

## 研究プロジェクト

電動ファン付き呼吸用保護具をロックダウン代替手段  
として活用した社会技術システム（第一報）

藤井雄作<sup>1,\*</sup>, 橋本誠司<sup>1</sup>, 吉浦紀晃<sup>2</sup>, 山口誉夫<sup>1</sup>,  
天谷賢児<sup>1</sup>, Dongwei Shu<sup>3</sup>, Mitra Djamal<sup>4</sup>

<sup>1</sup>群馬大学

<sup>2</sup>埼玉大学

<sup>3</sup>Nanyang Technological University, Singapore

<sup>4</sup>Institut Teknologi Bandung, Indonesia

\*<fujii@gunma-u.ac.jp>

**要旨**：本研究は、COVID-19 以降に提起された「ロックダウンの社会的損失を最小化しつつ空気感染症を抑制する代替手段」を、再現可能な工学的システムとして提示することを目的とする。著者らはこれまで、市民利用を前提とした電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR) の概念提示、流体力学モデルに基づく呼吸流量・漏れ推定法、マイクロコントローラとスマートフォンを連携した装着状態の可視化技術、さらに国際共同研究による低コストPAPR試作と現場運用評価に取り組んできた。本論文は、これらの知見を基盤として、採択された科研費（基盤研究B）における研究計画を開示するものである。具体的には、（1）一般市民向けPAPR本体と評価装置群の体系的開発、（2）装着率ネットワーク管理システムの設計、（3）地域社会での小規模社会実験による実効性・受容性評価を柱とする。現段階では未完成の計画段階であるが、社会的自由と感染制御の両立を目指す工学的アプローチの射程と課題を明確化する点に、本研究の意義がある。

## 1. はじめに

COVID-19 の流行は、現代社会における空気感染症対策の限界を明確に示した。特に、多くの国で実施されたロックダウンは、感染抑制に一定の効果を持つ一方で、市民生活の制限、経済活動の停滞、教育格差の拡大など、深刻な社会的損失をもたらした。これらの経験は、「社会的自由を最大限に保持しながら感染拡大を抑制する手段」が欠如しているという構造的課題を浮き彫りにした。本研究は、この問題に対する工学的代替策として、電動ファン付き呼吸用保護具 (Powered Air-Purifying Respirator, PAPR) の市民利用モデルを中心に据えた社会技術システムの構築を目指すものである。

本研究計画は、令和7年度 科研費・基盤研究 (B) (一般) [1] として採択されており、本論文はその研究計画の学術的背景・目的・技術的構想を明確に開示することを主目的とする。研究成果の報告ではなく、これから実施される研究の全体像を提示する点に本稿の特徴がある。

空気感染症は、飛沫核 ( $100 \mu\text{m}$ 以下) を主要経路として拡散する。感染成立には一定量のウイルス暴露 (300-2,000 virions 程度) が必要であることが報告されており、呼吸器周囲での暴露量を実質的に低減できれば、感染リスクを大きく抑制できる。この点において、HEPA フィルタと送風機を備えた PAPR は、高い遮蔽性能 (最も浸透しやすい粒径  $0.3 \mu\text{m}$ に対して 99.97%) を持ち、医療現場では高い防護等級 (NIOSH APF = 1,000) が認められている。しかし、従来のPAPRは高価・重量・メンテナンス性・社会受容性の面で市民利用を想定していない。本研究は、このギャップを埋めるための「市民用 PAPR 技術」と「社会的実装の枠組み」を統合的に設計する点に特徴がある。

著者らは既に、市民利用を前提とした PAPR の概念検討[2,3]、流体力学にもとづく呼吸流量・漏れ推定法[4,5]、マイコンとスマートフォンを連携した可視化技術、低価格試作機の国際共同開発[6,7]、「①政府による感染制御の効率化」と「②市民の装着しない時と場所を選ぶ権利の尊重」を両立させるための「装着率ネットワーク管理システム」におけるプライバシー保護手法[8-10]など、一連の学術的・工学的取り組みを進めてきた。また、PAPR の装着率が社会全体の感染動態 (実効再生産数  $R_t$ ) をどのように変化させるかについて解析を行い、「100%遮蔽能力を持つPAPRを人口の一定割合が装着すれば、ロックダウンと同等以上の感染抑制が実現しうる」ことを示している[3]。図1に示すように、 $R_t$  が 2 の場合でも、約55%の市民が高性能 PAPR を装着すれば  $R_t$  を 0.9 にまで低減できることがわかる。

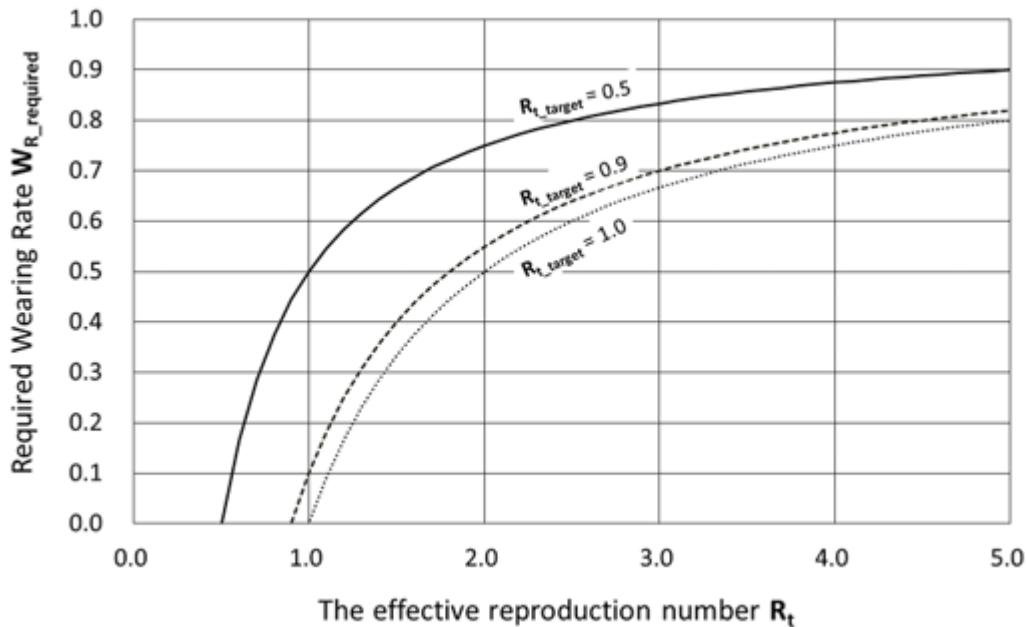


図1. No1：実効再生産数  $R_t$  を指定値 ( $R_t_{target} = 0.5, 0.9, 1.0$ ) まで低減するために必要な PAPR 装着率  $W_r_{required}$  の理論曲線. 初期  $R_t$  が高いほど必要装着率は増加し, 例えれば  $R_t = 2$  の場合は約55%の市民が高性能 PAPR を装着することで  $R_t$  を 0.9 に抑制できる [3]

しかし, これらの知見はあくまで要素技術としての段階に留まっており, 「市民向け PAPR 本体」「評価装置群」「装着率ネットワーク管理システム」「社会実験」という複数要素を結合した社会技術システムとしての全体像は示されていない. 本研究が取り組む中心的問いは, 以下の通りである.

「市民レベルで利用可能な PAPR を基盤とし, ロックダウンに依存しない感染症対策システムを構築することは可能か. その技術的・社会的条件は何か. 」

本論文は, 採択された科研費(基盤研究B)の研究計画を学術的文脈に位置づけつつ開示し, 今後3年間で取り組む研究開発の全体像を提示する. 第2章では研究目的と独自性を整理し, 第3章では既存研究との比較を通じて本研究の位置づけを明確にする. 第4章では, 開発する三要素(PAPR 本体・評価装置・装着率ネットワーク)の統合構想を示し, 第5章では具体的な研究方法を記述する. 本論文はまだ実験・実装が完了していない計画段階の開示であるが, 将来的に「自由と安全を両立させる社会技術」の確立に向けて必要な工学的射程を明らかにする点に意義がある.

## 2. 研究の目的 (Purpose of the Study)

### 2.1 本研究の中心目的

本研究の中心目的は, 「市民用PAPR本体・評価装置・装着率ネットワーク管理システムを統合した社会技術システムを構築し, その実現可能性を検証すること」にある.

COVID-19 以降, ロックダウンは感染制御の最後の砦として機能したが, 多大な社会的犠牲を伴う. 本研究は, その代替として「工学的介入による実効再生産数  $R_t$  の制御」を明示的に目標化し, PAPR 技術を市民レベルで運用することで ロックダウンと同等以上の効果を“自由を失わせずに”達成する 社会技術システムの構築を目指す.

本研究計画では, 以下の3要素を相互に連携させる点が重要である.

#### (1) 市民用 PAPR 本体の開発

簡易型[a] と標準型[b] を体系的に構築し, 市民向けの利便性・快適性・メンテナンス性を確立する.

#### (2) PAPR 評価装置の開発

呼吸模擬装置, マネキンヘッド, エアロゾル遮蔽実験装置を組み合わせ, PAPR の性能を科学的に評価するための基盤を整備する.

#### (3) 装着率ネットワーク管理システムの構築

PAPR 装着率  $W_r$  をリアルタイムで推定・集積し, 「装着率に応じた社会全体の感染抑制効果」を定量化する枠組みを確立する.

