

簡易金星版 AFES における運動エネルギースペクトル解析

樫村 博基 (神戸大)・杉本 憲彦 (慶應大)・高木 征弘 (京産大)・松田 佳久 (学芸大)・大淵 濟 (JAMSTEC)・榎本 剛 (京大防災研)・中島 健介 (九州大)・高橋 芳幸 (神戸大)・林 祥介 (神戸大)

1 はじめに

惑星規模の高速東西風「スーパーローテーション」をはじめ、金星大気の力学はほとんど解明されていない。大気循環を理解するために、大気大循環モデル (Atmospheric General Circulation Model; AGCM) による数値シミュレーションも重要である。我々は地球シミュレータ上に最適化された AGCM である AFES (AGCM For the Earth Simulator; Ohfuchi et al. 2004; Enomoto et al. 2008) の簡易な金星版を開発し、金星大気の数値シミュレーションを実施してきた (Sugimoto et al. 2013, 2014ab; Ando et al. 2016)。

本研究では簡易金星版 AFES の高解像度計算における運動エネルギースペクトルを求め、解析する。運動エネルギースペクトルは、惑星スケールからモデルが解像可能な最小スケールまでの運動エネルギー分布を記述する方法である。地球大気のエネルギースペクトルは、航空機観測によって求められ、数千 km から数百 km スケールでは波数に対して -3 乗、数百 km から数 km スケールでは波数に対して $-5/3$ 乗のべき乗則で減衰することが知られている (Nastrom & Gage 1985)。このようなエネルギースペクトル分布は AGCM によるシミュレーションでも再現されている (Takahashi et al. 2006 など)。金星大気シミュレーションのエネルギースペクトルを求めることは、金星大気の力学を考察するために有用だけでなく、比較惑星気象学の観点からも重要である。

2 計算設定・解析手法

本研究で用いる簡易金星版 AFES の計算設定を表 1 に示す。放射冷却過程は簡易なニュートン冷却であるが、その基準温度場は、近年の電波掩蔽観測の結果を反映して、高度 55–60 km に低安定度層ができるように工夫されている (図 1a)。初期値として剛体回転の高速東西風 (図 1b) と、それに傾度風平衡する温度場を与える。この設定で 4 地球年の時間積分を実施し、最後の 1 地球年を解析する。なお、本計算では惑星の自転方向は地球と同じにしている。

表 1 本研究の簡易金星版 AFES の計算設定

水平解像度	T159 (約 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ 格子)
鉛直解像度	L120 ($\Delta z =$ 約 1 km; σ -座標)
太陽加熱	南北差・日変化あり
放射冷却	水平一様なニュートン冷却 (低安定度層を導入)
地形	なし
乾燥対流調節	なし
雲・湿潤過程	なし
水平超粘性	∇^4 (切断波数の緩和時間は 0.01 地球日)
鉛直渦粘性	$0.15 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$
スポンジ層	80 km 以上に設置

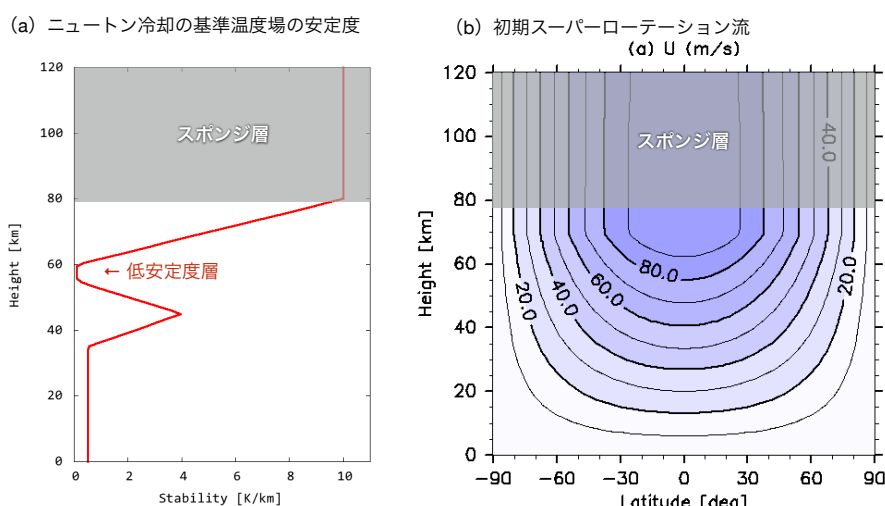


図 1 (a) ニュートン冷却の基準温度場の安定度分布. (b) 初期値のスーパーローテーション流.

