

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、瞬く間に世界中へと拡大し、2020 年以降は日常生活・教育・産業活動に大きな影響を与えた。COVID-19 は飛沫感染に加え、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、換気の不足した室内環境において感染リスクが著しく高まることが明らかになった。厚生労働省は、密閉・密集・密接のいわゆる「三つの密」を避ける行動を促し、特に密閉空間における換気の重要性が社会全体で再認識される契機となった。

このような背景から、CO<sub>2</sub> 濃度を用いて換気状態を把握する手法に注目が集まった。CO<sub>2</sub> は人体の呼気に大量に含まれるため、室内における滞在人数や密度を間接的に示す指標として利用でき、換気不足を判断するための有効な環境指標である。実際、コロナ禍では学校・飲食店・公共施設など多くの場面で CO<sub>2</sub> センサの設置が進み、室内の換気状態を可視化する取り組みが広がった。

一方で、2023 年以降は社会行動が徐々に平常化したことにより、季節性インフルエンザが全国的に大流行する状況が続いている。興味深いことに、コロナ禍の 2020～2021 年にはインフルエンザの報告件数が歴史的に低水準となったことが知られている。この現象は、マスク着用や行動制限に加え、換気の徹底が呼吸器感染症全体の抑制に大きく寄与していた可能性を示唆している。

このように、COVID-19 を契機として「空気環境の重要性」は社会的に大きな注目を集めたが、感染症対策としての換気の有効性は今後も維持すべき課題であり、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継続的な空気質管理が求められる。また、個人レベルでも自宅・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求められており、より柔軟に利用できる 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

大気中の主要成分のうち、CO<sub>2</sub> はわずかに 0.04% 程度と非常に低い割合しか占めていない。しかし室内においては、人の呼気により CO<sub>2</sub> 濃度が急激に上昇することがあるため、換気状態を評価する代表的な指標として利用されている。CO<sub>2</sub> 濃度は ppm (parts per million) で表され、屋外では一般に 415～450 ppm 程度でほぼ一定である。

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ために 1,500 ppm 以下が望ましいとされている。

CO<sub>2</sub> 濃度が上昇すると、換気不良に加えて、集中力低下や頭痛、疲労感などの健康影響が報告されている。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が低下することが示されており、教育現場でも空気質管理の重要性が指摘されている。

このように、CO<sub>2</sub> 濃度は単なる環境指標としてだけでなく、人の健康や作業効率に直結する要素であり、感染症リスク管理や快適な居住環境の実現に欠かせない情報である。

### 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、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、使用環境や対象に依拠し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性が生じる。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答えられていない。

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ー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、換気的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 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、モバイルバッテリー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にする。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、本研究で利用した開発環境、測定機器に搭載するモジュールについて記述する。

### 2.2 Arduino IDE

測定機器とマイクロコントローラの制御は Arduino IDE で行う。Arduino の開発環境である Arduino IDE (Integrated Development Environment) は Arduino ボード上で動作するソフトウェアを開発するための統合開発環境である。ソースコードの編集、コンパイル、デバッグ、およびシリアルモニタ（コンソール機能）を用いたデータ送受信機能などが提供される。また Arduino IDE には、様々な Arduino ボードや他社のマイクロコントローラに対応するためのボードパッケージマネージャや各種 I/O(センサ等を含む) サポートするライブラリマネージャ機能があり、ライブラリが豊富に提供されているため、CO<sub>2</sub> センサやその他のモジュールのセットアップが迅速に行える。また、今回利用した ArduinoIDE のバージョンは 2.3.6(Date: 2025-04-09T11:22:51.016Z) である。

### 2.3 測定機器構成

図??に測定機器に搭載するモジュールを示す。本測定機器はマイクロコントローラ、CO<sub>2</sub> センサで構成されている。CO<sub>2</sub> センサモジュールは Hailege SCD41 を利用した。

### 2.4 測定機器に搭載するモジュール

本研究では、CO<sub>2</sub> センサからのデータ取得や処理を行うために、マイクロコントローラを利用している。選定したマイクロコントローラは Seeed Studio XIAO ESP32C6 である。以下に詳細を述べる。

