

一番星へ行こう! 日本の金星探査機の挑戦 その41 ～LIRの新しい可能性～

神山 徹¹, 福谷 貴一², 今村 剛³,

(要旨) 中間赤外線カメラ(LIR)のデータ解析技術の進展から、LIRのデータに埋め込まれている様々な情報が得られるようになってきました。例えばスーパーローテーション維持機構に重要な「熱潮汐波」の全球的な構造を3次元的にとらえることに成功しています。また画像の低ノイズ化にも成功し、あかつきの悲願だった金星の夜の風速分布も手に入りつつあります。金星到着以降、巨大山岳波の発見など驚きの画像を送り続けているLIRの新しい展開についてご紹介します。

1. LIRによる金星観測

中間赤外カメラ、LIRでは8-12 μ mの赤外線を用い、対象からの熱放射を利用して観測を行います。このためLIRでは金星自身から放たれる熱放射を観測することができ、加えてこの波長帯では太陽光の反射は十分暗いことから、金星を昼・夜別なく観測することができます(図1)。雲頂高度の観測に関して、太陽光の反射を利用するUVIやIR1、IR2では、データは昼面だけに制限されることから、あかつきが搭載する5つのカメラのうちLIRだけが金星の昼・夜の区別がない観測データを提供可能です。

また、Pioneer VenusやVenus Expressなど過去の極軌道衛星とは異なり、あかつきは赤道軌道を周回しています。このためあかつきは赤道を中心として両半球に広がる現象の観測を得意とします。たとえば太陽光による雲の加熱を励起源とする「熱潮汐波」と呼ばれる、スーパーローテーションの生成・維

持に重要な大気波動があるのですが、熱潮汐波は赤道から極域、また昼・夜両面を覆う全球的な構造を持ち、過去の探査ではその全貌をとらえることが困難でした。あかつきの持つ赤道軌道と昼・夜の区別なく観測が行えるLIRの組み合わせにより、熱潮汐波の全球的な構造を観測的に捉えることが金星探査の歴史上はじめて可能になりました。

このように雲頂高度というある特定の高度において熱潮汐波の全球探査が可能となりましたが、大気現象は当然高度方向にも広がりを持ち、熱潮汐波の働きを理解するためには3次元的な探査が求められます。あかつきでは「電波掩蔽」観測により、電波が通過する緯度・経度に対して高度方向の情報を取得しているものの、より広範囲の3次元情報の取得は大気現象の理解に役立ちます。

このような課題があり、ミッションチームでは金星雲から放射される熱放射がどのように宇宙空間まで到達するか、放射伝達計算に基づき詳しい議論を行いました。議論の成果としてLIR単体でも(限定された高度範囲であるものの)高さ方向の情報が得られることが認識されました。本記事ではこの成果を活用し、熱潮汐波による温度場の3次元構造を明らか

1.産業技術総合研究所 人工知能研究センター
2.東京大学大学院 理学系研究科
3.東京大学大学院 新領域創成科学研究科
t.kouyama@aist.go.jp

