

気象および河川水の影響を受ける 遠州灘の細粒土砂の移動特性

CHARACTERISTIC OF FINE-GRAINED SEDIMENT TRANSPORT IN THE ENSHU-NADA SEA AFFECTED BY METEOROLOGICAL DISTURBANCES AND RIVER DISCHARGE

村上智一¹・青木伸一²

Tomokazu MURAKAMI and Shin-ichi AOKI

¹正会員 博(工) 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)

²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)

This study aims at discussing characteristics of fine-grained sediment transport in the Enshu-Nada Sea affected by meteorological disturbances and river discharge from a perspective of numerical analysis. Reproductions of coastal currents in the Enshu-Nada Sea in winter, large flood and summer were performed using an Atmosphere-Ocean-Wave coupled model, which enables us to estimate influences of the meteorological disturbances and the river discharge correctly. The validity and utility of the coupled model was verified by comparing the observation results with the computation ones regarding wind speed, tide level, and so on. Furthermore, the characteristics of fine-grained sediment transport in the Enshu-Nada Sea were examined by a particle tracking analysis. As a result, it was demonstrated that the characteristics of the fine-grained sediment transport were greatly influenced by the strong winds in winter and the river plume at large flood.

Key Words : *Fine-grained sediment transport, Enshu-Nada Sea, numerical simulation*

1. はじめに

天竜川上流域は、土砂生産量が非常に多く、礫や砂のみならずシルトや粘土といった細粒土砂を天竜川河口から遠州灘へ大量に放出する。とりわけ、天竜川ダム再編事業に関する検討では、事業の実施により、この細粒土砂の放出がさらに増大することが予測されている¹⁾。そのため、シラス漁業を中心とする遠州灘の漁業への細粒土砂の影響が懸念され、その対策や予測に細粒土砂の移動特性の解明が要求されている。

細粒土砂は、沈降速度が小さく、風による吹送流や河川プルームなどの影響を受ける。特に遠州灘では、冬季は強い北西風、雨季は天竜川からの出水が発生するため、季節によって細粒土砂の移動特性が異なるものと考えられる。そのため、数値モデルを用いて、遠州灘の細粒土砂の移動特性を解明するには、気象場からの影響および河川水の影響を正しく評価することが極めて重要となる。

前者の気象場からの影響を評価するには、風や降水等の気象情報が必要であり、この要求に対して、従来、アメダスなどの陸上観測データが用いられてきた。しかし、観測データは、面的・時間的に情報量が少ないのが現状であり、海上風の平面分布特性

を明らかにした山口らの研究²⁾、陸上風と海上風の特性的違い、毎日の海陸風の時間変化などを考えれば、観測データでは、気象場からの影響を適切に評価することができないのは当然と言える。また、観測データからは、大気海洋相互作用を正しく評価できないという問題もある。

後者の河川水の影響を適切に評価するには、河川流量のみならず河川プルームを精度良く取り扱う必要がある。河川プルームは、海面直下に生成される薄い層であり、そこでの密度の鉛直分布は非常に急峻なものとなるため、水面直下を常に高解像度に計算できる海洋モデルが必要となる。この要求に対して、代表的な海洋モデル POM³⁾では、 σ 座標系を用いているため、鉛直格子間隔が水深に連動して増減し、大水深の場所において河川プルームを適切に扱えない⁴⁾。

そこで本研究では、気象モデル、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⁵⁾を用いる。この結合モデルは、気象モデルによって面的・時間的に詳細な気象場を再現できるのみならず、気象場と海洋場のインターフェースとなる海面境界過程において働いている大気・海洋・波浪場の間の相互作用までを評価することが可能な数値モデルである。また、結合モデルに組み込まれて

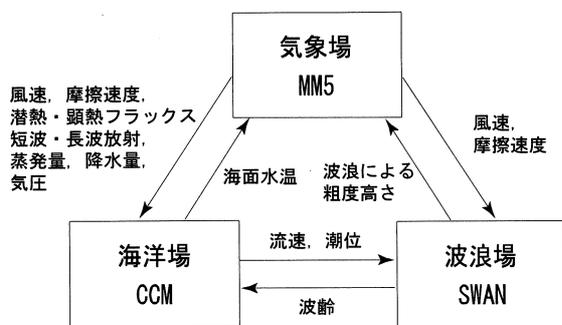


図-1 大気-海洋-波浪結合モデルの概要.

