U.D.C 621.316.17

マルチ無線を用いた建物向けセンサネットワークの構築
—IEEE802.11ah 準拠の無線装置を活用したプロトタイプの開発—

羽田　芳朗*　　山口　仁士*　　石橋　耀二*　　富田　健司*

要　約：　本報告では，複数の無線規格（マルチ無線）を用いた建物向けセンサネットワークの構築方法を提案する。設置する自由度が高くかつ配線が不要となるよう，コイン電池やエナジーハーベストで動作し，データ通信は BLE（**B**luetooth **L**ow **E**nergy）や EnOcean 等の無線通信を利用するセンサを採用した。センサの計測データはセンサゲートウェイに集約されて無線 LAN を介してサーバーに送信され，データベースに蓄積される。蓄積されたセンサデータをダッシュボードソフトでユーザーの端末で可視化できるシステムを構築した。本研究ではセンサネットワークの構築に IEEE802.11ah（Wi-Fi Halow）を使用し，エッジデバイスからサーバーまでエンドツーエンドで TCP/IP 通信が行えることを確認した。

ｷｰﾜｰﾄﾞ：　センサネットワーク，疎結合，BLE（Bluetooth Low Energy），EnOcean，LoRa，Wi-Fi Halow，MQTT

目　次：

1. はじめに
2. 建物のセンシングに関する問題点
3. センサネットワークの設計方針
4. センサネットワークの実装
5. 構築したセンサネットワークの試験運用
6. おわりに

1. はじめに

情報通信分野ではこれまで長年にわたりユビキタスネットワークの研究が行われてきた[1]。ユビキタスネットワークとは「いつでも，どこでも，何でもつながるネットワーク」と定義されており，携帯電話網などの移動通信システムやブロードバンド通信の発達，およびスマートフォンやタブレッドなどのモバイル端末の普及によりユビキタスネットワーク社会が実現されている。ユビキタスネットワークのうち，ユビキタスセンサネットワークでは数多くの小型センサが主として無線通信を介してネットワークに接続され，温湿度などの環境の状態や人の行動などのセンシングに利用されている[2]。センサネットワークの事例として IEEE802. 15.4 g の無線規格を利用したスマートメーターがある。これ以外にも，設備の状態監視，製造工場の検査工程におけるセンサによる計測，倉庫などの温湿度計測にセンサネットワークが利用されている[3]。近年ではパソコンやスマホなどの情報端末に限らず，自動車，家電，ロボット，設備などのあらゆるモノがネットワークにつながるようになってきたことから，ユビキタスネットワークよりも IoT（**I**nternet **o**f **T**hings）と呼称されることが多い[4]。

ロボット分野では空間そのものをロボット化する試みが行われている。佐藤らは空間の至るところに分散配置されたセンサやアクチュエータを相互に協調させるロボティックルームを提案している[5]。特に空間内における人の生活行動をセンシングすることに特化したロボティックルームはセンシングルームと呼ばれており，室内に構築されたセンサネットワークに加えて，行動データベースシステム，ヒトの行動情報を要約する機能などで構成されている。

このように情報通信分野やロボット分野ではセンサネットワークの研究開発が活発に行われており，社会実装も進んでいる。建築分野に目を向けてみると，建物向けの ICT としてこれまでに BAS（**B**uilding **A**utomation **S**ystem）[6] もしくは BACS（**B**uilding **A**utomation and **C**ontrol **S**ystem）[7] が活用されている。古いタイプの BAS では様々な設備と中央監視室のコンピュータは RS232C などの有線式シリアル通信で接続され，設備メーカー独自のプロトコルで通信が行われていたが，1990 年代以降は異なるメーカー同士の設備機器でも通信できるように通信プロトコルの規格化が進み，BACnet[8] などの規格が策定されている。

