

学 位 論 文 題 名

H₂O, NH₃ の凝結と NH₄SH の生成反応を考慮した 木星大気の雲対流ならびにその直接数値計算

学位論文内容の要旨

研究の背景と目的

木星大気の雲対流は、地球大気の場合と同様、大気の流れ場や物質分布の決定に重要な役割を担っていると考えられている (Gierasch *et al.*, 2000). しかし観測が困難なこともあり、その具体的な形態はあまりよく調べられていない. 従来の研究において、雲の鉛直分布は主として熱力学平衡計算によって予想されてきたにすぎない.

木星大気の鉛直構造は基本的には放射対流平衡、すなわち放射による熱輸送と多数の対流雲による熱・物質輸送の相互作用の結果として統計的に定まるものである. 従って、放射の効果を取り入れつつ多数の対流雲の生成消滅を長時間計算すれば、雲の振る舞いのみならず、観測が困難な流れ場と凝結成分気体の分布が求められるはずである. この観点からの先駆的な試みとして Nakajima *et al.* (2000) がある. 得られた対流は「二階建て対流」で、H₂O の凝縮に起因する強い安定層が形成され、乾燥空気に対して安定成層した上部の雲対流層と下部の乾燥対流層とが分離されて存在するという構造を示唆した. しかし、用いた数値モデルでは凝縮成分として H₂O しか考慮されておらず、与えた放射冷却が現実的な強度に比べて 2 桁程度大きい、という 2 つの問題があり、現実との定量的な対応付けには問題があった.

木星大気には Nakajima *et al.* (2000) の考慮しなかった NH₃ と NH₄SH の雲が存在すると予想されており、これらの雲の生成に伴う成層安定化効果によって流れ場はさらに鉛直方向に分割される可能性が考えられる. そこで本研究では以下の 2 つを段階的に調べることで、熱力学平衡計算による予想でしかなかった従来の木星大気の雲対流構造に対して、動力的見地からこれを明らかにすることを目的とする. (1) H₂O, NH₃, NH₄SH を含む大気の熱平衡状態の再検討として 3 成分の雲の生成に伴う成層安定化効果を評価する. (2) 熱平衡状態の再検討の結果を踏まつつ 3 つの凝結成分を考慮した雲対流モデルを開発することで雲対流に伴う平均的な流れ場と物質分布を調べる.

木星型惑星大気の成層構造に関する考察

鉛直 1 次元の熱平衡計算を行うことで、大気運動の特徴を支配する基本的な物理量である静的安定度 (浮力振動数の二乗) N^2 の見積もりを行った. 地球大気の種類より、惑星大気の雲層での N^2 は凝湿潤断熱減率と乾燥断熱減率との差から見積もることができる.

木星大気組成は不確定性が大きいので、ギブス自由エネルギー最小化法を利用した熱平衡計算スキームを開発し、元素の存在度を幅広く変化させた計算を容易に行えるようにした. その計算スキームを用いて凝湿潤断熱減率を計算し、木星型惑星大気において予想する大気組成と大気の鉛直成層構造との関係を明らかにした. 木星大気において安定層の形成に最も寄与する凝結成分は H₂O であるが、NH₃ の凝結と NH₄SH の生成反応に伴う成層安定度への寄与は H₂O の凝結に伴う成層安定度への寄与に比べ無視できないことが示された.

木星大気の雲層において、Achterberg and Ingersoll (1989) はかつて静的安定度と H₂O モル比とは比例することを指摘した. しかし本研究によると、元素存在度を太陽系元素存在度の約 5 倍以上とした場合には、その比例関係は成立しないことがわかった. さらに得られた N^2 と H₂O モル比との比例関係を用いて SL9 衝突波速度を大雑把に見積もると、

H₂O モル比を 10 倍にした場合でも SL9 衝突波速度を重力波のそれとして説明することは難しいことがわかった。

雲対流の直接数値計算

凝結成分の存在度と放射強制の大きさをパラメタとし、多数の雲の生成消滅が繰り返された結果として自然に決まる平均的な流れ場と物質分布を数値的に求めた。凝結成分の存在度は鉛直 1 次元の熱平衡計算にならって変化させる。放射強制はガリレオプローブの観測 (Sromovsky *et al.*, 1998) を参考に、大気上層のみに与えることとした。現実の木星大気の放射強制の値を用いると数年スケールの非常に長い積分時間が必要となるため、Nakajima *et al.* (2000) と同様に、放射強制を大きくすることで統計的平衡状態に達するまでの時間を短縮している。

標準実験

凝結成分の存在度を太陽組成の 1 倍とし、放射強制を Nakajima *et al.* (2000) と同様に -1 K/day とする。流れ場の特徴は Nakajima *et al.* (2000) と同じである。H₂O の凝結に起因する強い安定層が形成され、乾燥空気に対して安定成層した上部の雲対流層と下部の乾燥対流層とが分離されて存在するという構造を示した。NH₃ の潜熱と NH₄SH の反応熱に伴う安定層は流れ場にはほとんど影響しない。上昇域では H₂O 雲と NH₄SH の雲は大気上部の NH₃ 凝結高度より上空まで貫入する。大気上層の乾燥気塊は NH₃ 凝結高度と NH₄SH 生成高度を超えて H₂O 凝結高度の直上まで下降する。

