

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

# 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  $\text{CO}_2$  濃度に注目が集まった。 $\text{CO}_2$  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指標として利用できる。換気が不十分な環境では  $\text{CO}_2$  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、 $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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、 $\text{CO}_2$  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。

一方で、2023年以降は社会活動が徐々に平常化し、人々の行動制限や感染対策が緩和される傾向が見られるようになった。その結果、季節性インフルエンザをはじめとする呼吸器感染症が全国的に大流行する状況が続いている。特に注目すべき点として、コロナ禍にあたる2020～2021年には、インフルエンザの報告件数が過去に例を見ないほど低水準であったことが挙げられる。この現象は、マスク着用や人流抑制といった行動変容に加え、換気の徹底が感染拡大の抑制に大きく寄与していた可能性を示唆している。すなわち、換気は COVID-19 に限らず、インフルエンザなどの広範な呼吸器感染症に対しても有効な対策であると考えられる。

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  $\text{CO}_2$  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<sub>2</sub> 測定機器の必要性が高まっている。

## 1.2 CO<sub>2</sub> 濃度と空気環境

CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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指標として広く利用されている。このような性質から、CO<sub>2</sub> 濃度は空気質評価において重要な役割を果たしている。

CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、換気状態の良否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、CO<sub>2</sub> 濃度の継続的な監視が重要となる。

CO<sub>2</sub> 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において、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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。

さらに、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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。

以上のように、CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 濃度の目安

測定場所	CO <sub>2</sub> 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: CO<sub>2</sub> 濃度と人体・環境への影響の整理

CO <sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 だけでなく、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、乾燥した空気中で生存しやすく、また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、CO<sub>2</sub> 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 を契機として室内の換気状況を可視化する手段として CO<sub>2</sub> センサの普及が急速に進んだ。しかし、現在広く利用されている多くの CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、換気の不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、利用者が自宅、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するといった使い方には適していない。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は日常的に多く存在するが、現状の測定器はそのような用途に十分に応えられていない。

第三に、精度の高い NDIR 式 CO<sub>2</sub> センサは価格が高く、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も、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。

さらに、COVID-19 の流行以降、換気の重要性は社会的に広く認識されるようになった一方、2023 年以降の社会活動の再開に伴ってインフルエンザの大規模な流行が再び発生している。この状況は、感染症対策としての空気環境管理が依然として必要であることを示しているが、現状では個々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。

以上のように、据え置き型 CO<sub>2</sub> 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、現行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、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> センサ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 CO<sub>2</sub> センサを室内に設置し、空間内の CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> センサを配置し、高さ方向や位置ごとの CO<sub>2</sub> 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、換気状態を直感的に把握できる点が評価されている。

一方で、これらの先行研究で用いられている測定システム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。据え置き型センサは、特定の位置における空気環境を把握するには有効であるものの、利用者が移動しながら直面するさまざまな環境の空気質を評価することは困難である。また、測定対象は空間全体であることが多く、個人が実際に滞在・移動する位置での空気環境を直接的に把握することは難しい。

さらに、複数台のセンサを用いる測定システムは、設置や運用の手間、コストの増加といった問題を伴うため、個人利用や日常的な運用には適していない場合が多い。このため、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で、個人が日常生活の中で簡便に空気環境を把握するための手段としては、十分とは言えない。

以上のことから、従来の据え置き型 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 測定機器の開発が求められている。

## 1.6 本研究の目的

本研究の目的は、従来の据え置き型 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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ように設計することで、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 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを複数の環境で実際に使用し、CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、試作機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 を採用した。本モジュールは ESP32-C6 SoC を搭載しており、2つの32ビット RISC-V プロセッサで構成されている。高性能 (High Performance: HP) プロセッサは最大 160 MHz で動作し、低消費電力 (Low Power: LP) プロセッサは最大 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、本研究では高い演算性能と低消費電力動作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。

表 2.1: ESP32C6 の主なパラメータ



図 2.1: SeeedESP32C6

モデル No.	SCD41
I2C アドレス	0x62
測定対象	CO <sub>2</sub> , 温度, 湿度
CO <sub>2</sub> 測定範囲	400~5000 ppm
CO <sub>2</sub> 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
対応温度	-10~60 °C

### 2.2.2 CO<sub>2</sub> センサモジュール SCD41

二酸化炭素濃度は、室内空気質を評価する上で重要な指標の一つであり、換気状態や居住環境の快適性と密接に関係している。本研究では、CO<sub>2</sub> センサとして Sensirion 社製 SCD41 を搭載したモジュールを使用した。

SCD41 は NDIR (Non-Dispersive Infrared) 方式を採用した高精度な CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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、I<sup>2</sup>C 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。

