

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13701

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24686058

研究課題名(和文) 台風環境場を大気海洋力学的に考慮した台風災害外力モデリングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of a dynamic modeling system for typhoon disasters with coupled typhoon-ocean environment

研究代表者

吉野 純 (YOSHINO, Jun)

岐阜大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：70377688

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 20,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、可能最大規模の台風上陸を想定した台風災害外力を評価することを目的とする。台風予測に特化した高効率で高精度な台風災害外力モデリングシステムを新たに構築することで、温暖化の進行に伴い北西太平洋上の「強い台風」の勢力と頻度が一層増す傾向にあることが明らかとなった。また、温暖化の進行に伴い、全国的に可能最大高潮が徐々に増大するトレンド(傾き：約+0.5m/100年)にあり、一方で、年々変動によるばらつき(標準偏差：+0.7m～1.0m)も大きく、温暖化の進行の度合いに関わらず近い将来であっても悪条件が重なれば可能最大規模の高潮災害が発生する可能性がある」と結論づけられた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a dynamic modeling system for typhoon disasters has been developed in order to evaluate typhoon destructive forcing induced by a super typhoon at landfall. The modeling system predicts that the intensity and frequency of severe typhoon over the Northwestern Pacific Ocean increase with increasing greenhouse gas emission in late 21 century. The maximum potential storm surge heights also increase along the coastline in Japan with a trend of 50 cm/100year and a standard deviation of 70-100 cm. It is concluded that interannual variability of potential maximum storm surge height is large enough that the largest-scale storm surge disaster is anticipated to occur imminently regardless of how much of the global warming from the present to the late 21st century progresses actually.

研究分野：土木工学・水工学

キーワード：自然災害 防災 水工水理学 海岸工学 気象学 高潮 台風 地球温暖化

1. 研究開始当初の背景

IPCC 第 4 次報告書は、地球温暖化によって台風（以降、ハリケーンなど熱帯低気圧全般を意味する用語として使用）の強度が増大する可能性を指摘している。また、Webster et al. (2005) や Emanuel (2005) が示すように、台風強度と海面温度の間には高い相関があり、温暖化がゆらぎを伴いながら進行しつつある近年、より強大な台風が来襲する可能性が高まっている。そのため、台風常襲地帯である我が国では温暖化による台風強大化を見据えて、ハード対策とソフト対策の両面から防災・減災計画の見直しが急務となっている。東日本大震災の反省（想定を超える津波襲来）を踏まえ、台風災害に対しても物理的に生じ得る最悪シナリオを過不足なく適切に評価することで、想定外をも想定してゆく必要がある。

今日まで、海岸構造物の設計潮位・設計波高を評価する際には、既往データに対して確率密度関数を当てはめ、生起確率から再現期間に対する潮位・波高を求めるいわゆる「極値統計解析」が広く用いられてきた（山口ら、1995；畑田ら、1996；橋本ら、2003；加藤、2005）。また、台風内部の風速場・気圧場の推算の際には経験的な「2次元台風モデル」を用いるのが一般的であった（光田ら、1997）。しかし、IPCC の予測通りに温暖化が進行し海面温度が上昇するのならば、今後、台風自体に構造的・属性的な変化が生じる可能性が高く、極値統計解析では温暖化による台風強大化に対する影響を適切に評価できないものと懸念される。つまり、従来の統計的手法に依らない雲解像スケールの気象モデルをベースとする大気海洋力学的な台風災害外力の評価手法の開発が必須となってくる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、台風予測に特化した高効率で高精度な「台風災害外力モデリングシステム」を新たに開発し、更に、その入力条件として本質的となる「台風環境場」に対して周辺の気圧配置や地球温暖化の影響を合理的に加味することで、可能最大規模の台風上陸を想定した三大湾における台風災害ポテンシャルを評価することを目的としている。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下の 2 つの数値計算手法を独自に開発した。1 つは、台風環境場の自在な設定を可能にする台風初期値化手法である「台風渦位ボーガス」であり、もう 1 つは、それに基づいて台風災害外力を高精度に表現する「高解像度台風モデル」である。以下に、その概要を説明する。

