住宅内での簡易な空気中微粒子計測 IoT の可能性と課題

ほこりモニタキットでは何が測れるのか？

堤　富士雄[*1], 田中　伸幸[*2], 岩松　俊哉[*3]
*1 エネルギーイノベーション創発センター
*2 環境科学研究所 環境化学領域
*3 エネルギーイノベーション創発センター　カスタマーサービスユニット
2021 年 4 月

要約：

室内空気中の微粒子（室内微粒子）への関心が高まっている。室内微粒子は咳やくしゃみ、歩行、調理、清掃、喫煙などの生活行動によって発生する微粒子と、屋外から取り込まれた大気中の微粒子で構成される。これら室内微粒子は、健康への影響が懸念されるため、住宅内 QOL（Quality of Life）の大きな要素となっている。しかし、室内微粒子は種類が多い上に、家電動作や生活行動で状態変化し、換気および住宅構造にも影響されるなど、要因が複雑なため、各住宅内での室内微粒子の状況を把握するのは難しい。これに対し、IoT 型の微粒子計測技術が進展し、各種の計測に応用されはじめている。室内微粒子に関しても、IoT 型の微粒子計測技術を活用することで、各住宅での状況把握に役立つ可能性がある。そこで我々は、簡易かつ安価に室内微粒子を多点計測できる IoT 機器（ほこりモニタキット）を試作した。試作装置を 53 m^2 の実住宅で試験利用した結果、調理、洗濯、ベッドメーキング等に伴う室内微粒子の発生を、時空間的に把握できることが分かった。また、誤計測につながる使用上の注意点として外光や電源の問題を抽出し、対策案を示した。

©CRIEPI

目次

1. はじめに 3
2. ほこりモニタキット（HMK） 3
2.1 安価 5
2.2 簡易 5
2.3 多点 5
2.4 連続長時間計測 6
2.5 即時的な表示 6
3. 計測試験の条件 6
4. 計測試験の結果 8
4.1 洗濯 8
4.2 調理 10
4.3 ベッドメーキング 13
4.4 掃除 14
4.5 その他の検出可能な生活行動 15
4.6 計測を確認できなかった代表的な室内微粒子 15
4.7 誤計測につながる注意点 16
5. 考察 17
5.1 計測可能性に関する考察 17
5.2 課題に関する考察 18
6. おわりに 19
【参考文献】 19

©CRIEPI

1. はじめに

新型コロナウイルス（COVID-19）の感染拡大を契機として、エアロゾルなどの室内空気中の微粒子（室内微粒子）への関心が高まっている[1][2]。室内微粒子は咳やくしゃみ、歩行、調理、清掃、喫煙などの生活行動によって発生する微粒子と、屋外から取り込まれた大気中の微粒子で構成される。具体的には、微生物、タバコの煙、綿ほこり、ペットの毛、ダニの死骸、燃焼時発生微粒子、砂塵、花粉、海塩粒子、火山灰などがある[3][4][5]。これら室内微粒子は、ウイルス感染以外にも、健康への影響が懸念されるため[4][6]、住宅内 QOL（Quality of Life）改善の大きな要素となっている。しかし、室内微粒子は種類が多い上に、空調機器や掃除機などの家電や、生活行動で状態変化し、換気および住宅構造にも影響されるなど、要因が複雑なため、各住宅内での室内微粒子の状況を把握するのは難しい。

これに対し、簡易な微粒子センサや小型 PC の普及により、IoT（Internet of Things: モノのインターネット）型の微粒子計測技術が進展し、各種の計測に応用されはじめている[7][8][9]。室内微粒子に関しても、IoT 型の微粒子計測装置を活用することで、各住宅での状況把握に役立つ可能性がある。そこで本稿では、簡易かつ安価に室内微粒子を多点計測できる IoT 機器を試作し、実住宅での計測試験を行った結果を述べ、その計測可能性と課題を述べる。

開発した IoT 機器を「ほこりモニタキット（HMK: Hokori Monitor Kit）」と名付けた。既存の室内微粒子計測装置との違いは、以下である。

- 複数のほこりセンサを同時に使えるため、住宅内の微粒子分布を知ることができる。
- ほこりセンサは 10 秒間、空気中の微粒子量を測って、小さな表示窓に計測値を色付きで表示できるため、その場で微粒子量の変化を知ることができる。
- 複数のほこりセンサのデータ（1 分平均値）を PC に集約できる。
- センサ 1 個につき 4000 円以下の材料費であり、比較的安価に計測数を増やせる。

HMK は市民科学または当事者研究[10]の支援という側面を持っている。室内微粒子は、各住宅の異なる条件やライフスタイルに影響を受ける。よって、実際の住宅での QOL 改善のためには、空気清浄機や住宅設計に関する科学的知見の充実とともに、生活者自身が状況を把握し、改善手段を検討できる必要がある。つまり、HMK のような機器が普及することで、「各人がその場における種々の環境パラメータの状態を手軽に把握し、各人に応じた行動を判断出来るような市民社会」[11]に近づけることを期待するものである。

本資料の構成は以下の通りである。まず 2 章で HMK の概要を述べる。次に 3 章で試験環境を述べ、4 章で計測結果を報告する。5 章は計測結果の考察である。

2. ほこりモニタキット（HMK）

HMK は、一般住宅で誰もが簡単に使えて、生活改善のヒントになるような計測装置を目指して開発した。開発目的のポイントは、安価、簡易、多点、連続長時間計測、即時的な表示の 5 点である。本章でそれぞれの意図と、どのようにそれを実現したかを述べる。なお、

©CRIEPI

HMK の内部処理等の詳細な説明は別紙「ほこりモニタキットの作り方」を参照されたい。

なお、専門家による精密機器を用いた計測と異なり、HMK を用いた計測は、簡易なだけに容易に誤計測してしまう場合があることも後述の試験で分かっている。誤計測を防ぐノウハウについては 4.7 節、5.1 節で述べる。

HMK の構成を図 1 に示す。HMK は室内微粒子を計測する、ほこりセンサ（図 2）と、計測データを集約する PC（Raspberry Pi）で構成する。ほこりセンサで計測したデータは、Wi-Fi で PC に送信し、蓄積する仕組みとした。

