

全球気候モデルと室内実験におけるブロッキング現象に関する考察

Physical Mechanisms of Atmospheric Blocking in Global Climate Models and Laboratory Experiments

北海道大学大学院工学院 ○学生員 北野慈和 (Yoshikazu Kitano)
北海道大学大学院工学研究院 正員 山田朋人 (Tomohito J. Yamada)

1. はじめに

我が国が位置する中緯度において時空間スケールが最大規模の気象擾乱としてブロッキング現象が挙げられる。この現象は、中緯度を絶えず東進している低気圧・高気圧の渦列の一部が流線から剥離することで一地域に留まり生じる気圧の停滞現象であり、数週間から一ヶ月程度豪雨や干ばつ、熱波や寒波が継続することで知られている。近年の例では、2010年にはブロッキングの影響によりロシア西部において異常高温が続き、穀物収穫量の約30%低下及び500件に上る山火事の発生など、農業及び経済的損失が発生した。またこれに連動するようにしてパキスタンでは大洪水により3000人近くの犠牲者が出た¹⁾。このように長期及び広範囲に被害をもたらすブロッキングの解明及び予測は、治水や利水両面における将来の適応策を策定する上で必要不可欠である。

ブロッキングが気候変動に応じて将来どのような変遷をたどるかについては、多くの科学的疑問が存在する。Matsueda et al.²⁾は全球気候モデル(以下 GCM)を用い2075年～2099年のブロッキング発生頻度を計算し、一部を除きほぼ全ての経度帯において発生頻度が減少することを示した。一方、Mokhov et al.³⁾は1968年～1998年におけるブロッキングイベントの回数を求め、北半球の太平洋上(140°E～100°W)及び大陸域(100°W～80°W, 40°E～140°E)では増加傾向にあったことを示した。また、秦⁴⁾、Yamada & Hata⁵⁾は極域-赤道間の温度差(以下南北温度差)に着目し、1960～2000年の冬季において南北温度差が小さい年ほど大気波動の卓越東西波数が減少しブロッキング発生頻度が高まる傾向にあることを示した。同論文では、南北温度差の低下について極域における氷雪の被覆率低下が要因であるとされており、気候変動に伴う南北温度差の減少はブロッキング発生頻度を増加させる効果を有すると推測される。以上3論文を総合すると、現状ではブロッキング発生頻度は増加傾向にある経度帯があり、南北温度差の減少という点のみに着目すると将来は一層ブロッキングが発生しやすくなることが予想されるが、一方で将来予測結果はブロッキング発生頻度の減少を示しているという矛盾が生じている。この理由としては南北温度差の減少という要素はブロッキング発生の一素過程であり、将来においては他の素過程が有意となる場合、ブロッキングの発生頻度が減少する可能性が考えられる。しかしながら、将来のいつ頃をピークにブロッキングが減少に転じるのか、また減少を引き起こす素過程は何であるかについては未だに明らかにされていない。本研究ではこれらを明らかにするために、2種類の研究アプローチを試みる。まず、

南北温度差がブロッキング発生に及ぼす影響を解明するために中緯度における傾圧波動を説明する代表的な手法である室内水槽実験を行う。一方、将来においてブロッキング発生頻度を減少させる素過程を特定するため、複数のGCMによる将来の予測結果を分析する。第2章、第3章では室内水槽実験について、第4章、第5章ではGCMによる将来予測結果の解析結果について記述する。第6章でまとめと今後の方針について述べる。

2. 回転水槽実験概要

ブロッキングは偏西風波動の振幅が大きくなり、これにより高気圧や低気圧が切り離されることによって生じる。中緯度におけるこうした偏西風波動の定性的な説明を可能とする代表的な手法としてFowlis & Hide(1958)⁶⁾により提唱された回転水槽実験がある。この手法は3重の円筒水槽を用い、内側の水槽に冷水、外側の水槽に温水を入れることで傾圧不安定波を再現する(図-1a)。近年ではTamaki & Ukaji⁷⁾、三村⁸⁾などにおいて地形性β効果を回転水槽実験に組み込み緯度変化が傾圧不安定波に及ぼす影響を考察する研究等があり、β効果に着目したブロッキングの素過程解明の研究が行われている。本研究では、秦⁴⁾、Yamada & Hata⁵⁾が示した南北温度差とブロッキング発生頻度との関係性に着目し、水槽内部に発生する温度差と傾圧不安定波の振幅との関係が観測可能な実験手法を考案した。

