

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

PREDICTION OF POSSIBLE MAXIMUM STORM SURGE IN ISE BAY UNDER THE PRESENT CLIMATE

村上智一¹・深尾宏矩²・吉野 純³・安田孝志⁴

Tomokazu MURAKAMI, Hironori FUKAO, Jun YOSHINO and Takashi YASUDA

¹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)

³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)

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)

Initial fields of 50 potential typhoons under the present climate were provided by using a tropical cyclone potential vorticity bogussing scheme. Then, distributions of the possible maximum storm surges and high waves over the whole area of Ise Bay under the 50 initial fields were predicted by using an atmosphere-ocean-wave coupled model which enables us to perform highly accurate calculations of the storm surges in Ise Bay.

The results show that the potential storm tide over the inner area of Ise Bay exceeds 3.5 m which is the largest storm tide ever recorded in Japan. In particular, the maximum storm tide in Nagoya Port reached 5.6 m which exceeds a storm tide of 4.5 m pointed out by previous studies. Hence, there is a possibility of an occurrence of the storm surge of which height remarkably exceeds 3.5 m in Ise Bay under the present climate.

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

1. はじめに

伊勢湾は、その湾奥に世界有数の工業集積地帯と中核となる名古屋港や中部国際空港を擁し、重要性を増して来た。その一方、日本観測史上最大の潮位偏差3.5 mの高潮を発生させた伊勢湾台風によって明治以降最大の風水害を被った歴史を持っている。そのため、伊勢湾台風による高潮に耐えられる堤防が整備され、以来今日まで安全が確保されて来た。

同時に、伊勢湾台風による高潮を超える高潮発生の可能性についての検討もなされて来た。安田ら¹⁾は、コースによっては伊勢湾台風による名古屋港での潮位偏差が4 mに達し得ることを示し、山口ら²⁾は、確率的台風モデルによって湾奥での潮位偏差の1000年確率値が4 mに達することを明らかにした。また、同様な検討が加藤ら³⁾によっても行われ、湾奥での1000年確率値が4.57 mに達することが示された。しかしながら、これらの検討に用いられた経験的台風モデルは、大気・海洋相互作用を含めた台風の物理過程を簡略化しているため、陸域の影響を受ける内湾の海上風を高精度で算出できないのみならず、

ベストトラックデータのない想定台風の発達・減衰・進行過程を気象力学に基づいて正しく評価できないという本質的な限界を抱えている⁴⁾。

この問題を解決するために、吉野ら⁵⁾は、台風渦位ボーガスおよび大気-海洋-波浪結合モデルを用いて、大気・海洋力学的に伊勢湾の可能最大高潮の検討を行った。そこでは、湾奥の名古屋港で潮位偏差4.5 mに達す高潮の発生が確認された。この研究の手法は、前二者の研究手法と大きく異なり、物理的に発生可能な最大級の高潮を明らかにするものであり、現実の対策において想定外とされることが多いが、発生すれば壊滅的被害をもたらす外力の実態を明らかにすることを目指している。そうした観点からすれば、名古屋港での最大潮位偏差の検討だけでは不十分であり、伊勢湾全域の可能最大級の高潮・高波とそれらの時空間変化特性を伊勢湾台風による湾内主要地点での高潮の実測値(痕跡値を含む)との比較において明らかにすることは重要である。また、この研究手法では、出力時間の間隔や結合モデルの空間解像度、台風強度とも密接に関わる台風進路(初期位置の設定)などに改善の余地があ