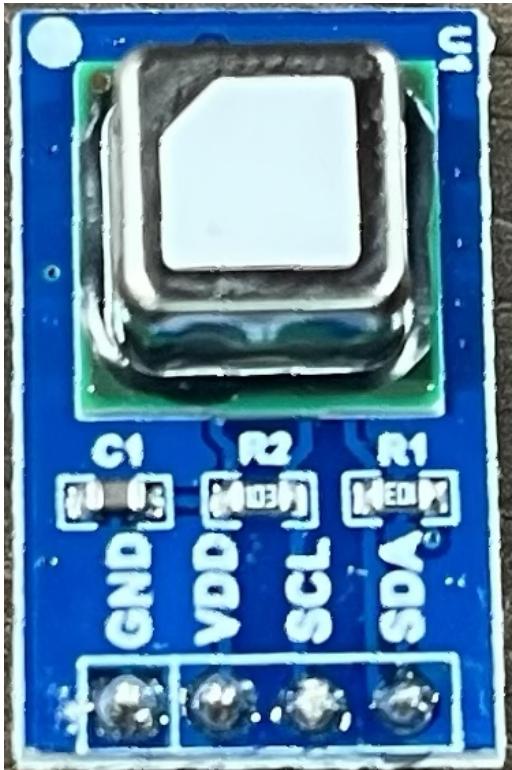


図 2.2: SCD41

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 <sub>2</sub> , 温度, 湿度
CO <sub>2</sub> 測定範囲	400~5000 ppm
CO <sub>2</sub> 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
対応温度	-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 CO<sub>2</sub> 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、携帯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 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 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。

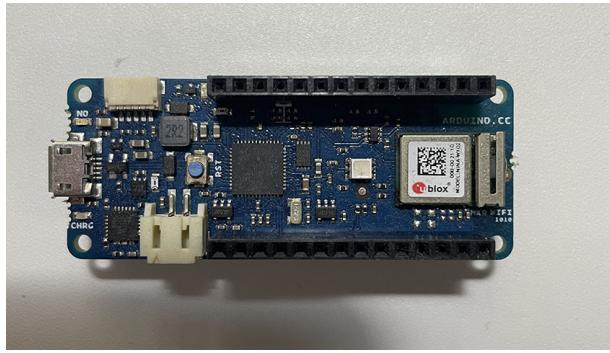


図 2.4: Arduino MKR WiFi 1010

### 2.3.2 CO<sub>2</sub> センサ MH-Z19C

MH-Z19C は、Winsen 社が製造する NDIR 方式の CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 2.4 に示す。



表 2.4: MH-Z19C の主なパラメータ

項目	内容
測定方式	NDIR
CO <sub>2</sub> 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

図 2.5: MH-Z19C

### 2.3.3 溫度・湿度・気圧センサ BME680

BME680 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 2.5 に示す。



表 2.5: 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 <sup>2</sup> C / SPI
動作電圧	1.7~3.6 V
用途	環境モニタリング

図 2.6: BME680

## 2.4 開発環境

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。

# 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 CO<sub>2</sub> 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携帯しながら CO<sub>2</sub> 濃度を測定できるデバイスの実現を目的とし、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。本デバイスは、CO<sub>2</sub> 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取得し、屋外環境を含むさまざまな場所からサーバへ送信することを想定している。

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説明する。

## 3.2 設計方針

本研究では、携帯型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスの実現を目的として、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とした設計とした。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、CO<sub>2</sub> 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よう設計した。

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、省電力化と移動環境での利用の両立を図る設計とした。

## 3.3 システム全体構成

本研究で設計した携帯型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスは、CO<sub>2</sub> 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関係性と、データおよび電力の流れについて説明する。

本システムでは、CO<sub>2</sub> センサによって周囲環境中の CO<sub>2</sub> 濃度を測定し、その測定データをマイクロコントローラで取得・処理する構成とした。マイクロコントローラは、測定データの管理および通信制御の中心的な役割を担い、一定時間間隔で通信モジュールを介して測定データをサーバへ送信することを想定している。通信機能については、屋外環境や移動中の利用を考慮し、Wi-Fi 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、システム全体が低消費電力で動作する構成を想定した。測定および通信以外の時間は、各構成要素が待機状態となることで、バッテリ消費を抑える設計とした。

以上の構成により、携帯性と測定精度を両立しつつ、移動環境においても利用可能な CO<sub>2</sub> 測定システムを実現することを目指した。

### 3.4 動作設計

本研究で設計した携帯型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスは、周期的な動作を前提とした構成とした。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 CO<sub>2</sub> 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動作を想定している。測定処理は一定時間間隔で繰り返し実行され、連続的な環境変化を把握できる構成とした。また、携帯型デバイスとしての利用を考慮し、測定および通信処理が完了した後は、待機状態へ移行する動作を前提とした設計とした。これにより、不要な処理を抑え、バッテリ消費を低減することを目指した。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採用することで、省電力性と実用性の両立を図る設計とした。この動作設計に基づき、後述する通信設計および省電力設計を行っている。