従来の回転水槽実験の装置と本研究で用いる装置との違いを図-1に示す。従来の実験水槽は3重の水槽の内側及び外側に冷水、温水を配置し、それらに挟まれた水槽内部の流体の挙動を観察した。この手法では、側壁が冷温源となっており、その側壁によって傾圧不安定波の振幅の増大が抑制されてしまうという問題が生じていた。一方、本研究で用いる実験水槽では、円筒形の水槽の底面中央部に冷源を、底面外周部に温源を設置している。これにより、冷温源であった側壁を取り外すことが可能となり、振幅の観察が可能となる。ブロッキングは大気中の傾圧不安定波であるロスビー波の砕波現象であり、水槽内に発生する傾圧不安定波の振幅の増大及び砕波の頻度を調べる事で、ブロッキング発生と南北温度差との関係性に着目する。

本実験において可変なパラメータは水槽内部の水深、底面の温度差、そして角速度であり、それぞれ2cm～8cm、2℃差～20℃差、10rpm～35rpmと設定する。また、Fowlis & Hide(1965)、Tamaki & Ukaji(2003)等にならない、水面に銀粉を載せ、それをトレーサとして波動の形態を可視化する。

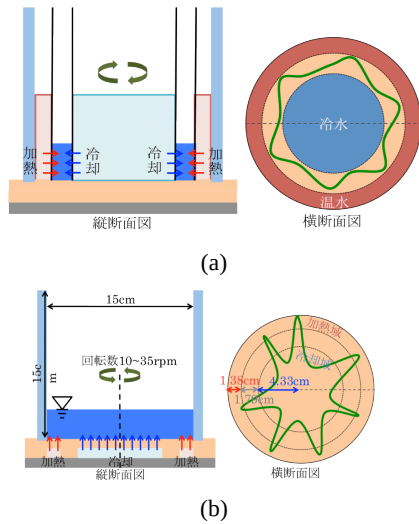


図-1 従来の回転水槽実験装置と本実験手法との比較
(a) Fowles & Hide 等による従来の実験装置
(b) 本研究で用いる実験装置

3. 回転水槽実験結果

図-2 は実験結果を無次元数を使用して分類したものである。 Ta はテイラー数、 Ro_T は熱ロスビー数を示しており、

$$Ta = \frac{4\Omega^2 L^4}{\nu^2}, \quad Ro_T = \frac{\alpha g h \Delta T}{\Omega^2 L^2} \quad (1)$$

でそれぞれ定義される。ここで、 Ω は回転水槽の角速度、 L は水槽の半径、 ν は動粘性係数、 α は熱膨張率、 g は重力加速度、 h は水深、 ΔT は底面温度差を示す。流れの形態は図-2 に示すような 4 形態に分類できる。

図-2 より、熱ロスビー数が 0.1~1 の範囲に傾圧波動に類似した蛇行流れが見て取れる。地球大気熱ロスビー数を概算すると約 0.1 前後となることから、本実験で観察された現象のオーダーは実現象と近いと言えよう。さらに、蛇行流れが発生した全ての実験条件に対し、碎波現象が観察された。しかし、現状の可視化手法では碎波現象の定量化は不可能であるため今後の課題とする。

4. GCM 及び再解析データ、解析手法

気候変動に伴い、将来のブロッキング発生頻度がどのような傾向をたどるかを考察するために、GCM による将来予測結果を解析する。採用する GCM は、MIROC-ESM(APRO/NIES/JAMSTEC, Japan)、BCC-CSM(China)、CSIRO(Australia, 一部欠損有り)の日平均データ 3 種である。比較のため、再解析データである ERA40(Europe)を用いる。

