

ポータブルサーバを用いた
マルチポイント同期計測システムの開発
～教室における温湿度・二酸化炭素濃度の計測～

2017 年 3 月

弘前大学大学院 教育学研究科

佐 藤 ゆかり

要 約

平成 21 年に文部科学省所管の学校環境衛生基準¹⁾が改正された。学校環境衛生の維持・改善を図るために、教室等の環境（換気、保温、採光、照明、騒音等）の検査項目の基準値と検査方法を示している。また、近年プロダクティビティ（作業効率や学習効率）向上のための室内環境が求められている。東らの研究¹³⁾や中川らの研究¹⁴⁾で、建築物環境衛生管理基準⁴⁾等に定められている基準値に対して、教室の温湿度と二酸化炭素濃度の不適率が年々増加傾向にあると報告された。温湿度は熱中症指数との関連があり、また、二酸化炭素濃度は室内空気汚染を評価する 1 つの指標として用いられている⁵⁾。教室の環境を快適に保つためには温熱・空気環境の指標である温度、湿度、二酸化炭素濃度を把握する必要がある。基本的には目に見えない温熱・空気環境の状態を知ることによって空調制御するきっかけとなるため、温熱・空気環境の計測が重要である。

先行研究で温熱・空気環境を調査するために室内の 1 ヶ所で計測したり、ほぼ同条件を再現した実験室で計測する研究があった。教室内は休み時間や授業時間によって在室者の人数や活動量が刻々と変化する。このような状況が変化する教室内の温湿度・二酸化炭素濃度の詳細を捉えるには、1 ヶ所の計測では不十分である。飯野らの研究²⁾では計測場所により温度に差が出ることを報告している。また実験室での計測は、教室の変化する状態の一部分だけの再現である。このため教室内の温湿度・二酸化炭素濃度を詳細に捉えるためには、教室で実測することが重要であり、マルチポイントで計測する必要がある。そして空間分布を把握するために、また、その分布の状態変化を捉えるためには、時間的整合性が不可欠である。このような計測を教室内において学習活動に影響を及ぼさないように行わなければならない、そのためにはワイヤレスセンサネットワークを用いることが有用である。

本研究ではワイヤレスセンサネットワークを使用して温度、湿度、二酸化炭素濃度を、マルチポイントにおいて同期計測をし、データを一元管理するシステムを開発した。まず、学校の温熱・空気環境に関する先行研究を調査し測定方法や課題を整理した。そして、10 台の計測器とデータ収集機を作成し、教室内の温湿度・二酸化炭素濃度をマルチポイントで同期計測させ、分布状況や状態変化が把握できるデータを保存できた。計測器をケーブル不要にし、また、小型で軽量にしたため、磁石を張り付けることで様々な場所への設置が可能になり、学習活動に影響を及ぼさず計測できた。

本研究で開発したシステムを使用することにより、効率的な換気方法を見つけ出したり、ネットワーク環境が整備されていない室内等の温湿度・二酸化炭素濃度の分布状況を把握できるようになる。今後の課題は、データ収集機の **RaspberryPi** を安全に停止させるための機能が必要で、また、計測例が数件と少数なため、今後は計測例を増やしシステムの信頼性を検討する。これらの課題を残しつつも、本研究で開発したシステムが室内空気環境の保持に貢献できると考える。

目 次

第1章	序論	1
1.1	研究背景	2
1.2	先行研究	5
1.2.1	学校における環境データ解析の先行研究	6
1.2.2	教室における環境データ計測の先行研究	7
1.2.3	ワイヤレスセンサネットワークを使用した計測システムの先行研究	9
1.3	研究目的と本論文の構成	12
第2章	温湿度・二酸化炭素濃度のマルチポイント同期計測システムの開発	13
2.1	システム構成	14
2.2	計測器とデータ収集機の動作	19
2.3	時刻同期	21
第3章	教室における温熱環境と空気環境の計測例	23
3.1	計測日時・場所・計測方法	24
3.2	計測結果	25
第4章	考察	26
第5章	結論	27
	参考文献	28
	付録	30
	謝辞	39

第 1 章 序論

1.1 研究背景

平成 21 年に文部科学省所管の学校環境衛生基準¹⁾が改正された。教室等の環境（換気、保温、採光、照明、騒音等）の検査項目を挙げ、基準値と検査方法を示し、学校環境衛生の維持・改善を図ることを目的としている。具体的な温度、相対湿度、換気の基準は表 1.1 のとおりである。

表 1.1 学校環境衛生基準の温度・相対湿度・換気の基準

項目	基準
温度	10℃以上、30℃以下であることが望ましい。
相対湿度	30%以上、80%以下であることが望ましい。
換気	換気の基準として、二酸化炭素濃度が 1500ppm*以下であることが望ましい。

この他にも、学校を含む建築物全般に対する空気環境および換気に関する基準として国土交通省所管の建築基準法²⁾と厚生労働省所管の建築物環境衛生管理基準³⁾が存在する。それぞれの温度、相対湿度、二酸化炭素濃度の基準は表 1.2、表 1.3 のとおりである。

表 1.2 建築基準法の温度・相対湿度・換気量の基準

項目	基準
温度	17℃以上、28℃以下。
相対湿度	40%以上、70%以下。
換気量	20m ³ /(h・人)以上。

表 1.3 建築物環境衛生管理基準の温度・相対湿度・二酸化炭素濃度の基準

項目	基準
温度	17℃以上、28℃以下。
相対湿度	40%以上、70%以下。
二酸化炭素濃度	1000ppm 以下。

* 1 ppm (parts per million) は 1 気体の占める体積比が 100 万分の 1 の状態を表す。

建築基準法や建築物環境衛生管理基準と比較すると学校環境衛生基準は、温度・相対湿度・換気共に低いレベルに設定されているが、学校で中央管理方式の空調設備が導入されている場合には、より厳しい建築基準法の基準が適用され、1 棟あたりの延べ床面積が 8,000m² 以上かつ空調設備がある場合には、建築物環境衛生管理基準が適用される。また教室の換気に関しては、建築基準法と学校環境衛生基準の 2 つの基準が適用される場合がある等、教室の温熱環境と空気環境の管理が重要であることが分かる。

学校環境衛生基準に検査項目の計測方法が定義されており、それぞれの検査項目は学校薬剤師が測定する。その中で温度や相対湿度、二酸化炭素濃度の計測については、検査回数は年 2 回定期に行い、時期は地域の特性を考慮して実施することとしている。検査場所については学校の授業中等に各階 1 以上の教室等を選び、適当な場所 1 ヶ所以上の机上の高さにおいて検査するとしており、厳密な計測方法は記されていない。日本建築学会等は、定期的に温熱・空気環境は計測されているが、そのフィードバックが十分でなく、市民が活用しやすいデータの公開が望まれるとし、また、自分たちの安全や健康を考えるうえで、生活している教室の環境を計測・評価し、対策を練るためにモニタリングが必要であるとした⁵⁾。

モニタリングを実現するための技術として近年注目されているのが、ワイヤレスセンサネットワーク (Wireless Sensor Networks : WSN) である。ワイヤレスセンサネットワークとは、通信機能を内蔵した複数の小型センサを分散して設置し、情報を収集する無線通信ネットワークであり、医療、農業、インフラ、監視・セキュリティ等様々な分野で活用が進んでいる。活用例に橋、トンネル、建築物等の構造モニタリングや、農地、森林、都市等の環境モニタリング等があり、企業からワイヤレスセンサネットワークを用いた製品やサービスが提供されている⁶⁾⁷⁾。

また、学校のネットワーク環境について文部科学省の平成 27 年度調査⁸⁾では、普通教室の校内 LAN 設備率は 86.4%で、そのうち無線 LAN の整備は 23.5%であった。そして、同省の第 2 期教育振興基本計画⁹⁾では平成 29 年度までに超高速インターネット接続率及び無線 LAN 設備率 100%の目標を掲げており、また、総務省は平成 32 年度までに、全国すべての小・中・高校に無線 LAN(Wi-Fi)を導入するための費用の一部を平成 29 年度概算要求に盛り込む検討を始めた¹⁰⁾。このように学校において無線 LAN の整備がより一層進められる予定である。

そして関連研究で熱中症モニタリングシステムを開発し、活用してきた。グラウンドや体育館等弘前大学附属学校園の校舎内外 16 ヶ所に温湿度センサ端末を設置し、計測したデータを LAN 経由でサーバに蓄積する。計測した温湿度から熱中症指数を算出し、パソコン、タブレット等の Web 端末でリアルタイムにモニタリングできる。ブラウザに表示させることにより職員室や保健室から、体育館やグラウンドの状況を把握し、夏季の熱中症予防対策と

† Wi-Fi(Wireless Fidelity)とは無線 LAN の規格のひとつである。業界団体 Wi-Fi Alliance が IEEE によって標準化された高速無線 LAN の規格である IEEE 802.11 規格群を推進し、相互運用性を保証している。

して活用している。以下にグラウンドと体育館に設置した計測器の様子と、データを表示したブラウザの画面を示す。



図 1.1 グラウンドに設置した計測器

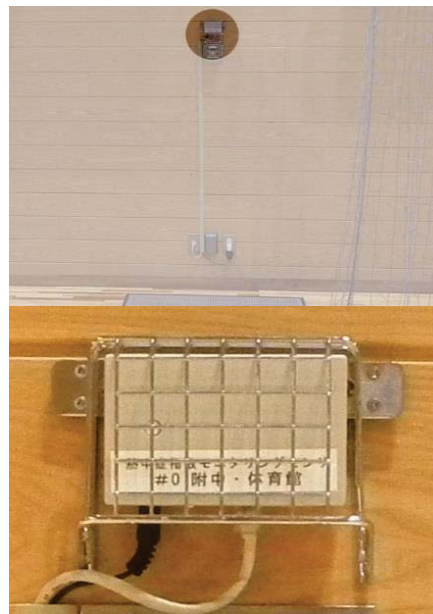


図 1.2 体育館に設置した計測器

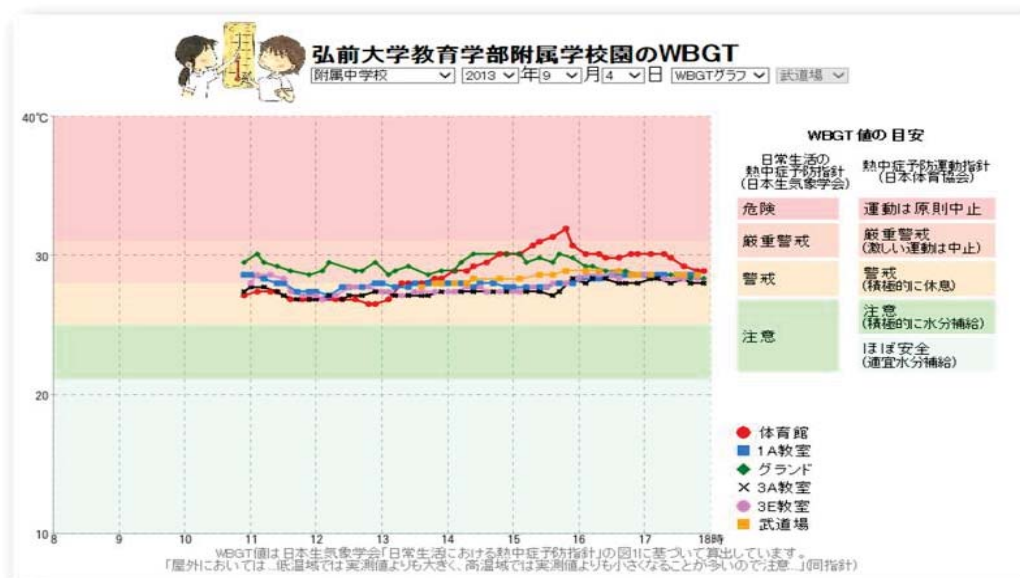


図 1.3 ブラウザ表示例

1.2 先行研究

1.2.1 学校における環境データ解析の先行研究

室内空気環境に関する金子らの研究¹¹⁾¹²⁾で、温熱・空気環境の質がプロダクティビティ（作業効率や学習効率）に影響を及ぼすとした。そして近年、学校教室に対して快適かつプロダクティビティの高い環境の要求が高まっており、大都市の学校では冷暖房の導入が進められ、換気も含めた空調設備を有する教室も増えつつある。プロダクティビティ向上を目指すためには温熱・空気環境の管理が重要になってくる。

