の作業環境測定(粉じん)は実施していない。フィットテスト 1 回目 PASS の割合は 60.0% (10 名中 6 名)であった。個人ばく露濃度測定では、実施者 10 名全員が吸入性粉じん(8 時間加重平均濃度) 1 mg/m³ (日本産業衛生学会の(第 2 種粉じん: 酸化鉄)許容濃度)、吸入性マンガ(時間加重平均濃度) 0.05 mg/m³ (溶接ヒュームの気中濃度

の基準値)、吸入性マンガ(8 時間加重平均濃度) 0.02 mg/m³ (ACGIH の TLV-TWA(ばく露限界値))を超えた。ヒュームばく露群とコントロール群の間で疲労の蓄積点数に有意差は認めなかった。ヒュームばく露群の方がコントロール群と比較して WAIS-IV のワーキングメモリー値が低かった(p<0.005)。タッピング、握力検査では有意差は認めなかった。

事業所 I (溶接作業従事者 16 名、コントロール 16 名)の作業環境測定(粉じん)は実施していない。フィットテスト 1 回目 PASS の割合は 75.0% (16 名中 12 名)であった。個人ばく露濃度測定結果は吸入性粉じん(8 時間加重平均濃度)は 16 名のうち 12 名が 1 mg/m³ を超えていた。吸入性マンガ(時間加重平均濃度)、16 名のうち 14 名は 0.05 mg/m³ (溶接ヒュームの気中濃度の基準値)以上であった。吸入性マンガ(8 時間加重平均濃度)は 16 名のうち 15 名は 0.02 mg/m³ (ACGIH の TLV-TWA(ばく露限界値))を超えていた。ヒュームばく露群とコントロール群の間で疲労の蓄積点数、WAIS-IV のワーキングメモリー値に有意差は認めなかった。ヒュームばく露群の方がコントロール群と比較してタッピング回数が少なかった(p<0.005)。握力検査では有意差は認めなかった。

事業所 J (溶接作業従事者 2 名、コントロール 20 名)の作業環境測定(粉じん)結果は第 2 管理区分、フィットテストの 1 回目 PASS の割合は 50% (2 名中 1 名)であった。個人ばく露濃度測定では吸入性粉じん(8 時間加重平均濃度)は未測定。吸入性マンガ(時間加重平均濃度)は、2 名とも 0.05 mg/m³ (溶接ヒュームの気中濃度の基準値)以下であった。吸入性マンガ(8 時間加重平均濃度)は 2 名とも 0.02 mg/m³ (ACGIH の TLV-TWA(ばく露限界値))以下であった。ヒュームばく露群とコントロール群の間で疲労の蓄積点数および各種神経学的検査の結果に有意差は認めなかった。

②血中・尿中の金属濃度測定(事業所 G, H, I, J)

○事業所別の比較(ヒュームばく露群): 血中 Cd や Ni において事業所間にばらつきがみられた。事業所 H のばく露群は、他の事業所に比べて血中 Ni、Mn、Cr、Pb 濃度が高い値を示した。事業所 H は、他の事業所に比べて Cd 濃度が低いのに対し、Cr 濃度が高い傾向にあった。

○個人サンプラーによる測定結果(ヒュームばく露群): 血中 Cd、Ni、Cr および尿中 Cr は、検出限界値以下の者が多かったため、以降の解析には含めていない。個人サンプラーによる吸入性粉塵および Mn 濃度のいずれとも、血中・尿中金属濃度との間にほとんど相関はなかった。個人サンプラー測定値による吸入性粉塵および Mn 濃度のいず

れとも、血中・尿中金属濃度との間にほとんど相関はなかった。

○溶接年数との関連(ヒュームばく露群):血中の金属濃度では顕著な関連は認められなかった。フィットテストの合格・不合格者に分けて検討したところ、以下の結果であった。フィットテスト不合格者において溶接年数と血中カドミウム濃度との正の相関がみられた。フィットテスト合格者において溶接年数と血中マンガン濃度との負の相関がみられた。フィットテスト合格者において溶接年数と血中マンガン濃度との負の相関傾向を示し、不合格者においては、正の相関を示した。(Spearman 相関係数)

●喫煙習慣と血液中・尿中の金属濃度(コントロール群):いずれの金属においても、喫煙習慣によって顕著な差はみられなかったが、血中鉛の濃度が喫煙経験者で高い傾向であった。

●飲酒習慣と血液中・尿中の金属濃度(コントロール群):いずれの金属においても、飲酒習慣によって顕著な差はみられなかった。

◎血液・尿中の各金属濃度分布の比較(ヒュームばく露群 vs コントロール群):ヒュームばく露群において、血中 Cd および尿中 Mn 濃度が高いものが分布していた。また、統計学的有意差はないものの、血中 Mn においてもばく露群で値が高い傾向が認められた。

◎血液・尿中の各金属濃度(測定値)の比較(ヒュームばく露群 vs コントロール群):ヒュームばく露群において、血中 Mn および Pb 濃度、尿中 Mn および Cr の濃度が有意に高値であった。

◎喫煙習慣を考慮した生体内の金属曝露量の比較(ヒュームばく露群 vs コントロール群):単変量解析において差を認めた血中の Mn と Pb 濃度、尿中の Cr 濃度について重回帰分析を行った。血中 Mn、Pb 濃度および尿中 Cd 濃度の分布には偏りがあったため、対数変換を行った上で解析に用いた。なお、尿中 Mn 濃度は、すべてのコントロール群が検出限界以下であったために、重回帰分析の対象から除外した。いずれの金属濃度においても、ヒュームばく露群で高いことが示された。

③サイトカイン・ケモカイン量の測定(事業所 A~J)

パイロット調査および本調査を実施したすべての事業所(10 事業所 A~J)の従業員(コントロール群 129 検体、ヒュームばく露群 105 検体)を一昨年度に手法として確立した LEGENDplex によりサイトカイン 13 種(IL-1 β 、IFN- α 2、IFN- γ 、TNF- α 、IL-6、IL-10、IL-12p70、IL-17A、IL-18、IL-23、IL-33)の定量を行った。結果、コントロール群とヒュームばく露群の血清中サイトカイン濃度を比較すると、IL-1 β 、TNF α 、IL-10、IL-12p70、IL-17A および IL-33 のコントロール群の

血清中濃度は、すべてヒュームばく露群と比較して高かった。

④経皮曝露および肌状態への影響(事業所 H, I)

2 か所の事業所(事業所 H, I)の従業員(事業所 H:溶接作業従事者 16 名、コントロール群 16 名、事業所 I:溶接作業従事者 10 名、コントロール群 10 名と工場非関連者 5 名(医師および大学職員)の肌測定を行い、比較検討した。色味測定では、工場非関連者と比較して、頸部の明るさが低く、赤みが強かった。弾力性については、表皮層では、工場非関連者と比較して弾性力が有意に高く、吸引後の戻り率が高かった。真皮層では、最大吸引高が有意に高く、粘性の度合いが低かった。

表皮モデルを用いた検討を示す。気相ばく露法で表皮モデルに溶接ヒュームを 1 時間曝露した結果、細胞障害性は認めなかった。気相ばく露した皮膚モデルを用いた DNA アレイ解析結果では、最も変動が大きかった遺伝子は MMP-9 であり、特に MMP ファミリーである MMP-1、10 の変動が大きかった。

D. 考察

①結果まとめ(事業所 G, H, I, J)

事業所ごとに作業・作業環境(作業環境測定・個人ばく露濃度測定結果)が異なっていた(H, I は未測定)。吸入性マンガン(時間加重平均濃度) 0.05 mg/m³以上の割合:事業所 G は 81.3%(16 名中 13 名)、事業所 H は 100%(10 名全員)、事業所 I は 87.5%(16 名中 14 名)、事業所 J は 0%(2 名中 0 名)であった。

フィットテスト 1 回目 PASS 割合:事業所 G は 62.5%(16 名中 10 名)、事業所 H は 60.0%(10 名中 6 名)、事業所 I は 75.0%(16 名中 12 名)、事業所 J は 50%(2 名中 1 名)であった。

質問票、呼吸機能検査、神経学的検査で統計的に差がみられた項目:事業所 H はヒュームばく露群の方がコントロール群と比較して WAIS-IV のワーキングメモリー値が低かった(p<0.005)。事業所 I はヒュームばく露群の方がコントロール群と比較してタッピング回数が少なかった(p<0.005)。

以上により、事業所で異なるが、ヒュームばく露群の方が神経学的機能が低下している可能性が示唆された。

②血中・尿中の金属濃度測定(事業所 G, H, I, J)

コントロール群と比べて、ヒュームばく露群では血中の Mn と Pb 濃度、尿中の Cd と Cr 濃度が高い値を示し、事業所と喫煙習慣を考慮した上でも、ヒュームばく露群では高いことが示された。また、ヒュームばく露群において、フィットテスト不合格者と合格者の金属濃度の比較を行った結果、不合格者は血中 Mn 濃度が有意に高い結果

を示しており、防護具を正しく装着することによるヒュームばく露の予防効果が確認された。

③サイトカイン・ケモカイン量の測定(事業所 A～J)
コントロール群とヒュームばく露群で、サイトカイン・ケモカイン量の測定値に違いが認められるものがあった。

④経皮曝露および肌状態への影響(事業所 H, I)
工場非関連者と比較して従業員の頸部の明るさが低く赤みが高かったことに関しては、工場内および付近で大気中に滞留している溶接ヒュームおよび PM2.5 がメラニンを経介した肌の色へ影響を与えている可能性が考えられた。弾力性については、表皮層では、工場非関連者と比較して硬いゴムのような肌状態であり、真皮層では弾力が無く伸びきった風船のような状態であることがわかった。

表皮モデルを用いた DNA アレイ解析で遺伝子変動を認めた MMP-ファミリーは、コラーゲン分解酵素である。このことから、ヒュームばく露により、MMP 発現量の誘導を経介した真皮コラーゲンの量の減少やハリ・弾力が低下することが示唆された。

E. 結論

コントロール群と比較して、ヒュームばく露(溶接作業従事者)群において、血中 Mn と Pb、尿中 Mn と Cr 濃度が高かった。フィットテスト合格者と不合格者において、血中 Mn 濃度が有意に異なる結果が得られたことや、溶接作業を行わないコントロール群とヒュームばく露群との間に血清サイトカイン値の有意な差を認めたことから、溶接作業従事者が正しく保護具の着用をすることの重要性が示唆された。

また、いくつかの事業所では WAIS-IV のワーキングメモリー低値、タッピング回数低値がヒュームばく露群で認められた。事業所ごとの作業・作業環境(作業環境測定・個人ばく露濃度測定結果・マスクの着用状況(フィットテスト結果を含む))の違い、個人の背景因子の違いを十分に考慮した上で更なる溶接ヒュームばく露と健康影響の関係を検討する必要があると考えられた。

F. 健康危険情報

該当無し

G. 研究発表

1. 論文発表

- 辻 真弓, 安村 美子, 保利 一, 上野 晋, 一瀬 豊日, 後藤 元秀, 石塚 恒年, 長谷川 渉, 呼吸用保護具の定量的フィットテストから得られた知見 ～金属アーク溶接

等作業に従事する労働者を対象とした調査から～, 産業医学ジャーナル: 45(5):52-57, 2022

- Mayumi Tsuji, Chihaya Koriyama, Yasuhiro Ishihara, Toyohi Isse, Tsunetoshi Ishizuka, Wataru Hasegawa, Motohide Goto, Rie Tanaka, Noriaki Kakiuchi, Hajime Hori, Kazuhiro Yatera, Naoki Kunugita, Megumi Yamamoto, Toshihide Sakuragi, Yoshiko Yasumura, Maori Kono, Mami Kuwamura, Kyoko Kitagawa, Susumu Ueno, Associations between welding fume exposure and neurological function in Japanese male welders and non-welders. Journal of Occupational Health 65(1): e12393, 2023
- Mayumi Tsuji, Hajime Hori, Chihaya Koriyama, Rie Tanaka, Toyohi Isse, Yasuhiro Ishihara, Tsunetoshi Ishizuka, Wataru Hasegawa, Motohide Goto, Kazuhiro Yatera, Naoki Kunugita, Mami Kuwamura, Toshihide Sakuragi, Yoshiko Yasumura, Megumi Yamamoto, Susumu Ueno, The effect of mask fit test on the association between the concentration of metals in biological samples and the results of time-weighted average personal exposure: a study on Japanese male welders. Journal of Occupational Health 65(1): e12399, 2023

2. 学会発表

- 辻 真弓: 我が国における溶接ヒュームばく露と健康影響に関する疫学調査. 日本薬学会第 142 年会、名古屋、オンライン開催、2022 年 3 月

H. 知的財産権の出願・登録状況

- | | |
|-----------|------|
| 1. 特許取得 | 該当無し |
| 2. 実用新案登録 | 該当無し |
| 3. その他 | 該当無し |

1. 本調査の実際と結果

研究代表者 辻 真弓 産業医科大学 医学部 衛生学 教授

研究要旨:

溶接ヒュームばく露の健康影響と溶接ヒューム濃度並びに生体試料中の溶接ヒューム関連化学物質濃度の関係を明らかにすることを目的とし、全国3か所の事業所（H, I, J）にて本調査を実施した。事業所G(前年度未報告分)、H, I, Jの結果を示す。※生体試料中の濃度測定の結果は「分担研究報告書：鹿児島大学 郡山千早 溶接作業従事者の健康影響に関する検討：血中・尿中の金属濃度等の比較」に記載。

事業所G(橋梁事業、鉄骨・鉄構事業)結果：(溶接作業従事者 16名、コントロール 16名)

作業環境測定(粉じん)：第2管理区分 **フィットテスト：**1回目 PASS 62.5% (16名中10名)

個人ばく露濃度測定：吸入性粉じん(8時間加重平均濃度)は、16名のうち9名が $1\text{mg}/\text{m}^3$ (日本産業衛生学会の(第2種粉じん：酸化鉄)許容濃度)以上、吸入性マンガン(時間加重平均濃度)は16名のうち13名が $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ (溶接ヒュームの気中濃度の基準値)を超え、吸入性マンガン(8時間加重平均濃度)は16名のうち13名が $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ (ACGIHのTLV-TWA(ばく露限界値))を超えていた。16名の吸入性粉じん中のマンガン含有率：0.53～14.7%

健康影響に関する調査：溶接作業従事者群とコントロール群の間で疲労の蓄積点数および各種神経学的検査の結果に有意差は認めなかった。

事業所H(建築・鉄鋼構造物工事業)結果：(溶接作業従事者 10名、コントロール 10名)

作業環境測定(粉じん)：未測定 **フィットテスト：**1回目 PASS 60.0% (10名中6名)

個人ばく露濃度測定：10名全員が吸入性粉じん(8時間加重平均濃度) $1\text{mg}/\text{m}^3$ (日本産業衛生学会の(第2種粉じん：酸化鉄)許容濃度)、吸入性マンガン(時間加重平均濃度) $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ (溶接ヒュームの気中濃度の基準値)、吸入性マンガン(8時間加重平均濃度) $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ (ACGIHのTLV-TWA(ばく露限界値))を超えた。10名の吸入性粉じん中のマンガン含有率：7.8～15.0%

健康影響に関する調査：溶接作業従事者群とコントロール群の間で、疲労の蓄積点数に有意差は認めなかった。ヒュームばく露群の方がコントロール群と比較してWAIS-IVのワーキングメモリー値が低かった($p<0.005$)。タッピング、握力検査では有意差は認めなかった。

事業所I(橋梁事業、鉄骨・鉄構事業)結果：(溶接作業従事者 16名、コントロール 16名)

作業環境測定(粉じん)：未測定 **フィットテスト：**1回目 PASS 75.0% (16名中12名)

個人ばく露濃度測定結果：吸入性粉じん(8時間加重平均濃度)は16名のうち12名が $1\text{mg}/\text{m}^3$ を超えていた。吸入性マンガン(時間加重平均濃度)、16名のうち14名は $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 以上であった。吸入性マンガン(8時間加重平均濃度)は16名のうち15名は $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ を超えていた。16名の吸入性粉じん中のマンガン含有率：7.58～19.3%。

健康影響に関する調査：溶接作業従事者群とコントロール群の間で、疲労の蓄積点数、WAIS-IVのワーキングメモリー値に有意差は認めなかった。ヒュームばく露群の方がコントロール群と比較してタッピング回数が少なかった($p<0.005$)。握力検査では有意差は認めなかった。

事業所J(自動車用ウレタンフォーム製造業)結果：(溶接作業従事者 2名、コントロール 20名)

作業環境測定(粉じん)：第2管理区分 **フィットテスト：**1回目 PASS 50% (2名中1名)

個人ばく露濃度測定結果：吸入性粉じん(8時間加重平均濃度)は未測定。吸入性マンガン(時間加重平均濃度)は、2名とも $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であった。吸入性マンガン(8時間加重平均濃度)は2名とも $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ 以下であった。

健康影響に関する調査：溶接作業従事者群とコントロール群の間で疲労の蓄積点数および各種神経学的検査の結果に有意差は認めなかった。

分担研究者

矢寺 和博 (産業医科大学医学部 呼吸器内科学 教授)
郡山 千早 (鹿児島大学大学院医歯学総合研究科疫
学・予防医学 教授)
樺田 尚樹 (産業医科大学 産業保健学部 産業・地
域看護学 教授)
上野 晋 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業
性中毒学 教授)
保利 一 (産業医科大学 名誉教授)
山元 恵 (国立水俣病総合研究センター 国際・総合
研究部長)
石原 康宏 (広島大学 大学院統合生命科学研究科 生
命医科学プログラム 准教授)
垣内 紀亮 (産業医科大学 産業生態科学研究所 作業
関連疾患予防学 非常勤助教)
一瀬 豊日 (産業医科大学 進路指導部 准教授)

研究協力者

河野まおり (大阪大学大学院薬学研究科先端化粧品科
学共同研究講座)
北川 恭子 (産業医科大学 医学部 衛生学)
桑村 真美 (産業医科大学 医学部 衛生学)
安村 美子 (産業医科大学 医学部 衛生学)
後藤 元秀 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業
性中毒学)
石塚 恒年 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業
性中毒学)
長谷川 渉 (産業医科大学 産業生態科学研究所 職業
性中毒学)
櫻木 俊秀 (産業医科大学 医学部 衛生学)

1. 研究目的

「溶接作業者の溶接ヒュームばく露（個人ばく露と
生体内ばく露）と健康影響の関係に関する疫学的研究」
の一環として、令和2（2020）年度と令和3（2021）年
度のパイロット調査と本調査で得られた知見を踏ま
え、最終年度の令和4（2022）年度は溶接ヒューム作
業従事者における溶接ヒュームばく露状況と健康影
響についての調査研究の総括することを目的とし、本
調査を実施した。

尚、令和2～3年度と同様に新型コロナウイルス感
染症流行下であるため、感染防止対策を徹底し、全国
3事業所で本調査を実施した。

2. 研究方法

実施場所：全国3か所の事業所

事業所H（建築・鉄鋼構造物工事業）

事業所I（橋梁事業、鉄骨・鉄構事業）

事業所J（自動車用ウレタンフォーム製造業）

※令和3（2021）年度に調査を行った事業所G（橋梁
事業、鉄骨・鉄構事業）も今年度記載する。

●事業所G（橋梁事業、鉄骨・鉄構事業）

① 調査日

2021年11月24日水曜日～26日金曜日

② 対象者

溶接^{※1}作業従事者 16名（H-1～H-16）

※1 母材：その他（SN49C, SM490）

溶剤：その他（Z3312 YGW18, Z3211 E4916U）

コントロール 16名（C-1～C-16）

③ 健康影響に関する調査 11月24日水曜日～ 26日金曜日

・G-③-1

質問票調査：基本属性（性、年齢、既往歴、現病歴、
喫煙状況、飲酒状況等）、勤務状況、職業歴 等

自覚症状：疲労感、うつ、頭痛、咳、痰、喘鳴、息切
れ、鼻水・鼻づまり等、健康診断時のエックス線写真
の結果、特殊健康診断の結果

・G-③-2

呼吸機能検査：努力肺活量（FVC）、%FVC、一秒率、%
一秒量

・G-③-3

神経学的検査：WAIS-IV（ワーキングメモリーに関する
項目のみ）、タッピング検査、握力検査

④ 溶接ヒュームの濃度測定 11月25日木曜日、26 日金曜日

・G-④-1

作業環境測定基準による方法（事業場）
方法：質量濃度測定法及び相対濃度測定法

・G-④-2

個人サンプラーを用いた測定方法（個人）

・G-④-3

測定対象物質：粉じん濃度、マンガン

⑤ フィットテスト 11 月 24 日水曜日

方法：JIS T8150:2021 に従う。

定量的フィットテスト

⑥ 生体試料中の化学物質濃度

生体試料：血液 5ml、尿 20ml

採取のタイミング：1 回(11 月 25 日木曜日、26 日金曜日就業後)

対象測定物質：

マンガン、クロム、ニッケル、カドミウム、鉛

検査方法：原子吸光法

血清中炎症マーカー、酸化ストレスマーカー測定等

●事業所 H(建築・鉄鋼構造物工事業)

① 調査日

2022 年 4 月 19 日火曜日、21 日木曜日、22 日金曜日

② 対象者

溶接^{※2}作業従事者 10 名 (H-1～H-10)

※2 母材：軟鋼 JIS Z 3313

溶材：軟鋼 J IS G 3101・3106・3136

コントロール 10 名 (C-1～C-10)

③ 健康影響に関する調査 4 月 19 日火曜日～22 日金曜日

・H-③-1

質問票調査・・・G-③-1 と同様

・H-③-2

呼吸機能検査・・・G-③-2 と同様

・H-③-3

神経学的検査・・・G-③-3 と同様

・H-③-4

生体試料採取・・・G-③-4 と同様

④ 溶接ヒュームの濃度測定 4 月 21 日木曜日、22 日金曜日

・H-④-1

作業環境測定基準による方法（事業場）

・・・G-④-1 と同様

・H-④-2

個人サンプラーを用いた測定方法（個人）

・・・G-④-2 と同様

・H-④-3

測定対象物質：マンガン

⑤ フィットテスト 4 月 19 日火曜日

方法：JIS T8150:2021 に従う。

定量的フィットテスト

⑥ 生体試料中の化学物質濃度

生体試料：血液 5ml、尿 20ml

採取のタイミング：1 回(4 月 21 日木曜日、22 日金曜日就業後)

対象測定物質：

マンガン、クロム、ニッケル、カドミウム、鉛

検査方法：原子吸光法

血清中炎症マーカー、酸化ストレスマーカー測定等

●事業所 I(橋梁事業、鉄骨・鉄構事業)

① 調査日

2022 年 6 月 7 日火曜日～10 日金曜日

② 対象者

溶接^{※3}作業従事者 16 名 (H-1～H-16)

※3 母材：その他 SM490B, C, TMPC3858, C

溶材：その他 SM - 55H, Z3312 YGW18

コントロール 16 名 (C-1～C-16)

③ 健康影響に関する調査 6 月 7 日火曜日～10 日金曜日

・I-③-1

質問票調査・・・G-③-1 と同様

・I-③-2

呼吸機能検査・・・G-③-2 と同様

・I-③-3

神経学的検査・・・G-③-3 と同様

・I-③-4

生体試料採取・・・G-③-4 と同様

④ 溶接ヒュームの濃度測定 6月9日木曜日、10日金曜日

・I-④-1

作業環境測定基準による方法（事業場）

・・・G-④-1 と同様

・I-④-2

個人サンプラーを用いた測定方法（個人）

・・・G-④-2 と同様

・I-④-3

測定対象物質：粉じん、マンガン

⑤ フィットテスト 6月7日火曜日、8日水曜日

方法：JIS T8150:2021 に従う。

定量的フィットテスト

⑥ 生体試料中の化学物質濃度

生体試料：血液 5ml、尿 20ml

採取のタイミング：1回（6月9日木曜日、10日金曜日就業後）

対象測定物質：

マンガン、クロム、ニッケル、カドミウム、鉛

検査方法：原子吸光法

血清中炎症マーカー、酸化ストレスマーカー測定等

●事業所 J(自動車用ウレタンフォーム製造業)

① 調査日

2022 年 7 月 27 日水曜日～29 日金曜日

② 対象者

溶接^{※4}作業従事者 2 名（H-1～H-2）

※4 母材：アルミ（AC4C）

溶材：鋼材（SS400 等）

コントロール 20 名（C-1～C-20）

③ 健康影響に関する調査 7月28日木曜日、29日金曜日

・J-③-1

質問票調査・・・G-③-1 と同様

・J-③-2

呼吸機能検査・・・G-③-2 と同様

・J-③-3

神経学的検査・・・G-③-3 と同様

・J-③-4

生体試料採取・・・G-③-4 と同様

④ 溶接ヒュームの濃度測定 7月29日金曜日

・J-④-1

作業環境測定基準による方法（事業場）

・・・G-④-1 と同様

・J-④-2

個人サンプラーを用いた測定方法（個人）

・・・G-④-2 と同様

・J-④-3

測定対象物質：マンガン

⑤ フィットテスト 7月27日水曜日

方法：JIS T8150:2021 に従う。

定量的フィットテスト

⑥ 生体試料中の化学物質濃度

生体試料：血液 5ml、尿 20ml

採取のタイミング：1回（7月28日木曜日、29日金曜日就業後）

対象測定物質：

マンガン、クロム、ニッケル、カドミウム、鉛

検査方法：原子吸光法

血清中炎症マーカー、酸化ストレスマーカー測定等

3. 研究結果 13 ページ以降に添付

(倫理面への配慮)

調査内容は産業医科大学倫理委員会の承認を得て実施した。(第 R2-011 号)

4. 考察

職場における化学物質のリスクを検討するには化

学物質の有害性を知る必要がある。溶接ヒュームは、発がん性 (IARC グループ 1)、神経障害、呼吸器系障害などの有害性が知られているが、日本において溶接ヒューム作業に従事する労働者の生体試料を用いた疫学研究は行われていない。本研究の目的は、溶接ヒュームばく露の健康影響と溶接ヒューム濃度並びに生体試料中の溶接ヒューム関連化学物質濃度の関係を明らかにすることである。令和 4 年度 (2022 年度) は令和 2 年度 (2020 年度) のパイロット調査と令和 3 年度の本調査から得られた知見 (生体試料の最適な採取タイミング) をもとに、全国 3 か所の事業所にて本調査を行った。前年度と同様、新型コロナウイルス感染症流行状況下であったため、感染防止対策を徹底した上で調査を実施した。

事業所 G, H, I では吸入性粉じん (8 時間加重平均濃度) が日本産業衛生学会の許容濃度である $1\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた対象者の割合はそれぞれ 56.3%, 100%, 75.0% であり、吸入性マンガン (時間加重平均濃度) が溶接ヒュームの気中濃度の基準値である $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた対象者の割合はそれぞれ 81.3%, 100%, 87.5% であった。さらに、吸入性マンガン (8 時間加重平均濃度) が ACGIH の TLV-TWA (ばく露限界値) $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた対象者の割合はそれぞれ 81.3%, 100%, 93.8% であった。一方、事業所 J では、吸入性マンガン (時間加重平均濃度) が溶接ヒュームの気中濃度の基準値である $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた対象者は 2 名中 0 名、吸入性マンガン (8 時間加重平均濃度) が ACGIH の TLV-TWA (ばく露限界値) $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた対象者は 2 名中 0 名であった (吸入性粉じん (8 時間加重平均濃度) は未測定)。事業所 G, J の作業環境測定 (粉じん) 結果は、第 2 管理区分であった (H, I は未測定)。事業所ごとに粉じんおよびマンガン濃度環境が異なることが示唆された。それぞれの事業所における作業および作業環境を十分に考慮した上で、溶接ヒュームばく露による生体試料中の金属濃度や炎症マーカーとの関連や健康影響を検討する必要がある。

フィットテストは 1 回目で PASS となった対象者の割合は G, H, I, J 事業所はそれぞれ 62.5%, 60.0%, 75.0%, 50.0% であった。マスク装着方法などの指導を行ったところ、事業所 H において、1 回目 PASS した対

象者は 60.0% だったが、2 回目 PASS した対象者は 90.0% まで上がった。同様に事業所 I でも、1 回目は PASS の対象者が 75.0% だったが、2 回目 PASS した対象者は 93.8% まで上がった。保護具の正しい装着方法の教育の有効性が示唆された。

健康影響に関する調査では、事業所 G, J で疲労の蓄積点数や一部の神経学的検査結果において、溶接作業従事者群とコントロール群とで有意な差は認められなかった。また事業所 H, I では一部の神経学的検査において、溶接作業従事者群とコントロール群とで有意な差が認められた ($p < 0.005$)。なお、呼吸機能検査では正常範囲外の対象者が多数存在したが、測定機器の不具合の可能性が考えられる。

健康影響に関しては事業所ごとの個人の背景因子 (年齢・溶接作業従事歴・喫煙歴など) の違いを踏まえた上で、横断研究の限界も含めて慎重に検討する必要がある。

5. 結論

事業所ごとに作業・作業環境 (作業環境測定・個人ばく露濃度測定結果) が異なる。生体試料中の金属・炎症マーカーの測定結果および健康影響については、これらの職場の要因に加え、個人の背景因子の違いを十分に考慮した上で慎重に検討する必要がある。

《フィットテスト》

溶接ヒューム対象者に、定量的フィットテストを行った。

・使用機器

労研式マスクフィッティングテスターMT-05U 型

・フィットテスト動作 各1分間

動作	動作の内容
1.通常の呼吸	話さずに通常の呼吸を繰り返す
2.深呼吸	ゆっくりとした深い呼吸を繰り返す
3.頭を左右に回す	①顔を右にゆっくり振る ②右端で息を吸う ③息を吐きながら、ゆっくり顔を左に振る ④左端で息を吸う ①～④の繰り返し
4.頭を上下に動かす	①顔を上にゆっくり振る ②上で息を吸う ③息を吐きながら、ゆっくり顔を下に振る ④下で息を吸う ①～④の繰り返し
5.話す	はっきり聞き取れるように、1から数を数える
6.前屈	手をつま先にできるだけ触れるように腰を曲げてから、直立姿勢に戻る
7.通常の呼吸	話さずに通常の呼吸を繰り返す