り、これらの点を改善することにより、ほぼ理論的に可能最大となる高潮を明らかにすることも期待できる。

そこで本研究では、時空間解像度や台風の初期位置設定に改善を行い、台風渦位ボーガス⁶⁾を大気－海洋－波浪結合モデル⁷⁾に組み込んだ計算を実施する。そして、このモデルを用いて現在気候の下で大気・海洋力学的に最大級（ほぼ伊勢湾台風級）となる台風を発生させ、紀伊半島に上陸して北上するように50通りの初期化を施す。これらの台風を結合モデルによって解くことにより、現在気候の下で沿岸各地点において物理的に起こり得る最大の高潮と波浪を明らかにする。さらに、伊勢湾全域の高潮・高波の極大値と時空間変化特性を明らかにするとともに、伊勢湾台風による湾内主要地点での高潮・高波の実測値（痕跡値を含む）との比較を行い、伊勢湾台風時を超え得る高潮の発生原因や名古屋港および中部国際空港での危険度の解明を行う。

2. 計算方法

本研究で用いる台風渦位ボーガスは、吉野ら⁶⁾によって開発されたものであり、渦位逆変換法に基づく台風初期値化手法である。このボーガスは、気象庁台風ボーガスに比べて、より経験的要素の少ない物理的な初期値化手法であり、周辺環境場との不連続が少ない客観的な台風気象場を作成することができる。

この台風渦位ボーガスを組み込んだ気象モデルMM5⁸⁾に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再現できる多重 σ 座標系沿岸海洋モデルCCM⁹⁾および波浪モデルSWAN¹⁰⁾を結合させ、大気、海洋および波浪場を1つの系として計算する。その概要を図-1に示す。この結合モデルは、台風時の伊勢湾の風速、風向および高潮などを精度良く再現できることが明らかとなっており⁴⁾、伊勢湾の可能最大高潮の予測計算に適したモデルである。

ここでは、現在気候の下での可能最大級台風（ほぼ伊勢湾台風級）を仮定し、1959年9月のECMWFの全球再解析データERA40を台風渦位ボーガスに与え、可能最大級台風およびその環境場を評価する。ついで、北緯26.5°、東経131.35°～135.70°の間に上記の手法で得られた可能最大級台風を9km間隔で順に50ケース埋め込む。このようにすることで、東経131.35°～東経134.90°の間に40ケースの台風を埋め込んだ吉野ら⁵⁾の初期化に比べて、より広い範囲から台風が紀伊半島に上陸して北上しやすくなり、より理論的に可能最大級高潮の評価を行うことが可能となっている。

そして、表-1に示す計算条件の下で1959年9月25日12時から27日0時（UTC）までの伊勢湾（図-2）の高潮・高波の計算を行う。

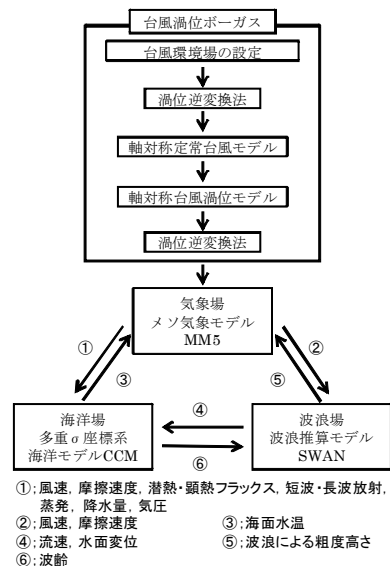


図-1 台風渦位ボーガスを組み込んだ大気－海洋－波浪結合モデルの概要

表-1 結合モデルの計算条件

気象モデル MM5	計算領域I	N23.6～39.6, E127.0～143.9
	計算領域II	N33.9～35.2, E136.0～137.6
	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	N34.2～35.1, E136.5～137.4
	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I	N28.2～35.2, E135.0～139.0
	計算領域II	N33.2～35.1, E135.3～138.4
	計算領域III	N34.2～35.1, E136.5～137.4
結合モデル	水平格子数	I:300×523, II:300×192, III:209×208
	タイムステップ	150秒
交換時間間隔		300秒

