

令和 8 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

評価年月：令和 8 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

（1）研究開発名称

周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の研究開発

（2）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」

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間・総事業費

実施期間：令和 4 年度～令和 7 年度（4 か年）

総事業費：29.7 億円

当時、当該事業が事前評価の対象となることについて組織内での確認が十分でなかったため、当該評価を実施していない。現在は、同様の事案の発生を防止するため、周知徹底及び複数課室による重層的な確認等の措置が講じられている。

・概 要

本研究は、小型民生機器搭載を目指した小型原子時計の実現と、それを用いた高精度時刻同期基盤・多点測位システムの確立を目的としたものである。

具体的には、小型原子時計について、半導体微細加工による小型・低消費電力の高精度周波数基準の開発と評価装置の標準化を進めるとともに、高精度時刻同期基盤・多点測位システムについて、時刻同期アルゴリズムと有無線混在環境での実証通信機器（モジュール）を開発し、多点測位システムでは、高精度且つ高速な測位を実現した。

これにより、高精度時刻同期基盤および原子時計活用技術について、3GPP や ITU-R への提案、評価手法の標準化、構成部品の規格化を推進することで標準化への貢献を目指す。また、小型原子時計の量産化・商用化に向けた技術移転を進めるとともに、成果の情報発信や産業界・研究機関との連携強化を通じて利用拡大を図り、標準化に伴う市場形成と関連産業の国際競争力強化につなげていく。併せて、小型原子時計による高精度な時刻・周波数基準の確立と、高精度時刻同期及びおよび多点測位システム技術の開発は、従来の同期精度や位置精度の制約を解消し、周波数資源の有効活用に寄与するものであった。

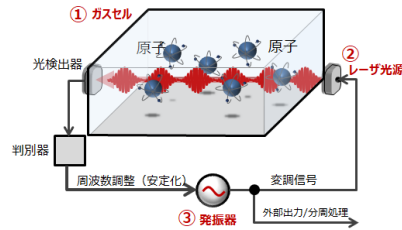
課題 1 小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発

小型民生機器に搭載できる小型化させた原子時計を開発する。現在、民生機器において一般的に周波数信号源として用いられる発振器等をさらに小型化・低消費電力化するとともに、より高精度なものと、半導体プロセスで生産可能な小型原子時計の実現を目指す。

ア. 原子時計主要構成部品の小型化の研究開発

- ① ガスセル量産化の研究開発
- ② 可変波長レーザー素子の研究開発
- ③ GHz帯クロック発振器の研究開発

イ. 原子時計評価システムの研究開発



ア-① ガスセル量産化の研究開発

- ルビジウム原子ガスを内包するガスセルをウェアレベルで生産可能とする技術の研究開発

ア-② 可変波長レーザー素子の研究開発

- ルビジウム原子ガスの共鳴線取得に特化した波長のレーザー素子（出力100μW以上、中心波長794.98nm、線幅100MHz以下）を、可変波長にして製造バラツキを抑制し安価を実現する研究開発

ア-③ GHz帯クロック発振器の研究開発

- 原子共鳴の周波数帯（3.417GHz帯）に適した発振器の研究開発（以下表の位相雑音、消費電力5.0mW以下、発振出力-60dBm以上、3mm×3mm×1mm以下の小型化、70〜120度での高効率の発振動作を確保）

周波数	10kHz	100kHz	1MHz	10MHz
位相雑音	< -100dBc/Hz	< -120dBc/Hz	< -140dBc/Hz	< -160dBc/Hz

➡ 周波数安定度 10×10^{-11} 、サイズ10cc、消費電力45mWの原子時計の研究開発

イ 小型原子時計の評価システムの研究開発

- 原子時計について各構成部品・パラメータを並列で同時に評価できる汎用的評価装置を実現する研究開発
- 外部発振装置の周波数を1秒積算 3×10^{-11} 以下に安定化

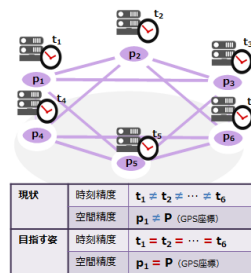
課題 2 高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発

小型原子時計を搭載した端末及びそれ以外の端末で構成された近距離通信において、小型原子時計から生成される周波数情報をもとに、各端末で時刻情報を高精度に同期・管理する高精度時刻同期基盤、さらにこれにより各端末の時空間座標の正確な把握を可能とする多点測位システムを確立する。

ウ. 小型原子時計を利用した有無線時刻・周波数同期技術の研究開発

- ① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発
- ② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

エ. 多点測位システムの研究開発



- ウ-① 原子時計による時刻管理のためのアルゴリズムの研究開発
 - 小型原子時計搭載／非搭載端末の混在ネットワークにおいて、**数十ナノ秒オーダー**の時刻同期精度を実現するアルゴリズム（時刻生成アルゴリズム、時刻供給アルゴリズム、異常検知アルゴリズム）の研究開発

ウ-② 小型原子時計を搭載した有無線モジュールの研究開発

- 高精度な時刻周波数比較機能（以下表の目標を実現）を搭載した通信機器の研究開発

時刻比較機能（1秒積算）	比較精度
有線／有線	10^{-11} 未満以下
無線／無線	10^{-11} 未満以下
有線／無線	10^{-11} 未満以下

- 上記通信機器を用いて、有無線かつ原子時計搭載／非搭載混在のネットワーク環境を想定した検証（複数の通信機器の結合で環境実現）

エ 多点測位システムの研究開発

- 時刻同期された複数ノードでの位置情報特定のための測位システムの研究開発（小型原子時計を搭載した端末において**1秒積算で位置精度10cm以下**の測位を実現）

技術の種類	技術の概要
小型原子時計技術（高精度周波数基準技術）	IoT 端末や小型民生機器への組み込みを目的とした、小型・低消費電力・高安定な原子時計を実現する技術である。半導体微細加工技術を活用し、ガスセル、可変波長レーザー、GHz 帯発振器などの構成要素をチップレベルで集積することで、従来よりも小型化・低コスト化を達成する。さらに、周波数安定度 10^{-11} オーダーの高精度な周波数基準を提供することで、通信や測位の基盤性能を飛躍的に向上させる。 図1. 原子時計のシステムイメージ
高精度時刻同期基盤技術（時刻同期プロトコル・アルゴリズム）	ネットワーク内の複数端末間で、ナノ秒オーダーの高精度な時刻同期を実現するためのアルゴリズムおよびプロトコル技術である。原子時計を搭載した端末と非搭載端末が混在する環境においても、時刻生成・時刻供給・異常検知の各アルゴリズムを組み合わせることで、高精度かつ安定した時刻共有を可能にする。また、有無線モジュールに時刻周波数比較機能を実装し、従来の

ム)	PTP (Precision Time Protocol) を大きく上回る同期精度を達成する。
多点測位システム技術（時空間座標基盤）	高精度時刻同期基盤を活用し、複数の通信ノードから取得される電波伝搬時間や位相情報を統合することで、高精度な位置推定を実現する技術である。GNSS (Global Navigation Satellite System) が利用困難な屋内・トンネル・都市環境においても利用可能であり、位置精度を大幅に向上させる。さらに、ビームフォーミングや空間多重通信と連携することで、通信効率の向上にも寄与する。

(2) 目標の達成状況

4年間の研究開発を通じて、周波数資源の有効活用に向けた高精度時刻同期基盤の構築を目的とした各要素技術について、当初の目標どおり達成することができた（詳細は下表のとおり）。具体的には、小型原子時計技術は周波数安定度 10×10^{-11} を維持しつつサイズ 10cc、消費電力 45mW の小型・低消費電力化を半導体プロセスに基づく構成部品レベルで実現し、高精度周波数基準の確立を達成した。また、高精度時刻同期基盤技術は原子時計搭載／非搭載端末が混在する環境においても数十ナノ秒オーダーの時刻同期精度を実現し、有無線における時刻・周波数比較精度 10^{-11} 前半、比較確度ナノ秒以下の同期基盤を確立した。さらに、多点測位システム技術は GNSS に依らない環境においても位置精度 10cm 以下、1 秒以内での高速測位を実現した。これにより、通信の高精度スケジューリング及び空間多重制御が可能となり、符号誤り率の低減や QAM 多値化の進展、分散 MIMO 技術の活用を通じて、周波数利用率を通信面で 2 倍以上、空間利用で 3 倍以上向上させ、総合で 6 倍以上の改善を達成し、周波数資源の有効活用への寄与が見込まれる。

なお、達成目標等については、基本計画書に記載のとおりである。

https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/220121_keikakusho_RD.pdf#page=11

技術の種類

目標の達成状況

小型原子時計技術（課題ア①～③）

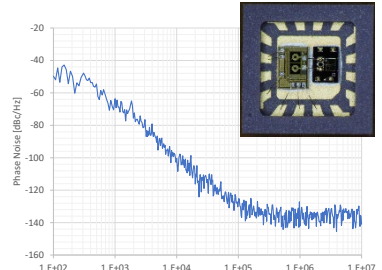
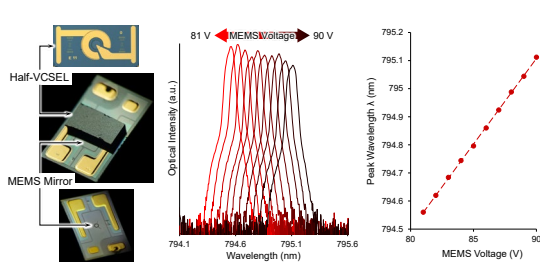


図 2. 波長可変レーザー素子の開発

図 3. GHz 発振器の特性例

半導体微細加工技術を活用し、ガスセル、可変波長レーザー素子、GHz 帯超小型発振器の各構成要素の小型化・高性能化を実現した。具体的には、レーザーについては中心波長 794.98nm、線幅 100MHz 以下(図 2)、発振器については 3.417GHz 発振及び低位相雑音特性を達成し(図 3)、各要素が目標仕様を満たすことを確認した。これらの成果により、周波数安定度 10×10^{-11} を維持しつつ、サイズ 10cc、消費電力 45mW の小型・低消費電力な高精度周波数基準を実現するための要素技術を確立した(表 1, 2, 図 4)。

表 1. 消費電力のマイルストーンと成果

Product		MAC	ULPAC	CLIFS1		CLIFS2
				Milestone 2025	The current status	Milestone 2030
Signal Processing	Micro Controller	20	7.6	5.58	5.58	4.32
	DAC, ADC	13	21.9	17.05	20	6.82
	Locking	8	9.2			
Physics	VCSEL Driver	3	3	7	7	3
	Heater	7	9.1			
	Coil	1	1			
Microwave/ RF	VCO	32	2	9.1	12.4	9.1
	PLL	20				
	Buffer	1				
	TCXO	7	7			
Power Manager & Passive Parts Loss		13	6.2			
Total		125	62.9	39.78(<45)	44.98(<45)	23.24(<25)

単位(mW)

表 2. デバイスサイズのマイルストーンと成果

Physics package		IC in PKG	Total
Fused Glass	0.6 cc	0.008 cc	0.608
MEMS(L)			
MEMS(S)	0.5 cc		0.508
Planar type(Discrete)		Stack type(SIP)	
>6.9 cc		>0.508 cc	



Milestone 2025<10cc
Milestone 2030<1cc



Milestone 2025<10cc
Milestone 2030<1cc

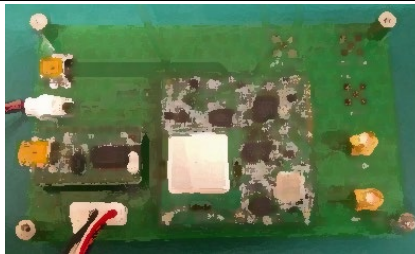
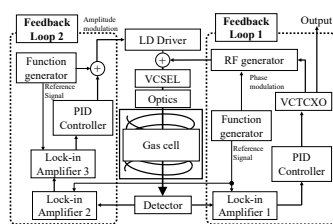


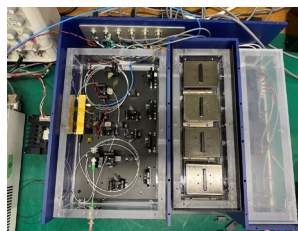
図 4. 原子時計試作例

原子時計の周波数安定度を高精度に評価するための評価システムを構築し、ルビジウム原子の共鳴スペクトルを用いた周波数安定化動作を実現した。積算時間 1 秒において短期周波数安定度 3×10^{-11} 以下を達成するとともに、複数ガスセルの並列同時評価機構を実装した。また、レーザー素子や発振器等の構成部品を効率的に交換・評価可能な構成とし、評価手順の標準化・体系化を確立した(図 5)。

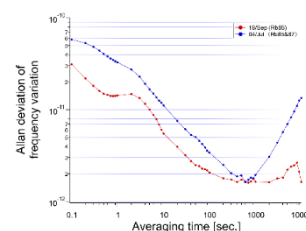
原子時計評価システム技術 (課題イ)



(a) 内部ブロック



(b) 並列システム化例



(c) 特性評価例

図 5. 原子時計評価システムの開発

時刻生成、時刻供給、異常検知の各アルゴリズムを開発・統合し、原子時計搭載／非搭載端末が混在するネットワークにおいて、数十ナノ秒オーダーの時刻同期精度を実現した(図 6)。また、有無線モジュールに高精度時刻・周波数比較機能を実装し、有線・無線双方において比較精度 10^{-11} 前半、比較確度ナノ秒以下を達成した。

高精度時刻同期基盤技術 (課題ウ①・②)

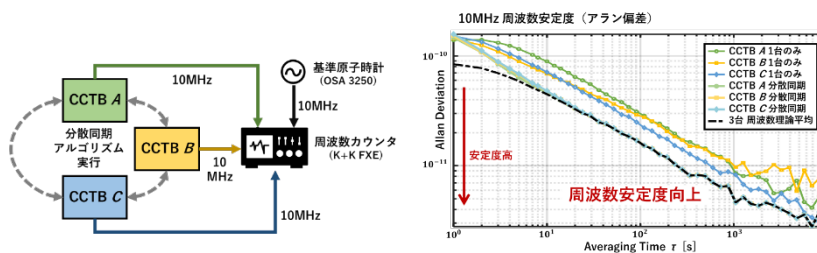
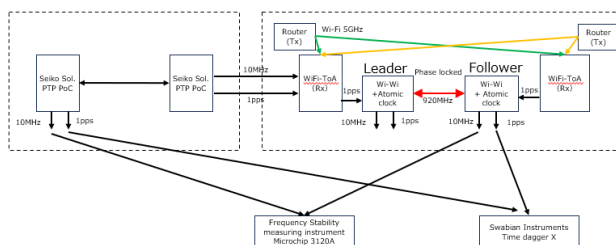
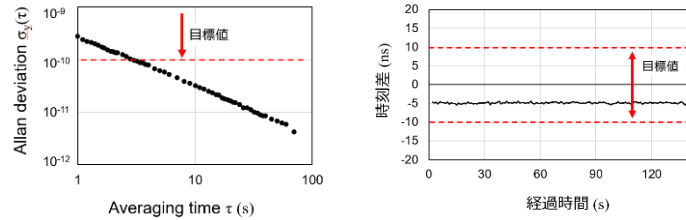


図 6. 分散アルゴリズムの実証例



(a) 有無線ネットワークの検証システム図

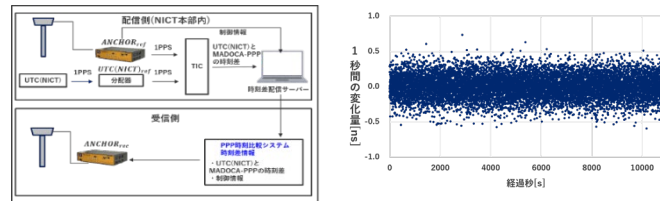


(b) 有無線ネットワーク
の周波数安定度

(c) 有無線ネットワーク
の時刻同期精度

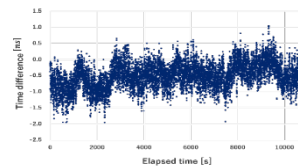
図 7. 有無線時刻同期システムの連携評価

高精度時刻同期基盤及び原子時計を活用し、複数ノードから取得される電波伝搬時間、位相、周波数情報を統合処理することにより、GNSS 非依存環境において位置精度 10cm 以下、1 秒以内の高速測位を実現した(図 8-10)。また、様々なユースシーンを想定した環境における測位性能を検証し、安定した位置推定性能を確認した。さらに、得られた位置情報を協調無線へ適用することで、空間多重通信の高度化及びスループット向上効果を実証した(周波数高精度化でスループット 2 倍以上(図 11)、空間情報の活用でスループット 3 倍以上(図 12))。

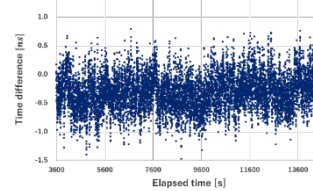


(a) 時刻比較評価

(b) 時刻差情報の変動量



(c) UTC(NICT)との比較



(d) UTC(NICT)の
リモートサイトとの比較

図 8 GNSS アンカーによる時空間情報のブロードキャスト

多点測位システム技術
(課題エ)



図 9 多点測位システムの交通インフラへの展開

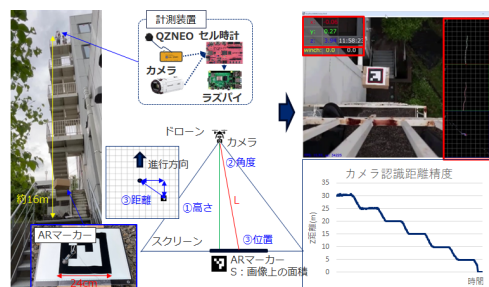
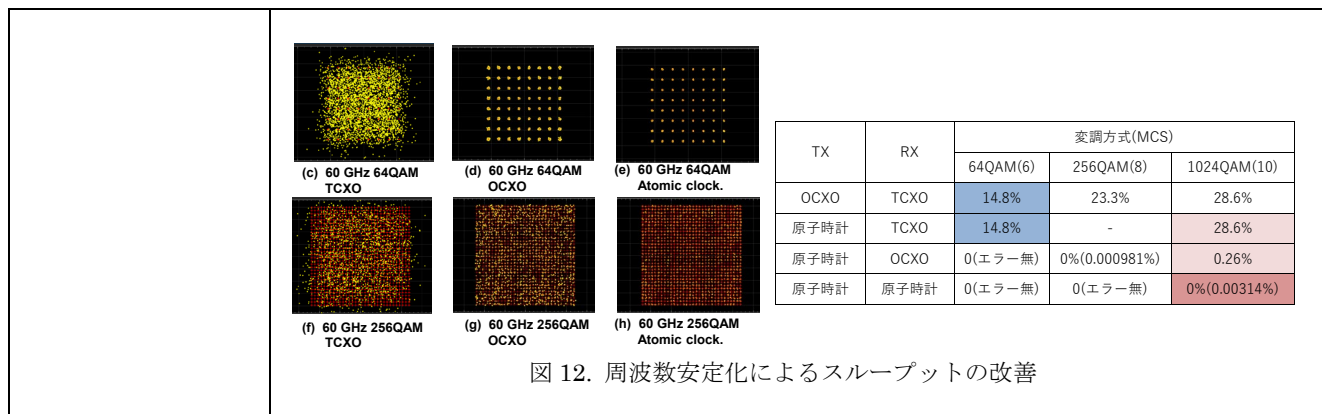


図 10. 多点測位システムのドローンシステムへの展開



3 政策効果の把握及び有識者の知見の活用

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に加え、論文発表件数、特許出願件数、国際標準化活動等の指標を用い、これらを基に専門家の意見を交えて、必要性・効率性・有効性の観点から総合的に評価を実施した（論文発表件数、特許出願件数、国際標準化活動等の成果実績については下表のとおり）。

また、電波利用料による研究開発制度では、外部有識者による評価会を年1回開催し、目標の達成状況、研究開発体制の妥当性、成果創出の状況及び実用化の見通し等について評価を行い、当該評価結果は、研究開発の継続可否、予算配分及び研究体制の見直し等に反映、研究開発マネジメントの適正化に活用することとしている。本研究開発においても、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和8年6月）において、目標の達成状況や得られた成果等について、研究開発の目的、政策的位置付け及び目標、研究開発マネジメント、研究開発成果の目標達成状況、研究開発成果の社会展開のための活動実績並びに研究開発成果の社会展開のための計画などの観点から、外部有識者・外部専門家による評価を実施したところ、以下のようなご意見があり、本研究開発の評価に活用した。

- ・小型原子時計、高精度時刻同期基盤技術、多点測位システム技術の開発に成功し、当初設定した主要な技術目標を達成。一部では目標を上回る性能も実証し、研究開発目標は概ね達成された。
- ・高性能な時刻同期・測位基盤の確立として、小型原子時計において目標を上回る周波数安定度（ 10^{-12} 台）を実証し、有無線混在ネットワークで 10^{-11} 台の同期精度と数ナノ秒以下の時刻確度、多点測位で 10cm 級の位置精度を達成した。
- ・原子時計、時刻同期基盤、多点測位システムを統合し、分散 MIMO による通信性能向上も含め、Beyond 5G/6G 時代の周波数利用効率向上に向けた基盤技術を確立した。
- ・特許出願 26 件、3GPP への標準化提案採択などの成果を上げており、通信・測位分野への製品展開や社会実装に向けたロードマップも示された。

また、研究開発運営委員会を設置し、年4回の頻度で進捗報告及び技術的評価を実施した。委員会では専門的見地からの助言を受け、研究開発の方向性や実施体制の改善に適宜反映した。

さらに、令和5年度以降は時空間同期シンポジウムを開催し、外部有識者や産業界との連携を通じて本技術の社会展開に向けた意識醸成及び知見共有を推進した。加えて、3GPP において関連する3件の寄与文書が採択されるなど、国際標準化においても具体的成果を創出した。

主な指標	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件 (1件)	5件 (4件)	2件 (1件)	1件 (1件)	9件 (7件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1件 (1件)	12件 (12件)	13件 (13件)	12件 (11件)	38件 (37件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	4件 (0件)	2件 (0件)	0件 (0件)	6件 (0件)
口頭発表数	12件 (4件)	14件 (2件)	26件 (5件)	33件 (5件)	85件 (16件)
特許出願数	3件 (0件)	3件 (0件)	8件 (0件)	12件 (4件)	26件 (4件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
国際標準提案数	0件 (0件)	1件 (1件)	3件 (3件)	2件 (2件)	6件 (6件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (1件)	2件 (2件)	3件 (3件)
受賞数	2件 (0件)	2件 (0件)	1件 (0件)	5件 (0件)	10件 (0件)
報道発表数	0件 (0件)	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)	1件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	1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及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)」及び「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。

4 政策評価の結果(総合評価)、今後の課題及び取組の方向性

(1) 政策評価の結果

■ 必要性

IoT機器やモビリティの拡大に伴い、無線トラフィックの増大や周波数資源の逼迫が深刻化する中、時間軸及び空間軸を活用した周波数利用効率の向上が重要な政策課題となっていた。本研究開発は、この課題に対し、小型原子時計による高精度な時刻・周波数基準の確立と、高精度時刻同期及び多点

測位システム技術の開発により、従来の同期精度や位置精度の制約を解消し、周波数資源の有効活用を実現することを目的とするものである。このような基盤技術は民間単独では実現が困難であり、電波資源の効率的利用という公共性の高い観点から、国が主導して推進する必要があったと認められる。

■ 有効性

本研究開発では、周波数安定度 10×10^{-11} を有する小型原子時計の要素技術を確立するとともに、原子時計搭載／非搭載端末が混在する環境においても数十ナノ秒オーダーの時刻同期精度を達成し、さらに GNSS 非依存環境において位置精度 10cm 以下、1 秒以内の高速測位を実現した。これらの成果により、通信の高精度スケジューリングや空間多重制御が可能となり、符号誤り率の低減及び QAM 多値化、分散 MIMO の高度化を通じて、周波数利用効率を通信面で 2 倍以上、空間利用で 3 倍以上、総合で 6 倍以上向上させた。これにより、無線通信の高度化及び周波数資源の有効活用に大きく寄与するとともに、次世代通信インフラの実現に向けた基盤技術を確立したことから、本研究開発は当初目標を達成しており、高い有効性が認められる。

