

紀伊半島に上陸する可能最大級台風に伴う 降水量の地球温暖化による変化

INFLUENCE OF GLOBAL WARMING ON MAXIMUM POTENTIAL RAINFALL
ASSOCIATED WITH A MAXIMUM-STRENGTH TYPHOON
LANDFALLING IN THE KII PENINSULA

吉野 純¹・飯田 潤士²・安田 孝志³
Jun YOSHINO, Junji IIDA and Takashi YASUDA

¹正会員 理博 岐阜大学助教 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²大日コンサルタント株式会社 地理空間情報部 (〒500-8384 岐阜市藪田南3-1-21)

³フェロー 工博 岐阜大学教授 工学研究科環境エネルギーシステム専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

The maximum potential rainfall associated with a maximum-strength typhoon under the present and future climates is investigated in this study using the mesoscale meteorological model PSU/NCAR MM5. To reduce uncertainties in them arising from small difference in typhoon track, a total of 40 numerical experiments are conducted under controlling the typhoon track, in which the initial typhoon center is ingested at different positions based on the typhoon potential vorticity bogussing technique. Comparing the differences of maximum potential rainfall rate in mm/10min, mm/hr, mm/6hr, and mm/day between the present and future climate simulations, it is found that the future global warming possibly links to an enhanced risk of torrential rainfall disaster especially in the lowland area and the outer-core region associated with a future-climate maximum-strength typhoon landfalling in the Kii Peninsula.

Key Words : maximum potential rainfall, maximum-strength typhoon, global warming

1. はじめに

IPCC第4次報告書は、地球温暖化によって台風が強大化する可能性を指摘しており、近年になり強い熱帯低気圧の数が増えつつある傾向も報告されている^{1), 2)}。温暖化による台風の強大化は、海面温度の上昇に伴う熱・水蒸気輸送の増大によるものであり^{3), 4)}、台風内部の可降水量の増大の結果として必然的に降水量も増加することになる。このため、台風の常襲地帯にある我が国のこれまでの治水対策は根本的見直しが迫られ、温暖化によって台風に伴う降水量が時空間的にどの程度変化する可能性があるのか定量的に把握することが、治水計画上の最重要課題となっている。

こうした要請を受け、国内諸機関においても温暖化の降水量への影響について検討が行われ、温暖化シナリオSRES A1Bの下での21世紀末の我が国における年最大日降水量は、20世紀末に比べて平均的に概ね1.1~1.3倍程度に増加するなどの試算結果が報告されている^{5), 6), 7)}。しかし、台風に伴う降水は、局所的な降雨帯（スパイラル状のレインバンド）によってもたらされ、更に地形の

影響を受けて強化されることから、場所によってはその数値を大きく超える可能性もある。また、これら既往計算では台風による降水の影響を十分に考慮できているとは言えず、量的に問題があると考えられる。

加えて、昨今、温暖化による気候変動に対応した拡張河川計画手法⁸⁾が提案されているが、その実施に当たっては、時空間的に変動する降水に対応した氾濫制御施設のダイナミック型ネットワーク管理が必要となることから、台風に伴う降水量を時空間関数として捉えた上で、その影響を明らかにしなくてはならない。つまり、台風に伴う降水量の温暖化による影響を適切に評価するためには、温暖化時に発生し得る可能最大級台風に対して大気力学的に台風初期値化を施し、雲微物理過程を考慮した時間発展型のメソ気象モデルに基づく数値計算に基づき評価する必要があると言える。この場合、求められる降水量は治水施設の外力となるため、km単位で各地の温暖化による降水量の増加率を知る必要がある。

このような要求に応えるためには、1) 与えられた気候条件の下で発達し得る可能最大規模の台風の強度と構造を適切に表現できる。2) その可能最大級台風を台風環境場中に物理的整合性を維持した上で埋め込み、メソ

