

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24740316

研究課題名(和文)木星型惑星大気の雲対流構造に関する数値的研究

研究課題名(英文) Numerical simulations of moist convection layers of Jovian planets

研究代表者

杉山 耕一郎 (Sugiyama, Ko-ichiro)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号：60463733

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：木星型惑星大気の雲対流層の特徴を調べるために水平鉛直 2 次元の数値実験を行った。全てのケースで積雲が間欠的に発生し、水とメタンの凝結高度が対流運動と物質分布に対する境界として作用する。平均的大気構造は熱平衡モデルに基づく従来の予想とは明らかに異なる。雲対流活動の間欠性は潜在不安定の蓄積・解放と関係している。潜在不安定を解消するトリガーは H<sub>2</sub>O 雨の落下である。潜在不安定が解消されると積雲の発達には止まる。間欠性の周期は活発な積雲活動による温度上昇と大気放射による冷却率によって見積もることができた。また、計算効率の向上と運動の 3 次的取り扱いを可能とすべく雲解像モデルの改良を行った。

研究成果の概要(英文)：Numerical simulations are performed to investigate idealized characteristics of the cloud layers of Jovian planets using two-dimensional settings. In all cases, active moist convection occurs intermittently, and the H<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> condensation levels act as steady kinematic and compositional boundaries. The mean vertical structure is distinctly different from the hitherto accepted structure based on a one-dimensional thermodynamical model. The intermittent cloud activity is associated with convective instability. The instability accumulates until an appropriate trigger is provided by H<sub>2</sub>O condensate that falls down through the H<sub>2</sub>O lifting condensation level. Active cloud development is terminated when the instability is exhausted. The period of intermittency is roughly equal to the time obtained by dividing the mean temperature increase, which is caused by active cumulonimbus development, by the body cooling rate. We also improve our cloud resolving model to treat three-dimensional motion.

研究分野：数物科学系

キーワード：雲対流 惑星大気循環 巨大ガス惑星 木星型惑星 数値計算

## 1. 研究開始当初の背景

木星型惑星には活発な積雲が存在することが知られている。木星における雷を伴う多数の積雲集団、土星の明るく輝く小スケールの雲や大白斑と呼ばれる積雲の集団はその一例である。このような木星型惑星で見られる雲対流は、地球大気の場合と同様に、大気の成層構造と物質分布の決定を通して平均的大気構造に大きな影響を与えると予想されている。しかし、厚い雲に覆われた木星型惑星の雲層の遠隔観測は限定的にならざるを得ず、木星型惑星における雲対流と平均的大気構造との関係については未だ明らかとなっていない点が多い。

従来の研究においては、雲層の平均的な温度・雲・凝結性成分気体の鉛直分布は、断熱的に上昇する気塊中の化学熱平衡を仮定した鉛直一次元の「平衡雲凝結モデル」によって推定されてきた（例えば、Weidenschilling and Lewis, 1973; Atreya and Romani, 1985）。このモデル計算結果より、木星・土星においては、 $H_2O$  と  $NH_3$  の凝結および  $NH_4SH$  の生成反応が生じると考えられている。天王星・海王星においては、木星・土星で予想される凝結と化学反応に加えて、 $CH_4$  の凝結も生じると考えられている。平衡雲凝結モデルの結果は地上・探査機からの観測結果を解釈するための基礎として広く受け入れられているが、このモデル化が直接当てはまるのは上昇域だけである。上昇流・下降流も含めた大気全体の平均的構造は、放射・雲微物理等の非保存的過程の存在も考えると、平衡雲凝結モデルの結果と一致する保証はない。

