

準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルの開発に基づく港口部での 底質浮遊と輸送に関する解析

田 村 仁*・灘 岡 和 夫**

1. はじめに

沿岸域や河川, 湖沼といった浅水流場においては, 浮遊砂輸送状態がその場の局所的な水理量だけでは決まらない, いわゆる非平衡状態となっていることが多い。その場合は, 浮遊砂濃度分布に関して平衡状態のような単純な指数分布を仮定できず, そのため一般的には浅水場といえども浮遊砂の移流拡散方程式の三次元計算が必要となる。しかしこのことは当然ながら高い計算負荷をもたらすこととなるため, いくつかの準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルが提案されてきている (例えば灘岡ら (1988), Nadaoka et. al (1991), 黒木ら (1988))。

一方, 著者らはこれまでに, 浅水流場での水平大規模渦の時間発展を, その三次元性も考慮した形で, 比較的低計算負荷で直接追跡可能な準三次元浅水乱流モデル“SDS-Q3D モデル”を開発してきている。

本研究では, この SDS-Q3D モデルと容易にカプリングが可能で, かつ, 低計算負荷で合理的に非平衡輸送過程を表現できる浮遊砂輸送モデルを新たに開発し, その基本性能の検証を行った。また, それを SDS-Q3D モデルとカプリングさせた準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルを開発し, 港口部での水平大規模渦による底質浮遊・水平輸送過程の解析を試みた。

2. 準三次元浅水乱流モデルの概要

本数値解析で用いる準三次元浅水乱流モデル SDS-Q3D は SDS-2DH モデルを基に導出を行っている (灘岡ら, 2000)。SDS-2DH 浅水乱流モデルでは乱れの分離スケールに関して, 通常の LES で用いられる計算格子幅ではなく, 浅水乱流場の物理構造上のキーとなる水深を用いることで水深スケール以下 (SDS 乱れ) とそれ以上の水平大規模渦スケールの現象を分離する。水深スケール以下の乱れについては, その生成項も含めてモデル化し, 渦動粘性係数を評価することで, 大規模複雑乱流場での水平大規模渦の直接数値計算が効率よく行える水深平均

平面二次元モデルとなっている (灘岡・八木, 1993; Nadaoka & Yagi, 1998)。本準三次元乱流モデルも SDS-2DH モデルと同様の考えに基づいた乱流モデルであるが, SDS-2DH モデルが運動量方程式に対して水深平均流速を仮定して水深積分するのに対し, SDS-Q3D モデルでは水平方向流速の鉛直分布関数を仮定し, これを用いて流速を多成分連成表示 (灘岡・中川, 1993) させ, 重み付き残差法の一つである Galerkin 法を用いて水深積分することで運動量方程式の準三次元化を行っている。

3. 準三次元浮遊砂輸送モデルの開発と基本性能の検証

(1) 準三次元浮遊砂輸送モデルの開発

浮遊砂輸送方程式に関しても灘岡らの多成分連成法の考え方を適用し, 互いに独立な数個の鉛直依存性関数の和で任意の非平衡浮遊砂濃度分布を表現することを試みた。基礎方程式は浮遊砂濃度 $c(x, y, z, t)$ の 3 次元移流拡散方程式であり, 次式で表される。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} - w_s \frac{\partial c}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに, t : 時間, x, y : 水平方向座標, z : 鉛直方向座標, u, v : 水平方向流速, w : 鉛直方向流速, A_i : i 方向の浮遊砂拡散係数, w_s : 砂粒の沈降速度。境界条件としては次の自由表面と底面における境界条件を用いる。水面における浮遊砂の境界条件は, ゼロ・フラックス条件, すなわち

$$A_z \frac{\partial c}{\partial z} + w_s c = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。底面での境界条件は, 底面での上向き拡散フラックスを浮遊砂の底面からの pick-up rate, P_k として規定する形

$$-A_z \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z=-h} = P_k \quad \dots\dots\dots (3)$$

で与える。

浮遊砂輸送方程式の準三次元化は, まず, 浮遊砂の鉛

* 学生会員 修(工) 東京工業大学大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻 博士課程
** フェロー 工 博 東京工業大学教授 大学院情報理工学研究所 情報環境学専攻

