

R009-26

Zoom meeting D : 11/2 AM1 (9:00-10:30)

10:00-10:15

## 中間赤外中空ファイバを用いたレーザーヘテロダイン分光器の信号取得効率の評価

#塚田 悟輝<sup>1)</sup>, 中川 広務<sup>2)</sup>, 村田 功<sup>3)</sup>, 平原 靖大<sup>4)</sup>, 笠羽 康正<sup>5)</sup>, 片桐 崇史<sup>6)</sup>, 松浦 祐司<sup>7)</sup>, 宮本 明歩<sup>1)</sup>, 山崎 敦<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup>東北大・理, <sup>2)</sup>東北大・理・地球物理, <sup>3)</sup>東北大院・環境, <sup>4)</sup>名大・院・環境・地球惑星, <sup>5)</sup>東北大・理, <sup>6)</sup>富山大, <sup>7)</sup>東北大・医工学, <sup>8)</sup>JAXA/宇宙研

## Evaluation of the efficiency of the mid-IR laser heterodyne spectrometer using hollow fibers

#Satoki Tsukada<sup>1)</sup>, Hiromu Nakagawa<sup>2)</sup>, Isao Murata<sup>3)</sup>, Yasuhiro Hirahara<sup>4)</sup>, Yasumasa Kasaba<sup>5)</sup>, Takashi Katagiri<sup>6)</sup>, Yuji Matsuura<sup>7)</sup>, Akiho Miyamoto<sup>1)</sup>, Atsushi Yamazaki<sup>8)</sup>

<sup>1)</sup>Science, Tohoku Univ., <sup>2)</sup>Geophysics, Tohoku Univ., <sup>3)</sup>Environmental Studies, Tohoku Univ., <sup>4)</sup>Earth&Planetary Sciences, Nagoya Univ., <sup>5)</sup>Tohoku Univ., <sup>6)</sup>Toyama Univ., <sup>7)</sup>Biomedical Engineering, Tohoku University, <sup>8)</sup>JAXA/ISAS

The mid-IR laser heterodyne spectroscopy provides high spectral resolution  $> 10^6$ , which is much greater than other direct spectroscopic measurements, by combining an IR source from the observing target and an IR laser, such as a quantum cascade laser (QCL) and/or a CO<sub>2</sub> gas laser, as the local oscillator (LO). We have developed the mid-infrared laser heterodyne spectrometer MILAHI (Mid Infrared LAsER Heterodyne Instrument) mounted on our dedicated Tohoku 60 cm telescope (T60) at the summit of Mt. Haleakala, Hawaii, which has successfully operated for measurements of Venusian and Martian atmosphere (Nakagawa et al., 2016, Takami et al., 2020).

The two beams are combined at the ZnSe beam splitter and then focused onto a HgCdTe photomixer. A precise optical alignment is required to combine two beams. Since the observable wavelength of a single feedback (FB)-QCL is restricted in the range of several cm<sup>-1</sup>, switching LOs is needed in order to observe various molecular lines. A CO<sub>2</sub> gas laser covers some parts of the wavelength ranges of 9-12  $\mu$ m and four QCLs provide the wavelength ranges of 7.43-7.44  $\mu$ m, 7.71-7.73  $\mu$ m, 9.54-9.59  $\mu$ m, 10.28-10.33  $\mu$ m are installed in MILAHI as LOs. A smooth switching mechanism of LOs is essential for applications of planetary atmosphere. In this study, we aim to simplify the optics, especially to provide a switching mechanism of LOs, by applying mid-IR transmissive hollow fibers.

There is few optical fiber which has a high transmittance at the wavelengths longer than 2  $\mu$ m. Recently mid-IR (5-20  $\mu$ m) transmissive hollow fibers has been developed by Tohoku University (e.g. Matsuura et al., 2002). The fibers are made of glass tubing whose inner diameter are 1 mm and have a metallic layer of Ag on the inside of glass tubing and then a dielectric layer of AgI over the metallic layer. Transmittance of 95 %/m at 10.6  $\mu$ m was reported in previous studies (e.g. George and Harrington, 2004), meanwhile we have achieved about 70% transmittance with a 300 mm hollow fiber at 10.4  $\mu$ m from our laboratory measurements. Transmittance of hollow fibers strongly depends on its incident angle of the light. Better transmittance might be possible by improving the alignment.

In this study, we evaluate the efficiency of the heterodyne signal using hollow fibers. The following two systems are compared for verifications using a CO<sub>2</sub> gas laser which emits IR at 10.6  $\mu$ m as a LO and a small blackbody furnace as an IR source.