この問題に取り組むために我々は、流体運動を直接解き、かつ単純化された複数凝結性成分の雲微物理過程を組み込んだ数値流体モデル（雲解像モデル）を開発した（Sugiyama et al., 2009）。放射を模した一様冷却を与えることで木星大気の雲対流の長時間計算を実行し、雲の生成消滅が繰り返された結果として維持される平均的大気構造および流れ場を調べてきた（Sugiyama et al., 2011, 杉山ら 2012）。得られた結果の大きな特徴は、 $H_2O$  持ち上げ凝結高度から対流圏界面まで達する強い積雲が間欠的に発生することである。積雲に伴う強い鉛直輸送によって、平均的な雲および凝結性成分気体の鉛直分布は平衡雲凝結モデルの予想から大きく変化する。また、凝結による成層安定化作用のために、 $H_2O$  持ち上げ凝結高度が対流運動と物質分布に対する定常的な境界として作用することも示された。間欠性の周期は大気深部で仮定する  $H_2O$  存在度におおまかに比例する。我々の数値実験によって得られた平均的な  $NH_3$  蒸気の鉛直分布は、平衡雲凝結モデルを元にした議論では説明が困難であった地上からの電波観測の結果を説明しうるものであった。

しかしながら本研究課題の開始時において、木星以外の土星・天王星・海王星については

雲対流計算を行っていない。また、我々の開発した数値モデルは水平鉛直 2 次元の系しか扱えないといった改良すべき点が残されていた。

## 2. 研究の目的

木星型惑星のそれぞれについて長時間の雲対流計算を実行することで、同一のモデルの枠組みの中でそれぞれの木星型惑星の平均的大気構造および流れ場を掌握することを目的とする。数値実験の結果より、それぞれの惑星大気の結果の共通点と相違点を明らかにする；木星以外の惑星を想定した数値実験においても雲対流の間欠性が生じるか否かを確認し、対流運動の凝結・化学反応に伴う成層安定化作用が平均的大気構造と流れ場に与える影響を議論する。それにより、これまでの鉛直一次元平衡雲凝結モデルの結果に基いた木星型惑星の大気構造の描像を新たにし、木星型惑星で観測される雲対流活動への理解の基礎を得ることを目指す。

## 3. 研究の方法

雲解像モデルの改良およびそれを用いた数値実験を行うことによって、木星型惑星大気における雲対流と平均的大気構造との関係について議論を進める。なお、天王星と海王星の温度圧力条件は類似であるので、本研究では木星・土星・天王星をターゲットとする。

## (1) 木星条件における雲対流活動の間欠性のメカニズムに関する考察

木星条件で行ってきた数値実験の解析を進め、雲対流の間欠性のメカニズムを議論する。これまでに得られた結果の大きな特徴は雲対流の間欠性であるが、その間欠性のメカニズムの議論は不十分であった。

## (2) 雲解像モデルの改良

計算効率の向上と対流運動の 3 次元構造を計算可能とすべく雲解像モデルを改良する。改良した雲解像モデルの検証として以下の数値実験を行う。

## ① 1 つの雲の発達のシミュレーション

木星型惑星のそれぞれについて 1 つの雲の発達をシミュレートし、各成分の雲の持ち上げ凝結高度が従来の鉛直一次元平衡雲凝結モデルから予想される高度と整合的に確認する。計算設定は木星大気および土星大気で同様の計算を行った Hueso and Sanchez-Lavega (2001, 2004) の設定を元にする。それぞれの惑星の大気圧力条件の下、相対湿度は 99%、背景風は無し、大気深部に雲の発生の種として 0.15 K の温度擾乱を与える。

## ② 強い熱強制を与えた雲対流計算

それぞれの木星型惑星について雲対流の数

値計算を実行することで、雲の生成消滅が繰り返された結果として維持される平均的大気構造と流れ場を調べる。本数値実験では統計的平衡状態が得られるまでの CPU 時間を短縮するために非常に強い熱強制 ( $-1$  K/day) を与えることで対流を加速する。この設定は数値モデル開発時 (Sugiyama et al., 2009) に用いたものと類似である。これまでの数値実験の結果から、このような設定を用いた場合であっても雲対流の活発な時間帯の定性的特徴を抽出できると考える。

### (3) 土星・天王星を想定した雲対流計算

土星・天王星のそれぞれについて、水平鉛直 2 次元の雲対流の長時間計算を実行することで、雲の生成消滅が繰り返された結果として維持される平均的大気構造および流れ場を同一のモデルの枠組みの中で掌握する。土星・天王星においても対流活動に間欠性が見られるかを確認し、各凝結成分の成層安定化作用の影響を調べる。本実験では得られる平均的大気構造および流れ場の定性的特徴が変わらなくなるまで熱強制の大きさを段階的に小さくする。具体的には与える熱強制の大きさを  $-1$  K/day から  $-0.03$  K/day まで変化させる。

