

「あかつき」が見せる金星大気構造の全貌

安藤紘基¹, はしもとじょーじ², 佐藤隆雄³, Lee Yeon Joo³, 岩上直幹⁴,
高木聖子⁵, 佐藤毅彦³, McGouldrick Kevin⁶, 田口真⁷, 福原哲哉⁷,
渡部重十⁸, 山崎敦³, 高橋幸弘⁹, 今村剛¹⁰, 中村正人³

1. 京都産業大学, 2. 岡山大学, 3. 宇宙科学研究所, 4. 専修大学, 5. 東海大学,
6. NASA, 7. 立教大学, 8. 北海道情報大学, 9. 北海道大学, 10. 東京大学

Venusian atmospheric structure revealed by Akatsuki

Hiroki Ando¹, George Hashimoto², Takao Sato³, Yeon Joo Lee³,
Naomoto Iwagami⁴, Seiko Takagi⁵, Takehiko Satoh³, Kevin McGouldrick⁶,
Makoto Taguchi⁷, Tetsuya Fukuhara⁷, Shigeto Watanabe⁸, Atsushi Yamazaki³,
Yukihiro Takahashi⁹, Takeshi Imamura¹⁰, Masato Nakamura³

1. Kyoto Sangyo University, 2. Okayama University, 3. ISAS, 4. Senshu University
5. Tokai University, 6. NASA, 7. Rikkyo University, 8. Hokkaido Information University,
9. Hokkaido University, 10. The University of Tokyo

要旨

「あかつき」は5台のカメラ(IR1, IR2, LIR, UVI, LAC)を搭載している。これらは、それぞれ異なる波長に感度を持ち様々な高度における大気の水平構造を調べることができる。また、「あかつき」は超高安定発振器(USO)から作られる電波を用いて、気温の高度分布を測定して大気の鉛直構造を知ることも可能である。これらは相補的な関係にあり、金星大気を立体的に捉えることと等価である。本発表では、各観測機器で得られた初期結果を提示すると共に、複数の測器の観測結果を組み合わせで見えてきた金星大気の空間構造に関する知見についても報告する。

1. 各観測機器によって明らかにされた金星の姿

この章では、それぞれの観測機器によって得られた観測成果を簡潔にまとめて記述する。

A) IR1 カメラの成果

IR1 カメラは、 $0.9\mu\text{m}$ の波長帯で昼面における太陽散乱光を捉えることで雲層下部の風速を導出する。また、 $1.01\mu\text{m}$ で夜側の地表面を観察し、活火山の有無を調べる。さらに、 0.97 と $1.01\mu\text{m}$ の 2 波長で夜側における地表面付近の H_2O を定量できる（図 1）。

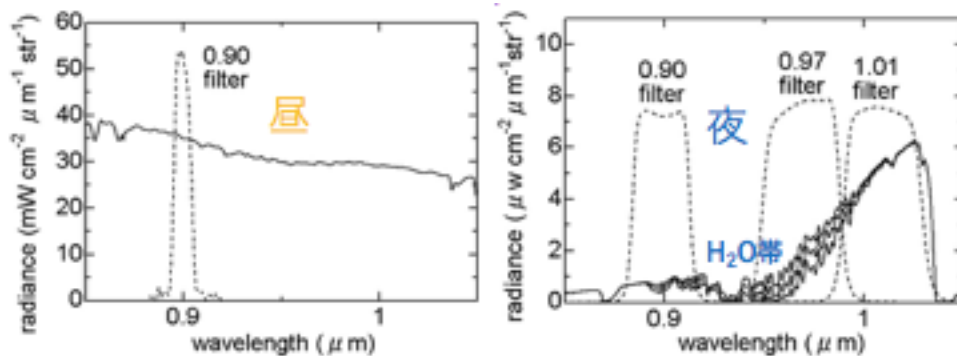


図 1 IR1 カメラが捕捉する波長帯の概念図。

図 2 は昼側の雲層下部（高度 50 km 辺り）における大気の運動を捉えたものである。雲の模様が時間と共に変化しており、これを追跡することで雲層下部での大気循環の様子を考察できると期待する。また図 3 は金星の地形と放射輝度を比較したものである。地形が高い所では気温が低く放射輝度が小さくなっており、地表面の大気の様子を精度良く捉えることができています。今後は、地表面の輝度の変化を捉えることで、活火山の有無に決着をつけたい。

