

ああああ

22RS012

井上 誠斗

九州産業大学 理工学部

情報科学科

令和8年1月

目 次

| | |
|--|-----------|
| 第 1 章 序論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 CO ₂ 濃度と空気環境 | 2 |
| 1.3 換気・温湿度と感染症リスク | 3 |
| 1.4 現在の課題 | 3 |
| 1.5 先行研究 | 4 |
| 1.6 本研究の目的 | 5 |
| 第 2 章 開発環境 | 6 |
| 2.1 概要 | 6 |
| 2.2 新規に作成した機器 | 6 |
| 2.2.1 マイクロコントローラ ESP32-C6 | 6 |
| 2.2.2 CO ₂ センサモジュール SCD41 | 7 |
| 2.2.3 リチウムポリマバッテリ | 8 |
| 2.2.4 LTE通信モジュール SIM7080G | 9 |
| 2.2.5 SIMカード | 10 |
| 2.3 先行研究で使用した機器 | 10 |
| 2.3.1 Arduino MKR WiFi 1010 | 10 |
| 2.3.2 CO ₂ センサ MH-Z19C | 11 |
| 2.3.3 温度・湿度・気圧センサ BME680 | 12 |
| 2.4 使用環境 | 13 |
| 2.4.1 Arduino IDE | 13 |
| 2.4.2 チャートくん | 13 |
| 第 3 章 設計 | 14 |
| 3.1 設計の概要 | 14 |
| 3.2 設計方針 | 14 |
| 3.3 システム全体構成 | 15 |
| 3.4 動作設計 | 16 |
| 3.5 通信設計 | 16 |
| 3.6 省電力設計 | 16 |
| 第 4 章 測定機器の実装 | 18 |
| 4.1 測定機器 1 の実装 | 18 |
| 4.2 測定機器 2,3 の実装 | 19 |
| 4.3 測定機器 3 の課題 | 20 |
| 4.4 LTE 通信方式の検討 | 20 |
| 4.5 測定機器 4 の実装 | 20 |
| 4.6 DeepSleep を用いた省電力制御 | 21 |
| 4.7 LTE 通信を用いたデータ送信 | 22 |

| | |
|--|-----------|
| 第5章 測定環境と測定方法 | 23 |
| 5.1 概要 | 23 |
| 5.2 測定環境 | 23 |
| 5.2.1 赤村ドームハウスにおける測定環境 | 23 |
| 5.2.2 電車内における測定環境 | 24 |
| 5.3 測定方法 | 25 |
| 5.3.1 センサの基礎特性確認 | 25 |
| 5.3.2 据え置き型センサとの比較測定方法 | 25 |
| 5.3.3 赤村ドームハウスにおける測定方法 | 25 |
| 5.3.4 電車内における測定方法 | 26 |
| 5.4 評価方法 | 27 |
| 第6章 測定結果と評価 | 28 |
| 6.1 概要 | 28 |
| 6.1.1 測定機器の基礎特性確認結果および評価 | 29 |
| 6.2 据え置き型測定機器との測定値比較 | 29 |
| 6.3 空間的CO ₂ 濃度分布環境における測定結果 | 30 |
| 6.3.1 ドームハウス内の据え置き型CO ₂ 測定機器による測定結果 | 30 |
| 6.3.2 ドームハウス内の小型CO ₂ 測定デバイスによる測定結果 | 31 |
| 6.3.3 ドームハウス内の据え置き型測定機器との比較評価 | 31 |
| 6.4 電車内におけるCO ₂ 濃度変化 | 31 |
| 6.4.1 行き（鳥栖行き普通列車）における測定結果 | 32 |
| 6.4.2 帰り（門司港行き普通列車）における測定結果 | 32 |
| 6.4.3 ドア付近とドアから離れた位置におけるCO ₂ 濃度の比較 | 33 |
| 6.5 省電力性能の評価結果 | 33 |
| 6.6 小型化に関する評価 | 35 |
| 第7章 結論 | 38 |
| 7.1 まとめ | 38 |
| 7.2 今後の課題 | 39 |
| 7.2.1 稼働時間の向上 | 39 |
| 7.2.2 測定機器のケース作成 | 39 |
| 7.2.3 授業姿勢の判定への応用 | 40 |
| 7.2.4 長期間運用における信頼性評価 | 40 |
| 謝辞 | 41 |
| 参考文献 | 42 |

図 目 次

| | | |
|-----|---------------------------------|----|
| 1.1 | 据え置き型 CO ₂ センサ | 5 |
| 2.1 | Seeed XIAO ESP32-C6 | 7 |
| 2.2 | SCD41 | 8 |
| 2.3 | SIM7080G | 9 |
| 2.4 | Arduino MKR WiFi 1010 | 10 |
| 2.5 | MH-Z19C | 11 |
| 2.6 | BME680 | 12 |
| 2.7 | LTE を使用した測定機器 | 13 |
| 4.1 | プロトタイプおよび測定機器 1 の外観 | 19 |
| 4.2 | 測定機器 2 および測定機器 3 の外観 | 20 |
| 4.3 | LTE を使用した測定機器 | 21 |
| 5.1 | ドームハウスの環境 | 24 |
| 5.2 | 電車内の環境 | 25 |
| 5.3 | プロトタイプおよび測定機器 1 の外観 | 26 |
| 5.4 | 電車内測定時の携帯型センサの位置 | 27 |
| 6.1 | アルコール、呼気への反応結果 | 29 |
| 6.2 | CO ₂ 濃度の比較 | 30 |
| 6.3 | 据え置き型と携帯型の CO ₂ 濃度比較 | 31 |
| 6.4 | 電車内の co ₂ 濃度変化 | 32 |
| 6.5 | 電車内の co ₂ 濃度変化 | 33 |
| 6.6 | 測定機器 4 のバッテリ持続時間 | 34 |
| 6.7 | 測定機器 3 のバッテリ持続時間 | 35 |

表 目 次

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | 場所別にみた CO ₂ 濃度の目安 | 2 |
| 1.2 | CO ₂ 濃度と人体・環境への影響の整理 | 3 |
| 2.1 | ESP32-C6 の主なパラメータ | 7 |
| 2.2 | SCD41 の主なパラメータ | 8 |
| 2.3 | SIM7080G の主なパラメータ | 10 |
| 2.4 | Arduino MKR WiFi 1010 の主な仕様 | 11 |
| 2.5 | MH-Z19C の主なパラメータ | 12 |
| 2.6 | BME680 の主なパラメータ | 13 |
| 6.1 | 据え置き型測定機器および測定機器 1～4 の外形寸法と体積の比較 | 36 |

第1章 序論

1.1 研究背景

2019年末に中国武漢市で報告された新型コロナウイルス感染症（COVID-19）は、短期間のうちに世界的な流行へと発展し、2020年以降の日常生活、教育、産業活動に深刻な影響を及ぼした。各国において外出制限や行動制限が実施され、人々の生活様式は大きく変化した。COVID-19は飛沫感染に加え、微小な粒子であるエアロゾルを介した空気感染の可能性が指摘されており、特に換気が不十分な室内環境では感染リスクが著しく高まることが明らかになっている。この状況を受け、厚生労働省は密閉・密集・密接のいわゆる「三つの密」を回避する行動を国民に呼びかけた。なかでも密閉空間における換気の重要性は、学校や職場、公共施設などあらゆる場面で強調され、空気環境への関心が社会全体で急速に高まる契機となった。

このような背景のもと、室内の換気状態を把握するための定量的な指標として CO_2 濃度に注目が集まった。 CO_2 は人体の呼気に多く含まれるため、室内における滞在人数や人の密度を間接的に反映するものとして利用できる。換気が不十分な環境では CO_2 濃度が上昇しやすく、その変化を観測することで換気状態を把握することが可能である。このため、 CO_2 濃度の上昇は換気不足を示す重要なサインとなり、空気環境評価において有効な指標として位置付けられている。実際にコロナ禍では、学校、飲食店、公共施設など多くの場所で CO_2 センサの設置が進められ、数値によって換気状態を可視化する取り組みが広く実施された。これにより、 CO_2 濃度は感染症対策を支援する実用的な環境指標として社会に定着したといえる。

換気の重要性は COVID-19 に限らず、季節性インフルエンザをはじめとする呼吸器感染症においても指摘されている。インフルエンザウイルスは空気が乾燥した環境において生存しやすいことが知られており、室内環境の管理が感染拡大に影響を及ぼす可能性がある。このことから、マスク着用や人流の抑制に加え、換気の徹底によって室内の空気環境を適切に維持することが、インフルエンザの感染拡大抑制に寄与すると考えられる。すなわち、換気はインフルエンザに対しても有効な感染対策の一つである。

以上のように、COVID-19 を契機として空気環境の重要性は社会的に広く認識されるようになったが、換気の有効性は一時的な感染症対策にとどめるべきではない。特に、教育機関、オフィス、飲食店など、多くの人が集まる空間では、平常時においても継続的な空気質管理が求められる。さらに、個人レベルにおいても、自宅、車内、店舗、移動先など多様な環境で空気質を把握できる仕組みが重要である。しかし、既存の CO_2 センサの多くは据え置き型であり、設置場所が限定されるという課題がある。このような背景から、柔軟に持ち運びが可能で、日常生活の中でさまざまな環境における空気質を把握できる CO_2 測定機器の必要性が高まっている。

1.2 CO₂ 濃度と空気環境

CO₂ 濃度は、室内の空気環境を評価するための代表的な指標の一つである。大気中の主要成分のうち、CO₂ は約 0.04% と非常に低い割合しか占めていないが、室内空間では人の呼気によって短時間で濃度が上昇する特徴を持つ。そのため、CO₂ 濃度の変化は、室内における人の滞在状況や換気の十分さを間接的に反映することから、空気質評価において重要な指標として広く利用されている。

CO₂ 濃度は ppm (parts per million) を単位として表され、屋外環境では一般に 415～450 ppm 程度でほぼ一定の値を示す。一方、換気が不十分な室内環境では、人の呼吸活動により CO₂ 濃度が急激に上昇することが知られている。このため、屋外濃度と室内濃度の差を観測することで、換気の十分さを定量的に評価することが可能である。特に、多人数が長時間滞在する空間では、CO₂ 濃度の継続的な監視が重要となる。

CO₂ 濃度に関しては、国の指針や基準においても具体的な数値が示されている。厚生労働省の「建築物環境衛生管理基準」では、空気調和設備を備える居室空間において、CO₂ 濃度を 1,000 ppm 以下に維持することが求められている。また、文部科学省の「学校環境衛生基準」では、教室内の換気状態を判断する目安として 1,500 ppm 以下が望ましいとされている。これらの基準は、CO₂ 濃度が室内空気環境の良否を判断する実用的な指標であることを示している。(表 1.1)

さらに、CO₂ 濃度の上昇は換気不良を示すだけでなく、人の健康や作業・学習効率にも影響を及ぼすことが報告されている。具体的には、CO₂ 濃度の上昇に伴い、集中力の低下、頭痛、眠気、疲労感などの症状が現れる可能性が指摘されている。特に学習環境においては、教室内の CO₂ 濃度が 1,000 ppm を超えると児童生徒の認知機能や学習効率が低下することが示されており、教育現場における空気質管理の重要性が強調されている。(表 1.2)

以上のように、CO₂ 濃度は換気状態を把握するための環境指標であると同時に、人の健康や快適性、作業・学習効率に直結する重要な要素である。そのため、感染症リスクの低減や快適な居住・活動環境を実現する上で、CO₂ 濃度を継続的に把握し、適切な換気を行うことが不可欠である。

表 1.1: 場所別にみた CO₂ 濃度の目安

| 測定場所 | CO ₂ 濃度の目安 |
|---------------|-----------------------|
| 屋外環境 | 約 415～450 ppm 程度 |
| 居住空間（住宅・オフィス） | 1,000 ppm 以下が望ましい |
| 教育施設（教室） | 1,500 ppm 以下が推奨される |

表 1.2: CO₂ 濃度と人体・環境への影響の整理

| CO ₂ 濃度 | 生理的影響 | 認知・行動への影響 | 評価・位置づけ |
|--------------------|-----------------|------------|-------------|
| 500 ppm 程度 | 特に影響なし | 快適な環境 | 屋外環境に近い状態 |
| 1,000 ppm 超 | 軽度の眼気・集中力低下の可能性 | 判断力・注意力の低下 | 室内環境の管理目安 |
| 1,500 ppm 超 | 不快感の増加 | 学習効率の低下 | 換気改善が望ましい水準 |
| 5,000 ppm 超 | 呼吸数の増加 | 作業効率の低下 | 労働環境の管理基準 |
| 10,000 ppm 超 | 呼吸困難・頭痛 | 正常な作業が困難 | 危険レベル |
| 50,000 ppm 超 | めまい・意識障害 | 行動不能 | 生命に危険 |

