

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：55201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K05656

研究課題名(和文)木星型惑星大気の雲対流構造～放射冷却率と凝結性成分存在度に対する依存性

研究課題名(英文) Numerical Modeling of Moist Convection in Jovian Planets -- dependency on radiative forcing and abundances of condensable species --

研究代表者

杉山 耕一郎 (Sugiyama, Ko-ichiro)

松江工業高等専門学校・情報工学科・准教授

研究者番号：60463733

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：木星型惑星大気の雲対流の数値シミュレーションを行った。得られた顕著な特徴は、熱力学的な考察から対流抑制が予想されてきたパラメタ範囲においても、強い雲対流が準周期的に生じることであった。このような強い雲対流活動は地球大気における「スコールライン」のように組織化されていた。上層雲からの雨の蒸発によって駆動された下降流は凝結・化学反応高度に形成される安定層で水平方向に向きを変え、強い寒気流出を形成する。寒気流出の前面では強い水平収束が生じ、気塊に働く負の浮力に打ち勝って新たな対流雲を引き起こしていた。この一連の雲の発達において静的に安定な凝結・化学反応高度は地球の地表面のような働きをする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の独創的な点は、1つの数値モデルの枠組みの中で、個々の雲の生成消滅の様相を調べるだけでなく、雲の生成消滅が繰り返された結果として決まる環境場としての流れ場および平均的な温度・成層・物質分布を一度に求めることにある。本研究のシミュレーション結果は力学的に保障されたものであり、従来の考察よりも現実的な雲対流構造を示すと考えられる。このような枠組みにおいて、木星型惑星の基本条件の1つである凝結性成分が多い条件下で発生する雲対流の定性的特徴を得たことは、今後の木星型惑星大気理解の基礎となる。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations of cloud convection in Jovian planets are performed. A prominent feature is that intense moist convections occur intermittently even in the parameter range where convection inhibition has been estimated based on thermodynamic consideration. The intense convective activities are organized like "squall lines" in the earth's atmosphere. That is, evaporation of rain falling from the upper clouds drives downward flow, which is braked around the stable layer at the condensation or chemical reaction level and forms a strong horizontal "cold air outflow". At the front of the outflow, intense horizontal convergence triggers new convective clouds overcoming the negative buoyancy due to the large mixing ratio of condensable species. In this series of cloud developments, the statically stable condensation or chemical reaction level acts like "ground surface" for the Earth's squall lines.

研究分野：惑星気象学

キーワード：木星大気 雲対流 雲解像モデル 数値モデリング 木星型惑星

1. 研究開始当初の背景

太陽系内の木星型惑星は厚い雲に覆われた姿をしており、太陽系外の木星型惑星においても雲の存在を示唆する観測結果が得られている。厚い雲で覆われているために大気のリモート観測は限定的にならざるをえず、木星型惑星の平均的な大気構造は未だによくわかっていない。これまで木星型惑星の平均的な大気構造は鉛直 1 次元の熱平衡計算に基づいて予想されてきたにすぎない。

この問題に取り組む上で、木星型惑星で観測される活発な雲対流は 1 つの切り口になりうる。地球大気の場合と同様に、雲対流は対流圏の温度・成層構造と物質分布の決定に重要な役割を担うからである。しかし、その重要性にもかかわらず、木星型惑星の基本条件の 1 つである凝結性成分が多い条件下で発生する雲対流の定性的特徴は未だよく理解されていない。凝結性成分が多い場合、分子量効果で飽和気塊に働く浮力は負になり、雲対流の発生が抑制される可能性があることがよく知られている(Guillot, 1995)。木星型惑星の主成分(H_2 , He)は凝結性成分(H_2O , H_2S , NH_3 , CH_4)の分子量より小さいためである。一方で、太陽系形成論から土星・天王星・海王星においては Guillot(1995)の閾値以上の H_2O が存在すると考えられており、実際に観測される雲対流の発生をどのように解釈すべきかについてほとんど議論されていない。

