

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

Amplification of Atmospheric Dominant Waves by the Meridional Gradient of Temperature and Blocking Formations

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 秦 佳弘(Yoshihiro HATA)
北海道大学大学院工学院准教授 正会員 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)は、地球温暖化に関する科学的知見の集約および評価を実施している。IPCC の枠組みの中で複数の大学、研究機関が有するGCM (General Circulation Model) を用いた大気循環の再現実験ならびに温室効果ガス排出シナリオも考慮した21世紀の予測実験を実施され、IPCC 第四次報告書において、将来洪水や干ばつといった極端な現象が増加し、また中緯度地域において特に顕著であるとの予測がなされている¹⁾。しかし、どのような気候システムの変化が、中緯度地域におけるこれらの極端現象の増加に結びつくのかは十分にわかっていない。

秦ら(2010)は、GCMによる20世紀再現実験および21世紀予測実験の出力結果から、将来の気候変動による気温上昇は、高緯度ほど顕著であり、低緯度と高緯度の温度の差(すなわち南北方向の温度勾配)は将来、春、秋、冬の期間で小さくなることなること、また、500hPaにおける大気波数(ジオポテンシャル高度の経度一周平均からの偏差を用いて求めた)も同様の期間で減少することを示し、南北方向の温度勾配の減少が大気波数を減少させ、それが極端減少の増加につながるのではないかと

指摘した²⁾。南北温度勾配の変化が大気波数に与える影響を知ることは、将来予測されている南北温度勾配の減少が、気候システムにどのような影響を与えるのかを理解する上で重要である。

極端現象をもたらす要因の一つにブロッキングが挙げられる。ブロッキングが発生すると、偏西風ジェットは南北に分流する形で大きく迂回する。ブロッキングは一度発生すると一箇所に長期間停滞し、蛇行した流れが暖気や寒気を流入させることで熱波、寒波を発生させる、西風の北上に伴い低気圧の通過頻度を増大させることで、降水量を増大させるといった極端現象を引き起こす。

横軸にロスビー波の西進位相速度 c を取り、縦軸に波の振幅を2乗して得られる全エネルギー(運動エネルギーと有効位置エネルギーの和)を取ると、大気大循環のエネルギースペクトルは、ある位相速度においてエネルギーピークをもつ³⁾。このピークにおけるスケールをRhines scale と呼ぶ。ロスビー波が増幅していく場合、波のスケールが Rhines scale を超えた時に砕波を起こす。このロスビー波の砕波により、ブロッキングが発生する。将来波数が変化した場合、ロスビー波の砕波によるブロッキングの発生頻度に影響があると考えられる。

本研究では、過去の気候の長期再解析データを用いて、南北温度勾配が大気波にどのような影響を与えるのか調べる。また、極端現象を引き起こす要因の一つであるブロッキングについて着目し、温度勾配の変化と極端現象の頻度について考察を行う。はじめに何の要因が南北温度勾配の大きさに影響が大きいかを検討し、そして毎月の温度勾配と大気の卓越波数の関係、温度勾配と卓越波の振幅の大きさの関係、そして温度勾配とブロッキングの発生頻度の関係を調べ、温度勾配の変化が極端現象の頻度変化にどのような影響を与えるかについて考察を行う。

