

## 7-7 テラヘルツ波による惑星観測：野辺山ミリ波干渉計を利用した金星大気観測

### 7-7 *Terahertz Remote-sensing of the Venusian Atmosphere: Observations using the Nobeyama Millimeter Array*

佐川英夫

SAGAWA Hideo

#### 要旨

テラヘルツ波で金星を観測すると、金星大気から射出された熱放射(連続波)及び様々な微量成分の回転遷移スペクトルが得られる。電波からテラヘルツ波にかけてはCO<sub>2</sub>大気が光学的に薄いいため、可視領域では観測不可能な金星の雲頂(高度70 km)より下から射出される熱放射が観測される。微量成分の吸収線からは、雲頂から中間圏(高度100 km)にかけての微量成分混合比がリトリバルされることに加えて、ドップラーシフトを利用して、それらの高度での風速を測ることができる。2004–2006年に野辺山ミリ波干渉計で取得した0.1 THz帯での連続波画像では、金星ディスク内部で輝度温度300–380 Kの明暗構造が確認された。0.1 THzでの輝度温度の変動には、高度50 km付近の気温の非一様性や、吸収物質であるSO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の偏在が反映される。しかし、今回観測された300–380 Kという非一様性は、これまでに知られている気温や吸収物質の変動幅では説明できなかった。また、同時に観測した<sup>12</sup>CO(J=1–0)の吸収線からは、高度100 km付近での大気循環は昼夜間循環が卓越しており、風速は150 m/s以上に達することが示された。

Venusian spectra at the terahertz region are characteristic of several rotational absorption lines of minor constituents superposed on a continuum of the atmospheric thermal emission. The intensity of the continuum emission varies from 700 to 200 K with increasing the observing frequency from radio to terahertz region, which enables us to observe the Venusian atmosphere in a wide vertical range: from the surface to the cloud top. The rotational lines provide us effective tools not just to retrieve the vertical and horizontal distribution of minor constituents but also to measure the wind velocity via Doppler-shift of the line center frequency. In this paper, the results of the aperture synthesis observations of Venus with the Nobeyama Millimeter Array are presented.

#### [キーワード]

テラヘルツ波, 金星大気, リモートセンシング, 電波干渉計, 開口合成

Terahertz radiation, Venus, Remote sensing, Interferometer, Aperture synthesis

### 1 はじめに

金星は地表面で90気圧にも達するCO<sub>2</sub>大気を持ち、高度50 km付近には厚さ数kmにも及ぶ硫酸液滴の雲が全球を覆っている。大量のCO<sub>2</sub>ガスは温室効果を引き起こし、地表での気温を700 K以上に至らしめている。これらの特異な大気構造に加えて、金星の下層大気(地表から高度

70 km付近)は、惑星自転速度の60倍にも達する高速で定常的な西向き循環(スーパーローテーション)を形成していることが知られている。地球のすぐ隣にあり、しかも固体惑星の大きさが非常に近いにもかかわらず、その表層環境は何故ここまで大きく掛け離れたのか?この問いに答える鍵は、現在の金星気候システムを解明することにあると考えられる。

金星の気候システムを観測的に研究するためには、大気組成や大気循環の3次元的把握が不可欠である。それには、分厚い大気を様々な高度まで見通す観測が重要となる。しかし、可視光を利用した観測では、光学的に厚い大気と雲層に遮られ、雲頂(高度70 km)よりも下方の様子を探ることは不可能である。1980年代に入り、CO<sub>2</sub>大気が光学的に薄くなり、金星夜面において雲層より下の大気を見通せる“大気の窓”が一部の近赤外領域で発見された[1]。しかし、この窓を利用しても、下層大気中の限られた高度の情報しか得られず、また、夜面しか観測できないというジレンマがある。

