24. 温暖化による台風気候の変化 — 大気大循環モデルを用いた数値実験 —

CLIMATOLOGICAL CHANGES IN TROPICAL CYCLONES ASSOCIATED WITH GLOBAL WARMING
— A NUMERICAL EXPERIMENT WITH AN ATMOSPHERIC GENERAL CIRCULATION MODEL —

筒井純一*

Junichi TSUTSUI*

ABSTRACT; To investigate the impacts of anthropogenic global warming on tropical cyclone (TC) activity, climate simulations were conducted under the present and CO₂-warmed conditions using the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model version 2. The CO₂-warmed condition includes doubled atmospheric CO₂ concentration and about 1°C of tropical sea surface temperature (SST) warming. Simulated TCs were objectively selected from twice daily instantaneous outputs during an eight-year time integration period of each simulation, and the changes associated with global warming were examined in terms of frequency of occurrence and mean intensity.

The frequency of global TC occurrence remains unchanged in response to the CO₂-induced warming. This fairly constant global TC frequency is in agreement with the almost neutral tendency in the zonally-averaged moist instability in the tropics. On the other hand, regional TC frequencies indicate relatively large tendencies depending on TC basins, including increased tendency in the western North Pacific and decreased tendency in the Western Hemisphere. These regional variations are connected with large-scale circulation and similar to the natural variability of observed TCs. Simulated changes in the mean TC intensity highlight increased tendencies over the warm SST regions in the western Pacific, which contribute to the significantly increased mean intensity of global TCs.

KEYWORDS; tropical cyclone, typhoon, general circulation model, global warming, climate change

1 緒 言

地球温暖化問題の社会的関心の高まりは、先進国等の温室効果気体の削減目標を定めた京都議定書の採択につながった。しかしながら、二酸化炭素などの温室効果気体の排出削減には、社会経済に深刻な影響を与えるほどの相当な努力を要する上、大気中二酸化炭素濃度の安定化に向けては、途上国からの排出削減も含めたさらなる努力目標を達成する必要がある。今後、長期にわたる温暖化対策のインセンティブを保つためには、将来の気候変動およびその社会的影響について、可能な限り正確かつ定量的な情報が求められる。温暖化に伴う台風の変化は、防災および水資源確保という点で、社会的影響の非常に大きい気候変動の一要素である。しかしながら、将来の台風の変化について、現時点では信頼できる予測結果は得られていない(西岡・原沢, 1997)。

本研究では、温暖化が台風活動におよぼす影響として、発生頻度および平均的な発達強度に注目する。一般に、熱帯低気圧は強度や発生海域によって様々な呼称があり、台風もその一つとされるが、本論文では、台風を風速の大きい熱帯低気圧に対する総称的な用語として用いる。台風の活動は、人為的な温暖化の影響以前に、さまざまな時間スケールの自然の気候変動の影響を受けている。ある海域の台風発生数は年によって大きく変動し、その変動の特徴も海域によって異なる。このため、温暖化の影響を検討するためには、より長期間の観測データの蓄積が必要である。しかしながら、地球全体の台風をくまなく観測できるようになったのは、人工衛星による観測が始まった1970年代以降であり、そのデータ蓄積期間は必ずしも十分ではない。したがって、温暖化が台風活動におよぼす影響を検討するためには、大気大循環モデル (general circulation model; GCM) を用いた数値シミュレーションが有力な研究手段となる。

GCMによる台風頻度についての研究では、通常、GCMの長期時間積分の結果から台風と見なされる擾乱を客観的な基準で選び出し、その出現頻度が温暖化による放射強制力や海面水温の変化に対してどのように変化するかが調べられる。こうした研究で用いられるGCMの空間分解能は、現時点では、高いものでも水平方向の計算格子間隔で120 km程度であり、台風の特徴的な構造である台風の眼やその周りの壁雲は表現されない。しかしな

* (財) 電力中央研究所 環境科学部 Central Research Institute of Electric Power Industry, Environmental Science Department

