

# 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

## A Predicting Technique of Long-Term Variability of Maximum Potential Storm Surge Heights Considering Future Climate Projections

吉野 純<sup>1</sup>・高島利紗<sup>2</sup>・小林智尚<sup>3</sup>

Jun YOSHINO, Risa TAKASHIMA and Tomonao KOBAYASHI

In this study, a typhoon storm surge model, which is forced by a mature-stage typhoon reaching to the maximum potential intensity (MPI), is newly developed in order to predict the long-term variability of the maximum potential storm surge (MPSS) under the future climate projections. We conduct 100-year numerical experiments constrained by the global circulation model UKMO HadCM3 with SRES A2, A1B, and B1. Results show that the linear trend of MPSS increase is higher in the B1 scenario than in the A2 and A1B scenarios, and the yearly fluctuations (i.e. standard deviation) of MPSS during the 21st century are 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.

### 1. はじめに

2013年に刊行されたIPCC第5次報告書によれば、「気候システムの温暖化には疑う余地がない」とされ、21世紀末における陸域の昇温の可能性は、発生確率99~100%で「ほぼ確実 (Virtually certain)」と結論づけている。一方で、21世紀末における強い熱帯低気圧の活動度の増加の可能性については、発生確率50~100%で「どちらかと言えば (More likely than not)」と未だ明確な結論は出していない。一方、過去30年間で熱帯低気圧の勢力ピークとなる地点は10年間で約0.5°ずつ極側へと拡大しつつあり (Kossinら, 2014)、温暖化による熱帯域の拡大が熱帯低気圧の強度に少なからず影響している観測的証拠が得られつつある。台風やハリケーンなどの熱帯低気圧の活動度の将来変化を正確に評価し、全国各地の港湾における計画高潮位を適切に見直してゆくことは、台風常襲地帯である我が国において火急の課題と言えよう。

このような背景の中、可能最大規模の台風に伴う高潮の将来変化を定量化することを目的として、吉野ら (2011a, 2011b) は「台風渦位ボーガス」と「大気-海洋-波浪結合モデル」の組み合わせに基づく大気・海洋力学的手法を提案している。「台風渦位ボーガス」の利用により、台風周辺的环境場 (台風環境場) の状態を加味して、大気力学的に発生し得る可能最大強度 (MPI: Maximum Potential Intensity) に達した台風 (以降、MPI台風とよぶ) の3次元気象場を数理的に評価でき、これ

を「大気-海洋-波浪結合モデル」に対して初期条件として入力することで、MPI台風が最悪の進路で上陸することで生じる最大潮位偏差 (以降、可能最大高潮) を評価できる。

村上ら (2011a, 2011b) は、この手法を用いることで、伊勢湾湾奥に位置する名古屋港を対象として、現在気候 (伊勢湾台風を想定) と将来気候 (A1Bシナリオ2099年9月を想定) における可能最大高潮の力学的評価を行っている。伊勢湾台風時 (1959年9月) の台風環境場を想定した現在気候アンサンブル実験により、上陸時中心気圧930 hPaのMPI台風が5.6 m (名古屋港) の可能最大高潮をもたらす。現在気候の条件下であっても伊勢湾台風時に観測された潮位偏差3.55 m (名古屋港) を大幅に上回る可能性を指摘している。また、A1Bシナリオ2099年9月を想定した擬似温暖化アンサンブル実験により、上陸時中心気圧905 hPaのMPI台風が6.9 m (名古屋港) の可能最大高潮をもたらす。今世紀末における温暖化の影響は無視できない規模となることが懸念されている。

これらの既往研究で用いられている「台風渦位ボーガス」や「大気-海洋-波浪結合モデル」は、温暖化の影響を加味してMIP台風に伴う可能最大高潮を大気・海洋力学的に評価できる利点がある反面、極めて計算コストが高く多量の計算を行うには適していない。そのため、21世紀100年間の可能最大高潮の年々変動の幅を評価できていないだけでなく、複数の異なった温暖化シナリオの比較さえもできていないのが現状であり、今後、適切な温暖化対策を講じてゆく上でも、既往研究で用いられた手法の合理的な簡略化と高効率化を図る必要がある。

そこで本研究では、既往研究の手法に比べてより簡略化され高効率化された「MPI台風-高潮結合モデル」を新たに開発し、MPI台風によりもたらされる可能最大高

1 正会員 博(理) 岐阜大学准教授大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻  
2 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻  
3 正会員 工博 岐阜大学教授大学院工学研究科環境エネルギーシステム専攻

