

タイタンの「雲対流」の諸問題

九大・理 中島 健介 (Nakajima Kensuke)

概要

土星の衛星タイタンは大量の大気を持ち、メタンの凝結による雲が生じる可能性が指摘されてきた。近年の観測はメタンの雲が短時間で変動することを示しており、これは雲が対流性のものである可能性を示唆する。その一方で、大気温度構造や下層のメタン混合比は、観測されるような湿潤対流の可能性を必ずしも支持しない。この発表では、タイタンのメタン雲について概観するとともに、凝結条件として大きな過飽和度を含めた場合を含め、数値実験の結果を紹介する。

1 タイタンとその大気：カッシーニ探査以前

土星の衛星タイタンは「衛星」としては太陽系で最大級であり、窒素を主成分とする分厚い大気を持つことが古くから知られているため、火星と並んで生命の存否も含めた様々な議論が行われてきた。しかし大気運動の様相や地表面の環境については、衛星の全面が光学的に非常に厚い「もや」に覆われているため (図 1 左)、最近のカッシーニ・ホイヘンスによる探査まで多くの謎が残されていた。

パラメタ	タイタン	地球	木星
表面重力加速度 [m/s^2]	1.35	9.8	23.2
大気上端の日射 [W/m^2]	15	1380	50
大気主成分	N_2	N_2, O_2	H_2, He
地表面温度 [K]	95	280	1300(注 †)
地表面気圧 [気圧]	1.5	1.0	1000(注 †)
内部からの熱フラックス	小さい	ほとんどなし	日射の 70%
大気面密度 [kg/m^2]	1.1×10^5	10^4	4×10^6 (注 †)
密度スケールハイト [km]	18	8	40
乾燥断熱温度勾配 [K/km]	1.35	10	2
雲の成分	CH_4, N_2	H_2O	H_2O, NH_3, NH_4SH
雲領域の圧力 [気圧]	0.5 – 1.5?	0.1 – 1	1–5?
雲領域の高度 [km]	8 – 25?	0 – 20	深さ 100?
雲領域の温度 [K]	75 – 90?	200 – 300	150–300?
凝結成分の凝結潜熱 L [J/Kg]	5.1×10^5	2.5×10^6	2.5×10^6 (H_2O)
凝結成分の下層混合比 q_s	0.03?	0.02	0.015?(H_2O)
潜熱加熱の目安 (Lq_s/c_p)[K]	15	50	3.1

表 1: タイタン・地球・木星大気のパラメタ。(†) 表面対流層の底での値。金属化深度までは $8 \times 10^9 [kg/m^2]$ 。

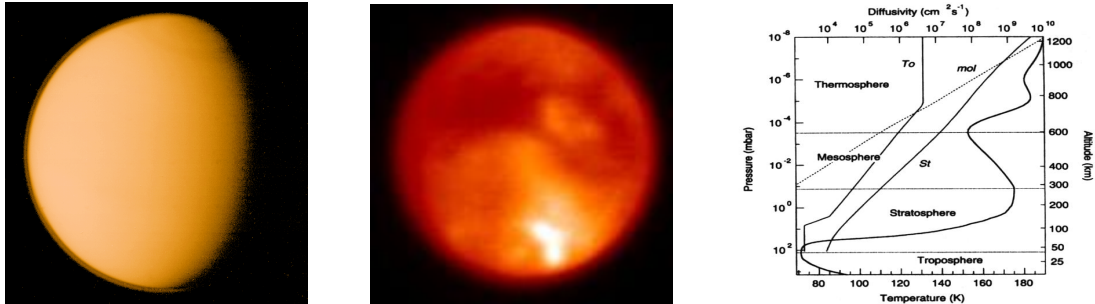


図 1: 左: Voyager 1 号が可視光で撮影したタイタン。中: Keck 望遠鏡を使用したメタン窓領域観測によるタイタン南極の雲活動¹⁾。右: タイタンの大気構造²⁾。

タイタンの大気の特徴を地球・木星の大気と比較してみると、表 1 の様になる。まず、衛星であるにもかかわらず、タイタンの地表面気圧は地球より高く、鉛直積分した単位面積あたり大気量は、実に地球の 10 倍以上である。太陽から遠方であるので日射は弱く温度は低いが、重力加速度が小さいためスケールハイトは地球大気より大きく、大気は幾何学的にも非常に厚い。

