

Macroscopic 乱流モデルを用いた透過性構造物内外の底質移動に関する研究

辻本剛三* ・ 柿木哲哉** ・ 浜浦雄大***
重松孝昌**** ・ 日下部重幸*****

透過性構造物内外の底質の移動に関して、室内実験と数値計算で検討した。多孔質内の熱伝導に関して適用例が多い Macroscopic 乱流モデルを適用し、透過層外は 2 方程式モデル、透過層内はゼロ方程式モデルを用いた。構造物上の水面変動は良好に再現できた。砂澱の峰に形成される渦と透過層の法面の影響により、底質が岸側に輸送されることが画像計測でわかった。透過層内に堆積した底質量は増減を繰り返しながら減少している。計算による堆積量は急激に減少しており、透過層内への 2 方程式モデルの検討が必要である。

1. はじめに

石積堤に代表されるような多孔質構造物を活用して、礫間接触酸化法による閉鎖性海域の水質改善策が検討されている。小田ら (1992) は室内水槽実験により礫間生物膜の基本的な浄化特性を明らかにし、また、担体接触部を有する透過性礫堤体の浄化特性を室内実験とフィックの拡散方程式で検討している事例もある。また、赤井ら (1990) は礫や捨石で築堤した透過性構造物と潮位差による往復流で海域の直接浄化を検討している。これらにおいて多孔質体の流動機構の把握が極めて重要であるが、層流・乱流の判別を目的とした計測はあるが、その事例は極めて少ない。そのような背景から重松ら (2004) は屈折率整合法を活用し、一方向流れ中に置かれた多孔質体内部の流れ場や乱流諸量の画像計測を行い、乱れエネルギーの生成・減衰はレイノルズ数に依存しないことを示した。

また、浚渫された土砂の処分方法として、透過性構造物を併用し元の海域に土砂を戻す「海域還元」の考え方が重要視されている。これは従来の陸揚げ処分では、処分地の確保が将来困難となり、また海底砂の減少が海岸侵食を促進させることもあるからである。さらに、港内に堆積する底質の起源が透過性構造物を透過した底質が原因となる場合があり、そのための対策等の検討が熊谷ら (2004)、榊山ら (2004) によってなされ、透過層内における底質等の移動現象の重要性を指摘している。

本研究ではこのような観点から、透過性構造物内外の流れ場や浮遊砂濃度の挙動特性を把握する事を目的とする。具体的には砂礫で作成した透過性潜堤（以下、構造物）上の水面変化、構造物周辺の浮遊砂濃度の画像計測とその内部への底質の移動量を実験的に計測する。また、

構造物内部の流れ等の解析に Macroscopic モデルを適用してその数値計算手法の妥当性を行い、計測が困難である透過性層内の流動や底質移動に関しても数値計算の結果よりその特性を明らかにする。

2. 透過性構造物に関連する既往の研究

透過性構造物による波の変形に関しては、近藤ら (1983) は長波理論に基づき、透過層内の抵抗を Darcy 則あるいは Dupuit-Forchheimer 型を線形化した抵抗則を用いた理論的扱いで検討を行っており、出口ら (1988) は非線形ダルシー則を適用して透過性潜堤上の波浪変形や層内の流体運動特性を調べている。泉宮ら (1989) は緩勾配方程式を透過性構造物が設置された場に拡張した理論で波動場の解析を行い、潜堤上の波高変化、反射率等の予測を行っている。榊山ら (1990) は波と透過性構造物の非線形効果を考慮するために Navier-Stokes 方程式に構造物の空隙率や流体抵抗を考慮したポーラスモデルで透過性構造物上の波の変形やその内部の流れ場を計算している。また、道奥ら (2005) は捨石堰の知見を生かして、透過性水制が設置された河川流の流れ場を二層流モデルで検討している。

一方、透過性構造物が設置された場での底質移動に関しては、榊山ら (2004) がポーラスモデルに移流拡散方程式を適用し、構造物前後における浮遊砂濃度の比較を行いモデルの妥当性を検討している。熊谷ら (2004) も数値波動水路 (CADMAS-SURF) を用いて地形変化の解析を行っているが透過性層内外での底質移動に関する研究は極めて少ない。

3. Macroscopic モデル

透過性構造物内の流動を数値的に検討するには、榊山らのようなポーラスモデルや著者ら (2000) が没水平板の水理特性の解明で行ったように構造物の形状を局所的に取り込む (Microscopic モデル) 方法があるが、透過性層内の空隙部の空間分布を計算格子に取り入れることは極めて困難である。Macroscopic モデルは触媒反応装

