

本研究の限界として、PAPR、防じんマスクともに単一型番での調査であることが挙げられる。また、単一の気温や湿度、運動条件による調査であることも挙げられる。今後は複数の型番で、様々な条件下での調査が望まれる。

また、本実験で使用した冷風装置では吸入する空気を 10℃ほど低くしたが、今後改良を重ねることでさらに吸入する空気の温度を下げる事が望まれる。

E. 結論

冷風装置付き PAPR は通常の PAPR や通常の防じんマスクと比較し、暑熱環境下における身体負荷を軽減させる可能性が示唆された。冷風装置付き PAPR は熱中症予防に有効である可能性がある。

F. 参考文献

1. Geladas, N. and E.W. Banister, Effect of cold air inhalation on core temperature in exercising subjects under heat stress. *J Appl Physiol* (1985), 1988. 64(6): p. 2381-7.

2. Tsuji, B., et al., Effects of cold air inhalation on body temperature, respiratory and cerebrovascular responses during exercise in the heat. *Extreme Physiology & Medicine*, 2015. 4(Suppl 1).

G. 研究発表

1. 論文発表
該当なし
2. 学会発表
該当なし

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得
特願 2020-2928
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

令和元年度労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

電動ファン付き呼吸用保護具装着による呼吸器負担への影響の検討

研究分担者 安藤 肇, 池上 和範

研究協力者 世古口 真吾, 吉武 英隆

産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学

研究要旨

我々が以前実施した PAPR を使用した際のバイタルサインへの影響についての研究では, PAPR の使用が身体負担の低減に繋がる可能性が示唆された. 本研究では身体負担を総合的に評価するため呼気ガス分析を行い, PAPR と通常防じんマスクの消費エネルギーについて検討した. 対象者は 10 名でクロスオーバー比較試験を実施した. 通常の防じんマスク (DM) として株式会社重松製作所製 DR70SDC2, PAPR として同社製の Sy11 を用いた. 呼気ガス分析には有限会社アルコシステム社製 ARCO-2000 を用いた. 排気弁から排出される呼気のみを捕集するため専用のアタッチメントを作製した. 人工気候室にて気温 20 度, 相対湿度 50% の環境下において 10 分間安静ののち 20 分間エルゴメーターにて 70W の運動負荷を行った. 呼気ガス分析計にて算出された消費エネルギー量を検討した. 安静時 (0~9 分) の平均消費エネルギー量 (標準偏差) は DM92.0 (26.6) W, PAPR86.5 (29.4)W であった. 運動時は運動開始直後のデータを除いた 12 分~30 分のデータにおいて, 平均消費エネルギー (標準偏差) は DM441.5 (47.3)W, PAPR414.6 (50.4)W であった. PAPR は DM と比較して消費エネルギー量が少ない可能性が示唆された. 高齢者や基礎疾患がある労働者など身体予備能の低下した労働者に有用である可能性がある.

A. 研究目的

呼吸用保護具は, じん肺をはじめとする健康障害防止を目的に多くの事業所で装着されている. 近年, 電動ファンとバッテリーを使用しマスク内に送風することで呼吸を楽にし, マスク内を陽圧にすることで防護

率を高める電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR) が普及しつつある. これまで我々は, PAPR の漏れ率や装着時の自覚症状, 血圧や心拍数を元にした身体的負担の評価を行ってきた. 主観的疲労度は PAPR の方が低く, 血圧, 呼吸数, 心拍数などの循環器指標の

変動から、PAPR の使用が身体的負担軽減につながると推察された。

一方、少子高齢化により、呼吸用保護具が必要となる職務に従事する高齢者や、循環器系疾患や呼吸器系疾患を持ちながら働く人が増加することが予想される。これらの労働者は心肺の予備能が低下している事が考えられることから、安全・快適に業務を遂行するためには、呼吸用保護具装着時の呼吸負担、身体負担を低減させることが課題である。PAPR は持続的にマスク内を陽圧にしているため、それらの負担を軽減できる可能性がある。PAPR を装着することにより、通常防じんマスク装着時より身体負担を低減できれば、より多くの高齢者や疾患を持つ人が防じんマスクが必要となる作業に従事することが可能になることが考えられる。

先行研究において、疲労感や息苦しさは通常の防じんマスクと比べてPAPR装着時で低いとされているが、呼吸用保護具装着時の消費エネルギー量を比較検討した研究はほとんどない。PAPR が通常の防じんマスクと比較して消費エネルギー量が低ければ、労働者全体の負荷軽減につながるだけでなく、高齢者や疾患を抱えた労働者がより幅広い職務に従事できることにつながるのではないかと考えた。

本研究では、呼気ガス分析を行うことで消費エネルギーを算出し、あわせて呼吸数、呼気量等から呼吸器負担を評価することを目的とする。取り替え式防じんマスクとPAPR 装着時それぞれで評価を行い、マスク

間での比較検討を行う。本研究により、呼吸用保護具装着時の身体的負担の客観的・定量的な比較を行うことで高齢者や疾患を持つ人が従事できる作業が増える可能性がある。

B. 研究方法

1. 研究デザインとセッティング

参加同意の得られた被験者に対して、クロスオーバー比較試験を実施した。調査は、産業医科大学人工気候室で、2019年10月から12月まで実施した。

2. 被験者

被験者の選定には健康な成人男性という条件を設定した。産業医科大学内にて被験者を募集し、参加同意を得られた10名を対象とした。平均年齢（標準偏差）は27.7（9.14）歳であった。

3. 呼吸用保護具

本研究で用いた呼吸用保護具は、後述するマスク専用アタッチメント作製に適合しやすい機種を市販品より選定して用いた。具体的には一般的な防じんマスクとして株式会社重松製作所製のDR70SDC2（以下、DM）、電動ファン付き呼吸用保護具として株式会社重松製作所製のSy11（以下、PAPR）を用いた。フィルタはそれぞれC2（対応規格：RL2）とG2（対応規格：PL1）を用いた。

4. 呼気ガス分析

呼気ガス分析計は有限会社アルコシステム社製 ARCO-2000 を用いた. 呼気代謝計測モジュール (ARCO-2000-MET) の Breath by Breath モードで呼気を毎回検知し, 分析を行った. 本装置は消費エネルギーを Weir の式により算出している. 具体的には

$$ME(\text{cal}/\text{min})=3.9*V\text{O}_2+1.1*V\text{C}\text{O}_2$$

である. なお, 解析は Watt を単位として算出された値を用いた.

5. アタッチメントの作製

呼吸用保護具を用いた際のガス分析としては, マスク面体にサンプリング孔を開け, 面

体内の空気をサンプリングする方法などが行われてきている. しかしながら, 面体内の空気では吸気と呼気の成分が混在していると考えられ, 正確な代謝量を知ることは困難であると考えられた. 一般的に最大酸素摂取量測定の場合には専用のマスクを装着し, 呼気弁外側に検知器を装着して呼気ガスの測定が行われている (図 1). 当該手法を参考に, 本研究では, より正確な代謝量を測定するため, 各呼吸用保護具の排気弁外側に専用のアタッチメントを装着し, 呼気のみを捕集することにより, 代謝量を測定することを試みた.



図 1 一般的な最大酸素摂取量測定風景

アタッチメントは各呼吸用保護具の寸法を測定した後、3D CAD (Autodesk 社製 Fusion360) にてモデリングを行い、3D プリンタ (Flashforge 社製 Creator3) で出力した。呼吸用保護具にフィットさせる必要があるため素材にはある程度の柔軟性を持った素材である ABS を用いた。形状については、PAPR の排気弁直上に締め紐のための部材が装着されていることから、干渉を避ける形状とした。DM には排気弁周辺に干渉する部材は存在しなかったものの、アタッチメントの装着に伴う測定値への影響を少なくするため、同様の形状とし、排気弁部分の直径等を修正するにとどめた。呼気ガス分析計のフローセンサー PN-230 と接続する部分についてはフローセンサーに合わせた径でデザインし、アタッチメントとフローセンサーを直結できる設計とした。

予備実験を行ったところ、DM については呼気ガス分析が可能であった一方、PAPR

については呼気を検出することができなかった。本研究における呼気ガス分析装置においては空気のフローから呼気中であるか否かを判定し、呼気のみを測定する仕組みとなっている。PAPR においては吸気時にも面体内の陽圧が維持されているため、排気弁から空気の漏れ出しがあり、常にフローが流れているため、呼気の検知に失敗したものと考えられた。この問題に対し、アタッチメント内に 2 つめの排気弁を設けることで吸気時のフローが減り、呼気検知が正常に動作することが判明したため、PAPR 用アタッチメントのみ排気弁を内蔵した形状とした。

アタッチメントは、各マスクに装着後、接続部からの漏れ出しを防ぐため、シールテープを巻き、接着剤や紫外線硬化性の樹脂などで密着させた。製作したアタッチメントの図面ならびに写真を図 2~5 に示す。

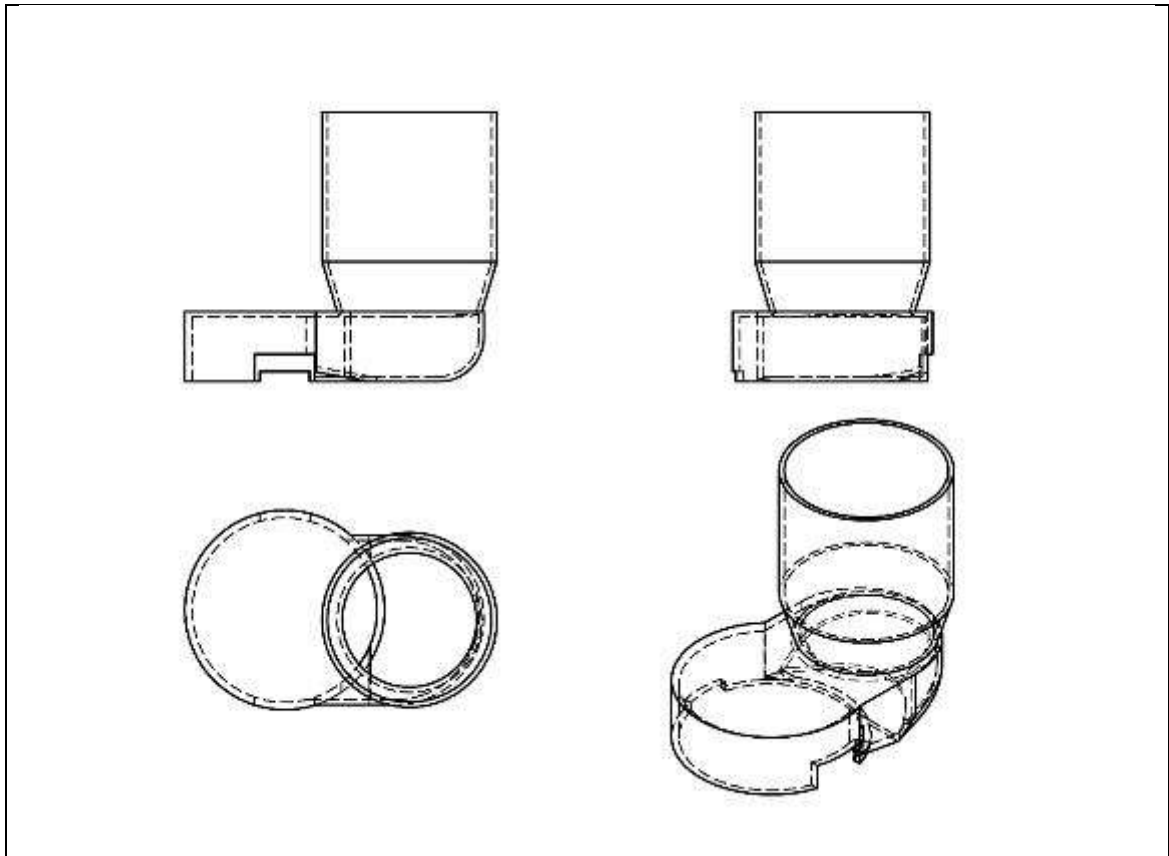


図2 通常防じんマスク用のアタッチメント図面



図3 通常防じんマスク用のアタッチメントを装着した状態の写真

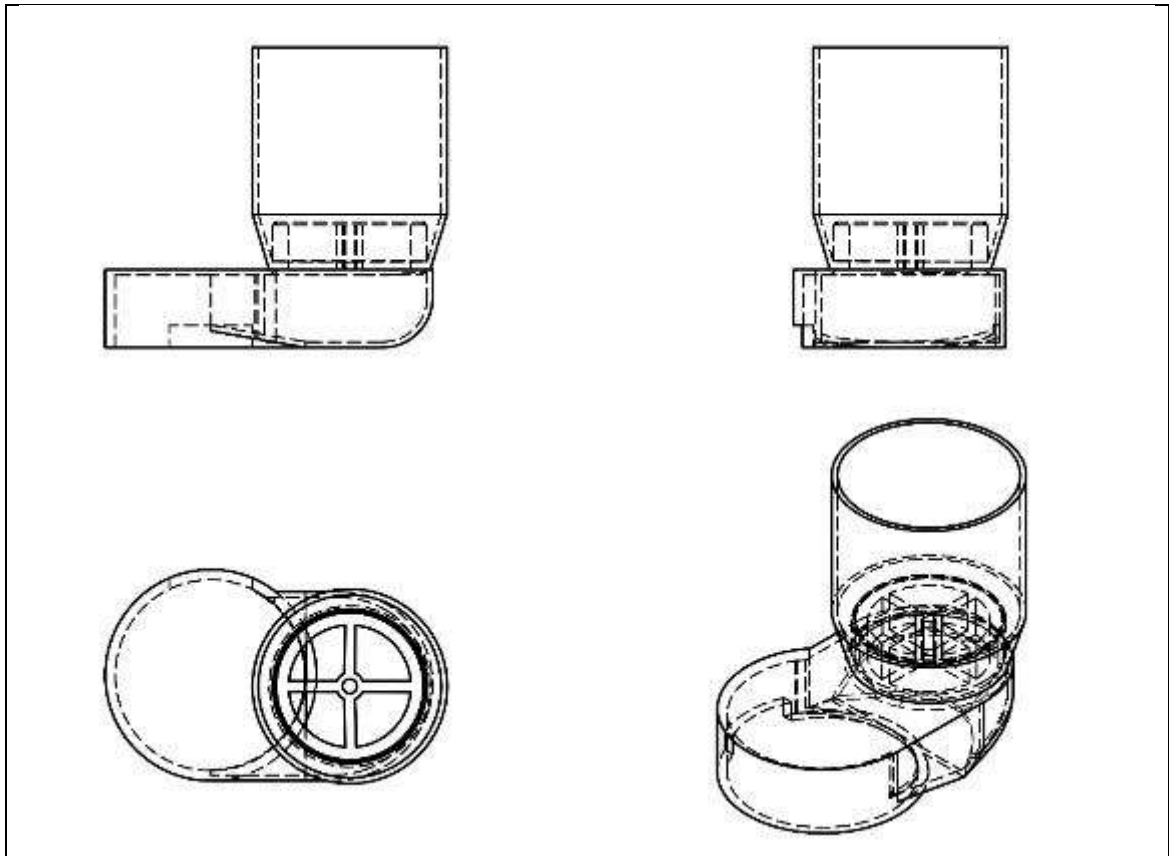


図4 PAPR用アタッチメントの図面



図5 PAPR用のアタッチメントを装着した状態の写真

6. 測定手順

実験は、気温や湿度の影響を考慮し、産業医科大学人工気候室において室温 20 度、湿度 50%を維持した状態で実施した.PAPR あるいは DM のいずれかを装着した状態で、初めに 10 分間の安静下で測定を行い、次いで 20 分間の運動負荷中にも同様の項目の測定を行った.運動負荷はエルゴメーターで 70W の負荷とした.

測定項目は、各種生理学的指標（心拍数、

呼吸数など）および呼気ガスの酸素濃度、二酸化炭素濃度、呼気量であるおよび呼気ガス分析データから算出される消費エネルギー量である.

同一日に実施するのは 1 種類の呼吸用保護具装着下での測定し、全 2 回計 2 日間測定を実施した.マスク装着の順に関しては無作為化割り当てを行った.実験の概要を図 6、測定風景を図 7 に示す.

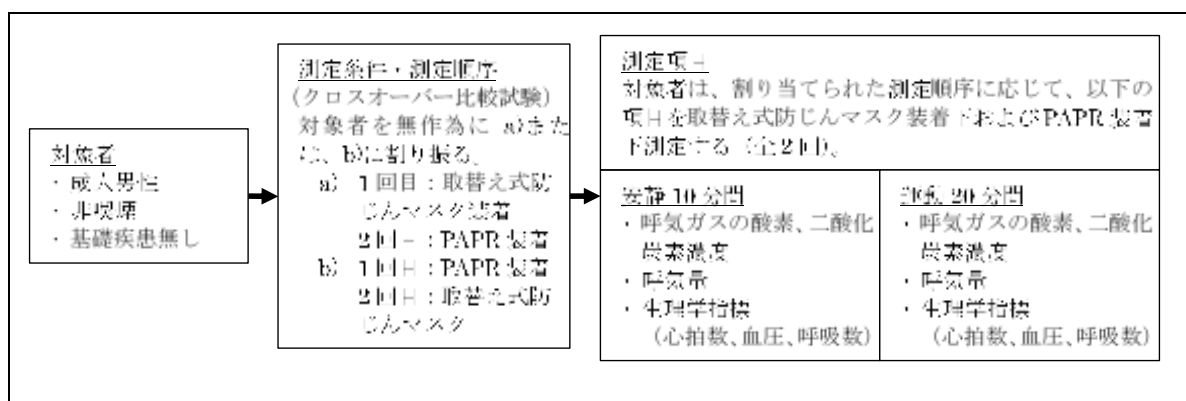


図 6 実験手順の概要



図7 測定風景（通常防じんマスク測定時）

7. 解析方法

呼吸ガス分析計による代謝量データは、呼吸タイミング等により1分間に6回程度計測される。今回は1分間の測定値を平均し、その時刻における代表値として用いた。

8. 倫理的配慮

本研究は産業医科大学倫理委員会の承認を得ており、個人情報の取扱いおよび保管には万全の配慮を行った。対象者は本研究に参加することの利益と不利益とを説明された上で、参加または不参加を自由に選択できることを保証した。参加に同意を得ら

れた対象者からは同意書を得た。

C. 研究結果

今回の被験者別の測定結果を図8に示す。全被験者の測定結果をまとめたものを図9に示す。安静時(0~9分)の平均消費エネルギー量(標準偏差)はDM92.0(26.6)W, PAPR86.5(29.4)Wであった。運動時は運動開始直後のデータを除いた12分~30分のデータにおいて、平均消費エネルギー(標準偏差)はDM441.5(47.3)W, PAPR414.6(50.4)Wであった。