■ 効率性

本研究開発では、年 1 回の外部評価及び年 4 回の研究開発運営委員会による進捗管理を通じて、研究開発体制や実施内容の適切な見直しを継続的に実施した。また、国際標準化活動（3GPP）やシンポジウム開催等を通じて成果の社会展開も並行して推進しており、限られた期間・資源の中で効率的な研究開発が実施されたと評価できる。

（２）今後の課題及び取組の方向性

本研究開発により、小型原子時計や高精度時刻同期基盤・多点測位システム技術の基盤が確立され、その成果として商用化された製品が市場に出ており、周波数利用効率の大幅な向上に寄与することが見込まれる。本研究開発の成果は、通信システム、IoT ネットワーク、自動運転、ドローン制御等の分野において活用が見込まれ、Beyond 5G/6G 時代における基盤技術として広範な波及効果が期待される。一方で、さらなる社会実装に向けては、スマートフォン等のポータブル端末への展開を視野に、一層の小型化、低消費電力化、コスト低減及びシステム統合の高度化が課題となる。今後は、これらの課題の解決に向け、量産技術や国際標準化（3GPP 等）の推進、成果の情報発信、産業界・研究機関との連携強化を進めるとともに、実環境での実証や商用展開を通じて、国際競争力の強化及び次世代情報通信インフラの実現を図る。

5 評価に使用した資料等

- 第 7 期科学技術・イノベーション基本計画（令和 8 年 3 月 27 日閣議決定）
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/7honbun.pdf>
- 周波数再編アクションプラン（令和 7 年度版（令和 7 年 11 月 28 日））
https://www.soumu.go.jp/main_content/001042686.pdf
- デジタル変革時代の電波政策懇談会 報告書（令和 3 年 8 月 31 日）
https://www.soumu.go.jp/main_content/000766569.pdf
- 本研究開発については、「総務省情報通信研究評価実施指針（第 6 版）」に基づく評価を行っており、関連資料は、以下の URL に掲載されている。また、本研究開発については、研究開発終了後一定の期間を経過してから、研究開発の直接の成果（アウトプット）から生み出された効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）等を確認することは有益であるほか、研究開発施策等の評価の基礎的なデータを取得するため、学会や海外における評価や関連特許、技術移転等の実用化に関する状況を調査し、活用状況等を把握する追跡調査を実施することとしている。
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/>

令和 8 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名：国際戦略局 技術政策課 研究推進室

評価年月：令和 8 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

（1）研究開発名称

安全なデータ連携による最適化 A I 技術の研究開発

（2）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」

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間・総事業費

実施期間：令和 5 年度～令和 7 年度（3 か年）

総事業費：27. 3 億円

・概 要

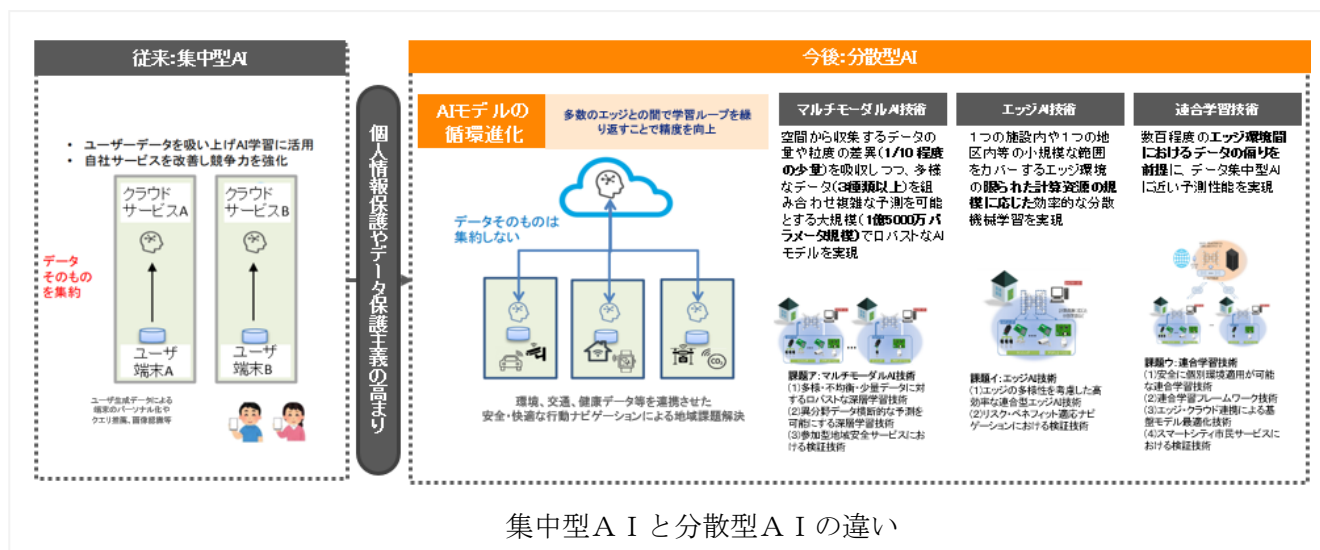
我が国が先端的 A I 技術の研究開発において世界をリードし、多様な者が有するデータを安全に連携させることを可能とする「A I モデル共創プラットフォーム」を世界に先駆けて創出し、分野横断的な A I の応用に関して我が国がトップランナーになるという目的の下、本研究開発では、プライバシーデータや機密データ等を含め、実空間に存在する多様なデータを安全に連携させ分野横断的な課題解決を可能とする分散型機械学習技術確立することを目指す。

具体的には、様々な種類のデータを組み合わせる A I 学習に活用するマルチモーダル A I 技術、エッジ環境で A I 学習を行うエッジ A I 技術、データを共有せずに A I 学習を行う連合学習技術確立し、これらの技術を組み合わせることにより、分散型機械学習システムを試作し、具体的な社会実装シーンを想定した技術実証を行うことにより、その有用性について検証するとともに、検証結果を踏まえて各要素技術の更なる改善を行う。

本研究開発終了後、確立した技術を活用した「A I モデル共創プラットフォーム」を創出し、分野を横断したデータ活用を進めることにより、我が国の社会課題の解決や我が国産業の労働生産性の向上等による産業競争力の向上に貢献することを政策目標（アウトカム目標）とする。

技術の種類	技術の概要
ア) マルチモーダル A I 技術	多様なデータを組み合わせ複雑な予測を可能とする大規模マルチモーダル深層学習モデルの構築技術、及び実空間から収集するデータの差異を吸収可能なマルチモーダル A I 技術についての研究開発を行う。 具体的には、3 種類以上のマルチモーダルデータを組み合わせ、複雑な予測を可能とする 1 億 5000 万パラメータ規模のマルチモーダル深層学習モデルの構築技術確立し、及び収集された場所や期間等によってデータの量や粒度が 1/10 程度の少量になってしまう場合でも、予測性能を概ね維持できるようなマルチモーダル A I 技術の確立を目標とする。
イ) エッジ A I 技術	マルチモーダル深層学習モデルを対象に、エッジ環境の限られた計算資源の規模に応じて、効率的に学習を行う技術の研究開発を行う。マルチモーダル深層学習モデルを対象に、1 つの建物内や 1 つの地区内等の、小規模な範囲をカバーするエッジ環境の限られた計算資源の規模に応じて、効率的に学習を行う技術の確立を目標とする。

ウ) 連合学習技術	マルチモーダル深層学習モデルを対象に、多数のエッジ環境間におけるデータの偏りを前提とした高精度な連合学習技術の研究開発を行う。マルチモーダル深層学習モデルを対象に、数百程度のエッジ環境間におけるデータの偏りを前提に、集中型AIに近い予測性能を実現可能な連合学習技術の確立を目標とする。
-----------	--



(2) 目標の達成状況

3年間の研究開発を通じて、実空間に存在する多様なデータを安全に連携し分野横断的な課題解決を可能とする分散型機械学習技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標を達成し、一部の技術開発項目については目標を超える高い成果を得ることができた。

各研究開発の結果、下表のとおり、基本計画書に定める目標を達成する成果が得られた。具体的には、マルチモーダルAI技術では、複数の実空間データを統合して複雑な状況を予測するマルチモーダルセンシングモデルの構築を行い、単一モダリティに依存する従来手法と比較して、複雑な環境下における予測性能の向上を実現した。エッジAI技術では、プライバシーを保護しながら、運転支援精度を継続的に高めていく、次世代型の車載システムを開発した。連合学習技術では、データを一か所に集めず学習する連合学習であっても、225クライアント規模の分散環境での検証において、従来の集中型学習とほぼ同等の性能を保てることを確認した。本研究開発では、これら3つの要素技術を組み合わせて分散型機械学習技術の確立に寄与することができた。

また、安心・安全なデータ連携と利活用を支援するプライバシー強化技術(Privacy Enhancing Technologies: PETs)の普及と社会実装を目的とした「PETs社会実装促進コンソーシアム」の設立や、成果の実用化を見据えたフィールド実証が実施されるなど、アウトカム目標の実現に向けた盤石な土台を築いた。

これにより、我が国の社会課題の解決や産業競争力向上実現のために必要な技術である、分野横断的な安全なデータ活用の礎を築くことに寄与した。

なお、達成目標等については、事前評価書記載のとおりである。

https://www.soumu.go.jp/main_content/000832854.pdf

技術の種類	目標の達成状況																				
ア) マルチモーダルAI技術	■マルチモーダルセンシングモデルの構築 画像・映像、心拍やCO2 排出量などの生体情報、行動ログ等の 3 種類以上の実空間データを統合して複雑な状況を予測するマルチモーダルセンシング深層学習手法を開発し、1 億 5000 万パラメータ規模のマルチモーダル深層学習モデルを構築した。本手法により、複数モダリティの相関関係を統合的に学習することで、単一モダリティに依存する従来手法と比較して、複雑な環境下における予測性能の向上を実現した。 <table><tr><th>構成バージョン</th><th>精度 (%)</th><th>再現率 (%)</th><th>F1スコア (%)</th></tr><tr><td>映像のみ</td><td>79.14</td><td>69.64</td><td>74.07</td></tr><tr><td>映像 + 心拍数</td><td>84.23</td><td>76.19</td><td>80.01</td></tr><tr><td>映像 + CO₂</td><td>81.88</td><td>72.15</td><td>76.70</td></tr><tr><td>全モダリティ統合</td><td>85.77</td><td>86.30</td><td>86.03</td></tr></table> マルチモーダルセンシングモデルの検証結果	構成バージョン	精度 (%)	再現率 (%)	F1スコア (%)	映像のみ	79.14	69.64	74.07	映像 + 心拍数	84.23	76.19	80.01	映像 + CO ₂	81.88	72.15	76.70	全モダリティ統合	85.77	86.30	86.03
	構成バージョン	精度 (%)	再現率 (%)	F1スコア (%)																	
	映像のみ	79.14	69.64	74.07																	
	映像 + 心拍数	84.23	76.19	80.01																	
映像 + CO ₂	81.88	72.15	76.70																		
全モダリティ統合	85.77	86.30	86.03																		
イ) エッジAI技術	■少量データ環境における予測安定性の検証 つくば市の人流・気象予測では、データ量が 1/10 の条件においても従来手法と比べて高精度な予測を達成し、予測誤差は 0.963 から 0.619 へ改善した。さらに、リモートセンシングによる崖崩壊リスク検知では実災害動画を用いた評価において分類精度が 97.6%から 98.2%の性能を示し、量が少ないデータ環境においても高い予測性能を維持できることを確認した。																				
	■交通分野におけるヒヤリハットリスク予測モデルの構築及び実証実験 不確実な状況下での予測精度を 15.67%から 64.55%へ向上させるとともに、マルチモーダルセンシング基盤モデルにより最大 5 秒先の危険予測を可能とし、空間推論精度 84%、行動・時間予測精度 38.52%を達成した。加えて、データ収集エリアの拡大及びユーザ評価を実施した結果、ドライバーアンケートでは 68.8%がポジティブな利用意向を示し、社会受容性の観点からも有効性を確認した。併せて、分析・実利用データの収集と整理を進め、研究開発受託者のコンソーシアム内で利用可能なデータ基盤を整備するとともに、外部機関が利用可能な公開体制を構築した。																				
	■限られた計算資源でも効率的に学習を行うエッジAI技術の開発及び検証基盤の整備 1 億 5,000 万パラメータ規模のマルチモーダル深層学習モデルを対象に、クラウドと多数のエッジデバイスを連携させた分散連合学習環境を構築し、小規模な建物・地区等のエッジ環境における限られた計算資源でも効率的に学習を行うエッジAI技術の開発を行った。クラウドと数十～数百台規模のエッジデバイスを接続し、モデル更新処理を分散化することで、最大 300 ノード規模のエッジ環境における学習処理を実現。検証の結果、従来手法と比較して学習時間を 25.3～30%短縮するとともに、CPU・GPU 利用の安定化及び通信帯域の効率化を確認した。また、5 TB 規模の実データを用いた 10 日間の連続稼働検証を通じて、クラウド多拠点エッジ環境における大規模マルチモーダルモデルの分散学習の実用性を確認した。 また、車載エッジ環境を想定したオフロード分散学習の高速化技術を開発し、非同期処理による大規模エッジ環境での効率的なモデル更新を実現した。併せて、外部研究者が分散学習AIの研究を行えるようシミュレーション実験システムの利用環境を整備・公開し、バックパック型実験システムを試験提供することで、エッジAI技術の検証基盤を整備した。 ■スマート運転支援実証 上記技術を実フィールドに適用し、車載エッジ環境におけるスマート運転支援システムの開発及び実証を実施。ドライブレコーダー映像等を活用した運転リスク予測を行い、ドライバーの行動変容を促す対話型AI機能を組み合わせた結果、予測精度 87%を達成するとともに、車載環境において 5 秒以内に通知可能な運転リスク予測を実現した。 ■ホットスポット予測実証 都市環境における応用としてホットスポット予測システムを構築し、都市の気象情																				

	報や人流データを活用したリスク予測情報をスマートフォンアプリに提供する仕組みを開発した。本システムでは、リスク情報を 30 秒以内に提供可能な処理性能を確認するとともに、ユーザアンケートにおいて気象情報とパーソナルデータを組み合わせた行動提案に対し 84% のポジティブな評価を得た。
ウ) 連合学習技術	■ データ分布の偏りを前提とした連合学習技術の開発 マルチモーダル深層学習モデルを対象に、数百規模のエッジ環境間におけるデータ分布の偏りを前提として、データを一箇所に集約する集中型 A I に近い予測性能を実現する連合学習技術の開発を行った。パーソナライズド連合学習方式を構築し、225 クライアント環境を用いた検証を実施した結果、全データを一箇所に集約した場合の精度 89.85% に対し、連合学習において 86.27% (iid(※1) の場合) 及び 87.46% (non-iid の場合) の精度を確認し、集中型 A I との差を 5% 以内に抑える目標に対して精度差 3.58% を達成した。また、メンバーシップ推論攻撃を用いた評価では攻撃精度 50% となり、学習データを特定できないことを確認するとともに、FPR(※2) 80% 条件での防御性能を確認した。 ■ 転移連合学習手法の開発 転移連合学習方式を開発し、転移元及び転移先の精度差を 10% 以内に抑えることを目標として検証を行った。その結果、転移元精度 92.9%、転移後精度 90.8% を達成し、精度差 2.1% により目標を満たす性能を確認した。また、データ分布が不均衡な場合にも対応可能な連合学習方式を実装し、その成果は国際会議 ICIP2025 に採録された。 ■ モデル循環の信頼性技術の開発 連合学習の実運用を想定した基盤として、分散連合学習フレームワーク及び連合学習フレームワーク xData Edge/FL (機能制限版) を開発し、関連ドキュメントとともに公開した。また、A I モデルの保存・交換 API やフェデレーション管理機能を備えたシステム基盤を整備するとともに、トレーサビリティ技術を導入し、各ノードにおける A I モデルの学習・評価の実行履歴をプロベナンスログとして記録し、分散環境から収集・連携する仕組みを構築した。これにより、A I モデルの来歴や評価履歴の分析を可能とし、第三者による検証可能性を確保するとともに、A I モデルの異常挙動や不正な参加者の検出を可能とすることで、A I モデル共有における信頼性・安全性・公平性の向上を実現した。さらに、モデル評価履歴の分析結果を参加者の貢献度評価やインセンティブ設計へ活用する仕組みの有効性を確認した。 ■ ヒヤリハット合成動画の構築 ヒヤリハットの危険シーン動画を、生成 A I 技術を用いて、マルチモーダルセンシングに準拠した 7 種のクラスラベルを付与した合成データを生成し、個人情報の対応により、利活用可能な 1000 本規模のデータを構築した。合成データの利用価値として、意図的なノイズを用いて危険分類の異常検知の検証から評価用データとしての有効性を示し、合成データによるファインチューニングにより、実世界の異種の評価データに対しても、分類精度向上により、汎用的な訓練データとしての有用性も確認した。 ■ ユーザ向けアプリ実証 都市環境データを統合したデータ連携基盤を構築し、交通・環境・防災データを統合した市民向けサービスとして、移動支援やリスク予測情報を提供するアプリケーションを開発した。大規模言語モデル (LLM) を活用した個別行動提案機能や UX/UI の改善を実施し、ユーザログ及びアンケート分析を通じて市民の行動変容及び社会実装可能性を確認した。市民の行動変容及び移動支援に対して約 84% のポジティブ評価を獲得し、目標とした有効性を証明した。

※1 iid(independent and identically distributed: 独立同一分布): 各クライアントが偏りのないデータを持っている状態。

※2 FPR(False Positive Rate): 実際は負であるものを間違って正と予測した割合。

3 政策効果の把握及び有識者の知見の活用

研究開発の評価については、基本計画書に記載の政策目標に向けた研究開発期間内での実施事項、状況に加え、論文数や特許出願件数などの間接的な指標を用い、これらを基に専門家の意見を交えながら、必要性・効率性・有効性等を総合的に評価するという手法が多く用いられている。

本政策においても、「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」（令和8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た。外部評価において、外部有識者から以下の御意見等を頂き、本研究開発の評価に活用した。

- ・ A I の急速な進展により本研究開発の重要性が高まっている中、当初目標を達成し、一部の技術開発項目については目標を超える高い成果が得られたことを評価する。事業終了後は、A I モデル共創プラットフォームの知見やデータ共有の価値を明確化することを含む成果公開や標準化貢献の早期具体化等により、アウトカム目標の達成に向け、実効性のある計画の実質的な進捗に期待する。

また、研究開発による特許・論文・研究発表の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど、成果展開に必要な技術を確実に確立しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等は下表のとおりである。

主な指標	令和5年度	令和6年度	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件（0件）	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）	3件（0件）	6件（4件）	14件（10件）	23件（14件）
その他の誌上発表数	1件（1件）	1件（0件）	2件（0件）	4件（1件）
口頭発表数	7件（1件）	8件（0件）	15件（3件）	30件（4件）
特許出願数	7件（0件）	4件（1件）	1件（1件）	12件（2件）
特許取得数	0件（0件）	3件（0件）	2件（0件）	5件（0件）
国際標準提案件数	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）	2件（0件）	2件（0件）
報道発表数	0件（0件）	0件（0件）	1件（0件）	1件（0件）
報道掲載数	2件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	2件（0件）

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

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

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

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

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

注6：同一の論文等は複数項目に計上しない。例えば、同一の論文等を「査読付き口頭発表論文数（印刷物を含む）」および「口頭発表数」のそれぞれに計上しない。ただし、学会の大会や研究会、国際会議等で口頭発表を行ったのち、当該学会より推奨を受ける等により、改めて査読が行われて論文等に掲載された場合は除く。

4 政策評価の結果（総合評価）、今後の課題及び取組の方向性

（１）政策評価の結果

A I の急速な進展による A I の適用領域の拡大や、我が国産業が有する分野毎のデータ活用や他分野との連携、日本が強みを有する分野と A I の融合が求められている中、プライバシーデータや機密データ等の取扱いに注意を要するデータを他者にそのまま共有することが困難であり、現実にはデータの連携が進まないという課題がある。本研究開発は、この課題に取り組むものであり、安全なデータ連携基盤の実装に寄与するものであったことから、本研究開発には必要性があったと認められる。

本研究開発において、実空間に存在する多様なデータを安全に連携し分野横断的な課題解決を可能とする分散型機械学習技術の要素技術である「マルチモーダル A I 技術」、「エッジ A I 技術」、「連合学習技術」はいずれも当初目標を達成した。交通分野における実環境での実証においては、本研究開発で開発した技術に関して、ユーザアンケート調査においてポジティブな評価が得られ、社会受容性を確認した。

以上のことから、本研究開発により分散型機械学習技術の確立に寄与することができ、本研究開発には有用性があったと認められる。

（２）今後の課題及び取組の方向性

1) 技術基盤の高度化

本研究開発の成果を社会実装に繋げるためには、構築した A I モデル共創プラットフォームの知見やデータ共有の価値を明確化することを含む成果公開・運用、産業界等と一体となった利用等により、実効性のある計画の実質的な進捗及び分野横断的に活用可能な技術が課題となる。これらの課題解決に向けて、以下のとおり技術基盤の高度化等を進める。

- A I モデル共創プラットフォームの成果公開・運用を通じ、企業・研究機関が参加可能な A I モデル共創環境を整備。
- マルチモーダル A I 基盤モデルの汎用化及び軽量化を進め、自治体や事業者が利用可能な A I 基盤として整備。
- 分散型 A I 運用技術の適用範囲を拡大し、継続学習及び大規模 A I モデル運用の実用化を推進。

2) 成果展開・社会実装

今後の成果展開・社会実装には上記の技術基盤の高度化とともに、本研究開発の成果の対外発信・成果展開や標準化、実用化、業種を超えたデータ連携が課題となる。以下の取組を通じて、成果の普及展開や社会実装を促進する。また、本研究開発及び実証の対象分野であった交通分野での取組を起点に、本研究開発の成果を医療・金融等の他分野や自治体への横展開を目指す。

- A I 安全性及び A I リスク対策に関する知見を国際標準 ISO/IEC 25959 に反映、2028 年発行を目指す。
- フレームワーク公開やハッカソン等のコンテストやワークショップの随時開催を通じ、A I モデル共創技術の普及及び技術者コミュニティ形成を推進。
- モビリティ分野において安全運転支援サービスを活用した公共ライドシェア等の展開を検討し、交通空白地域の課題解決に資するサービス展開を推進。
- スマート運転支援サービスについては、下記を段階的に進め、全国展開を視野にサービス化を推進。
 - ・実証フィールドでの技術検証
 - ・ドライブレコーダーメーカーとの共同実証による製品化
 - ・物流・モビリティ分野への展開
- 自治体ポータルアプリを活用した市民向けスマートシティサービスを展開し、つくば市等の実証結果を踏まえ複数自治体への水平展開を推進。

5 評価に使用した資料等

- 本研究開発については、「総務省情報通信研究評価実施指針（第 6 版）」に基づく評価を行っており、関連資料は、以下の URL に掲載されている。また、本研究開発については、研究開発終了後一定の期間を経過してから、研究開発の直接の成果（アウトプット）から生み出された効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）等を確認することは有益であるほか、研究開発施策等の評価の基礎的なデータを取得するため、学会や海外における評価や関連特許、技術移転等の実用化に関する状況を調査し、活