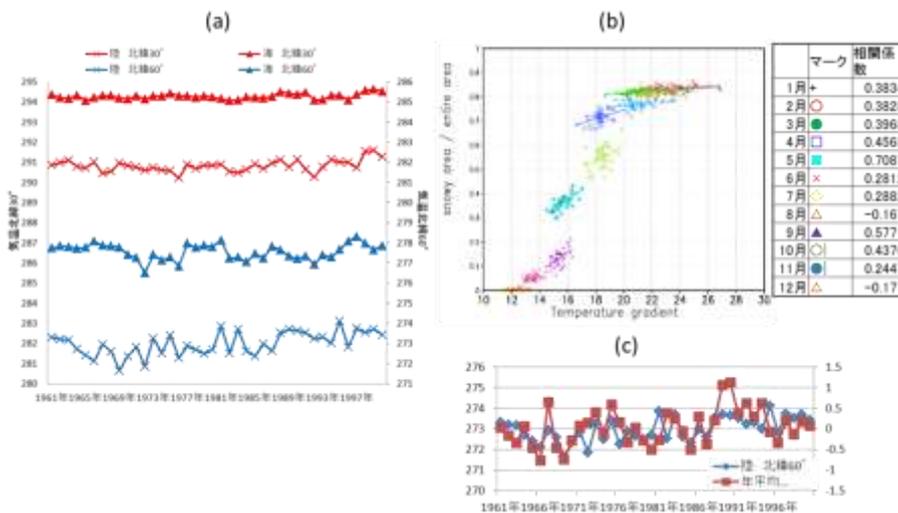


図-1 (a)ERA40の北緯30°、60°における陸、海上年平均地表面気温。(1961-2000年) (b)毎月の南北温度勾配(横軸)と北緯60°における雪に覆われた地表面の面積率(縦軸)直線は各月の最小二乗回帰直線を示す。図(c)は北緯60°の年平均地表面気温とA0指数の比較である。

表-1 使用した再解析データ、及びそれらの機関名、解像度、使用期間

再解析データ名	機関名	解像度	期間
ERA-40	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts	144x73	1961-2000年
NCEP/NCAR Reanalysis 1	National Oceanic and Atmospheric Administration	144x73	1961-2000年
JRA-25	気象庁/(財)電力中央研究所	288x145	1979-2010年

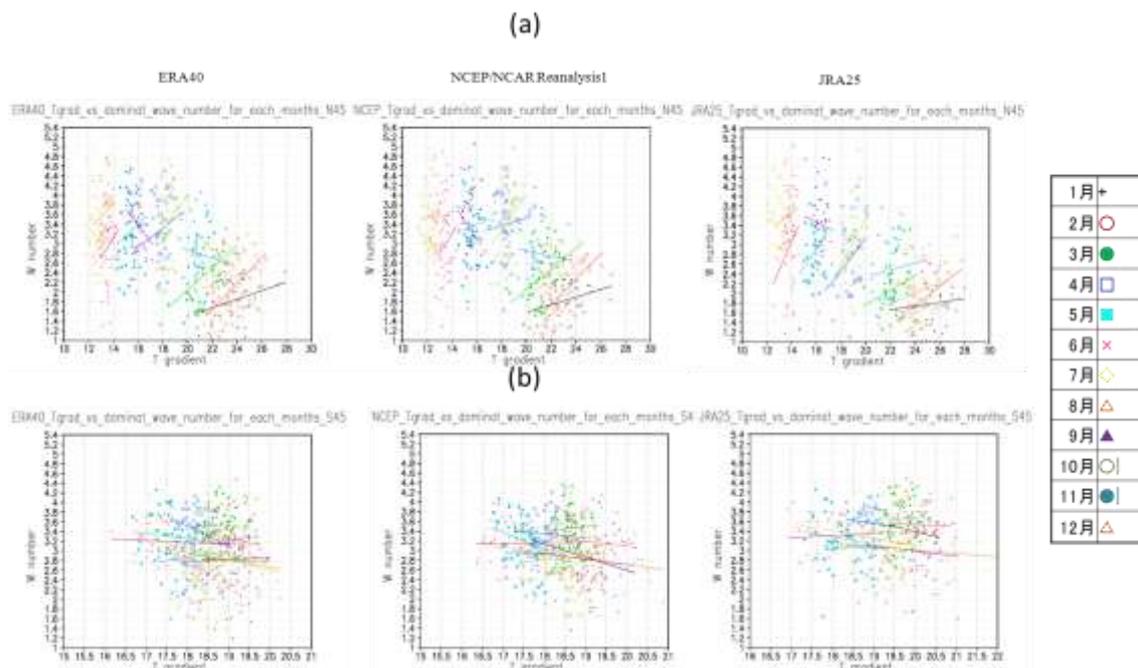


図-2 毎月の南北温度勾配（横軸）と大気卓越波数（縦軸）の関係。図中の直線は各月の最小二乗回帰直線を示す。(a)北半球、(b)南半球。(右)ERA40、(中央)NCEP/NCAR Reanalysis 1、(左)JRA25

