

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

The mechanism of Increasing Extreme Weather Events Associated with
The Relationship between Meridional Gradient of Temperature and Atmospheric Wave Numbers

北海道大学大学院工学院 ○学生会員 秦 佳弘
北海道大学大学院工学院准教授 正会員 山田 朋人

1. はじめに

気候変動の影響評価ならびに適応策をまとめるIPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) によって発行された第4次報告書によると、将来の地球温暖化の進行とそれに伴う生態系や人間活動への深刻な影響が懸念されている¹⁾。IPCCの枠組みにおいて複数の大学、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世紀の予測実験が実施され、同報告書において特に中緯度地域では将来大雨による洪水や干ばつが増加するとの予測がなされている。温暖化により地表面気温が上昇すると、大気中の保水容量が増加し、同時に蒸発散量も増加する²⁾。すなわち温暖化は、大気中の水蒸気含有量の増加をもたらす。これは降水の総量にとって重要である。一方、水循環システムの強化による降雨-蒸発散プロセスの活発化は、自然発生的な干ばつの強度を増幅させるとの報告がなされている³⁾。またピーク降雨強度と干ばつの持続時間を把握することは、水災害の軽減ならびに安定的な水資源の利用を考える上で不可欠である⁴⁾。本研究は上記のいわゆる極端現象のメカニズムの解明を目的とする。2章において解析で使用するデータの説明を行い、3章、4章において温度勾配および大気波数の解析を、5章、6章において極端降雨の頻度および、その原因と考えられる極端な

低気圧の頻度について解析を行う。そして、7章においてこれらの結果の考察および本研究の目的である極端現象のメカニズムについて考察を行う。

2. 使用するデータ

本研究においてデータを使用する GCM を表-1 に示す。使用したデータは、地表面気温、海面補正気圧、降水量についての出力結果とし、対象とする期間は 1961～2000 年 (20 世紀再現実験) の 40 年間と、2046～2065 年および 2081～2100 年の各 20 年間 (21 世紀予測実験) とする。また、21 世紀予測実験の温暖化シナリオは A1b を選択した。第 4 章において観測データとして、衛星データおよび雨量計データを組み合わせて作成された GPCP (Global Precipitation Climatology Project) データセットの日降水量データ(1997～2008 年)を使用した。

3. 南北方向の温度勾配

本論文において北緯 0～30°を低緯度、北緯 30～60°を中緯度、北緯 60～90°を高緯度と定義する。また、低緯度帯と高緯度帯の地表面温度の差を南北方向の温度勾配として以下の議論を行う。

各緯度帯について 20 世紀、21 世紀における平均気温を

表-1 解析に使用した大気大循環モデル(GCM)、及び
それらの機関名、モデル解像度(グリッド数)

モデル名	機関名	解像度
BCCR-BCM2.0	Bjerknes Centre for Climate Research	128*64
CGCM3.1(T63),	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	128*64
CNRM-CM3.0	Meteo-France, Centre National de Recherches Meteorologiques	128*64
CSIRO-Mk3.0,	CSIRO Atmospheric Research	192*96
GFDL-CM2.0	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	144*90
GISS-AOM	NASA Goddard Institute for Space Studies	90*60
MIROC3.2(hires)	CCSR/NIES/FRCGC	320*160
ECHAM5/MPI-OM	Max Planck Institute for Meteorology	192*96
MRI-CGCM2.3.2	Meteorological Research Institute	128*64

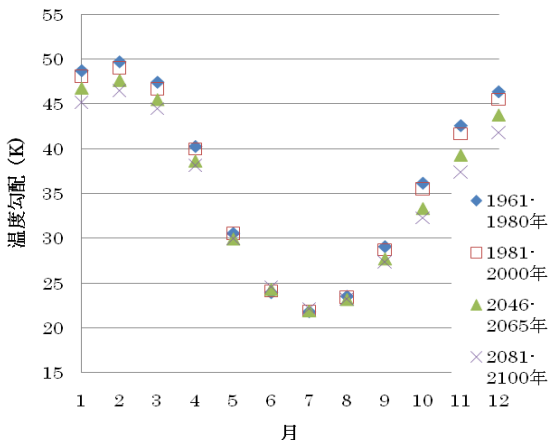


図-1 9つのGCMによって再現ならびに将来予測されている南北方向の温度勾配(低緯度[北緯0°～北緯30°]の気温(K)と高緯度[北緯60°～北緯90°]の気温(K)の差)を月ごとに示す。以上は、20世紀(1961～2000年)から21世紀(2046～2065年、2081～2100年)にかけて20年ごとに平均した値を用いた。

