

特集「金星研究の新展開」

金星の雲の形態学

今村 剛¹, 下山 学², 堀之内 武³

1. 雲が描き出すもの

惑星の気象を理解するために、大気中に生起する様々な擾乱や循環の空間構造を捉えたい。そのための正攻法は、多数の気象観測点を密に配置して気温や風速などを直接計測することであるが、地球以外の惑星ではそのような観測の実現はすぐには難しい。そこで、大気の運動に伴って作られる雲の分布や模様が注目される。雲画像が如何に雄弁であるかは多くの気象研究者の知るところである。たとえば地球のグローバルな雲画像には、低緯度のハドレー循環、中緯度の温帯低気圧（傾圧不安定）、熱帯域の積雲対流とその組織化、モンスーンのような大規模な海陸風など、地球気象の主要なプロセスが顕著に現れている。また、小規模な雲塊が時間とともに背景の風に流される様子から風速分布を求めることもできる。一方で雲は放射や潜熱を介して力学にフィードバックしており、雲の挙動には雲惑星特有の大気力学が映し出されている。

本稿では、金星の雲の模様に関する2つのトピックを、最近の我々自身の研究成果も織り交ぜて紹介する。これまでに得られた金星の気象データは極めて限られたものである。雲の模様は、この謎に包まれた世界を窺い知るための貴重な手がかりを提供している。

2. 金星雲頂での濃淡生成

金星の大気主成分は二酸化炭素であり、地表気圧は92 bar、地表気温は主に二酸化炭素がもたらす温

室効果のために740 Kに達する。およそ47~70 kmの高度には濃硫酸の液滴の雲（エアロゾル）が存在し、この高度では地球の対流圏~成層圏と同程度の気圧と気温である。高度57~70 kmの上層の雲は光化学起源で、大気の運動に伴う変動は比較的乏しいとされるが、それ以下の高度では凝結と蒸発が活発に起こっていると予想されている。金星の自転は西向きで周期243日と大変遅いが、大気にはスーパー・ローテーションと呼ばれる西向きの風が存在し、雲層はこの風に流されて4~7日で金星を1周する。

金星の雲はどこでも厚いため（光学的厚さ20~40）、可視域でのアルベドは場所によってあまり変化

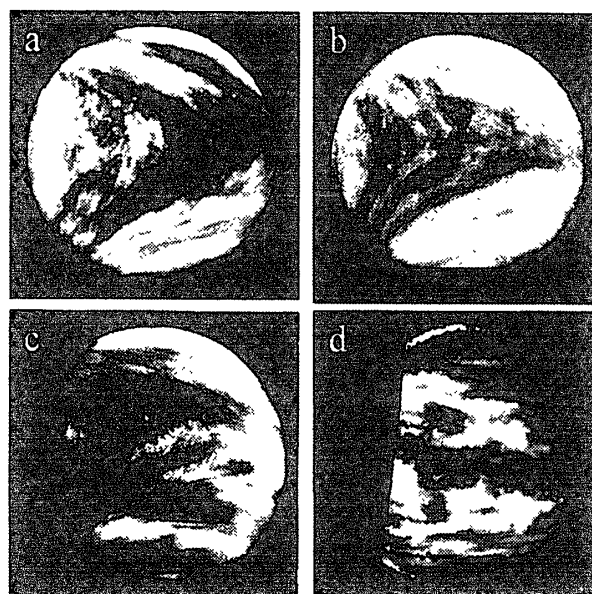


図1 (a) - (c) Pioneer Venus 搭載 Orbital Cloud Photopolarimeter による波長 365 nm での金星雲頂画像（文献[3]の図を改変）。(d) 1990年にGalileo木星探査機が金星でフライバイした際に、近赤外の窓の一つである波長2.30 μmで撮影した金星の夜側（NASAホームページより）。この波長では下層大気からの熱放射が漏れ出している。第5節を参照のこと。