大気の鉛直構造を図 1(右) に示す。地球と同様、下から対流圏・成層圏・中間圏・熱圏と区分される。成層圏界面付近の高温は、「もや」による日射吸収のためである。対流圏の温度が大変低いことが目立つが、これは「もや」が日射を遮る一方で赤外線を多少とも透過させることによる「逆温室効果」のためである。

大気の主成分は地球と同様、窒素であるが、地球大気中の水蒸気と同程度の混合比でメタンが存在し、これが凝結して雨を降らせる可能性が指摘されてきた。下層の空気塊を仮想的に持ち上げて含まれるメタンを全て凝結させると、潜熱による温度上昇は約 15 度になるが、これは地球の熱帯の場合の約 1/3 にもなり、大気運動に潜熱が及ぼす影響は無視できないと考えられる。(木星ではこの値はかなり小さい。) 実際、対流圏の温度減率はメタンの凝結を想定すると条件付き不安定であり、もしメタンが凝結すれば、対流雲の発達が予想される。ただし、対称性の良い有機分子であるメタンに対して効率の良い凝結核が存在するかは不明であり、実際、対流圏上部のメタンが相当に過飽和(過飽和度 50%程度)であることを示す観測³⁾ もあり、メタン雲の存否は観測的にも理論的にも決着しなかった。

「もや」の下の様相が伺えるようになったのは、1990 年代、adaptive optics 技術の実用化により飛躍的に高い解像度が実現した赤外線観測(波長約 2 ミクロンのメタンの窓領域)によってである。その結果からは、たとえば図 1(中) に示すような、衛星表面に固定した「模様」とともに、速く時間変化する小規模な雲の存在が明らかになった。後者がメタンの雲と推定される一方、前者、特に反射率が低い部分はメタン・エタンの海ではないかとする議論もあり、ホイヘンスプローブによる直接探査が熱望されることとなった。

2 カッシーニ・ホイヘンスによる探査

カッシーニ探査機は 2004 年 7 月に土星系に到着し、現在までに 10 回を超えるタイタンへの接近観測を行い、多くのデータを送ってきている。赤外域での撮像観測によると、南極近傍および南半球中緯度には、時々、数十分程度で時間変動する数十キロスケールの雲が生じることが確認され

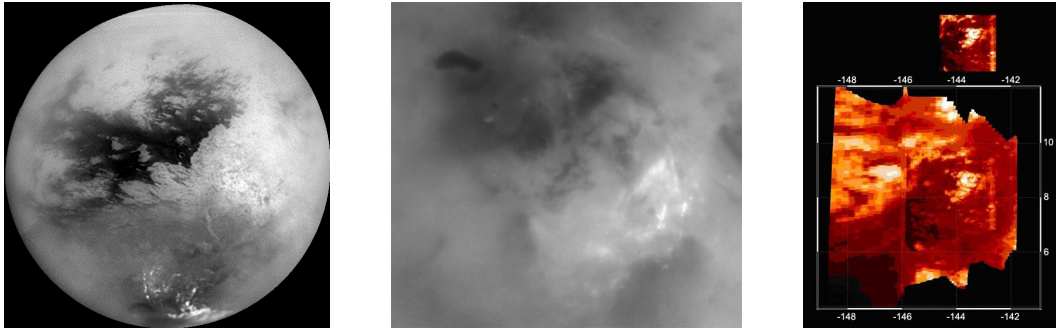


図 2: 左:カッシーニ軌道船が撮影したタイタン。南極付近(下部)に雲活動(白色)がある(Photojournal PIA06141)⁴⁾。中:カッシーニ軌道船が撮影したタイタンの南極付近。左上の黒い足跡状の模様は湖かもしれない(Photojournal PIA06241)。右:カッシーニ軌道船が撮影したタイタンの「火山」(Photojournal PIA07962)。

た。また地表面には固定した模様が確認されているが、その正体は、黒い部分がどうやら砂漠であることを除き、はっきりしていない(図2左、中)。また合成開口レーダーはクレーターや氷の火山らしきものも観測している(図2右)。

