

IoT 共通基盤技術の確立・実証 (PRISM 追加課題)
Establishment and Demonstration of Common IoT Platform Technologies
(PRISM advanced program)

プログラムディレクタ 松倉隆一 富士通
研究開発期間 平成30年度

【Abstract】

In order to realize "Society 5.0", we have applied the common IoT platform technology to the agriculture field as one of the examples. To perform a large-scale IoT systems, long-term stable operation and simple operation management like zero configuration are strongly required from the people of the fields. In the PRISM program, the goal is to digitize the field of a large horticulture and to control the field to maximize crop yields using analysis results.

We extended the common IoT platform technology and to develop some additional functions to the IoT device and the network equipment to cooperated with the platform. To promote the realization of the Digital Twin, an environment where anyone can easily install and operate is necessary. In this research project, devices and network devices are equipped with agents, and by taking on the role of common IoT infrastructure, the installation of devices is notified to the gateway and cloud, and services become available. In addition, it has a function for automating the subsequent operation management. We installed 1,056 sensors in 6 horticultural facilities including commercial facilities and confirmed this effect.

1 研究開発体制

- **プログラムディレクタ** 松倉隆一 (富士通)
- **各課題研究代表者** 高橋英一郎 (富士通)
近藤晴彦 (SMK)
丹 康雄 (北陸先端科学技術大学院大学)
大谷朋広 (KDDI)
- **総合ビジネスプロデューサ** 中村秀治 (三菱総合研究所)
- **ビジネスプロデューサ** 内田靖彦 (富士通)
益子 寛 (SMK)
Marios Sioutis (北陸先端科学技術大学院大学)
宮澤雅典 (KDDI)
平松稔雄 (ワイズ・システム)
松田尚久 (日本電気)

- **研究開発期間** 平成30年度

2 研究開発課題の目的および意義

第5期科学技術基本計画で掲げられた目指すべき未来社会の姿である「Society5.0」の実現に向けて、内閣府官民研究開発投資拡大プログラム（PRISM）において特定された追加課題として、農業分野等へのIoT（Internet of Things）基盤技術の早期社会実装を可能にするIoTデバイス基盤技術やエリアネットワーク自律運用技術等の研究開発を実施し、産学官連携による実証を通じて、IoTネットワークの大規模な運用を可能とし、耐障害性等に優れた汎用的なIoT基盤技術を確立し、国際標準化を推進するとともに、当該技術の社会実装を加速する。

農業分野等にIoTの社会実装を加速するためには、IoTの大規模化、長期運用、効率的管理等を可能とするIoTネットワーク基盤技術の確立が必要である。このため、本研究開発では、大規模なIoTネットワークを自律運用させる技術、IoTネットワークの耐障害性を強化する技術等の研究開発を実施し、産学官連携による実証を通じて、農業分野等に対応した、IoTネットワークの大規模な運用を可能とし、耐障害性等に優れた汎用的なIoT基盤技術を確立するとともに、研究成果に関する国際標準化を推進することにより、IoTネットワークの社会実装を加速することを政策目標とする。

3 研究開発成果（アウトプット）

IoTは、住宅、工場などの分野で活用が進んでいるものの、農業などの一部の分野ではIoTネットワークの大規模化、長期運用、効率的な管理等の課題があり、社会実装を進めるうえでの障壁となっている。また、こうしたIoTによるトラフィックはどのように振る舞い、広域ネットワークへどのように影響するかもまだ明確になっていない。政府が目指すSociety5.0時代にはあらゆる産業がつながり、サイバー空間とフィジカル空間の融合による超スマート社会が実現されるが、このIoTに関わる課題を解決することが本研究課題の目的である。

サイバーフィジカルシステム（CPS）を実現するには、IoTデバイスをネットワーク経由で、クラウドサービスまで接続する必要がある。IoTデバイスは既に規格化されたインタフェースで接続されるため、一般的には図1に示すように、クラウドとの接続にはゲートウェイを設置してWebインタフェースに変換しなければならない。ここでは、コアとなる技術としてW3Cで標準化を進められるWeb of Things（WoT）に基づくWoT基盤技術を中心に置き、周辺技術を開発して農業分野での社会実装を目指す。WoT基盤については、既に元施策（IoT共通基盤技術の確立・実証）にて標準化を含めて開発を進めている。WoTは情報モデルをJSONで表現し、情報モデルをRESTで操作する、現時点で広く使われている方法に基づいていることが特徴である。現在、住宅、ビル、インダストリ領域では、主にデバイスインタフェースに関する複数のIoT規格が乱立しており、WoTはこれらの規格間の橋渡しをすることが期待されている。

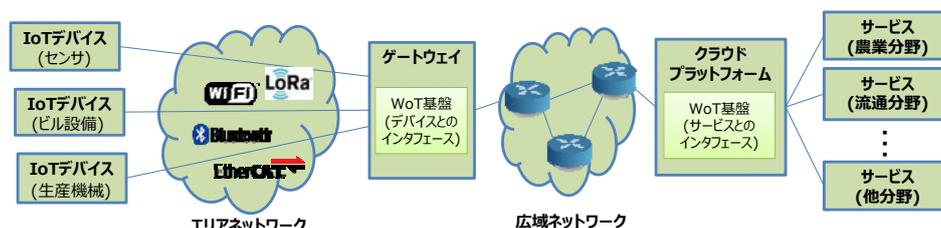


図1.IoTシステムの全体構成

このシステムを実現するために、本課題では4つの項目に分けて研究開発を進めた。

課題Ⅰでは、WoT 基盤技術の農業分野に合わせた技術拡張を行うとともに、実証環境の構築を行った。拡張においては、課題Ⅱ～Ⅳで開発した技術に対する基盤側の機能を取り込み、4 課題の成果をまとめている。成果としては、①ICT 専門家でなくても IoT 現場を構築可能なゼロコンフィギュレーション技術、②デバイスやネットワークの隠れた障害によるトラブルの検出と復旧に関する技術、③セキュリティを実現した。これらの成果を活用し、4 施設 6 か所の園芸施設（ビニルハウス）に 6 種類、合計 1,000 個以上のセンサを設置した。設置したセンサは、ほぼ自動的にネットワークに接続され、データは定期的にクラウドに収集された。また、設置後 2 か月経過しているが、特にトラブルなく動作している。

課題Ⅱでは、IoT デバイスと搭載される通信モジュールの開発を行った。デバイスの接続には無線を利用することとし、通信方式が異なる複数の方式を実現した。また、電源供給方法についても検討を行い、センサと無線の消費電力から①エネルギーハーベスタ、②バッテリー、③AC 電源の 3 種類の方式を実現している。エネルギーハーベスタを利用した方式では、太陽光パネルとキャパシタを搭載し、デバイスから一方的にデータを送信する方式で省電力化を図り、1 分間隔の通信、24 時間動作を実現している。主な機能は、通信モジュールに搭載し、他のセンサや装置にも適用可能になった。

課題Ⅲでは、HTIP に対応した L2 スイッチと Wi-Fi アクセスポイント（AP）を実際に開発し、課題Ⅱで開発したデバイスを含めて HTIP による運用管理を実現する。さらに、実証環境で収集した運用情報により、実際に発生する障害の検出及び原因の分析を機械学習で実現し、その有効性を一部示すことができた。

課題Ⅳでは、広域ネットワークを含めて運用管理を検討した。議論を簡単にするために、エリアネットワークとして LoRaWAN を利用し、LoRaWAN で発生した IoT トラフィックにより広域ネットワークが影響を受けないような、広域ネットワークでのスライス制御や LoRaWAN における通信制御を実現した。トラフィック情報収集や可視化を実現する OSS が既にあることから、これらの調査を行い大規模な IoT システムへの適用可能性を VM 環境で検証した。また、LoRaWAN については、課題Ⅱのセンサと組合せて動作確認を行っている。

IoT では導入環境の物理的な障害物や電波ノイズの影響を受けやすいため、導入前の検証が重要である。そのために、課題ⅠとⅢでは IoT システム全体とエリアネットワークのシミュレータを開発しており、設置する環境のレイアウトと設置するデバイス数、通信方式を入力することでシミュレーションすることが可能である。基本的な機能を開発した。

