

# 木星の気象学

中 島 健 介

〈九州大学 理学研究院 〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1〉

e-mail: kensuke@geo.kyushu-u.ac.jp

木星は、ガリレオによる探査などが行われているとはいえ、「気象学」の対象としてはまだまだ観測が不十分である。ここではまず、現在知られている木星の大気現象を概観し、次に、最も目立った特徴である「帯・縞構造」の成因について簡単に議論する。最近の探査でその姿がとらえられた雷雲活動は、帯・縞構造を含むいろいろな大気現象の力学で重要な役割を担っている可能性がある。

## 1. 天体としての木星 vs 気象学の対象としての木星

木星は太陽系最大の惑星であり、質量などサイズ的には太陽と地球の中間に位置している。サイズだけでなく、主星から受け取る熱と内部からわき出す熱が同程度であるという点においても、恒星と地球型惑星との中間的な性格をもつ。さらに、大気成分の一部が凝結して雲を生じている点で木星は、恒星の中で最小のクラスである褐色矮星と強い類似をもっている。近年、主星に近接して同期自転する木星サイズの惑星が、太陽系外惑星の重要なクラスとして注目され、「ホットジュピター」と呼ばれている。これらの惑星では、主星からの放射により大気上層が強く加熱されている点が木星とは大きく異なるが、成分や内部構造は木星と共通点が多いと考えられている。これら木星と対比されるべき天体たちは、太陽を唯一の例外として極めて遠方にあり、表面の構造を解像した観測を行うことも接近して探査することもできない。一方で木星は、ガリレオ（探査機でなく地動説のガリレオ=ガリレイ）時代から300年以上にわたり表面の模様が観測されており、パイオニア・ボイジャー・ガリレオ・カッシーニなどの

探査による近接観測データも蓄積されている。そのような意味で、「天体としての木星」は非常によく観測されている、と言えよう。

それに対して「気象学の対象としての木星」の観測は、悲しいほど観測が不十分であると言わねばならない。「気象学」とは天気変化をもたらす大気中の諸過程についての記述や考察である。後に述べるように、木星大気にも、地球の大気と同様、雷雲やジェット気流、渦状の低気圧・高気圧などが存在し、これらが「天気」を形作っている。しかし、ガリレオ探査機のプローブを文字通り唯一の例外として、木星の観測は専ら宇宙からの遠隔的なものに限られる。その結果、天気変化をもたらす現象の物理・化学的変数を定量的に知ることはできない。この状況は、個々の低気圧・高気圧が、それらの典型的寿命の間に空間的には何十カ所も、時間的にも10回以上にわたって観測（風向・風速・温度・湿度などの測定が必要である）されている地球大気の状態とは全く異なっているのである（それでもわれわれは「天気予報が当たらない」と不満なのであるが）。

このような観測的情報の不足を理論的な考察によって補おうとしても、その大前提となるパラメーターの多くがあやふやである。例えば、いっ

たいどの高度領域を「大気」として想定するのが適切であるかすら現状ではわかっていない。また、コンピュータモデルによって、いわば力づくで木星大気の状態を再現しようとしても、理論的アプローチについてと同様な基礎的パラメータの不定性、さらには、木星のサイズが巨大であることが立ちはだかる。地球大気のシミュレーションは数十個の低気圧・高気圧を再現すればよいが、木星大気のシミュレーションで再現すべき渦の数は数万個になるだろう。

本稿では、木星の大気運動の主に力学的な特徴について述べる。上に述べたような観測的情報の不足、理論的理解の不足を考慮して、内容は、(1) 木星大気の平均的構造について、(2) 観測される主な現象の紹介、および、(3) 主要な現象について想像されている相互関係の概略、にとどめる。観測的情報に関心がある方は、Rogersによる大著<sup>1)</sup>や、インターネット上の情報（NASAなどによる探査情報の集積サイトとアマチュアを含めた地上観測の情報の両方が重要である）が参考になるし、理論的な考察の入門には松田<sup>2)</sup>、森山<sup>3)</sup>などの教科書やその参考文献が役に立つ。また、Cambridge University Press から出版が予定されている総合報告<sup>4)</sup>が、最新情報のリファレンスとして期待される。なお、ここでは雲の「色」の問題（例えば大赤斑はなぜ赤いか）については全く触れることができなかった。関心のある方は上の本などを手がかりに、新しい研究についてサーベイされたい。

## 2. 木星の内部構造と大気の鉛直構造

図1に、現在推定されている木星の内部構造を示す（木星には「地面」はないので、その場の圧力でもって鉛直座標に替えている）。これに見るように、木星はそのほとんど全体が流体層であり、惑星深部に向かってどこまでを「大気」と呼ぶべきかは自明でない。かつては、惑星内部から大気圏までの全体が、一つの対流層であると考え

