

電動ファン付きマスクの身体負荷軽減の検討

— 事業場における計測 —

久保 大地・内貴 猛*・横溝 浩**・西出 忠司**・山本 正晴**

岡山理科大学大学院工学研究科修士課程生体医工学専攻

*岡山理科大学工学部生命医療工学科

**岡山産業保険総合支援センター

(2017年10月26日受付、2017年12月4日受理)

1. はじめに

現在でも粉じん作業場が多く、じん肺を発症する可能性が高い。従来の防じんマスク（DR）では、吸気時にマスク内が陰圧になることで、接顔部に生じた隙間からマスク内に粉じん等が流れ込むことやマスク内のフィルタの抵抗により息苦しいことが問題であった¹⁾。そこで、それらの問題を解決するために電動ファン付きマスク（PAPR）が開発された。PAPRを装着した場合には、吸気時に電動ファンが回転し、空気を強制的にフィルタを通してマスク内に送り込むことで、マスク内が陽圧に保たれるため、接顔部に生じた隙間からマスク内に粉じん等が流れ込むことがなく、フィルタの抵抗を感じにくい。PAPRの方が楽であるとの主観報告²⁾や電動ファンによるマスク内圧の増加を測定した研究³⁾はあるが、防じんマスクを装着することによる作業者の身体的負荷が電動ファンにより軽減されるかどうかを科学的に調査した研究はない。そこで本研究では、DRとPAPRを着用したときのマスク内外圧力差とともにマスク内外温度、皮膚温度、マスク内湿度、血中酸素飽和度、脈拍数を測定し、電動ファンによる身体的負荷の軽減効果を検証した。

2. 測定対象と方法

2-1 測定対象

粉じんが多い環境で作業を行う耐火物製造業（高炉用ブロック等を製造）2社と造船業2社の4事業場の各社

4名、計16名の作業者にDR（興研，1005R型あるいは重松製作所，DR28SU2K），PAPR（興研，BL-321Sあるいは重松製作所，Sy11V3）を順に装着して2-2に記述する測定を行った。DRとPAPRには、電動ファンの有無以外は基本的性能が同等の製品を選定した。耐火物製造業社では粉体混合作業，造船業社では溶接作業と鉄板のNCプラズマ切断作業時に測定した。さらに、電動ファンによる身体的負荷軽減効果と作業負荷との関係を検討するために、粉じんのない環境で事業場での作業よりも高い作業負荷の作業時にDR，PAPRをランダムな順番で健康男性12名に装着し、同様の測定を行った。この際には、マスク着用自体の影響を検討するために、マスクを着用しない状況についても測定した。高負荷な作業として1～5階間の階段昇降を3往復させた。なお、粉じんがある環境での測定については8,9月に実施し、粉じんがない環境での測定については10～12月に実施した。

2-2 測定装置

防じんマスクに取り付けた圧力トランスデューサ（Measurement Specialties, GA100-005WD）によりマスク内外圧力差，3個のK型熱電対（GRAPHTEC, JBS-7115-5M-K）によりマスク内・外温度と皮膚温度，湿度センサ（GRAPHTEC, B-530）によりマスク内湿度を測定した（図1）。ウエストバックの中にハンディデータロガー（GRAPHTEC, GL220）を入れ、約1.5時間の作業

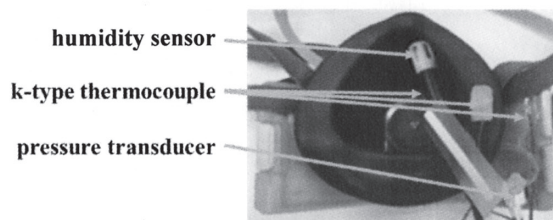


図1 マスクへのセンサ配置

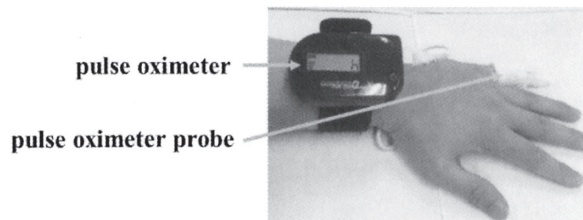


図2 パルスオキシメータ 装着例

中の上記の測定データを集積した。マスク内外圧力差のピーク間の時間から呼吸数を算出した。作業の妨げにならないようにパルスオキシメータ（パシフィックメディコ、PMP-200GplusX）のプローブを左手小指に装着し、血中酸素飽和度と脈拍数（図2）を測定した。粉じんのない環境でマスクを着用させずに測定した際には、血中酸素飽和度と脈拍数のみを測定した。