水平運動エネルギースペクトルの計算は Koshyk & Hamilton (2001) に従う. すなわち, 鉛直渦度と水平発散の球面調和関数展開の係数をそれぞれ ζ_n^m と D_n^m としたとき, 単位波数・単位質量あたりの運動エネルギー E_n^{total} は

$$E_n^{\text{total}} \equiv \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n (\zeta_n^m \zeta_n^{m*} + D_n^m D_n^{m*}) \quad (1)$$

で表される. ただし, a は惑星半径, m , n はそれぞれ東西波数, 全波数を表し, $*$ は複素共役を表す. また, エネルギースペクトルの回転成分 E_n^ζ および発散成分 E_n^D はそれぞれ

以下で定義される。

$$E_n^\zeta \equiv \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n \zeta_n^m \zeta_n^{m*} \quad (2)$$

$$E_n^D \equiv \frac{a^2}{2n(n+1)} \sum_{m=-n}^n D_n^m D_n^{m*} \quad (3)$$

3 結果・考察

まず、時間・東西平均した東西風速の緯度高度分布および雲頂高度（約 65 km）での緯度分布を図 2 に示す。強いスーパーローテーション流が維持されており、雲頂高度での風速分布は、過去の観測例（Taylor 2010）と類似している。この点から、本計算で得られた風速場は、金星大気の循環場をある程度再現していると期待される。

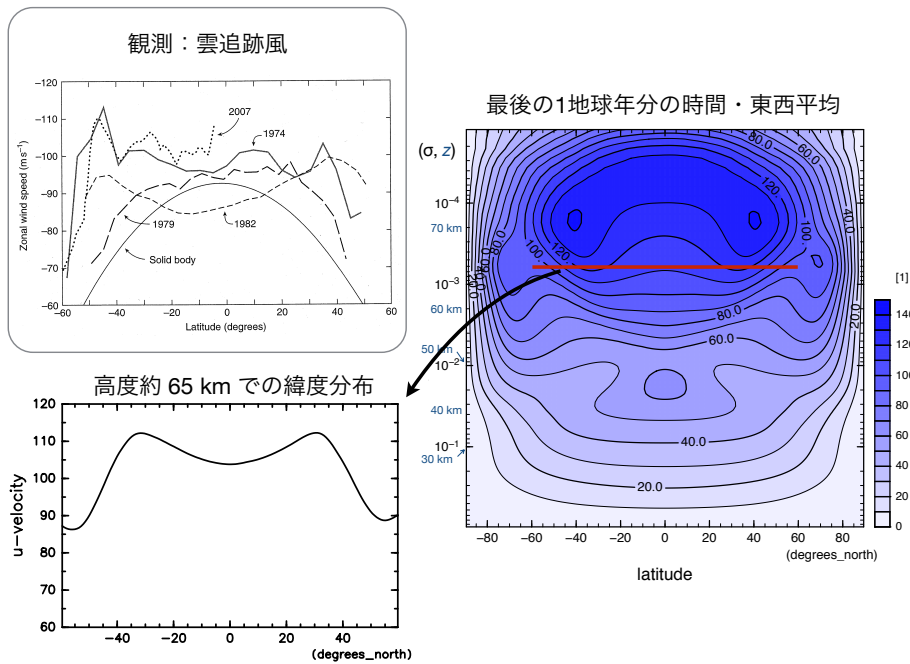


図 2 時間積分 4 年目の時間・東西平均東西風の緯度高度分布と高度約 65 km の緯度分布。囲いの中は過去の観測例（雲追跡風, Taylor 2010）。

次に、運動エネルギースペクトルを図 3a に示す。全波数に対するエネルギーの依存性の傾きは $-5/3$ が顕著である。特に高度 57 km から 73 km で、全波数 10 から 45 すなわち 4,000 km から 900 km のスケールで、傾きが $-5/3$ によく一致している。回転成分（図 3b）は高度 57 km から 73 km では傾きが $-5/3$ に近いが、高度 40 km では -3 乗の

傾きで減衰している。一方、発散成分（図 3c）は低波数側まで $-5/3$ の傾きを示しており、その大きさは回転成分と同等もしくはそれ以上となっている。これらは、地球大気では見られない特徴である。