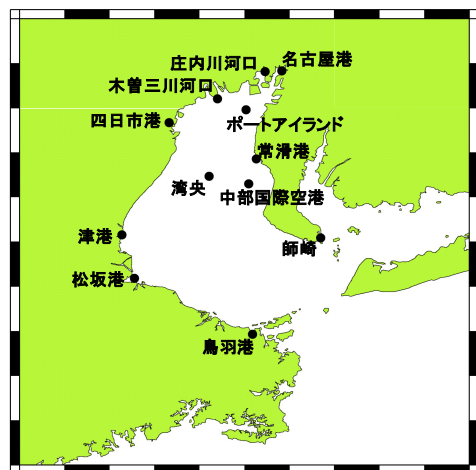


図-2 伊勢湾およびその主要地点

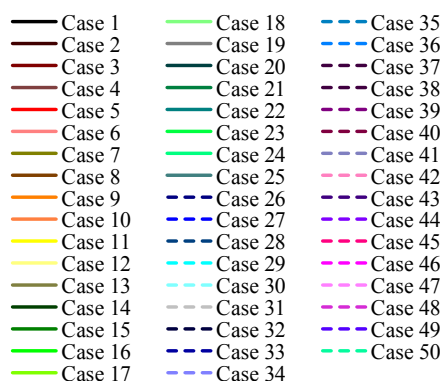
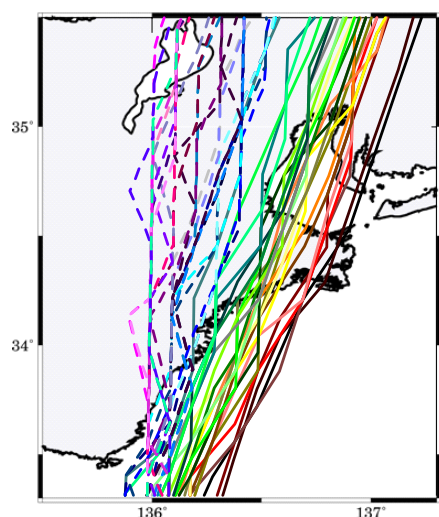


図-3 伊勢湾に來襲する想定台風50ケースの進路

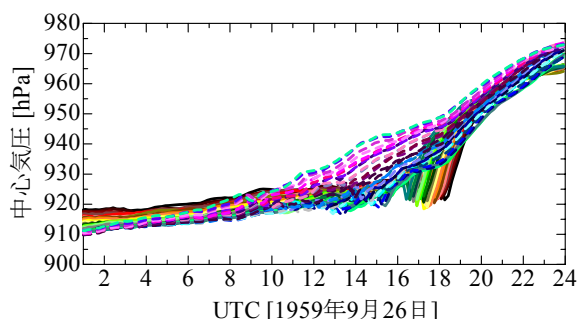


図-4 想定台風50ケースの中心気圧の時間変化（凡例は図-3と同様であるので省略）；台風上陸の時刻（UTC）は26日12時から18時頃。

3. 伊勢湾の可能最大高潮・高波

図-3は、伊勢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、本研究での想定台風50ケースは、それぞれ伊勢湾上から琵琶湖上までの広い範囲を通過していることがわかる。なお、これらの進路は、台風の実測で用いられているドボラック法によって決定されたものではなく、9 km格子の計算領域I（表-1参照）において最も低い気圧を記録した格子位置をプロットしたものである。そのため、ケースによっては進路が屈曲しているものもある。