上記 GCM 及び再解析データについて、以下の解析を行う。まず、ブロッキングの判定には、Pelly & Hoskins⁹⁾ に準拠し、以下のブロッキングインデックス B を用いる (図-3 参照)。

$$B = \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0}^{\phi_0 + \Delta\phi/2} \theta d\phi - \frac{2}{\Delta\phi} \int_{\phi_0 - \Delta\phi/2}^{\phi_0} \theta d\phi \quad (2)$$

ここで、 $\Delta\phi$ 、 ϕ_0 は対象とする緯度領域を示し、本研究ではそれぞれ北緯 30° ~ 北緯 60°、北緯 45° に設定

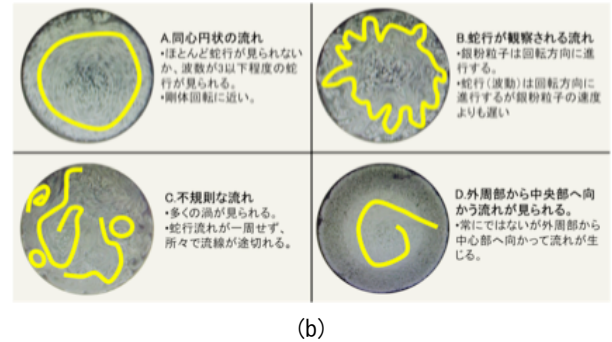
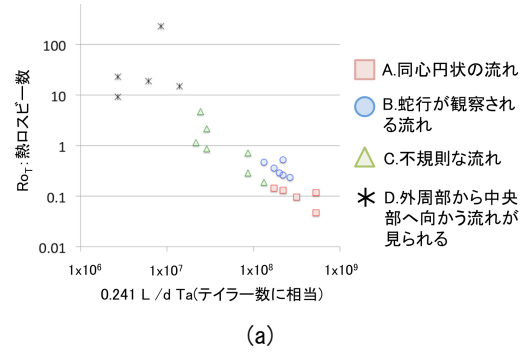


図-2 無次元数による実験結果の分類
(a) Ta 及び、 Ro_T を用いた流れの形態の分類。
(b) 実験水槽内で観察された流れの形態。

する。また、 θ は温位を示す。なお、高度は成層圏高さを考え、渦位が 2PVU になる面を設定している。上記式 (2) は右辺第 1 項が北緯 45° ~ 北緯 60° の温位の平均値を、第 2 項が北緯 30° ~ 北緯 45° の温位の平均値を表しており、 $B < 0$ の際にブロッキングが発生したと判定する。これは、図-3 のように偏西風の蛇行が大きくなり碎波することによって、南北の温度場が逆転することをブロッキングと判定していることと同義である。このブロッキングインデックスを全経度及び全日数に対し求め、全経度及び各月で平均した値をその月のブロッキング発生頻度とする。なお、ブロッキングは長期及び広範囲に停滞することから、ブロッキングインデックス B が 5 日未満、経度にして 15° 以下のスケールのものは除外している。

また、解析の為に、北緯 45° の対流圏高さ (標準大気を仮定し 2PVU 面の気圧高度を高度に変換したもの)、地表面における北緯 60° ~ 北緯 30° の温度勾配、対流圏高さにおける同緯度帯の温位勾配をそれぞれ求めた。これらは、第 2 章、第 3 章で述べた水槽実験における水深や温度差に対応するパラメータとして考えられる。

5. 解析結果

図-4 に ERA-40 の解析結果を示す。同図は、1960 年 ~ 1999 年の 40 年間のデータに関し、対流圏高さ、地表面の南北温度差、対流圏界面の南北温度差、熱ロスビー数の月ごとの平均値を計算し、それらに対するブロッキング発生頻度の平均値との対応をプロットしたものである。同図より以下の点が見て取れる。

