

平成 31 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局 技術政策課 研究推進室

評価年月：令和元年 8 月

1 政策（研究開発名称）

膨大な数の自律型モビリティシステムを支える多様な状況に応じた周波数有効利用技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

平成 29 年度～平成 30 年度（2 か年）

・実施主体

民間企業、国立研究開発法人

・総事業費

1,740 百万円

平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
940 百万円	800 百万円	1,740 百万円

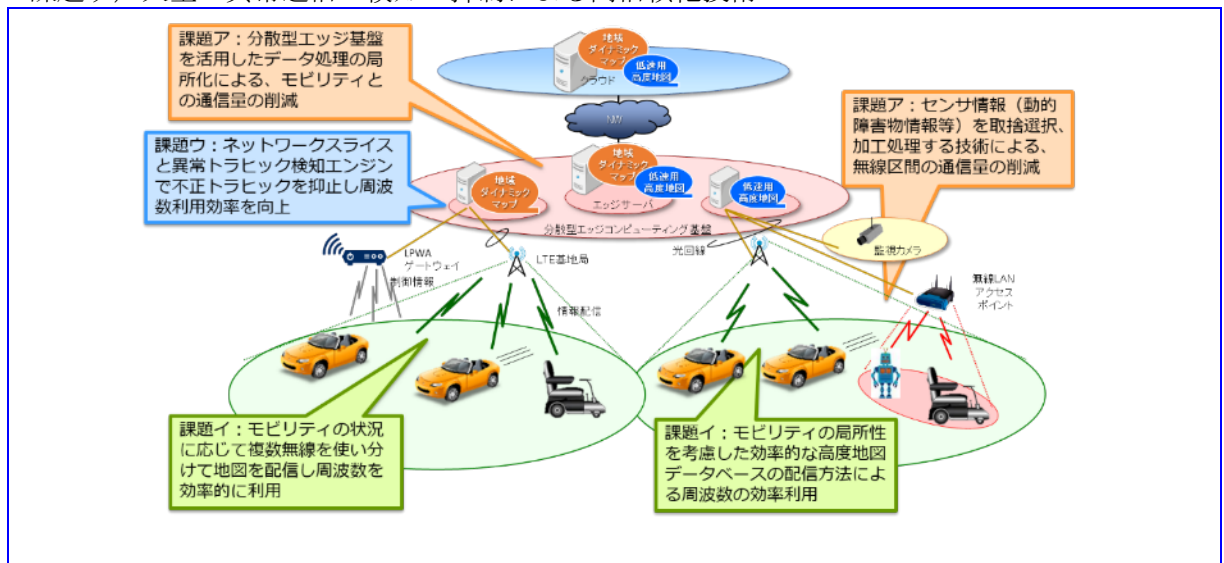
・概 要

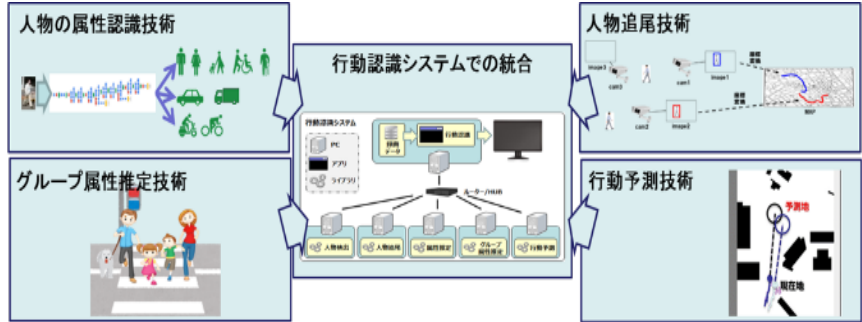
超高齢化と労働人口減少を迎える中、高信頼・高精度な自動走行を実現する自律型モビリティシステム（自動走行技術、自動制御技術等）の実現が期待されている。この自律型モビリティシステムの実現のためには、移動体自身に搭載するセンサーだけでなく、高度な自己位置推定や周辺環境認知を可能とする高度地図データベース等の情報を、遅延なくリアルタイムに収集・把握する通信技術の確立が極めて重要で必要不可欠となる。本研究開発では、自律型モビリティシステムを支える通信技術を確立するため、高度地図データベース等の多様で大容量な情報について、膨大な数の移動体との間でリアルタイムなやり取りを可能とする技術を確立するとともに、限られた電波資源を最大限に有効利用するための以下の技術を確立した。

課題ア）分散型データ処理等による高効率な通信処理技術

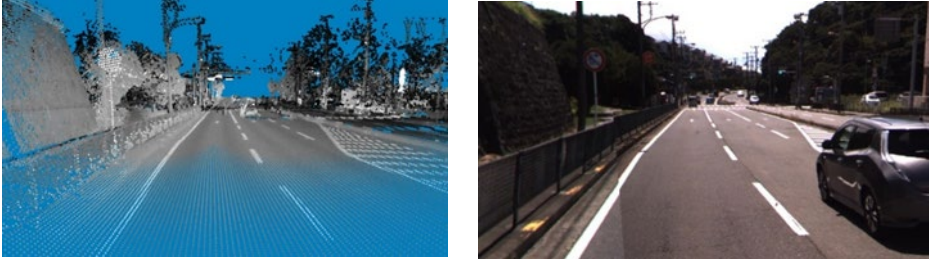
課題イ）複数無線システムを用いた高度地図データベースの更新・配信技術

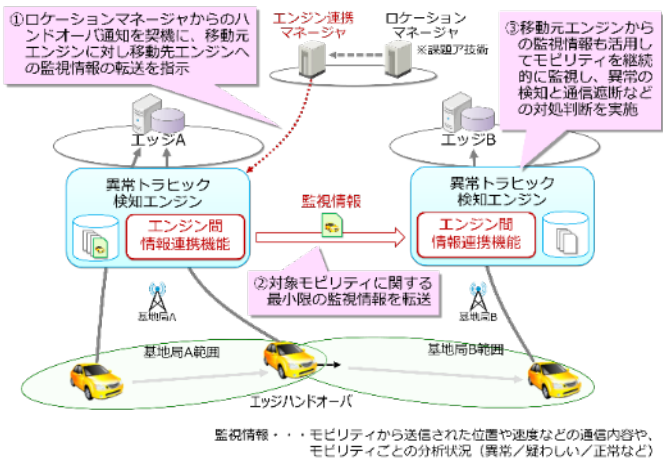
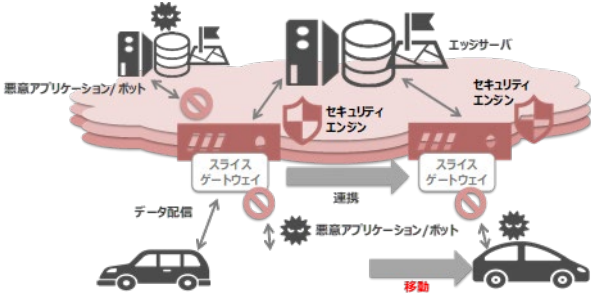
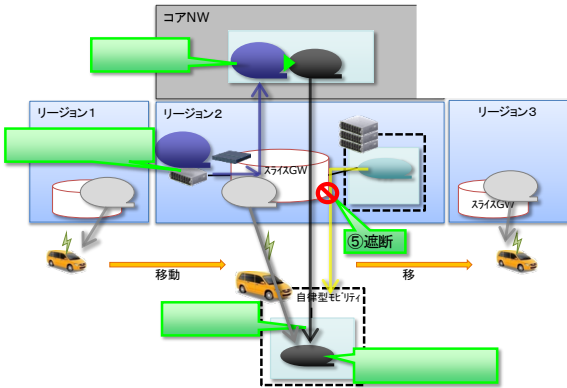
課題ウ）大量の異常通信の検知・抑制による高信頼化技術



技術の種類	技術の概要
課題ア-1-① 広域で高効率な通信処理を可能とするエッジコンピューティング技術の確立	エッジコンピューティング技術（従来のクラウドコンピューティングをネットワークのエッジにまで拡張し、ユーザやデータ発生源の近くで分散処理を行う技術）を用いて、ネットワークと端末間のデータ転送量の削減による電波の有効利用を目指す。エッジコンピューティングは、端末である自律型モビリティとの間のデータの送受信を行う中継地点となるため、無線区間のデータ転送量の削減を図るための基盤として活用することが可能である。このため、エッジコンピューティングを形成するノードであるエッジサーバと、端末の自律型モビリティの両端にデータ圧縮機能を持たせることで無線区間のデータ転送量を削減し、エッジコンピューティングによる分散処理に加えて更なるデータ転送量の削減を行うと同時に、転送時間を短縮することで更なるリアルタイム性の向上を図る。そして、エッジコンピューティングと自律型モビリティ間のデータ転送量を効率良く圧縮できる方式を通じ、電波の有効利用に繋げる。
課題ア-1-② 複数の分散型データ処理の協調制御を可能とするエッジサーバ技術の確立	エッジサーバに接続される自律型モビリティの密度変化への対応の研究開発を行う。自律型モビリティは端末が移動することに特徴があり、エッジサーバの収容設計も固定的に決定することはできず、車両の密度に応じて負荷が変動することが想定される。一方で、エッジサーバから提供される情報は自動走行に関わるクリティカルなものであり、収容限界に達したためにサービスが提供できないという事態は許容されない。このため、自律型モビリティの密度の変更に合わせたスケールアウトによる計算処理速度の維持や、周波数帯域が限界に達した場合は他の無線通信方式に切り替えて別のエッジサーバへフェイルオーバーするなどの非常時対応を検討し、電波資源の枯渇に対応する対策を検討する。
課題ア-1-③ 広域にまたがって様々な速度で走行する移動体の追従を可能とするエッジサーバ間ハンドオーバ技術の確立	アプリケーションレベルにおける自動走行車両との通信接続について、自動走行車両等の移動に追従したエッジサーバ間でのハンドオーバ性能を向上する技術と、エッジサーバ上におけるアプリケーション処理のマイグレーション効率化技術の確立を行い、実環境に即した実証実験を通して有用性及び実用性を検証する。
課題ア-1-④ リアルタイム情報収集を可能とする LPWA トラヒック制御技術	自動走行車両の位置情報のエッジサーバへの送信において、渋滞等により通信の輻輳が起きそうな領域に対し、位置情報の搬送とは別の LPWA（Low Power Wide Area）等のチャネルにより、領域毎の制御情報をモビリティに送り込んで、送信頻度の制御を行うことにより、データ転送量を削減する。広域の制御情報を集約可能な LPWA ゲートウェイを介して制御情報を送り込む方法と、割り込み合流などの協調動作を計画する車両から周囲の車両へ、直接、制御情報を送り込む方法を組み合わせることで、必要な位置情報の精度を確保しながら、柔軟な帯域制御が可能であることを、実証実験を通じて検証する。
課題ア-2-① 個人を特定しない環境センサーによる電波環境構造化技術	低速（6km/h 以下）の自律型モビリティ（電動車いすや運搬ロボット等）が、高齢者、障がい者に移動支援サービスを安全・安心に提供するために不可欠となるモビリティの近傍状況（電波環境を含む）を把握するために、物理的な人の位置や壁などの障害物の位置と、環境内の受信電波強度を推定する動的電波環境情報構造化技術、及び複数のモビリティからの計測情報を統合した低速用高度地図データベースをエッジサーバ上に作成・共有する技術
課題ア-2-①-2 固定されたカメラからの映像解析による環境情報把握技術	自律型モビリティシステムの動的電波環境の計測のために、固定カメラ映像から高精度で歩行者を検出、検出された歩行者などの属性・種別を識別、画像上の検出位置を実世界の位置に正確に変換、カメラ内及びカメラ間で追尾することにより移動経路を認識すると共に将来の行動を推定する技術。  映像解析による環境情報把握技術の概要

技術の種類	技術の概要
課題ア-2-②-1 低速の自律型モビリティシステムに適した無線ネットワーク構築・制御技術	多数の低速自律型モビリティが無線周波数のひっ迫を引き起こすことなく無線ネットワークを介して必要な情報をエッジサーバの低速用高度地図データベースにアップロード／ダウンロードすることを可能とする、移動している低速自律型モビリティに適した周波数利用効率の高い無線ネットワーク構築・制御技術
課題ア-2-②-2 低速の自律型モビリティシステムの協調連携制御技術	低速の自律型モビリティ（及び搭乗者）同士、または低速の自律型モビリティ（及び搭乗者）と周辺の人対話できる距離 10m 程度の範囲で、半径 10m 以内に最大 10 名以内の人がいる混雑さを前提として、低速の自律型モビリティが衝突回避など安全・安心を確保して移動・回遊を実現しつつ、低速の自律型モビリティ（及び搭乗者）と周辺の人や他のモビリティとの間での対話を可能にするための、移動体の位置及び速度を適切に制御する技術
課題ア-2-③ 低速の移動体の高効率な通信処理技術の実証・標準化	低速の自律型モビリティが実際に一般市民にサービスを提供する環境に近い場所を活用して、低速の自律型モビリティの高効率な通信処理技術の実証実験を実施する。そのための場所として、（１）複合商業施設（ATC）、及び（２）オフィスビルエントランス（横須賀リサーチパーク（YRP））を利用する。国際標準化については、Object Management Group（OMG）で国際標準化が進められているロボット対話サービス（Robotic Interaction Service (RoIS)）の仕様もしくはその後継となる仕様を対象として推進する。
課題ア-3 課題間の連携と実証	課題ア・イ・ウの各機能を統合した、高速・低速モビリティシステム共通のインフラを統合実証環境として構築し、各課題で開発した技術を統合した実証実験を行う。計算処理や通信処理において互いに悪影響を及ぼさないことを確認した上で、その状況でも単体と同等の周波数利用効率向上が可能なことを実証する。
課題イ-1 複数無線システムを連携して制御する技術	現在広く普及しているスマートフォンは、無線 LAN システムとの親和性が高く、大容量のデータを受信する際に、無線 LAN システム環境での受信を推奨するような注意喚起機能や受信条件を無線 LAN システム接続時のみとするような設定機能が実装されている。これは、利用者側への配慮だけでなく、大容量データの受信による帯域逼迫を避けるという通信キャリア側のメリットにもなる。自律型モビリティへのダイナミックマップ（高精度な 3 次元地図情報と、渋滞情報や事故による通行規制などの位置情報を組み合わせたデジタル地図）配信に関しても、携帯電話システムと無線 LAN システムを組み合わせる利用することが効果的であると想定される。このような背景のもと、平成 29 年度では、複数無線システムを動的に切り替える技術（以下、動的切替技術とする）の実証及び同一のダイナミックマップを異なる無線システムを通じて受信する技術（以下、同時通信技術とする）の机上検討を実施した。 平成 30 年度では、上記の平成 29 年度の検討結果を受けて、同時通信技術の研究開発、及び動的切替技術における切断ロジックの高度化、同時通信技術と動的通信技術を組み合わせ技術について実証を実施した。

技術の種類	技術の概要
課題イ-2-a 車両による情報 収集分析技術	自律型モビリティシステムの運用においては、基盤的地図の更新及びモビリティに対する配信が迅速に行われることが必要である。そこで、道路更新箇所を自動検知する手法に焦点をあて、一般車両に搭載したセンサーを用いて道路情報を収集する手法の検討、開発に取り組む。道路情報の収集にあたっては、車両から移動通信網を介してエッジサーバに送信する手法を検討する。 センサーが収集するデータとして、レーザセンサーによる点群データ、デジタルカメラによるカメラ画像、GNSS/IMU（Global Navigation Satellite System/Inertial Measurement Unit）※による位置姿勢情報が挙げられる。これらのデータ量は膨大であり、移動通信網で送信するには適さない。そこで、更新箇所の抽出という目的に適したデータのみ収集の対象とすることで、データ量の削減を図る。抽出の対象として、道路上の地物  のうち区画線、標識、路肩縁を採用する。 センサーが収集するデータの例（点群データ、カメラ画像） ※ GNSS/IMU とは、航空機などの移動体の正確な位置情報と姿勢情報を算出する技術。航空機などが移動中に観測した GNSS データと地上基準点の GNSS データの解析を行ない、さらに移動体に搭載した IMU 装置で計測された機体の傾きデータと加速度データを合わせて解析することにより、ある瞬間における移動体の位置と姿勢を求めることができる。
課題イ-2-b 路側設備による 情報収集分析技 術	路側に設置したカメラやレーダーによる准静的～准動的な道路事象の変化を車に効率的に適時通知配信することを可能とするため、カメラ情報に基づいた道路状態の変化とその状況（対象種別、事象等）を交差点に限らない周辺道路も含むエリアのセンサーから効率的に情報を収集する方式を確立する。
課題イ-3 高度地図データ ベースを効率的 に配信する技術	自律型モビリティに対する高度地図データベースの配信において無線アクセス区間の通信トラフィックを削減するためには、自動走行が成立する範囲において配信データ量を削減することや、配信タイミングを最適化することが必要となる。これを踏まえ、平成 29 年度では、自律型モビリティの走行状態やデータの用途、容量に応じて、高度地図データベースの更新情報の差分を配信する差分配信技術や、必要な範囲を配信する分割配信技術を研究開発した。 平成 30 年度では、上記の平成 29 年度の「配信制御技術の検討・実証」結果と平成 30 年に実施した「携帯電話システムと無線 LAN システムの連携制御技術を含む総合実証」の結果を結合し、無線 LAN システムにおいて通信時間の観点から有効性が高い同時通信技術（方式 1 ハイブリッドダウンロード（MPTCP））と無線 LAN 通信システムへの接続利用機会の観点から最も効率的な動的切替技術を効率的な高度地図データベースの配信技術と組み合わせて実証を実施した。

技術の種類	技術の概要
課題ウ-1 大量トラヒック 検知・判断技術	自律型モビリティのエッジ間移動のタイミングを捉えて移動元の検知エンジンから移動先の検知エンジンに対象モビリティの継続的な監視に必要な最小限の情報を転送することにより自律型モビリティのエッジ間移動に追従した継続的な監視が可能な、異常トラヒック検知及び通信制御上の対処方法の判断を行う技術。  大量異常トラヒック検知・判断技術
課題ウ-2 大量異常トラヒックのネット ワーク遮断技術	「課題ウ-1の異常トラヒック検知・判断」技術と連携し、自律型モビリティシステムに対する異常トラヒックの発生範囲に連動したネットワーク遮断を実行する技術。 具体的には、「課題ウ-1の異常トラヒック検知・判断」技術と連携し、移動体の基地局間移動に対応した自律型モビリティシステムに対する異常トラヒックの発生範囲に連動したネットワーク遮断を実行する。  ネットワーク遮断技術
課題ウ-3 正常ネットワー クへの移動体接 続及び安全動作 への誘導提示技 術	「課題ウ-2のネットワーク遮断」技術と連動し、正常なネットワークへの接続や手動運転への切り替え通知等の安全動作への誘導提示技術。 具体的には、「課題ウ-2における遮断制御」技術にて、異常となったエッジサーバから自動走行する自律型モビリティへの異常データを遮断する。自律型モビリティは自動走行に必要な情報を受信できなくなる為、スライス管理サーバから手動走行への切り替え通知を行う。 また、エッジサーバが復旧した際に、自動走行への切り替えが可能となる事を通知することにより、自動走行への復帰を促す。  安全動作への誘導を提示する技術

・スケジュール

技術の種類	平成 29 年度	平成 30 年度
課題ア-1-① 広域で高効率な通信処理を可能とするエッジコンピューティング技術の確立	基本方式の検討	実装及び通信削減効果の評価
課題ア-1-② 複数の分散型データ処理の協調制御を可能とするエッジサーバ技術の確立	課題ア内連携方式の検討・評価	課題間連携の実現と実証評価
課題ア-1-③ 広域にまたがって様々な速度で走行する移動体の追従を可能とするエッジサーバ間ハンドオーバ技術の確立	基本方式の実装と初期評価	統合実証環境での評価
課題ア-1-④ リアルタイム情報収集を可能とする LPWA トラヒック制御技術	基本方式の実装と初期評価	拡張方式の実装と統合実証環境での評価
課題ア-2-①-1 個人を特定しない環境センサーによる電波環境情報構造化技術	基本処理検討	基本技術の確立
課題ア-2-①-2 固定されたカメラからの映像解析による環境情報把握技術	学習・評価データ収集方式 実装、評価	実証実験及び改善
課題ア-2-②-1 低速の自律型モビリティシステムに適した無線ネットワーク構築・制御技術	ネットワーク制御・連携 技術の基本検討	ネットワーク構築・制御 技術の確立
課題ア-2-②-2 低速の自律型モビリティシステムの協調連携制御技術	協調連携制御技術の基本検討	協調連携制御技術の実装・評価
課題ア-2-③ 低速の移動体の高効率な通信処理技術の実証・標準化	システム統合・構築・ 小規模実証、国際標準	システム統合・構築・ 大規模実証、国際標準
課題ア-3 課題間の連携と実証	課題ア内連携システムの 構築・実証	課題間連携の実証環境構築と 統合実証
課題イ-1 複数無線システムを連携して制御する技術	基本方式の実装と初期評価	統合実証環境での評価
課題イ-2-a 車両による情報収集分析技術	基本方式の実装と初期評価	統合実証環境での評価
課題イ-2-b 路側設備による情報収集分析技術	基本技術の確立と実装	統合実証環境での評価
課題イ-3 高度地図データベースを効率的に配信する技術	基本方式の実装と初期評価	統合実証環境での評価
課題ウ-1 大量トラヒック検知・判断技術	基本技術の確立	統合実証環境での評価
課題ウ-2 大量異常トラヒックのネットワーク遮断技術	試作・評価	改良・総合評価
課題ウ-3 正常ネットワークへの移動体接続及び安全動作への誘導提示技術	改良・評価	改良・総合評価

(2) 達成目標

(課題ア) 分散型データ処理等による高効率な通信処理技術

日本の道路交通環境※ 及び歩行空間において、様々な利用シーンを想定してそれらに確実に対応出来るように、携帯電話システムや無線システム等の無線システムにおいて、移動体やエッジサーバ、周辺環境検知センサー等における複数のデータ処理技術と、広域で高効率な通信処理を可能とするエッジコンピューティング技術を組み合わせることによって、自動走行や自動制御を実現するうえで求められる位置把握精度（道路交通環境を走行する高速の移動体（電気自動車等）では誤差 30cm 程度、歩行空間を走行する低速の移動体（電動車いす、自律ロボット等）では誤差 5cm 程度）の確保を実現し、広域にまたがって様々な速度で走行する膨大な数の移動体の多様な状況に応じた正確な対応を可能とするとともに、無線アクセス区間における通信トラヒック量を 1/2 に削減することで、周波数利用効率について 2 倍以上の向上を実現する。

※日本の道路交通環境：走行速度は、「高速道路における法定速度：100km/h」を目安とする。
また、交通量密度については、「東京都における交通量密度：128 台/km²」を目安とする。

交通量密度の出典：情報通信審議会 情報通信技術分科会 UWB 無線システム委員会（第 10 回）配布資料のうち委員会報告（案）（1）

http://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/uwb_wlsystem/20187_3.html

(課題イ) 複数無線システムを用いた高度地図データベースの更新・配信技術

日本の道路交通環境及び歩行空間において、携帯電話システムや無線 LAN システム等の複数無線システムを組み合わせ、移動体から収集される最大 2Mbps 程度のプローブ情報（位置、情報や速度、移動方向、交通状況等）を用いて必要最小限のトラヒック量で高度地図データベースを効率的に更新し、移動体の状態（位置、速度、移動方向、周囲の無線環境等）やデータの用途や容量に応じて、高精度な地図情報や変動情報を効率的に配信する技術を確立する。

これら複数無線システムを用いた高度地図データベースの更新・配信技術を確立することにより、無線アクセス区間における通信トラヒック量を 1/2 に削減することで、単位周波数帯幅あたりの収容台数について 1.5 倍以上の向上を実現する。

(課題ウ) 大量の異常通信の検知・抑制による高信頼化技術

携帯電話システムや無線 LAN システム等の無線システムにおいて、移動体とエッジサーバ等との間におけるトラヒックをモニタリングし、DoS 攻撃等の大量の異常トラヒックとその発生範囲を早期に検知・判断する技術を確立するとともに、当該範囲に応じて移動体の隔離やネットワークの部分的な遮断等を瞬時に行うことで、異常を伴う大量な不要通信の抑制により、無線アクセス区間における通信トラヒック量を 1/2 に削減することで、周波数利用効率について 2 倍以上の向上を実現する。

更に、大量の異常トラヒックの検知・判断に基づく移動体の隔離やネットワークの部分的な遮断等を行った際に、日本の道路交通環境及び歩行空間における移動体について、追隨しての正常なネットワークへの接続や手動運転への切り替え通知等の安全動作への移行を可能とし、多様な状況に応じて確実に対応可能な自律型モビリティシステムの高信頼化を実現する。