(i) a conventional system combines two beams using a beam splitter without any fibers

(ii) a fiber system using 300 mm hollow fibers to guide two beams and combines them by a conventional beam splitter

In addition, we have developed the technology related to the fiber coupler and divider (a device enables coupling or splitting lights by combining fibers directly) for the hollow fibers (Tamura et al., 2017) and we will test the efficiency of the heterodyne signal using the fiber coupler. The fiber coupler can provide downsizing, weight saving, high stabilization of the instrument, which are essential to develop the instrument for space-born missions.

レーザーヘテロダイン分光とは、赤外線レーザーの光を局部発信周波数源 (Local Oscillator, LO) として、観測対象である惑星からの光を局発光に重ねること得られる混合光を GHz 帯まで応答する高速赤外線検出器で受信し、超高波長分解能 ( $R = \lambda/d\lambda > 10^6$ ) を得る分光法で、直接分光法に比べ圧倒的な分解能を誇る。我々はこれまでに、マウイ島ハレアカラ山頂に設置した東北大学望遠鏡 T60 (Tohoku 60 cm telescope) に、独自開発した中間赤外レーザーヘテロダイン分光器 MILAHI (Mid Infrared LAsER Heterodyne Instrument) を搭載し、金星・火星の大気の観測を実施してきた (Nakagawa et al., 2016; Takami et al., 2020)。現行機では、2つの光を多数の光学素子で折り曲げて導き、ビームスプリッターで混合しており、各光路で高い位置精度が求められるため光学アライメント調整、特に観測波長域の切り替えには課題を抱えている。それは、MILAHI の観測波長域は LO の発振波長域に依存しており、観測波長域の切り替えには、LO の切り替えが必須であるためである。現在は LO として、7.43-7.44  $\mu$ m (1343-1346 cm<sup>-1</sup>), 7.71-7.73  $\mu$ m (1293-1297 cm<sup>-1</sup>), 9.54-9.59  $\mu$ m (1043-1048 cm<sup>-1</sup>), 10.28-10.33  $\mu$ m (968-973 cm<sup>-1</sup>) の4つの量子カスケードレーザーならびに炭酸ガスレーザーを所有し、これらを切り替えることで惑星大気中の各成分を観測することが可能となる。本研究では、2つの光を中間赤外域で高効率の中空ファイバで伝送し、光学系を簡略化、特に LO の切り替えを簡略化することを企図する。

これまで、中間赤外域 (5-20  $\mu$ m) では伝送効率の高い光ファイバが存在しなかったが、近年低損失の中空ファイバ技術が開発され、医工学分野で応用に向けた研究が進められている。本研究では、東北大学医工学研究科で開発が進められてきた、内径1mmのガラスパイプの内面に銀を蒸着しヨウ化銀でコートした中間赤外中空ファイバを用い

ている (e.g. Matsuura et al., 2002)。先行研究で示されている伝送効率は、波長  $10.6 \mu\text{m}$  の光に対して  $95 \%/m$  (e.g. George and Harrington, 2004) である。我々のこれまでの室内実験では、長さ  $300 \text{ mm}$  の中空ファイバで波長  $10.4 \mu\text{m}$  の光に対して  $70 \%$  程の伝送効率を達成できている。伝送効率は光の入射条件に左右されるため、光の入射方法の改善で、伝送効率の更なる改善が期待される。

本発表では中空ファイバを用いたヘテロダイン分光器の信号取得効率の試験結果を報告する。試験では波長  $10.6 \mu\text{m}$  の赤外線を出射する炭酸ガスレーザーを LO、小型黒体炉を信号光源とする次の 2 つの系の信号強度を比較することで、中空ファイバを用いたレーザーヘテロダイン分光器の信号取得効率を評価する。

- ① 空气中を伝播した光をビームスプリッタで混合する系
- ② 信号光・局発光をそれぞれ独立した長さ  $300 \text{ mm}$  の中空ファイバで伝送し、ビームスプリッタで混合する系

さらに、光ファイバを直接結合することで複数の光の光路を結合・分割できるカップラー技術も発展がめざましく、我々も中空ファイバを用いた光混合・分波器の開発も進めており (Tamura et al., 2017)、今後この光混合・分波器を用いてヘテロダイン信号を取得できるか試験を行う予定である。この光混合・分波器を用いてヘテロダイン信号が得られればファイバに光を入射するだけでヘテロダイン信号が得られるようになるため、従来のヘテロダイン分光器と比較して大幅に光学アライメント調整を簡略化でき、装置の小型化・軽量化、高安定化が実現されることが期待され、将来の飛翔体搭載機器への援用に本質的である。