測定データからノイズと作業していないときのデータを取り除き、平均値を求め、粉じんがある環境では16名、粉じんがない環境では12名のデータの平均値を比較した。ただし、ノイズと作業していないときのデータを取り除いた結果、データ収集時間が0.5時間以下になった作業者のデータについては平均値の算出から除外した。

なお、本研究は独立行政法人労働者健康安全機構における平成27年度産業保険調査研究倫理審査委員会の承認（受付番号9）、および岡山理科大学人を対象とする研究倫理審査委員会の承認（受付番号27-7）を受けた上で、被験者には実験内容について説明を行い、書面にて同意を得て行った。

2-3 統計学的検定

測定データを平均値と標準偏差により表し、DRとPAPRの各測定値の平均値間の有意差の検定には対応のあるデータの t 検定を使用した。ただし、粉じんがない作業においてマスクを着用しなくても測定できる項目（脈拍数、血中酸素飽和度）については、3群間の比較になるため、一元配置分散分析とtukey法（多重比較）を使用して検定した。また、粉じんがある環境での被験者と粉じんがない環境での被験者は異なるため、粉じんがある作業と粉じんがない作業間の各測定値の平均値の有意差の検定にも一元配置分散分析とtukey法を使用した。

3. 結果

従来の防じんマスク（DR）着用時のマスク内外圧力

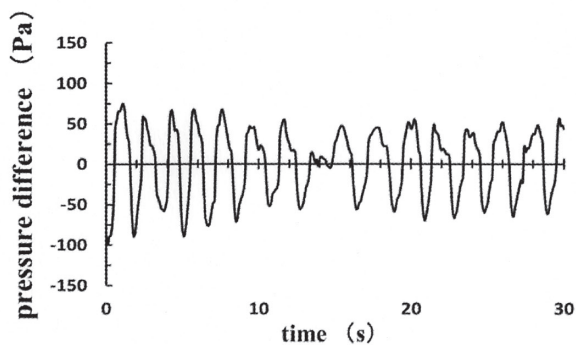


図3 従来の防じんマスク（DR）着用時におけるマスク内外圧力差の変化

差（マスク内圧）は吸気時に陰圧になり、呼気時に陽圧になることがわかった（図3）。一方で電動ファン付きマスク（PAPR）の場合には吸気時にもマスク内圧は陽圧になり、陰圧になることがないことがわかった（図4）。それらの結果、PAPRを着用したときのマスク内外圧力差の平均値（図5）は、DRを着用したときより有意に大きかった。ただし、粉じんのない環境における階段昇降作業でのDRを着用したときのマスク内外圧力差は粉じん作業におけるDR着用時の値より有意に小さかった。

粉じんがある環境ではPAPRを着用したときの脈拍数（図6）は、DRを着用したときより有意に小さかった。粉じんのない環境での脈拍数（約100 bpm）は粉じん作業における脈拍数（約80 bpm）より有意に高かった（約125%）。しかし、粉じんのない環境における階段昇降作業ではマスクの有無あるいはPAPR装着による差異はなかった。

粉じんがある環境と粉じんがない環境の両方について、PAPRを着用したときのマスク内湿度（図7）は、DRを着用したときより有意に小さかった。しかし、粉じんがある環境と粉じんがない環境との間には有意差はなかった。

血中酸素飽和度（図8）、皮膚温度（図9）、マスク内温度（図10）、呼吸数（図11）についてはマスクの有無あるいはPAPR装着による有意な差はなかった。ただし、皮膚温度とマスク内温度については粉じんがある環境の方が粉じんがない環境より有意に高かった。

4. 考察

本研究で測定した項目と身体的負荷あるいは精神的負荷との因果関係は図12のようになっていると考えられる。図中の実線矢印は始点のパラメータが終点のパラメータを促進する関係、点線は抑制する関係を表している。作業を行うと身体的負荷が発生し、それにより酸素消費量が増加し、血中酸素飽和度が減少する。