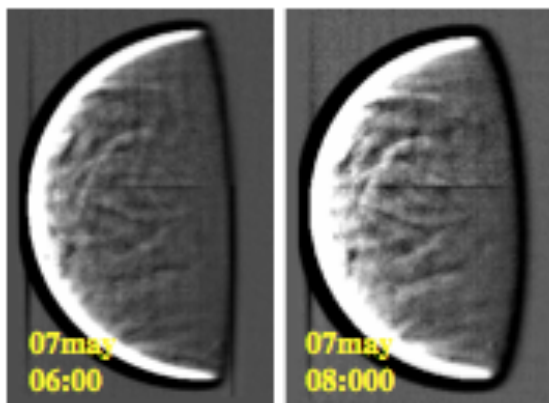


図 2 高度 50km 辺りの昼面における雲模様の時間変化。

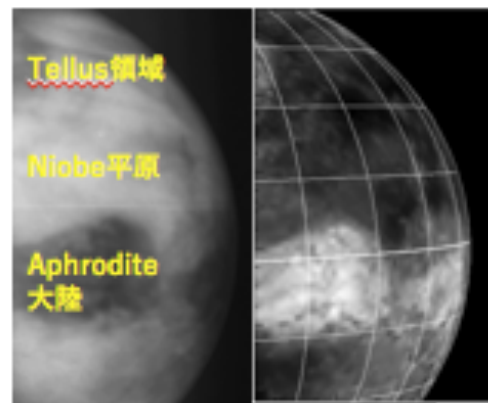


図 3 夜側地表面付近の放射輝度分布（左）と地形図（右）。左図は、明るい所ほど放射輝度が高いことを表し、右図では、明るい所ほど地形が高いことを示す。

B) IR2 カメラの成果

IR2 カメラは、 $2.02\mu\text{m}$ (CO 吸収帯) で昼面、 1.735 , 2.26 および $2.32\mu\text{m}$ (CO 吸収帯) で夜面を観測して、大気運動や雲の性質を探る (図 4)。波長 $2.02\mu\text{m}$ では CO_2 吸収量の差異を利用して雲頂高度のマッピングを行う。

図 5 は、精密な CO_2 吸収線データベを雲頂高度マップに変換したものである。昼面 $2.02\mu\text{m}$ 画像の暗部(明部)は CO_2 吸収の多い(少ない)=雲頂が低い(高い)領域を示している。赤道の対流セルを思わせる雲が高空に達していることが分かる。今後は、紫外模様や雲頂温度と比較することにより、雲層中の大気運動と気温の関係性を明らかにする。

濃硫酸雲は $1.74\mu\text{m}$ と $2.26\mu\text{m}$ で光吸収の度合いが異なるため、両者のデータから夜側での下層雲(高度 $48\sim 55\text{ km}$)のサイズ分布を調べることができる (図 6)。2 波長における放射強度の散布図には複数の異なるブランチがあり、それぞれが異なる雲粒サイズに対応する。雲粒サイズの空間分布は、微細な構造をもっていることが分かる。今後は、サイズ分布を追跡することによって下層大気の運動を調べる。

また、 2.26 , $2.32\mu\text{m}$ データの比較により、雲層より下(高度 $25\sim 35\text{ km}$)の CO 分布を見積もることができ、その緯度依存性や時間変化から下層の大気循環を調べる。この解析についても、現在進行中である。