(1) 台風渦位ボーガス

本研究では、台風環境場（環境場渦位）に対して渦位平均場と渦位偏差場に分離する

ことで、それぞれに対して適切なモデル台風の設定を行う。ここで、渦位平均場とは、温暖化や気候変動といった地域固有の長周期の渦位変動成分を示し、主に台風強度に強く影響する成分である。一方で、渦位偏差場とは、日々変動する亜熱帯高気圧（太平洋高気圧）や中緯度トラフ／リッジ（低気圧や高気圧）といった短周期的な渦位変動成分を示し、主に台風進路に強く影響する成分である。

本研究では、以下の手順に従って台風環境場を構築する。1) それぞれのモデル台風に対して全球客観解析データから渦位順変換する、2) その環境場渦位に対して渦位平均場と渦位偏差場に分離する、3) 渦位平均場に対して地球温暖化による影響（月平均温暖化差分）を加算する、4) 渦位偏差場に対して対象地域に台風が直撃するよう改変を加える、5) 修正された渦位偏差場と渦位平均場を合成して改変された環境場渦位を得る、6) 渦位逆変換法により改変された台風環境場が完成する、7) これらの一連のプロセスを計算期間にわたって繰り返す、以上のステップにより台風環境場を設定する。

設定された台風環境場を、台風渦位ボーガスに入力することで、高解像度台風モデルのための台風初期値化を行う。台風内部における観測数の不備をこの台風渦位ボーガスによって補完することができる。台風渦位ボーガスは、軸対称定常台風モデル（Emanuel ら、2004）、軸対称台風渦位モデル（Emanuel、1995）、および、渦位逆変換法（Davis ら、1991）により構成され、気象庁台風ボーガス（大澤ら、2005）に比べて経験的要素が少なく台風内部の軸対称構造を大気力学的に解析できるだけでなく、台風環境場に応じた非軸対称構造をも反映させることができる。

(2) 高解像度台風モデル

本研究で使用した高解像度台風モデルは、ペンシルバニア州立大学 PSU と米国大気科学研究センターNCAR により開発された 3次元領域気象モデル MM5（Dudhia、1993）をベースとしている。MM5 は、非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系プリミティブ方程式系モデルであり、台風内部の 3次元構造の時間発展を複雑地形の影響も考慮しながら高精度に予測できる。本研究では、この MM5 に対して、猛烈な勢力を有する台風を表現する上で不可欠となる「海洋混合層過程」、「粘性散逸加熱過程」、および「波飛沫蒸発過程」といった詳細な海面境界過程を組み込むことで独自の高解像度台風モデルを構築する。更に、この高解像度台風モデルに、台風の発生から消滅までその強度や内部構造を高解像度かつ高効率に計算できる「自動移動ネスティング」を導入する。また、親領域に対してのみに「4次元同化ナッジング」を適用することで、観測された台風の移動を高精度に再現できると期待される（ナッジング係数は、 1.0×10^{-5} とする）。

4. 研究成果

(1) 現在気候の台風強度の推算

本研究では、高解像度台風モデルの再現性を確認するために、現在気候（2004年）における全29個の台風に対する強度推定を行った。

図1は、2004年に発生した全29個の台風の高解像度台風モデルにより推定された中心気圧の時系列を示す。高解像度台風モデルは、猛烈な台風から弱い台風まで現実的に見られた台風強度の時間発展を上手く捉えることができている。暴風・暴浪下における海面境界過程を詳細に考慮し、台風中心付近を自動移動ネスティングにより高分解能に表現することにより、高精度に台風強度を評価できるものと考えられる。

中心気圧の推定値と観測値（気象庁ベストトラック）との間には強い正の相関があり、相関係数0.78、バイアス誤差-0.43hPa、RMS誤差15.12hPaとなった（図2）。また、最大風速については、相関係数0.67、バイアス誤差+0.86m/s、RMS誤差7.78m/sとなった。

よって、本研究で開発された高解像度台風モデルは、極めて高精度に現在気候下の台風強度を表現できると見なせ、(2)の擬似温暖化実験により得られる結果もまた信頼性は高いものと考えられる。