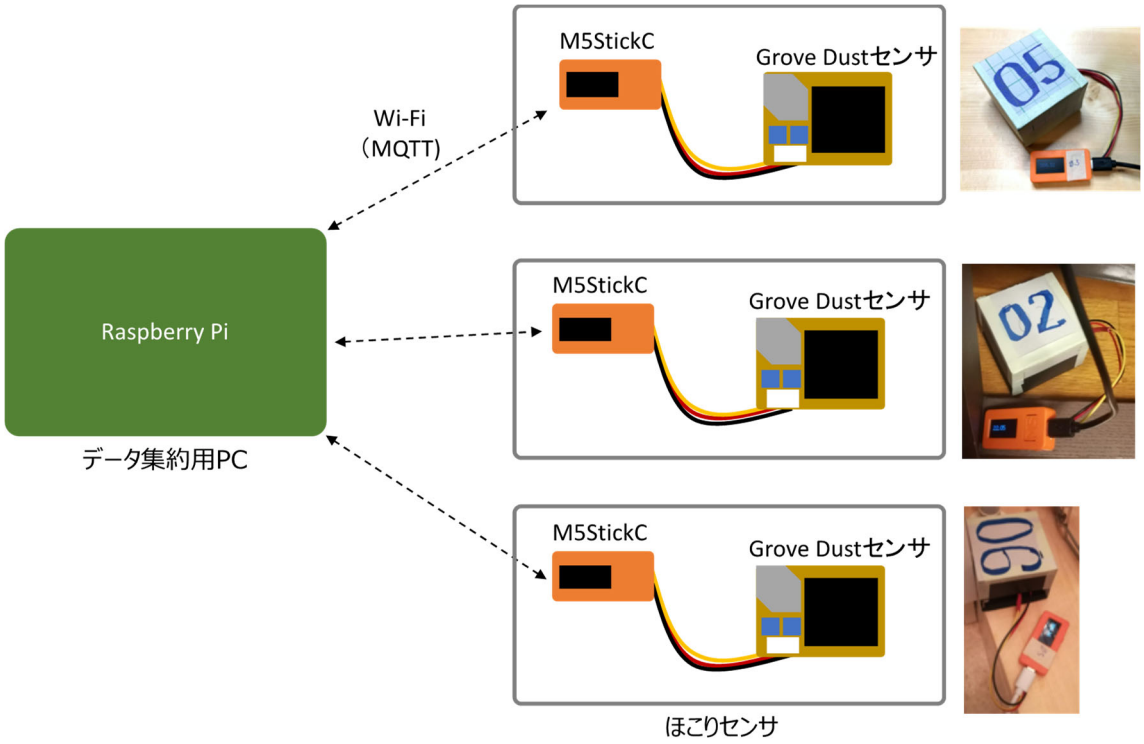

図 1 ほこりモニタキット（HMK）の構成

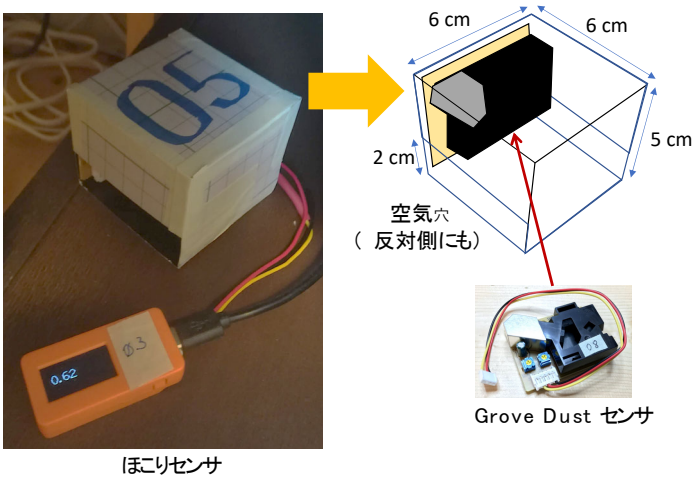

図 2 ほこりセンサ部の構造

©CRIEPI

2.1 安価

市販の室内微粒子計測器は専門家向けで高価である（10 万円～数百万円）。一方、一般住宅で広く利用するためには、装置コストを低く抑える必要がある。これに対し、HMK のほこりセンサ部は、1 セットあたり 4000 円以内と低コストである。微粒子センサとしては、低価格ながら多数の学術研究[12][13][14][15]でも活用されている Grove Dust センサ（PPD42NS、神栄テクノロジー製）[1]を用いた。本センサは 1μm 以上の微粒子を計測できる仕様となっている。なお、本センサに対しては文献[16]を始め、多数の詳細な解析がなされており、その性能と限界が示されている。計測間隔の制限など、本報告の実験の範囲内での、使用上の制限については 4 章と 5 章で述べる。

計測データの収集と表示、転送用のマイコンとしては M5StickC[2]を用いた。無線 LAN や 0.96 インチの TFT カラー液晶を備えた低価格[3]のマイコンであり、兄弟機の M5Stack 同様に電子工作（Makers）の分野で広く使われている。

なお、家庭向けの PM2.5 モニタなどの比較的安価な計測器が市販されているが、後述する多点同時計測の要求を満たせない上に、内部のデータ処理方法が不明、かつ一切のカスタマイズができないという難点がある。よって、1 章で述べた当事者研究の支援という点では HMK に優位性があると考えられる。

HMK では、データ収集用の PC に最も安価かつ普及している Raspberry Pi を用いるのを標準とした。既に PC がある環境であれば Raspberry Pi は不要であり、M5StickC から当該 PC にデータを送信するように設定すれば良い。また、既にインターネット接続環境（無線 LAN のアクセスポイントなど）が設置されている住宅であれば、M5StickC から直接クラウドにデータを送信することも可能である。

2.2 簡易

HMK は、別紙資料「ほこりモニタキットの作り方」に記載した手順を踏むことで、特別な専門知識が無くても簡単に作成できる。さらに、プログラムのインストール等を Raspberry Pi や M5StickC に施した状態であれば、後は装置を組み立てて、計測したい場所に設置し、電源を入れるだけで利用開始できる。プログラムのインストールには多少の IT 知識が必要だが、装置の組み立てには特段の技術は不要である。

2.3 多点

微粒子の大きさや重さ、発生原因の違い等により、室内微粒子の量は場所ごとに異なる。よって、状態を把握するには、生活空間の高さ方向と広がり方向の両方で、室内微粒子の状

---

[1] https://www.shinyei.co.jp/stc/products/optical/ppd42nj.html（2021 年 2 月 5 日アクセス）

[2] https://docs.m5stack.com/#/ja/core/m5stickc（2021 年 2 月 5 日アクセス）

[3] Switch Science で 1650 円（税込み）https://www.switch-science.com/catalog/6350/（2021 年 2 月 8 日アクセス）

©CRIEPI

態を計測する必要がある。一方で、微粒子がいつ発生するかは分からないため、センサは同じ場所に設置して、微粒子の発生を待ち伏せして使う必要がある。一台のセンサを移動して計測すると、発生のタイミングを見失う恐れがあるためである。

そこで HMK では、小型のほこりセンサ多数台を同時に用いて、計測値を PC に集約する構成とした。M5StickC と PC との間は、Wi-Fi 経由で軽量な MQTT プロトコルを用いている。無線であるため設置場所を選ばない。また、センサ部が低コストであるため、多数台導入へのハードルが低いという利点もある。

4 章の試験では最大 6 台を同時利用した結果を述べる。それ以上の台数を同時利用した知見は無い。

2.4 連続長時間計測

微粒子の発生時刻は、事前に分からないため常時計測が必要である。そのため、HMK では 1 分間隔で連続計測し、全てのデータを PC に集約している。なお、計測間隔を短くすることは可能だが、文献[16]において、Grove Dust センサでは 30 秒より短くすると計測誤差が大きくなるとの報告がある。HMK では、これら集約したデータを、時間を揃えて比較できるため、室内微粒子の時空間的な変化を把握することができる。

2.5 即時的な表示

室内微粒子は多数の種別があるが、HMK に限らず、微粒子の種別まで分類できる計測器はない[11][4]。これに対し、発生した微粒子が何なのかを、生活行動との対応付けや、生活者の五感（匂いなど）との対応付けによって把握することが考えられる。HMK は生活している本人が計測しているため、その対応付けは比較的容易である。これは当事者研究の優位性と言えるだろう。ただし、住宅内では様々な生活行動を区切り無く行っているため、時間が経つほど記憶は曖昧になる。

そこで HMK では M5StickC の小さな表示窓に、10 秒単位で計測した計測値を表示するようにした。例えば、センサ付近で衣類の片付けなどを行うと、瞬時に数値が上昇するのが分かる。記憶が失せる前に確認できるため、より端的な原因把握が可能である。さらに、一定値以上で黄色、赤色と表示を変えるようにしたため、離れた場所からでも室内微粒子の状態変化を察知できる。

3. 計測試験の条件

HMK を用いて実住宅での計測試験を行った。目的は HMK を用いて、生活行動に関連した室内微粒子の計測が可能か、また計測上の課題は何かを抽出することである。計測可能性としては、微粒子の種別を区別できるのか、も含まれる。さらに課題の中には、装置使用ノ

[4] 現在の微粒子計測装置では、サイズや重量による分類を原理としているため、同サイズ・同重量の異なる微粒子を区別できない。

©CRIEPI

ウハウの不足による誤計測を含む。仮説としては、「HMK を用いることで、生活行動と対応付けられた各種微粒子の計測が可能であり、室内の空間分布や微粒子の種類に関する情報も得ることができる」と想定した。

試験期間は 2020 年 5 月から 2021 年 2 月までであるが、その殆どの期間でトライアンドエラーを繰り返したため、試験期間を通した定量的な結果を得ることはできていない。後述の試験結果では、計測期間中に得られた各種事例を報告する。

計測対象とした住宅の間取りとセンサの設置箇所を図 3 に示す。住宅の諸元としては、東京都所在、築 29 年、鉄筋コンクリート造 1 階、床面積 53 m² である。室内微粒子に関連する付帯設備としては、ガスコンロ、エアコンがある（ストーブ等の開放型燃焼暖房機器は無い）。図の青い四角形の位置に、24 時間換気の換気扇と排気口が 3 箇所ある（風呂場、洗面所、トイレ）。また、オレンジ色の四角で示した位置にガスコンロと大型の換気扇がある。一方、給気口は図中左下にある直径 15 cm の給気口（床上 20 cm）のみである。ガスコンロ上の換気扇には強モードと弱モードがあり、いずれも排気能力が高く、オンにした状態だと、南の窓や玄関の開閉に圧力を感じるほどである[5]。ドア 1, 2, 3 および南と北西の窓は開いていることも、閉まっていることもある。なお、ドア 2 と北西の窓が閉まった状態では、ベッドの置かれた部屋（ベッドルーム）は給気も排気も無い。同じく、ドア 2 と 3 が閉まった状態だと、24 時間換気は南の部屋（リビング）の換気には、ほぼ役立たない。