### 3.5 通信設計

本研究では、携帯型 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。

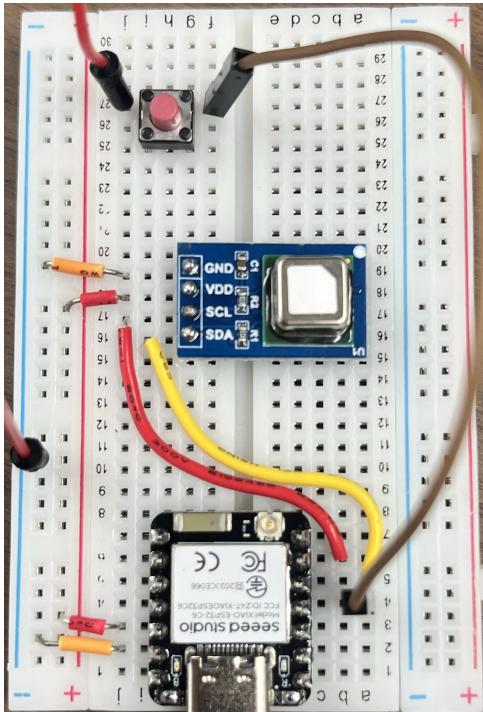
# 第4章 測定機器の実装

## 4.1 測定機器の開発方針

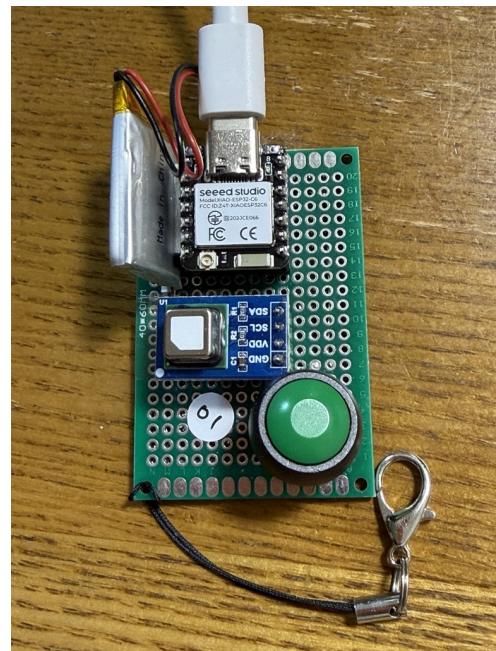
本研究では、「二酸化炭素濃度測定器の選定等に関するガイドライン」を参考にしながら、要件仕様を満たす CO<sub>2</sub> 測定機器の開発を行った。開発した測定機器は、通信方式や筐体構成の異なる複数の試作機から構成されており、段階的な改良を通して実用性の向上を図っている。

## 4.2 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、CO<sub>2</sub> 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 I<sup>2</sup>C 通信による CO<sub>2</sub> 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 (CO<sub>2</sub> 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 I<sup>2</sup>C 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 CO<sub>2</sub> 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 裏面に実装されたりチウムポリマバッテリ用ソケット(図～)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

### 4.3 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～）。本機器では、測定した CO<sub>2</sub> 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。一方、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～）。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 1 および測定機器 2 の外観

#### 4.4 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。

#### 4.5 LTE 通信方式の検討

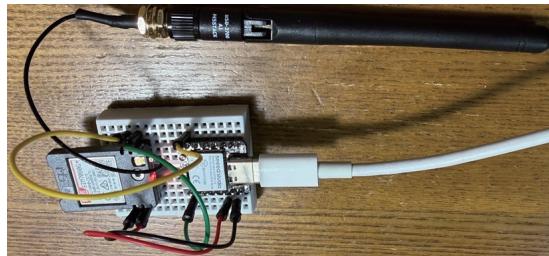
前節で述べた課題を解決するため、Wi-Fi 環境に依存しない通信方式としてセルラー通信の導入を検討した。セルラー通信を用いることで、屋内外を問わず安定した通信が可能となり、利用者による事前設定を不要とすることが期待できる。本研究では、低消費電力で IoT 用途に適した LTE 通信方式に着目し、LTE 通信を用いた測定機器の開発を行った。

#### 4.6 測定機器 4 の実装

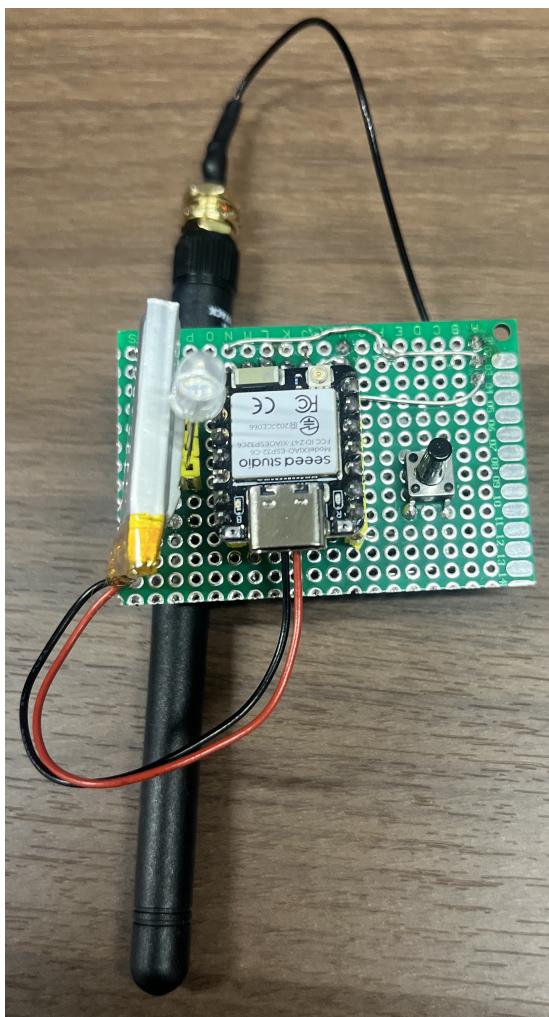
測定機器 4 では、測定機器 2 および 3 で課題となった通信方式の問題を解決するため、LTE 通信モジュールである SIM7080G を搭載した。これにより、Wi-Fi 環境やスマートフォンのテザリングに依存せず、測定機器単体でサーバへのデータ送信が可能となった。

