

令和 4 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、

総合通信基盤局電気通信事業部電気通信技術システム課

評価年月：令和 4 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発

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 3 年度（4 か年）

・実施主体

民間企業、大学

・総事業費

3,758 百万円

平成 30 年度	令和元年度	令和 2 年度	令和 3 年度	総 額
932 百万円	943 百万円	938 百万円	945 百万円	3,758 百万円

・概 要

通信トラヒックの増大に対応する高速大容量・低消費電力の光ネットワークの実現に寄与するため、以下の技術の確立に向けた研究開発を実施する。各技術は実施期間を通じて平行して研究開発を行うものである。

① 毎秒 5 テラビット級光伝送用信号処理技術の研究開発

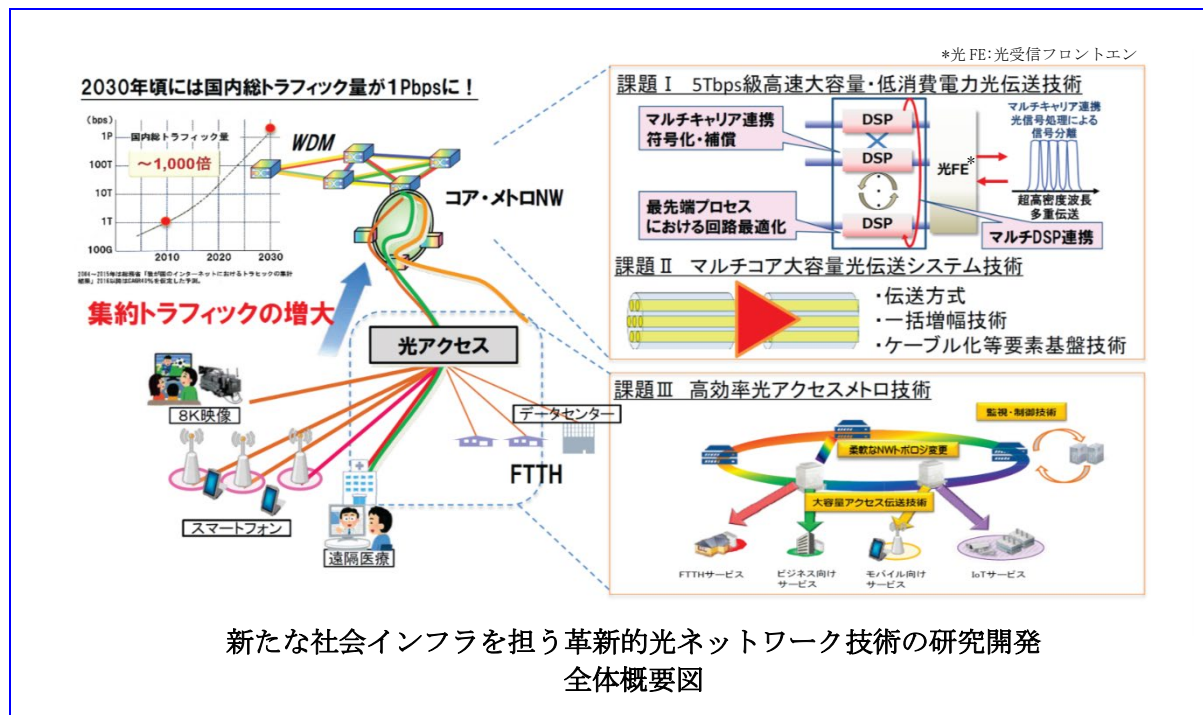
毎秒 5 テラビット級の光信号伝送について、現行技術と同等レベルの長距離伝送性能を実現しつつ伝送容量あたりの消費電力を 6 分の 1 以下に削減するため、並列協調信号処理技術や低消費電力回路技術等を確立する。

② マルチコアファイバ光伝送技術の研究開発

1 本の光ファイバで伝送できる容量は物理的限界を迎えるため、多数のコア（光伝送路）を有する革新的光ファイバ伝送の伝送方式・中継技術等の要素技術を確立する。

③ 高効率光アクセス技術の研究開発

大容量アクセス伝送技術（低コスト多値変調技術等）や、光アクセス網の構成を柔軟に変更するための最適構成技術、監視・制御技術等を確立する。



技術の種類	技術の概要
5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術	超高精細映像の流通やIoT・ビッグデータ・AI等の普及によって急速に増大する通信トラフィックに対応するため、デジタルコヒーレント技術(*1)による400Gbps級光伝送システムの実用化が始まり、1Tbps級光伝送技術の開発が進行している。通信トラフィックの増加は今後さらに加速することが予想されており、さらなる大容量・低消費電力化を実現する光通信技術の開発が必要とされている。 本研究開発は、高速大容量なチャネル容量5Tbps級(運用単位)の光伝送システムにおいて高度な光伝送方式に要求されるデジタル信号処理技術を導入し、新たな光伝送方式に対応可能な高速多値光伝送受信技術と伝送劣化補償技術を確立し、5Tbps級の大容量光伝送を実現する。また、5Tbps級のデジタル信号処理回路において100Gbps級の信号処理回路に対し、同一通信速度で比較して動作電力を1/6以下にするため、各信号処理技術の最適化を行って、最新の電子回路技術を駆使した低消費電力デジタル信号処理回路技術の確立を目指す。 *1 デジタル信号処理技術とコヒーレント光伝送技術を組み合わせることで、長距離・大容量伝送を実現できる技術 【研究開発概要図】 新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発 課題Ⅰ 5Tbps級高速大容量・低消費電力光伝送技術 (全体取りまとめ:NTT) ア) 高速多値光伝送受信技術 a) 高度変復調方式基本技術 (NTT) b) 誤り訂正基本技術 (三菱電機) イ) 伝送劣化補償技術 a) 信号等化基本技術 (富士通) b) クロストーク抑圧基本技術 (NEC) ウ) 伝送システム最適化設計技術 (NTT) エ) 低電力回路最適化設計技術 a) 低電力回路統合検証技術 (取りまとめ:NTT) 1) 高度変復調回路基本技術 (NTT) 2) 誤り訂正回路基本技術 (三菱電機) 3) 信号等化回路基本技術 (富士通) 4) クロストーク抑圧回路基本技術 (NEC) 5) 低電力信号処理統合検証技術 (NTT) b) マルチチップ高周波実装技術 (NTT)

マルチコア大容量光伝送システム技術

本研究開発では、長距離用光ファイバケーブルのケーブル容量の持続的な拡大のため、空間多重技術を導入し、1 ケーブル当りの総容量（ケーブル総容量）が既存海底ケーブルシステム(*1)の4倍以上となる240Tbps級以上（伝送距離1000km以上）(*2)の大容量化を目指し、空間多重型光ファイバ伝送方式とその要素基盤技術（ケーブル化技術、増幅技術、性能評価技術等）を確立する。

*1 太平洋横断級海底ケーブルシステム（FASTER:2016年）の伝送容量60Tbps（10Tbps/FP, 6FP（12芯））を想定。

*2 基本計画書における目標値が240Tbs級/1000km以上であり、受託者提案では全体目標をさらに高く320Tbps/3000km以上とした（下図）。（基本計画書：研究開発の目的、政策的位置付け、目標、研究開発内容、実施期間等を記述した研究開発課題を実施する上での基本的な計画を示したもの）

【研究開発概要図】

研究幹事：KDDI総合研究所

ア) 大容量マルチコア伝送方式の検討

ア)-a) 空間多重型光ファイバの方式検討

- ア)-a)-1 マルチコアファイバ方式（KDDI総合研）
- ア)-a)-2 “マルチコアファイバ”伝送方式における光雑音処理に関する技術開発（東北大）

ア)-b) 空間多重型光ファイバの評価技術検討

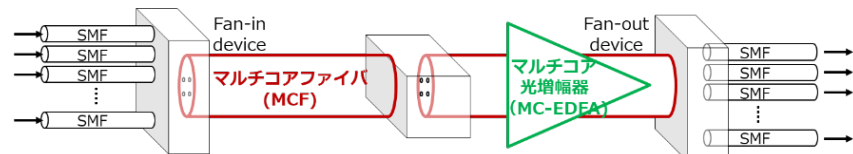
- ア)-b)-1 透過型測定による空間多重型光ファイバの評価技術（住友電工）
- ア)-b)-2 OTDRによる空間多重型光ファイバの評価技術の開発（東北大）

ア)-c) 空間多重型光中継器の方式検討

- ア)-c)-1 高効率マルチコア光増幅技術（古河電工）
- ア)-c)-2 結合型マルチコア光増幅システム技術（NEC）（R1年度まで）

イ) マルチコア要素基盤技術開発

- イ)-a) 空間多重型高密度デバイス基盤技術（オプトクエスト）
- イ)-b) マルチコアファイバケーブルシステムの基盤開発（NEC）



ア) a,b 空間多重型光ファイバの方式検討、評価技術検討

- ・結合・非結合マルチコアファイバの長距離伝送性能比較(～10000km)と評価技術の確立

結合型 非結合型



- ・MIMO受信
- ・変復調方式

ア) c 空間多重型光中継器の方式検討

- ・結合型・非結合型の両方式の電力効率などの性能比較と基盤技術確立

結合型 非結合型

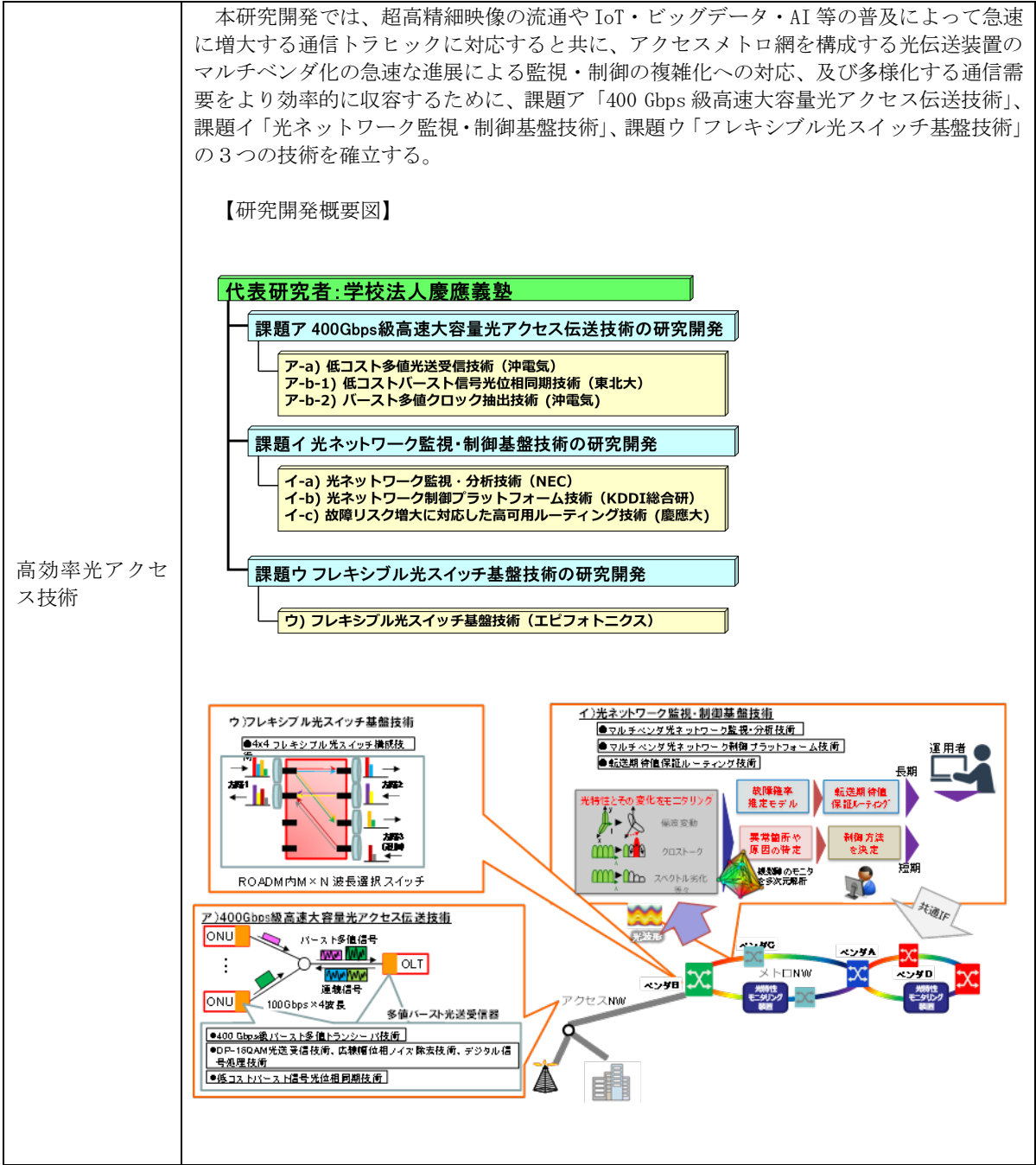


- ・クラッド励起
- ・コア励起

イ) a,b マルチコア光伝送システムの要素基盤技術開発

- ・マルチコアファイバの海底ケーブル試作とケーブル化後の性能予測
- ・空間多重型高密度光デバイスの開発

全体目標：ケーブル容量320Tb/s級マルチコア長距離伝送技術（3000km以上）と要素基盤技術の確立、システム設計技術（性能指標）



・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
5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術	←	＜総務省委託研究の実施＞		→
マルチコア大容量光伝送システム技術	←	＜総務省委託研究の実施＞		→
高効率光アクセス技術の研究開発	←	＜総務省委託研究の実施＞		→