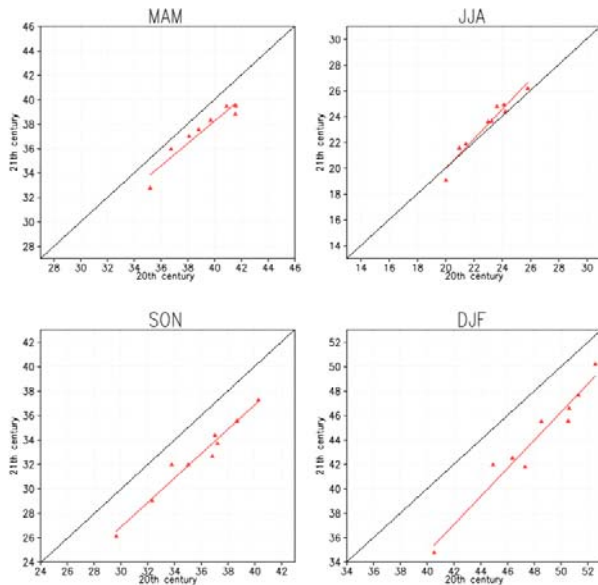


図-2 20 世紀と 21 世紀における温度勾配の比較(縦軸：21 世紀 横軸：20 世紀 (1961～2000 年) 図中の直線は、21 世紀 (2046-2065 年、2081-2100 年) の温度勾配を 9 つのモデルについてプロットし、モデル間の最小二乗回帰直線を示す。

求め、9 つのモデルについて平均したところ、20 世紀の平均気温と 21 世紀の平均気温は高緯度地域の気温上昇が中、低緯度に比べ著しいことがわかった。この理由として、高緯度において特に積雪量や氷河の減少が地表面アルベドの上昇を促し、その結果が影響しているものと考えられる。したがって、高緯度と低緯度の温度差、すなわち南北の温度勾配が将来減少するとの予測が複数の GCM によって示されていることを意味するものである。20 世紀、21 世紀における南北の温度勾配の月平均を 20 年ごとに平均し、9 つの GCM 平均値したものを図-1 に示す。図-1 より 6 月～8 月の 4 ヶ月間は南北の温度勾配がほとんど変化していないのに対し、9 月～4 月にかけての春・秋・冬の季節では南北の温度勾配は減少していることがわかる。図-1 より南北の温度勾配の変化に強い季節性が存在することが確認できたため、以降は季節ごとに分けて解析を進める。横軸を 20 世紀、縦軸を 21 世紀とし、20 世紀 (1961～2000 年)、21 世紀 (2046-2065 年、2081-2100 年) の各南北温度勾配 40 年間分を年平均し、季節ごとに分けて 9 つの GCM についてプロットしたものを図-2 に示す。図中の直線は、季節においてモデル間の最小二乗回帰直線である。図-2 から、3 月～5 月、9 月～11 月、12 月～2 月において、ほぼすべてのモデルで将来温度勾配は減少している。特に、9 月～11 月、12 月～1 月は温度勾配の減少は著しく、モデル間で値にばらつきが大きい。

4 . 中緯度地帯における大気波数

北緯 (30～60°N) において日々の気圧の偏差 (各緯度における気圧の平均値に対する同じ緯度の各グリッドの

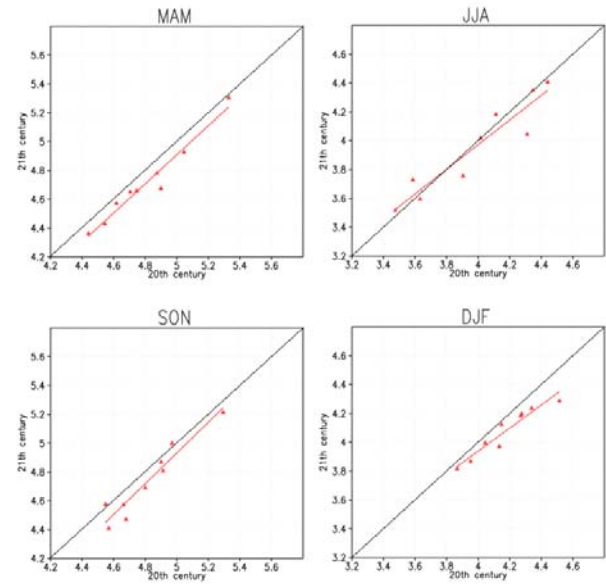


図-3 20 世紀と 21 世紀における大気波数の比較(縦軸：21 世紀 横軸：20 世紀 (1961～2000 年) 図中の直線は、21 世紀 (2046-2065 年、2081-2100 年) の大気波数を 9 つのモデルについてプロットし、モデル間の最小二乗回帰直線を示す。

