

平成 31 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：令和元年 8 月

1 政策（研究開発名称）

テラヘルツ波デバイス基盤技術の研究開発

2 研究開発の概要等

(1) 研究開発の概要

・実施期間

平成 26 年度～平成 30 年度（5 か年）

・実施主体

民間企業等

・総事業費

1, 726 百万円

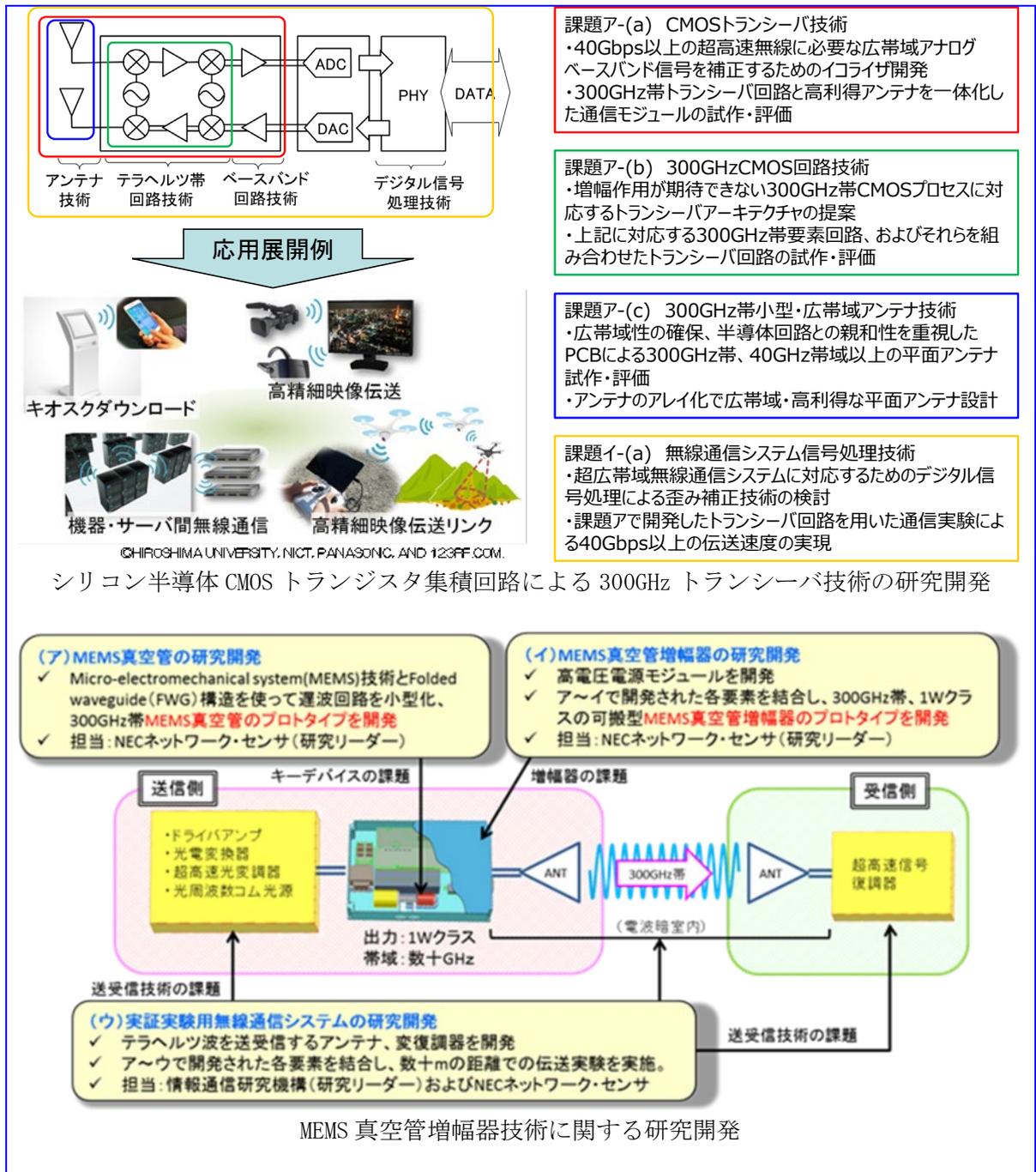
平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度	総 額
280 百万円	370 百万円	393 百万円	413 百万円	270 百万円	1,726 百万円

・概 要

本研究開発では、300GHz 帯のテラヘルツ波帯に関して体系的なデバイス基盤技術を確立するため、化合物半導体による 300GHz デバイス技術及びテラヘルツ波多重技術、シリコン半導体 CMOS（相補型金属・酸化物・半導体構造：Complementally Metal-Oxide-Semiconductor）トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術、MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発を行い、300GHz 帯の周波数帯域において、データ伝送速度 40～100Gbps 級の超近距離通信（機器内～1m）及び近距離通信（機器間～数 10m）を実現する要素技術を開発する。

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発では、CMOS デジタル回路とトランシーバの一体集積化や、小型で低コストのデバイス技術を確立するため、300GHz 帯無線通信用のシリコン半導体 CMOS トランシーバ技術、小型・広帯域なアンテナ技術、超高速無線通信に対応するための信号処理技術に関する研究開発を行ない、見通し距離 1m 程度において、40～100Gbps 級のデータ伝送速度の高品質無線通信を実現するための要素技術を開発する。

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発では、MEMS（マイクロマシンまたは微小電気機械システム：Micro Electro Mechanical System）技術により進行波管（TWT：Traveling Wave Tube）を高周波化した真空管（以下、MEMS 真空管）を新規に開発し、さらに MEMS 真空管を内蔵した 300 GHz 帯（0.3 THz 帯）真空管増幅器（以下、MEMS 真空管増幅器）の開発を行う。MEMS 真空管と新規開発の高電圧電源モジュールより構成される可搬型（A4 サイズ）MEMS 真空管増幅器のプロトタイプを開発する。MEMS 真空管増幅器を組み込んだ実証実験用試験システムを構築し、屋外ビル間にも適用可能な超高速無線通信（数十 Gbps 級）の原理実証を行う。



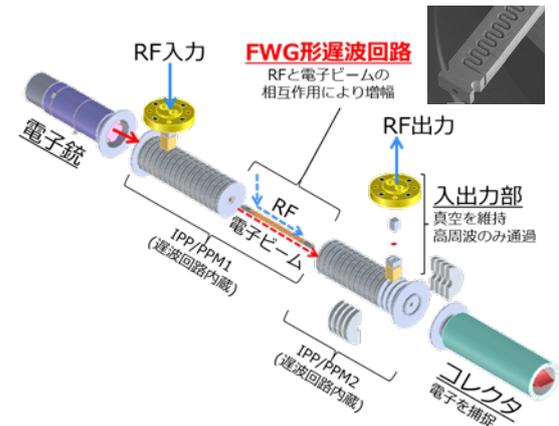
シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発