表-1 大気-海洋-波浪結合モデルの計算条件.

気象モデル MM5	計算領域	N33°.3'~36°.4', E136°.0'~140°.0'
	水平格子数	121×121
	水平解像度	3 km
	鉛直層数	24層
	タイムステップ	9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
	地表面過程	5-layer soil scheme
	初期値・境界値	気象庁メソ客観解析値
海洋モデル CCM	計算領域	N34°.1'~34.5', E137°.0'~138°.5'
	水平解像度	0.8 km
	水平格子数	176×102
	タイムステップ	6秒
	σ座標の適用領域数	6
波浪モデル SWAN	全層数	24層
	初期値・境界値	潮汐モデルNAO ¹⁰⁾ JCOPE2再解析データ ¹¹⁾
	計算領域	N34°.1'~34.5', E137°.0'~138°.5'
	水平解像度	0.8 km
結合モデル	水平格子数	176×102
	タイムステップ	120秒
結合モデル	交換時間間隔	10分

いる海洋モデルは、多重 σ 座標系海洋モデル CCM⁴⁾であり、このモデルで使用されている多重 σ 座標系は、海面直下の鉛直格子間隔が水深に依存しないため、河川プリュームを常に高解像度で取り扱うことができる。そして、結合モデルによって、冬季強風時、夏季弱風時および出水時の遠州灘の海水流動を再現する。次いで、精度検証を行い、結合モデルがこれらの期間の気象・海象現象を精度良く再現できることを示す。その後、この計算結果を基に冬季、夏季および出水時の細粒土砂の3次元粒子追跡解析を行い、それらの結果を比較・検討することで、気象および河川水が遠州灘の細粒土砂の移動特性に与える影響を明らかにする。

2. 計算方法

本研究では、気象モデル MM5⁶⁾、海洋モデル CCM⁴⁾および波浪モデル SWAN⁷⁾を結合させて大気、海洋、波浪場を1つの系として一体的に計算する大

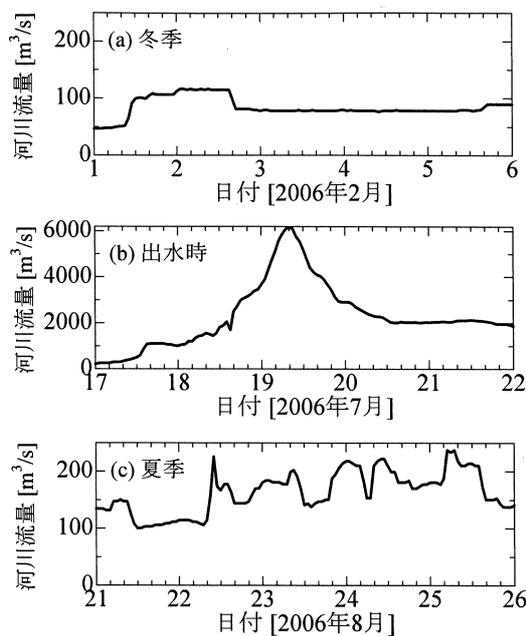


図-2 天竜川の河川流量.