気圧との差) から大気波数を計算し、その月平均の値を求めた。温度勾配と同様に横軸を 20 世紀、縦軸を 21 世紀における大気波数とし、21 世紀 (2046-2065 年、2081-2100 年) の大気波数を 9 つのモデルについてプロットし、図-3 に示す。3～5 月、9～11 月、12 月～2 月において、ほぼすべてのモデルで波数が減少している。これは、温度勾配の解析と一致した傾向である。モデルのばらつき具合を見ると、温度勾配では 3～5 月、6～8 月にモデル間のばらつきは小さいが、大気波数については、季節ごとにモデルのばらつきに違いは見られない。また、温度勾配では 3～5 月に比べ 9～11 月、12 月～2 月に大きく減少しているのに対し、大気波数ではこれらの季節で大気波数の減少量に違いはみられなかった。3～5 月、9～11 月について 20 世紀の波数の大きさに関わらず、各モデルの波数の減少は一定であるのに対し、12 月～2 月については、20 世紀の波数が大きいモデルほど、将来の波数の減少が大きい。これは著者らによって実施された室内実験で確認された回転流体の性質⁵⁾から南北の温度勾配と大気波数の関係を考えると、図 2 で示した南北温度勾配の減少は中緯度帯における大気波数の減少に結びつくのではないだろうか。そこで、温度勾配および大気波数が減少したこれらの月に着目し、極端豪雨およびその原因と考えられる極端に強い低気圧の頻度について分析を 6 章で行う。

5 . 中緯度帯における極端な降雨の頻度

温度勾配および大気波数が減少した 3～5 月、9～11 月、12 月～2 月について、21 世紀における極端な降雨現象は 20 世紀と比較してどのように変化すると予測されているのか明らかにすることを本章の目的とする。GPCP

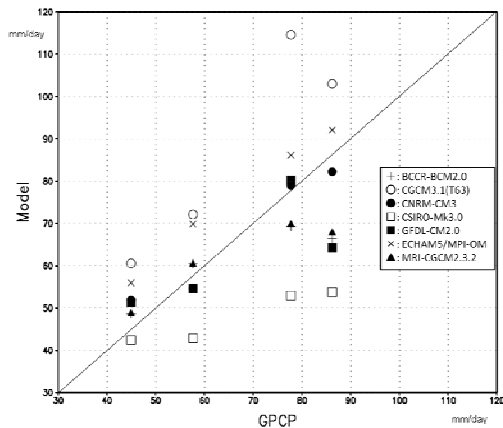


図-4 日本周辺地域(緯度:20N~50N, 経度 120E~150E)について 20 世紀後半の 12 年間における各季節の日降雨量の最大値を求め、観測値とモデルの出力結果を比較した。横軸:観測値(1997~2008 年)、縦軸:モデルの値[(1989~2000 年)、BCCR-BCM2.0 のみ 1987

データ(1997~2008 年)を用いて、極端降雨のモデルの再現性を確認するために、日本周辺地域(緯度:20N~50N, 経度 120E~150E)を対象に極端降雨の観測値と各モデルの 20 世紀再現実験における出力結果を比較する。観測値とモデルについて季節ごとに 20 世紀後半の 12 年間に観測された日降雨量の最大値を極端降雨とし、対象地域における平均値を求めた結果をモデルごとに図-4 に示す。データが存在する期間が限られているため、観測値(1997~2008 年)、モデル(1989~2000 年; BCCR-BCM2.0 のみ 1987~1998 年のデータによる結果である。各モデルについて季節ごとに観測値と値を比較すると各モデルには観測値との一定のずれがあり、大きいモデルでは観測値と 3 割以上値に差があることがわかる。これは、モデル内のパラメタリゼーションによる雲物理過程の取り扱いの違いによる影響が大きいと考えられる。ただし、気象予測の初期値として利用されている全球再解析データは GCM による数値計算結果を複数種類の観測データによってある時間間隔ごとに同化を行うものである。これに対して、図-3 で示す GCM による 20 世紀再現実験は、20 世紀のある時点における初期状態から大気-海洋-陸面過程の時間発展を計算したものであるため、観測データとの完全な一致を望む実験ではないことを付け加えておく。