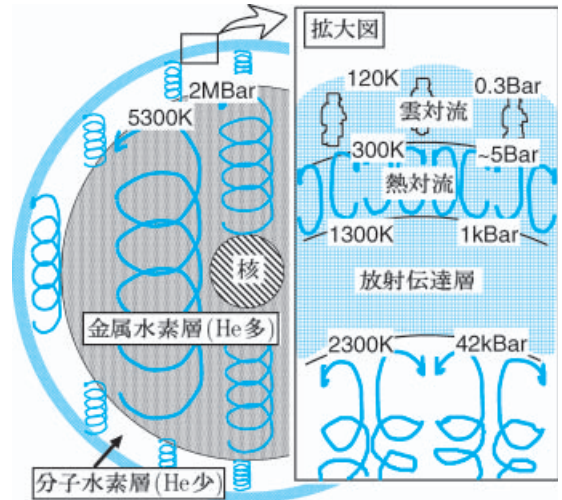


図1 木星の内部構造(左)と、表面付近の拡大図(右)。

られていた。しかし、Guillotら<sup>5)</sup>の放射対流平衡計算によれば、1 kbar から 40 kbar の付近は比較的放射に対して透明であるためにエネルギーが放射で十分効率よく運ばれ、対流運動がとぎれている可能性がある。これが正しいとすれば、1 kbar 付近を「対流圏の底」すなわち運動学的な「地面」と考えられるかもしれない。ガリレオが観測したヘリウム/水素比は、太陽大気の数値と異なっていた。このことから、木星内部のどこか（分子水素から金属水素への相変化深度付近）でヘリウムと水素の不混和が生じてヘリウムが惑星中心に向かって沈降していると推測されている。これが正しいとすると、そこで平均分子量に差が生じて成層が安定になり、対流がとぎれる。いずれにせよ、対流がとぎれる層があるとはいっても、惑星回転などのために上下の流体運動が相互作用する可能性はある。したがって、惑星の深部流体層の運動が望遠鏡で「見える」雲層の運動に強く影響を与えている可能性がある。

図2に、現在推定されている木星の「大気」の鉛直構造を示す。惑星内部へと接続する、温度が上に向かって単調減少する部分が「対流圏」であ

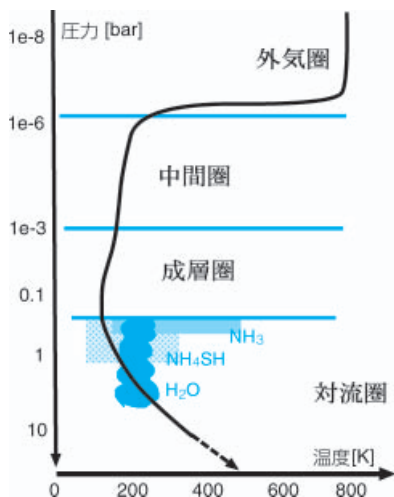


図2 木星大気温度構造。深部に向かっては、大体、断熱温度勾配に沿って温度は上昇し続ける。

り、その上端（対流圏界面）は0.2 bar付近にある。対流圏において上に向かって温度が下がるのは、対流圏での多少とも活発な鉛直運動に伴って気塊が断熱的に膨張するためである。

対流圏には、アンモニア・硫化水素アンモニウム・水の3種類の雲が存在すると考えられている<sup>6)</sup>。望遠鏡などで観測される雲の層は、アンモニアの氷と考えられている。ただし、必ずしも各領域に連続的に雲が存在するわけではない。特に、後に述べるように、「水の雲」の実態は強い鉛直運動を伴う孤立した雷雲であり、地球の熱帯をジェット機で飛んでみてもわかるとおり、曇っている領域は大気全体のほんの一部であると考えられる<sup>7)</sup>。木星に届く太陽光が地球の約1/25しかないにもかかわらず木星大気に活発な雲活動があるのは、自明でない（木星より太陽に近い火星に雷雲はない）。その主な理由は、(1) 惑星内部からの熱供給（惑星の集積過程において蓄積された熱と、その後のゆっくりとした惑星収縮の過程で重力ポテンシャルエネルギーから変換される熱が源である）の存在と、(2) 木星の大気が「底なし」であり、下方に向かってどんどん高温になれること、

の二つである。また、雲の元となる水蒸気・アンモニア・硫化水素が十分にあることも必要であるが、これらはガリレオプローブの観測により、太陽大気標準組成から算定される量よりも多いと推定されている（水蒸気だけは直接測定できなかった）。

対流圏界面から上に向かって温度が上昇する部分が「成層圏」、その上の等温層は「中間圏」と呼ばれている。成層圏と中間圏は温度分布が太陽光吸収と大気からの赤外線放出との間のバランスで規定されるという意味で共通しているが、地球大気における呼称と対応させて二つに区分されている。その上では再び温度は上昇し、「外気圏」に至る。ここでのエネルギー収支には、木星の強大な磁気圏からの高エネルギー粒子の降込みが大きな関与をしているらしい。

### 3. 知られている大気現象

以下に対流圏の雲層に見られる代表的な現象のパターンを示す。地上から望遠鏡などで古くから知られている大気現象は、すべてこれに含まれる。

最も目立つものは、東西にのびる帯状の明暗構造である（図3）。伝統的に、白っぽく見える部分は「帯 (zone)」, 黒っぽく見える部分は「縞 (belt)」

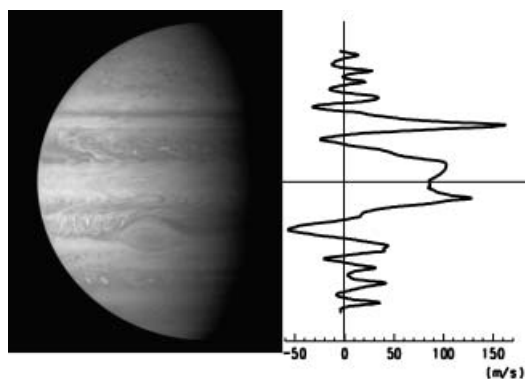


図3 (左) カッシーニ探査機が撮影した木星 (Photo-journal,<sup>8)</sup> PIA04866). (右) 東西風の緯度分布 (Limaye<sup>9)</sup> の表1より作成).