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 CO<sub>2</sub> 測定機器の実現が可能となった。

表??に、本研究で開発した測定機器 1~4 の構成および特徴を示す。測定機器 1 から測定機器 4 へと段階的に改良を行うことで、携帯性および実用性の向上を図った。



(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 4.3: LTE を使用した測定機器

## 4.7 DeepSleep を用いた省電力制御

本研究で開発した CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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。

## 4.8 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 濃度データの取得が可能となった。

# 第5章 測定方法と評価方法

## 5.1 概要

本章では、本研究で試作した小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを用い、従来の据え置き型 CO<sub>2</sub> センサと比較して、同一環境において同様の CO<sub>2</sub> 濃度変化が得られるかを評価する。また、測定デバイスを携帯した状態で、様々な環境において問題なく CO<sub>2</sub> 濃度を測定できるかを検証する。はじめに、福岡県赤村に設置されているドームハウス内において、従来の据え置き型 CO<sub>2</sub> センサを 35 台設置し、それぞれの近傍に本研究で試作した小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを配置した。この環境において両者の測定値を比較し、CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化が同様の傾向を示すかを確認した。次に、携帯型デバイスとしての有効性を評価するため、測定デバイスを首の前、首の後ろ、腰の前、腰の後ろの計 4箇所に装着し、赤村周辺の山道を登る測定を行った。この測定では、装着位置や移動によって CO<sub>2</sub> 濃度に異常な変動が生じないかを確認した。以下では、各測定環境および測定方法について詳述する。

## 5.2 測定環境

### 5.2.1 赤村ドームハウス

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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> センサの近傍に、本研究で試作した小型 CO<sub>2</sub> 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( $\text{CO}_2$ )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 $\text{CO}_2$ 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 $\text{CO}_2$ 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。

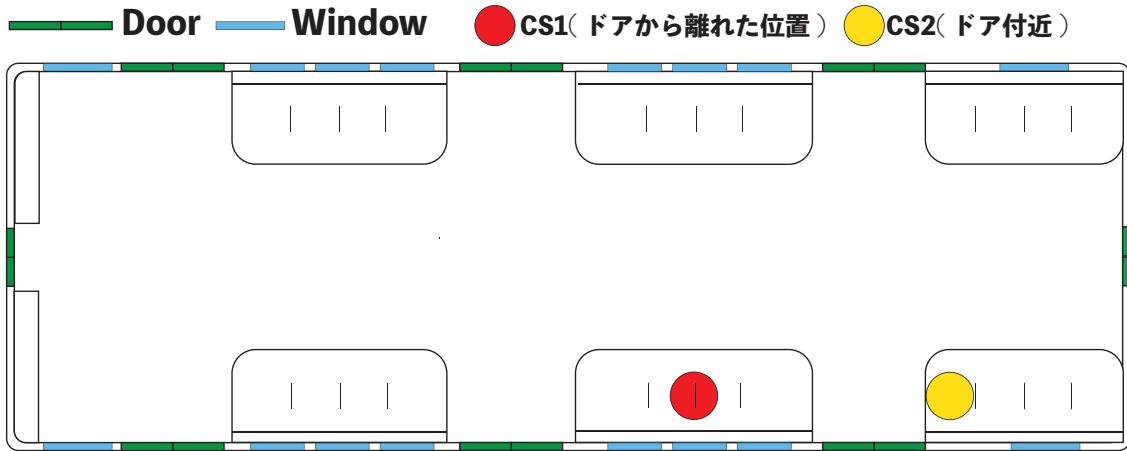


図 5.2: 電車内の環境

## 5.3 測定方法

### 5.3.1 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  $\text{CO}_2$  濃度分布および換気状態を把握するため、据え置き型  $\text{CO}_2$  測定器と、本研究で試作した小型  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  濃度を測定した。比較測定の手順として、小型  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  測定デバイスと据え置き型  $\text{CO}_2$  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  $\text{CO}_2$  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

### 5.3.2 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 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> 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