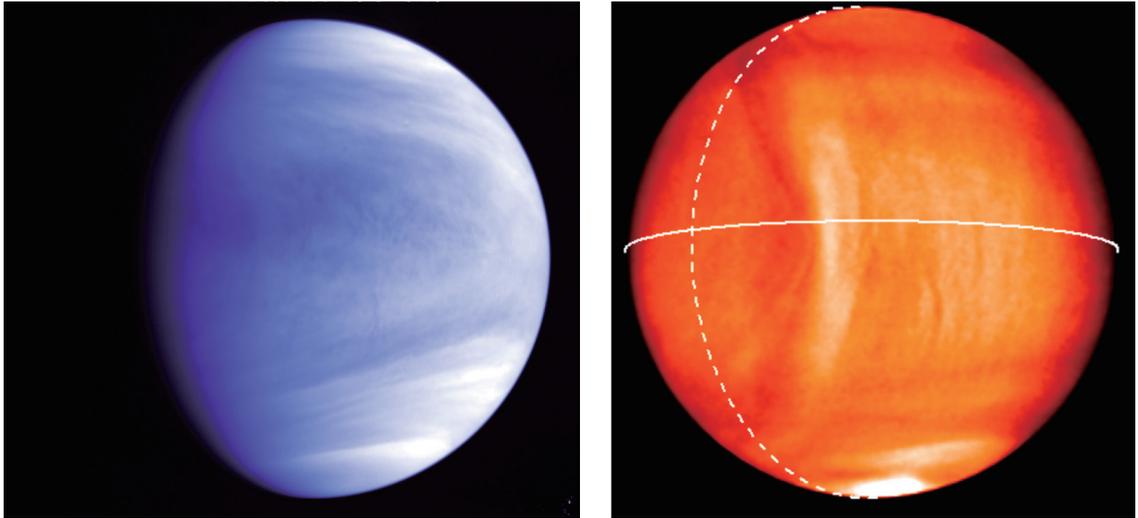


図1. 2015年12月7日に同じタイミングで取得された(a) UVI, (b)LIR観測画像. LIR画像中の実線は赤道, 白点線は昼夜境界線を示す. LIRは金星雲層から発せられる熱放射を観測するため, 昼・夜両面の情報が得られる.

にした結果を報告するとともに, さらにLIRのノイズ低減処理により, 金星雲頂高度における昼・夜両面の風速構造を得た成果について紹介します.

2. LIRデータ解析の新たな展開

2.1 観測高度の出射角依存性を利用した, LIRによる大気3次元観測

LIRでは熱赤外波長を扱います. この波長は金星大気を深く透過できるものの, 金星を分厚く覆う雲により散乱を受けるため, LIRでは主に金星雲層高度から射出される熱放射が観測されることになります. この熱放射は単一の高度から射出されるものが観測されるわけではなく, 雲の散乱の程度に合わせある幅を持った高度範囲の熱放射が観測されることになります. 放射伝達計算によりLIRでは高度60-75kmの範囲から射出される熱放射が積分されたものを観測すると見積もられています[1].

このようにLIRでは金星雲層の上部高度を観測します. 一方で, 金星は全球をすきまなく雲が覆うことから, 熱放射が射出される向きによって雲の見

かけの厚みが変わることになります(図2a). この効果により出射角ごとにLIRが観測する高度が変化します. 図2bではどの高度がLIRによってより観測されるかの指標となる寄与関数を, いくつかの出射角について示しています. 直下観測条件では最も深い高度の情報まで得られる一方, 出射角が大きくなるにつれてその高度が上層にシフトしていく様子が分かります. 寄与関数の広がる効果により重なる高度幅あるものの, 直下視と出射角 60° では実効的に3 kmほど高度方向に差のある情報が得られると見積もられています[2].

出射角ごとにLIRデータを区別することができれば, 異なる高度の情報が得られることになります. ちょうど良いことに同じ出射角を持つ領域は金星ディスク上で同心円状に分布し, 出射角が大きくなるほど半径が大きくなり(図2c), 出射角ごとにデータを区別することが可能です. つまり2次元センサであるLIRから様々な高度の情報が得られることを意味しています. もともとLIRでの観測の特性として昼・夜区別なく全球的にデータが得られることは分かっていたのですが, さらに高度方向にも情報が得られる特性が認識され, LIR単体でも3次元的な情報が抽出