(2) 達成目標

超高精細映像の流通や IoT・ビッグデータ・AI 等の普及によって急速に増大する通信トラフィックに対応するため、開発・実用化が進んでいる毎秒 400 ギガビット級、および毎秒 1 テラビット級の光伝送技術よりもさらに大容量・低消費電力化を実現する光通信技術の開発が必要とされている。また、光アクセス網においても、多様化する通信需要をより効率的に収容することが必要とされている。

そこで 1 テラビット級光伝送技術よりもさらに低消費電力化を実現しつつ、高速大容量化と柔軟で効率的な運用を実現する毎秒 5 テラビット級の光伝送用信号処理技術、光ファイバー本あたりの伝送容量を飛躍的に拡大するマルチコアファイバ光伝送技術等を確立するとともに、高効率光アクセス技術確立することで、急速に増大する通信トラフィックに対応する高速大容量・低消費電力の光ネットワークの実現に寄与する。また、開発成果の国際標準化・市場展開を推進し、我が国の光ネットワーク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)
科学技術イノベーション総合戦略 2017 (平成 29 年 6 月 2 日)	第 2 章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組 (2) 新たな経済社会としての「Society 5.0」を実現するプラットフォーム [C]重きを置くべき取組 ② プラットフォームを支える基盤技術の強化 i) サイバー空間関連の基盤技術の強化 ii) フィジカル空間 (現実空間) 関連の基盤技術の強化 第 3 章 経済・社会的課題への対応 (1) 持続的な成長と地域社会の自律的な発展 ① エネルギー、資源、食料の安定的な確保 i) エネルギーバリューチェーンの最適化 [C]重きを置くべき取組 オ 革新的な材料・デバイス等の幅広い分野への適用 (S I P を含む) ・ 革新的電子デバイスの開発
世界最先端 IT 国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画 (平成 29 年 5 月 30 日)	第 2 部 官民データ活用推進基本計画 II 施策集 II-1-(8) 研究開発【基本法第 16 条関係】
科学技術基本計画 (平成 28 年 1 月 22 日)	第 2 章 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組 (3) 「超スマート社会」における競争力向上と基盤技術の強化 ② 基盤技術の戦略的強化 i) 超スマート社会サービスプラットフォームの構築に必要な基盤技術 ・ 大規模化するデータを大容量・高速で流通するための「ネットワーク技術」

未来投資戦略 2017 —Society 5.0 の実現 に向けた改革—(平成 29 年 6 月 9 日)	中短期工程表「データ活用基盤の構築」④ 革新的光ネットワーク技術の研究開発の推進
AI 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)	Ⅲ. 産業・社会の基盤作り Ⅲ-2 データ関連基盤整備 (1) データ基盤 データ連携基盤を支えるための、膨大なデータを円滑にやり取りできる ネットワーク技術の確立 (2021 年度)【総】
経済財政運営と改革 の基本方針 2020(令 和 2 年 7 月 17 日)	第 3 章 「新たな日常」の実現 1. 「新たな日常」構築の原動力となるデジタル化への集中投資・実装 とその環境整備 (デジタルニューディール) (2) デジタルトランスフォーメーションの推進
成長戦略フォローア ップ(令和 2 年 7 月 17 日)	3. デジタル市場への対応 (2) 新たに講ずべき具体施策 iii) 5G の早期全国展開、ポスト 5G の推進、いわゆる 6G (ビヨ ンド 5G) の推進 ③いわゆる 6G (ビヨンド 5G) の推進
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)	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 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 (1) サイバー空間とフィジカル空間の融合による新たな価値の創出 (a) 現状認識 (c) 具体的な取組 ④ デジタル社会に対応した次世代インフラやデータ・AI 利活用技 術の整備・研究開発
デジタル社会の実現 に向けた重点計画(令 和 3 年 6 月 18 日)	第 2 部 デジタル社会の形成に向けた基本的な施策 3. 包括的データ戦略 (5) デジタルインフラの整備・拡充
統合イノベーション 戦略 2021 (令和 3 年 6 月 18 日)	第 1 部 総論 3. これまでの取組の評価・課題と重点的に取り組むべき事項 (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 ① サイバー空間とフィジカル空間の融合による新たな価値の創出 (AI 活用に適した次世代社会インフラの開発整備)

(3) 目標の達成状況

- ・ 5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術

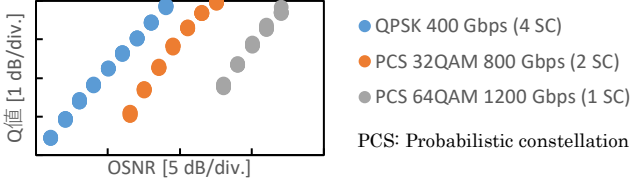
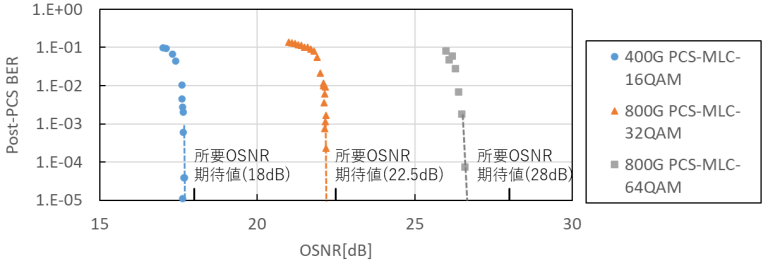
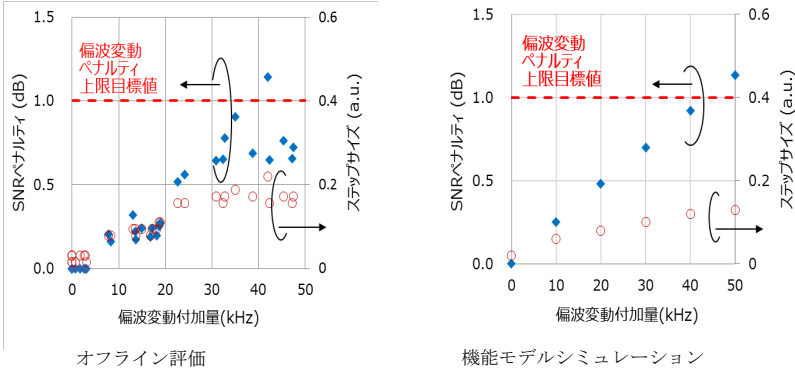
高速大容量な波長当たり 800Gbps×6 並列を想定したチャネル容量 5 Tbps 級（運用単位）のマルチキャリア光伝送システムを実現するための基本技術を確立した。またデジタル信号処理回路の 100Gbps 級当たりの消費電力について、当初目標値の 1/6 に対して 1/6.9 まで低減できることを確認しており、目標を上回る成果を達成した。

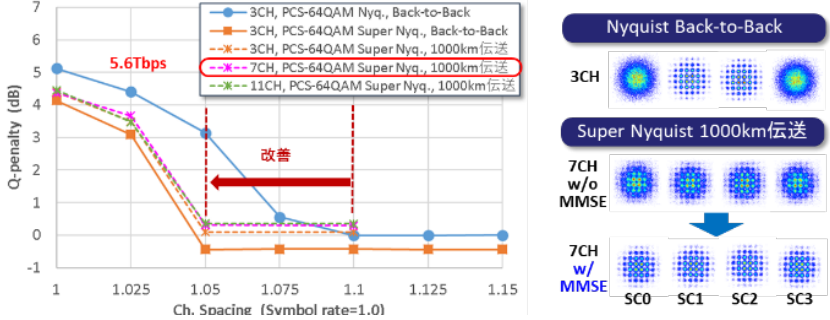
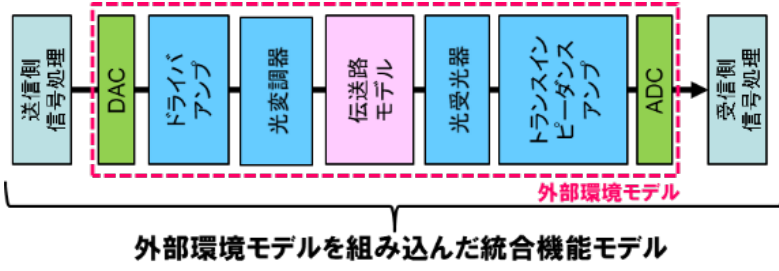
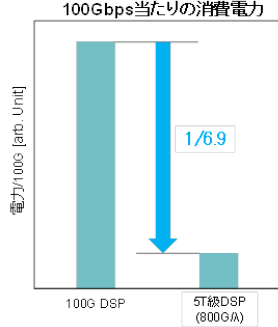
- ・ マルチコア大容量光伝送システム技術

極めて低損失で低クロストーク 4 コアファイバ（109Tbps/芯、伝送距離 3120km）の設計・開発に成功したことで、全体目標としていた 3000km 以上でケーブル総容量 320Tbps 以上（4 ファイバペア、80Tbps/芯以上×4）の大容量化を可能とする空間多重型光ファイバの設計および伝送技術を確立。さらに課題全体として、既存ケーブル構造のままでケーブル総容量 1.74Pbps（4 コアファイバ×16 ファイバペア、109Tbps×16=1.74Pbps、伝送距離 3120km）が可能であることを実証した。本成果は、基本計画書における目標値（ケーブル総容量 240Tbps）の 7 倍であり、目標を大幅に上回る成果を達成した。

- ・ 高効率光アクセス技術

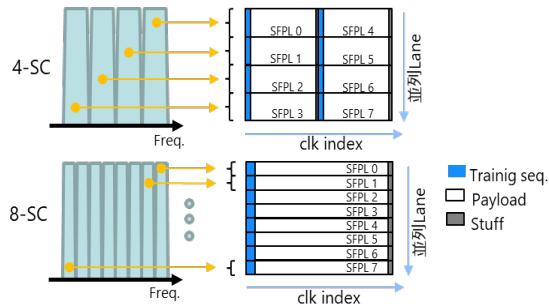
「400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術」では TWDM-PON（Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network）（10 Gbps×4 波=40Gbps）の 10 倍に対応する 400 Gbps 級バースト多値通信用送受信器技術を実現するため、3つの要素技術である「低コスト多値光送受信技術」、「低コストバースト信号光位相同期技術」、「バースト多値クロック抽出技術」をそれぞれ確立した。また、光アクセス網の構成の変更を柔軟に可能とする技術として「フレキシブル光スイッチ基盤技術」を確立し、研究開発期間中に一部製品化を完了した。さらに、監視・制御技術として「ネットワーク監視・分析技術」、「光ネットワーク制御プラットフォーム技術」及び「高可用性ルーティング技術」の確立と連携検証を実施し、目標を達成した。

技術の種類	目標の達成状況
5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術 課題ア)	課題ア) 高速多値光送受信技術 (a) 高度変復調方式基本技術 5 Tbps 級光伝送 (800Gbps×6 波長および 1.2Tbps×4 波長) を実現する高度変復調方式としてコンスタレーションシェーピング方式 (*1) およびサブキャリア変調方式 (*2)、送受信デバイス特性補償基本技術として送信デバイス特性および受信デバイス特性をそれぞれ送信機および受信機で補償することが可能なマルチステップ推定方式を選定し、実環境を模擬した外部環境モデルによる動作確認を完了し、高度変復調技術および送受信デバイス特性推定・補償方式を確立 (図ア a)、到達目標を達成。 *1 デジタル信号変調のためエネルギーを効率的に増幅させる変調方式のひとつ *2 1 チャンネルをさらに小さい帯域で区切った複数の小さい波 (サブキャリア) の変調方式  図ア a OSNR 耐力評価結果 (130 GBaud 級※) ※サブキャリアあたりボーレートの合計 (b) 誤り訂正基本技術 5 Tbps 級光伝送を実現するために必要なキャリア数や高度変復調方式と親和性が高く、電力効率に優れる符号化・復号処理および尤度生成アルゴリズムを開発、他機能との連携を考慮した検証によりアルゴリズムの妥当性を実証し、誤り訂正基本技術を確立 (図ア b)、到達目標を達成。  図ア b 他機能との連携を考慮したマルチレベル符号化構成誤り訂正性能
5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術 課題イ)	課題イ) 伝送劣化補償技術 (a) 信号等化基本技術 5 Tbps 級光伝送を実現する低演算で信号等化が可能なフラクショナル適応等化処理方式と高精度な偏波変動追従を実現するステップサイズ最適化アルゴリズムを選定し、機能モデル評価およびオフライン実験により目標性能の達成を確認し、信号等化基本技術を確立 (図イ a)、到達目標を達成。  図イ a オフライン評価および機能モデルシミュレーション

