

# 宇宙光通信用耐放射線性Er/Yb共添加光ファイバ

光応用技術R&Dセンター 西村 亮<sup>1</sup>・奥出 聡<sup>1</sup>・市井 健太郎<sup>2</sup>

## Radiation-hardened Er/Yb Co-doped Optical Fibers for Optical Communications in Space

R. Nishimura, S. Okude, and K. Ichii

宇宙衛星間通信は通信の大容量化が求められており、光による通信の実用化が進められている。特に低軌道衛星と静止軌道衛星間は距離が離れているため、10 W級の高い光出力が必要とされている。そのような10 W級の光増幅が可能な光ファイバとして、Er/Yb共添加光ファイバが知られている。市場においては、海外のいくつかのメーカーから宇宙用に耐放射線性を持ったEr/Yb共添加光ファイバが販売されているが、国内では今のところ上市されていない。そこで当社は耐放射線性を持つEr/Yb共添加光ファイバを開発し、10 W級の光出力が得られることを確認した。

Inter-satellite communication in space requires higher data transmission capacity, and the practical application of optical communication is being advanced. Particularly, long distance communication between low Earth orbit satellites and geostationary orbit satellites requires high optical output of 10 W-class. Er/Yb co-doped optical fibers are known as suitable media capable of achieving 10 W-class optical amplification. In the commercial market, radiation-hardened Er/Yb co-doped optical fibers for space applications are produced by a few foreign optical fiber manufacturers, and domestically produced ones are not available so far. Therefore, we have developed radiation-hardened Er/Yb co-doped optical fibers and confirmed that they can achieve 10 W-class optical output.

### 1. ま え が き

衛星間通信において従来のRadio Frequency (RF) 通信は0.5-30°の大きなビームの広がりを持ち、混信を防ぐために使用可能な周波数帯域が限られている<sup>1)</sup>。商用利用されているKa帯 (26.5-40 GHz) の帯域はひっ迫しつつあり、Ka帯よりも広帯域通信可能なQ帯 (33-50 GHz)、V帯 (40-75 GHz) も開発が進められているものの通信の高速化に限界がある。大きなビームの広がり角は信号の減衰が著しく、長距離通信では不利となる。一方光通信はビームの広がり角が0.006°未満の場合が多いため、RF通信と比較すると混信のリスクが低く、周波数帯域の法的な制約が無い。通信速度の面で見ても衛星光通信は真空中に光を通すため、地上の光ファイバ通信網と比較して長距離伝送であればあるほど低遅延で通信が可能であり、例えば地上での通信距離が3000 km以上離れる場合は、地上から550 kmの低軌道衛星コンステレーションを介した通信の方が低遅延になると試算されている<sup>2)</sup>。これらの理由から光による衛星間通信の需要が高まっている<sup>3,5)</sup>。衛星光通信の市場規

模は2024年に\$933.7 millionからCAGR 45.4%で成長し、2034年には\$36.4 billionに達するとの試算もある<sup>6)</sup>。衛星間の、特に低軌道と静止軌道間の通信においては低軌道同士よりも距離が遠く離れているため、10 W級の高出力光増幅器が必要となる<sup>7)</sup>。また低軌道と静止軌道間のように距離が離れている場合は、出力を高めるだけでなく偏波保持型の光ファイバを増幅に用いることで送信と受信の信号を分離することができ、高い感度で信号を処理可能である。そのため、偏波保持可能なPANDA型の増幅用ファイバが必要となる。また静止軌道衛星は低軌道衛星と比較すると打ち上げに数倍以上のコストがかかるため、より長期で運用される。そのため、特に静止軌道衛星用の光増幅器には、より高い耐放射線性が求められる。放射線劣化によってシステムの光出力が低下する場合でも、投入する電力を増やすことで一定程度は光出力強度を維持可能であるが、宇宙は地上と違って空気の熱伝導を使った放熱を行うことができないため、高い電力光変換効率を実現し発熱を抑制することも同時に求められる。

光通信波長としては1550 nm帯も広く適用されつつあるが、地上用でこの波長帯域の増幅に用いられるErbium doped fiber (EDF) は10 W級の出力を得ることが困難で