これら 3つの構成要素を統合することで、「工学モデル × 市民の選択権 × 行動データ」を組み合わせた新しい公共的感染症対策のプラットフォームを実現する。

## 2.2 学術的独自性

本研究の独自性は、以下の 4 点に整理される。

- (1) PAPR を “医療用防護具” から “市民用社会インフラ” へ拡張する構想

従来は病院内での使用に限られてきた PAPR を、市民の日常生活に組み込み、社会的自由を損なわずに感染抑制へ転換する視点は新しい。

- (2) 装着率 × 防護性能 × 行動データを統合した Rt 制御モデル

著者らの先行研究を基盤に、PAPR 装着率 Wr\_required による Rt\_target 達成のためのモデルを現実的な市民行動と結びつけ、社会実装可能な形に拡張する。

- (3) PAPR 評価指標の体系化

呼吸模擬、O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 測定、エアロゾル遮蔽試験などの評価項目を統合し、市民用 PAPR に適した新たな基準セットを構築する。

- (4) プライバシー保護を前提とした「装着率ネット管理」システム

AI・IoT 技術と社会制度設計の両面から、装着しない自由 を認めた上で「公平な感染制御」を実現するプライバシー保護型ネットワークの設計は学術的に新規性が高い。

## 2.3 研究計画の全体像

本研究の目的は、図2に示すように、PAPR 本体・評価システム・装着率ネットワークを並行して開発し、年度ごとに段階的に統合していく研究スケジュールによって具現化される。

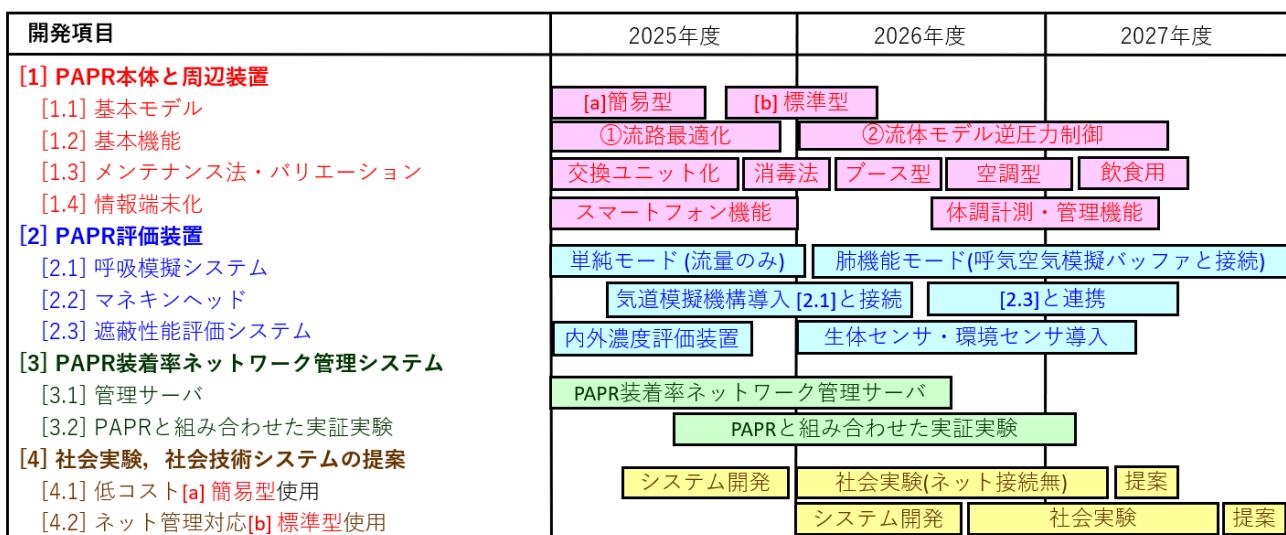


図2. No2 : 本研究の全体スケジュール。市民用 PAPR 本体の開発 ([1.1]～[1.4])、評価装置 (呼吸模擬・マネキンヘッド・エアロゾル遮蔽) の構築 ([2.1]～[2.3])、および装着率ネットワーク管理システム ([3.1]～[3.2]) の開発を 2025-2027 年度に段階的に進める。最終年度にはこれらを統合した社会実験を実施し、技術的・社会的実効性を検証する。

## 3. 関連研究と技術的位置づけ (Related Work and Positioning)

本章では、市民用 PAPR を中核とする社会技術システムを構築する上で、既存研究・技術との関連性を整理し、本研究の位置づけを明確化する。関連領域は (1) PAPR の工学的性能研究、(2) 空気感染症の制御工学、(3) 社会技術システム・プライバシー保護設計の三領域に大別できる。

### 3.1 PAPR の既往研究 (性能・APF・HEPA)

PAPR は本来、医療用防護具として設計され、高い防護性能を持つことが知られている。HEPA フィルタ [11] は粒径 0.3 μm の粒子に対して 99.97% の捕集効率を有し、NIOSH 規格における Assigned Protection Factor (APF) は医療用モデルで APF = 1,000 に達する [12]。

一方で、これら従来型 PAPR は重量・価格・装着快適性の面で、一般市民の日常生活での利用を想定していない。著者らは、ロックダウン代替手段として一般市民が用いるのに適した、低コスト・高性能PAPR「自由外出マスク」を提案し、開発してきた[13, 14]。国際共同研究においても、低コスト型 (DFM-I) [7]、医療機関での運用を想定した計測制御型 (DFM-F) [6] など、複数の市民指向 PAPR を試作してきた。

モデル	[A] Versaflo TR-300+(3M)	[B] 簡素モデル（試作機）	[C] 計測制御モデル（試作機）
外観（装着状態）	給気ホース 腰付ユニット（バッテリ、フィルタ、ポンプ）	HEPA フィルタユニット ポンプ（内側設置） バッテリ	HEPA フィルタユニット ポンプ（内側設置） バッテリ 制御器 CO <sub>2</sub> センサ（内側） 差圧センサ用チューブ
フィルタ	不織布フィルタ(HEPA相当)	HEPAフィルタ	HEPAフィルタ
内圧	陽圧	陽圧	陽圧（制御可能）
流量 [L/min]	180 (Low) or 200 (High)	400	300–400
コンピュータ			Board computer
センサ			2 CO <sub>2</sub> & 1 pressure sensors
コスト	市販価格: 1,000USD	試作部品価格: 40USD	試作部品価格: 300USD

図3. 市販医療用PAPR (A) と、著者らが開発した市民向け簡素型 (B) および計測制御型 (C) の比較。本研究における標準型PAPRは、これらの特徴を統合し最適化したモデルとして設計される。

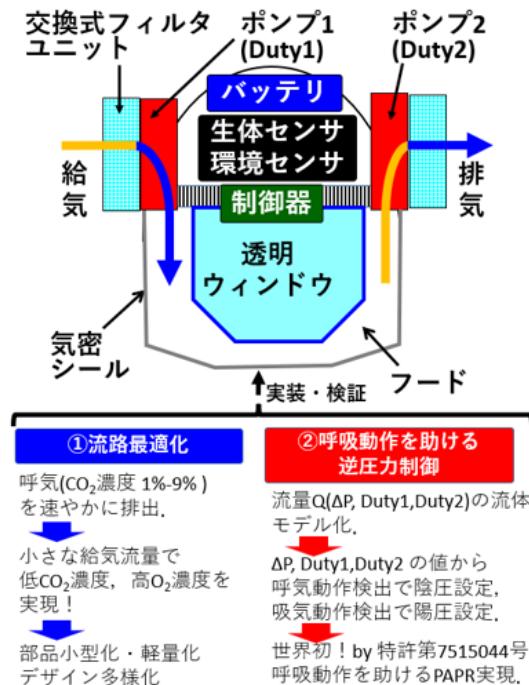


図4. 本研究で開発する標準型PAPRの構造と機能概略。ヘルメット部には交換式フィルタユニット、給気用ポンプ1 (Duty1)、排気用ポンプ2 (Duty2)、バッテリ、生体センサ、環境センサおよび制御器が一体化され、給気流量、排気流量が制御できる構造となっている。左下①は流路最適化により、効果的な呼気排出により、小さな給気流量で低CO<sub>2</sub>濃度・高O<sub>2</sub>濃度を実現しつつ、小型軽量化とデザイン多様化を可能にする機能を示す。右下②は流量 Q(ΔP, Duty1, Duty2) の流体モデルにもとづき、ΔP と Duty 比から呼気・吸気動作を検出し、それぞれに応じてフード内圧力を制御（呼吸を助ける逆圧力制御）を目指す。

図3は、医療用PAPRと著者らが開発してきた市民指向型PAPRの外観・フィルタ構成・流量・センサ構成を比較したものである。医療用モデル（A）は高い防護性能と安定性を備える一方で、高価かつ重量があり市民利用には適さない。これに対して、著者らが開発してきた市民指向型PAPR、高い防護性能（HEPAフィルタと陽圧構造）はそのままで、以下のような特徴を有している。簡素型モデル（B）は特に軽量・低コストであり、市民が導入しやすい構成となっている。計測制御型モデル（C）は、CO<sub>2</sub>センサおよび差圧センサを搭載し、呼吸状態・漏れ状態の可視化が可能であり、本研究で開発する標準型PAPRの技術基盤を形成する。これらの比較から、市民利用にとって必要となる条件（軽量性・高機能性・低コスト）を探っていく。