従来の BAS では建物内に設置された設備やセンサ等は中央監視室にあるコンピュータに接続され，空調の制御や照明の制御などに利用されてきた。今後，建物には多くのセンサが導入され，取得した大量のセンサデータを用いて空調や照明などをより快適かつ効率的に制御したり，建物の利用者に対する ICT を活用したサービスを提供したりする「スマートビル」へと発展することが期待されている[9)-12)]。スマートビルを実現するためには導入するセンサの種類や数量を増やせるかがカギとなる。本報告ではスマートビルの実現に向けて様々な無線通信規格，即ちマルチ無線を用いたセンサネットワークの構築方法を提案する。設置の自由度が高く配線を極力不要とするため，コイン電池やエナジーハーベストで動作し，データ通信は BLE や EnOcean[14]，LoRa（private）等の低消費電力な通信方式

＊技術研究所　温熱・風グループ

が用いられているセンサを採用した。センサから送られてくる計測値はセンサゲートウェイで集約され，ネットワークを介してサーバーと通信を行い，サーバーでセンサデータを蓄積するセンサシステムを構築した。

本報告の構成は以下の通りである。次節では従来のBASにおけるセンシングの課題について述べる。第3節では課題を解決するためのセンサネットワークの設計方針について述べる。第4節では設計方針に基づいて実装したセンサネットワークシステムについて述べる。第5節では構築したセンサネットワークの試験運用について述べ，最後に本報告をまとめる。

2. 建物のセンシングに関する問題点

文献[9]で議論されているように，建物のセンシングには次のような問題がある。

センサの設置場所と数の問題：空調を制御する目的で屋内に設置される温度計や湿度計，CO_2濃度を計測するセンサは電源の確保や通信線の取り回しの都合により壁面に取り付けられており，設置数も1部屋につき1個から数個程度のため，居住者が活動しているエリアを代表する点で計測が行われているとは言い難い状況である。オフィスビルの場合，オフィスワーカーの座席で温湿度や照度を測定できれば個人の好みに合わせて空調や照明を制御できる可能性があるものの，センサへの給電や通信路の確保の問題から既存のBASではそのような設置は行われていない。

センサの保守の問題：一般的に建物の寿命が数十年であるのに対しセンサの寿命は数年程度である。そのため定期的なセンサの状態確認や交換などの保守が必要となるが，壁や天井に固定されているセンサの保守は容易でない。センサに接続している給電/通信用ケーブルの交換が必要となった場合，ケーブルの撤去や交換の工事には多額のコストや手間が掛かる。

以上の議論を踏まえ，本研究ではセンサの設置/撤去の自由度の高く，かつ保守が容易なセンサネットワークの構築方法を提案する。

3. センサネットワークの設計方針

ここでは前節で述べた問題を解決するセンサネットワークの設計方針につて述べる。基本コンセプトは，ハードウェア・ソフトウェアともに「疎結合」なシステムとして設計・実装することである。疎結合とはIT分野ではよく使われる用語であり，システムを構成する個々の構成要素同士の結びつきが緩やかで，独立性が高い状態の事を意味する。疎結合なシステムでは構成要素は相互に連携して動作するものの，互いに依存する度合いが低いため，それぞれの構成要素を交換したり改良したりするよう柔軟な対処が可能となる。例えば，センサネットワークを停止しなくてもセンサを追加/交換/撤去することができる。

ハードウェアに関する方針：疎結合なセンサネットワークを実現するため，センサデバイスは消費電力が小さく，バッテリもしくは環境発電（エナジーハーベスト）で動作し，センサの計測値は無線で送信するセンサデバイスを選定する。後述するようにセンサの計測値は無線通信を介してセンサゲートウェイに送られるが，センサ-ゲートウェイ間の無線にはペアリングなし通信できる方式を選定する。そのような通信方式として例えばEnOceanやBLEのアドバタイジングパケットがある。また，センサゲートウェイとサーバー間の通信もできる限り無線化する。

ソフトウェアに関する方針：センサネットワークを構成するソフトウェアも疎結合なシステムとなるようにする。詳細は次節で述べるが，センサデータをセンサゲートウェイからサーバーに送るための通信プロトコルには疎結合なシステムを構成できるMQTT（**M**essage **Q**ueuing **T**elemetry **T**ransport）を採用した。