	(b) クロストーク抑圧基本技術 5 Tbps 級光伝送を実現するマルチキャリア光伝送において、変調方式の適応的な変化に対応可能なクロストーク抑圧方式を開発し、他の課題と連携を考慮した信号処理アルゴリズムの機能動作検証を完了（図イ b）し、アルゴリズムの基本技術を確立、到達目標を達成。  図イ b クロストーク抑圧基本技術による連携動作検証結果
5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術 課題ウ)	課題ウ) 伝送システム最適化設計技術 課題ア、イで検討した要素技術を選定・統合するとともに、光送受信器や光伝送路等のモデル化を行い、信号品質に影響すると想定される光送受信デバイスのパラメータを組み込んだ統合機能モデル（図ウ）を用いて、光送受信デバイスの線形および非線形な歪み、光ファイバ伝送路の歪みを付加して、基本伝送特性の評価を完了した。さらに機能連携アルゴリズムの統合検証を行うことで、目標の伝送特性を実現する信号処理機能全体の最適化設計に向けた基本技術を確立し、到達目標を達成。  図ウ 全負荷条件での評価が可能な統合機能モデル
5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術 課題エ)	課題エ) (a) 低電力回路統合検証技術 変復調方式、誤り訂正、信号等化、クロストーク抑圧についてハードウェア記述言語を用いた評価モデルにより、各機能の回路モデルによる動作検証、機能モデルとの等価性評価、および電力評価を完了。送受信部回路を結合した統合検証プラットフォーム（検証エミュレーション環境）を開発し、各機能のハードウェア記述言語を用いた回路モデルを用いることで、デジタル信号処理回路の 100Gbps あたりの消費電力について、目標を上回る 1/6.9 以下に低減できることを確認（図エ a）し、低消費電力化回路設計技術および統合検証技術を確立、到達目標を達成。  図エ a 100G DSP および 5Tbps 級 DSP の 100G あたりの消費電力の関係

(b) マルチチップ高周波実装技術

5 Tbps 級の光伝送システムを実現するために必要な高度な光伝送方式に対応した高速アナログ電気インターフェースやデバイス間連携インターフェースの性能・実装検討を行い、光送受信器を含めた特性検証を行うことで、マルチチップ高周波実装技術を確立。具体的には、複数 DSP (Digital Signal Processor) のチップ間連携方式およびマルチキャリア変調方式について、チップ間連携の際に課題となる信号間の到着時間ずれ (スキュー) の補償方式や、サブキャリア数に対して効率的にサブキャリア信号を収容するライン側フレーミング方式の設計 (図エ b) を行い、機能モデル・回路モデルを用いて動作検証を完了。また、5Tbps 級信号に対応するための ADC・DAC 仕様の策定し、光送受信機各部のレベルダイヤ最適化を完了し、5Tbps 級光伝送に対応した高周波実装技術を確立、到達目標を達成。



図エ b マルチキャリア信号に対応したライン側フレーミング方式の概要図

課題ア) 大容量マルチコア伝送方式の検討

(a) 空間多重型光ファイバの方式検討

既存海底ケーブルと同等のスペースで、ケーブル総容量 240Tbps 以上、伝送距離 1000km 超を可能とする空間多重型光ファイバの設計および伝送技術を確立するため、全体目標を基本計画書より高くケーブル総伝送容量 320Tbps/伝送距離 3000km 以上と設定したうえ、極めて低損失で低クロストーク (XT)、低空間モード分散 (SMD) な長尺の標準外径非結合型 4 コアファイバおよび結合型 4 コアファイバ (両ファイバとも 60.2 km×4 スパン) の設計・開発に成功、いずれも 3120km で伝送容量 80Tbps/芯以上を確認したことで、ケーブル総容量 320Tbps 以上 (4 ファイバペア) の大容量化を可能とする空間多重型光ファイバの設計および伝送技術を確立 (図ア a)。非結合型、結合型 4 コアファイバにてそれぞれ太平洋横断に必要な伝送距離である 9150km においても検証し、伝送容量 50Tbps/芯以上を確認。結合型 MCF (Multi-Core Fiber: マルチコアファイバ) 伝送については 7200km 伝送後でリアルタイム MIMO 信号処理の動作を確認し、リアルタイム長距離伝送が可能であることを実証。さらに、マルチコアファイバの GAWBS (Guided Acoustic Wave Brillouin Scattering: 導波音響波型ブリルアン散乱) 雑音の影響・補償技術を世界に先駆け実証。以上により、到達目標を達成。

マルチコア大容量光伝送システム技術

課題ア)

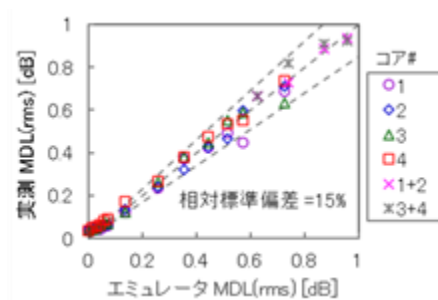


図ア a マルチコアファイバを用いた光海底ケーブルシステム骨子

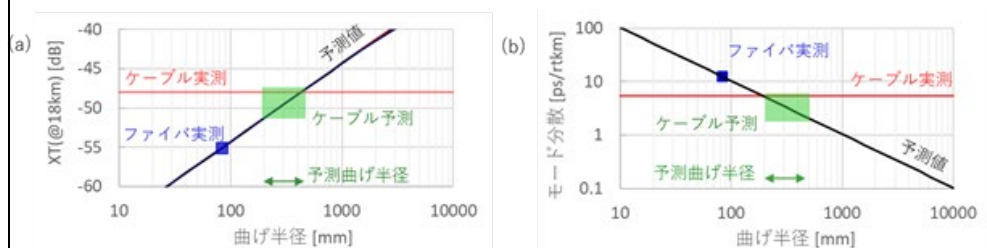
(b) 空間多重型光ファイバの評価技術検討

空間チャネルの損失均一性およびチャネル間結合を測定評価するため、波長掃引法 (波長を連続的に変化させながら測定する評価方法) と OTDR (Optical Time Domain Reflectometry: 時間領域光リフレクトメトリ) 法の 2 つの方式でチャネル間結合を評価する技術を確立、双方の評価値の一致を確認。波長掃引法で結合型 MCF の損失均一性 (MDL)

を評価する技術を確認、モード損失を設定値から標準偏差±15%の精度で測定可能であることを実証（図ア b-2）し、評価技術を確認。ファイバ特性と仮定するケーブル曲げ半径から、ケーブル化後の性能を予測する基本技術を確認（図ア b-2）、到達目標を達成。



図ア b-1 モード依存損失測定

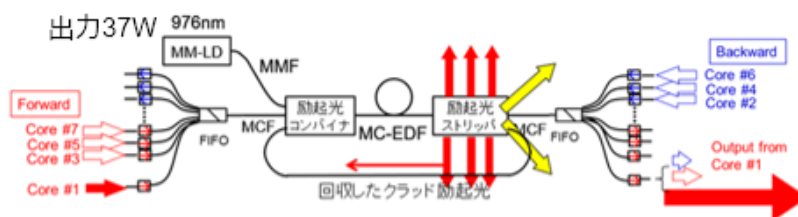


図ア b-2 (a) 非結合型 4 コアファイバのケーブル化後のクロストークの予測値および実測値、(b) 結合型 4 コアファイバのケーブル化後のモード分散の予測値および実測値。

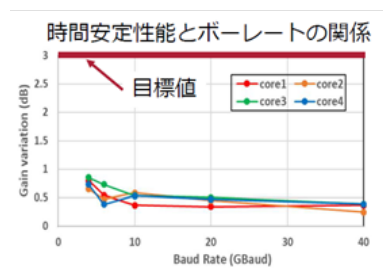
(c) 空間多重型光中継器の方式検討

双方向伝搬とポンプリサイクルの両機能の併用・実証により、コア当たりの消費電力が現行のシングルモードファイバ用増幅器に匹敵する性能（クロストークの半減）と、残留励起光（*1）の再入力による必要励起光の低減を実証（図ア c-1）。コア励起結合型 4 コア光増幅器において出力レベルを±1.5dB 以内（実力値：32GBaud で 0.5dB 以下）の安定化技術を確認（図ア c-2）。さらに、クラッド励起方式の励起効率を改善するため、クラッド内に散乱体（今回は気泡）を設け励起効率の上昇を確認し、到達目標を達成。

*1 励起光：蛍光体などの物質に励起を引き起こす光



図ア c-1 双方向伝搬とポンプリサイクルによる性能改善



図ア c-2 時間安定性能とボーレートの関係

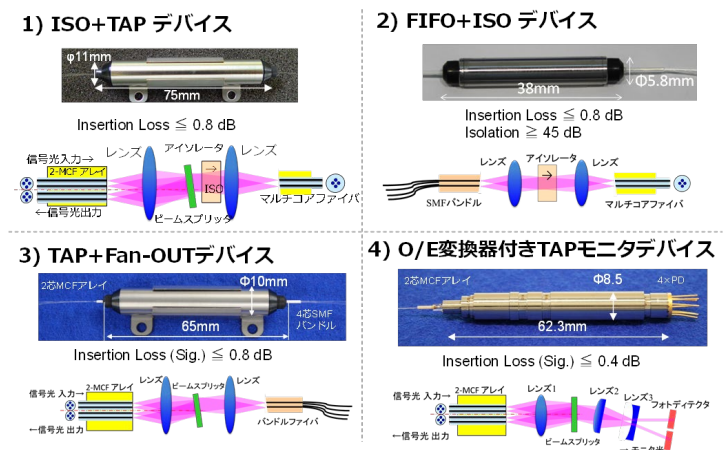
マルチコア大容量光伝送システム技術
課題イ)

課題イ) マルチコア要素基板技術開発

a) 空間多重型高密度デバイス基盤技術

基本計画書に記載の小型化、低損失化の具体的な数値目標としてデバイスサイズ従来の2/3 以下、損失 1dB 以下と設定し、2 つ以上の機能を複合した光増幅器用機能光デバイスを顧客のニーズに合わせて 4 種類開発し、各々において目標を上回るサイズ 55%以下、損失 0.8dB 以下の技術を確認 (図イ a)。単一レンズの使用によりコア径・コアピッチに依存しない構造を実現。

さらに、高い長期信頼性を有するデバイスとして、商品性を向上させるため耐環境性能と生産性の改善を実施し、振動衝撃試験、温度サイクル試験等複数の信頼性試験で特性劣化がないこと、1.5W/コアの高入力パワー耐性も確認。IR カメラを用いた光学調心技術を開発し、空間結合型デバイスのデメリットとして指摘される製造時間を従来工法と比較して 23%削減に成功し、到達目標を達成。



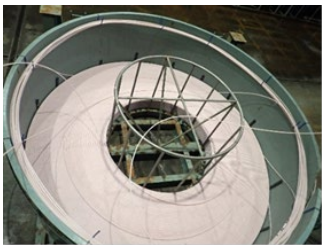
	損失 (平均値 / 3σ 値 / 平均+3σ) (目標値 : 1.0dB 以下)	サイズ比率 (目標値 : 1.5 倍以下)
1) ISO+TAP デバイス	0.65dB / 0.14dB / <u>0.79dB</u>	1.06 倍
2) FIFO+ISO デバイス	0.29dB / 0.41dB / <u>0.70dB</u>	0.50 倍
3) TAP+FO デバイス	0.52dB / 0.27dB / <u>0.79dB</u>	0.76 倍
4) O/E 変換器内蔵 TAP デバイス	0.15dB / 0.16dB / <u>0.31dB</u>	0.35 倍

図イ a 4 種類の複合機能光デバイスの開発

(b) マルチコアファイバケーブルシステムの基盤開発

クロストーク (XT) を考慮した Generalized OSNR やマルチコア光増幅器のセルフヒーリング効果の検討を通して、MCF システム特有の設計技術を開発。非結合型および結合型 4 コアファイバケーブルを試作し、既存 17mm ケーブルに最大で 16 ファイバペア (コア数で言えば、4 コア×16 ファイバペア×2=128 コア) の MCF 収容が可能であることを世界に先駆け実証 (課題ア-a と連携し、1.74Pbps のケーブル容量を実証) (図イ b-1)。本件について、報道発表 (2022 年 3 月 28 日) を行い、NHK ニュースにも掲載。

課題ア-c)、課題イ-a) と連携し、部品点数削減と部品最適配置などにより、現行収容スペースの 1/2 を実現 (図イ b-2)。課題ア-b) と連携し、2 種の開発ケーブルにてファイバ性能予測技術の妥当性を実証し、MCF 特有の XT、MDL、SMD 等の性能指標を明確化。以上により、到達目標を達成。

