

令和6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6年8月

1 政策（研究開発名称）

衛星通信における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

平成30年度～令和5年度（6か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人等

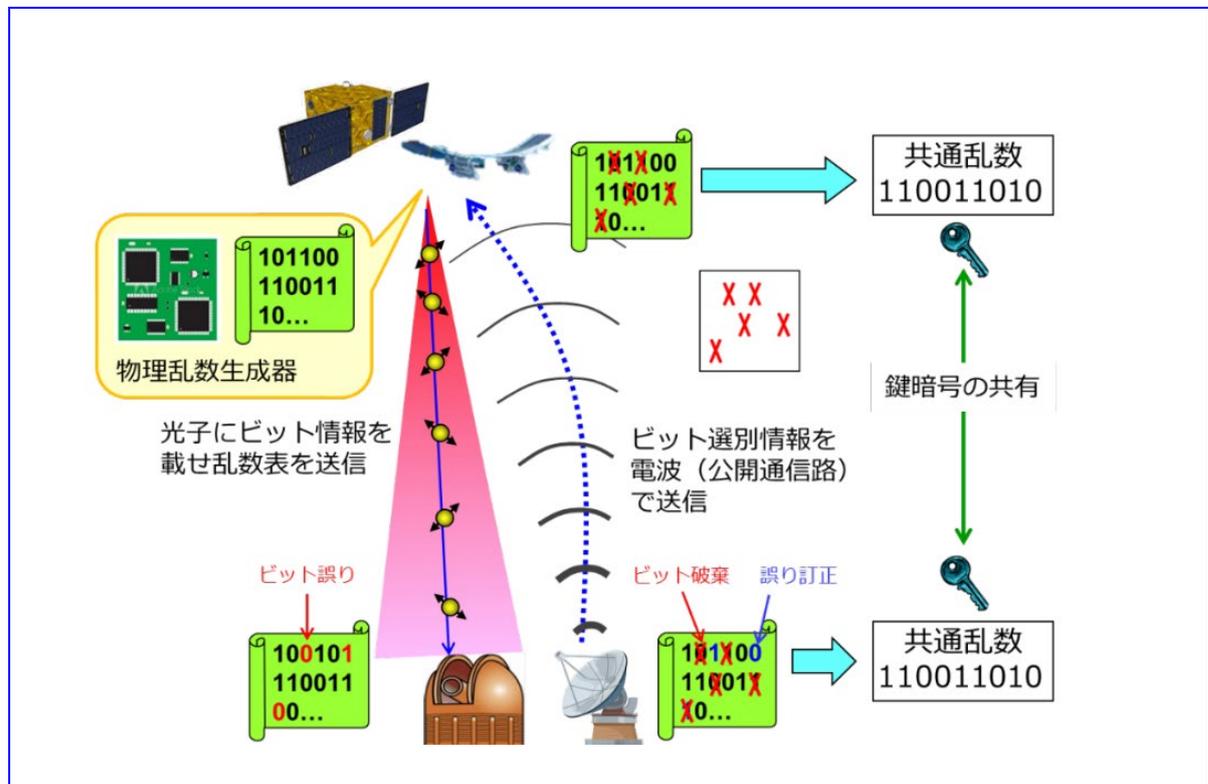
・総事業費

1,986百万円

| 平成30年度 | 令和元年度 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4、5年度 (予算繰越) | 総額 |
|--------|--------|--------|--------|-------------------|----------|
| 310百万円 | 356百万円 | 340百万円 | 500百万円 | 480百万円 | 1,986百万円 |

・概要

超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術、可搬型光地上局、飛しょう体用空間光通信技術を確認し、インテグレーション及び航空機等による実証実験を行う。特に、低軌道衛星-地上局間の典型的な空間光通信路損失に相当する50dB程度の空間光通信路において、10kbpsを超える速度で情報理論的安全性を持った暗号鍵を配送する技術を実証する。



| 技術の種類 | 技術の概要 |
|-----------------------|---|
| 超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術 | 情報理論的安全性を持った暗号鍵を衛星・地上局間で配送する量子暗号通信技術の研究開発を行う。特に、低コストの超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術を開発することで、将来の衛星コンステレーションによるネットワークにも適用可能な情報セキュリティ確保の基盤技術を確立することを目的とする。 |
| 可搬型光地上局の開発 | 従来の衛星光通信では、限られた機関が大型の固定光地上局を運用している場合がほとんどであり、そのため、利用者が限定され、かつ、その設置場所における気象条件に通信性能が大きく影響されるという問題があった。そこで、空間光通信の稼働率を向上させ、そのユーザビリティ向上とサービス拡大を図るため、可搬型光地上局及びそのための空間光通信技術の研究開発を行う。 |
| 飛しょう体用空間光通信技術 | 衛星による量子暗号通信のメリットを最大限に引き出すためには、衛星から出射された光ビームを可能な限り細く絞り光地上局の望遠鏡に結合させる必要がある。一方、超小型衛星では高精度な捕捉追尾技術の実現は依然として挑戦的課題である。そこで、狭ビームでも高精度な捕捉追尾機能を有し、かつ、飛しょう体に搭載可能な空間光通信機器の地上実証モデルを開発する。さらに、当該モデルを可搬型光地上局及び量子暗号通信機と組み合わせ、地上における実証実験を行う。 |
| インテグレーション・航空機等による実証実験 | 量子暗号通信が必要となる公開通信路用のRF回線を用いた無線局の技術開発を行う。そして、当該無線局及び上記研究開発内容で開発した技術をインテグレートし航空機等による実証実験を行う。 |

・スケジュール

| 技術の種類 | 平成30年度 | 令和元年度 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 |
|-----------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術 | | | | | → | |
| 可搬型光地上局の開発 | | | | | → | |
| 飛しょう体用空間光通信技術 | | | | | → | |
| インテグレーション・航空機等による実証実験 | | | | | | → |

(2) 達成目標

近年、世界的な宇宙分野における人工衛星等の産業利用に向けた活動が活発化しており、これまでは、商社や自動車など宇宙ビジネスに関わったことがない非宇宙系であった業界がその動きを牽引している。また、我が国のアクセルスペース社や米国の O3b Networks 社、OneWeb 社等によって衛星コンステレーションによるグローバルな地球観測や衛星通信網の構築に関する計画が進められており、今後一層の衛星利用の需要拡大が見込まれる状況である。

一方、衛星通信に対する第三者による通信内容の盗聴や改ざん、制御の乗っ取りといったサイバー攻撃が脅威となりつつあり、実際に攻撃を受けたという報告もある。

本研究開発は、安全な衛星通信ネットワークの構築を可能とするため、小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術、光地上局の高感度受信技術及び空間光通信・高精度捕捉追尾技術により、高

秘匿な衛星通信の確立に寄与する。また、国際標準の獲得等を推進することにより、我が国の国際競争力の向上に寄与する。

○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」

○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） |
|---|---|
| 宇宙基本計画の工程表改訂に向けた中間取りまとめ（平成 29 年 6 月 15 日） | <p>3. I（2）宇宙機器の競争力強化</p> <p>[I (2)-1] 技術試験衛星（工程表 13）</p> <ul style="list-style-type: none"> 通信衛星に関しては、宇宙通信システム技術に関する研究開発の一環として、光・レーザー通信や量子暗号化技術等の衛星通信用技術の開発にかかる検討を平成 29 年度に行い、平成 30 年度及びそれ以降の取組を具体化する。 |
| 宇宙産業ビジョン 2030（平成 29 年 5 月 29 日） | <p>4. 宇宙機器産業</p> <p>4. 2 宇宙機器産業の振興</p> <p>4. 2. 2 国際競争力の確保（新型基幹ロケット（H3）、小型ロケット、部品・コンポーネント戦略、調達制度、技術開発）</p> <p><技術開発支援策の強化></p> <p>宇宙関連技術は、科学技術と安全保障の両面の特性を有しており、我が国の国民生活を支えるものである。このようなデュアルユース技術については、研究機関・大学においても、研究者の裁量と責任において、積極的に取り組んでいくことが望ましい。また、デブリ除去技術、小型 SAR（合成開口レーダー）やテラヘルツセンサー、測位技術、衛星通信用技術⁴⁰、宇宙太陽光発電など、我が国の強みや重要技術を戦略的に強化していくことも重要である。</p> <p>⁴⁰ 光・レーザー通信や量子暗号化技術等</p> |
| 宇宙×ICTに関する懇談会 報告書（平成 29 年 8 月 8 日） | <p>第 3 章 新たな価値を創造する宇宙×ICT の重点 4 分野とこれらを支える基盤技術</p> <p>3-6 宇宙×ICT を支える基盤技術</p> <p>3-6-1 衛星セキュリティ技術</p> <p>③ 要素技術の研究開発ロードマップ</p> <p>衛星搭載用暗号技術の実用化を目指し、衛星通信用軽量暗号化技術の研究開発を進める。また、次世代光・量子暗号通信技術の実用化を目指し、衛星・地球局間のレーザー捕捉・追尾技術の高精度化、光子検出器の高速・高感度化、衛星用鍵蒸留システム、光伝搬視野特性モニタ・解析技術の研究開発を実施する。</p> <p>第 5 章 宇宙×ICT 総合推進戦略</p> <p>5-6 基盤技術研究開発推進戦略</p> <p>このため、総務省においては、どれ程の計算力をもってしても解読できない安全性を備えた通信を実現するための暗号技術として、衛星に搭載した物理乱数源から生成された真性乱数を、レーザー光で地上局へ伝送する技術及び衛星・地上局間で共有した真性乱数データから安全な暗号鍵を蒸留する技術（量子暗号等）の開発を推進するとともに、高秘匿衛星光通信技術の実証を行うことが適当である。</p> |

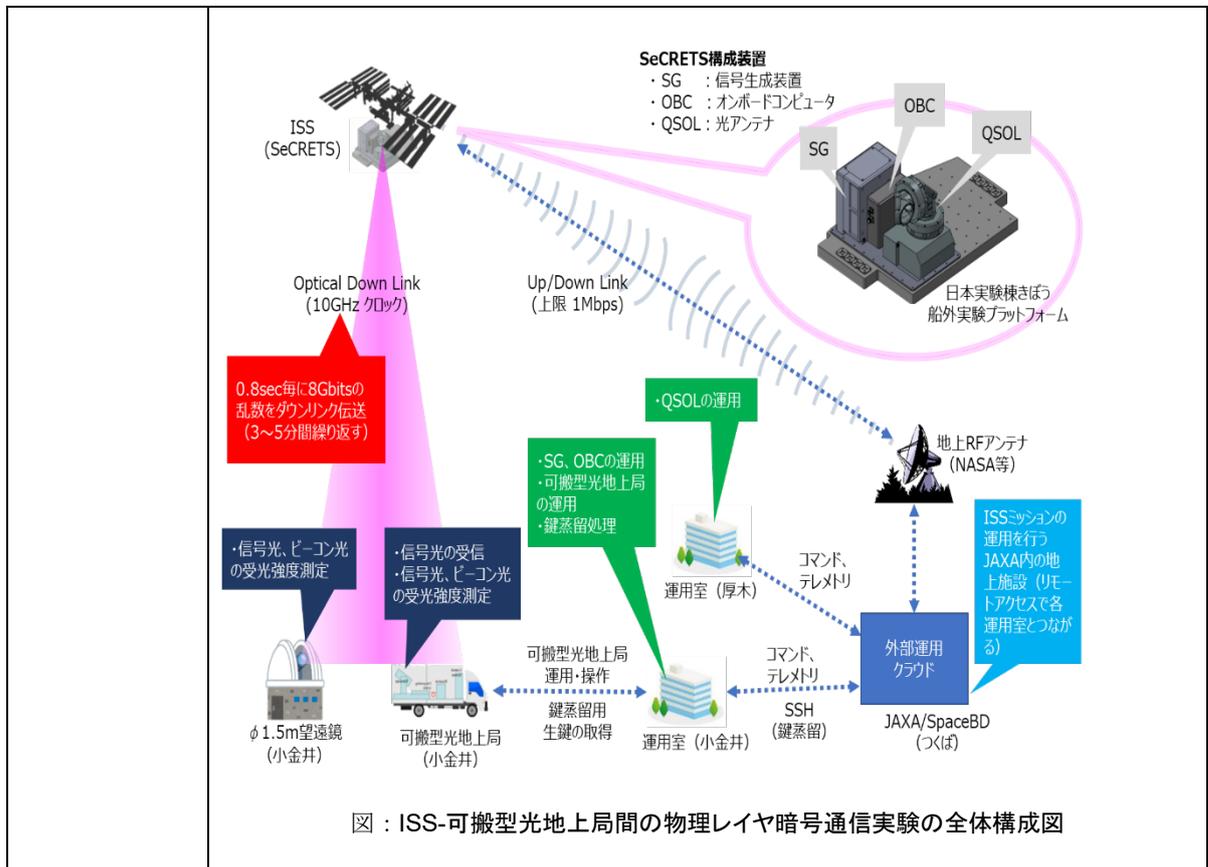
| | |
|--|--|
| 第6期科学技術・イノベーション基本計画 (令和3年3月26日閣議決定) | 第3章 科学技術・イノベーション政策の推進体制の強化 - 2. 官民連携による分野別戦略の推進 - ③ 量子技術 |
| 統合イノベーション戦略 2023 (令和5年6月9日閣議決定) | 第1章 総論 (国家的重要基盤を支え、社会課題を成長のエンジンに転換する科学技術・イノベーション) - 2. 科学技術・イノベーション政策の3つの基軸 - (1) 先端科学技術の戦略的な推進 - ① 重要技術の国家戦略の推進と国家的重要課題への対応 - 宇宙 以下の取組を着実に推進する。 (略) ・ 宇宙光通信ネットワーク、衛星量子暗号通信等の次世代技術を社会実装できるよう開発・実証を推進する。 |
| 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 - (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 - ii. 将来像 - (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。 |

(3) 目標の達成状況

国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) と可搬型光地上局間のフィールド環境において、2023年度に物理レイヤ暗号通信による実証実験を実施し、実効的な光総損失 50dB 程度の環境において 10 kbps 以上の速度で情報理論的安全性を持った暗号鍵の配送を行うという目標を達成した。

| 技術の種類 | 目標の達成状況 |
|---------------------|---|
| 超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術 | <p>【装置の小型化・軽量化技術】</p> <p>飛しょう体に搭載するための暗号装置の小型化・軽量化を可能にする実装技術を開発し、超小型衛星に搭載可能なサイズ (幅 335mm×奥行 575mm×高 386mm)・重量 (30kg) とすることで目標を達成した。</p> <p>【鍵生成の高速化技術】</p> <p>大気変動などによる通信環境の変動があった場合でも、適応的な制御によって安定的に鍵生成が行えるような可用性の高い技術として「物理レイヤ暗号通信技術」を開発し、ISS と可搬型光地上局間のフィールド環境で、物理レイヤ暗号通信による実証実験を実施し、損失 50dB 程度 (受信系の損失含む) の空間光通信路において、目標としていた 10 kbps を大きく超える 100 Mbps (10 ミリ秒で 1 メガビットの暗号鍵を獲得) での鍵生成を達成した。</p> |

| | |
|------------------------------|--|
| <p>可搬型光地上局の開発</p> | <p>【光地上局用空間光通信機器の小型化・軽量化技術】 高精度な捕捉追尾機能を有する光学系について、可搬型光地上局において使用できるレベルの小型化・軽量化を実現し、また低軌道衛星 - 地上局間で想定される大気ゆらぎの影響を低減する機能を有し、小型化・軽量化に適した空間光通信技術を開発することで目標を達成した。</p> <p>【光地上局の可搬化技術】 上記で開発された空間光通信技術を実装した可搬型光地上局を開発することで目標を達成した。なお、この可搬型光地上局は、ISS や低軌道衛星との光通信の稼働率を向上させるため、様々な環境でも容易に移動かつ設置ができるよう 8tトラックに搭載され、移動・設置後に空間光通信に必要な精度で光軸校正を行うことができるような光軸補正機能を有し、かつ通信品質の低下を緩和するための振動防止機能（エアサスペンション、搭載機器用の免振プレート）を有したものとした。</p> |
| <p>飛しょう体用空間光通信技術</p> | <p>【飛しょう体用空間光通信機器の小型化】 ISS に搭載するため、低軌道衛星 - 地上局間を想定した大気ゆらぎの影響を低減する機能を持った光通信装置の小型化・軽量化（約 220×360×360mm、約 10kg）、及び通信品質の向上を可能にする潜望鏡方式の筐体を含む高精度光通信技術を開発することで目標を達成した。</p> <p>【飛しょう体用補足追尾技術】 飛しょう体で生じるじょう乱（ISS の機体動揺等）の影響を低減可能で、自局の高精度位置情報により捕捉追尾シーケンスを確立し相手局を高精度かつ高安定に捕捉追尾できる飛しょう体搭載用の実装技術を開発することで目標を達成した。</p> |
| <p>インテグレーション・航空機等による実証実験</p> | <p>【RF 回線送受信技術】 鍵生成と遠隔制御のために十分な帯域を有する無線局（5GHz 帯・双方向通信）の開発を行うことで目標を達成した。</p> <p>【インテグレーション実証実験】 各技術をインテグレートした設備「SeCRETS」（SeCuRe lasEr communicaTionS terminal for LEO：低軌道高秘匿光通信装置）を完成させ、ISS へ搭載し、ISS - 可搬型光地上局間での物理レイヤ暗号通信による実証実験を行うことで目標を達成した。</p> |



図：ISS-可搬型光地上局間の物理レイヤ暗号通信実験の全体構成図

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6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、飛しょう体を介した暗号鍵共有に必要な技術、長距離の空間光通信による暗号鍵共有や可搬型光地上局の技術を確認しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

| 主な指標 | 平成30年度 | 令和元年度 | 令和2年度 |
|-------------------------|----------|----------|----------|
| 査読付き誌上発表論文数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) |
| 査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む) | 2件 (2件) | 3件 (2件) | 4件 (0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 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 1件 (0件) |
| 特許出願数 | 0件 (0件) | 1件 (0件) | 2件 (0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) | 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) |
| 受賞数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) |
| 報道発表数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) |
| 報道掲載数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) |

| 主な指標 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 合計 |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|
| 査読付き誌上発表論文数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 1件 (1件) | 1件 (1件) |
| 査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む) | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 9件 (4件) |
| その他の誌上発表数 | 2件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 2件 (0件) |
| 口頭発表数 | 3件 (0件) | 3件 (0件) | 1件 (0件) | 8件 (0件) |
| 特許出願数 | 3件 (0件) | 2件 (2件) | 0件 (0件) | 8件 (2件) |
| 特許取得数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 3件 (0件) | 3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) | 0件 (0件) | 0件 (0件) |
| 報道発表数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 1件 (0件) | 1件 (0件) |
| 報道掲載数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 4件 (0件) | 4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>近年の宇宙空間の産業利用進展（内閣府・宇宙産業ビジョン2030参照）に伴い、衛星通信の更なる需要拡大が見込まれるが、衛星通信に対するサイバー攻撃の脅威も増大している。このような脅威に対応するため、地上系で整備されつつある絶対に秘匿可能な量子暗号通信を衛星通信に応用することは有効なものとして期待されていた。本研究開発では、小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術、物理レイヤ暗号通信技術、光地上局の高感受信技術及び空間光通信・高精度捕捉追尾技術など、高秘匿な衛星通信の実現にとって必要不可欠な基礎技術を開発し、これらを組み合わせた装置で低軌道－地上間の空間光通信による暗号通信実験を実施し成功させた。このことは高秘匿衛星通信の社会実装に向けて極めて重要な一歩となるものであった。</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、衛星通信及び量子暗号に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究者等のノウハウを積極的に活用した（具体的には、量子暗号については情報通信研究機構及び東京大学、光送信機についてはソニーコンピュータサイエンス研究所、衛星搭載機のインテグレーションについては次世代宇宙システム技術研究組合、衛星通信や運用環境整備についてはスカパーJSATがそれぞれ担当）。このような専門家の適材適所の分担により、2020年度から1年半程度という極めて短期間でISS搭載機器を製造し、2023年度での打上げと地上との実証実験に成功するなど、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。</p> <p>また、研究開発成果の早期展開を図るため、学術機関や民間企業の専門家で構成する研究開発運営委員会を通じた、多様な業界との連携・協力の下、共創的に取り組みを推進した。さらに、実施内容、実施体制及び予算額等について外部評価を行い、費用の面でも効率的に研究開発を実施することができた。</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ったと認められる。</p> |
| 有効性 | <p>小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術、物理レイヤ暗号通信技術、可搬型光地上局の高感受信技術及び空間光通信・高精度捕捉追尾技術の研究開発を行い、2023年度には、ISSと可搬型光地上局との間で物理レイヤ暗号通信の実証試験を成功させた。これにより、衛星量子暗号通信技術の確立に大いに寄与した。</p> <p>また、国家レベルでの量子暗号を用いた高秘匿な通信技術に関する技術開発競争が激化する中、上記の実験実施により、安全な衛星通信を行うための技術開発を他国に先んじて進めることができ、衛星光通信の分野での我が国の国際競争力の向上に寄与することができた。</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>本研究開発でのISS搭載機器と地上局間での実証の成功により、衛星通信を用いた量子暗号通信技術の実現により近づいた。これは、国民生活の利便性の向上や広く国民に享受されうる利益が期待される衛星コンステレーションによるグローバルな衛星通信網の構築等、人工衛星を用いた衛星通信サービスの展開に寄与するものである。</p> <p>本研究開発の採択に当たっては、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>衛星コンステレーションによるグローバルな衛星通信網の構築等、人工衛星を用いた衛星通信サービスの展開が促進されるなど、今後一層、衛星通信の需要が見込まれる状況であることから、安全な衛星通信のサービス提供を可能とする技術開発が喫緊の課題となっている。</p> <p>また、諸外国における国家レベルの量子暗号通信技術に関する研究開発が積極的に進められていることから、我が国の国際競争力を確保するために安全な衛星通信を行うための技術を他国に先んじて確立することが必要であり、本技術を早急に開発することが極めて重要である。</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）

