

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04062

研究課題名（和文）非静力学金星大気大循環モデルの開発と雲層大規模構造における熱対流の役割解明

研究課題名（英文）Development of a Venusian non-hydrostatic atmospheric general circulation model for exploring the role of thermal convection in large-scale structures in the cloud layer

研究代表者

櫻村 博基 (Kashimura, Hiroki)

神戸大学・理学研究科・講師

研究者番号：80635186

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、金星大気の全球非静力学モデルを開発し、雲層の小規模な鉛直対流を陽に表現した全球高解像度シミュレーションを初めて実現し、金星大気循環における鉛直対流の重要性を示した。一方、静的不安定化の熱強制を加えた計算では、実現される安定度分布は従来よりも現実的な大きさになったものの、スーパーローテーションの強度は半減するという結果が得られた。すなわち、現実的な安定度分布と循環場の両立という新たな課題が得られた。また、自転軸の傾き約2.6度を導入した実験も行い、金星大気循環にも有意な季節依存性が存在し、その特徴は地球の季節依存性と定性的に一致することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、以下の3点である。(1)これまで静力学平衡を仮定した数値モデルで議論されてきた金星大気循環に対して、全球非静力学モデルという次世代型の数値モデルを提供したこと。(2)金星大気シミュレーションにおいて、雲層高度の安定度とスーパーローテーションの両立という新たな課題を露わにしたこと。(3)これまで見過ごされてきた、大気循環に対する自転軸の傾きの影響（季節依存性）を明確に示したこと。また本研究の社会的意義は、日本の金星探査機「あかつき」の成果に寄与し、日米欧でそれぞれ検討計画されている次期金星探査に資することで、国際貢献に繋がっている点である。

研究成果の概要（英文）：A global non-hydrostatic model of the Venusian atmosphere was developed, and the first global high-resolution simulation explicitly representing small-scale vertical convection in the cloud layer was performed to demonstrate the importance of vertical convection. With a thermal forcing that leads to a statically unstable state, the simulated stability became consistent with the observed value, but the superrotation was reduced by half. Our simulation showed that obtaining both a realistic stability profile and superrotation is a problem we need to address. We also carried out an experiment where we introduced a tilt of about 2.6 degrees to the axis of planetary rotation. This experiment showed that significant seasonal variations also exist in the Venusian atmospheric circulation, and that their characteristics are qualitatively consistent with those of the Earth's seasonal variations.

研究分野：惑星気象学

キーワード：金星大気 全球非静力学モデル 高解像度シミュレーション 鉛直対流 季節依存性

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

金星は全球が高度 45 km から 70 km におよぶ分厚い硫酸の雲で覆われており、雲の濃淡の観測により、大気スーパーローテーションや Y 字模様などの大気現象が発見されてきた。近年の金星探査機「あかつき」の高解像度カメラ観測によって、雲層に弓状構造と筋状構造と呼ばれる 2 つの大規模構造が新たに発見された。弓状構造は、巨大な山岳波すなわち山岳に励起された大気重力波が、薄い雲対流層を突き抜けて、雲頂高度まで伝播したものだと考えられている。一方、筋状構造は、傾圧不安定によって形成されることが数値シミュレーションによって示されており、傾圧不安定の発生には、雲層高度の低安定度層の存在が重要であることが示唆されている。

弓状構造と筋状構造はともに、中立あるいは低安定度の層の存在がメカニズムの重要な鍵となっていることが数値的に示されてきたが、両者とも、静力学近似を用いた従来型の大気大循環モデルによる数値実験で考察されていた。すなわち、中立あるいは低安定度の層の成因となる対流活動の存在を無視した系で考察されていた。そこで、水平に小規模な鉛直対流と大規模構造を同時に陽に表現した非静力学大気モデルによる全球シミュレーションが求められた。しかし、金星大気用の全球非静力学モデルは、世界でも開発されていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、金星大気用の全球非静力学モデルを開発し、全球で鉛直対流を解像した高解像度シミュレーションを実現することである。そして、計算結果から対流活動が大規模な弓状構造・筋状構造に与える影響を考察し明らかにすることである。

3. 研究の方法

金星大気全球非静力学モデルの開発には、全球非静力学コアである「SCALE-GM」を利用した。SCALE-GM は、地球大気用の全球非静力学モデル「NICAM」の力学コアを流用したものであり、正 20 面体準一様格子に基づいて離散化されているため、大規模並列計算機において高い計算性能が発揮できるように設計されている。