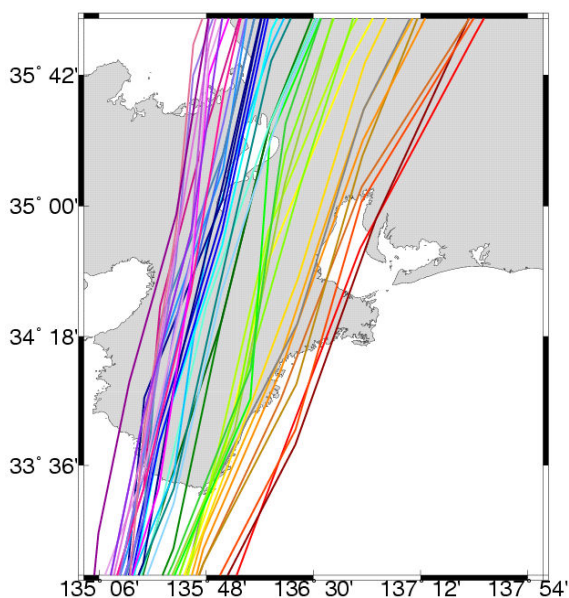


図-1 現在気候設定で計算された計40ケースの台風進路。

気象モデルのための3次元初期気象場を作成できる。3) 初期の台風中心位置を微妙にずらすことで多数の台風進路の下でメソ気象モデルによる数値計算ができる。以上の全てを満たす手法を開発する必要がある、こうして得られた多数の計算結果から降水量極値を格子点毎に評価することで、台風に伴う可能最大降水量を算出できると期待される。このように多数の台風進路により計算することで、微妙な進路の違いに起因する不確実性を減じた現実的な可能最大降水量を把握できると考えられる。

そこで本研究では、上記問題を解決するために、台風渦位ボーガス⁹⁾とメソ気象モデルPSU/NCAR MM5¹⁰⁾を用い、明治以降最大の台風被害をもたらした伊勢湾台風をモデル台風とすることで、現在気候と21世紀末の将来気候(SRES A1B)の下で発生し得る可能最大級台風が、計40ケースの多数の異なる進路で紀伊半島に上陸する数値実験を行う。これらの計算結果から中日本各地の可能最大降水量を格子点毎に評価し、現在気候と将来気候との間で比較することで、台風に伴う降水量の温暖化による変化やその地域間の差異を明らかにしたい。

2. 計算手法の概要

本研究では、与えられた気候状態の下で発生する可能最大強度の台風(定常状態に達した台風)が、最悪の進路を取った場合に生じる格子点毎の降水量極値(10分降水量[mm/10min]、1時間降水量[mm/hr]、6時間降水量[mm/6hr]、24時間降水量[mm/day])を「可能最大降水量」と定義する。この可能最大降水量を合理的に評価する手法として、本研究では台風渦位ボーガス⁹⁾とメソ気象モデルMM5¹⁰⁾を使用する。モデル台風として、1959年9月に東海地方に猛威を振るった伊勢湾台風

を選択する。これらの詳細な計算設定については、吉野ら(2009)を参照のこと⁹⁾。

はじめに、台風渦位ボーガスにより、現在・将来気候において発達可能な最大規模の台風に関して3次元初期気象場を合理的に作成する。この台風渦位ボーガスは、軸対称台風渦位モデル¹¹⁾と渦位逆変換法¹²⁾との組み合わせにより構成され、気象庁台風ボーガスでは為し得ない温暖化の影響を考慮した台風気象場の物理的初期値化が可能である。本研究では、この台風渦位ボーガスにより初期値・境界値を解析するに際して、現在気候と将来気候に共通の第一推定値(台風環境場)として伊勢湾台風時(1959年9月)のECMWF全球再解析データ(ERA40)を使用している。

