# AFES による金星大気の傾圧不安定に関する数値計算

杉本 憲彦(慶大日吉物理), 高木 征弘(京産大理), 松田 佳久(東京学芸大自然)

金星大気スーパーローテーション中の傾圧不安定を調べるために、大気大循環モデル(GCM)を用いた 数値実験を行った.地球シミュレータ向けに最適化された AFES (Atmospheric GCM For the Earth Simulator)を基に金星大気大循環モデルを新たに開発し、これを用いた高解像度の数値計算を目指し た.現実的な大気安定度の基に、理想化されたスーパーローテーションの初期場を設定し、緯度方向 の温度勾配による緩和強制によってこの場を維持した.この設定で時間発展させると、安定度の比較 的小さい雲層付近で傾圧不安定が発達した.発達するモードの構造は線形安定性解析による先行研究 と整合的である.これらの不安定モードの熱や運動量輸送を議論する.また、ニュートン冷却、太陽 加熱、熱潮汐波への依存性も調べた.

#### 1. はじめに

金星は地球と惑星半径や質量、重力加速度などの点で類似するが、その大気は大きく異なる.濃密な CO₂ より地 表面気圧は92bar に達する.また、このCO₂の温室効果により、地表気温は730Kにもなる.上空には、硫酸の液滴 からなる光学的に分厚い雲層が全球を覆っており、ここでの太陽光の吸収が、大気大循環の重要なエネルギー源と 考えられている.固体金星の自転速度は非常に遅く、地球日で243日かけて一回転する.その一方で、雲層上端の大 気は、自転を追い越す方向に、地表の60倍程度の風速で回転しており、スーパーローテーションと呼ばれている.

このスーパーローテーションは、惑星科学における大きな謎の一つである.金星大気を研究するために、地球の 大気大循環モデルを金星用に改変したものが使用され、ギーラッシュメカニズムや熱潮汐波などが、スーパーロー テーションの生成要因として考えられている.しかしながら、放射伝達過程をはじめとする物理過程は非常に簡略 化されており、金星大気の特性に即した改善が必要である.また、これらの数値実験の解像度は極めて低く、過去 の研究結果が高解像度の数値実験にそのまま適用できるか疑問である.また、地球流体力学で一般的になされるパ ラメータ走査実験(解像度、水平・鉛直の渦粘性、地形、太陽加熱、放射過程など)は、ほとんどなされていない.

AFES<sup>(1)</sup>はAtmospheric general circulation model For the Earth Simulator の略で,地球シミュレータのために 最適化された大気大循環モデルである.地球大気の研究において,様々な成果を挙げており,火星大気への応用で も優れた成果をあげている<sup>(2)</sup>.本研究では,AFESを金星版へと改変し,高解像度のパラメータ走査実験を順次行う. 最終的な目標は,金星のスーパーローテーションの生成メカニズムの解明による,多様な惑星大気大循環の理解で あるが,本発表では予備実験として,金星大気の傾圧モードに関するAFES数値実験の結果<sup>(3)</sup>(5)を示す.

金星の雲層付近では、大気の安定度が低く、高速の東西風が卓越する.このような状況下での線形安定性解析<sup>(6)</sup> では、傾圧モードが存在することが予想されているが、未だ観測による報告事例はない.本研究では、同様の設定 による非線形数値実験により、傾圧モードの有無を調べた.

#### 2. 実験設定

基礎方程式は、シグマ座標系における球面プリミティブ方程式である。物理パラメータは金星の観測値に設定した.また、地球大気の詳細な物理過程を金星大気の簡略化した物理過程に置き換えている。実験設定は基本的に観測データと過去の線形安定性解析<sup>(6)</sup>に基づく.

解像度は T42L60 を用いる.予備的な研究により, T21 では解像度が足りないことが分かっている.また, T63L120 の実験も行い,定性的に T42 と同様の結果が得られることを確認している.鉛直領域は地上から約 120 km で,ほぼ2 km 等間隔格子である.モデルには水平と鉛直の渦粘性を含む.水平の渦粘性は二階の超粘性を設定 し,緩和時間は最大波数に対して0.1地球日である.鉛直の渦粘性係数は0.015m<sup>2</sup>/sである.レイリー摩擦(スポンジ 層)を上層に課すが,帯状平均した東西風に作用させない.最下層には,水平風に対する地表面摩擦を課す.また, 乾燥対流調節を用いて,温度減率が静的に不安定な層を中立に戻すようにしている.

