

Sigfox ネットワークを用いた IoT 機器の開発と教育・研究への応用

田中 武*・山内 将行*

(令和 5 年11月24日受付)

Development of IoT devices using Sigfox network and application to education and research

Takeshi TANAKA, Masayuki YAMAUCHI

(Received November 24, 2023)

Abstract

We develop the measuring system of carbon dioxide (CO₂) concentrations 140 times a day in habitable spaces using Sigfox along with temperature, humidity, and atmospheric pressure measurements. In order to apply the education and research, we report the major device development process. we design and fabricate a printed circuit board to integrate the sensor with an Arduino processor. Using the developed sensor, we estimate that if one adult male performs light work for 1 h in a typical living room [3.17m (width 3.17m) × 7.4m (length 7.4m) × 2.6m (height 2.6m) = volume 61.4m³], the carbon dioxide CO₂ concentration will increase by approximately 200 ppm. In the future, the developed sensor could be used for detailed human behavior studies in the context of CO₂ concentrations.

Key Words: carbon dioxide sensor, internet of things, sigfox

1. はじめに

情報化社会 (Society 4.0) では知識や情報の交流が未だ進んでおらず、学際的な連携不足による課題が生じています。Society 5.0では、あらゆる人やモノが IoT (Internet of Things) でつながり、さまざまな知識や情報が共有されます。

このような背景から、私たちは Sigfox ネットワークとインターネットを利用して、温度、湿度、気圧などのセンサーを搭載し、さまざまな物理データを計測する IoT デバイスを開発しました^[1-5]。

ここでは、教育・研究に応用するために、CO₂センサーの主要なデバイス開発フロー (下記に示す) を報告する。

- 1) Gaussian プログラムを用いて CO₂ の特性を求める。
- 2) 有機物の影響を受けにくい光学式 CO₂ センサーの特

性を調査する。

- 3) レーザー加工によりプリント基板を作製し、基板に CO₂ センサー実装する。
- 4) Arduino UNO, Sigfox shield for Arduino, および作成したプリント基板を組み込む。
- 5) Sigfox 通信を利用して IoT システムの動作の確認をする。
- 6) 最後に、センサー設置場所近傍の気象情報と比較検討する。

2. CO₂ の特性

二酸化炭素の性質は NIST Webbook^[6] に掲載されており、その内容の一部を以下に示します。

●Formula: CO₂

* 広島工業大学工学部電子情報工学科

- Molecular weight: 44.0095
- IUPAC Standard InChI: 1S/CO₂/c2-1-3 Copy
- IUPAC Standard InChIKey: CURLTUGMZLYLDI-UHFFFAOYSA-N Copy
- CAS Registry Number: 124-38-9

CO₂の化学構造を図1に示します。

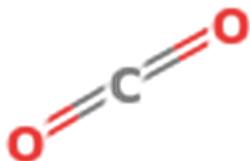


図1 CO₂の化学構造

次に、九州大学の大型計算機にインストールされたGaussianプログラムを用いて、CO₂の特性を計算しました。まず、Gaussianプログラムのデータセットの1つとしてプログラムAvogadro^[7]を使用して、入力ファイル(図2を参照)を作成しました。

