

1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名 低軌道衛星を利用したIoT超カバレッジの研究開発
- ◆受託者 国立大学法人東京大学、楽天モバイル株式会社
- ◆研究開発期間 令和3年度～令和6年度（4年間）
- ◆研究開発予算（契約額） 令和3年度から令和6年度までの総額1,690百万円（令和6年度397百万円）

2. 研究開発の目標

現在の地上系セルラーサービスが持っている国土面積カバレッジの限界を乗り越えるために低軌道衛星を利用したサービスエリア拡大を目標とする。
この研究では、①試験衛星を利用したLTE通信の確立、②NB-IoTのS/W開発と衛星適用、③超カバレッジIoTの実証実験の実施 を行う。

3. 研究開発の成果

本研究は東京大学と楽天モバイルの産学連携により実施された。研究の主要な流れは以下の通りである。

まず、開発および検証の段階において、商用環境の改変が困難であった為、試験が可能な新たな環境を構築した。
この新しい環境は、今後のプロトコル開発を目的として設計された。次に、この研究内容が学術論文として採択され、商用相当の環境での実際の検証が行われた。

具体的には、東京大学で開発された端末を楽天モバイルのラボ内における商用相当環境に接続し、試験を実施した。その後、東京大学と楽天モバイルは共同で実証実験を行い、共著として再度論文が採択された。また、実証実験の内容はICCCN 2025にて招待論文として発表予定であり、継続の結果を発表する予定である。
今後 6G 時代に向けて TN-NTN 統合、NTN 技術拡張、O-RAN の NTN への適用等技術革新への期待が高まって来ており、衛星ダイレクト通信とO-RAN商用ネットワーク適用の先駆者として、それぞれの分野で研究開発を継続している。

また国際標準化においては、国内外の企業や大学とのパートナーシップも重要である。本研究開発は東京大学と楽天モバイルとの共同プロジェクトであるが、双方の研究を円滑に進めるため、O-RAN ALLIANCEのアーキテクチャに基づき、東京大学ラボと楽天クラウドイノベーションラボを接続し、東京大学ラボにおいても2023年に実証実験を行える環境を構築した。

本プロジェクトで実現した産学連携により、東京大学、楽天モバイルの双方でO-RAN ALLIANCE関連の研究開発が加速され、2024年5月29日のO-RAN PlugFestにおいては、東京大学と楽天モバイルが共同で実証を行った。尚、NB-IoT SWの開発・衛星対応の推進においては、NB-IoTのプロトコルの開発検証を進めて論文としてまとめた。

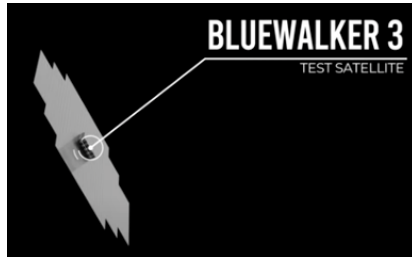
本研究で知財化した技術は既存LTEユーザ端末に修正不要で利用可能だが、無線インターフェースへの影響を無くしたことから、3GPPの標準化を直接目指すものではない。他方、国際電気通信連合(ITU)の無線通信規則には衛星ダイレクト通信に関する規定がないため、衛星ダイレクト通信の技術開発のみならず制度化・標準化の取り組みが必要であった背景から、ITU-R標準化・制度整備に向けた活動において、WRC-23で暫定議題化、WRC-27での正式議題化を目標とした活動を総務省を含め計画していた。しかし、衛星ダイレクト通信に対して通信市場における早期導入の機運が高まったことから前倒しで議論を進め、計画より4年早く議題化を実現した。

この活動では、各国と連携して議論を進めることで議題が設立され、設立の成果に対し2024年に日本ITU協会から奨励賞を受賞するなど、本委託研究を通じて国際社会及び日本の国際競争力、プレゼンス向上を図ることができた。

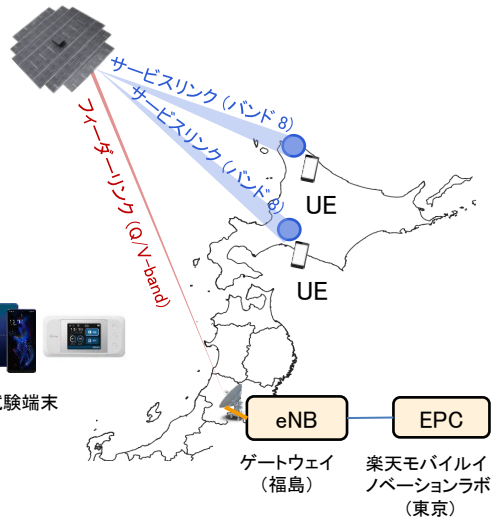
1-a) LTE衛星通信ネットワークの構築 (楽天モバイル)