潮の長期変動を温暖化シナリオ毎に予測することを目的としている。

## 2. MPI台風-高潮結合モデル

MPI台風に伴う可能最大高潮を評価するために、「MPI理論」「2次元台風モデル」および「2層高潮モデル」により構成される「MPI台風-高潮結合モデル」を開発する。本研究の計算フローを図-1に示す。

### (1) MPI理論

はじめに、「MPI理論」は、Bisterら(2002)により開発された定常軸対称台風モデルであり、台風周辺の環境場を考慮して熱力学的な可能最大強度(MPI)を評価できる。ここで、台風は、暖かい海面(海面温度 $T_s$ )にて加熱され、冷たい対流圏界面(対流圏界面温度 $T_0$ )で冷却されるカルノーサイクルエンジンと等価であるものとみなし、熱力学第一法則により、最大風速半径での最大風速(傾度風) $V_m$ を、

$$|V_m|^2 = \frac{C_k}{C_D} \frac{T_s}{T_0} [CAPE^* - CAPE] \dots\dots\dots (1)$$

によって評価できる。ここで、 $T_s$ は海面温度、 $T_0$ は対流圏界面温度、 $C_k$ は海面における熱交換係数、 $C_D$ は海面における運動量交換係数を示している。 $CAPE^*$ は海面における飽和空気を持ち上げた時の潜在有効位置エネルギーであり、 $CAPE$ は境界層内の湿潤空気を持ち上げた時の潜在有効位置エネルギーである。

次に、傾度風平衡の式と温度風平衡の式の組み合わせるにより、最大風速半径での海面気圧(ほぼ中心気圧とみなせる) $P_m$ を、

$$RT_s \ln\left(\frac{P_0}{P_m}\right) = CAPE + \frac{1}{2} V_m^2 \dots\dots\dots (2)$$

によって評価できる。ここで、 $P_0$ は環境場における海面気圧(=1000 hPa)、 $R$ は乾燥空気の気体定数を示す。

全球気候モデルにより得られる台風環境場データを入

力することで、式(1)と式(2)の連立により、MPI台風の可能最大風速 $V_m$ と可能最低気圧 $P_m$ を算定できる。既往研究(吉野ら, 2011a; 村上ら, 2011a)のように、この段階で3次元気象場を作成する必要がないため計算コストを大幅に低減できる。

### (2) 2次元台風モデル

次に、「2次元台風モデル」は、気圧場に対するMyresの式と風速ベクトル場に対する傾度風の式により構成される汎用型の経験的台風モデルである。環境場の海面気圧を1000 hPa、最大風速半径を30 kmとする。風速ベクトル場に対する台風移動効果にはBlatonの式を、地表面摩擦効果にはGoldberg-Mohn摩擦を仮定し、風速ベクトルの吹き込み角度は海上に典型的な $10^\circ$ としている。

初期条件として、MPI理論により評価された可能最低気圧が入力されるが、一般的に、この勢力を維持したまま日本列島に接近・上陸することは殆どなく、実際には、MPI台風であっても風の鉛直シアや陸地などの力学的影響を受けて少なからず減衰する。そこで本研究では、吉野ら(2009)によるメソ気象モデルによる台風の強度変化に関する理想実験の結果に基づいて、「風の鉛直シアの効果」や「上陸の効果」といった台風強度減衰に関するパラメタリゼーションを新たに導入する。

まず、「風の鉛直シアの効果」に対しては、台風強度変化と風の鉛直シア(200 hPaと850 hPaの風速差)との間には強い相関関係があることから、中心気圧の時間変化 $dP_m/dt$  [hPa/時]は、

$$\frac{dP_m}{dt} = -(0.0059P_{m0} + 5.9240) \times V_s \dots\dots\dots (3)$$

と表現できる。ここで、 $P_{m0}$ は初期の中心気圧[hPa]、 $V_s$ は風の鉛直シア[m/s]であり、台風の移動速度の1.1倍とする。弱い鉛直シア $-V_s \leq -0.1476P_{m0} + 139.1932$ の環境下では、中心気圧 $1.1183V_s + P_{m0}$  [hPa]で台風の強度減衰は止まり、強い鉛直シア $-V_s > -0.1476P_{m0} + 139.1932$ の環境下では、台風の強度減衰は中心気圧1000 hPaになるまで継続する。これまでの一般的な2次元台風モデルでは、Blatonの式の効果により、台風の移動速度が増大すればするほど、台風の右側象限での最大風速も増大する傾向を示していたが、この風の鉛直シアの効果を加味することで、その傾向を抑制することができる。衰弱期にある中緯度帯の台風においてより現実的な設定であると考えられる。

