

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。

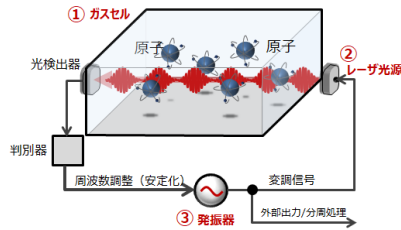
課題 1 小型で安価な高精度周波数基準実現のための研究開発

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度での高温帯の発振動作確認）

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

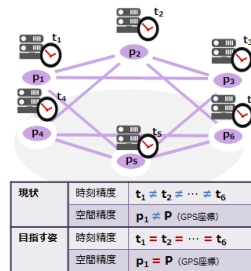
課題 2 高精度な時刻同期プロトコル実現のための研究開発

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。

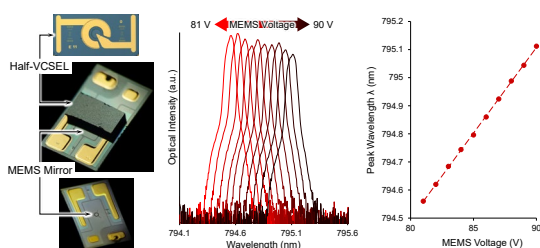
なお、達成目標等については、基本計画書に記載のとおりである。

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）



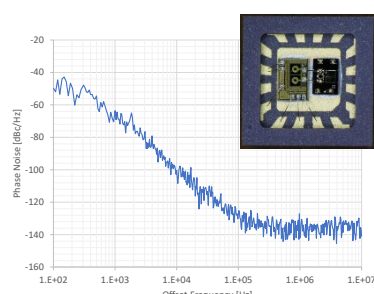


図 2. 波長可変レーザー素子の開発

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				CLIFS1		CLIFS2	
		MAC	ULPAC	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				
	VCSEL Driver	3	3				
Physics	Heater	7	9.1	7	7	3	
	Coil	1	1	1			
	VCO	32					
Microwave/ RF	PLL	20	2	9.1	12.4	9.1	
	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	6.608
MEMS(L)			
MEMS(S)	0.5 cc		
Planar type(Discrete)		Stack type(SIP)	
>6.9 cc		>0.508 cc	



Milestone2025<10ccMilestone2030<1cc



Milestone2025<10ccMilestone2030<1cc

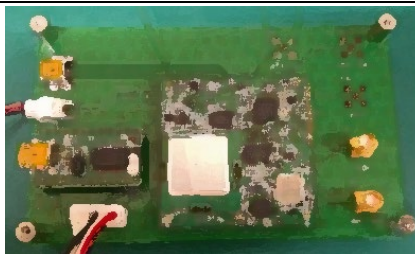
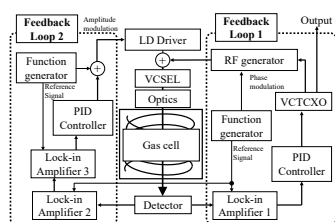


図 4. 原子時計試作例

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)。

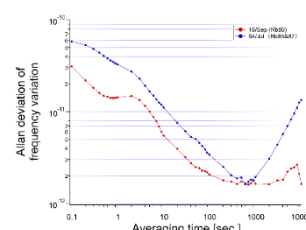
原子時計評価システム技術 (課題イ)



(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)

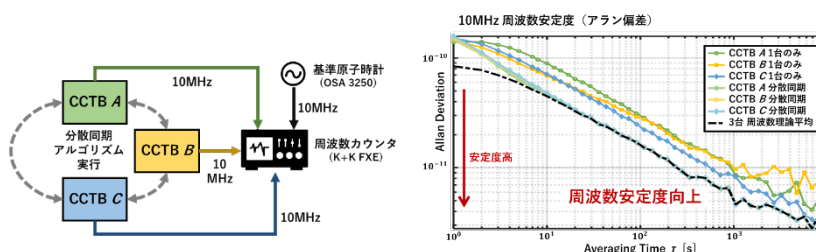
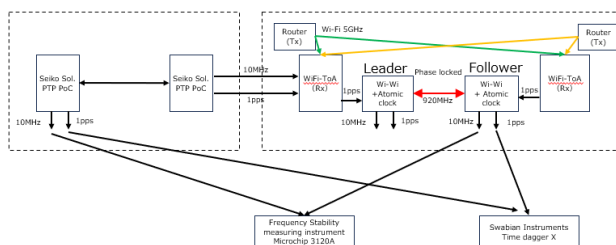
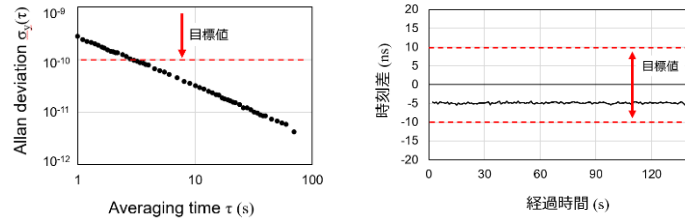