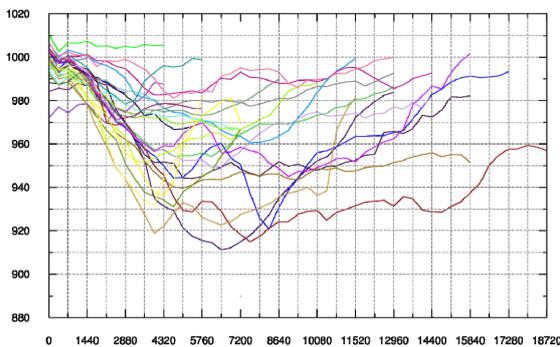


図1 現在気候実験（2004年）による全29個の台風の中心気圧の時系列。

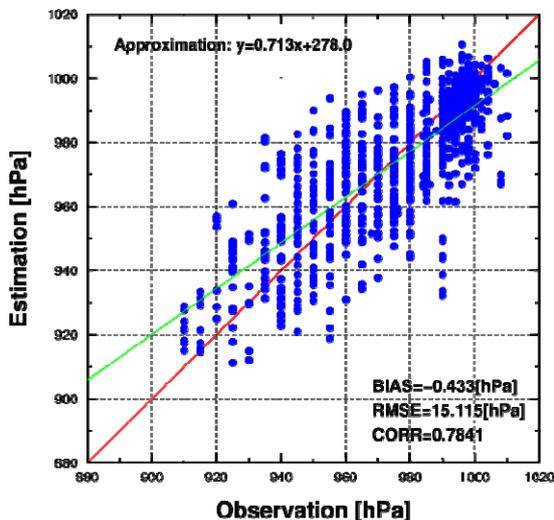


図2 現在気候実験の全台風の全期間における中心気圧の観測値と推定値の散布図。

(2) 台風強度のシナリオ間相互比較

本研究では、高精度な高解像度台風モデルを用いて、将来気候（B1, A1B, および, A2シナリオの2090年代）における擬似温暖化実験を行った。月平均温暖化差分は、英国気象局ハドレーセンターが開発した全球気候モデル HadCM3 の将来予測データに基づいて評価された。(1)の現在気候実験との対比により、台風強度に対する温暖化影響を評価できる。

擬似温暖化実験の結果、いずれの温暖化シナリオであっても現在気候実験に比べて全体的に中心気圧はより低下した（台風強度は増大した）。全台風平均の期間平均中心気圧（期間平均最大風速）に関しては、現在気候実験は975hPa（30.9m/s）となるのに対して、B1シナリオは972hPa（33.4m/s）、A1Bシナリオは971hPa（33.8m/s）、および、A2シナリオは970hPa（34.9m/s）となった。また、全台風平均の期間最低中心気圧（期間最高最大風速）に関しては、現在気候実験は957hPa（40.1m/s）となるのに対して、B1シナリオは948hPa（44.8m/s）、A1Bシナリオは948hPa（44.9m/s）、および、A2シナリオは944hPa（46.9m/s）となった。また、日本列島に上陸した全10個の台風の上陸時中心気圧（上陸時最大風速）に関しては、現在気候実験は966hPa（35.1m/s）となるのに対して、B1シナリオは964hPa（34.9m/s）、A1Bシナリオは960hPa（36.8m/s）、および、A2シナリオは958hPa（39.2m/s）となった。つまり、平均的に見れば、温暖化がより加速的に進行するシナリオでより台風強度は増大する（B1<A1B<A2）と見なすことができる。

また、現在気候実験の全29個の台風を「猛烈な台風（期間最低中心気圧930hPa未満）」「強い台風（期間最低中心気圧930hPa以上960hPa未満）」「弱い台風（期間最低中心気圧960hPa以上）」の3種類に分類し、それぞれの台風強度に対する平均的な温暖化影響量の評価した。その結果、「弱い台風」や「強い台風」に関しては、温暖化がより加速的に進むシナリオにおいてより強化される傾向（B1<A1B<A2）にあったが、「猛烈な台風」に関しては、温暖化の進行がより緩やかなシナリオの方がより強化される傾向（A2<A1B<B1）にあり、温暖化がより加速的に進むA2シナリオでは最盛期の強度発達が他のシナリオに比べて抑えられることが明らかとなった。