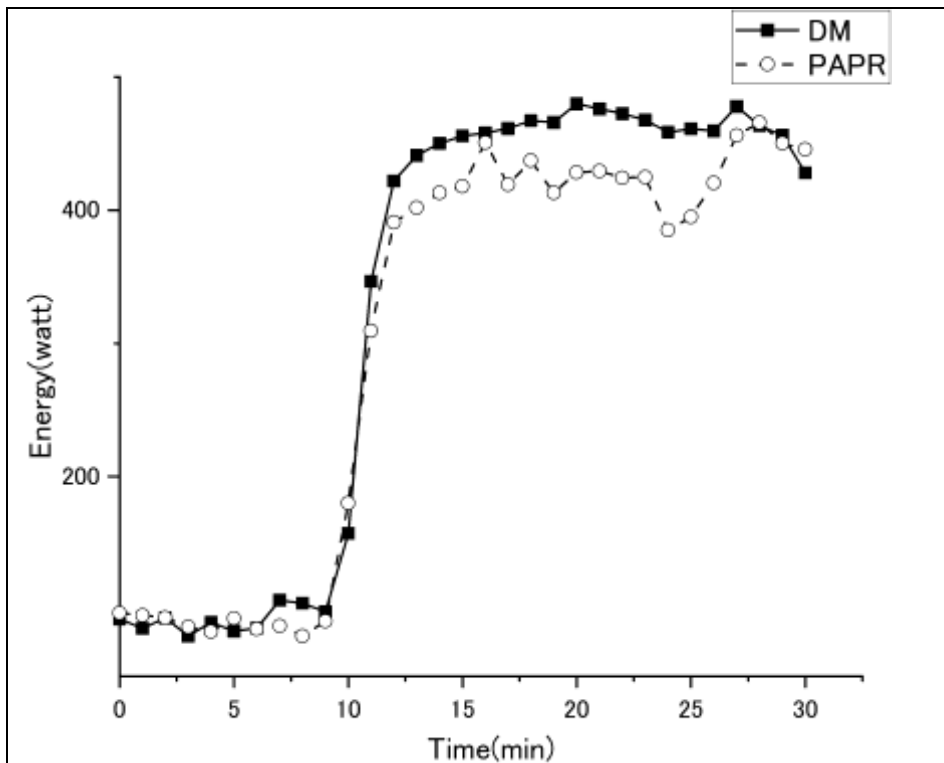


図 8-1 被験者 A の測定結果

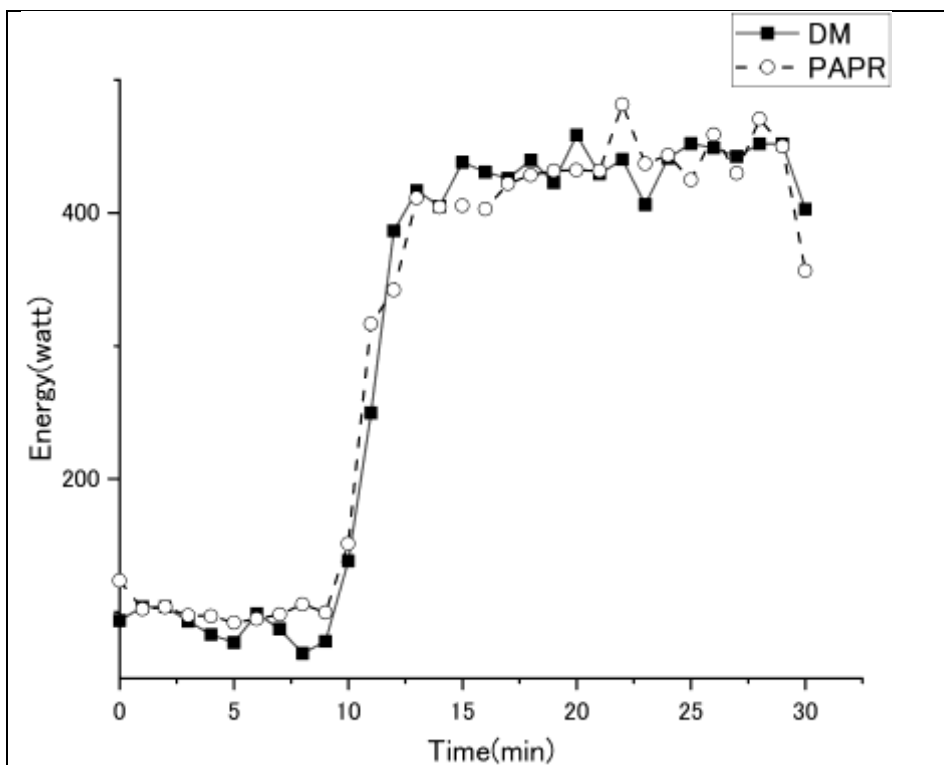


図 8-2 被験者 B の測定結果

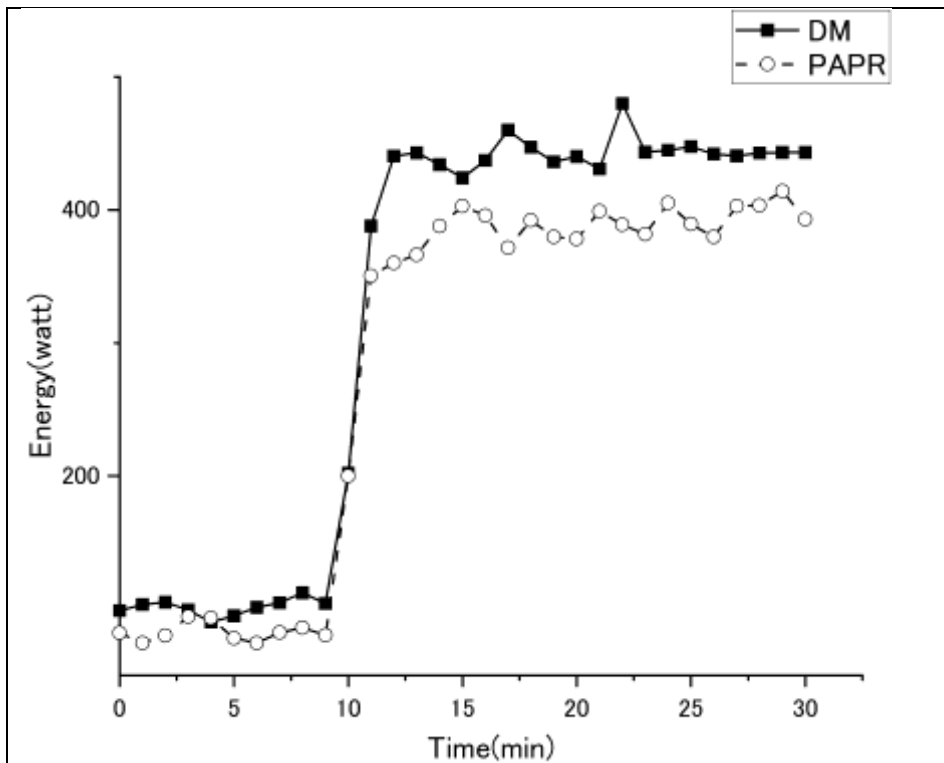


図 8-3 被験者 C の測定結果

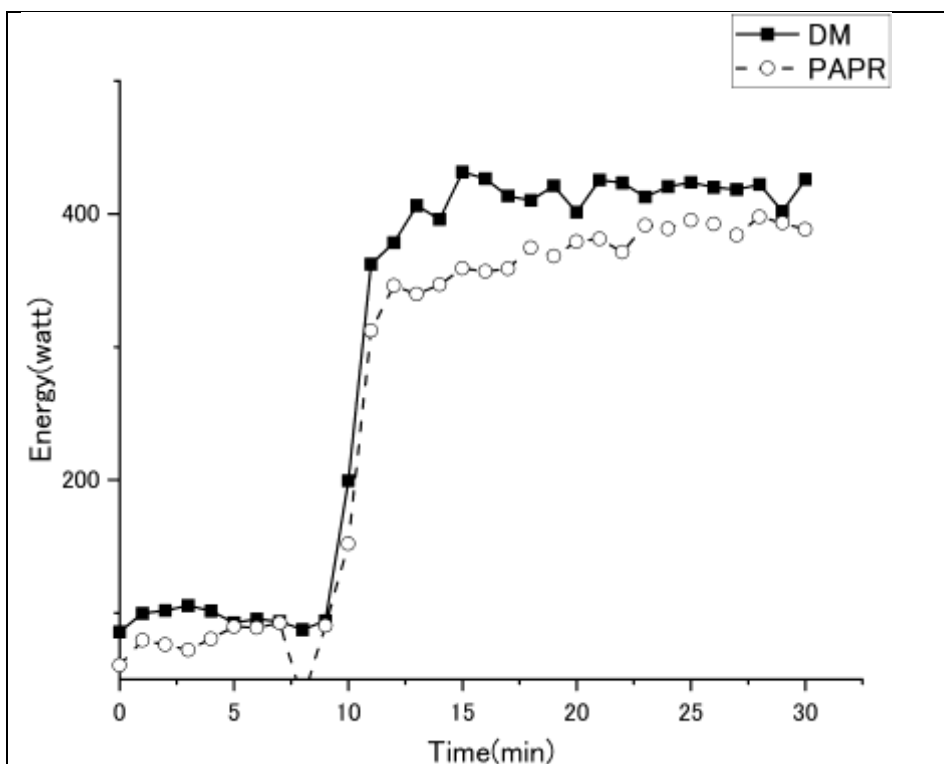


図 8-4 被験者 D の測定結果

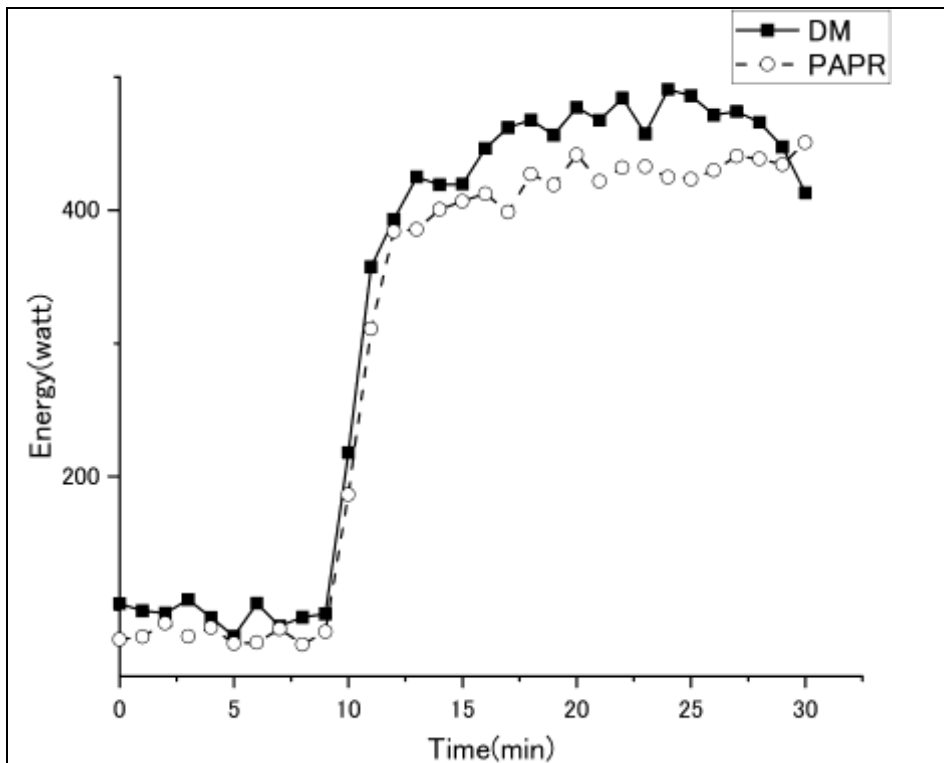


図 8-5 被験者 E の測定結果

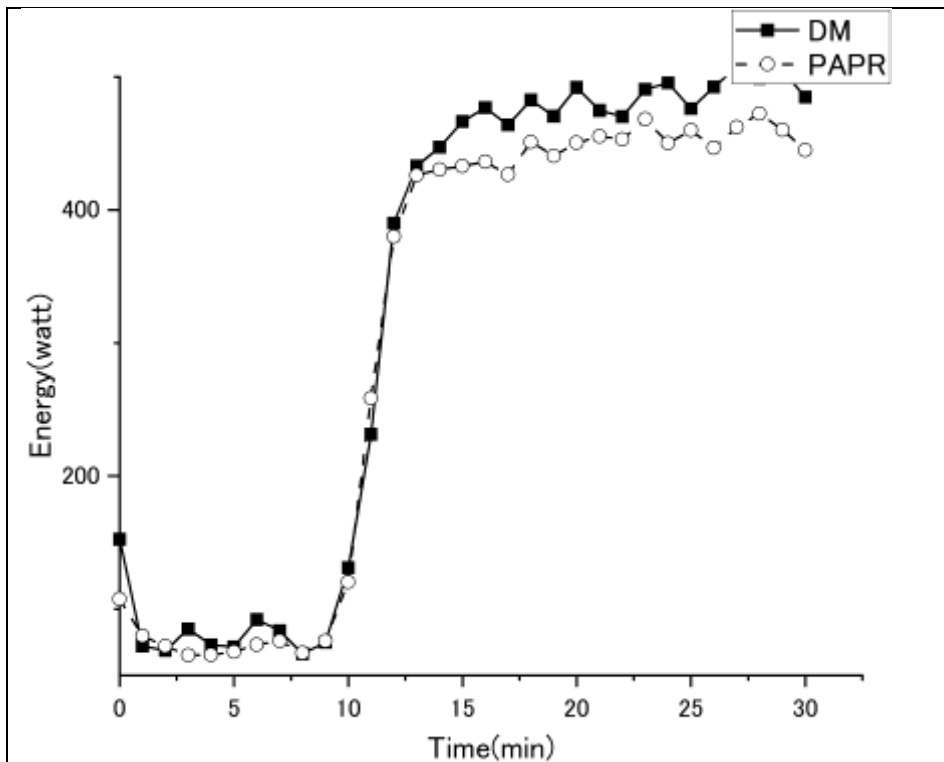


図 8-6 被験者 F の測定結果

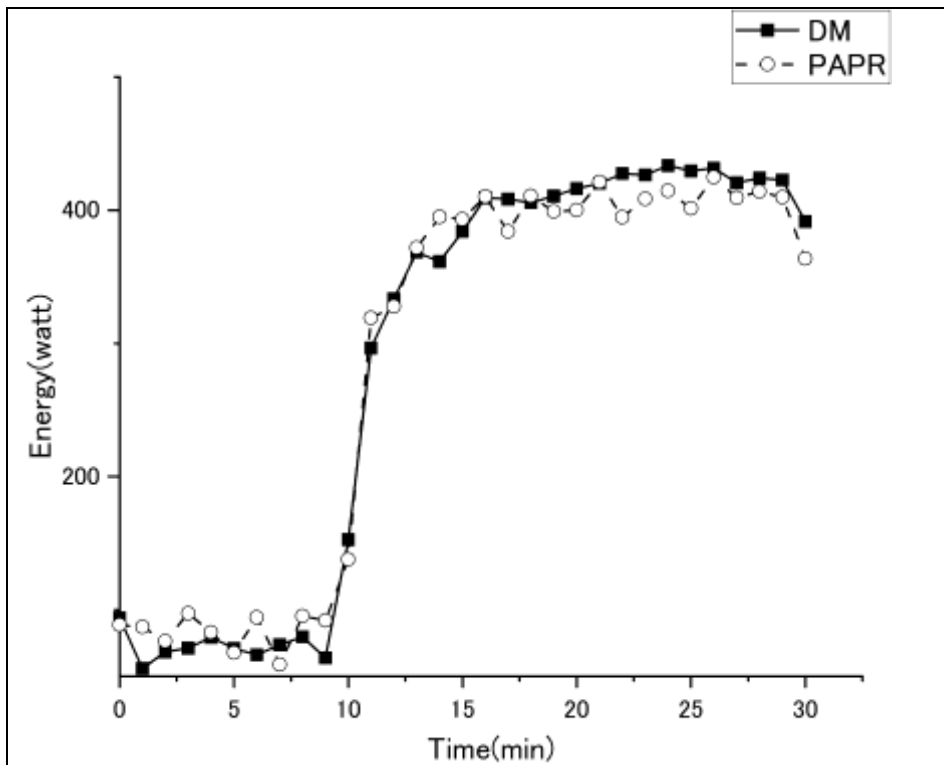


図 8-7 被験者 G の測定結果

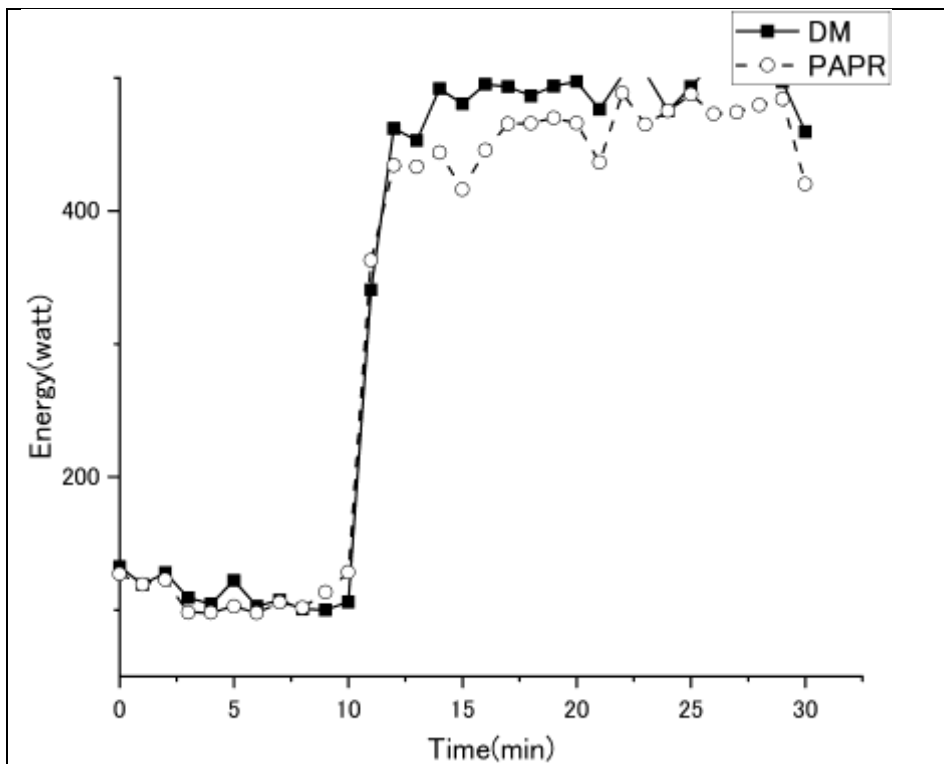


図 8-8 被験者 H の測定結果

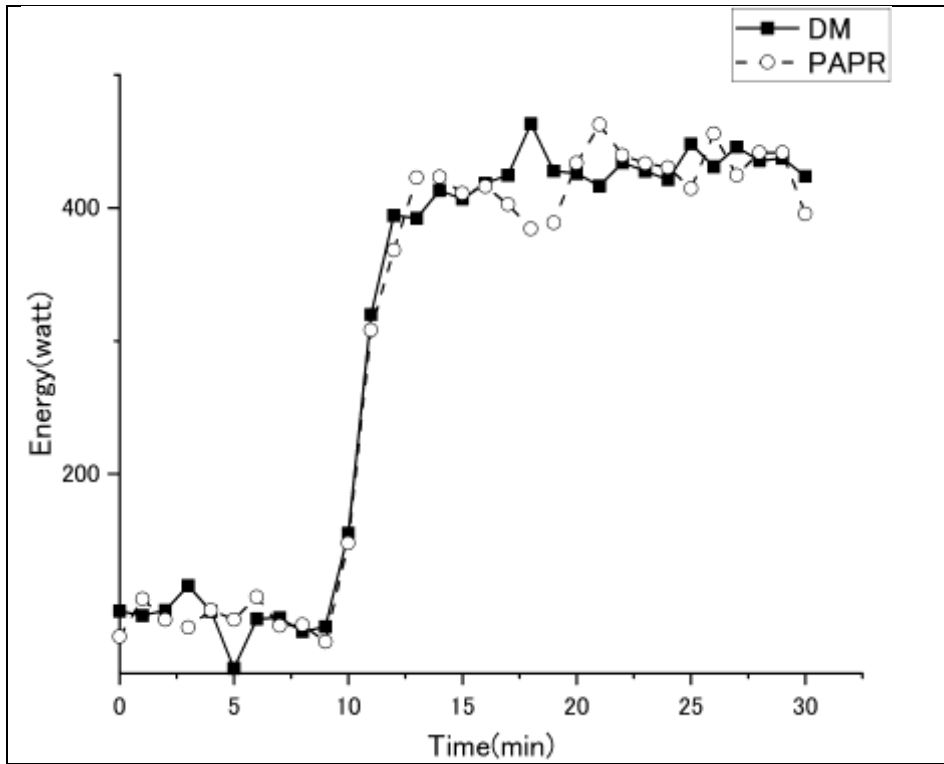


図 8-9 被験者 I の測定結果

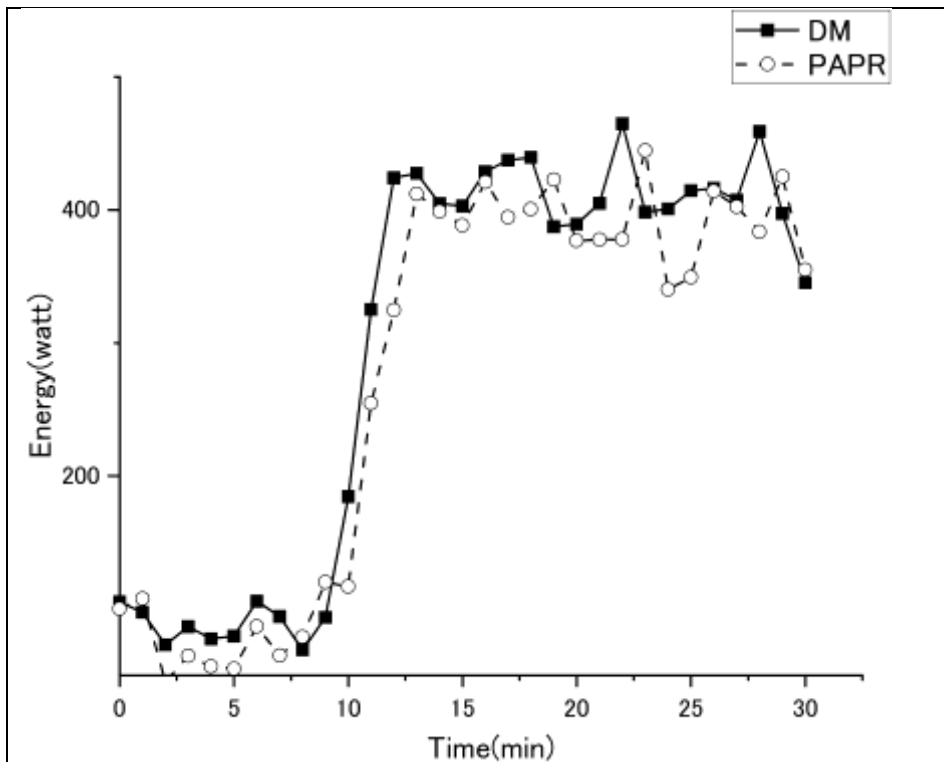


図 8-10 被験者 J の測定結果

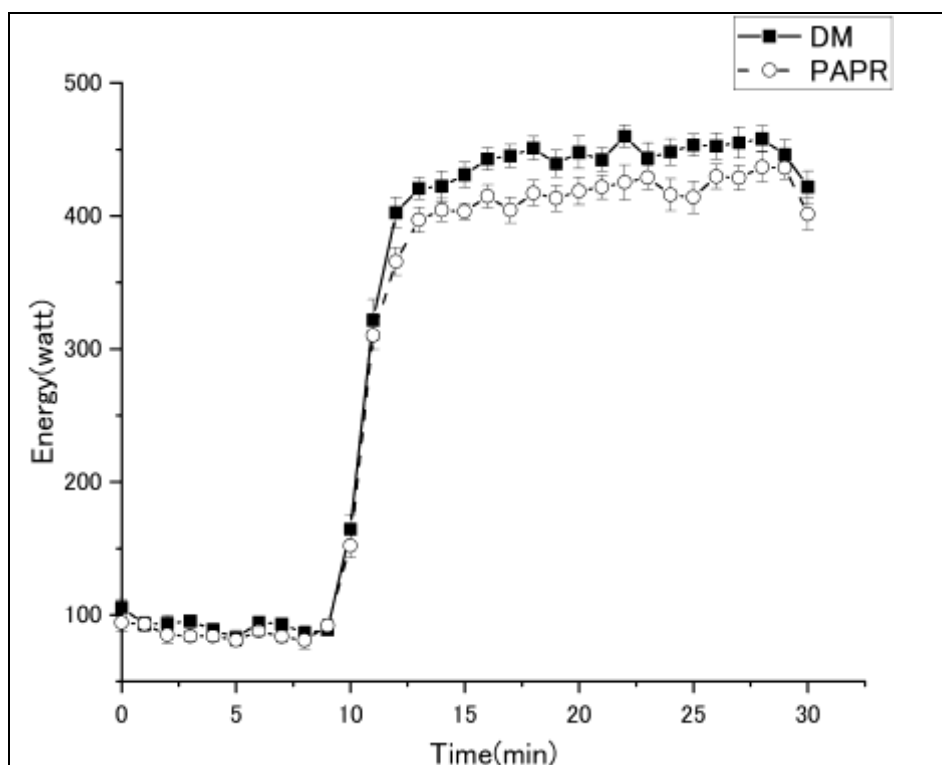


図9 全被験者の測定結果
 グラフは平均値±標準誤差を示す。

D. 考察

安静時の消費エネルギーについてはDM, PAPERともに概ね同等の水準で推移している。今回, DMとPAPERのアタッチメント構造が完全には一致していないものの, 安静時に同様の結果が得られたことから正常な測定が実施できたものと推察された。運動時についてはPAPERが継続的にDMの消費エネルギーを下回った。PAPERのアタッチメントには呼気弁が追加されており, 測定時に呼吸抵抗が強いとの意見もみられたものの, 消費エネルギー上はなお, PAPERの方が代謝への

