水惑星条件下における

海面水温変化に対する極端現象の応答

Sensitivity of extreme events to SST patterns in Aqua-Planet Experiments

北海道大学大学院工学院	○学生員	一瀬輪子 (Rinko Ichinose)
北海道大学大学院工学院	学生員	北野慈和 (Yoshikazu Kitano)
北海道大学工学研究院	正 員	山田朋人 (Tomohito Yamada)

1. はじめに

気 候 変 動 に 関 す る 政 府 間 パ ネ ル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)第5次報告書 によって、将来の地球温暖化による気温上昇の程度は北 半球の高緯度の対流圏下部、熱帯の対流圏上部で特に大 きいことが知られている. 各国の研究機関によって全球 気候モデル(GCM)を用いた将来予測が行われているが, 同一の気候シナリオにおいてもモデルによって気候感度 の相違が見られる.特に、全球平均地表面温度上昇の程 度と,南北間の気温上昇の差による傾圧性の変化は中緯 度における極端現象の発生頻度の将来変化に大きく寄与 していることが考えられる.本研究では、これらのパラ メータの将来変化の影響を解釈するため、海面水温 (SST: Sea Surface Temperature)の緯度分布を変化させ, GCM を用いた数値実験を行った.実験には、気温変化 の影響の簡潔な考察が可能である水惑星実験条件を利用 した. 水惑星とは、地球表面から陸地、海氷を取り除き、 海のみに覆われていると理想化した惑星である.

水惑星条件実験は単純な境界条件を持つため、モデル の特性や条件設定の比較に適している.このため、Haiyang et al.¹⁾はタイムステップや水平解像度の違いによる 降水量の特性を観察する水惑星実験を行った.また東西 一様の SST を有する特徴を利用し、Hayadhi and Sumi²⁾ は水惑星条件下において積雲対流の集団運動に起因する 30-60 日変動の調査を行った.Hu et al.³⁾は地形条件のな い水惑星において、現実の観測結果に類似した大気ブロ ッキング現象が発生し、ブロッキング現象の生成・維持

表-1 AGCM の条件設定.

水平解像度	T42
	(緯度2.8°, 経度1.67°四方)
鉛直解像度	10hpaまで20層(σ座標系)
解析対象期間	5年
スピンアップ時間	1年
基礎方程式的	連続式,運動方程式,熱
	力学式,水蒸気保存則
積雲対流スキーム	Arakawa and Schubelt ⁵⁾
鉛直対流スキーム	Mellor and Yamada ⁶⁾

に緯度方向の温度勾配が不可欠な要素であることを示した. Kodama and Iwasaki⁴⁾は緯度方向の勾配が異なる SST を与えた水惑星実験によって,ストームトラックの極方向へのシフトなどの温暖化実験の物理過程についてエネルギーサイクルを用いて説明した.

本研究では、現実の SST に近似させた基準 SST、基 準 SST に対し全緯度について気温を上昇させた全緯度 +SST、高緯度における SST のみを上昇させた高緯度+ SSTを設定し、これらを下部境界条件として与えた.本 研究の目的は、温度上昇の程度、南北温度勾配の変化と いうパラメータが中緯度地域における極端現象の発生頻 度に与える影響について、考察を行うことである.その ために複雑な境界条件を持たず、現象の物理的理解が容 易である水惑星条件下を利用した.第2章に実験設定、 第3章に実験結果、第4章にまとめと今後の展望を記す.

2. 実験設定

本実験では MIROC(Model for Interdisciplinary Research on Climate)のバージョン 5.7 をもとに,水惑星実験を可 能とさせた GCM を利用した. **表**-1 に数値実験の設定 を示す.水平解像度は緯度 2.8°×経度 1.67°, 鉛直解 像度は地表面 1000hPa から 10hPa まで 20 層とした.基 礎方程式には極座標系に変換した運動方程式,連続式, 熱力学式,水蒸気保存則を含む.



