

木星大気の湿潤対流と大気構造

九大・理	中島 健介 (Nakajima Kensuke)
九大・理	竹広 真一 (Takehiro Shin-ichi)
北大・地球環境	石渡 正樹 (Ishiwatari Masaki)
北大・理	林 祥介 (Hayashi Yoshi-Yuki)

1 はじめに

木星は直径が地球の約 11 倍、質量が約 300 倍という巨大な惑星である。大気の主成分(というより惑星全体の主成分)は水素・ヘリウムであり、その総量(惑星の単位表面積あたり)は(定義の仕方によるが)地球大気の 400 倍にもなる。太陽からの距離は太陽-地球間の約 5 倍であるため、日射は地球の値の約 1/27 に過ぎない。このように地球とはかけ離れた環境にあるにもかかわらず、木星大気には、地球でもお馴染みの「雷雲」が存在していることが分かってきた。しかも、これらの雷雲の生成には地球におけると同様に水蒸気の凝結が深くかかわっているらしい [1]。図 1(左)は米国の木星探査機ガリレオの軌道船が撮影した木星の赤外画像である。一見して大小様々な渦巻く雲が見えるが、これを注意深くしらべると、何か所か非常に放射温度が低い場所が見つかる。地球の気象衛星「ひまわり」の画像の場合と同様、こうした低温領域は激しい対流性の雲活動の証拠であると考えられている。実際、図 1(右)に見られるように、このような部分を夜に撮影した画像には雷放電らしきものが観測されている。このような活発な対流雲は木星の全面で常に数十個生じている。ここでは、こうした木星の対流雲の特性と大気構造の維持における役割について、地球の場合と対比しつつ、数値モデリングの結果を交えて概観してみる。

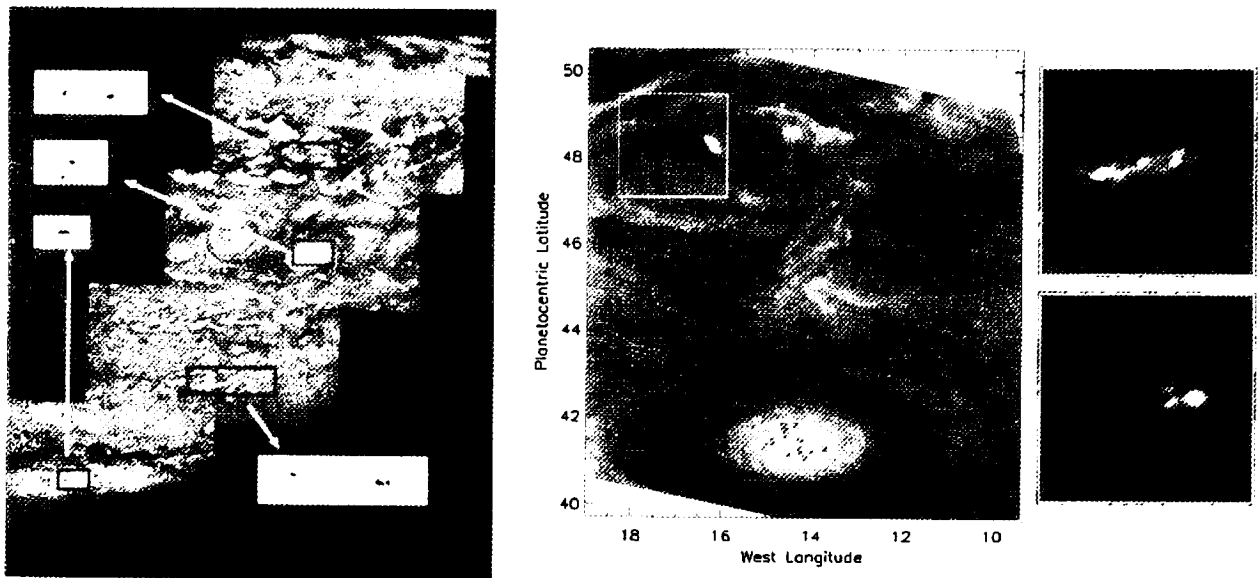


図 1: ガリレオ軌道船が撮影した木星画像。左: 画像中の 4 箇所を反転強調処理すると積乱雲の雲頂が見える。右: ガリレオ軌道船が撮影した積乱雲の電光。昼間に撮影した画像中の四角の領域を夜に撮影すると電光が見える。

パラメタ	木星	地球
惑星質量 [Kg]	1.9×10^{27}	5.9×10^{24}
赤道半径 [Km]	71400	6400
表面重力加速度 [m/s^2]	23.2	9.8
自転角速度 [rad/s]	1.76×10^{-4}	7.29×10^{-5}
平均軌道半径 [km]	7.8×10^8	1.5×10^8
大気上端の日射 [W/m^2]	50.3	1380
内部からの熱フラックス	日射の 70%	ほとんどなし
大気主成分	水素, ヘリウム	窒素, 酸素
大気面密度 [kg/m^2]	4×10^6 (注†)	10^4
scale height[km]	40	8
乾燥断熱温度勾配 [K/km]	2	10
雲の成分	H_2O, NH_3, NH_4SH	H_2O
雲領域の圧力 [気圧]	1 - 5?	0.1 - 1
雲領域の温度 [K]	150 - 300?	200 - 300

