

電動ファン付き保護具の実用性並びに普及に関する研究 (180302-01)

平成30年度～令和2年度 研究結果概要

研究代表者 大神 明

産業医科大学 産業生態科学研究所 作業関連疾患予防学 教授

A 研究の目的

粉じんによる健康障害防止のためには、作業環境の改善と呼吸用保護具の装着が重要である。近年、電動ファン付き呼吸用保護具 (Powered Air Purifying Respirators, 以下 PAPR と略) が開発され、粉じんの防護性向上や装着に伴う身体負担の軽減に効果があるとされる。現場作業における呼吸用保護具装着による心身への影響、PAPR 装着の有用性や負担軽減効果、防護性を明らかにし、適切な作業管理、健康管理に役立てること、および実際の現場作業や作業者の特性に適した呼吸用保護具の選定について普及啓発することで、じん肺等の健康障害の予防に繋げることを目的とした。

B 研究の方法・内容

本研究で研究期間 (3年間) に行ったことは以下の通りである

1. 人工気候室における調査

- 1) 装着バリエーションや呼吸用保護具の種類による漏れ率を安静時と運動時それぞれにおいて評価し、PAPR を含む呼吸用保護具の防護性の評価。
- 2) 冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具による身体負荷軽減効果の検討、
- 3) 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

2. 現場における調査

- 1) 実際の現場で認められる作業者の呼吸用保護具の装着バリエーションや使用している呼吸用保護具の種類に関する調査を行い、実態を把握した
- 2) 職場における粉じん発生作業下の呼吸用保護具の防御性能の評価、
- 3) 作業場における漏れ率測定調査：作業場において通常防じんマスクと PAPR との漏れ率の相違を客観的に評価。
- 4) 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、
- 5) 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。

3. ウェアラブルデバイスの開発と実用

- 1) ウェアラブル粉塵測定デバイス (PM2.5 センサー (WPM)) の開発と改良、
- 2) WPMを用いた職場環境 (屋外) の評価、

3) WPMの粉じん職場（屋内）における活用法の検討

4. 啓発用リーフレットの制作

C 研究成果

1 人工気候室における調査

1-1). 装着バリエーションや呼吸用保護具の種類による漏れ率を安静時と運動時それぞれにおいて評価し、PAPRを含む呼吸用保護具の防護性の評価

現場で確認される主要な装着方法であったメリヤスカバーを使用する装着方法、ヘッドバンドをヘルメットの上から固定する方法およびタオルを顔面に巻いた上から装着する方法の漏れ率を測定した。

ヘッドバンドをヘルメットの上から固定する方法は、顔面と接顔面の密着性が維持できていて、防護性を維持できている可能性がある。メリヤスカバーやタオルを使用する装着方法は、呼吸用保護具と顔面の密着性が低下し、取替え式防じんマスクを使用する場合は、十分な防護性を維持できていない可能性がある。顔面の皮膚障害を有する労働者や、著しい暑熱環境で作業している労働者において、メリヤスカバーやタオルを使用して呼吸用保護具を装着せざるを得ない状況でも、BS-PAPRを使用することで、防護性を維持できる可能性がある。保護具メーカーによる、皮膚障害を起こしにくい面体の開発や、ずれにくいヘッドバンドの開発に加えて、呼吸用保護具の選択や漏れ率を考慮した適切な装着方法が、じん肺をはじめとする健康障害予防の一助になると考える。

1-2). 冷風装置付き電動ファン付き呼吸用保護具による身体負荷軽減効果の検討

10名の被験者に対してクロスオーバー比較試験を実施した。PAPRとして興研株式会社のカサキ式 BL-321S 型、通常の防じんマスクとして同社のカサキ式 1180 型を用いた。冷風装置は産業医科大学作業関連疾患予防学のスタッフが自作したものを使用した。同一の被験者に対し、冷風装置付き PAPR を装着した条件、通常の PAPR を装着した条件、通常の防じんマスクを装着した条件の計 3 条件で実験を行った。各条件での実験において、被験者は体重測定を行った。その後、気温 28℃、相対湿度 45% (WBGT23℃) に設定した前室にて、安静状態で 20 分間測定した。その後、気温 36℃、相対湿度 45% (WBGT29℃) に設定した実験室にて、エルゴメーターで最大酸素摂取時の負荷の 30%の負荷で 30 分間測定した。運動終了後、前室にて安静状態で 20 分間測定した。その後、再度体重測定を行った。実験中 10 秒毎に直腸温、食道温、マスク内の温度（冷風装置を使用した際は装置内の呼吸用保護具側の温度）、心拍数を測定した。全被験者のマスク内温度の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、10℃ほど低く保たれた。全被験者の直腸温差分の平均は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して、運動開始以降は低く保たれた。全被験者