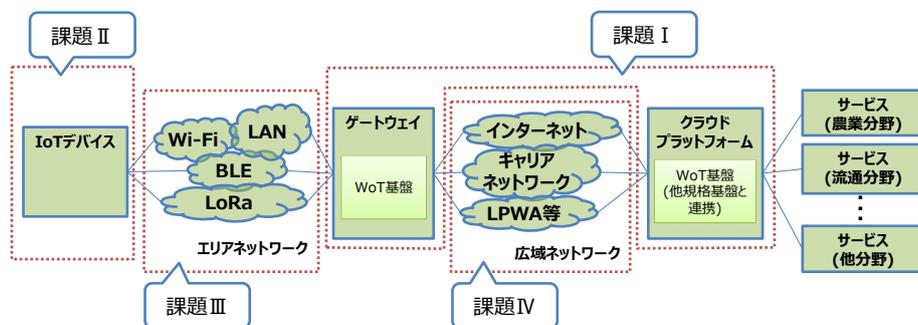


図 2. 課題Ⅰ～Ⅳの関係

本研究課題で新たに取り組んだ標準化活動に取り組んでいる。全体のアーキテクチャについては、平成 26 年に Y. 4409 を勧告化した。その後、WoT による通信インタフェース、HTIP による運用インタフ

エースの詳細の議論が進んだ。この内容を、Y. 4409の実装ガイドラインとして作成することをITU-T SG20で実施している。また、IoTで関心の高いセキュリティについても、ゲートウェイでデバイスを防御する方式について、WoTへの提案を行った。

3. 1 フィジカル・サイバー空間をつなぐWoT基盤技術（課題I）

3. 1. 1 WoT基盤の開発及び実証環境の構築（課題ア）

農業生産効率化につながる環境情報と植物生体情報をWoTのデータモデルとして表現し、農業フィールドにおいて合計1000個のセンサや装置等を接続し、課題I～IVを検証可能な実証環境を構築し動作検証を実施する。また、生産効率化を実現するアプリケーション開発に必要な農業向けWeb APIを開発する。また、WoT基盤の運用管理機能については、課題II～IVと連携して、運用情報をWoT基盤で収集し、機械学習を利用して障害の検出及び原因分析が可能となる機能追加を行う。セキュリティについては標準化団体の動向を見極め、技術要件を明確にする。また、これらの拡張機能に関して、適切な標準化団体を選択し、標準化提案を行う。

【実証環境の構築】

全国4か所6施設に、実証環境を構築した。今年度は、植物の生育条件を測定することを目的に、光合成に必要な条件を測定する6種類（温度、湿度、照度（可視光、紫外線）、気圧、CO2濃度）のセンサを1台のセンサユニットに搭載し、BLEまたはLoRaで通信することとした。これらのセンサユニットは、最寄りのゲートウェイと通信し、さらにインターネット経由してクラウドに接続される。各施設には施設の広さに応じて1～3台のゲートウェイを設置し、各センサユニットのデータはゲートウェイ経由でクラウドに収集される。デ・リーフデ北上のような大規模施設の場合、3台のゲートウェイでカバーしている。これらの施設に接続されるユニットは合計176台で、1,056個のセンサが接続され、1～5分間隔で24時間データを収集できている。

表 1. 各施設に設置したセンサユニット数（通信方式別）

施設名	農研機構 (つくば)	農村工学部門 (つくば)	豊橋技科大 (豊橋)	ベルファーム 実験棟(掛川)	ベルファーム 生産棟(掛川)	デ・リーフデ 北上(石巻)	合計
BLE	27	0	20	1	1	13	62
LoRa	30	18	1	8	21	36	114

【WoT基盤及び運用管理技術】

IoTシステムを設置、構築するには、センサデータをクラウドに収集するだけではなく、設置やその後の運用管理を簡単にする方法が必要であり、これらの機能がないと普及しない。本課題では、IoTデバイスの設置と動作確認を簡単にするためのゼロコンフィギュレーションと、IoTデバイスとデバイスが接続されるエリアネットワークの運用情報を収集する機能の開発を行った。

ゼロコンフィギュレーションでは、課題II等で開発したWi-Fi、BLE、LoRaで接続されるデバイスを対象に機能開発を行った。運用情報を通信する方式としてはHTIP（ITU-T G.9973）であり、情報通信技術委員会（TTC）で作成している非IP/非Ethernet通信向け接続ガイドラインに合わせて、実装を行った。その結果、接続時に検出されたデバイス、無線の場合には信号強度を作業者に通知し、そのまま接続してよいかどうかを判断したうえで設置環境可能なインタフェースを開発できた。この機能により、ICTに詳しくない人でも設置判断が可能であり、その後も安定した接続が期待できる。また、作業時間もほぼ1/10に削減された。

運用情報の収集機能に関しては、課題Ⅱ、課題Ⅲで開発した HTIP 対応のデバイスとネットワーク機器 (L2 スイッチと AP) からの運用情報を収集可能となった。この得られた運用情報からネットワークトポロジを自動的に判別できるほか、無線信号が弱くなっている個所やデバイスの CPU 温度が上がっているところなどの情報が可視化されるようになり、トラブル発生時の原因推定やトラブルが起こりそうな予兆を検出できる可能性がある。

【国際標準化】

日本が主導して標準化した IoT エリアネットワークに関するアーキテクチャ規格 Y. 4409 (旧 Y. 2070) に対して、その後、具体的な実装方式が元施策及び TTC 等での議論によって明らかになってきた。このため、この内容を実装ガイドラインとしてまとめ、Y. 4409 の Supplement として発行することを ITU-T SG20 に提案を行い、承認された。令和元年度の承認を目標として進めている。

具体的な内容としては、Y. 4409 に示された参照点の具体的なインターフェース仕様としての WoT や、HTIP による運用情報の通信インターフェース、FIWARE で使われている NGS の情報モデルとのマッピングに関する記述を行い、Y. 4409 を実際に利用するときに必要な情報を記載することで合意されている。ここで記載される内容は、本課題での社会実装で考慮されており、Y. 4409 の普及に寄与する。

一方、IoT セキュリティに関しても非常に関心が高まっている。WoT では IoT デバイスを Thing Description と呼ばれる情報モデルで表現しているが、IoT デバイスが持つ機能等の情報の他、アクセス方法やセマンティクスがメタデータによって記載される。この機能を拡張して、セキュリティ情報をメタデータとして記載し、インターフェースとして認証/暗号化機能を備えることを WoT ワーキンググループに提案した。また、この機能を WoT ゲートウェイに組み込み、IoT デバイスへのアクセスをゲートウェイで遮断することが可能であり、IoT デバイス自体がセキュリティ機能を持たなくてもゲートウェイで代替できる方式の実装を終えている。

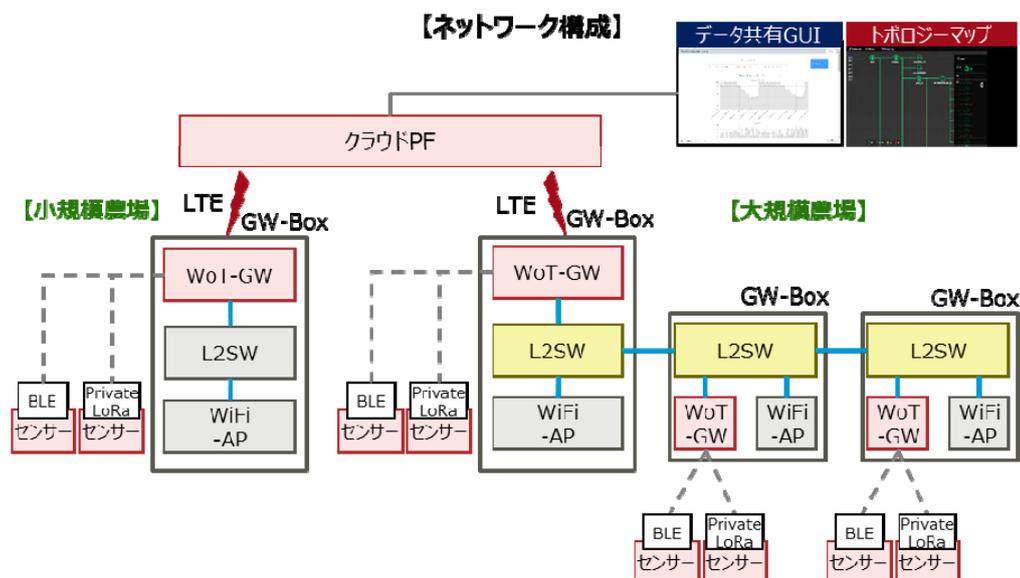


図 3. 園芸施設に設置した機器の構成 (抜粋)

3. 1. 2 WoT 基盤シミュレータの開発 (課題イ)

IoT デバイス、ゲートウェイ、それらを結ぶネットワーク(エリアネットワーク、コアネットワーク)

の動作を設計段階で検証可能な WoT ユースケースシミュレータを開発する。WoT ユースケースシミュレータは、エリアネットワークに接続される IoT デバイスのインタフェースや通信方式の多岐にわたる組合せが確認可能なものとする。デバイス、ネットワークの組合せやトポロジを簡単に設定できる GUI (Graphical User Interface) を開発する。

