

Full Spectral Inversion による金星大気電波掩蔽データの解析 (初期報告)

今村剛 (ISAS/JAXA), 安藤紘基 (東大理), 青山雄一 (極地研), 津田敏隆 (京大生存圏)

1. 電波掩蔽

惑星大気の電波掩蔽観測では、従来、幾何光学解法が用いられてきた。これは、各時刻において受信した信号のドップラー周波数から屈曲角とインパクトパラメータを求め、ここから惑星大気が球対称であるという仮定のもとに逆問題を解いて (Abel 変換) 屈折率の高度分布を求めるというものである。この幾何光学解法は、マルチパスの影響を除けないことや、高度分解能が Fresnel 直径で制限されるという問題がある。これを解決するために、地球の GPS 電波掩蔽では振幅情報も用いるホログラフィー法が試みられつつある。ホログラフィー法のひとつに Full Spectral Inversion (FSI) がある (Jensen et al., 2003)。我々は惑星大気の電波掩蔽においてホログラフィー解析を確立すべく、FSI を金星の電波掩蔽データに適用することを試みている。

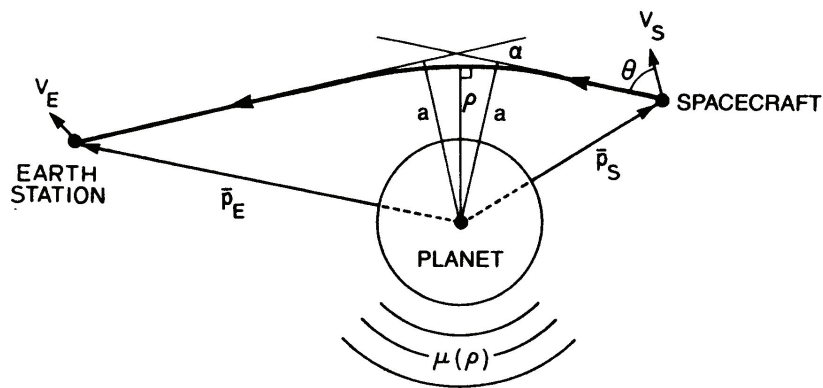


図 1 電波掩蔽の概念図 (Tyler et al., 1987)