・測定方法

装着するマスクの外側の粉じん粒子数(C_o)及びマスクの内側の粉じん粒子数(C_i)を計測し、フィットファクター(FF)を下の式によってそれぞれの動作ごとに計算される。

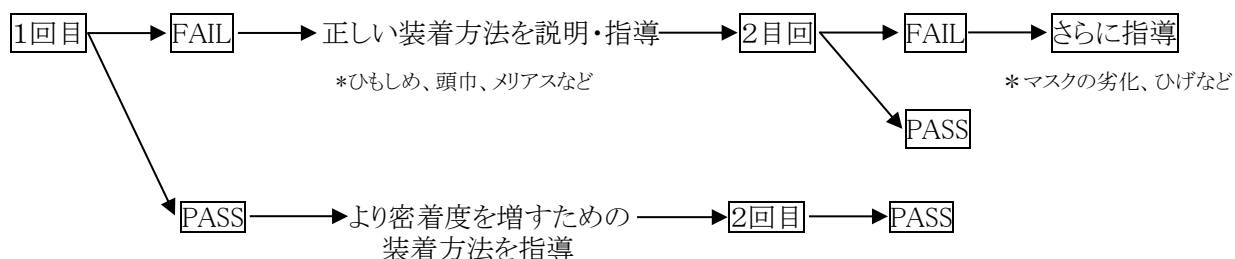
$$FF = \frac{C_i}{C_o}$$

総合的なフィットファクター(判定結果)は、7動作のフィットファクターの合計を7で割った数値である。

要求フィットファクターは、面体の種類によって異なり、全面形面体500以上、半面形面体100以上となり、総合的なフィットファクターが要求フィットファクターを上回っていた場合PASSとなる。

本調査では、以下の方法でマスクフィットテストを2回行った。

1回目は通常通りマスクを装着してもらい、FAIL・PASS に応じて、下の通りテストを行った



事業所 G (橋梁事業、鉄骨・鉄構事業) (溶接作業従事者 16 名、コントロール 16 名)

<質問票調査>

○基本情報・生活習慣

表 1 基本情報

	溶接作業従事者 (n=16)		コントロール (n=16)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
年齢 (歳)	41.9	11.3	40.4	12.5
BMI	24.9	3.2	25.5	4.8
溶接に従事した期間(年)	19.9	12.2	4.9	11.5

※コントロール群の 6 名は過去に溶接作業歴があった

表 2 生活習慣

	溶接作業従事者 (n=16)		コントロール (n=16)	
	n	%	n	%
たばこ				
吸わない	6	37.5	4	25.0
過去に吸っていた	4	25.0	5	31.3
現在吸っている	6	37.5	7	43.8
アルコール				
飲まない	4	25.0	3	18.8
過去飲んでいて	2	12.5	3	18.8
現在飲んでいる	10	62.5	9	56.3
野菜				
好き	8	50.0	7	43.8
どちらかといえば好き	5	31.3	4	25.0
あまり好きではない	2	12.5	3	18.8
好きではない	1	6.3	2	12.5

※コントロール群の 1 名は、飲酒歴について記載がなかった。

○自覚症状・既往歴

・溶接作業従事者：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり (2 名)、痰 (1 名) の回答があり、神経系の自覚症状として、手足のしびれ・ピリピリ感 (2 名)、発汗のせいで、日常生活で困ることがある (1 名) の回答があった。既往歴としては花粉症 (5 名)、角膜炎・結膜炎 (1 名) の回答があった。

・コントロール：呼吸器系の自覚症状として痰 (3 名)、咳 (2 名)、鼻水・鼻づまり (2 名) の回答があり、神経系の自覚症状として、手足や体が熱い感じ (1 名)、よだれが多い、よだれが出やすい (1 名)、筋肉がピクピクする (1 名) の回答があった。既往歴としては、花粉症 (3 名)、喘息 (2 名)、電気性眼炎 (1 名)、緑内障 (1 名)、金属熱 (1 名) の回答があった。

表 3 疲労の蓄積

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	20.4	16	5.2	29	13
溶接作業従事者	20.0	16	5.5	29	13
Total	20.2	32	5.2	29	13

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

<呼吸機能検査>

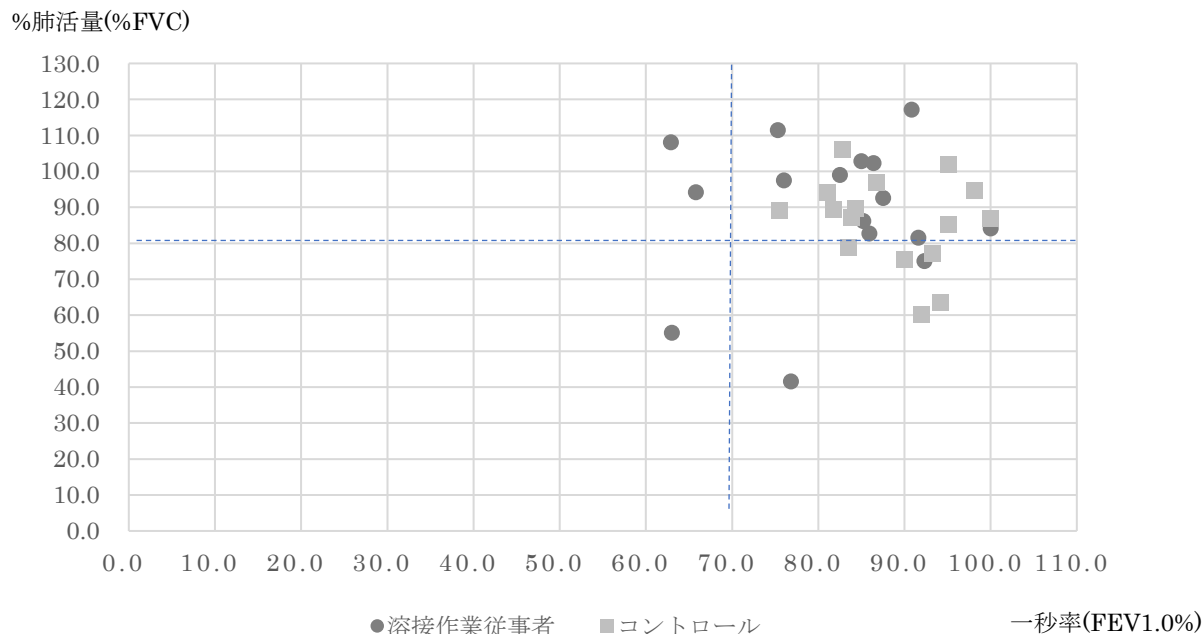


図 1 呼吸機能検査

<神経学的検査>

表 4 タッピング

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	113.1	16	26.2	168	61
溶接作業従事者	105.0	16	22.1	146	55
Total	109.1	32	24.2	168	55

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

表 5 握力

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	42.5	16	6.4	54.4	34.4
溶接作業従事者	46.8	16	5.3	57.5	38.9
Total	44.7	32	6.1	57.5	34.4

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

表 6 WAIS

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	97.6	16	16.0	131	79
溶接作業従事者	93.3	16	15.4	134	71
Total	95.4	32	15.6	134	71

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

G <溶接ヒュームの濃度測定>

1) 作業環境測定

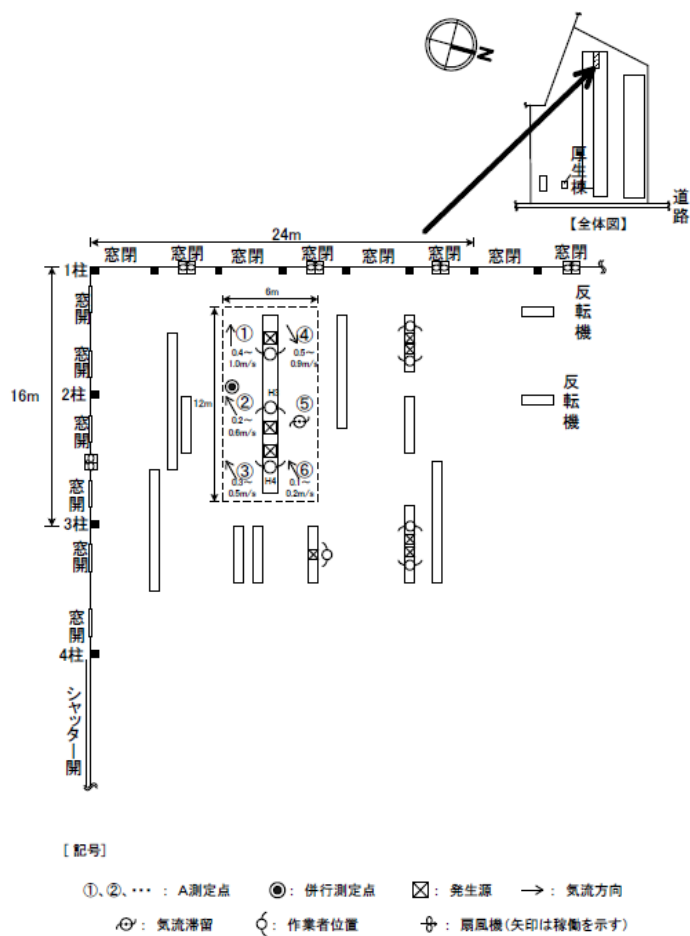


図 1 デザイン

* サンプル実施時に当該単位作業場所で行われていた作業、設備の稼働状況等及び測定値に影響を及ぼしたと考えられる事項の概要

〔作業工程と発生源及び作業者数〕

作業工程：梁溶接作業 部材の搬入～溶接～ガウジング～ハンドグラインダーによる仕上げ研磨～部材の反転又は搬出（この作業を繰り返す）

発生源：溶接の作業位置である 作業者：8名（うち2名が個人ばく露測定対象者H3, H4）

（呼吸用保護具着用（取替え式防じんマスク：DR28SU2K（RL2）（株）重松製作所）、溶接面使用）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・ 全体換気装置：5 台稼働
- ・ 局所排気装置等：無

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

- ・ シャッター：開
- ・ 窓：一部開
- ・ シャッター、窓から外気の流入が見られた。

〔当該単位作業場所の周辺からの影響〕

特になし

〔各測定点に関する特記事項〕 特になし

併行測定点 気温 20.5℃ 湿度 34%

気流 0.2～1.3m/s

外気条件 気温 17.6℃ 湿度 41% 晴（15時50分）

表 1 A 測定データ

測定方法 No.	相対濃度(cpm)	吸入性粉じん濃度 (mg/m ³)	吸引性粉じん濃度 (mg/m ³)	備考
1	249	2.66	4.08	
2	173	1.85	2.84	
3	95	1.02	1.56	
4	86	0.92	1.41	
5	76	0.81	1.25	
6	53	0.57	0.87	
7	以下余白	以下余白	以下余白	

表 2 吸入性粉じん濃度測定 作業環境測定結果

幾何平均値	M1 = 1.13 mg/m ³	M2 = — mg/m ³	M = 1.13 mg/m ³
幾何標準偏差	σ 1 = 1.77	σ 2 = —	σ = 2.40
第1評価値	EA1 = 4.80 mg/m ³		
第2評価値	EA2 = 1.67 mg/m ³		
管理濃度	3.0mg/m ³		
評価	A測定	区分2	
	評価結果	第2管理区分	

表 3 吸引性粉じん濃度測定 作業環境測定結果

幾何平均値	M1 = 1.74 mg/m ³	M2 = — mg/m ³	M1 = 1.74 mg/m ³
幾何標準偏差	σ 1 = 1.77	σ 2 = —	σ = 2.40
第1評価値	EA1 = 7.35 mg/m ³		
第2評価値	EA2 = 2.55 mg/m ³		

2) 個人サンプラーを用いた測定

H-1, H-2：鉄骨加工棟、大組立溶接作業（図 2）

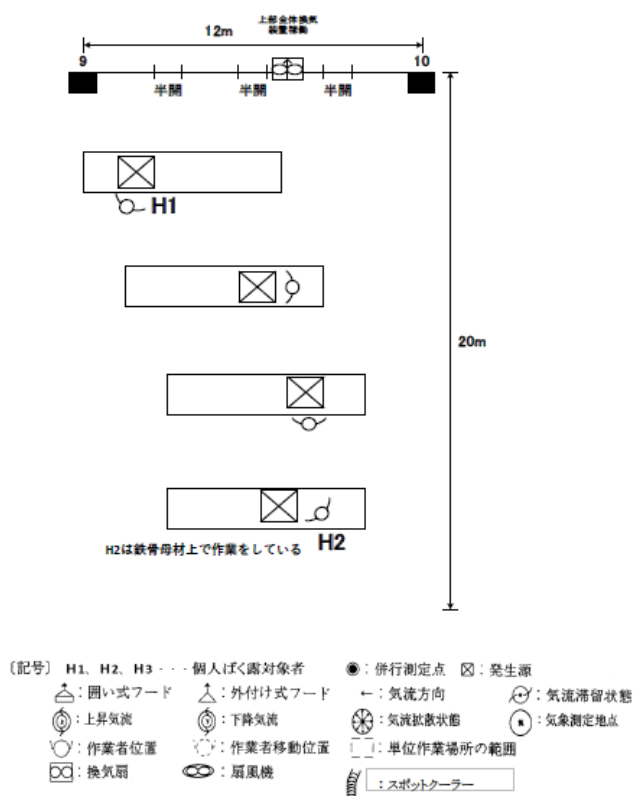


図 2 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：鋼構造物の製作における大組溶接作業
- 部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に

応じてガウジング作業、サンダー作業
（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：溶接作業、ガウジング作業、サンダー作業位置である

・作業人数：4 名

*呼吸用保護具着用 DR28SU2K (RL2) ((株) 重松製作所)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・扇風機：無

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓：一部開

・気流の状況：窓から外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

・作業員 H2 は、鉄骨上を作業位置とし溶接作業をおこなっていた。

表4 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H1	204	0.082
2	H2	218	1.51

表5 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	1.51
要求防護係数 $PF_{\gamma} = C/0.05$	30.2

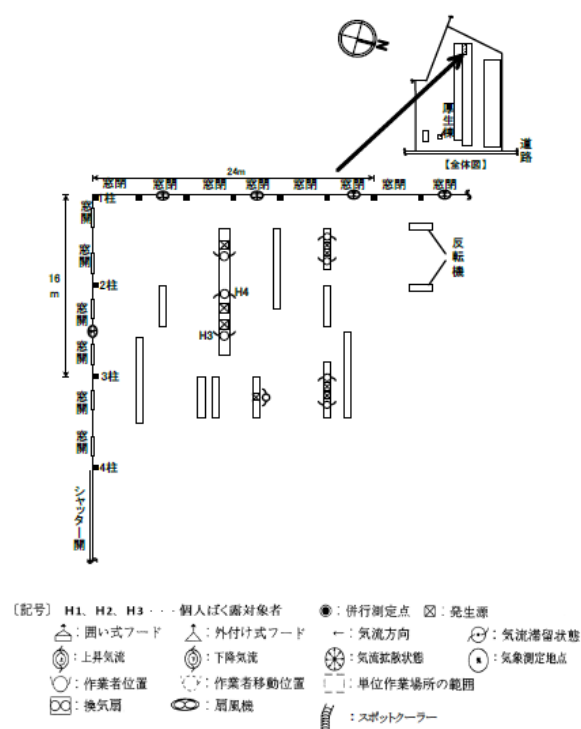
H-3, H-4：鉄骨加工棟、サブマージュ溶接、エレクトロスラグ溶接作業（図3）

図3 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

・作業工程：鋼構造物の製作におけるサブマージュ溶接、エレクトロスラグ溶接作業 部材を

準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてガウジング作業（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：溶接作業、ガウジング作業、である
・作業者数：8名

*呼吸用保護具着用 DR28SU2K (RL2) ((株) 重松製作所)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：5台稼働
・局所排気装置等：無
・扇風機：無

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・シャッター：開
・窓：一部開
・気流の状況：シャッター、窓から外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕 ・特になし

表6 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H3	225	1.18
2	H4	273	0.319

表7 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	1.18
要求防護係数 (P F γ)	23.6

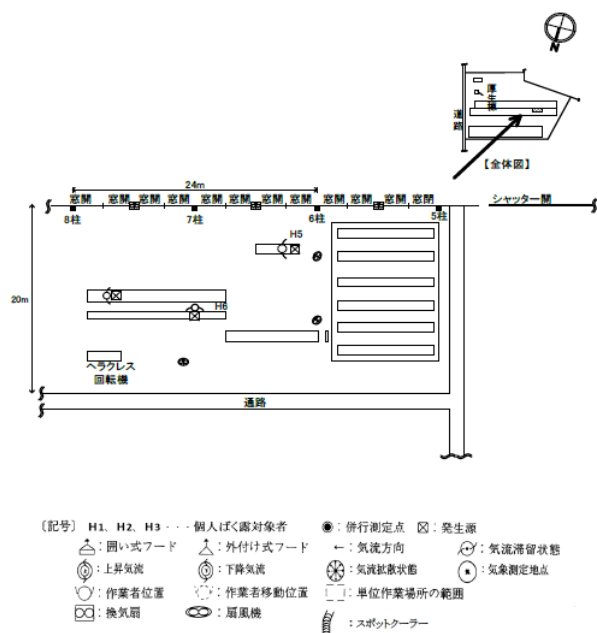
H-5, H-6：鉄骨加工棟、柱組立溶接作業（図4）

図4 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

・作業工程：鋼構造物の製作における柱組立溶接作業 部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてガウジング作業、グラインダー作業、掃除等

（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：溶接作業、ガウジング作業、グラインダー作業位置である

・作業人数：3名

*呼吸用保護具着用 DR28SU2K (RL2) ((株)重松製作所)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・換気扇：3台稼働

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓：一部開

・気流の状況：窓から外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、窓が開いており換気は良い状況であった。そのため、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

・特に無し

表8 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H5	254	0.252
2	H6	262	0.420

表9 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.420
要求防護係数 (P F γ)	8.4

H-7, H-8：鉄骨加工棟、仕口溶接作業（図5）

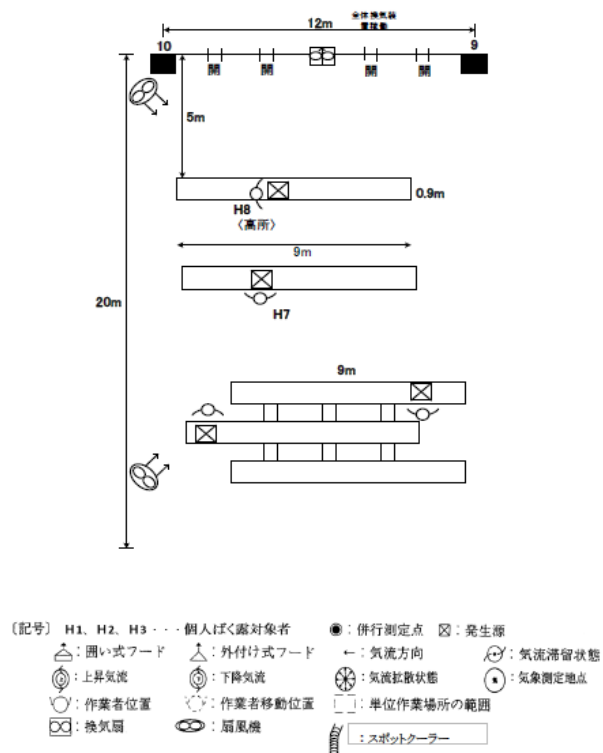


図5 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：鋼構造物の製作における仕口溶接作業

部材を準備する～位置決め～溶接作業
 （上記、この作業を繰り返す）

- ・発生源：各溶接作業位置である
- ・作業者数：4名

*呼吸用保護具着用 DR28SU2K (RL2) ((株)重松製作所)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- ・扇風機：2台稼働（工場上部にある全体換気装置のある方向へ気流を作っていた）

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

- ・窓：一部開
- ・気流の状況：窓から外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

- ・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

- ・作業員H7、H8は、鉄骨上を作業位置とし溶接を行っていた。

表10 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H7	221	0.191
2	H8	244	0.887

表11 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.887
要求防護係数 (P F γ)	17.7

H-9, H-10：橋梁棟、アーク溶接・仕上溶接作業サブマージュ溶接作業（図6）

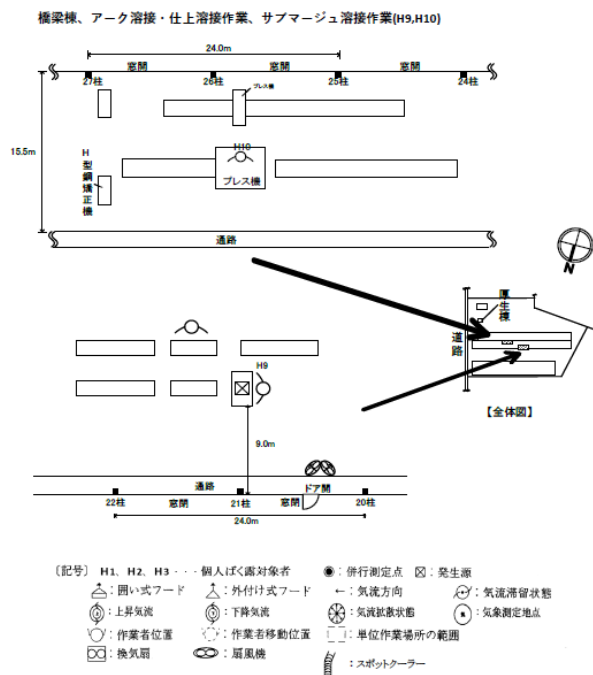


図6 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：鋼構造物（橋梁）の製作におけるアーク溶接・仕上溶接作業、サブマージュ溶接作業
- 部材を準備する～位置決め～溶接作業・仕上げ

作業～必要に応じてグラインダー作業
（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：溶接作業、グラインダー作業位置である

・作業人数：3名

*呼吸用保護具着用 H9：DR28SU2K（RL2）、H10：DR76DSU2K（RL2）（株）重松製作所 H10：呼吸用保護具〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・扇風機：2台稼働

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・ドア：開、窓：一部開

・気流の状況：ドア、窓から外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

・作業員H10は、本調査日は一日を通して溶接作業はなかった。（主に曲げ加工作業）

表12 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H9	268	0.852
2	H10	299	0.007

表13 測定結果

マンガン濃度の最大の値（C）（mg/m ³ ）	0.852
要求防護係数（P F γ）	17.0

H-11, H-12 : 橋梁棟、組立て・溶接作業 (図 7)

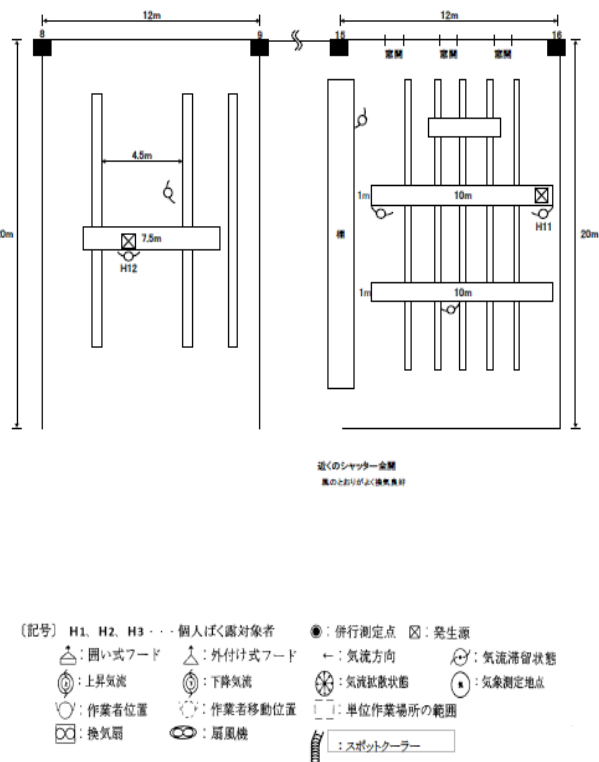


図 7 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：鋼構造物（橋梁）の製作における組立て・溶接作業

部材を準備する～位置決め～組立作業～溶接作業

(上記、この作業を繰り返す)

- ・発生源：溶接作業位置である
- ・作業者数：6名

*呼吸用保護具着用 : DR76DSU2K (RL2) ((株)
重松製作所)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- ・扇風機：無

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

- ・窓：一部開
- ・気流の状況：窓から外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

- ・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

- ・作業員H11は、本調査日は一日を通して溶接作業はなかった。(主にケガキ作業、ガス切断、グラインダー作業等)

表 1 4 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H11	268	0.012
2	H12	282	0.066

表 1 5 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.066
要求防護係数 (P F γ)	1.3

H-13, H-14 : 橋梁棟、橋梁溶接作業 (図 8)

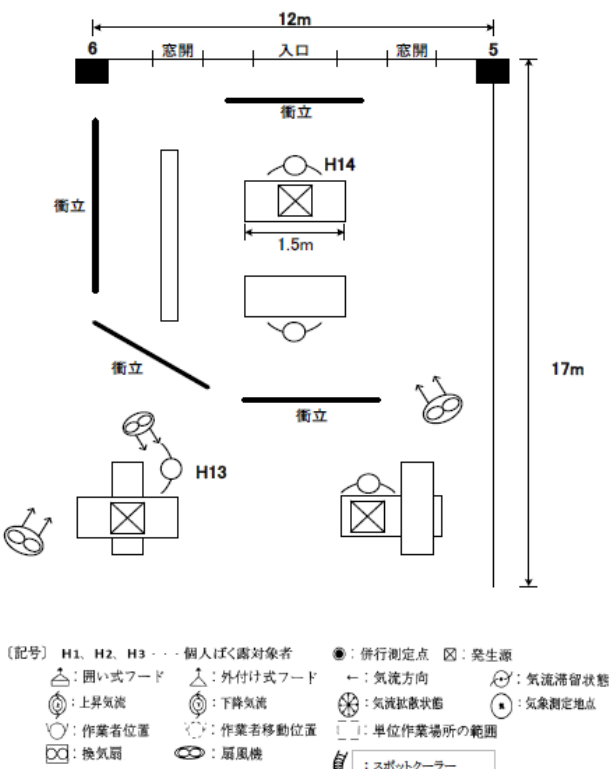


図 8 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：鋼構造物（橋梁）の製作における
橋梁溶接作業

部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてグラインダー作業、スパッタ除去作業（上記、この作業を繰り返す）

- ・発生源：溶接作業、グラインダー作業、スパッタ除去作業位置である
- ・作業人数：4名

*呼吸用保護具着用 DR28SU2K (RL2) ((株)重
松製作所)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- ・扇風機：3台稼働

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

- ・窓：一部開
 - ・気流の状況：窓から外気が流入していた
- 〔作業場所の周辺からの影響〕

- ・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

- ・特になし

表 1 6 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H13	246	0.429
2	H14	256	0.286

表 1 7 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m³)	0.429
要求防護係数 (P F γ)	8.6

H-15, H-16：仕上げ・手直し溶接作業（屋外）（図9）

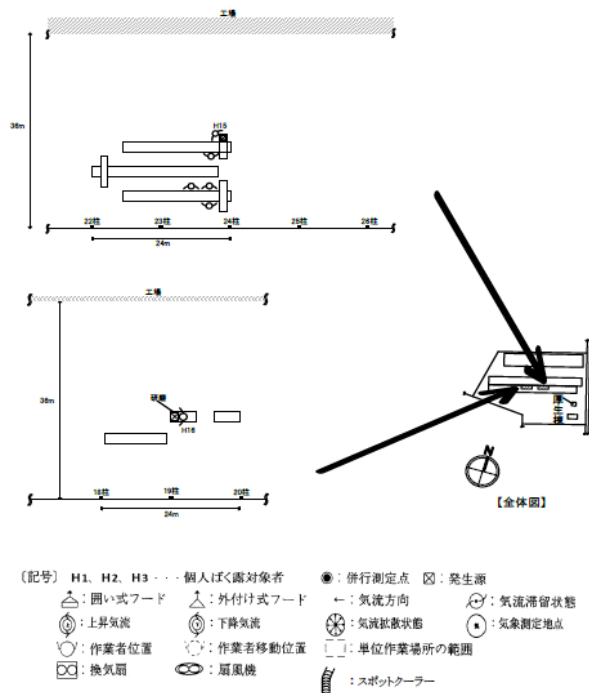


図9 デザイン

- 〔作業工程と発生源及び労働者数〕
- ・作業工程：鋼構造物（橋梁）の製作における仕上げ・手直し溶接作業
 - 部材を準備する～溶接作業～必要に応じてグラインダー作業、スパッタ除去作業（上記、この作業を繰り返す）
 - ・発生源：溶接作業、グラインダー作業、スパッタ除去作業位置である
 - ・作業人数：5名
- *呼吸用保護具着用 DR28SU2K (RL2) ((株)重松製作所)
- 〔設備、排気装置の稼働状況〕 屋外作業
- 〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕 屋外作業
- 〔作業場所の周辺からの影響〕
- ・屋外での溶接作業のため、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。
- 〔特記事項〕
- ・屋外での作業であった。

表18 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H15	246	0.169
2	H16	246	0.001

