

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

Estimation of Potential Storm Surge and Wave Heights in the Bag of Ise Based on the Atmosphere and Ocean Dynamics

吉野 純¹・小林孝輔²・児島弘展³・安田孝志⁴

Jun YOSHINO, Kosuke KOBAYASHI, Hironobu KOJIMA and Takashi YASUDA

Using a coupled atmosphere-ocean-wave model and a typhoon initialization technique, the potential storm surge and wave heights at the port of Nagoya are evaluated in accordance with the atmosphere and ocean dynamics. The terms “potential storm surge height” and “potential wave height” used herein are defined as the sea level height anomaly and significant wave height, respectively, that are likely to be spawned by a landfalling typhoon reaching the maximum potential intensity under the present and future climates. A total of 40 numerical experiments under the present and future climate environment predicts that the potential storm surge (potential wave height) at the port of Nagoya increases from 4.5m (2.2m) to 6.5m (2.8m) until 2100 as a result of the global warming.

1. はじめに

2007年のIPCC第4次報告書は、「地球温暖化は90%の確率で人間の経済活動により放出された温室効果ガスによる」と指摘しており、また、その結果生じる海面温度の上昇により「台風に伴う最大風速も増大する可能性が高い」と警鐘を鳴らしている。今後ほぼ確実に地球温暖化が進行するとみられる中、将来発生し得る最大規模の台風が最悪の進路を取ることにによって生じる高潮や波浪、いわゆる「可能最大高潮」や「可能最大波浪」を精度よく予測することは、避難対策や万一破堤した場合の減災対策のためだけでなく、今後の日本各地の長期的沿岸防災対策を講ずる上で不可欠となってくる。

今日まで、高潮・波浪推算の入力値となる台風気象場の推定の際には、低い計算コストで台風気象場を推算できるパラメトリックな2次元台風モデル(光田ら, 1997)が広く使用されてきた。しかしながら、この従来手法は、経験的な台風属性パラメータを多く有することから、将来の地球温暖化(環境場の変化)の影響を適切に考慮できるとは限らない。その上、この従来手法を用いる場合、将来、日本沿岸に接近・上陸する最大規模の台風強度(中心気圧や最大風速)を陽に入力する必要がある、合理性に欠ける入力値設定によっては致命的な誤差要因となるものと危惧される。加えて、この従来手法には台風縁辺部における気象場の再現性にも精度上の問題がある

ことが指摘されている(吉野ら, 2006)。よって、地球温暖化による影響を合理的に考慮した「可能最大高潮」や「可能最大波浪」の評価のためには、従来手法に代わる主観的・経験的要素の少ない、より大気・海洋力学的な推定手法の開発が要求されると言えるだろう。

そこで本研究では、渦位逆変換法(Davisら, 1991)に軸対称台風渦位モデル(Emanuel, 1995)を組み込んだ新しい台風渦位ボーガス手法(吉野ら, 2008)を使用して、現在気候及び将来気候で発生し得る最大規模の台風気象場をメソ気象モデルMM5(Dudhia, 1993)の初期条件として作成することで、従来手法が抱える数々の問題点の解決を目指す。現在気候および将来気候の台風環境場の設定には、ECMWF全球再解析データとCMIP3マルチ気候モデルデータを使用する。初期位置を微妙にずらした多数の台風進路設定の下で、伊勢湾を対象として大気-海洋-波浪結合モデル(村上ら, 2004)を運用することで、可能最大強度の台風が最悪の進路を取ることで生じる「可能最大高潮」と「可能最大波浪」を大気・海洋力学的に明らかにすることを本研究の目的としている。

2. 可能最大高潮と可能最大波浪の評価手法

本研究においては、与えられた気候状態の下で発生し得る可能最大強度の台風(定常状態に達した台風)が、伊勢湾に対して最悪の進路を取った場合に生じるピーク時の「潮位偏差」と「有義波高」を、それぞれ「可能最大高潮」と「可能最大波浪」と定義している。可能最大高潮と可能最大波浪を合理的に評価する新手法として、本研究では、図-1に示すような新しい計算アルゴリズムを提案したい。

この評価手法は、1) 与えられた気候状態を加味して

- | | | |
|--------|------|------------------------------|
| 1 正会員 | 博(理) | 岐阜大学助教 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 | 修(工) | 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 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 |
| 4 フェロー | 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 |