我々は長年にわたって、動的な数値シミュレーションによって木星大気で生じうる雲対流構造を調べてきた。Nakajima et al. (2000)は長時間の数値シミュレーションを実行し、木星の標準的と考えられている凝結成分存在度を与えた設定では、 H_2O の凝結に伴う潜熱放出と H_2O の凝結落下によって安定層が生じ、その安定成層を境に対流運動が鉛直方向に分離することを示した。凝結性成分が多い設定では、 H_2O の持ち上げ凝結高度付近で鉛直流が抑制され、凝結高度と対流開始高度が分離するという特徴を示した。しかしながらこれらのシミュレーションでは H_2O の凝結以外は考慮しておらず、また計算資源の節約のために放射冷却の大きさを現実で想定される値の約 100 倍としていた。これらの数値モデル的問題を解消した Sugiyama et al. (2009, 2011, 2014)は、木星の標準的と考えられている凝結成分存在度を与えた数値シミュレーションを実行し、間欠的な雲対流の発生という特徴を示した。ひとたび強い積雲が生じると、潜熱放出と重元素成分の凝結落下によって大気は安定化するため、強い雲対流の発生が抑制される。間欠性の周期は放射冷却の大きさに概ね反比例し、 H_2O 存在度に概ね比例するというパラメタ依存性があることがわかった。しかし、Sugiyama et al. (2014)では対流抑制が生じると考えられているパラメタ範囲での数値実験を行っていない。そこで、我々のこれまでの研究の自然な延長として、現実的な放射強制かつ凝結性成分が多い条件下で発生する雲対流の基本的性質を調べることを目指した。

2. 研究の目的

弱い放射冷却に起因する雲対流の間欠性と多量の凝結性成分に起因する飽和気塊に働く負の浮力の 2 つが、雲対流の発生に与える影響を把握することが本研究の目的である。静的な熱力学平衡の議論(Guillot, 1995)によって対流抑制が生じると考えられるパラメタ範囲で長時間の動的な数値シミュレーションを実行し、準平衡状態での温度・成層構造と物質分布を環境場として生成消滅する対流雲の様相を調べる。得られた雲対流構造の定性的特徴を、放射強制と凝結性成分存在度という 2 つのパラメタ空間上に位置付けることを目指す。

3. 研究の方法

研究推進に必要な数値計算ソフトウェアならびに解析ソフトウェアを改良・開発しつつ、動的な数値シミュレーションによって準平衡状態での対流雲の生成消滅の様相を調べる。数値計算ソフトウェアは我々がこれまで開発してきた雲解像モデル(Sugiyama et al., 2009)をベースに改良を加える。この数値モデルの基礎方程式は準圧縮系方程式(Klemp and Wilhelmson, 1978)に木星型惑星の全凝結性成分の保存式を組み合わせたものとなっている。乱流過程は 1.5 次のクロージャー(Klemp and Wilhelmson, 1978)によって表現され、雲微物理過程は地球大気で良く利用される雲微物理パラメタリゼーション(Kessler, 1973)に木星重力加速度の大きさを補正項として加えている。放射過程は陽に計算せず、その代用として雲層上部に水平一様かつ時間変化しない熱強制を与えている。解析ソフトウェアとして、膨大な数値シミュレーションデータを Web ブラウザ上で表示しつつ、拡大縮小・スクロールしながら全体像と興味ある微小な現象を同時に把握できるツールを開発する。

数値シミュレーションを実行するにあたっては計算領域を水平鉛直 2 次元に設定し、多数の雲の生成消滅が一度に収まるだけの計算領域を確保する。標準的な木星ケースにおいては水平方向に 1024 km、鉛直方向に 300 km の計算領域を確保し、解像度は水平・鉛直方向共に 2 km とする。また、パラメタ実験を行う際は、下部境界付近での凝結性成分の存在度と、放射の代替と