表 1: 木星と地球の色々なパラメタ。(†) 表面对流層の底まで。金属化深度までは $8 \times 10^9 [kg/m^2]$ 。

2 木星になぜ活発な雲対流が存在し得るか

後に述べるように、木星の場合も雷雲の活動は、地球と同様に水蒸気の凝結によって起っていると考えられている。だが、これは自明のことではない。惑星の温度は、太陽から入射するエネルギーと惑星の熱放射の釣り合いから極めて大ざっぱに見積もることが出来て、大体、日射の4乗根に比例することが分かっている。これをもとにすると、木星での日射量は地球の約 1/25 であるので、木星の温度は地球の約 1/2.2 すなわち 130[K] ということになる。この温度では大気には非常に少ない水蒸気しか含まれないはずであり、木星での雲活動は、起っているとしても非常に不活発であるはずなのだ。

ポイントの一つは、惑星内部からの熱フラックスである。地球では惑星内部からの熱はほとんど無視できるが、木星の場合、太陽からのエネルギーの7割にもなっている。これを考慮しても、先のエネルギー収支から見積もった惑星温度は高々 170K になる程度であるが、この熱が分厚い大気の内部から出てくることがポイントである。惑星大気の温度構造は、大気成分が熱放射に対して不透明である場合、断熱温度勾配で特徴付けられる。すると、木星の場合のように大気が分厚くまた内部熱源が存在する場合、たとえ大気上端の温度が低くとも、大気温度は下方に向かって断熱温度勾配に沿ってどんどん上がっていきけるのである。そのようなわけで、木星の気温は圧力で数気圧の深度で地球大気と大差無くなり、より下方では地球よりも高温になれるのである。

温度条件が満たされれば、あとは水蒸気の絶対量が問題である。これについては実は、ガリレオ探査機のプローブによる直接測定の結果でも決着がついていない。しかし、太陽系全体の標準的な化学組成をもとに推定すると、主成分に対する質量混合比で 1.5% 程度の水蒸気が存在することが予想される。これらのことから考えれば、木星に活発な対流雲が存在しても良いことになり、その活動は圧力で 1-5 気圧程度、温度で 150-300K 程度の領域で起っていると推定されている(図 2 左)。

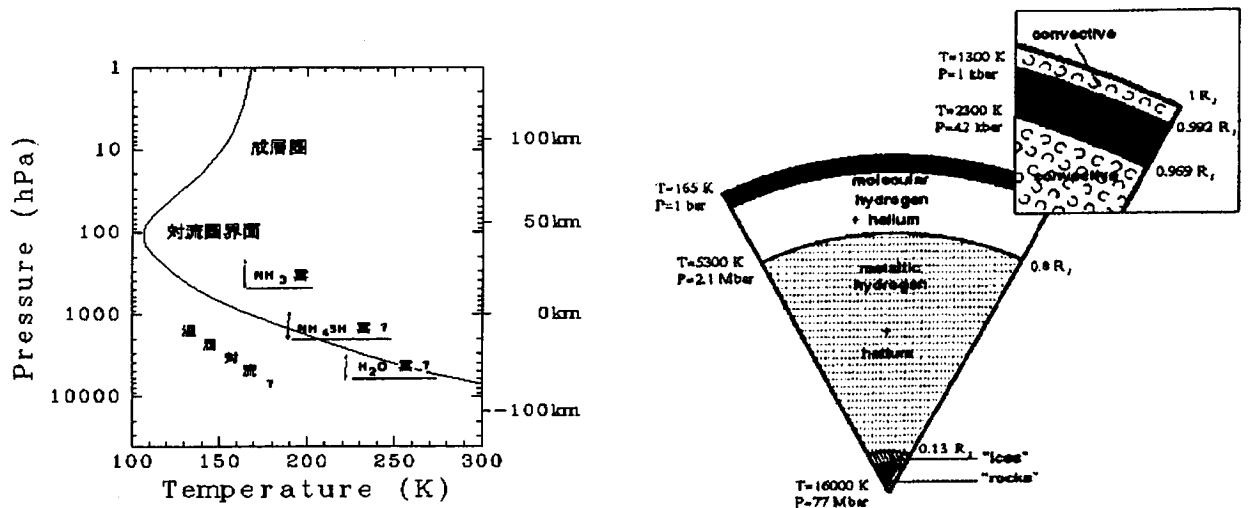


図 2: 左:平衡熱力学計算から推定される木星の大気構造 ([2]に基づく)。右:放射対流平衡モデルによる木星の内部構造 ([3]に基づく)。

3 木星の雲対流 vs 地球の雲対流

木星と地球の雲対流が先ず異なるのは、凝結する成分である。図 2(左)にも書いてある通り、水蒸気以外にも木星ではアンモニアの昇華、および、硫化水素とアンモニアからの硫化水素アンモニウム (NH_4SH) の生成が、雲の生成に寄与していると考えられている。実際、望遠鏡で見える木星の「表面」は、広く分布するアンモニアの雲であると考えられている。しかし、後で触れるような潜熱の総量を見積もってみると、これらの雲は水蒸気よりは力学的寄与がずっと小さいことが分かるので、ここでは扱わないことにする。