図-1 SST 分布の設定. 黒実線が基準実験, 色実線が 全緯度+実験, 色破線が高緯度+実験を示す. SST 分 布は東西一様, 赤道に対して南北対称とした.

平成28年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第73号



図-2 東西方向に帯状平均した(上)気温[K],(中)傾圧性[K/deg],(下)東西風[m/s]. 左から基準実験,全緯度+ 3℃,全緯度+6℃実験,高緯度+3℃,高緯度+6℃実験の結果.+実験については基準実験との差を示し,図中の緑 線は基準実験の等値線である.

下部境界条件として,東西一様で,赤道に対し南北対称の SST を与えた.基準実験の SST には現実の東西平均 SST 分布を以下の近似式で示した Qobs SST(Neale and Hoskins⁷⁾)を用い,全緯度について温度上昇させた全緯度+SST,高緯度のみ温度上昇させた高緯度+SST を作成した.

$$|\phi| < \frac{\pi}{3} \quad \text{icovc},$$

$$sst(\phi) = (27 + \delta) - \frac{27 - \gamma}{2} \left[\sin^2(\frac{3}{2}\phi) + \sin^4(\frac{3}{2}\phi) \right]$$
(1)

 $|\phi| \ge \frac{\pi}{3}$ について, $sst(\phi) = \phi + \gamma$

ここで¢は北極からの緯度変化(°)を示す.上昇温度は 1から6℃まで1℃ずつ変化させ、基準実験を含め、図-1に示される合計13種類のSSTを作成した.SST以外 の条件は各実験で同一とし、およそ南北対称の太陽放射 を与えるため春分に近い3月20日の放射条件を用い、 時間経過によらず季節変化を固定した.スピンアップ期 間を1年設け、以降5年間についての結果を解析に用い た.

3. 実験結果

図中の表記では,基準実験を黒い実線,全緯度+実験を 実線,高緯度+実験を破線で表記する.また,南北半球 での結果の相違が少ないため,北半球の結果についての み示した.

(1)基本場

Kodama and Iwasaki⁴⁾にならい,解析手法には Iwasaki⁸⁾ によって提唱された等温位面上における質量重み付き帯 状平均(MIM: Mass-Weighted Isentropic zonal Mean)を利 用した. 質量荷重を考慮し, 温位座標上で物理量を平均 する解析手法であり, 下部境界条件を正しく扱うことが できるという利点がある.

図-2 は帯状平均した気温,傾圧性,東西風の図である.全緯度+,高緯度+実験については基準実験との差 を示す.ここで傾圧性は等圧面上における温度の緯度変

$\ell(\partial T/\partial \phi \circ \pi)$ で表される. T は気温を示す.

全緯度+実験について、まず全緯度の SST が上昇し たことにより、対流圏全体の温度上昇が見られる.特に 赤道上の積雲対流の活発化に伴う水蒸気凝結の顕熱の増 加による、対流圏上層部の温度上昇が大きい.この上昇 により中緯度地域では対流圏上層部以上で傾圧性が増加 するが、一方、赤道上での凝結高度が上層に移動するた めか、下層部の低緯度よりで減少する.この分布に東西 風分布が類似し、中緯度上層で強化、対流圏では弱化、 さらにピークは高緯度側にシフトする.

高緯度+実験について,高緯度の海表面での気温上昇 が大きく,低緯度側ではむしろ温度低下が見られる.こ のため中緯度地域の対流圏では傾圧性が弱化,東西風も 伴って弱化,ピークが低緯度側へ移動する.

(2)降水量

図-3 に 5 年平均日積算降水量(mm/day)についての帯 状平均値の緯度方向の分布を示す.各実験において,赤 道上の上昇気流,活発な積乱雲の生成による降水量の突 出,下降気流地帯の亜熱帯高圧帯での落ち込み,中緯度 地域での温帯低気圧に伴う雨による極大といった現実大 気に則した分布が得られた.

