

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、H31 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 H31 年度版の改善点）

H30 年度（昨年度）の成果物（図 1）の課題と、H31 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、H31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、



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連結されたポケット 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 (0~999 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、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。



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。

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暴露濃度の評価には、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。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 H31 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. H31 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、H31 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。

表 1 センサー性能比較

性能指標	H30 年度（昨年度）	H31 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×12mm 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

C. まとめ

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、H31 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。