水蒸気に関与する対流雲が存在するとして、その様相は地球の対流雲とどの程度の異なると考えられるだろうか。まず対流の規模について考えてみよう。地球の場合、一つ積乱雲の水平規模は 10km 程度である。このスケールは基本的には対流運動が及ぶ鉛直スケールすなわち地面から対流圏界面までの高さと同様である。木星の場合、対流運動が及び得る鉛直領域のスケールは、100km 近くになっていると推定されている。したがって、木星の雷雲は地球の雷雲よりも一桁大きい水平規模を持っていてもおかしくはない。なお、地球の雷雲は単独に存在するのではなく、集団となって一桁以上大きな雲システムを構成することがしばしばある。実際、先の図 1 に写っている木星の雲活動領域は数百 km の規模があるので、木星でも雷雲は集団的に生じる機構があるのかもしれない。

次に水蒸気の役割について量的に考察してみよう。大気の主成分に対する質量混合比でみると、木星にも地球の熱帯大気下層に匹敵する割合で水蒸気が存在していると推定される。しかし、水蒸気の凝結潜熱 — これが雲対流を駆動する — によって大気をどの程度加熱出来るか (L : 水蒸気の凝結の潜熱, q : 水蒸気混合比, c_p : 主成分の比熱として Lq/C_p で与えられる) について比べると、地球の熱帯大気が 50K に達するの対して、木星の場合は一桁小さく、3K 程度に過ぎない。これは、木星大気の比熱 (単位質量当り) が非常に大きいこと、言い換えれば、数密度での水蒸気混合比では木星は地球より一桁小さいことに起因する。

さらに、木星と地球で事情が全く異なるのは、水蒸気が主成分に対して重いか軽いかである。地

地球大気の主成分の平均分子量は約 29 であり、水の分子量は約 18 であり、水蒸気は相対的に軽い。一方、木星では主成分の平均分子量は 2.2 であり、水蒸気はこれに比べて圧倒的に重い。実際、先の標準的見積もりである 1.5% の質量混合比は、同じ大きさの浮力を持つ温度偏差 (水蒸気の分子量が主成分より十分重いので、 T : 大気温度, q : 水蒸気質量混合比として、 $-Tq$ で与えられる) に換算すると 4K にもなる。これは先に見積もった潜熱による温度上昇を上回っている。だからといって、もちろん、対流雲の生成が不可能であるわけではない。たとえば、上昇する雲の周囲も適度に湿っていれば、雲の中の水蒸気による「負の浮力」の効果も (周囲との比較が問題であるから) 実質的には小さくなる。ともあれ、このような「重い凝結成分」が寄与する対流が全体としてどのような構造を持つかは自明でないのである。

最後に、これも地球と木星とで大きく異なるのは、雲対流にとっての下面境界条件である。地球の場合、大気圏の下には地面があり力学的には鉛直速度ゼロの境界条件を課している。また、雲から降った雨は海によって地面の広い範囲に再分配されるとともに、日射によって蒸発し大気にリサイクルされる。これに対して木星の場合には、地球における意味での「地面」は存在せず、どこまで行っても大気が続いているようなものである (正確に言えば、惑星の中心近くに固体の核が存在する)。それでも、Guillot らの惑星内部の放射対流平衡計算 (図 2 右) によれば、木星表面からの深さで 500km から 2000km の付近は比較的放射に対して透明であるために、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、深さ 500km 付近を「対流圏の底」すなわち運動学的な「地面」と考えられるかも知れない。また、深さ 15,000 km 付近では水素が分子から金属状態へと相転移すると推定されており、これより下ではヘリウムが分離する可能性があるため、ここも惑星全体として重要な力学的境界になり得る。なお、もう一つ力学的な「地面」として働き得るものがあるが、これについては後で述べよう。

4 水の対流雲の大気の構造への影響

地球大気におけると同様、水蒸気の雲対流は木星の大気構造に色々な影響を与えていると想像される。ガリレオによる探査以前の代表的な考察は Lunine と Hunten [4] によるものである。