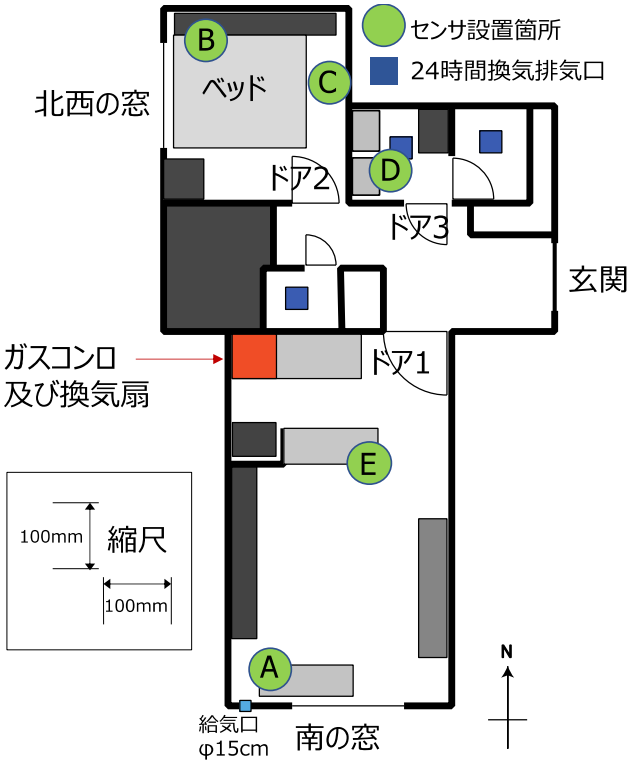

図 3 計測試験を行った住宅の間取り図とセンサの設置箇所

[5] 富士工業製 BDR-3H-601　風量（弱：315 m³/h、強：590 m³/h）

©CRIEPI

センサ設置箇所は試験期間中に移動させたため、計測例を示す時に設置環境の情報を合わせて示す。計測開始時はセンサ１個から開始し、最終的には 6 個を設置した。

住民は大人２名、ペット無し、喫煙者無しである。新型コロナウィルスの感染拡大期間（緊急事態宣言期間など）と重なり、２名とも在室時間が極めて長い状態での計測となった。

4. 計測試験の結果

本章では計測結果の事例として、4.1 節～4.5 節で洗濯、調理、掃除などの生活行動と対応した例を示す。また 4.6 節では今回観測できなかった室内微粒子について述べ、4.7 節で誤計測に繋がった HMK 使用上の注意点に関する事例を示す。以下にグラフ等で示す事例の計測値はすべて、1 分間平均での個数濃度（個/cm^3）で示している。なおセンサの仕様上の計測限界は 28 個/cm^3 なので、それを超える値は精度保証が無い点に留意いただきたい。

