

3 次元流動モデルによる津波防波堤の防護効果に関する数値計算

富田 孝史*・柿沼 太郎**・島田 昭男***

巨大津波に対するハード的およびソフト的な防護対策を構築するためには、津波による被害を予め精度良く推定することが大切である。本研究では、多層レベルモデル、3 次元流動モデルおよび 3 次元 VOF モデルから構成される数値モデルを開発しており、本論文において、数値モデルの妥当性を既存の模型実験結果との比較から検証した。そして、津波防波堤周辺および背後地における津波の数値計算を行い、震源から遡上域まで含めた津波の現象が、本数値モデルにより詳細に把握できること、また、防波堤開口部における 3 次元流動が、堤頭部のみならず堤幹部においても、構造物の安定性に対して重要な防波堤前後の水位差に影響を及ぼすことを明らかにした。

1. はじめに

東海、東南海、南海地震等による津波被害を防除・軽減する対策が緊急的に求められている。特に、巨大津波の場合には、防潮堤等の防護施設によるハード的な対策と防災情報や避難対策等のソフト的な対策を有効に連携させなければならない。必要な防護施設の強化やソフト対策を構築するためには、防護施設による防護機能を評価した上で、防護施設の背後で津波遡上によってどのような水位、流速、流体力、浸水域が発生するのかを明らかにする必要がある。

津波の数値計算では、線形長波理論と非線形長波理論に基づいた数値モデルを結合させる手法(例えば、後藤・佐藤, 1993) が現在よく用いられており、最近では非線形分散波理論に基づいた数値モデル(岩瀬ら, 2002) により津波の遡上をかなり精緻に計算できるようになってきた。さらに、正村ら(2001) は非静水圧 3 次元モデルと静水圧平面 2 次元モデルを結合したモデルを開発している。人口や資産の集積した臨海都市部では、防潮堤等の防護施設を含めて多くの構造物があり、それら周辺の津波は 3 次元的な挙動を示すと考えられるので、こういった現象を考慮した津波計算が大切である。

著者らは、これまでに 3 次元流動モデルを組み込んだ高潮・津波シミュレータ(STOC: Storm surge and Tsunami simulator in Oceans and Coastal areas)を開発して、津波防波堤の開口部における津波の 3 次元流動や開口部潜堤に作用する津波波圧を計算できることを確認してきた(柿沼ら, 2003)。ここでは、本モデルを浸水問題に適用できるよう拡張する。そして、既往の津波模型実験結果との比較により数値モデルの検証を行ってから、これまで十分に検討されていない津波防波堤の堤幹部の安定性に及ぼす 3 次元流動の影響や、津波防波堤背後の陸上遡上について検討する。

2. 数値モデルの概要

本研究で開発してきた数値モデル STOC は、3 次元流動モデル(STOC-NS)と多層レベルモデル(STOC-ML)によるハイブリッドモデルであり、それぞれのモデル適用領域を接合させるために、それらの間に接合モデルを適用する領域を設けた。接続領域は、STOC-ML と STOC-NS をともに適用する領域であり、例えば、STOC-NS の外側に STOC-ML を配置する場合には、接続領域の外側が STOC-NS 適用領域の境界、内側が STOC-ML 適用領域の境界となる。

STOC-NS の基礎方程式は、ポーラスモデル(榊山ら, 1990)を適用した 3 次元の連続式(式(1))と Navier-Stokes 方程式(式(2))である。なお、このモデルでは、水面位置を鉛直方向に積分した連続式(式(3))から算出することとしたので、砕波のように水面形が鉛直方向に多価になる場合には適用できない。

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

$$\gamma_v \frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \gamma_j u_j u_i}{\partial x_j} + C_i = \frac{\gamma_v}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \gamma_v \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \gamma_j \nu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right\} \quad \dots (2)$$

$$\gamma_z \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \int_{-h}^{\eta} \gamma_x u dz + \frac{\partial \eta}{\partial y} \int_{-h}^{\eta} \gamma_y v dz = 0 \quad \dots\dots (3)$$