表19 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.169
要求防護係数 (P F γ)	3.4

表1 フィットテスト結果

動作	普通の呼吸	深呼吸	顔を左右に振る	顔を上下に振る	話す	前屈	普通の呼吸	平均	PASS・FAIL	マスクの種類
H-1 1回目	35	141	163	131	58	92	204	84	FAIL	DR28SU2W
H-2 1回目	6474	330	639	931	4598	6693	4114	789	PASS	DR28SU2W
H-3 1回目	3310	672	1315	1008	2383	274	4314	892	PASS	DR28SU2W
H-4 1回目	5998	12878	1627	5240	3133	1471	5543	3140	PASS	DR28SU2W
H-5 1回目	607	510	321	526	566	425	587	484	PASS	DR28SU2W
H-6 1回目	540	167	87	11	856	7	216	27	FAIL	DR28SU2W
H-7 1回目	26	25	16	29	48	17	19	23	FAIL	DR28SU2W
H-8 1回目	40	38	36	39	52	35	39	39	FAIL	DR28SU2W
H-9 1回目	6899	5527	4866	6701	6813	1228	7915	3959	PASS	DR28SU2W
H-10 1回目	471	547	431	393	6	34	56	32	FAIL	DR76DSU2K
H-11 1回目	590	242	331	684	861	230	2495	432	PASS	DR76DSU2K
H-12 1回目	24503	9890	20593	15205	4646	863	28406	4204	PASS	DR76DSU2K
H-13 1回目	14178	4905	4443	5194	2870	730	2073	2419	PASS	DR28SU2W
H-14 1回目	7183	2985	3348	1943	4322	2128	1627	2689	PASS	DR28SU2W
H-15 1回目	244	223	186	179	365	44	497	149	PASS	DR28SU2W
H-16 1回目	3	3	4	5	4	5	3	4	FAIL	DR28SU2W

表 2 フィットテスト PASS・FAIL のみ

対象者	1 回目	マスクの種類
H-1	FAIL	DR28SU2W
H-2	PASS	DR28SU2W
H-3	PASS	DR28SU2W
H-4	PASS	DR28SU2W
H-5	PASS	DR28SU2W
H-6	FAIL	DR28SU2W
H-7	FAIL	DR28SU2W
H-8	FAIL	DR28SU2W
H-9	PASS	DR28SU2W
H-10	FAIL	DR76DSU2K
H-11	PASS	DR76DSU2K
H-12	PASS	DR76DSU2K
H-13	PASS	DR28SU2W
H-14	PASS	DR28SU2W
H-15	PASS	DR28SU2W
H-16	FAIL	DR28SU2W
PASS 合計	10	

表 3 マスクの種類別 PASS・FAIL

マスクの種類	PASS	FAIL
DR28SU2W	8	5
DR76DSU2K	2	1
合計	10	6

重松 防じんマスク DR28SU2W を使用した場合



事業所 H（建築・鉄鋼構造物工事業）（溶接作業従事者 10 名、コントロール 10 名）

<質問票調査>

○基本情報・生活習慣

表 1 基本情報

	溶接作業従事者 (n=10)		コントロール (n=10)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
年齢 (歳)	35.9	12.7	36.1	12.2
BMI	23.8	3.5	22.8	2.7
溶接に従事した期間(年)	14.7	10.0	0.1	0.3

※コントロール群のうち 1 名は過去に 1 年間の溶接作業歴があった

表 2 生活習慣

	溶接作業従事者 (n=10)		コントロール (n=10)	
	n	%	n	%
たばこ				
吸わない	2	20.0	5	50.0
過去に吸っていた	4	40.0	0	0.0
現在吸っている	4	40.0	5	50.0
アルコール				
飲まない	6	60.0	7	70.0
過去飲んでいて	1	10.0	2	20.0
現在飲んでいる	3	30.0	1	10.0
野菜				
好き	4	40.0	6	60.0
どちらかといえば好き	3	30.0	3	30.0
あまり好きではない	3	30.0	1	10.0
好きではない	0	0.0	0	0.0

○自覚症状・既往歴

・溶接作業従事者：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり（1 名）、神経系の自覚症状として手足のしびれ・ピリピリ感（2 名）、安静時に手が震えることがある（1 名）との回答があった。既往歴として角膜炎・結膜炎（2 名）、花粉症（1 名）、肺気腫（1 名）、肺炎（1 名）、喘息（1 名）、眼内異物（1 名）、電気性眼炎（1 名）であった。

・コントロール：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり（4 名）、咳（2 名）、痰（2 名）、神経系の自覚症状として筋肉がピクピクする（2 名）、安静時に手が震えることがある（1 名）、発汗のせいで日常生活で困ることがある（1 名）との回答があった。既往歴は花粉症（6 名）、喘息（1 名）、角膜炎・結膜炎（4 名）であった。

表 3 疲労の蓄積

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	20.7	10	6.0	31	14
溶接作業従事者	19.0	10	5.2	25	13
Total	19.9	20	5.5	31	13

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

<呼吸機能検査>

%肺活量(%FVC)

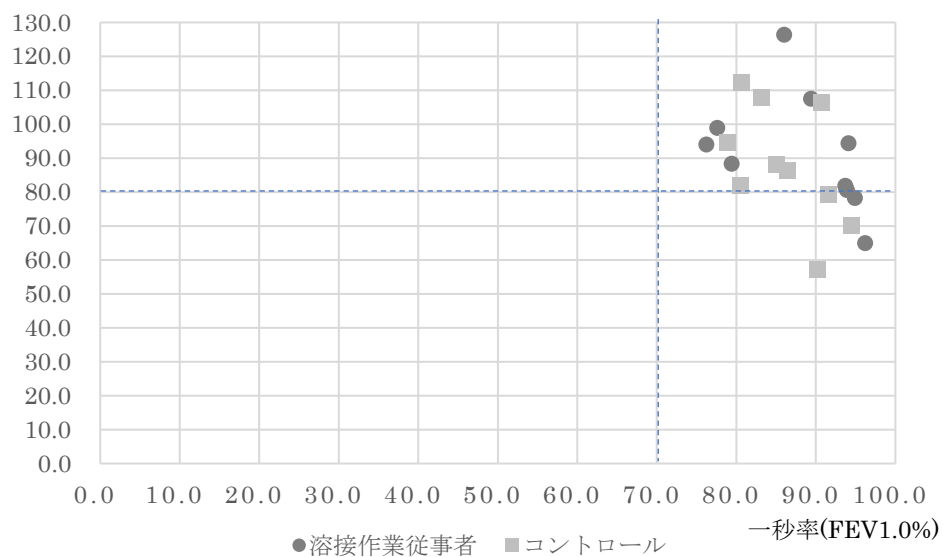


図 1 呼吸機能検査

<神経学的検査>

表 4 タッピング

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	125.5	10	25.8	170	85
溶接作業従事者	107.3	10	34.7	147	45
Total	116.4	20	31.2	170	45

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

表 5 握力

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	42.1	10	6.2	49.6	28.4
溶接作業従事者	44.8	10	13.9	58.7	20.3
Total	43.5	20	10.6	58.7	20.3

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

表 6 WAIS

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	99.8	10	10.0	117	88
溶接作業従事者	84.1	10	9.7	103	69
Total	92.0	20	12.6	117	69

平均値の比較 : Mann-Whitney test ($p < 0.005$)

H <溶接ヒュームの濃度測定>

1) 作業環境測定 未測定

2) 個人サンプラーを用いた測定

H-1, H-2, H-5, H-6 : 組立溶接作業場 (橋梁・高架橋) (図1)

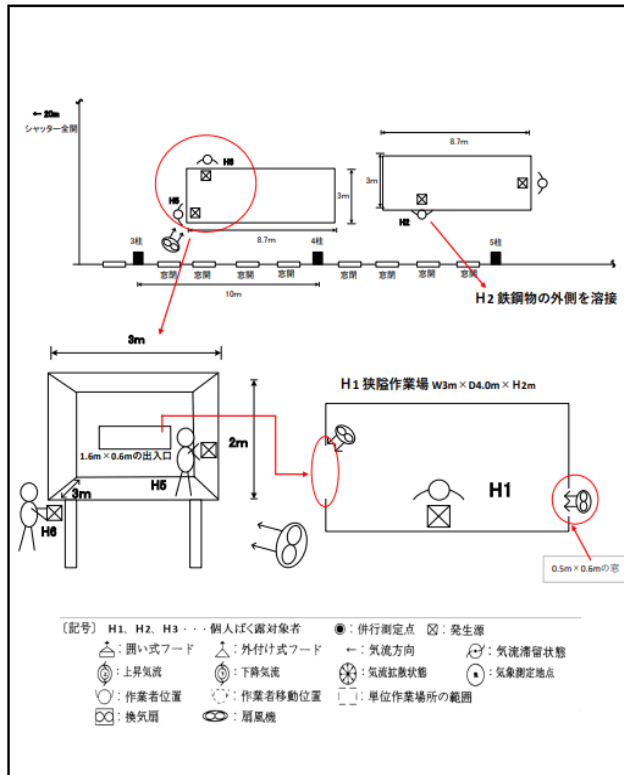


図1. デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

・作業工程：建築用鉄鋼物（橋梁高架橋）の組立溶接作業

部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてガウジング作業、サンダー作業

（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：溶接作業、ガウジング作業、サンダー作業位置である

・作業員数：8名

*呼吸用保護具着用 サカキ式 1005RR-05型(RL2)、作業員 H6 のみ 1015-02 型(RL2)

（興研株式会社）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・扇風機：有

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓：一部開

・シャッター開

・気流の状況：シャッター、窓からわずかに外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われているが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

・作業員 H1、H5、H6 は、同じ建築用鉄鋼物（ボックス型）の溶接作業をおこなっていた。作業員 H1 は鉄鋼物の狭隙部分（W3m×D4.0m×H2m）の中に入り作業を行っていた。作業員 H5 は鉄鋼物の周辺や時折狭隙部分に入り作業を行っていた。作業員 H6 は、鉄鋼物の外部周辺のための溶接作業であった。また、作業員 H2 は、同型の建築用鉄鋼物の外部周辺の溶接を行っていた。

表1 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H1	194	1.62
2	H2	298	0.908
3	H5	271	0.936
4	H6	238	0.197

表2 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	1.62
要求防護係数 (P F γ)	32.5

H-3, H-4 : セグメント溶接作業 (図2)

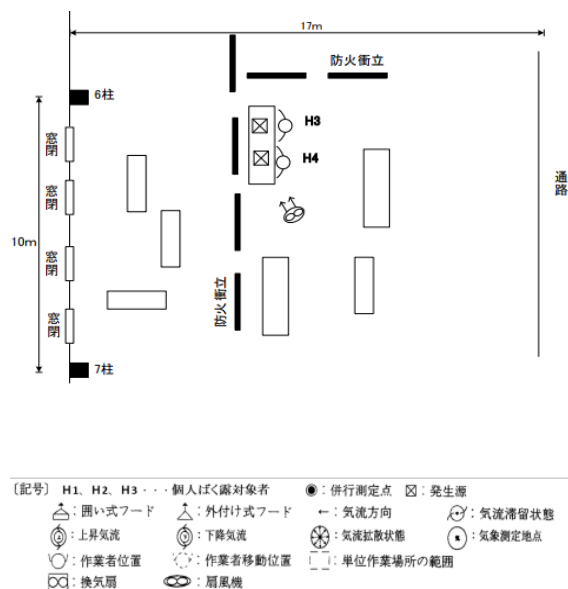


図2 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：建築用鉄鋼物（セグメント）の組立溶接作業

部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要

に応じてサンダー作業、クレーン作業
（上記、この作業を繰り返す）

- ・発生源：溶接作業、サンダー作業位置である
- ・作業人数：2名

*呼吸用保護具着用

サカホ式 1005RR-05 型 (RL2) (興研株式会社
〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- ・扇風機：有

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

- ・窓：閉
- ・シャッター開

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われているが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。

〔特記事項〕

- ・なし

表3 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H3	262	2.82
2	H4	283	0.603

表4 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	2.82
要求防護係数 (P F γ)	56.4

H-7, H-8 : 組立溶接作業（屋根鉄骨）（図 3）

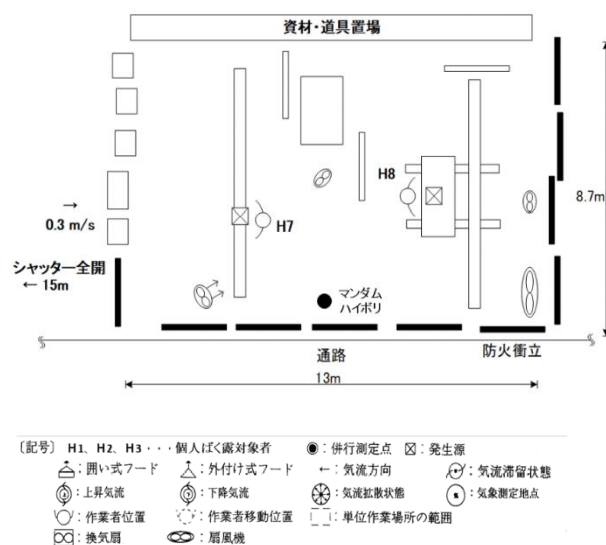


図 3 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：橋梁（屋根鉄骨）の溶接作業
部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてスパッタ除去作業、クレーン作業（上記、この作業を繰り返す）
- ・発生源：溶接作業、スパッタ除去作業位置で

ある

- ・作業者数：2 名
- *呼吸用保護具着用 サカヰ式 1005RR-05 型 (RL2) (興研株式会社)
- 〔設備、排気装置の稼働状況〕
- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- ・扇風機：有
- 〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕
- ・窓：窓近くになし
- ・シャッター開
- 〔作業場所の周辺からの影響〕
- ・工場内では、至るところで溶接作業が行われているが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。また、15m離れた出入口（シャッター全開）からの外気の流入が確認できた。
- 〔特記事項〕
- ・なし

表 5 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H7	267	0.284
2	H8	272	0.439

表 6 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.439
要求防護係数 (P F Y)	8.8

H-9, H-10：橋梁（鉄骨梁）の溶接作業（図4）

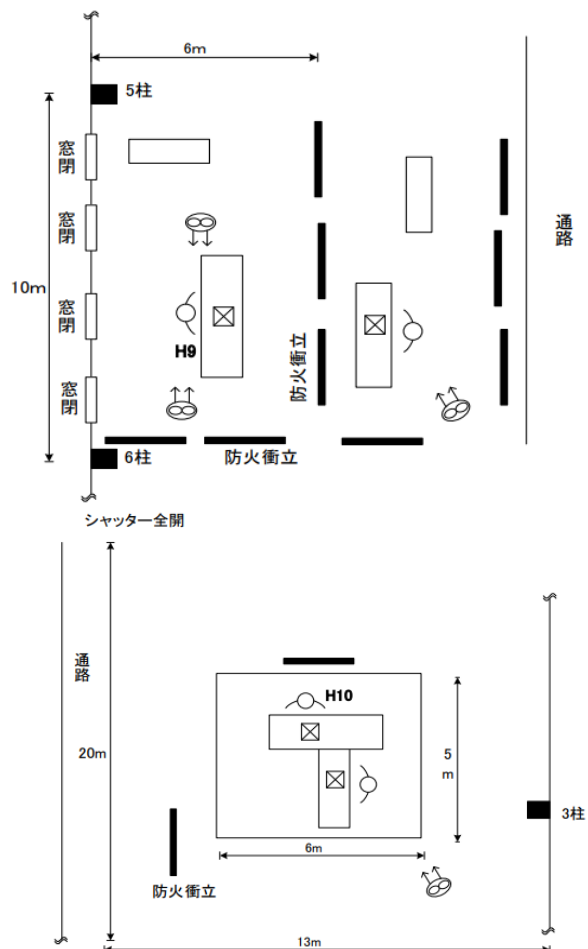


図4 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：橋梁（鉄骨梁）の溶接作業
部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてグラインダー作業
（上記、この作業を繰り返す）
- ・発生源：溶接作業、グラインダー作業位置である
- ・作業人数：4名

*呼吸用保護具着用 サカキ式 1005RR-05型（RL2）（興研株式会社）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- ・扇風機：有

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

- ・窓：窓近くになし
- ・シャッター開

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われているが、各作業場は離れており、他の作業場からの影響はなかったと考えられる。また、H10が溶接している作業場から20m離れた出入口（シャッター全開）からの外気の流入が確認できた。

〔特記事項〕

- ・なし

表7 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H9	278	0.283
2	H10	289	0.587

表8 測定結果

マンガン濃度の最大の値（C）（mg/m ³ ）	0.587
要求防護係数（PFY）	11.7

表1 フィットテスト結果

動作	普通 の呼 吸	深呼吸	顔を左 右に振 る	顔を上 下に振 る	話 す	前 屈	普通の 呼吸	平均	PASS・ FAIL
H-1 1回目	17	38	26	26	17	13	18	20	FAIL
H-1 2回目	242	223	322	229	821	61	205	181	PASS
H-2 1回目	238	319	213	154	87	53	249	132	FAIL
H-2 2回目	548	660	650	1009	429	323	713	551	PASS
H-3 1回目	86	96	91	90	36	72	80	71	FAIL
H-3 2回目	8744	6517	2546	4939	2951	2651	8279	4118	PASS
H-4 1回目	263	443	530	274	396	87	112	202	PASS
H-4 2回目	14241	6755	2688	6552	8421	1645	5289	4221	PASS
H-5 1回目	284	260	169	174	232	206	321	224	PASS
H-5 2回目	26735	11672	12518	7980	2384	2943	3090	4960	PASS
H-6 1回目	16	14	21	11	7	12	14	12	FAIL
H-6 2回目	50	46	106	15	30	23	32	31	FAIL
H-7 1回目	231	128	154	197	320	71	214	153	PASS
H-7 2回目	785	377	206	321	629	289	570	374	PASS
H-8 1回目	146	148	102	180	182	65	194	127	PASS
H-8 2回目	3060	623	220	278	3782	152	4337	409	PASS
H-9 1回目	822	1068	802	874	894	126	556	454	PASS
H-9 2回目	2480	3216	1882	1042	3218	667	4996	1661	PASS
H-10 1回目	3024	866	1100	1074	1533	2043	4349	1490	PASS
H-10 2回目	14850	37584	432	915	3941	5920	3919	1674	PASS

表 2 マスクフィットテスト PASS・FAIL のみ

対象者	1 回目	2 回目
H-1	FAIL	PASS
H-2	FAIL	PASS
H-3	FAIL	PASS
H-4	PASS	PASS
H-5	PASS	PASS
H-6	FAIL	FAIL
H-7	PASS	PASS
H-8	PASS	PASS
H-9	PASS	PASS
H-10	PASS	PASS
PASS 合計	6	9

興研 防じんマスク サカキ式 1005RR-05 型 マスク使用 1 例



事業所Ⅰ（橋梁事業、鉄骨・鉄構事業）（溶接作業従事者 16 名、コントロール 16 名）

<質問票調査>

○基本情報・生活習慣

表 1 基本情報

	溶接作業従事者 (n=16)		コントロール (n=16)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
年齢 (歳)	35.3	11.7	35.1	11.8
BMI	23.9	3.7	25.4	11.8
溶接に従事した期間(年)	13.6	10.4	0.3	1.3

※コントロール群のうち 1 名は過去に 5 年間の溶接作業歴があった

表 2 生活習慣

	溶接作業従事者 (n=16)		コントロール (n=16)	
	n	%	n	%
たばこ				
吸わない	9	56.3	8	50.0
過去に吸っていた	4	25.0	3	18.8
現在吸っている	3	18.8	5	31.3
アルコール				
飲まない	5	31.3	8	50.0
過去飲んでいて	1	6.3	1	6.3
現在飲んでいる	10	62.5	7	43.8
野菜				
好き	6	37.5	4	25.0
どちらかといえば好き	4	25.0	9	56.3
あまり好きではない	6	37.5	3	18.8
好きではない	0	0.0	0	0.0

○自覚症状・既往歴

・溶接作業従事者：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり（4 名）、痰（4 名）、咳（2 名）、喘鳴（2 名）、神経系の自覚症状として手足のしびれ・ピリピリ感（4 名）、よだれが多い、よだれが出やすい（2 名）、運動もしていない、暑くもないのに汗をかくことがある（2 名）との回答があった。既往歴として花粉症（5 名）、眼内異物（3 名）、喘息（3 名）、肺炎（1 名）、角膜炎・結膜炎（1 名）であった。

・コントロール：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり（2 名）、痰（2 名）、咳（1 名）、息切れ（1 名）、神経系の自覚症状として筋肉がピクピクする（2 名）、手足や体が熱い感じ（2 名）、手足のしびれ・ピリピリ感（1 名）、運動もしていない、暑くもないのに汗をかくことがある（1 名）との回答があった。既往歴は花粉症（5 名）、角膜炎・結膜炎（3 名）、喘息（2 名）、慢性気管支炎（1 名）、肺炎（1 名）眼内異物（1 名）、翼状片（1 名）であった。

表 3 疲労の蓄積

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	20.6	16	6.3	33	13
溶接作業従事者	19.6	16	5.3	35	13
Total	20.1	32	5.8	35	13

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

<呼吸機能検査>

%肺活量(%FVC)

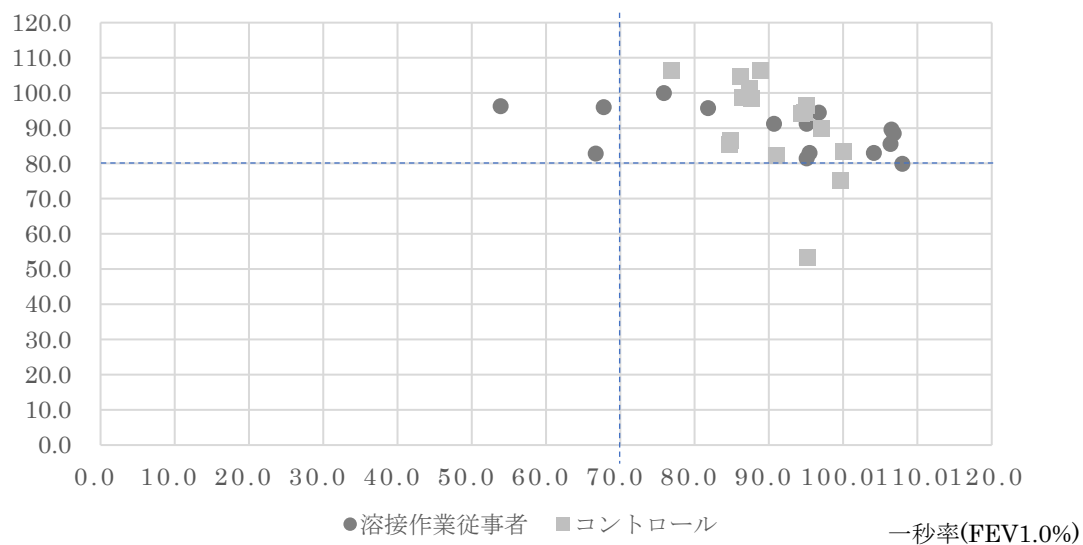


図 1 呼吸機能検査

<神経学的検査>

表 4 タッピング

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	134.8	16	24.3	170	73
溶接作業従事者	88.9	16	30.9	153	44
Total	111.8	32	35.9	170	44

平均値の比較：Mann-Whitney test ($p < 0.005$)

表 5 握力

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	43.0	16	5.4	51.6	31.7
溶接作業従事者	42.2	16	10.1	55.8	22.3
Total	42.6	32	7.9	55.8	22.3

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

表 6 WAIS

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	94.6	16	16.4	128	71
溶接作業従事者	83.6	16	10.6	103	67
Total	89.1	32	14.7	128	67

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間で有意差は認められなかった。

I <溶接ヒュームの濃度測定>

1) 作業環境測定 未測定

2) 個人サンプラーを用いた測定

H-1, H-2, H-5, H-6：第一工場 中央作業場（図1）

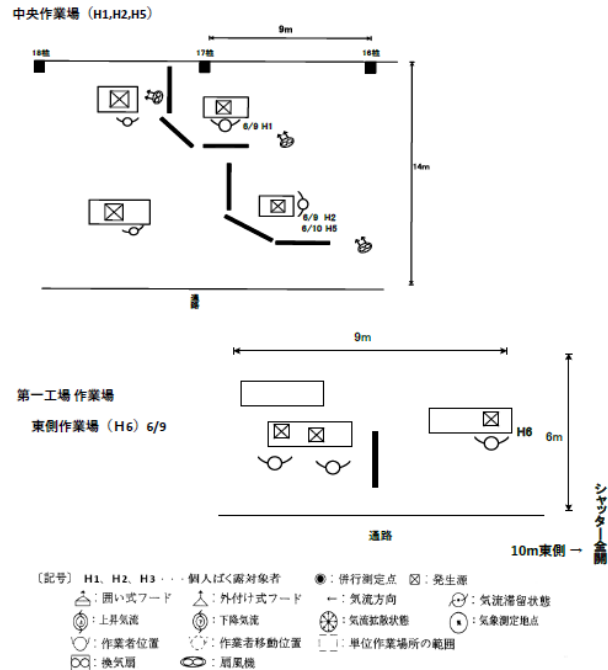


図1 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：建築用鉄鋼物の溶接作業
部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてガウジング作業、グラインダー作業、スパッタ除去
(上記、この作業を繰り返す)

・発生源：溶接作業、ガウジング作業、グラインダー作業、スパッタ除去位置である

・作業者数：7名

*呼吸用保護具着用 サカキ式 1005-R-RA-08型（RL2）（興研株式会社）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・扇風機：3台有

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓：一部開

・シャッター開

・気流の状況：シャッター、窓からわずかに外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたため、中央作業場付近では、ヒュームがやや立ち込めていた。

〔特記事項〕

・特に無し

表1 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H1	224	0.171
2	H2	238	0.833
3	H5	241	0.273
4	H6	262	0.273

表2 測定結果

マンガン濃度の最大の値（C）（mg/m ³ ）	1.25
要求防護係数（PFY）	24.9

H-3, H-4 : 50 t テント内の溶接作業場 (図 2)

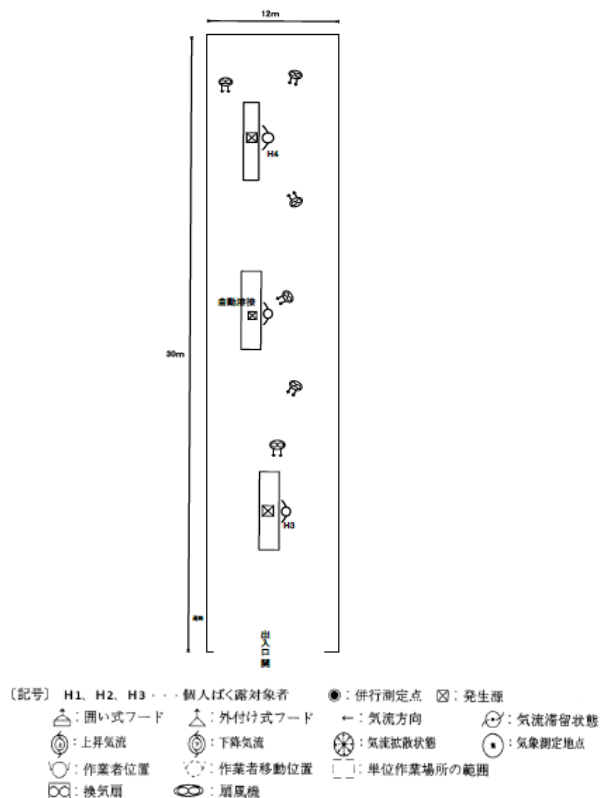


図 2 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：建築用鉄鋼物の仕上げ溶接作業
部材を準備する～位置決め～溶接作業開始～

必要に応じてガウジング、サンダー作業、クレーン作業。

（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：手動での溶接作業、ガウジング作業、サンダー作業位置である

・作業人数：2名

*呼吸用保護具着用 サカキ式 1005-R-RA-08型（RL2）（興研株式会社）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・送風機6台稼働

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓：無

・気流の状況：屋外にある大型テントの中での作業のため、気流が確認できた。

〔作業場所の周辺からの影響〕

・テント内では、至るところで溶接作業が行われていたが、出入り口は全開しており影響はなかった。

〔特記事項〕

・特に無し

表 3 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H3	250	0.096
2	H4	250	0.898

表 4 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.898
要求防護係数 (PFY)	18.0

H-7, H-8 : 第一工場 ロボット溶接作業場 (図 3)

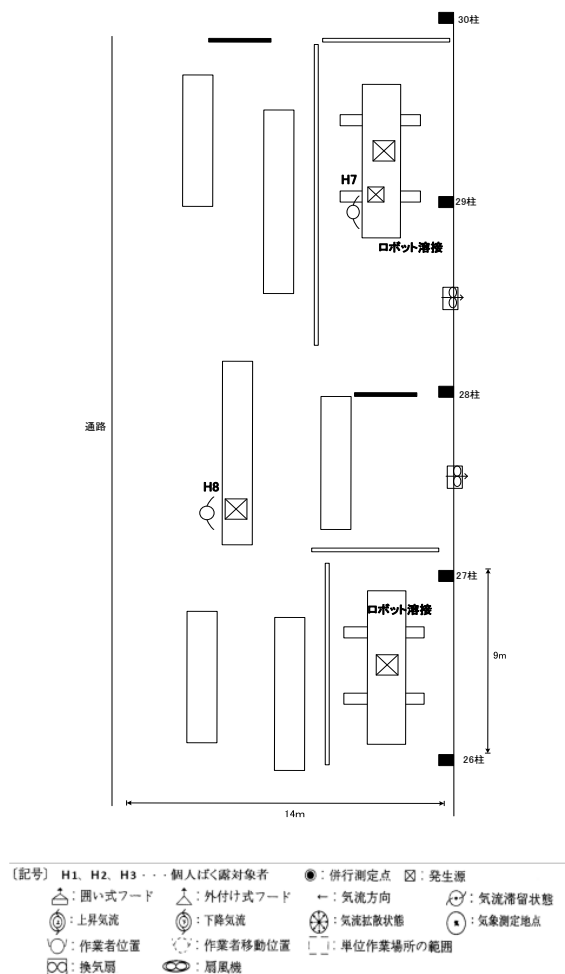


図3 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

・作業工程: 建築用鉄鋼物の仕上げ溶接作業

部材を準備する～位置決め～ロボット溶接作業開始～必要に応じて手動で溶接作業、ガウジング作業、グラインダー作業。

(上記、この作業を繰り返す)

・発生源: 手動での溶接作業、ガウジング作業、グラインダー作業位置である

・作業人数: 2 名

*呼吸用保護具着用 サカヰ式 1005R-08 型 (RL2) (興研株式会社)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置: 稼働