セキュリティに関する方針：センサネットワークではセンサなど個々のデバイスにセキュリティ対策を施すことは困難である。そのため，業務で使用するネットワークとは独立した専用のネットワークとして構築する方針とする。センサネットワークをインターネットに接続したい場合はインターネットルーターを導入する。その場合，インターネットルーターにはファイアウォールなどのセキュリティ対策を施す。

4. センサネットワークの実装

ここでは前節の方針に従って設計・実装したセンサネットワークについて述べる。

4.1 センサネットワークの機能構成

センサネットワークの機能構成を図1に示す。センサネットワークの機能は大別すると物理空間にある機能とサイバー空間にある機能に分類される。物理空間には物理空間の状態をセンシングしてサイバー空間に転写するセンサ，センサから送られてくるデータを受信してプロトコル変換してからサーバーに送信するセンサゲートウェイ，センサデータを可視化するユーザー端末がある。サイバー空間にはセンサデータを蓄積するデータベースサーバー，およびセンサデータを可視化するWebサービスを提供するアプリケーションサーバーがある。以降で各構成要素について詳しく述べる。

4.1.1 センサデバイス

本研究で使用するセンサには電池もしくはエナジーハーベスト動作する消費電力が小さいものを選定した。使用したセンサ一覧を表1に示す。どのセンサも計測したセンサデータは無線で送信しており，今回選定したセンサはBLE，EnOcean[14]，LoRaの3種類の方式が使われている。使用したBLEデバイスはアドバタイジングパケットにセンサの計測データをのせて送信するため，受信機とペアリングなしで通信可能である。EnOceanデバイスは通信エリア内にある全ての受信機でデータを受信することができる。LoRaデバイスは通信でACKを返さない設定で使用することで複数の受信機で同時にデータ受信できる設定とした。このようにすることで，センサを導入するときに送受信機のペアリングの設定を省略することができる。以上