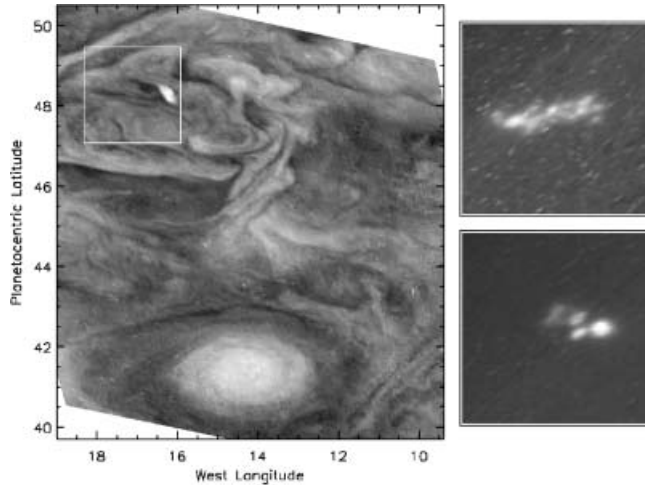


図 4 ガリレオ軌道船が撮影した積乱雲の電光 (Photojournal,<sup>8)</sup> PIA01638). 昼間に撮影した画像 (左) 中の四角の領域を夜に撮影すると (右) 電光が見える.

と呼ばれている。明暗はアンモニアの雲の層の光学的厚さに対応している。「縞」では大気の深いところまで見えており、赤外線フラックスが大きい。明暗に対応して、東西風のジェットが存在する。惑星回転によるコリオリ力を考慮すると、帯が高気圧、縞が低気圧である。

これらに埋め込まれるかたちで、さまざまな大きさの渦が存在する。渦は高気圧性・低気圧性の両方がある。高気圧性の渦は一般にきれいな楕円形であって、寿命が長い (10 年以上続くものもある)。

最大かつ最も長寿のものが大赤斑である (今まで約 300 年間継続している)。低気圧性のものは、周辺に微細かつ変動の激しい波動があり、寿命はせいぜい 2, 3 年である。

探査機 (ボイジャー、ガリレオ、カッシーニ) による調査で、雷雲が存在することがわかった (図 4)。雷雲のほとんどは、縞 (暗いところ) すなわち低気圧帯の部分に生じる。

赤道近傍の西風ジェット区域には、東西に周期的な構造が見られる (図 5)。プリューム / フェス

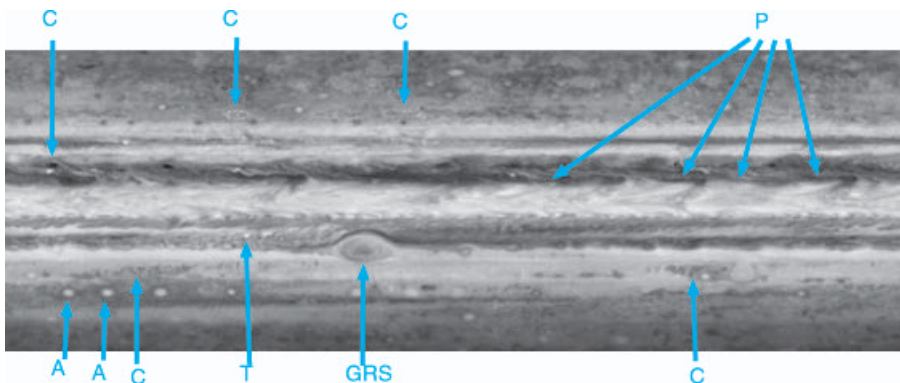


図 5 カッシーニ探査機が撮影した木星画像 (Photojournal,<sup>8)</sup> PIA02864). A: 高気圧性渦, C: 低気圧性渦, T: 雷雲活動, GRS: 大赤斑, P: プリューム。なお、PIA02863 として動画も公開されている。

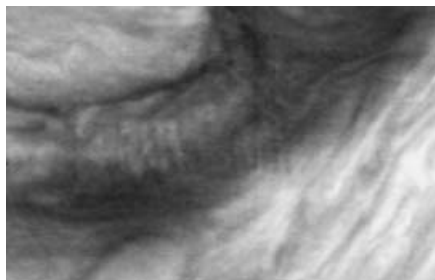


図 6 ガリレオ軌道船が撮影した小規模波動 (Photojournal,<sup>8)</sup> PIA00724). 波長は約 300 km.