そして、この台風渦位ボーガスにより様々な位置に可能最大級台風を配置した多数の初期値・境界値(計40ケース)を作成することで、メソ気象モデルMM5により時間発展を計算する。MM5は、非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系の領域気象モデルであり、詳細な雲微物理過程や積雲対流過程を考慮した3次元気象場の時間発展を評価できる。これによって、本研究の目的である可能最大級台風による降水量の時空間分布を格子点毎に得ることができる。出力値の時間解像度は10分、空間解像度は9kmである。多数の台風進路に基づき格子点毎の降水量極値を評価することで、台風進路の微妙な違いに起因したばらつきを考慮に入れた、より現実的な可能最大降水量を評価できる。

3. 現在気候と将来気候における可能最大級台風

現在気候の計算では、日本南方(北緯26.5度、東経136.4度)における海面温度を、伊勢湾台風時の観測に基づき29.0℃と設定することで、台風渦位ボーガスにより十分に発達した可能最低中心気圧910hPaの台風の3次元気象場を解析した。この可能最大級台風の中心位置を実際の伊勢湾台風中心から東西に9km間隔ずつずらして初期値・境界値を作成することで、計40ケースのMM5による数値実験を行った。これらの台風は、全て紀伊半島に東西に約200km程度の幅を持って上陸し(図-1)、上陸時の中心気圧は930hPaとなり、名古屋における可能最大風速は37m/sとなった。また、伊勢湾台風とほぼ同じ進路をとるケースは当時の各種の観測結果と良い一致を示した⁹⁾。

将来気候の計算では、日本南方(北緯26.5度、東経136.4度)における海面温度を、CMIP3マルチ気候モデルデータ(高度成長シナリオSRES A1B)の2099年9月の月平均場(アンサンブル平均場)に基づき30.2℃と設定することで、台風渦位ボーガスにより十分に発達した可能最低中心気圧880hPaの台風を含む初期値・境界値を作成した。現在気候の計算と同じ位置に可能最大級台風

