

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740304

研究課題名(和文) 初期火星における二酸化炭素雲対流に関する数値的研究

研究課題名(英文) Two-dimensional numerical experiments of atmospheric convection with condensation of the major component under early Mars condition

研究代表者

小高 正嗣 (Odaka, Masatsugu)

北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60344462

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：初期火星的な条件下で生じる大気主成分の凝結をともなう対流の流れ場と雲の分布を、2次元雲解像モデルを用いて数値的に調べた。

過飽和が許容されない場合、凝結は領域全体としては継続的に生じる。凝結高度より下には細胞状の乾燥対流が生じ、凝結高度より上の領域では内部重力波が卓越する。内部重力波に伴う鉛直流に対応して波状の雲構造が生じる。過飽和が許容される場合、凝結は準周期的なイベントとして生じる。強い上昇流は雲頂付近にのみ存在し、雲層全体を貫くような上昇流は生じない。凝結核数混合比を大きくすると、流れ場と雲分布の特徴は過飽和を許容しない場合の結果と似たものとなる。

研究成果の概要(英文)：We have developed a two-dimensional cloud resolving model and investigate the behavior of convection associated with the condensation of the major constituent in a simplified thermal condition considering the warm early Mars atmosphere.

When super saturation is not permitted, quasi steady distributions of flow field and cloud are obtained. A cellular convection structure develops below the condensation level, and gravity wave is generated and propagates above the condensation level. Cloud is formed by vertical motion associated with the gravity wave. When super saturation is permitted, the behavior of convection depends on the value of number mixing ratio of condensation nuclei: quasi-steady solution is obtained for relatively large number mixing ratio of condensation nuclei, whereas solution with quasi-periodic temporal variation is obtained for relatively small number mixing ratio. In the latter case, the updrafts develop through only a limited depth of the condensation layer.

研究分野：数物科学系

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：惑星大気 火星 大気対流 雲形成 数値シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

地球大気は微量成分である H<sub>2</sub>O が凝結する系であるのに対し、火星大気は主成分である CO<sub>2</sub> が凝結する系である。大気主成分である CO<sub>2</sub> が凝結する系において、どのような流れ場や雲が生じるかは流体力学的に興味深い問題であると同時に、初期(約 38 億年前)の火星の気候の研究において、重要な研究ターゲットの 1 つである。CO<sub>2</sub> 氷雲による散乱温室効果が、初期火星の温暖な気候の維持に重要な役割を果たしていた可能性が議論されているからである。

CO<sub>2</sub> 氷雲による散乱温室効果の強度は、CO<sub>2</sub> 氷雲の粒径、雲の光学的厚さ、雲量、雲の高度( )に強く依存することが指摘されている (Forget and Pierrehumbert, 1997; Mischna et al., 2000)。そのため CO<sub>2</sub> 氷雲に関する光学的な特性だけでなく、CO<sub>2</sub> の凝結に伴う流れ場と整合的な雲の分布を調べる必要がある。しかしながらこれまでの火星 CO<sub>2</sub> 氷雲の分布についてはそのような研究はほとんど行われていなかった。1 次元放射対流平衡モデルを用いた研究 (Forget and Pierrehumbert, 1997; Mischna et al., 2000; Mitsuda 2007) では、流れ場についての計算無しに雲分布を導入しあるいは考察している。大気大循環モデルを用いた研究 (Sabato 2008) では、鉛直対流を陽に表現することはできないため、適当な凝結過程を導入することで問題を回避している。大気主成分の凝結をともなう鉛直対流を研究した唯一の例として Colaprete et al. (2003) があるが、これも鉛直 1 次元のモデルを用いた研究であり、長期間平均の気候学的な意味でどのような流れ、温度分布、雲分布が実現されるのかは未解決の問題であった。

また、地球の積雲対流の数値シミュレーションに用いられる雲解像モデルは、大気微量成分が凝結する系を対象としたモデルであり、大気主成分が凝結する系を考察するためには支配方程式の検討から数値モデルの構築とその数値計算上の問題点を基本に立ち戻って検討する必要があった。

## 2. 研究の目的

以上の背景の下、本研究では主成分凝結対流における流れ場と雲分布の自然な特徴を、数値シミュレーションにより調べることをめざす。この目的の為、雲微物理と対流運動を陽に扱い、統計的平衡状態に至るまで長時間の数値実験を行うことが可能な数値モデルの開発を、基礎方程式の検討を含めて行う。ここでいうところの統計的平衡状態とは、個々の雲の生成・消滅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自然に実現される流れ場、大気構造、雲分布の事を差す。