図 6. 分散アルゴリズムの実証例



(a) 有無線ネットワークの検証システム図

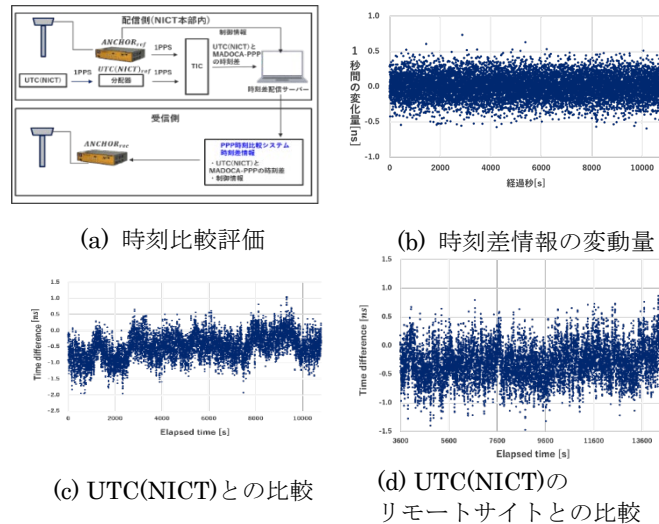


(b) 有無線ネットワーク
の周波数安定度

(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

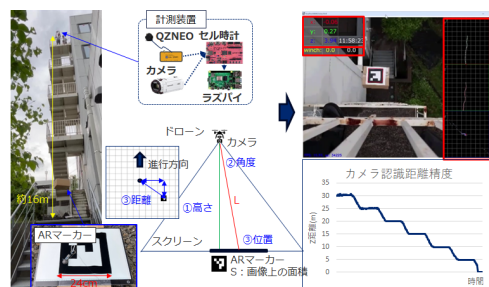
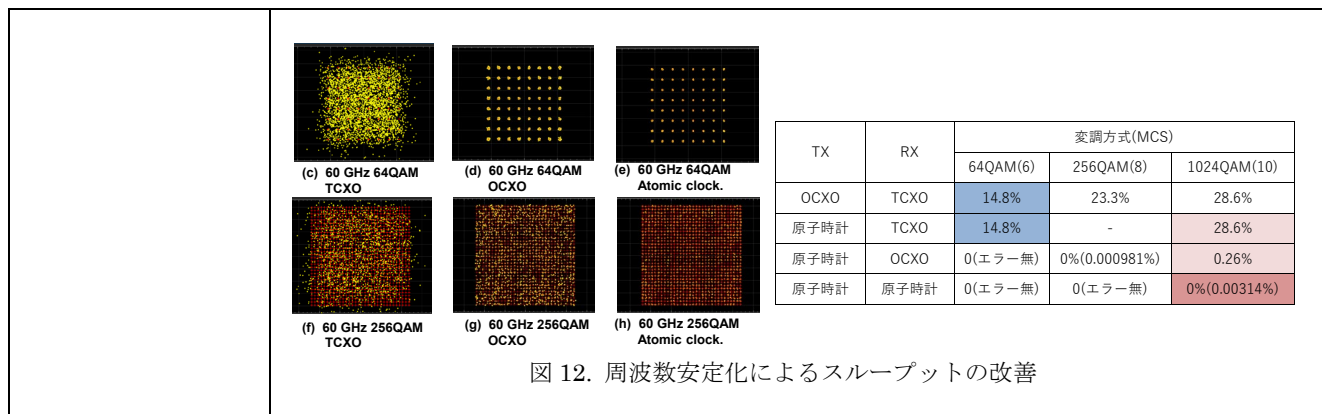


図 10. 多点測位システムのドローンシステムへの展開



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/>