【WoT 基盤シミュレータ】

クラウド内のサービスや広域ネットワークを含めたシステム全体の挙動を定量的に把握するためのシミュレータの開発を行った。本シミュレータのシステム全体の構成は ITU-T Y. 4409 に沿ったものとし、サービス、プラットフォーム、ゲートウェイ、デバイスといった情報処理要素と、広域ネットワーク、エリアネットワークといったネットワーク要素からなる。

このように多数の要素からなり、さらに様々な種類のデバイスを利用することとなるため、システム全体としての組み合わせは相当な数に及ぶことになる。一方、ネットワークのトポロジや利用されるデバイス等、システムの全体構成は利用用途によりある程度同じものになることが考えられる。そこで、本シミュレータでは頻繁に使われるパターンをテンプレート化することで、典型的なシステム構成のシミュレータを容易に構築可能である設計とした。

ネットワーク要素についても広域ネットワーク、エリアネットワーク、それぞれのテンプレートを用意することで、大まかな指定を行なうだけで詳細な伝送技術や通信サービスの模擬が反映されたネットワークシミュレータモジュールが構築できる設計とした。

デバイスについてはその動作がシステム全体の挙動に重要な影響を及ぼすため、実際に稼働する機器同様の動作をする仮想デバイスを、特に農業向けのデバイスを中心に用意した。これらを選択していくつかの動作設定を行なうことでシミュレータとして利用可能であり、システムの一部として動作する。クラウド側に存在するサービスやプラットフォームについては、実際のコードが入手できる場合には汎用の IA プロセッサで実物を稼働させシミュレータの一部として動作させるしくみを提供するが、インターネット上で実際にサービスとして動作しているものについては、本シミュレータからインターネットへのアクセスを通じて実際のサービスとシミュレータとを連携させた構成が実現できるようにする。

各モジュールの内部では従来から開発してきたシミュレータの技術を転用している。仮想技術を利用することでデバイスやゲートウェイを動作させる。また、ネットワークを模擬するシステムを利用することで広域ネットワークやエリアネットワーク内の通信品質の模擬を行う。また、StarBED 用に北陸先端大のメンバが主に開発してきた SpringOS の一部を利用し機器の設定やシミュレーションモジュール間の接続設定の一部を行う。

規模としては、1000 台規模のデバイスと直接的に、あるいはネットワークスイッチやアクセスポイントを介して間接的に接続するゲートウェイを含むエリアネットワークのシミュレーションを可能なシミュレータを構築した。また、このようなシステムを複数の農場に展開したケースも考えられ、そのようなシステムを一つのプラットフォームで集約したケースを想定したシミュレーション環境も構築できるような設計とした。

クラウド内のサービスや広域ネットワークを含めたシステム全体の挙動を定量的に把握するためのシミュレータを開発した。頻繁に利用されるパターンをテンプレート化して用意しておくことで、内部的な詳細規定に踏み込まずに台規模な IoT システムのシミュレータの構築が可能になった。

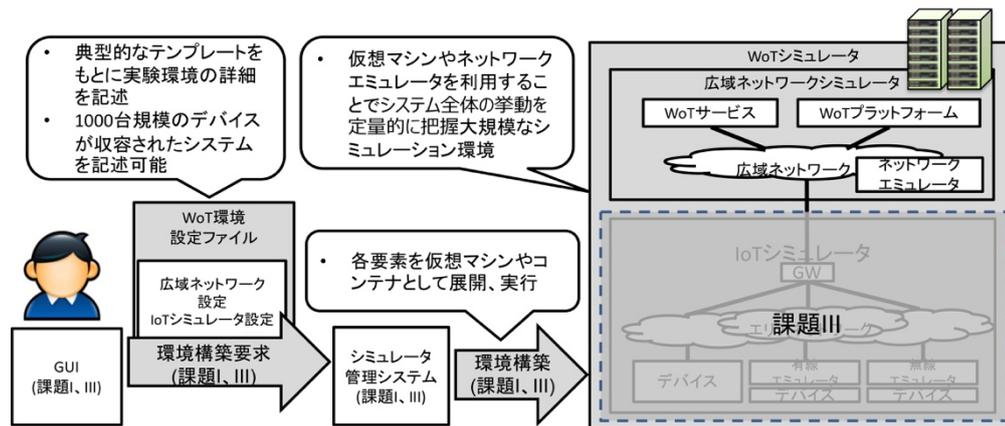


図 4. WoT シミュレータ

IoTシステムを俯瞰的にとらえつつ、テンプレートから所望の技術を選択してシミュレータ構成を指定することのできるGUIを開発した。また、ここで開発したGUIは1000個のデバイスを擁するシステムにおいても設定作業が煩雑にならないよう、階層化された指定が可能なユーザインターフェースとなっている。本GUIを用いることでシミュレーション環境の設計をインタラクティブに行うことが可能であり、その結果は課題Ⅲにおけるエリアネットワークシミュレータとの連携インターフェースを通じて全体システムのシミュレータに反映させることができる。シミュレータとの連携はロジカルな記述方法のものを使用している。

テンプレートから利用したい技術を選択してシミュレータ構成を指定することのできるGUIを開発した。階層的に設定できるユーザインターフェースを導入し、大規模なシステムでも現実的な設定が可能となった。

3. 2 設置簡易・長期動作可能なIoTデバイスの共通技術 (課題Ⅲ)

3. 2. 1 長期動作デバイスモジュールの開発 (課題ア)

エネルギーハーベスティングやバッテリー省電力機能を開発し、電源供給方法として(1)商用電源、(2)バッテリー、(3)バッテリーレス(自身で発電機能を持つ)の3種類の形態で動作可能となる共通回路・ソフトウェアを開発する。通信モジュールやMPUモジュールと一体化し、センサや装置に組み込み可能な共通モジュールを開発する。課題イ及び課題Iと連携することにより、IoTデバイスの設置簡易化と運用自律化を実現する。

施設園芸では1年間を通じて収穫可能な栽培方法となるため、設置するセンサ等のIoTデバイスは、バッテリー等の交換なしで長期間にわたり動作することが求められる。しかし、使用するデバイス、通信方式によって消費電力が大きく異なるため、消費電力を考慮したデバイスの設計が必要となる。本課題では、特に無線を利用するケースに関して、双方向通信を前提にするデバイスと片方向通信(センサデータを一方的に送信する)のデバイスに分けて、開発を行った。

【バッテリー動作(双方向通信)】

IoTデバイスは何らかの通信機能を持つため、共通の通信機能とセンサ等のデバイス機能にわけて、前者を共通機能として開発した。

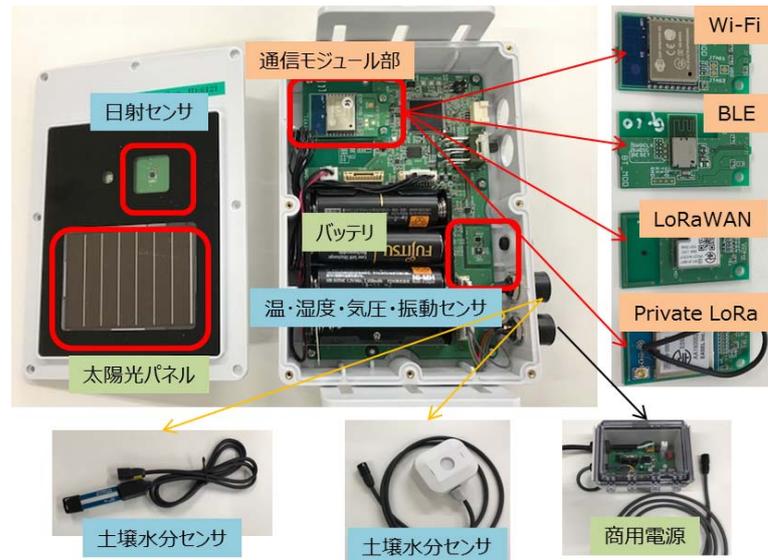


図 5. バッテリ駆動型 (双方向通信) センサ

このユニットでは通信は双方向で行われ、外部からのデータ要求に対して応答できるようになっている。そのため、常時電源をオンにして受信可能な状態になっている。通信方式は、BLE、LoRa (プライベート、LoRaWAN)、Wi-Fi であり、モジュールは交換可能であるほか、データフォーマットを共通化し、できるだけインターフェースが同じになるように設計している。また、ユニット内には 5 種類のセンサを内蔵し、外部に追加でセンサを接続できる。ユニットに搭載される MPU には、外部との通信インターフェース以外に、HTIP による運用管理インターフェースを持つ。