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

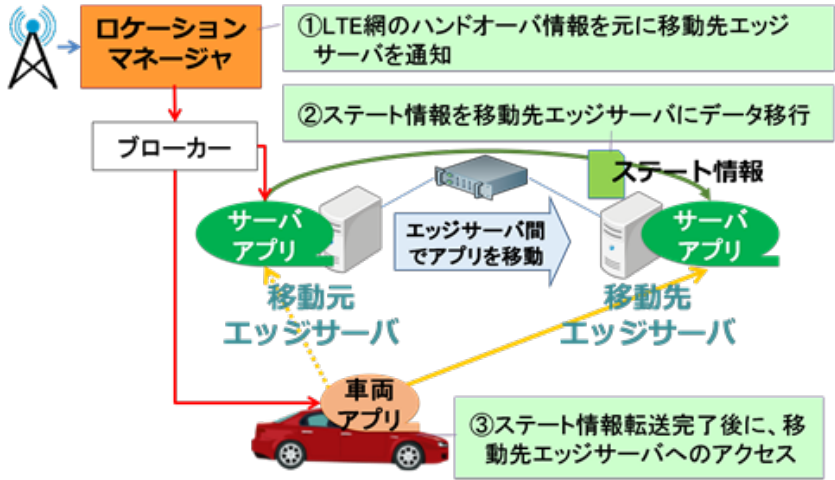
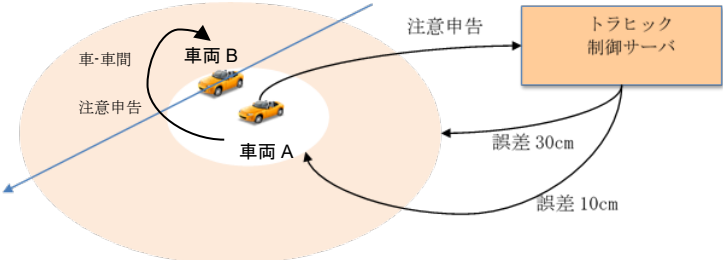
名称（年月日）	記載内容（抜粋）
「日本再興戦略改訂2016」（平成28年6月2日閣議決定）	「第2. I. 1. (2) i) イ) 無人自動走行を含む高度な自動走行の実現に向けた環境整備」において、「官民 ITS 構想・ロードマップ 2016」に基づき、2020 年東京オリンピック・パラリンピック競技大会までに、無人自動走行による移動サービスや高速道路での自動走行が可能となるよう、来年までに必要な実証を可能とする制度やインフラ面の環境整備を行う」とされている。
「科学技術イノベーション総合戦略 2016」（平成28年5月24日閣議決定）	「第2章（1）II. ii) 高度道路交通システム」においては、「Society5.0 の実現に向け、自動走行システムに関する研究開発を、本格的な「サイバーフィジカルシステム」の実現に向けた中核的な取組と位置付け、ダイナミックマップが様々なデータを地図基盤上に統合化するための共通プラットフォームとなるよう検討する。更に他分野との連携を積極的に進めるため、データ仕様やフォーマット等に関する情報共有・検討等を通じたユースケースの具体化、課題抽出等に取り組むこととする。自動走行システムの実現やそのデータ利活用については、様々な行政分野にまたがる取組であることから、SIP と各省庁取組等の緊密で効果的な連携が欠かせない」とされている。
「電波政策ビジョン懇談会最終報告書」（平成26年12月26日）	「第1章. 3. (5) 次世代 ITS の実現に向けた電波利用の推進」において、「高精度かつ高信頼な無線技術等により、車両が自らの進路上の交通環境を常に把握、認識し、これによる状況判断、車両制御等を適切に行っていくことが可能となるよう、更に高度な協調型 ITS の実現が必要となる」とされている。

(3) 目標の達成状況

2年間の研究開発を通じて、自律型モビリティシステムの実現を目的とした各要素技術について、当初の目標どおり達成することができた。具体的には、課題ア) 分散型のデータ処理等による高効率な通信処理技術については、通信やデータ処理の局地性を活用可能な分散型エッジコンピューティング基盤を開発し、その基盤上で多様なモビリティ（高速モビリティ：自動運転車両等／低速モビリティ：自動走行車椅子等）を収容する実証実験環境を構築し、高速・低速の各モビリティにおいて地域分散処理や通信量の削減が可能であることを実証した。課題イ) 複数無線システムを用いた高度地図データベースの更新・配信技術に関しては、自律型モビリティの走行状態やデータの用途や容量等に応じて、ダイナミックマップの差分配信や分割配信等を行う技術と、複数無線システムを連携した動的切り替えや同時通信技術の技術開発を行い、モバイル網に接続された高速モビリティに対して途切れることなく最新の情報を効率的に送ること、膨大な数のモビリティからの通信量を削減できることを確認した。課題ウ) 大量の異常通信の検知・抑制による高信頼化技術では、大量の異常トラヒックの検知からネットワークの部分的な遮断や安全動作への移行までの協調的な制御を実行する技術を確立し、自律型モビリティシステムの高信頼化を実現した。

課題ア・イ・ウの各課題で開発した技術は、高速・低速モビリティシステム共通のインフラとし構築した実証実験環境にそれぞれ実装し、各技術を組み合わせた実証シナリオをもとに統合実証実験を行った。これにより、自律型モビリティシステムの実現に必要な各技術が連携して動作する事、計算処理や通信処理において互いに悪影響を及ぼさず周波数利用効率向上の技術についても効果が発揮できることを確認し、当初の目標どおりの研究開発を達成できた。

技術の種類	目標の達成状況
課題ア-1-① 広域で高効率な通信処理を可能とするエッジコンピューティング技術の確立	通信データを不可逆ハッシュに変換し送受信することで冗長トラヒックを削減する Redundancy Elimination (RE) 技術を実装し、移動端末（モビリティ）と固定端末（エッジサーバ）間でのトラヒックがどの程度削減されるか、実験環境内の LTE 試験網にセンサーデータ等を流して実験・評価した。想定したモデルトラヒックにおいて標準的なデータ圧縮技術である gzip よりも高い圧縮効果が得られ、無線アクセス区間における通信トラヒック量を 1/2 に削減できることを確認した。 Redundancy Elimination によるデータ圧縮
課題ア-1-② 複数の分散型データ処理の協調制御を可能とするエッジサーバ技術の確立	自律型モビリティの密度変化に対応できるエッジサーバ技術を開発した。モビリティの移動履歴を用いた密度変化の予測により、エッジサーバの地域収容範囲を動的に変更する方式を評価し、想定交通トラヒックで予測される車両密度変化に対応できることを確認した。また特定無線方式の周波数帯域が限界を迎えた場合にもサービスを継続するための環境構成を検討し、他の無線通信方式に通信を切り替えることでエッジサーバとの接続性を維持しサービス提供を継続する方式を後述のロケーションマネージャの API として実装した。LTE 及び無線 LAN の 2 つの無線方式について環境構築を行い、統合実証シナリオにおける動作を実証した。

技術の種類	目標の達成状況
課題ア-1-③ 広域にまたがって様々な速度で走行する移動体の追従を可能とするエッジサーバ間ハンドオーバー技術の確立	広域かつエリアをまたがって移動する自律型モビリティに対応し、接続先のエッジサーバが切り替わっても自動運転支援等の処理を継続できるようにするための分散エッジコンピューティング基盤を開発した。地域分散処理を実現するため、モバイル網内の制御情報と連携した「ロケーションマネージャ」と呼ぶサーバを分散エッジコンピューティング基盤に設置し、エッジサーバあるいはモビリティ上で動くアプリケーションが、現在位置に応じてどのエッジサーバと接続すればよいかをロケーションマネージャ API 経由で問い合わせる方式を確立した。また、地域を跨ぐ移動によって収容エッジサーバの切り替えが必要な場合も、ロケーションマネージャがモバイル網内の情報をもとにハンドオーバーが必要なことを各アプリに通知し、アプリ処理を移動先のエッジサーバにスムーズに引き継げるようにした (図)。これらの技術について、車速 40km/h の実車走行、及び 100km/h の走行を想定した検証を実施し、高速移動するモビリティに対しても適用可能であることを実証した。  エッジ間アプリケーションデータ移行技術 (ロケーションマネージャによるエッジハンドオーバー)
課題ア-1-④ リアルタイム情報収集を可能とする LPWA トラヒック制御技術	LPWA を使って領域毎の誤差情報を車両に伝達し、この情報に基づいて位置情報をエッジサーバに送信する方式により、必要なエリアの位置情報精度を落とさずに輻輳を軽減・回避できることを、総合実証環境において実車両を用いて確認した。車・車間と GW 経由の制御情報の併用による実環境へ適用可能なスケーラビリティの確認を行い、最終的に位置情報のトラヒックを 1/2 以下に削減できることを確認した。  領域ベースの制御命令による位置情報通信トラヒック制御

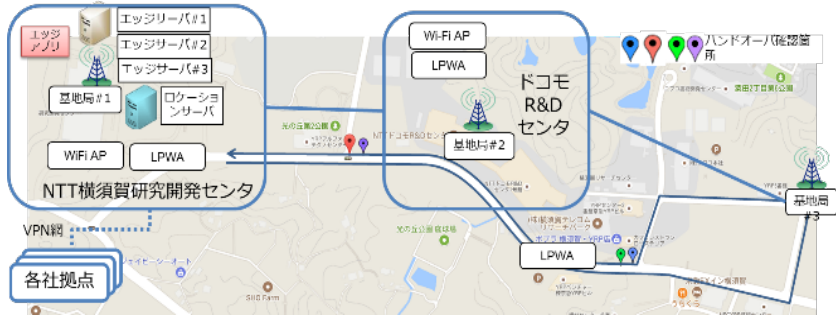
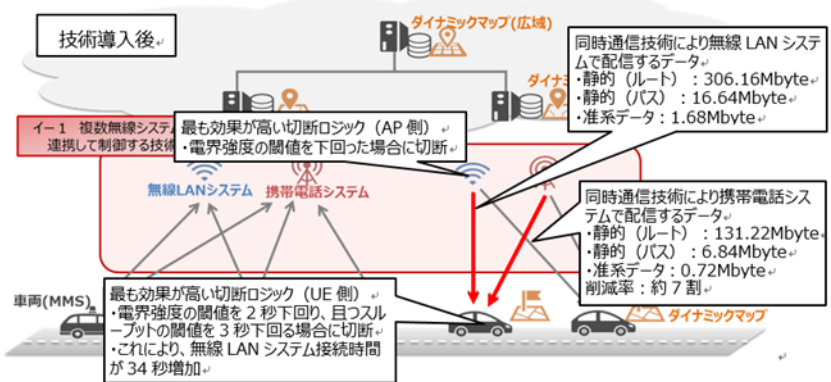
技術の種類	目標の達成状況
課題ア-2-①-1 個人を特定しない環境センサー による電波環境 情報構造化技術	レーザー測域センサーなどによって人々や障害物の位置を計測し、その情報と、無線 LAN アクセスポイントの位置や部屋の壁の位置等の情報に基づいて電波強度を推定する技術を開発した。 実験では、複数の低速自律型モビリティが近傍状況を認識し、アップロードすることで低速用高度地図データベースを作成し、そのデータベースから受信するセンサー情報を共有することで、単体のモビリティでは遮蔽の問題がある場合でも、近傍（半径 10m 以内）に 10 名程度の人々が存在する場合にも、周囲 10m 以内の人物や移動物体・動的な障害物の位置を検出できることを確認した。3 次元空間に関する大量のセンサー情報を蓄積、解析することで、周囲環境の立体的地図を構築し、5cm 以上の段差や階段を含む危険箇所を検出できること、及び、それらの情報に基づいて電波環境情報構造化を行い、動的電波環境情報を低速用高度地図データベースに反映できることを確認した。以上により、当初の目標を全て達成した。 (a) 個人を特定しないセンサーの配置 (b) 無線 LAN アクセスポイントの配置 (c) 推定された受信電波強度 実験環境でのセンサー及び無線 LAN アクセスポイントの配置 及び受信電波強度の推定結果

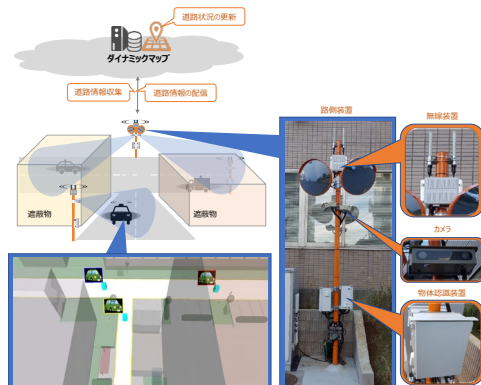
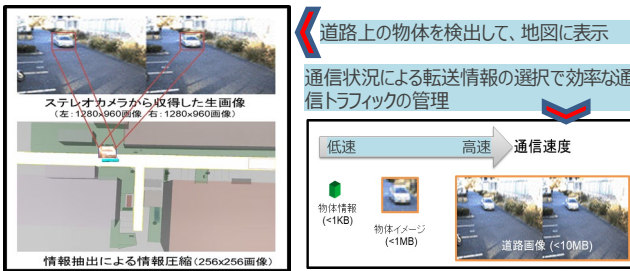
技術の種類	目標の達成状況
課題ア-2-①-2 固定されたカメラからの映像解析による環境情報把握技術	自律型モビリティシステムの動的電波環境の計測に必要な、固定カメラでの状況認識及び予測技術を確立するために、実環境を模した映像による評価と実証を行い、以下の成果を得た。 人物の属性推定技術において、地形に応じた閾値の設定と、非混雑時の結果をより信頼する混雑環境対応を行うことで、松葉杖、車椅子、ベビーカーの所有者推定精度、及び年齢層・性別推定 90%を達成した。グループ属性推定技術においては、グループを構成する 2 者の関係性推定において精度 95.4%を確認した。人物追尾技術においては、Hungarian アルゴリズムを用いた追跡途切れ発生後の軌跡補完などの手法により、同一カメラ内での平均人物追跡率 96.39%を達成、また、異なるカメラ間での同一人物判定においても Matching Rate で平均 96.3%を実現した。行動予測技術の研究開発では、マップ領域制限処理や、移動経路平滑化処理等の導入により 3 秒後の予測位置誤差 1m 以内 90%を実現した。 これらの成果を実証システム上に構築し、固定されたカメラで撮影された映像解析結果を、ユビキタスネットワークロボットプラットフォーム※（Ubiquitous Network Robot Platform（UNR プラットフォーム））を介して自律型電動車椅子と共有することにより、経路の最適化が可能であることを確認した。 固定カメラ映像からの環境情報により自律型電動車椅子が進路を変更する様子 ※ ユビキタスネットワークロボットプラットフォームは、ネットワークに接続されるロボット（スマートフォンや環境センサなども含む）が相互に連携してサービスを提供するためのプラットフォームであり、ロボットコンポーネント層、UNR-PF 層、サービスアプリケーション層の 3 層で構成される。UNR-PF 層では、接続されるロボットの情報や、共通して利用する地図情報（空間台帳内の空間情報）など、ロボットがサービスを提供する際に共通して利用するリソースが管理されており、ロボットやサービスアプリケーションからの要求に応じてリソースを提供する。この基本アーキテクチャと通信プロトコルは、国際電気通信連合（ITU）とオブジェクト・マネージメント・グループ（OMG）にてそれぞれ国際標準化されている。

技術の種類	目標の達成状況																																	
課題ア-2-②-1 低速の自律型モビリティシステムに適した無線ネットワーク構築・制御技術	低速の自律型モビリティに適した階層型無線ネットワークを構成することで、収容台数2倍以上を示すことを目標とした。下図に示す状態遷移に従い自動的にクラスタを構成するアルゴリズムを考案し、実機で構築した。周波数利用効率の更なる向上に向けて、階層型無線ネットワーク制御におけるクラスタの収容制御の詳細検討を行うとともに、クラスタ内直接通信における送信電力制御、チャネル選択などの無線伝送パラメータの適応制御、ならびに効率的なクラスタを形成するアルゴリズムの最適化の検討を行い、実装した。他の技術課題で検討した技術との連携による検証評価を行うとともに、多数の自律型モビリティシステムが存在する大規模な無線ネットワークを模擬した計算機シミュレーションにより、IEEE802.11g 相当の無線機の場合、下図に示すように従来の非階層型と比べて、接続台数が 2.28 倍となることを示した。以上により、当初の目標を全て達成した。 アクセスポイント クラスタヘッド 周囲に クラスタ ヘッド有り 周囲に クラスタ ヘッド無し アクセスポイント クラスタ メンバー アクセスポイント もクラスタ ヘッド もなし アクセスポイント があり、クラスタ ヘッド無し スタンド アローン クラスタヘッド 有り クラスタ構成の状態遷移 収容数 移動体の数 従来方式 提案方式 平均2.28倍 数の移動体 を収容する <table><tr><th>移動体の数</th><th>従来方式 (収容数)</th><th>提案方式 (収容数)</th></tr><tr><td>5</td><td>5</td><td>4</td></tr><tr><td>10</td><td>8</td><td>8</td></tr><tr><td>15</td><td>8</td><td>11</td></tr><tr><td>20</td><td>8</td><td>14</td></tr><tr><td>25</td><td>8</td><td>17</td></tr><tr><td>30</td><td>8</td><td>19</td></tr><tr><td>35</td><td>8</td><td>22</td></tr><tr><td>40</td><td>8</td><td>24</td></tr><tr><td>45</td><td>8</td><td>26</td></tr><tr><td>50</td><td>8</td><td>28</td></tr></table> 収容台数の比較	移動体の数	従来方式 (収容数)	提案方式 (収容数)	5	5	4	10	8	8	15	8	11	20	8	14	25	8	17	30	8	19	35	8	22	40	8	24	45	8	26	50	8	28
移動体の数	従来方式 (収容数)	提案方式 (収容数)																																
5	5	4																																
10	8	8																																
15	8	11																																
20	8	14																																
25	8	17																																
30	8	19																																
35	8	22																																
40	8	24																																
45	8	26																																
50	8	28																																

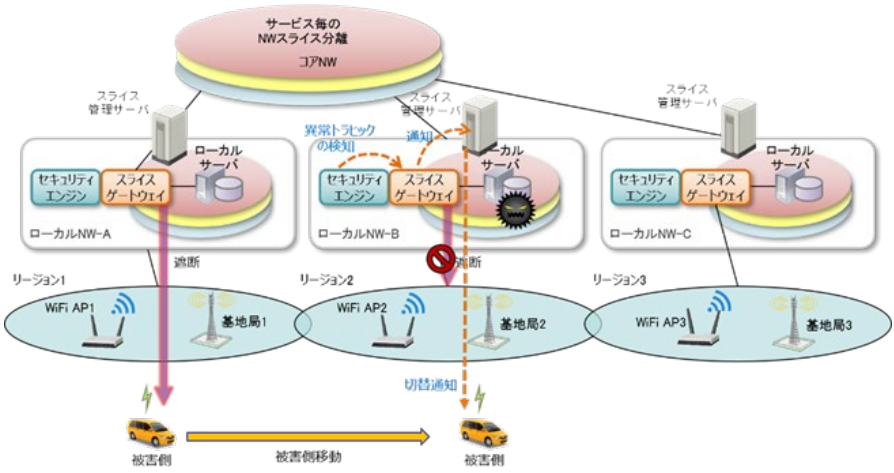
技術の種類	目標の達成状況
課題ア-2-②-2 低速の自律型モビリティシステムの協調連携制御技術	動的電波環境情報構造化技術、及び無線ネットワーク構築・制御技術により、低速の自律型モビリティが安全に移動できるようになった上で、さらに安心・快適で自由に移動できるようにするために、モビリティ同士またはモビリティと人のコミュニケーション（対話）を実現するための協調連携制御技術を開発した。モビリティ同士、またはモビリティと人が対話できる距離を 10m 程度として、半径 10m 以内に最大 10 名以内の混雑さを前提として、モビリティが衝突回避など安全・安心を確保して移動・回遊しつつ、具体的な 3 種類の協調連携行動（「展示を見て回る」、「狭い通路を通り抜ける」「フォーメーションを維持して一緒に歩く」）を開発した。評価実験の結果、2 台のモビリティ同士での協調行動において実用的な速度（定速の 83.5%の速さ）で移動できる事を明らかにした。また、モビリティと人の協調行動についても、移動時間全体の 84.3%の間フォーメーションを維持して移動できる事を明らかにした。以上により、当初の目標を全て達成した。   左：人型ロボットを用いた、人々と協調したモビリティ制御行動に関する評価実験の様子、右：複数モビリティ協調行動に関する評価で使ったテレプレゼンスロボット

技術の種類	目標の達成状況
課題ア-2-③ 低速の移動体の 高効率な通信処 理技術の実証・ 標準化	課題ア-2に関する技術を統合したシステム（下図）を構築し、まず、アジア太平洋トレードセンター（ATC）にある ATC エイジレスセンター内に本研究開発に用いる実験環境を構築し、利用場面を想定した動作検証実験（小規模実証）を行った。また、一般的なモビリティが、UNR プラットフォームをベースに構築した低速プラットフォームへの接続及びイベント制御の可否を検証した。検証対象として、一般に販売されている WHILL 株式会社製パーソナルモビリティ WHILL を採用した。横須賀リサーチパーク（YRP）にある YRP センターエントランスにて、本研究開発に用いる実験環境を構築し、高速プラットフォームと連携する統合実験（大規模実証）を実施した。また、一般的なモビリティである前述のパーソナルモビリティ WHILL に廉価なレーザ測域センサ（北陽製 UTM-30LX）を搭載することで、自律型モビリティ化し、実験環境内に設置した周囲の状況を把握する人位置追跡システムから獲得される人位置情報を、低速プラットフォームを介して取得し、経路を自律的に決定するナビゲーション実験を実施した。 人々が行き交う環境における低速の自律型モビリティシステムの実証実験の安全性と社会的受容性を検討するため、倫理的・法的・社会的課題(ELSI：Ethical, Legal and Social Issues)にも配慮した国内外の動向調査、及び ELSI に関する研究開発運営委員会を各年度に 1 回ずつ開催した。 国際標準化活動では、複数の低速型移動体の間で制御内容を相互に理解するためなどに必要となる知識記述(Robotic Service Ontology (RoSO))について、平成 29 年度は Object Management Group (OMG)での RFI (request for information) 提案とコメント集約を行い、平成 30 年度は RFP (request for proposal) を提出して実質的な標準化活動を開始した。OMG より平成 30 年 12 月に RFP が発行となり、令和元年 12 月を初期ドラフトの提案期日として公募が開始されている。RFP の発行を受け、OMG 内の他の task force 及び IEEE RAS (Robotics and Automation Society) で進める標準化活動との連携を進めることができた。 ISO TC299/WG6 で進む Modularity for Service Robots の標準化活動では、既存の OMG RoIS (Robotic Interaction Service、ロボット対話サービス記述に関する標準化) 及び RLS (Robotic Localization Service、ロボット位置情報サービス記述に関する標準化) を参考に抽象度の高い標準化を進めるよう国内委員会を通してコメントを送付するとともに平成 30 年 5 月に京都会議にはオブザーバとして参加し、平成 30 年 11 月に発行の CD2 (Committee Draft, 2nd)文書に修正を反映させることができた。 低速自律型モビリティシステムの構成

技術の種類	目標の達成状況
課題ア-3 課題間の連携と実証	課題ア・イ・ウの各機能を統合した、高速・低速モビリティシステム共通のインフラを横須賀リサーチパーク（YRP）に構築し、統合実証のシナリオを実行した。共通のインフラ上でシナリオ実行した場合も、計算処理や通信処理において互いに悪影響を及ぼさないことを確認した。これにより各課題で取り組んできた周波数利用効率向上の技術についてもシステム単体の動作時と同等の効果が発揮できることを確認した。また、統合実証のシナリオ動作の確認によって、膨大な数の自律型モビリティによるトラヒックを高速移動に対応可能な形で地域分散収容でき、高度な自動走行に必要なダイナミックマップの効率的な配信が可能なこと、高速・低速のモビリティの相互連携により外出困難者の長距離移動支援が可能なこと、悪意のあるモビリティを想定した場合でもシステム全体の信頼性を確保できることを実証した。  YRP に構築した統合実証実験環境
課題イ-1 複数無線システムを連携して制御する技術	同時通信技術の研究開発では、携帯電話システムと無線 LAN システムの同時通信技術 2 方式（MPTCP 方式、ハイブリッドコミュニケーション方式）を構築し、MPTCP 方式の同時通信技術が有効であることを確認した。さらに、同時通信技術を活用することで、無線 LAN システムに約 7 割をオフロードできることを確認し、携帯電話システムの無線区間アクセスのトラヒックを 7 割削減できることが確認できた。 動的切替の切断ロジック高度化の研究開発では、UE 側だけでなく、AP 側にも切断ロジックを組み込んだ切断ロジックにより、効率的な無線 LAN システムの切断が行われることを確認した。具体的には、UE 側の電界強度の閾値を 2 秒下回り、且つスループットの閾値を 3 秒下回った場合に、AP 側の電波受信強度閾値-73dBm を組み合わせた切断ロジックで、無線 LAN システムへの接続時間が、他の切断ロジックよりも平均 34 秒長く無線 LAN システムに接続した。  複数無線システムを連携して制御する技術の効果イメージ