宇宙空間の産業利用進展に伴い衛星通信の更なる需要拡大が見込まれる中、衛星通信に対して増大するサイバー攻撃の脅威に対応するため、地上系で整備されつつある量子暗号通信を衛星通信に応用することが期待されている。本研究開発では、小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術、物理レイヤ暗号通信技術、光地上局の高感度受信技術及び空間光通信・高精度捕捉追尾技術など、高秘匿な衛星通信の実現にとって必要不可欠な基礎技術を開発した。

また、2023年度にISS搭載機器と可搬型光地上局とで、物理レイヤ暗号通信による実証を実施し成功させた。これにより、量子暗号技術を利用した衛星通信の基礎となる衛星－地上間の空間光通信を用いた高秘匿な衛星暗号通信技術の確立に大いに寄与した。

本研究開発の実施では、量子暗号については情報通信研究機構及び東京大学、光送信機についてはソニーコンピュータサイエンス研究所、衛星搭載機のインテグレーションについては次世代宇宙システム技術研究組合、衛星通信や運用環境整備についてはスカパーJSATがそれぞれ担当し、衛星通信及び量子暗号に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究者等のノウハウを積極的に活用した。これにより、2020年度から1年半程度という極めて短期間で、ISSに搭載する機器を製造し、2023年度に打上げ、地上との実証に成功するなど、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。

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>

本研究開発の成果の実用化や普及展開に向けては、小型衛星と可搬型光地上局を利用した衛星量子鍵配送への技術的課題の解決と、衛星量子鍵配送の事業展開のためのビジネスモデル構築の検討が必要と考えられる。

小型衛星は、本研究開発で利用したISSに比して電力等のリソースの供給やプラットフォームとしての位置・姿勢の安定性に劣る。これらの技術的課題を解決するため、省電力、姿勢制御、高精度ポインティング技術等の点で更なる研究開発が必要となる。また、本研究開発の実証で用いた物理レイヤ暗号通信よりも低密度の光子を用いる量子暗号通信では、より精度の高い光強度制御技術の衛星環境での実装が必要となるため、この点での研究開発も必要となることから、これらの開発を今後進めていくことが必要である。

衛星量子鍵配送の事業展開のためのビジネスモデル構築の検討については、本研究開発内で素案の検討が行われたが、更にその検討を深める必要がある。例えば、採算性を検討する場合、想定ユーザーへのサービス増加にあわせて必要衛星機数が増加することとなるが、必要な鍵の容量と1機当たりの送達可能な鍵容量の関係性を踏まえ、ユーザー規模に応じた衛星寿命内での投資回収を実現する適切な衛星機数とサービス利用料の設定を行うことが求められる。なお、諸外国の検討においても、衛星量子鍵配送の主な利用シーンとして政府利用が想定されているところであり、我が国における衛星量子鍵配送サービスについても、導入当初の主要顧客は、政府となることが想定される。

これらの状況を加味し、今後は、本研究開発案件において追求した低軌道衛星からの鍵配送におけるビジネスモデルに関する検討を更に実施し、地上系・衛星系の量子暗号通信の統合運用に向けた検討等もあわせて行い、引き続き、社会実装時のビジネスモデルの検討を深化させていくことが肝要であると考えられる。

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6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。

- ・超小型衛星に搭載可能な量子暗号通信技術の開発に取り組み、その実現に必要な装置の開発、また、国際宇宙ステーション (ISS) と可搬光地上局間での物理レイヤ暗号通信の実証実験に成功したことは高く評価できる。

7 評価に使用した資料等

- 宇宙基本計画の工程表改訂に向けた中間取りまとめ (平成 29 年 6 月 15 日宇宙政策委員会決定)
<http://www8.cao.go.jp/space/hq/dail15/gijisidai.html>
- 宇宙産業ビジョン 2030 (平成 29 年 5 月 29 日宇宙政策委員会決定)
<http://www8.cao.go.jp/space/vision/vision.html>
- 宇宙×ICTに関する懇談会報告書 (平成 29 年 8 月 8 日 総務省)
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin05_02000011.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
- 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
- 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

令和6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電波政策課、基幹・衛星移動通信課基幹通信室

評価年月：令和6年8月

1 政策（研究開発名称）

仮想空間における電波模擬システム技術の高度化

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5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

7,306百万円

| 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 総額 |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1,637百万円 | 1,966百万円 | 1,636百万円 | 2,066百万円 | 7,306百万円 |

・概要

Beyond 5Gや自動走行、ドローン自律運転の普及・展開に向けて、多様な無線システムを大規模かつ高精度に模擬可能な電波模擬システムの実現に必要な以下の①～④に係る技術を確立するための研究開発等を行う。

なお、①②は技術課題ア「電波伝搬・空間モデルの構成技術」として、③は技術課題イ「仮想環境対応無線システムの構成技術」として、④は技術課題ウ「大規模仮想環境の検証基盤技術」として研究開発を実施した。

- ① 電波伝搬・干渉モデル化技術（技術課題ア「電波伝搬・空間モデルの構成技術」）
 - ・歩行者・自動車等の移動体の動きも考慮して、仮想空間上で電波発射を高精度に模擬可能とする電波伝搬モデルの構築
 - ・他の無線システムからの電波干渉による影響を実測・評価し、仮想空間上で干渉評価を可能とするモデルの構築
- ② 空間モデル化技術（技術課題ア「電波伝搬・空間モデルの構成技術」）
 - ・都市／山間・屋内外・天候等において技術試験を行い、電波伝搬特性を取得し、各環境・天候モデルの構築
 - ・建造物の形状・材質等について技術試験を行い、電波伝搬特性を取得し、建造物の形状・材質モデルの構築
- ③ 電波模擬技術（技術課題イ「仮想環境対応無線システムの構成技術」）
 - ・無線システムの電波発射等の挙動を仮想空間上で模擬可能な仮想無線システムの開発
 - ・仮想空間上の電波模擬のためのシナリオを受け取り、実装を行う電波模擬シナリオ実装技術の開発
 - ・開発したシステムと実際の無線システムの電波発射再現性の評価・検証
- ④ 電波伝搬検証基盤技術（技術課題ウ「大規模仮想環境の検証基盤技術」）
 - ・仮想空間上で高精度かつ大規模な電波伝搬・干渉影響評価を実現するために必要な検証基盤の開発
 - ・検証基盤内の計算機リソースを適切に組み合わせて、高速・高精度に計算可能な並列・分散

計算技術の開発

- ・電波伝搬・干渉モデル及び空間モデルや電波模擬技術を活用し、仮想空間上で任意の配置（多数同時接続を含む）で無線システムが存在する環境を模擬し、シナリオの実行を行うためのインタフェース技術の開発

電波模擬システムの実現により、既存無線システムとの共用検討や実環境では困難な大規模な技術検証に活用することができ、新たな無線システムの早期実用化・展開に貢献するとともに、周波数利用効率の向上を図る。

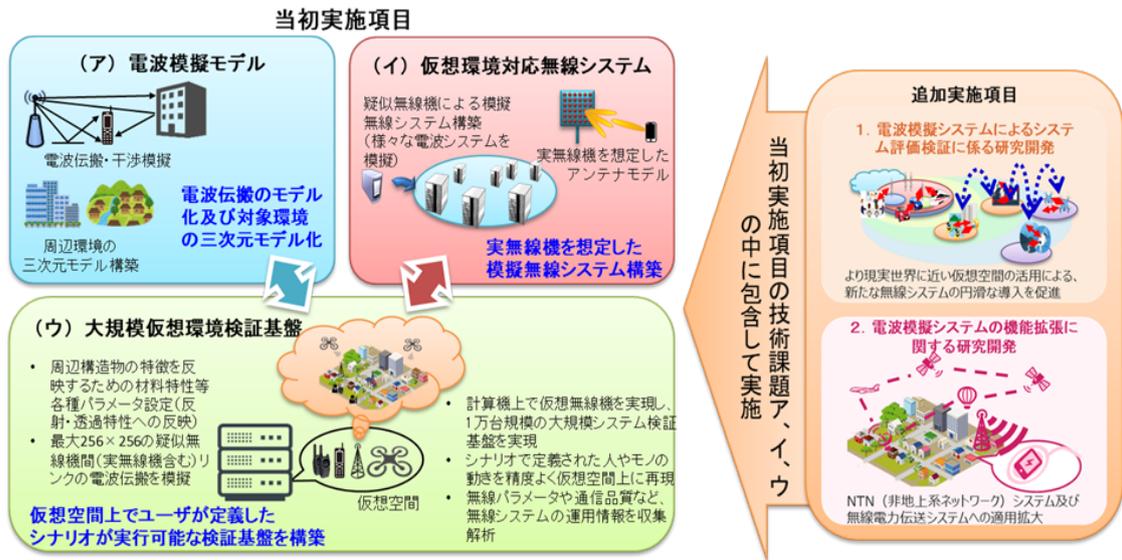


図1：研究開発概要図

| 技術の種類 | 技術の概要 |
|---------------|--|
| 電波伝搬・干渉モデル化技術 | <p>高度電波模擬システムにおけるシナリオ適用可能性に優れた電波伝搬モデルを構成するため、減衰・反射・回折などの電波伝搬特性や干渉特性を伝搬モデル解析やレイトレーシング解析等により高精度に模擬する。伝搬モデル解析では、従前から用いられているクラスタリング解析だけでなく、近年適用が期待されている深層学習を用いる手法も含む。得られた電波模擬モデルは、大規模仮想環境検証基盤に入力される。電波伝搬模擬手法としては、図2に示すように、無線機間、すなわちアンテナ間の相対的な距離に応じて狭域、中域、広域の3つの領域に分け、中域、広域の2つの領域について、最適な電波伝搬モデル化手法を適用する。</p> |
| 空間モデル化技 | 高精度な電波模擬には周辺環境のモデル化が必須である。本技術では、環境変動特性及び |

図2：電波模擬モデルの解析レイヤと構成

術

構造・材料特性を含めた周辺環境を精緻に三次元モデル化する。本システムは、屋内外の様々な環境を対象としている。対象とする屋外環境は、山岳や森林、市街地、橋梁など、多岐に渡る。屋内環境はオフィスや工場を対象としており、オフィス空間の対象環境は単一の部屋から複数の部屋、さらには複数のフロアを跨ぐ環境となる。また、工場空間は、機密性の高い情報が含まれる構造物やレイアウトなどの情報を簡素化する三次元モデル化手法を含む。得られた高精度空間モデルは、図3に示すように電波伝搬モデルの開発だけでなく、電波伝搬大規模仮想環境検証基盤に入力され、電波模擬システムでの空間可視化にも利用される。

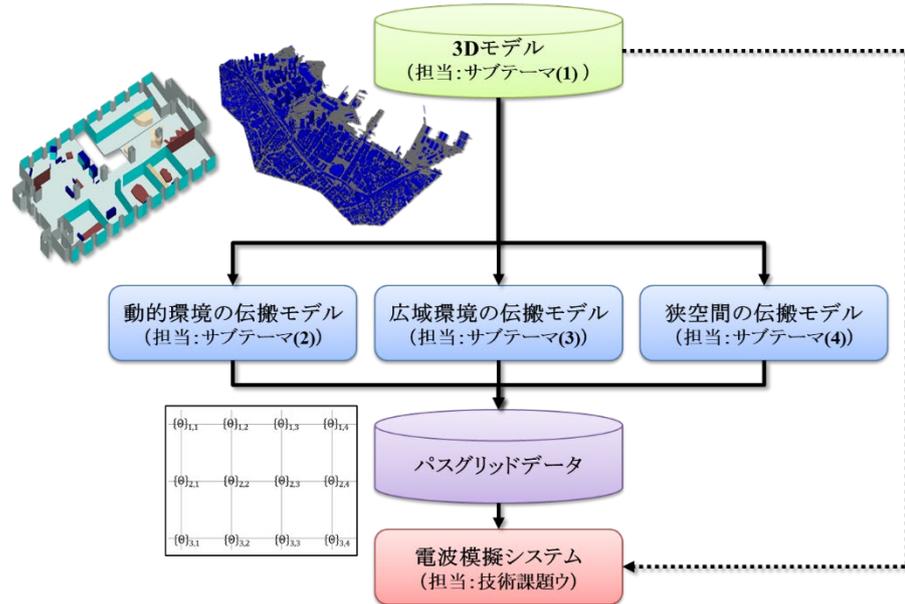


図3：電波模擬システムへの入力フロー

電波模擬技術

ワイヤレスエミュレータを構成する要素技術として、主に技術課題イ「仮想環境対応無線システムの構成技術」において開発を実施した。具体的には、無線システムの挙動を模擬・検証可能な模擬無線システム、仮想空間において電波伝搬を模擬して無線システムの通信特性等を評価するためのハードウェア無線リンクエミュレータ（本項目は技術課題ウにて開発）、模擬無線システムのアナログ信号を仮想空間で処理するデジタル信号に相互に変換するためのアナログデジタルインタフェース、無線機の電波発射を再現するための電波発射挙動モデルを開発した。これらの技術による全体の構成を図4に示す。

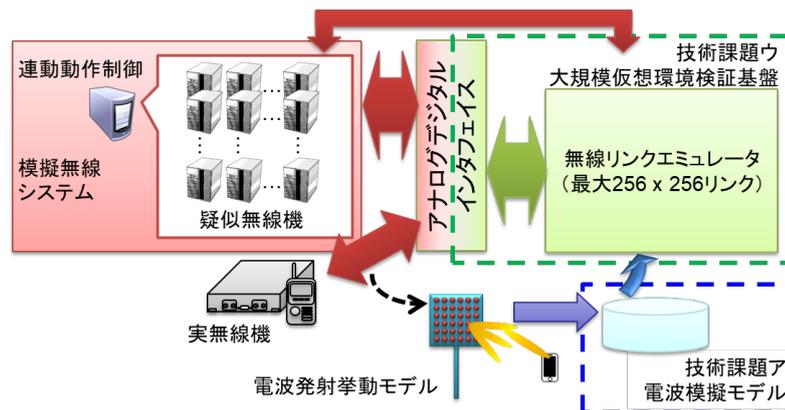


図4：電波模擬技術の構成

模擬無線システムは、送受信それぞれ4ポートを具備するソフトウェア無線機64台を用いた疑似無線機群であり、送受信それぞれ256ポートに対応する。無線リンクエミュレータは、この模擬無線システムに対応するため、最大256×256リンクに対応する。アナログデジタルインタフェースは、模擬無線システムの送受信それぞれ256ポートと無線リンクエミュレータを接続し、模擬無線システムのアナログ信号を無線リンクエミュレータで処理するためのアナログデジタル変換機能を具備する。電波発射挙動モデルは、ワイヤレスエ

ミュレータが対象とするアプリケーションに応じたアンテナの電波発射をモデル化したもので、具体的にはドローン搭載アンテナ、車載アンテナなどを対象とし、電磁界解析または実測によりモデル化を行う。このモデルは電波伝搬・干渉モデル化技術で開発した電波伝搬モデルに対してアンテナ特性を反映するためのモデルである。

本技術では、仮想空間上で高精度かつ大規模な電波伝搬・干渉影響評価を実現するために必要な検証基盤である大規模仮想環境検証基盤の開発を行う。また、当該検証基盤内の計算機リソースを適切に組み合わせて、高速・高精度に計算可能な並列・分散計算技術の開発を行う。さらに、電波伝搬・干渉モデル及び空間モデルや電波模擬技術を活用し、仮想空間上で任意の配置（多数同時接続を含む）で無線システムが存在する環境を模擬し、シナリオの実行を行うためのインタフェース技術の開発を行う。以下の図5に、大規模仮想環境検証基盤の構成概要を示す。

電波伝搬検証基盤技術

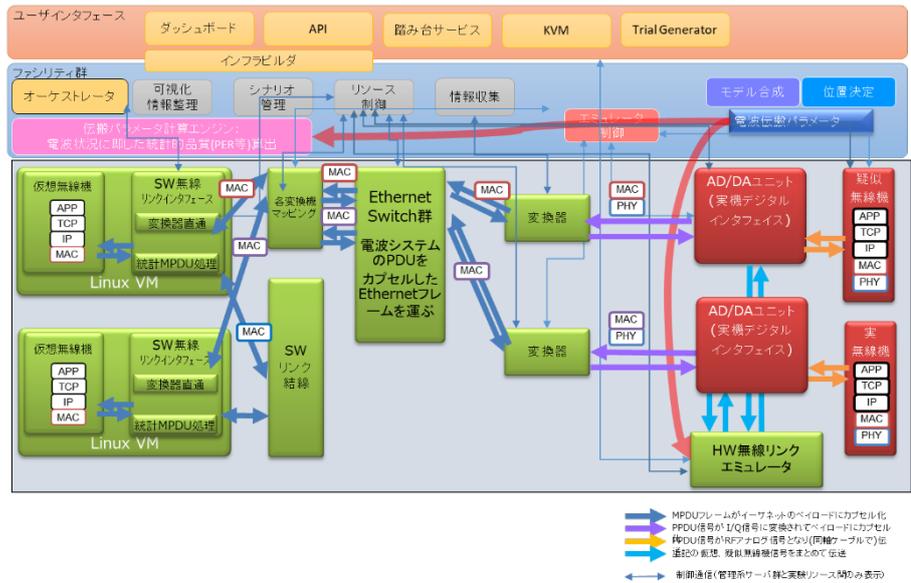


図5：大規模仮想環境検証基盤の構成

ワイヤレスエミュレータにおける基本的な動作と言える仮想空間上の無線機間の電波的相互作用は、図におけるハードウェア(HW)無線リンクエミュレータ、ソフトウェア(SW)無線リンクインタフェースにおいて実施される。こうした2種類の電波的相互作用実施機構は、評価対象である無線機の実装によって使い分けられている。疑似無線機間または疑似-仮想無線機の相互接続の場合では、HW無線リンクエミュレータにより、物理層変調された信号に、減衰および遅延をそれぞれ加味しながら合成する処理がなされる。一方で、仮想無線機間の接続の場合には、各信号の上位層成分をカプセル化したパッケージが、SW無線リンクインタフェースにより統計的に棄却されることで、想定する電波的相互作用が実現される。

・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 |
|---------------|------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 電波伝搬・干渉モデル化技術 | モデル化基礎検討 | モデル化拡張検討 | モデル反映手法検討 | 統合実証 |
| 空間モデル化技術 | モデル化基礎検討 | モデル化拡張検討 | モデル反映手法検討 | |
| 電波模擬技術 | 基礎開発 簡易シナリオ検討 | 拡張開発 基本実証シナリオ検討 | 結合評価 統合実証シナリオ検討 | |

| | | | | |
|----------------|------|------|------|--|
| | | | | |
| 電波伝搬検証 基盤技術 | 基礎開発 | 拡張開発 | 結合評価 | |

(2) 達成目標

新たな無線システムの導入に当たっては、既存無線システムに電波干渉が生じることがないように、実試験やシミュレーションにより共用検討を実施した上で技術基準を定める必要がある。しかしながら、実試験を行うためには、実機の試作や免許取得などの手続きに時間・費用を要することに加えて、実試験による検討では特定の環境における評価しか行えず、試験結果の信頼性に限界がある。今後、Beyond 5G や自動走行、ドローン自律運転等の利用が想定される中、実試験での検討に要する期間や費用の圧縮や、実環境では困難な大規模検証を実施するために、仮想空間上での電波模擬システム（電波エミュレータ）の構築が求められている。

そこで、仮想空間における高精度電波模擬システムの実現に向けて、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な電波模擬システム技術を確立するための研究開発及び総合的な技術試験を行い、周波数の有効利用を促進する。

