マルチモデルアンサンブルによる気候変動に伴う 熱帯低気圧特性の将来変化予測

Multi-Model Ensemble Projection of Future Tropical Cyclone Characteristics due to Global Climate Change

森 信人¹・村上裕之²・志村智也³・中條壯大⁴・安田誠宏⁵・間瀬 肇⁶

Nobuhito MORI, Hiroyuki MURAKAMI, Tomoya SHIMURA
Sota NAKAJO, Tomohiro YASUDA and Hajime MASE

Future change of tropical cyclone (TC) climatology is discussed by GCM ensemble runs. With GCMs, large degrees of uncertainty exist in future change in TC climatology at basin scale, and central pressure changes for each basin. The projection of future change of TC characteristics was conducted based on a series of ensemble experiments by the high-resolution AGCMs. The model ensemble means and their standard deviations of cyclogenesis and cycloysis are discussed in detail. The future change of location and intensity of TC are analyzed with synoptic climate.

1. 序論

近年、地球温暖化の海岸・海洋への影響評価研究が進められており、例えば海岸構造物に対する影響についての研究などが進められている（例えば、関本ら、2010）。特に西日本においては、台風が設計外力を決める場合が多く、台風特性の将来変化は、日本の太平洋側において極大波浪や高潮の将来変化に顕著な影響を与えることが予見されている。しかし、日本や東アジアといった領域スケールでの台風上陸個数等の台風特性の将来変化は予測の不確実性が大きく、その定量的な評価が難しい。

地球温暖化が台風に及ぼす影響については、多くの研究が行われており、例えば海面水温（SST）との関係が明らかにされている（例えば Vecchi ら、2007）。全球で見ると、温暖化により将来の台風の強度が増加し、数が減る傾向が見られるとの予測結果が多くあり、IPCC AR4 では、“it is more likely than not that anthropogenic influence has contributed to increases in the frequency of the most intense tropical cyclones” とある。Knutson ら（2010）は巨大台風の生成に及ぼす人的影響について議論しているが、現在のところ観測結果からこれを見出すことは難しい。台風の将来予測結果は外力およびモデル依存性が強く、素過程や解像度が異なる様々な機関で独立に実施された結果にはばらつきが大きいので、定量的な傾向を把握することが難しい。一方、高潮等の沿岸域への影響評

価に対して用いるためには、上記の議論より詳細な湾スケールの変化予測に踏み込む必要がある。

そこで中條ら（2011）は、確率台風モデルに、台風の発生位置や中心気圧のマクロ的特性の将来変化を埋め込み、台風の将来変化をモンテカルロ法で確率的に評価する研究を実施している。このようなアプローチでは、再現期間等、工学的に必要となる確率評価が可能であるが、将来の台風特性の設定を正確にする必要がある。

本研究では、気候変動に伴う熱帯低気圧（以下TC）のマクロ変化をターゲットに、GCMの偏差を考慮しつつ発生個数、発生・消滅位置等のTC特性の将来変化とその不確実性について検討を行った。

2. 解析手法の概要

(1) GCMデータの概略

序論で述べたように、台風の将来予測結果は外力およびモデル依存性が強く、SST等の外力、素過程や解像度が異なる様々なGCMのモデルアンサンブルにより評価することは難しい。Murakami ら（2012）は、気象研の60km解像度大気GCM（Mizuta ら、2012；以下60km AGCMと略記）を用いて、SST、初期条件および雲物理モデルをそれぞれ変化させ、台風の個数の将来変化に及ぼすそれぞれの影響について検討を行っている。この数値実験は、同一のGCMプラットフォーム下でアンサンブル実験を行ったユニークなものであり、本研究ではこれらのアンサンブル予測結果を用いて、台風の個数、発生位置、消滅位置、中心気圧、経路および移動速度（以下単に速度）について解析を行った。