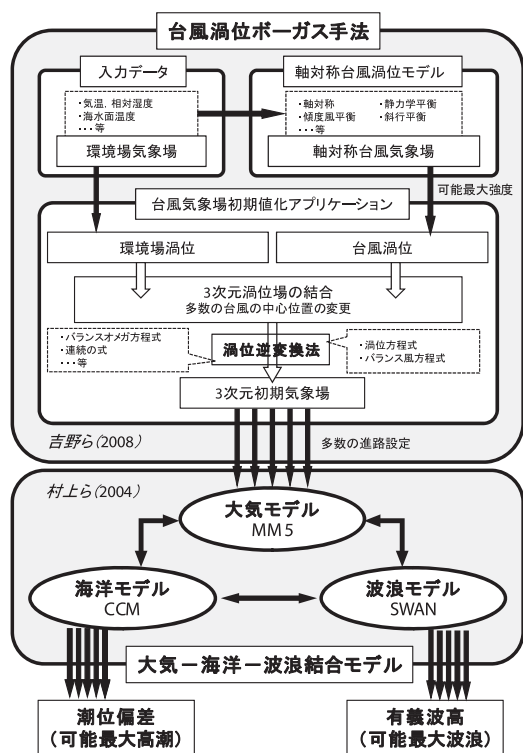


図-1 台風の可能最大高潮・波浪の計算フロー

最大規模の台風気象場を合理的に作成する「台風渦位ボーガス手法（吉野ら，2008）」、2）その初期気象場を元に多数の台風進路設定の下で潮位偏差と有義波高を評価する「大気－海洋－波浪結合モデル（村上ら，2004）」の2段階の計算プロセスから構成される。以下に、各計算プロセスに関する概要を記述する。

(1) 台風渦位ボーガス手法

本研究では、与えられた気候状態の下で発達可能な最大規模の台風気象場を、メソ気象モデルMM5の初期条件として合理的に作成できる「台風渦位ボーガス手法」を使用する。これは、Davisら（1991）による渦位逆変換法に基づく台風気象場初期値化アプリケーション（吉野ら，2007）と、Emanuel（1995）による軸対称台風渦位モデルを組み合わせることによって構成される（吉野ら，2008）。台風渦位ボーガス手法に関する詳細については、吉野ら（2007，2008）を参照して頂きたい。

ここで、台風渦位ボーガス手法の計算フローは（図-1上段参照）、1）対象地域（本研究では伊勢湾）の近傍に台風が接近した事例を選択し（本研究では伊勢湾台風とする）、前後1ヶ月分の客観解析データを入手する。2）現在気候または将来気候の日本沿岸の海水面温度データを入手する。3）これらのデータから得られた台風中心位置における月平均値（海水面温度、気温、相対湿度）を台風環境場とすることで、軸対称台風渦位モデルの境

界条件とする。4）設定された境界条件を元に、軸対称台風渦位モデルによる時間積分を開始する。5）台風が定常状態（可能最大強度）に達した時点で計算を終了し、得られた軸対称気象場から軸対称渦位場（台風渦位）に順変換する。6）得られた台風渦位を環境場渦位に埋め込む。7）渦位逆変換法により3次元渦位場から3次元気象場へと逆変換する。8）バランスオメガ方程式系により、風の発散成分と鉛直成分を考慮した3次元気象場へと修正する。9）最終的に、得られた3次元気象場をメソ気象モデルMM5の初期気象場としてデータフォーマットの変換を行う、の手順により計算が進められる。

従来の気象庁台風ボーガス手法（大澤，2005）と比較すると、本手法の利点は、1）「渦位」というただ1つの物理量の改変によって、物理現象を破綻させないように全ての物理量を同時に改変できる。2）台風内の気圧分布形を仮定する必要がなく、軸対称台風渦位モデルの導入により、与えられた台風環境場（気候状態）の影響を加味した現実的な台風気象場を作成できる。3）渦位逆変換はローパスフィルターとしての効果があるため、台風渦位と環境場渦位との間で生じる不連続や計算不安定の原因となる小スケールの重力波ノイズを除去できる。4）台風内部の3次元気象場は、台風渦位のみならず環境場渦位からの影響も受けて決定されるため、非軸対称ボーガスを投入せずとも、非軸対称的な台風気象場を評価できる、等が挙げられる。このため、近似や不整合が極めて少ない現実的かつ合理的な手法であると言える。

