

令和4年度

調査研究報告書

溶接作業におけるマンガンばく露と防じんマスク効率に関する
調査研究

令和5年3月

独立行政法人労働者健康安全機構

岡山産業保健総合支援センター

調査研究体制

研究代表者

岡山産業保健総合支援センター 所長 松山 正春

研究分担者

岡山産業保健総合支援センター 産業保健相談員 岸本 卓巳

岡山産業保健総合支援センター 産業保健相談員 横溝 浩

岡山産業保健総合支援センター 産業保健相談員 高尾 総司

岡山産業保健総合支援センター 労働衛生専門職 島村 明

溶接作業におけるマンガンばく露と防じんマスク効率に関する調査研究

研究代表者	松山 正春	所長	岡山産業保健総合支援センター
研究分担者	岸本 卓巳	産業保健相談員	岡山産業保健総合支援センター
	横溝 浩	産業保健相談員	岡山産業保健総合支援センター
	高尾 総司	産業保健相談員	岡山産業保健総合支援センター
	島村 明	労働衛生専門職	岡山産業保健総合支援センター

(目的)

溶接の際に発するヒュームについては2017年にInternational Agency for Research on Cancer (IARC)がGroup I (人に対して発がん性がある)とした他、マンガン吸入によるパーキンソン症候群様の運動機能障害が発症することが知られている。そのため厚生労働省は2021年4月に特定化学物質(管理第2類)に指定した。

溶接作業を行っている作業における吸入粉じん及びマンガンばく露の状況を検討するために、これら粉じんの個人ばく露濃度とともに全血中マンガン値を測定する。防じんマスクの漏れ率を測定することによりマンガンの許容濃度0.2 mg/m³あるいは管理濃度0.05 mg/m³を達成しているかどうかについて検討する。さらにマンガン中毒の予兆がどうか精神・神経学的な診察も行う。

(対象と方法)

対象は溶接作業を週40時間行っている8事業場のMAG (Metal Active Gas)溶接作業員36名とMIG (Metal Inert Gas)溶接作業員2名、TIG (Tungsten Inert Gas)溶接作業員1名、被覆溶接者4名である。8事業場のうち1事業場は対象者が1名であったため、その他の7事業場(A事業場12名、B事業場5名、C事業場3名、D事業場4名、E事業場8名、F事業場5名、G事業場5名)別の検討を行った。大半はMAG溶接作業であったが、E事業場では4名の被覆溶接作業員が含まれる。溶接材料におけるマンガンの含有はいずれの事業場で使用されているものも5%以下であった。これら43名については性別、

年齢、溶接作業期間及び防じんマスクの型を聴取し、個人サンプラーを用いて吸入粉じん濃度、溶接ヒューム中に含まれるマンガン濃度、着用している防じんマスクの漏れ率を測定するとともに原子吸光分光光度法を用いて全血中マンガン濃度を測定した。全血中マンガン測定は1週間のうちで、最もマンガン濃度が高くなると予想される金曜日の15～16時に行った。金曜日に調査できなかった事業場においても採血は15時以降におこなった。また、着用しているマスクの漏れ率は労研式マスクフィッティングテスターMT-03型を用いて測定した。

一方、精神・神経学的調査項目としては、パーキンソン症候群診断手順を参考として、問診および視診で精神症状、表情、声の大きさ、運動失調、振戦、身体診療として固縮の有無、片足立ちテスト及び突進現象について調査した。

対照者8名は通常は溶接作業を常時行っているが、溶接作業をしていない日の全血中マンガン濃度を測定した。

(結果)

対象者は全例男性で、年齢中央値は41歳(19～70歳)であった。溶接作業に従事した期間は中央値11.6年(0.5～41年)であった(図1)。防じんマスクは1005R(興研)が12名、DR28SC2(重松)が11名、DR-28SCS2(重松)が9名、DR-28u3w(重松)が5名、DD01-S2-2K(重松)が2名、DR28SU2K(重松)が1名、ハイラック(興研)1名、3M9002(3M)1名、使い捨て不織布マスク1名であった。

個人ばく露測定による吸入性粉じん濃度は4.05 ±

4.59 (0.09 ~ 17.61) mg/m³であった。図2に主な7事業場別の吸入粉じん濃度を示す。D事業場において高濃度傾向を示した。

一方、吸入性マンガン濃度は0.5623 ± 0.6374 (0.0013 ~ 2.378) mg/m³と溶接作業内容によって大きく異なっていた。図3に示すようにD事業場あるいはA事業場では他の5事業場と比較して吸入粉じん濃度と同様に吸入性マンガン濃度も高い傾向を示した。