専用端末を利用しない地上・衛星間のネットワーク構築

試験衛星、地上ゲートウェイ、
試験端末の準備

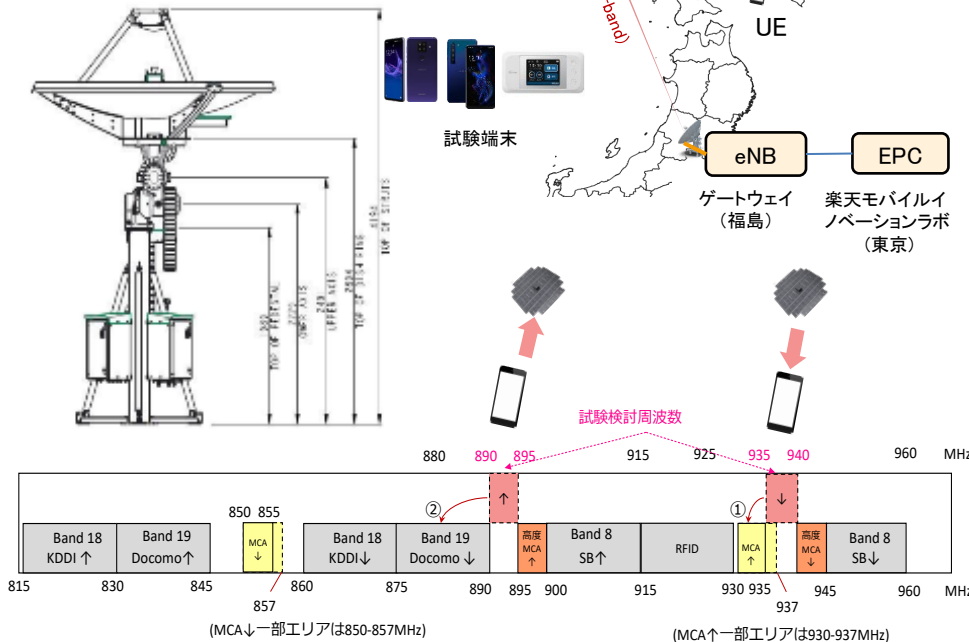


試験場所の選定、利用周波数の
検討、ネットワーク構築



試験端末

ゲートウェイ
(福島) 楽天モバイル
ノベーションラボ
(東京)



研究開発成果: 衛星通信ネットワークの構築

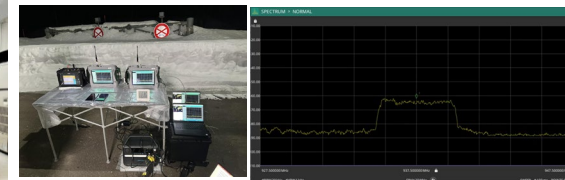
日本に衛星・地上間のLTE衛星通信ネットワークを構築し、実験試験局免許を取得の上、衛星と携帯電話端末間の通信試験を実施した。また開発したeNBによる試験を米国でも実施し、アタッチに成功した。

- 福島にゲートウェイ地球局設備を構築し、試験用EPCとの疎通確認を行った。
- 実験試験局免許の予備免許を取得した。
- 北海道における試験衛星との直接通信試験を開始し、衛星からのLTEダウンリンク信号の観測に成功した。
- 米国で試験を行い、アタッチに成功した。



ゲートウェイ
アンテナ

ゲートウェイシステム
及びeNB



北海道での通信試験
セットアップ

北海道で確認した衛星から
のLTEダウンリンク信号



実験試験局予備免許
(ゲートウェイ及び携帯端末)



米国での試験の様子

- IMT周波数のMSSへの国際分配へ向けWRC-23及び関連各種会合への参加、寄書
の inputs を行い結果として正式にWRC-27議題
1.13が設立され、IMT周波数を使った衛星と
既存端末の直接通信サービスの商用化実現
に向けて大きく貢献した。



