

平成21年 5月18日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19740294
 研究課題名（和文） 海洋形成条件の大気組成・雲に対する依存性の検討：
 汎用大気構造計算コードの開発
 研究課題名（英文） Dependence of Ocean Formation on Atmospheric Composition and
 Clouds: Development of Atmospheric Structure Model
 研究代表者
 はしもと じょーじ (HASHIMOTO GEORGE)
 神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点研究部・助教
 研究者番号：10372658

研究成果の概要：多様な条件下にある惑星大気について鉛直1次元の放射対流平衡の大気構造を計算するコードを新規開発した。また放射輸送計算に必要とされる大気成分の吸収線パラメータ、断熱温度勾配の計算に必要な熱力学データ、雲その他の粒子による散乱特性を計算するのに必要な凝結成分の複素屈折率など、大気構造計算に必要なデータの収集をおこなってデータベースを構築した

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	150,000	225,000

研究分野：惑星大気科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・気象・海洋物理・陸水学

キーワード：気象学、惑星起原・進化、惑星表層環境、系外惑星、惑星探査

1. 研究開始当初の背景

「生命を育む惑星」であることは地球のもっとも大きな特徴である。なぜ地球は生命を育む惑星となったのか、との問いには、どのようにしたら答えられるのかすらわからないのが現状であるが、海洋の存在することは生命を育む惑星となるための重要な条件のひとつと一般に考えられている。すなわち、地球を地球たらしめているのは海洋の存在であると、まとめることができる。

惑星表層に十分な量の水(H₂O)が存在する

場合、海洋(液体の水)が惑星表面に存在できるか否かという問題は液体の水の存在できる温度・圧力条件が惑星表面に出現するか否かという問題に帰着される。そのため海洋形成条件(海洋が存在するための条件)は気候形成の問題として取り扱うことができる。そして二酸化炭素を主成分とする大気がある場合の海洋形成条件は鉛直1次元の放射対流平衡モデルによって調べられ、その大枠は10年前までにはほぼ理解されたと考えられていた(e.g., Abe, 1993)。

しかし、地球形成から10億年程度の期間

について大気にはメタンやアンモニアといった還元的な成分が含まれていた可能性が強く示唆されるようになった(e.g., はしもと, 2005). そして、いくつかの先駆的な研究は、これら還元的な期待の温室効果が海洋形成条件に大きく影響することを示している(e.g., Kasting and Catling, 2003). 従来から考えられてきた水蒸気・二酸化炭素に加えてメタン・アンモニアをも含めた枠組みの下で、海洋形成条件を再構築することが必要とされている.

これまで惑星表層環境に関する研究は、実質的に地球・金星・火星のわずか3天体に限られていた(タイタン(土星の衛星)を加えたとしても4天体). そして海洋形成条件やその他の惑星表層環境に関する議論は、これらの惑星の間に見られる差異や同一性に基いてなされてきた. 惑星表層環境研究の対象が限られていることの原因は、そもそも観測することのできる惑星表層環境がこれだけしか存在しないことにある. しかし、この比較の対象とできる天体の数が非常に少ないことのために、議論の一般性は狭められ、そこから得られる結論の妥当性には大きな疑問符が付くこととなっている.

しかし近年、系外惑星が発見されたことでこの閉塞状況を打破するブレークスルーが見えてきた. さまざまな惑星に現れる表層環境を比較することでその本質の解明を目指す比較惑星環境学においては、比較対象となる惑星の数が増えるほどに議論の精度は高まっていく. したがって続々と発見が報告される系外惑星は、この学問分野を大きく発展させる可能性を秘めている. 現在はまだ系外惑星の表層環境そのものを観測するまでには至っていないが、それが可能となるのは時間の問題であろう. そうした観測が可能となったときに備えて、太陽系内の惑星だけでなく系外惑星やその衛星までもを含めた枠組みの中で、どのような条件のときどのような表層環境が形成されるのかということを明らかにしておくことが必要である.

