

# 令和7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、宇宙通信政策課

評価年月：令和7年8月

## 1 政策（研究開発名称）

グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発<sup>1</sup>

- (A) グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発
- (B) グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発

## 2 研究開発の概要等

### (1) 研究開発の概要

#### ・実施期間

令和2年度～令和6年度（5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

11,897百万円

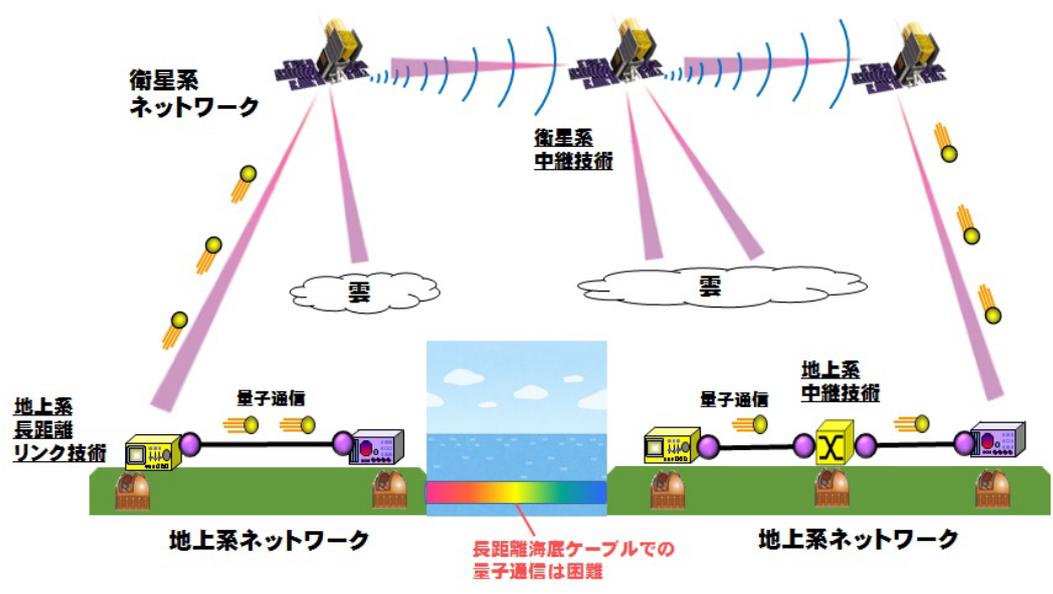
令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
1,409百万円	2,362百万円	2,816百万円	3,394百万円	1,916百万円	11,897百万円

#### ・概要

量子コンピュータの研究開発の加速により、現在使用されている暗号の危殆化が懸念されており、その対策としてグローバル規模での量子暗号通信ネットワークの確立・普及に向けた研究開発を実施する。地上系については、通信のさらなる長距離化技術（長距離リンク技術及び中継技術）を確立し、200 km圏量子暗号通信網における高可用性及び鍵生成速度 200Kbps を実現する。また、衛星系については、衛星間中継技術の確立に向けた取組及び将来の 1,000km 圏量子暗号通信網の構築・実証のための地上系との統合検証に向けた取組を実施する。

<sup>1</sup> ・事前事業評価は、「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」の名称により実施。  
・「グローバル量子暗号通信網構築のための研究開発」（地上系）と「グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発」（衛星系）の2件の研究開発を実施したもの。

地上系ネットワーク、衛星系ネットワークの組み合わせにより、距離や天候等に依らない堅牢な量子暗号通信網を実現（→どこまで行っても極めて堅牢性の高い安全なサイバー空間の実現）



技術の種類	技術の概要
地上系長距離リンク技術	QKD 装置の高性能化技術の開発により、量子鍵配送の長距離化・高速化等を実現するとともに、光子検出器の高度化のための開発等により、光子検出効率の向上を目指す。また、鍵管理サーバ技術の高信頼化や高度分散化技術の開発により、ネットワーク全体での信頼性や安全性、可用性を維持するトラステッドノード技術を確立する。
地上系中継技術	量子暗号通信の長距離化に向けては、ファイバの減衰を踏まえ、全量子的なノード処理によりノードの安全性を向上させる量子中継技術の実現が必要であるため、量子メモリの光リンク技術の確立を目指す。また、量子メモリ以外に重要となる量子中継基盤技術として、量子波長変換、波長多重化、量子メモリと光のインターフェース等に関する基盤技術を確立する。
衛星間中継技術	低軌道のみならず中軌道や静止軌道上の衛星と地上局間で情報理論的に安全な暗号通信を実現可能な衛星量子暗号・物理レイヤ暗号技術を搭載した衛星搭載可能な機器を開発し、静止衛星・地上局間の空間光通信路を模擬した環境（80～100dB の減衰）で安全な暗号鍵が生成できる（10bps 以上）ことを実証する。 また、衛星量子暗号・物理レイヤ暗号の実現に必要な地上局を開発するとともに、衛星系・地上系統合ネットワーク化技術を開発し、様々な軌道上の衛星と地上局間の量子暗号リンク・物理レイヤ暗号リンクを模擬した環境で、軌道上を移動する衛星から複数の地上局へ情報理論的に安全な暗号鍵を配送する機能、及び地上局から地上系量子暗号通信網への安全な相互接続・統合運用動作をシミュレーションや地上検証等により実証し、数百 km～数千 km といった大陸間スケールでの量子暗号通信網を構築できる機能を検証する。

・スケジュール

技術の種類	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
地上系長距離リンク技術					→
地上系中継技術					→
衛星間中継技術 注				→	

注：当初5年間の研究開発期間を予定していたが3年間に短縮されたものの計画していた装置の開発を着実に実施しており、各年度の目標を達成している。なお、本事業で短縮された2年間で実施する予定であった研究

開発内容については、令和6年7月に公募開始、同年12月に採択決定された宇宙戦略基金事業「衛星量子暗号通信技術の開発・実証」に含めて実施する予定である。

## (2) 達成目標

近年の量子コンピュータ研究の加速化により、実用的な量子コンピュータが実現されることで、現代暗号の安全性が破綻することが懸念されている。量子コンピュータ時代においても国家間や国内重要機関間の機密情報のやりとりを可能とするため、国として、グローバル規模での量子暗号通信ネットワークを確立する必要がある。

そこで、将来的なグローバル量子暗号通信網の構築に向けて、本研究開発では、地上系については、通信のさらなる長距離化技術（長距離リンク技術及び中継技術）を確立し、衛星系については、衛星間中継技術の確立及び地上系との統合検証に向けた取組みを実施する。以上により、極めて堅牢性の高い安全なサイバー空間の実現に寄与する。また、開発成果の国際標準化・市場展開を推進し、我が国の量子暗号通信技術の国際的な競争力を強化する。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT政策） 政策9「情報通信技術の研究開発・標準化の推進」

○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）
統合イノベーション戦略2019（令和元年6月21日）	<p>第I部</p> <p>8. 未来の競争力の鍵を握る重要分野</p> <p>AI、バイオテクノロジー、量子技術は、全ての科学技術イノベーションに影響する最先端の基盤的技術であり、経済社会構造にも大きな影響を与える。これらに関する世界レベルでの研究開発競争が高まっていることを踏まえ、AI、バイオテクノロジーに関する戦略を策定した。また、今後、量子技術に関する戦略を策定する。</p> <p>第II部</p> <p>第5章 特に取組を強化すべき主要分野</p> <p>(3) 量子技術</p> <p>① イノベーションにおける量子技術の必要性・重要性</p> <p>○ 世界的に経済・社会構造のパラダイムシフトの只中にあり、知識集約型の経済・社会への移行に向けてAIやデータの活用が極めて重要となる中、量子技術はその鍵となる基盤技術として位置付けられている。</p> <p>○ 例えば、量子コンピュータや量子計測・センシング、量子通信・暗号をはじめとする量子技術は、我が国製造業の生産性向上や健康・医療技術の進展、さらには国及び国民の安全・安心の確保など、飛躍的な革新をもたらす技術体系として期待が高まっている。</p> <p>○ このため、国として将来の産業・ビジネス構造等を見据えた上で、目指すべき社会像の実現に向け、産業・イノベーションまで念頭に置き、10～20年の中長期的視点に立った戦略的かつ総合的な取組が必要不可欠である。</p> <p>③ 目標達成に向けた施策・対応策</p> <p>&lt;「量子技術イノベーション戦略」の策定・推進&gt;</p> <p>○ これまで個々に行われてきた取組を糾合し、国全体を俯瞰し</p>

	<p>た「量子技術イノベーション戦略」を2019年末までに策定するとともに、これに基づき、国を挙げた量子技術イノベーションに関する総合的かつ戦略的取組を強力に推進する。</p> <p>(5) 安全・安心</p> <p>② 目標達成に向けた施策・対応策</p> <p>ii) 育てる</p> <p>先進的な技術についての基礎研究や挑戦的・革新的な研究開発を推進する制度を充実させ、安全・安心の確保に必要な科学技術を強力に育てていく。</p> <p>(ア) 基盤技術</p> <p>将来、幅広い領域で活用が期待される基盤技術（例えば、AI技術及び量子情報処理、量子暗号等を実現する量子技術等）</p>
成長戦略2019(令和元年6月21日閣議決定)	量子に関する主要技術領域におけるファンディング・研究機関の取組の重点化・強化、国際研究開発拠点の推進、人材育成の推進、とされている。
世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画について(令和元年6月14日閣議決定)	<p>V. 社会基盤の整備</p> <p>1 5Gを軸とした協業促進によるインフラ再構築</p> <p>(3) 5G環境等の普及、光ファイバ網の整備</p> <p>ネットワーク機能向上に向けた5Gの高度化や量子通信技術等の研究開発を強化するとともに、その成果のビジネス支援やオープンイノベーションを促進する環境整備を行い、海外展開を見据えた我が国技術優位性を確保する。</p>
防衛大綱の具体化と産業・科学における宇宙利用の拡大―第五次提言―(令和元年5月14日)	<p>2-1. 防衛大綱の具体化</p> <p>(3) 宇宙安全保障の強化(個別プログラム)</p> <p>⑤ 防衛衛星通信、測位システム</p> <p>・将来の防衛通信及びその他幅広い分野に必須となる量子暗号を用いた衛星通信の研究開発の加速</p>
デジタル変革時代のICTグローバル戦略懇談会報告書(令和元年5月)	<p>第5章 オープンイノベーションによるキーテクノロジーの高度化</p> <p>5. 1 今後の技術戦略の在り方の全体像</p> <p>5.1.2 今後の技術戦略の在り方</p> <p>イ キーテクノロジーのロードマップと時間軸</p> <p>【各技術分野における主なキーテクノロジー】</p> <p>D) セキュリティ：量子ICT、サイバーセキュリティ対策技術</p> <p>ウ キーテクノロジーの高度化の3つの方向性と具体的なプロジェクト</p> <p>方向性2) 安全安心なデータ主導社会の実現</p> <p>⑦ 量子ICT</p> <p>盗聴できないことが数学的に保証された、秘匿性の高い通信を地球規模で実現し、通信の安全性が大幅に向上する。光ネットワークを越える大容量・低消費電力の通信を実現する。革新的ネットワークの次の世代のネットワークに向けた普及が始まる。</p>
量子技術イノベーション戦略(令和2年1月21日統合イノベーション戦略推進会議)	※上記の「統合イノベーション戦略2019」にて策定・推進するとされたものを具体化した戦略。総務省が所掌すべき量子暗号通信技術を含むイノベーション戦略について、研究開発戦略を中心に全般的に記述されている。(令和4年4月改訂)
量子未来社会ビジョン(令和4年4月22日統合イノベーション戦略推進会議)	※「量子技術イノベーション戦略」に対し、社会変革に向けた戦略(未来ビジョン、目標等)について全般的に記述されている。

量子未来産業創出戦略（令和5年4月14日統合イノベーション戦略推進会議）	※上記の2戦略に対し、量子技術の実用化・産業化戦略について全般的に記述されている。
量子産業の創出・発展に向けた推進方策（令和6年4月9日量子技術イノベーション会議）	※2030年目標に向けて上記3戦略を強化し、補完する方策の報告書。量子技術の進展や各国の戦略、国内外の実用化・産業化の状況変化にいち早く対応するため、現在の政府戦略の下、グローバル視点を加えて早急に強化・追加すべき内容が全般的に記述されている。
宇宙基本計画（令和5年6月13日閣議決定）	2. 目標と将来像 ー（2）国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現 ー ii. 将来像 ー（a）次世代通信サービス（略） さらに、衛星光通信技術によって大容量、低遅延、セキュリティが堅牢な情報の伝達を実現していく。また、現代暗号の安全性の破綻が懸念される量子コンピュータ時代において、衛星による量子暗号通信技術により、地上インフラでは実現が困難な、大陸間・国際間の量子暗号通信の実現が期待される。
宇宙基本計画工程表（令和6年度改訂）（令和6年12月24日宇宙開発戦略本部決定）	（2）国土強靱化・地球規模課題への対応とイノベーションの実現 4次世代通信サービス <b>【量子暗号通信の早期実現に向けた開発・実証支援】</b> 我が国が強みを持つ衛星量子暗号通信技術の社会実装を早期に実現し、将来市場において我が国の技術的優位性を獲得していくため、距離に依らないグローバル規模での量子暗号網構築のための研究開発を進めるとともに、今後の活用等について安全保障分野も含め検討を進め、宇宙実証の実施など、早期実現に向けた取組を積極的に推進していく。 衛星量子暗号通信技術について、宇宙戦略基金を活用し、JAXAによる民間企業・大学等への技術開発支援を進める。さらに、早期の衛星実証・活用に向けて、当該技術の利用が想定される安全保障分野などに関わる府省等において調整を進める。

### （3）目標の達成状況

地上系については、当初の研究計画・目標に沿って十分な成果が得られており、基本計画書の目標を上回る有効かつ効率的な取組を実施した。特にTF-QKDについては、500kmに相当する環境での暗号鍵の生成に世界で初めて成功し、また、可搬性のあるシステムを世界で初めて開発するなどの特筆すべき成果を得られた。また、ITU-Tにおける関連標準化を主導し、200件を超える寄書を行い、多くの勧告をエディタとして主導して成立させた。

衛星系については、当初5年間の研究開発期間を予定していたが3年間に短縮されたものの計画していた装置の開発を着実に実施しており、各年度の目標を達成している。なお、本事業で短縮された2年間で実施する予定であった研究開発内容については、令和6年7月に公募開始、同年12月に採択決定された宇宙戦略基金事業「衛星量子暗号通信技術の開発・実証」に含めて実施する予定である。

技術の種類	目標の達成状況
地上系長距離リンク技術	多重化することで到達目標を超える約2.3Mbpsの鍵配信速度を達成。チップベースの技術に基づくTF-QKDシステムの実証を行い、500kmに相当する環境で暗号鍵の生成に成功（世界初）した。さらに、可搬性のあるTF-QKDシステムを開発（世界初）し、フィールド環境で実証。到達目標を大きく上回る帯域8GHzでショット雑音/回路雑音比10dBという性能を有するホモダイン検出器を実現（世界最高性能）した。情報セキュリティ強化・セキュリティ強化状態での鍵格納の高速化（約12Mbps）及びネットワーク化による鍵リレー

	<p>を実現した。QKDNのグローバル化に向けて、機密性・信頼性・効率性・スケール性を有する秘匿マルチキャストのアーキテクチャを世界に先駆けて確立し、目標を大幅に上回って達成。具体的には、4倍の経路冗長性と4パーティの秘匿計算機能を10Mbps以上の速度で実行する技術を開発した。</p> <p>また、グローバルQKDN構築のコア技術となるネットワーク制御・管理技術の開発のため、1都3県を想定した25×4ノード、10,000ユーザ規模を想定したQKDNを仮想環境に構築し、動作検証と総合評価を完了するとともに、集中型QKDN、分散型QKDN、衛星QKDリンク・地上管制局を模擬したドメインの3ドメインからなるマルチベンダ間インターワーキング鍵リレー技術を実証。その動作特性を明らかにし、規格化に必要なデータを蓄積し、ITU-Tにおける国際標準化を主導した。</p>
地上系中継技術	<p>独立して動作する2個以上の量子メモリ間を10km以上の光ファイバで接続し、量子ビットの中継(転送)操作により、到達目標を超える10秒に3回を達成。性能を3桁向上することが可能な量子メモリ内蔵ダイヤモンドフォトリソニック結晶共振器の作製に成功(世界初)した。通信波長帯(1,301nm又は1,550nm帯)での量子メモリ不要の全光量子中継や波長多重技術等の確立については、高速で高品質な波長多重量子もつれ光源を開発し、10箇所のノードを2点間接続するすべての45リンクで同時に、各リンク1秒に100カウント以上の量子もつれ配信を確認(世界初)。さらに、ダイヤモンドNV中心と量子もつれ光を量子波長変換技術を用いて結合し、10秒に約3回の頻度でのリンクを確認、光通信帯の波長多重量子もつれ光とダイヤモンドNV中心とのリンクを観測(世界初)した。</p>
衛星間中継技術	<p>令和7年度までの5年間で実施予定であった研究開発期間を令和5年度までの3年間に短縮したことから、目標の達成状況は以下のとおりである。</p> <p>衛星-地上局間で情報理論的に安全な暗号通信を実現可能な衛星量子暗号・物理レイヤ暗号技術を搭載した衛星搭載可能な機器の開発を行い、総光損失50dB程度で30kbps級、80~100dB程度で10bps~100bps級で情報理論的に安全な鍵配送できることの実現可能性を確認できたが、実証には至らなかったことから、目標は未達である。</p> <p>また、衛星量子暗号・物理レイヤ暗号の実現に必要な地上局の開発については、可搬型光地上局の詳細設計を完了し、衛星の補足追尾機構の製造を完了させたが、地上局の完成には至らず目標は未達である。</p> <p>シミュレーションとして、衛星を利用した1,000kmに及ぶ広域での量子暗号網を模擬的なネットワークで構成し、衛星系-地上系量子暗号網での鍵リレー及び鍵リレーのリルーティングを可能とし、運用管理できることを検証したことから、目標の原理的な実現可能性の確認に成功した。</p> <p>なお、短縮された2年間で実施する予定であった研究開発内容については、宇宙戦略基金事業「衛星量子暗号通信技術の開発・実証」に含めて実施する予定である。</p>

### 3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、基本計画書に記載の政策目標に向けた研究開発期間内での実施事項、状況に加え、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を用い、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、「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」(令和7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確実に確立しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件 (0件)	3件 (3件)	6件 (6件)	14件 (14件)	11件 (11件)	34件 (34件)
査読付き口頭発表論文数	1件	0件	5件	7件	19件	32件

(印刷物を含む)	(1件)	(0件)	(5件)	(7件)	(19件)	(32件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	1件 (0件)	7件 (0件)	10件 (1件)	5件 (0件)	23件 (1件)
口頭発表数	18件 (2件)	43件 (7件)	57件 (15件)	91件 (27件)	82件 (28件)	291件 (79件)
特許出願数	1件 (0件)	5件 (4件)	20件 (10件)	18件 (11件)	17件 (6件)	61件 (31件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	4件 (2件)	2件 (1件)	6件 (3件)
国際標準提案数	31件 (31件)	68件 (68件)	47件 (47件)	57件 (57件)	29件 (29件)	232件 (232件)
国際標準獲得数	5件 (5件)	2件 (2件)	1件 (1件)	5件 (5件)	7件 (7件)	20件 (20件)
受賞数	1件 (0件)	7件 (0件)	4件 (0件)	9件 (1件)	8件 (1件)	29件 (2件)
報道発表数	2件 (0件)	1件 (0件)	3件 (0件)	2件 (0件)	6件 (0件)	14件 (0件)
報道掲載数	1件 (0件)	18件 (9件)	59件 (39件)	10件 (0件)	9件 (0件)	97件 (48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	<p>量子コンピュータの実用化とともに、現在使用されている暗号は解読が可能になると考えられているが、物理現象をもとにした量子暗号通信技術は情報理論的安全性が証明されている唯一の手法であるため、量子暗号通信の要素技術の研究開発が進められている。しかしながら、地上系では長距離の暗号通信を効率的に実現する装置の開発には至っておらず、非地上系については悪天候等の影響が不可避である等の課題がある。このため、実用化に向けた研究開発が必要であった。</p> <p>また、本研究開発分野は欧米各国や中国等でも国家的なプロジェクトとして研究開発が行われるなど開発競争が激化しているが、「統合イノベーション戦略2019」に基づき策定された「量子技術イノベーション戦略」において、「我が国としても、国及び国民の安全・安心の確保、産業競争力の強化等の観点から、重要デジタル情報を安全に保管する手段として、機密性・完全性等を有し、かつ市場化を見据えて国際競争力の高い、量子通信・暗号に関する研究開発や、その事業化・標準化等に、国をあげて取り組むことが極めて重要である」とされている。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	量子暗号通信技術に関する国内でのメインプレイヤーが受託者に揃った本事業では、専門的知識や

	<p>研究開発遂行の能力を有する企業や研究者のノウハウを有効的に活用し、研究開発を実施した。また、これまでの研究開発の成果や他事業である NICT の量子暗号通信テストベッドである東京 QKD ネットワークを活用し、研究開発・技術実証を行った。実施期間中は、外部の有識者で構成される運営委員会において研究開発の進捗や成果等に関する助言を受けるほか、継続評価において研究計画や実施状況等について評価等を受けるなど、効率的な実施のため、外部有識者からの知見を有効的に活用した。</p> <p>また、委託費の執行に当たっても、総務省担当職員による経費の執行に係る経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有する監査法人による経理検査を通して、委託費の執行の適正性・効率性を確保している。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発における QKD 装置の高性能化により、長距離化や可搬性等について世界で初めてとなる技術を実現した。また、NICT の量子暗号通信テストベッド（東京 QKD ネットワーク）を活用し、潜在顧客である事業者とのユーザ参加型のトライアルやデモを実施し、フィードバックを得るとともに、量子暗号通信の理解を得た。研究開発成果については、ITU-T において 20 件の勧告をエディタとして主導し成立させ、IOWN Global Forum でも提案内容が標準に採用された。さらに、NICT 若手チャレンジラボ Quantum Camp などの人材育成イベントを開催し、人材育成に貢献した。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発は、防衛や金融・医療などの機微情報を扱う機関における安全な情報通信を実現するために必要な技術の研究開発であり、開発成果が広く活用されることにより、広く国民の利益になるものである。</p> <p>また、受託者の選定に当たっては、広く公募を行い、応募のあった研究提案について外部有識者・外部専門家による評価において最も優れた提案を採択することにより、競争性・公平性を担保した。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>世界各国で量子コンピュータの実用に向けた投資を進めるなど、研究開発は加速化しており、安全保障等に係る機微情報の通信に関しては、量子暗号通信の早期の実現が極めて重要である。</p> <p>また、本研究開発分野は 2019 年 6 月に日本主導で ITU-T の量子暗号通信関連の勧告を成立させているなど、他国に対して優位性のある分野であるが、量子暗号通信の実現に係る他国での取組も強化されているため、世界における優位性を確保し続けるためにも、優先的に取り組む必要がある。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

## 5 政策評価の結果（総合評価）

近年、国際的な競争の激化に伴い、量子コンピュータに関する研究開発が加速しており、攻撃者は実用的な量子コンピュータの実現を見越して、既に暗号通信の盗聴・保存（Harvest now, decrypt later 攻撃）を始めていると考えられており、対策が急務となっている。

量子暗号通信は、観察されると量子状態が決定するという量子力学の原理を利用することで、盗聴を確実に検知することができ、量子コンピュータを含め絶対に解読できないことが証明されているワンタイムパッド（共通鍵暗号）を量子暗号通信で送ることにより、情報理論的安全性を確保でき、国家間や国内の重要機関間における機微情報のやりとりが可能となる。

本事業では、地上系長距離リンク技術、地上系中継技術、衛星間中継技術の研究開発を実施し、当初の研究計画・目標に沿って光子検出器から各種の通信方式、さらにネットワークの運用にわたる広範な課題に取り組み、有意義な成果を達成した。特に地上系の成果は、長距離化や可搬化等において世界初となる技術を実現するなど目標を上回るものであった。また、NICT の量子暗号通信テストベッドである東京 QKD ネットワークを適切に活用した実証試験や、過年度の評価結果を踏まえた潜在ユーザとの共同トライアルなどの取組を実施した。さらに、ITU-T 等における関連標準化を主導し、多くの勧告を成立させるなど標準化活動にも積極的に取り組み、我が国の技術的優位性を確保した。

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>

地上系については、ITU-T 等における本研究成果の国際標準仕様の確立に向けて進めていく。同時に、QKD の国際市場展開の重要な要件となる QKD 装置の評価・認証制度の整備については、セキュリ

ティ要件仕様書（プロテクションプロファイル）や関連文書群を整備し、認証制度の設計・実装を進めていく。また、早期社会実装に必要な機能の研究開発を実証するため、後継施策である「量子暗号通信網の早期社会実装に向けた研究開発」を実施する。衛星系については、これまでの成果を継承し、量子鍵配送及び物理レイヤ暗号による鍵共有機能を有する衛星の開発を実施するとともに、暗号通信網の実用性・利便性を向上させるため、衛星地上局間の量子鍵配送において衛星と光通信リンクを形成可能とする地上局を開発するなどの研究開発を推進する。

## 6 学識経験を有する者の知見の活用

「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和7年6月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部有識者・外部専門家による評価を実施し、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。

- ・本研究開発は、当初の研究計画・、目標に沿って十分な成果が得られており、基本計画書の目標を上回る有効かつ効率的な研究開発取組を実施したと評価できるである。この研究成果を基にした今後の開発、社会実装についても期待が持てる。（地上系）
- ・今後、国策として、量子暗号通信について世界をリードするため、他国が急速に追従してくる中でもサプライチェーンリスクをクリアした本研究開発としてこの流れを保ち、維持できるよう継続されることが望ましい。（地上系）
- ・3年間で計画されていた装置の開発を着実に実施しており、各年度の目標を達成している。これまでの成果を継承した研究開発を推進し、我が国の国際競争力の向上に資することを期待する。（衛星系）

## 7 評価に使用した資料等

- 経済財政運営と改革の基本方針 2019（令和元年6月21日閣議決定）  
<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/honebuto/2019/decision0621.html>
- 統合イノベーション戦略 2019（令和元年6月21日閣議決定）  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/index.html>
- 宇宙基本計画（令和5年6月13日閣議決定）  
[https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy05/honbun\\_fy05.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf)
- 宇宙基本計画工程表（令和6年度改訂）（令和6年12月24日 宇宙開発戦略本部決定）  
[https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy06/kaitei\\_fy0612.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy06/kaitei_fy0612.pdf)
- 情報通信技術の情報通信技術の研究開発の評価について  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027\\_1.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027_1.html)

# 令和7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7年8月

## 1 政策（研究開発名称）

多言語翻訳技術の高度化に関する研究開発<sup>1</sup>

## 2 研究開発の概要等

### (1) 研究開発の概要

#### ・実施期間

令和2年度～令和6年度（5か年）

#### ・実施主体

民間企業、国立研究開発法人

#### ・総事業費

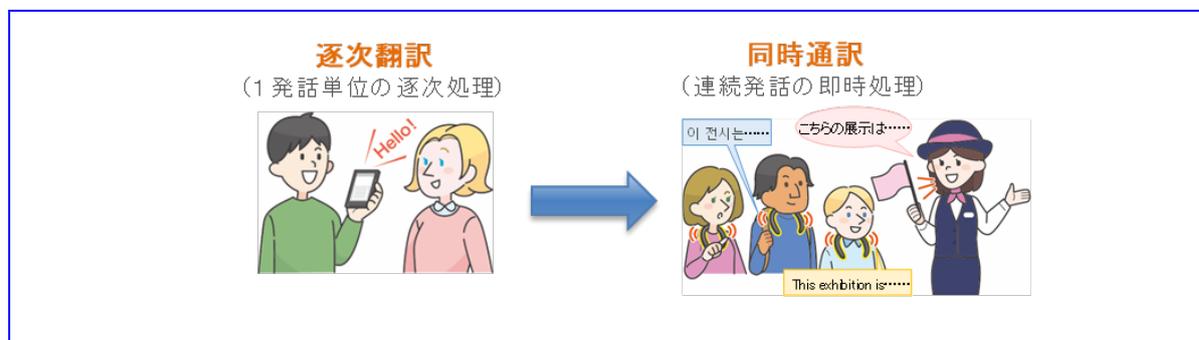
8,553 百万円

令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
1,317 百万円	1,371 百万円	1,255 百万円	2,743 百万円	1,867 百万円	8,553 百万円

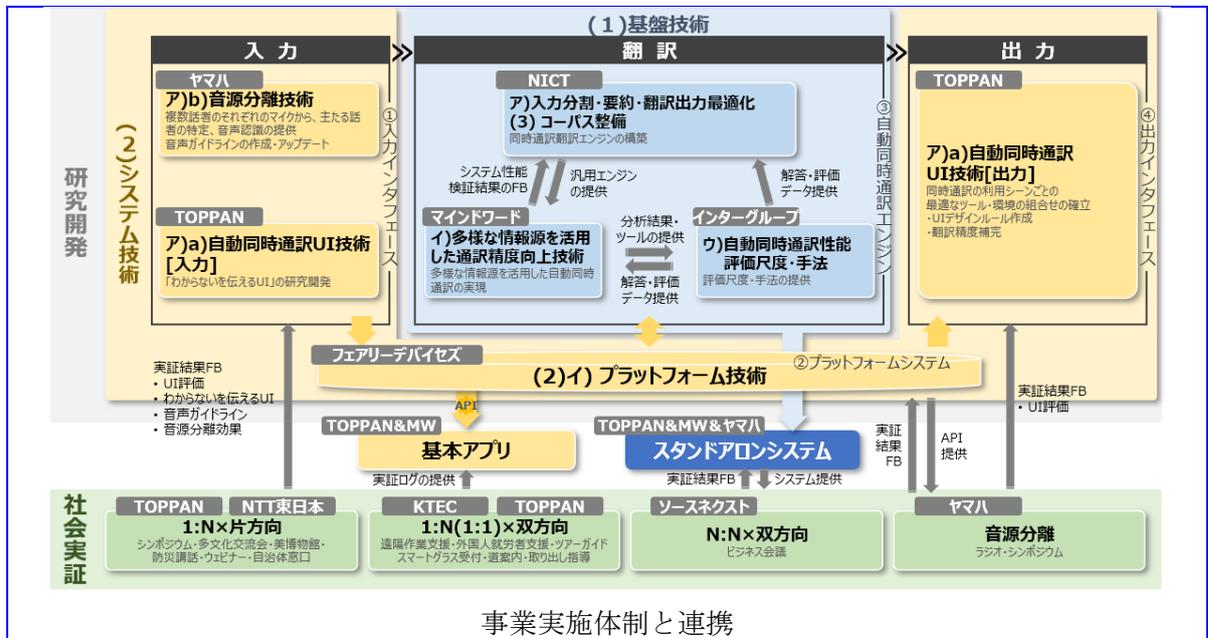
#### ・概要

近年、訪日外国人及び在留外国人は共に増加傾向にあり、2024年には訪日外国人が3600万人を超え過去最高を記録した。また、在留外国人は住民50人に対して約1.4人の割合に達している。地方も含む日本全体で外国人との交流の機会が今後ますます増え、日常生活の様々な分野（行政手続・医療・交通・観光等）や仕事などの場面で「言葉の壁」と向き合わなければならない状況が生じている。このような背景から、本研究開発では、国立研究開発法人情報通信研究機構（以下NICT）の多言語自動翻訳技術の更なる高度化により、従来の短文の逐次翻訳を「同時通訳」へと飛躍させるとともに、開発成果を通訳サービスの提供又は利活用の主体となる企業等が共通に利用できる仕組みを構築した。

本研究開発成果の社会実装に向けた取組として、日本国際博覧会（大阪・関西万博）において、自動同時通訳技術が会場内のアナウンスや講演会場、翻訳アプリ等で活用されており、世界中の人々とリアルタイムで会話ができる多言語通訳システムを実現した。



