

地球温暖化による熱帯低気圧の変化 に関する研究動向

RESEARCH DIRECTION ABOUT CHANGES IN TROPICAL CYCLONES ASSOCIATED WITH GLOBAL WARMING

筒井純一¹

Junichi TSUTSUI

¹正会員 工修 電力中央研究所 環境科学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

To improve scientific knowledge of the relationship between tropical cyclones and global warming, recent research direction and extreme events have been reviewed. Past studies provide reasonably consistent results about intensity changes due to global warming. It is estimated from a theoretical model and numerical experiments that the central sea level pressure deepening of a developed tropical cyclone increases by 10-20% for about 2°C increase of sea surface temperature. On the other hand, the fidelity and duration of past observation records are not enough to detect a global warming signal. Although there is a report to indicate a rapid increase in the frequency of intense tropical cyclones during recent thirty years, the credibility of this report is not conclusive. Also, regarding the extreme tropical cyclone events, which frequently occurred in 2004 and 2005, any attribution to global warming is not approved. The long-term tendency of tropical cyclone activity including frequency and motion will be gradually elucidated with the accumulation of observation records and the development of numerical models.

Key Words: Tropical cyclone, typhoon, global warming, sea surface temperature, maximum potential intensity

1. はじめに

2004-05 年は, 台風やハリケーンなどの熱帯低気圧による自然災害が, 世界的に頻発した. 熱帯低気圧が我が国の海岸構造物をはじめとする社会におよぼす影響は極めて大きく, その変化傾向についての関心は高い. 特に, 2005 年の米国におけるハリケーン災害^{1,2)}や, 同年に発表された強い熱帯低気圧の急増を指摘する論文^{3,4)}を契機に, 地球温暖化との関連性等について専門家の間でも論争が続いている^{5,6,7)}.

温暖化に関する様々な問題に対しては, 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) が, 科学的知見をまとめた評価報告書を定期的に出版している. 2007 年には, 最新の第 4 次評価報告書が発表され, 温暖化は明白であり, 人為的な温室効果気体の増加が原因であることが, ほぼ断定された. また, 気候系の慣性のため, 今後 30 年程度は, 温室効果気体の排出量の増減によらず, ある程度の温暖化は不可避免的に進行すると予想されている. 熱帯低気圧については, 比較的確度は低いものの, 温暖化によって強度が増加する可能性が指摘されている.

このような状況を踏まえ, 本稿では, 熱帯低気圧に関する研究動向から, 最近の顕著事象や温暖化との関係を調査し, この問題に関する現段階での

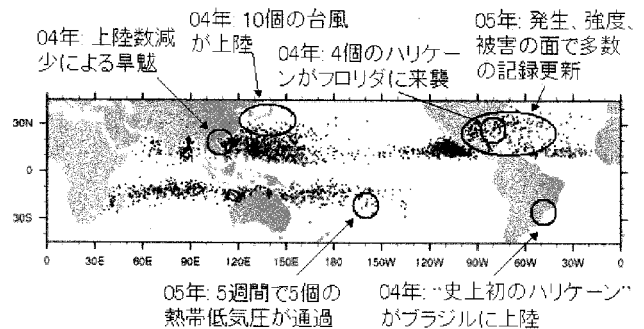


図-1 2004-05 年の熱帯低気圧に関する顕著事象. 黒点は過去 30 年間の風速 17 m s^{-1} 以上の熱帯低気圧の発生地点を表す.

知見を集約する. 熱帯低気圧は, 熱帯海洋上で発生する低気圧 (擾乱) の総称であり, 発生海域や強度によって異なる名称で呼ばれる. 本稿では, 風速 17 m s^{-1} 以上の熱帯低気圧について, 南シナ海を含む西部北太平洋に限定する場合は「台風」とする. また, 「ハリケーン」は, 風速 33 m s^{-1} 以上に達した西半球の熱帯低気圧として用いる.