して与える熱強制の鉛直プロファイルを複数与えることにした。

4. 研究成果

(1) 上昇するブリューム中で $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{NH}_4\text{SH}$ の化学反応が生じるという条件下において静的な熱力学平衡状態を検討し、化学反応に伴う対流抑制の条件を定式化した。木星型惑星の雲層では、 H_2O 、 NH_3 、 CH_4 などの凝結だけでなく、 NH_4SH の化学反応による粒子生成も生じていると推定されているが、従来の Guillot (1995) では化学反応は考慮されていなかった。得られた式は Guillot (1995) の凝結雲についての対流禁止条件を変形した表式となっていた。この式より、凝結だけでなく化学反応に伴っても対流抑制が生じる可能性があること、 NH_4SH の化学反応に伴う対流抑制の生じる閾値は太陽組成の 30 倍程度であること、の 2 つが確認できた。

(2) 放射の代替として与える熱強制の強度を現実的な値の 1 倍から 10 倍程度に設定し、静的な熱力学的議論において対流抑制が発生すると考えられる凝結性成分存在度を与えて、木星型惑星を模した水平鉛直 2 次元の動的な雲対流数値シミュレーションを実施した。全ての凝結性成分の存在度を太陽組成の 30 倍から 100 倍程度に増やした場合においても対流活動は抑制されず、対流圏界面まで達する活発な積雲が発生する時間帯が準周期的に現れるという特徴を得た。周期は放射の代替として与えた熱強制の大きさに概ね反比例し、 H_2O 存在度の大きさに概ね比例した。これらの特徴は Sugiyama et al. (2014) で得られた結果と整合的であった。また、 H_2O 、 NH_3 、 H_2S の各成分の存在度を同時にではなく個々に増減させたケース、例えば NH_3 存在度のみを対流抑制が発生すると考えられる存在度まで増やしたケースなど、について網羅的に数値シミュレーションを行ったところ、どの凝結性成分に対しても対流圏界面まで達する活発な積雲が発生する時間帯が準周期的に現れるという特徴は変化しなかった。

数値シミュレーション中に見られる雲活動の準周期的発生は、地球で見られる「スコールライン」と同様な雲対流活動の組織化を伴っていた。すなわち、活発な積雲が発生する直前では、降雨粒子の蒸発冷却に伴って生じた下降流が周囲に補償流としての上昇流を駆動し、相対的に低い高度に次の雲を発生させるという雲対流活動が繰り返されていた。このような組織化された雲対流活動によって下降流の到達高度は次第に下がり、ついには凝結高度および化学反応高度付近に形成される安定層の影響を受けるようになる。静的に安定した凝結高度・反応高度は地球のスコールラインにおける「地表」と同じ役割を果たしており、降水粒子の蒸発冷却によって駆動された流れは向きを変え、水平方向に強い寒気流出が形成される。寒気流出の前面では収束が強くなるため、凝結高度・反応高度付近の凝結性成分を多く含む相対的に重い空気塊が強制的に持ち上げられ、強い積雲の発生が実現されていた。

(3) 木星大気において、放射の代替として与える熱強制の鉛直プロファイルをより現実に近い動的な雲対流数値シミュレーションを実施した。前述(2)項の数値実験では探査機の観測結果を理想化した鉛直プロファイルを用いていたが (Sugiyama et al., 2014)、本数値実験では鉛直 1 次元放射対流平衡計算 (高橋康人, 2018) から得られた平均的な熱強制の鉛直プロファイルを与えた。数値実験より準周期的な雲対流活動などの特徴が得られ、それは Sugiyama et al. (2014) と整合的であった。一方で、 NH_3 雲が対流圏界面付近で層状に広がり計算領域を覆うという放射冷却の鉛直分布の違いに起因する特徴も得られた。対流圏界面付近に安定層が形成・維持されており、雲対流活動に伴ってこの安定層に貫入した NH_3 雲粒はすぐに落下することができず、水平方向にたなびく。この特徴は現実の木星大気の特徴に近いものであった。