- 対流圏高さでは地表面から 7200m~7300m に、地表面南北温度差では 0.006~0.008°C/km に、対流圏界面南

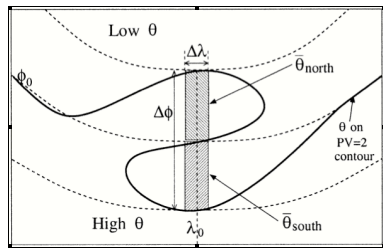


図-3 ブロッキングインデックスの概念図 (Pelly & Hoskins)。破線は等緯度を示し、実線は傾圧波動が碎波状態にある等温位面を示す。

北温度差では $0.006\sim 0.007^{\circ}\text{C}/\text{km}$ に、熱ロスビー数では 0.11 付近にブロッキング発生頻度のピークが見て取れる。

- ・前述の Yamada & Hata(2013)⁵⁾示したように、同じ月では地表面南北温度差が小さい年の方がブロッキング発生頻度は小さい。また、この傾向は対流圏界面における南北温度差にも当てはまる。

上記の点を踏まえ、MIROC-ESM、BCC-CSM、CSIRO それぞれの GCM の過去 (1950 年～2005 年) 及び将来 (2006 年～2099 年) の解析結果を比較する。図-5、図-6 にその結果を示す。

図-5 は過去及び将来の予測結果における、月ごとの対流圏高さとブロッキング発生頻度との関係を示す。過去及び将来を比較すると以下の点が見て取れる。

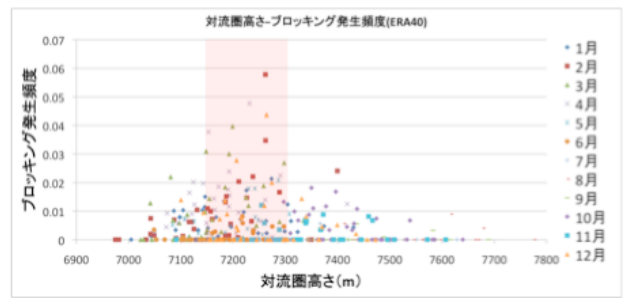
- ・ブロッキング発生頻度がピークとなる対流圏高さの値は両者とも 7100m 付近である。
- ・将来においては対流圏高さが高い月が過去に比べ増加している。

紙面の都合上割愛するが、3 モデル全てにおいて将来対流圏高さは上昇することが示されており、これは温暖化の影響で地表面が暖められ、鉛直対流により対流圏界面が押し上げられるためと考えられる。一方、ブロッキング発生頻度が高い対流圏界面の高さは過去においても将来においても 7100m 付近と一定値のままである。これより、将来のブロッキング発生頻度の減少は、対流圏高さが増加し、ブロッキング発生頻度のピークとなる 7100m 付近から遠ざかることによって生じているのではないかと推察される。

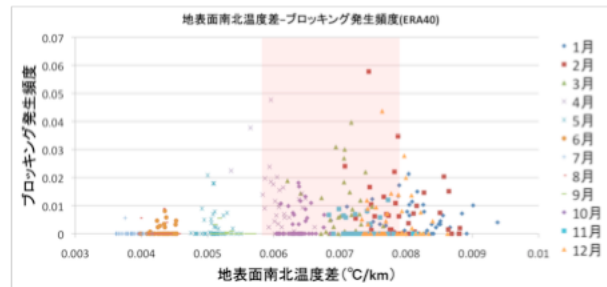
図-6 は、CSIRO における過去 (1950 年～2005 年) 及び将来 (2006 年～2049 年、2050 年～2099 年) の予測結果における、月ごとの地表面南北温度差とブロッキング発生頻度との関係を示す。他の 2 つのモデルは CSIRO とは異なる分布を示していたが誌面の都合上割愛する。以下には共通して読み取れる事項のみ記述する。

- ・冬季における南北温度差は将来減少傾向にあるが、夏期の温度差は変化がみられない。
- ・ある特定の月毎 (1 月のデータ毎、2 月のデータ毎等) では、一部の例外を除き南北温度差が小さい年ほどブロッキング発生頻度が大きい傾向にある。
- ・過去及び将来に共通するブロッキング発生頻度が極大を与える南北温度差の値はない。