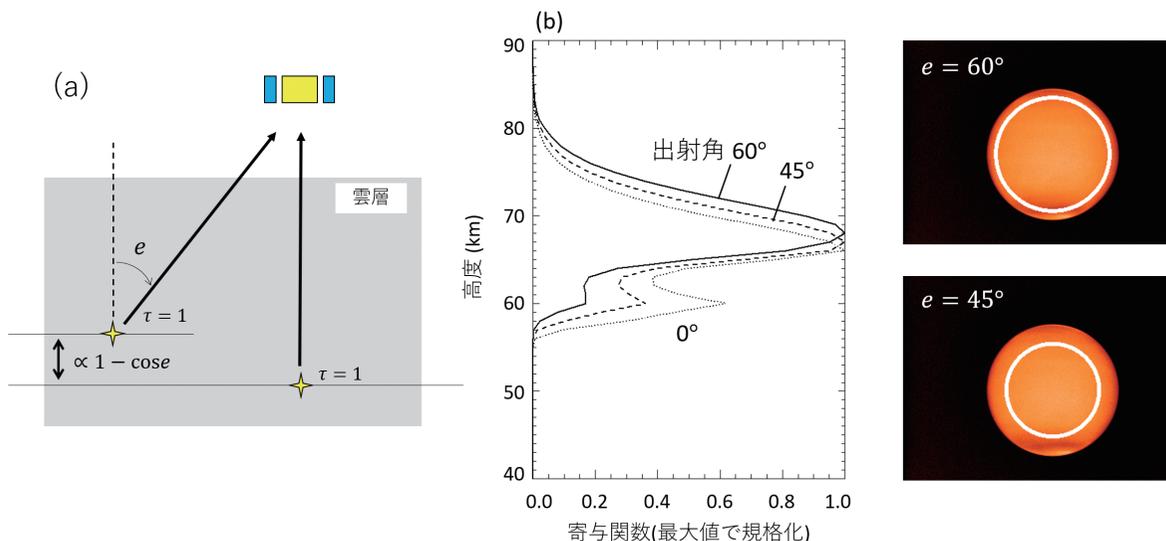


図2. (a) 出射角の違いによって観測高度が変わる概略図. e は出射角を示す. もし雲の密度がどの高度でも一定とすると, 光路長の変化に合わせて観測可能高度は $1 - \cos e$ に従って上昇する. (b) 出射角 0° , 45° , 60° における寄与関数の高度分布. (c) LIR画像中での出射角 45° , 60° に相当する領域(白線). Kouyama et al [2]より抜粋.

可能という測器としての新たな描像が得られています.

2.2 LIR画像の低ノイズ化による模様追跡

LIR観測の別の観点として, 軌道投入以前に予想された以上にLIR画像に小規模な雲の擾乱構造がみられない, という事情がありました. 事前に行われていた地上観測の研究成果等から, LIRでも紫外波長でみられる細かな模様のような小規模な大気の乱れが観測されると期待されていました[3]が, 実際には小規模な擾乱による温度の乱れをLIR画像で識別することは困難でした. これは2.1章で示したようなLIRが持つ10kmの幅の寄与関数による効果が影響していると考えられています. 寄与関数の幅分, 高度方向に情報が足し合わされ, 高度方向に小さな構造をもつような温度擾乱はその振幅がキャンセルされ, LIRのもつ温度分解能($\Delta T = 0.3$ K)を下回ってしまうためです. 逆にLIRによってはじめて同定された地形固定の「定在波[4]」にとってはこの特性は有利に働きました. 定在波は鉛直波長が100 kmにもなると予想され, 大気下層から雲層までつながった構造を持つことから鉛直積分の効果はあまり

効かず, 他の構造に対して相対的に強調される形になります. 事実LIRでは大小さまざまな定在波構造の検出に繰り返し成功しています[5].

では本当に高度方向にもスケールの小さい小規模擾乱の情報はLIRでは検出できないのでしょうか. 結論としてはLIR画像の温度分解能を向上させることにより, その検出ができました. LIRの温度分解能はノイズ成分によって決まっています[6]. そのあらわれ方はランダム的であり, シンプルに画像を重ね合わせることで統計的に減少させることが可能です. 一方で単純に画像を重ね合わせるのではなく, LIR画像を緯度経度展開したL3プロダクト[7]を用い, スーパーローテーションとともに動く座標上において画像の重ね合わせを実施しました. これによりスーパーローテーションによって移流される成分のみが強調されることとなります(地形固定成分も除去できる). 結果, 期待した通り温度分解能が向上し, 目視においても相関などの統計処理においても雲模様の識別性が改善しました(図3 [8]).

