

赤外域ファイバーオプティクス：要素技術開発および惑星探査機・着陸機等 搭載用小型分光器への応用検討

Broadband mid-IR fiber optics instruments for solar system exploration missions

(地球電磁気・地球惑星圏学会推薦)

代表研究者	東北大学	中川 広務	Tohoku University	Hiromu NAKAGAWA
協同研究者	東北大学	笠羽 康正	Tohoku University	Yasumasa KASABA
	富山大学	片桐 崇史	Toyama University	Takashi KATAGIRI
	東北大学	松浦 裕司	Tohoku University	Yuji MATSUURA
	名古屋大学	平原 靖大	Nagoya University	Yasuhiro HIRAHARA

We present a concept and laboratory demonstration of instruments based on ‘broadband mid-infrared (IR) hollow-optical fiber technology’ for the explorations of our solar system. The hollow-fiber techniques developed by Tohoku University provide sufficiently low loss transmission with 0.5 dB/m at 10 micron. In this paper, we demonstrate the feasibility studies for (1) the improvement of optical output in metal hollow-optical fibers for mid-IR light, (2) rectangular hollow waveguide branching device with multi-mode interferences for mid-IR, and (3) mid-IR heterodyne spectroscopic technique by using the hollow-optical fibers. For (1), our simulations confirmed the concept and design of the loss reduction in lower temperature environment. In 77 K, the numerical results showed that metal hollow-optical fiber remarkably improved the optical output up to 2.8 dB/m. We also manufactured a lab-scale prototype model and confirmed the improvement of the output. For (2), our waveguide branching device successfully achieved a clear beam pattern divided into two or three maxima at 7.0 and 10.6 micron in a distance of 20-25 cm, as predicted by the numerical simulation.

研究目的

本研究は、急激に進歩しつつあるファイバー技術を基礎とした中間赤外線ファイバーオプティクスの要素技術を開発・評価し、またこれを援用した惑星探査を目指す次世代中間赤外ファイバー分光器群の基礎検討を行うことを目的としたものである。

このファイバーは東北大・富山大チームが開発成功した中間赤外用中空ファイバーであり、チューブ内側面を銀コーティングして赤外光を反射伝送させることで高効率伝送 (0.5 dB/m 以下) を達成している。芯材の透過特性に依存せず赤外光に留まらず幅広い波長にも適用可能であることが特徴であり、医学分野へ応用されつつあるものを将来惑星探査へ

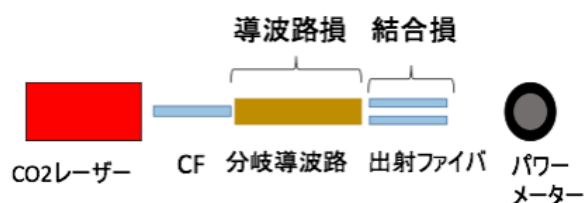
資する狙いである。本研究では、(1)ファイバー光路結合・分割技術および真空技術等の要素開発、(2)ファイバー技術を援用する小型・高安定の宇宙機搭載赤外分光器の基礎検討について成果を報告する。

研究経過

ファイバーの直接結合による光路結合・分割技術の実現に向け、矩形中空導波路内における多モード干渉を利用した光分岐デバイスを提案し、その製作、評価を行った。このデバイスは、入力ファイバ径の2倍の幅をもつ矩形導波路の中央部にファイバを結合することで、導波路内に多モードを励振し、そのモード間干渉で分岐を行うものである。入射波長

10.6 μm に対する出射光ニアフィールドパターンを得ることができ、シミュレーション予測通りに導波路長により 3 分岐・2 分岐していく様子が実証された(図 1)。また、入射波長 7.0 μm に対するものと比較することで、光の波長によってパワー分布が大きく変化することが確認できた。

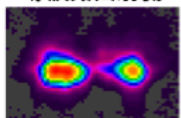
実験系



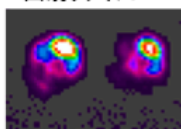
②矩形導波路25 cm

・導波路出射側

導波路損: 1.18 dB



・出射ファイバ



	R	L
分岐比	53.4	46.6
導波路損 + 結合損 (dB)	5.60	4.85
結合損 (dB)	4.41	3.70
結合損-3 dB	1.41	0.70

