

4次元台風ボーガス同化を用いた台風0918号 直下の伊勢・三河湾の高潮シミュレーション

SIMULATION USING 4DDA WITH A TROPICAL CYCLONE
BOGUSSING SCHEME FOR STORM SURGE IN ISE-MIKAWA BAY
ATTACKED BY TYPHOON 0918

村上智一¹・吉野 純²・安田孝志³・

飯塚 聡⁴・下川信也⁵・青木伸一⁶

Tomokazu MURAKAMI, Jun YOSHINO, Takashi YASUDA,
Satoshi IIZUKA, Shinya SHIMOKAWA and Shin-ichi AOKI

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)

⁴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)

⁵理博 (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)

⁶正会員 工博 豊橋技術科学大学 建設工学系 (〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

Typhoon 0918 attacked Ise-Mikawa Bay on October 2009, creating one of the largest storm tides on record—a storm tide of 2.6 m—observed at Mikawa Port. Correct evaluation of sea surface winds must be done to produce highly accurate calculation of the storm surge generated by the typhoon 0918.

In this study, an atmosphere-ocean-wave coupled model performing the 4DDA with a tropical cyclone bogussing scheme was developed to reproduce the sea surface winds and the storm surge under the typhoon 0918 accurately. Its validity and utility were verified by comparing the observed results with the computed ones concerning on a track of the typhoon, wind speeds, wind directions, storm tides and so on. The comparisons showed that the calculated results using the coupled model with the 4DDA are in a good agreement with the observed data of the storm surge generated by the typhoon 0918.

Key Words : Storm surge, Typhoon, Four-dimensional data assimilation, Tropical cyclone bogussing scheme, Atmosphere-ocean-wave coupled model

1. はじめに

2009年10月7日(UTC)に伊勢・三河湾に直撃した台風0918号(MELOR)は、三河湾湾奥の三河港において伊勢湾台風時に次ぐ大きな高潮(潮位偏差2.6 m)を発生させ、三河港埠頭のコンテナを散乱させるなどの被害をもたらした。今後、温暖化による台風の強大化に伴って、このような災害事例の増加・激化が予想され^{1), 2)}、効果的な高潮対策を講じるためには、強大化台風によって発生する高潮を精度良く再現できる数値モデルが必須となる。

台風直下の高潮計算では、台風の進路および台風の直撃に伴う急激な気圧・風速の変化を極めて高精度に再現することが課題となる。これに対して、従

来の高潮計算では、Myersの式などを組み合わせた経験的台風モデルが用いられて来た。しかしながら、経験的台風モデルは内湾や内海の高潮を高精度に計算するには不十分なものであることが、既往の研究によって指摘されている³⁾。これによると、経験的台風モデルは、沿岸地域の陸面・海面境界の効果や広域気象場の再現など重要な物理プロセスを簡略化しているため、海上風を正しく評価できず、その結果、高潮の計算精度を著しく低下させることになる。

近年、この問題を改善するために、沿岸地域の陸面・海面境界の効果や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、広域気象場などを評価できる気象モデルが用いられるようになって来た。さらに、台

風の中心付近のシャープな気圧低下や強風を初期場において正しく評価するために台風ボーガスも併せて用いられて来た⁴⁾。しかしながら、ボーガスの埋め込みは初期場のみになされるのが一般的であり⁵⁾、気象モデルの時間発展に伴い、台風の構造や進路を正しく再現するのが難しくなる。

そこで本研究では、ナッジング法に基づく台風ボーガスの4次元同化（これを4次元台風ボーガス同化と呼称）を行い、これを適用した気象モデルに海洋モデルおよび波浪モデルを結合させた大気－海洋－波浪結合モデルを開発する。そして、これを用いて伊勢・三河湾に直撃した台風 0918 号下の高潮の再現計算を行い、実測値との比較によって、本手法が台風直下の高潮計算に極めて有用となることを実証する。