この状況にブレイクスルーをもたらすのが、テラヘルツ波を利用したリモートセンシングである。テラヘルツ波のうち、周波数0.1 THzといった低周波数帯では、金星大気の透過率が可視光領域よりも高く、雲層による散乱・吸収効果は可視光領域と比較して小さい。さらに、テラヘルツ波では、太陽光は金星大気の熱放射と比較して無視できる。そのため、テラヘルツ波を利用することで、これまで観測されていなかった雲の下の様子を昼夜両面で知ることが可能になる。テラヘルツ波のもう一つの特徴としては、金星の中間圏(高度70–100 km)に存在する微量成分(COやH<sub>2</sub>O等)の回転遷移線が観測される点を指摘できる。テラヘルツ波観測で実現される高分散分光観測は、これら微量成分の鉛直分布のリトリバルを可能にするだけでなく、吸収線の中心周波数が金星の大気循環によってドップラーシフトしている様子さえも観測可能にしている。

本文は、野辺山ミリ波干渉計を利用した0.1 THz帯での金星観測の結果を中心に、テラヘルツ波で開かれる金星大気のリモートセンシングについて述べるものである。まず、2で電波干渉計を利用した金星観測に関して簡潔に言及する。その後、3以降で、金星大気からの熱放射(連続波)を対象した高度50 km付近の観測と、分子吸収線を対象した高度100 km付近の観測について記述する。

## 2 干渉計を利用した開口合成観測

電波干渉計とは、複数の電波望遠鏡(アンテナ素子と呼ばれる)を離れた場所に設置し、各素子で受信される信号の相関を取ったのちに結合させ

ることで、あたかも一つの大口径望遠鏡で観測されたような画像を合成(開口合成)する観測装置である。電波望遠鏡が分解可能な離角の小ささには理論的限界値(回折限界)があり、それは望遠鏡の主鏡(アンテナのパラボラ)の大きさ及び観測波長の短さに比例する。最近の地上望遠鏡を利用した光学観測では1"以下の空間分解能が一般的となっているが、同等の空間分解能をテラヘルツ波(0.1 THz)の観測で実現しようとする、口径750 mにも及ぶ非現実的な巨大パラボラが必要となる。この問題を解決するために考えられたのが電波干渉計を利用した開口合成観測である。野辺山ミリ波干渉計では、6基の口径10 mのアンテナ素子を最大350 m離して設置することができ、0.1 THzの観測では最高空間分解能~2"を実現している。これは、欧米のPlateau de Bure干渉計やCARMA干渉計と比較しても、世界最高レベルの観測性能である。

本章では、データ解析の詳細を記述するのではなく、干渉計を惑星観測に利用する際の留意点について言及したい。なお、各アンテナ素子で取得された信号が干渉計の出力となるまでの信号処理や、観測データから電波画像を合成する解析方法に関しては、Thompsonらの参考文献[2]が詳しい。

### 2.1 輝度分布一様成分の resolve out

高空間分解能を誇る電波干渉計ではあるが、その弱点の一つに、空間的に一様に広がった構造を持つ電波源に対しては感度がないことが挙げられる。干渉計で得られるデータ  $o(u, v)$  (ビジビリティと呼ばれる)は、観測対象の輝度分布  $I(x, y)$  をフーリエ変換したものに相当する。

$$o(u, v) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} I(x, y) e^{2\pi i(ux+vy)} dx dy \quad (1)$$

式(1)ではアンテナの感度特性は無視している。 $(u, v)$ は、実空間座標  $(x, y)$  の空間周波数成分であり、観測における素子間の距離と観測周波数によって決定される。素子間の距離には物理的な制約(アンテナ口径よりも近い距離には設置できない)があるために  $(u, v) = 0$  付近の小さな空間周波数成分は観測できない。言い換えれば、干渉計では、特定の空間スケールよりも広がった構造を持つ輝度成分は観測されないのである。

Resolve out と呼ばれるこの問題は、惑星のように広がった構造を持つ観測対象では極めて深刻となる。図1は、視直径10–40"のディスク内に一様な輝度を持つ電波源を、野辺山ミリ波干渉計のC配列(素子間の距離が26–164 mの配列)で観測した際に得られる初期合成画像をシミュレーションしたものである。視直径が20"を超えると、ディスク構造が再現されず(二つに分離する)、観測されるフラックス強度も減少することが分かる。

この問題は、欠損している部分のビジビリティを何かしらのモデルで仮定することで解決される。惑星の輝度分布は第一次近似的には一様な周縁減光効果を伴ったディスク構造をしていると仮