## 4. 研究成果

### (1) 間欠性のメカニズムに対する考察

雲対流活動の間欠性は、湿潤対流層における潜在不安定の蓄積・解放と関係していた。潜在不安定を解消するトリガーは  $H_2O$  の雨であった。雨の蒸発によって駆動された鉛直流が大気深部の  $H_2O$  蒸気に富む気塊を持ち上げる。持ち上げられた湿潤気塊は活発な積雲を次々発生させ、潜在不安定を解消させる。潜在不安定がひとたび解消されると積雲の発達は止まり、放射強制によって再び湿潤対流層の潜在不安定は蓄積される。この状態は定量的には潜在不安定の指標(浮力の鉛直積分の値)がほぼゼロとして表すことができる(図 1)。間欠性の周期は活発な積雲活動による温度上昇と大気放射による冷却率によっておおまかに見積もることができた (Sugiyama et al., 2014)。

### (2) 数値モデルの改良

我々がこれまでに開発した水平鉛直 2 次元の雲対流モデル (Sugiyama et al., 2009) を拡張し、3 次元の雲対流モデルとして再構成した。雲解像モデル内で使われる配列を 3 次元に拡張し、 $y$  方向の運動方程式を導入し、 $x$  方向と  $y$  方向の両方に対して MPI を用いた並列化を適用した。また、共同研究者と策定した数値モデルのコーディングルールに沿ってプログラムを全て書き換えた (Takehiro et al., 2012)。力学コアのボトルネックを解消したことによって計算速度を 2 倍以上向上させた。加えて、モデル開発のベースとし

た Klemp and Wilhelmson (1978) では無視されていた圧力方程式の項を導入した。地球大気における長時間計算を行う際、これらの項の導入は下部境界圧力のドリフトを防ぐために必要であった。

### ① 1 つの雲の発達のシミュレーション

それぞれの惑星を想定した実験において、凝結物およびその凝結高度が従来の鉛直一次元平衡雲凝結モデル (例えば Atreya and Romani, 1985) から予想される高度と整合的であることを確認した。例として土星大気を想定した実験の結果を図 2 に示す。サーマルの上昇に伴い、 $H_2O$ ,  $NH_4SH$ ,  $NH_3$  の雲が生成する。上昇流速の大きさは  $40$  m/s 程度に止まった。この値は Hueso and Sanchez-Lavega (2004) の baseline calculation の結果の  $1/3$  程度である。また  $H_2O$  凝縮高度より下では彼らの結果には見られなかった下降流が生じた。上昇流速が小さくなったのは、雲と雨に作用する重力が気塊を下向きに引きずるためである。下降流が存在するのは、生成された雨が落下した後に蒸発し、その部分の空気を冷却すると共に平均分子量を増加させたためである。このような差異はモデルに組み込まれた雲微物理過程が異なることに起因するものであった。Hueso and Sanchez-Lavega (2004) では雲微物理過程を非常に単純化していた。

### ② 強い熱強制を与えた雲対流計算

木星・土星・天王星条件において雲対流の数値計算を実行した。土星と天王星条件の結果は、メタンの雲の有無を除き定性的に似ているため、以下では土星条件の結果を示す。土星条件においても、木星条件と同様に、活発な対流が生じる (図 3)。活発な対流によって  $H_2O$  と  $NH_4SH$  の雲粒は  $NH_3$  持ち上げ凝結高度より上空まで移流され (図 3 a, b), 強い上昇流が見られる (図 3 c)。 $H_2O$  持ち上げ凝結高度 ( $p = 10$  bar) に形成される安定層が流れ場に対する境界として作用しており、鉛直速度の自乗平均はその高度において局所的な最小値を取る (図 3 d)。また、活発な対流に伴う鉛直混合によって乾燥気塊が  $H_2O$  持ち上げ凝結高度付近まで下降するため、水平・時間平均した  $NH_3$  と  $H_2S$  蒸気の混合比はそれぞれの持ち上げ凝結高度ではなく  $H_2O$  持ち上げ凝結高度より高度と共に減少を始める (図は無し)。