* フェロー 工博 神戸市立工業高等専門学校 教授

** 正 会 員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校 講師

*** 神戸市立工業高等専門学校専攻科

**** 正 会 員 博(工) 大阪市立大学大学院 助教授

***** 正 会 員 博(工) 神戸市立工業高等専門学校 教授

置や断熱層の多孔質内の運動量、物質、熱などの輸送現象解明に適用されることが多い。空間平均された諸量で時間平均された連続式、運動量方程式は (Getachew2000) によれば以下になる。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i + \overline{u'_j u'_i})}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \phi \frac{\nu}{K} u_i \\ & - \phi^2 \frac{C_F}{\sqrt{K}} [(u_j + u'_j)(u_i + u'_i)]^{1/2} (u_i + u'_i) \\ & + \nu f \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2) \end{aligned}$$

ここで、 u ：時間平均流速、 u' ：変動速度成分、 x ：空間座標、 ρ ：密度、 p ：圧力、 ϕ ：空隙率、 ν ：動粘性係数、 K ：長さの2乗の次元を有する透水係数、 C_F ：Forchheimer 係数、 f ：粘性係数比、 i, j ：1, 2である。

(2) 式の右辺第3項で $u_j u_i \gg u'_j u'_i$ と仮定し、 $u_j u_i \gg u'_j u'_i$ の高次の項を無視すると (3) 式となる。

$$\begin{aligned} & [(u_j + u'_j)(u_i + u'_i)]^{1/2} (u_i + u'_i) \approx \\ & (u_j u_i)^{1/2} u_i + \frac{u_j}{(u_j u_i)^{1/2}} \overline{u'_j u'_i} \quad (3) \end{aligned}$$

よって、(2) 式の運動量方程式は以下になる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_j u_i)}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu f \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \overline{u'_j u'_i} \right] \\ & - \phi \frac{\nu}{K} u_i - \phi^2 \frac{C_F}{\sqrt{K}} \left[(u_j u_i)^{1/2} u_i + \frac{u_j}{(u_j u_i)^{1/2}} \overline{u'_j u'_i} \right] \quad (4) \end{aligned}$$

ここで、右辺第2項が Brinkman 項、第3項が Darcy 項、第4項が Forchheimer 項である。Masuoka ら (1996)、Abtohe ら (1997)、Nakayama ら (1999) は Forchheimer 項の第2項を考慮せずに扱っている。

4. 実験

(1) 実験装置

実験は神戸市立工業高等専門学校の2次元造波水槽 (長さ18 m、高さ0.8 m、幅0.6 m) に透過性構造物 (天端幅1.7 m、高さ0.1 m、法面勾配1:2) を中央粒径 (0.7 cm, 2.0 cm) の2種類の砂礫を用いて作成した。図-1 にその粒径加積曲線を示す。粒径 d_{85} と d_{15} の比 (d_{85}/d_{15}) < 1.5 であれば単一粒径とみなしてよいが、やや不均質な砂礫であった。

(2) 実験方法

構造物上に波を作用させ水面形状はデジタルビデオカメラで撮影し、画像から直接水位を読み取った。構造物沖側前面に中央粒径0.028 cm の砂で厚み2 cm、5 cm、長さ1.5 m の移動床を作成した。構造物の斜面近傍の浮遊砂濃度を画像計測により測定した。画像計測は PTV

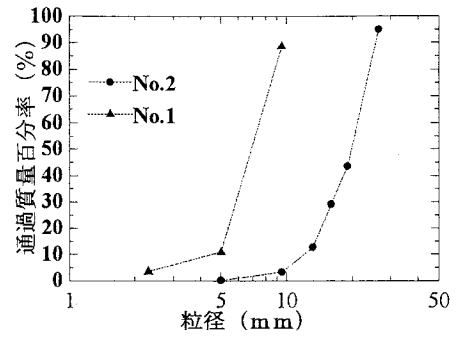


図-1 底質の粒径加積曲線

計測 (ダブルパルス Nd:YAG レーザー、制御用コンピュータ、CCD カメラ) を用いた。Nd:YAG レーザーの波長は532 nm、パルス幅は5~7 ns、出力は1パルス当たり25 mJ である。CCD カメラは、解像度1008(H)×1018(V) ピクセルであり、1/15秒間隔で撮影し、柿木・辻本 (2004, 2005) が用いた手法により画像中の砂粒子を抽出し、浮遊砂濃度場を推定した。構造物内を移動・堆積する底質量を算定は、構造物内部の底質を除去した状態で構造物を設置して約1時間程度波を作用させた後、沖側から幅20 cm、3 cm 間隔毎に構造物をスライスして砂礫と砂を回収し、炉乾燥後両者を分けて質量を計測した。なお、移動床には波長6~7 cm、波高2~2.5 cm の砂漣が形成されていた。