直分布関数 $H_m(z)$ を用いて浮遊砂濃度 $c(x, y, z, t)$ の近似解 $c^M(x, y, z, t)$ を以下のように表す。

$$c^M(x, y, z, t) = \sum_{m=1}^M H_m(z) \cdot C_m(x, y, t) \cdots \cdots (4)$$

ここで $C_m(x, y, t) (m=1, \cdots, M)$ は各鉛直分布関数 $H_m(z)$ の重みであり、Galerkin 法を用いて水深積分することで M 個の未知変数 $C_m(x, y, t)$ に対して、以下の M 個の方程式系が得られる（ただし、境界条件（2），（3），および、底面に関して緩勾配仮定を用いている）。

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1}^M \int_{-h}^0 H_i H_m dz \cdot \frac{\partial C_m}{\partial t} \\ & + \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \left[\int_{-h}^0 H_i F_n H_m dz \cdot (U_n \cdot \nabla C_m) \right. \\ & \quad \left. - \int_{-h}^0 H_i G_n \frac{\partial H_m}{\partial z} dz \cdot (\text{div} U_n \cdot C_m) \right] \\ & = H_{ib} \cdot Er - H_{ib} \cdot De \\ & + \sum_{m=1}^M \int_{-h}^0 H_i H_m dz \\ & \quad \cdot \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(A_x \frac{\partial C_m}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A_y \frac{\partial C_m}{\partial y} \right) \right] \\ & - w_s \cdot \sum_{m=1}^M \int_{-h}^0 \frac{\partial H_i}{\partial z} H_m dz \cdot C_m \\ & - A_z \sum_{m=1}^M \int_{-h}^0 \frac{\partial H_i}{\partial z} \frac{\partial H_m}{\partial z} dz \cdot C_m \\ & \quad (i=1, \cdots, M) \cdots \cdots (5) \end{aligned}$$

$$Er = P_k, \quad De = w_s c|_{-h}$$

ここで、 h ：水深、 $F_n(z)$ ：水平方向流速の鉛直分布関数、 $H_{ib} : z = -h$ での H_i 、 $G_m(z) = \int_{-h}^z F_m dz$ である。

浮遊砂濃度の鉛直分布関数としては、少ない鉛直分布関数の和で非平衡状態を合理的に表せること、最も簡単な平衡状態の鉛直分布を単一の関数で表せること、等を考慮して次式で表される指数関数系を用いることとした。

$$H_m(z) = \exp \left(-a_m \cdot r \cdot \left(1 + \frac{z}{h} \right) \right) \cdots \cdots (6)$$

ここに $r = w_s h / A_z$ 、また a_m は任意のパラメータで、後で示すように異なった a_m の指数関数 $H_m(z)$ の組み合わせで非平衡浮遊砂分布の特徴である非指数関数形状を表現することができる。

なお、このモデルは差分法による三次元モデルに比べて、1) 低計算負荷であること、2) 鉛直方向に対して数値粘性による解の劣化がないこと、3) 非一様水深場への適用が簡単である、といった特徴を有している。

(2) 鉛直一次元拡散沈降問題における本モデルの基本性能の検討

本物質輸送モデルの基本性能を調べるため、簡単な鉛直一次元場における浮遊砂の非平衡拡散問題について検証を行った。比較に用いた実験結果は Dobbins (1944) による実験結果 run IV, run V である。これはある平衡状

態から pick-up 量を急激に減らし (run IV：pick-up 量を 0, run V：初期 pick-up 量の 30%)、次の平衡状態に至る減衰過程を計測した実験結果である。

数値計算で設定した鉛直分布関数は run IV, run V ともに 3 成分で a_m をそれぞれ 0.1, 1, 5 に設定した (図-1)。また、パラメータ r に関係する w_s , h , A_z は Dobbins (1944) による実験値を用いている。

図-2 はそれぞれ (a) run IV, (b) run V での実験値 (丸印) と計算値 (実線) を比較したものである。平衡状態から時間の進行とともに鉛直浮遊砂濃度は減衰するが、実験値と比較して精度良く表せていることがわかる。さらに実験 run IV においては、pick-up 量が 0 なので底面での浮遊砂濃度勾配も 0 となることになるが、図-2 (a) に示された本モデルによる計算結果においても、このような非平衡過程の重要な特徴が良く表現できていることが確認できる。