影響が少ないという結果であった。被験者別にみると運動中の代謝量がDMとPAPERでほとんど変わらない者とPAPERの方が低い被験者に分かれているが, この要因については明らかではなかった。

今回の結果より, 身体負荷に対する予備能の低い者, 例えば代謝性疾患や呼吸・循環器系の疾患がある者, 高齢者等においては代謝への影響がより少ないPAPERを活用することが有用である可能性が示唆された。

本研究の限界として, DM・PAPERともに単一型番での調査であり, DM・PAPER一般にお

ける代謝の相違について論じることはできない。第2に、今回実施したアタッチメントによる測定手法は一般化されたものではなく、必ずしも正しい代謝量が測定されたかは不明である。しかしながら、両保護具でほぼ同等の手法で測定を行っていることから、代謝量の相対的な関係性は維持されているものと考えられる。今後は、さらに高齢者や疾患のあるものを対象にした調査などで、よりPAPRが有効である集団を明らかにしていくことが望まれる。あわせて、PAPR装着時の方が消費エネルギーが低下するか否かに影響する因子について検討することが望まれる。

E. 結論

PAPRは防じんマスクと比較し代謝量が少なくなる可能性が示唆された。PAPRは身体負荷予備能の低いものに対してより有効である可能性がある。

F. 参考文献

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

なし

2. 学会発表

なし

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

特記事項なし

令和元年度労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

ウェアラブル粉じん計を用いた職場環境の評価について

研究分担者 安藤 肇¹⁾, 池上和範¹⁾, 盛武 敬²⁾, 明星 敏彦³⁾, 保利 一⁴⁾

研究協力者 世古口 真吾¹⁾, 吉武 英隆¹⁾, 石垣 陽⁵⁾

1) 産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学

2) 産業医科大学 産業生態科学研究所 放射線健康医学

3) 産業医科大学 産業生態科学研究所 労働衛生工学

4) 産業医科大学 産業保健学部 作業環境計測制御学

5) 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

研究要旨

労働現場における粉じん濃度をリアルタイムで把握することができれば、粉じんばく露量が多い作業環境や作業内容を高い確度で特定することができ、作業環境や作業方法の改善や呼吸用保護具の適切な選定など、粉じん作業従事労働者の健康障害防止のための行動につながる可能性がある。我々は、環境中の粉じん濃度を随時測定し可視化するために、スマートフォン接続型の小型のウェアラブルパーティクルモニター（ヤグチ電子工業株式会社、以下、WPM）を試作した。本研究の目的は、第一に、ウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証を行い、その有用性を検討すること、第二にウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査することである。前者は、実験室の粉じんばく露チャンバーを用いて実施し、後者は、屋外粉じん発生事業場で実施された。今後、いくつか改良すべき点が明らかになったが、ウェアラブルパーティクルモニターは、作業者のいる環境中の粉じん濃度の推定が可能であり、粉じんばく露状況の把握に有用である。

A. 背景

粉じん作業現場では労働安全衛生法に基づき、作業環境測定が行われている。しかし、溶接業などでは作業環境測定と個

人ばく露に解離性があるため、作業環境測定だけでなく、個人ばく露も問題となっている。

環境中の粉じん濃度は時々刻々と変化

しており、リアルタイムで把握することは容易ではない。仮に、労働現場における粉じん濃度をリアルタイムで把握することができれば、粉じんばく露量が多い作業環境や作業内容を高い確度で特定することができる。それにより、作業環境や作業方法の改善や呼吸用保護具の適切な選定など、粉じん作業従事労働者の健康障害防止のための行動につながる可能性がある。

我々は、環境中の粉じん濃度を随時測定し可視化するために、スマートフォン接続型の小型のウェアラブルパーティクルモニター（ヤグチ電子工業株式会社）を試作した（図 1, 図 2）。すでに、市販されているリオン社製のパーティクルカウンターKC-52 との比較性能評価（信頼性、妥当性）を実施した。機器毎の計測値のばらつきは認められたものの、日常の職場環境を測定するレベルの粉じん濃度相対値を測定するには十分な信頼性を確認できた。作業環境測定や個人ばく露測定に代わりになるものではないが、粉じんばく露状況の大まかな推測に活用できる可能性がある。

ウェアラブルパーティクルモニターは、光散乱方式（LD-6N2 型と同様）、測定範囲：0～999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、設定 K 値は、たばこ粒子の質量濃度変換係数がデフォルト設定されているが、その詳細については不明（仕様書にも未記載）、サイズ：42.5mm×32mm×24.5mm、重さ：68g、吸入：ファン式／流量（未確認）
ウェアラブルパーティクルモニターとスマートフォンを Bluetooth で接続し、app で計測値を随時確認できる。センサー自

体に取り付けられたライトで、おおよその相対濃度レベルの確認も可能である（図 2）。

本研究の目的は、第一に、ウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証を行い、その有用性を検討すること、第二にウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査することである。



図 1. ウェアラブルパーティクルモニター(本体とアンドロイド用アプリケーション)



図 2. ウェアラブルパーティクルモニター

B. ウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証（実験1）

1. 目的

本研究の目的は、ウェアラブルパーティクルモニターの信頼性・妥当性検証を行い、その有用性を検討する。

2. 方法

実験室内のばく露チャンバー内（図3-5）にウェアラブルパーティクルモニター9

台を設置しネブライザー内に標準粒子（ポリエチレンラテックス PSL 粒子） $\phi 1\mu\text{m}$ 、 $\phi 2.5\mu\text{m}$ 、 $\phi 0.6\mu\text{m}$ ）をこの順で加えた（図6）。リオン社製のパーティクルカウンターKC-52を比較対象として粉じん濃度の計測を行った。



図3. ウェアラブルパーティクルモニターを設置した粉じんばく露チャンバー内



図 4. 粉じんばく露チャンバー内のウェアラブルパーティクルモニターによる粉じん濃度測定中の様子

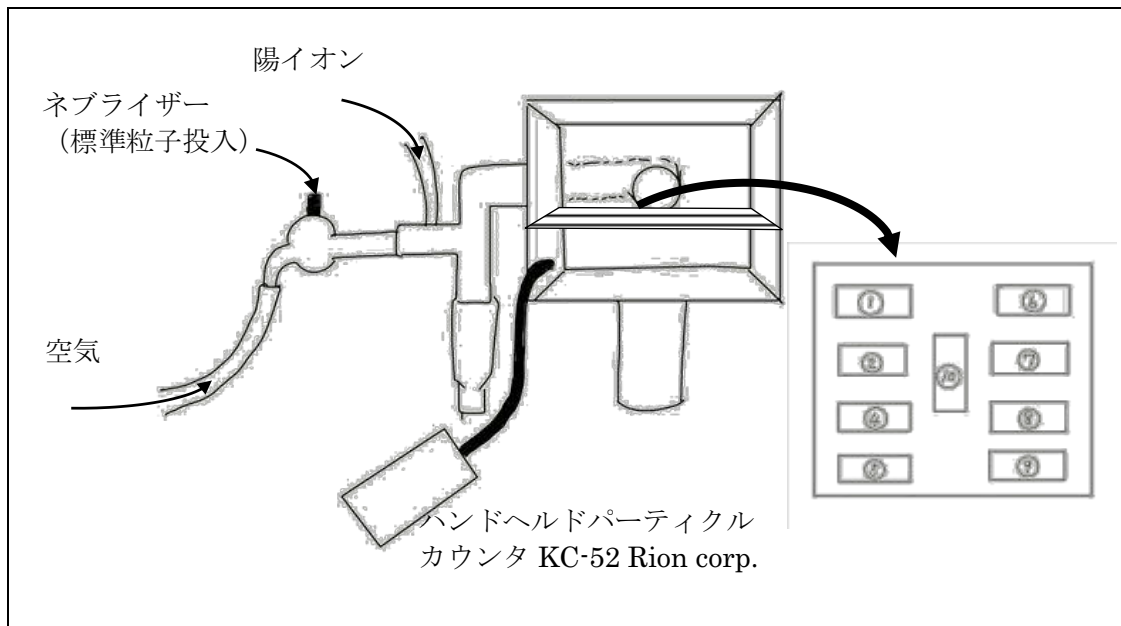


図 5. 粉じんばく露チャンバーの構造

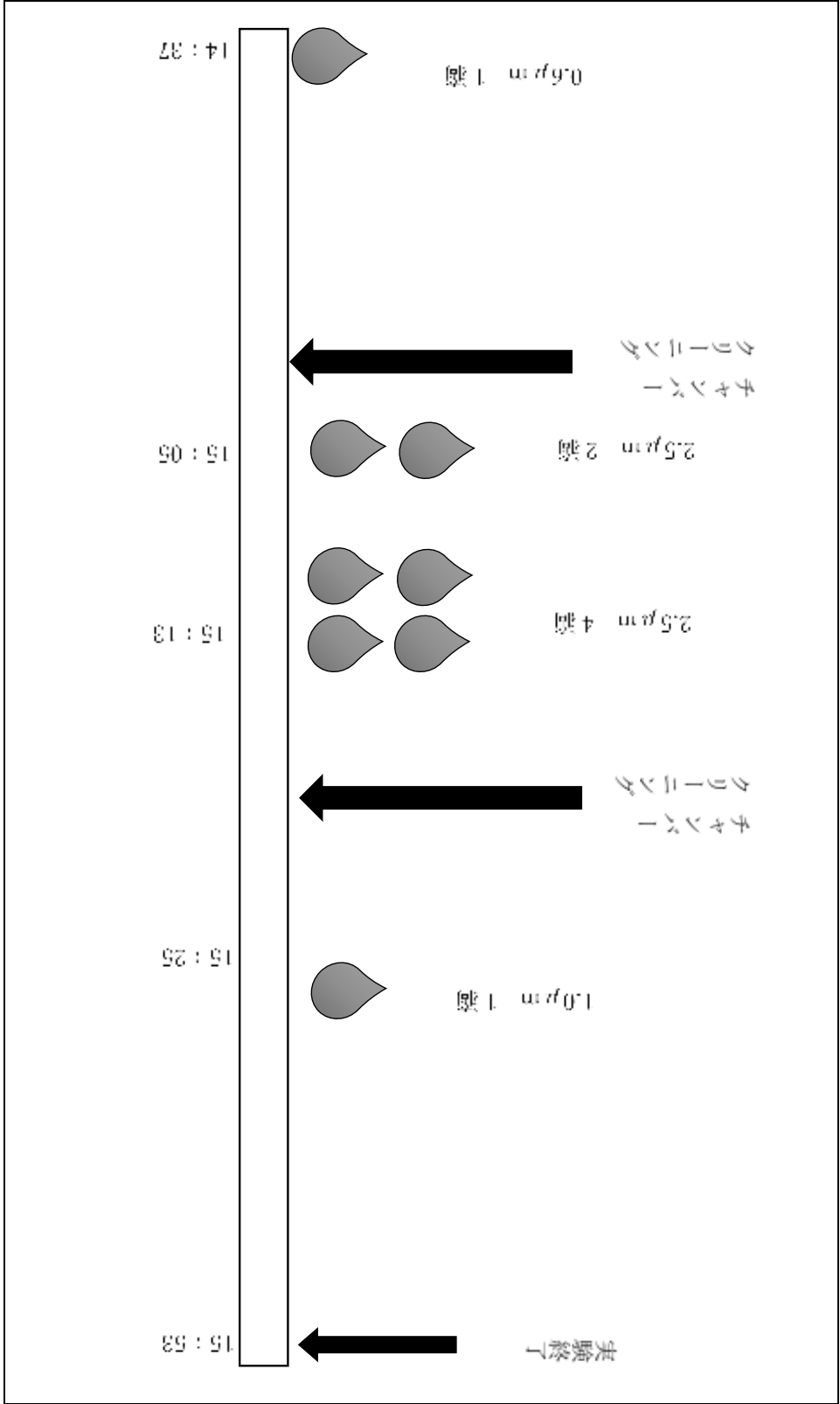


図 6. 標準粒子 (ポリエチレンテトラックス PSL 粒子)の滴下のタイミング

3. 結果・考察

ウェアラブルパーティクルモニターは物質の種類や粒形にかかわらず、同一の質量濃度係数 K 値を使用しており、実際は粒子数のカウントに相当する。そのため、粒子数 (CPM) との整合性は保たれていたが、当然、質量濃度との整合性は良くなかった (図 7, 8)。各ウェアラブルパーティクルモニターの測定値の挙動は同様の傾向があったが、機器間で測定値の乖離を認めた。外れ値を「各センサーの平均値±標準偏差の3倍の範囲外」の値とした場合、外れ値2個発生が7台、1個発生が2台あった。

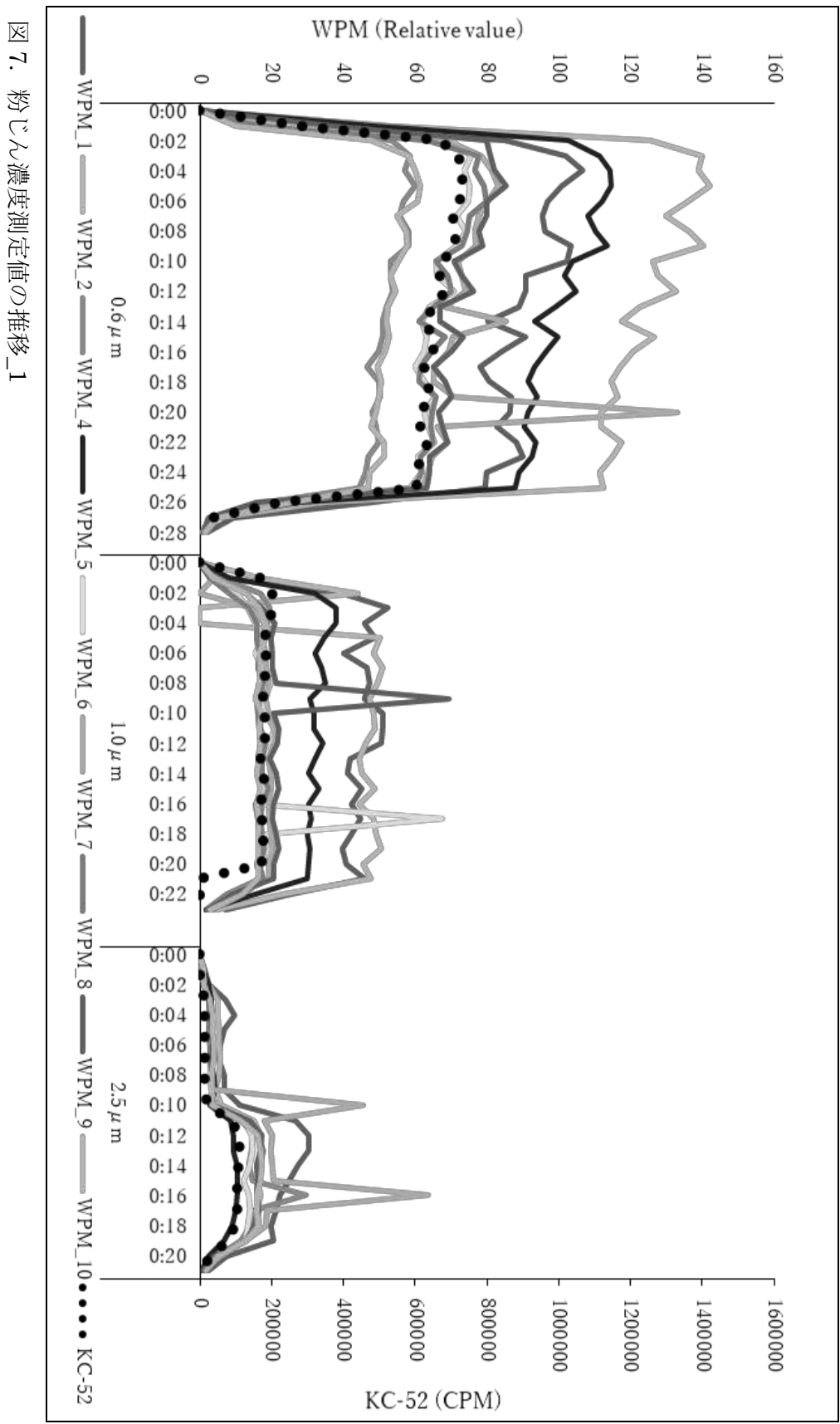


図 7. 粉じん濃度測定値の推移_1

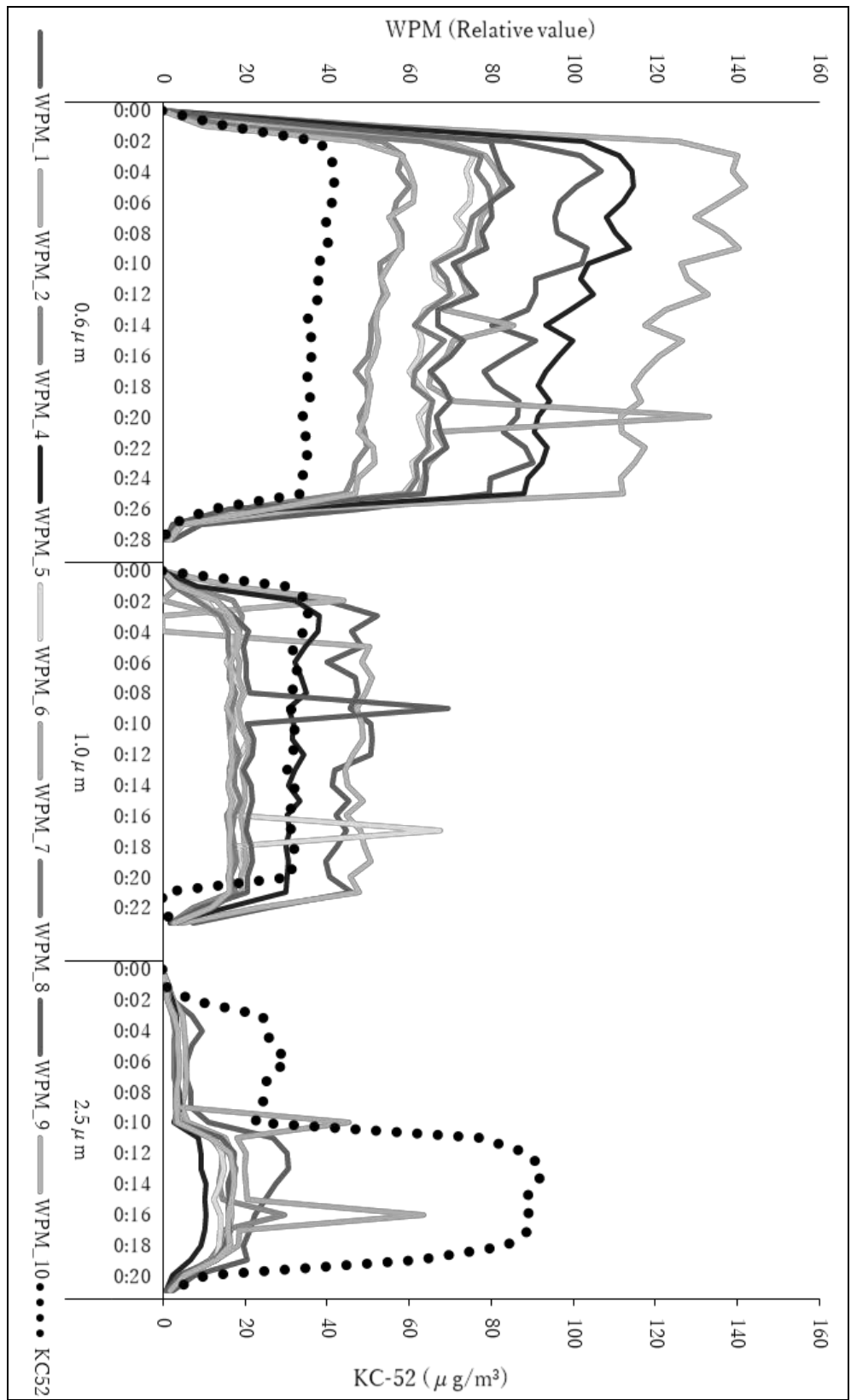


図 8. 粉じん濃度測定値の推移_2

C. ウェアラブルパーティクルモニターによる実際の屋外粉じん発生職場環境の測定
(実験2)

1. 目的

ウェアラブルパーティクルモニターを、実際の粉じん発生職場環境で用い、取得したデータから職場の粉じん濃度が高い場所の特定が可能かを調査する。

2. 方法

2. 1 セッティング

鉄鋼関連事業場内を自動車にて周回し、ウェアラブルパーティクルモニターによって、屋外粉じん濃度を計測した。計測時間は、約1時間であった。尚、自動車の窓は全開にし、10km/hの低速で周回した。天候は、晴れ、気温11.0度、風速1.9-2.4m/sであった。

