

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 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指標として利用できる。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。

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 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 CO₂ 測定機器の必要性が高まっている。

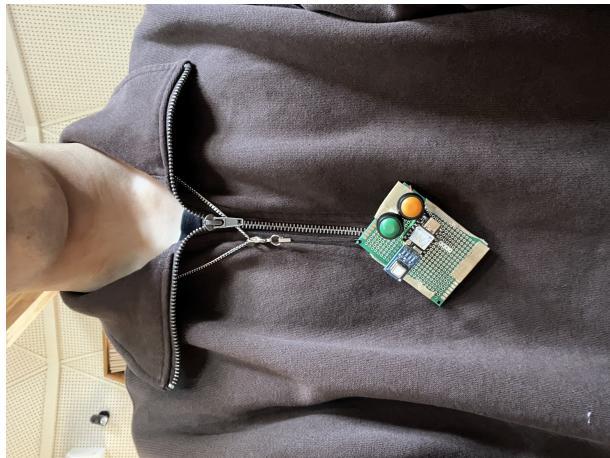


図 1.1: ESP32-C6

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指標として広く利用されている。このような性質から、CO₂ 濃度は空気質評価において重要な役割を果たしている。

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、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。

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、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。

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。

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_2 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_2 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。

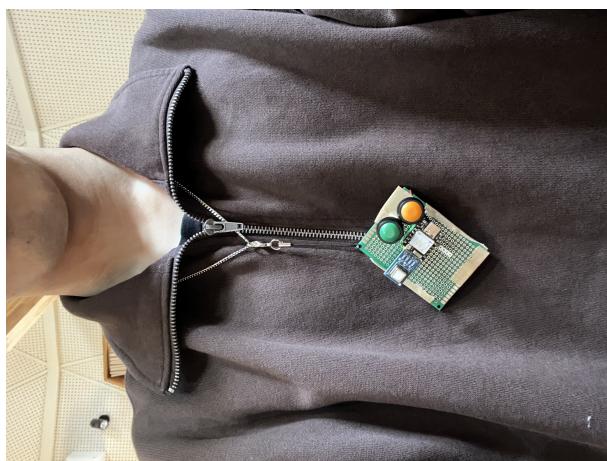


図 1.2: ESP32-C6

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_2 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_2 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_2 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 CO₂ 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 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。

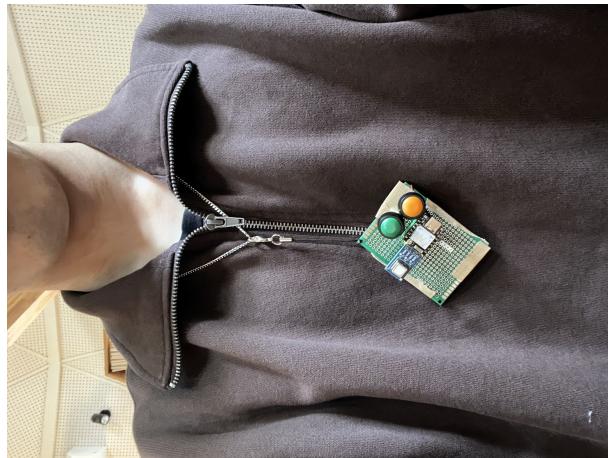


図 1.3: ESP32-C6

1.5 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になる。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 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。

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、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。

2.2.2 CO₂ 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、CO₂ 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 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。

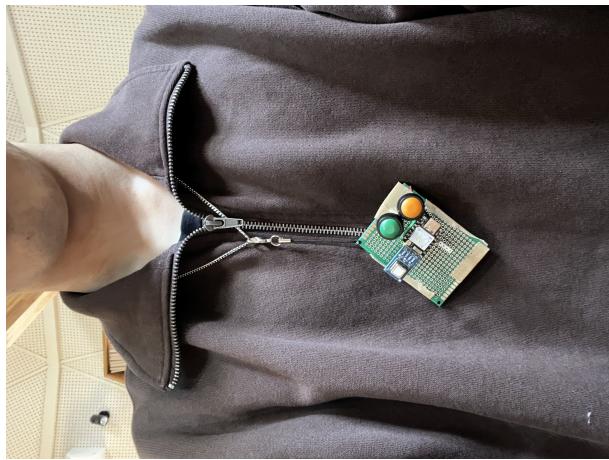


図 2.1: ESP32-C6

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 2.1 に示す。

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 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 mm × 10.1 mm × 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 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。