全緯度+実験では,基準実験に比べ赤道上での降水量 が大きく,温帯での極大が高緯度側に移動する傾向が見 られる.これは,図-2(a)に見られた赤道上の積雲対流強 化により降水量が増加,また,この効果によりハドレー 循環が強化され,下降域が全体として高緯度側へ移動し たことが原因ではないかと思われる.

高緯度+実験では反対に,基準実験に比べ赤道上での 降水量は小さく,温帯での極大は低緯度方向に移動した. また全緯度+,高緯度+の両実験について温帯の極大値 は増加する.これらの傾向は温度上昇が大きいほど顕著 に現れる.

図-4(a)に北緯 30~40°において 5 年間(1800 日)につ いて各グリッドの降水量を昇順に並び替え,降水量に対 する発生日数を示した片対数図を示す.また,図-4(b) に降水量の平均値と各グリッド 1800 日間の値について 標準偏差の散布図を示す.基準実験と比較して,全緯度 +実験では発生最大降水量は大きいが,無降雨降水に近



図-3 5年平均日積算降水量の帯状平均値(mm/day). 中緯度における極大は全緯度+実験で高緯度側,高 緯度+実験で低緯度側へシフトする.

い降水量が発生する頻度が多く,対象の緯度における平 均値は基準実験よりも小さい傾向がある.基準実験に比 べ,降水量の総量は減少するが,日々の降水量の変動が 増大する傾向があることがわかる.

高緯度+実験では、無降雨降水の発生日数,発生最大 降水量ともに基準実験と大きく変化しないが、対象の緯 度における平均値は大きい.基準実験と比較して降水の 総量が増加する傾向がある.

図-4(c)(d)に北緯 40~50°についてそれぞれ図-4(a)(b)と同様に降水量について解析した結果を示す. 全緯度+実験においては、全体として降水量が増加し、 平均値の増加に伴って標準偏差が増加する.高緯度+実 験では、降水量に対する発生日数の変化が小さく、平均 値、標準偏差ともに基準実験と近い値となった.

(3)エネルギー収支

Lorenz⁹は、帯状有効位置エネルギー A_z 、帯状運動エ ネルギー K_z 、渦有効位置エネルギー A_E 、渦運動エネル ギー K_E の4つのボックスからなる大気大循環のエネル ギー変換に関するエネルギーボックスを導いた.エネル ギーボックスについて、IwasakiはMIMを利用した帯状 平均に基づいてエネルギー方程式を導出した.このボッ クスでは、等温位面上で帯状平均した熱力学式が熱の渦 輸送の項を含まないため、 A_z 、 A_E 間の変換がない.代 わりに K_z 、 A_E 間の変換が生じている.

図-6 に K_Z , K_E , 変換量 $C(K_Z \rightarrow A_E)$, $C(K_Z \rightarrow K_E)$ の緯 度分布を示す.帯状運動エネルギーは南北の温度勾配に よって生成されるため,中緯度地域で傾圧性が増加する 全緯度+実験では増加,傾圧性が減少する.高緯度+実 験では減少がそれぞれ生じた.東西風の強弱はこの K_Z の増減に従う.



図-4 (左)日積算降水量に対応する発生日数と(右)日積算降水量の平均値(横軸)と標準偏差(縦軸). (a)(b)が北緯 30~40°, (c)(d)が北緯40~50°を対象としている.



図-6 (a) 渦運動エネルギー K_{E} , (b) 帯状運動エネルギー K_{Z} , (c) K_{Z} から A_{E} への変換量, (d) K_{Z} から K_{E} への変換量の緯度分布.

