

令和 4 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 00601

研究開発課題名 Beyond 5G 次世代小型衛星コンステレーション向け電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

副 題 次世代 LEO 通信コンステレーション構築に向けた超小型・低コスト電波・光ハイブリッド通信システムおよび通信制御システムの研究開発

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、研究者らの 50-200kg 級超小型衛星および関連技術の開発・製造・運用経験を活用した以下の研究開発項目を実施し、本研究開発の成果と研究者の超小型衛星バス技術および量産製造・自動運用システムとを組み合わせることで、LEO 通信コンステレーションの早期構築を目指す。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

株式会社アクセルスペース<代表研究者>
国立大学法人東京大学
国立大学法人東京工業大学
株式会社清原光学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 1,728 百万円 (令和 4 年度 1,370 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

LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

研究開発項目 1-a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発

((株)清原光学、(株)アクセルスペース)

研究開発項目 1-b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発

((株)アクセルスペース、東京大学、東京工業大学)

研究開発項目 1-c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発

((株)清原光学、(株)アクセルスペース)

研究開発項目 2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

研究開発項目 2-a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発 ((株)清原光学)

研究開発項目 2-b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発

((株)アクセルスペース、東京大学)

(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	2	2
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	0	0
	その他研究発表	15	15
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	4	4
	展示会	6	6
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目1 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

研究開発項目1-a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発

((株)清原光学、(株)アクセルスペース)

① 衛星搭載光通信機器の開発 ((株)清原光学)

仕様案を作成し、その仕様に基づき、必要物品の手配を行い、光通信基礎実験用光アンテナを総アルミ製と低膨張ガラスの2系統を製作した。温度サイクル試験を実施し、前後での透過波面を測定した。光学的優位性が現れなかったため、結果から、生産性を考慮し、総アルミ製の採用を決めた。

総アルミ製光アンテナを使用して、対向にて空間伝搬実験を実施し、結合効率を測定した。

② ジンバル機構、衛星インタフェースなど ((株)アクセルスペース)

東大・清原光学と共に光学系、1-b)の電波・光ハイブリッド通信制御システムと連携して、ジンバル機構の性能仕様およびインタフェース仕様を策定し、フィジビリティを確認した。まずは2鏡型ジンバルにおいて成立性を確認したが、さらなる小型化を実現するためには1鏡型ジンバルにすることが有効であることが分かった。解析の結果1鏡型ジンバルにおいてもミッション視野要求を満たすことが確認できたため、1鏡型ジンバルにて開発を進めることとした。

研究開発項目1-b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発 ((株)アクセルスペース、東京大学、東京工業大学)

① RF 通信システム統合/デジタル処理部 ((株)アクセルスペース)

・ RF 通信システム統合

RF 通信システムの共同研究者である東工大と共同で電気・構造・熱など各種のインタフェースについて継続議論・調整を行い、決定した事項については試験や開発を進めた。打ち上げ衝撃や宇宙空間での熱環境に耐えるコンポーネントの構造を検討するために、放熱経路などを検討した筐体で熱解析・熱真空試験を行った。

また、アンテナと信号などの接続や電源供給を担う基板設計を進めた。

・ デジタル処理部

前年度の検討を元に、試作基板の回路設計・製造・試験を行った。試作基板を用いて、送信系の動作確認と、受信系の一部機能確認を実施した。そこで問題点もいくつか見つけたため、改良基板の仕様策定を進めている。次年度以降に改良版基板での試験と受信系の実装を進める予定である。

② 電波・光通信経路制御 ((株)アクセルスペース)

評価ボードを使用し、経路制御アルゴリズムの開発・実装を行った。正常系だけではな

く、再送制御等の異常系についても実装を行い、データ転送のテストを実施した。アルゴリズム実装・試験の成果をもとに使用デバイスやメモリ実装量を詳細化し開発基板の仕様を策定した。

③ 光通信初期捕捉・姿勢協調制御/姿勢制御・軌道推定性能の高度化 (株)アクセルスペース

・ 低遅延・高出力レート・高精度 STT(Star Tracker) の開発

現在軌道上運用中の弊社衛星に搭載のSTT から実際の星画像を取得し、そのセントロイド誤差を評価し、その結果と昨年度の星分布の調査結果から、今回開発するSTTの目標仕様を策定した。アルゴリズム面では、セントロイド誤差を改善するための迷光フィルタ処理、レンズの歪み補正、星同定アルゴリズムの改善をPython上で実装し、同星画像で実際にセントロイド誤差を改善できるとともに、姿勢推定の成功率も向上できることを示した。