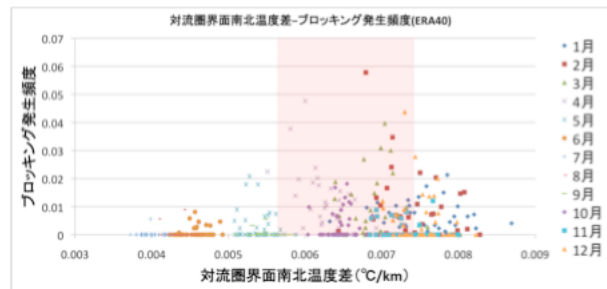
以上より、南北温度差は、ある同一の気候条件においてはその大小でブロッキングの発生頻度に影響を与えるが、



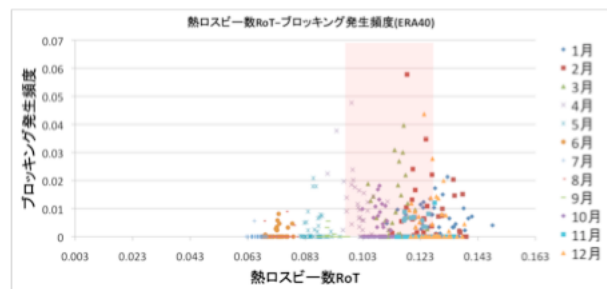
(a)



(b)



(c)



(d)

図-4 ERA40 における (a) 対流圏高さ、(b) 地表面南北温度差、(c) 対流圏界面南北温度差、(d) 熱ロスビー数とブロッキング発生頻度との関係図。1960 年～1999 年の 40 年間のデータに対し、一月ごとに平均値を求め、それぞれプロットした。

異なる気候条件間では同等の議論が出来ないことが推察される。

6. まとめ

GCM の解析結果より、南北温度差はある特定の気候条件では温度差が小さい年ほどブロッキングが発生しやすいことが観察されたが、一方で南北温度差が大きい数十年及び小さい数十年という異なる気候条件に対しては

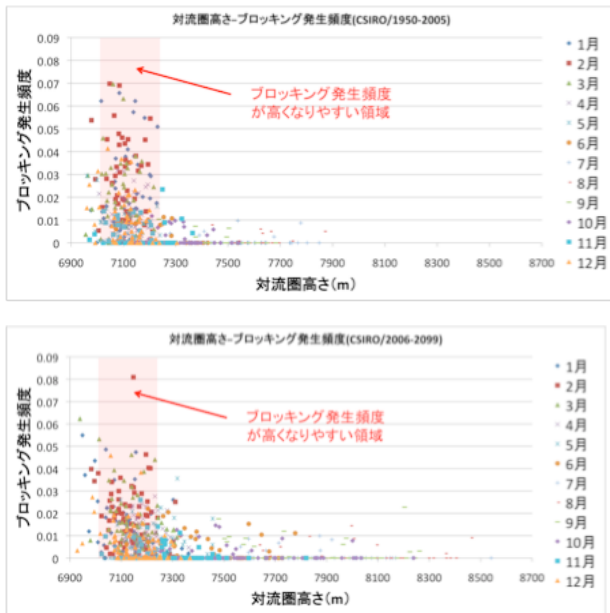


図-5 GCM による将来予測結果の解析の一例。1950 年～2005 年の過去の解析結果（上）及び 2006 年～2099 年の将来の予測結果（下）における月ごとの対流圏高さとブロッキング発生頻度との関係図（他のモデルも同様の傾向を示すため、紙面の都合上 CSIRO の場合のみ掲載。）

同様の議論が成り立たないことが分かった。一方対流圏高さに関しては気候条件によらずある対流圏高さでブロッキング発生頻度がピークを有することが分かった。前述の通り、これにより将来ブロッキング発生頻度は減少するのではないかと考えられる。

なお、今後は第 2 章、第 3 章で述べた水槽実験を定量的に実施し、GCM の解析によって観察された傾向を流体力学的に説明出来る範囲を明らかにする。

謝辞

本研究は MEXT/RECCA, MEXT/SOUSEI(theme C-i-C), JICA 及び JST の地球規模課題対応国際科学技術協力事業(SATREPS)IMPAC-T と CREST(Core Research for Evolutional Science and Technology)の成果の一部である。