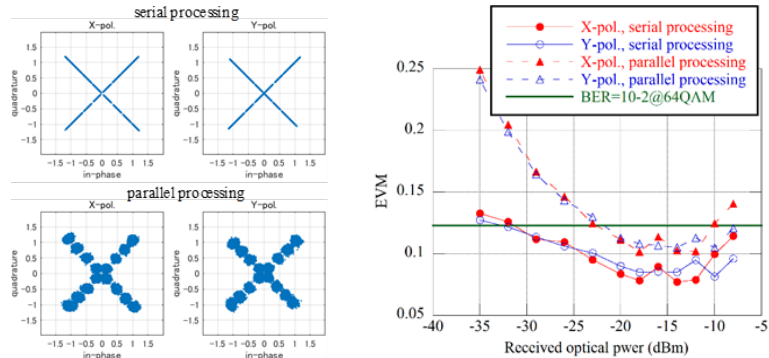


図イ b-1 試作した非結合型マルチコアケーブル

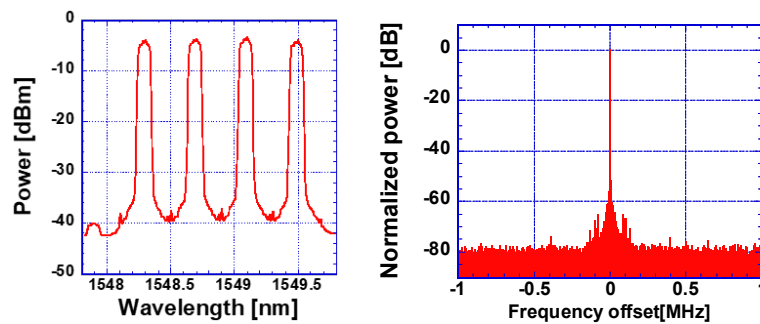


図イ b-2 試作したマルチコアゲインブロック

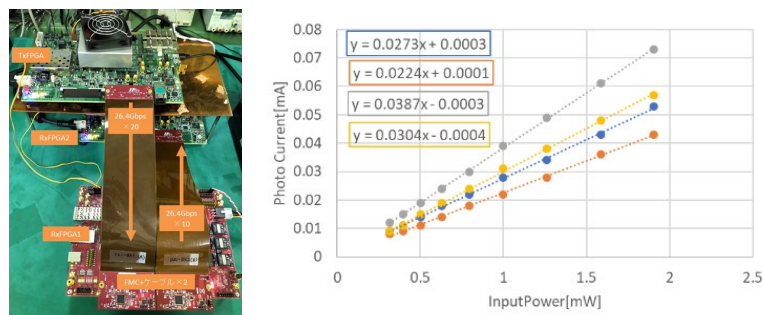
「400 Gbps 級高速大容量光アクセス伝送技術」では TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network) (10 Gbps×4 波=40Gbps) の 10 倍以上に対応する 400 Gbps 級バースト多値通信用送受信器技術を実現するため、「低コスト多値光送受信技術」においては、DP-16APSK (Dual Polarization 16 Amplitude and Phase Shift Keying) の多値信号による 100 Gbps/波長でのリアルタイム変復調評価を完了し、送信+5 dBm、受信 -24 dBm を計測、パスロス 29 dB となる目標を達成 (図ア-1)。「低コストバースト信号光位同期期技術」においては、光源を共有化した簡易な構成の双方向デジタルコヒーレント伝送システムを開発し、位相雑音 0.6 度、1 μ s 以下を目標とする条件の下での同期遅延時間を達成し、400 Gbps 信号の 10 km 双方向伝送に成功 (図ア-2)。「バースト多値クロック抽出技術」においては 1 波 100 Gbps 光トランシーバプロトタイプ受信系の電気系試作を完了した (図ア-3)。これらの 3 つの技術の統合検証にて 400 Gbps 級光アクセス信号伝送技術を確立、到達目標を達成。



図ア-1 DP-16APSK 変復調評価結果と伝送特性測定結果



図ア-2 400 Gbps 信号双方向伝送実験結果



図ア-3 プロトタイプ電気系と動作検証結果

高効率光アクセス技術

課題ア)

高効率光アクセス技術 課題イ)	「光ネットワーク監視・制御基盤技術」では、「ネットワーク監視・分析技術」として、ベンダ非依存の線路監視装置のハードウェア最適化ソフトウェア機能拡張を完了し、リアルタイムノード監視装置の試作及び性能評価を完了（図イ-1）。加えて、「光ネットワーク制御プラットフォーム技術」として、検証用の5ベンダ光ネットワーク制御プラットフォームの開発及びテストベッドを構築し、マルチベンダ環境下での障害自動復旧機能拡張を完了（図イ-2）。さらに、「ネットワーク監視・分析技術」と「光ネットワーク制御プラットフォーム技術」の連携実験によりプロビジョニング、障害対応それぞれにおいて、運用工数が単一ベンダ時と同等にできることを確認。また、故障リスク増大に対応した高可用ルーティング技術により転送期待値保証ルーティングでの 99.9%以上の高可用性実現を確認し（図イ-3）、「ネットワーク監視・分析技術」及び「光ネットワーク制御プラットフォーム技術」との統合連携実験（図イ-4）により、高可用な運用実現性を確認し、光信号特性を利用したマルチベンダ対応ネットワーク監視制御技術及び高可用性ルーティング技術を確立、到達目標を達成。 図イ-1 リアルタイムノード監視装置試作 図イ-2 マルチベンダ光ネットワークテストベッドでの連携実験 図イ-3 高可用性シミュレーション検証結果 図イ-4 ネットワーク監視・分析技術、光ネットワーク制御プラットフォーム技術、転送期待値保証ルーティングの遠隔連携実験
高効率光アクセス技術 課題ウ)	「フレキシブル光スイッチ基盤技術」では、波長選択光スイッチのポート入出力ソフトウェアで柔軟に切り替え可能なフレキシブル光スイッチ（M×N型）基盤技術を確立し、96CHにおける挿入損失として目標とした 8.5dB を大きく下回る 6.6 dB を達成（図ウ-1）、消費電力は目標である 1/2 を超える 1/17 を達成し、柔軟なネットワークポロジ変更を可能とする省電力フレキシブル光スイッチ技術を確立。さらに、ポート入出力をソフトウェアで柔軟に切り替え可能な 5×5 型フレキシブル波長選択光スイッチ（WSS（Wavelength Selective Switch））を試作（図ウ-2）し、社会実装として、1×9 型 WSS の製品化を完了。また、5×5 型 WSS 製品化に向けたノウハウの蓄積とサプライチェーンを確立、到達目標を達成。 図ウ-1 96CH 波長選択スイッチ評価結果 図ウ-2 5×5型 WSS モジュール

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、基本計画書に記載された目標指数の達成状況とともに、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（第122回）」（令和4年6月）において、目標の達成状況等に関して外部評価を実施し、政策効果の把握に活用した。また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等も調査し、必要性・有効性等を分析した。

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を実際に確立しており、また、ITU-T（International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector、国際電気通信連合電気通信標準化部門）における寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

主な指標	平成30年度	令和元年度	令和2年度	令和3年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件（0件）	5件（5件）	14件（13件）	13件（11件）	32件（29件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	4件（4件）	27件（20件）	26件（22件）	32件（24件）	89件（70件）
その他の誌上発表数	0件（0件）	0件（0件）	1件（0件）	1件（0件）	2件（0件）
口頭発表数	19件（3件）	44件（5件）	46件（3件）	38件（3件）	147件（14件）
特許出願数	10件（3件）	28件（10件）	25件（7件）	35件（19件）	98件（39件）
特許取得数	0件（0件）	2件（0件）	0件（0件）	3件（0件）	5件（0件）
国際標準提案数	1件（1件）	4件（4件）	1件（1件）	2件（2件）	8件（8件）
国際標準獲得数	0件（0件）	2件（2件）	0件（0件）	0件（0件）	2件（2件）
受賞数	2件（1件）	4件（0件）	2件（1件）	2件（0件）	10件（2件）
報道発表数	2件（2件）	1件（0件）	2件（0件）	10件（0件）	15件（2件）
報道掲載数	2件（0件）	8件（0件）	14件（0件）	35件（3件）	59件（3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	本研究開発では、超高精細映像の流通や第5世代移動通信システム(5G)の普及による通信トラフィック増大とそれにかかる消費電力増大に対応し、社会インフラとして様々なネットワークサービスを支える光通信網が必要とされている。そこで、基幹網からアクセス網まで総合的な大容量化・高効率化を実現する革新的光通信技術を確立し、我が国の社会・経済活動を支える情報通信インフラの持続的な維持・発展に貢献することを目的として、以下の技術課題に取り組み、当初目標を上回る成果を達成した。 ・ 5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術 ・ マルチコア大容量光伝送システム技術 ・ 高効率光アクセス技術 政策的位置付けとして、「第5期科学技術基本計画」(平成28年1月22日閣議決定)、「世界最先端IT国家創造宣言・官民データ活用推進基本計画」(平成29年5月30日閣議決定)、「科学技術イノベーション総合戦略2017」(平成29年6月2日閣議決定)、および「未来投資戦略2017」工程表(平成29年6月9日閣議決定)において、大規模データの高速・リアルタイム処理を低消費電力で実現するための「デバイス技術」、大規模化するデータを大容量・高速で流通するための「ネットワーク技術」等の基盤技術についての速やかな強化を図ること等が掲げられている。 以上により、本研究開発においては、国が戦略的に研究開発を実施し、国内民間事業者がそれぞれ有する得意分野の技術を結集させて技術的課題を解決し、研究開発成果の国際標準化・製品化を推進して我が国の国際競争力を強化したことから、必要性があったと認められる。
効率性	複数者の保有する得意な技術を持ち寄り、オープンイノベーションによる研究開発体制をとることにより、国際競争に勝てる最先端技術を集積して、1者単独開発では難しい効率的かつ迅速な研究開発を可能とした。各者の代表研究者・実務担当者が集まってプロジェクト推進会議等を開催し、各者の進捗状況や課題を共有・調整して迅速に判断する体制の下で研究開発を推進した。また、各課題について、年に2回程度、外部の有識者と研究受託者から構成されるアドバイザリ委員会を開催し、研究進捗や進め方に対して適切な助言・提言を頂くことにより、研究開発の効率的な運用を行った。さらに、ビジネスプロデューサによる統括のもと、本研究開発成果の製品化に早期に取り組むなど高い成果を上げた。 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して、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。 本事業では、外部有識者からなる評価会において、成果目標・活動指標について適切との評価を得ていることから、コスト等の水準は妥当であると認められる。以上により、当初予算計画に対して、当初目標の仕様を大幅に上回る機能・性能を達成して、効率性の高い研究開発成果を創出できたことから、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術、マルチコア大容量光伝送システム技術、高効率光アクセス技術を確立することにより、基幹網から末端のアクセス網までの通信インフラの大容量化・低消費電力化を可能とした。これらは5G等のサービス実現に伴う通信トラフィック及び通信機器の消費電力の急速な増大に有効に対処するものであり、高速大容量・低消費電力の光ネットワークの実現に寄与することができた。 さらに受託者において、すでに本研究開発の成果を含むトランスポンダー・トランシーバー・ラインカード等(*1)の製品化に着手していること、また、特許出願、標準化提案による国際展開、報道発表による情報発信等において目標件数を上回る成果を達成していることから、アウトカム目標である製品化へ向けて着実に推進できている。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。 *1 いずれも光通信において電気信号と光信号を相互に変換するためのデバイス

公平性	本研究開発の成果である光ネットワークの高速大容量化技術および低消費電力化技術は、我が国の社会・経済活動を支える情報通信インフラの持続的な維持・発展に貢献できるものであり、受託者や関係者のみならず、広く国民に利益が享受されるものである。 また、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企画競争方式を採用したことから、競争性を担保している。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	超高精細映像の流通や IoT・ビッグデータ・AI 等の普及によって急速に増大する通信トラフィックに対応するため、現行開発されているものよりもさらに大容量・低消費電力化を実現する光通信技術の開発が喫緊の課題となっており、光アクセス網においても多様化する通信需要をより効率的に収容することが必要とされていた。また、本研究開発分野は、欧米各国においても国家プロジェクトとして大規模かつ戦略的な研究開発が行われており、国連の専門機関である国際電気通信連合（ITU）等においてし烈な国際標準化競争が展開されているところであり、我が国が世界において優位性を確保するためにも優先的にこれに取り組む必要があった。 これらの状況を鑑みて、本分野における世の中の技術動向も意識した高い目標を設定したうえ、全ての課題において目標を達成した。 よって、本研究開発には、優位性があったと認められる。

5 政策評価の結果（総合評価）

超高精細映像の流通や IoT・ビッグデータ・AI 等の普及、さらには 5 G の実用化によって急速に増大する通信トラフィックに対応するため、情報通信インフラである光通信技術の更なる高度化により消費電力を抑制しつつネットワーク資源の拡大を図ることが必要となっている。

本研究開発においては、5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術、マルチコア大容量光伝送システム技術、高効率光アクセス技術を確立することにより、基幹網から末端のアクセス網までの通信インフラの大容量・低消費電力化を可能とした。これらは 5 G 等のサービス実現に伴う通信トラフィック及び通信機器の消費電力の急速な増大に有効に対処するものであり、高速大容量・低消費電力の光ネットワークの実現に寄与することができた。さらに、受託者において、すでに本研究開発の成果を含むトランスポンダー・トランシーバー・ラインカード等の製品化に着手していること、また、特許出願、標準化提案による国際展開、報道発表による情報発信等において目標件数を上回る成果を達成していることから、アウトカム目標である製品化へ向けて着実に推進できている。

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＞

評価結果を踏まえ、今後は受託者において本研究開発の成果を活用した製品の実用化を進めるとともに、国の後継プロジェクト等を活用してさらなる技術の発展を目指す。引き続き知財確保、標準化活動を推進することで、光ネットワーク分野における技術の国際的優位性を維持するとともに、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく。