の食道温差分の平均と心拍数の平均は、冷風 PAPR を使用した条件とそれ以外の条件とで、明らかな差はないように見受けられた。各測定条件における体重減少率は、冷風 PAPR を使用した条件では、それ以外の条件と比較して低かった。

1-3) 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

身体負荷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。

2. 現場における調査

2-1) 実際の現場で認められる作業者の呼吸用保護具の装着バリエーションや使用している呼吸用保護具の種類に関する調査

研究参加事業場は、福岡県、山口県、千葉県に所在している 10 事業場であり、事業場に勤務する男性労働者 284 名に対して、自記式質問紙を配布した。212 名の労働者から調査参加の同意および質問紙への回答が得られた。(回収率: 74.6%)

調査の大項目は、基本属性、使用している呼吸用保護具の種類とその装着方法、防護性に対する認識の 3 項目とした。

常用マスクについて取替え式防じんマスクと回答したものが 113 名 (53.3%) と最も多く、次いで使い捨て式防じんマスクと回答したものが 41 名 (19.3%)、防毒マスクと回答したものが 30 名 (14.2%) であった。電動ファン付き呼吸用保護具 (Powered Air Purifying Respirators, 以下 PAPR と略する) の回答数は 0 名であった

装着方法に関して、113 名中、54 名 (47.8%) がヘッドバンドの位置は頭頂部と、52 名 (44.2%) がヘッドバンドはヘルメットの上から固定すると回答した。それ以外の回答として、ヘッドバンドは後頭部に固定すると回答したのが 4 名 (3.5%)、タオルや頭巾を巻いた上からヘッドバンドを固定すると回答したものが 2 名 (1.8%) であった

呼吸用保護具を使用している作業現場では、様々な装着方法が認められ、呼吸用保護具の装着方法に関する教育の不十分さや、個人的・職場環境的要因の課題が明らかになった。

2-2) 職場における粉じん発生作業下の呼吸用保護具の防御性能の評価

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。実験は、被験者が所属する製造業事業場内で、2020年12月に実施した。被験者の選定には、成人男性であり、基礎疾患を有さず、日々の業務で取替え式防じんマスク（RPR）を使用し、粉じん作業に従事している者という条件を設定した。事業場において被験者を募集し、参加同意を得られた9名を対象とした。平均年齢（標準偏差）は44.8（14.2）歳であった。9名の被験者に対してクロスオーバー比較試験を実施した。PAPRは株式会社重松製作所のSy11G2（フィルターはPL1）を使用した。RPRは、同社のDR77SR2（フィルターはRL2）を使用した。同一の被験者に対し、RPRを通常通り着用した条件（N-RPR）、RPRを推奨される方法で着用した条件（R-RPR）、PAPRを「RPRの通常通りの着用方法」に準じて着用した条件（PAPR）の計3条件で実験を行った。各条件での実験において、被験者には15分間連続で粉じん作業を行ってもらい、その間の呼吸用保護具外側・内側の粒子数を基に作業場防護係数を算出した。粒子数の測定には、柴田科学株式会社の労研式マスクフィッティングテスターMT-05U型を使用した。

作業場防護係数の幾何平均（幾何標準偏差）は、N-RPRが24.6（3.65）、R-RPRが14.8（2.82）、PAPRが110.6（4.77）であった。

PAPRは実際の職場環境下においても高い防護性能を発揮することが示唆された。PAPRは粉じんによって引き起こされる健康障害を防止するために有効であると考えられた。