<sup>1</sup> 事前事業評価は、「多言語翻訳技術の高度化に関する研究開発の研究開発」の名称により実施。



(1) 自動同時通訳基盤技術

技術の種類	技術の概要
<p>ア) 入力分割・要約・翻訳出力最適化技術</p>	<p>低遅延かつ実用的な精度の自動同時通訳を実現するため、長い入力発話（連続した文章）から瞬時に音声と言語に関わる情報を読み込み、翻訳単位（翻訳可能な短い意味のまとまり、チャンクとも呼ぶ）を限定した上でこれを切り出し検出する技術、入力発話情報から内容の薄い部分を削除して要点に絞込む（要約する）技術、単言語内で聞き手が理解しやすい単語や表現に変換する技術、及びこれらの技術を組み合わせて AI 学習により翻訳単位ごとに自動で聞き手にわかりやすい最適な通訳結果を出力し続ける技術の研究開発を行う。</p> <div data-bbox="544 1128 1345 1610" data-label="Diagram"> </div>
<p>イ) 多様な情報源を活用した通訳精度向上技術</p>	<p>発話に加えて多様な補助情報を利用して、通訳精度を向上させるために、文脈情報としての画像やテキストあるいは「病院」などの通訳の利用場所の情報などを補助情報として利用する検討を行う。これらの補助情報を通訳システム間で伝送するためのデータ形式や通信手段を開発し訳質向上を目指す。</p>
<p>ウ) 自動通訳性能評価尺度の確立</p>	<p>自動同時通訳の性能を的確に評価するには、BLEU 値 (※) などの従来の客観的指標だけでなく、実際の使用環境における内容の正確さ、専門性、語彙・表現の適切さ、発話速度などの要素を考慮した「利用者の充足度」に基づく評価尺度が必要である。本研究では、人の通訳と比較しながら、各要素に対する充足度を分析し、自動通訳の性能を評価・分類する新たな尺度と、半自動的に評価できる技術の確立を目指す。最終的には、複数の評価者による 5 段階評価で、評価の一致率 80%以上を目標とする。</p>

※ BLEU：機械翻訳の品質を評価する指標。スコアは0から1で表され、1に近いほど翻訳が高品質となる。

(2) 自動同時通訳システム技術

技術の種類	技術の概要
ア) 自動同時通訳ユーザインタフェース技術 a) システム利活用要件に応じた統合検証技術	自動同時通訳技術の想定される利用シーンと、シーンに対応した最適なツール・環境の組み合わせを確立したうえ、各々の組み合わせ条件において、用務達成度（ツールによって業務の目的を達成する事が出来たかを数値化したもの。）80%以上を目標とする。 また、自動同時通訳技術において求められる諸要件を研究開発及び社会実証を経て抽出する。研究を通して得られた知見をもとに、ユーザインタフェースガイドライン案として取りまとめる。
ア) 自動同時通訳ユーザインタフェース技術 b) 入力音源分離技術	複数の話者に入力マイクが1つずつ割り当てられ、それぞれの入力マイクから独立した音声認識を行う条件において、主となる話者を特定し、適切に音声認識を行うことができるようになることを目標とする。また、発話被りが短時間発生した場合に、目的話者の音声のSNR（信号対雑音比（SNR, Signal-to-Noise Ratio））が目的外話者の音声により0dB程度に低下した場合でも、SNRが15dBの時と同等の音声認識精度が得られること。
イ) 自動同時通訳プラットフォーム技術	自動同時通訳システムを実社会で広く利用できるようにするためのプラットフォーム技術の研究開発を行う。自動同時通訳プラットフォームは、自動同時通訳基盤技術を実装したエンジンを内包し、外部APIによって自動同時通訳機能を提供するサービス基盤として構築する。このプラットフォームを利用する共同研究企業や実証企業等の利活用性を最大化するために、研究開発期間中の各時点において、パブリッククラウド上で提供される基盤技術を最大限活用してプラットフォームの構築及び検証・改善を行う。

・スケジュール

技術の種類	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
入力分割・要約・翻訳出力最適化技術					→
多様な情報源を活用した通訳精度向上技術					→
自動通訳性能評価尺度の確立					→
システム利活用要件に応じた統合検証技術				→	
入力音源分離技術					→
自動同時通訳プラットフォーム技術					→

(2) 達成目標

NICTが開発したAIによる多言語翻訳技術の更なる高度化により、2025年度までに、文脈に応じた語彙の統一、周囲の状況や文化的背景等を考慮して話者の意図を補完した翻訳、議論にも利用可能な翻訳等を可能とする要素技術を確立し、高精度かつ低遅延な実用レベルの同時通訳を、入力された発話から意味的まとまりを検出する技術等の確立によって実現することにより、世界の「言葉の壁」をなくし、グローバルで自由な交流や外国人との共生社会の実現に寄与する。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT政策）政策9「情報通信技術の研究開発・標準化の推進」

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
<p>経済財政運営と改革の基本方針 2019（令和元年 6 月 21 日閣議決定）</p>	<p>第 2 章 Society 5.0 時代にふさわしい仕組みづくり                      5. 重要課題への取組                      （4）分野別の対応                      ① 大規模国際大会等の成功                      ラグビーワールドカップ 2019 や 2020 年東京オリンピック・パラリンピック競技大会、<u>2025 年大阪・関西万博の開催に向け、（中略）深層学習<sup>115</sup>による同時通訳を含む自動翻訳システムの開発・普及</u>など、新しい日本の創造に関する取組を地方自治体や民間企業と連携しながら進め、レガシーを創出し、将来の開催国等に示していく。                      （後略）  <sup>115</sup> <u>多層構造の人工神経回路を用いたコンピューターによる学習。</u></p>
<p>統合イノベーション戦略 2019（令和元年 6 月 21 日閣議決定）</p>	<p>第 6 章 特に取組を強化すべき主要分野                      （1）A I 技術                      ② 目標達成に向けた施策・対応策                      ○ <u>上記目標を達成するため、以下を含む施策、対応策を A I 戦略に沿って実施する。【全府省庁】</u></p>
<p>A I 戦略 2019（令和元年 6 月 11 日統合イノベーション戦略推進会議決定）</p>	<p>Ⅱ. 未来への基盤作り：教育改革と研究開発体制の再構築                      Ⅱ-2 研究開発体制の再構築                      （前略）                      この中で、各 A I 関連中核センターは、各々の重点領域において、世界的にトップとなる成果を出し続け、国際的な拠点となることが求められる。これまでにおいては、理研 AIP は、理論研究を中心とした革新的な基盤技術の研究開発及びその社会実装までの一体的推進を、<u>NICT は、自然言語処理、多言語翻訳、多言語音声処理、脳の認知モデル構築を中心とした研究開発と蓄積データを含めた利用環境の整備及び社会実装</u>を、産総研 AIRC は、優れた A I 技術の企業等への橋渡し（応用面）を中心とした社会実装の推進を主に行ってきた。今後においては、理研 AIP は、A I に関する理論研究を中心とした革新的な基盤技術の研究開発で世界トップを狙い、<u>NICT は、大規模データを用いた革新的自然言語処理による対話技術、アジアからの訪日・在留外国人への対応を含めた多言語翻訳・音声処理技術、更に心の通うコミュニケーションの実現を目指した脳の認知モデルの構築と応用において世界トップを狙い</u>、産総研 AIRC は、A I の実世界適用に向けた A I 基盤技術と社会への橋渡しに向けた研究の世界的な中核機関として世界をリードすることを狙う。また、<u>各 A I 関連中核センターはその研究成果を迅速に社会で活用させることを目指す。</u>                      （後略）</p>

(別表 1) 中核基盤研究開発				
今後の研究開発重点項目	個別項目	具体的取組内容	達成時期	担当
4-3. 人間共生型 AI	言葉の壁を越える、翻訳・通訳ができる AI	<p>ストレスなく実用可能な以下の翻訳技術を段階的に実現</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・特定場面（医療、行政手続き、日常生活や旅行、ビジネス等）で利用可能（会話レベル）</li> <li>・周囲の状況や文化的背景も考慮し、話者の意図を補足しながら利用可能（議論レベル）</li> <li>・シビアな交渉場面でも利用可能（交渉レベル）</li> </ul>	2020 年度 2025 年度 2030 年度	【総】
	汎用多言語自動翻訳・同時通訳技術	<p>以下の基盤技術開発と音声認識・合成を組合せ、高精度と遅延の最小化を両立する実用レベルの同時通訳の実現</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・対訳が無い又は少ない条件下でも少ない性能劣化で、対話、SNS、論文、新聞などあらゆる分野で日本語のみで受発信可能な汎用多言語多分野自動翻訳</li> <li>・一文を超えた情報の取り込みにより、実用可能な反応速度内で高精度化を達成する技術</li> </ul>	2025 年度	【総】
2025 年大阪・関西万博アクションプラン Ver.5 (令和 6 年 1 月 25 日国際博覧会推進本部決定)	<p>3. 具体的な取組</p> <p>③ デジタル技術を駆使した展示・発信 (前略)</p> <p>多言語翻訳技術については、現状の逐次翻訳に加えて、<u>AI による実用レベルの「同時通訳」を実現するための研究開発を実施し、その成果を大阪・関西万博に実装・活用することにより、「言葉の壁」から解放された万博体験を実現する。</u></p> <p>(後略)</p>			
「外国人材の受入れ・共生のための総合的対応策（令和 6 年度改訂）」（令和 6 年 6 月 21 日外国人材の受入れ・共生に関する関係閣僚会議決定）	<p>II 施策</p> <p>2 外国人に対する情報発信・外国人向けの相談体制の強化</p> <p>(2) 具体的施策</p> <p>イ 外国人が抱える問題に寄り添った相談体制の強化 (前略)</p> <p>多言語翻訳技術については、<u>令和 7 年 (2025 年) 大阪・関西万博も見据え、日常生活・行政手続・観光等の場面に加え、ビジネスや国際会議等での議論の場面も含め、日本人と外国人及び外国人同士でストレスなく十分なコミュニケーションを可能とするため、AI による同時通訳の実現に取り組むとともに、平成 31 年(2019 年) 4 月の出入国管理及び難民認定法の改正も踏まえ、特定技能外国人を含め、在留外国人に対応する観点やウクライナ避難民に対応する観点等から重点対応言語を 21 言語に拡大し、併せて翻訳精度の向上を図る。</u></p> <p>(後略)</p>			

### (3) 目標の達成状況

まず、研究開発課題ごとに達成すべき指標を設定し、年次計画を踏まえて進めるとともに、初年度から社会実証を推進してきた。これにより、社会実装の観点から各研究の横連動を促進し、共同研究としての成果の最大化を図ってきた。令和 5 年度より、自動同時通訳技術の実社会における活用場面を想定し、本番環境に近い現場での利用開始前から利用終了後までの一連の運用や継続利用を考慮したユーザ評価を実施してきた。これにより、利用中だけでなく利用開始前後のユーザ目線での示唆を得ることができ、自動同時通訳技術の商用化に向けたニーズや課題を抽出することができた。

各研究開発の技術は、下表のとおり、基本計画書に定める到達目標以上の成果を生み出し、周囲の状況等を考慮して話者の意図を補完した翻訳等の要素技術や入力された発話から意味的まとまりを検出する技術等を確立し、高精度かつ低遅延な実用レベルの同時通訳を実現した。また、活用シーン

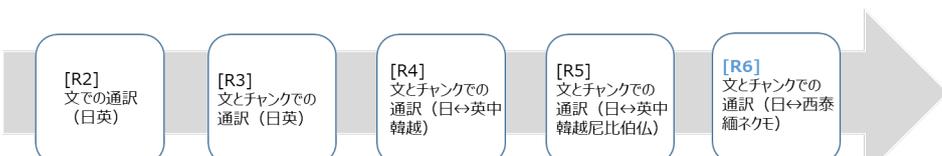
のニーズを踏まえたスタンドアロンシステム(※)の開発や、複数の商用サービスが展開（令和6年度から）されるなど、アウトカム目標の実現に向けた盤石な土台を築いた。

さらに、民間企業が2025年大阪・関西万博へ協賛したことにより、令和5年度からは、会場での利用を想定した実証も実施した。万博では、来場者や会場の案内役を利用者として想定し、スマートフォン等の端末で利用できる翻訳アプリを提供している。また、セミナーや講演会などで登壇者の発表内容を翻訳する同時通訳システム、場内アナウンスを翻訳しスマホ画面に表示するシステムが提供され、世界から集う多くの人々に利用されることとなった。

これにより、自動同時通訳の社会的受容性を高めることで、自動同時通訳サービス提供者が参入するための礎を築いた。

※ スタンドアロンシステム：PC 端末に自動同時通訳を実装したネットワークを経由しない通訳システム。

### (1) 自動同時通訳基盤技術

技術の種類	目標の達成状況
<p>ア) 入力分割・要約・翻訳出力最適化技術</p>	<p>■ 文分割技術、及びチャンク分割技術の開発</p> <p>話に低遅延で追従しながら実用的精度を実現する自動同時通訳には、長い文章から翻訳に適した単位(文、又は文より短いもの。「チャンク」と呼ぶ。)を切り出す入力分割技術が不可欠である。このため、通訳者が原文を分割したデータを15言語に対して構築し、深層学習によりモデル化して入力分割を実現した。これにより、入力終端まで待ってから翻訳する場合に比べると3～5割の遅延削減効果があった。本研究では並行して翻訳精度の向上も出来たことから、併せて、多言語で、低遅延・高精度の両立という類例のない優れた効果を実現した。(対応言語：英語(英)、中国語(中)、韓国語(韓)、ベトナム語(越)、インドネシア語(尼)、フィリピン語(比)、ブラジルポルトガル語(伯)、フランス語(仏)、スペイン語(西)、タイ語(泰)、ミャンマー語(緬)、ネパール語(ネ)、クメール語(ク)、モンゴル語(モ))</p>  <p>図：年度毎の対応言語</p> <p>■ 要点に絞り込む(要約する)技術の開発</p> <p>入力発話情報から内容の薄い部分を削除して要点に絞り込む(要約する)技術としては、機械翻訳技術を要約に応用することにより実現。具体的には、入力文とそれを短縮した文を学習データとして用いて、機械学習により、入力文を70～80%に短縮する技術を開発。</p> <p>■ 自動同時通訳技術の有用性を確認</p> <p>①自動同時通訳技術と人間の作業の連携及び②自動同時通訳技術単独の利活用の2条件において、人間の通訳者と同等の有用性(実利用可能性)を確認した。</p>
<p>イ) 多様な情報源を活用した通訳精度向上技術</p>	<p>■ 補助情報を利用し通訳精度を向上</p> <p>文脈情報としての画像やテキストあるいは「病院」などの通訳の利用場所の情報を補助情報として利用し、通訳精度向上に貢献した。また、ペナルティスコア(※1)と相関性の高い客観評価尺度(※2)を開発し、通訳性能が改善されたことを証明した。これらの補助情報を通訳システムの中で利用するための通信手段の開発を行った。</p>
<p>ウ) 自動通訳性能評価尺度の確立</p>	<p>■ 半自動的な評価を実施できるシステム構築の可能性を確認</p> <p>従来の翻訳技術において用いられてきた評価尺度では十分に評価できなかった通訳の性能を的確に評価するため、同時通訳に特化した新たな評価尺度「ペナルティスコア方式」を開発した。本方式では、評価項目として「訳抜け」「構文」「語彙」の3項目を設定し、それぞれの項目に対して誤りの個数及び深刻度に応じた減点をおこなう手法を採用している。</p> <p>この評価尺度を用いて、通訳技能者48名による通訳試験(英日)の解答結果を7名の評価者が評価したところ、1名を除き、評価者間で相関係数0.85以上が得られ、人による安定的な評価が可能であることが確認された。なお、本成果は、言語処理学会第30回年次大会(NLP2024)において発表済みである。</p>

	さらに、「ペナルティスコア方式」を用いた人手評価手法と、翻訳自動評価指標である「BERT Score (Recall) (※3)」との相関を分析した結果、最も高い項目では相関係数が0.8を超える値が得られ、半自動的な評価を実施できるシステム構築の可能性を見出した。
--	--

- ※1 ペナルティスコア (Penalty Score) : 通訳結果を「訳抜け」「構文」「語彙」の観点から減点方式でスコア付けすることにより通訳の正確性を評価する手法。
- ※2 客観評価尺度 : 評価用データから計算により通訳の質を数値に変換する尺度。
- ※3 BERT Score : 機械翻訳や要約などテキスト生成の評価指標の一つで、単語がマッチングするかどうかではなく、意味が似ているかどうかをベクトルで判断する。

## (2) 自動同時通訳システム技術

技術の種類	目標の達成状況																														
<p>ア) 自動同時通訳ユーザインタフェース技術 a) システム利活用要件に応じた統合検証技術</p>	<p>■利用シーンとツールの組み合わせの検証 オンライン会議やツアーガイド、シンポジウムなど、対面・遠隔の両方で多様な実証を実施。得られた知見から、自動同時通訳システムの最適な活用条件と棲み分けを明確化。実証実績を基に、類似の特性を持つ新たな活用シーンを発見し、シーンの横展開を実施。また、シーンとツールの組み合わせに関しても検証を行い、特にツアーガイドシーンでは、音声入出力ヘッドセットとスマホアプリの組み合わせが効果的であることを実証。</p> <p>■用務達成度の達成 「会話の目的を達成できたか」という観点からヒアリングを実施し、用務達成度を測定。実証全体では、用務達成度 80.6%を記録。</p> <p>■システム要件の確立 音声認識技術の向上が最重要課題として浮上。特に、非ネイティブ話者の音声認識精度向上が課題。また、フィルターの多用、早口、連続的な発話、不明瞭な発音、小声など、話者の状態による認識精度の低下も確認。これらの課題に対し、人間の自然な話し方や行動に適応可能なシステム設計とデバイス開発の必要性を特定。</p> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center; background-color: #424242; color: white; padding: 2px;">実証の蓄積</p> <table style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td rowspan="2" style="vertical-align: middle;">           累計実証回数 <b>113回</b> 延べ被験者数 <b>509人</b> </td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>etc</td> </tr> </table> </div> <p style="text-align: center; background-color: #424242; color: white; padding: 2px;">同時通訳システムが活躍する条件の発見</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 通訳者・逐次通訳と棲み分けを図る条件「リアルタイム性」「文脈依存度」「翻訳精度要求度」</li> <li>● 同時通訳システムを用いた円滑なコミュニケーションを行うための条件「周辺音」「回り込み」「専門性」</li> </ul> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 15%; vertical-align: top;"> <b>棲み分け条件</b> </td> <td style="width: 45%;"> <table style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">リアルタイム性</td> <td style="padding: 2px;">リアルタイム性が重視され、多少の誤訳が許容される。</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">周辺音</td> <td style="padding: 2px;">普通の声で問題なく会話可能な音声環境。</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">文脈依存度</td> <td style="padding: 2px;">文脈依存度が低く、非言語的な情報が少ない。</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">回り込み</td> <td style="padding: 2px;">他人の発話が入りこまない。 ※音源分離技術は未対応</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">翻訳精度要求度</td> <td style="padding: 2px;">誤訳が前後の文脈で補完され、許容される。 (多少の不正確さが問題とならない)</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">専門性</td> <td style="padding: 2px;">辞書登録が不要、または簡単に対応可能。</td> </tr> </table> </td> <td style="width: 15%; vertical-align: middle; text-align: center;"> <b>利用条件</b> </td> <td style="width: 15%;"></td> </tr> </table>							累計実証回数 <b>113回</b> 延べ被験者数 <b>509人</b>							etc	<b>棲み分け条件</b>	<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">リアルタイム性</td> <td style="padding: 2px;">リアルタイム性が重視され、多少の誤訳が許容される。</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">周辺音</td> <td style="padding: 2px;">普通の声で問題なく会話可能な音声環境。</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">文脈依存度</td> <td style="padding: 2px;">文脈依存度が低く、非言語的な情報が少ない。</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">回り込み</td> <td style="padding: 2px;">他人の発話が入りこまない。 ※音源分離技術は未対応</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">翻訳精度要求度</td> <td style="padding: 2px;">誤訳が前後の文脈で補完され、許容される。 (多少の不正確さが問題とならない)</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">専門性</td> <td style="padding: 2px;">辞書登録が不要、または簡単に対応可能。</td> </tr> </table>	リアルタイム性	リアルタイム性が重視され、多少の誤訳が許容される。	周辺音	普通の声で問題なく会話可能な音声環境。	文脈依存度	文脈依存度が低く、非言語的な情報が少ない。	回り込み	他人の発話が入りこまない。 ※音源分離技術は未対応	翻訳精度要求度	誤訳が前後の文脈で補完され、許容される。 (多少の不正確さが問題とならない)	専門性	辞書登録が不要、または簡単に対応可能。	<b>利用条件</b>	
						累計実証回数 <b>113回</b> 延べ被験者数 <b>509人</b>																									
							etc																								
<b>棲み分け条件</b>	<table style="width: 100%;"> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">リアルタイム性</td> <td style="padding: 2px;">リアルタイム性が重視され、多少の誤訳が許容される。</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">周辺音</td> <td style="padding: 2px;">普通の声で問題なく会話可能な音声環境。</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">文脈依存度</td> <td style="padding: 2px;">文脈依存度が低く、非言語的な情報が少ない。</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">回り込み</td> <td style="padding: 2px;">他人の発話が入りこまない。 ※音源分離技術は未対応</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">翻訳精度要求度</td> <td style="padding: 2px;">誤訳が前後の文脈で補完され、許容される。 (多少の不正確さが問題とならない)</td> <td style="border: 1px solid #ccc; padding: 2px;">専門性</td> <td style="padding: 2px;">辞書登録が不要、または簡単に対応可能。</td> </tr> </table>	リアルタイム性	リアルタイム性が重視され、多少の誤訳が許容される。	周辺音	普通の声で問題なく会話可能な音声環境。	文脈依存度	文脈依存度が低く、非言語的な情報が少ない。	回り込み	他人の発話が入りこまない。 ※音源分離技術は未対応	翻訳精度要求度	誤訳が前後の文脈で補完され、許容される。 (多少の不正確さが問題とならない)	専門性	辞書登録が不要、または簡単に対応可能。	<b>利用条件</b>																	
リアルタイム性	リアルタイム性が重視され、多少の誤訳が許容される。	周辺音	普通の声で問題なく会話可能な音声環境。																												
文脈依存度	文脈依存度が低く、非言語的な情報が少ない。	回り込み	他人の発話が入りこまない。 ※音源分離技術は未対応																												
翻訳精度要求度	誤訳が前後の文脈で補完され、許容される。 (多少の不正確さが問題とならない)	専門性	辞書登録が不要、または簡単に対応可能。																												
<p>ア) 自動同時通訳ユーザインタフェース技術 b) 入力音源分離技術</p>	<p>■SNR の 15dB 改善相当の分離効果を実現 最大同時発話者 2 人の音声サンプル群に対し目標の SNR15dB 相当の分離効果を得た。新たな評価指標として、分離技術を必要とせず分離効果を測定できる音声の特徴量を選定。音声信号同士の相互相関係数から音声成分の他チャンネルへの混入度を評価し、その値に応じて入力音声のゲインを動的に制御することによって実現した。</p>																														

図：同時通訳の要素技術とフロー

### ■UI ガイドラインの策定

「自動同時通訳システム向け UI デザインルール」を策定し、GCP 協議会ホームページ上で一般公開。これにより、事業者による自動同時通訳サービスの開発と社会実装を促進。また、自動翻訳シンポジウムや Japan MICE EXPO などの展示会での技術展示を通じて、本技術の普及啓発を実施した。

<p>イ) 自動同時通訳プラットフォーム技術</p>	<p><b>■実証のための自動同時通訳プラットフォームの構築・運用</b></p> <p>初年度に、委託研究や実証利用者が使用可能な「自動同時通訳プラットフォーム」を構築し、5年間の委託研究機関を通じて運用した。初年度に外部 API 仕様を策定し共有の上、年度ごとの各技術の研究成果が反映されたエンジンを迅速にプラットフォームに反映しつつ常に最新の研究成果を実証で利用できるようにし、実証の円滑な実施に貢献した。</p> <p>図：プラットフォームの外部提供イメージ</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・自動同時通訳システムユニット <ul style="list-style-type: none"> <li>利用者ごとに構築する同時通訳プラットフォーム。下記ユニット管理システムを通じて、このシステムユニットを利用者が使用するタイミングごとに起動・停止することで不使用時のコストを抑えることができる。</li> </ul> </li> <li>・ユニット管理システム <ul style="list-style-type: none"> <li>上記システムユニットの運用状態を監視し、利用時間の集計やログの集約を行うサブシステム。</li> </ul> </li> <li>・利用者向けコンソール画面 <ul style="list-style-type: none"> <li>利用者がウェブ画面上にて、システムユニットの起動・停止の制御や利用履歴の確認を行えるもの。</li> </ul> </li> </ul> <p><b>■災害時等でのシステム安全性の確認</b></p> <p>災害などの大規模障害の発生を想定したシステムの可用性検討を実施し。障害発生時の早期復帰又は継続運用するための仕組みを設計した。また、コンテナ技術を用いたオーケストレーションにより運用するシステムに対し、データセンター全停止のケースを想定したシミュレーションを行い到達目標が達成できることを確認した。</p> <p><b>■自動同時通訳プラットフォームの計算資源利用効率の向上</b></p> <p>検証用の自動同時通訳プラットフォームの運用において、音声認識の計算資源利用効率面での課題を解決するため、効率化の設計・実装及び負荷試験による検証を実施した。音声認識の計算資源利用効率については 60%を超えて利用できることを確認した。また、負荷試験の過程で別途抽出した翻訳エンジン利用の課題もアーキテクチャの再構成を行い解決した。</p>
	<p><b>3 政策効果の把握の手法</b></p>

## 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、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件 (0件)	1件 (1件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0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)	1件 (1件)	1件 (1件)	4件 (0件)	0件 (0件)	7件 (3件)
その他の誌上発表数	2件 (1件)	5件 (3件)	1件 (1件)	0件 (0件)	0件 (0件)	8件 (5件)
口頭発表数	2件 (0件)	6件 (0件)	9件 (0件)	4件 (0件)	3件 (0件)	24件 (0件)
特許出願数	2件 (0件)	2件 (0件)	6件 (0件)	5件 (0件)	2件 (0件)	17件 (0件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (0件)	1件 (0件)
国際標準提案数	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)	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	6件 (0件)	1件 (0件)	0件 (0件)	6件 (0件)	9件 (0件)	22件 (0件)
報道掲載数	6件 (0件)	2件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0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	平成30年、我が国の年間訪日外国人旅行者数は約3,119万人と初めて3,000万人を超え、また、在留外国人数は同年12月末時点で約273万人と過去最高を記録するなど、我が国の訪日・在留外国人は

	<p>年々増加しており、平成31年4月の出入国管理法改正も背景として今後更に増加が見込まれるなど、外国人との交流の機会もますます増えるとともに、2025年には大阪・関西万博の開催も控えていた。国際会議、ビジネス、行政手続、日常生活、観光等の場面で、多くの日本人と外国人との間でストレスなく十分なコミュニケーションを図るため、AIによる多言語翻訳技術の更なる高度化が求められていた。</p> <p>また、「経済財政運営と改革の基本方針2019」、「統合イノベーション戦略2019」、「AI戦略2019」等、政府の重要戦略において、2025年大阪・関西万博の開催等に向け、深層学習（ディープラーニング）により高精度と遅延の最小化を両立する実用レベルの同時通訳の実現、周囲の状況や文化的背景も考慮し、話者の意図を補足しながら利用可能（議論レベル）な翻訳技術の実現を目指すことが政策課題として定められており、外国人との共生社会の実現に向けた本研究開発を直ちに取り組む必要があった。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発の実施に当たっては、NICTが蓄積した既存の技術・ノウハウを最大限に活用し、メーカー等の技術力を結集して、AIによる多言語翻訳技術の更なる高度化及び同時通訳の実現に向けた研究開発を実施した。更に、通訳会社、通訳学校、コンテンツホルダー、旅行代理店、商社、メーカー等、翻訳サービスの提供が見込まれる事業者の協力のもと、研究開発と並行して社会実証に取り組み、本研究開発で開発する技術の性能評価を実環境で実施することにより、確実な社会実装を図ることとしており、またその際に、外部有識者や他の研究機関との連携、チェックを行うことにより、効率的な開発が進められた。</p> <p>委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関する経理書類を提出させ、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保している。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があると認められる。</p>
有効性	<p>文脈に応じた語彙の統一、周囲の状況や文化的背景等を考慮して話者の意図を補完した翻訳、議論にも利用可能な翻訳等を可能とする要素技術、高精度かつ低遅延な実用レベルの同時通訳技術の確立により、国際会議、ビジネス、行政手続、日常生活、観光等の場面で、多くの日本人が外国人との間でストレスなく十分なコミュニケーションを図ることができるようになることから、グローバルで自由な交流や外国人との共生社会の実現に寄与すると認められる。</p> <p>また、翻訳サービスの提供が見込まれる事業者の協力のもとで、社会実証に取り組み、本研究開発で開発する技術の性能評価を実環境で実施することにより、実態に即した評価が得られた。当該評価結果は、これらを反映した技術開発を可能とするものであり、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があると認められる。</p>
公平性	<p>多言語自動翻訳技術の更なる高度化による、会話の文脈や話者の意図も補完した同時通訳技術等の確立は、世界の「言葉の壁」をなくし、グローバルで自由な交流や外国人との共生社会の実現に寄与するものであり、開発した技術を活用したサービスやアプリケーションを民間に展開することができたことから、本研究開発の成果は広く国民の利益になるものである。</p> <p>研究開発委託先の選定に当たっては、公募を広く行い、応募者の提案について外部専門家・有識者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企画競争方式により、競争性が確保された。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>平成30年、我が国の年間訪日外国人旅行者数は約3,119万人と初めて3,000万人を超え、また、在留外国人数は同年12月末時点で約273万人と過去最高を記録するなど、我が国の訪日・在留外国人は年々増加しており、今後更に増加が見込まれた（令和6年3,687万人）ほか、2025年には大阪・関西万博の開催も控えていた。こうした中、「経済財政運営と改革の基本方針2019」、「統合イノベーション戦略2019」、「AI戦略2019」等、政府の重要戦略において、2025年大阪・関西万博の開催等に向け、深層学習（ディープラーニング）により高精度と遅延の最小化を両立する実用レベルの同時通訳の実現、周囲の状況や文化的背景も考慮し、話者の意図を補足しながら利用可能（議論レベル）な翻訳技術の実現を目指すことが政策課題として定められていた。</p> <p>加えて、外国人との交流の機会がますます増える中、国際会議、ビジネス、行政手続、日常生活、観光等の場面で、多くの日本人と外国人との間でストレスなく十分なコミュニケーションを図るため、AIによる多言語翻訳技術の更なる高度化が求められており、国が先導して、外国人との共生社会の実現に向けた本研究開発やインフラ整備を進める必要があった。</p> <p>よって、本研究開発には優先性があると認められる。</p>

## 5 政策評価の結果（総合評価）

我が国の令和6年の訪日・在留外国人は過去最高を更新し、令和7年は大阪・関西万博も開催されていることから、外国人との交流の機会はますます増加している。そのような中で深層学習（ディープラーニング）により高精度と低遅延を両立する実用レベルの自動同時通訳の実現、周囲状況等も考慮した翻訳技術の実現が求められており、外国人との共生社会の実現に向けた本研究開発を直ちに取り組む必要があった。

本研究開発では自動同時通訳システムの基盤技術として「入力分割・要約・翻訳出力最適化技術」、「多様な情報源を活用した通訳精度向上技術」等を開発し、訳出スピードの高速化や補助情報を利用して通訳精度の向上等を実現した。また、社会実装を進めていくうえで必要なシステム技術として、「入力音源分離技術」、「プラットフォーム技術」等を開発し、音声認識精度の向上や計算資源利用効率の向上等を実現した。さらに、社会実証においては、通訳ニーズが高い複数の分野・場面で実証を行い、同時通訳システムが求められるシーンの利用条件等を明確にした。国内外の様々な場面での「通訳」ニーズに対して ICT を活用し、社会経済活動において「言葉の壁」を感じさせない環境を創出することにより、グローバルで自由な交流や外国人との共生社会の実現に向けて、利用者利便の一層の推進に寄与することができた。

よって、本研究開発には必要性、有効性等があると認められる。

<今後の課題及び取組の方向性>

### 1) 「研究開発と実用化」

本研究開発の成果をさらに実用化するためには、次の技術課題が残されている。マルチモーダル化技術の高度化、コンテキスト活用技術の高精度化、省資源言語対応技術の超多言語化、軽量化技術である。