60kmAGCMの概略は以下の通りである。計算は現在気候が1979-2003年、将来気候が2074-2099年の期間で、下

1 正会員	博(工)	京都大学准教授 防災研究所
2	博(理)	ハワイ大学研究員
3 学生会員	修(工)	京都大学大学院工学研究科
4 正会員	博(工)	熊本大学助教 大学院自然科学研究科
5 正会員	博(工)	京都大学助教 防災研究所
6 正会員	工博	京都大学教授 防災研究所

表-1 解析に用いたCGMモデルコードとおよびその概要

Model MRI-AGCM-3.1H (60km)				Model MRI-AGCM-3.2H (60km)			
SST/Initial	Initial 0	Initial 1	Initial 2	SST/Physics	Yoshimura	Kain-Fritsch	Arakawa-Schubert
CMIP3	3.1H	3.1H_m1	3.1H_m2	CMIP3	3.2H_YS	3.2H_KF	3.2H_AS
CSIRO	3.1H_c	3.1H_c_m1	3.1H_c_m2	Cluster 1	3.2H_YS_c1	3.2H_KF_c1	3.2H_AS_c1
MIROC	3.1H_m	3.1H_m_m1	3.1H_m_m2	Cluster 2	3.2H_YS_c2	3.2H_KF_c2	3.2H_AS_c2
MRI	3.1H_M	3.1H_M_m1	3.1H_M_m2	Cluster 3	3.2H_YS_c3	3.2H_KF_c3	3.2H_AS_c3

部境界条件として観測のSSTとIPCC SRES A1Bに基づく将来SSTをそれぞれ与えている。60kmAGCMアンサンブル実験は、2つの異なるモデルバージョン（MRI-AGCM 3.1Hおよび3.2H）で構成され、表-1に示すように、3.1Hでは4通りのSSTと3通りの初期条件アンサンブル、3.2Hでは4通りのSSTと3通りの雲物理過程アンサンブルの合計24ケース実施された（以下では表-1のコード番号に従って表記）。3.1HのSSTはCMIP3の平均に加えて3機関のAOGCMの結果のSSTが与えられ、3.2Hでは、CMIP3のSSTの将来予測結果をクラスター分析し、特徴的な3つのSST将来分布が与えられている。この2アンサンブル群に加え、同じモデルを基本とする20km解像度のMRI-AGCM3.1S, 3.2S (Kitohら, 2009) も加え、合計26ケースを解析対象とした。

(2) 将来変化量の推定方法

計算結果から熱帯低気圧（以下、単に台風）を抽出するとともに、環境場についても解析を行った。台風の抽出条件は、Murakamiら（2012）に従い、現在気候における全球の発生個数が一致するように閾値を与えている。

現在気候実験結果の再現性についてNOAAのIBTrACSにより精度検証を実施し、それぞれのマクロ量について、現在気候の再現性に基づいた重み付き平均操作をした上で将来評価を行った。重み付き平均操作には正規分布を用い、分散をモデル分散で与え、寄与率を現在気候の再現精度で評価した（詳細はMori, 2012）。台風マクロ量の将来変化は、発生個数、発生・移動・消滅位置、中心気圧、移動速度および方位の平均と分散を解析対象とした。個数、位置については全球・海域別に評価し、その他の統計量については緯度方向の平均値を対象に評価を行った。海域毎の評価では、中條ら（2011）の海域分類に従い、北インド洋（NI）、北西太平洋（WP）、北東太平洋（EP）、北大西洋（NA）、南インド洋（SI）、南太平洋（SP）、南大西洋（SA）に分類した。将来変化量については、t検定を実施し、有意水準95%を満すものを掲載した。

表-2 海洋毎の発生数の平均変化割合とモデル間標準偏差

Basin	mean	σ	σ (SST)	σ (init)	σ (phys)
WP	-0.13	0.26	0.29	0.08	0.09
EP	-0.21	0.21	0.16	0.07	0.14
NA	-0.15	0.23	0.23	0.20	0.23