用状況等を把握する追跡調査を実施することとしている。

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

令和 8 年度事後事業評価書

政策所管部局課室名 国際戦略局 研究推進室

評価年月：令和 8 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

（1）研究開発名称

テラヘルツ波による超大容量無線 LAN 伝送技術の研究開発

（2）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」

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間・総事業費

実施期間：令和 4 年度～令和 7 年度（4 か年）

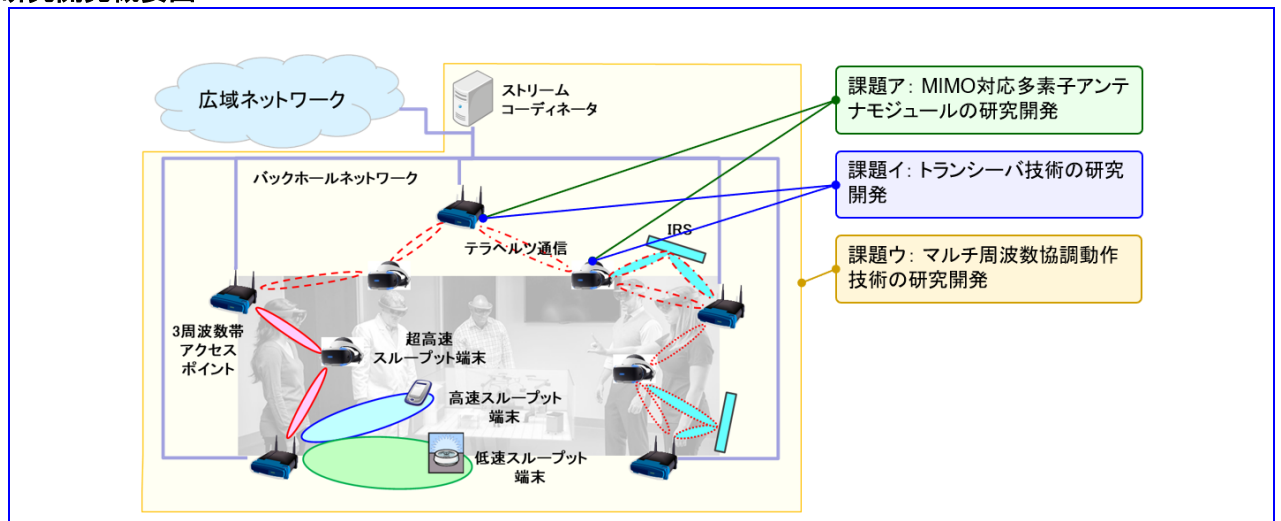
総事業費 36.6 億円

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

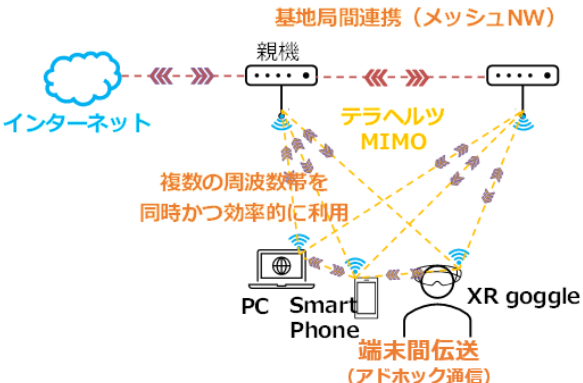
・概 要

本研究開発は、Beyond 5G/6G 時代に求められる超高精細映像伝送、デジタルツイン、XR 等の大容量・低遅延通信サービスを支える超大容量無線 LAN 技術の確立を目的とするものである。具体的には、151.5～164GHz、209～226GHz、252～296GHz 等の 100GHz 以上のテラヘルツ帯における、電波伝搬特性に基づく MIMO（Multiple Input Multiple Output）対応多素子アンテナモジュール、アンテナと一体化した集積回路を実現するトランシーバ技術、空間リソース最適化に向けたマルチ周波数協調動作技術の研究開発し、伝送速度 100Gbps 以上を実現するとともに、将来的には 1Tbps 級無線 LAN 技術の確立することを目指す。また、既存無線 LAN と同等の同時多接続・信頼性を実現し、IEEE802 等のデファクト国際標準化への対応にも取り組む。

・研究開発概要図



技術の種類	技術の概要
MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発	テラヘルツ帯における超大容量無線 LAN の実現に向け、代表的な室内利用環境を対象として MIMO 伝搬特性の測定・解析を行い、MIMO 伝送に適した電波伝搬環境及びアンテナ構成の検討を実施した。また、多素子アンテナの小型集積化に必要な高精度加工技術及び RF フロントエンドとの低損失接続技術を開発するとともに、MIMO 対応可能な多素子アンテナモジュールの設計・試作・評価を行った。 電波伝搬のモデル化 設計 シミュレーション結果 反映 MIMOアンテナ検討 図：MIMO 対応多素子アンテナモジュールの構成及び伝搬特性評価の概要
トランシーバ技術の研究開発	テラヘルツ帯における MIMO 伝送を実現するため、多素子アンテナと一体化可能なトランシーバ技術の研究開発を実施した。具体的には、RF フロントエンド回路、変復調回路、位相制御回路等の設計・試作を行うとともに、多素子アンテナとの高精度実装技術及びビーム制御技術を開発した。また、複数アンテナ素子を用いたフェーズドアレー構成について検討し、テラヘルツ帯に適したトランシーバアーキテクチャの構築及び評価を行った。 MIMO信号処理集積回路 実装 トランシーバモジュール (送受信装置) 図：フェーズドアレートランシーバ及びビーム制御技術の概要

マルチ周波数協調動作技術の研究開発	テラヘルツ帯特有の高い直進性及び伝搬損失に対応し、安定した無線 LAN 通信を実現するため、マルチ周波数協調動作技術の研究開発を実施した。具体的には、テラヘルツ帯とマイクロ波帯を連携させたネットワークアーキテクチャの検討を行うとともに、周波数リソース制御技術、空間リソース制御技術及び複数アクセスポイント連携技術を開発した。また、システムシミュレーション及び統合評価システムを用いて、実利用環境を想定した協調制御方式の設計・評価を行った。  図：マルチ周波数協調動作システムの構成概要
--------------------------	--

(2) 目標の達成状況

4年間の研究開発を通じて、超高速テラヘルツ無線通信を実現するための MIMO 対応多素子アンテナモジュール技術、フェーズドアレイトランシーバ技術及びマルチ周波数協調動作技術について、当初目標を上回るレベルで達成することができた。

具体的には、MIMO 対応多素子アンテナモジュール技術において、体積 1cm^3 以下の両偏波対応多素子アンテナモジュールを実現し、3m 以上の通信距離で 100Gbps 超、さらに 20m の通信距離で 120Gbps の超高速伝送を達成した。トランシーバ技術においては、300GHz 帯フェーズドアレイトランシーバにより、1 チャンネル当たり 40Gbps 伝送及び ± 30 度以上の 2 次元電子ビーム走査を実現した。また、マルチ周波数協調動作技術においては、リンク予測技術による探索オーバーヘッド 50% 以上削減、IRS (Intelligent Reflecting Surface) 制御によるシステムスループット 30% 以上向上、Joint Transmission による 100Gbps 超の伝送速度達成を実現した。

これらの成果により、テラヘルツ帯において 100Gbps 級の超高速・高信頼無線通信を実現するための基盤技術が確立され、将来の Beyond 5G/6G ネットワークにおける超大容量通信システムの実現が可能となった。その結果、高精細映像伝送、デジタルツイン、XR、産業 DX 等の大容量・低遅延通信サービスの社会実装に向けた技術基盤の確立というアウトカムの実現に大きく貢献した。

なお、達成目標等については、基本計画書に記載のとおりである。

https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/fees/purpose/pdf/220121_keikakusho_RD.pdf#page=22

技術の種類	目標の達成状況
MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発	室内環境におけるテラヘルツ帯電波伝搬特性の解明及び 150GHz 帯における MIMO 対応多素子アンテナモジュール技術の研究開発に取り組んだ。具体的には、300GHz 帯及び 150GHz 帯における MIMO 伝搬環境の測定・解析を実施し、MIMO パス環境を明確化するとともに、アンテナ指向性及び反射板の形状・配置に関する設計指針を策定した。また、体積 1cm^3 以下の両偏波対応多素子アンテナモジュールを設計・試作し、3m 以上の通信距離において 100Gbps 以上の伝送速度を実現した。さらに、長距離伝送に対応するアンテナ及び RF フロントエンドの設計・試作を行い、20m の通信距離において 120Gbps の高速無線伝送を達成した。 これらにより、テラヘルツ帯における小型・高集積な MIMO 対応アンテナモジュール技術及び超大容量無線 LAN 技術の基盤を確立した。

トランシーバ技術の研究開発	300GHz 帯を用いた 1 チャネル当たり 40Gb/s の高速データ伝送及び±30 度の 2 次元電子ビーム走査を可能とする平面アンテナ一体型フェーズドアレートランシーバ技術の確立を目的として研究開発を実施した。具体的には、アレー状に配置可能な送信回路・受信回路及び RF フロントエンドモジュール技術の開発、セミアナログ方式を用いたフェーズドアレー対応 RF 制御技術及び 40Gb/s 通信技術の開発、さらに平面アンテナを素子とするフェーズドアレーによる±30 度の 2 次元電子ビーム走査技術の開発に取り組んだ。 研究開発の結果、2×2 core chip を適用した補間給電型 5×5 アレー送信機を試作し、1 チャネル当たり 40Gb/s、2 チャネル合計 80Gb/s のデータ伝送を実証した。また、全給電型 8×8 フェーズドアレートランシーバを開発し、30 度以上の 2 次元ビーム制御を実証するとともに、送信側で 40Gb/s (16QAM)、受信側で 18Gb/s (QPSK) の無線伝送を達成した。 さらに、試作したベースバンド回路単体での通信実験及び RF 回路との接続実験を実施し、Time Domain Equalizer (TDE) を用いた歪補正効果を確認するとともに、ビーム制御方式を策定した。加えて、多層基板内並行差動給電開口アンテナを開発し、8×8 全素子給電アレー向けに、広帯域かつ低損失で IC 電源配線と共存可能なアンテナ構造を実現した。さらに、5×5 素子及び 3×3 素子の補間給電構成を用いた平面アンテナについて、電磁界シミュレーション及び実験により 2 次元ビーム制御性能を検証し、300GHz 帯フェーズドアレートランシーバの実現に必要な基盤技術を確認した。
マルチ周波数協調動作技術の研究開発	テラヘルツ帯無線 LAN の実現に向けて、マルチ周波数協調動作技術、周波数リソース制御技術及び空間リソース制御技術の研究開発を実施した。具体的には、ミリ波スweep情報に基づくリンク予測技術を開発し、リンク状態の判定誤差 10%以下を達成するとともに、Non-standalone 運用時の探索処理に関する机上評価により、探索オーバーヘッドを 50%以上削減できることを確認した。また、通信品質を考慮した損失関数の設計を行い、所要通信品質を満たせなくなる時間率の劣化を 10%以内に抑制できることを確認した。 さらに、IRS (Intelligent Reflecting Surface) 割当・負荷分散制御技術及び IRS ビーム制御技術の高度化を実施し、システムスループットを 30%以上向上する目標を達成した。加えて、Non-standalone 運用を前提とした Joint Transmission (JT) 方式のアクセスプロトコルを設計し、シミュレーションにより 100Gbps を超える伝送速度を実現可能であることを確認した。また、マイクロ波帯を想定した面的なリンクレベルシミュレーションを実施し、JT 方式が単一アクセスポイント伝送と比較して実効データレートを 35%向上できることを明らかにした。 加えて、上記「MIMO 対応多素子アンテナモジュールに関する研究開発」で開発したテラヘルツ帯デバイス及び本課題で開発した各種制御技術を統合した評価システムを構築し、テラヘルツ帯マルチストリーム伝送の実験的検証を実施した。これにより、複数アクセスポイント連携やマルチ周波数協調制御を活用した超大容量・高信頼無線 LAN システムの実現に向けた基盤技術を確認した。

3 政策効果の把握及び有識者の知見の活用

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、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。

本政策においても、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」(令和 8 年 6 月 19 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た。ここで、外部有識者から全ての成果目標を達成している、社会実装に向けた道筋が明確に示されている等の御意見を頂き、将来的な 1Tbps 級通信の実現に向けた強力な技術基盤を構築した、総合的に見て有益な研究開発であった等の評価を得ており、本研究開発の評価に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等は下表のとおりである。

	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件(0件)	3件(2件)	12件(11件)	14件(13件)	29件(26件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	0件(0件)	29件(29件)	42件(42件)	33件(33件)	104件(104件)
その他の誌上発表数	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)
口頭発表数	43件(7件)	70件(18件)	66件(17件)	64件(15件)	243件(57件)
特許出願数	9件(1件)	21件(10件)	12件(5件)	11件(6件)	53件(22件)
	0件(0件)	0件(0件)	0件(0件)	3件(1件)	3件(1件)
国際標準提案数	5件(5件)	11件(11件)	19件(19件)	12件(12件)	47件(47件)
国際標準獲得数	2件(2件)	4件(4件)	3件(3件)	0件(0件)	9件(9件)
受賞数	0件(0件)	12件(9件)	4件(3件)	5件(4件)	21件(16件)
報道発表数	0件(0件)	2件(1件)	3件(2件)	3件(1件)	8件(4件)
報道掲載数	0件(0件)	5件(2件)	17件(6件)	31件(5件)	53件(13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。

4 政策評価の結果(総合評価)、今後の課題及び取組の方向性

(1) 政策評価の結果

Society5.0の実現やBeyond 5G/6G時代に向けて、超高精細映像、センシング情報等の大容量データを複数ユーザーへ同時に伝送可能な無線通信技術の実現が求められている。また、既存周波数帯の利用拡大には限界があることから、100GHzを超えるテラヘルツ帯の利用促進による新たな電波資源の開拓が重要な課題となっている。本研究開発は、テラヘルツ帯を用いた超大容量無線LAN技術を確立し、新たな周波数帯の利用促進及び電波資源の拡大に資すると共に、「インフラシステム輸出戦略」(令和元年6月3日)に基づき、我が国が強みを有する本技術の標準化活動に寄与するものであること等から、国が実施すべき研究開発として高い必要性があったと認められる。

本研究開発では、MIMO対応多素子アンテナモジュール技術、トランシーバ技術及びマルチ周波数協調動作技術の研究開発を実施し、室内環境におけるテラヘルツ帯電波伝搬特性の解明、150GHz帯における体積1cm³以下の多素子アンテナモジュールによる100Gbps超の伝送、300GHz帯における2次元ビーム制御及び多ストリーム伝送技術の実証を達成した。また、マルチ周波数協調動作技術においても、探索オーバーヘッドの50%以上削減、システムスループット30%以上向上、100Gbps超の伝送速度達成を確認するなど、当初の技術目標を達成した。これにより、将来的な1Tbps級無線LAN技術の実現に向けた基盤技術を確立するとともに、テラヘルツ帯を活用した超大容量無線通信システムの実現可能性を示した。よって、本研究開発には高い有効性があると認められた。

さらに、本研究開発では、電波伝搬解析からアンテナモジュール、トランシーバ、ビーム制御及びマルチ周波数協調制御までを一体的に研究開発するとともに、統合評価システムによる実証を行うことで、効率的に研究開発を推進した。また、得られた成果は、Beyond 5G/6G に向けたテラヘルツ通信システムの研究開発や国際標準化活動への展開が期待されるものであり、将来的なテラヘルツ帯の利用拡大及び関連産業の発展への波及効果も期待されることから、効率性及び波及効果の観点からも高く評価できる。

以上より、本研究開発は、必要性及び有効性が認められ、電波資源の拡大及び Beyond 5G/6G 時代の超大容量無線通信技術の実現に大きく寄与する成果を創出したものと評価できる。

(2) 今後の課題及び取組の方向性

本研究開発により、151.5～164GHz、209～226GHz、252～296GHz 等のテラヘルツ帯において、100Gbps 級の超大容量無線 LAN を実現するための MIMO 対応多素子アンテナモジュール技術、トランシーバ技術及びマルチ周波数協調動作技術を確立するとともに、実利用環境を想定した統合評価システムによる有効性を実証した。

今後は、本研究開発で得られた成果を実用化につなげるため、通信距離の更なる長距離化、端末及びアクセスポイントの小型化・低消費電力化、複数ユーザーが同時接続する環境での通信品質向上等に取り組む必要がある。また、実フィールドでの検証を通じて、工場、データセンター、医療、XR、自動運転等の大容量通信需要が見込まれる分野への適用可能性を検証し、社会実装を推進することが期待される。

国際展開の観点では、本研究開発で確立したテラヘルツ帯無線 LAN 関連技術について、IEEE 等における国際標準化活動への反映を進めるとともに、WRC における周波数利用に関する国際的な議論や制度整備にも貢献することが期待される。これにより、我が国が強みを有するテラヘルツ通信技術の国際競争力の維持・向上及び関連産業の創出・発展につなげることが期待される。

さらに、本研究開発で得られた電波伝搬特性、MIMO 伝送技術、ビーム制御技術及びマルチ周波数協調制御技術は、Beyond 5G/6G に向けたテラヘルツ帯通信システムの研究開発や、将来的な Tbps 級無線通信技術の実現に向けた基盤技術として活用されることが期待される。これらの成果を後継研究開発へ展開することで、新たな周波数帯の利用促進及び電波資源の拡大に貢献するものである。

5 評価に使用した資料等

○成長戦略フォローアップ（令和3年6月18日）

<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/fu2021.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

○インフラシステム輸出戦略（令和元年6月3日）

<https://www.cas.go.jp/jp/seisakukaigi/keikyou/dai43/siryou2.pdf>

○官民 ITS 構想・ロードマップ（令和3年6月15日 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議）

https://www.digital.go.jp/assets/contents/node/basic_page/field_ref_resources/2b3315d1-5865-4712-99dd-84c54a396f9b/d2ddcc36/20231211_meeting_mobility-working-group_outline_09.pdf

○本研究開発については、外部専門家・外部有識者から構成される「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」に基づく評価を行っており、関連資料は、以下の URL に掲載されている。また、本研究開発については、研究開発終了後一定の期間を経過してから、研究開発の直接の成果（アウトプット）から生み出された効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）等を確認することは有益であるほか、研究開発施策等の評価の基礎的なデータを取得するため、学会や海外における評価や関連特許、技術移転等の実用化に関する状況を調査し、活用状況等を把握する追跡調査を実施することとしている。

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

令和 8 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 8 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

（1）研究開発名称

グリーン社会に資する先端光伝送技術の研究開発

（2）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」

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間・総事業費

実施期間：令和 4 年度～令和 7 年度（4 か年）

総事業費：55.2 億円

・概 要

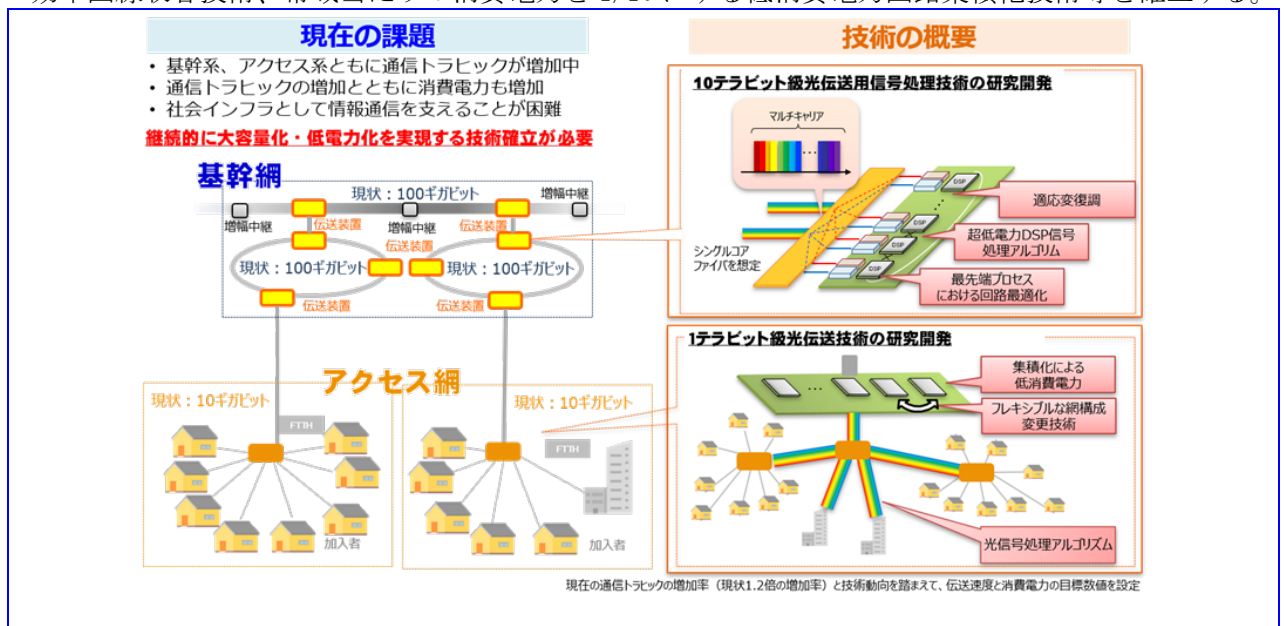
通信トラフィックの増大に対応する高速大容量・低消費電力の光ネットワークの実現に寄与するため、以下の技術の確立に向けた研究開発を実施した。

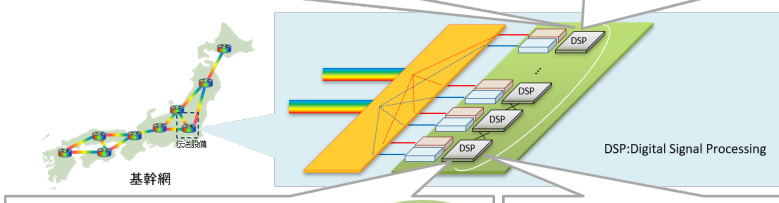
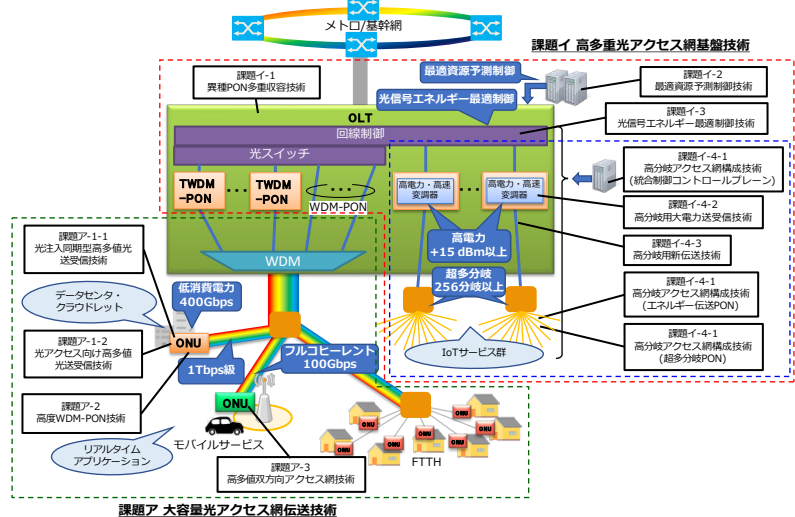
① 10 テラビット級光伝送技術

毎秒 10 テラビット級の光信号の長距離伝送及び低消費電力化（従来の毎秒 100 ギガビット級に比べ 1/10）を実現するため、適応変調技術や低消費電力回路実装技術等を確立する。

② 大容量・高多重光アクセス網伝送技術

毎秒 1 テラビット級の大容量低消費電力アクセス伝送を実現するため、低コスト多値変調技術、高効率回線収容技術、帯域当たりの消費電力を 1/10 にする低消費電力回路集積化技術等を確立する。



