

SOLA-SURF 法による潜堤周辺波動場の数値計算

細山田得三*・吉田 茂**・早川典生***・辻本剛三****

1. はじめに

波動場における諸現象をモデル化し、計算機によってその発展を予測していく手法の開発は、コンピュータが一般の研究者に広く普及してから海岸工学における主要な研究テーマと考えられてきた。波動場は、本来3次元で自由表面を有し、砕波や乱流を生じる複雑な領域である。このため波動場の数値計算は種々の仮定のもとに問題を単純化して行われてきた。それらには①物理的考察に基づくモデル方程式に対する単純化、②計算対象領域の単純化が挙げられる。具体的には①には、波動場に対する非粘性、非回転の仮定や長波近似が該当し、②には計算対象の2次元化が該当する。これらの計算は計算機への負荷が少なく、その結果は定性的には正しい結果を与えることができた。しかしながら近年、海岸空間の高度な利用や海浜保全の観点から数値計算による海浜変形等の将来予測に対してさらなる精度が期待される事例が多くなってきている。特に、構造物周辺の局所洗掘予測計算においては、洗掘位置と堆積位置が隣接している場合があり、計算の分解能を高め、空間的なコントラストを明瞭にしていくことが強く望まれている（運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所, 1996）。

一方、数値流体力学（CFD, Computational Fluid Mechanics）の分野においては自由表面を有する流れの数値シミュレーションコードが各種開発されてきている。これらはナビエーストックス方程式（NS 方程式）を用いて直接計算を行うため、乱流をモデル化する以外には原理的には仮定を含んでいないと考えられる。海岸工学においてはこれらの成果を取り入れてさらに精度の高い数値計算をおこなう気運が高まりつつあると思われる（土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会, 1994）。また、近年、大容量のメモリを搭載した高速ワークステーションの低廉化にともない、CFD コードの海岸工学の諸問題への適用が急速に進むことが予想される。

SOLA-SURF 法は自由表面を取り扱える CFD コード

としては比較的初期にロスアラモス研究所の Hirt ら（1975）によって開発され、孤立波の分裂等の計算に応用されている（奥村ら, 1981）。本研究では海岸空間の高度利用のために建設される事例が多くなっている潜堤を含む断面2次元の波動場を計算対象領域とし、SOLA-SURF 法を用いた波動場の数値計算を実施してその妥当性、問題点について検討したものである。

2. 各種計算法の比較

NS 方程式を直接ベースにした自由表面を含む流体数値計算法には① MAC 法、② VOF 法、③ BFC 法、④ SOLA-SURF 法が挙げられる。いずれも差分法によって計算するため、図-1(a), (b) に示すようなメッシュで計算領域全体（水（斜線）、気体部）を被覆する（以下、メッシュ分割された矩形をセル、セルの四隅をノードと呼ぶ）。これら4つの手法のうち、①、②は、自由表面位置を計算する際にセル内に配置したマーカを内挿流速によって移動させるため、マーカの離合集散による自由表面の急激な変動（砕波）が計算できることになる（岩田ら, 1995；滝川ら, 1995）。しかしながら、砕波は上部の空気の巻き込みが計算されなければ精度の高い計算はできないものと思われる。③、④は、マーカを用いないため砕波を計算することは出来ないが、自由表面での境界条件式に従って表面形状の時間発展を計算できる。③の方法は、境界適合座標（BFC）に対して支配方程式を書き直し、計算空間と物理空間の間の変換を行う。このために煩雑となり、計算時間が長くなる（辻本ら, 1997）。また、3次元への拡張性が困難であることが予想され、さらに透過性構造物を計算領域に配置するような計算領域内の非一様性を取り込みにくいと思われる。④は、自由表面の条件を計算する際、水部よりも外側の流速を外挿しなければならず、若干その外挿方法に疑問が残るが、取り扱いが容易で拡張性に優れている。

3. SOLA-SURF 法の概要と境界条件

SOLA-SURF 法とは非圧縮性流体数値計算手法である SOLA 法（Numerical Solution Algorithm）を自由水表面形状の発展方程式（SURF）に応用したものである。

* 正会員 工博 長岡技術科学大学環境・建設系 助教授
 ** 正会員 工修 長岡工業高等専門学校環境都市工学科 助教授
 *** 正会員 Ph.D. 長岡技術科学大学環境・建設系 教授
 **** 正会員 工博 神戸市立工業高等専門学校都市工学科 助教授