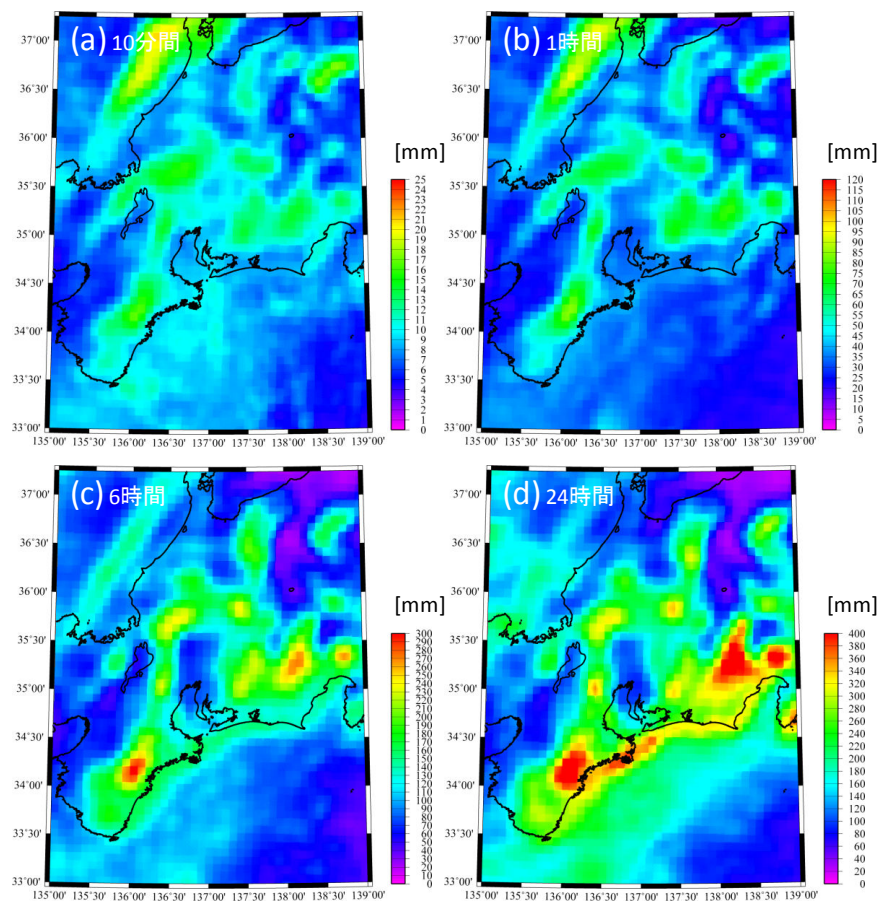


図-2 現在気候における台風の可能最大降水量分布。(a) 10分間, (b) 1時間, (c) 6時間, (d) 24時間降水量。

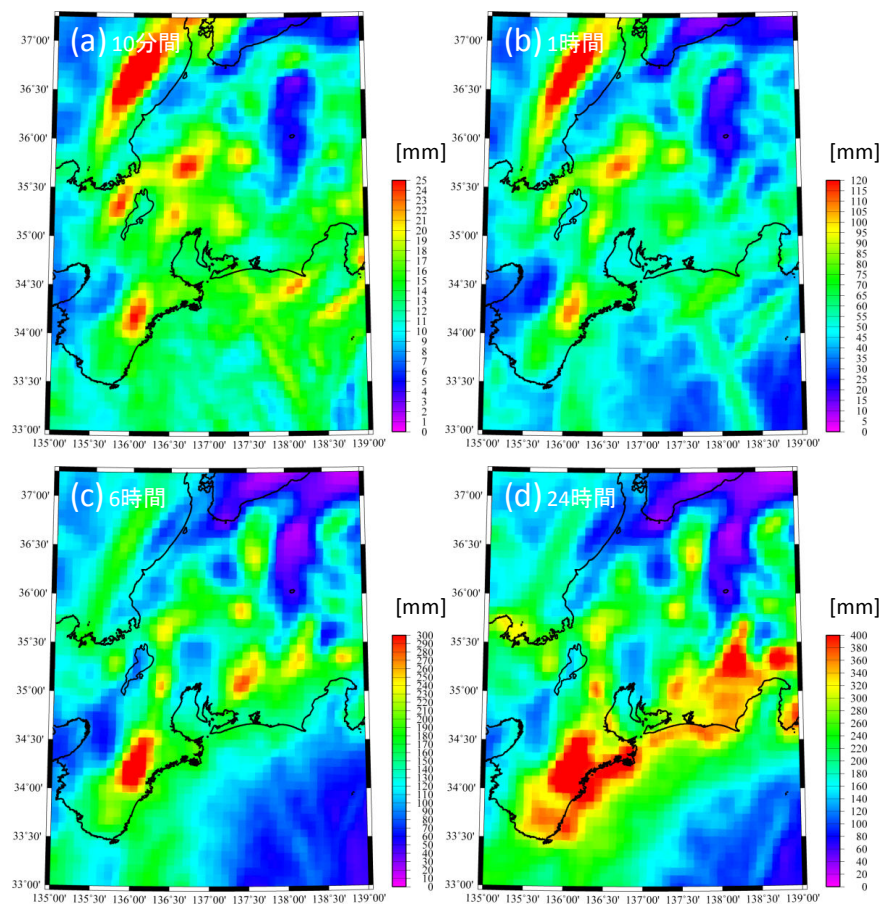


図-3 将来気候における台風の可能最大降水量分布。(a) 10分間, (b) 1時間, (c) 6時間, (d) 24時間降水量。

を配置することで、同じく計40ケースのMM5による数値実験を行った。これらの台風は、現在気候の台風とほぼ同じ進路をとり紀伊半島に上陸することで（図省略）、上陸時の中心気圧は905hPaとなり、名古屋における可能最大風速は43m/sとなった。この結果、名古屋港での可能最大高潮は6.5m、可能最大波浪は2.8mとなり、恐るべき規模の災害外力となる可能性が明らかとなった⁹⁾。