技術の種類	技術の概要
10 テラビット級 光伝送技術	本研究開発は、最大チャネル容量 10 テラビット級（運用単位¹⁾）の光伝送システムの実用化を目指し、より高度な光伝送方式に要求されるデジタル信号処理の基本技術を確立する。また、各信号処理技術を連携させ、先端微細加工技術の適用により低消費電力デジタル信号処理回路の基本技術を確立する。これにより、既に実用化されている 100 ギガビット級光伝送向けデジタル信号処理回路と比較して、100 ギガビット当たりの消費電力 1/10 以下を実現する。 ア) 多並列光適応送受信符号化技術 信号処理技術 10テラビット級(運用単位)を実現し、アプリケーションに応じて変調多値度、並列度、符号化等を適応的に制御可能な多並列光適応変調方式やそれに対応した光送受信デバイス特性補償方式の基本技術を確立 - 高度多値変復調方式に連動して最適な処理を行う誤り訂正処理方式の基本技術を確立 イ) 伝送信号歪み補償技術 信号処理技術 - 並列数・変復調方式等の変化に対し、波長分散等により生じる静的波形歪みを補償する静的信号等化処理アルゴリズムを確立 - 光ファイバ伝送システムで生じる偏波モード分散等の動的波形歪みの補正を可能とする動的信号等化処理アルゴリズムを確立 ウ) 低電力回路最適化設計技術 回路設計技術 - 多並列光適応送受信符号化技術に対応した回路規模と消費電力を最適化しながら回路として実現するための回路アーキテクチャを確立 - 静的／動的信号歪み補償技術に対応した回路規模と消費電力を最適化する回路アーキテクチャを確立 エ) 信号処理統合最適化技術 回路設計技術 - 課題ア)イ)ウ)で検討した各機能・回路等を統合・連携し、消費電力 1/10 以下(既存の100ギガビット級光伝送向けデジタル信号処理回路と単位通信速度当たりで比較)での動作を可能とする信号処理統合最適化技術を確立  図：研究開発概要図
大容量・高多重 光アクセス網伝送 技術	本研究開発は、1 テラビット級（サービス単位）の伝送容量を実現するために、400 ギガビット以上の光伝送技術を確立しつつ WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing - Passive Optical Network) 技術を組み合わせることで高速大容量光アクセス網伝送技術を確立する。また、WDM-PON 技術を使用した高多重光アクセス網基盤技術の開発・高度化を行うことで既に実用化されている光信号処理技術と比較して、100 ギガビット当たりの消費電力を 1/10 以下とする。  図：研究開発概要図

(2) 目標の達成状況

① 10 テラビット級光伝送技術

高速大容量な波長当たり 1.6Tbps×6 波長を想定したチャネル容量 10Tbps 級（運用単位）のマルチ

¹ 光伝送装置 1 台当たりの伝送容量を指す。光伝送装置には複数のデジタル信号処理装置（DSP）が含まれる。

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1/10に対して長距離モードにおいて1/18、短距離モードにおいて1/27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。

② 大容量・高多重光アクセス網伝送技術

大容量光アクセス網伝送技術として、400 Gbps/波長の送受信技術をベースにした WDM-PON による1Tbps 級(800Gbps)の光アクセス伝送技術を確立し、信号処理技術の簡略化により信号処理において最大25%、変調方式において7.8%の低消費電力化を実現した。高多重光アクセス基盤技術として、400ギガビット級 WDM-PON を収容可能な異種 PON 多重収容技術と資源制御技術、光伝送リンク技術を確立し、OLT (Optical Line Terminal) において80.9%、ONU (Optical Network Unit) において50%の低消費電力化を実現した。

これらの各技術による消費電力削減効果を加算することで、100 ギガビット当たりの消費電力を約90%削減可能となり、目標としていた1/10以下を達成した。

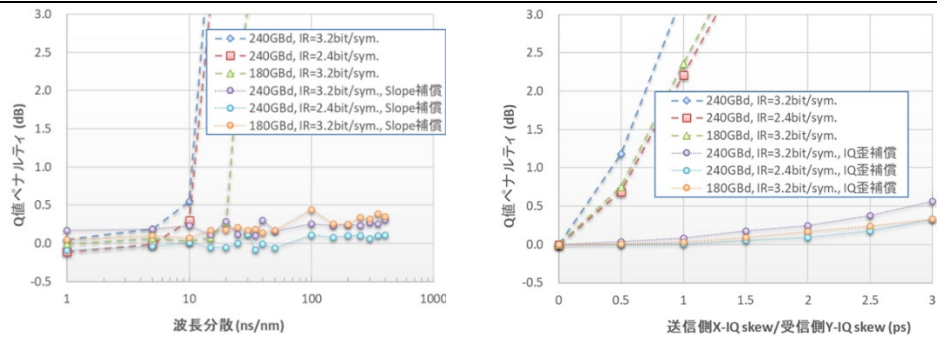
なお、達成目標等については、事前評価書記載の通りである。

https://www.soumu.go.jp/main_content/000766955.pdf

(1) 10 テラビット級光伝送技術

技術の種類	目標の達成状況
ア) 多並列光適応送受信符号化技術	a) 多並列光適応送受信基本技術 シンボルレート到達性、外部動向を考慮しつつ、変調方式・符号化・並列度を比較評価し、240 GBd 級 16QAM 方式²を選択し、十分な伝送性能を確認した。また、光送受信デバイス特性の推定・補償技術については、マルチステップ方式及び合成伝達関数分離方式の比較評価を行い、補償性能に優れる合成伝達関数分離方式を採用し、全体機能モデルに組み込んだ上で伝送特性評価を実施し、有効性を確認した。以上により、最大10 テラビット級光伝送の実現に向けた多並列光適応送受信方式及び高度な送受信器特性補償技術を確立した。 b) 誤り訂正基本技術 1 波長当たり 1.6 Tbps の市場で標準化が進む 240 GBd/16QAM 伝送に整合した低電力アルゴリズムとして、標準符号と共通のインタフェースを維持しつつ、性能差別化を図る冗長度15%超の「固定符号長可変レート誤り訂正アルゴリズム」を提案した。また、性能及び電力の両面から詳細評価を行い、提案手法の妥当性を実証した。以上により、最大10 テラビット級光伝送の実現に向けた伝送効率を最大化する誤り訂正処理／尤度生成アルゴリズムの基本技術を確立した。 (a) パリティ検査行列概要 (b) 誤り訂正符号化利得 図：固定符号長可変レート誤り訂正符号設計結果
イ) 伝送信号歪み補償技術	a) 静的信号等化基本技術 多並列光適応送受信における静的な伝送信号歪みに応じて信号歪みを補償する静的信号等化技術について、他の課題との連携を考慮した複合負荷環境を用いて、光伝送性能、演算・回路リソースの観点からの実環境に近い条件でのシミュレーション等による評価・比較検討を実施し、アルゴリズム候補の機能動作検証を完了した。(下図は詳細動作検証の一例として、回路実装を考慮した演算ビット精度において、変調速度、情報量に対する波長分散スロープ、及び、I-Q スキューに起因する信号品質劣化についての等化性能の比較検証を行った結果である。)

² 240 GBd 級の高速なシンボルレートと、1 シンボル当たり 4 ビットを表現可能な 16QAM (16 値直交振幅変調) を組み合わせた光伝送方式。1 波長当たり 1.6 Tbps 級の大容量伝送を実現するための方式として用いられる。

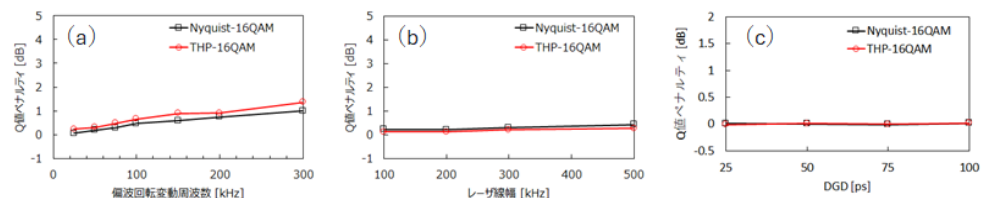


図：実環境に近い複合負荷条件下での静的信号等化連携動作検証結果
(左：波長分散スロープ補償 右：I-Q スキュー補償)

以上により、最大 10 テラビット級光伝送の実現に向けた静的信号等化基本技術を確立した。

b) 動的信号等化基本技術

16QAM、240 GBd のような高ボーレート光伝送において、従来の Nyquist 信号とアナログデバイス帯域制約の影響に強い THP (Tomlinson-Harashima Precoding) 信号が共通で動作する、動的信号等化アルゴリズムを検討し、高安定で低演算な回路を機能モデルへ搭載した。本機能モデルを使用して偏波変動耐力・レーザ線幅耐力・偏波モード分散耐力について評価を行い、動的信号等化処理が安定動作することを確認した。以上により、最大 10 テラビット級光伝送の実現に向けた動的信号等化基本技術を確立した。



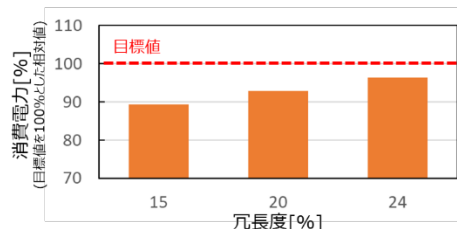
図：動的等化信号回路機能モデル性能評価結果
(a) 偏波変動耐力、(b) レーザ線幅耐力、(c) 偏波モード分散耐力

a) 多並列光適応送受信回路基本技術

多並列光適応送受信技術の低電力回路最適化に向け、変調方式を特徴づける各種パラメータ(変調方式、符号化率、変調速度、並列度等)の可変範囲及び粒度を体系的に整理し、適応送受信動作を実現する回路アーキテクチャを設計し、適応制御と回路規模・消費電力の両立を可能とした。また、回路レベルでの性能評価、部分的ファームウェアへオフロード検討を通して、多並列光適応送受信機能の低電力回路最適化に向けた基本技術を確立した。

b) 誤り訂正回路基本技術

課題ア-b の誤り訂正基本技術を基に、符号化利得と消費電力を最適化した適応型送受信回路の基本技術を確立した。誤り訂正回路の配線性問題について、制御を含め詳細に解析し、実装予測ツールを用いた配線解析と設計改善を反復試行により低電力化を推進した。また、3 nm プロセス特性を考慮し、高消費電力セルの削減やアルゴリズム精査による低電力化を追求した。その結果、最先端 CMOS プロセスの適用を前提として定めた目標電力に対し、96.3%の低消費電力化を達成した。以上により、最大 10 テラビット級光伝送の実現に向けた、誤り訂正符号化・復号回路技術の最適回路設計に係る基本技術を確立した。



図：誤り訂正回路の消費電力

c) 静的信号等化回路基本技術

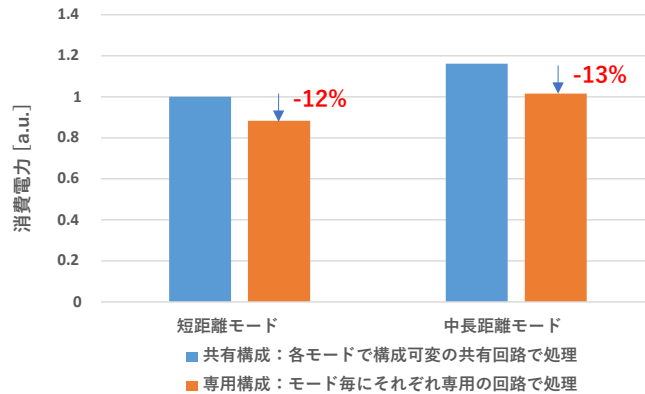
最大 10 テラビット級の通信処理速度に対応可能な静的信号等化処理回路における基本技術を確立した。

具体的には、回路規模や消費電力の観点から静的信号等化処理回路の回路方式を最適化するた

ウ) 低電力回路最適化設計技術

め、伝送距離に応じた動作モードごとに最適化可能な専用回路構成を選定した。その上で、
 ①実用的な回路規模及び消費電力で最適化構成を実現可能であること
 ②検討した回路最適化の実現方式、効率的な最適化を実現する設計・検証効率化方式がそれぞれ有効であること
 を確認した。

下図は静的信号等化処理回路の最適化検討の一例として、伝送距離が異なる動作モードごとに専用回路構成を選定した場合と、回路パラメータ変更により動作モード変更可能な共有回路構成とした場合について、消費電力を評価した結果である。評価の結果、動作モードごとに専用構成を選定した方が、12%～13%の消費電力を低減できることを確認した。



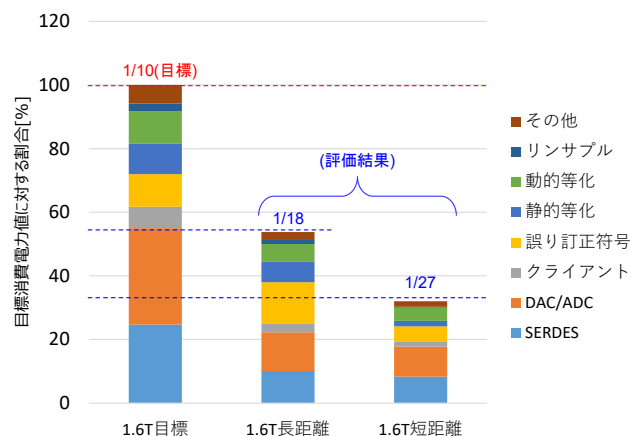
図：最適化全体構成回路の消費電力評価結果

d) 動的信号等化回路基本技術

信号処理全体として既存 100 ギガビット級光伝送向け信号処理回路と比較して同一通信速度で 1/10 以下の低消費電力化を実現する動的信号等化回路のアーキテクチャ検討を実施し、多並列処理を効率良く行うための基本回路アーキテクチャを決定すると共にフロアプランや物理的な配置・配線の最適化を行い、性能と低電力化を両立可能な回路構成を実現した。以上により、最大 10 テラビット級光伝送の実現に向けた、動的信号等化処理の低電力回路最適化技術を確立した。

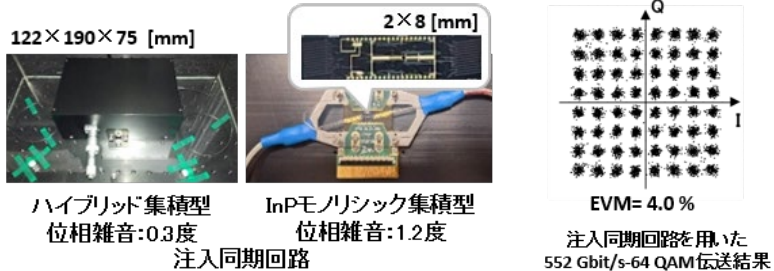
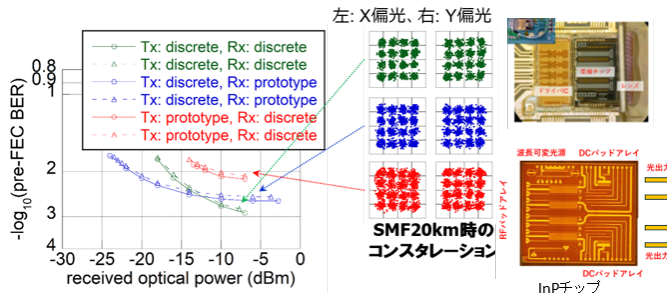
エ) 信号処理統合最適化技術

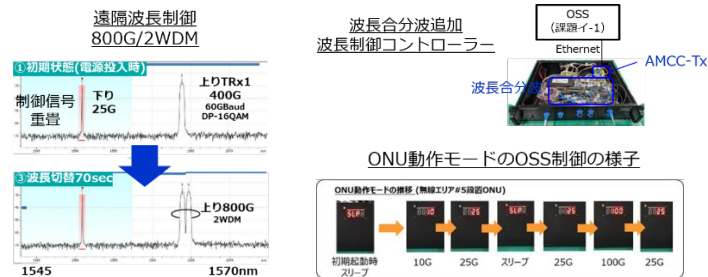
課題ア及びイで検討した各機能の機能モデルと外部環境を統合した統合機能モデル環境を構築し、機能間の連携動作及び性能評価を完了した。また、課題ウで検討したハードウェア記述言語による回路モデルを結合し、統合設計を行い、波長分散補償や周波数オフセット推定を含む全体制御シーケンスを実装した上で、回路間の連携動作検証及び最適化を実施した。さらに、統合設計した回路モデルを用いて各機能ブロック及び DSP（デジタル信号処理装置）全体の消費電力評価を行い、既存の 100 ギガビット級 DSP と比較して同一通信速度において長距離モードにおいて 1/18、短距離モードにおいて 1/27 の低消費電力動作を確認し、目標を大きく上回る成果を達成した。以上により、信号処理統合最適化に向けた基本技術を確立した。



図：DSP 全体の消費電力評価結果

(2) 大容量・高多重光アクセス網伝送技術

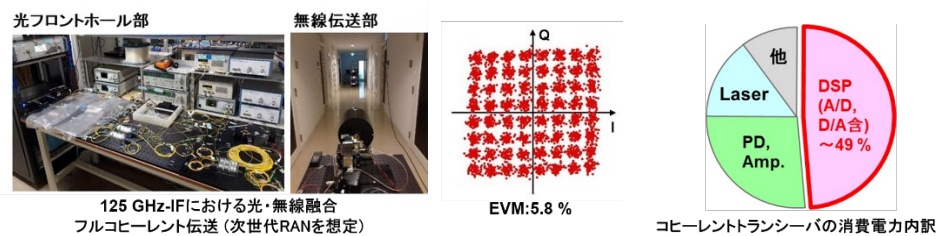
技術の種類	目標の達成状況
ア) 大容量光アクセス網伝送技術	1-1) 高多重光アクセス送受信技術の研究開発：光注入同期型高多値光受信技術の研究開発 4度以下の位相雑音で位相同期が可能な集積型光注入同期回路として、目標値(4度以下)を上回る位相雑音0.4度のハイブリッド集積型、及び位相雑音1.2度のモノリシック集積型回路を開発し、さらに従来不可欠であった偏波制御回路を不要とする偏波無依存光注入同期回路を新たに実現することで、従来のコヒーレント受信回路と同等規模の構成で16値以上の高多値QAM信号の復調を可能とし、小型化・低消費電力化に資する先進的成果を得た。 また従来の2～16値変調方式と比較して、より高多値な64QAM信号を用いた単一波長552 Gbps信号のシングルモードファイバ10 km伝送に成功した。 さらに、注入同期回路の適用により、従来の光キャリア位相補償に係るデジタル信号処理負荷を削減し、従来のトランシーバと比較して約15%の消費電力低減効果を示した。  122×190×75 [mm] 2×8 [mm] ハイブリッド集積型 InPモノリシック集積型 位相雑音:0.3度 位相雑音:1.2度 注入同期回路 EVM= 4.0 % 注入同期回路を用いた 552 Gbit/s-64 QAM伝送結果
	図：課題ア-1-1 で作成した注入同期回路 1-2) 高多重光アクセス送受信技術の研究開発：光アクセス向け高多重送受信技術の研究開発 既存の光デバイスを使用した16値以上の高多値変調方式による400ギガビットの伝送容量を実現するために、DSP(Digital Signal Processing)ボード、COSA(Coherent Optical Sub-Assembly)モジュール、TOSA(Transmitter Optical Sub-Assembly)モジュール及びROSA(Receiver Optical Sub-Assembly)モジュールによる400 Gbpsの評価系を構築し、60GBaud-DP-16QAM(16値)による400 Gbpsのループバック動作及び20 km伝送を確認した。 また、光トランシーバの小型化として、光集積技術によるCOSAの試作を行い、400 Gbpsのリアルタイム光伝送でFEC(Forward Error Correction)限界(10^{-2})以下の誤り率を達成した。また、1芯双方向での光送受信の動作も確認できた。  左: X偏光, 右: Y偏光 — Tx: discrete, Rx: discrete - - Tx: discrete, Rx: discrete - - Tx: discrete, Rx: prototype - - Tx: discrete, Rx: prototype - - Tx: prototype, Rx: discrete - - Tx: prototype, Rx: discrete SMF20km時の コンスタレーション 波長可変光源 DCパッドアレイ 光出力 InPチップ DCパッドアレイ 光出力 図：課題ア-1-2 における試作 COSA 評価基板の検証結果 2) 高度 WDM-PON 技術の研究開発 AMCC(Auxiliary Management and Control Channel)方式による遠隔制御装置を試作し小型光トランシーバ(SFP28 (Small Form-factor Pluggable 28)など)の制御インターフェース規格であるCMIS(Common Management Interface Specification)を実装し、光トランシーバ設定の遠隔制御を実現した。 AMCC 波長遠隔制御を使って、400 Gbps×2台の光トランシーバを制御することで、800 GbpsのWDM通信を確認した。イ-1)の異種PON収容システムにAMCC制御装置を使用し、ONU動作モードの切替を実現した。 異種PONシステムの検証に合わせて、PONシステム3台の波長合分波機能とOSSとのEthernet接続機能を追加しての単体評価を行い、制御信号の送受信方式をオーバーサンプリングに変更し、従来方式と比較したところ改善効果を確認した。以上のことから、光トランシーバを遠隔制御できる高度WDM-PON技術を確立した。



3) 高多値双方向アクセス網技術の研究開発

次世代 Radio Access Network への適用を念頭に、課題 A-1-1 で開発した光集積型注入同期ヘテロダイン受信回路を光・無線周波数変換として適用することで、高多値双方向コヒーレントアナログ（フルコヒーレント）伝送システムを実現し、従来よりも高多値変調である 64QAM 信号を用いた 108 Gbps-64QAM 信号のシングルモードファイバ 10 km 伝送、及び 125 GHz 帯における 70 m の下りフルコヒーレント伝送を実現した。

さらに、注入同期回路を用いたフルコヒーレント方式の適用により、従来のデジタル方式で必要であった ADC・DAC・DSP を削減し、光フロントホール区間の消費電力を約 25%削減可能であることを示した。



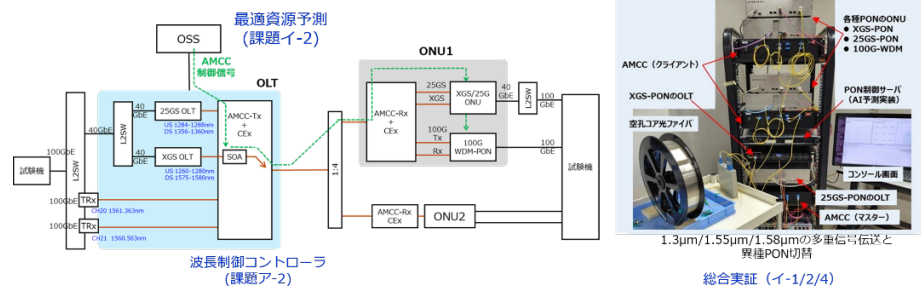
イ) 高多重光アクセス
網基盤技術

1) 異種 PON 多重収容技術の研究開発

FPGA(Field Programmable Gate Array)ボードを用いて試作した XGS-PON と 25GS-PON の統合 ONU における XGS-PON/25GS-PON のモード切替の確認と、オープンソースである ONOS(Open Network OS)/VOLTHA(Virtual OLT Hardware Abstraction)をベースに試作した XGS-PON/25GS-PON の認証などの設定機能を用いた XGS-PON/25GS-PON のシステム動作を確認した。

ア-2 の AMCC 装置と組み合わせて、XGS-PON/25GS-PON/100G-WDM-PON の異種 PON システムを構築し、イ-2 の資源制御アルゴリズムを OSS (Open Source Software) ベースの PON 制御に実装し、異種 PON 収容切替を検証した。トラフィック量に応じた割当通りに XGS-PON/25GS-PON/100G-WDM-PON を動作できることを確認した。以上のことから、異種 PON 多重収容技術を確立した。

イ-4-3 の空孔コア光ファイバを伝送路として接続し、課題間の総合実証を行った。O バンド、C バンド、L バンドが多重された信号を空孔コア光ファイバで伝送させても多重化された各 PON の信号が正常に送受信できることを確認した。