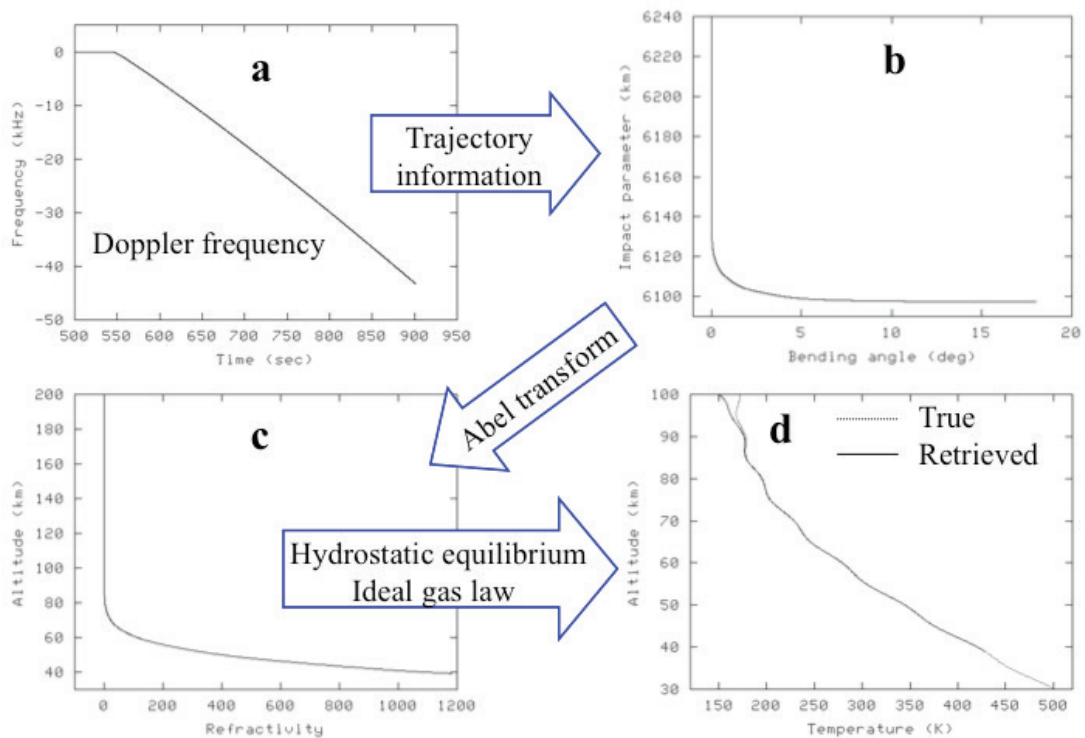


図 2 データ処理の流れ。幾何光学解法では、まず周波数時系列(a)を求め、ここからインパクトパラメータ・屈曲角の関係(b)、屈折率の高度分布(c)、気温分布(d)へ進む。FSI では(a)を経ずに複素振幅データから(b)を求め、そのあと(c)、(d)へ進む。

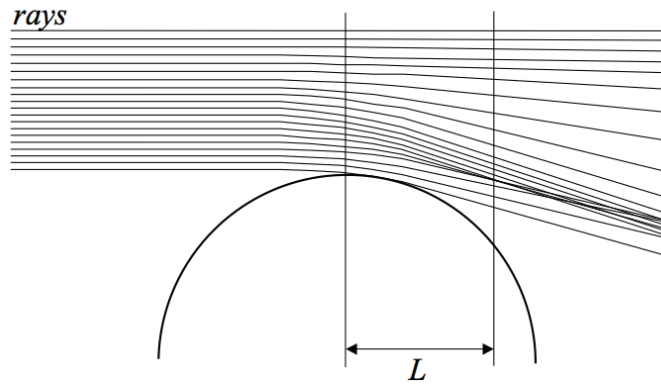


図3 マルチパスの概念図 (Sokolovskiy, 2004)

2. Full Spectral Inversion (FSI)

Full Spectral Inversion (Jensen et al., 2003)では、観測された信号は1つまたはそれ以上の副信号からなると考える。それぞれの副信号はひとつの電波経路に対応し、その瞬間周波数は与えられた電波経路に関連づけられるとする。副信号 q (時間 t_1 に到達)の瞬間周波数は位相 ϕ_q を用いて

$$\omega = d\phi_q/dt(t=t_1)$$

と書ける。停留値法により Fourier 積分は近似的に

$$\hat{V}(\omega) \cong \sqrt{\frac{2\pi i}{\frac{d^2\phi_q}{dt^2}(t_1)}} Q_q(t_1) \exp[i(\phi_q(t_1) - \omega t_1)]$$

と表される。すると、周波数 ω が受信された時刻は、常識の位相部分 u を ω で微分して次のように得られる。

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

電波源と受信局がともに惑星を円軌道で周回する場合、全ての周波数 ω はせいぜい1回しか現れない。一对の ω と t_1 から一对のインパクトパラメータと屈曲角が得られることになる。

3. Venus Express 電波掩蔽データへの適用

2010年6月16日に欧州の金星探査機 Venus Express の無変調電波を臼田宇宙空間観測所で受信して open-loop 記録したものをを用いる。Venus Express は超高安定発振機 (USO) を基準信号とする周波数の安定した電波を送信しており、受信周波数の変動は軌道運動および金星大気による屈折の影響と考えることができる。今回は探査機が地球から見て金星の背後に隠れていくとき (ingress) の観測データを用いた。

データは 8.4GHz の受信信号を 500kHz 程度にダウンコンバートして波形ごと 2MHz サンプルングしたものである。まず、信号振幅と金星大気による周波数シフトを 15Hz 程度のサンプルング周波数で導出した。ここから、周波数が数 kHz にわたって変化する複素信号を表現すべく、サンプルング周波数 18kHz の複素数データを生成し、FSI への入力データとした。硫酸蒸気による電波吸収が顕著な高度 50 km 以下は今回は解析しない。