通常防じんマスクの漏れ率は21.90 ± 19.57 % (1.10 ~ 81.00) %であるが、各事業場とも10 ~ 30 %程度の漏れ率であったが、F事業場では10 %未満であった(図4)。使い捨て不織布マスクを使用して溶接作業を行った1名ではマスクの漏れ率は100 %であった。

マスクの漏れ率から求めた吸入性マンガン濃度は0.144 ± 0.269 (0.001 ~ 1.405) mg/m³であった(図5)。D事業場ではマスクの漏れ率を考慮した吸入マンガン濃度が0.423 ± 0.350 (0.075 ~ 0.836) mg/m³と全ての作業場で管理濃度の0.05mg/m³を超えていた。また、A事業場でも11名中7名が管理濃度を超えていた。しかし、防じんマスクの漏れ率に換算するとvariationはあるが、A、D事業場の2事業場以外は管理濃度の0.05 mg/m³未満であった。

全血中マンガン濃度は1.47 ± 0.49 (0.80 ~ 2.90) µg/dLであった。図6に示すようにD、A事業場では吸入性マンガン濃度が高いため、全血中マンガン濃度も高い傾向を示していたが、E事業場ではそれ程吸入マンガン濃度が高くないのに全血中マンガン濃度の平均が1.5 µg/dLを超えていた。さらに2.0 µg/dL以上の高値を示した作業者が6名いた。その内訳はA、D、E事業場各2名であった。E事業場の2名は被覆溶接作業であり、吸入マンガン濃度は各々0.0162, 0.0568 mg/m³とどちらも吸入マンガン濃度は高くなかったが、全血中マンガン濃度は各々2.1 µg/dL、2.9 µg/dLと高値を示した。

図5・6を比較すると吸入マンガン濃度が高い作業場で全血中マンガン濃度も高値を示す可能性が示唆された。一方、コントロールでは1.30 ± 0.15 (1.10 ~ 1.60) µg/dLで有意差は認められなかった。また、全血中マンガン濃度に対して吸入性マンガン濃度やマスクの漏れ率、吸入性マ

ンガン濃度等を用いた多変量解析を行ったが有意差は認められなかった。

また、マスクの種類、溶接の種類、溶接棒のマンガン含有率等で調整した場合でも、吸入マンガン濃度と全血中マンガン値には関連性がないことが判った。その理由として個人差が大きかったことも挙げられると考えている。

