

宇宙用 10W 級国産高出力光増幅器の技術開発 Development of an Indigenous 10-W-Class High-Power Optical Amplifier for Space Applications

代表研究責任者 山川 史郎 宇宙航空研究開発機構
研究開発期間 令和 5 年度～令和 7 年度

【Abstract】

This research and development project aims to realize a domestically produced, space-qualified 10 W-class high-power optical amplifier for optical satellite communications. Optical amplifiers are essential to space optical links, since higher transmission power enables higher data rates while reducing terminal size, mass, and overall system power consumption. A previous Japanese mission relied on an overseas product, underscoring the need for technological autonomy.

In this project, an engineering-model optical amplifier equivalent to a flight design is developed and evaluated in simulated space environments. Target performance includes optical output exceeding 10 W, electrical-to-optical efficiency of at least 10%, and compliance with satellite requirements such as thermal-vacuum endurance and radiation hardness equivalent to more than 17 years in geostationary orbit. Building on a previously developed amplifier for the International Space Station, the project integrates advanced optical design with satellite-grade electrical, thermal, and reliability technologies to establish a domestic framework for supplying future flight models.

1 研究開発体制

- 代表研究責任者 山川史郎（宇宙航空研究開発機構）
- 研究分担者 佐藤洋平†（宇宙航空研究開発機構†）
谷 学††（株式会社ニコン††）
野田雅樹†††（三菱電機株式会社†††）
- 総合ビジネスプロデューサ 安藤俊行（三菱電機株式会社）
- ビジネスプロデューサ 板橋孝昌†（宇宙航空研究開発機構†）
油野法雄††（株式会社ニコン††）
安藤俊行†††（三菱電機株式会社†††）

- 研究開発期間 令和 5 年度～令和 7 年度

- 研究開発予算 総額 600 百万円

（内訳）

令和 5 年度	令和 6 年度	令和 7 年度
200 百万円	200 百万円	200 百万円

2 研究開発課題の目的および意義

本研究の目的は、出力 10W 級かつ高効率な宇宙用高出力光増幅器を国産技術として確立することである。宇宙光通信は、周波数に制約されずデータ量・通信ノード数の急増に対応可能な基盤技術として、データ中継、通信衛星コンステレーション、月周回拠点や深宇宙との通信など将来ミッションに不可欠であり、その競争力は光増幅器の出力に大きく依存する。これは、光通信機の通信速度や（機器寸法・質量を支配的に決定する）開口径が送信出力で律速されるためである。他方、光増幅器を高出力化すると、同時に電力消費も劇的に増えてしまい、システム全体の成立性に影響する。このため、高出力化と共に高効率化も強く求められている。

我が国は宇宙用高出力光増幅器を海外製品に依存しており、経済安全保障や技術的自在性の観点で課題を有する。本研究は、世界最先端の出力と効率を両立しつつ、耐放射線性や長寿命・信頼性を含む光増幅器技術の国産化を実現することで、国際競争力と自立性を強化するものである。また、Beyond 5G 時代の非地上系ネットワーク展開や新たな宇宙×ICT ビジネスの創出に貢献する戦略的意義を有する。

3 研究開発成果（アウトプット）

3. 1 排熱技術

波長が $1.55\mu\text{m}$ 帯である地上用の光ファイバ増幅器をベースに、各素子の排熱量のバランスを取り、排熱に最適な構造を開発する。一般的な衛星搭載品の動作温度である $0\sim+50^{\circ}\text{C}$ の範囲で動作するものとする。

また、衛星搭載に向けては小型・軽量であることが求められることから、目標サイズを $30\text{cm}\times 30\text{cm}\times 20\text{cm}$ 以下、 10kg 以下とし、それらも考慮した構造を検討し、排熱に優れた 10W 以上の出力を持つ光増幅器のエンジニアリングモデル（EM）を開発する。

1. 光学部

令和 5 年度に開発仕様書に基づき、ISS（国際宇宙ステーション）実証実験向け EM の設計をベースに光 HPA（高出力光増幅器）の光増幅部の構成を検討した。目標の増幅率達成のため、増幅段を 3 段構成とした。光増幅用 Er/Yb 共添加ファイバは将来の性能向上、コストダウン、キーパーツ国産化の期待から、国内製（フジクラ製）ファイバを採用した。各ファイバ長は、 1540nm 増幅効率が最大となるよう最適化した。目標の設計寿命対応のため、励起用レーザダイオードは高出力品（最大出力 35W）を採用した。