### 5.4.1 CO<sub>2</sub> 濃度測定精度の評価方法

CO<sub>2</sub> 濃度測定精度の評価は、据え置き型 CO<sub>2</sub> 測定器を基準として、本研究で試作した小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスの測定結果を比較することで行った。評価では、測定値の絶対値の一一致ではなく、時間変化の傾向が一致しているかに着目した。具体的には、同一位置・同一環境において取得した据え置き型測定器および小型測定デバイスの CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化を比較し、両者が同様の増減傾向を示す場合に、測定精度が十分であると判断した。

### 5.4.2 省電力性能の評価方法

省電力性能の評価は、ドームハウスおよび山道での測定とは別に、教室内において実施した。本評価では、測定機器を通常の測定動作状態で動作させ、バッテリ駆動時における連続稼働時間を確認した。評価時の測定条件として、測定間隔は 5 分とし、測定時以外の時間は ESP32-C6 を DeepSleep 状態へ移行させた。測定機器は、バッテリ電圧の低下により動作が停止するまで連続動作させ、その動作時間を稼働時間として記録した。本研究では、測定機器からサーバへ送信された測定データの確認および評価を行うため、研究室内で開発された iOS アプリを使用した。本アプリは、サーバにアップロードされた CO<sub>2</sub> 濃度データを時系列グラフとして表示する機能を備えており、測定中の動作確認および測定終了時刻の判断に利用した。

# 第6章 測定結果と評価

## 6.1 概要

本章では、第5章で述べた測定方式および試作した小型CO<sub>2</sub>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、据え置き型CO<sub>2</sub>センサとの比較を通じて、携帯型測定デバイスの特性を評価することを目的とする。はじめに、福岡県赤村に設置されたドームハウスを対象として、高さ方向におけるCO<sub>2</sub>濃度分布の測定を行う。ドームハウス内には床付近から天井付近にかけて複数の据え置き型CO<sub>2</sub>センサを設置し、空間全体のCO<sub>2</sub>濃度分布を把握する。また、これらの測定結果を基準として、本研究で試作した携帯型CO<sub>2</sub>測定デバイスによる比較測定を行い、高さ方向におけるCO<sub>2</sub>濃度変化の傾向を比較する。次に、携帯型CO<sub>2</sub>測定デバイスを実際の生活環境で使用した際の測定結果について示す。具体的には、装着位置の違いによる測定結果の比較、登山中および電車内といった移動環境におけるCO<sub>2</sub>濃度の時間変化を測定し、環境条件や混雑状況の変化が測定結果に与える影響を検討する。さらに、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たバッテリ駆動時の稼働時間の比較や、試作機ごとの外形寸法の整理を通じて、携帯型CO<sub>2</sub>測定デバイスとしての実用性について検討する。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述べる。

## 6.2 据え置き型センサとの比較結果

### 6.2.1 据え置き型CO<sub>2</sub>センサによる測定結果

据え置き型CO<sub>2</sub>センサを用いてドームハウス内のCO<sub>2</sub>濃度分布を測定した結果を図6.5に示す。据え置き型センサ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<sub>2</sub>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<sub>2</sub>濃度が観測されており、ドームハウス内部においてCO<sub>2</sub>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<sub>2</sub>濃度の偏りが生じている可能性を示している。

### 6.2.2 小型CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>センサと同様に、高さの増加に伴ってCO<sub>2</sub>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、据え置き型センサ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CO<sub>2</sub>濃度が高くなるという相対的な変化の傾向は、据え置き型センサの結果と概ね一致している。

表 6.1: ドームハウス内における高さ方向のCO<sub>2</sub>濃度測定結果

測定位置	据え置き型 CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]	携帯型 CO <sub>2</sub> 濃度 [ppm]
階段下部	701.0	1153.8
階段中部	739.4	1184.6
階段上部	871.0	1279.6
2階下部	749.2	1170.4
2階中下	824.6	1172.8
2階中部	828.4	1233.6
2階上部	836.6	1264.8

### 6.2.3 据え置き型センサとの比較評価

図6.5は、据え置き型CO<sub>2</sub>センサおよび携帯型CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>測定デバイスは、多数の据え置き型センサを用いなくても、空間内におけるCO<sub>2</sub>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CO<sub>2</sub>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。