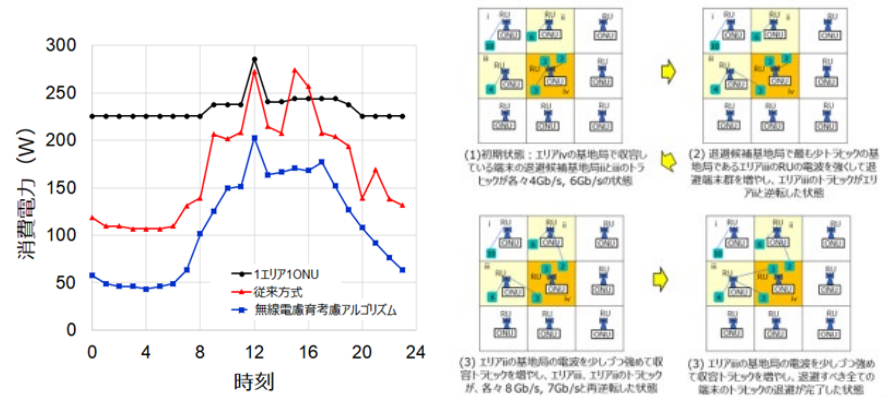
2) 最適資源予測制御技術の研究開発

モバイルを想定し、フロントホールに XGS-PON/25GS-PON (PtMP: Point-to-MultiPoint)、100G-WDM-PON (PtP: Point-to-Point) を配置するネットワークモデルを構築し、PON 資源の割当アルゴリズムを検討し、このモデル及び割当アルゴリズムにモバイルの実データ (あるエリアの滞在

人口の変動データ)を使って、消費電力変動のシミュレーションを行った。

無駄な電力の削減効果を向上させるために、無線エリアの統合制御アルゴリズムを検討し、このアルゴリズムでシミュレーションした結果、80.9%の消費電力削減を確認し、目標を達成した。

モバイル実データの学習から LSTM(Long and Short Term Memory)によるトラフィック量の予測を行い、平均予測誤差 5%以下を確認した。この予測を用いて、資源割当に反映するアルゴリズムを開発し、イー-1 の異種 PON 収容システムに実装し、総合実証を行った結果、シミュレーションで行った結果と同じ割当結果(収容制御結果)が得られることを確認した。



図：課題イー-2における消費電力変動シミュレーションの結果

3) 光信号エネルギー最適制御技術の研究開発

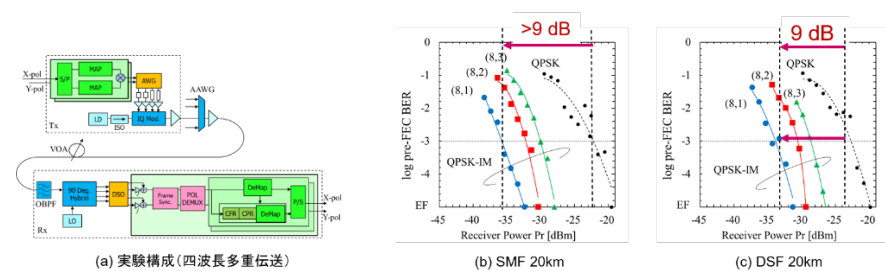
光アクセスネットワークの回線容量を通信トラフィック需要、リンクスパンの変化にあわせて柔軟に適應させる時間領域単一搬送波インデックス変調(TDSC-IM)方式を提唱し、MATLAB/SIMULINK 上に提案方式のデジタル信号処理回路におけるオフライン伝送実験を通じて動作検証を実施した結果、送受信器内部及び伝送路に起因する波形歪を補償する等価フィルタも含め、符号誤り率特性評価において外れ値の少ない安定動作を確認できた。

このデジタル信号処理回路を活用し、シングルモード光ファイバ(SMF) 20 km 及び分散シフト光ファイバ(DSF) 20 km で4波長多重伝送実験を行い、基本計画書の目標である 25 GBaud のシンボルレートにおいて、小容量トラフィック、ロングリーチモード時伝送に適用可能な 8 タイムスロットを1ブロックとする TDSC(8, K, QPSK) IM 方式の受信感度性能を評価した。その結果、トラフィック量が 5/16 倍(5 dB ダウン)の K=1 の条件で 9 dB (伝送距離換算 18 km) 以上の受信感度性能向上効果が得られた。

この結果を踏まえ、将来アクセスネットワークの受信器局発光源電力の抑制による省電力化シナリオを実験的に実証し、局発光源電力を 6 dB 低下できることを実証した。

追加目標として 2025 年度に新規に設定した(i)バースト伝送モードシミュレーション、(ii)波長多重伝送実験、(iii)M-QAM 対応方式伝送実験の実施についても計画通りに完了した。(i)については 1 kHz 以下のファイバ偏波変動の追跡能力をシミュレーションで確認、(ii)については 10 dBm/ch までの平均出力条件での伝送能力の確認、(iii)については 16QAM 方式に対応した省電力動作モードとしての PAM-4 ベースインデックス変調実験における受信感度向上を確認した。

また、課題イー-4)と連携した長さ 3.9 km の空孔コア光ファイバにおける送信出力 20 dBm~30 dBm の高出力伝送実験では、単一波長信号として過去最大の送信光電力条件である送信出力 30 dBm においても、当該伝送条件下での符号誤り率特性評価において外れ値の少ない安定動作が可能であることを実証した。



図：課題イー-3における受信感度評価結果(20 km 伝送時)

4-1) 高多分岐化技術の研究開発：高多分岐アクセス網構成技術の研究開発

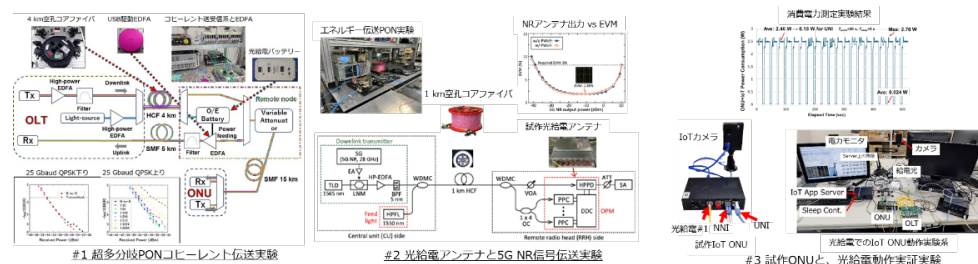
空孔コア光ファイバ（課題イ-4-3 が提供）を前提として、波長分割多重又は高光強度信号光を利用した光給電によるリモート装置（上り信号用光アンプ、無線アンテナ、ONU 等）駆動アーキテクチャに基づいた、超多分岐 PON 伝送技術、エネルギー伝送 PON 伝送技術、アプリケーション連携 ONU スリープ技術を検討した。

超多分岐 PON 伝送技術では、波長多重によりトータル伝送光強度 +40 dBm での、256 分岐相当 100 Gbps コヒーレント信号（25 Gbaud QPSK 変調）及び 32 Gbps NRZ（Non-Return to Zero）変調信号の 4 km 空孔コアファイバを介した伝送（上りは光給電駆動される EDFA（Erbium Doped Fiber Amplifier）を利用）を実証した。シミュレーションにより 1000 分岐以上の可能性を提示することで超多分岐 PON の基本技術を確立した。並行して低コストの直接変調レーザを利用した、+35 dBm IMDD（Intensity Modulation-Direct Detection）25.6 Gbps 信号伝送実験により、信号光と給電光を兼用する簡易な光給電伝送システムを実証した。

エネルギー伝送 PON 伝送技術では波長分割多重による入力光パワー最大 +40 dBm の条件下で、アナログ光ファイバ無線（Wi-Fi 信号）を用いた 1 km 空孔コア光ファイバ伝送（下り方向）と、256 分岐化伝送実験により、非線形光学効果が生じない光リンクの実現性を実証し、光エネルギー伝送による ONU（無線アンテナ装置）の実現技術を確立した。また、標準化されている TWDM-PON の 4 波長 WDM を利用した +40 dBm 光入力アナログ光ファイバ無線（5G NR（New Radio）信号（28 GHz）伝送を実証した。さらに、5G NR 信号を利用したアナログ光ファイバ無線用光給電アンテナ（下り方向）による 10 mW 5G NR 信号出力に成功した。

アプリケーション連携 ONU スリープ技術では ONU に接続されている IoT アプリケーションの起動、スリープに同期するように外部制御される、1 秒以上のスリープが可能な簡易 ONU プロトタイプ（信号速度 1 Gbps）を開発し、動作時消費電力平均 2.46 W、スリープ時平均消費電力 0.024 W、スリープからの立上り時間平均 5.9 秒を実現した。その結果、Active 率（Active 時間/（Active 時間+Sleep 時間））< 0.34 であれば、2.46 W 動作時に既存 FTTH 用 PON の標準規格である TRx スリープによる省電力動作（30%削減可能）を適用した場合と比較して消費電力を 50%削減し、既存 FTTH 用 PON の標準規格比 1/70 の待機消費電力を実現した。さらに給電光入力 1,200 mW、Active 率 0.1 の条件において光給電のみでの動作が可能となることを実証した。

また、未来光ネットワークオープン研究センターを開設し、未来光ネットワークオープンラボにおいて空孔コア光ファイバを中心とした共同利用実験を実施し、低遅延化特性や低非線形／大電力伝送特性についての実証を行った。



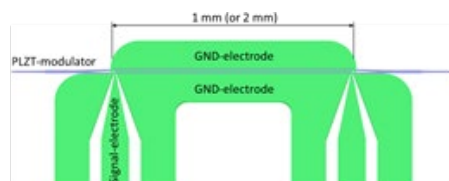
図：課題イ-4-1 における各種実証実験の構成及び結果

4-2) 高多分岐化技術の研究開発：高多分岐用大電力送受信技術の研究開発

MZ 型高光強度光受容変調器として PLZT を用いた光変調器の研究開発において、PLZT 光変調器チップに設けた直線導波路からの出力光強度の評価を行い、最終目標値を上回る最大+19 dBm の出力を達成した。出力光強度を上げるための PLZT 光導波路の損失低減のためのプロセスにも注力し、従来の PLZT 光変調器での損失 6 dB/cm より低損失で世界最高品質の 0.8 dB/cm を達成した。

PLZT 光変調器、終端抵抗とその実装の最適化により、電極長 1 mm、膜厚 600 nm の PLZT 光変調器において目標の帯域 25 GHz を達成し、さらに 40 GHz を超える帯域の見通しを得た。

駆動方法の革新によって、従来国内外で報告されているデータと比較して最高レベルである電極長 2 mm の場合の駆動電圧 1.05 V、電圧対電極積値 $V \pi \cdot L = 0.21 \text{ V} \cdot \text{cm}$ を達成した。



イ-4-2 PLZT光変調器



イ-4-2 PLZT光変調器パッケージ

図：課題イ-4-2 における PLZT 光変調器

4-3) 高多分岐化技術の研究開発：高多分岐用新伝送技術の研究開発

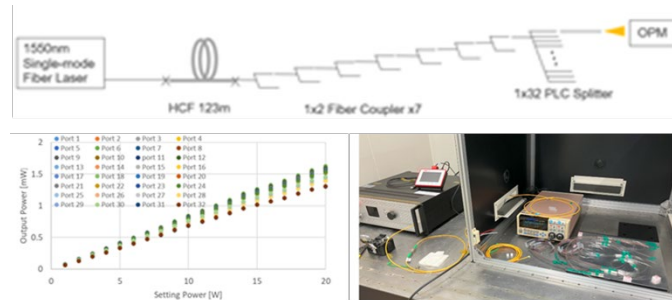
PON の 256 分岐、及び光信号と光パワーの共伝送を実現するために、+40 dBm 以上の入射に適應可能な最適な光リンク技術を確立することを目標として検討を行った。

光伝送路として C-Band 以外 (S/O/L-Band) も伝送可能でありハイパワー耐性を有する空孔コア光ファイバに関する設計やプロセスの最適化を行い、2.19 km の空孔コア光ファイバを実現した。

光リンク技術として、シリカ系コアファイバと空孔コア光ファイバの融着接合において、当初目標であった融着接続損失 0.7 dB を超える 0.54dB を前倒して達成し、他の接続機構に対しての検討を追加で行った。その結果、空間結合モジュールで挿入損失 0.50 dB (反射損失は-53 dB)、バットジョイントモジュールで挿入損失 0.42 dB (反射損失は-39 dB) を、それぞれ実現した。

これらの技術を用いることで、従来の PON システムが 32~64 分岐程度で入力パワーも+10 dBm 以下であるのに対して、PON 用最適光リンク構築において 4,000 分岐以上の最適 PON の構築と+43 dBm の高パワー伝送に成功した。

また、連携実験用に空孔コア光ファイバの提供を行った。

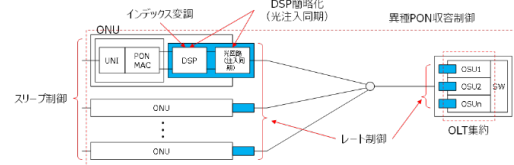


図：課題イ-4-3 における空孔コアファイバリンクの最適化検討

100 ギガビット当たりの消費電力に関して、課題ア及び課題イの各技術において実現した低消費電力削減効果を加算することにより、全体で約 90% の消費電力削減効果を実現した。

対象箇所	目的	削減ポイント	本研究開発	削減率目標	結果
デバイス	方式改良	製造プロセス微細化	対象外	-	-
信号処理		処理の光化、簡略化	ア-1：光注入同期、アクセス向けデジコヒア-3：RoF	15%	A:15%削減達成 (RoFは25%削減)
変調方式		変調方式による最適化	イ-3：インデックス変調	15%	B:7.8%削減達成
資源制御	無駄排除	通信容量に応じたOLTスリープ	イ-1/2：異種PON收容制御	80%	C:80.9%削減達成
		通信レートのアジャスト	イ-2、イ-4-1：ONUのレート可変制御		
		通信状態に応じたONUスリープ	イ-2、イ-4-1：ONUスリープ制御		
		ONU結電	イ-4-1：ONUへの光給電	30%	

課題全体での消費電力削減効果
改善なしの電力を100%
Aの効果：15%/25%
Bの効果：(100%-A) × 7.8%=6.6%/5.9%
Cの効果：(100%- (A+B)) × 80.9%=63.4%/55.9%
Dの効果：(100%- (A+B+C)) × 50%=7.5%/6.6%
削減率=A+B+C+D=92.5%/93.4%
(青字はRoFを適用した場合)



図：課題全体における低消費電力効果

課題全体の消費電力削減

3 政策効果の把握及び有識者の知見の活用

研究開発の評価については、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、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。

本政策においても、「情報通信技術の研究開発の評価に関する会合」(令和8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た。ここで、外部有識者から以下のような御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・市場動向を踏まえて開発ターゲットを絞り込むなどして、基本技術に対する目標を達成したのみならず、消費電力や特許出願の観点で目標を上回る成果を挙げた。特に、1波長当たり1.6テラビット/秒の実用化の見通しを得たことは高く評価できる。今後は、更なるアウトカム達成のための取組を継

続し、商用化を急ぐとともに、海外市場を含めた展開につなげることを期待する。

- ・大容量・高多重光アクセス網伝送技術は目標を全て達成した。各目標のうち、一部については当初目標を上回る成果であり、特に、アウトプット目標については当初目標を大幅に上回る実績であった。
- ・世界市場でのシェア拡大に向けては、ターゲット顧客、競争相手を明確にした戦略の立案や国内光産業関係者との共有も含めた活動を、商品化については、例えば標準化から得られる情報を活用した商品開発を並行して行い市場のニーズに応じてすぐにリリース可能にするなどの戦略を期待する。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等は下表のとおりである。

主な指標	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件 (0件)	3件 (3件)	6件 (6件)	7件 (7件)	17件 (16件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	3件 (3件)	11件 (11件)	16件 (16件)	16件 (16件)	46件 (46件)
その他の誌上発表数	2件 (0件)	2件 (0件)	1件 (0件)	2件 (0件)	7件 (0件)
口頭発表数	17件 (2件)	36件 (7件)	66件 (16件)	59件 (16件)	178件 (41件)
特許出願数	10件 (2件)	23件 (4件)	18件 (3件)	25件 (8件)	76件 (17件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	7件 (0件)	11件 (2件)	18件 (2件)
国際標準提案数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
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	1件 (1件)	2件 (0件)	2件 (2件)	3件 (1件)	8件 (4件)
報道発表数	2件 (1件)	4件 (1件)	1件 (0件)	2件 (0件)	9件 (2件)
報道掲載数	5件 (0件)	21件 (0件)	4件 (0件)	4件 (0件)	34件 (0件)

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

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

4 政策評価の結果(総合評価)、今後の課題及び取組の方向性

(1) 政策評価の結果

テレワーク等の新たな生活様式の定着・進展や超高精細映像の流通、AI等を含む先端技術を活用したデジタルツイン社会の形成による通信トラヒックの急速な増大とそれに伴う消費電力の増大に対応するため、社会インフラとして大容量かつ低消費電力の光通信網が必要とされている。本研究開発により、基幹網からアクセス網に至るまで一体的な大容量化・低消費電力化を実現する先端光伝送技術を確立するこ

とが出来た。このことは、我が国の光伝送技術の国際的な競争力を強化するとともに、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・発展に寄与するものであることから、本研究開発は必要性があったと認められる。

本研究開発では、毎秒 10 テラビット級の基幹網及び毎秒 1 テラビット級のアクセス網において、100 ギガビット当たりの消費電力を従来技術と比較して 1/10 以下とすることを目指していた。研究開発の結果、基幹網においては、消費電力を長距離モードにおいて 1/18、短距離モードにおいて 1/27 まで削減できることを確認し、アクセス網においては、消費電力を 1/10 まで削減することを実現し、目標を達成することができた。この成果は、社会インフラとして大容量かつ低消費電力の光通信網の構築等に寄与するものであり、本研究開発には有効性があったと認められる。

(2) 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商品化を進めるとともに、国の後続プロジェクトである「次世代の通信インフラを担う光伝送技術の研究開発」等を活用して更なる技術の発展を目指す。また、引き続き知的財産権確保、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、これらの取組について追跡調査等によりフォローアップを実施していく。

5 評価に使用した資料等

- 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>
- 第 6 次エネルギー基本計画（令和 3 年 10 月 22 日閣議決定）
https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf
- 統合イノベーション戦略 2021（令和 3 年 6 月 18 日閣議決定）
https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/togo2021_honbun.pdf
- 成長戦略フォローアップ（令和 3 年 6 月 18 日閣議決定）
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/fu2021.pdf>
- 成長戦略実行計画（令和 3 年 6 月 18 日閣議決定）
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/ap2021.pdf>
- 本研究開発については、「総務省情報通信研究評価実施指針（第 6 版）」に基づく評価を行っており、関連資料は、以下の URL に掲載されている。また、本研究開発については、研究開発終了後一定の期間を経過してから、研究開発の直接の成果（アウトプット）から生み出された効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）等を確認することは有益であるほか、研究開発施策等の評価の基礎的なデータを取得するため、学会や海外における評価や関連特許、技術移転等の実用化に関する状況を調査し、活用状況等を把握する追跡調査を実施することとしている。
https://www.soumu.go.jp/menu_seisaku/ictseisaku/ictR-D/index.html

令和 8 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 電波環境課

評価年月：令和 8 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

（1）研究開発名称

空間伝送型ワイヤレス電力伝送の干渉抑制・高度化技術に関する研究開発

（2）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」

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間・総事業費

実施期間：令和 4 年度～令和 7 年度（4 か年）

総事業費：17.0 億円

・概 要

5 G の高速・低遅延な無線通信技術を活用した多様なモバイル機器や、多数の IoT 向けセンサ等に給電可能で利用環境に制限のない空間伝送型ワイヤレス電力伝送システムの実現（以下「空間伝送型 WPT システム」という。）に期待が高まっている。しかし、空間伝送型 WPT システムは通常の無線通信に比べて送信電力が大きく、従来技術のまま大容量化・多数化を実現しようとした場合、空間電力漏洩量が増大し他の無線局への干渉等が課題となる。他方で、他の無線システムの共存性を精緻に評価できないために、空間伝送型 WPT システムの利用環境が過剰に制限されるといった課題もあり、これらの解決のためにはワイヤレス電力伝送技術の向上と共存性評価技術の精緻化が必要となる。

本研究開発では、モバイル機器や多数の IoT 接続デバイスへの屋内外における空間伝送型 WPT システムの運用に伴って生じる他の無線システムに対する干渉問題を抑制し、干渉抑制・高度化技術を確立することで、周波数の有効利用に資することを目的とした。

具体的には、大容量・多数給電に対応した空間伝送型 WPT システムの本格的利用に当たり、適切な電波環境を維持しつつ実現できるよう、以下の 3 つの技術課題に取り組んだ。

ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術

ウ 共存性評価技術

これにより、従来の空間伝送型 WPT システムと比較したときに、他の無線システムとの共用条件を満たしたうえで、時間当たりの給電能力を 10 倍以上に向上することを数値目標とした。

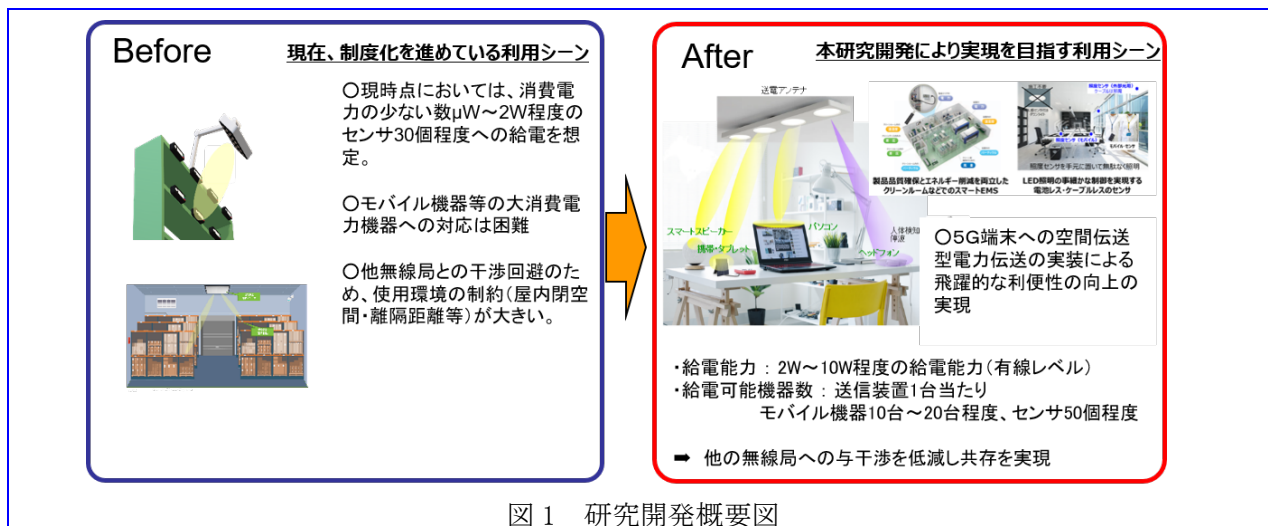


図1 研究開発概要図

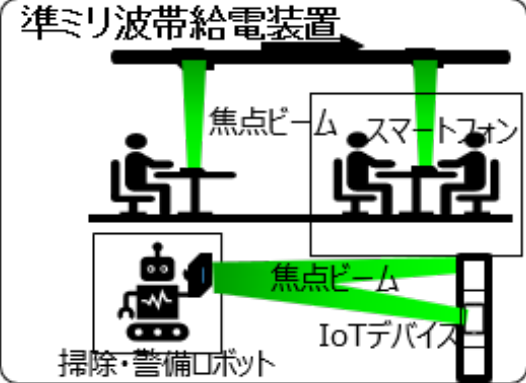
技術の種類	技術の概要
研究課題ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術	ビームフォーミングの鋭角化が可能な、新たな高周波数帯（準ミリ波帯）の送電用デバイスを開発し、送信電力当たりの給電可能量を向上させる。 - 新たな高周波数帯利用を視野に入れて、高出力鋭角ビームの送信機を開発し、数Wクラスの空間伝送型 WPT システムの実現を図る。 - 準ミリ波帯送電アンテナと 5 G 基地局アンテナを共用化し、高電力となる給電システムから 5 G 通信への干渉低減を図る。 準ミリ波帯給電装置  準ミリ波帯 共用アンテナデバイス技術 
研究課題イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術	多数デバイスの給電タイミング等を適切に制御することで、給電時間割合を向上させる。 - 多種多様なマルチデバイスを適切に送電スケジューリングするためのアクセス制御プロトコルを開発する。有人環境に対応するため電波防護指針によって定められている指針値以下となるよう給電を制御する。 - 空間環境に応じてビーム方向等を調整し、特定空間への漏洩電力量を最小化する技術を開発する。