がら、水平格子間隔数百 km 程度の分解能であっても、上空に温暖核を有する前線の渦としての台風の表現は可能であり、そのような台風の地理的・季節的な発生分布が現実的に再現できるモデルもいくつかある (例えば、Tsutsui and Kasahara, 1996)。ところが、温暖化による台風頻度の変化となると、必ずしも一貫したシミュレーション結果が得られているわけではない。これまで、米国地球流体力学研究所 (Broccoli and Manabe, 1990)、英国気象局 (Haarsma et al., 1993)、ドイツのマックス・プランク気象研究所 (Bengtsson et al., 1996)、それに気象庁 (Sugi et al., 2000; Yoshimura et al., 2000) のモデルを用いた研究事例があるが、温暖化による台風数の増減傾向についての予測結果はモデルによって異なる。最近の比較的高分解能のモデルを用いた研究では、温暖化によって台風数が減少するという結果が比較的多く報告されている。しかしながら、そうした変化のメカニズムが完全に理解されているわけではない。本研究では、これまでの研究事例を踏まえて、GCM シミュレーションから得られる台風の変化をそれに関連する大規模大気循環場とともに詳しく分析し、温暖化が台風活動におよぼす影響についての理解を深めることを目的とする。

2 数値モデル

本研究では、米国大気研究センター (NCAR) で開発された CCM2 (Hack et al., 1993) と呼ばれる GCM を用いる。モデルの力学方程式は、水平風渦度および発散、気温、水蒸気、それに地表面気圧に対する予測方程式から構成され、水平方向にスペクトル変換法、鉛直方向に差分法を用いて時間積分が計算される。ただし、水蒸気の移流計算はラグランジュ的に扱われる。鉛直座標には、地表面付近の地形に沿った座標系 (シグマ座標系) から成層圏の気圧座標系に滑らかに遷移するハイブリッド座標系が用いられている。時間積分は、線形項および非線形項に対しそれぞれ陰解法および陽解法を適用するセミ・インプリシット法を利用したリーフフロックスキームが用いられている。モデルの標準的な分解能は、水平 T42 (緯度・経度 2.8 度の計算格子に相当) および鉛直 18 層 (モデル上端は 2.917 hPa レベル) であり、時間積分間隔は 20 分である。計算格子間隔より小さい空間スケールの物理過程は、いわゆるパラメター化と呼ばれる手法によって評価される。そのような物理過程には、雲、放射、湿潤対流、大規模凝結、大気境界層、地表面エネルギー交換などがある。このうち、台風のシミュレーションに重要な役割を果たすのが湿潤対流であり、CCM2 では Hack (1994) による方式が採用されている。

CCM2 による気候学的な台風の再現性については、Tsutsui and Kasahara (1996) によって詳しく調べられ、発生位置の地理的分布や発生数の季節変動の再現性が比較的良好であることが示されている。地域的には、北太平洋西部および南太平洋西部で特に再現性に優れるものの、北大西洋および北太平洋東部では観測される台風の発生分布の特徴があまり良く表現されないという違いがある。こうした海域による再現性の違いには、台風の発生機構 (McBride, 1995) との関連性が示唆される。多くの台風は、モンスーンによる西風とその高緯度側の貿易風による東風との間に形成されるモンスーントラフと呼ばれる低圧部において発生する。これに対し、大西洋の台風発生域にはモンスーンによる西風領域が存在せず、他の海域とは発生機構が異なる。ここでは、それぞれの発生機構をモンスーントラフ型および貿易風型と称する。モンスーンによる西風は、下層風の収束域の形成の他、台風発生条件 (Gray, 1979) の一つである風の鉛直シアが小さくなることにも関与する。したがって、貿易風型の台風発生においては、一時的に鉛直シアを小さくするような風場が形成される必要がある。さらに、北太平洋東部の台風発生については、大西洋を西進する擾乱と中央アメリカの山岳との相互作用が重要な役割を果たしているという指摘もある (例えば、Molinari et al., 2000)。いずれにしろ、CCM2 では、主要な台風発生機構であるモンスーントラフ型の台風発生は比較的良好に表現できるが、貿易風型および地形の影響を受ける台風発生機構の再現性はあまり良くないと言える。