彼らは、水の雲の構造が地球大気の雷雲似ていると仮定して図 3 の様なモデルを立てた。その要点は上昇流と下降流の非対称にある。すなわち、上昇流は速度が大きく断面積が小さいのに対して、下降流は速度が小さく断面積が広い。このうち上昇域では凝結が生じて氷の雲が出来るが、その氷が雪となって落下する結果として大気から水が絞り取られる。氷が完全に落下するとすれば、雲頂から出てくる空気の湿度は、雲頂高度での飽和水蒸気量で拘束され、極めて低くなる。この後、この湿度を保ったまま空気が下降すれば、下降域での湿度は最初に上昇域に吸い込まれた際の湿度よりずっと低くなる。しかも、断面積は下降域が圧倒的に広いため、平均的にはこの低い湿度が代表値となる。もちろん、このように極端に低い湿度が実現するためには、雲が同じ場所で定常的に生成することなど、色々な制約が必要であり、現実の木星がこうなっているかどうかはわからない。

雲対流が大気の大規模構造に及ぼすもう一つの効果は凝結の潜熱の鉛直温度構造への影響である。凝結しつつ断熱上昇する雲内の気塊の温度変化は「湿潤断熱減率」と呼ばれ、その値は凝結成

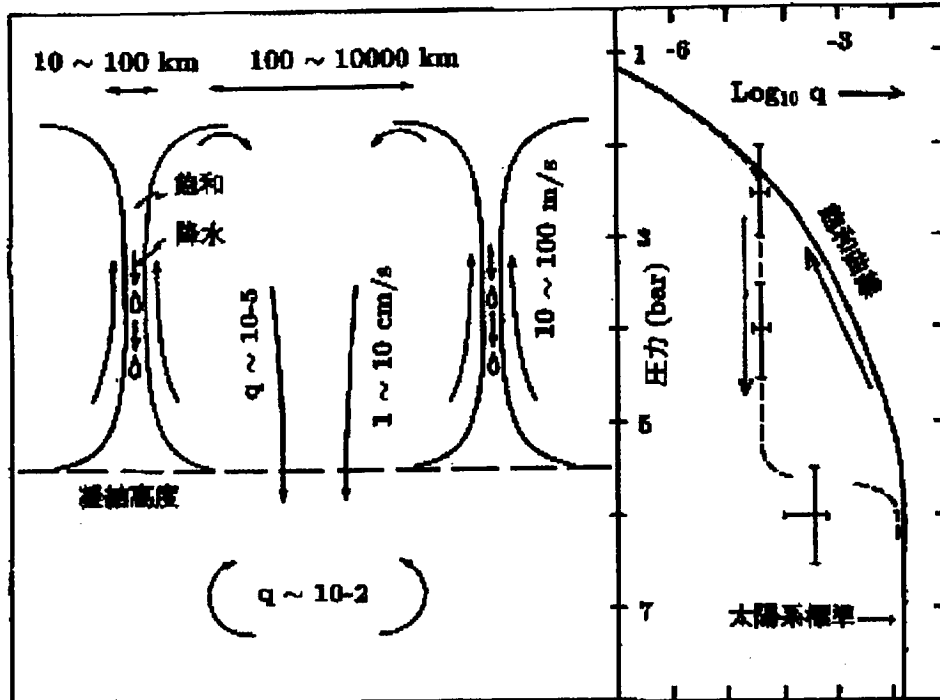


図 3: Lunine and Hunten(1987) による木星の水蒸気雲対流層の様相

分が少ないという近似のもとで

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{m.a.} = -\frac{g}{c_p} \frac{1 + \frac{Lq}{RT}}{1 + \frac{L^2q}{c_p R_v T^2}} \approx -\frac{g}{c_p} \left\{ 1 - \left(\frac{L}{R_v T} - \frac{c_p}{R} \right) \frac{Lq}{c_p T} \right\}$$

である。ただし g は重力加速度、 c_p は非凝結成分の質量当たり定圧比熱、 R は非凝結成分の質量当たり気体定数、 R_v は凝結成分の質量当たり気体定数、 T は温度、 L は質量あたりの潜熱、 q は凝結成分の質量混合比である。これに木星の水の雲についてのもっともらしい値を代入してみると、乾燥断熱減率 ($-g/c_p$) と比べて湿潤断熱減率は 16% 小さい程度である。ちなみに地球大気について同様に調べると、湿潤断熱減率は乾燥断熱減率の 6 割程度まで小さくなっている。木星大気における水蒸気潜熱の効果は地球と比べるとだいぶ影が薄い。それでも、地球の場合と同じように、大気全般の温度構造が雲の影響で湿潤断熱温度勾配に近くなっていれば、いろいろな大規模運動の構造にも影響が現れる可能性がある。その影響は大気の成層安定度の目安である浮力振動数 N

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{dT}{dz} + \frac{g}{c_p} \right) + g \left(\frac{m_d}{m_v} - 1 \right) \frac{dq_0}{dz} \approx \frac{g^2}{c_p T} \left(\frac{L}{R_v T} - \frac{c_p}{R} \right) \left\{ \frac{L}{c_p T} + r \left(1 - \frac{m_d}{m_v} \right) \right\} q$$