土星条件の計算結果の大きな特徴は、湿潤対流層 ( $0.1 < p < 10$  bar) の上部に強い下降流が多数見られることである (図 3 c)。その大きさは  $50$  m/s 程度である。強い下降流が存在するという特徴は、狭くて強い上昇域と広くて弱い下降域によって特徴づけられた木星条件の計算結果と対照的である。

土星条件において下降流が卓越するのは以下の 2 つの理由による。1 つは対流運動が対流圏界面付近の冷却層 ( $0.1 < p < 2$  bar) に

よって駆動されるためである。もう 1 つの理由は、対流圏上部の温度は木星大気よりも土星大気の方が低温だからである。土星大気では  $\text{H}_2\text{O}$  の凝結がより下層（高圧）で始まる。木星大気の  $\text{H}_2\text{O}$  凝結高度は約 4 bar であるのに対して、土星大気での  $\text{H}_2\text{O}$  凝結高度は約 10 bar である。湿潤対流層の上部では  $\text{H}_2\text{O}$  混合比がほぼゼロとなるため、その高度領域では  $\text{H}_2\text{O}$  の凝結潜熱の寄与が小さくなり、狭くて強い上昇域と広くて弱い下降域という湿潤対流の特徴が失われる。

さらに、木星・土星条件において 3 次元の雲対流の数値計算を実行した（図は無し）。得られた結果の定性的特徴は前述の水平鉛直 2 次元の数値実験で得られた定性的特徴と整合的であった。

### (3) 土星・天王星大気を想定した雲対流の長時間計算

土星と天王星の雲層において実現しうる流れ場と平均的大気構造を掌握するために、放射を模した一様冷却下で雲対流の長時間の数値計算を実行し、雲の生成消滅が繰り返された結果として実現する統計的平衡状態での雲対流構造を得た。以下に示す結果は  $-0.03 \text{ K/day}$  を与えた数値実験の結果である。定性的特徴は変化しない程度に熱強制の大きさを大きくすることで、統計的平衡状態に至るまでの CPU 時間を節約した。

土星においては  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$  の凝結と  $\text{H}_2\text{S} + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{SH}$  の反応によって雲が生じる。天王星では、土星で生じる凝結と化学反応に加えて、 $\text{CH}_4$  の凝結によって雲が生じる。得られた結果は、これらの惑星においても間欠的に活発な雲対流運動が生じることを示すものであった（図 4）。対流運動が活発な時期では、強い積雲が連続的に発達し、対流圏界面付近では各成分の雲粒の混合が生じる。対流活動が静穏な時期では、各成分の雲層が鉛直方向に分かれて存在する傾向がある。この明瞭な雲対流運動の準周期性は、木星条件での雲対流計算と同様に（Sugiyama et al., 2011; 2014）、活発期に積雲内で発生する  $\text{H}_2\text{O}$  の凝結加熱による温度上昇が一様冷却によって瞬時に解消されないという事実に起因する。

また、各凝結成分の持ち上げ凝結高度に形成される安定層も、木星条件での雲対流計算と同様に（Sugiyama et al., 2011; 2014）、対流運動に対する境界として作用する。土星では  $\text{H}_2\text{O}$  の凝結に伴う安定成層が、天王星では  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  の凝結に伴う安定層が、流れ場に対する定常的な境界として作用する。 $\text{NH}_3$  の凝結に伴う安定層は対流活動が弱い時期にのみ定常的な境界として作用しうる。このような流れ場の特徴のために、得られた平均的大気構造は従来の鉛直一次元の熱平衡計算に基づく大気構造の描像から大きく変化する（図 5）。時間・水平平均した  $\text{H}_2\text{S}$  と  $\text{NH}_3$  蒸気の混合比はそれぞれの持ち上げ凝結高度ではなく、 $\text{H}_2\text{O}$  持ち上げ凝結高度から高度と共に

減少を始める。また天王星では  $\text{CH}_4$  蒸気の混合比は持上凝結高度までほぼ一定となる。

土星条件で得られた雲対流の間欠性は、土星において約 30 年周期で観測される大白斑に対応するものかもしれない。観測される現象との対応を議論することは今後の課題である。