技術の種類	目標の達成状況																													
課題イ-2-a 車両による情報 収集分析技術	車両によって収集した道路情報を、道路更新箇所の抽出が可能な品質を維持しつつ、100 分の 1 のデータサイズまで圧縮することを目標に据えた。実証実験で収集した道路情報は、4.6km のリンク長に対して約 3.1 ギガバイトであった。 情報収集機能の研究開発として、地物の特徴点の抽出を行った。具体的には、レーザセンサーで収集した点群情報から路肩縁を示すベクトル情報の抽出を行った。また、カメラ画像から区画線、標識の抽出を行った。これらの抽出手法により、データサイズは 0.023 ギガバイトまで削減された。これは圧縮前のデータサイズの 133 分の 1 (0.75%) に相当し、目標に達している。 情報分析機能の研究開発として、特徴点から変化点の自動検知を行った。特徴点が正しく抽出されている場合、道路更新箇所の抽出が可能であり、到達目標を達成した。 <table><tr><th colspan="2">削減前</th><th colspan="2">削減後</th><th>削減比</th></tr><tr><td>位置姿勢</td><td>309, 946byte</td><td>位置姿勢</td><td>309, 946byte</td><td>100%</td></tr><tr><td>レーザ点群</td><td>556, 159, 392byte</td><td rowspan="2">路肩縁候補</td><td rowspan="2">6, 114, 725byte</td><td rowspan="2">0. 90%</td></tr><tr><td>走行軌跡</td><td>121, 254, 930byte</td></tr><tr><td rowspan="2">カメラ画像</td><td rowspan="2">2, 657, 619, 390byte</td><td>白線候補</td><td>18, 488, 014byte</td><td rowspan="2">0. 69%</td></tr><tr><td>標識候補</td><td>41, 309byte</td></tr><tr><td>計</td><td>3, 335, 343, 658byte</td><td>計</td><td>24, 953, 994byte</td><td>0. 75%</td></tr></table>	削減前		削減後		削減比	位置姿勢	309, 946byte	位置姿勢	309, 946byte	100%	レーザ点群	556, 159, 392byte	路肩縁候補	6, 114, 725byte	0. 90%	走行軌跡	121, 254, 930byte	カメラ画像	2, 657, 619, 390byte	白線候補	18, 488, 014byte	0. 69%	標識候補	41, 309byte	計	3, 335, 343, 658byte	計	24, 953, 994byte	0. 75%
削減前		削減後		削減比																										
位置姿勢	309, 946byte	位置姿勢	309, 946byte	100%																										
レーザ点群	556, 159, 392byte	路肩縁候補	6, 114, 725byte	0. 90%																										
走行軌跡	121, 254, 930byte																													
カメラ画像	2, 657, 619, 390byte	白線候補	18, 488, 014byte	0. 69%																										
		標識候補	41, 309byte																											
計	3, 335, 343, 658byte	計	24, 953, 994byte	0. 75%																										
課題イ-2-b 路側設備による 情報収集分析技術	路側に設置したカメラやレーダーによる准静的～准動的な道路事象の変化を車に適時通知配信することを可能とするため、道路側にカメラやレーダーといった物体検出装置を設置し、道路側の状況変化を検出し、その情報を高度地図データベース（ダイナミックマップ）に効率的に更新を行うための研究開発を行った。 具体的には、複数の道路側物体検出装置（カメラ、レーダー等）を用いて、道路情報を取得し、道路上の物体（車、歩行者、パイロン等）の検出を行う。道路事情の変化情報をダイナミックマップにネットワークを介して更新する際、道路事情の更新の高効率化、及び通信ネットワークの負荷を軽減するため、情報圧縮方法を検討した。効率的な情報圧縮を行うため、道路側に設置した画像取得装置（カメラ）によって取得した元画像情報から道路状況の変化有無を判断、及び対象物の存在を検出し、対象物のみを元画像から切り取りすることにより、データ削減を検証した。提案の情報圧縮手法により、元情報を 1/18 まで圧縮できることを確認でき当初トラフィック 1/2 削減の到達目標を達成した。  路側設備による情報収集分析技術の実証  情報圧縮によるトラフィック軽減の実証																													

技術の種類	目標の達成状況
課題イ-3 高度地図データベースを効率的に配信する技術	開発した同時通信技術、動的切替技術、及び効率的な高度地図データベースの配信技術である差分配信、分割配信を組み合わせ、自律型モビリティの状況に応じたダイナミックマップの配信が、正常に動作することを確認した。更に、通常走行の状態でダイナミックマップの配信がサービス成立時間内に完了することを確認した。 上記に加え、路側からのカメラ画像による准系データの生成・配信の仕組みを加えた課題イ全体の総合実証においても、自律型モビリティの状況に応じたダイナミックマップの配信が正常に動作することを確認した。 更に、他課題との統合実証においても、正常にダイナミックマップが配信されることを確認した。 今回の実証実験では、渋滞時（大混雑時）においては、通信帯域が小さくなることもあり、サービス成立時間内にダイナミックマップの配信を完了することができないケースがあった。渋滞情報の検知・生成は、ダイナミックマップの効率的な配信技術により路側センサーから取得する情報を元に生成される情報であり、本実証実験の範囲で実現されている技術である。そのため、生成された情報の内容に応じて、当該区間より前の区間で配信するなど仕組みを導入するなどの配信技術のさらなる高度化も望まれる。
課題ウ-1 大量トラフィック検知・判断技術	自律型モビリティ（移動体）とエッジサーバ間の通信を自律型モビリティのエッジ間移動に追従して連続的に監視し、異常トラフィックの検知及び対処方法の判断を行う技術を確認した。 交通量密度 1000 台/km²（最高速度 100km/h の移動体を含む）の交通状態を模擬したシミュレーション環境を構築し、当該環境で自律型モビリティのエッジ間移動に追従した連続的な監視が可能であることを確認し、本技術の有効性を確認した。 また、多数の車両から大量の通信（プローブ情報送信）が行われる状態（実車両 1 台を含む 351 台の車両が 100 ミリ秒毎にプローブ情報を送信し、1 秒間に約 3,500 プローブを監視・処理しなければならない状態）を模擬した実車両を用いた検証環境下で、異常なプローブ情報が送信されてから、本技術による検知及び対処方法の判断、さらに本技術による判断に基づく対処（課題ウ-2 による通信遮断）までを准動的情報の配信間隔として想定される 1 分を下回る 7 秒以内に完了できることを確認した。
課題ウ-2 大量異常トラフィックのネットワーク遮断技術	自律型モビリティシステムに対する異常トラフィックの発生範囲に連動したネットワーク遮断を実行する技術を確認した。 具体的には、社会実装に向け、大規模エリアに対応したスライス管理（自律型モビリティサービスが収容された仮想ネットワークの管理（生成・監視・削除他））サーバの管理アーキテクチャとして、スケーラビリティを考慮した分割管理型アーキテクチャを採用した。 スライス管理サーバ・スライス GW の振る舞いをエミュレータにて検証を行ない、最高速度 100km/h、或いは交通量密度：1000 台/km² の疑似環境において大量異常トラフィックに対するネットワーク遮断技術の妥当性の確認できた。 ネットワーク遮断技術のシステム概要

技術の種類	目標の達成状況
課題ウ-3 正常ネットワークへの移動体接続及び安全動作への誘導提示技術	正常ネットワークへの移動体接続及び安全動作への誘導提示技術を実装したソフトウェアの評価を行い、正常ネットワークへの移動体接続及び安全動作への誘導が提示できる技術を確認した。 具体的には、「課題ウ-3 正常ネットワークへの移動体接続及び安全動作への誘導提示」技術を実装したソフトウェアにて、正常ネットワークへの移動体接続、及び安全動作への誘導が提示できることを確認した。 また、最高速度 100km/h、或いは交通量密度：1000 台/km² の疑似環境において正常なネットワークへの移動体接続及び安全動作への誘導技術を確認した。  安全動作への誘導を提示する技術のシステム概要

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年6月）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を実際に確立しており、また、ETSI ISG MECにおける寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成29年度	平成30年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件（0件）	0件（0件）	1件（0件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	0件（0件）	7件（7件）	7件（7件）
その他の誌上発表数	3件（0件）	4件（0件）	7件（0件）
口頭発表数	28件（2件）	21件（3件）	49件（5件）
特許出願数	14件（1件）	12件（1件）	26件（2件）
特許取得数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
国際標準提案数	3件（3件）	1件（0件）	4件（3件）
国際標準獲得数	0件（0件）	1件（0件）	1件（0件）
受賞数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
報道発表数	2件（0件）	4件（1件）	6件（1件）
報道掲載数	0件（0件）	10件（0件）	10件（0件）

観点	分析
必要性	我が国が超高齢化と労働人口減少を迎える中、過疎地も含めた高齢者の安全・安心な生活や観光、土木、福祉等の多様な経済活動の生産性確保等を図るため、高信頼・高精度な自動走行を実現する自律型モビリティシステム（自動走行技術、自動制御技術等）の実現が期待されており、主要国でも官民を挙げた大規模プロジェクトが始動している。 自律型モビリティシステムの実現のためには、移動体（電気自動車、電動車いす、自律ロボット等）自身に搭載するセンサーだけでなく、高度な自己位置推定や周辺環境認知を可能とする高度地図データベース等の情報を、遅延なくリアルタイムに収集・把握する通信技術の確立が極めて重要で必要不可欠である。 一方で、現在日本で走行している約8,000万台の車を含めた膨大な数の移動体が、無線通信を介して、大容量の情報をリアルタイムにやり取りするようになった場合には、膨大な通信需要が生じることが想定されるため、限られた電波資源を最大限有効利用するための周波数有効利用技術の確立も必要不可欠である。 このように多様な分野への展開が期待されている自律型モビリティシステムを支える通信技術確立するため、高度地図データベース等の多様で大容量な情報について、膨大な数の移動体との間でリアルタイムなやり取りを可能とする技術の確立するとともに、限られた電波資源を最大限に有効利用するための周波数有効利用技術の確立することが必要であることから、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発の実施に当たっては、高度道路交通システム（ITS）、移動通信システムに関する専門的知識や研究開発実績を有する受託者が蓄積したノウハウを積極的に活用することにより、効率的に研究開発が進められた他、外部の有識者から構成される本研究開発の運営委員会や、外部有識者による継続評価会において、研究開発の進捗状況の確認や今後の進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。 予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。

観点	分析
有効性	(日本電信電話) 通信やデータ処理の局地性を活用可能な分散型エッジコンピューティング基盤を開発し、その基盤の上で多様なモビリティを収容する構成を実現した。それぞれの技術は到達目標で設定したモデル交通量やモデル通信トラヒックを想定した場合にも有効であることを評価によって確認した。 また、各課題で開発した技術を統合した実証実験環境を YRP に構築して統合実証を行い、各技術が単独だけではなく統合して動作可能であることも確認した。これにより膨大な数の自律型モビリティからの通信を処理できるシステムの実現のための基本技術を確認できたと言える。 ネットワークと連携した自動走行デモの様子をイベントで市民に体験してもらうなど、将来的な社会実装の姿を一般に広くアピールした。 (NTT アドバンステクノロジー) 車両の位置情報を収集する際の通信トラヒックを 1/2 以下に抑さえ、道の駅等の、郊外で車両が集まる地区で特に想定される LTE の輻輳を、回避・軽減するための基本技術を確認した。LPWA のゲートウェイを用いる制御と、車-車間で制御情報を伝達する制御を組み合わせることで、必要な部分の精度を落とさずに、広域にわたるトラヒック制御が可能であることを明らかにした。 (国際電気通信基礎技術研究所) ・課題ア-2-①-1 個人を特定しない環境センサーによる電波環境情報構造化技術、課題ア-2-②複数の低速モビリティの安心安全を確保する協調連携のための高効率な通信処理技術を確認することにより、従来に比べて 2 倍以上の台数の低速・自律型モビリティ（電動車いす、案内ロボット、運搬ロボット）が、無線ネットワーク接続を確保しつつ、安心・安全な移動支援（特に屋内及び半屋外）を高齢者や障害者に提供できるようになるというアウトカムの実現に寄与した。 ・課題ア-2-③低速の移動体の高効率な通信処理技術の実証・標準化において、低速の自律型モビリティに関連する研究開発成果を確実に得るため、アジア太平洋トレードセンター（ATC）にある ATC エイジレスセンター内に、環境に設置するセンサーの位置や照明条件などを調整できる専用の実験環境を構築した。これによって、多種の環境条件での実験が可能になった。また、研究開発成果の社会的受容性を様々な観点から検討するため、倫理的・法的・社会的課題(ELSI: Ethical, Legal and Social Issues)に関する研究開発運営委員会を各年度末に実施した。この委員会により、研究開発成果の社会実装にともなう多くのステークホルダの視点から社会的受容性を検討することができ、研究開発の方向性を適宜改善することができた。 ・低速のモビリティ、特に電動車いすや屋内で活動する案内ロボットや運搬ロボットは、今後、自律化が進む。課題ア-2に関連する技術が活用されることによって、低速のモビリティが安全に移動できるようになるだけでなく、モビリティ（及び搭乗者）と人の対話が可能になり、これらのサービスを利用する人々の安心感の向上と、特に高齢者・障がい者の社会参加促進に寄与する。 (パナソニック) 固定されたカメラからの映像解析による環境情報把握技術により、防犯カメラなど既に普及しているセンサーの活用により効率的に人物の属性・位置及び移動の予測が可能になり、動的電波環境の計測及び低速型モビリティの行動の最適化に寄与した。 (NTT ドコモ) 複数無線システムを連携して制御する技術を確認することにより、自律型モビリティシステムのサービスが成立する範囲において、携帯電話システムの無線アクセス区間の通信トラヒックの約 7 割を無線 LAN システムにオフロードすることが可能になることが期待される。 高度地図データベースの効率的な配信技術を確認することにより、自律型モビリティシステムのサービスが成立する範囲において、配信する地図(静的情報、准静的情報、准動的情報)の総データサイズの約 5 割を削減することが可能となり、携帯電話システムの無線アクセス区間の通信トラヒックの低減が期待される。

	(パスコ) 高度地図データベースを効率的に更新する技術の研究開発のうち、車両による情報収集分析技術確立することにより、道路の変化を自動検知できるようになる。このことにより、計測機材を搭載した一般車両による道路情報の収集が期待される。また、目視により実施していた道路変化箇所の検知を自動化することで、リードタイムの削減が期待される。 (情報通信研究機構) 車の往来があまり多くない通りや、見通しの悪いカーブや交差点、更に車の通行が減る夜間等の時間帯、また運用初期のカメラ等を有する車両があまり多くない時期においては、路側設備による情報収集分析技術を活用することで道路事情を十分反映することが可能である。 (日立製作所) 「課題ウ：大量の異常通信の検知・抑制による高信頼化技術」では、大量の異常トラヒックの検知からネットワークの部分的な遮断や安全動作への移行までの協調的な制御を実行し、限られた電波資源を最大限に有効利用するための技術をシミュレーションや実証実験を通じて確認した。 大量の異常トラヒック検知後のネットワークの部分的な遮断技術、安全動作への移行までの協調的な制御技術確立することにより、今後普及が見込まれる 5G 等の無線ネットワークにおける電波資源の有効利用に資することができた。 (日本電信電話) 移動通信のトラヒックは年々増え続けるため、攻撃により発生する大量の異常トラヒックが無線リソースを支配すると、限られた周波数資源が枯渇し、周波数有効利用の観点からは極めて重要な問題となる。そのような中、大量のトラヒックを効率的に分析して異常を検知する自律型モビリティ向けの異常トラヒック検知・判断技術確立することにより、限られた電波資源を最大限に有効利用するために確立する技術の効果を高く保つことが可能な自律型モビリティシステムの高信頼化に寄与することができた。 さらに、国内の学会や国際会議での発表や、国内のイベントへの出展、報道発表により、本研究開発技術の必要性を広く知らしめるとともに、本研究開発の成果を広くアピールした。 よって、本研究開発には有効性があつたと認められる。
公平性	本研究開発による分散型データ処理等による高効率な通信処理技術、複数無線システムを用いた高度地図データベースの更新・配信技術確立し、無線アクセス区間における通信トラヒック量を 1/2 に削減することで、周波数利用効率について 2 倍以上の向上を実現することにより、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 また、支出先の選定に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定をしている。 よって、本研究開発には公平性があつたと認められる。
優先性	自律型モビリティ、中でも自動走行は、国内自動車メーカや海外自動車メーカ、Google などの IT 企業が開発や試験走行に取り組んでいるとともに、米国・欧州・韓国などの各国において、自動走行の実現に向けた研究開発・試験走行が推進されている状況である。我が国でも、自動走行は戦略的イノベーション創出プログラム（SIP：Strategic Innovation Promotion Program）の 11 の研究課題の一つとなっており、2020 年代前半の準自動走行システム（レベル 3）を目指して、内閣府の元で、警察庁、総務省、経済産業省、国土交通省（道路局、自動車局）が協力して遂行しており、実用化の加速が期待される。一方で、米国 NSF（National Science Foundation）、及び欧州 HORIZON2020 で実施されている自動走行絡んで実施されている研究開発を調査したところ、そのほとんどは自動車が車両単体として動作する自動走行の実現に向けた取り組みであり、ネットワークを活用した取り組みは、多くないのが現状である。 車両同士がネットワークを介してより高度に連携するモビリティ社会を他国に先駆けて実現することは、我が国が超高齢化と労働人口減少を迎える中、安全・安心な生活や多様な経済活動の生産性確保等を通じた国際競争力の向上に大いに資すると考えられる。そのためには無線システムの通信技術を用いた状況の把握や共有するためのシステムの研究開発が必要不可欠である。 よって、本研究開発には、優先性があつたと認められる。

5 政策評価の結果（総合評価）

我が国のおかれた環境において、高信頼・高精度な自動走行を実現する自律型モビリティシステムが生活や産業全体に波及する効果は非常に大きく、他国に先駆けた実現に向けて優先して投資が必要とされる研究開発であった。

自律型モビリティシステムの実現に向け、分散型データ処理等による高効率な通信処理技術、複数無線システムを用いた高度地図データベースの更新・配信技術、大量の異常通信の検知・抑制による高信頼化技術について研究開発を行い、それぞれ計画時に設定した到達目標を達成し、設定したモデル交通量やモデル通信トラフィックを想定した場合に有効であることが確認された。また、各課題で開発した技術を統合した実証実験環境を横須賀リサーチパークに構築して統合実証を行い、各技術が単独だけではなく統合した場合にも効率的に動作可能であることも確認された。これにより膨大な数の自律型モビリティからの通信を処理できるシステムの実現のための基本技術を確立できたと言える。

イベントにおいてこれらの成果を用いたデモを行い、ネットワークと連携した自動走行の様子を市民に体験してもらうなど、将来的なモビリティ社会の姿を一般に広くアピールするなど、社会実装に向けた取り組みも進んでいる。

よって、本研究開発には有効性、効率性等があると認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

（日本電信電話）

自律型モビリティシステム全体の社会実装に向けては、安心・安全に自律型モビリティシステムがネットワークに接続され、必要なデータを電波の有効利用を図りながら、授受できる基盤技術を実現するまでのロードマップ策定を行う必要がある。具体的には、官民 ITS 構想・ロードマップ 2018 に掲げられている高度自動運転システムの市場化・普及目標時期である 2025 年頃を目途に社会実装を進めていく想定で、関連する標準化団体などでの標準化による国際的な普及の推進や、自動運転の実用化に伴う社会のニーズに従った事業化を進め、技術開発を継続していく。

（NTT アドバンステクノロジー）

広い範囲で車両の渋滞の緩和を実現できる程には、LPWA 網が発展しない事も考えられるので、位置情報の搬送波の隙間に制御情報を埋め込む、あるいは自動運転車両に導入済みで利用可能なバンドで使えるように制御プロトコルを整理していく。

（国際電気通信基礎技術研究所）

Object Management Group（OMG）で国際標準化が進められているロボット対話サービス（Robotic Interaction Service（RoIS））仕様への反映、併せて ISO TC299 WG6（Modularity for Service Robots）にも貢献していく。ロボットや IoT の関連企業の企業コンソーシアムである一般社団法人 i-RooBO Network Forum などを通じて、第三者の企業や研究会発機関などに技術の利用を促しており、ショッピングセンターや公共施設等、高齢者も多く集う場所において、段階的なサービス導入を想定している。

（パナソニック）

固定されたカメラからの映像解析による環境情報把握技術は、多様な技術要素及び取得可能な情報を含んでおり、自律型モビリティへの活用だけでなく、安心安全・防災・都市計画・マーケティングなど様々な応用アプリケーションとして社会貢献していくと考えられる。そのためには、カメラ映像内の個人情報の取り扱いに対する社会的なコンセンサス形成が必要不可欠である。

（NTT ドコモ）

今回の実証実験では、混雑箇所（渋滞中 等）においては、通信帯域が逼迫する恐れもあり、サービス成立時間内に配信を完了することができないケースも存在した。ルート上の前方の渋滞情報が事前に分かっているのであれば、渋滞区間を避けるルート変更や、渋滞区間に到着するより

も事前に当該区間の情報を配信するなどの回避策が考えられる。いずれにしても、准静的・准動的情報の更新技術により生成した情報などと連携した配信技術のさらなる高度化も望まれる。

今後は、今回開発した技術が将来の自律型モビリティの実現だけでなく、高度地図データベースの普及などにも寄与する技術であり、関連団体や、事業者等に対して周知していくことが望ましい。なお、周知のためのツールとして、本実証実験の成果をまとめたガイドラインを作成している。

また、一般的には通信技術や IT 技術の進歩は自動車の開発やライフサイクルと比べて短いと言われている。実際に、今回対象とした第 4 世代携帯電話システムや無線 LAN システムでさえ、次世代の技術開発が進められている状況である。将来、自律型モビリティに無線通信を搭載させる際に、自動車とのライフサイクルの違いや、新たな技術の登場、既存技術の進展などの適用なども踏まえたシステム設計が求められる。

(情報通信研究機構)

カメラ等のセンサーを有する自動車が頻繁に往来する市街地の道路においては、車両センサー等により開発された技術によりダイナミックマップの更新が期待できる。しかし、車の往来があまり多くない通りや、車の通行が減る夜間等の時間帯、また運用初期のカメラ等を有する自動車があまり多くない時期においては、最新の道路事象の変化がダイナミックマップに十分に反映されない恐れがある。特に現状でも事故の発生が多い見通しの悪いカーブや交差点などにおいては、見通せない先に道路交通規制や静止車両などがあった場合には、その情報がダイナミックマップ上に反映されていることが望ましい。路側設備による情報収集分析技術を活用することで道路事情を十分反映することが可能である。しかし、路側設備を広範囲に広げることは初期運用において困難である。路側設備による情報収集分析技術の活用拡大に向けて、見通しの悪いカーブや交差点などの交通事故が多発する場所などにスポット的な運用を目指す。

(日立製作所)

「課題ウ：大量の異常通信の検知・抑制による高信頼化技術」においては、高度地図情報データを安全・安心に自動走行車両に伝達するために重要な技術であり、セキュアな仮想ネットワークを社会実装するためにも研究成果の意義は大きいと考える。今後、自動運転のみならず、エッジコンピューティングに配備される様々な IoT データの進展が予想され、限りあるネットワークインフラ上への複数サービスをセキュアにかつ経済的に提供するためにも、本課題で取り組んだ高信頼化技術による社会的効果は大きいものと考ええる。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ 事前評価時に設定した達成目標や基本計画書に記載された到達目標はほぼ達成されている。
- ・ 実施体制は妥当であり、予算は効率的に使用されたと判断する。
- ・ 研究期間は 2 年間であるが、今後の展開も見据えた実用化計画となっている。
- ・ 各課題毎に通信トラヒックの削減が期待できる成果が得られている。また、各課題を連携させた統合実証実験においても同様の周波数利用効率の向上が得られており、道路だけでなく複合商業施設や空港などの施設内でも多数の移動体が安全・安心にサービスを提供できることが期待され、本研究開発は有益であったと判断する。

7 評価に使用した資料等

- 「日本再興戦略改訂 2016」（平成 28 年 6 月 2 日閣議決定）
https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/2016_zentaihombun.pdf
- 「科学技術イノベーション総合戦略 2016」（平成 28 年 5 月 24 日閣議決定）
<https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2016.html>
- 「電波政策ビジョン懇談会最終報告書」（平成 26 年 12 月 26 日）
http://www.soumu.go.jp/main_content/000334592.pdf
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 ＜電波利用料＞
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