2. 2004-05 年の顕著事象

2004-05 年の熱帯低気圧に関する顕著事象として, 世界気象機関 (WMO) では, 図 1 に示すような事例

を挙げている⁸⁾。ここでは、日本の上陸台風と大西洋の事例について概要を述べる。

2004年に日本に上陸した台風は、平年の約4倍の10個に達し、それ以前の最高記録であった6個を大きく上回った。この上陸台風による死者・行方不明者の数は200名を越え、損害保険の支払額も合計で6000億円以上となり、1991年の台風19号による5679億円を上回った⁹⁾。

2004年に上陸台風が多発したことは、太平洋高気圧の位置や低緯度の対流活動の状況から、ある程度説明できる。熱帯低気圧は大規模な風に流されながら移動するため、西部北太平洋では、太平洋高気圧の縁を沿うような移動経路をとる傾向にある。2004年は、この太平洋高気圧が平年より北に位置して日本付近に張り出し、台風が日本に接近しやすいような配置であった。また、低緯度の対流活動が平年より活発で、その海域も北に位置した。この対流活動は、赤道付近の30~50日周期の変動現象として知られ、上陸台風が集中した6、8、10月は、対流活動が強化された時期に対応する¹⁰⁾。なお、2004年の西部北太平洋の発生数は29個であり、平年値(27個)と比べて特に多かったわけではない。2004年の上陸数がなぜ極端に多かったのか、今後もこのような傾向が続くのかといった点については、今後の研究課題である。

北大西洋では、2004年の活発なシーズンに続き、2005年は熱帯低気圧に関する多くの記録が更新されるほどの特異な年であった¹¹⁾。風速 17 ms^{-1} に達した熱帯低気圧は27個であり、それ以前の記録(1933年の21個)を大きく上回った。発生数だけでなく、活発な時期が長く続いたのも特徴である。6-7月に7個、10月以降に10個発生し、8-9月の最盛期前後の発生数としては、いずれも過去最大である。

強度や被害についても記録的であり、ハリケーン強度に達したものは15個、うち最高階級(カテゴリ5、風速 70 ms^{-1} 以上)の強度に達したものは3個であり、いずれもそれ以前の記録(それぞれ12個、2個)を更新した。特に、ハリケーンWillmaは観測史上最低となる中心気圧882 hPaを記録した。米国の上陸数は15個となり、そのうちのいくつかは強い勢力のまま上陸して大きな被害を引き起こした。被害総額は、控え目に見積って1000億ドル以上の規模である。メキシコなどの中南米諸国でも多数の上陸があり、深刻な被害をもたらした。

このような北大西洋における活発な熱帯低気圧活動は、海面水温、大規模な風の場合、アフリカからの偏東風波動といった気候学的要因から説明される。2005年は多くの要因で熱帯低気圧の発生・発達に適した偏差を示している。この傾向は1995年以降続いており、それ以前の1971-94年の不活発であった時期と区別される。このような活発・不活発な時

期は、少なくとも部分的には、10年以上の時間規模をもつ自然の気候変動の一端であると考えられている。また、北大西洋で起きていることは、必ずしも地球規模の変化と同期しているわけではない。2005年の熱帯低気圧活動については、北大西洋を除く海域では平年並もしくは平年を下回っている。また、領域の接する東部北太平洋では、熱帯低気圧活動が北大西洋と逆位相になる傾向があり、1995年以降平年以下の状況が続いている。

2004年3月にブラジルに被害をもたらした擾乱は、専門家の間でも大きな関心を呼んだ¹²⁾。この擾乱は、南大西洋の寒冷前線上の低気圧として発生したが、まもなく典型的な熱帯低気圧の特徴をもつ擾乱に変質した。衛星写真では、中心の「眼」に向かって時計回り(南半球の低気圧性循環)に収束する雲バンドがはっきりと捉えられ、強度は風速 $33\sim 42\text{ ms}^{-1}$ のハリケーン相当と分析されている。この擾乱の構造がハリケーンかどうかについては専門家の間でも意見が分かれ、熱帯低気圧と温帯低気圧の中間的な形態とも考えられている。熱帯低気圧と温帯低気圧は前線や暖気核の有無などで分類されるが、実際には両者の中間的な形態も様々な発達段階で存在する。

以上のように、2004-05年の顕著事象については、ある程度の理解が進んでおり、今後も様々な角度から検討されるであろう。現段階における専門家の共通認識⁸⁾では、個々の事象を直接的に温暖化と関連づけることはできないとされる。ただし、温暖化に伴う熱環境の変化が、全体の背景的要因として影響した可能性が指摘されている。

