

次世代赤外ヘテロダイン分光器MILAHlに導入する中間赤外ファイバーの評価と金星中間圏風速・温度場のリトリバル手法の確立

高見 康介 [1]; 中川 広務 [1]; 佐川 英夫 [2]; Krause Pia[3]; 青木 翔平 [4]; 笠羽 康正 [5]; 村田 功 [6]; 平原 靖大 [7]; Benderov Oleg[8]; 片桐 崇史 [9]

[1] 東北大・理・地球物理; [2] 京都産業大学; [3] University of Cologne; [4] BIRA-IASB; [5] 東北大・理; [6] 東北大院・環境; [7] 名大・院・環境・地球惑星; [8] MIPT; [9] 東北大・工

Evaluation of optical fiber for MILAHl and Verification of the retrieval method for wind and temperature in Venusian mesosphere

Kosuke Takami[1]; Hiromu Nakagawa[1]; Hideo Sagawa[2]; Pia Krause[3]; Shohei Aoki[4]; Yasumasa Kasaba[5]; Isao Murata[6]; Yasuhiro Hirahara[7]; Oleg Benderov[8]; Takashi Katagiri[9]

[1] Geophysics, Tohoku Univ.; [2] Kyoto Sangyo University; [3] University of Cologne; [4] BIRA-IASB; [5] Tohoku Univ.; [6] Environmental Studies, Tohoku Univ.; [7] Earth&Planetary Sciences, Nagoya Univ.; [8] MIPT; [9] Engineering, Tohoku Univ.

Spatial and temporal variations of the thermal structure in Venusian mesosphere (above 70 km) were found by Venus Express (VEX) (Patzold et al., 2007; Bougher et al., 2015; Mahieux et al., 2015). This altitude is considered as the region where the global dynamics change from superrotation to the sub-solar to anti-solar flow, suggesting that any variations on the thermal structure might be related to the variations on the dynamics. However, the wind velocity in this region have not been understood due to difficulty of observation for the altitude range of 70 - 95 km. CO₂ absorption spectra in 10 um band fully resolved by mid-infrared (MIR) heterodyne spectrometers, are an effective tracer to observe the mesosphere, and are retrieved for wind velocity and temperature by radiative transfer and inverse calculation (Nakagawa et al., 2016). Then, we are able to study the relationship between mesospheric wind and temperature variations.

We retrieved the wind velocity and temperature from the heterodyne spectroscopic data obtained on March 20 - 29 by THIS (developed by University of Cologne) and on May 18 - 20 by HIPWAC (developed by NASA) in 2012. We detected the sensitivities of the altitude range of 85 - 100 km with the altitude resolution of 10 km and the uncertainties of +/-33 - 54 m/s, and of the altitude range of 70 - 95 km with the altitude resolution of 5 km and the uncertainties of +/-0.6 - 13 K from retrievals of wind velocity and temperature, respectively. In addition, we estimated the dependences on initial guess of inverse calculation. The dependences of wind velocity and temperature are +/-10 - 35 m/s and +/-3 - 5 K, respectively. The dependences do not influence the retrieval results because they are within the maximum of the retrieval uncertainties. The retrieved vertical temperature profile well agreed with the previous result of MIR heterodyne spectrometers (Stangier et al., 2015) and of radio occultation experiments by VeRa/VEX in the altitude range of 75 - 90 km. The study verified the method of the retrieval for Venusian mesospheric wind velocity and temperature. The understanding of Venusian mesosphere will be progressed with long-term observations by MIR heterodyne spectroscopy.

We have developed the Mid-Infrared LAsER Heterodyne Instrument (MILAHl) attached on Tohoku University 60 cm diameter telescope at Mt. Haleakala. The instrument had been recently upgraded with a fast Fourier transform spectrometer of 2.5 GHz range. The test observation of this upgraded instrumentation was conducted against Venus in May, 2017. We also started the test of MIR fiber optics in collaboration with Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) for the future development of the instruments on lander, orbiter and ground-based observations. Fiber technology has the advantages for reduction of mass and size due to simplification of optics, and simplification of the light path alignment. In addition, it is also enable us to observe several wavelengths due to easy reconnection of multiple laser sources, and to retrieve the physical parameters in several altitudes due to observations of absorption in different optical thickness. The optical fibers for near-IR had well developed and will be implemented for the instrument on ExoMars platform (Rodin et al., 2015). The optical fibers for MIR are more challenging because of its low transmission. Furthermore, smaller core diameter is needed to transmit single-mode for heterodyne system. The MIR fibers developed in Tohoku University are Ag-covered hollow fibers with inner and outer diameter of 1 and 1.6 mm, respectively. High transmission of laser source with loss rate less than 0.5 dB/m could be achieved by this large core size. We also confirmed the single-mode transmission with small numerical aperture due to diminishment of other modes. In this study, we discuss the feasibility of the MIR fibers as a key component of future MIR heterodyne spectrometer.