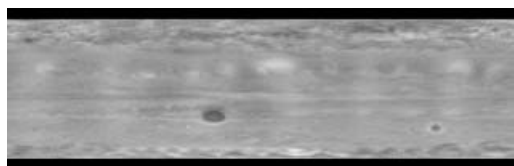


図 7 カッシーニ探査機が撮影した木星下部成層圏の「もや」の画像 (Photojournal,<sup>8)</sup> PIA03474).

トーン構造，ホットスポットなどと呼ばれる。これらの位相（例えばプリュームの発生位置）は、平均風に対して相対的に西向きに伝播していくことが知られている。

小規模な波動状の雲も時折り現れる（図 6）。なぜか赤道西風の中にだけ見られる。このような小規模な現象は、探査機による観測を丹念に調べると、いろいろに分類できるものが見つかるかもしれない。

探査や地上からの広い波長にわたる高精度の観測によって、東西方向に波動状の大規模な現象も見いだされている。これらのうち熱帯のものは、プリューム/フェストーン構造と直接対応するスケール・位相速度をもつ。一方、他の緯度帯では、木星の磁場パターンに相対的に、すなわち、惑星深部の運動に対して相対的にほとんど動かないものも存在する。カッシーニが最近撮影した上層のエアロゾル分布の画像にも、これに対応するらしいものが写っている（図 7）。

帯・縞を含む対流圏のパターンの一般的な構造は上のようなものだが、実は数年あるいは数十年

の時間スケールをもつ大規模な変動が存在する。例えば、活発な雷雲集団の活動を伴って突発的に縞が明るくなり、数カ月かけて元に戻る、などの変動が見られる。ただし、少なくとも近年の例に関する限り、これらの変動は縞・帯の明暗についてのものであって、東西風の変動は伴っていないようである。

また、成層圏に独特の時間変動として、東西平均した温度の緯度構造が 4 年程度の周期で変動する現象 (QO) が見つかっている。地衡風バランスを考えると、東西風も変動していることになる<sup>10)</sup>。

#### 4. 諸現象のメカニズムと相互関係 —特に帯・縞構造について—

前節のように木星大気に多様な現象が起こっていることはわかってきている。実際、カッシーニ探査機がフライバイした際の雲のムービー（例えば Photojournal<sup>8)</sup> の PIA02864, PIA03452 などを見よ）には各種の擾乱が満ちあふれ、想像力を刺激するものである。しかし、雲の下で何が起きているかを知る手段は極度に制限されており、はじめに書いたように木星に関する知識は諸々の大気現象の力学を定量的に把握するには程遠い。したがって以下の概略の議論も、過去の多くの研究者の努力にもかかわらず、よく言って「推測」の段階である。木星の気象学上の最大の問題は、やはり縞・帯構造の成因であるので、ここではこの問題を主に議論しよう。

縞・帯問題には二つの面がある。一つは雲の明暗の問題であり、もう一つは東西流の問題である。専ら地上からの眼視観測にたよっていた時代には、木星の雲の明暗について、反射率の大きい「白っぽい物質」の濃淡が原因であるという見方と、反対に反射率の小さい「黒っぽい物質」の濃淡が原因であるという見方の二つがあった。しかし現在では、定量的な遠隔測定と探査機による観測によって、「白っぽい物質」すなわちアンモニア

の氷粒が「帯」で多く存在し「縞」では少ないことが明暗をつくっていることがわかっている。一方、帯・縞と東西流との関係については、図3にもあるように、少なくとも対流圏の上部では、「帯」すなわち明るい部分の極側が西風、赤道側が東風であることがわかっている。地衡流バランスによれば、このような東西風分布は、明るい帯が高気圧、暗い縞が低気圧であることを示している。また、やはり遠隔測定によれば、雲の頂上付近の高さにおける温度は、明るい帯では低温、暗い縞では高温である。

帯・縞構造の成因については大きく分けて二つの説がある。一つは、直接には観測できない木星内部の対流の影響が重要であるとする「深部起源説」、もう一つは、観測できる大気表層の運動によって帯・縞が生じるとする「浅部起源説」である。まず深部起源説について述べよう。2節で簡単に述べたように、木星内部では深さ1万キロ以上に及ぶ対流層がある。その対流運動は、惑星自転の影響を受けて軸が南北に長く伸びたロールとなっていると考えられる。これらは、球面内部に閉じ込められているために波動的に西に進み、同時に平均東西風を生じることが議論されている。深部起源説は、このような深部の対流に伴う東西平均流が大気表面にまで及ぶであろうと考えるものである。深部起源説の問題点は、図1に示したような安定成層領域があるために、深部の東西流

が大気に及びにくいのではないかと、という点である。最近の力学的な研究では、南北幅10,000 km程度以上の規模のものであれば、ある程度の東西風が表面まで到達しうるであろうと議論されている<sup>11)</sup>。しかし深部の東西流の構造や流速がそもそもわかっておらず推測の域を出ないので、ここでは「深部起源説」についてこれ以上の追求はしない。