図4は、本研究で開発する標準型PAPRの内部構造と機能を示すものである。ヘルメット部には交換式フィルタユニット、給気用ポンプ1（Duty1）、排気用ポンプ2（Duty2）、バッテリ、生体センサ、環境センサ、および制御器が一体的に配置されている。本モデルでは、給気流路と排気流路を独立に制御可能であり、呼気排出の効率化と装着者の呼吸負荷低減を同時に実現する。

左側①は「流路最適化」であり、呼気の効率的排気を実現し、それにより、小さな給気流量で低CO<sub>2</sub>濃度・高O<sub>2</sub>濃度を維持できるよう、流路形状が最適化される。右側②は「逆圧力制御」であり、流量  $Q(\Delta P, Duty1, Duty2)$  の流体モデルにもとづいて  $\Delta P$  と Duty 比から呼気・吸気動作を推定し[4, 5]、それに応じてフレード内圧力を制御する。これにより、呼吸を助ける差圧制御の実現を目指す。

### 3.2 感染症制御における工学的アプローチ

空気感染症の拡大は、ウイルス暴露量・換気・防護具性能・接触時間などの複合因子に依存する。工学的アプローチとして、実効再生産数  $R_t$  を装着率  $Wr$  と遮蔽効率で制御するモデルが著者らにより提案されている[2, 3]。先行研究では、PAPR 装着率  $Wr_{required}$  を一定値以上に維持できれば、ロックダウンを回避しつつ  $Rt_{target}$  を達成できることが示されている。

- 著者らは、これまで、
- $\Delta P$  と Duty 比 (Duty1, Duty2) から呼吸流量  $Q(t)$  を推定するモデル[4]、
  - 単一差圧センサを用いた漏れ推定法[5]、
  - 呼吸模擬装置と PAPR の接続による遮蔽性能評価法「4, 5」

を開発しており、本研究はこれらの要素技術を統合する形で進められる。

したがって本研究は、感染症制御を「社会政策」ではなく「工学的制御可能量 ( $R_t$ )」として取り扱う立場を明確にし、その実装手段として PAPR 技術を社会レベルに拡張する点に特色を持つ。

### 3.3 社会技術システム研究との関連

市民の行動、社会制度設計、プライバシー保護技術を統合した「社会技術システム」研究は、監視カメラ運用やAIガバナンス分野で進展している[8-10]。著者らが提案してきた **Verifiable Record of AI Output (VRAIO)** は、AIシステムの透明性を確保しつつプライバシー保護を両立するための枠組みであり、本研究で扱う「装着率ネットワーク管理システム」に直接応用できる。

特に、「装着しない自由」を前提としながら社会全体の感染抑制を図る場合、「市民が装着していない時間と場所の選択権を保持しつつ、装着行動データをどこまで扱えるか」が核心となる。著者らのVRAIO研究は、プライバシー関連データの利活用に対して、もれなく「検証可能記録」を残す、という基本姿勢を持ち、本研究の設計理念と整合的である。

したがって本研究は、「工学」「社会科学」「デジタルガバナンス」を橋渡しする学際的アプローチを探り、市民参加型の感染症対策インフラという新しい研究領域を切り開く位置づけにある。

## 4. 研究全体構想 (Overall Research Framework)

本研究は、第2章で示した三つの要素

- (1) 市民用PAPR本体の開発、
- (2) PAPR評価装置の開発、
- (3) PAPR装着率ネットワーク管理システムの構築、

を段階的に統合し、最終的に地域社会での社会実験へと接続する構成をとる。本章では、各要素の位置づけと相互関係、および年度ごとの進め方を概観する。

### 4.1 開発する三要素

第一の要素である市民用PAPR本体は、簡易型[a]と標準型[b]の二系統から構成される。簡易型[a]は、低コストかつ軽量であることを重視し、市民が日常生活の中で気軽に装着できるモデルとして設計する。標準型[b]

は、呼吸状態や漏れ状態の推定機能を備えた計測制御型PAPRであり、第3章で示した既存試作機を基盤として、市民用社会インフラとして必要な性能・快適性・意匠性を備えたモデルへと発展させる。

第二の要素であるPAPR評価装置は、呼吸模擬装置、マネキンヘッド、エアロゾル遮蔽性能評価システムからなる実験プラットフォームである。これにより、市民用PAPRの呼吸負荷、CO<sub>2</sub>／O<sub>2</sub>濃度、漏れ量、エアロゾル遮蔽率などを定量的に測定し、設計仕様とのギャップを検証する。評価装置はPAPR本体の設計とフィードバックループを形成し、本研究における工学的妥当性の根拠を与える役割を担う。

第三の要素であるPAPR装着率ネットワーク管理システムは、スマートフォンアプリと装着率管理サーバから構成される情報基盤である。各PAPRとスマートフォンを連携させることで、個々人の装着状態Wrをローカルに可視化しつつ、匿名化・暗号化された形で装着率データを集約する。これにより、「どの程度のPAPR装着率が社会全体のRt低減に寄与しているか」をリアルタイムに把握できる社会技術インフラの構築を目指す。

これら三要素は互いに独立したサブプロジェクトではなく、

**PAPR本体 → 評価装置による性能検証 → ネットワークによる社会的運用**

という一連の流れを構成しており、第5章で述べる研究方法はこの全体構想に沿って具体化される。

#### 4.2 社会実験の位置づけ

本研究における社会実験は、上記三要素を統合した「市民用社会技術システム」の実証の場として位置づけられる。具体的には、まず簡易型PAPR[a]を用いて、小規模集団における装着実験とアンケート調査を行い、装着感、日常生活への影響、受容性、および装着率ネットワークへの参加意欲を評価する。この段階では、技術的性能よりも「市民が実際に受け入れられるかどうか」を重視する。

次に、標準型PAPR[b]と装着率ネットワーク管理システムを組み合わせた社会実験を実施する。ここでは、PAPRから取得される呼吸状態・装着状態データと、ネットワークに集約された装着率Wrの統計量を用い、「想定される感染拡大シナリオに対して、どの程度の装着率を政策目標として設定すればよいか」を検討する。また、プライバシー保護に関する参加者の不安や意識変化も評価し、VRAIOの枠組みを応用した制度設計の妥当性を検証する。

このように、本研究の社会実験は、単なる試作品のデモンストレーションではなく、「ロックダウンに依存しない感染症対策」が現実の市民生活の中でどこまで成立しうるかを検証する、橋渡し的なステップとして位置づけられる。

#### 4.3 全体スケジュール

図2に示したように、本研究は2025年度から2027年度までの3年間を想定し、以下のような流れで進める。

2025年度は、既存試作機を基盤として市民用PAPR本体の改良と、PAPR評価装置の基本構成の構築を行う。並行して、装着率ネットワーク管理システムの試作版を開発し、少人数の被験者を対象とした技術検証を行う。

2026年度は、標準型PAPR[b]の完成度を高めるとともに、評価装置を用いた系統的な性能評価を実施する。この結果を反映してPAPR本体の設計をアップデートし、装着率ネットワーク管理システムとの連携機能を拡充する。この段階で、小規模な社会実験を試行し、技術的実現可能性と受容性の両面を評価する。

2027年度は、三要素を統合した形での社会実験を本格的に実施し、PAPR装着率Wr\_requiredの達成可能性、市民の行動変容、プライバシー保護に関する制度的課題などを総合的に検討する。同時に、得られた知見をもとに、次段階の大規模実証や制度提案につながる設計指針を整理する。

以上のように、本研究は、PAPR本体・評価装置・ネットワークシステムの三要素を、年度ごとの明確なマイルストーンのもとで段階的に統合し、最終的に社会実験を通じて「ロックダウン代替社会インフラ」としての可能性を検証する構想をとる。

### 5. 研究方法 (Methods)

本章では、前章で示した三要素の全体構想に基づき、PAPR本体、評価装置、装着率ネットワーク管理システムおよび社会実験と研究体制について、具体的な実施方法を述べる。

#### 5.1 PAPR本体の開発

PAPR本体の開発は、簡易型[a]と標準型[b]の二系統について並行して行う。簡易型[a]は、低コスト・軽量性・メンテナンス性を重視したモデルであり、大量配布や日常使用を想定した設計とする。標準型[b]は、呼吸状態と漏れ状態の推定機能を備えた計測制御型PAPRであり、第3章で示した既存試作機（図3、図4）を基盤として改良を進める。

まず、[1.1] 基本モデル構築では、フィルタユニット、送風機、フード形状、バッテリ配置などの基本構成を決定し、市民が長時間装着しても負担にならない重量・重心・視界を実現する。簡易型[a]については、DFM-I, DFM-Fで得られた知見を踏まえ、3Dプリンタや汎用部品を活用した低コスト設計を行う。標準型[b]では、CO<sub>2</sub>センサ、差圧センサ、制御基板、Bluetooth通信モジュールを統合し、図4に示すような一体型構造を完成させる。

次に、[1.2] 流体性能向上として、流路設計および流体モデル  $Q(\Delta P, \text{Duty1}, \text{Duty2})$  の高度化を行う。具体的には、 $\Delta P$  (マスク内外差圧) とポンプDuty比 (Duty1, Duty2) を入力とし、給気流量と排気流量を推定するモデルを構築し[4, 5]、数値計算と実測データの比較によりパラメータ同定を行う。このモデルに基づき、呼気時には効率的な排気とCO<sub>2</sub>排出を優先し、吸気時には適切な陽圧を維持するよう制御則を設計する。