上記の計算では a_m を 0.1, 1, 5 に設定しているが、この a_m の設定の違いが計算結果に与える影響を見えるために、run IV に対してパラメータ a_m の値を 1, 3, 10 (図-3 (a)) として計算を行ってみた。その結果が図-3 (b) であるが、上記の結果 (図-2 (a)) とほとんど計算結果が変わっていないことがわかる。このことは本モデルが a_m の設定に対する依存性があまりないことを示している。

4. 港口部における三次元大規模渦と底質浮遊・輸送に関する数値シミュレーション

海岸工学的見地から流動場の三次元性と浮遊砂輸送の非平衡過程が非常に重要となる問題として、中小港湾埋没の問題がある。これは、防波堤先端部において発生した渦により連行された底質が、渦に伴う上昇流により上方まで持ち上げられて高濃度の浮遊砂領域が形成され、それがさらに水平方向に移流されることで、港内に多量の浮遊砂が運び込まれるという問題である (松本ら

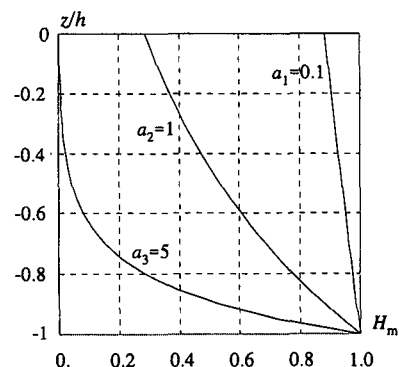


図-1 浮遊砂濃度の鉛直分布関数

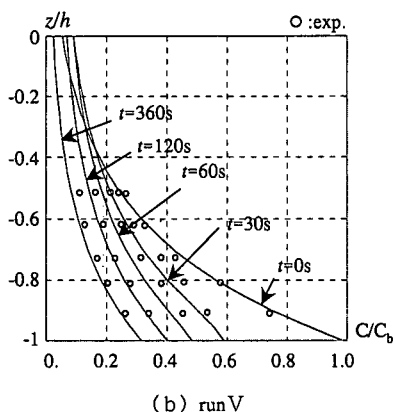
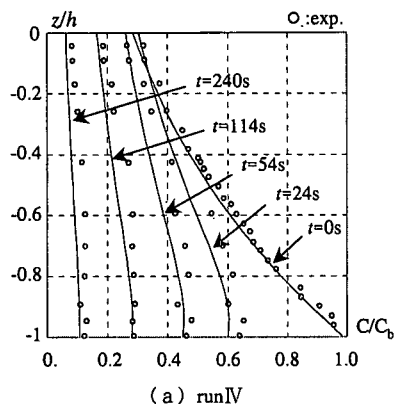


図-2 本モデルと実験値との比較

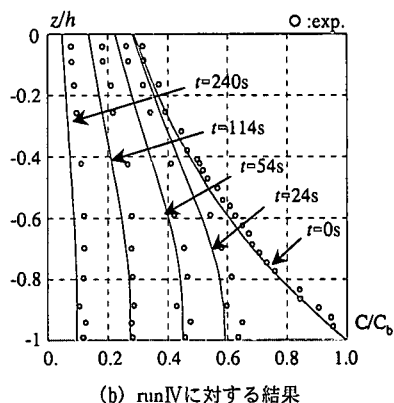
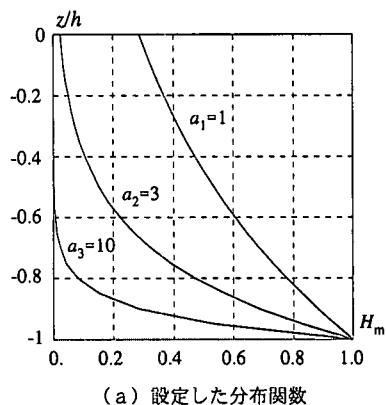


図-3 浮遊砂濃度分布の検討

(1993), 中山ら (1994)). そこで前報 (灘岡ら (2000)) に引き続きこのような中小港湾の港口部を想定し, SDS-Q3D モデルに本非平衡浮遊砂モデルをカップリングさせたモデルを用いて, 水平大規模渦生成とそれに伴う底質の浮遊・輸送に関する数値シミュレーションを行った。