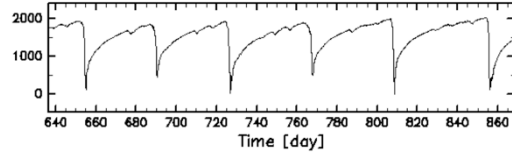


図 1: 潜在不安定の指標(浮力の鉛直積分値)の時間変化。

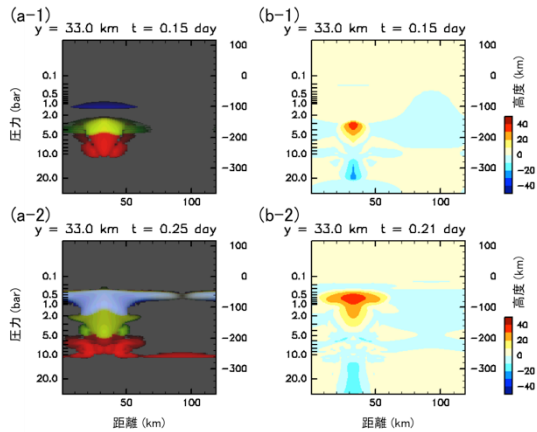


図 2: 土星大気を想定した 1 つの雲の生成のシミュレートで得られた凝結物の分布 (a-1, a-2) と鉛直速度の分布 (b-1, b-2). 凝結物の混合比の表現方法は  $\text{H}_2\text{O}$  雲混合比を赤色の濃淡で、 $\text{NH}_4\text{SH}$  雲混合比を緑色の濃淡で、 $\text{NH}_3$  雲混合比を青色の濃淡で表現し、複数の種類の雲が共存する領域はそれぞれの色の合成色で表現する。

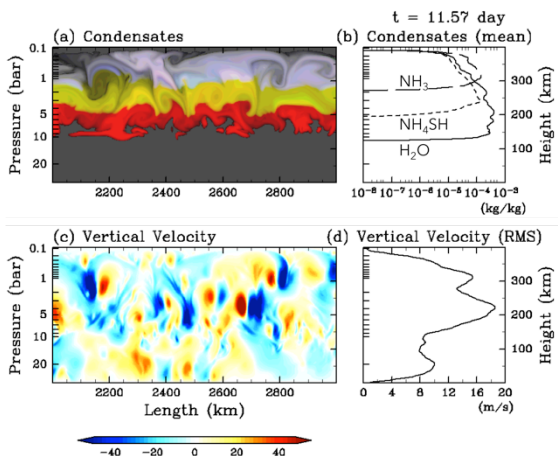


図 3: 土星条件で得られた対流運動が活発な時期の凝結物の混合比の分布 (a) とその水平平均値の鉛直プロファイル (b), および鉛直速度の分布 (c) とその自乗平均値の鉛直プロファイル (d). (a) において凝結物の表現方法は図 2 と同じである。

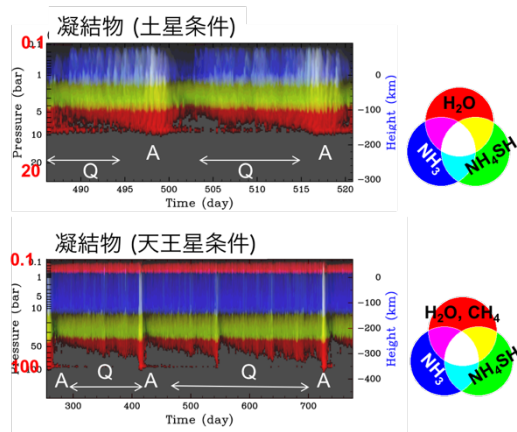


図 4: 土星条件と天王星条件で得られた水平平均した凝結物の鉛直分布の時間変化. 図中の A は対流の活発な時期を, Q は対流の静穏な時期を意味する. 土星条件の凝結物の表現方法は図 2 と同じである. 天王星条件では  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  雲を赤色で,  $\text{NH}_4\text{SH}$  雲を緑色で,  $\text{NH}_3$  雲を青色で表現し, 複数の種類の雲が共存する領域はそれぞれの色の合成色 (RGB 合成色) で表現する.