観測によるデータは十分な期間存在せず、統計的な降水量の値を求めるにはデータ量が不足している。そこで、モデルの出力結果を用いて極端豪雨が現在と将来とではどのように変化するかを求めた。7 つのモデルについて、グリッドごとに 20 世紀の年最大日降水量を求め、それがグンベル分布に従うと仮定して、20 世紀における 10 年確率降水量以上の降雨をそのグリッド地点における豪雨と定義する。将来、波数および温度勾配の減少が特に予測されている 3-5 月、9-11 月、12 月-2 月について、グリッドごとに日降水量が定義された豪雨の値以上の日

数が 20 世紀(40 年間)および 21 世紀(40 年間)にそれぞれ何日あるかを数え、豪雨頻度の変化について議論を行う。

$$Pr = x_0 - \frac{1}{\lambda} \ln \left(\ln \frac{T}{T-1} \right) \quad (1a)$$

$$\frac{1}{\lambda} = 0.7797 s_x \quad (1b)$$

$$\bar{x} = \bar{x} - 0.4500 s_x \quad (1c)$$

Pr: 10 年確率降水量(mm/day), T: 再現期間 10 年

$\bar{x}$: 年最大日降水量の平均, s_x : 年最大日降水量の分散

20 世紀と 21 世紀における豪雨の増加日数を中緯度帯全体について平均し、それらをモデルごとに表-2 に示す。各期間において、7 つ中すべての GCM が豪雨頻度の増加を予測していることがわかる。モデル間で増加量にばらつきが見られるものの、すべてのモデルで共通して 3-5 月と 9-11 月の増加量はほぼ等しく、12-2 月において大きく増加している。これは、豪雨の頻度増加がモデルに依存し、豪雨増加のメカニズムを考察する上でモデル間の比較が重要となると考えられる。

6. 中緯度帯における極端に強い低気圧の頻度

20 世紀の年最低の地表面日気圧を求め、それが正規分布に従うと仮定して、その 10 年確率以下の気圧を極端に強い低気圧と定義する。豪雨頻度の解析と同様に、3-5 月、9-11 月、12 月-2 月について、各グリッドにおいて極端に強い低気圧以下の日数が 20 世紀(40 年間)および 21 世紀(40 年間)中に存在する日数を算出する。

$$P = \bar{x} - \sigma \quad (2a)$$

P: 10 年確率低気圧(hpa), $\bar{x}$: 年最低日低気圧の平均

σ : 年最低日低気圧の分散, c: 事象値

非超過確率 $W(c)=1/T=1/10=0.1$ から正規分布の片側

20 世紀と 21 世紀における極端な低気圧の増加日数を中緯度帯全体について平均し、それらをモデルごとに表-3 に示す。各期間において、多くの GCM が極端な低気圧の頻度の増加を予測している。豪雨頻度の解析と異なり、明確に頻度が増加したモデルは、3-5 月は 7 つ中 3 つ、9-11 月は 7 つ中 4 つである。また、各モデルについて豪雨の頻度増加と極端に強い低気圧の頻度増加に関して顕著な相関関係は見られない。モデル間の平均を見ると、豪雨頻度の解析の時と同様に 3-5 月と 9-11 月の増加量はほぼ等しいが、12-2 月においてはすべてのモデルが極端に強い低気圧の増加を予測している。表-2 における豪雨頻度に関しても同季節ではすべてのモデルが将来の豪雨頻度の増加を予測しており、以上から低緯度-高緯度間の温度勾配と豪雨特性ならびに低気圧の強

表-2 20 世紀における 10 年に 1 回の日降水量を超える降水の発生回数に対する
21 世紀における同様の日降水量を超える降水の発生回数の増加量

	CGCM3.1(T63),	CNRM-CM3.0	GFDL-CM2.0	GISS-AOM	ECHAM5/MPI-OM	GFDL-CM2.0	CSIRO-Mk3.0,	モデル平均
3-5 月	4.4	4.2	4.8	4	5.6	4	2.8	4.3
9-11 月	4	4.7	5	4	5.2	4.1	3.2	4.3
12-2 月	6.4	6.2	6.5	4.9	7.4	6.2	3.9	5.9

表-3 20 世紀における 10 年に 1 回の極端に強い日スケールの低気圧の発生回数に対する
21 世紀における同じ大きさの低気圧の発生回数の変化量

	CGCM3.1(T63),	CNRM-CM3.0	GFDL-CM2.0	GISS-AOM	ECHAM5/MPI-OM	GFDL-CM2.0	MIROC3.2(hires)	モデル平均
3-5 月	2.2	-0.48	0.03	4	0.5	1.8	0.5	1.23
9-11 月	1.5	0.6	1.6	4	-0.3	2	-0.3	1.3
12-2 月	1.5	3.7	1.1	4.9	1.6	2.6	1.6	2.4

