

大気－海洋－波浪結合モデルを用いた 可能最大級台風による東京湾の高潮予測

PREDICTION USING ATMOSPHERE-OCEAN-WAVE COUPLED MODEL FOR POSSIBLE MAXIMUM STORM SURGE IN TOKYO BAY

村上智一¹・吉野 純²・深尾宏矩³・安田孝志⁴・飯塚 聡⁵・下川信也⁵Tomokazu MURAKAMI, Jun YOSHINO, Hironori FUKAO,
Takashi YASUDA, Satoshi IIZUKA and Shinya SHIMOKAWA¹正会員 博(工) (独) 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部
(〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)²正会員 博(理) 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
(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)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 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)⁴フェロー 工博 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
(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)⁵博(理) (独) 防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

A storm surge caused by typhoon FITOW (2007) in Tokyo Bay was reproduced using an atmosphere-ocean-wave coupled model. Comparisons of the storm tides between the calculated values and observed ones were performed at four observation stations located in Tokyo Bay. It was demonstrated that the coupled model can accurately calculate high storm tides in Tokyo Bay.

Then, distributions of possible maximum storm surges in Tokyo Bay caused by potential typhoons of 50 cases under present climate were predicted by using the coupled model and a tropical cyclone potential vorticity bogussing scheme. The results show that the potential storm tide exceeds 2 m over the large area in Tokyo Bay and its maximum value reaches 3.3 m, which exceeds the largest storm tide 2.3 m ever recorded in Tokyo Bay.

Key Words : Storm surge, Typhoon, Tokyo Bay, Atmosphere-ocean-wave coupled model

1. はじめに

東京湾には日本の中核機能と大都市が集中しており、そこで大規模な高潮災害が発生した場合、その影響は首都圏に留まらず、全国さらには世界に及ぶ可能性がある。その規模も東日本大震災を遙かに越えるものになると懸念される。それゆえ、現在気候の下で東京湾において起こりえる最大級の高潮の実態を大気・海洋力学的に明らかにすることは、社会的にも最重要課題と言える。

これまで、東京湾において過去に発生した最大級高潮の再現やその発生確率の検討、さらには東京湾での可能最大級の高潮を検討するために、伊勢湾台風などをモデル台風とした高潮予測が行われて来た^{1), 2), 3), 4), 5)}。

しかしながら、これらのいずれの検討においても、海上風の推定を基本的には経験的台風モデルに基づ

いて行っており、そこに共通の精度上の問題がある。経験的台風モデルは、大気・海洋相互作用、台風のライフサイクル（発生期、最盛期、減衰期、温帯低気圧化期）に応じた内部構造の変化、広域気象場の影響のみならず複雑な地形に囲まれる沿岸地域の地面起伏・粗度変化の効果など沿岸域の海上風にとって重要な物理的プロセスを簡略化している。そのため、複雑な沿岸地形に囲まれた東京湾などでは、海上風を高精度に再現できず、高潮を精度良く計算することができない。さらに、想定台風による高潮予測を行う際の本質的な問題として、ベストトラックデータのない想定台風の発達・減衰を含めた強度や進行過程を気象力学に基づいて正しく評価できないと言った致命的欠陥を抱えている。

そこで本研究では、この問題を解決し、科学的に信頼できる可能最大級高潮の予測を行うため、大気－海洋－波浪結合モデル⁶⁾を用いる。まず、東京湾

に來襲した台風0709号による高潮の再現計算および精度検証を結合モデルによって実施し、従来の経験的台風モデルを用いた高潮計算に比べて高い精度で高潮を再現でき、信頼性の高い高潮予測を行うことができることを実証する。ついで、気象力学に基づき台風の進路や強度を客観的に変更させることのできる台風渦位ボーガスを用いて結合モデルの初期化を行い、伊勢湾台風級の台風が50通りの進路で東京湾に來襲する場合のシナリオを仮定する。そして、これらのシナリオの下での高潮計算を行い、結合モデルによる信頼性の高い東京湾の潮位偏差の最大値分布やその時間変動特性を提示する。