¹ 宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部

² 東京大学大学院理学系研究科

³ 京都大学宇宙電波科学研究センター

せず, そのためにはっきりした模様は見えない. しかし波長 400 nm 程度以下の紫～紫外では状況が異なり, 雲頂 (高度 65～70 km) に濃淡模様が観察される (図 1a-c). おそらく何らかの紫外吸収物質が存在し, その物質が光学的に浅いところに存在する場合に, 雲による太陽紫外線の散乱が弱められて暗くなるものと思われる. 波長 320 nm 以下での吸収は主に二酸化硫黄によると考えられているが, それより長波長側での吸収物質は, 候補として元素状硫黄や S_2O や $FeCl_3$ などが挙げられているものの, まだ同定されていない[1]. これまで金星では, 主に後者の長波長側で Mariner 10 (フライバイ) や Pioneer Venus (周回衛星) などにより撮像観測が行われ, 様々な模様が観察されてきた (図 2).

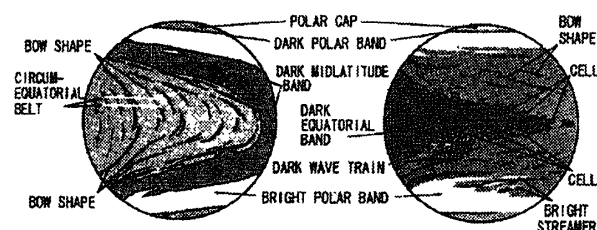


図2 金星の紫外画像に見られる特徴的な模様 (文献[2]の図を改変)

濃淡のコントラストの位相角依存性などから, 紫外吸収物質の濃度は雲頂 (光学的深さ 1 付近) から低高度で急激に大きくなると考えられている. そのような高度分布は, 紫外吸収物質が雲頂より上では光学的に分解され, それ以下では安定であることによるのであろう. 少なくとも, 波長 320 nm 以下で寄与するとされる二酸化硫黄は, たしかに雲頂より下で急激に混合比が大きくなるような分布をしているようである. そのような紫外吸収物質が上昇流によって運び上げられると暗部が生じる, というのが想定されているメカニズムである[2]. ただしその一方で, 雲頂付近での雲そのものの不均一な分布も濃淡に影響しているという指摘もあり, とくに高緯度の明るい部分には高高度での微細な粒子が寄与しているらしい[4].

3. 水平 Y 字模様の謎

3.1 大規模波動の相互作用

紫外での模様のうち最大かつコントラストの大きな (反射率が 20～30% 変化) 構造は, 赤道域から中緯度にかけて見られる東西波数 1 (東西方向 1 周あたり 1 波長) の模様で, 暗部が Y の字を自転方向 (西向き) に倒したような形をしていることから「水平 Y 字模様」と呼ばれている. Y 字は概ね周囲の大気と同程度の速度で西向きに動いており, 地形との関連は見出されていない. 赤道域での濃淡パターンは小規模な模様の動きから求められた東西風振動と概ね同期しており, このことから, dark equatorial band と呼ばれる Y 字の軸の部分 (図 2) は赤道ケルビン波によって作られる構造と考えられている. 赤道ケルビン波とは赤道波の一種で, 南北方向にはコリオリ力 (金星では大気自身の回転がもたらす) と気圧傾度力が地衡風バランスし, 東西・鉛直方向に内部重力波として伝播する. 赤道ケルビン波であれば背景風より速く自転方向に伝播するはずだが, Pioneer Venus の 6 年におよぶ観測によれば, 背景風に対する位相速度は $-3 \sim +16$ m/s (誤差 ± 5 m/s) の範囲に散らばっている[5]. サンプリングが疎らであることや昼側のデータのみを用いて求めた背景風速がグローバルな平均ではないことなどが原因かもしれないが, 今のところよく分からない. ここで取り上げる問題は, Y 字の腕, すなわち赤道から中緯度にかけて延びる暗部の傾きである. この部分は dark mid-latitude band と呼ばれ, dark equatorial band とは切り離して考える見方もあるが, 両者はセットで現れて Y 字を形作ることが多いらしい[3]. 赤道ケルビン波の位相は緯度によらないため, Y 字の腕の傾きは赤道ケルビン波だけでは説明がつかない.