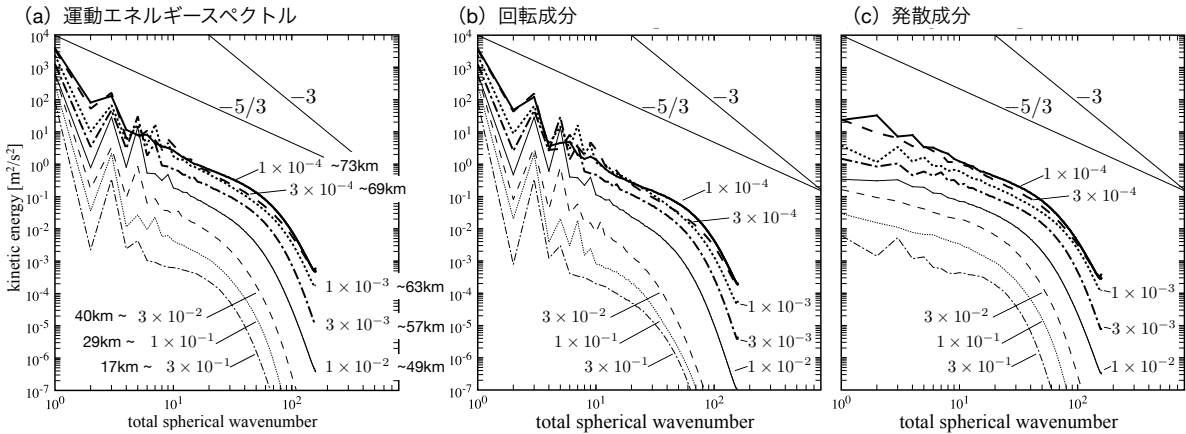


図 3 (a) 運動エネルギースペクトル (b) 回転成分 (c) 発散成分. 時間積分 4 年目を時間平均した値.

全体に対する発散成分の割合を詳しく調べるため、その割合 (E_n^D/E_n^{total}) の波数高度分布を求めた (図 4a). 発散成分の割合は高度約 60 km で高波数側 ($n = 20$ から 80 程度) で低くなっており、この高度より上方および下方では徐々に発散成分の割合が高くなっている。これは、地球設定の AFES による計算結果 (Takahashi et al. 2006) から求めた同様の図 (図 5) において、気圧高度 500 hPa 付近で見られる特徴と同じであり、重力波の上方伝播を示唆している。これより、金星大気でも高度 60 km 付近からの重力波の上方伝播が類推される。

さらに、各高度の平均密度をかけたエネルギースペクトル (図 4b) は、全波数 10 以上の範囲では、高度 60 km 近辺で、最大となっている。このように、波の励起高度の運動エネルギーが他の高度よりも大きいので、下方へ伝播した重力波も、伝播先の発散成分の割合を増加させうる。ゆえに本研究の結果は、金星では高度約 60 km つまり雲層上端付近で、重力波が励起され、上下に伝播していることを示唆している。

図 4c は、本計算での東西平均した極赤道間の温度差 (実線)、加熱差 (点線) および全球平均の静的安定度 (破線) の高度分布を表している。重力波が励起されていると思われる高度 60 km 付近では、温度差が大きく、安定度が低くなっている。これは傾圧不安定の発生に有利な条件である。実際、Sugimoto et al. (2014a) では本研究と同じ簡易金星版 AFES の低解像度計算において、傾圧不安定が生じることが報告されている。よって、

本研究で見られたエネルギーの発散成分の鉛直構造には、傾圧不安定によって励起された重力波の上下伝播が寄与している可能性がある。

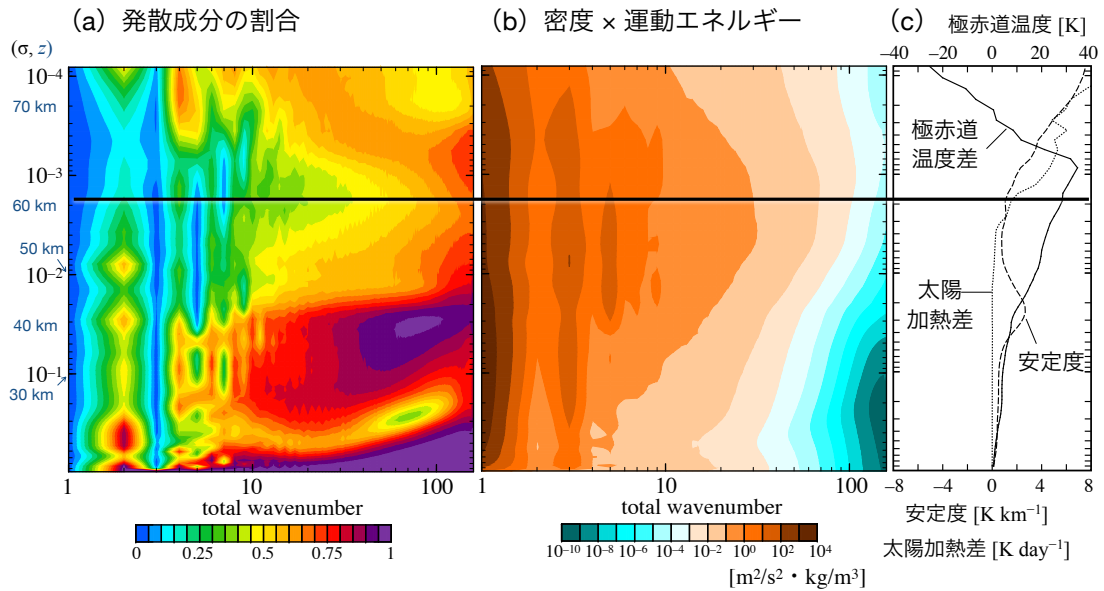


図4 (a) 運動エネルギースペクトルの発散成分の割合 (b) 各高度の平均密度をかけたエネルギースペクトル (c) 極赤道間の温度差 (実線) 太陽加熱差 (点線) および静的安定度 (破線). 黒い水平線は発散成分の割合が、極小となっている高度を表す。

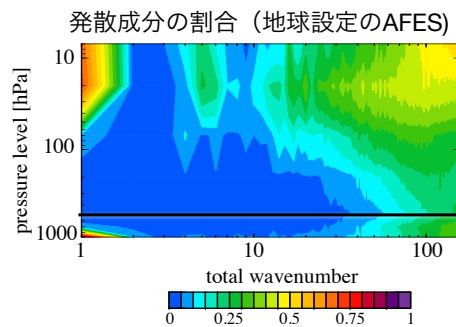


図5 図4aと同様。ただし、地球設定のAFESの場合。

謝辞

北村祐二博士、石岡圭一博士、岩山隆寛博士に多くの助言を頂きました。また、本研究は地球シミュレータ利用課題『AFESを用いた地球型惑星の大気大循環シミュレーション』および『AFESを用いた火星・金星大気の高解像度大循環シミュレーション』のもとで実施しました。

参考文献

- Ando, H., Sugimoto, N., Takagi, M., Kashimura, H., Imamura, T., & Matsuda, Y. (2016). The puzzling Venusian polar atmospheric structure reproduced by a general circulation model. *Nature Communications*, **7**, 10398.
- Enomoto, T., Kuwano-Yoshida, A., Komori, N., & Ohfuchi, W. (2008). Description of AFES 2: Improvements for High-Resolution and Coupled Simulations. In Hamilton, K. & Ohfuchi, W. (Eds.), *High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean* (pp. 77–97). Springer New York.
- Koshyk, J. N. & Hamilton, K. (2001). The horizontal kinetic energy spectrum and spectral budget simulated by a high-resolution troposphere-stratosphere-mesosphere GCM. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**(4), 329–348.
- Nastrom, G. D. & Gage, K. S. (1985). A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **42**(9), 950–960.
- Ohfuchi, W., Nakamura, H., Yoshioka, M. K., Enomoto, T., Takaya, K., Peng, X., Yamane, S., Nishimura, T., Kurihara, Y., & Ninomiya, K. (2004). 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*, **1**, 8–34.
- Sugimoto, N., Takagi, M., Matsuda, Y., Takahashi, Y. O., Ishiwatari, M., & Hayashi, Y.-Y. (2013). Baroclinic Modes in the Atmosphere on Venus Simulated by AFES. *Theoretical and Applied Mechanics Japan*, **61**, 11–21.
- Sugimoto, N., Takagi, M., & Matsuda, Y. (2014a). Baroclinic instability in the Venus atmosphere simulated by GCM. *Journal of Geophysical Research-Planets*, **119**(8), 1950–1968.
- Sugimoto, N., Takagi, M., & Matsuda, Y. (2014b). Waves in a Venus general circulation model. *Geophysical Research Letters*, **41**(21), 7461–7467.
- Takahashi, Y. O., Hamilton, K., & Ohfuchi, W. (2006). Explicit global simulation of the mesoscale spectrum of atmospheric motions. *Geophysical Research Letters*, **33**(12), L12812.
- Taylor, F. W. (2010). *Planetary Atmospheres*. Oxford University Press.