気-海洋-波浪結合モデル⁵⁾を用いて、遠州灘の海水流動を再現する。図-1 に結合モデルの概要を示す。結合モデルでは、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、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、流速および潮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⁸⁾の海面境界条件式⁹⁾へ、それぞれ出力し、各モデルの精度向上を図っている。

計算期間は、冬季強風時であった2006年2月1日~6日、出水時であった2006年7月17日~22日および夏季弱風時であった2006年8月21日~26日とする。計算条件は、表-1 に示す通りである。また、天竜川の河川流量は、観測された毎時流量データ(図-2)を与える。

3. 精度検証

ここでは、観測値と前述の結合モデルによる計算値を比較し、モデルの精度を明らかにする。

図-3 は、浜松における風速の観測値と計算値の比較を示したものである。これより、計算値は、全ての計算期間において風速の大きさを精度良く再現していることが示され、結合モデルは冬季の強風のみならず夏季の弱風までを精度良く計算できるものと判断される。

図-4 は、浜松における風向の観測値と計算値の

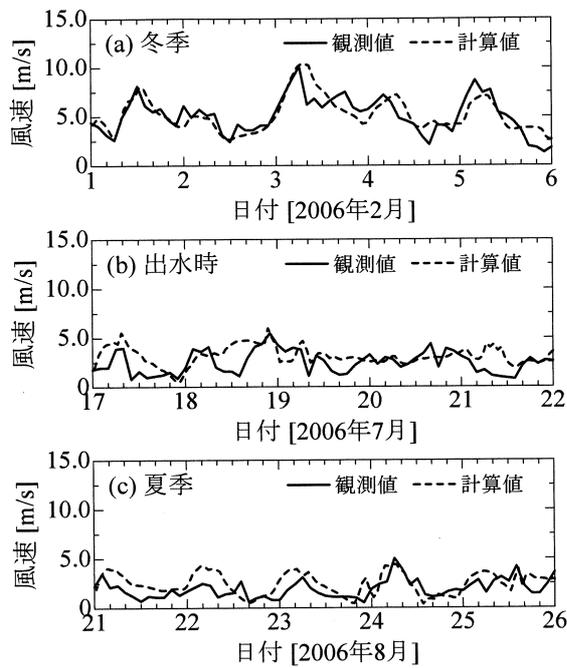


図-3 浜松における風速の観測値と計算値の比較.

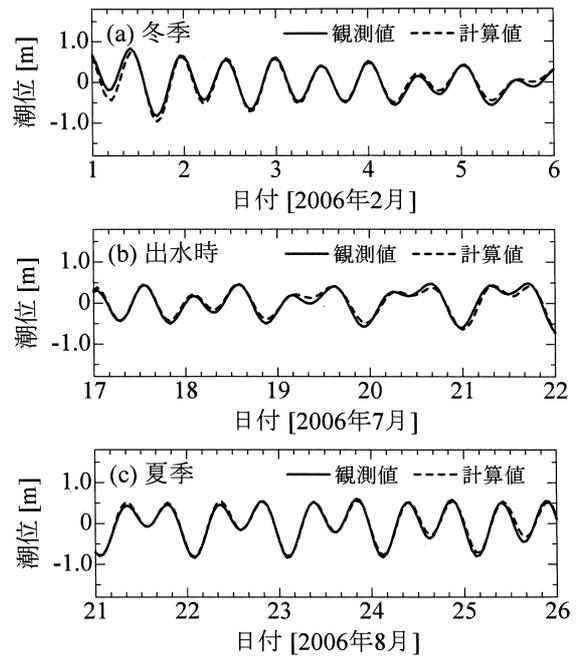


図-5 御前崎における潮位の観測値と計算値の比較.