2. 使用するデータ

使用した気候の長期再解析データの名称、発行機関、解像度、使用期間を表-1 に示す。本研究では、地表面気温、ジオポテンシャル高度の日平均データを用いた。

3. 温度勾配の大きさに影響を与える要因

図-1(a)はERA40の北緯30°、北緯60°における陸、海上年平均地表面気温（1961-2000年）を示す。北緯30°に比べ北緯60°の方が、海上に比べ陸上の方が気温の経年変動が大きい。これは、海と陸の比熱の違いによるものだと考えられる。南北温度勾配の経年変動は、高緯度地域の陸上気温による影響が大きい。

高緯度地域における氷雪の存在は、地表面アルベドを増加させ、太陽光の吸収エネルギーを減少させる効果がある。ERA40の毎月の南北温度勾配と北緯60°における地表面の氷雪面積率（北緯60°の経度一周において、雪で覆われた陸地面積を全陸地面積で除したもの）の関係を図-1(b)に示す。9-10月、1-5月において、相関係数が3.8以上の正の相関がみられ、氷雪の存在が少ない年ほど温度勾配が小さいという関係にある。特に、9月、10月の降雪開始時期や4月、5月の雪解け時期においてその関係が強い。将来、気候変動によって降雪時期の遅れや雪解け時期が早まる場合、この強い関係性は冬季にシフトすると考えられる。図-1(c)は北緯60°における地表面気温とAO(Arctic Oscillation)指数の比較である。両者の変動の仕方は似通っており、高緯度の地表面気温はAO指数に影響を受けるのではないかと。

4. 卓越波数と南北温度勾配

素らは回転水槽実験を実施し、流れに垂直方向の温度

勾配を変化させた時の回転流体中の流れの波数を調べ、テイラー数と熱ロスビー数を用いて実験結果を記した⁴⁾。この実験で確認された、回転流体において温度勾配が減少すると波数も減少するという性質から、地球上においても南北の温度勾配と中緯度地域の気卓越波数の間に同様の関係があるのではないかと考え、温度勾配の違いが大気卓越波数にどのような影響を与えるのかを調べた。縦軸に大気卓越波数、横軸に南北温度勾配をとり、北半球と南半球それぞれについて、毎月の平均卓越波数と平均温度勾配の関係を図-2に示す。本研究では、北緯45°（南緯45°）における500hPaジオポテンシャル高度を、経度一周についてスペクトル解析し、最も卓越した波数を大気卓越波数とした。また、北緯30°（南緯30°）における地表面気温と北緯45°（南緯45°）における地表面気温の差を南北温度勾配とした。

北半球では、月によって温度勾配の大きさに違いがあるのに対し、南半球では一年を通して温度勾配の大きさはあまり変化しない。南半球では高、低緯度共に比熱の大きい海洋が広く分布しており、気温の季節変動が小さく、年間を通じて温度勾配はあまり変化しないのに対し、北半球では高緯度地域に比熱の小さい陸地が多く、また雪解け等による地表面アルベドの季節変化が存在するため、季節による温度勾配の変動が大きいと考えられる。

北半球では、どのモデルについても12、1、2、3月において、相関係数がおおむね0.2以上の値となっており南北温度勾配と卓越波数の間に正の相関がみられ、温度勾配が小さい年では卓越波数も小さいという関係がみられた。特に2月において、すべてのモデルで相関係数が0.4以上であった。これは、室内実験で確認された回転流体の性質と一致した関係である。すなわち、実際の地球上においても回転流体の性質により、南北の温度勾配