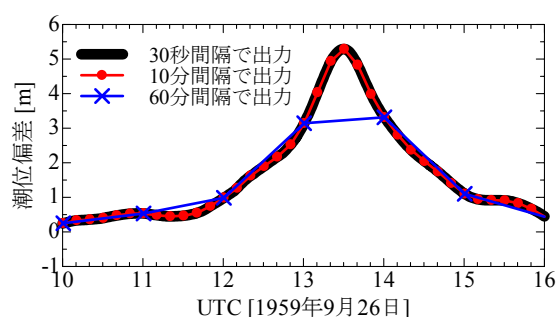


図-5 潮位偏差のデータ出力時間間隔の比較；Case 30による名古屋港での潮位偏差を30秒、10分および60分間隔で出力して示した。

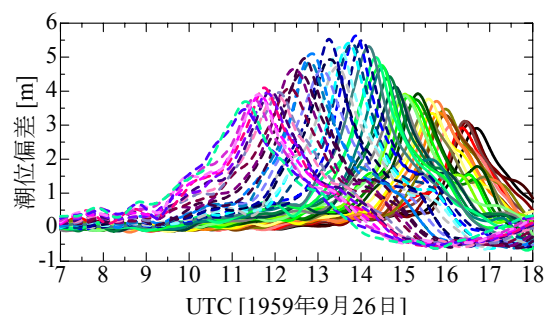


図-6 想定50台風による名古屋港（図-2参照）での潮位偏差の時間変化（凡例は図-3と同様であるので省略）

図-4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。大気・海洋相互作用を含めた台風物理過程を評価できる結合モデルを用いているため、図-3に示した各ケース間の進路の差によって中心気圧のUTC（世界時）での時間変化の様子がケース毎で異なり、ケースによっては上陸時の中心気圧が最低の920 hPaとなるものもある。

次に潮位偏差の極大値を検討するに当たり、時系列データの出力時間間隔との関係について調べる。

図-5は、Case 30による名古屋港での潮位偏差を30秒、10分および60分間隔で出力し、それらを比較したものである。30秒間隔と10分間隔では差異は全く見られないが、60分間隔とでは極大値に関して明瞭な差異が認められる。このように、シャープな時間変化を持つ湾奥での潮位偏差に対しては、60分毎の出力は不適切であり、本研究では10分間隔で出力した潮位偏差について検討を行う。

図-6は、想定50台風による名古屋港（図-2参照）での潮位偏差の時間変化をそれぞれ示したものである。これより、各ケースの潮位偏差の極大値の起時は、前述の図-3で示した台風の進路の差異によって大きく異なり、起時が最も早いものは26日11時頃、遅いものは17時頃となっていることがわかる。また、Case 27の潮位偏差が全ケース中で最も大きく、5.6 mに達している。これは、実際の伊勢湾台風によって観測された日本観測史上最大の潮位偏差3.5 mを大きく上回り、さらにこれまで指摘されてきた潮位偏差4.5 mの可能最大高潮⁹⁾を1.1 mも上回る大きな