この成果によりついにLIRによる大気擾乱の追跡が可能となり, これまで世界でまだ誰も成功していない, 雲上層高度(65-70km)における昼・夜の区別

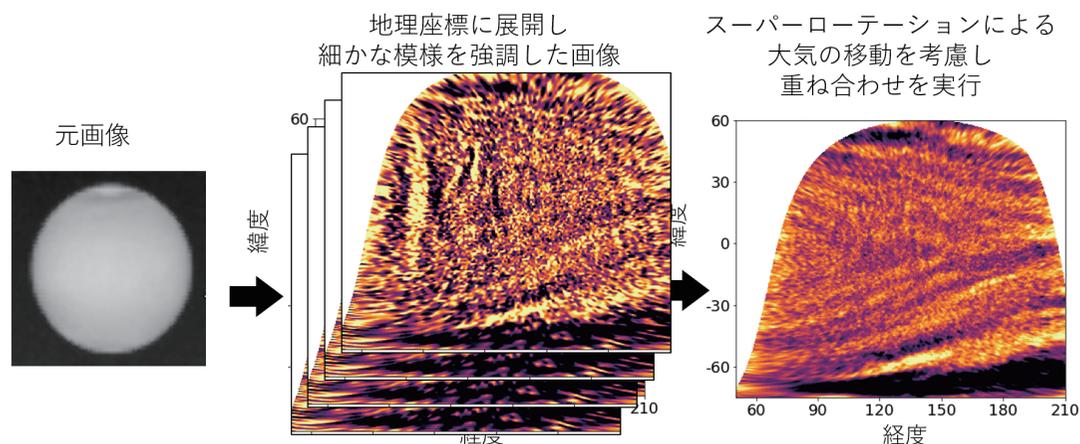


図3. 重ね合わせによるノイズ低減手法の流れとその効果.

のない風速分布の導出が可能となりました.

3. 観測成果

3.1 熱潮汐波による温度擾乱の全球構造

2.1章で紹介した通り, LIR観測高度の出射角依存性と, あかつき赤道軌道上からの全球観測の組み合わせにより, 熱潮汐波の構造が(雲上層高度に限定されるものの)3次元的に得られました. まず図4では出射角60°に着目し(代表高度: 69 km), 2016年10月から2019年1月まで, 3金星年以上のLIR画像を平均して得られた熱潮汐波構造を示しています. 南北両半球とも赤道から中緯度帯まで波数2, 半日潮汐成分の構造が卓越し, 緯度45°より高緯度帯では波数1, 一日潮汐成分の構造が明瞭になる様子が見られています.

このように両半球にわたり, ローカルタイムに欠けないデータセットが得られたのはLIRが初めてです. さらに1金星年ごとに熱潮汐波構造の調査を行った結果, 振幅, 位相どちらも時間変化が小さく, 安定して存在することが確認されました[2].

次に異なる出射角ごとにデータを平均し, 高度による構造の違いが調査されました. 赤道での輝度温度プロファイルを位相角ごとに表示してみると, 出射角が大きくなるにつれ, つまり高度が高くなるにつ

れ, ローカルタイムが小さくなる方向に半日潮汐成分の位相が変化する様子が確認され(図5), 同様の高度を観測した電波掩蔽観測[9]と良い整合性を示していました. この位相関係は下層で励起された熱潮汐波が上方に向かって伝搬している様を示すものであり, 熱潮汐波が少なくとも定性的にはスーパーローテーションを加速している証拠をとらえたと考えられています. このような観測事実は理論研究に有益な情報として活用が検討されています.