図2 準ミリ波帯の送電用デバイス開発イメージ

	MAC層的アクセス技術 ①所望の受電 端末のみへ電 力伝送 ②遮蔽物や他 の無線システム への干渉回避 漏洩電力量最小化技術 図3 多数デバイスの給電制御イメージ
研究課題ウ 共存性評価 技術	他の無線システムへの与干渉を適切に評価する共存性評価技術を確立し、他者が管理する無線システムとの離隔距離を適切に設定することで、空間的稠密度を向上させる。 干渉量評価技術 電力漏洩量 <実測> 電力漏洩量 <予測> 予測の 精緻化 共存性評価に係る データベースの構築 図4 共存性評価技術イメージ

（２）目標の達成状況

空間伝送型 WPT システムの高度化と利用効率の向上を目指し、各技術課題において当初の想定を上回る顕著な成果を得ることができ、目標を達成した。主要な成果は以下の通りである。

- ①給電電力の向上（研究課題ア）：１対１の環境下における動作必要電力を、現行の 2W から 8.2W（平均値）へと 4.1 倍に向上させることに成功した。
- ②給電効率の改善（研究課題イ）：給電時間割合を、現行の 20%程度から 80%へと 4 倍まで向上させ、より連続的かつ効率的な給電を可能とした。
- ③共存検討のための基盤構築（研究課題ウ）：建材の電波透過・反射特性に関する基盤データベースを構築した。これにより、エリア外への電波強度予測の精度が向上し、電波伝搬シミュレーションの精緻化を実現。他の無線システムと共用するための具体的な要件（出力、離隔、時間等）の策定を可能とした。

上記要素技術の相乗効果（4.1 倍×4 倍）により、現行の空間伝送型 WPT システムと比較して、時間当たりの給電能力を 16.4 倍に向上させた。

なお、達成目標等については、事前評価書に記載のとおりである。

https://www.soumu.go.jp/main_content/000766956.pdf

技術の種類

目標の達成状況

研究課題ア
新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術

本研究課題では、24GHz 帯を用いた USB Type-C 相当 (7.5W) の給電実現及び利用範囲の拡大を目的とし、評価基盤の整備と制度化・標準化を推進した。

研究成果の要点は、制度化・標準化の着実な進展、高効率な送受電性能の実証、及びシステム共用と装置最適化の達成である。本研究により、実用化の障壁であった制度及び熱管理上の課題が大きく改善され、屋外や有人環境における空間伝送型 WPT システムの社会実装に向けた基盤が整った。

(a)-1 「WPT システム構成設計と全体最適化」

○研究開発の背景と管理体制

本課題では、要素技術の統合・体系化を図るため、独自の「成果のロードマップ (成果の木)」を策定した。設定したマイルストーンに基づき計画的な進捗管理を徹底した結果、当初目標に合致する成果を得た。

○技術的成果：給電能力の飛躍的向上

各要素技術の相乗効果により、現行システムを大幅に上回る給電性能を実証した。

- ・給電能力の向上： 給電電力の 4.1 倍向上と 4 倍効率化を達成。
- ・総合評価： 他の研究課題成果の統合により、時間当たりの給電能力を従来比で合計 16 倍に向上させることに成功した。

(a)-2 「WPT システム全体の定量的評価」

本課題では、空間伝送型 WPT システムの実用化及び普及を目的とし、実証試験の実施、干渉評価システムの構築、及び実証フィールドでの統合評価を通じた制度化・標準化に向けた活動を推進した。

○実証評価試験と標準化に向けた調整

(a)-1 と連携し、外部機関やメーカーとの連携を通じて研究成果の公開、評価パラメータの定量評価に向けた関係機関との調整を実施した。

具体的には、4 年間の実証期間において、計 4 バンド・32 種類の既存無線システムを対象とした実証評価試験を遂行した。本試験により、各無線システムへの干渉影響を詳細に把握するとともに、許容基準値の策定等、制度化に向けた技術的根拠を明確化した。

周波数帯	被干渉の無線システム	種類	備考
920MHz 帯	・高度MCAシステム移動局 ・デジタルMCAシステム移動局 ・RFID特定小電力無線局システム ・RFIDテレメータ用、テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備	2機種 3機種 3機種 (3メーカー) 3機種 (3メーカー)	
2.4GHz 帯	・2.4GHz帯無人移動体画像伝送システム ・N-STAR携帯移動地球局 ・2450MHz帯構内無線局 (特定小電力) ・無線LANシステム	1機種 1機種 2機種 (2メーカー) 3機種	ATR暗室 ATR暗室
5.7GHz 帯	・5.7GHz帯無人移動体画像伝送システム ・無線LANシステム ・気象レーダーシステム	1機種 3機種 1機種	筑波気象研究所
24GHz帯	・自動車用車両検知レーダーシステム ・24GHz帯レーダーモジュール ・移動体検知センサ ・空港面探知レーダー	2機種 (2車両) /1システム 3機種 3機種 1機種	JARI施設 つくば/城里 伊丹空港

表 1 実証実験を実施した被干渉無線システム

○干渉評価システムの構築と検証

実運用環境を想定した評価手法として、JWPT (ワイヤレス電力伝送運用調整協議会) と連携し、今後設置される空間伝送型 WPT システムの無線設備に適用可能な「干渉評価システム」の構築を行った。本システムの活用により、周辺無線環境に対する影響の定量的な評価が可能となり、より信頼性の高い運用調整プロセスの確立に寄与するものである。

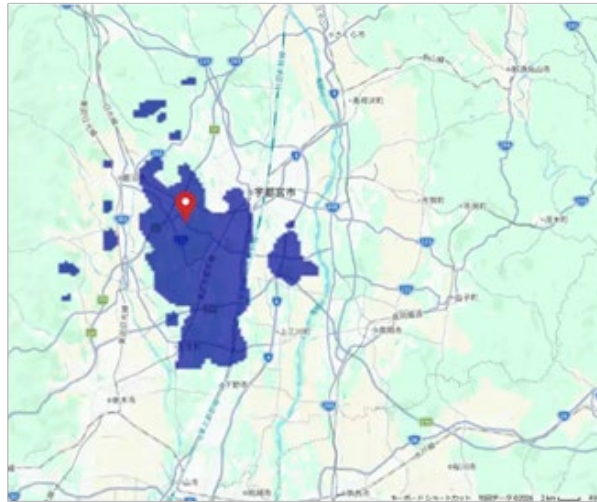


図5 空間伝送型 WPT システムによる干渉影響コンタ図の例

○実証フィールドによる成果確認

開発された各要素技術を統合的に評価するため、実証フィールドでの成果確認を実施した。ここでは、個別の技術評価に留まらず、各評価手法の連携を図ることで、システム全体としての整合性を検証し、フィールド実証を通じて、実運用環境における技術の有効性を最終的に確認した。

(b)-1 「高出力鋭角ビームの送信技術に関する研究」

24GHz の可搬型 WPT 送電装置の高出力化装置を試作した。256 素子構成で空中線電力 12.85W を実現し、高出力かつ鋭角ビーム構成を実現した。なおアンテナ内で 2 分岐構成としているため、論理的には 2 倍の約 25W まで電力拡大が可能となる。図 6 に、アンテナから 0.5m 離れた 10cm 角の平面における電界分布を示す(シミュレーション値)。

さらに可搬型 WPT 送電装置として、移動ロボット (AGV) に搭載した形で、PC で空間伝送型 WPT システムの指向性を自由に制御できるようにした。ロボットの移動と指向性の制御の組み合わせにより、給電範囲の拡大が確認できた。

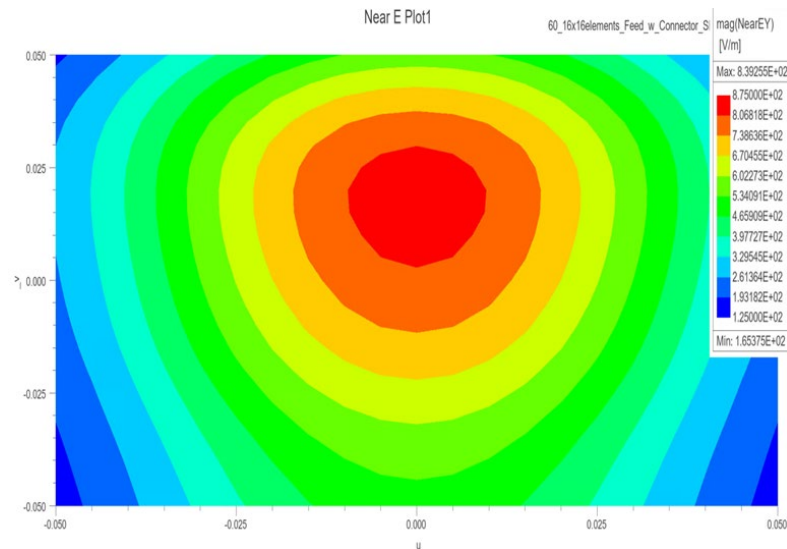


図6 256 素子アンテナにより 0.5m 地点での電界の様子 (シミュレーション)

(b)-2 「高効率パワーアンプ IC に関する研究開発」

GaN HEMT プロセス ($L_g=0.1\mu\text{m}$) を用いて、出力 1W、ドレイン効率 60%、電力負荷効率 51% のパワーアンプを実現し、電力損失を従来比 16.6%削減した (目標 15%)。

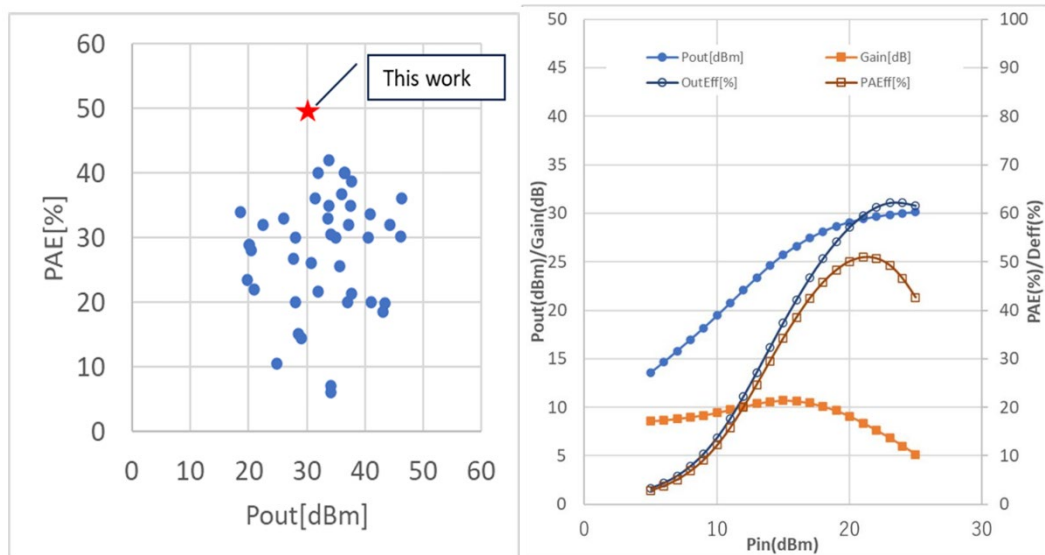


図7 試作パワーアンプ IC の入出力特性と他機関発表パワーアンプ IC との特性比較

(b)-3-1「大電力高効率受電レクテナに関する研究」

本課題では、USB Type-C 相当 (7.5W) の給電を実現するため、DC 電力 7.5W 以上を出力可能なレクテナアレーを開発することが目標である。これに適用する 24GHz 帯 1WGaAs レクテナの開発を行った。図8に構成を示す。

開発したレクテナの特長は以下の通り：

- (1) GaAs SBD よりも高電流密度である GaAs E-pHEMT により Gated anode diode (GAD) を構成し、これを整流用ダイオードとして用い、大電力化した。
- (2) アンテナと整流用ダイオードを直接接続する Diode on Antenna (DoA) 構成を適用し、回路損失を抑制。世界トップの整流効率 72.7%@入力電力 1W を得た。
- (3) GaAs MMIC 上のループアンテナとワイヤアンテナを電磁結合させ非接触給電を実現。アンテナとダイオードの接続損失を抑制し、放射効率 95%、利得 8.1 dBi を得た。
- (4) ワイヤアンテナを窒化アルミウム基板に構成し、その上にレクテナ MMIC を搭載する放熱構造とした。

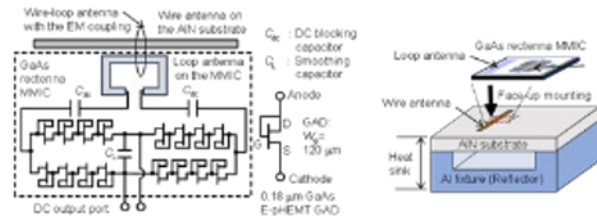


図8 24GHz 帯 1W レクテナの構成

このレクテナにより、図9に示す 16 アレーを構成し、24GHz 帯電力 15.9W 照射時に DC 出力 11.4W (効率 72%) を得た。さらにこれを用い、電気興業製 1024 素子アレーアンテナ (EIRP:82dBm) と対向させ、DC 出力 7.58W を得て、所期の目標を達成した。



図9 24GHzでの無線電力伝送実験

大電力受電時に課題となる発熱を抑え、高効率に動作するレクテナ実装技術の高度化に取り組んだ。具体的には、GaN素子をグラファイト及びAlN+グラファイト複合構造へ安定して実装する圧着技術を確認するとともに、凹凸のある基板にも対応できる専用のチップ押し付けジグを開発した。その結果、10W級GaN素子において、従来のAuSn溶ダ接着と比べて約25%の熱抵抗低減を確認した。さらに、複合構造基板はAlN単体より温度上昇を抑えられることもシミュレーションで示され、受電レクテナの高出力化・高信頼化に有効な基盤技術を得た。

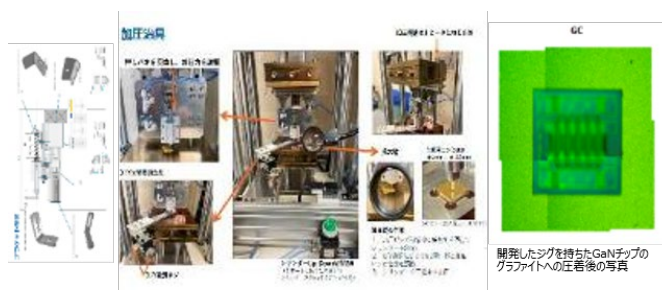


図10 GaN素子の圧着装置と実装したGaNチップ

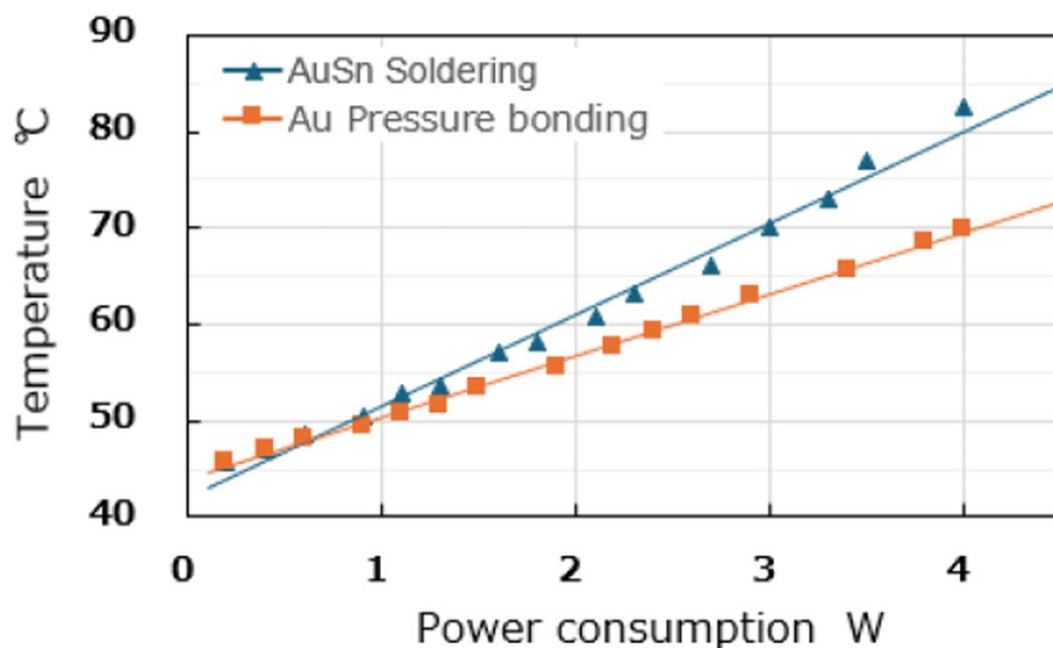


図 11 従来の AuSn 接着剤と圧着技術を用いて作製した GaN 実装基板の温度上昇比較

(b)-3-2「大電力受電素子の開発」

準ミリ波帯 GaN-GAD の基本デバイスを作製し、良好な DC 特性を確認した。実測 I-V と S パラメータに基づいて GAD の SPICE モデルを抽出した。ワット級 GAD を設計し、シミュレーションにより 1 W 受電動作可能であることを確認した。これにより、ワット級 GAD 整流器の試作を完了した。

また、10W 級 GAD のレイアウトを設計し、試作を完了した。DC、S パラメータの温度特性の測定結果に基づいて自己発熱導入 GAD モデルを開発した。GAD モデルに基づいて 10W 級倍電圧回路 ($W_g = 1.2 \text{ mm}$) の整流特性を計算した結果、40dBm 入力時の変換効率 73.3%、38dBm 入力時の変換効率 77.0% を予測した。



図 12 準ミリ波 GaN-GAD の素子構造と DC 特性（測定結果）と 10 W 級 TEG の整流特性のゲートピッチ依存性（計算結果）

既存のロードプル・ソースプル評価装置を活用することで、整流器特性を効率的に評価できる測定系を整備し、構造設計から実測評価までを短期間で回せる体制を構築した。その結果、試作した GaN-GAD の 24GHzRF 入力条件で最大 35% の変換効率を確認しており、大電力受電素子の実用化に向けた有望な成果が得られた。

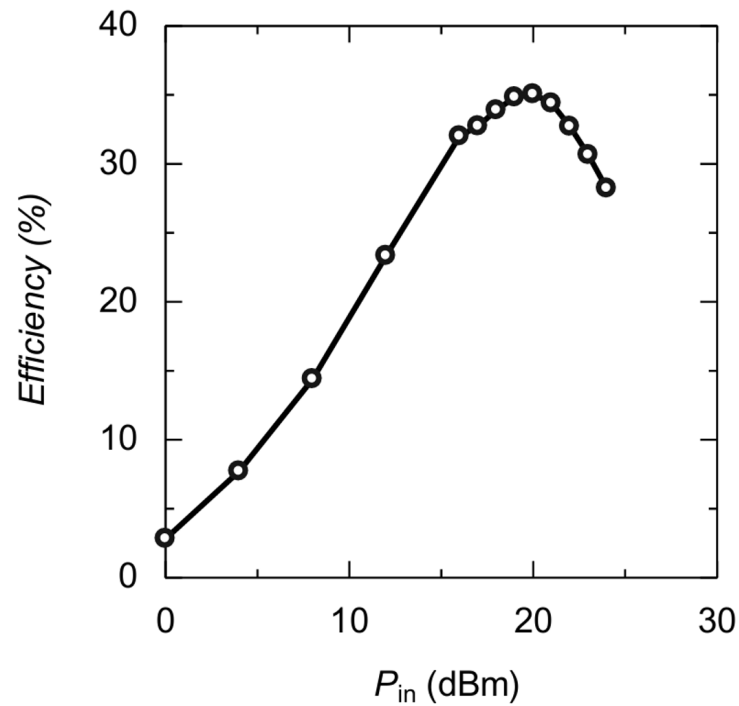


図 13 準ミリ波 GaN-GAD の 24GHz 入力における変換効率-入力電力特性

(c) 「5G 準ミリ波との共用化技術」

本課題では、メタマテリアルアンテナ技術を活かし、円偏波複偏波アンテナによる可変偏波を可能とした 1024 素子アレーにより構成される、WPT 送電装置を開発し、OTA (Over the Air) 設備評価にて、目標 EIRP+82 dBm 以上を実現した。また、レクテナ全面に平均化し、高い効率を得るフラットビーム成形により、7.58W の DC 出力を達成した。

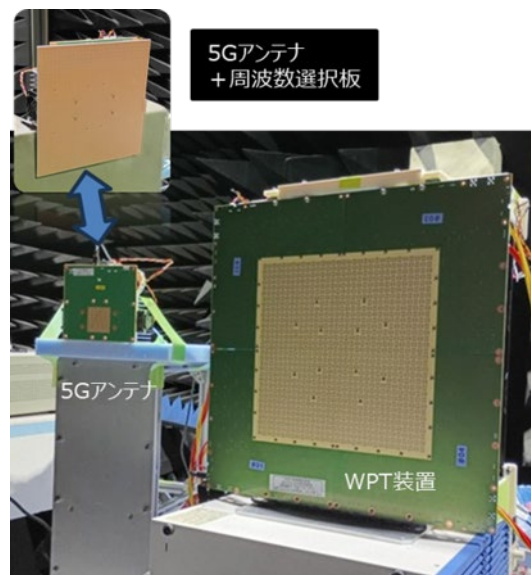


図 14 24GHz 帯 1024 素子 WPT 装置と 5G 装置検証

28GHz 帯 5G 基地局との共用化において、WPT 反射波による 3dB 以上の受信レベル圧縮が課題となったが、5G 装置前面への周波数選択板の配置により影響をほぼ解消し、両システムの共用化を可能とした。

次世代空間伝送型 WPT システム用の空冷化と高効率化の実現に向け、パワーアンプ及び通信部の構成を最適化し、空間伝送型 WPT システムに最適なビームフォーミング IC の回路設計を推進した。

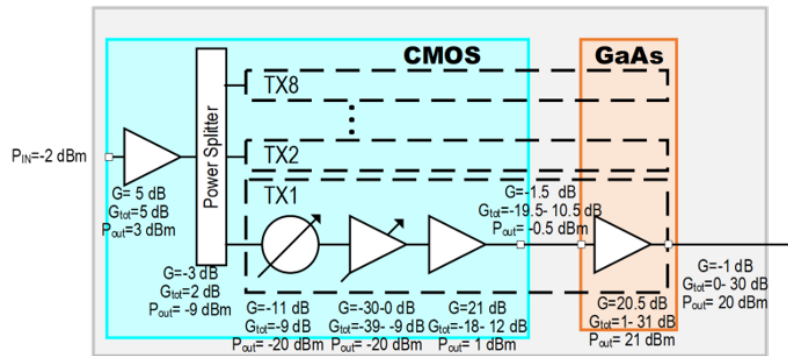


図 15 WPT 用ビームフォーミング IC の構成概要

本研究課題では、漏洩電力量を最小化し、給電時間割合 80%を実現することを目標とした。空間伝送型 WPT システム全体の定量的評価及び共存性評価技術と連携し、漏洩電力スペクトラム観測技術により評価環境を整備した。実証評価試験の実測に基づいて、キャリアセンス不要で空間伝送型 WPT システムを運用できる条件を明確化した。漏洩電力量可視化技術を用いた人体暴露指針遵守の給電停止運用を行うと共に、通信給電混在型メディアアクセス制御技術や、MAC 層のアクセス技術による時分割多重等により効率的な給電制御を実現することで、目標を達成した。

(a)-1 「給電用メディアアクセス制御」

本課題では、複数端末に対して効率的かつ安定的に電力を供給するための給電用メディアアクセス制御 (MAC) 手法の検討と、グループ給電の実現を目的として研究を行った。電力供給を通信ネットワークの資源配分問題として捉え、図 16 に示す電力をパケットとして扱う「パワーパケット」モデルを導入した。