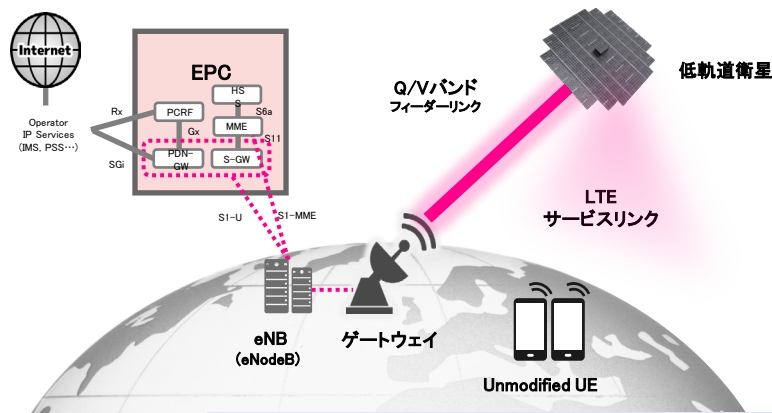
日本ITU協会 奨励賞を受賞

1-b) LTE衛星通信の安定化・最適化、NB-IoT SWの開発・衛星適用(東京大学、楽天モバイル)

研究開発目標

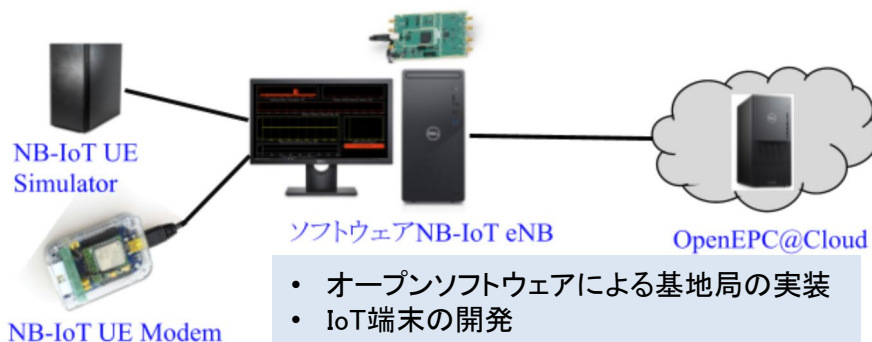
研究開発成果

衛星を利用したLTE/NB-IoTの超カバレッジIoTの仕様策定



- NB-IoT通信の課題抽出
- 通信安定化・最適化のためのソフトウェア開発

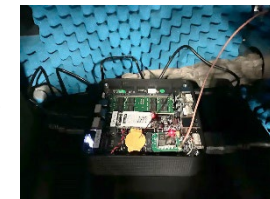
衛星を利用したLTE/NB-IoT SWとIoT端末の開発とNB-IoT通信の最適化



- オープンソフトウェアによる基地局の実装
- IoT端末の開発

LTE衛星通信の安定化・最適化、NB-IoT SWの開発・衛星適用

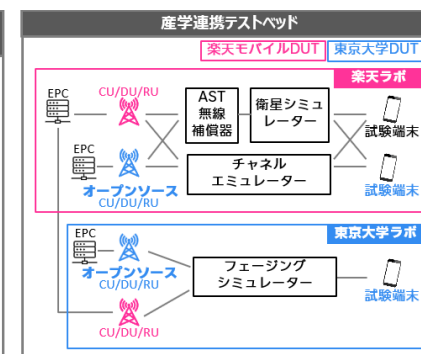
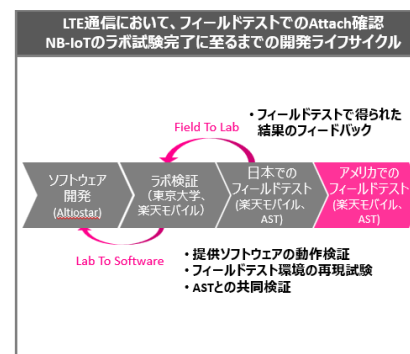
● 東京大学ではNB-IoT端末の新規作成に際し、既存の論文成果を活用するため標準インターフェースであるM.2チップに通信モジュールBC660K-GLを組み込み、汎用PCに挿入することでIoT端末としての機能を実現した。本モジュールはFCC認証を取得しており、楽天モバイルとの国内外フィールドテストでも使用可能である。さらに、対向として動作するオープンソースのソフトウェア基地局Open Air Interface (OAI)を用いて、NB-IoTプロトコルをサポートするeNBを開発した。本端末とOAI-eNBを接続し、アタッチ及び通信について可能な事を確認した。