技術の種類	技術の概要
課題ア 近距離無線通信用300GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバ技術	○アナログベースバンド補正技術 300GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバの小型低消費電力化のために、アナログベースバンド補正技術の検討を行う。周波数特性の補正によって、広帯域アナログデジタル変換回路およびデジタルベースバンド処理の負担を軽減する広帯域アナログイコライザを設計する。ベースバンド帯域幅6.25GHz以上において10dB以上の補正量をもつアナログイコライザを、可変性が高くCMOSプロセスでの実装にも適した回路アーキテクチャで実現する。
(a) CMOSトランシーバ技術	○300GHz帯モジュール技術 300GHz帯シリコン半導体CMOSトランシーバを実現するための基盤技術として、実装信頼性と低損失を両立する実装技術の検討を行う。ファンアウト型ウェハレベルパッケージ(FOWLP: Fan-Out Wafer Level Package)構造において、300GHz帯での基板設計に必要な技術蓄積を行う。また、無線通信の長距離化を目標とし、パッケージ上のアンテナ素子を用いてCMOSトランシーバに適した高利得アンテナの実現性検討を行う。

課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術 (b) 300GHz CMOS 回路技術	300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバのフロントエンド部を実現するため、CMOS トランシーバのフロントエンド部を構成するアナログ要素回路の設計および評価を行う。開発する 300GHz 帯 CMOS 要素回路は、動作周波数の上限付近で使用するようになるため、トランジスタ性能を極限まで引き出す必要がある。また高次変調による高速化を可能とするために位相変調に対応した回路特性を持つことが必要となる。ここでは増幅器、局部発振源、周波数変換素子などの能動素子について、トランジスタの最高動作周波数付近で使用する回路技術を開発する。特に、位相雑音特性に優れた局部発振源、高い位相精度を持つ周波数変換回路の実現に取り組む。また、これら回路間のインピーダンス整合や信号分配、合成に用いる高い位相精度の受動素子を設計し、評価する。以上の要素回路を組み合わせることにより、シリコン半導体 CMOS トランシーバのフロントエンド部として送信部と受信部を集積化した CMOS トランシーバチップを実現する。
課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術 (c) 300GHz 帯小型・広帯域アンテナ技術	300GHz 帯に適した小型・広帯域アンテナの研究開発を行う。小型化を念頭に置きながら、30GHz 以上の帯域幅（反射損失が 10dB 以下の帯域として定義）を持つアンテナを実現する。300GHz の小型アンテナを評価するための評価系の構築と評価技術の確立を行う。
課題イ 300GHz 帯の周波数の電波を使用する近距離無線通信システムの開発及び通信実験による機能実証 (a) 無線通信システム信号処理技術	○高速デジタル信号処理技術 300GHz 帯の周波数を利用した 100Gbps 級の高速無線伝送を実現するために、デジタル信号処理による歪補正技術の検討を行う。データセンタのサーバ筐体内配線の無線化を想定し、サーバ筐体内のマルチパスフェージングへの対策として低密度パリティ検査符号 (LDPC) 符号化周波数領域ソフトキャンセル (SC) /最小平均二乗誤差 (MMSE) ターボ等化器を開発する。特に、100Gbps 級の高速伝送システムに実装可能な反復回数でターボ等化器を実現するための構成を検討する。また、数 G~数十 G サンプル/秒の高速アナログ/デジタル変換器 (ADC) では高分解能化が困難であるため、ADC の分解能削減検討を行う。 ○通信実験による機能検証 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバの実用性の実証のために、開発した CMOS トランシーバを用いたリアルタイム映像伝送の実験を行う。実用性を高めるために、少数の電源をつなぐだけで動作する小型な無線通信機構成の検討を行い、さらにアンテナ性能の向上による通信距離の長距離化を検討する。製作した無線通信機を用いて、送受信機間の距離が 10m において安定した通信を行い、リアルタイム映像伝送を実現する。

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発

技術の種類	技術の概要
MEMS 真空管技術	折返し導波管 (Folded Waveguide) 構造を使用した遅波回路を高周波化・広帯域化する設計技術を確立し、MEMS 技術を応用した微細加工技術により 300 GHz 帯で動作できるテラヘルツ遅波回路を開発する。高アスペクト比・深堀対応が可能な製造技術を確立し、Folded Waveguide 構造の微細化を実現する。高周波入出力部分および遅波回路を含む高周波回路全体の整合特性を改善し、MEMS 真空管の電力損失を低減する。遅波回路を含む高周波回路を精密組み立てする技術を開発し、数十 μm 径の極細電子ビームの攪乱を抑制、効率を向上するための高精度組立技術を開発する。周期磁界装置部 (PPM: Periodic Permanent Magnets) の採用により小型化を実現する。開発された MEMS 真空管を使用して、周波数帯域幅が数十 GHz 以上、利得が 20 dB 以上、出力 1 W クラスの増幅器を実現可能であることを実証する。

	 <p style="text-align: center;">MEMS 真空管構造図</p>
MEMS 真空管増幅器技術	<p>MEMS 真空管を内蔵し、300 GHz 帯で数十 GHz の周波数帯域幅、20 dB 以上の利得、出力 1W クラスの性能を有する MEMS 真空管増幅器を開発する。キロボルトから十数キロボルトの高電圧を供給できかつ低背化された高電圧トランスを開発し、さらに制御回路を部分的にワンチップ化することにより MEMS 真空管を動作させるための高電圧電源モジュールを小型化する技術を確認する。放熱の効率化および電磁ノイズに関するシステム内障害を低減し、高電圧電源モジュールと MEMS 真空管を A4 サイズの筐体内に高密度に実装する技術を確認する。実証実験用通信システムへの組み込みを考慮し、電氣的・機械的な仕様を最適化する。</p>  <p style="text-align: center;">MEMS 真空管増幅器外観</p>
実証実験用無線通信システム技術	<p>300 GHz 帯テラヘルツ無線信号を、光技術を利用して高精度に発生させる技術の開発を行い、300 GHz 無線信号として伝送速度 50 Gbps 以上を実現するシステムを開発する。安定的に 300 GHz 帯テラヘルツ信号を発生させることが可能な光・テラヘルツ信号発生技術を、最先端光ファイバ通信技術を適用・展開して開発することで実現する。テラヘルツ信号発生技術を基盤とした伝送システムに、MEMS 真空管増幅器を適用し、伝送距離 10 m 以上を実現するテラヘルツ無線伝送の実証実験を実施する。</p>

・スケジュール

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発

技術の種類	平成 26 年度	平 27 年度	平 28 年度	平成 29 年度	平成 30 年度
課題アー(a) CMOS トランシーバ技術					→
課題アー(b) 300GHz CMOS 回路技術					→
課題アー(c) 300GHz 帯小型・広帯域アンテナ技術					→
課題イー(a) 無線通信システム					→