(2) 大気－海洋－波浪結合モデル

台風渦位ボーガス手法により作成された多数の初期気象場を元に、多数の台風進路設定の下で最大潮位偏差と最大有義波高を同時に評価するために、本研究では、村上ら（2004）によって開発された「大気－海洋－波浪結合モデル」を採用する。この結合モデルは、大気モデルMM5、海洋モデルCCM、波浪モデルSWANにより構成され（図-1下段参照）、既に、実際の高潮事例を高精度に推算できることが実証済みである（吉野ら，2006；橋本ら，2007）。大気－海洋－波浪結合モデルに関する詳細については、村上ら（2004）を参照して頂きたい。

MM5は、ペンシルベニア州立大学と米国大気研究センターにより開発された非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系のメソ気象モデルである。雲微物理過程、積雲対流過程、大気放射過程、大気境界層過程、地表面過程など、気象要素に影響を及ぼす重要な物理過程が考慮されている（Dudhia，1993）。MM5による入出力値は、後述の海洋モデルCCMや波浪モデルSWANの入出力値と双方向的に相互交換される。

CCMは、村上ら（2004）により開発された多重座標系

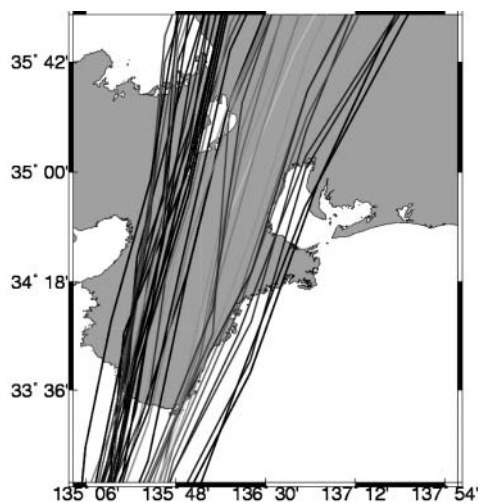


図-2 全40ケースの台風進路 (現在気候設定)

海洋モデルである。基礎方程式系は、静水圧近似・ブジネスク近似が施された運動方程式、連続方程式、温度・塩分に関する移流拡散方程式、状態方程式によって構成される。MM5から出力される外力（風速、摩擦速度、気圧、下向き短波放射量、下向き長波放射量、降水量、等）に応じて、CCMにより潮位偏差（すなわち、可能最大高潮）が評価される。

SWANは、デルフト工科大学で開発された第3世代波浪推算モデルである。基礎方程式系は波作用量平衡方程式からなり、深海域から極浅海域まで対応している。MM5による時々刻々と変化する外力（風速、摩擦速度）をSWANに入力することで、有義波高（すなわち、可能最大波浪）が算出される。

これら3つの独立したモデルをシェルベースで相互結合し、タイムステップ10分毎にモデル間で物理量を相互交換し、同時計算を行う。大気-海洋-波浪結合モデルの計算領域および計算設定に関しては、吉野ら（2007）と同様のものとする。

3. 現在気候における可能最大高潮と可能最大波浪

ここではまず、将来気候における伊勢湾の可能最大高潮と可能最大波浪の評価に先立ち、現在気候における可能最大高潮と可能最大波浪の評価を行った。また、伊勢湾台風の観測値と対比することで、本手法の妥当性についても検討した。

(1) 計算設定

現在気候における可能最大高潮と可能最大波浪の評価の際には、台風渦位ボーガス手法と大気-海洋-波浪結合モデルを図-1の流れで実行した。まず、 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ メッシュのECMWF全球再解析データ（ERA40）の伊勢湾台風時のデータ（1959年9月25日12時）により計算さ

れた渦位場（以降、環境場渦位）に、軸対称台風渦位モデルにより評価された渦位場（以降、台風渦位）を埋め込むことで、渦位逆変換法による初期気象場の解析を行った。軸対称台風渦位モデルは、吉野ら（2008）の設定に倣い、伊勢湾台風時の台風環境場（温度、湿度プロファイル）と海水面温度（観測値 29.0°C ）を入力することで、定常状態（可能最大強度）に達するまで時間積分が続けられた。この可能最大強度に達した台風渦位（中心気圧 910hPa ）は、北緯 26.5 度に緯度を固定し東経 131.35 度～東経 134.90 度の間を 9km 間隔でずらしながら投入され、全40ケースの初期気象場が作成された。これらの初期気象場を元に、大気-海洋-波浪結合モデルにより台風進路の違いによる40ケースの想定高潮実験を行い、ピーク時における最大潮位偏差と最大有義波高をそれぞれ現在気候における「可能最大高潮」と「可能最大波浪」とした。