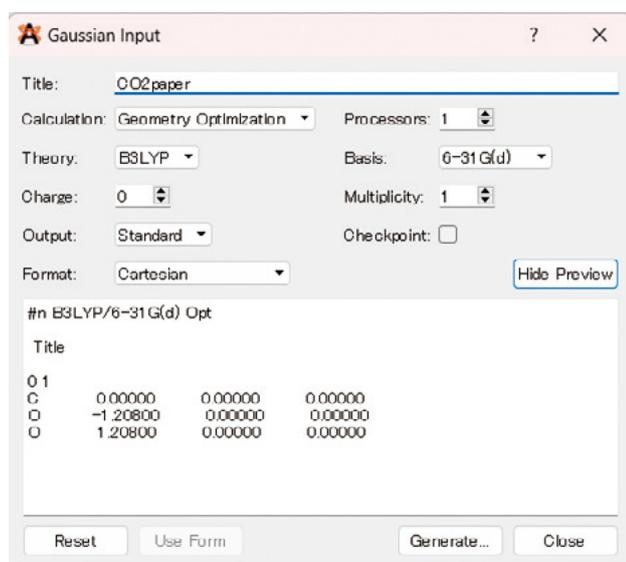


図2 Gaussian 入力ファイル

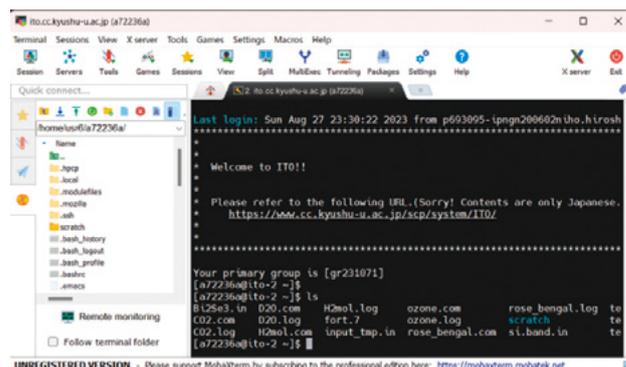


図3 MobaXterm^[8]を利用して九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムに接続

MobaXtermを使用して九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムに接続し(図3参照)、GaussianプログラムとGaussian入力ファイルを用いてCO₂を計算しました(図2参照)。結果を図4に示します。

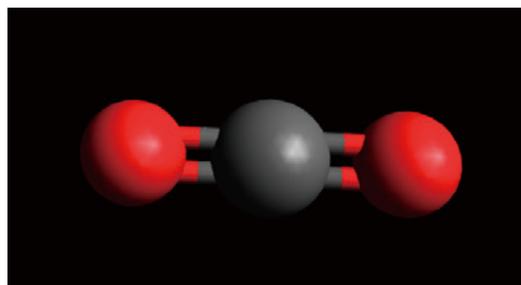


図4 Gaussianプログラムで計算されたデータを用いたCO₂の化学結合の構造図

3. Sigfox を用いた IoT 機器のための CO₂モジュールの製作

3.1 IoT 機器作成に用いた部品

3.1.1 CO₂センサーモジュールの概要

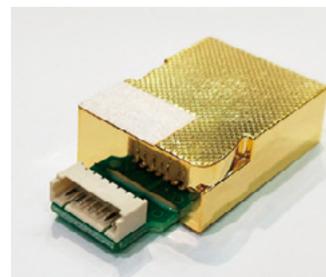


図5 CO₂センサーモジュール (MH-Z19C) の写真

CO₂センサーモジュールとして、MH-Z19C NDIR 赤外線ガスモジュール (Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd., Zhengzhou, China) (図5を参照)を用いた。このセンサーは、一般的なタイプの小型セン

サーで、非分散型赤外線（NDIR）原理を使用して空気中の CO₂ の存在を検出し、良好な選択性、非酸素依存性、および非依存性を備え、長寿命です^[9]。

CO₂センサーモジュールの主要なパラメータと CO₂センサーモジュールの検出範囲と精度をそれぞれ表 1 と表 2 に示します。

表 1 CO₂センサーモジュールの主要なパラメータ

Model No.	MH-719C
Detection Gas	CO2
Working voltage	5.0±0.1V DC
Average current	< 40mA (@5V power supply)
Peak current	125mA (@5V power supply)
Interface level	3.3 V (Compatible with 5V)
Detection Range	400~10000ppm(optional)
Output signal	Serial Port (UART) (TTL level 3.3V)
	PWM
Preheat time	1 min
Response Time	T ₉₀ < 120 s
Working temperature	-10 ~ 50 °C
Working humidity	0 ~ 95% RH (No condensation)
Storage temperature	-20~60 °C
Weight	5 g
Lifespan	> 10 years

表 2 CO₂センサーモジュールの検出範囲と精度

Detection Gas	Formula	Detection Range	Accuracy
Carbon Dioxide	CO2	400~2000ppm	± (50ppm+5% reading value)
		400~5000ppm	

3.1.2 CO₂センサーモジュール用プリント基板の作製

CO₂センサーモジュール用プリント基板を作製するために、レーザー加工装置付属の Computer Aided Design (CAD) ソフトウェアである LPKF CircuitPro^[10]を用いて、設計した。(図 6 参照)

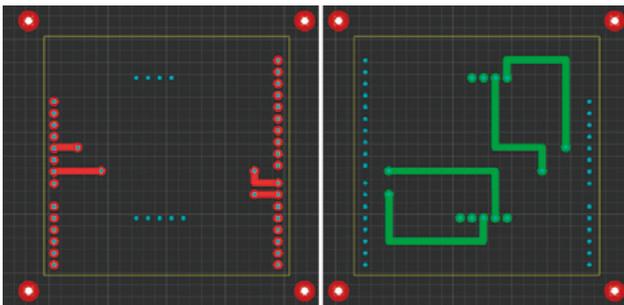


図 6 CAD で設計した回路レイアウト図^[11]