(1) 数値計算概要

計算領域は図-4 に示すように $x=100$ m に港口部を設定し, 水深 5 m とした。境界条件は沖側境界 ($x=0$ m) での水位変動を周期 100 s, 振幅 10 cm とし与え, それ以外の境界では slip 壁条件として与えている。計算格子幅は x, y 方向にそれぞれ 2 m と 1 m とし, 計算時間刻み幅は 0.05 s とした。流動計算には, 鉛直分布関数として Legendre 多項式を用いており, 成分数は 2 としている。また, 浮遊砂計算においては 3 成分とし, 3.(2) と同様の分布関数系 ($a_m: 0.1, 1, 5$) を用いている (図-1)。

本数値計算モデルでは流動計算と浮遊砂輸送計算を同時に行っているが, 今回は浮遊砂による SDS 乱れエネルギーの生成や浮遊砂輸送に伴う地形変化の流動場への影響を考慮したモデルとはなっていない。

浮遊砂輸送計算に関して, 底質粒子は平均粒径: 0.29

mm, 密度: 2.65 とし, 沈降速度 w_s は Rubey の式を用いて 3.89 cm/s とした。また, 浮遊砂拡散係数は渦動粘性係数を用いて評価している。浮遊砂のピックアップモデルに関しては, これまで多くのモデルが提案されてきているが, 一般性のあるモデルがまだ存在しないことから, ここでは池田ら (1992) を参照して与えた。計算初期条件は静水状態で浮遊砂量 0 としている。

(2) 浮遊砂濃度に対する三次元流動構造の影響

図-5 は流動計算を (a) 平面二次元モデルとして行った場合 (成分数 1) と (b) 準三次元モデルとして行った

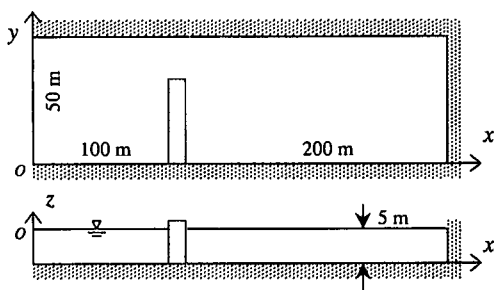
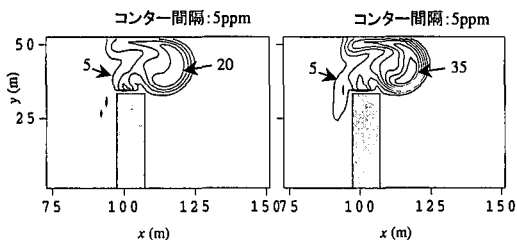


図-4 数値計算領域



(a) 平面二次元モデル計算 (b) 準三次元モデル計算

図-5 浮遊砂濃度の比較 ($z = -2.5$ m)

場合(成分数2)の $t = 175$ sにおける中層($z = -2.5$ m)での浮遊砂濃度の平面分布を示したものである(このときの流速分布は図-6に示されている)。これから、港口部周辺でともに浮遊砂雲が発達しているものの、水平大規模渦の三次元構造が考慮されていない(a)では水平大規模渦に伴う上昇流による上向き浮遊砂フラックスが表現されていないため(b)よりも浮遊砂濃度がかなり低くなっており、このような浮遊砂計算における流動場の三次元性の合理的な評価の重要性が理解できる。

(3) 港口部における大規模渦の発生と浮遊砂輸送

図-6は計算開始175 sから500 sまでの各瞬間における水深平均水平流速を表している。 $t = 175$ sでは港内に向かう流れにより、港口部付近で直径が約25 m程度の大規模渦が発生している。これが $t = 200$ sで港湾外へ向けて進行し始めるが、港湾内へ向かう逆方向の流れによって押し戻される結果となり($t = 250$ s)、その後、港口部付近に3つの大規模渦が生成されていることがわかる($t = 275$ s)。その内、1つの時計回りの大規模渦はその規模は小さくなりつつも自走を続け、港内に輸送されるといった計算結果となっている($t = 325$ s, $t = 500$ s)。