一方、マンガンによる精神・神経学的な診察では、43名には異常所見は認められなかった。

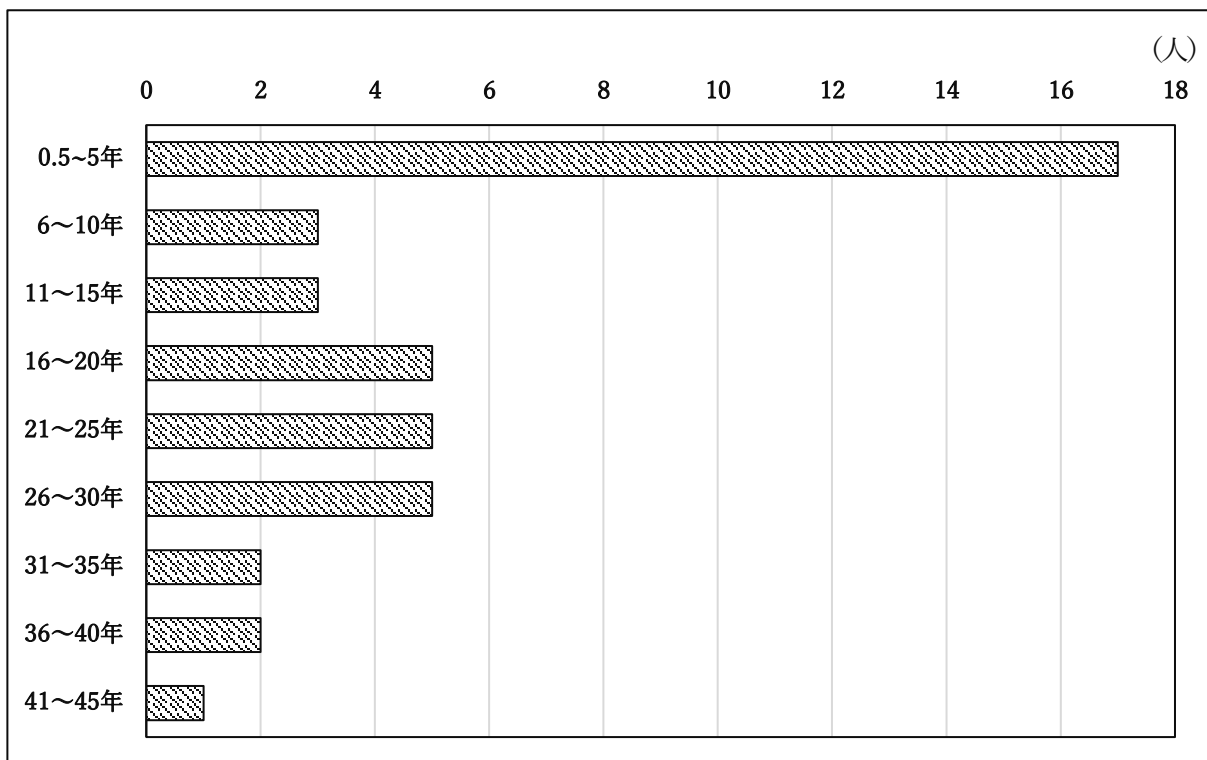


図1. 溶接作業期間

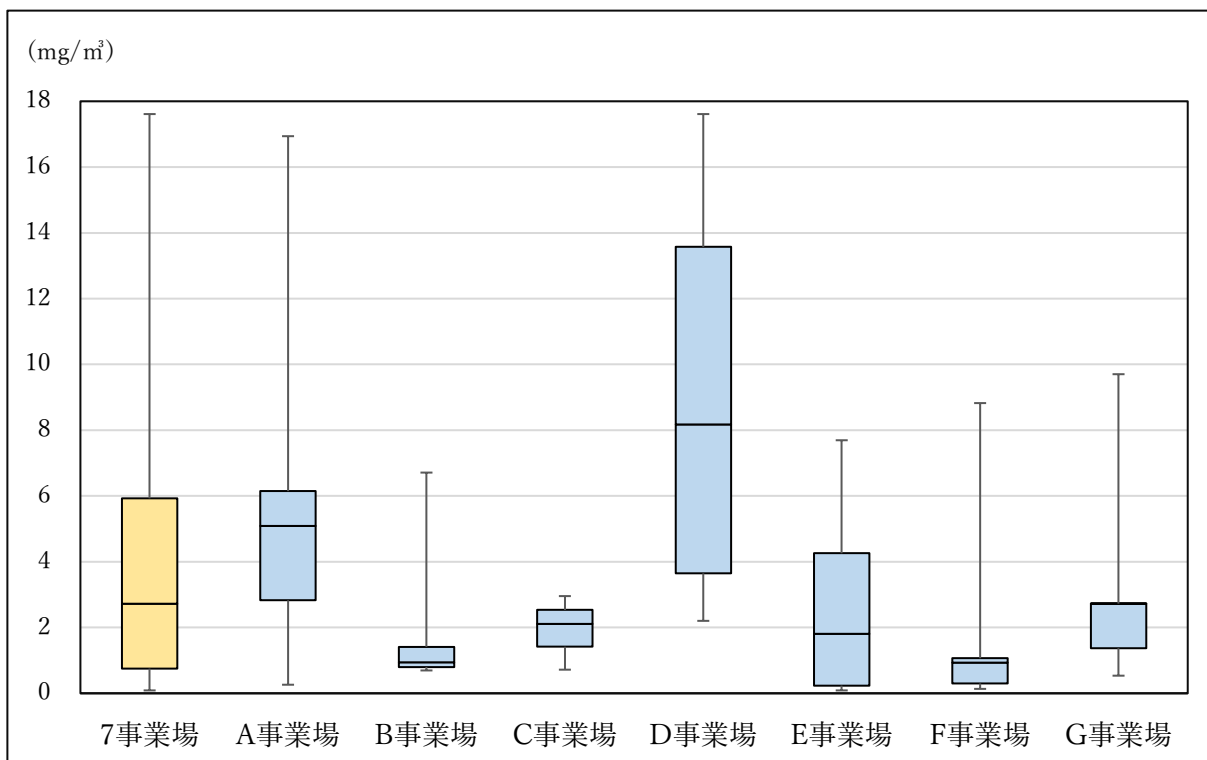


図2. 吸入性粉じん濃度 (mg/m³)