1.3 換気・温湿度と感染症リスク

空気環境の指標としては CO₂ 濃度だけでなく、温度・湿度も重要である。先行研究では、低温環境や過度に乾燥した環境が呼吸器系疾患の罹患率を高めることが報告されており、適切な温湿度管理は感染症対策としても不可欠である。

COVID-19 をはじめ、インフルエンザウイルスなどの多くの呼吸器ウイルスは神吉条件に影響されやすく、低温環境では免疫機能が低下し感染しやすくなることが知られている。さらに、換気不足の環境ではウイルスを含むエアロゾルが滞留し、同一空間内での集団感染リスクを高める。

このように、空気環境と感染症リスクは密接に関連しており、CO₂ 濃度と温湿度を総合的に把握することが、快適性の向上だけでなく、感染症予防・健康維持の観点からも重要である。

1.4 現在の課題

近年、COVID-19 を契機に室内の換気状況を可視化する手段として CO₂ センサが急速に普及した。しかし、現在広く利用されている多くの CO₂ 測定機器には、使用環境や対象に応じていくつかの課題が残されている。

第一に、既存の CO₂ センサの多くは据え置き型として設計されており、設置位置により測定結果が大きく変動するという問題がある。室内環境は空気の流れや空間の形状、人の動きに大きく影響されるため、換気の十分な場所とそうでない場所が混在することがある。したがって、一台の据え置き型センサでは空間全体の換気状況を把握することが困難であり、複数台のセンサを導入する必要が生じる。しかし、複数台を設置するためにはコストや設置場所の確保といった制約があり、特に個人利用や小規模環境においては現実的ではない。

第二に、既存製品はサイズが大きく携帯性に乏しいため、自宅、大学、飲食店、車内など複数の環境を移動しながら空気質を測定したい利用者のニーズに応えられず、実際には密閉空間や混雑した空間に入る前に換気状態を確認したい場面が日常的に多く存在するにもかかわらず、現状の測定器では十分に対応できない。

第三に、精度の高いとされている NDIR(Non-Dispersive Infrared) 式 CO₂ センサは信頼性に優れる一方で価格が高く、一般利用者が複数の環境で使用するには導入コストが大きな負担となる。またセンサの精度が高くて、消費電力が大きくバッテリ駆動に向かない製品も多いため、携帯型デバイスとして長時間使用することが難しいという課題がある。

これらの課題は、個人が自らの生活環境における換気状態を能動的に把握し、適切な判断を行うための手軽なツールが不足していることを示しており、感染症対策において、室内空気環境を適切に管理することの重要性を改めて示している。

以上のように、据え置き型 CO₂ センサでは測定場所が限定されること、小型で携帯性に優れた測定機器が不足していること、そして個人が移動先の空気環境を評価する手段が十分に整備されていないことなど、現状の環境計測機器には依然として多くの課題が存在する。

1.5 先行研究

これまでに、室内環境の換気状態を把握することを目的として、CO₂ センサを用いたさまざまな研究が行われてきた。特に、COVID-19 の流行以降は、学校や公共施設などの室内空間における換気状況を定量的に評価する手法として、据え置き型 CO₂ センサ（図 1.1）を用いた測定システムに関する研究が多く報告されている。これらの研究では、複数台の CO₂ センサを室内に設置し、空間内の CO₂ 濃度分布や時間変化を可視化することで、換気状態を評価する手法が提案されている。

例えば、室内に複数の CO₂ センサを配置し、高さ方向や位置ごとの CO₂ 濃度差を測定することで、換気の偏りや滞留しやすい領域を明らかにする研究が報告されている。これにより、空調設備や換気経路の改善に向けた有用な知見が得られており、室内環境の評価手法として高い有効性を示している。また、測定結果をサーバに集約し、PC やスマートフォン上で時系列グラフとして可視化するシステムも提案されており、換気状態を視覚的に把握できる点が評価されている。

しかし、これらの先行研究で用いられている測定システムは多くが据え置き型であり、前述の課題を抱えている。さらに、測定対象は空間全体に偏る傾向があり、個人が実際に滞在・移動する位置での空気環境を直接評価することは困難である。このことから、先行研究は室内環境全体の評価という観点では有用である一方、個人の生活環境における簡便な空気質把握手段としては十分とはいえない。

以上のことから、従来の据え置き型 CO₂ センサを用いた研究は、室内空気環境の評価において重要な役割を果たしてきたものの、携帯性や個人単位での環境把握という点においては課題が残されている。これらの課題を踏まえ、利用者が移動しながらさまざまな環境における空気質を把握できる、小型で携帯可能な CO₂ 測定機器の開発が求められている。



図 1.1: 据え置き型 CO₂ センサ

1.6 本研究の目的

本研究の目的は、従来の据え置き型 CO₂ センサの課題を踏まえ、携帯可能でありながら高精度な測定が可能な小型 CO₂ 測定デバイスを試作し、日常生活における多様な環境での空気質把握を可能にすることである。

具体的には、センサシステム全体の小型化・省電力化を図り、モバイルバッテリや内蔵電源によって長時間稼働できる CO₂ 測定デバイスの実現を目指す。これにより、自宅や大学といった固定的な環境だけでなく、車内、カフェ、研究室、イベント会場など、利用者が移動しながら直面するさまざまな環境の換気状況を簡便に評価できるようとする。また、NDIR 方式を採用した高精度な CO₂ 測定を可能とし、空気質の変化をリアルタイムで取得できることで、換気の不足を素早く検知し、感染症予防や健康維持につながる判断を支援する。

本研究では、試作した小型 CO₂ 測定デバイスを複数の環境で実際に使用し、CO₂ 濃度の変動や換気状態の違いを測定・評価する。これにより、デバイスの実用性や測定精度、省電力性能を検証し、持ち運び型空気質モニタとしての有効性を明らかにすることを目指す。さらに、測定結果を通じて、空気質の改善や適切な換気行動を促すための新たな知見を得ることも期待される。

以上の取り組みにより、個人が日常生活の中で空気環境に対する意識を高め、安全で快適な生活空間を維持するための一助となる測定デバイスの開発を目指す。

第2章 開発環境

2.1 概要

本章では、本研究において使用した開発環境および機器について述べる。本研究では、新規に試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスを中心に、マイクロコントローラ、センサ、通信モジュール、電源系を含むハードウェア構成を設計・実装した。また、性能比較および有効性検証のため、先行研究で使用された機器についても併せて説明する。

2.2 新規に作成した機器

本研究では、携帯型 CO₂ 測定デバイスの実現を目的として、新たにハードウェア構成を設計・試作した。本節では、測定機器を構成する各機器について説明する。

2.2.1 マイクロコントローラ ESP32-C6

本研究では、マイクロコントローラとして Seeed Studio XIAO ESP32-C6（図 2.1）を採用した。本モジュールは 32 ビット RISC-V アーキテクチャのシングルコアプロセッサを搭載しており、高性能動作および低消費電力動作の 2 種類の動作モードを有している。高性能動作モード（High Performance: HP）は最大 160 MHz で動作し、低消費電力動作モード（Low Power: LP）は最大 20 MHz での動作が可能である。

また、512 KB の SRAM および 4 MB のフラッシュメモリを内蔵しており、センサ制御、通信処理、データ管理を同時に行う IoT 用途に十分な記憶容量を備えている。無線通信機能として、2.4 GHz Wi-Fi 6、Bluetooth 5.3、Zigbee、Thread（IEEE 802.15.4）をサポートしており、Matter にネイティブ対応している点も特徴である。

これらの特性から、本研究では低消費電力動作と通信性能を両立できるマイクロコントローラとして ESP32-C6 を採用した。本モジュールの主なパラメータを表 2.1 に示す。



図 2.1: Seeed XIAO ESP32-C6

表 2.1: ESP32-C6 の主なパラメータ

| モデル No. | Seeed XIAO ESP32-C6 |
|---------|---|
| CPU | RISC-V 32bit (シングルコア) |
| 最大動作周波数 | 160 MHz |
| 無線通信 | Wi-Fi 6 (802.11 b/g/n/ax), Bluetooth 5.3, IEEE 802.15.4 |
| 対応プロトコル | Thread, Zigbee, Matter |
| 通信方式 | UART, I2C, SPI, PWM |
| 動作電圧 | 3.3 V |
| 入力電圧 | 5 V (USB) / 5 V・3.3 V ピン |
| ボード寸法 | 約 21.0 × 17.5 mm |
| 対応温度 | -40~85 °C (MCU 仕様) |

2.2.2 CO₂ センサモジュール SCD41

本研究では、CO₂ センサとして Sensirion 社製 SCD41（図 2.2）を搭載したモジュールを使用した。

SCD41 は NDIR 方式を採用した高精度な CO₂ センサであり、小型かつ低消費電力である点が特徴である。また、温度および湿度センサを内蔵しており、これらの測定値を用いた補正により、安定した CO₂ 濃度測定が可能である。

本モジュールは 2.54 mm ピッチのピンインターフェースを備えており、I²C 通信によってマイクロコントローラと接続される。これにより、携帯型デバイスへの組み込みが容易であり、本研究の目的に適している。本モジュールの主なパラメータを表 2.2 に示す。

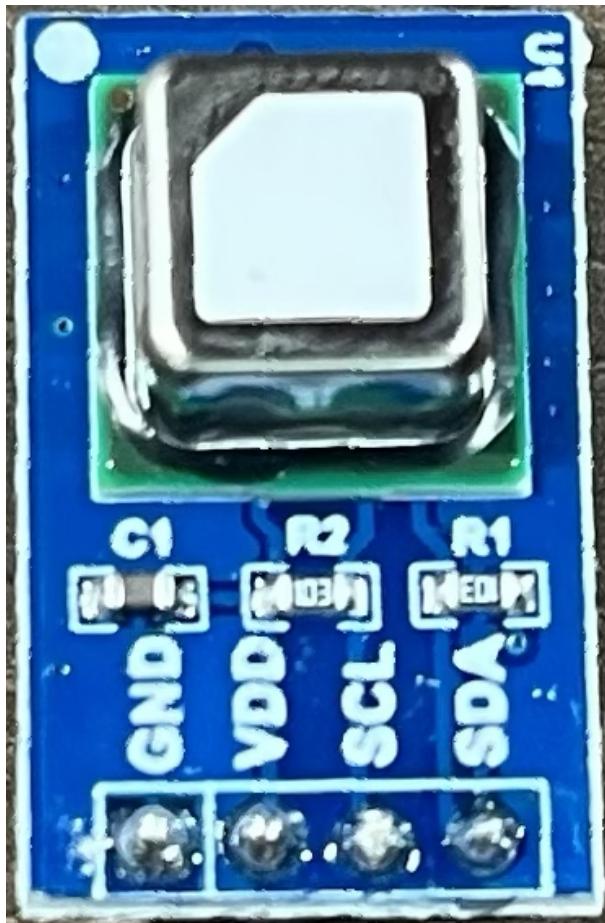


図 2.2: SCD41

表 2.2: SCD41 の主なパラメータ

| モデル No. | SCD41 |
|----------------------|--------------------------|
| I2C アドレス | 0x62 |
| 測定対象 | CO ₂ , 温度, 湿度 |
| CO ₂ 測定範囲 | 400~5000 ppm |
| CO ₂ 測定精度 | ±(40 ppm + 5%) |
| 温度測定範囲 | -10~60 °C |
| 湿度測定範囲 | 0~95 %RH |
| 解像度 | 16 ビット |
| 入力電圧 | 2.4~5.5 V |
| 平均消費電流 | 約 15 mA |
| ボード寸法 | 約 10.1 × 10.1 × 7.0 mm |
| 動作温度範囲 | -10~60 °C |

2.2.3 リチウムポリマバッテリ

本研究で試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスの電源として、リチウムポリマバッテリを使用した。リチウムポリマバッテリは、高エネルギー密度、小型・軽量である点から、携

帶機器やウェアラブルデバイスに広く利用されている。

本研究では、長時間駆動および携帯性の両立を目的として、バッテリ駆動による動作を前提とした設計を行った。

2.2.4 LTE 通信モジュール SIM7080G

通信モジュールとして、SIMCom 社製 SIM7080G（図 2.3）を使用した。SIM7080G は、LTE Cat.M1 および NB-IoT に対応した低消費電力通信モジュールであり、M2M および IoT 用途に特化して設計されている。

本モジュールは Qualcomm 製コアを搭載し、省電力クラス Class 5 に対応している。また、グローバルモデルであるため、幅広い通信環境での利用が可能である。本研究では、屋外や移動環境においても測定データをサーバへ送信することを目的として、本モジュールを採用した。本モジュールの主なパラメータを表 2.3 に示す。