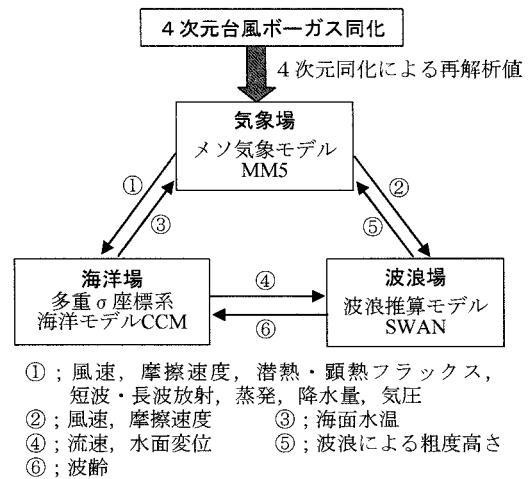


図-1 4次元台風ボーガス同化を適用した大気－海洋－波浪結合モデル

2. 計算方法

(1) 4次元台風ボーガス同化

本研究では、大澤ら^{6), 7)}によって作成された台風ボーガスを用いる。この台風ボーガスは、Fujita の経験式⁸⁾による地上気圧分布の評価、解析関数を用いた高度偏差の3次元軸対称構造の記述、コリオリ力、遠心力と気圧傾度のバランスによる傾度風の計算および解析値の台風非対称成分の付加を行うものであり、気象庁の現業台風予報にも採用されている。この台風ボーガスは、一般的な台風ボーガス⁵⁾と比べて、気圧と風速の係数に地衡風近似でなく傾度風近似を用いていること、台風を中心気圧を入力値とし、それにバランスした風速を算出する点に大きな違いがある。

そして、上述の方法で得られた台風ボーガスをクレスマン内挿法により解析値へ埋め込む。その際、初期場に加えて計算期間中の全ての解析値に台風ボーガスを埋め込み、再解析値を作成する。そして、再解析値と推算値の差をタイムステップ毎に風速、気温および混合比に関する時間発展方程式に外力項として付加することで、ナッジング法に基づく台風ボーガスの4次元同化を行う。

ナッジング法では、ナッジング係数を大きくすることで、推算値が台風ボーガスを埋め込んだ再解析値へと近づくため、台風の進路や強度の計算精度向上が期待できる。しかしながら、ナッジング係数を大きくし過ぎると、ナッジングによる外力項が卓越し、強制的に推算値が再解析値に近づけられることになる。これは、気象モデル中の時間発展方程式によって計算される沿岸地域の陸面・海面境界の効果や広域気象場の影響などを正しく評価しないことを意味し、陸上気圧や風速の計算精度を低下させる可能性がある。そこで本研究では、ナッジング係数の最適化のために数ケースのテスト計算を行い、台風の進路、気圧および風速が最も精度良く計算できたケースを計算結果として採用する。

(2) 大気－海洋－波浪結合モデル

本研究では、気象場の計算に気象モデル MM5⁹⁾を用いる。このモデルは、非静力学平衡・完全圧縮・非膨張系のメソ気象モデルであり、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および広域気象場などの再現を可能としている。そして、このモデルにおいて前述の4次元台風ボーガス同化を行う。

現実により近い海水流動を計算するために、4次元台風ボーガス同化を適用した気象モデル MM5 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 CCM^{3), 10)}および波浪モデル SWAN¹¹⁾を結合させ、大気、海洋および波浪場を1つの系として一体的に計算する。その概要を図-1に示す。このモデルでは、気象モデル MM5 から出力される風速、摩擦速度、潜熱・顕熱フラックス、短波放射、下向き長波放射、蒸発、降水量および気圧と、海洋モデル CCM から出力される海面温度を用いて、海面での運動量フラックスおよび熱・塩分フラックスを計算している。さらに、波浪モデル SWAN では、MM5 および CCM で求められた風速、摩擦速度、流速および水面変位が入力値として用いられている。そして、これらを基にして計算された波浪による粗度高さを MM5 の大気境界層スキームへ、波齢を CCM の Mellor・Yamada Level 2.5 乱流モデルの海面境界条件式¹²⁾へ、それぞれ出力し、各モデルの精度向上を図っている¹³⁾。