図 1. ファイバ光路分割試験 (生田目他)

一方、中空ファイバを加工した合分光ファイバカップラを提案した。提案するファイバカップラは、2 本の金属内装中空光ファイバの側面を研磨し、研磨した面を張り合わせることで作製する。カップラを設計するにあたり、カップラに光を入射した時の電界分布をビーム伝搬法シミュレーションソフトウェア Rsoft Beam PROP を用いて解析したところ、一方のファイバから他方のファイバに安定したモードが移行し、約 10mm の結合長において 95% の結合効率が見通しを得ることができた。現在構築中の試作機セットアップ外観図を図 3 に示す。

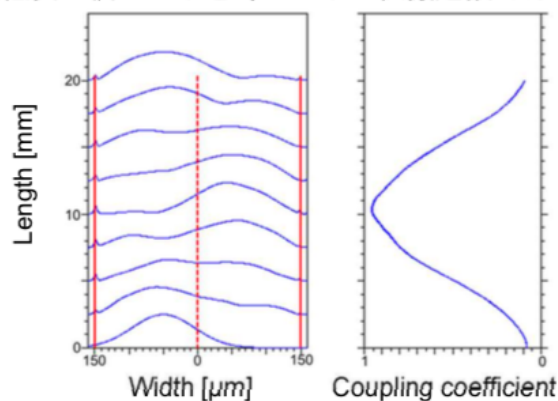


図 2. 界分布と結合効率 (加藤他)

Experimental setup

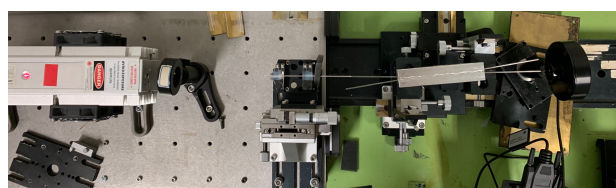
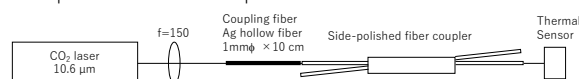


図 3. ファイバカップラ試作機セットアップ (片桐他)

また、常温および真空用レンズホルダの設計・開発を行い、これを用いたファイバーの性能評価光学系の構築を進めた。複数ファイバ間を接続する低損失の「カップリング法」を確立し、長光路への適用可能性の拡大とより柔軟な光路設計を可能とした。具体的には、ファイバー内に物質が詰まっていない中空ファイバーの端面へ直径 2mm の AR コート Ge 窓を接着した SMA コネクタを装着し、「赤外透過窓材」による蓋で大気圧を遮断する構造とした。これにより、「SMA コネクタ同士の結合」という光軸間の安定性が保たれる方法でのファイバー連結が可能となり、またファイバー端面での真空保持も安定して可能となった。これらを用いて、ファイバー特性の改善検討にも着手した。具体には、 10^{-2} Pa に真空減圧のち液体窒素を流入して 77K に冷却できる試験システムを構築したことで、冷却によって透過率は約 10% 程度改善がみられた(図 4)。この結果は銀(Ag)薄膜の低温電気伝導度、および中空ファイバー内の光伝搬に関するドルーデモデルと整合的(図 5)で、この手法の有効性を確認することができた。

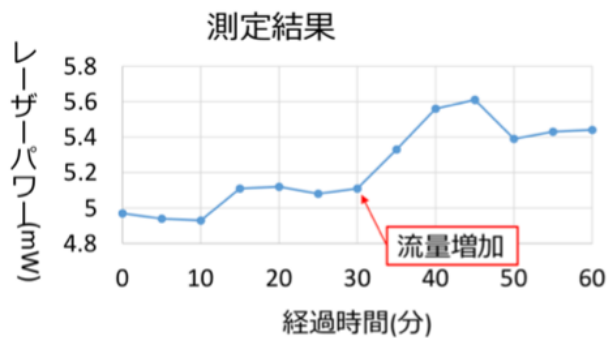


図 4. 真空冷却測定結果 (Ito et al., 2019)