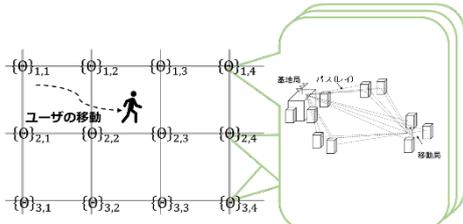
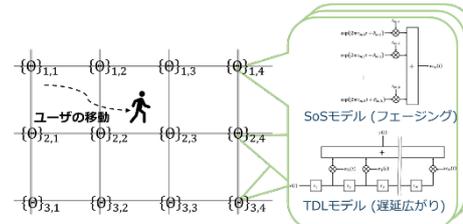
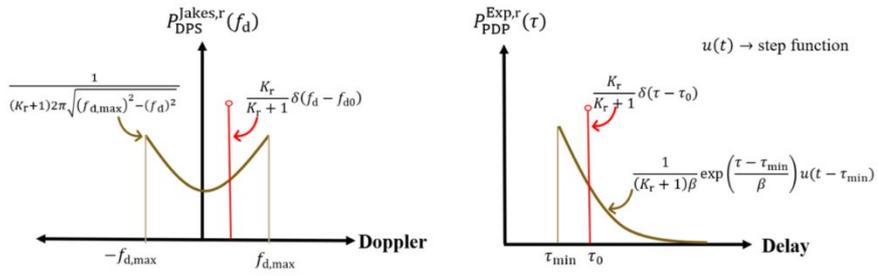
○関連する主要な政策

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） |
|--|---|
| 成長戦略フォローアップ（令和元年6月21日） | I. 1. ii) ② イ) ネットワークの更なる強化と高度化の推進 今後の電波利用ニーズの拡大への対応として、Beyond 5G の要素技術やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境、HAPS（High-Altitude Platform Station）を用いた通信システム等に関する研究開発を推進するとともに、既存システムとのダイナミックな周波数共用を可能とするシステムの構築を来年度末までに行う。 |
| 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（令和元年6月14日） | 第一部 V. 1（3）5G 環境等の普及、光ファイバ網の整備 今後の電波利用ニーズの拡大への対応として 5G の普及・高度化に向け、5G 基地局の小型化や高エネルギー効率化、高信頼化やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境等に関する研究開発を推進するとともに、既存システムとのダイナミックな周波数共用を可能とするシステムの構築を令和2年度末までに行う。あわせて、5G のサービスを支える基地局や光ファイバなどの情報通信インフラの整備を進めるとともに、5G による地域課題解決に向けた開発実証を推進していく。 |
| デジタル社会の実現に向けた重点計画（令和5年6月9日） | 第3-2 5.（4）①高度情報通信環境の普及促進に向けた研究開発・実証 新たな電波システムの円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境に関する研究開発を推進し、令和5年度（2023年度）までに試験環境を構築する。 |

(3) 目標の達成状況

| 技術の種類 | 目標の達成状況 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|---|--|-----|-----------|------|----|--|----|--------------------------|----------|---------|--|--------|----------|---|---------|--------|--|
| 電波伝搬・干渉モデル化技術 | <p>周波数の有効利用の一層の向上には、自動走行を含む ITS や、人やモノの動きも含めた動的環境における電波伝搬の解析等を可能とし、移動経路の変更をリアルタイムに適用できるような仕組みを実装する必要がある。そこで本技術開発では図6のように空間上のグリッド点において振幅・遅延時間・伝搬角度などの情報を有する複数の伝搬パスにより電波伝搬特性をモデル化し（これをパスグリッドモデルと呼んでいる）、このモデルに送受信機のアンテナ指向性を重畳し、さらにワイヤレスエミュレータのオーケストレータから指示される端末等の移動によって生じるドップラ変動を加えた SoS(sum of sinusoid)-TDL (tapped delay line) グリッドモデルを開発した（図7）。TDL モデルは各パスの連続的な伝搬遅延時間をクラスタ化し、有限個数の遅延タップで表現したもので、広帯域信号の周波数選択性を表現する。SoS モデルは、遅延時間によりクラスタ化された複数のパスが伝搬方向と移動方向のなす角度に依存したドプラ周波数で位相回転することで、動的チャネルの時間選択性を表現する。さらに、時間に伴って移動する端末位置に対応してグリッド内の任意の点におけるチャネル応答をグリッド点から補間により求めることで SoS-TDL 時刻データが出力される。SoS-TDL 時刻データは、疑似無線機に対応しリアルタイムでチャネル応答を模擬する無線リンクエミュレータに入力されるほか、仮想無線機向けに変動分布、時間相関特性、周波数相関特性が等価となる標準チャネルモデル（図8）に変換され、無線リンクインタフェースの動作を決定する MAC 層の packets 誤り率(PER)/ブロック誤り率(BLER)へマッピングされる。</p> <p>開発した各環境のパスグリッドデータは、実測データにより比較検証により、伝搬損失は統計的に 80%の精度を実現した。また工場環境のシナリオについては、任意の送信局と受信局の組み合わせのパスグリッドデータを完成し、基地局と端末間だけでなく、端末間互士の干渉についても評価可能なモデルの構築を実現した。実験データにより検証された（伝搬損失による決定係数 80%以上の精度を実現）パスグリッドデータ一覧を表1に示す。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>図6：パスグリッドモデル</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>図7：SoS-TDL モデル</p> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;">  <p>図8：仮想無線機用標準チャネルモデル</p> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p>表1：仮想無線機用標準チャネルモデル</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #4a86e8; color: white;"> <th>アプリケーション</th> <th>サイト</th> <th>周波数 (モデル)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">ドローン</td> <td>橋梁</td> <td>169 MHz (R), 920 MHz (R), 2.4 GHz (R), 5.7 GHz (R)</td> </tr> <tr> <td>山岳</td> <td>169 MHz (R), 2.4 GHz (R)</td> </tr> <tr> <td>スマートオフィス</td> <td>オフィスフロア</td> <td>2.4 GHz (R), 4.85 GHz (R), 5.2 GHz (R), 28 GHz (R), ITU-R P.1238 (S)</td> </tr> <tr> <td>スマート工場</td> <td>屋内 (大、中)</td> <td>2.4 GHz (R), 5.3 GHz (R), 920 MHz (R), 4.85 GHz (R), 28 GHz (R), 60 GHz (R)</td> </tr> <tr> <td>スマートメータ</td> <td>みなとみらい</td> <td>920 MHz (R/P/H), 2.4 GHz (P), 4.9 GHz (R/P/H), 28 GHz (R/P/H), 3GPP SCM (C), ITU-R P.1411 over roof top (S), ITU-R P.1411 street canyon (S)</td> </tr> </tbody> </table> <p>R:レイトレーシングレイヤ, P:伝搬モデルレイヤ, H:RPハイブリッド, S:簡易モデル(パスグリッドなし), C:計算コード提供</p> </div> | アプリケーション | サイト | 周波数 (モデル) | ドローン | 橋梁 | 169 MHz (R), 920 MHz (R), 2.4 GHz (R), 5.7 GHz (R) | 山岳 | 169 MHz (R), 2.4 GHz (R) | スマートオフィス | オフィスフロア | 2.4 GHz (R), 4.85 GHz (R), 5.2 GHz (R), 28 GHz (R), ITU-R P.1238 (S) | スマート工場 | 屋内 (大、中) | 2.4 GHz (R), 5.3 GHz (R), 920 MHz (R), 4.85 GHz (R), 28 GHz (R), 60 GHz (R) | スマートメータ | みなとみらい | 920 MHz (R/P/H), 2.4 GHz (P), 4.9 GHz (R/P/H), 28 GHz (R/P/H), 3GPP SCM (C), ITU-R P.1411 over roof top (S), ITU-R P.1411 street canyon (S) |
| アプリケーション | サイト | 周波数 (モデル) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ドローン | 橋梁 | 169 MHz (R), 920 MHz (R), 2.4 GHz (R), 5.7 GHz (R) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 山岳 | 169 MHz (R), 2.4 GHz (R) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| スマートオフィス | オフィスフロア | 2.4 GHz (R), 4.85 GHz (R), 5.2 GHz (R), 28 GHz (R), ITU-R P.1238 (S) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| スマート工場 | 屋内 (大、中) | 2.4 GHz (R), 5.3 GHz (R), 920 MHz (R), 4.85 GHz (R), 28 GHz (R), 60 GHz (R) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| スマートメータ | みなとみらい | 920 MHz (R/P/H), 2.4 GHz (P), 4.9 GHz (R/P/H), 28 GHz (R/P/H), 3GPP SCM (C), ITU-R P.1411 over roof top (S), ITU-R P.1411 street canyon (S) | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | |
|--------------|---|
| 空間モデル化 技術 | <p>電波模擬システムでは、通信システムの評価を行う予定の通信環境を電波模擬システム内に取り込み、想定環境における通信システムの性能を評価できる機能が必要である。本技術では、建造物の形状・材質モデルの構築のため、レーザースキャナ等により計測された周辺環境をシミュレーションモデルとして構成する技術や電波模擬システム内に周辺環境モデルを取り込む技術について検討を行い、電波模擬システム上で、レイトレーシングシミュレーション等に適用可能な、誤差 1m 以下の精緻な屋内・屋外の周辺環境の 3D モデルを構成する技術を確立した。</p> <p>令和 3 年度までの研究では、屋内・屋外のそれぞれの環境において、高精度な点群データを用いてレイトレーシングシミュレーションで利用可能な建造物の面情報を持つ 3D モデル（以下、詳細 3D モデル）を構成する手法を検討した。実寸や元の点群データと 3D モデルの寸法を比較し、構成した詳細 3D モデルが誤差 1m 以下であることを確認した。さらに令和 4 年度の研究では、詳細 3D モデルを電波模擬システムで想定される大規模なレイトレーシングシミュレーションに適用するために、3D モデルの単純化手法を検討した。単純化された 3D モデル（以下、単純 3D モデル）を用いたレイトレーシングシミュレーションを実施し、計算時間や計算精度の検証からレイトレーシングシミュレーションに適用可能であることを確認した。令和 5 年度の研究では、令和 4 年度までに検討した屋内・屋外の 3D モデルの構成技術について、さらにアルゴリズムの改良やパラメータチューニングを実施し、レイトレーシングシミュレーションに最適な 3D モデルを構成した。また、伝搬モデル検討を行う各サブテーマへ本 3D モデルを提供し、構成した 3D モデルを技術課題ウの電波模擬システム上で再現する技術を確立した。</p> <p>本研究に用いた屋外環境の点群データには、屋外建造物の全容がデータ取得可能な航空機レーザで計測した点群データ（以下、航空データ）や、地表付近の建造物のデータ取得に優れた Mobile Mapping System (MMS) による車載レーザで計測した点群データ（以下、MMS データ）等がある。本研究では、これらを組み合わせて相互に補完した図 9 に示す点群モデルを用いた。</p> <p>また各環境・天候モデルの構築のため、都市／山間・屋内外・天候等において電波伝搬特性を取得し（図 10）、山間部のドローン自律運転の無線システム向けには、図 11 に示すように季節による植生の変化を空間モデルに反映した、また自動走行の無線システムでは、天候によりミリ波レーダなどで車両からの電波の反射強度が変わることを想定した測定も実施した（図 12）。</p> <div data-bbox="478 1153 1372 1624" style="text-align: center;"> </div> <p>図 9：航空データと MMS データが結合された屋外点群モデル（各点の高さで色分け）</p> |
|--------------|---|

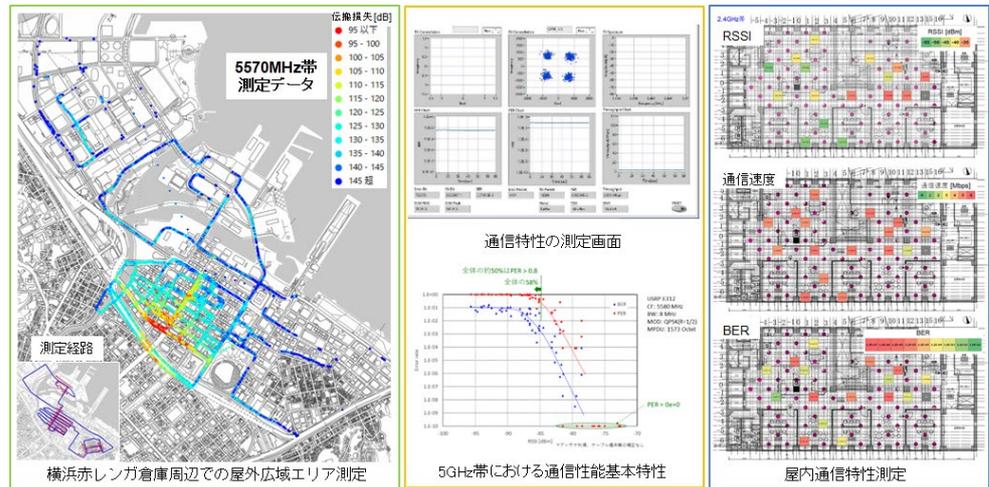


図 10：屋内外環境における電波伝搬特性の取得

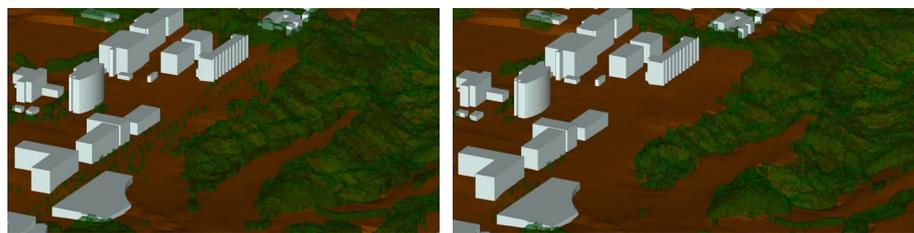


図 11：山岳環境空間データ



図 12：降雨の影響を考慮した電波反射測定（対象物に散水した状況で測定）

電波模擬技術

4年間の研究開発を通じて、仮想環境において無線システムの評価を行うための各要素技術（模擬無線システム、ハードウェア無線リンクエミュレータ、アナログデジタルインタフェース、電波発射挙動モデル）の開発について、当初の目標通り達成することができた。模擬無線システムは、送受信それぞれ4ポートに対応したソフトウェア無線機を用いて5G NRやIEEE 802.11ax等の電波システムが動作する疑似無線機を開発した（図13）。64台の疑似無線機を用いて送受信それぞれ256ポートの動作が検証できる模擬無線システムを開発した。ハードウェア無線リンクエミュレータと模擬無線システムを接続するためのアナログデジタルインタフェースを開発した。256×256の無線リンクに対して独立に電波伝搬モデルを与えることができ、ユーザが定義するシナリオに基づき電波伝搬特性が動的に変化する統合システムを開発した。周波数帯域幅は100MHzを標準としつつ、複数のリンクを束ねることで最大400MHzに対応可能とし、100MHz帯域幅の5G NRなどの複数の信号が混在した環境を模擬して相互干渉による特性劣化などの評価が可能であることを実証した。また、商用のフェージングエミュレータと比較による検証を実施し、比較可能な特性については同等の性能が得られることを確認した。実無線機としては、上述の疑似無線機のほか、Wi-FiやBluetoothなどの実無線機を用いて評価できることも確認した。これらの成果により、実無線機に関しては送受信それぞれ最大256ポートの制限の中で、SISO(Single Input Single Output)であれば最大256台、4×4 MIMO (Multi Input Multi Output) であれば最大64台の大規模な同時検証を実現できる評価環境の構築を実現した。また異なる無線システム間の

干渉評価等のみでなく、新しい無線アクセス技術であるフルデュプレクス（全二重通信、FD）を実現するための端末スケジューラ機能を包含したエミュレーションオーケストレータを開発し、Beyond 5G (B5G) を志向した FD 動作を追加した場合のエミュレーションを実現した。これらの成果により、周波数の有効利用の一層の向上を目指した新規技術の検証が可能であることを確認した。

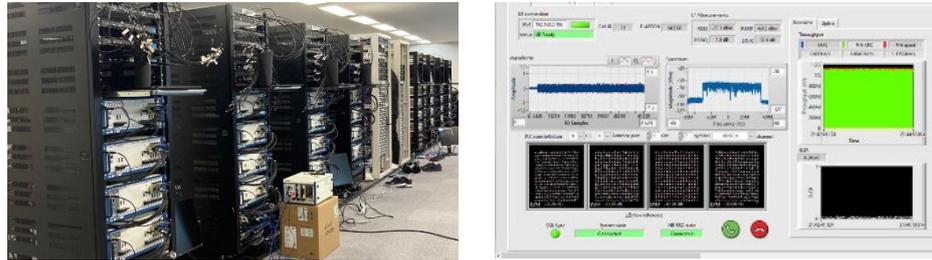


図 13：開発した模擬無線システム
(左：横須賀に設置した模擬無線システム、右：5G NR の評価画面)

ワイヤレスエミュレータを活用するユースケース/アプリケーションとして、B5G セルラシステム、ドローン/ロボット、ITS、スマートオフィス、スマート工場、次世代スマートメータを対象とした実利用に関する開発を実施した。また、電波伝搬特性に静止衛星や低軌道衛星に対応した長遅延、高速ドップラを適用するための拡張を行い、疑似衛星局を接続して NTN 通信の電波伝搬模擬が可能であることを実証した。

無線機の電波発射を高精度に模擬するため、ドローンや車載アンテナなど、実利用を想定したアンテナの電波発射挙動モデルの開発を実施した。無指向性アンテナの評価では、Sub6GHz 帯の多くの周波数帯において、半値角+30 %の角度範囲で決定係数 0.8 を達成した (図 14)。つまり、仮想環境における伝搬損失の計算データは、実測データの 80%の精度であった。また、指向性アンテナの放射パターンを反映させ、受信電力のヒートマップが出力できることを工場環境にて確認した (図 15)。これらの成果により、仮想環境において、実環境に近い条件で自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現した。

| 角度範囲 | 169 MHz | 760 MHz | 922 MHz | 2462 MHz | 4050 MHz | 4850 MHz | 5410 MHz | 5810 MHz |
|----------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| HPBW | 0.8 | 0.7 | 1 | 0.5 | 0.9 | 0.8 | 0.1 | 0.6 |
| HPBW+30% | 0.9 | 0.8 | 1 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.5 | 0.8 |
| 全体 | 1 | 0.9 | 1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1 |

図 14：決定係数としての無指向性アンテナの放射パターン精度検証結果

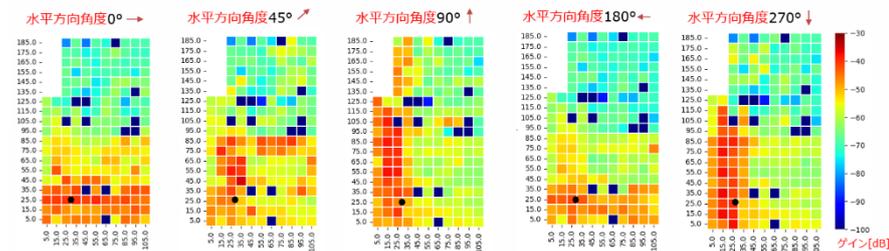


図 15：工場環境にて指向性アンテナの放射パターンを反映させた受信電力のヒートマップ

電波伝搬検証
基盤技術

電波伝搬検証基盤技術では、「技術課題ウ 大規模仮想環境の検証基盤技術」の観点より、4年間の研究開発を通じて、無線機間の通信状態を模擬するために、ユーザの実験シナリオに基づき、電波伝搬モデルを最適に構築する大規模仮想環境検証基盤の構築のための研究開発について、当初の目標どおり達成することができた。具体的には、「ハードウェア無線リンクエミュレータ技術の研究開発」では、ハードウェア無線リンクエミュレーションと呼ぶ、高精細な伝搬モデルを基にした無線リンクの伝搬模擬と、疑似無線機、仮想無線機、実無線機との間の通信具現化を実現し、「仮想無線機エミュレータ技術の研究開発」では、最大 10,000 ノードの仮想無線機の模擬と、実環境同様のアプリケーションとプ

プロトコルスタックを利用した実験を実現し、「実験実行オーケストレータ技術の研究開発」では、ユーザが定義するシナリオを元に模擬を実行し、上記の課題に対し適切な動作の提供を実現し、「実験観測機構の研究開発」では、模擬の状況や結果をわかりやすく管理者や利用者が得るための観測システムを実現した。これにより、当該検証基盤上に、10,000台規模の仮想無線機を計算機環境の整備により構築し、疑似無線機と相互に接続ができ、個別の移動パターンやアプリケーション等を同時に変化可能な検証環境を仮想空間上に構築し、想定されるエミュレーションシナリオに応じて適切に連携させながら動作可能とした。

「ハードウェア無線リンクエミュレータ技術の研究開発」について、疑似無線機、仮想無線機、実無線機との間の通信の具現化を行い、IEEE 802.11g/ax、Wi-SUN FANの相互接続実証を実施した〔アウトカム：大規模な同時検証を実現〕。以下の図16に、IEEE 802.11axの相互接続実証について示す。