東らの建築物における衛生環境の実態と解析の研究¹³⁾では、統計情報センターで公表している建築物の維持管理項目の不適合数を用いて分析した。考察では学校における温度、相対湿度、二酸化炭素濃度について、2003年度から2008年度にかけて建築物衛生法の環境衛生管理基準⁴⁾に対する不適合率が、年々増加傾向にあったとした。全国学校保健調査で、これまでの教室の換気方法は、常に欄間・窓・戸等を少し開け、休み時間に窓・戸等を開ける方法が一番多かったが、1999年度から2004年度にかけて、休み時間のみに窓・戸等を開ける比率が増加していることが分かっており、東らはこのことが管理基準の不適合率増加の原因の1つとした。

中川らの研究¹⁴⁾では1971年度から2009年度まで東京都が測定した居室内の二酸化炭素濃度の集計結果を用いて分析し、東らと同様に学校における二酸化炭素濃度が年々増加しているとし、設計時の換気能力不足が原因であるとした。

このように、学校における温熱・空気環境の基準値は定められているものの、実態は基準値を上回っており、また不適合率は上昇傾向にある。

1.2.2 教室における環境データ計測の先行研究

教室における温熱・空気環境がプロダクティビティに与える影響についての研究が数多い。各研究において空気環境の実態の調査として計測器を用いて計測し、その結果からプロダクティビティ向上を果たすための考察をしている。

そこで教室における温熱・空気環境に影響を及ぼす温度、湿度、二酸化炭素濃度を計測した先行研究を取り上げ、目的・計測対象・計測場所・時間等に着目し計測方法を表 1.4 に整理した 2)11)12)15)16)17)18)。

表 1.4 先行研究の計測方法

研究者	目的	計測対象	計測場所・時間・計測間隔
飯野 他 2)	新旧校舎の教室の熱・光環境を比較し、建築要素が及ぼす影響を把握する。	温湿度	教室 5 ヶ所：7.5～9h×約 33 回 5 分間隔
金子 他 11)12)	温熱・空気環境を現地実測し、学習効率に及ぼす影響を把握する。	温湿度・ CO ₂	教室中央 1 ヶ所：4h×6 回 実験室 9 ヶ所：4h×不明 1 分間隔
綾部 他 15)	教室の快適温度の算出と計算式を導出する。また教室環境データの可視化画面を作成。	温湿度	教室 6 ヶ所：1.5h×12 回 計測間隔不明
白川 他 16)	講義室内の空気環境の現状と空気環境が学習効率に与える影響を把握する。	温湿度・ CO ₂	講義室 温湿度 4 ヶ所・CO ₂ 1 ヶ所：計測時間不明×11 回 5 分間隔
佐藤 他 17)	気候別、設備別による教室の空気環境への影響を検討する。	CO ₂	国内外 9 教室 計測場所等不明： 2h～4h×約 8 回 計測間隔不明
岩下 他 18)	エビデンス・ベースド・アプローチ [‡] に基づく教室の空気環境の研究。	温湿度・ CO ₂	中学高校 8 教室 黒板横 1 ヶ所： 4.5h 又は 6.5h×約 7 か月 10 分間隔

※表中の"h"は時間(hour)を表す。

計測は 1～10 分間隔で行われていた。計測場所は、一つの教室内では綾部らの研究 15)が 6 ヶ所と一番多く、次いで飯野らの研究 2)と白川らの研究 16)が合計 5 ヶ所、その他は少数又

[‡] エビデンス・ベースド・アプローチとはオルポートが提唱した研究方法の一つで、実験や調査に基づく数量的アプローチを指す。

は不明であった。教室内の熱・光環境の空間分布と取り上げた飯野らの研究²⁾では、空間分布を把握するために温湿度を 5 ヶ所で計測しており、計測場所により温度に差が出ることを報告した。温熱・空気環境が学習効率に及ぼす影響について研究した金子ら¹¹⁾¹²⁾は、空調設備が整った実験室において温湿度・二酸化炭素濃度を 9 ヶ所で計測しているが、実際の教室においては 1 ヶ所だけであった。綾部ら¹⁵⁾は、教室の快適温度の算出と環境データの可視化を研究した。授業中に教室内を快適な環境に保つためには、温熱・空気環境を計測し、データを可視化することで空気制御の手助けができるとしており、6 ヶ所で計測しデータは Web 上から確認できる。教室の平面図を 6 つに区切り、その中に計測値が数字で表されている。室内環境と学習効率に関しての白川らの研究¹⁶⁾では、教室の 4 ヶ所で温湿度を計測しており、その平均を計算し使用していた。計測場所による温湿度の数値の差異は扱っていない。気候別、設備別に教室の空気環境の影響を研究した佐藤ら¹⁷⁾は、国内外の 9 つの教室で二酸化炭素濃度を計測したが、1 つの教室内において計測場所の数は明らかでない。エビデンス・ベースド・アプローチに基づく教室の空気環境の研究をした岩下ら¹⁸⁾は、温湿度と二酸化炭素濃度を教室の 1 ヶ所で 10 分間隔で計測した。

温熱・空気環境を詳細に捉えるためには、その指標である温湿度・二酸化炭素濃度の空間分布や、その分布状態の変化を把握する必要がある。計測場所が少数だったり、同時刻に計測されなければ、これを捉えることはできない。このためマルチポイントで同期制御した計測が重要である。ここで取り上げた研究において同期制御した計測が行われていたかは明らかでない。

1.2.3 ワイヤレスセンサネットワークを使用した

計測システムの先行研究

教室内の温湿度や二酸化炭素濃度を計測するには、現場に計測器を設置し計測者が行わなければならないため、授業中等で在室者への影響が出た。また、同期制御しマルチポイントで計測するには、複数の計測者が必要になる。学校生活に影響を与えず同期制御しマルチポイントで計測するためには、ワイヤレスセンサネットワークを使用した計測が有用と考えた。同期とは複数の事象が同時に起こることで、ここではマルチポイントにおいて同時刻に計測することを表す。そこで、これまでのワイヤレスセンサを使用した計測システムの研究を取り上げ表 1.5 に整理した¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾²²⁾。

表 1.5 ワイヤレスセンサネットワークを使用した計測システム

研究者	計測対象	計測点	同期	計測間隔	無線	データ保存	備考
荒木 他 ¹⁹⁾	照度	30 増加可	○ 毎回	5 分 変更可	2.4 GHz	メインユニット と RS-232C で 有線接続したコ ンピュータ	メインユニットとサ ブの間は無線で、それ 以外は有線。同期精度 は不明である。
森川 他 ²⁰⁾	温湿度	複数	不明	1 秒	2.4 GHz	サーバ	計測現場を再現し実 験した。
鈴木 他 ²¹⁾	加速度	複数	○ 毎回	30 ミリ秒	2.4 GHz	外部 SRAM	橋梁の状態監視をし た。同期精度は不明で ある。
森 ²²⁾	温度・ 照度	複数	不明	不明	2.4 GHz	サーバ	卓上で動作検証をし た。

いずれの研究もデータ収集には 2.4GHz の無線 LAN を使用していた。照度を計測した荒木らの研究¹⁹⁾では、センサに日置電機のルクスハイテスタ 3423、コントロールモジュールに遠隔計測監視システム 2300 を用いて、多点同期計測を実現した。計測間隔毎にメインユニットと有線接続したコンピュータから、各ユニットへ計測命令を送信して同期を取った。高温下における温湿度を計測した森川らの研究²⁰⁾では、時計機能を持たない計測器の場合、計測時刻を NULL として送信し、データ収集サーバ側でパケット到着時刻を計測時刻として保存した。同期制御に関しては不明である。変位や異常を監視する橋梁モニタリングをした鈴木らの研究²¹⁾では同期制御した計測をしている。鈴木ら自らが開発した同時送信技術

を用いた無線通信機構"Choco"を用いており、同期パケットと各ノードの残存パケット数を使用してスケジューリングし同期を取った。森の研究²²⁾では、特別なハードウェアやソフトウェアの知識や技術がなくてもワイヤレスセンサネットワークの開発・構築できること、そして計測器が生成する連続かつ大量のデータをリアルタイムに収集できることを目的に、システムを構築した。計測器には **Arduino** を、データ収集にはオープンクラウドとして提供されている **Amazon Web Services** を用いた。計測器からはデータを **HTTP** の **POST** リクエストとしてクラウドサーバに送信する。同期制御に関しては不明である。マルチポイントで温湿度や二酸化炭素濃度を同期計測した研究は見当たらない。

また、表 1.6 に現在製品として発売されている主な温湿度や二酸化炭素濃度の計測器について整理した²³⁾²⁴⁾²⁵⁾。

表 1.6 市販されている主な温湿度や二酸化炭素濃度の計測器

製品名	計測点	同期	計測 間隔	無線	データ 保存	備考
おんどとり RTR-576 ²³⁾	1～ 100	○	1 秒～ 60 分	2.4 GHz	計測器	複数計測器の計測開始時刻を予約スタートすると同期可能。計測器に時計機能はない。データ収集には専用の収集機と専用アプリがインストールされたパソコンが必要である。
CO2- 9904SD ²⁴⁾	1～16	○	2 秒～ 9 時間	×	計測器 ・SD カード	同期計測するには PC に専用ソフトをインストールし計測器を USB 接続する。同期方法は不明。
環境センサ 2JCIE- BL01 ²⁵⁾	1	×	1 秒～ 1 時間	2.4 GHz	計測器	スマートフォン等に専用アプリをインストールし、計測器と Bluetooth で接続するとデータ確認できる。