また、「上陸の効果」に対しては、粗度長の大きい陸上では地表面摩擦によるエネルギー損失が海上に比べてより大きいことから、中心気圧の時間変化 $dP_m/dt$  [hPa/時]は、

$$\frac{dP_m}{dt} = -0.0635z_0^{0.1853} (P_m - 1000) \dots\dots\dots (4)$$

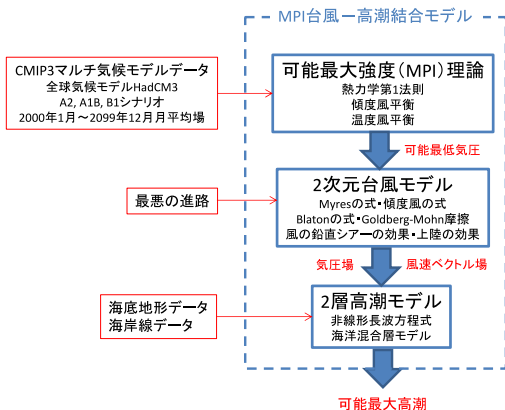


図-1 開発したMPI台風-高潮結合モデルの計算フロー。

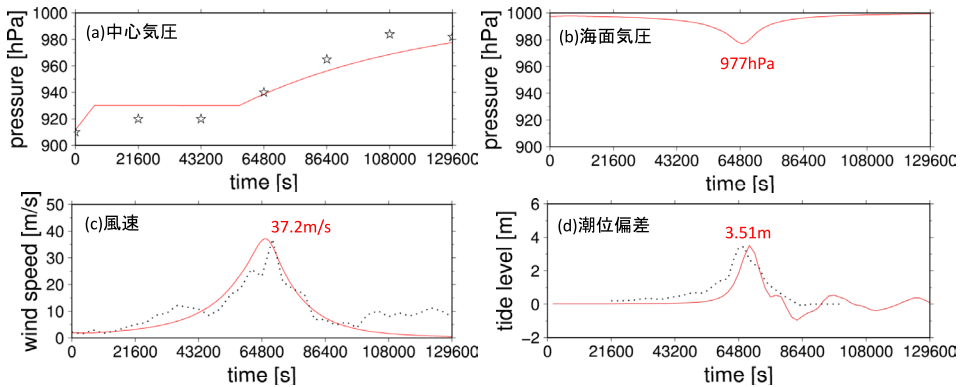


図-2 MPI台風-高潮結合モデルにより再現された伊勢湾台風の(a)中心気圧(星印は気象庁ベストトラックによる観測値), 名古屋港の(b)海面気圧, (c)風速, および, (d)潮位偏差の時系列(点線は名古屋における観測値)。

と表現できる。ここで、 $z_0$ は陸上の粗度長 [cm] であり、本研究では $z_0=50$  cmに設定した。粗度長の大きな陸面であるほど強度減衰の変化率はより大きくなる。

これら2種類のパラメタリゼーションを適用することで、日本列島に接近・上陸する台風の強度変化を現実的に表現できるようになると期待される。この二次元台風モデルの利用により、既往研究のように3次元気象場の時間発展を計算する必要がないため大幅に計算コストを下げることができる。

### (3) 2層高潮モデル

最後に、「2層高潮モデル」は、鉛直2層の非線形長波方程式(運動方程式および連続式)により構成され、運動方程式は移流項、コリオリ項、水面勾配項、圧力勾配項、風応力項、底面摩擦項、および、水平拡散項が考慮されている。水平格子間隔は $1.0 \text{ km} \times 1.0 \text{ km}$ として、海底地形データにはETOPO1(1分間隔)、海岸線データにはGTOPO30(30秒間隔)を使用する。二次元台風モデルにより評価されたMPI台風の気圧場および風速ベクトル場が入力され、Garratの海面抵抗係数式に基づき第1層目の海面風応力が計算される。第1層目の層厚は鉛直渦拡散を基本とする海洋混合層モデル(Shade, 1999; 吉野ら, 2012)により表現され、本研究では初期混合層深を30 mとしている。第2層目では減減重力が作用するため、単層高潮モデルと比べて時間ステップ幅をより長く設定できることから、本研究では、時間ステップ幅は5秒としている。