[1.3] メンテナンス容易化およびバリエーション展開では、フィルタ交換機構の簡略化、洗浄可能な部位の明確化、部品モジュール化による型式展開 (ヘルメット型、ブース型、屋内外兼用型など) を検討する。これにより、市民が日常的に使用しつつ長期運用できるPAPRとしての実用性を高める。

最後に、[1.4] 情報端末化として、PAPR本体をスマートフォンと連携するためのファームウェアおよび通信プロトコルを実装する。標準型[b]は、呼吸状態・CO<sub>2</sub>濃度・漏れ指標などをリアルタイムにスマートフォンに送信し、ユーザ自身が装着状態を把握できるとともに、装着率ネットワーク管理システムに接続できるよう設計する。

## 5.2 PAPR評価装置の構築

図5は、本研究で構築するPAPR評価システムの構成を示す。呼吸模擬システム (①) はシリンダとリニア駆動装置からなり、任意の換気量波形  $Q(t)$  を再現できる。このシステムにマネキンヘッド (②) を接続し、PAPR装着時のCO<sub>2</sub>濃度、O<sub>2</sub>濃度、フード内圧などを計測することで、呼吸負荷や換気効率を評価する。さらに、エアロゾル遮蔽性能評価システム (③) を組み合わせ、粒径分布を制御したエアロゾルをPAPR外部に供給し、内部濃度との比較から遮蔽性能を量化する。

各サブシステムは計測制御用PCにより統合され、ポンプDuty比、流量、内圧、CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>濃度、エアロゾル濃度などの多変量データを同期取得する。これらのデータにもとづき、PAPR本体の設計パラメータ (流路形状、ポンプ能力、フィルタ面積など) と呼吸快適性・遮蔽性能の関係を明らかにし、標準型[b]の仕様決定にフィードバックする。

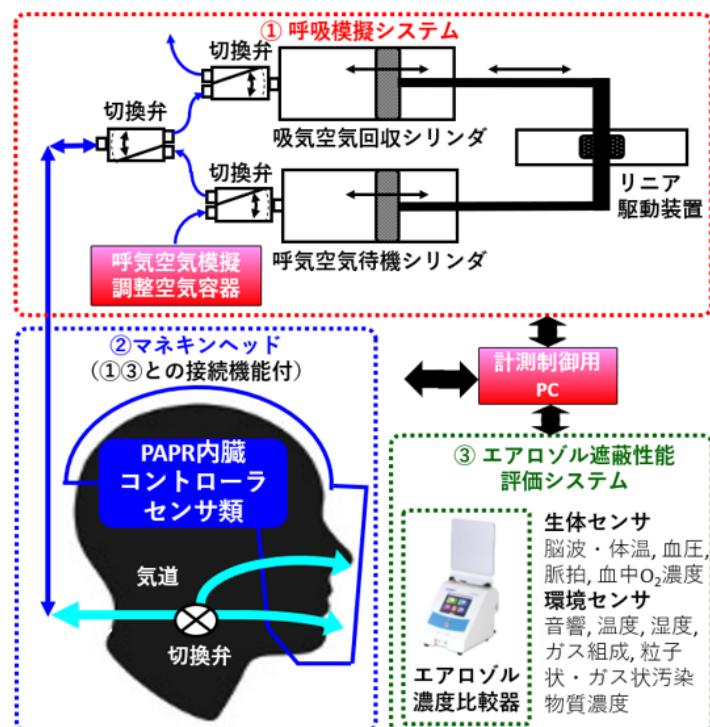


図5. PAPR評価システムの構成。①呼吸模擬システムはシリンダとリニア駆動装置により任意の換気波形  $Q(t)$  を生成し、②マネキンヘッドにPAPRを装着してCO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>濃度や内圧を計測する。③エアロゾル遮蔽性能評価システムでは、制御されたエアロゾルを外部から供給し、内外濃度の比較により遮蔽性能を評価する。これらをPCで統合することで、市民用PAPRの性能評価を一体的に行う。

### 5.3 PAPR装着率ネットワーク管理システム

図6は、PAPR装着率ネットワーク管理システムの概念図である。各市民は、ヘルメット型またはブース型PAPRとスマートフォンアプリをBluetoothで接続し、自身の装着状態  $W_r$  をローカルにモニタリングする。スマートフォンは、装着率データを匿名化・暗号化した形で装着率管理サーバに送信し、サーバ側では(1)各市民の装着率の計測・記録、(2)装着実績の電子証明、(3)濃厚接触の推定と記録、(4)アクセス履歴を含む検証可能記録の保存を行う。

これらの機能は、著者らが提案してきたVRAI0の枠組みを応用し、監視のための「ブラックボックス化」ではなく、後から検証可能な「記録」として運用される。個々人の装着しない自由を残しつつ、社会全体として必要な装着率  $W_r_{\text{required}}$  が達成できているかをリアルタイムに把握することが、本システムの目的である。収集された装着率データは、Rt制御モデル[2, 3]と接続し、「ロックダウンを行わずに達成可能なRt\_target」を政策的に検討するための基礎データとして活用する。

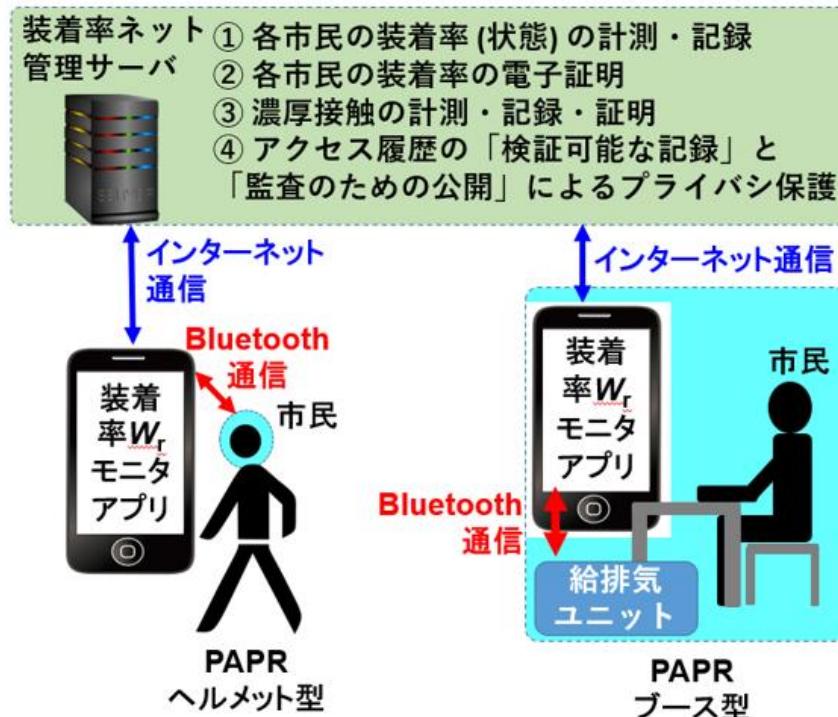


図6. PAPR装着率ネットワーク管理システムの概念図。市民はPAPRとスマートフォンアプリをBluetoothで接続し、自身の装着率  $W_r$  をモニタリングする。装着率データはインターネット経由で装着率管理サーバに送信され、(1)装着率の計測・記録、(2)電子証明、(3)濃厚接触推定、(4)検証可能記録にもとづくプライバシー保護が行われる。本システムは、社会全体として必要な装着率  $W_r_{\text{required}}$  の達成状況を把握するための基盤となる。

### 5.4 統合的社会実験

統合的社会実験は、簡易型PAPR[a]、標準型PAPR[b]、PAPR評価装置、および装着率ネットワーク管理システムを組み合わせ、実際の生活環境に近い条件で運用可能性を検証することを目的とする。

第1段階では、簡易型PAPR[a]を用い、大学キャンパスや協力自治体など限られた地域社会において、数十～百人規模の装着実験を行う。ここでは、装着時間帯や場面（移動時、屋内作業時など）、装着感、熱・騒音・視界などに関するアンケートを実施し、市民が日常的に装着可能かどうかを評価する。同時に、PAPR評価装置で得られた性能値と主観評価の関係を分析し、設計改善の方向性を検討する。

第2段階では、標準型PAPR[b]と装着率ネットワーク管理システムを組み合わせた社会実験を行う。参加者にはスマートフォンアプリを通じて、自身の装着履歴や推定装着率  $W_r$  が提示され、任意で装着する期間を設定してもらう。研究側は、匿名化された装着率データとPAPRからのセンシングデータを集約し、実効再生産数Rtの仮想シミュレーションを行うことで、「もし同様の装着行動が社会全体に拡大した場合にどの程度の感染抑制効果が期待できるか」を推定する。

いざれの段階においても、プライバシー保護と倫理的配慮を最優先とし、データ利用範囲の説明と同意取得を徹底する。また、装着しない選択をした参加者についても、その理由や心理的バリアを調査し、PAPRを社会インフラとして普及させるための制度設計・インセンティブ設計に反映させる。

## 5.5 研究体制

本研究は、PAPR開発、流体解析、計測工学、情報ネットワーク、社会調査・倫理の専門家から構成される研究チームによって遂行される。研究代表者は、これまでに市民用PAPRの概念提案、低コスト試作機の開発、国際共同研究プロジェクト (DFM-I, DFM-F)、およびVRAIOに関するAIガバナンス研究を主導してきた[2-10]。研究分担者は、PAPR本体の機械設計と量産性評価、呼吸模擬装置およびエアロゾル試験系の構築、スマートフォン・サーバ間通信の実装、アンケート設計と社会実験運営などを分担する。