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（第 122 回）」（令和 4 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。

・ 5 Tbps 級高速大容量・低消費電力光伝送技術

チャネル容量 5 Tbps 級のデジタルコヒーレント光伝送システムを実現するための基本技術を確立するとともに、低消費電力化技術の確立では、目標を上回る成果を達成している。また、特許・

論文等の件数も目標を大きく上回っており、有効かつ効率的な研究開発であることが評価できる。

- ・マルチコア大容量光伝送システム技術

既存光海底ケーブルシステムの4倍以上となる伝送容量240Tbps、伝送距離1000km以上を実現するための基盤技術を確立するとともに、3000km級伝送において当初目標の7倍となる1.74Pbpsの実現可能性まで実証しており、基本計画書における目標を上回る有効かつ効率的な研究開発であったと評価できる。世界トップの技術を有する組織による研究開発成果であることから、我が国の関連企業による国際市場展開、シェアの維持・拡大につながることを期待できる。

- ・高効率光アクセス技術の研究開発

従来比10倍の400Gbps級高速大容量光アクセス伝送を実現するための基盤技術を確立するとともに、低消費電力フレキシブル光スイッチ基盤技術の確立では、目標を上回る成果を挙げており、有効かつ効率的な研究開発であったと認められる。本研究開発の成果が、国民生活に密着した安価で高性能なサービスの提供に活かされることを期待する。

7 評価に使用した資料等

○科学技術イノベーション総合戦略2017（平成29年6月2日閣議決定）

<https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2017/honbun2017.pdf>

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

<https://warp.ndl.go.jp/info:ndl.jp/pid/12187388/www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20170530/siryoul.pdf>

○科学技術基本計画（平成28年1月22日閣議決定）

<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>

○未来投資戦略2017-Society5.0の実現に向けた改革-（平成29年6月9日 未来投資会議）

http://www.kantei.go.jp/jp/headline/pdf/seicho_senryaku/2017_all.pdf

○AI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/aistratagy2019.pdf>

○経済財政運営と改革の基本方針2020（令和2年7月17日）

https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2020/2020_basicpolicies_ja.pdf

○成長戦略フォローアップ（令和2年7月17日）

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/fu2020.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）

<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/6honbun.pdf>

○デジタル社会の実現に向けた重点計画（令和3年6月18日）

https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/information/field_ref_resources/576be222-e4f3-494c-bf05-8a79ab17ef4d/210618_01_doc01.pdf

○統合イノベーション戦略2021（令和3年6月18日）

https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2021_honbun.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>

https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/091027_1.html

- 「新たな社会インフラを担う革新的光ネットワーク技術の研究開発」基本計画書
https://www.soumu.go.jp/main_content/000544575.pdf

令和4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4年8月

1 政策（研究開発名称）

高ノイズ環境における周波数共用のための適応メディアアクセス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

令和元年度～令和3年度（3か年）

・実施主体

国立研究開発法人、民間企業、大学

・総事業費

1,105 百万円

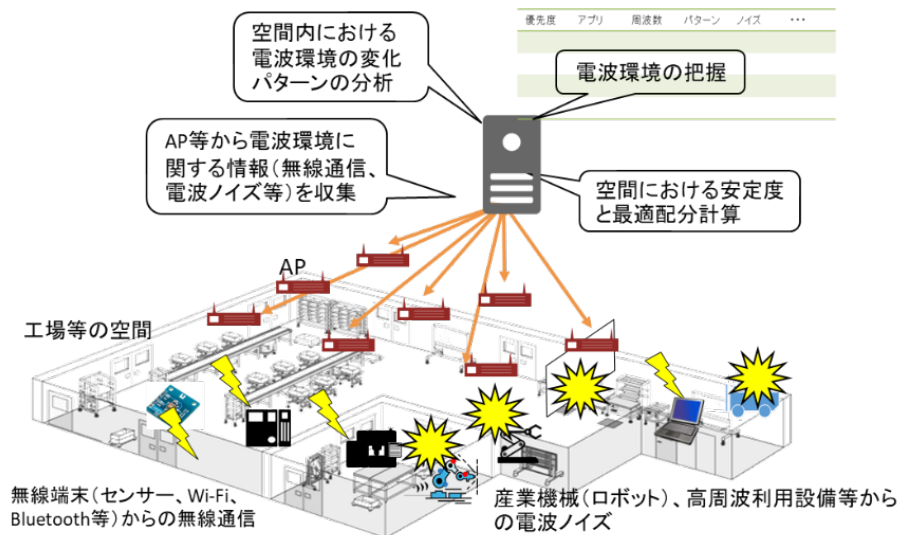
令和元年度	令和2年度	令和3年度	総 額
350 百万円	393 百万円	362 百万円	1,105 百万円

※ 予算要求時点では総額が10億円を超えることが想定されていなかったため、事前事業評価は未実施。

・概 要

製造現場や医療現場等では、利便性の向上、生産の効率化、安全性 確保等の視点から、様々な無線システムの導入が進んでいる。一方で、産業機械、ロボット等のモータ・インバータや高周波利用設備等から発射される電波がノイズとなり、通信の遮断・輻輳が発生している。そこで、異種の無線システムや産業機械等が共存し、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下においても、信頼性ある無線通信を可能にするため、状況に応じて送信タイミングを制御する技術、既存チャンネルを複数に分割・冗長化して送信する技術等を確立し、周波数共用の促進と周波数利用効率を向上させる。

具体的には、異種の無線システムが共存し、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下で、信頼性ある無線通信を可能にする無線通信技術として、状況に応じて送信タイミングを制御すると共に既存チャンネルを複数に分割・冗長化して送信する技術、無線環境を可視化・シミュレーションする技術及び稼働物体との高信頼無線通信を行う技術等を確立し、これら複数の技術を組み合わせることで、課題全体として、従来方法に比べて2倍以上の周波数利用効率向上を目指す。



技術の種類	技術の概要
適応的複合メディアアクセス制御技術	産業機械等から発される電波ノイズの影響を回避するための適応的複合メディアアクセス技術と、冗長性を持たせること及び複数の端末が連携することで通信信頼性を高める通信制御技術を開発する。
多用途周波数共用最適化技術	実測データを用いて、様々な用途で使用されている無線システムからの電波や複数の周波数にまたがる電波ノイズ等のパターンを抽出し、各用途の電波が相互に与える影響や、電波ノイズが各用途の電波に与える影響等の可視化を実現する。また、通信の安定性を確保するため、多用途の周波数の相互影響や電波ノイズが与える影響等を考慮して、複数周波数利用時の無線リソースの使い方を最適化する技術を確立する。
稼働物体との高信頼無線通信技術	遠方の他のシステムから発せられる電波や高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下における金属加工機や製造ロボットなどの予防保全と遠隔制御のための信頼性のある無線通信を実現する。

	令和元年度	令和2年度	令和3年度
適応的複合メディアアクセス制御技術	通信環境と用途に合わせて制御を行う技術の一次試作	通信環境と用途に合わせて制御を行う技術の二次試作	全体統合および総合評価実験の実施、改良
多用途周波数共用最適化技術	多用途周波数相互影響可視化技術の一次試作 複数周波数利用時の無線リソース(時間、周波数、空間)の最適化を数値的に行う技術の一次試作	多用途周波数相互影響可視化技術の二次試作 複数周波数利用時の無線リソース(時間、周波数、空間)の最適化を数値的に行う技術の二次試作	
稼働物体との高信頼無線通信技術	適応的複合メディアアクセス制御を応用した狭空間における高速稼働物体との高信頼無線通信技術確立のための一次試作	適応的複合メディアアクセス制御を応用した狭空間における高速稼働物体との高信頼無線通信技術確立のための二次試作	

(2) 達成目標

本研究開発では、適応的複合メディアアクセス制御技術、多用途周波数共用最適化技術及び稼働物体との高信頼無線通信技術を確立し、これら複数の技術を組み合わせることで、課題全体として、従来方法に比べて2倍以上の周波数利用効率向上を目指し、周波数の有効利用の一層の向上に資する。

○関連する主要な政策

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

○政府の基本方針（閣議決定等）、上位計画・全体計画等

名称（年月日）	記載内容（抜粋）
未来投資戦略 2018-「Society 5.0」「データ駆動型社会」への変革（平成 30 年 6 月 15 日）	「Ⅱ．[1]1.（3）iii）⑤「Society 5.0」を支える通信環境の整備」において「スマートワイヤレス工場等の生産現場における無線通信の円滑な導入を進めるため、工場内の無線通信を最適制御する技術の研究開発を実施」
経済財政運営と改革の基本方針 2018（平成 30 年 6 月 15 日）	「第 2 章 5.（2）①」において「我が国の国際競争力を強化する観点から、「知的財産推進計画」や「人工知能技術戦略実行計画」の策定・実行を進めるとともに、サイバーセキュリティ対策、先端技術の国際標準化などに官民挙げて取り組む」
知的財産推進計画 2018（平成 30 年 6 月 12 日）	「Ⅰ．1. 45. 第 4 次産業革命時代を見据えた IoT サービス等に関する国際標準化戦略の推進」において「ワイヤレス工場の普及・展開に向けて、工場等の狭空間における無線通信を最適化する技術等の研究開発や国際標準化を推進するとともに、ドイツをはじめとする海外の研究機関等との国際連携、情報発信と仲間作り、人材育成等の取組を一体的に推進する」

(3) 目標の達成状況

本研究開発では2倍以上の周波数利用効率向上を目指してきており、課題アの「複数無線局連携による空間再利用技術」として、無線局連携を応用したノイズ情報の収集と、それを用いたメディアアクセスのパラメータ制御により1.4倍の周波数利用効率の改善を確認した。課題アの「ノイズの発生パターンを考慮したノイズの回避技術」として、送信待機時間を考慮した無線割り当て方式により、実際の製造現場のノイズ占有率 30%以上で通信スループット1.2倍の改善を確認した。課題アの「無線局連携送受信技術」として、マルチチャネル通信とマルチポイント通信を効率的に組み入れた無線局連携送受信技術の適用により、1.3倍の周波数利用効率の改善を確認した。課題イの「多用途周波数共用最適化技術」では、課題アでの周波数利用効率向上に資する通信制御に利用可能な周波数軸と時間軸上の電波環境情報を解析・出力を可能とした。課題ウの「稼働物体との高信頼無線通信」では、送信側で搬送波を作り出すことなく、Wi-Fi の電波をアンテナのインピーダンスをスイッチで高速に切り替えるだけでデータを送信する Wi-Fi バックスキュッタという技術を利用し、最適ビームを瞬時に選定して、稼働するロボットアームに取り付けられたセンサノードとアクセスポイント間の簡易ビームフォーミングによる高信頼性通信を達成した。以上により、目標としていた周波数利用効率に対し、2.1倍以上の向上を達成した。

技術の種類	目標の達成状況
適応的複合メディアアクセス	製造現場では、産業機器・高周波利用設備から発せられる高レベル・広帯域な電波ノイズ、無線給電からの放射ノイズ、マルチパスリッチな環境などに起因して信

号強度が不安定となり、信号対雑音比（SN 比）の悪化による無線通信の途絶といった課題がある。このような課題に対し、ノイズの発生時刻に対して送信待機時間を考慮した無線割り当て方式や、データリンク層より上の階層での IP パケット消失訂正符号化/復号を適用する方式が考えられるため、これら 2 方式を組み合わせる送信タイミングを制御することにより、無線通信を安定化する研究開発を実施した（図 1）。

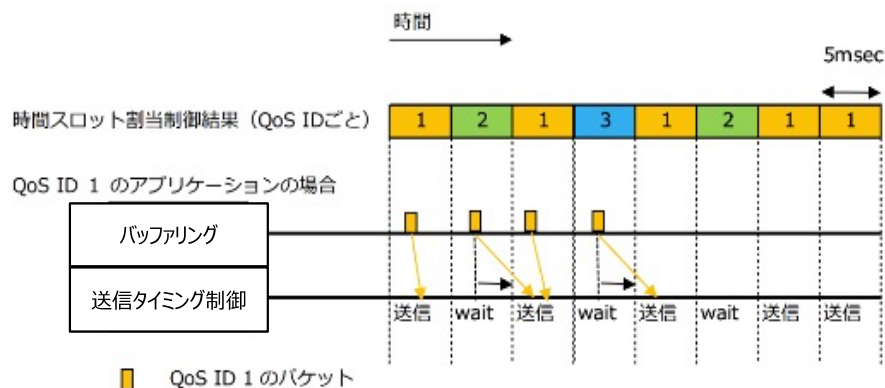


図 1 送信待機時間を考慮した無線割り当て方式

送信待機時刻及び IP パケット消失訂正符号化/復号を考慮したアクセス制御の機能を実現するため、令和元年度に実証実験一次試作系の開発を行った。開発した実証実験一次試作系を用いて特性を評価した結果、送信待機時刻を考慮したアクセス制御は効果があり、ノイズと複数のタイプのデータ通信が共存できることを確認した。令和 2 年度の実証実験二次試作系の開発においては、観測したノイズから送信待機時刻を自動生成する機能を実現し、ノイズを避けたデータ通信を動的に制御できることを確認した。令和 3 年度の研究開発は、ノイズの発生時刻を正確に予測できる場合における性能評価と、ノイズの発生時刻を正確に予測できない場合に IP パケット消失訂正符号化/復号の適用制御を行う統合ソフトウェアを開発した。図 2 に統合実証実験系を用いて、送信タイミングを制御した場合（提案方式）のスループット特性の性能評価結果を示す。横軸はノイズの時間占有率、縦軸を通信スループットとした。