2005年1月にはカッシーニ本体から分離されたホイヘンスプローブがタイタン大気に投入され、パラシュートによって2時間以上にわたり大気構造を観測しつつ降下し、地表面に到着した。降下中に撮影された画像には侵食地形と思われる構造(図3左)も見られ、また、降下地点(図3中)は明らかに「地面」であるものの、散らばる石ころは丸く、これまた侵食作用を示唆する。これらの特徴をどう解釈すべきか(特に侵食の年代)については、研究が始まったばかりである。降下中の観測によると、地面から5km程度までは、中立成層と一様なメタン濃度で特徴付けられる混合層となっていた(図3右)。メタンの雲を示す直接的なデータは得られず、また、メタンの過飽和は観測されなかった。ただし、ホイヘンスの降下地点(赤道近く)は、この時にメタンの雲らしきものが観測されていた地点(南極近傍)からは離れていたため、雲が観測できなかったことは当然とも言える。

以上のように、カッシーニ・ホイヘンスによる探査は、多くの新データをもたらしてはいるが、木星におけるガリレオ軌道船およびプローブ探査と同様、直接観測は1点だけであり、大気の総合

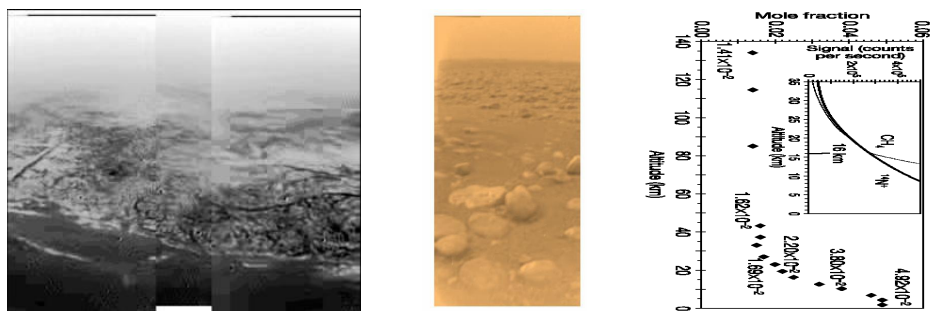


図 3: ガリレオ軌道船が撮影した木星画像。左: ホイヘンスプローブの降下中に撮影したタイタン表面地形(Photojournal PIA07231)。中: ホイヘンスプローブの着陸地点の映像(Photojournal PIA07232)。右: ホイヘンスプローブのが降下中に観測した大気組成⁵⁾。

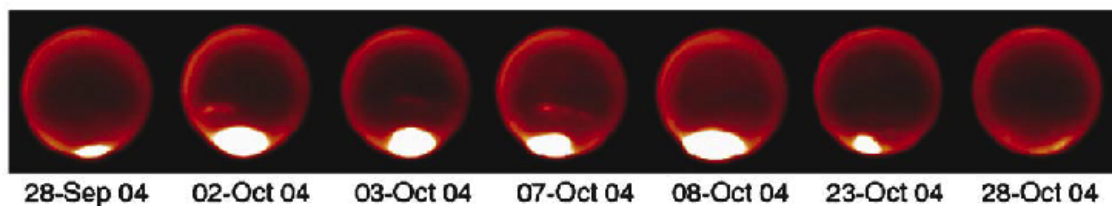


図 4: タイタン南極付近の突発的な大規模雲活動⁶⁾.

的な様相の把握には不十分なものである。将来、飛行船やプロペラ機を持ち込むことも構想されているが、やはり実施はしばらく先であり、タイタンの「気象学」の全貌が明らかになるにはまだまだ時間がかかると思われる。

3 タイタンの雲対流の問題点

観測的情報が不足する現状において、数値モデリングの果たす役割は大きい。地球と同様、タイタンの大気においても、小規模な乱流から全球規模循環まで多スケールの擾乱の階層構造が存在すると思われるので、各階層の運動構造に適合した数値モデリングと、その結果相互の関係付けが必要である。ここで、数値モデリングに先立ち、観測から示唆される雲対流と、その役割について、疑問点・問題点を整理しておこう。