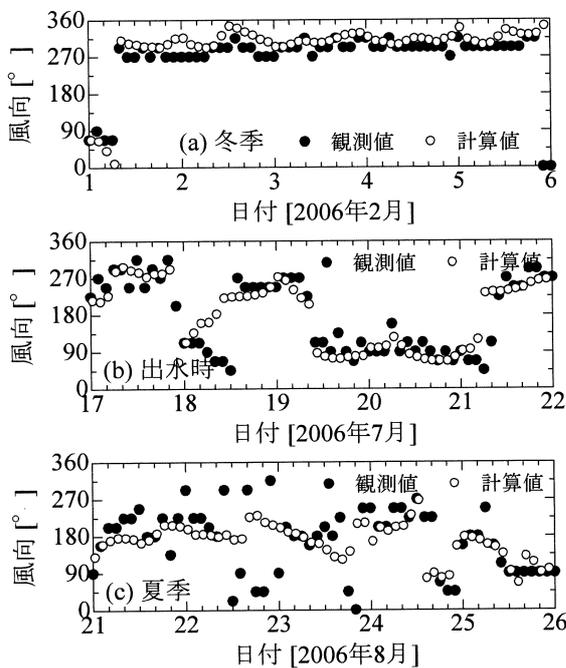


図-4 浜松における風向の観測値と計算値の比較；
0° は北風，90° は東風を示す。

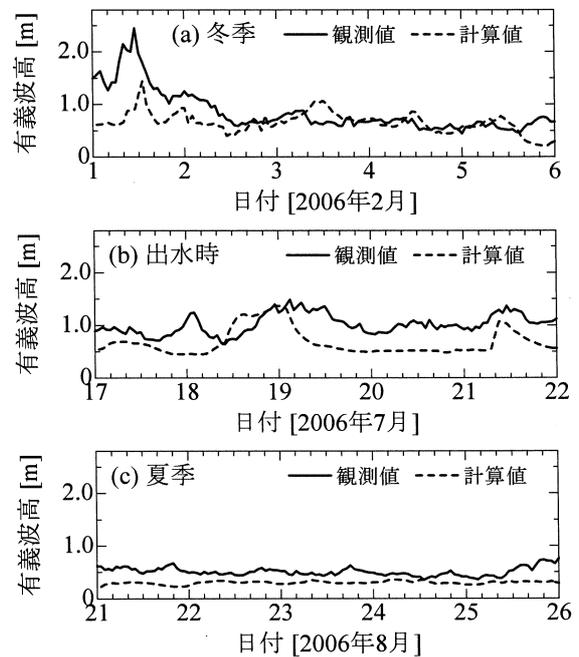


図-6 御前崎における有義波高の観測値と計算値の比較.

比較を示したものである。冬季の風向を示す図-4(a)では、計算値と観測値がほぼ一致しており、冬季遠州灘の特徴である北西風が正しく再現されていることがわかる。また、図-4(b), (c)に示す出水時および夏季の風向は、冬季のものに比べると精度が劣るものの、南寄りの風向などは概ね再現されている。そして、前述の図-3(b), (c)に示されたように出水時および夏季の風速は弱風であることを鑑みれば、この計算精度は数値解析を行う際に問題のないものと判断できる。

図-5 は、御前崎における潮位の観測値と計算値の比較を示したものである。これらの図より、全ての期間において計算値と観測値は、良く一致していることが示され、結合モデルは遠州灘の海水流動を正しく記述しているものと言える。

図-6 は、御前崎における有義波高の観測値 (NOWPHAS) と計算値の比較を示したものである。冬季 (図-6(a)) の計算値は、計算開始時から大きな数値誤差があり、2月1日12時頃の大きな有義波高も再現できていない。しかし、その後の有義波

高の大きさは、ほぼ再現されている。これらのことから、冬季波浪場の初期値作成に問題があるものと考えられ、今後、改善していく必要がある。また、出水時（図-6(b)）および夏季（図-6(c)）の計算値は、観測された有義波高に対してやや過小評価傾向である。

以上より、大気-海洋-波浪結合モデルは、冬季強風時、出水時および夏季弱風時の風速や潮位を精度良く計算できることが示された。また、本研究の計算期間中に流速や密度などの観測データが得られなかったため、これらの精度検証を実施することができなかった。しかしながら、筆者らは、伊勢湾において結合モデルが流速や密度などを精度良く再現できることを示しており⁵⁾、本研究の遠州灘でも同様の良い精度で流速や密度などを再現できるものと推察される。