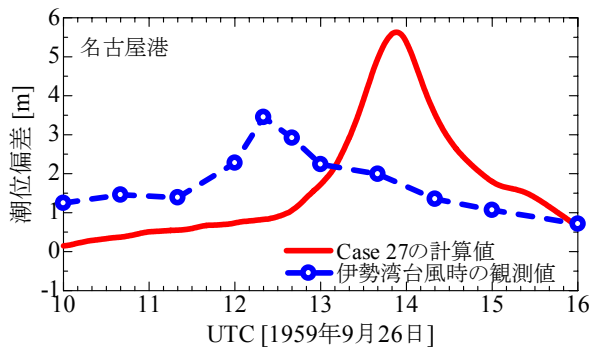


図-7 Case 27および伊勢湾台風による名古屋港（図-2参照）での潮位偏差の時間変化の比較

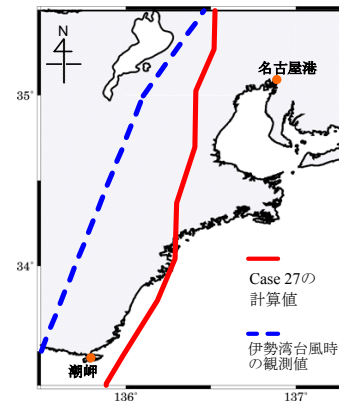


図-8 Case 27と伊勢湾台風の進路の比較

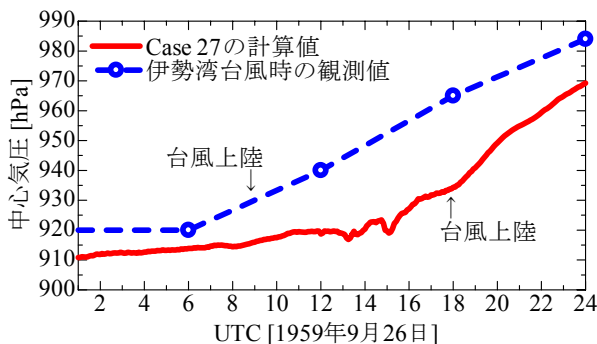


図-9 Case 27の台風と伊勢湾台風の中心気圧の比較

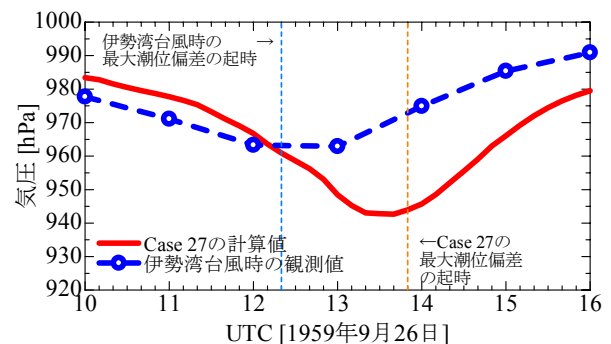


図-10 Case 27の台風と伊勢湾台風の名古屋での気圧の時間変化の比較

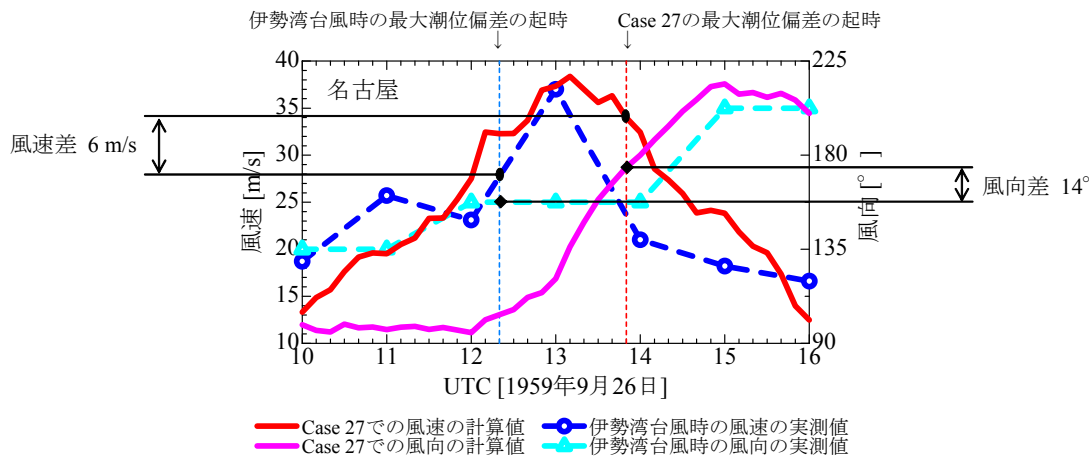


図-11 Case 27と伊勢湾台風の名古屋での風速および風向の時間変化の比較；90°は東風，180°は南風を示す。

高潮である．そこで，このCase 27の計算値を伊勢湾台風時の実測データと詳細に比較し，5.6 mの潮位偏差の発生原因について検討する．

図-7は，Case 27および伊勢湾台風による名古屋港での潮位偏差の時間変化を示したものである．前述したようにCase 27の潮位偏差の最大値は，伊勢湾台風によるものを2 mも上回る5.6 mとなっているが，その最大潮位偏差の起時は，伊勢湾台風によるものが12時20分，想定台風によるものが13時50分と異なっている．