次に「浅部起源説」について述べるが、浅部の運動の効果に注目するといっても、雲による凝結加熱のコントラストに注目する「熱強制説」と、乱流的な渦運動に注目する「乱流カスケード説」の、二つのバリエーションがある。「熱強制説」は地球大気の熱的な循環を参考にしたものである。もし明るい「帯」で雲活動が強ければ、凝結の潜熱で加熱された大気が上昇する。そして、この上昇流が対流圏界面で南北に発散し、これに惑星回転に伴うコリオリ力が作用すれば、観測に合う東西流が生じる(図8)。しかし、探査機の探査で木星の雷活動が見つかったと、このようなモデルには問題があることがわかってきた。ボイジャーの観測(その後のガリレオ、カッシーニでも検証された)によれば、活発な雷雲はほとんどが縞で起こっている。木星の雷雲は地球のものと同様に水蒸気の凝結を伴っていると考えられている。木星大気中の水蒸気とアンモニアの混合比の推定値から考えて、暗い「縞」での雷雲活動による凝結熱の発生量は、明るい「帯」でのアンモニアの雲の凝結の潜熱の総量を大幅に上回ると考えられる。したがって、大局的に見て「縞」の方が上昇流域、「帯」は下降流域であることになり、「熱強制説」は破綻してしまう。

もう一方の「乱流カスケード説」の概略は以下のようなものである<sup>12)</sup>。木星大気のうち比較的浅い部分(Weather Layer)だけを取り出し、この部分の水平2次元の運動だけを考える。木星大気には多数の渦が存在するが、これらが球面上の「2次元乱流」として相互作用するうちに、しだいに

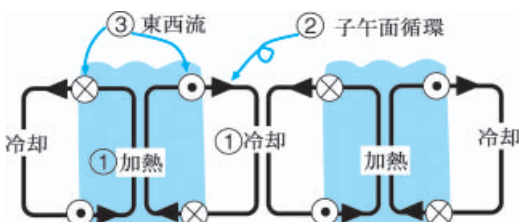


図8 「熱強制説」による帯縞構造の駆動メカニズム(南北・鉛直断面)。「帯」を水色に塗っている。加熱・冷却のコントラストによって子午面循環が生じ、これが、コリオリ力によって東西風を生じる。

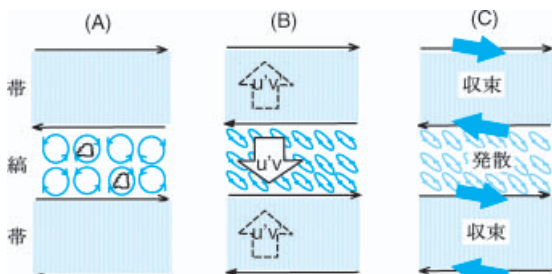


図9 「運動量強制説」による東西風駆動メカニズム (平面図)。(ここでは雷雲による駆動と、雷雲活動へのフィードバックを含めている。)「帯」を水色に塗っている。(A) 緯領域の雷雲によって小さい渦が生じる。(B) 渦が東西風によって変形し、これが西風運動量を南北に運ぶ。(C) 渦による運動量輸送によって、東西風が強化される。コリオリ力を考慮すると、流れは南北成分をもち、収束発散を生じる。

大きな渦を生じ、最終的に惑星の球面効果が効き始めると東西風を形成するというものである。なぜ東西風が生じてくるのか、大筋としては図9のように考えられている。最初にある程度の東西風が存在していると仮定すると、それにより渦（あるいは渦を伴った波動）が大規模な流れによって変形される。そのような変形に伴って、運動量の南北輸送が生じる。その運動量輸送は、はじめに仮定した東西風を加速するような南北構造をもつ。このような意味で、「乱流カスケード説」は、帯・緯構造の形成メカニズムとして見れば「運動量強制説」と言ってもよい。(乱流が大規模な流れを加速するのは、日常経験から見れば不可解であるが、惑星規模の流れではしばしば起こる。なお、より正確には、本稿の図9に書いた「渦」ではなく「波動」による運動量輸送も考えなければならない。こうした側面に関して関心のある方はMcIntyreによる概説<sup>13)</sup>を参照されたい。)

この説の問題点は、第一には、最初に述べたように大気の浅部だけを、しかも2次元的な運動だけに着目したものであることである。したがって、3次元構造をもつであろう実際の木星大気

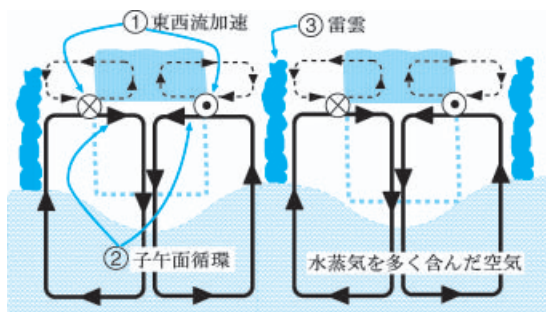


図10 雷雲を含む帯・緯構造の駆動メカニズム (鉛直断面)。「帯」を水色に塗っている。運動量強制 (図9) により東西風加速が生じ、これがコリオリ力により子午面循環を駆動する。子午面循環により、水蒸気を多く含んだ空気が「緯」で上昇し、雷雲活動を活発にする。雷雲活動は緯領域で渦を生成し、運動量強制に寄与する。対流圏上層の循環・対流圏下部の雲 (点線) も存在する可能性がある。