2. 2 測定者

作業関連疾患予防学スタッフ2名、当該事業場従業員1名に図9のようにウェアラブルパーティクルモニターを1名につき2台、左右上腕に装着した



図9. ウェアラブルパーティクルモニターの上腕装着

2. 3 ウェアラブルパーティクルモニター筐体

ウェアラブルパーティクルモニター装着用筐体をデザインし、3D CAD (Autodesk 社製 Fusion360) にてモデリングを行い、3D プリンタ (Flashforge 社製 Creator3) で出力した (図 10) . 嵌合式の蓋があるため素材にはある程度の柔軟性を持った素材である ABS を用いた. また、実際に装着するときは、ゴムバンドで上腕に固定した (図 11) .

2. 4 測定事業場地図および測定ルート

事業場地図と測定ルートを図 12 に示す. 尚、協力事業場が特定されないように、今回の測定ルート以外の構内外道路は変更を行っている.

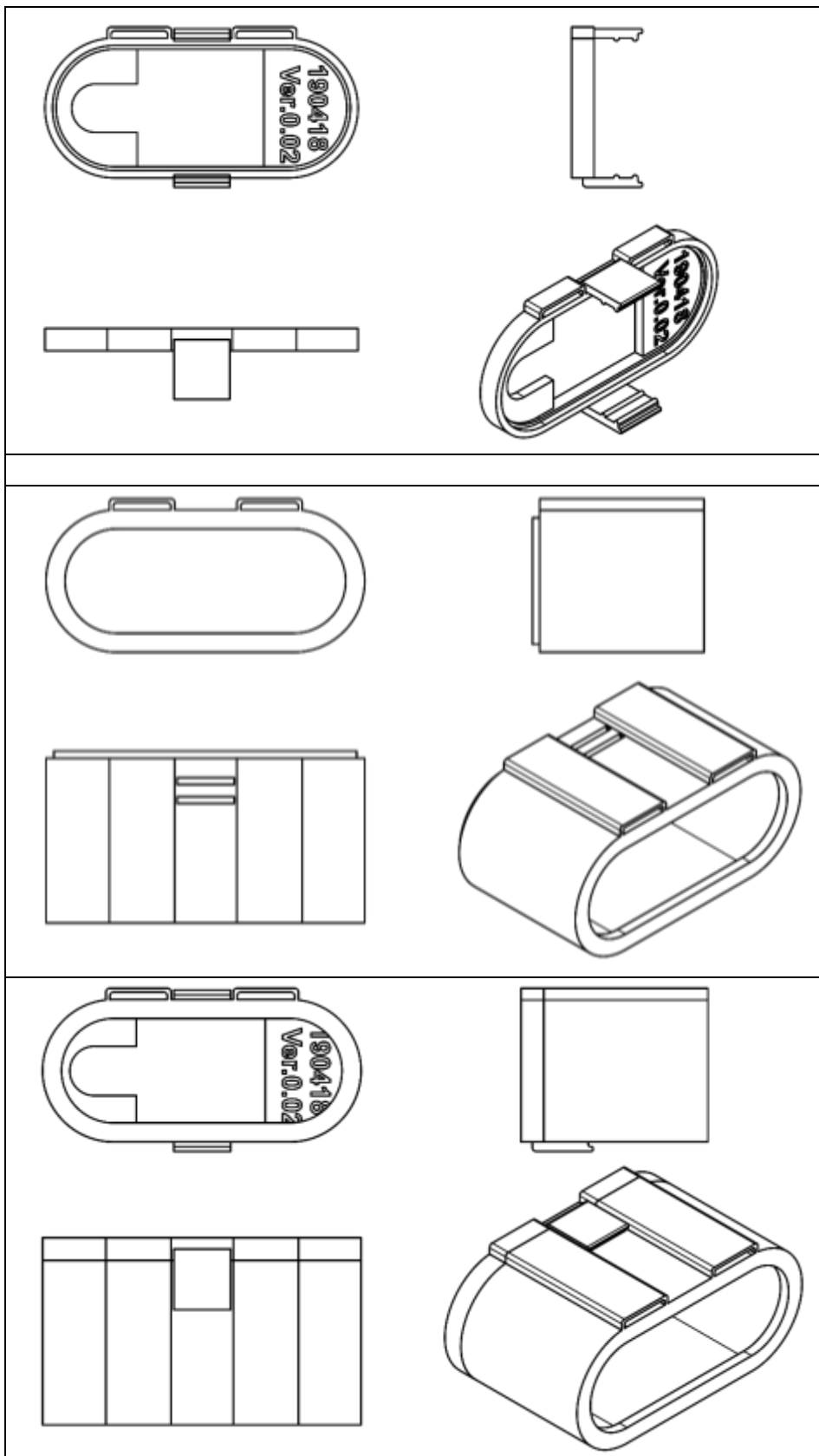


図 10. ウェアラブルパーティクルモニター装着用筐体のデザイン



図 11. ウェアラブルパーティクルモニター装着用筐体

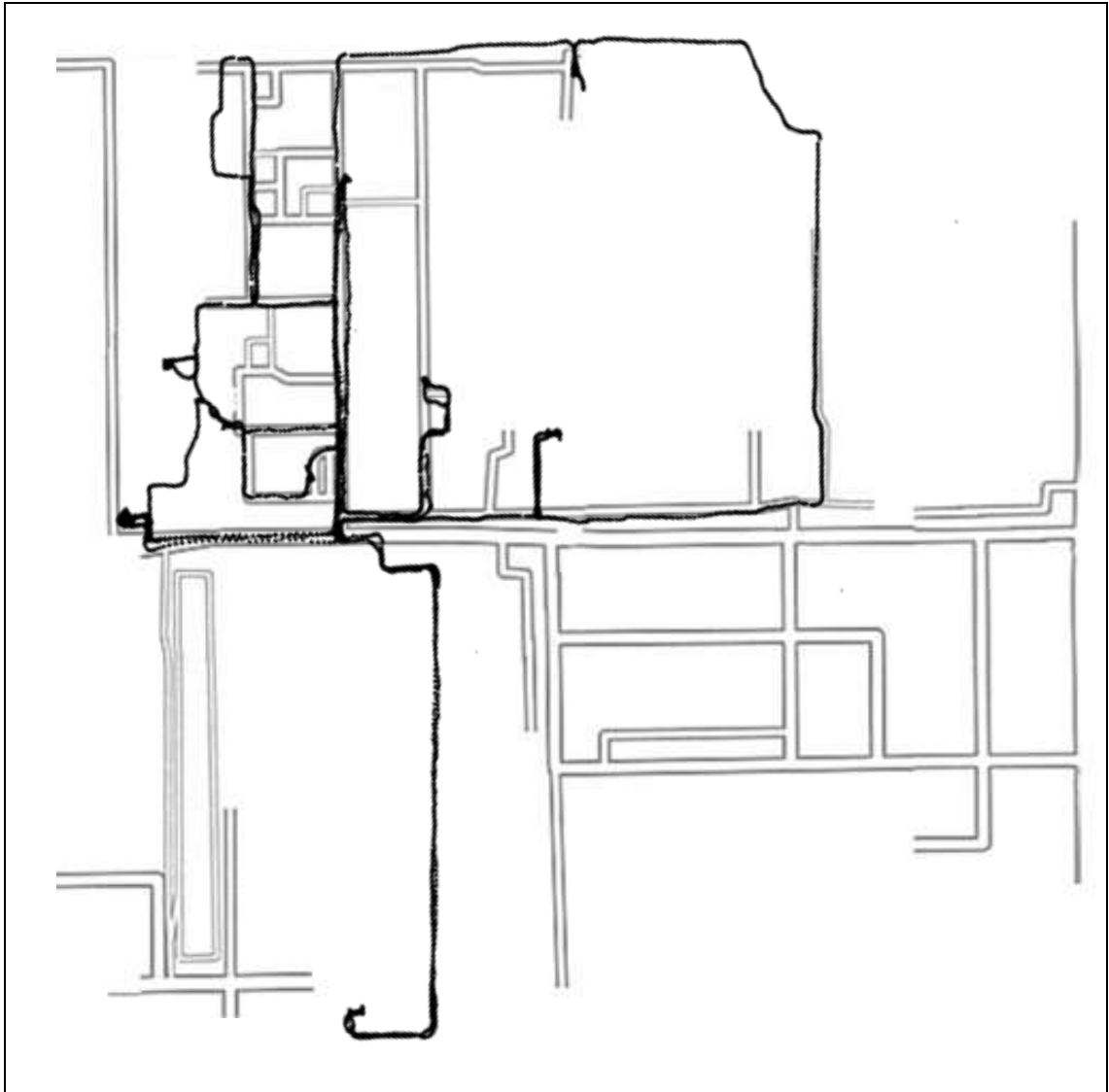


図 12. 測定事業場地図および測定ルート

3. 結果・考察

スマートフォンに搭載されている GPS で取得した参考移動経路を図 12 に示す。さらに、ウェアラブルパーティクルモニターのデータを図 13 に示す。加熱炉横一裏の車道と原料置場入口の粉じん濃度がそれぞれ、20–25, 11–16 程度と他の場所に比べて高い値を示した。図 14 は、屋外粉じん発生職場の測定ルートとウェアラブルパーティクルモニターによる粉じん測定値の推移を Microsoft excel を用いてヒートマップ化したものである。

ウェアラブルパーティクルモニターの値は、一般大気中の粉じん濃度の実測値に近似していることは、先行研究で確認されている。測定当日の福岡県内の大気中 PM2.5 観測データは、 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ であった。同日に測定したウェアラブルパーティクルモニターの値が 30 未満であったことより、今回測定した屋外粉じん発生職場が、粉じん濃度が高いということはないと考えられる。しかし、リアルタイムで粉じん濃度の変化がわかることから、粉じん濃度が高い場所の測定や粉じんが発生しやすい時間帯などの特定が可能である。散水された原料置場は、粉じん濃度が相対的に低い傾向であったことから、対策の効果なども評価しやすいと考えられる。センサーごとの差異はあるが環境中の粉じん濃度の挙動は、計測することが

できており、職場内で環境の粉じん濃度が高低の評価が十分可能である。

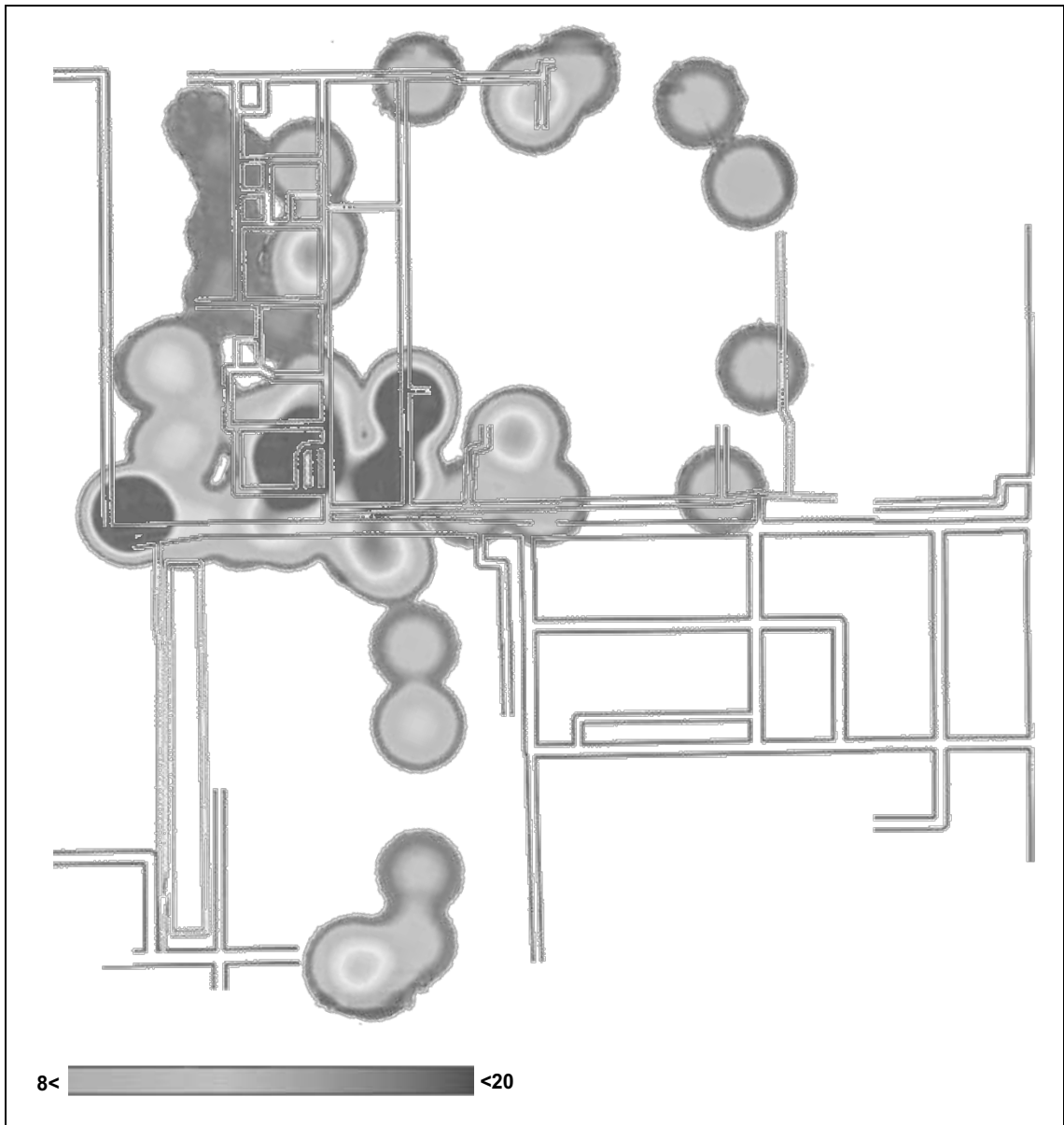


図 14. ウェアラブルパーティクルモニター測定値のヒートマップ化

D. 課題と展望

ウェアラブルパーティクルモニター使用時に判明した課題と今後の改良を検討すべき点について、列挙する。

- ・ CSV でデータを取り出した際、測定上限である $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を越えた値が記録されている（1 時間に数秒ほどの頻度）
- ・ データのモニター本体への内部記録の搭載
- ・ バッテリー残量が少なくなっていることを告知する機能
- ・ バッテリー駆動時間の延長（バッテリーの数の増加）
- ・ 上腕に装着した際に本体のランプが見えにくい。また、作業者が本体やスマートフォンを常時見続けることは現実的ではない。例えば、粉じん濃度がある一定値を越えた際に作業者に知らせるアラート機能が考えられる。通信切断時のことを考えると、本体にアラームやヴァイブレーションがあることが好ましいが、難しい場合は、スマートフォンのアラームやヴァイブレーションを使用するなど。
- ・ 集中管理方式（複数のウェアラブル粉じん計・スマートフォンの値を一つの端末・ディスプレイで表示・管理する）も取れると作業環境の評価にも活用できるかも。
- ・ ウェアラブル粉じん計の数値だけみるとかなり低値をとる。今後のリスクとして、この値を真のばく露濃度だと誤解する人もでてくるかもしれない。本機の仕様を十分に説明することはもちろん、相対値あるいはカ

ウント値であることを明確に示すように変更する。

E. 結論

今後、いくつか改良すべき点はあるが、ウェアラブルパーティクルモニターは、作業者のいる環境中の粉じん濃度の推定が可能であり、粉じんばく露状況の把握に有用である。

F. 研究発表

G. 論文発表

該当なし

H. 学会発表

世古口真吾，盛武敬，吉武英隆，安藤肇，池上和範，石垣陽，明星敏彦，大神明．ウェアラブル粉じん計試作機の性能評価．第29回日本産業衛生学会全国協議会．2019年9月．仙台

I. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含む）

1. 特許取得
なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

令和元年度労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

現場での電動ファン付き呼吸用保護具装着の使用感に関する調査

研究分担者 安藤 肇¹⁾, 池上 和範¹⁾,
研究協力者 世古口 真吾¹⁾, 吉武 英隆¹⁾, 長谷川 将之^{1,2)}, 宮本 俊明³⁾

1) 産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学

2) 日本製鉄株式会社 技術開発本部

3) 日本製鉄株式会社 君津製鉄所

研究要旨

実現場において継続的に PAPR を使用した場合の使用感の評価を行い, 現場における PAPR 装着による効果を明らかにすることを目的とする. 43 名の被験者に対する介入研究を実施した. まず事前調査として現病歴, 既往歴, 作業歴, 嗜好品等を調査票を用いて調査した. 併せて, 電子ピークフローメーターを用い, 被験者の呼吸機能検査を実施した. 既に呼吸機能検査を実施している被験者は, その呼吸機能検査結果の提出を持って完了とした. 次に, 1 回目調査として, PAPR を 1 カ月間連続して装着して業務を行ってもらい, 1 カ月終了後に被験者に対して呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票を実施した. 次に, 2 回目調査として, 以前より職場で使用していた通常の防じんマスクを 1 カ月間連続して装着して業務を行ってもらい, 1 カ月終了後に被験者に呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票を実施した. その後, 3 回目調査として, 再度 PAPR を 1 カ月間連続して装着して業務を行ってもらい, 1 カ月終了後に対象者に呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票を実施した. 2020 年 2 月末日現在, 調査継続中である.

A. 研究目的

粉じん作業労働者数は, 昭和 55 年の 572, 086 人から, その後減少傾向にあるものの, 近年は 45 万人前後で推移しており, 毎年 24 万人前後の粉じん作業労働者が, じん肺健康診断を受診している. じん肺の新規有所見者は長期的には大幅減少しているが, ここ数年減少せず今なお年間

約 200 人発生している現状から, 呼吸用保護具の適切な着用を促進する対策が必要である.