凝結核の活動度 先に触れたように、有機物であるメタンについて、効率の良い凝結核が存在するかどうかはまだわかっていない。確かにホイヘンスプローブは大きな過飽和を観測しなかったが、観測地点が雲の活動域から離れていたこと、および、雲活動に季節変化その他の間欠性が存在することを考えると、時期や場所によってはメタンの大きな過飽和が生じ、それで初めて雲が生じるのだ、という可能性もまだ残っている。もしも、過去の観測が示したような大きな過飽和度（～50%）が雲の形成に必要なものであれば、雲活動の様相は地球の雲とは全く異なるかもしれない。

地面に雨は降るか？ カッシーニ・ホイヘンスの探査によって、どうやら、タイタンの表面には地球の「大洋」のような大きなメタンの「海」は存在しないことがわかった。となると、常識的に考えれば、地表面からのメタンの「蒸発」は極めて少ないことになり、大気中のメタン量の収支が均衡しているとすれば、大気から地面への降水量も極めて少なくなければならない。しかし、ホイヘンスプローブが降下中に撮影した地形や、着陸後に撮影した地表面の丸い石ころは、大量の液体による侵食を示唆する。Lorenz ら⁷⁾ は、この相反する状況をメタンの降水が時空間的に集中して生じることで説明しているが、そのようなことは力学的に可能なのだろうか？

大気メタン収支は均衡しているのか 実はそもそも、大気中のメタンの量が収支均衡しているという仮定は、現段階では自明ではない。カッシーニは、「氷火山」かもしれない地形（図 2 右）を観測しているが、ここで言う「氷火山」とは、水の氷だけでなく、アンモニアやメタンも

噴出する可能性がある。となると、表面地形は、火山活動が盛んであった時期の降水活動の様相を反映している可能性もある。

雲の到達高度 上の問題とも関連するが、カッシーニ探査機の観測結果から、Griffith⁸⁾ らは中緯度の対流雲的な雲の高度が 35 分間で高度 20km から 42km まで上昇したとする解析結果を示している。これが対流雲によるものとするれば、鉛直流として 10m/s を越える大きさが必要であるが、重力加速度が小さいタイタンにおいて、これは可能だろうか？さらに、代表的な下層メタン混合比を仮定して保存的にパーセルを持ち上げても、正の浮力を持ち得るのはせいぜい高度 28km 程度までであり、42km という到達高度を説明するには何か特別の機構を必要とする。

雲の間欠性 地上観測の解析から、カッシーニの土星系到着の直前には、非常に大規模な雲活動の「バースト」があったことがわかってきた(図 4)。このような雲活動の間欠性は、季節変化の一環なのか、あるいは対流雲活動の自発的な性質として現れるものなのだろうか。

以上のように、雲の様相やメタンの「水循環」には、地球における雲の様相と水循環とは、かなりの相違がある可能性もある。火山活動など外的要因の効果など、幅広い可能性も含めて、先入観を抜きに検討する必要があると思われる。

4 非静力学モデルによる数値実験

ここでは、タイタンの雲の振る舞いを、火山の効果や過飽和の必要性も含めて幅広い可能性を念頭において検討した数値実験の試みを紹介する。過去のタイタン大気の数値計算としては、鉛直 1 次元モデルによる計算か、あるいは、粗い解像度の循環モデル計算があるだけなので、本研究は今のところ世界初の試みとなる。

数値モデルは水平・鉛直の 2 次元であり、非弾性系に基づく⁹⁾。領域は水平 1,024km (周期境界条件)・鉛直 60km、解像度は水平 500m・鉛直 250m である。メタンは、地球の「温かい雨」のバルクパラメタリゼーションに倣って、蒸気・雲・雨の 3 カテゴリに分けて計算する。簡単のために、雲・雨は純粋なメタンと仮定する。特に注意しない限り、蒸気と雲の間の変換は飽和条件で起るとする。また、雨は不飽和では蒸発し、過飽和では凝結成長する(変換率は地球の雲の場合の 1/10)。雲から雨への変換は、雲混合比に比例して時定数 1000 秒で生じさせる。雨の落下速度は、小さな重力加速度を考慮して、地球の場合の 1/10 とする。飽和蒸気圧曲線は、Thompson ら¹⁰⁾ の表 5 の数値を Tetens の式にフィットしたものをを用いた。