様相を、このモデルがどの程度とらえているかは不明である。また、このモデルは帯・緯問題の二つの面のうち、東西風の形成には答えを与えるが、明暗の形成つまり雲のでき方については直接には語ってくれないことも不満である。さらには、このメカニズムが作用するために必要な渦の起源について何も言っていないことが問題である。木星大気には多数の渦が確かに存在している。しかし、大赤斑をはじめとした比較的大きな渦は、帯・緯構造に伴う東西風が存在する結果として生成・維持されている、という理解が主流である。さらには、東西風加速のためには、相当に小さいスケールの渦が必要であることが理論的にわかっている。そのようなスケールの渦が十分たくさん存在しているか否か、それらの成因は何であるかが問題である。

以上のように、帯・緯問題の理解はやや膠着した状態にあったのであるが、ガリレオとカッシーニによる最近の探査が、ある程度の進展をもたらした<sup>14), 15)</sup>。それによると、帯・緯構造の駆動メカニズムは「乱流カスケード説」となるが、その中で重要なのは「熱強制説」の難点として登場した

雷雲である。具体的には、雷雲活動が乱流カスケードを経て東西風を加速し、同時に、東西風加速の副産物としての鉛直循環が「縞」における雷雲活動を促進する、という相互扶助メカニズムが提唱されている（図9, 図10）。先に書いたように、雷雲のほとんどは暗い「縞」で生じる。雷雲の内部で起こる水蒸気の凝結は、その潜熱によって大気を加熱するが、この熱が帯・縞構造を駆動するのではない。雷雲の中では強い集中した上昇流が生じるが、この上昇流は対流圏界面に突き当たると周囲に発散する。この発散流にコリオリ力が働くことにより、雷雲の回りに渦が生じる。こうして生じた渦は比較的小さいことがわかっており、これを格好の出発点として乱流カスケードが起こり、東西風が加速される。一方、東西風加速は、帯・縞に伴う気圧の高低と東西風との間の地衡流バランスを崩し、結果として上層の低気圧（縞）から高気圧（帯）に向かう南北流を駆動する（この上層南北流の向きは「熱駆動説」のものとは逆である）。この南北流のために、「縞」では上層で空気が発散し、それを補うために「縞」では大規模な上昇流が駆動される。この上昇流は、大気下層にある湿った空気を持ち上げることにより、雷雲活動の発生・維持に寄与する。

もし、縞が大規模な上昇流域であることを認めると、大体において縞が晴れている理由、および逆に、帯が下降流にもかかわらず曇っている理由が問題となるが、これも雷雲の性質によって説明できる可能性がある。雷雲の中には先に述べたように激しい上昇気流があるが、これによって運ばれる空気の量と、帯・縞構造の東西風加速が駆動する大規模上昇流とがちょうど等しくなる保証はない。もし、大気下層での水蒸気が十分にあれば、雷雲の中の空気上昇量の方が多くなり、雷雲の上部から吹き出した空気の一部は「縞」の領域内でゆっくりと下降することになる。この下降運動に伴う断熱昇温により、ごく一部の領域を占める雷雲を除き、「縞」の大部分は晴れた状態が維持され

る（地球の熱帯において、時折激しいスコールはあるが、大部分の時間・場所では晴れているのと同様である）。実際、「縞」の部分の中層で水蒸気が非常に少ないことが、電波観測などでもわかっている。「帯」が曇っていることの説明はやや難しい。地球大気でも、湿度が高ければ放射による冷却のために下降流域でも雲は維持される（例えば夏の寒帯の海上）ので、これと似た機構でアンモニアの雲が生じているのかもしれない。あるいは、先に述べた東西風加速が強く作用する高度が対流圏界面より低ければ、対流圏の上部では「縞」で下降流、「帯」で上昇流、という対流圏下部とは逆向きの循環が駆動される可能性もある（図10）。

以上のように、雷雲と乱流の相互作用によって帯・縞構造が維持される筋書きが見えてきているが、これを定量的に検証するためには、雷雲の時空間分布の詳細（これは探査機がある程度明らかにした）だけでなく、雷雲が作る小規模な渦の構造を全惑星的に、しかも3次元的にとらえる必要がある。また依然として、惑星内部の大規模な対流運動や東西流の強度、そしてこれと観測で見える帯・縞との関係は謎のままである。さらには、東西流の強さを知るためには、「加速」のメカニズムだけでなく、その消散機構を知る必要がある（地球では地面が存在するので話はわかりやすい）。その一部は次に述べる「渦」の形成が担っているかもしれないが、全貌の把握には程遠い。

以下、帯・縞構造以外の現象について、簡単に触れよう。帯・縞に次いで目立つ現象は、大赤斑をはじめとする渦である。渦にはさまざまなスケールのものがあるが、それらの多くは帯・縞構造に伴う東西風が流体力学的な不安定を起こして生じると考えられている。生じた渦は、同じ向きの渦同士、互いに合体してしだいに大きくなるが、ある程度の大きさになると、高気圧性回転（北半球では時計回り、南半球では反時計回り）のもの安定度が選択的に高まることが理論的に知られている。実際、長寿命の渦はすべて高気圧性