我々は, 電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR) の装着による心身への影響や主観的な使用感 (装着感, 作業性, 心身への負担感など) に関する調査を行ってきた. 従来の防じんマスクと比較し, PAPR は, 呼

吸負荷の軽減やマスクの漏れ率の軽減に繋がることを明らかにした。使用感に関しては、PAPRは呼吸サポートによって、マスク内部が効率的に換気され、さらにマスク内部の陽圧が維持されるため、従来の呼吸用保護具と比較すると高い防護性能と快適性が維持されると考えられる。そして、先行研究にて呼吸用保護具の使用感、心身への負担感について、呼吸用保護具を普段から使用している作業者を対象に一時的にPAPRを装着してもらい、その使用感について検討を行なった。しかし、PAPRを使用させた期間が短かったため、普段装着し慣れている通常の呼吸用保護具との対比になってしまっていた可能性があり、PAPRの使用感や作業軽減効果を正確に評価することが難しいという課題が明らかになった。先行研究を踏まえ、PAPRを継続的に使用しその使用感を評価する研究デザインが必要であると考えた。また、加齢や作業歴、健康状態、とりわけ作業者の呼吸機能などによる影響も考慮する必要がある。

本研究の目的は、実現場において継続的にPAPRを使用した場合の使用感の評価を行い、現場におけるPAPR装着による効果を明らかにすることである。本研究に基づき、実際の現場および作業者に適した呼吸用保護具の選択方法を提案することによって、職場の作業管理、労働者の健康管理に寄与する。

B. 研究方法

1. 研究デザインとセッティング

参加同意の得られた被験者に対して、介入研究を実施した。調査は、日本製鉄株式会社君津製鉄所内、または株式会社テツゲン君津支店内で、被験者が日常的に作業を行っている作業場で、2020年1月から実施した。

2. 被験者

日本製鉄株式会社君津製鉄所内、または株式会社テツゲン君津支店内で常時呼吸用保護具を使用している20歳以上の男性粉じん作業者を募集し、参加同意を得られた計43名を対象とした。

3. 実施手順

本研究は、PAPRの継続的な主観的使用感・身体負担感を評価するため、対象者にPAPRを1カ月間程度連続装着した場合の主観的な使用感（装着感、作業性、心身への負担感など）に関する調査を行った。実際の調査は、以下の手順で行った。

1) 現病歴、既往歴、作業歴や嗜好品等に関する呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票（事前調査）を用いて調査する。併せて、電子ピークフローメーター（アスマワノン®）を用い、対象者の呼吸機能検査を実施する。日本製鉄株式会社においては、じん肺健康診断の検査項目の一つとして、呼吸機能検査を実施している者もいる。既に呼吸機能検査を実施している者は、その呼吸機能検査結果の提出を持って完了とする。

2) （1回目調査）PAPRを1カ月間連続して装着し、業務を行ってもらい。1カ月装着後、対象者に呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票（PAPRの実際の装着

時間および使用感)を実施する。

3) (2回目調査)次に,以前より職場で使用していた通常の防じんマスクを1カ月間連続して装着し,業務を行ってもらう.1カ月装着後,対象者に呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票を実施する。

4) (3回目調査)2)の調査結果の再現性などを評価するため,再度PAPRを1カ月間連続して装着し,業務を行ってもらう.1カ月装着後,対象者に呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票を実施する。

調査の概要を図1に示す。

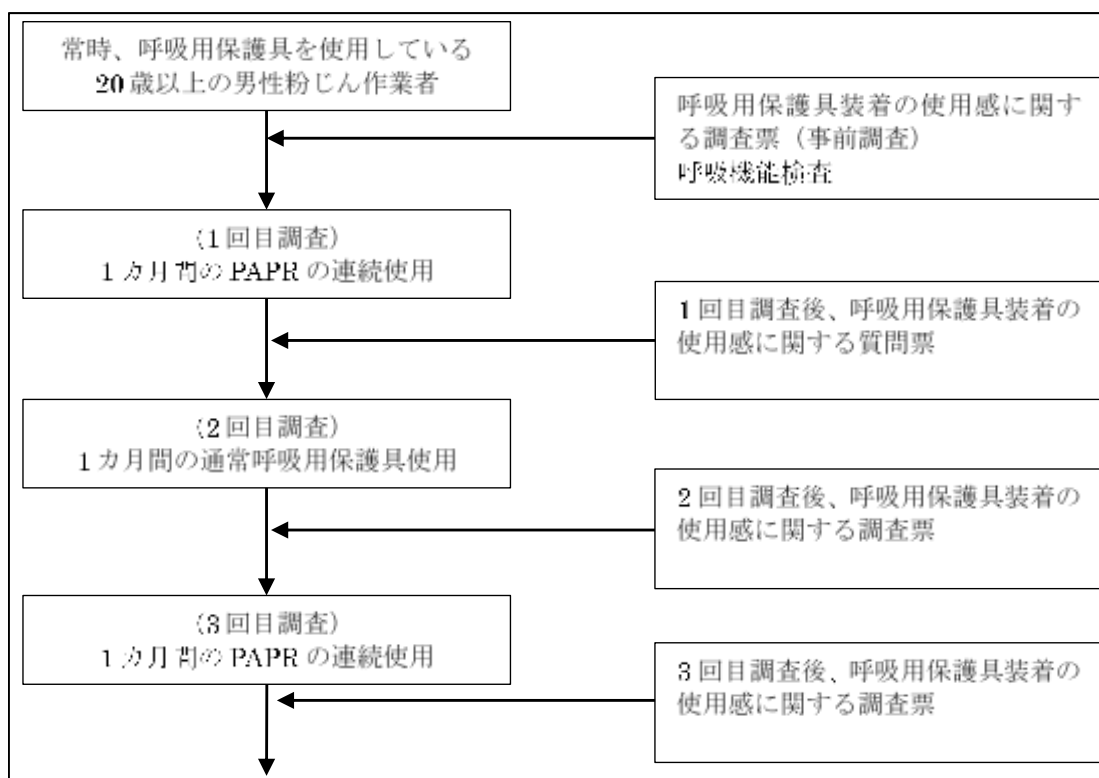


図1 調査概要

4. PAPR用バッテリー充電ステーション

先行研究で, PAPR用バッテリーの交換や本体および充電器の管理が困難であることが分かった.今回,我々はこの問題点

を解決すべく PAPR用バッテリー充電ステーションの製作を行った.このステーションにて,本体および充電器の定位置・定品・定量が可能である..

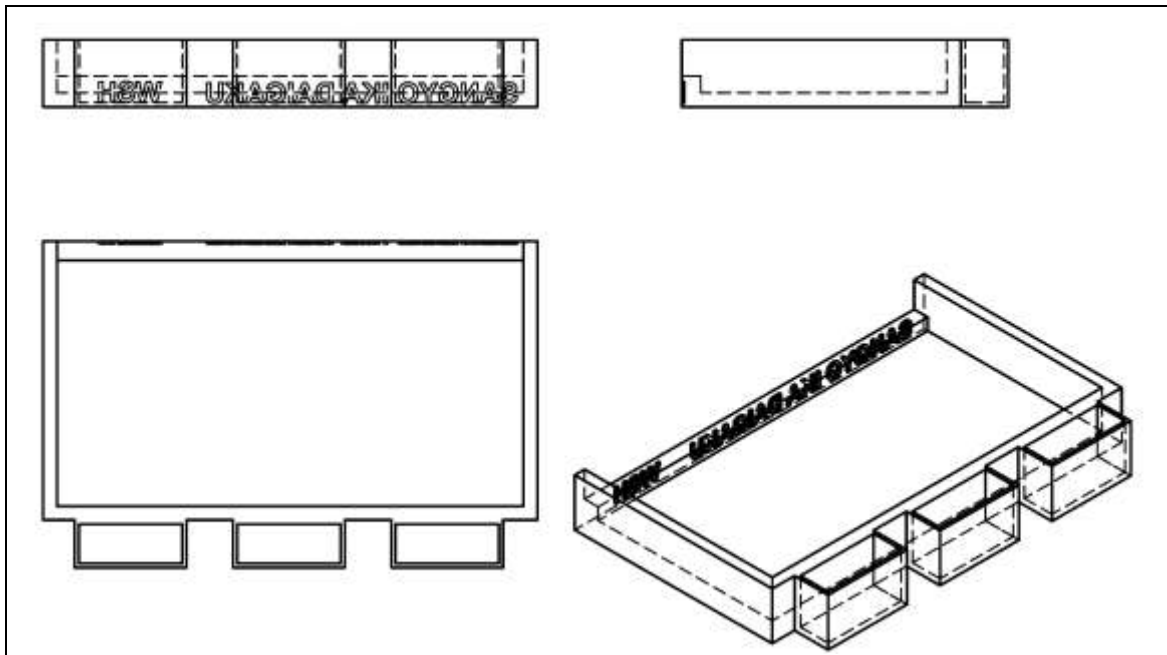


図 1. PAPER 用バッテリー充電ステーション作図

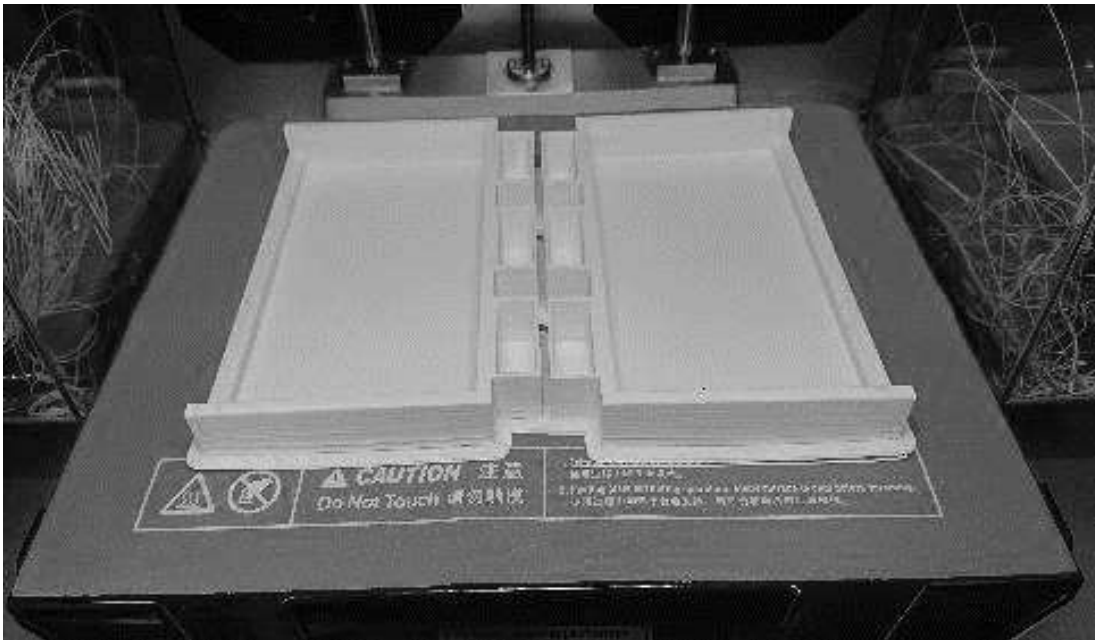


図 2. PAPER 用バッテリー充電ステーションの作成

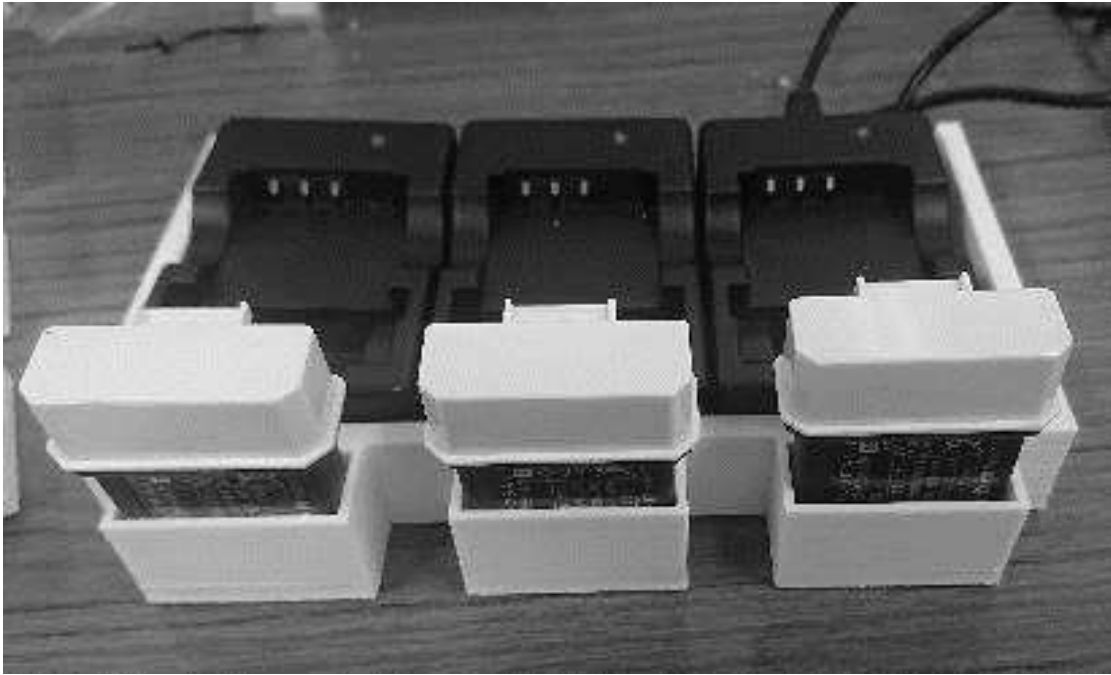


図 3. PAPR 用バッテリー装着後の PAPR 用バッテリー充電ステーション

5. 解析方法

PAPR 装着時・通常マスク装着時の間で、各質問項目の単純集計およびノンパラメトリック検定による比較を行う。加えて、年齢や呼吸機能検査の結果に応じ、各変数について多変量解析を行う。

6. 倫理的配慮

本研究は産業医科大学倫理委員会の承認を得ており、個人情報の取扱いおよび保管には万全の配慮を行った。対象者は本研究に参加することの利益と不利益とを説明された上で、参加または不参加を

自由に選択できることを保証した。参加に同意を得られた対象者からは同意書を得た。

C. 研究結果

2020 年 2 月末日現在、株式会社テツゲン君津支店内における 1 回目調査までが終了している。その結果を表に示す（表 1-3）。現在、株式会社テツゲン君津支店内における 2 回目以降の調査と、日本製鉄株式会社君津製鉄所内における調査は継続中である。

表 1. 現在,使用している保護具の使用感に関して

	事前調査		1 回目調査 (PAPR 装着後)		Δ
	M	(SD)	M	(SD)	
呼吸用保護具の装着感 (1.良好—5.不良)	3.0	0.7	3.9	0.6	-0.9
呼吸用保護具内の湿度 (1.低—5.高)	2.3	0.8	3.1	1.0	-0.8
呼吸用保護具内の暑さ (1.高—5.低)	2.5	0.5	3.3	0.7	-0.8
吸気時の息苦しさ (1.楽—5.苦)	3.4	0.6	3.0	1.0	0.4
呼気時の息苦しさ (1.楽—5.苦)	3.3	0.5	3.1	0.4	0.2
作業中息切れ (1.ない—5.頻繁)	2.7	0.7	2.7	0.6	0.0
口で呼吸すること (1.ない—5.頻繁)	3.1	0.7	3.1	0.5	0.0
作業の疲労感 (1.楽—5.苦)	3.5	0.6	3.4	0.7	0.1
作業時の発汗 (1.少—5.多)	3.7	0.8	3.2	0.9	0.5
呼吸用保護具の重さ (1.軽—5.重)	2.6	0.8	4.1	0.6	-1.5
呼吸用保護具から発生する音 (1.気になる—5.気にならない)	3.4	0.9	2.2	1.0	1.2

Δは, 1 回目調査得点から事前調査得点を減算した値

表 2. 保護具装着時の自覚症状について

質問項目 (すべての項目で 1.低—4.高)	事前調査		1 回目調査 (PAPR 装着後)	
	M	(SD)	M	(SD)
保護具を装着している時のイライラ	-	-	2.8	0.8
保護具を装着している時の不安感	-	-	2.5	0.9
保護具を装着している時の落ち着かない感じ	-	-	2.6	0.7
保護具を装着している時のゆううつな感じ	-	-	2.3	0.8
保護具を装着している時の体調不良	-	-	1.8	0.8
保護具を装着している時の集中力低下	-	-	2.2	0.9
保護具を装着している時の作業ミス	-	-	1.6	0.7
保護具を装着している時の眠気	-	-	1.5	0.5
保護具を装着している時のやる気低下	-	-	1.9	0.8
保護具を装着している時のぐったりした疲れ	-	-	1.7	0.7

表 3. 保護具を使用した後の労働機能 (Wfun 得点) について

事前調査		1 回目調査 (PAPR 装着後)	
M	(SD)	M	(SD)
-	-	11.0	6.1

Wfun:最低点 7, 最高点 35 点, 得点高い方が悪い)

D. 参考文献

なし

E. 研究発表・論文発表

該当なし

F. 学会発表

該当なし

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む)

1. 特許取得

該当なし

2. 実用新案登録

該当なし

3. その他

該当なし

呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票（事前調査）

Q1. 下記の内容についてお知らせください。

Q1-1. あなたの氏名・年齢・回答日をお知らせください

氏名 _____ 年齢 _____ 回答日 _____ / _____ / _____

Q1-2. 現在治療中の病気があればお知らせください。

病名： _____ 通院開始： _____ 年 _____ 月～ 内服：有・無

病名： _____ 通院開始： _____ 年 _____ 月～ 内服：有・無

Q1-3. 喫煙状況について下記から該当する番号を○で囲ってください。

1. 喫煙したことがない 2. 過去に喫煙していた 3. 現在喫煙している

2 または 3 と回答された方 ⇒ _____ 1日 _____ 本程度、 _____ 年間

Q2. 現在の仕事について教えてください。

Q2-1. 平均的な1日の粉じん作業は何時間くらいですか。…………… _____ 時間

Q2-2. 平均的な1日の防じんマスクの装着時間は何時間くらいですか。…………… _____ 時間

Q2-3. 現在の業務に何年間くらい従事していますか。…………… _____ 年間

Q3. 現在、使用している保護具の使用感についてお答えください。

Q3-1. 呼吸用保護具の装着感についてお答えください。

1. とても快適 2. やや快適 3. 普通 4. やや不快 5. とても不快…………… _____

Q3-2. 呼吸用保護具内の湿度についてお答えください

1. とても湿潤 2. やや湿潤 3. 普通 4. やや乾燥 5. とても乾燥 …………… _____

Q3-3. 呼吸用保護具内の暑さについてお答えください。

1. とても暑い 2. やや暑い 3. 普通 4. やや涼しい 5. とても涼しい…………… _____

Q3-4. 息苦しさ（吸うとき）についてお答えください。

1. とても楽 2. やや楽 3. 普通 4. ややきつい 5. とてもきつい…………… _____

Q3-5. 息苦しさ（吐くとき）についてお答えください。

1. とても楽 2. やや楽 3. 普通 4. ややきつい 5. とてもきつい…………… _____

Q3-6. 作業中息切れをしたことがありますか。

1. 全くない 2. ほとんどない 3. 多少 4. 頻繁に…………… _____

呼吸用保護具装着の使用感に関する調査票

氏名 _____ 年齢 _____ 回答日 _____ / _____ / _____

Q1.呼吸用保護具の装着感について該当する番号を下線部に記入ください。

Q1-1. 呼吸用保護具の装着感についてお答えください。

1.とても快適 2.やや快適 3.普通 4.やや不快 5.とても不快..... _____

Q1-2. 呼吸用保護具内の湿度についてお答えください

1.とても湿潤 2.やや湿潤 3.普通 4.やや乾燥 5.とても乾燥 _____

Q1-3. 呼吸用保護具内の暑さについてお答えください。

1.とても暑い 2.やや暑い 3.普通 4.やや涼しい 5.とても涼しい..... _____

Q1-4. 息苦しさ（吸うとき）についてお答えください。

1.とても楽 2.やや楽 3.普通 4.ややきつい 5.とてもきつい..... _____

Q1-5. 息苦しさ（吐くとき）についてお答えください。

1.とても楽 2.やや楽 3.普通 4.ややきつい 5.とてもきつい..... _____

Q1-6. 作業中息切れをしたことがありますか。

1.全くない 2.ほとんどない 3.多少 4.頻繁に _____

Q1-7. 口で呼吸することがありましたか。

1.全くない 2.ほとんどない 3.多少 4.頻繁に _____

Q1-8. 作業の疲労感についてお答えください。

1.とても楽 2.やや楽 3.普通 4.ややきつい 5.とてもきつい..... _____

Q1-9. 作業時の発汗についてお答えください。

1.とても少ない 2.やや少ない 3.普通 4.やや多い 5.とても多い..... _____

Q1-10. 呼吸用保護具の重さについてお答えください。

1.とても軽い 2.やや軽い 3.普通 4.やや重い 5.とても思い..... _____

Q1-11. 呼吸用保護具から発生する音についてお答えください。

1.とても気になる 2.やや気になる 3.普通
4.あまり気にならない 5.まったく気にならない..... _____

Q2. 今回、保護具装着時の自覚症状について、該当する番号を下線部に記入ください。

1.全くなかった 2.ほとんどなかった 3.多少あった 4.強くあった

- Q2-1. 保護具を装着している時のイライラ感。.....
- Q2-2. 保護具を装着している時の不安感。.....
- Q2-3. 保護具を装着している時の落ち着かない感じ。.....
- Q2-4. 保護具を装着している時のゆううつな感じ。.....
- Q2-5. 保護具を装着している時の体調不良。.....
- Q2-6. 保護具を装着している時の集中力低下。.....
- Q2-7. 保護具を装着している時の作業ミス。.....
- Q2-8. 保護具を装着している時の眠気。.....
- Q2-9. 保護具を装着している時のやる気低下。.....
- Q2-10.保護具を装着している時のぐったりした疲れ。.....