いずれの製品も基本的に一つの計測器で環境データを計測する。おんどとり **RTR-576**²³⁾ は計測器を増やせ、複数計測器の計測開始時刻を予約スタートすることで同期計測が可能である。また、計測値のデータを取り扱うためには、専用の収集機を使用し、専用アプリがインストールされているパソコンに吸い上げが必要である。計測器には時計機能がないため、吸い上げたデータを専用アプリに取り込み、パソコンの時間情報を使用し、逆算して計測時刻にしている。このため、パソコンの時間にズレが生じると計測時刻にも影響する。そこで、パソコンの時計機能の管理が必要になる。また、専用アプリがインストールされたパソコンがなければ、計測時刻を得ることができない。温湿度や二酸化炭素濃度の数値だけで

は、他の計測器のデータとの関連付けができなくなる。

また CO2-9904SD²⁴⁾は計測器を最大 16 台まで増やせる。パソコンに専用ソフトをインストールすることにより、計測値を一元管理し同期制御した計測が可能だが、パソコンに各計測器が USB で接続されていなければならない。環境センサ 2JCIE-BL01²⁵⁾は計測器の追加は可能だが、複数計測器のデータを一度に扱うことはできず、また同期制御機能はない。

1.3 研究目的と本論文の構成

近年プロダクティビティ（作業効率や学習効率）向上のための室内環境が求められている。東らの研究¹³⁾や中川らの研究¹⁴⁾で、建築物環境衛生管理基準⁴⁾等に定められている基準値に対して、教室の温湿度と二酸化炭素濃度の不適率が年々増加傾向にあると報告された。温湿度は熱中症指数との関連があり、また二酸化炭素濃度は室内空気汚染を評価する 1 つの指標として用いられている⁵⁾。教室の環境を快適に保つために温熱・空気環境に影響を与える温湿度・二酸化炭素濃度を把握する必要がある、基本的には目に見えない温熱・空気環境の状態を知ることによって空調制御するきっかけとなるため、温熱・空気環境の計測が重要である。

先行研究で温熱・空気環境を調査するために室内の 1 ヶ所で計測したり、ほぼ同条件を再現した実験室で計測する研究があった。各学校において窓や戸、欄間や空調設備の構造や設置位置が違い、各教室の位置も違う。そして、教室内は休み時間を挟みながら様々な授業が順次行われ、それに伴って在室者の人数や活動量が刻々と変化する。このような状況が変化する教室内の温湿度・二酸化炭素濃度の詳細は、1 ヶ所の計測では捉えられない。飯野らの研究²⁾では計測場所により温度に差が出ることを報告している。また実験室での計測は、状態が変化する教室の一部分の再現になり、計測した結果が全ての時間、場所に当てはまるとは言えない。このため学習活動の過半の時間を過ごす教室内の温湿度・二酸化炭素濃度を詳細に捉えるためには、教室で実測することが重要であり、マルチポイントで計測する必要がある。そして空間分布を把握するために、また、その分布の状態変化を捉えるためには、時間的整合性が不可欠である。そして、このような計測を教室において学習活動に影響を及ぼさないように行わなければならない、そのためにはワイヤレスセンサネットワークを用いることが有用である。ワイヤレスセンサネットワークを使用した計測システムの先行研究では、照度や加速度を対象とした同期計測の研究はあるが、温湿度・二酸化炭素濃度を対象とした研究で同期計測していたかは明らかでない。そして、市販されている主な温湿度や二酸化炭素濃度の計測器では、同期の精度が不明であったり、同期制御して計測するためにケーブルが必要だった。これは温湿度・二酸化炭素濃度の分布状況を捉える際に誤差が生じたり、学習活動に影響を及ぼす可能性が出てくる。

本研究では教室において、温熱・空気環境に影響を与える温度、湿度、二酸化炭素濃度の詳細を、日常の学習活動に影響を及ぼさないように実測するために、ワイヤレスセンサネットワークを使用して、マルチポイントにおいて同期制御した計測をし、分布状況や経時的変化を捉えることができるデータを、一元管理するシステムを開発する。本論文の構成は第 1 章の序論では、研究背景や先行研究について記述する。第 2 章では温湿度・二酸化炭素濃度のマルチポイント同期計測システムの開発について述べる。第 3 章は教室における温湿度・二酸化炭素濃度の計測例について述べ、第 4 章で考察について述べる。最後に第 5 章で本研究で得られた研究成果について記述する。

第2章 温湿度・二酸化炭素濃度の

マルチポイント同期計測システムの開発

2.1 システム構成

教室における温湿度と二酸化炭素濃度の分布状況を把握するために、また、状況の変化を明らかにするために、マルチポイントで同期制御して計測するシステムを開発した。マルチポイントで計測する場合、日常の学習活動に影響を及ぼさないようにするために、小型の計測器とデータ収集機を作成し、Wi-Fi を使用し無線通信させた。

開発したシステムアーキテクチャを図 2.1 に示す。

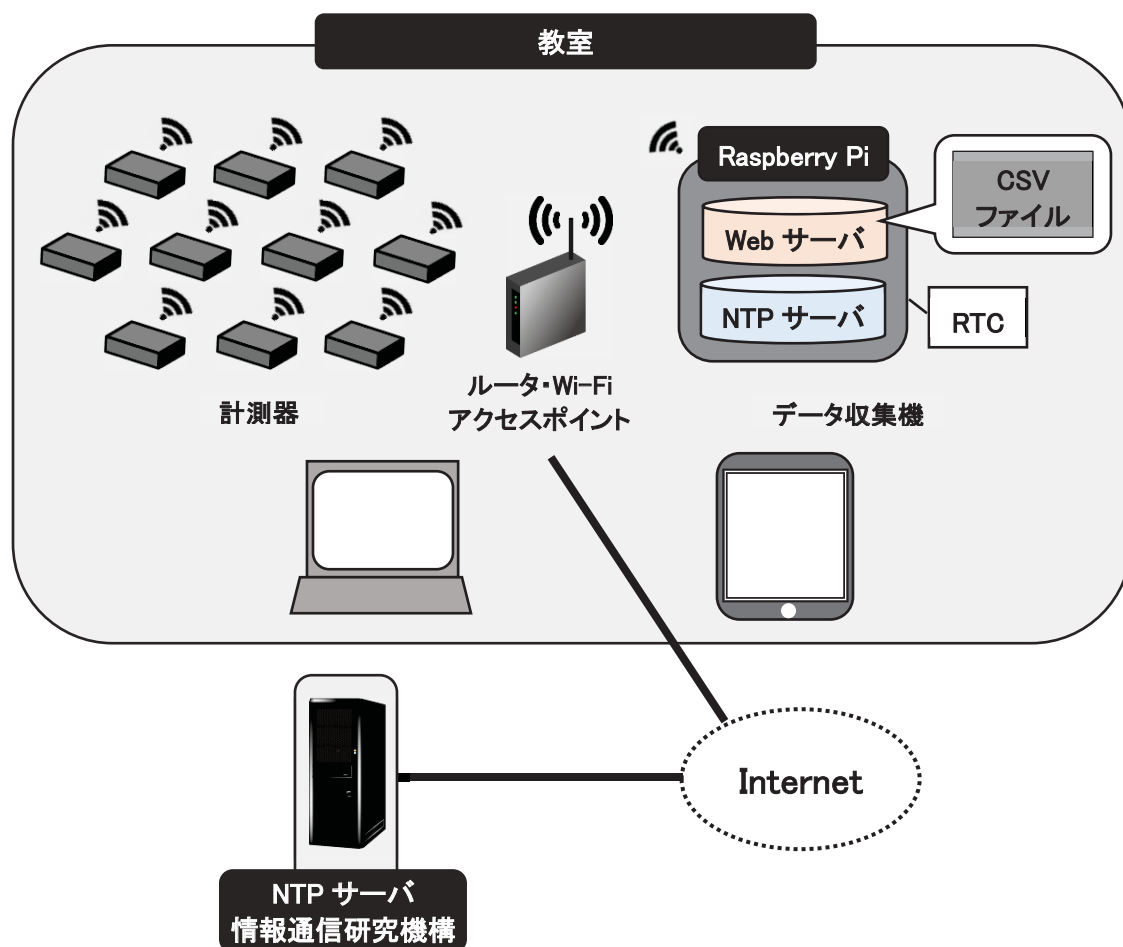


図 2.1 システムアーキテクチャ

計測器は温湿度・二酸化炭素濃度を計測し、Wi-Fi を使用してデータ収集機の Web サーバにデータを送信する。Web サーバでは PHP プログラムがデータを受信し、CSV ファイルに保存する。データ形式は計測年月日、計測時刻、学校 ID、計測器 ID、温度、湿度、二酸化炭素濃度である。Web サーバに保存した様子を図 2.2 に示す。

[計測年月日・計測時刻・学校 ID・計測器 ID・温度・湿度・二酸化炭素濃度]

```
2016/12/1,8:00:00,5,0,15.1,53,966↓
2016/12/1,8:00:00,5,8,14.3,53.8,914↓
2016/12/1,8:00:00,5,7,13.9,55.5,1060↓
2016/12/1,8:00:00,5,1,14.4,54.7,934↓
2016/12/1,8:00:00,5,6,15.53,1.987↓
2016/12/1,8:00:00,5,2,14.5,55,1026↓
2016/12/1,8:00:00,5,4,15.2,56.4,1078↓
2016/12/1,8:00:00,5,9,14.7,54.5,971↓
2016/12/1,8:00:00,5,5,13.9,57.3,1110↓
2016/12/1,8:01:00,5,0,15.3,52.4,936↓
2016/12/1,8:01:00,5,4,15.4,52.2,968↓
2016/12/1,8:01:00,5,9,14.9,55.8,1065↓
```

図 2.2 Web サーバに保存したデータ

計測器は時計機能がないため、データ収集機の NTP サーバ[§]と同期し時刻データを取得した。電源投入時は直ちに計測を行い、計測 2 回目以降は計測時刻になるまで待ってから計測し、Web サーバにデータを送信する。そして Web サーバから計測間隔時間を受け取ったら次回計測時刻を計算・保存し、その時刻まで低消費電流の Deep-Sleep モードになる。そして、計測時刻になったら Wake-up し通常モードになる。このとき Wi-Fi 接続や NTP サーバとの同期にかかる時間が変動するため、Sleep モードの時間を微調整した。計測間隔時間は Web サーバ内に保存しており 1 分から設定できる。例えば 10 分に設定した場合、計測器は毎時 00 分、10 分、20 分、30 分、40 分、50 分に計測する。

システムの構成要素は表 2.1 のとおりである。

表 2.1 システムの構成要素

	部品	製品名等
計測器 10 台	マイクロコントローラ	Espressif Systems 社 ESP-WROOM-02 DIP 化キット ²⁶⁾ (無線 LAN チップ内蔵)
	温湿度センサ	Sensirion 社 SHT11 ²⁷⁾
	二酸化炭素濃度センサ	FIGARO 社 CDM7160 CO2 センサ ²⁸⁾
	電源	単 3 電池×2
データ 収集機	ハードウェア	Raspberry Pi 3 Model B ²⁹⁾
	OS	RASPBIAN JESSIE LITE
	ソフトウェア	Apache・PHP
	RTC**	elecrow 社 Tiny RTC I2C modules
無線 LAN ルータ・アクセスポイント		BUFFALO 社 Air Station HIGH POWER