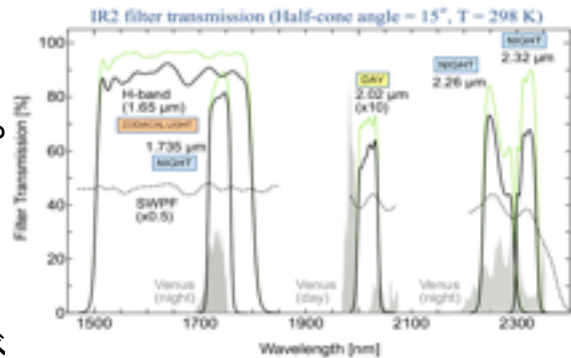


図 4 IR2 カメラが捕捉する波長帯の概念図。

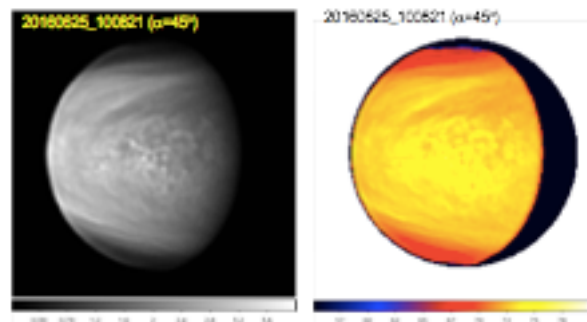


図 5 $2.02\mu\text{m}$ 画像から導出した金星昼面における雲頂高度分布。

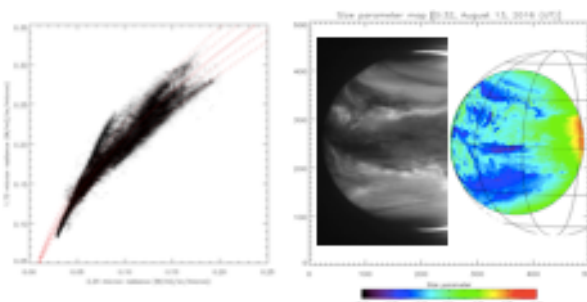


図 6 $1.74\mu\text{m}$ と $2.26\mu\text{m}$ 画像から導出した金星夜面での雲粒子サイズ分布。

C) LIR カメラの成果

LIR カメラは、波長 8–12 μm の赤外放射を使って雲頂域(~65 km)を撮像する (図 7)。温度が 230K の対象を観測したときの温度分解能は 0.3 K である。また、他の観測機器と異なり、昼面と夜面を同じ撮像条件で観測可能である。時間を隔てた複数画像の相関解析により、雲頂高度での風速ベクトル場も導出することができる。

図 8 は、軌道投入直後に LIR によって観測された雲頂高度における温度分布の日変化を示したものである。南北方向に伸びる長さ 10,000 km 以上の巨大な弓形の温度構造が夕方日照面に現れている。この構造は、2015 年 12 月 7 日~11 日の 5 日間に渡って、ゆっくりと回転する地表面に対してほぼ同じ位置に観測され、弓形構造の高温・低温領域の温度はそれぞれ 230-231K, 225-226K であった。また、より小さいスケールの弓形構造も低緯度領域に見られた。現在、この構造の成因について理論的な考察を進めている。

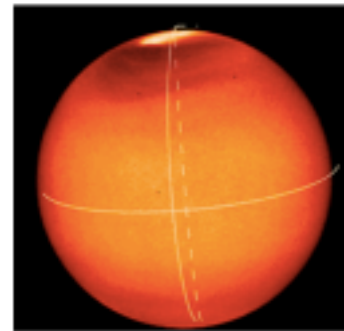


図 7 雲頂輝度温度分布の一例(2016 年 10 月 8 日)。このときは北極上空が最も高温になっており、それを取り巻く冷たい緯度帯(cold collar)も見られる。

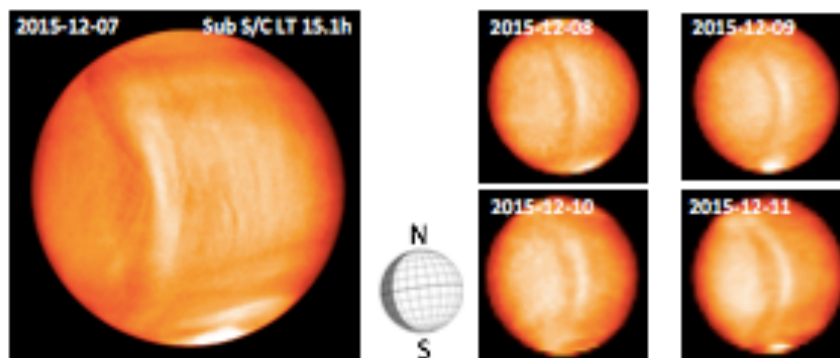


図 8 2015 年 12 月 7 日から 11 日の 5 日間にわたって雲頂高度で観測された、惑星規模の巨大弓形温度構造。

D) UVI カメラの成果

UVI カメラは、金星の雲による太陽光の散乱を紫外波長によって捉える。雲頂高度（65 km 辺り）にある SO_2 と未知の紫外吸収物質が暗い模様を作っていると考えられており、UVI カメラでは 283 nm（主に SO_2 の吸収）と 365 nm（主に未知の紫外吸収物質）の波長域で撮像する（図 9）。