東京大学作成NB-IoTデバイス

● 楽天モバイルでは、LTE衛星通信の安定化・最適化およびNB-IoTソフトウェアの開発・衛星適用に向けて、eNBにおけるRAプロシージャの改善、HARQ機能の無効化、VoLTE音声品質改善のためのSPS機能の導入を行った。また、フィールドテストのフィードバックを基に接続のロバスト性を高めるパラメータチューニングを実施し、フィールドテストにおいてアタッチの成功を確認した。

● 楽天モバイルと東京大学の双方の研究を円滑に進めるため、産学連携の検証開発ライフサイクルを構築した。さらに、O-RAN ALLIANCEのアーキテクチャに基づき、東京大学ラボと楽天クラウドイノベーションラボを接続し、2023年に東京大学ラボで実証実験を行える環境を整備した。テストベッドをアップデートし、フィールドテストの伝搬状況を模擬した試験環境を構築。楽天モバイルが開発したeNBに対し、東京大学が作成したNB-IoTデバイスを使用した試験において導通を確認した。

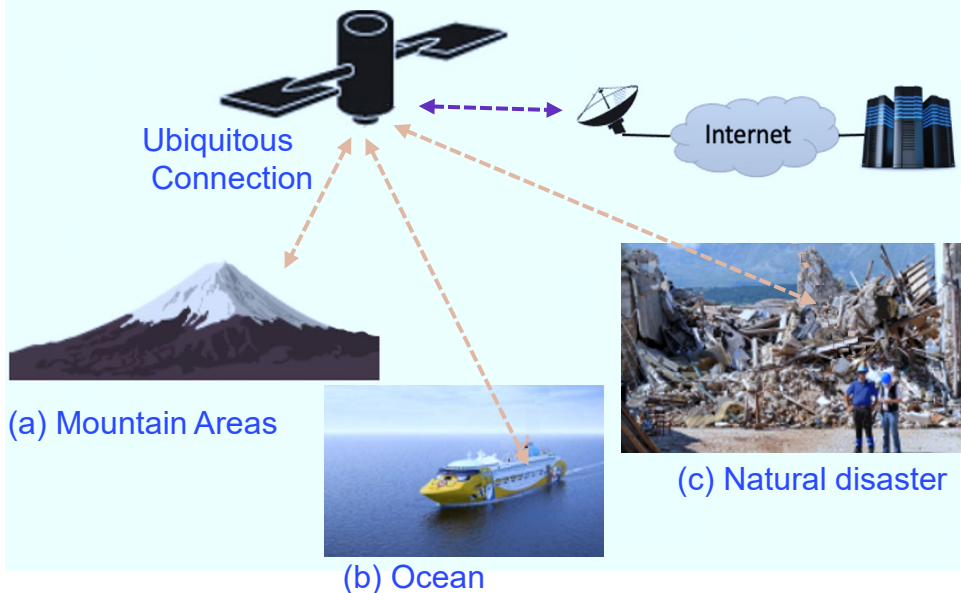


1-c) 超カバレージIoTのユースケース検討、 超カバレージIoTの実証実験 (東京大学、楽天モバイル)

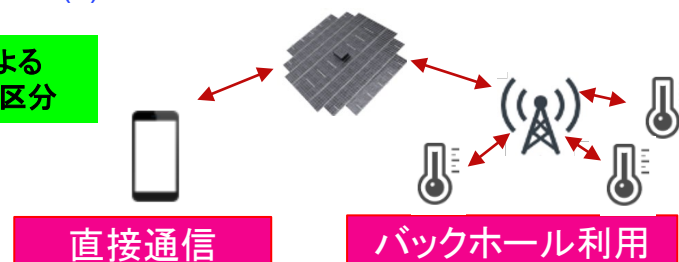
研究開発目標

- 衛星リンクのネットワーク状態(帯域幅、遅延、ジッターなど)を調査し、また、実証実験の準備のために衛星リンクエミュレーターを使用して、NB-IoT端末を直出した場合の通信性能の把握、および、それに適したユースケースを検討
- 次年度以降のユースケースの実証実験の立案、実施可能なユースケースの予備実験を実施

