

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540482

研究課題名(和文) 電波掩蔽による金星大気マイクロプロセスの解明

研究課題名(英文) Microscale processes in the Venus atmosphere revealed by radio occultation

研究代表者

今村 剛 (Imamura, Takeshi)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・准教授

研究者番号：40311170

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：従来の電波掩蔽観測では幾何光学解法が用いられてきたが、多重伝搬が起るときに解がうまく求まらない、回折効果により高度分解能が粗くなる、といった問題があった。そこで新たな手法である電波ホログラフィ法のうちの一つ、Full Spectral Inversionを金星大気に応用し、これらの問題を解決して、大気重力波にともなう微細な層構造や、対流圏界の急峻な温度極小の構造を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：In the previous radio occultation observations, geometrical optics method has been used for retrieving refractive index profiles from measured phase time series, and multipath effect and diffraction effect prevented us from obtaining detailed atmospheric structures. We applied a radio holographic analysis to radio occultation data of Venusian atmosphere to solve these problems, and successfully revealed fine structures related to gravity waves and inversion layers.

研究分野：惑星大気科学

キーワード：電波掩蔽 電波ホログラフィ Full Spectral Inversion 金星大気 惑星大気

1. 研究開始当初の背景

惑星規模の温度や風速の分布の形成には数十メートルから数万キロメートルにわたる幅広い空間スケールの流体運動が関わっている。1 キロメートル以下の現象は観測が難しいこともあり地球においても十分に把握されておらず、他の惑星の大気においては一層謎に包まれている。

電波掩蔽は惑星大気中の微細構造を全球的にリモートセンシングする強力な手法である。電波掩蔽とは、探査機が地球から見て惑星の反対側に隠れる際に通信電波が惑星大気を通過することを利用して大気の構造を調べる観測手法である(図1)。従来の電波掩蔽観測のデータ解析においては電波を1本の光線として扱う幾何光学解法が用いられてきた。この手法では、各時刻における受信周波数から各時刻の電波経路を推定し、そこからインパクトパラメータと屈曲角の関係を導き、これに Abel 変換を施すことによって大気の屈折率の高度分布を得る。しかしこの手法では、複数の異なる経路の電波が同時に受信器に届くマルチパス(多重伝搬)が生じる状況(図2)では正しく鉛直構造を求められないという問題がある。また回折効果により高度分解能がフレネル径程度に制限されるという問題もある。図3は欧州の金星探査機 Venus Express の電波掩蔽データから幾何光学解法で求めた温度分布から算出した鉛直波数スペクトルであるが、フレネル径にあたる波数 1 km^{-1} (波長 1 km) 程度より小さなスケールでは飽和重力波の -3 乗則の理論スペクトルより低下する傾向が見られる。これは鉛直分解能の制限を反映すると考えられる。

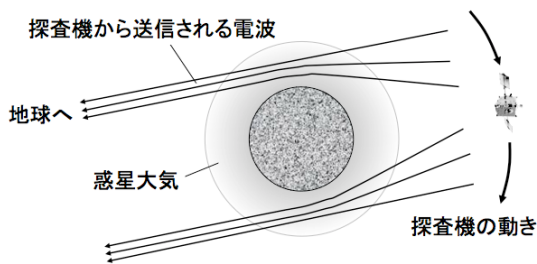


図1 電波掩蔽の概念図。

2. 研究の目的

近年、地球大気の GPS 掩蔽観測において、位相と振幅の時系列全体を同時に周波数解析して大気構造を得る、電波ホログラフィ法が考案された。この手法には、マルチパスの問題を解決できることや、高度分解能がフレネル径で制限されないという利点がある。しかし数学的に難しいことや、惑星大気の電波掩蔽では GPS 掩蔽とは異なる幾何学的特徴があり修正が必要であることから、これまで惑星探査に応用されることはなかった。

本研究ではこの新たな手法を金星大気の電波掩蔽データに応用し、惑星大気観測における電波ホログラフィ法の有効性を実証する。このことにより、大気重力波が臨界高度付近で作り出す微細層構造や、砕波の指標となる鉛直波数スペクトルの特徴を明らかにする。またマルチパスの影響を除去して対流圏界面(雲頂)の細かな温度構造を導出することにより、雲層高度の大気のエネルギーバランスの手がかりを得る。