次に、プリント基板の加工に用いられた LPKF ProtoLaser U4 (LPKF Laser & Electronics SE, Garbsen, Germany) について説明する。この装置には UV レーザーが搭載されており、このレーザーは高いビーム品質と吸収特性を備え、さまざまなタスクに適している。また、UV レーザーの特定の波長により、さまざまな材料を構造化し、彫刻し、穴あけし、パネルを剥離することができる。さらにこのレーザーシステムは低出力範囲でも安定しているため、最小限の熱入力力で薄層や有機層を加工するのにも使用できることが報告されている^[10]。また、ProtoLaser U4 の仕様を表 3 に示す。

設計されたレイアウト図に基づき、LPKF ProtoLaser U4 を用いて、銅箔で覆われているプリント基板をレーザー加工した。(図 7 参照)

表 3 LPKF ProtoLaser U4 の仕様

LPKF ProtoLaser U4	
Max. layout area (X/Y/Z)	229 mm x 305 mm x 7 mm (9" x 12" x 0.28")
Max. material size (X/Y/Z)	239 mm x 315 mm x 7 mm (9.4" x 12.4" x 0.28")
Laser wavelength	355 nm
Max. laser power	5.7 W
Laser pulse frequency	25 - 300 kHz
Diameter of focused laser beam	20 ± 2 μm (0.78 ± 0.08 mil)
Structuring speed	5.5 cm ² /min (0.9 in ² /min) ^a on laminated substrates 18 μm (0.5 oz) Cu
Minimum line/space	50 μm / 20 μm (2.0 mil / 0.8 mil) ^a on FR4 18 μm (0.5 oz) Cu
Positioning accuracy in the scan field	± 10 μm (± 0.39 mil)
Repeatability in the scan field	± 2.2 μm (± 0.09 mil)
Dimensions (W x H x D)	910 mm x 1650 mm x 795 mm (35.8" x 64.9" x 31.3") ^b
Weight	350 kg (772 lbs)
Power supply	110 - 230 V, 50 - 60 Hz, 1.5 kW
Compressed air supply	Min. 6 bar; 185 l/min (min 87 psi; 185 l/min)
Cooling	Air-cooled (internal cooling cycle)
Ambient temperature; humidity	22 °C ± 2 °C (71.6 °F ± 4 °F); < 60%
Software	LPKF CircuitPro Advanced
Options and accessories	Dust extraction unit, compressor, starter set

^a Depending on material and laser beam parameters
^b Height with open hood: 1765 mm (69.5")

次に、プリント基板のレーザー加工に用いた、LPKF ProtoLaser U4 の写真を図 7 に示す。



図 7 プリント基板のレーザー加工装置 (The LPKF ProtoLaser U4、本体 (左)、レーザー加工中 (右上 (全体像)、右下 (加工部分の拡大))^[11]

プリント基板上の銅箔のレーザー加工の概要^[10]を図 8

に示す。入射レーザー光は、次の3つの方法で材料と相互作用します。

- ・透過 - 材料を通過するレーザー光の一部
- ・反射 - 材料によって反射されるレーザー光の一部
- ・吸収 - ターゲット材料に影響を与えるレーザー光

レーザーは、材料に触れずにエネルギーを材料に伝達します。吸収されたエネルギーにより、ターゲット材料内の電子が励起されます。これには次の3つの異なる効果があります。

- ・化学結合は入力エネルギーによって切断されます。
- ・エネルギーの入力により材料が溶けます。
- ・高パルスエネルギーは材料を蒸発させます。

以上から、レーザー光を用いて、プリント基板上の銅箔の加工することができる。

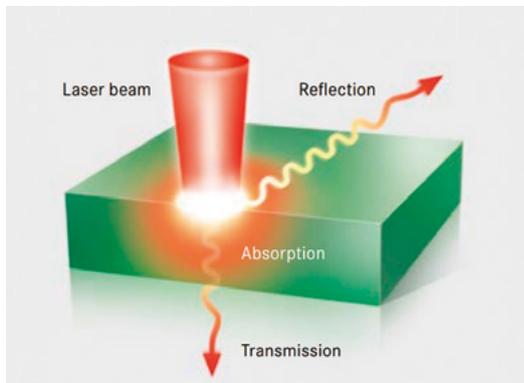


図8 レーザ加工のモデル図^[10]