Q3. 普段の体調が良い時と比べて、保護具を使用した後の仕事に関して以下のようなことがどのくらいありますか。

1.ほとんどない 2.まれに 3.ときどき 4.頻繁に 5.ほとんどずっと

- Q3-1. 社会的にふるまえなかった。.....
- Q3-2. ていねいに仕事をする事ができなかった。.....
- Q3-3. 考えがまとまらなかった。.....
- Q3-4. 仕事を中断する回数が増えた。.....
- Q3-5. 仕事がうまくいかないと感じた。.....
- Q3-6. 冷静に判断することができなかった。.....
- Q3-7. 自発的に仕事ができなかった。.....

何か気づいた点があれば自由に記載ください。

質問は以上です。 ご記入ありがとうございました。

電動ファン付き防じんマスク（PAPR）の着用直後と
4週間後の装着における相違の検討

研究分担者 岸本 卓巳

（独）労働者健康安全機構アスベスト疾患研究・研修センター 所長

研究要旨

通常防じんマスクと PAPR のマスクのもれ率について、常時粉じん作業を行っている黒鉛製造等作業員 14 名と耐火物粉砕等作業員 14 名の合計 28 名を対象として測定した。対象者は 27 名が男性で年齢の中央値は 45.5 歳であった。1 日の作業時間は平均 7 時間で、粉砕、粉詰出等の粉じん量の多い作業で、作業年数は 15 年であった。測定の結果、通常防じんマスクのもれ率は 17.57%、PAPR は 0.36%であった。耐火物粉砕等事業場では正しい装着方法の指導を受けていたこともあり、通常防じんマスクのもれ率が 12.7%であった。しかし、通常防じんマスクのもれ率が 19.32%ある場合、個人ばく露濃度測定結果を基に吸入粉じん量を換算すると $0.25\text{mg}/\text{m}^3$ となり、許容濃度を超えるが、PAPR では $0.00006\text{mg}/\text{m}^3$ であった。

また、PAPR を着用して開始後 3 時間と 4 週間の装着感についてアンケート調査したところ、大きさや重さなどのデメリットもあったが、呼吸が楽で粉じんを吸入しないなどのメリットにより 80%を超える作業員が、着用直後のみならず 4 週間後であっても着用したいという回答であった。特に通常防じんマスクのもれ率が少なかった作業場でも大多数の作業員が PAPR を着用したいという回答であった。

今後は長期間着用後のマスクのもれ率の推移とともに購入価格の高い PAPR の費用対効果についても検討 PAPR の幅広い粉じん作業で着用できるよう努力して行くつもりである。

A. 研究目的

通常の防じんマスクに比較して、PAPR はマスク内が陰圧にならないようにファンが作動して陽圧にするためマスクのもれが少なく、フィットテストなどの圧着に配慮しなくてもマスクのもれがないことを報告してきた。一方で、PAPR はマスクの大きさが大きく、マスク内に電池が内蔵しているため重さがあり、なおかつファンが作動する際に音が発生することから、継続して着用することが可能かどうかの問題点もある。

そこで今回も通常防じんマスクと PAPR 装着によるマスクのもれ率を測定するとともに、PAPR を初めて着用して 3 時間後と 4 週間継続して着用した後での PAPR の装着に関するア

ンケート調査を行なったので報告する。

B. 研究方法

対象は黒鉛等を製造している作業員 14 名と耐火物粉砕等作業員 14 名でいずれも常時粉じん作業を行っており、防じんマスクを着用している作業員である。

興研社製 BL-1500 型 PAPR と重松製作所製 Sy-11 型 PAPR を各 14 名の粉じん作業員に貸与して、着用開始 3 時間後と 4 週間継続で着用した後の PAPR の装着感についてアンケート調査した。調査の内容は表 1 に示す項目である。また、粉じん作業開始時には従来から着用していた通常防じんマスクのもれ率を測定するとともに、新たに貸与した PAPR のもれ率を着用 3 時間後に測定した。防じんマスクのもれの測定機器は柴

田科学社製のマスク内圧・フィッティングテストター (MNFT ver. 2) を着用した。

両作業場の各2名では個人サンプラーを用いて、個人の吸入粉じん濃度 (総・吸入性粉じん濃度) を測定した。個人ばく露濃度とマスクのもれ率から作業者の吸入粉じん濃度 (総・吸入性粉じん濃度) を換算した。

(倫理面への配慮)

事前に研究目的を説明し、全ての作業者の研究同意を得てから調査を開始した。本研究は、倫理委員会の承認を得て実施した。

C. 研究結果

今回対象とした作業者 28 名の性別では男性が 27 名、女性が 1 名であった。年齢は 20~69 歳で、平均 44.8 ± 14.0 歳で、中央値は 45.5 歳であった (図 1)。粉じん作業時間は 1 日平均 7.0 ± 1.6 時間であった。1 週間の作業時間は 32.9 ± 11.1 時間であった (図 2)。その作業内容は粉碎、粉詰出が多かった。また、作業年数は 15.0 ± 10.3 年であった (図 3)。

通常防じんマスクのもれ率は、28 名全例では 18.15 ± 10.39 (3.69~39.76) % 中央値 17.57% であり、PAPR では 0.39 ± 0.27 (0.08~1.07) % 中央値 0.36% であった (図 4)。黒鉛製造等作業者での通常防じんマスクのもれ率は、図 5 に示すように 22.82 ± 10.51 (4.05~39.76) %、中央値 22.66% であり、PAPR では 0.21 ± 0.16 (0.08~0.58) %、中央値 0.15% であった。

一方、耐火物粉碎等作業者での防じんマスクのもれ率は、 12.70 ± 7.06 (3.69~26.00) %、中央値 10.18% であり、PAPR では 0.57 ± 0.23 (0.24~1.07) %、中央値 0.50% であった (図 6)。作業者の吸入粉じん量を個人ばく露濃度にマスクのもれ率と呼吸量を考慮して計算したところ、黒鉛製造等作業者では個人ばく露濃度が低いいため、通常防じんマスクのもれ率が 35.68% と大きくても吸入粉じん量は $0.01 \text{mg}/\text{m}^3$ であった。

一方、耐火物等粉碎作業者では、通常防じんマスクのもれ率が 19.32% があると吸入粉じん量が $0.24 \text{mg}/\text{m}^3$ となり、許容濃度の $0.15 \text{mg}/\text{m}^3$ を超えたが、PAPR では $0.00006 \text{mg}/\text{m}^3$ と極めて低値であった (図 7)。

アンケート結果は図 8~19 に示す。PAPR は大

きさが大きく、電池が組み込まれているため重い、大きさ、重さを少し以上感じる作業者が着用開始後 3 時間では 57.2%、及び重さについては 100% であった (図 8, 9)。一方、着用 4 週間後では各々 64.3%、85.7% であり、重さについては時間経過によりそれほど感じなくなった作業者が 15% 程度あった。

また、視界や動きに変化を感じるかどうかの問いに対しては視界に多少影響があるが 35.7%、動きにくさが少し以上ある作業者が 46.4% あった (図 10, 11)。一方、4 週間後には各 32.2%、57.2% とほぼ同様であった。

ファンの音に対しては少し気になる以上が 32.1%、メガネの曇りに関しては 100% が曇りを感じていなかった (図 12, 13)。しかし、4 週間後にはファンの音については変化なかったが、メガネの曇りを 35.7% が訴えるようになっていた。

マスク内への粉じんのもれを感じると答えた作業者は 3 時間後にはいなかったが、4 週間後に 1 名感じるようになっていた。粉じん吸入についても 96.3% が粉じん吸入を感じていないと回答し、4 週間後にはすべての作業者が粉じん吸入はしていないと回答していた (図 14, 15)。

作業効率については PAPR に変更して効率が悪化したと答えた作業者が 3 時間後には 3.6% いたが、4 週間後には 14.3% が低下すると回答していた。

作業後に疲労感が楽であった作業者が 3 時間後には 32.1% であったが、4 週間後には 35.7% とほぼ同様であった (図 16, 17)。また、通常防じんマスクと比較して呼吸が楽になったと回答した作業者は 100% でありこの結果は 4 週間後にも同様であり呼吸が楽になったことは対象者すべてで経過如何にかかわらなかった (図 18)。

以上の感想をまとめて、今後 PAPR を着用したいと希望した作業者は 3 時間後が 92.6% と大半であったが 4 週間後にも 23 名 (82.1%) と 80% を超えていた (図 19)。

希望しなかった 5 名は PAPR の大きさや重さのため、通常防じんマスクの方がよいと回答していた。

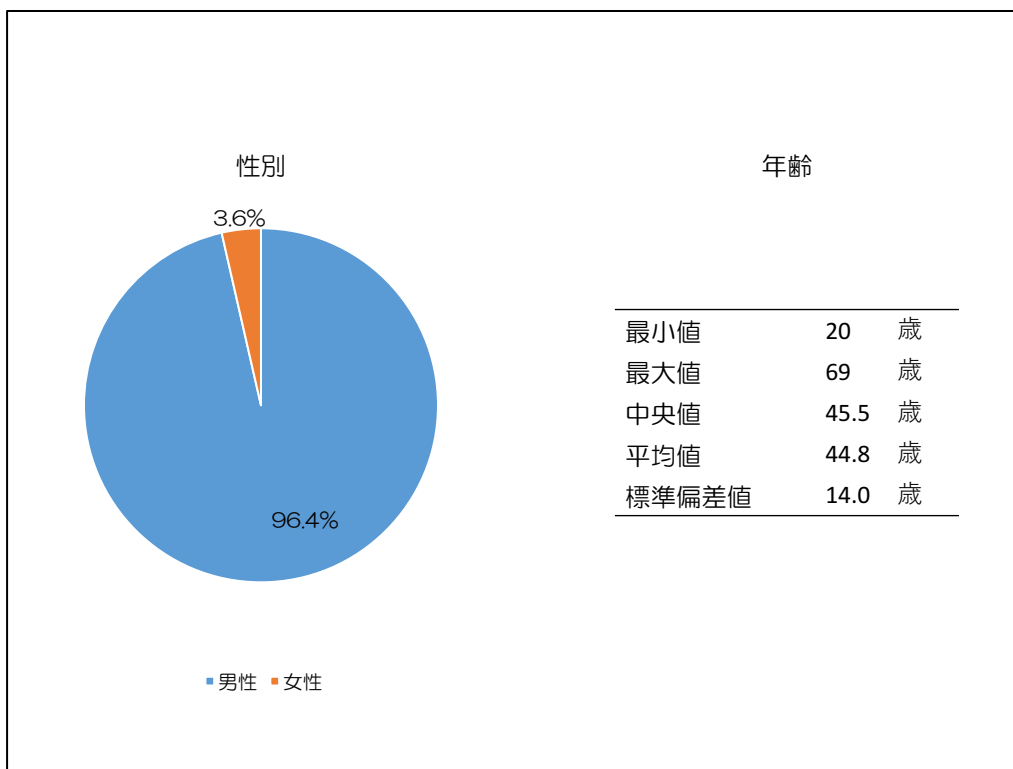


図 1. 対象者 28 名の性別

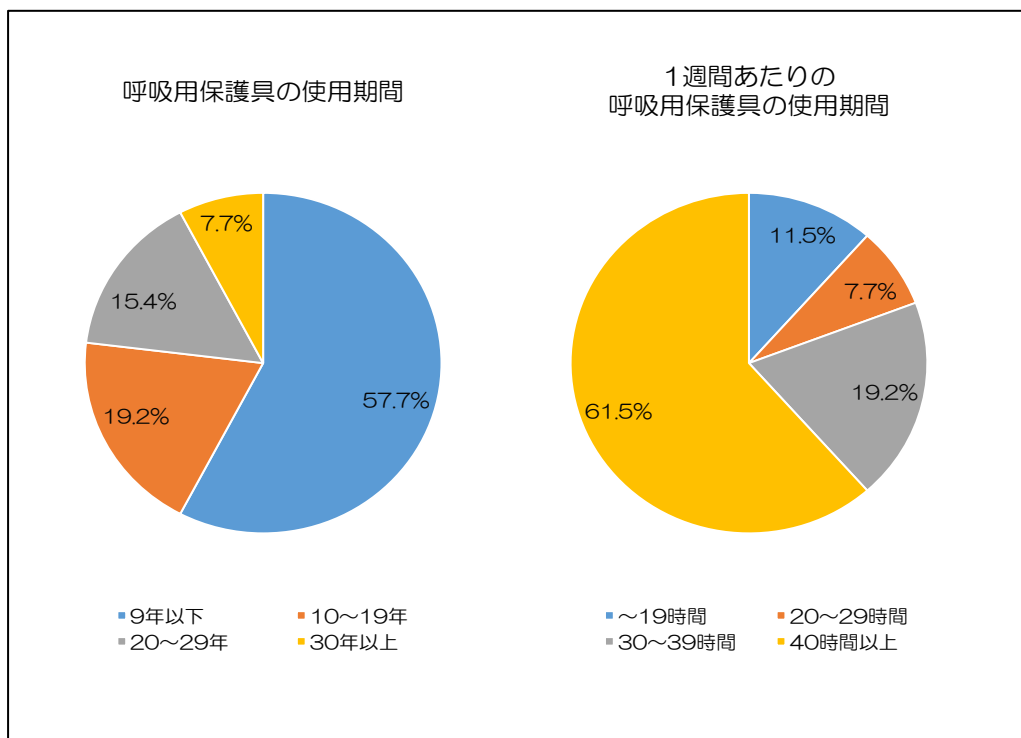


図2.通常防じんマスクの着用期間

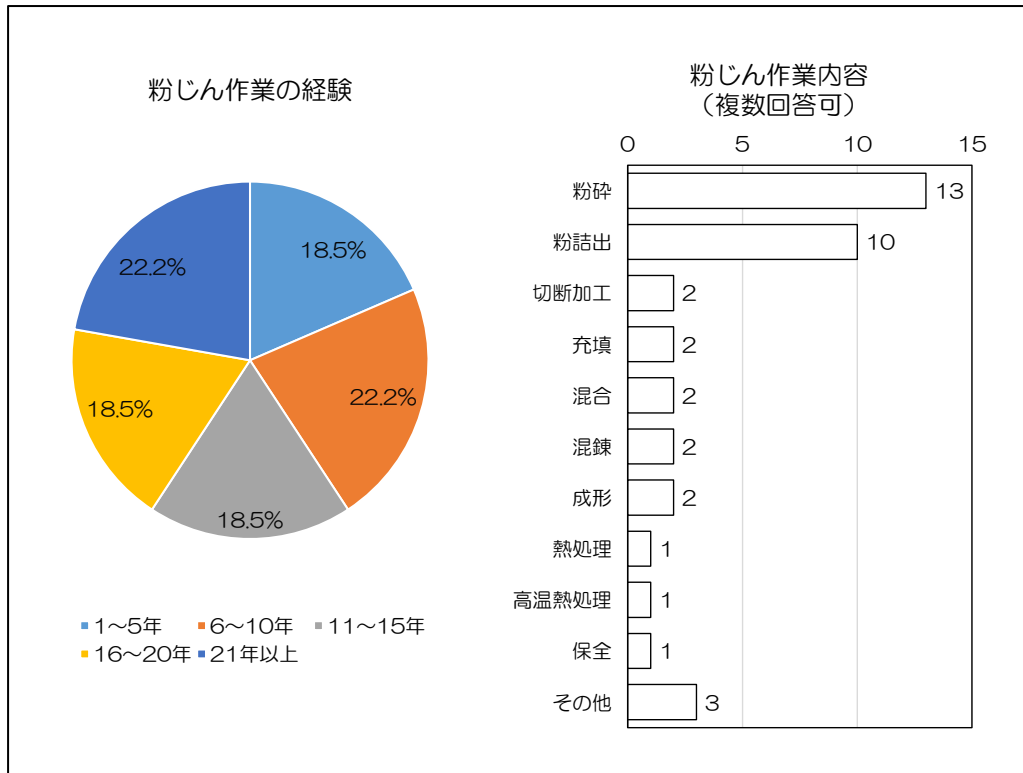


図3. 粉じん作業期間と内容

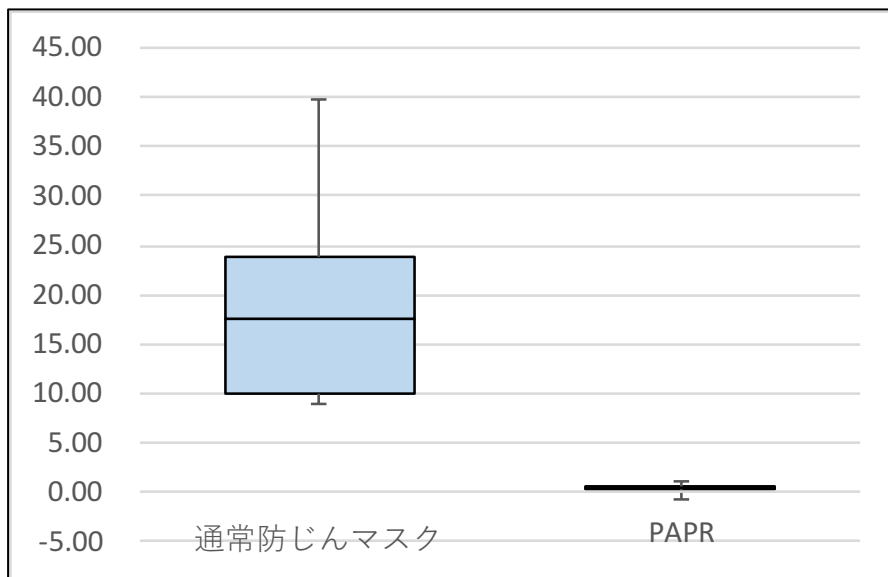


図4. 通常防じんマスクとPAPRのもれ率の比較

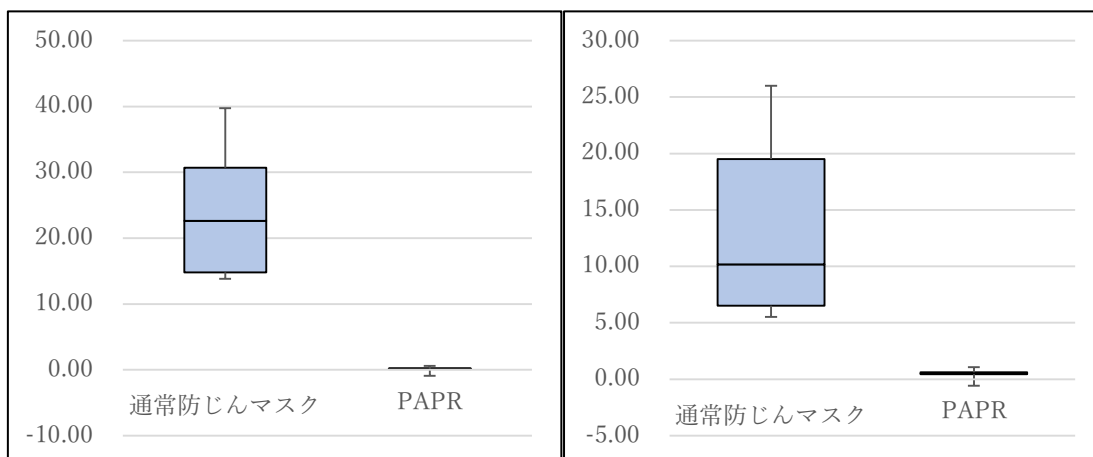


図5. 黒鉛製造等作業者

図6. 耐火物粉砕等作業者

作業者	作業内容	測定器	マスク		漏れ率 (%)	個人ばく露濃度		呼吸量測定結果(興研)		
						(mg/m)	吸入粉じん量 (mg/m ³)	平均呼吸量 (m ³ /分)	吸入粉じん量 (mg/m ³)	
A	粉詰出	MNFT	通常マスク	1010A	35.68	R	0.03	0.010704		
						T	0.12	0.042816		
			PAPR	BL-1005	0.11	R	0.03	0.000033		
						T	0.12	0.000132		
B	粉詰出	MNFT	通常マスク	1010A	10.88	R	0.07	0.007616		
						T	0.73	0.079424		
			PAPR	BL-1005	0.09	R	0.07	0.000063		
						T	0.73	0.000657		
C	原料粉砕	MNFT	通常マスク	-	16.28	R	1.17	0.190476	27.7	0.05
						T	1.85	0.301180		
			PAPR	Sy-11	0.97	R	1.17	0.011349	27.7	0.05
						T	1.85	0.017945		
D	原料粉砕	MNFT	通常マスク	-	19.32	R	1.28	0.247296	23.8	247.7
						T	5.81	0.017945		
			PAPR	Sy-11	0.063	R	1.28	0.000063	23.8	247.7
						T	5.81	0.000657		