(上は浮力振動数の 2 乗を与える式。ただし m_d, m_v はそれぞれ大気主成分と水蒸気の分子量、 q_0 は平均場の水の水の混合比、 $r \equiv q_0/q$ は平均場の相対湿度である。ここでは q が十分小さく、また r は一定であると仮定した。) を通じて現れる。上の式に見るように N には温度構造と同時に水蒸気自体の重さも効いてくる。先に注意した様に、木星では地球と比べると温度構造における水蒸気の寄与が小さい一方で、水蒸気の重さの効果 (これは混合比自身が決める) は同程度なので、結果として水蒸気の重さの重要性が大きくなっている。



図 4: ガリレオ軌道船による木星の「ホットスポット」の画像。中央やや左下の黒く見える横長の領域である。赤外線測定される輝度温度が高い。下降流が卓越するために乾燥していると想像されてきた。

木星の大気構造については、1995年12月に木星に到着したガリレオの probe が直接的な回答を与えてくれるはずであった。しかし、probe の突入地点が「ホットスポット」と呼ばれる特異な領域であったために、その観測結果(たとえば、深部に至るまで水が非常に少ないこと [5]) は木星全体を代表していないと考えられている。

5 木星の雲対流の数値計算

ガリレオ探査を経てさえ、木星の雲対流層については断片的・間接的な観測事実しか無いから、そこで何が起きているかを洞察するにあたって理論計算の果たす役割は大きい。以下では筆者らによる木星大気深部の対流の流体力学モデル計算 [6] の結果を紹介する。今までにも木星の対流の数値計算は幾つか行なわれてきた [7] が、これら過去の研究の目的はあくまで「雲」すなわち上昇流の部分の降るまいを調べることであったので、一つの雲の生成から消滅を都合の良い初期条件から計算すれば必要十分であった。これに対して筆者らの目的は適当な熱的強制のもとで生じる多数の雲の生成消滅の繰り返しを経て、平均的な大気構造がどの様に定まるかを知ることにある。そのため我々は過去の研究に用いられたよりも一桁以上大きな領域の数値モデルを、従来の研究より一桁以上長時間にわたって走らせている。

数値モデル

使用した数値モデルは非弾性方程式系 — 基本場の密度変化を考慮したブジネスク系と水の保存の式を組合せたものである。ただし、熱力学第一法則には水の相変化の潜熱を考慮し、浮力の項には温度の他に水(水蒸気および凝結水)の混合比を考慮する。水としては気相(水蒸気)と液相のみを扱い、液相はさらに雲水・雨水に二分する。雲水・雨水の相違は、(1) 雲水の凝結・蒸発は瞬間的に起こらせるが雨水の蒸発には有限の時間が必要であると仮定すること、および、(2) 雲水は空気とともに流されるだけだが雨水は空気に対して相対的な落下速度をもつこと、の二つである。これらは本質的には、凝結物のうちサイズの小さいものを雲水に、サイズの大きいものを雨水に分類したことの反映である。雲水・雨水間の変換(いわゆる雲微物理)は単純な形で仮定する。基礎方

程式の詳細については中島ら [8] を参照されたい。

計算領域は水平には 512 km (一部の計算では 4096 km) であり、周期境界条件を課する。鉛直には圧力 30 Bar ~ 0.001 Bar までの 300 km の範囲を含み、上下の境界では鉛直速度をゼロとする。本物の木星大気はいわば「底無し」であるから、特に下面境界条件は適当でないかもしれない。しかし、当面の研究対象である水の凝結を伴う対流の層は計算領域の中央部の厚さ約 100 km の部分であるから、この部分に関する限り、境界の影響は小さいと期待する。解像度は鉛直・水平とも 2 km である。

初期条件としては木星大気の構造としてもっともらしいと考えられる構造を与えた。高度 200 km (圧力 0.3 気圧) よりも上の成層圏では等温 (120 K) とし、これより下方の対流圏では温度勾配が乾燥断熱減率である分布を与えた。圧力 1 気圧における温度は 169 K である。水蒸気混合比は高度 100 km (圧力 6 気圧) より下で一定とし、その値は標準推測値で与えた。100 km より上では相対湿度が 85 % になる様に与えた。この混合比では凝結高度の気圧は 5 bar となっている。

先に述べたように、我々は多数の雲の生成・消滅に伴って自然に成立する大気構造を調べることを目的にしている。従って、ここで与えた初期条件はそれ程重要なものではなく、むしろ系が初期条件を十分に忘れた段階で実現する統計的定常状態に注目する。熱的強制としては、本来は実際の木星大気の状態を模したものを与えるべきである。しかしこれを正直に与えると、木星における放射緩和時間すなわち数年以上の数値積分が必要となり現状では数値計算が困難である。そこで、実際よりも強い熱的強制を与えて対流構造の確立を加速している。また大気下端では初期の温度に保つという熱的境界条件を課し、深部での熱源の効果を代用させている。