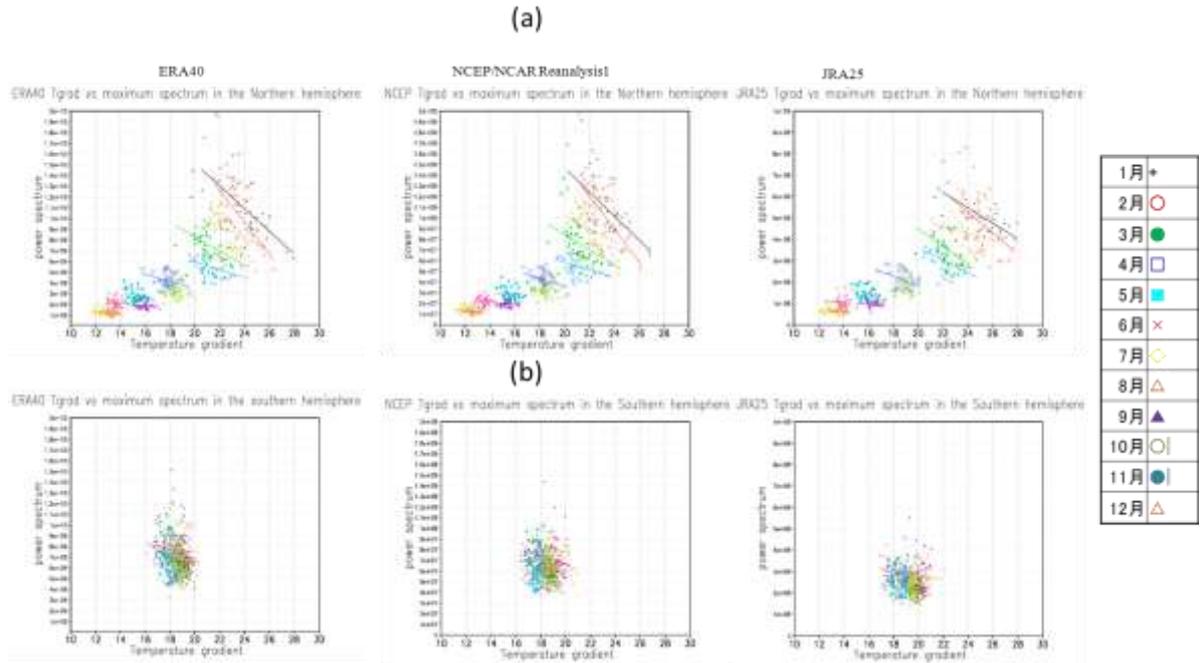


図-3 毎月の南北温度勾配(横軸)と卓越波数のパワースペクトル(縦軸)の関係。図中の直線は各月の最小二乗回帰直線を示す。(a)北半球、(b)南半球。(右)ERA40、(中央)NCEP/NCAR Reanalysis 1、(左)JRA25

が何らかの原因で減少した場合、大気の波数もそれにとまって、減少するのではないか。

一方、南半球では、どの月、どのモデルにおいても相関係数の値はおおむね小さく、同じ月であってもモデルによって値が大きく異なる。南半球では、南北温度勾配と卓越波数の間に相関性は見られなかった。

5. 温度勾配と卓越波の振幅

次に南北温度勾配と卓越波数の振幅の関係を調べた。前章で卓越波数のスペクトル解析を行った際に求めた、卓越波数のパワースペクトルの大きさ(これは、卓越波数の振幅の大きさと言い換えることができる)と南北温度勾配の関係を図-3に示す。

北半球では、すべてのモデルで12月～3月において、温度勾配と卓越波数の振幅の間に、相関係数が-0.2よりも小さい負の相関が見られ、温度勾配が小さい年は卓越波数の振幅が大きいという関係が見られる。また、前章で特に相関性が見られた2月において、同様に他の月に比べて強い相関が見られる。

一方、南半球では、8月、9月(南半球冬季)において、三個中二個のモデルで、相関係数-0.2以下の相関が見られる。

前章の卓越波数と南北温度勾配の比較から、12～3月の冬季において、温度勾配が小さい年では卓越波数も小さいという関係がみられた。同様の期間において温度勾配が小さい年ほど卓越波数の振幅が大きいという関係がみられた。これらの結果から、温度勾配と東西大気波数の間に、次のようなメカニズムが存在するのではないか。冬季において南北の温度勾配が減少することで、大気の東西波数が減少する。波のスケールがプラネタリー領域に近づくことで、流れは水平二次元的になる。二次元的

