

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

○宮本麻由 [1]、今村剛[2]、安藤紘基[2]、津田 敏隆[3]、青山 雄一[4]

[1]東京大学理学系研究科地球惑星科学専攻、[2]ISAS/JAXA、[3]京都大学・生存研、[4]
極地研究所

1. 金星大気における重力波

重力波は浮力を復元力とする波動で、運動量やエネルギーを鉛直輸送し大気大循環を駆動すると考えられている。また上方伝搬と共に波の振幅が大きくなると、対流不安定やシア不安定といった局所的な不安定を介して砕波し、それに伴う乱流は物質やエネルギーや運動量の拡散に重要な役割を果たすと考えられている。地球大気では、ラジオゾンデやレーダーにより鉛直波長が数十 m~数 km の重力波が観測され、小スケールの波の構造まで良く理解されている。また、鉛直スケール 1 km 以下での強い速度シアや乱流層といった薄い大気構造が普遍的に存在し、大気力学や物質輸送において重要な役割を果たしている。直接観測が難しい惑星大気の場合、電波掩蔽(図 2)によって大気の鉛直構造を高い分解能で捉えることが強く望まれているが、従来の幾何光学解法による電波掩蔽データの解析では鉛直分解能が 1 km 程度と限られており、幅広い重力波スペクトルのうちのごく一部分しかとらえられていない(図 1)。高分解能な金星大気の温度の鉛直分布が得られれば、金星大気における重力波の伝搬・散逸過程の全体像が明らかになる。

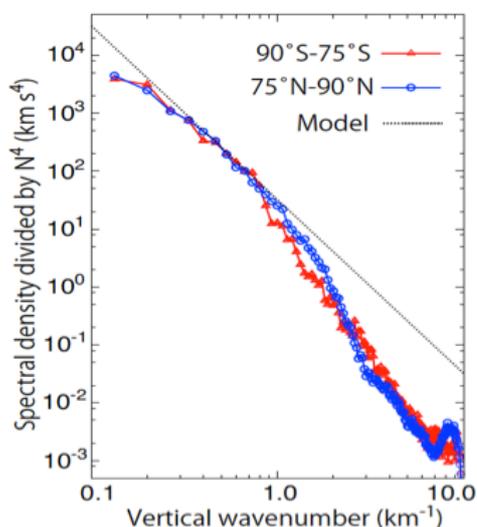


図 1 Venus Express の電波掩蔽データの幾何光学解法による温度分布から算出した高緯度での平均パワースペクトル。波数 1 km^{-1} (波長 1 km に相当) 付近より高波数側では鉛直分解能の制限のために振幅の低下が見られる。(Ando et al., in press)

2. 研究目的

地球大気の GPS 掩蔽観測で開発された電波ホログラフィ法の一つである Full Spectral Inversion(FSI) (Jensen et al., 2003)を金星大気の電波掩蔽データに初めて応用することで、より小スケールの金星大気の構造を明らかにする。また、この新たな解析手法は、解析の精度を低下させることで長年にわたる難題であった複数の経路を通った電波が同時に受信局に届く「マルチパス」の問題も解決できる。これは金星の対流圏と成層圏の境界近くで屈折率が高度によって急激に変化することで生じる。