この問題に対して, Covey and Schubert [6] は赤道ケルビン波とロスビー波の重ねあわせを提唱した. ロスビー波も自転する惑星上で存在できる波動で, 金星では紫外の濃淡の時系列データをスペクトル解

析した結果として東西波数1の南北対称な構造が検出されている。ロスビー波に伴う上下変位は中緯度で振幅最大となるため、赤道で振幅最大となる赤道ケルビン波と都合よく位相をずらして重ね合わせるとY字の腕の傾きを作れそうである。ただし両者の波は位相速度が異なるため、ある時期に都合良くY字になったとしても別の時期には反対方向を向いたY字になってしまう。

この困難を解決したのがYamamoto and Tanaka [7]である。彼らは雲層高度付近を取り出した簡単な力学・エアロゾル物理モデルにおいて下端から赤道ケルビン波を強制し、準平衡状態を調べた。その結果によれば、雲頂では、中緯度での力学的不安定から

生じたロスビー波と、上層に伝播した赤道ケルビン波が共存する。そしてこれらの波に伴う風がエアロゾルを輸送する結果として、雲頂での散乱係数の分布にY字のような構造が現れる。しかも、二つの波が相互作用してロスビー波の振幅が変動する結果として、反対方向のY字発生は抑制される(図3)。Y字のところでは雲が薄いため太陽光が低高度まで入射し、紫外吸収物質の影響を強く受けるため、暗く見えるだろうと言うのである。波の相互作用の過程はよく分かっておらず、また濃淡を定量的に説明できるのかどうか不明だが、興味深い仮説である。ただしここでは赤道ケルビン波は外から与えられており、その励起メカニズムは現在に至るまで謎である。

他のアイデアとしては、bow shapeと呼ばれる、赤道から中緯度にかけて細く伸びる沢山の弓状の構造(図2)に注目するものがある。Smith et al. [8]によれば、bow shapeは赤道域の熱対流で作られた小規模な模様が引き伸ばされながら水平移流して作られるものであり、移流させる風として軸対称な平均風に加えて赤道ケルビン波を考えれば、bow shapeの粗密がY字らしいパターンを作る。彼らはまた、波に伴う雲生成が赤外放射場を介して力学にフィードバックする過程を考えることにより、広帯域の擾乱によって赤道ケルビン波が卓越モードとして効果的に励起される可能性を示した。ただし彼らの研究では東西波数1の濃淡が生じる理由は説明されておらず、Y字の本質的な解決にはなっていないと考えられる。

3.2 新たなシナリオ

今村と堀之内[9]は最近、赤道ケルビン波と背景風によってY字が作られる可能性を検討した。背景風としては、雲頂での小規模な模様の動きから検出されている、ハドレー循環の上部と思われる極向きの風と中緯度ジェットを考える(図4)。赤道ケルビン波が赤道域で東西波数1の紫外吸収物質の分布を作り、それが背景風によって南西および北西方向に流