なお、電波源 (Venus Express)、受信局 (臼田局) とともに金星のまわりの円軌道上にないため、FSI 解析に先立って信号位相の補正を行って仮想的な円軌道でのデータを生成し、これを解析した。

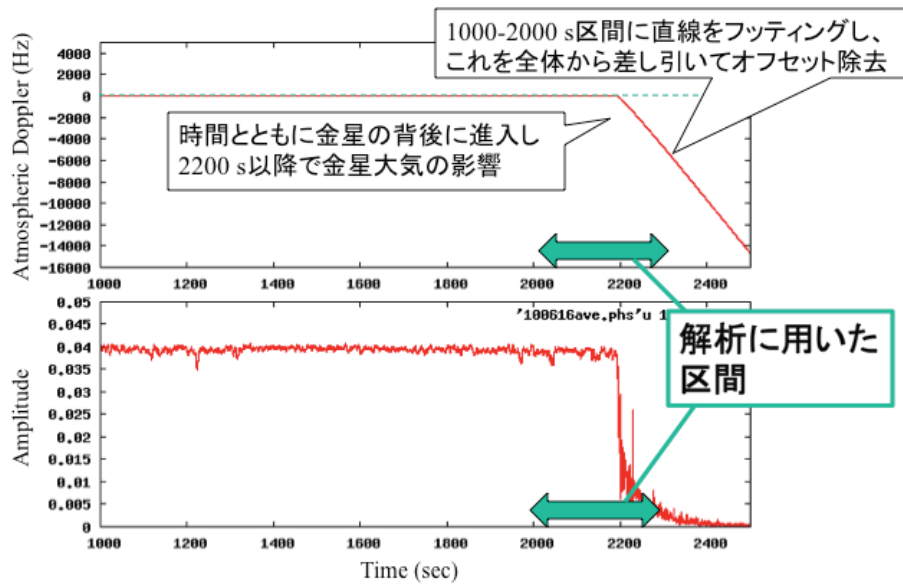


図4 FSI入力データ（上：周波数 下：振幅）

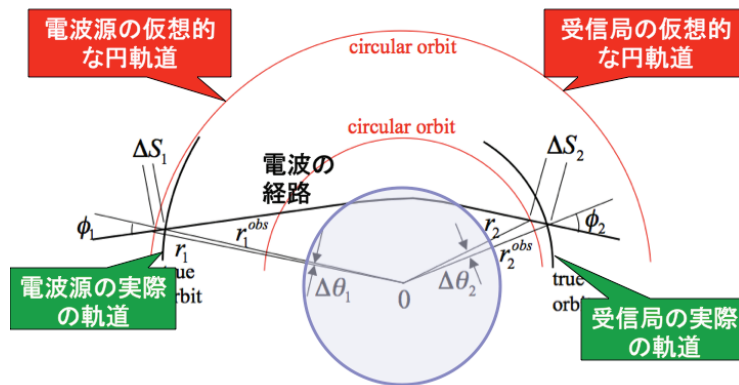


図5 円軌道への位相補正のイメージ (Sokolovskiy, 2004 を改変)