対流の構造

図 5 は、圧力 6 bar から 0.4 bar までの部分を一様に冷却した場合に得られる対流の代表的な状態である。対流の構造の特徴を一口で言い表すと「二階建構造」となる。すなわち、凝結高度 (与えた水蒸気がちょうど飽和に達する高度) を境にして上下の対流が分離している。その様子は鉛直流で特に明白である。凝結高度より下での対流は基本的には通常のベナール対流と似ている。ここでは対流の構造は時間的にほぼ定常である。一方、凝結高度より上の対流は水の凝結を伴っている。この部分の対流の構造は非定常であり、個々の「雲」すなわち凝結をともなう上昇流域は 2 時間程度の寿命で生成・消滅する。雲の中で生成した雨の一部は凝結高度より下まで落下している。「雲」の幅は、凝結高度近くで生成する際には 10 km 程度であるが、上昇とともに大きくなり、成層圏との境に達する頃には数十 km になっている。この大きさは、凝結対流層の厚さにほぼ等しい。

因みにここで現れた雲のサイズは図 1 に示したガリレオが観測した雲よりも一桁小さい。実際にはガリレオはこれらより小規模な雲も観測しているので、我々の計算ではこの小規模な方の雲が再現されたと考えても良からう。しかし、図 1 で見るような大規模な雲活動がどのように生じるのかも問題である。雲対流の規模が小さいのは、計算領域が狭すぎるためである可能性もある。実際、対流層の上部のみを冷却し計算領域を 4096 km まで広げた実験では、200 km 程度の狭い領域で 20 時間以上にもわたって雲が集中的に生成するイベントも生じている。これにともなって、成層圏直下では薄い雲が 1000 km 程度まで広がっている。

また、実際に観測される大規模な対流雲が、木星全体にまんべんなく生じているのではなく特定の場所に集中していることを考えると、雲よりもっと大規模な運動—地球の高気圧、低気圧に対応する様な?—に支配されている可能性もある。実際、ここでは示さない (研究会当日にアニメー