計測器の主な部品はマイクロコントローラの ESP-WROOM-02 DIP 化キット、温湿度センサの SHT11、二酸化炭素濃度センサの CDM7160 CO2 センサである。電源にはケーブル

[§]NTP サーバは NTP(Network Time Protocol)で現在時刻のデータを配信するサーバである。

** RTC(Real Time Clock)は時計の機能を持つチップである。本体電源が切られても内部電源で駆動できる。

不要にするために電池を使用した。計測器の外観を図 2.3 と図 2.4 に示す。



図 2.3 計測器の外観 1

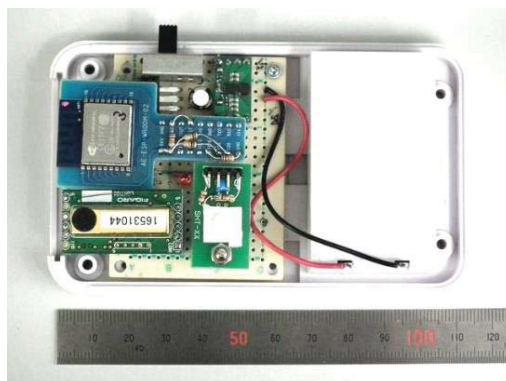


図 2.4 計測器の外観 2

計測器のサイズは $10\text{cm} \times 6.5\text{cm} \times 3.5\text{cm}$ と小型で、重さは約 200g と軽量である。付属しているのは電源のスイッチだけで、持ち運びやすい形である。背面には磁石を張り付けており机の側面等にも取り付け可能にし、教室に在室する生徒の学習活動に影響を及ぼさないように配慮した計測器を 10 台作成した。計測器の回路図を図 2.5 に示す。

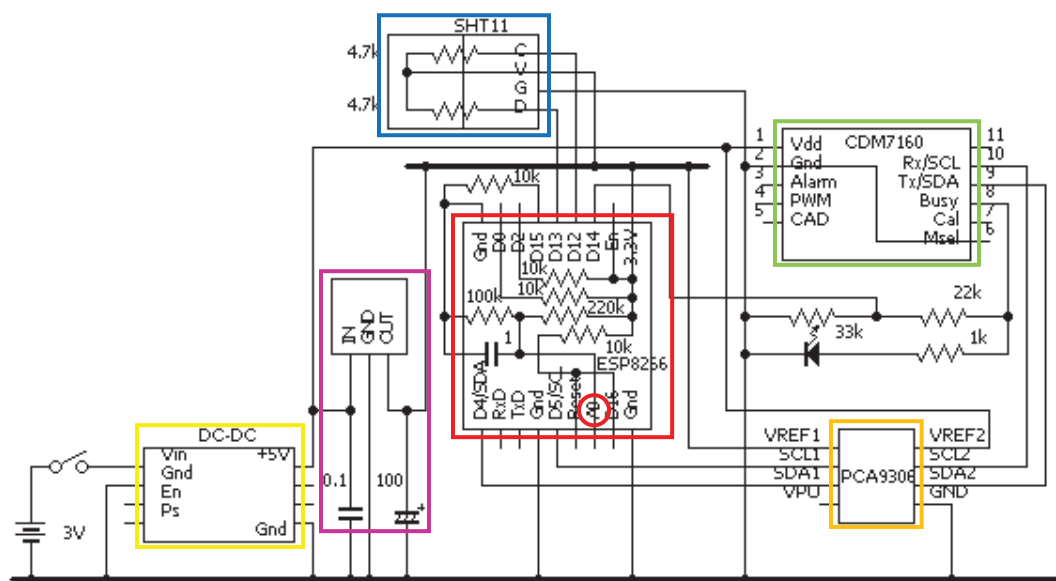


図 2.5 計測器の回路図

赤枠の ESP8266 がマイクロコントローラ、青枠の SHT11 が温湿度センサ、緑枠の CDM7160 が二酸化炭素濃度センサである。バッテリー 3V の直流電圧を黄色枠の DC/DC コンバータにより 5V の直流電圧に変換し、SHT11 と CDM7160 に投入した。5V の電圧を紫枠の 3 端子レギュレータにより 3.3V に降下し、ESP8266 に投入した。SHT11 とは 2 線式

のシリアルインターフェースで通信し、CDM7160 とは I2C(Inter-Integrated Circuit)で通信した。I2C 通信するためにオレンジ枠の双方向電圧変換モジュール PCA9306 を使用した。計測したデータは無線 LAN チップが内蔵されている ESP8266 が、Wi-Fi を使用してデータ収集機の Web サーバに送信する。

室内空気汚染を評価する指標の 1 つである 二酸化炭素濃度を対象とし、計測器の精度を確認した。空気の移動をできるだけ抑えるため、机上に並べた 10 台の計測器を箱で覆い計測した。で計測間隔時間 1 分で約 60 分計測した誤差を図 2.6 に示す。

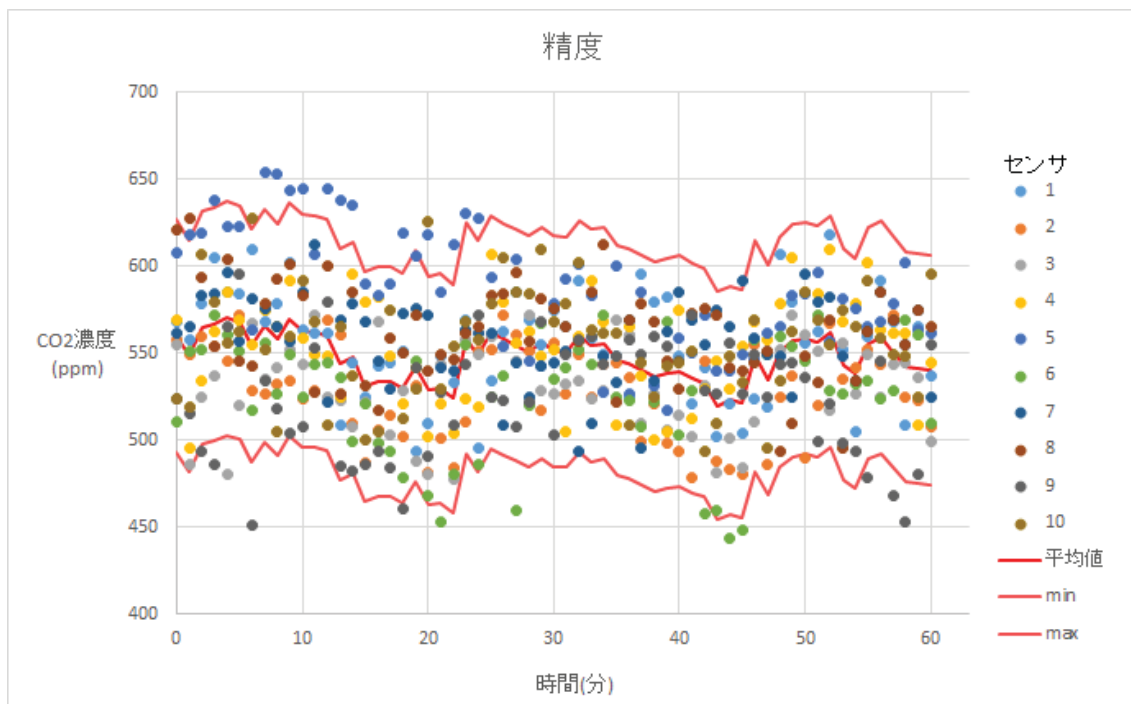


図 2.6 計測器(二酸化炭素濃度計測)の精度

赤線が各時間の計測値平均で、ピンク線がデータシートの精度 $\pm(50\text{ppm} + \text{計測値} \times 0.03)$ である。全測定値の 95%が精度の範囲内である。5 番のセンサは計測開始約 15 分間は範囲外の高い数値を計測し、その後計測値は範囲内になった。また、6 番と 9 番のセンサは単発的に範囲外の低い数値を計測したが、約 90%は範囲内である。これらを踏まえ、作成した計測器 10 台をシステムで使用することは有用であると考ええる。

図 2.1 のデータ収集機は Web サーバ、NTP サーバとして動作させるため、データを保存するメモリ、Wi-Fi、時計機能等が必要である。Raspberry Pi 3 Model B は CPU のコアが 4 個あり OS を軽快に動かす基本性能を備えている。1G バイトのメモリや無線 LAN チップが搭載されており、また、サイズが 8.5 cm × 5.6 cm × 1.7cm と小型で、最大消費電力が約 12.5W とノートパソコンに比べ小さいため、データ収集機に Raspberry Pi 3 Model B を使用した。時計機能がないために RTC を接続した。

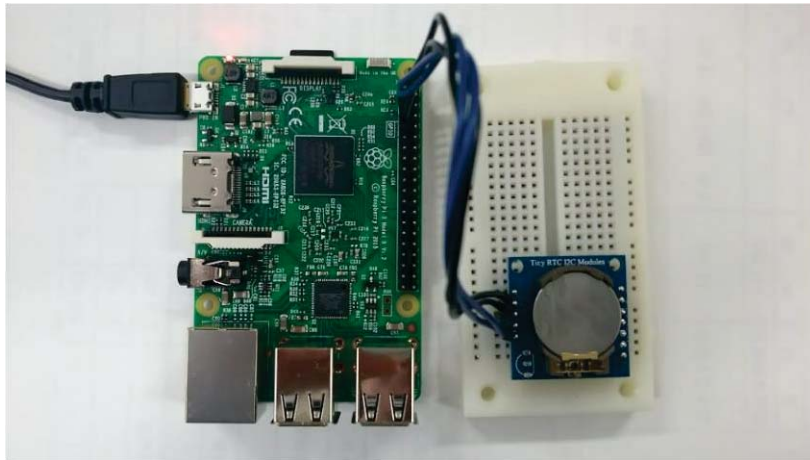


図 2.7 Raspberry Pi と RTC の接続

OS には RASPBIAN JESSIE LITE を使用し、無線 LAN で通信するための設定をした。`wpa_supplicant.conf` ファイルには SSID 名、暗号化キー、認証方法を追加し、`dhcpcd.conf` ファイルに設定したい IP アドレス、デフォルトゲートウェイの IP アドレス、DNS サーバの IP アドレスを追加し設定した(付録 2 を参照)。また、標準でインストールされている NTP サーバの設定ファイル `ntp.conf` を変更した(付録 3 を参照)。正確な時刻データを取り扱うために外部の NTP サーバに情報通信研究機構の公開サーバを指定し、LAN 内のクライアントからの問い合わせを許可する設定をした。そして Web サーバ構築のために Apache・PHP をインストールした。計測器からの受信データを CSV 形式で保存し、計測間隔時間を返信する機能を PHP プログラムで作成した(付録 6 を参照)。また、Web 上から計測値等のデータをダウンロードでき、計測間隔時間を変更できるようにした(付録 7、8 を参照)。