2. 計算方法

(1) 台風渦位ボーガス

台風初期場の作成に吉野らによって開発された台風渦位ボーガスを用いる。この台風渦位ボーガスは、軸対称台風渦位モデルと渦位逆変換法に基づく台風渦位ボーガス（2008）⁷⁾に改良を加えたものである。台風環境場の渦位を長い周期で変化する地域固有の渦位平均場と短い周期で変動する渦位偏差場に分離し、後者の渦位偏差場に対して摂動を加えることで、局所気象場を含めた周辺環境場に矛盾することなく台風進路を支配する亜熱帯高気圧や中緯度トラフなどを移動させることができ、任意の地域に可能最大級台風を通過させることが可能となっている。

ここでは、伊勢湾台風を現在気候の可能最大級台風と仮定し、それを東京湾に來襲させるように台風渦位ボーガスを用いて初期化する。具体的には、ECMWFの再解析データERA40に基づく1959年9月の環境渦位場を渦位平均場と渦位偏差場に分離し、渦位偏差場を東方向に3.25度平行移動させるとともに、台風を北緯26.5度、東経134.6度～138.9度9 km間隔で50ケース埋め込み、台風初期場を作成する。

(2) 大気－海洋－波浪結合モデル

台風・高潮・波浪の計算に大気－海洋－波浪結合モデル⁶⁾を用いる。このモデルは、経験的台風モデルでは考慮できない沿岸地域の陸面・海面境界の効果、台風のライフサイクルに応じた内部構造の変化などを考慮できる気象モデルMM5⁸⁾、高潮の規模を決定付ける外洋からの海水流入を高精度に計算できる海洋モデルCCM⁹⁾および深海域から内湾などの浅海域までの波浪を精度良く評価できる波浪モデルSWAN¹⁰⁾によって構成されている。このように本研究で用いる結合モデルは、台風・高潮・波浪の計算に適したモデルである。

そして、結合モデルを用いて、前述の台風渦位ボーガスによって作成した50ケースの台風初期場の下で図-1に示す東京湾を対象に高潮予測を行った。その際の結合モデルの計算条件は、表-1に示す通りである。

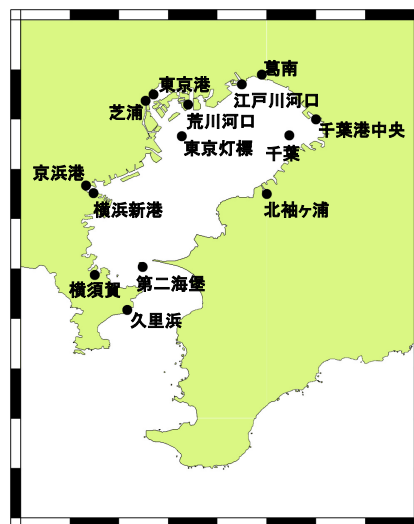


図-1 東京湾およびその主要地点

表-1 結合モデルの計算条件

気象モデル MM5	計算領域I	N23.5～39.5, E130.5～147.5
	計算領域II	N34.6～35.9, E139.0～140.6
	水平格子数	I: 199×160, II: 52×52
	水平解像度	I: 9 km, II: 3 km
	鉛直層数	23層
	タイムステップ	I: 30秒, II: 10秒
	大気境界層スキーム	Eta M-Y scheme
	雲物理過程	Reisner graupel scheme
海洋モデル CCM	放射過程	Dudhia's radiation scheme
	計算領域	N34.6～35.7, E139.0～140.1
	タイムステップ	2秒
	水平解像度	450 m
	水平格子数	209×208
波浪モデル SWAN	多重σ座標の領域数	7
	全層数	31層
	計算領域	N34.6～35.7, E139.0～140.1
	水平解像度	450 m
結合モデル	水平格子数	209×208
	タイムステップ	150秒
交換時間間隔		300秒

3. 台風 0709 号による高潮の再現計算

前述の大気－海洋－波浪結合モデルを用い、2007年9月6日0時～7日6時（UTC）までの間の台風0709号による東京湾の高潮を再現する。その際の計算条件は前述の表-1の通りである。この結果をCase 1と呼ぶ。