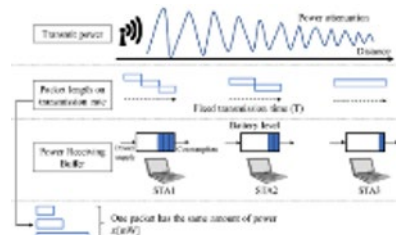


図 16 電力パケット変換方式の概要図

これにより、複数端末からの給電要求をキューとして管理し、スケジューリングに基づいて電力を分配する MAC 制御を構築した。さらに、PTDD (時間分割給電) に対して、RR (Round Robin) 方式を基準とし、これを拡張した MFQ (Multilevel Feedback Queue) 方式を提案した。MFQ 方式では、端末のバッテリー状態や消費電力に応じて優先度を動的に変更することで、給電機会を適応的に制御する。シミュレーション評価の結果、RR 方式では公平な給電機会は確保されるものの、条件差に対する適応性に課題があるのに対し、MFQ 方式では端末間の電力偏りや枯渇を抑制し、より安定した給電制御が実現できることを確認した。

また、本研究では、シミュレータを用いた給電制御設計手法を確立し、その結果を実機に実装して実証実験を行った。実験結果より、提案手法により端末間の電力偏りが抑制され、安定したグループ給電が実現できることを確認した (図 17)。

研究課題イ
空間環境に
応じた多数
デバイス給
電制御技術

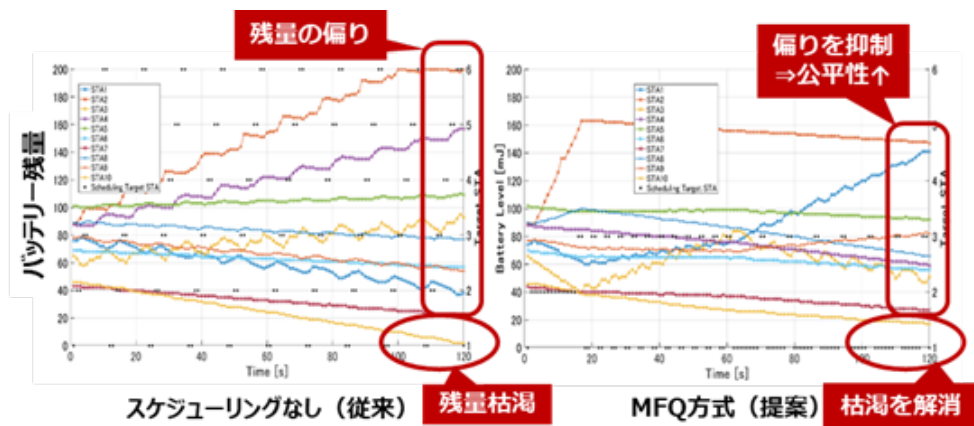


図 17 実証実験による方式の効果比較

(a)-2 「通信給電混在型メディアアクセス制御技術」

空間伝送型 WPT システムの送電システムと通信システムの共存方式の開発を行った。現場に設置したセンサで検知した電波情報に基づいて、制御サーバで機械学習を用いて空間伝送型 WPT システムからの電波を識別し、無線通信の状況に応じて以下の制御することで、空間伝送型 WPT システムと共存可能な無線通信制御機能を開発した。

- ・無線通信の占有率が低い場合：空間伝送型 WPT システムとの時分割制御により同一周波数で棲み分ける
- ・無線通信の占有率が高い場合：無線通信の周波数を切り替える

時分割制御により空間伝送型 WPT システムと無線 LAN とを共存させた様子を、図 18 に示す。図より 130ms ごとに空間伝送型 WPT システムと無線 LAN とを切り替え、共存を行っていることを確認できた。

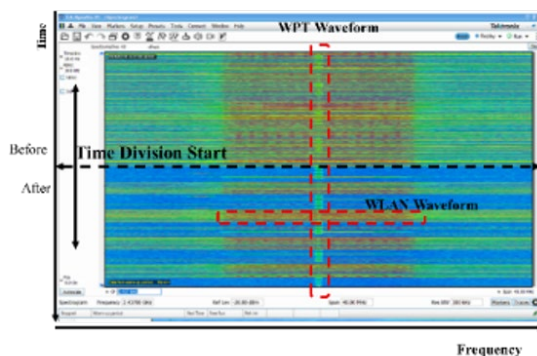


図 18 時分割共存の様子

(b)-1 「漏洩電力量可視化技術」

本研究課題では、建築資材の透過・反射特性等を考慮し、空間内の電界状況を可視化する技術を確立した。これに基づき、空間伝送型 WPT システムと通信の共存に向けた伝搬解析（レイトレース法）による「相互影響エリアの特定」や「キャリアセンス閾値の調整」等の機能を備えた可視化プラットフォームを構築した。同プラットフォームでは、複数システムの連続切り替え表示機能等の有効性を検証し、相互影響の効率的な把握を可能とした。



図 19 可視化プラットフォーム

伝搬解析においては、レイトレース法を「経路探索部」と「電界計算部」に分離し、計算負荷の高い経路探索結果を再利用することで、精度を維持したまま計算を高速化する手法を提案した。大規模な実証評価試験環境において、本手法により計算時間を従来比で 60～80%削減しつつ、計算結果の再現誤差を同室内で 1dB 以内、室外で 2dB 以内に抑えることが可能であることを確認した。

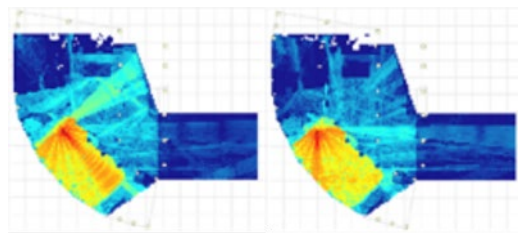
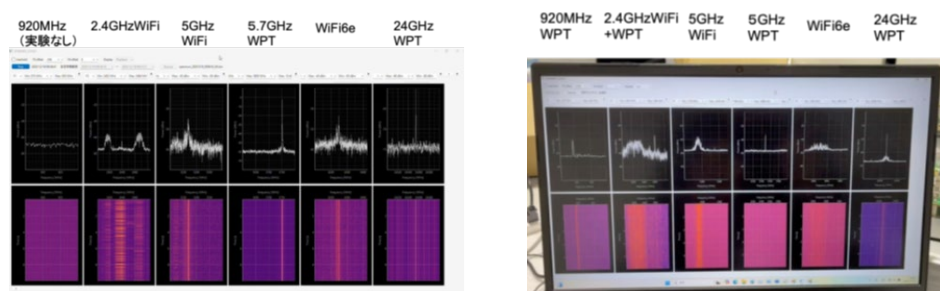


図 20 実証評価試験環境(YRP)での評価例

(b)-2「漏洩電力スペクトラム観測技術」

漏洩電力スペクトラム観測技術は、無線帯域への妨害を考慮し、無線 IoT+WPT スペクトラム周波数を同時に観測する事を目標とした。低コスト化を念頭にしたダイレクト RF アンダーサンプリング法による試作したスペクトラムモタを用いて、実証フィールド実験にて、2.4GHzWiFi、5GHzWiFi、5.7GHzWPT、WiFi6e、24GHzWPT のスペクトラム観測を行った。その結果、上記信号帯スペクトラムの観測に成功し、さらに、WLAN 信号の周波数チャネル変更の状況もスペクトログラムとして観測に成功(図 21(a))した。実証フィールド実験では 920MHz 帯の実験がなかったため、920MHz 帯スペクトラムは得られていないが、暗室内事前確認実験では、920MHz 信号の観測に成功(図 20(b))している。これにより、本研究の目標(無線 IoT+WPT スペクトラム周波数を同時に観測)を達成した。



(a) 実証フィールド実験での結果

(b) 事前実験での結果

図 21 スペクトラム、スペクトログラム観測結果

研究課題ウ
共存性評価
技術

「(a) 共存性評価に係る基盤データ整備」、「(b) 干渉評価システム技術」を確立し、シミュレーションにより共用可能要件(出力、離隔、時間等)の精緻化を実現するとともに、「技術課題ア 新たな高周波数帯を活用した電力伝送効率化技術」、「技術課題イ 空間環境に応じた多数デバイス給電制御技術」と連携し、共用可能要件の緩和について実証を交

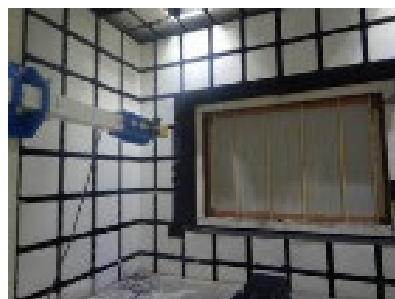
えて検証を行った。

具体的には、シミュレーション評価、共存制御技術での利用を想定し、24種類の建材の電波透過・反射特性に関するデータや建物・構造物特性に関する基礎データを実測した。また、建材の電波透過・反射特性をデータベースとして活用し、屋外等のエリア外の電波強度を予測し、他の無線システムと共用可能な要件（出力、離隔、時間等）を解析することが可能なシステムを開発し、実証試験によりシミュレーションによる建物内外の電界強度の予測値と実測による測定値を比較し、その精度を検証した。

このように、技術課題ア及びイと連携し、実証実験を通じて電波伝搬シミュレーションシステムの精度を検証した結果、920MHz帯、2.4GHz帯及び5.7GHz帯では概ね $\pm 10\text{dB}$ 以内に収まる非常に高い精度でシミュレーションできることが確認され、特定空間への漏洩電力の影響を最小化するための技術の評価に活用可能なシミュレーション環境が整備された。

(a)-1「建築材料、建物構造物の電気特性実験」

屋外漏洩電力評価のためのレイトレース法によるシミュレーションの高精度化に向けて、実施工状態を模擬した24種の建材の920MHz、2.4GHz、5.7GHz、24GHzにおける透過及び反射特性を評価した。なお、屋外漏洩の主要因と考えられる窓ガラス材料については24GHz帯の複素比誘電率についても測定し、建材特性データベースを構築した。また、このデータベースを反映した電波伝搬シミュレーションの解析精度評価のため実物件2件において、屋外漏洩電力分布を測定した。測定の結果、目標精度である $\pm 10\text{dB}$ 以内の計算精度が得られていることを明らかとした。

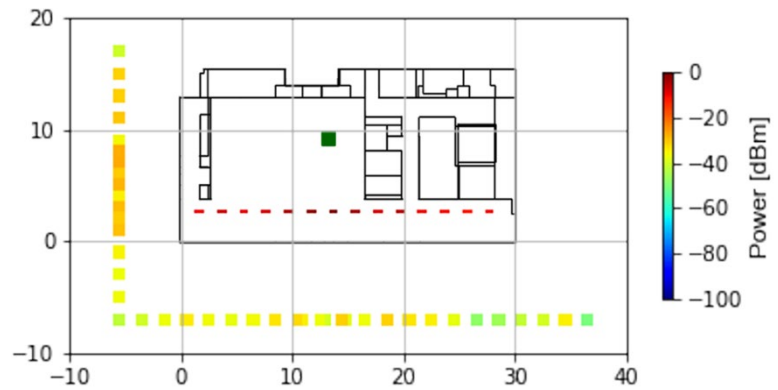


透過特性



(b) 反射特性

図 22 自由空間法による建材の透過反射係数の測定系



(a) 屋外の受信系

(b) 920MHz における受信電力分布

図 23 屋外漏洩電力の測定

(a)-2 「実験用 5.75GHzWPT 送信システムの試作」

屋外等のエリア外の電波強度のシミュレーションモデルを検証するため、送電出力とアンテナ素子数・開口径の異なる 2 種の 5.75GHzWPT 送信システム（16 素子・21W 出力と 36 素子・216W 出力）を開発し、実物件 2 件における電波伝搬・屋外漏洩電力分布を測定評価する実証試験を行った。また、これらの装置を用いて WLAN と 5.75GHz 帯 WPT 送信波との干渉評価試験を行い、共存性に関する技術要件案を策定し、制度化検討推進団体に提案を行った。



(a) 16 素子送電装置 (b) 36 素子送電装置

図 24 試作した実験用 5.75GHzWPT 送信システム

(a)-3 「国内外規格の調査、提案書作成」

2025 年 4 月、日本建築学会において「空間伝送型ワイヤレス給電システムを使用する建築部材の電磁波特性評価ガイドライン・同解説」の策定を開始し、2026 年 3 月時点で、WD (Working Draft) の策定を完了した。

(b) 「干渉評価システム技術」

24 種類の建築部材の測定値をデータベース化した。本研究では、実際の建築物に利用する実大の建設資材及び実際の建築物と同様の施工法で製作した建物・構造物試験体の透過減衰量の周波数特性、反射減衰量の角度特性を実測し、自由空間透過法を利用して、透過・反射減衰量の角度特性をデータ化した。これにより、測定のみでは把握が困難な透過・反射減衰量の角度特性に対応した電波特性データベースを整備した。また、他の研究機関と

の連携を目的として、構造計画研究所がリリースしているレイトレース法による電波伝搬解析ツール Wireless InSite に本研究で開発した電波特性データベース及びアンテナ指向性を実装した。

電波特性データベースを用いて 4 周波数帯の建物内外の漏洩電力をシミュレーションし、測定値との比較を実施した。920M、2.4G、5.7GHz 帯では概ね±10dB 以内に収まり非常に高い精度でシミュレーションできることを確認した。

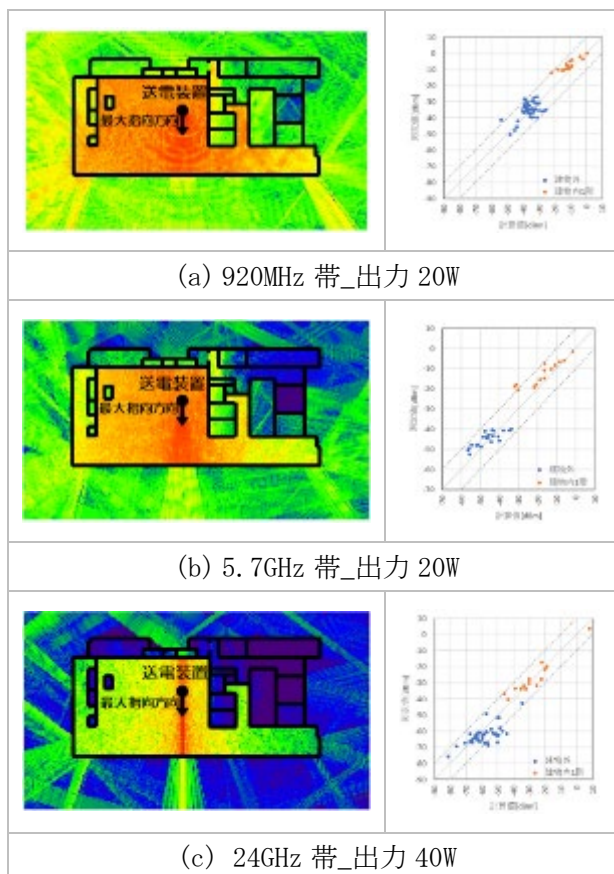


図 25 電波伝搬シミュレーション結果(左)計算値と測定値の比較(右)

3 政策効果の把握及び有識者の知見の活用

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。本政策においても、「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和 5 年 3 月、令和 6 年 3 月及び令和 7 年 3 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、当初の目的の達成や事業実施の妥当性について確認したほか、外部有識者からの個々の要素技術を円滑に統合するためのロードマップ及びマイルストーンや指摘や論文発表や特許取得の活動状況への指摘等をいただいております、これらを本研究開発の評価に活用した。

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。口頭発表数は目標を大きく上回り、査読付き口頭発表論文数は目標を達成した。さらに、10 件の受賞を得た。

主な指標	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件（1件）	2件（0件）	6件（4件）	8件（2件）	17件（7件）
査読付き口頭発表論文数 （印刷物を含む）	0件（0件）	1件（1件）	8件（8件）	14件（13件）	23件（22件）
その他の誌上発表数	8件（0件）	1件（0件）	2件（0件）	2件（0件）	13件（0件）
口頭発表数	29件（3件）	56件（7件）	53件（4件）	59件（3件）	197件（17件）
特許出願数	4件（0件）	4件（1件）	8件（0件）	4件（0件）	20件（1件）
特許取得数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
国際標準提案数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
国際標準獲得数	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）	0件（0件）
受賞数	2件（0件）	5件（1件）	3件（0件）	0件（0件）	10件（1件）
報道発表数	0件（0件）	2件（0件）	8件（0件）	7件（0件）	15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）」及び「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。

4 政策評価の結果（総合評価）、今後の課題及び取組の方向性

（1）政策評価の結果

5 Gの高速・低遅延な無線通信技術を活用した多様なモバイル機器や、多数の IoT 向けセンサ等に給電可能な利用環境に制限のない空間伝送型 WPT システムの実現に期待が高まっている中、他の無線局に与える干渉レベルを抑制しつつ、給電方式を向上させることが課題であった。本研究開発の技術は、この課題に取り組むものであり、空間伝送型 WPT システムの周波数利用効率を向上させ、周波数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、現行の空間伝送型 WPT システムと比較して、時間当たりの給電能力を 10 倍以上向上させることを目指していた。研究開発の結果、16.4 倍と目標を大幅に上回る給電能力を達成したほか、24GHz 帯において、実用化を見据えた基盤技術（半導体技術）を確立し、さらに精緻化したシミュレーションと建材の基盤データベースの整備を完了するなど、目標を達成することができ、空間伝送型 WPT システムの実用化に寄与する成果を得た。よって、本研究開発には有効性があると認

められる。

(2) 今後の課題及び取組の方向性

本研究開発では、目標を上回る要素技術が得られ、今後の社会実装に向けた課題の整理とロードマップに基づく取組が積極的に進められている。個々の要素技術については、今後は受託者において、24GHz 帯送電装置の空冷化を含む低コスト化、効率的な給電プロトコル・制御技術の組込みに向けた標準化、簡易なシミュレーションによる精緻化した評価方法の確立などの社会での活用や実用化に向けた応用研究、国際規格化活動、論文などによる情報発信が行われる予定であり、これらについて追跡調査等でフォローアップしていく。

5 評価に使用した資料等

○デジタル変革時代の電波政策懇談会 報告書（令和3年8月）

https://www.soumu.go.jp/main_content/000766569.pdf

○統合イノベーション戦略 2020（令和2年7月17日）

https://www8.cao.go.jp/cstp/togo2020_honbun.pdf

○電波有効利用成長戦略懇談会 報告書（平成30年8月31日）

https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban09_02000273.html

○本研究開発については、「総務省情報通信研究評価実施指針（第6版）」に基づく評価を行っており、関連資料は、以下の URL に掲載されている。また、本研究開発については、研究開発終了後一定の期間を経過してから、研究開発の直接の成果（アウトプット）から生み出された効果・効用（アウトカム）や波及効果（インパクト）等を確認することは有益であるほか、研究開発施策等の評価の基礎的なデータを取得するため、学会や海外における評価や関連特許、技術移転等の実用化に関する状況を調査し、活用状況等を把握する追跡調査を実施することとしている。

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

令和 8 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環境課

評価年月：令和 8 年 8 月

1 政策（研究開発名称）

（1）研究開発名称

Beyond 5G/6G 等の多様化する新たな無線システムに対応した電波ばく露¹評価技術に関する研究

（2）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」

2 研究開発の概要等

（1）研究開発の概要

・実施期間・総事業費

実施期間：令和 3 年度～令和 7 年度（5 か年）

総事業費：21.4 億円

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

・概 要

電波の人体への安全性に関して、我が国では電波防護指針²を策定し、基本的な考え方や基準値を示すとともに、電波法令に基づく規制を行い、適切な電波利用環境を構築している。電波防護指針に基づく基準値を遵守していくためには、人体への電波ばく露（以下「ばく露」という。）量を評価する技術や電波防護指針との適合性を確認するための技術が必要である。また、これらの技術については、国際的な整合性も確保されていることが重要である。

一方で、今後は、2020 年（令和 2 年）にサービスが開始された 5G や、IoT(Internet of Things)等を始めとして、超高周波帯への拡張や電波利用の多様化が更に進展していくことが想定される。そのため、これらの多様化した波源から発射される電波に対し、国際的な整合性を図りつつ、人体への電波ばく露量を簡便かつ再現性を有する形で評価する技術を開発していくことが必要である。

また、現在開発が進められている Beyond 5G/6G では、300GHz を超えるテラヘルツ帯までの電波が使用されることが想定されているが、300GHz を超える周波数領域においては人体への電波ばく露量を適切に評価する技術がまだ確立されていない。今後も継続して安全・安心な電波利用環境を構築していくためには、テラヘルツ帯までの人体の電波へのばく露特性について研究を進め、データを蓄積していく必要がある。

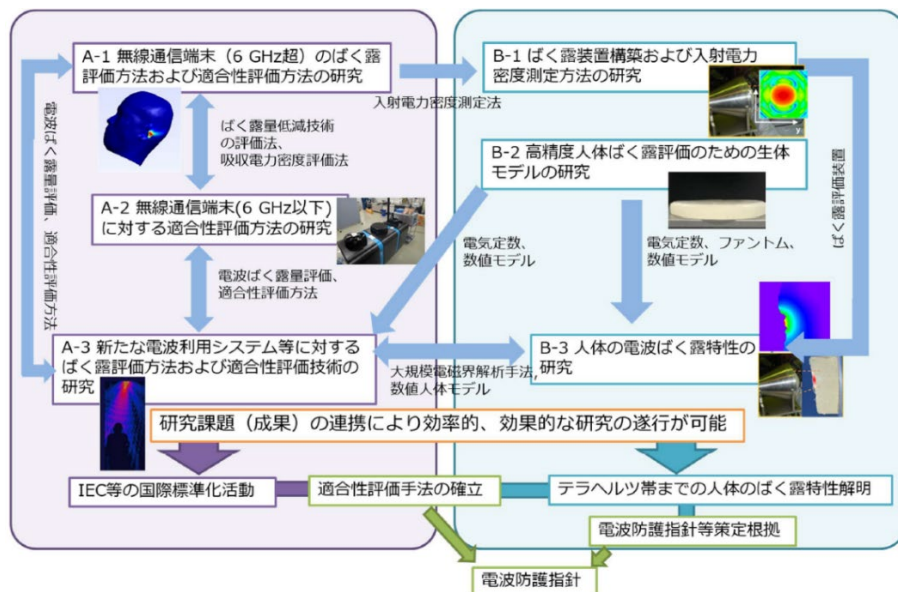
そのため本研究では、多様化する電波利用に対して、様々な利用環境下で、電波防護指針への適合性を簡便かつ再現性を有する形で評価するための手法を開発する。また、テラヘルツ帯までの電波について、人体へのばく露特性を明らかにし、人体への電波ばく露評価技術を開発する。加えて、電波防護に関する国内の技術基準の検討や国際機関におけるガイドライン・国際規格等の策定にも貢献する。