2.2 計測器とデータ収集機の動作

まず、データ収集機の RaspberryPi は電源投入すると Web サーバと NTP サーバが起動し、情報通信研究機構が公開している NTP サーバと同期を取る。電源投入後の初期動作は図 2.7 のとおりである。

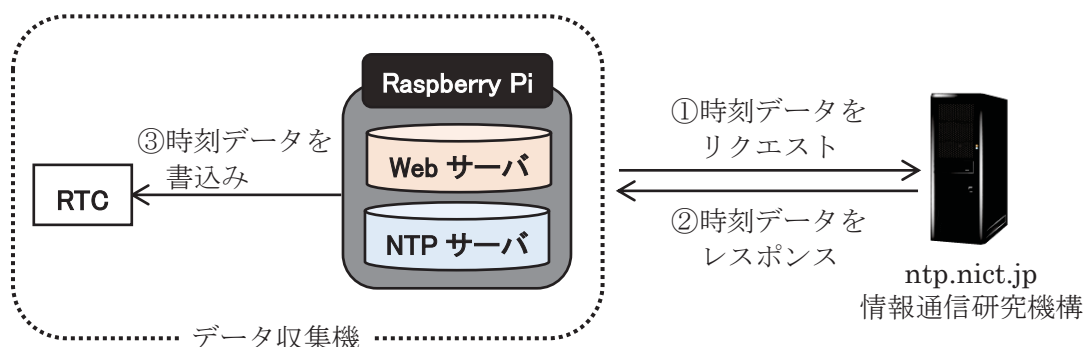
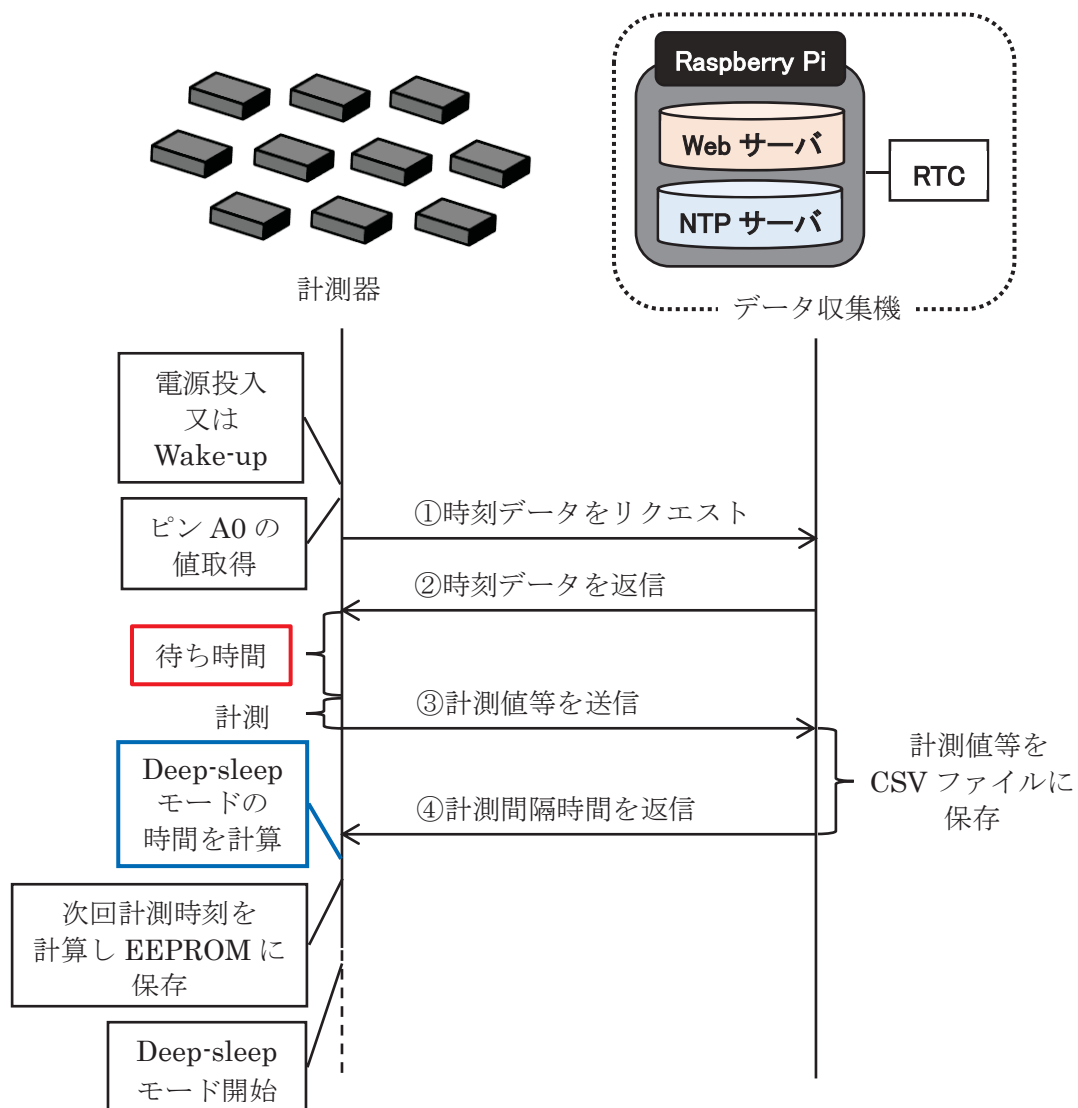


図 2.7 RaspberryPi に電源投入後の初期動作

Raspberry Pi は情報通信研究機構の NTP サーバに時刻データをリクエストし(①)、時刻データを受信する(②)。その後受信した時刻データを RTC に書き込む(③)。これは Raspberry Pi に電源投入された時だけの動作である。初期動作後は計測器からのリクエストに待機し、リクエストを受け取った時には RTC の時刻データを返信する。

電源が投入され初期動作後の計測器とデータ収集機間の通信の様子を図 2.8 に示す。計測器は電源投入または Wake-up すると、図 2.5 計測器の回路図に記されているピン A0 の値により電源投入時か否かを判断し、待ち時間を決める。そして、アクセスポイントを介してデータ収集機と無線通信を開始する。計測器が NTP サーバに時刻データをリクエストし(①)、NTP サーバは RTC の時刻データを返信する(②)。計測器は計測時刻になったら二酸化炭素濃度と温湿度を計測し、計測値等を HTTP の POST リクエストとして Web サーバに送信する(③)。Web サーバは受信した計測値等を CSV ファイルに保存し、現在の計測間隔時間を返信する(④)。計測器は受信した計測間隔時間を元に、Deep-Sleep モードの時間と次回計測時刻を計算する。ESP モジュールの通常の消費電流は平均 80mA だが、Deep-Sleep モードにすると $10\mu\text{A}$ で消費電流を抑えることができる。電池の消耗を考慮し待機する時間は Deep-Sleep モードにした。Deep-Sleep モードはデータが消えてしまうため次回計測時刻を EEPROM^{††} に保存した。

^{††} EEPROM は電源を切っても記録内容が消えない不揮発性メモリの一種で、電氣的に内容の書き換えができる。



※待ち時間 [単位：ミリ秒]

電源投入時 : 無し。直ちに計測開始

電源投入時以外 : 計測時刻 - 現在時刻 - 2300

図 2.8 計測器とデータ収集機間の通信

2.3 時刻同期

温熱・空気環境に関する要素の空間分布を把握するために、また、その分布の状態変化を捉えるためには、時間的整合性が不可欠なため、各計測器の計測時刻を同期制御した。

まず、Wi-Fi 接続や NTP サーバと同期する時間が、各計測器によって差が出るため、それぞれの動作にかかる時間を調査した。動作の合計時間は約 9 秒から 11 秒必要で、約 2 秒の差があることが分かった。そこで、各計測器の計測時刻を同時するために、図 2.8 に示す Deep-Sleep 時間を 10 秒短くし少し早く Wake-up させ、動作時間に差が出る Wi-Fi 接続や NTP サーバと同期した後に、現在時刻から次回計測時刻までの時間を計算し待ち時間にする。動作の合計時間の差を吸収した。計測器が電源投入又は Wake-up し、Deep-Sleep モードになるまでの各動作にかかる時間を図 2.9 に示す。"次の計測時刻まで待つ"動作は図 2.8 の"待ち時間"に相当する。

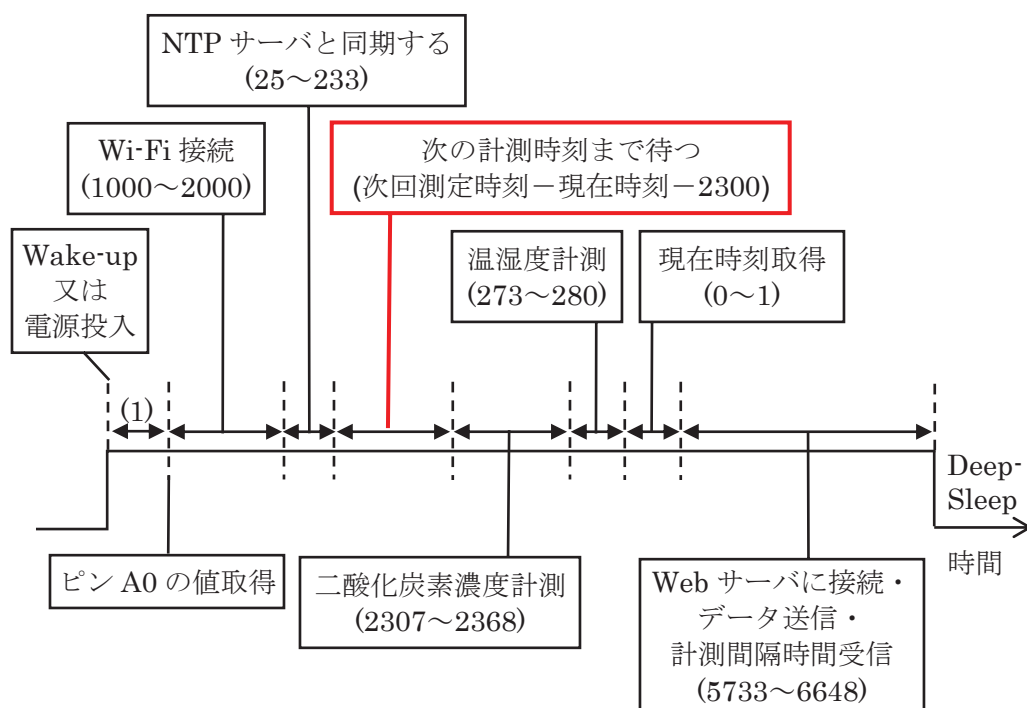


図 2.9 計測器の各動作にかかる時間（数値の単位はミリ秒）

各動作のカッコ内は処理にかかる時間、または処理時間の計算式を表している。単位はミリ秒である。"次の計測時刻まで待つ"動作のカッコ内に記述している 2300 ミリ秒は、二酸化炭素濃度の計測にかかる時間である。計測器の動作フローを図 2.10 に示す。電源投入または Wake-up の後、ピン A0 の値を取得し、電源投入直後かどうかを判断する(付録 5 を参照)。電源投入直後の計測は同期せず、2 回目以降から同期計測可能である。