課題 I の実証では、LoRaWAN デバイスは課題IVと連携して接続し、それ以外は課題 1 のゲートウェイと接続を行っている。

【バッテリーレス動作 (片方向通信)】

双方向通信を行う場合、外部からの要求を待ち受けるために常時電源をオンにする必要があり、消費電力が大きくなりバッテリーレス化が図りにくい。そこで、デバイスから定期的にセンサ値を送信する方式のデバイスを開発した。

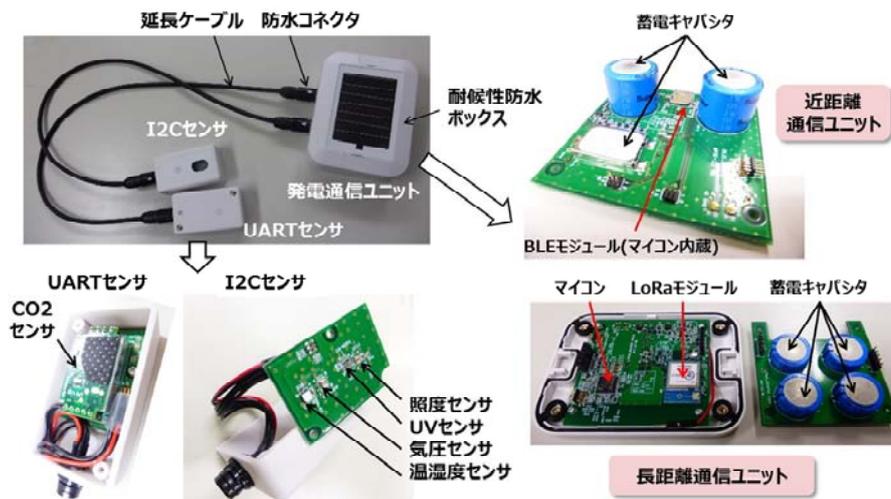


図 6. バッテリーレス (片方向通信) センサ

通信方式は、BLE と LoRa (プライベート) の 2 方式である。太陽電池で駆動する電池交換不要な方式として、発電できない夜間のために蓄電素子を内蔵した。BLE と LoRa では 1 回の送信に必要な消費電力

1,000倍異なるため回路は共通ではないが、センサのインタフェースは共通化されており交換が可能となっている。

太陽電池を用いた安定動作を実現するために、2つの電力制御技術を開発した。1つは蓄電素子を利用した時の電圧変動の抑制を、安定化回路を使わずに実現する技術で、蓄電素子を半減させることに成功した。もう1つは、発電量と蓄電残量をモニタすることによって、電力不足にならないようにデータ送信前に必要な電力が確保されているかを確認する機能を実現した。

3. 2. 2 自律運用エージェントの開発（課題イ）

Wi-Fi、Bluetooth 等に対応した IoT デバイスを接続する通信モジュールに対して、運用管理エージェントを搭載し、ゲートウェイと連携して運用管理の自律化を実現する。エージェントは、OSS化された HTIP(G.9973)スタックと通信モジュールからなり、異なる通信方式・異なる企業間でも共通インタフェースとなるような開発ガイドラインを作成する。

元施策の中で HTIP の OSS を開発している。この OSS を活用して IoT デバイスに対して、HTIP 対応を加速することが可能である。

【運用情報収集の共通化】

ITU-T G. 9973 に記載している HTIP(Home-network Topology Identifying Protocol)規格に加え、IoT デバイスの運用管理情報収集技術の定義を行う。その技術に基づき開発された HTIP 搭載の SubGHz 通信モジュールや BLE モジュールと共に、非イーサネット・非 IP 通信規格の LoRaWAN 通信モジュールにも管理運用機能を新規で開発する。搭載される管理機能は図 3.2.1 のように上位コントローラから UART 経由で制御することが可能にする。それによって IoT デバイスの開発者が手軽に利用可能にし、本技術の普及を図る。

G. 9973 の運用管理技術規格を基に開発した管理情報収集機能搭載の Wi-Fi、BLE 通信モジュールに加え、非イーサネット・非 IP 規格である LoRaWAN モジュールに管理情報収集機能搭載を検討し、3種類の通信モジュールを使用するセンサデバイスを実装した。組み込み機器(Wi-Fi 搭載)のための HTIP 機能が実装出来る OSS を FreeRTOS 基盤のシステム環境で有用可能に設計し、通信モジュールなどに搭載可能な事例を搭載し、接続確認を行った。

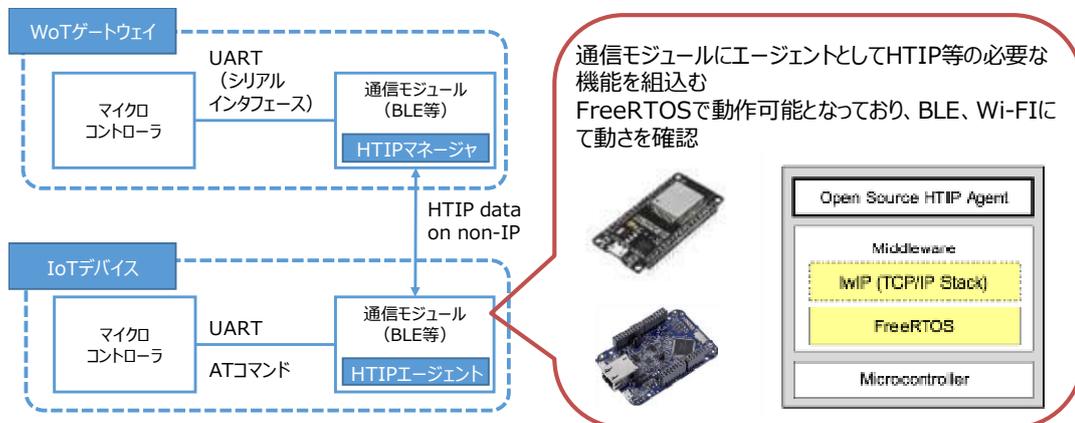


図 7. 通信モジュールに組み込まれる運用エージェント

【運用管理エージェント】

非 IP 系のセンサデバイスの状態把握、システム上でのトポロジ可視化を実現するため、無線 I/F、電源 I/F、および、センサを制御するセンサエージェントと連携して、HTIP 情報やセンサデータを送信する運用管理エージェント技術を開発した。HTIP の情報は、課題 I の WoT-GW の運用管理基盤にアダプタを介して集約されるよう構成した(図 8)。また、WoT-GW から制御情報を運用管理エージェントに送信することでメインルーチンに働きかけ、送信間隔や送信電力などを変更できるようにすると共に、センサにアクセスする順番や個数、センサへの電源供給などを管理するセンサエージェントも開発し、様々な IoT 現場においてセンサの取り換えや頻度調整に柔軟に対応できるシステムを実現した。

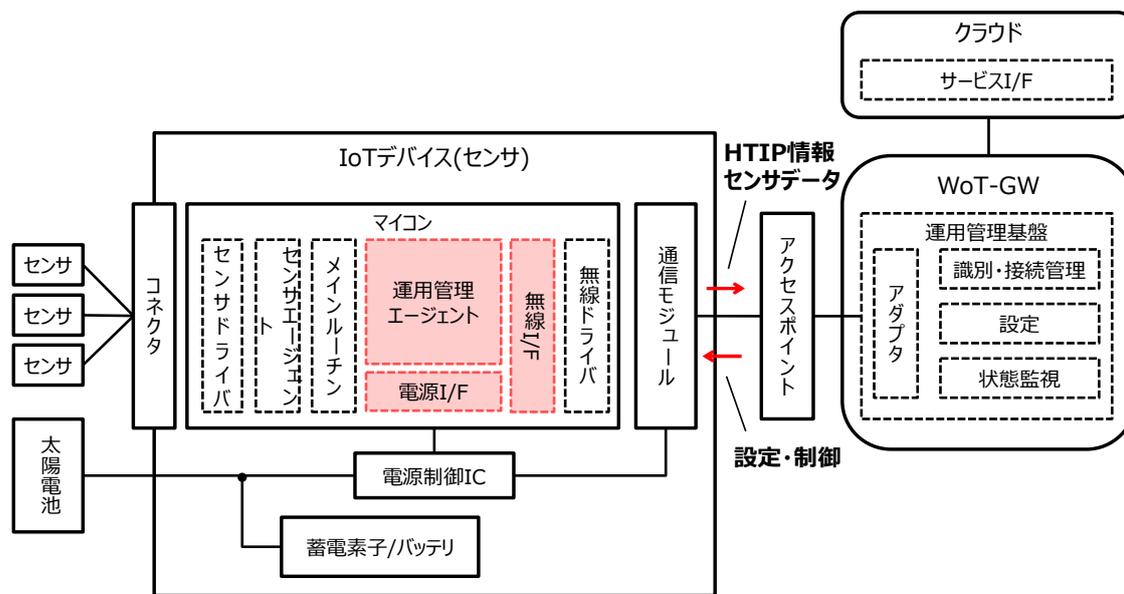


図 8 WoT-GW と連携する運用管理エージェント

さらに、センサエージェントの別の機能として、新たなセンサを取り付けた場合にも、そのセンサドライバを半自動で作成する機能を追加した。従来、センサノードから各種センサにアクセスするためには、制御用コードやデータ取得までの待ち時間など、予め専用のドライバを書き込んでおく必要があった。特に、現場で新規にセンサを追加する場合、従来はファームウェア丸ごと Over the Air によって送信するか、現地に赴きセンサノードの筐体を開け、直接専用コネクタを繋げてファームウェアにドライバを書き込む必要があった。