定できる[3]。この仮定の下、観測ビジビリティに合うようなディスク状輝度分布のモデルビジビリティを求めてやることで、 $(u, v)=0$ のフラックス強度が得られる(図2)。

## 2.2 サイドローブパターンの除去

干渉計で観測したビジビリティから電波画像を合成する原理は、式(1)の逆フーリエ変換で与えられる。しかし、実際の観測では、離散的かつ有限の空間周波数サンプリングとなる点を考慮する必要がある。0と1の値を持つサンプリング関数 $s(u, v)$ を導入すると、実際の観測ビジビリティは、 $o_{\text{obs}}(u, v) = s(u, v)o(u, v)$ と表現される。これを逆フーリエ変換した場合には、実際の電波源構造 $I(x, y)$ にサンプリング関数の逆フーリエ変換関数 $S(x, y)$ が畳み込まれる。 $S(x, y)$ は合成ビームと呼ばれ、 $(x, y)=0$ 付近に存在する主ビームの外側に、正負に波打つサイドローブパターンを持っている。このサイドローブパターンの影響で、図1の初期合成画像では、モデルで与えたディスク電波源の外側にも電波源(正負の値を持つ)が在るかのような画像となっている。この初期合成画像から合成ビームのサイドローブパターンの影響を取り除いた後に初めて有意な画像が得られる。

点状電波源に対しては、複数のサイドローブ除去手法が確立されている[4]。しかし、それらの点状電波源用の手法を惑星のように広がった面光源に機械的に適用することは危険である。なぜなら、面光源では、サイドローブパターンによる偽の信号が面光源内部に重なってしまい、真の輝度分布の微細な振幅が埋もれていることがあるためである。例えば図3左端の画像は金星の初期合成画像であるが、この画像では輝度の微細構造は識別で

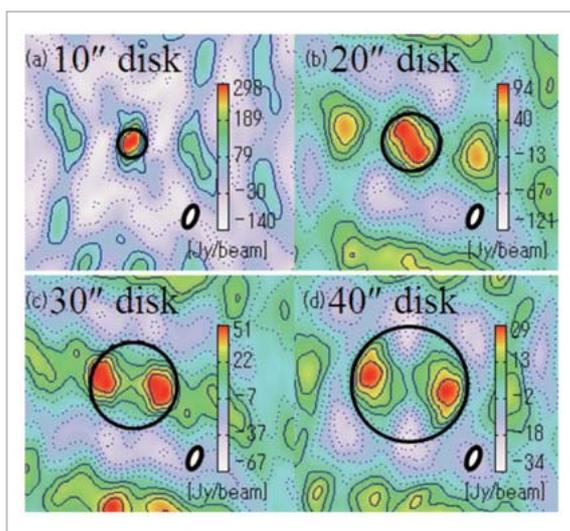


図1 Resolve outの様子

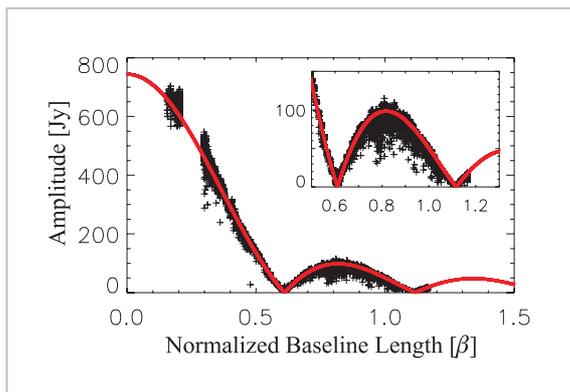


図2 金星ビジビリティ(黒点)と周縁減光ディスクのモデルビジビリティ(赤線)

横軸は空間周波数を金星視直径で規格化してある。フィッティングで得られた $(u, v)=0$ でのフラックス強度(全球平均の輝度温度)は337 K。

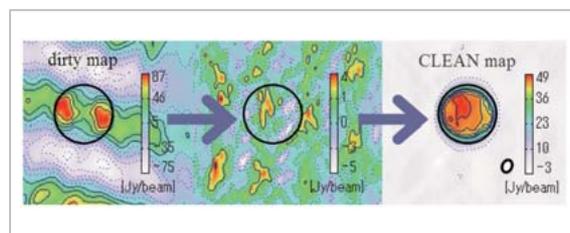


図3 サイドローブ除去の様子

詳細は本文を参照のこと。黒円は金星ディスクが在るべき位置を示す。また、本文中では触れていないが、本研究ではself-calと呼ばれる位相補正操作[6]を適用することで金星ディスク外部のノイズパターンを低く抑えている。