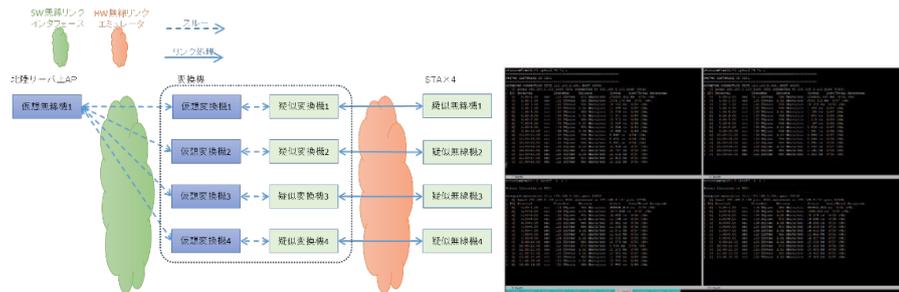


図16：IEEE 802.11axの相互接続実証：(左)トポロジ構成、(右)アプリ動作画面

「仮想無線機エミュレータ技術の研究開発」について、Wi-SUN FAN仮想無線機10000台の動作実証を成功裏に行った〔アウトカム：周波数の有効利用の一層の向上、大規模な同時検証を実現〕。また、課題イの各エミュレーションシナリオに即した、5G-NR、802.11g/ax、Wi-SUN FANの仮想無線機が動作できる環境を整備した。以下の図17に、IEEE 802.11ax仮想無線機を用いたEDCA機能の動作検証を示す。

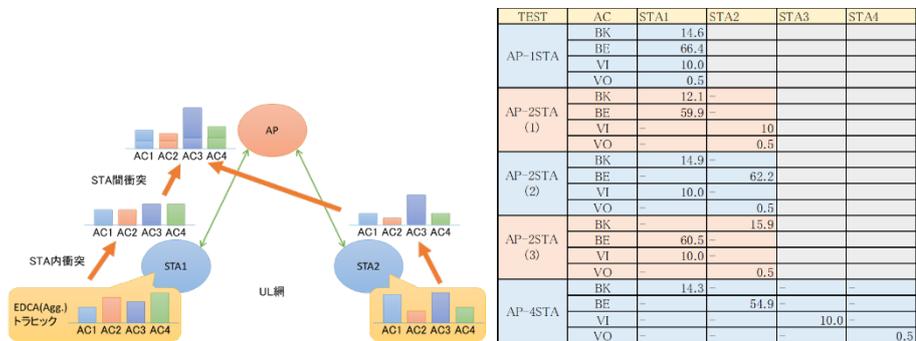


図17：IEEE 802.11ax仮想無線機を用いたEDCA機能動作検証：(左)動作概要、(右)検証結果

「実験実行オーケストレータ技術の研究開発」について、課題イの各エミュレーションシナリオと、山岳地帯ドローンシステムのシナリオを実証した〔アウトカム：自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現〕。以下の図18に、山岳ドローンシステムのシナリオ実行画面を示す。

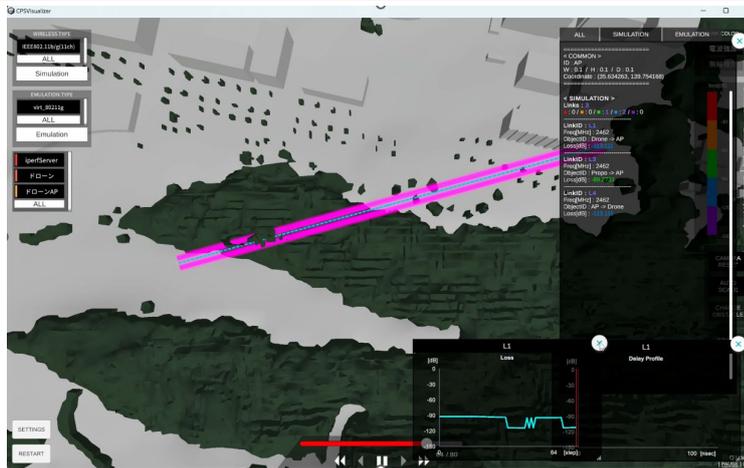


図 18：山岳ドローンシステムのシナリオ実行画面

「実験観測機構の研究開発」について、利用者側のインタフェースの実装によりビジュアライザを構築し、進行エミュレーションの観測系も実装した。以下の図 19 に、開発されたビジュアライザ上でユーザインタフェースとして提供されるメニュー画面を示す。



図 19：ビジュアライザのメニュー画面

〔アウトカム：大規模な同時検証を実現〕の4年間の目標達成状況について、図 20 に示す。

| 主な指標 | 目標値 | 目標年度 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 |
|-------------|---------|-------|---------------------|--------|--------|---------|
| 大規模な同時検証を実現 | 10,000台 | 令和5年度 | —(複数台動作に関する基本検討を実施) | 2,000台 | 5,000台 | 10,000台 |

図 20：[大規模な同時検証を実現]の目標達成状況の推移

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6年6月21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、仮想環境における実無線機の高精度模擬のための実装技術開発の成果をまとめた論文が、通信産業分野のパラダイムシフトを促す成果として評価され国際会議でベストペーパーアワードを受賞するなど、国外においても高い評価が得られた。また、工場環境での電波伝搬推定及び可視化技術をベースに市販の工場レイアウトシミュレーションソフト上に通信状態を可視化する機能に関する特許を国内機関と共同で出願し、電波可視化機能プラグインとして実製品化を目指した開発を進めるなど、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。
- ・当該研究開発による特許の実績として、同一周波数帯で、周波数資源を共有する無線機同士の干渉回避・共存動作の大規模仮想環境検証基盤における実装を想定した無線アクセス制御方式のモデル化に関連する発明が特許出願されており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。
- ・当該研究開発による論文の実績として、仮想空間における多数の無線機間の自律分散型周波数資源共用、および外部システムからの無線干渉回避のモデル化に関する検証手法に関する論文が、査読付き国際会議で採録されるとともに、うち2件の論文について、当該国際会議が定めるベストペーパーアワードが授与されており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。
- ・当該研究開発による研究発表の実績として、大規模仮想環境検証基盤も関連するテストベッド環境の国際接続実証を兼ねた展示会等において複数回の出展ならびに成果発表を実施していて、うち1件の出展については、展示会が定めた受賞を受けており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

(2024/7/29 現在)

| 主な指標 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 合計 |
|---------------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 査読付き誌上 発表論文数 | 0件 (0件) | 3件 (3件) | 4件 (2件) | 13件 (9件) | 20件 (14件) |
| 査読付き口頭 発表論文数 (印刷物を含 む) | 8件 (8件) | 15件 (15件) | 28件 (27件) | 20件 (19件) | 71件 (69件) |
| その他の誌上 発表数 | 0件 (0件) | 3件 (0件) | 2件 (0件) | 3件 (0件) | 8件 (0件) |
| 口頭発表数 | 35件 (1件) | 68件 (8件) | 87件 (18件) | 124件 (7件) | 314件 (34件) |
| 特許出願数 | 8件 (0件) | 10件 (0件) | 7件 (0件) | 9件 (0件) | 34件 (0件) |
| 特許取得数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 3件 (0件) | 3件 (0件) |
| 国際標準提案 数 | 0件 (0件) | 1件 (1件) | 2件 (2件) | 0件 (0件) | 3件 (3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 | 2件 (2件) | 1件 (0件) | 3件 (2件) | 8件 (1件) | 14件 (5件) |
| 報道発表数 | 1件 (0件) | 1件 (0件) | 0件 (0件) | 4件 (0件) | 6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>「超高速」、「多数接続」、「低遅延」といった特徴を持つ無線通信を可能とする第5世代移動通信システム（5G）は、2020年代に普及していくことが想定されるが、無線通信は概ね10年で世代交代が行われていることを踏まえ、2030年代の新たな無線通信である「Beyond 5G」に関する検討が進められている。新たな無線システムの導入に当たっては、既存無線システムに電波干渉が生じることがないように、実試験やシミュレーションにより共用検討を実施した上で技術基準を定めることになるが、実試験を行うためには、実機の試作や免許取得などの手続きに膨大な時間・費用を要する。また、既存無線局についても、我が国の無線局数はここ数十年、一貫して増加傾向にある。膨大な数の無線局が実環境において問題なく動作するか確認するため、実証において、現在は実機による実試験が行われているが、特定の環境において限定的な数での評価しか行えず、試験結果の信頼性に限界がある。</p> <p>実試験での検討に要する期間や費用の圧縮や、実環境では困難な大規模検証を実施するために、仮想空間上での電波模擬システムの構築が求められてきた。本研究開発で開発したワイヤレスエミュレータは、送受信それぞれ256ポートの実無線機、最大10000台の仮想無線機による大規模実証を可能とし、ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータのアプリケーションのそれぞれに求められる検証機能（中継経路選定、置局設計、大規模検証など）により評価環境としての有効性を評価することができる。また、電波伝搬検証基盤技術を活用したワイヤレスエミュレーション技術を適用することにより、上記課題の解決に資するだけでなく、災害時、事故時等の環境変化を高精度にシミュレートし、システムやサービスの挙動を可視化し、評価・検証することも可能になる。これにより、新たな無線システムの研究開発プロセスの加速化・コスト削減及び、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの導入・普及の加速化を図り、我が国の新産業の創出及び国際競争力強化に対して、本研究開発の寄与は極めて大きい。</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>電波模擬技術の推進に当たっては、本研究開発の成果であるワイヤレスエミュレータを用いることで、実環境を模擬した仮想環境において多くの実無線機を用いることなく、様々なアプリケーションでの無線通信のシステム評価、置局設計等の検証などが実現でき、これまでの実フィールドによる実証に対する質の高い代替手段として活用できる見込みを得た。また、電波伝搬検証基盤技術の推進に当たっては、電波伝搬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、独立行政法人等のノウハウや既存のデータを積極的に活用することにより、効率的に研究開発等を推進することができるため、投資に対して最大の効果が見込まれるよう進めてきた。</p> <p>実施期間中は、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。また対象とする5つのアプリケーション（ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータ）に関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究者等が参画し、それぞれのノウハウを積極的に活用して効率的に研究開発が進められた。また、早期に研究開発成果の社会展開を図るため、産学官からなるユーザフォーラム等の関係機関と密接に連携し、実用化を見据えた検討を進めてきた。</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・効率性を確保してきた。予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。</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>電波模擬技術では、仮想環境において無線システムの評価を行うための要素技術を開発し、256×256の無線リンクに対して独立に電波伝搬モデルを与え、ユーザが定義するシナリオに基づき電波伝搬特性が動的に変化する統合システムとして、SISOであれば最大256台、4×4 MIMOであれば最大64台の大規模な同時検証を実現できる評価環境の構築を実現した。また、新しい無線アクセス技術であるFDを実現するための機能を開発し、B5Gを志向した新規技術のエミュレーションを実現し、周波数の有効利用の一層の向上を目指した新規技術の検証が可能であることを確認した。無線機の電波発射を高精度に模擬するため、ドローンや車載アンテナなど、実利用を想定したアンテナの電波発射挙動モデル</p> |

| | |
|-----|---|
| | <p>を開発し、多くの周波数帯において半値角+30 %の角度範囲で決定係数 0.8 を達成した。これらの成果により、仮想環境において、実環境に近い条件で自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現した。</p> <p>電波伝搬検証基盤技術では、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な大規模仮想環境検証基盤を構築し、当該基盤を用いた仮想空間上で電波を放射することなく評価対象システム・サービスの検証を実施することにより、新たな無線システムの研究開発プロセスの加速化・コスト削減及び、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの導入・普及の加速化を通じた我が国の新産業の創出及び国際競争力強化が見込まれる。具体的な成果として、Wi-SUN FAN 仮想無線機 10000 台の動作実証を成功裏に行った成果をはじめ、5G/B5G、ドローン、ITS、スマートオフィス、スマートメータなどの各エミュレーションシナリオに即した、5G-NR、802.11g/ax、Wi-SUN FAN の仮想無線機が動作できる環境を整備し、周波数の有効利用の一層の向上、大規模な同時検証、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現 [いずれもアウトカム] のいずれに対しても寄与することができた。また、スマートオフィスのための無線システムのプロバイダをはじめとするワイヤレスエミュレータの利用者を構成員に含むユーザフォーラム「ワイヤレスエミュレータ利活用社会推進フォーラム」を立上げ、当該フォーラムにおいて、ワイヤレスエミュレータの利活用に有効な所要技術等について議論を継続していることから、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い確実性が得られた。また、ユーザフォーラムを通じて、研究開発成果の周知だけでなく、当該研究開発終了後のワイヤレスエミュレータの利活用の持続的な発展に繋がる活動を推進してきた。このような活動は、当該研究開発の受託機関等にとどまらず、今後新たにワイヤレスエミュレータの利活用に関する業務を開始した機関の新規参入をも想定するものであることから、当該研究開発の関連分野の将来の発展にも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ると認められる。</p> |
| 公平性 | <p>本研究開発は、5 つの具体的なアプリケーション (ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータ) を想定した開発を実施し、それぞれに関して利用者の目線で必要な機能の実装を行った。また、電波伝搬検証基盤技術では、幅広い周波数帯について、無線システムの周波数帯・通信方式等を大規模かつ高精度で模擬可能な大規模仮想環境検証基盤を実現するものであるから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の受益となる。これらの機能を含む具体的な成果については、研究開発の各年度末に開催したワイヤレスエミュレータシンポジウムにて一般にも広く周知するとともに、ワイヤレスエミュレータの仕様策定・拡張に向けた公平な議論の場を提供するユーザフォーラムを設立した。</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。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>無線局数の増加が見込まれる中、無線システム間の高度な周波数共用などの周波数の稠密利用の検討は喫緊の課題であり、また、我が国の無線産業がグローバル市場への参画を継続するためには、共通的な検証・評価が可能な電波模擬システムを構築し、新たな無線システムの研究開発や技術試験を効率的かつ迅速に実施できるようにする必要がある。特に、今後、Beyond 5G システムの導入に向けて、各国がその主導権を獲得するために様々な技術検証に積極的に取り組むことが予想されるところ、成長戦略フォローアップ (令和元年 6 月 21 日閣議決定) においても、「Beyond 5G の要素技術やその円滑かつ迅速な導入に必要となる実世界の電波伝搬を模擬的に再現する試験環境に関する研究開発を推進する」こととされており、我が国が Beyond 5G システムの開発や国際標準化に乗り遅れないためにも、本研究開発等を実施する必要がある。また、今後普及が予想される自動運転やドローン自律走行等についても、実環境では実施できない大規模・複雑な異種・同種システム間の干渉評価を行えるような技術基盤を早期に構築する必要がある。</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）

Beyond 5G での新たな無線システムの導入に当たり、実試験での検討に要する期間や費用の圧縮や、実環境では困難な大規模検証を実施するために、仮想空間上での電波模擬システムを開発し、ITS、ドローン、スマートオフィス、スマート工場、スマートメータのアプリケーションのそれぞれに求められる検証機能（中継経路選定、置局設計、大規模検証など）により評価環境を構築した。電波伝搬検証基盤技術を活用したワイヤレスエミュレーション技術を適用することにより、新たな無線システムの研究開発プロセスの加速化・コスト削減及び、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの導入・普及の加速化を図り、我が国の新産業の創出及び国際競争力強化に対して、本研究開発の寄与は極めて大きい。よって、本研究開発には必要性があったと認められる。

仮想環境において無線システムの評価を行うため、256×256 の無線リンクに対して独立に電波伝搬モデルを与え、ユーザが定義するシナリオに基づき電波伝搬特性が動的に変化する統合システムとして、SISO であれば最大 256 台、4×4 MIMO であれば最大 64 台の大規模な同時検証を実現できる評価環境の構築を実現した。また、新しい無線アクセス技術である FD を実現するための機能を開発し、B5G を志向した新規技術のエミュレーションを実現し、周波数の有効利用の一層の向上を目指した新規技術の検証が可能であることを確認した。

無線機の電波発射を高精度に模擬するため、ドローンや車載アンテナなど、実利用を想定したアンテナの電波発射挙動モデルを開発し、半値角+30 %の角度範囲で決定係数 0.8 を達成した。これらの成果により、仮想環境において、実環境に近い条件で自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現した。

電波伝搬検証基盤技術では、Wi-SUN FAN 仮想無線機 10000 台の動作実証を成功裏に行った成果をはじめ、課題イの各エミュレーションシナリオに即した、5G-NR、802.11g/ax、Wi-SUN FAN の仮想無線機が動作できる環境を整備し、周波数の有効利用の一層の向上、大規模な同時検証、自動走行・ドローン自律運転等の無線システムの電波模擬を実現〔いずれもアウトカム〕のいずれに対しても寄与することができ、成果目標を達成することができた。

電波伝搬検証基盤技術では、大規模仮想環境検証基盤の構築により整備された仮想空間上に、評価対象として想定される電波システム、アプリケーションそれぞれに対するワイヤレスエミュレーションに必要な技術的要件を策定することで、本研究開発の必要性、効率性、有効性、公平性、優先性について示すことができたほか、当該成果については、本研究開発終了後も利活用について検討される場であるユーザフォーラムの継続や、関連する研究開発等への波及効果が認められる。

よって、電波伝搬検証基盤技術にて得られた成果により、本研究開発の目標は達成されたと認めることができる。

<今後の課題及び取組の方向性>

応用開発段階においては、周波数資源有効利用に資する無線エリア拡張、無線干渉回避技術に関する研究開発ならびに社会実装への寄与として、このような技術を適用する電波システムのエミュレーションを可能とするとともに、該当外部無線機との相互接続検証を検討する。併せて、想定電波システムに準ずるエミュレーション項目の組合せ最適化および、詳細物理層エミュレーションの実装を行う。

実用化段階においては、研究開発成果を、Beyond 5G 等の無線システム・サービスの実証環境であるテストベッド環境上に整備し、関連する研究開発のための利活用、公募プロジェクト等における利活用、イベント等における利活用に供する。併せて、当該システム・サービスの普及化のためのフォーラム等の活動と連携し、同様に利活用・実証の事例を拡げる。

事業化段階においては、ワイヤレスエミュレータを一般に公開し、法令等の整備や制度化に向けた施策評価、研究開発、事業者による実無線環境・システム評価等の各用途に適したサービス提供を行う。特に事業者等の一般ユーザに向けたサービスとして、評価環境の 3D モデル及び電波伝搬モデル生成のツールを提供し、それらを活用して無線システム導入環境等での活用が可能なサービスフローの構築を完了する。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和 6 年 6 月 21 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。

- 様々な電波システムを、仮想空間上で高精度かつリアルタイムにエミュレーション可能な電波模擬システムを開発したことにより、テストベッドの提供や、Beyond 5G時代の我が国の競争力が高まることが期待できる点で、高く評価できる。
- 大規模で多岐にわたるこれらの研究開発要素を適切に統合し、具体的な無線システムを想定した特性検証まで効率的に進捗させた点は、高く評価できる。また、当初からユーザフォーラムと緊密な連携が図られており、実サービス提供に向けた取り組みが着実になされている点も心強い。
- 大規模な実際の無線ネットワークの電波伝搬環境を模擬した汎用性を有するエミュレータはこれまで例がなく、今後、様々な電波利用システムの高度化・周波数有効利用に役立つものと期待される。対外発表の件数も多い。

7 評価に使用した資料等

- 成長戦略フォローアップ（令和元年6月21日閣議決定）
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/fu2019.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（令和元年6月14日閣議決定）
<https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190614/siryoul.pdf>
- デジタル社会の実現に向けた重点計画（令和5年6月9日閣議決定）
https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/5ecac8cc-50f1-4168-b989-2bcaabffe870/b24ac613/20230609_policies_priority_outline_05.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>

令和 6 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 6 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

100GHz 以上の高周波数帯通信デバイスに関する研究開発

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 5 年度（3 か年）

・実施主体

民間企業

・総事業費

3,869 百万円

| 令和 3 年度 | 令和 4 年度 | 令和 5 年度 | 総 額 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1,176 百万円 | 1,370 百万円 | 1,323 百万円 | 3,869 百万円 |

当時の事前事業評価の時点では、事業実施機関及び総事業費が確定しておらず、10 億円を超えることが見込まれなかったため。

・概 要

社会基盤・産業基盤を支える 5G 以降の移動通信システムにおいては、現在の移動通信システムを超える高速・大容量の通信の実現が必要となる。そこで、新たに屋内外で利用可能な移動通信システムに活用することを前提として、広帯域を確保可能な 100GHz 超帯の高周波数帯を用いた高速・大容量通信にて、通信伝送距離の延伸化を実現するための研究開発を行った。具体的には、以下(ア)から(ウ)のとおりである。

（ア）高周波数帯における無線システム構成技術

無線システム全体として最適となるよう設計し、システム内の構成品への機能・性能配分した後、以下の(イ)及び(ウ)の検討内容を反映した評価装置を試作した。同装置を用いて、送信機のアンテナから送信した電波が受信機で直接受信できる場合(以下、見通し内)、または