図 2.3: SIM7080G

表 2.3: SIM7080G の主なパラメータ

| 項目 | 内容 |
|------------|---------------------------------|
| 対応通信方式 | LTE Cat.M1 / NB-IoT |
| 対応周波数帯 | LTE Band 1, 3, 8, 18, 19, 26 ほか |
| 通信プロトコル | TCP/IP, UDP, HTTP |
| 動作電圧 | 3.3~4.2 V |
| 消費電力 (待機時) | 数 mA 程度 |
| 動作温度範囲 | -40~85 °C |
| 用途 | M2M / IoT 通信 |

2.2.5 SIM カード

本研究では、LTE 通信に IIJ (インターネットイニシアティブ) 社が提供する SIM カードを使用した。本 SIM カードを用いることで、SIM7080G を介したモバイル通信が可能となる。これにより、設置場所に依存しないデータ収集が可能となり、携帯型測定デバイスとしての有効性を検証できる構成とした。

2.3 先行研究で使用した機器

本研究では、提案手法の有効性を検証するため、先行研究で使用された機器との比較を行った。本節では、先行研究で用いられた主な機器について説明する。

2.3.1 Arduino MKR WiFi 1010

Arduino MKR WiFi 1010 (図 2.4) は、SAMD21G18A マイクロコントローラを中心に、無線通信機能を担う NINA-W102 モジュールや、セキュア通信を実現する暗号チップ ATECC508 を搭載した小型開発ボードである。また、外部 SPI フラッシュメモリとして 2 MB の記憶領域を備えており、プログラムやデータの保存が可能である。先行研究では、室内環境計測用デバイスの制御用マイクロコントローラとして使用されていた。本モジュールの主なパラメータを表 2.4 に示す。



図 2.4: Arduino MKR WiFi 1010

表 2.4: Arduino MKR WiFi 1010 の主な仕様

| モデル No. | Arduino MKR WiFi 1010 |
|---------|--|
| CPU | ARM Cortex-M0+ |
| 最大動作周波数 | 48 MHz |
| 無線通信 | Wi-Fi (802.11 b/g/n), Bluetooth Low Energy |
| 対応プロトコル | TCP/IP, SSL/TLS |
| 通信方式 | UART, I2C, SPI, PWM |
| 動作電圧 | 3.3 V |
| 入力電圧 | 5 V (USB) / VIN 7~12 V |
| ボード寸法 | 約 61.5 × 25.0 mm |
| 対応温度 | 0~70 °C (一般動作範囲) |

2.3.2 CO₂ センサ MH-Z19C

MH-Z19C (図 2.5) は、Winsen 社が製造する NDIR 方式の CO₂ センサモジュールである。比較的安価であり、室内環境測定用途として広く利用されている。先行研究では、本センサを用いて CO₂ 濃度の測定が行われていた。本モジュールの主なパラメータを表 2.5 に示す。



図 2.5: MH-Z19C

表 2.5: MH-Z19C の主なパラメータ

| 項目 | 内容 |
|----------------------|----------------|
| 測定方式 | NDIR |
| CO ₂ 測定範囲 | 0~5000 ppm |
| 測定精度 | ±(50 ppm + 5%) |
| 応答時間 | <120 s |
| 動作電圧 | 4.5~5.5 V |
| 平均消費電流 | 約 60 mA |
| 通信方式 | UART / PWM |
| 用途 | 室内据え置き測定 |

2.3.3 溫度・湿度・気圧センサ BME680

BME680 (図 2.6) は, Bosch Sensortec 社製の環境センサであり, 温度, 湿度, 気圧に加えてガスセンサを内蔵している. 内蔵されたガスセンサは主に揮発性有機化合物 (VOC) に反応し, 室内空気中の汚染度を間接的に評価することが可能である. 先行研究では, これら複数の環境指標を組み合わせることで, 室内環境を総合的に評価する目的で本センサが使用されていた. 本モジュールの主なパラメータを表 2.6 に示す.



図 2.6: BME680

表 2.6: BME680 の主なパラメータ

| 項目 | 内容 |
|------|------------------------|
| 測定対象 | 温度・湿度・気圧・VOC |
| 通信方式 | I ² C / SPI |
| 動作電圧 | 1.7~3.6 V |
| 用途 | 環境モニタリング |

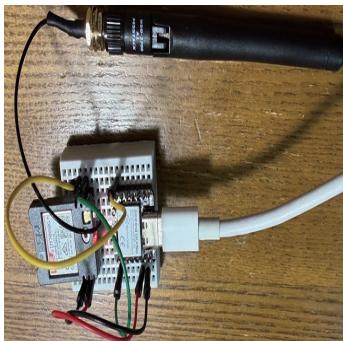
2.4 使用環境

2.4.1 Arduino IDE

本研究におけるソフトウェア開発には Arduino IDE を使用した。Arduino IDE は、マイクロコントローラ向けの統合開発環境であり、プログラムの作成、コンパイル、書き込みを一貫して行うことができる。本研究では Arduino IDE Version 2.3.7 を使用し、ESP32-C6 および各種センサ、通信モジュールの制御プログラムを開発した。また、Arduino CLI Version 1.3.1 が内部的に用いられており、ビルドおよび書き込み処理が行われている。

2.4.2 チャートくん

チャートくんは本研究室で作成された iOS アプリである。計測機器からサーバに送信されたデータを時系列グラフに表示できる。また、BLE (Bluetooth Low Energy) を使用して測定機器へ機器の Location,Wifi,ssid を送信し、接続先を読み書きすることができる。このチャートくんを使用して、測定機器を連続稼働させた時のバッテリの稼働時間を計測した。計測結果に関しては第 6 章 測定結果と評価に記入する。



(a) LTE を使用した試作機



(b) 測定機器表面



(c) 測定機器裏面

図 2.7: LTE を使用した測定機器

第3章 設計

3.1 設計の概要

本章では、本研究で試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスの設計について述べる。本研究では、日常生活のさまざまな環境において、利用者がデバイスを携帯しながら CO₂ 濃度を柔軟に測定できることを目的とし、小型化、省電力化、測定精度、および通信機能を考慮した設計を行った。

従来の CO₂ 測定機器は、据え置き型として室内環境の評価に用いられることが多く、設置位置が固定されるため、利用者の行動や移動に伴う空気環境の変化を直接的に把握することは困難であった。これに対し本研究では、利用者自身が測定機器を携帯することで、生活空間や移動環境における CO₂ 濃度の変化を把握できる測定システムの実現を目指した。

本デバイスは、CO₂ センサ、マイクロコントローラ、通信モジュール、および電源系から構成されており、測定データを一定時間間隔で自動的に取得する方式に加え、利用者がボタンを操作することで任意のタイミングで測定を行う方式の両方に対応した構成としている。取得した測定データは、屋内外を含むさまざまな環境からサーバへ送信されることを想定している。

このように、定期的な測定による環境変化の把握と、利用者の判断による即時的な測定を両立することで、携帯型 CO₂ 測定デバイスとしての実用性および柔軟性の向上を図った。

本章では、これらの目的を達成するために採用した設計方針、システム全体の構成、動作および通信の考え方、ならびに省電力化に関する設計上の考慮点について順に説明する。

3.2 設計方針

本研究における携帯型 CO₂ 測定デバイスの設計にあたっては、経済産業省および産業用ガス検知警報器工業会により制定された「二酸化炭素濃度測定器の選定等に関するガイドライン」を参考とした。CO₂ 濃度測定器に求められる基本的な性能として、以下の点が示されている。

- CO₂ の検知原理として光学式を用いていること
- 測定値の安定性を確保するための補正機能を有すること
- 屋外環境における CO₂ 濃度が 415～450 ppm 程度を示すこと
- 呼気を吹きかけた際に測定値が大きく増加すること

- 消毒用アルコールを近づけた場合に測定値が大きく変化しないこと

本研究では、これらの要件を満たすことを設計上の前提条件とし、センサの選定および測定デバイスの設計を行った。これらの指針を踏まえ、日常生活環境において利用者が携帯して使用する際にも、CO₂濃度を安定して測定できるデバイスの実現を目指し、センサの選定およびシステム設計を行った。その上で、携帯型CO₂測定デバイスとして、利用者が日常生活の中で無理なく使用できることを重視し、小型化、省電力化、測定精度、および通信機能のバランスを考慮した設計方針を採用した。特に、小型化、省電力化、測定精度、および通信機能のバランスを考慮し、実用性を意識した設計を行った。まず、小型化については、据え置き型測定器とは異なり、利用者が身につけて使用することを想定し、筐体サイズおよび重量を可能な限り抑える設計とした。これにより、屋内外を問わず携帯可能な測定デバイスの実現を目指した。次に、省電力化については、商用電源に依存せずバッテリ駆動での長時間利用を前提にした設計とした。測定および通信処理に伴う消費電力を抑えることを重視し、必要な処理のみを周期的に実行する構成を想定した。測定精度に関しては、室内外の換気状態を適切に評価するため、CO₂濃度を安定して測定できることを重視した。そのため、測定原理や補正機能を考慮し、環境変化の影響を受けにくい測定が可能となる設計とした。通信機能については、常時通信を行うのではなく、一定時間間隔で測定データを送信する方式を想定した。これにより、通信回数を抑え、省電力化を図る設計とした。

3.3 システム全体構成

本研究で設計した携帯型CO₂測定デバイスは、CO₂センサ、マイクロコントローラ、通信モジュール、および電源系から構成される。本節では、これらの構成要素の役割と、データおよび電力の流れについて説明する。

CO₂センサは、周囲環境中のCO₂濃度を測定し、その測定値をマイクロコントローラへ出力する。マイクロコントローラは、測定データの取得および管理を行うとともに、通信制御や省電力制御を担う中核的な役割を果たす。

本デバイスでは、測定方式として一定時間間隔で自動的に測定を行う周期測定と、利用者がボタンを操作することで任意のタイミングで測定を行う任意測定の二つの方式を採用した。周期測定により、時間的なCO₂濃度変化を継続的に把握することが可能となり、任意測定により、利用者が特定の場所や状況において即時的に測定を行うことが可能となる。

取得された測定データは、通信モジュールを介してサーバへ送信されることを想定している。通信方式については、屋内外や移動環境での利用を考慮し、特定の設置環境に依存しない構成とした。これにより、測定場所に制約されることなく、継続的なデータ収集が可能となる。

電源系については、小型バッテリによる駆動を前提とし、測定および通信処理が行われていない時間帯には、各構成要素が待機状態へ移行する構成とした。このような構成により、携帯性と省電力性を両立したCO₂測定システムの実現を目指した。

3.4 動作設計

本研究で設計した携帯型 CO₂ 測定デバイスは、周期的な動作と利用者操作による動作の両方に対応した構成とした。本節では、デバイス全体の基本的な動作の流れと、その設計上の考え方について述べる。

本デバイスは、起動後に周囲環境の CO₂ 濃度を測定し、取得した測定データを内部で保持した後、必要に応じて通信処理を行う。この一連の動作は、一定時間間隔で自動的に繰り返される周期動作として設計した。これにより、長時間にわたる環境変化を継続的に把握することが可能となる。

一方で、利用者が特定の場所や状況において即時的に CO₂ 濃度を確認したい場合に対応するため、ボタン操作による任意測定機能を実装した。ボタンが押下されると、周期測定とは独立して測定処理が実行され、その時点の CO₂ 濃度が取得される。この測定結果も、通常の測定データと同様に必要に応じて通信処理が行われる。

測定および通信処理が完了した後は、デバイス全体が待機状態へ移行する。この待機状態では、消費電力の大きい処理を停止することで、バッテリ消費を抑える設計とした。本研究では、常時動作による連続測定ではなく、測定・通信・待機を繰り返す周期動作を基本とし、必要に応じて任意測定を行う構成とすることで、省電力性と実用性の両立を図った。

3.5 通信設計

本研究では、携帯型 CO₂ 測定デバイスとしての利用を想定し、通信機能についても省電力性と実用性の両立を重視した設計とした。本節では、通信方式および通信タイミングに関する設計上の考え方を述べる。通信設計においては、測定データを常時送信する構成ではなく、一定時間間隔でまとめて送信する方式を想定した。これは、通信処理がデバイス全体の消費電力に与える影響が大きいことを考慮し、不要な通信回数を削減することを目的としている。また、本デバイスは屋外環境や移動中での利用を想定しているため、特定の通信環境に依存しない構成とした。これにより、自宅や大学といった屋内環境に限らず、車内や外出先においても測定データの送信が可能となる設計とした。

通信処理は、測定データの取得後に必要に応じて実行されるものとし、通信が不要な時間帯においては、通信機能を待機状態とする設計を採用した。このような通信設計により、携帯型デバイスとしての利便性を確保しつつ、バッテリ消費の低減を図ることを目指した。