(4) 研究推進に必要な解析ソフトウェア開発では、Web Map Tile Service (WMTS) に独自拡張を加えることで、膨大な数値データを Web ブラウザ上で拡大縮小・スクロールしながら全体像と興味ある微小な現象を同時に把握できるツールが実現可能であることを示した。独自拡張は実数値を画像の RGB 値に 1 対 1 変換する画像フォーマットであり、「数値データタイル」と名付けた (杉山ら, 2021)。また、数値シミュレーションデータの可視化に必要な情報を JSON ファイルないし HTML 要素に持たせることで、共同研究者間でのデータ共有が可能となることを示した (森脇ら, 2023)。

<参考文献>

1. Guillot, T., Condensation of methane ammonia and water in the inhibition of convection in giant planets, *Science*, 269, 1697-1699, 1995.
2. Kessler, E., On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation, *Meteor. Monogr.*, 10. American Meteorological Society, Boston, 1969.
3. Klemp, J.B., Wilhelmson, R.B., The simulation of three-dimensional convective storm dynamics. *J. Atmos. Sci.* 35, 1070-1096, 1978.
4. Nakajima, K., Takehiro, S., Ishiwatari, M., Hayashi, Y.-Y., Numerical modeling of Jupiter's moist convection layer. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3129-3133, 2000.
5. Sugiyama, K., Odaka, M., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., Development of a cloud convection model to investigate the Jupiter's atmosphere. *Nagare Multimedia (J.*