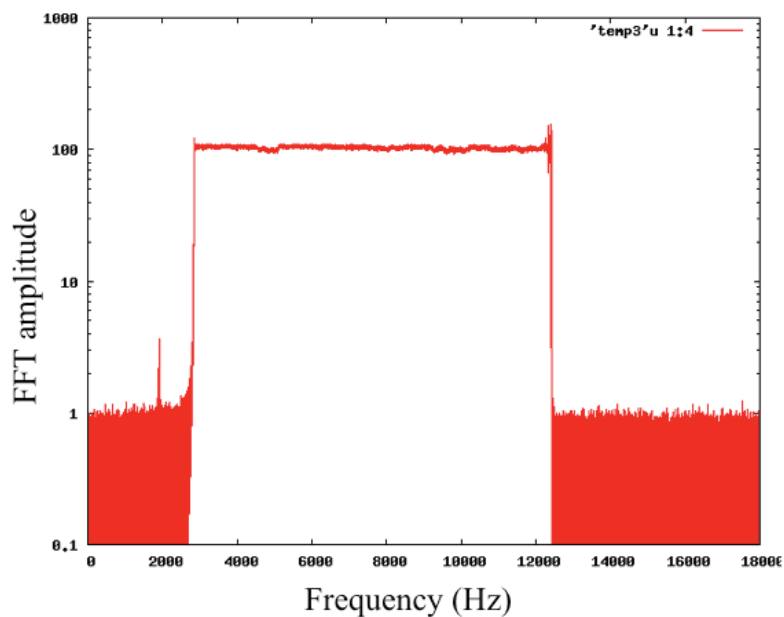


図6 受信信号（振幅・位相）の観測時間全体のフーリエ変換の振幅

4. 結果

受信信号（振幅・位相）の観測時間全体のフーリエ変換を行うと、信号帯域内で振幅がほぼ平らである。これは FSI の理論と整合的であり、FSI を適用できる条件が満たされていると判断できる。

FSI によりインパクトパラメータ-屈曲角の関係を求め、さらに屈折率の高度分布を求めた。インパクトパラメータ 6150 km（高度 98 km）以上ではなぜか屈曲角がわずかに負になったため、とりあえず 6150 km 以下の部分を用いて解析した。屈折率から大気密度の高度分布を求め、さらに静水圧平衡を仮定して気圧の高度分布を求めた。そのあと気圧と密度から状態方程式を用いて温度を求めた。

得られた気温分布を従来の幾何光学解法の結果と比べると、細かな構造は似ているが、高度方向に数百メートルずれており、また高度とともに緩やかに変化するオフセットがある。この理由と、FSI を用いることによる精度向上可能性について、今後検討していく。