センサにアクセスする際には、制御コマンド、起動(コードの読み書き)や測定に要する待ち時間、データの読出しサイズが定義されていれば、センサデータを取得できる条件が揃うことに着目し、図 3.4.2 に示す構成でセンサにアクセスするドライバのフォーマットを取り決め、必要な情報を WoT-GW から送信することによってドライバの半自動作成を可能にした。今回、実際に農場に設置したセンサノードのドライバは、開発したセンサエージェント技術により作成したドライバを使用しており、データ取得が問題なく行えていることから本技術の有効性が立証できた。

本機能は、農場以外の現場で新たなセンサを取り付けて運用する際にも、遠隔地からのコマンド送信によるドライバ生成とセンシングの実現が見込める拡張機能(ただしセンサに条件あり)であり、無線通信ユニットとセンサユニットを分離して運用する IoT システムにとって先進的な成果である。

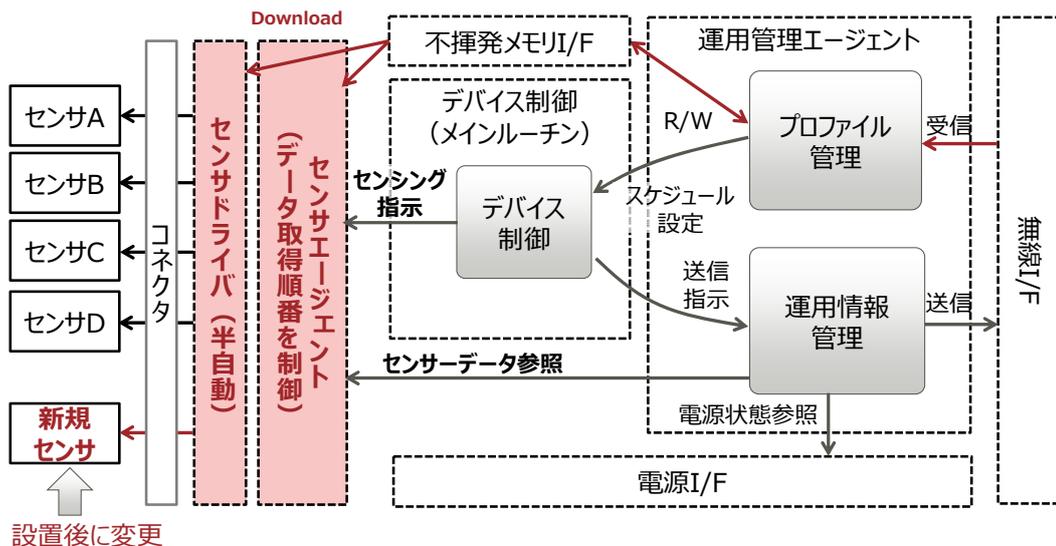


図9 新規センサも接続可能な半自動ドライバを適用したシステム構成

3. 3 IoT エリアネットワーク自律運用技術 (課題Ⅲ)

3. 3. 1 IoT エリアネットワークシミュレータの開発 (課題ア)

Ethernet、Wi-Fi、Bluetooth 等から2つ以上の接続方式を選定し、IoT エリアネットワークで利用される様々な無線システムが混在する環境を模擬し、通信の輻輳の発生可能性等を検証するIoT エリアネットワークシミュレータを開発する。また、デバイスやネットワーク、中継装置等の構成を入力するGUIを開発する。

エリアネットワークのトポロジ構成、通信方式、物理配置などについて、実際のフィールドでの設置の前に事前に動作確認を行なうことを目的としたIoT エリアネットワークシミュレータを開発した。シミュレートする通信方法としてはEthernetとWi-Fiを基本とし、干渉源としてWi-Fiと同じ周波数帯域を用いるBLEが存在する場合のシミュレーションが行えるしくみを実現した。

また、シミュレータの設定をGUIで直感的に行えるしくみを実装した。IoT エリアネットワークにおいては無線通信区間におけるノード間の距離や障害物、有線通信区間での媒体長や経路、各装置への電源の供給可能な範囲など、様々な制約がついた中での配置を行なう必要がある。本GUIでは図面上での配置と、図面上での各種パラメータの付与という直感的な手段でIoT エリアネットワークを設計し、その設計内容をシミュレータで即座に評価し、その結果によってGUIで修正を加えるという形で動的な設計を行なうことができるようになっている。

これにより、設計が容易になるだけでなく、障害が生じた際の原因究明にも役立つなど、多様なシミュレータの利用方法が期待できる。

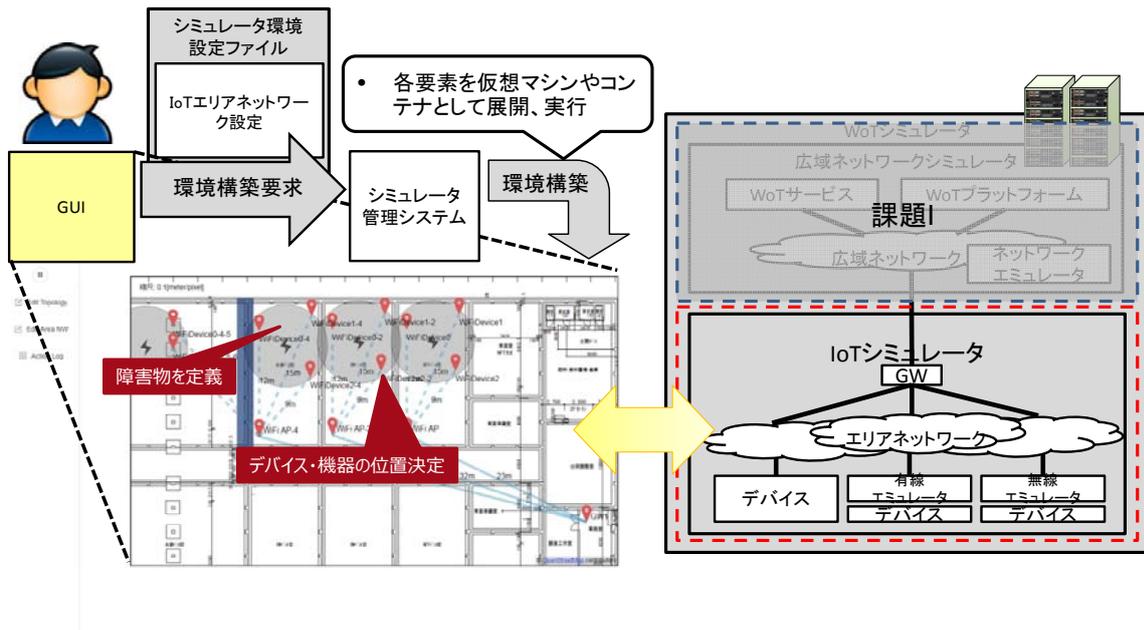


図 10. エリアネットワークの設計を支援する動的構成変更可能なシミュレータと GUI

3. 3. 2 IoT エリアネットワーク自律運用機器の開発

IoT エリアネットワークを構成する中継装置、ネットワーク機器等の運用管理エージェントの開発を行う。また、この運用管理エージェントより、IoT エリアネットワークにおけるデバイスやネットワークの状況を収集し、機械学習を利用して、IoT エリアネットワークの運用中に発生するネットワークやデバイスの障害を検出し、原因の分析を行う IoT エリアネットワーク自律運用機器を開発する。開発する運用管理エージェントは、課題 II と同様の機能を持つこととする。また、中継機器については、IoT ネットワークで多く使用される機器を想定し、その中から 2 機種以上を選択して実装を行う。

【HTIP 搭載中継機器の開発】

HTIP を実装した中継機器として、Ethernet L2 スイッチと Wi-Fi アクセスポイントを各 60 台製作し、課題 1 で構築した実証環境に提供した。