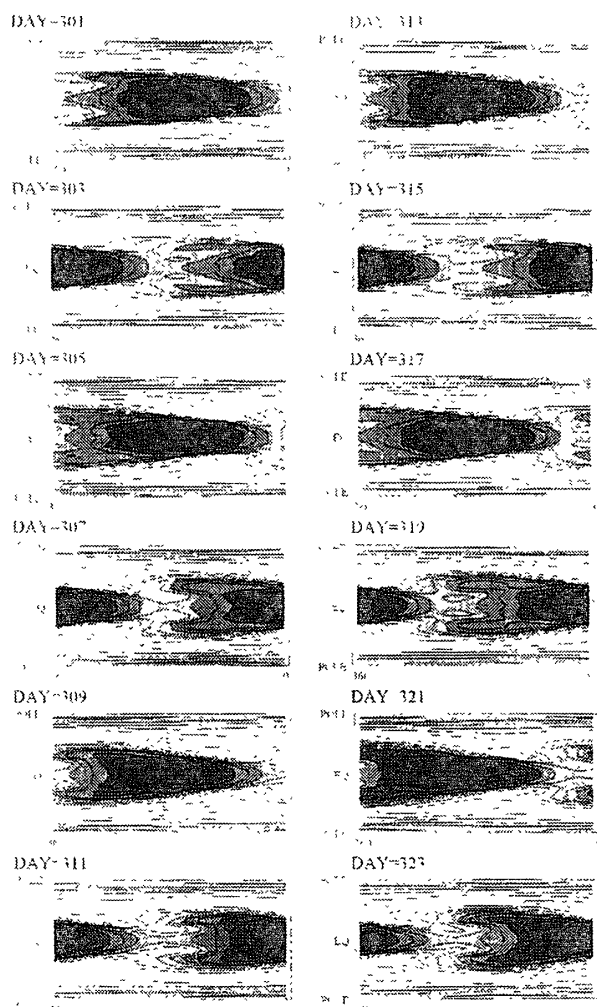


図3 数値モデルによる雲頂高度での散乱係数の分布。等高線の間隔は $4.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ で、値が $4.0 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 以下の部分に陰をつけてある。(文献[7]の図を改変、著者提供)

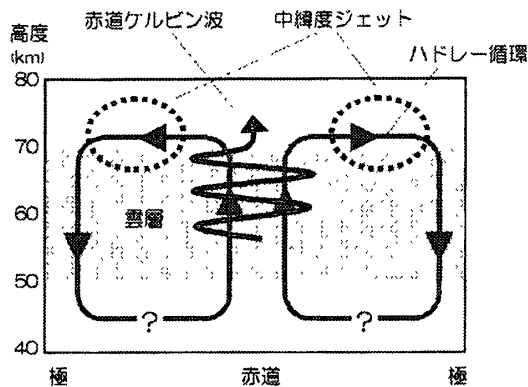


図4 金星の雲頂付近を伝播するケルビン波の概念図

されるわけである。ここで重要な仮定は、赤道ケルビン波は自転方向に加えて下向きの位相速度を持つが(群速度は上向き)、赤道域の平均上昇流が波を押し上げる結果として、雲頂高度では位相が背景東西風に対してほぼ静止(あるいは後退)しているということである。なぜなら、もしも赤道ケルビン波が背景風より速く自転方向(西向き)に伝播していると、紫外吸収物質が極向きに流される間に赤道上の暗部は西に進んでしまい、赤道近傍では腕の傾きが逆方向になってしまうからである。Pioneer Venusによる観測では時として背景風に対して十数m/sの正の位相速度も得られているが、昼側の雲追跡で求めた背景風速は熱潮汐の影響でかなり過小評価されているという理論的予想もあるため[10]、ここでの仮定は観測とも符合するかもしれない。赤道域の雲層全体が上昇流の中にあるであろうことは、近年 Imamura and Hashimoto [11]によって雲微物理の観点から主張されている。

このようなシナリオを、高度領域50～90 kmの簡単な数値モデルで検討する。モデルの力学部分は赤道 β 面の非線形プリミティブ方程式を解き、簡単のために背景風と気温の高度依存性を無視する。中緯度ジェットに伴う水平シアは下端のジオポテンシャル勾配で強制され、帯状平均気温は250 KにNewton冷却される。また、帯状風へ抵抗を課すことによって全領域に1～数m/sの極向き循環と数mm/sの上昇流を作り出す。下端からは位相速度ゼロの赤道ケルビン波

を強制し(振幅は雲頂で観測された東西風振動を再現するように与える)、擾乱成分には適当な放射緩和を課す。雲粒の混合比は80 km以下では一定値、それ以上では90 kmにかけてゼロに近づくとし、粒径(半径 $1\ \mu\text{m}$)と単散乱アルベド(0.995)は一定とする。モデルの放射・化学部分は、そのような雲の中の紫外放射場を二方向近似で解き、紫外吸収物質は下端から供給されて光強度に比例する速度で数日の時定数で分解する。紫外吸収物質の吸収断面積は雲頂の反射率(入射光に対する上向き散乱光の割合)が0.4～0.5程度になるように与えられる。