太陽加熱は、観測結果<sup>(7), (9)</sup>に基づいた鉛直プロファイルを用い、東西方向には平均した分布を用いる(放射モデルの設定に依る). ただし、日変化成分(熱潮汐波を励起する成分)も加えられる. 定圧比熱の鉛直分布は一定値にし、 Venus international reference atmosphere (VIRA)のデータ<sup>(9)</sup>を用いた. 赤外の放射過程については、ニュートン 冷却で簡略化し、その係数には放射モデルによる推定値<sup>®</sup>を用いた.これによって、温度場は南北に温度傾度を持つ場に緩和される.東西に一様であるが、南北には傾度を持つ温度場への緩和は、太陽加熱の帯状平均成分を取り除くことと整合的である.太陽加熱を加えた実験では、逆に水平一様な温度場に緩和させた.

時間積分の初期値には、スーパーローテーションの東西風を設定した. 与えた東西風は地上から 70 km まで高度 とともに線形に増加し、70 km より上空で一定値(100 m/s)にし、南北には剛体回転させた. 温度場は東西風と傾度 風バランスするように設定し、静的安定度は観測値を模擬した. 図 1 に初期の東西風および温度の緯度高度断面と 安定度の高度分布を示す. この初期状態から 5 地球年積分した. 積分にはリープフロッグ法を用い、積分刻みは 600s である. アセリンフィルターで計算モードを除いた.



図1:初期場に用いた理想化したスーパーローテーションの帯状平均東西風(a)と温度(b)の緯度高度断面図,及び安定度(c)の鉛直分布.

### 3. コントロール実験の結果

図2 に帯状平均した東西風の時間発展の結果を示す.初期の数日で、安定度の低い雲層付近から不安定擾乱が発達した. その後、安定度の高い上層へと重力波が伝播し、低密度の上層の東西風が減速された. その一方で、数年後には温度場への緩和が進んだため、基本場のスーパーローテーションの構造が維持されている. これらの期間における不安定モードの空間構造を調べるため、安定度の低い高度54km付近に着目した解析を行った.



図2:帯状平均東西風の緯度高度断面図;(a)15日後,(b)30日後,(c)1年後,(d)4年後を示す.

図3に54kmでの水平断面における30日積分後と4年積分後の渦度の擾乱成分を示す.積分開始初期に波数5-6の擾乱が両半球の中緯度付近に発達する.後半でも、北半球で北東から南西に構造が傾いた波数4-5の擾乱が見えるが、これらはほぼ準定常状態を維持しており、時間空間的に変動しているわけではない.これら擾乱の空間構造を調べるために、経度高度断面を調べた.



図3:高度54kmにおける渦度擾乱の水平断面図; (a)30日後, (b)4年後を示す.

図4に南北風と温度擾乱について、30日積分後と4年積分後の北緯45度での経度高度(44-64 km)断面を示す.南 北風と温度擾乱の関係は、渦管が上空西側に傾き、寒気の南下と暖気の北上の典型的な発達する傾圧不安定の構造 をしている.これらは、過去の線形安定性解析の結果<sup>(a)</sup>とも整合的であり、金星に傾圧不安定が存在することを示 唆する結果である.一方、後半の準定常状態でも傾圧不安定の構造を示すものの、その擾乱の振幅は小さい.長時 間積分すると次第に減衰していく様子がわかった.



図4:南北風(左)および温度擾乱(右)の北緯45度での経度高度断面図; (a)30日後, (b)4年後を示す.

図5に東西風と熱の緯度方向のフラックスを30日平均したものを30日積分後と4年積分後について,緯度高度 断面で示す.初期の傾圧擾乱は、有効位置エネルギーを使い、中緯度において東西風速を加速する.一方、後半の時 間では、極向きの運動量と熱の輸送が顕著に見えている.準定常状態では基本場のニュートン冷却による傾圧性の 維持と、振幅を弱めた擾乱による輸送とが釣り合っていると考えられるが、そのフラックスは小さい.また、両時 間ともフラックスの輸送領域は安定度の小さな領域内にとどまっている.下層は密度が大きく、傾圧モードは貫入 しづらい.一方、上空は密度が小さいものの、安定度が高いためやはり貫入しづらいと考えられる.



図5:帯状平均した運動量(左)と熱フラックス(右)の緯度高度断面図; (a)31 日後と(b)1 年後から 30 日平均した.