また、目標仕様に基づき、COTSレンズ3製品およびイメージセンサ1製品の選定ならびに調達を行い、実際の星空画像の確認、ならびにイメージセンサの暗電流ノイズ評価を行った。また、選定したイメージセンサを搭載した基板の開発を開始し、今年度は回路設計までを完了した。

昨年度に選定を行ったFPGA SoM 基板候補のうち、第一候補のSoM基板のSEEおよびTID放射線試験を行い、いずれも放射線耐性のあることができたため、こちらで開発を進めることを決定した。

昨年度に詳細設計を行った軽量・小型フードについて、4種類の黒色処理の反射率測定を行った。また、3種類の材質および表面処理(黒色処理)により製造を行い、各バーン単体でのエッジの測定および、フードとして組み上げた状態での、迷光減衰率の測定をJAXA暗室にて行った。

・ 姿勢・位置推定アルゴリズムの改善

高精度STT(TY-Space社NST4S)および高精度MEMSジャイロ(シリコンセンシング社RPU30デモ機)の調達を行い、両者を同一の治具プレートに搭載し、それらをヘキサポッドに設置することで、姿勢センサデータの取得を行った。データの取得に際しては、実際の夜空にSTTを向け、種々の角速度で水平軸周り、および鉛直軸周りで往復回転運動をさせることで、姿勢マヌーバ時におけるSTTおよびジャイロのデータを得ることが出来た。まず、静止時におけるSTTならびにジャイロのランダムノイズがデータシート通りであることを確認することができた。

・ 高性能・倍精度マルチコア OBC(On Board Computer) の開発

高度な姿勢・位置推定アルゴリズムを実装するための次世代OBC上で動作させる、拡張性やメンテナンス性等に優れたフレームワークを検討した。オープンソースのフレームワークをベースに一部独自の改良を加え採用した。フレームワーク上で動作する単純な1軸姿勢制御ソフトウェアを実装し、さらにシミュレータと組み合わせてSoftware in the loop simulationを行いクローズドループでの基本的な検証手法を確立した。シミュレータの利用性と高めるため、結果のグラフやレポートを自動生成する機能を開発した。

・ RW(Reaction Wheel) の擾乱低減技術の開発

昨年度選定したRW2機種(NewSpaceSystems社製NRWA-T065および三菱プレシジョン社製HMMW)を調達し、RW擾乱測定用治具およびプログラムを作成して、外部の擾乱測定設備にて同2機種の擾乱測定試験を行った。その結果、静的アンバランスおよび動的アンバランスについては、どちらの機種もデータシート通りの低擾乱性を確認することができた。一方、構造共振に伴う擾乱についてはデータシートには記載がなく、今回の擾乱測定により明らかにすることができた。特に前者は3000rpm以上では擾乱が大きくなるものの、3000rpm以下ではロッキングモードが抑えられているという優れた低擾乱性を持つことが明らかとなり、後者は2300rpm付近で強い構造共振が見られ、擾乱が非常に大きくなることが明らかとなった。また、次年度に引き続き擾乱測定を行うため、擾乱測定機器の調達と、さらなる

低擾乱性の見込まれる CMG 1 機種調達を行った。

- ④ 初期捕捉・姿勢協調制御シミュレーション・アルゴリズム開発（東京大学）
- ・ 昨年度実施した回線計算等の初期捕捉・追尾の前提となる条件を基に、捕捉追尾アルゴリズムを具体化し、シミュレータ上に実装した。
 - ・ 検討したアルゴリズムの性能をシミュレータ上で検証し、要求されている性能を満たすことを確認した。具体的には、初期誤差全角 0.25deg の範囲内から通信相手方向を推定し、40 秒程度で目標追尾精度 $2\text{urad}-1\sigma$ を達成可能なことを確認した。
 - ・ 当該成果を学会にて発表した。

⑤ RF 通信システム用アンテナ・RFIC（東京工業大学）

2021 年度の検討結果を踏まえ、それぞれ送信機および受信機用 RFIC の設計、試作評価を行った。RFIC を搭載したフェーズドアレイの性能を評価するために、評価用高周波基板を作成し、ビームフォーミング、消費電力等の特性評価を行った。16 個の IC をもちいて 64 素子のフェーズドアレイ受信機を試作し、1 系統の消費電力 3mW 、 -31dB 以下の EVM、 24Gbps の通信速度を達成、目標を大きく上回る性能を実現した。