(3) 計算条件

4次元台風ボーガス同化を適用した大気－海洋－波浪結合モデルを用いて、2009年10月7日0時から8日12時(UTC)までの台風0918号下の伊勢・三河湾の高潮を再現する。その際、台風ボーガスの計算に必要な台風の位置および中心気圧等の情

表-1 計算条件

4次元台風 ボーガス 同化	入力データ	気象庁ベストトラック
	時間解像度	1時間間隔
	ナッジング係数	1.0×10^{-4}
気象モデル MM5	計算領域I	N23.4~39.3, E127.3~142.5
	計算領域II	N33.9~35.3, E135.9~137.7
	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	24層
	タイムステップ	I: 30秒, II: 10秒
	大気境界層スキーム	Blackadar scheme
	雲物理過程	Reisner graupel scheme
	放射過程	Cloud-radiation scheme
	初期値・境界値	NCEP全球客観解析値
海洋モデル CCM	計算領域I	N30.0~35.4, E130.7~138.9
	計算領域II	N34.2~35.1, E136.5~137.3
	水平解像度	I: 2.6 km, II: 0.8 km
	水平格子数	I: 326×217, II: 99×97
	タイムステップ	I: 10秒, II: 5秒
	σ 座標の適用領域数	7
	全層数	40層
波浪モデル SWAN	初期値・境界値	気候値 (関根, 1996) ¹⁴⁾
	計算領域	N34.2~35.1, E136.5~137.3
	水平解像度	0.8 km
	水平格子数	99×97
結合モデル	タイムステップ	150秒
	交換時間間隔	150秒

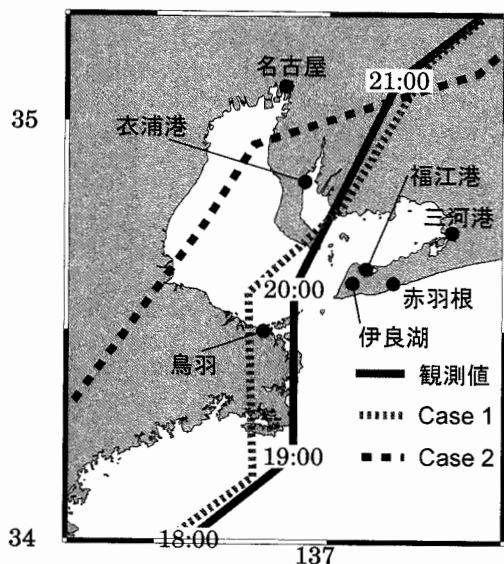


図-2 台風0918号の進路の観測値と計算値の比較

報は、気象庁ベストトラックによって与える。そして、NCEP 全球客観解析値を用いて気象モデル MM5 に対する 1 時間間隔の解析値を作成し、それら全ての解析値に本章第 1 節で述べた手法を用いて台風ボーガスを埋め込む。その他の計算条件は、表-1 に示す通りである。このようにして計算したものを Case 1 と呼ぶ。