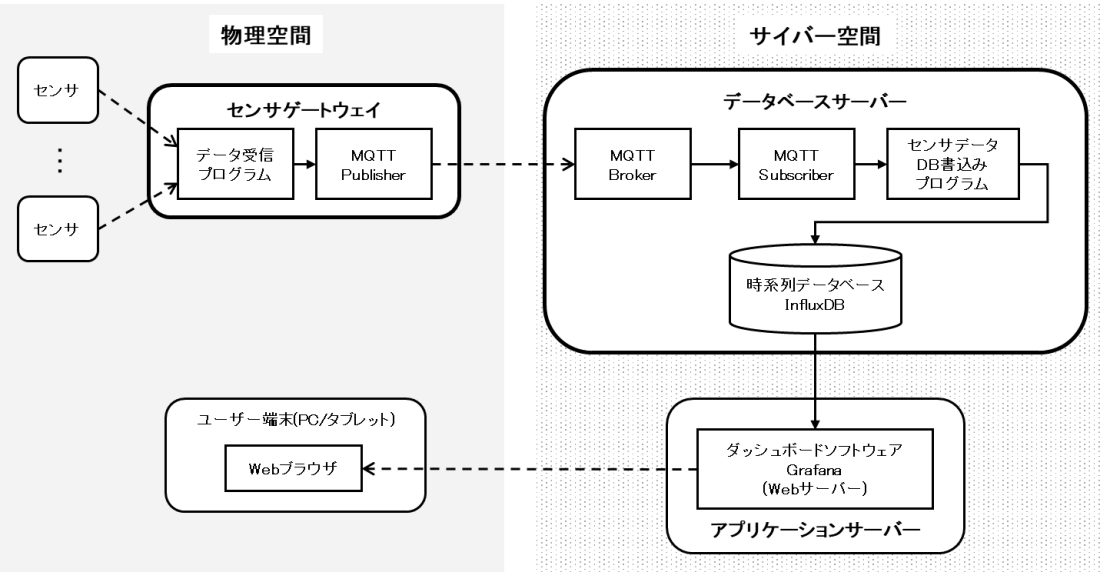

図1　センサネットワークの機能構成

の方法では複数のゲートウェイで同じパケットを同時に受信してサーバーに送信する場合があるが，重複データのクレンジングはサーバーで処理することとした。

表1　本研究で使用したセンサ

種類	メーカー	型番	通信
漏水検知	ABLIC	S-CBTGAAAC)/ S-CBSSAAAC-001	BLE
温湿度， 照度等	OMRON	2JCIE-BL01	BLE
温湿度， 照度	RICOH	EH 環境センサ D101	BLE
CO_2	RICOH	EH CO_2センサ D101	BLE
温湿度， 照度	EnOcean Alliance	STM550J EEP D2-14-41	EnOcean
CO_2	Echoflex Solutions	RCT EEP A5-09-04	EnOcean
人検知	Echoflex Solutions	ROS EEP A5-07-01	EnOcean
温湿度	EASEL	ES920LRTH2	LoRa

センサネットワークではセンサデバイスは個体毎に一意に識別される必要がある。センサによっては予めメーカーが個体毎にユニークなIDが割り当てている製品と，そうでない製品がある。例えばBluetoothデバイスには一台毎に異なるMACアドレスが割り当てられており，これを利用すれば同種のセンサでも個体を識別できる。EnOceanも個体ごとにユニークなIDが割り当てられている。一方，LoRaデバイスには予めユニークなIDは割り当てられていない。本研究で使用したEASEL社のLoRaセンサはソフトウェアでIDを設定する機能があり，今回は手動でIDを割り当てて使用した。

4.1.2　センサゲートウェイ

センサゲートウェイには小型コンピュータボード「Raspberry Pi Zero WH」を使用した。寸法が65 mm(W)×30 mm(D)×9 mm(H)，重量が約11 gと小型・計量であり，消費電力が最大約2 Wと低消費電力でありながらLinux OSが動作するため，プログラムの開発・実装を容易に行うことができる。コンピュータボードにはWi-FiおよびBluetoothで通信するコンボチップが搭載されており，ボード単体でBLEデバイスやサーバーと通信可能である。センサゲートウェイは常時稼働させる必要があるためAC電源で給電する。

Raspberry Pi Zero WH本体のみではEnOceanやLoRaのデバイスと通信できないため，USBポートに専用の受信デバイスを接続して使用する。EnOceanデバイスとの通信にはROHM社製USB400Jを使用した。LoRaデバイスとの通信にはEASEL社製のLoRa開発評価キットES-920SDK2を使用した。

ゲートウェイで受信したセンサデータは後述するようにMQTTプロトコルで送信される。ゲートウェイにはセンサデータを受信し，MQTTでデータを送信するプログラムが実装されている。このプログラムはPythonで開発した。

センサから送られてくる計測データを受信するため，1つのフロアに複数のセンサゲートウェイを設置する。センサゲートウェイの配置はセンサの通信距離を考慮して決める。例えばBLEデバイスのセンサは計測データをアドバタイジングパケットにのせて送信するが，我々のオフィス環境でアドバタイジングパケットを取りこぼし無く受信できる距離は，実験によれば約10 mであった。本研究では

この通信距離を考慮しながらフロア全体をカバーできるように複数のゲートウェイを配置した。

4.1.3　センサデータを送信する通信プロトコル

本研究ではセンサゲートウェイからサーバーにセンサデータを通信するプロトコルとして MQTT を採用した。MQTT は出版-購読モデルの通信方式であり，データを送信する Publisher，受信する Subscriber，および Broker の 3 つの要素で構成される。MQTT を利用してセンサネットワークを構築した先行研究として例えば文献[9) 13)] があり，MQTT はセンサネットワークの研究で広く利用されている。

MQTT では Publisher と対になる Subscriber の間で通信を行うが，このペアを組むのに MQTT Topic が使用される。本研究では表 2 のような 4 階層の MQTT Topic を設計した。例えば RICOH のエナジーハーベスト型環境センサの MQTT トピックは 'device/sensor/ricoh/ehd101' のように記述する。