・局所排気装置等: 無

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓: 閉

・気流の状況: 窓、シャッターが開いていないため気流はなかった。

〔作業場所の周辺からの影響〕 ・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、各作業場が離れており影響はなかった。

〔特記事項〕

・特に無し

表 5 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H7	256	0.044
2	H8	261	0.349

表 6 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.349
要求防護係数 (P F Y)	7.0

H-9, H-10, H-11, H-12, H-13, H-14：第一工場 西作業場（図3）

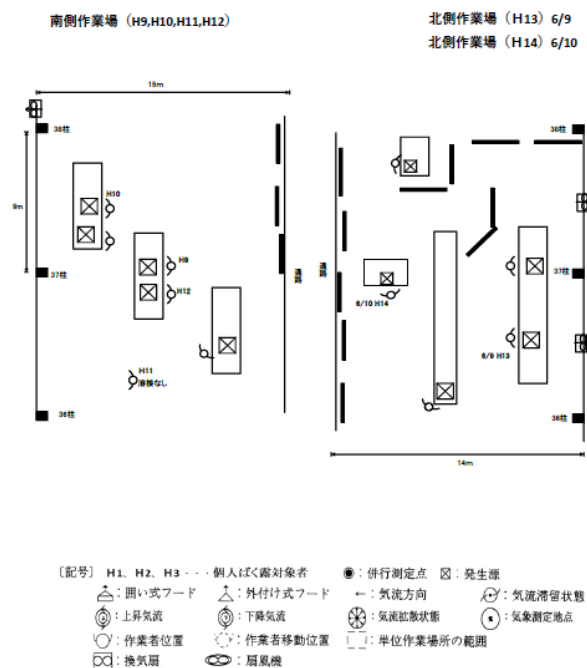


図3 デザイン

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：建築用鉄鋼物の仕上げ溶接作業部材を準備する～位置決め～溶接作業～必要に応じてガウジング作業、グラインダー作業、スパッタ除去（上記、この作業を繰り返す）

・発生源：溶接作業、ガウジング作業、グラインダー作業、スパッタ除去位置である

・作業者数：11名

*呼吸用保護具着用 サカキ式 1005-R-RA-08型（RL2）（興研株式会社）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・工場内全体換気装置：稼働

・局所排気装置等：無

・扇風機：無

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・窓：一部開

・シャッター開

・気流の状況：シャッター、窓からわずかに外気が流入していた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われており、作業場西エリアはヒュームがやや立ち込めていた。

〔特記事項〕

・なし

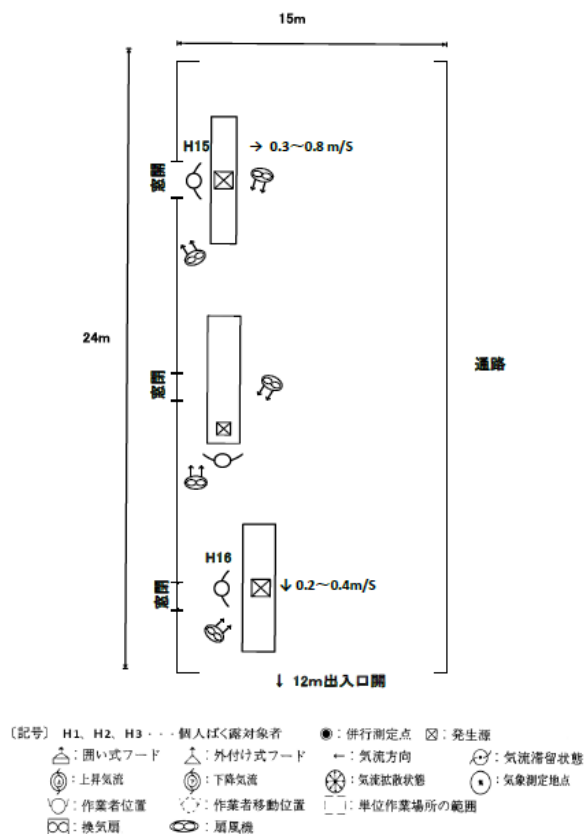
表7 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H9	241	0.627
2	H10	249	0.849
3	H11	227	0.024
4	H12	240	1.71
5	H13	263	0.643
6	H14	255	0.310

表8 測定結果

マンガン濃度の最大の値（C）（mg/m ³ ）	1.71
要求防護係数（PFY）	34.1

H-15, H-16：第二工場内の溶接作業場（図4）



〔作業工程と発生源及び労働者数〕

- ・作業工程：建築用鉄鋼物の溶接作業
部材を準備する～位置決め～溶接作業開始
～必要に応じてスパッタ除去作業。（上記、この作業を繰り返す）
- ・発生源：手動での溶接作業、スパッタ除去作業位置である
- ・作業者数：2名

*呼吸用保護具着用 サカキ式 1005-R-RA-08型（RL2）（興研株式会社）

〔設備、排気装置の稼働状況〕

- ・工場内全体換気装置：稼働
- ・局所排気装置等：無
- 〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕
- ・窓：無

・気流の状況：H15の作業場近くの窓は開いており気流が確認できた。

〔作業場所の周辺からの影響〕

・工場内では、至るところで溶接作業が行われていたが、全体換気装置が稼働しており影響は少なかった。また、出入口も開放されていたため影響は少なかった。

〔特記事項〕

- ・特に無し

表9 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間（分）	測定時間加重平均濃度 マンガンとして（mg/m ³ ）
1	H15	243	0.303
2	H16	282	1.22

表10 測定結果

マンガン濃度の最大の値（C）（mg/m ³ ）	1.22
要求防護係数（PFY）	24.4

表1 フィットテスト結果

動作	普通 の呼 吸	深呼吸	顔を左 右に振 る	顔を上 下に振 る	話 す	前 屈	普通の 呼吸	平均	PASS・ FAIL	マスク 新品・ 本人
H-1 1回目	1317	1265	748	615	364	69	1140	309	PASS	本人
H-1 2回目	2090	2127	3109	2706	6109	549	2761	1756	PASS	新品
H-2 1回目	135	165	334	302	648	160	157	206	PASS	本人
H-2 2回目	1018	1906	4002	18792	3604	2737	24346	2806	PASS	新品
H-3 1回目	680	599	1218	967	660	112	551	406	PASS	本人
H-3 2回目	15181	8645	3564	3946	6171	524	8685	2414	PASS	新品
H-4 1回目	1206	721	207	66	289	241	561	221	PASS	本人
H-4 2回目	2706	1618	132	124	760	197	2542	299	PASS	新品
H-5 1回目	6	67	223	262	898	35	46	31	FAIL	本人
H-5 2回目	365	250	696	2226	1635	854	868	606	PASS	新品
H-6 1回目	68	71	74	85	342	300	69	93	FAIL	本人
H-6 2回目	2842	2532	887	1928	3956	4254	3237	2195	PASS	新品
H-7 1回目	19	28	10	9	21	18	28	16	FAIL	本人
H-7 2回目	102	174	11	15	603	68	163	35	FAIL	新品
H-7 3回目	175	38	5	—	—	—	—	—	FAIL	新品
H-8 1回目	353	741	835	731	726	131	1969	430	PASS	本人
H-8 2回目	2263	4388	1412	1998	12978	545	3035	1699	PASS	新品
H-9 1回目	307	291	224	159	270	299	185	234	PASS	本人
H-9 2回目	2161	3275	2855	2600	23674	553	4938	1969	PASS	新品
H-10 1回目	245	235	224	309	1722	66	272	197	PASS	本人
H-10 2回目	16949	11055	1534	4529	10003	2053	17223	4208	PASS	新品
H-11 1回目	5545	2886	3181	2034	2314	1124	2843	2328	PASS	本人
H-11 2回目	47872	10420	5633	8385	2908	938	5257	3477	PASS	新品
H-12 1回目	936	568	1262	2546	2424	1037	685	1022	PASS	本人
H-12 2回目	4630	3228	5365	5850	5307	13782	23989	5903	PASS	新品
H-13 1回目	701	386	897	1344	585	434	287	523	PASS	本人
H-13 2回目	6995	993	17775	7075	979920	2930	15089	3985	PASS	新品
H-14 1回目	75	64	108	57	15	27	30	36	PASS	本人
H-14 2回目	234	262	289	227	174	202	206	222	PASS	新品
H-15 1回目	36	59	23	31	22	23	72	31	PASS	本人
H-15 2回目	664	896	157	30	830	331	1199	148	PASS	新品
H-16 1回目	39	36	133	61	19	52	56	42	FAIL	本人
H-16 2回目	2175	3854	1069	695	2718	552	939	1104	PASS	新品

表2 フィットテスト PASS・FAIL のみ

対象者	1 回目 本人	2 回目 新品	3回目 新品
H-1	PASS	PASS	
H-2	PASS	PASS	
H-3	PASS	PASS	
H-4	PASS	PASS	
H-5	FAIL	PASS	
H-6	FAIL	PASS	
H-7	FAIL	FAIL	FAIL
H-8	PASS	PASS	
H-9	PASS	PASS	
H-10	PASS	PASS	
H-11	PASS	PASS	
H-12	PASS	PASS	
H-13	PASS	PASS	
H-14	PASS	PASS	
H-15	PASS	PASS	
H-16	FAIL	PASS	
PASS 合計	12	15	

興研 サカキ式 005-R-RA-08 型 使用 1 例



事業所 J(自動車用ウレタンフォーム製造業) (溶接作業従事者 2 名、コントロール 20 名)

<質問票調査>

○基本情報・生活習慣

表 1 基本情報

	溶接作業従事者 (n=2)		コントロール (n=20)	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
年齢 (歳)	38.5	2.1	40.1	9.5
BMI	25.6	1.2	23.6	9.5
溶接に従事した期間(年)	6.5	7.8	0.2	0.7

※コントロール群のうち 1 名は過去に 3 年間の溶接作業歴があった

表 2 生活習慣

	溶接作業従事者 (n=2)		コントロール (n=20)	
	n	%	n	%
たばこ				
吸わない	1	50.0	4	20.0
過去に吸っていた	0	0.0	5	25.0
現在吸っている	1	50.0	11	55.0
アルコール				
飲まない	1	50.0	9	45.0
過去飲んでいて	0	0.0	1	5.0
現在飲んでいる	1	50.0	10	50.0
野菜				
好き	1	50.0	8	40.0
どちらかといえば好き	1	50.0	7	35.0
あまり好きではない	0	0.0	4	20.0
好きではない	0	0.0	1	5.0

○自覚症状・既往歴

・溶接作業従事者：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり (1 名) との回答があった。神経系の自覚症状の回答はなかった。既往歴は、喘息 (2 名) であった。

・コントロール：呼吸器系の自覚症状として鼻水・鼻づまり (1 名) との回答があった。神経系の自覚症状の回答はなかった。既往歴は花粉症 (8 名)、喘息 (3 名)、肺結核・肋膜炎 (1 名) であった。

表 3 疲労の蓄積

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	20.9	20	5.7	30	14
溶接作業従事者	21.0	2	9.9	28	14
Total	20.9	22	5.8	30	14

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

<呼吸機能検査>

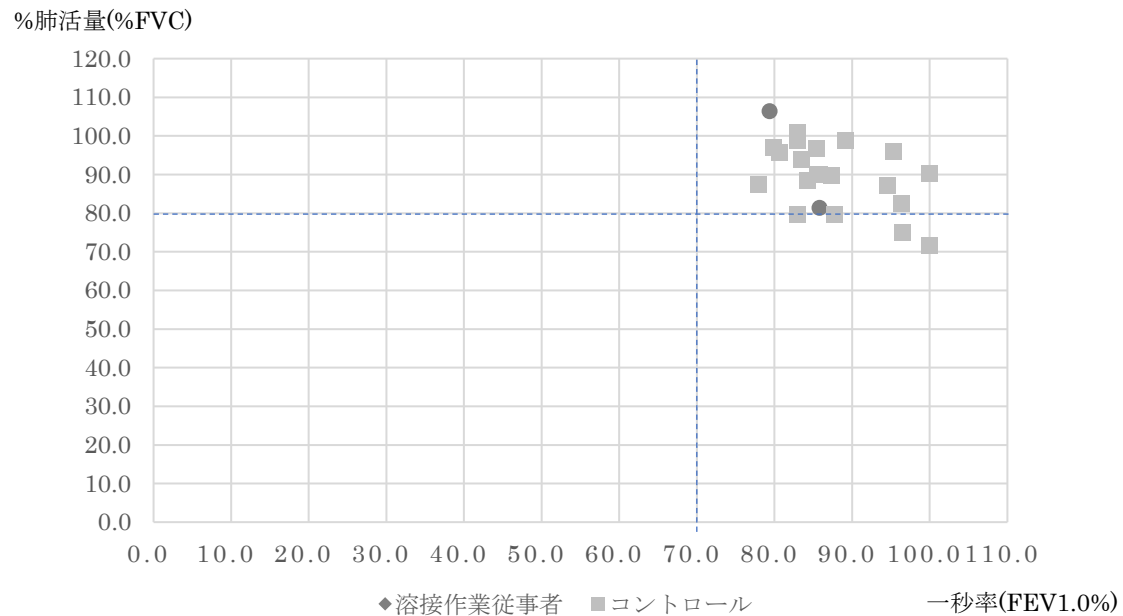


図 1 呼吸機能検査

<神経学的検査>

表 4 タッピング

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	119.7	20	27.9	167	50
溶接作業従事者	141.0	2	29.7	162	120
Total	121.6	22	28.0	167	50

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

表 5 握力

	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	40.8	20	5.9	49.0	31.3
溶接作業従事者	48.3	2	3.0	50.4	46.2
Total	41.5	22	6.0	50.4	31.3

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

表 6 WAIS

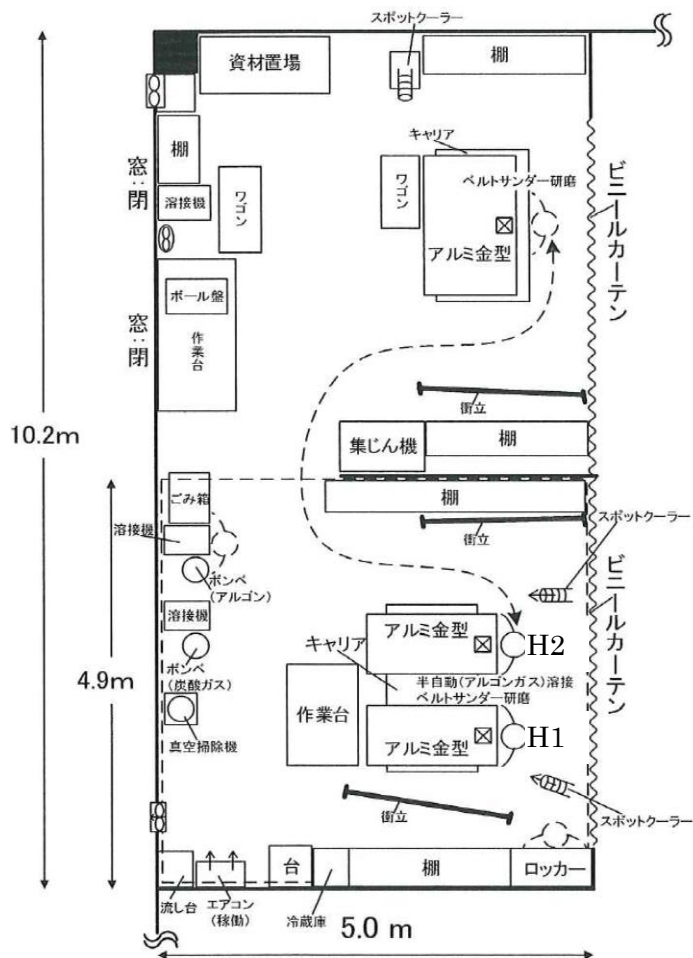
	平均値	n	標準偏差	最大値	最小値
コントロール	94.8	20	10.1	112	79
溶接作業従事者	98.5	2	14.8	109	88
Total	95.1	22	10.2	112	79

Mann-Whitney test では溶接作業従事者群とコントロール群の間に有意差は認められなかった。

J <溶接ヒュームの濃度測定>

1) 作業環境測定

メンテ室



[記号]
 ○: 作業員、☒: 溶接ヒューム発生源
 △: 囲い式フード、△: 外付け式フード、※: プッシュプル型換気装置
 ⊗: 扇風機 (矢印は稼働を示す)、⊗: 天井扇 (矢印は稼働を示す)、⊗: 換気扇 (矢印は稼働を示す)

図1 デザイン

* サンプル実施時に当該単位作業場所で行われていた作業、設備の稼働状況等及び測定値に影響を及ぼしたと考えられる事項の概要
 [作業工程と発生源及び作業員数]
 作業工程: キャリアにアルミ金型を置く→調整 (MIG 溶接、ベルトサンダーによる研磨等) →確認→搬出
 発生源: MIG 溶接作業及びベルトサンダーによる研磨作業。
 作業員: 2名 (使い捨て式防じんマスク着用)。
 [設備、排気装置の稼働状況]
 ・換気扇: 1 / 2 稼働。
 ・扇風機: 停止
 ・スポットクーラー: 稼働
 ・エアコン: 稼働
 [ドア、窓の開閉、気流の状況]
 ・窓: 閉。
 ・ビニールカーテン: 閉。
 ・気流の状況: スポットクーラーやエアコンが稼働していたため、一部の測定点ではその吹き出し気流の影響が見られた。
 [当該単位作業場所の周辺からの影響]
 特になし
 [各測定点に関する特記事項]
 特になし
 外気: 気温 29.85℃ 湿度 68% 晴 (10 時)

表1 A 測定データ

No	相対濃度 (cpm)	質量濃度 (mg/m ³)
1	416	0.832
2	354	0.708
3	1010	2.02
4	711	1.42
5	203	0.406

表 2 吸入性粉じん濃度測定 作業環境測定結果

幾何平均値		M1 = 0.93 mg/m ³	M2 = — mg/m ³	M = 0.93 mg/m ³
幾何標準偏差		σ 1 = 1.87	σ 2 = —	σ = 2.49
第 1 評価値		EA1 = 4.16 mg/m ³		
第 2 評価値		EA2 = 1.41 mg/m ³		
管理濃度		2.21mg/m ³		
評価	A 測定	区分 2		
	評価結果	第 2 管理区分		

2) 個人サンプラーを用いた測定

H-1, H-2 : メンテ室 (図 1)

〔作業工程と発生源及び労働者数〕

・作業工程 : キャリアにアルミ金型を置く→肉盛り・接合 (半自動溶接 (炭酸ガス・アルゴンガス)) →スパッタ除去・表面加工 (ベルトサンダー使用)

・発生源 : 各種アーク溶接作業

・作業者数 : 2 名

*呼吸用保護具着用 使い捨て式防じんマスク
9105J DS2 (3M 社製)

〔設備、排気装置の稼働状況〕

・壁換気扇 : 1 / 2 基稼働

・扇風機 : 停止 (午後は一部稼働)

・エアコン・スポットクーラー : 稼働

・半自動 (炭酸ガス) 溶接機 (1 基)、半自動

(アルゴンガス) 溶接機 (1 基) : 稼働

・TIG 溶接機 (1 基) : 停止

〔ドア、窓の開閉、気流の状況〕

・ビニールカーテン : 閉 (午後は一部開放)

・窓 : 閉

・気流の状況 : 一部のスポットクーラーを溶接作業位置に向けて稼働させていたため、溶接作業位置ではその吹き出し気流の影響が見られた

〔作業場所の周辺からの影響〕

・特になし

〔特記事項〕

・特になし

表 4 個人ばく露測定結果一覧

No.	氏名等	サンプリング時間 (分)	測定時間加重平均濃度 マンガンとして (mg/m ³)
1	H1	324	0.005 未満
3	H2	326	0.007

表 5 測定結果

マンガン濃度の最大の値 (C) (mg/m ³)	0.007
要求防護係数 (P F Y)	0.13

フィットテスト 3M 9105J-DS2(レギュラー)

表 1 フィットテスト結果

動作	普通の呼吸	深呼吸	顔を左右に振る	顔を上下に振る	話す	前屈	普通の呼吸	平均	PASS・FAIL	マスク 新品・本人
H-1 1回目	364	301	187	155	149	35	196	120	PASS	新品
H-2 1回目	3	4	7	10	10	6	7	6	FAIL	新品
H-2 2回目	46	—	—	—	—	—	—	—	—	新品

表 2 フィットテスト PASS・FAIL のみ

対象者	1 回目	2 回目
H-1	PASS	
H-2	FAIL	FAIL
PASS 合計	1	

3M 9105J-DS2(レギュラー)



2. 溶接作業従事者の健康影響に関する検討：

血中・尿中の金属濃度等の比較

研究分担者 郡山千早 鹿児島大学大学院医歯学総合研究科疫学・予防医学 教授

研究結果

溶接作業従事者の健康影響に関する検討：血中・尿中の金属濃度等の比較を 48 ページ以降に記す。

目的および測定対象の金属について

1. 溶接作業に伴うヒュームばく露によって、生体内の金属濃度に及ぼす影響を評価するために、ばく露群（溶接作業従事者）と同事業所に所属するコントロール群を対象として、5つの金属濃度（カドミウム、ニッケル、マンガン、クロム、および鉛）の測定を行った。

本研究で検討した血中・尿中の金属は以下の5つである。いずれも**週後半の午後**に採取した生体試料を用いた。

- 血液：カドミウム、ニッケル、マンガン、クロム、および鉛
- 尿：カドミウム、マンガン、クロム

基準値については、公表されている値を参考にした。

	カドミウム(Cd)	ニッケル(Ni)	マンガン(Mn)	クロム(Cr)	鉛(Pb)
血液	0.5 $\mu\text{g/dL}$ 以下	0.6 $\mu\text{g/dL}$ 以下	0.4~2.0 $\mu\text{g/dL}$	基準値なし	1.0 $\mu\text{g/dL}$ 以下
尿	3.8 $\mu\text{g/L}$ 以下	基準値なし	2.0 $\mu\text{g/L}$ 未満	基準値なし	基準値なし

2. 個人サンプラーを用いた測定結果を用い、溶接作業へのヒュームばく露状況の評価を行い、生体試料中の濃度との関連を解析した。

研究対象者

4つの事業所を対象とし、ばく露群44名（うち1名は女性）、コントロール群62名（うち1名は女性）について、生体試料中の金属濃度の測定を行った。対象者の属性を表1に示す。

2群間の基本的属性に大きな差はみられない。

表1 本調査の対象者の属性分布

		コントロール群 (n=62)	ヒュームばく露群 (n=44)	P 値
事業所	G	16 (26%)	16 (36%)	
	H	10 (16%)	10 (23%)	
	I	16 (26%)	16 (36%)	
	J	20 (32%)	2 (5%)	
性	男性	61 (98%)	43 (98%)	
年齢	中央値(範囲)	38 (20, 62)	39 (20, 62)	0.898*
BMI	中央値(範囲)	23.8 (19.3, 37.1)	23.9 (18.4, 32.3)	0.923*
	25 未満	39 (63%)	30 (68%)	0.560**
	25 以上	18 (29%)	9 (20%)	
	30 以上	5 (8%)	5 (11%)	
溶接経験	なし	54 (87%)	0	<0.001**
	あり	8 (13%)	44	
溶接経験年数	中央値 (範囲)	0 (0, 41)	13 (1, 45)	<0.001*
	10 年未満	26 (93%)	15 (34%)	<0.001
	10 年以上	0 (0%)	15 (34%)	
	20 年以上	2 (7%)	14 (32%)	
喫煙習慣	なし	33 (57%)	17 (40%)	0.149**
	禁煙	8 (14%)	12 (29%)	
	現在、喫煙	17 (29%)	13 (31%)	
受動喫煙#	ほとんどなし	24 (53%)	17 (55%)	0.094**
	週 1-3 日	7 (16%)	7 (22%)	
	週 4 - 6 日	2 (4%)	5 (16%)	
	毎日	12 (27%)	2 (6%)	
飲酒習慣	飲まない	27 (44%)	16 (36%)	0.690**
	以前、飲んでいて	7 (11%)	4 (9%)	
	現在も飲んでいる	27 (44%)	24 (55%)	

*Mann-Whitney U test

**Fisher's exact test

***周囲で溶接作業をしている職場環境にある者 1 名を含む

#現在、喫煙者を除く

生体試料中の金属濃度の分布

ヒュームばく露群とコントロール群において、血液・尿中の各金属濃度の分布を比較した（表 2）。カテゴリーのカットオフ値には、検出限界値および公表されている基準値（前述）をそれぞれ用いた。

ばく露群において、血中 Cd および尿中 Mn 濃度が高い者が分布していた。また統計的有意差はないものの、血中 Mn においてもばく露群で値が高い傾向が認められた。

表 2 ばく露群とコントロール群の比較：試料中の金属濃度分布（基準値/限界値別）

金属	試料	カテゴリー	人数 (%)		P 値*
			コントロール群	ヒュームばく露群	
Cd	血液 ($\mu\text{g/dL}$)	限界値 (0.1) 以下	43 (69%)	28 (64%)	0.012
		基準値 (0.5) 以下	7 (11%)	0	
		>基準値 (0.5)	12 (19%)	16 (36%)	
	尿 ($\mu\text{g/L}$)	限界値 (0.4) 以下	46 (74%)	30 (68%)	0.519
		基準値 (3.8) 以下	16 (26%)	14 (32%)	
		>基準値 (3.8)	0	0	
Ni	血液 ($\mu\text{g/dL}$)	限界値 (0.1) 以下	35 (56%)	27 (61%)	0.691
		基準値 (0.6) 以下	27 (44%)	17 (39%)	
		>基準値 (0.6)	0	0	
Mn	血液 ($\mu\text{g/dL}$)	基準値 (0.4) 未満	1 (2%)	0	0.170
		基準値 (0.4~2.0)	61 (98%)	42 (95%)	
		>基準値 (2.0)	0	2 (5%)	
	尿 ($\mu\text{g/L}$)	限界値 (1.0) 未満	62 (100%)	32 (73%)	< 0.001
		基準値 (2.0) 未満	0	8 (18%)	
		$\geq$ 基準値 (2.0)	0	4 (9%)	
Cr	血液 ($\mu\text{g/dL}$)	限界値 (0.02) 以下	62 (100%)	43 (98%)	0.415
		>限界値 (0.02)	0	1 (2%)	
	尿 ($\mu\text{g/L}$)	限界値 (0.2) 以下	2 (3%)	1 (2%)	1.00
		>限界値 (0.2)	60 (97%)	43 (98%)	
Pb	血液 ($\mu\text{g/dL}$)	限界値 (0.1) 以下	7 (11%)	2 (5%)	0.344
		基準値 (1.0) 以下	16 (26%)	16 (36%)	
		>基準値 (1.0)	39 (63%)	26 (59%)	

*Fisher's exact test

血液中の金属濃度の比較

血液中の各金属濃度（測定値）を用いて、ヒュームばく露群とコントロール群の比較を行った（表 3）。なお、検出限界値以下を示した者については、各限界値の 10 分の 1 の値を用いた上で比較している。

ヒュームばく露群で、血中 Mn および Pb 濃度が有意に高かった。

なお、ヒュームばく露群を防護具のフィットテスト不合格者に限定すると、クロムを除くいずれの金属濃度において群間の差が大きくなる傾向が認められた。

表 3-1 ばく露群とコントロール群の比較：血液中の金属濃度分布（連続量*）

	コントロール群		ヒュームばく露群		P 値**
	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$	
Cd	62	0.01 (0.01, 0.2)	44	0.01 (0.01, 0.3)	0.542
Ni	62	0.01 (0.01, 0.3)	44	0.01 (0.01, 0.3)	0.747
Mn	62	1.0 (0.3, 1.7)	44	1.1 (0.7, 2.5)	0.003
Cr	62	0.002 (0.002, 0.002)	44	0.002 (0.002, 0.03)	0.830
Pb	62	1.3 (0.1, 2.5)	44	1.7 (0.1, 3.7)	<0.001

*各金属濃度の検出限界値以下を示した者については、限界値の 10 分の 1 の値に置き換えて算出した。

**Mann-Whitney U test, exact P values

表 3-2 フィットテスト不合格のばく露群とコントロール群の比較：血液中の金属濃度分布（連続量*）

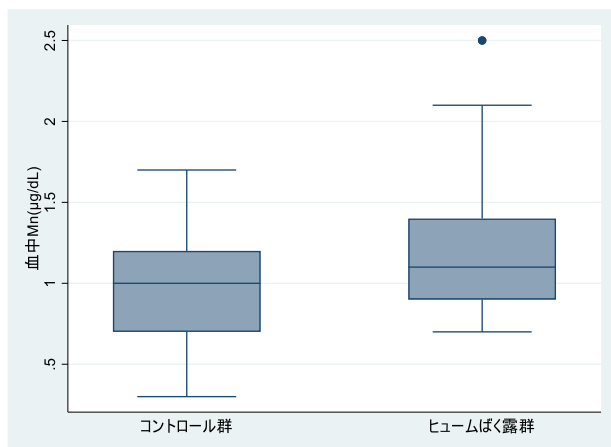
	コントロール群		ヒュームばく露群		P 値**
	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$	
Cd	62	0.01 (0.01, 0.2)	15	0.01 (0.01, 0.3)	0.102
Ni	62	0.01 (0.01, 0.3)	15	0.2 (0.01, 0.3)	0.376
Mn	62	1.0 (0.3, 1.7)	15	1.4 (0.9, 1.9)	<0.001
Cr	62	0.002 (0.002, 0.002)	15	0.002 (0.002, 0.002)	1.00
Pb	62	1.3 (0.1, 2.5)	15	1.9 (0.1, 2.1)	0.008