金星化開発として、まず惑星や大気の諸定数を金星の値に変更した。次に、従来型の静力学平衡を仮定した金星大気大循環モデルとして実績のある「AFES-Venus」で用いられている簡略な放射過程を SCALE-GM に導入した。そして、低解像度から高解像度まで各水平解像度に対して、様々な水平拡散やスポンジ層の強さで計算を行い、AFES-Venus の計算結果と対照し、それぞれの解像度における適切な値を求めた。その後、SCALE-GM に対して任意の日周期・年周期を設定できるように改良を加え、金星の日変化・季節変化を計算可能にした。

AFES-Venus の放射加熱冷却は、静力学モデル用に調整されているため、静的不安定な場になりにくい強制であった。また、実現される低安定度層の安定度が、観測されている値よりも大きくなるという課題を有していた。そこで、AFES-Venus と金星 SCALE-GM の両モデルを用いて、低安定度層の高度におけるニュートン冷却の基準温度場の安定度（以後、強制安定度と呼ぶ）を従来の 0.1 K/km から段階的に -1.5 K/km まで減少させたパラメータ実験を実施した。AFES-Venus では不安定な場は乾燥対流調節により中立化されるが、SCALE-GM では、解像度が十分であれば、鉛直対流が陽に駆動されることが予想される。

また、金星 SCALE-GM の高解像度試計算の過程で、循環場の南北非対称構造が数百日に渡って持続するという興味深い結果が得られた。ここから着想を得て、これまでは省略されてきた金星の自転軸の傾き約 2.6 度を導入した計算を実施し、金星大気循環における季節変化を調べた。

4. 研究成果

SCALE-GM を金星化するために、惑星や大気の諸定数を金星の値に変更し、AFES-Venus の放射過程を導入した。これは、水平一様なニュートン冷却と東西一様な太陽加熱関数からなる。ニュートン冷却の基準温度場は、観測されている大気安定度を模した形で設定され、高度 55-60 km に安定度が 0.1 K/km の低安定度層が設置されている。ニュートン冷却の緩和時定数の分布は、Crisp (1986) に従う。太陽加熱関数は、Tomasko et al. (1980) を基に、水平平均がゼロになるように調整されている。

大気上端高度は AFES-Venus と同じく 120 km とし、鉛直層間隔を 1 km、鉛直層数を 120 とした。高度 85 km より上空にはスポンジ層を設置した。ただし、スペクトルモデルである AFES-Venus では、東西非一様成分のみを減衰させるスポンジが導入されているのに対し、正 20 面体格子モデルである SCALE-GM では、東西非一様成分の分離が容易ではないため、1 次のラプラス演算子とレイリーダンピングの形でスポンジを導入した。

正 20 面体格子モデルでは、水平解像度は正 20 面体の分割数を表す glevel で表現される。本研究では、まず glevel 5 (格子点間隔 $dx \sim 210$ km) から glevel 10 ($dx \sim 6.5$ km) までの解像度で計算を実施した。計算結果が、AFES-Venus の結果と整合的かつ運動エネルギーが最小スケールに貯まっていないことを確認しつつ、時間刻み幅、水平拡散の次数と時定数、スポンジ層の時定数を調整して、適切な値を求めた (表 1)。また、AFES-Venus の高解像度計算で表現された鉛直風の惑星規模筋状構造 (Kashimura et al., 2019) も、SCALE-GM の同様の解像度の計算でよく再現されることが確認された (図 1)。太陽加熱の日変化成分を導入した計算でも、従来の AFES-Venus と整合的な結果が得られた。すなわち、熱潮汐波に伴う角運動量輸送による赤道ジェットの強化が確認された。

表 1: 金星 SCALE-GM の水平解像度と時間刻み幅 dt 、水平拡散とスポンジ層それぞれの最小スケールに対する時定数。水平拡散は 2 次のラプラシアン、スポンジ層は 1 次ラプラシアンで表現される。

glevel	水平格子点数	dx	dt	水平拡散の時定数	スポンジ層の時定数
5	10,242	210 km	300 s	400 s	3600 s
6	40,962	105 km	150 s	200 s	900 s
7	163,842	52 km	75 s	100 s	200 s
8	655,362	26 km	30 s	50 s	50 s
9	2,621,442	13 km	15 s	25 s	15 s
10	10,485,762	6.5 km	7.5 s	12.5 s	5 s