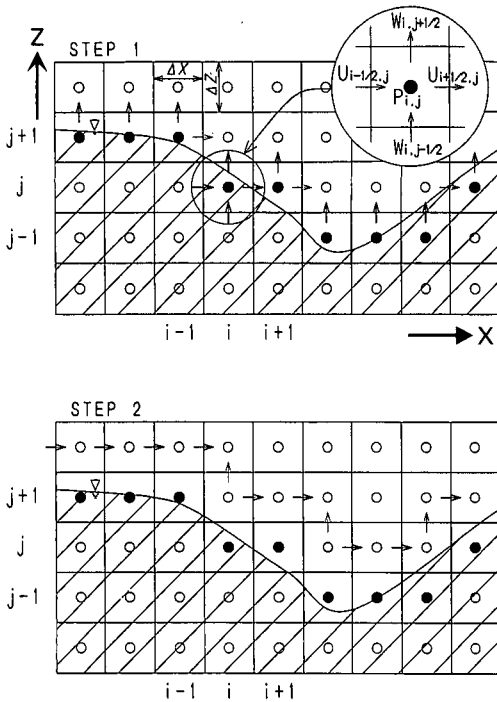


図-1 SOLA-SURF 法における自由表面の取扱い
(a): 上段 (STEP 1), (b): 下段 (STEP 2)

非圧縮性の流れ場を数値的に解く場合、NS 方程式は流速についての時間発展方程式となるが連続式は時間発展式とならない。このため新しい時間ステップの流速と圧力を同時に緩和して連続式を満足させなくてはならない。MAC 法においては、圧力のポアソン方程式を解いて圧力を更新し、再度時間発展方程式に代入して更新値を求めるが、SOLA 法では流速の発散値に適当な係数をかけて圧力と流速を同時補正するため簡易的でありかつ高速である。図-1 には x, z を独立変数とする断面 2 次元における計算領域を示す。流速はスタッガード格子で配置し(図-1)、圧力はセル中央(白, 黒丸)において定義されている。ノードにおいては物理量は定義されていない。

計算の境界条件は、

- ① 計算領域左端：造波境界
- ② 計算領域右端：ゾンマーフェルトの放射条件
- ③ 固体壁面：不透過条件とすべりなしの条件
- ④ 自由表面での運動学的条件と力学的条件

である。ゾンマーフェルトの放射条件に用いた波速は、造波周期と放射条件設定位置での静水位を用いて微小振幅波理論によって計算された。造波境界においては入射波の振幅と流入流量を与えた。通常は、入射波高と位相を与えてそれに応じた流入流速を微小振幅波理論やストークス波理論を用いて計算する。しかしながら今回は

入射波の振幅と流量振幅を独立に与えて波高検定に相当する予備計算を行い、所定の入射波高に応じた造波条件が選択できるように設定した。

水表面において力学的条件は、通常単に自由表面の圧力値を大気圧 ($P=0$) に等しいとする条件が用いられることが多い。本研究では、自由表面における水部と気体部での応力テンソルを用い、自由表面での水部と気体部の双方で応力の接線方向成分、法線方向成分がそれぞれ一致する様にした。自由表面での法線ベクトルの水平成分を無視すれば、接線および法線方向成分について以下の 2 式が得られる (Bullgarelli ら, 1984)。

$$\nu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) = C_D \frac{\rho_a}{\rho} |U_a| U_a \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$P_s = P_a + 2\nu \frac{\partial w}{\partial z} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 u, w は、 x, z 方向の流速、 $C_D, \rho_a, \rho, U_a, \nu, P_s, P_a$ はそれぞれ水表面での抵抗係数、空気、水の密度、風速、動粘性係数、自由表面での圧力、大気圧である。この条件式より SOLA-SURF 法では、海上風の波の運動への影響を考慮できるが、本研究では U_a, P_a をいずれも 0 としている。実際の水表面での流速に関する条件は以下の手順で計算する。

STEP 1: 自由表面セル i, j (図-1(a) 黒丸で示したセル) における鉛直方向速度 $W_{i,j+1/2}$ (上向き矢印) を連続式から計算する。その際、 $i+1, j$ セルのように水平方向に隣接するセルが空気の場合は、水平流速 (横向き矢印) を直下の水平流速で代用する。