平成 31 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局 技術政策課 研究推進室

評価年月：令和元年 8 月

1 政策（研究開発名称）

テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

平成 26 年度～平成 30 年度（5 か年）

・実施主体

民間企業等

・総事業費

1, 7 2 6 百万円

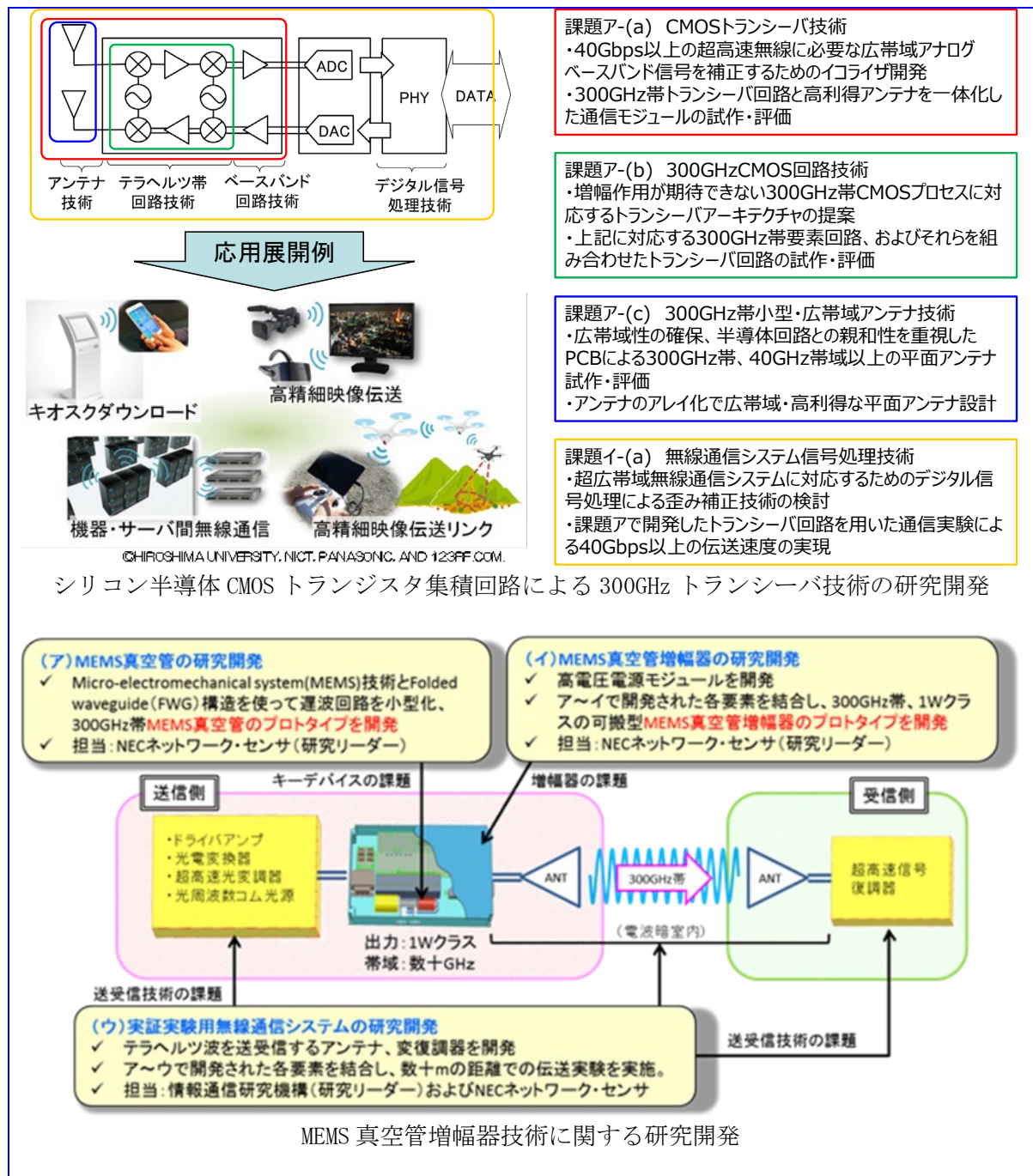
平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
280 百万円	370 百万円	393 百万円	413 百万円	270 百万円	1, 726 百万円

・概 要

本研究開発では、300GHz 帯のテラヘルツ波帯に関して体系的なデバイス基盤技術を確立するため、化合物半導体による 300GHz デバイス技術及びテラヘルツ波多重技術、シリコン半導体 CMOS（相補型金属・酸化物・半導体構造：Complementally Metal-Oxide-Semiconductor）トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術、MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発を行い、300GHz 帯の周波数帯域において、データ伝送速度 40～100Gbps 級の超近距離通信（機器内～1 m）及び近距離通信（機器間～数 10m）を実現する要素技術を開発する。

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発では、CMOS デジタル回路とトランシーバの一体集積化や、小型で低コストのデバイス技術を確立するため、300GHz 帯無線通信用のシリコン半導体 CMOS トランシーバ技術、小型・広帯域なアンテナ技術、超高速無線通信に対応するための信号処理技術に関する研究開発を行ない、見通し距離 1 m 程度において、40～100Gbps 級のデータ伝送速度の高品質無線通信を実現するための要素技術を開発する。

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発では、MEMS（マイクロマシンまたは微小電気機械システム：Micro Electro Mechanical System）技術により進行波管（TWT：Traveling Wave Tube）を高周波化した真空管（以下、MEMS 真空管）を新規に開発し、さらに MEMS 真空管を内蔵した 300 GHz 帯（0.3 THz 帯）真空管増幅器（以下、MEMS 真空管増幅器）の開発を行う。MEMS 真空管と新規開発の高電圧電源モジュールより構成される可搬型（A4 サイズ）MEMS 真空管増幅器のプロトタイプを開発する。MEMS 真空管増幅器を組み込んだ実証実験用試験システムを構築し、屋外ビル間にも適用可能な超高速無線通信（数十 Gbps 級）の原理実証を行う。



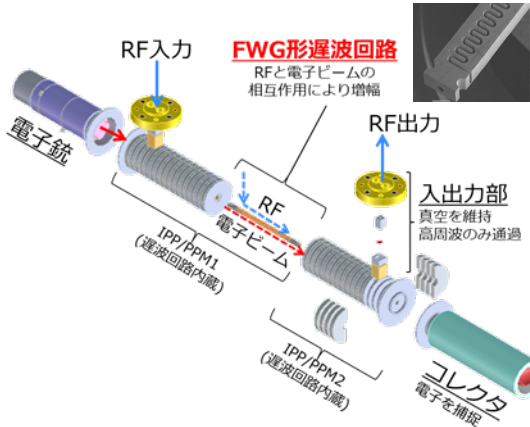
シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発

技術の種類	技術の概要
課題ア 近距離無線通信用300GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバ技術	○アナログベースバンド補正技術 300GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバの小型低消費電力化のために、アナログベースバンド補正技術の検討を行う。周波数特性の補正によって、広帯域アナログデジタル変換回路およびデジタルベースバンド処理の負担を軽減する広帯域アナログイコライザを設計する。ベースバンド帯域幅 6.25GHz 以上において 10dB 以上の補正量をもつアナログイコライザを、可変性が高く CMOS プロセスでの実装にも適した回路アーキテクチャで実現する。
(a) CMOS トランシーバ技術	○300GHz帯モジュール技術 300GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバを実現するための基盤技術として、実装信頼性と低損失を両立する実装技術の検討を行う。ファンアウト型ウェハレベルパッケージ(FOWLP: Fan-Out Wafer Level Package)構造において、300GHz帯での基板設計に必要な技術蓄積を行う。また、無線通信の長距離化を目標とし、パッケージ上のアンテナ素子を用いて CMOS トランシーバに適した高利得アンテナの実現性検討を行う。

課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術 (b) 300GHz CMOS 回路技術	300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバのフロントエンド部を実現するため、CMOS トランシーバのフロントエンド部を構成するアナログ要素回路の設計および評価を行う。開発する 300GHz 帯 CMOS 要素回路は、動作周波数の上限付近で使用することになるため、トランジスタ性能を極限まで引き出す必要がある。また高次変調による高速化を可能とするために位相変調に対応した回路特性を持つことが必要となる。ここでは増幅器、局部発振源、周波数変換素子などの能動素子について、トランジスタの最高動作周波数付近で使用する回路技術を開発する。特に、位相雑音特性に優れた局部発振源、高い位相精度を持つ周波数変換回路の実現に取り組む。また、これら回路間のインピーダンス整合や信号分配、合成に用いる高い位相精度の受動素子を設計し、評価する。以上の要素回路を組み合わせることにより、シリコン半導体 CMOS トランシーバのフロントエンド部として送信部と受信部を集積化した CMOS トランシーバチップを実現する。
課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術 (c) 300GHz 帯小型・広帯域アンテナ技術	300GHz 帯に適した小型・広帯域アンテナの研究開発を行う。小型化を念頭に置きながら、30GHz 以上の帯域幅（反射損失が 10dB 以下の帯域として定義）を持つアンテナを実現する。300GHz の小型アンテナを評価するための評価系の構築と評価技術の確立を行う。
課題イ 300GHz 帯の周波数の電波を使用する近距離無線通信システムの開発及び通信実験による機能実証 (a) 無線通信システム信号処理技術	○高速デジタル信号処理技術 300GHz 帯の周波数を利用した 100Gbps 級の高速度無線伝送を実現するために、デジタル信号処理による歪補正技術の検討を行う。データセンタのサーバ筐体内配線の無線化を想定し、サーバ筐体内のマルチパスフェージングへの対策として低密度パリティ検査符号（LDPC）符号化周波数領域ソフトキャンセル（SC）/最小平均二乗誤差（MMSE）ターボ等化器を開発する。特に、100Gbps 級の高速度伝送システムに実装可能な反復回数でターボ等化器を実現するための構成を検討する。また、数 G～数十 G サンプル/秒の高速度アナログ/デジタル変換器（ADC）では高分解能化が困難であるため、ADC の分解能削減検討を行う。 ○通信実験による機能検証 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバの実用性の実証のために、開発した CMOS トランシーバを用いたリアルタイム映像伝送の実験を行う。実用性を高めるために、少数の電源をつなぐだけで動作する小型な無線通信機構成の検討を行い、さらにアンテナ性能の向上による通信距離の長距離化を検討する。製作した無線通信機を用いて、送受信機間の距離が 10m において安定した通信を行い、リアルタイム映像伝送を実現する。

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発

技術の種類	技術の概要
MEMS 真空管技術	折返し導波管（Folded Waveguide）構造を使用した遅波回路を高周波化・広帯域化する設計技術を確立し、MEMS 技術を応用した微細加工技術により 300 GHz 帯で動作できるテラヘルツ遅波回路を開発する。高アスペクト比・深堀対応が可能な製造技術を確立し、Folded Waveguide 構造の微細化を実現する。高周波入出力部分および遅波回路を含む高周波回路全体の整合特性を改善し、MEMS 真空管の電力損失を低減する。遅波回路を含む高周波回路を精密組み立てする技術を開発し、数十 μm 径の極細電子ビームの攪乱を抑制、効率を向上するための高精度組立技術を開発する。周期磁界装置部（PPM: Periodic Permanent Magnets）の採用により小型化を実現する。開発された MEMS 真空管を使用して、周波数帯域幅が数十 GHz 以上、利得が 20 dB 以上、出力 1 W クラスの増幅器を実現可能であることを実証する。

	 MEMS 真空管構造図
MEMS 真空管増幅器技術	MEMS 真空管を内蔵し、300 GHz 帯で数十 GHz の周波数帯域幅、20 dB 以上の利得、出力 1W クラスの性能を有する MEMS 真空管増幅器を開発する。キロボルトから十数キロボルトの高電圧を供給できかつ低背化された高電圧トランスを開発し、さらに制御回路を部分的にワンチップ化することにより MEMS 真空管を動作させるための高電圧電源モジュールを小型化する技術を確認する。放熱の効率化および電磁ノイズに関するシステム内障害を低減し、高電圧電源モジュールと MEMS 真空管を A4 サイズの筐体内に高密度に実装する技術を確認する。実証実験用通信システムへの組み込みを考慮し、電氣的・機械的な仕様を最適化する。  MEMS 真空管増幅器外観
実証実験用無線通信システム技術	300 GHz 帯テラヘルツ無線信号を、光技術を利用して高精度に発生させる技術の開発を行い、300 GHz 無線信号として伝送速度 50 Gbps 以上を実現するシステムを開発する。安定的に 300 GHz 帯テラヘルツ信号を発生させることが可能な光・テラヘルツ信号発生技術を、最先端光ファイバ通信技術を適用・展開して開発することで実現する。テラヘルツ信号発生技術を基盤とした伝送システムに、MEMS 真空管増幅器を適用し、伝送距離 10 m 以上を実現するテラヘルツ無線伝送の実証実験を実施する。

・スケジュール

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発

技術の種類	平成 26 年度	平 27 年度	平 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
課題アー(a) CMOS トランシーバ技術					→
課題アー(b) 300GHzCMOS 回路技術					→
課題アー(c) 300GHz 帯小型・広帯域アンテナ技術					→
課題イー(a) 無線通信システ					→

△信号処理技術					
---------	--	--	--	--	--

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発

技術の種類	平成 2 6 年度	平成 2 7 年度	平成 2 8 年度	平成 2 9 年度
MEMS 真空管技術	→			→
MEMS 真空管増幅器技術	→			→
実証実験用無線通信システム技術	→			→

(2) 達成目標

本研究開発では、これまで実用化されておらず、かつ周波数が分配されていない 300 GHz 帯の周波数帯域のテラヘルツ波帯に関して、その高出力発生と高感度検出・信号処理を可能とする半導体集積回路等のデバイス基盤技術を確立し、テラヘルツ波帯で動作する増幅器と集積回路デバイス等を開発する。

具体的には、半導体技術によってテラヘルツ波帯の周波数を扱うためのデバイス技術を確立するとともに、真空管技術によって 300GHz 帯の増幅器技術を確立することにより、300GHz 帯の周波数帯域において、データ伝送速度 40～100Gbps 級の通信を実現するための要素技術の開発を行う。

(シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発)

本研究開発では、300GHz 帯の周波数の電波を使用する、無線通信用のシリコン半導体 CMOS トランシーバ技術を確立し、見通し距離 1 m 程度において、40～100Gbps 級のデータ伝送速度の高品質無線通信を実証する。

(MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発)

本研究開発では、300GHz 帯の周波数の電波を使用するデータ伝送速度数十 (20～40) Gbps 級の無線通信において、20dB 以上の利得、1 W 以上の出力を実現する大出力増幅器技術を確立する。本技術を用いてビル間通信を実現することを想定し、少なくとも数 10m 以上の無線通信を実証する。加えて、無線通信装置の設置面積の縮小のために、A4 サイズの増幅器を実現する小型化技術を確立する。

○政府の基本方針 (閣議決定等)、上位計画・全体計画等

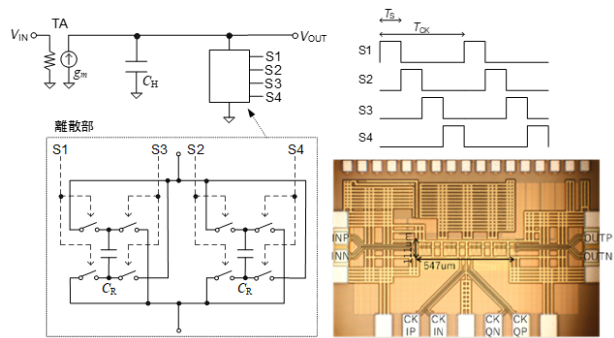
名称 (年月日)	記載内容 (抜粋)
電波有効利用の促進に関する検討会一報告書—(平成 24 年 12 月 25 日)	同報告書において、「電波の有効利用を一層推進する観点から、今後は、センサーネットワーク、M2M、テラヘルツ帯デバイス、無人無線航行関連技術など、新たなニーズに対応した無線技術をタイムリーに実現するとともに、電波利用環境を保護するための技術について開発をより一層推進するため、国際標準化、国際展開も含め、成果の実用化に向けた各段階の取組の充実・強化を図ることが必要である。」とされている。
情報通信審議会 中間答申「イノベーション創出実現に向けた情報通信技術政策の在	同中間答申中、「5 今後取り組むべき技術分野 5.3 基盤技術 ④通信技術・ネットワーク技術」の項目において、「テラヘルツなど、現在未利用の高い周波数の開拓をはじめとする、無線通信技術の高速化、安定化技術」が掲げられている。

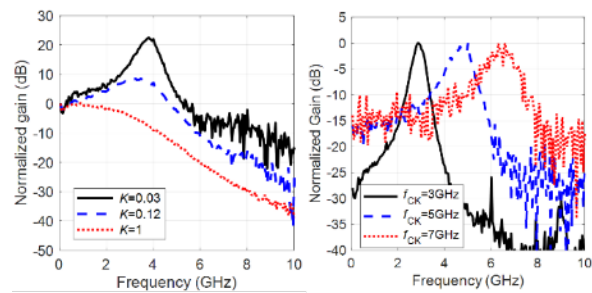
り方」(平成 25 年 1 月 18 日付け諮問第 19 号)	
科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～(平成 25 年 6 月 7 日 閣議決定)・平成 26 年度科学技術重要施策アクションプラン(平成 25 年 7 月 31 日総合科学技術会議決定)	本研究開発は、「テラヘルツ波の利用による超高速・低消費電力無線技術および高効率高周波デバイス技術の研究開発」として平成 26 年度科学技術重要施策アクションプランに特定された。

(3) 目標の達成状況

(シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発)

5 年間の研究開発を通じて、世界的に周波数分配が行われていない 275・370GHz のテラヘルツ帯を用いて毎秒数十ギガビット級の超高速伝送を可能とする無線通信基盤技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標を達成することができた。具体的には、300GHz 帯に対応可能なトランシーバアーキテクチャを提案すると共に、CMOS 回路技術を用いて実現した 300GHz 帯トランシーバ回路を CMOS トランシーバ技術としてモジュール化することで、当初目標としていた 40Gbps の 2 倍に当たる 80Gbps の伝送速度を達成した。また、300GHz 帯における高利得アンテナの開発に成功することで、基本計画書に記載された通信距離の目標 1m も達成した。

技術の種類	目標の達成状況
課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術 (a) CMOS トランシーバ技術	○アナログベースバンド補正技術 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバの小型低消費電力化のために、広帯域アナログイコライザの検討を行った。連続時間系 (CT) の回路では、回路の可変性がなく、CMOS プロセスにおける特性のバラツキの影響も大きくなり量産に適さない。一方、離散時間系 (DT) の回路は特性のバラツキが小さく CMOS 実装に適し、回路の可変性も高いが広帯域動作が難しい。そこで、連続-離散時間ハイブリッド型のアーキテクチャを提案し、広帯域かつ可変性の高いアナログイコライザを実現した。容量比 K とクロック周波数 f_{CK} によって周波数特性を制御でき、ベースバンド帯域幅 7GHz において 10dB 以上のピーキングによる周波数特性の補正を実現した。  図：提案したイコライザの回路図とチップ写真



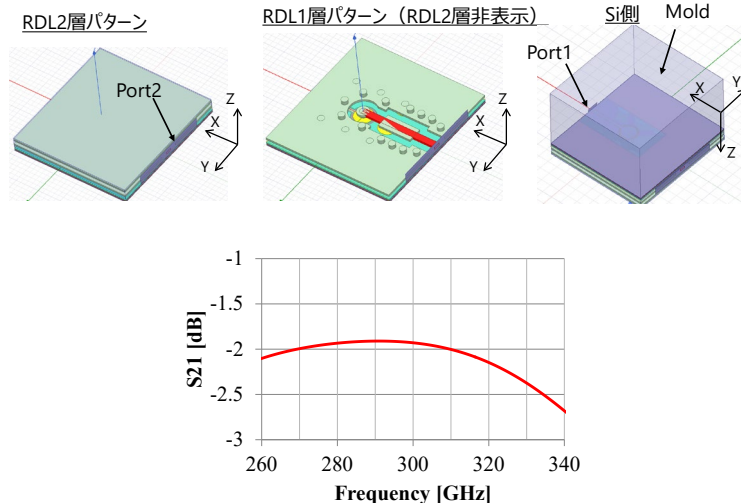
(a)容量比による制御 (b)クロック周波数による制御

図：CT/DT ハイブリッド型イコライザの測定結果

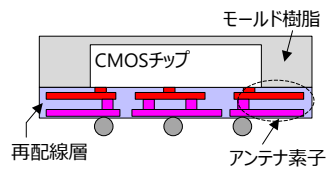
○300GHz 帯モジュール技術

300GHz 帯での実装技術検討として、FOWLP 構造によるパッケージ基板を試作し、300GHz 帯での技術蓄積を行った。これまで、再配線層材料の 300GHz 帯での電気定数（比誘電率、誘電正接）は未抽出であったが、伝送線路、共振パターンなどを再配線層上に設計・試作したパッケージ基板より、300GHz 帯における電気定数を抽出した。抽出した電気定数を用いて、製造可能なデザインルールに沿った構造での CMOS チップ実装部の接続損失として 2dB 以下実現の目途を得た。

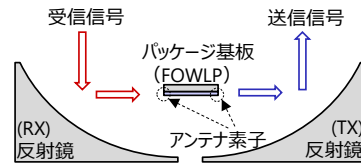
また、FOWLP 構造の再配線層上にアンテナを形成し、反射鏡と組み合わせたオフセットパラボラアンテナにより高利得化を図ったモジュール構成を提案した。この構成により、CMOS チップとアンテナ間の接続をパッケージ内で完結して低損失化が実現でき、さらにオフセットパラボラ構成として送受反射鏡を並べて配置することで、トランシーバ機能を有する無線機が構成可能である。この構成の有効性を検証するため、パッケージ基板およびオフセットパラボラアンテナを試作した。FOWLP 構造では再配線層の層間が非常に薄いため、層間厚が薄くても広帯域化が可能な八木アンテナを採用し、基板水平方向に放射するエンドファイア型の指向性を実現した。このアンテナを 1 次放射器として、反射鏡による高利得化設計を行った。300GHz において、解析でのピーク利得 32.0dBi に対して実測で 31.3dBi の利得が得られ、FOWLP と反射鏡の組み合わせ構成による通信用トランシーバモジュールとしての有効性を検証した。



図：CMOS 実装部接続損失の解析結果



FOWLP構造断面図

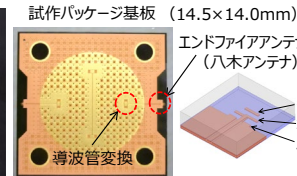
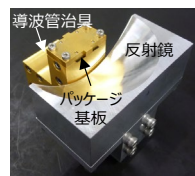


送受反射鏡との組み合わせ

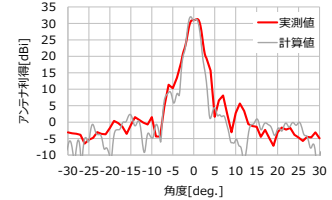
図：トランシーバモジュールの提案構成

(FOWLP+オフセットパラボラアンテナ)

試作アンテナ



指向特性



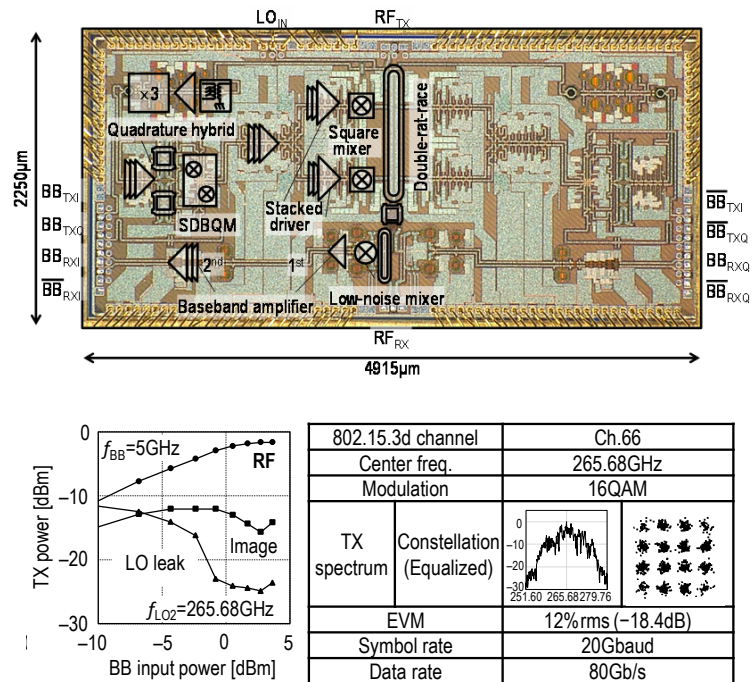
図：試作したオフセットパラボラアンテナの放射特性

課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術
(b) 300GHz CMOS 回路技術

300GHz 帯トランシーバを CMOS 集積回路で実現するためのアーキテクチャの検討を行い、QAM 変調対応可能で最大 80Gb/s の伝送レートを有するワンチップ 300GHz 帯トランシーバを実現した。CMOS 集積回路では 300GHz 帯増幅回路の実現が困難であることから、送信機の電力増幅回路と受信機の高雑音増幅回路を用いないアーキテクチャを採用している。送信機では、スクエアミキサとよぶ 1 入力 1 出力型のミキサを最終段で並列接続することにより、-1.6dBm の最大出力電力を実現した。また、送信機に用いられる回路により高出力の受信機の局部発振信号を生成し、受信機初段ミキサの変換損を軽減している。これらの技術を用いることにより、IEEE Std 802.15.3d で 300GHz 帯通信向けに定められたチャネル 66 を用いて 80Gb/s の通信を実現し、国際学会 ISSCC2019 にて発表を実施した。