ここに、 x_i はデカルト座標系(x, y, z)、 u_i は x_i 方向の流速(u, v, w)、 η は水位変動、 h は基準水面からの水深、 ρ_0 は基準密度、 p は圧力、 γ_v は有効体積多孔率(メッシュ内を占める液相の体積率、 $0 \leq \gamma_v \leq 1$)、 γ_i は x_i 方向の有効面透過率($\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: 断面を占める液相の面積率、 $0 \leq \gamma_i \leq 1$)、 g_i は各方向の重力加速度($0, 0, g$)、 ν_e は実効動粘性係数(動粘性係数と渦動粘性係数の和)である。 C_i はコリオリ項であり、 x および y 方向ではそれぞれ $-f_0 v$ および $f_0 u$ であり、 f_0 はコリオリのパラメタである。密度 ρ に関しては、温度および塩分に関する移流・拡散方程式を数値的に解き、得られた温度と塩分を経験

* 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部 高潮津波研究室長
** 正会員 博(工) (独法)港湾空港技術研究所 海洋・水工部
*** (株)富士総合研究所 産業安全解析センター

式(例えば, 松梨編, 1993)に代入して求めることとした。これらを基礎方程式として, スタaggerドメッシュで空間を離散化し, リープフロッグ法により時間発展させた。

STOC-MLは, 鉛直方向を数層に分割し, 各層に静水圧近似を適用したモデルである。圧力を解かないということ以外はSTOC-NSと同様の計算手法を用いた。

乱流モデルには, SGS渦動粘性係数のように計算メッシュの大きさに依存させるゼロ方程式モデルの他, 高レイノルズ数型 $k-\varepsilon$ 2方程式モデルも採用できるようにした(数値流体力学編集委員会編, 1995)。

さらに, VOF法(沿岸開発技術研究センター, 2001)を拡張した3次元VOFモデル(STOC-VF)も新たに導入できるようにした。このモデルでは, 自由表面位置の計算をするために, 式(3)の代わりにVOF関数に関する移流方程式を解くので, 砕波のように水面形が多価になる場合にも計算が可能である。

3. 模型実験結果との比較

(1) 津波防波堤に関する模型実験

谷本ら(1988)が, 釜石湾口防波堤を対象とした3次元模型実験(模型縮尺1/50)を実施しているので, その結果と比較した。数値計算では, 実験水槽の全体にSTOC-NSを適用した。計算格子サイズは, 流れ方向(全長40m)では, 開口部潜堤を中心とした前後10mの範囲で25cmあるいは12.5cm, その両外側で50cmとし, 流れに直交する方向(全長20m)では, 全て25cmとした。鉛直方向には静水面を基準として, -120, -100, -80, -60, -50, -40, -30, -20, -10, -6, -4, -2, 0, 2, 4, 6, 10および20cmに計算格子を設定した。

図-1は, 防波堤開口部中央を通る流れ方向の水位の空間変化について模型実験結果と数値計算結果を比較したものである。模型実験ケースは開口部の平均流速が0.98 m/sおよび1.05 m/sのものであり, 数値計算ではこれらに対応させて1.0 m/sとした。

防波堤開口部におけるエネルギー減衰が重要になるので, 渦動粘性係数を幾つか変えた数値計算を実施した。水平方向および鉛直方向の渦動粘性係数としては, 定数として $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ の範囲で変化させた場合およびSGS渦動粘性モデル(モデル定数 $C_s=0.2$)を使用した場合について行った。なお, 定数としての $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ は 20°C における水の動粘性係数である。図中の例えば(-2, -4)は, 水平および鉛直方向の渦動粘性係数の10のべき数を示しており, 水平および鉛直渦動粘性係数がそれぞれ $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ および $1.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ であることを示している。また, (SGS)および(SGS, F)は, SGS渦動粘性係数を適用したケースであ

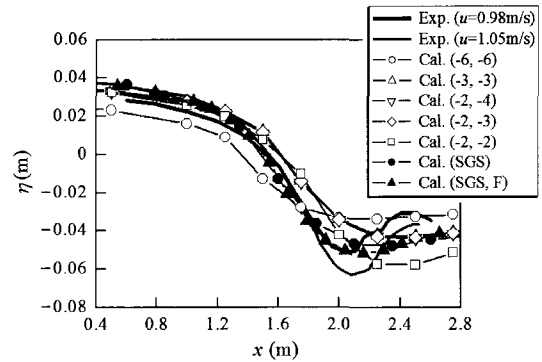


図-1 津波防波堤開口部潜堤周りの水面波形の比較

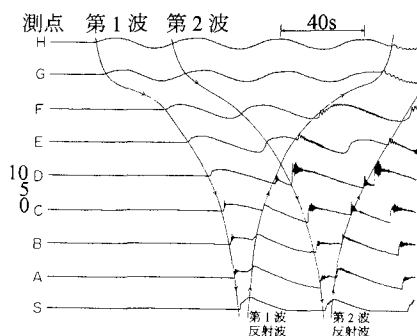
り, このうちFの付くものは, x 方向の計算格子サイズを25cmから12.5cmに細かくしたケースである。