3. 既往の研究

(1) 理論

熱帯低気圧は、前線がないこと(気温の南北傾度が小さい)、および上空に暖気核をもつ(周囲と比べて気温が高い)という構造上の特徴により、温帯低気圧と区別される。暖気核が形成されるのは、地表付近の湿潤な空気のもつ熱エネルギーが対流によって上空に運ばれた結果である。上空の暖気核は地表面の気圧低下をもたらすため、地表付近の気温と水蒸気量は中心気圧の下限値を決める重要な要素である。特に、熱帯低気圧の発達では、海面水温が高い状態で気圧が低下することにより、地表付近の熱エネルギーが増大する点が重要である。

この考え方を発展させて、Emanuel¹³⁾は熱帯低気圧の熱力学的なモデルを提案した。熱帯低気圧内部の空気の流れには、ほぼ軸対称の強い低気圧性循環(北半球では反時計回り)と、それと直交する動径方向の二次的な循環がある。この二次的な循環は、大気境界層内を中心に向かう吹き込み、中心付近の

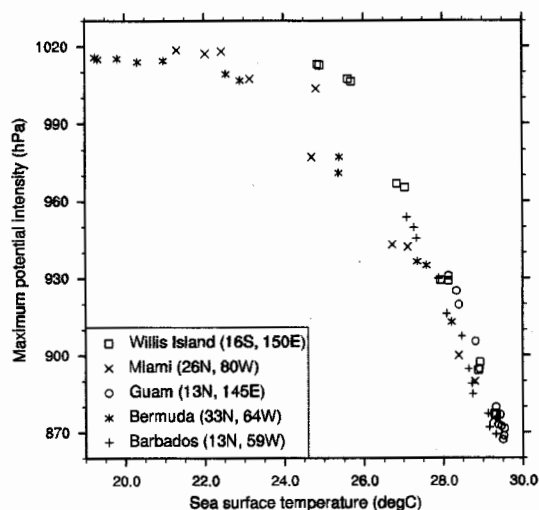


図-2 代表的な5地点における平年の月平均海面水温に対する熱帯低気圧の最大ポテンシャル強度。海面水温の他に平年の気温の鉛直分布を考慮。海面水温と気温は、JRA-25長期再解析データ¹⁴⁾に基づく。熱帯低気圧強度は、Holland¹⁵⁾モデルにしたがって計算した中心気圧。

壁雲での外向きに傾斜した上昇流、圏界面付近での吹き出し、中心から離れた領域でのゆっくりした下降流から構成される。Emanuelのモデルは、この熱帯低気圧の二次循環をカルノーの熱機関（カルノーサイクル）で表現することで、中心気圧を海面水温と上空の気温の関数として定式化したものである。

Emanuelのモデルは熱帯低気圧の理解向上に貢献し、温暖化に伴う熱帯低気圧の強化の可能性について議論する土台を与えた。これに対し、Holland¹⁵⁾は、Emanuelモデルの欠点を修正し、より現実的なモデルを提案した。Hollandモデルでは、熱帯低気圧の眼と壁雲が明示的に考慮され、与えられた環境場（気温の鉛直分布、地表気圧、および海面水温）に対して、発達可能な最大強度（中心気圧）が見積られる。現在の平年の環境場に対する海面水温と発達強度の関係を図2に示す。熱帯低気圧の発達は、26°C以下の水温では不十分であり、26°Cに達すると、水温上昇とともに急激に増加する。この結果は、経験的に知られる事実と整合する。

26°C付近を境に海面水温と発達強度の関係に変化が生じるのは、環境場の気温の鉛直分布の特徴から理解される。26°C以上の水温では、水温上昇による対流圏下層の昇温と圏界面高度の上昇（対流圏上層の降温）が顕著であり、熱帯低気圧の発達に適した環境場の度合いが高まる。図2からは、1°Cの水温上昇につき、中心気圧は30 hPa程度低下すると見積られる。29°Cを越えるような非常に高い水温では、対流圏中層の昇温や、圏界面高度が100 hPa付近で頭打ちとなることから、さらなる強度増加は抑制される傾向にある。