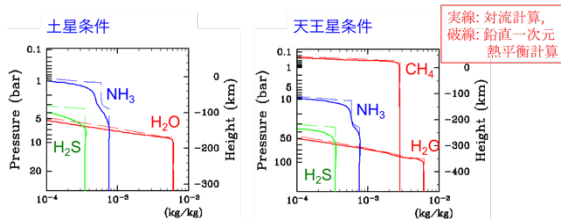


図 5: 土星条件と天王星条件で得られた時間・水平平均した凝結性成分気体の混合比の鉛直分布.  $\text{H}_2\text{O}$  と  $\text{CH}_4$  雲を赤色で,  $\text{NH}_4\text{SH}$  雲を緑色で,  $\text{NH}_3$  雲を青色で示す. 本対流計算の結果を実線で示す. 従来の鉛直一次元熱平衡計算の結果を示す.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

- (1) Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., Hayashi, Y.-Y., 2014: Numerical simulations of Jupiter's moist convection layer: Structure and dynamics in statistically steady states, *Icarus*, 229, 71--91. (査読有り)
- (2) 杉山耕一郎, 鈴木絢子, 高橋隼, 中村友昭, 真鍋翔, 堺正太郎, 鶴巻亮一, 中岡礼奈, 辰巳信平, 谷伊織, 加藤則行, 梅本隆史, 押川智美, 三上峻, 倉本圭, 林祥介, 中川義次, 惑星科学研究センター, 2012: 惑星科学研究センター (CPS) における知見アーカイブ, 遊星人(日本惑星科学学会会誌), 21, 368-376. (査読有り)

- (3) Takehiro, S., Takahashi, Y. O., Sugiyama, K., Odaka, M., Ishiwatari, M., Sasaki, Y., Nishizawa, S., Ishioka, K., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., 2012: Construction of Hierarchical Models for the Fluid Dynamics in Earth and Planetary Sciences : DCMODEL project . Proceeding of International Conference on Simulation and Technology (JSST 2012), 301-306. (査読無し)

[学会発表] (計 24 件)

- (1) Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., Hayashi, Y.-Y., "Numerical Modeling of Moist Convection in Saturn's and Uranus' atmospheres", International Workshop on "Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity III", Okinawa, 2016/02.
- (2) Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Kuramoto, K., Hayashi, Y.-Y., "Extreme Intermittency of Moist Convection on the Giant Planets", Joint Juno-Cassini Jupiter-Saturn Atmospheric Dynamics Meeting, San Francisco (USA), 2015/13. (招待講演)
- (3) 山崎健吾, 竹内覚, 杉山耕一郎, 「雲解像モデルを用いた木星大気のマイクロ波熱放射」, 日本惑星科学会 2015 年秋季講演会, 東京工業大学, 2015/10.
- (4) 高橋康人, はしもとじょーじ, 石渡正樹, 高橋芳幸, 杉山耕一郎, 大西将徳, 倉本圭, 「木星大気放射冷却に対する雲対流の寄与」, 日本惑星科学会 2015 年秋季講演会, 東京工業大学, 2015/10.
- (5) 杉山耕一郎, 「地球以外の惑星・衛星に見られる雲 ---地球の雲との共通点と相違点 ---」, 名古屋大学 地球水循環研究センター 公開講演会, 名古屋大学, 2015/07 (招待講演)
- (6) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 倉本圭, 林祥介, 「木星型惑星大気の雲対流の数値実験」, 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 幕張メッセ, 2015/05.
- (7) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 倉本圭, 林祥介, 「木星型惑星大気の雲対流の数値実験」, 日本気象学会 2015 年度春季大会, つくば国際会議場, 2015/05.
- (8) Nakajima, K., Sugiyama, K., Odaka, M., Kuramoto, K., Hayashi, Y.-Y., "Numerical Simulations of Jupiter's Moist Convection Layer: Structure and Dynamics in Statistically Steady States", 46th Meeting of the Division for Planetary Sciences, Tucson, Arizona (USA), 2014/11.
- (9) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 倉本