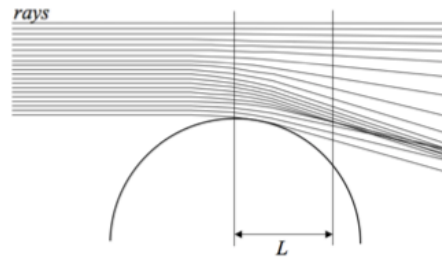


図2 マルチパスの概念図。
Sokolovskiy et al. (2004)より。

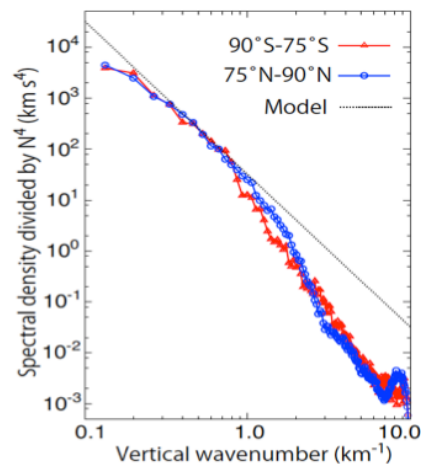


図3 金星大気の電波掩蔽データから幾何光学解法で求めた温度分布から算出した鉛直波数スペクトル (Ando et al. 2015)

3. 研究の方法

ホログラフィ法には様々なバリエーションがあるが、ここでは観測点での位相・振幅の時系列全体に一度に FFT を施して幾何学的経路を精密決定する Full Spectrum Inversion (FSI) 法 (Jensen et al. 2003) を採用する。FFT で得られた複素振幅スペクトルから各周波数における「位相」を求め、その位相を周波数について微分することにより、その周波数が観測されるべき時刻を精密決定することができる。探査機が長い距離を移動する間の時系列全体をひとまとめに周波数解析することにより、実効的に巨大な開口径のアンテナで観測することになり、空間分解能が向上すると考えることができる。

従来の幾何光学解法では周波数が時刻の関数として得られるのに対して、FSI では時刻が周波数の関数として得られるため、同一時刻に複数のドップラ周波数の波が観測されるマルチパスの状況でも正しく解析できる。電波源と受信局がともに対象天体を中心として概ね円軌道上にあることが前提であるが、そうではない惑星電波掩蔽データにおいても観測された位相に補正を施すことにより適用可能であると考えられる。

我々の研究グループは欧州の金星周回機 Venus Express の電波科学チームと協力して open-loop データの解析を担当しており、本研究ではこのデータを利用した。まずデータから信号位相の時系列を求め、この位相に対して、電波源と受信局が仮想的な円軌道上にあるときの位相となるよう補正を施す。この補正後の位相をもとに改めて信号波形データを作成し、これに FFT を施し、得られた複素振幅の位相の周波数微分によって各周波数の受信時刻を求めた。この周波数と時刻の関係からは、インパクトパラメータと屈曲角の関係が得られる。このあとは通常の幾何光学解法と同様であり、Abel 変換によって屈折率の高度分布を求めたのち大気密度の高度分布を求め、ここから静水圧平衡の仮定のもとに気圧を求め、さらに状態方程式により温度を求めた。

4. 研究成果

解析で得たインパクトパラメータと屈曲角の関係の例を図 4 に示す。線が乱れている領域はマルチパスにあたり、雲頂高度付近で気温勾配が大きく変化して屈折率が複雑な構造をとることによる。幾何光学解法では解が正しく求まらず細かい振動が見られるが、FSI ではもっともらしく構造が得られている。

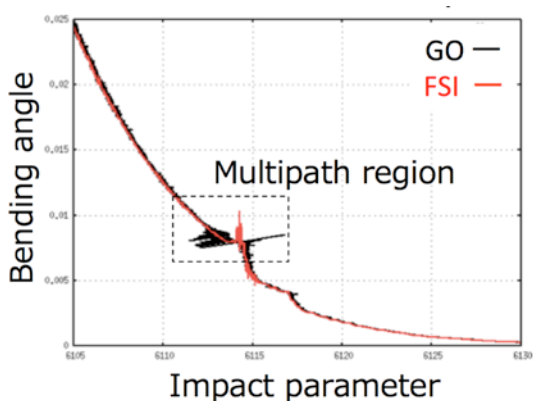


図 4 インパクトパラメータと屈曲角の関係の一例。黒線は幾何光学、赤線は FSI による結果。

得られた気温分布の一例を図 5 に、その拡大図を図 6 に示す。雲頂高度にあたる高度 62 km 付近よりも上では重力波によると考えられる波状構造が見られる。幾何光学解法の結果に比べ、FSI ではより細かい構造が見られ