研究環境としては、既に呼吸模擬装置、差圧センサ・流量計、ガス分析計、エアロゾル発生器、3Dプリンタ、CNC加工機などが整備されており、PAPRの設計・試作・評価を一貫して行うことが可能である。また、フィリピン・セブ市をはじめとする海外の医療機関・大学との連携が確立しており、将来的な国際共同実証に発展させる素地もある。

このような研究体制と環境により、本研究は初年度から具体的な試作・評価・社会実験の準備に着手できるだけの実行可能性を有している。

## 6. 期待される成果と学術的意義 (Expected Contributions)

本章では、本研究プロジェクトが完了したときに期待される成果と、それが工学・社会技術・国際的議論に対して持つ意義を整理する。本研究は、PAPRという個別技術の改良にとどまらず、「ロックダウンに依存しない感染症対策インフラ」という新しい社会技術モデルを提示する点に特徴がある。

### 6.1 工学的成果

第一に、市民利用を前提としたPAPR試作機とその評価手法に関する工学的成果が得られる。第5章で述べたように、本研究では簡易型[a]と標準型[b]という二系統のPAPRを設計・試作し、呼吸模擬装置およびエアロゾル遮蔽性能評価システムを用いて、呼吸負荷、CO<sub>2</sub>／O<sub>2</sub>濃度、漏れ量、エアロゾル遮蔽率を系統的に測定する。これにより、「市民が日常的に装着可能な重量・流量・フード形状」と「医療用に匹敵する遮蔽性能」とを両立させるための設計条件が明らかになると期待される。

第二に、差圧とポンプDuty比にもとづく流量モデル  $Q(\Delta P, Duty_1, Duty_2)$  を用いた逆圧力制御の有効性を検証できる。標準型[b]では、呼吸動作を推定し、吸気時には陽圧を、呼気時には効率的な排気を実現する制御則を実装する。その結果として、従来の単純な陽圧維持型PAPRと比較して、呼吸の快適性とCO<sub>2</sub>蓄積の抑制を同時に達成できれば、今後のPAPR開発における一つの設計標準として提案することができる。

第三に、評価装置とPAPR本体の設計を結びつけることで、市民用PAPRの性能評価指標の体系化が進む。従来は、医療用PAPRの性能評価は限定された環境で行われてきたが、本研究では「市民が実際に使用する状況」に近い換気波形や活動パターンを模擬し、その下での性能を定量的に評価する。これにより、今後他の研究者・メーカーが市民用PAPRを開発する際に参考可能な評価プロトコルの原型を提供できる。

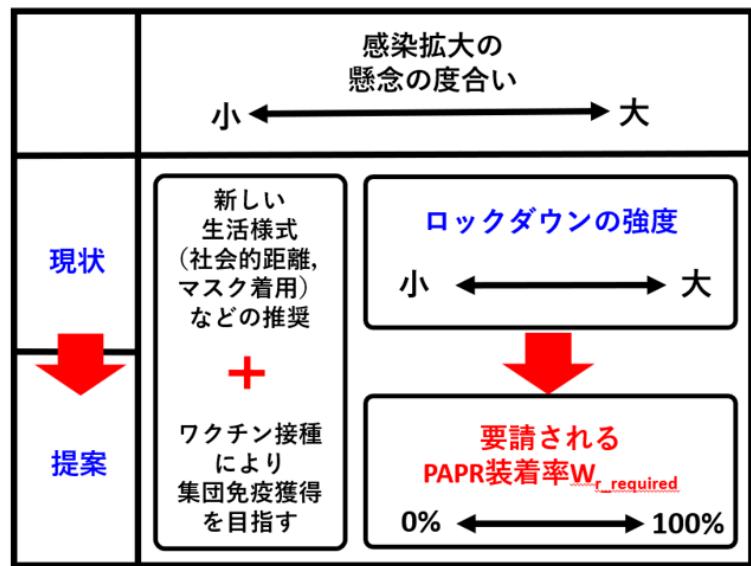
### 6.2 社会技術システムとしての新規性

本研究の第二の成果は、PAPRを中心とする社会技術システムの概念と設計原理を提示する点にある。図7は、感染拡大の懸念の度合いとロックダウン強度、およびPAPR装着率Wr\_requiredの関係を概念的に整理したものである。上段は、従来の対策が「新しい生活様式の徹底」と「ロックダウンの強化」の組み合わせで感染拡大リスクを抑制してきたことを示している。下段は、本研究で提案する枠組みを示しており、ロックダウン強度を抑えつつPAPR装着率Wrを政策変数として導入し、「自由度の高い生活」と「感染抑制」の両立を図ることを目指す。

このマトリクスは、感染症対策を「行動制限の強弱」だけでなく、「工学的防護の導入率」という軸で捉え直す視点を提供する。装着率ネットワーク管理システムによって、社会全体のPAPR装着率Wrと実効再生産数Rtの関係が定量的に把握できれば、政府や自治体は「どの程度の装着率を達成すればロックダウンを回避できるか」を具体的な数値目標として提示できる。これは、従来の「自粛要請」や「一律の行動制限」とは異なる、新しいタイプのリスクコミュニケーションである。

さらに、本研究ではVRAIOの枠組みを応用し、「装着しない自由」と「感染制御の効率化」を両立させる制度設計を検討する。個々人の装着行動はプライバシー保護された形で扱われ、社会全体として必要な装着率が達成されているかどうかのみが政策判断に用いられる。このような設計原理は、PAPRに限らず、他のウェアラブル

ルセンサや市民参加型センシングにも応用可能であり、「監視によらないデジタルガバナンス」の一つのモデルを提示するものとなる。



### 6.3 國際的インパクト

第三の成果として、本研究はロックダウン代替策に関する国際的議論に具体的な工学的オプションを提供する。特に、医療資源やワクチン供給が限られた地域においても、低コストPAPRと装着率ネットワークを組み合わせることで、「強制的な行動制限に依存しない感染症対策」を模索できる点は重要である。DFM-I, DFM-Fで蓄積されたフィリピン・セブ市での経験を踏まえ、本研究の成果はグローバルサウスを含む各国での社会実装に向けた技術的指針となりうる。

また、本研究は、AI・IoTを活用した公共的インフラの設計において、「プライバシー保護」と「公共の安全」のトレードオフをどのように扱うかという普遍的な課題に対して、一つの実証的ケーススタディを提供する。PAPR装着率ネットワークは、技術面では比較的単純なシステムであるが、そこで用いられるVRAIO型の記録管理や、装着しない自由を前提とした制度設計の議論は、他の高度なAI監視システムやスマートシティ構想にも応用可能である。

このように、本研究が目指す「ロックダウンに依存しない社会技術インフラ」は、感染症対策にとどまらず、民主主義社会におけるデジタルガバナンスの具体的な実装例として国際的な意味を持つと考えられる。

## 7. 倫理的配慮 (Ethical Considerations)

本研究は、市民が装着するPAPRとスマートフォンアプリを活用し、装着率や呼吸状態に関するデータを取得する計画であるため、研究参加者の安全確保とプライバシー保護を最優先事項として位置づける。以下に、PAPRの安全性、人を対象とする研究倫理、データ保護とプライバシーの三点について、基本方針を示す。

### 7.1 PAPR使用に関する安全性とリスク管理

PAPRは、医療現場で使用される電動ファン付き呼吸用保護具と同等レベルの安全性を確保する必要がある。本研究で用いる簡易型[a]および標準型[b]のPAPRは、既存の医療用PAPRの知見と関連規格を参照しつつ、以下の点に留意して設計・運用する。

第一に、フィルタ・送風機・電源系に関して、異常動作時にフード内が過度の陰圧・陽圧にならないように安全側に制御し、必要に応じて自動停止機構やバイパス経路を設ける。第二に、CO<sub>2</sub>蓄積や酸素欠乏を避けるため、評価装置による検証を行い、通常使用時に許容範囲内のCO<sub>2</sub>／O<sub>2</sub>濃度が維持されることを確認する。第三に、重量・騒音・熱などが長時間装着時の健康に悪影響を与えないよう、試作段階から使用感評価を繰り返す。

社会実験においては、PAPRの使用に起因する健康被害が生じないよう、事前に装着方法と異常時の対応（息苦しさを感じた場合の即時脱着など）を参加者に周知し、装置の点検・清掃・フィルタ交換を定期的に実施する。必要に応じて、学内・医学系倫理委員会の指針に従い、医師等の専門家とも連携して安全管理体制を整える。

## 7.2 人を対象とする研究倫理とインフォームド・コンセント

本研究で実施する装着実験およびアンケート調査は、人を対象とする研究に該当するため、所属機関の倫理審査委員会の承認を得た上で実施する。参加者には、研究の目的、内容、想定されるリスクと便益、参加の任意性、途中辞退の自由、データの取扱いなどについて、わかりやすい文書と口頭説明によりインフォームド・コンセントを取得する。

参加者の年齢や健康状態に応じて、負担が過度にならないよう配慮する。未成年者や意思決定能力に制約のある対象者を含める場合には、保護者等の代理同意を含めた追加的配慮を行う。また、装着実験は原則として感染リスクの低い状況（通常時または十分な感染対策が講じられた環境）で実施し、PAPR装着の有無が参加者の健康状態に不利益を与えないよう留意する。