上空の気温分布の役割は、温暖化の問題を考える

上でも重要である。温暖化による昇温は地球規模で生じるが、熱帯大気では、一般に、上部対流圏でより大きな昇温となる。これは、高さとともに気温が低下する割合（気温減率）が、熱帯大気では湿潤断熱線に近いことから説明される¹⁶⁾。したがって、温暖化した気候では、水温上昇による強度増加が、上空のより大きな昇温によってある程度抑制される可能性がある。

温暖化した気候に対するHollandモデルによる検討は、Henderson-Sellers et al.¹⁷⁾が実施した。温暖化の条件は、複数の気候モデルで予測された結果に基づくもので、発生海域の水温が、現状気候に対して2°C程度高い状態が想定されている。この結果では、図2に示されるような現状気候に見出される海面水温と強度の関係が、温暖化による水温変化の分だけ並行移動したような関係で示されている。すなわち、熱帯低気圧の発達に適する水温条件が、現状気候の26°C以上に対して、温暖化気候では28°C以上になり、発生海域は温暖化してもほとんど変化しないという結果である。また、発生海域毎の強度の上限は、多くの場合僅かな変化（中心気圧で数hPa程度）に留まり、900hPaを下回るような最も発達する場合で10~20 hPa程度の低下と見込まれている。

このような熱力学モデルで得られる結果は、少なからず不確実性が含まれるが、海面水温についての熱帯低気圧の発生条件は、現状気候と温暖化した気候で大きく異なると考えるのが妥当である。非常に強い熱帯低気圧については、温暖化によって幾分か強度が増加する可能性があるが、海面水温だけから推定されるような大きな変化ではないことに留意すべきである。なお、熱力学モデルによる検討では、力学的要因に大きく左右される発生頻度や移動経路に関する情報は得られない。

(2) 観測

図3に、熱帯の地上気温偏差の経年変化を示す。このデータは、陸上の固定観測地点のデータと、船舶やブイによる海上のデータに基づき、英国の研究機関でまとめられたものである¹⁸⁾。熱帯の地上気温は、20世紀初頭から1940年頃にかけて増加傾向、その後、30年程度の間は減少もしくは小幅な変化、1970年代から増加傾向を示す。このような変化傾向は全球規模でも見られ、特に最近の急激な温暖化は、人間活動による大気中の温室効果気体の増加が関係するのは確実と考えられている。

図3によれば、1970年代以降の温暖化は0.5°C程度である。主要な熱帯低気圧の発生海域における海面水温も、同程度の変化が見込まれる。このような海面水温の変化は、熱帯低気圧の発生、強度、移動経路等にも何らかの影響をおよぼすと考えられる。しかしながら、以下に述べるように、熱帯低気圧は

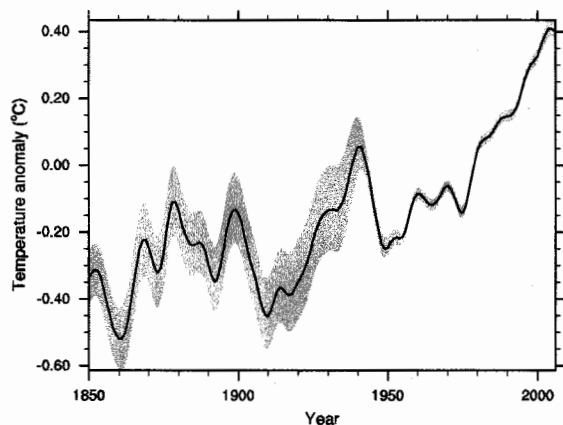


図-3 熱帯(30S-30N平均)の地上気温偏差の平滑化された経年変化. Brohan et al.¹⁸⁾による. 偏差の基準となる平均値は1961-1990年平均. 影をつけた部分は不確実性の度合いを表す.