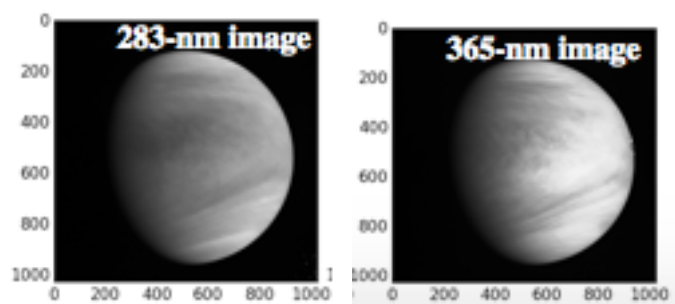


図9 軌道投入直度に紫外波長で撮影した金星の画像。

紫外画像を使えば、 SO_2 量や未知の紫外吸収物質の分布を知ることができる。283nm と 365nm のアルベドの相関が高い時と低い時がある。相関が低い時は、 SO_2 による吸収よりも、未知の紫外吸収物質の方が 283nm に対するアルベド分布に寄与していることを示唆する（図 10）。同様の解析を他のデータについて行い、 SO_2 量や未知の紫外吸収物質の分布を精確に調べ、そして金星における放射バランスの理解を深めたい。また、UVI 画像を解析して雲の模様の時間変化から風速の計測や波の水平構造を知ることができる。これらは金星大気の運動や力学の理解に役立つ。これらの解析も現在進行中である。

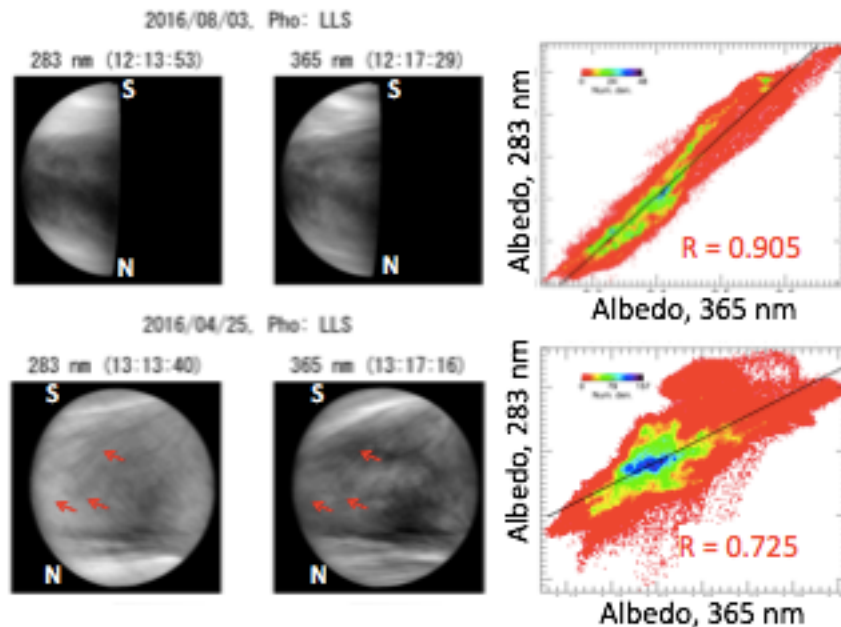


図 10 283・365 nm 画像と両波長に対するアルベドの相関。上は相関係数が高い時、下は低い時を示している。

E) USO の成果

衛星が惑星の背後に隠れる時または背後から現れる時に、超高安定発振器 (USO) から作られる無変調の電波を射出する。その際、電波は衛星の軌道運動に伴うドップラーシフトを受けながら、大気中を屈折して進み地上局にて受信される (図 11)。これを電波掩蔽法と呼び、金星大気における気温の高度分布を高精度 (温度測定誤差 ~ 0.1 K)・高分解能 (高度分解能 ~ 1 km) で測定することができる (図 12)。