きない。これを解決するために、面光源用のサイドローブ除去作業を行う必要がある[5]。まず、広がった一様輝度成分をビジビリティからあらかじめ差し引いておき、その残差から合成される初期画像(図3中央)を微小な点状電波源の集まりと考える。残差画像に、点光源用のサイドローブ除去操作を繰り返し適用していき、最後に事前に差し引いた一様輝度分布を足し戻せば、2.1で記述した resolve out の成分も併せて補正した金星の画像となる(図3右端)。

## 2.3 より高い周波数での観測に向けて

観測ビジビリティの空間周波数は、素子間距離と観測周波数に比例する。同じアンテナ配列で 0.1 THz と 0.5 THz の観測を行った場合、0.5 THz で観測した方が、より高い空間周波数のビジビリティが得られることになり、より高い空間分解能で画像を合成することができる。一方で、0.5 THz の観測では、得られる最低空間周波数が 0.1 THz の観測よりも大きくなり、resolve out するフラックスも大きくなる。図2の観測ビジビリティの強度分布からも分かるように、ビジビリティの第一ヌル( $\beta \sim 0.6$ )よりも大きな空間周波数では、惑星のフラックス強度は急激に減少する。空間周波数が高くなるにつれて地球大気の揺らぎによるノイズが著しく増加するため、第一ヌルよりも低い空間周波数成分が無い観測値に、周縁減光ディスクのモデルビジビリティを精度良くフィッティングすることは難しい。このような場合には、単一鏡の電波望遠鏡を利用して( $u, v$ ) = 0 のフラックス強度そのものを追加観測する必要がある。

高い観測周波数では干渉計の視野の狭さも問題になる。干渉計の視野は各素子のアンテナ感度特性の半値幅で決定される。野辺山ミリ波干渉計の 10 m アンテナでは 0.1 THz で約 65" である。アンテナの口径を一定とすると、観測周波数が高くなるにつれ視野は小さくなる。仮に口径 10 m のアンテナで構成される干渉計で 0.5 THz の観測を想定した場合、視野は 15" にまで狭くなり、外合付近の視直径の小さな金星でしか全体像を観測できなくなる。この場合は、単一鏡で内合付近の金星をマッピングする方が、実効的な空間分解能は大きくなる。

## 3 雲の下を探る： 連続波を利用した観測

### 3.1 テラヘルツ波連続波観測の意義

テラヘルツ波における金星大気の光学的な厚みは、主に、大気主成分である CO<sub>2</sub> のコンティナム吸収によって決定される。これは、CO<sub>2</sub> 分子同士の衝突によって CO<sub>2</sub> 分子内に双極子モーメントが励起されることに由来するものである。図4(a)は、CO<sub>2</sub> コンティナム吸収を考慮した放射輸送方程式を解き、電波からテラヘルツ波にかけての金星の輝度温度を計算した結果である。輝度温度を金星大気の気温鉛直分布(図4(b))と対応させれば、どの高度の大気から射出された熱放射が観測されるのかが分かる。CO<sub>2</sub> のコンティナム吸収は、周波数が高くなるに従って強くなる[7]。その影響で、電波からテラヘルツ波にかけて 700 K から 200 K まで“連続的に”変化した輝度温度が観測される。これは、電波～テラヘルツ波連続波を利用した金星大気のリモートセンシングの有効性を端的に表している：観測周波数を適切に設定することで雲頂以下の任意の高度を自在に観測できるのである。

### 3.2 野辺山ミリ波干渉計での観測

図5に野辺山ミリ波干渉計を利用して取得した 0.1 THz (103 GHz) 連続波での金星輝度分布画像を示した。金星ディスクの内部で輝度分布が 300–380 K の変動を示している。この非一様性は過去の先行研究でも指摘されている[10]。本研究では彼らの観測よりも高い空間分解能で観測を行っており、その結果、先行研究で指摘されていたよりも空間的に微細で、かつ、振幅の大きな輝度温度変動が確認された。