また、比較のために、初期場のみ台風ボーガスを埋め込む従来の手法を結合モデルに適用し、これを用いた計算も併せて行う。これを Case 2 と呼ぶ。

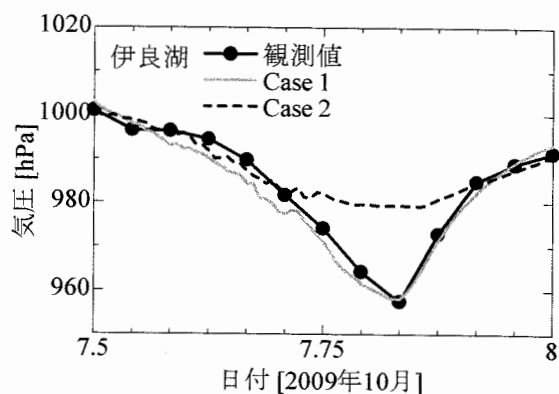


図-3 伊良湖における気圧の観測値と計算値の比較；横軸はUTCであり、7.5は7日12時、8は8日0時を示す。

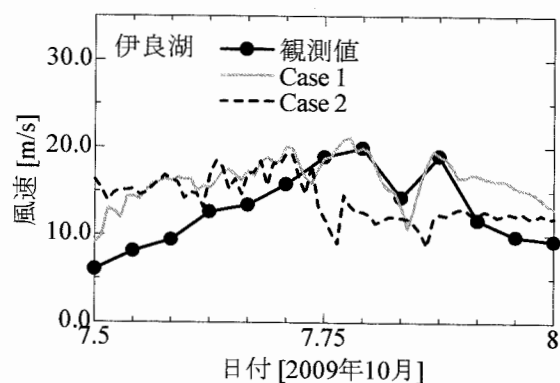


図-4 伊良湖における風速の観測値と計算値の比較

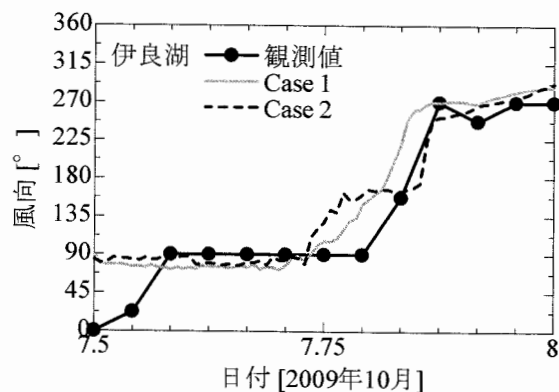
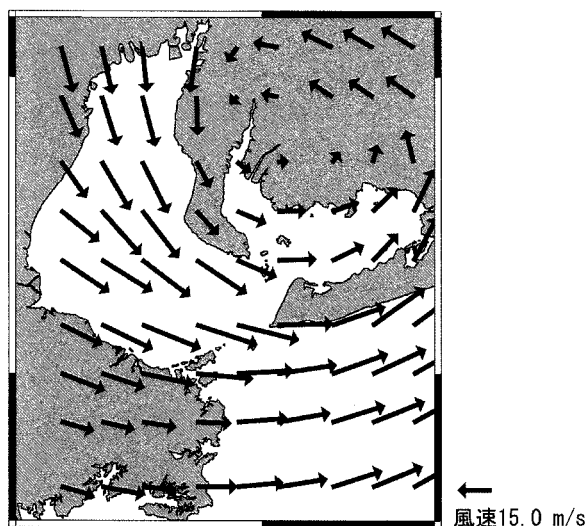


図-5 伊良湖における風向の観測値と計算値の比較；0°は北風、90°は東風を示す。

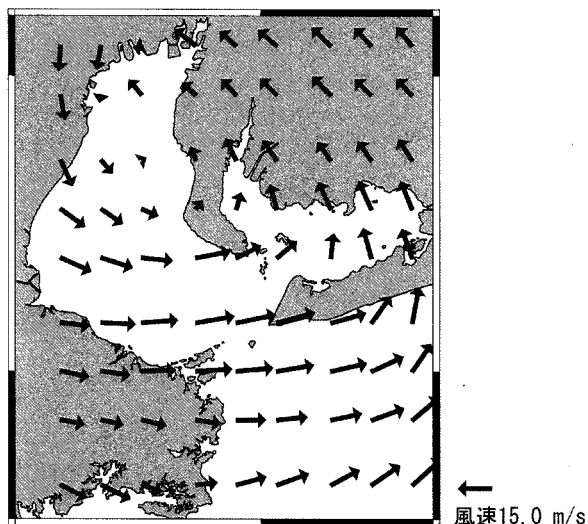
3. 計算結果

(1) 気象場に対する精度検証

図-2 は、台風 0918 号の進路の観測値（気象庁ベストトラック）と計算値を比較したものである。これより、初期場のみ台風ボーガスを埋め込む従来の手法である Case 2 の台風進路は、観測値の進路に対して大きく西方向に外れていることがわかる。その一方で Case 1 は、観測値の進路を高精度に再現している。これは、Case 1 が 1 時間間隔の解析値