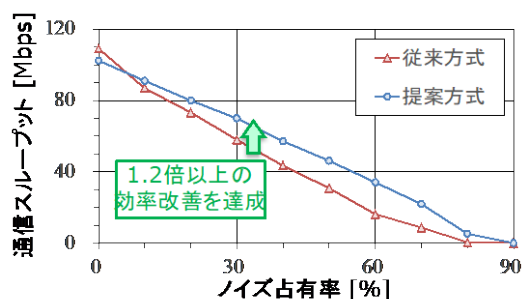


図 2 送信タイミング制御によるスループット特性評価

ノイズ時間占有率が 10%以下では、従来の無線 LAN の方が提案方式よりも高い平均スループットが得られる。ノイズ時間占有率が 10%以上 90%以下のときには、提

	案方式の方が従来の無線 LAN よりも高い平均スループットが得られる。ノイズ時間占有率が 90%以上になると、提案方式でも全時間帯が送信待機時刻になるためデータを流すことができない。実際の製造現場におけるノイズ時間占有率を想定し、30%以上のとき従来の無線 LAN に対して提案方式のスループットが 1.20 倍以上になっており、ノイズ占有率 60%以上において周波数利用の効率が 1.37 倍以上となっていることがわかった。以上により、ノイズ環境下において、ノイズの発生時刻が予測できる場合においては送信待機時間を考慮した無線割り当て方式は効果的であり、ノイズの発生時刻が予測できない場合には IP 消失訂正符号の適用は効果があり、周波数利用効率が従来の無線 LAN に対して改善し、ノイズと複数のタイプのデータ通信が共存できることを確認した。
多用途周波数共有最適化技術	本課題では、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下での信頼性の高い無線通信の実現に向け、無線通信を使用する製造現場での、電磁ノイズのモニタリングシステムの構築、取得したデータの可視化、分析技術の研究開発を実施した。 電波環境情報を取得するため、製造現場の無線機器の多くが使用する 920MHz、2.4GHz、5GHz 帯をカバーし、これらにまたがる広帯域の電磁ノイズ等を時間的な相関がわかるように時間同期して計測可能なセンサを試作した。生産現場への実用展開を考慮したより簡易で柔軟なシステムで必要な情報を抽出可能とするため、複数のソフトウェア無線機を電波受信部として構成した。工作機械の放射する電磁ノイズを計測する実証実験を実施した（図 3）。 （左）電波環境モニタリングシステム、（右）工作機械から放射される電磁ノイズの計測 図 3 電波環境センシング技術 センサにより得られた電波環境データを、機械学習等を用いて解析し、製造現場の運用・管理者が電波の状況を把握可能にするための可視化を行った。広帯域かつ長時間で膨大な量の計測データから、未知のものも含めた電磁ノイズの分離抽出を行うための、モニタリングシステムの運用処理フローを構築した。電磁ノイズの抽出のための一連の分析アルゴリズムとして、教師データ作成のためのクラスタリング、多様な製造現場の電波環境での計測運用を考慮した複数のセンサを配置した場合の学習データ生成手法、分類手法、新規性検出と学習フィードバックの検証、時系列パターン抽出、定常ノイズキャンセルによるデータ転送量の削減と分類精度の向上手法を確立した（図 4）。

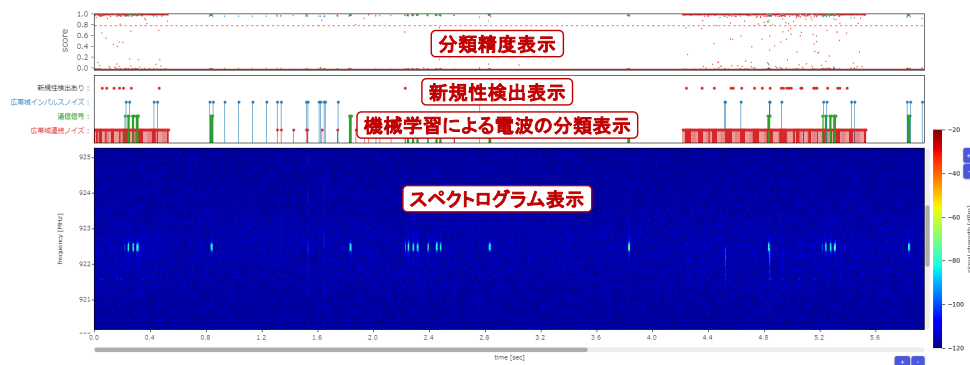


図4 電波環境可視化技術

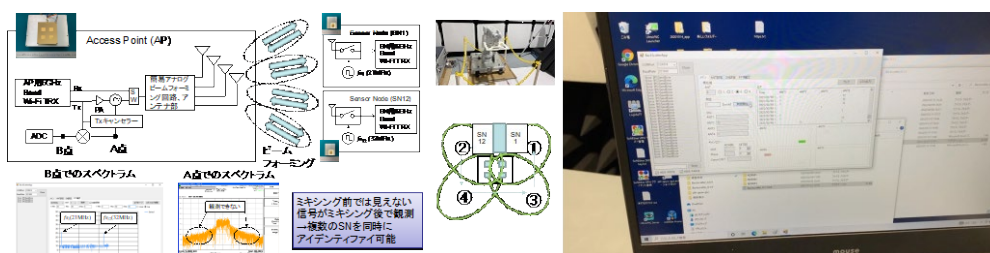
令和元年度は、アクセスポイント(AP)およびセンサノード(SN)の簡易ビームフォーミング送受信機のアンテナ部試作を行い、アンテナ素子数と構成を決定し、回路設計を行った。ビームトラッキングに必要となる、高速移動、回転するセンサノードとの相対位置情報取得方法を検討し、その原理実験に必要な測定系を構築した。

令和2年度は、令和元年度のアンテナ部試作結果を元に、最終年度に向けて、簡易ビームフォーミング送受信機の部分試作を行った。さらに、前年度構築した測定系を用いて、高速移動、回転するセンサノードとのビーム形成、制御の測定器を使った原理実験を行った。

令和3年度は、令和2年度の部分試作結果をもとに、Wi-Fi バックスキヤッタを用いた簡易ビームフォーミング送受信機の全体試作を行った(図5(a))。さらに、高速移動、回転するセンサノードとのビーム形成、制御に関して、ロボットアームを用いた実環境に近い状況での実証実験を行い、2個のSNと最適ビームの組み合わせを瞬時に判別した。(図5(b))。

以上の結果、Wi-Fi バックスキヤッタを用いる事により、移動するロボットアームに取り付けられたSNとAP間の簡易ビームフォーミングを実施すると共に、高速移動するSNとの通信制御手法を開発した。

稼働物体との高信頼無線通信技術



(a) 提案高効率電波送受信システム

(b) 検証実験状況

図5 効率電波送受信システム

また、適応的複合メディアアクセス制御技術の効果が期待できるアプリケーションとして、振動センサを用いた予防保全と移動体の安定制御の検証を行った。

稼働中の工場における実際の振動データに基づき、データの間引きに必要な処理能力とデータ量の関係性を分析した。この実験では、フライス加工機で金属を繰り返し切削し、その際の振動データをセンシングした。センシングされた典型的な振

動波形（切削初期）をローパスフィルタ、ピーク検出の手順で処理し、ピーク検出処理後に Peak-Peak マップを生成した（図 6）。切削回数ごとにマップ比較を行ったところ、切削歯の状態に違いがあり、閾値導入で OK/NG の判断が可能であることがわかった。（図 6 において切削初期は 2 回目の切削、切削後期は 26 回目の切削）

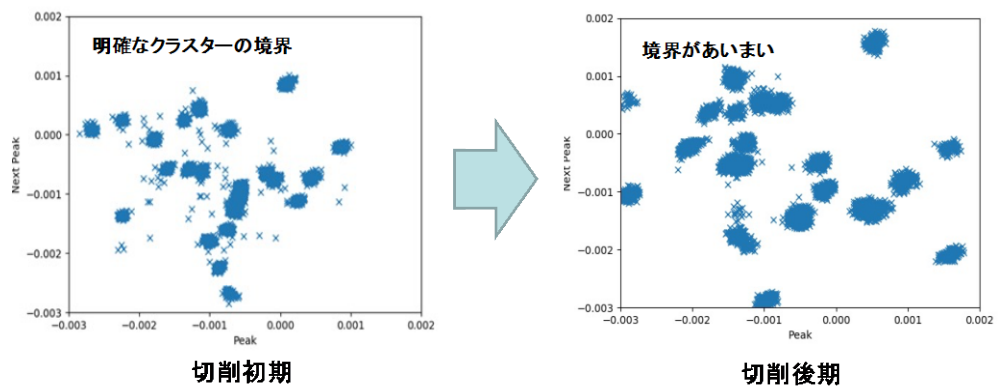


図 6 Peak-Peak マップ

さらに統合実験システム（図 7）を構築し、送信データ量の間引き検証、および冗長性を持たせたデータ送信による移動体の通信安定化検証を行った。

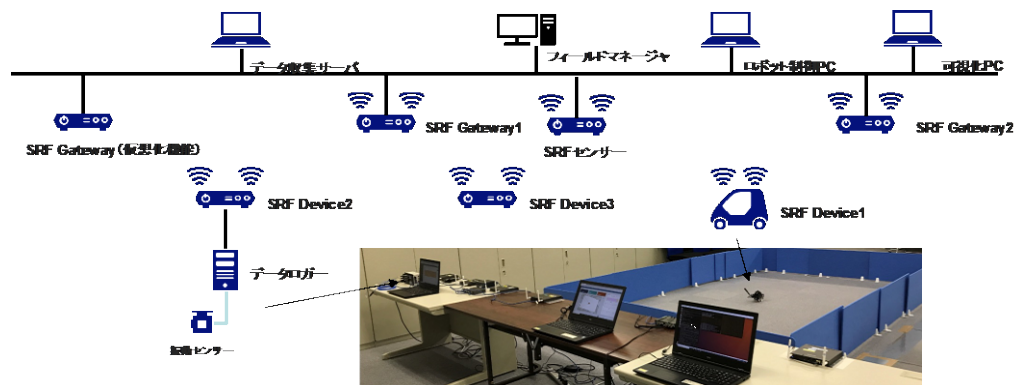


図 7 統合実験システム

冗長化機能を有効化すれば、事前にリンクの品質がわからない状態でも、常に到達が早い方のパケットを採用することで遅延を抑える効果があった。統合実験システムを用いて評価した結果、図 8 のように冗長化制御機能により片方向遅延が抑えられていることがわかった。

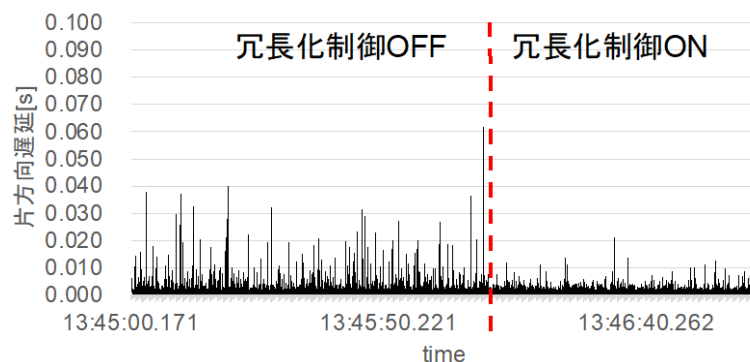


図 8 通信の冗長化による遅延改善

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4年7月1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 24 件の論文発表及び合計 40 件の口頭発表に加え、合計 12 件の特許出願を行った。さらに、合計 7 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 として活動を開始し、令和 3 年にドラフト 0.0、令和 4 年にドラフト 0.1 を発行するなど、国際標準獲得に向けて非常に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	令和元年度	令和2年度	令和3年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0 件 (0 件)	2 件 (2 件)	5 件 (1 件)	7 件 (3 件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1 件 (1 件)	6 件 (6 件)	10 件 (7 件)	17 件 (14 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	10 件 (2 件)	17 件 (1 件)	13 件 (0 件)	40 件 (3 件)
特許出願数	2 件 (0 件)	6 件 (0 件)	4 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)
国際標準提案数	1 件 (1 件)	1 件 (1 件)	5 件 (5 件)	7 件 (7 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 (0 件)	1 件 (0 件)	3 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)	0 件 (0 件)	0 件 (0 件)

注：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。

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	本格的な IoT 時代を迎え、製造、小売り、農業、健康等の様々な分野で無線通信を使った IoT の導入が進んでいる。特に、工場等では様々な工具、装置、機械などに無線機器が取り付けられ、作業データ等の収集・分析が行われ、生産性の向上に向けた取組が進んでいる。また、工場等で利用される無線機器は、無線 LAN 等で利用されている 2.4GHz 帯の周波数を中心とした同一周波数帯域を共用している状況である。 他方、工場等の製造現場では、無線機器以外にも産業機械及び高周波利用設備が稼動しており、これらから発せられる高レベル・広帯域な電波ノイズが原因となっており、無線機器の通信が途絶し輻輳するといった問題が発生しているのが現状となっているため、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下においても信頼性のある無線通信を可能とする技術等を確立することで、既存の周波数を用いた高信頼性の無線通信の実現が必要不可欠であった。 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	IoT 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