施設園芸での利用を考慮し、通常のネットワーク機器に求められるより厳しい温度条件 (-20°C~70°C) で動作可能なハードウェアコンポーネントを選択し、完成したセットを恒温槽内で 10 時間動作させる試験を行っている。また、電源の少ない園芸施設での利用を考慮して、L2 スイッチについては PoE (Power over Ethernet) による稼働も可能としている。

HTIP エージェントとしての実装においては、規格上必須とされている情報に加え、実装推奨(メーカーコード、機種名)および、オプション項目として、電波強度、LLDPDU 送信間隔、関連デバイス数、アクティブノード数、無線品質、CPU 使用率、メモリ使用率を実装している。この実装にあたっては今後必要とされる情報が変化することが見込まれるため、各情報の作成処理をそれぞれ独立させることによって、オプション項目の追加、更新、削除を容易に行えるような実装となっている。これらの機器の動作はプロトコル・アナライザでの確認、オープンソースのマネージャとの接続、農業の実験フィールドでの接続において検証を行っている。



図 11. 製作したネットワーク機器

また、HTIP で管理できる対象をエリアネットワーク全体に広げるためには Ethernet フレームでの通信ではなく、かつ、IP トンネリングもできないような条件でも HTIP で必要とされる情報をやりとりすることのできる手段が必要となる。これについて、課題 II での検討と合わせて整理を行い、情報通信技術委員会のテクニカルレポート TR-1073「JJ-300.00 機能実装ガイドライン～非 IP 及び非イーサネット通信機器～」として発行すべく審議に入っている。

【機械学習による障害検出】

収集した情報を用いて自律的に診断を行なうための技術として、HTIP で収集した機器疎通情報(接続先、L2/L7 疎通有無等)、通信品質情報(RSSI, 応答時間等)、稼動情報情報(CPU・メモリ使用率, ロードアベレージ等)を用い、時系列変化を可視化するツールおよび障害要因の推定アルゴリズムを開発した。また、人が経験とカンで行っていた機械学習のパラメータ調整を、通信途絶やデータ取得失敗等の客観的に判断可能な障害事象の発生と、学習の判定結果が一致するように、パラメータを自動調整する方式を実装した。

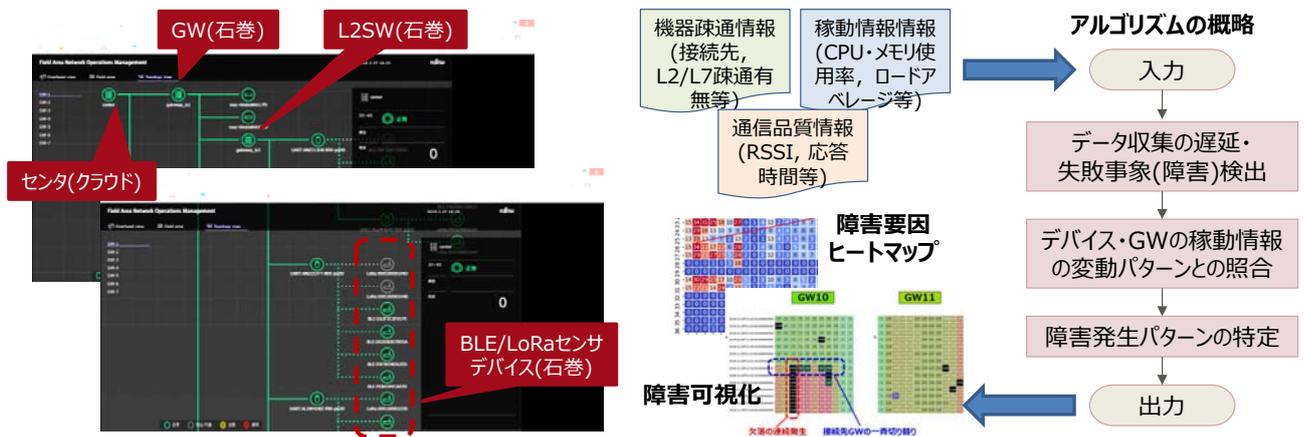


図 12. 自立運用化に向けた技術の開発

3. 4 IoT トラフィックに対応した広域ネットワーク自律運用技術 (課題IV)

3. 4. 1 広域ネットワーク自律運用技術の開発 (課題ア)

IoT デバイスが 1000 台接続されたエリアネットワークにおける IoT のトラフィック状況や広域ネットワーク内の状況に応じて、ネットワーク機能(通信帯域、経路等)を自律的に制御するための運用管理機能を開発する。

【広域ネットワーク運用効率化】

IoTデバイスが接続されたIoTエリアネットワークや広域ネットワークからトラフィック等に関する各種データを収集する機能、収集したデータを一元的に可視化する機能を実現した。オープンソース・ソフトウェアである OpenStack を用い、ネットワークスライス環境を構築するための仮想インフラストラクチャー環境を構築し、構築した仮想インフラストラクチャー環境上において、オープンソース・ソフトウェアである nwEPC を用いネットワークスライス環境を設計・構築した。構築した仮想インフラストラクチャーおよびネットワークスライス環境を対象に、Grafana などオープンソース・ソフトウェアを活用しスライス環境ステータス情報・スライス環境構成情報・スライス環境統計情報など各種データを収集し一元的に可視化する機能を構築した。

IoT エリアネットワーク異常時等の状況に応じた、広域ネットワーク側のネットワークスライシング機能等と連携した運用管理アルゴリズムの設計を実施した。3GPP や TIP など標準化・オープンソースコミュニティの NW スライス技術動向を調査した。調査結果を元に運用モデル・運用自動化・構成管理に関する手法を検討し、検討結果を元に NW スライスに関する運用管理アルゴリズムの設計を実施した。前述した機能を利用し NW スライスサービスディスカバリ・NW スライス構成情報・NW スライスサービス管理などの設計に関する検証を行った。オープンソース・ソフトウェア Prometheus のサービスディスカバリ機能にて、監視対象追加に伴う動的な監視データの収集、蓄積できることを検証した。構成情報データベースを作成し、VNF の追加や削除、ネットワークスライスの追加や削除を実施することにより動的に構成管理データベースへ更新されることを検証した。検証の結果、本開発におけるネットワークスライス制御に関する運用管理アルゴリズムの設計について、オープンソース・ソフトウェアを利用したネットワークスライス環境でのサービス品質保証の観点における自動化、効率化についての有効性が確認できた。

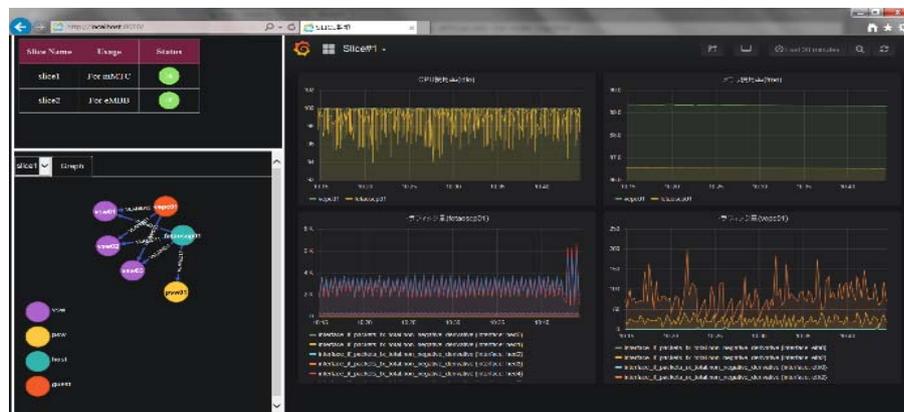


図 13. 開発したネットワーク運用管理ダッシュボード

【エリアネットワークを考慮した運用管理】

IoT デバイスや IoT エリアネットワークのポリシー制御アルゴリズムの設計を実施した。フォグコンピューティングや IoT トラフィック調査、メッセージング機能調査などを実施した。調査結果を元にメッセージングモデル・ポリシー制御に関する手法を検討し、検討結果を元に IoT デバイスや IoT エリアネットワークに関するポリシー制御アルゴリズムの設計を実施した。前述した機能を利用し IoT デバイスの通常稼働時・障害発生時などに関するメッセージング機能・ポリシー制御機能の検証を行った。IoT デバイス通常稼働時において、ポリシー配布機能や CPU およびメモリなどのリソース情報が正常に取得できていることを検証した。IoT デバイス障害発生時において、メッセージング機能によりクラスタ内部

その他の IoT バイスに異常発生を通知すること、およびポリシーに基づいた異常状態回復のアクションを実行することを検証した。検証の結果、本開発における IoT デバイスや IoT エリアネットワークのポリシー制御アルゴリズムの設計について、自立分散型エッジコンピューティング運用技術の有効性が確認できた。一方時間の制約上、機械学習などを用いた収集したデータから故障に関する高度分析アルゴリズムについては実証まで達成することができなかった。