マルチモーダル化技術の高度化により、非言語情報を活用することで翻訳精度の向上が期待される。また、コンテキスト活用技術の高精度化により、自然な表現や専門用語の正確な翻訳が可能となり、より高度なコミュニケーションを実現することができる。さらに、省資源言語対応技術の超多言語化は、少数言語の翻訳が可能となり、日本企業の海外企業進出を後押しし、グローバルコミュニケーションの拡大が見込まれる。これらの技術を社会実装するためには、精度を保ちながらコンパクトな実装が可能な Neural Machine Translation (NMT) や中規模生成 AI 技術の軽量化技術の研究開発が不可欠である。

これらの技術課題を解決することで、実用化の促進と市場拡大に繋がるため、産学官連携組織であるグローバルコミュニケーション開発推進協議会と密に連携し、市場分析と今後のロードマップ策定を実施する予定である。また、実用化を推進するためには、本研究開発成果の技術移転の推進とユースケースの積み上げが重要である。さらに、研究開発成果を広く発信し認知度を向上させるために、イベントでの出展やセミナーでの紹介などを通じて、普及展開に努めていく。

### 2) 「市場展開・社会実装」

今後の市場展開・社会実装には更なる実用化に向けた技術課題の解決とともに、社会の受容性を高めることが重要である。展示会やシンポジウムを活用し、本研究開発成果を活用した製品の出展を行うことで認知度を向上させ、企業や組織への導入を促進していく。そのために、包括的なサポート体制を構築し、公共交通機関や商業施設などへの多言語情報配信サービスの実践的な導入を目指していく。技術課題を解決する過程で、新たな活用シーンを開拓し、実践的な導入事例を積み重ねることで、新しい市場の開拓と社会実装の深化に繋げていく。

## 6 学識経験を有する者の知見の活用

「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和7年6月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、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。

- ・訪日外国人や在留外国人の増加に伴い、「言葉の壁」を取り除くという目標は妥当である。同時通訳技術へのニーズが高まり、システムの円滑な運用が求められている。本研究開発は独創性と革新性に優れた統合型自動同時通訳システムを目指しており、利用分野の拡大により産業や経済活動の活性化が期待される。
- ・LLM の普及により日本語処理技術の重要性が増している中、本課題は適切な政策目標と研究開発目標に基づいて組織的に研究開発が行われた。スタンドアロン構成の開発等、個々の成果は優れている一方で、それらをシステムとして統合し効果的にアピールするためにはさらなる工夫が必要である。

## 7 評価に使用した資料等

- 経済財政運営と改革の基本方針 2019（令和元年6月21日閣議決定）  
<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/honebuto/2019/decision0621.html>
- 統合イノベーション戦略 2019（令和元年6月21日閣議決定）  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/index.html>
- A I 戦略 2019（令和元年6月11日統合イノベーション戦略推進会議決定）  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/ai/index.html>
- 外国人材の受入れ・共生のための総合的対応策  
（平成30年12月25日 外国人材の受入れ・共生に関する関係閣僚会議決定）  
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/gaikokujinzai/index.html>
- 情報通信技術の情報通信技術の研究開発の評価について  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027\\_1.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027_1.html)

# 令和7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7年8月

## 1 政策（研究開発名称）

リモートセンシング技術のユーザー最適型データ提供に関する要素技術の研究開発

## 2 研究開発の概要等

### (1) 研究開発の概要

#### ・実施期間

令和4年度～令和6年度（3か年）

#### ・実施主体

株式会社 Preferred Networks、国立研究開発法人 情報通信研究機構

#### ・総事業費

3,821 百万円

令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
1,362 百万円	1,269 百万円	1,190 万円	3,821 百万円

#### ・概要

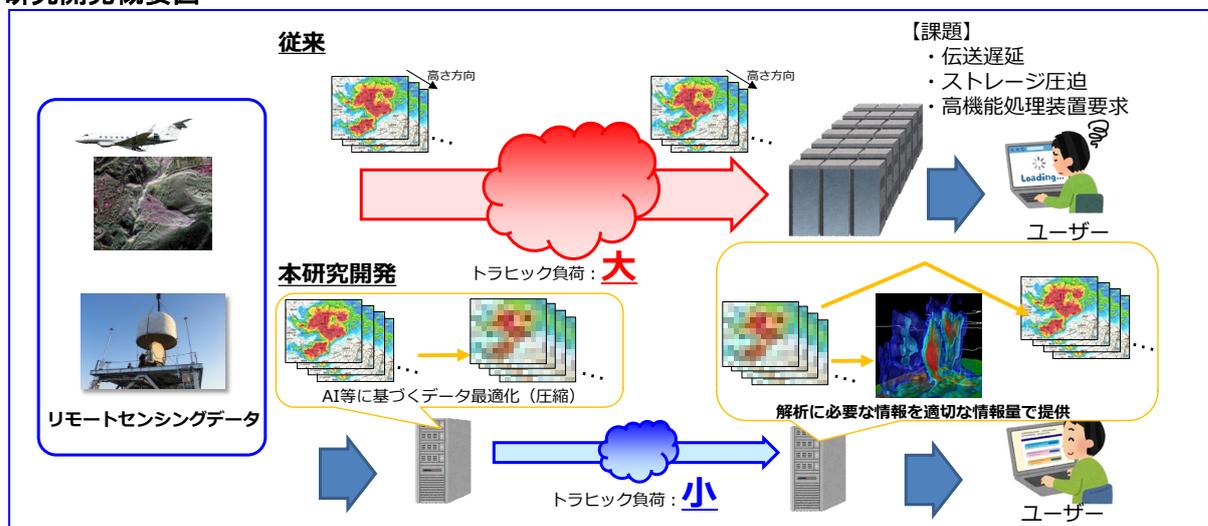
時間的・空間的に分解能が高いリモートセンシング技術として、雨雲の様子を高速かつ高密度に観測可能な次世代気象レーダー（MP-PAWR※<sup>1</sup>）や、悪天候時や夜間にも地表面を観測可能な航空機搭載型合成開口レーダー（Pi-SAR※<sup>2</sup>）等を用いた観測手法があるが、社会実装に向けては、膨大な取得データをリアルタイムに伝送可能な技術やシステムが不足しているという課題があった。

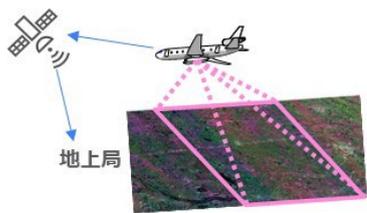
本研究開発では、AI等を活用したこれらのデータの圧縮・復元の要素技術の研究開発するとともに、圧縮・復元技術を用いたデータ提供システムの開発とユーザー実証を行う。

※1 MP-PAWR (Multi-Parameter Phased Array Weather Radar)

※2 Pi-SAR (The third generation X-band airborne Polarimetric and interferometric Synthetic Aperture Radar)

#### ・研究開発概要図



技術の種類	技術の概要
MP-PAWR データ 圧縮復元技術	<p>ユーザーの通信トラフィック環境に応じて 100Mbps、10Mbps、400kbps の3段階のデータ伝送速度内で、ユーザーが期待する情報を遅滞無く提供することが可能なデータ圧縮・復元技術の確立をする。</p> <p>観測データを中断無くユーザーへ提供する必要があることから、処理遅れによるデータ遅滞が無く、かつデータ圧縮処理、ユーザーへの伝送、ユーザー環境での復元処理を行うことが可能なデータ提供手法を確立することとし、これら一連の工程を求められる復元精度に基づきおおむね2分を目途として完了させる。</p>
Pi-SAR データ 圧縮復元技術	<p>航空機上での画像生成処理によって得られた画像（2 km 四方）を、土砂崩れや河川氾濫等の被災状況が把握できる画質に変換する。使用する通信回線は航空機運用の特性上、衛星通信回線を利用することとし、画像の圧縮処理、衛星通信回線を用いたデータ提供システムへの伝送及び画像の復元処理の一連の工程を、30分以内に完了させる。</p> 
圧縮・復元技術 を用いたデータ 提供システムの 試作及び実証	<p>センサーサイトに設置するデータ圧縮技術を搭載したデータ圧縮装置及びデータ復元技術を実装した検証用端末に加え、トラフィック環境を自動判別してユーザーが期待する最適なデータをリアルタイムに提供可能なデータ提供システムの技術的条件を明確にするとともに、プロトタイプを試作する。</p> <p>また、試作したプロトタイプを用い、想定するユーザーを交えた実証実験により、データ圧縮・復元技術の性能改善を図るとともに、本システムの有効性及び最適なデータ提供形態を検証する。</p> <p>なお、試作するデータ提供システムは、Web ブラウザで提供及び閲覧可能な形態と、ユーザー独自の環境に組み込めるよう API 提供の2通りを実装し、ユーザー数が増加した際のシステム拡張にも対応する。</p> 

・スケジュール

技術の種類	令和4年度	令和5年度	令和6年度
MP-PAWR データ 圧縮復元技術			→
Pi-SAR データ 圧縮復元技術			→
圧縮・復元技術 を用いたデータ 提供システムの 試作及び実証	→		→

(2) 達成目標

近年、自然災害の激甚化が進み、毎年1兆円を超える災害被害が生じている。これら災害被害を最小限にするためには、災害発生前及び発生後の気象・地形状況をきめ細かく把握することが極めて重要であり、多種多量な降雨・地形等の情報を取得可能なリモートセンシングデータの活用が期

待されている。一方でこれらリモートセンシングデータは、時間的及び空間的に分解能が高いことからデータ量が膨大となり、特に災害時における限られた通信トラヒック環境下においてリアルタイムでのデータ提供に課題を残している。

本研究開発では、時間的・空間的に分解能の高いリモートセンシングデータを、ユーザー（気象予測や情報公開を行う公的機関・民間企業等）の通信トラヒック環境に応じて3段階（※）のデータ伝送容量内で提供できるよう、通信トラヒックへの負荷を軽減しつつ効率的に計測データを伝送する技術を確立する。本研究開発により、平時はもとより災害時等の限られた通信トラヒック環境下にあっても、適切にデータ提供が行え、激甚化する災害被害の低減に向けた環境を構築することができる。

※100Mbps（既存光回線の実効速度）、10Mbps（既存携帯電話回線（上り）の実効速度）、400kbps（既存衛星通信回線の実効速度）の3段階とする。

○関連する主要な政策

V. 情報通信（ICT 政策） 政策9「情報通信技術の研究開発・標準化の推進」

○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）
<p>経済財政運営と改革の基本方針2021(令和3年6月18日閣議決定)</p>	<p>第1章 新型コロナウイルス感染症の克服とポストコロナの経済社会のビジョン</p> <p>5. 防災・減災、国土強靱化、東日本大震災等からの復興</p> <p>(1) 防災・減災、国土強靱化</p> <p>気候変動の影響により激甚化・頻発化する水害・土砂災害や高潮・高波への対策として、堤防・ダム・砂防堰堤・下水道・ため池の整備、森林整備・治山対策、ダムの事前放流・堆砂対策、線状降水帯等の予測精度向上、グリーンインフラの活用、災害リスクも勘案した土地利用規制等を含むまちづくりとの連携など、流域全体を俯瞰した流域治水を推進する。</p> <p>第2章 次なる時代をリードする新たな成長の源泉～4つの原動力と基盤づくり～</p> <p>2. 官民挙げたデジタル化の加速</p> <p>(2) 民間部門におけるDXの加速</p> <p>(略)</p> <p>大規模災害等への対応のため、インターネットエクスチェンジ36の地方分散やデータセンターの国内立地・新規拠点整備等に取り組む。また、クラウドサービスの信頼性向上、相互接続性や強靱性の確保を図る。このほか、地理空間（G空間）情報の高度活用及び衛星データの利活用を図る。</p>
<p>第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月26日閣議決定）</p>	<p>第2章 Society 5.0の実現に向けた科学技術・イノベーション政策</p> <p>1. 国民の安全と安心を確保する持続可能で強靱な社会への変革</p> <p>(3) レジリエントで安全・安心な社会の構築</p> <p>(b)あるべき姿とその実現に向けた方向性</p> <p>頻発化・激甚化する自然災害に対し、先端ICTに加え、人文・社会科学の知見も活用した総合的な防災力の発揮により、適切な避難行動等による逃げ遅れ被害の最小化、市民生活や経済の</p>

	<p>早期の復旧・復興が図られるレジリエントな社会を構築する。</p> <p>(c) 具体的な取組</p> <p>①頻発化、激甚化する自然災害への対応</p> <p>○国際的な枠組みを踏まえた地震・津波等に係る取組も含め、自然災害に対する予防、観測・予測、応急対応、復旧・復興の各プロセスにおいて、気候変動も考慮した対策水準の高度化に向けた研究開発や、それに必要な観測体制の強化や研究施設の整備等を進め、特に先端 ICT 等を活用したレジリエンスの強化を重点的に実施する。</p>
○防災基本計画（令和3年5月中央防災会議決定）	<p>第1編 総則</p> <p>第3章 防災をめぐる社会構造の変化と対応（略）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・効果的・効率的な防災対策を行うため、AI、IoT、クラウドコンピューティング技術、SNS の活用など、災害対応業務のデジタル化を促進する必要がある。デジタル化に当たっては、災害対応に必要な情報項目等の標準化や、システムを活用したデータ収集・分析・加工・共有の体制整備を図る必要がある。</li> </ul> <p>第2編 各災害に共通する対策編</p> <p>第1章 災害予防</p> <p>第4節 災害及び防災に関する研究及び観測等の推進</p> <p>2 防災知識の普及，訓練</p> <p>(2) 災害予知・予測研究及び観測の充実・強化等</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・国〔内閣府，文部科学省，気象庁等〕は，研究機関等の行った観測研究の成果が防災体制の強化（風水害においては災害危険区域の指定を含む。）に資するよう、国、地方公共団体等の防災機関への情報提供等を推進するものとする。</li> </ul>

### (3) 目標の達成状況

3年間の研究開発を通じて、データ圧縮・復元技術の研究開発について、当初の目標より高いレベルで達成することができた。具体的には、MP-PAWR データ圧縮復元技術については、通信帯域に応じてユーザーの必要とする観測データを、高い品質を保ちつつより高効率に圧縮・送信・復号することを実現した。Pi-SAR データ圧縮復元技術については、画像データをより小さく圧縮し、衛星通信回線経由で伝送・復元することを実現した。圧縮・復元技術を用いたデータ提供システムの試作及び実証について、MP-PAWR については、MP-PAWR データ提供システムと 4D 閲覧システムである「きゅむろん」を開発し、航空機搭載合成開口レーダーについては、最新の観測画像をブラウザで閲覧可能なリアルタイム配信プラットフォームを開発した。これにより、想定されるユーザーが実際のデータを使用して実証を行うことができるようになったため、当初計画を大きく上回るユーザー候補の 55 者と有効性検証の議論を行い、そのうちの 9 者と実証を行うことを通して、プラットフォームの有用性を示すことができ、目標を達成した。

技術の種類	目標の達成状況
MP-PAWR データ圧縮復元技術	MP-PAWR データ圧縮復元技術について、幅のある通信帯域に対応可能な、優先度付き符号化の仕組みを開発することで、当初目標（各特微量の PSNR の平均が 30dB 以上の高い品質を保ちつつ 2 分以内に圧縮・送信・復号）を超える、36.9dB で 79.8 秒以内での圧縮・送信・復号の実証し、目標を上回って達成した。
Pi-SAR データ圧縮復元技術	航空機搭載合成開口レーダーデータ圧縮復元技術については、伝送時間を短縮するために、新たなデスペックリング法を用いた SAR 画像特有のスペックルノイズの除去する技術

	<p>を開発し、最新の画像圧縮コーデックの一つである、AVIF を利用することで、当初目標（元画像との PSNR が 15dB 以上となる品質を保ちつつ、JPEG 画像に比べて半分のサイズに圧縮）を超える、16.5dB の品質で JPEG 画像に比べて 31.2%のサイズの圧縮を実現し、目標を上回って達成した。この技術を利用することで、2 km 四方の画像を衛星回線経由で地上に送信する際の当初目標（実効帯域 400Kbps、30 分以内）を超える実効帯域 121Kbps、平均 22 分 17 秒で圧縮、通信、復号の一連の処理ができることを確認し、目標を上回って達成した。</p>
<p>圧縮・復元技術を用いたデータ提供システムの試作及び実証</p>	<p>MP-PAWR データについては、MP-PAWR データ提供システムと 4D 閲覧システムの「きゅむろん」を試作して令和 6 年度に公表した上で、想定ユーザーとなる 55 者と議論を行い、うち 4 件の実証及び Preferred Networks における自社研究を行った。さらに、実証等を踏まえ、「きゅむろん」のユーザーインターフェースの改善や提供するデータのファイルフォーマットの変更などを行い、当初目標（ユーザーが期待する最適なデータをリアルタイムに提供可能なデータ提供システムの技術的条件を明確にするとともに、プロトタイプを試作し、想定ユーザーによる実証実験と、ユーザーフィードバックに基づいたシステムの挙動や機能の改善）を上回って達成した。</p> <p>航空機搭載合成開口レーダーデータについては、普段、SAR 画像を取り扱わない自治体関係者等にも判断に有用な情報を提供するために、関心領域自動抽出技術を開発し、当初目標（誤差 1m 以下の必要十分な正確さで関心領域（例えば道路）を把握）を超える、幅 3m の道路で誤差 1m に相当する IoU (Intersection over Union) = 0.5 を上回る IoU = 0.575 を確認し、目標を上回って達成した。また、想定ユーザーとなる 55 者と議論を行い、観測画像をブラウザで閲覧可能な Pi-SAR X3 リアルタイム配信プラットフォームを試作した上で、うち 4 件の実証を行い、当初目標（ユーザーが期待する最適なデータをリアルタイムに提供可能なデータ提供システムの技術的条件を明確にするとともに、プロトタイプを試作）を達成した。</p>

### 3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、基本計画書に記載の政策目標に向けた研究開発期間内での実施事項、達成状況に加え、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を用い、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、「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和 7 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。

### 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、MP-PAWR 及び航空機搭載合成開口レーダーのデータ圧縮復元技術を確実に確立しており、また、技術実証が報道掲載されるなど社会的な周知も達成し、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 ( 0 件)	1 件 ( 1 件)	0 件 ( 0 件)	1 件 ( 1 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0 件 ( 0 件)	2 件 ( 2 件)	0 件 ( 0 件)	2 件 ( 2 件)
その他の誌上発表数	3 件 ( 0 件)	0 件 ( 0 件)	2 件 ( 0 件)	5 件 ( 0 件)
口頭発表数	3 件 ( 0 件)	7 件 ( 0 件)	11 件 ( 0 件)	21 件 ( 0 件)
特許出願数	0 件 ( 0 件)	3 件 ( 3 件)	3 件 ( 3 件)	6 件 ( 6 件)
特許取得数	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)	0件(0件)	0件(0件)
国際標準獲得数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
受賞数	0件(0件)	0件(0件)	1件(0件)	1件(0件)
報道発表数	0件(0件)	0件(0件)	2件(0件)	2件(0件)
報道掲載数	0件(0件)	0件(0件)	5件(0件)	5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：「査読付き誌上发表論文数」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：「その他の誌上发表数」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	『経済財政運営と改革の基本方針2021(令和3年6月18日閣議決定)』でも触れられているとおり、激甚化・頻発化する水害・土砂災害等への対策として、防災、減災、国土強靱化が求められる中で、時間的・空間的に分解能が高いリモートセンシングデータを活用することが期待されており、実用化に向けた課題であったデータのリアルタイム伝送の課題を解決することが求められていた。防災対策、特にリモートセンシング技術は、その性質上、民間が単独で研究開発を行うことは難しく、国家として研究開発を実施することが妥当であったと考えられる。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、リモートセンシング技術に加え、従来あまり取り組まれてこなかったAIに関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する研究者等のノウハウを積極的に活用した。具体的には、従来、気象に関する推定では物理法則の知識に基づいたアプローチが行われてきたが、気象の専門家のアドバイスを受けながらデータドリブンな形で推定を行う手法を適用することができた。このような専門家の適材適所により、3年間の中で、当初の目標を上回る技術の開発に加え、実証を複数行うなど、効率的に研究開発を推進することで、最大の投資効果を得ることができた。 また、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アドバイザリ委員会や、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。 委託経費の執行に当たっては、事前に予算計画書を確認するとともに、年度途中及び年度末に経費の執行に関する経理書類を提出させ、総務省担当職員が詳細な経理検査を行い、予算の効率的な執行に努めた。加えて、専門的知見を有した監査法人に経理検査の補助を依頼し、経費執行の適正性・効率性を確保している。 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	高分解能かつ高精度なリモートセンシング技術によって取得した膨大な観測データに、AI等を利用した圧縮・復元技術を適用し、通信トラフィック環境に応じユーザーが期待する情報を適切に提供する技術を確立するとともに、取得したデータをリアルタイムにユーザーへ提供するデータ提供システム

	<p>の技術を確立することにより、ユーザーが期待するデータを間断無くリアルタイムに提供し続け、災害被害の拡大防止や早期対応による事業継続等への貢献が期待できることが確認できた。</p> <p>リモートセンシング技術の実用化に向けたデータ伝送技術の開発を確立しその提供システムを作成することにより、事業者が実証を行う環境整備を実現し、55 者との有効性検証の議論や9 者との実証実験を行うことができた。</p> <p>リモートセンシング技術や気象関係の外部有識者や専門家を含む研究開発運営委員会の意見も踏まえつつ技術開発を行い、実証においては、官公庁、自治体、民間事業者（気象予測事業者、報道関係事業者）等幅広い事業者からのフィードバックを得ることで、研究開発と実証実験を一体的に推進しており、研究開発期間終了後の実用化を見越した結果が得られた。</p> <p>さらに、事業終了後も関係機関と連携し、2025 年の大阪・関西万博においては、高精度な気象予測情報を来場者や博覧会協会の運営者等に提供する実証を行うなど、社会的効果が期待できる。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>リモートセンシング技術の実用化に向けたデータ伝送技術の開発とその提供システムの試作と実証は、今後の防災減災対策に寄与するものであり、安全・安心な生活の確保に繋がるなど、本研究開発の成果は、広く国民の利益になるものである。</p> <p>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。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>近年、豪雨等による自然災害の激甚化が進み、その被害を抑え、早急に復旧・復興を進めることが、国民の安心・安全を実現するための喫緊の課題となっている中で、その対策として期待されている時間的・空間的に分解能が高いリモートセンシングデータを活用するための技術開発と提供システムを作成することは急務であった。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

## 5 政策評価の結果（総合評価）

- ・近年、豪雨等による自然災害の激甚化が進み、防災、減災、国土強靱化が求められる中で、時間的・空間的に分解能が高いリモートセンシングデータを活用することが期待されており、実用化に向けた課題であったデータのリアルタイム伝送の課題を解決することが求められていた。
- ・本事業を通じて開発された技術及びシステムにより、ユーザーが期待するデータを間断無くリアルタイムに提供し続け、災害被害の拡大防止や早期対応による事業継続等への貢献が期待できることが確認できた。
- ・リモートセンシング技術の実用化に向けたデータ伝送技術の開発を確立しその提供システムを作成することにより、事業者が実証を行う環境整備を実現し、9 者との実証実験を行うなど、目標を達成することができた。
- ・さらに、2025 年の大阪・関西万博においては、関係機関と連携し、高精度な気象予測情報を来場者や博覧会協会の運営者等に提供する実証を行うなど、研究成果の実用化へ向けた成果が得られた。
- ・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＞

- ・MP-PAWR 観測と提供システムの運用の継続を通じたユーザーの拡大。
- ・大阪・関西万博における実証を含む研究開発後の実用化に向けた実証や検討。
- ・航空機搭載型合成開口レーダーデータの利活用の促進。

## 6 学識経験を有する者の知見の活用

「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和7年6月）において、目標の達成状況や得

られた成果等について、研究開発の目的・政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部評価を実施し、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。

- ・異常気象や大規模災害が深刻化する中、非常に重要な研究開発に取り組んでおり、基本計画書の目標を上回る成果が得られている。
- ・技術開発にとどまらず、ユーザーニーズや実環境を踏まえた研究を行うとともに、関係者へのヒアリングを積極的に行うなど、今後の社会実装を見据えた動きも評価できる。
- ・本研究で開発された技術を広く展開するためにも、実用化への取組や外部への成果公表等に関する一層の努力を期待する。

## 7 評価に使用した資料等

- 経済財政運営と改革の基本方針 2021（令和3年6月18日閣議決定）  
[https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2021/2021\\_basicpolicies\\_ja.pdf](https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2021/2021_basicpolicies_ja.pdf)
- 第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月26日閣議決定）  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf>
- 防災基本計画（令和3年5月25日中央防災会議決定）  
[http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon\\_gaiyou.pdf](http://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_gaiyou.pdf)
- 情報通信技術の情報通信技術の研究開発の評価について <一般>  
[http://www.soumu.go.jp/menu\\_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027\\_1.html](http://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027_1.html)

# 令和7年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局 宇宙通信政策課

評価年月：令和7年8月

## 1 政策（研究開発名称）

多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御に関する研究開発

## 2 研究開発の概要等

### (1) 研究開発の概要

#### ・実施期間

令和2年度～令和6年度（5か年）

#### ・実施主体

民間企業、大学及び国立研究開発法人

#### ・総事業費

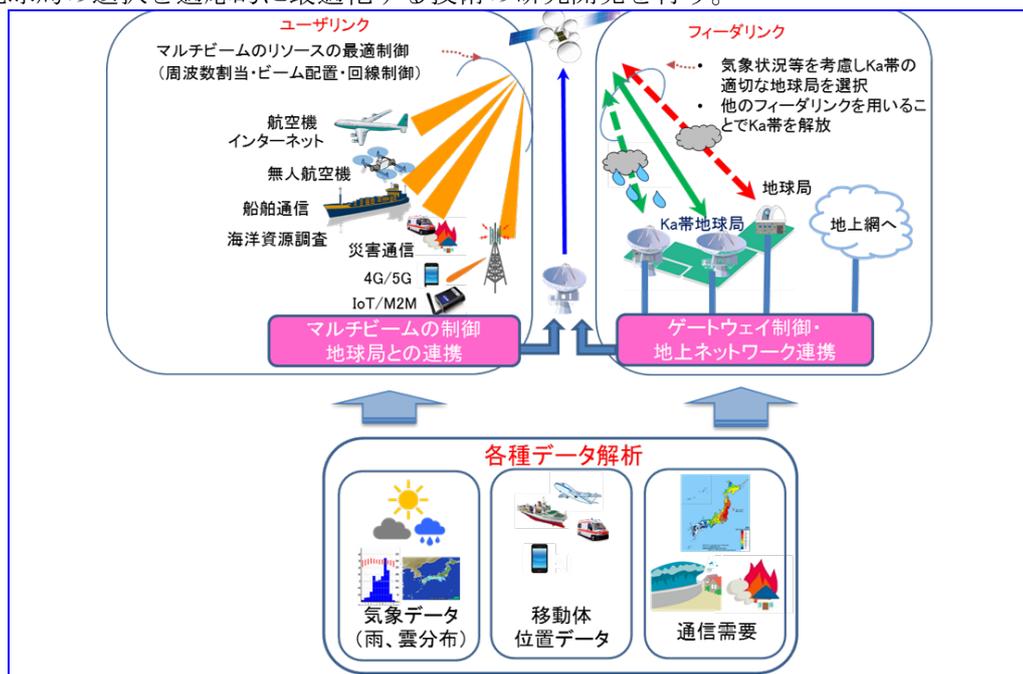
6,305百万円

令和2年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
1,227百万円	1,610百万円	1,455百万円	1,251百万円	762百万円	6,305百万円

当時、事前評価が必要であることの確認が不十分だったため当該評価は実施していない。現在は、評価対象事業に係るそうした確認不足等を防止するための周知徹底や複数課室による重層的な確認等の措置が講じられている。

#### ・概要

フレキシビリティ化を実現し、衛星通信に対する多様なニーズに対応するため、各ユーザ側が用いている衛星端末システムとフレキシブルなHTS（High Throughput Satellite）衛星及びゲートウェイ地球局等の地上系システムからなる衛星通信システムが円滑に接続するとともに、ユーザ側のニーズや天候状況、及びそれらの変動を総合的に考慮して、各ビーム及び各ユーザ端末への帯域割当や、各ビームの形状・位置の変更によるエリアの制御、フィーダリンク及びゲートウェイ地球局の選択を適応的に最適化する技術の研究開発を行う。



技術の種類	技術の概要
衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術	衛星通信と地上網との接続における TCP/IP 通信における実効伝送速度（実効スループット）の低下や、最悪の場合通信切断が発生し、エンド to エンドの適切な通信が出来ないという課題に対応するため、各種ニーズに対応した衛星通信システムにおける通信方式に関し、特にサービス品質において重要な、衛星回線と地上網の遅延時間の差や回線速度の差、衛星／地上（5G、IoT（Internet of Things）等）間の通信プロトコルの違いを考慮した QoS（Quality of Service）対策に資する衛星—地上接続方式（衛星システムと地上システムを途切れずに接続するための方式）の検討を行う。
予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術	時々刻々と変化する通信需要及び回線条件、並びに衛星リソースの制御周期を考慮して適切に運用計画を立案しなければ、呼損の発生や、衛星リソースの余剰が発生し、ユーザに適切な通信サービスを提供できない可能性があるため、通信需要や天候などによる回線条件の変化をデータ解析に基づき予測を行い、ユーザリンク、フィーダリンクに関する衛星リソースを適切に割り当てる運用計画方式を検討する。加えて、「衛星のフルデジタル化」を踏まえた運用計画方式を考慮する。
衛星リソース制御技術及び総合評価	各種干渉を考慮した周波数配列の最適化を実現するデジタルチャネライザ及びデジタルビームフォーミング、フィーダリンクのリソース制御のための方式を検討し、リソース制御システムについて詳細設計を行い、その実証のために必要となるハード及びソフトからなるシステムを製作し、単体評価を実施する。 令和元年までの ETS-9（技術試験衛星 9 号機）の開発成果と、上記 2 件及び前記リソース制御システムを連携した、衛星そのもののシステム及び衛星通信のための地上系のシステム、一部の地上網を統合した総合実証環境の構築に資するための、総合評価の方式検討を行う。なお総合評価には、キャリブレーション技術（励振係数の補正技術）の評価も含まれる。

## ・スケジュール

各年度の成果又は実施内容を簡潔に記載すること。

技術の種類	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度
衛星通信システムにおける衛星—地上接続技術	基本設計等		詳細設計	地上総合評価準備	有効性検証
予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術	基本設計等			課題抽出／最適化等	有効性検証
衛星リソース制御技術及び総合評価	基本設計、詳細設計等				有効性検証
	方式検討等		地上総合評価環境の構築・評価		地上総合評価

## (2) 達成目標

様々な通信要求に対応し、ビーム毎の周波数割り当てやビーム配置、地球局選択等の最適化を可能とする衛星通信システムの制御のための技術を確立することで、従来の衛星通信システムに比べ周波数利用効率を 2 倍に改善することで、周波数の有効利用に資する。

○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）
宇宙基本計画(平成 27 年 1 月 9 日宇宙開発)	「通信・放送衛星に関する技術革新を進め、最先端の技術を獲得・保有していくことは、我が国の安全保障及び宇宙産業の国際競争力の