である。なかでも「大赤斑」や「永続白斑」（最近になって合体の結果、数が減った）は極めて長寿命（数十年以上）であるが、これらは東西流の中に埋め込まれて、これとの相互作用の結果さらに安定度を増した「渦ソリトン」であると解釈されている。これらの議論はこれまで主に鉛直一層の単純なモデルで議論されてきたが、最近行われるようになった3次元計算もその結果を大筋でサポートしている。

図6のような小規模波状雲は、風の高度変化が大きい層が不安定となって形成されると考えられており、雲層の下になっている部分の温度・風の情報を得るヒントになる可能性がある。これらが専ら赤道近くの強い西風の領域にだけ生じていることは、赤道西風が対流圏の上部で強く下部では弱いことを示唆するのかもしれない<sup>16)</sup>。

赤外域観測で見いだされる惑星規模の波動は、赤道域のものは「プリューム」などの雲構造との対応から、雷雲などでの水蒸気凝結潜熱が大気を加熱し励起されるのではないかと議論されている。地球の熱帯大気に適用されている枠組みを応用してメカニズムが議論されているが、そこでは、波動を水平方向に効率よく伝えるための強い成層領域が対流圏深部に必要とされている<sup>17)</sup>。この強い成層も、雷雲活動が始まる高度領域で水蒸気（分子量が木星の「空気」である水素・ヘリウムよりずっと大きい）が除去される効果によって説明される<sup>7)</sup>。一方、中緯度に存在する惑星規模波動の起源については、例えば平均東西風と大赤斑などの大きな渦との相互作用とする説もあるが、まだよくわかっていない。

最後に、成層圏の東西平均温度・風の長周期変動「準4年周期変動」(QOO) に関して触れる。実は、これと似た現象が地球の赤道域の成層圏で起こっており、「準2年周期変動」(QBO) として知られている。そこで、発見当初から木星のQOOに地球のQBOの理論を適用する試みがなされている。その具体的な中身は、大規模波動（惑星自

転のために赤道に捕捉される波がある）あるいはもっと小規模な波動に伴う角運動量輸送（詳しくは、これらの波動の伝播特性が平均東西風によって変化すること）に平均南北循環による各運動量輸送を組み合わせたものである。例によって、波動の励起には雷雲が一役買っていると想像されている。これらの検証は、例によって観測データの不足のために、現在のところ困難である。QOOの様相（特に鉛直構造）はいまだおぼろげにしか把握できていないし、波の活動については断片的情報しかない。（波に関していえば、実は地球のQBOに関してさえ、その一翼を担っている小規模な波動の詳細な定量的観測は近年になって始まったばかりである。）

## 5. 今後の課題

はじめに述べたように、「気象学の対象としての木星」の観測はまだ圧倒的に不足している。大気の浅い部分については、それなりに多くの情報があるものの、雷雲や大小の渦の詳細をとらえるには不足である。さらには大気深部からについては観測の不足は決定的である。木星を真に「気象学的に」理解するには、データを量・質ともに充実させることが不可欠である。

「見える」部分のデータについて、当面、最も期待されるのは、実はカッシーニによる土星の観測である。ガリレオ探査機は故障のために高利得アンテナが展開できず、転送できた画像の数は期待を大きく下回った。土星はいろいろな点で木星と似ており、その観測は木星の理解にもつながる。実際、公表され始めた動画などには、雷雲と思われる擾乱の活動も見られる。カッシーニ探査機には今のところ目立ったトラブルはなく、すでに多くの画像を送ってきており、特に高い時間分解能での連続的画像の取得が期待される。一方、ハッブル望遠鏡による木星画像などからもわかるように、いったん大気圏を出れば、地球軌道からでも高分解能・広波長域の観測が行える。そこで、惑

星観測専用の宇宙望遠鏡を備えた衛星を打ち上げる計画もあり、実現が期待される<sup>18)</sup>。

「見えない」部分の情報については、現在われわれがもっているのはガリレオプローブの観測が唯一のものである。すでに述べてきたように木星にはいろいろな大気現象が存在しているので、その構造を把握するためには、多くのプローブを（できれば何度も）投入する必要がある。さらに、木星の近くを通る軌道を巡る探査機により、重力場を精密に調べれば、惑星内部を含む深部の密度の非一様（ひいては流れ）を推定できる。また、「陽震学」（太陽のスペクトルの面的な連続観測から太陽表面の振動を観測し、それをもとに太陽内部の密度や東西風を推定する）の手法を木星に適用できればやはり惑星内部の密度分布や流れの分布が推定できる。しかし木星の自由振動（雷雲活動などによって、ある程度励起される可能性がある）の振幅は太陽の自由振動よりずっと弱いと考えられるので、観測手法から開発しなければならない<sup>19)</sup>。

理論の面では、帯・縞構造についての考察は、まだまだこれからと言わねばならない。特に、雷雲（これは惑星規模波動など帯・縞構造以外の現象にもかかわる）の役割については、最近議論が始まったばかりであり、発展が期待される。惑星内部の流れとの関係についても、さらに考察が必要である。実際のところ、浅い駆動力と深部の影響と、どちらかが決定的に重要であるというよりは、両者がともに重要であるのかもしれないし、両者がお互いに影響し合っている可能性もある（地球大気においても、対流圏と成層圏との間には、対流圏の変動の影響が成層圏に及んでいくこともあれば、成層圏の変動の影響が対流圏に伝わることもあるという、双方向の因果関係が存在する）。これらは、新たな観測データを得つつ、また、大規模な数値モデリングの手法も投入しつつ、これから考えるべき課題である。