4. 細粒土砂の粒子追跡解析

本章では、前述の計算結果に基づき、遠州灘の細粒土砂の移動特性について検討する。

(1) 解析方法

近年、細粒土砂の分布量や移動特性の解析に懸濁物質の移流拡散解析が用いられるようになってきた。この手法は、細粒土砂を懸濁物質濃度として取り扱い、これを移流拡散方程式に組み込み解析するものであり、定量的な細粒土砂の分布量の解析が可能であるのみならず波浪による巻き上げ効果や凝集効果^{12), 13)}なども考慮可能である。そして実際に石狩湾、伊勢湾、渤海などでこの手法を用いた解析が行われ、それぞれの地域での細粒土砂の分布量や移動特性が明らかにされてきた^{14), 15), 16)}。

しかしながら、本研究で対象とする天竜川起源の細粒土砂は、現在、観測が行われているものの¹⁷⁾、その懸濁物質濃度の冬季、夏季および出水時の流入量は、十分に明らかにされていない。そのため、細粒土砂の流入源となる天竜川からの懸濁物質濃度のフラックスを境界値として定めることができず、現時点では懸濁物質の移流拡散解析の実施は不可能である。そこで本研究では、定性的ではあるが細粒土砂の移動特性の解明を目的とし、物質の移動量を解析するのに最適な粒子追跡解析を用いることにした。

本研究で行う粒子追跡解析は、個々の土粒子をラグランジュ的に追跡するもので、①拡散効果は考えない、②海底面に到達した土粒子は限界シールス数を超えるとのみ掃流するといった条件を課している。また、水深の深い遠州灘において広域の細粒土砂の移動を取り扱うことから、土粒子は海水流動および自重による沈降（Rubeyの実験式より算出）のみによって移動するものとし、砕波帯内の波浪による巻き上げ効果は考慮しない。そして、天竜川河口から粒径 0.003 mm（粘土）および 0.03 mm（シルト）の土粒子をそれぞれ 30 分毎に放流し、追跡計