## 7.3 データ保護、プライバシー、VRAIOの活用

装着率ネットワーク管理システムでは、PAPRとスマートフォンアプリを通じて、装着状態Wrや一部のセンシングデータがサーバに送信される。これらのデータは個人情報保護法および関連ガイドラインに準拠して扱い、研究目的以外には利用しない。具体的には、(1) データ送信時の暗号化、(2) 個人を特定可能な情報と計測データの分離管理、(3) 研究終了後の適切な保存期間と廃棄方法、を明確化する。

本研究では、装着状態ネットワーク管理システムの試作においては、著者らが提案してきた Verifiable Record of AI Output (VRAIO) の考え方を適用し、装着率データやアクセス履歴について「検証可能記録」を残しつつ、監視のためではなく説明責任とトレーサビリティ確保のために利用することも検討する。政策的議論や学術発表に際しては、統計的に集約されたデータのみを用い、個々の参加者が特定されない形で結果を公表する。

Webアンケート等で取得する自由記述データについても、匿名化処理を施した上で分析し、個人や特定施設が識別される情報は公開しない。また、データの二次利用を行う場合には、その範囲と目的を明示し、必要に応じて再同意を得る。

## 8. 本研究に関する知的財産

本研究で提示した社会技術システムは、PAPR 本体・評価装置・装着率ネットワーク管理システムを統合した新しい公共インフラとして構築されるものであり、その中核には著者らが長年にわたり開発してきた基盤技術群が存在する。これらの技術の一部はすでに権利化されており、特に「装着状態の推定」「呼吸流量のモデル化」「逆圧力制御」「装着率ネットワークにおけるプライバシー保護」といった要素は、本研究計画の実現可能性を支える本質的構成要素である。

本章では、読者の検証可能性と学術的透明性を確保するため、また本研究計画の技術的基盤を正確に理解していただるために、既に特許権として確立した請求項を原文どおり全文掲載する。請求項をそのまま記載することは冗長に見える面もあるが、本研究が依拠する技術的コアを正確に共有し、将来的な社会実装議論における誤解を避ける上で不可欠である。

以下に示す各特許は、(1) PAPR の装着状態の推定、(2) 呼吸流量と圧力のモデル化と制御、(3) 強制吸排気を伴うヘルメット型マスクの構造と制御体系、(4) プライバシー保護型カメラ・記録管理システムという四つの柱から構成されており、本研究の3要素（PAPR 本体・評価装置・装着率ネットワーク）のそれぞれに直接的に関係する。本研究計画において、これらの特許技術は単体の技術として扱われるのではなく、統合的な社会技術インフラを支える「運用上の前提条件」として位置づけられる。

以下に、権利化された請求項をそのまま掲載し、本研究計画の技術的背景と基盤的知財の全体像を明らかにする。

### 8.1. 特許第7515044号：マスク装着状況・他者との接触状況の管理方法、管理システム

本特許は、PAPR装着状態の検知・記録と、他者との距離・装着状況の把握を可能にする基盤技術を対象としており、本研究における「装着率ネットワーク管理システム」の中核を構成する要素である。特に、給気・排気流量から装着状態を推定する手法は、装着率 Wr をリアルタイムに把握するための前提条件であり、社会実験や政策設計に不可欠な基礎データを生成する。本節では、この基盤となる請求項を原文のまま示す。

#### 【請求項 1】

「呼吸空気净化器具」の微粒子・飛沫・ウイルス等の遮蔽率、装着の有無などの装着状態を、排気流量と給気

流量に基づいて判断し、時刻と共に、記録装置に記録することを特徴とする、呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

【請求項2】

「呼吸空気浄化器具」の排気流量と給気流量を、ヘルメット内の内圧、および／または、ポンプ出力で表す校正式に基づいて推定することを特徴とする、請求項1に記載の呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

【請求項3】

近隣の他者の存在、および／または、近隣の他者との距離、および／または、近隣の他者の「呼吸空気浄化器具」の装着状態を、ブルートゥースなどの無線通信手段で検知し、記録することを特徴とする、請求項1から請求項2のいずれか1項に記載の呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

【請求項4】

近隣の他者の存在、および／または、近隣の他者との距離、および／または、近隣の他者の「呼吸空気浄化器具」の装着状態を、通常のカメラや赤外線カメラなどで撮影されたカメラ画像を画像解析することで検知し、記録することを特徴とする、請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

【請求項5】

ウイルスの遮蔽率を、「呼吸空気浄化器具」の外部から内部への侵入に対する遮蔽率と、「呼吸空気浄化器具」の内部から外部への漏洩に対する遮蔽率とに分離して取り扱うことを特徴とする請求項1から請求項4のいずれか1項に記載の呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

【請求項6】

感染防護器具のカメラを利用して、周囲の映像と音声を記録し、後に再生する機能と、再生権は装着者本人のみが所有し、警察等の捜査依頼に関して一時的に再生権を委譲できることを特徴とする、請求項1から請求項5のいずれか1項に記載の呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

【請求項7】

スマートフォンのアプリを用いて感染防護器具を装着した写真を撮影することにより、画像解析にて装着されている感染防護器具の種類を判定する機能を有し、さらに複数の角度から撮影された写真から装着方法の正誤を判定し、正しい装着方法を教示する機能を有する事を特徴とする、請求項1から請求項6のいずれか1項に記載の呼吸空気浄化器具装着状況の記録・管理システム。

## 8.2. 特許第7653735号：呼吸空気浄化器具

本特許は、呼気・吸気の周期に応じて給気流量や内圧を動的に制御する仕組みを規定しており、本研究で開発する標準型PAPR[b]における「逆圧力制御」の中核となる技術である。従来の“単純な陽圧保持型”を超えて、呼吸動作に追従する制御則を実装することで、呼吸負荷軽減とCO<sub>2</sub>蓄積抑制を両立する設計が可能となる。本節では、本研究計画の技術的的前提となる請求項をそのまま掲載する。

【請求項1】

ポンプ給気機能付きマスクにおいて、装着の呼吸に合わせて、呼気時には流入量目標値を小さく、および／または、内圧目標値を小さくし、吸気時には流入量目標値を大きく、および／または、内圧目標値を大きくすることを特徴とする、呼吸空気浄化器具。

【請求項2】

給気ポンプ一つとヘルメット装着の流量センサ、圧力センサ、CO<sub>2</sub>センサを用いた制御により、流量、圧力、CO<sub>2</sub>濃度の設定条件を満たすことを特徴とする、ポンプ給気機能付き呼吸空気浄化器具。

【請求項3】

ポンプの流量Qが印加電圧Vと外部と内部の差圧Pの関数Q (V, P) となることを利用し、流量センサを用いてその推定値により流量、圧力、CO<sub>2</sub>濃度の設定条件を満たすことを特徴とする、請求項2に記載のポンプ給気機能付き呼吸空気浄化器具。

## 8.3. 特許第7616624号：強制吸排気機能付きヘルメット型マスク

本特許は、給気側・排気側ポンプ（またはバルブ）を協調的に制御し、ヘルメット内部の圧力と流量を同時に管理する設計原理を示したものである。本研究で開発する標準型PAPR[b]の構造設計および制御体系に直接結びつく内容であり、PAPR内部環境の安定化や快適性の確保に不可欠な基盤技術である。本節では、この制御体系を規定する請求項を全文掲載する。

【請求項1】

給気側ポンプを有しており、気密ヘルメット内の圧力計測値、および、ヘルメット流量計測値に基づいて、気密ヘルメット内の圧力を正圧に制御するとともに、流量を目標値に制御する空気供給装置であり、給気側のポンプ、および排気側のバルブの制御において、流量が目標値となるようにポンプの回転速度をフィードバック制御し、同様にヘルメット内の圧力が正圧となるようにバルブの開度をフィードバック制御することを特徴とする空気供給装置。

【請求項2】

給気側ポンプを有しており、気密ヘルメット内の圧力計測値、および、ヘルメット流量計測値に基づいて、気密ヘルメット内の圧力を正圧に制御するとともに、流量を目標値に制御する空気供給装置であり、給気側、排気側のポンプ、および／または、給気側、排気側のバルブの制御において、流量が目標値となるようにあらかじめ2つのポンプの回転速度、および／または、バルブの開度を一定に調整し、同様に、ヘルメット内の圧力が一定となるようにあらかじめ2つのポンプの回転速度の差、および／または、バルブの開度の差を一定に調整し、また、設定値に対する変動分に対しては1つのポンプの回転速度、および／または、バルブ開度で流量を補正するようフィードバック制御し、もう1つのポンプの回転速度、および／または、バルブの開度でヘルメット内の圧力を補正するようフィードバック制御することを特徴とする空気供給装置。

【請求項3】

給気側ポンプを有しており、気密ヘルメット内の圧力計測値、および、ヘルメット流量計測値に基づいて、気密ヘルメット内の圧力を正圧に制御するとともに、流量を目標値に制御する空気供給装置であり、給気側、排気側のポンプ、および／または、給気側、排気側のバルブの制御において、2つのポンプの回転速度の和、または、2つのバルブの開度の和をフィードバック制御することにより流量を制御し、2つのポンプの回転速度の差、または、2つのバルブの開度の差をフィードバック制御することによりヘルメット内の圧力を制御することを特徴とする空気供給装置。