4.1 放射冷却で駆動される「自然な」雲対流

地球の熱帯における気候学的な積雲対流活動と同様に、放射による冷却と地表面からの熱(潜熱を含む)供給で支配される雲対流の様相を調べてみる。ただし、タイタンにおける放射冷却は非常に弱いので、そのまま導入したのでは非現実的に長い計算時間が必要となる。そこで今回は、冷却率を 0.03[K/d] とした。地面からの熱とメタンのフラックスはバルク式で計算する。地表面風速は重力潮汐の影響¹¹⁾を想定して 3[m/s] とし、また、メタンフラックスの計算には地面の wetness

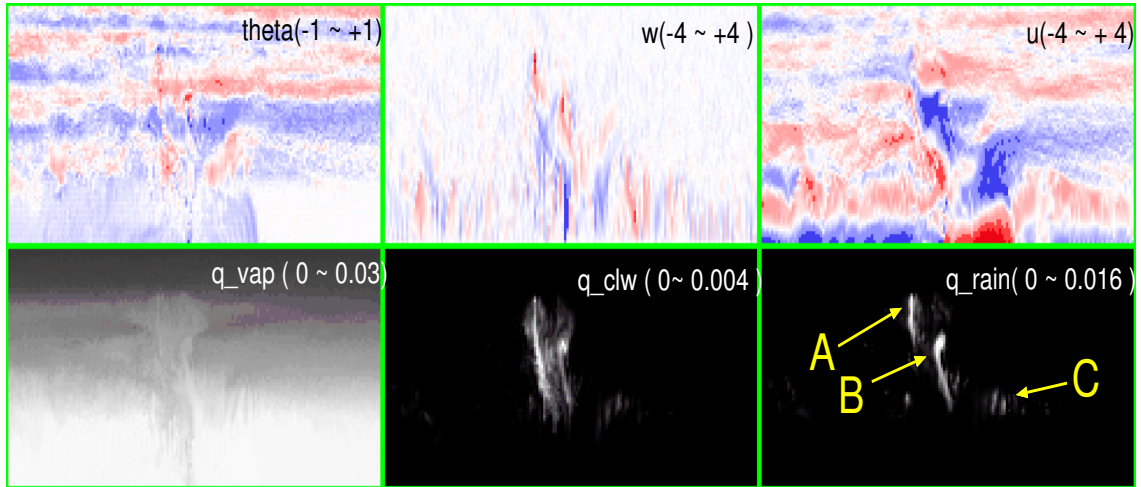


図 5: 計算開始から 1377 時間後のスナップショット (水平 80 キロ鉛直 20 キロの領域を切り出している)。温度偏差 (上左)、鉛直流 (上中)、水平風 (上右)、メタン気体質量混合比 (下左)、メタンの雲の混合比 (下中)、メタンの雨混合比 (下右; A,B,C については本文を参照)。

として 0.01 を仮定した。計算は 75[d] 継続しているが、まだ、大気全体は統計的熱平衡状態に至っていないことに注意しなければならない。

図 5 に、計算で生じた雲活動のスナップショット (水平 80km、鉛直 20km の領域を切り出している) を示す。個々の雲のライフサイクルは定性的には地球の積乱雲と似ている。ただし、雲の寿命は地球の雲よりずっと長い。この時点で、描かれている領域には 3 つの対流雲 (図中の A, B, C) が存在している。ここに示さないが前後の時間発展を見比べると、右側の C は「生成期」、B は発生から 5 時を経て「最盛期」、左側の A は最も古く、発生から 15 時間を経過して「消滅期」に入っている。

この図のなかで最も注目すべき点は、中層で相当の凝結物が生成されているにもかかわらず、地表面に全く降水が到達していないことである。これは、海が存在しないために、大気下層の湿度が 50%以下と低く、雨が落下途中で蒸発してしまうためである。