4. 可能最大級台風に伴う可能最大降水量

まず、現在気候の可能最大降水量の分布に関して考察する（図-2）。積算時間10分及び1時間の短時間降水量（図-2a及び図-2b）に関しては、特に、北陸沖の日本海上と東海地方の太平洋に面した山岳部において、60 mm/hrを超える降雨域が存在することが特徴的である。北陸沖での強雨は、台風が接近する際に停滞前線が強化されて生じたものであり、東海地方の山岳部での強雨は、台風内部の移動性の降雨帯が山岳によって強化されたものである。そして、積算時間6時間及び24時間の長時間積算降水量（図-2c及び図-2d）になると、東海地方の山岳部の中でも特に、紀伊山地や赤石山脈で周囲に比べて積算雨量がより大きくなり、場所によっては400 mm/dayを超える積算雨量となる。これは、台風に伴う強い南東風に長時間さらされることで地形性降雨が卓越しているものと推測される。一方、短時間降水量には見られた北

陸沖での強雨に関しては、積分時間が長くなるにつれて顕著ではなくなっている。これは台風が停滞前線に接近した際に一時的に強化された一過性かつ移動性の降雨帯であることを意味している。また、積分時間が長くなるにつれて、東海地方の沿岸部に定常的な降雨域が現れることも特徴的である。ここでは、海岸線に沿って定常的な気流の収束帯が形成され、定常的な降雨が卓越しやすい状況にあると推測される。

次に、将来気候の可能最大降水量の分布に関して考察する（図-3）。短時間降水量（図-3a及び図-3b）については、現在気候と同じく、北陸沖の海上と東海地方の太平洋に面した山岳部において強雨が卓越し、60 mm/hr超の面積はより広域に渡り、局所的には100 mm/hr超となる箇所も現れる。また、台風の直撃を受ける平野部においても70 mm/hr超の短時間の強雨が卓越し、更に、台風中心から遠く離れた海上や平野部でも移動性の降雨帯によって短時間の強雨が発生しやすくなる。また、長時間積算降水量（図-3c及び図-3d）においても、現在気候と同じく、特に紀伊山地や赤石山脈で積算雨量が周囲に比べて大きくなり、より広範囲に渡り400 mm/dayを超えるようになる。東海地方の沿岸部における定常的な降雨域も、将来気候ではより強化されていることが確認できる。

可能最大級台風に伴う降水量の温暖化による変化をより詳細に調べるために、現在気候と将来気候の可能最大降水量に関する陸上格子点数の発生頻度分布を図-4に示す。短時間降水量（図-4a及び図-4b）については、平均