図-8および9は，Case 27と伊勢湾台風の進路およ

び中心気圧をそれぞれ比較したものである．これより，Case 27の進路は，伊勢湾台風に比べて東寄りであり，伊勢湾に近い進路を通っていることがわかる．また，Case 27と伊勢湾台風の上陸時の中心気圧は，それぞれ915 hPa，930 hPaであり，Case 27の中心気圧は，伊勢湾台風のものより15 hPa低くなっている．これは，Case 27が潮岬より東の進路を通り，より長く海上に位置したため，強い勢力を保ったものと考えられる．

図-10は，Case 27の台風と伊勢湾台風の名古屋での気圧の時間変化をそれぞれ示したものである．

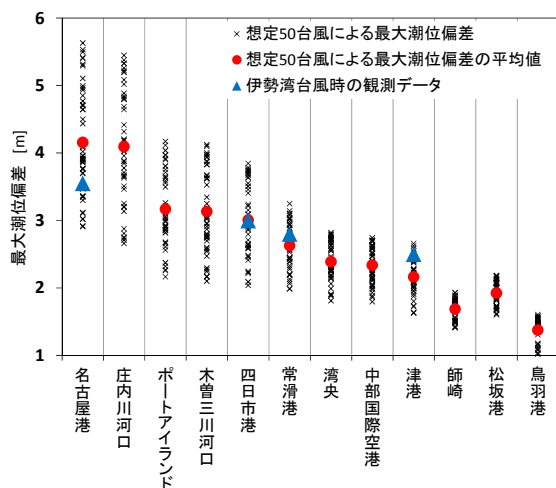


図-12 想定50台風による主要地点（図-2参照）での最大潮位偏差およびその平均値

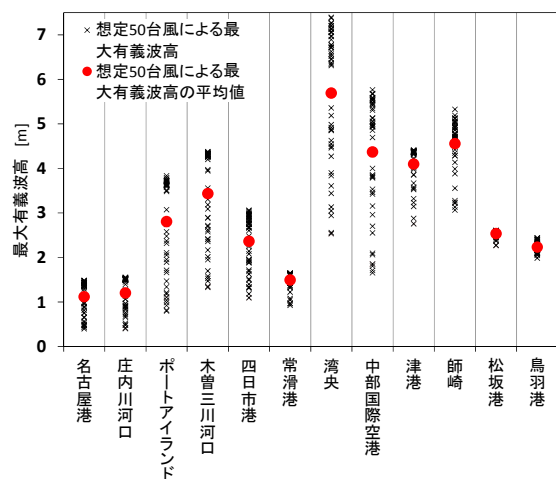


図-13 想定50台風による主要地点（図-2参照）での最大有義波高およびその平均値

表-2 想定台風による中部国際空港での高潮危険度

施設名	計画地盤・ 護岸天端高	最悪想定 T.P.+3.99 m	平均想定 T.P.+3.31 m
旅客施設	T.P.+3.29 m	-0.70 m	-0.02 m
離着陸施設	T.P.+3.29 m	-0.70 m	-0.02 m
南面護岸	T.P.+4.79 m	+0.80 m	+1.48 m
西面南端護岸	T.P.+3.79 m	-0.20 m	+0.48 m
西面中央護岸	T.P.+2.79 m	-1.20 m	-0.52 m

- 最悪想定：想定台風による最大高潮＋朔望年平均満潮位
2.77 m + (T.P.+1.22 m) = T.P.+3.99 m
- 平均想定：想定台風による平均高潮＋台風期平均満潮位
2.34 m + (T.P.+0.97 m) = T.P.+3.31 m
- 想定台風による最大有義波高：5.8 m
- 想定台風による平均有義波高：4.4 m

Case 27の気圧は、伊勢湾台風時のものより20 hPa低くなっており、このような低い気圧によって生じる吸い上げ効果が前述の大きな潮位偏差（図-7参照）に影響を与えた要因の一つであると判断される。