なお、大気-海洋-波浪結合モデルの計算領域および計算設定については、吉野ら（2007）と同様のものとし、海水面温度は領域一様で 29.0°C とし、天文潮位の影響は加味せず、現在の地形条件の下で計算を行った。

(2) 計算結果と考察

現在気候の設定の下、大気-海洋-波浪結合モデルにより評価された計40ケースの台風の進路を図-2に示す。いずれのケースも伊勢湾より西の紀伊半島に上陸し、東西方向におよそ 100km 程度の進路の違いしか生じていないが、名古屋港における潮位偏差（図-3（a））や有義波高（図-3（b））の計36時間分の時系列には大きな差が現れた。これらの時系列は、伊勢湾により近い位置を通過する台風に比べて、潮岬（紀伊半島の中心）付近に上陸し、その後、伊勢湾から西に約 50km 程度離れて通過した台風の方がより大きなピーク値を示している。このことは、気圧による吸い上げ効果よりも風による吹き寄せ効果の方が卓越しやすいことを意味しており、吉野ら（2007）が指摘するように、台風中心の直撃を受けるよりも、長期間に渡り湾口から湾奥にかけて台風に伴う強い南風にさらされる進路を取る方が、高潮や波浪による被害のリスクが高まることを意味している。

現実の伊勢湾台風と最も近い進路を取った1つのケースについて詳細に調査したところ、上陸時の台風中心気圧は 931hPa （観測値 929hPa ）となり、また、名古屋港でのピーク時の潮位偏差は 3.25m （観測値 3.55m ）、有義波高は 2.17m （観測値 2.4m ）となり、観測との良い一致を示した。つまり、本手法の再現性は高く、現実的な可能最大高潮と可能最大波浪を評価できていると見なせる。

名古屋港における潮位偏差と有義波高の時系列（図-3）より、現在気候の設定の下では、可能最大高潮は 4.5m 、可能最大波浪は 2.2m となることが明らかとなり、現在

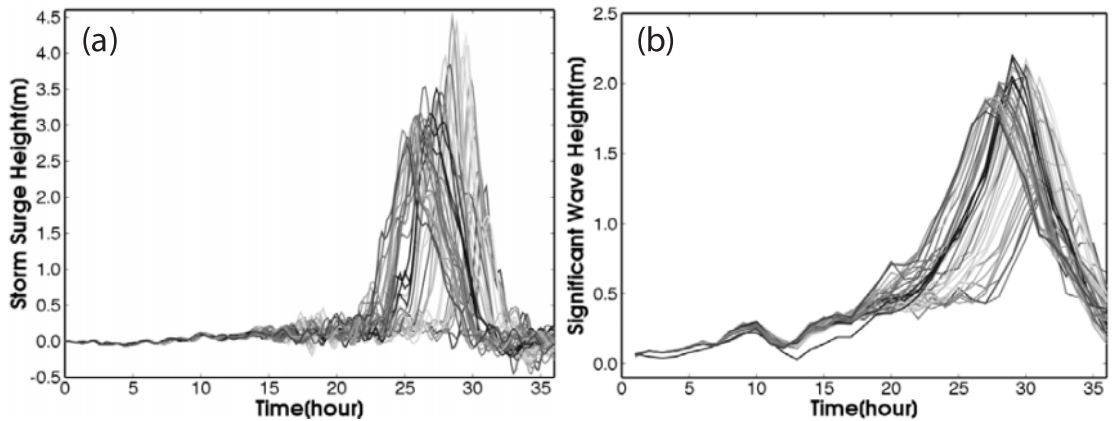


図-3 現在気候実験による名古屋港での全40ケースの (a) 潮位偏差と (b) 有義波高の時系列 (計36時間)

気候においても最悪の進路を取る場合には、伊勢湾台風による高潮を1m近く上回る高潮が発生する可能性があることが明らかとなった。

4. 将来気候における可能最大高潮と可能最大波浪

次に、地球温暖化の影響を受けた将来気候（西暦2099年の海面水温状態）での、伊勢湾における可能最大高潮と可能最大波浪を評価した。現在気候との比較により、将来の強大化した台風がもたらすであろう高潮災害の脅威について検討した。