3. 結果と考察

(1) 発生個数の将来変化

まず発生個数について検討を行った。図には示さないが、全球では20.4% ± 34.8%でTC発生個数は減少し、北半球のばらつきと比較して、南半球ではほぼ全モデルで減少傾向を示した。北半球では概ね減少傾向であるが、雲物理およびSSTによる影響が大きく、モデル間の変動が大きい。同一のデータを使用しているため、全球的傾向はMurakamiら（2012）の結果とほぼ同じである。図-1に示すのは、各海域における台風発生数の将来変化割合である。台風の将来変化割合は、ほとんどの海域で減少傾向であるが、将来SSTの与え方によっては増加するケースも見られる。SSTの依存性は3.1H実験の方が顕著であり、北半球のほうが応答が強い。主な台風の発生域であるWP, EP, NAに着目すると、変化要因に対する応答が異なり、例えば初期値・SSTアンサンブルの3.1Hでは安定した傾向を示したEPは、雲物理・SSTアンサンブルを行った3.2Hでは大きくばらついている。このことは、単にSSTの変化度合いだけではなく、その空間パターンが台風の発生個数に大きな影響をあたえることを示している。この3海域における将来変化量の平均値とモデル偏差を表-2に示す。モデル偏差では、SST、初期値（init）および雲物理（phys）アンサンブルによる標準偏差についても調べた。表からわかるように、これら海域では13～21% 将来個数減少があり、平均値とほぼ同じかそれ以上の標準偏差が存在する。今回考慮した3つの要因の中でもっとも影響が強いのはSSTであり、初期値と雲物理モデルはSSTの1/3程度の寄与である。但し、EPでは3要因がほぼ同じオーダーであり、太平洋とは応答がかなり異なることが分かった。発生個数の将来変化にはSST>>雲物理モデル=初期値の順で影響を与える。

(a) 初期値・SST依存性 (MRI-AGCM 3.1H)

(b) 雲物理・SST依存性 (MRI-AGCM 3.2H)

図-1 台風発生数の将来変化割合

(a) 初期値・SST依存性 (MRI-AGCM 3.1H)

(b) 雲物理・SST依存性 (MRI-AGCM 3.2H)

図-2 日本周辺の台風消滅位置の将来変化 (×：観測値，矢印：将来変化，図中の文字は表-1のモデルコードに対応)

(2) 発生・消滅位置の将来変化

ついで、台風の発生・消滅位置の将来変化について調べた。ここではこれらの位置を海域毎に重心を取り、その位置変化で評価した。詳細な経路変化および季節変化等の解析は別の機会に譲りたい。TCの発生・消滅位置は、多くのケースで経度方向に大洋の中心（北西太平洋の場合は東）へ移動し、緯度方向には経度方向の数割極方向にシフトする変化が見られた。図-2は日本周辺の消滅位置の将来変化を示したものである。図-2(a)の初期値・SSTアンサンブル結果に対して、(b)の雲物理・SSTアンサンブルの結果は、雲物理モデル毎に現在気候の重心位置が異なるものの、SST変化に対する将来変化のパスは良く似ている。これはSSTの空間分布により将来変化の経路が大きく影響を受けることを意味している。また、雲物理モデルは経路そのものには大きな影響を与えないが、消滅位置特性を南北方向に変化させる傾向がある。

台風の発生・消滅位置について詳細に見るため、図-3に示すのは、海域毎の台風発生位置の将来変化である

(北・東向きが正)。まず、経度方向の将来変化は緯度方向に比べて数倍大きい。また、3.2Hの結果の方がアンサンブル間の符号の変化が少ない、つまり不確実性が低い結果であった。TCの発生・消滅位置は、多くのケースで経度方向に大洋の中心へ移動し、緯度方向には経度方向の数割極方向にシフトする変化が見られた。