図-11は、Case 27と伊勢湾台風の名古屋での風速

および風向の時間変化をそれぞれ示したものである。これより、Case 27と伊勢湾台風時の風速の最大値は、ともに38 m/sで同程度であることがわかる。伊勢湾台風発生時の1959年と現在では土地利用状況が大きく異なり、より粗度が大きくなっている現在の地物環境では、陸上での風速は弱まる傾向にある。このことを鑑みれば、1959年と現在で粗度に差異がない海上では、伊勢湾台風よりCase 27の風速が大きいものと推察される。さらに、それぞれの最大潮位起時での風速・風向について見ると、Case 27のものは、伊勢湾台風のを風速で6 m/s上回り、風向も14°ほど真北（湾奥）に向いており、名古屋港に向かう吹送流がより卓越しやすい環境にあったことがわかる。

以上の検討より、現在気候において発生し得るCase 27の台風による5.6 mの高潮は、伊勢湾台風よりも低い気圧と名古屋港に向かうより強い南風が吹いたために発生したものと判断される。

次に伊勢湾内の主要地点での最大潮位偏差を明らかにする。図-12は、図-2に示す主要地点での想定台風50ケースの最大潮位偏差の分布とその平均値を示したものである。また、伊勢湾台風時の観測データが存在する地点での観測値も併せて示した。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、木曽三川河口より湾奥の地点では、潮位偏差の最大値が4 mを超えていることがわかる。これは、湾奥の名古屋港でなくても大きな高潮が発生する可能性を示している。最奥の名古屋港では、潮位偏差が最も大きく、想定台風50ケースの内の38ケースで伊勢湾台風時の最大潮位偏差3.5 mを超え、50ケースの平均値も4.1 mに達している。ただし、四日市港以南では潮位偏差の平均値は伊勢湾台風時のものと同程度もしくは下回っており、湾奥において高潮が急激に発達している。したがって、伊勢湾台風は名古屋港にほぼ最悪のコースを通り、未曾有の高潮を発生させたと考えられて来たが、現在気候であっても伊勢湾台風級の台風が紀伊半島に上陸して北上すれば、コースに依らず8割近い確率でこれを超える高潮が名古屋港で発生する可能性があることに注意が必要と言える。

図-13は、図-2の主要地点での想定台風50ケースの最大有義波高の分布とその平均値を示したものである。有義波高は湾央や中部国際空港で大きく、その最大値はそれぞれ7.4 mおよび5.8 mであり、平均値もそれぞれ5.7 mおよび4.4 mとなっている。

次に図-12および13で示した高潮・高波が中部国際空港に与える危険度を検討するために、表-2に中部国際空港の各施設の地盤高・護岸高と最悪および平均想定での潮位の関係を示した。ここで最悪想定は、図-12に示した中部国際空港での最大潮位偏差に朔望年平均満潮位を足した潮位T.P.+3.99 mであり、平均想定は平均潮位偏差に台風期平均満潮位を足した潮位T.P.+3.31 mである。この表より、最悪想定では南面護岸以外、平均想定では南面護岸およ

