台風0918号襲来時の伊勢湾海域における水塊構造の変動過程に関する数値的研究

Numerical Study on Variation Process of Water Mass Structure in Ise Bay Area under Influence of Typhoon 0918

鈴木一輝¹・川崎浩司²・高杉有輝³・村上智一⁴・青木伸一⁵

Kazuki SUZUKI, Koji KAWASAKI, Yuki TAKASUGI, Tomokazu MURAKAMI and Shin-ichi AOKI

Water mass structure in a coastal area is significantly affected by meteorological forcing. Typhoons, in particular, have a great impact on the coastal water environment. The present study aims at numerically investigating the variation process of water mass structure in Ise Bay area under influence of Typhoon 0918 using an Atmosphere-Ocean-Wave-Water Quality coupled model and the four dimensional data assimilation with a tropical cyclone bogus scheme. As a result, the flow structure was found to be significantly changed by the effect of the typhoon, such as the formation of a vertical circulation flow due to strong winds. Furthermore, the numerical results revealed that the vertical mixing of water column was induced by the vertical circulation flow, resulting in the disappearance of hypoxia.

1. はじめに

伊勢湾海域の水塊構造は、気象現象による影響を強く受けている。特に、急激な気象擾乱を有する台風襲来時には、水環境が大きく変化することが既往の観測的研究から明らかにされている。川崎ら(2014)は、台風0918号襲来時に三河湾で観測された海象データから、台風接近時の強風と通過後の出水により、水塊構造が大きく変化したことを明らかにしている。ただし、水塊構造の変動過程については、時空間的な観測データ量の制約から、十分な検討には至っていない。

近年では、観測データ数の不足を補うために、数値解析に基づく研究が伊勢湾海域を対象に実施されている(東ら, 2008など)。しかし、その多くは季節変動や経年変動について議論しており、台風や豪雨といった気象擾乱を伴う短期的な事象を対象とした研究はわずかである(川崎ら, 2008; 村上・川崎, 2009)。村上・川崎(2009)は、領域気象モデルMM5を組み込んだ大気-海洋-波浪結合モデルを用いることで、台風襲来時の流動・密度構造を忠実に再現できることを示すとともに、流動・密度構造の変動過程を明らかにした。しかし、水質構造の再現計算は行っておらず、台風襲来時の水質構造の変動過程までは議論していない。

本研究では、激しい気象擾乱下においても海象現象を高精度に計算可能な大気-海洋-波浪-水質結合モデル(川崎ら, 2008)を用いた台風0918号襲来時の伊勢湾海域の再現計算より、台風作用下における伊勢湾海域の水塊構造の変動過程を明らかにすることを目的とする。

2. 数値計算の概要

(1) 大気-海洋-波浪-水質結合モデル

大気-海洋-波浪-水質結合モデル(川崎ら, 2008)は、気象モデルMM5、海洋モデルCCM(村上ら, 2004)、波浪モデルSWAN、植物プランクトンの一次生産、有機物の分解、窒素・リン循環を考慮した水質モデルから構成される。各モデル間でデータ交換させることで、気象場と海象場の相互作用を適切に評価でき、気象擾乱などによる短期的な水塊構造の変化を高精度に計算可能である。なお、本研究では、Murakamiら(2011)を参考に、台風進路および台風接近に伴う気圧・風速の急変を精度良く計算するために、ナッジング法に基づく台風ボーガスの4次元同化をMM5に適用した。

(2) 計算条件

主要な計算条件を表-1に示す。計算期間は、台風0918号が伊勢湾海域に襲来した2009年10月7日0時から10月8日3時(UTC)までの27時間とした。計算領域は、図-1に示すとおりであり、外洋水の流入を正確に評価し、対象領域を高解像度で計算するために、外洋(Domain I)から伊勢湾海域(Domain III)まで、3段階の一方向ネスティングにより計算を実施した。計算時間短縮のため、Domain IとDomain IIでは、水質計算を行わず、水温と塩分は一定とした。Domain IIIでは、開境界の水位条件として、Domain IIで得られた水位の時空間内挿値に、