Architecture	Block diagram	Technology	QAM Constellation
PA last	Mixer (IF, LO) → Power amp. → RF	InP Gain (dB) vs f (Hz) RF peak at f_{max}	16-QAM
Tripler last	Mixer (BB, LO) → IF amp. → Tripler (x3) → RF	CMOS Gain (dB) vs f (Hz) RF peak at f_{max}	16-QAM
Square Mixer last	Mixer (BB, LO) → IF amp. → Square Mixer → RF	CMOS Gain (dB) vs f (Hz) RF peak at f_{max}	16-QAM

図：テラヘルツ帯トランシーバのアーキテクチャ



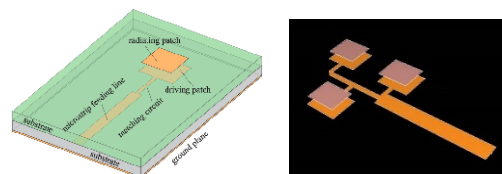
図：試作した 300GHz 帯 CMOS トランシーバ回路の評価結果

300GHz 帯という非常に高い周波数帯に使用可能な誘電体基板を選定した。300GHz 帯の伝送線路で高次伝搬モードが生じないように十分に薄くできることと、その損失（誘電体損と線路の導体損）が十分に小さいことが必須条件である。しかし、この周波数帯での誘電率や損失などの重要な特性は、製造メーカから提供されていない上、信頼できる研究データも皆無に近いため、いくつかの候補基板に伝送線路などを実際に試作し、測定評価より、それぞれの基礎特性を明らかにした。最終的に LCP（液晶ポリマー）基板を選定した。LCP は、安価の上、薄い基板（50 マイクロメートル以下）が製造・提供されている。実測の結果、300GHz 帯での比誘電率が約 3.08、伝送線路において 1dB/mm 以下の損失が確認され、その損失値はアンテナ回路においてある程度容認できることがわかった。

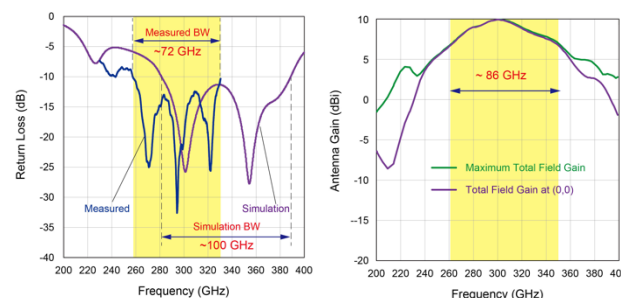
次に、アンテナの広帯域化について、一般的に、300GHz 帯で伝送線路に高次モードが生じないように基板を薄くすると、アンテナの動作帯域が 1% 以下のような狭帯域動作となってしまうが、多層基板構成を導入しスタック構造を用いることにより、アンテナのパッチ間に強い結合を持たせた上、複数の放射素子間に相互作用を生じさせることにより、アンテナの動作帯域を飛躍的に広げた。さらに、アンテナの利得を上げるため、2 パッチスタック構造を用いた広帯域アンテナのアレー化を図った。試作したアンテナの形状と特性の一例を図に示す。70GHz 以上の広帯域かつ 10dBi 以上の最大利得を持つ実用に使用可能な平面小型アンテナを開発することができた。

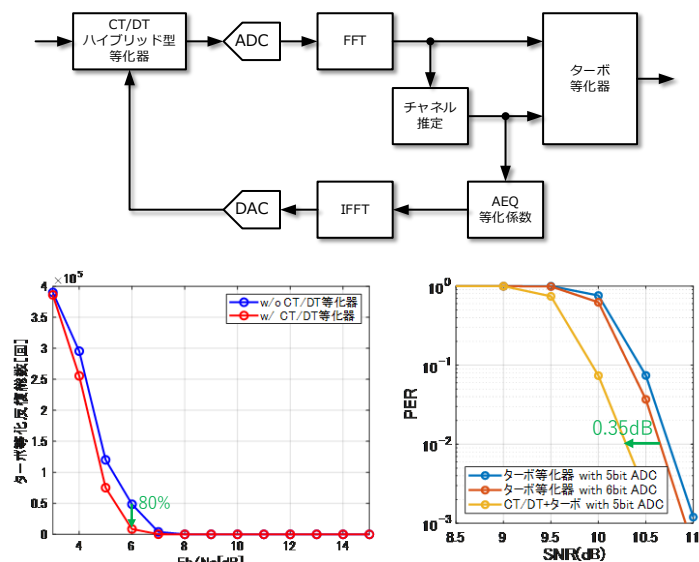
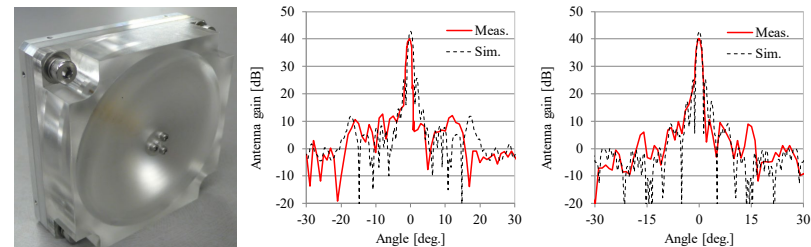
課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術

(c) 300GHz 帯小型・広帯域アンテナ技術



(a) 3 素子構成アレーアンテナ（単体素子は、スタックパッチ構成）



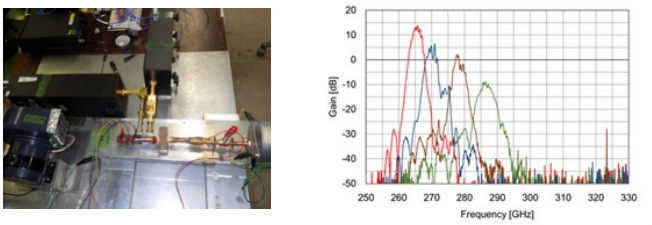
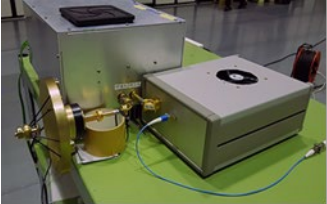
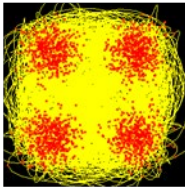
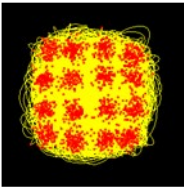
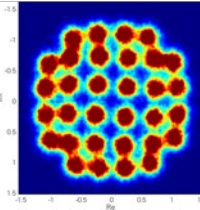
	(b) アンテナの反射特性 (c) アンテナの利得特性 図：広帯域アンテナアレーの反射特性 (シミュレーション及び実測結果)
課題イ 300GHz 帯の周波数の電波を使用する近距離無線通信システムの開発及び通信実験による機能実証 (a) 無線通信システム信号処理技術	○高速デジタル信号処理技術 データセンタのサーバラック筐体内で 100Gbps 級無線伝送を実現するため、筐体内の伝搬特性の解析および LDPC 符号化周波数領域 SC/MMSE ターボ等化器を開発した。ターボ等化器は、反復処理を伴い処理遅延が大きく高速伝送への適用が困難であることから、課題ア(a)で開発したアナログ等化器 (CT/DT ハイブリッド型等化器) との協調等化器構成を採用することでターボ等化器単体時に比べて BPSK@PER=1%の反復回数を約 80%削減した。また、協調等化器構成の採用は、アナログフロントエンドの帯域内偏差による ADC クリップ (非線形歪) を回避し、その結果、16QAM@PER=1%で ADC ビット数を 1 ビット削減しつつターボ等化器の性能を約 0.35dB 改善した。  図：CT/DT ハイブリッド+ターボ協調等化器による性能改善 ○通信実験による機能検証 通信距離の長距離化に向けた高利得アンテナとしてカセグレンアンテナを開発した。主反射鏡の直径を 60mm とし、アンテナ前面にはシクロオレフィンポリマー (COP) を用いたレドームを付け、副反射鏡はレドームに固定する構成とした。設計したカセグレンアンテナの実測で 39dBi の利得を達成した。さらに CMOS トランシーバならびに制御用の電源基板を小さな筐体に収めた RF モジュールを開発し、この RF モジュール及びカセグレンアンテナからなる 300GHz 帯無線通信機を構成した。試作した無線通信機を用いて、動画のリアルタイム伝送の実験を行った。帯域幅 100MHz の 8 つのコンポーネントキャリアからなる OFDM 信号を使用して通信を行い、距離 10m において安定した無線通信を実現し、動画のリアルタイム伝送ができることを実証した。  図：カセグレンアンテナの利得・放射パターン



(MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発)

ミリ波帯小型 TWT (進行波管) の技術をベースに、MEMS (マイクロマシン) 技術を真空中で使用する遅波回路を作製できるよう改良し、300GHz 帯で必要となる FWG 形遅波回路の作製を実施し、小型増幅器を実現できる基礎的な技術を確認するとともに、300GHz 帯 MEMS 真空管を組み込んだ増幅器を開発した。デバイスばらつきにより目標の 1W が達成できなかったが、MEMS 技術の改良により達成できる見通しを得ている。MEMS 真空管増幅器と送信機を接続し、電波暗室内で伝送実験を実施した。1W クラスの出力ができれば、数 10m 以上の距離での無線通信が実現できることを示した。

技術の種類	目標の達成状況
MEMS 真空管技術	ミリ波帯小型 TWT (進行波管) の技術をベースに 1W クラスの出力が可能な MEMS 真空管の設計を実施した。MEMS (マイクロマシン) 技術を真空中で使用する遅波回路を作製できるよう改良し、300GHz 帯で必要となる FWG 形遅波回路の作製を実施した。この FWG 形遅波回路を増幅素子として使って TWT として動作できることを示した。試作した結果、最大+15dB のゲイン (265GHz)、ピークで 0.1W の出力を達成し、小型増幅器を実現できる基礎的な技術を確認した (入力 0.03W 時)。 目標値である 1W クラスを達成できなかった理由はデバイスのばらつきにあり、MEMS 技術の改良、精密組立技術の向上を実施中である。PJ 終了後も部品レベルでの改良を実施し、FWG 形遅波回路については、従来貼り合せにより作製していたが、一体型で作製できる MEMS 技術を開発した。これにより、アライメントのずれによるゲイン低下が相当に抑制できる。窓については、応力緩和できる構造を採用し、真空度を低下させるリークの発生を防止した。2019.5 現在新しい試作品の製造を準備中であり、出力 1W クラスの達成を達成する計画である。

	 MEMS 真空管の評価 増幅特性																						
MEMS 真空管増幅器技術	300GHz 帯 MEMS 真空管を組み込んだ増幅器を開発した。増幅器の平面サイズは 21.8cm×29.7cm とし、ほぼ A4 サイズの可搬型とした。これを実現するため、特に大きな部品である高電圧トランスの低背化技術を開発し、MEMS 真空管を動作させた。 MEMS 真空管の出力が 1W に達しなかったため、増幅器の出力も 1W に達成していないが、MEMS 真空管を動作させるための電圧、電流は MEMS 真空管の性能によらず変わることはないため、1W クラスのデバイスを駆動できる技術は確立した。  入出力用フランジ (WR-3) MEMS 真空管増幅器外観 電力モジュールの主要性能 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2">高電圧電源モジュール 主要性能</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2">電气的性能</td> </tr> <tr> <td>給電部入力電圧</td> <td>20 V～25 V</td> </tr> <tr> <td>電源効率 (最大出力時)</td> <td>76%</td> </tr> <tr> <td colspan="2">機械的性能</td> </tr> <tr> <td>モジュール外形 (本体のみ)</td> <td>高さ 150 mm×幅 218×奥行 297 mm</td> </tr> <tr> <td>質量 (本体のみ)</td> <td>7 kg</td> </tr> <tr> <td colspan="2">監視制御入出力機能</td> </tr> <tr> <td>高圧投入遮断制御入力</td> <td>接点短絡時高圧投入／開放時高圧遮断</td> </tr> <tr> <td>主電源投入監視出力</td> <td>給電時接点短絡</td> </tr> <tr> <td>予熱完了監視出力</td> <td>予熱完了時接点短絡</td> </tr> </tbody> </table>	高電圧電源モジュール 主要性能		電气的性能		給電部入力電圧	20 V～25 V	電源効率 (最大出力時)	76%	機械的性能		モジュール外形 (本体のみ)	高さ 150 mm×幅 218×奥行 297 mm	質量 (本体のみ)	7 kg	監視制御入出力機能		高圧投入遮断制御入力	接点短絡時高圧投入／開放時高圧遮断	主電源投入監視出力	給電時接点短絡	予熱完了監視出力	予熱完了時接点短絡
高電圧電源モジュール 主要性能																							
電气的性能																							
給電部入力電圧	20 V～25 V																						
電源効率 (最大出力時)	76%																						
機械的性能																							
モジュール外形 (本体のみ)	高さ 150 mm×幅 218×奥行 297 mm																						
質量 (本体のみ)	7 kg																						
監視制御入出力機能																							
高圧投入遮断制御入力	接点短絡時高圧投入／開放時高圧遮断																						
主電源投入監視出力	給電時接点短絡																						
予熱完了監視出力	予熱完了時接点短絡																						
実証実験用無線通信システム技術	MEMS 真空管増幅器と送信機を接続し、電波暗室内で伝送実験を実施した。シンボル速度 5 Gbaud の QPSK および 2Gbaud 16QAM にて検証を行ったところ、それぞれおよそ 29%、14% の EVM が得られ (5 m 伝送時)、通信可能な性能であることが示された。また、1 Gbaud 32QAM で線形性検証を行ったところ信号の疎通が確認された。さらに出力を上げれば通信距離を延伸した数十 Gbps の信号伝送が可能であることを確認した。今回 5m の距離で実施したのは、300GHz 帯送受信系との周波数帯のずれ等により距離が制限されたためである。今後デバイスの動作が安定して 1W クラスの出力を 300GHz 前後の周波数帯で出すことができれば、数 10m 以上の距離での無線通信が実現できることを示した。あわせて今後の伝送実験に必要な信号発生、アンテナ技術の検討を行った。     伝送実験風景 5Gbaud QPSK (左)、2Gbaud 16QAM (中)、および 1Gbaud 32QAM (右) の復調コンスタレーション図																						

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 6 月）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を実際に確立しており、また、国際電気通信連合無線通信部門(ITU-R)の WP1A, WP5A, WP5C、及び APG-19、AWG(APT Wireless Group)の各会合へ寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発

主な指標	H26 年度	H27 年度	H28 年度	H29 年度	H30 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	4 件 (4 件)	2 件 (2 件)	8 件 (5 件)	15 件 (12 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 件 (1 件)	11 件 (11 件)	7 件 (7 件)	9 件 (9 件)	7 件 (7 件)	35 件 (35 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
口頭発表数	4 件 (0 件)	11 件 (0 件)	24 件 (7 件)	22 件 (13 件)	18 件 (10 件)	79 件 (30 件)
特許出願数	3 件 (0 件)	16 件 (7 件)	10 件 (4 件)	16 件 (7 件)	10 件 (6 件)	55 件 (24 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	2 件 (2 件)	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	7 件 (7 件)
国際標準提案数	5 件 (5 件)	12 件 (12 件)	19 件 (19 件)	11 件 (11 件)	12 件 (12 件)	59 件 (59 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	1 件 (1 件)	4 件 (4 件)	2 件 (2 件)	12 件 (12 件)
受賞数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (0 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	3 件 (2 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	2 件 (1 件)	2 件 (1 件)	0 件 (0 件)	2 件 (1 件)	6 件 (3 件)
報道掲載数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発

主な指標	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1 件 (1 件)	2 件 (0 件)	3 件 (3 件)	3 件 (2 件)	9 件 (6 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 件 (1 件)	12 件 (12 件)	12 件 (12 件)	4 件 (4 件)	29 件 (29 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	2 件 (2 件)	2 件 (2 件)
口頭発表数	2 件 (0 件)	13 件 (2 件)	10 件 (3 件)	12 件 (4 件)	37 件 (9 件)

特 許 出 願 数	1 件 (0 件)	7 件 (1 件)	3 件 (0 件)	1 件 (0 件)	12 件 (1 件)
特 許 取 得 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国 際 標 準 提 案 数	5 件 (5 件)	12 件 (12 件)	18 件 (18 件)	11 件 (11 件)	46 件 (46 件)
国 際 標 準 獲 得 数	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	1 件 (1 件)	4 件 (4 件)	10 件 (10 件)
受 賞 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 発 表 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報 道 掲 載 数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)

○各観点からの分析

観 点	分 析
必要性	高精細映像伝送などによる Gbps 級の大容量の情報伝送需要の急増により、現在利用が可能な周波数帯では必要な伝送容量を十分に確保できず、周波数が急速にひっ迫することが想定される。また、今後、携帯機器とネットワークとのデータ転送需要の大幅な伸びが予想されており、大容量のデータを瞬時に、かつ簡易に利用できるデータ転送システムの実現が必要となっている。275-370 GHz の超高周波数帯域は、これまで実用化されておらず利用されていないが、潜在的に数十 Gbps 級の大容量の情報を瞬時に伝送することが可能であり、本研究開発により、当該周波数帯域を利用することができるようになることで、急速に増大が予想される情報伝送需要に応えることが可能になる。 また、世界的に周波数割当が行われていない 275GHz-370GHz 帯を利用するための研究開発が世界各国で進められている中、世界に先駆けて研究開発を行い、その技術に適合した周波数利用を提案することで、大きなアドバンテージを得られる状況にある。このような情勢に鑑み、275GHz-370GHz の周波数帯における将来の我が国の電波利用権益の確保及び国際競争力強化のため、早急に当該技術を確立する必要がある。 以上に述べたように、本研究開発は、未開拓周波数の利用を推進する研究開発であり、ハイリスクかつ高度な技術が求められるため民間のみでは実施困難であるとともに、ITU-R の周波数分配や IEEE802 における標準化とも深く関連しているため、国が主導して実施する必要があった。 以上より、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発は、未利用の超高周波数帯である 275 - 370 GHz のテラヘルツ帯を用い、大容量のデータを瞬時に伝送することを可能とするための要素技術の開発を行うものであるが、未利用周波数帯への移行促進のために、これまで利用ができなかった当該周波数帯の利用を可能とするには、その要素技術の開発が必要不可欠であり、他に効率的で質の高い代替手段はない。 また、本研究開発の実施に当たっては、これまで無線通信分野における商用化実績、研究開発実績等の専門知識を有する通信機器ベンダー、通信事業者、大学等のノウハウが活用されており、実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。 予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。以上より、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	本研究開発の実施により、これまでに実用化されていない 300GHz の周波数帯を無線用に利用するための基盤技術が確立され、電波の利用周波数帯域が拡大されるとともに既存業務の高い周波数への移行が促進されたと言える。また、世界的に周波数分配が行われていない 300GHz における無線通信基盤技術を世界に先駆けて確立することによって、無線通信分野における標準化議論の際には先手を打つことが可能であり、我が国の国際競争力を強化できる。よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発によって、新たな周波数帯が利用可能となるとともに、既存の周波数帯からの移行促進

	により既存周波数帯の有効利用にもつながることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。 以上より、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	情報伝送需要の急増による既存の無線通信周波数帯の伝送容量の逼迫や、既存の無線通信周波数帯では実現できない高速大容量無線通信の需要に、早急に対応することが必要であった。 また、本研究開発の対象となる 275GHz - 370GHz 帯の周波数帯は世界各国で能動業務による利用検討が進められており、我が国が世界に先駆けて研究開発を実施し、同周波数帯の利用権益の確保及び国際競争力の強化に資するためには、優先的に研究開発に取り組む必要があった。 以上より、本研究開発には優先性があったと認められる。

5 政策評価の結果（総合評価）

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路によって、300GHz 帯トランシーバを実現し、当初目標としていた 40Gbps の 2 倍に当たる 80Gbps の伝送速度を達成した。300GHz 帯 MEMS 真空管を組み込んだ増幅器を開発し、1W が達成できる見通しを得るとともに、数 10m 以上の距離での無線通信が実現できることを示した。

5 年間の研究開発を通じて、世界的に周波数分配が行われていない 275 - 370GHz のテラヘルツ帯を用いて毎秒数十ギガビット級の超高速伝送を可能とする無線通信基盤技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標を達成することができた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

本研究開発で得られた基盤技術を発展させ、低価格の超小型デバイスや長距離化を実現するための研究開発を進め、より実用性を高めるとともに、高精細映像等の大容量データの高速無線伝送等への応用技術開発への展開を図ることで、産業的に未利用な 300GHz 帯の産業利用を推進していく。引き続き ITU-R 等の国際標準化活動に積極的に貢献し、300GHz 帯の利活用における国際的な合意形成を図っていく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）における終了評価において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・所定の成果目標が達成されている。特に 300GHz の CMOS 高周波アナログ集積回路技術は世界トップレベルであり、今後の周波数開拓を支える基盤技術を確立しつつあるのは高く評価できる。特許も多数出願されており、高く評価できる。
- ・3 機関連携で実証実験を行い性能確認するなど、実施体制は妥当である。また、予算は効率的に使用されたと判断する。
- ・ITU-R、APT WRC-15 準備会合 APG15-5、WRC-19、IEEE802 各会合において国際標準化活動を推進して成果を得ている。また、本研究開発の成果により無線設備規則に 300GHz 帯に対応する無線設備の記載が 2024 年度に追記されることが予定されており、実用化が期待される。

7 評価に使用した資料等

○電波有効利用の促進に関する検討会—報告書—（平成 24 年 12 月 25 日）

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02kiban09_03000173.html

○情報通信審議会 中間答申「イノベーション創出実現に向けた情報通信技術政策の在り方」（平成 25 年 1 月 18 日付け諮問第 19 号）

http://www.soumu.go.jp/main_content/000299834.pdf

○科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～（平成 25 年 6 月 7 日 閣議決定）

<https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2013/honbun.pdf>

- 平成 26 年度科学技術重要施策アクションプラン（平成 25 年 7 月 31 日総合科学技術会議決定）
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kyogikai/life/4kai/siryo2.pdf>
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 ＜電波利用料＞
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

平成 31 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：情報流通行政局放送技術課

評価年月：令和元年8月

1 政策（研究開発名称）

地上テレビジョン放送の高度化技術に関する研究開発

2 研究開発の概要等

(1) 研究開発の概要

・実施期間

平成28年度～平成30年度（3か年）

· 实施主体

民間企業、大学、特殊法人

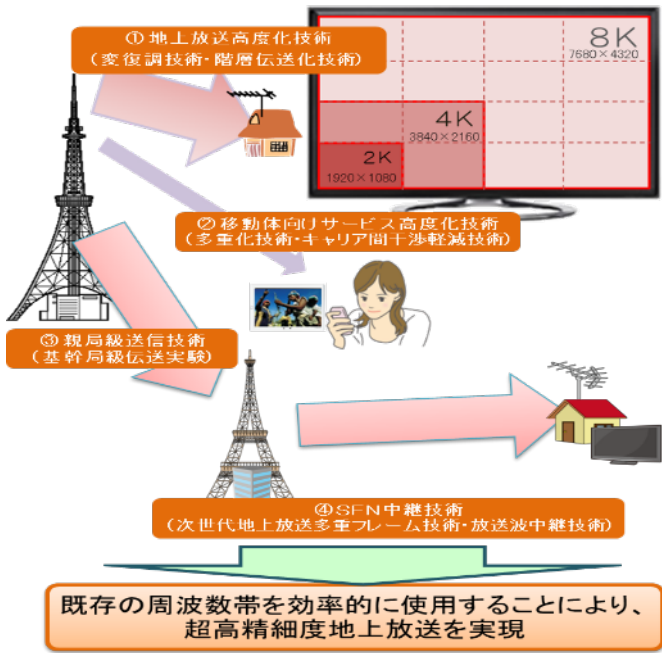
・ 総事業費

1,805 百万円

平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
345 百万円	827 百万円	633 百万円	1,805 百万円