3.6 省電力設計

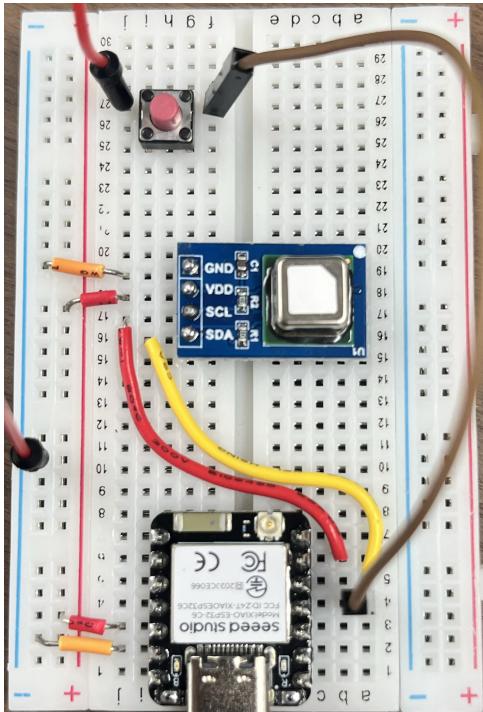
携帯型 CO₂ 測定デバイスとして長時間利用を可能とするため、本研究では省電力性を重視した設計を行った。本節では、デバイス全体の消費電力を抑えるために考慮した設計上の方針について述べる。本デバイスはバッテリ駆動を前提としているため、常時動作による連続測定ではなく、測定・通信・待機を繰り返す周期動作を基本とした設計とした。これにより、不要な処理が実行される時間を最小限に抑え、全体の消費電力低減を図ることを目的とした。

省電力設計においては、特に通信処理が消費電力に与える影響が大きい点を考慮した。そのため、測定ごとに通信を行う構成は採用せず、一定時間ごとに測定データをまとめて送信する方式を想定した。これにより、通信回数の削減とバッテリ消費の低減を両立する設計とした。また、測定および通信処理が完了した後は、デバイス全体が待機状態となることを前提とし、動作していない時間帯の消費電力を抑える設計とした。このような省電力設計により、携帯型デバイスとしての実用性を確保しつつ、長時間の連続利用を可能とすることを目指した。

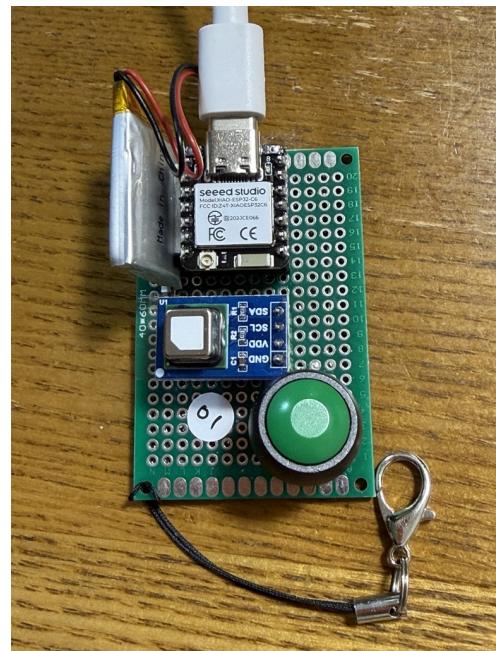
第4章 測定機器の実装

4.1 測定機器1の実装

はじめに、ESP32-C6 と SCD41 を用いた最小構成のプロトタイプとして、ブレッドボード上に ESP32-C6, SCD41, およびプッシュボタンのみを接続した試作機を作成した（図～）。本プロトタイプは、CO₂ 濃度の測定およびサーバへのデータ送信が可能であるかを確認することを目的としている。この試作により、ESP32-C6 と SCD41 間の I²C 通信による CO₂ 濃度測定、ならびに Wi-Fi 通信を用いた測定データのサーバ送信が正常に行えることを確認した。これらの結果を踏まえ、本構成を基に測定機器1を作成した。測定機器1は、ESP32-C6（Wi-Fi 通信機能を搭載したマイクロコントローラ）、SCD41（CO₂ センサ）、プッシュボタン、およびリチウムポリマバッテリから構成されている。ESP32-C6 と SCD41 は I²C 通信によって接続されており、ESP32-C6 が測定タイミングの制御およびデータ処理を行う。プッシュボタンは、図～に示すように抵抗を用いたプルアップ回路として構成しており、ボタンが押されたタイミングで CO₂ 濃度の測定およびサーバへのデータ送信を実行する。測定および通信処理が完了した後、ESP32-C6 は DeepSleep モードへ移行し、消費電力を抑える構成とした。DeepSleep の詳細な動作については後述する。動作確認は、まず USB 給電によって行い、その後 ESP32-C6 裏面に実装されたリチウムポリマバッテリ用ソケット（図 4.1）にバッテリを接続した状態でも正常に動作することを確認した。なお、測定機器1の外形寸法は、約 40 mm × 60 mm である。



(a) プロトタイプ



(b) 測定機器 1

図 4.1: プロトタイプおよび測定機器 1 の外観

4.2 測定機器 2,3 の実装

測定機器 2 は、測定機器 1 の基本構成を維持したまま、利用者への視覚的なフィードバックを目的として LED を追加した試作機である（図 4.2）。本機器では、測定した CO₂ 濃度に応じて LED の色を変化させることで、数値を直接確認しなくとも換気状態を把握できる仕組みを実装した。また、本機器は Wi-Fi 通信を用いて測定データをサーバへ送信する構成であるため、屋外環境で使用する場合にはスマートフォンのテザリング等を利用する必要がある。そこで、ESP32-C6 とスマートフォンを Bluetooth 接続し、スマートフォンから SSID およびパスワードを ESP32-C6 に登録する機能を実装した。これにより、利用環境に応じて複数の Wi-Fi ネットワークへ接続可能な構成とした。測定機器 2 の外形寸法は、約 50 mm × 70 mm である。

測定機器 3 は、測定機器 2 の機能を維持したまま、携帯性の向上を目的として筐体の小型化を行った試作機である（図 4.2）。ESP32-C6 の表面および裏面の両方に部品を配置する構成とすることで、部品配置の高密度化を図った。その結果、測定機器 1 と比較してサイズを大幅に縮小することができた。

測定機器 3 の外形寸法は、約 30 mm × 40 mm である。この小型化により、日常生活において持ち運びやすい測定機器を実現した。



(a) 測定機器 2



(b) 測定機器 3

図 4.2: 測定機器 2 および測定機器 3 の外観

4.3 測定機器 3 の課題

一方で、測定機器 3 では、Bluetooth 接続やスマートフォンのテザリング設定など、利用者に対して事前の操作や設定を要求する点が課題として明らかになった。特に、高齢者や子どもといった情報機器の操作に不慣れな利用者にとっては、設定作業が負担となる可能性がある。また、利用環境によっては Wi-Fi 接続が不安定となる場合があり、通信の信頼性という点でも課題が残った。これらの点から、より簡便かつ安定した通信方式の導入が必要であると考えられた。

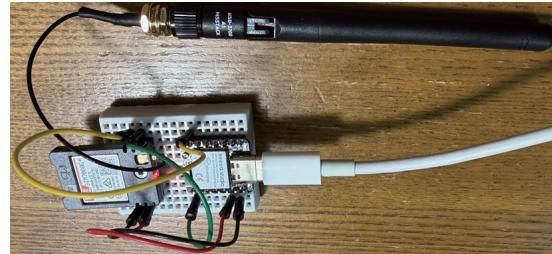
4.4 LTE 通信方式の検討

前節で述べた課題を解決するため、Wi-Fi 環境に依存しない通信方式としてセルラー通信の導入を検討した。セルラー通信を用いることで、屋内外を問わず安定した通信が可能となり、利用者による事前設定を不要とすることが期待できる。本研究では、低消費電力で IoT 用途に適した LTE 通信方式に着目し、LTE 通信を用いた測定機器の開発を行った。

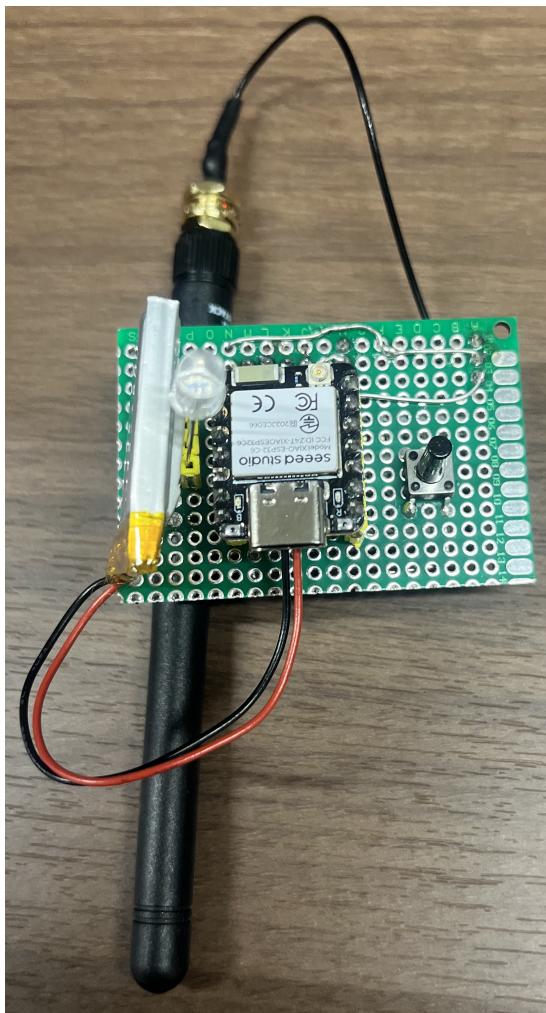
4.5 測定機器 4 の実装

測定機器 4 では、測定機器 2 および 3 で課題となった通信方式の問題を解決するため、LTE 通信モジュールである SIM7080G を搭載した。（図 4.3）これにより、Wi-Fi 環境やスマートフォンのテザリングに依存せず、測定機器単体でサーバへのデータ送信が可能と

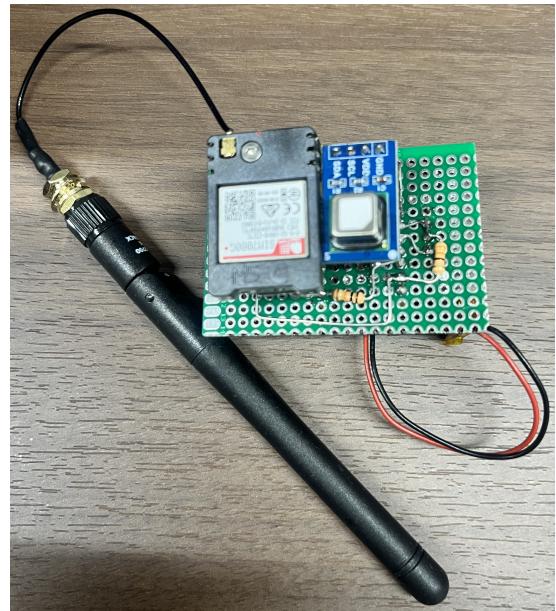
なった。本構成では、利用者が通信設定を行う必要がなくなり、操作負担を大幅に軽減できる。その結果、高齢者や子どもを含む幅広い利用者にとって扱いやすい CO₂ 測定機器の実現が可能となった。



(a) LTE を使用した試作機



(b) 測定機器 4 表面



(c) 測定機器 4 裏面

図 4.3: LTE を使用した測定機器

4.6 DeepSleep を用いた省電力制御

本研究で開発した CO₂ 測定デバイスは、携帯型デバイスとして長時間動作することが求められるため、消費電力の低減が重要な設計要件となる。そこで、本研究では ESP32-C6

が備える DeepSleep 機能を用いた省電力制御を採用した。DeepSleep とは、マイクロコントローラの動作を一時的に停止し、必要最小限の回路のみを動作させる低消費電力モードである。この状態では、CPU や無線通信機能などが停止されるため、通常動作時と比較して消費電力を大幅に削減することが可能である。

測定機器 1~3 では、通常時は DeepSleep 状態とし、ユーザがボタンを押した際に DeepSleep 状態から復帰する構成とした。復帰後は CO₂ 濃度の測定を行い、測定データをサーバへ送信した後、再び DeepSleep 状態へ移行する。このような動作により、測定および通信を行う時間を最小限に抑え、バッテリ消費を抑制している。以上の構成により、リチウムポリマーバッテリによる駆動においても、携帯型 CO₂ 測定デバイスとして実用的な動作時間を確保することが可能となった。

4.7 LTE 通信を用いたデータ送信

測定機器 3 では、セルラー通信モジュールである SIM7080G を用いて LTE 回線によるデータ通信を行っている。SIM7080G は、LTE 回線を利用したデータ通信が可能なモジュールであり、広い通信エリアを有することから、屋内外を問わず安定した通信を行うことができる。