	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を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。 予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	本研究開発では2倍以上の周波数利用効率向上を目指してきており、課題アの「複数無線局連携による空間再利用技術」として、無線局連携を応用したノイズ情報の収集と、それを用いたメディアアクセスのパラメータ制御により1.4倍の周波数利用効率の改善を確認した。課題アの「ノイズの発生パターンを考慮したノイズの回避技術」として、送信待機時間を考慮した無線割り当て方式により、実際の製造現場のノイズ占有率30%以上で通信スループット1.2倍の改善を確認した。課題アの「無線局連携送受信技術」として、マルチチャネル通信とマルチポイント通信を効率的に組み入れた無線局連携送受信技術の適用により、1.3倍の周波数利用効率の改善を確認した。課題イの「多用途周波数共有最適化技術」では、課題アでの周波数利用効率向上に資する通信制御に利用可能な周波数軸と時間軸上の電波環境情報を解析・出力を可能とした。課題ウの「稼働物体との高信頼無線通信」では、Wi-Fi バックスキヤッタ稼働するロボットアームに取り付けられたセンサノードとアクセスポイント間の簡易ビームフォーミングによる高信頼性通信を達成した。以上により、目標としていた周波数利用効率に対し、2.1倍以上の向上を達成するとともに、周波数の有効利用の一層の向上に資することができた。 また、本研究開発は、IoT 機器ベンダーや機器の利用者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、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することとしており、研究成果の実用化等へ向けた高い確実性が得られた。 さらに、特許出願や標準化に向けた活動なども着実に実施されるなど、国際標準化活動を積極的に行った。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発は、施設内空間における周波数の有効利用の一層の向上を可能とする技術を開発するものであり、研究開発成果は広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 また、本研究開発の実施に当たっては、開示する電波資源拡大のための研究開発平成31年度基本計画書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。なお、基本計画とは、研究開発課題の提案の公募に先立ち、研究開発内容・技術課題・到達目標など研究開発を実施する上での基本的な計画を記載したものである。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	工場等の生産現場では、様々な工具・装置・機械等に無線機器が取り付けられ、無線の利活用が進んでいる一方、無線機器以外にも産業機械及び高周波利用設備が稼働しており、これらから発せされる高レベル・広帯域な電波ノイズが原因となって、無線機器の通信が途絶し、輻輳するといった課題が発生している。 今後、無線機器を使った状況把握・制御・給電等の需要が増加し、急速な無線利用が進むことが見込まれており、同時に産業用ロボットの利用拡大が見込まれていることから、上記課題に早急に対応する必要があるため、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下においても信頼性のある無線通信を可能とする技術の研究開発を早急に実施する必要がある。 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）

高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下においても信頼性のある無線通信を可能とする技術等を確立することで、既存の周波数を用いた高信頼性の無線通信を実現した。

適応的複合メディアアクセス制御技術、多用途周波数共用最適化技術及び稼動物体との高信頼無線通信技術を確立することにより、目標としていた周波数利用効率に対し、2.1倍以上の向上を達成するとともに、周波数の有効利用の一層の向上に資することができた。

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。

＜今後の課題及び取組の方向性＞

本研究開発で確立した技術は、異種の無線システムが共存し、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下において、無線の不安定性を克服し高信頼な無線システムを提供することを可能とする技術である。この特徴を生かし、次世代型製造現場（スマート工場）対応FA（ファクトリー・オートメーション）システム市場での実用化を目指す。

今後、第5世代移動通信システムにおいて、IoT時代に対応するため高密度・高信頼化が進められているが、本研究開発で推進している狭空間で免許不要帯を利用する無線システムで高密度・高信頼化を推し進めることは、すみ分けや補完関係を維持・発展させるものである。限られた周波数資源の条件の下で、IoT機器の増加や、発生する情報の増大に対して、ユーザの要件を満たすネットワークと、それを利用したサービスを柔軟に提供することが可能となる。

本研究開発では、工場、倉庫、病院、駅、空港など施設（狭空間）を想定し、動的な無線環境でも安定な通信を確立する技術である。したがって、スタジアムやホールなどイベントに伴って無線トラフィックが増加する場合でも、施設管理、安全管理を確実に運用したり、災害時にテンポラリーに集められた複数の複数無線システムを安定に運用するようなケースでも有効であると考ええる。

また、複数の無線システムでポリシー制御による連携を行うためのインターフェースとプロトコルを規格化させ、少ない実装コストや検証コストでこの規格を取り入れるようにできる。その結果、無線システムを販売するベンダーにとって、無線通信の不安化リスクを下げ、ユーザの期待を満足させることができ、市場機会の増加をもたらす効果がある。

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4年7月1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。

- ・異種の無線システムや産業機械等が共存し、高レベル・広帯域なノイズが発生する環境下で、信頼性のある無線通信を可能にする無線通信技術を確立できており、有益であったと判断する。
- ・IEEE802.11での標準化提案、IEEE802.1との標準化連携提案に取り組んで、寄書を入力しプロジェクトに参加している。また、査読付き口頭発表40件を含む査読付き発表論文数47件、申請特許数12件であり、知的財産に積極的に取り組んでいると判断する。

7 評価に使用した資料等

○未来投資戦略2018-「Society 5.0」「データ駆動型社会」への変革-（平成30年6月15日 閣議決定）

https://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/miraitousi2018_zentai.pdf

○経済財政運営と改革の基本方針2018（平成30年6月15日 閣議決定）

https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/2018/2018_basicpolicies_ja.pdf

○知的財産推進計画 2018（平成 30 年 6 月 12 日）

<https://www.kantei.go.jp/jp/singi/titeki2/kettei/chizaikeikaku2018.pdf>

○電波資源拡大のための研究開発 平成 31 年度基本計画書

https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/190128_keikakusho.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4年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：総合通信基盤局 新世代移動通信システム推進室

評価年月：令和4年8月

1 政策（研究開発名称）

移動物体高度認識レーダー基盤技術の研究開発¹

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間

令和元年度～令和3年度（3か年）

・実施主体

民間企業、大学、国立研究開発法人²

・総事業費

1,104百万円

令和元年度	令和2年度	令和3年度	総額
356百万円	390百万円	358百万円	1,104百万円

※ 予算要求時に予算総額が10億円を超えることが想定されていなかったため、事前事業評価については未実施。

・概要

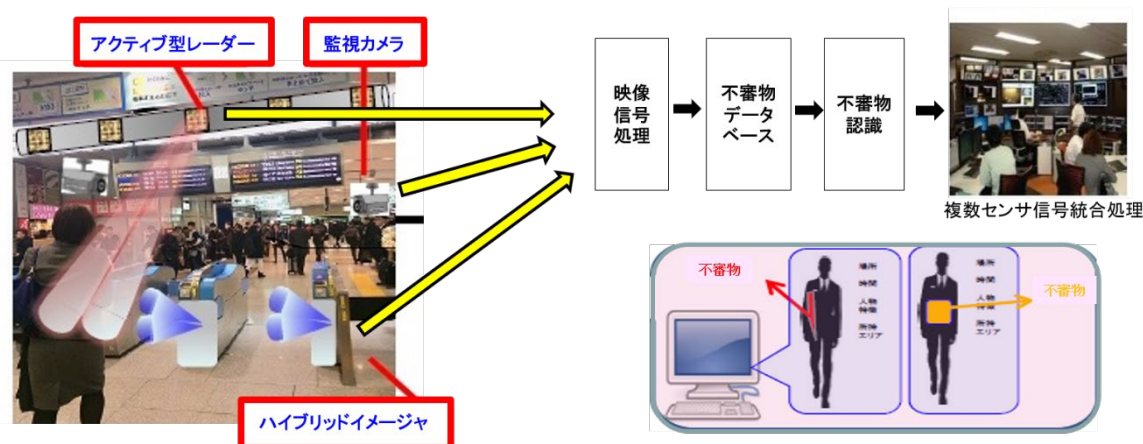
世界各国ではテロ等による脅威が拡散し、特にソフトターゲット³を標的としたテロが増加しており、セキュリティ確保は重要な課題となっている。現在、空港の保安検査では、金属探知機検査やX線による手荷物検査、諸外国ではミリ波帯を利用した禁制物検査等が実施されているが数十センチの距離まで近づく必要があり、保安区域外では人が隠し持った危険物（銃や爆弾、刃物等）を把握することができず課題となっている。

本研究開発では、隠し持った危険物を可視化する不審物認識システムの実現に向け、W帯（75～110GHz帯）の比較的高い周波数帯を利用し、15m離れた対象物の検知を可能とするレーダー及び5m離れた対象物の可視化を可能とするイメージャを開発する。また、レーダー及びイメージャにより得られた情報を統合し、機械学習により危険物を高精度に判別するシステムの基盤技術について研究開発を行う。本研究開発により未利用周波数帯での電波の有効利用が見込まれる。

¹ 新案件名「セキュリティ強化に向けた移動物体高度認識レーダー基盤技術の研究開発」。平成31年度当初予算で開始し、令和2年度に研究開発を継続する際に名称を変更したもの。

² 公共上の事務等のうち、その特性に照らし、一定の自主性及び自律性を発揮しつつ、中長期的な視点に立って執行することが求められる科学技術に関する試験、研究又は開発に係るものを主要な業務として国が中長期的な期間について定める業務運営に関する目標を達成するための計画に基づき行うことにより、我が国における科学技術の水準の向上を通じた国民経済の健全な発展その他の公益に資するため研究開発の最大限の成果を確保することを目的とする独立行政法人

³ テロ攻撃に対して比較的脆弱とみられる施設等のこと。不特定多数の人が集まりやすい駅や空港ロビー等が一例として挙げられる。



技術の種類	技術の概要
超高感度干渉積分方式を用いたW帯センシング・イメージング技術	W帯電波の透過・反射特性を利用し、公共スペースを移動する人が所持する不可視な不審物を離れた場所から検知できるセンシング・イメージング技術(アクティブ型イメージング技術⁴及びパッシブ型イメージング技術⁵を併用したハイブリッド型イメージング技術並びにアクティブ型レーダー技術⁶)の研究開発を実施。 また、可搬型での運用に向けたアクティブ型レーダーの小型化端末用アンテナ等の研究開発及びW帯電波による物体検知距離延伸のためのレンズ及び光電界センサの開発を実施。
各センシング・イメージング技術を統合したセンサーフュージョン技術	ハイブリッド型イメージング技術で得られるイメージは、可視光線で得られるイメージ(カメラ画像等)に比べ、著しく解像度が低く、雑音による劣化もあるため、画像処理のための映像信号処理技術、不審物を検知するための認識技術、不審物の検知精度を上げるための機械学習用データベース技術を利用し、衣服の内側等に隠し持った不審物を高精度に認識するための研究開発を実施。 また、センシング・イメージング技術の研究成果を、可視光による監視カメラ等の既存のセキュリティシステムに統合し、ネットワーク上でシステムとして動作するように最適化を行い、移動する不審者が隠し持つ危険物を判別するための「不審モノ(物・者)ネットワークシステム」としての有効性を実証。

⁴ 対象物に対して電波を発射し、反射する電波を面で受信することにより、対象物を透過せず反射した電波の強度から対象物の形状を可視化する技術

⁵ 物体が放射する電磁波(熱放射)を面で受信することにより、受信する電磁波の強度から対象物の形状を可視化する技術

⁶ 電波を発射し、対象物に当たって反射する電波を受信することにより、受信する電波の強度や到達時間差等から対象物の距離と方位を検知する技術

・スケジュール

技術の種類	令和元年度	令和2年度	令和3年度
超高感度干渉積分方式を用いたW帯センシング・イメージング技術		パッシブイメージャの設計・試作	評価・改良
		アクティブイメージャの設計・試作	評価・改良
		ハイブリッドイメージャの設計・試作	評価・改良
		小型アクティブレーダーの設計・試作	評価・改良
		W帯用レンズ・光電界センサの設計・試作	評価・改良
各センシング・イメージング技術を統合したセンサーフュージョン技術	センシング・イメージングデータ解析	機械学習用サンプルデータ制作・学習	センシング・イメージング実データの学習
	不審モノネットワークシステムの開発	システムの評価・改良	システムの構築
		実用化・標準化に向けた調査	
		統合化試験準備	統合化試験・評価

(2) 達成目標

不特定多数の人が集まり警備が比較的緩やかな地下鉄や空港ロビー等のソフトターゲットを標的としたテロ等に対するセキュリティ対策を強化するため、15m 程度離れた対象物を測定可能な W 帯レーダー及び 5m 程度離れた対象物を測定可能なイメージャを開発し、更にこれらが得たセンシング・イメージング情報を統合し、高度な認識技術を活用することで、不審者が隠し持った危険物を認識精度 50%以上で認識するシステムの基盤技術を確立する。