主な台風の発生域であるWP, EP, NAの3海域における将来変化量の平均値とモデル偏差を表-3に示す。モデル偏差については表-2と同じ方法で整理している。経度方向の発生位置の将来変化は、WPで1.58度、EPで3.2度であり、海域により2倍の開きが見られた。一方、緯度方向はこれよりかなり小さく、モデルの解像度が60kmであることを考えると、誤差の範囲に入る将来変化量であった。台風の発生個数と異なり、経路の変化は、SST、初期値および雲物理モデルの違いによる偏差がほぼ同じオーダーであり、ランダム性が高いことがわかった。海域別には、最も将来変化が強く表れるのは北東太平洋であり、経路が平均3.2度西進し、SSTの差による変動は

図-3 台風の発生位置の将来変化 (上段: 経度, 下段: 緯度, 棒グラフは図-1の凡例参照)

130%程度である。一方、北西太平洋や北大西洋では物理モデルの影響も大きく、海域毎に不確実性が異なる。将来移動量については、発生、移動および消滅位置の順で変化が大きく、消滅位置の移動量は発生位置と比べて約2倍である。つまり、中緯度に位置する日本周辺では、台風経路の将来変化が顕著に出やすいことがわかった。

(3) 中心気圧・速度等の将来変化

中心気圧、速度、進行方向については、大陸の影響を無視すると緯度方向に明確な構造を持つため、その将来変化については、経度方向に平均し、緯度方向の分布形状と標準偏差について評価した。速度および進行方向は、平均値および標準偏差共に統計的に有意な将来変化は見られなかった。一方、中心気圧については経度方向に顕著な将来変化傾向が見られ、赤道から極域に向かって中心気圧が低下する傾向が得られた。

図-4に示すのは、経度方向に平均化した中心気圧の将来変化の分布であり、細線は各60kmGCM、太線は20km GCMとCMIP3を用いたモデルアンサンブルの結果

表-3 海洋毎の台風発生位置の将来変化とモデル間標準偏差
(a) 経度方向の重心移動量 (degree)

Basin	mean	σ	σ (SST)	σ (init)	σ (phys)
WP	1.58	2.73	3.84	3.25	0.88
EP	-3.20	5.50	3.90	3.84	2.61
NA	2.00	3.98	3.46	2.45	5.25

(b) 緯度方向の重心移動量 (degree)

Basin	mean	σ	σ (SST)	σ (init)	σ (phys)
WP	0.16	0.68	0.82	1.08	0.46
EP	0.43	0.52	0.59	0.42	0.49
NA	0.31	1.04	1.35	1.22	1.64

図-4 経度方向に平均化した中心気圧の将来変化
(細線: 各 GCM, 太線: Mori (2012))

(Mori, 2012) である。60kmモデルの結果は、北緯30度で平均5hPaの低下が見られ、変動もほぼ同じオーダであった。この傾向は、20kmモデルの結果と比較すると低緯度と高緯度で減少程度が小さく、台風の力学的特性にモデルの解像度が影響していることが示唆される。

(4) 環境場の影響

発生位置重心等の経路代表量についての将来変化と台風の力学的および熱力学的気候値 (SST, Maximum Potential Intensity:MPI, 相対湿度, 鉛直シア等) の関係を検討した。発生位置の将来変化と台風の力学的および熱力学的気候値の関係は時間・空間スケールが異なるため、明瞭な関係を得ることが難しいが、幾つかの代表量とは弱い相関が見られた。

まず、太平洋・インド洋では、60kmモデルアンサンブルと発生位置の将来変化と関連するSSTについて明確な関係は見られなかった。一方、20kmモデルとCMIP3の解析結果では、図-5に示すようにNino SST海域の昇温と相関があり、WPでは特にNINO4海域、インド洋NINO-IOBW海域と相関が見られ、太平洋のTCの発生位置と

図-5 発生位置の将来変化（緯度経度合計）とSSTの関係（インド洋・太平洋のみ）

ENSOの関係が示唆された。CMIP3のように平均的に昇温を考えると将来のSSTの昇温とこれに対応した海域の発生位置の将来変化は明瞭である一方、60kmモデルアンサンブル実験のように、将来SSTのパターンを変化させると将来の位置変化が一義的でなくなることがわかった。