測定機器 3 では、ESP32-C6 と SIM7080G を接続し、測定した CO₂ 濃度データを LTE 回線を介してサーバへ送信する構成とした。この方式により、Wi-Fi の SSID やパスワードの設定、スマートフォンによるテザリング操作が不要となり、測定機器単体で通信が可能となっている。以上の構成により、測定環境や利用者の通信環境に依存せず、安定した CO₂ 濃度データの取得が可能となった。

第5章 測定環境と測定方法

5.1 概要

本章では、本研究で試作した小型 CO₂ 測定デバイスを用い、従来の据え置き型 CO₂ センサと比較して、同一環境下において同様の CO₂ 濃度変化を捉えることが可能であるかを評価する。また、携帯型測定デバイスとして、日常生活環境や移動環境においても安定した CO₂ 濃度測定が行えるかを検証することを目的とする。

はじめに、空間的に CO₂ 濃度のばらつきが生じやすい環境として、福岡県赤村に設置されているドームハウスを測定対象とした。ドームハウス内には、床付近から天井付近にかけて高さ方向に据え置き型 CO₂ センサを 35 台設置し、空間全体の CO₂ 濃度分布を詳細に取得した。これらの測定結果を基準として、本研究で試作した小型 CO₂ 測定デバイスを各据え置き型センサの近傍に配置し、同一高さ・同一環境における測定値の比較を行った。これにより、携帯型測定デバイスが据え置き型センサと同様の CO₂ 濃度変化の傾向を捉えられるかを検証した。

次に、実利用環境における有効性を評価するため、公共交通機関である電車内において CO₂ 濃度の測定を行った。電車内では、ドア付近およびドアから離れた位置の異なる 2 箇所において測定を実施し、乗客の乗降やドア開閉による換気状況の変化が CO₂ 濃度に与える影響を評価した。

本章では、これらの測定に用いた測定環境および測定方法について詳述し、次章において示す測定結果および評価の前提条件を整理する。

5.2 測定環境

5.2.1 赤村ドームハウスにおける測定環境

本研究で測定対象とした赤村ドームハウスは、福岡県田川郡赤村に位置する多目的利用施設であり、地域活動や宿泊体験、ワークショップ等に利用されている建築物である。本施設は半球状に近いドーム型構造を有しており、内部は天井高が高く、床面から天井付近まで連続した一つの空間として構成されている。ドームハウス内部は、壁面や天井に仕切りが少なく、空気の流れや滞留が空間全体の構造に大きく影響される特徴を持つ。このような構造は、換気条件や人の滞在状況によって CO₂ 濃度の空間分布が生じやすいと考えられ、室内空気質の評価を行う測定環境として適している。本測定では、ドームハウス内の高さ方向における CO₂ 濃度分布を把握するため、先行研究で使用された据え置き型 CO₂ センサを合計 35 台設置した。各センサは、床付近から階段部、2 階部分、および天井付近に至るまで、異なる高さ位置に配置されており、空間全体の CO₂ 濃度分布を詳細に取得できる構成とした。

また、各据え置き型 CO₂ センサの近傍に、本研究で試作した小型 CO₂ 測定デバイスを順次配置し、同一環境・同一高さにおける測定値の比較を行った。これにより、多数の据え置き型センサによる測定結果を基準として、携帯型デバイスによる測定が空間内の換気状態をどの程度把握できるかを評価した。図 5.1a にドームハウスの外観を、図 5.1b に内部の様子を示す。



(a) ドームハウスの外観



(b) ドームハウスの内観

図 5.1: ドームハウスの環境

5.2.2 電車内における測定環境

本測定は、実際の公共交通機関における空気環境を評価することを目的として、走行中の電車内において実施した。測定対象は、JR 九州 鹿児島本線を走行する一般的な通勤型車両とし、香椎駅から鳥栖駅までの区間において測定を行った。測定に使用した車両は 813 系電車であり、車内はロングシート構成を基本とし、各車両には複数のドアおよび窓が設置されている。通勤時間帯に運行される車両であるため、乗客の乗降や車内の人員密度の変化が生じやすい環境である。

図 5.2 に、測定を行った電車内の概略図を示す。図中の緑色部分はドア位置、青色部分は窓位置を表している。本研究では、車内における位置の違いが二酸化炭素 (CO₂) 濃度に与える影響を評価するため、異なる 2箇所に携帯型測定デバイスを装着した人を配置した。

CS1 は、ドアから離れた座席位置に着席した被験者の腰部に装着し、乗客の乗降や外気流入の影響を比較的受けにくい位置における CO₂ 濃度を測定した。一方、CS2 はドア付近の座席に着席した被験者の腰部に装着し、乗客の乗降やドア開閉による外気流入の影響を受けやすい位置での CO₂ 濃度を測定した。いずれの測定においても、被験者は着席状態を維持しており、測定デバイスは腰部に装着することで、歩行や立位による影響を排除した条件で測定を行った。

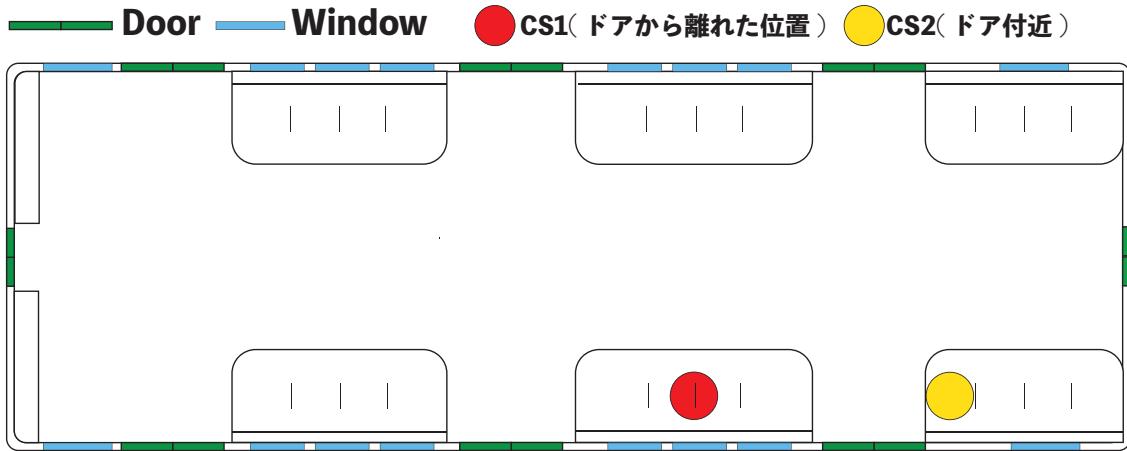


図 5.2: 電車内の環境

5.3 測定方法

5.3.1 センサの基礎特性確認

実環境における測定に先立ち、使用する CO₂ 測定デバイスが、CO₂ 測定機器の選定ガイドラインに示される基本的な応答特性を有しているかを確認するため、アルコールおよび呼気に対する反応を評価する基礎的な測定を実施した。本測定では、12 時に測定を開始し、30 秒間隔で CO₂ 濃度を記録した。測定開始から 20 分後に、アルコールを入れたコップおよびアルコールを浸したティッシュを測定デバイス近傍に設置し、約 10 分間静置した。その後、測定開始から 40 分後に、測定デバイスに向けて 1 分間連続して呼気を吹きかけた。本測定の結果および評価については、次章において測定結果と併せて示す。

5.3.2 据え置き型センサとの比較測定方法

据え置き型 CO₂ センサと携帯型 CO₂ 測定デバイスの測定値の整合性を確認するため、両センサを同一環境下に設置し、CO₂ 濃度の測定を行った。測定は 13 時 30 分から 24 時 30 分まで実施し、両センサとともに 5 分間隔で CO₂ 濃度を記録した。本測定の結果および評価については、次章において示す。

5.3.3 赤村ドームハウスにおける測定方法

ドームハウス内における CO₂ 濃度分布および換気状態を把握するため、据え置き型 CO₂ 測定器と、本研究で試作した小型 CO₂ 測定デバイスを用いた測定を行った。本測定では、ドームハウス内部の高さ方向に着目し、床付近から天井付近にかけて CO₂ 濃度がどのように変化するかを評価することを目的とした。はじめに、先行研究で使用された据

え置き型 CO₂ 測定器を用いて測定を行った。据え置き型測定器は合計 35 台使用し、螺旋階段および 2 階部分に設置された棚を含め、床面付近から天井付近までの高さ方向に配置した。各測定器には EXAKA1 から EXAKA35 の識別子を付与し、EXAKA1 を最下部、EXAKA35 を最上部とした。測定は同一時間帯に実施し、各測定器から得られた CO₂ 濃度データを用いて、ドームハウス内における高さ方向の CO₂ 濃度分布を把握した。

次に、据え置き型測定器による測定結果を基準として、本研究で試作した小型 CO₂ 測定デバイスによる測定を行った。本測定では、多数のセンサを同時に設置する方法ではなく、利用者が携帯型デバイスを用いて任意の位置で測定を行う状況を想定し、小型 CO₂ 測定デバイスを携帯した状態で、ドームハウス内の異なる高さ位置において逐次的に CO₂ 濃度を測定した。比較測定の手順として、小型 CO₂ 測定デバイスを各据え置き型測定器の直近に配置し、同一高さ・同一空間における CO₂ 濃度を測定した。測定終了後、小型測定デバイスを一段上の設置位置へ移動させ、同様の測定を繰り返した。この操作を EXAKA1 から EXAKA35 までの全ての据え置き型測定器に対して順に実施し、合計 35 箇所における比較測定を行った。測定時には、小型 CO₂ 測定デバイスと据え置き型 CO₂ 測定器が可能な限り近接するよう配置し、同一高さ・同一環境条件における CO₂ 濃度を測定できるよう配慮した。小型測定デバイスによる測定は、各高さ位置において測定ボタンを操作することで実施した。



(a) 階段



(b) 階段の上部

図 5.3: プロトタイプおよび測定機器 1 の外観

5.3.4 電車内における測定方法

測定は、JR 九州 鹿児島本線において、香椎駅 20 時 35 分発の下り普通列車（813 系）に乗車して実施した。本測定では、一定時間間隔による連続測定ではなく、各駅停車時にお

けるドア開閉の前後に着目した測定方法を採用した。具体的には、各駅においてドアが開く直前およびドアが閉まった直後のタイミングで携帯型 CO₂ 測定デバイスによる測定を行った。これにより、乗客の乗降および外気流入が車内の CO₂ 濃度に与える影響を評価した。

図 5.4 に、電車内測定時における携帯型センサの装着位置を示す。測定中は、CS1 および CS2 のいずれにおいても、被験者は着席状態を維持し、測定デバイスは被験者の腰部に装着した状態で測定を行った。

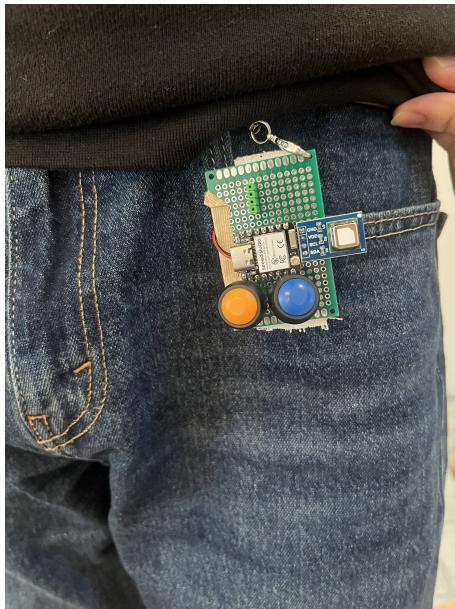


図 5.4: 電車内測定時の携帯型センサの位置

5.4 評価方法

本研究で実施した各測定により得られた結果については、赤村ドームハウスおよび電車内における測定結果に基づき、従来の据え置き型 CO₂ 測定器との比較や、測定値の時間変化の傾向に着目して評価を行う。また、省電力性能については、バッテリ駆動時の連続稼働時間を指標として評価する。評価の詳細は次章において測定結果と併せて示す。