1 光通信研究部

2 光通信研究部 部長

## 略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
PANDAファイバ	PANDA (Polarization-maintaining AND Absorption-reducing) 型偏波保持光ファイバ	コアの両側方に円形の応力付与部を持つ偏波保持光ファイバ.
ダブルクラッドファイバ	Double clad fiber	クラッドが2層あり, コア, 内側クラッド, 外側クラッドの順に屈折率が高い光ファイバ. 主に増幅用ファイバでコアに添加された希土類元素を効率よく励起するために使われ, 多くの場合, 外側クラッドは低屈折樹脂で構成される.
誘導放出	Stimulated emission	光などで励起された電子が基底状態に遷移する際に外部から入力された信号光と同一の波長, 位相でエネルギーを放出する現象.
プリアンプ	Pre-amplifier	出力の低い低ノイズの増幅器.

ある. 本稿では, 同波長帯で10 W級の出力を得ることができるErbium Ytterbium co-doped fiber (EYDF) を用いた耐放射線性ファイバについて報告する.

## 2. 耐放射線性光ファイバ

通信用の汎用シングルモード光ファイバは, コアにゲルマニウムが添加されている. このファイバに放射線が照射されると, ゲルマニウムを添加したことによって多くの欠陥が生成され, コアを伝搬する光は欠陥による吸収損失を受けるため耐放射線性が低い. そこで, コアを純粋シリカガラス, クラッドにフッ素を添加することで, ゲルマニウムを添加したことによる欠陥生成がなくなるため耐放射線性が向上する. さらにコアにもフッ素を添加することでシリカガラス由来の欠陥生成も抑制されるため, より高い耐放射線性が得られる<sup>8,9)</sup>. これらの技術を適用したコア, クラッドともにフッ素を添加した高耐放射線性光ファイバは, 世界最大規模の素粒子物理学の研究所である欧州原子核研究機構 (CERN) で採用されている<sup>10)</sup>.

一般的なEYDFはドーパントとしてエルビウムとイッテルビウムのほか, これらの希土類元素をシリカガラスに分散させる役割などをもつリンも添加される. シリカガラス中のリンは放射線が照射されるとP1欠陥と呼ばれる1570 nmをピークとする吸収損失が発生する. 図1では積算放射線量100 kradの放射線<sup>11)</sup> の照射による損失増加を示す. 100 kradの積算放射線量は, 静止軌道衛星10年間でアルミ厚4 mmの衛星筐体内に入り込む放射線に相当する. 通信波長帯1550 nm付近では3 dB/m程度の損失増加が発生す

ることがわかる. EYDFは増幅用光ファイバなので一般的な通信用光ファイバと異なり使用長は数m程度と短いものの, 仮に7 mの使用長でも20 dBを超える損失, すなわち入力光のうち1%しか出力されないほどの非常に高い損失である. このため, 静止軌道衛星のように10年以上のミッション期間が求められる場合では, 放射線による損失増が大きいEYDFを使用することは困難である. 上述の課題に対し我々は, あえてゲルマニウムを添加することでP1欠陥を大幅に抑制し, EYDFの耐放射線性を向上させる手法を提案した<sup>12)</sup>. 前述したように, ゲルマニウム添加によって生じる放射線誘起欠陥吸収は通信用としては大きな損失である一方, P1欠陥による吸収損失と比較すると2桁程度小さい値となる. むしろ放射線照射によるゲルマニウムの欠陥生成とP1欠陥生成は競合反応の関係にあるため, P1欠陥を抑制する効果の方がより大きく, 全体として耐放射線性が大きく向上する. 図1に示すように, ゲルマニウム添加したEYDFでは, 通信波長帯1550 nm付近における放射線による損失増加が1.0 dB/m未満に抑制された.