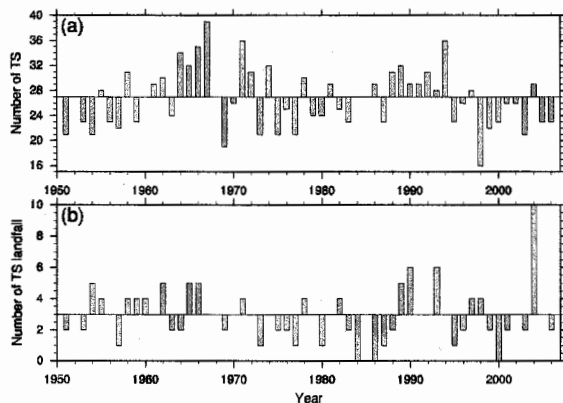


図-4 台風の発生数(a)と日本への上陸数(b)の経年変化. それぞれの中央値(27個と3個)を基準とする偏差で表す. 気象庁のベストトラックデータと上陸台風の定義(台風の中心が北海道, 本州, 四国, 九州の海岸線に達する)による.

自然の変動も大きく, 観測データの期間や精度も十分ではない. したがって, 既に人為的な温暖化影響が起きているとしても, それを検出するのは多くの場合困難である.

例えば, 台風の発生数と日本への上陸数は, 図4のように変動してきたことが過去の記録から示される. いずれの統計量についても, 海面水温の変化に対応するような明確なトレンドを見出すことはできない. 発生数, 上陸数とも, 年々の変動に加えて, 10年以上の規模の長期的な変動が見られる. 発生数が多い年は, 1960-70年代と1980年代後半から1990年代前半の時期に多く見られ, 最近10年間は少ない年が目立つ. 一方, 上陸数は1950-60年代に多く, 1970-80年代に少ない傾向であり, 1990年頃からは少数の極端に多い年を除き, 平均値に近い年が多い. また, 2004年の事例のように, 発生数と上陸数の多寡は必ずしも対応しない.

熱帯低気圧活動の長期的な変動は, 前述のよう

に, 北大西洋においても顕著である. 西部北太平洋と北大西洋以外の海域では, 発生した熱帯低気圧が見落としなく観測されるようになったのが, 衛星観測が行われるようになった1970年代以降に限られる. したがって, これらの海域では, 温暖化影響を見出すことはさらに難しくなる. 熱帯低気圧の見落としがない時期についても, 強度の観測(推定)手法が時代によって異なることから, 観測データにバイアスが含まれる可能性にも注意する必要がある.

このような事情により, これまでは, 熱帯低気圧の統計から温暖化による変化は検出できないと考えられてきた. ところが, 強い熱帯低気圧の頻度が過去30年程度の間に急激に増加していると指摘する論文が相次いで発表され^{3,4)}, 大きな関心呼んだ. Webster et al.³⁾によれば, 風速 59 ms^{-1} 以上の非常に強い熱帯低気圧に限ると, その数や全体数に占める割合が, 過去35年でいずれの海域でも急増しているとされる. また, Emanuel⁴⁾によれば, 熱帯低気圧の破壊力を表す指標が海面水温と高い相関をもち, 西部北太平洋と北大西洋において過去30年で倍増しているとされる.

この結果は, これまでの認識と大きく異なるもので, 専門家の間で大きな論争となった^{5,6,7)}. 反論する立場からは, 特に, 元になっているベストトラックデータの品質を問うものが多い. ベストトラックデータは, 警報として発表された熱帯低気圧情報(6時間毎の位置, 風速, 中心気圧など)を事後解析による修正を経てまとめたものである. ただし, その作成過程において, 過去30数年にわたって一貫性のある強度推定がされてきたとは考えにくい. 航空機観測が継続されている北大西洋については, データの信頼性は比較的高いと思われるが, 長周期変動の一面を捉えたものに過ぎないという見方もできる. いずれにしても, Webster et al. 自身も指摘していることだが, 検出された変化が温暖化に起因するかどうかは慎重に判断すべきである. Emanuelが指摘する破壊力の増加についても, 自身の理論モデルから見積られる変化と比べて, 最近の変化は過大であることに言及している.

熱帯低気圧の自然変動には, 海域毎に異なる様々な要因が考えられる. 例えば, 北大西洋では, 数年程度までの比較的短い周期の変動に対して, エルニーニョと南方振動(ENSO)との関連性が指摘されている¹⁹⁾. ENSOの影響は, 他の海域では北大西洋ほど明確ではないが, 例えば, 西部北太平洋では, ENSOによる対流活発域の変動に伴い, 発生域が南東(エルニーニョ時)や北西(ラニーニャ時)に偏る傾向がある²⁰⁾. 温暖化が熱帯低気圧活動におよぼす影響を理解するには, 自然変動と人為的な変化を切り分けて考え, さらに人為的な変化が自然の変動におよぼす影響も考慮する必要がある. いずれも, 現段階の知見では予測困難な課題である.

