

薄い周惑星円盤で集積するタイタンの原始大気：窒素大気の起源と内部分化への示唆

Structure of the proto-atmosphere on Titan accreted in a gas-starved circumplanetary disk

岡田 英誉¹, 倉本 圭^{1*}

OKADA, Hidetaka¹, KURAMOTO, Kiyoshi^{1*}

¹ 北海道大学 大学院 理学院 宇宙理学専攻

¹Department of CosmoSciences, Hokkaido University

タイタンは惑星に匹敵するほどの大きさを持つ土星最大の衛星であり、その著しい特徴として、N₂を主体とした地表面で1.5気圧に達する大気をもつことが挙げられる。また探査機カッシーニのデータによると、タイタン内部は分化しており、タイタンはその熱史の中で氷が融解する温度を経験したと考えられる。このような大気の起源や内部の分化を明らかにするためには、タイタンの形成過程や集積期の熱的進化を理解することが重要となる。

Kuramoto and Matsui (1994) は、タイタンが真空中で集積することを仮定し、材料物質中の氷成分の蒸発により形成される原始水蒸気大気の保温効果を考慮して、集積期のタイタンの熱史を求めた。それによると集積時間が10⁵年よりも短い場合には、集積中に地表面温度がH₂Oの融点を超え内部が分化することを示した。また地表面温度は最高で500K以上に達し、このような高温環境では大量の水蒸気がタイタンの重力圏外に流出することも示した。しかし、近年の衛星形成の理論の発展によれば、衛星は薄い周惑星円盤で集積することが有力視される (Canup and Ward, 2002, 2006)。したがってタイタンの原始大気はH₂やHeも豊富に含むと考えられる。そこで本研究では、薄い周惑星円盤と静力学的に接続している集積期のタイタンの原始大気の熱的構造を数値的に調べ、タイタンの分化と窒素大気の形成過程への影響について考察した。

原始大気はH₂とHeからなる円盤ガス成分と、H₂Oからなる脱ガス成分との混合大気とし、周惑星円盤から温度と圧力が連続的に接続している等温の上層大気(成層圏)と、対流平衡にあり湿潤断熱減率を持つ下層大気(対流圏)からなるとする。大気の大気圏界面高度をパラメータとし、静力学的な原始大気の温度圧力構造を求めた。この構造に対して水蒸気と水素分子を吸収源と仮定して放射伝達を解くことにより、原始大気上端からの熱放射を計算した。タイタン軌道における周惑星円盤の温度圧力条件は先行研究 (Canup and Ward, 2002) をもとに与えた。

上記の仮定の下で大気構造を求めたところ、地表面温度はおよそ300Kが上限となることがわかった。もし集積加熱によってこれよりも地表面温度が高くなれば、静水圧性と連続性の仮定が崩れ、衛星ヒル半径において原始大気の圧力が円盤の圧力を上回って大気流出することになる。この静水圧条件を満たすことのできる上限地表面温度を以下では臨界温度と呼ぶ。さらに、求めた大気上端からの熱放射と集積エネルギーの比較から、円盤圧力が10 Paよりも大きければ、タイタンの集積時間として長めの見積もりである100万年を仮定してもタイタンの地表面温度は集積期にH₂Oの融点を超える。さらに衛星からの熱放射には上限値がある。この射出限界の値は約400 W/m²で、これは集積時間が約40万年のときの集積エネルギーフラックスに相当する。もしこれよりも短時間でタイタンが集積すると、差分のエネルギーが昇温に使われ、地表面温度が臨界温度を超え、大気流出が発生すると考えられる。タイタンの集積時間は1万年~100万年と見積もられており、実際にこのような温度上昇と大気流出を起こす可能性が高い。

大気流出が生じると、軽い円盤ガス成分が選択的に散逸する。今回のモデルでは、H₂, He, H₂O以外の成分は無視しているが、タイタンの材料物質の水の中にはNH₃も含まれていたと考えられている。NH₃は水溶性であるため、大気流出の際にも全てが散逸することなく液体の水に溶けて衛星に残る。一方、非水溶性のArは原始大気の流出に伴い散逸してしまうと考えられる。さらに、微衛星衝突の際の衝撃波によりNH₃からN₂への化学変化が起こり、大気中にN₂が放出される可能性がある (McKay et al., 1988)。集積エネルギーの供給がおさまると、タイタンの大気はしだいに冷えて、水蒸気やNH₃はほぼ完全に凝結する。現在のN₂を主体とし、Arが欠乏したタイタンの大気の形成は、以上のシナリオで説明できるかもしれない。