(a) Case 1



(b) Case 2

図-6 Case 1およびCase 2の7日20時30分における海面上10 mの風速ベクトルの比較

全てに台風ボーガスを含め込み、その再解析値をナッジング法に基づいて4次元同化したためであると考えられる。以上の結果より、4次元台風ボーガス同化が台風進路の再現性を大きく向上させることが明らかとなった。

図-3は、伊良湖（図-2参照）における気圧の観測値と計算値を比較したものである。これより、Case 2では、台風の接近に伴う気圧低下の再現が不十分であることがわかる。前述の図-2に示したように、実際の台風は、伊良湖観測点より僅か15 km北西を通過していたものの、Case 2の台風は観測点より大きく離れた約45 km北西を通過した。そのため、観測点への台風接近に伴う気圧低下が十分に再現できなかったものと判断される。これに対して、Case 1は、4次元台風ボーガス同化の適用によって

台風進路を高精度に再現できるため、台風の接近に伴う気圧低下も精度良く計算していることが図-3より明らかである。

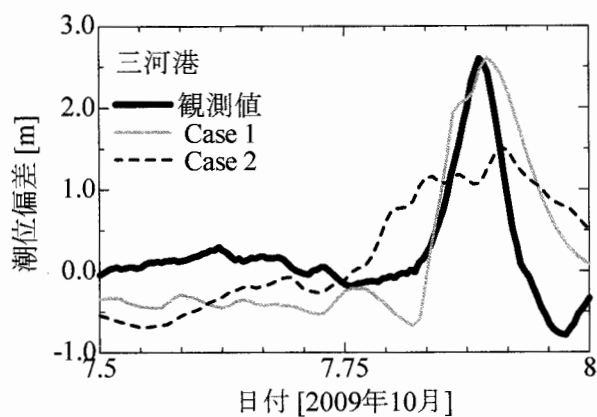
図-4は、伊良湖（図-2参照）における風速の観測値と計算値を比較したものである。この図より、Case 1は、台風接近時（7日18時～21時頃）の風速を精度良く計算していることがわかる。特に台風の目の通過時（20時）において風速の低下も再現されている。Case 2は、Case 1に比べてこれらの計算精度が劣っている。また、第2章で述べたようにCase 1の4次元台風ボーガス同化のナッジング係数を大きくした場合、台風進路の再現性が向上する一方で、風速の計算精度に問題が生じる可能性がある。しかしながら、図-2および4に示されたように、Case 1は、台風の進路と同時に風速を精度良く再現しており、本研究におけるナッジング係数の選択は、適切なものであると判断される。

図-5は、伊良湖（図-2参照）における風向の観測値と計算値を比較したものである。この図より、Case 1およびCase 2共に、台風接近時の風向の変化を精度良く再現している様子が認められる。これは、図-2に示されたように両ケースの台風の進路が観測値と同様の伊良湖観測点より北西の進路を取っていたためであると考えられる。