4.1 洗濯

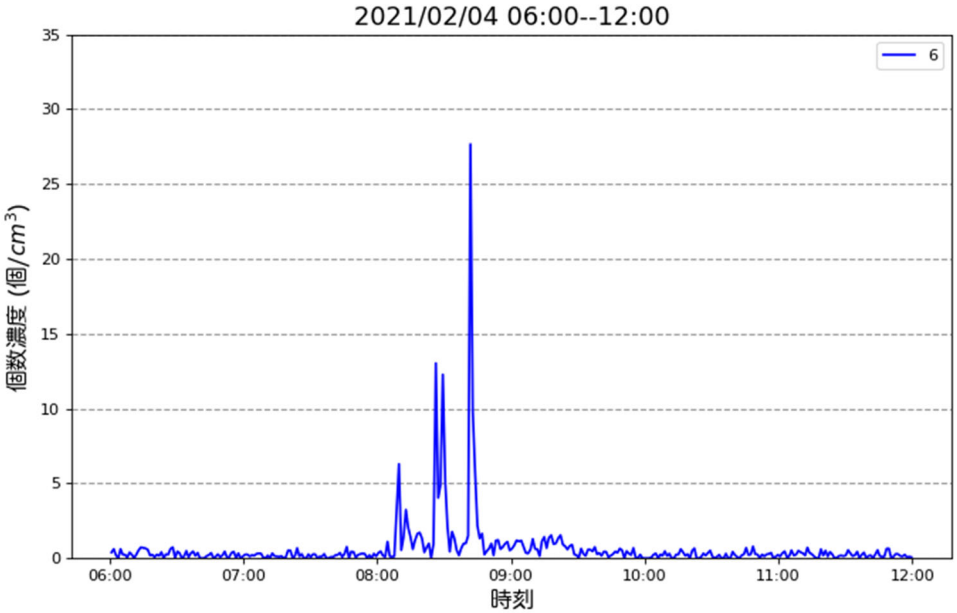

図 4 洗濯時の微粒子変化その１

©CRIEPI

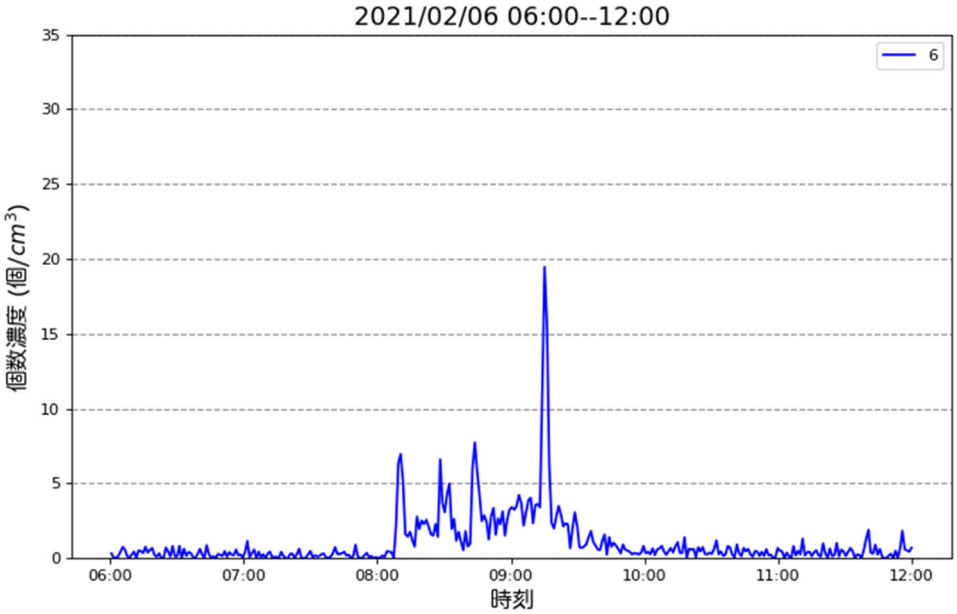

図 5 洗濯時の微粒子変化その 2

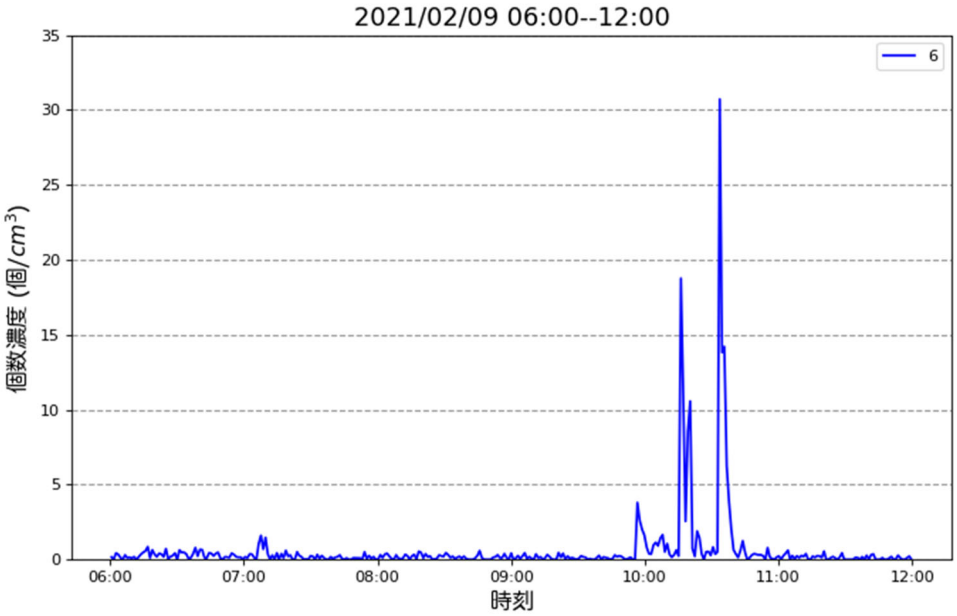

図 6 洗濯時の微粒子変化その 3

図 4～図 6 に、洗濯時または乾燥機使用時の衣類移動や家電の振動等に伴って発生する室内微粒子の変化例を示す。センサは図 3 の地点 D、洗濯機と洗面台の間、床上 5 cm に設置している。発生の特徴は、ピークが 10~30 個/cm³ と比較的高く、かつ収まるまで 30 分～1 時間ほどもかかっている点である。また、家電の自動動作（脱水時の振動や衣類乾燥機の回転）により、複数回のピークが立つ点も発生状況の特徴である。概ね 3 回から 4 回のピークが立ち、最初が衣類の洗濯槽への移動、2 回目、3 回目が脱水時の振動、4 回目がある場合は衣類の取り出しや衣類乾燥機の振動時に、概ね対応している。より正確な対応関係の調査

©CRIEPI

は今後の課題である。ピークがシャープなのは、衣類等から発生する微粒子の代表である「綿ほこり」が、凡そ 1 分程度で落下するためと考えられる[3]。なお、24 時間換気は常に動作している状態、またドア 3 および浴室のドアは概ね閉じた情報での計測結果である。

4.2 調理

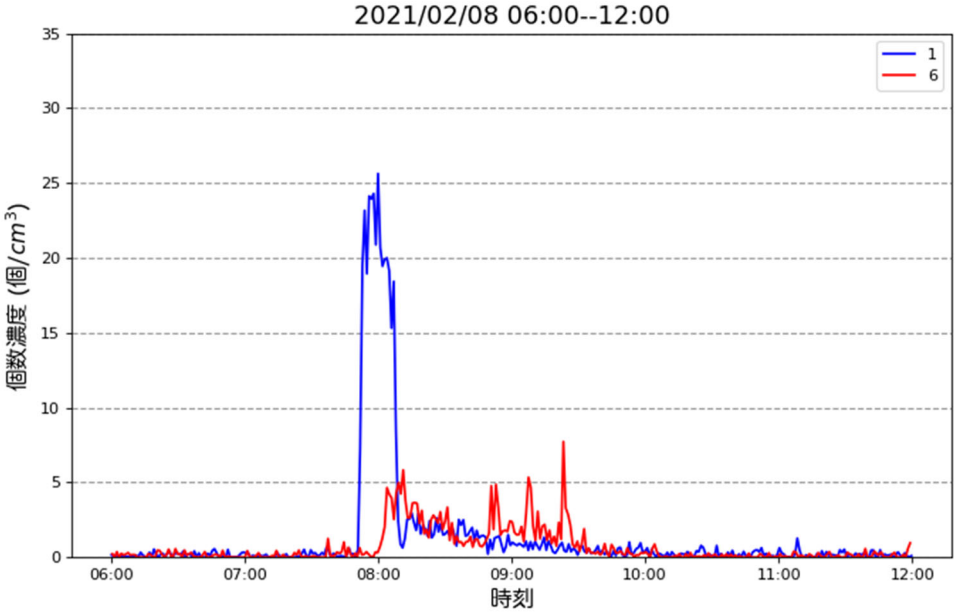

図 7 調理時に発生する室内微粒子の計測例その 1

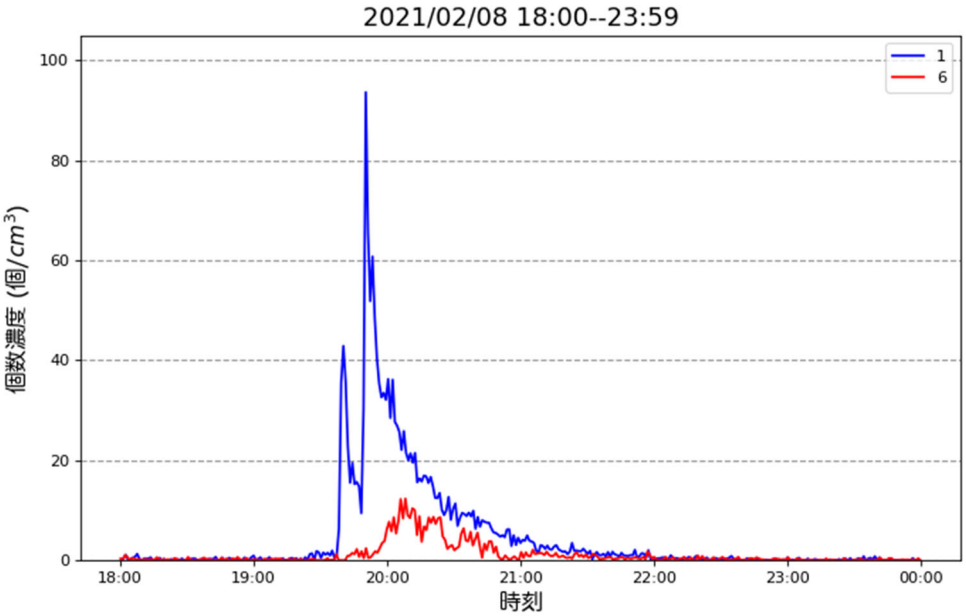

図 8 調理時に発生する室内微粒子の計測例その 2

HMK が最も明確に検知する生活行動は調理である。図 7(7:50~8:40)と図 8(19:30~22:00)に調理時に発生する微粒子を計測した時のグラフを示す。青い線の 1 号機は地点 A 床上 30

©CRIEPI

cm、赤い線の 6 号機は前節と同じく洗面所の地点 D での計測結果である。なお、図 8 では、グラフの縦軸が最大 100 個/cm³ と大きいことに注意が必要である。

発生状況の特徴は、急峻にピークが立ち上がり、その値も多い場合は 100 個/cm³ と非常に大きな値を示す点、なだらかなカーブを描いて減少していく点である。この減少カーブは換気状況によって異なることが分かっている。図 7 のピーク時（8:00）は、窓を開けて換気扇を回した場合であり、図 8 の例（19:50）は換気扇を回しているが夜間であるため窓を開けていない場合である。窓を開けることで一気に換気が進み、計測値が急低下する。窓を開けていないと給気口からの空気で徐々に換気がなされ、10 個/cm³ を切るまでに 1 時間半もかかっていることがわかる。

なお、ピークの高さ（発生する微粒子の量）は、調理内容によって大きく異なる。大きな値が発生するのは、フライパンでの肉類のグリル料理や、その他にも油が跳ねるような調理で発生する。また、空焼きや焦げ付き、オーブントースターでの焼き過ぎなどの調理トラブル時に発生する煙も大きな要因である。一方で、煮物料理やゆで料理ではほとんどピークは無く、調理によってはセンサで全く検知できない場合もある。調理時に発生する微粒子は、各種粒径のオイルミストなどであり、実験用チャンバーを用いた精密計測が複数報告されている[17][18][19]。HMK の計測もこれらの実験結果と矛盾しない。

さらに、調理時に生じる微粒子は 6 号機でも検出されているように、他の部屋でも検知される広がりを示す点も特徴である。これはオイルミストが PM2.5 の粒径であり、綿ほこり等と異なり重力沈降があまり効かないことが原因と考えられる。この時、ドア 1 は閉じていたが、ドア 3 は開いた状態である。ドアの隙間を通り抜けて洗面所にも微粒子が広がっている。なお、図 7 の 6 号機の計測値変化の内、8:45 以降のピークは 4.1 節で述べた洗濯によるものである。