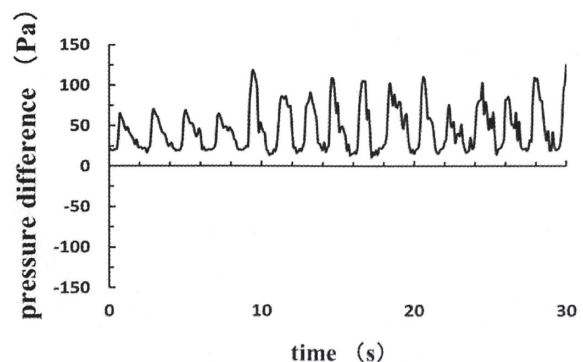


図4 電動ファン付きマスク（PAPR）着用時におけるマスク内外圧力差の変化

血中酸素飽和度を一定に保つために脈拍数は上昇し、その結果として体温（皮膚温度）が上昇する。一方で血中酸素濃度の低下により呼吸数も増加し、その結果として呼吸努力が増加し、マスク内湿度と温度が上昇すると考えられる。防じんマスク（DR）を着用することによりさらなる呼吸努力が必要になり、その分の身体的負荷が増加し、脈拍数等をより増加させることになると考えられる。DRを電動ファン付きマスク（PAPR）に交換することにより呼吸努力が減少し、その分の身体的負荷が軽減すると考えられる。以上の因果関係を考えると、電動ファンによって身体的負荷が軽減され