*各金属濃度の検出限界値以下を示した者については、限界値の 10 分の 1 の値に置き換えて算出した。

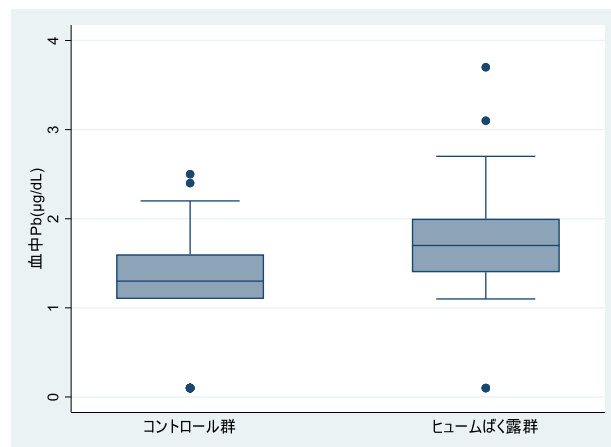
**Mann-Whitney U test, exact P values

全対象者

血中マンガン濃度

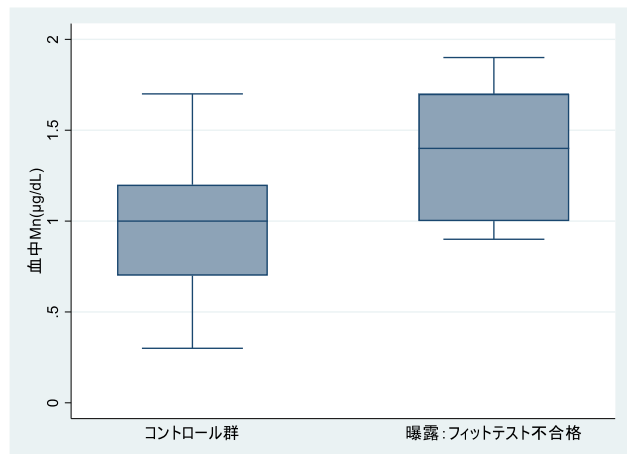


血中鉛濃度

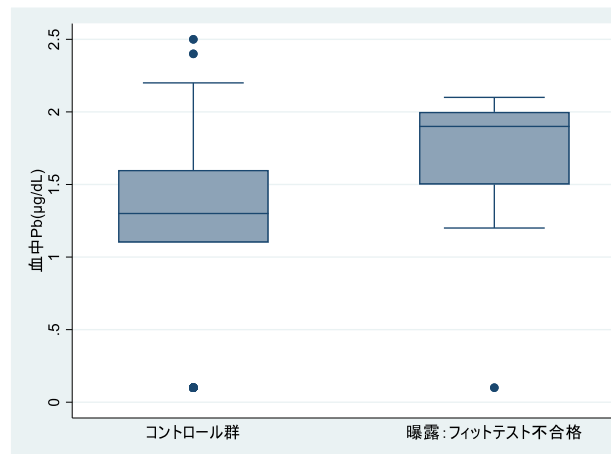


ヒュームばく露群は、防護具のフィットテスト不合格者に限定

血中マンガン濃度



血中鉛濃度



尿中の金属濃度の比較

尿中の各金属濃度（測定値）を用いて、ヒュームばく露群とコントロール群の比較を行った（表 4）。なお、検出限界値以下を示した者については、各限界値の 10 分の 1 の値を用いた上で比較している。

ヒュームばく露群で、尿中 Mn と Cr の値が有意に高かった。

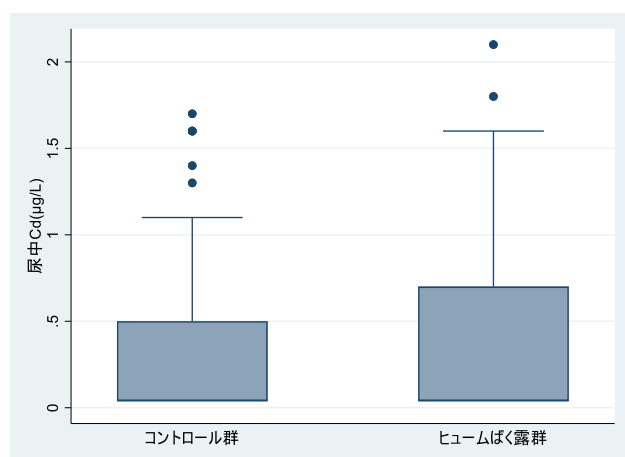
表 4 ばく露群とコントロール群の比較：尿中の金属濃度分布（連続量*）

	コントロール群		ヒュームばく露群		P 値
	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/L}$	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/L}$	
Cd	62	0.04 (0.04, 1.7)	44	0.04 (0.04, 2.1)	0.417
Mn	62	0.1 (0.1, 0.1)	44	0.1 (0.1, 3.5)	<0.001
Cr	62	0.4 (0.02, 1)	44	0.5 (0.02, 2.7)	0.040

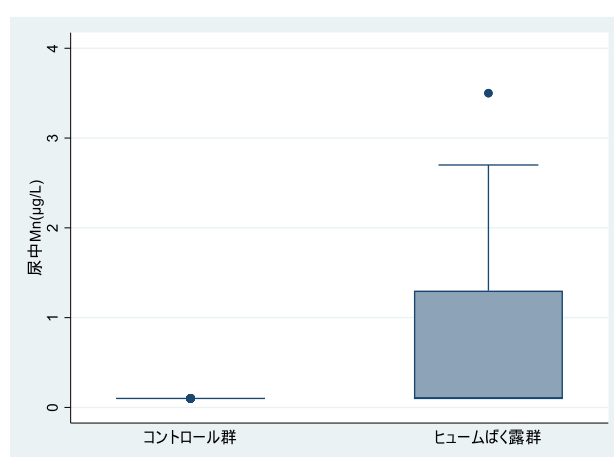
*各金属濃度の検出限界値以下を示した者については、限界値の 10 分の 1 の値に置き換えて算出した。

**Mann-Whitney U test

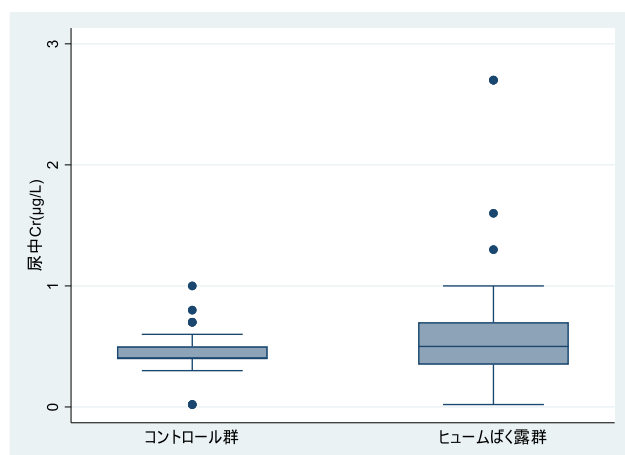
尿中カドミウム濃度



尿中マンガン濃度



尿中クロム濃度



溶接年数との関連（ヒュームばく露群のみ）

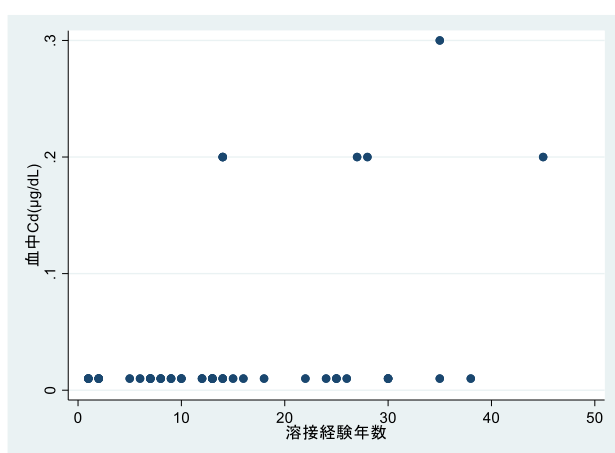
血中金属濃度

ばく露群のみを対象として、溶接作業経験年数と金属濃度との関連を検討したが、血中の金属濃度では顕著な関連は認められなかった。図にはカドミウムとマンガン血中濃度との関連のみを示す(Spearman相関係数)。

血中カドミウム濃度

溶接年数と血中カドミウム濃度との関連は、防護具のフィットテスト不合格者において正の相関がみられた。

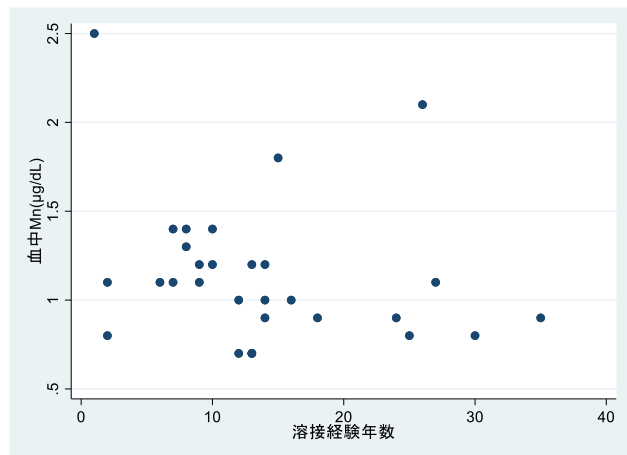
全員($\rho=0.393$)



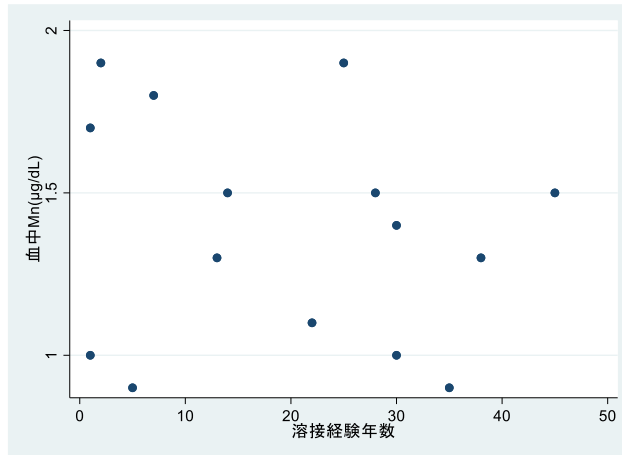
血中マンガン濃度

一方、血中マンガン濃度は、全体において負の相関傾向を示しており、防護具のフィットテスト合格者において、特にその相関が強かった。

フィットテスト PASS($\rho=-0.329$)



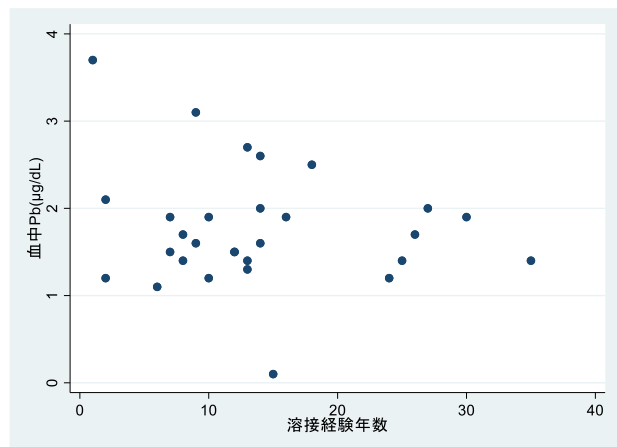
フィットテスト FAIL ($\rho=-0.180$)



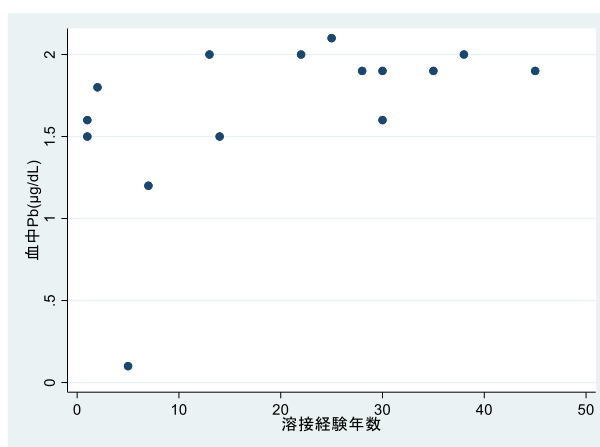
血中鉛濃度

血中鉛濃度は、防護具のフィットテスト合格者では負の相関傾向を示し、不合格者においては、正の相関を示した。

フィットテスト PASS($\rho=-0.018$)



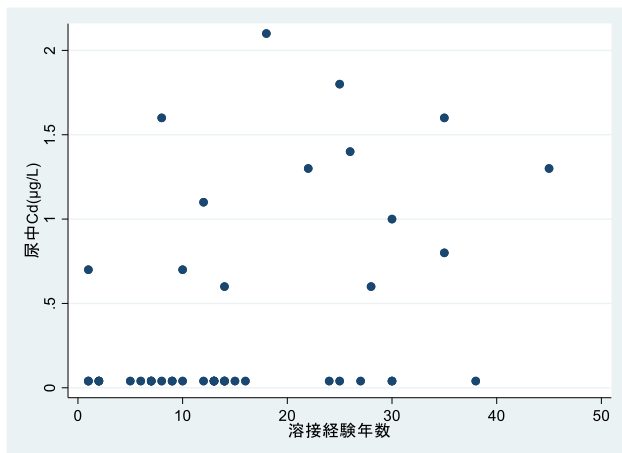
フィットテスト FAIL ($\rho=0.528$)



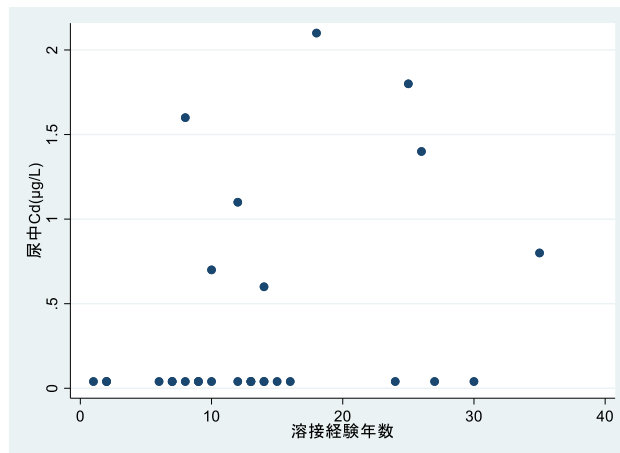
尿中金属濃度

ばく露群のみを対象として、溶接作業経験年数と尿中の金属濃度の相関を検討した。カドミウム濃度と正の相関傾向を認め(Spearman 相関係数)、防護具のフィットテスト不合格者において、その傾向は強かった。

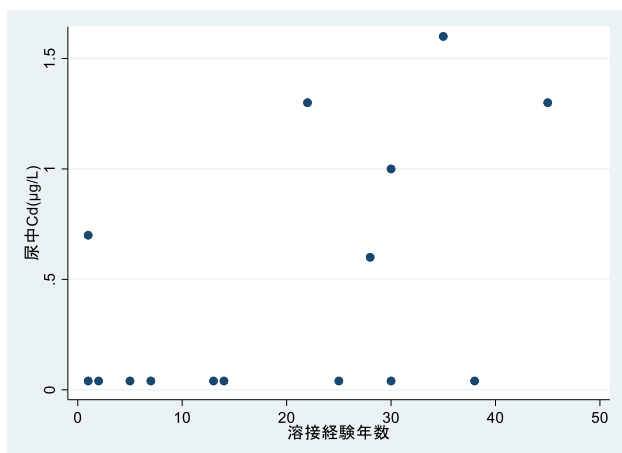
尿中カドミウム: 全員($\rho=0.371$)



尿中カドミウム:フィットテスト PASS ($\rho=0.327$)

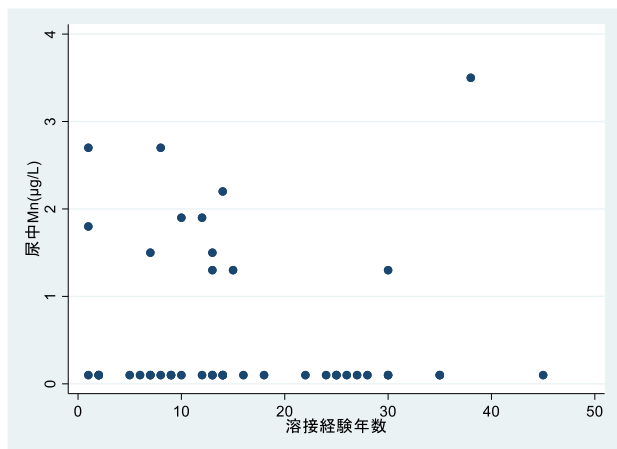


尿中カドミウム:フィットテスト FAIL ($\rho=0.424$)

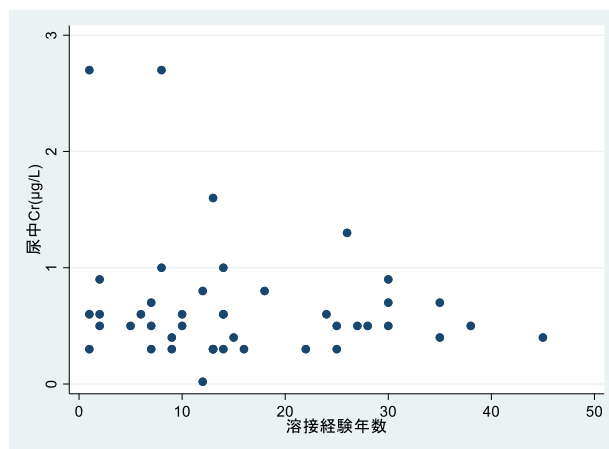


溶接作業経験年数と尿中のマンガンおよびクロム濃度間に関連はみられなかった。

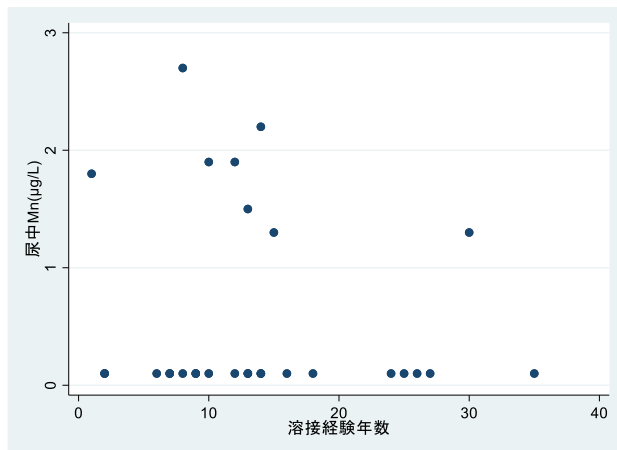
尿中マンガン: 全員($\rho=-0.131$)



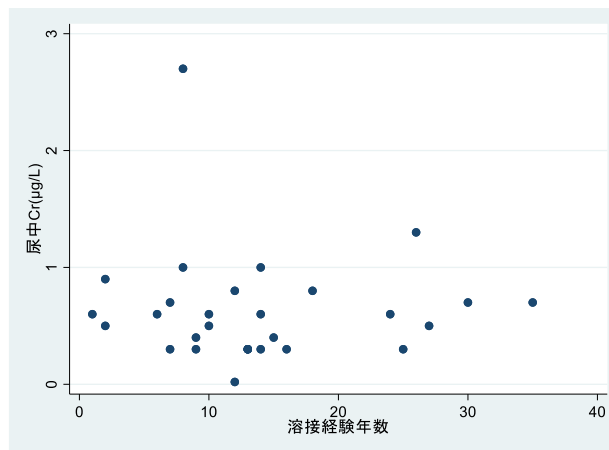
尿中クロム: 全員($\rho=-0.084$)



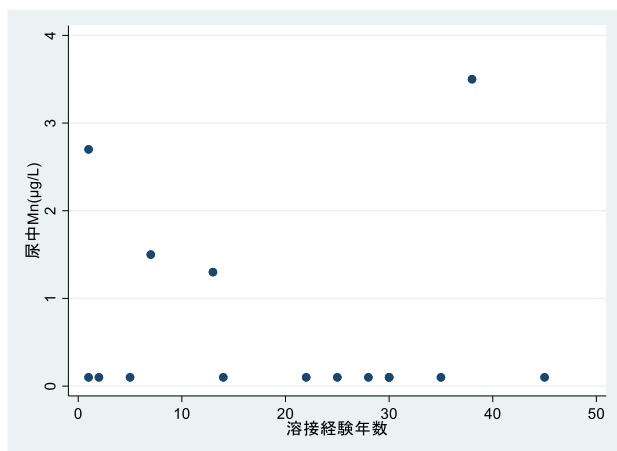
尿中マンガン: フィットテスト PASS ($\rho=-0.068$)



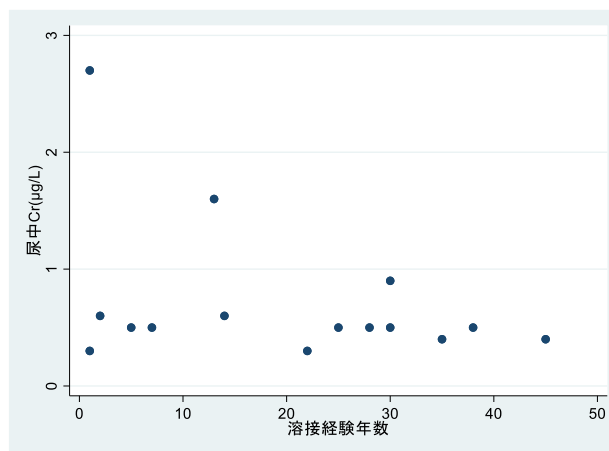
尿中クロム: フィットテスト PASS ($\rho=-0.028$)



尿中マンガン: フィットテスト FAIL ($\rho=-0.1423$)



尿中クロム: フィットテスト FAIL ($\rho=-0.280$)



フィットテスト結果と金属濃度（ヒュームばく露群のみ）

ばく露群のみを対象として、フィットテスト合格者と不合格者の群間で金属濃度を比較検討した。

表 5 事業者別にみたフィットテストの結果

溶接作業者の 66%がフィットテストの結果は合格であり、事業所間の顕著な差は認めなかった。

	FAIL 群	PASS 群	P 値*
G	6 (38%)	10 (63%)	0.795
H	4 (40%)	6 (60%)	
I	4 (25%)	12 (75%)	
J	1 (50%)	1 (50%)	
全体	15 (34%)	29 (66%)	

*Fisher's exact test

表 6 フィットテスト結果による比較：血液中の金属濃度分布（連続量*）

フィットテスト不合格者において血中 Mn 濃度が有意に高い結果を示した。また Ni 濃度も高い傾向を示したが統計学的有意差はなかった。その他の金属濃度については、顕著な差はみられなかった。

	FAIL 群		PASS 露群		P 値**
	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$	
Cd	15	0.01 (0.01, 0.3)	29	0.01 (0.01, 0.2)	0.131
Ni	15	0.2 (0.01, 0.3)	29	0.01 (0.01, 0.2)	0.117
Mn	15	1.4 (0.9, 1.9)	29	1.1 (0.7, 2.5)	0.023
Cr	15	0.002 (0.002, 0.002)	29	0.002 (0.002, 0.03)	1.00
Pb	15	1.9 (0.1, 2.1)	29	1.6 (0.1, 3.7)	0.627

*各金属濃度の検出限界値以下を示した者については、限界値の 10 分の 1 の値に置き換えて算出した。

**Mann-Whitney U test, exact P values

表 7 フィットテスト結果による比較：尿中の金属濃度分布（連続量*）

フィットテスト結果による尿中金属濃度の差はみられなかった。

	FAIL 群		PASS 露群		P 値**
	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/L}$	人数	中央値（範囲） $\mu\text{g/L}$	
Cd	15	0.04 (0.04, 1.6)	29	0.04 (0.04, 2.1)	0.534
Mn	15	0.1 (0.1, 3.5)	29	0.1 (0.1, 2.7)	0.947
Cr	15	0.5 (0.3, 2.7)	29	0.6 (0.02, 2.7)	0.975

*各金属濃度の検出限界値以下を示した者については、限界値の 10 分の 1 の値に置き換えて算出した。

**Mann-Whitney U test, exact P values

事業所間の金属濃度の比較（ヒュームばく露群のみ）

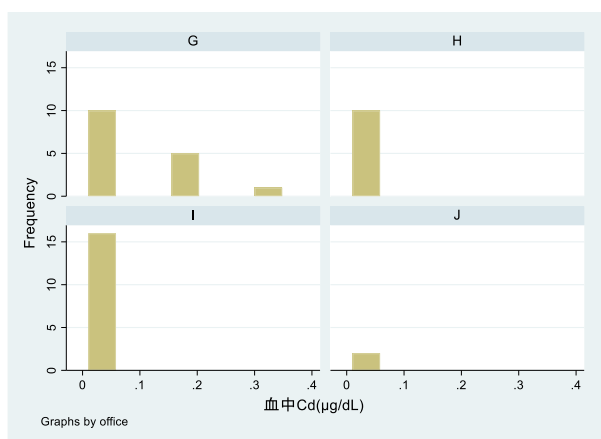
ばく露群の血中金属濃度は、カドミウムやニッケルにおいて事業所間にバラつきがみられ、カドミウム以外は、事業所 H が高い値を示した。

表 8 血中金属濃度の比較（事業所別）

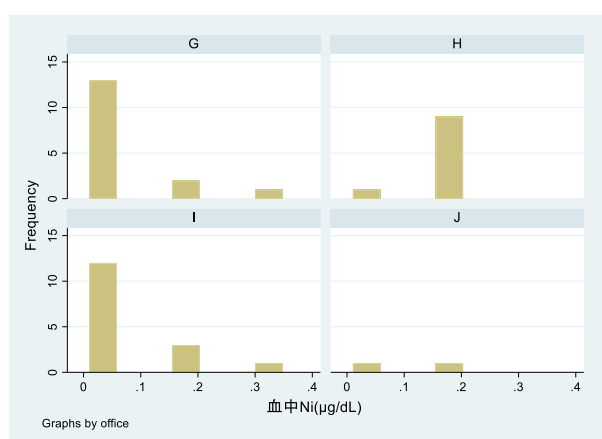
	中央値（範囲） $\mu\text{g/dL}$				
	G (n=16)	H (n=10)	I (n=16)	J (n=2)	P 値*
Cd	0.01 (0.01, 0.3)	0.01 (0.01, 0.01)	0.01 (0.01, 0.01)	0.01 (0.01, 0.01)	0.008
Ni	0.01 (0.01, 0.3)	0.2 (0.01, 0.2)	0.01 (0.01, 0.3)	0.105 (0.01, 0.2)	0.007
Mn	1.05 (0.8, 1.8)	1.3 (0.8, 1.9)	1.2 (0.7, 2.5)	0.85 (0.7, 1.0)	0.165
Cr	0.002 (0.002, 0.03)	0.002 (0.002, 0.002)	0.002 (0.002, 0.002)	0.002 (0.002, 0.002)	0.626
Pb	1.55 (1.1, 2.0)	1.9 (1.4, 2.7)	1.8 (0.1, 3.7)	1.55 (1.5, 1.6)	0.244

*Kruskal-Wallis test

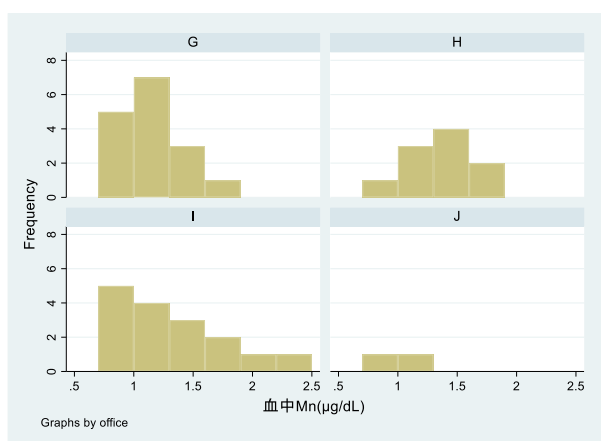
血中カドミウム



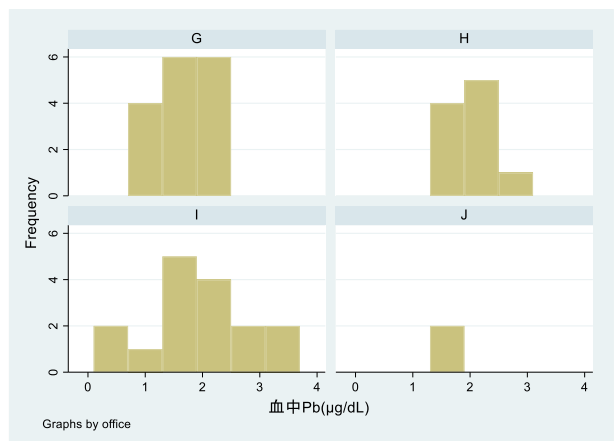
血中ニッケル



血中マンガン



血中鉛



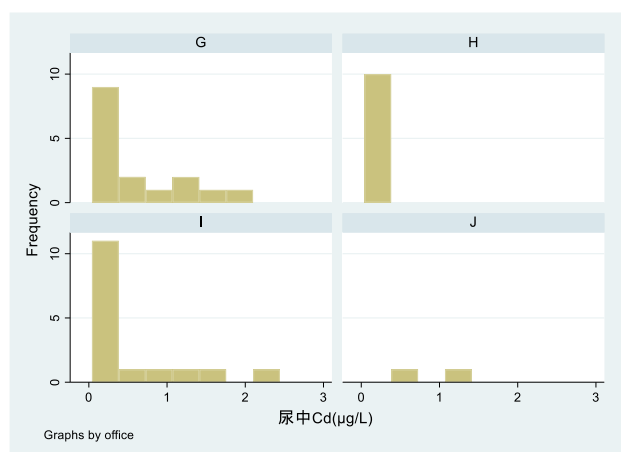
尿中の金属濃度を事業者間で比較したところ、事業所 H は、他の事業所と比べて Cd 濃度が低いのに対し、Cr 濃度が高い傾向にある。