第6章 測定結果と評価

6.1 概要

本章では、第5章までに述べた測定方式および試作した小型CO₂測定デバイスを用いて実施した各種測定実験の結果を示し、携帯型測定デバイスとしての有効性および実用性について評価を行うことを目的とする。特に、本研究で試作した携帯型CO₂測定デバイスが、据え置き型CO₂測定機器と比較して、環境中のCO₂濃度変化を適切に捉えることができるか、また実際の生活環境や移動環境において利用可能であるかに着目して検討を行う。はじめに、実環境における測定に先立ち、測定機器の基礎特性確認を行う。具体的には、CO₂測定機器の選定ガイドラインに基づき、アルコールおよび呼気に対する応答特性を評価し、本研究で使用した測定デバイスがCO₂濃度測定を目的とした機器として適切な特性を有しているかを確認する。この結果を踏まえ、以降の実環境測定において本測定デバイスを用いる妥当性を示す。次に、据え置き型CO₂測定機器との比較測定を行い、両者を同一環境下に設置した際のCO₂濃度の時間変化を比較する。長時間にわたる測定結果を基に、携帯型測定デバイスが据え置き型測定機器と同様のCO₂濃度変化の傾向を捉えられているかを評価し、携帯型デバイスとしての測定信頼性について検討する。さらに、空間的にCO₂濃度のばらつきが生じる環境として、福岡県赤村に設置されたドームハウスを対象に測定を行う。ドームハウス内には、床付近から天井付近にかけて多数の据え置き型CO₂測定機器を設置し、高さ方向におけるCO₂濃度分布を把握する。その上で、携帯型CO₂測定デバイスを用いた測定結果と比較し、空間内における相対的なCO₂濃度分布や換気が不十分な領域を、携帯型デバイス単体で把握できるかを評価する。また、実際の生活環境および移動環境における測定例として、電車内におけるCO₂濃度の時間変化を測定する。異なる位置において測定を行うことで、車内における換気状況や混雑状況の変化がCO₂濃度に与える影響を明らかにし、携帯型測定デバイスが移動環境においても有効に機能するかを検討する。加えて、本章では測定機器の省電力性能および小型化に関する評価を行う。通信方式の異なる測定機器を用いて、バッテリ駆動時の稼働時間を比較することで、通信方式が消費電力に与える影響を明らかにする。また、段階的に試作した測定機器1～4の外形寸法を整理し、小型化の進展について定量的に評価することで、携帯型CO₂測定デバイスとしての実用性を検討する。以上の評価を通じて、本研究で提案する携帯型CO₂測定デバイスが、据え置き型測定機器と同様にCO₂濃度変化を把握可能であり、かつ日常生活環境や移動環境において利用可能な測定手段であることを示す。以下では、各測定環境における測定結果および評価について、順に詳述する。

6.1.1 測定機器の基礎特性確認結果および評価

図 6.1 に、アルコールおよび呼気に対する CO_2 濃度の測定結果を示す。測定開始から 20 分後に、アルコールを入れたコップおよびアルコールを浸したティッシュを測定デバイス近傍に設置したが、この期間において CO_2 濃度に顕著な変化は認められなかった。

一方、測定開始から 40 分後に、測定デバイスに向けて 1 分間連続して呼気を吹きかけた際には、 CO_2 濃度が急激に上昇する挙動が確認された。この上昇は呼気付与の直後に生じており、呼気中に含まれる CO_2 に対して測定デバイスが応答していることを示している。

以上の結果から、本研究で使用した CO_2 測定デバイスは、アルコール蒸気に対しては反応せず、呼気中の CO_2 に対しては明確に反応する挙動を示した。この挙動は、 CO_2 測定機器の選定ガイドラインに示される基本的な応答特性と整合しており、本デバイスが CO_2 濃度測定を目的とした測定機器として適切な特性を有していることが確認できる。したがって、本研究では以降の実環境測定において、本測定デバイスを用いて CO_2 濃度の測定を行うこととした。

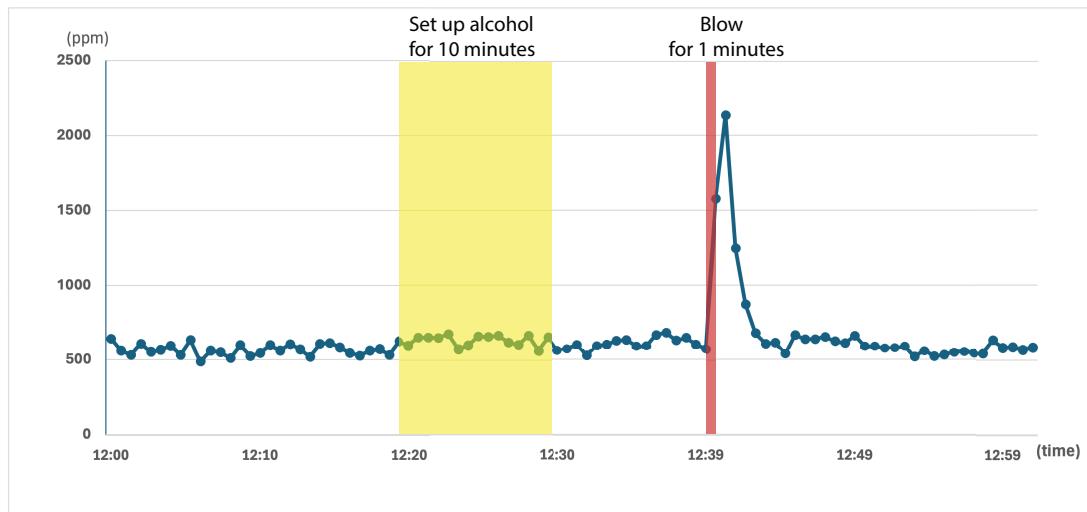


図 6.1: アルコール、呼気への反応結果

6.2 据え置き型測定機器との測定値比較

本節では、据え置き型 CO_2 測定機器と、本研究で試作した携帯型 CO_2 測定デバイスを同一環境下に設置し、両者の測定値の時間変化を比較した結果について述べる。測定は 13 時 30 分から 24 時 30 分までの約 11 時間にわたり実施し、両測定機器とともに 5 分間隔で CO_2 濃度を測定した。

図 6.2 に、据え置き型測定機器および携帯型測定機器による CO_2 濃度の時間変化を示す。測定開始直後には、両測定機器ともに高い CO_2 濃度を示しており、その後、時間の経過とともに CO_2 濃度が低下する傾向が確認された。なお、測定開始直後に観測された高い CO_2 濃度は、測定機器設置作業時に呼気が測定機器近傍にかかったことによる一時的な影響であると考えられる。この低下傾向は、両測定機器においてほぼ同時に観測されている。また、18 時 30 分頃には、両測定機器の測定値において CO_2 濃度の上昇が確認

され、その後再び低下する挙動が見られた。このような CO_2 濃度の増減のタイミングは、据え置き型測定機器と携帯型測定機器の間で概ね一致しており、両者が同一環境における CO_2 濃度変化を捉えていることが分かる。

一方で、携帯型測定機器の測定値は、据え置き型測定機器と比較して一部の時間帯においてわずかな差が見られる。これは、測定機器の設置位置や個体差、応答特性の違いによる影響であると考えられる。しかしながら、 CO_2 濃度の上昇および低下といった時間変化の傾向は両者で概ね一致している。

以上の結果から、本研究で試作した携帯型 CO_2 測定デバイスは、据え置き型 CO_2 測定機器と同様の CO_2 濃度変化の傾向を示すことが確認できた。このことから、携帯型測定機器は同一環境下において CO_2 濃度の時間的な変化を把握する用途において、据え置き型測定機器と同等の情報を取得可能であると考えられる。

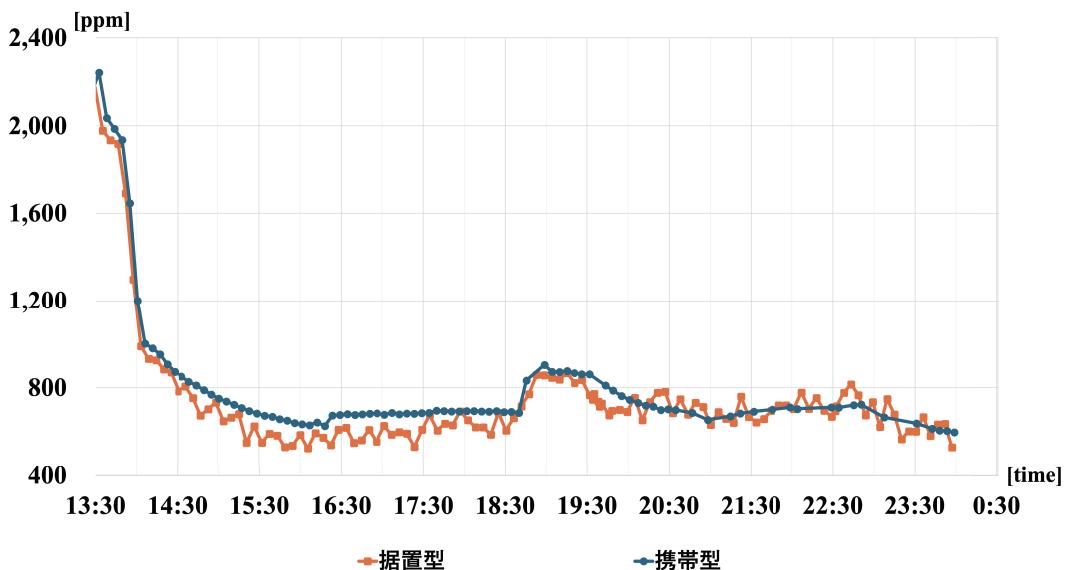


図 6.2: CO_2 濃度の比較

6.3 空間的 CO_2 濃度分布環境における測定結果

6.3.1 ドームハウス内の据え置き型 CO_2 測定機器による測定結果

据え置き型 CO_2 測定機器を用いてドームハウス内の CO_2 濃度分布を測定した結果を図 6.3 に示す。据え置き型測定機器による測定結果では、階段下から階段上部、さらに 2 階上部へと高さが増加するにつれて、 CO_2 濃度が段階的に上昇する傾向が確認された。特に、階段上部および 2 階上部では、階段下部と比較して高い CO_2 濃度が観測されており、ドームハウス内部において CO_2 が上部に滞留しやすい空間構造を有していることが示唆される。この結果は、空気の対流や換気経路の影響により、高さ方向に CO_2 濃度の偏りが生じている可能性を示している。

6.3.2 ドームハウス内の小型 CO₂ 測定デバイスによる測定結果

次に、本研究で試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスを用いて、同様にドームハウス内の高さ方向における測定を行った。その結果、小型デバイスにおいても、据え置き型 CO₂ 測定機器と同様に、高さの増加に伴って CO₂ 濃度が上昇する傾向が確認された。小型デバイスによる測定値は、据え置き型測定機器の測定値と比較して全体的に高い値を示しているが、これはキャリブレーション条件や測定環境の違いによる影響であると考えられる。一方で、階段上部および 2 階上部において CO₂ 濃度が高くなるという相対的な変化の傾向は、据え置き型測定機器の結果と概ね一致している。

6.3.3 ドームハウス内の据え置き型測定機器との比較評価

図 6.3 は、据え置き型 CO₂ 測定機器および携帯型 CO₂ 測定デバイスによる測定結果を、各測定点を 5 点ずつ平均化し、高さ方向に 7 区分して比較したものである。本図より、両者の測定結果は絶対値こそ異なるものの、高さ方向に沿った CO₂ 濃度の遷移の仕方が類似していることが分かる。特に、階段下部から階段上部にかけての上昇傾向、および 2 階上部における高濃度領域の検出は、両者で共通して確認された。このことから、小型 CO₂ 測定デバイスは、多数の据え置き型測定機器を用いなくとも、空間内における CO₂ 濃度分布の特徴や、相対的に換気が不十分な領域を把握できる可能性が示された。以上の結果より、本研究で試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスは、利用者が任意の位置で測定を行うことで、空間内の危険性が高い領域を簡便に察知する手段として有効であると考えられる。

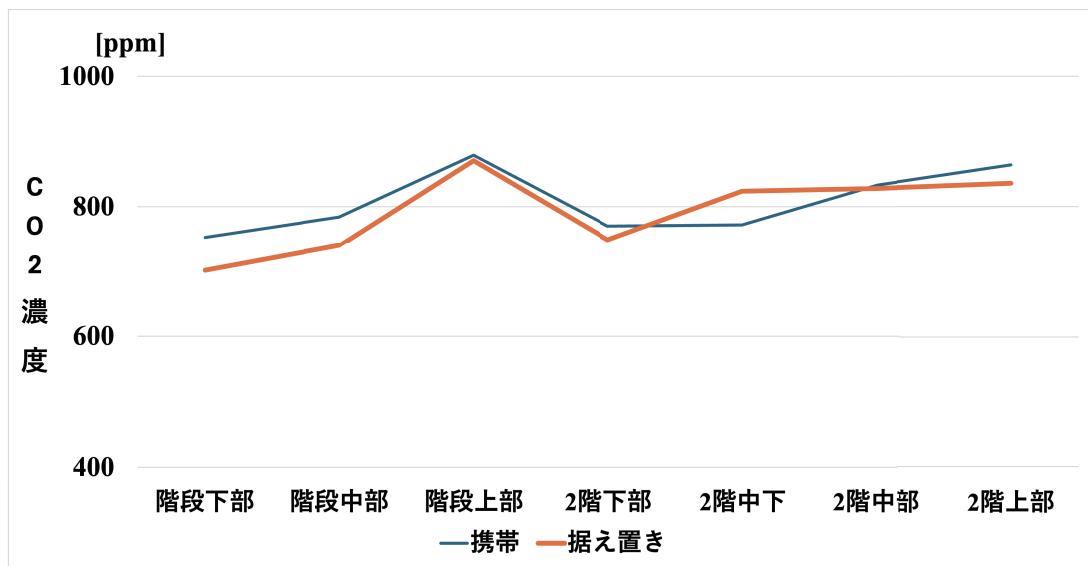


図 6.3: 据え置き型と携帯型の CO₂ 濃度比較

6.4 電車内における CO₂ 濃度変化

本節では、JR 九州 鹿児島本線において実施した電車内測定について、鳥栖行き普通列車（行き）および門司港行き普通列車（帰り）の 2 つの測定結果を示し、乗客数の変化、