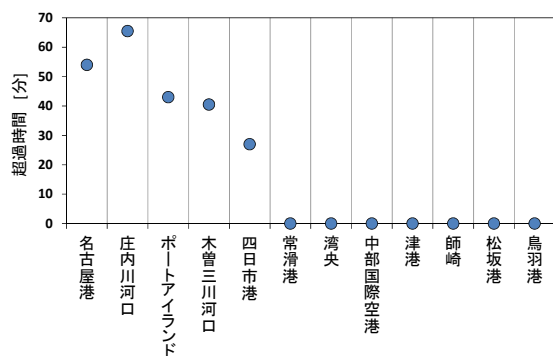


図-14 主要地点（図-2参照）で最大潮位偏差を記録したケースにおいて潮位偏差が3.5 mを超過する時間の空間分布

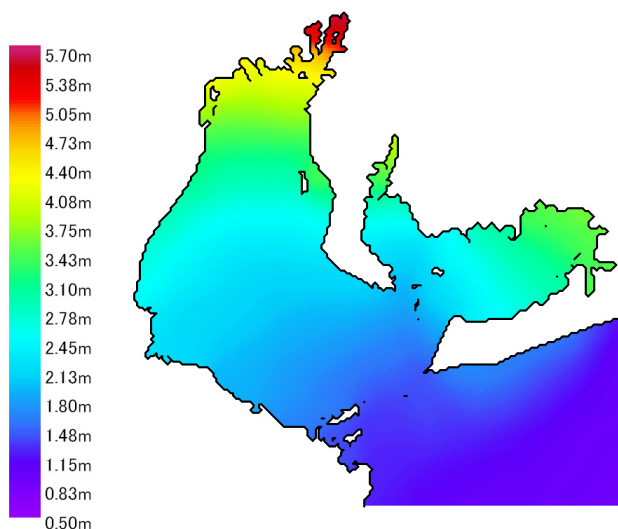


図-15 想定50台風による伊勢湾の潮位偏差の最大値の空間分布

び西面南端護岸以外の全ての施設・護岸がそれぞれ潮位だけで水没することがわかる。そして、図-13に示されたように中部国際空港付近では最大で5.8 m、平均でも4.4 mの高波が発生し、この波の影響が加われば中部国際空港の全ての施設で壊滅的状况に陥ると懸念される。

図-14は、主要地点（図-2参照）で最大潮位偏差を記録したケースにおいて潮位偏差が3.5 mを超過する時間を示したものである。四日市より湾奥の地点では潮位偏差が3.5 mを超える時間は30分以上、湾奥の名古屋港および庄内川河口ではそれぞれ54分および66分もの長時間に及ぶことがわかる。

図-15は、想定50台風による伊勢湾での潮位偏差の全ケースかつ全計算期間中の最大値の空間分布を示したものである。この図より、現在気候の下でも湾中央部から湾奥部の広い範囲にかけて伊勢湾台風時の潮位偏差3.5 mを超えることがわかる。特に湾奥の名古屋港周辺では5.6 mに達する大きな高潮発生の可能性があり、これに朔望年平均満潮位1.22 mを加えると、潮位だけで堤防計画高を上回る場所もあることに注意が必要と言える。

4. おわりに

本研究では、結合モデルを用い、現在気候の下でコースおよび中心気圧が物理的に変化する50個の最大級台風による伊勢湾における可能最大級高潮・高波の予測を行った。その結果、伊勢湾台風時の名古屋港で発生した既往最大の潮位偏差3.5 mの高潮だけでなく、これまでその可能性が指摘されて来た4.5 mの高潮をさらに上回る5.6 mの高潮が現在気候において発生する可能性が示された。また、四日市港以北の湾奥全域で潮位偏差が3.5 mを超える高潮発生のある一方、それより南の中部国際空港では、最悪の場合、潮位がT.P.+3.99 mに達し、水没の危険があることが示された。

この結果は、結合モデルに基づく科学的に信頼性の高いものであり、このような高潮が現実となる前に発生確率を含めた検討が必要である。

謝辞：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による成果である。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) 安田孝志, 吉金典晃, 長治淳嗣: 伊勢湾における高潮に及ぼす台風特性と海面上昇の影響, 岐阜大学研究報告, 第44巻, pp. 13-24, 1994.
- 2) 山口正隆, 畑田佳男, 花山格章: 伊勢湾における高潮の極値の推定, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 321-325, 1995.
- 3) 加藤史訓, 鳥居謙一, 柴木秀之, 鈴山勝之: 確率的台風モデルを用いた潮位と越波量の確率評価, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 291-295, 2003.
- 4) Murakami, T., J. Yoshino, T. Yasuda, S. Iizuka, and S. Shimokawa: Atmosphere-Ocean-Wave Coupled Model Performing 4DDA with a Tropical Cyclone Bogussing Scheme to Calculate Storm Surges in an Inner Bay, *Asian Journal of Environment and Disaster Management*, Vol. 3, No. 2, pp. 217-228, 2011.
- 5) 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, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第65巻, pp. 396-400, 2009.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.