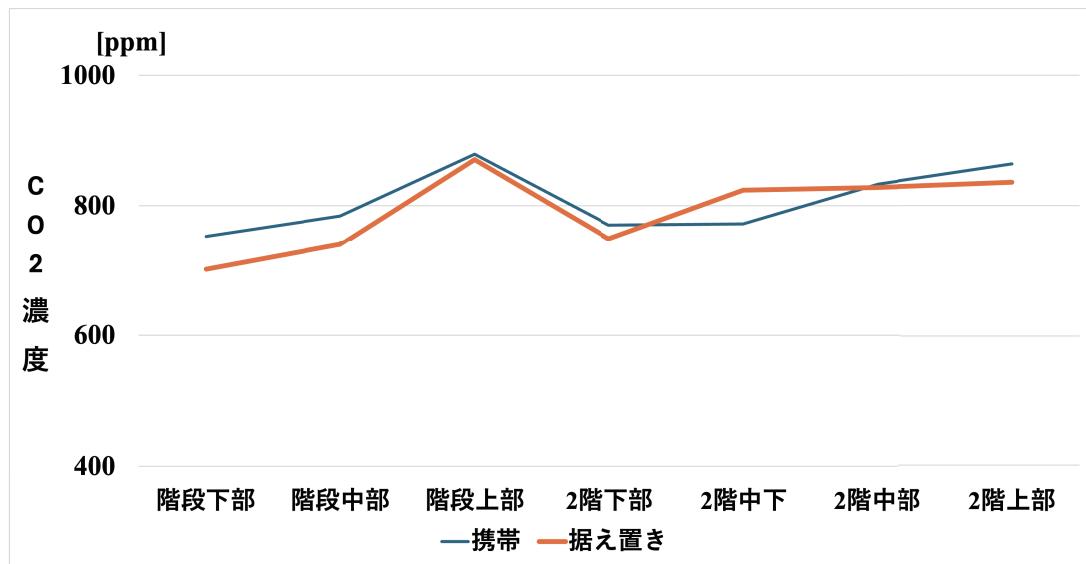


図 6.1: 据え置き型と携帯型のCO<sub>2</sub>濃度比較

## 6.3 携帯時の測定結果

### 6.3.1 装着位置による測定結果

#### 6.3.2 電車内の CO<sub>2</sub> 濃度変化

図 6.4 に、電車内において異なる位置で測定した CO<sub>2</sub> 濃度の時間変化を示す。オレンジの線はドア付近 (CS2)、青の線はドアから離れた位置 (CS1) で測定した結果である。

測定区間全体を通して、両測定点の CO<sub>2</sub> 濃度は同様の増減傾向を示したが、濃度の絶対値には明確な差が確認された。特に、複数の時間帯においてドアから離れた位置 (CS1) の CO<sub>2</sub> 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、20:55 頃には CS1 で約 1300 ppm を超える値が観測された一方、同時刻の CS2 ではそれより低い値を示している。また、各駅での停車前後に着目すると、ドア開放直後に CO<sub>2</sub> 濃度が低下する傾向が確認された。これは、ドア開放に伴う外気の流入により換気が促進されたためと考えられる。この低下はドア付近の測定点 (CS2) でより顕著であり、ドアから離れた位置では低下量が小さい、もしくは遅れて現れる場合があった。さらに、博多駅など乗降客が多い駅では、停車後に CO<sub>2</sub> 濃度が一時的に上昇する傾向も観測された。これは、乗客増加に伴う呼気由来の CO<sub>2</sub> 発生量の増加が、換気量を上回ったためと推測される。一方、弥生ヶ丘駅付近のように車内の乗客数が少ない区間では、全体的に CO<sub>2</sub> 濃度が低下し、両測定点の差も縮小する傾向が見られた。これらの結果から、同一車両内であっても測定位置によって CO<sub>2</sub> 濃度、すなわち換気状況に差が生じることが明らかとなった。特に、ドアから離れた位置では換気の影響を受けにくく、CO<sub>2</sub> 濃度が高くなりやすい傾向が示された。

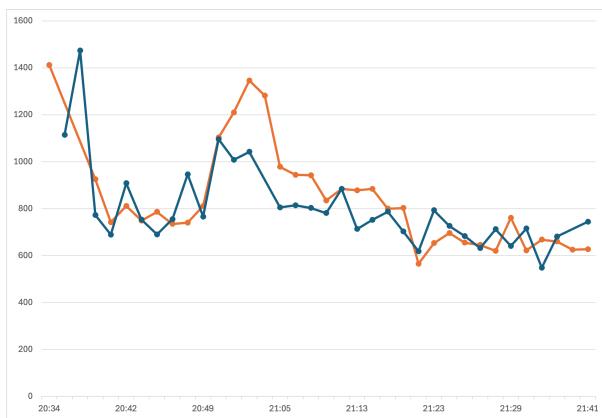


図 6.2: 電車内の co2 濃度変化

## 6.4 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 25 mAh のリチウムポリマバッテリを使用し、測定間隔は 5 分とした。測定時には CO<sub>2</sub> 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?? 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。

18 hours ◊  
Voltage Levels (Last 18 Hours)  
Data type: Voltage (V) | Showing all locations

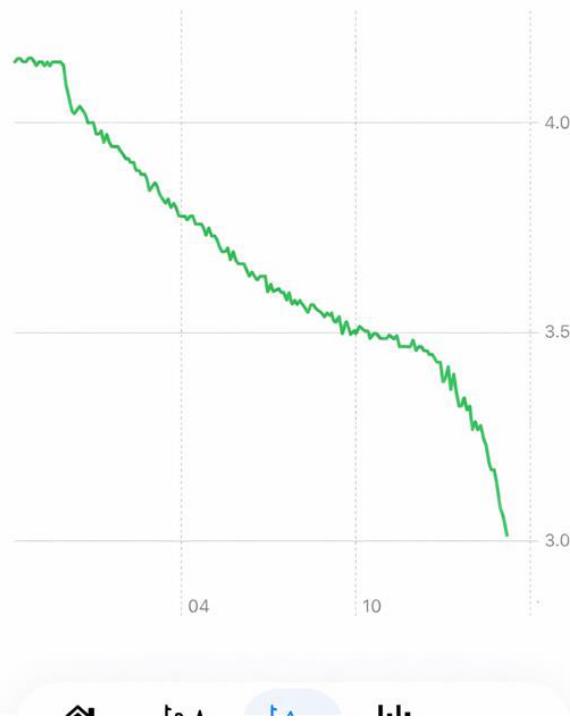


図 6.3: 測定機器 4 のバッテリ持続時間

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 25 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、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。