STEP 2: 自由表面セルよりも 1 つ上のセルの水平流速 $u_{i+1/2,j+1}$ (図-1(b) 右向き矢印) の流速を式 (1) から求める。その際も空気と判断されたセルの流速もその周辺流速で代用する。

以上の方法により、流体境界外部の流速を与えることによって境界条件を満足させることができる。圧力に関する境界条件は式 (2) であり、圧力の自由表面での値を求め、更に表面セルにおいて圧力が定義されている点(黒丸)に対して内挿・外挿して求められる。これらの境界条件の設定は、流速・圧力緩和計算の間もそれに応じて変化する。

また、自由表面形状の時間発展は、自由表面の運動学的条件を数値積分して求めた。計算領域内に設置した透過潜堤は次のようにして処理した。図-2 に示すようにその大きさ・形状に応じて計算領域内のセルに 0, 1 等のフラグgingを行った。そして、各セルの属性(0, 1 など)に従って使用する発展方程式を選択させた。すなわち水部のセルには通常の NS 方程式を適用し、潜堤内部では以下の式を用いて計算した。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\varepsilon \nu}{k} u \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\varepsilon \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\varepsilon \nu}{k} w - \varepsilon g \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 p, ε, k はそれぞれ圧力、潜堤内部の空隙率、透水係数である。なお、楠山 (1994) は、ポアスボディモデルにおいて水部と構造部において式に係数を含んだ形で NS 方程式と (3)、(4) 式とを同一方程式として取り扱っている。また両式の右辺第 2 項にあらわれる ν/k は抵抗係数となる。また、非圧縮性を仮定しているので連続式については水部、潜堤内部の両方において流速ベクトルの発散が 0 となる。

4. 計算条件

計算領域の水深は、70, 55 cm の 2 通りとし、水路長は、

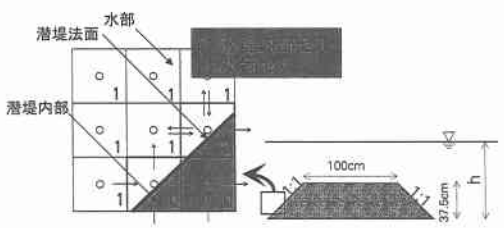


図-2 水部と潜堤内部の取扱い

15 m、入射波の周期はすべて 1.5 秒である。これは著者らの研究グループが昨年度実施した室内実験と同一 (細山田ら: 1996) であり、比較検討できるものとした。セル幅 dx は 5 cm, 10 cm, セル高さ dz は 2 cm, 3 cm の 2 通りとし、適宜選択した。時間積分の刻み幅 dt は 0.001, 0.005 s から選択し、 dx, dz の大きさに応じて変化させた。潜堤形状は高さ及び幅がそれぞれ 37.5 cm, 100 cm で岸沖両法勾配 1:1 の等脚台形である。