### (4) 伊勢湾台風の再現計算

この完成したMPI台風-高潮結合モデルを用いることで、1959年9月の伊勢湾台風の予備的な再現実験を行った(図-2)。再現実験による台風強度変化は、観測と良い一致を示し、南海上で可能最低気圧910 hPaに達した伊勢湾台風は、 $0.539^\circ/\text{時}$ の速度で北北東進することにより徐々に減衰し、中心気圧930 hPaで上陸した後は更に急

激に減衰している(図-2a)。このMPI台風が、紀伊半島に上陸することにより、ピーク時に、名古屋では最低気圧977 hPa(図-2b)、最大風速37.2 m/s(図-2c)となり、その結果、名古屋港で最高潮位偏差3.51 mになると算定された(図-2d)。これは伊勢湾台風時に観測された最高潮位偏差3.55 m(名古屋港)とも良い一致を示していることから、MPI台風-高潮結合モデルの再現性の高さが実証された。

## 3. 使用したデータと計算設定

本研究では、このMPI台風-高潮結合モデルを用いて、伊勢湾湾奥に位置する名古屋港を対象として、可能最大高潮の長期変動を温暖化シナリオ毎に評価することを目的とする。

MPI理論に用いる台風環境場データは、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の将来予測データである。これはCMIP3マルチ気候モデルデータの1つである。下端1000 hPaから上端70 hPaまでの水平格子間隔 $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ からなる1ヶ月平均格子点データ

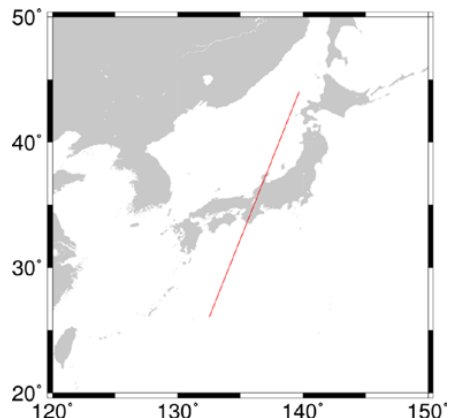


図-3 名古屋港で可能最大高潮をもたらす最悪の台風進路。

(気温, 相対湿度, ジオポテンシャル高度, 地表面気圧, および, 海水面温度)を使用する。A2シナリオ(今世紀末の大気中の二酸化炭素濃度1250 ppm:地上気温+6.6°C/100年), A1Bシナリオ(同850 ppm:地上気温+5.5°C/100年), および, B1シナリオ(同600 ppm:地上気温+3.7°C/100年)を想定しており, 計算期間は2000年1月~2099年12月までの計1200ヶ月分(100年間分)である。例年7~10月の間に可能最低気圧の極小値が出現し, 冬季には1000 hPaに近い可能最低気圧となる。日本列島の南海上の10°×10°海域内(130°E~140°E, 20°N~30°N)における可能最低気圧の空間平均値を計算することで, 2次元台風モデル(MPI台風)の初期の中心気圧とする。そして, 名古屋港に接近・上陸するこのMPI台風に対して, 最悪の移動速度と最悪の進行方向を設定することで, 2層高潮モデルにより対象地域の可能最大高潮を評価する。ここで, 最悪の移動速度と最悪の進行方向については, 名古屋港を対象とする多数の感度実験の結果(図省略)に基づいて, 図-3に示すように, 0.485°/時で北北東進する台風進路が設定される。MPI台風の初期の中心位置は, 133.3°E, 26.9°Nとして, 温暖化シナリオ毎に36時間積分を1200ヶ月分繰り返す。

4. 結果と考察

ここでは, MPI台風-高潮結合モデルによる21世紀100年間の可能最低気圧と可能最大高潮の経年変化と温暖化シナリオ間の差異について考察する。

まず, 図-4は, 温暖化シナリオ毎(A2, A1B, および, B1シナリオ)の21世紀100年間の日本列島南海上での可能最低気圧(年間最小値)の経年変化を示す。どの温暖化シナリオであっても可能最低気圧は緩やかに減少する