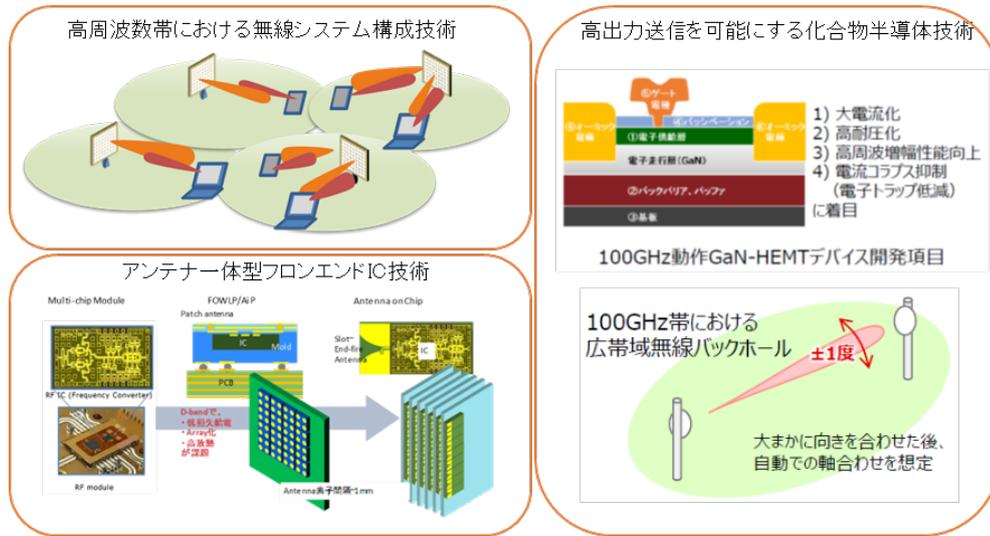
送信機のアンテナから送信した電波が受信機で直接受信できない場合(以下、見通し外)において移動通信システムの伝送実験を実施し、100GHz 超帯の移動通信システムの実現性を評価し、見通し内の伝送距離 100m においてスループット 100Gbps を達成する技術を確立した。見通し外での無線通信において、伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする技術課題を明らかにした。

（イ）アンテナ一体型フロントエンド IC 技術

低損失な実装技術であるアンテナオンチップとして、素子アンテナとフロントエンド IC を一体化させる技術を確立した。以下の(ウ)のアクティブフェーズドアレーアンテナ(APAA)の検討と連携しながら、素子アンテナとフロントエンド IC を集積した基板を波長に依存する素子アンテナ間隔で複数配置することで、100GHz 超帯で動作する APAA を実現した。最終的に、100 素子以上からなる APAA において、100GHz 超帯で 50dBm 以上の等価等方輻射電力(EIRP)を実現した。

（ウ）高出力送信を可能とする化合物系半導体技術

化合物半導体を用いて、100GHz 超帯において出力 10W 以上かつ効率 20%以上、300GHz 帯において出力 100mW 以上かつ効率 5%以上の高出力増幅器を開発した。また、APAA に関しては(イ)の検討と連携しながら、開発した高出力増幅器やビームフォーミングのための移相器及び周波数コンバータの機能を有する集積回路により構成される低損失モジュールを実現した。



| 技術の種類 | 技術の概要 |
|--------------------------------|---|
| <p>(ア) 高周波数帯における無線システム構成技術</p> | <p>移動通信システムに適応できる 100GHz 超帯を用いた高速・大容量通信を可能とする無線装置に関する研究開発を行った。基本伝搬特性を評価し、100GHz 超帯に適した移動通信システムの要求条件を明らかにした。100GHz 帯及び 300GHz 帯の実験用無線装置をそれぞれ構成した。100GHz 帯にて屋内・屋外にて見通し内外における伝送実験により、伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする技術を明らかにした。また、300GHz 帯にて屋内にて見通し内外における伝送実験により、伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする技術を明らかにした。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="478 1198 925 1478"> <p>システム全体の最適化</p> <ul style="list-style-type: none"> ■基地局向け高周波数帯無線回路 ■送信電力 ■帯域幅 ■変調方式 ■ビーム幅 ■フェーシング ... <p>移動通信システム全体の最適化 送信系統・受信系統の機能・性能配分</p> </div> <div data-bbox="957 1198 1404 1478"> <p>伝送評価</p> <p>100GHz超帯における屋内外・見通し内外の伝送特性を把握 伝送距離、スループットを評価</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">図：取り組み内容</p> |
| <p>(イ) アンテナ一体型フロントエンドIC技術</p> | <p>100GHz 超帯の高周波数帯を扱う無線装置には、それ以下の周波数帯を扱う無線装置と比較して、無線回路の線路や各素子にて損失が増大することが予想される。そこで、損失の発生する回路の線路長の極小化するアンテナオンチップ型のデバイスに関する研究開発を行った。100 素子以上からなるアクティブフェーズドアレイアンテナ (APAA) において 100GHz 超帯で 50dBm 以上の等価等方輻射電力 (EIRP) を実現した。</p> <div style="text-align: center;"> <p>アンテナオンチップデバイス</p> <p>EHF帯下限 100GHz超帯</p> <p>高周波数帯の回路による損失を局限するアンテナ一体型フロントエンドICを実現</p> </div> |

| | | |
|------------------------|---|---|
| | APAAを構築して、高出力の送信を実現 | |
| | 図：取り組み内容 | |
| (ウ)高出力送信を可能にする化合物半導体技術 | <p>送信系統の EIRP の増大するためには、アンテナ（素子アンテナを含む）へ電力を給電するトランジスタ等の電力増幅器の高出力化も求められている。従来と比較して更なる高出力化と高周波数帯での動作が求められる。GaN 及び InP 等の化合物半導体の材料からなる高出力電力増幅器の高周波数化及び高出力化に関する研究開発を行った。100GHz 帯にて出力 40dBm、効率 20%の高出力電力増幅器を開発した。300GHz 帯にて出力 20dBm、効率 5%の高出力電力増幅器を開発した。数素子(2x2)程度のアレイアンテナによるビーム制御を可能にする低損出モジュールを開発した。</p> | |
| | <p>化合物半導体の出力</p> <p>化合物半導体を用いた高出力の増幅器を実現</p> | <p>化合物半導体増幅器を用いたAPAA</p> <p>化合物半導体増幅器を用いてAPAAを構築し、ビームフォーミングを実施</p> |
| | 図：取り組み内容 | |

・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 |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| (ア)高周波数帯における無線システム構成技術 | 伝搬測定 → 装置検討1 → | 仕様検討 → 装置検討2 → | 伝送実験 → |
| (イ)アンテナ一体型フロントエンドIC技術 | 部分試作 → | 装置試作 → | 全体試作 → |
| (ウ)高出力送信を可能にする化合物半導体技術 | デバイス開発 → ビーム制御系設計 → | 集積回路開発 → 移相器設計・試作 → | 装置実証 → ビーム制御系構築 → |

(2) 達成目標

5G の普及期においては、IoT 機器の爆発的な普及が見込まれ、通信トラフィック量も飛躍的に増加し、現在移動体通信システムに割当てられている周波数がひっ迫することが想定される。このため、今後の移動通信システムの更なる周波数需要の高まりに応えるために、新たに広帯域を確保可能と見込まれる 100GHz 超帯の周波数帯を移動通信システムに活用するための研究開発を実施する。具体的な達成目標は以下の4点である。

- ・高周波数帯の実験用無線装置を構成し、屋内・屋外にて見通し内外における 100GHz 超帯伝送実験を行い、伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする技術を明らかにする。
- ・100 素子以上からなるアクティブフェーズドアレイアンテナ (APAA) において 100GHz 超帯で 50dBm 以上の等価等方輻射電力 (EIRP) を実現する。
- ・化合物半導体を用いて 100GHz 帯にて出力 40dBm、効率 20%の高出力電力増幅器を開発する。同様に 300GHz 帯にて出力 20dBm、効率 5%の高出力電力増幅器を開発する。数素子(2x2)程度のアレイアンテナによるビーム制御を可能にする低損出モジュールを開発する。

- ・100GHz 超帯での移動通信システムに向けた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 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) |
|---|--|
| 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。」 |
| 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。」 |
| 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。」 |

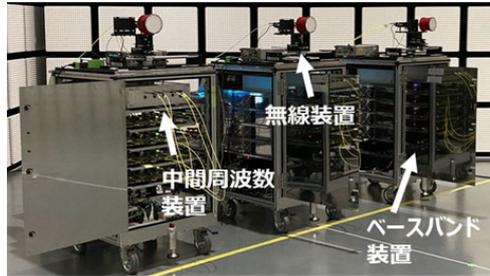
(3) 目標の達成状況

- 3 年間の研究開発を通じて、目標を達成することができた。
- ・100GHz 帯にて実験用伝送装置を用いて、屋外にて見通し内距離 100m でスループット 100Gbps 以上を達成した。見通し外の無線通信において、反射板を用いた屋内伝送実験により見通し内と同等の無線伝送特性を得られることを確認した。
 - ・300GHz 帯にて実験用伝送装置を用いて、屋内にて反射板を用いて総距離 100m でスループット 100Gbps を達成した。
 - ・ビームフォーミング IC とアレイアンテナを一体化した 100 素子以上の APAA モジュール試作を行い、100GHz 超帯において EIRP 50dBm、ビームステアリング角±45 度の特性を実現した。
 - ・100GHz 帯にて単体 GaN 系 HEMT にて出力電力 27.8dBm、効率 30.5%を達成し、それを用いた電力増幅器にて出力電力 40dBm、効率 20.4%を達成した。
 - ・300GHz 帯にて単体 InP 系 HEMT を用いた電力増幅器にて出力 20dBm、効率 9.3%を達成した。
 - ・100GHz 帯移相器チップ、2x2 アンテナ、低損失モジュールを開発し、±1 度のビーム制御を実現した。
 - ・以上の目標達成により、100GHz 超帯での移動通信システムに向けた利用可能性に関する基礎的な研究成果を得ることができた。

| 技術の種類 | 目標の達成状況 |
|-------------------------|---|
| (ア) 高周波数帯における無線システム構成技術 | <p>本技術における到達目標と研究開発内容の概要は、以下の(1)から(3)の通りである。</p> <p>(1) 100GHz 帯における見通し内での距離 100m にてスループット 100Gbps を達成する無線システム構成技術の確立</p> <p>(2) 100GHz 帯における見通し外での伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする無線システム構成技術の明確化</p> <p>(3) 300GHz 帯における伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする無線システム構成技術の確立</p> <p>以降で上記の(1)から(3)について詳細に述べる。</p> |

(1) 100GHz 帯における見通し内での距離 100m にてスループット 100Gbps を達成する無線システム構成技術の確立

現実的な無線デバイスを用いて、ベースバンド部からフロンエンド部までの送信機及び受信機を構成した。無線チャンネルは4チャンネルの周波数多重と、中心周波数の異なる3系統の送信機を用いて、合計12チャンネルを用いて伝送実験を行った。1チャンネルあたりの帯域幅は2GHzであり、変調方式は64QAMまたは128QAMとした。屋外にて見通し内での伝送距離100mにてスループット100Gbps以上を達成した。



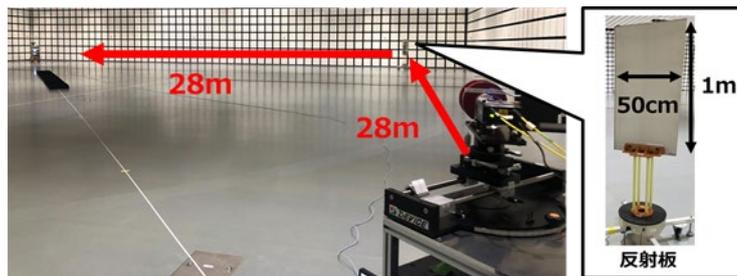
図：製作した送信機(3系統)



図：屋外無線伝送実験の状況

(2) 100GHz 帯における見通し外での伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする無線システム構成技術の明確化

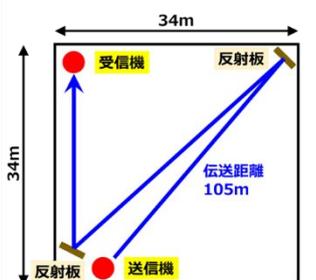
(1)の送信機及び受信機を用いて、送信機の見通し外に受信機を配置し、反射板を用いて無線伝送実験を実施した。送信機と反射板、反射板と受信機の距離をそれぞれ28mとした。実験の結果、反射板を用いた見通し外の無線伝送特性は、見通し内で同等の距離を離隔したときの無線伝送特性とおおむね一致することを確認した。本実験により、100GHz帯において、見通し外のエリア化を図るには、反射板が利用できることを明らかにした。



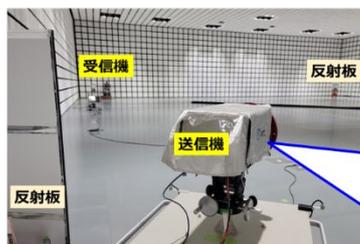
図：見通し外無線伝送実験の状況

(3) 300GHz 帯における伝送距離 100m にてスループット 100Gbps を可能にする無線システム構成技術の確立

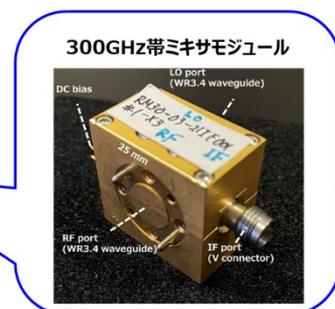
無線システム構成及び構成品の所要性能を策定し、キーデバイスとなる広帯域ミキサを創出した。策定した無線システム構成、及び広帯域ミキサを活用した実験用無線装置を構築した。電波暗室にて反射板を2枚用いて伝送距離105mを確保し、送受信間でスループット100Gbpsの無線伝送を達成した。



無線伝送実験系
(反射板を用いた距離105mを実現)



電波暗室における
100Gbps伝送実験の様

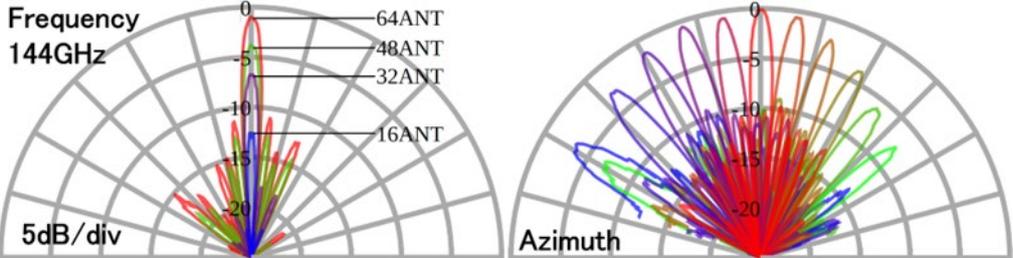
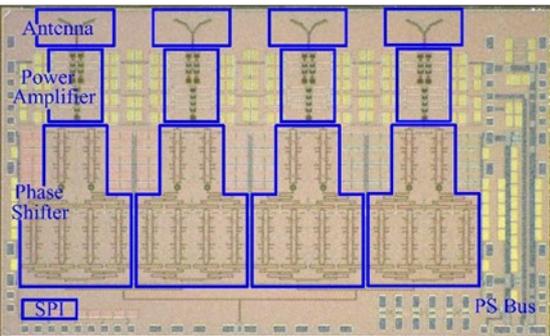


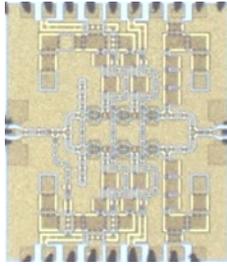
図：300GHz帯無線伝送実験の概要

(イ) アンテナ

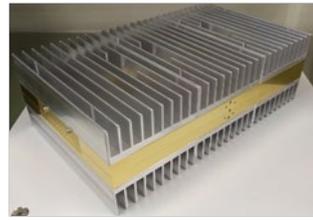
本技術における到達目標と研究開発内容の概要は、以下の(1)及び(2)の通りである。

(1) 高利得アンテナモジュール技術：ビームフォーミング IC とアレイアンテナを一体化した

| | |
|--------------------------------|---|
| <p>一体型フロントエンド IC 技術</p> | <p>100 素子以上の APAA モジュール試作を行い、EIRP 50dBm 以上、ビームステアリング角± 30 度程度の特性を有していることを実証する。</p> <p>(2) 高出力ビームフォーミング IC 技術：ビームフォーミング集積化回路の設計・試作を行う。試作したビームフォーミングに必要な基本要素回路を集積した IC チップを開発する。</p> <p>以降で上記の(1)及び(2)について詳細を述べる。</p> <p>(1) 高利得アンテナモジュール技術 ビームフォーミング IC とアレイアンテナを一体化した 100 素子以上の APAA モジュール試作を行い、EIRP 50dBm、ビームステアリング角± 45 度の特性を有していることを確認した。</p>  <p>図：フェーズドアレーによる EIRP 向上と高精度ビームステアリングの測定結果</p> <p>(2) 高出力ビームフォーミング IC 技術 フェーズドアレーアンテナと移相器、増幅器で構成された送信機 4 系統分を集積した IC チップの開発を完了した。</p>   <p>図：アンテナオンチップ 4 素子フェーズドアレー IC と 128 素子フェーズドアレーモジュール</p> |
| <p>(ウ) 高出力送信を可能にする化合物半導体技術</p> | <p>本技術における到達目標と研究開発内容の概要は、以下の(1)から(3)の通りである。</p> <p>(1) 100GHz 帯高出力電力増幅器の開発：GaN 系 HEMT を用いた電力増幅器にて出力 40dBm、効率 20%を達成する。</p> <p>(2) 300GHz 帯高出力電力増幅器の開発：InP 系 HEMT を用いた電力増幅器にて出力 20dBm、効率 5%を達成する。</p> <p>(3) ビーム制御法の開発：100GHz 帯移相器チップ、2x2 アンテナ、低損失モジュールを開発し、± 1 度のビーム制御を実現する。</p> <p>以下で上記の(1)から(3)について詳細に述べる。</p> <p>(1) 100GHz 帯高出力電力増幅器の開発 GaN 系 HEMT について、終端膜、裏面発振抑止膜の開発により電気的特性を改善した。単体 HEMT にて、出力 27.8dBm、効率 30.5%を達成した。この性能は世界トップである。これを用いて電力増幅器を構成した。発振抑止 2 並列モノリシック集積回路にて、出力 29.7dBm、効率 20.4%を達成した。また、8 合成モジュールにて出力 40dBm を達成できることを確認した。</p> |



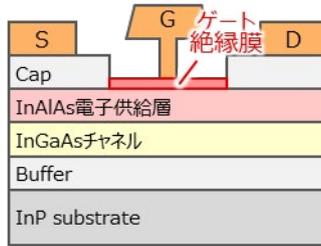
図：3段2並列電力増幅器



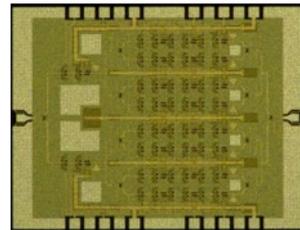
図：10W相当8合成電力増幅器モジュール

(2) 300GHz 帯高出力電力増幅器の開発

InP系 HEMT にて Al_2O_3 による MOS 構造を実現した。また独自エピ構造にて大電流・高電圧化を可能にした。ゲート設置2段直列モノリシック集積回路にて、出力電力 9.2dBm、効率 9.3% を達成した。これを8合成した電力増幅器にて出力 20dBm を達成できることを確認した。



図：InP系 MOS-HEMT の断面図



図：InP系 300GHz 帯モノリシック集積回路

(3) ビーム制御法の開発

数素子(2x2)程度のアレイアンテナによるビーム制御を検討した。100GHz 帯移相器チップ、2x2 アンテナ、低損失モジュールを開発し、±1 度のビーム制御を実現した。また、送受対向でのアンテナの自動軸合わせプログラムを開発し、無線システム構成技術での 100GHz 帯送信機のフロントエンド部として用いることで、屋外・見通し内で伝送距離 100m を達成した。さらに、開発した 100GHz 帯電力増幅器を用いて、屋内・見通し内に伝送距離 100m に相当する無線伝送実験に成功した。