実際にLPKF ProtoLaser U4を用いて加工されたプリント基板を図9に示す。

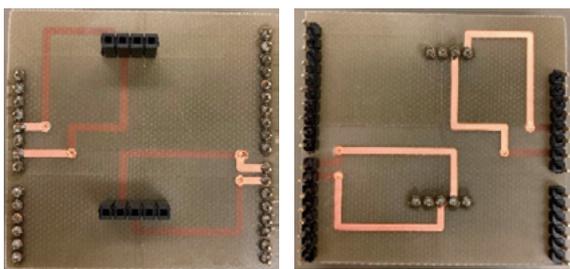


図9 加工されたプリント基板^[11]

3.1.3 CO₂センサーモジュール用 Sigfox shield for Arduino の概要



図10 Sigfox を用いた IoT 機器 (部品)。
左から、Arduino UNO, Sigfox shield for Arduino, 作製したプリント基板、および、CO₂センサーモジュール。

IoT 機器内のセンサーは、Sigfox shield for Arduino 内にある。温湿度・気圧センサ (BOSCH BME-280) を用いた。そのセンサーの仕様^[12]は、動作温度範囲：-40～+85℃ (定格)・湿度：0～100% (相対湿度)・気圧：300～1100hPa・温度精度：±1℃ (0～65℃)・湿度精度：±3%RH (25℃、絶対精度の公差)・気圧精度：±1.0hPa (0～65℃、絶対精度)である。

3.2 IoT 機器の組み立てと、プログラムの書き込み

Sigfox を用いた IoT 機器を構成する部品を、図10に示す。構成する部品を、差し込むだけで組み上げることができた。完成品を図11に示す。



図11 Sigfox を用いた IoT 機器 (完成品)

Arduino IDE を用いて、Sigfox を用いた IoT 機器内の Arduino UNO Rev3 にスケッチを書き込んだ。(書き込んだスケッチを、図12に示す。)



図12 本研究に用いた Arduino のスケッチの例

4. CO₂モジュールを持つ IoT 機器のための Sigfox の設定

現在の設定では、sigfox の ID 771E42で、送信されているデータを読み込むことができる (図13参照)^[13]。

Time	Delay (s)	Seq Num	Data / Decoding
2023-11-24 15:24:20	1.2	670	1d001400fa033a031c039901

図13 backend.sigfox.com の ID771E42 のデータの一部

毎回、backend.sigfox.com にアクセスし、送信されたデータを読み、それら进行处理することは煩雑になる。Sigfox には、callback (図14参照) という機能があり、この機能を用いて、ThingSpeak にデータを転送し、ThingSpeak 内でデータを処理し、表示することを試みる。

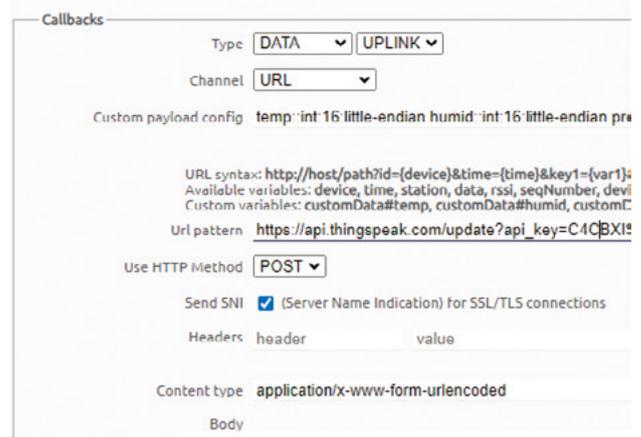


図14 backend.sigfox.com の ID771E42 の callback の例

5. ThingSpeak を用いたデータ処理

ThingSpeak のデータ処理は、Analytics, および、Actions で構成される。Analytics としては、MATLAB Analysis, MATLAB visualizations, Plugins がある。Actions としては、ThingTweet, TimeControl, React, TalkBack, ThingHTTP があり、その概要を図15に示す。