令和 6 年度から令和 7 年度にかけて光学部の試験モデル（エンジニアリングモデル相当品）の製造を進めた。組立を完了した試験モデルの常温、常圧下の開発試験（機能性能試験）を実施し、信号波長 1540nm 、 1560nm において目標出力 10W が得られることを確認した。

開発仕様については仕様明確化の目的で、第 2 回研究開発運営委員会（基本設計確認会）にて、OSNR（光信号対雑音比）要求を 26dB 以上と設定した。その後、検討作業等を進める中で参照帯域幅を設定する必要性を認識した。そこで、想定する受信器の設計として、内部に透過帯域幅 $\pm 2\text{nm}$ 程度以下の BPF（帯域通過フィルタ）を設定する見込みであることから、この $\pm 2\text{nm}$ （全幅 4nm ）を参照帯域として、新たに設定することとした。

2. 電気部

開発仕様書並びに令和5年度に実施した基本設計に従い、電気部の詳細設計、組み立ておよび要素試験を完了した。電気部は電源回路、制御回路および電流駆動回路を具備する。高排熱部品の排熱経路を確保するため、光学部から独立したスライス構造として、設計、製造を行った。

電源回路は、衛星システムからの一次電源電圧を受け、電流駆動回路部ならびに電気部内部の各回路への電源供給を行い、駆動回路は光学部の光増幅用ファイバの励起用レーザダイオードに対して二次電源電圧/電流に変換する。詳細設計ならびに単体による常圧下の開発試験において、励起用レーザダイオードを75%以上の電力効率で動作し、排熱に適した設計であることを確認した。

制御回路は電流、電圧、光パワー、温度モニタの各種テレメトリによる監視、また光学部のレーザダイオード制御およびフォトディテクタを介して、光電力一定制御、電流一定制御コマンドを可能とし、実システム運用に資する電流、電圧、光パワー、温度モニタの各種テレメトリ、コマンドインターフェースを具備し、機能試験において正常動作することを検証した。また、将来拡張として、テレメトリ、コマンドを通じた外部光アンテナとの連携による光電力一定制御も可能としている。

電気部に採用した各部品は高信頼、耐放射線特性を前提とした。熱設計においては、内部の部品配置を最適化して、ディレーティングを加味した上で全ての部品が、負荷条件下で許容ジャンクション温度を下回り、0～+50℃の範囲での動作を確保している。

3. 2 高効率化技術

電気－光変換効率を決定する主要要素である励起レーザダイオードを動作させる駆動回路について、小型化かつ高効率化に資する最適な配置検討や部品選定を実施し、様々な装置の効率化に関するノウハウを活用することで、光増幅器全体として電気－光変換効率 10%以上を目指す。

電流駆動回路については駆動方式ならび部品選定の最適化を行ない、小型化ならびに高効率化を行なった。電流駆動回路として 75%以上の電力効率を実現し、各要素部単体での試験結果から、光増幅器全体として電気－光変換効率 10%以上を達成する基盤技術を確立した。

電流駆動回路には、高効率化を実現するため、次世代半導体 Gallium Nitride High Electron Mobility Transistor (GaN HEMT)¹を導入し、消費電力を低減した。また、光学部と調整したレーザダイオードの電流および電圧インタフェースを元に、レーザダイオード毎にフライバック方式、フォワード方式など各種方式を適用したトレードオフを検討し、最適な駆動方式を採用した。

本開発において、駆動電流回路は高効率化とともに静止軌道衛星での長期間の運用に耐え得る高信頼性が求められる。このため、駆動電流回路を含む電気部は完全二重化に対応可能な構成とした。駆動電流回路基板および電源回路と制御回路を組み合わせた基板をそれぞれ一つのスライスとして、主系および従系の 4 スライスからなる構造となる。また冗長化した複数レーザダイオードをスイッチにより切り替えられる構成としており、高信頼化のため、一部電力増大も招いている。

単体試験では試験装置を用いて、10W 光出力時の規定となる電力インタフェース要求仕様に設定し、常圧での温度試験において電気部単体での消費電力が約 30W となった。光学部試験結果と合わせることで、全体として 100W 以下となる結果が得られた。

15 年間の設計寿命を考慮した場合、寿命最後で 100W を超える条件もあるが、冗長化および電気部機能の見直しによる対応が可能と考えられる。これらの結果より、電気－光変換効率 10%以上で光出力 10W 以上となる光増幅器の基盤技術を確立した。