(1) 計算設定

将来気候における可能最大高潮と可能最大波浪の評価の際も、現在気候のそれと同様に図-1の流れで実行した。軸対称台風渦位モデルには、CMIP3マルチ気候モデルデータの高度成長シナリオSRES A1Bの2099年9月の北緯26.5度、東経136.4度におけるアンサンブル平均海面水温(30.2℃)を境界条件として入力することで(図-4中の星印の箇所)、定常状態(可能最大強度)に達するまで時間積分を続けた。A1Bシナリオによると、何れの気候モデルも海面水温は単調に上昇し続けており、100年間で約3℃近い温度上昇を示している(図省略)。この可能最大強度に達した台風渦位(中心気圧880hPa)は、同じく微妙に初期位置をずらすことで伊勢湾台風時(1959年9月25日12時)の環境場渦位に投入され、渦位逆変換法により全40ケースの初期気象場が作成された。これらの初期気象場を元に、大気-海洋-波浪結合モデルにより台風進路の違いによる40ケースの想定高潮実験を行い、ピーク時における最大潮位偏差と最大有義波高をそれぞれ将来気候における「可能最大高潮」と「可能最大波浪」とした。

なお、大気-海洋-波浪結合モデルの計算領域および計算設定については、初期気象場と海面水温(領域一様30.2℃)の違い以外は現在気候と同様のものとし、地

球温暖化に伴う海面上昇の影響や天文潮位の影響は加味せず、現在の地形条件の下で計算を行った。

(2) 計算結果と考察

将来気候の設定の下で、大気-海洋-波浪結合モデルにより評価された計40ケースの台風進路は、現在気候のそれ(図-2)と殆ど一致していることから(図省略)、台風渦位と海面水温のみの改変だけでは台風進路には殆ど影響しないと言い換えられる。

名古屋港における潮位偏差(図-5(a))と有義波高(図-5(b))の計36時間分の時系列より、現在気候(図-3)と比較して、いずれもより大きなピーク値を示していることが分かる。将来気候における可能最大強度の台風は、上陸時には中心気圧は約910hPaを示し、名古屋港での可能最大高潮は6.5m、可能最大波浪は2.8mとなることが明らかとなった。つまり、伊勢湾台風の高潮(潮位偏差

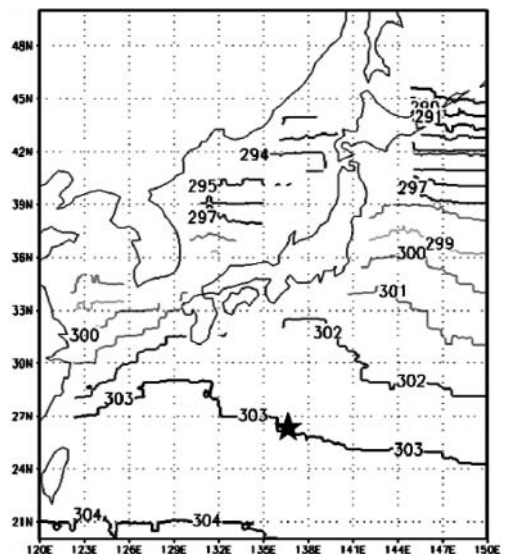


図-4 CMIP3マルチ気候モデルデータのアンサンブル平均海面水温[単位: K] (2099年9月)

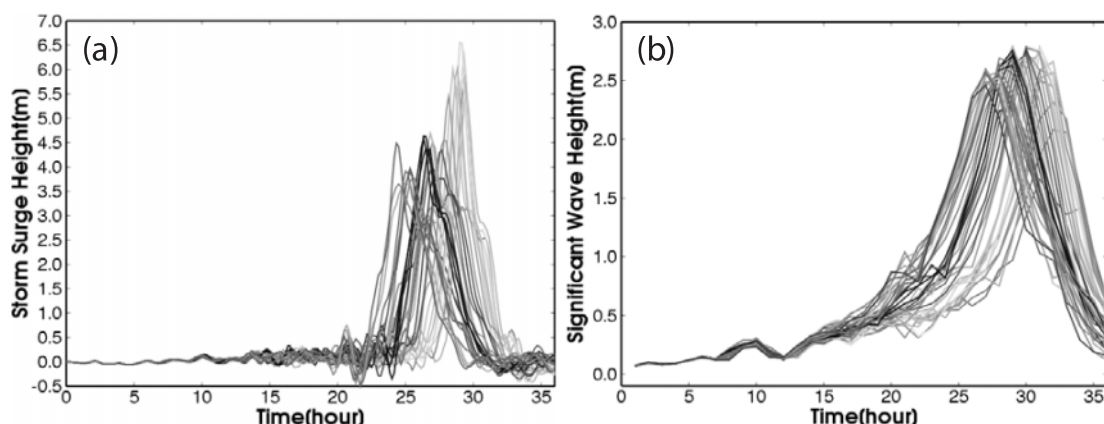


図-5 将来気候実験による名古屋港での全40ケースの (a) 潮位偏差と (b) 有義波高の時系列 (計36時間)