な流れでは、小スケールの波が大スケールの波にエネルギーを受け渡す逆カスケードが起きるので、ロスビー波が増幅され振幅を増加させたのではないか。ロスビー波の増幅によって波のエネルギーがRhines scaleに達すると、砕波を起こしてブロッキングを形成する。

6. ブロッキング発生件数と卓越波数の関係

中緯度地域の大気波数の変化がブロッキングの発生頻度にどのような影響を与えるかを調べるために、各季節の卓越波数とブロッキングの発生頻度の関係を求めた。ブロッキングの定義には様々な方法が提案されているが、本研究ではTibaldi(1998)らの500hPaジオポテンシャル高度の南北の傾きの大きさによって、ブロッキングの有無を判別する方法を用いた⁵⁾。以下の式で定義されるGHGS、GHGNを用いてブロッキングの定義を行った。

$$GHGS = \frac{Z(\varphi_n) - Z(\varphi_s)}{(\varphi_n - \varphi_s)} \quad (1)$$

$$GHGN = \frac{Z(\varphi_n) - Z(\varphi_0)}{(\varphi_n - \varphi_0)} \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \varphi_n &= 80^\circ N(S) + \Delta \\ \varphi_0 &= 60^\circ N(S) + \Delta \\ \varphi_s &= 40^\circ N(S) + \Delta \\ \Delta &= -2.5^\circ, 0^\circ, 2.5^\circ \end{aligned} \quad (3)$$

各経度グリッドについて、GHGS、GHGNを計算し、少なくとも1つのΔに対して、

$$GHGS > 0 \quad (4)$$

$$GHGN < -10m/deg \text{ lat} \quad (5)$$

が満たされた場合、その経度でブロッキングが発生したと判断した。

経度一周分の各経度グリッドについてTibaldi(1998)ら

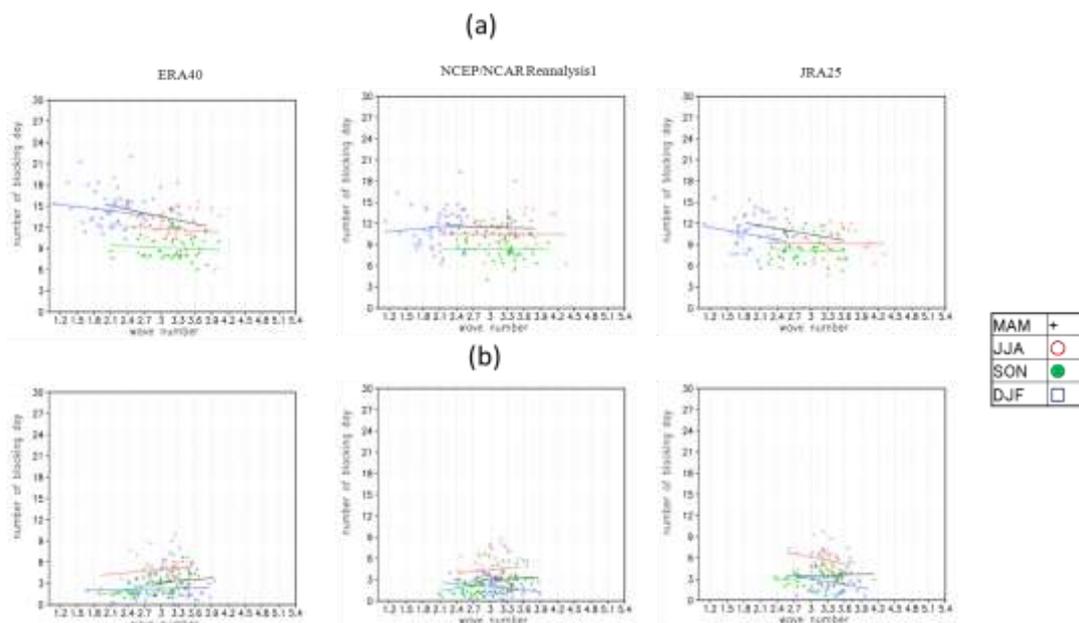


図-4 各季節の卓越波数（横軸）とブロッキング発生回数（縦軸）の関係。図中の直線は各月の最小二乗回帰直線を示す。(a) 北半球、(b)南半球。(右)ERA40、(中央) NCEP/NCAR Reanalysis 1、(左) JRA25