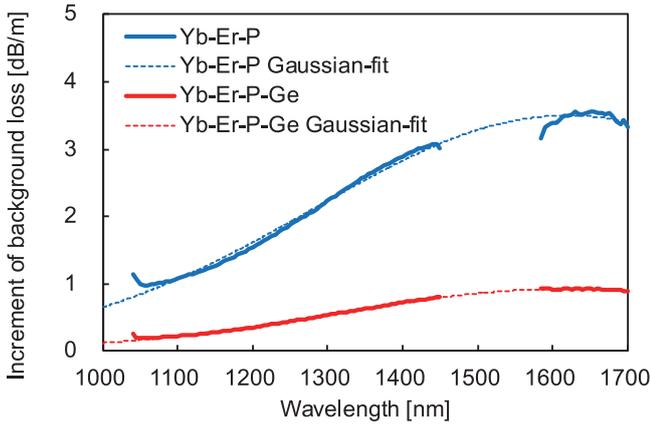


図1 積算放射線量100 kradの照射後の背景損失増加量  
Fig.1. The increment of background loss after cumulative dose of 100 krad radiation exposure.

### 3. EYDF増幅原理

図2にEYDFのエネルギー準位図を示す。EYDFはEDFと同じくエルビウム（ガラス中では三価のイオン）の持つ増幅波長帯を用いて、通信波長帯である1550 nmの増幅が可能となる一方で、イッテルビウムが添加されているため励起光は高い励起光の吸収特性を持つイッテルビウム（同じく三価のイオン）で吸収させることができる。本稿での増幅特性評価では915 nmの励起光でイッテルビウムを $^2F_{5/2}$ 準位へ励起させた後、エルビウム-イッテルビウム間のエネルギー移動によりエルビウムを $^4I_{11/2}$ 準位に励起する。励起されたエルビウムは $^4I_{13/2}$ に無輻射緩和し、 $^4I_{13/2}$ - $^4I_{15/2}$ 準位間で反転分布を形成、誘導放出により通信波長帯の1550 nmの信号光が増幅される。リンはエルビウムやイッテルビウムをシリカガラス中に分散させるだけでなく、イッテルビウムからエルビウムへのエネルギー移動効率を高める観点でも高い濃度での添加が必要となる<sup>13)</sup>。リンの添加が不十分でエネルギー移動効率が低い場合、励起されたエネルギーはエルビウムに移ることなく、イッテルビウ

ムが $^2F_{5/2}$ から $^2F_{7/2}$ へ輻射遷移するため、光増幅に関与しない1  $\mu$ m帯の自然放射増幅光（ASE:amplified spontaneous emission）が発生し、最終的に熱に変換される。1  $\mu$ m ASEが抑制されておらず増幅効率が低い場合、同じ目標の出力を得るためにより多くの熱を発生させるため1  $\mu$ m ASEの抑制がEYDFの一つの課題となる。EYDFでは適切なドーパント組成の調整、コア径等の設計により、1  $\mu$ m ASEを抑制した高効率な増幅が可能となる<sup>14)</sup>。

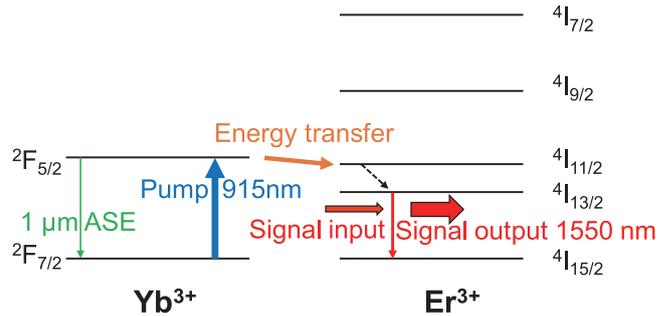


図2 EYDFエネルギー準位図  
Fig.2. Energy level diagram of EYDF.

### 4. 増幅特性評価系

本稿での増幅特性評価系は図3に示す通り、915 nmの励起光を用いた後方励起型を用いた。波長1550 nmの種光をプリアンプで増幅し、EYDF入射時点で50 mW程度になるように調整した。波長915 nmの励起光は、ダブルクラッドファイバからEYDFのガラスクラッド全体に入射される。EYDFで増幅された光はシングルモードファイバから出射され、その出力強度を測定することで評価した。イッテルビウムからエルビウムへのエネルギー移動効率が低いことで発生する1  $\mu$ m ASEは、コアを伝搬する光を前方側のカプラで分岐し、パワーメータで評価した。