3. 観測と解析

3.1. 電波掩蔽観測

地上局から見て探査機が惑星の背後へ入出する際、探査機から送信された電波が惑星大気を通過することを利用し大気の高度方向の温度分布を測定できる観測。

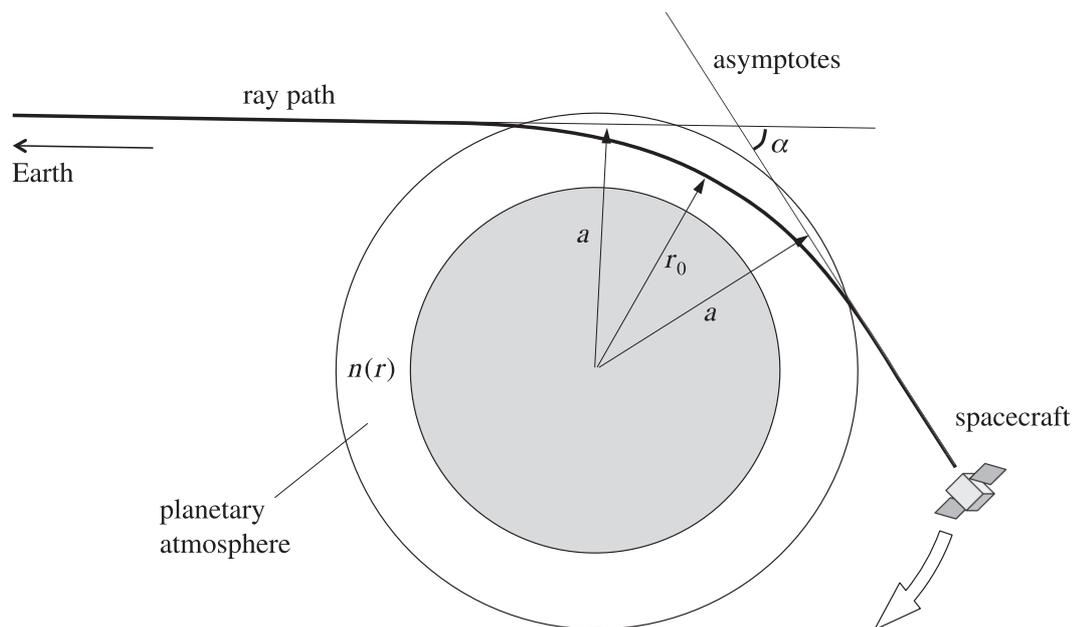


図2 惑星大気による電波の曲げ (Imamura et al., 2011)

(a :インパクトパラメータ、 α :ベンディングアングル、 r :惑星中心からの距離、 n :屈折率)

3.2. 温度分布の求め方

以下のようなプロセスで温度の高度分布が求まる。

ドップラーシフトした電波の受信周波数、軌道情報

↓ 幾何光学解法 →新しい手法へ

インパクトパラメーター a 、ベンディングアングル $\alpha(a)$

↓ Abel 変換

屈折率 $n(r)$ 、数密度 $N(r)$

↓ 静水圧平衡、状態方程式

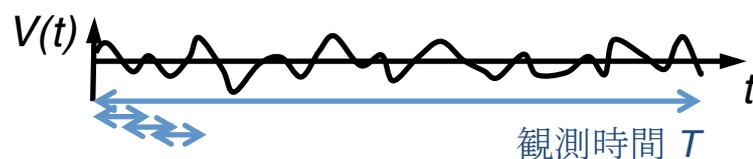
圧力 $p(r)$ 、温度 $T(r)$

3.3. Full spectral inversion(FSI)の原理

FSI では観測された信号は 1 つまたはそれ以上の経路から来た副信号からなるとする。受信信号の振幅と位相の時系列全体を同時にスペクトル解析し、インパクトパラメーター a 、ベンディングアングル $\alpha(a)$ を求めることができる。

観測された位相と振幅をそれぞれ φ 、 Q とすれば、観測された信号の時系列は

$$V(t) = \sum_p Q_p(t) \exp(i\varphi_p(t)).$$



となる。これを観測時間 T でフーリエ変換すると

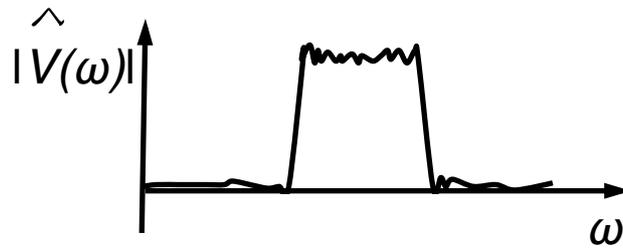
$$\hat{V}(\omega) = \sum_p \int_0^T Q_p(t') \exp[i(\varphi_p(t') - \omega t')] dt',$$

となる。ここで、 ω はある時刻 t_1 に到達した副信号 q の瞬間周波数で

$\omega = d\varphi_q/dt(t=t_1)$ と表される。

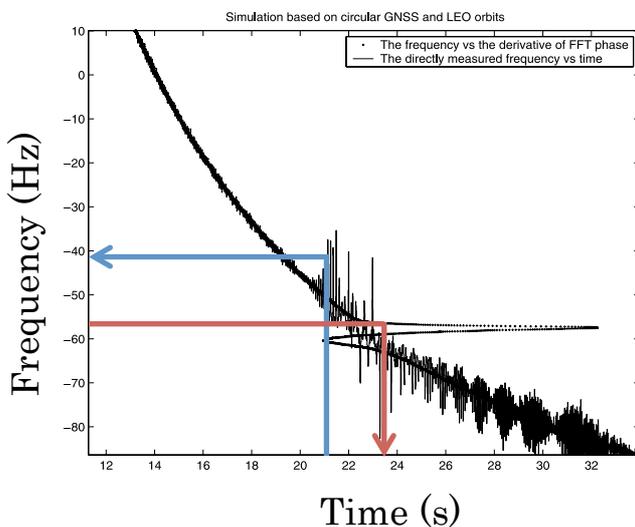
電波源と受信局が共に同じ惑星のまわりの円軌道の上であれば、この瞬間周波数 ω は観測中に 1 回しか生じないと仮定できる。すると、上式のフーリエ変換は q 番目の信号が支配的になり、停留値法により以下のように近似できる。