## 4. ニュートン冷却の温度場を変化させた実験,太陽加熱を加えた実験

前節では、傾圧擾乱が準定常的に発生する一方で、これらは大きな振幅に発達しなかった.そこで、初期場は前節と同様であるが、ニュートン冷却で緩和させる温度場の南北傾度や緩和時間を変化させた実験を行った.図6に傾度を3倍(FT=3.0)にした実験について、東西風の時間発展の結果を積分1年後と4年後について示す.積分1年後には、中緯度の雲層上層にジェット構造が現れた.これは強い南北の温度傾度を反映して、子午面循環が形成されたからと考えられる.一方、積分4年後には、発達した擾乱による赤道方向への東西風の運動量が輸送され、赤道上空に140m/sのジェット構造が現れた.



図6:ニュートン冷却の温度場変化(FT=3.0)実験の帯状平均東西風の緯度高度断面図;(a)1年後,(b)4年後を示す.

図 7 に高度 70km での東西平均風の 20 年間の時間変動を赤道と中緯度(北緯 45 度)について示す.赤道では 150m/s までスーパーローテーションが発達している.一方,中緯度では 100m/s 程度である.緩和させる場の温度 傾度が強くなると東西風は非定常的に時間変動し,コントロール実験で見られた準定常状態とは異なる様相を見せる.図には示さないが,強い温度傾度にバランスする東西風の構造は順圧的に不安定であり,特に高緯度域での順 圧渦の発達をもたらしていることがわかった.



図7:高度70km での東西平均風の20年間の時間変動;赤道(赤線)と北緯45度(黒線).

さらに、太陽加熱を加えた実験も行った.太陽加熱として、東西平均した加熱を加えた実験(Qz=1.0)と、さらに熱 潮汐波も加えた実験(Qt=1.0)を行った.ニュートン冷却で緩和させる温度場は、水平一様にした.これらの設定で も、初期に傾圧擾乱が発生したが、積分後半では、非定常な大規模渦が発生した.図8 に東西風の時間発展の結果 (積分4年後)を示す.東西平均した加熱実験では、中高緯度の雲層上層に140m/sのジェット構造が現れる.その一 方で、熱潮汐波も加えた実験では、ジェットから赤道方向への運動量の再分配が起こっている.また、上空(80km 以上)の加速減速も際立っている.



図8:太陽加熱を加えた実験の帯状平均東西風の緯度高度断面図(4年後);(a)東西平均加熱(Qz=1.0),(b)熱潮汐波も 含めた加熱(Qt=1.0).

東西平均加熱(Qz=1.0)実験について、初期から 30 日平均した帯状平均南北風(a)と鉛直風(b)の緯度高度断面を図 9 に示す.赤道域の太陽加熱による子午面循環の形成がわかる.これによって中高緯度に運ばれた角運動量が中高 緯度ジェット生成の要因であると考えられる.



図9:東西平均加熱(Qz=1.0)実験の帯状平均南北風(a)と鉛直風(b)の緯度高度断面図. 初期から30日平均した.

図10に東西平均加熱実験の東西風と熱フラックスの緯度高度断面(3年積分後から30日平均)を示す.子午面循環の形成によると考えられる上下一対の子午面フラックスが顕著である.一方,熱潮汐波実験では,熱潮汐波の伝播による上空の加速減速,加熱冷却が大きく見えている.図には示さないが,南北温度傾度の強化による傾圧擾乱の間欠的な発生が見られており,コントロール実験とは構造や発生頻度など大きく異なることがわかっている.これらの変動は観測で見られるスーパーローテーション強度の時間変動<sup>(10), (11)</sup>を説明する可能性がある.今後はこれらの太陽加熱を加えた実験についても,様々な擾乱の水平,鉛直構造の解析を行っていきたい.



図 10:帯状平均した運動量(左)と熱フラックス(右)の緯度高度断面図;(a)東西平均加熱(Qz=1.0),(b)熱潮汐波も含めた加熱(Qt=1.0).3 年後から 30 日平均した.