本研究では MQTT Broker に mosquitto を使用した。

表 2　MQTT Topic の命名規則

階層	Key
1	device（固定）
2	device の種類(sensor/tag)
3	device のメーカー名 但し EnOcean デバイスの場合は 'enocean' で固定
4	センサの型式

4.1.4　データベースサーバー

図 1 のデータベースサーバーは Raspberry Pi4 で実装した。長期間センサデータを蓄積できるよう USB HDD（2TB）を接続し，この HDD にセンサデータを記録するようにした。データベースには NoSQL 系の時系列データベースである InfluxDB を使用した。今回はセンサの種類毎にデータベーステーブルを作成した。

データベースサーバーにはセンサゲートウェイから送られてくるセンサデータを MQTT Subscriber で受信して InfluxDB に記録するプログラムが実装されている。このプログラムは Python で開発した。

4.1.5　アプリケーションサーバー

図 1 のアプリケーションサーバーは Raspberry Pi4 で実装した。InfluxDB に蓄積されたセンサデータの可視化にはダッシュボードソフト Grafana を使用した。Grafana には InfluxDB を参照する機能および Web サーバーの機能があり，ユーザーが指定したセンサデータをグラフや数値データの形式で Web ブラウザに表示することができる。

4.2　ネットワークの物理構成

4.2.1　フロア間通信の課題と解決方法

前述のようにセンサゲートウェイは無線 LAN を介してサーバーと通信する。複数のフロアを跨いで建物全体にセンサネットワークを構築する場合，無線 LAN のアクセスポイント（AP）をバックボーンネットワークに接続する必要があり，一般的には有線 LAN ケーブルが使われる。バックボーンネットワークを有線ケーブルで構築する場合，フロアを跨いだ配線にはコストや作業労力が掛かる。本研究では物理的に疎結合なシステムとして構成することを目指しており，バックボーンネットワークを無線で構築する方法を検討した。

設置するセンサデバイスの数やサンプリングレートにも依るが，表 1 のセンサを使用する場合の通信速度は数百 kbps〜1 Mbps 程度あれば十分だと考えられる。本研究ではセンサネットワークでフロア間の通信を行うバックボーンネットワークに IEEE802.11ah（Wi-Fi Halow[14)]）を採用し，センサネットワークへの適用の可否について検証した。IEEE802.11ah を用いたネットワーク構成を図 2 に示す。

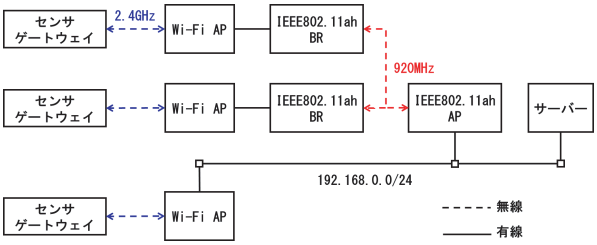

図 2　ネットワーク構成

4.2.2　IEEE802.11ah（Wi-Fi Halow）

Wi-Fi Halow は Wi-Fi Alliance で仕様が策定され，IEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）で IEEE802.11ah[15) 16)] として標準化された無線通信規格である。サブギガ帯（日本では 920 MHz）を使用する通信方式でありながらエッジデバイスからサーバーまでエンドツーエンドで TCP/IP の豊富な通信プロトコルを利用できる特長がある。本研究では IEEE802.11ah の無線装置としてサイレックス・テクノロジー株式会社の AP-100AH[17)] および BR-100AH[18)] を使用した。日本では 920 MHz 帯の無線は電波法（ARIB STD-T108[19)]）に適合している必要があり，その制約のため本報告の執筆時点（2022 年 7 月）では Wi-Fi Halow は規格上の性能を最大限に発揮することができない。2022 年秋に電波法令の改正が予定されており，通信性能が大幅に向上する見込みである。法律の改正前後の違いを表 3 に示す。