戦略本部決定)	強化の双方の観点から重要である。このため、今後の情報通信技術の動向やニーズを把握した上で我が国として開発すべきミッション技術や衛星バス技術等を明確化し、技術試験衛星の打ち上げから国際展開に至るロードマップ、国際競争力に関する目標設定や今後の技術開発の在り方について検討を行い、平成 27 年度中に結論を得る。これを踏まえた新たな技術試験衛星を平成 33 年度（令和 3 年）をめどに打ち上げることを目指す」旨が記載されている。
宇宙基本計画工程表 （令和元年12月13日 宇宙開発戦略本部決定）	「技術試験衛星（9号機）の衛星バス及びミッション機器ともに詳細設計やプロトフライトモデル製作・試験、各種試験等を継続し、2022年度の打上げを目指す。その後、5G・IoT等の地上システムと連携した次世代ハイスループット衛星の実現のための実証実験等を行う。」旨が記載されている。
宇宙基本計画工程表 （令和2年12月15日 宇宙開発戦略本部決定）	産業・科学技術基盤を始めとする我が国の宇宙活動を支える総合的基盤の強化において、「衛星開発等を巡る国際競争が激化する中、我が国の競争力強化が急務であり、衛星開発・実証プラットフォームの推進体制を2020年度内に構築。各衛星開発・実証プロジェクト（衛星光通信、衛星量子暗号通信、衛星のフルデジタル化等）を効果的・効率的に推進。」旨の記載されている。また、2020年度末までの取組状況・実績の記載の中に、「技術試験衛星（9号機）の開発では、2023年度の打上げに向けて」という記載があり、打ち上げ年度が2023年度に変更された。
宇宙基本計画工程表 （令和3年12月28日 宇宙開発戦略本部決定）	「産業競争力の強化を目指し、技術試験衛星9号機について、フルデジタル通信ペイロードの搭載を踏まえて詳細設計、維持設計を行い、プロトフライトモデルの製作・試験等を継続し、2023年度の打上げを目指す。その後、5G・IoT等の地上システムと連携した次世代ハイスループット衛星実現のための実証実験を行う。」旨が記載されている。
宇宙基本計画工程表 （令和4年12月23日 宇宙開発戦略本部決定）	「技術試験衛星9号機の開発では、2025年度の打上げに向けて、詳細設計、エンジニアリングモデル・プロトフライトモデルの製作・試験等を実施した。」「5G・IoT等の地上システムと連携する、次世代静止通信衛星の実現に向けて、フルデジタル通信ペイロード、固定ビーム及び可変ビームを搭載した技術試験衛星9号機の維持設計を継続する。」旨が記載されている。
宇宙基本計画工程表 （令和6年12月24日 宇宙開発戦略本部決定）	「フルデジタル通信ペイロード、固定ビーム及び可変ビームを搭載した技術試験衛星9号機を2025年度以降の打上げを目指して、維持設計及びプロトフライトモデルの製作・試験等を継続するとともに、打上げ後の海外展開を含めた実装を着実に進め、当該分野における国際競争力強化を図っていく。」「打上げ時期については、開発状況等を踏まえて今後検討。」との旨が記載されている。
統合イノベーション 戦略2019(令和元年6 月21日閣議決定)	「国際競争力強化を目指したH3ロケットの開発、情報収集衛星の機数増及び機能保証強化、先進光学・レーダ衛星の開発、技術試験衛星の開発等を行う。」旨が記載されている。
デジタル変革時代の ICTグローバル戦略懇 談会 報告書（令和元 年5月31日）	「衛星及び地球上のネットワークがシームレスに連携した基盤が実現する」旨が記載されている。
宙を拓くタスクフォ ース 報告書（令和元 年6月7日）	「衛星通信技術の高度化等」について記載されている。
宇宙技術戦略(令和6 年度改訂)(令和7年	「大容量で柔軟な通信を提供するためのペイロードの高度化」について、「衛星の打上げ後に軌道上でソフトウェアを書き換えることに

3月25日)	より、機能の変更が可能で通信ニーズの変化に対応可能なデジタル通信ペイロードの需要が大半となってきたこと、「我が国では、これまでフルデジタル通信ペイロード、固定・可変ビームを開発してきており、これらを搭載した ETS-9 の打上げを目指して取組を進めている。」こと等が記載されている。
--------	---

### (3) 目標の達成状況

5年間の研究開発を通じて、フレキシブルな衛星通信機器の通信リソース配分を最適化するための制御技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標どおり達成することができた。

具体的には、課題アの衛星通信システムにおける衛星-地上接続技術は、衛星回線と地上回線の差を考慮した新たな衛星-地上接続方式を開発しシミュレーション及び疑似衛星局・エミュレータによる接続試験により有効性を確認し、目標を達成した。

課題イの予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術は、フレキシビリティを有する衛星リソースを適切に割り当てる衛星リソース割当方式や AI 技術を活用した衛星リソース制御方式の数理モデル、通信需要・回線条件の予測技術、衛星システム制御機能を開発し周波数利用効率を2倍以上改善可能であることをシミュレーションにより確認し、目標を達成した。

課題ウの衛星リソース制御技術及び総合評価は、フレキシビリティを有する衛星リソースを適切に制御する方式を開発し、各衛星通信サブシステムの実証実験方式を検討し、地上検証・衛星搭載及び性能試験により実証環境の構築を実施し、また、衛星通信システム全体の総合評価として地上総合評価を行い、疑似衛星局を用いたシナリオ評価により周波数利用効率が改善することを機能的に確認し、課題イのシミュレーションと上記の評価結果により、周波数利用効率の目標を平均で2.0倍、最大で6.6倍の改善効果を確認しており、目標を上回って達成した。

これにより、ETS-9 を利用した軌道上実証を実施するために必要な地上系システムを運用・評価できる環境を構築できる目途が得られたため、目標を達成した。

技術の種類	目標の達成状況
課題ア 衛星通信システムにおける衛星-地上接続技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>衛星回線と地上回線の差を考慮した新たな衛星-地上接続方式を開発（NTN スライスや QI マッピングの提案、QoS 制御可能なネットワークスライシング方式の提案等）した。</li> <li>シミュレーション及び疑似衛星局・エミュレータによる接続試験により有効性を確認した。</li> </ul>
課題イ 予測技術を活用した衛星通信システムの運用計画作成技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>フレキシビリティを有する衛星リソースを適切に割り当てる衛星リソース割当方式を提案し、これを実装するネットワーク管制装置の運用計画作成機能を開発し、有効性を確認した。</li> <li>AI 技術を活用した衛星リソース制御方式の数理モデルを構築し、周波数利用効率に与える影響評価を完了した。</li> <li>通信需要・回線条件の変化をデータ解析に基づき予測する技術を開発し、予測値を運用計画作成機能へと受け渡す気象状況予測サブシステム・移動体需要予測サブシステムを実装・評価し、サブシステムの有効性を確認した。</li> <li>衛星通信システム制御機能を開発し、運用計画作成機能との接続評価により衛星リソースを適切に割り当てる運用計画方式を確立した。</li> <li>周波数利用効率を2倍以上改善可能であることをシミュレーションにより確認した。</li> </ul>
課題ウ 衛星リソース制御技術及び総合評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>フレキシビリティを有する衛星リソースを適切に制御する方式を開発し、H/W 開発による単体評価、接続評価により有効性を確認した。</li> <li>実証実験方式を検討し、実証環境を構築するために地上設備を整備し、また国際周波数調整を実施し、衛星軌道・周波数の確保を実施した。</li> <li>衛星通信システム全体の総合評価として、地上総合評価を行い、衛星搭載機器による評価（キャリブレーション技術評価を含む）、及び疑似衛星局を用いたシナリオ評価により、フィーダリンク・ユーザリンクの周波数利用効率が改善することを機能的に確認。課題アの衛星-地上接続方式の成果は疑似衛星局を使用した検証を実施し動作を確認。課題イの成果を取り込んだ NOC～SOC のハードウェア接続評価を実施し、運用計画から衛星中継器制御コマンド生成までの動作を確認した。</li> <li>課題イのシミュレーション及び上記の評価結果により、周波数利用効率を2倍以上改善可能であることを確認した。</li> </ul>

### 3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、基本計画書に記載の政策目標に向けた研究開発期間内での実施事項、達成状況に加え、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を用い、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7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。

### 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出願・取得、論文・研究発表の実績から、フレキシブルな衛星通信機器の通信リソース配分を最適化するための制御技術を確立しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和2年度	令和3年度	令和4年度
査読付き誌上発表論文数	0件（0件）	3件（3件）	2件（2件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	2件（2件）	7件（7件）	5件（5件）
その他の誌上発表数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
口頭発表数	18件（1件）	20件（2件）	24件（4件）
特許出願数	5件（0件）	6件（0件）	6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	0件（0件）	2件（2件）	1件（1件）
国際標準獲得数	0件（0件）	0件（0件）	1件（1件）
受賞数	0件（0件）	1件（1件）	0件（0件）
報道発表数	1件（0件）	1件（0件）	0件（0件）
報道掲載数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）

主な指標	令和5年度	令和6年度	合計
査読付き誌上発表論文数	2件（2件）	2件（2件）	9件（9件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	4件（4件）	0件（0件）	18件（18件）
その他の誌上発表数	2件（0件）	0件（0件）	2件（0件）
口頭発表数	29件（0件）	28件（2件）	119件（9件）
特許出願数	6件（2件）	5件（3件）	28件（7件）
特許取得数	5件（0件）	5件（0件）	10件（0件）
国際標準提案数	2件（2件）	0件（0件）	5件（5件）
国際標準獲得数	0件（0件）	1件（1件）	2件（2件）
受賞数	3件（2件）	1件（0件）	5件（3件）
報道発表数	3件（1件）	1件（0件）	6件（1件）
報道掲載数	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:「その他の誌上发表数」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	<p>欧米では、ブロードバンド環境を提供しつつ周波数のひっ迫状況に対応するため、ハイスループット衛星(High Throughput Satellite:HTS)と呼ばれる通信容量の大容量化を狙った衛星通信システムの開発が進んでいる。HTSは広帯域を確保可能なKa帯以上の周波数帯の利用、100ビーム級のマルチビーム構成による高い周波数利用効率、複数ゲートウェイ地球局の利用によって大容量化を実現する。しかしながら、Ka帯においては近年、固定通信や移動通信などの地上回線と衛星回線の双方での利用が進み、周波数のひっ迫により、周波数の効率的な運用や他のシステムとの共用が求められている。</p> <p>限られた周波数の中でこれらを有効に機能させるためには、衛星通信システムとして、5G網やIoT網などへの接続に対応した衛星通信システムであると同時に、ユースケース毎のニーズやその変動、電波伝搬状況などを総合的に考慮して、各ビームの周波数帯域の幅、及び各ユーザ端末への帯域割当、各ビームの形状・位置の制御、フィードリンク及びゲートウェイ地球局の選択などを最適化し、衛星に割り当てられた周波数を有効に利用する必要がある。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発の実施に当たっては、衛星搭載中継器制御技術に関するこれまでの要素技術研究の成果と本研究開発内で開発した評価環境を最大限に活用して効果的に研究開発及び実証等を実施した。また、研究開発成果は宇宙科学技術連合講演会にてオーガナイズドセッションを組み、各課題を総合的に報告し、また展示会等において広く来場者からの意見等をうかがい、さらに標準化などの最新情報を調査しながら研究開発を推進したことにより、投資に対して最大限の効果が得られた。</p> <p>実施期間中には受託各社が関連事項に関し、インタフェース管理文書などを作成するなど進捗状況や課題を調整・共有し、外部の有識者と受託者から構成される運営委員会から、研究の進捗状況や今後の進め方等について助言を受けるなど、効率的な研究開発の実施に向けた情報交換が積極的に行われた。</p> <p>さらに、衛星搭載中継器及び制御技術あるいは衛星回線品質に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、大学、研究者等のノウハウを積極的に活用することにより、各社がそれぞれ得意な分野を担当し、効率的に研究開発がすすめられた。</p> <p>また、経費の執行においては、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。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発によってフレキシブルな衛星通信機器の通信リソース配分を最適化するための制御技術を確立したことにより、衛星通信を活用した多様なユースケースの需要に応えるために必要不可欠となる衛星通信システムの制御技術が実現した。このことから、今後普及が見込まれる地上系のモバイル通信網のエリア外のブロードバンド通信やIoT通信、5G等のモバイル通信と連携した通信サービスなどの多様なユースケースに対応可能なブロードバンド衛星通信システムの普及に寄与することができた。</p> <p>また、フレキシブルなリソース配分を実現する衛星通信システムは非常災害時の地上系通信の補完や緊急通信システムによる利用等の通信需要の急激な増大にも対応可能なシステムであり、非常災害時に際して強靱な衛星通信システムの普及にも寄与することが期待できる。</p> <p>本技術の確立は、今後利用が広がっていく海域や上空、宇宙空間までの三次元の領域におけるブロードバンド環境を実現するため、静止衛星や非静止衛星、高高度プラットフォーム(HAPS)等が連携して複数の軌道により多層化されたマルチオービット通信システムの普及にも寄与することが期待できる。</p>

	<p>さらに「NTNを含む複数の通信システム間の相互接続に関する APT 新報告」には、本研究開発の成果である地上基地局と衛星ネットワーク間の接続技術の開発やデジタルビームフォーミング (DBF) やソフトウェア定義無線 (SDR) による通信最適化技術が反映された。これら成果の活用により、アジア太平洋地域におけるデジタルデバイドの解消や、災害時発生時の迅速な情報伝達と救援活動の向上、さらにはスマート農業化による作業の効率化と生産性向上に利用できるものと期待される。また、本報告書を契機として、ITU-R や 3GPP などの標準化団体での衛星・地上ネットワーク統合に関する議論の活発化や、2027 年に開催予定の世界無線通信会議 (WRC-27) へ有意な影響を与えることが期待される。特に本研究開発成果を含む上記の APT 新報告の完成を契機として、APT/AWG においては Ka 帯を含む衛星通信及び非地上系ネットワーク (NTN) の活用の議題が多数開始され、議論が活発化した。</p> <p>また、過年度開発済みの ETS-9 の固定・可変ビーム、及び本研究開発の成果の一部が反映された固定・可変ビームのリソース制御を行う固定・可変 SOC/NOC、フルデジタル通信パイロード (FDP) のリソース制御を行う DPRM について、軌道上実証に向けた開発・評価 (地上総合評価を含む地上実証) を進めることにより、我が国の宇宙産業の国際競争力強化、及び研究開発成果の実用化に向けた道筋を形成した。実用通信衛星の提案活動を継続・推進するにあたり、ETS-9 のこれまでの地上実証における開発・評価成果に加えて、軌道上実証の実績が重要であるため、FDP と固定ビームの組み合わせによる軌道上実証及び運用実績を獲得し、我が国として通信事業者 (オペレータ) 等に十分に訴求可能な提案活動を進め、実用通信衛星の受注展開に寄与することが期待される。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発の成果を基に衛星 5G/Beyond5G 連携技術やユースケースの実証に活用されることで、離島、海上、山間部のような地上系システムでカバーできない地域での利用が進み、また、自然災害をはじめとする非常時等に備えた地上系ネットワークの冗長性の確保にも有効であるので広く国民の利益になるものである。</p> <p>また、本研究開発は NTN の国際標準化に貢献しており、周波数資源の利用効率の向上とともに、次世代の通信インフラの普及促進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。</p> <p>また、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。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>2030 年代に実現を目指している次世代の通信技術である Beyond 5G は開発競争が年々激化している。Beyond 5G は従来からの陸・海・空に加え宇宙を含めた領域をシームレスにつなぐ環境が想定されており、我が国が開発競争に遅れることなく非地上系ネットワーク (NTN) について、世界に先駆けて開発・実装・利活用を一体的に進めていく必要がある。</p> <p>本研究開発の成果は、ネットワークが整備されていない遠隔地に加え、ドローンや空飛ぶ車等の飛行体への通信サービスの提供など多様な通信サービスの実現や、地政学リスクや災害リスクに備えた強靱なネットワークの実現に資するものであり、次世代通信インフラの構築に向けた取り組みの一環として優先的に取り組む必要がある。加えて現在 Ka 帯は固定通信や移動通信などの地上回線と衛星回線の双方での利用が進んでいることから、周波数の効率的な運用や他のシステムとの共用を優先的に進めていく必要がある。</p> <p>また、静止軌道における衛星の調達においては、衛星通信需要が多様化していることや、需要の変化の不確実性が増大していることから、衛星の打上げ後に軌道上でソフトウェアを書き換えることにより、機能の変更が可能で通信ニーズの変化に対応が可能なデジタル通信パイロードの需要が大半となってきた。このため我が国では、これまでフルデジタル通信パイロード、固定・可変ビームを開発してきており、これらを搭載した ETS-9 の打上げを目指して取組みを進めているところである。この技術は、安全保障を含めた通信の抗たん性強化にも資するものであり、将来、通信衛星市場において競争力の一端を担うことが想定されることから、これらに係る研究開発を着実に進めることは重要である。</p> <p>本研究開発は衛星のデジタル化・フレキシブル化に対応するための制御の高度化を実現する地上システム技術の研究開発を担うものであり、ETS-9 打上げ後の海外展開を含めた実装を着実に進め、当該分野における国際競争力強化に欠かせない取り組みである。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。</p>

## 5 政策評価の結果 (総合評価)

周波数のひっ迫状況に対応するため、ハイスループット衛星と呼ばれる通信容量の大容量化を狙った衛星通信システムの実現への期待が高まっている中、Ka 帯においては近年、固定通信や移動通信などの地上回線と衛星回線の双方での利用が進み、周波数の効率的な運用や他のシステムとの共用が求められている。本研究開発により、衛星通信システムの周波数の効率的な利用並びに Ka 帯の高い周波数への移行を促進する通信手段の一つとして衛星通信システムが活用されることに寄与すること

ができ、本研究開発には必要性があったと認められる。

本研究開発により、上空や海域、宇宙における活動領域におけるブロードバンド環境や地上のエリア外の通信ニーズ、大規模災害時における通信ニーズなどに応えるブロードバンド衛星通信システムの普及に寄与することができ、目標を達成できた。

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。

<今後の課題及び取り組みの方向性>

本研究開発成果の軌道上実証により、衛星通信システムによる多様なユースケースの普及促進や本技術の運用実績の獲得による受注展開への寄与が期待されることから、今後は、ETS-9 による軌道上実証を目指して取り組みを進めていく。

## 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7年6月20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。

- ・ ETS-9 を利用した軌道上実証実験による総合評価を行うことを念頭において、打上げ前の地上総合評価により、衛星 5G 連携、変化する通信需要／回線条件に対応した AI を活用した予測による時間軸上で適切な割り当てなど、フレキシビリティ機能を有する HTS のリソースの最適な制御技術を確立しており、到達目標は十分に達成されたと思われる。
- ・ 予測技術を活用した運用計画作成技術では、AI による需要・回線条件予測サブシステムと運用計画立案技術を確立し、周波数利用効率の改善（平均 2 倍以上）を実証した。さらに、衛星リソース制御技術の開発と地上総合評価も完了しており、各サブシステムの地上検証や衛星システムへの組み込みも順調に進んでいる。これらの成果は、次世代衛星通信の実現に向けた重要な進展である。

## 7 評価に使用した資料等

- デジタル変革時代の ICT グローバル戦略懇談会 報告書（令和元年5月31日）  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000624358.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000624358.pdf)
- 宙を拓くタスクフォース 報告書（令和元年6月7日）  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000624305.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000624305.pdf)
- 第6期科学技術・イノベーション基本計画（令和3年3月26日 閣議決定）  
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf>
- 統合イノベーション戦略 2023（令和5年6月9日 閣議決定）  
[https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2023\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2023_honbun.pdf)
- 宇宙基本計画（令和5年6月13日 閣議決定）  
[https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy05/honbun\\_fy05.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf)
- 宇宙基本計画工程表（令和6年12月24日 宇宙開発戦略本部決定）  
[https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy06/kaitei\\_fy0612.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy06/kaitei_fy0612.pdf)
- 電波資源拡大のための研究開発の適正な実施のための評価体制  
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>
- 宇宙技術戦略（令和6年度改訂）（令和7年3月25日 内閣府宇宙開発戦略推進事務局）  
[https://www8.cao.go.jp/space/gijutu/honbun\\_20250325.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/gijutu/honbun_20250325.pdf)

# 令和7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 基幹・衛星移動通信課 基幹通信室  
評価年月：令和7年8月

## 1 政策(研究開発名称)

無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信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

令和3年度～令和6年度（4か年）

#### ・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人

#### ・総事業費

1,583 百万円

令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
350 百万円	339 百万円	442 百万円	452 百万円	1,583 百万円

事業開始時点で、十億円以上の費用を要することが見込まれていなかったため、事前評価は実施していない。

#### ・概要

350-600GHz 帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m 以上の距離で 200Gbps 超の伝送容量、100 $\mu$ s 程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するため、下記3技術課題を連携して実施する。

#### 技術課題ア テラヘルツ帯 RF 技術

- ・350-600GHz 帯で動作可能な動作回路を基本要素とし、光ネットワークからの信号を直接無線信号に変換する化合物半導体チップを開発する。

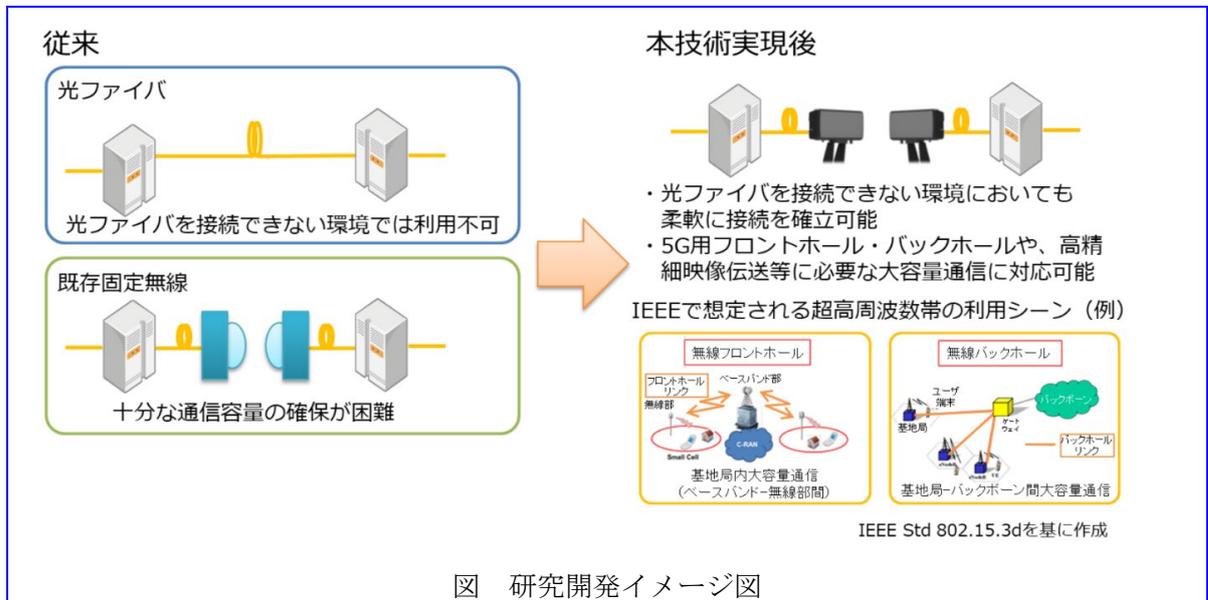
#### 技術課題イ 光電気相互変換技術

- ・低位相雑音かつ高い基本発振周波数を有する光電気発振技術を基盤とし、光信号とミリ波・テラヘルツ信号を効率的に相互変換する技術の研究開発を行う。

#### 技術課題ウ テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク

- ・テラヘルツ波とミリ波を組み合わせることにより、高い可用性を有する無線ネットワーク技術の研究開発を行う。
- ・課題ア～ウの技術を組み合わせた統合システムの構築を行い、屋内又は地下空間におけるシステム実証試験を実施する。

本技術の利用を通じて、5Gにおける無線フロントホール・バックホールに使用する周波数帯を、5Gで利用が想定されるマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行することにより、将来のマイクロ波・ミリ波の周波数逼迫を緩和する。



技術の種類	技術の概要
テラヘルツ帯 RF 技術	<p>搬送波周波数が 500GHz の無線信号を送受信するためのテラヘルツ帯集積回路を開発するための技術開発を実施する。</p> <p>極めて周波数が高く波長が短い信号を扱う場合は、市販の計測設備を導入するだけでは目的とする評価が実施できないという課題がある。そのため、専用の設計環境・計測環境を構築するとともに、送受信化合物集積回路等の増幅器、混合器、通倍器などの要素回路技術を実現する。最終的には、要素回路を組み合わせた送信段の出力電圧 0dBm (導波管端) 以上及び送受信帯域幅 50GHz の無線システムを構築する。</p>
光電気相互変換技術	<p>テラヘルツ帯の無線システムを実現するためには位相雑音の優れた信号源が必要となる。そのため、高品質な超高周波光電気信号を直接生成可能なマイクロ光コムを核とした光電気発振技術の実現を目指す。</p> <p>具体的には光領域で高性能化が進んでいる「マイクロ光コム」による低位相雑音のテラヘルツ波の生成を実現するために、以下の技術の確率を目指す。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>周波数間隔 350~600GHz のマイクロ光コムを用いた周波数通倍を必要としない低位相ノイズ超高周波光電気信号発生技術</li> <li>マイクロ光コムのモード間隔に等しい周波数と低位相ノイズを有するテラヘルツ波信号が発生可能な光/テラヘルツ変換技術</li> <li>テラヘルツ波の伝送信号情報を光キャリア信号に重畳可能なテラヘルツ/光変換技術</li> <li>オール光型テラヘルツ発生及び検出の特徴を活かしたテラヘルツ変復調技術</li> </ol> <p>これら 4 つの課題と並行して、マイクロ光コム技術による信号生成は、直近では無線機に実装するための信号電力が十分でない可能性があるため、光電気変換により 60GHz の低位相雑音信号を生成する技術の開発も目指す。</p>
テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク	<p>テラヘルツ帯の伝送システムではその伝送特性が雨や風などの天候の影響を受けやすく受信電力が条件によっては充分得られないという課題がある。高いゲインのアンテナが比較的容易に実現できるという特徴がある反面、最大利得を満たす方向から僅かでもアンテナの方向性にズレが生じると、所要のアンテナ利得が得られないため、アンテナの方向制御の高精度化が必要となる。</p> <p>このため降雨減衰や風によるアンテナ方向性の揺らぎなど天候の影響を考慮に入れた伝送システム設計や、ビーム制御、複数帯域の同時使用、システム評価のための広帯域中間周波数帯技術の実現を目指す。</p> <p>更に光信号から OOK 方式の無線通信に適した信号処理を行うための信号波形処理インタフェースを実装する。</p>

## ・スケジュール

技術の種類	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
超高周波数帯無線通信技術	一次試作	二次試作	統合試験 (I)	統合試験 (II)
光電気発信器による帯域変換技術	一次試作	回路モジュール化	二次試作	実証実験
ミリ波統合ネットワーク技術	一次試作	二次試作	制御設備試作	無線システムの検証

## (2)達成目標

5Gの進展に伴い、莫大な数の小型の基地局の設置が必要となり、その接続リンク（フロントホール）の必要容量も激増することが想定される。また、スモールセルの多用が見込まれる中、全てを光ファイバで接続することが地理的・コスト的に困難であるため、設置が容易で200Gbpsを超える伝送レートが確保可能な無線通信技術の研究開発が急務である。

しかしながら、実用化が進んでいる100GHz以下のミリ波帯や研究開発が盛んに行われている300GHz帯（周波数特定されている帯域）では周波数帯域が足りず200Gbpsを超える伝送レートを実現することは困難である。

本施策では、これまで利用が進められてきていない超高周波数帯（350～600GHz）における無線技術及び光ファイバ信号との相互変換技術の研究開発を実施し、固定無線通信システムの超高周波数帯への移行の促進を通じた周波数の有効利用を図る。また、国際競争力の強化を実現するため、ITUやAPTをはじめとした国際標準化に関連する国際機関への標準化提案を継続して実施する。

### ○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）
Beyond 5G 推進戦略-6Gへのロードマップ（令和2年6月30日）	超高速・大容量といった5Gが有する特長の更なる高度化に加えて、自律性や拡張性といった新たな機能を実現するには、テラヘルツ波や光・量子、AI等の非連続な飛躍的進化を可能とする先端技術を含む無線技術、ネットワーク技術、省エネ技術、セキュリティ技術、そして、これらの基盤となるソフトウェア関連技術等の開発・高度化・標準化が不可欠である。
デジタル時代の新たなIT政策大綱（令和元年6月7日）	【2つめの柱】官民のデジタル化の推進において「なお、「5Gの次」も視野に入れ、新たな要素技術に関する研究開発や、その円滑かつ迅速な社会実装の観点から、実世界の電波伝搬を模擬する試験環境に関する研究開発を推進する。また、産業・ビジネス創出に寄与する産学連携等を同時並行で進めることとする。

## (3)目標の達成状況

4年間の研究開発を通じて、350-600GHz帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m以上の距離で200Gbps超の伝送容量、100μs程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するための基盤技術を確立した。各技術課題の達成状況は下記の通りである。

技術の種類	目標の達成状況
テラヘルツ帯RF技術	テラヘルツ帯RF技術の研究開発では搬送波周波数500GHzの無線信号を送受信するためのテラヘルツ帯集積回路を開発するため下記の項目を実施した。 ①デバイスモデリング及び評価技術 ②集積化モジュール及び無線通信装置の設計技術  ①ではテラヘルツ帯の信号評価システムと実測に基づくデバイスモデリングを実施して

設計環境を構築した。

②では並行して搬送波周波数 500GHz、帯域幅 50GHz の送受信化合物集積回路を増幅器、混合器、通倍器などの要素回路を組み合わせて実現した。

また最終年度には無線システムとしてのシステム実証を行い、送信段の出力電力 0dBm（導波管端）以上（送信アンテナ利得 53dBi 想定時）及び送受信機帯域幅 50GHz を実現した。

### ①デバイスモデリング評価技術

搬送波 500GHz 以上、帯域幅 50GHz 以上に対応する化合物半導体 MMIC の試作評価を行うため、本開発では、半導体の製作にはファウンドリーサービスを利用し、Fmax の高い InP\_HEMT プロセスを採用した。選択したプロセスにて試作した半導体素子について、DC 特性と AC 特性を評価し、計算値と実測値はほぼ同様の特性傾向を示していた。



図 構築した MMIC 評価システム

MMIC の評価には上図のベクトルネットワークアナライザと外部バイアス電源システムにて MMIC 評価システムを構築した。これによりテラヘルツ波帯の 220GHz～1100GHz の範囲にて MMIC の評価を可能とした。

### ②集積化モジュール・無線通信装置の評価技術

化合物半導体 MMIC を用いて集積化モジュールを実現することは、無線通信装置の組み立て、装置内部の回路系統の評価を効率的に行うために必要な過程である。MMIC は単体での性能評価は困難であるため下図に示すように、MMIC 単体実装評価用パッケージに実装しスカラー評価系統で MMIC 単体評価を行った。



図 MMIC 単体評価例

設計した性能が得られたのちにバイアス電源供給回路を設計し MMIC と共に MMIC モジュール用実装パッケージに実装した。下図に開発した集積化及びモジュールに実装したバイアス回路を示す。



図 モジュール写真とバイアス回路

集積化モジュールの出力電力帯周波数特性を下図に示す。500GHz 帯の周波数は、局発信号が約 58GHz であり 9 倍となる 520GHz を搬送波として出力電力特性を評価した。出力電力は目標値である 500GHz 帯で 0dBm を達成し、50GHz 以上の帯域幅も確認できた。このことから 500GHz 以上の搬送波にて帯域幅 50GHz で 0dBm の無通信装置の開発を達成した。

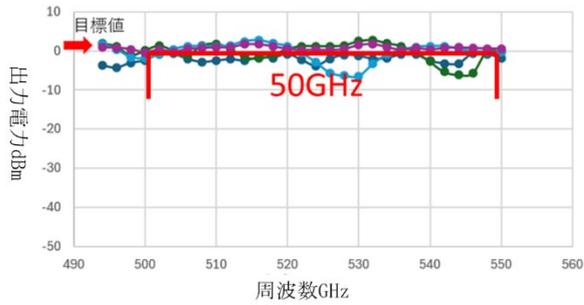


図 出力電力対周波数特性

高品質な超高周波光電気信号を直接生成可能なマイクロ光コムを核とした光電気発振技術を実現するため、以下の4課題を実施した。

①マイクロ光コムを用いた超高周波光電気信号発生技術

周波数通倍を必要としない新たな超高周波・低位相ノイズな光電気信号発生手段として、半導体プロセス技術と親和性の高い構成によりマイクロ光コムを活用する手法を検証した。

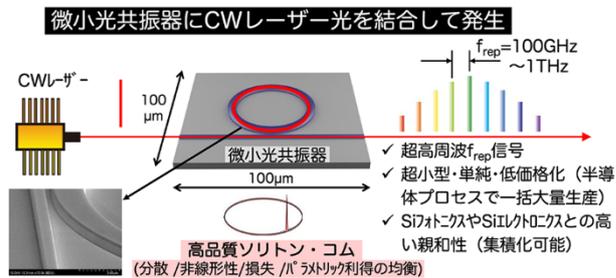


図 マイクロ光コム

具体的には、 $\text{Si}_3\text{N}_4$ リング型微小光共振器 ( $Q \approx 10^6$ ) を基盤としたマイクロ光コム発生装置を開発した。まず、FSR=560 GHz の微小光共振器を用い、ソリトンマイクロ光コムを発生させた。下図に示すように、得られた光スペクトルは、ソリトンマイクロ光コム特有の  $\text{sech}^2$  型スペクトル形状を呈し、560 GHz 間隔で等間隔に並ぶ光周波数モード列と広帯域なスペクトル帯域を有している。また、テラヘルツ帯 RF 技術との周波数接続の可能性を検討するため、低  $f_{\text{rep}}$  マイクロ光コムの実現可能性を検証した。こちらにおいても、下図 2(b) に示すように、安定なソリトンマイクロ光コムの発生に成功した。