本観測で得られた輝度温度 300–380 K は、雲層下部にあたる高度 50 km 付近の気温に相当する。金星の雲層は、0.1 THz 帯では光学的に極めて薄いと考えられ、輝度温度変動の原因にはならない[11]。雲の濃淡以外に、輝度温度の非一様性を作るものとしては、気温分布の非一様性と、0.1 THz 帯付近に複数の回転遷移線を持つ SO<sub>2</sub> と H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> の偏在が考えられる。過去のパイオニア・ビーナス探査機の降下プローブなどによる in-situ 観測から示唆されている高度 50 km 付近での気温

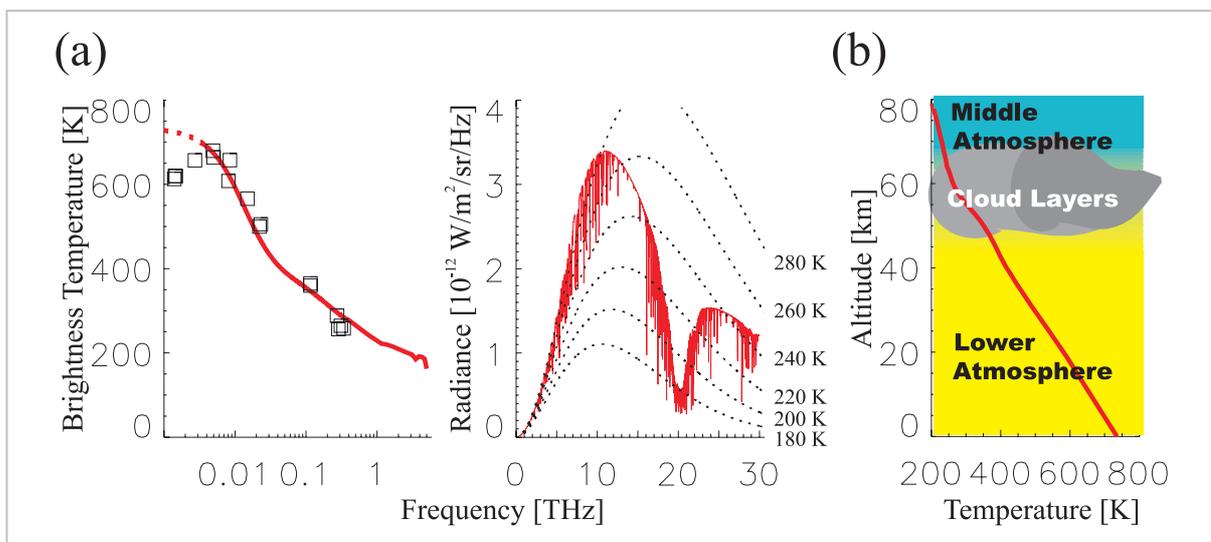


図4 (a)各波長における金星輝度の計算値。5 THz 以下は輝度温度に換算してある。180–280 K のプランク関数を重ねた。□は過去の電波観測で示された値[8]。この計算には地表面の emissivity を考慮していないため、センチ波では観測結果と一致しない。(b)金星の標準的な気温鉛直構造[9]。電波領域では金星地表面まで見透かせるのに対して、テラヘルツ波では雲層下部から雲頂にかけての大気が観測される。