(3) 数値実験

理論モデルと観測データから得られる情報には限界があるため、気候や気象の数値モデルを用いた数値実験が有力な研究手法として期待される。モデルは、地球全体を計算する大循環モデルと、地球上の一部を高解像度で計算する領域モデルに大きく分けられる。それぞれ、空間解像度、考慮される物理過程とその表現方法、海洋や陸面の扱いといった違いにより、多種多様なものが存在し、目的に応じて使い分けられる。モデルによる熱帯低気圧の表現は、一般に、空間解像度が高いほど精緻なものとなるが、適用可能な解像度には計算資源の制約がある。また、解像度を高くすると、モデル化すべき現象の複雑さも増し、不確実性の度合いが大きくなるという側面もある。

大循環モデルを用いる研究では、通常、長期シミュレーションの過程でモデル自身によって生成される熱帯低気圧が調査対象である。シミュレートされた擾乱は、その空間構造がモデルの解像度に依存するものの、気候学的特性については、比較的粗い解像度であっても多くの点で実際の熱帯低気圧に類似する²¹⁾。ただし、現在のほとんどの大循環モデルでは、積雲対流が簡略化された方式で扱われる点に注意が必要である。この方式では、発生した擾乱が発達・維持される仕組みは表現されるが、発生の初期段階で重要な積雲対流と大規模場の相互作用は適切に表現できない²²⁾。したがって、気候シミュレーションで現れる熱帯擾乱は、多くの場合、発生過程が簡略化されたものと理解すべきである。

大循環モデルを用いた主な研究結果を表1にまとめる。いずれも、気候シミュレーションの結果から、何らかの基準で熱帯低気圧と見なされる擾乱を抽出し、温暖化による頻度や強度などの変化傾向を調査したものである。使われたモデルは、解像度や海洋の扱いなど多くの点で違いがあり、結果のばらつきも大きい。全体的には、温暖化によって、全球規模で発生頻度が減少し、強度はあまり変化がない、もしくは強くなるという傾向である。また、地域規模の変化は必ずしも全球規模の変化と一致せず、海域間で比較的大きな違いが生じる例もある。

表1の中では、Oouchi et al.²⁹⁾で20 km相当の解像度のモデルが使われているのが特筆される。このモデルで表現される熱帯低気圧は、全体的に頻度が過少評価されているが、中心付近の構造も含めて非常に現実的である。このような高解像度の計算は、計算機性能の飛躍的な進歩によって可能となり、この種の研究の信頼性を大いに高めたと言える。実験で想定された温暖化の規模は熱帯の海面水温で2°C程度であり、年最大風速と年平均風速の増加率は、それぞれ13.7%と10.7%である。この変化は中心気圧では21.3%と16.6%の変化量に相当する。

領域モデルを用いる研究では、米国のハリケーン予報に使われる数値モデルを用いて、初期条件で与えられる弱い熱帯擾乱の発達強度を調査したKnutson and Tuleya³¹⁾による研究が最も注目される。この研究では、多数の計算条件(CO₂濃度、海面水温、気温・水蒸気の鉛直分布、積雲対流の計算方式など)を考慮した数値実験から、温暖化(海面水温偏差は平均して2°C程度)によって、中心気圧が平均で13.7%低下するという結果が得られている。また、熱帯低気圧に伴う降水強度が平均で18%増加するという結果も得られている。温暖化による気温上昇は、大気中の水蒸気量の増加をもたらす。したがって、降水強度の増加には、渦の強大化の他に、大気中の水蒸気量増加も関与する。