同図によると, 動粘性係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ を使った計算結果は, 渦による乱れを考慮できないため, 実験結果と全く一致しない。渦による乱れを考慮した定数の渦動粘性係数の場合, 開口部沖側(図中 $x < 1.6 \text{ m}$)の範囲では, 渦動粘性係数の差異は水位の空間変化に大きな影響を及ぼさないが, 開口部背後では大きな影響が現れている。鉛直方向渦動粘性係数が小さな(-3, -3), (-2, -4)および(-2, -3)では開口部の渦によるエネルギーの低減が十分でなく, 水位の低下量が実験に比べると小さい。一方, 水平方向および鉛直方向渦動粘性係数を共に $1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ としたケースでは, 実験結果と比較的よく一致する。数値モデルにおいて鉛直渦動粘性係数を大きくしないと実験結果を再現することができないのは, 水深1.2mの開口部に高さ0.82mの潜堤があるため鉛直方向の渦による乱れの寄与が大きかったためと考えられる。

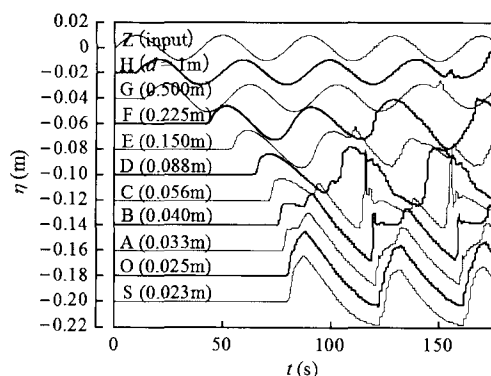
また, SGS渦動粘性係数を使った場合には, 定数としての渦動粘性係数よりもさらに実験結果とよく一致するようになり, 細かな計算格子を使うとさらに実験結果に一致する。ただし, 実験では, $x=2.1 \text{ m}$ から 2.4 m にかけて水位が -0.06 m から -0.04 m まで回復しているが, 数値計算では水位の回復の程度は弱い。この水位の回復過程は, y 方向や潜堤上部近傍の z 方向の計算格子サイズを更に細かくすることにより, 実験結果に合うようになるのではないかとと思われる。

(2) 斜面上の津波に関する模型実験

斜面上の津波について, 鶴谷・中野による断面模型実験(谷本ら, 1983)と比較する。図-2(a)は, 勾配1/200の斜面上に周期40s, 図中H(斜面前面の一樣水深部, 静水深1m)における波形勾配が 1.9×10^{-4} 程度の津波が来襲する場合の実験ケース(参考文献中の図-6.8)を示しており, 同図(b)はこれに対応させたSTOC-NSに



(a) 模型実験結果 (谷本ら (1983) における図-6.8)



(b) 計算結果

図-2 斜面上の津波波形の比較

よる数値計算結果である。図中に示した d はその地点における水深である。

数値計算では、計算格子サイズを $\Delta x/L = 4 \times 10^{-3}$ および $\Delta z/H = 0.5$ とした。ここに、 L は造波境界における波長、 H は造波波高である。計算結果は、計算値の地点 C では、沖からの津波の第 2 波と岸からの反射波が重合するときに高い水位上昇量が現れて、模型実験結果と一致していないが、その他の地点においては概ね良好に模型実験結果を再現することができた。このように、砕波を考慮することができない STOC-NS であっても、模型実験で出現した斜面上をソリトン分裂して遡上する津波を破綻せずに概ね良好に計算できた。

4. 津波防波堤の周辺海域への適用

前報 (柿沼ら, 2003) と同様に、図-3 に示す津波防波堤開口部潜堤を中心とした $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ の範囲に STOC-NS を適用し、その周囲に単層の STOC-ML を配置した。計算格子サイズは、図に示した全領域で x 方向 (東西方向) および y 方向 (南北方向) とともに 12.5 m である。STOC-NS の適用領域では鉛直方向の格子サイズを適宜変化させ、自由表面近傍では 1 m の格子サイズに