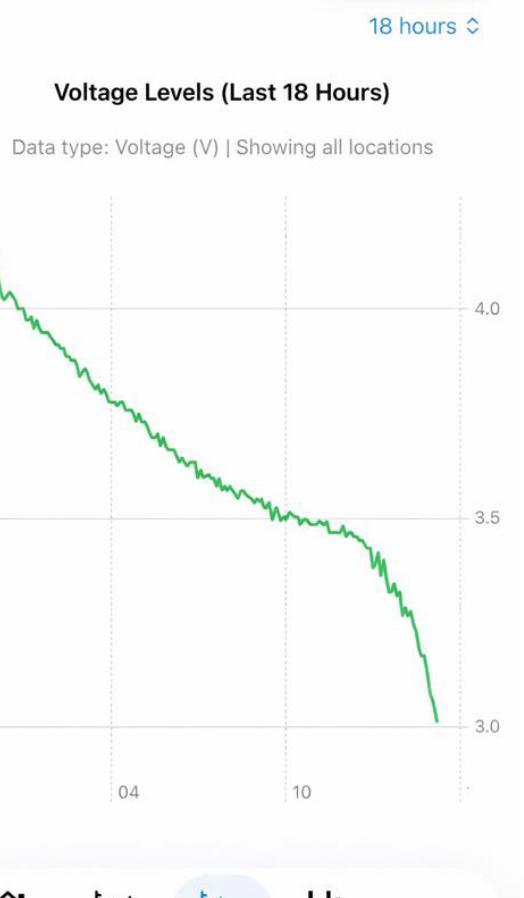


図 6.4: 測定機器 3 のバッテリ持続時間

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。

## 6.5 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 CO<sub>2</sub> 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。そのため、本研究では各試作機の外形寸法を整理し、小型化の進展について定量的および定性的に評価を行った。

表 6.2 に、測定機器 1~4 の外形寸法の比較を示す。本表では、各測定機器の外形寸法を縦および横の寸法で示しており、試作機ごとの構成や改良点を併せて整理している。

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試作機であり、外形寸法は約 40 mm × 60 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。

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 mm × 70 mm となり、測定機

表 6.2: 測定機器 1~4 の外形寸法の比較

測定機器	外形寸法 [mm]	備考
測定機器 1	約 40 × 60	初期試作機
測定機器 2	約 50 × 70	LED 追加
測定機器 3	約 30 × 40	小型化試作機
測定機器 4	約 35 × 55	LTE 通信対応

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。

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 mm × 40 mm まで縮小された。測定機器 1 と比較すると、外形寸法（縦×横）から算出した外形面積は、約 2400 mm<sup>2</sup> から約 1200 mm<sup>2</sup> へと減少しており、約 50% の削減が達成されている。この結果から、携帯型測定機器としての実用性が大きく向上していることが分かる。

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 mm × 55 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<sup>2</sup> から約 1925 mm<sup>2</sup> へと減少しており、通信機能を追加しながらも、約 45% の小型化が実現されている。

以上の結果から、本研究では測定機器 1 から測定機器 4 へと段階的に改良を行うことで、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、日常生活において携帯可能なサイズを達成しており、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 CO<sub>2</sub> 測定デバイスであると評価できる。これらの小型化に関する評価結果は、携帯型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスとしての実用性を示す重要な要素であり、本研究で提案する測定機器の有効性を定量的に裏付ける結果である。