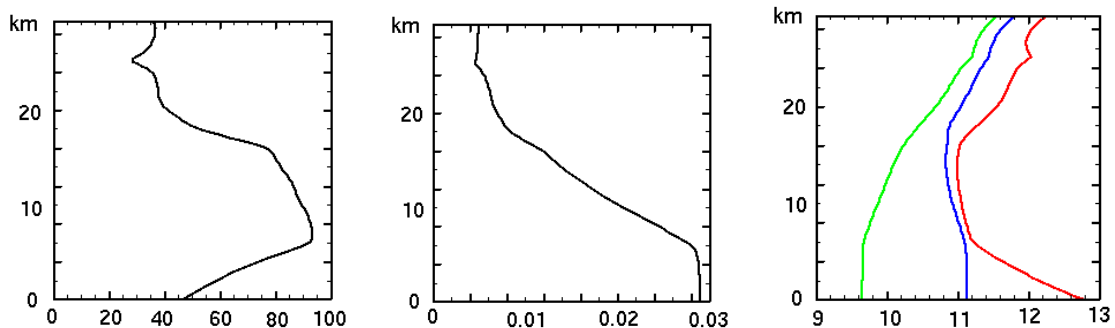


図 6: 計算結果の長時間平均でのモデル大気鉛直構造。左: 相対湿度、中: メタン気体質量混合比、右: 温度 (緑)、相当温度 (青)、飽和相当温度 (赤)

雨の蒸発にともなってこの部分の空気は冷却され、対流雲 B の直下には強い下降流が形成されている。また、対流雲 A が同様の機構で数時間前に形成した下降流は、この時刻には gravity current として左右に 50km 程度に広がっている。対流雲 C は、まさにこの gravity current 拡大のフロントでの強制上昇の結果として生じている（実は対流雲 B も同様であった）。この様に、雨の蒸発を介して新旧の雲が相互作用する様子は、地球のメソスケールシステムと良く似ている。実際、領域内全体での雲活動もランダムに生じるのではなく、一ヶ所で雲ができ始めると、その周囲で次々に新しい雲を生じる結果、3 日間程度の間雲活動が継続し、その後、しばらく雲活動が停止するという間欠性をもっている。

図 6 に領域全体の平均的な鉛直大気構造を示す。これより、地表面から高度 6km 程度までは混合層であることがわかる。その上、高度 20km 弱までが条件付き不安定であり、実際、対流雲は高度 18km 程度まで届いている。

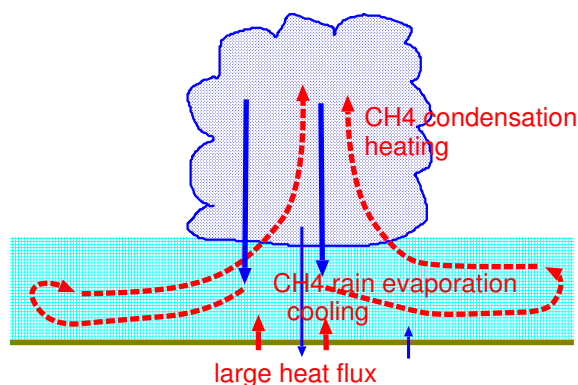


図 7: タイタンの大気と地面の間のメタン・エネルギー循環の大筋。

先にも注意したが、この計算では、対流圏中層で相当の凝結が生じ、活発な対流雲が多数生成するものの、雨は混合層を落下する途中でほとんど全て蒸発する。このようなメタンの「水循環」の様相は、惑星規模の「海」が存在し、大気と海との間で降水・蒸発によって水が交換する地球のものとは全く異なる。もしこの計算結果が正しいとすると、タイタンのメタン循環は、図 7 のように、ほとんど大気の中で閉じていることになる。ただし、エネルギー収支においては地面とのやりとりが含まれる。即ち、対流雲から落下してきた雨の蒸発により混合層から奪われた熱は、地面からの顕熱補給で補われる。そして、この混合層中の顕熱は、メタンの潜熱を介して対流圏中層以上に輸送されることになる。

4.2 「自然な」対流雲の以外の可能性

上の計算で、雲の高度はせいぜい 20km、鉛直流速はせいぜい 5m/s 程度であった。しかし、カッシーニ探査機が観測した「対流雲」の高度は 40km を越えており、鉛直成長速度も 10m/s を明らかに越えていた。このような食い違いを説明する可能性のあるシナリオを 2 つ紹介しておこう。

先に述べた様に、過去の遠隔観測でタイタンの対流圏で大きな過飽和が認められた。このことは、メタンの凝結には大きな過飽和が必要であることを示唆しているのかもしれない。そこで雲物