21世紀末までに、海水面温度はA2シナリオでより上昇するのに対して、対流圏界面温度はA2シナリオでより一層大きく上昇することから、B1シナリオよりA2シナリオで可能最大強度が抑制されることになるとMPI理論によって結論づけることができる。

(3) 現在気候の可能最大高潮の推算

本研究では、日本の三大湾での現在気候下

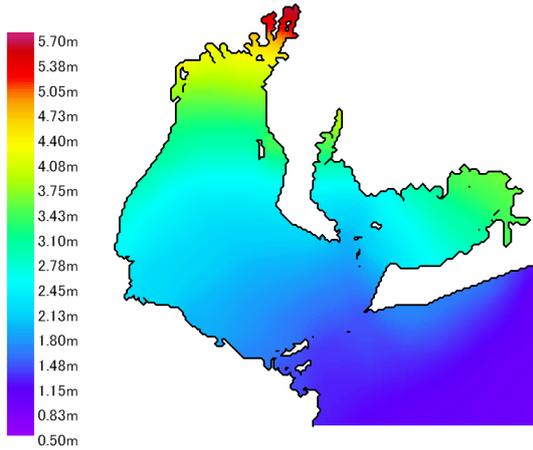


図3 現在気候における伊勢湾の可能最大高潮.

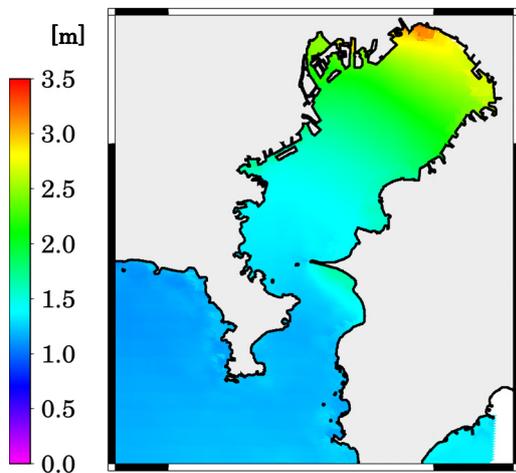


図4 現在気候における東京湾の可能最大高潮.

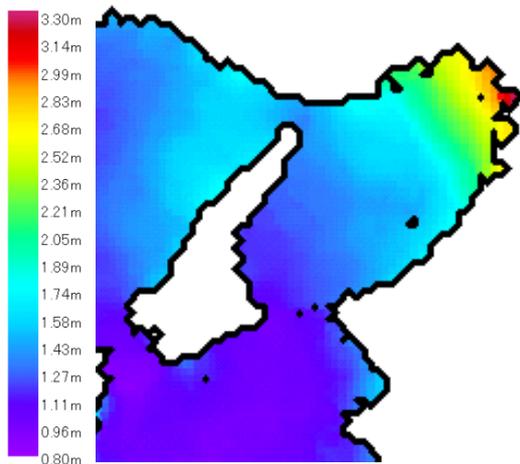


図5 現在気候における大阪湾の可能最大高潮.

における可能最大高潮を評価した。台風環境場の設定において、モデル台風として1959年9月の伊勢湾台風に定め、渦位平均場に対しては現在気候の状態を設定し、さらに、渦位偏差場に対しては適切な気圧配置を設定

することで、自由自在に現在気候下の最大規模台風を対象地域へと直撃させることができる。

まず、伊勢湾における計50ケースの現在気候アンサンブル実験を行った。上陸時中心気圧は920hPaから930hPaであり、台風は北よりの方向に進行した。その結果、湾奥の名古屋港では既往最大潮位偏差3.5mを大きく上回る5.6mの潮位偏差が発生し得ることが明らかとなった(図3)。

次に、伊勢湾台風時の渦位偏差場を3.25°東方向に平行移動させることで、東京湾における計50ケースの現在気候アンサンブル実験を行った。同じく上陸時中心気圧は920hPaから930hPaであり、北よりの方向に進行した。その結果、東京湾の湾奥の広い範囲で潮位偏差が2mを超え、最大で3.3mに達することが明らかとなった(図4)。また、東京湾台風による既往最大潮位偏差2.3mを超える継続時間が54分に及ぶことを明らかにした。