図：屋内見通し内無線伝送実験の様子

図：屋外見通し内無線伝送実験の様子

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6年6月21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、下表のように査読付き誌上発表論文 10 件、査読付き口頭論文発表 19 件、その他誌上発表 10 件、口頭発表 57 件を実施した。受託 3 年間にて、タイムリーな研究成果をアピールに努めているといえる。これらの発表の中で、マイクロ波・ミリ波に関する技術分野で最も著名な論文誌 (IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques: IF = 4.3) への掲載、著名な国際学会 (IEEE Microwave Symposium, European Microwave Week (EuMW) など) に採録されている。半導体分野においても最も著名な論文誌 (IEEE Transactions on Electron Devices: IF = 2.9, Japanese Journal of Applied Physics: IF=1.5) に掲載、著名な国際学会 (International Conference on Solid State Devices and Materials など) に掲載されている。また、Microwave Workshop and Exhibition, Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), EuMW などの国際学会、電子情報通信学会などの国内学会での招待講演の依頼を多数受けている。さらに APMC, Asia-Pacific Conference on Communications での採録論文にて論文賞 2 件を受賞している。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ともに、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。
- 特許の観点では、3 年間で 42 年、うち国際特許出願 12 件を実施済みである。本研究開発では半導体技術、回路技術などのハードウェアに関わるものであり、出願された特許にはこれら関わる基礎的な特許が含まれており、権利化後の有効性が高い。今後も関連する特許出願が見込まれることもあり、本研究開発の必要性と有効性が認められる。
- 国際標準化の観点では、本研究開発の性質から受託期間中での寄与文書の提出がないが、電波伝搬特性について ITU-R への寄与文書提出 1 件があった。これは下表の口頭発表に含まれている。これまでの無線システムの国際標準化に先立ち、電波伝搬などの調査報告がされ、いわゆる伝搬モデルの作成が進められる。また、100GHz 超帯でのスループット 100Gbps を達成する技術は今後の国際標準化の議論にてさらに深められる。これらの検討での基礎的な成果として、本研究開発の必要性と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 | 合計 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 査読付き誌上発表論文数 | 1件 (1件) | 3件 (3件) | 6件 (5件) | 10件 (9件) |
| 査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む) | 1件 (1件) | 9件 (9件) | 9件 (9件) | 19件 (19件) |
| その他の誌上発表数 | 0件 (0件) | 4件 (2件) | 6件 (2件) | 10件 (4件) |
| 口頭発表数 | 12件 (1件) | 21件 (6件) | 24件 (6件) | 57件 (13件) |
| 特許出願数 | 9件 (0件) | 17件 (4件) | 16件 (8件) | 42件 (12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) | 2件 (2件) | 0件 (0件) | 2件 (2件) |
| 報道発表数 | 0件 (0件) | 2件 (1件) | 4件 (2件) | 6件 (3件) |
| 報道掲載数 | 0件 (0件) | 1件 (0件) | 43件 (0件) | 44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 をはじめとする移動通信に割り当てられた周波数帯も近い将来ひっ迫することが予想され、2030 年代には 5G の後継となる移動通信システムが構築されることを念頭に、更なる高周波数帯での通信に関する技術の確立が求められていた。2019 年世界無線通信会議（WRC-19）において、新たに陸上移動用途で仕様できる周波数帯が合意されたほか、5G を念頭とした周波数として 71GHz までの周波数帯が特定され、今後さらに高い周波数帯の割当てが期待されているなど、国際的にも 100GHz 以上の EHF 帯の利用に対する期待が高まっていた。本研究開発は高周波数帯で大容量通信を実現するための技術を開発するために行うものであり、周波数の有効利用に資する技術の確立が課題であった。</p> <p>これら国際的・社会的な動向に対して、成長戦略実行計画(令和 2 年 7 月 17 日閣議決定)における「いわゆる 6G(ビヨンド 5G)の推進」として、100GHz 超帯での伝送距離延伸を可能にする技術、CMOS を用いたアンテナ一体型フロントエンド IC 技術、高送信出力を可能にする化合物半導体技術に先んじて取り組み、必要な技術実現した、本研究開発の方向性が正しかったことは明らかである。</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>本研究開発の推進に当たっては、移動通信システム技術、100GHz 超帯での半導体技術・集積回路技術に関する専門知識や研究遂行能力を有する民間企業のノウハウを積極的に用いており、効率的な研究開発がすすめられた。本件研究開発では、これまでに実用化されておらず、世界的に見ても基礎研究段階である 100GHz 超帯での半導体技術・集積回路技術を移動通信システムへの適用に向けた研究開発が必須であること、世界的に見ても伝送距離 10m 程度の無線伝送を伝送距離 100m に飛躍的に延伸するための移動通信システム技術の研究開発が必須であることから、他の効率的で質の高い代替手段はなかった。</p> <p>実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的な会合において、各社の進捗状況や課題が調整・共有され、各社の研究開発成果を持ち寄った伝送実験の実施など各社で協調して実施した。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の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>本研究開発で得られた成果の早期な社会展開を図るために、査読付き論文誌への掲載、国際学会等での口頭発表等を受託 3 年間で合計 96 件実施した。運営委員会の委員から同種の研究開発に比較して本研究開発は受託 3 年間で短いとの指摘があったが、受託 3 年間で目標を達成した。</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>本研究開発の目標を次のように達成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 100GHz 超帯にて伝送距離 100m、スループット 100Gbps を達成する無線システム構成技術について、現実的な無線デバイスを用いた 100GHz 帯実験用伝送装置を構成し、屋外にて見通し内距離 100m でスループット 100Gbps 以上を達成し、見通し外の無線通信において、反射板を用いた屋内伝送実験により見通し内と同等の無線伝送特性を得られることを確認した。また、後述する CMOS によるアンテナ一体型フロントエンド部を用いた無線伝送実験にて、ビーム切り替えを瞬時に実施できることを示した。さらに化合物半導体による 100GHz 帯移相器チップ、2x2 アンテナ、低損失モジュールによるフロンエンド部を用いた無線伝送実験にて、屋外見通し内にて伝送距離 100m にて±1 度のビーム制御を実現した。300GHz 帯にて実験用伝送装置を用いて、屋内にて反射板を |

| | |
|-----|--|
| | <p>用いて総距離 100m でスループット 100Gbps を達成した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ CMOS を用いたビームフォーミング IC とアレイアンテナを一体化した 100 素子以上の APAA モジュール試作を行い、EIRP 50dBm、ビームステアリング角±45 度の特性を実現した。 ・ 100GHz 帯にて単体 GaN 系 HEMT にて出力電力 27.8dBm、効率 30.5%を達成し、それを用いた電力増幅器にて出力電力 40dBm、効率 20.4%を達成した。300GHz 帯にて単体 InP 系 HEMT を用いた電力増幅器にて出力 20dBm、効率 9.3%を達成した。 <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、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し、高い周波数帯の活用及び周波数の有効利用を促進する技術の研究開発であるため、広く無線通信の利用者の受益となる。</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> |
| 優先性 | <p>昨今の周波数ひっ迫事情及び今後の移動通信の高度化を鑑みるに、更なる高周波数帯への移行による大容量通信の実現が喫緊の課題となることから、高周波数帯で大容量通信を実現する技術の早期確立は急務であった。また欧米を中心に、100GHz 以上の高周波数帯を移動通信に適用するための基礎的な研究開発が精力的に実施されている。このような背景の中、各国を先導するために、我が国においても 5G の高度化を実現し、5G の後継となる移動通信システムの橋渡しとなるであろう 100GHz 以上での高速伝送可能な無線システムの実現に向けて研究開発を加速していく必要があった。</p> <p>成長戦略実行計画(令和 2 年 7 月 17 日閣議決定)においても、「我が国においても、ビヨンド 5G に対する先行投資を今から行い、シェアの確保を目指す必要がある。具体的には、オール光ネットワーク、低消費電力半導体、量子暗号など、その実現のカギを握る先端技術の研究開発を加速する。」こととされている。現在まで我が国は諸外国に対して、ミリ波帯の通信デバイスにおける技術的優位性を有していた。100GHz 以上の高周波数通信デバイスの研究開発においても優位性を維持し、我が国の製品が世界で広く利用される機会につなげるため、本研究開発を早急に実施する必要があった。</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）

5G をはじめとする移動通信に割り当てられた周波数帯も近い将来ひっ迫することが予想され、2030 年代には 5G の後継となる移動通信システムが構築されることを念頭に、更なる高周波数帯での通信に関する技術の確立が求められていた。2019 年世界無線通信会議（WRC-19）において、新たに陸上移動用途で仕様できる周波数帯が合意されたほか、5G 用周波数として 71GHz までの周波数帯が特定され、今後さらに高い周波数帯の割当てが期待されているなど、国際的にも 100GHz 以上の EHF 帯の利用に対する期待が高まっていた。このような状況を踏まえると、本研究開発のような高周波数帯で大容量通信を実現するための技術を開発し、周波数の有効利用に資する技術を確立することが課題であった。

そこで、本研究開発では以下に述べる通り、100GHz 超帯での伝送距離延伸を可能にする技術、CMOS を用いたアンテナ一体型フロントエンド IC 技術、高送信出力を可能にする化合物半導体技術に先んじて取り組みを行ったものである。

本研究開発においては、100GHz 超帯にて伝送距離 100m、スループット 100Gbps を達成する無線システム構成技術について、現実的な無線デバイスを用いた 100GHz 帯実験用伝送装置を構成し、屋外にて見通し内距離 100m でスループット 100Gbps 以上を達成し、見通し外の無線通信において、反射板を用いた屋内伝送実験により見通し内と同等の無線伝送特性を得られることを確認した。また、後述する CMOS によるアンテナ一体型フロントエンド部を用いた無線伝送実験にて、ビーム切り替えを瞬時に実施できることを示した。さらに化合物半導体による 100GHz 帯移相器チップ、2x2 アンテナ、低損失モジュールによるフロンエンド部を用いた無線伝送実験にて、屋外見通し内にて伝送距離 100m にて±1 度のビーム制御を実現した。300GHz 帯にて実験用伝送装置を用いて、屋内にて反射板を用い

て総距離 100m でスループット 100Gbps を達成した。CMOS を用いたビームフォーミング IC とアレイアンテナを一体化した 100 素子以上の APAA モジュール試作を行い、EIRP 50dBm、ビームステアリング角±45 度の特性を実現した。100GHz 帯にて単体 GaN 系 HEMT にて出力電力 27.8dBm、効率 30.5%を達成し、それを用いた電力増幅器にて出力電力 40dBm、効率 20.4%を達成した。300GHz 帯にて単体 InP 系 HEMT を用いた電力増幅器にて出力 20dBm、効率 9.3%を達成した。これら技術の確立により、100GHz 超帯にて移動通信システムの利用に向けた可能性を明らかにしたことにより、周波数利用の一層の向上につながることに寄与しており、目標を達成することができた。

本研究開発の成果は、100GHz 超帯での移動通信システムの実現に向けた初期の成果であり、100GHz 超帯の移動通信システムへの利用可能性を示した成果である。この成果は、今後、100GHz 超帯での移動通信システムの国際標準化での貢献、通信機器で使用される高性能半導体技術・回路技術などの戦略的な技術の囲い込み、それら製品の海外市場の確保などのアウトカムにつながることで、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。

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>

前述したように、本研究開発の目標は達成された。研究開発成果は、100GHz 超帯における移動通信システムの利用に向けた初期の成果であり、諸外国に比肩として遜色ない水準の成果である。研究開発成果が、移動通信システムの実用化に貢献できるように、本研究開発のそれぞれの技術を深化させるために継続した取り組みが必要である。本研究開発でのそれぞれの技術が、社会で活用されていくように取り組みを進めていく。発展させた内容の特許出願、論文等による情報発信、国際標準化活動を進めていく。

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 6 年 6 月 21 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。

- ・いい成果がでている。100GHz 超帯はこれから非常に注目されると思うので、実用化に向けて進めてもらいたい。
- ・低消費電力化は、カーボンニュートラルを目指す上で重要であり、実現にはデバイスの性能が大きいため、標準化にも取り組んでいただきたい。

7 評価に使用した資料等

- 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://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20200717/siryoul.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>
- 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
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 <電波利用料>
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>
- 基本計画書 100GHz 以上の高周波数帯通信デバイスに関する研究開発
https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/210126_keikakusho_RD.pdf

令和6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

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6年8月

1 政策（研究開発名称）

HAPS¹を利用した無線通信システムに係る周波数有効利用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2年度～令和5年度（4か年）

・実施主体

民間企業、国立研究開発法人

・総事業費

2,063 百万円

| 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 総額 |
|---------|---------|---------|---------|-----------|
| 541 百万円 | 536 百万円 | 493 百万円 | 493 百万円 | 2,063 百万円 |

当初計画段階では携帯電話のバックホールを想定した HAPS と地上間の固定通信システムの研究開発を予定していたが、より実用化に近づけるために HAPS と移動通信端末間の移動通信システムに必要な研究課題を加え、3年計画から4年計画とすることで10億円を超えたため、事後事業評価を実施することとした。

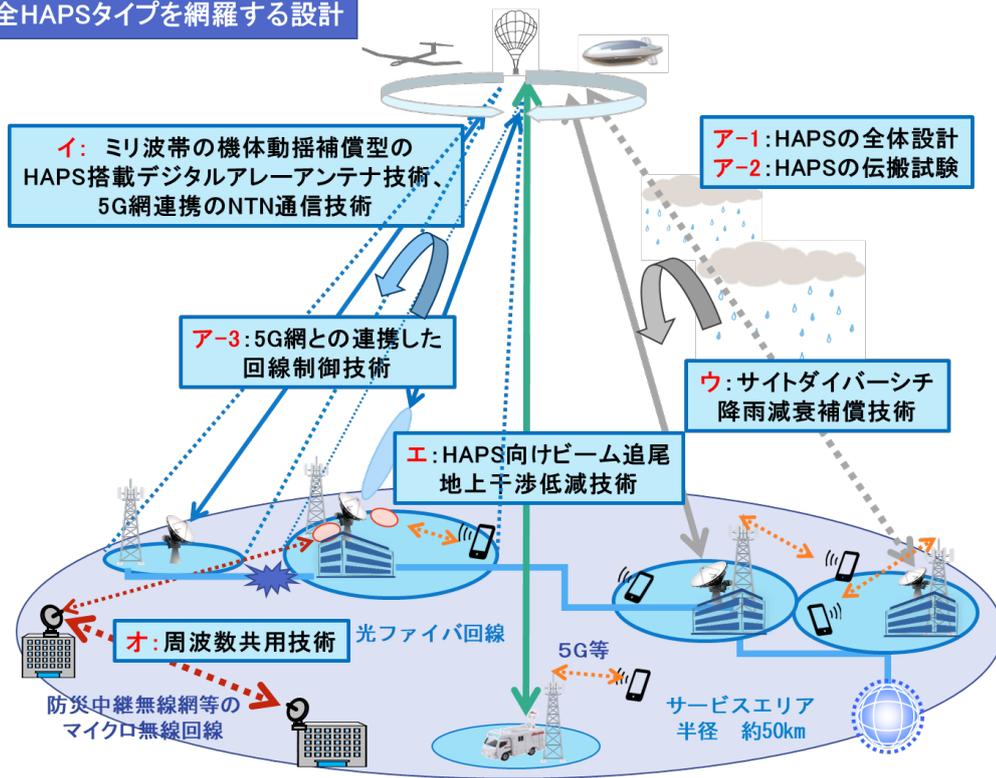
・概要

上空約20kmの高高度に滞留させた無人航空機に設置する無線システムと地上との間で、災害に強く、地方への高度情報インフラ整備が地上系と連携して柔軟に実現できる通信サービスを提供するために必要となる無線通信技術の開発、電波伝搬特性の把握、周波数有効利用技術の開発を行う。

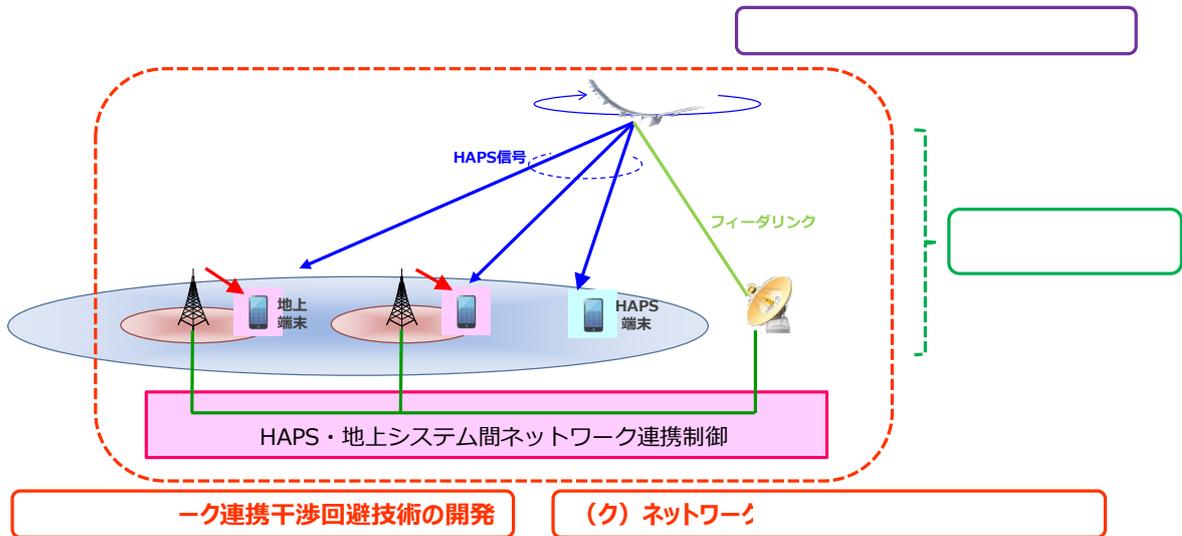
¹ High Altitude Platform Station（高高度プラットフォーム）の略。高高度（高度20km程度の成層圏）の飛行機等に携帯電話基地局等の機能を搭載して広範囲の通信エリアを構築。

【固定通信システム】

全HAPSタイプを網羅する設計



【移動通信システム】



| 技術の種類 | 技術の概要 |
|---|---|
| (課題ア) 5G網等と連携したHAPSシステムの全体設計/評価及び回線制御技術 | HAPS を利用したブロードバンド通信のための帯域確保が期待されるミリ波帯(38GHz 帯)の利用を想定し、5G 網の全国整備要求や、災害時や障害時における地上系通信システムへの強化要求に対して、主に国内で商用利用されている Ku 帯静止衛星通信と比べて、高速、大容量、低遅延な回線を提供できる無線システムを開発する。また、地上 5G 基地局と HAPS ネットワーク間でシームレスにハンドオーバーを行うための回線制御技術を開発する。 |
| (課題イ) HAPS 搭載の動揺 | HAPS の姿勢動揺を補償する機能を持ち、HAPS カバレッジの直下とエッジの通信品質の差を低減するためのアンテナ設計を行うとともに、携帯電話網の要求に連携して、アンテ |

| | |
|-------------------------|---|
| 補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術 | ナの指向方向をビームごとに独立に変更できる多地点スポットビームアンテナを実現する。 |
| (課題ウ) ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術 | HAPS 局と地上局の取りうる位置関係を想定した条件において、降雨減衰推定に必要な基礎データを国内できめ細かく測定し、ITU-R の降雨減衰量推定モデルに準じて分析することによって、38GHz 帯における精度の高い国内用の降雨減衰推定モデルを構築し、本モデルを用いて、38GHz 帯の降雨減衰補償方策として、降雨断が予測される基地局から降雨断の影響を受けない隣接基地局へ HAPS のスポットビームの指向方向を切り替え、プロアクティブに地上局の経路を切り替えるサイトダイバーシチ技術を開発する。 |
| (課題エ) HAPS 向け地上局用アンテナ技術 | HAPS 向け地上局用アンテナ技術として、自律的に位置変動する HAPS 方向を常に捕捉追尾する技術とともに、同一周波数帯を用いる他の固定無線局との間の干渉状況を把握し、指向性パターン等の送信特性を活用した干渉軽減技術を開発する。また、携帯電話網との同一周波数共用を実現するため、携帯電話網と連携した通信制御技術を開発する。 |
| (課題オ) 周波数共用技術 | WRC-19 会合にて HAPS 固定系に特定された 38GHz 帯 (38.0 - 39.5GHz) の既存システム (計画中を含む) との周波数共用検討の結果及び HAPS 関連の WRC-23 会合の結果を踏まえ、HAPS 事業化に資する固定系に加え移動系や C2 (Command and Control: 制御操縦用) リンク系も合わせ、制度整備及び非地上系ネットワーク (NTN) の国際標準化推進に資する検討を行う。 |
| (課題カ) 高精度時間同期技術 | HAPS システムと地上システムからの信号送信のタイミングを適切に制御するためには、HAPS 中継局と地上の基地局にて高精度な時間同期を行うことが課題である。HAPS の高度 20km での飛行に応じて変化する HAPS 中継局と地上基地局間の伝搬距離差を考慮した動的な高精度時間同期技術を開発する。開発にあたっては、様々な機体タイプの HAPS の運航特性を考慮する。 |
| (課題キ) ネットワーク連携干渉回避技術 | HAPS システムと地上システム間で同一エリアにおいて同一周波数を共用する場合、システム間で相互に干渉が発生するため、大きく通信品質が低下することが課題である。相互に干渉とならないように無線リソースの割当制御を行うネットワーク連携干渉回避技術を開発する。 |
| (課題ク) ネットワーク連携干渉キャンセル技術 | HAPS から地上システムへの干渉が非常に大きい場合においては干渉回避技術が必要である一方、干渉レベルが同等程度以下である場合においては、HAPS からの干渉を低減するように HAPS 中継局と地上基地局が連携して信号送信制御を行う干渉キャンセル技術が求められる。干渉状況やトラフィック状況に応じて、干渉回避技術と干渉キャンセル技術を適応的に切替制御する技術を実現する必要がある。 |