また、従来の高潮計算で多用されてきた経験的台風モデルの問題点を明らかにするため、これによる風速・気圧分布の計算も行い、これらをCase 1で用いられている海洋モデルに入力することで高潮を再現する。この結果をCase 2と呼ぶ。

図-2は、6日19時における両ケースの風速分布をそれぞれ示したものである。この図より、両ケース間の風速分布に大きな差があることがわかる。Case 1で用いられている気象モデルMM5は、経験

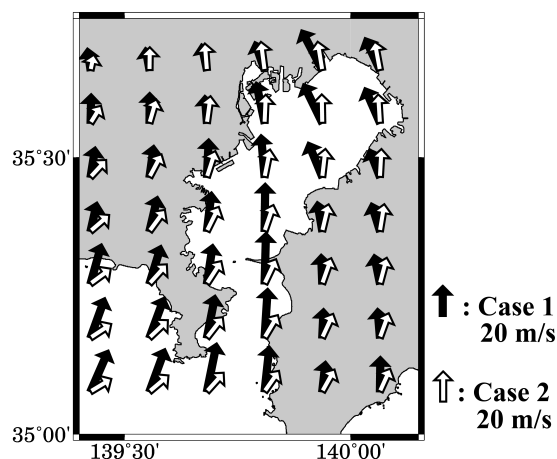


図-2 6日19時における両ケースの風速分布：黒のベクトルがCase 1，白のベクトルがCase 2を示す。

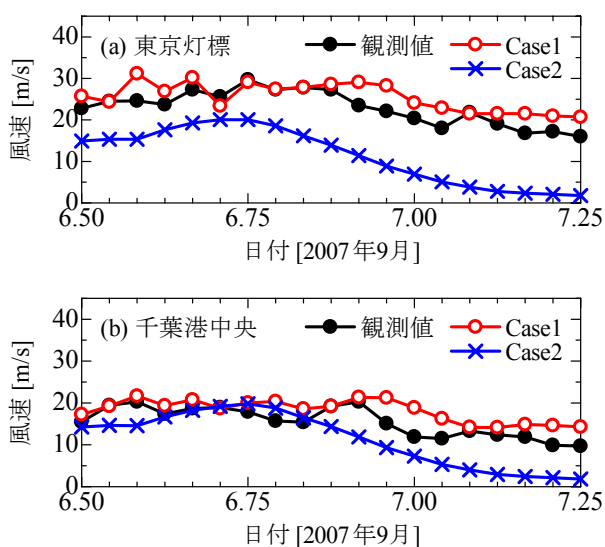


図-3 東京灯標および千葉港中央（図-1参照）における風速の観測値と計算値の比較

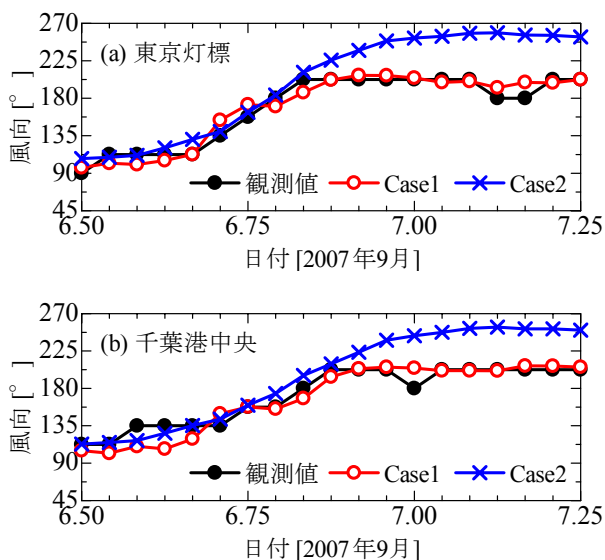


図-4 東京灯標および千葉港中央（図-1参照）における風向の観測値と計算値の比較；0°は北風，90°は東風を示す。

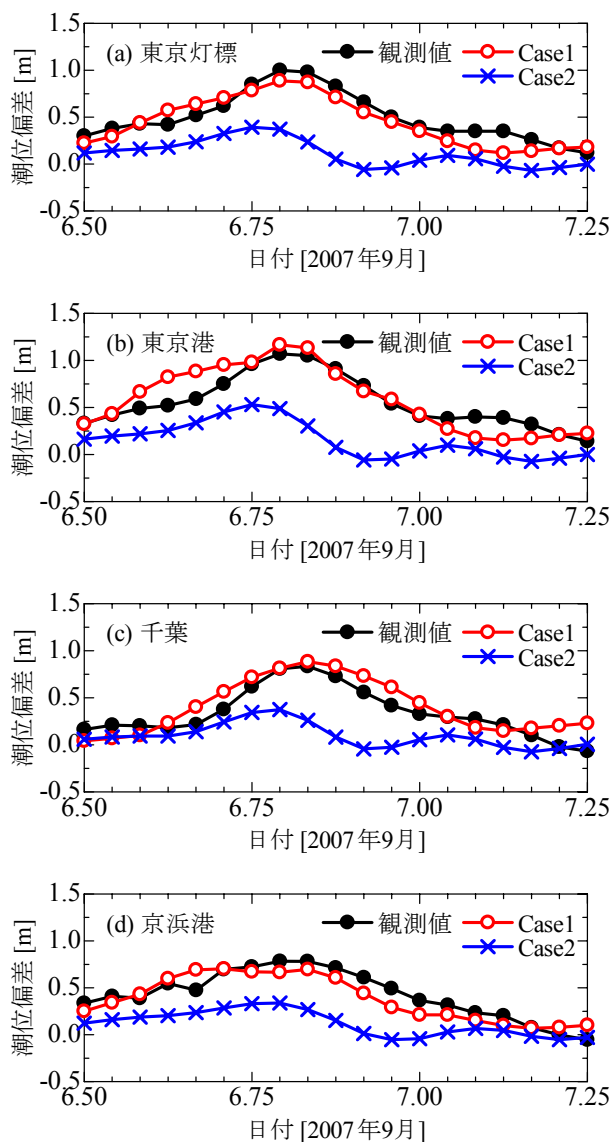


図-5 東京灯標，東京港，千葉および京浜港（図-1参照）における潮位偏差の観測値と計算値の比較

的台風モデルでは評価できない複雑な沿岸地形やその土地利用状態の効果が考慮できる。そのため、Case 1では、陸域と海域で風速が大きく異なり、複雑な風速の空間分布を示している。特に外洋から東京湾内へ向かう海上風が強くなっていることが特徴的である。これに対して、Case 2は、沿岸地域の地面起伏・粗度変化の効果などを簡略化しているため、陸域と海域での風速差を表現できないことが明らかとなっている。