理過程を変更し、凝結に湿度 120%が必要である、として計算を行ってみた。ただし、非現実的ではあるが、初期条件として厚さ 40km にわたり湿度 120%とした。すると（ここには示さないが）、領域内の一ヶ所で凝結が始まった 5 分後には、厚さ 40 キロの過飽和層の全体で、幅 20km 程度の雲が生じた。この雲の上下への拡大は、最初の凝結により生じる重力波が上下の空気を上に変位させ過飽和にすることにより生じたものであり、パーセルの移動を伴う「対流雲」とは全く異なる機構で生じている。もちろん、このような場合には大気の圧縮性を完全に導入したモデルが適切であるので、今回の非弾性系による計算結果がどこまで妥当かは、これから検討せねばならない。ともあれ、もし、ぶ厚い過飽和層が存在すれば、極端な場合、たとえ条件付対流不安定でなくとも、鉛直方向に素早く「成長」する雲 — これは見掛け上「対流雲」と見做されるであろう — が生じる可能性がある。

また、もしもタイタン表面で現在も「火山」活動があり、局所的に混合層内の温度やメタン濃度が高まるとどうなるだろうか。上の計算では、地表付近の湿度は 50% 程度であったから、局所的に飽和すれば単位質量あたりの潜熱の量は周囲の 2 倍程度になりえる。やはりここでは示さないが、局所的に混合層をメタンで飽和させた初期条件を与えて数値実験では、鉛直速度 50m/s に達する激しい対流雲が生じ、1 時間以内に雲頂高度 40km に達する。このように、「火山」のシナリオは有望にみえるが、地表の様相と雲活動がどの程度対応しているか、今後の観測により検証しなければならない。

5 おわりに

まだタイタンの「気象学」、特にメタンの雲活動については、観測が圧倒的に不足している。もちろん、今後 2 年間のカッシーニ探査機も多くのデータを収集するであろうが、タイタンの「1 年」が、土星の公転周期である 29.5 年であることを考えれば、地上からの観測も引き続き重要な意義をもつ。

タイタンの環境はかなり地球と異なるが、標準的なケースとして紹介した数値実験での雲の様相は、地球のものと非常に異ってはいなかった。もちろん、これは誤った「先入観」がモデルの定式化に反映しているためであるかも知れない。最後に触れた、過飽和が本質的に重要である可能性や火山活動の可能性も念頭に入れて、地質学的なものも含めた幅広い観測的情報の総合化が必要である。

ともあれ、太陽系外を含む惑星大気において、大気中で相変化を伴う「雲対流」は普遍的なものである。現在の太陽系の中で、地球の雲対流についてはかなりの知識の蓄積があり、木星の雲についても多少の情報が得られている。さらにタイタンの雲対流についても理解するとともに、これら太陽系内の雲対流についての考察を「一般化」していくことは、惑星科学全般への「気象学」の応用において不可欠な重要性を持つものである。

参考文献

- 1) Brown, M.E. *et al*, 2002: Detection of variable tropospheric clouds near Titan's south pole. *Nature*, **420**, 795-797.

- 2) Flasar, F.M., 1998: The composition of Titan's atmosphere: a meteorological perspective. *Planet. Space Sci.*, **46**, 1109-1124.
- 3) Samuelson, R.E., et al, 1997: Gaseous abundances and methane supersaturation in Titan's troposphere. *Planet. Space Sci.*, **45**, 959-980.
- 4) NASA Planetary Photojournal., <http://photojournal.jpl.nasa.gov/index.html>
- 5) Niemann, H.B., et al, 2005: The abundances of constituents of Titan' atmosphere from the GCMS instrument on the Huygens probe, *Nature*, doi:10.1038/nature04122.
- 6) Schaller, E.L., et al, 2006: A large cloud outburst at Titan's south pole, *Icarus*, **182**, 224-229.
- 7) Lorenz, R.D., et al, 2005: Convective plumes and the scarcity of Titan's clouds *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2004GL021415, 2005.
- 8) Griffith, C.A., et al , 2005: The evolution of Titan's midlatitude clouds. doi: 10.1126/science.1117702.
- 9) 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).
- 10) Thompson, W.R., et al, 1992: Vapor-liquid thermodynamics of $N_2 + CH_4$: model and Titan application., *Icarus*, **97**, 187-199.
- 11) Tokano, T. and Neubauer F.M., 2002: Tidal winds on Titan caused by Saturn, *Icarus*, **158**, 499-515.