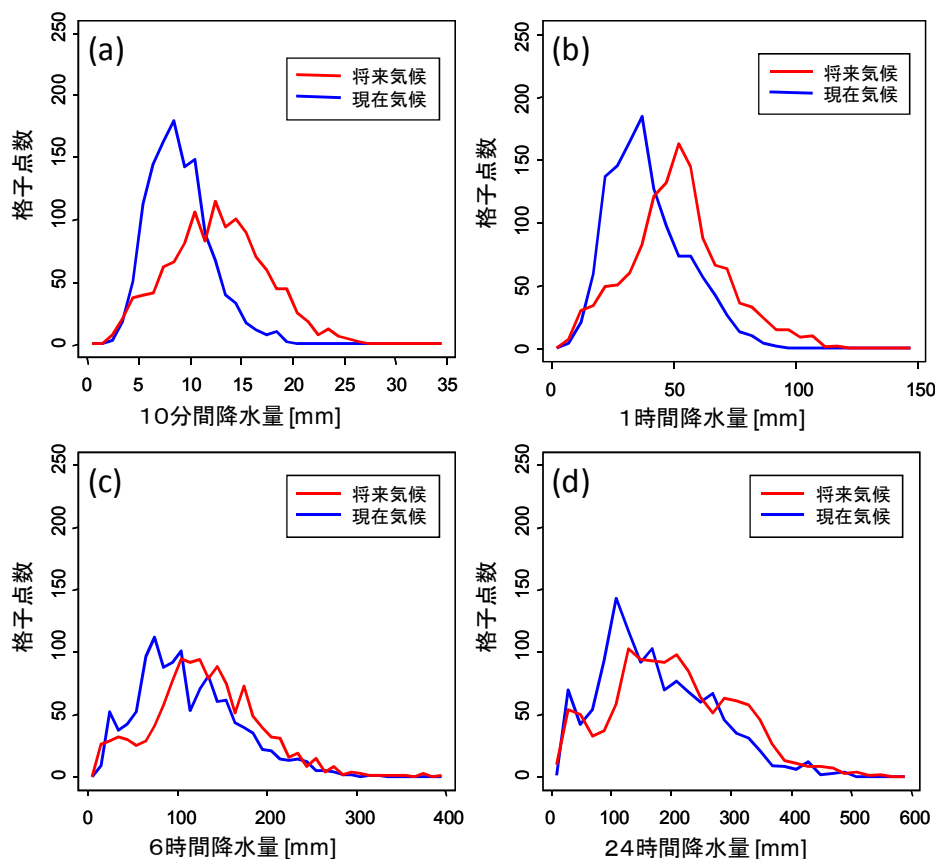


図-4 可能最大降水量に関する陸上格子点数の頻度分布。(a) 10分間、(b) 1時間、(c) 6時間、(d) 24時間降水量。

値（頻度ピーク）の付近に集積するほぼ対称な分布形状を示し、温暖化の影響によって、その分布形は平均値と共に右側（増加側）へとシフトしていることから、台風内部から台風縁辺部まで全域において短時間の強雨が強まる可能性が示唆される。一方で、長時間積算降水量（図-4c及び図-4d）について見ると、頻度ピークから右裾に広がった非対称な分布を示しており、同じく温暖化の影響によって頻度ピークはより右側（増加側）へとシフトしていることが分かる。頻度ピークから離れて右裾に近づくほど、現在気候と将来気候との間の頻度差が縮小していることが見て取れる。このことは、将来気候において、積算雨量200～400 mm/dayの面積がより増えやすくなる傾向を示す一方で、積算雨量400 mm/day超の面積はそれほど増えないことを意味している。

ここで、図-5は、将来気候（図-3）の現在気候（図-2）に対する可能最大降水量の比（増加率）を分布で示している。全体的に、長時間積算降水量（図-5c及び図-5d）に比べて短時間降水量（図-5a及び図-5b）の方がより高い増加率を示し、温暖化による影響は短時間の強雨に対してより大きくなるものと懸念される。また、山岳部における増加率に比べ平野部や海上での増加率がより大きいことも特徴的である。短時間降水量（図-5a及び図-5b）については、台風の直撃を受ける地域の中でも特に濃尾平野や大阪平野といった平野部（都市部）において2.0倍を超える増加率を示しており、都市型の内水

氾濫の発生リスクが高まると言える。また、台風中心から遠く離れた太平洋や北陸沖の海上において増加率が高く、2.0倍以上の増加率に達している。つまり、温暖化は台風の影響半径をより増大させるようにも作用し、台風縁辺部や停滞前線における移動性の降雨帯がより強化されやすくなると推測される。また、長時間積算降水量（図-5c及び図-5d）では、その増加率は短時間降水量ほど大きくないものの、台風の直撃を受ける濃尾平野や大阪平野、東海地方の沿岸部で1.5～1.8倍の増加率となっている。将来気候においては、台風内部の可降水量が増大し、直撃を受ける地域での積算雨量もより増大することから、それに伴う洪水災害リスクもより一層増すものと危惧される。

更なる理解のために、図-6に、可能最大降水量の比（増加率）に関する陸上格子点数の発生頻度分布を示す。長時間積算降水量に関しては、頻度ピークは1.2倍付近に、最大値は1.8倍付近に現れている。この結果は、前述⁷⁾のGCM（A1Bシナリオ）によって評価された年最大日降水量の比（21世紀末／20世紀末）が平均1.1～1.3倍になることとよく整合しているが、増加率の最大については1.5倍になるとしており、本研究（1.8倍）に比べて若干の隔たりがあることから上方修正の余地が残されていると言える。また、短時間降水量に関しては、頻度ピークは1.5倍付近に、最大値は3.0倍付近に現れる。この結果からも、温暖化による台風強化の影響は10分間