· 概 要

現在の地上テレビジョン放送の特徴を継承しつつ超高精細度地上放送等のサービスを実現するため、移動体受信及び固定受信の双方の圧縮伝送効率の向上に向けた地上放送の高度化方式の研究開発等により、伝送容量拡大及び伝送効率向上技術等の確立を図るとともに、高度化方式において同一の周波数の繰り返し利用を実現するための中継技術（SFN中継技術）を確立し、より一層の電波の有効利用を図るもの。



技術の種類	技術の概要
地上放送高度化方式の研究開発	現行の地上テレビジョン放送で使用している 6MHz のチャンネル帯域幅を維持しながら、移動受信向け、固定受信向けそれぞれの伝送容量を拡大し、現在のセグメント数を越えるセグメント数の構造を有し、さらに大きな FFT (Fast Fourier Transform: 高速フーリエ変換) サイズ (サンプリング点数) に対応する階層伝送方式を、地上放送高度化方式として開発した。 地上放送高度化方式の開発において、現状より少ないガードバンドでも伝送できることが確認できた。占有信号帯域幅が現行と異なる伝送方式を採用する場合、引き続き同一周波数帯で利用される現行の地上テレビジョン放送受信機へ混信を与えないことが必須であることから、現行の地上テレビジョン放送受信機に対する混信保護比を検証した。 地上放送高度化方式として、超多値変調や不均一コンスタレーション等の最新の変復調技術を利用することにより伝送容量拡大による受信特性の劣化を補償することができる技術を開発した。また、地上放送高度化方式のセグメント構造やフレーム構造に対応した多重化方式を開発した。 映像符号化の前処理として、ウェーブレットシュリンクエージ技術 (ウェーブレット変換を用いて映像を周波数分解し、各周波数帯域内で符号化劣化に結びつきやすい成分を、縮退関数を用いて抑圧する技術) を用いて帯域制限・雑音除去を行う技術と、入力映像に応じてそのフィルタパラメータを制御する技術を開発した。入力映像をウェーブレット分解した対角最高周波数帯域内における全要素のパワーの標準偏差が大きいほど符号化が困難であるとして、帯域制限・雑音除去量を大きくするようにフィルタパラメータを制御することで、符号化劣化が抑制できることを確認した。 図：地上放送高度化方式の信号構造と信号点配置例
移動体向けサービス高度化技術の研究開発	伝送容量拡大のためには FFT サイズの拡大が有効であるが、一般的に大きなサイズの FFT は移動受信の伝送特性を劣化させることから、伝送容量の拡大と伝送耐性の確保を両立する受信改善技術及び多重化技術を開発した。 なお最終年度には、大規模実験局を用いた都市部の移動受信実験を実施し、受信改善技術の効果を評価するとともに、車両における移動実験を行い、FFT サイズ拡大によるキャリア間干渉の影響を調査し検証した。

	図：部分受信帯域の構成と小型試作受信機の構成例
大規模局向け送信技術の研究開発	地上放送高度化方式の実験電波を発射し、上記地上放送高度化方式の研究開発において開発した復調装置を用いて固定受信実験及び移動受信実験を実施した。 固定受信実験においては、受信電力、周波数特性、遅延プロファイル、所要受信電力などを 26 地点で測定した。ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial:地上デジタルテレビジョン放送の日本方式) と同程度の耐ガウス雑音特性(熱雑音特性)となるパラメータを用いて測定を実施したところ、全受信点で受信可能であった。また、水平偏波と垂直偏波の電界強度差を評価するとともに、SISO (Single-Input Single-Output:送信機及び受信機間で単一のアンテナを使用する方式) と MIMO (Multi-Input Multi-Output:送信機と受信機間で複数のアンテナを使用する方式) の伝送特性を比較した。さらに固定受信実験において取得した伝搬路の周波数特性データを踏まえ室内実験を実施したところ、地上放送高度化方式のマルチパスによる劣化は ISDB-T のときの劣化よりも小さくなることを確認した。 移動受信実験においては、上記移動体向けサービス高度化技術の研究開発で検討したパラメータを用いて移動受信特性を評価した。速度による特性差、進行方向による特性差、FFT サイズによる特性差、時間インターリーブ長による特性差を評価し、現行の地上テレビジョン放送の FFT サイズ (8K) より大きい場合にも、ダイバーシティ受信を用いて、FFT サイズと時間インターリーブを適切に選択することで高度化方式が自動車での高速移動にも対応できることを確認した。 図：フィールド検証実験項目
S F N方式による中継技術に関する研究開発	上記地上放送高度化方式の研究開発で開発した伝送方式をベースとし、SFN 方式が成立するための再多重化する仕組み及び多重フレームを IP パケット化して変調装置に配信する仕組みを開発した。 名古屋地区に親局と中継局の実験試験局を設置して SFN 環境を構築し、IP 回線を用いた配信の同期技術を確認した。実験試験局から電波を発射して、SFN 環境における固定受信および移動受信の実験を実施し、高度化方式の方が現行の ISDB-T よりも信号の劣化が小さいことを確認した。 図：SFN を用いた場合の送信システム例

・スケジュール

	平成28年度	平成29年度	平成30年度
ア)地上放送 高度化方式の研究開発	高度化方式対応変復調装置の設計・試作 → 室内実験による方式検証・混信保護比検討 → 符号化装置・多重化装置の設計	高度化方式対応変復調装置の改良 → 符号化装置・多重化装置の試作	高度化方式対応変復調装置の改良 → 符号化装置・多重化装置の評価
イ)移動体向け サービス高度化 技術の研究開発	移動体向け受信改善技術の開発	移動体向け受信改善技術の改良	高速移動実験による特性評価
ウ)大規模局向け 送信技術の開発	実験試験局用チャンネルの選定	実験局送信設備の試作	実験局整備 大規模野外実験による特性評価 高度化方式による移動受信、 固定受信特性を確認
エ)SFN方式に よる中継技術に 関する研究開発		SFN対応再多重化装置の設計・試作 → 実験局送信諸元の検討・整備	実験局の整備 実証試験による特性評価 ・送信ネットワークの同期化技術 の機能を検証、 ・SFN時の受信エリアの検証

(2) 達成目標

逼迫している地上テレビジョン放送用周波数帯で、超高精細度地上テレビジョン放送等を実現するためには、伝送容量や伝送効率を高め、固定受信と移動体向けの柔軟なサービスが1つのチャンネルで提供できる伝送方式及び映像符号化方式等の研究開発が必要となる。

本研究開発は、超多値変調、誤り訂正符号及び映像圧縮における雑音除去や帯域制限等の高度化を図る地上放送の高度化方式の研究開発等により、伝送容量の拡大や伝送効率の向上を実現し、現行の地上テレビジョン放送の特徴を継承しながら現行の約4倍程度の圧縮伝送効率を可能とする技術を確認する。

また、親局及び中継局により放送エリアの確保・拡大を図るため、高度化方式において同一の周波数の繰り返し利用を実現するため中継技術（SFN中継技術）を確認し、周波数の有効利用の一層の向上に資する。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT政策） 政策13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
4K・8Kロードマップに関するフォローアップ会合 第二次中間報告（平成27年7月30日）	5-(6)地上放送に関する取り組み 『地上放送における4K・8Kの実現には、技術やコスト等の解決すべき課題は多い。このため、より効率的な伝送を実現すべく、速やかに総合的な研究開発の取り組みを進めて、その上で、技術的な可能性を検証するために、都市部における地上波によるパブリックビューイング向けなどの伝送実験等を検討する。』

世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 27 年 6 月 30 日）	Ⅲ 目指すべき社会・姿を実現するための取組 3. IT を利活用した安全・安心・豊かさが実感できる社会 （6）次世代放送・通信サービスの実現による映像産業分野の新事業創出、国際競争力の強化 「4K 放送については 2015 年、8K 放送については 2018 年の実用放送開始を目指す。」及び「放送に関わる事業者が目標やアクションプランを共有・実行するための体制整備や、実用化に必要な技術面・制度面のルール策定・公開、国際標準化及び技術検証などの環境整備を行い、コンテンツやアプリケーションの提供を行う意欲を持つ者なら誰でも参加できる、新しいオープンなメディア空間を創造し、2020 年には、4K・8K 放送が普及し、多くの視聴者が市販のテレビで 4K・8K 番組やスマートテレビに対応したサービスを享受できる環境を実現する。」
電波政策ビジョン懇談会最終報告書（平成 26 年 12 月 26 日）	2-③ 超高精細度テレビジョン放送等の実現 『超高精細度テレビジョン放送のための素材伝送の進展や、東京オリンピック・パラリンピック等に向けた対応状況等も踏まえながら圧縮伝送技術を開発するなど、周波数の有効利用を図ることが必要である。』
4K・8K ロードマップに関するフォローアップ会合 中間報告（平成 26 年 9 月 9 日）	8 今後の検討課題 （5）その他 「4K・8K も含め地上放送の高度化に係る技術的な可能性を検証するために、適切な機会をとらえて、都市部における地上波による伝送実験等を検討する」

（3）目標の達成状況

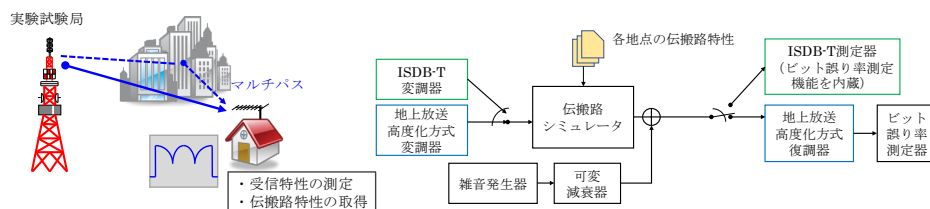
本研究開発においては、以下の技術を確立し、地上テレビジョン放送用周波数帯で超高精細度地上テレビジョン放送等を実現するために必要な、伝送容量拡大技術や伝送効率向上技術等を確立し、周波数の有効利用の一層の向上に寄与した。このことから、所期の目標を達成したといえる。

技術の種類	目標の達成状況
地上放送高度化方式の研究開発	符号化した際にブロック歪などの画質劣化が発生しやすい映像（以下、「クリティカルな映像」という）が入力された場合の符号化画質劣化を抑制するために、HEVC/H.265 エンコーダの前処理としてウェーブレットシュリンケージ技術を利用して 8K 解像度の超高精細度テレビジョン映像の雑音除去・帯域制限を行う技術を検討して、入力映像に応じてフィルタパラメータを制御する技術を開発した。開発した技術を映像処理装置に実装し、符号化画質劣化抑制効果を確認した。 これらの装置を用いて、8K 解像度の超高精細度テレビジョン映像を約 56Mbps に符号化することで、クリティカルな映像が入力された場合でも映像の破綻が生じないことを示した。 1024QAM や 4096QAM などの超多値変調技術の開発、FFT サイズ・信号帯域幅の拡大、符号長 69,120 ビットの LDPC (Low Density Parity Check) 符号の新規設計、不均一コンスタレーションの新規設計等により、高い伝送効率をもつ地上放送高度化方式を確立し、変復調装置を試作して高い伝送効率（約 56Mbps）が実現可能であることを確認した。 現行の地上テレビジョン放送の映像ビットレート約 14Mbps に比べ、本研究開発では 8K 映像を用いて現行の 4 倍の約 56Mbps の伝送を確認した。よって、4 倍の圧縮伝送効率を実現するという目標を達成できた。

	表：ISDB-T と高度化方式の比較																																																		
	<table><tr><td></td><td>ISDB-T</td><td colspan="2">提案方式</td></tr><tr><td>帯域幅</td><td>6MHz</td><td colspan="2">6MHz</td></tr><tr><td>セグメント分割数</td><td>14</td><td colspan="2">36</td></tr><tr><td>セグメント数</td><td>13</td><td>33+調整帯域 (互換モード)</td><td>35 (ノーマルモード)</td></tr><tr><td>占有帯域幅</td><td>5.57MHz</td><td>5.57MHz</td><td>5.83MHz</td></tr><tr><td>部分受信帯域幅</td><td>1 セグメント</td><td colspan="2">9 セグメント (A 階層のセグメント数:1〜9)</td></tr><tr><td>階層数</td><td>最大 3 階層</td><td colspan="2">最大 3 階層</td></tr><tr><td>モード(FFT サイズ)</td><td>1 (2048) , 2 (4096) , 3 (8192)</td><td colspan="2">3 (8192) , 4 (16384) , 5 (32768)</td></tr><tr><td>FFT クロック</td><td>8.12698…MHz</td><td colspan="2">6.32098…MHz</td></tr><tr><td>GI 比</td><td>1/4, 1/8, 1/16, 1/32</td><td colspan="2">1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128 797/FFT サイズ</td></tr></table>				ISDB-T	提案方式		帯域幅	6MHz	6MHz		セグメント分割数	14	36		セグメント数	13	33+調整帯域 (互換モード)	35 (ノーマルモード)	占有帯域幅	5.57MHz	5.57MHz	5.83MHz	部分受信帯域幅	1 セグメント	9 セグメント (A 階層のセグメント数:1〜9)		階層数	最大 3 階層	最大 3 階層		モード(FFT サイズ)	1 (2048) , 2 (4096) , 3 (8192)	3 (8192) , 4 (16384) , 5 (32768)		FFT クロック	8.12698…MHz	6.32098…MHz		GI 比	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128 797/FFT サイズ									
	ISDB-T	提案方式																																																	
帯域幅	6MHz	6MHz																																																	
セグメント分割数	14	36																																																	
セグメント数	13	33+調整帯域 (互換モード)	35 (ノーマルモード)																																																
占有帯域幅	5.57MHz	5.57MHz	5.83MHz																																																
部分受信帯域幅	1 セグメント	9 セグメント (A 階層のセグメント数:1〜9)																																																	
階層数	最大 3 階層	最大 3 階層																																																	
モード(FFT サイズ)	1 (2048) , 2 (4096) , 3 (8192)	3 (8192) , 4 (16384) , 5 (32768)																																																	
FFT クロック	8.12698…MHz	6.32098…MHz																																																	
GI 比	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128 797/FFT サイズ																																																	
移動体向けサービス高度化技術の研究開発	高度化方式に基づくシミュレータを作成し、現実的なノイズ推定と伝送路推定アルゴリズムを用いた移動特性を評価した。TU6 (Typical Urban 6 paths) チャネルモデル (6 波から構成される典型的な都市型マルチパス伝搬環境) において、FFT サイズ、変調方式、符号化率、時間インターリーブの深さ、部分受信のセグメント数、ダイバーシティ受信の受信アンテナ本数の移動受信性能を検討した。16KFFT、16QAM(不均一)、符号化率 7/16、時間インターリーブ I=1、9 セグメント、受信アンテナ本数 1 本において、伝送耐性の確保(最大ドップラー周波数が 95Hz 以上)と伝送容量拡大(伝送容量が 2Mbps 以上)の結果が得られた。また、ダイバーシティ受信の受信アンテナ本数 (1 本、2 本、4 本) による最大ドップラー周波数と所要 CN 比の改善効果を確認できた。 移動体向けサービスの高度化技術の開発で検討した部分受信部の移動受信特性を、第三京浜道路で取得したデータを用いて評価した。エラー発生率は、FFT サイズ (32K、16K) とダイバーシティ受信の受信アンテナ本数 (1 本、2 本、4 本) による改善効果が大きく、目安速度 (80km/h、60km/h) と時間インターリーブ (I=0、1、2、3) において改善する傾向が示された。高度化方式の FFT サイズでもダイバーシティ受信を用いることにより移動受信が可能であることを確認できた。したがって、実験試験局を用いた移動受信実験により、伝送容量の拡大と伝送耐性の確保を両立する FFT サイズの検証や、受信改善技術の効果を評価するという目標を達成できた。 ■受信アンテナ1本 ■受信アンテナ2本 ■受信アンテナ4本 <table><thead><tr><th colspan="4">80km/h</th><th colspan="4">60km/h</th></tr><tr><th colspan="2">FFT16K</th><th colspan="2">FFT32K</th><th colspan="2">FFT16K</th><th colspan="2">FFT32K</th></tr></thead><tbody><tr><td>TiL0</td><td>0.28</td><td>0.15</td><td>0.52</td><td>0.18</td><td>0.20</td><td>0.40</td><td>0.15</td></tr><tr><td>TiL1</td><td>0.22</td><td>0.08</td><td>0.45</td><td>0.12</td><td>0.35</td><td>0.35</td><td>0.08</td></tr><tr><td>TiL2</td><td>0.18</td><td>0.05</td><td>0.42</td><td>0.08</td><td>0.35</td><td>0.35</td><td>0.05</td></tr><tr><td>TiL3</td><td>0.25</td><td>0.12</td><td>0.38</td><td>0.15</td><td>0.35</td><td>0.35</td><td>0.12</td></tr></tbody></table>			80km/h				60km/h				FFT16K		FFT32K		FFT16K		FFT32K		TiL0	0.28	0.15	0.52	0.18	0.20	0.40	0.15	TiL1	0.22	0.08	0.45	0.12	0.35	0.35	0.08	TiL2	0.18	0.05	0.42	0.08	0.35	0.35	0.05	TiL3	0.25	0.12	0.38	0.15	0.35	0.35	0.12
80km/h				60km/h																																															
FFT16K		FFT32K		FFT16K		FFT32K																																													
TiL0	0.28	0.15	0.52	0.18	0.20	0.40	0.15																																												
TiL1	0.22	0.08	0.45	0.12	0.35	0.35	0.08																																												
TiL2	0.18	0.05	0.42	0.08	0.35	0.35	0.05																																												
TiL3	0.25	0.12	0.38	0.15	0.35	0.35	0.12																																												
大規模局向け送信技術の研究開発	地上放送高度化方式の帯域幅は、現行の地上テレビジョン放送の伝送方式である ISDB-T の 5.57MHz から 5.83MHz に拡張している。大規模実験試験局の送信諸元の実現性を検討するため、信号帯域幅 5.83MHz に対応した送信装置用の出力フィルタを試作し、得られた周波数特性による伝送特性をシミュレーションにより確認した。フィルタ無しの場合と比較し、所要 CN 比の劣化が 0.1dB 以下であった。 整備した実験試験局の送信装置を使用し、地上テレビジョン放送波の受信へ及ぼす干渉の影響を調査した。送信出力の帯域外輻射成分は設計した帯域外輻射成分の許容範囲に入っており、上隣接チャンネル干渉、下隣接チャンネル干渉、同一チャンネル干渉とも、すべての受信機で混信保護比を満足していた。 マルチパスを含む実際の受信環境で地上放送高度化方式を評価するために、実験試験局のフリンジを含むエリア内の 26 地点で伝搬路特性と受信特性を測定した。測定を実施した 26 地点全てにおいて、ISDB-T と同程度の耐ガウス雑音特性（熱雑音特性）を確認でき																																																		

た。また、所要受信電力の最小値は全てのパラメータについて室内実験結果と同等であり、野外実験においても地上放送高度化方式の伝送路符号化技術の特性が得られることを確認できた。さらに、ISDB-T と地上放送高度化方式のマルチパスに対する耐性を比較するために、マルチパスが混入した際に ISDB-T および地上放送高度化方式の所要 CN 比がどの程度劣化するのかを評価した。図のように、各地点で取得した伝搬路特性を室内実験で再現し、ISDB-T と地上放送高度化方式の所要 CN 比がそれぞれのどの程度劣化するのかを測定した。ISDB-T の所要 CN 比は最大 0.9dB 劣化するのに対し、地上放送高度化方式の所要 CN 比は最大 0.6dB の劣化となり、地上放送高度化方式のマルチパスに対する耐性が ISDB-T と比較して向上していることを確認できた。

以上により、干渉の許容値の検証結果から実験試験局の送信諸元を決め、東京地区（芝）に置局を行い、地上放送高度化方式による移動受信・固定受信特性の確認や受信エリアの検証を行い、都市部における受信特性を評価し、地上テレビジョン放送の高度化技術の確立に寄与した。



図：野外実験による特性測定

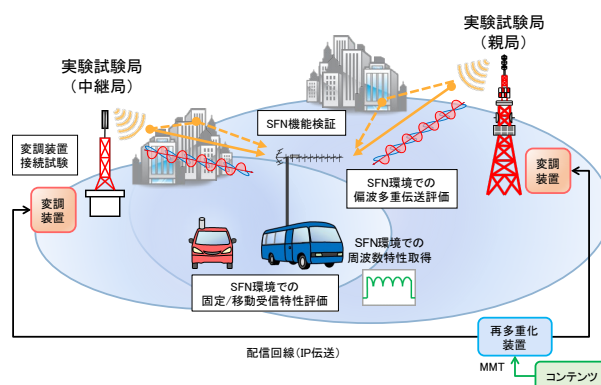
図：室内実験によるマルチパス耐性の比較

SFN を検証するための実験局として、名古屋地区の東山と鍋田にそれぞれ実験試験局を設置し実験を行った。両局間のプログラム伝送回線を、従来の無線ではなく IP 回線で構築した。再多重化装置から変調装置に XMI (eXtensible Modulator Interface) 多重フレームを伝送できること、IP 回線を用いて複数の変調装置に同一の信号を送信できることなど、SFN を実現可能とする機能を確認した。特に、送信タイミングの調整に従来の方式である 1PPS (Pulse Per Second) を用いた方式に加え、IP を用いた精密同期技術の PTP (Precision Time Protocol) を用いた方式で実験を行った。PTP を用いた場合も 1PPS を用いた場合と同様に変調器において送信タイミングが調整可能であり、計算通りに SFN を構築できることを確認した。

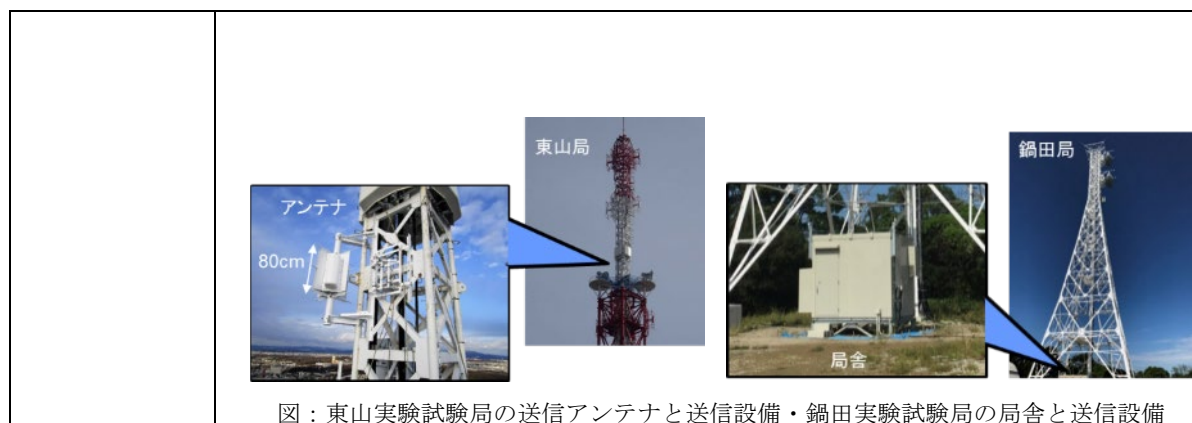
東山実験試験局を希望局、鍋田実験試験局を SFN 局として、希望波と SFN 波の到来角度が異なる 6 つの測定点において SFN 環境下における伝送特性を測定した。希望局と SFN 局の受信電力比(DUR)と所要受信電力の関係、希望波と SFN 波の到達時間差 (τ) と所要受信電力の関係を評価した結果、全ての測定点で SFN の成立を確認した。

以上より、XMI 多重フレーム構造を用いた送信ネットワーク同期化技術の検討・開発を行い、検討結果を反映した実験試験局を置局し、地上放送高度化方式による SFN 時の移動受信・固定受信特性の確認や受信エリアの検証を行うという目標を達成できた。

SFN 方式による中継技術に関する研究開発



図：SFN 方式による中継技術に関する実験の概要



図：東山実験試験局の送信アンテナと送信設備・鍋田実験試験局の局舎と送信設備

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年8月28日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績については、下表に示すとおり。