### 2.5 マイクロコントローラ

マイクロコントローラとは、RAM、ROM、プロセッサ、I/O ポートなどを単一の集積回路 (IC) にまとめた、組み込み用マイクロプロセッサのことである。マイクロコントローラ Seeed Studio XIAO ESP32C6 (図??) を利用する。

### 2.5.1 Seeed Studio XIAO ESP32C6

ESP32-C6 は、Espressif Systems 社が開発した Wi-Fi 6 対応のマイクロコントローラであり、2.4 GHz 帯 Wi-Fi および Bluetooth Low Energy (BLE) を内蔵している。本研究では、無線通信機能を外付けすることなく測定データをサーバへ送信できる点に加え、バッテリー駆動を想定した 3.3 V ピンを備え、小型デバイスへの組込みに適している点を評価し、ESP32-C6 を採用した。

ESP32-C6 は 32 ビット RISC-V プロセッサを搭載し、十分な演算性能と低消費電力動作を両立している。また、小型パッケージで多数の GPIO や SPI, UART, I<sup>2</sup>C などの周辺インタフェースを備えており、センサとの接続や携帯型デバイスへの組込みに適している。

## 2.6 センサ

本研究では、CO<sub>2</sub> 濃度の測定に Hailege 社の SCD41 CO<sub>2</sub> 二酸化炭素ガスセンサモジュールと Tassety 社の SCD40 Gas Sensor Module を使用する。センサにはそれぞれ Sensirion 社の CO<sub>2</sub> センサ SCD40、SCD41 を搭載している。以下に主な特性を述べる。

### 2.7 二酸化炭素センサ SCD41

二酸化炭素濃度を測定するセンサとして、Sensirion 社の SCD41 (図??) を使用した。SCD41 は、光音響分光法 (Photoacoustic Spectroscopy) を採用した高精度な CO<sub>2</sub> センサであり、小型でありながら高精度な計測が可能である。この方式は、CO<sub>2</sub> 分子が特定の赤外線波長を吸収した際に発生する音波を検出することで濃度を算出するものであり、従来の NDIR 方式に比べて光学経路を短縮できるという利点を有する。

また、SCD41 は温度および湿度センサを内蔵しており、環境補正を自動的に行うことで安定した測定値を得ることができる。測定範囲は 400 ~ 5,000 ppm、精度は  $\pm(40 \text{ ppm} + 5\%)$  である。動作電圧は 2.4 ~ 5.5 V と広く、低消費電力設計が施されているため、バッテリー駆動の組込み機器にも適している。

さらに、SCD41 は I<sup>2</sup>C 通信を介してマイクロコントローラと接続され、取得した CO<sub>2</sub> 濃度・温度・湿度データをリアルタイムに処理することが可能である。本研究では、省電力化のために SCD41 のシングルショット測定モードを用い、必要時のみ測定を行う構成とした。SCD41 の主な仕様を図??に示す。

## 2.8 通信プロトコル

測定機器に搭載したモジュール間の通信には I2C を使用している。I2C はシリアル通信の一部で、シリアル通信とはデータを送受信するための信号線を 1 本または 2 本使用して、データを 1 ビットずつ連続的に送受信する通信方式である。シリアル通信以外にも、データを送受信するための信号線を 1 本または 2 本使用して、データを同時に送信するため複数ビットで送受信するパラレル通信がある。以下にシリアル通信方式の、I2C、UART それぞれの特徴を述べる。

表 2.1: 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 mm × 10.1 mm × 7.0 mm
対応温度	-10~60 °C