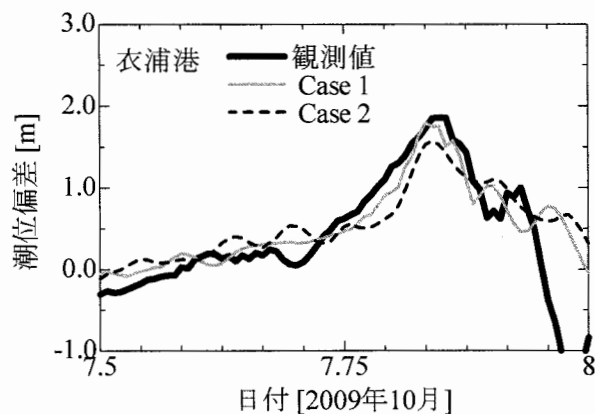
図-6は、Case 1およびCase 2の7日20時30分における海面上10 mの風速ベクトルを比較したものである。前述したように両ケース間では、台風の進路に大きな違いがあるため、伊勢湾や三河湾上での海上風の分布に大きな差が生じている。Case 2は、初期場のみ台風ボーガスを埋め込んでいるため、気象モデルの時間発展に伴い台風の進路のみならず台風のシャープな構造の再現も難しくなる。そのため、4次元台風ボーガス同化を適用したCase 1とは、台風構造の評価にも差が生じる。このような差異も、両ケース間の海上風の分布の差につながったものと考えられる。また、図2～5において検証したように、Case 2に比べてCase 1は、台風の進路、気圧および風速を精度良く計算しており、この事実を鑑みれば、Case 1の海上風の分布は、Case 2よりも現実的なものであると推察される。

(2) 海洋場に対する精度検証

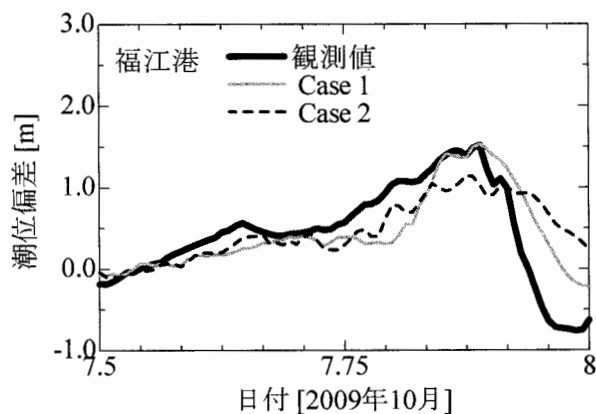
図-7は、三河港、衣浦港、福江港、名古屋、鳥羽および赤羽根（図-2参照）における潮位偏差の観測値と計算値の比較をそれぞれ示したものである。コンテナが流される被害が発生した三河港では（図-7(a)参照）、7日21時20分に2.6 mの大きな潮位偏差が観測された。Case 1の三河港での最大潮位偏差は、7日21時30分の2.61 mであり、潮位偏差の発生時刻に僅かに遅れがあるものの極めて高い精度で三河港の高潮を再現していると言える。これに対して、Case 2の最大潮位偏差は、7日21時50分の1.52 mであり、過小評価が顕著である。Case 1がCase 2の潮位偏差の計算精度を大きく改善した主因は、図-6に示した海上風の分布にあり、



