

令和 6 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 08901
研究開発課題名 Beyond5G 通信基盤を支えるミリ波～テラヘルツ波帯
フレキシブル導波管基盤技術の研究開発

(1) 研究開発の目的

新しい有線電波伝送手段としてのフレキシブル導波管技術の確立と、これを通じたテラヘルツ波通信の早期実用化への貢献と新しい有線電波通信の実現

(2) 研究開発期間

令和 6 年度から令和 8 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人福井大学〈代表研究者〉
株式会社米澤物産
学校法人早稲田大学
国立大学法人東海国立大学機構 岐阜大学
株式会社多摩川電子
国立大学法人京都工芸繊維大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 6 年度 100 百万円 ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 フレキシブル導波管基礎要素技術の研究開発

研究開発項目 1-a) 300GHz 帯向け導波管構成に関わる先導的研究 (京都工芸繊維大学)

研究開発項目 1-b) 300GHz 帯向け新規導波管構成のフィジビリティ評価 (福井大学)

研究開発項目 1-c) より高周波に対応したフレキシブル導波管製造方法開発 ((株)米澤物産)

研究開発項目 1-d) フレキシブル導波管損失要因の研究 (京都工芸繊維大学)

研究開発項目 1-e) 50～110GHz 帯低損失材料の探索、製品構成の見直し (福井大学)

研究開発項目 2 フレキシブル導波管の課題解決にむけた周辺要素技術の研究開発

研究開発項目 2-a) EMI 特性向上に向けた漏出状況の精密測定法の研究開発 (岐阜大学)

研究開発項目 2-b) 民生応用の可能性を広げる有線・無線変換方式の研究開発 (岐阜大学)

研究開発項目 2-c) フレキシブル導波管特性の精密評価測定方法の開発 (福井大学)

研究開発項目 2-d) コネクタ国際標準化に向けた標準仕様検討 ((株)米澤物産)

研究開発項目 3 通信応用実験の実施

研究開発項目 3-a) 通信応用実験の計画と技術課題の抽出 (早稲田大学)

研究開発項目 3-b) フレキシブル導波管の通信応用実験の実施 ((株)多摩川電子)

(6) 特許出願、外部発表等

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	1	1
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	1	1
	その他研究発表	17	17
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	1	1
	展示会	2	2
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

3年間での成果創出を見越した準備（文献調査、材料の探索、設備要素の探索、設備導入、予備的検討）を行い、これを完了した。一部のテーマでは、具体的な研究開発にも着手し、次年度以降の成果獲得に向けた見通しを得た。

研究開発項目 1-a) 300GHz 帯向け導波管構成に関わる先導的研究（京都工芸繊維大学）

テラヘルツ帯で低損失伝送を可能とする導波路に関する文献調査のため、論文検索を行った。IEEE Xplore、国際学会 APS、AIP の論文検索ツール等において、low loss terahertz waveguide などのキーワードで検索を行ったが、それぞれ 1,000 編程度と非常に多くの論文が対象候補となり、このうち関連性の高い論文を抽出した。今年度調査した論文数は96編である。内訳として、フレキシブル(flexible)・繊維(textile)が27編、中空金属導波管(metallic hollow waveguide)が19編、中空誘電体導波路(dielectric tube)が11編、フォトニック結晶(PC)/多孔性(porous)コアを持つ誘電体導波路が15編、従来の誘電体導波路が12編、PC/多孔性クラッド層をもつ誘電体導波路が10編、その他2編となった。これまでに行った調査結果から、300GHz 帯のサブテラヘルツ領域では、導体損失の影響が非常に深刻となるため、低損失導波路としては誘電体のみからなる導波路構造を採用するものが多いことが分かった。

研究開発項目 1-b) 300GHz 帯向け新規導波管構成のフィジビリティ評価（福井大学）

300GHz 帯において利用可能な導波管用低損失材料について、複素誘電率（誘電正接）、機械特性、熱的特性、物理化学的特性の観点から探索、調査を実施し、これを完了した。

研究開発項目 1-c) より高周波に対応したフレキシブル導波管製造方法開発（(株)米澤物産）

より高周波に対応するため必要な設備要素、主にキャリアの改造を実施した。同改造したキャリアを用いて、F 帯および D 帯の編組テストを実施し、新たな課題を抽出した。また、より高周波に対応するために必要な平箔系の製作を完了した。同平箔系は従来品に比べて引張強度が 0.5N 向上し、また、表面粗さも改善した。次年度にむけて製紐設備メーカーの抽出および製紐テストを実施した。その伝送特性の測定結果から、細径化に有望な機器メーカー1社を抽出し、これを完了した。

研究開発項目 1-d) フレキシブル導波管損失要因の研究（京都工芸繊維大学）

本開発項目においては、現状フレキシブル導波管の導体壁面を構成する組紐構造に対して、サブ波長サイズの周期をもつ単位セル構造を抽出し、モデル化を行った。同モデルを用いて、平面波が斜入射する場合の反射特性、透過特性を電磁界シミュレーションにより求め、同構造のもつ材料損失、放射損失の評価を行った。その結果、(i)放射損失は材料損失の数分の1以下、(ii)組紐構造の材料損失の主要因は銅箔の導体損失で、樹脂フィルムの誘電損失は非常に小さい、(iii)組紐構造の材料損失は従来の単純な銅膜のおよそ2倍程度、ということが分かった。さらに、組紐構造からなる導体壁面を表面インピーダンスに換算し、芯材として PTFE を挿入した場合のフレキシブル導波管の伝送特性の評価を行った。その結果、伝送損失に占める芯材の誘電損失の割合が大きく、気孔率の高い低損失誘電体材料の利用が不可欠であることが分かった。以上の評価結果を得て、損失要因の概算切り分けを完了した。