3.2 昼と夜とで異なる南北風の向き

2.2章で示したように, スーパーローテーションによる大気の移動を考慮しながら画像を重ね合わせることで, スーパーローテーションに乗って, あるいはスーパーローテーションに近い速度で移動する模様のみが強調されます. 1時間おき, あるいは2時間おきに取得されたLIR画像を昼側10時間, 夜側9時間分の平滑化幅を持って重ね合わせた結果を図6に示しています. 昼面, 夜面ともに目視でも確認できるほど雲模様が明瞭になり, 昼側で雲模様が赤道から極向きに発散していくさまが確認される一方, 夜側では逆に極から赤道に収束する模様の動きが確認されました[8].

このような南北風速の波数1構造が存在することは, 熱潮汐波の理論的研究から予想されていました(たとえば[10]). しかし紫外波長観測では観測範囲

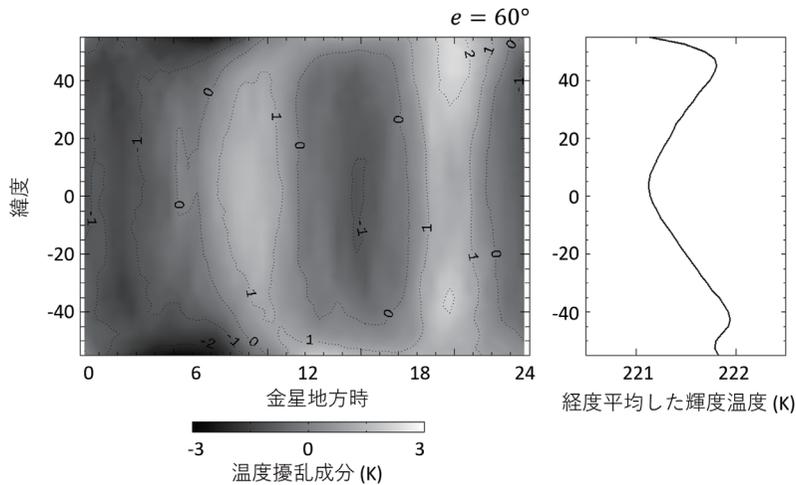


図4. LIRによって初めて同定された熱潮汐波の全球構造(出射角60°のデータを利用). 3金星年分のLIR画像を平均処理することで導出. 熱潮汐波は太陽光加熱を励起源とするため, その構造が固定されている金星地方時—緯度座標系において平均処理を行った.

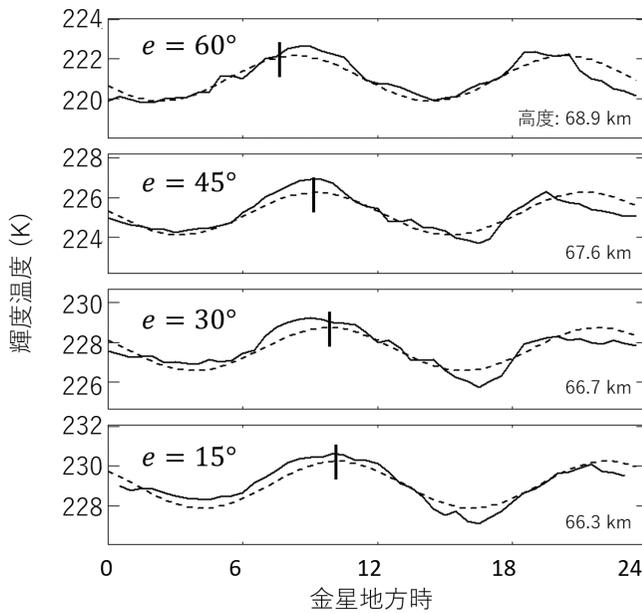


図5. 複数の出射角を用いて導出した赤道上空での温度プロファイル(実線). 点線は波数2成分のフィッティング結果を示す. 高度による位相変化を見やすくするため, 金星の午前域に存在する温度極大位置にマークをした.