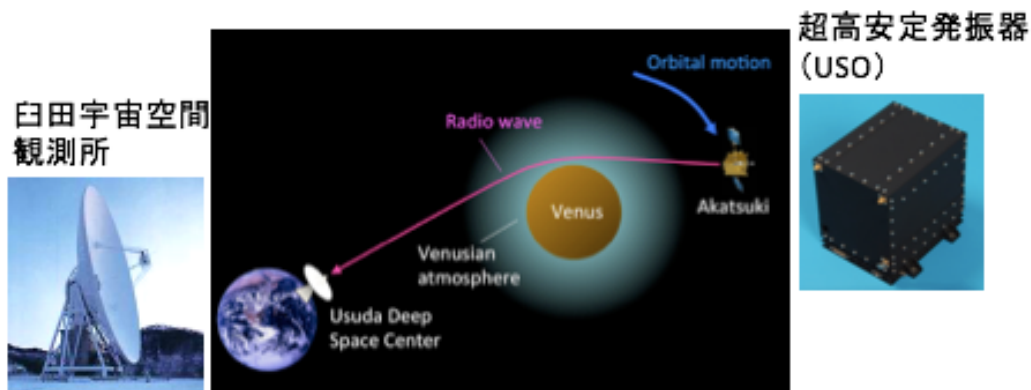


図 11 電波掩蔽観測のイメージ図

「あかつき」では、これまで電波掩蔽観測によって気温分布を 15 個取得した。低緯度における大気安定度を昼と夜に分けてプロットしたものを図 13 に示す。これを見ると、昼側に比べて夜側の方が中立層が深い、または変動が大きいことがわかる。また、中立層より上では大気安定度が夜側の方が変動が激しい。これは、夜側では対流が強く、その分だけ強い重力波が発生していることを示唆しており、過去の理論研究 (e.g. Imamura et al. 2014) と定性的に整合する。

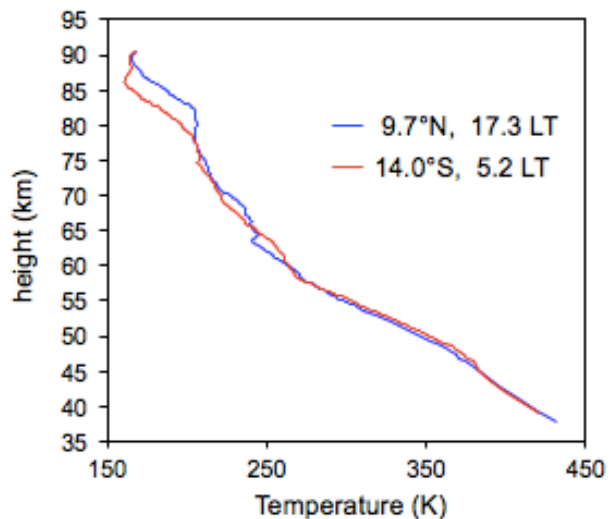


図 12 実際に得られた気温の高度分布の一例。データは、2016 年 5 月 6 日のもの。

電波掩蔽観測では、気温の高度分布の他に、電波受信強度の変化から金星大気中に含まれる硫酸蒸気の混合比分布も導出することができ、金星の雲物理の理解に役立つ。また、受信電波の位相から、金星電離層や太陽コロナの電子密度分布を調べることも可能である。これらのデータも別途解析中である。

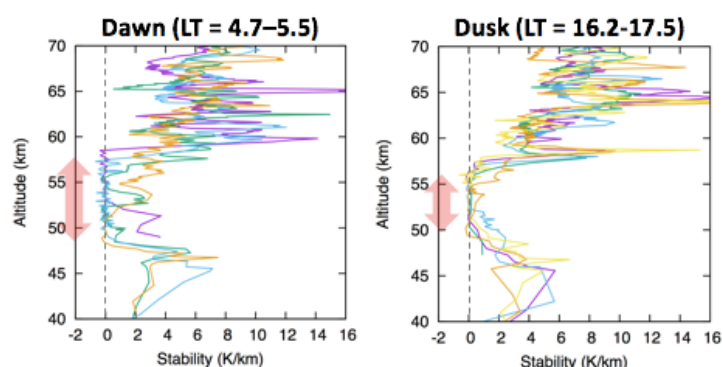


図 13 電波掩蔽観測から導出した大気安定度の高度分布の昼夜依存性。

F) LAC の状況

金星雷放電の存在に関する議論は、半世紀にわたって続いている。LAC はその終止符を打つため、32 μ sec の高速サンプリングとフィルタ直付の高感度 APD Array 検出器を武器に、<1.0 msec の高速発光現象を捉える (図 14)。

現時点では雷起源と思われる発光を捉えるには至っていない。今後は、雷活動の不定期活発化の可能性を視野に、惑星規模の Y 字雲模様、巨大地形構造や火山活動などを候補に戦略的な観測領域設定を行い、モニターを継続する。