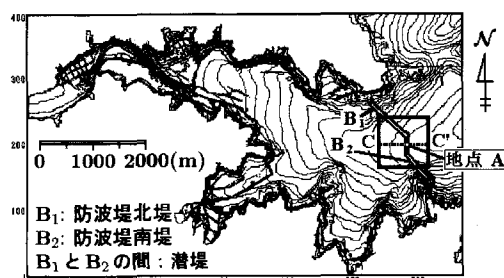
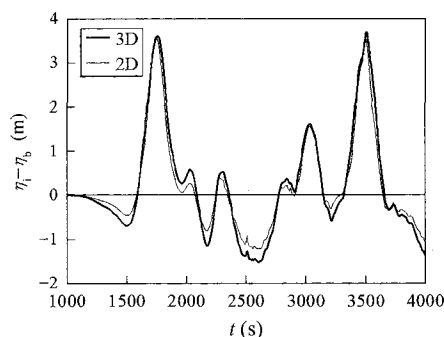


図-3 津波防波堤に関する数値計算領域

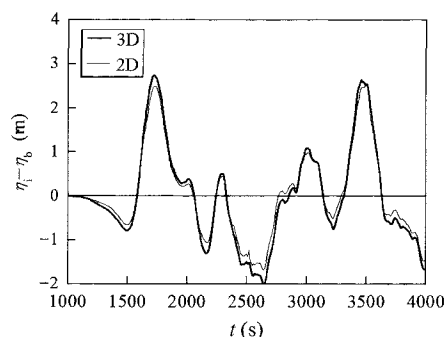
した。接続領域は 1 辺 1 km 正方形を外縁として 10 メッシュ内側までの範囲である。全計算領域は、明治三陸地震の震源位置を含む領域とし、明治三陸地震による津波を断層パラメタから計算した。

図-4 は、北防波堤の堤幹部 (堤頭部から 50 m) および南防波堤の堤幹部 (堤頭部から 80 m) における防波堤の堤外側水位 η_i と堤内側水位 η_o の差を示したものである。防波堤の堤幹部では、堤頭部と異なり津波の水位による静水圧的な力が支配的となるので、この水位差の評価が堤体の安定性に重要な影響を及ぼすことになる。数値計算に使用した水平および鉛直方向の渦動粘性係数は、それぞれ海水流動計算においてよく用いられる $1.0 \times 10^2\text{ m}^2/\text{s}$ と $1.0 \times 10^{-2}\text{ m}^2/\text{s}$ である。なお、図には比較のために、平面 2 次元モデルによる結果を併記しており、使用した運動量補正係数は後藤・佐藤 (1993) により釜石湾口防波堤に対して提案されている $f_D = 0.5$ である。図によると、押し波時では、北防波堤においては 3 次元流動の効果はほとんど現れていないが、南防波堤では 3 次元流動の効果により平面 2 次元モデルに比べて 1.1 倍の水位差が発生している。一方、引き波時では、北防波堤と南防波堤共に、3 次元流動を考慮した場合において 1.25 倍程度水位差が大きくなっている。これらの差異は、開口部における 3 次元流動が防波堤堤頭部だけでなく堤幹部にも影響を及ぼすことを示しているの、堤幹部における 3 次元流動の影響把握が今後の課題となる。さらに、乱流の評価をより精度高く行うことにより結果は異なることが予想されるので、乱流モデルの検討も必要である。

図-5 は、津波防波堤で守られた北側湾奥部における陸上の津波浸水深を示したものである。この領域に来襲する津波を (a) と (b) で同一にしているが、(a) の 3 次元計算により得られた浸水域は全体的に狭くなっている。とくに、埠頭中央部分に津波浸水が発生しない三角形の領域が認められるが、これは、この三角形の領域の沖側および港内側境界に位置する高さ 3 m 程度の壁を津波が越えなかったためである。しかし、この領域



(a) 北防波堤の堤幹部 (堤頭部から 50 m)