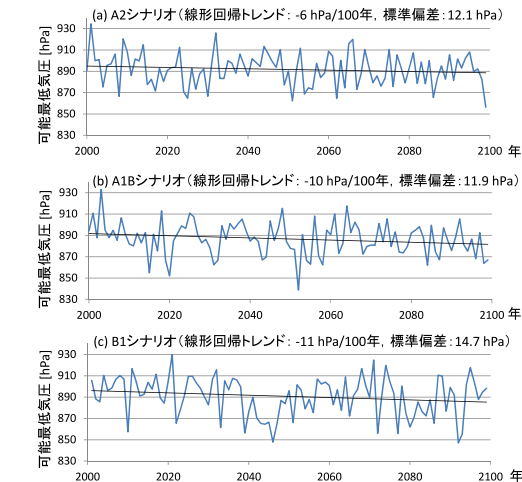


図-4 (a)A2, (b)A1B, および, (c)B1シナリオにおける, 2000~2099年までの南海上の可能最低気圧の時系列。

トレンドを示しており, 吉野ら(2011a)の結果と同様に, 温暖化の進行により21世紀末にはMPI台風はより強化され, 平均的な可能最低気圧はおよそ880 hPaになるものと推定される。しかしながら, 複数の温暖化シナリオの間で比較すると, その線形回帰トレンドは, 温暖化の進行度合いの最も小さいB1シナリオにおいて, MPI台風の強度は増大しており(-11 hPa/100年), 逆に, 温暖化の進行度合いが最も大きいA2シナリオでは, 台風の強化はそれほど明瞭にあらわれないこと(-6 hPa/100年)が明らかとなった。温暖化が強まるほど台風強度も増大するというこれまでの推測に反する結果となった。

この原因を明らかにするため, 図-5と図-6には, 温暖化シナリオ毎(A2, A1B, および, B1シナリオ)の21世紀中の日本列島南海上での平均海水面温度と平均対流圏界面温度の経年変化をそれぞれ示す。日本南海上の海水面温度は, 温暖化の影響を受けて徐々に上昇する傾向が見て取れ, 温暖化シナリオ毎に比較すると, A2シナリオでは+2.8°C/100年, A1Bシナリオでは+2.5°C/100年, B1シナリオでは+2.0°C/100年となる。この結果からも, 確かに, A2シナリオが海水面温度の上昇量が最も大きいシナリオであると言える。一方で, 対流圏界面温度は, 海水面温度以上に大きな上昇幅を示しており, A2シナリオでは+7.4°C/100年, A1Bシナリオでは+6.4°C/100年, B1シナリオでは+4.0°C/100年となる。MPI理論の