AP-100AH および BR-100AH にはスリーブアンテナが付属している。このアンテナの指向性を電波暗室で 3 m 法により測定した。図 3 の左側に測定の様子を，右側に測定結果を示す。右側の中央に描かれている黒い線はアンテナの向きを表している。この図からアンテナの軸と垂直な方向に電波が強く放射していることが分かる。この測定結果から IEEE802.11ah 無線装置を同一の鉛直線上に配置してフロア間通信を行う場合，アンテナの軸方向を水平に設

表 3　現行法と法改正後の IEEE802.11ah の性能の違い

項目	現行法	改正後
帯域幅	1MHz	1/2/4MHz より選択
出力	1mW	20mW
チャンネル数	1CH	1MHz：6 2MHz：2 4MHz：1
電波到達距離（見通し）	～300m	～1km 程度

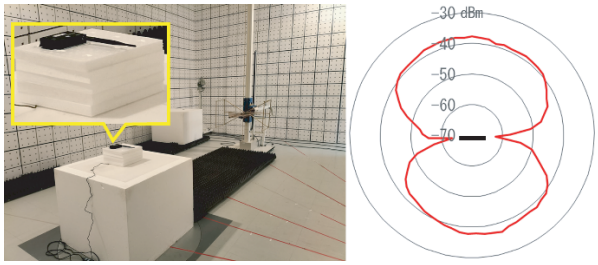

図 3　IEEE802.11ah のアンテナの指向性の測定

置した方が離れた階に電波を飛ばせることが分かる。本研究では IEEE802.11ah の送信機および受信機のアンテナを水平に設置して使用した。

本研究で提案した IEEE802.11ah を用いたセンサネットワークを東急建設技術研究所のオフィスビルに構築した。今回導入した IEEE802.11ah 無線装置である AP-100AH と BR-100AH を用いて，1 階から 3 階のフロアを跨いだ通信環境でもセンサデータを送信するための MQTT，HTTP や TSL（**T**ransport **L**ayer **S**ecurity）などのプロトコルが利用できることを確認した。

北米仕様の製品を用いた実験のため単純に比較できないが，文献[20] によれば法改正後相当の製品は現状より通信距離が長くなり，通信速度の向上も見込まれる。以上から 2.4/5 GHz 帯と比較して建物の中で電波の到達距離が長い 920 MHz 帯の周波数を利用し，かつ TCP/IP 通信が可能な IEEE802.11ah は建物内でセンサネットワークを構築するのに有用な通信方式だと考えられる。

5. 構築したセンサネットワークの試験運用

本報告で提案したセンサネットワークを東急建設技術研究所のオフィスビルに構築した。このオフィスビルは地上 5 階，地下 1 階の RC 構造の建物であり，1 フロアの床面積は約 400 平方メートルである。今回は執務スペースのある 3 階のフロアに BLE タイプのセンサを 12 台設置し，4 ヶ所にセンサゲートウェイを設置した。1 階ロビーには LoRa タイプの温湿度センサを 14 台設置した。LoRa 用センサゲートウェイは 3 階に設置し，LoRa を用いた通信は 1 階と 3 階の間で行う設定とした。

センサネットワークで取得した各種センサデータはダッシュボードソフト「Grafana」でリアルタイムに可視化している。オムロンの環境センサで取得した計測値を Grafana で可視化した画面を図 4 に示す。この例では，複数の個体の温度，湿度，騒音について現時刻までの時間変化をリアルタイムに可視化している。

6. おわりに

本報告では，複数の無線規格（マルチ無線）を用いた疎結合なセンサネットワークの構築方法を提案した。提案する設計に基づいてセンサネットワークを実装し，特に IEEE802.11ah はフロア間の通信で活用できる見通しを得られた。

今後は，開発したセンサネットワークを活用して建物内の様々な事象をセンシングによりサイバー空間に転写し，蓄積された建物内のセンサデータの活用方法を検討する予定である。

図 4　Grafana によるセンサデータの可視化の例

謝　辞

アンテナ指向性の測定実験に協力して下さった技術研究所・建設 ICT グループの渡辺拓人博士に感謝します。また，Wi-Fi Halow 準拠の無線機器の導入を支援して下さったサイレックス・テクノロジー株式会社に謝意を表します。