マイクロ光コムによるテラヘルツ信号発生技術

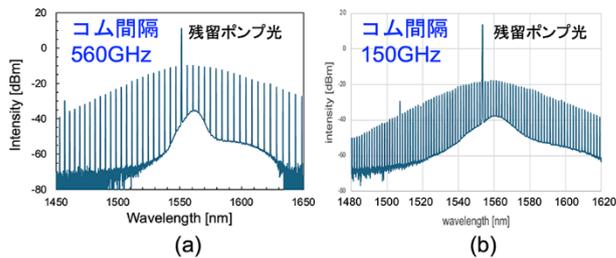


図 ソリトンマイクロ光コムの光スペクトル

(a)  $f_{\text{rep}}=560\text{GHz}$  と (b)  $f_{\text{rep}}=150\text{GHz}$

②-(a) オール光型テラヘルツ発生技術

マイクロ光コムのフォトミキシングを用いて THz 波を発生させた (下図 (a))。具体的には、マイクロ光コムの隣接 2 モードをバンドパスフィルターにより選択的に抽出し、時間領域において光ビート信号を生成する。この光信号を単一走行キャリア・フォトダイオード (UTC-PD) に入力することで、光ビート信号の包絡波成分を電気信号として取り出し、THz 帯に位置する高周

波電波として出力した。下図(b)は、 $f_{rep}$  の低位相ノイズ化制御の有無による THz 波の位相ノイズスペクトルの比較を示している。低位相ノイズ化制御を施すことで、10kHz オフセットにおいて-100dBc/Hz の極めて低い位相ノイズ特性が得られることを確認した。下図(c)は、低位相ノイズ化制御時における  $f_{rep}$  信号と THz 波の位相ノイズスペクトルの比較を示している。これは、マイクロコム  $f_{rep}$  信号の超低位相ノイズ特性が、フォトミキシングを経ても損なわれることなく THz 波側に忠実に転送されていることを示しており、本手法が高品質な THz 信号として有効であることを意味している。

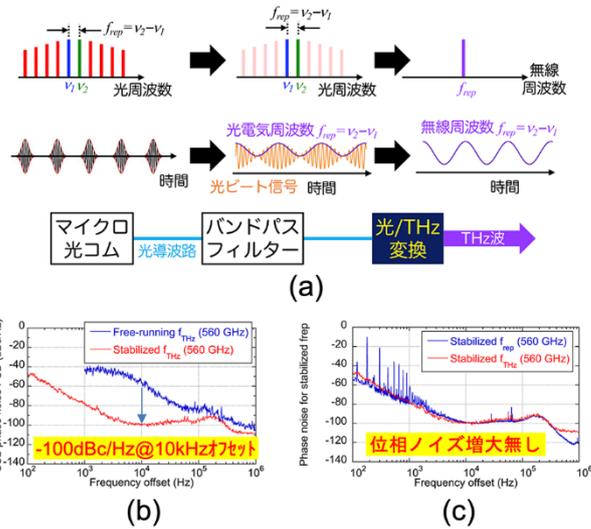


図 (a) フォトミキシングの原理と (b) THz 波の位相ノイズスペクトル

### ②-(b) 60GHz 帯電気光発振器の開発

500GHz 帯の高 SN・THz 波信号発生のため、50-60GHz 信号を 9 乗倍する手法を確立するため、低雑音性に優れると考えられる 50-60GHz 帯の電気光発振 (Optoelectronic oscillator; OEO) の開発を行った。OEO システムの性能向上及び小型化をすすめ、60GHz 帯で動作可能な低ノイズ、低駆動電圧型マッシュツェンダ変調器、60GHz 帯集積型高変換利得光検出器デバイス、狭線幅半導体レーザの開発を行うとともに、光源、光変調器、光検出器を組み込んだ OE 発振装置の設計・試作・評価を行った。図 2-2-8 (a) に代表的な OE 発振器構成を示す。光源、光変調器、光検出器を組み込んだ集積型モジュールの外観が図 2-2-8 (b) となる。このモジュールを発振動作させた際の電気スペクトルが図 2-2-8 (c) である。58GHz 帯での発振が得られており、9 乗倍した際に 500GHz 帯のテラヘルツ帯が得られることが分かり、設計通りの電気光発振器の動作が確認された。また、このスペクトル中心の位相ノイズを測定した結果が図 2-2-8 (d) である。目標であった 10kHz オフセット周波数で-100dBc/Hz を下回るノイズ特性が得られており、低雑音の 50-60GHz 帯発振器を実現した。

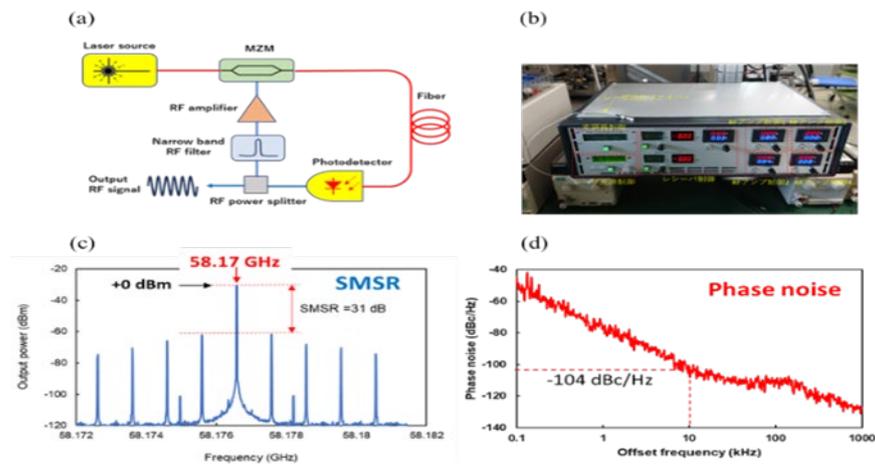


図 (a) 58GHz 帯電気発振器の構成図、(b) 作製した集積型電気光発振器モジュール、(c) 発振動作時の電気スペクトル、(d) 位相ノイズスペクトル

### ③オール光型テラヘルツ検出技術

テラヘルツ無線信号を光信号へ直接変換するデバイスの実現を目指し、電気光学 (EO) ポリマー導波路と上下配置パッチアンテナレイを用いた 375 GHz 帯アンテナ結合型光変調器の試作と評価を実施した。

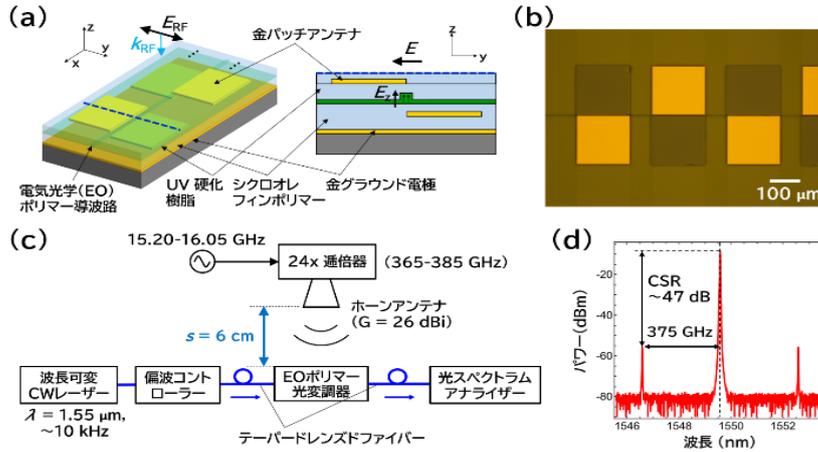


図 375 GHz 帯アンテナ結合型電気光学 (EO) ポリマー光変調器の (a) 顕微鏡画像、(b) 評価系、(c) 375 GHz 電磁波照射時の出力光のスペクトル

EO ポリマー導波路の上下に上部及び下部パッチアンテナのエッジが来るように配置されており、テラヘルツ波が照射されると EO ポリマー導波路に z 方向電場が印加され、EO 効果 (ポッケルス効果) により導波路中を伝搬する光が位相変調される。

### ④オール光型テラヘルツ変復調技術

ベースバンド信号による変復調技術を用いて、QPSK (四相位相変調: Quadrature Phase Shift Keying) 及び 16QAM (16 値直交振幅変調: 16 Quadrature Amplitude Modulation) 方式による THz 帯データ伝送実験を実施した。図 2-2-7(a) に示すように、実験系の中核には低位相ノイズ特性を有するマイクロ光コムを配置し、光源としての高い周波数安定性を確保している。また、光注入同期を用いた構成により、ASE 背景光の少ない光増幅を実現した。IQ 変調器は、マルチレベル変調信号の生成に利用した。さらに、受信側にはヘテロダイン検出方式を採用し、高感度かつ広帯域な信号復調を可能としている。

下図に EVM (Error Vector Magnitude) の伝送レート依存性を示す。QPSK 変調において最大 84 Gbps、16QAM 変調においては 100 Gbps のデータ伝送を達成し、いずれも HD-FEC (Hard-Decision Forward Error Correction) リミットを下回る良好な信号品質を確認した。本システムは 500~570 GHz 帯における世界初の 100 Gbps 達成事例となった。

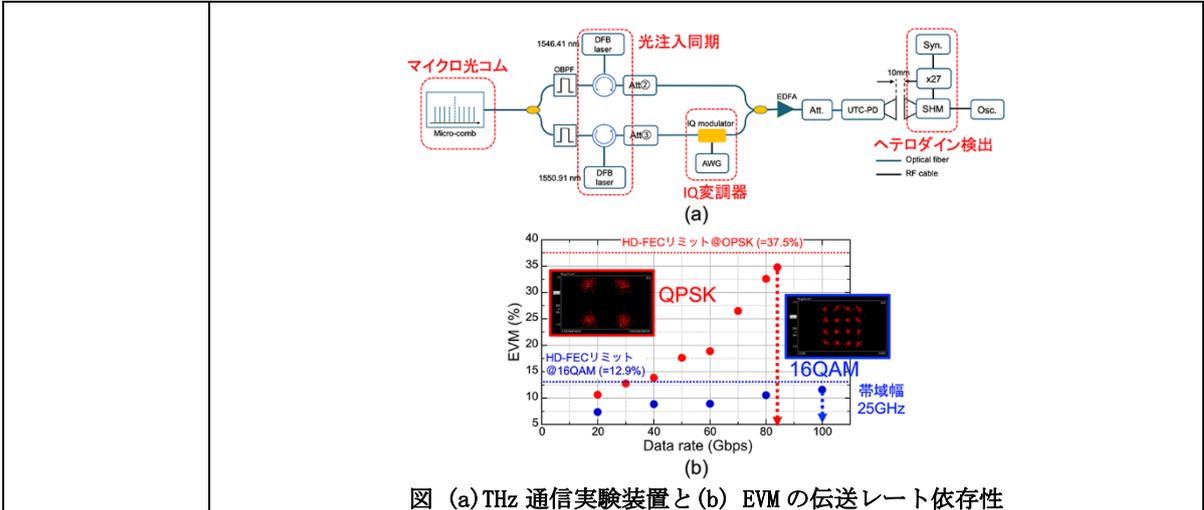


図 (a) THz 通信実験装置と (b) EVM の伝送レート依存性

①要素技術の開発

テラヘルツ帯伝送システムではその特性が雨や風などの天候の影響を受けやすいという課題があるため、天候の影響を考慮に入れた伝送システム設計や、ビーム制御、複数帯域の同時使用、システム評価のための広帯域中間周波数帯技術などの開発を実施した。



図 300GHz 帯屋外伝送装置

②システム化技術

テラヘルツ波帯の RF 部の変調方式はOOK方式としたため、それに伴い無線通信を制御する信号処理基板のインタフェース設計が必要となった。信号処理基板と、基板から出力された 25Gbps のデータ信号波形を示す。本開発では 25Gbps のデータ伝送を送受信する無線回線を最小の無線回線として、この無線回線を偏波多重や周波数多重を組み合わせることで 200Gbps のデータ伝送達成を目指した。

テラヘルツ波・ミリ波統合ネットワーク実証技術



図 開発した信号処理基板と 25Gbps の出力波形

無線通信装置にて 25Gbps のデータ伝送回線を束ねるため、データの多重化及び多重化分割についての評価も実施した。なお、上記のような 25Gbps の伝送レートを持つ回線の組み合わせを、以下のように多数行うことで 200Gbps の伝送速度の達成の見通しを得た。

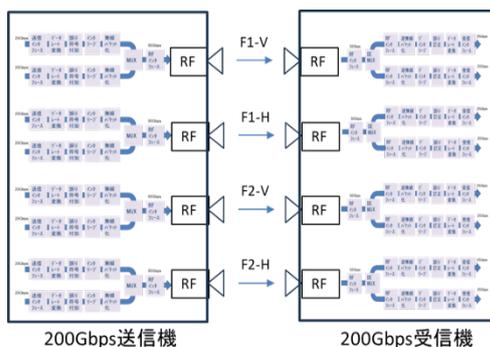


図 200Gbps 無線伝送装置の構成伝送

テラヘルツ波帯の無線回線と、周波数の異なるミリ波 60GHz の無線通信装置を並列設置し、周波数毎の伝搬特性の差を観測した結果を用いて、テラヘルツ波帯の無線回線品質の信頼性向上に利用するシステムを構築するため、60GHz 帯無線伝送装置を開発した。開発した装置の外観写真と装置諸元を下図に示す。



項目	仕様
送信周波数	57~66GHz
送信電力	10mW
データ伝送レート	400Mbps
有線インタフェース	1000base-LX
電源	DC5V、12V
耐水性	JISC0920 5級
使用温度範囲	-10~50℃

図 60GHz 無線通信装置

### 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 7 年 6 月 20 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、当該会議に臨んで、本研究開発の成果として得られた電波伝搬検証基盤技術に関する外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査すると同時に、必要性・有効性等の分析を実施した。

### 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、多数の発表を行い、査読付き誌上発表論文数が 14 件、査読付き口頭発表論文数が 67 件、特許も 9 件出願、国際標準化提案を合計 9 件提案するなど、社会実装に必要な技術を確実に確立していると認められる。

主な指標	令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度	合計
査読付き誌上発表論文数	3 件 (3 件)	3 件 (1 件)	7 件 (5 件)	1 件 (1 件)	14 件 (10 件)

査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	2件 (2件)	22件 (22件)	17件 (17件)	26件 (26件)	67件 (67件)
その他の誌上発表数	2件 (0件)	3件 (0件)	8件 (1件)	4件 (1件)	17件 (2件)
口頭発表数	18件 (4件)	35件 (13件)	12件 (2件)	20件 (3件)	85件 (22件)
特許出願数	0件 (0件)	3件 (0件)	3件 (0件)	6件 (0件)	12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)
国際標準提案数	1件 (1件)	2件 (2件)	2件 (2件)	4件 (4件)	9件 (9件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	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)	1件 (0件)	1件 (0件)	1件 (0件)
報道発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (0件)	0件 (0件)	2件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (0件)	0件 (0件)	2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	<p>周波数のひっ迫が進む中で、無線システムの高周波数帯への移行が求められており、「Beyond 5G 推進戦略ー6G へのロードマップ(令和2年6月30日)」でもテラヘルツ波に関連する技術の高度化・標準化の重要性が指摘されている。</p> <p>また、5Gの進展に伴い、莫大な数の小型の基地局及びリモートアンテナ局の設置が必要となり、その接続リンク(フロントホール)の必要容量も激増することが想定される。スモールセルの多用が見込まれる中、全てを光ファイバで接続することが地理的・コスト的に困難であるため、設置が容易で200Gbpsを超える伝送レートが確保可能な無線通信技術の研究開発が急務であった。</p> <p>そのため、本研究開発によって取り組む超高周波数帯における無線技術及び光ファイバ信号との相互変換技術は、固定無線の高周波数帯への移行を進める電波資源の有効利用に資するものであり、国が実施すべき研究開発として推進する必要があった。</p>

	<p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発を実施するに当たって、テラヘルツ波や光通信に関する豊富な研究実績や専門知識を有する受託者によって、蓄積されたノウハウや知見を有効に活用することで、質の高い研究開発が進められた。</p> <p>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に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。</p> <p>経費の執行にあたっては、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。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>4年間の研究開発を通じて、350-600GHz帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m以上の距離で200Gbps超の伝送容量、100μs程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するための基盤技術を確立した。</p> <p>また、本研究開発は、無線機器メーカーや大学等研究機関を構成員に含むコンソーシアムや外部有識者や専門家を含む研究開発運営委員会などとの連携・協力を得つつ、研究開発と実証実験を一体的に推進しており、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。</p> <p>さらに、本研究開発で得られたテラヘルツ波に関する成果は、ITU-RやAPT等の国際標準化機関へ積極的に入力された。本研究開発で実施した周波数帯域はITU-Rにおいても割り当て、特定が行われていないため、固定無線への特定・割り当てに関する議論は今後行われる予定だが、本研究開発の成果を基にした寄与文書により国際標準化での議論が開始されたことの意義は大きく、日本の国際競争力を向上させ、経済的・社会的効果が得られるものと期待される。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発によって実用化を目指すテラヘルツ帯の実用無線機は、モバイルフロントホール・バックホールでの利用や、山間部といった光ファイバが敷設困難な地域において利用されることが見込まれ、高周波数帯を利用した超高速・大容量無線通信を実現することは、広く国民の利益になるものである。</p> <p>また、本委託研究開発で得られた成果について、ITU-RやAPTをはじめとした国際標準化機関に提案を行うことで、国際標準化を目指した。これは広く我が国における無線通信メーカーの利益となることが期待される。</p> <p>また、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。</p> <p>よって公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>5Gの商用サービスがスタートし、ユーザスループットとして1Gbpsを超える高速モバイル通信が普及しつつある。しかし、瞬間ピークレート20Gbpsを目指す5Gにおいて、リモートアンテナ局と基地局内ベースバンドユニットを結ぶデジタル伝送システムを用いたモバイルフロントホールの容量不足が課題となっている。さらに、5Gの進展に当たっては、更なるユーザスループットの向上に加え、IoT等の超多数接続が要求されるため基地局とリモートアンテナ局を結ぶモバイルフロントホールの必要容量が激増することが予想されている。そのため、高周波数帯を用いた高速大容量の固定通信を実現することは喫緊の課題である。</p> <p>Beyond 5G 推進戦略-6Gへのロードマップ（令和2年6月30日）においても、「超高速・大容量といった5Gが有する特長の更なる高度化に加えて、自律性や拡張性といった新たな機能を実現するには、テラヘルツ波や光・量子、AI等の非連続な飛躍的進化を可能とする先端技術を含む無線技術、ネットワーク技術、省エネ技術、セキュリティ技術、そして、これらの基盤となるソフトウェア関連技術等の開発・高度化・標準化が不可欠である。」こととされている。WRC-31に向けた議題1.8についても、275GHz以上</p>

の規格の策定を目標としており、それに向けた我が国における高度な通信技術の国際標準化を推進することは緊急を要する。
--

## 5 政策評価の結果(総合評価)

5Gの進展に伴い、莫大な数の小型の基地局及びリモートアンテナ局の設置が必要となり、スモールセルの多用が見込まれる中、全てを光ファイバで接続することが地理的・コスト的に困難であるため、設置が容易で200Gbpsを超える伝送レートが確保可能な無線通信技術の研究開発が急務であった。

本研究開発は、無線フロントホール・バックホールに使用する周波数帯をマイクロ波・ミリ波よりも高い周波数帯に移行するために、大気減衰の大きさからこれまで利用が進んでいなかった350GHz以上の周波数を利用した200Gbps超の低遅延・大容量無線伝送を実現することを目指した。

4年間の研究開発を通じて、350-600GHz帯を利用した無線伝送基盤技術を確立し、100m以上の距離で200Gbps超の伝送容量、100 $\mu$ s程度の遅延といった、超大容量低遅延無線伝送技術を実現するための基盤技術を確立した。

本研究開発の成果は、査読付き誌上発表論文数が14件、査読付き口頭発表論文数が67件などと多数であり、特許も9件出願するなど、社会実装に必要な技術も確実に確立していると認められる。加えて国際標準化に向けた取り組みも積極的に推進しており、国際標準化提案を合計9件提案している。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>

国際標準化団体への寄与文書入力を行うことによって継続的に標準化活動を行う予定であり、ITU-R WP5Cにて、450GHz以上の固定無線アプリケーションの技術特性や運用特性に関するレポート作成の議論が行われているところ、本研究開発にて得られた知見を提供していく。

加えて、社会実装に向けた取り組みも実施する予定であり、ホーム監視用8K映像伝送や、ロボティクス用の瞬時大容量伝送などテラヘルツ帯でしか実現できない応用分野開拓を進めていく予定である。

## 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7年6月20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。

- ・電気光発振器の利用による低位相雑音テラヘルツ発振に関しては特徴的な成果を創出しており学術的価値が認められる。特に、オール光回路で375GHz発振回路・検出回路等を実現した部分は大いに評価できる。
- ・本研究プロジェクトは、テラヘルツ帯RF技術の研究開発において、当初目標をおおよそ達成している。500GHz帯集積回路の開発では、搬送波周波数500GHz、帯域幅50GHzの送受信MMICを実現し、出力電力0dBm以上を達成した。
- ・APT/AWGのAWG-34で新レポートが承認、また、ITU-R WP5Cで継続審議、2026年度の新レポート承認に向け推進している。よって、総合的に見て有益であったと思われる。

## 7 評価に使用した資料等

○デジタル時代の新たなIT政策大綱(令和元年6月7日)

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190607/siryoul.pdf>

○「Beyond 5G推進戦略ー6Gへのロードマップー」の公表(令和2年6月30日報道発表)

[https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01kiban09\\_02000364.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000364.html)

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合  
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>

# 令和7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基幹・衛星移動通信課基幹通信室

評価年月：令和7年8月

## 1 政策（研究開発名称）

アクティブ空間無線リソース制御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

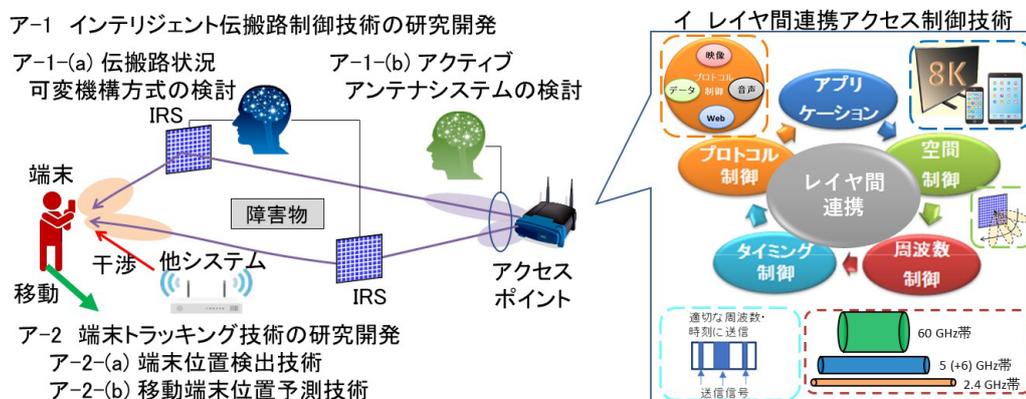
- ・実施期間  
令和3年度～令和6年度（4か年）
- ・実施主体  
民間企業
- ・総事業費  
1,518百万円

令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
424百万円	376百万円	368百万円	350百万円	1,518百万円

事業開始時点で、十億円以上の費用を要することが見込まれていなかったため、事前評価は実施していない。

### ・概要

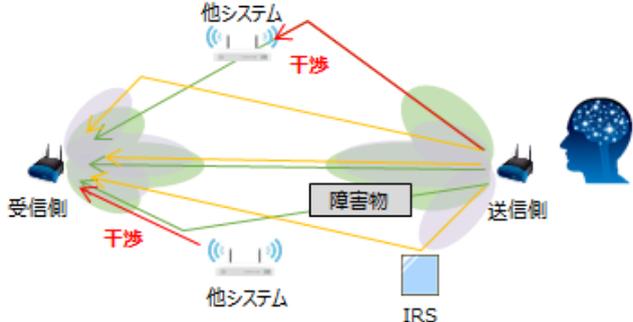
今後の自営無線ネットワークにおける通信量の増加に伴う干渉爆発及び電波の不感地帯の発生を回避すべく、無線伝搬路状況や干渉発生状況に応じてアンテナ指向性等を制御する技術と、反射波の発生状況を変化させるインテリジェントな反射板（IRS）<sup>1</sup>等の伝搬路状況可変機構を用いて無線伝搬路状況を制御する技術と連携動作させ、通信端末の位置に応じて伝搬路を動的に制御して干渉や不感地帯を低減する技術の研究開発を実施した。これに加え、無線環境を把握して、必要となる無線リソースを効率的に管理して大容量・低遅延トラヒックの収容を可能とするレイヤ間連携アクセス制御技術の研究開発を行った。これらの技術の活用により、自営無線ネットワークの周波数利用効率の一層の向上を図ることを目標とする。本研究開発の全体像を図1に示す。

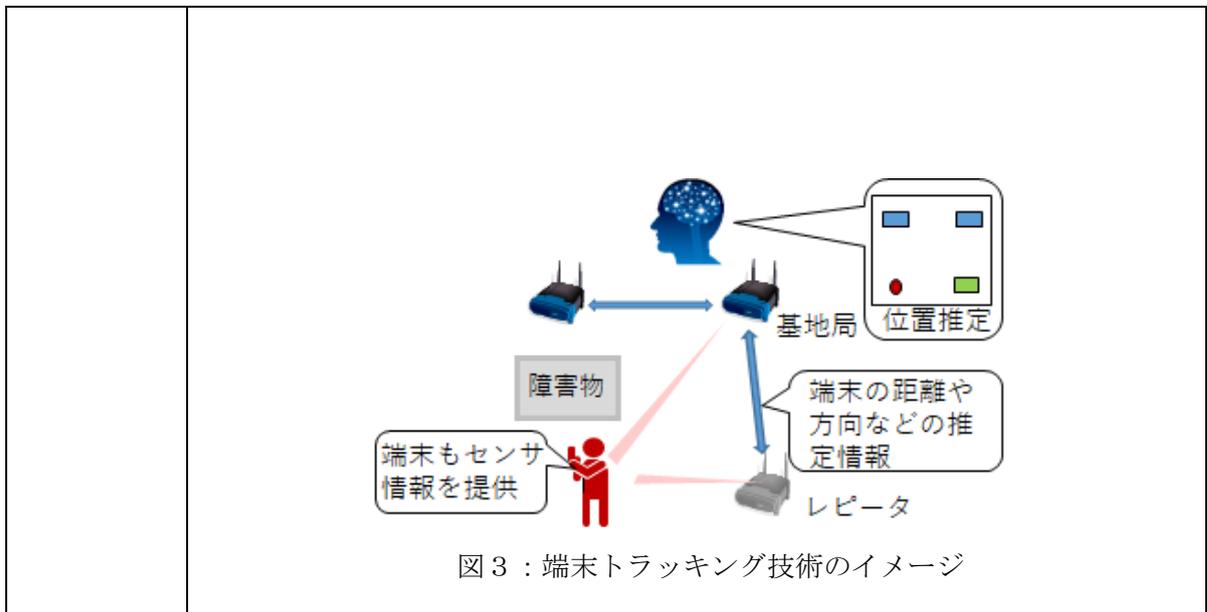


<sup>1</sup> 知能電波反射面：Intelligent Reflecting Surface の略。入射した電波の反射方向を任意の方向に制御可能。

図1 本研究開発の全体像

本研究開発の到達目標は、課題ア（干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術）、課題イ（レイヤ間連携アクセス制御技術）で研究開発した技術を統合して、それらの技術を使用しない場合に対し、大容量・低遅延トラヒックに関する「面的周波数利用効率」（単位面積・単位周波数当たりの収容可能トラヒックの比）を課題ア、課題イを統合して4倍以上（課題ア、課題イそれぞれで2倍以上）に改善すること、また、アクセスポイントを増やすことなく不感地帯を減らすために大容量・低遅延トラヒックを収容可能な「場所率」（エリア全体に対する大容量・低遅延トラヒックを利用可能なエリアの面積比）を2.25倍以上（距離換算で1.5倍以上）に改善すること、「端末位置の推定精度」として、最も近いアクセスポイントから5m離れた位置において誤差10cm以下とすることの3つである。

技術の種類	技術の概要
インテリジェント伝搬路制御技術	<p>大量の大容量・低遅延トラヒックを同時に収容するためには、同一無線チャネルを利用する無線装置（アクセスポイントや端末）間での与・被干渉を極力抑えけるとともに、場所率改善のために端末が電波の不感地帯に陥らず、アクセスポイントとの間で良好な伝搬状況を維持する必要がある。そのためには IRS などにより構成される伝搬路状況可変機構を導入するとともに、これとアクティブアンテナシステムとを適切に制御し、与・被干渉の低減と所望信号の受信電力の確保を実現する必要がある。</p> <p>そのため、同一無線チャネルを利用するアクセスポイントや端末が多数存在する干渉爆発環境下において、「端末トラッキング技術」との連携や、既存技術の適切な制御等を行うことにより、与・被干渉の低減と不感地帯を解消し、大容量・低遅延トラヒックの収容数改善に寄与する伝搬路状況可変機構とアクティブアンテナシステムの制御技術の確立に向けての研究開発を実施する。</p>  <p>IRSなどの伝搬路状況可変機構とアクティブアンテナシステムにより安定した伝搬路を確保 IRS: Intelligent Reflecting Surface</p> <p>図2：インテリジェント伝搬路制御技術のイメージ</p>
端末トラッキング技術	<p>利用可能な周波数幅が広いミリ波帯などでは回折や散乱による見通し外伝搬が期待できないことから、端末の位置を高精度に把握しておくことにより、インテリジェント伝搬路制御における伝搬路状況可変機構及びアクティブアンテナシステムの制御に際して、制御の高精度化や制御オーバーヘッドの著しい低減が実現できると期待される。</p> <p>高精度に位置情報を取得する手段としてGPSがあるが、無線LANが主に利用されている屋内ではこれを利用することができない。現在の無線LANではフレームの受信側において既知信号を用いた伝搬路推定を行っているものの、それにより得られる伝搬路情報のみからでは、端末位置を推定することはできない。</p> <p>そのような状況下で、トラヒックが削減される事を目指し、端末位置を推定するための技術の研究開発を実施する。</p>

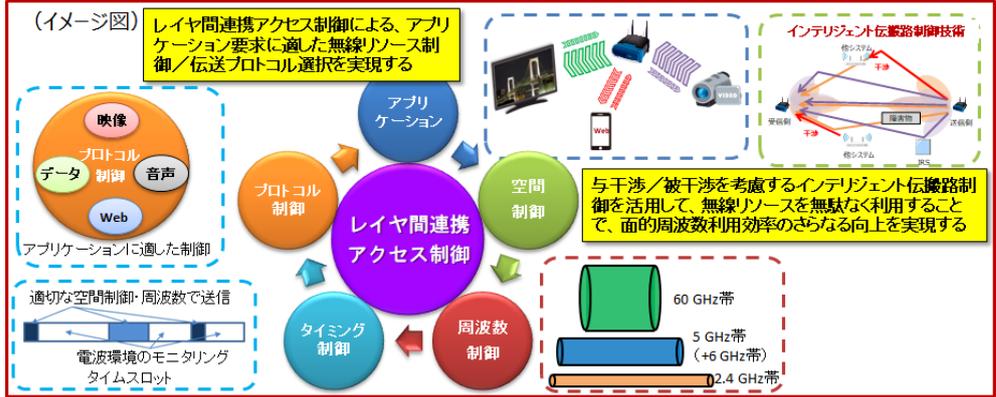


常に高い通信レートを必要とするような大容量アプリケーションを安定的に伝送するためには、無線リソースを十分に確保する必要があるが、干渉爆発が生じると無線リソースの割当てが困難な状況に陥ることとなる。また、従来の考え方では、ネットワークインターフェース層(物理層、媒体アクセス制御層)による時間・空間・周波数領域の無線リソース制御と、アプリケーションの要求条件に直接影響を与えるアプリケーション層及びトランスポート層におけるプロトコル制御は独立に行われてきたため、例えば、アプリケーションの要求条件に対して、過剰な無線リソースが設定され、他のアプリケーションに設定する無線リソースが枯渇するような状況が発生する。特に無線リソースに限られる干渉爆発環境下においては、その影響は大きい。