1 学生会員	修(工)	名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻
2 正会員	博(工)	(株)ハイドロソフト技術研究所 研究開発センター長
3 正会員	修(工)	日揮(株)
4 正会員	博(工)	(独法)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究ユニット 主任研究員
5 正会員	工博	大阪大学教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻

表-1 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°
	タイムステップ	I : 30 s, II : 10 s
	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
	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 ・ 水質モデル	放射過程	Dudhia's radiation scheme
	ナッジング係数	$0.7 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$
	タイムステップ	I : 5 s, II : 2 s, III : 1 s
	水平格子数	I : 300×160, II : 250×190 III : 301×280
	水平解像度	I : 2430 m, II : 810 m, III : 270 m
	σ 座標の領域数	7
	鉛直層数	30
	初期値・境界値	NAO.99Jb 主要10河川の流量データ 水温・塩分・DO観測値 主要10河川の河川流入負荷
波浪モデル SWAN	タイムステップ	I, II, III : 150 s
	水平解像度	I : 2430 m, II : 810 m, III : 270 m
	水平格子数	I : 300×160, II : 250×190, III : 301×280
結合モデル	変数交換の時間間隔	150 s

図-1 計算領域

図-2 伊良湖の気圧および風速・風向の時間変化

図-3 三河港(上)と鳥羽(下)における水位変動の時間変化

NAO.99Jb (Matsumotoら, 2000) で求めた天文潮を加えることにより, 潮汐の効果を取り入れた. また, 図-1中の赤丸で示す伊勢湾海域に面する主要10河川の影響を考慮した. 各河川の流量と流入負荷量は, 水文水質データベース (国土交通省, 2002) から取得した対象期間中の毎時流量と毎時水位および2009年10月の各水質項目の濃度を基に1時間間隔で与えた. なお, 対象期間中, 河口周辺で出水に対応したクロロフィルaの増大が確認された (川崎ら, 2014) ことを踏まえ, 本研究では, 流入負荷量としてクロロフィルaも考慮した. ただし, 長良川以外のデータを取得できなかったため, 長良川での観測値を各河川に与えた. 初期条件は, 水位はNAO.99Jbで求めた計算開始時刻の天文潮を与え, 流速は0とした. 密度場と水質場は, 三河湾では, 愛知県水産試験場による自動観測パイと陸ら (2010) が実施した定点観測による観測値を与えた. 伊勢湾では, 計算開始時刻の観測データを取得できなかったため, 三重県水産研究所による浅海定線調査データを解析し, 秋季の平均的な分布として, 2009年から2011年の9月と10月の平均値を与えた.

3. 計算結果および考察

(1) 再現性の検証

図-2は, 伊良湖 (図-1 (b) 参照) の気圧および風速・風向の観測値と計算値を比較したものである. 計算値は台風通過時の気圧低下を精度良く表現していることがわかる. 風速・風向については, 全体的な風速の過大評価や台風接近時の風向の違いなど, 観測値と計算値に若干の違いがみられる. しかし, 台風中心接近時の一時的な

風速の減少や台風通過に伴う風向の変化など、台風0918号の特徴的な気象場を適切に表現しているといえる。

図-3に、三河港と鳥羽（図-1（b）参照）における水位変動の計算値と観測値の比較を示す。両地点ともに、計算値は潮位の最大値を過小評価している。特に、三河港では急激な水位上昇（T.P.+3.15 m）を再現していない。しかし、最大潮位の発生時刻は、観測値と概ね一致している。高潮を過小評価した要因としては、台風接近時の風を精度良く再現できなかったことにより、外洋から伊勢湾海域への水塊流入を過小評価したことが考えられる。三河港で観測された急激な水位上昇は、台風通過時の風向の急変により、伊勢湾側の水塊が自由長波として三河湾へ流入したことが原因であると指摘されている（青木・加藤，2010；川崎ら，2014）。そこで、最大潮位の発生時刻に着目し、水塊の伝播特性を検討する。図-3より、鳥羽と三河港の最大潮位の時間差は62分である。この時間は、2点間（距離 $D=55$ km、平均水深 $h=20$ m）を長波（伝播速度 $C=(gh)^{1/2}=14.0$ m/s、 g ：重力加速度）が伝播するのにかかる時間（65分）とほぼ一致する。したがって、既往の研究で指摘された台風0918号襲来時の特徴的な流動場をある程度表現しているといえる。ただし、高潮の再現検証については今後の検討すべき課題である。