図-3 および 4 は、東京灯標および千葉港中央（図-1 参照）における風速および風向の観測値と計算値をそれぞれ比較したものである。これより、Case 1 は、東京灯標および千葉港中央の風速を精度良く計算していることがわかる。一方、Case 2 は、風速の過小評価傾向が顕著である。また、風向の精度検証の結果からも、Case 1 は Case 2 に比べて計算精度が良いことがわかる。これらの結果は、図-2 に示された Case 1 の風速分布が Case 2 のものより

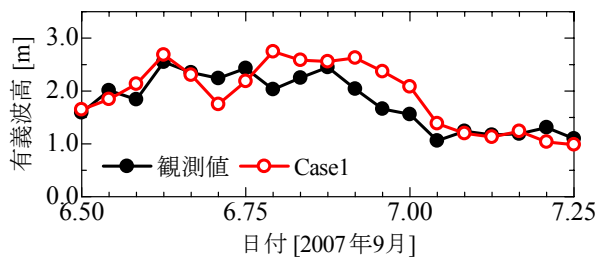


図-6 東京灯標（図-1参照）における有義波高の観測値とCase 1の計算値の比較

も事実に近いことを示唆している。

図-5 は、東京灯標、東京港、千葉および京浜港（図-1 参照）における潮位偏差の観測値と計算値をそれぞれ比較したものである。Case1 は、全ての観測点での潮位偏差を高精度に再現していることが明らかである。これに対して Case 2 は、どの地点でも潮位偏差を大きく過小評価しており、経験的台風モデルでは、台風の進路および中心気圧がベストトラックデータに基づいていても高潮を正しく計算できないことがわかる。これら両ケース間の差異は、前述の図-3 および 4 に示された風速および風向の計算精度の差に起因するものと考えられる。