の定義からブロッキングの有無を求め、それらのグリッドの中で、一か月間でもっともブロッキングの発生回数が多かった値をその月のブロッキング発生回数とした。ブロッキング発生回数および卓越波数を季節平均し、これらの散布図を図-4に示す。

南半球では北半球に比べ、年間通してブロッキングの発生回数が少ない。

北半球において、冬季のブロッキング発生回数と卓越波数を比較すると ERA40、JRA25 について、卓越波数が小さい年では、ブロッキング発生回数は多いという関係が見られる。北半球冬季において、温度勾配が減少することで、波数も減少し、前章で述べたメカニズムによって、ロスビー数の増幅が起こり、Rhines scale に達することでブロッキングが発生しやすくなるのではないかと。

7. まとめ

本論文は中緯度地域の極端現象のメカニズムを、南北温度勾配、東西大気波数、大気波の振幅の観点から明らかにすることを目的とした。南北温度勾配の変動は高緯度の陸上は気温の年変動による影響が大きい。氷雪の有無は地表面アルベドによる太陽放射エネルギーの吸収量を変化させる。9-10月、1-5月において、温度勾配と北緯60°の氷雪面積には、相関係数が3.8以上の正の相関性が存在する。降雪初期や雪解け時期において、特に氷雪面積が小さい年は温度勾配が小さいという関係性がみられる。北半球冬季(12月、1月、2月)において、南北温度勾配と卓越波数の間に、相関係数がおおむね0.2以上の値の正の相関があり、温度勾配が小さい年では卓越波数も小さいという関係がみられた。また、この期間における南北温度勾配と卓越波数の振幅の間には、相関係数が-0.2よりも小さい負の相関があり、温度勾配が小さい年ほど卓越波数の振幅が大きいという関係がみられ

た。同様の期間において、季節毎に見た卓越波数とブロッキングの発生回数の間には弱い負の相関があり、卓越波数が小さい年では、ブロッキング発生回数は多いという関係が見られた。

南北の温度勾配の減少は、次のようなプロセスで、ブロッキングの頻度に影響するのではないかと。高緯度地域の氷雪面積が減少すると、アルベドが減少し気温が上昇、南北の温度勾配は小さくなる。南北の温度勾配が減少すると、回転流体の性質から大気波の東西波数が減少、波がプラネタリー領域に近くなり、水平二次元的な流れになる。逆カスケードによって、大きいスケールの波の振幅が増幅される。そして、波のエネルギーがRhines scaleに達した時に、波は砕波してブロッキングを発生させ、それが中緯度地域において様々な極端現象を引き起こす。

今後はGCMを用いたシミュレーションによって、南北温度勾配が変化した場合にブロッキング発生頻度や大気波数がどのように変化するかを確認したい。

参考文献

- 1) IPCC : IPCC 第4次評価報告書
- 2) 秦佳弘, 山田朋人(2010): 気候変動に伴う南北温度勾配と大気波数の変化による極端現象増加メカニズム, 土木学会北海道学術論文報告集(第67号)
- 3) Tanaka, H and Terasaki, K: 2006, 'Blocking Formation by an Accumulation of Barotropic Energy Exceeding the Rossby Wave Saturation Level at the Spherical Rhines Scale.' J. Meteor. Soc. Japan, 83, 319-332.
- 4) 秦佳弘(2009): 回転水槽流体と地球大気における温度の南北傾度と大気波数の関係, 北海道大学工学部環境社会工学科卒業論文
- 5) S. Tibaldi and F. Molteni: 1990, 'On the operational predictability of blocking.' Tellus, 42A, 343-365