式 (4) おける C_F 及び K は透水試験より決定した。内径7.5 cm、長さ70 cm の塩化ビニル管に前述の砂礫を入れ、一定流量を通水し2点間の損失水頭を計測した。透水層内の空隙が大きい場合は式 (5) の Forchheimer により提唱された非線形 Darcy 則が適用される。

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = u(\nu/K + C_F/\sqrt{K}|u|) \quad (5)$$

ここで、 u^* ：浸透流速ベクトル、 $u = \phi u^*$ で定義される断面平均流速である。損失水頭と流速の回帰直線から C_F と K を決定し、表-1 にその結果を示す。

表-1 砂礫の諸量

	粒径 cm	空隙率	C_F	$K \text{ cm}^2$
No.1	0.7	0.384	0.875	0.000978
No.2	2.1	0.401	0.143	0.000602

5. 計算方法

(1) 渦動粘性係数の扱い

前述の式 (1), (4) をクローズするため、レイノルズ応力を勾配拡散型で表示し、2方程式系の標準的な $k-\epsilon$ 乱流モデルを適用した。透過性構造物内では空隙のスケールと底質のスケールに応じて Void Vortex と

Pseudo Vortex のスケールの異なる渦が存在し、これらを考慮した $k-\varepsilon$ 乱流モデルが近年提案されている (Masuoka ら, 1996; Abtohe ら, 1997; Getachew, 2000) が、適用例や精度の高いモデルが少ないのが現状である。そのためここでは、Masuoka ら (1996) によって提案されたゼロ方程式モデルで透過性層内の渦動粘性係数 ν_t を算定した。

$$\begin{aligned}\nu_t &= C_\mu \cdot k^2 / \varepsilon & (\text{構造物外}) \\ \nu_t &= F / \sigma \cdot \sqrt{u^2} \sqrt{K} & (\text{構造物内})\end{aligned} \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 k : 乱れエネルギー、 ε : 乱れエネルギーの逸散率、 $C_\mu = 0.09$ 、 $F = 1.75 / \sqrt{150\phi^3}$ 、 ϕ : 空隙率、 σ : ダルシーの法則による考え方を乱流場に拡張したことよる補正係数であり、ここでは1.0とした。

(2) 移動量の算定

構造物内の底質移動量の算定は著者 (1998) が用いた手法と同様であり、式 (7) で示される浮遊砂の移流拡散方程式を用いた。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial (u_i c)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_i} \right) \frac{\partial c}{\partial x_j} - w_0 c \cdot \delta_{2j} \right] \dots\dots (7)$$

ここで、 c : 浮遊砂濃度、 w_0 : 底質の沈降速度、 σ_i : シュミット数である。 δ_{2j} : クロネッカーのデルタ関数である。

(3) 計算手順

式 (1), (4), (7) と標準 $k-\varepsilon$ 乱流方程式群を境界適合座標系で変換し、境界条件等は著者 (1998) と同様である。境界適合座標を用いているため、構造物位置は位相毎に計算格子内で考慮した。連続式と運動量方程式から得た流動場より、乱流諸量を算定した。

6. 実験および計算結果

(1) 水面形状

図-2 に波高6.7 cm, 周期1.21秒, 水深28 cm の条件での構造物上の水面形状の分布を示す。構造物は No.1 の砂礫で作成した。図中の▲と●が実験結果である。撮影された範囲内での実験結果と計算結果との対応は良好であることがわかる。構造物内の流速は場所や位相によって異なるが構造物上方の10~30%である。構造物直上では no slip とならず水平方向の流速が生じている。

(2) 水平流速の鉛直分布

図-3 に波の峰が沖側法面を通過時の水平流速の計算結果を示す。側線の位置は図-2 と同じである。透過層内では鉛直方向に一樣な流れとなっており、岸側に進むに連れてその値が減少している。潜堤内外の流れの方向が互いに異なっている側線も見られる。