### 2.8.1 I2C 通信

I2C 通信とは、I2C (Inter-Integrated Circuit) の略称である。I2C 通信はフィリップス社が提唱する通信インターフェースでクロックに同期させてデータの通信を行う同期式シリアル通信の一つである。I2C ではクロックを送るための端子 (SCL), データ入出力する端子 (SDA) の 2 本の信号線を用いて通信を行い、マイコンとマイコン周辺機器の通信に用いられることが多い。I2C 通信では、マスタとスレーブという二つの役割に分け、マスタからスレーブに対して送信や受信の指示を行う。クロックはマスタから出力され、入力と出力はクロックに同期して行われる。1 つのマスタで複数のスレーブと通信することが可能なため、省配線や省スペース化が実現可能である。I2C 通信が SPI 通信と大きく異なる点として、個々のスレーブがアドレスを持っておりデータの中にアドレスが含まれていること、1 バイト転送毎に受信側から ACK 信号 (確認応答) をして互いに確認を取りながらデータ転送を行っていることが上げられる。

### 2.8.2 UART

UART 通信とは、UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) の略称で、クロックの信号線が存在せず、データ送信用の端子 (TX) とデータ受信用の端子 (RX) 2 本の信号線で通信を行う非同期式シリアル通信の一つである。コンピュータと外部の機器を繋ぐシリアルポートやシリアルインターフェースの制御に用いられることが多い。UART ではクロックの信号線が存在しないため、通信をする前にあらかじめ送受信するデバイス間で通信速度 (ボーレート) を決めておく必要がある。ボーレートとは 1 秒間に何 bit のデータを転送するかを意味し、bps (bit per second) という単位で表記される。UART でよく使用される通信速度は 4,800, 9,600, 19,200, 38,400, 57,600, 115,200bps である。



図 2.1: AVHzYct-3

## 2.9 AVHzYct-3

今回，測定機器の消費電力を測定する際に使用するツールとして，AVHzYct-3 を用いた．図 2.1 に AVHzYct-3 を示す．AVHzYct-3 は，機器と USB で接続することにより，その機器の電圧や電流，消費電力，対応する急速充電規格を確認することができる．また，パソコンに接続し，専用のソフトを使用することで，詳細なデータを取得し，保存することができる．実際にパソコンで表示したデータは図??に示す．AVHzYct-3 を使用することにより，対象機器の消費電力や，時間毎の電圧，電流，経過時間，極値などを確認することができる．波形データからは，測定機器がどのタイミングで電力を消費しているかを確認でき，消費電力のピーク値や消費電力の変化を確認することができる．また，消費電力の時間的变化からスリープ状態とデータの取得，送信時の遷移が確認でき，測定機器が安定して計測・データ送信を行っているかどうかを確認することができる．

## 2.10 サーバ

サーバ側の処理は AlmaLinux 9.5 で動作している MariaDB を利用している．MariaDB は MySQL から派生したオープンソースの RDBMS（リレーショナルデータベース管理システム）である．MariaDB は，高速で信頼性が高く，複数のデータベースを同時に操作することができるため，センサデータの取得や処理に適している MySQL と高い互換性を維持しつつセキュリティやパフォーマンスが向上しているという利点がある．今回は PHP を使用して MariaDB に接続し，JavaScript でデータを処理，ブラウザに表示している．

### 2.10.1 PHP

PHP は，Web アプリケーションの開発に広く使用されているスクリプト言語である．本研究では，PHP を使用して，センサデータの収集，処理，および可視化を行っている．



PHP は、データベースとの連携が容易であり、Web サーバー上で動作するため、センサデータをリアルタイムで取得し、Web ブラウザに表示することが可能である。

### 2.10.2 JavaScript

JavaScript は、Web ページの動的なコンテンツを制御するためのスクリプト言語である。本研究では、JavaScript を使用して、Web ページ上でのセンサデータのリアルタイム表示やグラフの描画を行っている。JavaScript は、Web ブラウザ上で動作するため、センサデータをリアルタイムで取得し、Web ページ上に表示することが可能である。

## 2.11 Blender

Blender は、オープンソースの 3D コンピュータグラフィックスソフトウェアである。本研究では、測定機器用のケースを作成するために使用した。Blender を使用して、測定機器用のケースの 3D モデルを設計し、3D プリンタで出力している。Blender は、高度な 3D モデリングやアニメーションを行うことができるため、設置台のデザインや機能の検証に適している。今回 3D モデルの印刷には本大学にあるオープンイノベーションセンタの 3D プリンタを使用している。