## 3. 研究の方法

### (1) モデルの枠組みの検討

大気主成分の凝結を考慮した対流の数値計算を行うため、まずモデル方程式の検討を行った。運動方程式としては地球大気用の雲解像モデルによく用いられている准圧縮方程式系を出発点とした。この方程式系の質量保存の式と熱力学の式に、主成分の凝結にともなう質量変化と加熱冷却の効果を取り入れた。さらに現在および過去の火星大気における物性値や典型的な温度と気圧の条件を考慮して適切な近似を行い、准圧縮方程式系の近似が成り立つ範囲で系の自然な拡張を行うことにした。

雲物理については計算結果の解釈を簡単にできるように、凝結と重力沈降と蒸発の過程のみを考慮することにした。雲の生成と消滅は拡散成長する雲粒を考慮した Tobie et al. (2003) のモデルを導入することにした。このモデルは現在の火星の極夜領域で観測される重力波起源の CO<sub>2</sub> 氷雲の分布をよく再現していることから採用した。モデルの制御パラメータは臨界飽和比(飽和蒸気圧に対する凝結開始時の圧力の比)と凝結核数混合比である。放射過程については、当初 Mitsuda (2007) にて開発された K 分布法に基づく大気及び CO<sub>2</sub> 雲の放射伝達モデルを簡略化したものを導入することを検討していたが、後述する凝結過程の数値モデル化とその検証に時間を要したため、本モデルでは鉛直 1 次元モデルで計算された加熱率分布を外部強制として与えることにした。

### (2) 大気主成分凝結過程の数値モデル化

Tobie et al. (2003) の雲物理モデルを導入するにあたり、背景場が定常で一様な系において CO<sub>2</sub> 雲の生成消滅実験を行った。この結果、単純に臨界飽和比のみをパラメータとして計算を行うと、拡散時間よりも早い時間スケールで凝結領域が拡大してしまった。解析の結果、凝結領域の拡大する時間スケールは時間ステップと空間格子間隔に依存することがわかった。これはモデルの空間離散化にともなうもので、数値モデル化を行う場合に避けられないものであった。このような非物理的な凝結の進行を抑制するため、飽和比が 1 より大きく臨界飽和比よりも小さい場合には、凝結および蒸発が起こるための雲密度の閾値を導入することにした。閾値の値は後述する数値計算に合わせ、凝結領域の拡大がモデルの格子スケールの移流時間を超えないように設定することにした。また、凝結の特徴的なスケールのオーダーが 10 秒であることから、対流モデル内での雲物理過程の計算は、音波計算の時間ステップで行うことが適切であることを確認した。

### (3) 大気主成分凝結を伴う対流の数値計算

上記で検討・開発した数値モデルを用い、水平鉛直 2 次元系での数値計算を行う。系を 2 次元に限定したのは、計算領域と解像度を確保しつつ、後述するパラメータ実験を効率よく行うためである。Colaprete et al. (2003) による研究の成果により、主成分が凝結する系の場合、系が過飽和を許容するかしないかによって運動の様子が異なることが示唆されている。そこで、本研究の数値計算では実験の制御パラメータとして臨界飽和比と、先に導入した雲物理モデルの制御パラメータである凝結核数混合比を選択する。これらのパラメータによって、流れ場と雲の分布がどのように影響を受けるかを調べることを、具体的な研究目標とした。

計算領域は水平に 100 km、鉛直に 80 km とし、空間格子間隔は水平に 500 m、鉛直に 400 m である。初期温度場と強制として与える加熱率分布は、初期火星の温暖な気候を対象とした鉛直 1 次元放射対流平衡モデル (Kasting 1991) によって得られた分布を参考にして与える。臨界飽和比の値は過飽和を許容しない場合には 1.0、過飽和を許容する場合には 1.35 とした。過飽和を許容する場合は過去の室内実験によって得られた値 (Glandorf et al., 2002) である。凝結核数混合比は先行研究 (Forget et al., 2013) を参考に、 $5.0 \times 10^8$  kg,  $5.0 \times 10^6$  kg,  $5.0 \times 10^4$  kg の 3 通りを与える。

## 4. 研究成果

上記の数値計算の結果以下のことが明らかとなった。

(1) 流れ場の構造と雲の分布は、臨界飽和比と凝結核数濃度によって大きく変わることがわかった。系全体の運動エネルギー (図 1) および雲質量の時間変化の様子から、過飽和が許容されない場合には凝結は継続的に生じ、過飽和が許容され、かつ凝結核数濃度が相対的に小さい場合には凝結はイベント的に生じることがわかった。凝結がイベント的に生じるかどうかは凝結領域の温度が飽和温度から臨界飽和状態になる温度へと放射冷却される時間スケールと、雲粒の落下のスケールとの比較で概ね理解できることがわかった。