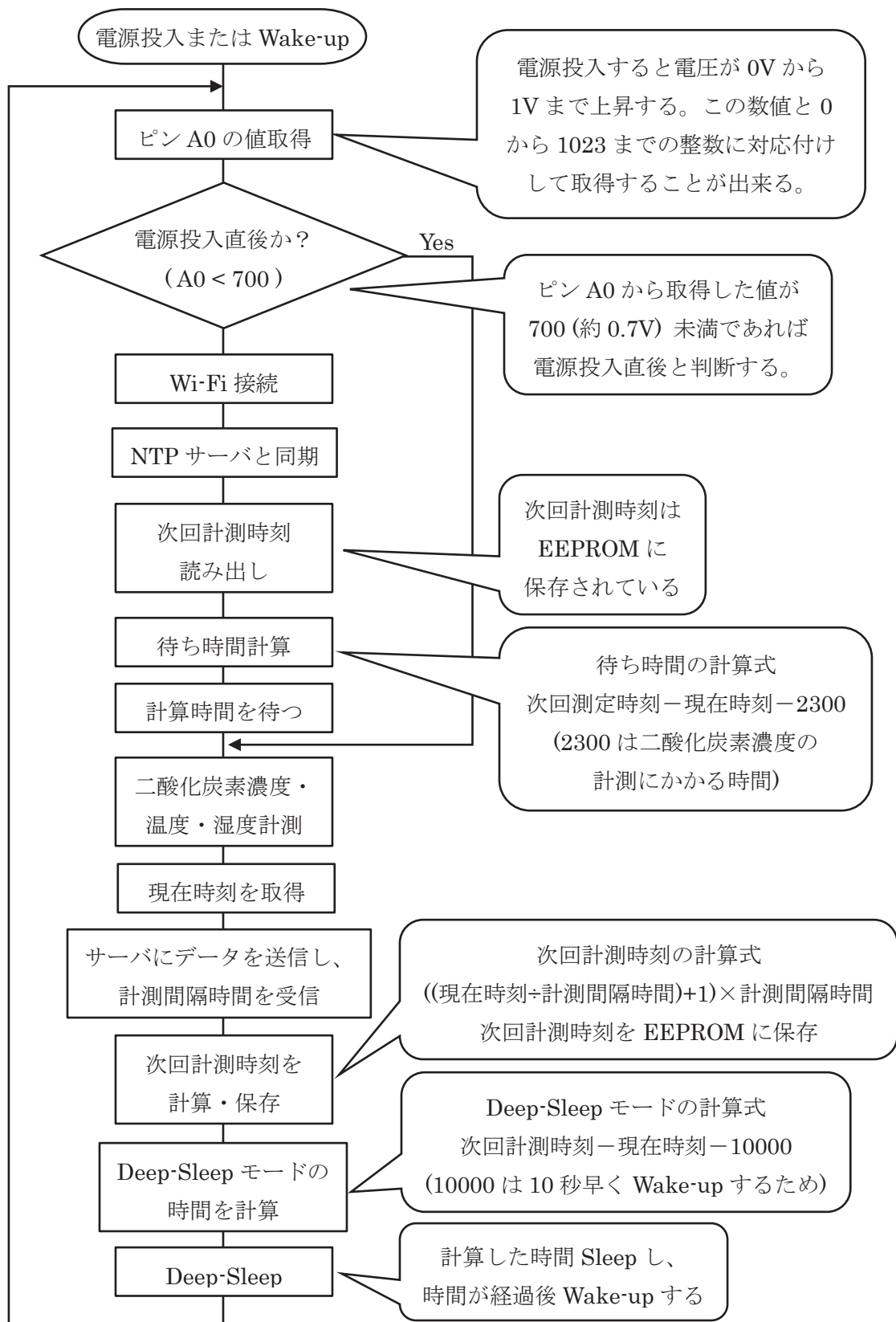
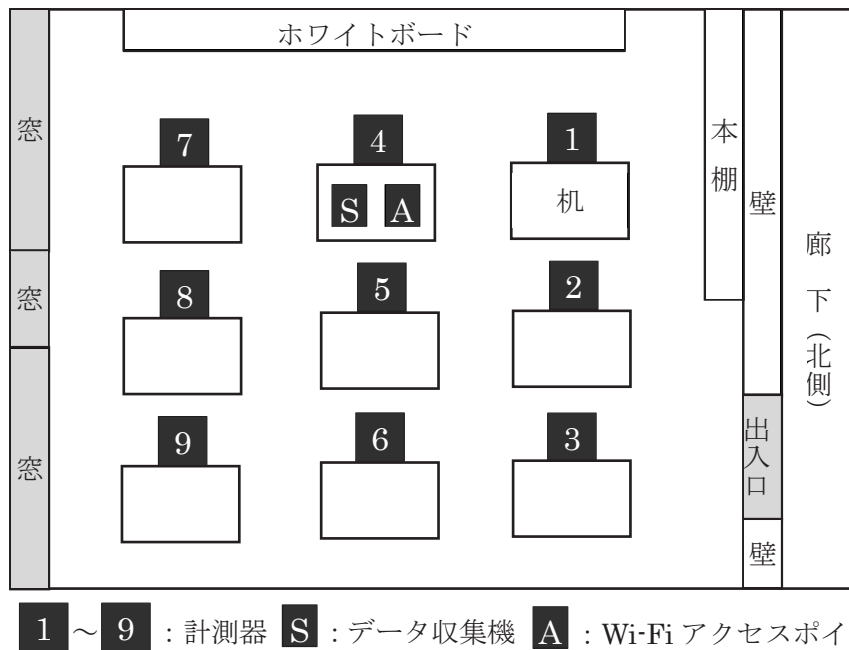


図 2.10 計測器の動作フロー (計算式の数値の単位はミリ秒)

第3章 教室における温熱環境と空気環境の計測例

3.1 計測日時・場所・計測方法

2016 年 12 月 22 日 8:40～12:10 東北コンピュータ専門学校において、日常の学習活動を行う教室 9 箇所の机の前面（床 65cm）に計測器を設置した。教室の平面図と計測位置を図 3.1 に、計測器設置の様子を図 3.2 に示す。



1 ～ 9 : 計測器 S : データ収集機 A : Wi-Fi アクセスポイント

図 3.1 教室の平面図と計測位置



図 3.2 計測器設置の様子

鉄筋コンクリート構造 5 階建て校舎の 3 階中央部の教室で計測した。北側の窓は閉め切り、眩しさを軽減するためブラインド調節した。暖房機はパネルヒーターとエアコンを使用し、換気扇は稼働させていない。

在室人数は、生徒 5 名及び教師 1 名で最大 6 名であった。教室内に設置された各計測器は温度・湿度・二酸化炭素濃度を 1 分毎、計測するように設定した。

3.2 計測結果

3 時間 30 分計測し、1995 件のデータが保存できた。計測時間内の温湿度と二酸化炭素濃度の数値は、大きな変化はなく全て基準値の範囲内だった。また、計測器の電池は 1 分間隔の計測で 12 時間以上稼働できた。そして、異なる無線 LAN 環境においても、電源を供給するだけでシステムが稼働し、計測したデータを保存できることを確認した。

2016 年 12 月 1 日に弘前大学教育学部附属中学校においての例では、RC 構造 3 階建て校舎の 3 階中央部の教室で 8 : 00 ~ 17 : 00 まで計測した。生徒と教師の在室状況や、戸・窓の開閉状況を把握するために、教室後方のロッカー上にビデオカメラを設置して記録した。システムで取得した二酸化炭素濃度のデータと、ビデオカメラで記録した教室の在室人数の情報を合わせてグラフにしたのが図 3.3 である。

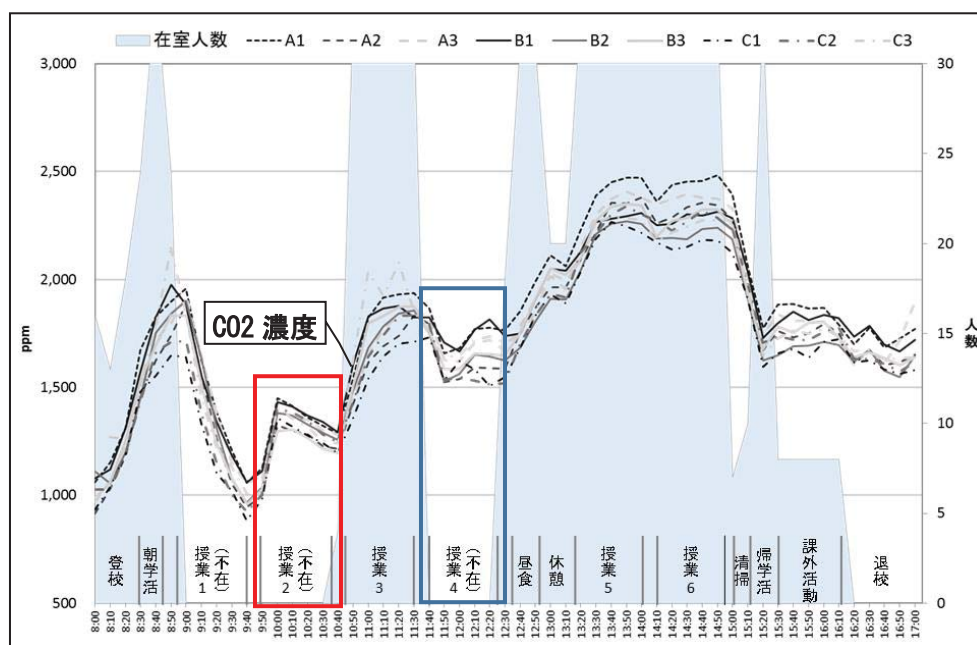


図 3.3 二酸化炭素濃度と在室人数の変化

二酸化炭素濃度の変化は、在室人数に連動している様子が分かる。また、計測場所によって数値の変化の違いが分かる。赤枠の部分は在室者はいないが二酸化炭素濃度が高くなっている。この時間帯に隣の教室で授業があったためと推測できる。また、青枠の部分では同時刻に計測した数値で、ある場所では上昇し別な場所では下降しており、原因は不明である。このような二酸化炭素濃度の変化はマルチポイントで同期制御した計測をしたことで捉えることができる。

第4章 考察

教室の環境を快適に保つためには温熱・空気環境の計測が必要であり、計測は学習活動に影響を及ぼさないようにしなければならない。

先行研究では計測場所が少数の研究が多かったが、本研究ではワイヤレスセンサネットワークを使用し、10ヶ所で計測できるようにした。教室内の温熱・空気環境の状態を詳細に知るためにマルチポイントで同期計測させ、温湿度・二酸化炭素濃度の分布状況や状態変化が把握できるデータが取れた。計測器を小型化し磁石を張り付けることで様々な場所への設置が可能になり、学習活動に影響を及ぼさず計測できた。