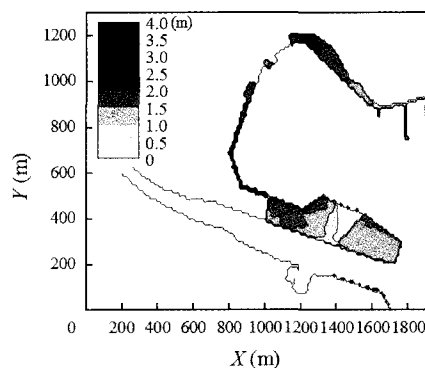
(b) 南防波堤の堤幹部 (堤頭部から 80 m)

図一4 津波防波堤の堤幹部前後の津波による水位差

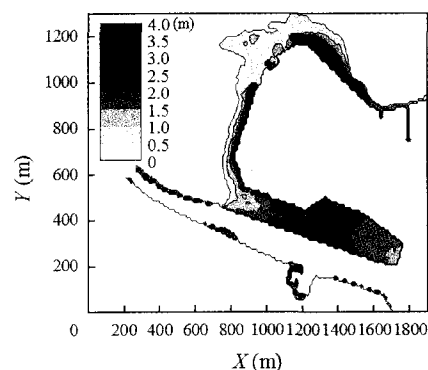
は平面 2 次元計算では浸水している。海に突き出した埠頭先端付近の津波遡上水位の時間波形を比較した図一6 によると、平面 2 次元計算 (図中 2D) よりも 3 次元計算 (3D) では津波高さが低くなる傾向にあり、この差異が浸水するか否かの差を発生させた。どちらが正しいかを判断するのは現段階では困難であるが、少なくともこういった場所に 3 次元モデルを適用すべきかについて、今後検討しなければならない。

5. STOC-VF による津波遡上計算の一例

防波堤および海岸線における防潮堤によって守られているモデル臨海部に STOC-VF を適用して津波による浸水を計算した。図一7 は、そのときの津波の浸水状況の時間変化を示したものである。なお、VOF 関数を用いた津波遡上に関する数値計算には安田ら (2003) もある。同図 (a) で潜堤がある断面の地形は同図 (d) に示すようであり、防波堤の高さは $Z=7.0$ m である。津波としては、防波堤の沖側の海底から 0.5 m/s で流入する流れにより、高さ約 6.6 m の津波の来襲を模擬した。同図 (a) や (b) に見られるように、防波堤の直背後地では潜堤部分の直背後に比べて津波の到達時刻が若干遅れているが、浸水したときの浸水深の差異はほとんど無い。この

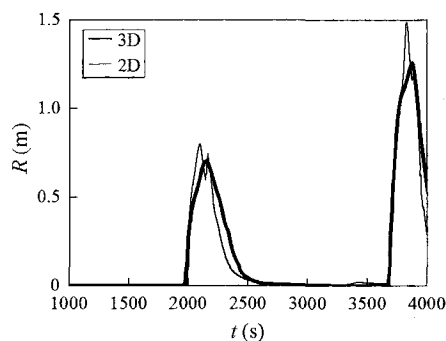


(a) 3次元計算結果



(b) 平面 2 次元計算結果

図一5 湾奥部の最大浸水深



図一6 埠頭先端付近の遡上水位の比較

ように 3 次元 VOF モデルを津波計算に適用することにより、建物周辺の流れの様子を詳細に再現することができる。こういった視覚的かつ詳細な計算結果を示すことで、津波に対する住民等の理解がより深まり、迅速かつ確かな避難に役立つものと期待される。