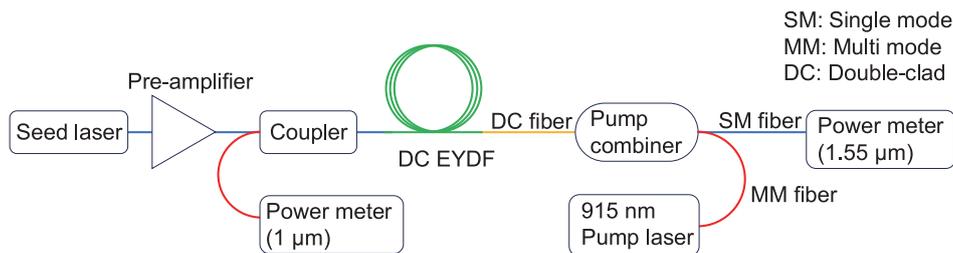


図3 増幅特性評価系  
Fig.3. Amplifier evaluation system.

## 5. 増幅特性評価結果

表1に開発したゲルマニウムドープしたEYDFと、市販されている他社製耐放射線性のセリウムドープしたEYDFの諸元を示す。コア径や吸収量などの基本的な特性においては、両者に顕著な差異は見られなかった。一方で、応力付与部の径や位置など断面構造から推定計算された開発品の複屈折は、他社製品のカタログ値より高いことがわかった。この結果は、開発品が偏波保持特性において優れた性能を有する可能性を示唆している。なお、偏波保持特性評価には、アンプユーザが実際に使用する10 W出力などの目標の動作状態での評価がより正確な指標となり、今後さらなる検証が必要である。

図4に積算放射線量100 kradの放射線を照射する前後の増幅特性を示す。出力の値はEYDFの後方側ファイバの損失を考慮したEYDFの出力端換算での値を示す。放射線照射前は励起光25 Wで10.1 Wの高出力を達成した。また放射線照射後であっても8.7 Wの高出力を維持しており、放射線の照射による出力の低下は、目標値である20%以内の低下に対して14.5%の低下に留まる良好な結果であった。放射線照射前は1  $\mu$ m ASEは励起光25 Wでもほとんど上昇しておらず、放射線照射後の励起光25 W時点で0.2 W未満のわずかな上昇に留まった。本報告の増幅特性評価系では、最大励起光強度を27 Wまでしか投入していないが、励起光強度に対する出力光強度の直線性も高いことから、10 W級を超える高い出力が得られる可能性がある。あるいは、放射線による出力の低下にあわせて励起光を27 Wよりも高くすることで、10 W級の出力を放射線照射後も維持可能であると考えられる。

表1 EYDF諸元<sup>15)</sup>

Table 1. EYDF specifications.

項目	当社開発品 (典型値)	他社 (仏 Exail社) IXF-2 CF-EY-PM-12-130-RAD
耐放射性ドーパント	Ge	Ce
コア径	13.8 $\mu$ m	12 $\pm$ 1 $\mu$ m
クラッド径	125 $\mu$ m	125 $\pm$ 3 $\mu$ m
偏波保持構造	PANDA	PANDA
複屈折	2.0 $\times$ 10 <sup>-4</sup>	> 1 $\times$ 10 <sup>-4</sup>
クラッドYb吸収量	4.33 dB/m (915nm)	2.6 $\pm$ 0.6 dB/m (915nm)
コアEr吸収量	32.2 dB/m (1530nm)	50 $\pm$ 10 dB/m (1536nm)