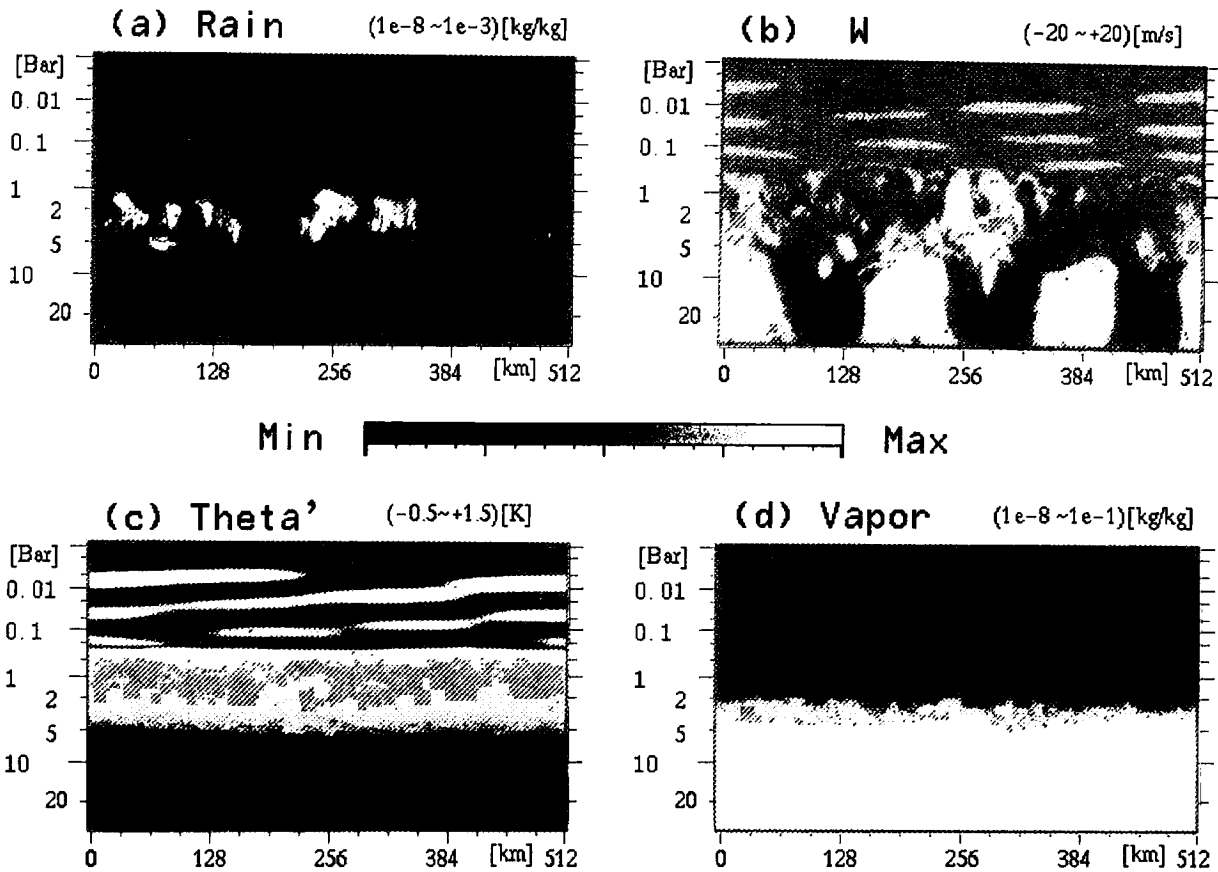


図 5: 木星の水蒸気雲対流層の数値実験の結果 (Nakajima *et al*, 2000[6] より)。左上: 雨水混合比 (log scale $10^{-8} \sim 10^{-3}$)、右上: 鉛直流速 ($\pm 20\text{m/s}$)、左下: 温位偏差 ($-0.5 \sim 1.5\text{K}$)、右下: 水蒸気混合比 (log scale $10^{-8} \sim 10^{-1}$)。

ションで示した) 初期条件として雲対流が生じない様に設定したうえで、その後に放射冷却によって強い不安定が蓄積していくとした数値実験では、いわば待ちに待った状態ですぐに始まる雲対流は、先に示したものよりはるかに大規模で強いものになる。

最後に、凝結高度における鉛直熱輸送についてコメントしておこう。先に述べた様に対流運動は凝結高度を境にして鉛直に分離した「二階建て構造」になっているから、この高度では直接的に対流によって熱を運ぶわけにはいかない。実は、ここでの熱輸送を担っているのは水循環である。つまり、「二階」の雲の中で生成した雨が「一階」に落下して蒸発し、同時に「二階」の空気の一部が「一階」に下降する。一方、雲の生成の際には「一階」の上端が飽和して「二階」に上昇していく。これらの、水が気相で上昇し液相で下降するサイクルによって、潜熱として熱が上に運ばれることになる。このため、放射冷却が雲層の上部に限られている場合でも、放射冷却が「二階」の雲対流を駆動し、そこから降って来る雨の蒸発が「一階」の対流を駆動することも起るのである。この様に降った雨が「一階」でリサイクルされることを考えると、「一階」は地球の海洋に相当しているともいえる。さらに、「一階」と「二階」の境界が下で見えるように安定層になっていることも考えると、ここが、まさに地面とはいわないまでも「やわらかい海面」に近い存在であるとも言えよう。

平均的大気構造

次に、この様な対流とともに実現された平均的大気構造について述べる。焦点は湿度と成層の鉛直構造とその決まり方である。図6(右)は計算領域全体で平均した水蒸気混合比の鉛直分布である。一見してわかる特徴は、凝結高度より下では混合比が一様であるのに対して、凝結高度より上では急減することである。飽和混合比と比較すると、凝結高度より上での相対湿度は比較的高く、20%を下回らない。この値は Lunine と Hunten が簡単な雲対流の構造を仮定して予測した値よりもずっと高い。

一方で、湿度の空間分布のスナップショットを見る限りでは Lunine と Hunten の予想した機構、すなわち下降流による乾燥空気の持ち込みは、局所的・瞬間的には働いている。図5(c)に示した蒸気混合比の空間分布をみると、凝結高度より下では混合比は水平・鉛直にほぼ一様であるが、凝結高度より上方では非一様が目立つ。「雲」の中で値が大きい(飽和している)一方、その外ではずっと乾燥しており、場所によっては相対湿度にして1%以下にもなっている。

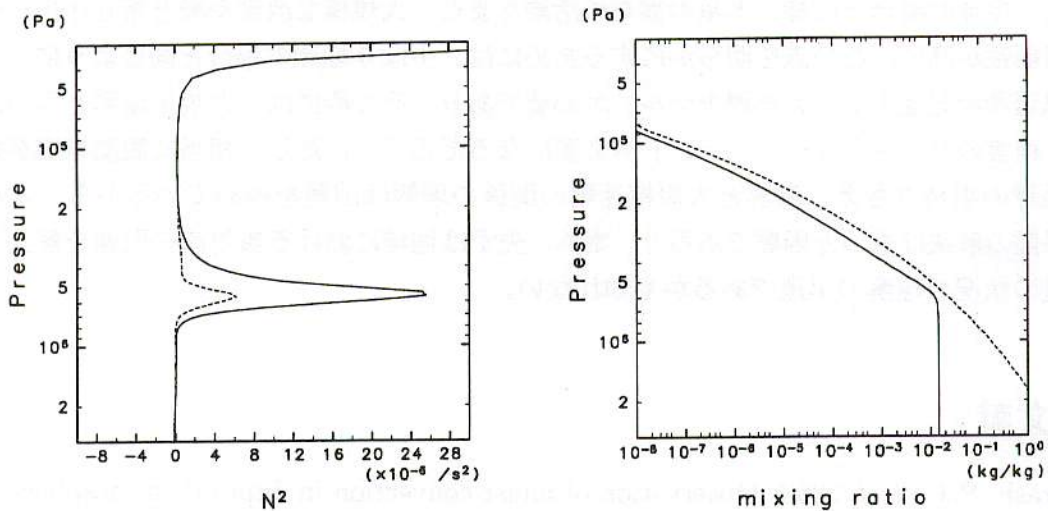


図6: 数値モデリングにより実現した平均的大気構造 [6]。左:浮力振動数の鉛直分布 (点線は温度成層の寄与)。右:水蒸気混合比の鉛直分布 (点線は飽和混合比)。