R = 吸入性粉じん、T = 総粉じん

図7. 個人ばく露濃度

A,B は黒煙製造等,C,D は耐火物粉砕等作業場の常時粉じん作業者

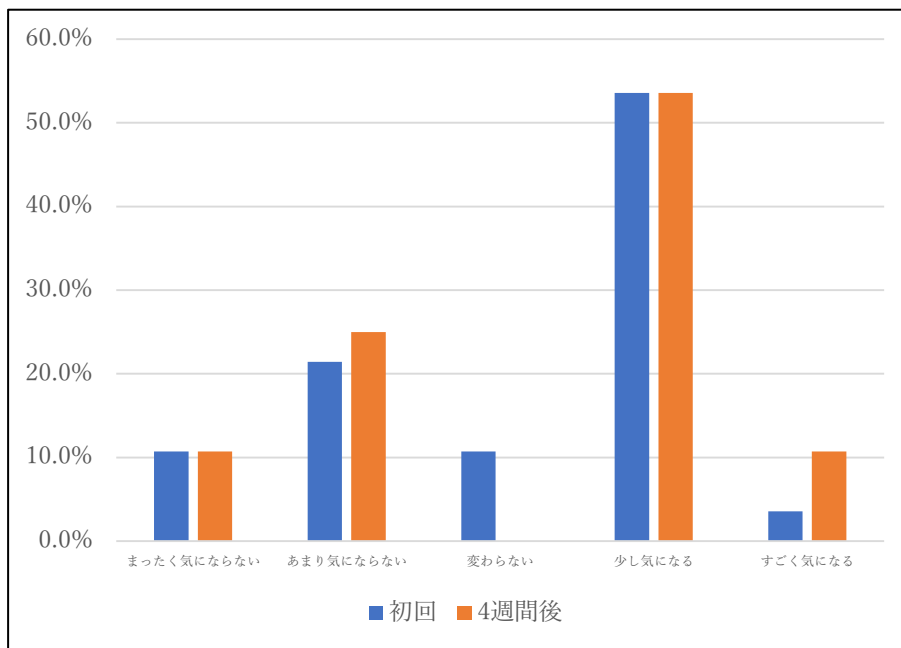


図8. マスクの大きさが気になるか

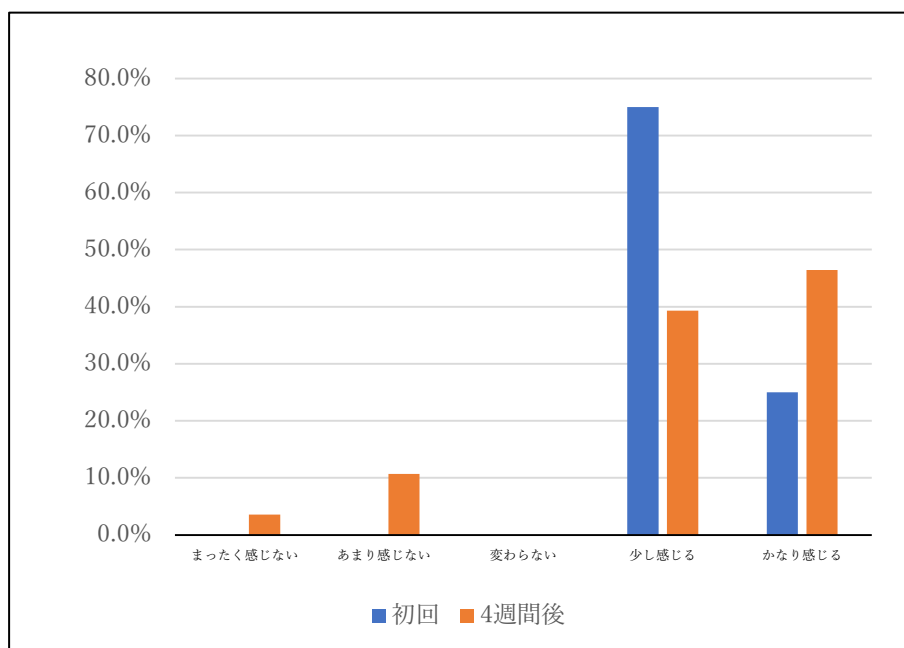


図9. マスクの重さは感じるか

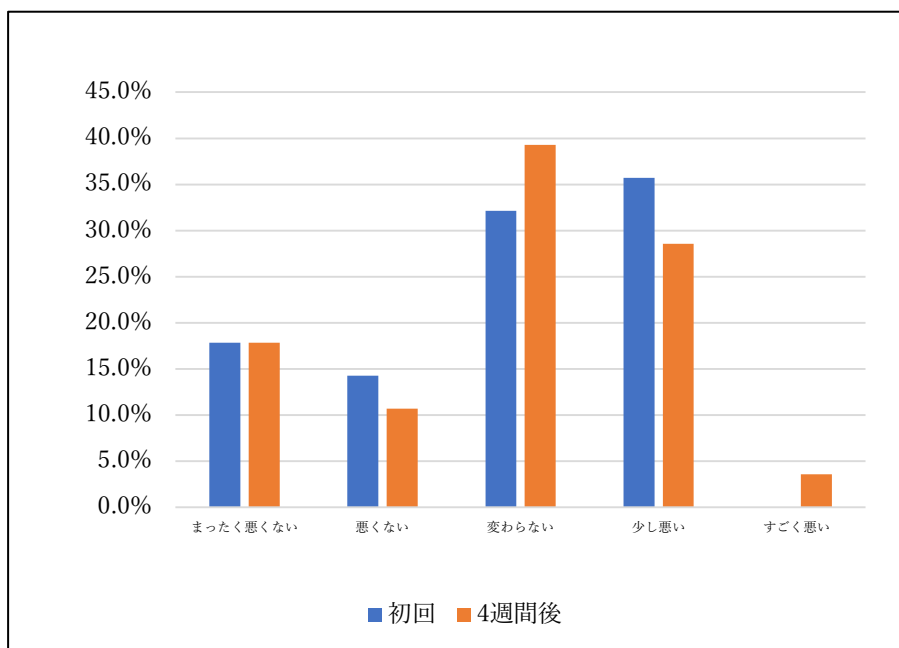


図10. 視界が悪くなったか

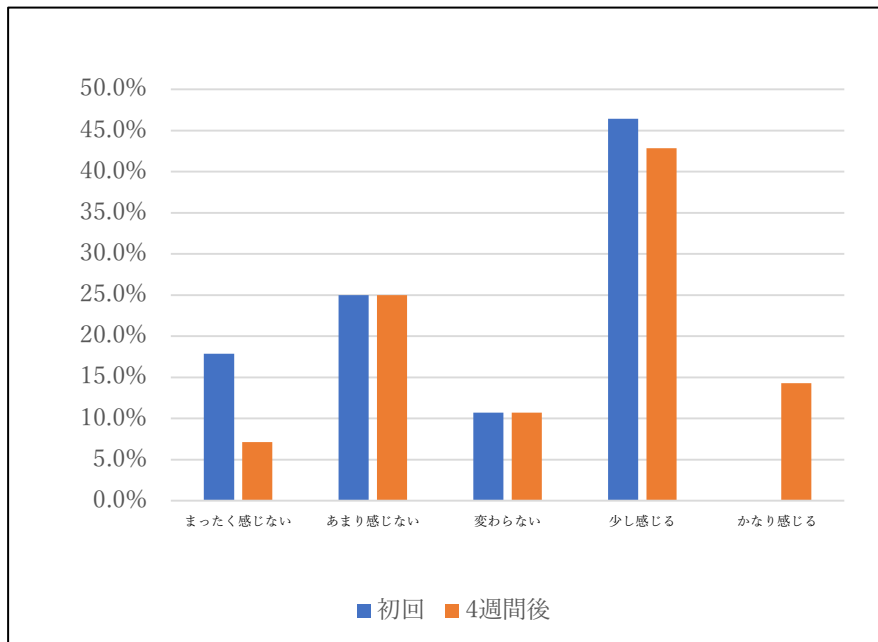


図 11. 動きにくさを感じる

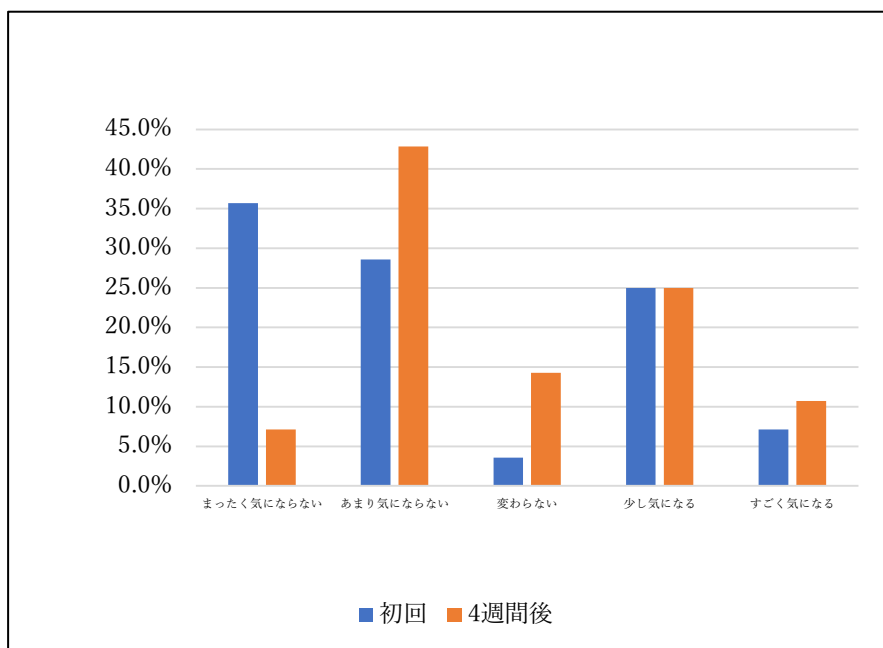


図 12. ファンの音は気になる

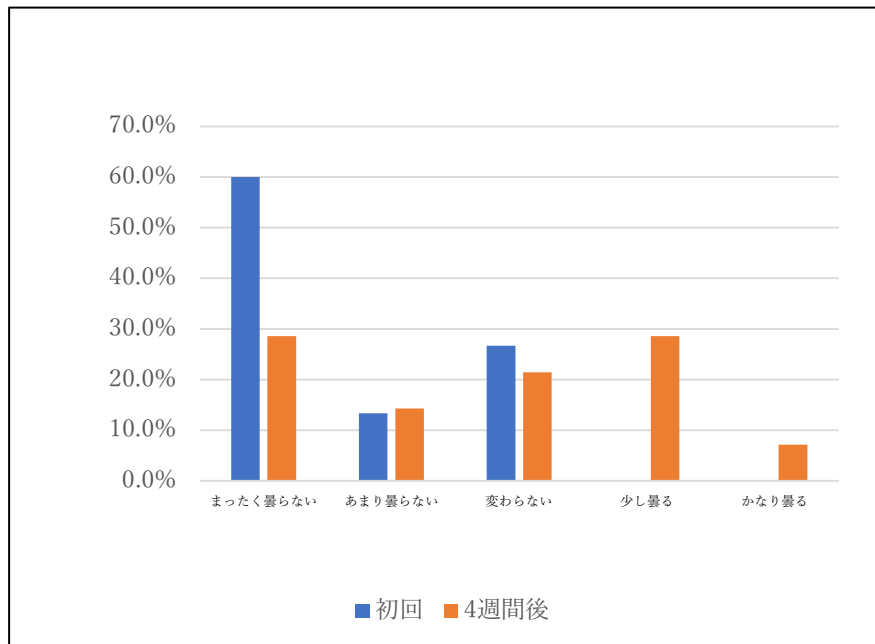


図 13. メガネは曇る

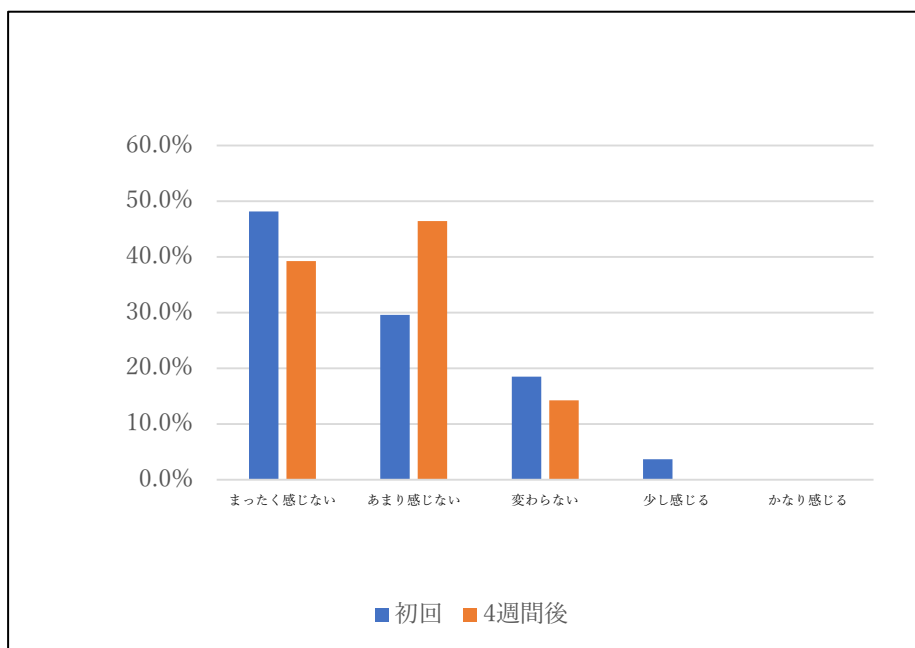


図 14. マスク内への粉じんの漏れ込みを感じる

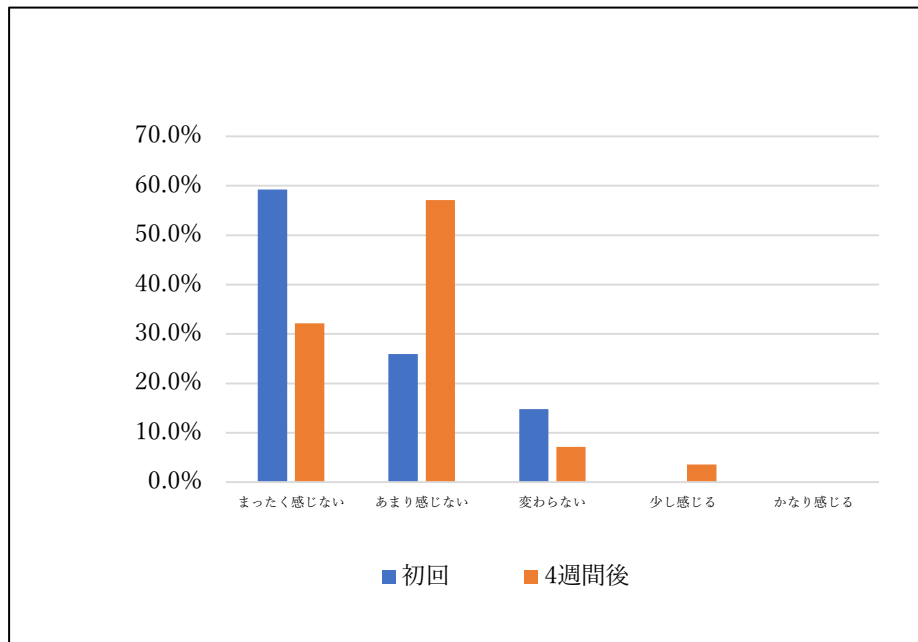


図 15. 粉じんを吸っていると感じることはある

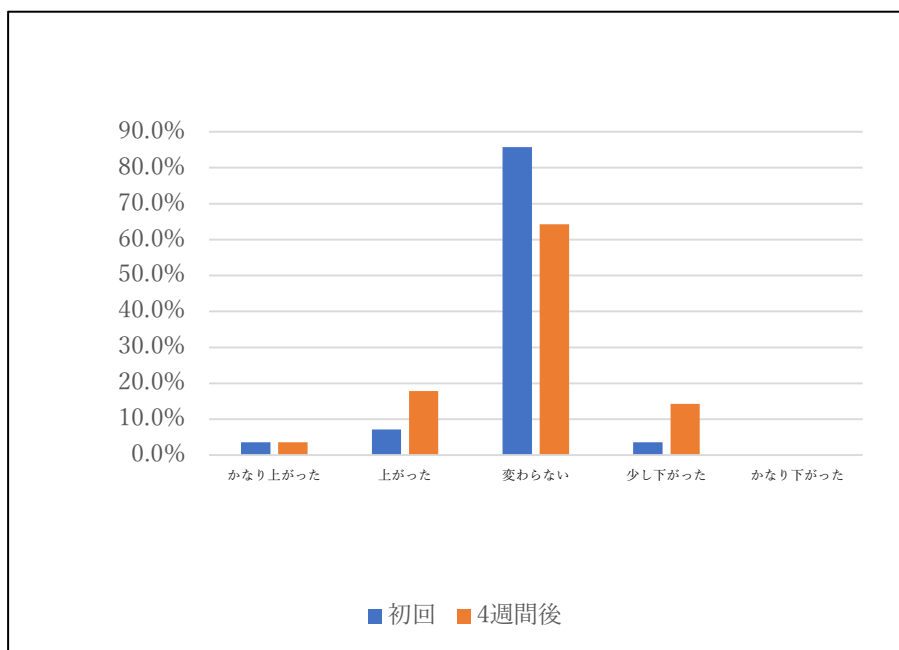


図16. 作業効率は上がったと感じるか

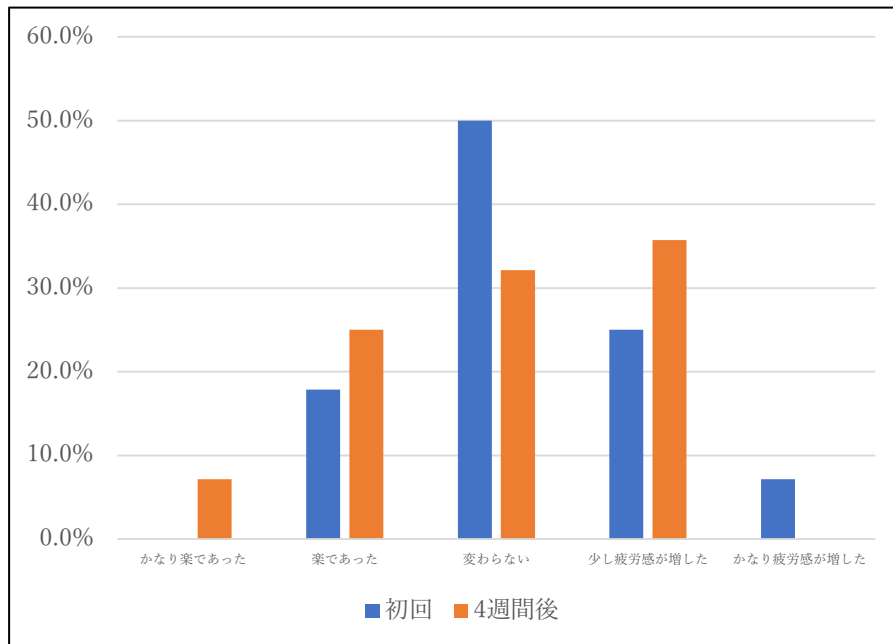


図17. 作業後に疲労に差があるか

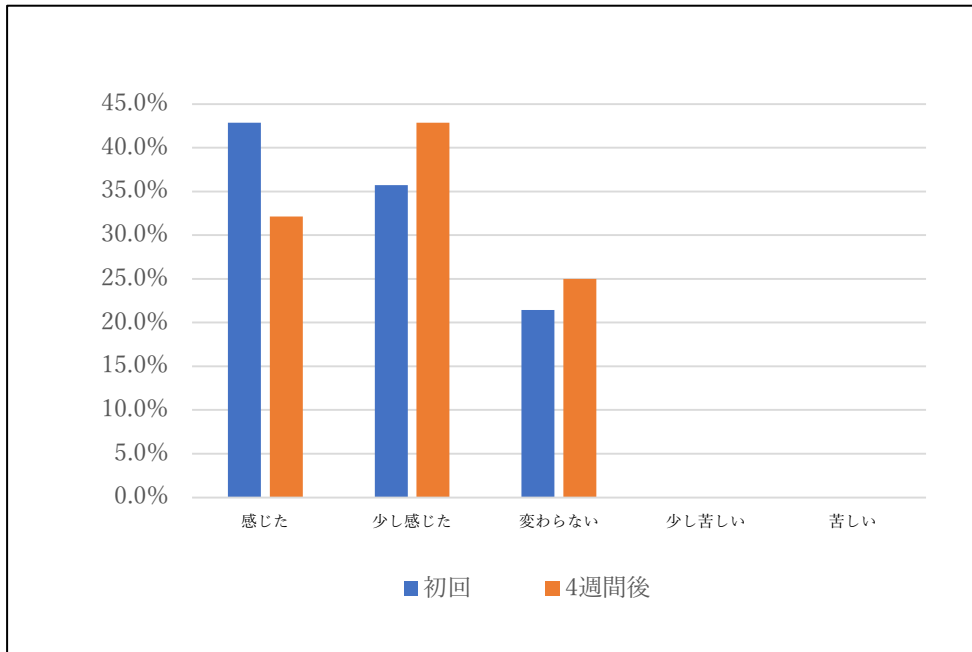


図18. 呼吸が楽に感じたか

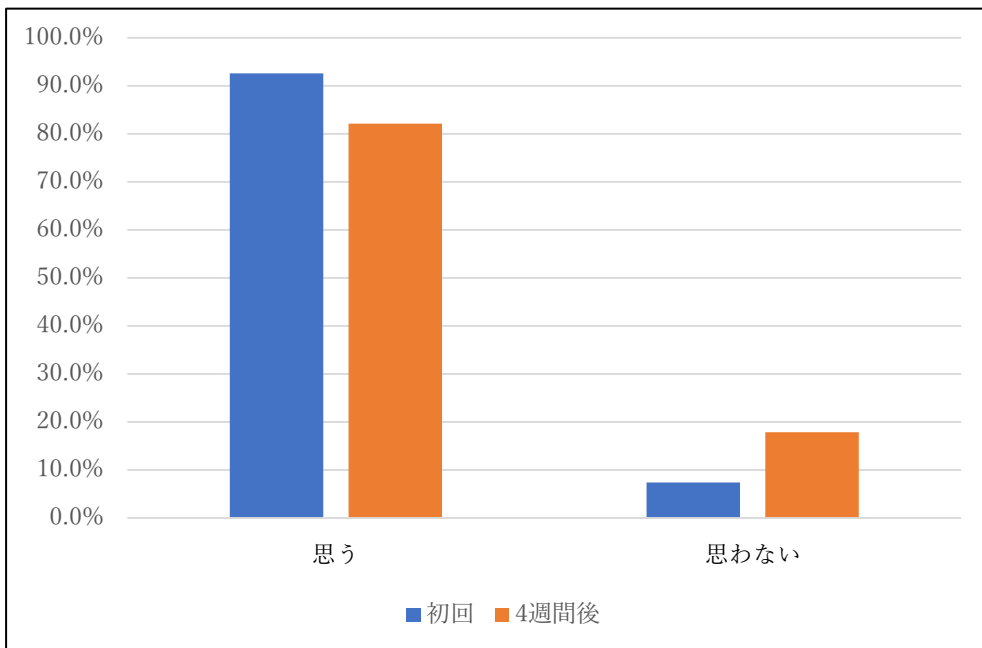


図19. 今後PAPRを着用したいか

D. 考察

平成 15 年度の岡山産業保健推進センターの調査研究において、じん肺有所見者が高率に存在する理由として、防じんマスクのもれが問題ではないかと考え、粉じん作業者が着用している防じんマスクの平均もれ率を測定した。その結果、対象とした 178 人のもれ率の平均が 24.3%あり、その原因が紐の締め具合が緩いあるいはメリヤス付きのマスクであることが原因ではないかということ報告した。