さの関係は特に 12-2 月において顕著であることが明らかとなった。

7. まとめ

本論文は極端現象のメカニズムの解明を目的とし、南北方向の温度勾配の変化、大気波数の変化、豪雨の発生頻度および強い低気圧の発生頻度について解析を行ったものである。低緯度帯、中緯度帯、高緯度帯における 20 世紀、21 世紀の気温変化から、温暖化による気温上昇は緯度帯に大きく依存し、高緯度について気温上昇が著しい。これは、南北の温度勾配（高緯度と低緯度の温度差）が緯度による温暖化の進行の程度の違いによって減少することを意味している。極端降雨のモデルの再現性を確認するために、日本周辺地域対象に極端降雨の観測値と各モデルの 20 世紀再現実験における出力結果を比較した。観測値と各モデルの値にはモデル固有の一定のずれがあった。これは、パラメタリゼーションによる雲物理過程の取り扱いの違いによるものではないかと考えられる。9 つのモデルを用いた 20 世紀、21 世紀における季節ごとの南北温度勾配に関する解析から、3-5 月、9-11 月、12 月-2 月において温度勾配の減少が予測されていることが確認された。また、大気波数に着目した解析からは、温度勾配と同様の期間で波数の減少がみられた。上記期間において、7 つのモデルを用いた将来の豪雨の発生頻度はモデル間で増加量にばらつきがあるが、3-5 月と 9-11 月の増加量はほぼ等しく、12-2 月において大きく増加する共通の傾向がみられた。豪雨の原因と考えられる極端な低気圧は多くのモデルで増加が予測されており、モデル平均すると 3-5 月と 9-11 月の増加量はほぼ等しく、12-2 月において大きく増加する傾向がある。個々のモデルでは 3-5 月と 9-11 月に増加するモデルは半分程度であり、また豪雨の増加量と極端な低気圧の増加量の間に比例した関係は見られなかった。これまでの、温度勾配、大気波数、極端な降雨および極端な低気圧の解析結果を考察するにあたり、極端現象の増加に対して、次のようなメカニズムが考えられる。

温暖化の進行の程度が低緯度に比べ高緯度が著しいことから、将来 3-5 月、9-11 月、12 月-2 月について南北

方向の温度勾配が減少する。これらの月について温度勾配の変化により、地球物理学的性質による南北方向の温度勾配と大気波数の関係から中緯度地域で大気波数が減少する。大気大循環のエネルギーの元となる太陽定数が一定と考えた場合、大気波数の減少は大気不安定度を解消する場合・条件の減少を意味すると推測できる。中緯度帯における水蒸気量が一定と仮定した場合、一回あたりにより多くの不安定の解消する必要が生じ、単一の降水イベントにおける降水量は増大するのではないだろうか。また、大気波数の減少により、気圧の周期変化が遅くなることで、干ばつの周期が長くなり、干ばつの頻度や強度の増加がもたらされるとの仮説が考えられる。

今後は GCM の出力結果だけでなく、全球再解析データについても解析を行ない、さらに温度の南北傾度、豪雨特性、ならびに極端現象の物理的な関係を解明する所存である。

参考文献

- 1) IPCC : IPCC 第 4 次評価報告書
 - 2) Trenberth, K.E.:1999 'Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change.' *Climate Change* **42**:327-339
 - 3) Gregory, J. M., Mitchell, J. F. B., and Brady, A. J.: 1997, 'Summer Drought in Northern Midlatitudes in a Time-Dependent Climate Experiment' *J. climate* **10**:662-686
 - 4) Meehl, G. A. et al. :2000, 'Trends in extreme weather and climate events: issues related to modelling extremes in projections of future climate change.' *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **81**, 427-436
 - 5) 秦佳弘, 山田朋人, 泉典洋(2009):地球温暖化に伴う気候変動が傾圧不安定波の波数に与える影響,土木学会北海道学術論文報告集(第 66 号)
 - 6) 秦佳弘, 山田朋人(2010):気候変動に伴う極端現象の増加と南北温度勾配および大気波数の関係, 第 23 回水文・水資源学会総会・研究発表会
- 謝辞：本研究は地球規模課題対応国際科学技術協力事業・気候変動の適応又は緩和に資する研究(領域特定型)および平成 22 年度 CREST 持続可能な水利用を実現する革新的な技術システムの成果の一部である。