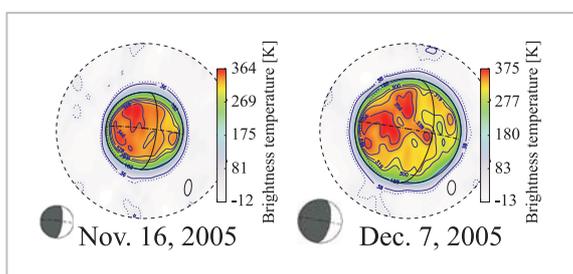


図5 野辺山ミリ波干渉計で取得した 103 GHz 連続波輝度分布の一例

金星の視直径は、それぞれ、30、40"であった。右下の楕円は、合成ビームのサイズ(空間分解能)。金星の外側にある点線円は、干渉計の視野。

の水平面内変動は、10 K 程度と考えられる[9]。SO<sub>2</sub>やH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>分布の非一様性に関しては、ベガ探査機の降下プローブ[12]やマゼラン探査機の電波掩蔽観測[13]で観測されている。しかし、それらの非一様性で再現可能な輝度温度の変動を放射輸送方程式を解くことで見積ると、340–360 K 程度の変動しか得られなかった。300–380 K という観測結果を、気温分布とSO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>の分布で解釈しようとする、それらの分布に今までに観測されている以上の非一様性を想定する必要がある。現段階では、そうした想定を裏付ける材料が不足しており、輝度温度明暗の生成物理を断定することはできない。しかし、本観測で示された輝度温度非一様性は、これまで近赤外波長を利用し

た雲の濃淡構造の観測でしか測る術がなかった高度 50 km 付近での金星大気構造に新たな知見を与えるものであると言える。

### 3.3 テラヘルツ波連続波観測の今後

今後、周波数 10 GHz 程度の帯域で、分解能 1 GHz の広帯域連続波スペクトルを取得するような観測が実現できれば非常に興味深い。そのような広帯域スペクトルを利用すれば、高度 40–60 km にかけての大気構造を 3 次元的に可視化することができ、また、SO<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>のコンテナム吸収の周波数特性の差を利用して、互いの影響を分離できるであろう。

観測周波数を高くしていくと、次第に雲粒の吸収・散乱効果も効いてくると考えられる。高周波のテラヘルツ波での観測例を増やすことで、金星の昼夜両面での下層雲の濃淡が観測可能になり、雲の物理パラメータの 3 次元分布が得られると期待される。ただし、テラヘルツ波における硫酸液滴の光学特性を実験室で取得しておく必要がある。

## 4 金星中間圏大気循環の可視化

### 4.1 <sup>12</sup>C<sup>18</sup>O(J=1-0)吸収線の観測

テラヘルツ波での高分散分光観測を利用することで、様々な大気微量成分の回転遷移線が観測で

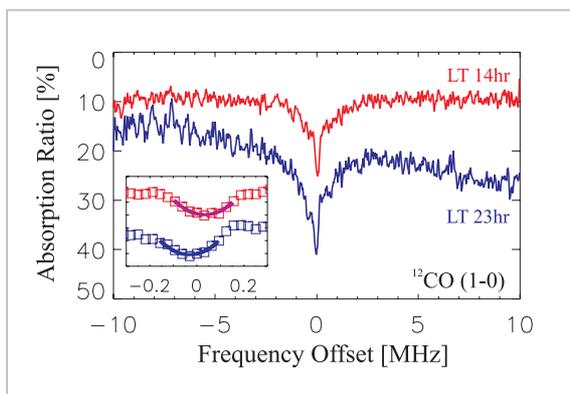


図6 金星の異なるローカルタイムで抽出した<sup>12</sup>CO スペクトル

横軸は静止周波数からの周波数差。吸収線中心部分の拡大図では、ドップラーシフト量の違いが見られる。

きる。金星では、これまでに 0.1–0.5 THz の領域で<sup>12</sup>CO、<sup>13</sup>CO、H<sub>2</sub>O、HDO、SO<sub>2</sub>などが観測されている [14][15]。これらの吸収線の中心周波数付近で観測される放射は、金星大気中間圏（高度 70–100 km 付近）に荷重関数のピークを持つ。したがって、3 で述べた熱放射連続波が雲よりも下を見ているのに対し、吸収線の観測では、雲よりも上の情報が得られることとなる。

著者らは、野辺山ミリ波干渉計を利用した<sup>12</sup>CO (J=1-0, 115.271 GHz) のマッピング観測を行った。使用した分光相関器の周波数分解能は 31.25 kHz (速度分解能 80 m/s) である。図 6 に、金星の真昼と真夜中付近 (14 時と 23 時) から抽出したスペクトルを示した。両スペクトルで、(1) 吸収の深さが異なり、また、(2) 吸収線の中心周波数もずれていることが分かる。(1) からは、高度 100 km 付近では、夜面で昼面よりも CO が濃く分布していることが判断できる。これは先行観測結果 [14] とも整合する。金星大気中の CO は、昼面における CO<sub>2</sub> の光解離で生成する。生成源のない夜面で CO が濃いという結果は、CO を昼から夜に輸送するような昼夜間での大気循環が高度 100 km 付近で存在していることを示唆している。