・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 |
|--|------------------------|----------------------------|--|------------|
| 5G 網等と連携した HAPS システムの全体設計 / 評価及び回線制御技術 | システムの全体設計 回線制御モデル検討 | 全体設計修正 回線制御アルゴリズム 開発 | 性能評価・実証 試験準備 回線制御ソフトウェア 開発・試験 | 統合実証 試験 |
| HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯の多地点スポットビームアンテナの開発 | 設計・開発 | 機器開発 | 単体地上試験 | |
| ミリ波帯の降雨減衰補 | 伝搬特性分析 | 降雨減衰補償技 | 地上試験 | HAPS へアン |

| | | | | |
|-----------------------|------------|---------------|-----------------|----------------------|
| 償技術の開発 | | 術開発 | | テナ機装 アンテナ単 体試験 |
| HAPS 向け地上用アンテナの開発 | 設計・開発 | 通信技術開発 | 地上試験 試験基地局整備 | |
| 周波数共用技術の検討 | 既存系と共用検討 | 国際標準化向け活動 | WRC-23 向け活動 | WRC-23 対応 |
| 時間同期技術、リソース割当て制御技術の開発 | 基本検討等 | 機器開発 | 装置試作・評価 | |
| 干渉信号キャンセル技術 | 干渉シミュレーション | サイトダイバーシチ技術開発 | 装置試作・評価 | |

(2) 達成目標

【固定通信システム】

HAPS に搭載するミリ波帯アンテナシステム及びそれと対向する固定通信システム用地上局を開発し、HAPS の滞留位置変動下や姿勢動揺下においても、他の地上システムからの干渉を軽減させながら無線回線を成立させるとともに、HAPS と携帯電話網と連動したダイバーシチ技術を用いて、降雨減衰の影響が大きい 38GHz 帯においても、従来の国内 Ku 帯静止衛星システムを利用した携帯電話向けバックホール回線と同等の総合回線稼働率を確保し、静止衛星システムでは 3 (bit/symbol) 前後であった周波数利用効率を 1.1 倍以上（スループットを 1.1 倍以上）の 3 (bit/symbol) 後半から 4 (bit/symbol) 台に改善させることを目標とする。

【移動通信システム】

上空の HAPS システムと地上システムの高精度時間同期技術、HAPS システムと地上システムがネットワーク連携した干渉回避技術及び干渉キャンセル技術を確立し、連携しない場合に比べて周波数利用効率を 1.2 倍以上（スループットを 1.2 倍以上）に改善することを目標とする。

○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） |
|------------------------|---|
| 成長戦略フォローアップ(令和元年6月21日) | <p>I. Society5.0 の実現</p> <p>1. デジタル市場のルール整備</p> <p>(1) KPI の主な進捗状況</p> <p>ii) データ流通の促進</p> <p>② 流通・活用環境の整備</p> <p>イ) ネットワークの更なる強化と高度化の推進</p> <p>・今後の電波利用ニーズの拡大への対応として、Beyond 5G の要素技術やその円滑かつ迅速な導入に必要な実世界の電波伝搬を模倣的に再現する試験環境、HAPS (High-Altitude Platform Station) を用いた通信システム等に関する研究開発を推進するとともに、既存シ</p> |

| | |
|---|---|
| | システムとのダイナミックな周波数共有を可能とするシステムの構築を来年度末までに行う。 |
| デジタル田園都市国家インフラ整備計画（改訂版）（令和5年4月25日） | 第2章 整備方針・具体的施策等 2-4 非地上系ネットワーク（NTN） （3）具体的施策 ① HAPS ・WRC-23（世界無線通信会議）において、HAPSで利用可能な周波数の拡大や、国際調整の仕組み作りなどの国際ルール策定で我が国が主導すべく取り組んでいくとともに、HAPSに必要な無線システムの技術実証等を進め、その実用化に向けた国内制度の整備に着実に取り組む。 |
| 国土強靱化年次計画2023（令和5年6月21日） | （別紙1）分野別施策一覧 6. 情報通信 非地上系ネットワーク（NTN）の整備等 ・WRC-23（世界無線通信会議）において、HAPSで利用可能な周波数の拡大等に取り組む。 HAPSの社会実装に向けた関係府省庁の連携体制を構築し、関連する施策や必要な制度整備、支援策などについて検討を加速化する。 |
| 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画2024年改訂版（令和6年6月21日） | V. 投資の推進 2. DX （3）ポスト5G、6Gの実現 衛星通信や、HAPS（高高度プラットフォーム）を活用した成層圏からの通信により、災害時や従来のネットワークが届かない空、海、離島、山間部等も含めて広範囲の通信を継続可能とする非地上系ネットワーク（NTN）の早期実装を図るため、研究開発の加速と技術基準の整備を行う。 |

（3）目標の達成状況

- 固定通信システムの研究課題に関しては、38GHz帯（38-39.5GHz）の無線通信システムの技術開発を行い、開発目標（Ku帯静止衛星システムと同等の回線稼働率（99.9%）を維持しつつ、3bit/symbol前後であったスループットを1.1倍以上の3の後半から4bit/symbol台に改善）に対して、HAPSダウンリンクで5bit/symbol台となり、目標を達成した。また、固定通信システムの各技術課題について、開発成果の有効性を解析、単体試験、統合実証試験を通して実用化に資する検証ができた。
- 移動通信システムの研究課題に関しては、達成目標としてHAPS-地上システム構成において、提案する高精度時間同期技術及びネットワーク連携干渉制御技術により、同期精度誤差を±1マイクロ秒以下に抑え、干渉制御技術を適用しない場合に対して「1.2倍以上」の周波数利用効率の向上を目指す。達成状況としては、試作装置開発により提案技術の実時間での動作検証を行うとともに、システムシミュレーションにより周波数利用効率の評価を行い、目標とした同期精度誤差、および、周波数利用効率の向上を十分に達成できることを確認した。

| 技術の種類 | 目標の達成状況 |
|--|---|
| （課題ア）5G網等と連携したHAPSシステムの全体設計／評価及び回線制御技術 | <ul style="list-style-type: none"> HAPS搭載システムを用いた国内統合実証試験により、開発目標であるKu帯静止衛星システムと同等の回線稼働率（99.9%）を維持しつつ、3（bit/symbol）前後であったスループットを1.1倍以上の3（bit/symbol）の後半から4（bit/symbol）台に改善できることを確認した。 38GHz帯電波伝搬測定を2回実施し、統合実証試験および将来のHAPS実用化に向けた課題洗い出しを完了した。 地上5G基地局とHAPSネットワーク間でハンドオーバーができることを統合実証試験で確認した。 将来の高度化に向けて、HAPSシミュレータによる干渉回避技術評価を実施し、3GPP Release 18において、5G NRが長距離通信をサポートするために必要な技術提案をする等 |

| | |
|---|--|
| | NTN 標準化にも貢献した。 |
| (課題イ) HAPS 搭載の動揺補償型ミリ波帯多地点スポットビームアンテナ技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・38GHz 帯マルチビームフルデジタルアレイアンテナと、5G NTN スタンドアローン機体搭載型基地局の構成で、機体の移動や揺れに適応し、任意の地上局間のリンクを瞬時に切り替えることで悪天候や被災時でもレジリエンスなシステムを目標に開発を進めた。 ・開発した C2 リンク用モジュール、ミリ波用モジュール、基地局を航空機に機装の上、航空機を用いた飛行試験を実施し、HAPS 搭載局が複数地上局間のリレー通信を安定的に行い、HAPS 経由のバックホール回線を提供可能であることを確認することができた。 |
| (課題ウ) ミリ波帯の電波伝搬損失の補償技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・ミリ波帯の降雨減衰長期測定を実施し、電波伝搬路上の降雨を考慮した HAPS 回線の降雨減衰モデル (ITU-R 勧告 P. 618-13) を利用して構築し、HAPS サービスエリア内の降雨の相関が大きい 2 局間においてもサイトダイバーシティの効果を得るよう降雨予測に基づくプロアクティブ・サイトダイバーシティを開発し、サイトダイバーシチアルゴリズムを実装した回線制御装置を用い 5G 網と連携した回線制御技術として実証した。 |
| (課題エ) HAPS 向け地上局用アンテナ技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・38GHz 帯レンズアンテナとアレーフィードを組合せて HAPS が 5GHz 帯で送信する位置情報を元に HAPS 方向を捕捉追尾する地上局アンテナの開発を完了し、航空機により実証し、追尾精度 0.4 度以内 (60cm φ アンテナの主ビーム半値幅の 1/2) の達成を確認した。 ・5G 網とのハンドオーバー及びサイトダイバーシティと組み合わせた屋内・屋外地上結合試験を行い、End-to-End の 5G-NR による導通試験評価を完了した。 |
| (課題オ) 周波数共用技術 | <ul style="list-style-type: none"> ・HAPS と地上 5G は、地上局の周りに電波シールド等干渉軽減策を施すことにより、概ね、周波数共用が可能であることを確認した。 ・地上 5G と HAPS 間の干渉、回線品質を評価するシミュレーションを開発した。 ・制度化、技術的条件に資する検討課題検討スケジュールの整理を実施した。 ・スマホへ直接通信を可能とするシステムについて、WRC-23 会合にて、実用化に資する議題 1.4 における HIBS サービスリンク帯域拡大と PFD 制限値の議論に際しては、日本案の策定の推進に寄与し、結果として我が国を含めた多数の国において、HIBS としての利用が可能となる決定が行われた。 ・HAPS Alliance 等の業界の協力を得つつ、APG/AWG 会合に、HIBS 標準化推進する日本提案を共同提案するとともに地域会合 (アラブ、アフリカ) で、日本提案の支持拡大を求める活動に参加した。 ・HAPS Alliance の Telecom-WG では HAPS ユースケースの白書作成活動に参加し、主に HAPS を含めた NTN 利用の作成を担当した。 |
| (課題カ) 高精度時間同期技術 | <p>(無線インターフェーススペースの高精度時間同期技術について検討(目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・計算機シミュレーションソフトウェアを開発した。 ・検討したアルゴリズムについてシミュレーション評価を実施するとともに、同期精度を改善するための連続判定等の手法を開発した。 <p>(試作装置への実装および同期精度の確認(目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・検討したアルゴリズムについて、試作装置への実装を完了し、動的なタイミング追従による高精度同期が機能することを確認した。 ・室内試験によって、SNR0dB 以下の環境においても 1 マイクロ以下の同期精度を達成できることを確認した。 |
| (課題キ) ネットワーク連携干渉回避技術 | <p>(ネットワーク連携干渉回避制御(目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・無線リソース割当制御のアルゴリズムについて検討し、計算機シミュレーションソフトウェアを開発した。 ・シミュレーション評価を実施し、干渉回避による改善効果を確認した。 <p>(試作装置への実装(目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・試作装置へネットワーク連携干渉回避機能を実装した。 ・室内試験によって、課題カの高精度時間同期機能を実装した状態での、スループット改善効果を確認した。 |
| (課題ク) ネットワーク連携干渉キャンセル技術 | <p>(地上側干渉抑圧技術の開発 (目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・信号処理アルゴリズムを確立し、実機評価により所望の改善効果を確認した。 <p>(HAPS 側干渉抑圧技術の開発 (目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ヌルフォーミング及びこれを拡張したヌルスweepingを新たに提案し、計算機シミュレーションにより通信容量の大幅な改善効果を確認した。 |
| 移動通信システム共通課題 | <p>(HAPS 対応電波伝搬推定技術の開発 (目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・HAPS 対応電波伝搬損失推定技術を開発した。 ・HAPS 対応時空間電波伝搬推定技術を開発した。 <p>(開発した推定技術の国際標準化活動 (目標達成))</p> <ul style="list-style-type: none"> ・干渉検討用 HAPS 対応電波伝搬推定技術の国際標準化を達成した。 |

| | |
|--|---|
| | <ul style="list-style-type: none"> ・国際標準化した干渉検出用伝搬推定技術が WRC-23 における HAPS 新周波数追加に貢献した。(当初計画を超える成果) ・システムデザイン用 HAPS 対応電波伝搬推定技術及び時空間電波伝搬推定技術の一部について、先駆けて国際標準化を達成した。 ・室内実験評価 (目標達成) <ul style="list-style-type: none"> ・各要素機能の試作装置への実装を完了し、所望の改善効果が得られることを確認した。 ・統合システムを完成させ室内総合試験を完了した。 ・総合評価 (目標達成) <ul style="list-style-type: none"> ・干渉キャンセラ及び干渉回避技術の連携システムの評価を実施し、当初目標である周波数利用効率 1.2 倍を達成した。 |
|--|---|

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和6年6月21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。

さらに、固定通信システムでは開発目標 (Ku 帯静止衛星システムと同等の回線稼働率 (99.9%) を維持しつつ、3 bit/symbol 前後であったスループットを 1.1 倍以上の3の後半から 4 bit/symbol 台に改善) に対して、HAPS ダウンリンクで 5 bit/symbol 台となり、移動通信システムでは目標 (同期精度誤差を ±1 マイクロ秒以下に抑え、干渉制御技術を適用しない場合に対して「1.2 倍以上」の周波数利用効率の向上) について試作装置開発により提案技術の実時間での動作検証を行うとともに、システムシミュレーションにより確認し、効果を把握した。

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、特許も 6 件取得するなど HAPS に必要な技術を確実に確立しており、また、多数の国際標準提案を行い、5 件の国際標準を獲得するなど、国際標準化にも貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

| 主な指標 | 令和2年度 | 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 合計 |
|-------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| 査読付き誌上発表論文数 | 0件 (0件) | 8件 (3件) | 5件 (4件) | 4件 (1件) | 17件 (8件) |
| 査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む) | 8件 (8件) | 9件 (9件) | 7件 (7件) | 5件 (4件) | 29件 (28件) |
| その他の誌上発表数 | 0件 (0件) | 10件 (4件) | 2件 (1件) | 3件 (1件) | 15件 (6件) |
| 口頭発表数 | 26件 (0件) | 54件 (8件) | 39件 (4件) | 25件 (1件) | 144件 (13件) |
| 特許出願数 | 4件 (0件) | 13件 (6件) | 7件 (4件) | 9件 (9件) | 33件 (19件) |
| 特許取得数 | 0件 (0件) | 0件 (0件) | 2件 (0件) | 4件 (1件) | 6件 (1件) |
| 国際標準提案数 | 6件 (6件) | 37件 (37件) | 24件 (24件) | 36件 (36件) | 103件 (103件) |

| | | | | | |
|---------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| 国際標準獲得数 | 0件 (0件) | 3件 (3件) | 0件 (0件) | 2件 (2件) | 5件 (5件) |
| 受賞数 | 0件 (0件) | 3件 (1件) | 4件 (0件) | 1件 (0件) | 8件 (1件) |
| 報道発表数 | 2件 (1件) | 2件 (0件) | 6件 (1件) | 1件 (0件) | 11件 (2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 | <p>HAPSの事業化に向け、近年、小型～中型の無人機の技術が急速に発展・普及し、また、携帯電話やIoTの技術が大幅に進展してきており、ITUや国際民間航空機関(ICA0)においても勧告・規格化を目指した検討が始まるなど、HAPS実現に向けた国際的な動きが加速し、環境整備と技術開発が進み、その普及拡大が見込まれている。</p> <p>HAPSを利用した固定通信システムとしては、5G等の次世代モバイル通信システムの普及に伴う基地局へのバックホール回線の冗長化要求が増すことや既存携帯電話システムの更なるトラヒックひっ迫が想定されるとともに、昨今の風水害の激甚化に伴い、地上の通信インフラ網の強靱化が喫緊の課題となっている中、土砂崩れや河川の氾濫等により地上のインフラ網が寸断し通信が途絶した場合においても、上空経路にて冗長経路が確保できる高速ブロードバンド通信を用いて広範囲の災害現場の映像や要支援物資等の情報などを災害時の拠点となる国や地方公共団体に速やかに提供できるHAPSは、広域災害時の備えとして有効な手段であり、早急な実現への期待が高まっている。</p> <p>また、HAPSを利用した移動通信システムとしては、超広域カバーエリア、災害に強いネットワーク及び上空を含む三次元空間エリアへの通信サービスの提供を実現するプラットフォームとしての利用が期待されている。特に、2.7GHz以下の携帯電話向け地上移動通信システムと同一の周波数帯を利用する上での共用技術を確立することで、既存の端末をそのまま使用可能なシステムを構築し、地上のセル境界におけるスループット向上や災害時の通信手段確保といった、現在の移動通信システムが抱える課題を解決することが求められている。</p> <p>このため、本研究開発でHAPSを利用した無線通信システムの研究開発を実施することで、上空経路で冗長経路を確保できるブロードバンド通信等を実現するとともに、地上移動通信システムとの干渉による影響を抑え周波数共用を可能とする技術を確立し、固定通信システム及び移動通信システムそれぞれにおける周波数の効率的な利用を実現するとともに、災害時の通信確保手段の一つとしてHAPSが活用されることに寄与することができた。</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>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</p> |

| | |
|-----|--|
| | <p>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、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進められた。</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>本研究開発は、NTNの構成要素であるHAPSと地上5G系とのネットワーク統合を可能とする基礎技術の開発であり、2025年度頃に想定されるHAPS事業化の推進を支援するものであり、この開発によってBeyond 5GのHAPS高度化やNTNへの応用が加速されるため、それら無線ネットワークの信頼性向上や携帯電話網との連携や統合促進に対する波及効果は高く、またNTNによる垂直方向への無線ネットワークの展開により、航空機やドローン、あるいは空飛ぶ自動車向けといった様々な移動体アプリケーションへの高信頼な通信ニーズへの発展・応用も期待できる。</p> <p>また、本研究開発は、移動体アプリケーションの多層化に資すると共に、本研究課題成果であるシステムアーキテクチャ、通信方式、国際標準仕様等は、NTNがターゲットとするHAPSに加えて衛星通信にも適応可能な要素である。</p> <p>これら複数のインフラサービスによる多層化されたNTNサービスによって、地球上のあらゆる場所でより使い勝手の良い価格帯でのサービスが広がり、さらには災害への強靱性も高まるという特徴を活かした新たな産業が形成されていくと思われる。本研究開発の成果により、このような拡大するグローバル航空宇宙通信産業のエコシステムの中で、我が国がポジションを確立していくための要素の一部として機能することが期待できる。</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>本研究開発によって実用化に寄与するHAPSは、離島、海上、山間部等の効率的なカバーや自然災害をはじめとする非常時等に備えた海底ケーブル等を含む地上系ネットワークの冗長性の確保に有用であることから広く国民の利益になるものである。</p> <p>また、HAPSの実用化において、本研究開発によって開発した技術により周波数を有効利用することは、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あたっては、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>情報通信インフラが我が国の国民生活・経済活動の基盤となっている中で、ネットワークの信頼性の向上や通信カバレッジの拡張への期待が高まっている。また、グローバル企業による技術、市場の寡占が進む一方で、国民生活・経済活動のみならず、安全保障の面からも情報通信インフラの重要性が高まりつつある。さらに、人口減少や少子高齢化が急速に進むことに伴い、地方におけるデジタル活用の促進や情報通信インフラの維持が課題となっており、また、情報通信設備の高度化・複雑化とも相まって、保守・運用体制の整備や人材育成も必要になっている。次世代インフラBeyond 5G (6G) については、国際的な開発競争の更なる激化等が進んでおり、早期社会実装に当たりグローバル市場での競争力発揮が課題であり、我が国の政策の進展を踏まえた戦略的取組の必要性が高まっている。</p> <p>HAPSを含む非地上系ネットワーク (NTN) は、離島、海上、山間部等の効率的なカバーや自然災害をはじめとする非常時等に備えた海底ケーブル等を含む地上系ネットワークの冗長性の確保に有用である。</p> <p>よって、HAPSの早期実現に資する本研究開発には、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）

HAPSは、広域災害時の備えとして有効な手段であり、早急な実現への期待が高まっている中、本研究開発により、固定通信システム及び移動通信システムそれぞれにおける周波数の効率的な利用を实

現するとともに、災害時の通信確保手段の一つとして HAPS 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、NTN の構成要素である HAPS と地上 5G 系とのネットワーク統合を可能とする基礎技術を開発したことは、2025 年度頃に想定される HAPS 事業化の推進に大きく寄与するものである。

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>

HAPS の実用化にあたっては、本研究開発で開発した技術による周波数の有効利用が期待され、今後は、HAPS の早期国内導入に向け、必要な技術基準の策定等を進めていく。

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 6 年 6 月 21 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。

- ・ HAPS 通信の研究開発は随分長くやってきており、実用化も重要だと認識している。
- ・ 実用化段階での評価は、実用化に則した実証方法もあるだろう。

7 評価に使用した資料等

- 成長戦略フォローアップ（令和元年 6 月 21 日）
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/fu2019.pdf>
- デジタル田園都市国家インフラ整備計画（改訂版）（令和 5 年 4 月 25 日総務省）
https://www.soumu.go.jp/main_content/000877891.pdf
- 国土強靱化年次計画 2023（令和 5 年 7 月 28 日国土強靱化推進本部決定）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyoujinka/pdf/kakuteihonbun_r057028.pdf
- 新しい資本主義のグランドデザイン及び実行計画 2024 年改訂版（令和 6 年 6 月 21 日）
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/atarashii_sihonsyugi/pdf/ap2024.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>

令和6年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局通信規格課

評価年月：令和6年8月

1 政策（研究開発名称）

リアルタイムアプリケーションを支える動的制御型周波数共用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5年度（3か年）