る。雲頂高度付近で温度勾配が急激に変化しており、温度極小点の上には逆転層がある。温度極小の構造は幾何光学に比べて FSI のほうが急峻であり、この傾向は他の日の観測結果でも同様に見られる。金星の高緯度の雲頂高度に温度極小が存在することは以前から知られているが、これほどの急峻な構造はこれまで知られていなかったものである。

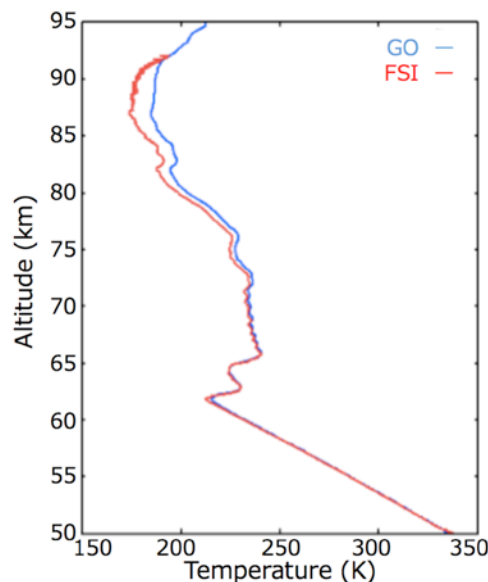


図 5 得られた気温の高度分布の一例。青線は幾何光学、赤線は FSI による結果。緯度 71° N のもの。

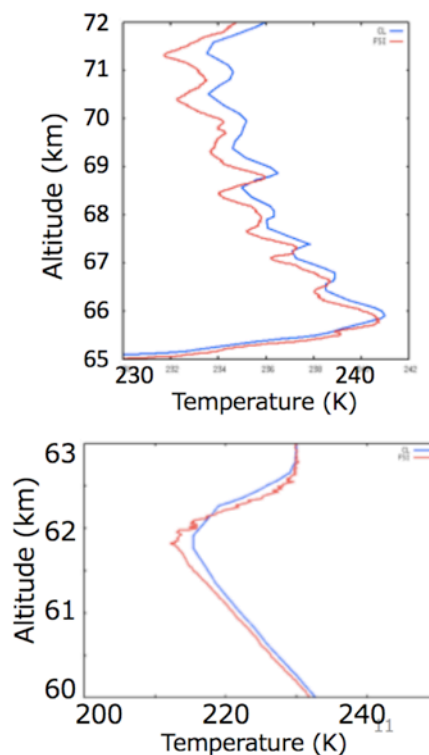


図 6 図 5 の気温の高度分布の拡大図。波状構造が見える領域 (上) と雲頂の逆転層付近 (下)。

気温の高度分布から求めた鉛直波数スペクトルの一例を図7に示す。波数 1 km^{-1} (波長 1 km) 程度より大きなスケールでは幾何光学と FSI の結果はよく一致し、飽和重力波の -3 乗の理論スペクトルに近い。しかしそれより小さなスケールでは、波数 3 km^{-1} くらいにかけて幾何光学でのスペクトル密度が FSI より1桁くらい小さくなる。これは、このスケールでは FSI では大気構造が正しく求められているのに対して、幾何光学ではフレネル径の制限により構造が平滑化されているものと解釈できる。

さらに高波数側では、幾何光学においてはノイズが卓越すると考えられる。一方 FSI では、波数 10 km^{-1} (波長 100 m) 程度より低波数側では -3 乗則、高波数側では平坦なノイズフロアの特徴を示しており、ここから FSI の実質的な鉛直分解能が 100 m 程度であることがわかる。