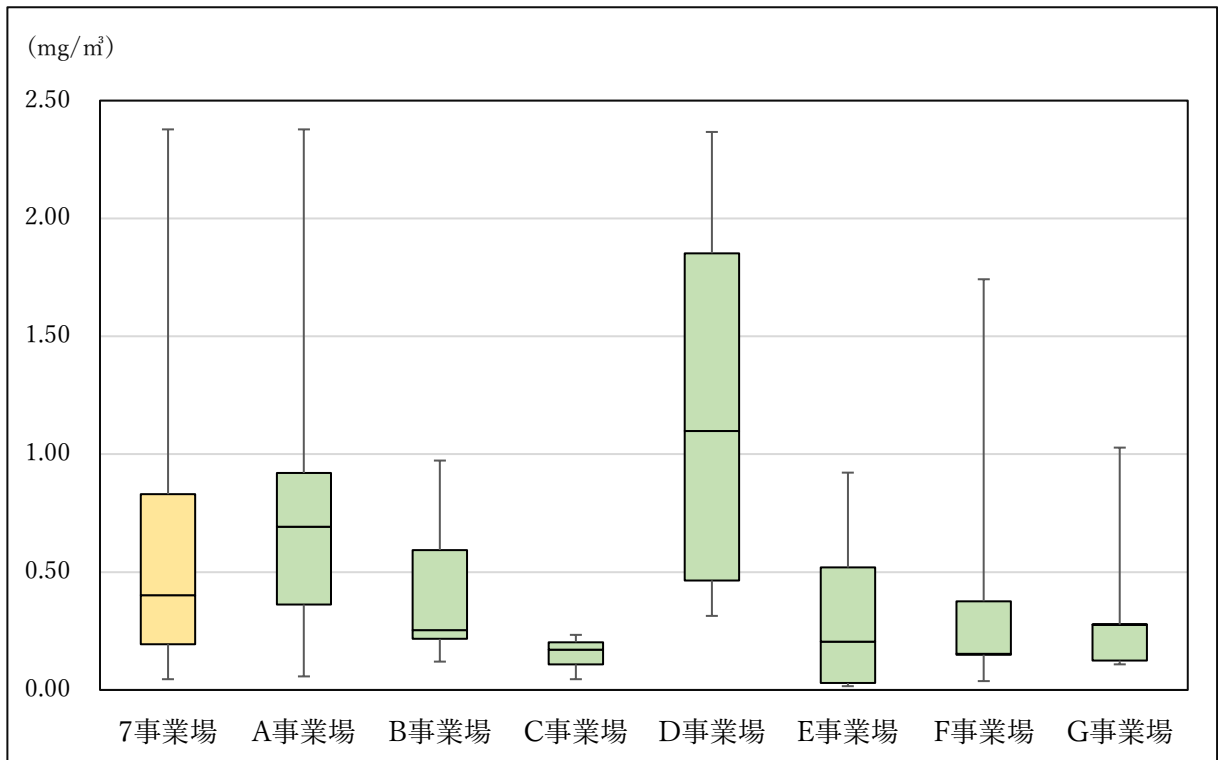


図3. 吸入性マンガン濃度 (mg/m³)

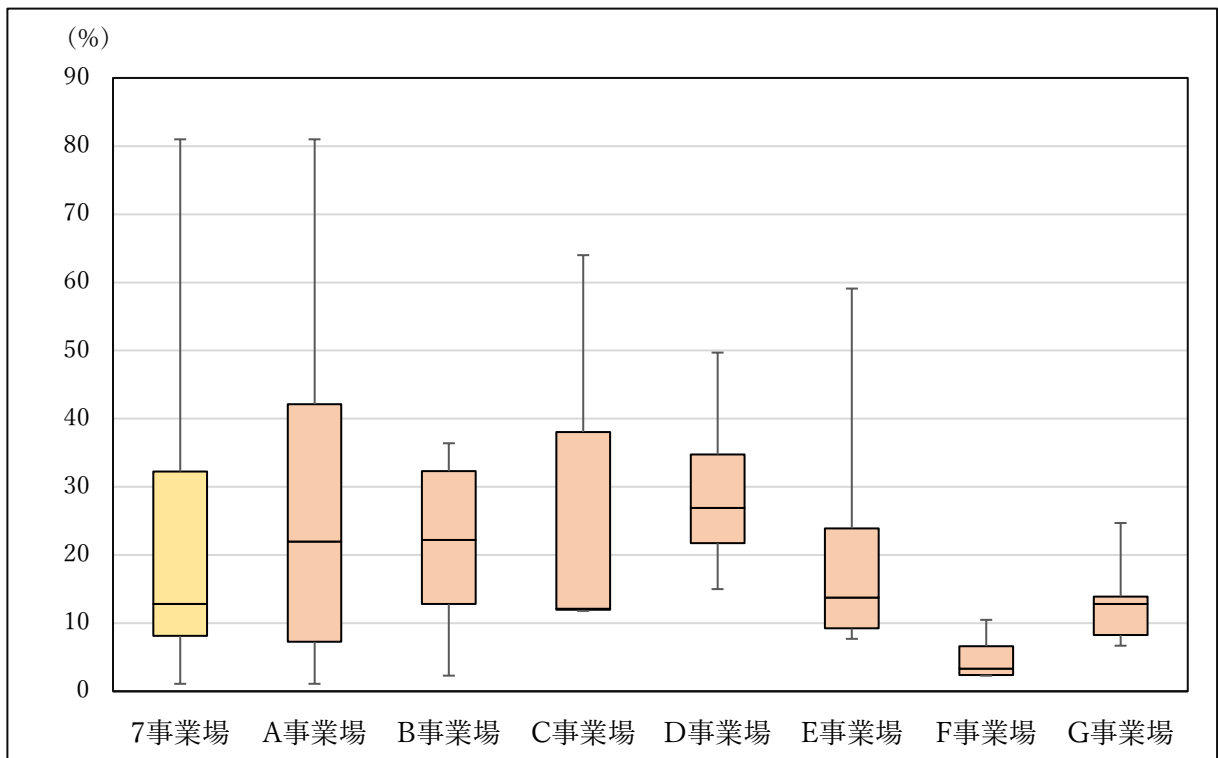


図4. 防じんマスクの漏れ率 (%)