研究開発項目 1-c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発

((株)清原光学、(株)アクセルスペース)

① 地上局光アンテナ・捕捉追尾部の開発 ((株)清原光学)

ミラーでの精追尾光学系における、捕捉追尾部の仕様を策定し、その策定仕様に基づきフィルタ等の光学部品の手配を行った。

COTS からベストマッチの望遠鏡がないことから、可搬地上局用望遠鏡の設計を完了し、製作を行った。望遠鏡としての透過波面測定を実施し、精度評価を行った。

② COTS 望遠鏡の自動追尾 ((株)アクセルスペース)

光可搬地上局のシステム検討や構成要素の定義、開発方針・開発スケジュールについて清原光学・東大等と調整しながら方針決めを行った。

また、回線設計や追尾誤差バジェット計算等のシステム成立性検証、それに基づいた架台の選定、開発スケジュールの策定等を行った。来年度以降、実装と試験を進める予定である。

研究開発項目 2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

研究開発項目 2-a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発 ((株)清原光学)

① 多波長光通信

本分野における他国を含めた他研究の調査を Small Satellite Conference, PhotonicsWest, SATELLITE 等の学会および展示会にて調査を行った。

概念設計および仕様検討に必要な多波長光通信の構成部材の情報収集を行い、開発用の部材を入手した。

研究開発項目 2-b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発

((株)アクセルスペース、東京大学)

① 光通信機の故障診断 ((株)アクセルスペース)

光通信機、経路制御部、協調制御部の HW 構成について、清原光学および東京大学と策定を行った。その構成や、その中で選定したコンポーネント仕様を基に、故障診断のためにモニタすべき情報を検討し、ブロック間の信号 IF の策定を行った。

- ② LEO コンステレーションシミュレータ開発（東京大学）
 - ・ 太陽光の干渉や光ターミナル設計性能を考慮したリンク成立判定モデルをシミュレータ内に実装した。
 - ・ 故障事象を考慮しない場合に有効な通信経路選択アルゴリズムを実装し、通信サービスのユースケースに関する 4 種類のシナリオに対して、通信経路選択・データ伝送シミュレーションを実施することで、現段階での通信衛星コンステレーションのノミナル性能を確認した。
 - ・ 当該成果を学会にて発表した。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目 1 LEO コンステレーション用小型衛星搭載電波・光ハイブリッド通信技術の研究開発

研究開発項目 1-a) 小型衛星搭載用フレキシブル光通信システムの研究開発

(株)清原光学、(株)アクセルスペース

① 光通信機開発 (株)清原光学

2024 年度までに PFM(Proto Flight Model)開発と衛星システム統合試験、及び宇宙環境試験を行う。

2023 年度には、光アンテナ、内部光学部品の放射線試験および、熱真空試験を実施する予定。

モデム部の仕様策定および評価基板の製作および放射試験等の環境試験を実施する。

EDFA 部の最終選定から、部品手配を実施し、放射試験等の環境試験を実施する。

FSM の駆動方式を決定し、放射線耐性なども併せて評価する。

② ジンバル機構、衛星インタフェースなど (株)アクセルスペース

引き続き 1 鏡型ジンバルの仕様検討を進める。衛星搭載方法や、光学系のアライメントについても考慮したインタフェース仕様を策定し、BBM を開発する。

研究開発項目 1-b) 小型衛星搭載用電波・光ハイブリッド通信制御システムの研究開発 (株)アクセルスペース、東京大学、東京工業大学

① RF 通信システム統合/デジタル処理部 (株)アクセルスペース

- ・ RF 通信システム統合
 - 熱・振動・放射線等宇宙環境に対応する試験実施
- ・ デジタル処理部の開発
 - 試作基板での性能測定、改良基板の仕様策定
 - 受信系のファームウェア実装、受信系全体の成立性確認

② 電波・光通信経路制御 (株)アクセルスペース

- ・ 評価ボードを使用し、経路制御アルゴリズムの検証および実装を継続する
- ・ 特に異常系についての検討を進める
- ・ 昨年度策定した基板仕様をもとに、基板の開発を進める
- ・ 開発した基板を用いて、評価基板にて検証できなかった検証項目を検証する
 - 多チャンネル同時通信
 - 経路迂回動作
 - データ再送動作 等