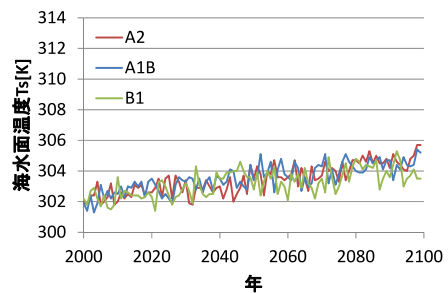


図-5 A2, A1B, および, B1シナリオにおける, 2000~2099年までの南海上の海水面温度の時系列。

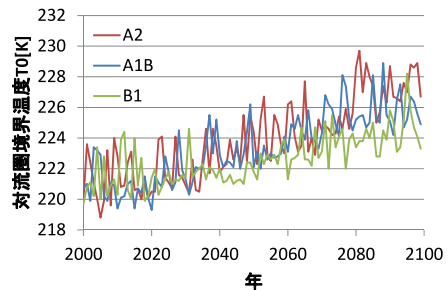


図-6 A2, A1B, および, B1シナリオにおける, 2000~2099年までの南海上の対流圏界面温度の時系列。

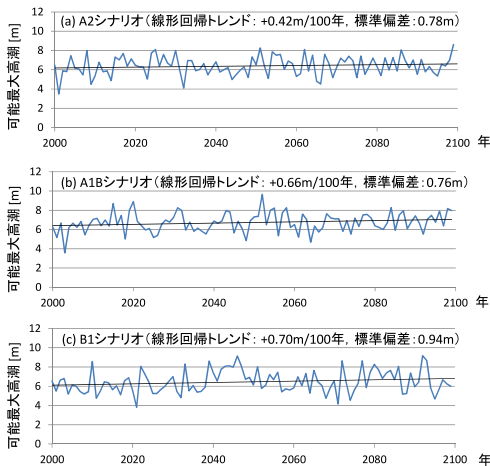


図-7 (a)A2, (b)A1B, および, (c)B1シナリオにおける, 2000～2099年までの名古屋港の可能最大高潮の時系列。

式 (1) が示すように, 可能最大風速 $V_m$ の2乗は, 海水面温度 $T_s$ に比例する一方で, 対流圏界面温度 $T_0$ に反比例することから, A2シナリオのように加速的に対流圏界面温度が増加するシナリオにおいては, 台風強度がより抑制されやすい環境場になるものと考えられる。

最後に, 図-7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MPI台風に伴う可能最大高潮 (年間最大値) の経年変化を示す。図-4の結果と整合するように, MPI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7.0 mになると見積もられる。この結果は, 村上ら (2011b) の研究ともよく一致している。温暖化シナリオ毎に比較すると, A2シナリオでは+0.42 m / 100年, A1Bシナリオでは+0.66 m / 100年, B1シナリオでは+0.70 m / 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 mを超えており (可能最低気圧の標準偏差は10 hPa以上), 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) の方がより卓越しており, 年々変動の中で偶然的に現れる極端な年に, MPI台風が最悪の進路で上陸することにより, 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. 結語

本研究では, MIP台風に伴う可能最大高潮の将来変化

を定量化することを目的として, 従来手法に比べてより高効率な「MPI台風-高潮結合モデル」を開発した。これにより, 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。その結果, 温暖化の進行度合いの最も小さいB1シナリオが可能最大高潮の増加率が最も大きくなることが明らかとなった。今世紀末に温暖化が最も進行するA2シナリオにおいては, 日本南海上において海水面温度は他のシナリオに比べてより上昇するが, 対流圏界面温度もまた加速的に上昇するため, 台風強度が抑制されやすい環境になるものと推察される。また, 温暖化シナリオに関係なくその年々変動の幅は極めて大きく, 極端な年に最悪の条件が重なれば21世紀末を待たずとも最大規模の高潮災害が発生する可能性があると考えられる。

今後は, 観測データの存在する20世紀の100年間の評価も同様に行うのみならず, 伊勢湾以外の沿岸地域に評価を拡張することで, MPI台風に伴う可能最大高潮の日本全域における温暖化影響を過去・現在・未来に対して定量化する必要がある。

謝辞: 本研究は, 科学研究費補助金若手研究A (24686058) および基盤研究B (24360199) による成果であることをここに付記する。

## 参考文献

- 村上智一・深尾宏矩・吉野 純・安田孝志 (2011a): 現在気候の下での最大級台風による伊勢湾の可能最大高潮, 土木学会論文集B3, 第67巻, pp.985-990.
- 村上智一・深尾宏矩・吉野 純・安田孝志 (2011b): 温暖化シナリオA1Bの下で今世紀末に予想される最大級台風による伊勢湾全域の高潮・高波, 土木学会論文集B2, 第67巻, pp.406-410.
- 吉野 純・吉田尚弘・岩本学士・村上智一・安田孝志 (2009): 高分解能台風強度予測モデルの開発とその高精度化に関する検討, 海岸工学論文集, 第56巻, pp.1261-1265.
- 吉野 純・岩本学士・安田孝志 (2011a): 地球温暖化の力学的影響評価のための台風渦位ポアガスの改良, 土木学会論文集B2, 第67巻, pp.416-420.
- 吉野 純・岩本学士・村上智一・安田孝志 (2011b): 台風渦位ポアガスに基づく東京湾地域における可能最大風速の大気力学的評価, 土木学会論文集B2, 第67巻, pp.411-415.
- 吉野 純・Jane Strachan・Pier Luigi Vidale (2012): 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, 第68巻, pp. I\_1211-I\_1215.
- Bister, B. and K. A. Emanuel (2002): Low frequency variability of tropical cyclone potential intensity. 1. Interannual to interdecadal variability, J. Geophys. Res., 107, D24, 4801.
- Kossin, P. J., K. A. Emanuel and G. A. Vecchi (2014): The poleward migration of the location of tropical cyclone maximum intensity, Nature, 509, pp. 349-352.