調理時に発生した室内微粒子が部屋を跨って大きく広がった例を図 9 に示す。縦軸の最大値が 200 個/cm³ と極めて大きな値であることに注意が必要である。1 号機は A 地点床上 30 cm、4 号機は E 地点床上 85 cm、2 号機は B 地点床上 180 cm、3 号機は B 地点床上 100 cm での計測値である。調理開始とともに A 地点と E 地点で一気に微粒子が高いピークで観測されている。その後、ドアの隙間を介して、ベッドルームにある 2 台のセンサ（2 号機と 3 号機）も高い値で微粒子を検知している。調理場と換気扇に近いリビングの 1 号機と 4 号機では、窓開けにより急速に値が下がっているのに対し、ベッドルームではピークが下がるまでの時間がかかっていることが分かる。ベッドルームは上述したように給気口・排気口が無く、換気に時間がかかるためである。

図 10 も、調理時に発生した微粒子が部屋を超えて広がった事例である。1 号機は A 地点床上 30 cm、6 号機は地点 D 床上 5 cm、2 号機と 5 号機は地点 C、それぞれ床上 0 cm、25 cm である。ドアが比較的大きく開いていたため、時間遅れなくベッドルームにも微粒子が広がっている。また、この場合はベッドルームで窓を開けて換気をしたため、急速に計測値が下がっている様子がわかる。6 号機のある洗面所は窓から遠く、24 時間換気で換気する