③ 光通信初期捕捉・姿勢協調制御/姿勢制御・軌道推定性能の高度化 (株)アクセルスペース

- ・ 低遅延・高出力レート・高精度 STT(Star Tracker) の開発
 - Python で実装された改善アルゴリズムを SoM 上の C++プログラムに移植し、速度および電力の最適化を行う。
 - イメージセンサ基板のアーワーク設計ならびに製造を行い、姿勢推定を

- 実行した際の消費電力の評価を行って、低消費電力実装を行う。
 - 迷光試験の結果を解析・検討し、新規フードの設計・製造を行う。
 - 姿勢・位置推定アルゴリズムの改善
 - 引き続き回転動作時のデータの解析を進めるとともに、STT とジャイロ間の遅延時間を推定し、カルマンフィルタの実装を含めた、遅れ補償アルゴリズムの開発を行う
 - ジャイロのノイズ低減フィルタの設計を行う
 - 高性能・倍精度マルチコア OBC(On Board Computer) の開発
 - 構成した姿勢制御系フライトソフトのフレームワーク上に実際の 3 軸姿勢制御機能を実装し、シミュレータを用いて性能評価を行う。
 - より高精度なシミュレーションを行うために、センサ・アクチュエータの高精度モデルを開発し実装する。
 - RW(Reaction Wheel) の擾乱低減技術の開発
 - 擾乱測定環境を整備し、調達した CMG の擾乱測定を行う。

初期捕捉・姿勢協調制御シミュレーション・アルゴリズム開発 (東京大学)

- シミュレータ上で検証したアルゴリズムを、搭載計算機上で動作する搭載ソフトウェアおよび FPGA ロジックとして実装し、搭載計算機とシミュレータを連結した Hardware-In-the-Loop シミュレーションにて、実フライト品として所望の性能が達成できることを確認する。
- 制御系で用いる各機器の実機性能評価を行い、捕捉追尾制御アルゴリズムが前提としている各機器性能を、各々の機器が実際に達成できることを確認する。

⑤ RFIC 試作評価 (東京工業大学)

2023年度までに RFIC およびアンテナの単体評価を完了させ、2024年度では±66度の広角ビーム走査可能なアンテナと RFIC を高周波基板上に統合してフェーズドアレイ送信機および受信機を実現する。

研究開発項目 1-c) フレキシブル光通信システム対応光地上局システムの研究開発 (株)清原光学、(株)アクセルスペース

① 地上局システム開発 (株)清原光学

2024 年度までに地上局システム統合試験を行う。

2023 年度は、2022 年度に作成した可搬型地上局用望遠鏡に適合した内部光学部の製作を行う。

③ COTS 望遠鏡の自動追尾 (株)アクセルスペース

架台制御ソフトウェアの開発、試験用追尾対象のリスト化や試験環境整備等試験を効率的にできる方策の準備をする。選定した試験用小型架台を使用した追尾成立性の確認を行う。

研究開発項目 2 超広帯域光衛星通信システムの実現に向けた基盤技術の研究開発

研究開発項目 2-a) 100Gbps 級フレキシブル光衛星通信システムに向けた搭載用光通信機器の研究開発 (株)清原光学

① 光通信機開発

2022 年度に調達した COTS 品の HPA の評価を行う。波長多重化技術およびデジタルコヒーレント技術の調査を継続し、未完了の COTS 品の選定及び評価を進める。2024 年度までに COTS 品選定、新規製品の仕様決定、PFM 試作及び光通信システムの開発及び統合試験を行う。

研究開発項目2-b) LEO コンステレーション用光通信機器の自動運用システムの研究開発
(株)アクセルスペース、東京大学)

① 光通信機の故障診断 (株)アクセルスペース)

HW 構成検討の中で策定した、モニタすべきテレメトリ情報やIF 仕様を基に、故障診断や、復帰方法に関するアルゴリズムを検討する。

② LEO コンステレーションシミュレータ開発 (東京大学)

- 課題 1 での光ターミナル設計性能結果を取り込み、シミュレータモデルをより精緻化する。
- 通信機故障や天候等による通信断がある場合にも対応可能な、ロバストな通信経路ルーティングアルゴリズムを検討し、シミュレータに実装する。
- 様々なコンステレーション軌道をシミュレーションし、システム性能を比較することで、より高性能なコンステレーション軌道を検討する。