3 数値実験

本研究では標準分解能の CCM2 を用いた 2 種類の気候シミュレーションを実施した。一つは現状気候を想定したケース、もう一つは大気中 CO_2 濃度を 2 倍にしたケースで、両者とも 8 年間の時間積分を行った。ここでは、それぞれコントロールランおよび CO_2 倍増ランと呼ぶ。両者の違いは CO_2 濃度および海面水温境界条件のみである。コントロールランでは、 CO_2 濃度を 330 ppmv に設定し、海面水温には月平均気候値を用いた。これに対

し、CO₂ 倍増ランでは、CO₂ 濃度をコントロールランの 2 倍に設定し、海面水温には気候値に温暖化による偏差を加えた値を用いた。

CO₂ 倍増ランに適用される海面水温偏差は、NCAR の Climate System Model (CSM) と呼ばれる大気・海洋結合大循環モデルを用いて実行された CO₂ 漸増気候シミュレーション (平口ほか, 1998) の結果に基づいて算出した。この気候シミュレーションでは、CO₂ 濃度が現状レベルで一定に保たれた 10 年間のランに続いて、年 1% の割合で CO₂ 濃度が増加するというシナリオで 115 年間のランが行われた。ここでは、月平均された海面水温の出力値から、CO₂ 濃度がほぼ 2 倍に達する漸増開始 71 年目から 80 年目までの 10 年間と、最初の 10 年間の平均を計算し、両者の差を CO₂ 倍増ランに適用する海面水温偏差とした。この結合モデルによる CO₂ 漸増シミュレーションでは、全球平均の地表面温度が CO₂ 倍増時に約 1.5°C 上昇するという結果が得られている。

図 1 に 1 月および 7 月の海面水温偏差について全球分布および東西平均の緯度分布を示す。温暖化による海面水温偏差は場所によって異なるが、熱帯・亜熱帯域では概ね 1°C の正偏差であり、高緯度に向かうにつれて偏差が大きくなり、2°C を越える大きな正偏差域も見られる。低緯度の偏差分布には、特に 1 月に東部赤道太平洋で偏差の極大が見られ、エルニーニョ時の水温偏差分布と類似する。これに関連して、太平洋の亜熱帯域では相対的に水温偏差は小さい。こうした分布の特徴は大西洋では見られず、特に 7 月は太平洋と大西洋との違いが顕著である。また、高緯度域の大きな正偏差には、海水の融解が少なからず影響していると考えられる。

本研究では、40°N から 40°S までの海洋格子点上の海面気圧極小点において、渦の強さおよび温暖核構造に関する次の二つの条件を満たすものを台風と定義する。

1. 1200 km 四方の領域で 2 hPa 間隔の等圧線が 2 本以上描けるような気圧傾度がある。
2. 200 hPa レベルと 700 hPa レベルの間の層厚が渦の中心付近で極大となる。

これらの条件にしたがって、コントロールランおよび CO₂ 倍増ランのそれぞれ 8 年分の出力結果に対し、12 時間おきの瞬間値出力データから台風を抽出した。通常、台風の頻度を考える場合には、発生から消滅まで時間的・空間的に連続すると見なされる台風を一つの台風と数える。これに対して本研究では、温暖化の影響をより定量的に評価するために、経路判定をせずに、12 時間毎の瞬間値出力データから抽出されたサンプルをそのまま統計処理した。

4 結果および考察

4.1 全球的な台風変化傾向

台風頻度を台風の出現した期間の延べ日数として評価すると、コントロールランおよび CO₂ 倍増ランでは、年平均でそれぞれ 500 日および 509 日となる。両者の差は小さいが、それぞれの年々変動は比較的大きく、標準偏差はともに 33 日である。統計的な検定によると、両者の差についての有意水準は 0.75 以下であり、全球の台風数については温暖化による有意な変化はないと判断される。

図 4 は、台風が存在した地点における海面水温について、0.5°C 刻みで頻度分布を調べた結果である。両者の分布形には高温側で違いが見られるが、29°C を越える海域の面積の違いを考慮すると、本質的な差異はないと考えられる。特に、コントロールランでの 28.5°C 以下の頻度分布は、CO₂ 倍増ランでの 29.5°C 以下の分布と良く対応している。この 1°C の差は、図 1 に示される熱帯海洋上での水温変化と一致している。現実の台風は、水温 26°C 以上の海域で発生することが経験的に知られているが、この数値実験からは、温暖化による水温上昇が発生数・発生域の拡大には寄与しないことが示唆される。