ドア開閉状況、および測定位置の違いがCO₂濃度に与える影響について考察する。

6.4.1 行き（鳥栖行き普通列車）における測定結果

行きの測定は、鳥栖行き普通列車において実施した。測定結果を図6.4にしめす。測定は1両目において、進行方向最後部のドア付近に位置し、携帯型CO₂測定デバイスを腰部に装着した状態で行った。20時32分に九産大前駅から乗車し、21時33分に鳥栖駅へ到着するまでの区間を対象とした。

測定開始直後（20:32～20:40頃）は、車内の乗客数が少なく、CO₂濃度は比較的低い値で推移していた。その後、博多駅（20:47停車）において多数の乗客が乗車したことにより、発車直後からCO₂濃度の上昇が確認された。この上昇は、乗客の増加に伴う呼気由来のCO₂発生量の増加によるものと考えられる。

一方、竹下駅（20:51）、笹原駅（20:55）、南福岡駅（20:58）以降では、乗客が段階的に降車したことに伴い、CO₂濃度は徐々に低下する傾向を示した。特に、原田駅（21:17停車）では、列車の待ち合わせのためドアが長時間開放されており、この区間においてCO₂濃度の顕著な低下が観測された。これは、ドア開放による外気流入が車内換気を大きく促進した結果であると考えられる。

以上より、行きの測定結果からは、乗客数の増減およびドア開閉状況が電車内のCO₂濃度に直接的な影響を与えることが確認できた。

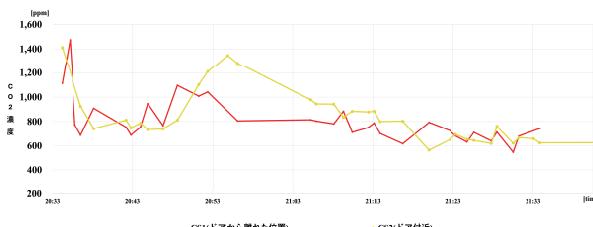


図 6.4: 電車内のCO₂濃度変化

6.4.2 帰り（門司港行き普通列車）における測定結果

帰りの測定は、門司港行き普通列車において実施した。測定結果を図6.5に示す。測定位置は9両目の進行方向先頭側ドア付近とし、21時41分に鳥栖駅から乗車し、22時43分に九産大前駅へ到着するまで測定を行った。乗車時点での車内人数は約4名と少なく、発車までの間はドアが開放された状態であった。

測定開始直後は、車内の乗客数が少ないと加え、ドアが開放されていたため、CO₂濃度は500～600 ppm程度の低い値で安定して推移した。その後、各駅での停車と発進を繰り返す中でも、乗客数の変化が小さい区間ではCO₂濃度に大きな変動は見られなかった。

一方、博多駅（22:26停車）では、多くの乗客が乗車したことにより、発車後にCO₂濃度が急激に上昇する挙動が確認された。さらに、ドア付近で会話をを行う乗客が存在した区間では、局所的にCO₂濃度が高くなる傾向が見られた。その後、香椎駅（22:38停車）では、乗客の降車およびドア開放が長時間続いたことにより、CO₂濃度は再び低下した。

このように、帰りの測定結果からは、車内人数が少ない状態では CO_2 濃度が低く保たれる一方で、主要駅における大量乗車やドア付近での会話といった局所的要因により、短時間で CO_2 濃度が上昇することが確認された。

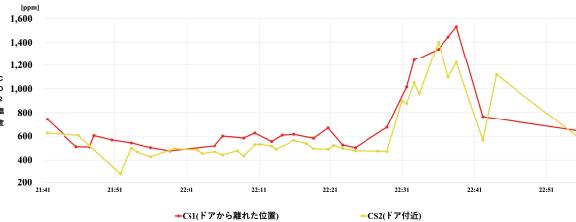


図 6.5: 電車内の CO_2 濃度変化

6.4.3 ドア付近とドアから離れた位置における CO_2 濃度の比較

本測定では、電車内における換気状況の位置依存性を評価するため、ドア付近 (CS2) およびドアから離れた位置 (CS1) の 2 箇所において CO_2 濃度の測定を行った。両測定点はいずれも同一車両内に位置しているが、ドア開閉や外気流入の影響の受けやすさが異なる点が特徴である。

行きおよび帰りの測定結果を通して、両測定点の CO_2 濃度は概ね同様の増減傾向を示したものの、濃度の絶対値には明確な差が確認された。特に、多くの時間帯において、ドアから離れた位置 (CS1) の CO_2 濃度が、ドア付近 (CS2) よりも高くなる傾向が見られた。

例えば、行きの測定においては、博多駅通過後の混雑区間において、CS1 では 1300 ppm を超える値が観測された一方、CS2 ではそれより低い値で推移している。これは、ドア付近では停車時のドア開閉に伴って外気が流入しやすく、局所的な換気が促進されるのにに対し、ドアから離れた位置では外気流入の影響を受けにくく、呼気由来の CO_2 が滞留しやすいためであると考えられる。

また、各駅停車時に着目すると、ドア開放直後に CO_2 濃度が低下する挙動はドア付近 (CS2) でより顕著に現れており、ドアから離れた位置 (CS1) では低下量が小さい、あるいは時間遅れを伴って現れる場合があった。この結果は同一車両内であっても換気効果が一様ではなく、位置によって大きく異なることを示している。以上の結果から、電車内においてはドア付近では比較的換気が行われやすい一方で、ドアから離れた座席付近では CO_2 濃度が高くなりやすい傾向があることが明らかとなった。本研究で試作した携帯型 CO_2 測定デバイスを用いることで、このような車内の位置による換気状況の違いを利用者が把握できる可能性が示された。

6.5 省電力性能の評価結果

本節では、測定機器 3 および測定機器 4 において、バッテリ駆動時の稼働時間を測定し、通信方式の違いが消費電力に与える影響について評価を行う。各測定機器には容量 250 mAh のリチウムポリマーバッテリを使用し、測定間隔は 5 分とした。測定時には CO_2 濃度の取得および必要な通信処理を行い、それ以外の時間は ESP32-C6 を DeepSleep 状

態へ移行させる構成とした。この条件の下で、バッテリ電圧の時間変化および連続稼働時間を測定した。LTE 通信モジュール SIM7080G を搭載した測定機器 4 では、0 時から 15 時までの約 15 時間にわたり連続動作することを確認した。図 6.6 に示すように、動作開始直後は約 4.1 V 付近であったバッテリ電圧が、時間の経過とともに徐々に低下し、動作終了時には約 3.0 V まで低下した。この間、設定した測定間隔で測定および通信処理が正常に実行されており、LTE 通信を含む構成においても DeepSleep を用いた周期動作が実現できていることが確認できた。

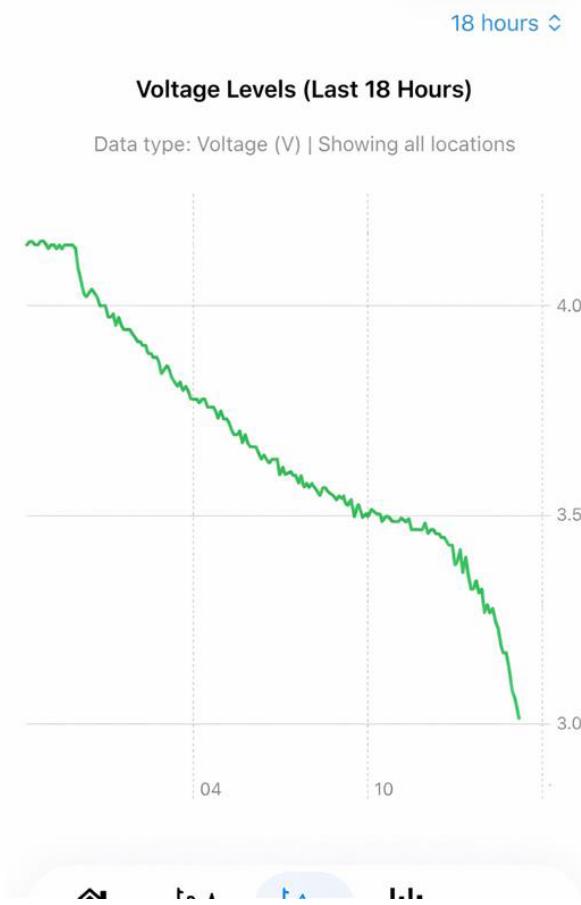


図 6.6: 測定機器 4 のバッテリ持続時間

一方で、LTE 通信を使用しない測定機器 3 について評価を行った。測定機器 3 では、Wi-Fi を用いて測定データを送信する構成であり、LTE 通信モジュールを搭載していない点が特徴である。そのため、セルラー通信に比べて通信時の消費電力を抑えた動作が可能である。その結果、同一条件（測定間隔 5 分、DeepSleep 使用、バッテリ容量 250 mAh）において、約 56 時間の連続稼働を確認した。この結果から、Wi-Fi 通信を用いた構成においても、DeepSleep を併用することで小容量バッテリによる長時間動作が可能であることが示された。これらの結果から、通信方式の違いが測定機器の消費電力および稼働時間に大きく影響することが分かる。LTE 通信を用いた測定機器 4 は、屋内外を問わず単体で通信可能であるという利点を持つ一方、消費電力が増加し、図 6.7 に示すように、稼働時間は約 15 時間となった。一方で、LTE 通信を使用しない測定機器 3 では、通信機能が制限されるものの、約 56 時間の連続稼働が可能であり、省電力性に優れた構成であることが確認された。

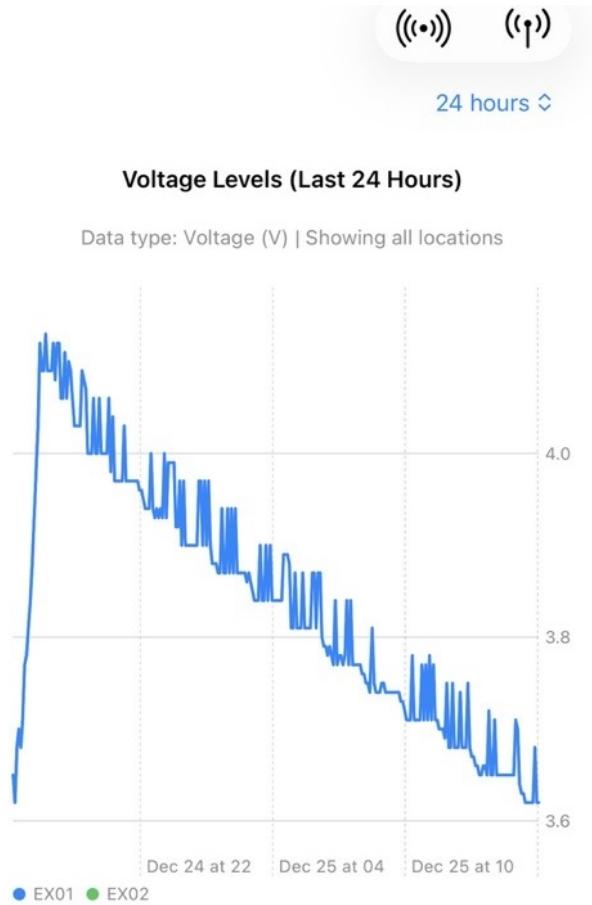


図 6.7: 測定機器 3 のバッテリ持続時間

以上より、本研究で提案する測定機器は、利用目的に応じて通信方式を選択することで、携帯性と稼働時間のバランスを調整できることが示された。

6.6 小型化に関する評価

本節では、本研究で段階的に開発した測定機器 1~4 について、筐体の小型化の観点から評価を行う。携帯型 CO₂ 測定デバイスとして日常生活での利用を想定した場合、測定精度や通信性能に加えて、機器の大きさは携帯性や使用頻度に大きく影響する重要な要素である。

従来、本研究室の先行研究において、据え置き型 CO₂ 測定機器が作成され、室内環境における CO₂ 濃度の定点観測に用いられてきた。これらの据え置き型測定機器は、長時間にわたる安定した測定が可能であり、空間全体の換気状態を把握する上で有効である一方で、外形寸法が大きく、利用者が身につけて移動しながら測定を行う用途においては、携帯性の観点から実用が困難であることが、先行研究における課題点として挙げられていた。