が昼側のみに限られるなど, 過去の探査で観測的に確かめた事例はなく, LIRにより初めて同定されました. ここまでは定性的な評価ですが, 波数1構造の強度や昼・夜平均した際に残る全球平均としての南北風の強さ(つまり子午面循環の真の強度)につい

て, 定量的な調査がまさに今行われています.

4. まとめ

本記事では最近目覚ましい発展のあった, あかつ

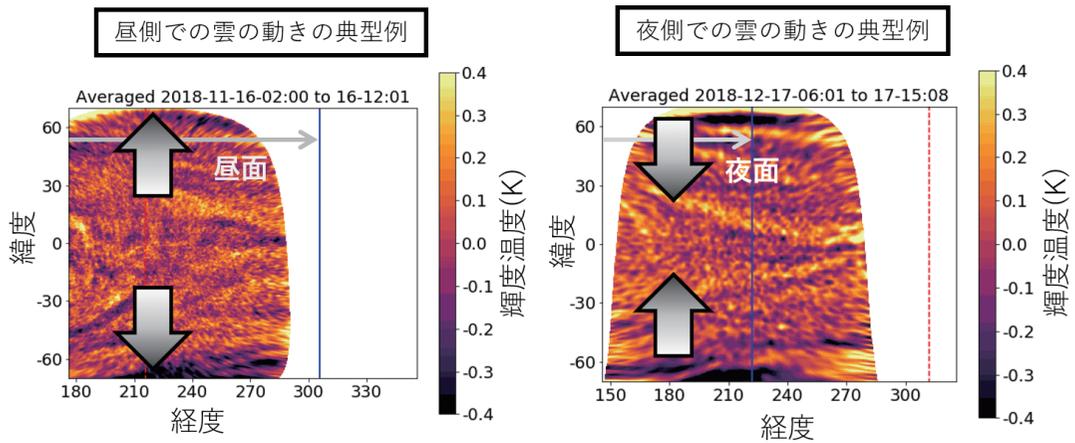


図6. ノイズ低減処理により取得された昼・夜のLIR緯度経度展開画像. 矢印は確認された雲模様の南北移動方向を示す.

き/LIRの解析手法について紹介するとともに、この手法を用いて得られた観測成果、特にスーパーローテーションの維持・生成に深く関与していると考えられている熱潮汐波に関する成果を紹介しました。過去の観測では得られなかった情報が手に入ったことにより、理論的研究がさらに進むものと期待されています。

また画像重ね合わせによるノイズ成分を低減する処理そのものは一般的な処理であるものの、長くミッションに参加しているメンバー(また長くあかつきデータを見ているはずの世界中の研究者)では雲模様を効果的に抽出する手順にまでは到達できませんでした。画像重ね合わせに関する成果は新しくミッションに参加したメンバーがフレッシュな視点で試行した結果であり、それが世界初の成果につながりました。思い込みのない新しい視点をミッションに加えることの大切さもこの研究成果から再認識しています。

参考文献

- [1] Taguchi, M. et al., 2007, *Advanced Space Research* 40, 861.
- [2] Kouyama, T. et al., 2019, *Geophys. Res. Lett.* 46, 9457. doi: 10.1029/2019GRL083820.
- [3] Sato, T. M. et al., 2014, *Icarus* 243, 386.
- [4] Fukuhara, T. et al., 2017, *Nat. Geoscience* 10, 85.
- [5] Kouyama, T. et al., 2017, *Geophys. Res. Lett.* 44, 12098. doi: 10.1002/2017GRL075792.
- [6] Fukuhara, T. et al., 2011, *Earth Planets Space* 63, 1009.
- [7] Ogohara, K. et al., 2017, *Earth Planets Space* 69, 167.
- [8] Fukuya, K. et al., 2019, *In proc. EPSC-DPS2019*, 397.
- [9] Ando, H. et al., 2018, *J. Geophys. Res.* 123, 2270.
- [10] Takagi, M. et al., 2018, *J. Geophys. Res.* 123, 335. doi: 10.1002/2017JE005449.