全球の台風頻度に温暖化による有意な変化が見られないという結果は、熱帯対流圏の熱力学的構造と関係が深い。図 2 および図 3 に、それぞれ東西平均された気温および相当温位について、CO₂ 倍増ランからコントロールランの結果を引いた偏差分布を示す。気温偏差には上部熱帯対流圏における大きな昇温、成層圏の寒冷化、および海水の融解に起因する冬半球極付近における顕著な昇温といった、CO₂ 増加に伴う一般的な気温偏差分布の特徴が見られる。上部熱帯対流圏で相対的に昇温量が大きくなるのは、湿潤断熱過程における鉛直気温減率が、温度が高いほど小さくなるためである。これに対し、相当温位の偏差は鉛直方向に均一化された分布を示す。このような気温と相当温位の変化の違いは、温暖化によって下部熱帯対流圏で水蒸気量が増加することを反映している。

図 1: NCAR CSM を用いた CO_2 漸増シミュレーションから得られた CO_2 濃度倍増時の 1 月および 7 月の月平均海面水温偏差。右側の図は東西方向に平均された値の緯度分布。

図 2: 東西平均気温の鉛直・緯度分布。 CO_2 倍増ランの結果からコントロールランの結果を引いた偏差。(a) 7-9 月の平均、(b) 1-3 月の平均。実線は 1°C 間隔の等値線、破線は 1.5°C および 2.5°C の等値線。

図 3: 図 2 と同様。ただし、相当温位の分布を表す。

図 4: 台風が存在した地点の海面水温の頻度分布。 図 5: 台風の中心気圧の頻度分布。

図 6: 7-9 月平均の 850 hPa レベルにおける流線関数および風速ベクトルの全球分布。(a) コントロールラン、(b) CO_2 倍増ラン (コントロールランからの偏差)。(a) および (b) の等値線間隔はそれぞれ $2.5 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ および $1 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 。破線は負の値であることを示す。

図 7: 20°S から 20°N の間で積分された 7-9 月平均の東西風に関する質量流線関数の鉛直・東西分布。(a) コントロールラン、(b) CO_2 倍増ラン。等値線間隔は $20 \times 10^9 \text{ kg s}^{-1}$ 、点刻は負の値であることを示す。

表 1: 海域毎の年間延べ台風日数の変化。(A) および (B) はそれぞれコントロールランおよび CO₂ 倍増ランを表す。

	(A)	(B)	(B-A)	信頼区間	
				90%	95%
北大西洋	88.6	76.4	-12.2	± 11.1	13.5
北太平洋東部	48.8	44.4	-4.4	± 5.1	6.2
北太平洋西部	171.	189.	18.	± 19.6	23.8
北インド洋	11.6	13.4	1.8	± 2.8	3.5
南インド洋	33.3	41.4	8.1	± 8.3	10.1
南太平洋西部	132.	130.	-2.	± 12.3	14.9
全球	500.	509.	9.	± 29.5	36.0

(単位: 日)

表 2: 海域毎の全体の 10%を占める強い台風についての平均中心気圧の変化。(A) および (B) はそれぞれコントロールランおよび CO₂ 倍増ランを表す。

	(A)	(B)	(B-A)	信頼区間	
				90%	95%
北大西洋	988.9	989.7	0.8	± 1.9	2.3
北太平洋東部	996.7	997.4	0.7	± 1.7	2.1
北太平洋西部	986.9	983.2	-3.7	± 2.3	2.7
北インド洋	992.4	993.0	0.6	± 3.1	3.8
南インド洋	992.9	993.4	0.5	± 2.7	3.3
南太平洋西部	993.6	991.2	-2.4	± 1.8	2.2

(単位: hPa)

本研究の数値シミュレーションでは、温暖化によって対流圏上層でより大きな気温上昇が生じたが、その安定化の効果を打ち消すように下層では水蒸気量が増加し、結果的に湿潤大気に対する不安定度の変化は小さく、台風頻度に大きな変化が起こらなかったと推察される。