平成 30 年度には、通常防じんマスクと PAPR のマスクのもれ率について、耐火レンガ製造作業 72 名、自動車部品製造における溶接作業 28 名及び磁性粉製造作業 4 名の常時行っている作業 104 名を対象として測定し、通常防じんマスクのもれ率は 24.8%、PAPR では 0.45%であり、その防じん作用は明らかによく、粉じん吸入量が有意 ($p < 0.0001$) に軽減していることが実証された。

今年度は、黒鉛製造等作業 14 名と耐火物粉砕等作業 14 名でいずれも常時粉じん作業を行ない、通常防じんマスクを装着している作業 28 名を対象とした。

28 名すべての通常防じんマスクのもれ率は、中央値 17.57%で、PAPR は 0.36%であった。一方、黒鉛製造等作業の通常防じんマスクのもれ率が 22.66%であったのに対して耐火物粉砕等作業では 12.70%と過去に通常防じんマスクのもれ率を測定した企業の中ではもれ率が最も低かった。平成 15 年から 5 年間岡山産業保健推進センターでは、マスク着用指導員が、月に一度適正な通常防じんマスクの着用指導に行き、7 社のうち 2 社では有意なもれ率の低下があったことを報告した。今回調査した耐火物粉砕等作業を行っている 14 名については過去に同センターより、通常防じんマスクの正しい装着方法の指導を受けていたこともあり、通常防じんマスクのもれ率が低値を示した。正しい装着を行なうことによって、もれ率低下に繋がったと考えられる。しかし、作業者の吸入粉じん量を個人ばく露濃度にマスクのもれ率と呼吸量を考慮して計算したところ、耐火物等粉砕等作業の D では、通常防じんマスクのもれ率が 19.32%あると吸入粉じん量が $0.25\text{mg}/\text{m}^3$ となり、許容濃度の $0.15\text{mg}/\text{m}^3$ を超えることになるが、PAPR では $0.00006\text{mg}/\text{m}^3$ で新たなじん肺発生の危険性が大きく低下することになると思われる。

一方、今回は短時間 PAPR を着用するのみならず、4 週間毎日 PAPR を着用した後の感想につい

でも調査した。マスクの装着感等大きさは 60%程度、重さは 100%が着用開始直後は感じてはいたが、長期間着用することで約 15%の作業者がその重さを感じなくなっていた。一方視野への影響や動きにくさを感じる作業者は 4 週間後の結果もほぼ同様であった。

また、マスク内への粉じんのもれを感じるあるいは粉じん吸入を感じる作業者は、着用当初においても 4 週間後でもほとんどなかった。

作業効率の低下については、当初は 3.6%、4 週間後では 14.3%が低下したと述べていたが、作業後の疲労感が減少した作業者ははじめが 32.1%であったが 4 週間後には 35.7%とほぼ同様であった。さらに呼吸が楽になったと答えた作業者は当初から 4 週間後まで 100%であり、今後 PAPR を着用したいと答えた作業者は当初は 92.6%、4 週間後は 82.1%と大半であった。特に通常防じんマスクが比較的適正に着用されている作業者においても PAPR を着用したいと回答したが、ほぼ全例であったことは、PAPR の大きな評価につながると思われる。なお、着用の推進に問題があるとするならば、高額である費用とどれくらいの耐用性があるかが問題であろうと思われる。

今後は費用対策効果について検討するつもりである。

E. 結論

今回調査した常時粉じん作業 28 名においても PAPR の着用によりマスク効率は極めて良好で、耐火物粉砕等作業の中には PAPR 着用により新たなじん肺発生を防止できるようなケースもあった。一方対象者すべてが PAPR 着用により呼吸が楽であると回答しており、PAPR 着用に対して良い感触が得られた。今後は大きさや重さなどに問題点はあるものの 80%以上の常時粉じん作業者が 4 週間以上着用継続した後も PAPR を着用したいと回答していることから、幅広い粉じん作業において PAPR が着用できるよう努力して行くつもりである。

参考文献

1. 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調査研究報告書 3月 2004
2. 防じんマスク適正着用の教育指導の効果に関する検討 岡山産業保健推進センター調査研究報告書 3月 2009
3. 電動ファン付き防じんマスクと通常防じんマスクの比較に関する研究—電動ファン付き防じんマスク (PAPR) の主観的並びに客観的な効果の検討— 岡山産業保健総合支援センター調査研究報告書 3月 2019

F. 研究発表

1. 論文発表
該当なし

2. 学会発表
該当なし

G. 知的財産権の出願・登録状況 (予定を含む.)

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

表 1. 電動ファン付き呼吸用保護具の調査アンケート

電動ファン付き呼吸用保護具の調査アンケート

整理番号 ()

氏名		年齢	歳
----	--	----	---

Q1. はじめにお聞きします.

① 性別	1. 男性 2. 女性
② 粉じん作業の経験	_____年_____か月
③ どんな作業で防じんマスクを使用していますか?	「グラインダーでの研磨作業」「アーク溶接作業」「原料の投入作業」等具体的にお答えください
④ 現在使用機会のある呼吸用保護具を全て選んで下さい(複数回答可)	1. 防じんマスク (取替え式) 2. 防じんマスク (使い捨て式) 3. 防毒マスク 4. 防じん機能付き防毒マスク 5. 電動ファン付き呼吸用保護具 6. 送気マスク
⑤ 防じんマスクの使用期間はどのくらいですか?	_____年_____か月
⑥ 呼吸器疾患はありますか?	1. ない 2. ある 差し支えなければ、疾患名をお書きください ()

Q2. 防じんマスクと比較して電動ファン付き呼吸用保護具におけるアンケートをお願いいたします.

① この度装着された電動ファン付き呼吸用保護具を教えてください	1. 面体形 製品名 () 2. ルーズフィット形 製品名 ()
② 防じんマスクと比較して電動ファン付きは呼吸が楽に感じましたか?	1. 感じた 2. 少し感じた 3. 変わらない 4. 少し苦しい 5. 苦しい

*裏面につづく

③ マスクの大きさは気になりますか？	1. まったく気にならない 3. 変わらない 5. 大変気になる	2. あまり気にならない 4. 少し気になる
④ 視界に変化を感じませんか？	1. まったく気にならない 3. 大変気になる	2. 少し気になる
⑤ マスクの重さは感じますか？	1. まったく感じない 3. 変わらない 5. かなり感じる	2. あまり感じない 4. 少し感じる
⑥ 動きにくさを感じますか？	1. まったく感じない 3. 変わらない 5. かなり感じる	2. あまり感じない 4. 少し感じる
⑦ マスク内へ粉じんのもれ込みを感じますか？	1. まったく感じない 3. 変わらない 5. かなり感じる	2. あまり感じない 4. 少し感じる
⑧ 作業後の疲労感に差はありましたか？	1. かなり楽であった 3. 変わらない 5. かなり増した	2. 楽であった 4. 少し増した
⑨ 作業の効率が上がったと感じますか？	1. かなり上がった 3. 変わらない 5. かなり落ちた	2. 上がった 4. 少し落ちた
⑩ 粉じんを吸っていると感じることはありますか？	1. まったく感じない 3. 変わらない 5. かなり感じる	2. あまり感じない 4. 少し感じる
⑪ メガネが曇りませんか？	1. まったく曇らない 3. 少し曇る	2. 変わらない 4. かなり曇る
⑫ ファンの音は気になりますか？	1. まったく気にならない 2. 少し気になる 3. 大変気になる	
⑬ 今後、電動ファン付き呼吸用保護具を使用していきたいと思いませんか？	1. 思う 2. 思わない その理由等があればお答えください ()	

Q3. 日頃,作業で防じんマスク（電動ファン付き呼吸用保護具以外）を使用している人にお聞きします.

① 防じんマスクの装着時間は,平均して 1 日あたり何時間くらいですか？	_____ 時間
② 今までに,呼吸保護具の装着方法に関する教育を受けたことはありますか？	1. ない 2. ある
③ フィットテストをしたことがありますか？	1. 作業前に必ず行う 2. 時々行う 3. 行ったことがない どのようにフィットテストをしていますか？ ()
④ 呼吸保護具装着時に接顔面と顔面の隙間に何かが入り込むことはありますか？（複数回答可）	1. 何もない 2. メリヤスカバー 3. タオル 4. その他 ()
⑤ 通常防じんマスクは圧着がきついと息苦しいですか？	1. まったく感じない 2. あまり感じない 3. 変わらない 4. 少し感じる 5. かなり感じる
⑥ 接着面の皮膚はかゆいですか？	1. まったく感じない 2. あまり感じない 3. 変わらない 4. 少し感じる 5. かなり感じる
⑦ 接着面の皮膚は痛いですか？	1. まったく感じない 2. あまり感じない 3. 変わらない 4. 少し感じる 5. かなり感じる
⑧ 呼吸用保護具の装着が必要な状況にもかかわらず,呼吸用保護具を外したことはありますか？外したことがある方は,どのような状況において外しましたか？（複数回答可）	1. 外したことはない 2. 暑さや汗が気になるなど,不快感がある状況で外した 3. 息苦しくなったため外した 4. 会話において相手に声を届けようとして外した 5. その他 ()
⑨ 使用していて,機能の低下等を感じますか？（感じる部分はどこですか？）	1. まったく感じない 2. 少し感じる () 3. 強く感じる ()

ご協力ありがとうございました.

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

ウェアラブル粉塵測定デバイスの開発

研究分担者 盛武 敬 産業医科大学産業生態科学研究所放射線健康医学研究室
研究協力者 石垣 陽 電気通信大学・ヤグチ電子工業（株）CTO

研究要旨

PAPR 被験者の個人粉塵ばく露量を随時測定し可視化することを目的とし、被験者に脱着可能で小型軽量な PM2.5 センサー（ウェアラブル粉塵測定デバイス）の開発を目指す研究の2年度目として、前回試作機（H30年度版）を用いて実施されたフィールドデータや、その使用感をフィードバックし、R1年度改良型のコンセプトをまとめ、これらを取り入れた新設計を施し試作を行った。

A. 研究目的

本研究では、PAPR 被験者に脱着可能で小型軽量な PM2.5 センサー（ウェアラブル粉塵測定デバイス）を開発し、被験者の個人粉塵ばく露量を随時測定し可視化することを目的とする。このデバイスの完成により、体内への粉塵取り込み量と具体的な作業内容を関連づけることが可能となるため、PAPR 装着が必要とされるシチュエーションや作業内容を、具体的な粉塵濃度を基に指摘できるようになり、粉塵作業現場の労働衛生管理の改善に貢献できると考えている。

B. ウェアラブル粉塵測定デバイスの開発
(H30年度版の課題と R1年度版の改善点)

H30年度（昨年度）の成果物（図1）の課題と、R1年度（今年度）の成果物（図2）における主な改良点について、以下に詳しく説明する。

1. ソフトウェアの改善

(1) 連続測定時間の延長

昨年度の改良点として、市販のポケット PM2.5 センサーは 1.0h までしか測定できないため、実験時間の 2.0~3.0h 程度（以上）まで測定・グラフ可視化できるようアプリを改良した。今回はさらなるハードウェアの改良（以下参照）により、4.0h を超える時間の可視化に対応した。

2. ハードウェアの改善

(1) 連続動作時間の延長（現状は約 1.5h）

ヤグチ電子工業（株）（宮城県・石巻市）が市販している（現状の）ポケット PM2.5 センサーでは、消費電流が大きいため連続動作は 1.5h 程度が限界である。そこで H30年度（昨年度）の改良点として、間欠動作や低消費電力化に取り組むことで動作時間を延長し、およそ 2.5~3.0h 程度の動作が可能となった。これを用いて実証実験を行ったところ、現場の実験担当者から「バッテリーの連続稼働時間を増やしたい」という強

い要望が上がったため、R1 年度（今年度）は電池の大型化とセンサの小型化に取り組み、動作時間を 4.0h 以上へと延長を図った。

(2) Bluetooth 無線化及びスマホレス化

市販のポケット PM2.5 センサーでは、20cm 程度の USB シリアルケーブルでセンサー本体とスマホを接続する必要がある。そのため、本研究で粉塵作業者が胸～肩にセンサーを置いて測定することを考えると、USB シリアルケーブルを数十 cm 以上に延長することが必要となる。いっぽうで、このケーブルの延長は電磁ノイズの影響の増大を来すというデメリットにも繋がる。そこで H30 年度は、様々なスマホに対応する汎用 Bluetooth 無線接続方式を採用して、ケーブルレスにセンサー本体とスマホとの

データリンクを確立し、ノイズの影響を極力回避することに成功した。

無線によるセンサーとスマホの接続方法には、大きく分けて、測定中に常時両者が通信をする「同期方式」（Bluetooth, Wifi 等による）と、測定時は内蔵メモリーへの記録（後述）を行い、測定終了後にスマホや PC と有線ケーブルや SD カードなどにより随時リンクしてデータを取得する「非同期方式」の、2つの方法が想定されるが、H30 年度は時間と予算の制約により、前者の「同期方式」での試作を行った。そこで、本年度はスマホ無しで内蔵メモリーに記録できる「非同期方式」を実装することで、現場で作業員にスマホを携帯させなくとも測定することを可能とした。これにより大幅に携帯性能が向上した。



図1 H30 年度（昨年度）開発した粉塵測定システム

Bluetooth 無線方式でスマホと接続されたポケット PM2.5 センサー。約 2.5～3.0 時間の連続測定が実現された。PM2.5/10 値 ($0\sim 999\mu\text{g}/\text{m}^3$)、GPS 情報、時刻が csv 形式で書き出すことができる。



図2 H31 年度（今年度）開発した粉塵測定システム

スマホを必要とせず、完全にスタンドアロンで動作する。ログ記録は非同期式であり、内蔵された SD カードに最大1年分が記録でき、PC 等に接続して読み込みが可能。連続動作時間も大幅に伸びた他、センサー性能も向上している。

3. 検出粉塵レベルの仕様について

ヤグチ電子工業(株)が販売する現行モデルの測定上限濃度は $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ までとなっており, それを超える極端な粉塵作業現場では値が飽和してしまう. そのような状況下での個人粉塵曝露濃度の評価には, 個人サンプリングした粉塵質量を曝露持続時間で除すことで, 個別粉塵現場での概算粉塵濃度/時間の暫定値を用いるなど, 運用方法の検討が必要である.

そこで H30 年度(昨年度)の開発では, これまでの測定では不可能であった「個人曝露濃度の時間トレンドを相対的に観察する」という機能の実現に焦点を当てて開発を行った. しかしフィールド実験を行ったところ, センサモジュールがハードウェアの測定限界を超えた濃度を検出する際に, まれに $999 \mu\text{g}/\text{m}^3$ を超える濃度が出力されてしまうという問題が発見された. これはセンサーの設計限界を超えた非常に高い濃度が検出された際にモジュールが誤動作することが原因であった. 本年度ではファームウェアの改良により, この問題を解消した.

また, 作業現場によっては高い濃度(例: 数百 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) であってもマスクをしていない場合もあるため, 任意の閾値を設定して視聴覚的なアラームを出す機能の実装も望まれた. そこで R1 年度(本年度)は, 触覚及び視聴覚に訴えるアラームのサンプルプログラム(図3)をラピッドプロトタイプとして事前作成し, 研究者間で事前検証を行った. その結果, バイブレーション無し, 鳴動周波数は 1kHz (MEMS ピエゾブザーによる極力大きな音量), 視覚警報は LED のフ

ラッシュの仕様により, アラーム機能を実装することとなった.



図3 アラーム機能の動作確認用プログラム(ラピッドプロトタイプ)

4. R1 年度(本年度)ウェアラブル粉塵測定デバイスへ追加された機能の概要

(1) センサー部

実験環境のニーズに合わせて, センサーの各種性能について改良を行った. H30 年度(昨年度)との対比は表1のとおり.

(2) バッテリー

センサーの大幅な小型化により, より大型の LiPO バッテリーを搭載することができた. これにより, 連続使用時間が H30 年度(昨年度)の場合 2.0~3.0h 程度だったものが, R1 年度(今年度)は 4.0h 以上を確保することができ, 現場での有効性が向上した.

(3) 内蔵メモリーへの記録機能

スマホと常時接続(無線・有線を問わず)していなくても, 単独で内蔵メモリーを準備し一定のデータを記録できるような機能を実装した. 具体的には SD カードを内蔵させ, そこに CSV ファイル形式にて逐次自動

的にログを記録する。スマホレスで動作させることができるため、H30 年度（昨年度）よりも可搬性が大幅に向上し、現場でのユーザビリティが上がった。

（４）アラームによる警報機能

現場から要望が高かったアラーム機能（音+LED 点滅）を実装した。任意の閾値を超えた濃度が検出された場合に起動する。

H30 年度に製作を行ったウェアラブル粉塵測定デバイスのテスト結果と現場からの要望を取り入れ、R1 年度版の試作を完了した。さらに来年度は最終版の製作へ向けたフィールドテストの実施と、最終的な PAPR の装着の効果判定に活用されることが望まれる。

C. まとめ

表 1 センサー性能比較

性能指標	H30 年度（昨年度）	R1 年度（今年度）
相対誤差	PM2.5 ±15% 濃度が極端に高い場合誤動作することがあった。	PM2.5 ±15% 誤動作対策により信頼性を改善した。
動作温度	-20 ~ +60°C	-20 ~ +70°C
保管温度	-10 ~ +50°C	-10 ~ +85°C
湿度条件	50%RH にて標準化	0%RHから95%RHにて動作保証,non-condensing
サイズ	42.5mm × 32mm × 24.5mm	44mm×36mm×12 mm 体積を約 1/2 に減ずることで、バッテリーとメモリーモジュールに充当できた。
設計寿命	1 年	10 年

Ⅲ. 研究成果の刊行に関する一覧表

Ⅲ 研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

本年度は該当なし

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の 編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ

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
Shirasaka T, Ando H, Ikegami K, Ogami A.	A survey on methods of wearing respiratory protective equipment and awareness of respiratory protection among workers engaged in dust-generating work.	Environ Occup Health Practice	doi:10.1539/eohp.2019-0005-FS		2019
世古口真吾, 吉武英隆, 白坂泰樹, 安藤肇, 池上和範, 大神 明	現場で認める装着方法の漏れ率の検討	Clean Health Safety NEWS	11月号	p8-11	2019