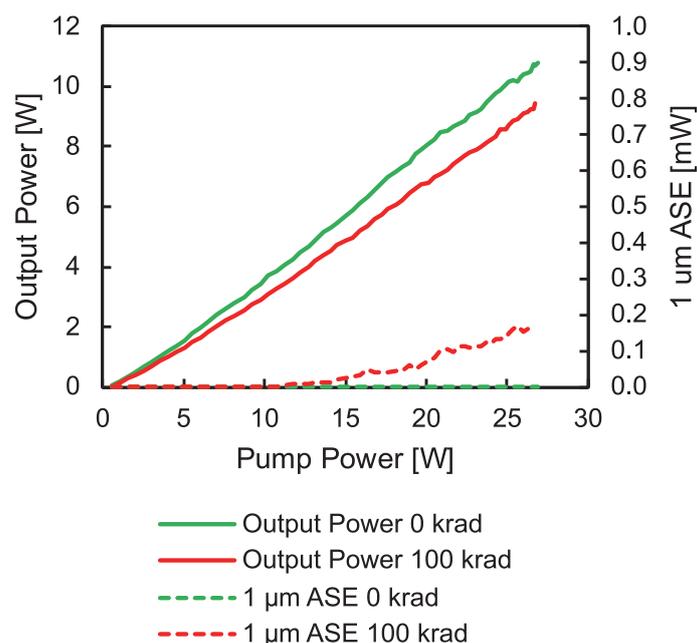


図4 積算放射線量100 krad照射前後の増幅特性

Fig.4. Amplification characteristics of EYDF before and after cumulative dose of 100 krad radiation exposure.

## 6. むすび

励起光25 WでEYDFの出力端換算で10.1 Wの高効率増幅可能なEYDFを開発した。ゲルマニウムを共添加することで高い耐放射線性を示し、静止軌道衛星10年分に相当する放射線の照射後であっても14.5%の出力低下に留めることができた。

今後は10 W出力させた状態での偏波保持特性評価を行い、アンプユーザが実際に使用する状態での偏波保持特性の優位性を確認する。また、増幅用光ファイバのより大きな需要が見込まれる低軌道衛星向けに、数W程度の低出力増幅に最適な耐放射線性EYDFを開発していく。

## 謝 辞

本研究は、宇宙航空研究開発機構、木村祥太博士、橋本洋輔博士、水田栄一様、栗野穰太博士、および豊田工業大学齋藤和也教授の協力のもと行った。

## 参考文献

- 1) F. Khatri: "Laser communications to enable space exploration," NASA Technical Report Service, 20240016424, 2024
- 2) M. Gioulis et al.: "Comprehensive optical inter-satellite communication model for low earth orbit constellations: analyzing transmission power requirements," Preprints.org, 0379.v1, 2025
- 3) <https://www8.cao.go.jp/space/gijutu/siryuu.pdf> (2025.3.3現在)
- 4) [https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei\\_fy05/honbun\\_fy05.pdf](https://www8.cao.go.jp/space/plan/plan2/kaitei_fy05/honbun_fy05.pdf) (2025.3.3現在)
- 5) M. Toyoshima et al.: "Recent trends in space laser communications for small satellites and constellations," J. Lightwave Technol., vol.39, no.3, pp.693-699, 2021
- 6) <https://www.gminsights.com/industry-analysis/satellite-laser-communication-market> (2025.3.12現在)
- 7) 小西ほか:「静止衛星向け10 W級光増幅器の研究開発」, 第68回宇宙科学技術連合講演会,2C19,2024
- 8) 角田ほか:「耐放射線性光ファイバーの開発」,応用物理,55巻,3号,pp.248-252,1986
- 9) 愛川ほか:「耐放射線シングルモード光ファイバ」,フジクラ技報,第113号,pp.10-14,2008
- 10) 愛川ほか:「耐放射線シングルモード光ファイバ」,フジクラ技報,第124号,pp.51-52,2013
- 11) JAXA 共通技術文書JERG-2-141,2010
- 12) Y. Kobayashi et al.: "Effects of Ge co-doping on P-related radiation-induced absorption in Er/Yb-doped optical fibers for space applications," J. Lightwave Technol., vol.36, no.13, pp.2723-2729, 2018
- 13) J. E. Townsend et al.: "Yb<sup>3+</sup> sensitized Er<sup>3+</sup> doped silica optical fiber with ultrahigh transfer efficiency and gain," Electron. Lett., vol.27, no.21, pp.1958-1956, 1991
- 14) Y. Kobayashi et al.: "Effect of P-to-rare earth atomic ratio on energy transfer in Er-Yb-doped optical fiber," J. Lightwave Technol., vol.38, no.16, pp.4504-4512, 2020
- 15) S. Kimura et al.: "Radiation-hardened Er/Yb co-doped fiber with Ge doping for high-power amplifiers," International Conference on Space Optics, 275, 2024