©CRIEPI

しかないため、他の部屋より換気に時間がかかっている。

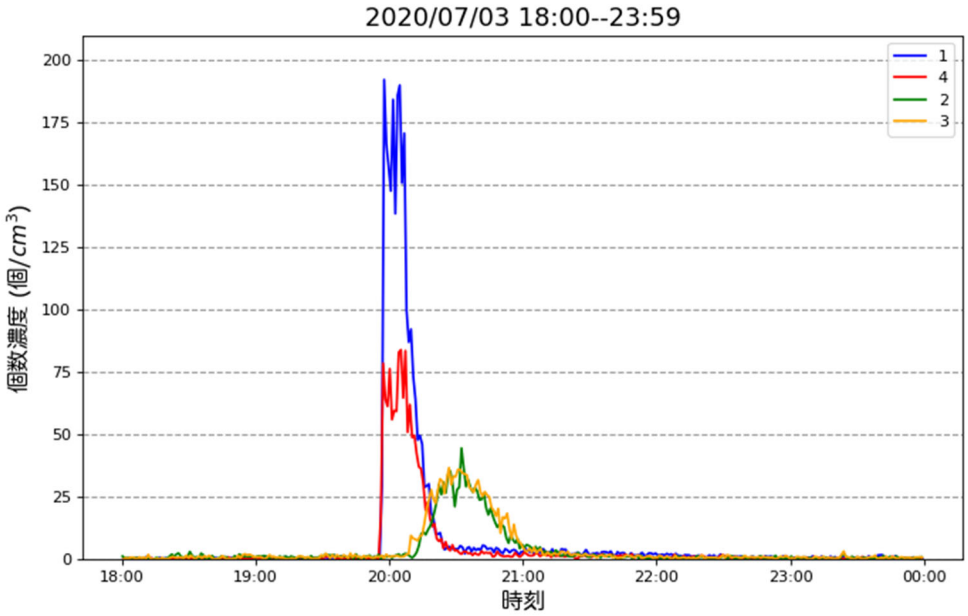

図 9 ドアの隙間を介して調理時に発生した室内微粒子が移動する様子

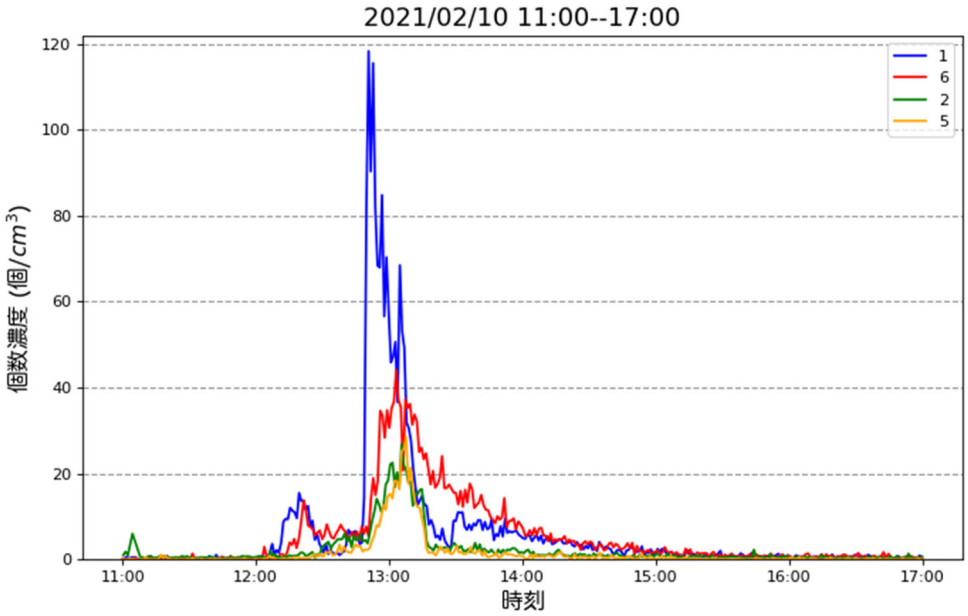

図 10 調理時に発生した微粒子が部屋を超えて広がった事例

©CRIEPI

4.3 ベッドメーキング

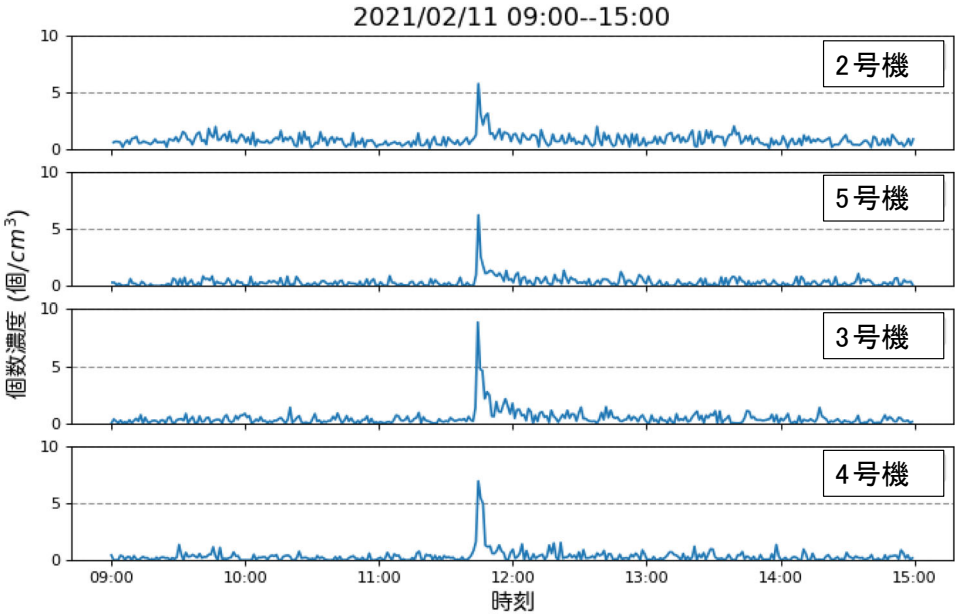

図 11 ベッドメーキング時の微粒子発生の様子その 1

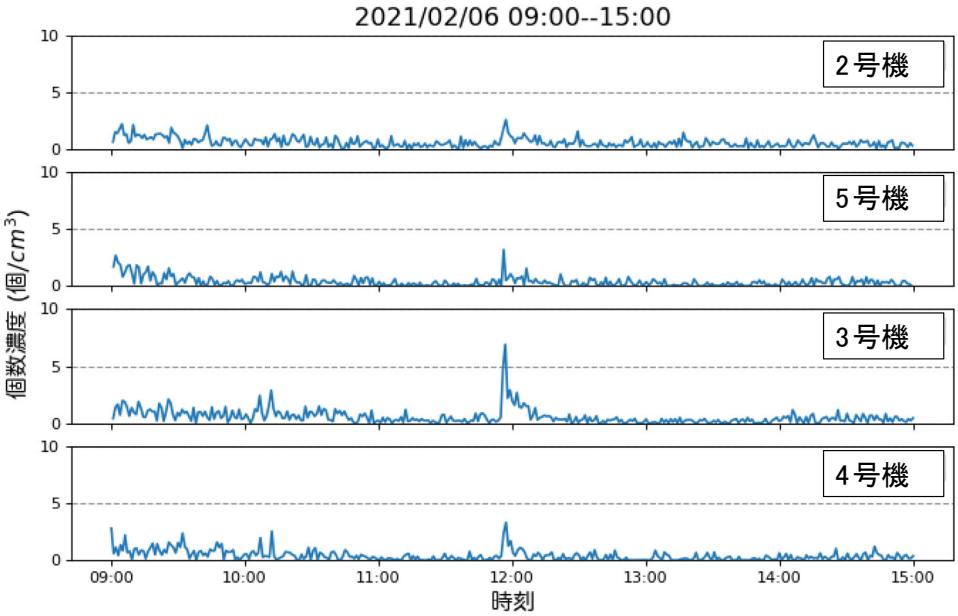

図 12 ベッドメーキング時の微粒子発生の様子その 2

布団を叩くなど、寝具を整えるベッドメーキング時に、微粒子が発生する様子を示す。図 11 の 11:44 頃と、図 12 の 12:00 頃にベッドメーキングを実施している。縦軸の最大値が 10 個/cm³ と小さい点に注意が必要である。２号機を地点 C 床上 0 cm、５号機を地点 C 床

©CRIEPI

上 25 cm に設置し、3 号機と 4 号機は地点 B 床上 100 cm に併置して計測した。いずれも 5～10 個/cm³ 程度の小さなピークが立ち、ピークは 1 分程度で立ち下がり、概ね 10 分以内には 1 個/cm³ 程度に減衰する。ベッドルーム内の 4 台のセンサがほぼ同時に検出している。また、高さ方向でタイムラグがないため、発生した綿ほこりは瞬間的に広がっている。ただし床上の 2 号機の検出量は他に比べて少ない。

これは、綿ほこりなどの大きな粒子は 1 分以内に落下するという文献[3]の記述と一致する計測結果である。一方で、実住宅での室内微粒子を調査した貴重な従来研究[20]における、布団の上げ下ろしにより 1 時間以上も浮遊塵が存在し続ける、との報告とは異なる状況を示している。布団の上げ下ろしでは、より細かな微粒子が発生しており、住宅環境や寝具の違いが影響しているものと考えられる。

4.4 掃除

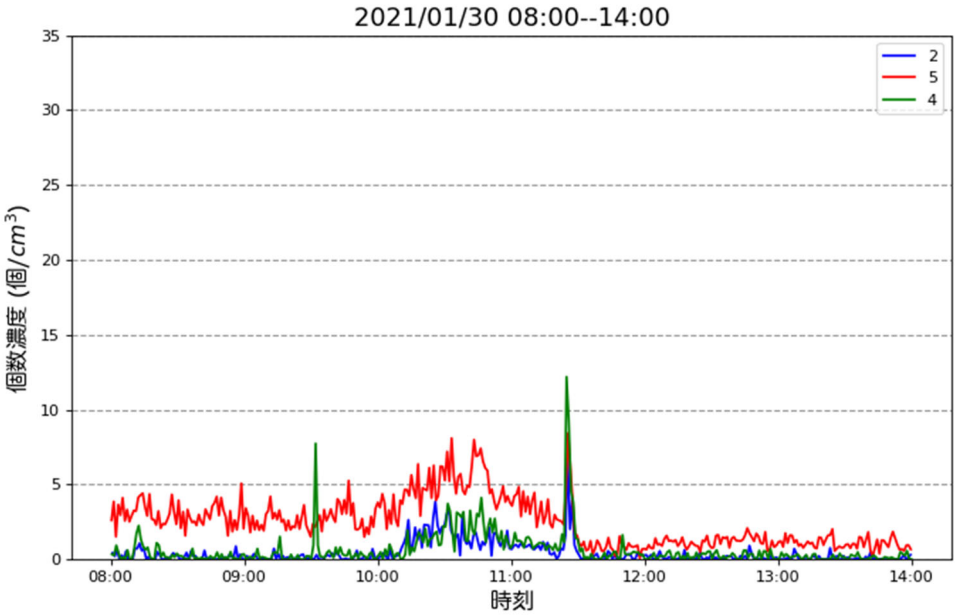

図 13 掃除による微粒子の発生と減衰

図 13 に掃除の前後での微粒子の変化の様子を示す。図には 3 台のセンサの結果を重ねて表示している。2 号機は C 地点の 25 cm、5 号機は C 地点の床上 0 cm、4 号機は B 地点の床上 100 cm に設置している。掃除を行ったのは 11:25 のピーク位置の前である。掃除機やフロアモップで床の掃除を行った。ピークはセンサ 3 台が設置されているベッドルームを掃除した際に発生している。その後、3 台のセンサはいずれも計測値がほぼ 0 に収まっており、室内微粒子が減った様子が観測できる。なお、5 号機のように床上 0 cm に設置すると、センサ自体にホコリなどが溜まる難点がある。

なお、試験期間中に掃除は幾度となく行われたが、図 13 のように比較的明確に掃除の効

©CRIEPI

果として、微粒子量の減少が見られる例はまれである。試験期間中ほとんどのセンサは床上 20 cm より上に設置しており、ほこり類は短時間に落下し、空中に浮遊しないためと考えられる。

4.5 その他の検出可能な生活行動

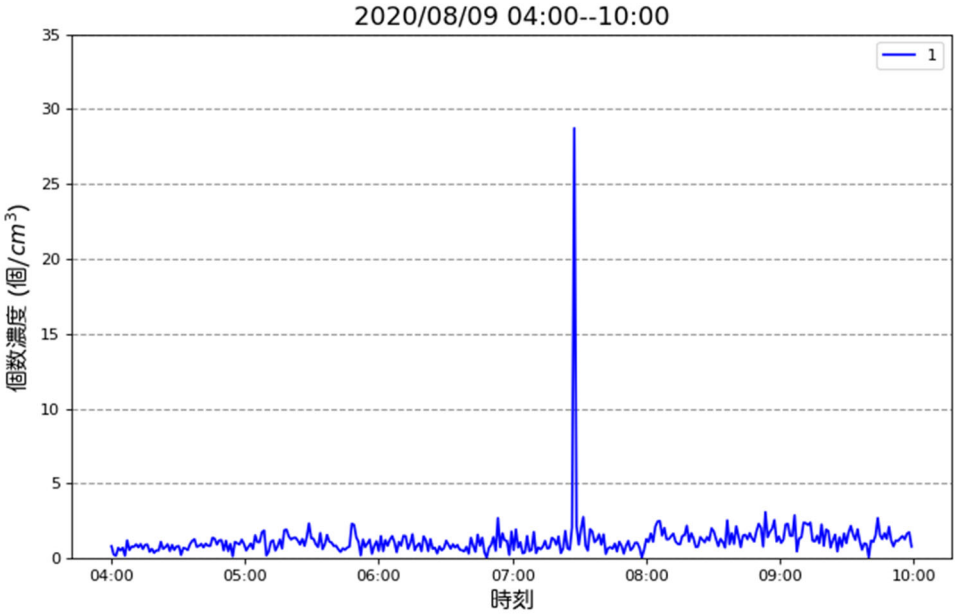

図 14 殺虫スプレーの噴霧を検出した例

HMK はスプレー類の噴霧も検出する（図 14）。A 地点の床上 30 cm 地点での計測例である。噴霧したスプレーは、ワンプッシュで蚊などを退治できる殺虫スプレーで、ほんの一瞬スプレーしただけだが、一瞬にして部屋中に広がり、すぐに検知できないレベルに低下した。同様に、ミスト（霧）も検出することを、スチームアイロンをセンサに吹き付けて確認した。ただし日常生活でミストが直接センサに当たることは試験期間中なかった。調理中に湯気が発生することはあるが、すぐに水蒸気に変わり、センサで計測できるサイズを下回るため、4.2 節で述べたように、ゆで料理の類は検出できない。

4.6 計測を確認できなかった代表的な室内微粒子

試験対象の住宅にはペットや喫煙者はいないため、ペットの毛やタバコの煙は計測できていない。また、どの家でも存在する花粉や砂塵、ダニの死骸、カビなどを、区別して計測できたといえる事例はなかった。これらは衣類や寝具に付着するため、洗濯時やベッドメーキング時に発生した室内微粒子に含まれている可能性はある。なお、花粉に関しては飛散量の多い春の計測がなかった点も原因と考えられる。飛散の多い時期であれば、窓開けにより室内微粒子が増える状況を観測できるかもしれない。また、ウイルス感染に関して関心の高