(3) 渦動粘性係数

図-4 に図-3 と同位相での波の乱れエネルギーと渦動粘性係数の鉛直分布を示す。構造物内ではゼロ方程式、

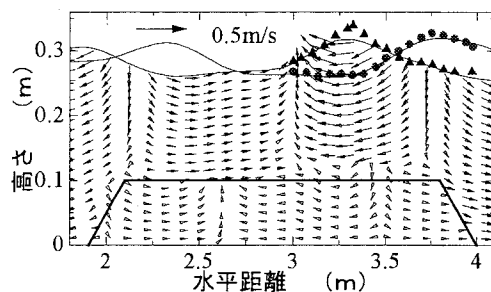


図-2 波形の比較

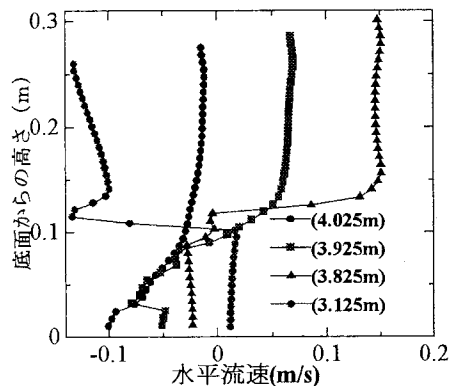


図-3 水平流速分布

外では勾配拡散型と異なる方法で算定しているため、透過性層の境界付近で急激に値が変化しており、妥当性の検討が必要である。沖側の法面内部では動粘性係数の約10倍程度になっているが、内部に進むに連れて減少している。

(4) 浮遊砂濃度

底質は構造物の沖側斜面から透過し、天端上を移流・拡散する底質はほとんど見られなかったので画像計測は沖側法面近傍とした。図-5 は水深28 cm, 波高6.7 cm, 周期1.21秒の波条件下における画像の一例である。

図-6 は主な位相での砂粒子数の空間分布の結果である。法面の沖側には砂澱が形成されて、砂澱と法面との境界付近の法尻は局所的に洗掘されていた。通常、波の峰通過時に形成された砂澱上の浮遊砂雲は、沖側に輸送され、ネットの移動方向は沖向きが一般的であるが、後述するように透過性層内には砂粒子が堆積しており、岸向きの砂粒子の存在が確認された。

波の谷時は浮遊砂が斜面に沿って下向きに移動しているが、その個数は多くない (図-6(a))。岸向きの反転時は更に砂粒子の個数は減少している (図-6(b))。波の峰時は通常の砂澱上では剥離渦が顕著であるが、本実験条件では砂澱と法面の境界付近で渦が形成され難くなり、そのために浮遊砂雲の一部がトラップされず、法面の斜