$$\hat{V}(\omega) \cong \sqrt{\frac{2\pi i}{\frac{d^2\varphi_q}{dt^2}(t_1)}} Q_q(t_1) \exp\left[\underbrace{i(\varphi_q(t_1) - \omega t_1)}_{\text{フーリエ変換の位相}}\right].$$



すると周波数 ω が受信された時刻 t_1 は、フーリエ変換の位相を微分することで求められる。

$$\frac{d}{d\omega}(\varphi_q(t_1) - \omega t_1) = \frac{d\varphi_q}{dt_1} \frac{dt_1}{d\omega} - \omega \frac{dt_1}{d\omega} - t_1 = -t_1$$



幾何光学解法

$$(t, \omega(t)) = \left(t, \frac{d\varphi(t)}{dt} \right)$$

FSI

$$(\omega(t), t) = \left(\omega, \frac{d(\varphi(t) - \omega t)}{d\omega} \right)$$

図 3 周波数 ω と時間 t の関係

4. 解析結果と考察

4.1. 解析データ

- Venus Express の電波掩蔽データ
- 緯度 70° S(2006年8月8日)、 50° S(2006年7月23日)、 0° (2006年7月14日)

4.2. 鉛直温度分布

図4はFSI(赤)と幾何光学(緑)で求められた緯度 70° S での鉛直温度分布である。高度 63km 付近に見られる温度の低下は、高緯度の対流圏界面に現れることが知られている。ここは電波掩蔽でマルチパスの起きやすい領域である。

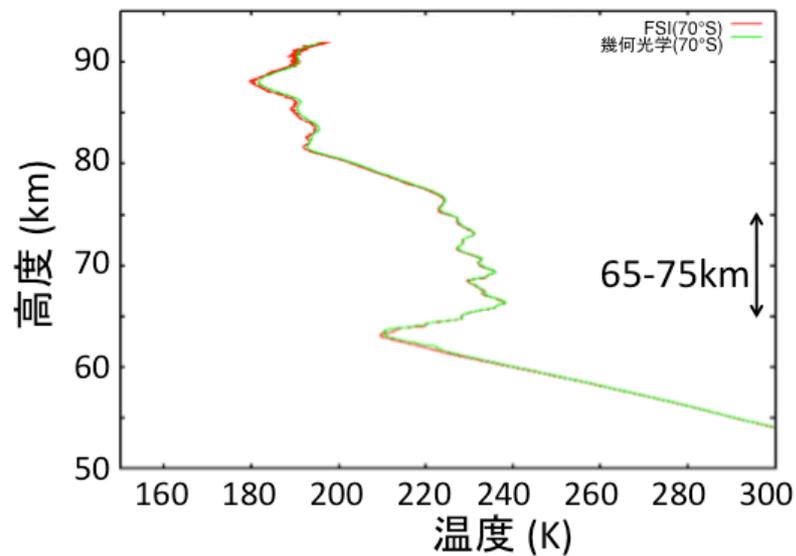


図4 鉛直温度分布 (緯度 70° S)

4.3. 鉛直波数スペクトル

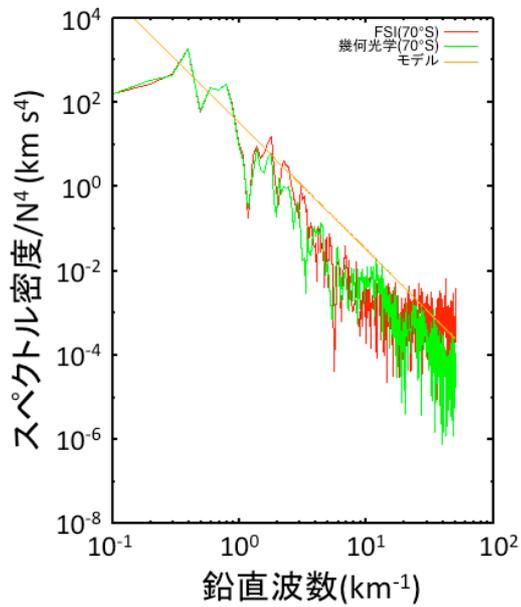


図5 鉛直波数スペクトル
(緯度 70°S)