図-6 は、東京灯標（図-1 参照）における有義波高の観測値と Case 1 の計算値を比較したものである。台風は、東京灯標に 6 日 15 時（6.63 日）から 20 時頃（6.83 日）接近し、これに伴って 2 m を超える大きな有義波高が観測されている。Case 1 は、この台風接近時の大きな有義波高をほぼ再現しており、結合モデルは高潮のみならず高波も精度良く計算できることが示された。

以上の精度検証の結果、結合モデルは、経験的台風モデルでは計算不可能な複雑な沿岸地形に囲まれた東京湾での風速・風向や高潮の計算を高精度で行えることが示された。それゆえ、次章において行う結合モデルを用いた高潮予測は、信頼性の高いものと考えられる。

4. 可能最大級台風による高潮予測

図-7 は、東京湾に來襲する想定台風 50 ケースの大気・海洋力学的に可能な進路を示したものである。これより、想定台風 50 ケースは、小田原付近から房総半島の館山付近までの広い範囲にわたって上陸していることがわかる。

図-8 は、想定台風 50 ケースの中心気圧の時間変化を示したものである。前述の図-7 に示したように、50 ケースの想定台風はそれぞれ異なった進路を通っている。この進路の違いによって、台風強度に対する海面水温や陸上地形の影響が異なり、水温の高い領域を通過するケースは強い台風強度が保たれる一方で、高い山岳部を通過するケースは台風強度が減衰するなどの差が生じ、想定台風 50 ケース

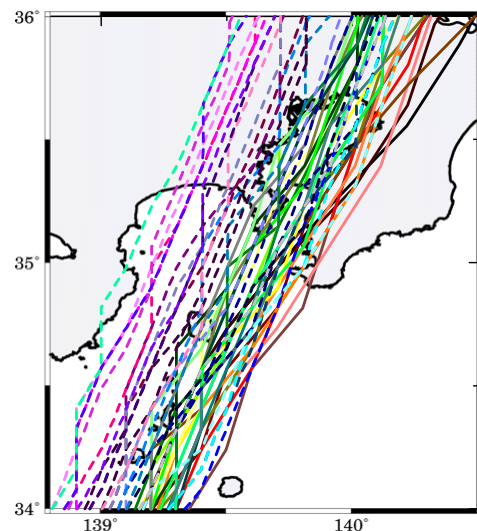


図-7 想定50台風の進路

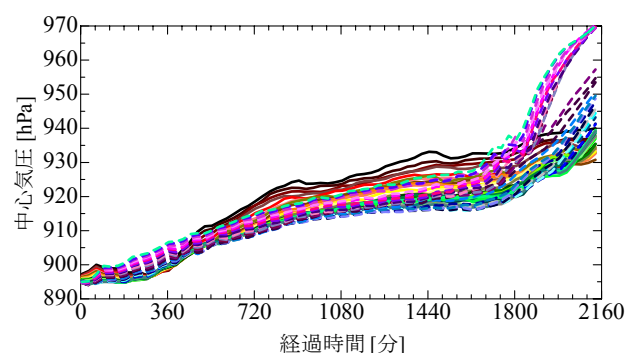


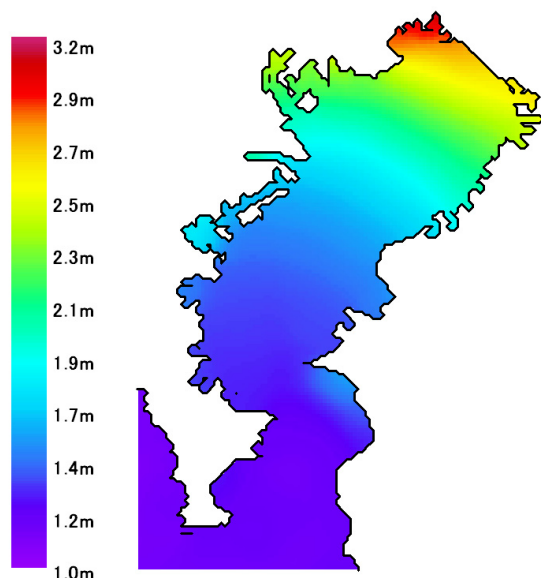
図-8 想定50台風の中心気圧

の全てで中心気圧の時間分布が異なる結果となっている。このような台風強度に対する海面・陸面の影響は、台風の進路および中心気圧を入力値とする経験的台風モデルでは評価することができず、台風渦位ボーガスおよび結合モデルを用いた予測計算によって初めて評価可能となる。