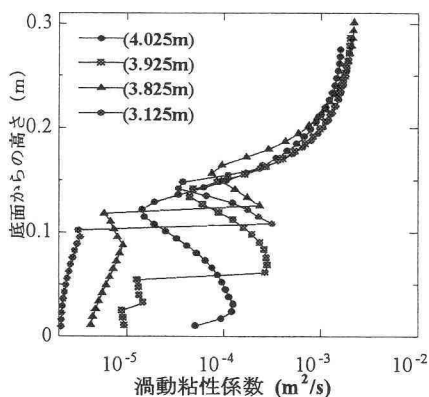


図-4 渦動粘性係数の分布

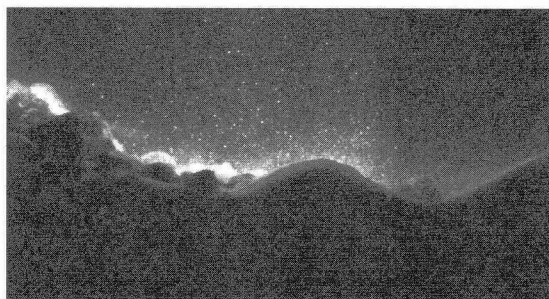


図-5 画像計測の例

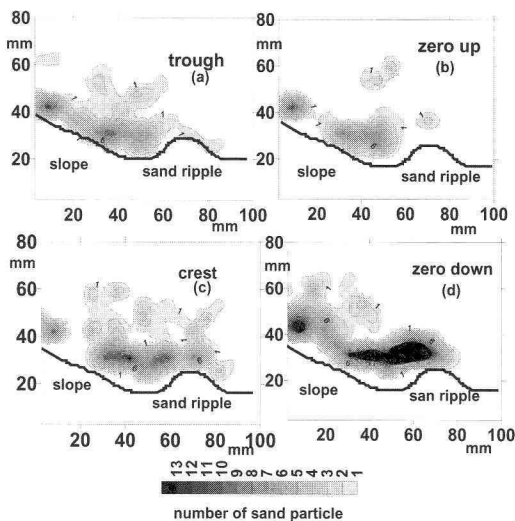


図-6 砂粒子個数の空間分布

面を遡上するように移動している (図-6(c)). 冲向きの反転時は極めて砂粒子の個数が増加し、その一部が斜面を岸側に向かって移動している (図-6(d)).

図-7 に濃度に換算した一周期平均の浮遊砂濃度分布を示す。斜面上に 2～3 箇所の高濃度場所が見られる。

図-8 に実験と同じ条件下で波の峰が沖側法面を通過

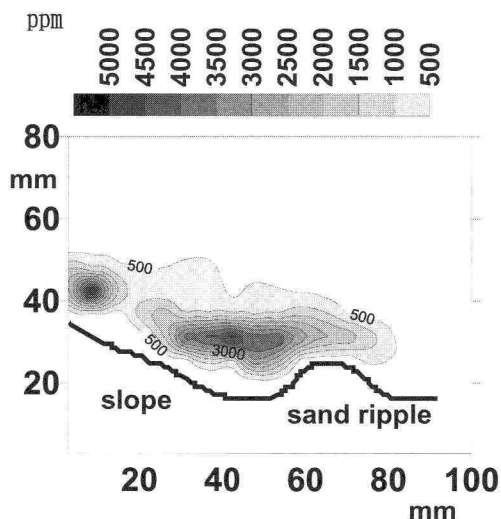


図-7 一周期平均の浮遊砂濃度

した時の結果を示す。計算では最大 2000 ppm 程度であり実験値の約 50% 程度になっている。本計算での濃度の境界条件には底面剪断力が重要であり、実験で底面に砂漣が形成されているように砂漣上の剪断力で評価する必要があるが、本計算では微小な底面地形が考慮されていないことが 1 つの要因と考えられる。構造物の沖側から約 0.2 m、底面から数 cm 内に底質の分布が見られる。

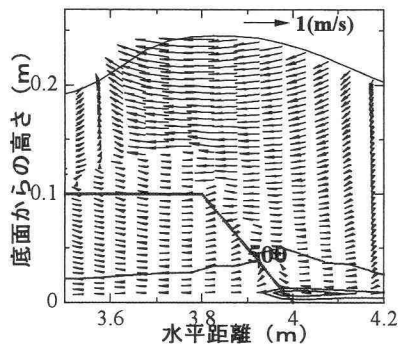


図-8 浮遊砂濃度の計算結果

(5) 透過層内の堆積量

図-3 と同じ波浪条件で実験した構造物内への底質の堆積量を図-9 に示す。図中の曲線はスプライン関数で補間した曲線である。同一の条件で行っているにも関わらず、データーのバラツキが見られるため、定量的な評価は困難であるが、構造物内に堆積する底質量は様に減少するのではなく、振動をしながら減少している。また、砂礫の粒径が小さい方が透過層の奥まで振動が顕著である。

図-10 には水平流速と浮遊砂濃度分布から計算した堆

積量の結果を示す。沖側の堆積量は実験結果に近い値であり、透過層内での底質の堆積量が減少する傾向も再現されている。しかしながら、実験結果に見られたような振動しながら減少せず、急激に減少している結果となった。

また、図示はしていないが、構造物の沖側では負の堆積量となり、前面で洗掘が生じる結果となり、その傾向は実験と同様であった。

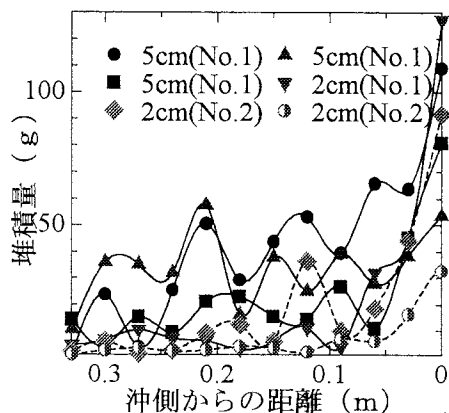


図-9 堆積量の分布 (実験)