2. 研究の目的

近年の大気形成・進化に関する研究によって、惑星形成と同時に形成される大気には還元的な成分がかなりの割合で含まれることや、そうした還元的な成分を含む大気が10億年程度の期間存続することなどが示されている(e.g., はしもと, 2005). これまで十分な注意が向けられず散発的にしか調べられてこなかったメタン・アンモニアであるが、これらの気体が存在するならばその強い温室効果によって惑星表層環境は大きく影響

を受ける.

本研究は、系統的な研究がおこなわれていないメタン・アンモニア等を含む大気について徹底的なパラメタスタディをおこない、1次元放射対流平衡モデルの枠組みで大気組成と惑星表層温度の関係を整理する. そして地球および他惑星の表層環境の進化史を理解する上での土台となる海洋形成条件を再構築する.

この海洋形成条件の再構築にあたっては、あくまで鉛直1次元の放射対流平衡モデルにこだわることにする. 3次元モデルは膨大な計算機資源を必要とするため系統的なパラメタスタディをおこなうことが難しい. また結果の解釈も1次元モデルに比べると格段に難しい. 鉛直1次元モデルを用いて広く系統的なパラメタスタディをおこなうことで、3次元モデルによって重点的に検討されるべき対象をあぶり出すとともに、3次元モデルの結果を解釈する際に拠って立つ所となる基礎情報を作り出す. すなわち鉛直1次元モデルを用いる本研究は、世の中の大局を概観するための視座を築くことを目的としている.

3. 研究の方法

海洋が形成されるための条件は、(1) 地表温度が液体の水の安定に存在できる範囲(三十点~臨界点)にあること、かつ、(2) 惑星表層に十分な量(地表での水蒸気分圧が飽和水蒸気圧以上)の水が存在すること、である. ここでは鉛直1次元の放射対流平衡モデルを用いて惑星上につくられる大気の構造を計算し、地表温度が大気組成やその他のパラメタとどのような関係にあるのかを明らかにする.

鉛直1次元の放射対流平衡の大気構造を計算するための計算コードは、これまで作成してきた放射輸送計算コードなどを基に新しく開発する. 広いパラメタ空間で系統的なパラメタスタディをおこなうことを考慮して、幅広い種類の大気に対応することが可能な高い汎用性を持った大気構造計算コードを開発する. 多様な大気を区別することなく扱えるようにすることで、広いパラメタ空間における惑星大気の振る舞いを系統的に調べる計算を半自動的におこなえるようにする.

惑星大気構造の計算においては放射輸送の計算と断熱温度勾配の計算が2本の柱となる. 放射過程において重要なのは、気体および粒子の吸収・散乱特性の計算である. これまで地球大気の研究で培われてきた技術を拡張し、温度・圧力や大気組成が地球と大きく異なる大気の吸収・散乱特性も計算する

ことが可能なコードを開発する。一方、断熱温度勾配は、系のギブス自由エネルギーを計算して熱化学平衡を見つけ出すことによって計算する。この計算法は凝結成分の数や種類を問わないため、どのような性質の大気にも適用することができるという利点をもつ。

計算コードの開発にあたっては、地球大気をはじめ太陽系で観測される惑星の大気を想定した計算を適宜おこなって動作確認と性能チェックをおこなう。また、いろいろな組成の大気に対応できるように、気体の吸収線パラメータや熱力学データの収集をおこなってデータベースの構築もおこなう。

4. 研究成果

様々な大気組成、惑星サイズ、中心星の放射スペクトル、といったパラメータ空間において、鉛直1次元の放射対流平衡の大気構造を計算するコードを新規開発した。また放射輸送計算に必要な大気成分の吸収線パラメータ、断熱温度勾配の計算に必要な熱力学データ、雲その他の粒子による散乱特性を計算するのに必要な凝結成分の複素屈折率など、大気構造計算に必要なデータの収集をおこなって、大気構造計算に際して必要とされるデータを参照するためのデータベースを構築した。

地球大気と金星大気を想定した条件において大気構造の計算をおこなって、コードの動作確認と性能チェックをおこなった。ここで開発されたコードは計算時間がかかるといって問題はあるものの、大気構造を計算できることを確認した。