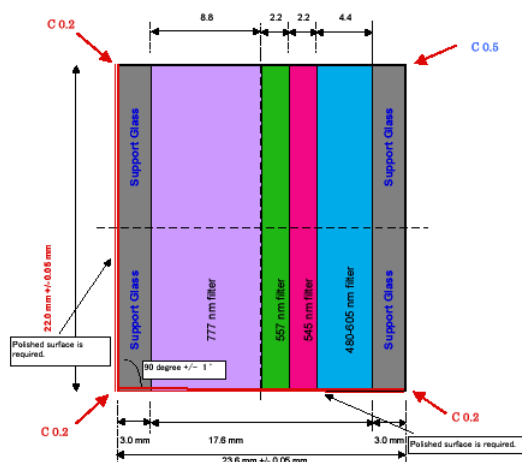


図 14 検出器の内装。777.4 nm は雷発光、557.7 nm は O 原子の大気光、545 nm は背景光、480–605 nm は O₂ の大気光をそれぞれ捉えることを目的としている。

2. 複数の観測機器の組み合わせから明らかになった金星の姿

A) LIR カメラと UVI カメラ

巨大な弓形温度構造は、UVI カメラにもかすかに映っている（図 15）。この構造が高度方向にどのように変化するか、両者をより詳しく調べ比べることにより、伝播特性や空間構造を明らかにしたい。