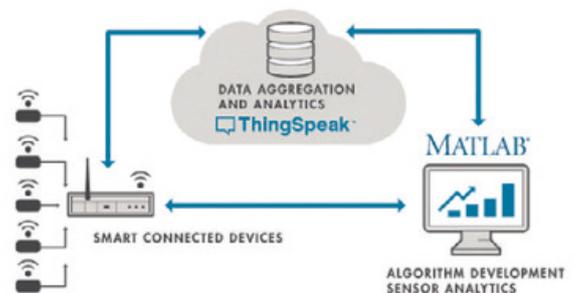


図15 IoT 機器、ThingSpeak, Matlab/Simulink の概要^[14]

ThingSpeak 内に、チャンネルを作り、チャンネルセッティングを行う (図16参照)。

Channel Settings

Percentage complete 50%

Channel ID 1933180

Name

Description

Field 1

Field 2

Field 3

Field 4

Field 5

Field 6

図16 ThingSpeak のチャンネル設定例

以上の設定を行うと、温度（図17参照）、湿度（図18参照）、気圧（図19参照）、および CO₂濃度（図20参照）のグラフを入手できる。

さらに、これらのデータを公開すると、<https://thingspeak.com/channels/1933180> にアクセスすると、同様なグラフを入手できる。（現在は、非公開中）