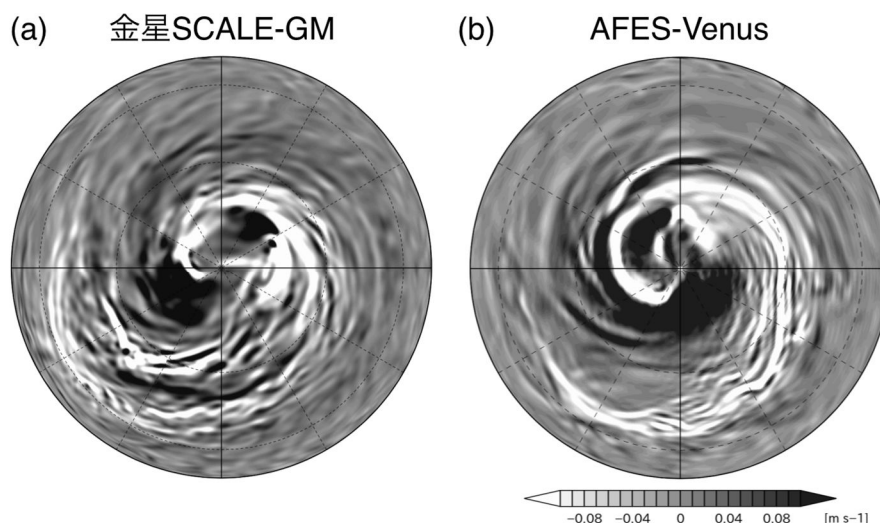


図 1: (a)金星 SCALE-GM と(b)AFES-Venus で計算された高度 60 km の鉛直風の瞬間場。中心は北極、最外円は赤道を表す。太陽加熱は東西一様、強制安定度は 0.1 K/km である。両モデルとも下降風 (白色) で惑星規模の筋状構造が再現されている。

低安定度層高度 (55-60 km) の強制安定度を、従来の 0.1 K/km から -1.5 K/km までの範囲で減少させたパラメータ実験の結果、実現される低安定度層の安定度は約 1.0 K/km から強制安定度を下げるにつれて小さくなり、強制安定度が -0.75 K/km 程度かそれ以下だと観測される安定度 0.1 K/km が実現することが明らかになった。一方、上空の高速東西風 (スーパーローテーション) はこれまで 110 m/s 程度が実現されていたのに対して、強制安定度を下げるにつれてその速さが減少し、強制安定度 -0.75 K/km の設定では約 60 m/s に半減することが分かった。子午面循環場と温度場の解析から、強制安定度を下げると直接循環が強化され、南北温度傾度が減少することで、温度風の関係から東西風速が減少することが示唆された。なお、これらの結果は AFES-Venus でも同様に確認されており、鉛直対流を陽に表現した影響ではなく、低安定度層の安定度を小さくしたことが直接影響しているものと考えられる。

強制安定度が -1.5 K/km の計算について鉛直流を解析したところ、高度 50-60 km の地方時 20 時から 8 時の夜から朝にわたる領域で、鉛直対流の発生が確認された (図 2)。表現される鉛直対流の水平規模は解像度に依存し、glevel 8 ($dx \sim 26$ km) だと数百 km 規模、glevel 11 ($dx \sim 3.3$ km) だと数十 km 規模であった。また、glevel 8 について、対流規模擾乱の鉛直流の大きさと熱・運動量輸送を解析した。結果、対流規模の鉛直流の大きさは、低緯度において平均流や総観規模擾乱のそれよりも数倍から 1 桁程度大きく、大気鉛直混合に大きく寄与することが示唆された。熱・運動量輸送に関しても、低緯度で対流規模擾乱による寄与が他の成分よりも大きく、鉛直対流を陽に表現することの重要性が確認された。ただし、上述の通り、鉛直対流を発生させるために強制安定度を下げたことで、低安定度層高度で実現される安定度は現実的になったものの、大規模循環場 (とくにスーパーローテーション) が変わったため、当初の計画していた筋状構造と弓状構造に対する鉛直対流の影響を (大規模場の影響と分離して) 考察すること