そこで本研究では、先行研究で明らかとなった「持ち運びには大きい」という課題を解決することを目的として、小型 CO₂ 測定デバイスの開発を行った。据え置き型測定機器

の測定精度や測定手法を踏襲しつつ、日常生活のさまざまな環境において利用者が携帯可能なサイズを実現することを目標とし、小型化を重視した設計を行った。

表 6.1 に、据え置き型測定機器および測定機器 1~4 の外形寸法と体積（外形面積）の比較を示す。据え置き型測定機器は外形寸法が約 $73 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$ 、外形面積が約 4745 mm^2 であり、携帯型として使用するには大きいことが分かる。これに対し、本研究で試作した測定機器はいずれも、据え置き型測定機器と比較して大幅な小型化が達成されている。

表 6.1: 据え置き型測定機器および測定機器 1~4 の外形寸法と体積の比較

| 測定機器 | 外形寸法 [mm] | 体積 [mm^2] |
|-----------|----------------|----------------------|
| 据え置き型測定機器 | 73×65 | 4745 |
| 測定機器 1 | 40×60 | 2400 |
| 測定機器 2 | 50×70 | 3500 |
| 測定機器 3 | 30×40 | 1200 |
| 測定機器 4 | 35×55 | 1925 |

測定機器 1 は、ESP32-C6、SCD41、プッシュボタンおよびリチウムポリマバッテリを用いた最小構成の測定機器であり、外形寸法は約 $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ であった。本機器は機能確認を主目的として作成したため、部品配置の最適化や筐体サイズの削減は行っておらず、比較的余裕のある寸法となっている。しかしながら、据え置き型測定機器と比較すると、外形面積は約 50% 程度に抑えられており、携帯型測定機器としての可能性を示す結果である。

測定機器 2 では、測定機器 1 の構成を維持したまま、利用者への視覚的フィードバックを目的として LED を追加した。その結果、外形寸法は約 $50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ となり、測定機器 1 と比較してやや大型化している。これは機能追加を優先した設計によるものであり、試作段階における仕様上の選択である。それでもなお、据え置き型測定機器と比較すると外形面積は小さく、携帯型測定機器としての基本的な要件は満たしている。

測定機器 3 では、測定機器 2 で確認された機能を維持しつつ、携帯性の向上を目的として筐体の小型化を行った。部品配置を見直し、ESP32-C6 の表面および裏面の両方に部品を実装する構成とすることで、外形寸法は約 $30 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ まで縮小された。測定機器 1 と比較すると、外形面積は約 2400 mm^2 から約 1200 mm^2 へと減少しており、約 50% の削減が達成されている。また、据え置き型測定機器と比較すると、外形面積は約 75% 削減されており、本研究の目的である携帯性の向上が大きく達成されたことが分かる。

さらに、測定機器 4 では、測定機器 3 で達成した小型化を意識しつつ、LTE 通信モジュールである SIM7080G を新たに搭載した。通信機能の追加により構成は複雑化したもの、外形寸法は約 $35 \text{ mm} \times 55 \text{ mm}$ に抑えられている。

測定機器 2 と比較すると、外形面積は約 3500 mm^2 から約 1925 mm^2 へと減少しており、約 45% の小型化が実現されている。これは、通信機能を追加しながらも、部品配置の最適化によって筐体の縮小が可能であったことを示している。また、据え置き型測定機器と比較すると、外形面積は約 4745 mm^2 から約 1925 mm^2 へと減少しており、約 60% の小型化が達成されている。この結果から、LTE 通信を備えた構成であっても、据え置き型測定機器では困難であった携帯性を確保できることが明らかとなった。

以上の結果から、本研究では据え置き型 CO₂ 測定機器の課題であった大型化という問題に対し、ESP 系マイクロコントローラを用いた段階的な設計改良を行うことで、機能

追加と小型化の両立を実現してきたといえる。特に、測定機器3および測定機器4では、ネックレスや腰部への装着といった利用形態にも適した携帯型CO₂測定デバイスであると評価できる。

第7章 結論

7.1 まとめ

本研究では、日常生活環境における換気状態の把握を目的として、携帯可能な小型 CO₂ 測定デバイスの設計・試作および評価を行った。従来の据え置き型 CO₂ 測定器は、設置場所が限定されることや、利用者の周囲環境を直接的に把握することが難しいという課題があった。これに対し、本研究では、利用者が身につけて使用できる携帯型デバイスに着目し、小型化・省電力化・測定精度・通信機能を両立した CO₂ 測定システムの実現を目指した。

まず、設計段階においては、経済産業省および産業用ガス検知警報器工業会により制定された「二酸化炭素濃度測定器の選定等に関するガイドライン」を参考とし、CO₂ 濃度測定器に求められる基本的な性能を満たすことを重視した。具体的には、呼気中の CO₂ に対して適切に応答する一方で、消毒用アルコールなどの揮発性成分に対して誤反応しないこと、および安定した測定が可能であることを設計方針として採用した。これらの指針に基づき、光学式 CO₂ センサを中心とした構成を採用し、携帯型デバイスとしての実用性を考慮したシステム設計を行った。

次に、試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスについて、実環境での測定に先立ち、センサの基礎特性確認を実施した。アルコールおよび呼気に対する応答を評価した結果、アルコールに対しては測定値の大きな変動が見られなかった一方で、呼気を吹きかけた際には CO₂ 濃度の顕著な上昇が確認された。この結果から、本研究で使用した CO₂ 測定デバイスは、ガイドラインに示される基本的な応答特性を満たしており、実環境における CO₂ 濃度測定に適したセンサであることが確認された。

据え置き型 CO₂ センサとの比較測定では、同一環境下において両者を設置し、長時間にわたる CO₂ 濃度の時間変化を比較した。その結果、測定開始直後に見られた高い CO₂ 濃度は、設置時に呼気がセンサにかかった影響であると考えられるものの、その後の時間変化においては、据え置き型センサと携帯型センサが同様の増減傾向を示すことが確認された。一部の時間帯において測定値に差が見られたものの、CO₂ 濃度の上昇および低下のタイミングは概ね一致しており、携帯型デバイスが環境中の CO₂ 濃度変化を適切に捉えていることが示された。

さらに、赤村ドームハウスにおける測定では、高さ方向に CO₂ 濃度の分布が生じる環境において、携帯型デバイスが利用者周囲の CO₂ 濃度を把握できるかを検証した。多数の据え置き型センサによる測定結果と比較した結果、携帯型デバイスによる測定値は、設置位置に応じた CO₂ 濃度の違いを反映しており、空間内の換気状態を把握する手段として有効であることが確認された。この結果から、携帯型 CO₂ 測定デバイスは、空間全体の分布を把握する用途に加え、利用者の周囲環境を評価する用途においても有用であると考えられる。

また、電車内における測定では、公共交通機関という人の乗降や換気条件が刻々と変化する環境において測定を行った。ドア付近およびドアから離れた座席位置において測定した結果、ドア開閉や乗客の乗降に伴う CO₂ 濃度の変化が確認され、測定位置による濃度差が生じることが示された。このことから、携帯型 CO₂ 測定デバイスは、移動環境においても測定可能であり、公共交通機関内の換気状況や空気環境を評価する手段として活用できる可能性が示唆された。

省電力性能の評価においては、周期的な測定・通信・待機動作を採用することで、バッテリ駆動による長時間動作が可能であることを確認した。これにより、携帯型デバイスとして日常的に使用する際にも、頻繁な充電を必要としない実用的な運用が可能であると考えられる。

以上の結果から、本研究で試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスは、ガイドラインに基づく基本的な測定性能を満たし、据え置き型センサと同様の CO₂ 濃度変化を捉えることができること、ならびに屋内外や移動環境を含むさまざまな実環境において利用可能であることが示された。本研究の成果は、換気状態の可視化や空気環境の把握を目的とした携帯型 CO₂ 測定システムの実現に向けた有用な知見を提供するものである。

7.2 今後の課題

本研究により、携帯型 CO₂ 測定デバイスの有効性および実環境における測定可能性が示された一方で、実用化および応用展開を見据えた際には、いくつかの課題が残されている。本節では、本研究を通じて明らかになった今後の課題について述べる。

7.2.1 稼働時間の向上

本研究では、通信方式として Wi-Fi および LTE を用いた測定機器を試作し、それぞれの省電力性能について評価を行った。その結果、テザリングや Wi-Fi 環境を利用した ESP32-C6 単体の測定機器においては、周期的な測定および待機動作を採用することで、十分な省電力動作が可能であることが確認された。一方で、LTE 通信を用いた測定機器では、通信時の消費電力が大きく、バッテリ駆動による連続稼働時間が約 16 時間程度にとどまった。

携帯型デバイスとして日常生活の中で継続的に利用することを想定した場合、1 日以上の連続稼働が可能であることが望ましい。そのため、今後は LTE 通信時の消費電力削減を目的として、通信頻度のさらなる最適化や、送信データ量の削減、通信モジュールのスリープ制御の高度化などを検討する必要がある。また、バッテリ容量の見直しや、高効率な電源回路の導入も、稼働時間向上に向けた有効な手段であると考えられる。

7.2.2 測定機器のケース作成

本研究では、測定機器の小型化を重視した設計を行ったものの、現状の試作機ではセンサ部や電子部品が外部に露出しており、持ち運び時や日常使用時における破損の危険性が残されている。また、外部からの衝撃や埃、湿気などの影響を受けやすい構造であることも課題として挙げられる。

一方で、CO₂ センサは周囲空気を直接取り込む必要があるため、完全に密閉されたケースを用いることは測定結果に影響を及ぼす可能性がある。そのため、今後は、通気性を確保しつつ、センサおよび回路を保護できるケース構造の検討が必要である。例えば、通気孔の配置やフィルタ材の使用、3D プリンタを用いた専用ケースの設計などが考えられる。これにより、携帯性および耐久性を向上させ、実用的な測定機器としての完成度を高めることが期待される。

7.2.3 授業姿勢の判定への応用

本研究で試作した携帯型 CO₂ 測定デバイスは、利用者の周囲環境における CO₂ 濃度を直接測定できるという特徴を有している。この特性を応用することで、教室環境における換気状態の把握だけでなく、授業中の姿勢や行動状態の推定への応用が考えられる。

例えば、着席状態で前傾姿勢をとった場合や、顔が机に近づいた場合には、呼気の影響によりセンサ近傍の CO₂ 濃度が一時的に上昇する可能性がある。このような CO₂ 濃度の変動パターンを、加速度センサや姿勢センサなどの他のセンサ情報と組み合わせることで、授業中の姿勢や集中状態を推定する手法へと発展させることが考えられる。今後は、複数センサを組み合わせたデータ取得および解析手法の検討が課題である。

7.2.4 長期間運用における信頼性評価

本研究では、短期間の測定を中心に評価を行ったが、実用化を見据えた場合、長期間にわたる連続運用時の信頼性評価が重要となる。特に、センサの経時的なドリフトや、環境条件の変化による測定精度への影響については、十分な検証が必要である。

今後は、数日から数週間にわたる連続測定を行い、測定値の安定性や再現性を評価するとともに、必要に応じて補正手法の導入を検討することが求められる。

謝辞

本研究の遂行および本論文の執筆にあたり、多大なるご指導とご支援を賜りました九州産業大学理工学部情報科学科の田中康一郎教授に、心より感謝申し上げます。研究の進め方のみならず、問題に対する考え方や研究者としての姿勢について多くのことをご教示いただきました。日々の議論や助言を通して、研究に対する視野を広げる貴重な機会を与えていただいたことに、深く感謝しております。

また、2年間にわたり同じ研究室に所属し、ともに研究活動に取り組んだ学部4年の青柳貴之氏、上原一眞氏、木村光翔氏、須賀翔一氏、竹内勇人氏、平田健斗氏、嶺田あんず氏には、心から感謝いたします。研究が思うように進まない時期においても、互いに意見を交換し、励まし合いながら研究を進めることができたことは、本研究を完成させる上で大きな支えとなりました。日々の研究活動を通して、多くの刺激を受け、ともに成長できたことを大変嬉しく思います。

さらに、学部3年の阿比留新太氏、彌永大翔氏、岡野望生氏、熊添翠杏氏、佐藤乃果氏、島崎佑亮氏、野坂卓矢氏、日高祥平氏には、測定実験やデータ整理など、研究活動のさまざまな場面において多大な協力をいただきました。忙しい中にもかかわらず、快く研究を手伝っていただいたことに、深く感謝いたします。皆様の協力なくして、本研究を円滑に進めることはできませんでした。

最後に、大学4年間にわたり、経済的にも精神的にも支えてくれた家族に心から感謝します。研究や学業に集中できる環境を与えてくれたこと、そして常に温かく見守り続けてくれたことに、深く感謝しております。

2026/1
井上誠斗

参考文献