 K_E は、 A_E と K_E の和、波動エネルギーW に変換され るが、その変換量の内訳は傾圧過程 $K_Z \rightarrow A_E$ 、順圧過程 $K_Z \rightarrow K_Z$ という 2 つの経路を持つ. $\mathbf{20}$ -6 (c) (d) より、 A_E への変換は K_Z の分布と類似しており、全緯度+で大き く、高緯度+で小さい. K_E 、 K_Z 間の変換量は正味では 負の値をとり、中緯度北側で K_E を減少させ、南側で増 加させる. 全緯度+ではこの効果が大きく、 K_E のピー クを高緯度側にシフトさせ、高緯度+では反対の効果が ある. 温帯低気圧は K_E に起因するため、中緯度の降水 の極大の移動に影響していると考えられる.

4. まとめと今後の展望

水惑星実験条件における数値実験によって,基本場, 降水量,エネルギーについての解析を行った.高緯度+ 実験では中緯度における傾圧性の増加による東西風の強 化,渦運動エネルギー,降水量の極大の高緯度シフトな どが見られた.高緯度+実験では,東西風弱化,降水極 大の低緯度シフトといった反対の傾向が得られ,気温上 昇の程度の緯度分布によって全く異なった気候が現れる と考えられる.

今後は降水頻度,エネルギー収支の関係の解析を深め, 降水の持続性や発生原因について議論を進める.また, 大気ブロッキング現象の頻度や,東西波数を調査し,極 端現象の増減とそのメカニズムについて解析を行う.傾 圧不安定波を再現する「底面に冷熱源を持つ回転水槽実 験」⁹⁾¹⁰⁾とのエネルギー解析などを用いた定性的な比較 も行う予定である.

謝辞:本研究は MEXT/SICAT, MEXT/SOUSEI(theme C-i-C), JSPS 科研費 15K18118 の成果の一部である

参考文献

 Hai-Yang, Y., Qing, B., Lin-Jiong, Z., Xiao-Cong, W., and Yi-Min.
L. : Sensitivity of precipitation in aqua-planet experiments with an AGCM, Atmospheric and Osceanic Science Letters, Vol. 7, No. 1, 1-6, 2016.

- Hayashi, Y-Y., and Sumi, A. : The 30-40 day oscillations simulated in an aqua-planet mode, j. Meteorol. Soc. Japan, 64, pp.451-467, 1986.
- Hu. Y, Yang. D., and Yang. J. : Geophys, Res. Lett., Vol. 35, L19818, doi:10.1029/2008GL035351, 2008.
- Kodama , C., and T. Iwasaki., : Influence of the SST rise on baroclinic instability wave activity under an aqua-planet condition., J. Atmos. Sci., 66, pp. 2272-2287, 2009.
- Arakawa, A., and W. H. Schubert : Interaction of cumulus cloud enable with the large-scale environment. Part I. J. Atmos. Sci., 31, 671-701, 1974.
- Mellor, G. L., and T. Yamada : Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Atomos. Phys., 20, 851-875, 1982.
- Neale, R. B., and B. J. Hoskins. : A standard test for AGCMs including their physical parametrizations I, The proposal. Atmos. Sci. Lett., 1, 101-107, doi:10.1006/asle.2000.0020, 2001.
- Iwasaki, T. : Atmospheric energy cycle viewed from wave-meanflow interaction and Lagrangian mean circulation. J. Atmos. Sci., 58, 3036-3052, 2001.
- Lorenz, E. N. : Available potential energy and the maintenance of the general circulation. Tellus, 7, 157 167, 1995.
- 10) 一瀬輪子, 北野慈和,山田朋人,渡部靖憲,泉典洋: 底面の加熱および冷却を伴う回転水槽実験による傾圧不安定 波の再現,土木学会論文集 G(環境),71(5), I_289-I_294, 2015.
- 乙部直人,筆保弘徳,菅田誠治,伊賀啓太,佐藤正樹,田島 俊彦,佐藤元,酒井敏,三村和男,山田朋人,北野慈和:回転 水槽実験のこれまでとこれから,日本気象学会機関誌 「天気」(印刷中)