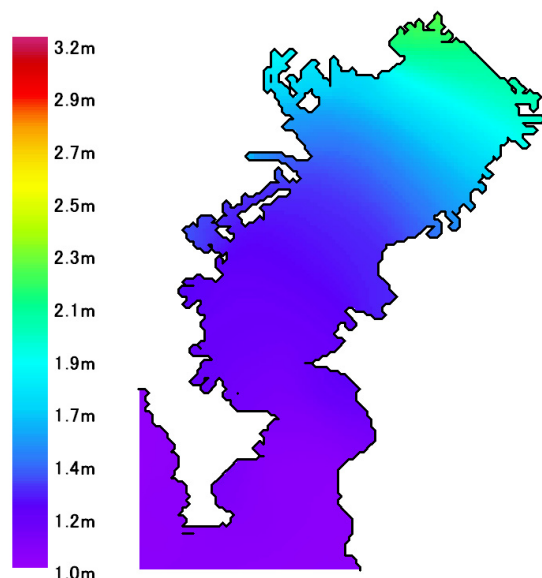
図-9 は、想定 50 台風による東京湾での潮位偏差および有義波高の全ケースかつ全計算期間中の最大値の空間分布をそれぞれ示したものである。図-9(a)より、現在気候において伊勢湾台風級の台風が発生し、最悪のコースを通れば、東京湾奥の広い範囲で潮位偏差が 2 m を超え、最大で 3.3 m に達することがわかる。このため、現在気候の下であっても東京湾奥においてこれまでにない大きな高潮発生可能性がある。また、図-9(b)より、湾央部の有義波高は 5 m に達し、複雑な港湾に囲まれた湾奥部でも 2 m 近い有義波高が生じることが示された。

図-10 は、想定 50 台風による東京湾での潮位偏差および有義波高の平均値の空間分布を示したものである。これより、平均された潮位偏差であっても湾奥部では 2 m を超える潮位偏差が発生することがわかる。また、東京湾内の有義波高の平均値は、千葉港中央沖で最も大きく 3.5 m に達する。

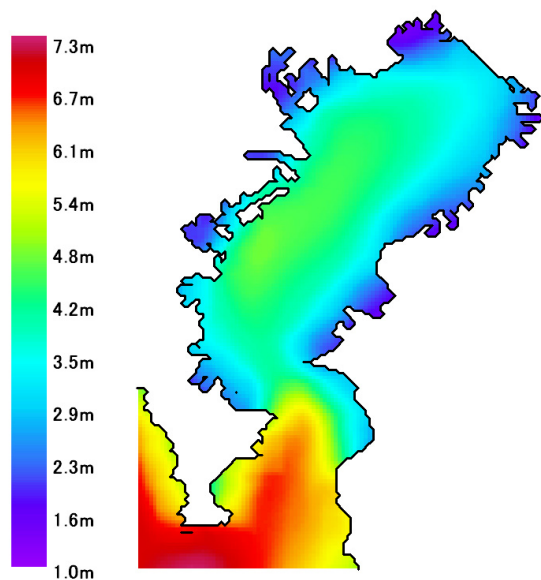
図-11 は、想定 50 台風による主要地点（図-1 参照）での最大潮位偏差の分布およびその平均値を示