△信号処理技術					
---------	--	--	--	--	--

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発

技術の種類	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
MEMS 真空管技術	→			→
MEMS 真空管増幅器技術	→			→
実証実験用無線通信システム技術	→			→

(2) 達成目標

本研究開発では、これまで実用化されておらず、かつ周波数が分配されていない 300 GHz 帯の周波数帯域のテラヘルツ波帯に関して、その高出力発生と高感度検出・信号処理を可能とする半導体集積回路等のデバイス基盤技術を確立し、テラヘルツ波帯で動作する増幅器と集積回路デバイス等を開発する。

具体的には、半導体技術によってテラヘルツ波帯の周波数を扱うためのデバイス技術を確立するとともに、真空管技術によって 300GHz 帯の増幅器技術を確立することにより、300GHz 帯の周波数帯域において、データ伝送速度 40～100Gbps 級の通信を実現するための要素技術の開発を行う。

(シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発)

本研究開発では、300GHz 帯の周波数の電波を使用する、無線通信用のシリコン半導体 CMOS トランシーバ技術を確立し、見通し距離 1 m 程度において、40～100Gbps 級のデータ伝送速度の高品質無線通信を実証する。

(MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発)

本研究開発では、300GHz 帯の周波数の電波を使用するデータ伝送速度数十 (20～40) Gbps 級の無線通信において、20dB 以上の利得、1 W 以上の出力を実現する大出力増幅器技術を確立する。本技術を用いてビル間通信を実現することを想定し、少なくとも数 10m 以上の無線通信を実証する。加えて、無線通信装置の設置面積の縮小のために、A4 サイズの増幅器を実現する小型化技術を確立する。

○政府の基本方針 (閣議決定等)、上位計画・全体計画等

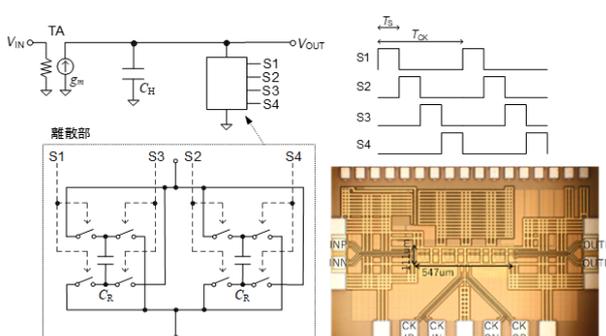
名称 (年月日)	記載内容 (抜粋)
電波有効利用の促進に関する検討会一報告書—(平成 24 年 12 月 25 日)	同報告書において、「電波の有効利用を一層推進する観点から、今後は、センサーネットワーク、M2M、テラヘルツ帯デバイス、無人無線航行関連技術など、新たなニーズに対応した無線技術をタイムリーに実現するとともに、電波利用環境を保護するための技術について開発をより一層推進するため、国際標準化、国際展開も含め、成果の実用化に向けた各段階の取組の充実・強化を図ることが必要である。」とされている。
情報通信審議会 中間答申「イノベーション創出実現に向けた情報通信技術政策の在	同中間答申中、「5 今後取り組むべき技術分野 5.3 基盤技術 ④通信技術・ネットワーク技術」の項目において、「テラヘルツなど、現在未利用の高い周波数の開拓をはじめとする、無線通信技術の高速化、安定化技術」が掲げられている。

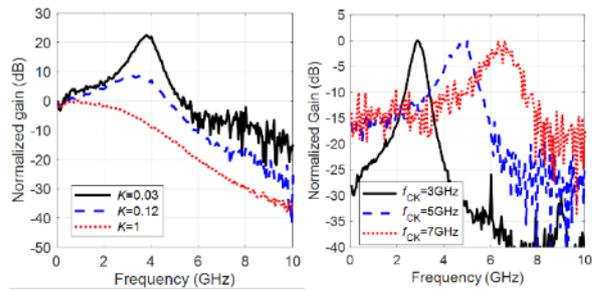
り方」(平成 25 年 1 月 18 日付け諮問第 19 号)	
科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～(平成 25 年 6 月 7 日 閣議決定)・平成 26 年度科学技術重要施策アクションプラン(平成 25 年 7 月 31 日総合科学技術会議決定)	本研究開発は、「テラヘルツ波の利用による超高速・低消費電力無線技術および高効率高周波デバイス技術の研究開発」として平成 26 年度科学技術重要施策アクションプランに特定された。

(3) 目標の達成状況

(シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発)

5 年間の研究開発を通じて、世界的に周波数分配が行われていない 275 - 370GHz のテラヘルツ帯を用いて毎秒数十ギガビット級の超高速伝送を可能とする無線通信基盤技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標を達成することができた。具体的には、300GHz 帯に対応可能なトランシーバアーキテクチャを提案すると共に、CMOS 回路技術を用いて実現した 300GHz 帯トランシーバ回路を CMOS トランシーバ技術としてモジュール化することで、当初目標としていた 40Gbps の 2 倍に当たる 80Gbps の伝送速度を達成した。また、300GHz 帯における高利得アンテナの開発に成功することで、基本計画書に記載された通信距離の目標 1m も達成した。

技術の種類	目標の達成状況
課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術 (a) CMOS トランシーバ技術	<p>○アナログベースバンド補正技術</p> <p>300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバの小型低消費電力化のために、広帯域アナログイコライザの検討を行った。連続時間系 (CT) の回路では、回路の可変性がなく、CMOS プロセスにおける特性のバラツキの影響も大きくなり量産に適さない。一方、離散時間系 (DT) の回路は特性のバラツキが小さく CMOS 実装に適し、回路の可変性も高いが広帯域動作が難しい。そこで、連続-離散時間ハイブリッド型のアーキテクチャを提案し、広帯域かつ可変性の高いアナログイコライザを実現した。容量比 K とクロック周波数 f_{CK} によって周波数特性を制御でき、ベースバンド帯域幅 7GHz において 10dB 以上のピーキングによる周波数特性の補正を実現した。</p>  <p>図：提案したイコライザの回路図とチップ写真</p>



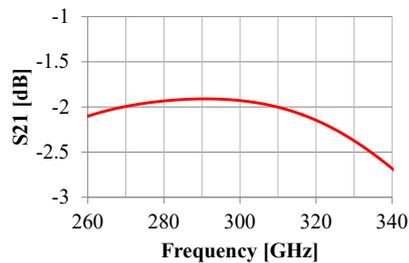
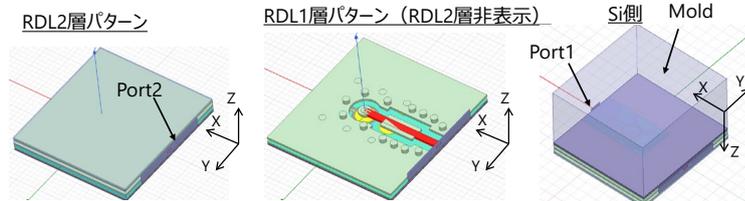
(a)容量比による制御 (b)クロック周波数による制御