図-7は底面での pick-up 量 P_k と沈降フラックスの差を、計算開始から $t = 300$ sまでと $t = 500$ sまで時間積分した値を表している(破線部が侵食領域、実線が堆積領域)。これにより、港口部頂部で巻き上げられた浮遊砂が港口部周辺および港内の比較的流速が遅くなっている領域で堆積している状況が示されており、これから本計算対象が浮遊砂の非平衡輸送が非常に重要となっている場となっていることが理解できる。

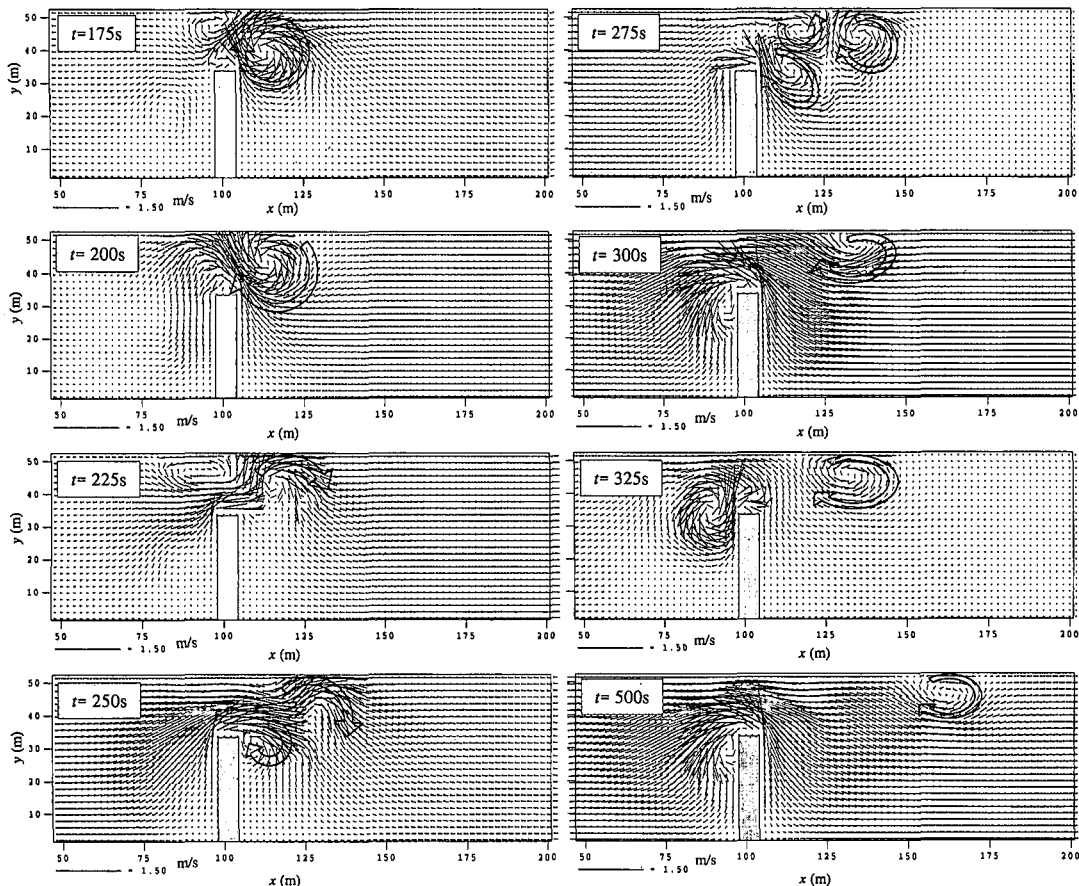


図-6 水深平均水平流速の時系列

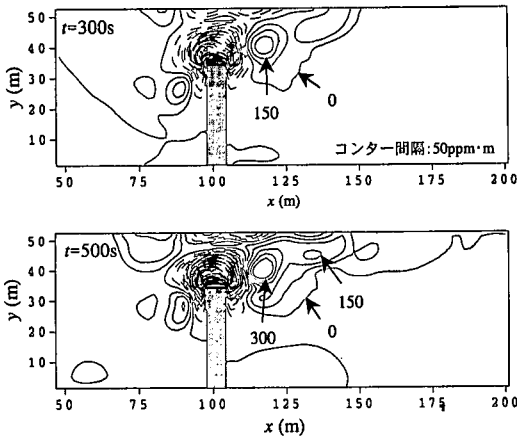


図-7 浮遊砂堆積量

また、図-8は $t=300$ sにおける中層 ($z=-2.5$ m) での浮遊砂濃度分布を表したものである。これから港口部で生成され、港内に向かう大規模渦中には多量の浮遊砂が含まれていることがわかる。その大規模渦が港内に自走するにつれ次第にその規模が小さくなり、その結果として、図-7の $t=300$ sと $t=500$ sを比較するとわかるように、大規模渦の通過に伴ってその周辺に浮遊砂が堆積されていく結果となっている。