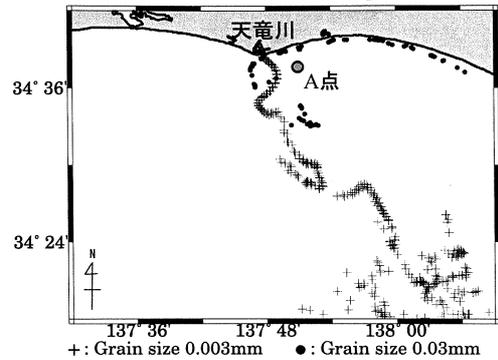


図-7 冬季の計算終了時（2月6日0時）における土粒子の空間分布。

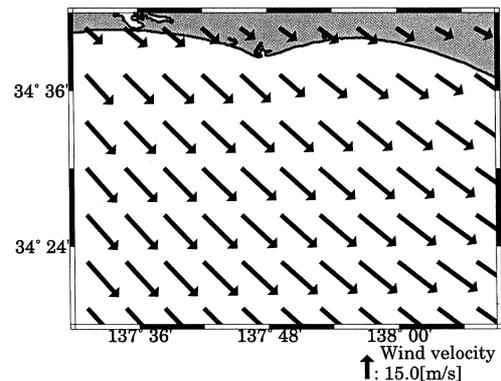


図-8 冬季の計算期間中における風速分布。

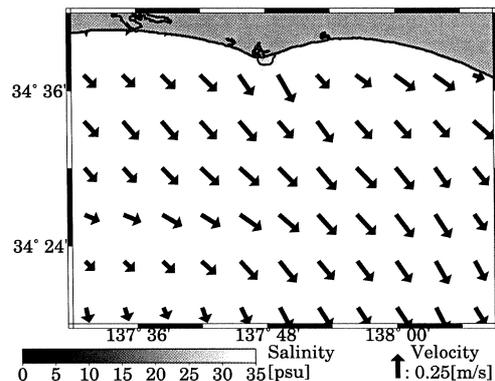


図-9 冬季の計算期間中における平均流速および平均塩分の海面分布。

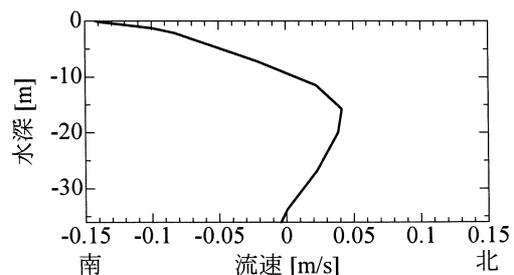


図-10 A点（前述の図-7参照）における冬季の計算期間中の平均流速の鉛直分布；正の値は北に向かう流れ、負の値は南に向かう流れを示す。

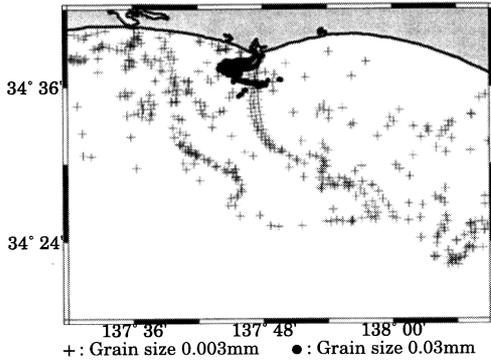


図-11 出水時の計算終了時（7月22日0時）における土粒子の空間分布。

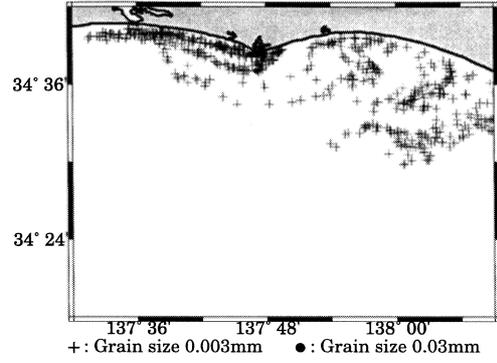


図-14 夏季の計算終了時（7月22日0時）における土粒子の空間分布。

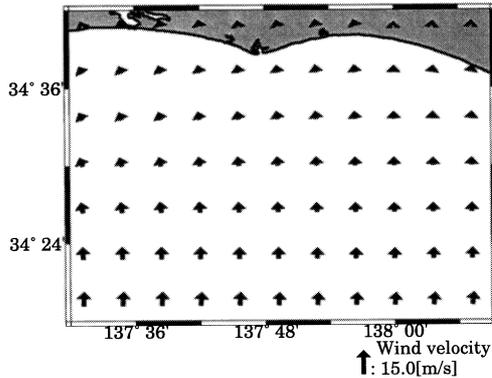


図-12 出水時の計算期間中における風速分布。

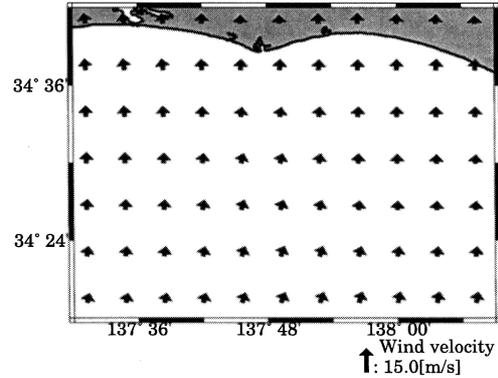


図-15 夏季の計算期間中における風速分布。

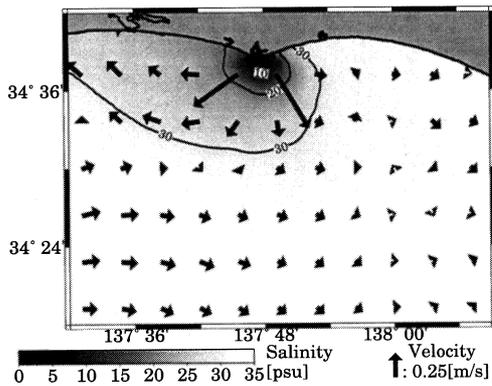


図-13 出水時の計算期間中における平均流速および平均塩分の海面分布。

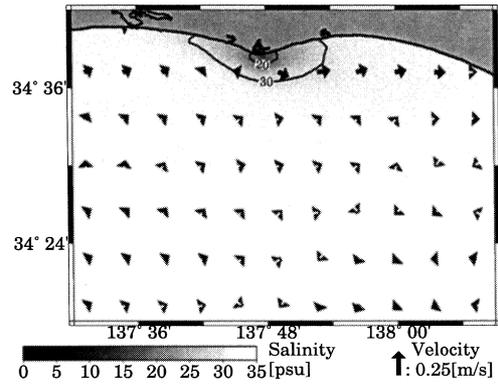


図-16 夏季の計算期間中における平均流速および平均塩分の海面分布。

算を行った。また、土粒子の密度はいずれも $2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ の一定値とした。

(2) 細粒土砂の移動特性

図-7は、冬季の計算終了時（2月6日0時）における土粒子の空間分布を示したものである。また、図-8に計算期間中の平均風速分布を、図-9に平均流速および平均塩分の海面分布を示した。図-7より、粒径0.003mmの土粒子は、南東方向に大きく移動していることがわかる。冬季遠州灘は、図-8示されるように強い北西風が吹いており、これに起因した吹送流（図-9）によって土粒子が南東方向へ大きく輸送されたものと考えられる。一方、粒径