表 9 尿中金属濃度の比較（事業所別）

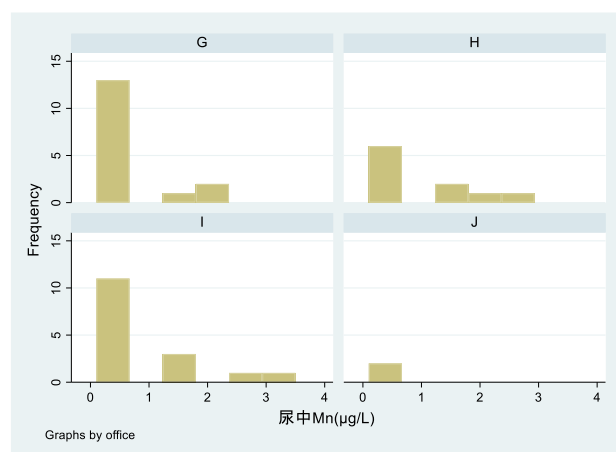
	中央値（範囲） $\mu\text{g/L}$				P 値*
	G (n=16)	H (n=10)	I (n=16)	J (n=2)	
Cd	1.1 (0.04, 1.8)	1.05 (0.04, 0.04)	1.5 (0.04, 2.1)	0.04 (0.7, 1.1)	0.044
Mn	0.1 (0.1, 2.2)	0.1 (0.1, 2.7)	0.1 (0.1, 3.5)	0.1 (0.1, 0.1)	0.584
Cr	0.5 (0.02, 0.7)	0.7 (0.3, 2.7)	1 (0.3, 1.3)	0.6 (0.8, 2.7)	0.031

*Kruskal-Wallis test

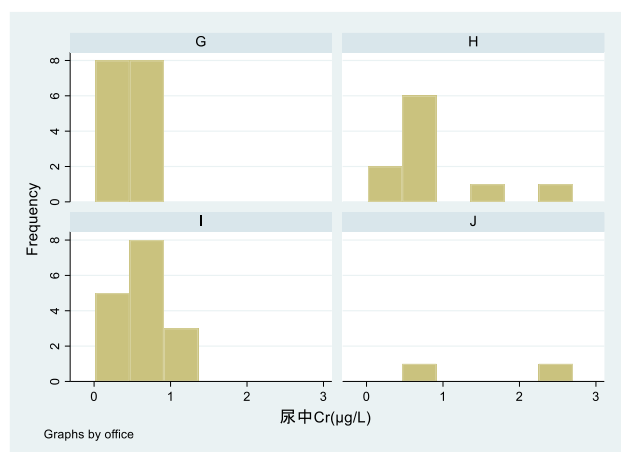
尿中カドミウム



尿中マンガン



尿中クロム



事業所間の吸入性濃度の比較（個人サンプラー：ヒュームばく露群のみ）

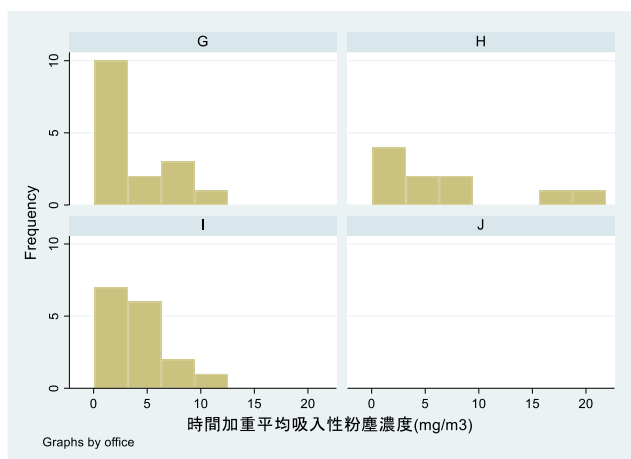
個人サンプラーによる吸入性粉塵濃度、Mn 濃度ともに、事業所 H において高い傾向が認められた。

表 10 時間加重平均吸入性粉塵/Mn 濃度の比較（事業所別）

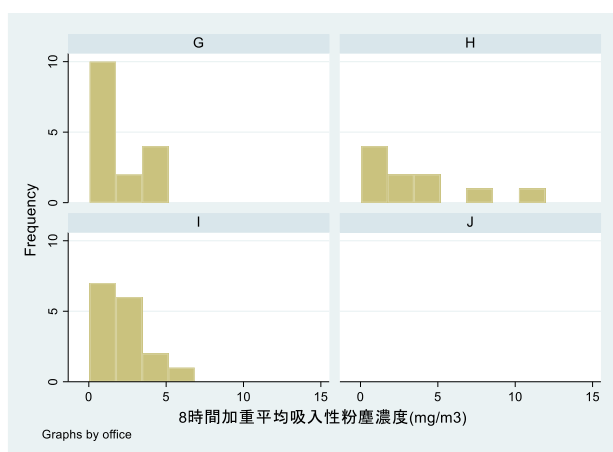
	中央値（範囲） mg/m ³				
	G (n=16)	H (n=10)	I (n=16)	J (n=2)	P 値*
粉塵	2.25 (0.09, 10.5)	4.36 (1.92, 18.8)	4.54 (0.32, 9.74)	-	0.231
8 時間 粉塵	1.20 (0.06, 5.00)	2.60 (1.11, 10.2)	2.15 (0.15, 5.52)	-	0.138
Mn	0.27 (0.001, 1.51)	0.60 (0.20, 2.82)	0.49 (0.02, 1.71)	0.004 (0.001, 0.007)	0.026
8 時間 Mn	0.14 (0.0005, 0.69)	0.35 (0.10, 1.54)	0.22 (0.01, 0.85)	0.001 (0.001, 0.001)	0.025

*Kruskal-Wallis test

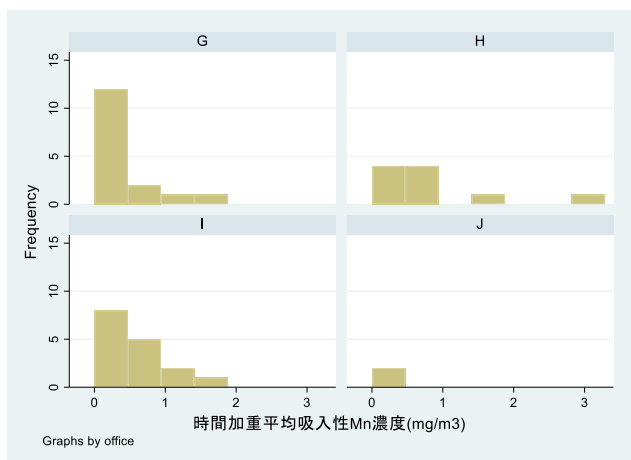
時間加重平均吸入性粉塵



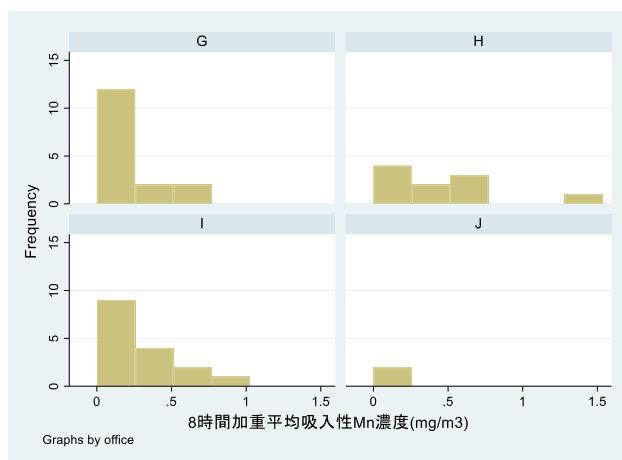
8 時間加重平均吸入性粉塵



時間加重平均吸入性 Mn 濃度



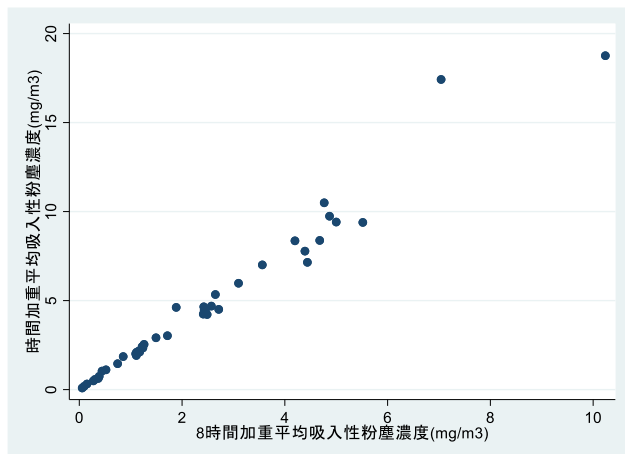
8 時間加重平均吸入性 Mn 濃度



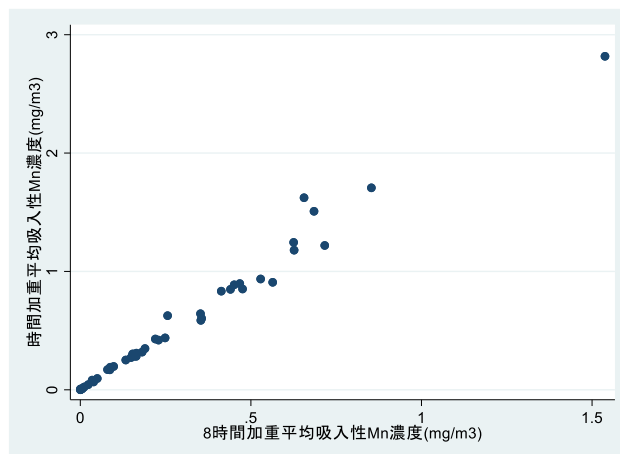
個人サンプラーによる測定結果

時間加重平均と 8 時間加重平均値との相関

吸入性粉塵濃度 ($\rho=0.9903$)



吸入性 Mn 濃度 ($\rho=0.9951$)



血中 Cd, Ni, Cr および尿中 Cr は、検出限界値以下の者が多かったため、以降の解析には含めていない。個人サンプラーによる吸入性粉塵および Mn 濃度のいずれとも、血中・尿中金属濃度との間にほとんど相関はなかった。

表 11 個人サンプラーによる吸入性粉塵・Mn 濃度と金属濃度との相関

	Spearman 相関係数			
	血中 Mn	血中 Pb	尿中 Cd	尿中 Cr
粉塵濃度	0.070	0.015	0.013	0.228
粉塵濃度 (8hrs)	0.078	0.0008	0.005	0.216
吸入性 Mn 濃度	0.185	0.079	-0.124	0.148
吸入性 Mn 濃度 (8hrs)	0.161	0.084	-0.119	0.141

喫煙習慣と血液中の金属濃度（コントロール群のみ）

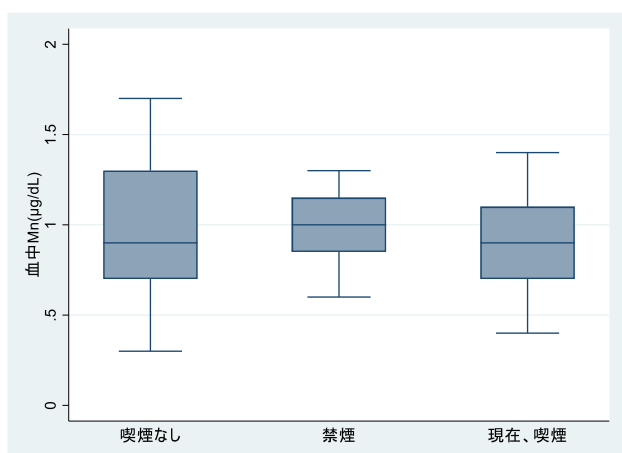
いずれの金属においても、喫煙習慣によって顕著な差はみられなかったが、鉛の濃度が喫煙経験者で高い傾向であった。

表 12 血中金属濃度の分布（喫煙習慣別）

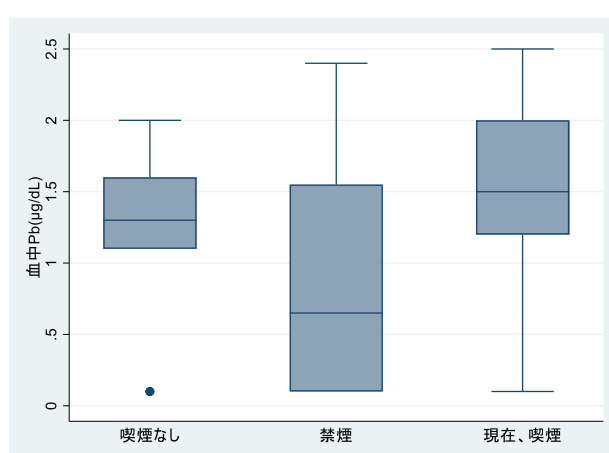
	中央値（範囲）			
	喫煙なし(n=33)	禁煙した(n=8)	現在、喫煙(n=17)	P 値*
Cd	0.01 (0.01, 0.2)	0.01 (0.01, 0.01)	0.01 (0.01, 0.2)	0.521
Ni	0.01 (0.01, 0.3)	0.01 (0.01, 0.2)	0.01 (0.01, 0.2)	0.172
Mn	0.9 (0.3, 1.7)	1.0 (0.6, 1.3)	0.9 (0.4, 1.4)	0.520
Cr	0.002 (0.002, 0.002)	0.002 (0.002, 0.002)	0.002 (0.002, 0.002)	1.00
Pb	1.3 (0.1, 2.0)	0.65 (0.1, 2.4)	1.5 (0.1, 2.5)	0.124

*Kruskal-Wallis test

血中マンガン（喫煙習慣別）



血中鉛（喫煙習慣別）



喫煙習慣と尿中の金属濃度（コントロール群のみ）

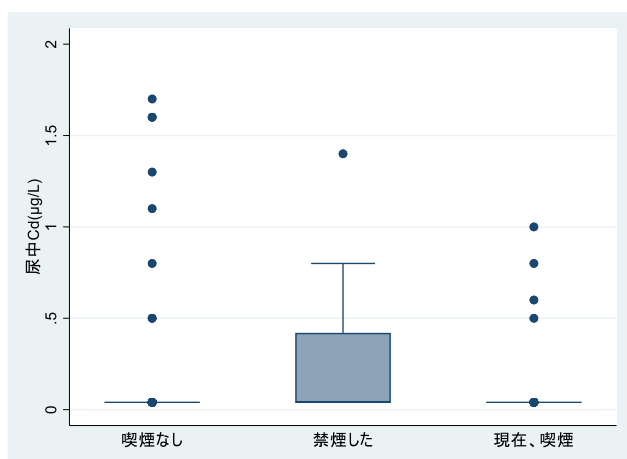
いずれの金属においても、喫煙習慣によって顕著な差はみられなかった。

表 13 尿中金属濃度の分布（喫煙習慣別）

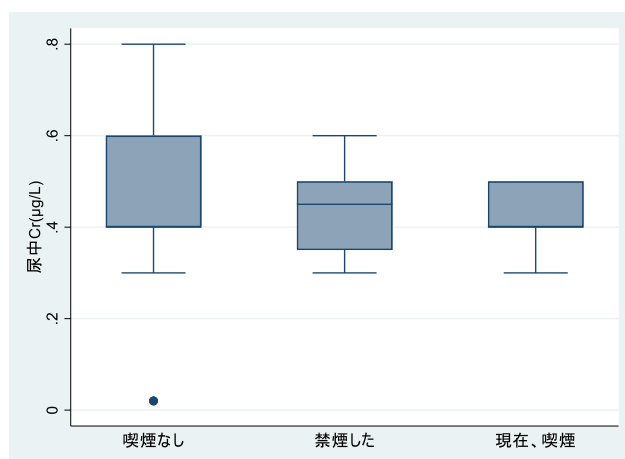
	中央値（範囲）			
	喫煙なし(n=33)	禁煙した(n=8)	現在、喫煙(n=17)	P 値*
Cd	0.04 (0.04, 1.7)	0.04 (0.04, 1.4)	0.04 (0.04, 1.0)	0.956
Cr	0.4 (0.2, 0.8)	0.45 (0.3, 0.6)	0.4 (0.3, 0.5)	0.417

*Kruskal-Wallis test

尿中カドミウム（喫煙習慣別）



血中クロム（喫煙習慣別）



飲酒習慣と血液中の金属濃度（コントロール群のみ）

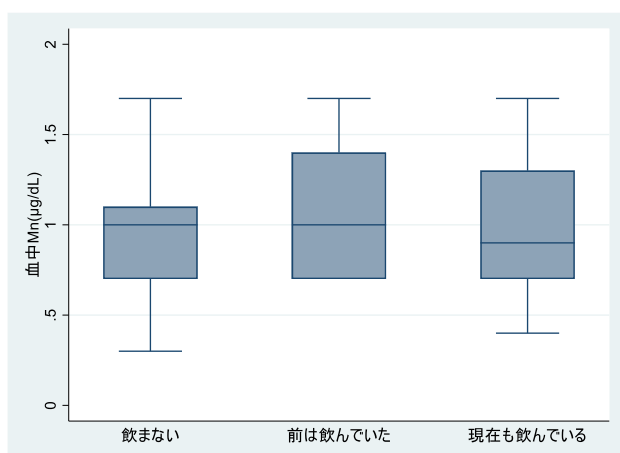
いずれの金属においても、飲酒習慣によって顕著な差はみられなかった。

表 14 血中金属濃度の分布（飲酒習慣別）

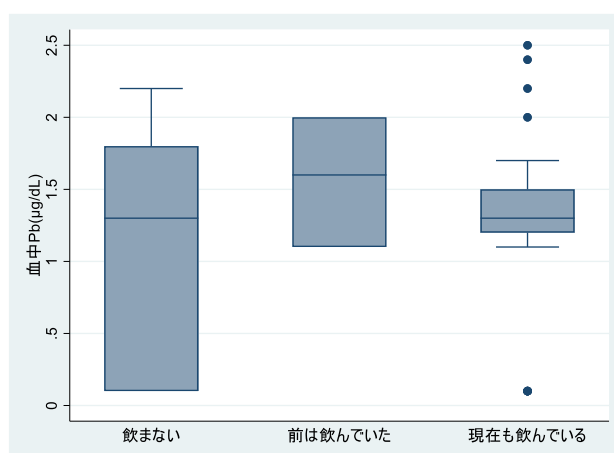
	中央値（範囲）			P 値*
	飲まない (n=27)	前は飲んでいた (n=7)	現在も飲んでいる (n=27)	
Cd	0.01 (0.01, 0.01)	0.01 (0.01, 0.2)	0.01 (0.01, 0.2)	0.119
Ni	0.01 (0.01, 0.3)	0.2 (0.01, 0.2)	0.01 (0.01, 0.2)	0.298
Mn	1.0 (0.3, 1.7)	1.0 (0.7, 1.7)	0.9 (0.4, 1.7)	0.769
Cr	0.002 (0.002, 0.002)	0.002 (0.002, 0.002)	0.002 (0.002, 0.002)	1.00
Pb	1.3 (0.1, 2.2)	1.1 (1.1, 2.0)	1.3 (0.1, 2.5)	0.716

*Kruskal-Wallis test

血中マンガン（飲酒習慣別）



血中鉛（飲酒習慣別）



飲酒習慣と尿中の金属濃度（コントロール群のみ）

いずれの金属においても、飲酒習慣によって顕著な差はみられなかった。

表 15 尿中金属濃度の分布（飲酒習慣別）

	中央値（範囲）			P 値*
	飲まない (n=27)	前は飲んでいた (n=7)	現在も飲んでいる (n=27)	
Cd	0.04 (0.04, 1.6)	0.04 (0.04, 0.04)	0.04 (0.04, 1.7)	0.115
Cr	0.5 (0.02, 1.0)	0.4 (0.3, 0.6)	0.4 (0.02, 0.8)	0.402

*Kruskal-Wallis test

重回帰分析

以上の結果より、生体内の金属曝露量の比較においては、事業所と喫煙習慣を考慮した上で、ヒュームばく露群とコントロール群の比較を行うこととし、単変量解析において差を認めた血中の Mn と Pb 濃度、尿中の Cr 濃度について重回帰分析を行った。血中 Mn 濃度の分布には偏りがあったため、対数変換を行った上で解析に用いた。なお、尿中 Mn 濃度は、すべてのコントロール群が検出限界値以下であったために、重回帰分析の対象から除外した。

いずれの金属濃度において、コントロールと比べてヒュームばく露群が高いことが示された。

さらにヒュームばく露群においては、フィットテスト不合格者に限定して解析すると、血中 Mn 濃度の回帰係数が 60% 近く増加したのに対し、他の金属濃度においてはそのような傾向は認められなかった。

表 16 重回帰分析結果

従属変数	対象人数	ヒュームばく露群 (vs コントロール)		P 値
		回帰係数	標準誤差	
血中 Mn (対数変換)	100	0.112	0.033	0.001
血中 Pb	100	0.462	0.133	0.001
尿中 Cr	100	0.205	0.065	0.002

いずれの回帰モデルとも、事業所と喫煙習慣を共変数に加えた。

表 17 重回帰分析結果 (ヒューム曝露群はフィットテスト不合格者)

従属変数	対象人数	ヒュームばく露群 (vs コントロール)		P 値
		回帰係数	標準誤差	
血中 Mn (対数変換)	72	0.178	0.047	<0.001
血中 Pb	72	0.324	0.180	0.077
尿中 Cr	72	0.174	0.056	0.003

いずれの回帰モデルとも、事業所と喫煙習慣を共変数に加えた。

まとめ

コントロール群と比べて、ヒュームばく露群では血中の Mn と Pb 濃度、尿中の Mn と Cr 濃度が高い値を示した。ヒュームばく露群を、防護具のフィットテスト不合格者に限定した上でコントロール群と比較した結果、Cr を除くすべての血中金属濃度において、群間の差が大きくなる傾向が認められた。

生体試料中の金属濃度、個人サンプラーによる吸入性粉塵濃度および Mn 濃度において、事業所間のばらつきが認められた。この点を考慮し、事業所と喫煙習慣による影響を補正した上で、ヒュームばく露群とコントロール群の血中 Mn、Pb 濃度および尿中 Cr 濃度の差を重回帰モデルにより検討した結果、いずれの濃度もヒュームばく露群において高いことが示された。

ヒュームばく露群において、防護具のフィットテスト不合格者と合格者の金属濃度の比較を行った結果、不合格者は血中 Mn 濃度が有意に高い結果を示しており、防護具を正しく装着することによるヒュームばく露の予防効果が確認された。

3. ヒューム曝露による血清サイトカイン およびケモカイン量の変化

研究分担者 石原 康宏 広島大学大学院統合生命科学研究科 生命医科学プログラム 准教授

研究結果

ヒューム曝露による血清サイトカインおよびケモカイン量の変化を 68 ページ以降に記す。

I. 序論

金属アーク溶接などにより発生する溶接ヒューム（一般的に、粒子径 $1\mu\text{m}$ 以下の微粒子）は、長期にわたって吸引すると肺組織の線維化や気腫性変化、炎症などを特徴とするじん肺のリスクとなる。気管支炎、肺がん、気胸などの合併症に罹患することもあり、ヒュームへの曝露をやめても症状は進行する。また、現在、じん肺の治療法は存在しない。従って、ヒュームへの曝露状況を把握し、作業環境を改善するなど、予防に努めることが重要である。溶接ヒュームは令和 3 年 4 月 1 日より特定化学物質（第 2 類物質）に追加されるなど、政令の改正も進んでいる。

ヒュームは固体が気化した後に急速に冷却されることによって生じる、おおよその径が $1\mu\text{m}$ 以下の球状または結晶状の微粒子である。溶接ヒュームの主成分は金属であり、酸化鉄や酸化マンガンを多く含む（溶接学会誌 75(7):7, 2006）。溶接ヒュームは、その曝露により炎症を引き起こすことが報告されている（Toxicol Appl Pharmacol 223(3):234, 2007; Exp Lung Res. 23(3):205, 1997）。最近、吸入した微粒子が肺胞マクロファージに貪食され、IL-1 α の放出をトリガーとして炎症性細胞が肺に浸潤することが示された（Immunity 45(6):1299, 2016）。従って、ヒュームの曝露により生じる炎症反応が肺の障害に関わっているかもしれない。

本研究課題では、溶接作業者のヒューム曝露による健康影響を評価するために、血清中のサイトカインとケモカインを測定する。今年度は、事業所 H と I を訪問し、ハイボリウムエアーサンプラーにより溶接工場内の PM2.5 を採取し、ICP-MS により金属分析を行うことによって、工場内の PM2.5 成分組成を解析した。また、一昨年度に手法として確立した LEGENDplex によりサイトカイン 13 種（IL-1 β 、IFN- α 2、IFN- γ 、TNF- α 、IL-6、IL-10、IL-12p70、IL-17A、IL-18、IL-23、IL-33）の定量

を行った。

Ⅱ. 方法

1. 溶接工場内 PM2.5 のサンプリング

石英フィルターを装着したハイボリュームエアースンプラー（HV-500R、柴田科学）を溶

接現場近傍に設置し、500L/min の吸入量で溶接工場内の PM2.5 をフィルター上に採取した。なお、2 時間吸入すると圧損が生じたため、1 時間半の採取とした。



図 1. 溶接工場における PM2.5 採取の様子

得られたフィルターから PM2.5 を抽出した。フィルターをハサミで細かく裁断し、蒸留水を添加した。10W で 1 分間超音波処理を行った

後、ピンセットを用いてフィルターを取り除いた。20,000 g で 5 分間遠心分離を行い、得られた沈殿を溶接工場内大気中の PM2.5 とした。

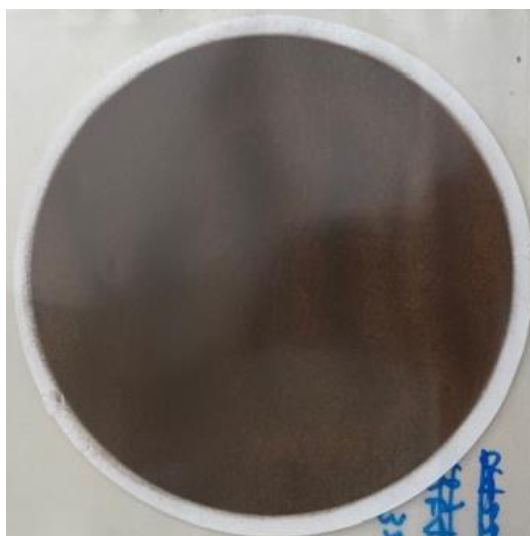


図 2. 石英フィルター上に捕集された溶接工場内 PM2.5

2. 大気中微粒子濃度の測定

気中微粒子濃度をパーティクルカウンター（KC-51、リオン）を用いて測定した。0.3 μm ～0.5 μm 、0.5 μm ～5 μm 径の微粒子について、幾何平均径と微粒子の密度（ドイツ都市部 PM2.5 密度 1.60 g/cm³、Environ Sci Technol 42:5087, 2008）大気中重量濃度（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を算出した。

3. PM2.5 に含まれる重金属の定量

重金属の定量は、ICP-MS を用いて行った。測定はいで株式会社 に委託した。試料 0.0085mg にフッ化水素酸 3mL 及び硝酸 5mL を添加し、マイクロ波による加熱加圧分解を行った。次に、過酸化水素水 1mL を添加し、ホットプレート上で加熱してフッ化水素酸を除去した後、内標準物質溶液を加えて超純水で 10mL に定容した。適宜希釈を行い、ICP-MS で測定した。定量は、内標準法で行った。

表 1. ICP-MS 測定条件

ICP-MS (Agilent 7900, Agilent Technologies 社製)	
高周波出力：1,550W	
Carrier Gas 流量：1.05 L/min	
Make Up Gas 流量：0.10 L/min	
Spray Chamber 温度：2 °C	
衝突/反応ガス：He 4.5 mL/min (Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, As, Zn)	
H ₂ 6.0 mL/min (K, Ca, Fe, Se, Cd)	
H ₂ 8.0 mL/min (S)	
測定対象元素(<i>m/z</i>)：	[内標準]
Mg (24), Al (27), S (33), K (39), Ca (40), Ti (47), V (51), Cr (52), Mn (55), Fe (56), Co (59), Ni (60), Cu (63), Zn (66), As (75), Se (78)	Ge (ゲルマニウム) (72)
Cd : 111	In (インジウム) (115)
Pb : 208	Tb (テルビウム) (159)

表 2. 検出対象元素およびその検出・定量下限値

対象元素	検出下限値 ($\mu\text{g/g}$)	定量下限値 ($\mu\text{g/g}$)	対象元素	検出下限値 ($\mu\text{g/g}$)	定量下限値 ($\mu\text{g/g}$)
Mg	0.9	3	Fe	40	200
Al	20	40	Co	0.004	0.02
S	20	70	Ni	0.3	0.7
K	6	20	Cu	0.04	0.2
Ca	20	40	Zn	1	4
Ti	4	20	As	0.03	0.09
V	0.02	0.04	Se	0.004	0.02
Cr	0.04	0.2	Cd	0.005	0.02
Mn	0.7	3	Pb	0.06	0.2

4. ヒト血清検体

本研究は広島大学疫学研究倫理審査委員会の許可を得て遂行した（許可日：令和 2 年 9 月 3 日，許可番号：第 E-2181 号、承認日：2022 年 2 月 21 日，承認番号：E-1440-2）。ヒト血清（溶接工場事務員、溶接従事者）は産業医科大学医学部衛生学講座より提供を受け、測定まで -80°C で保存した。

5. フローサイトメーターを用いた血清中炎症性分子の網羅的解析

解析には LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex) with Filter Plate (Bio Legend, 740808) を使用した。測定は添付マニュアルに沿って行った。フィルタープレートの溶液の吸引除去にはマルチスクリーン HTS バキュームマニホールド (MSVMHTS00, ミリポア) を使用した。ベックマン・コールター社製コンパクトフローサイトメーター CytoFLEX S (488nm, 561nm レーザー搭載) によりビーズの蛍光を測定した。当該キットによる炎症性分子定量には、2 種の蛍光の同時測定が必要である。PE と PerCP、PE と PE-Cy7 および PE と PC5.5 のチャンネルにつ