図：CT/DT ハイブリッド型イコライザの測定結果

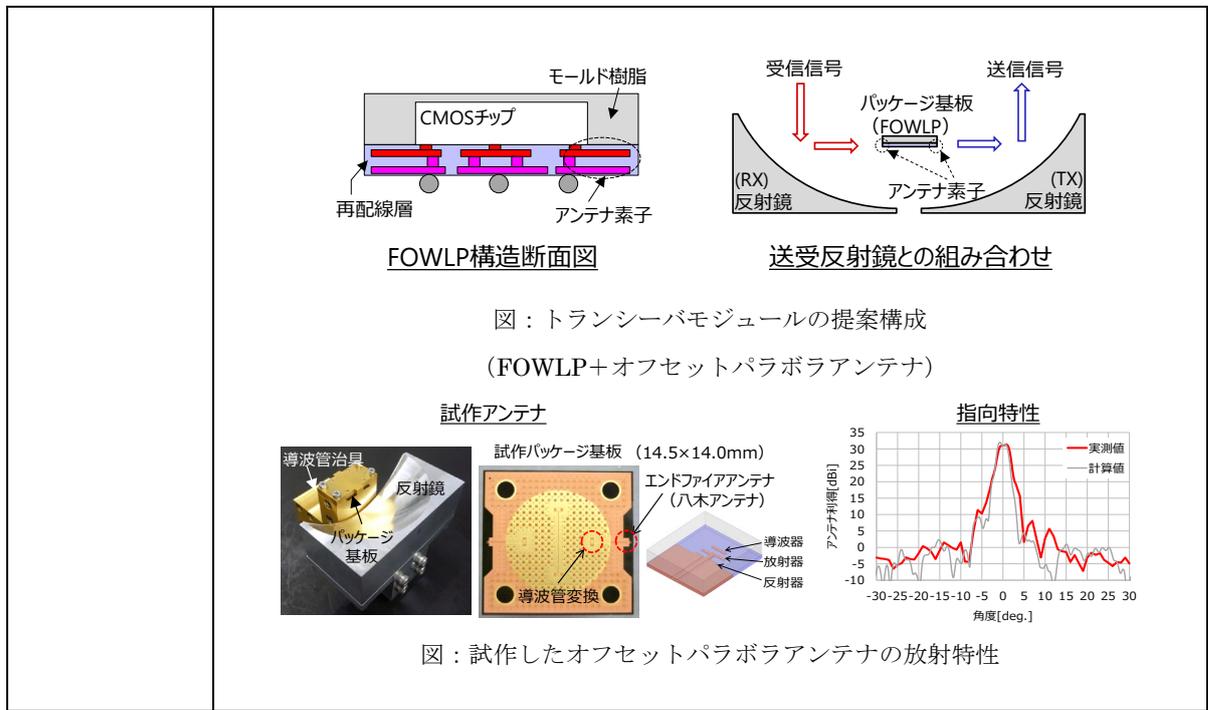
○300GHz 帯モジュール技術

300GHz 帯での実装技術検討として、FOWLP 構造によるパッケージ基板を試作し、300GHz 帯での技術蓄積を行った。これまで、再配線層材料の 300GHz 帯での電気定数（比誘電率、誘電正接）は未抽出であったが、伝送線路、共振パターンなどを再配線層上に設計・試作したパッケージ基板より、300GHz 帯における電気定数を抽出した。抽出した電気定数を用いて、製造可能なデザインルールに沿った構造での CMOS チップ実装部の接続損失として 2dB 以下実現の目途を得た。

また、FOWLP 構造の再配線層上にアンテナを形成し、反射鏡と組み合わせたオフセットパラボラアンテナにより高利得化を図ったモジュール構成を提案した。この構成により、CMOS チップとアンテナ間の接続をパッケージ内で完結して低損失化が実現でき、さらにオフセットパラボラ構成として送受反射鏡を並べて配置することで、トランシーバ機能を有する無線機が構成可能である。この構成の有効性を検証するため、パッケージ基板およびオフセットパラボラアンテナを試作した。FOWLP 構造では再配線層の層間が非常に薄いため、層間厚が薄くても広帯域化が可能な八木アンテナを採用し、基板水平方向に放射するエンドファイア型の指向性を実現した。このアンテナを 1 次放射器として、反射鏡による高利得化設計を行った。300GHz において、解析でのピーク利得 32.0dBi に対して実測で 31.3dBi の利得が得られ、FOWLP と反射鏡の組み合わせ構成による通信用トランシーバモジュールとしての有効性を検証した。



図：CMOS 実装部接続損失の解析結果

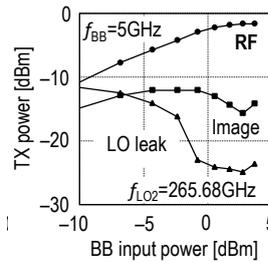
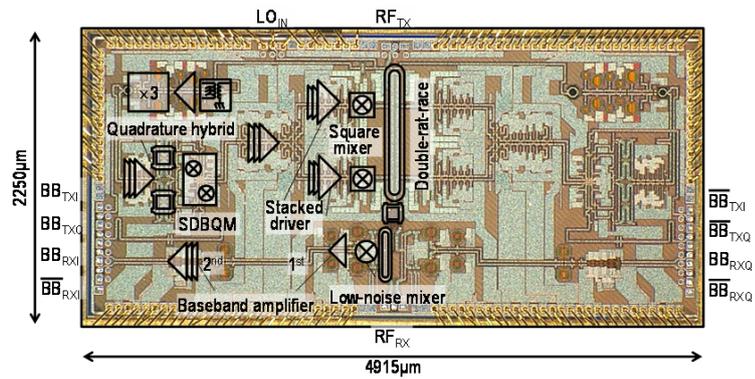


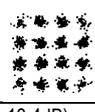
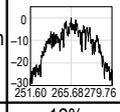
課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術
(b) 300GHz CMOS 回路技術

300GHz 帯トランシーバを CMOS 集積回路で実現するためのアーキテクチャの検討を行い、QAM 変調対応可能で最大 80Gb/s の伝送レートをもつ 300GHz 帯トランシーバを実現した。CMOS 集積回路では 300GHz 帯増幅回路の実現が困難であることから、送信機の電力増幅回路と受信機の低雑音増幅回路を用いないアーキテクチャを採用している。送信機では、スクエアミキサとよぶ 1 入力 1 出力型のミキサを最終段で並列接続することにより、-1.6dBm の最大出力電力を実現した。また、送信機に用いられる回路により高出力の受信機の局部発振信号を生成し、受信機初段ミキサの変換損を軽減している。これらの技術を用いることにより、IEEE Std 802.15.3d で 300GHz 帯通信向けに定められたチャネル 66 を用いて 80Gb/s の通信を実現し、国際学会 ISSCC2019 にて発表を実施した。