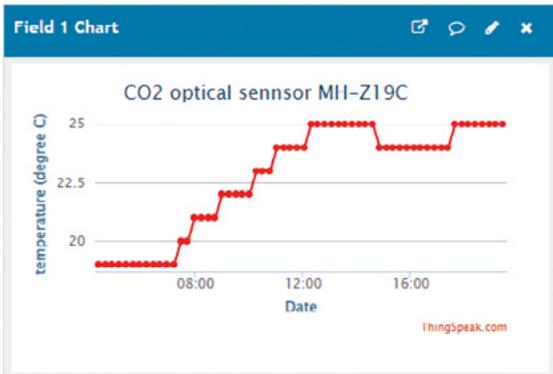


図17 Sigfox を用いた CO₂センサーを有する IoT 機器からの温度

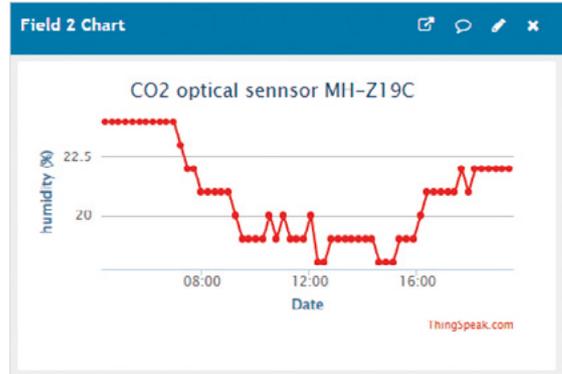


図18 Sigfox を用いた CO₂センサーを有する IoT 機器からの湿度

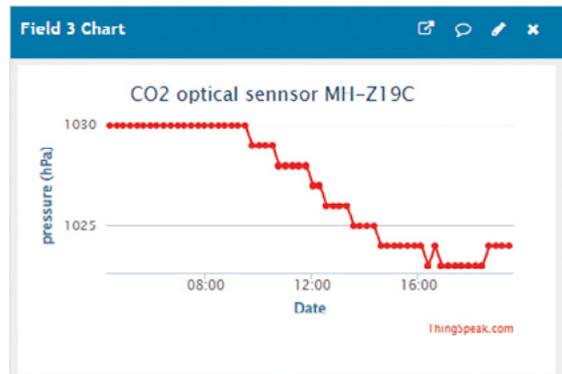


図19 Sigfox を用いた CO₂センサーを有する IoT 機器からの温度

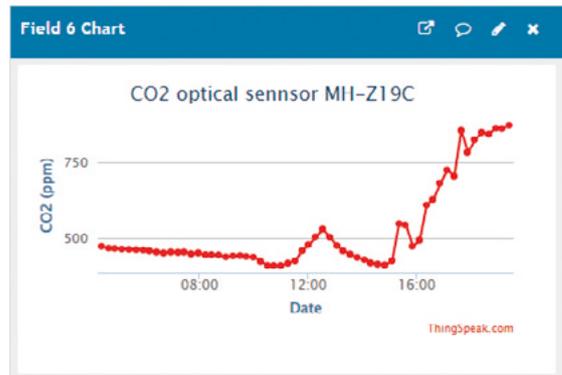


図20 Sigfox を用いた CO₂センサーを有する IoT 機器からの CO₂濃度

上で述べたように、広島工業大学工学部電子情報工学科新1号館607号室（N1-607）に在室している人間は1時間あたり0.02m³のCO₂を放出します。N1-607の体積は、幅3.17m × 長さ7.4m × 高さ2.6m=61m³となり、327ppm (=0.02m³/61m³) 増加するはずですが、ただし、18:00から20:00までの電流増加は約140ppm/hです（図20）。CO₂濃度が予想よりも低いのは、人間のCO₂排出量の精度とセンサーの位置が高いためである可能性があります。さらに、人体では1日あたり1kgのCO₂が生成されます^[14]。1kgのCO₂の体積は約0.5m³、または1時間あたり約0.02m³です。厚生労働省によれば、「換気の悪い密閉空

間」を改善するために必要な換気量として、1人当たり1時間あたり30立方メートルは一定の合理性があるとされています。この値は、1人1時間あたりのCO₂生成と換気の比率が $0.02/30=0.000666$ と666ppmであり、この値が妥当であることを示唆しています^[15]。