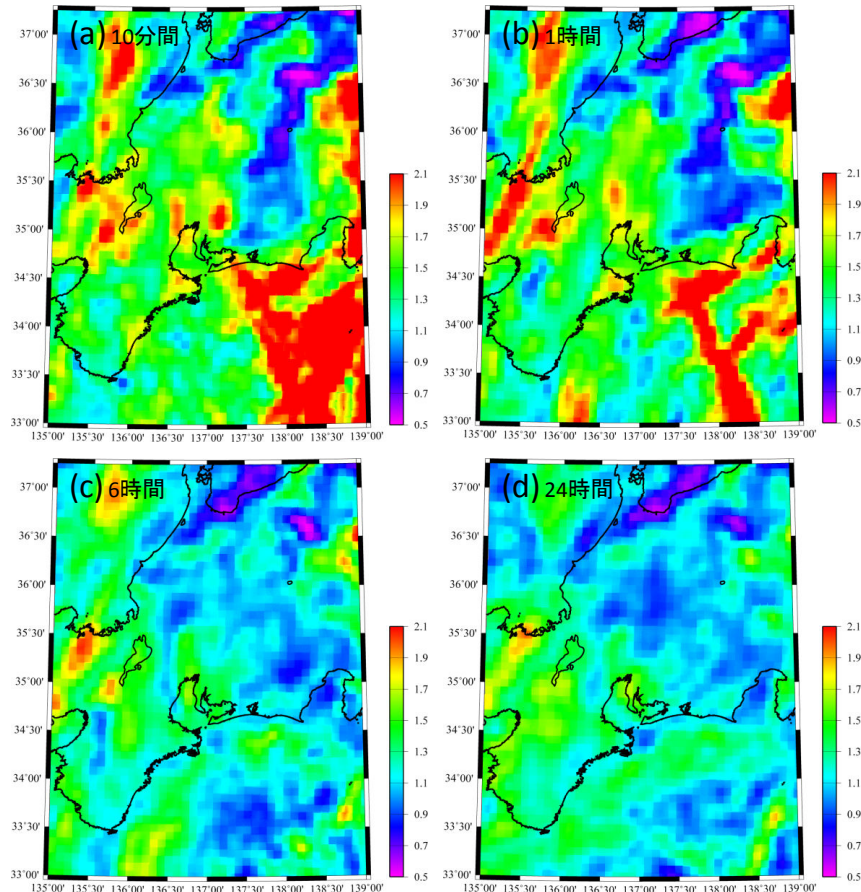


図-5 可能最大降水量の比（将来気候／現在気候）の分布。(a) 10分間、(b) 1時間、(c) 6時間、(d) 24時間降水量。

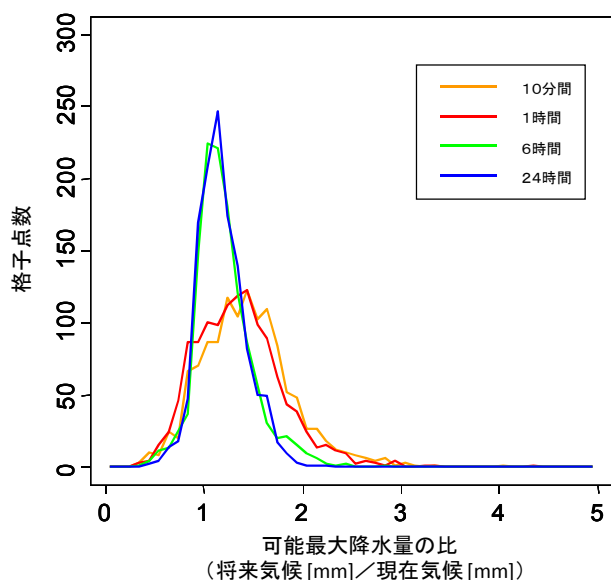


図-6 可能最大降水量の比(将来気候/現在気候)に関する陸上格子点数の頻度分布。

から1時間程度までの短時間降水量への影響が特に大きいと結論付けられる。

5. 結語

本研究では、台風渦位ボーガスとメソ気象モデルMM5を用いて、現在気候と将来気候の下で発生し得る可能最大級台風(伊勢湾台風をモデル台風とした)が、紀伊半島に上陸し最悪の進路を取ることによって生じる中日本各地の可能最大降水量を評価した。その結果、太平洋に面した紀伊山地や赤石山脈、東海地方の沿岸域において400 mm/dayを越える積算雨量となることが計算により明らかとなった。また、温暖化による台風強化の結果として、短時間降水量と長時間積算降水量は共に増加する傾向を示したが、特に短時間降水量への影響(増加率)がより大きいことが明らかとなった。台風の直撃を受ける地域の平野部(都市部)や台風縁辺部における降雨域に対する影響が特に大きくなり、短時間降水量の増加率(将来気候/現在気候)としては2.0倍以上に達することが明らかとなった。

これらの結果は、大河川の支川や山間部の中小河川といった洪水流出期間の短い河川の洪水災害や山間部での土砂災害などのリスクが増すことを意味しており、更に、そのリスクは台風直撃を受ける地域にとどまらず広範囲に及ぶことを意味している。つまり、既往データに基づくこれまでの治水対策では、このような将来気候における可能最大級台風には対応できない可能性があり、抜本的見直しが必要となる。今後、本手法を用いて、伊勢

湾台風以外にも様々なモデル台風(台風環境場)を設定することによって、他地域に対しても温暖化を考慮した可能最大降水量の評価を行い、それに基づいた河川毎の安全度診断が実施されることが望まれる。

謝辞：本研究は、国土交通省建設技術開発費補助金、科学研究費補助金若手研究(B)20760325、及び、科学研究費補助金基盤研究(B)(2)21360234による成果の一部であることを、ここに付記する。

参考文献

- 1) Emanuel, K. A.: Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 year, *Nature*, Vol. 436, pp. 686-688, 2005.
- 2) 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.
- 3) Yoshimura, J. and Sugi, M.: Tropical cyclone climatology in a high-resolution AGCM-Impacts of SST warming and CO₂ increase, *SOLA*, Vol. 1, pp. 133-136, 2005.