では、Lunine と Hunten の仮定はどこが不適切だったのだろうか。一つは対流の非定常性の影響を考えなかったことである。雲の外に下降流が十分広い領域で長時間維持されれば、平均構造にも十分反映するわけであるが、実際には、この水の凝結を伴う対流層の運動は非定常であり、乾燥化の完了を待たずに下から新しい雲が上昇し、大気を湿らせてしまう。別の言い方をすれば、有限寿命の雲によって熱輸送を維持するためには、常に新しい雲を生成する必要がある、その結果、大気中には最盛期の雲だけでなく出来かけの雲(飽和している)や雲の残骸(湿度が高い)が常に存在する。この状態を水平平均すると湿度は比較的高くならざるを得ない。

図6(右)は平均的な成層安定度の鉛直分布を示している。一見して気付く特徴は、凝結高度近傍では成層が強い(浮力振動数が大きい)が、その上下では成層が極めて弱いことである。言い換えれば、木星の対流圏は大ざっぱに言って「二層流体」で近似できることを示す。成層は前に述べた様に温度構造と水の混合比で定まるが、この計算での両者の寄与を調べると、温度ではなく水の混合比の寄与が支配的である。結局、雲は確かに木星の成層を支配しているが、その主要なメカニズムは潜熱により上空の温度を上げるのではなく、分子量の大きい水を除去することである。

6 おわりに

流体モデルによる数値実験によって、ガリレオによる探査によっても十分にはのぞき見る事が許されなかった木星大気の高層部の状況の大まかなイメージが掴めて来たように思う。もちろん、筆者らのモデル計算自体は、ちゃんとした放射計算を行っていないこと、アンモニアなど水以外の凝結物を考慮していないこと、そして何よりモデルが2次元であることなど、色々と改良の余地がある。しかし、もっと大枠において残されている問題点がある。

第一に、下の境界条件の選び方の問題である。最初に述べた様に木星では本質的には「大気」と「内部」の区別が無い。したがって、大気の対流が惑星内部の運動とどの様に接続するかが大きな問題である。もっと具体的にいえば、木星内部では惑星自転軸方向に伸びた細長い柱状の対流セルの存在が想像されているが、これと筆者らの計算結果の「一階」の部分の運動とがどのような関係になるか、という問題である。これが適切に理解されれば、今回の様な計算において下面の境界条件をどう設定すべきであるかも理解できる可能性がある。

第二に、地球の場合と同様、木星の雲対流活動もまた、大規模な波動や渦と相互作用しつつ生じている可能性が高い。この点を明らかにするためには、やはり地球の場合と同じように、木星の大規模大気運動を記述する「大循環モデル」が必要であり、その際には、大規模運動と雲の関係を記述する「積雲のパラメタリゼーション」も必要になるだろう。ただし、相当に観測事実が蓄積されている地球の場合でさえ、積雲と大規模運動の関係の理解は困難を極めているから、木星におけるこの課題の解決はもっと困難であろう。案外、まずは地球における雲対流の問題を解決することが、木星の状況の理解の早道であるかも知れない。

参考文献

- [1] Gierasch, P.J. *et al*, 2000: Observation of moist convection in Jupiter's atmosphere. *Nature*, **403**, 628-630.
- [2] Weidenschilling, S.J., and Lewis, J.S., 1973: Atmospheric and cloud structures of the Jovian planets. *Icarus*, **20**, 465-476.
- [3] Guillot, T.D. *et al*, 1994: Are the giant planets fully convective? *Icarus*, **112**, 337-353.
- [4] Lunine, J.I., and Hunten, D.M., 1987: Moist convection and the abundance of water in the troposphere of Jupiter. *Icarus*, **69**, 566-570.
- [5] Niemann, H.B. *et al.*, 1996: The Galileo probe mass spectrometer: Composition of Jupiter's atmosphere. *Science*, **272**, 846-849.
- [6] Nakajima, K., Takehiro, S., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., 2000: Numerical modeling of Jupiter's moist convection layer. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 3129-3132.
- [7] Yair, Y., Levin, Z., and Tzivion, S., 1995: Microphysical processes and dynamics of a Jovian thundercloud. *Icarus*, **114**, 278-299.
- [8] 中島健介, 竹広真一, 石渡正樹, 林 祥介, 1998: 地球流体における「雲対流」.
<http://www.nagare.or.jp/mm/98/nakajima/> (「ながれ」, 17 no.3 付録 CD-ROM).