研究開発項目 1-e) 50~110GHz 帯低損失材料の探索、製品構成の見直し（福井大学）

50~110GHz 帯において低損失化に有望と思われる芯線（内部誘電体）材料の調査を行い、これを完了した。具体的にはテラヘルツ時間領域分光法を用いて低損失化に有望と思われる複数の芯線材料について 50~110GHz 帯における誘電正接を評価し、その結果 PTFE が最も低損失であるとの評価結果を得た。

研究開発項目 1-f) 伝送特性の安定化に向けた研究開発（(株)米澤物産）

V 帯、E 帯、W 帯において、製紐条件を変更したフレキシブル導波管の製紐テストを実施、伝送特性のばらつき量の把握を完了した。また、1-c と連動して伝送特性安定化のために有望な設備要素(キャリア)の抽出を実施した。同抽出したキャリアの改造を完了し、新たな課題の抽出を完了した。また、1-c と連動して次年度に向け製紐の安定化に可能性のある製紐設備メーカーを抽出し、これを完了した。

研究開発項目 2-a) EMI 特性向上に向けた漏出状況の精密測定法の研究開発（岐阜大学）

既存のフレキシブル導波管を対象とした 70GHz 帯漏出電波の可視化システムの構築を行った。具体的には、岐阜大学でこれまで構築してきた電波可視化システムを応用し、曲げ状況に応じたプローブ空間走査を実現するシステムを新たに構築した。直動ステージを用いた手法とロボットアームを用いた手法を検討した結果、直動ステージによる構成とした。また、構築したシステムによる 70GHz 帯漏出電波の可視化から、110GHz 帯への拡張に向けた課題抽出を行った。

研究開発項目 2-b) 民生応用の可能性を広げる有線・無線変換方式の研究開発（岐阜大学）

中空導波管に接続可能な誘電体アンテナ開発でこれまでに得た知見に基づき、70GHz 帯を対象とした誘電体アンテナの設計と試作を行った。具体的には、フレキシブル導波管に接続した状態でのアンテナの基礎特性をシミュレーションから明らかにした。また、アンテナサイズとアンテナ利得・放射パターンとの関係をシミュレーションから明らかにし、所望のアンテナ利得と放射パターンを実現するための誘電体アンテナ形状をシミュレーションに基づき設計した。

研究開発項目 2-c) フレキシブル導波管特性の精密評価測定方法の開発（福井大学）

導波管特性評価用の VNA の導入とテラヘルツ時間領域分光装置の構築を行い、これを完了した。導入したテラヘルツ時間領域分光装置の最適化を行い、導入した当初よりもスペクトルダイナミックレンジにおいて約 2 桁近くの信号対雑音比の改善が達成された（Taiwan THz Winter Workshop 2025 で成果報告）。導入 VNA についても、 S_{21} 測定条件の最適化を行った。フレキシブル導波管評価測定における接続部については、テーパ付き導波管を採用し、接続部を含む評価用装置の設計と設定を行った。

研究開発項目 2-d) コネクタ国際標準化に向けた標準仕様検討（(株)米澤物産）

コネクタメーカーと連携して作製したコネクタ初期仕様案と取組み計画に基づき、一次試作を実施、完了した。この試作品評価の結果を反映した 1.5 次試作を行い、この試作品評価も完了した。更にここで得られた知見を基に、次期の試作（2次試作）にむけた準備に着手した。また、国際標準化に向けて SC46F 国内委員会での報告を行い、意見を得た。

研究開発項目 3-a) 通信応用実験の計画と技術課題の抽出（早稲田大学）

アンテナ部と無線機本体をフレキシブル導波管で機械的に分離し、アンテナ部のみを簡便な機構で可動とするシステムの基本設計を行った。既存の無線装置に増設する形でシステム全体の設計を進めた。機械的に変化した際のフレキシブル導波管の特性変動についての基礎的な評価を実施し、完了した。

研究開発項目 3-b) フレキシブル導波管の通信応用実験の実施（(株)多摩川電子）

同軸系プローブシステムにおいて、導波管周波数拡張装置と導波管プローブを、フレキシブル導波管で接続、測定できるシステムの概念設計、実設計を行った。実際に組み上げ、機械的にプローブがコンタクトすることを確認した。次年度の測定器応用としての実験につなげる。また、フレキシブル導波管を信号の伝搬路として使用している為、フレキシブル導波管の温度特性、安定度などの評価を行い、使用温度範囲の知見を得た。

(8) 今後の研究開発計画

前項で示した初年度成果を活かし、研究開発期間（3年間）で最終目標達成に向けた取り組みを進める。今後に向けて、現在の研究開発計画を変更する必要は無いと考えており、初期の計画に従い、年度ごとの目標を確実に達成していく。

但し、これまでの取り組みにおいて発生した事象（装置故障などのトラブル、連携における状況変化、など）や評価委員ご指摘（スタートアップミーティングおよびステージゲート評価）を踏まえた検討は適切に追加し、今後の研究開発の質を向上していく。