そのため、無線リソースに限られる干渉爆発環境下においてもアプリケーションの要求を満たすために、時間・周波数・空間の各無線リソースの効率的な活用及び従来手法とは異なり、アプリケーション層から無線レイヤまでを一括して制御するレイヤ間連携アクセス制御技術が必要となる。

レイヤ間連携アクセス制御技術では、無線リソース制御によって達成し得るネットワークインターフェース層の通信品質をトランスポート層やアプリケーション層と共有し、レイヤ間の効率的な情報連携を実現するインターフェースを備え、各アプリケーションに設定する伝送プロトコルの動的制御を行う。

レイヤ間連携アクセス制御技術



・スケジュール

技術の種類	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
-------	-------	-------	-------	-------

インテリジェント伝搬路制御技術	伝搬路制御機構・制御方式の基本検討	伝搬路制御機構・制御方式の詳細検討・改良		統合システムの干渉爆発環境下での評価系構築及び評価(総合検証)
	アクティブアンテナの基本方式検討	アクティブアンテナの改良方式検討とシミュレーション検証	伝搬路制御機構とアクティブアンテナを統合したインテリジェント伝搬路制御系の構築と機能検証	
端末トラッキング技術	端末位置推定に用いる情報の選定	実機による端末位置把握評価		
	端末位置推定方式の基本設計	伝搬路制御機構への情報提供方式の検討	伝搬路制御機構とも連携し端末位置を把握・追尾する系の構築	
レイヤ間連携アクセス制御技術	空間多重・マイクロ波・ミリ波連携方式の基本方式の考案	アクセスポイント間連携も含めた時間・空間リソース最適制御方式の検討評価	無線リソース制御とレイヤ間連携アクセス技術の統合制御手法考案	
	レイヤ間連携プロトコルの基本方式考案	大容量アプリケーション想定レイヤ間連携技術の検討・評価	評価用無線通信システムへの機能実装と評価改良検討	

**(2) 達成目標**

課題ア 干渉抑圧と不感地帯対策を両立させるインテリジェント伝搬路制御技術

アー1 インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発

伝搬路状況可変機構を利用しない従来のアクティブアンテナシステムと比較して高い伝送レートで通信可能なエリアを拡大し、面的周波数利用効率を、伝搬路状況の制御に必要なオーバヘッドを加味した上で2倍以上（課題イと統合して4倍以上）に改善し、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を2.25倍以上（距離換算で1.5倍以上）改善することを性能目標とする。

アー2 端末トラッキング技術の研究開発

端末位置の推定精度として、最も近いアクセスポイントから5m離れた位置において誤差10cmを性能目標とする。

課題イ レイヤ間連携アクセス制御技術

レイヤ間連携アクセス制御を用いない場合と比較して、アプリケーションを実行したとき、レイヤ間連携アクセス制御を用いた場合に、利用可能な周波数帯や帯域幅を変えずに面的周波数利用効率を2倍以上（課題アと統合して4倍以上）に改善し、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を1.5倍以上改善することを性能目標とする。

○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）
統合イノベーション戦略2020(令和2年7月17日閣議決定)	「第Ⅲ部 各論 第1章 知の源泉 (1) 社会のデジタル化を支える基盤整備」において、「研究開発として、超低遅延や超高信頼性等を保証可能な通信機能複合型ネットワーク技術や、光・電波融合アクセス技術として6G時代以降のアクセス網でのTbps級通信容量の実現に資するサブTbps級メディア調和アクセス基盤技術の確立、複数の自

	動運転システム群・ドローンに確実かつ効率的に接続するための無線技術の研究開発、極限的な環境でも確実に接続するためのワイヤレス拡張技術等の5年をめどとした技術の確立を目指す。」旨の記載あり。
新たな情報通信技術戦略の在り方(令和2年8月5日情報通信審議会答申)	「第2章 国として重点的に取り組むべき研究開発」において、「タフ環境に適応する無線アクセス技術の研究開発：外来干渉や複雑な構造によるマルチパス等によって電波の利用が困難な環境（タフ環境）において、低遅延・高信頼を提供する無線ネットワークが必要になる群ロボットの制御等への適用を想定し、リアルタイム性を備えた電波の伝わり方の可視化技術、可視化された情報をもとにした周波数チャネル・通信経路等の通信資源最適化技術、高信頼・低遅延・多数同時接続を両立させる無線アクセス技術、及び電力・周波数の利用効率や接続性の向上を図る無線ネットワーク技術を確立する。」旨の記載あり。

### (3) 目標の達成状況

- ・インテリジェント伝搬路制御技術の研究開発においては、フィールド検証やシミュレーションを通して、達成目標である面的周波数利用効率2倍以上については、観測区間の平均収容数及び中央値（CDF<sup>2</sup> 50%値）において、それぞれ2.4倍、3倍と目標を上回る達成が確認された。また、達成目標である場所率1.5倍についても、1.5倍の距離（面積は2.25倍）においても大容量・低遅延トラヒックのユーザ収容数が上回り目標の達成が確認された。
- ・端末トラッキング技術の研究開発においては、フィールド検証における実測において、本研究で考案した3方式を統合することで、達成目標である端末位置の推定精度5m以遠で10cm以下については、十分に推定可能であることを示した。
- ・レイヤ間連携アクセス制御技術の研究開発においては、フィールド検証やシミュレーションを通して、達成目標である面的周波数利用効率2倍以上については、観測区間の平均収容数及び中央値（CDF 50%値）において、それぞれ2.9倍、4倍と目標を上回る達成が確認された。また、達成目標である場所率1.5倍についても、1.5倍の距離（面積は2.25倍）においても大容量・低遅延トラヒックのユーザ収容数が上回り目標の達成が確認された。

技術の種類	目標の達成状況
インテリジェント伝搬路制御技術	<p>大量の大容量・低遅延トラヒックを同時に収容するために、IRSなどにより構成される伝搬路状況可変機構を導入するとともに、これとアクティブアンテナシステムとを適切に制御し、与・被干渉の低減と所望信号の受信電力の確保を実現した。また、端末トラッキング技術との連携等を行うことにより、与・被干渉の低減と不感地帯を解消し、大容量・低遅延トラヒックの収容数改善に寄与する伝搬路状況可変機構とアクティブアンテナシステムの制御技術の研究開発を実施した。</p> <p>その結果、フィールド検証やシミュレーションを通して、達成目標である面的周波数利用効率2倍以上については、図5のとおり観測区間の平均収容数及び中央値（CDF 50%値）において、それぞれ2.4倍、3倍と達成が確認された。また、達成目標である場所率1.5倍については、図6のとおり、1.5倍の距離（面積は2.25倍）においてもユーザ収容数が上回り目標の達成が確認された。</p>

<sup>2</sup> 累積分布関数：Cumulative distribution function の略。確率変数がある値以下の値となる確率を表す関数。

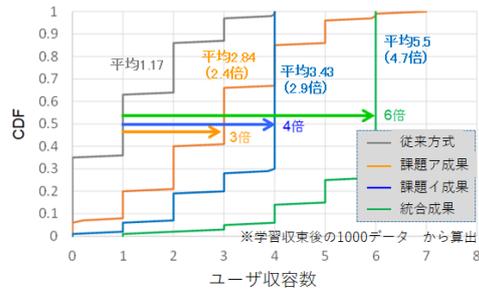


図5 面的周波数効率の達成状況

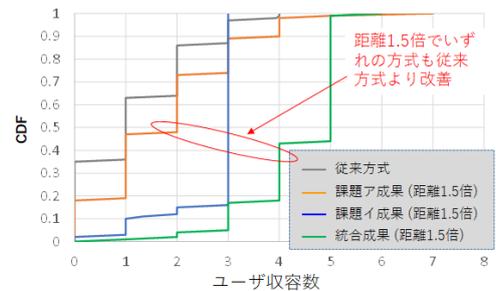


図6 場所率の達成状況

回折や散乱による見通し外伝搬が期待できないミリ波帯通信やGPS信号の受信が困難な屋内環境においても適用が可能で、かつ無線LAN制御フレームのオーバーヘッドの増加を招かない方式として3方式を考案し評価を実施した。その結果、フィールド検証を通して図7の3方式を統合することで、達成目標である端末位置の推定精度5m以遠で10cm以下については、表1の測定結果に示すように推定することが可能であることを示した。

①回転式電波探査+レイトレース	②3D空間認識+SLAM画像解析	③フィルム状アンテナの面的配置
測定速度は遅いが反射にも対応	高速測定可能だが死角対応はNG	高速測定可能だがアンテナ敷設必要

図7 端末位置推定に用いた3方式

端末トラッキング技術

対象端末	方式	X [m]	Y [m]	X誤差	Y誤差
STA1-a 距離* 10m	③	23.64	3.07	-0.25	0.03
	②	23.80	3.05	-0.09	0.01
	①	22.51	3.51	-1.38	0.47
STA2-a 距離* 7.5m	③	21.79	8.23	-0.11	0.21
	②	21.79	7.97	-0.11	-0.05
	①	22.51	8.51	0.61	0.49
STA4-a 距離* 5m	③	--	--	--	--
	②	5.28	4.97	-0.24	-0.05
	①	4.51	5.51	-1.01	0.49

(\* ) ここでの距離は、②で用いたLiDARセンサーからの距離を示す

表1 端末位置推定結果

干渉爆発環境下では十分な無線リソースを獲得することが困難となるため、従来のレイヤ毎の独立制御ではなく、アプリケーションにとって効率的なアクセス制御を行うことができるレイヤ間連携アクセス制御技術の確立を目指し、研究開発を実施した。

レイヤ間連携アクセス制御技術

図8はIRSありの場合の深層強化学習の学習曲線であるが学習が進むにつれ、各ユーザのトータルスループット(青)が安定し、アプリケーション収容数(赤)が増えることが確認できた。表2に示すよう深層強化学習を用いた周波数帯選択技術を用いた場合、ランダム選択に対して平均アプリケーション収容数が2.1~2.8倍に向上し、さらにIRSも用いた場合には、ランダム選択に対して平均ユーザー収容数が2.8~3.6倍に向上することを確認できた。

ユーザー収容数のCDFは図9に示すよう中央値(CDF = 0.5)において最大

3倍、CDF=0.9において2.3倍の改善効果を確認できた。

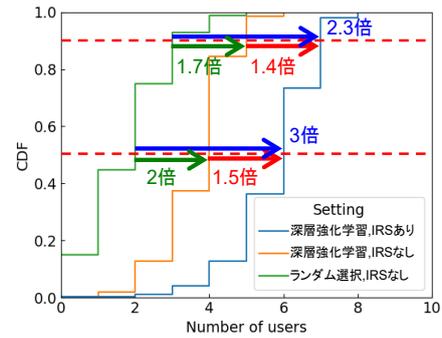
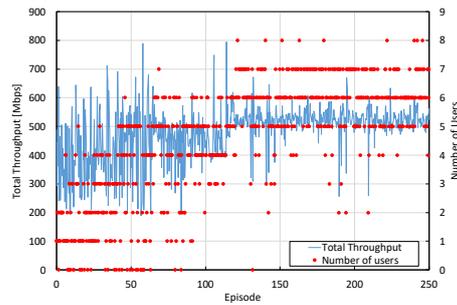


図8 深層強化学習の学習曲線 (IRS あり) 図9 ユーザ収容数の CDF

表2 アプリケーション収容数平均値

ユーザ配置	ランダム選択	深層強化学習	深層強化学習+IRS
1	1.74	3.64	5.74
2	1.75	4.98	6.37
3	1.88	4.40	5.23

アプリケーションの要求条件に基づく無線リソース制御である APF<sup>3</sup>を提案した。APF はシステム映像スループットと STA<sup>4</sup>間の公平性と、ユーザ毎の平均映像レートと瞬時に要求される映像レートを考慮して、無線周波数帯内の無線リソース制御を行う。図10に示すように計算機シミュレーションで APF の有効性を確認した。図10ではビットスループット(破線)と映像スループット(実線)を示しており、PF は映像スループットがビットスループットから大きく劣化しているのに対し、APF は映像スループットとビットスループットはほぼ同様の特性を示しており、APF がアプリ収容のために無線リソースを有効活用できていることを確認した。

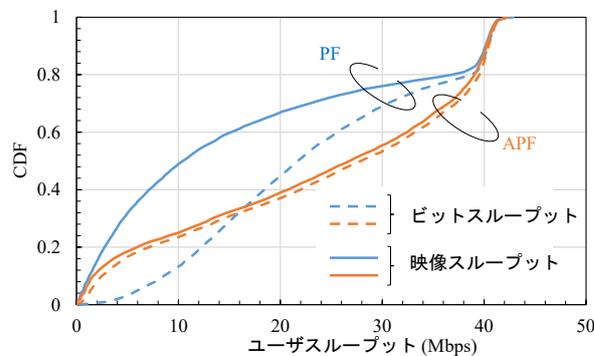


図10 ユーザスループットの CDF

### 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7年6月20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、

<sup>3</sup> APF: Application Proportional Fairness の略。アプリケーションの要求に基づいて割り当てるデータ量を変化させ、効率と公平さを同時に実現するようにスロットを割り当てる。

<sup>4</sup> STA: ステーション。端末を指す。

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出願・取得、論文・研究発表の実績から、多数の発表を行い、特許も7件取得するなど、インテリジェント伝搬路制御技術、端末トラッキング技術、レイヤ間連携アクセス制御技術に必要な技術を確実に確立しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件 (0件)	1件 (0件)	0件 (0件)	3件 (0件)	4件 (0件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0件 (0件)	2件 (2件)	3件 (3件)	3件 (3件)	8件 (8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)
口頭発表数	7件 (0件)	12件 (0件)	10件 (0件)	13件 (0件)	42件 (0件)
特許出願数	10件 (4件)	16件 (4件)	19件 (6件)	28件 (7件)	73件 (21件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	7件 (0件)	7件 (0件)
国際標準提案数	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (1件)	3件 (3件)	4件 (4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)
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)	4件 (0件)	4件 (0件)	6件 (0件)	14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)

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	<p>5Gの普及に伴いトラフィックが爆発的に増加していくなかで、トラフィックの分散のためにWi-Fi等のプライベートネットワークで大容量伝送を行うことが強く求められる。だが、代表的な既存プライベートネットワークであるWi-Fiは、周波数を切り替えることなくベストエフォートのCSMA方式（他の機器が送信している間は送信を停止する）を用いるため、一定量の通信帯域を継続して確保することが必要となる大容量伝送には不向きであり、特にトラフィックの多いプライベートネットワークが隣接した場合、通信帯域の確保が困難な干渉爆発の状態となる。</p> <p>このような中、「統合イノベーション戦略2020」（令和2年7月17日閣議決定）などにおいても、超低遅延や超高信頼性等を保証可能な通信機能複合型ネットワーク技術の確立を目指す旨が記載されているところである。</p> <p>本研究開発の技術は、これら課題に取り組むものであり、国民の財産である電波資源の有効利用に資するものであることから、国が実施すべき研究開発として推進する必要がある。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発の実施にあたっては、研究開発課題について、専門的知識や研究開発遂行能力を有する内容によって、委託事業者がそれぞれ得意な分野を担当することで、効率的に研究開発が進められた。</p> <p>また、本研究開発の実施期間中においては、受託各社の研究代表者及び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、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、更なる効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>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。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発において、インテリジェント伝搬路制御技術、端末トラッキング技術、レイヤ間連携アクセス制御技術を確立することを目標としており、インテリジェント伝搬路制御技術については、面的周波数利用効率を伝搬路状況の制御に必要となるオーバーヘッドを加味した上で2倍以上に改善するとともに、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を1.5倍以上改善し、目標を達成した。端末トラッキング技術については、端末位置の推定精度として最も近いアクセスポイントから5m離れた位置において誤差10cm以下を実現し、目標を達成した。また、レイヤ間連携アクセス制御技術については、レイヤ間連携アクセス制御を用いない場合と比較して、アプリケーションを実行したとき、レイヤ間連携アクセス制御を用いた場合に利用可能な周波数帯や帯域幅を変えずに面的周波数利用効率を2倍以上に改善するとともに、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を1.5倍以上改善し、目標を達成した。</p> <p>これにより、インテリジェント伝搬路制御技術、レイヤ間連携アクセス制御技術それぞれにおける結果を統合したうえで面的周波数利用効率4倍以上を改善し、目標を達成した。</p> <p>これにより、干渉や不感地帯の低減がされるとともに、大容量アプリケーションを安定的に伝送することが可能となるため、周波数の有効利用の一層の向上に寄与することができた。</p> <p>また、本研究開発は、外部有識者や専門家で構成される研究開発運営委員会など、研究開発成果の利用者や情報通信業界に限らない多様な専門家や利用者との連携・協力を得つつ、研究開発と実証実験を一体的に推進しており、研究成果の実用化等へ向けた高</p>

	<p>い確実性が得られた。</p> <p>さらに、本研究開発で開発された伝搬路制御技術を用いることで、端末位置推定の精度や推定速度を高めることが可能である。このような成果を今後の研究に活用していくことで、技術の発展ひいては社会実装に貢献することが期待される。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発は、5G の普及によってトラフィックが爆発的に増加するなかで、多数の端末が存在する環境下で端末位置を把握し、アクティブアンテナ技術や IRS 等の連係動作により伝搬路を動的に制御することで干渉や不感地帯を低減するとともに、大容量アプリケーションをより安定的に伝送するためにレイヤ間連携アクセス制御を行うものである。これにより、周波数の利用効率を向上し、多くの国民が使用する Wi-Fi 等の無線ネットワークのトラフィック解消に資することから、受託者や関係者のみならず広く国民の利益となる。</p> <p>また、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。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>国内において5G サービスが始まり、今後、爆発的にトラフィックの増加が見込まれる中、5G 時代における干渉爆発の状態を回避するためには本技術の導入に向けた取り組みを優先的に実施していく必要があったと認められる。</p>

## 5 政策評価の結果（総合評価）

5G の普及に伴いトラフィックが爆発的に増加していくなかで、トラフィックの分散のために Wi-Fi 等のプライベートネットワークで大容量伝送を行うことが強く求められていた。だが、Wi-Fi のような代表的な既存プライベートネットワークは大容量伝送には不向きのため、通信帯域の確保が困難な干渉爆発が生じる可能性があり、トラフィックの増大に対応可能な技術の確立を行う必要性があった。

本研究開発において、インテリジェント伝搬路制御技術については、面的周波数利用効率をオーバーヘッドを加味した上で2倍以上改善するとともに、大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を1.5倍以上改善し、端末トラッキング技術については端末位置の推定精度5m以遠で10cm以下を達成した。また、レイヤ間連携アクセス制御を用いた場合に利用可能な周波数帯や帯域幅を変えずに面的周波数利用効率2倍以上改善するとともに大容量・低遅延アプリケーションが実現可能な場所率を1.5倍以上改善した。これにより、課題全体での面的周波数利用効率4倍以上の改善を実現し、目標の達成が確認された。

また、論文、口頭発表、特許取得や国際標準化の提案など、本研究開発の実用化に向けた検討もあわせて実施されている。

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>

前述のように、本研究開発において目標としていた要素技術の確立を達成したが、今後は確立した技術を実用化していくため、受託者において、社会での活用や実用化に向け応用研究、国際規格化活動、論文などによる情報発信を行い、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく予定である。

## 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7年6月20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。

- ・開発した伝搬路制御及び連携アクセス技術により、目標とした周波数利用効率の向上が達成できる

ことを、シミュレーション結果並びにフィールド実験により検証できている。開発した連携アクセス方式において採用されている3方式による端末位置高精度推定技術やビームフォーミング技術の効果を、同じく開発した伝搬路制御により高めることも期待できるのではないかと。

- 電波伝搬の詳細な測定・解析に基づいて空間無線リソースの有効利用を可能にしているが、実際のフィールドの伝搬環境の詳細な測定・解析を行う経済的・時間的コストをどこまで抑えることができるかについてさらに検討が必要と考えられる。
- 本研究開発の高精度な端末位置推定技術は、電波資源の飛躍的な拡大に貢献する。これにより、面的周波数利用効率は4倍以上、場所率は2.25倍以上となり、周波数利用効率に優れた無線通信システムの構築が可能となる。これは、限られた電波資源の有効活用と、より高密度な通信環境の実現に繋がるものである。

## 7 評価に使用した資料等

- 統合イノベーション戦略 2020（令和2年7月17日閣議決定）

[https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020_honbun.pdf)

- 新たな情報通信技術戦略の在り方（令和2年8月5日情報通信審議会答申）

[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000701531.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000701531.pdf)

- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合

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

# 令和7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7年8月

## 1 政策（研究開発名称）

基地局端末間の協調による動的ネットワーク制御に関する研究開発

## 2 研究開発の概要等

### （1）研究開発の概要

#### ・実施期間

令和3年度～令和6年度（4か年）

#### ・実施主体

民間企業、大学等

#### ・総事業費

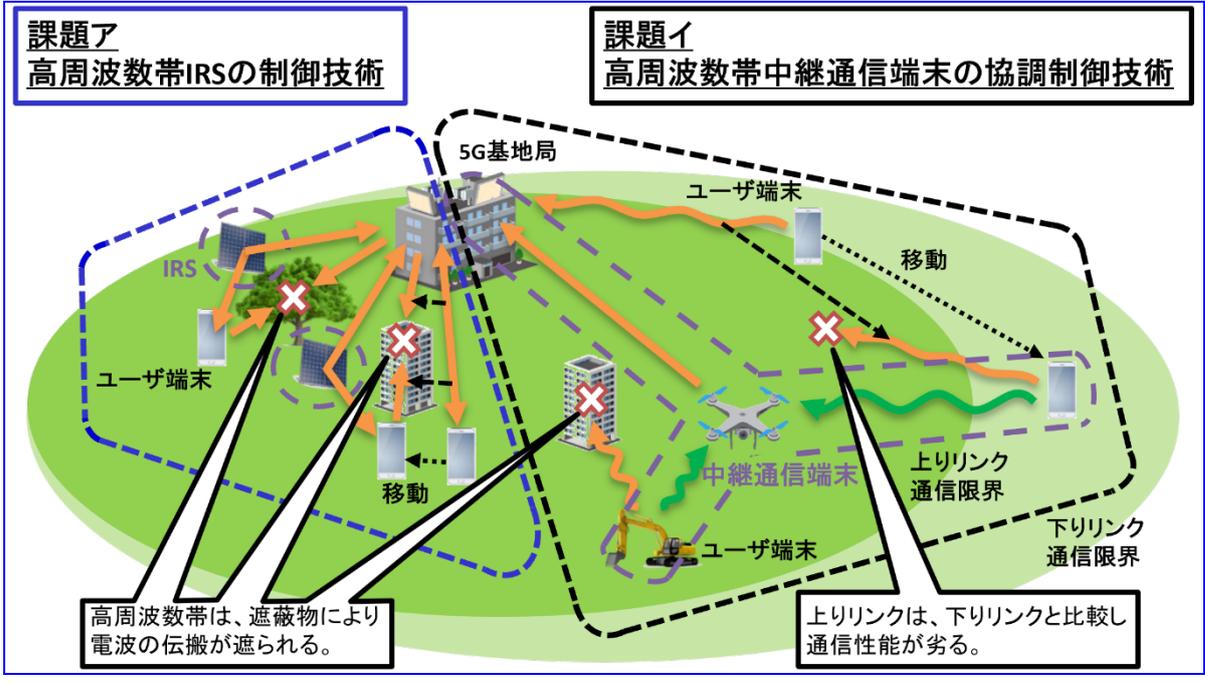
2,804百万円

令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	総額
777百万円	850百万円	803百万円	374百万円	2,804百万円

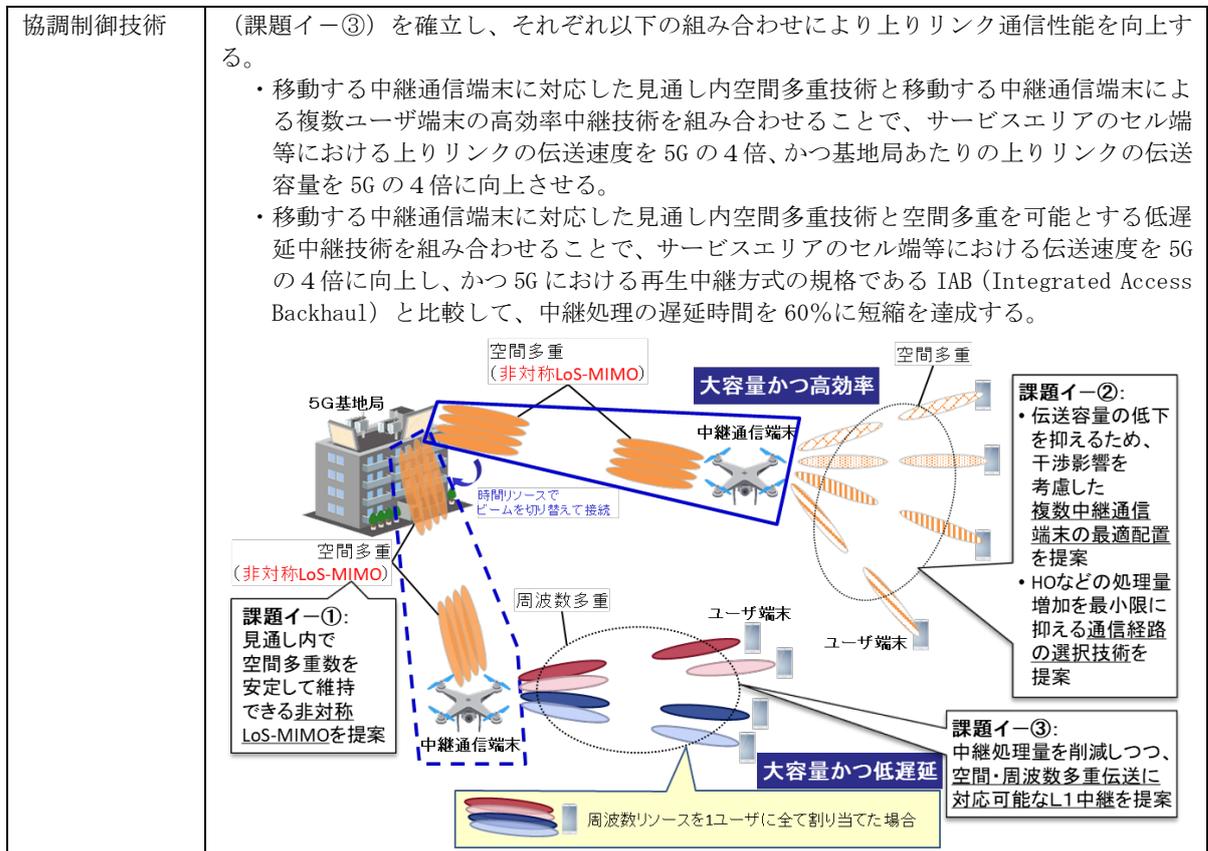
当時、事前評価が必要であることの確認が不十分だったため当該評価は実施していない。現在は、評価対象事業に係るそうした確認不足等を防止するための周知徹底や複数課室による重層的な確認等の措置が講じられている。

#### ・概要

昨今の移動通信システムの高まりに加え、5G普及期においては、さまざまなユースケースでの利活用により、これまで以上に高速・大容量伝送の需要が増大すると想定される。こうした周波数ひっ迫の状況を回避するために、広帯域が確保された高周波数帯の有効な利用が求められている。しかしながら、これまでに5Gの移動通信システムに割り当てられた周波数帯より更に高い周波数帯を使用する場合、建物や樹木等による電波の遮蔽により、ユーザが通信を行う場所ごとの電波の不安定性がますます高まると予想される。また、高周波数帯では通信距離も短くなるため、通信が出来なくなる限界に近い場所で通信を行う可能性が高まる。そのような環境では、上りリンクの通信性能を決めるユーザ端末の性能の限界が顕著に表れるようになる。そこで本研究開発では、ユーザ端末から基地局の上りリンク方向の通信の大容量化を実現すべく、高周波数帯における無線環境の不安定性や端末性能の限界からくる通信性能限界を克服するため、高周波数帯の伝搬路を動的に制御する技術と共に中継通信端末を用いて通信性能を向上させる技術確立し、上りリンクの空間多重度を第5世代移動通信システム（5G）に対して4倍以上に引き上げる。



技術の種類	技術の概要
<p>課題ア 高周波数帯 IRS の制御技術</p>	<p>IRS (知能電波反射面 : Intelligent Reflecting Surface) の反射特性可変デバイス構成技術 (課題ア①) として、大きさが 100 波長程度、反射効率 (入射電力の総和に対する反射電力の総和の比率) の低下量が設計角度範囲内のすべての入射反射方向について 6 dB 以下で、1.5 秒以内で反射方向を変更可能な液晶 IRS を実現する。</p> <p>また、反射特性制御技術 (課題ア②) を確立し、<math>\pm 50^\circ</math> 以上の範囲に反射可能であり、かつ隣接周波数への影響を抑える反射パターン形成を実現する。</p> <p>基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術 (課題ア③) の確立では、IRS が対策する不感地帯において、移動するユーザ端末に反射パターンを追従させることで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1% 以下を実現し、安定した通信を提供する。</p> <div data-bbox="454 1209 734 1310"> <p>① IRSデバイス構成技術 低損失、高速応答可能な 大規模液晶IRSデバイス</p> </div> <div data-bbox="750 1209 1005 1467"> <p>(1): 反射特性を可変にするIRS用の材料・デバイス技術 液晶の移相量・低損失・高速応答を同時実現する、 新たな液晶材料・構成の開発。</p> <p>(2): IRSの高性能反射素子 (1)の液晶で任意の反射位相を実現する反射素子設計</p> <p>(3): IRSの反射性可変デバイス構成技術 数方に及ぶ反射素子を制御し、かつ不要反射を低減 する駆動配線の設計</p> <p>(4): IRSの大規模構造化技術 0.01波長の寸法精度で、100波長のサイズの実現</p> </div> <div data-bbox="454 1489 734 1590"> <p>②: 反射パターン形成技術 広い角度範囲に反射でき、 隣接周波数への影響を抑える 反射パターン形成</p> </div> <div data-bbox="750 1489 1005 1691"> <p>広範囲に所望の方向に反射</p> <p>隣接周波数帯の反射の影響を低減</p> <p>隣接周波数</p> <p>設計周波数</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>数方に及ぶ反射素子の位相制御量を高速に計算し、任意の反射パターンを形成</li> <li>バンドパス特性を有するレドームにより、隣接周波数への影響を低減</li> </ul> </div> <div data-bbox="454 1702 734 1803"> <p>③: IRS反射パターン制御技術 ユーザ端末と連動し、 安定した通信を提供する 反射パターン制御</p> </div> <div data-bbox="750 1702 1005 1881"> <p>(1): 反射パターン決定方式 ユーザ端末の移動に追従した 反射パターン決定</p> <p>(2): 基地局・ユーザ端末とIRSの連携制御方式 (1)を実現する、IRS制御プロトコル</p> </div>
<p>課題イ 高周波数帯 中継通信端末の</p>	<p>5G 以降の移動通信システムで想定される様々なユースケースに対応するため、移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術 (課題イ①)、移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術 (課題イ②)、空間多重を可能とする低遅延中継技術</p>



・スケジュール

技術の種類	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
課題ア 高周波数帯 IRSの制御技術	方式検討 ・ 液晶デバイス/ レドーム設計	方式/設計改良 ・ 10波長サイズ 液晶IRS試作 ・ IRS制御装置開発	方式/設計改良 ・ 100波長サイズ 液晶IRS試作 ・ 反射パターン追従試験	統合実証評価
課題イ 高周波数帯 中継通信端末の 協調制御技術	方式検討 ・ 評価環境設計/試作	方式検討/改良 ・ 評価環境構築/改良	LoS-MIMOと高効率 中継の統合評価 ・ LoS-MIMOと低遅延 中継の統合評価	実証実験