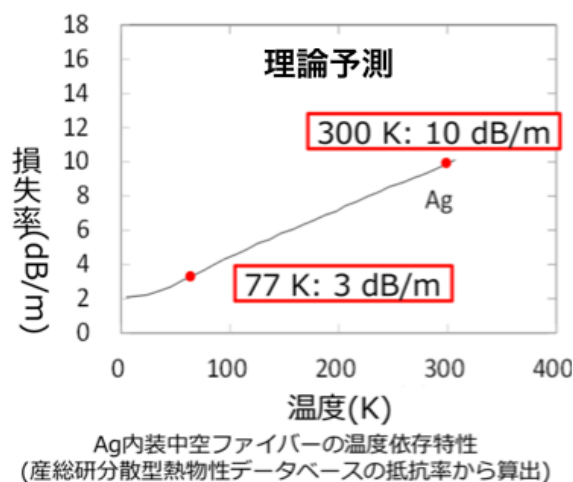


図 5. Ag 内装中空ファイバ温度依存特性 (Ito et al., 2019)

また、宇宙搭載赤外分光器（レーザー分光、レーザーヘテロダイン分光）への援用検討を開始した。上述したファイバカップラを応用したヘテロダイン混合の前段階として、ファイバを経由した光導入によるビームスプリッタヘテロダイン混合強度の評価試験を進めた。内側面への光入射角が大きいと伝送損失が増大するため、入射角度と曲げ半径に制約がある。想定する光学系を構築し（図 6）、ヘテロダイン信号受信に成功している。現在は、入射・透過効率や出射ビーム形状を実測して、具体的な光路設計の基礎となる評価条件・最適化に資する基礎データを取得しつつある。今夏秋の火星大接近に合わせたハワイでの火星試験観測に向けて、上記のファイバ光学技術を援用して著しい小型化・高効率化・高安定化を目指す。

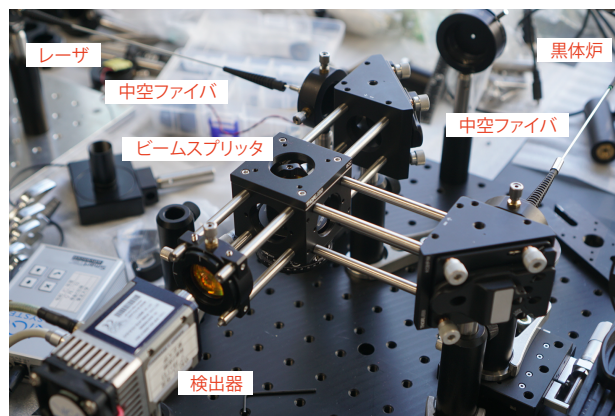


図 6. 中空ファイバを用いたレーザーヘテロダイン光学系。

研究の発表

口頭発表

- ・ 加藤 仁教, 松浦 祐司, 片桐 崇史, “中赤外レーザー用研磨型中空光ファイバカップラ”, レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会, 仙台、2020 年 1 月.
- ・ 生田目浩至, 松浦祐司, “中赤外域で機能する矩形中空導波路多モード干渉型分岐素子”, レーザー学会学術講演会第 40 回年次大会, 仙台、2020 年 1 月.
- ・ Nakagawa, H., Y. Kasaba, Y. Hirahara, Y. Matsuura, T. Katagiri, R. Ito, Y. Yokoyama, K. Namatame, I. Murata, S. Tsukada, K. Takami, A. Yamazaki, “Broadband mid-IR fiber optics instruments for solar system exploration missions”, Space Science Symposium, ISAS/JAAXA, 2020 年 1 月.
- ・ Ito, R., Y. Hirahara, Y. Matsuura, K. Takami, H. Nakagawa, Y. Kasaba, A. Yamazaki, “Transmittance measurement of mid-infrared Hollow core fiber at cryogenic temperature”, Society of Geomagnetism and Earth, Planetary and Space Sciences: 2019 fall meeting, Kumamoto, 2019 年 10 月.

誌上発表 (なし)