¹ 電波ばく露：人体が電磁界にさらされること

² 電波防護指針：電磁界が人体の健康に好ましくないと考えられる生体作用を及ぼさない安全な状況であるために推奨される指針

技術の種類	技術の概要
ア 電波利用の多様化に対応した電波ばく露量評価技術及び適合性評価技術	5Gを含む電波利用の多様化に対応した電波ばく露量評価技術及び適合性評価技術を開発する。運用が開始された5G無線端末からのばく露評価及び適合性評価法の確認・改良に加え、国際ガイドラインにおいて6GHz以上の指標として新たに定められた局所吸収電力密度（APD）³の評価法について準ミリ波帯・ミリ波帯を中心に開発を行う。また、今後利用が拡大すると考えられるワイヤレス電力伝送（以下「WPT」という。）システムやIoTデバイス等からのばく露量評価も実施する。 ・研究課題 A-1 無線通信端末（6GHz 超）のばく露評価方法及び適合性評価方法の研究 国際ガイドラインで新たに定められた局所吸収電力密度の評価方法を開発するとともに、入射電力密度（IPD）⁴による防護指針への適合性評価方法の妥当性検証及び改良を行う。 ・研究課題 A-2 無線通信端末（6GHz 以下）に対する適合性評価方法の研究 最新の無線通信方式やばく露低減機能搭載端末に対する適合性評価方法の妥当性検証・改良及び適合性評価方法の簡素化・高速化を検討する。 ・研究課題 A-3 新たな電波利用システム等に対するばく露評価方法及び適合性評価方法の研究 IoT デバイス、ビームフォーミング機能を有する WPT や携帯電話基地局に対するばく露量評価技術及び多様化する周波数帯の複合ばく露評価技術を開発する。
イ テラヘルツ帯までの電波に対するばく露評価技術	テラヘルツ帯までの電波に対するばく露評価技術を開発する。国際的にも 275-450GHz が陸上移動用及び固定業務用として新たに分配されたことを踏まえ、概ね 600GHz までの電波に対する入射電力密度の評価技術を開発する。 ・研究課題 B-1 ばく露装置構築及び入射電力密度測定方法の研究 ばく露装置の開発と、100～300GHz の入射電力密度評価方法の妥当性検証、300GHz 以上の評価方法開発、テラヘルツ帯の入射電力密度分布の変動を測定可能なシステムの開発を行う。
ウ 人体への電波ばく露特性の高精度化	Beyond 5G/6G での使用が想定される周波数領域までの人体ばく露特性を高精度に評価する手法を確立するとともに、人体ばく露量特性の詳細な検討を実施し、電波防護指針や国際ガイドライン等の根拠となる人体への電波ばく露特性の高精度化に向けた検討を行う。 ・研究課題 B-2 高精度人体ばく露評価のための生体モデルの研究 100～600GHz にわたる生体組織電気定数・反射特性 DB を拡充し、生体等価ファントム及び数値人体モデルの改良、生体内温度上昇分布の空間分解能が高い計測方法を検討する。 ・研究課題 B-3 人体の電波ばく露特性の研究 超高精細数値人体モデルを用いた超大規模数値シミュレーション及び生体等価ファントム実験により、600GHz までの詳細な人体ばく露特性データを取得する。

研究課題間の連携は以下のとおり。



³ 吸収電力密度（APD）：人体表面に吸収される単位面積当たりの電力

⁴ 入射電力密度（IPD）：人体表面に入射する単位面積当たりの電力

(2) 目標の達成状況

5年間の研究を通じて、Beyond 5G/6G等の多様化する新たな無線システムに対応した電波ばく露評価技術について、5Gを含む電波利用の多様化に対応した電波ばく露量評価技術及び適合性評価技術（吸収電力密度の評価方法を含む。）の開発・改良、テラヘルツ帯までの電波に対するばく露評価技術（入射電力密度の評価方法を含む。）の開発、Beyond 5G/6Gでの使用が想定される周波数領域までの人体ばく露特性を高精度に評価する手法の確立、得られた成果に基づく電波防護に関する国内の技術基準の検討及び国際機関におけるガイドライン・国際規格等の策定・改定等への寄与、といった当初の目標を全て達成することができた（当初の目標より高いレベルで達成することができた。）。具体的な達成状況は下記表のとおり。

なお、本研究は、電波の安全性に関する研究ロードマップ（2018年（平成30年）に「生体電磁環境に関する研究戦略検討会」が取りまとめた「生体電磁環境に関する研究戦略検討会第一次報告書」にて掲載、2025年（令和7年）に「電波有効利用委員会」報告内で見直し、答申）を踏まえて実施したものである。

なお、達成目標等については、基本計画書に記載のとおりである。

https://www.tele.soumu.go.jp/resource/j/ele/body/report/pdf/r3_plan.pdf

技術の種類	目標の達成状況
ア 電波利用の多様化に対応した電波ばく露量評価技術及び適合性評価技術	・研究課題 A-1 無線通信端末（6GHz 超）のばく露評価方法及び適合性評価方法の研究 28GHz 帯において、入射電力密度を導出する手法を開発した。また、同手法の高周波帯への適用性と再現性を検証し、6GHz 超の電波を使用する端末に対する適合性評価の手法として有効であることを明らかにした。 図：ホーンアンテナを照射源とした場合のファントム表面における空間平均 APD 分布（左から順に、離隔距離、5、10、15、20mm としている。実線は測定値、破線は基準値） また、入射電力密度による適合性評価方法の妥当性検証及び改良を行った。具体的には、平面波スペクトル（Plane Wave Spectrum, PWS）法による再構成手法⁵（システム 1）と、擬似ベクトル電界プローブを用いた手法⁶（システム 2）の 2 種類の測定システムを用い、IPD 測定結果の妥当性評価を行った。 図：2 種類の測定システムによるピーク空間平均入射電力密度（psIPD）の比較（左図は 1cm² 及び 4cm² の平均化面積に対して 5 回の繰り返し測定を行った結果、右図は平均値と標準偏差をまとめたもの） 両システムの結果は、規格で定められた測定不確かさ⁷の範囲内に収まっており、FR2（24.25-52.6GHz）における IPD 評価方法として妥当であることを示している。

⁵ PWS 法：評価面から離れた場所で測定した電界を基に、評価面上の電力密度を計算で求める手法

⁶ 擬似電界ベクトルプローブを用いた手法：単一プローブによる 2 平面の電界強度測定から、位相を推定して電力密度を求める手法

⁷ 測定不確かさ：測定結果の信頼性（どれくらいの幅で真の値を含んでいそうか）を定量的に表したもの

なお、開発した吸収電力密度の評価方法については、IEC 技術報告書（2026 年 3 月）に反映され、現在策定中の国際規格へも反映見込みである。

・研究課題 A-2 無線通信端末（6GHz 以下）に対する適合性評価方法の研究

導入が進められているばく露の低減機能（近接センサや時間平均機能）を有する無線通信端末に対する国際標準規格で提案されている評価方法について、市販スマートフォンの測定により妥当性を検証、確認した。

加えて、近年、適合性評価において測定条件数の増加が課題となっていることから、適合性評価方法の簡素化・高速化等の検討を実施した。国際標準規格に記載のある測定条件数削減手法について評価を実施し、網羅的な測定での測定率を 100%としたものに対して、削減手法を適用することで測定率を 65%程度まで削減できることを明らかにした。

さらに、6GHz～10GHz において、比吸収率（SAR）⁸の測定結果から吸収電力密度（APD）を算出する方法が国際規格（IEC PAS 63446）にて提案されていることから、測定した SAR から算出した APD を数値シミュレーションによる APD と比較し、本算出方法の妥当性を確認した。

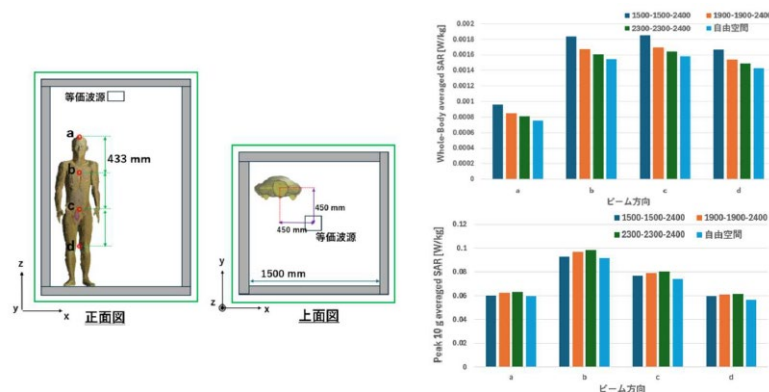
また、SAR から APD を算出する手法については、標準波源を用いた妥当性評価と不確かさ評価を実施し、その結果は総務省 電波利用環境委員会 電力密度評価法作業班において参照され、国内法令の改正に大きく貢献した。

・研究課題 A-3 新たな電波利用システム等に対するばく露評価方法及び適合性評価方法の研究

今後利用拡大が想定される IoT デバイス、ビームフォーミング機能を有する WPT や、携帯電話基地局に対する人体の電波へのばく露量の評価技術、これまで以上に多様化した様々な周波数帯の電波に対する複合ばく露の評価技術等の検討を行った。

ビームフォーミング機能を有する携帯電話基地局に対する人体の電波へのばく露評価として、ミリ波帯の通信に用いられるスモールセルを想定したばく露評価を行った。ビーム方向を変化させた場合の全身平均 SAR を、参考レベルである入射電力密度の全身平均と比較したところ、両者に相関が見られたことから、ビームばく露についても参考レベル（入射電力密度）に基づく制限値の設定の妥当性が確認できた。

また、WPT における評価として、ビームフォーミング機能を有するマイクロ波 WPT システムの屋内利用における電波ばく露特性について評価を実施した。その結果、全身平均 SAR についてはビーム方向に対するばく露量変化が小さかったが、平均局所 SAR についてはビーム方向に対する変化が大きいことを確認した。また、屋内空間サイズを変化させた際のばく露量は、全身平均 SAR については空間サイズが小さくなることで値が単調増加する傾向であったが、平均局所 SAR については空間サイズに依存した傾向がみられなかった。これは、壁面等からの反射波により複雑な電界分布となっているためと考えられる。

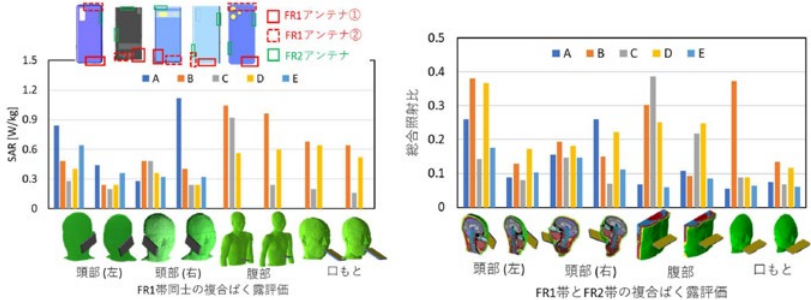
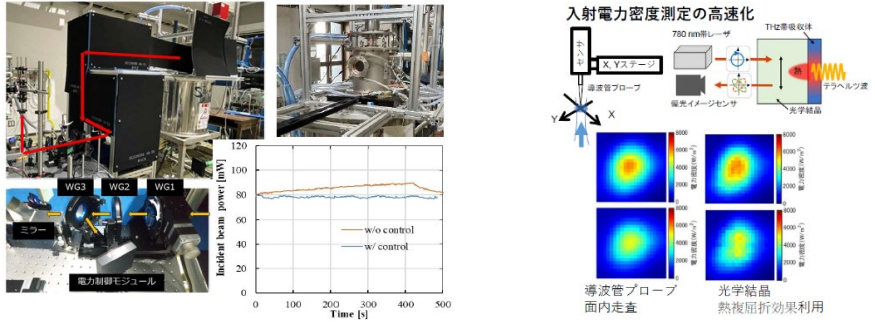
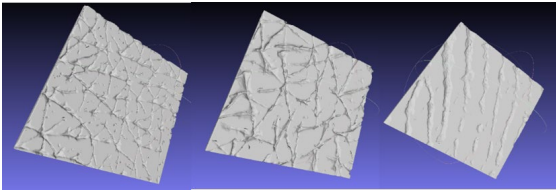


図：マイクロ波 WPT システムに対するばく露量の評価
（左図はばく露評価モデル、右上図は空間サイズ・ビーム方向を変化させた場合の全身平均 SAR、右下図は平均局所 SAR）

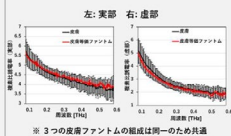
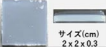
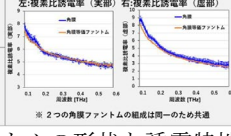
IoT デバイスからのばく露評価について、その使用状況から人体周辺に多数の機器が存在する状況を想定し、ばく露特性について評価を実施した。その結果、平均局所 SAR については、アンテナ本数の増加ではなく、人体とアンテナ間距離によるばく露量の変動が大きいことが確認できた。

多様化した様々な周波数帯の電波に対する複合ばく露の評価においては、4G、5G において用いられる複数の周波数帯の電波を同時に発射する技術（キャリアアグリゲーション、デュアルコネクティビティ）を対象に、複数周波数帯による複合ばく露を評価可能な端末モデルを開発

⁸ 比吸収率（SAR）：人体に吸収される単位質量当たりの電力

	し、複合ばく露データを取得した。6GHz 以下（5G NR FR1）の周波数帯（1.95GHz、3.75GHz）において比吸収率(SAR)を評価した結果、複合ばく露時において国際規格の制限値である 2W/kg を下回ることを確認した。また、FR1 帯同士の複合ばく露及び FR2 帯も含む複合ばく露評価を実施し、全ての条件において、制限値の 2.0W/kg 以下であることを確認した。  図：複合ばく露評価の結果 （左図は 1.95GHz、3GHz 超の複合ばく露による SAR の値、 右図は 1.95GHz、28GHz の複合ばく露における総合照射比⁹⁾）
イ テラヘルツ帯までの電波に対するばく露評価技術	・研究課題 B-1 ばく露装置構築及び入射電力密度測定方法の研究 テラヘルツ帯の入射電力密度評価方法の妥当性検証を行うべく、265GHz 及び 600GHz の高強度ばく露装置を開発し、独自の電力制御方法により照射電力の安定性を確保した。また、走査型及び従来の 1/20 以下の時間で測定可能な手法を開発した。  図：高強度ばく露装置 図：入射電力密度測定の高速化
ウ 人体への電波ばく露特性の高精度化	・研究課題 B-2 高精度人体ばく露評価のための生体モデルの研究 皮膚表面の構造（皮溝・皮丘）や表皮・真皮の厚さは、部位によって大きく異なることから、テラヘルツ帯での電波ばく露量の皮膚表面構造依存性を数値シミュレーションにより明らかにすることを目的として、5 種類の精密な皮膚構造モデルを構築した。  図：開発した皮膚モデル例（表皮＋真皮） これを踏まえ、研究課題 B-3「人体の電波ばく露特性の研究」で必要不可欠な皮膚及び眼部組織を対象とした生体等価ファントムを開発し、また、それらのファントム内部の温度上昇分布を測定するための手法を開発した。

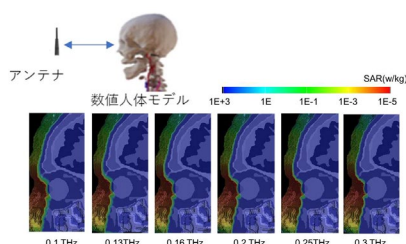
⁹⁾ 総合照射比：SAR と電力密度をそれぞれの安全基準値で正規化し、その比を合算することで、複数の周波数帯における電波ばく露を総合的に評価する指標

	外観（上面・側面） ／サイズ	材料	RMS 表面粗さ	曲率半径	生体組織とファントムの 複素比誘電率
皮膚（フラット）	 サイズ(cm) 2×2×0.3	・生理食塩水 (68 wt%)	0.005 mm	—	 左：実部 右：虚部 ※ 3つの皮膚ファントムの組成は同一のため共通
皮膚（形状模擬） ①	 サイズ(cm) 2×2×0.3	・寒天 (2 wt%)	0.01 mm	—	
皮膚（形状模擬） ②	 サイズ(cm) 2×2×0.3	・エタノール (30 wt%)	0.03 mm	—	
角膜（フラット）	 サイズ(cm) 2×2×0.3	・生理食塩水 (78 wt%)	0.005 mm	—	 左：複素比誘電率（実部） 右：複素比誘電率（虚部） ※ 2つの角膜ファントムの組成は同一のため共通
角膜（形状模擬）	 サイズ(cm) φ 1.4×厚さ0.4	・寒天 (2 wt%) ・グリセリン (20 wt%)	—	8.8 mm	

図：作製した皮膚及び角膜等価ファントムの形状と誘電特性

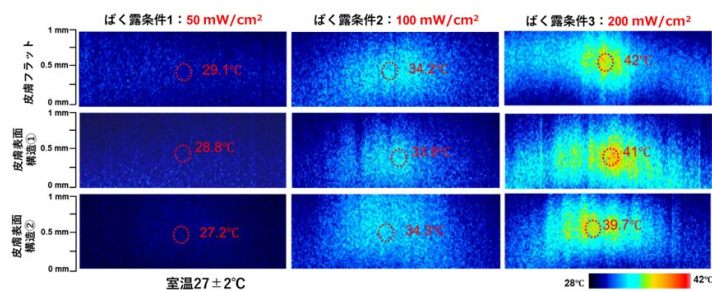
・研究課題 B-3 人体の電波ばく露特性の研究

テラヘルツ帯における信頼性の高い人体ばく露評価を実現するため、超高精細数値人体モデルを用いた大規模電磁界解析環境を段階的に整備した。



図：人体眼球近傍にアンテナを配置した際の電波吸収特性の一例

基本的なばく露特性を明らかにするために、研究課題 B-1 で構築した高強度ばく露装置や研究課題 B-2 で作製した生体等価ファントム等を用いて、265GHz 及び 600GHz 帯において電波ばく露実験を行った。600GHz 帯については、50mW/cm²では温度上昇は観測されず、100、200mW/cm²において電波吸収に起因する温度上昇が、表皮厚（0.1mm 程度）以上の深部において生じることを明らかにした。265GHz についても同様に、深部において温度上昇が確認された。600GHz では、皮膚表面での電波の散乱に伴う温度分布の広がり等が観測できており、実験的に詳細なばく露特性データの取得を可能とするという目標を達成した。



図：600GHz 帯電波の吸収に起因する皮膚等価ファントム内部の温度上昇例

3 政策効果の把握及び有識者の知見の活用

研究開発の評価については、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、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。

本政策においても、「生体電磁環境研究及び電波の安全性に関する評価技術研究に係る評価に関する会合」（令和 8 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、研究の目的・政策的位置付け及び目標、研究の実施体制の妥当性及び経済的効率性、研究成果の有効性などの観点から外部評価を実

施した。ここで、外部有識者から「基本計画書等に示した全ての目標を達成する成果が得られ、かつ目標を上回る成果が認められる」、「有効かつ効率的な研究が行われ、優れた体制のマネジメントが認められる」、「研究成果は電波の健康リスクを評価する上で有効と認められ、かつ、一部にさらに優れた成果等が認められる」等の御意見等を頂き、総論として「基本計画書における目標を上回る、非常に有効かつ効率的な研究であった」との評価を得ており、本研究開発の評価に活用した。

また、外部発表や特許出願件数、国際標準提案件数等は下表のとおりである。

主な指標	令和3年度	令和4年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度	実施期間 終了後	合計
査読付き誌上 発表論文数	2件 (2件)	2件 (1件)	7件 (5件)	3件 (3件)	7件 (6件)	18件 (16件)	39件 (33件)
査読付き口頭 発表論文数 (印刷物を含む)	3件 (3件)	19件 (19件)	26件 (26件)	22件 (22件)	18件 (18件)	9件 (9件)	97件 (97件)
その他の誌上 発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	5件 (0件)	0件 (0件)	5件 (0件)	0件 (0件)	10件 (0件)
口頭発表数	17件 (2件)	22件 (0件)	24件 (3件)	36件 (0件)	19件 (0件)	12件 (0件)	130件 (5件)
特許出願数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
国際標準提案 数	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (1件)	3件 (3件)	1件 (1件)	3件 (3件)	9件 (8件)
国際標準獲得 数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	3件 (3件)	3件 (3件)	6件 (6件)
受賞数	2件 (2件)	1件 (0件)	3件 (2件)	5件 (3件)	4件 (0件)	0件 (0件)	15件 (7件)
報道発表数	0件 (0件)	2件 (0件)	2件 (2件)	1件 (0件)	0件 (0件)	2件 (1件)	7件 (3件)
報道掲載数	3件 (0件)	7件 (0件)	8件 (0件)	1件 (0件)	1件 (0件)	0件 (0件)	20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。

4 政策評価の結果（総合評価）、今後の課題及び取組の方向性

（１）政策評価の結果

2020 年（令和 2 年）3 月に商用サービスが開始された 5G をはじめ、IoT 等の普及により超高周波帯を含む電波利用の多様化・拡大が急速に進んでいる。国民の日常生活における電波ばく露の機会の増大に伴い、電波の人体への安全性に対する社会的関心は高まっており、様々な利用環境下でのばく露量を簡便かつ再現性がある形で評価できる手法の確立が強く求められている。しかしながら、現行の適合性評価方法は、多様化した波源や利用環境への対応という観点から課題が残っており、国際的整合性を確保しつつ評価方法を高度化することが急務となっている。

さらに、総務省「Beyond 5G 推進戦略－6G へのロードマップ－」（2020 年 6 月）に掲げられているとおり、2030 年代の社会基盤として中核的役割を担う Beyond 5G/6G の早期かつ円滑な導入が政策上の重要課題となっている。Beyond 5G/6G では 300GHz を超えるテラヘルツ帯の利用が想定されているが、当該周波数領域における人体ばく露特性に関するデータの蓄積は世界的にも不十分であり、ばく露評価技術はいまだ確立されていない。今後も継続して安全・安心な電波利用環境を維持・発展させるためには、テラヘルツ帯を含む広帯域にわたる人体ばく露特性の解明とデータ蓄積が不可欠である。

そのような中、特に、本研究開発において、300GHz 超のテラヘルツ帯について、ばく露特性を解明し、データを蓄積したことは、将来的な超高周波を利用する新たな無線システムの普及・促進につながるものと考えられることから、将来的な Beyond 5G/6G の利用促進に向けて本研究開発は必要性があると認められる。

また、Beyond 5G/6G での利用が想定される周波数帯について、効率的で再現性のある適合性評価方法を確立し、その妥当性を検証したことは、今後の当該システムのより円滑な導入に資するものであり、有効性があると認められる。

さらに、本研究開発の成果は、国際標準化に貢献するとともに国内制度の整備にも活用されており、当初設定した目標を全て達成し、電波利用の多様化・拡大が急速に進む中において、継続して安全・安心な電波利用環境の構築に寄与するものであることから、本研究開発には有効性があったと認められる。

（２）今後の課題及び取組の方向性

本研究では、適合性評価方法の開発や妥当性検証等について、FR2（24.25～52.6GHz）を主な対象としたが、今後の Beyond 5G/6G での利用が見込まれる FR3（7.125GHz～24.25GHz）及び 70GHz 超については未着手であることから、当該周波数帯を対象として研究を実施する必要がある。また、電波利用の高度化・多様化に伴い、適合性評価のプロセスが複雑化し、膨大な測定条件での測定を必要とすることから、評価に長い期間を要しているが、AI 等の先進的手法を従来の適合性評価プロセスに適用し、評価方法の簡素化・効率化を図り、大規模・多条件下での適合性評価に対応し得る新たなアプローチの枠組みを作り出す必要がある。さらに、テラヘルツ帯におけるばく露評価について、多様なばく露条件下で得られるデータを体系的に蓄積し、人体への電波ばく露量における個体差や利用形態に起因する不確かさの定量化を通じ、電波防護指針の信頼性向上を図ることが有益である。

これらの取組を通じて得られる成果について、国際的なガイドラインには科学的根拠として、国際規格には評価方法として反映させていく必要がある。これにより、将来利用が想定される電波利用システムから発射される電波が人体の健康に影響を及ぼすことのないよう、適切な指針値及び評価方法の確立に貢献し、国民が安全・安心に利用できる電波利用環境を先んじて構築していく必要がある。

5 評価に使用した資料等

- 電波の安全性に関する研究ロードマップ（2018 年（平成 30 年）に「生体電磁環境に関する研究戦略検討会」が取りまとめた「生体電磁環境に関する研究戦略検討会第一次報告書」にて掲載、2025 年（令和 7 年）に「電波有効利用委員会」報告内で見直し、同年 9 月に答申）

https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/policyreports/joho_tsusin/denpa_yukoriyo/02ki_ban09_04000666.html

- 本研究開発については、「総務省情報通信研究評価実施指針（第 6 版）」に基づく評価を行っており、関連資料は、以下の URL に掲載されている。また、本研究開発については、研究開発終了後一定の期間を経過してから、研究開発の直接の成果（アウトプット）から生み出された効果・効用（アウトカム）や

波及効果（インパクト）等を確認することは有益であるほか、研究開発施策等の評価の基礎的なデータを取得するため、学会や海外における評価等に関する状況を調査し、状況等を把握する追跡調査を実施することとしている。

<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/ele/seitai/protect/index.htm>