図 5 は、図 4 と同様な図であるが、中心気圧についての頻度分布を示したものである。本研究で用いた GCM は台風の発達強度に関係する台風中心付近の構造を表現できない。したがって、強度変化についての評価は定性的な議論に留める。CO₂ 倍増ランでは、変化は小さいものの、1000 hPa を境として弱い台風が減少し強い台風が増加するという傾向が見られる。1000 hPa を下回る台風の数全体に占める割合は、コントロールランおよび CO₂ 倍増ランでそれぞれ 35% および 41% である。それぞれの年々変動についての標準偏差が 2.4% および 2.6% であることから、両者の差は 0.9995 の水準で有意であると判断される。したがって、平均的な台風強度は温暖化によって増加傾向となる。温暖化によって台風強度が増すという結果は他の研究事例 (例えば、Knutson et al., 1998) ととも共通する。上に述べたような湿潤不安定度の変化の小さい熱力学的構造は、あくまでも平均的な気候状態についてであり、ごく稀に発現する台風についてはその限りではない。むしろ、台風が発生するような時には大気は条件付不安定な成層をしているはずであり、そのような場合には、気温の高い方が水蒸気量も多く、より強い台風が起りやすいと考えられる。

4.2 地域的な台風変化傾向

台風頻度の変化を六つの主要な台風発生海域でまとめた結果を表 1 に示す。温暖化の影響は海域によって異なり、出現頻度は北太平洋西部およびインド洋では増加傾向であるが、北大西洋および北太平洋東部では逆に減少傾向である。また、南太平洋ではほとんど変化がない。年々変動を考慮した統計的な信頼区間によると、北大西洋における減少傾向だけが有意水準 0.90 を満たしているのみであり、全体的に変化の有意性は高くない。台風活動は様々な時間スケールの自然の気候変動の影響を受けるため、観測される台風頻度は年によって大きく変化する。モデルでシミュレートされた台風についても、観測される自然変動と同程度の大きさの年々変動が得られることは既に確認されている。したがって、1°C 程度の海面水温偏差が地域的な台風頻度におよぼす影響は、自然の変動と区別できるほど大きくはないことが示唆される。むしろ、以下に述べるように、温暖化による地域的な台風活動の変化には自然変動との類似性が認められる。

地域的な台風頻度の変化には、概ね東半球で増加傾向、西半球で減少傾向という特徴がある。こうした違いは大規模な風場と関係が深い。ここでは、北半球の台風シーズンに相当する 7-9 月の期間で平均された風場を調べる。図 6 に 850 hPa レベルにおける流線関数および風速ベクトルを示す。ここで、CO₂ 倍増ランの結果はコントロールランの結果からの偏差によって示されている。温暖化の影響は北太平洋西部で顕著であり、流線関数に大きな負の偏差域が広がっている。この負偏差は、モンスーンによる西風域の拡大に伴ってモンスーントラフが強化されることと関連する。北太平洋西部の台風は大部分モンスーントラフで発生するので、モンスーントラフの強化がこの海域の台風頻度の増加に寄与していると考えられる。

貿易風型の台風発生が多い北大西洋では、上層の風が台風活動を左右するより重要な要因である。図 7 に赤道付近の東西風に関する質量流線関数の鉛直・経度分布を示す。ここでは、経度方向の負 (正) の傾度が上昇流 (下

降流)を表すように流線関数が定義されている。西太平洋では、温暖化によって強い上昇流の領域が東方に広がっており、これは上述のモンスーントラフの強化に対応する。一方、東太平洋から大西洋にかけては、温暖化によって100°W付近の反時計回りの循環が弱まり、上層の西風が卓越してくる。このような上空の西風の強まりが風の鉛直シアの増大をもたらし、この海域の台風頻度の減少につながったと考えられる。このような上空の西風と台風活動との関係は、エルニーニョ時に北大西洋の台風活動が抑制されるメカニズム (Gray, 1984) と同様である。