図-4は、愛知県水産試験場が保有する2号観測ブイの位置を示すB2（図-1（b）参照）における表層塩分と底層塩分の計算値と観測値の比較を示したものである。同図より、計算値では、鉛直混合が観測値よりも早く生じているものの、観測値の傾向をおおよそ捉えている。混合

時刻が異なる要因の一つとして、気象場の計算において、台風接近前の風速を過大評価していることが挙げられる。

(2) 台風襲来時の流動構造

図-5は、風、表層流、底層流の空間分布をそれぞれ図示したものである。台風接近前である10時の時点では、北寄りの風によって、表層で南向きの流れが生じている。台風が接近する17時では、図からわかるように、強い東風が海上を吹き、その結果、表層で強い西向きの流れが引き起こされている。同時刻の底層流分布をみると、西向き表層流の補償流として0.5 m/s程度の東向きの流れが発生しており、鉛直循環流の形成が確認できる。台風が伊勢湾海域上を通過する20時では、風向が大きく変化し、三河湾の湾口では、表層と底層ともに三河湾の湾奥へ向かう強い流れが生じている。23時では、台風の吹き返しによって北西寄りの風が卓越し、伊勢湾の表層で南東向き、底層で北西向きの流れとなっている。

海域の流動構造を詳細に検討するために、図-6に伊勢湾海域横断面（図-1（b）中A-A'断面）における水平方

図-4 B2における表層塩分と底層塩分の時間変化(10月7日20時以降の観測値は欠測)

図-5 風(上段)・表層流(中段)・底層流(下段)の空間分布の時間変化

向流速の断面接線成分 u_t の空間分布を示す。同図からも、図-5で示した17時の鉛直循環流の発生が確認できる。20時では、三河湾で水深方向に一樣な東向きの流れが認められる。そして、台風通過後の23時では、西風によって、伊勢湾では主に東向きの流れが卓越している。一方、三河湾では、西向きの流れが卓越し、風向と流向が一致し

ていない。これは、現地観測で確認された水塊の変動特性(川崎ら, 2014)と一致しており、伊勢湾から流入した水塊が湾奥部で反射したために生じたと推察される。

(3) 水塊構造の変動過程

前節では、台風0918号襲来時に鉛直循環流の形成や全水深にわたる水塊移動など流動場が大きく変化することが判明した。そこで、本節では、計算結果に基づき、水塊構造の変動過程について議論する。

図-7と図-8に、台風襲来前後の表層塩分および底層DOの空間分布を示す。表層塩分をみると、10時では、伊勢湾湾奥部などの河口付近で塩分が低く、伊勢湾と三河湾の湾口で比較的高い分布となっている。台風通過後は、河川出水の影響により河口付近が低塩分化し、伊勢湾の湾央部東側(知多半島西側)で32 psu以上の高塩分水塊が広がっていることが認められる。図-8に示す底層DOの空間分布から、台風通過後は、水深の浅い海域だけでなく、伊勢湾湾央部などの水深が30 m程度と比較的深い海域でも、DO値が3 mg/l以下の貧酸素水塊が解消されていることがわかる。

伊勢湾における高塩分水塊と貧酸素水塊の挙動を明らかにするために、伊勢湾横断面(図-1(b)中B-B'断面)の塩分分布とDO分布を図-9と図-10にそれぞれ示す。図-9より、10時の時点では、上下層で約5 psuの塩分差があり、塩分成層が確認できる。その後、台風接近に伴う東風に起因した鉛直循環流によって、底層の高塩分水塊が

図-6 伊勢湾海域横断面(A-A'断面)における水平方向流速の断面接線成分 u_t の空間分布の時間変化(正の流速は三河湾湾奥向きの流れを示す)