©CRIEPI

い、咳やくしゃみで発生するエアロゾルに関しても、それと区別して計測できた事例はなかった。

4.7 誤計測につながる注意点

HMK は安価なセンサやデバイスを組み合わせ、厚紙製の簡易なケースに収めた装置であるため、メーカーで緻密に製品試験した計測器と異なり、不注意な使用によって誤計測を生じる。本節では試験期間中に遭遇した誤計測事例と対策案を報告する。

(1) 外光

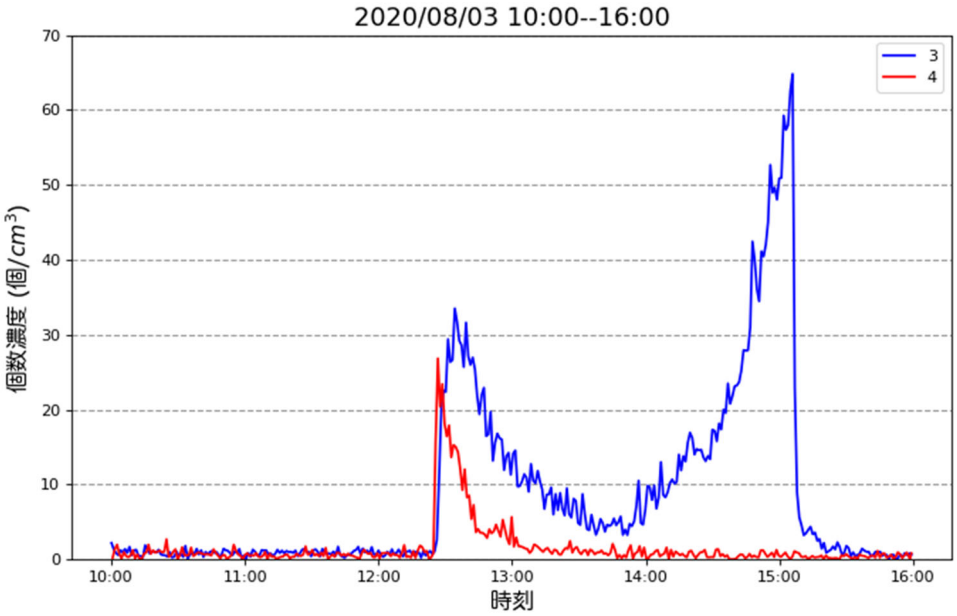

図 15 外光による誤計測事例

Grove Dust センサは光散乱法による微粒子センサであるため、計測室内に外光が入射すると誤計測する。微粒子による赤外線の散乱を計測する原理であるため、一定の光量では誤計測しないが、チラチラと入射光が変化すると大きな誤計測を生じる。よって、空気の流れを遮らないように、かつ外光が当たらないようにケースで覆う必要がある。そのため、例えば Grove Dust センサを使った既存の計測装置[21]では、長辺が 20 cm もの大きなケースを用いている。しかし家庭内の自由な場所で計測できるようにするには、センサ部はなるべく小さい方が良い。図 2 に示した厚紙製の長辺 6 cm のケースは、なるべく小さく、かつ外光が入射しないようにという要求を満たすべく試行錯誤した結果である。

その試行錯誤の途中で発生した極端な誤計測事例を図 15 に示す。3 号機と 4 号機は同じく地点 B の床上 100 cm に設置していた。12:30 から 13:30 にかけてのピークと減衰は調理時に発生した微粒子がベッドルームまで流れ込んだことを表している。一方、3 号機による 14 時以降のピークは室内微粒子とは関係ないことが、併置した 4 号機の計測値からわかる。

©CRIEPI

これは 3 号機が窓近くにあり、太陽光が壁で遮られる 15 時過ぎに急速に値が下がっていることから、西日が横方向からセンサに入射したことが原因と考えられる。図 2 に示したケースは、斜め上からの入射光には影響されにくい構造になっているが、真横や下方から光が入るような環境での使用は誤計測が生じやすい点に注意が必要である。

(2) 電源

計測データを収集し PC に無線送付するために用いた M5StickC では、使用する電源によっては計測データにノイズが乗ることが分かった。試験期間中に、複数の USB-AC アダプタでテストしたが AC アダプタによっては接続すると、ほこりの無い環境（センサ自体を金属製の箱に閉じ込めた状態）でも数十個/cm^3 の計測値をランダムに出力する場合があることが分かった。同じ状態で USB-C ケーブルを外して M5StickC の内蔵電池で動作させると、すぐに計測値が 0 付近に減ることが根拠である。M5StickC ではデジタル信号線の入力端子と USB-C の電源端子の間隔は 1 mm であり、電源ノイズの影響を受けやすいと考えられる。明らかに室内微粒子が無い状態で、電源のオン・オフをしても、誤検出が続く場合は、AC アダプタの交換を検討する必要がある。

また、2 個口の AC アダプタに 2 個の M5StickC を接続（1 台の AC アダプタで 2 個の M5StickC に電源供給）する場合でも、同様の問題が発生する場合があることがわかった。M5Stack に関しては電源ノイズが大きいという指摘があり[6]、M5StickC に関しても同様の問題が影響している可能性は高い。AC アダプタ 1 個に対し M5StickC を 1 個接続することを推奨する。

(3) センサ自体への微粒子の付着

ほこりの多い環境に設置すると、ケース内面やセンサの計測室にほこりが付着してしまう。完全に付着して取れなければ計測には影響無いが、空気の流れにより舞い上がって、再びケース内に落下するといったことが繰り返されると、誤計測に結びつく。特に床上 0 cm などに設置すると 1 ～ 2 週間で微粒子が溜まるため、ケース内部の定期的なクリーニングが必要となる。

5. 考察

5.1 計測可能性に関する考察

HMK を用いることで、生活行動と対応付けられた各種微粒子の計測が可能であり、室内の空間分布や微粒子の種類に関する情報も得ることができる、との試験前仮説はある程度裏付けられる結果となった。ただし、4.7 節に述べたように使用上の注意点を良く理解して使うことが前提である。メーカーが製造する信頼おける装置と異なり、自由なカスタマイズ

[6] 「M5Stack でできること ～M5Stack の電源ノイズを測定する（1） | さとやまノート」、https://sample.msr-r.net/try-m5stack-vg-noise-1/（2021 年 3 月 4 日アクセス）

©CRIEPI

が可能である反面、原理を理解せずに使用すると容易に誤計測をしてしまう。

今回の試験で、洗濯、調理、ベッドメーキングに関しては他と区別できる明確な微粒子発生を検出可能と分かった。一方で、「掃除」を代表として他の生活行動と対応した室内微粒子の発生を、区別して検出できていない。定期的に掃除がなされた部屋では、床上 0 cm といった極端な設置環境でなければ、計測値はほぼ底を打つ結果となった。

なお、4 章で紹介したように、多点同時計測という HMK の特徴は有用であった。まず調理時やベッドメーキング時のように、微粒子の移動や換気による排出を定量的に把握できるのは多点同時計測ならではといえる。窓開けや換気扇の、換気状況に与える効果も目に見えて分かるため、各部屋での換気完了を確認して、窓閉めや換気扇のオフを行える。また 4.7 節(1)で紹介したように誤計測があった場合の確認にも、多点同時計測は有用である。HMK の使用ノウハウが会得できるまでは、同じ場所に複数台設置して誤計測が無いかを確認することで、簡易なセンサでも信頼して利用できる。これが 1 台しか無ければ、使い方が悪いのか、センサが悪いのか、実際に微粒子が発生しているのか区別できない。

また、M5StickC の LCD 画面に計測値を色付きで表示するという機能は、限定的だが有用だった。例えば布団をはたくと、周囲に設置したセンサが一斉に黄色や赤色の表示に変わり、ほこりが落ち着くに従って、順番に黒色表示に戻る。調理時の微粒子では、嗅覚では気づかない程度の微粒子であっても、センサが黄色表示になることで、臭いに気づくといったことがあった。一方で M5StickC の画面は 0.96 インチ（10 mm × 20 mm）と極めて小さく、目につきにくい点は課題である。