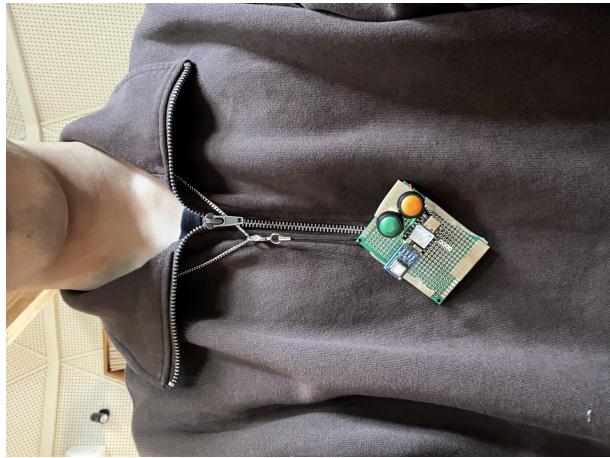


図 2.2: SCD41

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 2.2 に示す。

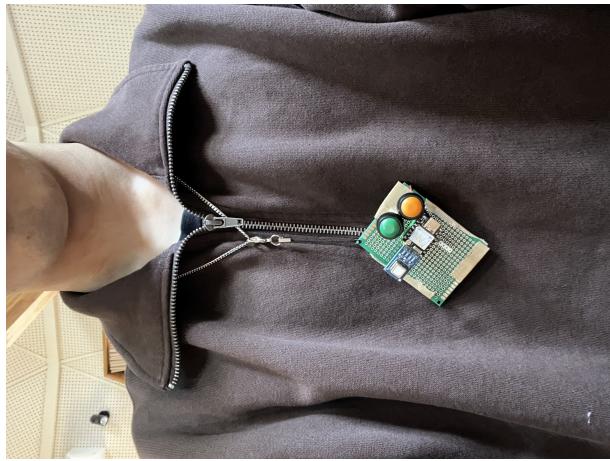


図 2.3: SIM7080G

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。

表 2.2: 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

2.3 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。

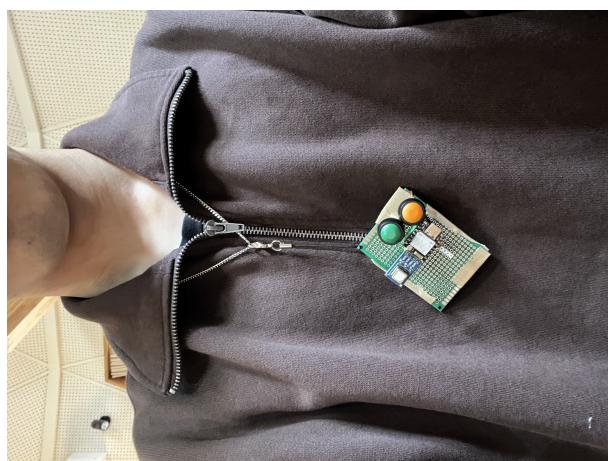


図 2.4: Arduino MKR WiFi 1010

2.3.2 CO₂ センサ MH-Z19C

MH-Z19C 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 2.3 に示す。



図 2.5: MH-Z19C

表 2.3: 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 温度・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 2.4 に示す。