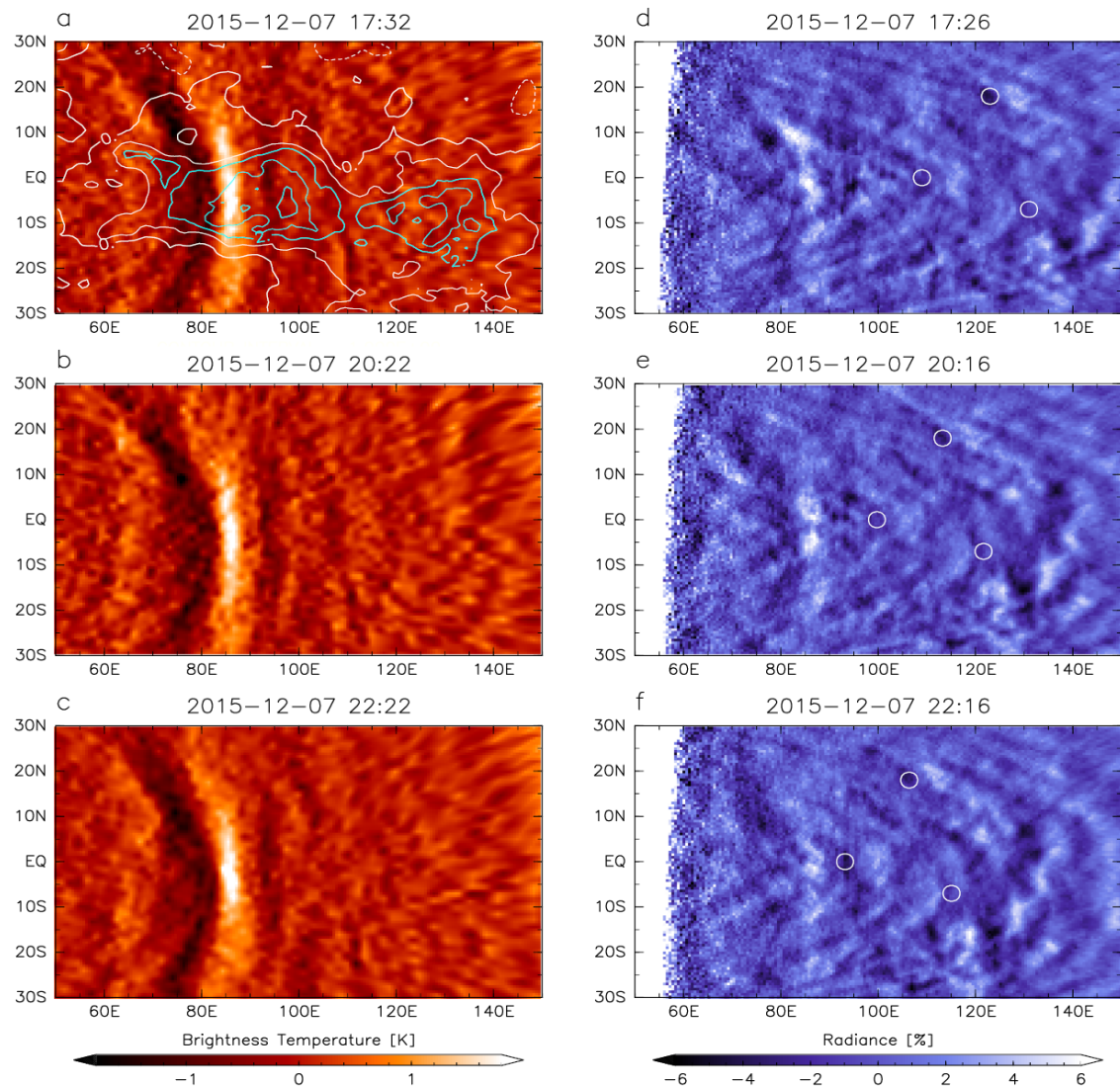


図 15 左はハイパスフィルター後の雲頂温度分布(LIR)であり、等高線は表面地形を表している。一方、右はハイパスフィルター後の紫外放射輝度(UVI, 283nm)のデータであり、3つの小さい○は風速 96m/s の東風による大気の移動を示す。

B) IR2 カメラと USO

雲の分布、特に雲の厚みは下からの赤外放射の透過度を決める一因であるため、気温や大気安定度の高度分布に影響を及ぼす。USO のデータと IR2 のデータを比較すると、雲が厚い所（画像の暗い所）では、高度 55km より上の大気安定度が大きくなっているように見える（図 16）。これは、雲量と大気安定度分布に何らかの関係性があることを示唆している。今後は、両データのサンプル数を増やし、より統計的な議論を進めていきたい。

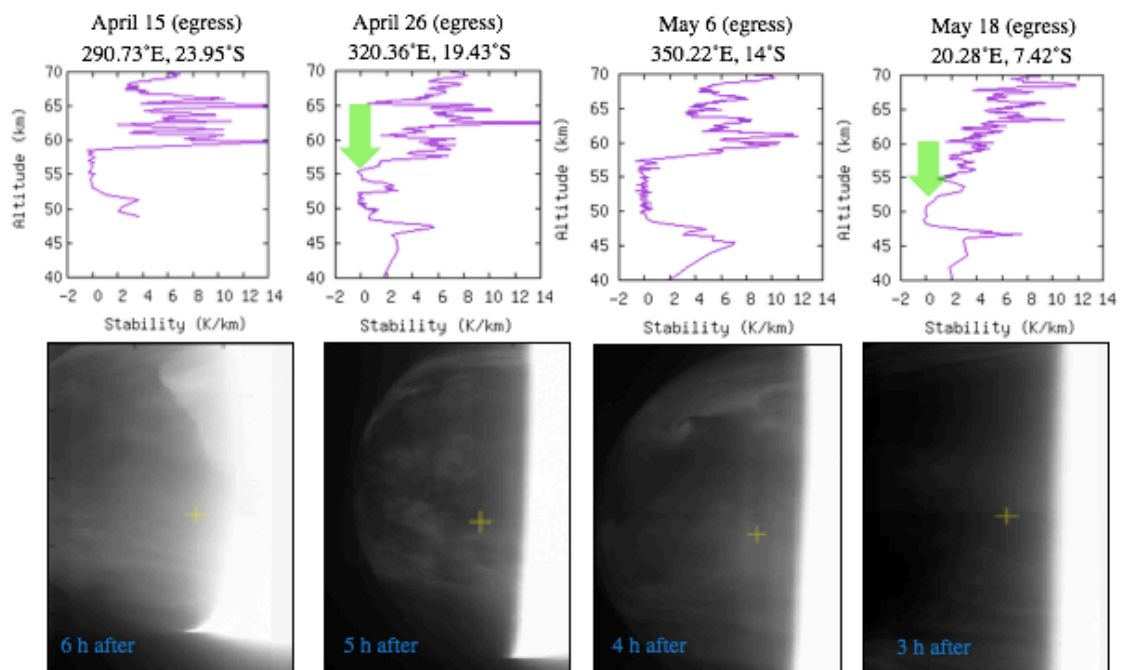


図 16 上は電波掩蔽観測から得られた大気安定度分布、下は IR2 の夜面画像から導出した雲量分布である。小さな+印は、電波掩蔽観測の観測点を表す。