0.03mmの土粒子は、天竜川沖および天竜川東側の岸付近に分布している。天竜川沖へ移動した粒径0.03mmの土粒子は、粒径0.003mmのものと同様に南東向きの吹送流によって輸送されたものと判断される。また、粒径0.03mmの土粒子は、粒径0.003mmのものに比べて沈降速度が大きく、中層から下層に分布し易い。その中層から下層では、図-10に示すように岸方向へ向かう北向きの流れが生じている。これは、前述の南東向きの吹送流を補償するための流れであり、これによって、一端は沖へ輸送された土粒子が岸方向へ戻され、その結果、天竜川東側の岸付近に粒径0.03mmの土粒子が分布したものと考えられる。これらのことから、冬季

遠州灘の細粒土砂は、その粒径によって移動方向が大きく異なることが明らかとなった。

図-11は、出水時の計算終了時（7月22日0時）における土粒子の空間分布を示したものである。また、図-12に計算期間中の平均風速分布を、図-13に平均流速および平均塩分の海面分布を示した。

図-11より、粒径0.003 mmの土粒子は、南北方向のみならず東西方向にも広く分布している様子が見て取れる。これと前述の図-7に示した冬季のものを比較すると、出水時の土粒子は、南東方向への移動量が小さくなっている一方で、冬季の土粒子に見られなかった天竜川より西方向への輸送が生じていることがわかる。南東方向への移動量が小さくなった原因は、図-12に示されるように風域場が弱風であり、細粒土砂を輸送する吹送流が発生しなかったためであると判断できる。一方、後者の天竜川より西方向への輸送は、図-13に示される天竜川沖西部に見られる西向きの流れによるものである。この計算期間は、天竜川からの河川流量が大きく増大しており（図-2参照）、それに伴った河川プリュームが発生している（図-13参照）。そして、河川プリュームは、コリオリ力の影響を受けて西方向へ流れるため、細粒土砂も西方向へ輸送されたものと考えられる。また、粒径0.03 mmの土粒子は、細粒土砂を輸送する吹送流が発生しなかったため、図-10に示したような岸向きの流れも発生せず、天竜川河口付近のみに分布している。