参考文献

1）平成 16 年版 情報通信白書，総務省，2004
2）大橋正良，大槻知明：ユビキタスセンサネットワーク，電子情報通信学会誌，第 95 巻，第 9 号，pp. 772–778, 2012
3）冨岡克己，近藤憲二：ユビキタスセンサネットワークシステム，NEC 技報，第 59 巻，第 1 号，pp. 72–75, 2006
4）平成 27 年版 情報通信白書，総務省，2015
5）佐藤知正：人と共存するコンピュータ・ロボット学，pp. 51–61，オーム社，2004
6）野田肇：ビル管理システム（BAS）の変遷，電気学会誌，第 129 巻，第 6 号，pp. 369–372, 2009
7）住友俊保：ISO BACS の基本機能，電気設備学会誌，第 25 巻，第 2 号，pp. 97–102, 2005
8）池田耕一：BACnet の現状と動向，電気設備学会誌，第 27 巻，第 12 号，pp. 959–963, 2007
9）廣瀬啓一，白石理人，山崎元明，ほか 2 名：施設内 IoT プラットフォームの開発と活用，清水建設研究報告，第 96 号，pp. 127–134, 2018
10）粕谷貴司，田中規敏：IoT を活用した建物制御システム，電気設備学会誌，第 38 巻，第 8 号，pp. 466–469, 2018
11）粕谷貴司，江崎浩：futaba：スマートビルのためのビッグデータ・プラットフォーム，情報処理学会論文誌，第 62 巻，第 3 号，pp. 867–876, 2021
12）渡邊剛：IoT 時代におけるビルマネジメントシステム，電気設備学会誌，第 37 巻，第 3 号，pp. 180–183, 2017
13）粕谷貴司，近藤正方，茂手木直也，ほか 7 名：スマートシティのための MQTT プラットフォームの検証，第 13 回情報科学技術フォーラム（FIT2014）予稿集 RL–001，情報処理学会/電子情報通信学会共催，2014
14）Wi–Fi Alliance : Wi–Fi Halow, https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/wi-fi-certified-halow
15）802.11ah 推進協議会：IEEE802.11ah, https://www.11ahpc.org/11ah/index.html
16）小野忠男監修：プライベートワイヤレスネットワーク入門，pp. 121–140，リックテレコム，2021
17）サイレックス・テクノロジー株式会社：IEEE802.11ah 対応ワイヤレスアクセスポイント AP–100AH 北米モデル，https://www.silex.jp/products/wireless_infra/gateway-accesspoint/ap100ah.html
18）サイレックス・テクノロジー株式会社：IEEE802.11ah 対応ワイヤレスブリッジ BR–100AH 北米モデル，https://www.silex.jp/products/device_networking/bridge/br100ah.html
19）電波産業会：標準規格概要 STD–T108 1.4 版，https://www.arib.or.jp/kikaku/kikaku_tushin/desc/std-t108.html
20）サイレックス・テクノロジー株式会社：IEEE802.11ah の実証実験結果ら見えた屋内アプリケーションでの活用，https://www1.silex.jp/wp_ieee802.11ah_wi-fi_haLow_indoor_demonstration.html

Development of a Sensor Network System for a Building using Multiple Radio Communication Standards

Y. Hada, H. Yamaguchi, Y. Ishibashi, and K. Tomita

In this paper we propose a sensor network system for a building using various wireless communication standards. In order to make sensor installation a high degree of freedom and eliminate wiring, we adopted sensors powered by a coin battery or an energy harvesting and utilizing low power wireless communication such as BLE（**B**luetooth **L**ow **E**nergy), EnOcean and LoRa. The sensor measurement data is aggregated from each sensor to a sensor gateway to send them to a server computer via wireless LAN. Finally, the sensor data is stored into the time series database（InfluxDB）working on the server computer. The stored sensor data can be visualized using dashboard software 'Grafana'. In this prototypic sensor network system, we tried to use IEEE802.11ah communication devices which enable us end–to–end TCP/IP communication from edge device to servers.