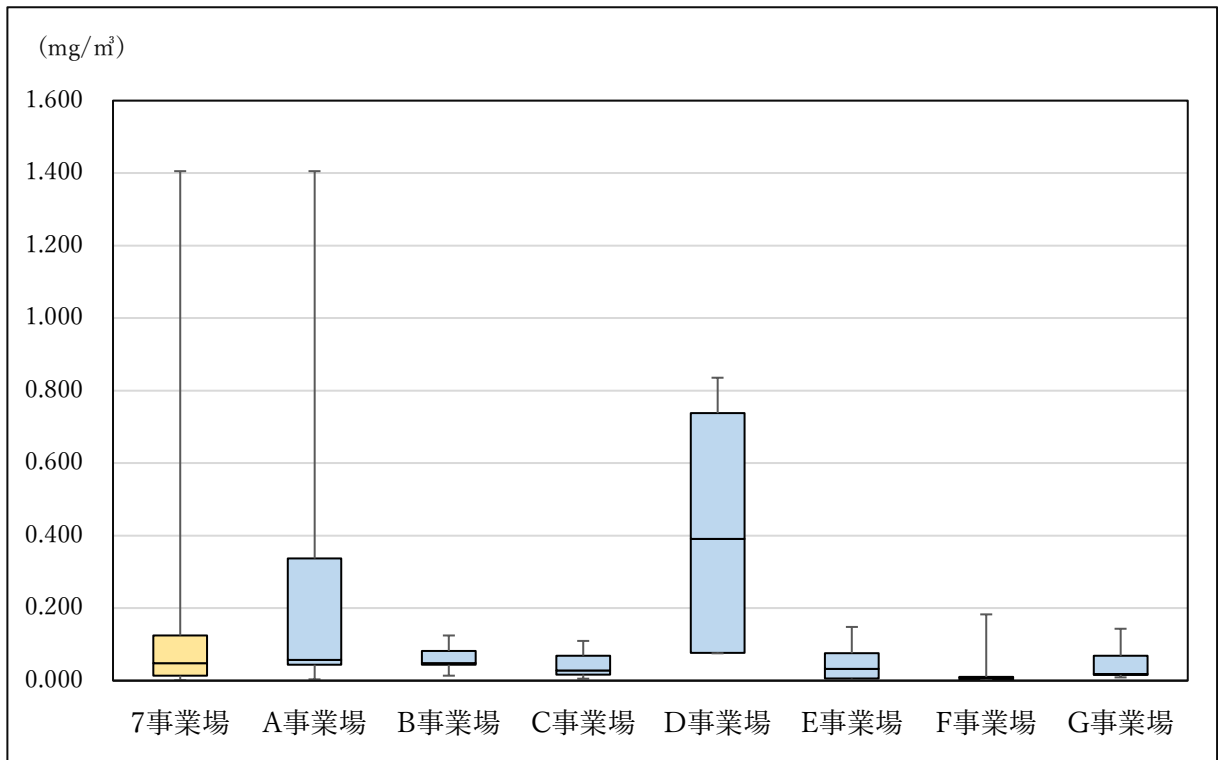


図5. マスクの漏れ率より求めたマンガン濃度 (mg/m³)