## 第3章 要求仕様と設計

### 3.1 概要

本章では、本研究で開発する小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスの仕様設計について述べる。本研究の目的は、携帯可能でありながら高精度な CO<sub>2</sub> 濃度測定を可能とするデバイスを試作し、日常生活のさまざまな環境における換気状況を把握できる仕組みを構築することである。そのため、本デバイスには小型化、省電力化、測定精度、通信機能といった複数の要件が求められる。

### 3.2 設計仕様

本研究で開発する CO<sub>2</sub> 測定デバイスは、以下の仕様を満たすことを目標とする。

1. 測定値と実際の CO<sub>2</sub> 濃度との差が小さいこと
2. 様々な環境において CO<sub>2</sub> 濃度を測定できること
3. リチウムポリマーバッテリーにより駆動できること
4. 小型で持ち運び可能であること
5. 測定した CO<sub>2</sub> 濃度を一定時間おきにサーバへアップロードできること

仕様1では、測定値が実際の CO<sub>2</sub> 濃度を正確に反映していることを重視する。そのため、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」を参考にする。同ガイドラインでは、適切な CO<sub>2</sub> 濃度測定器の条件として、検知原理に光学式（NDIR 方式など）を用いていること、補正用の機能が測定器に付帯していることが示されている。また、屋外環境において測定を行った際に、測定値が外気中の CO<sub>2</sub> 濃度（415～450 ppm 程度）に近い値を示すことや、測定器に呼気を吹きかけた際に CO<sub>2</sub> 濃度が大きく上昇すること、さらに、消毒用アルコールを塗布した手や布を測定器に近づけても CO<sub>2</sub> 濃度の測定値が大きく変化しないことが求められている。本研究では、これらの条件に準拠した測定デバイスを設計・開発する。

仕様2では、据え置き型の CO<sub>2</sub> 測定器にはない特長として、利用者が移動しながら使用できる点を重視する。自宅や大学、研究室といった固定的な環境に加え、車内や飲食店など多様な環境においても問題なく測定できることを目標とし、携帯型測定デバイスとしての有効性を検証する。

仕様3および仕様4では、携帯型デバイスとしての実用性を高めるため、電源方式および筐体サイズに着目する。本デバイスはリチウムポリマーバッテリーによる駆動を可能とし、商用電源に依存せず長時間動作できる構成とする。また、デバイス全体を小型化することで、バッグやポケットに収納して持ち運ぶことができ、日常生活の中で手軽に使用できる測定器の実現を目指す。

仕様5では、測定した CO<sub>2</sub> 濃度を一定時間間隔でサーバへアップロードする機能を持たせる。

## 第4章 測定機器の開発

### 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 の設計と実装

測定機器の開発にあたり、最初に ESP32-C6 と SCD41 を組み合わせたプロトタイプを作成した。このプロトタイプにより、CO<sub>2</sub> 濃度の測定およびサーバへのデータ送信が正常に行えることを確認した。これらの動作確認を踏まえ、ボタンおよび LED を搭載した測定機器 1 を作成した。測定機器 1 は、ボタンを押すことでディープスリープ状態から起動し、CO<sub>2</sub> 濃度を測定した後、測定データをサーバへ送信し、再びディープスリープ状態へ移行する構成とした。また、測定結果やデータ送信の成否を視覚的に確認できるように、LED の点灯パターンによる状態表示を行っている。ディープスリープ機能については、後述する。

### 4.3 測定機器 2 の設計と実装

測定機器 2 は、測定機器 1 の機能を維持したまま、筐体の小型化を目的として設計したものである。ESP32-C6 の表面および裏面の両方に基板を配置する構成とすることで、部品配置の高密度化を行い、測定機器 1 と比較してサイズを約 3 分の 1 に縮小した。この小型化により、携帯性が向上し、日常生活において持ち運びやすい測定機器となった。