¹ 窒素ガリウム高電子移動度トランジスタ。高耐圧であり、スイッチング周波数が高いため、高効率な電圧変換を実施できる。

3. 3 宇宙環境試験

光増幅器について、耐放射線試験や熱真空試験、振動試験等の宇宙環境試験を実施し、衛星搭載に必要な耐環境性を実証する。宇宙環境の条件としては静止衛星への搭載を前提とし、累計動作時間は一般的な静止衛星の設計寿命である 15 年以上とする。また、電気推進による軌道遷移を想定し、耐放射線性は 17 年相当以上とする。

1. 光学部

目標の設計寿命達成のため、信頼性試験の方針を検討した。寿命・故障率配分の光学部の割り当てを電気部と調整し、155FIT (Failure In Time) とした。設計当初はファイバコプラ類のいくつかがメーカーから FIT の値を得られておらず、暫定的に IEC (国際電気標準会議) 62380 の値を用いて算出したため、224FIT と不適合であった。メーカーにて実力値算出の試験を実施し、その値を適用した結果、光学部全体で 75FIT まで低減することができ、目標値を達成できた。

光学部の寿命試験 (光増幅部の ON/OFF 試験) を実施し、GEO (静止軌道) 運用を想定した 10,000 サイクルを令和 6 年に完了した。令和 7 年は、参考評価として、LEO (低高度軌道) を想定した 70,000 サイクルを完了した。目標回数の設定は、GEO 向けを想定し、10,000 サイクル (地球周回回数 1 cyc/日×15 年運用×安全率 2) とした。エキストラで LEO 向けを想定し、70,000 サイクル (地球周回回数 14 cyc/日×7 年運用×安全率 2) とした。試験セットアップを構築し (ニコン予算)、70,000 サイクルを完了した。

試験モデルの耐環境性を確認するため、温度サイクル試験を実施した。低温時に光学部の不具合事象が発生し、試験は中断となった。不具合事象箇所、原因を特定し、対策案を決定した。試験モデルへ対策案処置し、低温時の不具合事象の改善を確認した。不具合事象の改善後、常温、低温、高温での 10W 出力動作を確認した。本件の対応に期間を要したため機器全体での環境試験 (耐機械環境・熱真空環境試験) は未了となった。

2. 電気部

電気部においては、耐振動衝撃への高い耐性を意図した詳細設計ならびに製造を実施した。電気部の剛性について解析し、固有振動数が剛性要求以上であることを満足し、共振を避け振動耐性を確保できていることを確認した。また電気部を構成する基板の振動時の応力解析を実施し、コンポーネントへの最大予測荷重である最大応力に対して、構造が耐えられる許容応力が上回り、安全余裕があることを示した。

また放射線解析においても、詳細設計の結果、目標である 17 年相当以上の耐性を保有することを確認した。衛星軌道条件ならびに衛星構体厚みを加味した放射線条件を元に、電気部構造から各部のトータルドーズ量を見積もり、トータルドーズ量が高いエリアに配置した部品は十分に高い放射線耐性を持つデバイスであり、電気部全体としても問題ないことを確認している。

光学部と組み合わせた光増幅器全体組立および耐機械環境・熱真空環境試験には至らなかったが、詳細設計におけるインタフェースならびに各要素部における試験の結果を反映して、常圧での環境試験ならび各種機能試験を実施した。光学部における電気インタフェースを模擬した電子負荷による電力測定結果と、光学部実測部を元にしたデータを取得している。また今後の耐機械環境・熱真空環境試験にむけた詳細試験計画の策定ならびに治具などの準備についても実施した。