また、伊勢湾台風時(北よりの進路)の渦位偏差場を台風0918号(北東よりの進路)の渦位偏差場に置き換えることで、大阪湾における計50ケースの現在気候アンサンブル実験を行った。同じく上陸時中心気圧は920hPaから930hPaであり、北東よりの方向に進行した。その結果、可能最大高潮は大阪港で3.3mにまで達している(図5)。この数値は、大阪港の設計高潮位の基となっている室戸台風による既往最大高潮3.1mを超えており、今後の大阪湾地域における高潮対策に反映させる必要があると言えよう。

以上より、本研究で開発した台風渦位ボガスと高解像度台風モデルを用いることにより、日本の三大湾における可能最大高潮を定量評価することに成功した。

(4) 可能最大高潮のシナリオ間相互比較

本研究では、名古屋港を対象とすることで、今世紀100年間における可能最大高潮の長期変動を温暖化シナリオ毎(A2, A1B, および、B1シナリオ)に評価した。

図6は、温暖化シナリオ毎(A2, A1B, および、B1シナリオ)の21世紀100年間の名古屋港における可能最大規模台風に伴う可能最大高潮の年最大値の経年変化を示す。可能最大規模の台風に伴う可能最大高潮は100年間で緩やかに増大する傾向が見て取れ、21世紀末には平均的な可能最大高潮はおよそ7.0mになると見積られる。温暖化シナリオ毎に比較すると、A2シナリオでは+0.42m/100年、A1Bシナリオでは+0.66m/100年、B1シナリオでは+0.70m/100年となり、やはり、温暖化の進みがより緩やかなB1シナリオでの可能最大高潮の増加がより顕著である。また、どの温暖化シナリオであっても、可能最大高潮の標準偏差は0.7~1.0mとなり、温暖化による長期的変化(線形回帰トレンド)よりも年々変動による短周期変化(標準偏差)の方がより顕著であると言える。

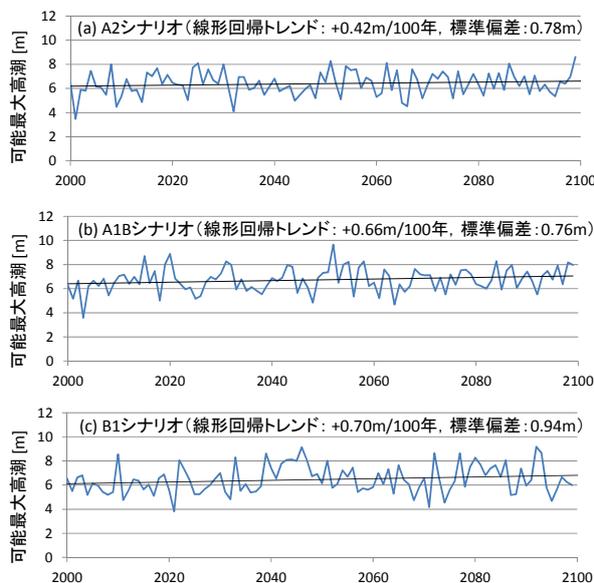


図6 (a)A2, (b)A1B, および, (c)B1 シナリオにおける, 2000~2099年までの名古屋港の可能最大高潮の時系列.

よって, 温暖化の進行の度合いに関わらず悪条件が重なれば, 21世紀末を待たずとも既往最大を大幅に上回る高潮災害が発生する可能性があるものと結論づけられる.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 34 件)

- ① Murakami, T., S. Shimokawa, J. Yoshino, and T. Yasuda, A new index for evaluation of risk of complex disaster due to typhoons, *Natural Hazards*, 査読有, (受理), 2015.
- ② 吉野純・荒川悟・豊田将也・小林智尚, 高解像度台風モデルによる台風強度に対する温暖化影響のシナリオ間相互比較, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.71, (受理), 2014.
- ③ 豊田将也・吉野純・荒川悟・小林智尚, 高解像度台風-高潮結合モデルによる台風 1330 号とそれに伴う高潮の再現実験, *土木学会論文集 B2*, 査読有, Vol.71, (受理), 2014.
- ④ Saitoh, T. M., S. Nagai, J. Yoshino, H. Kondo, I. Tamagawa, H. Muraoka, Effects of canopy phenology on deciduous overstory and evergreen understory carbon budgets in a cool-temperate forest ecosystem under ongoing climate change, *Ecological Research*, 査読有, Vol.30, 267-277, 2015.
- ⑤ Oku, Y., J. Yoshino, T. Takemi, and H. Ishikawa, Assessment of heavy rainfall-induced disaster potential based on an ensemble simulation of Typhoon Talas (2011) with controlled track and intensity: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 査読有, Vol.14, 2699-2709, 2014.