放射対流平衡モデルの核心部分のひとつである放射輸送を計算する部分については、特に精密な性能チェックが必要であると考え、実際のデータ解析に適用してみることをした。計算結果を観測データと突き合わせることで、計算コードの性能を厳しく評価するとともに、計算コードの限界を確認することができた。

地球とは異なる環境にある大気の大気放射がどれくらいの精度で計算できているのかを確認することを目的として、米国の探査機 Galileo によって取得された金星大気放射データの解析をおこなった。探査機に搭載された近赤外分光計 (NIMS) が観測した放射は、高温の金星地表から射出された熱放射で、それは大気と雲による吸収や散乱の影響を受けている。解析では放射輸送の計算コードを使って大気と雲の影響を評価することによって、金星地表の近赤外線波長における放射率を世界で初めて推定することに成功した (Hashimoto et al., 2008)。その結果によ

ると、金星は標高によって地表放射率に違いのあることが示されている。この結果の解釈には複数の可能性が考えられるが、そのうちのひとつは金星の高地がカコウ岩であるとするものである。カコウ岩の生成には海洋とプレートテクトニクスが必要であると考えられており、そのことを受け入れるならば金星のカコウ岩は過去の金星に海洋とプレートテクトニクスがあったことを示唆するものになる。このことが確認されたならば、過去の金星は地球と同様に海洋を保持した「生命を育む惑星」であったことになり、「生命を育む惑星」の形成条件を考える上で非常に重要な示唆を与えるものとなる。

また、放射輸送計算コードは地上望遠鏡によって取得されたデータの解析にも適用し、金星の HCl 存在量の面的な分布を導きだした (Iwagami et al., 2008)。得られた結果は他の研究グループがおこなった観測結果と調和的であり、放射輸送計算コードの動作確認ができた。HCl は光化学反応や大気大循環によってその存在量の分布が決まると考えられているので、HCl の分布を調べることは地球と違う環境にある大気の大循環や大気化学についての理解を深めるための手がかりになるものと期待される。

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 Hashimoto, G. L., M. Roos-Serote, S. Sugita, M. S. Gilmore, L. W. Kamp, R. W. Carlson, and K. H. Baines, Felsic highland crust on Venus suggested by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer data, *J. Geophys. Res.*, 113, E00B24, doi:10.1029/2008JE003134, 2008, 査読有。

② Mueller, N., J. Helbert, G. L. Hashimoto, C. C. C. Tsang, S. Erard, G. Piccione, and P. Drossart, Venus surface thermal emission at 1 mm in VIRTIS imaging observations: Evidence for variation of crust and mantle differentiation conditions, *J. Geophys. Res.*, 113, E00B17, doi:10.1029/2008JE003118, 2008, 査読有。

③ Iwagami, N., S. Ohtsuki, K. Tokuda, N. Ohira, Y. Kasaba, T. Imamura, H. Sagawa, G. L. Hashimoto, S. Takeuchi, M. Ueno, and S. Okumura, Hemispheric distributions of HCl above and below the Venus's clouds by ground-based 1.7 mm spectroscopy, *Planet. Space Sci.*, 56, 1424-1434, 2008, 査読有。

〔学会発表〕（計 3 件）

- ① はしもとじょーじ・阿部豊、金星の表層物質と気候システム、日本地球惑星科学連合 2008 年大会、幕張、2008.
- ② Hashimoto, G. L., Habitability of Planets, Japanese-American Frontiers of Science Symposium, Hayama, 2007.
- ③ はしもとじょーじ・阿部豊・杉田精司、地球型惑星の初期進化、日本地球惑星科学連合 2007 年大会、幕張、2007.

〔図書〕（計 1 件）

- ① はしもとじょーじ、金星の大気、「惑星地質学」、宮本英昭・橘省吾・平田成・杉田精司 編、第 II 部 2-1、東京大学出版会、2008.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

はしもと じょーじ (HASHIMOTO GEORGE)
神戸大学・自然科学系先端融合研究環重点
研究部・助教
研究者番号：1 0 3 7 2 6 5 8

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし