

[共同研究成果]

水惑星条件における傾圧不安定波動に対する 海水面温度上昇の影響

小玉知央 岩崎俊樹
東北大学大学院理学研究科

地球温暖化時の傾圧不安定波動の活動を理解するため、水惑星と呼ばれる理想化した条件の下で SST（海水面温度）を上昇させる数値実験を行った。高緯度の SST を上昇させた場合、対流圏下部で極・赤道間の温度差が小さくなり、傾圧不安定波動は衰退した。一方、SST を全球一様に上昇させた場合、対流圏上部で極・赤道間の温度差は大きくなったが、傾圧不安定波動は衰退した。SST 一様上昇時の結果は傾圧不安定波動の理論から予想される結果に反しており、結果の解釈が今後の課題である。

1. はじめに

CO₂ に代表される温室効果気体の増加によって、対流圏（地表～高度 10km 程度）は温暖化しつつあると言われている。過去に我々が行った将来気候の数値シミュレーションによると、日本を含む中緯度の気候を支配する高・低気圧の活動は温暖化によって衰退すると予測された^[1,2]。しかし、温暖化による高・低気圧の活動の衰退は、以下に述べる理由で解釈が難しい。

将来の気温上昇の大きさは対流圏全体で一様ではなく、熱帯の対流圏上部で特に大きいことが知られている。もともと対流圏の気温は熱帯で高く高緯度で低いため、温暖化によって対流圏上部で極・赤道間の温度差が拡大することになる。一方、高・低気圧の活動は傾圧不安定波動と呼ばれる現象として理解されている。傾圧不安定波動とは、（太陽放射加熱の緯度依存性に起因する）極・赤道間の温度差を解消しようと起こる運動である。従って、温暖化によって対流圏上部で極・赤道間の温度差が拡大すれば、傾圧不安定波動、つまり高・低気圧の活動は活発になると考えるのが自然である。しかし、実際には高・低気圧の活動は衰退するという結果を得ており、傾圧不安定波動の理論とは矛盾しているように見える。

そこで本研究では、傾圧不安定波動の活動に対する極・赤道間の温度差の影響を、水惑星という単純化した条件の下で数値実験を行って調べた。水惑星とは地形がなく、表面が全て海で覆われた惑星のことである。このような理想化した条件を用いることで、地形や海陸分布の影響を取り去った純粋な傾圧不安定波動の活動を見ることができる。

2. 方法

図 1 に数値実験のイメージを示した。実験は、数値モデルに与える SST（海水面温度）の分布を変えることで極・赤道間の温度差を調整することができる、という考え方で行った。初めに基準となる SST 分布を与えた基準実験を行った^[3]。次に基準実験の SST に対して高緯度の SST のみ 3K 上昇させる実験（高緯度+3 実験）を行った。この実験は温暖化による海水の減少とそれに伴う気温上昇を意識した実験であり、対流圏下部の極・赤道間の温度差を小さくすることができる。さらに、基準実験の SST

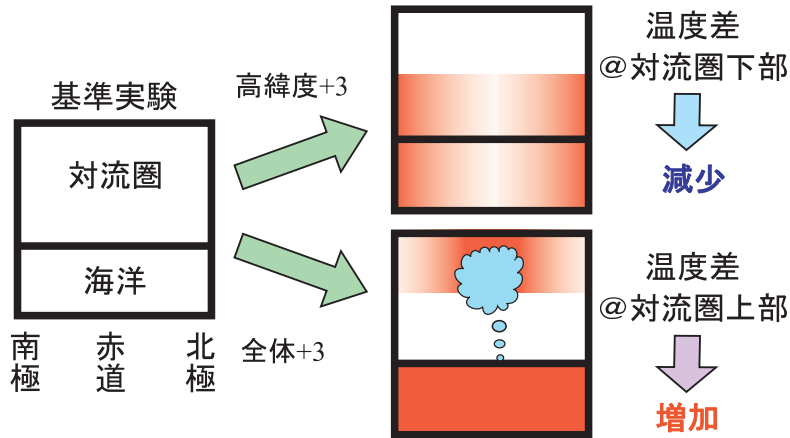


図1：実験のイメージ。赤色は 度上昇、特に極・赤道間の温度差が変化する領域を表す

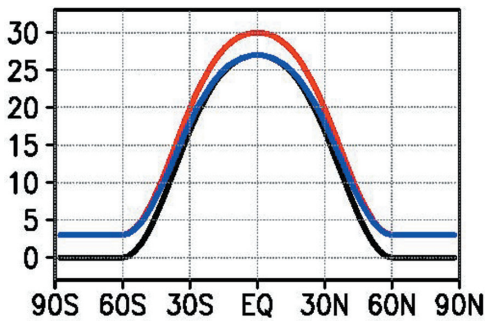


図2：SST（海水面温度）の分布[°C]。
 黒：基準実験
 青：高緯度+3実験
 赤：全体+3実験

分布を全球一様に 3K 上昇させる実験（全体+3 実験）を行った。この実験では、積雲対流の活発化によって、実際の温暖化のように熱帯の対流圏上部で気温上昇が大きくなることが期待される。従って、対流圏上部の極・赤道間の温度差を大きくすることができる。このような 2 種類の実験を行うことで、対流圏上部・下部それぞれの極・赤道間の温度差と傾圧不安定波動の活動との関係を調べた。具体的に用いた SST 分布は図 2 の通りである。

実験には気象研究所で開発された大気大循環モデル MRI/JMA98^[4,5]を用いた。水平解像度は T42（2.8° の緯度経度格子に相当）、鉛直層数は 45 層で 0.01hPa（高度約 80km）までカバーしている。下部境界条件として図 2 に示した理想化した SST 分布を与えた。SST 分布も含めた全ての条件は南北対称、東西一様で与え、太陽放射は春分条件で固定した。積分は 4 年間行い、後半 3 年分の結果を解析に用いた。解析は等温位面上で質量重み付き東西平均^[6]を行った。

3. 結果と考察

図 3 は気温、図 4 は東西風について、東西平均を行った南北・鉛直分布を図示した。事前に意図した通り、高緯度+3 実験では高緯度の対流圏下部で気温上昇が大きく、

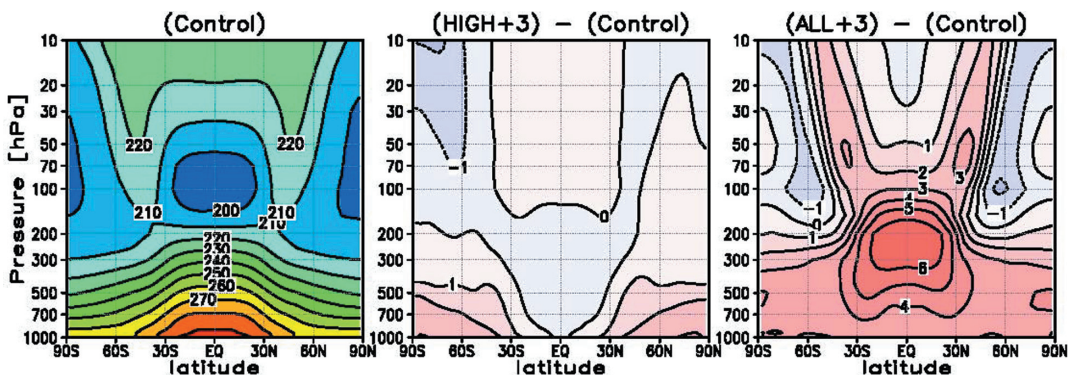


図3：東西平均した気温[K]。(左) 基準実験、(中央) 高緯度+3 実験の基準実験に対する変化、(右) 全体+3 実験の基準実験に対する変化。

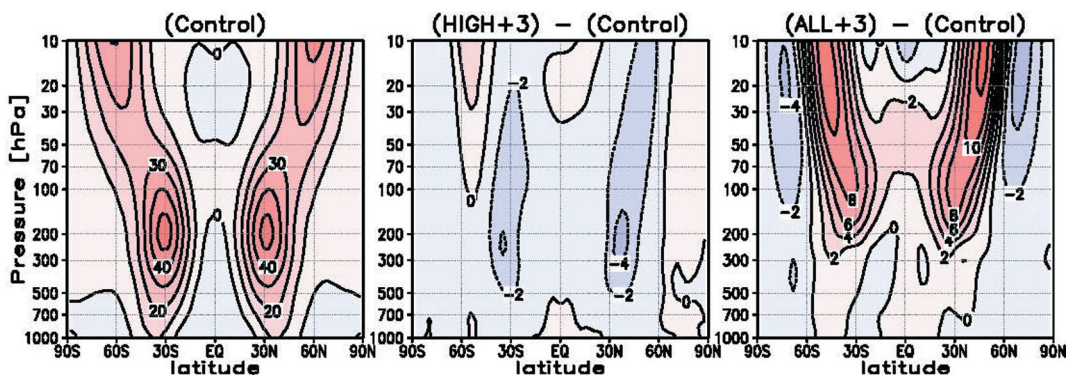


図4：図3と同様、ただし東西平均した東西風[m/s]。

極・赤道間の温度差は対流圏下部で縮小した。従って、(気温の水平微分は東西風の鉛直微分に比例するという) 温度風の関係から、東西風は中緯度の対流圏・成層圏全体で弱まった。次に全体+3 実験では熱帯の対流圏上部で気温上昇が大きく、極・赤道間の温度差は対流圏上部で拡大した。従って、東西風は中緯度の対流圏上部、成層圏で強まった。

以上のような気温・東西風の場合のもとで、傾圧不安定波動(高・低気圧)の活動がどう変化したかを調べた。図5は波動活動の指標の一つである渦運動エネルギーを明示したものである。高緯度+3 実験では渦運動エネルギーは対流圏全体で減少した。全体+3 実験でも渦運動エネルギーは全体的に減少し、かつ分布が高緯度・極側へ移動した。

高緯度+3 実験における波動活動の変化については解釈が容易である。すなわち、対流圏下部で極・赤道間の温度差が小さくなることで、傾圧不安定波動の理論通り波動活動は弱まった。一方で全体+3 実験の結果については、対流圏上部における極・赤道間の温度差の拡大と波動活動の減衰が同時に起こっており、温暖化実験の場合と同様に解釈が難しい。

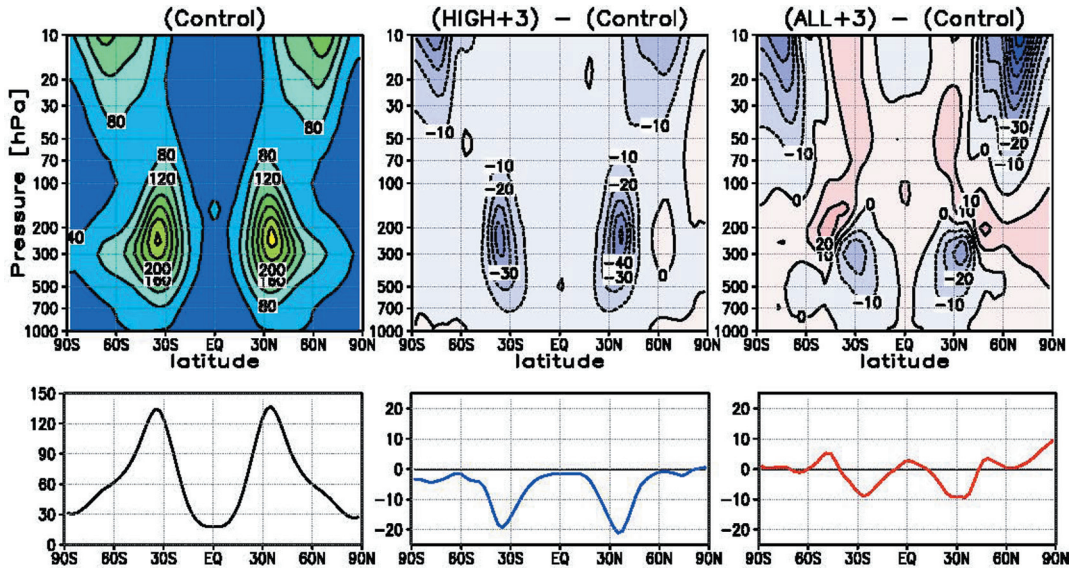


図 5 : 図 3 と同様、ただし (上) 渦運動エネルギー $[m^2/s^2]$ 、(下)鉛直積算した渦運動エネルギー $[10^4 J/m^2]$ 。

ここでは詳述しないが、全体+3 実験の結果を解釈するために、(1)傾圧性、(2)対流圏界面の高さ (=対流圏の厚さ)、に注目して解析を行った。傾圧性とは線形理論の下で波動がどれくらいの時間スケールで増幅するかを表した量で、極・赤道間の温度差と大気の安定度の関数である。対流圏界面の高さは、過去の研究から高くなれば高くなるほど波動活動が弱まることが予想される。解析の結果、成層の安定化によって対流圏下部で傾圧性が弱まったことが分かった。しかし傾圧性の弱まりは波動活動の衰退を説明できるほど大きくなく、傾圧性の変化はあまり重要ではないことが示唆された。現在は対流圏界面の高さが重要であるという作業仮説を立て、検証を行っているところである。

4. まとめと今後の見通し

傾圧不安定波動の活動に対する極・赤道間の温度差の影響を調べるため、水惑星を用いた数値実験を行った。高緯度の SST を 3K 上昇させた高緯度+3 実験では、対流圏下部で極・赤道間の温度差が縮小し、波動活動は減衰した。一方、SST 全体を 3K 上昇させた全体+3 実験では、対流圏上部で極・赤道間の温度差が拡大したにもかかわらず、波動活動は減衰した。全体+3 実験の解釈が今後の課題である。

別の大きな問題として、今回使用したモデルの水平解像度は T42 (2.8°格子に相当) であるが、傾圧不安定波動をきちんと表現するためには水平解像度が不十分である。これから行う予定である水平解像度 T63 (1.9°格子に相当)、T106 (1.1°格子に相当) の計算では、計算時間とメモリ使用量を考えると、スーパーコンピュータはますます必要不可欠なものとなってくる。また、結果の信頼性を高めるためにはより長い期間の積分も必要である。従って、今後も積極的にスーパーコンピュータの資源を使う計画である。

気候学は学問的な興味にとどまらず、地球温暖化問題など社会的な要請が強い分野でもある。近年、気候の研究で用いられる数値モデルは高解像度化、精密化が進んでおり、必要な計算量も膨大になってきている。気候の研究者にとって大型計算機は必要不可欠であり、東北大学情報シナジーセンターには今後の大型計算機の充実に大きな期待を寄せている。

謝辞

本研究は東北大学情報シナジーセンター大規模科学計算システムとの共同研究「気候モデルの高速化に関する研究」として行われた。使用した気候モデルは気象研究所から貸与されたものである。また、21世紀 COE プログラム「先端地球科学技術による地球の未来像創出」の支援を受けた。

参考文献

- [1] 小玉知央、岩崎俊樹、柴田清孝、行本誠史 (2006), 成層圏平均子午面循環に対する CO₂ 増加の影響, 東北大学情報シナジーセンター広報, **39**, 7-14.
- [2] Kodama, C., T. Iwasaki, K. Shibata and S. Yukimoto (2007), Changes in the stratospheric mean meridional circulation due to increased CO₂ -Radiation and sea surface temperature-induced effects, *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2006JD008219.
- [3] Neale, R. B. and B. J. Hoskins (2000), A standard test for AGCMs including their physical parametrizations: I: The proposal, *Atmos. Sci. Lett.*, **1**, 101-107.
- [4] Shibata, K, H. Yoshimura, M. Ohizumi, M. Hosaka and M. Sugi (1999), A simulation of troposphere, stratosphere and mesosphere with an MRI/JMA98 GCM, *Pap. Meteor. Geophys.*, **50**, 15-53.
- [5] Yukimoto S., A. Noda, A. Kitoh, Y. Kitamura, M. Hosaka, K. Shibata, S. Maeda and T. Uchiyama (2001), The New Meteorological Research Institute Coupled GCM (MRI-CGCM2) -Model climate and variability-, *Pap. Meteor. Geophys.*, **51**, 47-88.
- [6] Iwasaki (1989), A diagnostic formulation for wave-mean flow interactions and Lagrangian-mean circulation with a hybrid vertical coordinate of pressure and isentropes, *J. Meteor. Soc. Japan*, **67**, 293-312.