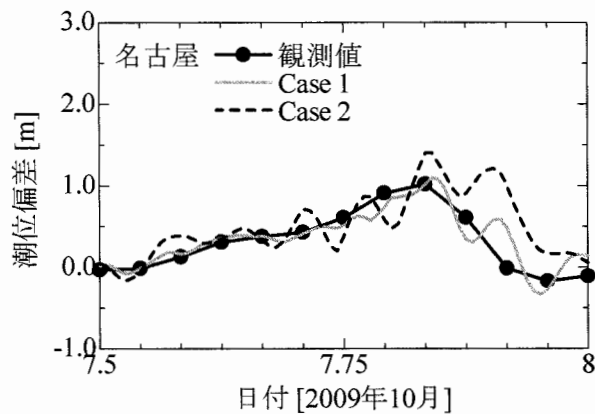
(a) 三河港



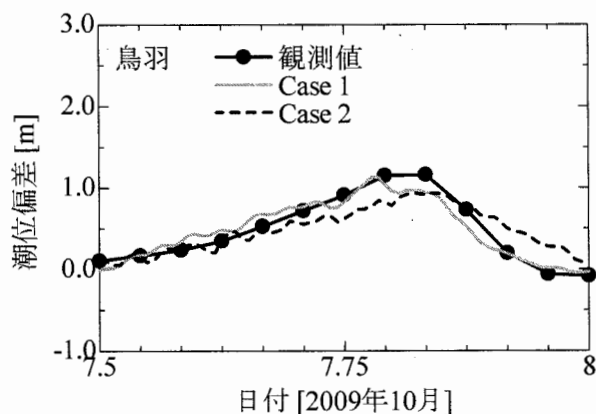
(b) 衣浦港



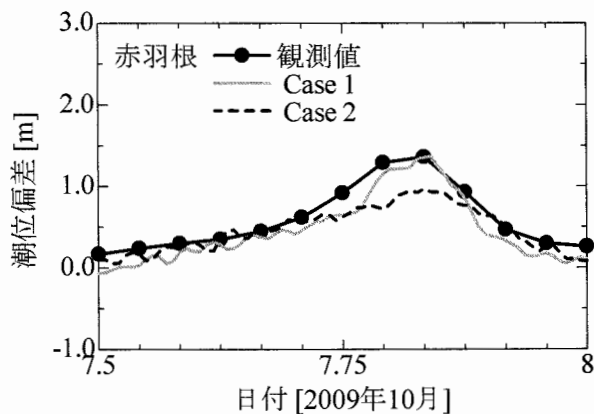
(c) 福江港



(d) 名古屋港



(e) 鳥羽



(f) 赤羽根

図-7 三河港、衣浦港、福江港、名古屋、鳥羽および赤羽根(図-2参照)における潮位偏差の観測値と計算値の比較；観測値の時間間隔は、三河港、衣浦港および福江港が10分間隔、名古屋、鳥羽および赤羽根が1時間間隔である。

Case 1 の 7 日 20 時 30 分の三河湾上の海上風は、Case 2 のものに比べて西風が強くなっている。そして、この西風に起因した吹送流によって海水が三河湾湾奥へ輸送され、Case 1 の三河港の潮位偏差は大きくなり、観測された 2.6 m の潮位偏差を再現できたものと考えられる。また、図-7(b), (c), (d), (e) および(f)に示した衣浦港、福江港、名古屋、鳥羽および赤羽根においても、Case 1 は、Case 2 に比べ

て潮位偏差を精度良く計算しており、伊勢・三河湾の広い範囲において高潮を精度良く再現できるものと言える。以上の比較・検討より、台風ボーガスを初期場に埋め込むだけの従来の手法を大気-海洋-波浪結合モデルに適用しても台風直下の高潮の高精度計算は難しく、この問題の改善には4次元台風ボーガス同化が必須となることが明らかとなった。