(2) 過飽和が許容されない場合、凝結は領域全体としては継続的に生じる。凝結高度より下には細胞状の乾燥対流が生じこれに伴う上昇流は凝結高度を越えて 1km 程度しか貫入しない。その貫入領域では周囲より濃い雲が生じる。凝結高度より上の領域では内部重力波が卓越し、これに伴う鉛直流に対応して波状の雲構造が生じる (図 2)。雲密度の平均的な鉛直分布は、凝結高度付近にピー

クを持ち、高さとともに指数的に減少するようなものとなる。この鉛直分布は凝結層上部では放射冷却による雲粒の生成と雲粒の重力落下との釣り合いで、凝結層下部では「液水静的エネルギー」に対応する量の保存から概ね説明できる。これらの特徴は凝結核数混合比には依存しない。

(3) 過飽和が許容される場合、凝結は準周期的なイベントとして生じる。凝結が生じない期間の流れ場は過飽和が許容されない場合と同様の構造を持つ。凝結イベントは乾燥対流に伴う上昇流が凝結高度を超えて貫入した領域での雲の発生で始まる。その後、雲は鉛直上向きに広がって行く。このとき生じる雲濃度は過飽和が許容されない場合に比べて大きい。上昇流は雲頂付近にのみ存在し、雲層全体を貫くような上昇流は生じない (図 3)。凝結核数混合比を大きくすると、準周期的な凝結イベントは生じなくなり、流れ場と雲分布の特徴は過飽和を許容しない場合の結果と似たものとなる。