○関連する主要な政策

政策 13 「電波利用料財源による電波監視等の実施」

○電波政策 2020 懇談会 報告書（平成 28 年 7 月）

第 3 章 制度見直しの方向性

1. 電波利用料の見直しに関する基本方針

(2) 電波利用共益事務の在り方

②次期における電波利用料の使途

(オ) 電波資源拡大のための研究開発、周波数ひっ迫対策のための技術試験事務

d) ミリ波・テラヘルツ分野

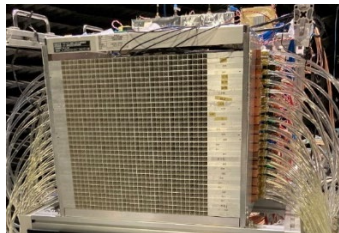
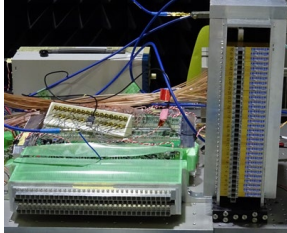
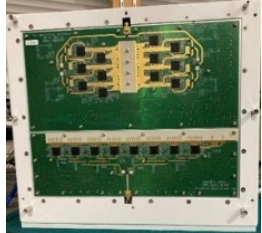
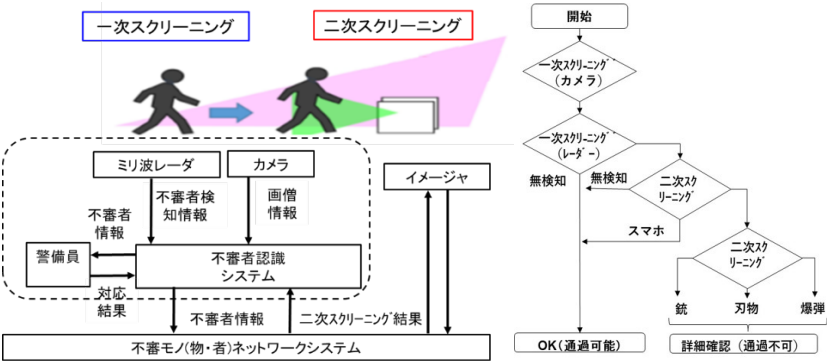
ミリ波帯を利用した大容量通信システムや高精度レーダーの開発、100GHz 超の電波を利用するための基盤技術の開発及び試験を実施する。

(3) 目標の達成状況

3年間の研究開発を通じて、W帯の周波数を用いたハイブリッドイメージャ、小型アクティブレーダー等を開発し、目標を達成した。また、これらにより得られたセンシング・イメージング情報を統合し、不審者の認識及び不審者が持つ不審物の認識を2段階で判定を行うシステムの実証を行い、それぞれ目標を達成した。

これらの成果は、比較的無線技術の利用が進んでいない高周波数帯の利用の促進に資するものである。

具体的な主要結果は以下のとおり。

技術の種類	目標の達成状況
超高感度干渉積分方式を用いたW帯センシング・イメージング技術	アクティブ型イメージング技術とパッシブ型イメージング技術を組み合わせたハイブリッド型イメージング技術について、その原理検証を行い、5m離れた場所にある対象物のイメージの取得に成功した。アクティブ型イメージング技術については2つの周波数を用いることで3次元のイメージを取得する方法を開発した。 また、最大検知距離16mの範囲で不審物の疑いのある物体を検知可能なアクティブ型レーダーについて、持ち運びが可能となるように小型のレーダーを開発した。 さらに、ミリ波レーダー・イメージャの検知距離を延伸するためのミリ波用レンズ・光電界センサを開発した。    図1 ハイブリッドイメージャ 図2 2周波イメージャ 図3 アクティブ型レーダー
各センシング・イメージング技術を統合したセンサーフュージョン技術	開発したイメージャで得られるイメージを、映像信号処理により雑音を除去する技術を開発した。また、複数のイメージを機械学習することにより、得られたイメージから不審物を高精度に認識する実証を行った。 また、開発したハイブリッド型イメージャ、アクティブ型レーダーで得られる情報に加え監視カメラの映像を統合し、不審者・不審物の検知を段階的に行う「不審モノ（物・者）ネットワークシステム」を開発し、不審者・不審物を検知することが可能であることを実証した。認識精度については、不審者の平均適合率は75.8%、不審物の平均適合率は66.1%を達成した。 今後は2024年にシステムの実用化に向けた実証を実施予定。  図4 不審モノ（物・者）ネットワークシステムの概要

3 政策効果の把握の手法

研究開発の評価については、各要素技術における目標の達成状況、論文数や特許出願件数などの指標が用いられ、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。この観点に基づき、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和4年7月1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4件の論文発表及び合計35件の口頭発表に加え、合計3件の特許出願（監視方法及び監視装置に関する特許など）を行った。また、IEC TC103⁷において短距離レーダーに関する新規プロジェクトの設立に関与し、本研究開発成果の国際標準化を推進している。

以上より、本研究開発は数多くの成果を上げており、その必要性、有効性等が認められた。

主な指標	令和元年度	令和2年度	令和3年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件（0件）	3件（2件）	1件（1件）	4件（3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）	6件（6件）	16件（16件）
その他の誌上発表数	1件（0件）	2件（0件）	0件（0件）	3件（0件）
口頭発表数	11件（1件）	12件（0件）	12件（5件）	35件（6件）
特許出願数	1件（0件）	2件（0件）	0件（0件）	3件（0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）	1件（1件）	1件（1件）	2件（2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（1件）	0件（0件）	1件（1件）
報道発表数	1件（0件）	0件（0件）	1件（0件）	2件（0件）
報道掲載数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）

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

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

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

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

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

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行った

⁷ IEC TC103：IEC（国際電気標準会議）は電気及び電子技術分野の国際標準化活動を行っており、TC103はIEC内の技術委員会（Technical Committee）の1つであり、無線通信用送信装置の標準化を行っている。

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	現在、空港の保安検査では、金属探知機検査や X 線による手荷物検査、諸外国ではミリ波帯を利用した禁制物検査等が実施されているが数十センチの距離まで近づく必要があり、保安区域外では人が隠し持った危険物（銃や爆弾、刃物等）を把握することができず課題となっている。 この課題を解決するため、本研究開発は、数メートル離れた対象の隠し持った危険物を認識することができるレーダー・イメージャ技術及び当該レーダー・イメージャから得られる情報と監視カメラから得られる情報を統合し、不審者の早期発見のためのシステムを開発するものである。 よって、本研究開発の成果は、ソフトターゲットを対象としたテロ攻撃等の脅威に対する未然防止に関する技術であり、公共安全の向上に資するものであり、必要性が認められる。 また、本研究開発の成果は比較的無線技術の利用が進んでいない高周波数帯の利用の促進に資するものである。 よって、本研究開発には必要性があったと認められる。
効率性	本研究開発の実施体制にあたっては、ミリ波帯レーダーに関する専門的知識や研究開発遂行能力を有する企業、研究開発期間等のノウハウを積極的に活用することにより、効率的に研究開発が実施されている。 また、研究開発の実施期間中も、無線システム、航空保安対策の専門家等で構成される外部有識者と受託者による研究開発運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のための情報交換が積極的に行われた。 経費執行の効率性については、予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。 よって、本研究開発には効率性があったと認められる。
有効性	アクティブ型イメージング技術及びパッシブ型イメージング技術を組み合わせたハイブリッド型イメージング技術について、その原理検証を行い、イメージの取得に成功した。また、小型アクティブ型レーダー、ミリ波用レンズ・光電解センサを開発した。さらに、これらのセンシング・イメージング技術と監視カメラ映像を組み合わせて、不審者・不審物を高精度に検知するシステムを開発した。 これらの研究開発成果が実用化に至れば、不審者・不審物の早期発見に寄与し、公共安全の向上に資することが期待される。 また、本研究開発は、無線システム、航空保安対策の専門家等で構成される外部有識者と受託者による研究開発運営委員会を通じて、実用化を前提として研究開発を推進していた。 よって、本研究開発には有効性があったと認められる。
公平性	本研究開発の成果が社会実装された場合、不特定多数の人が集まる駅舎や空港ロビー等におけるテロ活動等から国民の命や財産を守ることにつながることから、広く国民の利益につながるものである。 また、比較的使用率の低い高周波数帯の活用に大きく寄与するものであることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。 支出先の選定にあたっては、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あたっては、開示する基本計画⁸に基づき広く提案公募を行う、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。 よって、本研究開発には公平性があったと認められる。
優先性	本研究開発の成果は、ソフトターゲットを対象としたテロ活動等の脅威を未然に防止するための技術であり、公共安全の向上に資するものであることから、優先的に取り組むことが適切である。 また、本研究開発は、より高い周波数の利用技術確立するものであり、周波数逼迫対策にも資することから、優先的に実施していく必要がある。 よって、本研究開発には、優先性があったと認められる。

⁸ 基本計画とは、研究開発課題の提案の公募に先立ち、研究開発内容・技術課題・到達目標など研究開発を実施する上での基本的な計画を記載したもの。

5 政策評価の結果（総合評価）

本研究開発は、不特定多数の人が集まり警備が比較的緩やかな地下鉄や空港ロビー等のソフトターゲットを標的としたテロに対するセキュリティ対策を強化するため、15m 離れた対象物を測定可能な W 帯レーダー及び 5m 程度離れた対象物を測定可能なイメージャを開発し、更にこれらが得たセンシング・イメージング情報を統合し、高度な認識技術を活用することで、人が隠し持った危険物を認識するシステムの基盤技術確立することを目的として研究開発を実施したものである。

本研究開発において、超高感度干渉積分方式を用いた W 帯センシング・イメージング技術、各センシング・イメージング技術を統合したセンサーフュージョン技術を開発し、原理確認のためのシミュレーション及び実環境における実証実験を実施し、目標の達成を確認した。

また、論文・口頭発表、特許出願や国際標準化に向けた活動など、実用化に向けた検討もあわせて実施されている。

以上より、本研究開発は有効性、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＞

今後は、本研究開発で確立した技術を新たな無線システムとして実用化するため、引き続き、各事業者において、更なる技術開発を進めていくとともに、継続して国際標準化活動を推進していく。また、同周波数帯を使用する他の無線システム等との共用に係る検討を進めるなど、国内外における実用化に向けた積極的な取り組みを推進していく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和 4 年 7 月 1 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。

- ・ W 帯を使用したセンシング・イメージング技術として、検知距離 2～5m を目標に人が所持する不審物を衣服の上からイメージング画像を取得するイメージャ及び、検知距離 15m を目標に人の位置及び不審物からの反射特性情報を取得するレーダーシステムから構成された数センチ程度の解像度を持つ WUO イメージャを開発し、検知距離 5m を目標に不審物の対象を金属系刃物と想定した上で、可搬・携帯可能なサイズで数キロ程度の重量まで小型化した。また、WUO イメージャを用いた金属系刃物の映像収集や当該映像情報の雑音除去・解像度改善のための信号処理技術の開発、金属系刃物を判別するための不審物認識データベースの構築、物体検出アルゴリズムの開発を行い、歩いている人が金属系刃物を隠し持っている場合に認識率 50%以上で金属系刃物と認識し、不審者の映像情報と不審物の映像情報の紐付けを行う不審物ネットワークの開発を行い、到達目標を達成した。計画通り研究開発がなされており、予算は効率的に使用されたと思われる。W 帯を利用したイメージング・認識技術および機器の海外展開可能サービス／潜在需要を調査し、認証手順、空港での問題点、新たな動向について整理し、危険物の特定のために、これらの特性データベースの蓄積を行うこと、装置を認証することを役割とする公的機関が市場獲得に必要な結論を得た。また、セキュリティ検査用レーダーシステムの周波数利用を他のシステムと共用するための技術基準を策定するため、国際電気連合にて、規格化活動を実施した。以上、総合的に見て有益であったと思われる。
- ・ 公共スペースのセキュリティ対策を強化するため、W 帯における複数の周波数帯でのセンシング・イメージング技術を開発し、人が隠し持った不審物を認識するシステムの基盤技術確立するとともに、レーダー技術を W 帯に適用することで高い周波数帯の利用を促進し、電波の有効利用を図ることを目的とした研究開発である。本研究開発の成果を実用化することにより、W 帯にレーダー技術を適用することで高い周波数帯の利用を促進し、公共スペースのセキュリティ対策を強化することができることから有益であったと判断する。
- ・ 本研究開発は、公共スペースのセキュリティ対策として、W 帯を活用した物体認識レーダー基盤技術をセンシングイメージング技術とセンサーイメージング技術に大別し、各々について、設計、実装、評価を行い、概ね当初の目標を達成しているものと判断できる。W 帯を利用する物体認識レーダーに関連する基盤要素技術の性能を実証レベルで確認できた点は評価できるが、認識率向

上といった最終目標に対する適用技術の適切性については、継続的な検討を期待したい。また、今後の実用化へ向けては、性能やコストの観点も含めた本研究開発成果の優位性の明確化も重要と思われる。総じて、本研究開発は、物体認識レーダーの W 帯への適用可能性を検証した成果として有益なものと判断される。

7 評価に使用した資料等

○電波政策 2020 懇談会 報告書

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

○電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 <電波利用料>

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

○令和元年度 電波利用料による研究開発 基本計画書（本案件の基本計画書は P29～35）

https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/190128_keikakusho.pdf