- Japan Soc. Fluid Mech.), 2009.
6. Sugiyama, K. et al., Intermittent cumulonimbus activity breaking the three-layer cloud structure of Jupiter. *Geophys. Res. Lett.* 38, L13201, 2011.
 7. Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., Hayashi, Y.-Y., Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states, *Icarus*, 229, 71-91, 2014.
 8. 杉山 耕一朗, 松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介, ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化, *宇宙科学情報解析論文誌*, 10, 127-137, 2021.
 9. 高橋康人, 木星対流圏の放射エネルギー収支に関する数値モデル研究, 北海道大学大学院理学院宇宙理学専攻 博士論文, 2018.
 10. 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介, 杉山 耕一朗, 大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化ツールの開発: 地図投影法の切り替え機能の実現方法の検討, *宇宙科学情報解析論文誌*, 12, 41-49, 2023.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 杉山 耕一朗, 松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介	4. 巻 1
2. 論文標題 ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 宇宙科学情報解析論文誌	6. 最初と最後の頁 127,137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 森脇 大智	4. 巻 -
2. 論文標題 大規模惑星数値シミュレーションデータの格納方法の検討	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 松江工業高等専門学校 情報工学科 卒業論文	6. 最初と最後の頁 1,14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 白濱 理花	4. 巻 -
2. 論文標題 雲解像モデル deepconv への 地形の導入と数値実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 神戸大学大学院理学研究科修士論文	6. 最初と最後の頁 1,83
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 関口 太郎	4. 巻 -
2. 論文標題 温度と放射加熱の分布が木星雲対流に及ぼす影響 - Sugiyama et al. (2014) の再検討 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 北海道大学大学院理学院 宇宙理学専攻 修士論文	6. 最初と最後の頁 1,84
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 川上竜乃進	4. 巻 -
2. 論文標題 惑星対流流体モデルに向けた汎用的な平衡大気組成計算プログラムの開発	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 松江工業高等専門学校 情報工学科 卒業論文	6. 最初と最後の頁 1, 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 若木亮佑	4. 巻 -
2. 論文標題 惑星対流モデルの非直交曲線座標系への適用に関する研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 松江工業高等専門学校 情報工学科 卒業論文	6. 最初と最後の頁 1, 36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 福之上 嘉刀	4. 巻 -
2. 論文標題 雲形成が木星型惑星の大気対流に及ぼす影響についての考察 ~鉄及び硫化水素アンモニウムの場合~	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 九州大学大学院理学院 地球惑星科学専攻 修士論文	6. 最初と最後の頁 1,34
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 杉山 耕一朗, 松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介	4. 巻 10
2. 論文標題 ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 宇宙科学情報解析論文誌	6. 最初と最後の頁 127,137
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 関口 太郎, 杉山 耕一朗, 石渡 正樹, 中島 健介, 倉本 圭, 林 祥介
2. 発表標題 木星の雲対流の数値計算 ~放射伝達計算による平均冷却鉛直分布を与えた場合~
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 関口 太郎, 杉山 耕一朗, 石渡 正樹, 中島 健介, 倉本 圭, 林 祥介
2. 発表標題 木星の雲対流の数値計算 ~放射伝達計算による平均冷却鉛直分布を与えた場合~
3. 学会等名 日本気象学会2021年度春季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉山 耕一朗, 松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介
2. 発表標題 ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気 数値シミュレーションデータの可視化
3. 学会等名 ARC-Space拠点集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介, 杉山 耕一朗
2. 発表標題 大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化ツールの開発 -地図投影の実装-
3. 学会等名 宇宙科学情報解析シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Sugiyama, K. Nakajima, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi
2. 発表標題 Inhibition of moist convection in the atmospheres of Jovian planets: the case of NH ₄ SH formation by chemical reaction of NH ₃ and H ₂ S
3. 学会等名 JPGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Sugiyama, K. Nakajima, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi
2. 発表標題 Numerical Modeling of Moist Convection in Jovian Planets considering negative buoyancy due to large amount of heavy components
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉山 耕一郎, 中島 健介, 倉本 圭, 林 祥介
2. 発表標題 凝結性成分による対流抑制条件を念頭においた木星型惑星の雲対流の数値計算
3. 学会等名 日本気象学会2020年春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 ウェブ地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータ可視化ツールdcwmtの開発
2. 発表標題 杉山 耕一郎, 松村 和樹, 森脇 大智, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介
3. 学会等名 日本惑星科学会2020年秋季講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松村 和樹, 杉山 耕一朗, 村橋 究理基, 石渡 正樹, 林 祥介
2. 発表標題 Web地図技術を用いた大規模惑星大気数値シミュレーションデータの可視化
3. 学会等名 JPGU-AGU Joint Meeting 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中島 健介, 福之上嘉刀, 杉山耕一朗
2. 発表標題 木星型惑星の大気における湿潤対流の禁止条件: NH ₃ とH ₂ Sの化学反応によるNH ₄ SH生成の場合
3. 学会等名 日本惑星科学会 2019年 秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉山 耕一朗, 中島 健介, 倉本 圭, 林 祥介
2. 発表標題 NH ₄ SH生成反応による対流抑制条件を念頭においた木星型惑星の雲対流の数値計算
3. 学会等名 日本惑星科学会 2019年 秋季講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Nakajima, H. Fukunoue, K. Sugiyama, K. Kuramoto, and Y.-Y. Hayashi
2. 発表標題 Inhibition of moist convection in the atmospheres of Jovian planets: the case of formation of NH ₄ SH by chemical reaction by chemical reaction of NH ₃ and H ₂ S
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中島 健介, 福之上 嘉刀
2. 発表標題 木星型惑星における湿潤対流の禁止条件について
3. 学会等名 地球流体力学研究集会「地球流体における波動と対流現象の力学」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Wong, M., Bjoraker, G., Brown, S. T., Rogers, J., de Pater, I., Tollefson, J., Goullaud, C., Moeckel, C., Simon, A., Li, C., Sugiyama, K., Nakajima, K.
2. 発表標題 Superstorms on Jupiter: Convection, volatiles, clouds, and lightning near Juno's 4th orbit
3. 学会等名 American Astronomical Society, DPS meeting #50 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉山耕一朗, 中島健介, 小高正嗣, 倉本圭, 林祥介
2. 発表標題 木星型惑星を想定した雲対流の数値計算～凝結性成分が多いケース～
3. 学会等名 JpGU Meeting 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高温多湿大気における積雲対流の数値実験
2. 発表標題 中島健介, 谷川琢也, 杉山耕一朗, 小高正嗣, 石渡正樹, 竹広真一, 林祥介
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	中島 健介 (Nakajima Kensuke) (10192668)	九州大学・理学研究院・助教 (17102)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------