Architecture	Block diagram	Technology	QAM Constellation
PA last	Mixer (IF, LO) → Power amp. → RF	InP (RF, f_{max})	4-QAM
Tripler last	Mixer (BB, LO) → IF amp. → Tripler (x3) → RF	CMOS (RF, f_{max})	16-QAM
Square Mixer last	Mixer (BB, LO) → IF amp. → Square Mixer → RF	CMOS (RF, f_{max})	16-QAM

図：テラヘルツ帯トランシーバのアーキテクチャ



802.15.3d channel		Ch.66
Center freq.		265.68GHz
Modulation		16QAM
TX spectrum	Constellation (Equalized)	
	TX spectrum	
EVM		12% rms (-18.4dB)
Symbol rate		20Gbaud
Data rate		80Gb/s

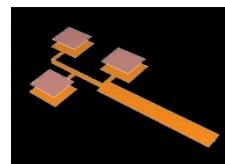
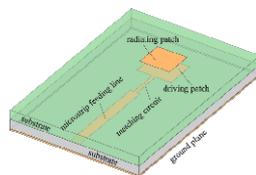
図：試作した 300GHz 帯 CMOS トランシーバ回路の評価結果

課題ア 近距離無線通信用 300GHz 帯シリコン半導体 CMOS トランシーバ技術

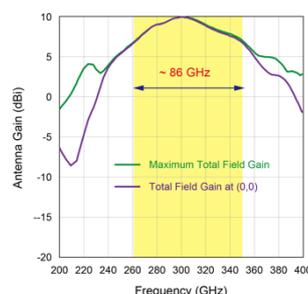
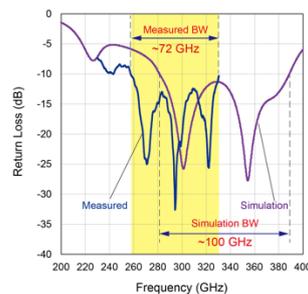
(c) 300GHz 帯小型・広帯域アンテナ技術

300GHz 帯という非常に高い周波数帯に使用可能な誘電体基板を選定した。300GHz 帯の伝送線路で高次伝搬モードが生じないように十分に薄くできることと、その損失（誘電体損と線路の導体損）が十分に小さいことが必須条件である。しかし、この周波数帯での誘電率や損失などの重要な特性は、製造メーカから提供されていない上、信頼できる研究データも皆無に近いため、いくつかの候補基板に伝送線路などを実際に試作し、測定評価より、それぞれの基礎特性を明らかにした。最終的に LCP（液晶ポリマー）基板を選定した。LCP は、安価の上、薄い基板（50 マイクロメートル以下）が製造・提供されている。実測の結果、300GHz 帯での比誘電率が約 3.08、伝送線路において 1dB/mm 以下の損失が確認され、その損失値はアンテナ回路においてある程度容認できることがわかった。

次に、アンテナの広帯域化について、一般的に、300GHz 帯で伝送線路に高次モードが生じないように基板を薄くすると、アンテナの動作帯域が 1% 以下のような狭帯域動作となってしまうが、多層基板構成を導入しスタック構造を用いることにより、アンテナのパッチ間に強い結合を持たせた上、複数の放射素子間に相互作用を生じさせることにより、アンテナの動作帯域を飛躍的に広げた。さらに、アンテナの利得を上げるため、2パッチスタック構造を用いた広帯域アンテナのアレー化を図った。試作したアンテナの形状と特性の一例を図に示す。70GHz 以上の広帯域かつ 10dBi 以上の最大利得を持つ実用に使用可能な平面小型アンテナを開発することができた。



(a) 3素子構成アレーアンテナ（単体素子は、スタックパッチ構成）

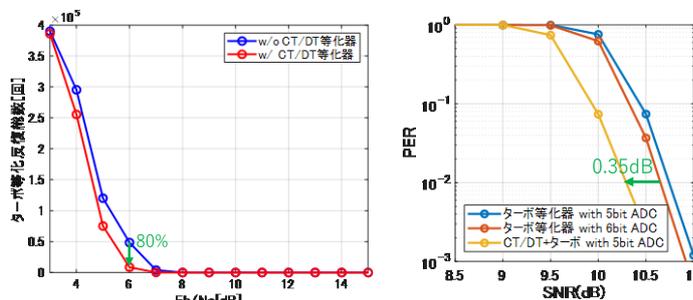
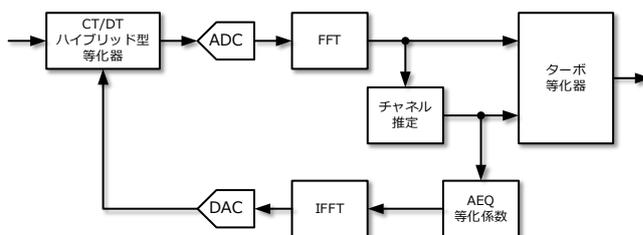


(b) アンテナの反射特性 (c) アンテナの利得特性

図：広帯域アンテナアレーの反射特性 (シミュレーション及び実測結果)

○高速デジタル信号処理技術

データセンタのサーバラック筐体内で 100Gbps 級無線伝送を実現するため、筐体内の伝搬特性の解析および LDPC 符号化周波数領域 SC/MMSE ターボ等化器を開発した。ターボ等化器は、反復処理を伴い処理遅延が大きく高速伝送への適用が困難であることから、課題ア- (a) で開発したアナログ等化器 (CT/DT ハイブリッド型等化器) との協調等化器構成を採用することでターボ等化器単体時に比べて BPSK@PER=1% の反復回数を約 80% 削減した。また、協調等化器構成の採用は、アナログフロントエンドの帯域内偏差による ADC クリップ (非線形歪) を回避し、その結果、16QAM@PER=1% で ADC ビット数を 1 ビット削減しつつターボ等化器の性能を約 0.35dB 改善した。