なお、目では見えない室内微粒子の状態がセンサにより可視化されることは、ほこりや換気の対策を考える上でのきっかけと、掃除範囲の限定などに役立つ。また、リアルタイムに分かることは、心理的な安心感を与える効果がある。センサの計測値が低いことで、少なくとも計測できるような室内微粒子は無いことを確認できるからである。

5.2 課題に関する考察

まず、「HMK を用いて生活行動に関連した室内微粒子の計測が可能か」という目的に近づくための重要な課題として、生活行動と室内微粒子との対応付けが意外に難しいという点がある。明らかにピークが立つような微粒子発生ならば、その直前に行われた生活行動が原因と分かる。しかし、住宅内では複数の生活行動が並行して行われるため、ピークが立たない程度の変化の原因は分かりづらい。これに対しては、ターゲットを絞ったセンサの設置箇所選定が対策として考えられる。室内微粒子の気になる場所（玄関や乳児の居場所、ゴミ置き場など）に置くことで、発生原因を絞り込むという考え方である。また Grove Dust センサは今回の使用では標準で用意されたデジタル出力を 1 つのみ使用したが、実際は出力が 2 つあり、両方を使うことで粒子サイズを絞り込んだ計測が可能との報告がある[16]。このように、検知できる粒子サイズを限定できれば、精密なパーティクルカウンターの代用として、微粒子が区別できるようになるかもしれない。

©CRIEPI

また、発生原因に気づいたとしても、それを記録する手段がセンサ自体には無いため、忘れてしまうという課題もある。今回は Google Home の音声認識機能を用いて Google Calendar に発生原因を発話で記録する方法を併用したが、他のセンサと組み合わせて自動的に生活行動を記録できれば手間が減る。例えば、今回、南の窓には窓の開閉を検知するセンサを取り付けているため、窓開けの時刻は正確に自動記録されている。他にもドアや換気扇の状態を記録できるセンサがあれば、HMK の計測結果との照らし合わせが容易になるだろう。

他の課題として、装置の改良に関するものがある。M5StickC の表示画面が小さすぎる点は、高輝度 LED を付けたり、LCD が 1.14 インチの M5StickC Plus を用いる改良が考えられる。他にも、外付けのファンをつければ多少のコストアップになるが、センサ内の強制換気により、室内微粒子が溜まることを防ぎ、計測の反応性を高められるとされている[22]。

6. おわりに

本資料では、簡易かつ安価に室内微粒子を多点計測できる IoT 機器（ほこりモニタキット）を試作し、実住宅で計測試験した結果を述べた。試験の結果、調理、洗濯、ベッドメーキング等に伴う室内微粒子の発生を、時空間的に把握できることが分かった。また、誤計測しないように使うノウハウも示した。

一方で、微粒子発生と生活行動との対応付けが難しい場合もあり、微粒子の区別も部分的にしかできないため、生活の役に立つ計測装置としての課題は多数残っている。また、試験環境の制限から、ペットやタバコに起因する微粒子や、空気清浄機の効果、周辺環境（自然、工場、道路など）の影響なども今回の試験からは不明である。いずれにしろ単一の住宅での試験だけでは限界がある。

今後、HMK を当事者研究のツールとして有用なものにするには、複数の住宅環境で計測されたデータが共有されることが必要と考えられる。HMK の製造方法は別紙「ほこりモニタキットの作り方」に公開した。日曜大工や夏休みの宿題といった感覚で作成、試験して、その結果を公表いただければと期待する。

【参考文献】

[1] 篠原 直秀「コロナウィルス感染対策に有用な室内環境に関連する研究事例の紹介」室内環境、Vol.23、No.2、pp.99-106、2020.

[2] 橋本 一浩「室内環境の微生物に関わる最近の話題（６） 室内環境微生物の諸問題の総括：測定法および IPM による対策」室内環境、Vol.23、No.2、pp.107-118、2020.

[3] 東邦精機「東邦精機 技術 情報 環境 安全 法律 法令 規制 印刷機 スプレー 循環装置 加湿 相対湿度 静電気」http://www.toho-seiki.com/index05.html（2021 年 2 月 5 日アクセス）

[4] 関根 嘉香、蘓原 滉稀、三澤 和洋「大気中の微粒子およびその室内への侵入」室内

©CRIEPI

環境、Vol.23、No.2、pp.121-127、2020.

[5] 鍵 直樹「一般室内環境及びクリーンルームの粒子状物質について」室内環境、Vol.23、No.2、pp.171-179、2020.

[6] 東 賢一「微小粒子状物質の健康リスクに関する近年の知見と国際的な動向」室内環境、Vol.23、No.2、pp.121-139、2020.

[7] B. Jiang and C. F. Huacón, "Cloud-based smart device for environment monitoring," 2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Phoenix, AZ, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/SusTech.2017.8333472.

[8] S. Shanthi, T. Gopi and C. Vidhyesh, "IoT Based Water and Air Quality Monitoring System and Analysis", International Journal of Applied Engineering Research, Vol.14, No.6, 2019.

[9] H. Pritchard, J. Gabrys and L. Houston, "Re-calibrating DIY: Testing digital participation across dust sensors, fry pans and environmental pollution", new media & society, 2018.

[10] 佐倉統 「科学とはなにか 新しい科学論、いま必要な三つの視点（ブルーバックス)」、講談社、2020.

[11] 福嶋 信彦、佐藤 佳宏「室内環境における粒子計測技術の現状と今後の展望について」室内環境、Vol.23、No.2、pp.161-169、2020.

[12] K. K. Johnson, M. H. Bergin, A. G. Russell, and G. S. Hagler “Field Test of Several Low-Cost Particulate Matter Sensors in High and Low Concentration Urban Environments” Aerosol Air Quality Research, Vol. 18, Issue 3, pp.565-578., 2018.

[13] E. Austin, I. Novosselov, E. Seto and M. G. Yost, ”Laboratory Evaluation of the Shinyei PPD42NS Low-Cost Particulate Matter Sensor”, PLoS ONE 10(9): e0137789. 2015.

[14] J. Kuula, T. Mäkelä, R. Hillamo and H. Timonen, "Response Characterization of an Inexpensive Aerosol Sensor", Sensors 17, no. 12: 2915, 2017.

[15] G. Guan, Y. Chen, K. Guo, Y. Gao and W. Dong, "Low-cost urban air quality monitoring with Mosaic," 2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), San Francisco, CA, 2016, pp. 642-643, doi: 10.1109/INFCOMW.2016.7562155.

[16] M. Canu, B. Gálvis, and M. Madelin, “What does the Shinyei PPD42NS Low-Cost Dust Sensor Really Measure?”, International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 12, No. 1, January 2021.

[17] 田中 伸幸、津崎 昌東「業務用電化厨房機器からのオイルミスト排出実態の把握及びトレーサオイルミスト発生システムによる粒径分布の模擬」電力中央研究所、研究報告、V11024、2011.

©CRIEPI

[18] 田中 伸幸、大竹 加耶子、津崎 昌東、宮崎 あかね「食品の加熱調理により排出されるオイルミスト中の多環芳香族炭化水素の分析」、分析化学、61 巻, 2 号, p. 77-86、2012.

[19] 齋藤 義博、近藤 靖史、込山 皓基、吉野 一、奥田 篤、小松 洋登「調理時に発生するオイルミストの粒度分布の測定」空気調和・衛生工学会大会　学術講演論文集、2014.4 巻、平成 26 年度大会（秋田）学術講演論文集　第４巻　通風・換気 編、セッション ID I-32、p. 125-128、2014.

[20] 栗山 恵都子、斎藤 美奈、田中 辰明「一般居住環境における浮遊粉じんの挙動と空気清浄機の除去能力について」、空気調和・衛生工学会 論文集、Vol.27、No.85、pp.41-47、2002.

[21] N. A. Surib, A. F. N. Mohammad Azlan, N. Jamian, M. R. Mohd Yusof, K. Mohd Paád, and W. Lenggoro, “Shinyei Based Sensor with Added Roof Enhanced Detection of Indoor Particulate Matter”. International Journal of Integrated Engineering, 11(7), 67-76, 2019.

[22] Seeed Technology Co.,Ltd. “Grove - Dust Sensor - Seeed Wiki”, https://wiki.seeedstudio.com/Grove-Dust_Sensor/ (2021 年 2 月 12 日アクセス)

©CRIEPI