6. おわりに

本論文では、これまでに開発してきた多層レベルモデ

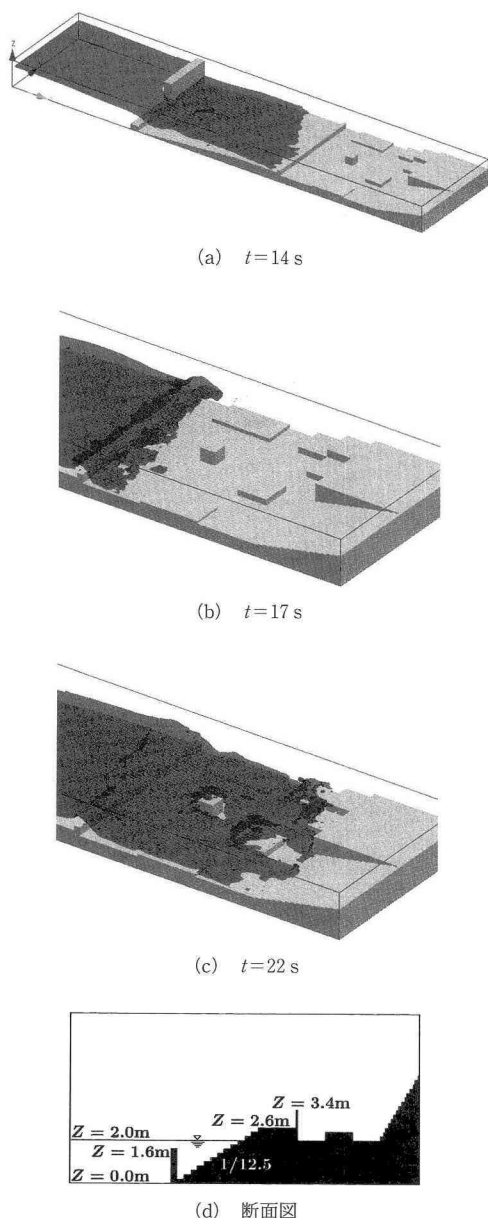


図-7 モデル臨海部における STOC-VF の適用

ル, 3次元流動モデルおよび3次元VOFモデルから構成される高潮・津波シミュレータSTOCを津波計算に適用した。まず, 津波防波堤開口部周辺や斜面上の津波に関する既往の模型実験結果との比較から, 3次元流動モデルの妥当性及精度を検証した。そして, これまで十分に検討されていない津波防波堤の堤幹部における津波の影響について数値計算を行い, 防波堤開口部における3次元流動が堤幹部にも影響を及ぼすことを明らかにし

た。さらに, 津波防波堤背後における津波の陸上遡上についても検討を加え, 震源から遡上域までの津波の現象が本数値モデルによって詳細に把握できることを示した。

3次元流動モデルの有効性は構造物周辺における津波の現象を精度高く推定することにあり, その精度を上げるためには乱流モデルの検討を今後十分に行う必要がある。この問題が解消されると, 3次元流動モデルと一般的に用いられる平面2次元モデルとの比較から, 防波堤の形状等に依存する運動量損失係数を推定することが可能になり, この値を用いることで平面2次元計算の精度向上が期待できる。今後は, 乱流モデルについてさらに検討を加えるとともに, 津波の3次元性を評価すべき箇所の抽出を行う所存である。

最後に, 本研究の遂行に当たり, 京都大学防災研究所の特定共同研究(14P-2)「都市域における氾濫災害危険度評価法の研究開発」(代表: 高山知司教授)において, 貴重な意見交換ができました。また, (株)富士総合研究所の秋山 実氏にはプログラム開発および数値計算の実施に多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 岩瀬浩之・藤間功司・見上敏文・柴木秀之・後藤智明 (2002): 波数分散効果を考慮した日本海中部地震津波の遡上計算, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 266-270.
- 沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発 (CADMAS-SURF), 沿岸開発技術ライブラリー, No. 12, 296 p.
- 柿沼太郎・富田孝史・秋山 実 (2003): 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波の数値計算, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 286-290.
- 後藤智明・佐藤一央 (1993): 三陸沿岸を対象とした津波数値計算システムの開発, 港湾技術研究所報告, 第32巻, 第2号, pp. 3-44.
- 神山 勉・阿部宣行・鹿島遼一 (1990): ポーラスモデルによる透過性構造物周辺の非線形波動解析, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 554-558.
- 数値流体力学編集委員会編(1995): 乱流解析, 東京大学出版会, 314 p.
- 谷本勝利・木村克俊・宮崎啓司 (1988): 津波防波堤開口部潜堤の安定性に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第27巻, 第4号, pp. 93-121.
- 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也 (1983): 1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察, 港湾技術研究所資料, No. 470, 299 p.
- 正村憲史・藤間功司・後藤智明・飯田邦彦・重村利幸 (2001): 2次元・3次元ハイブリッドモデルを用いた津波の数値解析, 土木学会論文集, No. 670/II-54, pp. 49-61.
- 松梨順三郎編 (1993): 環境流体汚染, 森北出版, 407 p.
- 安田誠宏・平石哲也・永瀬恭一・島田昌也 (2003): 流体直接解析法による臨海部の浸水リスク解析, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 301-305.