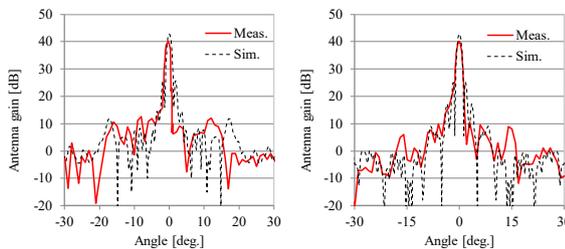
図：CT/DT ハイブリッド+ターボ協調等化器による性能改善

課題イ 300GHz 帯の周波数の電波を使用する近距離無線通信システムの開発及び通信実験による機能実証

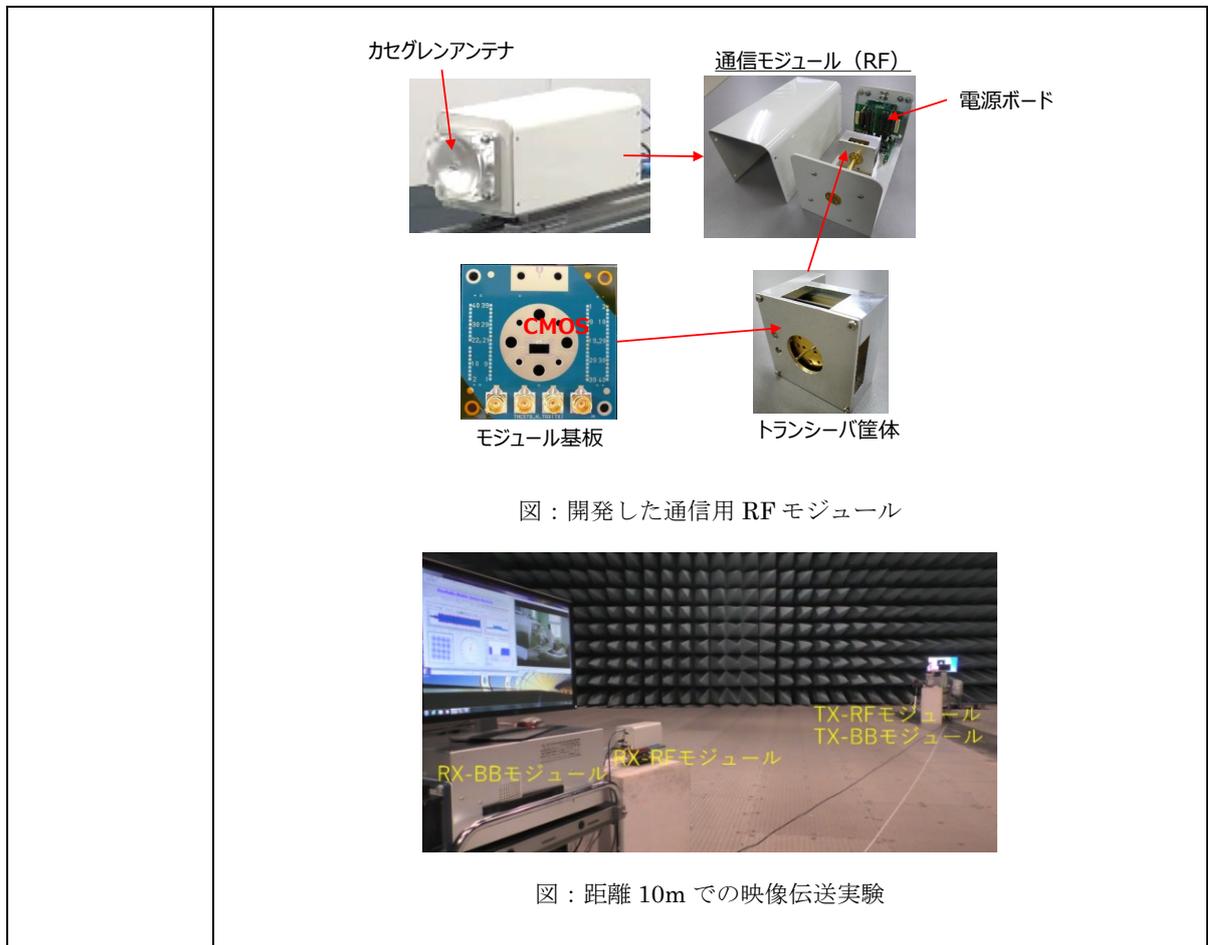
(a) 無線通信システム信号処理技術

○通信実験による機能検証

通信距離の長距離化に向けた高利得アンテナとしてカセグレンアンテナを開発した。主反射鏡の直径を 60mm とし、アンテナ前面にはシクロオレフィンポリマー (COP) を用いたレドームを付け、副反射鏡はレドームに固定する構成とした。設計したカセグレンアンテナの実測で 39dBi の利得を達成した。さらに CMOS トランシーバならびに制御用の電源基板を小さな筐体に収めた RF モジュールを開発し、この RF モジュール及びカセグレンアンテナからなる 300GHz 帯無線通信機を構成した。試作した無線通信機を用いて、動画のリアルタイム伝送の実験を行った。帯域幅 100MHz の 8 つのコンポーネントキャリアからなる OFDM 信号を使用して通信を行い、距離 10m において安定した無線通信を実現し、動画のリアルタイム伝送ができることを実証した。



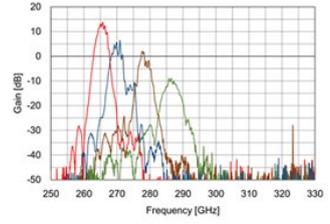
図：カセグレンアンテナの利得・放射パターン



(MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発)

ミリ波帯小型 TWT (進行波管) の技術をベースに、MEMS (マイクロマシン) 技術を真空中で使用できる遅波回路を作製できるよう改良し、300GHz 帯で必要となる FWG 形遅波回路の作製を実施し、小型増幅器を実現できる基礎的な技術を確認するとともに、300GHz 帯 MEMS 真空管を組み込んだ増幅器を開発した。デバイスばらつきにより目標の 1W が達成できなかったが、MEMS 技術の改良により達成できる見通しを得ている。MEMS 真空管増幅器と送信機を接続し、電波暗室内で伝送実験を実施した。1W クラスの出力ができれば、数 10m 以上の距離での無線通信が実現できることを示した。

技術の種類	目標の達成状況
MEMS 真空管技術	<p>ミリ波帯小型 TWT (進行波管) の技術をベースに 1W クラスの出力が可能な MEMS 真空管の設計を実施した。MEMS (マイクロマシン) 技術を真空中で使用できる遅波回路を作製できるよう改良し、300GHz 帯で必要となる FWG 形遅波回路の作製を実施した。この FWG 形遅波回路を増幅素子として使って TWT として動作できることを示した。試作した結果、最大+15dB のゲイン (265GHz)、ピークで 0.1W の出力を達成し、小型増幅器を実現できる基礎的な技術を確認した (入力 0.03W 時)。</p> <p>目標値である 1W クラスを達成できなかった理由はデバイスのばらつきにあり、MEMS 技術の改良、精密組立技術の向上を実施中である。PJ 終了後も部品レベルでの改良を実施し、FWG 形遅波回路については、従来貼り合せにより作製していたが、一体型で作製できる MEMS 技術を開発した。これにより、アライメントのずれによるゲイン低下が相当に抑制できる。窓については、応力緩和できる構造を採用し、真空度を低下させるリークの発生を防止した。2019.5 現在新しい試作品の製造を準備中であり、出力 1W クラスの達成を達成する計画である。</p>