ここでほとんど触れられなかった「模様」の数

年・数十年スケールの変動については、その長い時間スケールのため、何が起きているかの記述だけでも非常に長い期間の観測を必要とするので探査機などによる短期間の観測でとらえることは困難である。となると、アマチュアによる観測も含む過去のデータの再吟味が重要な意義をもってくる。ただし、過去の観測においては、「火星の運河」の問題に象徴されるように、その時代における木星の模様の認識パラダイムが色濃く反映されていると思われるので、いろいろな角度からの再評価（あるいは「翻訳」）が不可欠であるだろう。例えば模様の変動を、かつては黒い雲の発生ととらえていたことがどう影響しているか、また、解像度の不足（例えば分解能が粗いと、雷雲活動の集団が細長い連続的な雲域に見えるだろう）がどのように影響するか、など複雑な問題があることに注意しなければならないだろう。

最後に、ホットジュピターその他の太陽系外惑星、褐色矮星との関係について述べておく。木星は、サイズ・組成の点でこれらの天体と多くの共通点をもつ。しかし、恒星からの距離や天体内部からの熱流量など、熱的パラメーターの違いを考える（木星の双子的なものの中にはあるだろう）と、大気の構造や運動の様相に関して、木星大気との直接的な類似を求めるには無理があるだろう。それでもこれらの天体の大気を、地球大気（内部熱源をほとんどもたず明確な「地面」をもちサイズは小さい）と比べるよりは、木星と比べる方がまだ「まし」であるという面は確かにあるだろう。したがって、太陽系外惑星・褐色矮星において、「気象学的」な様相はどうなっているのか、その役割は何なのかなど、いろいろな疑問について考えを巡らすネタとして、木星その他、太陽系内の巨大惑星の気象学は役立つかもしれない。逆に、太陽系外惑星・褐色矮星についての考察から、気象学全般に新たな問題意識が突きつけられるという面もあり、今後じっくり考察していきたいところである。

## 参考文献

- 1) Rogers, J. H., 1995, "The Giant Planet Jupiter," Cambridge University Press.
- 2) 松田佳久, 2000, 「惑星気象学」, 東京大学出版会
- 3) 森山 茂, 1993, 「惑星の気象」, 清水幹夫編, 「惑星の科学」, 第2章, 浅倉書店
- 4) Bagenal F., et al., ed., 2004, "Jupiter: The Planet, Satellites and Magnetosphere," Cambridge University Press.
- 5) Guillot T. D., et al., 1994, *Icarus* 112, 337-353
- 6) Weidenschilling S. J., Lewis, J. S., 1973, *Icarus* 20, 465-476
- 7) 中島健介ほか, 1998, ながれマルチメディア 98, <http://www.nagare.or.jp/mm/98/nakajima/>.
- 8) "Planetary Photojournal," Jet Propulsion Laboratory, California Inst. Technology, <http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>
- 9) Limaye S. S., 1986, *Icarus* 65, 335-352
- 10) Leovy C. B., et al., 1991, *Nature* 354, 380-382
- 11) Takehiro S. and Lister J. R., 2002, *Geophys. Res. Lett.* 29(16), 10.1029/2002GL015450, 2002
- 12) Williams G. P., 1978, *J. Atmos. Sci.* 35, 1399-1426
- 13) McIntyre M. E., 2002, "Some Fundamental Aspects of Atmospheric Dynamics, with a Solar Spinoff," in *Meteorology at the Millennium*, Pearce R. P., ed., Academic Press
- 14) Ingersoll. A., et al., 2000, *Nature* 403, 630-632
- 15) Porco C. C. et al., 2003, *Science* 299, 1541-1547
- 16) Flasar F. M., Gierasch P. J., 1986, *J. Atmos. Sci.* 43, 2683-2707
- 17) Allison M., 1990, *Icarus* 83, 282-307
- 18) 高橋幸弘ほか, 2003, 地球惑星科学関連学会 2003 年合同大会予稿集 J034-013, <http://www-jm.eps.s.u-tokyo.ac.jp/2003cd-rom/pdf/j034/j034-013.pdf>
- 19) 奥地拓生, 小林直樹, 2000, 地球惑星科学関連学会 2000 年合同大会予稿集 Pe-017, <http://www-jm.eps.s.u-tokyo.ac.jp/2000cd-rom/pdf/pe/pe-017.pdf>

### Meteorology of Jupiter

Kensuke NAKAJIMA

*Graduate School of Sciences, Kyushu University,  
6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka 812-  
8581, Japan*

Abstract: Jupiter is still poorly observed as a target of "meteorology," even after the recent flybys by Cassini and Galileo. Here, we briefly overview currently known features in the atmosphere of Jupiter. Next, the origin of the "Belt-Zone" structure, which is the most prominent feature in the Jupiter's atmosphere, is discussed. Thunderstorms, whose detail are revealed only recently by Galileo and Cassini, may be playing an important role in shaping various Jovian atmospheric motions including the Belt-Zone structure.