・実施主体

国立研究開発法人情報通信研究機構
株式会社国際電気通信基礎技術研究所
株式会社構造計画研究所
公立大学法人大阪 大阪公立大学

・総事業費

1,163百万円

| 令和3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 総額 |
|--------|--------|--------|----------|
| 401百万円 | 383百万円 | 378百万円 | 1,163百万円 |

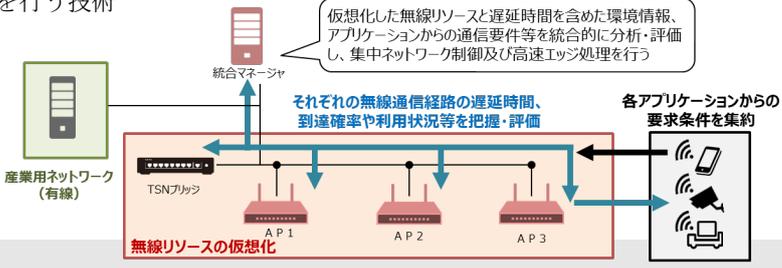
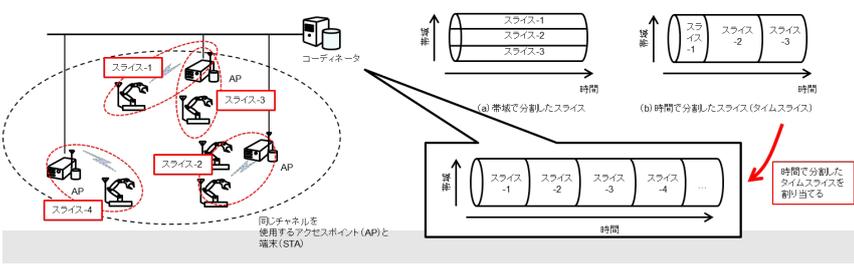
予算要求段階では総額10億円超となるか未定だったため、事前事業評価は未実施。

・概要

本研究開発では、通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する環境下においても、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して到達保証時間内の無線通信を実現しながら、周波数利用効率を向上させ、同時収容可能なアプリケーションの種類を増やすための技術等を確立することで、既存の周波数を用いた低遅延・高信頼な無線通信を実現しつつ、周波数の共用及び利用効率を向上し、電波の有効利用を実現するための技術の研究開発を行う。

本研究開発では、製造現場のように通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する場合において、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して低遅延・高信頼な通信を可能とするため、Wi-Fi、Bluetooth、特定小電力無線、5G等の様々な無線通信と有線通信が融合したヘテロジニアスなネットワーク環境において、ネットワーク内に分散された無線リソースを仮想的に1つのリソースとみなし特定のアプリケーションに対して優先度に応じた割り込み処理や時限的な専用帯域を予約・確保することにより通信の到達保証を行う技術、ネットワークの状態を考慮しつつアプリケーションの要求に応じて動的に最適制御を行うネットワークスライシング技術の確立に向け、以下の区分により研究開発を実施する。

- ア 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術
- イ オンデマンドネットワークスライシング技術

| 技術の種類 | 技術の概要 |
|-------------------------|--|
| 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術 | <p>ネットワーク内に分散された無線リソースを仮想的に1つのリソースとみなし特定のアプリケーションに対して時域的な専用帯域を予約・確保することにより通信の到達保証を行う技術</p>  <p>図：無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術概要</p> |
| オンデマンドネットワークスライシング技術 | <p>ネットワークの状態を考慮し、アプリケーションの要求に応じて最適制御を行うネットワークスライシング技術</p>  <p>図：オンデマンドネットワークスライシング技術</p> |

・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3年度 | 令和4年度 | 令和5年度 | 令和6年度 |
|----------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------|
| 無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術 | 技術開発 | 技術開発 | 統合 実証実験 | 本技術をネットワーク機器ベンダ等に展開 |
| オンデマンドネットワークスライシング技術 | 技術開発 | 技術開発 | | 本技術をシステムインテグレータ等に展開 |
| 国際標準化 IEEE802.1Q 内の TSN-TG | ▲D0.0 発行 ▲D0.1 発行 | ▲D0.2 発行(TG) | ▲D0.4 発行(TG) ▲D1.0 発行(WG) | ▲D2.0 発行(SA) ▲出版 承認 |
| IEC SC65C/WG17 IEC62657 シリーズ | ▲IEC 国内委員会 提案 | ▲コン ピナー 提案 ▲WG 提案 | ▲CD 発行 ▲コメン ト対応 ▲CDV 発行 | ▲FDIS 提案 |

※ TG: Time-Sensitive Networking Task Group、WG: 802.1 Working Group、SA: IEEE Standard Association、CD: Committee Draft (委員会原案)、CDV: Committee Draft for Vote (投票用委員会原案)、FDIS: Final Draft International Standard (最終国際規格案)

(2) 達成目標

通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する環境下においても、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して確実な通信を行うための技術として、ローカルエリアネットワークにおける無線リソースの仮想化・動的管理技術及び遅延保証技術、オンデマンドネットワークスライシング技術を確立する。これらの取組により、製造現場における制御システム等の優先度の高いアプリケーションの動作に必要な一塊のデータブロックを規定時間内に配送する遅延保証(パケット多重化した通信に対して 10~100msec 以内)を可能としつつ、スライシングによるネットワーク全体の最適制御を行い、周波数利用効率及び同時利用可能なアプリケーション数を 2 倍以上とすることを目指す。

○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」

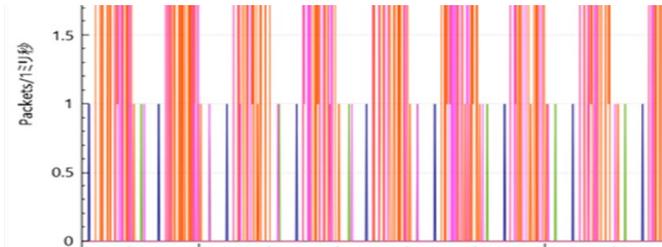
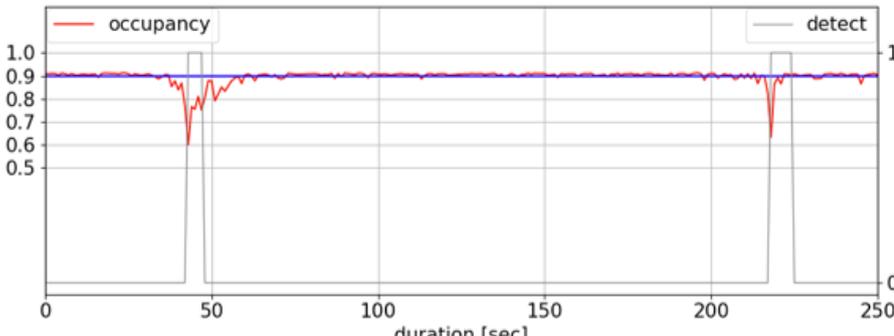
○政府の基本方針 (閣議決定等)、上位計画・全体計画等

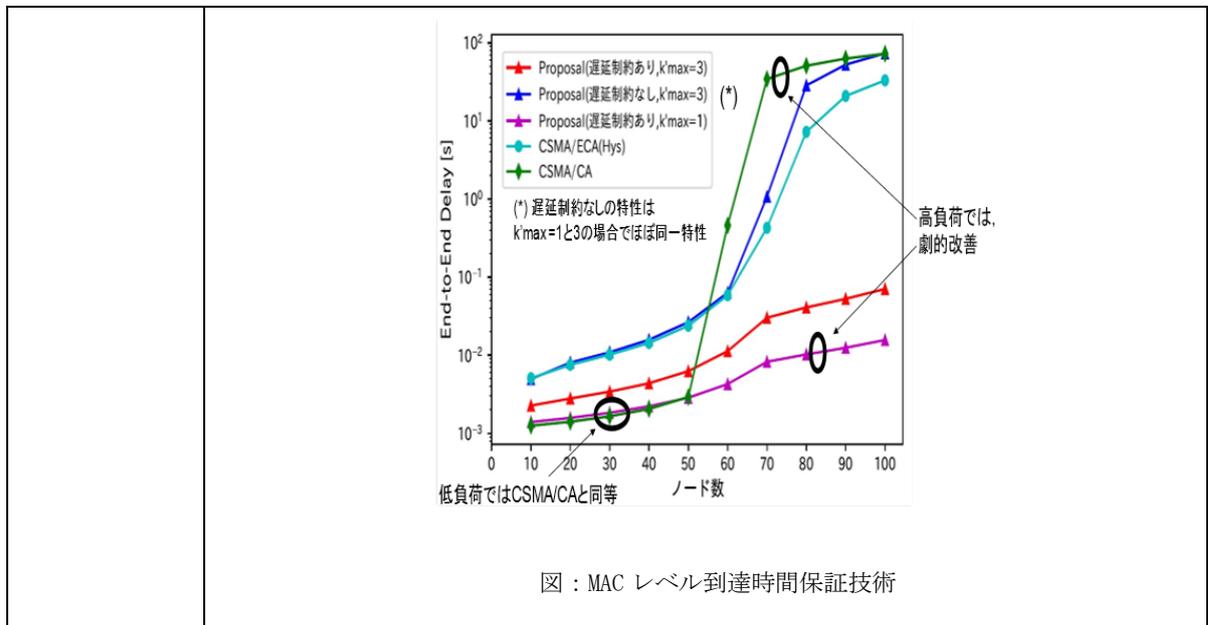
| 名称 (年月日) | 記載内容 (抜粋) |
|--|---|
| 「統合イノベーション戦略 2020」(令和 2 年 7 月 17 日閣議決定) | II. 3. 3 レジリエントで持続可能な社会・経済構造の構築」において 5G 等の情報通信技術の製造現場での本格活用のための技術開発や先行事例の創出に向けて取り組む」旨が記載されている。 |
| 「成長戦略フォローアップ」(令和 2 年 7 月 17 日閣議決定) | 「4. (2)v 次世代産業システム 1 サプライチェーンにおけるデータ連携・活用の促進」において、「5G 等の情報通信技術の製造現場での本格活用のための技術開発や先行事例の創出に向けて取り組む」旨記載されている。 |
| 「新たな情報通信技術戦略の在り方」第 4 次中間答申(令和 2 年 8 月 5 日) | 「4. 2. 1. 2(3) 2 製造分野」において、「制御系のワイヤレス化への期待から更なる低遅延や遅延保証等への要求を満たすための標準化作業が見込まれ、この動きを活用する視点が重要」の旨が記載されている。 |

(3) 目標の達成状況

研究課題ア「無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術」に係る取り組みにより、周波数利用効率の改善目標(AGV、締め付け工具、高解像度映像伝送の 3 つのアプリケーションが混在、混雑時)において、2 倍以上の周波数利用効率を実現した。

NICT が研究開発を進めている Smart Resource Flow (SRF)無線プラットフォームに関しては、標準化を推進している Flexible Factory Partner Alliance(FFPA)により認証プログラムが開始され、認証された製品が 15 製品となった。また、SRF 無線プラットフォームを IEC 標準仕様に載せるべく、IEC SC65C/WG17 (Industrial networks / Wireless coexistence)において提案活動しているが、ドラフトの執筆と WG17 国際会合での提案を行い、5 月に Final Draft International Standard (最終国際規格案)を提案、2025 年度に発行見込みとなった。また、IEEE 802.1Q 内の Time-Sensitive Networking (TSN) Task Group (TG)に散発的・バースト的に発生する製造アプリケーションのトラフィックに対し、通信遅延を保証するために必要なシェーパの制御パラメータ設定について P802.1Qdq として提案中であり、タスクグループバロットが終了し、現在ワーキンググループバロット中であり、こちらも 2025 年度に発行見込みとなった。

| 技術の種類 | 目標の達成状況 | | | | | | | | |
|--------------------------------|---|------|--------|-------------|-------|-------------|-------|-------------|--------|
| 有無線統合型ネットワークにおけるグローバルリソース仮想化技術 | <p>有無線統合型ネットワークにおけるグローバルリソース仮想化技術では、同一周波数帯域で制御用(遅延 10-20ms)と映像用(遅延 100ms)通信を時分割で共存させることで、目標 1.4 倍のところ 1.5 倍を達成した。</p>  <p>図：有無線統合型ネットワークにおけるグローバルリソース仮想化技術</p> | | | | | | | | |
| ローカルエリア情報高速収集・分析技術 | <p>ローカルエリア情報高速収集・分析技術では、通信が不安定になる箇所を検知し、通信レートが自動的に上がるのを抑制する通信レート抑制アルゴリズムを用いる事で、目標 1.2 倍のところ、1.18 倍を達成した。</p> <table border="1" data-bbox="646 739 1228 1019"> <tr> <td>検出区間</td> <td>10.0 秒</td> </tr> <tr> <td>改善前の空帯域率(A)</td> <td>76.5%</td> </tr> <tr> <td>改善後の空帯域率(B)</td> <td>90.0%</td> </tr> <tr> <td>改善率 (B)/(A)</td> <td>1.18 倍</td> </tr> </table>  <p>図：通信レート抑制アルゴリズム</p> | 検出区間 | 10.0 秒 | 改善前の空帯域率(A) | 76.5% | 改善後の空帯域率(B) | 90.0% | 改善率 (B)/(A) | 1.18 倍 |
| 検出区間 | 10.0 秒 | | | | | | | | |
| 改善前の空帯域率(A) | 76.5% | | | | | | | | |
| 改善後の空帯域率(B) | 90.0% | | | | | | | | |
| 改善率 (B)/(A) | 1.18 倍 | | | | | | | | |
| MAC レベル到達時間保証技術 | <p>MAC レベル到達時間保証技術 (CSMA/CA 伝送環境) に関しては、CSMA/ECA をベースとした改良プロトコルにより遅延制約機能を実現し、目標 1.2 倍のところ 1.63 倍を達成した。</p> | | | | | | | | |



3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、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6年6月21日)において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。

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

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、合計 17 件の論文発表及び合計 49 件の口頭発表に加え、合計 9 件の特許出願を行った。さらに、合計 19 件の国際標準提案を行った結果、IEEE802.1 のプロジェクトの 1 つである P802.1Qdq として活動をし、令和 5 年度にドラフト 1.0 を発行、また IEC SC65C/WG17 にてドラフトの執筆と提案を行い、令和 5 年 5 月に CD(Committee Draft、委員会原案)、令和 6 年 1 月に CDV(Committee Draft for Vote、投票用委員会原案)を発行するなど、国際標準獲得に向けて多くの成果を挙げており、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 | 合計 |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 査読付き誌上発表論文数 | 0件 (0件) | 1件 (1件) | 1件 (1件) | 2件 (2件) |
| 査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む) | 0件 (0件) | 4件 (4件) | 11件 (11件) | 15件 (15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) |
| 口頭発表数 | 16件 (0件) | 18件 (0件) | 15件 (0件) | 49件 (0件) |
| 特許出願数 | 2件 (0件) | 4件 (0件) | 3件 (2件) | 9件 (2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 | 4件(4件) | 7件(7件) | 8件(8件) | 19件(19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) | 1件(0件) | 1件(1件) | 2件(1件) |
| 報道発表数 | 1件(0件) | 0件(0件) | 0件(0件) | 1件(0件) |
| 報道掲載数 | 0件(0件) | 0件(0件) | 0件(0件) | 0件(0件) |

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

注2：「査読付き誌上发表論文数」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 | <p>5G等の技術進展に伴い、次世代の無線規格として低遅延・高信頼化に向けた検討が進み、工場等ではIoT 機器が急速に導入され、これまで有線で接続されていた機器の無線化や無線通信の(ローカル)エリアネットワークとしての活用に期待が更に高まっている。他方で、製造現場のように通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する場合において、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して低遅延・高信頼な通信を実現とすることが課題であった。</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、5G等の情報通信技術の製造現場での本格活用のための技術開発や先行事例の創出に向けた取組の重要性が指摘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>本研究開発においては、実証の対象環境として想定された製造現場等での実験経験の豊富な企業、研究者等の専門知識やノウハウ、蓄積された実験データを積極的に活用することにより、各機関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。また、実施期間中も受託各機関の研究代表者・実務者の定期的な連絡会議において、各機関の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに専門家を含む研究開発運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言</p> |

| | |
|-----|---|
| | <p>を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。</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、効率的な実施が確認された。</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>本研究開発では、技術的数値目標として周波数利用効率及び同時利用可能なアプリケーション数を2倍以上とすることを目指していた。周波数利用効率については、課題アの「無線リソースの仮想化・動的管理及び遅延保証技術」として「有無線統合型ネットワークにおけるグローバルリソース仮想化技術」で1.50倍、「ローカルエリア情報高速収集・分析技術」で1.18倍、「MACレベル到達時間保証技術」で1.63倍の改善を確認し、あわせて2.89倍の改善を達成している。</p> <p>また、課題アと課題イ「オンデマンドネットワークスライシング技術」の連携により、AGV、締め付け工具、高解像度映像伝送の3つのアプリケーションが混在、混雑したケースで、2倍以上の周波数利用効率の改善を確認した。</p> <p>以上により周波数の有効利用の向上に資するものであり、目標を達成している。</p> <p>また、本研究開発は、製造等の産業無線利用者である企業等を含む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、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推進しており、研究成果の実用化等に向けた高い確実性が確認された。</p> <p>更に、特許出願や国際標準化における提案活動なども着実かつ積極的に行われた。</p> <p>以上より、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>本研究開発では、通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する環境下においても、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して到達保証時間内の無線通信を実現しながら、周波数利用効率を向上させ、同時収容可能なアプリケーションの種類を増やすための技術等を確立するものであり、既存の周波数を用いた低遅延・高信頼な無線通信を実現しつつ、周波数の共用及び利用効率を向上し、電波の有効利用を実現するものである。そのため、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、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>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>5G等の技術進展に伴い、工場自動化や建設機械の遠隔制御、医療分野での遠隔作業支援等の様々なサービスへの活用を念頭に、次世代の無線規格の低遅延・高信頼化に向けた検討が進められているが、他方で、限られた周波数資源においては、これまで通りの固定的なスケジューリング・リソース配分では多様なアプリケーションを同時に収容できず、また、データ到達時間保証・高信頼性を要求するユースケースの増加・拡大に伴う周波数需要の急激な増大も問題であり、大容量通信と低遅延及び高信頼性は、製造現場等のワイヤレス化に向けた喫緊の課題であった。</p> <p>本研究開発は、製造現場のように通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する場合において、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して低遅延・高信頼な通信を可能とするものであり、周波数ひっ迫対策にも資することから、優先的に実施していく必要があったと認められる。</p> |

5 政策評価の結果（総合評価）

5G 等の技術進展に伴い、低遅延・高信頼化に向けた検討が進む一方で、製造現場のように通信要件の異なる複数のアプリケーションが混在する場合において、リアルタイム性の高いアプリケーションに対して低遅延・高信頼な通信を実現とすることが課題であった。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ったと認められる。

本研究開発では、技術的数値目標として周波数利用効率及び同時利用可能なアプリケーション数を2倍以上とすることを目指していた。研究開発の結果、全体として、**2.89倍**の周波数利用効率の改善を達成するなど、周波数の有効利用の向上に資するなど目標を達成することができた。

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、実用化への取り組みや国際標準化獲得に向けた取り組みなど、本研究開発成果の普及展開を進めていく。

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6年6月21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。

- ・ 総合的に見て、本研究開発は非常に有益であった。目標を完全に達成し、実用化に向けた具体的なステップも進められた。技術的な成果は高く評価でき、経済的効率性の面でも大きな問題はなかった。成果発表の観点でこれからの進展を期待したい。
- ・ 総合的に見て有益であったと判断する。本研究開発で得られた成果を IEC SC65C/WG17 (Industrial networks / Wireless coexistence) および IEEE 等の標準化に注力することで、本研究開発終了後の速やかな社会実装を実現することを期待する。
- ・ 本研究開発では、通信要件の異なる複数のアプリケーション混在下において、到達時間保証と同時収容数の両立を実現すべく、通信リソース情報の収集、遅延時間保証技術の適用、有無線ネットワークスライシングの点から要素技術の設計・試作・評価を行い、各要素技術について、概ね目標とする周波数利用効率を達成している。学術的な取り組みは控えめな印象があるものの、IEC、IEEE802.1Q への国際標準化提案、特許申請、FFPA 認証取得といった産業上の波及効果の高い取り組みを着実に進めている。今後は、研究開発成果の国際標準化、国内規格化、製品化が期待される。
- ・ 当初計画の目標が達成されており、有益であったと認められる。なお、受託者に製品メーカーが含まれないので、今後本案件で開発された技術の普及、社会実装化への取り組みが今後も求められる。

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日閣議決定）
https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020_honbun.pdf

- 「成長戦略フォローアップ」(令和2年7月17日閣議決定)
<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/fu2020.pdf>
- 「新たな情報通信技術戦略の在り方」第4次中間答申(令和2年8月5日)
https://www.soumu.go.jp/main_content/000724320.pdf
- 電波政策2020 懇談会 報告書 (平成28年7月 総務省)
http://www.soumu.go.jp/main_content/000430220.pdf
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合
<http://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>