凝結成分の存在量に対する応答

凝結成分が太陽組成の 0.1 倍の時には、もはや H₂O 凝結高度に強い成層は形成されず、流れ場は下部境界から対流圏界面まで貫く対流が生じる。大気上層の乾燥気塊は下部境界の 30 bar まで下降することができる。

その一方で凝結成分を太陽組成の 5 倍、10 倍にすると、流れ場は対流活動が活発な時期と静穏な時期を周期的に繰り返すようになる。対流が活発な時期の流れ場と物質分布は標準実験とほぼ同じである。その一方で静穏な時期には放射冷却が直接働く NH₃ 凝結高度付近と NH₄SH 凝結高度付近で局所的に対流が生じようになり、NH₃ の雲層と、NH₄SH と H₂O が共存する雲層とが分かれて存在する。大気上層の乾燥気塊は NH₃ 凝結高度と NH₄SH 生成高度を超えて下降し難くなる。この周期的変化のタイムスケールは、潜熱による温度上昇を放射で緩和する時間スケールで決まる。

放射強制の大きさに対する応答

放射冷却を標準実験の 0.1 倍、すなわち実際の木星大気での値の 10 倍、とする。この計算では潜熱による加熱が放射冷却に比して大きいため、凝結成分を太陽組成の 10 倍とした計算と同様の流れ場と物質分布が得られた。このことは、放射強制を現実の木星大気の値に近づけることで、相対的に NH₃ の凝結と NH₄SH の生成が流れ場と物質分布に与える影響が大きくなることを示唆する。

本研究を通して、熱力学平衡計算による予想にすぎなかった雲の鉛直分布に対する認識、3 種類の凝結成分に対応する 3 層の雲層、を大きく修正することができた。すなわち、雲対流活動が活発な時期には H₂O と NH₄SH の雲は大気上部の NH₃ 凝結高度より上空まで上昇し、3 種類の凝結成分が全体として 1 つの雲層を形成する。対流活動が静穏な時期には NH₃ の雲層と、NH₄SH と H₂O が共存する雲層とが分離して存在する。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 林 祥 介

副 査 教 授 渡 部 重 十

副 査 助 教 授 倉 本 圭

副 査 教 授 遊 馬 芳 雄 (琉球大学大学院理工学

研究科)

学 位 論 文 題 名

H_2O , NH_3 の凝結と NH_4SH の生成反応を考慮した 木星大気 of 雲対流ならびにその直接数値計算

木星大気の雲対流は、地球大気の場合と同様、大気の構造の決定に重要な役割を担っていると考えられている。しかし木星表面の雲層の下を遠隔観測で調べることは困難であり、従来の研究では雲物質の鉛直分布が熱平衡計算によって与えられてきたにすぎない。ガリレオ探査機の大気プローブによる直接探査を経た現在においても、結局 1 地点の観測に過ぎず、木星雲層での運動構造と雲分布はよくわかっていない問題となっている。著者はこの問題に対して循環構造を陽に扱って雲層の描像を得ることを目指し、従来の熱平衡計算を再検討し、その知見を元に木星大気の雲対流の直接数値計算を実現した。

熱平衡計算の再検討においては、凝結成分の存在度をパラメタとして幅広く変化させることのできる熱平衡計算コードを新たに開発し、平衡雲物質分布と付随する成層安定度の凝結成分量依存性を考察した。得られた成層安定度の分布は従来の計算では考慮されてこなかった NH_3 の凝結と NH_4SH の生成反応からの寄与を含むものであり、木星大気に対する標準参照値としての価値を持つものとなっている。さらに、 NH_3 の凝結と NH_4SH の生成反応が成層構造に与える影響は H_2O の凝結が与える影響に比べて無視できないことを明らかにし、従来常識とされてきた成層の強さと H_2O の存在度の比例関係は必ずしも成立しないことも明らかにした。

これらの熱力学的考察を基礎として、 H_2O と NH_3 の凝結と NH_4SH の生成反応を考慮した木星大気の雲対流モデルを世界で初めて開発し数値計算を実現した。木星の対流構造には、 H_2O 凝結高度を境に循環は上下に 2 分される傾向が顕著であるが、 NH_3 や NH_4SH の雲層には定常的な循環境界が付随しない、という特徴があることが示された。また、パラメタによっては雲層の対流に間欠性が見出され、雲対流の活発な時期には H_2O の雲と NH_4SH の雲が NH_3 凝結高度の上まで上昇し混合するのに対し、静穏な時期には NH_3 の雲層と NH_4SH と H_2O から成る雲層とが分離して存在する。これらの雲分布の特徴は、3 層の雲が別々の高度領域に分かれて存在するという熱力学平衡計算に基づいた従来の木星雲分布の描像を大きく修正するものとなっている。

以上のような理由により、著者は北海道大学博士 (理学) の学位を授与される資格あるものと認める。