特に、国際標準化について、大規模局向け送信技術の研究開発およびSFN方式による中継技術に関する研究開発の野外実験に関しては、ITU-R SG6 WP6A 会合において、各国のUHDTVの地上波野外伝送実験に関するレポート（ITU-R BT.2343）へ情報を追加する改訂が承認・発行されるなど当初目標を達成できており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成 28 年度	平成 29 年度	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)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 件 (1 件)	4 件 (4 件)	4 件 (4 件)	9 件 (9 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	3 件 (0 件)	3 件 (0 件)	6 件 (0 件)
口頭発表数	13 件 (2 件)	20 件 (3 件)	36 件 (4 件)	69 件 (9 件)
特許出願数	32 件 (0 件)	66 件 (39 件)	25 件 (24 件)	123 件 (63 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	4 件 (4 件)	4 件 (4 件)
国際標準提案数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)
受賞数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
報道掲載数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	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（特許協力条約）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。（何カ国への出願でも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。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。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。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	通信・放送サービスを取り巻く環境が大きく変化している中、平成30年12月の新4K8K衛星放送開始や2020年オリンピック・パラリンピック東京大会開催等、新たな放送サービスに対するニーズが高まっており、世界最先端IT国家創造宣言（平成27年6月30日決定）においても、次世代放送・通信サービスの実現による映像産業分野の新事業創出、国際競争力の強化として、『4K放送については2015年、8K放送については2018年の実用放送開始を目指す。』や『2020年には、4K・8K放送が普及し、多くの視聴者が市販のテレビで4K・8K番組やスマートテレビに対応したサービスを享受できる環境を実現する。』ことが求められている。 超高精細度映像の放送は、現行のハイビジョン放送を遥かに上回る伝送容量が必要であるため、地上テレビジョン放送において伝送するためには、高度な映像圧縮伝送による伝送路帯域の大幅削減や、地上放送用周波数帯（UHF帯）においてさらに周波数利用効率のよい伝送方式の開発が求められており、これらの技術開発によって、現行の地上テレビジョン放送の1チャンネルの帯域幅（6MHz）で超高精細度映像を用いた新たな放送サービスを実現するための伝送基盤技術を早期に確立し、より一層の電波の有効利用を行う必要があったものである。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発の実施に当たっては、放送システム（映像符号化技術、伝送容量拡大技術や伝送効率向上技術等）に関する専門的知識や研究開発実績を有する受託者が蓄積したノウハウを積極的に活用することにより、効率的に研究開発が進められた他、外部の有識者から構成される本研究開発の運営委員会や、外部有識者による継続評価会において、研究開発の進捗状況の確認や今後の進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。 予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了段階毎に、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	本研究開発の実施により、伝送容量を拡大する技術として、超多値変調技術、FFTサイズ・信号帯域幅の拡大、誤り訂正符号や不均一コンスタレーションの設計等を確立した他、高圧縮・伝送効率向上技術として、ウェーブレットシュリンケージ技術を利用した符号化画質劣化による映像の破綻を抑制するための雑音除去・帯域制限を行う技術、周波数の有効利用技術として、SFN方式による再多重化装置と変調装置の開発と中継技術の確立等により、伝送容量の拡大とともに超高精細度映像の伝送を可能とし、周波数の有効利用に資することができた。 さらに、本研究開発で開発した伝送容量拡大技術やSFN方式による中継技術等を使用する高度化方式については、平成31年度から実施している技術試験事務の放送用周波数を有効活用する技術方策に関する調査検討において、具体的なパラメータの検討を行っており、将来の実用化に向けて社会的・経済的効果が見込まれている。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。

公平性	本研究開発の成果は地上放送用周波数の有効利用の一層の向上に寄与するものであることから広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。また、成果は平成 31 年度から実施している技術試験事務の放送用周波数を有効活用する技術方策に関する調査検討において、確立した技術を実用化する際の具体的なパラメータの検討が行われており、今後の新たな放送サービスとしての展開に繋がるものとして広く国民の利益に適うものと考えられる。 なお、本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により、審査・選定を行ったものである。 よって本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	新 4K 8K 衛星放送の開始や 2020 年オリンピック・パラリンピック東京大会開催等を契機として、4K・8K の超高精細度放送に対する国民のニーズが高まっており、かつ、諸外国においても、例えば韓国では、地上波による 4K 放送が開始され、また、米国では次世代放送の技術標準である ATSC3.0 の利用・推進が進められるなど、放送の高画質化に向けた取組が世界的に進展している状況であり、我が国においても超高精細度映像等を行う次世代放送サービスの実現に向けて、早期に研究開発に取り組む必要があったところ。 世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 27 年 6 月 30 日決定）においても、次世代放送・通信サービスの実現による映像産業分野の新事業創出、国際競争力の強化として、『4K 放送については 2015 年、8K 放送については 2018 年の実用放送開始を目指す。』や『2020 年には、4K・8K 放送が普及し、多くの視聴者が市販のテレビで 4K・8K 番組やスマートテレビに対応したサービスを楽しむ環境を実現する。』と記載されており、国策として次世代放送サービスの実現に向けた技術の研究開発を優先的に着手する必要があったもの。 よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

5 政策評価の結果（総合評価）

本研究開発では、現在の地上テレビジョン放送の特徴を継承しつつ超高精細度地上放送等のサービスを実現するため、移動体受信及び固定受信の双方の圧縮伝送効率の向上に向けた地上放送の高度化方式の研究開発等を実施し、伝送容量拡大及び伝送効率向上技術等を確立するとともに、高度化方式において同一の周波数の繰り返し利用を実現するための中継技術（SFN 中継技術）を確立し、より一層の電波の有効利用に資することができた。

特に、本研究開発で開発した伝送容量拡大技術や SFN 方式による中継技術等を使用する高度化方式等は、平成 31 年度（令和元年度）から実施する放送用周波数を有効活用する技術方策に関する調査検討（周波数ひっ迫対策のための技術試験事務）において、具体的なパラメータの検討を行っており、将来の実用化に向けての大きな寄与が見込まれている。

また、多くの論文の発表、特許の出願、国際標準化に係る活動なども着実に実施され、当初目標を十分に達成しており、本研究開発の有効性、効率性等が認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

地上放送に関する取り組みとして、4K・8K ロードマップに関するフォローアップ会合第二次中間報告（平成 27 年 7 月 総務省）において、『地上放送における 4K・8K の実現には技術やコスト等の解決すべき課題は多い。このため、より効率的な伝送を実現するべく、速やかに総合的な研究開発の取組を進めて、その上で、技術的な可能性を検証するために、都市部における地上波によるパブリックビューイング向けなどの伝送実験等を検討することが考えられる。』と提言されたことを踏まえ、本研究開発の成果も活用しながら、引き続き技術検討の取組を進めていく必要がある。

具体的には、ひっ迫している地上テレビジョン放送用周波数帯で超高精細度地上テレビジョン放送等の新たな放送サービスを実現するため、本研究開発の成果も活用しながら、平成 31 年度（令和元年度）以降も引き続き技術検討に取り組んでいく。

（平成 31 年度（令和元年度）から、放送用周波数を有効活用する技術方策に関する調査検討（周波数ひっ迫対策のための技術試験事務）を実施中。）

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・目標の達成度については、計画に沿って目標を達成している。標準化への取組なども十分な成果を挙げている。
- ・実施体制については、受託者だけでなく、有識者による運営委員会も構成されており妥当である。
- ・経済的効率性については、得られた成果は予算に対して適切なものと考えられる。
- ・総合的に見ても大変有益であったと考えられる。

7 評価に使用した資料等

- 世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 27 年 6 月 30 日閣議決定）
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20150630/siryou1.pdf>
- 4K・8K ロードマップに関するフォローアップ会合 第二次中間報告（平成 27 年 7 月 30 日）
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ryutsu11_02000058.html
- 電波政策ビジョン懇談会最終報告書（平成 26 年 12 月 26 日）
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000151.html
- 4K・8K ロードマップに関するフォローアップ会合 中間報告（平成 26 年 9 月 9 日）
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01ryutsu11_02000039.html
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 ＜電波利用料＞
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

平成 31 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局電波部移動通信課新世代移動通信システム推進室

評価年月：令和元年 8 月

1 政策（研究開発名称）

第 5 世代移動通信システム実現に向けた研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

平成 27 年度～平成 30 年度（4 か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人等

・総事業費

8,494 百万円

平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
1,827 百万円	2,327 百万円	2,186 百万円	2,154 百万円	8,494 百万円

・概 要

周波数の有効利用を促進する第 5 世代移動通信システム（以下「5G」という。）の実現に向けて、以下の要求条件を達成すべく、既存技術を発展させる研究開発（第 4 世代移動通信システム（以下「4G」という。）までの技術の高度化）、無線通信技術を革新する研究開発（新しい無線技術の開発等）を実施する。具体的には、以下の技術を開発する。

技術の種類	技術の概要
超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術	2020 年以降の多種・多様なサービス・アプリケーションの実現に向け大幅に大容量化を図った 5G 移動通信システムを構築するため、以下の要素技術を開発。 ・低 SHF 帯スモールセル ¹ を超高密度に分散配置し、分散配置されたアンテナ間の干渉を低減することで超高密度配置に対応する、協調制御技術及びアンテナ配置構成の最適化技術等の開発により、単位面積あたりのシステム容量を大幅に向上する分散アンテナ技術を確立。 ・低 SHF 帯スモールセルの超高密度配置によるフロントホール回線の伝送装置数や光ファイバ数が増大することに対応する、上り送信帯域制御や光・無線伝送連携のアルゴリズム等の開発及びハードウェア実装での検証により、送信点を柔軟かつ効率的にネットワーク収容する光収容技術を確立。

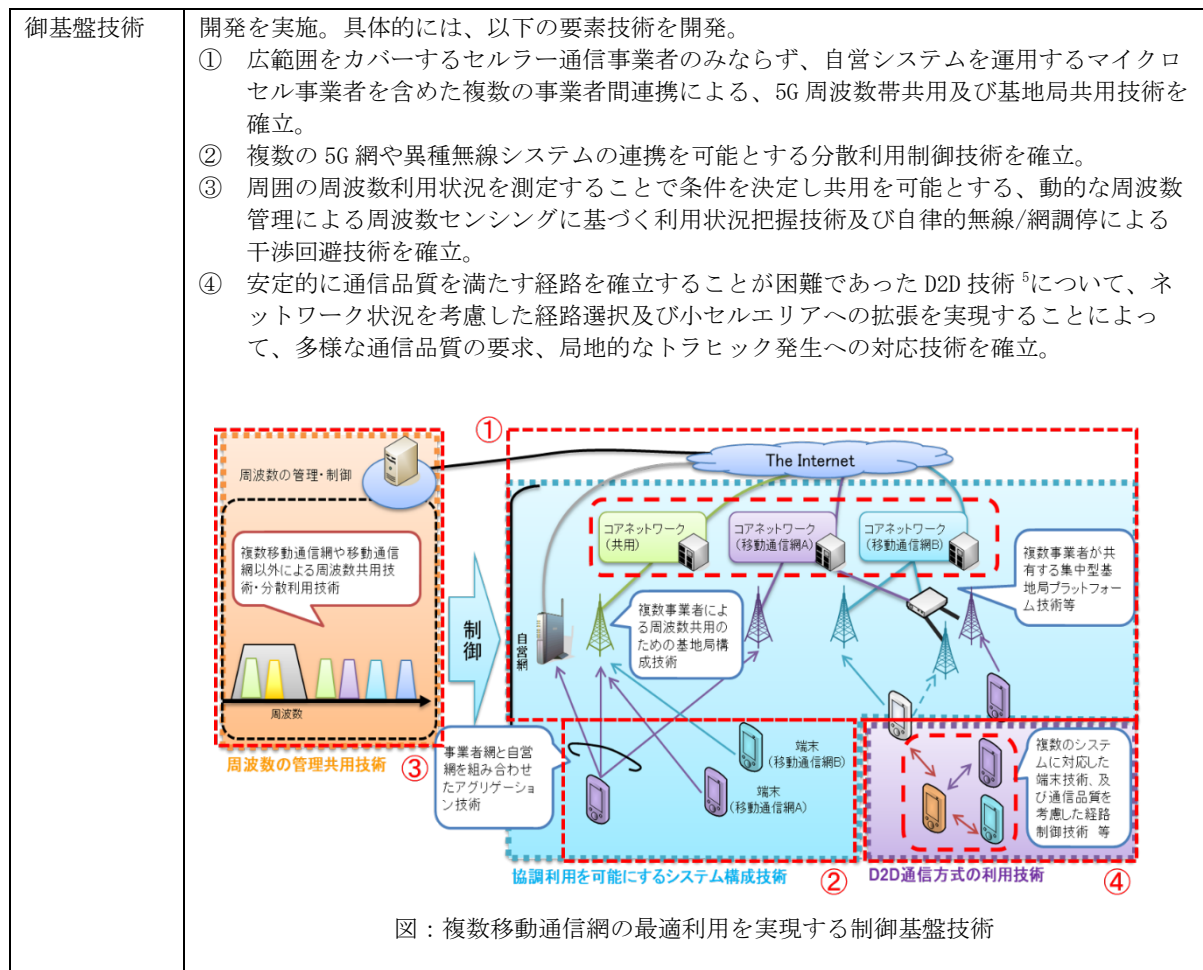
¹ 低 SHF 帯は、3 GHz から 6 GHz 以下の周波数帯域を指す。低 SHF 帯を利用して通信を行うセル半径の小さいセルを低 SHF 帯スモールセルと呼ぶ。

	・将来追加される様々な無線アクセス技術や周波数帯に対応する、無線リソース割当て制御アルゴリズム・セル選択アルゴリズム等の開発及びシミュレーションやハードウェア実装での検証並びにマルチバンド対応の信号増幅器等の開発・検証等により、マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成²⁾において、システム容量を向上するシステム間連携技術確立。 図：超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術概要
高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術	2020 年以降の多種・多様なサービス・アプリケーションの実現に向けて大幅に高速化・低消費電力化を図った第5世代移動通信システム（5G）を構築することを目的とし、高周波数帯・広帯域超多素子アンテナ³⁾による高速・低消費電力無線アクセス技術の確立するため、以下の研究開発を実施。 ・超多素子アンテナを用いたアクセスポイントの協調制御を行う集約基地局の開発や、空間多重伝送を行う際のビーム間干渉回避を高精度化したハイブリッドビームフォーミング型の超多素子アンテナシステムの開発などを行い、低SHF帯および高SHF帯における超多素子アンテナ技術とビーム制御技術確立。 ・上りの送信要求信号の検出アルゴリズムを構築することで、超低消費電力で接続可能にする端末ディスカバリー技術確立。 図：高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術概要
複数移動通信網の最適利用を実現する制	5G によって大幅に向上する無線性能を活かすためには、運用主体が異なる無線システム間での協調利用を可能とする基盤技術の開発が必要。そこで、コアネットワーク側で具備すべき機能、より高効率な周波数の利用法及びマルチホップ⁴⁾によるエリアの拡大方式に関する研究

² UHF 帯マクロセルに加えて、6 GHz 以下の低 SHF 帯及び 6 GHz を超える高 SHF 帯スモールセルをオーバレイ配置する構成をマルチバンド多層セル構成と呼ぶ。さらにマルチバンド多層セルに無線 LAN 等の移動通信以外の無線アクセスを加えたセル構成をマルチバンド・マルチアクセス多層セル構成と呼ぶ。

³ アンテナの素子数が従来のアンテナよりも大幅に多く、なおかつ、高精度なビーム制御と空間多重が可能なアンテナシステムを超多素子アンテナと呼ぶ。

⁴ 複数の端末等が通信を中継することをマルチホップと呼ぶ。基地局に複数の端末が接続する構成と異なり、通信距離を拡張することが可能となる。



・スケジュール

技術の種類	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術	リソーススケジューラ構成の基盤技術の確立評価プラットフォームの開発等	協調無線リソーススケジューラ構成技術の確立、改良等		接続実験と評価等
高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術	低 SHF 帯および高 SHF 帯の超多素子アンテナシステムの仕様策定・開発、ビームフォーミング方式・ユーザ選択・空間多重技術の確立等		超多素子アンテナシステムを搭載した基地局相当装置と端末相当装置で基本性能を検証等	複数の基地局相当装置による協調ビームフォーミングや、移動環境での超高速伝送のシステム評価等
複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術	方式検討、分散利用技術評価装置の試作、共用基地局の試作等		基礎特性試験、評価、改良	総合試験、評価、改良等

(2) 達成目標

2020 年までには現在の約 200 倍以上に増大すると予想される携帯電話等の通信トラヒックに対応するため、大容量化、超高速化、多数接続、低遅延化及び低消費電力化技術等第 5 世代移動通信

⁵ 端末 (Device) 同士が基地局を介さず直接通信することを可能にする技術を指す。

システムの実現に必要な技術を確立し、周波数の有効利用を促進する。また、当該技術の実現は、我が国のモバイル分野の産業競争力の強化を念頭においた研究開発成果の他国へのアピール、経済活動の基盤となる新世代のモバイル通信インフラのスムーズな構築に寄与するため、研究開発とともに国際標準化を推進する。

○関連する主要な政策

政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○ 世界最先端 IT 国家創造宣言 工程表（平成 25 年 6 月 14 日決定、平成 26 年 6 月 24 日改定、高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）

4. 利活用の裾野拡大を推進するための基盤の強化

（2）世界最高水準の IT インフラ環境の確保

【短期（2014 年度～2015 年度）】

○通信ネットワークインフラの推進

・・・第 4 世代移動通信システムの導入促進及び第 5 世代移動通信システムに求められる多様なニーズに対応するための研究開発等を推進する。

【中期（2016 年度～2018 年度）】

○通信ネットワークインフラの推進

・・・第 5 世代移動通信システムの実現に向けた周波数の高度利用等を可能とする研究開発及び実証実験を推進する。

○ 電波政策ビジョン懇談会中間とりまとめ（平成 26 年 7 月 14 日）

第 1 章 新しい電波利用の姿

3 2020 年以降の主要な移動通信システム

（3）第 5 世代移動通信システム（5 G）の研究開発・標準化から導入に向けて

① 5 G ネットワークの必要性

5 G の実現とその普及加速によって、「いつでも」、「誰でも」、「なんでも」つながっている社会へと近づけていくべきである。

③ 5 G の円滑な標準化と導入に向けた課題

イ) 5 G 要求条件を満たす通信技術実現に向けた研究開発

5 G に関する研究開発については、2020 年（平成 32 年）に向けて国として推進する研究開発の最重点課題の一つとして位置付け、国と民間企業や学識経験者の産学官連携により、その取組みを加速することが必要である。

（3）目標の達成状況

本研究開発においては、ピーク 15Gbps 超の伝送速度や、制御遅延の $50\mu s$ 以下への低減、送信電力の 1/10 以下への低減、D2D 通信を含む複数無線アクセスを連携させる通信制御方式の実現等、当初目標としていた項目をいずれも達成した。このことから、所期の目標を達成したといえる。具体的な主要結果は以下のとおり。

技術の種類	目標の達成状況
超高密度マルチバンド・マルチ	超高密度セル構成における低 SHF 帯の分散アンテナ技術を確立し、超高密度環境におけるシステム容量を 4G に比べて 3 倍以上に向上するという目標に対して、伝送実験システム

アクセス多層セル構成による大容量化技術	によるフィールド実験で4倍の大容量化を実現した。 さらに、超高密度配置された低 SHF 帯スモールセルの送信点を柔軟かつ効率的にネットワーク収容する光収容技術を確立し、16 以上のセルをネットワーク収容した場合の制御遅延を $50\mu\text{s}$ 以下に低減という目標に対して、$50\mu\text{s}$ 以下 ($20\sim 40\mu\text{s}$ 程度) の低遅延化を実現した。 また、マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成において、最適な無線リソースを割り当てることができるようシステム間連携技術を確立し、4G 端末を前提とする制御に比べシステム容量を 2 倍程度以上に向上という目標に対して、システムレベルシミュレーションでシステム容量 3.1 倍を実現した。
高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術	低 SHF 帯スモールセルにおいて、無線周波数帯域幅が 50 MHz 幅を超える広帯域化と 100 素子以上の超多素子アンテナを用いることで 4Gbps を超える高速伝送を実現することを目指していたところ、4.5GHz 帯、無線周波数帯域幅 100MHz、最大 128 素子の超多素子アンテナシステムにおいて、2 台の基地局間協調デジタルビームフォーミングにより、8 台の端末を収容 (16 ストリームを空間多重) することで、5.6Gbps のスループットを達成した。 (4.5GHz 帯 5G 超多素子アンテナ基地局間協調の効果を明らかにしたのは世界初。) また、高 SHF 帯スモールセルにおいては、無線周波数帯域幅が 300 MHz 幅を超える広帯域化と 200 素子以上の超多素子アンテナを用いることで 15 Gbps を超える超高速伝送を実現しつつ、広帯域化により、4 G システムの無線アクセス技術を用いる場合に比べて、無線フレーム長を 4 分の 1 以下に短縮した超低遅延無線伝送を実現することを目指していたところ、4,096 素子の 28GHz 帯超多素子アンテナ技術により、シングルユーザで 16 ビーム空間多重を実現することで、帯域幅 500MHz で、27Gbps 以上のスループットを世界で初めて達成するとともに、無線フレーム長を 4 分の 1 以下 (0.25 ms 以下) に低減した。 さらに、高利得及び高効率なアクセス技術により、4G システムのアクセス技術を適用した場合に比べて、エリア内で所望の上り通信速度を達成しない端末数を 10 分の 1 以下に削減するとともに、約 10 分の 1 の上り送信電力という超低消費電力化を実現することを目指していたところ、所定のスループット (10Mbps) に満たない 5G-IoT 端末の割合を 4G に比べて約 1/10 へ低減するとともに、所定の検出性能を満たす条件下における端末の上り信号の送信電力を 4G に比べて 1/10 へ低減することを達成した。
複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術	複数の移動通信網が同一周波数を動的に共用する場合に必要な制御技術を確立するとともに、複数の 5 G 網や異種無線システムの連携を可能とする分散利用制御技術を確立し、その制御に応じて動作する無線システムを開発することを目指していたところ、以下①～③の要素技術を相互に組み合わせることにより、目標の技術を実現した。 ①協調利用を可能にするシステム構成技術として、周波数共用基地局による自営システム展開と商用網との連携方式を開発し、集中型共有基地局プラットフォームと帯域外への不要輻射を高能率に抑圧可能な UTW-OFDM 方式を開発した。 ②周波数の管理共用技術として、一次利用者の通信方式及び SINR⁶から許容 SINR を導出する共用可能な周波数の発見技術を開発し、広帯域アレイセンサを用いた分散モニタリング技術、共用条件分析方式及び自律的な無線調停・網調停技術を開発した。 ③D2D 通信方式の利用技術として、D2D 通信を含む複数無線アクセスを連携させる通信制御方式を開発し、多数存在するフローを、各々の通信品質への要求を満たしつつスモールセルに収容するための分配制御法を開発した。

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和元年 8 月 28 日予定)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用する予定。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

⁶ 信号対干渉雑音比を意味し、他のシステムからの干渉電力 (Interference) および雑音電力 (Noise) の合計に対する所望の信号電力 (Signal) の比で表される。この数値が大きいほど、良好な通信状態が得られる。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、合計 256 件の論文発表及び合計 800 件の口頭発表に加え、合計 350 件の特許出願（協調無線リソーススケジューリング技術に関する特許など）（うち特許取得 41 件）など、非常に多くの成果を挙げている。また、3GPP においては超高速伝送を実現する復調用参照信号の最大直交多重数及び復調用参照信号配置、MU-MIMO における伝送性能向上を目的としたプリコーディング処理、ビームを用いて通信を行う基地局に対する端末のアクセス信号送信方法等、超高速伝送を実現するための多数の提案を行うなど活発に標準化活動にも貢献し、その提案内容のうちいくつかが合意された。以上より、本研究開発は特筆すべき成果を数多く上げており、その必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	2 件 (2 件)	15 件 (9 件)	20 件 (12 件)	25 件 (22 件)	62 件 (45 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	7 件 (7 件)	56 件 (55 件)	68 件 (68 件)	63 件 (59 件)	194 件 (189 件)
その他の誌上発表数	4 件 (0 件)	18 件 (1 件)	15 件 (1 件)	10 件 (1 件)	47 件 (3 件)
口頭発表数	94 件 (6 件)	255 件 (53 件)	263 件 (72 件)	188 件 (34 件)	800 件 (165 件)
特許出願数	47 件 (14 件)	116 件 (32 件)	107 件 (44 件)	80 件 (36 件)	350 件 (126 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	7 件 (0 件)	14 件 (1 件)	20 件 (9 件)	41 件 (10 件)
国際標準提案数	0 件 (0 件)	70 件 (70 件)	28 件 (28 件)	19 件 (19 件)	117 件 (117 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)
受賞数	0 件 (0 件)	8 件 (3 件)	9 件 (2 件)	15 件 (1 件)	32 件 (6 件)
報道発表数	4 件 (0 件)	7 件 (1 件)	9 件 (2 件)	8 件 (4 件)	28 件 (7 件)
報道掲載数	0 件 (0 件)	3 件 (0 件)	31 件 (0 件)	0 件 (0 件)	34 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（特許協力条約）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。（何カ国への出願でも 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。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。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。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	2011 年 9 月に 150Gbps であった我が国の移動通信トラフィックは、わずか 3 年間で 780Gbps と 5 倍以