2-3) 作業場における漏れ率測定調査（分担研究者：岸本）

（2018年度の調査結果）：通常防じんマスクは、紐のゆるみやメリヤスの装着により平均34.20%のもれが生じていることが明らかとなった。粉じん作業場における個人ばく露濃度を測定し、マスクのもれ率を考慮し換算したところ、通常防じんマスクでは総粉じん濃度は平均1.18mg/m³の吸入があり、吸入性粉じん濃度は平均0.22 mg/m³の吸入が生じていることが明らかになり、作業環境基準濃度を超えていることが判明した。一方、PAPRでは、マスクのもれ率は平均0.76%で、個人ばく露ともれ率を換算しても総粉じん濃度は平均0.029mg/m³、吸入性粉じん濃度の平均は0.004 mg/m³と問題になる吸入量では無かった。通常防じんマスクのもれ率が大きい原因として、マスクの適切な使用方法あるいはフィットテストに対する教育が不十分であることも考えられた。

（2019年度の調査結果）：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 0.25mg/m³ となり、許容濃度を超えるが、PAPR では 0.00006mg/m³ であった。

(2020 年度の調査結果)：通常防じんマスクと PAPR のマスクの漏れ率について、常時粉じん作業を行っている溶接作業 11 名と粉体製造・粉砕作業 11 名、築炉関連作業 19 名の合計 41 名を対象として測定した。対象者は 40 名が男性で 1 名は女性であった。年齢の中央値は 32.0 歳であった。1 日の作業時間は平均 4.8 時間で、溶接、粉体製造・粉砕、築炉と粉じん量の多い作業で、作業年数は 7.3 年であった。通常防じんマスクの漏れ率は 13.4%、PAPR は 0.7% であった。個人ばく露濃度を測定した 11 名については通常防じんマスクの漏れ率が 19.2% であったが、個人ばく露濃度測定結果を基に吸入粉じん濃度を換算すると 0.26mg/m³ となり、粉じんの許容濃度を超えるが、PAPR では 0.007mg/m³ であった。

2-4) 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

日本製鉄株式会社君津製鉄所構内にある粉じん発生職場がある 2 つの事業場から協力が得られ、対象者が日常的に作業を行っている粉じん発生作業場内において、2019 年 12 月から 2020 年 3 月末まで行った。対象者は、この 2 カ所の事業場に所属する男性従業員の中から、常時フィルター取り替え式防じんマスクを使用している作業員で、本研究への参加同意が得られた者を対象者とした。結果的に 41 名が研究参加に応募した。

アンケート結果より、1) PAPR は、通常の取り換え式防じんマスクよりも、マスク内の暑さや蒸れの軽減されること。呼吸の負担感が軽減されること。2) PAPR は、通常の取り換え式防じんマスクよりも、保護具の重さを感じる。保護具から発生する音が気になること。3) 年齢が高い労働者の方が、PAPR の呼吸の負担感および身体の軽減を感じやすいこと。4) 呼吸機能が強い方のほうが、PAPR の呼吸の負担感を軽減を感じやすいこと。5) マスクの装着時間が短い方のほうが、PAPR の呼吸の負担感を軽減を感じやすいこと、が明らかになった。

2-5) 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。(分担研究者：岸本)

(2018 年度の調査結果)：PAPR 装着に対するアンケート調査結果ではマスクの重さや大きさ、ファンの音さらには動きにくさが気になる作業員もいたが、通常防じんマスクに比較して呼吸が楽あるいはやや楽と感じた作業員は 75%あり、全体の 56.5%は今後 PAPR を使用したいと回答していた。

(2019 年度の調査結果)：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%を超える作業者が、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者が PAPR を着用したいという回答であった。

(2020 年度の調査結果) : 36 名について PAPR を着用開始 3 時間後と 4 週間後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、一方通常防じんマスクを適切に使用した際に感じる強い圧着、その結果生じる接着面のかゆみや痛みを PAPR 着用でそれほど感じない、あるいは呼吸が楽で粉じんを吸入しないなどのメリットにより、86%を超える作業者が着用直後のみならず、4 週間後であっても今後も着用したいという回答であった。

3. ウェアラブルデバイスの開発と実用

3-1) ウェアラブル粉塵測定デバイス (PM2.5 センサー (WPM)) の開発と改良 (分担研究者 : 盛武)