5. おわりに

本研究ではSDS-Q3Dモデルと容易にカップリングが可能で、かつ、低計算負荷で非平衡輸送過程を表現できる浮遊砂輸送モデルを開発し、その基本性能の検証を行った。さらにSDS-Q3Dモデルとカップリングさせた準三次元非平衡浮遊砂輸送モデルを開発し、港口部での水平大規模渦による底質浮遊・水平輸送過程の解析を試みた。その結果として、鉛直一次元拡散沈降過程における実験結果との比較により、本モデルによって浮遊砂の非平衡輸送過程を精度良く表せることが示された。また、港口部における大規模渦の発生とその輸送に伴う浮遊砂輸送過程を追跡できることが確認できた。今後、本モデルを現地の中小港湾に適用することで、浮遊砂輸送量に関する定量的な評価を行っていく予定である。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B) (1)

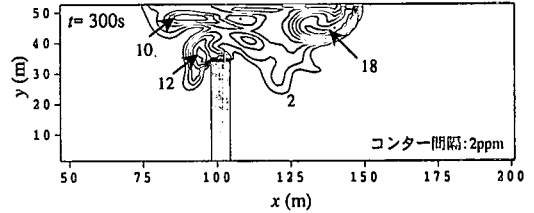


図-8 中層における浮遊砂濃度分布

(研究代表者：灘岡，課題番号：12450198)，同基盤研究(B) (2) (研究代表者：灘岡，課題番号：12555147)，平和中島財団国際学術共同研究助成金(研究代表者：灘岡)を得て行ったものであることを付記する。

参考文献

- 池田駿介・太田賢一・長谷川洋 (1992): 側岸部植生帯が流れ及び粒子懸物質の輸送に及ぼす影響, 土木学会論文集, No. 447, pp. 25-34.
- 黒木幹男・史 亜傑・岸 力 (1988): 非平衡浮遊砂理論とその応用, 第32回水理講演会論文集, pp. 407-412.
- 中山哲蔵・山本 潤・松岡道夫・池田正徳・竹内聖一・灘岡和夫・八木 宏 (1994): 中小港湾港口部に発生する水平大規模渦についての現地観測, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 321-325.
- 灘岡和夫・蒲田浩久・八木 宏 (1988): 非平衡性および三次元性を考慮した簡易浮遊砂計算法の提案, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 322-326.
- 灘岡和夫・田村 仁・八木 宏・二瓶泰雄 (2000): 準三次元浅水乱流モデルの開発に基づく三次元大規模渦構造の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 466-470.
- 灘岡和夫・中川康之 (1993): 不規則波動シミュレーションのための強分散性波動方程式の導出とその基本特性の検討, 土木学会論文集, No. 467, II-23, pp. 83-92.
- 灘岡和夫・八木 宏 (1993): 浅い水域の乱流場に関する数値計算モデルの開発と沿岸流場への適用, 土木学会論文集, No. 473, II-24, pp. 25-34.
- 松本 朗・松岡道男・中山哲蔵・山本 潤・灘岡和夫・八木 宏 (1993): 中小港湾埋没機構解明に向けての長期連続現地観測の試み, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 491-495.
- Dobbins, W. E. (1944): Effect of turbulence on sediment, Trans. ASCE, 109: pp. 629-656.
- Nadaoka, K. and Yagi, H. (1998): Shallow water turbulence modeling and horizontal large-eddy computation of river flow, J. of Hydraulics Eng., pp. 493-500.
- Nadaoka, K., Yagi, H. and Kamata, H. (1991): A simple quasi-3-D model of suspended sediment transport in a nonequilibrium state, Coastal Eng., pp. 459-474.