図-8 および 9 は、三河港(図-2 参照)における

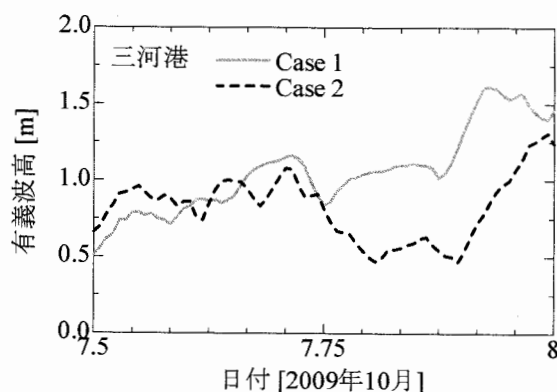


図-8 三河港におけるCase 1とCase 2の有義波高の比較

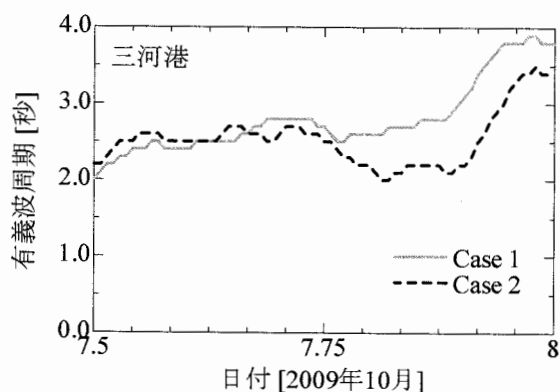


図-9 三河港におけるCase 1とCase 2の有義波周期の比較

Case 1 と Case 2 の有義波高および有義波周期をそれぞれ比較したものである。三河港では有義波高および有義波周期の観測が行われていないために、ここでは計算値のみの比較を行った。台風接近時（7日18時～21時頃）においてCase 1の有義波高は、Case 2に比べて約0.5～0.8 m大きくなっていることがわかる。また、同時期にCase 1の有義波周期は、Case 2のものより約0.5秒長くなっている。これらの結果は、両ケースの台風進路の差異によるところが大きく、気象モデル上で台風の進路を制御できる4次元台風ボーガス同化は、台風直下の高潮のみならず波浪の計算にも不可欠な手法と言える。

4. おわりに

本研究では、台風直下の高潮を高精度に再現するために4次元台風ボーガス同化を適用した大気-海洋-波浪結合モデルを開発し、伊勢・三河湾に直撃した台風0918号下の高潮の再現計算および精度検証を行った。その結果、4次元台風ボーガス同化の適用により、台風ボーガスを初期場に埋め込むだけの従来の計算手法では不可能であった台風の進路やその接近に伴う気圧・風速の急激な変化の高精度計算が可能となり、台風直下の高潮を精度良く計算できることが実証された。

本研究で開発した4次元台風ボーガス同化を適用

した結合モデルは、従来の経験的台風モデルでは考慮できない沿岸地域の陸面・海面境界の効果や広域気象場などを正しく評価すると同時に、これまでの気象モデルの台風計算の課題であった台風進路を高精度に計算できるようにしたものである。よって、本研究手法は、台風が内湾や内海へ直撃した場合の高潮の再現計算に極めて有用となる。

謝辞：本研究の一部は、（独）防災科学技術研究所プロジェクト「台風災害の長期予測に関する研究」、科学研究費補助金基盤研究(B)(2)21360234、若手研究(B)20760325 および科学技術振興調整費研究「先端技術を用いた動的土砂管理と沿岸防災」による成果である。また、数値計算の実施にあたり神戸大学・大澤輝夫准教授および豊橋技術科学大学・岡田拓巳氏の協力を得た。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 1) Trenberth, K. E. : Warmer Oceans, Stronger Hurricanes, *Scientific American*, Vol. 297, pp. 44-51, 2007.
- 2) Emanuel, K., Sundararajan R. and Williams J. : Hurricanes and Global Warming: Results from Downscaling IPCC AR4 Simulations, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, Vol. 89, pp. 347-367, 2008.
- 3) 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.
- 4) 大澤輝夫, 竹山剛生, 安田孝志 : メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 281-285, 2001.
- 5) Davis, C. and Low-nam, S. : The NCAR-AFWA tropical cyclone bogussing scheme, *A report prepared for the Air Force Weather Agency*, p. 12, 2001.
- 6) 大澤輝夫 : 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, 2005.
- 7) 台風時の内湾海上風推算の研究（その2）報告書, 財団法人日本気象協会, pp. 14-62, 2006.
- 8) Fujita, T. : Pressure Distribution Within Typhoon, *Geophys. Mag.*, Vol. 23, pp. 437-451, 1952.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) Mellor, G. L. and Blumberg, A. F. : Wave breaking and ocean surface layer thermal response, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 34, pp. 693-698, 2004.
- 13) 村上智一, 伊藤秀文, 安田孝志, 大澤輝夫 : 大気-海洋-波浪結合モデルの構築とその精度検証, 日本海洋学会春季大会講演要旨集, p. 128, 2005.
- 14) 関根義彦 : 伊勢湾, 沿岸海洋研究, 第34巻, pp. 20-33, 1996.