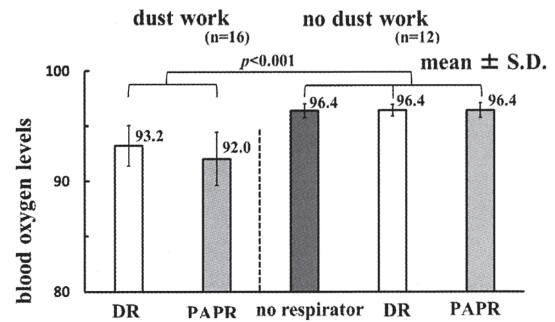


図8 血中酸素飽和度の比較

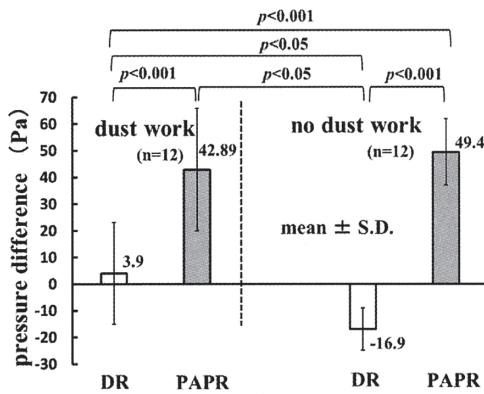


図5 マスク内外圧力差の比較

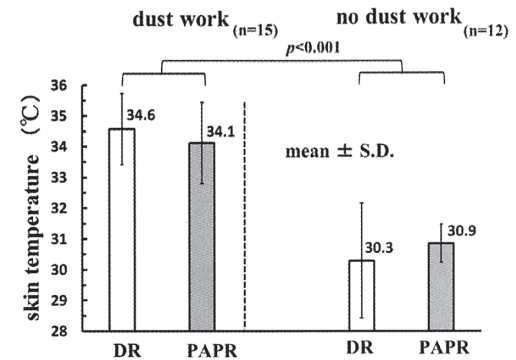


図9 皮膚温度の比較

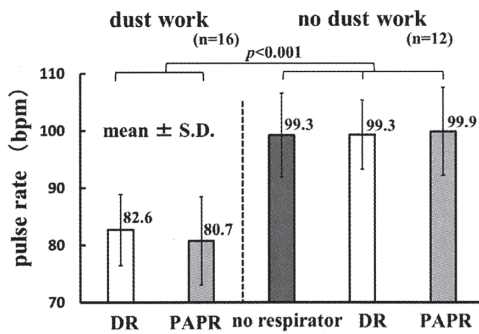


図6 脈拍数の比較

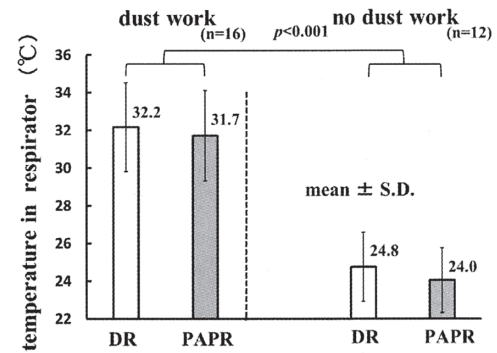


図10 マスク内温度の比較

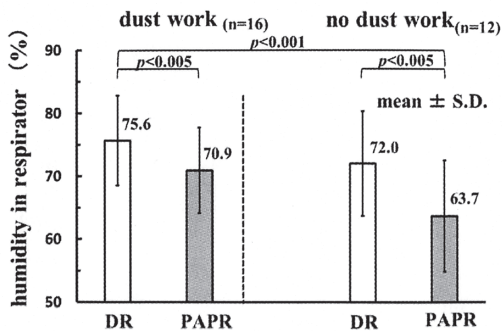


図7 マスク内湿度の比較

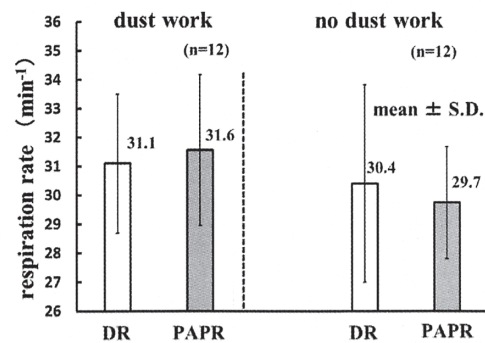


図11 呼吸数の比較

たかどうかはDRとPAPRを装着したときの血中酸素飽和度や脈拍数、呼吸数、皮膚温度、マスク内温度、湿度の差異を調べれば判定できると考えられる。しかし、これらの項目には血中酸素飽和度のように、身体の恒常性により一定に保たれる項目も存在する。その点に注意して測定結果を考察する必要がある。

吸気時のマスク内圧が電動ファンにより有意に増加した(図4)ことから、電動ファンは使用者の呼吸補助を行っていることが認められ、使用者の呼吸努力を軽減していることが推測された。血中酸素飽和度(図8)、皮膚温度(図9)、マスク内温度(図10)、呼吸数(図11)については電動ファンによる影響はなかったが、脈拍数とマスク内湿度は電動ファンにより有意に減少した。マスク内湿度についてはマスク内への外気の流入流量にも多分に影響され、本研究では流量を測定していないため、身体的負荷軽減の証拠とは判断できない。しかし、脈拍数については身体的負荷の変化によって減少したと考えられ、防じんマスク装着にともなう身体的負荷が電動ファンにより軽減したことを示す証拠ではないかと考えられる。

粉じんのない環境における階段昇降作業においてDR着用時の平均マスク内外圧差が有意に低いこと、脈拍数が粉じんがある環境よりも125%程度高いことから、階段昇降作業の負荷は想定どおりに粉じん中の作業よりも高かったと考えられる。皮膚温度(図9)、マスク内温度(図10)が粉じんがある環境での測定より有意に低かったのは気温(環境温度)の違いによるものと考えられるが、粉じんがある環境と同様に電動ファンによる影響はなかった。また、マスク内湿度についても粉じんがある環境と同様の結果であった。しかし、階段昇降作業では粉じん作業において見られた脈拍数の減少が予想に反して見られなかった。この結果から、高

い負荷の作業の場合には電動ファンが供給する吸気量が不足して電動ファンによる身体負荷軽減効果が得られなかった、あるいは電動ファンによる身体負荷軽減効果が高負荷の作業による脈拍数の増加に埋もれてしまったことが原因だと考えられる。今後は作業負荷を段階的に変えて作業負荷と電動ファンによる脈拍数減少効果の関係をより詳細に調べる必要があることが明らかになった。