4 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた取組みの実施状況

- ① アウトカム目標達成のため、最初の具体的なユーザ候補である準天頂衛星システムと実現時期を含めた情報共有を進めつつ本研究を進めてきた。事業終了時点でスケジュール上の齟齬は発生していない。
- ② 事業期間を通して、海外の研究開発動向や民間小型衛星コンステレーション事業者、シスルナ通信等の事業動向・ニーズの調査を継続してきた。そのうえで、本研究成果の主要な適用先は、根強い需要がありつつも比較的競合他社が少ない静止軌道ベースの光通信システムと定め、これを着実に抑えたうえで将来の発展形として低軌道通信衛星コンステレーションに展開していく計画として、本研究開発を進めてきた。製品の設計作業においては、安定して継続的な製造体制を維持できるよう、主要部品であるアクティブファイバに国産品を選定する、海外製部品を使用する部分はセカンドソースを確保可能である箇所に限る、などの配慮を行った。
- ③ 参加する3者間で協力協定を締結し、これに役割分担を明記した。また、機器設計においては、各社の担当箇所間のインタフェース管理文書を制定・維持管理し、これに基づき各社の設計が行われる仕組みを構築しつつ進めた。
- ④ 著名なレーザー工学・光ファイバ・宇宙通信システムの専門家からなる研究開発運営委員会を構築し、定期的にレビューを受けつつ事業を進めた。
- ⑤ 本事業期間において総務省からのシンポジウムや共同実証実験への参加打診の実績は発生しなかったが、あれば対応可能な体制を敷いて事業を進めた。
- ⑥ 本研究開発における知財権確保のため、考案したアイデアを3件出願し、うち早期に出願した信頼性に係る1件については、プロジェクト期間中での特許を取得した。

5 政策目標（アウトカム目標）の達成に向けた計画

研究開発期間中に顕在化した技術課題への対応に期間を要したため機器全体での環境試験が未了となっている。よって、まずは新たな外部資金を得て、この環境試験の完了を目指す。そのうえで、JAXA-STEPS（JAXA 宇宙技術実証加速プログラム）などの機会を用いて宇宙実証を目指すこととする。

政府ミッションの需要をきっかけとして本製品が多くの光通信ミッションに採用されることにより、我が国の宇宙活動の自在性が確保されるほか、宇宙光通信事業を展開する国内事業者の国際競争力強化などの波及効果が予想される。

6 査読付き誌上発表論文リスト

(該当なし)

7 査読付き口頭発表論文（印刷物を含む）リスト

- [1] Hiroki Kobayashi et al(Nikon Corporation), “Performance and Reliability of 10 W-Class High-Power Optical Amplifiers for Space Laser Communications on Geostationary Satellites” 2025 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS) (Kyoto, Japan) (29 October 2025)

8 その他の誌上発表リスト

(該当なし)

9 口頭発表リスト

- [1] 佐藤 洋平 他、“光衛星間通信システム（LUCAS）の初期運用状況について”、第 67 回宇宙科学技術連合講演会（富山市）（2023 年 10 月 17 日）
- [2] 小西 良明 他、“静止衛星向け 10W 級光増幅器の研究開発”（2C19）、第 68 回宇宙科学技術連合講演会（姫路市）（2024 年 11 月 6 日）
- [3] 小林 啓紀 他、“宇宙空間光通信実証用 単一横モード偏波保持 10 W ファイバー増幅器の開発 電子情報通信学会 ソサイエティ大会”（岡山市）、（2025 年 9 月 11 日）

10 出願特許リスト

- [1] 望月輝、光増幅器および制御方法、PCT、2024 年 3 月 27 日
- [2] 三浦浩志、小西良明、吉田剛、空間光通信装置およびシステム、日本、2025 年 3 月 15 日
- [3] 清水秀徳、小西良明、望月輝、光空間システムおよび装置、日本、2026 年 2 月 16 日

11 取得特許リスト

- [1] 望月輝、光増幅器および制御方法、日本、2026 年 3 月 5 日、特許第 7829826 号

12 国際標準提案・獲得リスト

(該当なし)

13 参加国際標準会議リスト

(該当なし)

14 受賞リスト

(該当なし)

15 報道発表リスト

(該当なし)

研究開発による成果数

	令和5年度	令和6年度	令和7年度
査読付き誌上発表論文数	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)	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (1件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)
口頭発表数	1件 (0件)	1件 (0件)	1件 (1件)
特許出願数	1件 (1件)	1件 (0件)	1件 (0件)
特許取得数	0件 (0件)	0件 (0件)	1件 (0件)
国際標準提案数	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)
受賞数	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)
報道掲載数	0件 (0件)	0件 (0件)	0件 (0件)

	合計
査読付き誌上発表論文数	0件 (0件)
査読付き口頭発表論文数 (印刷物を含む)	1件 (1件)
その他の誌上発表数	0件 (0件)
口頭発表数	3件 (3件)
特許出願数	3件 (1件)
特許取得数	1件 (0件)
国際標準提案数	0件 (0件)
国際標準獲得数	0件 (0件)
受賞数	0件 (0件)
報道発表数	0件 (0件)
報道掲載数	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 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こと。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こと。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。