表 2.4: 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

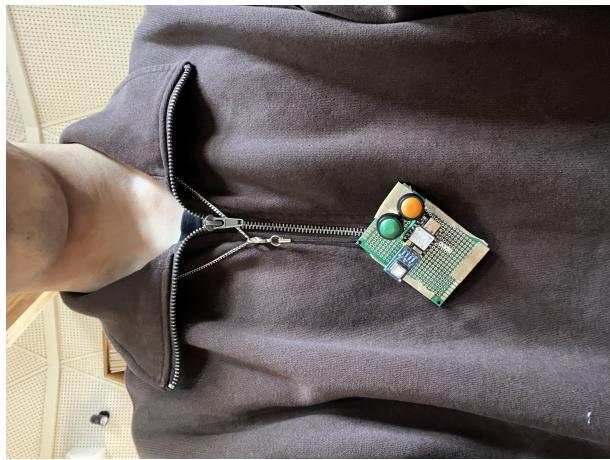


図 2.6: BME680

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 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携帯しながら CO₂ 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、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 CO₂ 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、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 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、CO₂ センサによって周囲環境中の CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 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 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 CO₂ 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、CO₂ 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、CO₂ 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、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 CO₂ 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 ₂ 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 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。

4.8 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 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 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、同一環境において同様の CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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、CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ センサを 35 台設置し、それぞれの近傍に小型 CO₂ 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 CO₂ 測定デバイスを携帯した状態での測定が可能であるか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 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 測定器を複数台設置することで得られる室内の CO₂ 濃度分布を基準とし、携帯型の小型 CO₂ 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 CO₂ 測定器を対象として実施した。本測定では、据え置き型 CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 測定デバイスと据え置き型 CO₂ 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 CO₂ 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

携帯時の測定では、小型 CO₂ 測定デバイスを利用者の身体に装着し、登山中に連続して CO₂ 濃度を測定した。装着位置は、首の前、首の後ろ、腰の前、腰の後ろの計 4 箇所とした。測定中は通常の歩行動作を行い、移動や姿勢変化によって測定値に大きな変動や異常値が発生しないかを確認した。

5.4 測定条件

5.4.1 測定間隔

山道における測定では、スマートフォンのテザリング接続が一定時間通信を行わない場合に切断される特性を考慮し、測定間隔を 30 秒とした。これにより、通信が途切れることなく安定して測定データを取得できるようにした。ドームハウスでの測定では、各測定位置において小型 CO₂ 測定デバイスを据え置き型測定器の近傍に設置して測定を行い、測定終了後は速やかに次の測定位置へ移動した。

5.4.2 装着位置

装着位置は、日常的な携帯を想定し、首および腰の前後の 4 箇所とした。

5.4.3 測定時間

ドームハウスにおける測定では、最下部に設置された測定器から最上部に設置された測定器までの全測定位置において比較測定を行い、測定全体に要した時間は約 30 分間であった。山道における測定では、登山開始から登頂および下山完了までの約 2 時間にわたり測定を行った。

5.5 評価方法

5.5.1 CO₂ 濃度測定精度の評価方法

CO₂ 濃度測定精度の評価は、据え置き型 CO₂ 測定器を基準として、本研究で試作した小型 CO₂ 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 CO₂ 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。

5.5.2 携帯利用時の測定安定性の評価方法

5.5.3 通信機能の評価方法

5.5.4 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、一定時間あたりの消費電力を測定することで、長時間利用の可能性を評価した。

具体的には、測定機器を 10 分間動作させ、その間の消費電力を計測した。得られた消費電力量を基に、使用しているリチウムポリマーバッテリの総電力量と比較することで、連続動作時における動作可能時間を推定した。この方法により、屋外環境を含む様々な場所で長時間利用するという設計仕様に対して、省電力設計が有効であるかを評価した。

第6章 測定結果と評価

本章では5章で述べた測定方式で測定した結果と評価を述べる。

6.1 概要

6.2 据え置き型センサとの比較結果

6.2.1 CO₂ 濃度の時間変化

6.2.2 高さ方向における測定結果

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 登山中の CO₂ 濃度変化

6.4 通信機能の動作結果

6.5 省電力性能の評価結果

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。