この昼夜間循環を直接的に可視化するのが、前述の (2) で示されているような、風速視線方向成分によって生じるドップラーシフトである。図 7 は、異なる観測日において、ドップラーシフト量 (観測直下点の吸収線中心周波数からの周波数差) をマッピングしたものである。2004 年 4 月や 2005 年 11 月のデータでは、金星の昼面でブルー

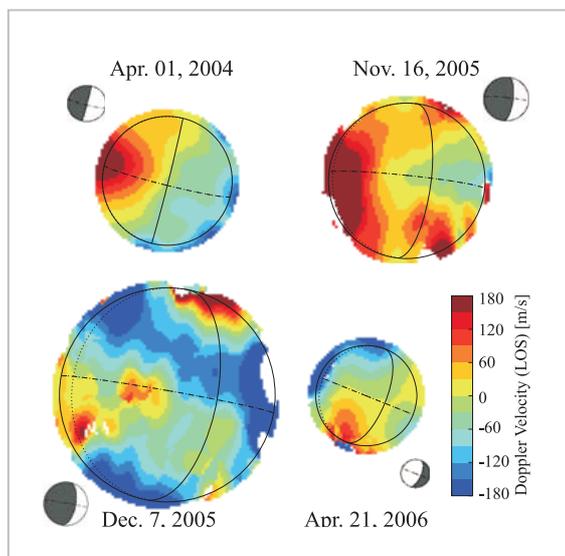


図7 ドップラーシフト分布。地球から遠ざかる向き (レッドシフト) を正としている

シフト、夜面でレッドシフトとなっている。昼夜でドップラーシフトの向きが反転している様子から、昼から夜に流れる風の様子が想像できる。このパターンは、スーパーローテーション (西向き帯状流) によって作られるパターンとも同様である。しかし、昼夜の位置関係が逆転している 2006 年 4 月の結果を見れば、スーパーローテーションよりも、昼夜循環が卓越していることが分かる。また、2005 年 12 月の観測では、局所的に夜から昼に風が吹いているような領域も示されており、中間圏の大気循環の非一様性を示唆する結果となっている。

#### 4.2 テラヘルツ波吸収線観測の今後

本観測で見られたような高度 100 km 付近での昼夜間循環と下層大気の運動を支配するスーパーローテーションの間では、風速はどのように変遷しているのだろうか？ これは、スーパーローテーションの形成メカニズムを議論する上でも重要な疑問である。テラヘルツ波には、今回観測した<sup>12</sup>CO 以外にも、複数の金星中間圏微量成分の吸収線が存在する。それら異なる光学的厚みを持つ複数の吸収線を併せて観測することで、中間圏の風速鉛直分布が観測的に明らかになる。例として、異なる次数での CO 同位体回転遷移線を観測した際の標準的な荷重関数を図 8 に示した。これらの観測で、高度 80–100 km にかけての情報が

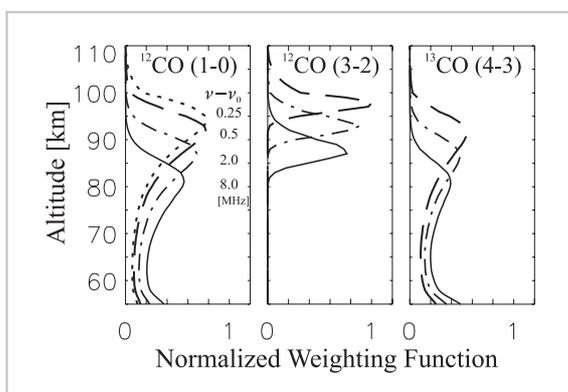


図8 異なる回転遷移のCO同位体を観測した際に予想される荷重関数

得られることが分かる。光学的厚みの異なる吸収線を同時観測することは、分子混合比と気温の鉛直分布をリトリーバルする際の精度を上げる観点からも有意義である。

## 5 むすび

本文では、テラヘルツ波を利用したリモートセンシングが金星大気の研究に効果的であることを

述べた。詳細は以下のとおりである。

干渉計を利用した開口合成撮像をすることで、テラヘルツ波でも惑星を空間分解する観測が実現される(2章)。テラヘルツ波で観測される熱放射は、金星の雲層下部から雲頂にかけての任意の高度を昼夜関係なくリモートセンシングする唯一無二の手段となる(3章)。また、テラヘルツ波に複数存在する分子回転遷移線は、これまで可視化する手段が極めて限られていた金星中間圏の大気循環を把握するのに最適である(4章)。