5. 計算結果

5.1 計算領域全体における波の伝播状況

図-3 は縦軸を下向きを正とした計算時間、横軸を水

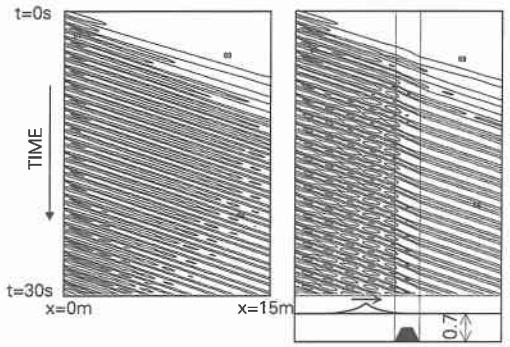


図-3 等水面線の時空間分布

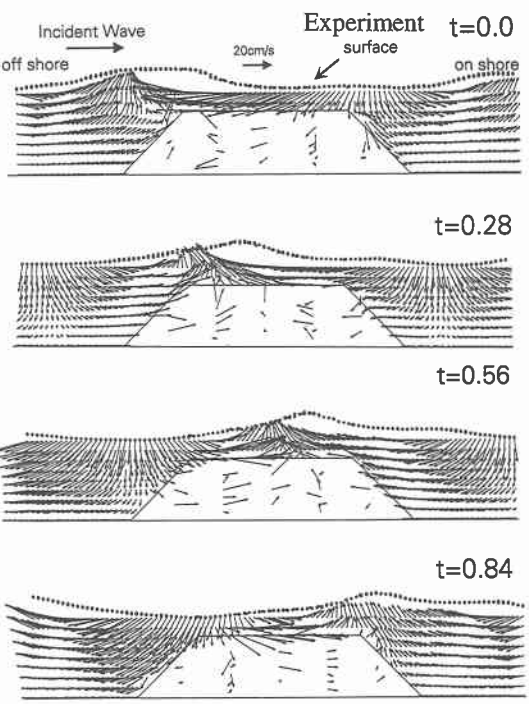
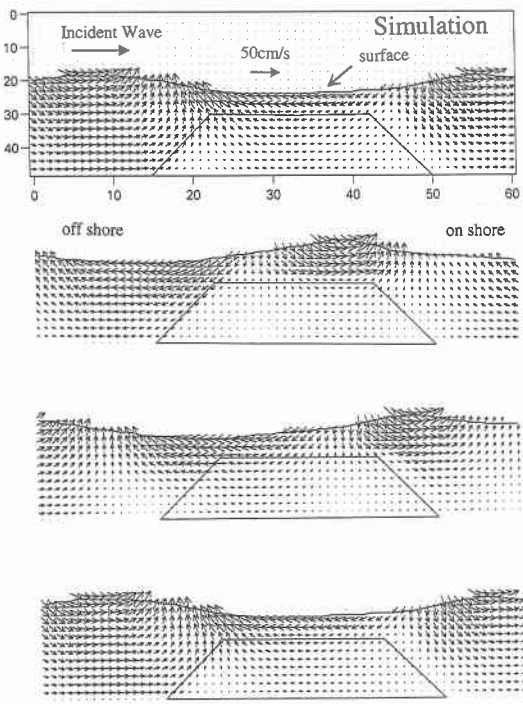
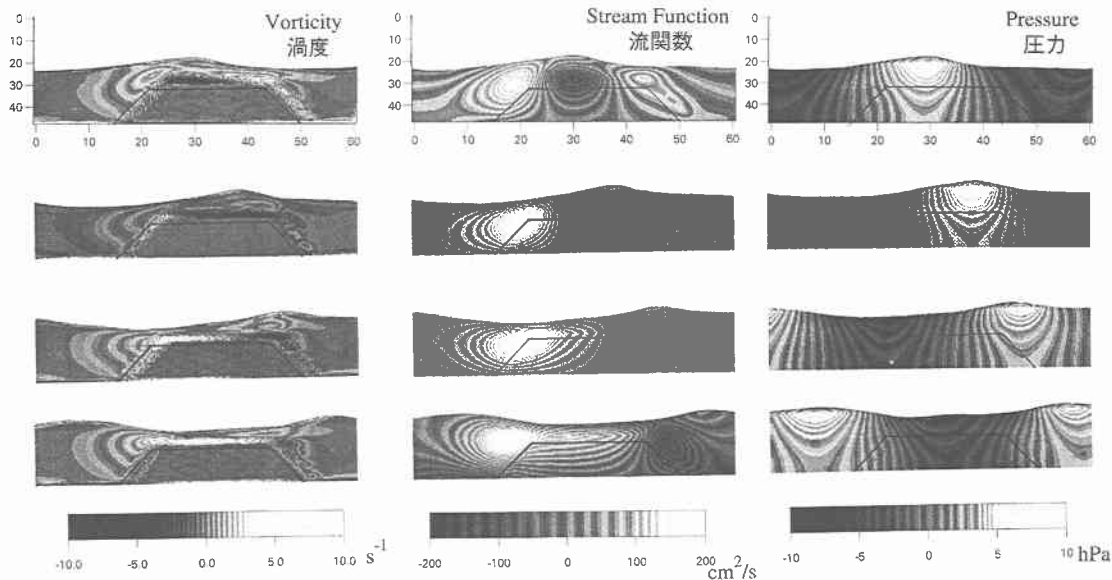


図-4 潜堤周辺の流速ベクトル (左: 数値計算, 右: 室内実験)