用途によるユースケース区分



通信形態による ユースケース区分



研究開発成果

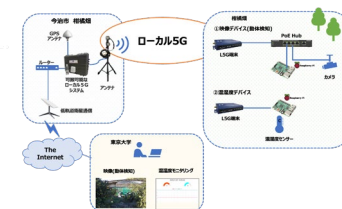
超カバレージ IoT のユースケース検討、超カバレージ IoTの実証実験

島嶼地域や山岳地帯、海洋地域など、従来のLTE/5Gネットワークでは十分に活用されていなかったエリアを対象に、超カバレージIoTのユースケースを検討した。一次産業への適用を目指して島嶼地域、山岳地帯、海洋地域を想定したユースケースを定め、LTE端末やIoT端末の試作、センサーの選定・開発を行い、以下の実証実験を実施した。

衛星通信の疎通後、さらなる実証実験を予定している。

・島嶼地域:

低軌道衛星通信とローカル5Gを接続させたシステムを展開し、果樹園での24時間の温湿度データ取得や監視カメラを利用した環境モニタリングを利用した実証実験



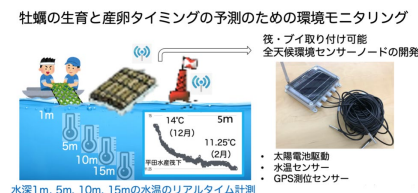
・山岳地帯:

圃場の土壌センサーを活用し、効率的な農業ノウハウの習得を行える実証実験を実施。通信状況が不安定となる可能に対して、データ送信方法を最適化した



・海洋地域:

牡蠣養殖の環境モニタリングにより労働負担を軽減し、生産効率と所得向上を行える実証実験



実証実験を通じて得られた知見から、NB-IoTソフトウェアの開発や衛星通信へ課題の適用を進め、解決を確認した。

今後は衛星を活用した高品質で信頼性の高いサービスの早期普及を目指す。



4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
5 (5)	22 (15)	2 (2)	52 (18)	23 (6)	2 (0)	2 (1)	1 (1)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

1. 東京大学は、各種5G、IoT関連セミナーまた電子情報通信学会等において本研究の取組みに関して講演発表並びに収録論文発表を実施した。

- ・ ” Enabling LEO Satellite Mobile Direct NB-IoT Communication With Exisiting Unmodified Ues” IEEE GLOBECOM
- ・ ” Verification of Modified eNodeB Protocol for Direct-to-Cell Communication Using Real LEO Satellite and Laboratory Testbed” IEEE WCNC
- ・ ” LoRa-Based Localization for Drones:Methodological Enhancements Explored Through Simulations and Real-World Experiments” IEEE ACCESS
- ・ ” A Security-Oriented Overview of Federated Learning Utilizing Layered Reference Model” IEEE ACCESS

2. 楽天モバイルは、令和6年度にて、特許出願 (20件) および標準化提案 (6件) を実施。

- ・ 特許提案については、一昨年、昨年出願した特許の各国展開を中心に実施。NB IoTデバイスに関する特許出願も行った。
- ・ 標準化活動については、ITU-R、APT等の会合に日本代表団の一員として参加しており、国際標準化活動に貢献したとして、研究員が日本ITU協会から奨励賞を受賞した。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究開発では、AST SpaceMobile社の衛星コンステレーションを活用し、地上の既存LTE/NB-IoT端末と直接通信が可能な技術を開発した。将来的には、日本国内だけでなく海外市場にも展開し、グローバルな普及を目指していく。国内では2026年目途の商用サービス開始に向け、衛星間ハンドオーバー等の通信試験を進め、準備を行う。国際的には2027年のWRC-27での無線通信規則改定を目指して活動を進める。6G時代を見据えた技術開発も進行中で、低軌道衛星を活用した通信ネットワークの統合や、6G対応の無線インターフェースの標準化に向けた取り組みを強化していく。

今後の展望としては、衛星通信と地上通信の統合技術を進化させ、EtoE通信環境の改善を図るとともに、さまざまなユースケース実証を行うことで、社会実装を加速させ、6G時代に対応した高効率で低コストな通信システムの実現を目指す。また、東京大学を拠点に、学生や若手研究者の育成を進め、次世代の高度宇宙人材を育てることに重点を置きながら、IoTやデータ解析技術など関連分野のスキルを持つ人材の育成を強化し、宇宙産業に必要な多様なスキルセットを持つ人材の確保を目指す。これにより、6G時代における日本の宇宙分野の競争力を強化し、宇宙市場の拡大を促進する。