- 主, 林祥介, 「木星大気の雲対流と大気構造」, 日本気象学会 2014 年度秋季大会, 福岡国際会議場, 2014/10.
- (10) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 倉本圭, 林祥介, 「木星型惑星を想定した雲対流の数値計算」, 日本惑星科学会 2014 年秋季講演会, 東北大学, 2014/09.
- (11) 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”, Joint Workshop of 6th International Workshop on Global Cloud Resolving Modeling and 3rd International Workshop on Nonhydrostatic Numerical Models, Kobe (Japan), 2014/09.
- (12) 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”, AOGS2014, Sapporo (Japan), 2014/07.
- (13) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 倉本圭, 林祥介, 「巨大惑星を想定した雲対流の 2 次元数値計算」, 日本気象学会 2014 年度春季大会, 横浜市開港記念会館, 2014/05.
- (14) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 倉本圭, 林祥介, 「巨大惑星を想定した雲対流の 2 次元数値計算」, 日本地球惑星科学連合 2014 年大会, パシフィコ横浜, 2014/04.
- (15) 杉山耕一郎, 「木星の大気構造」, 巨大惑星系研究会, 東京工業大学, 2014/04. (招待講演)
- (16) 杉山耕一郎, 「木星型惑星大気の雲対流の数値計算」, 国立天文台天文シミュレーションプロジェクトユーザーズミーティング, 国立天文台, 2014/01.
- (17) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 石渡正樹, 倉本圭, 西澤誠也, 高橋芳幸, 林祥介, 「木星大気の雲対流の直接数値計算---雲対流の間欠性に関する考察---」, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 幕張メッセ, 2013/05.
- (18) 杉山耕一郎, 中島健介, 小高正嗣, 石渡正樹, 倉本圭, 西澤誠也, 高橋芳幸, 林祥介, 「木星大気の雲対流の直接数値計算---雲対流の間欠性に関する考察---」, 日本気象学会 2013 年春季大会, 代々木国立オリンピック記念青少年総合センター, 2013/05.
- (19) Sugiyama, K., Nakajima, K., Odaka, M., Ishiwatari, M., Kuramoto, K., Nishizawa, S., Takahashi, Y. O., Y.-Y. Hayashi, “Numerical Modeling of Cloud Convection in Jupiter’s Atmosphere: robustness and a mechanism of the intermittent emergence of vigorous cumulonimbus clouds”, AGU Fall Meeting 2012, San Francisco (USA), 2012/12.
- (20) Takahashi, Y. O., Sugiyama, K., Odaka, M., Ishiwatari, M., Sasaki, Y., Nishizawa, S., Nakajima, K., Takehiro, S., Hayashi, Y.-Y., “Construction of Hierarchical Models for the Fluid Dynamics in Earth and Planetary Sciences: DCMODEL project”, AGU Fall Meeting 2012, San Francisco (USA), 2012/12.
- (21) Kawashita, S., Nakajima, K., Sugiyama, K., “An attempt to estimate the static stability and the abundance of oxygen of Jupiter’s lower atmosphere based on the vertical structure of large-scale disturbances”, AGU Fall Meeting 2012, San Francisco (USA), 2012/12
- (22) Takehiro, S., Takahashi, Y. O., Sugiyama, K., Odaka, M., Ishiwatari, M., Sasaki, Y., Nishizawa, S., Ishioka, K., Nakajima, K., Hayashi, Y.-Y., Construction of Hierarchical Models for the Fluid Dynamics in Earth and Planetary Sciences: DCMODEL project, JSST 2012 International Conference on Simulation and Technology, Kobe (Japan), 2012/09.
- (23) 杉山耕一郎, 鈴木絢子, 中村友昭, 真鍋翔, 堺正太郎, 鶴巻亮一, 辰巳信平, 中岡礼奈, 加藤則行, 谷伊織, 梅本隆史, 押川智美, 惑星科学研究センター, 「惑星科学研究センター (CPS) における知見アーカイブ」, 地球惑星科学連合大会 2012 年大会, 幕張メッセ, 2012/05.
- (24) 杉山耕一郎, “Numerical modeling of moist convection in Jupiter’s atmosphere”, 第 8 回太陽系外惑星大研究会, 熱海, 2012/04. (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<http://www.gfd->

[dennou.org/library/deepconv/](http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/)

<https://www.cps-jp.org/~mosir/pub/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉山 耕一郎 (SUGIYAMA, Ko-ichiro)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・研究員

研究者番号: 60463733