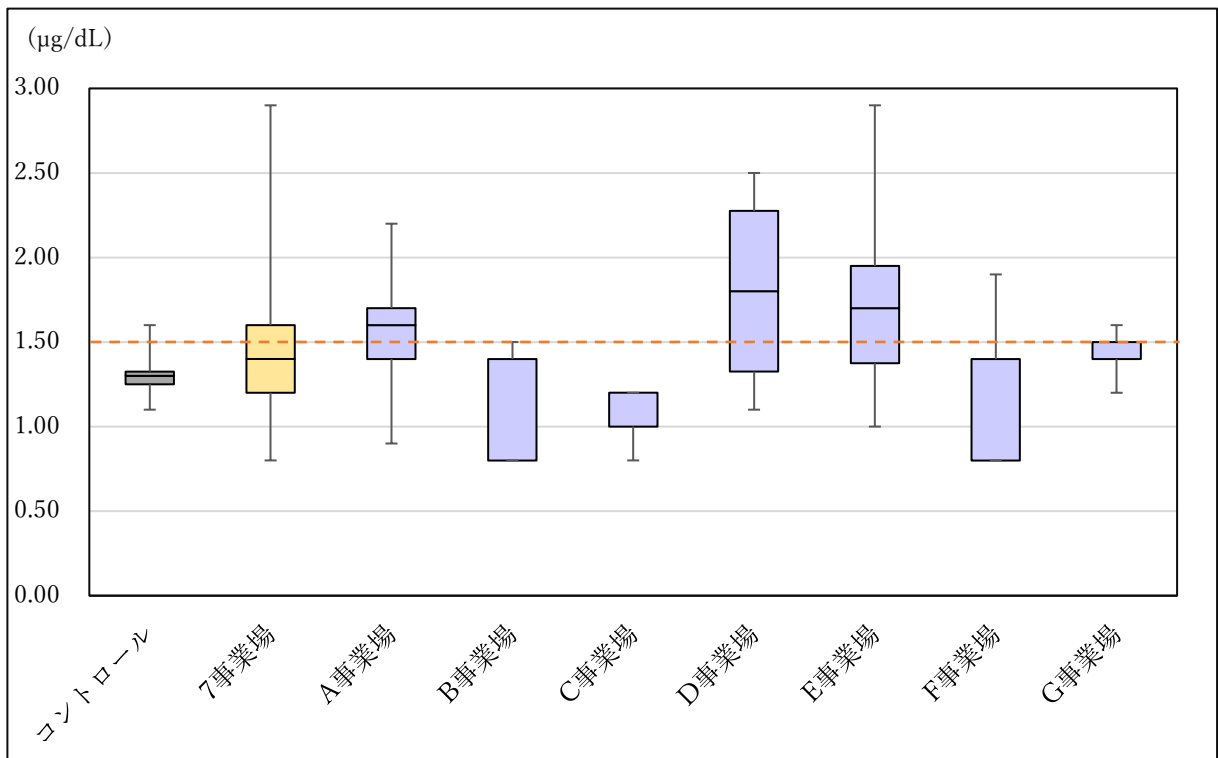


図6. 7事業場 (A~G 事業場) とコントロールの全血中マンガン濃度 (µg/dL) の比較

(考察)

令和3年度から2年間に調査した常時溶接作業員43名の吸入性粉じん濃度は 4.05 ± 4.59 ($0.09 \sim 17.61$) mg/m^3 であった。我々が2000年に造船溶接作業員11名を対象とした吸入性粉じん濃度のデータでは 24.90 ± 23.97 ($3.33 \sim 86.33$) mg/m^3 であり、今回の溶接作業の約6倍高い濃度であった。ヒュームの吸入性粉じんの許容濃度が $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ であることから、過去の造船溶接作業がいかに過酷であったかということが判る¹⁾。TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接と被覆溶接は速度が遅く慣れが必要である手作業であるが、MIG 溶接・MAG 溶接は半自動アーク溶接法である。MIG 溶接とMAG 溶接の違いは溶接時に用いるシールドガスの違いである。MIG 溶接ではアルゴンガス単体のもの、MAG 溶接では混合ガス(アルゴンガス80%、炭酸ガス20%)を使用していたが、吸入粉じん量及びマンガン吸入量については、MIG 溶接とMAG 溶接で相違はなかった(データ示さず)。TIG 溶接は不活性ガスを使用しているため、金属表面に穴やくぼみができにくく、吸入粉じん濃度は他の溶接に比較して低濃度であった。

防じんマスクの漏れ率は過去の我々の報告と同様²⁾、約25%の漏れが認められた。今回対象とした43名について、適正な装着をすれば1.10%の漏れであるが、排気弁に問題があると81%の漏れがある事例もあった。25%以上の漏れを検出した作業員に適正な装着を指導したところ、メリヤス布の使用を中止することにより漏れ率が25.3%から9.7%に、絞め紐のゆるみの是正により47.5%から5.2%に漏れ率が改善された作業員もあった。フィットテストを行う前に紐の状態や排気弁チェック等の始業前点検をきちんと行ってから作業を開始すべきである。

一方、マスクの漏れ率で換算した吸入性マンガン濃度は $0.144 \pm 0.269 \text{ mg}/\text{m}^3$ と管理濃度の $0.05 \text{ mg}/\text{m}^3$ に比較して高いのみならず、D事業場あるいはA事業場では許容濃度の $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ に比較しても高い作業員が多く、全体的に個人ばく露量が多いことが判った。個人ばく露濃度を減らすためにはより適正な防じんマスクの着用に心がけるか、電動ファン付き防じんマスク(PAPR: Powered Air Purifying Respirators)のようなマスク効率の高いマスク