- ⑥ Shimokawa, S., T. Murakami, S. Iizuka, J. Yoshino, and T. Yasuda, A new typhoon bogusing scheme to obtain the possible maximum typhoon and its application for assessment of impacts of the possible maximum storm surges in Ise and Tokyo Bays in Japan, *Natural Hazards*, 査読有, Vol.74, 2037-2052, 2014.
- ⑦ 吉野純・高島利紗・小林智尚, 気候変動を考慮した可能最大高潮の長期変動予測技術の開発, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.70, I_1251-I_1255, 2014.
- ⑧ 村上智一・吉野純・深尾宏矩・安田孝志, 三河湾に発生する‘想定外’高潮とその発生機構, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.69, I_221-I_225, 2013.
- ⑨ 田中智也・吉野純・嶋田進・小林智尚, 台風進行速度が台風下の有義波・最大波に及ぼす影響, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.69, I_141-I_145, 2013.
- ⑩ 吉野純・村上智一・深尾宏矩・安田孝志, 台風渦位ポーガスの改良による大阪湾地域における可能最大高潮の力学的評価, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.69, I_241-I_245, 2013.
- ⑪ 吉野純・荒川悟・嶋田進・小林智尚, 軸対称 2 次元および領域 3 次元台風モデルによる 2004 年全台風の強度解析, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.69, I_1256-I_1260, 2013.
- ⑫ Ishikawa, H., Y. Oku, S. Kim, T. Takemi, and J. Yoshino, Estimation of a possible maximum flood event in the Tone River basin, Japan caused by a tropical cyclone, *Hydrological Processes*, 査読有, Vol.27, 3292-3300, 2013.
- ⑬ Murakami, T., J. Iida, J. Yoshino and T. Yasuda, Damage simulation system for coupled hazards caused by maximum possible typhoons in coastal zones under a future climate, *Proc. Conference on the ATC-SEI Advances in Hurricane Engineering*, 査読有, 561-572, 2012.
- ⑭ Rahim, M., J. Yoshino, Y. Doi and T. Yasuda, Effects of global warming on the average wind speed field in central Japan, *Journal of Sustainable Energy and Environment*, 査読有, Vol.3, 165-171, 2012.
- ⑮ 吉野純・J. Strachan・P. L. Vidale, 猛烈な勢力の台風の全生涯に対する高解像度・高効率予測技術の開発, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.68, I_1211-I_1215, 2012.
- ⑯ 村上智一・飯田潤士・深尾宏矩・吉野純・安田孝志, 伊勢湾に來襲する可能最大台風の複合外力による災害危険度評価, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 査読有, Vol.68, I_1291-I_1295, 2012.
- ⑰ 村上智一・深尾宏矩・吉野純・安田孝志, 温暖化シナリオ A1B の下での最大級台

風による三河湾の高潮とその特性解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 査読有, Vol. 68, I_286-I_290, 2012.

- ⑱ 村上智一・深尾宏矩・吉野純・安田孝志, 大気-海洋-波浪結合モデルに基づく現在気候下の最大級台風による三河湾での高潮と高波の解明, 土木学会論文集 B3(海洋開発), 査読有, Vol.68, I_846-I_851, 2012.
- ⑲ Saitoh, T. M., S. Nagai, J. Yoshino, H. Muraoka, N. Saigusa, and I. Tamagawa, Functional consequences of differences in canopy phenology for the carbon budgets of two cool-temperate forest types: simulations using the NCAR/LSM model and validation using tower flux and biometric data, Eurasian Journal of Forest Research, 査読有, Vol.15, 19-30, 2012.
- ⑳ Rahim, M., J. Yoshino, and T. Yasuda, Evaluation of solar radiation abundance and electricity production capacity for application and development of solar energy, International Journal of Energy and Environment, 査読有, Vol.3, 687-700, 2012.