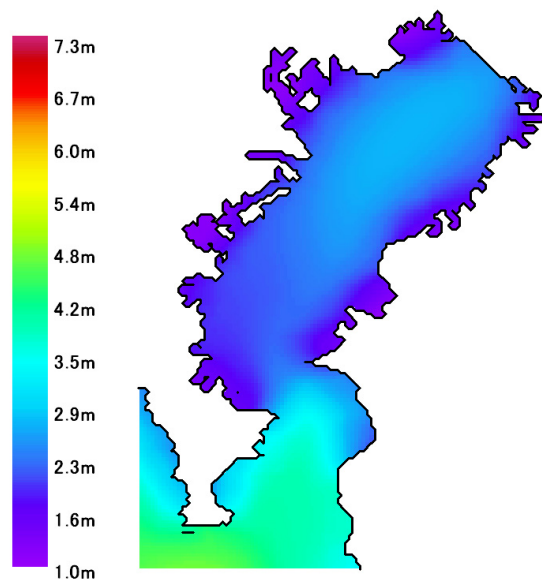
(a) 潮位偏差



(a) 潮位偏差



(b) 有義波高



(b) 有義波高

図-9 想定50台風による東京湾の潮位偏差および有義波高の最大値の空間分布

図-10 想定50台風による東京湾の潮位偏差および有義波高の平均値の空間分布

したものである。また、1917年の東京湾台風によって江戸川河口で観測された東京湾の観測史上最大の潮位偏差 2.3 m も併せて示した。これより、湾口から湾奥へ行くに従い潮位偏差が大きくなり、千葉より湾奥の地点では、潮位偏差の最大値が東京湾台風による潮位偏差 2.3 m を超えることがわかる。特に最奥の葛南では、この潮位偏差 2.3 m を超えるケースが 25 ケース存在するなど大きな高潮が発生する確率が高く、その最大潮位偏差は 3.3 m、平均値は 2.4 m となっている。

図-12 は、主要地点（図-1 参照）で最大潮位偏差を記録したケースにおいて潮位偏差が 2.3 m を超過する時間を示したものである。前述したように千葉より湾奥の地点で潮位偏差が 2.3 m を超えており、その継続時間が 20 分以上に及ぶことが明らか

となった。また、最大の潮位偏差を記録した葛南では、その継続時間も長く 54 分にも及ぶ。このように大きな潮位偏差が長時間続くことで、高潮災害の被害拡大が懸念される。

図-13 は、想定 50 台風による葛南（図-1 参照）での潮位偏差の時系列を示したものである。前述したように、葛南では大きな高潮の発生確率が高いが、その極大値の起時が計算開始から 1630～1720 分に大別されるグループと 1830～1840 分に大別されるグループに分かれている。前者のグループは東京湾より西寄りの進路を通ったもので、後者のグループは東京湾より東寄りの進路を通ったものであることが前述の図-7 よりわかる。このような台風進路の差によって、潮位偏差の極大値のみならずその発生起時も異なることが明らかとなった。