3. 4. 2 ゲートウェイ運用管理連携技術の開発（課題イ）

ゲートウェイに分散配備されたエリアネットワークの運用管理機能（トラヒック等）を開発するとともに、広域ネットワークの運用管理機能とゲートウェイとの間でトラヒック等の情報をやりとりできるインターフェースを開発する。また、異常トラヒック発生時には自動的に復旧を実施するための機能を開発する。

ネットワークサーバは各ゲートウェイから定期的にチャンネル使用状況を取得し、取得した情報をもとに最適なチャンネルとデータレートの分析を行った。分析結果をもとに最適なチャンネル/データレートをネットワークサーバから端末へ指示する方式を実装した。チャンネルの有効活用およびデータレートとの組み合わせによるチャンネル負荷分散によりコリジョン頻度の低減を実現することができた。

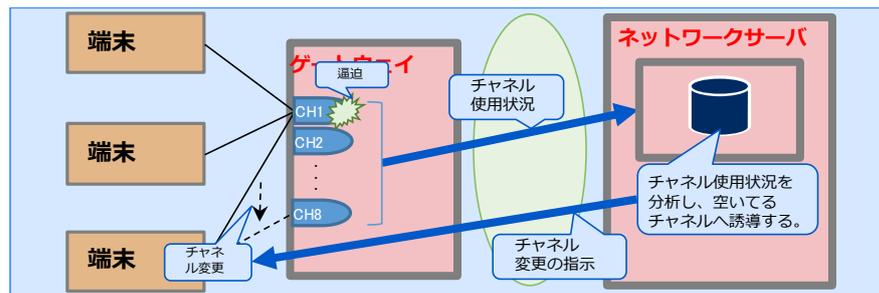


図 14. 自動的に最適なチャンネル選択とデータレート制御

ゲートウェイ側とネットワークサーバ側の二か所で端末からのデータを受信した時間を計測した。遅延と判定する閾値を検討し、その閾値を超えた場合、ネットワークサーバから端末に対し受信タイミングを遅らせるよう指示する方式を実装した。ゲートウェイとネットワークサーバ間のネットワークが輻輳した時の端末へのダウンリンク到達率の向上を実現することができた。

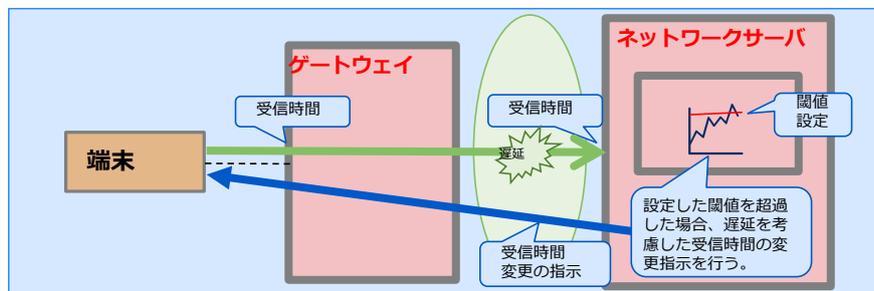


図 15. ダウンリンク送達精度の向上

ゲートウェイはホワイトリストの情報をもとにフィルタリングを行い、複数ゲートウェイからアップリンクを受信した場合、無線状況が悪いゲートウェイ側のホワイトリストから該当端末の情報を削除する。これにより不要な通信をゲートウェイで破棄することで、広域ネットワークの通信量の低減を実現することができた。

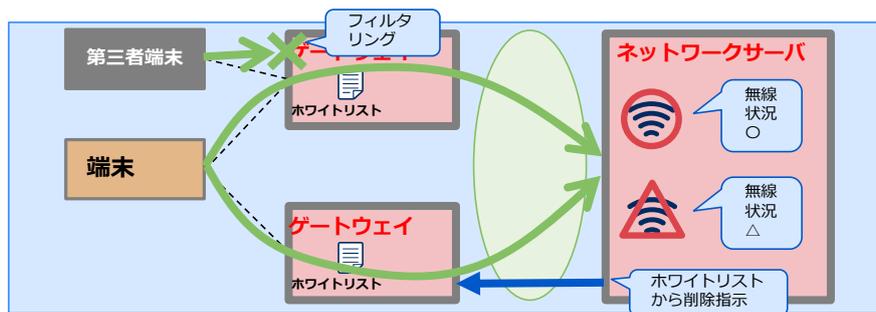


図 16. 広域ネットワークへのトラフィック増影響を低減

3. 5 施策全体での成果

(1) 課題 I～IVを統合した成果

5G 時代を見据えた IoT 共通基盤の在り方として、(1) IoT デバイスの多様なインタフェースをそのまま受け入れる方法と (2) ネットワークを共通化し IoT デバイスのインタフェースを集約する方法が考えられる。課題 I～III のアプローチは、(1) に基づいており現在の設備をそのまま収容する方向であり、エリアネットワークの自律運用の実現が大きな課題である。一方、課題IVを含めたアプローチは、(2) に基づいてデバイス・ネットワークの運用管理を効率化することを第一として、デバイスのインタフェースを中長期的に統合していくアプローチと考えられる。接続するデバイスの種類が少ない場合には後者のアプローチが有効であり、絞りこめない場合には前者のアプローチをとることになる。いずれにしても、インタフェースをどこかで共通化していく方向性であり、WoT はそのインタフェースの候補である。研究開発全体としては、普及に向けた IoT システムの構築、運用、データ利用の観点から、運用管理とインタフェース共通化を目標としたものであり、大規模な社会実装によって効果を示すことができた。

(2) 農業分野 PRISM としての成果

現在、施設園芸に普及する統合制御システムはオランダ製であり、日本の高温多湿地域には合わない部分がある。また、農業従事者によって、多収量、高品質、目的特化などニーズが異なるため、センシングから制御方法までを細かく設定可能であることが求められる。このような背景の下、内閣府官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) において、関連省庁が有する技術を農業用にカスタマイズし、省庁間で連携しながら社会実装することで、農業生産現場における有用性を実証し、AI を活用した農業生産のスマート化へと繋げることとなった。

これを受けて本課題では、農研機構と連携し、こうした多様なニーズに対応するためのセンシング方法について検討し、複数のセンサの同時収集により園芸施設全体でムラがなく正確な制御を実現するセンシング基盤について実現した。センサについては、NIMS と連携し、新しいセンサ (モイスチャセンサ) 等の接続を実現した。以上から、本研究開発を実施したことにより、農業分野における AI 活用を容易とし、栽培・労務管理の最適化の実現に繋げることができた。

収集したデータはクラウドで、共通の情報モデルにより提供され、センサ個別のフォーマットによらず AI 分析等に活用しやすい形となっている。



図 17. 農業 PRISM としての成果

4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

【課題Ⅰ】

・WoT 基盤技術の事業化

W3C WoT 標準化は元施策で推進中であり、令和元年 7 月に勧告化見込み。

WoT に準拠した WoT 基盤の製品化を令和元年度中に予定。本課題で開発した、ワンタッチプロビジョニング、運用管理技術、セキュリティ技術については、WoT 基盤と統合して実証環境で動作しており、事業性を考慮しながら製品への適用を順次進める。

・WoT シミュレータ（エリアネットワークシミュレータ）

基本部分は GUI を含めて開発済みである。今後、適用範囲を農業に限定せずに整備を進め、OSS 化を進める。課題Ⅲのエリアネットワークシミュレータとの統合をしているので、エリアネットワークシミュレータとして継続する。

・実装ガイドライン

本研究開発を ITU-T Y. 4409、ITU-T G. 9973、W3C WoT 標準を含む IoT システムのフレームワークとして、ITU-T SG20 の国際的な標準化団体にて勧告化を行う。令和元年度中の承認目標。

【課題Ⅱ】

・農業施設の IoT 化の推進・普及(SMK)

長期動作センサデバイスの製品化・事業化

運用管理技術と連携できる 4 つの通信方式を基礎とする技術開発ができ、性能の検証を継続している。

・エネルギーハーベスタ技術を利用した IoT デバイスの社会実装の加速(富士通)

IoT デバイスの製品化・事業化

長期連続稼働なセンサデバイスの基礎モデルができ、実地実証を継続している。

・自律運用技術の普及（HTIP 対応通信モジュールの事業化）

課題Ⅰと連携した自律型運用技術、エージェント技術の開発を完了。デバイスを稼働させることが出来、実地検証を継続している。北陸先端大が開発した OSS を活用し、通信モジュールへの組み込みを加速化する。また、WoT 基盤技術との連携によるゼロコンフィギュレーション機能の実現など、求心力となるユースケースの普及に努める。