4. おわりに

従来の防じんマスクと電動ファン付きマスクを着用したときのマスク内外圧力差、マスク内湿度、マスク内外温度、体温(皮膚温度)、脈拍数、血中酸素飽和度を比較検討した結果、電動ファン付きマスクを着用することで吸気時のマスク内圧の増加により、マスク装着にともなう身体的負荷が軽減され、その結果として脈拍数が減少することが示唆された。また、電動ファンによりマスク内湿度が有意に低下したことから、不快感も低下し、精神的負荷も軽減することが示唆された。しかし、電動ファンによる脈拍数の減少は脈拍数が80 bpm程度になる比較的軽度の作業でのみ現れることがわかった。

参考文献

- 1) 独立行政法人作業健康福祉機構 岡山産業保健支援センター, 調査研究報告書 粉塵作業場におけるマスク効率と呼吸機能に関する研究, <<http://www.okayamas.johas.go.jp/09-tyousa.html>>, 2003
- 2) 事業場におけるばく露防止対策 作業者の健康リスクを最小限に抑えるために防じんマスクから電動ファン付き呼吸用保護具へ切り替え, Clean Health Safety NEWS, No. 679, pp. 8-11, 2015
- 3) フィールドにおける電動ファン付き呼吸用保護具の有効性について, Clean Health Safety NEWS, No. 674, pp. 8-11, 2015

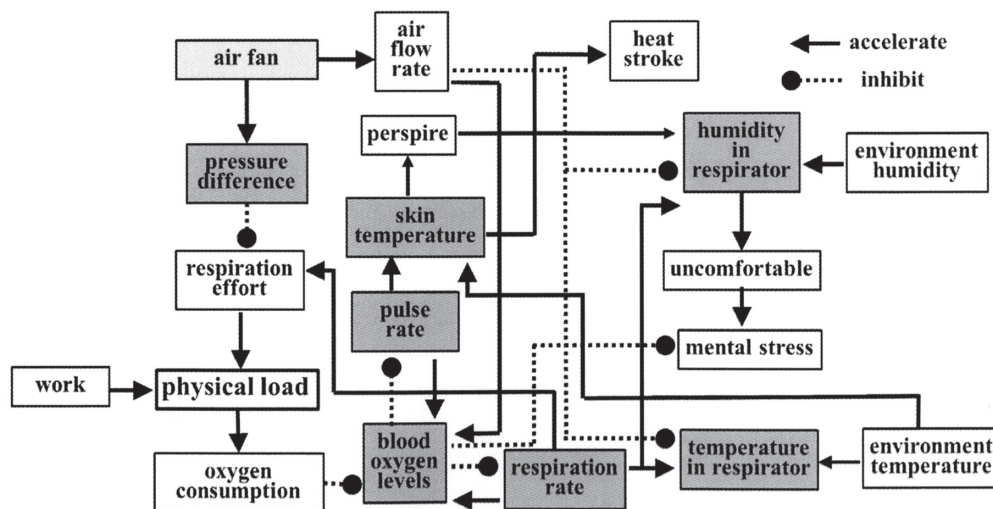


図12 測定項目の因果関係

Reduction effect of powered air purifying respirator on physical load

— Measurements in factories —

Daichi Kubo, Takeru Naiki*, Hiroshi Yokomizo**, Tadashi Nishide**, and

Masaharu Yamamoto**

Graduate School of Engineering,

** Department of Biomedical Engineering, Faculty of Engineering,*

Okayama University of Science,

1-1 Ridai-cho, Kita-ku, Okayama 700-0005, Japan

*** Okayama Occupational Health Promotion center*

(Received October 26, 2017; accepted December 4, 2017)

Pressure and temperature in and out of the dust respirator, skin temperature, humidity in the respirator, blood oxygen levels, and pulse rate of the workers using a conventional dust respirator or powered air-purifying respirator (PAPR) were measured during dust work to evaluate the effects of an electric fan on a worker's physical load. The results showed that the pulse rate was significantly decreased and internal pressure of the respirator was significantly increased when using PAPR. From these results, it was considered that the pulse rate and the worker's physical load might be reduced by increased internal pressure of the respirator. In addition, it was found that this effect appeared only in relatively light work in which the pulse rate is around 80 bpm.

Keywords: dust respirator, respiration rate, blood oxygen levels, pulse rate, biomedical measurement.