# 5. まとめ

本研究では、金星大気のスーパーローテーションの成因およびその維持機構の解明を目標に、AFES の金星への 適用化と、これを用いた高解像度の数値実験を行った。今回は予備的な実験として、線形安定性解析で示唆された スーパーローテーション中の傾圧不安定を調べるために、初期に現実的な大気安定度のもとに理想化したスーパー ローテーションを仮定し、そこから発達する擾乱の時間発展を調べた。その結果、安定度の低い雲層付近に、未だ 観測では見つかっていない、傾圧不安定が存在することがわかった。

また,ニュートン冷却のパラメータ変化や太陽加熱(熱潮汐波を含む)を加えた実験では、帯状平均東西風に顕著 な緯度高度構造が見られ、南北に温度傾度が大きいニュートン冷却場や熱潮汐波を加えた実験では、赤道上空にも ジェット構造が得られた.

今後は、傾圧不安定擾乱が担う温度や運動量の子午面輸送の定量的な評価を行うとともに、太陽加熱等を加えた 現実的な設定のもとでの静止状態からの長時間数値実験等も並行しながら、高解像度モデルでのスーパーローテー ションの再現とメカニズムの解明を目指す.

### 謝辞

本研究は、地球シミュレータの共同研究プロジェクト「AFES を用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション」の基に行われた.

## 参考文献

- (1) Ohfuchi, W., Nakamura, H., Yoshioka, M.K., Enomoto, T., Takaya, K., Peng, X., Yamane, S., Nishimura, T., Kurihara, Y., and Ninomiya, K., "10-km Mesh Meso-scale Resolving Simulations of the Global Atmosphere on the Earth Simulator, -Preliminary Outcomes of AFES (AGCM for the Earth Simulator)-," Journal of the Earth Simulator, Vol. 1, (2004), pp. 8-34.
- (2) Hayashi, Y.-Y., Takagi, M., and Takahashi, Y.-Y., "Simulations of Atmospheric General Circulations of Earth-like Planets by AFES," Annual report of the Earth Simulator Center April 2009-March 2010, (2010), pp. 33-37.
- (3) Sugimoto, N., Takagi, M., Matsuda, Y., Takahashi, Y.-Y., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., "Numerical modeling for Venus atmosphere based on AFES (Atmospheric GCM For the Earth Simulator)," System Simulation and Scientific Computing, Communications in Computer and Information Science (CCIS), Springer-Verlag, (2012), pp. 70-78.
- (4) Sugimoto, N., Takagi, M., Matsuda, Y., Takahashi, Y.-Y., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., "Toward high resolution simulation for the atmosphere on Venus by AFES (Atmospheric GCM For the Earth Simulator)", Proceedings of International Conference on Simulation Technology, (2012), Paper ID: 73 (8 pages).
- (5) Sugimoto, N., Takagi, M., Matsuda, Y., Takahashi, Y.-Y., Ishiwatari, M., and Hayashi, Y.-Y., "Baroclinic modes in the atmosphere on Venus simulated by AFES," Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.61, (2013) pp. 11-21.
- (6) Takagi, M. and Matsuda, Y., "A study on the stability of a baroclinic flow in cyclostrophic balance on the sphere," Geophysical Research letters, Vol. 33, (2006), L14807, doi:10.1029/2006GL026200 D09112.
- (7) Tomasko, M.G., Doose, L.R., Smith, P.H., and Odell, A.P., "Measurements of the flux of sunlight in the atmosphere of Venus," Journal of Geophysical Research, Vol. 85, (1980), pp. 8167-8186.
- (8) Crisp, D., "Radiative forcing of the Venus mesosphere: I. solar fluxes and heating rates," Icarus. Vol. 67, (1986), pp. 484-514.
- (9) Seiff, A., Schofield, J.T., Kliore, A.J., Taylor, F.W., Limaye, S.S., Revercomb, H.E., Sromovsky, L.A., Kerzhanovich, V.V., Moroz, V.I., and Marov, M.Ya, "Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude," Advances in Space Research, Vol. 5(11), (1985), pp. 3-58.
- (10) Kouyama, T., Imamura, T., Nakamura, M., Satoh, T., and Futaana, Y., "Horizontal structure of planetary-scale waves at the cloud top of Venus deduced from Galileo SSI images with an improved cloud-tracking technique", Planetary and Space Science, Vol. 60, (2012), pp. 207-216.
- (11) Hosouchi, M., Kouyama, T., Iwagami, N., Ohtsuki, S., and Takagi, M., "Wave signature in the Venus dayside cloud layer at 58–64 km observed by ground-based infrared spectroscopy", Icarus, Vol. 220, (2012), pp. 552-560.