【課題Ⅲ】

- ・HTIP 対応エリアネットワーク機器の自動化

L2 スイッチ及び Wi-Fi AP に関して HTIP 対応機器を試作。施設園芸にて実証を行っている。製品化については、令和元年以降検討する予定。

- ・エリアネットワーク運用自律化技術

HTIP に対応したデバイス、ネットワーク機器、ゲートウェイによる実証環境を構築し、動作することは確認できた。製品化については、適用領域やネットワーク構成を絞り込んで対応予定。多様なエリアネットワークに対しては、開発したシミュレーションを改良しながら検討を進める。

【課題Ⅳ】

- ・広域ネットワーク自律運用技術

OpenStack 上に OSS を活用し、疑似広域ネットワークを構成し、その上に運用管理機能を実装した。疑似環境における開発した運用管理機能の動作を確認した。今後は実際のネットワークでの動作確認が必要となるため、元施策の中で実証を行いながら進める予定。

- ・ゲートウェイ運用管理技術

実際の LoRaWAN システムを利用した開発は環境。農研機構の園芸施設で一部実証を行った。今後、更に追加で実証実験を行い、実用化の判断を行う。

5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

平成 30 年度に課題 I ～IV が連携して商業施設 2 か所を含む 4 か所で実証実験を構築したため、各課題で開発した技術の位置づけは明確になっている。また、商業施設は 1ha を超える施設であり、実運用に必要な課題を抽出することができた。最終的には、農業以外の領域にも適用することにより、農業を含む業界をまたぐエコシステムを実現することが必要であり、このエコシステムが事業化を加速し、その結果コストダウンも実現可能と考えている。そのため、今後は情報通信技術委員会（TTC）やスマート IoT 推進フォーラム等のコミュニティを利用した活動で連携しながら、各研究機関は個別技術の事業化に向けた活動を推進する。

標準化については、W3C WoT は令和元年 7 月には勧告化の見込み。関連して ITUT-T にて Y. 4409 に基づく詳細仕様（実装ガイドライン）の標準化を推進。WoT ではゲートウェイのセキュリティ提案実施。

各課題での事業化による普及の他に、北陸先端大が開発したシミュレータや OSS を広めることで WoT や HTIP を活用する企業等が増える活動を行う。具体的には、情報通信技術委員会（TTC）やスマート IoT 推進フォーラムでの活動を継続し、新規開発者の支援となる実装・運用ガイドライン等を策定することで技術への理解と普及に努める。また、課題Ⅳについて元施策と連携して実装を進める予定である。

以下に、研究期間終了後のアウトカム目標に対する計画と指標について示す。

	H30	H31/R1	R2	R3	R4
課題Ⅰ WoT基盤技術事業化		基本部分事業化			
エリアネットワークシミュレータ		公開			
課題Ⅱ 農業センサ製品化		事業化			
HTIP対応通信モジュール製品化		事業化			
課題Ⅲ HTIP対応ネットワーク機器製品化		事業化			
運用ガイドライン策定		発行			
課題Ⅳ 広域ネットワーク自律運用事業化		事業化			
ゲートウェイ運用技術事業化		事業化			

アウトカム指標	目標年度	数値目標等	調査方法	終了条件
課題Ⅰ WoT基盤技術事業化	平成31年	製品リリース1件	Webページ、パンフレット等	数値目標を達成した時点
エリアネットワークシミュレータ	令和2年	一般公開1回	広報ページ等	数値目標を達成した時点
実装ガイドラインの標準化	令和2年	勧告1件	国際標準化機関Webページ等	数値目標を達成した時点
課題Ⅱ センサ製品化	令和3年	製品リリース1件	Webページ、パンフレット等	数値目標を達成した時点
HTIP対応通信モジュール製品化	令和3年	製品リリース1件	Webページ、パンフレット等	数値目標を達成した時点
課題Ⅲ HTIP対応ネットワーク機器製品化	令和2年	製品リリース1件	Webページ、パンフレット等	数値目標を達成した時点
運用ガイドライン策定	令和2年	ガイドライン発行1回	ガイドライン出版	数値目標を達成した時点
課題Ⅳ 広域ネットワーク自律運用事業化	令和4年	製品リリース1件	Webページ、パンフレット等	数値目標を達成した時点
ゲートウェイ運用技術事業化	令和4年	製品リリース1件	Webページ、パンフレット等	数値目標を達成した時点

6 査読付き誌上発表論文リスト

なし

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] シウティス マリオス、リム 勇仁、丹 康雄（北陸先端科学技術大学院大学）、“Open source implementation of HTIP for embedded devices”、The 8th IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2019) (Osaka, Japan) (2019年10月15日~18日)「投稿中」
- [2] 牧野 義樹、リム 勇仁、丹 康雄（北陸先端科学技術大学院大学）、“Development of interactive user interfaces for IoT area network simulator”、The 8th IEEE Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2019) (Osaka, Japan) (2019年10月15日~18日)「投稿中」

8 その他の誌上発表リスト

なし

9 口頭発表リスト

- [1]城哲,加須屋悠己,宮澤雅典, ネットワークスライス技術を用いた IoT サービストラフィックにおけるコアネットワークの自律運用管理手法, 電子情報通信学会総合大会, 2019/3.
- [2]川崎健一、中本裕之、“エナジーハーベスタを用いた効率的な電源制御と汎用性を高めるデバイス設計手法の開発”、2019年電子情報通信学会総合大会（早稲田大学）（2019年3月19日）

10 出願特許リスト

- [1]城哲,加須屋悠己,宮澤雅典、IoT デバイスの自律的プロビジョニング手法、日本、2019/02/05
- [2]川崎健一、センサ取り替え可能にするエナジーハーベスタを用いた無線送受信システム、日本、特願2019-063234、申請日2019年3月28日
- [3]中村洋介,坂本拓也,二村和明、認証装置、認証方法及び認証プログラム、日本、2018年11月9日

11 取得特許リスト

なし

12 国際標準提案・獲得リスト

- [1]World Wide Web Consortium(W3C)・WoT-IG/WG Joint F2F in Princeton、“Security Metadata Description Example”、2019年2月1日
- [2]ITU-T SG20, SG20-C454, “Implementation Guidelines to ITU-T Y.4409”, 2018年12月7日
- [3]ITU-T SG20 Q4, Q4-20-Feb19-C-22, “Implementation Guidelines to ITU-T Y.4409”, 2019年2月27日

13 参加国際標準会議リスト

- [1]World Wide Web Consortium(W3C)・WoT-IG/WG Joint F2F in Princeton、プリンストン（米国）、2019

年1月28日-2月2日

[2]ITU-T SG20、無錫（中国）、2018年12月3日-13日

[3]ITU-T SG20 Q4、電話会議、2019年2月27日

14 受賞リスト

なし

15 報道発表リスト

なし

研究開発による成果数

	平成 30 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
口 頭 発 表 数	2 件 (0 件)	2 件 (0 件)
特 許 出 願 数	3 件 (0 件)	3 件 (0 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	3 件 (0 件)	3 件 (0 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)

注 1 : 各々の件数は国内分と海外分の合計値を記入。(括弧)内は、その内海外分のみを再掲。

注 2 : 「査読付き誌上発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌等、査読 (peer-review (論文投稿先の学会等で選出された当該分野の専門家である査読員により、当該論文の採録又は入選等の可否が新規性、信頼性、論理性等の観点より判定されたもの)) のある出版物に掲載された論文等 (Nature、Science、IEEE Transactions、電子情報通信学会論文誌等および査読のある小論文、研究速報、レター等を含む) を計上する。

注 3 : 「査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)」には、学会の大会や研究会、国際会議等における口頭発表あるいはポスター発表のための査読のある資料集 (電子媒体含む) に掲載された論文等 (ICC、ECOC、OFC など、Conference、Workshop、Symposium 等での proceedings に掲載された論文形式のものなどとする。ただし、発表用のスライドなどは含まない。) を計上する。なお、口頭発表あるいはポスター発表のための査読のない資料集に掲載された論文等 (電子情報通信学会技術研究報告など) は、「口頭発表数」に分類する。

注 4 : 「その他の誌上発表数」には、専門誌、業界誌、機関誌等、査読のない出版物に掲載された記事等 (査読の有無に関わらず企業、公的研究機関及び大学等における紀要論文や技報を含む) を計上する。

注5：PCT 国際出願については出願を行った時点で、海外分1件として記入。(何か国への出願でも1件として計上)。また、国内段階に移行した時点で、移行した国数分を計上。

注6：同一の論文等は複数項目に計上しないこと。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数(印刷物を含む)」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しないこと。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。