(2) 達成目標

5G普及期においては、高品質画像やリアルタイム性を重視した遠隔医療など、さまざまなユースケースでの活用により、これまで以上に高速・大容量伝送の需要が増大すると想定される。こうした周波数ひっ迫の状況を回避するために、広帯域が確保された高周波数帯の有効な利用が求められているが、電波の特性と周辺環境に起因する不感地帯の発生や、上りリンク通信性能の劣位が利用促進を阻害する要因となっている。そこで高周波数帯の伝搬路を動的に制御する技術と共に中継通信端末を用いて通信性能を向上させる技術が必要とされている。

以下に、本研究開発における達成目標を示す。

- ・IRSの反射特性可変デバイスと反射特性制御技術の確立では、大きさが100波長程度、反射効率(入射電力の総和に対する反射電力の総和の比率)の低下量が設計角度範囲内のすべての入射反射方向について6dB以下で、±50°以上の範囲に1.5秒以内に反射方向を変更可能なIRSを実現する。

- ・ 基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術の確立では、IRS が対策する不感地帯において、移動するユーザ端末に反射パターンを追従させることで、通信中の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間を 1.5 秒以内かつ時間率 1 % 以下を実現する。
- ・ 高周波数帯中継通信端末の協調制御技術の確立では、移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術、移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術、空間多重を可能とする低遅延中継技術を確立することで、伝送容量を 5G の 4 倍、5G の中継方式に対して中継による遅延時間を 60% に短縮しつつユーザ単体の伝送速度を 5G の 4 倍に向上させる。
- ・ IRS の反射特性可変デバイスと反射特性制御技術、基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術、高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確立することにより、高周波数帯利用時に生じる不感地帯のエリア化を図る。
- ・ 高周波数帯利用時に生じる不感地帯のエリア化と高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確立することによる上りリンク通信性能向上により、高周波数帯における周波数の有効利用の一層の向上を図る。

○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）
Beyond 5G 推進戦略懇談会提言（令和 2 年 6 月）	「4. Beyond 5G 推進戦略 4-2. (3)（開発・製造基盤の強化）」において、「(略) このため、5G の機能強化に対応した情報通信システムの中核となる技術を開発することにより、その開発・製造基盤強化に取り組む。」旨の記載あり。
まち・ひと・しごと創生基本方針 2020（令和 2 年 7 月 17 日閣議決定）	「6. 新しい時代の流れを力にする (1) ② (a) 5G などの情報通信基盤の早期整備」において、「(略) 5G やローカル 5G による地域の課題解決、5G の高度化・高信頼化を推進する。」旨の記載あり。
世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和 2 年 7 月 17 日閣議決定）	「7 社会基盤の整備 (2) 次世代インフラの整備」において、「また、Society 5.0 をより高いレベルで実現していくためには、サイバー空間と現実世界（フィジカル空間）をより高度に一体化させる必要があり、それを支える中核的なインフラとしては 5G よりも更に高度なネットワークが求められる。」旨の記載あり。

(3) 目標の達成状況

4 年間の研究開発を通じて、高周波数帯における無線環境の不安定性や端末性能の限界からくる通信性能限界を克服することを目的とした各要素技術について、下記に示す通り当初の目標どおり達成することができた。

- ・ 課題ア-①が連携して検討を行った IRS の反射特性可変デバイス構成技術では、液晶 IRS の大規模化（約 100 波長サイズ）、低損失化（損失 6 dB 以下）、高速応答化（応答時間 1.5 秒以内）を実現するとともに、反射範囲についても  $\pm 50^\circ$  以上を実現した。
- ・ 課題ア-②が課題ア-①と連携して検討を行った反射特性制御技術では、反射範囲  $\pm 50^\circ$  以上かつ任意のビーム幅を形成可能な液晶 IRS の反射パターン形成技術を確立した。さらに、IRS の設置を考慮し、所望の周波数以外の電波に対する影響を低減する技術を確立した。
- ・ 課題ア-③として検討を行った基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術では、ユーザ端末の受信電力から反射パターンを決定し、200 ミリ秒以内に反射パターン情報を IRS に通知する反射パターン決定技術を確立し、ユーザ端末の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間が 1.5 秒以上となる時間率 1 % 以内を達成した。
- ・ 課題イ-①移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術と課題イ-②移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術を組み合わせることで、セル端を模擬した見

通し外環境において、伝送速度が上りリンクで 5G の 4 倍以上、また電波無響室内での実証実験の結果を基に、1 基地局のカバーエリアを 100m と仮定した場合の基地局当たりの上りリンクの伝送容量が 5G の 4 倍を達成した。

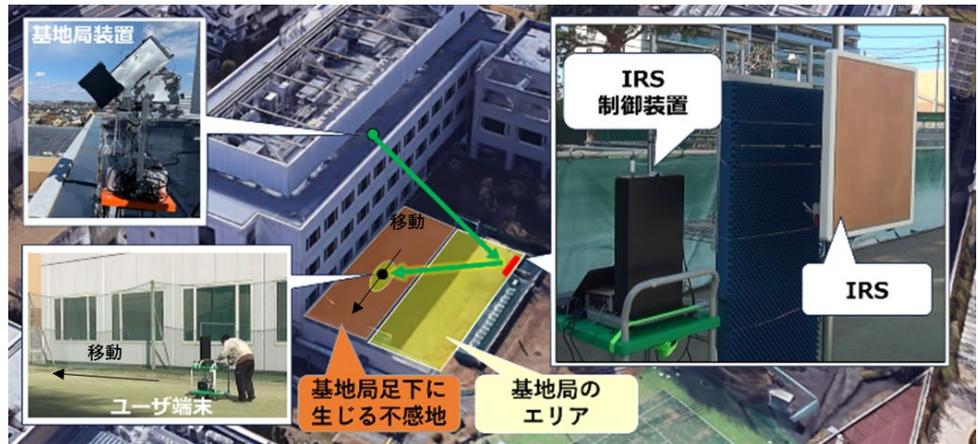
- ・課題イー①移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術と課題イー③空間多重を可能とする低遅延中継技術を組み合わせることで、セル端相当の環境における伝送速度が 5G の 4 倍以上を達成した。また、試作した低遅延中継回路を用いた中継処理の遅延時間測定結果から、IAB と比較して中継処理の遅延時間を 60% 以下に短縮達成に資する結果を確認した。
- ・課題アー①・②・③で研究開発した技術を統合したフィールド実証実験を行い、ビル屋上に設置した基地局の足元に生じる不感地帯において、反射パターン切替によるユーザ端末の受信電力改善を確認した。また、課題イー①・②で研究開発した技術を組み合わせることで電波無響室内での実証実験を行い、直接通信ができない見通し外環境でも見通し内環境と同等の伝送速度を達成できることを確認した。さらに、課題イー①・③で研究開発した技術を組み合わせることで屋外での実証実験を行い、直接通信ができない見通し外環境でも、低遅延中継局を経由することで同一スロット内での通信が可能となることを確認した。以上のことから、液晶 IRS、高効率中継技術、低遅延中継技術による不感地帯のエリア化を達成した。
- ・高周波数帯利用時に生じる不感地帯のエリア化と高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確認することによる上りリンク通信性能向上により、高周波数帯における周波数の有効利用の一層の向上を図ることができ、目標を達成した。

技術の種類	目標の達成状況
課題ア 高周波数帯 IRS の制御技術	<ul style="list-style-type: none"> <li>・<b>液晶 IRS の大規模化（約 100 波長サイズ）</b> 課題アー①（3）「IRS の反射特性可変デバイス構成技術」において、課題アー①（2）「IRS の高性能反射素子」が開発した反射素子を用いた 16 波長サイズの小規模 IRS を開発した。さらに小規模 IRS の組み合わせにより、約 100 波長サイズの大規模 IRS を実現するためのタイリング技術を確認し、液晶 IRS の大規模化を実現した。また、タイリングによる大規模化をした際に、液晶を制御する TFT (Thin Film Transistor)、及びその周辺配線による不要反射を低減する配線技術を確認した。</li> <li>・<b>液晶 IRS の低損失化（損失 6 dB 以下）と反射範囲の確保（±50° 以上）</b> 課題アー①（2）「IRS の高性能反射素子」において、反射方向の制御に必要な反射位相の調整量を確保しつつ、低損失な反射素子を開発した。液晶層の厚さ、反射素子構造による位相調整量と反射損失の関係の分析結果をもとに、反射素子のパラメータを決定し、反射位相調整量 360°、損失 5.91 dB を実現した。反射位相調整を 360° 確保することにより、到達目標の ±50° を上回る、±60° の反射範囲を達成した。</li> <li>・<b>液晶 IRS の高速応答化（応答時間 1.5 秒以内）</b> 課題アー①（1）「反射特性を可変にする IRS 用の材料・デバイス技術」において、応答を高速化するため、液晶分子配向を安定化する微細な高分子隔壁構造を液晶層に導入した新構造素子を開発した。課題アー①（4）「IRS の大規模構造化技術」と連携し、微細な高分子隔壁構造を大規模化する技術を確認し、1,000 分の 1 波長（6.27 μm）の寸法公差での隔壁構造を実現した。この素子構造により、応答時間が 500 ミリ秒以下となり、到達目標の 1.5 秒以内を上回る成果を達成した。</li> <li>・<b>反射範囲 ±50° 以上かつ任意のビーム幅を形成可能な液晶 IRS の反射パターン形成技術</b> 課題アー②「IRS の反射特性制御技術」において、反射板から反射された電波が強め合う点（焦点）の位置を制御することで、反射範囲（ビーム幅）を調整する技術を確認し、到達目標の ±50° を上回る、±60° の範囲で任意のビーム幅の形成を実現した。</li> <li>・<b>所望周波数以外の電波に対する影響の低減技術</b> 課題アー②「IRS の反射特性制御技術」において、周波数選択板と誘電体スラブの 2 層構造から成るレドームを提案し、課題アー①（4）「IRS の大規模構造化技術」と連携して開発を行い、設計周波数を透過し、設計周波数以外の電波を反射するレドームを実現した。当該レドームを課題アー①（3）「IRS の反射特性可変デバイス構成技術」で開発した液晶 IRS の前に設置する事で、設計した周波数の電波だけ制御可能な IRS 装置を実現した。</li> <li>・<b>IRS によるユーザ端末追従技術（ユーザ端末の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間が 1.5 秒以上となる時間率 1% 以内）</b></li> </ul>

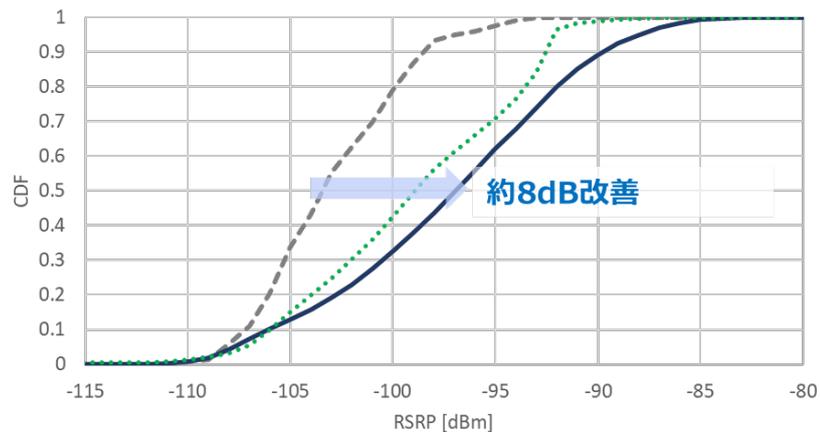
課題アー③「基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術」において、ユーザ端末から 20 ミリ秒毎に基地局が取得可能な受信電力情報からユーザ端末位置を推定し、推定位置に基づき IRS の反射パターンを決定する手法を確立した。シミュレーション評価を行い、ユーザ端末の受信電力が最低受信感度以下となる連続時間が 1.5 秒以上となる時間率 0.9% を達成した。

・液晶 IRS の統合実証実験

課題アー①・②・③で研究開発した技術を統合したフィールド実証実験を行い、ビル屋上に設置した基地局の足元に生じる不感地帯において、ユーザ端末の移動に追従して反射パターンを切り替えることで、ユーザ端末の受信電力を中央値で 8 dB 改善する効果を確認した。この時、端末・基地局間は見通し外となる位置であり、直接通信ができない環境であったが、IRS を経由することで通信が可能となることを確認した。



実証環境と装置構成



- 提案IRS (高速・低損失) + 従来反射パターン + 反射パターン固定
- 提案IRS (高速・低損失) + 提案反射パターン + 提案反射パターン割当手法 (UE1台)
- ... 提案IRS (高速・低損失) + 提案反射パターン + 提案反射パターン割当手法 (UE2台)

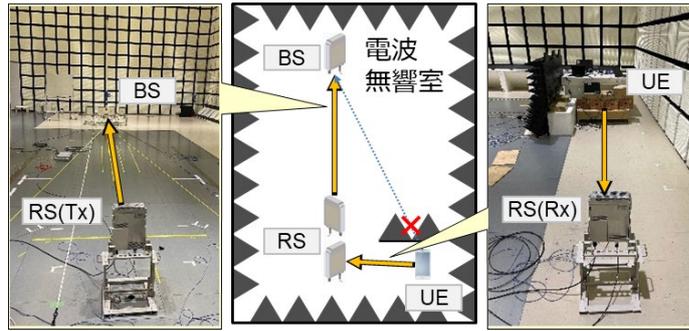
受信電力のCDF

課題イ  
高周波数帯  
中継通信端末の  
協調制御技術

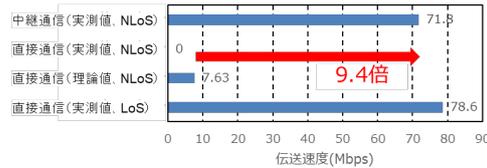
・課題イー① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術・課題イー② 移動する中継通信端末による複数ユーザ端末の高効率中継技術 (伝送速度が上りリンクで 5G の 4 倍以上、基地局当たりの上りリンクの伝送容量が 5G の 4 倍)

見通し内空間多重技術及び高効率中継技術を用いた実証システムを構築し、電波無響室内で実証実験を行った。その結果、セル端を模擬した見通し外環境において、直接通信ができない環境であったが、高効率中継により通信が可能となることを確認した。また、同環境における直接通信時の伝送速度を理論計算により算出し、提案中継技術により伝送速度が約 9.4 倍になることが確認でき、サービスエリアのセル端等における伝送速度が上りリンクで 5G の 4 倍以上に資する結果が得られたことを確認した。さらに、電波無響室内での実証実験の結果を基に、1 基地局のカバーエリアを 100m と仮定した場合の基地局当た

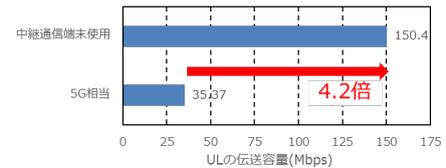
りの上りリンクの伝送容量を算出し、伝送容量が中継局を用いない 5G の 4.2 倍となることを確認した。



屋内実証実験環境



上りリンク伝送速度の実証実験結果

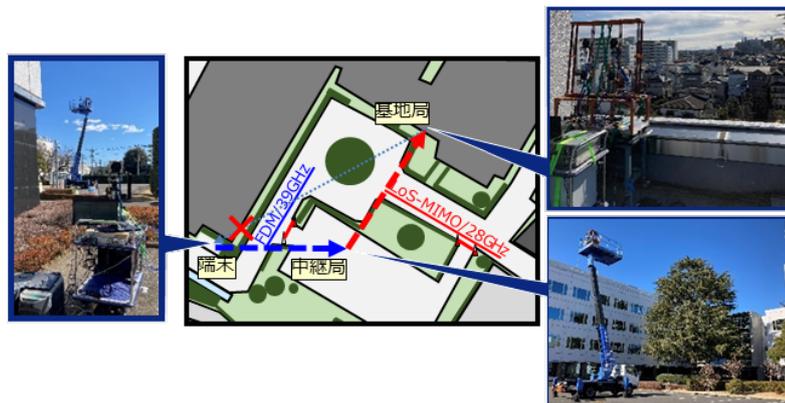


基地局当たりの上りリンクの伝送容量

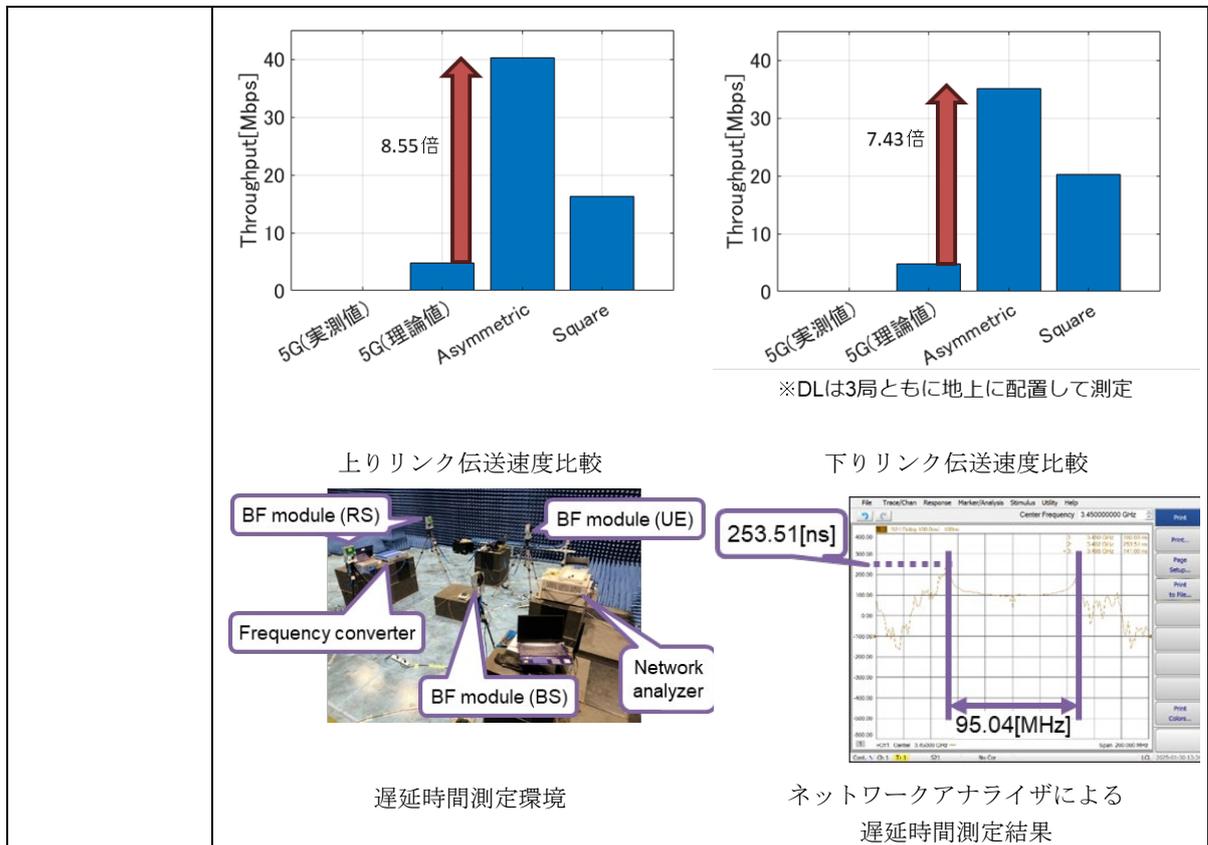
・課題イー① 移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術・課題イー③ 空間多重を可能とする低遅延中継技術 (伝送速度が 5G の 4 倍以上、中継処理の遅延時間を 60%以下に短縮)

低遅延中継回路を含む試作装置を用いて、屋外で実証実験を行った。この時、端末・基地局間は見通し外となる位置に配置されており、直接通信ができない環境であったが、低遅延中継により通信が可能となることを確認した。また、同環境における直接通信時の伝送速度を理論計算により算出し、提案中継技術により伝送速度が 5G の 4 倍以上 (上りリンクで約 8.6 倍、下りリンクで約 7.4 倍) に資する結果が得られたことを確認した。

また電波無響室内で中継処理による遅延時間を測定し、通信帯域内における遅延時間の最大値 253.51 [ns] がサブキャリア間隔 120 [kHz] の CP 長 590 [ns] 以下であることを確認した。これにより、中継通信時にも同一スロット内で通信が可能である見込みを得た。ここで、中継時にも同一スロット内で通信が可能な場合、IAB と比較して中継処理の遅延時間が 50%になることをシーケンスの比較から確認している。以上のことから、到達目標である IAB と比較して中継処理の遅延時間を 60%に短縮を上回る結果を確認した。



屋外実証実験環境



### 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7年6月20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

- 論文や研究発表、特許の実績の観点では、下表のように4年間で査読付き誌上発表論文13件、査読付き口頭発表論文39件、その他誌上発表5件、口頭発表120件、特許出願86件と多数の発表と成果展開に必要な技術の確立を進めており、タイムリーな研究成果アピールに努めていると言える。これらの発表の中には、アンテナ・伝播に関する世界最大の論文誌 (IEEE Trans. Antennas Propag.、IF=5.8) への掲載2件、ACES-ChinaやICEAA2024などの計算電磁気学の分野における世界最大規模の会議での招待講演2件等も含まれている。また、これらの発表内容に対し、国内外で13件の受賞がある。さらに、出願特許の内数で27件は海外出願を実施済みであり、IRSの素材や製造方法に関する特許の他、後述する国際標準化に関連して出願されたものも含まれている。これらの内容は、研究成果のアピールを積極的に行っていると共に、本研究開発の必要性と有効性が外部から認められた証左と考える。
- 国際標準化の観点では、低遅延中継の制御や通信方式に関する寄書を3GPP Release 18 Network-controlled repeater (NCR)へ5件提出するとともに、3GPP Release 19でIRSをstudy item (SI)化するための寄書を4件提出し、国際標準化活動を推進した。NCRに関しては、提出した寄書で入力した提案7件の規格文書への反映を確認しており、これらの国際標準化活動を通して、本

研究開発の成果内容を規格化できたことは、本研究開発で検討した技術の必要性和有効性が外部から認められた証左であると考える。

主な指標	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	合計
査読付き誌上发表論文数	1件 (1件)	4件 (2件)	3件 (3件)	5件 (2件)	13件 (8件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	2件 (0件)	11件 (11件)	13件 (9件)	13件 (11件)	39件 (31件)
その他の誌上发表数	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (0件)	3件* (0件)	5件* (0件)
口頭発表数	36件 (0件)	35件 (3件)	27件 (0件)	22件 (2件)	120件 (5件)
特許出願数	12件 (0件)	26件 (7件)	33件 (15件)	15件 (5件)	86件 (27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	0件 (0件)	6件 (6件)	2件 (2件)	1件 (1件)	9件 (9件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	0件 (0件)	7件 (7件)	0件 (0件)	7件 (7件)
受賞数	3件 (0件)	6件 (1件)	4件 (0件)	0件 (0件)	13件 (1件)
報道発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (0件)	1件 (0件)	2件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	3件 (0件)	3件 (0件)	3件 (0件)	9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：「査読付き市場発表論文数」には、定期的に刊行される論文誌や学会誌など、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：「その他の誌上发表数」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。

\*XGMF白書(<https://xgmf.jp/2025/05/07/1339/>)への寄稿3件(2025年5月7日公開)含む。

#### ○各観点からの分析

観点	分析
必要性	モバイル通信機器の普及、個人の使用するモバイルデータ量の飛躍的な増加及び多種多様なセンサや機器のネットワークへの加入により、移動通信トラフィックは年率1.2倍で増加傾向であり、さらに5G普及期においては、高品質画像やリアルタイム性を重視した遠隔医療など、さまざまなユースケースでの利活用により、これまで以上に高速・大容量伝送の需要が増大すると想定される。こうした周波

	<p>数ひっ迫の状況を回避するため、広帯域が確保された高周波数帯の有効利用は喫緊の課題であった。</p> <p>また、世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和2年7月17日）における「次世代インフラの整備」として、Society 5.0をより高いレベルで実現していくためには、それを支える中核的なインフラとしては5Gよりも更に高度なネットワークが求められるとある。超高速・大容量等、5G機能のさらなる高度化のためには、これまでに5Gの移動通信システムに割り当てられた周波数帯より更に高い周波数帯の活用が重要であり、本研究開発では高周波数帯の有効利用の観点から先んじて取り組み、必要な技術を実現している。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
<p>効率性</p>	<p>本研究開発を推進するに当たっては、移動通信技術に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する民間企業、大学、国立研究開発法人のノウハウを積極的に活用しており、効率的に研究開発を進められた。また、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。</p> <p>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。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
<p>有効性</p>	<p>従来、電波の特性と周辺環境に起因する不感地帯の発生や、上りリンク通信性能の劣位が高周波数帯の利用促進を阻害する要因となっていた。そこで、本研究開発において、IRSの反射特性可変デバイスと反射特性制御技術、基地局・ユーザ端末とのIRS協調技術及び高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確立することにより、高周波数帯利用時に生じる不感地帯においても通信が可能となり、不感地帯のエリア化を進めることができた。さらに、高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確立することにより、上りリンク通信性能を向上することができた。以上のことから、高周波数帯利用時に生じる不感地帯のエリア化と上りリンク通信性能向上により、高周波数帯における周波数の有効利用の一層の向上に寄与することができた。</p> <p>さらに、本研究開発で確立したIRSの構成技術や移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術は、セルラシステムだけでなく、IoT(Internet of Things)や無線LAN等の他システムにも応用することができる。本研究開発で試作したIRSは47GHz帯(47.2-48.2GHz)を動作周波数とするが、IRSを実現する材料の創出方法、構造の確立方法、加工技術等は他の周波数帯でも応用することができる。したがって、本研究開発で確立するIRSの構成技術を用いることで、Beyond 5Gや6G以降での利用が検討されているFR3やテラヘルツ帯、IoTや無線LAN等の他の無線システムにおいても、IRSを用いて高周波数帯において発生する不感地帯の対策として活用することが可能である。特に、Beyond 5Gや6G以降での利用が検討されているFR3においても、ミリ波帯に近い周波数帯が検討対象となっており、本研究開発で確立した高効率中継技術・低遅延中継技術を活用できる。本研究開発で確立したIRSや中継技術については、5Gの普及とBeyond 5G以降の研究開発を推進することを目的に設立されたXGモバイル推進フォーラム(XGMF)が2025年5月7日に発行した白書に対し3件の寄稿を行っており、広く世界に向けて周知している。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
<p>公平性</p>	<p>本研究開発は、移動通信トラフィックの増加に伴い、移動通信システム等に利用されている周波数帯域のひっ迫状況を緩和するため、高い周波数帯の有効活用を促進する技術の研究開発であり、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。</p> <p>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。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
<p>優先性</p>	<p>移動通信トラフィックは年率1.2倍で増加傾向であり、さらに5G普及期においては、これまで以上に高速・大容量伝送の需要が増大すると想定される。こうした周波数ひっ迫の状況を回避するため、広帯域が確保された高周波数帯の有効利用は喫緊の課題であり、早急に対応する必要がある。</p> <p>また、世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画（令和2年7月17日）においても、Society 5.0をより高いレベルで実現していくため、それを支える中核的なインフラとして5Gよりも更に高度なネットワークであるBeyond 5Gの早期かつ円滑な導入と、我が国の国際競争力強化に向けて、産官学が連携して戦略的に取り組める「Beyond 5G推進コンソーシアム（仮称）」を構築し、研究開発戦略、知財・標準化戦略及び展開戦略を強力かつ積極的に推進するとある。5G機能のさらなる高度化のためには、これまでに5Gの移動通信システムに割り当てられた周波数帯より更に高い周波数帯の活用が重要であり、本研究開発において先んじて取り組み、必要な技術を実現する必要があった。</p> <p>本研究開発の成果は、査読付き誌上発表論文13件、査読付き口頭発表論文39件といった、専門家が査読を行いその内容を認めた発表をタイムリーに行っている。加えて、外国出願27件を含む特許出願86件を達成しており、必要とされる技術のタイムリーな知財化により、国際競争力の確保に早くから貢献できている。さらに、低遅延中継の制御や通信方式に関して3GPP Release 18 NCRへ提出した</p>

5 件の寄書で入力した提案 7 件の規格文書への反映を確認しており、タイムリーな国際標準化活動が できている。 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）

我が国の移動通信トラヒックは、モバイル通信機器の普及や個人の使用するモバイルデータ量の飛躍的な増加、IoT 機器のネットワーク加入等により年々増加傾向である。さらに 5G 普及期においては、さまざまなユースケースでの利活用により、これまで以上に高速・大容量伝送の需要が増大すると想定される。こうした周波数ひっ迫状況の回避に加え、Society 5.0 をより高いレベルで実現していくためには 5G よりも更に高度なネットワークが求められており、広帯域が確保された高周波数帯の有効利用の観点から、必要な研究開発に先んじて取り組みを進めた。

従来、電波の特性と周辺環境に起因する不感地帯の発生や、上りリンク通信性能の劣位が高周波数帯の利用促進を阻害する要因となっていた。そこで、本研究開発において、IRS の反射特性可変デバイスと反射特性制御技術、基地局・ユーザ端末との IRS 協調技術及び高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確立することにより、高周波数帯利用時に生じる不感地帯においても通信が可能となり、不感地帯のエリア化を進めることができた。さらに、高周波数帯中継通信端末の協調制御技術を確立することにより、上りリンク通信性能を向上することができた。以上のことから、高周波数帯利用時に生じる不感地帯のエリア化と上りリンク通信性能向上により、高周波数帯における周波数の有効利用の一層の向上に寄与することができた。

本研究開発の成果は、査読付き誌上発表論文 13 件、査読付き口頭発表論文 39 件といった、専門家が査読を行いその内容を認めた発表をタイムリーに行っている。加えて、外国出願 27 件を含む特許出願 86 件を達成しており、必要とされる技術のタイムリーな知財化により、国際競争力の確保に早くから貢献できている。さらに、低遅延中継の制御や通信方式に関して 3GPP Release 18 NCR へ提出した 5 件の寄書で入力した提案 7 件の規格文書への反映を確認しており、タイムリーな国際標準化活動ができている。加えて、本研究開発で確立した IRS や中継技術については、5G の普及と Beyond 5G 以降の研究開発を推進することを目的に設立された XG モバイル推進フォーラム (XGMF) が 2025 年 5 月 7 日に発行した白書に対し 3 件の寄稿を行っており、広く世界に向けて周知している。なお、本研究開発で確立した IRS の構成技術や移動する中継通信端末に対応した見通し内空間多重技術は、セルラシステムだけでなく、IoT や無線 LAN 等の他システムにも応用することができる。特に、IRS を実現する材料の創出方法、構造の確立方法、加工技術等は他の周波数帯でも応用可能であり、Beyond 5G や 6G 以降での利用が検討されている FR3 やテラヘルツ帯でも活用できる。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>

本研究開発で確立した技術について、低遅延中継に関連するものなど、一部については受託期間中に国際標準化を進めることができているが、IRS 等の標準化が先送りになっている技術についても、5G のセルラシステムだけでなく、他システムや FR3・テラヘルツ帯などのミリ波以外の周波数帯への応用も可能であるため、今後も論文等による情報発信や特許出願、標準化動向の確認や寄書入力等の活動を継続していく。

## 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 7 年 6 月 20 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。

- ・研究開発した液晶 IRS 技術により、反射の方向を任意に制御できるようになったとのことだが、反射板としての反射特性、具体的には反射方向毎の反射係数など、がどの程度維持できるのか、データがあれば教えてほしいとのコメントがあり、今回開発した液晶 IRS については、反射方向を  $\pm 60^\circ$  の範囲で変化させた場合でも電力の低下が  $-6$  dB に収まる様に設計している旨が回答された。外部評価委員から、反射方向を変化させた場合でも反射特性は良好であり、液晶 IRS と

いう非常に面白い技術が開発されたと感心したとのコメントもあり、本研究開発は有益であったと判断する。

- ・ 高効率中継・低遅延中継の実証実験における伝送速度評価では、具体的な変調方式や符号化方式を変更して測定しているのか、それとも測定した受信電力から理論的に計算したのかを教えてほしいとのコメントがあり、今回開発した高効率中継・低遅延中継の実証実験用装置は、OAI (Open Air Interface) と呼ばれる 5G 信号に準拠した信号を使用しているため、実際に変調多値数や符号化率の組み合わせを 5G に準拠して変更して測定を行った旨が回答された。実用化に向けて理論上の特性だけでなく、具体的に 5G 信号に準拠した信号を用いて評価を行っており、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