欧州の金星探査機 Venus Express(VEX)の電波掩蔽観測によって、金星中間圏・下部熱圏(高度70 kmより上方)における熱構造の時間・空間的変動が明らかになった(Patzold et al., 2007; Bougher et al., 2015; Mahieux et al., 2015)。また、中間圏は大気循環がスーパーローテーションから昼夜間対流に遷移する領域と考えられており、温度構造の時間・空間変動には風速場との相関関係があると推測されるが、高度70 - 95 kmにおける風速の観測は難しく、理論的にも観測的にも理解が進んでいない。CO₂の10 um帯のスペクトルは、雲層の上に分布するCO₂大気が雲頂からの背景放射を吸収することで形成されるため、その吸収線には中間圏領域の情報が含まれている。このスペクトルを3X10⁷の高周波数分解能(1MHz)を達成する中間赤外ヘテロダイン分光器を用いて観測し、また放射伝達計算と反転解析を行うことで中間圏の視線方向の風速と温度鉛直分布を導出することができ(Nakagawa et al., 2016)、中間圏の風速場の変動と温度構造の変動の相関関係を議論することが可能になる。

我々の先の研究では、2012年3月20-29日のTHIS（ケルン大学開発）と5月18-20日のHIPWAC（NASA開発）の2つの中間赤外ヘテロダイン分光観測から風速と温度を導出した。風速解析は、誤差 $\pm 33-54$ m/sの範囲で高度85-100 kmに高度分解能10 kmで1つまたは2つの高度に感度を持つことがわかった。温度解析では、高度分解能5 kmで70-95 kmの温度鉛直分布を誤差 $\pm 0.6-13$ Kで得られた。反転解析の初期値依存性の評価を行ったところ、風速が $\pm 10-35$ m/s、温度が $\pm 3-10$ Kであった。この結果より、それぞれの初期値依存性は解析誤差の最大値の範囲内に収まっており、初期値依存性による解析結果への影響は十分小さいことがわかった。また、温度分布について、中間赤外ヘテロダイン分光観測 (Stangier et al., 2015) と電波掩蔽観測 VeRa/VEX の先行研究と高度75-90 kmの範囲でよく一致した。本研究により、中間圏の風速と温度の導出手法が確立され今後の中間赤外ヘテロダイン分光の長期観測により中間圏の理解が進むと期待される。

この目的のため、我々はハレアカラ山頂に位置する東北大学60cm望遠鏡に東北大学開発のMid-Infrared LAser Heterodyne Instrument (MILAH)を設置し地球型惑星の長期的な観測の実現に向けて開発を進めている。2017年5月には、2.5 GHzの高速フーリエ変換分光器を導入し長期観測の準備を整え、金星試験観測を行った。現在では、Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) と共同で惑星着陸機や周回軌道衛星、地上観測の観測器に中間赤外ファイバーを導入するための試験を行っている。ファイバー技術は、光学系の簡易化による装置の軽量、小型化、光路調整の簡易化に繋がる。また、ファイバーの繋ぎ換えのみでレーザー光源を簡単に換えられるため、複数波長で異なる光学的厚みの吸収線を観測でき様々な高度での大気物理量の導出が可能となる。近赤外ファイバーの技術はすでに確立されており、ExoMarsの火星着陸機に搭載することが決定されているが (Rodin et al., 2015)、中間赤外ファイバーは、伝送率が悪く今までは実用段階に達していなかった。また、ヘテロダイン分光に用いられるファイバーは、伝送モードがシングルモードになる必要があり、コア径が小さいものでなければならない。東北大学工学部で開発されている銀コーティングの内径1 mm、外径1.6 mmの中空ファイバーは、損失特性がCO₂レーザー光源で0.5 db/m以下の高伝送を達成できている。加えて、内径が大きいながらも入射開口数を小さくすることで基底モード以外のモードが十分に減衰しシングルモードの伝送が可能であることが確認された。本発表では、ヘテロダイン分光器の重要な要素として中間赤外ファイバーの可能性について議論する。