今後は人間のCO₂排出量やセンサーの設置高さ、室内位置なども考慮する必要がある。

6. 地域の気象データの活用（OpenWeatherMapの利用）による天気データの収集

OpenWeatherMapを利用して、大学の近くの甘日市市の、気温（図21）、湿度（図22）、気圧（図23）、雲の割合（図24）、および風速（図25）を示す。

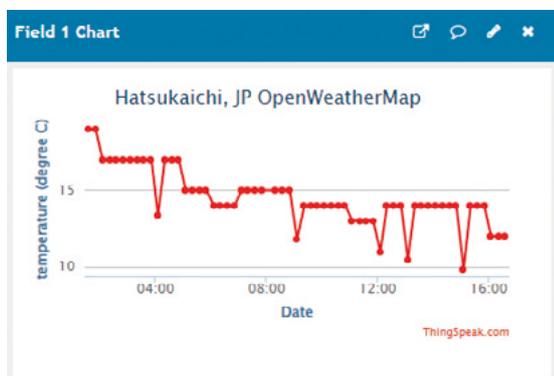


図21 甘日市市の気温

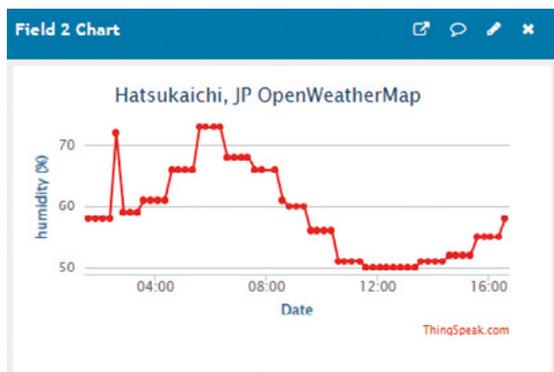


図22 甘日市市の湿度

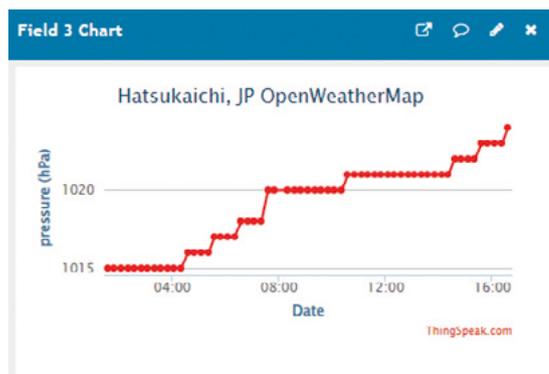


図23 甘日市市の気圧

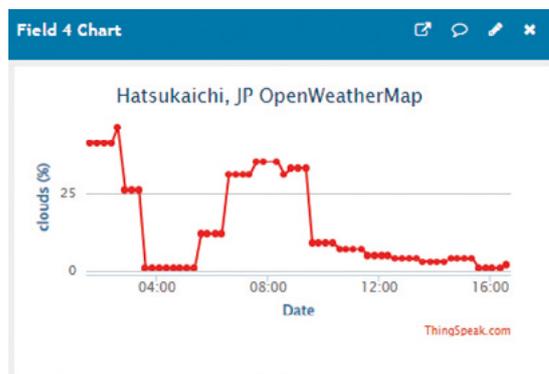


図24 甘日市市の雲の割合

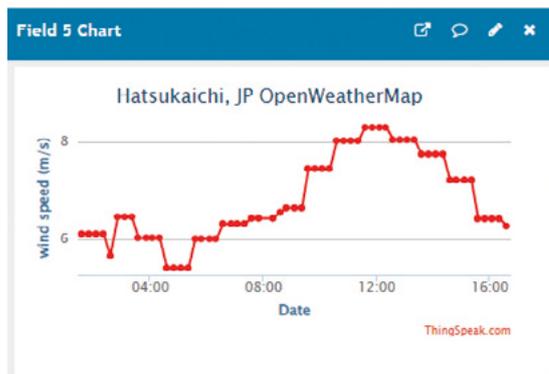


図25 甘日市市の風速

以上より、OpenWeatherMapを用いることにより、地域の気象データを容易に収集でき、開発したIoT機器の実測データと比較できることが明らかになった。

7. まとめ

私たちはSigfoxネットワークとインターネットを利用して、温度、湿度、気圧などのセンサーを搭載し、さまざまな物理データを計測するIoTデバイスを開発してきました。

ここでは、教育・研究に応用するために、CO₂センサーの主要なデバイス開発フロー（下記に示す）

1) Gaussianプログラムを用いてCO₂の特性を求める。

- 2) 有機物の影響を受けにくい光学式 CO₂センサーの特性を調査する。
- 3) レーザー加工によりプリント基板を作製し、基板に CO₂センサー実装する。
- 4) Arduino UNO, Sigfox shield for Arduino, および作成したプリント基板を組み込む。
- 5) Sigfox 通信を利用して IoT システムの動作の確認をする。
- 6) 最後に、センサー設置場所近傍の気象情報と比較検討する
を報告した。

謝辞

本研究を実施するにあたり、協力して頂いた広島工業大学大学院工学系研究科電気電子工学専攻 佐々木優一君、増本 諒太君をはじめ院生・学生、および、また、本研究の一部は九州大学情報基盤研究開発センター研究用計算機システムの一般利用を利用したことに謝意を表します。

文献

- 1) R. Matsuda, H. Suizu, K. Hiyama, K. Kai, I. Yamasaki, K. Oda, N. Okamitsu, K. Eto, T. Tanaka, *Industry 4.0*, 3 (2018), Issue 1, pg (s) 11-14
- 2) T. Tanaka, N. Okamitsu, T. Hamada, K. Nishino, *Electrotechnica & Electronica* 55 (E + E), (3-4), 2020, 35-40, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603-5421 (Online)
- 3) T. Tanaka, N. Okamitsu, K. Nishino, *Electrotechnica & Electronica (E + E)*, 55 (5-8), 2020, 94-98, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603-5421 (Online)
- 4) N. Okamitsu, K. Miyazono, T. Tanaka, *Electrotechnica & Electronica (E + E)*, 55 (9-12), 2020, 99-104, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603-5421 (Online)
- 5) T. Tanaka, M. Yamauchi, K. Kakugawa, T. Uchida, S. Ishihara, K. Ishihara, *Electrotechnica & Electronica (E + E)*, 57 (1-2), 2022, 24-30, ISSN: 0861-4717 (Print), 2603-5421 (Online)
- 6) https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19c-pins-type-co2-manual-ver1_0.pdf
- 7) <https://avogadro.cc/>
- 8) <https://mobaxterm.mobatek.net/>
- 9) https://www.winsen-sensor.com/d/files/infrared-gas-sensor/mh-z19c-pins-type-co2-manual-ver1_0.pdf
- 10) https://www.lpkf.com/fileadmin/mediadownload/products/pdf/DQ/DQ_TechGuide_EN.pdf
- 11) S. Tada, T. Tanaka, R. Masumoto, M. Yamauchi, K. Kakugawa, S. Ishihara, and K. Vutova, "Development of CO₂ sensors for an IoT system by using Sigfox," *Industry 4.0*, Dec. 2023, (now printing)
- 12) <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>
- 13) <https://backend.sigfox.com/device/7806530/messages>
- 14) [https://www.man-es.com/discover/decarbonization-glossary---man-energy-solutions/carbon-dioxide\(co2\)--decarbonization-glossary-man-energy-solutions](https://www.man-es.com/discover/decarbonization-glossary---man-energy-solutions/carbon-dioxide(co2)--decarbonization-glossary-man-energy-solutions)
- 15) <https://www.mhlw.go.jp/content/10900000/000616069.pdf>