図-14は、夏季の計算終了時（8月26日0時）における土粒子の空間分布を示したものである。また、図-15に計算期間中の平均風速分布を、図-16に平均流速および平均塩分の海面分布を示した。これより、0.03 mmおよび0.003 mmの両粒径の土粒子は、前述の冬季や出水時のものに比べて移動範囲が狭く、ほとんどの土粒子が岸付近に分布していることがわかる。この計算期間は、図-15に示されるように風速も小さく、河川プリュームも発生しなかったため（図-16参照）、細粒土砂の輸送が岸付近に限られたものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、気象および河川水の影響を受ける遠州灘の細粒土砂の移動特性を解明するために、大気-海洋-波浪結合モデルを用いて再現計算を行った。そして、結合モデルの精度検証を行い、冬季強風時、出水時および夏季弱風時の風速や潮位を精度良く計算できることを明らかにした。その後、この計算結果に基づき、細粒土砂の3次元粒子追跡解析を行い、気象および河川水が遠州灘の細粒土砂の移動に大きな影響を与え、冬季、出水時および夏季によって異なる移動特性を持つことを示した。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費・重要課題解決型研究「先端技術を用いた動的土砂管

理と沿岸防災」（研究代表者：豊橋技術科学大学・青木伸一）の一環として実施したものである。ここに記して関係諸氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 宇多高明, 長島郁夫, 古池 鋼, 宮原志帆, 石川仁憲: 天竜川ダム再編事業による流出土砂量の増加が海岸に及ぼす影響, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.656-660, 2008.
- 2) 山口正隆, 渡辺 健, 畑田佳男: 大阪湾における海上風の平面分布特性について, 海岸工学論文集, 第28巻, pp.168-172, 1981.
- 3) Mellor, G. L.: Users Guide for A Three-Dimensional, Primitive Equation, Numerical Ocean Model, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom/FTPbackup/usersguide0604.pdf>
- 4) 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.
- 5) 村上智一, 川崎浩司, 山口将人, 水谷法美: 気象場に支配される伊勢湾を対象とした大気-海洋-波浪結合モデルの精度検証, 海洋開発論文集, 第22巻, pp.103-108, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Mellor, G. L. and Yamada, T.: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Rev. Geophys. Space Phys.*, Vol.20, No.4, pp.851-875, 1982.
- 9) Mellor, G. L. and Blumberg, A. F.: Wave breaking and ocean surface layer thermal response, *J. Phys. Oceanogr.*, Vol. 34, pp. 693-698, 2004.
- 10) Matsumoto, K., Takanezawa, T. and Ooe, M.: Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional around Japan, *J. Oceanography*, Vol. 56, pp.567-581, 2000.
- 11) 宮澤泰正, 小松幸生, 瀬藤 聡: 数値海況予測システム JCOPE2による黒潮・親潮混合域の再現性, 海と空, 第84巻, pp.85-91, 2008.
- 12) Riandini, F., 山下隆男, 高山知司: 底泥の輸送・凝集・圧密モデルのマハカムエスチャリーへの適用, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.476-480, 2006.
- 13) 山崎真一, 森田真郷, 山下俊彦: 河川水中の懸濁粒子の海水混合による凝集・沈降特性, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 961-965, 2003.
- 14) 奥西 武, 鈴村晃浩, 金子彰雄, 中間大輔, 山崎真一, 山下俊彦: 石狩湾沿岸域における細粒土砂の移動特性について, 海洋開発論文集, 第21巻, pp.641-645, 2005.
- 15) 喜岡 渉, 堀 孝博, 堀部扶実, 北野利一: 伊勢湾・三河湾における降雨後の物質輸送について, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.1036-1040, 2008.
- 16) 中辻啓二, 志水克成, 山中亮一: 中国・黄河から渤海に流入する高濁度水塊の挙動特性に及ぼす潮流及び風応力の影響, 海岸工学論文集, 第53巻, pp.376-380, 2006.
- 17) Syamsidik, 青木伸一, 加藤 茂: 河口沖合での潮流と浮遊砂フラックスの特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.601-605, 2007.