【請求項4】

吸排気制御機能付きヘルメット型マスク用のヘルメット部を、気密空間に置き換えることを特徴とする、請求項1から請求項3のいずれか1項に記載の空気供給装置。

#### 8.4. 特許第6671627号：プライバシ保護を可能とするカメラシステム

本特許は、画像データの暗号化保存とアクセス管理を中心とするプライバシー保護技術を対象とし、本研究が採用する「検証可能記録（VRAIO）」[8]の思想的前身となる技術である。装着率ネットワーク管理システムにおける“装着しない自由を尊重しつつデータを扱う”という設計理念を支える上で、本特許の暗号化・許可コード・理由コードの構組みは極めて重要である。本節では、その根幹を成す請求項を原文のまま示す。

【請求項1】

カメラで撮影された画像データを暗号化して保存し、暗号化された当該画像データを前記カメラから入手する、または、復号化する、または、利用するには、許可コードが必要であるカメラシステムであり、当該許可コードは許可コード発行条件に基づき記録サーバから発行されるカメラシステムであり、当該記録サーバは、当該許可コードの発行の要請の受付から、許可コード発行までの過程における、カメラ、画像データ、閲覧者、許可コードの項目のうちいずれか1つ以上の項目に関する情報を記録することを特徴とする、または、

カメラで撮影された画像データを保存し、当該画像データを前記カメラから入手する、または、利用するには、許可コードが必要であるカメラシステムであり、当該許可コードは許可コード発行条件に基づき記録サーバから発行されるカメラシステムであり、当該記録サーバは、当該許可コードの発行の要請の受付から、許可コード発行までの過程における、カメラ、画像データ、閲覧者、許可コードの項目のうちいずれか1つ以上の項目に関する情報を記録することを特徴とするカメラシステムであり、

カメラが画像を暗号化する際に利用する暗号キー／復号キーを、カメラ及び閲覧装置・閲覧ソフトウェアに設定する設定装置・設定ソフトウェアを含み、この設定装置・設定ソフトウェア内部に保持する暗号キー／復号キーを、カメラ及び閲覧装置・閲覧ソフトウェアのみに知らしめることを特徴とするカメラシステム。

【請求項2】

カメラで撮影された画像データを暗号化して保存し、暗号化された当該画像データを前記カメラから入手する、または、復号化する、または、利用するには、許可コードが必要であるカメラシステムであり、当該許可コードは許可コード発行条件に基づき記録サーバから発行されるカメラシステムであり、当該記録サーバは、当該許可コードの発行の要請の受付から、許可コード発行までの過程における、カメラ、画像データ、閲覧者、許可コードの項目のうちいずれか1つ以上の項目に関する情報を記録することを特徴とする、または、

カメラで撮影された画像データを保存し、当該画像データを前記カメラから入手する、または、利用するには、許可コードが必要であるカメラシステムであり、当該許可コードは許可コード発行条件に基づき記録サーバから発行されるカメラシステムであり、当該記録サーバは、当該許可コードの発行の要請の受付から、許可

コード発行までの過程における、カメラ、画像データ、閲覧者、許可コードの項目のうちいずれか1つ以上の項目に関する情報を記録することを特徴とするカメラシステムであり、

カメラが保存する画像データを入手するために、及び／または、暗号化された画像データを復号化するために、当該入手、及び／または、当該復号化の理由を示すための理由コードを必要とするカメラシステムであり、当該理由コードの全部または一部が、電子署名されていることを特徴とするカメラシステム。

### 8.5. その他

本研究に関連する知的財産には、上述の特許群に加え、装着率ネットワーク管理システムにおけるプライバシー保護の根幹を成す VRAI0 [8] 関連の基本特許についても、すでに出願済みである。公開特許として特開2025-141642 [19] があり、さらに未公開のものとして特願2024-075023 [20]、特願2025-037891 [21]が存在する。これらはいずれも、本研究で構築するプライバシー保護型ネットワークの制度的・技術的基盤を支える“基本特許”として位置づけられる。

## 9. 結論 (Conclusion)

本研究は、COVID-19 で顕在化した「ロックダウン依存」の問題に対し、市民が日常生活の中で利用可能な電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR) を中核とする社会技術システムを構想し、その研究計画を開示したものである。ロックダウンは感染抑制に一定の効果を持つ一方で、市民生活・経済活動・教育機会に重大な犠牲を強いる。本稿では、この構造的課題に対する工学的代替策として、「PAPR装着率を制御変数とした実効再生産数  $R_t$  の管理」という考え方にもとづき、ロックダウンに依存しない感染症対策インフラの可能性を示した。

具体的には、(1) 簡易型[a]と標準型[b]からなる市民用PAPR本体の開発、(2) 呼吸模擬装置・マネキンヘッド・エアロゾル遮蔽評価系を統合したPAPR評価装置の構築、(3) 装着率ネットワーク管理システムを用いた社会的運用基盤の設計、という三要素からなる研究計画を提示した。さらに、これら三要素を段階的に統合し、地域社会における統合的社会実験を通じて、技術的実現可能性と市民の受容性、およびプライバシー保護と感染制御の両立可能性を検証する枠組みを示した。

本研究の特徴は、PAPRを単なる個人用防護具としてではなく、「社会インフラの一部」として位置づけ、装着率  $Wr_{required}$  と実効再生産数  $R_t$  の関係を明示的に扱う点にある。装着率ネットワーク管理システムと VRAI0型の検証可能記録を組み合わせることで、「装着しない自由」を前提としながら、社会全体として必要な装着率を政策変数として扱う新しい社会技術モデルを提案した。これは、監視社会化を伴わないデジタルガバナンスの具体的な設計例としても意義を持つ。

一方で、本稿で示した内容はあくまで計画段階の開示であり、PAPR設計の最適化、評価指標の妥当性、市民の長期的な受容性、プライバシー保護に対する社会的合意形成など、多くの課題が残されている。今後は、試作・評価・社会実験を通じて得られるデータにもとづき、本計画の仮説を検証するとともに、制度設計や国際展開も視野に入れた検討を進める必要がある。

最終的には、本研究で提案するPAPRベースの社会技術システムが、「自由を最大限に尊重しつつ感染症リスクを受容可能な水準に抑える」という、新しい公共インフラの選択肢として位置づけされることを目指す。本稿はその第一報として、今後の学術的議論と実証研究の出発点を示すものである。

## 謝辞

本研究は、2021年度科学研究費助成事業 国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(B)) (課題番号:21KK0080)、および、2025年度科学研究費助成事業 基盤(B) (課題番号:25K00735)の助成を受けて実施された。

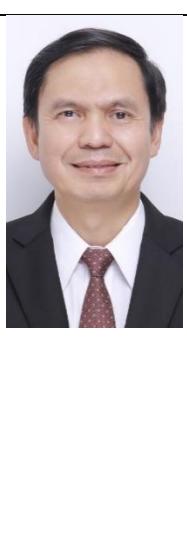
## 参考文献

- 1) 日本学術振興会、科研費・基盤研究 (B) (一般)、課題番号: 25K00735 「電動ファン付き呼吸用保護具をロックダウン代替手段として活用した社会技術システム」、研究期間: 2025-2028。  
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-25K00735/>
- 2) Y. Fujii, “An Engineering Alternative to Lockdown During COVID-19 and Other Airborne Infectious Disease Pandemics: Feasibility Study”, *JMIR Biomedical Engineering*, Vol. 9, e54666, 2024.  
<https://biomedeng.jmir.org/2024/1/e54666/>
- 3) Y. Fujii, “Examination of the requirements for powered air-purifying respirator (PAPR) utilization as an alternative to lockdown”, *Scientific Reports*, Vol. 15, 1217, 2025.  
<https://www.nature.com/articles/s41598-024-82348-0>

