

# 平成 26 年度 地球シミュレータ利用報告 研究成果概要

## 1. 課題名

AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション

Simulations of Atmospheric General Circulations of Earth-like Planets by AFES

## 2. 課題責任者

林 祥介(神戸大学大学院理学研究科)

Yoshiyuki Hayashi

## 3. 課題の目的

地球型惑星の大気、すなわち、惑星半径に比べて薄く、大気層下端が地面によって明確に定義されるという共通性のある大気の大循環の特徴を、統合的な枠組みの上に位置づけることを目指し、地球シミュレータ用に改良がなされてきた大気大循環モデル AFES を共通基盤とし、これに各惑星大気に適した物理過程モジュールを開発導入することでその大循環計算を実現し、その計算結果から大循環の力学構造の理解を進める。

## 4. 今年度当初の研究計画

### 1) 金星大気大循環実験

金星大気大循環の大きな謎であるスーパーローテーションの維持機構を解明する。これまでの研究では、スーパーローテーションの駆動のために強い加熱強制を与え、低解像度モデルを用いて長時間積分する方法が主流であった。しかしながら、それらの先行研究では、金星の大気大循環の表現に大きな影響があると考えられる、雲層付近の大気安定度の低い層の存在は考慮されていなかった。そのような低安定度層の存在で生じる様々な不安定擾乱を調べ、それに伴う運動量や熱の輸送を調べておくことは、現実的な太陽加熱を設定した精密な放射モデルによる金星 GCM の高精度化を実現し、それを用いてスーパーローテーションを再現し、その生成・維持機構を解明する上で避けて通れない過程である。今年度は、これまで開発してきた金星大気用 AFES を用いて、現実的な太陽加熱の存在下での、雲層における中規模擾乱に着目した高解像度の数値実験を行い、そこに発現する波や擾乱の解析、高緯度域における極渦やそれを取り巻く周極帯状低温域(cold collar)の再現可能性、さらにその成因を調べる。また、金星 GCM のさらなる高精度化では、精密な放射過程の開発と導入を進める。

### 2) 火星大気大循環実験

火星大気中に常時浮遊するダストの供給、およびダストストームの発生に寄与する物理過程を明らかにするため、直接観測が困難な中小規模擾乱に伴う風の寄与に注目し、高解像計算で中小規模擾乱を陽に表現する全球火星大気実験を引き続き実施する。これまでに実施してきた実験の結果、乾燥した火星条件で特有の大きな日変化のモデル内での表現が、計算結果に見られる特徴的な渦構造を理解する上で極めて重要であることがわかってきた。今年度は、この日変化の

モデル内表現を掌握し、追実験による詳細なデータ解析を進め、その理解を目指す。

## 5. 研究計画に沿った利用状況

計画に沿って、金星計算においてはニュートン冷却に基づく簡略化した放射過程を用いた高解像度実験を行い、火星計算においては小規模渦のパラメータ依存性を調べるための追実験を行った。また、新しい精密な放射過程の導入に向けた作業を行った。

## 6. 今年度得られた成果、および達成度

### <成果>

昨年度に引き続き、金星大気用 AFES の高精度化を行うとともに、簡略化放射過程による高解像度実験を行った。金星大気中には雲層付近(高度約 45-70 km)に大気安定度の低い領域が全球的に広がっているが、GCM を用いたこれまでの金星大気研究ではこの特徴が無視され、全層にわたって安定成層した大気を基本場とする数値計算が行われてきた。しかしながら、子午面循環の構造や熱潮汐波の鉛直伝播が大気安定度の鉛直分布に強く影響されることは明らかである。また、スーパーローテーションの再現のために、下層で強すぎる太陽加熱を与えることも頻繁に行われてきた。これらに対し本研究では、観測に基づく大気安定度分布を考慮するとともに、日変化成分を含む現実的な値を持つ太陽加熱強制を用いて、そこに発生するスーパーローテーションの力学的安定性に着目した研究を行ってきた。昨年度に、傾圧不安定擾乱の、モデル解像度依存性、安定度依存性、基本場として与えるスーパーローテーション(平均東西風)の緯度分布への依存性を調べる感度実験を行い、雲層付近の弱安定度層の導入が傾圧不安定の発生に本質的に重要であり、傾圧不安定が金星大気中で熱や運動量の輸送に大きく寄与するという結果を得た。今年度はそこから生じる中立波についての解析を行った。その結果、観測と整合的な西進口スビー波と東進ケルビン波に相当する波がモデル中で観測された。これらは現実的な金星 GCM で観測と整合的な中立波を再現した初めての例である。さらに、高緯度域における極渦の構造を解析した結果では、熱潮汐波を含む実験においてのみ、最近の観測と整合的な周極帯状低温域が再現され、平均子午面循環による極域の昇温がその成因である可能性が示唆された。これまで報告されている金星 GCM 研究では現実的な周極帯状低温域の再現例はなく、我々の成果は初の結果であると思われる。また高解像度実験で得られた中小規模擾乱について、運動エネルギーのスペクトル解析を行った結果、金星大気中では地球に比べて発散(重力波)モードがより卓越する可能性が示唆された。本研究で開発している金星 GCM により、雲層付近の大気擾乱の特徴はかなり明らかにすることができるようになったといえる。

火星計算に関しては、昨年度までに行われた我々の高解像度計算では、低緯度の大気運動に多数の小規模渦が存在することが際立った特徴として見出されていた。これらモデルで表現される小規模渦はその大きさが水平解像度に依存しており、モデルが表現できる最小解像度付近で表現される鉛直対流運動が原因となっていると考えられた。このため、この小規模渦の物理的特性を把握することを念頭に、特にパラメタリゼーション依存性を調べるために追実験を実施した。我々のモデルでは陽に表現できない対流運動の効果は、Mellor and Yamada (1982) のパラメタリゼーションによって評価してきた。しかし、このパラメタリゼーションのみでは大気不安定度を十