本研究で開発したシステムは、計測時に時刻を取得し保存先の Web サーバに送信しているため、Web サーバを変更したり追加してしも、計測データ（計測年月日・計測時刻・学校 ID・計測器 ID・温度・湿度・二酸化炭素濃度）を扱える。

このマルチポイント同期計測システムを使用することにより、これまで目に見えなかった温度・湿度・二酸化炭素濃度の詳細な状態を捉えることができるようになる。不適合率が年々増加傾向とされている温湿度・二酸化炭素濃度だが、基準値を超えているのが空間全体なのか一部なのかや、機械換気や自然換気でどの場所がどんな数値に変化するかを捉えることができる。このことで各室内毎に効率的な換気方法を見つけることができると考える。

また、ケーブル不要な計測器とデータ収集機、Wi-Fi アクセスポイントを使用することで、ネットワーク環境がない空間においても Wi-Fi アクセスポイントに接続できる範囲において、計測可能である。建築したばかりの建物や普段ネットワークを必要としない作業場等の温湿度・二酸化炭素濃度の分布状況を把握できるようになる。

今回取り上げた計測例は、1つの教室内で同じ高さに計測器を設置したマルチポイントの計測である。計測器が小型で軽量、そしてワイヤレスなため、高さを変えて計測したり、Wi-Fi に接続可能な範囲の複数の教室や廊下等で計測することも可能である。また、計測器のセンサを変えたり追加することで様々な対象をマルチポイントで計測し、Web サーバに保存できる。

そして、計測したデータは同時刻に計測し時間的整合性がとれているため、温熱、空気環境を研究等に有用と考える。

今後の課題は、データ収集サーバの RaspberryPi を安全に停止させるための機能が必要である。システムを稼働し計測した例が数件と少数なため、今後は計測例を増やしシステムの信頼性を検討する必要がある。

第5章 結論

教室内の温湿度・二酸化炭素濃度をマルチポイントで同期計測させ、分布状況や状態変化が把握できるデータを保存できた。計測器とデータ収集機間を Wi-Fi を利用しデータを送受信することで、ケーブル不要にすることができ、また、計測器を小型化し、磁石を張り付けることで様々な場所への設置が可能になり、学習活動に影響を及ぼさず計測できた。

本研究で開発したシステムを使用することにより、効率的な換気方法を見つけ出したり、ネットワーク環境が整備されていない室内等の温湿度・二酸化炭素濃度の分布状況を把握できるようになる。

今後の課題は、データ収集機の RaspberryPi を安全に停止させるための機能が必要で、また、計測例が数件と少数なため、今後は計測例を増やしシステムの信頼性を検討する。

これらの課題を残しつつも、本研究で開発したシステムが室内空気環境の保持に貢献できると考える。

参考文献

- 1) 文部科学省: [改正版] 学校環境衛生管理マニュアル～「学校環境衛生基準」の理論と実践～,2010.3
- 2) 飯野秋成,飯野由香利,内山剛志:小学校における教室内熱・光環境の空間分布の改善に関する研究,日本建築学会計画系論文集,565,91-98,2003.3
- 3) 国土交通省: 建築基準法(昭和二十五年五月二十四日法律第二百一号)
<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S25/S25HO201.html>,2017.1.15 参照
- 4) 厚生労働省:建築物環境衛生管理基準について,
<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/seikatsu-eisei10/>,2015.3 参照
- 5) 日本建築学会,環境工学委員会,空気環境運営委員会,換気・通風小委員会:学校における温熱・空気環境に関する現状の問題点と対策ー子供たちが健康で快適に学習できる環境づくりのためにー,2015.3
- 6) 太陽誘電(株):インフラ・建物モニタリング,
<http://www.yuden.co.jp/jp/solutions/wsn/scene/index4.html>,2017.1.24 参照
- 7) NATIONAL INSTRUMENTS: NI ワイヤレスセンサネットワーク (WSN) アプリケーション分野, <http://www.ni.com/wsn/applications/ja/>,2017.1.24 参照
- 8) 文部科学省:平成 27 年度 学校における教育の情報化の実態等に関する調査結果(概要),
http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/__icsFiles/afieldfile/2016/09/26/1376689_1.pdf,2016.9.28 参照
- 9) 文部科学省:より効果的な授業を行うため学校の ICT 環境を整備しましょう!,
<http://jouhouka.mext.go.jp/school/pdf/2014ICT-panf.pdf>,2016.9.29 参照
- 10) 日経経済新聞:2016.5.8 電子版,全小中高に無線 LAN 電子教科書に対応、20 年までに国、費用 5 割補助,http://www.nikkei.com/article/DGXLASFS28H8T_X00C16A5MM8000/,2016.9.30 参照
- 11) 金子隆昌,村上周三,伊藤一秀,深尾仁:現地実測による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討～学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究(その 1),日本建築学会環境系論文集,第 606 号,43-50,2006.8
- 12) 金子隆昌,村上周三,伊藤一秀,深尾仁,樋渡潔,亀田健一:実験室実験による温熱・空気環境の質が学習効率に及ぼす影響の検討～学習環境におけるプロダクティビティ向上に関する研究(その 2),日本建築学会環境系論文集,第 611 号,45-52,2007.1
- 13) 東賢一,池田耕一,大澤元毅,鍵直樹,柳宇,齊藤秀樹,鎌倉良太:建築物における衛生環境とその維持管理の実態に関する調査解析,空気調和・衛生工学会論文集,179,2012.2
- 14) 中川晋也,木原真隆,高橋佳代子,富田広造,嶋原茂,大貫奈穂美:特定建築物における二酸化炭素濃度不適率上昇原因と対策,東京都健康安全研究センター研究年報,62,別刷,2011

- 15) 綾部櫻子,森口英喜,遠藤幸次,諏訪敬祐:大教室における快適温度と環境データ可視化表示,東京都市大学 環境情報学部 情報メディアセンタージャーナル 12,2011.3
- 16) 白川純也,宋城基:大学講義室の室内環境の現状と学習効率に関する研究,日本建築学会中国支部研究報告集,第 36 巻,427-430,2013.3
- 17) 佐藤麻里奈,柳宇,長谷川麻子,長谷川兼一,鍵直樹,大澤元毅:大学教室における室内二酸化炭素濃度の実態に関する調査研究,日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道),41417,849-850,2013.8
- 18) 岩下剛,鹿島駿,井口幸汰,三上永靖:エビデンス・ベースドアプローチに基づく学校教室の空気環境に関する研究(その 1 空調された中学・高等学校における空気環境に関する長期連続測定),日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),41436,915-916,2014.9
- 19) 荒木慶和,坂野正幸,熊木輝明,田中大輔,白鳥豊,陳秀洪,服部恭幸:多点同時照度測定システムの構築,照明学会誌,93,11,2009
- 20) 森川暉大,宮脇望,辻岡哲夫,三浦孝平,松本泰希,伊與田浩志,田中倫明,北村治雄:過熱水蒸気の温度湿度センシングー2.4GHz 帯無線ネットワークを用いた遠隔モニタリングとその応用ー,電子情報通信学会 信学技法,CS2014-31,2014.7
- 21) 鈴木誠,長山智則,森川博之:長期同期計測が可能な省電力無線橋梁モニタリングシステム,電子情報通信学会 信学技法,ASN2014-17,2014.5
- 22) 森慎太郎:Arduino およびクラウド統合型センサネットワークシステムの開発,情報システム学会誌,11,1,2015.5
- 23) (株)T&D:ワイヤレスデータロガー RTR-500 シリーズ,
<http://shop.tandd.co.jp/products/rtr576.php>,2016.8.26 参照
- 24) (株)佐藤商事:データロガー二酸化炭素 CO2 濃度計 CO2-9904SD[SD カード記録式],
<https://satosokuteiki.com/item/detail/2701>,2016.9.12 参照
- 25) オムロン:環境センサ 快適な暮らしをサポート 身の回りの様々な環境情報をセンシング,
<https://www.omron.co.jp/ecb/products/sensor/special/environmentsensor/>, 2016.8.26 参照
- 26) 秋月電子通商:Wi-Fi モジュール ESP-WROOM-02 DIP 化キット,
<http://akizukidenshi.com/catalog/g/gK-09758/>,2016.10.3 参照
- 27) SENSIRION:Datasheet SHT1x,
https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/Sensirion_Humidity_SHT1x_Datasheet_V5.pdf, 2016.6.6 参照
- 28) フィガロ技研株式会社:CDM7160 CO2 センサモジュール,
http://www.figaro.co.jp/product/docs/cdm7160_product%20infomation%28jp%29_rev06.pdf, 2016.6.6 参照
- 29) The Raspberry Pi Foundation: RASPBERRY PI 3 MODEL B,
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>,2016.10.2 参照

付録

1. Raspberry Pi にインストールしたソフトウェア一覧

OS	RASPBIAN JESSIE LITE
Web サーバ	Apache ・ PHP
I2C 通信	i2c-tools
NTP クライアント	ntpdate

2. Raspberry Pi の無線 LAN の設定

●/etc/wpa_supplicant/wpa_supplicant.conf

SSID 名、暗号化キー、認証方法を追加した。

```
country=JP
ctrl_interface=DIR=/var/run/wpa_supplicant GROUP=netdev
update_config=1
network=[
    ssid="0024A5D8CC4D-1"
    psk=[REDACTED]
    key_mgmt=WPA-PSK
]
network=[
    ssid="co2"
    #psk=[REDACTED]
    psk=[REDACTED]
    key_mgmt=WPA-PSK
]
network=[
    ssid="106F3FDE7C4C"
    #psk=[REDACTED]
    psk=[REDACTED]
    key_mgmt=WPA-PSK
]
```

黄枠の部分を追加し、3 つの Wi-Fi アクセスポイントを設定した。

●/etc/dhcpd.conf

設定したい IP アドレス、デフォルトゲートウェイの IP アドレス、DNS サーバの IP アドレスを追加した。

```
# A hook script is provided to lookup the hostname if not set by the DHCP
# server, but it should not be run by default.
nohook lookup-hostname

interface wlan0

ssid co2
static ip_address=
static routers=
static domain_name_servers=

ssid 0024A5D8CC4D-1
static ip_address=
static routers=
static domain_name_servers=

ssid 106F3FDE7C4C
static ip_address=
static routers=
static domain_name_servers=
```

黄枠の部分を追加し、wpa_supplicant.conf に追加した Wi-Fi アクセスポイントの SSID を指定し、それぞれの環境に合わせて設定した。

3. NTP サーバの設定

●/etc/ntp.conf

以下のように変更

```
server 0.debian.pool.ntp.org iburst
server 1.debian.pool.ntp.org iburst
server 2.debian.pool.ntp.org iburst
server 3.debian.pool.ntp.org iburst
```