### 4.4 測定機器 2 の課題

一方で、測定機器 2 は Wi-Fi 通信を用いてデータ送信を行うため、屋外で使用する場合には、スマートフォンのテザリング機能を利用する必要があった。具体的には、Bluetooth を用いて Wi-Fi の SSID およびパスワードを登録し、スマートフォン経由で通信を行う構成である。この方式は、利用者に対して事前設定や操作を要求するため、高齢者や子どもにとっては操作が難しい場合がある。また、利用者に追加の操作負担を与えてしまう点が課題として挙げられた。

## 4.5 LTE 通信方式の検討

これらの課題を解決するため、Wi-Fi 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。屋内外を問わず安定した通信を行うことを目的として、LTE 通信を用いた測定機器の開発を行った。

## 4.6 測定機器 3 の設計と実装

測定機器 3 では、測定機器 2 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、屋内外を問わず単体でサーバへのデータ送信が可能となった。

本構成により、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 4.1 に、本研究で開発した測定機器 1～3 の構成および特徴を示す。測定機器 1 から測定機器 3 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。

表 4.1: 開発した測定機器の比較

項目	測定機器 1	測定機器 2	測定機器 3
マイクロコントローラ	ESP32-C6	ESP32-C6	ESP32-C6
CO <sub>2</sub> センサ	SCD41	SCD41	SCD41
通信方式	Wi-Fi	Wi-Fi	LTE (SIM7080G)
屋外利用	テザリングが必要	テザリングが必要	単体で可能
電源方式	Li-Po バッテリ	Li-Po バッテリ	Li-Po バッテリ
操作方法	ボタン操作	ボタン操作	ボタン操作
状態表示	LED 表示	LED 表示	LED 表示
筐体サイズ	標準	約 1/3 に小型化	測定機器 2 と同等
主な目的	動作確認	携帯性向上	実用性向上

## 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、バッテリー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ー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

赤村のドームハウスは、複数人が滞在可能な閉鎖空間であり、換気状態や人の滞在による CO<sub>2</sub> 濃度変化を評価するのに適した環境である。本測定では、ドームハウス内に従来の据え置き型 CO<sub>2</sub> センサを 35 台設置し、それぞれの近傍に小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを配置した。

#### 5.2.2 山道における携帯測定環境

山道における携帯測定は、福岡県赤村に位置する岩石山において実施した。岩石山は標高約 454 m の山であり、登山道が整備されたハイキングコースを有している。本測定では、屋外の移動環境において小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを携帯した状態での測定が可能であることを評価することを目的とした。測定は登山中に実施し、小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを首の前、首の後ろ、腰の前、腰の後ろの計 4 箇所に装着した。これにより、装着位置や身体の動きによって CO<sub>2</sub> 濃度の測定値に異常な変動が生じないかを確認した。

## 5.3 測定方法

### 5.3.1 据え置き型センサとの比較測定

本測定では、据え置き型 CO<sub>2</sub> 測定器を複数台設置することで得られる室内の CO<sub>2</sub> 濃度分布を基準とし、携帯型の小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスが換気状態の把握という目的に対してどの程度有効であるかを評価することを目的とした。そのため、小型測定デバイスを据え置き型測定器の設置位置ごとに順次配置し、同一高さ・同一環境における測定値の比較を行った。

比較測定は、福岡県赤村のドームハウス内に設置された据え置き型 CO<sub>2</sub> 測定器を対象として実施した。本測定では、据え置き型 CO<sub>2</sub> 測定器を合計 35 台使用し、これらは螺旋階段および 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されている。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。

比較測定の手順として、小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスを各据え置き型測定器の直近に配置して測定を行い、測定終了後に設置位置を一段上へ移動させる操作を繰り返した。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。測定時の小型 CO<sub>2</sub> 測定デバイスと据え置き型 CO<sub>2</sub> 測定器の配置関係を図?? に示す。本図に示すように、小型測定デバイスは各据え置き型測定器の近傍に設置されており、同一高さ・同一空間における CO<sub>2</sub> 濃度を測定できるよう配慮した。

### 5.3.2 携帯時の測定方法

本測定では、図～に示すように

## 5.4 測定条件

### 5.4.1 測定間隔

### 5.4.2 装着位置

### 5.4.3 測定時間

## 5.5 評価方法