分には解消できない可能性が考えられた。そこでモデルに乾燥対流調節過程を導入し、計算の過程で生じる不安定成層を 1 タイムステップで中立成層に戻す条件で実験を行った。この実験で表現された低緯度の小規模渦は、その強さが若干弱くなっており、それらが対流運動によって生じるとの考察を支持する。しかし、依然として低緯度循環は滑らかにはならず、際立った小規模渦活動は存在しており、また渦が現れる領域もほぼ変わらないことが確認された。これまでの計算で得られた小規模渦の存在は、現在知られているサブグリッドスケールの対流表現には依存していないことが確認された。逆に、このことは、現存するサブグリッドスケールの対流表現が火星大気の状態を表現できるものとはなっていない可能性を示唆する。

### <達成度>

(年度当初の研究計画を全て達成した場合を 100% / 複数の目標があった場合は、それぞれについて達成度を数値で記載)

金星計算: 60%

火星計算: 50%

金星計算においては、観測と統合的な中立波や高緯度域での周極低温域の再現、運動エネルギースペクトルの初期解析などの重要な知見が得られたものの、精密な放射モデルの開発・導入が遅延したため、放射過程を導入した大規模計算には至っていない。

火星計算においては、パラメタリゼーション依存性を確認するための追実験は実施したものの、詳細な解析はできていない。

## 7. 計算機資源の利用状況

### <計算機資源の利用状況>

(計画的に計算機資源を利用できているか、状況を記載)

おおよそ目的の半分に関しては、計画に沿って利用を進めてきた。

### <チューニングによる成果>

(ベクトル化、並列化チューニング等、計算機資源を有効利用するために行ったこととその効果を記載)

これまでに最適化したコードを使用した。

### <計画的に利用できていない場合、その理由>

金星計算においては放射過程を導入した新しいモデルの開発が完了しておらず、大規模計算への移行が遅延してしまった。

## 8. 新聞、雑誌での掲載記事

特になし

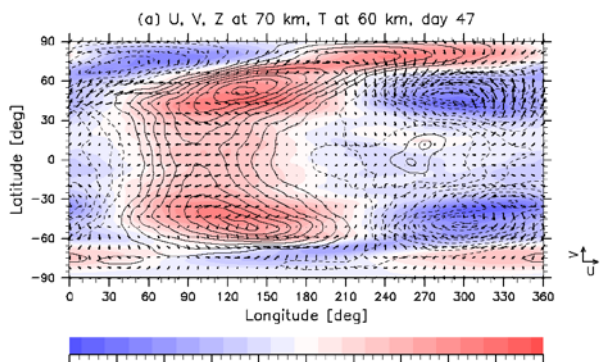
# AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション

林 祥介、神戸大学大学院理学研究科

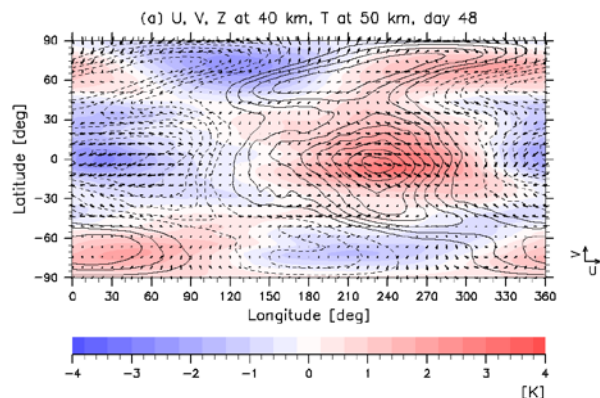
## 金星大気計算

- 観測と整合的な中立波やcold collarの再現
- 運動エネルギースペクトルの初期解析

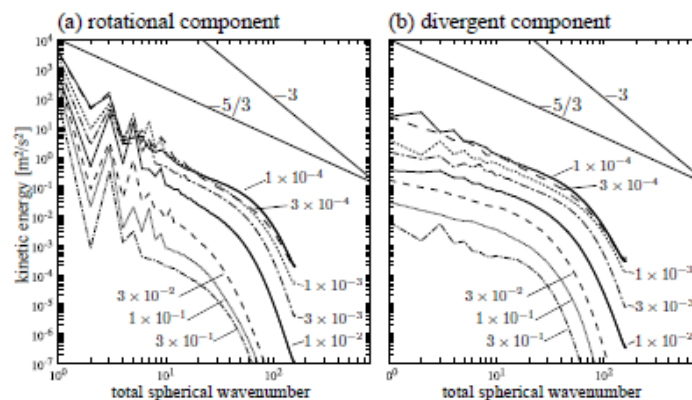
Rossby-type waves at the cloud top level (70km)



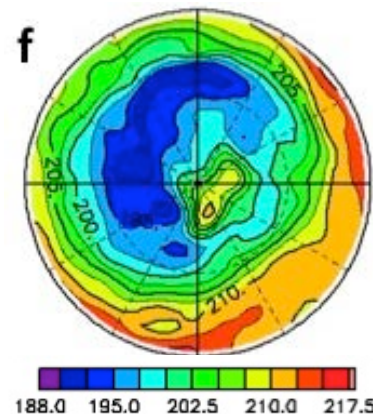
Kelvin-type waves at the cloud bottom level (50km)



Time-averaged kinetic horizontal energy per unit mass per unit wavenumber



Cold collar in the polar region (~68 km)



## 火星大気計算

- 小規模渦のパラメタリゼーション依存性の調査

Vorticity at 4 hPa

(left) no convective adjustment (right) use convective adjustment