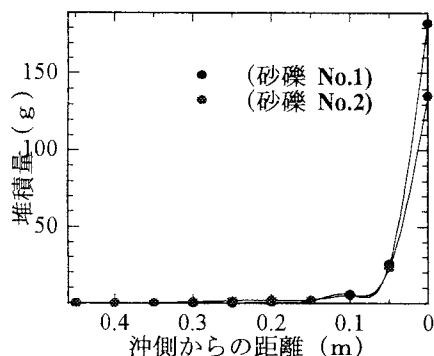


図-10 堆積量の分布 (計算)

7. 結 論

透過性構造物を通過する底質に着目して、周辺の砂移動現象や透過層内に堆積する底質量を実験と数値計算で検討した結果次のような結論を得た。

(1) Macroscopic 乱流モデルの適用性が確認できた。その時の Forchheimer 係数は実測値を用いたが、計算感度はそれほど高くない。

(2) 浮遊砂濃度の算定には、微小な海底地形を考慮す

る必要がある。また、渦動粘性係数の評価に関しては、透過性境界付近での変化が著しいため、2 方程式モデルでの検討が必要である。

(3) 透過層内に堆積する底質量は、増大と減少を繰り返しながら減少していくことがわかった。

参 考 文 献

- 赤井一昭・上田伸三・和田安彦・上嶋英機(1990)：人工環礁（海洋の空）の機能について，海洋開発論文集，Vol.6，pp. 71-75.
- 泉宮尊司・遠藤雅人(1989)：潜堤および透過性構造物のある海浜における波動場解析，海岸工学論文集，第36巻，pp. 638-642.
- 小田一紀・貫上佳則・重松孝昌・大屋博史・綱潔之・倉田克彦(1992)：礫間生物膜の海水浄化効果と現地への応用に関する研究，海岸工学論文集，第39巻，pp. 991-995.
- 柿木哲哉・辻本剛三(2004)：浮遊粒子の粒度及び濃度分の同時計測に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第51巻，pp. 1446-1450.
- 柿木哲哉・辻本剛三(2005)：画像解析を用いた波動場における混合粒径の浮遊砂粒度計測，海岸工学論文集，第52巻，(投稿中)。
- 熊谷隆宏・窪泰治・藤田和浩・植木一(2004)：透過堤内および周辺を対象とした非定常地形変化解析モデルの構築とその適用について，海岸工学論文集，第51巻，pp. 461-465.
- 近藤俊郎・竹田英章(1983)：消波構造物，森北出版，p. 275.
- 神山勉・阿部宣行・鹿島遼一(1990)：ポラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析，第37巻，海岸工学論文集，pp. 554-558.
- 神山勉・伊藤裕・小林正典・板井雅之・小林英次(2004)：傾斜堤を透過する浮遊砂の濃度評価への数値計算モデルの適用，海岸工学論文集，第51巻，pp. 456-460.
- 重松孝昌・塩足純一・竹原幸生・辻本剛三(2004)：一方向流中に置かれた多孔質体による乱流の生成・減衰過程に関する基礎実験，海岸工学論文集，第51巻，pp. 661-665.
- 辻本剛三(1998)：浮遊砂濃度フラックスによる2次元海浜変の地形変化に関する研究，海岸工学論文集，第45巻，pp. 496-500.
- 辻本剛三・角野昇八・竹原幸生・山野貴司・重松孝昌(2000)：画像計測及び乱流モデルによる有孔水平板の波浪制御特性と周辺流動場の解明，海岸工学論文集，第47巻，pp. 781-785.
- 道奥康治・南条雅志・石垣泰輔・前野詩朗(2005)：捨石水制が冠水した開水路流の二次元二層流モデル，土木学会論文集，No.782，pp. 31-50.
- Anothe, B.V. and J.L. Lage (1997)：A general two-equation macroscopic turbulence model for incompressible flow in porous media, Int. J. Heat Mass Transfer, 40 (13), pp. 3013-3024.
- Getachew, D., W. J. Minkowycz and J.L. Lage (2000)：A modified form of the $k-\epsilon$ model for turbulent flows of an incompressible fluid in porous media, J. Heat Mass Transfer, 43 (16), pp. 2909-2915.
- Masuoka, T. and Takatsu, Y. (1996)：Turbulence model for flow through porous media, J. Heat Mass Transfer, 39 (13), pp. 2803-2809.