以上のように、代表的な数値実験で得られた温暖化による変化のうち、強度については理論モデルによる見積りと概ね整合的である。これに対し、過去30年程度の観測記録から見出される変化は、0.5°C程度の水温変化に対して7-8%程度の強度増と見積られる³²⁾。この変化の割合は、理論や数値実験と比べてやや大きい。一方、頻度については、大循環モデルで得られた結果の妥当性を評価するのは難しい。表1のいくつかの研究では、頻度が減少する理由として、温暖化による熱帯の大気安定度の増加を挙げている。この変化は理論的な裏づけ¹⁶⁾があるが、平均的な安定度の変化が、どの程度熱帯低気圧の発生頻度に関係するかは不明である。また、実際の熱帯低気圧の発生は、熱力学的要因よりも力学的要因に強く左右される傾向がある。結局のところ、温暖化による頻度の変化は、全球規模の熱力学的効果と、大規模循環の変化による局所的な力学的効果を区別して考える必要があり、いずれも今後さらに研究が必要である。

4. おわりに

本稿では、熱帯低気圧に関する顕著事象や温暖化による変化の可能性について、最近の研究動向を調査した。温暖化は、定性的には熱帯低気圧強度の増加をもたらすと予想されるが、最近の変化傾向と温暖化との関係については、変化の実態も含めて、明確に結論づけることはできない。また、日本への来襲頻度といった強度以外の要素については、定性的な評価も一般に困難である。現段階では、防災面の拡充などの対策に必要な十分な情報が得られているとは言えない。温暖化による熱帯低気圧の変化は、観測データの蓄積と数値モデルの精度向上とともに、今後、信頼性の高い情報が徐々に得られるようになると思われる。沿岸防災施設に対する合理的な投資計画に向けて、新しい研究成果を適切に反映する仕組みが望まれる。

表-1 大循環モデルによる気候シミュレーションで得られる温暖化による熱帯低気圧の変化。モデルの特徴の欄には、大気モデルの水平解像度（概算）と海洋の扱いを記入。

研究論文	モデルの特徴	頻度の変化	備考
Broccoli and Manabe ²³⁾	5~3° 大気, 海洋混合層	+6%, -6%	雲の扱いに依存
Haarsma et al. ²⁴⁾	3° 大気, 海洋混合層	+50%	最大強度+15%
Bengtsson et al. ²⁵⁾	1° 大気, 海面水温	-37%	強度変化なし
Tsutsui ²⁶⁾	3° 大気, 海面水温	+1%	最大強度増加
Sugi et al. ²⁷⁾	1° 大気, 海面水温	-34	北大西洋+60%, 強度変化なし
McDonald et al. ²⁸⁾	1° 大気, 全海洋	-6%	平均強度増加
Oouchi et al. ²⁹⁾	0.2° 大気, 海面水温	-30%	強い低気圧数増加
Yoshimura et al. ³⁰⁾	1° 大気, 海面水温	-18~-9%	複数の水温分布, 積雲モデル考慮