いて蛍光の混ざりこみを測定したところ、蛍光混ざり込み補正をした上で PE と PE-Cy7 のチャンネルを使用すると、蛍光の混ざり込みを最低限におさえて精度が高い測定値を得ることができることが分かった (Data not shown)。そこで、PE と PE-Cy7 チャンネルによりサイトカインを定量することとした。クラウドベースの解析ソフト (<https://www.biolegend.com/en-us/legendplex>) を用い、血清中に含まれるサイトカインを算出した。

尚、検出限界以下であった場合、キットマニュアルに記載されている検出限界地の 1/2 を便宜上用いて平均値を算出し、また統計解析を行った。

III. 結果と考察

1. 溶接事業所内の環境と大気中微粒子組成

パーティクルカウンターを用いて事務室および溶接工場内の微粒子の空間濃度を測定した。尚、測定対象は直径 $0.3\sim 5\mu\text{m}$ の微粒子である。H 社溶接工場内 (2022 年 4 月 21 日 10 時) の微粒子濃度は $112\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。一方、H 社事務所内 (2022 年 4 月 21 日 16 時) の微粒子濃度は $62\mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。溶接工場内で高

い空間濃度を示すことは予想されることであるが、事務所内においても PM2.5 環境基準 (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下) よりも高い空間濃度が検出された。また、I 社において同様の測定をしたところ、溶接工場内 (2022 年 6 月 10 日 10 時) で 81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、事務所内 (2022 年 6 月 9 日 12 時) で 83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ の空間濃度であった。以上の結果より、溶接を行う事業所においては、工場内だけでなく事務室等でも高い空間濃度となることが明らかとなった。

溶接工場 H 社と I 社において工場内で PM2.5 を収集し、PM2.5 に含まれる 18 種類の金属を ICP-MS により定量した (表 3)。ヒュームの成

分である鉄やマンガンが多く含まれる一方、カルシウムなどヒュームとは直接関連しない金属も多く検出された。また、H 社でマグネシウムや銅、亜鉛が多く含まれるなど、事業所間の違いも検出された。また、これらの金属をすべて足し合わせても、PM2.5 の質量の半分にも及ばない。工場内にはディーゼル発電機など、微粒子を排出する機器が多く設置されているため、これらからの排出微粒子も寄与していると考えられる。鉄やマンガンなどヒュームに特徴的な金属をヒューム由来と考えたとしても、溶接工場内 PM2.5 のなかでヒュームが占める割合は 30~40%程度ではないかと予測される。

表 3. 溶接工場内 PM2.5 に含まれる金属濃度

	H 社	I 社
Mg	25000	1600
Al	22000	17000
S	1200	740
K	7800	5200
Ca	46000	21000
Ti	20000	7200
V	87	22
Cr	400	240
Mn	68000	34000
Fe	220000	230000
Co	15	15
Ni	1200	220
Cu	3800	650
Zn	27000	5000
As	64	19
Se	9.3	0.35
Cd	2.4	0.41
Pb	200	120 (ng metal/mg PM2.5)

2. 工場事務員および溶接作業従事者の血清中サイトカイン濃度の測定

産業医科大学医学部衛生学講座より溶接事業者 9 社の従業員の血清（事務員 129 検体、溶接作業従事者 105 検体）の提供を受けた。これらの血清中に含まれるサイトカイン 13 種（IL-1 β 、IFN- α 2、IFN- γ 、TNF- α 、IL-6、IL-10、IL-12p70、IL-17A、IL-18、IL-23、IL-33）を定量

し、群間比較を行った。

IL-1 β を測定したところ、溶接工場溶接従事者の血清中濃度は、工場事務員と比較して有意に低かった（図 3）。血清中 TNF α 、IL-10、IL-12p70、IL-17A および IL-33 濃度についても、事務員と比較して溶接作業従事者において有意に低かった（図 4, 5, 6, 7, 9）。IL-23 については、群間で有意な差は得られなかった。

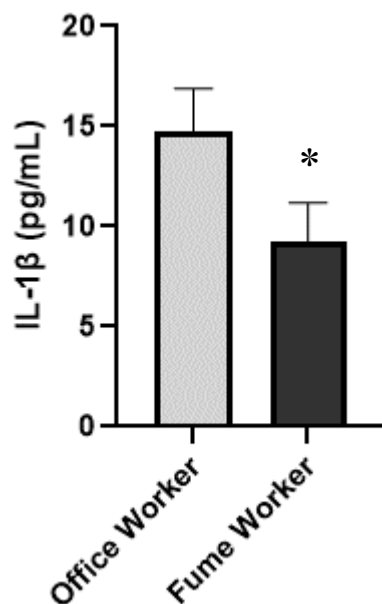


図 3. 工場事務員および溶接従事者における血液中 IL-1 β の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 IL-1 β 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

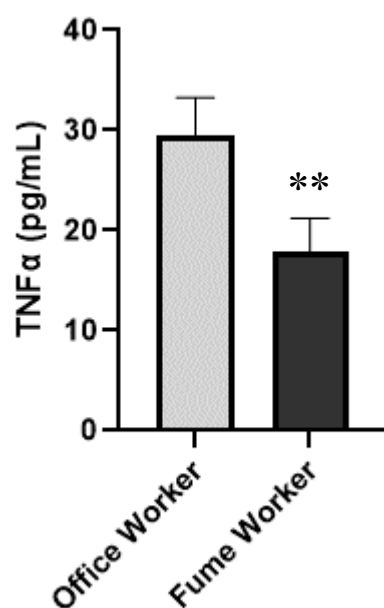


図 4. 工場事務員および溶接従事者における血液中 TNF α の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 TNF α 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

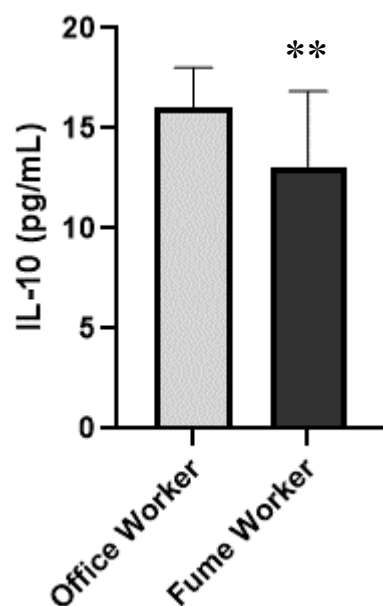


図 5. 工場事務員および溶接従事者における血液中 IL-10 の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 IL-10 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

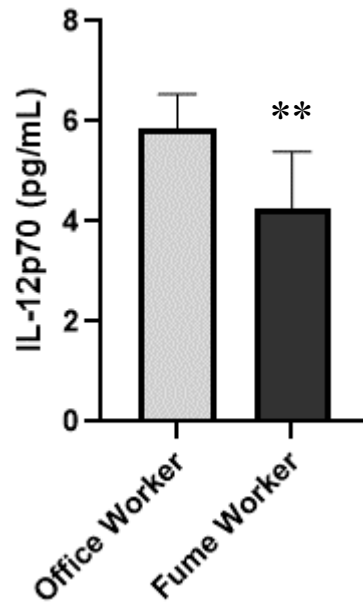


図 6. 工場事務員および溶接従事者における血液中 IL-12p70 の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 IL-12p70 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

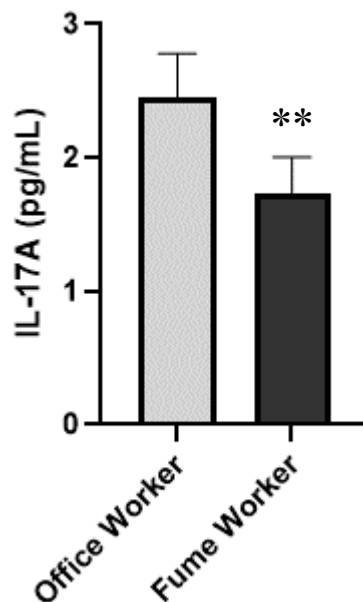


図 7. 工場事務員および溶接従事者における血液中 IL-17A の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 IL-17A 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

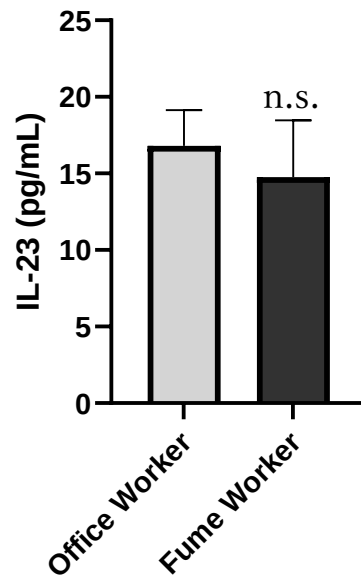


図 8. 工場事務員および溶接従事者における血液中 IL-23 の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 IL-23 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

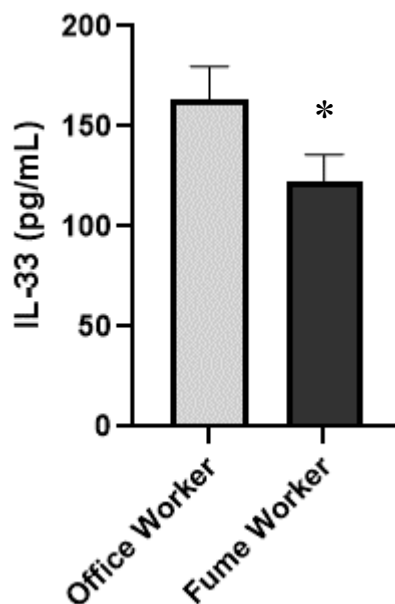


図 9. 工場事務員および溶接従事者における血液中 IL-33 の定量

溶接工場事務員および溶接工場溶接従事者から得たヒト血清について、LEGENDplex Human Inflammation Panel 1 (13-plex)キットマニュアルに従ってビーズおよび検出抗体で処置し、とフローサイトメーターCytoFLEX S により蛍光値を測定した。検量線より、血清中 IL-33 濃度を算出した。バーは標準誤差であり、分散分析の後に Mann-Whitney U test を行った。工場事務員 N=129、溶接従事者 N=105

今回の研究より、工場事務員と溶接作業従事者の血清中サイトカイン濃度を比較すると、工場事務員の血清中濃度は、溶接作業従事者のそれと比較して高いという結果が得られた。例えば、IL-1 β は前駆体として合成され、インフラマソームにおいて Caspase-1 によって切断することにより成熟する炎症性サイトカインであり、マクロファージやリンパ球など、様々な免疫系細胞の IL-1 受容体に結合して細胞を活性化する。他のサイトカインについても、作用機序は異なるものの、免疫系細胞を活性化し、炎症反応を増強、進行させるはたらきを有する。従って、工場事務員は溶接作業従事者と比較して全身性の炎症状態が亢進していると考えられる。例えば H 社において、溶接工場内と事務所内の空間微粒子濃度はほぼ同一である。さらに、溶接従事者は作業時には溶接マスクなどの高度な保護具を身に付けている一方、事務員は保護具を身に付けない。従って、空間微粒子濃度が同程度である以上、保護具の有無が曝露量、ひいては全身性の炎症状態に関係しているのかもしれない。また、溶接事業所のリスク評価を行う上で、溶接事業所から離れた地域に居住する一般住民（環境基準内の PM2.5 濃度で生活している）の測定値との比較が重要であると考えられた。

溶接ヒュームに限らず産業曝露を評価する研究において、工場労働者や近隣住民に着目している研究は存在するが、工場事務員に着目した例はほとんどない。事業所内やその周囲の PM2.5 濃度や成分組成を正確に把握し、防護器具を加味した上で曝露量を見積もってリスク管理を行う必要があるかもしれない。

IV. 結論

本研究では、溶接事業所の環境、大気中微粒子組成および事務員、溶接作業従事者の血清中サイトカイン量を定量した。溶接作業従事者と比較して事業所事務員において全身の炎症状態が高まっていることが明らかとなった。正確

な作業環境の把握と曝露量の推定が、ヒュームを始めとした微粒子のリスク管理に繋がるであろう。

以上



図 10.ハイボリュームエアーサンプラー工場内設置光景

4. ヒューム曝露による経皮曝露および肌状態への影響

研究協力者 河野 まおり 大阪大学大学院薬学研究科先端化粧品科学共同研究講座 特任助教

研究結果

ヒューム曝露による経皮曝露および肌状態への影響を 80 ページ以降に記す。

【背景】

溶接作業時に生じた蒸気が空気中で凝固した固体の粒子（粒径 0.1~1 μ m 程度）の総称である溶接ヒュームは、国際がん研究機関（IARC）のグループ 1 に該当し、発がん性を有すること、また、溶接ヒュームに含まれる酸化マンガ（MnO）について神経機能障害、三酸化二マンガ（Mn₂O₃）については神経機能障害、呼吸器系障害が報告されている（厚生労働省「屋外溶接ヒューム パンフレット」より）。そのため、厚生労働省は「労働安全衛生法施行令」「特定化学物質障害予防規則（特化則）」の法改正を行い（令和 3 年 4 月 1 日に施工・適用）、溶接ヒュームの作業を行うにあたり定められたいくつかの規則をあげている。その規則には、空間全体の換気、濃度の測定を行い適切な防護マスクを使用、フィットテストの年に 1 回実施である。もちろん環境自体をクリーン化することは重要である。さらに、呼吸器からの曝露は、防護マスクやフィットテストを行うことで曝露量を抑えることは可能になる。一方、経皮曝露に関してはあまり重要視されていないものの、溶接ヒュームの健康へ与える影響を考察するにあたり、露出度が高くヒト最大の臓器である皮膚への影響を検討する必要があると考える。

外層を保護するヒト最大の器官である皮膚は、溶接ヒュームに曝露されやすいことは明らかである。しかし、皮膚はその表面にケラチノサイトが多層化された表皮を有しており、非常に強固なバリア機能を有する。500Da 以上の分子は皮膚に浸透せず、紫外線などの活性酸素を誘導する外部環境因子に対しても、抗酸化酵素を有するなど、肌は外部環境から内部生体を保護する役割をもっている。そのため、ヒュームが及ぼす皮膚影響も限定的であると考えられる。しかし、微小粒子状物質の 1 つである PM2.5 と皮膚に関する先行研究において、環境中 PM2.5 濃度の低い地域であるアメリカデンバー（PM2.5 環境中濃度 25~35 μ g/m³）で 6 カ月生

活した後に、環境中 PM2.5 濃度の高い地域である韓国ソウル（100~180 μ g/m³）で 6 カ月生活したヒト 4 名を対象に、テープストリップによる肌バリア機能関連因子を調べたところ、大気汚染物質が高濃度の地域で 6 カ月生活した際に、皮膚バリア機能関連因子が低下することが報告された（Byung Eui Kim et al., 2021）。この微粒子曝露が肌へ影響を及ぼすことを直接的に報告したこの研究より、溶接ヒュームも長期的に肌へ曝露されることによって、肌バリア機能をはじめ様々な影響を与える可能性があると考えた。

そこで、溶接作業者の溶接ヒュームが肌へ曝露されることによる肌影響を評価するために、溶接作業従事者および工場事務員の肌状態について、真皮層・表皮層の弾力性や色味などの評価を実施し、溶接作業従事者や工場事務員の肌状態に関する知見を得た。また、バリア機能を評価できるケラチノサイト細胞を多層化させた再構築三次元表皮モデル（以下表皮モデル）を用いて、遺伝子の動きや組織学上的変化について検討することとした。事業所 H と I にて、ハイボリュームエアサンプラーにより溶接工場内の PM2.5 を採取し、採取した PM2.5 を表皮モデルに曝露させることにより、in vitro 実験によって細胞レベルでの溶接ヒュームが肌へ及ぼす影響について検討した。

【方法】

1. 溶接工場内 PM2.5 のサンプリング

石英フィルターを装着したハイボリュームエアースンプラー（HV-500R、柴田科学）を溶接現場（工場）内近傍に設置し、500 L/min の吸入量で工場内の PM2.5 をフィルター上に採取した。なお、2 時間吸入すると圧損が生じたため、1 時間半にわたり採取した。得られたフィルターから PM2.5 を抽出した。フィルターをハサミで細かく裁断し、蒸留水を添加した。10W で 1 分間超音波処理を行った後、ピンセットを用いてフィルターを取り除いた。20,000 g で 5 分間遠心分離を行い、得られた沈殿を工場内大気中の PM2.5 とした（詳細や写真については、広島大学石原准教授報告書に記載のため省略）。

2. 大気中微粒子濃度の測定

訪問した事業所内の、工場および工業隣接事業所内の大気中微粒子濃度を、パーティクルカウンター（KC-51、リオン）を用い、測定した。パーティクルカウンター内の $0.3\ \mu\text{m} \sim 0.5\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ 径の微粒子について、幾何平均径と微粒子の密度（ドイツ都市部 PM2.5 密度 $1.60\ \text{g}/\text{cm}^3$ 、Environ Sci Technol 42:5087, 2008）大気中重量濃度（ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）を算出した。

3. ヒト肌測定試験

3-1. 色味測定

色差計（CM-700d：コニカミノルタ製）を用いて、頬部、頸部の肌の明るさ、赤味、黄味を計測した。

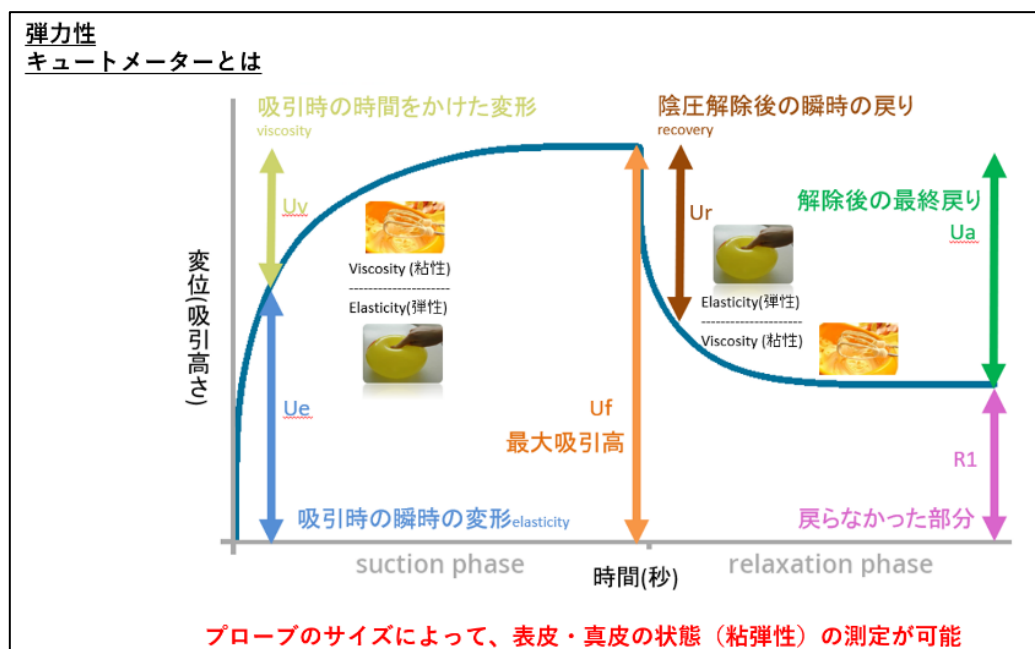


色味測定に用いた色差計

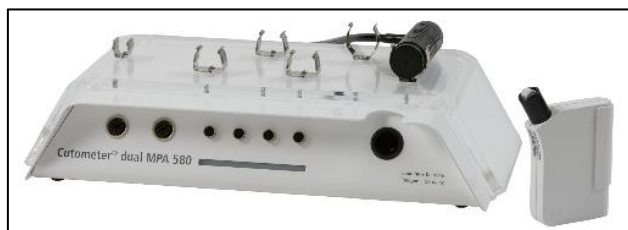
3-2. 弾力性(真皮・表皮)

キュートメーター (MPA580D: Courage+Khazaka) を用いて、頸部の弾力性を評価した。陰圧によってプローブの開口部から皮膚を吸引/陰圧にした後、解除し、皮膚の変位量の推移から弾力

性を評価した。真皮の評価には、口径は 6 mm を、表皮の評価には、口径 2 mm のプローブを用いた。



キュートメーターによる測定原理の概略

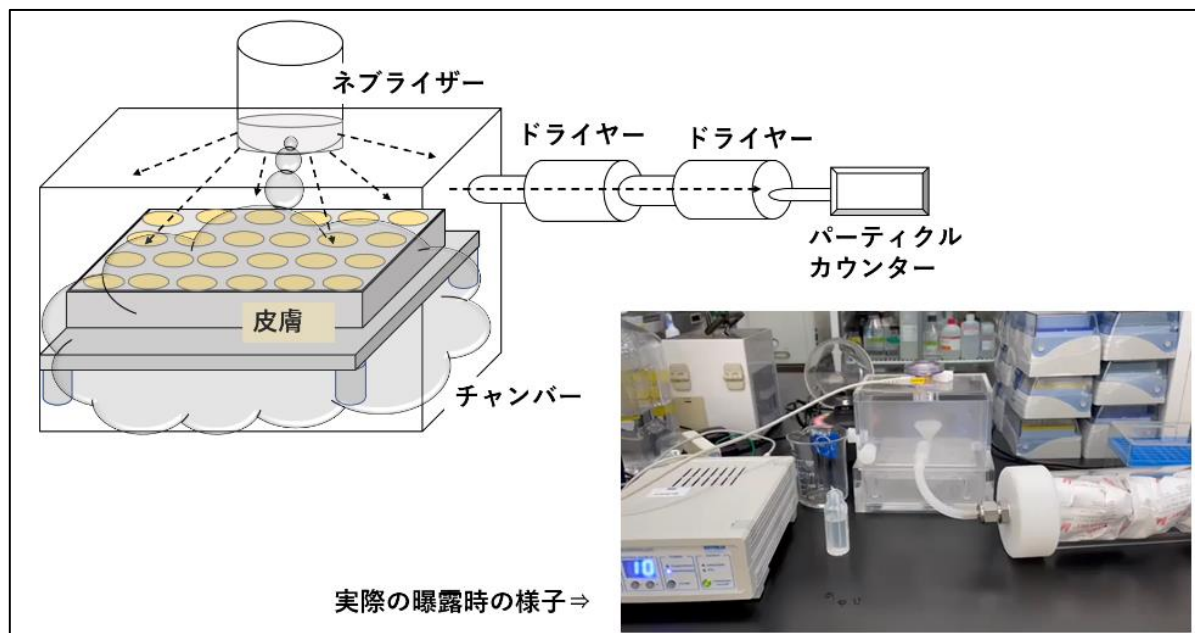


弾力性測定に用いたキュートメーター



実際の測定時の様子

4. 表皮モデルを用いた肌影響への検討



気相曝露システムの概略 (左：イメージ、右：実際の様子)

4-1 ネブライザーによる気相曝露

皮膚モデルの角質層側からのみ曝露されるようにインサートカップ用台座にトランスウェルを設置し、アクリルチャンバー内で超音波式ネブライザーにより霧化した PM2.5 懸濁液を 1 時間曝露した後、23 時間 37°C 5% CO₂ インキュベーター内で静置させた。

各濃度に十分に懸濁した PM2.5 溶液をネブライザーヘッド上に注入し、ネブライジングしてチャンバー内に霧化した PM2.5 懸濁液を充填させ、チャンバー内の PM2.5 空間濃度を測定した。チャンバー内の PM2.5 空間濃度は、リオン社パーティクルカウンター KC-51 (レンジは > 0.3 μm、> 0.5 μm および > 5.0 μm の 3 チャンネル) を拡散ドライヤーにつなぎ、チャンバーに接続して計測した。拡散ドライヤーは、通気部分の直径 13 mm、長さ 400 mm の円筒形であり、乾燥剤として塩化マグネシウム (ニッソードライ) を封入した。今回構築した気相曝露系の概略写真を上図に示す。

パーティクルカウンターは、0-0.3 μm、0.3-0.5 μm、0.5-5.0 μm の粒子数が表示される。各粒子直径

は、幾何学平均値より、0.3-0.5 μm は 0.39 μm、0.5-5.0 μm は 1.58 μm である。先行研究より、PM2.5 実粒子の密度を 1.60 g/cm³ 値を用い、チャンバー内 PM2.5 濃度を以下の計算式で算出した。

$$\begin{aligned} \text{PM 濃度}(\mu\text{g}/\text{m}^3) \\ = (0.3-0.5 \mu\text{m の粒子数}) \times 1.6 \times 4/3\pi(0.39/2)^3 + (0.5-5.0 \mu\text{m の粒子数}) \times 1.6 \times 4/3\pi(1.58/2)^3 \end{aligned}$$

4-2 細胞生存率の測定

細胞生存率を WST-8 法にて算出した。

Cell Counting Kit-8 (CCK-8, DOJIN) を用いて実施した。CCK-8 を Earle's Balanced Salts (EBSS) 溶液にて、10 倍希釈した溶液を作製し、24 well plate に 300 μL/well 分注した。さらに、PM2.5 曝露が終了した皮膚モデルをインサートカップ毎に、希釈した CCK-8 溶液が分注された 24 well plate に入れ替えて、4 時間程度 CO₂ インキュベーター内で培養を続け呈色反応を行った。マイクロプレートリーダーで 450 nm の吸光度を測定して、NT 群との吸光度に対する比を算出した。

4-3 DNA アレイによる遺伝子に関する包括的な変動解析

各種細胞を RLT buffer(Promega)にて十分に溶解し、Maxwell RSC simply RNA Tissue Kit(Promega)を用い、メーカー推奨プロトコールに従って mRNA の抽出を行った。mRNA 濃度を測定した後、ClariomS human array(ThermoFisher)による包括的な遺伝子変動解析をおこなった。解析には TAC4.0 ソフトを用いて実施した。

【結果および考察】

1. 溶接工場内 PM2.5 のサンプリング

事業所 H と I において工場内で採取した PM2.5 の 18 種類の金属を ICP-MS により定量した結果は石原准教授報告書に詳細記載のため割愛する。両事業所において、ヒュームの成分である鉄やマンガンが多く含まれていることが分かった。

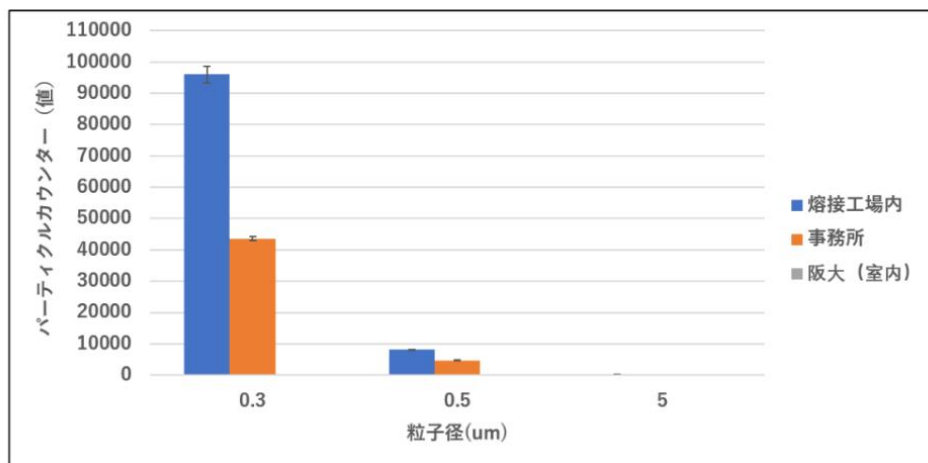
4-4 組織切片および HE 染色による組織形状変化

ホルマリン固定した角層モデルから、組織切片の作製および HE 染色を実施した（アプライドメディカルサーチ社実施）。また、HE 染色後の組織切片観察は KEYENCE 顕微鏡にて観察した。

2. 大気中微粒子濃度の測定

工場内、工場隣接事業所および、大阪大学吹田キャンパス薬学部 4 号館室内において、パーティクルカウンター（下右写真）を用いて、各微粒子数を測定した。

工場内での、0-0.3 μm 、0.3-0.5 μm 、0.5-5.0 μm の粒子数の値の平均値は、96000、8170、228 であり、事業所内の平均はそれぞれ、43630、4711、20 であった。一方、阪大室内では、87、2、6 であった（下左図）。以上より、事業所内は、作業場である工場内と比較すると約半分のカウンター値であったものの、阪大室内と比較すると、非常に高い値であることが分かった。



事業所 H で測定した際のパーティクルカウンターの値（左）およびスクリーン画面（右）

3. ヒト肌測定試験

2の結果より、ヒト肌測定群について、事業所内従事者に加え、工場関連非関連者として追加で5名（医師および大学職員）の肌測定を追加

で実施し、本群を NT とした。群分けは下記とした（下表）。

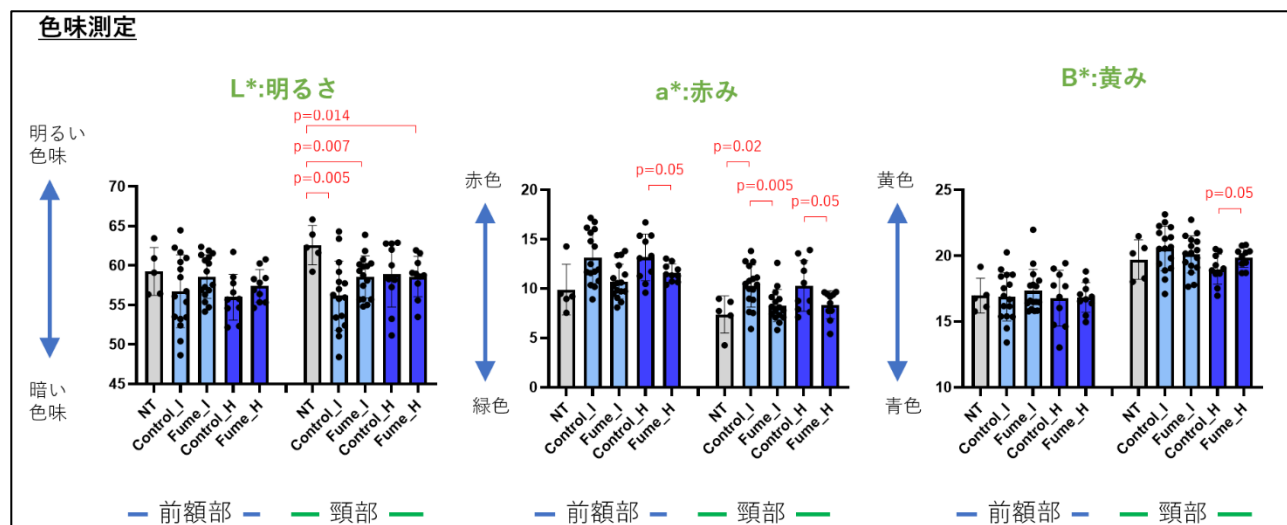
ヒト肌測定試験の群分け

Sample name	n数	職業	測定場所
NT	5	医師など（工場非関連者）	事業所I
Control_I	16	工場隣接事業所にて勤務（溶接作業以外）	事業所I
Fume_I	16	溶接作業	事業所I
Control_H	10	工場隣接事業所にて勤務（溶接作業以外）	事業所H
Fume_H	10	溶接作業	事業所H