の使用が望まれる。

また、全血中マンガン濃度は $1.47 \pm 0.49 \mu\text{g}/\text{dL}$ であり、コントロールと有意差はなかった。文献によれば全血中マンガン濃度の基準値は $0.4 \sim 1.5 \mu\text{g}/\text{dL}$ と報告されている^{3,4)}。Matsuda⁵⁾は自験例で、マンガン濃度基準値は $1.12 \pm 0.47 \mu\text{g}/\text{dL}$ で $1.5 \sim 1.6 \mu\text{g}/\text{dL}$ が上限ではないかと報告している。マンガンばく露のバイオマーカーとして全血あるいは血漿中のマンガン濃度が使用されるが^{5,6)}、血漿中のマンガンのターンオーバーは速く、骨等の組織では長く保持される⁷⁾。血漿中マンガンは溶接作業員のバイオマーカーとなりうるという報告もあるが、全血中マンガン濃度の約10分の1のレベルであり⁸⁾、血漿や尿中マンガンよりも全血中マンガンはホメオスタシスに関連性が高いと報告されている⁹⁾。また、全血中マンガン濃度は直近のマンガンばく露を反映するものの変動が大きいとも報告されている⁹⁾。一方、Mn/Fe比(MIR)は全血中マンガン濃度やMRIよりもマンガン中毒発症に対する信頼度が高いバイオマーカーとされているが、その証拠に乏しい⁶⁾。そのため、足の爪のマンガン測定は組織内のマンガン蓄積の評価として使用できるとの報告もある¹⁰⁾。

今回我々はマンガンのバイオマーカーとして全血中マンガン濃度を使用した。その基準値を用いれば明らかに高値を示した $2.0 \mu\text{g}/\text{dL}$ 以上の6名に関して吸入性マンガン濃度は $0.162 \sim 0.6927$ (0.4721 ± 0.2134) mg/m^3 であったが、防じんマスクの漏れ率は個人差が大きかったもののマスクの漏れ率の大きい作業員では、許容濃度を超える高濃度のマンガンを吸入していたと考えられる。この結果を考察すると、通常防じんマスクの適正な使用(選定・着用・管理)をしなければマンガン中毒に至る可能性が示唆される。特に使い捨て不織布マスクで溶接作業を行っていた作業員では100%の漏れが確認され、全血中マンガン濃度も $2.2 \mu\text{g}/\text{dL}$ と高値を示していた。

なお、全血中マンガン濃度を従属変数、吸入マンガン濃度や吸入総粉じん量を独立変数とし、溶接方法やマスク漏れ率等を調整した重回帰分析を網羅的に実施したが、吸入マンガン濃度および吸入粉じん量が全血中マンガン濃度をうまく予測するモデルはなかった(吸入マンガン濃度および吸入総粉じん量の β は有意ではなかった)。

マンガン過剰状態となると中毒症状が発生することが

知られている¹⁰⁾。特にマンガ含有の鋼鉄を切断したり、溶接工ではマンガ中毒が起りやすいとされている¹²⁾。マンガ中毒は中枢神経系が主として侵され精神症状と神経症状としてパーキンソン症候群様などの錐体外路症状が発生しやすい。たとえば、サンフランシスコとオークランドの間のベイブリッジ建設のため、溶接を行っていた26名においては精神・神経症状が確認されて、溶接中止後に認知機能は改善されたが、神経症状は悪化したと報告されている¹³⁾。日本においても溶接作業中に発症したマンガ中毒は2例報告されている。そのうち1例は30年間造船溶接を行って典型的パーキンソン症候群様の神経症状を呈しており、全血中マンガ濃度は5.0 µg/dLと高値を示しているが、その他の1例は1.9 µg/dLとそれほど高値を示していなかった。一般的に血液、尿、毛髪のマング含有量は臨床症状とは並行しないことが知られている¹⁴⁾。

全血中マンガ濃度はバイオマーカーになりうるかどうかについてはさらなる症例を蓄積して検討する必要があるが、この指標はvariationが大きいことに留意しておくべきである¹⁵⁾。

我々は2年間で43名の溶接作業者を対象としたが、その年齢は中央値で41歳、溶接作業者期間は中央値11.6年であり、一定期間この作業を行っており、溶接作業者を対象とした他の調査とはほぼ同様であった^{6,10,13)}。しかし、43名の中にはマンガ中毒を示唆する精神・神経学的な異常を示唆する作業者はいなかったが、全血中マンガ濃度は溶接作業者では非作業者に比較して有意に高く、神経学的な不調に陥る¹⁶⁾。フィットテストでパスした作業者ではそうでない作業者に比較して全血中マンガ濃度が有意に高値を示すとの報告もある¹⁷⁾。マンガ中毒の発症には作業中のマンガ濃度とばく露期間の2つの因子が重要な意義を有するが、粉じん濃度がより重要視されている¹²⁾。