こうして定常状態まで積分したところ、波は上昇流の中を伝播し、波と背景風による移流の結果としてY字に似たパターンが作り出された(図5)。反射

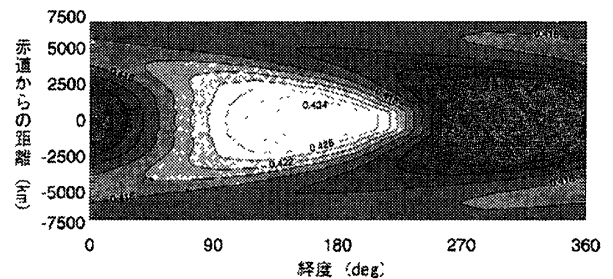


図5 数値モデルによる雲頂高度での反射率の分布

率のコントラストは10%程度である。ここで詳細は割愛するが、ハドレー循環の影響で赤道ケルビン波の構造が変化する結果として、赤道向きの角運動量輸送が起こっている。このような赤道向き運動量輸送は、ハドレー循環との組み合わせによりスーパー・ローテーションの維持に寄与する可能性がある[12]。ただし、この研究ではケルビン波の励起過程については答えられない。

これまで述べたように、Y字を説明するアイデアとしては様々なものがある。これらが同時に寄与している可能性もあるが、各々の妥当性を検証するためには新たな観測が必要である。例えば赤道ケルビン波とロスビー波の重ね合わせ仮説については、これら二つの波の位相差と紫外濃淡変動との間の関係や、紫外濃淡変動と雲密度変動との間の関係が鍵と

なる。赤道ケルビン波と背景風による仮説については、ラグランジュ的な移流パターンと Y 字の腕の傾きとの間の関係、そしてケルビン波の背景風に対する正確な位相速度が鍵となる。これらを観測的に確かめる可能性については後述する。

4. 空間パワースペクトル～階層構造へのアプローチ

特定のパターンに注目する研究とは別に、空間構造のパワースペクトルから力学過程を推定する試みがある。地球の大気力学研究においては、しばしば運動エネルギーの空間スペクトルをもとに擾乱の源やスケール間相互作用が議論されてきた。Nastrom and Gage [13]によれば、地球大気の運動エネルギーのスペクトル密度は水平波長 500 km あたりを境に長波長側では波数の -3 乗、短波長側では $-5/3$ 乗の依存性があるが、その古典的な解釈では大気の運動を水平 2 次元面内の運動と見做し、2 次元乱流理論（文献[12]などを参照）からこれを解釈する。2 次元運動では、エネルギーに加えてエンストロフィー（渦度 = 速度場の回転、の二乗）が保存される。そのような保存則をもとに、波長 500 km 以上の部分では波長数千 km のところにエネルギー供給があって短波長側へのエンストロフィーの流れでスペクトルが決まり、一方波長 500 km 以下の部分では波長数十 km 以下にエネルギー供給があって長波長側へのエネルギーの流れでスペクトルが決まる、と考える。しかしこのような解釈には異論も多く、まだ決着していない問題である。

金星では運動エネルギーのスペクトルを求められるようなデータは得られていないが、紫外の濃淡が大気の運動によって作られるものだとすれば、そのコントラストの空間パワースペクトルから力学の手がかりが得られるかもしれない。大気の上変位が濃淡を作り出すとすれば、濃淡が擾乱の（有効）位置エネルギーの指標になるというのはありそうなことで

ある。地球大気においては位置エネルギースペクトルが運動エネルギースペクトルと似た波数依存性を持つことが示されており、準 2 次元（準地衡）乱流の理論と整合的に解釈されている[14]。Travis [15]は Mariner 10 による金星紫外画像を解析し、波長 1300 ～ 13000 km（東西波数 3 ～ 30）の範囲について、低緯度では波数の -2.7 乗、中緯度では -1.8 乗の依存性を見出した。Travis の解釈によれば、低緯度では Y 字のような大規模構造からより小さいスケールへのエンストロフィーの流れが -3 乗に近い依存性を生み出すが、中緯度ではジェットの力学的不安定（順圧不安定）によってより小さなスケールの擾乱が作り出されるためにそうはならない。一方、Pioneer Venus のデータを用いた後年の同様の解析では、このような緯度による違いは認められていない[3]。このときは波長約 3800 km を境に長波長側では -4 乗、短波長側では -2.5 乗の依存性が見出され、前述の地球大気における仮説のように、長波長側と短波長側にそれぞれ別のエネルギー源が存在する可能性が示唆されている。