- Beyond 5G 推進戦略懇談会提言(令和 2 年 6 月)  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000696612.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000696612.pdf)
- まち・ひと・しごと創生基本方針 2020(令和 2 年 7 月 17 日閣議決定)  
<https://www.chisou.go.jp/sousei/info/pdf/r02-07-17-kihonhousin2020hontai.pdf>
- 世界最先端デジタル国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画(令和 2 年 7 月 17 日閣議決定)  
<https://www.moj.go.jp/content/001345317.pdf>
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合  
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>
- 基本計画書 基地局端末間の協調による動的ネットワーク制御に関する研究開発  
[https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/210126\\_keikakusho\\_RD.pdf](https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/210126_keikakusho_RD.pdf)  
(P. 40～48)

# 令和 7 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：サイバーセキュリティ統括官室

評価年月：令和 7 年 8 月

## 1 政策（研究開発名称）

安全な無線通信サービスのための新世代暗号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

令和 3 年度～令和 6 年度（4 か年）

#### ・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人

#### ・総事業費

1,647 百万円

令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度	総 額
409 百万円	406 百万円	441 百万円	390 百万円	1,647 百万円

事業開始時点で、十億円以上の費用を要することが見込まれていなかったため、事前評価は実施していない。

#### ・概 要

5G 等の無線通信の高度化においては、将来的に実用化が想定される大規模量子コンピュータに対応する必要がある。大規模量子コンピュータへの対策としては、共通鍵暗号方式<sup>1</sup>においては、鍵長の増加、公開鍵暗号方式<sup>2</sup>においては、耐量子計算機暗号（以下「PQC<sup>3</sup>」という。）への移行が挙げられる。一方、それらの技術を適用する際には、5G 等が求める超高速・大容量等の通信特性を損なわず、計算資源や通信リソースにも影響を与えないよう配慮する必要がある。

本研究開発では、5G 等の特性を損なわない形で、現状と同等の安全性を確保するために鍵長を倍にしつつ、超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式を開発し、一般的な計算機環境において処理速度を 50Gbps にするとともに、暗号処理に要する時間を従来方式と比較して最大 50%程度削減することを目指す。また、5G 等の様々なユースケースに合わせた PQC への機能付加技術等を確立し、オーバーヘッド（暗号文サイズ、処理時間等）を最大 8%以内に抑え、無線リソースのひっ迫を抑止することで電波の有効利用を図る。さらに、これらの実用化に向けて暗号アルゴリズムや PQC 活用ガイドラインの国際標準化に取り組む。

<sup>1</sup> 暗号化・復号の過程で、同じ鍵が用いられる暗号方式。

<sup>2</sup> 一对の異なる暗号鍵ペア（本人しか所有しない「秘密鍵」と一般に誰でも入手可能な「公開鍵」）が用いられており、一方の鍵で暗号化したものについては、それに対応するもう一方の鍵でしか復号できない暗号方式。

<sup>3</sup> Post-Quantum Cryptography の略。

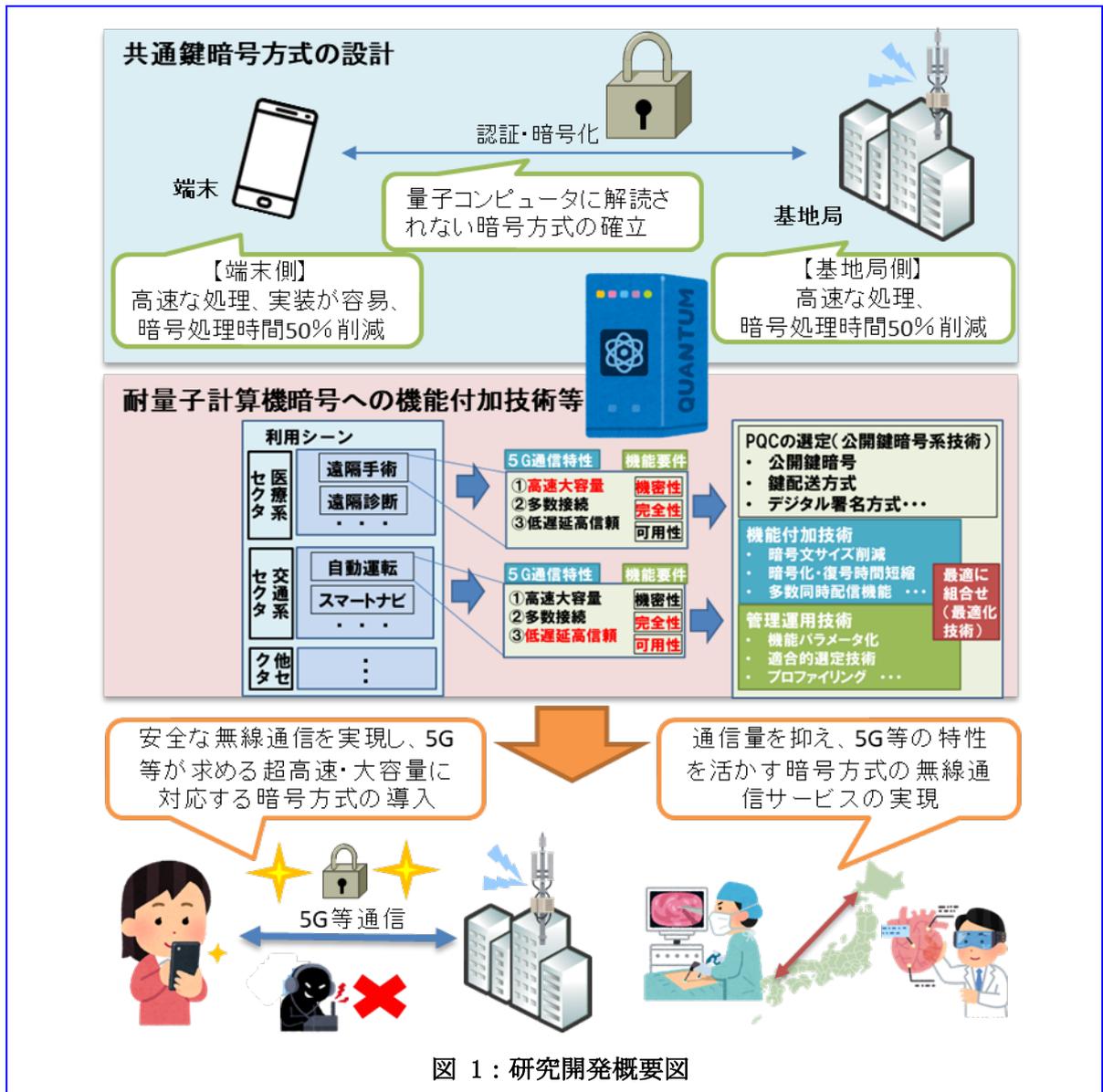


図 1：研究開発概要図

技術の種類	技術の概要
5G 等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術（高速共通鍵暗号）	<p>5G 及びより高度な無線通信(端末と基地局の間の通信)においては、さらなる高速大容量化が図られると考えられ、既存の暗号方式よりも高速な共通鍵暗号方式が求められる。また、大規模量子コンピュータが実用化されると鍵の解読にかかる計算時間が削減されるため、現在利用されている鍵長 (128bit) を 2 倍に伸ばし、鍵長 256bit の鍵を利用可能とする必要がある。一般に、速度と鍵長はトレードオフの関係にあり、既存の暗号方式で 256bit 鍵を使用した場合には、速度低下を引き起こすため、5G 等の無線通信に求められるようなさらなる高速化は実現できない。そのため、計算機リソースが限られた携帯端末にも実装が可能であり、大規模量子コンピュータへの安全性を確保しながら、5G 等に適した高速な共通鍵暗号方式の確立が必要となる。</p> <p>また、暗号方式は、最新の解読手法等を考慮しても十分な安全性を保持することが求められるため、最新の攻撃手法を調査するとともに、将来想定される攻撃手法の改良に対しても検討を行う必要がある。併せて、暗号方式の実用性を評価するためには、実利用に近い環境において、その性能等を実証評価する必要がある。</p> <p>したがって、大規模量子コンピュータに対する安全性を確保しつつ、暗号化処理に要する計算量や処理時間を低減させた高速共通鍵暗号方式の確立を目的として研究開発を行う。</p>
5G 等のための耐量子計算機暗号への機能付加技術等（耐量子コ	<p>5G 環境では、既に規格化された暗号化、認証、鍵管理技術が活用されているが、5G の高度化の一環として、将来の大規模量子コンピュータの実用化を見据え、5G の特性を損なわずに、PQC 技術を実装する必要がある。</p> <p>将来の大規模量子コンピュータの実現を想定した 5G 等の無線環境において、PQC を利活</p>

<p>ンピュータセキュリティ技術)</p>	<p>用するためには、鍵長や暗号文サイズ、鍵生成・暗号化・復号の処理時間などをユースケース毎に適切に検討することによる、無線リソースを逼迫させないためのPQCの選定及び当該方式におけるパラメータの選択等が重要となる。一例として、医療サービスにおける「遠隔手術」のユースケースを想定した場合、扱われる手術関連データの完全性、手術システムの可用性や低遅延性などが重要な特性と考えられ、これらの特性を加味した形でPQCの適用方法、実装方法の検討を進める必要がある。また、その際には、計算機リソースが限られた端末でも5Gの特性(低遅延等)を実現するため、物理層セキュリティについても検討を行うことが重要となる。</p> <p>そこで、5Gの様々なユースケースに応じてオーバーヘッドがより少なくなるように、複数のPQCへの機能付加技術、管理運用技術、最適化技術(総称して「耐量子暗号系セキュリティ技術」という。)及び耐量子暗号系セキュリティ技術において計算機リソースをより効率的に利用するための物理層セキュリティ技術(耐量子暗号系セキュリティ技術と総称して耐量子コンピュータセキュリティ技術)を確立することを目的として研究開発を行う。</p>
-----------------------	--

・スケジュール

技術の種類	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度
5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術(高速共通鍵暗号)	安全性・機能性評価指針の検討	アルゴリズムの設計	アルゴリズムの安全性評価・実装評価	無線通信環境での実証評価
5G等のための耐量子計算機暗号への機能付加技術等(耐量子コンピュータセキュリティ技術)	PQCの機能評価	耐量子暗号系セキュリティ技術の構築	技術の改良・特定ユースケースでの評価	無線通信環境での実証評価

(2) 達成目標

5G等において、将来的に実用化が想定される大規模量子コンピュータによって既存の暗号技術は危殆化するおそれがある。そこで、本研究開発では、大規模量子コンピュータへの耐性を持ちながら、無線通信リソースの効率的な利用環境を提供できる暗号技術を開発することで、無線リソースのひっ迫を抑止し電波の有効利用を図る。さらに、開発した暗号技術については、国際標準化に向けた取組を推進する。

(5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術(高速共通鍵暗号))

共通鍵暗号として、大規模量子コンピュータにおいても、現実的な計算時間で解読できない方式、かつ計算機リソースが限られた携帯端末にも実装が可能な設計を行う。さらに、一般的に入手可能な既存の計算機環境における暗号処理のスループットとして50Gbpsを達成すること及び暗号処理に要する時間を従来方式と比較して最大50%程度削減する。

(5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等(耐量子コンピュータセキュリティ技術))

通信事業者が提供する5G基盤サービスや各種ユースケースにおける5Gサービスにおいて、その特性を損なわない耐量子コンピュータセキュリティ技術を構築し、技術付与前と比較してそのオーバーヘッド(暗号文サイズ、処理時間等)を最大8%以内に抑える。また、PQCの活用の視点から、計算機リソースが限られた携帯端末等でも実装が可能な技術開発も行う。

○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)
統合イノベーション戦略2020(令和2年7月17日)	<p>第Ⅲ部 第1章 知の源泉</p> <p>(2) 信頼性のある自由なデータ流通の実現及びデータ駆動型社会の社会実装</p>

	<p>②目標に向けた施策・対応策</p> <p>&lt;サイバーセキュリティ統合知的基盤の構築&gt;</p> <p>○5Gに対応したセキュリティ検証技術、IoT機器や通信機器等のコネクテッドデバイスのセキュリティ検証技術のほか、データのセキュリティやプライバシーを確保し、安全なデータ流通と利活用を促進する技術の創出を行うとともに、暗号技術の安全性評価や耐量子計算機暗号などの新たな暗号技術の開発により、量子計算機時代に安全に利用できる暗号基盤技術を確立する。</p>
サイバーセキュリティ研究・技術開発取組方針(令和元年5月17日)	<p>4. 今後の取組強化の方向性</p> <p>④ 暗号等の基礎研究の促進</p> <p>&lt;具体的取組&gt;</p> <p>既存の暗号システムの危殆化につながる量子コンピュータ等の国際動向を把握しつつ、耐量子計算機暗号や量子暗号等の安全なセキュリティ技術の研究・技術開発に取り組む。</p>

### (3) 目標の達成状況

4年間の研究開発を通じて、目標を達成することができた。

「5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術(高速共通鍵暗号)」については、大規模量子コンピュータへの耐性のある高速共通鍵暗号の暗号アルゴリズムを設計し、現在利用されている共通鍵暗号方式の鍵長(128bit)を2倍にした256bitの共通鍵において、当初目標50Gbpsに対し、世界最速の530.7Gbps<sup>4</sup>の処理速度を達成した。さらに、暗号処理に係る時間については、最大50%削減という当初目標に対し、従来方式(AES)と比較して約84%の削減を実現した。

「5G等のための耐量子計算機暗号の機能付加技術等(耐量子コンピュータセキュリティ技術)」について、高速大容量通信、低遅延高信頼通信、多数接続通信が必要とされるユースケースを考慮し、PQCに対する機能付加技術、管理運用技術及び最適化技術等を確立した。特に、オーバーヘッドを最大8%以内に抑えるという当初目標に対しては、制限付きIDベース暗号技術<sup>5</sup>とプロキシ再暗号化技術<sup>6</sup>において、暗号文長のオーバーヘッド0%(暗号文の冗長なし)を達成した。

本研究開発において設計した暗号技術については、大規模量子コンピュータへの耐性を有しており、将来的に無線通信システムの標準仕様に採用されることによって、5G等の特性を保ちながら、安全性を有する無線通信サービスを実現でき、周波数の有効利用の一層の向上が期待される。

また、本研究開発で開発した高速共通鍵暗号については、3GPP、ISO/IEC、IETFに標準化規格として提案活動を実施するとともに、PQCを基盤とした高機能暗号の活用に関する技術ガイダンス文書については、ITU-Tの国際標準規格に提案しており、国際標準化にも貢献している。

技術の種類	目標の達成状況
5G等のための超高速・大容量に対応した共通鍵暗号方式技術(高速共通鍵暗号)	<ul style="list-style-type: none"> <li>高速共通鍵暗号の暗号アルゴリズムの図2のとおり設計を完了。</li> <li>設計したアルゴリズムについては、インドの大学及びフランスの大学の独立した専門家による第三者安全性評価を実施し、安全性が確保されていることを確認。</li> <li>ソフトウェア実装の暗号処理性能として、当初目標50Gbpsであるところ、PCでは世界最速の530.7Gbps、スマートフォンでは173.0Gbpsを達成し、大幅に目標値を超えた。</li> <li>ソフトウェア実装の暗号処理時間に関し、当初目標50%削減であるところ、従来方式であるAESと比較して、暗号処理に要する時間を最大84%削減され、暗号処理時間の観点でも大幅に目標値を超えた。</li> <li>ハードウェア実装に関し、特定用途向けの集積回路であるASICによるシミュレーション評価において、処理性能が世界最速の2.02Tbpsを達成。FPGA実装においては、102.4Gbpsを達成。</li> <li>高いセキュリティ実装を実現するため、サイドチャネル攻撃に利用可能な電磁波による情報漏洩がないことを確認し、十分な安全性を有することを確認。</li> <li>256bit共通鍵暗号として、AES-256と開発した高速共通鍵暗号を導入し、3.7GHz帯の無</li> </ul>

<sup>4</sup> 他研究の実績においては、352.3Gbpsが最速であった。

<sup>5</sup> メールアドレス等の任意の値を公開鍵に設定可能な公開鍵暗号。

<sup>6</sup> 暗号化されているデータを復号することなく、再び暗号化する

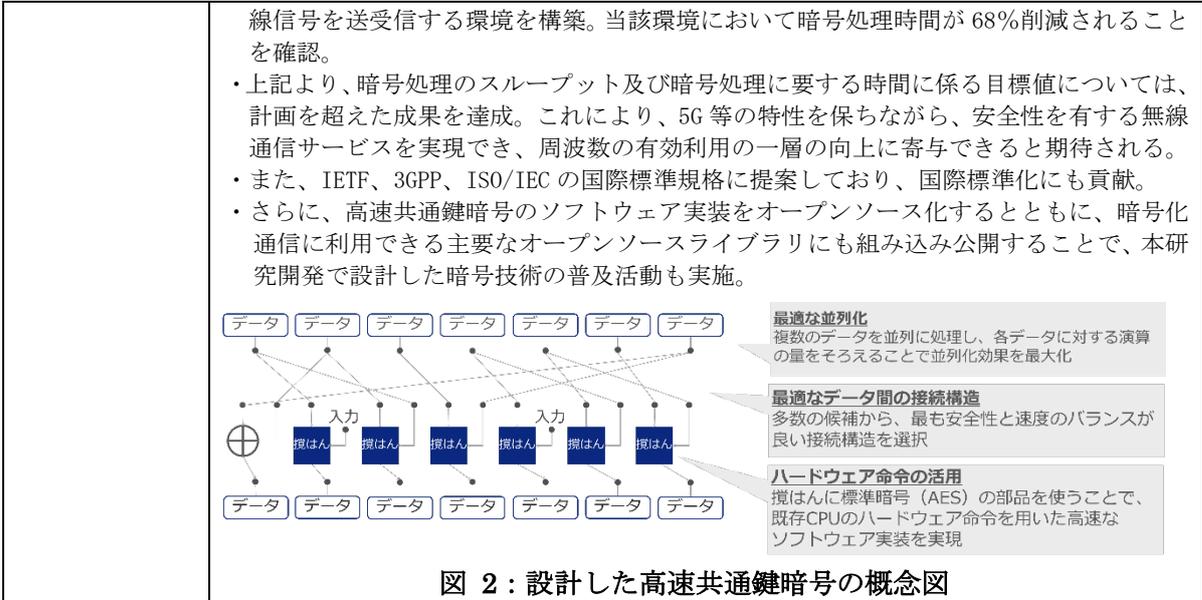


図 2：設計した高速共通鍵暗号の概念図

- 実用的な高機能PQCとして、暗号文長のオーバーヘッドが0%の制限付きIDベース暗号技術及びプロキシ再暗号化技術等を開発。これにより、暗号文サイズ等のオーバーヘッドを最大8%以内に抑える当初目標を達成。
- さらに、効率的な高機能PQCとして、IDベース暗号の拡張方式を開発し、従来方式と比較して復号鍵サイズが約1/72のサイズ、暗号文サイズが約1/7を実現。また、IDベース署名については、従来方式と比較して鍵サイズが約1/20のサイズ、署名サイズが約1/250のサイズを実現。これら幅広いPQCの機能付加技術を開発。
- その他、新たな鍵共有方式やデジタル署名の高速化を開発するとともに、多変数連立方程式の求解を競う暗号解読コンテストにおいて2回の世界記録更新を達成。
- PQCの管理運用技術については、5G等の多様なユースケースと高機能暗号のアクセス構造に対応したPQCの管理フレームワークの設計を実施。
- ユースケースごとの機能要件に基づき最適な暗号方式を選択する技術を開発し、本研究開発で開発した高速共通鍵暗号及び集約署名を併せた統合評価を実施(図3)。端末が少ない場合は通常の署名方式を使用し、端末が多い場合は集約署名を適用することで、通信量の削減が可能であることを実証。
- 物理層セキュリティ技術として、PQCを利用できない環境において、無線通信路の特性を活用して秘密鍵を共有する技術やPQCの実装に対するサイドチャネル対策技術について検討を実施。
- 上記より、暗号文長のオーバーヘッドに係る目標値については達成。これにより、5G等の特性を保ちながら、安全性を有する無線通信サービスを実現でき、周波数の有効利用の一層の向上に寄与できると期待される。
- また、PQCを基盤とした高機能暗号の活用に関する技術ガイダンス文書のITU-T規格化に向け、「Guidance on use of advanced cryptography based on PQC (TR.ac-pqc)」を提案しており、国際標準化にも貢献。

5G等のための耐量子計算機暗号への機能付加技術等(耐量子コンピュータセキュリティ技術)



図 3：統合評価系

### 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7年6月20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

- 論文や研究発表の実績の観点では、下表に示すとおり、査読付き誌上发表論文 51 件、査読付き口頭発表論文 55 件、その他の誌上发表 21 件、口頭発表 136 件を実施した。受託期間 4 年間で、研究成果についてタイムリーにアピールに努めていた。これらの発表の中には、暗号技術のトップカンファレンスである Eurocrypt (2 件) や Asiacypt (2 件) への採択も含まれる。また、本研究に係る一連の成果により、文部科学大臣表彰 若手科学者賞、末松安晴賞、船井学術賞など、数々の権威ある賞を受賞した。これらの内容は、研究成果のアピールを積極的に行っているとともに、本研究開発の必要性、有効性等が外部から認められた証左と考える。
- 特許の観点では、下表に示すとおり、受託期間 4 年間で 28 件(うち国際特許出願は 2 件)を実施した。本研究開発は、大規模量子コンピュータの実用化後においても、無線通信システムに導入可能な暗号技術に関わるものであり、権利化後の有効性は高い。今後も関連する特許出願が見込まれ、本研究開発の必要性、有効性が認められる。
- 国際標準化の観点では、下表に示すとおり、受託期間 4 年間で 37 件の寄書を実施。IETF、3GPP、ISO/IEC 及び ITU-T に提案活動を実施しており、議論が継続中である。国際標準化により移動体通信の基地局や端末等への導入が進むことが期待され、本研究開発の必要性、有効性が認められる。

主な指標	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	合計
査読付き誌上发表論文数	1 件 (1 件)	18 件 (18 件)	14 件 (14 件)	18 件 (18 件)	51 件 (51 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 件 (1 件)	10 件 (10 件)	24 件 (24 件)	20 件 (20 件)	55 件 (55 件)
その他の誌上发表数	4 件 (4 件)	7 件 (3 件)	4 件 (3 件)	6 件 (3 件)	21 件 (13 件)
口頭発表数	18 件 (0 件)	37 件 (1 件)	47 件 (1 件)	34 件 (3 件)	136 件 (5 件)
特許出願数	1 件 (0 件)	8 件 (0 件)	9 件 (2 件)	10 件 (0 件)	28 件 (2 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	0 件 (0 件)	5 件 (5 件)	11 件 (11 件)	21 件 (21 件)	37 件 (37 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)
受賞数	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)	7 件 (1 件)	8 件 (1 件)	17 件 (2 件)
報道発表数	1 件 (0 件)	0 件 (0 件)	2 件 (0 件)	0 件 (0 件)	3 件 (0 件)
報道掲載数	1 件 (0 件)	2 件 (0 件)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)	3 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：「査読付き誌上发表論文数」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	<p>5G 等の無線通信システムにおいても、送信者と受信者で共通の鍵を使って暗号化・復号化を行う共通鍵暗号方式と、暗号化と復号化で公開鍵・秘密鍵という別の鍵を使う公開鍵暗号方式が広く利用されている。これらの暗号方式は計算困難性に基づいて利用されているが、大規模量子コンピュータが実用化されると、従来の公開鍵暗号方式が危殆化するおそれがあるため、PQC に移行する必要がある。PQC として様々な暗号技術が開発・提案されているが、移行する PQC の方式によっては、暗号文データが膨大となり、無線通信における帯域をひっ迫する可能性がある。また、共通鍵暗号方式についても、大規模量子コンピュータへの耐性を持つには、一般に鍵長を2倍程度増やす必要があるとされているが、鍵長が増えると暗号化に要する計算量等が増え、単位時間あたりに処理可能なデータ量が減少する。つまり、5G 等の高速・大容量といった特性を踏まえると、大規模量子コンピュータに耐性のある暗号技術の暗号化処理に係る時間がボトルネックとなることが想定される。</p> <p>統合イノベーション戦略 2020（令和2年7月17日）においては、暗号技術の安全性評価や耐量子計算機暗号などの新たな暗号技術の開発による、量子計算機時代に安全に利用できる暗号基盤技術についての研究開発の重要性が指摘されているところ、本研究開発は、5G 等が求める超高速・大容量に対応した暗号アルゴリズムを開発するとともに、ユースケースに合わせた PQC の機能付加技術等を開発することで、5G 等におけるセキュリティの確保を通じて安全・安心な社会インフラの実現に資することから、研究開発すべき課題である。</p> <p>また、高速共通鍵暗号や公開鍵暗号に基づく PQC への機能付加技術等の開発により、暗号処理性能の向上や暗号データ量の削減等が実現されることは、国民の財産である電波資源の有効利用及び国民の生活インフラである ICT の安全・安心の確保に資するものであり、国が実施すべき研究開発として推進する必要がある。</p> <p>よって、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>実施期間中も受託者の研究代表者・実務者の定期的な合会において各々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。</p> <p>また、暗号技術に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業・大学・国立研究開発法人、研究者等のノウハウを積極的に活用することにより、各々がそれぞれ得意な分野を担当し、効率的に研究開発が進められた。</p> <p>委託経費の執行に当たっては、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。</p> <p>よって、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発においては、将来実用化が想定される大規模量子コンピュータにも安全性を有する高速共通鍵暗号の設計完了・実装技術を完成するとともに、5G 等のユースケースに応じて、PQC の機能付加技術等を開発した。超高速・低遅延な共通鍵暗号方式や効率的な高機能 PQC の開発により、5G 等の高速・大容量という特性を活かしながら、安全性を有する暗号技術を導入することができ、大規模量子コンピュータ実用化後においても安全性を有する無線通信サービスが提供できる。これらの研究成果</p>

	<p>により、周波数の有効利用の一層の向上に寄与することができる。</p> <p>さらに、5G やその後継技術となる無線通信の保護に利用できる。本研究開発において設計した高速共通鍵暗号方式や PQC の機能付加技術等については、国際標準化規格への提案活動を実施しており、これらの移動通信システムの標準仕様に採用されることで、基地局、端末、センサデバイス、スマートカード等への実装が進み、本暗号技術の普及が急速に進むことが期待できる。ソーシャルメディア、ネット動画視聴サービス、ネットショッピング等のオンラインサービスにおいては、通信の暗号化に共通鍵暗号方式、認証・鍵共有に公開鍵暗号方式を利用することが一般的であり、国際競争力のある高速共通鍵暗号方式の設計や PQC の機能付加技術の開発に成功したことで、さまざまなサービスに導入されることが期待できる。また、これらの技術開発により知的財産を確保するとともに、この知的財産を我が国の製造事業者やサービス事業者にライセンスする体制を築き上げることにも寄与するものである。このことにより、研究成果の実用化・商用化を促進するとともに、我が国の製品開発能力の引き上げを図る。</p> <p>よって、本研究開発には有効性があつたと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発の成果は、国民の財産である電波資源の有効利用に資するものであり、無線通信サービスの利用者の利益となる。また、本件研究開発は情報セキュリティの基盤である暗号技術に関するものであり、国民の生活インフラである ICT の安全・安心の確保に資するものである。</p> <p>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。</p> <p>よって、本研究開発には公平性があつたと認められる。</p>
優先性	<p>5G 等の無線通信システムにおいては、将来的に実用化が想定される大規模量子コンピュータに耐え得る安全性を担保する必要がある。加えて、十分な安全性評価や標準化活動を行う期間がそれぞれ必要となるため、社会において新たな暗号方式を導入し普及させるためには 10 年以上を要する。</p> <p>以上から、本研究開発の成果を社会実装し、周波数の有効利用を図りつつ、安全・安心に 5G 等の無線通信システムを活用できる社会を実現するため、本研究開発を優先的に実施する必要がある。</p> <p>また、サイバーセキュリティ研究・技術開発取組方針（令和元年 5 月 17 日）においても、「既存の暗号システムの危殆化につながる量子コンピュータ等の国際動向を把握しつつ、耐量子計算機暗号や量子暗号等の安全なセキュリティ技術の研究・技術開発に取り組む」とされており、大規模量子コンピュータに耐性のある暗号技術の研究開発は早急に実施する必要がある。</p> <p>よって、本研究開発には、優先性があつたと認められる。</p>

## 5 政策評価の結果（総合評価）

5G 等の無線通信システムにおいて、将来実用化が想定される大規模量子コンピュータにより、従来使用してきた暗号技術が危殆化するおそれがあるため、高速・大容量といった 5G 等の特性を損なわず、大規模量子コンピュータにも耐性のある暗号技術を利用する必要がある。本研究開発においては、5G 等の特性を保つことを前提に、超高速・低遅延な共通鍵暗号方式を開発するとともに、5G 等のユースケースに応じて、PQC の機能付加技術等を開発した。なお、本研究開発で開発した暗号技術については、当初設定した目標を大幅に超えて達成することができた。

また、本研究開発において設計した高速共通鍵暗号方式や PQC の機能付加技術等が、今後移動通信システムの標準仕様に採用されることで、基地局、端末、センサデバイス、スマートカード等への実装が進み、本暗号技術の普及が急速に進むことが期待できるため、大規模量子コンピュータの実用化後においても安全性だけでなく効率的な無線通信サービスの提供に貢献し、周波数の有効利用の一層の向上も貢献できる。

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>

上述のとおり、本研究開発の目標は達成することができたが、研究成果の社会実装を目指し、国際標準化活動に係る取組を実施する必要がある。

本研究開発で開発した高速共通鍵暗号については、3GPP、ISO/IEC 及び IETF での標準化を目指す。3GPP については、標準化されることによって我が国を含む様々な国の移動体通信の基地局や端

末等への導入が進むことが期待される。ISO/IEC の標準化については、汎用共通鍵暗号アルゴリズムとして幅広い普及が見込まれる。IETF の標準化については、インターネットにおける暗号化通信のデファクトスタンダードである TLS (Transport Layer Security) を規定しており、当該高速共通鍵暗号を暗号スイートに追加することで、インターネットでの通信における幅広い活用が期待される。

また、本研究開発では、PQC を基盤とした高機能暗号の活用に関する技術ガイダンス文書の ITU-T 規格化にも取り組む必要があり、サービス設計者・開発者に向けた参考指針となることが期待される。

上記の取組を通して、本研究開発の成果を社会に還元し、電波の有効利用に貢献していく。

## 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 7 年 6 月 20 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。

- ・高速共通鍵暗号に関しては、アルゴリズムの設計を完了し、ソフトウェア実装により、PC では 530.7Gbps (世界最速)、スマートフォン (iPhone 16) では 173.0Gbps の処理性能を達成し、AES-256 と比較し暗号処理時間を最大 84%削減している。また、高速共通鍵暗号を無線通信プロトコルに組み込み、暗号の処理時間を約 68%削減している。耐量子計算機暗号 (PQC) に関しては、同種写像問題に基づく新たな鍵共有方式、格子問題に基づくデジタル署名の高速化、効率的、実用的な PQC ベース高機能暗号の開発と評価を行っている。査読あり論文 51 件、査読あり口頭発表 55 件、特許申請 28 件、受賞 17 件と顕著な研究成果をあげており、高く評価できる。予算は効率的に使用されたと思われる。標準必須特許への採用を目指した特許出願 17 件、外国出願 2 件を含め、28 件の特許出願がなされている。高速共通鍵暗号に関しては、3GPP において 256bit 暗号の導入に合意し、技術文書を発行し、また、ISO/IEC において認証暗号規格 ISO/IEC 19772 の改定に向けた作業項目を主導している。耐量子計算機暗号の機能付加技術に関しては、2025 年度に ITU-T 勧告 (TR) として完成させ、承認の取得を目指している。よって、総合的に見て有益であったと思われる。

## 7 評価に使用した資料等

○統合イノベーション戦略 2020 (令和 2 年 7 月 17 日)

[https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020\\_honbun.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020_honbun.pdf)

○サイバーセキュリティ研究・技術開発取組方針 (令和元年 5 月 17 日)

[https://www.nisc.go.jp/pdf/council/cs/kenkyu/dai12/kenkyu\\_torikumi.pdf](https://www.nisc.go.jp/pdf/council/cs/kenkyu/dai12/kenkyu_torikumi.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>

○基本計画書 安全な無線通信サービスのための新世代暗号技術に関する研究開発

[https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/210126\\_keikakusho\\_RD.pdf](https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/210126_keikakusho_RD.pdf)