	上になるなど爆発的な増加を見せていた。また、今後も、モバイル環境での 4K 視聴など高精細動画の伝送需要の増大やモバイルとクラウド・コンピューティングサービスとの連携拡大等を受け、移動通信トラフィックの増加が継続すると見込まれる。さらには、無数に配置されるセンサー、機器間通信 (M2M) といったスマートフォンやタブレット以外の様々なアプリケーションが提供され、トラフィック傾向の質的变化なども予想される。 これらの様々な環境の変化に適切に対応し、新サービスの登場に備えるためには、飛躍的なシステム能力の向上が必要であり、4G のさらなる能力向上の技術開発に加えて、全く新しい無線アクセス技術を盛り込んだ 5G の研究開発が急務となっていた。具体的には 5G では、通信システム容量向上、通信速度向上、低遅延化、接続可能デバイス数の増加、低消費電力化等が求められており、本研究開発は、これらの課題の解決に寄与するものであったことから、必要性があったと認められる。
効率性	研究開発の実施体制については、移動通信システムについて実際にサービス提供を行っている実施主体により、技術課題の選定及び目標設定のもと実用化を見据えて適切に研究開発が実施されている。また、研究開発の実施期間中も、無線システム、電波伝搬、携帯電話事業等の専門家等で構成される外部有識者と受託者による研究開発運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。 経費執行の効率性については、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	本研究開発の実施により、超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術、高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術、複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術などを開発することにより、5G の実現に必要な不可欠な大容量化、超高速化、多数接続、低遅延化及び低消費電力化技術等が確立されることにより周波数の利用効率が向上し、その結果、その周波数帯を同時に利用する(ある周波数あたりに存在する)ユーザ数が非常に多くなることから、周波数の有効利用が促進される。また当該技術の実現は、我が国のモバイル分野の産業競争力の強化を念頭ににおいた研究開発成果の他国へのアピール、経済活動の基盤となる新世代のモバイル通信インフラのスムーズな構築への寄与が見込める。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発は、携帯電話等に利用されている周波数帯域のひっ迫状況を緩和し、周波数の有効利用を促進する技術の研究開発であるから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の受益となる。 また、支出先の選定に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定をしている。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	本研究開発は、周波数がひっ迫している中で、周波数の有効利用を図ることが急務であること、さらに、今後加速的に増大すると予想される携帯電話等の通信トラフィックに対応するために、5G による移動通信システムの大容量化、超高速化、多数接続、低遅延化及び低消費電力化技術等が求められていることから、これらの課題に早急に対応する必要がある。 世界最先端 IT 国家創造宣言 工程表(平成 25 年 6 月 14 日決定、平成 26 年 6 月 24 日改定)においても、「第 5 世代移動通信システムの実現に向けた周波数の高度利用等を可能とする研究開発及び実証実験を推進する」とこととされていた。また、諸外国においても 5G について国際的な議論が急速に活発化してきているために、早期に実施する必要性があった。 よって、本研究開発には優先性があると認められる。

5 政策評価の結果(総合評価)

本研究開発は、今後加速的に増大すると予想される携帯電話等の通信トラフィックに対応するために、5G による移動通信システムの大容量化、超高速化、多数接続、低遅延化及び低消費電力化技術等が求められていることから実施したものである。

本研究開発において、超高密度マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成による大容量化技術、高周波数帯・広帯域超多素子アンテナによる高速・低消費電力無線アクセス技術、複数移動通信網の最適利用を実現する制御基盤技術などを開発し、これにより目標を達成することができた。

また、実用化に向けてシミュレーションや試作装置による実証実験を行うことにより、実環境における動作確認や目標の達成状況を確認している。また、論文・口頭発表、特許出願や国際標準化に向けた活動なども着実に実施されるなど本研究開発の有効性、効率性等が認められた。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

本研究開発で確立した技術については、5G の通信オペレータによる 2020 年からの商用化やその拡大、ローカル 5G としての活用等で実際に広く適用されるよう関連する制度整備等を推進するとともに、その有効性を学術論文や国際会議等における口頭発表等を通じて広く啓蒙する。また、引き続き、5G の更なる高度化に向けた研究開発などの取組を推進する。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）において、毎年度継続的に目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の指導等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・ 計算機シミュレーション及びフィールド実験を通じ、超高密度セルにおける分散アンテナ技術及び光収容技術を活用することで 3 倍以上、マルチバンド・マルチアクセス多層セル構成におけるシステム間連携技術により 2 倍以上のシステム容量増大を確認しており、到達目標は達成されていると判断する。
- ・ 本研究開発成果の技術を活用して低 SHF 帯、高 SHF 帯及び 4G 周波数を含めたマルチ RAT を積極的に利用することにより、通信システム容量の向上、通信速度の向上等が可能となり増加が予想される移動通信トラフィックを適切に収容することが期待され、本研究開発は有益であったと判断する。
- ・ 低 SHF 帯超多素子アンテナ技術とビーム制御技術、高 SHF 帯広帯域超多素子アンテナ技術とビーム制御技術、超低消費電力で接続可能にする端末ディスカバリー技術に関して、多くの成果をあげている。光張り出し構成を採用した 4.5GHz 帯超多素子アンテナシステムにおいて、2 台の基地局間協調デジタルビームフォーミングにより、8 台の端末の 16 ストリームを空間多重することで収容し、5.6Gbps のシステムスループットを達成し、5G 超多素子アンテナ基地局間協調の効果を世界で初めて明らかにした。また、28GHz 帯で 4096 素子の超多素子アンテナ技術により、シングルユーザで 16 ビーム空間多重を実現し、500MHz の帯域幅で 27Gbps のスループットを世界で初めて達成するなど、顕著な成果をあげている。
- ・ 複数移動通信網による同一周波数の共用及び分散利用制御を可能とする技術の開発によって周波数資源を新たに創出し、通信容量の拡大に成功している。新たに創出した周波数資源に相当する周波数帯域幅は当初の到達目標値を大きく上回っており、所要の到達目標は達成されていると判断できる。
- ・ 複数の移動通信網が同一周波数を動的に共用する場合の有効性等が評価されている。さらに、標準化に向けた活動も進められており、総合的に見て非常に有益である。

7 評価に使用した資料等

○世界最先端IT国家創造宣言 工程表（平成25年6月14日決定、平成26年6月24日改定、高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部）

<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20140624/siryou3.pdf>

○電波政策ビジョン懇談会中間とりまとめ

http://www.soumu.go.jp/main_content/000295513.pdf

○電波政策2020懇談会 報告書（平成28年7月 総務省）

http://www.soumu.go.jp/main_content/000430220.pdf

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合＜電波利用料＞

<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>

○世界最先端 I T 国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（平成29年5月30日閣議決定）

<http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20160520/siryou1.pdf>

平成 31 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局新世代移動通信システム推進室

評価年月：令和元年 8 月

1 政策（研究開発名称）

ミリ波帯による高速移動用バックホール技術の研究開発

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

平成 26 年度～平成 30 年度（5 か年）

・実施主体

民間企業、公益財団法人、国立研究開発法人等

・総事業費

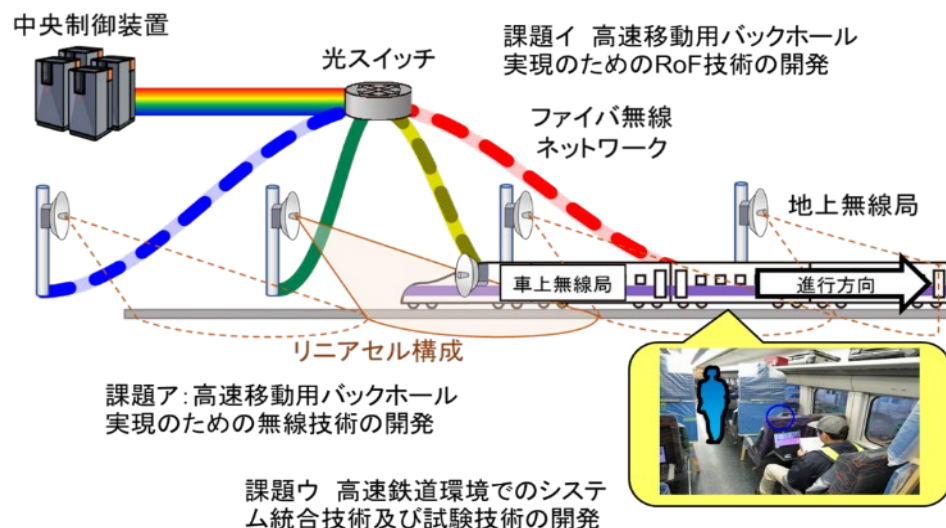
1,625 百万円

平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
332 百万円	378 百万円	348 百万円	288 百万円	279 百万円	1,625 百万円

・概 要

現行の新幹線や、国内外で建設が進められている次世代高速鉄道は、その移動速度が 230～500 km/h と大きく、1000 人程度の乗客が一列車に集中する。このため公衆網を利用した既存の移動体通信システムでは、乗客が満足するユーザーあたりの回線速度を実現する事は困難な状態にある。このため、高速鉄道が一定の軌道上を移動するという点を利用し、軌道に沿って敷設した光ファイバネットワークと、指向性・広帯域性に優れたミリ波帯の電波資源を組み合わせる事により、高速移動体に向けたブロードバンド接続手段を実現するための基盤技術を確認した。具体的には以下の技術である。

・概要図



技術の種類	技術の概要
高速移動用バックホール実現のための無線技術	高速移動用バックホール ¹ 実現のためのデジタル無線通信の信号は、1Gbps クラスの伝送速度が必要となる。本研究では高速で移動する列車に対し 1Gbps 以上の伝送速度を安定的に維持するため、90GHz 帯において双方向通信を行うためのベースバンド・RF 回路技術を確立した。これら技術を利用した無線設備の伝送品質の評価技術、240km/h で走行する新幹線でも適切に地上無線局を切り替えるネットワーク制御技術を実証した。
高速移動用バックホール実現のための RoF ² 技術	1Gbps を超える大容量信号を、RoF（光）ネットワークでも伝送可能とするため、ミリ波信号と光信号の双方向で用いることができる大容量多値変復調技術を確立した。また、中央制御装置から配信される RoF（光）信号をミリ波信号へ変換するためのミリ波対応光変換技術を確立した。RoF 技術を応用しアナログ信号を光ファイバで伝送することにより、各路線側無線局に周波数安定度の高い信号源を搭載することなくミリ波通信を行えるため、コスト低減が可能になる。
高速鉄道環境でのシステム統合技術及び試験技術	実際の鉄道環境にける電波伝搬特性や伝送品質測定を行う実証実験、ユーザー向け列車内空間における電波伝搬特性試験を実施するとともに、車上無線局（移動局）を追跡して確実に接続するためのネットワーク制御技術を確立した。

・スケジュール

技術の種類	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
高速移動用バックホール実現のための無線技術	デバイス設計 試作	無線機設計 試作	無線システム 評価	無線システム 構築・準備	実証実験
高速移動用バックホール実現のための RoF 技術	大容量多値変調 技術原理検証	高速切替 NW 検証	光・ミリ波変換 デバイス試作	通倍型変復調 システム検証	実証実験
高速鉄道環境でのシステム統合技術及び試験技術	90GHz 帯伝搬 特性評価	列車内伝搬 特性評価	NW 切り替え技術 評価	実証実験 システム準備	実証実験

（２）達成目標

新幹線等の高速移動体におけるブロードバンド環境の構築に向け、90GHz 帯等の複数のミリ波帯と光ファイバを利用した分布アンテナシステムによる無線伝送技術を確立し、平成 30 年度までに速度 300km/h で移動する高速移動体において通信速度 1Gbps を可能とする無線伝送技術の実現を目指す。

○関連する主要な政策

政策 13「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 25 年 6 月 閣議決定）

Ⅳ 利活用の裾野拡大を推進するための基盤の強化

4. 研究開発の推進・研究開発成果との連携

上記項目において、世界最高水準の IT 社会を実現し、維持・発展させるために、情報通信社会の今後の動向を見据えた研究開発を推進することが必要であると記載されている。

○電波有効利用の促進に関する検討会報告書（平成 24 年 12 月）

第 1 章 電波利用環境の変化に応じた規律の柔軟な見直し

¹ コアネットワーク（インターネット等の基幹回線）と車内無線設備との間を結ぶ大容量の中継回線

² Radio over Fiber の略であり、無線高周波信号を光ファイバにのせて長距離伝送する技術

1. 電波有効利用を促進する柔軟な無線局の運用

(3) 周波数再編の加速

②電波有効利用技術の活用

上記項目において、電波の有効利用を一層推進する観点から、新たなニーズに対応した無線技術をタイムリーに実現することが必要であると記載されている。

(3) 目標の達成状況

本研究開発においては、以下の技術を確立することにより、実際の鉄道環境（速度 240km/h）における実証試験で地上・車上間で通信速度 1.5Gbps を実現し、シミュレーション上では、時速 500km において通信速度 1Gbps を実現した。このことから、所期の目標を達成したといえる。具体的な主要結果は以下のとおり。

技術の種類	目標の達成状況
高速移動用バックホール実現のための無線技術	車上無線局と地上無線局で 90GHz 帯を使用した大容量双方向通信を行うため、ベースバンド回路部で 4 波マルチキャリア変調波の生成を実現し、RF 回路部で 90GHz 帯の 4 波マルチキャリア変換を実現した。 また、それら技術を利用した無線局の伝送品質評価を行うため、IP 信号をカプセル化して無線伝送するための変換装置を作成し、IP 信号をミリ波無線信号で伝送できる伝送品質評価技術を実現した。 更に、速度 240km/h で走行する新幹線でも適切に地上無線局を切り替える技術を、高速に車両を検出するセンサ及び高速に切替可能な光スイッチを用いて実現した。 図1 無線システムの構成 図2 RF回路部 90GHz帯送信スペクトラム
高速移動用バックホール実現のためのRoF技術	ミリ波帯と光ファイバの双方向で用いることができる大容量多値変復調技術を確立し、10GHz 帯域幅で 45Gbps の伝送レートを実現した。また、中央制御装置から配信される RoF（光）信号をミリ波信号へ変換するための高周波数対応光変換技術を確立し、100GHz 超まで直接変換可能な光・電気信号変換部を開発し、従来の変換効率に対して、10 倍以上の高感度化と高速性の両立を実現した。 図3 適応変調型 RoF・ミリ波統合技術による90GHz 帯広帯域 IF 信号 図4 ミリ波・光変換モジュール
高速鉄道環境でのシステム統合	実際の鉄道環境における電波伝搬特性や伝送品質の測定を行うため、北陸新幹線の営業列車（列車速度 240km/h）を使用した実証試験で 1.5Gbps の伝送速度を実現した。ま

技術及び試験技術

た、シミュレーション上では、列車速度 500km/h において、1Gbps の伝送速度を実現した。

車上無線局（移動局）を追跡して確実に接続するためのネットワーク制御技術を確認し、複数地上無線局間との通信に成功した。

また、列車内空間における電波伝搬特性試験として、現在、新幹線で使用されている 60GHz 帯の無線 LAN を想定したアクセスポイント選択法により、電波遮蔽時のスムーズな無線切替を行い、全席で 1Gbps 以上の伝送速度を実現した。

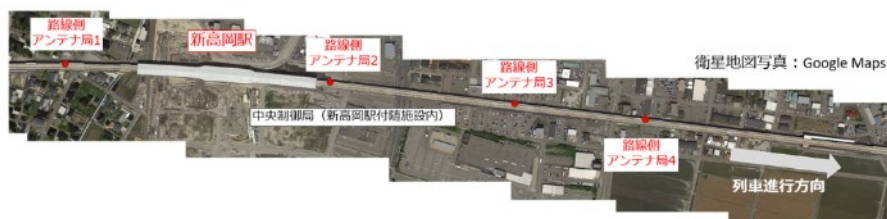


図5 地上無線局設置状況

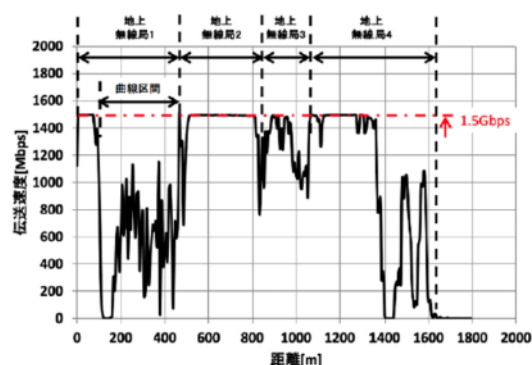


図6 新幹線通過時の伝送速度

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、合計 140 件の論文発表及び合計 78 件の口頭発表に加え、合計 13 件の特許出願（無線システム切り替えに関する特許など）など、非常に多くの成果を挙げている。また、国際電気通信連合 無線通信連合（ITU-R）において提案帯域を利用する他業務との周波数共用、90GHz 帯の鉄道環境における電波伝播モデルを提案するなど活発に標準化活動にも貢献し、その提案内容のうちいくつかが勧告化された。以上より、本研究開発は特筆すべき成果を数多く上げており、その必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	4 件 (4 件)	4 件 (4 件)	4 件 (4 件)	17 件 (17 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	6 件 (6 件)	29 件 (29 件)	33 件 (33 件)	22 件 (22 件)	33 件 (24 件)	123 件 (114 件)
その他の誌上発表数	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)	1 件 (0 件)	4 件 (1 件)
口頭発表数	11 件 (1 件)	16 件 (0 件)	10 件 (1 件)	17 件 (3 件)	24 件 (18 件)	78 件 (23 件)
特許出願数	0 件 (0 件)	11 件 (0 件)	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)	0 件 (0 件)	13 件 (0 件)
特許取得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
国際標準提案数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	4 件 (4 件)	5 件 (5 件)	3 件 (3 件)	12 件 (12 件)
国際標準獲得数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)
受賞数	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (1 件)	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)
報道発表数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	4 件 (0 件)	6 件 (0 件)
報道掲載数	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	1 件 (0 件)	1 件 (0 件)	6 件 (0 件)	8 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 (特許協力条約) 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。(何カ国への出願でも 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。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。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。

観点	分析
必要性	現行の新幹線や、国内外で建設が進められている次世代高速鉄道はその移動速度が 500 km/h と大きく、また、1000 人程度の乗客が一列車に集中することから、公衆網を利用した既存の移動体通信システムでは、乗客が満足するユーザーあたりの回線速度を実現する事は困難な状態にある。スマートフォンやクラウド、エッジコンピューティングが社会基盤として益々重要性を増している中、長距離を長時間拘束されがちな高速鉄道移動中においても安定したブロードバンド環境の供給は必須であり、ブロードバンド接続環境から離れる事は様々な弊害を生みかねない。 このような状況で、高速鉄道が一定の軌道の上を高速で移動するという点を利用し、軌道に沿って敷設した光ファイバ網と、指向性・広帯域性に優れたミリ波帯の電波資源を組み合わせる事により、高速移動体に適したブロードバンド接続手段を実現するための基盤技術を開発することは必要である。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発の実施体制にあたっては、ミリ波帯通信や鉄道システムに関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究機関等のノウハウを積極的に活用することにより、効率的に研究開発が

	実施されている。 また、研究開発の実施期間中も、無線システム、電波伝搬、鉄道システム等の専門家等で構成される外部有識者と受託者による研究開発運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。 経費執行の効率性については、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。よって、本研究開発には効率性があつたと認められる。
有効性	本研究開発は、新幹線等の高速移動体におけるブロードバンド環境実現の需要に応えるものである。近年のクラウド化社会の進展によりブロードバンド通信が、「いつでも、どこでも」利用できることが社会生活の基本になりつつある。例えばセキュリティー向上の観点から多くのPCがシンクライアント方式、すなわちインターネットで繋がった先のサーバー画面を操作することにより安全性を高めている。このような状況の中、新幹線等の高速鉄道の車両内においてもより高速なブロードバンド環境の需要が高まっているが、現状では利用者は携帯電話等の商用回線を利用しており、通信速度の制約により利用が制限されるのが実情である。 また、鉄道事業者側の観点からは、近年、車内監視の必要性が高まっており、各車両に数台の監視カメラが設置される様になっている。しかしながら現状では監視カメラ映像を地上設備にリアルタイムで送る手段として、無線によるバックホール回線の活用が期待されている。 本研究開発成果となるミリ波バックホールシステムは、鉄道利用者の利便性と安全性の向上の視点からの需要に応えるものであり、国民生活の向上に寄与するものである。 鉄道向けのミリ波通信システムは各国で開発が進んでいる。「造り込み」が必要な鉄道システムにおけるミリ波通信は世界的に見ても我が国が競争優位性を維持している分野である。我が国の「室の高い」インフラ技術を海外に展開していくことは国の基本政策としても取り組まれているところである。本技術を確立することによって、我が国が主導する海外向け鉄道システムの付加価値が向上すれば鉄道システム全体の海外展開にも有利に働くことになる。鉄道システム技術の中で競争優位性を示す大きな要素であるミリ波帯通信は日本の技術を積極的に海外展開していく際の優位技術として貢献が可能である。よって、本研究開発に有効性があつたと認められる。
公平性	本研究の成果が社会実装されれば、高速鉄道におけるブロードバンド通信環境の向上や車両内の監視システムの強化につながり、これを利用する国民に利便性と安全性の向上をもたらすことから、広く国民の利益になるものである。 本件は、携帯電話等に利用されているマイクロ波帯のひっ迫状況を緩和し、高い周波数への移を促進する技術の研究開発であるから、電波利用料財源で実施する研究開発として、公平性があつたと認められる。更に未利用周波数帯への活用に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 支出先の選定に当たっては、実施希望者の公募を広く行い、研究提案について外部専門家から構成される評価会において最も優れた提案を採択する方式により、競争性を担保した。 本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。 また研究開発の方向性については年間 3 回の運営委員会を実施し鉄道事業者及び大学等の有識者の意見も参考に随時修正を行いつつ実施した。
優先性	平成 25 年 6 月に閣議決定された世界最先端 IT 国家創造宣言において、「世界最高水準の IT 社会を実現し、維持・発展させるために、情報通信社会の今後の動向を見据えた研究開発を推進する」とされている。情報通信社会の今後の動向を見据えたとき、新幹線に代表される高速移動体に 1000 名以上の乗客が集中する環境でブロードバンド環境を実現することは世界最高水準の IT 社会を実現するためには必須の技術である。 第 5 世代移動通信システム（5G）は超高速、多数接続を実現する技術であるが、高速鉄道に乗車したユーザーと一般のユーザーに同時に高品質の無線接続環境を提供することは技術的にも経済的な観点からも困難性が高い。また、鉄道事業の保安通信として、監視映像等のデータ伝送でも使用も可能とするためには、高速鉄道に特化した専用の無線システム開発が必須となる。 また、本研究開発は 5G で想定する周波数よりも高い周波数の利用技術を確立するものであり、周波数のひっ迫対策にも資することから、優先的に実施していく必要がある。

5 政策評価の結果（総合評価）

本研究開発は、高速鉄道移動中でも安定したブロードバンド環境の供給するために、90GHz 帯のミリ波帯無線による高速移動用バックホール技術を確立し、移動速度 300km/h 以上の列車内に対し 1Gbps の伝送環境を実現することを目的として研究開発を実施したものである。

本研究開発において、高速移動用バックホール実現のための無線技術、高速移動用バックホール実現のための RoF 技術、高速鉄道環境でのシステム統合技術及び試験技術を開発し、実環境における実証実験及びシミュレーションを行うことで、目標を達成したことを確認した。

また、論文・口頭発表、特許出願や国際標準化に向けた活動なども着実に実施されるなど本研究開発の有効性、効率性等が認められた。

<今後の課題及び取組の方向性>

今後は、本研究会開発で確立した技術を発展させ、ミリ波通信と RoF 技術を活用した高速鉄道システム用の新しい無線通信システムを実用化するため、引き続き、各事業者において、更なる技術開発を進めていく。また技術開発と並行し、国際電気通信連合 ITU において、鉄道無線用として 92.0-109.5GHz の国際標準化活動も推進していく。更に鉄道・航空などインフラ向け電波システムとして国内外の共同研究機関と協力し実証実験や実用化に関しても積極的に推進していく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・所定の目標は達成できている。装置試作と列車での実験も行われており、技術の実証がなされている点は評価できる。特許申請は13件で予算規模や技術内容を勘案すると妥当だが、もう少し出せるのではないかと思う。ただし受託者らが先行的に出願した技術の実証という位置づけであれば問題ない。
- ・査読付き論文誌や国際会議等に 140 件の多数の論文を掲載しており、申請特許も 13 件あり、極めて優れた研究業績をあげている。
- ・実施体制は概ね妥当であったと判断できる。また、予算については、物品費や旅費、その他に該当する費用は効率的に運用できていると思われる一方各技術課題の研究分担者数が明示されていないため、人件費の運用における妥当性は判断しかねる。
- ・ITU-R、APT/AWG、APT/ASTAP において標準化提案を行っている。本研究開発で実証した基本技術の海外展開も推進予定であり、実用化が期待できる。

7 評価に使用した資料等

- 世界最先端 IT 国家創造宣言（平成 25 年 6 月 14 日閣議決定）
http://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/pdf/it_kokkasouzousengen.pdf
- 電波有効利用の促進に関する検討会報告書（平成 24 年 12 月）
http://www.soumu.go.jp/main_content/000193002.pdf
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 <電波利用料>
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>