下山と今村[16]は、Galileo 木星探査機が 1990 年に金星をフライバイした際に紫（波長 404 nm）と近赤外（波長 986 nm）で得た高い空間分解能の昼側の画像[17]を同様の手法で解析し、従来より約 1 桁小さいスケールまでの空間スペクトルを求めた。紫画像での結果では、Mariner 10 や Pioneer Venus がカバーした波長 1000 km 以上では従来と同様に -3 ～ -4 乗の依存性が見られるが、それより短波長側では -1 ～ $-5/3$ 乗である（図 6）。このような遷移がなぜ生じるのか分からないが、全体として地球大気のエネルギースペクトルと似通っていることは興味深い。近赤外では雲層全体からの散乱光を見るため紫～紫外より深いところの情報が含まれるが、その結果においては短波長側での遷移がさらに顕著である。その原因としては、安定成層している雲頂付近と違って雲層下部では鉛直対流が生じており、比較的小さなスケールに大きなエネルギー源があることが想定さ

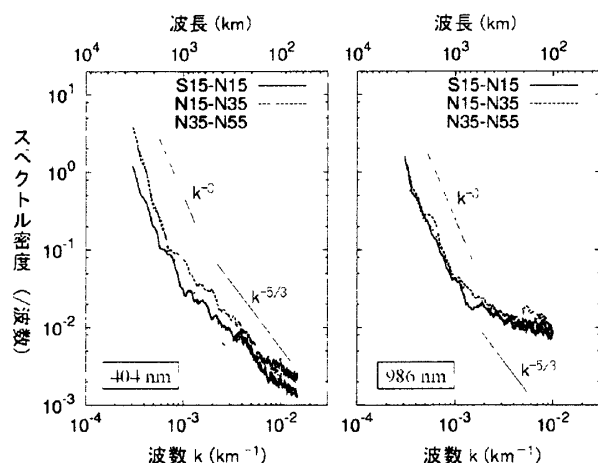


図6 Galileo探査機搭載Solid State Imagerによる金星の昼側404 nm画像(左)と986 nm画像(右)を解析して得た、濃淡の東西方向の空間パワースペクトル。3種の曲線はそれぞれ、南緯15～北緯15°、北緯15～35°、北緯35～55°についての結果。

れる。もちろん、そもそも雲の模様を作り出す力学がはっきりしない現状では、これらの結果をもとに力学過程を論ずるのは勇み足である。それでも、模様の生成に寄与する運動の性質が水平スケールや高度領域によって変化しているとは言えそうである。

ここから先へ進むためには、風速や温度を高い空間分解能で計測してエネルギースペクトルを求めなければならない。将来的には、惑星スケールから数kmスケールまでの階層間の相互作用という地球気象学においても答えの得られていない問題に、比較惑星科学的な側面から光を当てたいと考える。

5. 今後の展開～金星ミッションへの期待

ここで紹介したのは、金星の雲の模様が提起する問題のうちごく一部にすぎない。たとえば太陽直下点付近に見られる数百～1000 km規模の細胞状構造(cells)、南北伝播する縞状構造(circum equatorial belt: 南向き伝播のみ観測されている)、赤道付近の小規模な縞々(wave trains)、高緯度の白い帯(bright polar band)など特徴的な構造が知られているが(図2)、そのほとんどの成因が全く分かっていない。こ

れらを理解するためには、総観スケール(数千km)以上の力学に加えて、硫酸エアロゾルに関わる化学・放射を考慮した中層大気メソスケール(1～1000 km)気象学とでも呼ぶべきものが必要と思われるが、それはまだほとんど手の付けられていない未知の領域である。とくに、紫外吸収物質の太陽光吸収による加熱効果や、上昇流の中で凝結した硫酸液滴が熱放射を吸収することによる加熱効果が、今後集中的に検討されるべきだろう。