2018 年度はヤグチ電子工業 (株) にて既に上市している、スマホ接続型の小型 PM2.5 センサー「ポケット PM2.5 センサー」を、外注委託により本研究仕様のウェアラブル粉塵測定デバイスに改良した。初年度の開発では、これまでの測定では不可能であった「個人暴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。

2019 年度は、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い、ウェアラブル粉塵測定デバイス (ウェアラブルパーティクルモニター : WPM) へ機能を追加した。追加した機能は、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、連続使用時間の持続化を確保することができ、現場での有効性が向上した。

また、内蔵メモリーへの記録機能としてスマホと常時接続 (無線・有線を問わず) してなくても、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。これにより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。さらに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。

2020 年度は、前回試作機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、最終的にこれらを取り入れた新設計として親機+子機により構成、LED によるゴーグル上での警報機能、ペンダント・スマートウォッチ型バイブレータ警報機能を R2 年度改良型のコンセプトをまとめ、試作を行った。

3-2) WPMを用いた職場環境 (屋外) の評価

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 (WPM) 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。スマートフォンに搭載されている GPS で取得した参

考移動経路と、WPMのデータ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。粉じん発生場所に応じてWPMの粉じん濃度がそれぞれ他の場所に比べて高い値を示した。

3-3) WPMの粉じん職場（屋内）における活用法の検討

職場測定（屋内）では、測定者が左右の上腕に装着した計2台のWPMを使用して、模擬工場内を周回し、動作中の粉じん濃度相対値を計測した。模擬工場内には、2台の加湿器を設置し、食塩水を噴霧させ模擬粉じんとした。また、WPMによる粉じん測定と並行して、Wi-Fi-RTT (Round Trip Time) を利用したスマートフォンの位置計測アプリケーションを使用して位置情報を測定した。アプリケーションは、MIT ライセンスにて公開されているプログラムに修正を加えたものを使用した。以上の方法により取得した1秒間のWPM測定値と端末座標をもとに、粉じんレベルのヒートマップを作成した。その結果、屋内の測定においても、WPMを使用することで、実験中の模擬工場内の粉じん濃度相対値を測定することができた。また、Wi-Fi-RTTを利用することで、実験中の測定者の位置情報を取得することができた。さらに、粉じん濃度相対値と位置情報を組み合わせることで、粉じんレベルのヒートマップを作成することができた。

4. 啓発用リーフレットの制作

3年間の研究期間で得られた知見を基にして、①皮膚が弱い作業員用、②作業負荷の高い作業員用、③高齢作業員用、④作業環境測定結果が悪い職場で働いている作業員用、⑤屋外作業にて直接粉じんばく露がある作業員用、

以上の種類のPAPRの着用促進に関する啓発用リーフレットを作成した。

D 結論

本研究全体を通して以下の知見が得られた。

1) 粉じん作業における保護具の装着実態においては、メリヤス使用やタオル使用、不適切な装着などの実態が明らかになった。装着感に対する調査ではPAPR着用に対して良い感触が得られた。

2) マスクの漏れ率については、従来のマスクは実験室内及び現場も含めメリヤスやタオル使用などでは漏れ率が高度になることが明らかになった。一方PAPR着用の場合、現場においても従来のマスクより漏れ率が低減されPAPRは高い防護性能を発揮し、粉じんによって引き起こされる健康障害を防止するために有効であると考えられた。

3) PAPR装着時に冷却した呼気を導入すると、装着者の直腸温を下げる効果が期待できること、PAPR装着により従来のマスクに比較して装着者の代謝への影響が少なく、高齢者や呼吸器疾患を背景に持つ作業員に対してメリットとなり得ると思われた。

4) ウェアラブル粉じんモニター装着により、屋外および屋内作業場においてもリアルタイムでの粉じん曝露濃度予測や、作業環境濃度推測に有用であることがわかった。作業環境をモニターすることにより適材適所での PAPR 使用の啓発に繋がることが示唆された。

E 今後の展望

今後、現場における PAPR の適正使用の啓発を行い、さらに健康障害のリスクが高い物質を取り扱う作業者への PAPR 使用の推進を図るべきと思われる。PAPR 装着に伴う負担軽減をどう改善させるかについては、特に頭頸部への負担が主要となると思われるため、PAPR 本体の軽量化を図るとともに、作業内容による PAPR のモデルの適正な選択も必要と思われる。