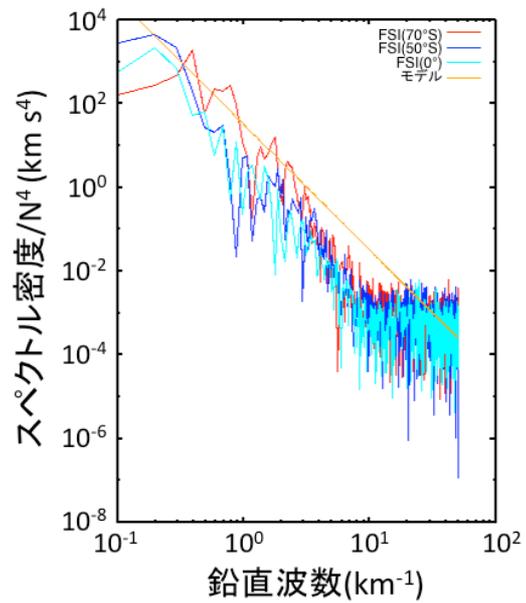


図6 鉛直波数スペクトル
(緯度 70°S、50° S、0°)

図5はFSI(赤)と幾何光学(緑)で求められた高度65-75kmにおける温度擾乱の鉛直波数スペクトルである。図6はFSIで求めた緯度70°S(赤)、50°S(青)、0°(水色)の鉛直波数スペクトルである。

- 今まで見えなかった小さいスケール(鉛直波長 100m オーダー)まで冪乗則に従うような傾向が見られた。
- 低緯度に比べ高緯度でスペクトル密度が大きい傾向は知られており、今回の解析では同様の傾向が従来よりも小スケールでも観察された。

4.4 大気安定度

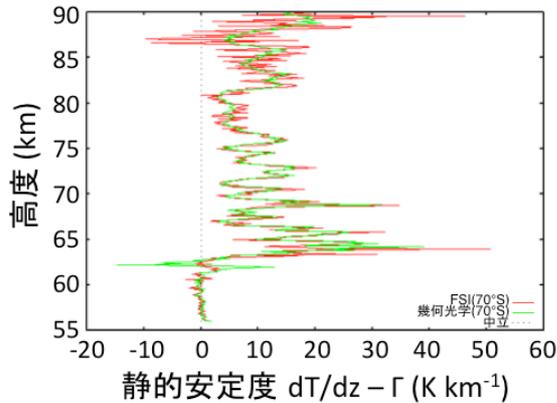


図7 大気安定度 (緯度 70°S)

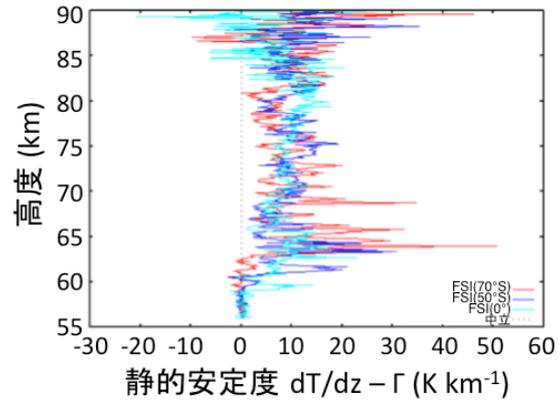


図8 大気安定度 (緯度 70°S、50°S、0°)

図7は図4から求めた大気安定度で、図8は緯度70°S(赤)、50°S(青)、0°(水色)の大気安定度である。ここで T は温度、 z は高度、 $\Gamma=g/C_p(z)$ で g は重力加速度、 $C_p(z)$ は定圧比熱。

- 図8で、高緯度で中立成層の上端高度が高いことが知られており、今回の結果にも見られる。

5. まとめ

地球大気GPS掩蔽観測で開発された新たな電波掩蔽解析手法FSI(Jensen et al., 2003)を金星大気電波掩蔽データに初めて応用し、鉛直波数100mオーダーという従来にくらべ1桁小さい鉛直温度構造が明らかになった。

鉛直温度分布から鉛直波数スペクトルを求めた。幾何光学解法での鉛直分解能(～1 km)より小さいスケールでも冪乗則に従う傾向がみられた。高緯度ほどスペクトル密度が大きい傾向も見られた。

6. 今後の課題

他の緯度、経度、高度における鉛直波数スペクトルを求め、重力波の減衰過程を考察する。

大気安定度から薄い不安定層を検出し、乱流生成域の時空間分布を明らかにする。