MEMS 真空管の評価

増幅特性

300GHz 帯 MEMS 真空管を組み込んだ増幅器を開発した。増幅器の平面サイズは 21.8cm×29.7cm とし、ほぼ A4 サイズの可搬型とした。これを実現するため、特に大きな部品である高電圧トランスの低背化技術を開発し、MEMS 真空管を動作させた。

MEMS 真空管の出力が 1W に達しなかったため、増幅器の出力も 1W に達成していないが、MEMS 真空管を動作させるための電圧、電流は MEMS 真空管の性能によらず変わることはないため、1W クラスのデバイスを駆動できる技術は確立した。



入出力用フランジ (WR-3)

MEMS 真空管増幅器外観

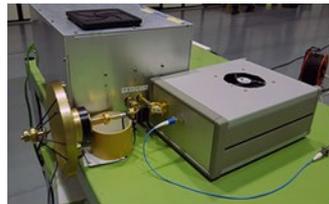
MEMS 真空管増幅器技術

電力モジュールの主要性能

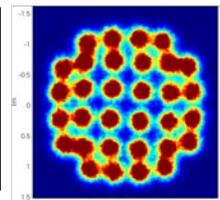
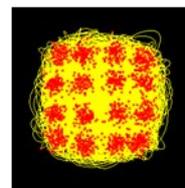
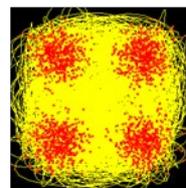
高電圧電源モジュール 主要性能	
電気的性能	
給電部入力電圧	20 V~25 V
電源効率 (最大出力時)	76%
機械的性能	
モジュール外形 (本体のみ)	高さ 150 mm×幅 218×奥行 297 mm
質量 (本体のみ)	7 kg
監視制御入出力機能	
高圧投入遮断制御入力	接点短絡時高圧投入／開放時高圧遮断
主電源投入監視出力	給電時接点短絡
予熱完了監視出力	予熱完了時接点短絡

MEMS 真空管増幅器と送信機を接続し、電波暗室内で伝送実験を実施した。シンボル速度 5 Gbaud の QPSK および 2Gbaud 16QAM にて検証を行ったところ、それぞれおよそ 29%、14% の EVM が得られ (5 m 伝送時)、通信可能な性能であることが示された。また、1 Gbaud 32QAM で線形性検証を行ったところ信号の疎通が確認された。さらに出力を上げれば通信距離を延伸した数十 Gbps の信号伝送が可能であることを確認した。今回 5m の距離で実施したのは、300GHz 帯送受信系との周波数帯のずれ等により距離が制限されたためである。今後デバイスの動作が安定して 1W クラスの出力を 300GHz 前後の周波数帯で出すことができれば、数 10m 以上の距離での無線通信が実現できることを示した。あわせて今後の伝送実験に必要な信号発生、アンテナ技術の検討を行った。

実証実験用無線通信システム技術



伝送実験風景



5Gbaud QPSK (左)、2Gbaud 16QAM (中)、および 1Gbaud 32QAM (右) の復調コンスタレーション図

3 政策効果の把握の手法

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

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

4 政策評価の観点・分析等

○研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績からの分析

研究開発による特許・論文・研究発表・国際標準の実績から、各開発技術に関する特許を出願するなど成果展開に必要な技術を確実に確立しており、また、国際電気通信連合無線通信部門(ITU-R)のWP1A、WP5A、WP5C、及びAPG-19、AWG(APT Wireless Group)の各会合へ寄書提案を行うなど、国際標準化に貢献しており、本研究開発の必要性、有効性等が認められた。

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路による 300GHz トランシーバ技術の研究開発

主な指標	H26年度	H27年度	H28年度	H29年度	H30年度	合計
査読付き誌上発表論文数	0件 (0件)	1件 (1件)	4件 (4件)	2件 (2件)	8件 (5件)	15件 (12件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1件 (1件)	11件 (11件)	7件 (7件)	9件 (9件)	7件 (7件)	35件 (35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)	0件 (0件)
口頭発表数	4件 (0件)	11件 (0件)	24件 (7件)	22件 (13件)	18件 (10件)	79件 (30件)
特許出願数	3件 (0件)	16件 (7件)	10件 (4件)	16件 (7件)	10件 (6件)	55件 (24件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (2件)	0件 (0件)	5件 (5件)	7件 (7件)
国際標準提案数	5件 (5件)	12件 (12件)	19件 (19件)	11件 (11件)	12件 (12件)	59件 (59件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	5件 (5件)	1件 (1件)	4件 (4件)	2件 (2件)	12件 (12件)
受賞数	0件 (0件)	1件 (1件)	1件 (0件)	1件 (1件)	0件 (0件)	3件 (2件)
報道発表数	0件 (0件)	2件 (1件)	2件 (1件)	0件 (0件)	2件 (1件)	6件 (3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)	0件 (0件)

MEMS 真空管増幅器技術に関する研究開発

主な指標	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	合計
査読付き誌上発表論文数	1件 (1件)	2件 (0件)	3件 (3件)	3件 (2件)	9件 (6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)	12件 (12件)	4件 (4件)	29件 (29件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	2件 (2件)	2件 (2件)
口頭発表数	2件 (0件)	13件 (2件)	10件 (3件)	12件 (4件)	37件 (9件)

特許出願数	1件 (0件)	7件 (1件)	3件 (0件)	1件 (0件)	12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	5件 (5件)	12件 (12件)	18件 (18件)	11件 (11件)	46件 (46件)
国際標準獲得数	0件 (0件)	5件 (5件)	1件 (1件)	4件 (4件)	10件 (10件)
受賞数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
報道発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)