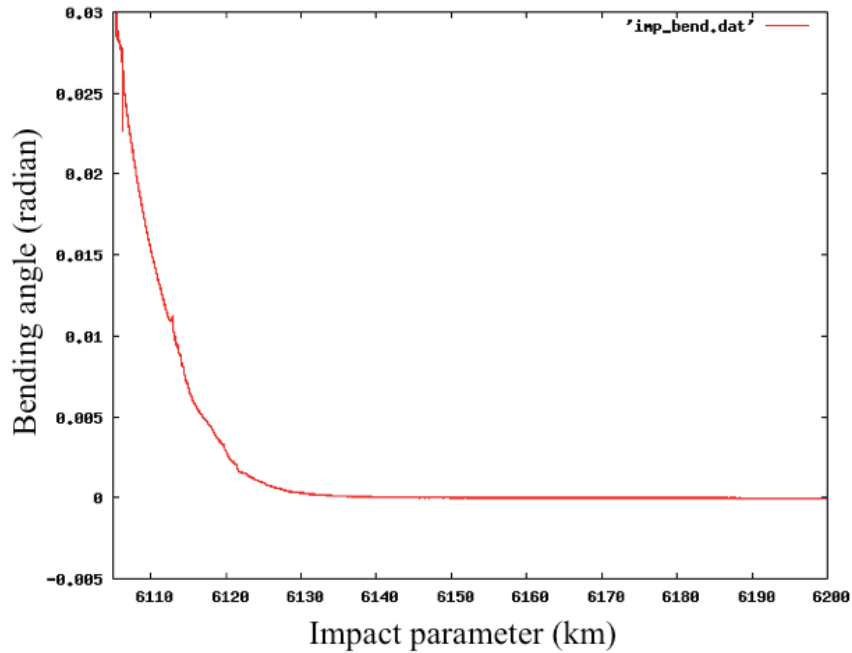


図 7 FSI で求めたインパクトパラメータ-屈曲角の関係

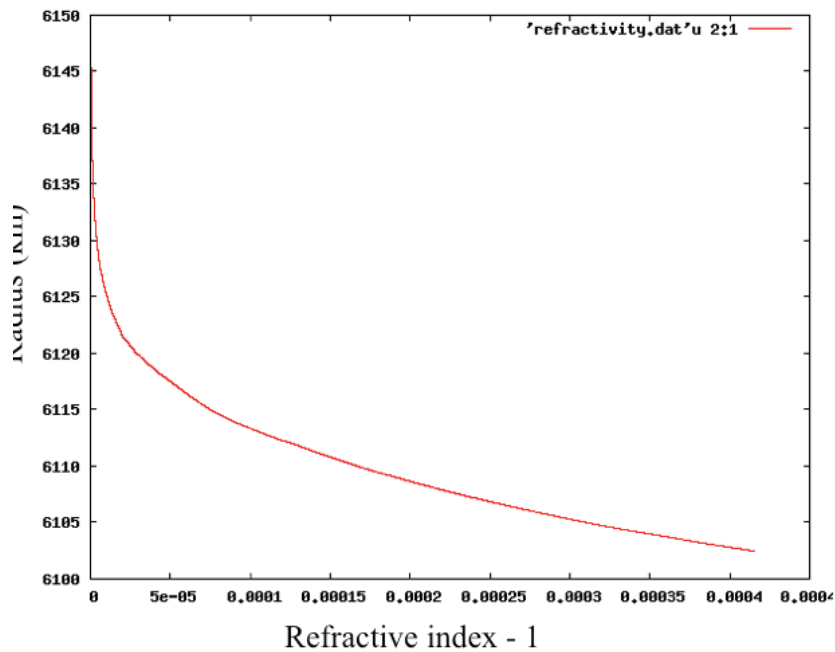


図 8 FSI で求めた屈折率の高度分布

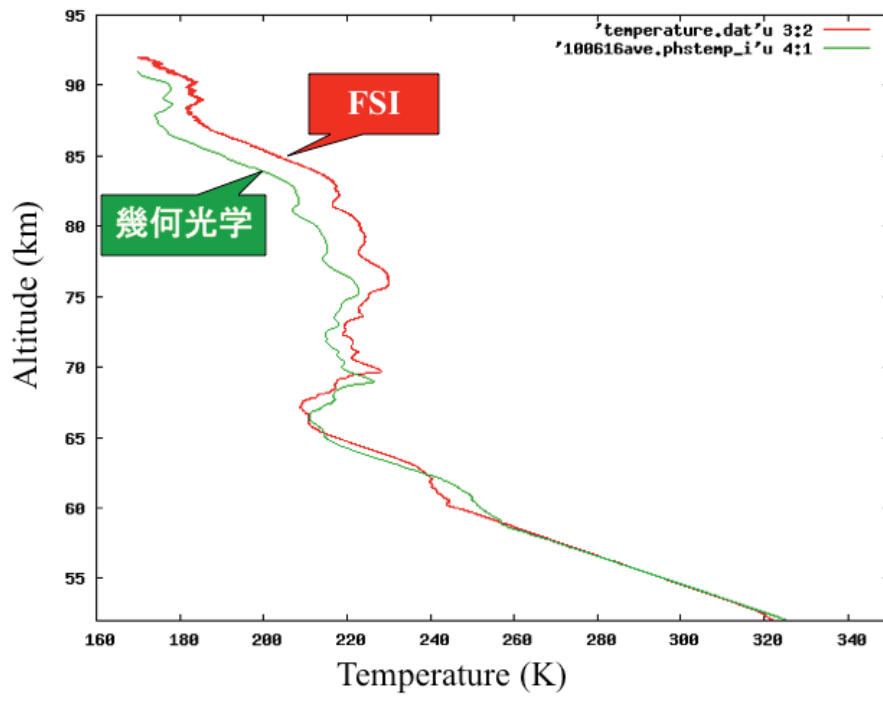


図9 気温の高度分布。FSIで得た結果を幾何光学による結果と比較している。