図一5 渦度，流関数，動圧力の空間分布（透過性潜堤，0.3秒間隔の時間発展，縦横軸の数字はセル番号）

槽内の造波境界からの水平距離とした時空間における等水位線図を示す。図一3 左右の図はそれぞれ通過波と潜堤を設置した場合である。いずれも水深 h は 70 cm, 波高 H は 18 cm ($H/h=0.26$) である。通過波では造波第1波目（先行波）は、造波後波高が低減しており、等水位線が右端境界まで到達していない。第2波目以降は、波高の低減が少なくなり、6波目以降は安定した波高で伝播している。また、ゾンマーフェルト放射条件を設定した右端境界に進入した波は反射されることなく放射条件が有効であることがわかる。ただし12秒程度以降経過すると、波の峰の水位が右端境界付近で低減していることが分かる。これは群速度で進行する波のエネルギーがこの放射条件では完全には放射されないことによると思われる。潜堤を設置した場合には潜堤よりも沖側では波の反射により等水位線が閉じている様子がわかる。また、潜堤上では、等水位線が若干捻れている。これは潜堤による波形変化を表しており、波形が若干、前傾していることに対応していると思われる。

5.2 潜堤付近の流速場

図一4には潜堤上を波が通過する場合に生じる流速場のベクトル図を示す。全計算・計測点のうち、潜堤周辺部分を拡大したものである。入射波高 H は 13.2 cm, 周期 T は 1.5 秒である。左側が SOLA-SURF 法による数値計算であり、右側は室内実験による計測結果である。左図の最上段のグラフの縦および横軸に付した番号は、セル番号である。SOLA-SURF 法による計算結果は、波の入射による流速場の変動をよく再現していることがわかる。潜堤内部の流速は、外部の変動と連動してほぼ同位

相で変動しているが、流速の大きさは周囲に比べて低減している。右側の実験値においては、潜堤上を通過する波と水平流速は位相差が生じており、波の峰が通過している時点でその直下の流速は沖側を向いている。計算ではこのような位相差は顕著ではない。この理由は、実験の場合、潜堤岸側での水位上昇とそれとともなう平均的な冲向き流速が生じるが、数値計算では岸側での放射条件により水位上昇が大きくないことが考えられる。また、実験では潜堤沖側法肩部付近での冲向き流速が潜堤岸側法肩部の岸向き流速よりも大きくなっていることがわかるが、これは数値計算でも表現されていることがわかる。

図一5には SOLA-SURF 法を用いて計算した透過性潜堤周辺の渦度，流関数，動圧力の空間分布の時間発展を示す。波の諸元は、図一4の場合と同じである。波の峰が潜堤上を通過し、岸側に向けて通過していく0.9秒間の時間変化を等値線で示している。渦度は潜堤の沖側の法肩部付近で大きな値を取り、波の位相で若干値が変化しているものの、ほぼ全時間にわたって消滅することなく高い渦度が維持されている。また、波の峰が潜堤岸側に進入すると同時に渦度も岸側に進入していることがわかる。著者らが昨年度に実施した潜堤岸側付近の渦度の潜堤法面に沿った下降も見られる。また、この渦度の下降は著者 (1996a) らの実験と同様に本研究においても底面に到達しておらず、昨年度の成果と一致するものである。潜堤天端付近では黒で示された負の渦度（時計回りの渦）が卓越している部分があり、岸側に進行している。その後、正の渦が沖側の法肩部付近から発生して、岸側へ伸張している様子が分かる。本計算ではここに示すよ

うに渦度の空間分布をダイナミックに評価することができ、潜堤周辺の底質の動きやそれによる局所的な洗掘等の再現計算に用いることができるものと思われる。図-5の中央には流関数の時間変化を示している。流関数 ψ の計算では渦度 ω を用いてポアソン方程式 $\Delta\psi=-\omega$ の境界値問題を収束計算を行って求めた。流関数はセル状の構造を持ち、波の進行にあわせてセルが移動している。図中の中央より左側の正の値を示すセル(白)は、波の進行とともに移動するが、潜堤内には入りきらずに変形していることがわかる。これは潜堤内での流速の低減とそれとともなう流れ構造の変化を示している。また、最上段ではセル構造が3つ見えているが、2段目では右側のセルが分裂して真ん中のセルと合体している。合体したセルはその後、波の進行とともに移動して行くが、波よりも位相速度が遅く、若干下降していく傾向にあることがわかる。図の右端に示した圧力は、計算時には静水圧と動圧の和として計算されているので計算結果出力時に静水圧の値を差し引いた値で示している。圧力の時間変化はほぼ波の位相と一致しており、波の峰で最大値を取り、波の谷で最小値を取っている。等圧線は必ずしも対称とはならず、等圧線に歪みが生じている。また、潜堤を通過した波の圧力は波高低減に伴い、当然ではあるが低下している。また等圧線は潜堤内外においてなめらかに接続されているものの分布形状が若干歪んでおり、潜堤内外での圧力分布の違いがあらわれている。