ついで、図-6に示すのは、WP、EP、NAに絞った台風消滅位置の将来変化と環境場との関係である。図中の記号はモデルコードを意味する。経度方向の発生位置の移動については、鉛直シアや、上昇流といった力学的な気候値と有意な相関は見られなかったが、500hPa高度の上昇流 ω_{500} とは高い相関があった（ $R=0.87$ ）。一方で、熱力学的な気候値とも弱い相関が見られた。例えば、MPIや700hPa高度相対湿度の将来変化と発生位置の経度方向の将来変化は弱い相関が見られ、対流圏下層の循環場の影響が示唆される結果が得られた。但し、海域毎に見ると、北西太平洋では明確なシグナルは得られなかった。将来の台風特性の変化と環境場との関係は、力学的および熱力学的な両面から詳細に議論する必要がある、今後の課題としたい。

4. 結論

AGCMアンサンブル実験結果を元に、台風のマクロ統計量の将来変化について評価を行った。主な台風の発生海域では、台風個数の将来変化割合は、北半球の各海域で13～21%の減少であった。

経度方向の発生位置の将来変化は、WPで1.58度、EPで3.2度であり、海域により2倍の開きが見られた。将来移動量については、発生、移動および消滅位置の順で変化が大きく、消滅位置の移動量は発生位置と比べて約2倍である。つまり、中緯度に位置する日本周辺では、台風経路の将来変化が顕著に出やすいことがわかった。

図-6 台風消滅位置の将来変化と ω_{500} との関係（文字：モデルコード、赤：WP、緑：EP、青：NA）

また、中心気圧については経度方向に顕著な将来変化傾向が見られ、速度および進行方向は、平均値および標準偏差共に統計的に有意な将来変化は見られなかった。

今後は、より詳細な解析、特に台風経路の重心位置以外の変化傾向、SSTの昇温パターンとの関係を明らかにするとともに、今回得られた台風の将来変化傾向を確率台風モデルに取り入れた評価を実施する予定である。

謝辞：本研究は、文部科学省気候変動リスク情報創生プログラムおよび科学研究費補助金による成果である。

参考文献

- Kitoh, A. et al. (2009) : Projection of changes in future weather extremes using super-high-resolution global and regional atmospheric models in the kakushin program, Hydrological Research Letters, Vol.3, pp.49-53.
- Knutson, T.R. et al. (2010) : Tropical cyclones and climate change, Nature Geoscience, 3, pp.157-163.
- Mizuta, R. et al. (2012) : Climate simulations using MRI-AGCM3.2 with 20-km grid. J. Met. Soc. Japan, 印刷中.
- Mori, N. (2012) : Projection of future tropical cyclone characteristics based on statistical model, In cyclones Formation, Triggers and Control, Nova Science Publishers, Inc., 印刷中.
- Murakami, H., R. Mizuta, and E. Shindo (2012): Future changes in tropical cyclone activity projected by multi-physics and multi-SST ensemble experiments using the 60-km-mesh MRI-AGCM. Climate Dynamics, DOI:10.1007/s00382-011-1223-x.
- Vecchi, G. A. and B. J. Soden (2007) : Effect of remote sea surface temperature change on tropical cyclone potential intensity, Nature 450, pp.1066-1070.
- 関本恒浩・安野浩一郎・中嶋さやか・磯部雅彦 (2010) : 海域施設の温暖化適応策に向けた新しい性能評価指標の提案, 土木学会論文B2 (海岸工学), Vol.66, 901-905.
- 中條壯大・森 信人・安田誠宏・間瀬 肇 (2011) : 全球確率台風モデルの開発と地球温暖化影響評価への応用, 土木学会論文B2 (海岸工学), Vol.67, No.2, pp.I_1176-I_1180.