3.55m)の約2倍近い高潮が発生する可能性があることを意味している。これに朔望平均満潮位1.22mとA1Bシナリオでの全球平均の海面上昇0.35mが加われば、潮位だけで名古屋港での計画天端高T.P.+7.5mをはるかに上回る8.07mの高潮が発生することになる。また、ほぼ全てのケースが伊勢湾台風の潮位偏差を超えていることから、将来気候においては最悪の進路を取らずとも可能最大強度にまで発達した台風がこの地方に接近するだけで、伊勢湾台風級の高潮が頻発するようになると懸念される。名古屋港は伊勢湾の湾奥部に位置しており、地形効果によって、他地域よりも台風の強大化の影響を特に大きく受けやすいと考察される。

5. 結語

本研究では、現在気候及び将来気候において発生し得る最大規模の台風が最悪の進路を取ることによって生じる「可能最大高潮」と「可能最大波浪」を大気・海洋力学的に評価した。渦位逆変換法に基づく台風気象場初期値化アプリケーションと軸対称台風渦位モデルを組み合わせた独自の台風渦位ボーガス手法の採用により、与えられた台風環境場（気候状態）を加味した上で3次元気象場中の台風渦の中心位置と強度を合理的に変更することが可能となり、従来手法では決して為し得ない日本各地の沿岸部における可能最大高潮と可能最大波浪を精度よく評価できるようになった。

本手法に基づき、現在気候及び将来気候における最大規模台風を伊勢湾近傍に全40ケースの進路で直撃させ、名古屋港における可能最大高潮と可能最大波浪を評価したところ、現在気候においては、可能最大高潮は4.5m（可能最大波浪は2.2m）となり、最悪の進路を取る場合には、伊勢湾台風による高潮（観測潮位偏差3.55m）を大きく上回る高潮が発生する可能性があることが明らかとなった。また、将来気候においては、可能最大高潮は

6.5m（可能最大波浪は2.8m）となり、伊勢湾台風による高潮の2倍近い高潮が発生する可能性があることが判明した。更に、将来の強大化した台風は、図-2のいずれのコースを通過しても、伊勢湾台風級の高潮が発生するという驚くべき結果を得た。

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (B) 20760325、及び、基盤研究 (B) (2) 21360234による成果であることをここに付記する。

参 考 文 献

- 大澤輝夫 (2005) : MM5用台風ボーガス導入ツールの作成と2004年の5つの台風を対象とした動作検証, 月刊海洋, 第42巻, pp. 178-185.
- 橋本孝治・吉野純・村上智一・安田孝志 (2007) : エクマン輸送に起因する新たな外洋型の高潮発生機構, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 271-275.
- 光田寧・藤井健 (1997) : 台風時における気圧場から計算した風速と実測された風速との関係, 京都大学防災研究所年報, 第40号, pp. 165-172.
- 村上智一・安田孝志・大澤輝夫 (2004) : 気象場と結合させた湾内海水流動計算のための多重 σ 座標モデルの開発, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 366-370.
- 吉野純・村上智一・林雅典・安田孝志 (2006) : 高潮計算精度に及ぼす入力台風気象場の再現性の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 1276-1280.
- 吉野純・村上智一・小林孝輔・安田孝志 (2007) : 台風気象場初期値化アプリケーションによる可能最大高潮評価手法の検討, 海岸工学論文集, 第54巻, pp. 316-320.
- 吉野純・児島弘展・安田孝志 (2008) : 台風予測精度向上のための渦位に基づく新しい台風ボーガス手法の開発, 海岸工学論文集, 第55巻, pp. 436-440.
- Davis, C. A. and K. A. Emanuel (1991) : Potential vorticity diagnostics of cyclogenesis, Mon. Wea. Rev., 119, pp. 1929-1953.
- Dudhia, J. (1993) : A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model : Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, Mon. Wea. Rev., 121, pp. 1493-1513.
- Emanuel, K. A. (1995) : The behavior of a simple hurricane model using a convective scheme based on subcloud-layer entropy equilibrium, J. Atmos. Sci., 52, pp. 3959-3968.