○各観点からの分析

観点	分析
必要性	<p>高精細映像伝送などによる Gbps 級の大容量の情報伝送需要の急増により、現在利用が可能な周波数帯では必要な伝送容量を十分に確保できず、周波数が急速にひっ迫することが想定される。また、今後、携帯機器とネットワークとのデータ転送需要の大幅な伸びが予想されており、大容量のデータを瞬時に、かつ簡易に利用できるデータ転送システムの実現が必要となっている。275-370 GHz の超高周波数帯域は、これまで実用化されておらず利用されていないが、潜在的に数十 Gbps 級の大容量の情報伝送を瞬時に伝送することが可能であり、本研究開発により、当該周波数帯域を利用することができるようになることで、急速に増大が予想される情報伝送需要に応えることが可能になる。</p> <p>また、世界的に周波数割当が行われていない 275GHz-370GHz 帯を利用するための研究開発が世界各国で進められている中、世界に先駆けて研究開発を行い、その技術に適合した周波数利用を提案することで、大きなアドバンテージを得られる状況にある。このような情勢に鑑み、275GHz-370GHz の周波数帯における将来の我が国の電波利用権益の確保及び国際競争力強化のため、早急に当該技術の確立が必要であった。</p> <p>以上に述べたように、本研究開発は、未開拓周波数の利用を推進する研究開発であり、ハイリスクかつ高度な技術が求められるため民間のみでは実施困難であるとともに、ITU-R の周波数分配や IEEE802 における標準化とも深く関連しているため、国が主導して実施する必要があった。以上より、本研究開発には必要性があったと認められる。</p>
効率性	<p>本研究開発は、未利用の超高周波数帯である 275 - 370 GHz のテラヘルツ帯を用い、大容量のデータを瞬時に伝送することを可能とするための要素技術の開発を行うものであるが、未利用周波数帯への移行促進のために、これまで利用ができなかった当該周波数帯の利用を可能とするには、その要素技術の開発が必要不可欠であり、他に効率的で質の高い代替手段はない。</p> <p>また、本研究開発の実施に当たっては、これまで無線通信分野における商用化実績、研究開発実績等の専門知識を有する通信機器ベンダー、通信事業者、大学等のノウハウが活用されており、実施期間中も受託各社の研究代表者・実務者の定期的会合において各社の進捗状況や課題が調整・共有され、さらに外部の有識者と受託者から構成される運営委員会や、外部有識者による継続評価において、研究進捗や進め方等について助言を受けるなど、効率的な実施のため情報交換が積極的に行われた。</p> <p>予算要求段階、公募実施の前段階、提案された研究開発提案を採択する段階、研究開発の実施段階及び研究開発の終了後における、実施内容、実施体制及び予算額等について、外部専門家・外部有識者から構成される評価会において評価を行い、効率的に実施した。以上より、本研究開発には効率性があったと認められる。</p>
有効性	<p>本研究開発の実施により、これまでに実用化されていない 300GHz の周波数帯を無線線に利用するための基盤技術が確立され、電波の利用周波数帯域が拡大されるとともに既存業務の高い周波数への移行が促進されたと言える。また、世界的に周波数分配が行われていない 300GHz における無線通信基盤技術を世界に先駆けて確立することによって、無線通信分野における標準化議論の際には先手を打つことが可能であり、我が国の国際競争力を強化できる。よって、本研究開発には有効性があったと認められる。</p>
公平性	<p>本研究開発によって、新たな周波数帯が利用可能となるとともに、既存の周波数帯からの移行促進</p>

	<p>により既存周波数帯の有効利用にもつながることから、広く無線局免許人や無線通信の利用者の利益となる。</p> <p>本研究開発の実施に当たっては、開示する基本計画に基づき広く提案公募を行い、提案者と利害関係を有しない複数の有識者により審査・選定した。</p> <p>以上より、本研究開発には公平性があったと認められる。</p>
優先性	<p>情報伝送需要の急増による既存の無線通信周波数帯の伝送容量の逼迫や、既存の無線通信周波数帯では実現できない高速大容量無線通信の需要に、早急に対応することが必要であった。</p> <p>また、本研究開発の対象となる 275GHz - 370GHz 帯の周波数帯は世界各国で能動業務による利用検討が進められており、我が国が世界に先駆けて研究開発を実施し、同周波数帯の利用権益の確保及び国際競争力の強化に資するためには、優先的に研究開発に取り組む必要があった。</p> <p>以上より、本研究開発には優先性があったと認められる。</p>

5 政策評価の結果（総合評価）

シリコン半導体 CMOS トランジスタ集積回路によって、300GHz 帯トランシーバを実現し、当初目標としていた 40Gbps の 2 倍に当たる 80Gbps の伝送速度を達成した。300GHz 帯 MEMS 真空管を組み込んだ増幅器を開発し、1W が達成できる見通しを得るとともに、数 10m 以上の距離での無線通信が実現できることを示した。

5 年間の研究開発を通じて、世界的に周波数分配が行われていない 275 - 370GHz のテラヘルツ帯を用いて毎秒数十ギガビット級の超高速伝送を可能とする無線通信基盤技術の確立を目的とした各要素技術について、当初の目標を達成することができた。

<今後の課題及び取組の方向性>

本研究開発で得られた基盤技術を発展させ、低価格の超小型デバイスや長距離化を実現するための研究開発を進め、より実用性を高めるとともに、高精細映像等の大容量データの高速無線伝送等への応用技術開発への展開を図ることで、産業的に未利用な 300GHz 帯の産業利用を推進していく。引き続き ITU-R 等の国際標準化活動に積極的に貢献し、300GHz 帯の利活用における国際的な合意形成を図っていく。

6 学識経験を有する者の知見の活用

「電波利用料による研究開発等の評価に関する会合」（令和元年 8 月 28 日）における終了評価において、目標の達成状況や得られた成果等、実施体制の妥当性及び経済的効率性、実用化等の目途等について外部評価を実施し、外部有識者から以下の御意見等を頂いたため、本研究開発の評価に活用した。

- ・所定の成果目標が達成されている。特に 300GHz の CMOS 高周波アナログ集積回路技術は世界トップレベルであり、今後の周波数開拓を支える基盤技術を確立しつつあるのは高く評価できる。特許も多数出願されており、高く評価できる。
- ・3 機関連携で実証実験を行い性能確認するなど、実施体制は妥当である。また、予算は効率的に使用されたと判断する。
- ・ITU-R、APT WRC-15 準備会合 APG15-5、WRC-19、IEEE802 各会合において国際標準化活動を推進して成果を得ている。また、本研究開発の成果により無線設備規則に 300GHz 帯に対応する無線設備の記載が 2024 年度に追記されることが予定されており、実用化が期待される。

7 評価に使用した資料等

○電波有効利用の促進に関する検討会—報告書—（平成 24 年 12 月 25 日）

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02kiban09_03000173.html

○情報通信審議会 中間答申「イノベーション創出実現に向けた情報通信技術政策の在り方」（平成 25 年 1 月 18 日付け諮問第 19 号）

http://www.soumu.go.jp/main_content/000299834.pdf

○科学技術イノベーション総合戦略～新次元日本創造への挑戦～（平成 25 年 6 月 7 日 閣議決定）

<https://www8.cao.go.jp/cstp/sogosenryaku/2013/honbun.pdf>

- 平成 26 年度科学技術重要施策アクションプラン（平成 25 年 7 月 31 日総合科学技術会議決定）
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kyogikai/life/4kai/siryu2.pdf>
- 電波利用料による研究開発等の評価に関する会合 <電波利用料>
<https://www.tele.soumu.go.jp/j/sys/fees/purpose/kenkyu/index.htm>