[学会発表] (計 53 件)

- ① 豊田将也・吉野純・荒川悟・小林智尚, 高解像度台風モデルによる台風ハイエン(台風 1330 号)の再現実験, 土木学会中部支部研究発表会, 2015 年 3 月 6 日, 愛知県豊橋市.
- ② 吉野純・高島利紗・小林智尚: 気候変動を考慮した可能最大高潮の長期変動予測技術の開発, 海岸工学講演会, 2014 年 11 月 12 日, 愛知県名古屋市.
- ③ Yoshino, J., Intensity hindcasts on the 2004 Pacific typhoons using a high-resolution tropical cyclone model. The third Capacity Building Workshop of the WMO/IOC Data Buoy Cooperation Panel (DBCP) for the North Pacific Ocean and Its Marginal Seas (NPOMS-3) - Application of Regional Ocean Observations for Increasing Society's Understanding and Forecasting of Typhoons -, 2014 年 10 月 6 日, 京都府宇治市.
- ④ 吉野純・荒川悟・小林智尚, 領域台風モデルによる台風強度に関する擬似温暖化実験, 土木学会中部支部研究発表会, 2014 年 3 月 7 日, 岐阜県岐阜市.
- ⑤ 吉野純・荒川悟・小林智尚・嶋田進, 領域台風モデルによる 2004 年全台風の強度解析, 日本気象学会, 2013 年 11 月 19 日, 宮城県仙台市.
- ⑥ 吉野純, 温暖化による台風強大化研究最前線, 愛知工科大学シンポジウム(温暖化の現状と未来, 三河湾に襲撃する台風・高潮への影響と備え), 2013 年 9 月 30 日, 愛知県蒲郡市.
- ⑦ 吉野純, 地球温暖化による海象・気象へ

の影響と可能最大級高潮, 2013 年度(第 49 回)水工学に関する夏期研修会, 2013 年 8 月 26 日, 愛知県名古屋市.

- ⑧ Ishikawa, H, Y. Oku, S. Kim, K. Kobayashi, T. Takemi and J. Yoshino, Hydrological application of Ensemble Typhoon Forecasts by Numerical Weather Prediction(NWP), ACTS First Workshop Advanced Technology on Typhoon Forecasting and its Social Implications, 2013 年 6 月 6 日, 台湾・台北.
- ⑨ Yoshino, J., Maximum potential storm surge under the present and future climates estimated by a coupled TC-ocean model, Japan Geoscience Union Meeting 2013, 2013 年 5 月 23 日, 千葉県千葉市.
- ⑩ Yoshino, J., J. Strachan, and P. L. Vidale, Nonlinear interaction between sea spray process and dissipative heating process in Super Typhoon Vera (1959), 2012 American Geophysical Union Fall Meeting, 2012 年 12 月 5 日, アメリカ・サンフランシスコ.
- ⑪ 吉野純・J. Strachan・P. L. Vidale, 高分解能台風シミュレーションのための海面境界物理過程の改良, 日本気象学会, 2012 年 10 月 5 日, 北海道札幌市.
- ⑫ 吉野純, 三河湾地域に襲撃する最大級台風, 愛知工科大学シンポジウム(三河湾に襲撃する最大級台風・高潮・津波の予測), 2012 年 9 月 13 日, 愛知県蒲郡市.
- ⑬ 深尾宏矩・村上智一・吉野純・安田孝志, 人工的海面水温低下による台風災害ポテンシャルの抑制に関する検討, 土木学会全全国大会年次学術講演会, 2012 年 9 月 5 日, 愛知県名古屋市.

[図書] (計 1 件)

- ① 筆保弘徳・芳村圭・稲津将・吉野純・加藤輝之・茂木耕作・三好建正, 天気と気象についてわかっていることとわかっていないこと - ようこそ空の研究室へ -, ベレ出版, 2013, pp.280.

[その他]

岐阜大学局地気象予報ホームページ
<http://net.cive.gifu-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉野 純 (YOSHINO Jun)

岐阜大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70377688