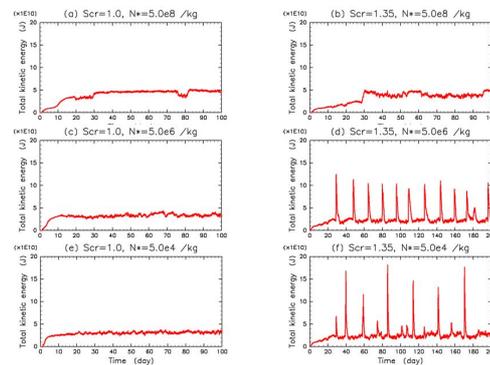


図 1: 全運動エネルギーの時間発展。左列は過飽和を許容しない場合、右列は過飽和を許容する場合。上段から下段に向かって凝結核数濃度は減少していく。

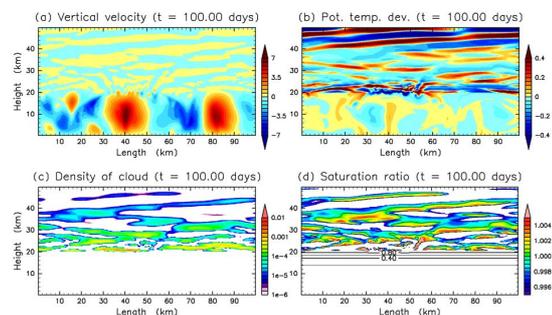


図 2: 過飽和が許容されない場合の流れ場と雲分布の様子。(左上) 鉛直流 (右上) 温位偏差 (左下) 雲密度 (右下) 飽和比。

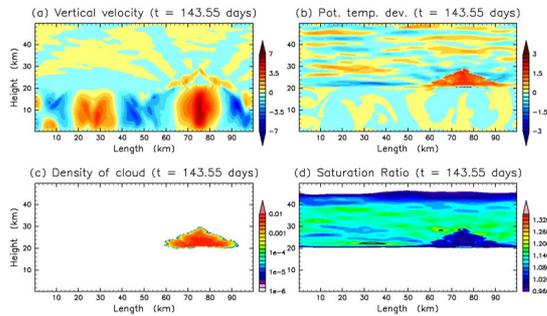


図 3:過飽和が許容されない場合の流れ場と雲分布の様子。(左上)鉛直流(右上)温位偏差(左下)雲密度(右下)飽和比。

### 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 4 件)

- (1) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 林祥介, 2013: 初期火星大気中の主成分凝結対流の二次元数値実験 - 臨界飽和比と凝結核数密度に関するパラメータ依存性 -, 第 27 回大気圏シンポジウム講演集, **27**, 187-190. (査読無し).
- (2) T. Yamashita, M. Odaka, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y. O. Takahashi, S. Nishizawa and Y.-Y. Hayashi, 2011: Two-dimensional model simulation of Martian atmospheric convection with condensation of the major component under fixed thermal forcing, Proceedings of the 44th ISAS Lunar and Planetary Symposium, 6 pp. (CD-ROM) (査読無し)
- (3) T. Yamashita, M. Odaka, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, 2010: Atmospheric convection with condensation of the major component, Proceeding of the 43th ISAS Lunar and Planetary Symposium, **43** (CD-ROM) (査読無し)
- (4) T. Yamashita, M. Odaka, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, 2010: Two-dimensional numerical experiments of Martian atmospheric convection with condensation of the major component, Eos Trans. AGU, **91(26)**. West. Pac. Geophys. Meet. Suppl., Abstract P34A-03 (査読無し)

[学会発表](計 13 件)

- (1) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 林祥介, 2013: A 2D numerical simulation of atmospheric

convection with condensation of major component under early Mars condition, 日本地球惑星科学連合 2013 年大会, 2013 年 5 月 21 日, 幕張メッセ国際会議場.

- (2) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 林祥介, 2013: 初期火星大気中の主成分凝結対流の二次元数値実験 - 臨界飽和比と凝結核数密度に対する依存性 - 日本気象学会 2013 年度春季大会, 2013 年 5 月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.
- (3) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 林祥介, 2013: 初期火星大気中の主成分凝結対流の二次元数値実験 - 臨界飽和比と凝結核数密度に関するパラメータ依存性 -, 第 27 回大気圏シンポジウム, 2013 年 3 月 1 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.
- (4) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 西澤誠也, 林祥介, 2012: 火星極冠上空を想定した主成分凝結対流の二次元数値実験, 日本気象学会 2012 年度春季大会, 2012 年 5 月 28 日, つくば国際会議場.
- (5) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 西澤誠也, 林祥介, 2012: Two-dimensional simulation of Martian atmospheric convection with the major component condensation over CO<sub>2</sub> ice surface 日本地球惑星科学連合 2012 年大会, 2012 年 5 月 24 日, 幕張メッセ国際会議場.
- (6) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 西澤誠也, 林祥介, 2012: 火星主成分凝結対流の二次元数値実験 ~ CO<sub>2</sub>凍結表面上の場合 ~ 系外惑星大気ワークショップ, 2012 年 3 月 17 日, ニチイ学館 神戸ポートアイランドセンター.
- (7) T. Yamashita, M. Odaka, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y. O. Takahashi, S. Nishizawa and Y.-Y. Hayashi, 2011: Two-dimensional model simulation of Martian atmospheric convection with condensation of the major component under fixed thermal forcing, EPSC-DPS Joint Meeting 2011, Oct. 4th, 2011, Nantes, France, La Cité Internationale des Congrès Nantes Metropole.
- (8) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一朗, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 西澤誠也, 林祥介 2011: 水平一様熱強制の下で生じる火星大気中の主成分凝結対流の二次元数値実験, 第 44 回月惑星シ

ンポジウム, 2011 年 8 月 1 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部.

- (9) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一郎, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 西澤誠也, 林祥介, 2011: 主成分の凝結を伴う大気対流, 日本地球惑星科学連合 2011 年大会, 2011 年 5 月 25 日, 幕張メッセ国際会議場.
- (10) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一郎, 中島健介, 石渡正樹, 高橋芳幸, 西澤誠也, 林祥介, 2011: 主成分凝結を伴う 2 次元大気対流の準平衡状態 日本気象学会 2011 年度春季大会, 2011 年 5 月 18 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.
- (11) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一郎, 中島健介, 石渡正樹, 林祥介, 2011: 主成分の凝結を伴う対流の 2 次元数値計算, 第 7 回 HSS ワークショップ, 北海道大学, 2011 年 2 月 24 日, 北海道大学創成科学研究棟 5 階大会議室.
- (12) T. Yamashita, M. Odaka, K. Sugiyama, K. Nakajima, M. Ishiwatari, Y.-Y. Hayashi, 2011: Atmospheric convection with condensation of the major component, Fourth International Workshop on the Mars Atmosphere: Modeling and Observations, 8th-11th February, 2011, Paris, France.
- (13) 山下達也, 小高正嗣, 杉山耕一郎, 中島健介, 石渡正樹, 林祥介, 2010: 主成分凝結を伴う火星大気対流の二次元数値実験. 日本気象学会 2010 年度春季大会. 2010 年 05 月 23 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小高 正嗣 (ODAKA, Masatsugu)

北海道大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号: 60344462