参考文献

- 林春男: ハリケーン・カトリーナがもたらした新しい広域災害 (速報), 土木学会誌, Vol.90, 11, pp.34-38, 2005.
- 山下隆男: ハリケーン・カトリーナによるニューオーリンズの高潮災害 (速報), 土木学会誌, Vol.90, 11, pp.39-43, 2005.
- Webster, P. J., Holland, G. J., Curry, J. A. and Chang, H.-R.: Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, *Science*, Vol.309, pp.1844-1846, 2005.
- Emanuel, K.: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years, *Nature*, Vol.436, pp.686-688, 2005.
- Chan, J. C. L.: Comment on "Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment", *Science*, Vol.311, p.1713b, 2006.
- Landsea, C. W.: Hurricanes and global warming, *Nature*, Vol.438, pp.E11-E12, 2005, doi:10.1038/nature04477.
- Pielke, Jr., R. A.: Are there trends in hurricane destruction?, *Nature*, Vol.438, p.E11, 2005, doi:10.1038/nature04426.
- Statement on tropical cyclones and climate change, 2006, URL http://www.wmo.ch/web/arep/press_releases/2006/iwtc_summary.pdf.
- 気象研究所: 平成 16(2004) 年日本上陸台風の概要, 技術報告 49, 気象研究所, 2006.
- Nakazawa, T.: Madden-Julian Oscillation activity and typhoon landfall on Japan in 2004, *SOLA*, Vol.2, pp.136-139, 2006.
- Shein, K. A.: State of the climate in 2005, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.87, pp.S1-S102, 2006, Special supplement to the Bull. Amer. Meteor. Soc. Vol. 87, No. 6, June 2006.
- Levinson, D. H.: State of the climate in 2004, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.86, pp.S1-S86, 2005.
- Emanuel, K. A.: The theory of hurricanes, In Lumley, J. L., Dyke, M. V. and Reed, H. L., editors, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, pp.179-196. Annual Reviews Inc., 1991.
- Onogi, K., Tsutsui, J., Koide, H., Sakamoto, M., Kobayashi, S., Hatsushika, H., Matsumoto, T., Yamazaki, N., Kama-hori, H., Takahashi, K., Kadokura, S., Wada, K., Kato, K., Oyama, R., Ose, T., Mannoji, N. and Taira, R.: The JRA-25 reanalysis, *J. Meteor. Soc. Japan*, 2007, accepted.
- Holland, G. J.: The maximum potential intensity of tropical cyclones, *J. Atmos. Sci.*, Vol.54, pp.2519-2541, 1997.
- Hartmann, D. L.: *Global Physical Climatology*. Academic Press, 1994, 411p.
- Henderson-Sellers, A., Zhang, H., Berz, G., Emanuel, K., Gray, W., Landsea, C., Holland, G., Lighthill, J., Shieh, S.-L., Webster, P. and McGuffie, K.: Tropical cyclones and global climate change: A post-IPCC assessment, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.79, pp.19-38, 1998.
- Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B. and Jones, P. D.: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, *J. Geophys. Res.*, Vol.111, D12106, 2006, doi:10.1029/2005JD006548.
- Gray, W. M.: Atlantic seasonal hurricane frequency, Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences, *Mon. Wea. Rev.*, Vol.112, pp.1649-1668, 1984.
- Wang, B. and Chan, J. C. L.: How strong ENSO events affect tropical storm activity over the western North Pacific, *J. Climate*, Vol.15, pp.1643-1658, 2002.
- Tsutsui, J. and Kasahara, A.: Simulated tropical cyclones using the National Center for Atmospheric Research Community Climate Model (CCM2), *J. Geophys. Res.*, Vol.101, D10, pp.15013-15032, 1996.
- Yamasaki, M.: A study of tropical cyclone formation with a 20-km grid model, *SOLA*, Vol.2, pp.9-12, 2006.
- Broccoli, A. J. and Manabe, S.: Can existing climate models be used to study anthropogenic changes in tropical cyclone climate?, *Geophys. Res. Lett.*, Vol.17, pp.1917-1920, 1990.
- Haarsma, R. J., Mitchell, J. F. B. and Senior, C. A.: Tropical disturbances in a GCM, *Climate Dyn.*, Vol.8, pp.247-257, 1993.
- Bengtsson, L., Botzet, M. and Esch, M.: Will greenhouse gas-induced warming over the next 50 years lead to higher frequency and greater intensity of hurricanes?, *Tellus*, Vol.48A, pp.57-73, 1996.
- Tsutsui, J.: Implications of anthropogenic climate change for tropical cyclone activity: A case study with the NCAR CCM2, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.80, pp.45-65, 2002.
- Sugi, M., Noda, A. and Sato, N.: Influence of the global warming on tropical cyclone climatology: An experiment with the JMA global model, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.80, pp.249-272, 2002.
- McDonald, R. E., Bleaken, D. G., Cresswell, D. R., Pope, V. D. and Senior, C. A.: Tropical storms: representation and diagnosis in climate models and the impacts of climate change, *Climate Dyn.*, Vol.25, pp.19-36, 2005.
- Oouchi, K., Yoshimura, J., Yoshimura, H., Mizuta, R., Kusunoki, S. and Noda, A.: Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20 km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.84, pp.259-276, 2006.
- Yoshimura, J., Sugi, M. and Noda, A.: Influence of greenhouse warming on tropical cyclone frequency, *J. Meteor. Soc. Japan*, Vol.84, pp.405-428, 2006.
- Knutson, T. R. and Tuleya, R. E.: Impact of CO₂-induced warming on simulated hurricane intensity and precipitation: Sensitivity to the choice of climate model and convective parameterization, *J. Climate*, Vol.17, pp.3477-3495, 2004.
- Curry, J. A., Webster, P. J. and Holland, G. J.: Mixing politics and science in testing the hypothesis that greenhouse warming is causing a global increase in hurricane intensity, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol.87, pp.1025-1037, 2006.