## 6.6 アルコール、呼気への反応評価

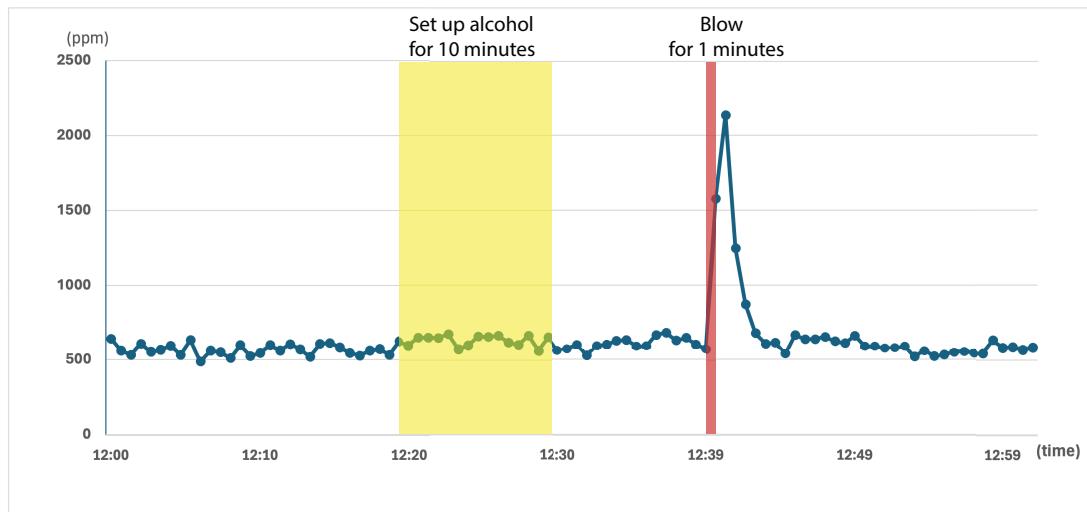


図 6.5: アルコール、呼気への反応評価

# 第7章 結論

## 7.1 まとめ

近年の温暖化や異常気象による急激な温度差の変化により、空調設備の需要が高まる中、空調設備の保守点検作業の効率化が求められている。現在の空調設備の保守点検作業は、手動で測定を行うため、作業員の負担が大きい上に、作業員ごとに測定値が異なることがある。そこで本研究プロジェクトでは風速や気温、湿度を自動で測定し、測定値を閲覧できるシステムを開発することで、空調設備の保守点検作業を効率化を目指した。

この目標を達成するために、以下の段階を踏んで開発を進めていく。風速や温湿度を測定できる機器を開発し、自動で測定を行えるようなシステムを開発する。そして、無線で測定値を送信でき、測定値を閲覧できるシステムを開発する。次に、測定機器が1週間程度の長期間にわたって稼働できるように設計し、最終的に測定機器の小型化やシステムの低コスト化を目指す。

本研究の目的として、以下の二つを掲げた。一つ目は、測定機器については405iの測定値と比較して誤差を10%以内に抑えること、および1週間の稼働を達成することを目標とした。二つ目は、閲覧システムについては測定後20秒以内にデータを閲覧可能とすることを目標とした。これらの目標を基に、ハードウェアとソフトウェアの両面から開発を進めた。

測定機器は吹出し口用の測定機器を4つ、吸込み口用の測定機器を3つ開発し、それぞれの測定機器の風速の測定精度、稼働時間、データの測定と送信の安定性を評価した。

風速の測定精度については、吹出し口用の測定機器の風速の測定精度を評価するため、405iと比較して風速を測定した。結果として、吹出し口タイプ3の測定が405iと比較して誤差を1.35%に抑えることができ、高い精度での測定が可能であることが確認された。稼働時間については、2400mAhで122時間の稼働が確認できたが、理論値よりも30時間短い結果となった。稼働時間の改善については、今後の課題として処理の効率化や省エネ設計をさらに進める必要がある。

作成した測定機器の中で不安定な動作を示す測定機器も確認できたが、構造によるものかセンサの不良によるものかを調査することで、今後の改善につなげることができる。基板を使用していない吸込み口タイプ3はディープスリープを適用する前はマイコンが発生する熱が籠ったままで正しい測定が行えなかったが、ディープスリープを適用することで正常に測定を行うことが可能となった。これは、ディープスリープからの復帰で起こる負荷よりも、WiFiやセンサの測定で起こる負荷の方が大きいことが原因であると考えられる。

閲覧システムについては、測定後20秒以内に測定されたデータを閲覧するシステムを開発できたまた、測定機器の測定間隔を調整することで、さらに即時性の高いデータの閲覧も可能である。

以上の結果から、風速、温度、湿度を自動で測定し、風速の測定誤差を10%以内に収めるとともに、測定値をリアルタイムで閲覧可能なシステムの開発に成功した。さらに、既存のサービスと比較しても引けを取らない性能を有しており、空調設備の保守点検作業の効率化に貢献できると考えられる。

## 7.2 今後の課題

今後の課題としては、以下の点が挙げられる。

### 7.2.1 稼働時間の向上

測定間隔を20秒のまま維持しながら、測定機器の稼働時間を1週間に延長することである。これには、現在の20秒ごとに消費電力の大きい WiFi に接続する処理ではなく、データを一時的に保存し、一定時間ごとにまとめて送信することで、WiFi に接続する回数を減らし、消費電力を削減するという方法が考えられる。また、WiFi の接続に失敗した際の消費電力が大きいため、安定して接続できるように接続する WiFi ルータの設定や設置位置を見直すことも必要である。

### 7.2.2 測定機器の小型化

測定機器の小型化を実現することである。小型化により、空調設備への設置方法が多様化し、現在測定に使用しているカセット型の空調機器以外にも設置できるようになる可能性があり、より幅広い用途での測定を可能にできると考えられる。

### 7.2.3 システム全体のコストダウン

システムの構成や測定機器の開発手順を見直すことで、より運用コストの低いシステムを構築することができる。具体的には、現在コンパイル時にのみ WiFi の設定が可能なため、特定の条件の時に、BlueToothなどの接続手段を使用し、WiFi の設定を行うことで、運用コストを削減することができる。

# 関連図書