一方、対象者の大半は法で定められた防じんマスクを使用しているが、使用しているマスク着用時の漏れ率を考慮すると理論上は要求防護係数を満たしている場合でも、マスク漏れの為比較的高濃度のマンガを吸入している可能性が考えられるので、保護具着用管理責任者の管理により、防じんマスクのフィットテスト実施者を定め、マスクが適正に着用されているかをチェックする、防護係数の高い電動ファン付き防じんマスクを使用するといった対策

が必要である。

今回対象とした43名の吸入マンガ濃度と防じんマスクの漏れ率から計算したマンガのばく露量は少なくないことから今後とも慎重な経過観察が望まれる。

(結論)

溶接作業者のマンガ個人ばく露濃度は比較的高いため、通常防じんマスクを適正に装着しなければ全血中マンガ濃度が高くなり大脳基底核に沈着して中毒症状が出現する可能性もあると考えられた。

(謝辞)

研究について、西出忠司氏(令和4年11月逝去)には、研究分担者として多大なるご尽力をいただきました。心より感謝いたします。

(参考文献)

- 1) 粉じん作業場におけるじん肺患者発生状況に関する研究 岡山産業保健推進センター報告書 2001年3月
- 2) 粉じん作業場におけるマスク効率と呼吸機能に関する研究 岡山産業保健推進センター報告書 2004年3月
- 3) マング IV生化学検査 [2] G.金属 日本臨床 68巻 増刊号1 pp321-324,2010
- 4) ATSDR. Toxicological Profiles. 2012 Sep. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>
- 5) Matsuda A., Kimura M, Takeda T, Kataoka M, Sato M, Itokawa Y. Changes in manganese content of mononuclear blood cells in patients receiving total parenteral nutrition. Clin Chem. 40:829-832, 1994.
- 6) Zhemg W, Fu SX, Dydak U, Cowan DM Biomarkers of manganese intoxication Neurotoxicol 32:1-8
- 7) O'Neal SL, Zheng W. Manganesetoxicity upon overexposure: a decade in review. Curr Environ Health Rep 2:315-328, 2015

- 8) Theiner E, Weber C, Müller E, Venner M, Vervuert I. [Manganese concentrations in whole blood, plasma and serum of adult warmblood horses from 3 locations in Germany] *Tierarztl Prax Ausg G Grosstiere Nutztiere*. 49:234-246,2021
- 9) Baker MG, Simpson CD, Sheppard L, Stove B, Morton J, Coker J, Seixas N Variance components of short-term biomarkers of manganese exposure in an inception cohort of welding trainees *J Trace Elem Med Biol* 0:123-129,2015
- 10) Ward EJ, Edmondson DA, Nour MM, Snyder S, Rosenthal FS, Dydak U. Toenail manganese: a sensitive and specific biomarker of exposure to manganese in career welders *Ann Work Expo Health* 62:101-111, 2018
- 11) 伊規須英輝、松岡雅人、奥野丈夫 マンガン中毒 臨床と研究 80:2225-2228、2003
- 12) 井上尚英 マンガンによる中毒の臨床 臨床と研究 78:1132-1138、2001
- 13) Bowler RM, Gocheva V, Harris M, Ngo L, Abdelouahab N, Wilkinson J, Doty RL, Park R, Roel HA. Prospective study on neurotoxic effects in manganese-exposed bridge construction welders *Neurotoxicol* 32:596-605,2011]
- 14) 大森博之、内野誠 中毒—マンガン、一酸化炭素など 診断と散るよう 92:767-771,2004
- 15) 佐藤紀美子, 上山秀嗣, 荒川竜樹, 熊本俊秀, 津田富康. 溶接工に発症したマンガン中毒性パーキンソニズムの1例. *臨床神経*. 40:1110-1115,2000
- 16) Tsuji M, Koriyama C, Ishihara Y, Isse T, Ishizuka T, Hasegawa W, Goto M, Tanaka R, Kakiuchi N, Hori H, Yatera K, Kunugita N, Yamamoto M, Sakuragi T, Yasumura Y, Kono M, Kuwamura M, Kitagawa K, Ueno S. Associations between welding fume exposure and neurological function in Japanese male welders and non-welders. *J Occup Health*. 65(1):e12393, 2023
- 17) Tsuji M, Hori H, Koriyama C, Tanaka R, Isse T, Ishihara Y, Ishizuka T, Hasegawa W, Goto M, Yatera K, Kunugita N, Kuwamura M, Sakuragi T, Yasumura Y, Yamamoto M, Ueno S. 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. *J Occup Health*. 65(1):e12399, 2023