- 4) Y. Fujii, A. Takita, S. Hashimoto, K. Amagai, “Estimation of Respiratory States Based on a Measurement Model of Airflow Characteristics in Powered Air-Purifying Respirators Using Differential Pressure and Pulse Width Modulation Control Signals—In the Development of a Public-Oriented Powered Air-Purifying Respirator as an Alternative to Lockdown Measures” , *Sensors*, Vol. 25, No. 9, 2939, 2025.  
<https://doi.org/10.3390/s25092939>
- 5) Y. Fujii, “The Real-Time Estimation of Respiratory Flow and Mask Leakage in a PAPR Using a Single Differential-Pressure Sensor and Microcontroller-Based Smartphone Interface in the Development of a Public-Oriented Powered Air-Purifying Respirator as an Alternative to Lockdown Measures” , *Sensors*, Vol. 25, No. 17, 5340, 2025.  
<https://doi.org/10.3390/s25175340>
- 6) R. M. Galindo, A. Takita, E. Carcasona, E. Magalang, T. S. Galindo, S. Hashimoto, T. Yamaguchi, E. U. Tibay, D. W. Shu, H. Kobayashi, K. Amagai, N. Ohta, N. Yoshiura, A. Kuwana, A. Yano and Y. Fujii, “Low-Cost Powered Air-Purifying Respirator (PAPR) “Distancing-Free Mask Frontline (DFM-F) Prototype No. 1” for the Operational Tests in Hospitals in Cebu City, Philippines” , *Journal of Mechanical and Electrical Intelligent System*, Vol. 5, No. 2, pp. 1-6, 2022.  
[https://jmeis.e-jikei.org/ARCHIVES/v05n02/JMEIS\\_v05n02a001.pdf](https://jmeis.e-jikei.org/ARCHIVES/v05n02/JMEIS_v05n02a001.pdf)
- 7) E. Carcasona, R. M. Galindo, A. Takita, E. Magalang, T. S. Galindo, S. Hashimoto, T. Yamaguchi, E. U. Tibay, D. W. Shu, H. Kobayashi, K. Amagai, N. Ohta, N. Yoshiura, A. Kuwana, A. Yano and Y. Fujii, “Very-Low-Cost Powered Air-Purifying Respirator (PAPR) “Distancing-Free Mask Industry (DFM-I) Prototype No. 1” and Proposal for a Lockdown-Free Industry” , *Journal of Technology and Social Science*, Vol. 6, No. 2, pp. 1-4, 2022.  
[https://jtss.e-jikei.org/issue/archives/v06n02/JTSS\\_v06n02a001.pdf](https://jtss.e-jikei.org/issue/archives/v06n02/JTSS_v06n02a001.pdf)
- 8) Y. Fujii, “Verifiable record of AI output for privacy protection: public space watched by AI-connected cameras as a target example” , *AI & Society*, Vol. 40, pp. 3697-3706, 2025.  
<https://doi.org/10.1007/s00146-024-02122-8>
- 9) Y. Fujii, “Lessons from the Roman Empire: ‘Bread and Circuses’ as a Model for Democracy in the AGI Age” , *AI & Society*, 2025.  
<https://doi.org/10.1007/s00146-025-02449-w>, <https://rdcu.be/ev0Kd>
- 10) Y. Fujii, “Governing AI Output in Autonomous Driving: Scalable Privacy Infrastructure for Societal Acceptance” , *Future Transportation*, Vol. 5, No. 3, 116, 2025.  
<https://doi.org/10.3390/futuretransp5030116>
- 11) M. W. First, “HEPA filters,” *J. Amer. Biol. Saf. Assoc.*, vol. 3, no. 1, pp. 33-42, Mar. 1998.  
<https://doi.org/10.1177/109135059800300111>
- 12) Occupational Safety and Health Administration (OSHA), *Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard*, OSHA Publication 3352-02, 2009.  
<https://www.osha.gov/sites/default/files/publications/3352-APF-respirators.pdf>
- 13) 藤井雄作, “新型コロナウイルスとの共存に向けて” , *社会安全とプライバシー*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-5, 2020.  
[http://jjssp.e-jikei.org/ARCHIVES/vol04no01/JpnJSSP\\_vol04\\_no01\\_p01.pdf](http://jjssp.e-jikei.org/ARCHIVES/vol04no01/JpnJSSP_vol04_no01_p01.pdf)
- 14) 藤井雄作, 田北啓洋, 橋本誠司, “ウイルスをほぼ完全に遮蔽できるマスクの開発, および, ロックダウンを不要化する社会基盤の提案” , *社会安全とプライバシー*, Vol. 4, No. 1, pp. 6-10, 2020.  
[https://jjssp.e-jikei.org/ARCHIVES/vol04no01/JpnJSSP\\_vol04\\_no01\\_p06.pdf](https://jjssp.e-jikei.org/ARCHIVES/vol04no01/JpnJSSP_vol04_no01_p06.pdf)
- 15) 特許第7515044号, マスク装着状況・他者との接触状況の管理方法, 管理システム, 発明者: 藤井雄作, 橋本誠司, 田北啓洋, 登録日: 2024. 7. 4.  
<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-7515044/15/ja>

- 16) 特許第7653735号, 呼吸空気浄化器具, 発明者: 藤井雄作, 橋本誠司, 田北啓洋, 登録日: 2025. 3. 21.  
<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-7653735/15/ja>
- 17) 特許第7616624号, 強制吸排気機能付きヘルメット型マスク, 発明者: 藤井雄作, 橋本誠司, 山口薦夫, 田北啓洋, 登録日: 2025. 1. 8.  
<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-7616624/15/ja>
- 18) 特許第6671627号, プライバシ保護を可能とするカメラシステム, 発明者: 藤井雄作, 吉浦紀晃, 太田直哉, 田北啓洋, 登録日: 2020. 3. 6.  
<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-6671627/15/ja>
- 19) 特願2025-141642, ブロックチェーンを用いた閲覧履歴の保存方法, 発明者: 藤井雄作, 太田直哉, 出願日: 2024. 3. 15.  
<https://www.j-platpat.inpit.go.jp/c1801/PU/JP-2025-141642/11/ja>
- 20) 特願2024-075023, 利活用履歴の完全なる保存, 発明者: 藤井雄作, 出願日: 2024. 5. 6.
- 21) 特願2025-037891, 情報処理システムにおけるプライバシ保護法, 発明者: 藤井雄作, 出願日: 2025. 3. 11.

	<p>藤井雄作 FUJII, Yusaku 群馬大学大学院理工学府 1989年3月東京大学工学部船舶工学科卒業, 1991年3月東京大学大学院工学系研究科修士課程修了. 2001年東京大学より博士(工学)の学位修得. 1991年4月川崎製鉄株式会社入社, 工業技術院計量研究所, 産業技術総合研究所を経て, 現在群馬大学理工学府教授. 2004年よりNPO法人e自警ネットワーク研究会理事長. 社会安全工学, 防犯カメラシステム, 精密計測, 光波干渉計などが専門.</p>
	<p>橋本誠司 HASHIMOTO Seiji 群馬大学大学院理工学府 1999年3月宇都宮大学大学院工学研究科博士課程修了. 1996年～1999年日本学術振興会特別研究員. 2000年より小山工業高等専門学校機械工学科助手, 2002年より群馬大学工学部助手, 2005年に同助教授, 2016年に教授, 現在に至る. 博士(工学). 主にシステム同定・制御理論の産業分野への応用に関する研究に従事. 2001年, 2003年IEEE IES Best Presentation Award受賞. 2012年IEEE IMCS Best Application Paper Award受賞. 計測自動制御学会, IEEE会員.</p>
	<p>吉浦紀晃 YOSHIURA Noriaki 埼玉大学理工学研究科 1991年3月東京工業大学工学部情報工学科卒. 1997年3月東京工業大学大学院理工学研究科博士課程単位取得退学. 博士(学術). 東京工業大学助手, 群馬大学助教授, 埼玉大学大学院理工学研究科准教授を経て. 現在埼玉大学大学院理工学研究科教授. ソフトウェア検証やネットワーク運用技術の研究に従事.</p>
	<p>山口薦夫 YAMAGUCHI Takao 群馬大学大学院理工学府 1986年3月名古屋大学工学部卒業, 1986年4月富士重工業株式会社入社, スバル研究所を経て, 現在, 群馬大学理工学府教授, 現在に至る. 1996年群馬大学より博士(工学)の学位修得. 自動車や構造物の制振・防音特性, 波動ブラックホール, 柔軟構造の非線形, カオス振動, 生体反応の影響を含むダイナミックスなどの研究に従事. 日本機械学会, 日本音響学会, 計算工学会, 自動車技術会会員.</p>
	<p>天谷賢児 AMAGAI Kenji 群馬大学大学院理工学府 1985年3月電気通信大学電気通信学部機械工学科卒業, 同大学院修士課程修了, 1992年3月東北大工学部研究科博士後期課程修了, 博士(工学). 1991年～1992年日本学術振興会特別研究員, 1992年4月より群馬大学工学部助手, 助教授, 准教授を経て, 現在同大学院理工学府教授, 次世代モビリティ社会実装研究センター・センター長, 主に熱流体力学, レーザー計測, 次世代モビリティ研究に従事. 日本エネルギー学会, 自動車技術会, 日本機械学会, 日本工学教育協会等会員.</p>

	<p>Dongwei SHU Nanyang Technological University, Singapore Dongwei SHU was born in Siping, China, in 1963. He received the B.Sc., M.Sc. from Peking University, Beijing, China and Ph.D degrees from Cambridge University, UK, in 1984, 1987 and 1990, respectively. After conducting research in University of Waterloo (Canada), Sydney University (Australian), and lecturing in Monash University (Australia), he joined Nanyang Technological University of Singapore in 1993. He had studied dynamic plasticity in energy absorption, spina bifida in biomechanics, delamination of composites, drop test of hard disk drives, ballistics, and mechanics of meta-materials and structures.</p>
	<p>Mitra Djamal is a distinguished academic and scientist. He holds the position of Professor of Physics at the Faculty of Mathematics and Natural Sciences (FMIPA) at the ITB (Bandung Institute of Technology) since October 2009. His educational background includes a Bachelor's degree (S1) in Physics from ITB (1984) and a Doctor of Engineering (Dr.-Ing.) in Electrical Engineering with a focus on Measurement and Automation from the Federal Armed Forces University Munich, Germany (1992). Throughout his career, Prof. Mitra Djamal has held various significant leadership roles, including Rector of the ITERA (Sumatera Institute of Technology) 2021–2022, Head of the ITERA Academic Senate (2018–2022), Head of the Physical Society of Indonesia (formerly the Indonesian Physics Association) 2014–2022, Accreditation Reviewer of BAN PT (National Accreditation Board for Higher Education) since 2009, and the Executives Board Director of LAMSAMA (Independent Accreditation Agency for Natural Sciences and Formal Sciences) since 2017. His areas of expertise and teaching encompass instrumentation physics, sensors, sensor systems, and instrumentation, where he has also served as Principal Investigator (PI) for 125 research topics. His academic contributions are substantial, with over 88 international journal publications, 45 national journal publications, 108 international conference papers, and the successful supervision of 42 Master's and 18 Doctoral students.</p>