参考文献

- 1) Coumou D. & S. Rahmstorf: A decade of weather extremes, Nature Climate Change 2.7, pp.491-496,2012
- 2) M. Matsueda, R. Mizuta & S. Kusunoki: Future change in wintertime atmospheric blocking simulated using a 20-km-mesh atmospheric global circulation model, Journal of geophysical research, vol. 114, D12, 2009.
- 3) Wiedenmann J. M., A. R. Lupo, I. I. Mokhov and E. A. Tikhonova: The climatology of blocking anticyclones for the northern and southern hemisphere: Block intensity as a Diagnostic, Journal of Climate, Vol.15, pp. 3459-3473, 2002.
- 4) 秦佳弘: 南北温度勾配の減少による大気卓越波の増幅とブロッキングの形成,北海道大学大学院工学院環境フィールド工学専攻修士論文.

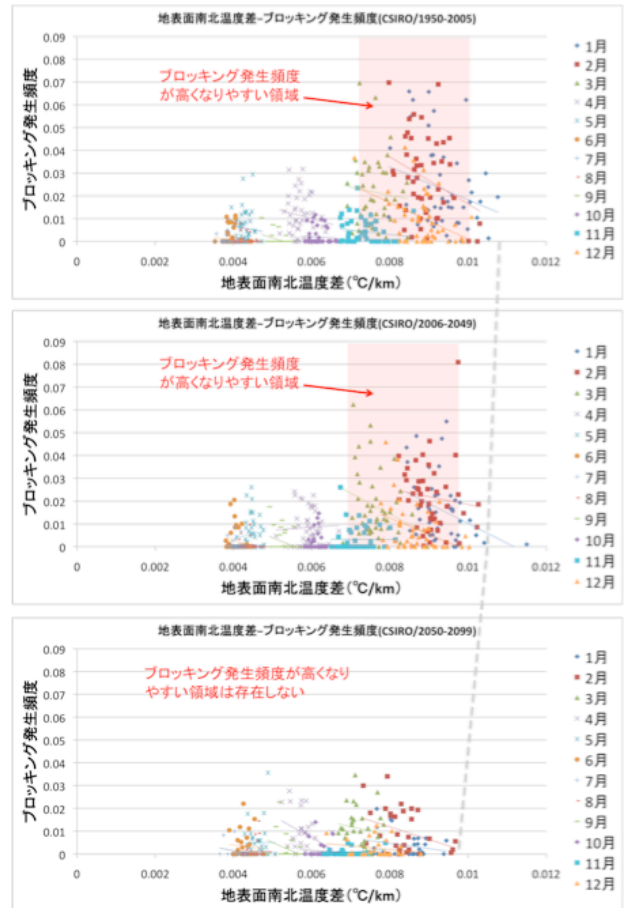


図-6 GCM による将来予測結果の解析の一例。1950 年～2005 年の過去の解析結果（上）、2006 年～2049 年（中）及び 2050 年～2099 年（下）の将来の予測結果における月ごとの地表面南北温度差とブロッキング発生頻度の関係図。

- 5) Yamada T. J., Y. Hata: Frequency of Atmospheric Blocking Associated with Meridional Surface Temperature Characteristics in Boreal Winter in the Mid-Latitudes, Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.57, 2013.
- 6) W. W. Fowles & R. Hide: Thermal Convection in a Rotating Annulus of Liquid: Effect of Viscosity on the Transition Between Axisymmetric and Non-Axisymmetric Flow Regimes, Journal of the atmospheric science, vol.22, pp. 541-558, 1965.
- 7) K. Tamaki & K. Ukaji: An Experimental Study of Wave Dispersion in a Differentially Heated Rotating Fluid Annulus with a Radially Sloping Bottom, Journal of the meteorological Society of Japan, Vol. 81, No. 5, pp. 951-962, 2003.
- 8) 三村和男: 室内実験によるブロッキング現象の研究 (2005 年度学部等研究教育補助金等報告), 東海大学紀要, 教育学部 37, pp.261-265, 2006.
- 9) J. L. Pelly & B. J. Hoskins: A new perspective on blocking, Journal of the Atmospheric Science, Vol.60, pp. 743-755, 2003.