↓

```
#server 0.debian.pool.ntp.org iburst
#server 1.debian.pool.ntp.org iburst
#server 2.debian.pool.ntp.org iburst
#server 3.debian.pool.ntp.org iburst
pool ntp.nict.jp iburst
```

追加

```
restrict ntp.nict.jp kod notrap nomodify nopeer noquery
restrict 192.168.11.0 mask 255.255.255.0 nomodify notrap
restrict 127.0.0.1
```

4. ブート時に NTP クライアント又は RTC で時刻設定

●/var/www/html/co2/setsystime.sh

```
#!/bin/sh
echo ds1307 0x68 > /sys/class/i2c-adapter/i2c-1/new_device
ntpdate -v ntp.nict.jp
if [ $? = 0 ]; then
    hwclock -w
else
    hwclock -s
fi
date
```

●/etc/systemd/system/setsystime.service

```
[Unit]
Description = setsystime
[Service]
ExecStart=/var/www/html/co2/setsystime.sh
Restart=no
Type=simple
[Install]
WantedBy=multi-user.target
```

※コマンドから「sudo systemctl enable setsystime.service」を入力し、サービスを有効にする。

5. 計測値等を Web サーバに送信(ESP8266 のプログラム)

ライターを作成し ESP8266 に下記のプログラムを書き込んだ。

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <Wire.h>
#include <Sensirion.h>
#include <WiFiUdp.h>
#include <TimeLib.h>
#include <EEPROM.h>
#include <NTPClient.h>
#include "info.h"
#define SN 16
#define T 600
#define CDM 0x69
#define CDM_CTL 0x01
```

```

#define CDM_ST1 0x02
#define CDM_DAL 0x03
#define CDM_DAH 0x04
#define CDM_BUSY 14 // CDM7160...BUSY:14
#define BUSBUSY (digitalRead(5)==LOW || digitalRead(4)==LOW)
#define CDMbusy0 digitalRead(CDM_BUSY)

Sensirion SHT(13, 12); // SHT11...D:13, C:12
const char *ssid = "*****";
const char *password = "*****";
const char *host = "*****";
WiFiUDP ntpUDP;
NTPClient timeClient(ntpUDP, host, 0, 86400000);

int readCO2(){
    int co2=0;
    Wire.beginTransaction(CDM); Wire.write(CDM_CTL);
    Wire.write(0x02); Wire.endTransmission(); // 連続動作モード
    while(!CDMbusy0) delay(10); // BUSY になるまで待つ
    while(CDMbusy0) delay(10); // BUSY 完了を待つ
    while(!CDMbusy0) delay(10); // BUSY になるまで待つ
    while(CDMbusy0) delay(10); // BUSY 完了を待つ...1st データ
    Wire.beginTransaction(CDM); Wire.write(CDM_DAL); Wire.endTransmission();
    while(BUSBUSY); // *** バス開放を待つ ***
    Wire.requestFrom(CDM, 2); co2+=Wire.read(); co2+=(Wire.read()<<8);
    Wire.beginTransaction(CDM); Wire.write(CDM_CTL);
    Wire.write(0x00); Wire.endTransmission(); // パワーダウンモード
    return (co2);
}

void setup(){
    float t,h,d; sn=SN; char c; int flg=0;
    char timestr[10];
    delay(1);
    bool poweronflag=(analogRead(A0)<700); ← ピン A0 の値取得し、
    for(int i=0;i<10;i++) timestr[i]=' '; 700 未満かどうかを判断
    pinMode(CDM_BUSY, INPUT);
    WiFi.begin(ssid, password);
    EEPROM.begin(100);
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("");
    while(WiFi.status()!=WL_CONNECTED){ delay(500); Serial.print("."); }
    Wire.begin();
    if(timeClient.update())
        setTime(timeClient.getEpochTime());
    unsigned long jtime = now();
    unsigned long adjust;
    unsigned long nextmtime2;
    EEPROM.get(0, nextmtime2);
    unsigned long overTime = 2678400;
    unsigned int measureTime = 2; // 温湿度・CO2 計測時間(秒)

```

```

if(poweronflag || nextmtime2<jtime || nextmtime2>(jtime+overTime) ||
    nextmtime2<(jtime+measureTime)){
    adjust = 0;
}else adjust = nextmtime2-jtime-measureTime;
delay(adjust*1000);
int co2=readCO2();           // CDM7160 で CO2 測定
SHT.measure(&t,&h,&d);        // SHT11 で温湿度測定
unsigned long mtime = now();

WiFiClient client;
if(!client.connect(host, 80)){ Serial.println("connection failed"); return; }
else{
    //client.print("GET /siva/fuzoku_wbgt/log/co2log.php?temp=");
    client.print("GET /co2/log/co2log.php?temp=");
    client.print(mtime); client.print(',');
    client.print(sid[sn]); client.print(','); client.print(pid[sn]); client.print(',');
    client.print(t,1); client.print(','); client.print(h,1);
    if(co2>0){ client.print(','); client.print(co2);}
    client.print(" HTTP/1.1\r\nHOST: "); client.print(host); client.print("\r\n\r\n");
    unsigned long now=millis();
    while(!client.available() && ((millis()-now)<5000)); // 最大 5 秒待つ
    while(true){
        c=client.read(); // 戻り値
        if(c=='*' && flg==0){
            flg=1;
            c=client.read(); // 戻り値
        }
        for(int i=0;flg==1;i++){
            timestr[i]=c;
            c=client.read(); // 戻り値
            if(c=='*'){
                flg=0;
            }
        }
        if(!client.connected()) break; //disconnect 待ち
    }
    client.stop();
}

unsigned long cycleTime = atoi(timestr); //秒
// 次の計測時間(s)
unsigned long nextmtime=((unsigned long)(mtime/cycleTime)+1)*cycleTime;
if(nextmtime <= mtime + 10) nextmtime+=cycleTime;
EEPROM.put(0,nextmtime);
EEPROM.commit();
Serial.println("DEEP SLEEP START!!");
// deepsleep モード
ESP.deepSleep((nextmtime-10-mtime)*1000*1000, WAKE_RF_DEFAULT);
delay(1000);
Serial.println("DEEP SLEEPing....");
}

void loop(){

```

6. 計測器から送信されたデータを受信・保存(Web サーバのプログラム)

●/var/www/html/co2/log/co2log.php

```
<html>
<head><title>気温・湿度データの記録</title></head><body>
<?php
    date_default_timezone_set('Asia/Tokyo');
    //define('LOGFILE','wbgtlog.csv');
    define('LOGFILE','2dwbgt'.date("Ym").'.csv');
    if(isset($_GET['temp'])){
        $time= time();
        //$strLog=date("Y/m/d,H:i:s").'.'. $_GET['temp']."¥n";
        $str=$_GET['temp'];
        $array = explode(",", $str);
        $strLog=date("Y/m/d,H:i:s", $array[0]).'.'. $array[1].',
            '.$array[2].'.'. $array[3].'.'. $array[4];
        if(count($array)>5)
            $strLog=$strLog.'.'. $array[5];
        $strLog=$strLog."¥n";
        $fp=fopen(LOGFILE,'a');
        if(flock($fp,LOCK_EX)){
            fwrite($fp,$strLog);
            flock($fp,LOCK_UN);
        }else{
            print('ファイルロックに失敗しました');
        }
        fclose($fp);
        $nextTime;
        $fp=fopen('time.txt','r');
        if(flock($fp,LOCK_EX)){
            $nextTime=fgets($fp);
            flock($fp,LOCK_UN);
        }else{
            print('ファイルロックに失敗しました');
        }
        fclose($fp);
```

```

        echo '*'.$nextTime.*';
    }
?>
</body></html>

```

7. csv ファイルのダウンロード(Web サーバのプログラム)

●/var/www/html/co2/fileDownload.php

```

<body>
<table border="1">
<tr>
<th>ファイル名</th><th>サイズ</th><th>最終アクセス日</th><th>最終更新日</th>
</tr>
<?php
    clearstatcache();
    $place = './log/';
    $dir = opendir($place);
    while($file = readdir($dir)){
        if (preg_match('/.csv/i', $file)) {
            print('<tr>');
            print('<td><a href="' . $place . '/' . $file . '"> . $file . '</a></td>');
            print('<td>' . filesize($place . $file) . '</td>');
            print('<td>' . date('Y/m/d H:i:s', filemtime($place . $file)) . '</td>');
            print('<td>' . date('Y/m/d H:i:s', filemtime($place . $file)) . '</td>');
            print('</tr>');
        }
    }
    closedir($dir);
?>
</table>
</body>

```


8. 計測間隔時間を変更(Web サーバのプログラム)

計測間隔時間変更画面

●/var/www/html/co2/timeChange.html

```
<!DOCTYPE html>
<html lang=ja>
<head><meta charset="UTF-8">
  <title>弘前大学教育学部附属学校園の CO2</title>
  <script>
    function send(){
      var frm=document.form;
      if((frm.elements["minute"].value=="") ||
        (frm.elements["minute"].value=="0") ||
        (isNaN(frm.elements["minute"].value)==true)){
        alert("テキストボックスに正しい数値を入力してください。");
        return false;
      }else{
        frm.action="log/time.php";
        frm.method="get";
        frm.encoding="application/x-www-form-urlencoded";
        //return e.preventDefault();
      }
    }
  </script>
</head>
<body>
<center>
<h2><small>弘前大学教育学部附属学校園の CO2</small></h2>
<form name="form" action=""  onclick="return send();return false;">
  CO2 計測周期
  <input type="text" name="minute" size="3" maxlength="3">   (単位 : 分)
  <input type="submit" value="変更">
</form>
</center>
</body>
</html>
```

計測間隔時間を変更

●/var/www/html/co2/log/time.php

```
<html>
<head><title>CO2 データの記録</title></head><body>
<?php
    if(isset($_GET['minute'])){
        $time=$_GET['minute'];
        $fp=fopen('time.txt','w');
        if(flock($fp,LOCK_EX)){
            fwrite($fp,$time);
            flock($fp,LOCK_UN);
        }else{
            print('ファイルロックに失敗しました');
        }
        fclose($fp);
    }
    echo $time."秒に変更しました。";
?>
</body></html>
```

計測間隔時間を保存

●/co2/log/time.txt

謝辞

本研究の遂行ならびに論文のまとめに際し、多くのご指導とご鞭撻を賜りました、主指導教官である弘前大学教育学部 小山智史先生に深く感謝申し上げます。また、審査委員として多くのご助言を頂きました、弘前大学教育学部 櫻田安志先生、上之園哲也先生に厚く御礼申し上げます。

研究生生活を共にし、多くのご協力と励ましのお言葉を頂いた弘前大学大学院地域社会研究科 森菜穂子氏に心より感謝いたします。仕事をしながら研究活動が続けられたのは、多くのご助言があったからであり、感謝の念に堪えません。

また、研究の場を与えてくださった勤務先の上司、励ましのお言葉を頂いた同僚にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

最後に、この日を迎えることができたのは、陰ながら励まし支えてくれた家族がいてくれたからである。本当に、ありがとう。