- 4) 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 20km-mesh global atmospheric model: Frequency and wind intensity analyses, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, Vol. 84, pp. 259-276, 2006.
- 5) Kimoto, M., Yasutomi, N., Yokoyama, C. and Emori, S.: Projected Changes in Precipitation Characteristics around Japan under the Global Warming, *SOLA*, Vol. 1, pp. 85-88, 2005.
- 6) 和田一範, 村瀬勝彦, 富澤洋介: 地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集, No. 729/II-72, pp. 23-37, 2005.
- 7) 社会資本整備審議会: 水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への対応策のあり方について, 2008.
- 8) 清治真人: 気候変動に対応する拡張河川計画手法の提案, 水工学論文集, Vol. 53, pp. 559-564, 2009.
- 9) 吉野純, 小林孝輔, 児島弘展, 安田孝志: 大気・海洋力学的手法に基づく伊勢湾の可能最大高潮・波浪の評価, 海岸工学論文集, Vol. 56, pp. 396-370, 2009.
- 10) Dudhia, J.: A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Monthly Weather Review*, Vol. 121, pp. 1493-1513, 1993.
- 11) Emanuel, K. A.: The behavior of a simple hurricane model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium, *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 52, PP. 3959-3968, 1995.
- 12) Davis, C. A. and Emanuel, K. A.: Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis, *Monthly Weather Review*, Vol. 119, pp. 1929-1953, 1991.

(2009. 9. 30受付)