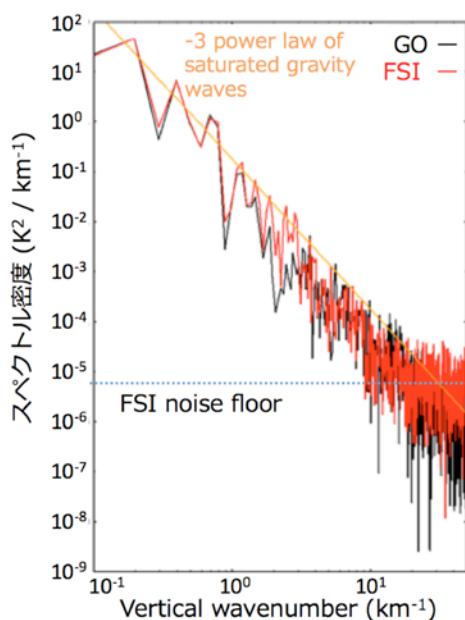


図7 気温の高度分布から求めた鉛直波数スペクトルの一例。黒線は幾何光学、赤線は FSI による結果。緯度 59° N 。

大気安定度の鉛直分布の一例を図8に示す。重力波と思われる波状構造が卓越する領域において、幾何光学の結果では強安定層だけが観察されるが、FSI の結果には弱安定あるいは中立成層の領域も見られる。現状では細かなノイズ成分との切り分けが不十分であるが、FSI は高い高度分解能を実現することにより従来見られなかった薄い乱流層を検出できている可能性がある。このような乱流層は重力波の砕波にともなって生成すると予想されるものである。

以上のような解析を様々な緯度帯の観測データに適用して、短い鉛直波長での重力波の振幅が低緯度より高緯度で大きいこと、雲

頂の急峻な温度極小が高緯度にもみ見られること、などが明らかになりつつある。このように本研究により電波ホログラフィ法の一つである FSI を惑星大気観測へ応用する道が拓かれた。この手法は今後の惑星大気電波掩蔽における標準的な手法となることが期待される。

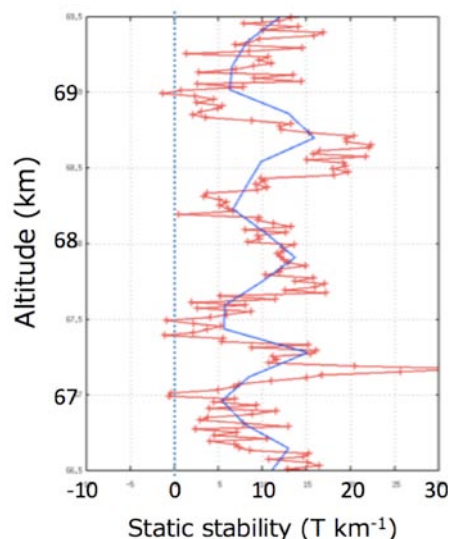


図8 大気安定度の鉛直分布の一例。青線は幾何光学、赤線は FSI による結果。緯度 71° N 。

<引用文献>

- Ando, H., T. Imamura, T. Tsuda, S. Tellmann, M. Pätzold and B. Häusler, Vertical wavenumber spectra of gravity waves in the Venus atmosphere obtained from Venus Express radio occultation data: evidence for saturation, *J. Atmos. Sci.*, 72, 2318-2329, 2015.
- Jensen, A. S., M. S. Lohmann, H.-H. Benzon, and A. S. Nielsen, Full Spectrum Inversion of radio occultation signals, *Radio Sci.*, 38(3), 1040, doi:10.1029/2002RS002763, 2003.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Ando, H., T. Imamura, T. Tsuda, S. Tellmann, M. Pätzold and B. Häusler, Vertical wavenumber spectra of gravity waves in the Venus atmosphere obtained from Venus Express radio occultation data: evidence for saturation, *J. Atmos. Sci.*, 72, 2318-2329, 2015. doi:10.1175/JAS-D-14-0315.1, 査読有り

[学会発表] (計1件)

- ① 宮本 麻由, 今村 剛, 安藤 紘基, 津田敏隆, 青山雄一, 電波ホログラフィ法による金

星大気の電波掩蔽データの解析, JpGU2015, 5
月 26 日, 幕張コンベンションホール, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今村 剛 (IMAMURA, Takeshi)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所

・准教授

研究者番号 : 40311170