新たな観測的アプローチとしては、惑星気象学におけるブレイクスルーを目指して日本が2008年頃送り出そうとしている金星周回衛星が挙げられる。このミッションでは下層大気や地表面まで宇宙空間から観察できる近赤外の「窓」波長を最大限に活用する(図1d)。そして、この窓波長を含む赤外～紫外の多バンド(それぞれが異なる観測高度に対応)において高解像度(～10 km)のグローバル撮像を連続的に行うと同時に、雷発光を捉えるカメラによって雲層内の激しい上下運動をモニターし、また電波掩蔽法により気温の鉛直分布を計測する。撮像観測では雲や微量気体の分布が可視化されるだけでなく、紫外での小規模な模様の追跡から雲頂高度(～70 km)の水平風速分布が、近赤外での雲追跡から雲底付近(～50 km)の水平風速分布が導出される。これらのデータを統合して金星大気圏の波動や循環の3次元構造を初めて描き出し、スーパー・ローテーションを含む大気大循環のメカニズムを解明するというのが、ミッションの主な狙いである。Y字模様に関係するところでは、ケルビン波やロスビー波の時々刻々の位相と振幅、子午面循環も含めた背景風、紫外吸収物質に加えて雲密度そのものの変動が明らかとなるはずである。このことによって、Y字形成の力学、さらには雲層の維持や大気大循環におけるY字の役割が、一気に理解されるだろう。

メソスケールまでの徹底した雲の形態観察も期待が大きい。サンプリング頻度(1～2時間毎)や解像度が従来の紫外撮像を大きく上回るだけでなく、新

たに加わった近赤外の窓波長では、雲底付近で活発に生成・消滅していると思われる凝結雲のグローバルな分布が高い時間・空間分解能で観測される。背景風速場や成層度が雲頂と全く異なる領域における大量の雲画像から、我々は全く新たに雲の形態学を構築しなすことになる。これらの異なる高度領域における雲画像、そして熱赤外で得られる雲頂温度分布や雷カメラによるグローバルな雷雲分布を関連付けて、個々の現象の立体構造と力学を推定することを目指す。

参考文献

- [1] Esposito, L. W. et al., 1997, Venus II, Univ. Arizona Press, 415.
- [2] Pollack, J. B. et al., 1980, J. Geophys. Res. 85, 8141.
- [3] Rossow, W. B. et al., 1980, J. Geophys. Res. 85, 8107
- [4] Kawabata, K. et al., 1980, J. Geophys. Res. 85, 8129.
- [5] Del Genio, A. D. and W. B. Rossow, 1990, J Atmos. Sci. 47, 293.
- [6] Covey, C. and G. Schubert, 1982, J. Atmos. Sci. 39, 2397
- [7] Yamamoto, M. and H. Tanaka, 1998, J. Atmos. Sci. 55, 1400.
- [8] Smith, M. D. et al., 1993, J. Atmos. Sci. 50, 4080.
- [9] Imamura, T. and T. Horinouchi, 2003, 2003 IUGG meeting, Sapporo, Japan.
- [10] Newman, M., and C. Leovy, 1992, Science 257, 647.
- [11] Imamura, T. and G. L. Hashimoto, 2001, J. Atmos. Sci. 58, 3597.
- [12] 松田佳久, 2000, 惑星気象学, 東京大学出版会.
- [13] Nastrom, G. D. and K. S. Gage, 1985, J. Atmos. Sci. 42, 950.
- [14] Gage, K. S. and G. C. Nastrom, 1986, J. Atmos. Sci. 43, 729.
- [15] Travis, L. D., 1978, J. Atmos. Sci. 35, 1584.
- [16] Shimoyama, M. and T. Imamura, 2003, 2003 IUGG meeting, Sapporo, Japan.
- [17] Belton, M. J. S. et al., 1991, Science 253, 1531.