## 謝辞

本文は、著者の学位論文を基に構成したものである。野辺山ミリ波干渉計での共同利用観測及びデータ解析の議論に際しては、北村良実助教授(JAXA)、はしもとじょーじ氏(神戸大学)、中西康一郎氏(国立天文台)をはじめとして、多くの方々の協力・助言を頂いている。また、野辺山ミリ波干渉計の運営スタッフの方々からも多大なサポートを頂いた。ここに感謝する。

## 参考文献

- 1 Carlson, R. W., et al., "Variations in Venus cloud particle properties: A new view of Venus's cloud morphology as observed by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer," *Planet. Space Sci.*, 41, 477-485, 1993.
- 2 Thompson, A. R., J. M. Moran, and G. W. Swenson Jr., "Interferometry and synthesis in radio astronomy", Second edition, Germany, Wiley-VCH, 2001.
- 3 Butler, B. J., and T. S. Bastian, "Solar system objects", in *Synthesis imaging in radio astronomy II*, eds. G. B. Taylor, C. L. Carilli and R. A. Perley, San Francisco, Astronomical Society of the Pacific, 625-656, 1999.
- 4 Cornwell, T. J., "The application of closure phase to astronomical imaging", *Science*, 245, 263-269, 1989.
- 5 de Pater, I., "Radio images of the planets", *Annu. Rev. Astron. Astrophysics*, 28, 347-399, 1990.
- 6 Cornwell, T., and R. Braun, "Deconvolution", in *Synthesis imaging in radio astronomy*, eds. A. P. Richard, F. R. Schwab and A. H. Bridle, San Francisco, the Astronomical Society of the Pacific, 109-121, 1989.
- 7 Gruszka, M., and A. Borysow, "Roto-translational collision-induced absorption of CO<sub>2</sub> for the atmosphere of Venus at frequencies from 0 to 250 cm<sup>-1</sup>, at temperatures from 200 to 800 K", *Icarus*, 129, 172-177, 1997.

- 8 Butler, B. J., et al., "Accurate and Consistent Microwave Observations of Venus and Their Implications", *Icarus*, 154, 226-238, 2001.
- 9 Seiff, A., et al., "Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude", *Adv. Sp. Res.*, 5, 3-58, 1985.
- 10 de Pater, I., F. P. Schloerb, and A. Rudolph, "Venus imaged with the Hat Creek interferometer in the J=1-0 CO line", *Icarus*, 90, 282-298, 1991.
- 11 Fahd, A. K., and P. G. Steffes, "Laboratory measurement of the millimeter wave properties of liquid sulfuric acid", *J. Geophys. Res.*, 96, 17471-17476, 1991.
- 12 Bertaux, J. L., et al., "VEGA 1 and VEGA 2 entry probes: An investigation of local UV absorption (220-400 nm) in the atmosphere of Venus (SO<sub>2</sub>, aerosols, cloud structure)", *J. Geophys. Res.*, 101, 12709-12746, 1996.
- 13 Kolodner, M. A., and P. G. Steffes, "The microwave absorption and abundance of sulfuric acid vapor in the Venus atmosphere based on new laboratory measurements", *Icarus*, 132, 151-169, 1998.
- 14 Lellouch, E., et al., "Global circulation, thermal structure, and carbon monoxide distribution in Venus' mesosphere in 1991", *Icarus*, 110, 315-339, 1994.
- 15 Gurwell, M. A., et al., "SWAS observations of water vapor in the Venus mesosphere", *Icarus*, 188, 288-304, 2007.



さかuchi ひでお  
佐川英夫

ドイツ・マックスプランク研究所  
博士(理学)  
惑星大気のリモートセンシング