6. ま と め

本研究では、従来あまり使われることのなかったSOLA-SURF法を用いて潜堤周辺の波動場の数値解析を行い、室内実験との比較検討も行った。

本計算は、自由表面の境界条件を満足させるにあたって自由表面外の流速成分を外挿して求めるという点において誤差等が含まれる可能性があるが、大変簡便であり、計算速度が早い。本報告で使用したコンピュータは、ペンティアム搭載パソコン(MPU: intel: Pentium-120), DEC Alpha Station 600 5/333 (OS: Digital Unix), 及び VT-alpha 433 AXP (OS: Windows NT) である。パソコンでは30秒間の波動場を計算するのに要した時間が約40分、その他のDEC Alphaを搭載したワークステーションでは約3分であった。著者ら(1996a, b)は境界積分方程式による波動場数値シミュレーションを実施しているが、式の取り扱いの簡便さと3次元への拡張性、計算によって得られる情報量という点において本計算の方が優れているものと思われる。

また、流れの計算においては流れの場が乱流化していることを想定して乱流モデルを導入することが考えられる。今回の報告においては、①波動成分と乱流成分を比

較した場合、前者の方が支配的である、②自由表面における乱流成分の境界条件に若干疑問が残る、③波動成分と乱流成分の分離が不明確である、という理由で敢えて乱流モデルの導入を見送った。今後は、これらの問題を検討して導入していきたいと考えている。また、この計算法は2次元計算領域に対しては前述したとおり、予想以上に計算時間が短く、3次元波動場への拡張を行ってもスーパーコンピュータを用いず、ワークステーションなどの一般的な計算機資源を用いても十分実行しうものと思われる。今後は計算スキームの検討と、本計算法の拡張をおこなって行く予定である。

本論文執筆に当たり、作図等の補助作業をお願いした長岡技術科学大学大学院生野田和宏君、藤田和成君、好井義隆君には感謝の意を表する。

本研究は文部省科学研究補助金(萌芽的研究 08875093 研究代表者 細山田得三)で行ったことを記してここに感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・川崎浩司・金 度三 (1995): 水中構造物による碎波の数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 781-785.
- 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所・(財)沿岸開発技術研究センター (1996): 新潟西海岸浜浜工等技術検討調査調査委託参考資料.
- 奥村博司・武本行正・福岡 順・藤井 宏 (1981): 非圧縮性粘性流体の数値解析プログラム(その2), 京都大学大型計算機広報14 (1), pp. 31-40.
- 神山 勉・鹿島遼一 (1994): 透過性防波堤周辺の波動場解析へのボラスボディモデルの適用, 電力中央研究所報告, U 93052, 45 p.
- 神山 勉(1995): 透過性潜堤上で碎波をともなう波の変形特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 771-775.
- 滝川 清・山田文彦・松本健作 (1995): 潜堤上碎波変形の内部特性とその数値解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 66-70.
- 辻本剛三・細山田得三 (1997): 自由表面と乱流モデルを考慮した潜堤周辺の流れ場の数値計算, 第52回土木学会年次学術講演会(印刷中).
- 土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会 (1994): 海岸波動一波・構造物・地盤の相互作用の解析法, 土木学会, 520 p.
- 細山田得三・早川典生・辻本剛三 (1996a): 境界要素法による波動場数値計算の潜堤周辺流れ場への適用, 第51回土木学会年次学術講演会, pp. 200-201.
- 細山田得三・早川典生・吉田 茂・辻本剛三・田安正茂 (1996b): 透過性潜堤の流れ構造に関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 116-120.
- 松見吉晴・石田昭雄・木村 晃 (1993): 幅広潜堤に発生する流体圧力の数値シミュレーション, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 781-785.
- Hirt, C. W., Nichols, B., D., Romero, N., C (1975): SOLA-A Numerical Solution Algorithm for Transient Fluid Flows, Los Alamos Scientific Laboratory LA-5852, pp. 1-50.
- Bulgarelli, U., Casulli, V., Greenspan, D. (1984): Pressure Methods for the Numerical Solution of Free Surface Fluid Flows, Pineridge Press Swansea U. K., 323 p.