台風強度については、各海域において全体の10%を占める強い台風を選び、その平均中心気圧の変化から温暖化による影響を調べる。表2にその結果を、年々変動を考慮した信頼区間とともに示す。有意な変化が認められるのは北太平洋西部および南太平洋西部の海域で、CO₂ 倍增気候での平均中心気圧は、現状気候と比べて両者とも2-4 hPa 程度低下している。図5に示された全球的な平均強度の増加傾向には、西太平洋における強度変化が反映されていると解釈される。台風強度が海面水温の高い西太平洋で増加するという結果は、温暖化による強度変化の度合いが海面水温に依存することを示した Shen et al. (2000) による結果とも一貫性がある。

5 結 語

温暖化に伴う台風の変化を GCM を用いた数値実験によって検討し、(1) 全球の台風活動が、温暖化に対する大気の熱力学的構造の応答に関係すること、および(2) 地域的な台風活動の温暖化による変化が、自然の気候変動に伴う台風活動の変化と類似することが示された。将来の台風変化についてより信頼性の高い予測結果を得るには、大気の熱力学的構造に関係するモデルの物理過程をさらに改良することが課題である。また、自然変動と温暖化による気候変動との関係や、自然変動が台風活動におよぼす影響について理解を深めることも重要である。

参考文献

- Bengtsson, L., M. Botzet and M. Esch, 1996: Will Greenhouse Gas-Induced Warming over the Next 50 Years Lead to Higher Frequency and Greater Intensity of Hurricanes? *Tellus*, **48A**, 57-73.
- Broccoli, A. J. and S. Manabe, 1990: Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate. *Geophys. Res. Lett.*, **17**, 1917-1920.
- Gray, W. M., 1979: Hurricanes: Their formation, structure and likely role in the tropical circulation. *Meteorology over the tropical oceans*, D. B. Shaw, Ed., Roy. Meteor. Soc., 155-218.
- Gray, W. M., 1984: Atlantic seasonal hurricane frequency, Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1649-1668.
- Haarsma, R. J., J. F. B. Mitchell and C. A. Senior, 1993: Tropical disturbances in a GCM. *Climate Dyn.*, **8**, 247-257.
- Hack, J. J., 1994: Parameterization of moist convection in the NCAR Community Climate Model (CCM2). *J. Geophys. Res.*, **99**, D3, 5551-5568.
- Hack, J. J., B. A. Boville, B. P. Briegleb, J. T. Kiehl, P. J. Rasch and D. L. Williamson, 1993: *Description of the NCAR Community Climate Model (CCM2)*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-382+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO.
- Knutson, T. R., R. E. Tuleya and Y. Kurihara, 1998: Simulated Increase of Hurricane Intensities in a CO₂-Warmed Climate. *Science*, **279**, 1018-1020.
- McBride, J. L., 1995: Tropical cyclone formation. *Global perspectives on tropical cyclones*, R. L. Elsberry, Ed., No. WMO/TD-No. 693, TCP-38, World Meteorological Organization, 63-105.
- Molinari, J., D. Volaro, S. Skubis and M. Dickinson, 2000: Origins and mechanisms of eastern Pacific tropical cyclogenesis: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 125-139.
- Shen, W., R. E. Tuleya and I. Ginis, 2000: A sensitivity study of the thermodynamic environment on GFDL model hurricane intensity: Implications for global warming. *J. Climate*, **13**, 109-121.
- Sugi, M., A. Noda and N. Sato, 2000: Influence of global warming on tropical cyclone climatology. *J. Meteor. Soc. Japan*, (to be submitted).
- Tsutsui, J. and A. Kasahara, 1996: Simulated tropical cyclones using the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (CCM2). *J. Geophys. Res.*, **101**, D10, 15,013-15,032.
- Yoshimura, J., M. Sugi and A. Noda, 2000: Influence of greenhouse warming on tropical cyclone frequency — Experiments using different SSTs and convection schemes. *J. Climate*, (to be submitted).
- 西岡秀三, 原沢英夫 (編), 1997: 地球温暖化と日本 — 自然・人への影響予測 —. 古今書院.
- 平口博丸, 丸山康樹, 筒井純一, 仲敷憲和, 1998: NCAR の大気・海洋結合モデルによる温暖化予測実験. 第6回 地球環境シンポジウム講演予稿集土木学会 地球環境委員会, 187-192.