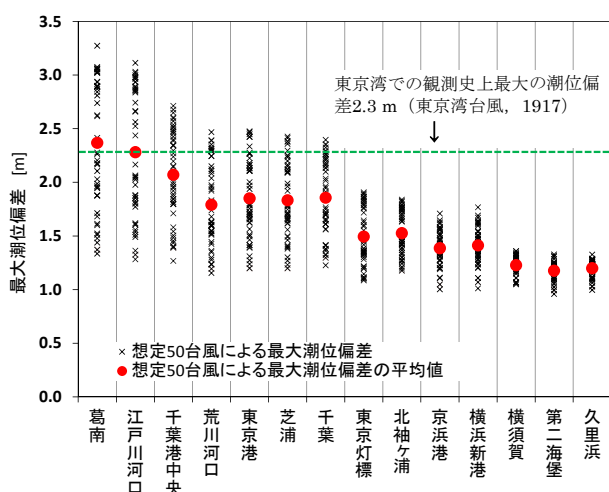


図-11 想定50台風による主要地点（図-1参照）での最大潮位偏差およびその平均値

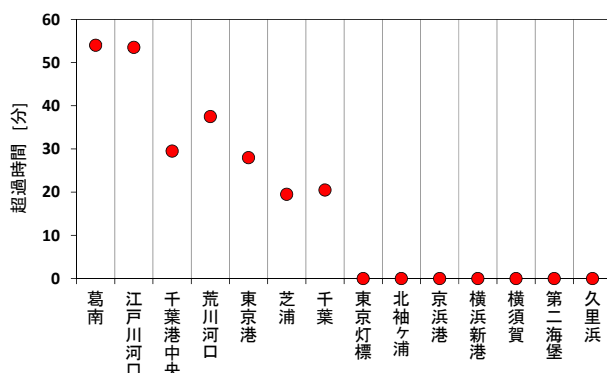


図-12 主要地点（図-1参照）で最大潮位偏差を記録したケースにおいて潮位偏差が2.3 mを超過する時間の空間分布

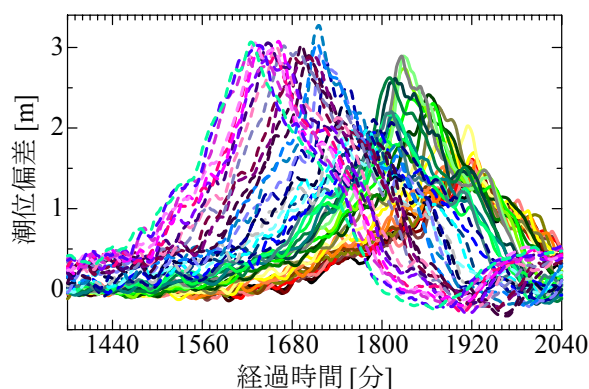


図-13 想定50台風による葛南（図-1参照）での潮位偏差の時系列

5. おわりに

本研究では、まず、東京湾に来襲した台風 0709 号による高潮を対象に大気－海洋－波浪結合モデル

の精度検証を行い、これによって東京湾の高潮の高精度計算が可能となる一方で、経験的台風モデルでは精度的に不十分であることを示した。ついで、台風渦位ボーガスと結合モデルを用いて可能最大級台風 50 ケースによる東京湾の潮位偏差の最大値分布を予測した。その結果、現在気候の下であっても東京湾台風による高潮（潮位偏差 2.3 m）を超える潮位偏差 3.3 m の高潮が湾最奥部で発生し、東京湾台風による潮位偏差 2.3 m をを超える継続時間が 54 分に及ぶことを明らかにした。この結果は、従来の高潮計算に多用されてきた経験的台風モデルとは異なる結合モデルに基づく科学的にも信頼性の高いものであり、東京湾の高潮対策に役立つものと考えられる。

謝辞：精度検証に用いた観測データの一部は、（独）港湾空港技術研究所よりご提供頂いた。本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(2)21360234および（独）防災科学技術研究所プロジェクト「沿岸災害の予測技術と危険度評価技術の開発」による成果である。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 河合弘泰，竹村慎治，原信彦：東京湾における台風による高潮と高波の同時性と継続時間特性，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 251-255，2002.
- 藤本憲久，柴木秀之，仲井圭二：密度成層と内湾海上風の特性を考慮した東京湾の高潮推算，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 246-250，2002.
- 松田真盛，河田恵昭，永田茂：1955～1998 年の 60 台風客観解析データを用いた高潮ハザードの算出，海岸工学論文集，第 49 巻，pp. 1426-1430，2002.
- 河合弘泰，橋本典明，松浦邦明：確率台風モデルを用いた内湾の高潮の極値と継続時間の推定，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 301-305，2007.
- 原信彦，山田正，柴木秀之：一般座標系による河川分流を考慮した高潮・洪水同時生起の数値シミュレーション，土木学会論文集 B2（海岸工学），第 65 巻，pp. 246-250，2009.
- 村上智一，安田孝志，吉野純：気象モデルおよび多重 σ 座標系海洋モデルを用いた台風 0416 号による広域高潮の再現，土木学会論文集 B，Vol. 63，No. 4，pp. 282-290，2007.
- 吉野純，児島弘展，安田孝志：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構築，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 436-440，2008.
- Dudhia, J. : A nonhydrostatic version of the Penn State-NCAR mesoscale model: Validation test and simulation of an Atlantic cyclone and cold front, *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 121, pp. 1493-1513, 1993.
- 村上智一，安田孝志，大澤輝夫：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. 366-370，2004.
- Booij, N., Holthuijsen, L. H. and Ris, R. C. : The SWAN wave model for shallow water, *Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engng.*, Vol. 1, pp. 668-676, 1996.