図-7 台風襲来前後の表層塩分の空間分布

図-8 台風襲来前後の底層DOの空間分布

図-9 伊勢湾横断面(B-B'断面)の塩分分布の時間変化

図-10 伊勢湾横断面(B-B'断面)のDO分布の時間変化

東側に押し込まれ、海底地形に沿って表層へ湧昇している様子が認められる。よって、図-7でみられた、台風通過後の伊勢湾東側における表層塩分の増大は、底層の高塩分水塊が湧昇したため生じたといえる。図-10をみると、10時の時点では、中層から底層にかけて、貧酸素水塊が形成されている。その後、塩分変動と同様に、鉛直循環流により貧酸素水塊が伊勢湾東側へ輸送され、20時には、海底地形に沿って中層（水深約10 m）まで湧昇している。しかし、貧酸素水塊は表層まで達することなく、中層以深で解消されている。このように、伊勢湾では、台風に伴う強風により鉛直循環流が形成され、底層水塊が表層に湧昇するものの、躍層付近で強い鉛直混合が生じることで、水深の浅い海域だけでなく、比較的深い海域でも、貧酸素水塊が解消することが判明した。

ついで、三河湾で生じた全水深にわたる水塊移動による湾内への影響を検討する。図-11に伊勢湾海域横断面（図-1 (b) 中A-A' 断面）の塩分分布を示す。水塊の移動前である19時では、各地点で水深方向に様な分布を示し、三河湾の湾口部（断面中央付近）では、比較的塩分の高い水塊が確認できる。21時から22時にかけては、三河湾湾内へ高塩分水塊が全層で流入している様子が認められる。台風通過後の23時では、伊勢湾側に高塩分水塊が流出しており、水塊の移動前である19時の三河湾の水塊構造と比較して、大きな違いはみられない。

4. おわりに

本研究では、台風作用下における伊勢湾海域の水塊構造の変動過程を明らかにするために、大気-海洋-波浪-水質結合モデルを用い、台風0918号襲来時の伊勢湾海域の再現計算を実施した。その結果、台風接近時の東風に起因した鉛直循環流の形成や全水深にわたる水塊移動など、台風により伊勢湾海域の流動構造が一変することを確認した。さらに、鉛直循環流により底層水塊が表層へ輸送されることがわかった。そして、躍層界面での強い鉛直混合により、水深の浅い海域だけでなく、比較的深い海域でも、貧酸素水塊が解消することが判明した。

今後は、密度成層が発達する夏季に台風が襲来した場合など、様々な条件下の計算を行うことで、伊勢湾海域の水塊構造について詳細に検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究で利用した観測データの一部は、三重県水産研究所および愛知県水産試験場より提供頂いた。ここに付記し、謝意を表する。

参考文献

青木伸一・加藤 茂 (2010)：台風0918号による三河湾の高潮について、土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66, No.

図-11 伊勢湾海域横断面(A-A' 断面)における塩分分布の時間変化

1, pp. 296-300.

川崎浩司・鈴木一輝・高杉有輝・村上智一・青木伸一 (2014) 海象観測データに基づく台風0918号襲来時における三河湾の水塊構造の変動特性, 土木学会論文集B3（海洋開発），Vol. 69, No. 2, 印刷中.

川崎浩司・村上智一・大久保陽介・金 昌勲・水谷法美 (2008)：大気-海洋-波浪-水質結合の構築と東海豪雨時における伊勢湾の水質構造解析, 海工論文集, 第55巻, pp. 1211-1215.

国土交通省 (2002)：水水文質データベース（オンライン）, <http://www1.river.go.jp/>, 参照2013-10-30.

東 博紀・越川 海・木幡邦男・村上正吾・水落元之 (2008)：伊勢湾における気温・風速の長期変動傾向とそれに伴う流動・水質の変化, 海工論文集, 第55巻, pp. 1041-1045.

村上智一・川崎浩司 (2009)：台風0423号下における伊勢湾の海水流動・密度構造の変化過程, 海洋開発論文集, 第25巻, pp. 1299-1304.

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, 海工論文集, 第51巻, pp. 366-370.

陸 真姫・青木伸一・井上隆信・杉山佳幸 (2010)：エスチュアリー循環による河口浅海域への物質輸送に関する研究, 土木学会論文集B2（海岸工学），Vol. 66, No. 1, pp. 361-365.

Matsumoto, K., T. Takanezawa, and M. Ooe (2000)：Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan, J. Oceanogr., Vol. 56, pp. 567-581.

Murakami, T., J. Yoshino, T. Yasuda, S. Iizuka, and S. Shimokawa (2011)：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.