3-1. 色味測定

頸部において、NT と比較して他群は総じて明るさ（L 値）が低く（くすんでいる）、赤み（a 値）が高いという結果となった（下図）。PM2.5 がマウス皮膚、ヒト皮膚モデルにおいて IRE1α 経路を介してメラニン産生を増加させること

が報告されており（Yuri Ahn et al., Journal Journal of Investigative Dermatology,2021）、工場内および付近で大気中に滞留している溶接ヒュームおよび PM2.5 がメラニンを介した肌の色へ影響を与えている可能性があると考え

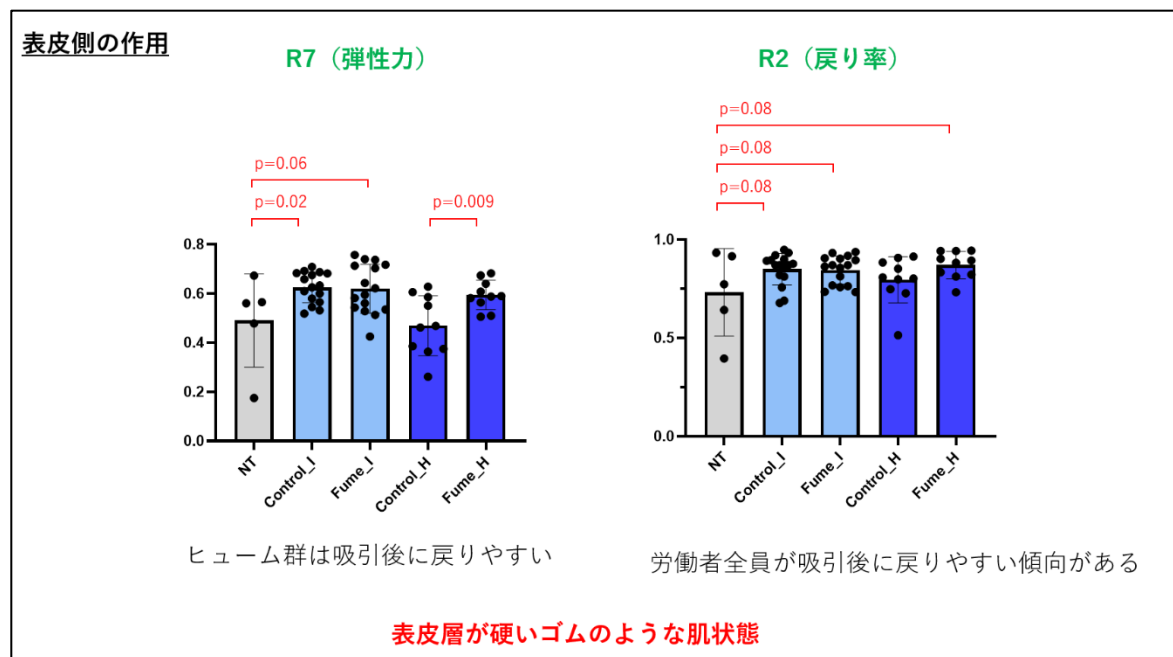


各群における色味測定結果

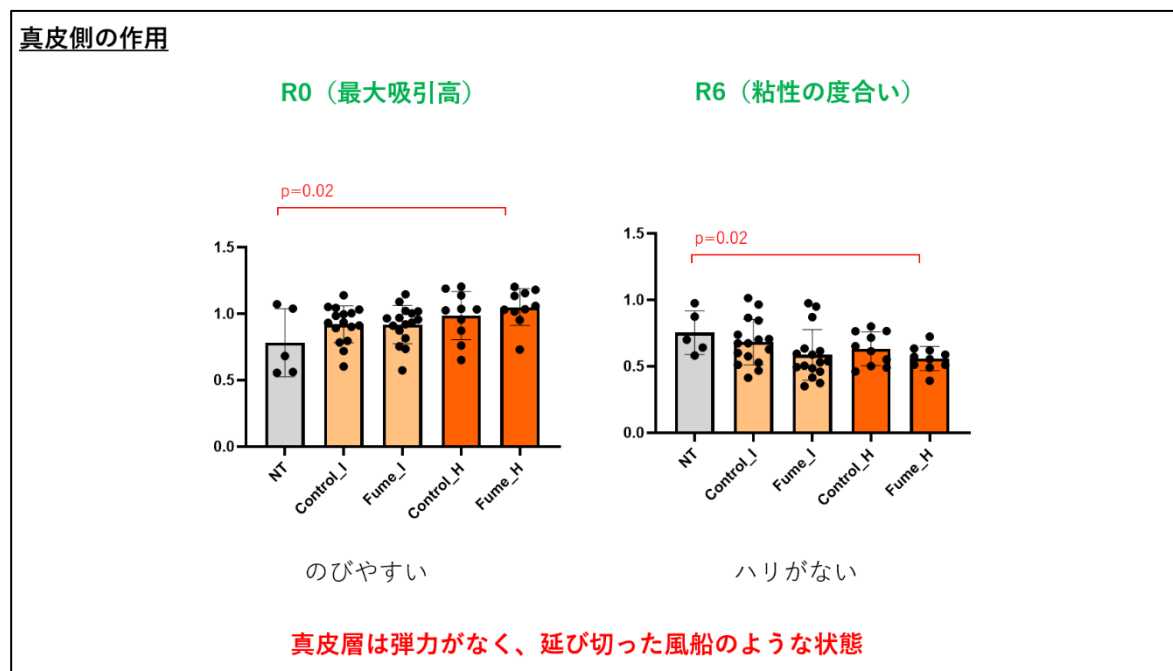
3-2.弾力性(表皮・真皮)

特に表皮側の弾力性について、NT と比較して工場労働者群との間に、差がある傾向となった(下図)。表皮層については、NT 群と比較して、

硬いゴムのような肌状態であり(次頁図)、真皮層は弾力がなく、伸び切った風船のような状態であることが分かった。



各群における皮膚表皮層側の弾力性結果



各群における皮膚真皮層側の弾力性結果

NT 群の n 数がまだ少なく明確な傾向が分からないものの、弾力性に影響が出ている可能性がある。大気汚染物質がヒト摘出皮膚に付着することによって真皮層のコラーゲン量が低下するという報告があり (Minkyung Kim et al., 2019)、

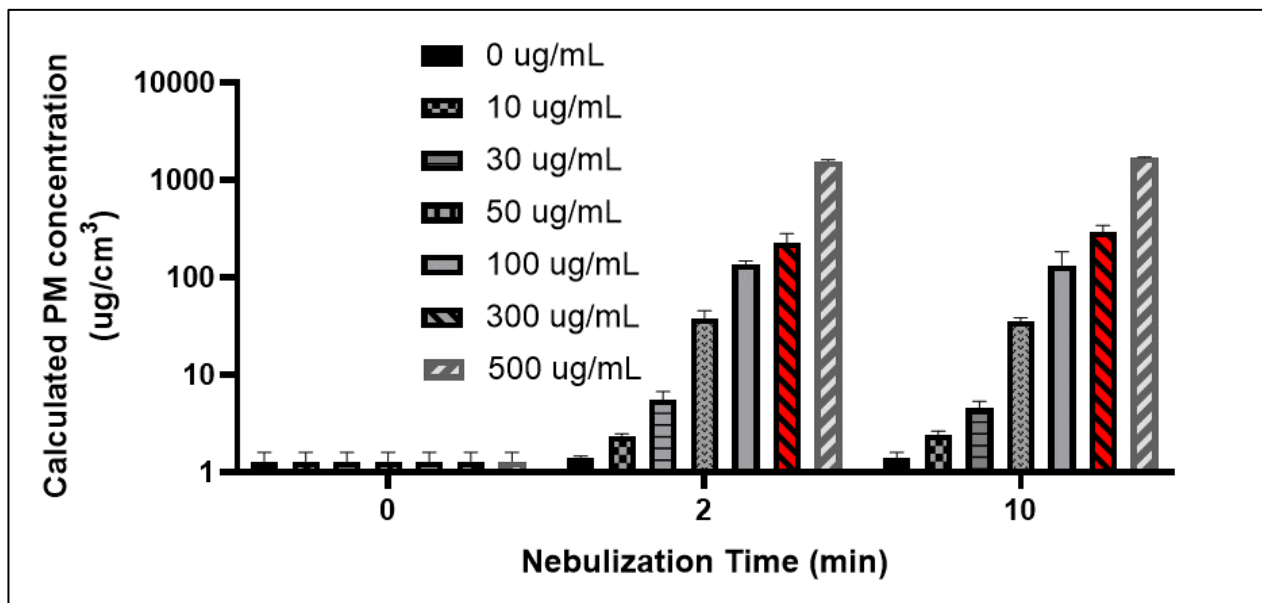
PM2.5 や溶接ヒュームが弾力性に影響を与える可能性は十分に想定される。NT 群の n 数を増やし、更なる知見を蓄積していく必要があると考える。

4. 表皮モデルを用いた肌影響への検討

4-1 ネブライザーによる気相曝露

事業所 H および in vitro 気相曝露系時のパーティクルカウンター実測

(パーティクルカウンター 実測値)	溶接作業所 (事業所 H)	工場隣接事業所 (事業所 H)	気相曝露in vitro実験 (300 ug/mL)
0.3	96004	43620	94544
0.5	8170	4711	23534
5	228	20	536
Total	104402	48352	118613

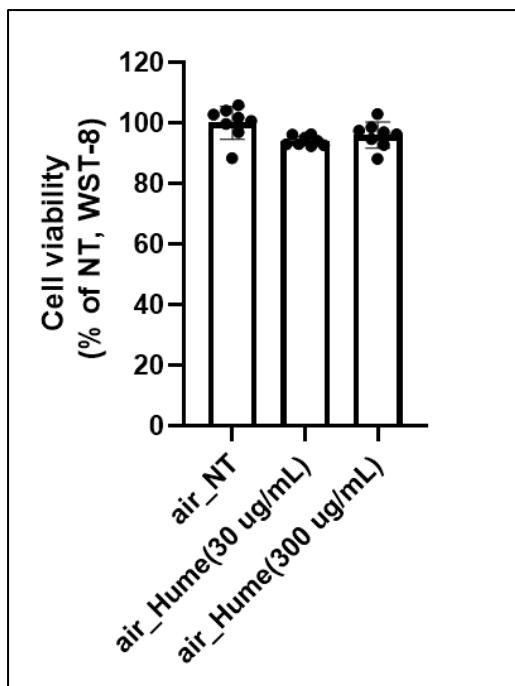


In vitro 気相曝露系における各懸濁液濃度を入れた際の空間内溶接ヒューム濃度換算結果

300 $\mu\text{g}/\text{mL}$ の溶接ヒューム溶液を上記の系で曝露した際のチャンバー内空間濃度は、事業所 H の工場内で測定した際のパーティクルカウンター値と近い値であった（上表）。このチャンバーを用いた気相曝露では、溶接ヒュームを 30, 300 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 濃度で 1 時間ネブライジング噴霧された三次元皮膚モデルを用いて、肌影響を調べることにした。まずは、次項の細胞生存率の評価を実施した。

また、300 $\mu\text{g}/\text{mL}$ の溶接ヒューム懸濁液を気相曝露システムにてチャンバー内をしたところ、ネブライジング開始 2 分後には充分充填されること、その際の空間内濃度は、300 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 程度であることが分かった。PM2.5 の日本の環境基準値が年平均 15 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ 、24 時間平均で 35 $\mu\text{g}/\text{cm}^3$ であることを考えると、各事業所の工場内には高濃度の溶接ヒュームが大気中に滞留していたと想定される。

4-2 細胞生存率の測定



気相曝露時の細胞生存率結果

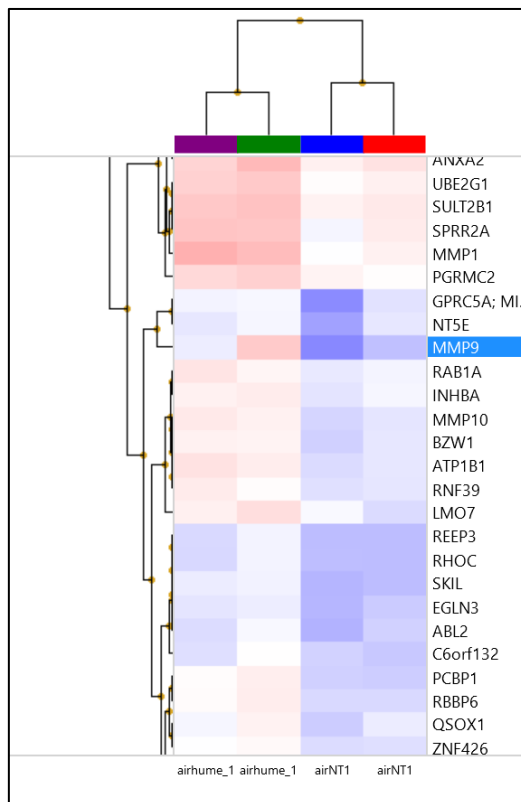
気相曝露法にて、30, 300 $\mu\text{g/mL}$ を1時間曝露し、その後 wash out なしで、23 時間ポストインキュベーションした後に、NT との比較により細胞障害性を調べた。高濃度である 300 $\mu\text{g/mL}$ の溶接ヒュームをネブライジングシステムによる気相曝露法を用いて皮膚モデルの表層から曝露した結果においても、特に細胞障害性は起きないということが分かった。

この結果から、工場内にて測定した大気環境状況と同じパーティクルカウンター値であった、300 $\mu\text{g/mL}$ のヒュームを1時間角層側からネブライジングシステムを用いて、気相曝露し皮膚モデルを用いて、以下の実験を実施した。

4-3 DNA アレイによる遺伝子に関する包括的な変動解析

DNA アレイ解析結果より抽出された変動の大きい上位 20 遺伝子（左）および一部の解析結果例（右）

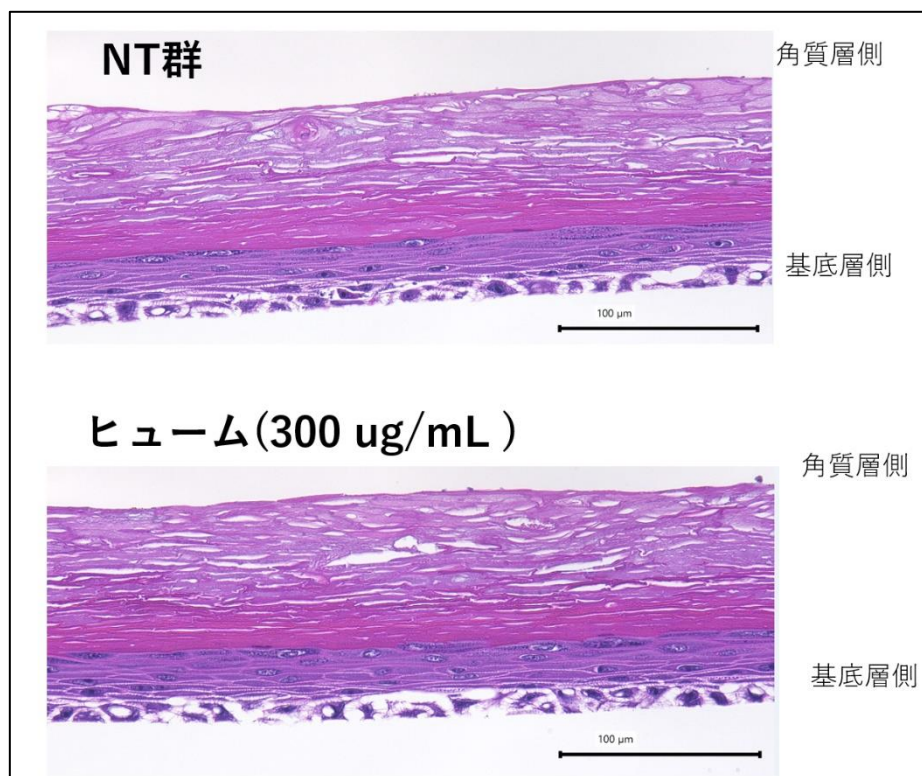
Gene Symbol	Description	P-val
MMP9	matrix metalloproteinase 9	<0.001
ANXA1	annexin A1	<0.001
IL1R2	interleukin 1 receptor, type II	<0.001
MMP1	matrix metalloproteinase 1	<0.001
TM4SF1	transmembrane 4 L six family member 1	<0.05
C15orf48; MIR147B	chromosome 15 open reading frame 48; microRNA 147b	<0.05
GPRC5A; MIR614	G protein-coupled receptor, class C, group 5, member A; microRNA 614	<0.01
PCBP1	poly(rC) binding protein 1	<0.001
SEMA3C	sema domain, immunoglobulin domain (Ig), short basic domain, secreted, (semaphorin) 3C	<0.01
DHRS9	dehydrogenase/reductase (SDR family) member 9	<0.001
LAMB3; MIR4260	laminin, beta 3; microRNA 4260	<0.001
CLDN4	claudin 4	<0.001
ATP1B1	ATPase, Na ⁺ /K ⁺ transporting, beta 1 polypeptide	<0.01
HK2	hexokinase 2	<0.001
ERO1A	endoplasmic reticulum oxidoreductase alpha	<0.05
SKIL	SKI-like proto-oncogene	<0.001
SPRR2A	small proline-rich protein 2A	<0.01
RHCG	Rh family, C glycoprotein	<0.01
HIST1H2AA	histone cluster 1, H2aa	<0.001
MMP10	matrix metalloproteinase 10	<0.01



網羅的な遺伝子変動解析を実施した結果、最も変動が大きかった遺伝子は、MMP-9 であり、また上位 20 遺伝子については上記の結果となった。特に、MMP ファミリーである MMP-1,10 の変動も大きいという結果となり、ヒューム曝露

により、コラーゲン分解酵素である MMP ファミリーの発現量が上昇することが分かった。このことから、ヒューム曝露により、MMP 発現量の誘導を介した真皮コラーゲン量の減少や、ハリ・弾力が低下することが示唆された。

4-4 組織切片および HE 染色による組織形状変化



気相曝露時の表皮三次元皮膚モデルの HE 染色画像

細胞障害性において、大きな変化がなく、同様に組織形態的な顕著な変化は認められなかった。しかし、DNA アレイの結果より、MMP 関連タンパク質の発現上昇が想定され、免疫組織染色等により、MMP 発現部位や量についても検討していく必要があると考える。また、今回用いた三次元皮膚モデルは表皮モデルであるものの、MMP タンパクについての変動が得ら

れた場合は、表皮と真皮層からなる全層三次元皮膚モデルや摘出皮膚などの真皮コラーゲン層がある状態のモデル等を用いた、ヒューム曝露による真皮層に与える影響についても包括的に知見を得る必要があると考える。

皮膚検査機器



皮膚粘弾性測定装置
Cutometer DUAL MPA580



色差計



肌の粘弾性
スキングリップメーター AS-GP1



皮膚測定総合機械 DermaLab

Ⅲ. 研究成果の刊行に関する一覧表

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
辻 真弓、安村 美子、保利 一、 上野 晋、一瀬 豊日、後藤 元秀、 石塚 恒年、長谷川 渉	呼吸用保護具の定量的フィ ットテストから得られた知 見 ～金属アーク溶接等作業 に従事する労働者を対象と した調査から～	産業医学ジャーナル	45(5)	52-57	2022
Mayumi Tsuji, Chihaya Koriyama, Yasuhiro Ishihara, Toyohi Isse, Tsunetoshi Ishizuka, Wataru Hasegawa, Motohide Goto, Rie Tanaka, Noriaki Kakiuchi, Hajime Hori, Kazuhiro Yatera, Naoki Kunugita, Megumi Yamamoto, Toshihide Sakuragi, Yoshiko Yasumura, Maori Kono, Mami Kuwamura, Kyoko Kitagawa, Susumu Ueno	Associations between welding fume exposure and neurological function in Japanese male welders and non-welders.	Journal of Occupational Health	65(1)	e12393	2023
Mayumi Tsuji1, Hajime Hori, Chihaya Koriyama, Rie Tanaka, Toyohi Isse, Yasuhiro Ishihara, Tsunetoshi Ishizuka, Wataru Hasegawa, Motohide Goto, Kazuhiro Yatera, Naoki Kunugita, Mami Kuwamura, Toshihide Sakuragi, Yoshiko Yasumura, Megumi Yamamoto, Susumu Ueno	The effect of mask fit test on the association between the concentration of metals in biological samples and the results of time-weighted average personal exposure: a study on Japanese male welders	Journal of Occupational Health	65(1)	e12399	2023

● 投稿論文 ●

呼吸用保護具の定量的フィットテストから得られた知見 ～金属アーク溶接等作業に従事する 労働者を対象とした調査から～

辻 真 弓 安 村 美 子 保 利 一 上 野 晋
一 瀬 豊 日 後 藤 元 秀 石 塚 恒 年 長谷川 渉

要 約

令和5年4月1日から、金属アーク溶接等作業を継続して行う屋内作業場で面体を有する呼吸用保護具を使用させる場合、1年以内に1回、フィットテストによって労働者が呼吸用保護具を適切に装着できていることを確認することが義務付けられる。本調査では、溶接作業に従事する労働者を対象に定量的フィットテストを行い、テストに不合格となった理由の探索を行った。

はじめに

溶接ヒュームに含まれるマンガン及びその化合物が労働者に神経障害等の健康障害を及ぼすおそれがあることが明らかとなり、令和3年4月1日より「溶接ヒューム」が特定化学物質（第2類物質）に加えられることとなった。また健康障害防止措置の一環として、個人ばく露測定により空気中の溶接ヒューム濃度を測定し、その測定結果によって呼吸用保護具を選択すること、呼吸用保護具が適切に装着されているかを確認するためにフィットテストが実施されることとなった。フィットテストは、日本産業規格T 八五〇（JIST 8150）に定める方法またはこれと同等の方法により労働者の顔面と呼吸用保護具の面体との密着の程度を示す係数（フィットファクタ）を求め、フィットファクタが呼吸用保護具の種類に応じた要求フィットファクタを上回っていることを確認するテストである。大きく分けて定性的方法と定量的方法の2種類があり、定量的フィットテストは発生エアロゾルまたは大気じんを用いて行われる。

著者らは、溶接ヒュームばく露の健康影響と溶接ヒューム濃度並びに生体試料中の溶接ヒ

ューム関連化学物質濃度の関係を明らかにすることを目的として、令和2年度より労災疾病臨床研究「溶接作業者の溶接ヒュームばく露（個人ばく露と生体内ばく露）と健康影響の関係に関する疫学的研究（代表者：辻真弓）」を行っている。本稿では、研究の一環として行っている定量的フィットテストの一事業所の結果を示し、不合格の原因を探索することとする。

方 法

対象者は、国内の機械製造業に勤務する溶接作業従事者9名（男性）である。使用している呼吸用保護具は、取替え式防じんマスクDR28SU2W（株式会社重松製作所）である。2021年8月に対象者に定量的フィットテストを2回行った（図1）。1回目は、著者らの「いつも通りにマスクを装着してください」という指示後に、対象者が現在使用中のマスクを用いてテストを行った。ほぼ全員のマスクに、何かしらの汚れや劣化が認められた（図2）。メリヤスを使用していたり、頭巾の上からマスクを使用していたりした場合も、そのままテストを行った（図3）。2回目は、マスクの正しい装着方法

ORIGINAL ARTICLE

Associations between welding fume exposure and neurological function in Japanese male welders and non-welders

Mayumi Tsuji¹  | Chihaya Koriyama² | Yasuhiro Ishihara³  | Toyohi Isse⁴  |
 Tsunetoshi Ishizuka⁵ | Wataru Hasegawa⁵ | Motohide Goto⁵  | Rie Tanaka¹  |
 Noriaki Kakiuchi⁶ | Hajime Hori⁷ | Kazuhiro Yatera⁸ | Naoki Kunugita⁹  |
 Megumi Yamamoto¹⁰  | Toshihide Sakuragi¹  | Yoshiko Yasumura¹ |
 Maori Kono¹¹ | Mami Kuwamura¹  | Kyoko Kitagawa¹ | Susumu Ueno⁵ 

¹Department of Environmental Health, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

²Department of Epidemiology and Preventive Medicine, Kagoshima University Graduate School of Medical and Dental Sciences, Kagoshima, Japan

³Program of Biomedical Science, Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University, Hiroshima, Japan

⁴Section of Postgraduate Guidance School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁵Department of Occupational Toxicology, Institute of Industrial Ecological Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁶Institute of Industrial Ecological Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁷Department of Occupational Hygiene, School of Health Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁸Department of Respiratory Medicine, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁹Department of Occupational and Community Health Nursing, School of Health Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

¹⁰Department of Environment and Public Health, National Institute for Minamata Disease, Kumamoto, Japan

¹¹Laboratory of Advanced Cosmetic Science, Graduate School of Pharmaceutical Sciences, Osaka University, Osaka, Japan

Correspondence

Mayumi Tsuji, Department of Environmental Health, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, 1-1 Iseigaoka, Yahatanishi-ku, Kitakyushu, Fukuoka 807-8555, Japan.
 Email: tsuji@med.uoeh-u.ac.jp

Funding information

Ministry of Health, Labour and Welfare, Grant/Award Number: JPMH 200501

Abstract

Objectives: There are some studies reporting the association between (manganese [Mn]) exposure to welding fume and neurological dysfunction. This study examined the relationship between Mn exposure and neurological behavior in Japanese male welders and non-welders using biological samples, which to date has not been assessed in Japan.

Methods: A total of 94 male welders and 95 male non-welders who worked in the same factories were recruited. The blood and urine samples were obtained from all the participants to measure Mn exposure levels. Neurological function tests were also conducted with all participants. The sampling of the breathing air zone using a personal sampler was measured for welders only.

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

© 2023 The Authors. *Journal of Occupational Health* published by John Wiley & Sons Australia, Ltd on behalf of The Japan Society for Occupational Health.

ORIGINAL ARTICLE

The effect of mask fit test on the association between the concentration of metals in biological samples and the results of time-weighted average personal exposure: A study on Japanese male welders

Mayumi Tsuji¹  | Hajime Hori² | Chihaya Koriyama³  | Rie Tanaka¹  |
Toyohi Isse⁴  | Yasuhiro Ishihara⁵  | Tsunetoshi Ishizuka⁶ | Wataru Hasegawa⁶ |
Motohide Goto⁶  | Kazuhiro Yatera⁷ | Naoki Kunugita⁸  | Mami Kuwamura¹  |
Toshihide Sakuragi¹  | Yoshiko Yasumura¹ | Megumi Yamamoto⁹ | Susumu Ueno⁶ 

¹Department of Environmental Health, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

²Department of Occupational Hygiene, School of Health Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

³Department of Epidemiology and Preventive Medicine, Kagoshima University Graduate School of Medical and Dental Sciences, Kagoshima, Japan

⁴Section of Postgraduate Guidance School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁵Program of Biomedical Science, Graduate School of Integrated Sciences for Life, Hiroshima University, Hiroshima, Japan

⁶Department of Occupational Toxicology, Institute of Industrial Ecological Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁷Department of Respiratory Medicine, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁸Department of Occupational and Community Health Nursing, School of Health Sciences, University of Occupational and Environmental Health, Fukuoka, Japan

⁹Department of Environment and Public Health, National Institute for Minamata Disease, Kumamoto, Japan

Correspondence

Mayumi Tsuji, Department of Environmental Health, School of Medicine, University of Occupational and Environmental Health 1-1 Iseigaoka, Yahatanishi-ku, Kitakyushu, Fukuoka 807-8555, Japan.
Email: tsuji@med.uoeh-u.ac.jp

Funding information

Ministry of Health, Labour and Welfare, Grant/Award Number: JPMH 200501

Abstract

Objectives: The mask fit test confirms whether the wearing condition of the wearer's face and the facepiece of the respirators are used appropriately. This study aimed to examine whether the results of the mask fit test affect the association between the concentration of metals related to welding fumes in biological samples and the results of time-weighted average (TWA) personal exposures.

Methods: A total of 94 male welders were recruited. Blood and urine samples were obtained from all participants to measure the metal exposure levels. Using personal exposure measurements, the 8-h TWA (8h-TWA) of respirable dust, TWA of respirable Mn, and 8-h TWA of respirable Mn were calculated. The mask fit test was performed using the quantitative method specified in the Japanese Industrial Standard T8150:2021.

Results: Fifty-four participants (57%) passed the mask fit test. Only in the Fail group of the mask fit test, it was observed that blood Mn concentrations be

This is an open access article under the terms of the [Creative Commons Attribution-NonCommercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

© 2023 The Authors. *Journal of Occupational Health* published by John Wiley & Sons Australia, Ltd on behalf of The Japan Society for Occupational Health.

労災疾病臨床研究事業費補助金
令和4年度 総括・分担研究報告書

溶接作業者の溶接ヒュームばく露（個人ばく露と生体内ばく露）と
健康影響の関係に関する疫学的研究
令和5（2023）年 3月

研究代表者 辻 真弓
産業医科大学医学部衛生学講座
〒807-8555 北九州市八幡西区医生ヶ丘 1-1
TEL 093-691-7429
FAX 093-691-9341