が難しくなった。すなわち、鉛直対流を陽に表現しつつ大規模循環場と安定度分布が観測値と整合的になるように加熱強制等を工夫することが、新たな課題として見出された。

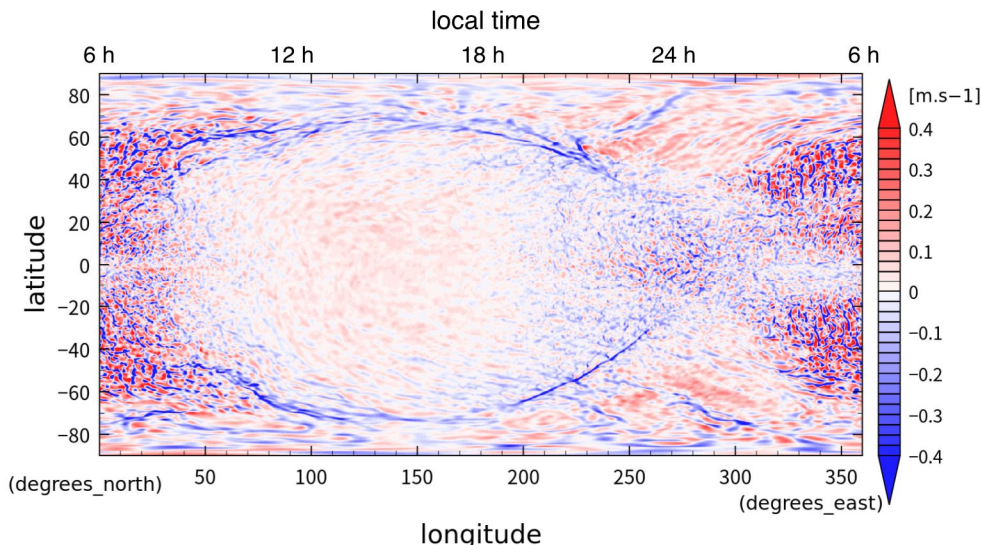


図2：金星 SCALE-GM で計算された高度 60 km の鉛直風分布。太陽加熱は日変化成分を含み、強制安定度は -1.5 K/km である。地方時 20 時から 8 時にかけて鉛直対流が生じている。

一方、計画外の成果として、金星大気循環の自転軸の傾き依存性（季節変化）に関する知見が得られた。金星の自転軸の傾きは約 2.6 度と小さく、至点時に夏半球が受け取る太陽加熱の分点時からの増分は約 4.6% にとどまる（地球は約 40% 増）。それにもかかわらず、AFES-Venus を用いた数値実験の結果から、循環場や温度場に顕著な季節依存性が確認された。その主な特徴は以下の通りである。

- (1) 高度 70 km 付近の中緯度ジェットが、冬半球で夏半球よりも 10 m/s ほど強い（図 3）。
 - (2) 高度 60 km 付近の低緯度の直接循環が、冬半球で拡大強化、夏半球で縮小弱化される。
 - (3) 中高緯度の南北温度傾度および渦熱輸送が、冬半球で大きく、夏半球で小さくなる。
- これらの特徴は、地球の大気循環の季節依存性と定性的に一致している。また、低緯度の直接循環の関係から中緯度ジェットの成因が、地球の亜熱帯ジェットと同じ力学であることが示唆された。今後、こうした季節依存性を考慮することで、近年の探査機や地上望遠鏡による観測で発見されている、金星大気の南北非対称構造の理解に繋がると期待される。

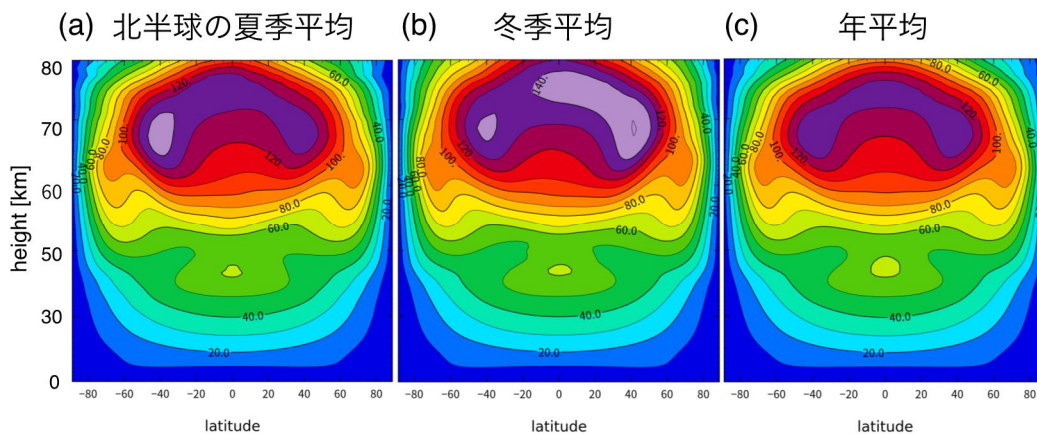


図3：自転軸の傾きを導入した AFES-Venus で計算された東西平均東西風分布。(a)北半球の夏季平均、(b)冬季平均、(c)年平均。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3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 3件）

1. 著者名 櫻村 博基	4. 巻 42
2. 論文標題 金星大気の全球シミュレーション	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本流体力学会 学会誌『ながれ』	6. 最初と最後の頁 290-296
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto Norihiko, Fujisawa Yukiko, Komori Nobumasa, Kashimura Hiroki, Takagi Masahiro, Matsuda Yoshihisa	4. 巻 75
2. 論文標題 Super-rotation independent of horizontal diffusion reproduced in a Venus GCM	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40623-023-01806-7	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 Sugimoto Norihiko, Fujisawa Yukiko, Kashimura Hiroki, Noguchi Katsuyuki, Kuroda Takeshi, Takagi Masahiro, Hayashi Yoshi-Yuki	4. 巻 12
2. 論文標題 Generation of gravity waves from thermal tides in the Venus atmosphere	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-021-24002-1	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12件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

〔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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------