

臨海部における津波解析への3次元非静水圧流動モデルの適用

Application of Three-dimensional Non-hydrostatic Numerical Model to Tsunamis in Coastal Areas

富田孝史¹・本多和彦²

Takashi TOMITA and Kazuhiko HONDA

The numerical simulator (STOC) has been developed to estimate tsunami damage on coastal areas in which there are lots of structures. STOC consists of two sub-models: three-dimensional and non-hydrostatic model (STOC-IC) and multi-layer hydrostatic model (STOC-ML). The present model, especially STOC-IC is validated by experiments on flow around a rectangular weir and tsunamis passing a tsunami breakwater. In addition, applying the combination model of STOC-IC and STOC-ML to tsunami simulation in actual topography of harbor, it confirms that non-hydrostatic phenomena appear around seawalls and bending section of channels.

1. はじめに

津波計算には、長波理論に基づいた平面2次元モデルが一般的に使用される。しかし、例えば、防波堤開口部の潜堤上を通過する津波の模型実験結果と比較した Fujima ら (2002) や1993年北海道南西沖地震津波による奥尻島の最大遡上高さを検証した模型実験結果と比較した米山ら (2002) が示しているように、非静水圧の3次元モデルの適用が必要な場合がある。

本研究では、著者らがこれまで開発してきた3次元非静水圧流動モデルを含んだ高潮津波シミュレータ STOC (富田・柿沼, 2005) の妥当性及精度を、模型実験結果との比較から検証した。さらに、STOCを実地形に適用して、非静水圧の効果の現れ方を調べた。ここに、それらの結果を報告する。

2. 数値計算モデル

STOCは、構造物と干渉するような津波を解析するためのSTOC-ICと、大洋を伝播する津波を計算するためのSTOC-MLを接続するモデルである。

STOC-ICは、3次元非静水圧流動を対象としたRANSモデルである。計算負荷の低減のため、水表面の位置は連続式を鉛直方向に積分した式(Fujimaら, 2002)から算出した。また、地形変化や構造物の形状を滑らかに捉えるため、基礎方程式にはボラスモデル (榊山ら, 1990)を導入した。これらを基礎方程式として、staggered格子で空間を離散化し、leap-frog法により時間発展させた。

STOC中の渦動粘性モデルは、式(1)に示すSGSタイプ

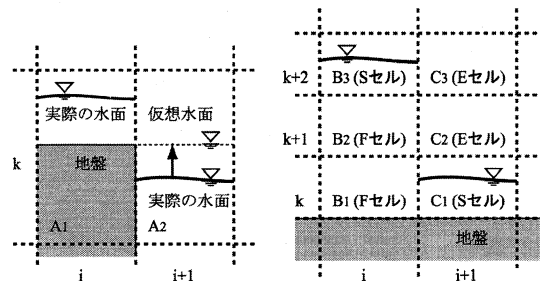
のモデルを基本とした。LESで通常用いられるSGSモデルは、計算格子サイズ以下の渦が統計的な等方性を有することを仮定しているため、小さい計算格子が必要であるが、中辻ら (1992) は、代表長さ歪率を用いて渦動粘性係数 ν_e を表現した0方程式モデルであると解釈を広げて、大きい格子での計算に適用した。

$$\nu_e = (C_s \Delta)^2 \sqrt{\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)} \quad (1)$$

ここに、上式は縮約規則により表記されており、 x_i ($i=1, 2, 3$) はデカルト座標系、 u_i は流速、 Δ は水平2方向および鉛直方向の計算格子長の積の3乗根で定義されたフィルター幅である。 C_s はモデル係数であり、本研究と同じオーダーの計算スケールでSGSモデルを適用した Fujima ら (2002) に倣い、0.20を基本とした。ただし、後述するように、この値については実験結果との比較により検討した。

STOC-MLは、計算領域を鉛直方向に多層に分割し、各層で静水圧を仮定したモデルである。基礎方程式は圧力の取り扱い以外はSTOC-ICと同様である。

図-1に、STOCにおいて特別な水表面処理をする場合



(a) 隣接する地盤よりも水位が低い場合
(b) 層をまたいで水位差がある場合

図-1 特別な水表面処理の模式図(断面図)

1 正 会 員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 上席研究官
2 正 会 員 修(工) (独法) 港湾空港技術研究所 津波防災研究センター 研究官

の模式図(断面図)を示す。ここで、Fセルは流体で満たされた計算セル、Sセルは水位を内在する計算セル、Eセルは流体が存在しない計算セルである。

図-1(a)のように水位が隣接する地盤より低い場合、セル A_1 とセル A_2 の間の圧力勾配により、セル A_1 の地盤上の水位が非常に浅い場合でも、セル A_1 とセル A_2 間に極めて速い流速が生じるという計算上の不具合が生じることがある。これを防ぐために、STOC-ICおよびSTOC-MLともに、セル A_2 内の水位をセル A_1 の地盤と同じ高さまで仮想的に引き上げ、その水位に基づいた静水圧により A_2 の圧力を評価することとした。

また、図-1(b)のように層をまたがって水位差が生じる場合、STOC-ICとSTOC-MLでは計算の処理が異なる。STOC-MLの場合、FセルおよびSセルでは静水圧近似に基づいて圧力を設定し、Eセルではセルの下側境界面に仮想的に設定した水位に基づいた静水圧分布から圧力を計算した。仮想的に水位を設定するのは、STOC-MLは図-1(b)のような状況には本来適用できないモデルであるが、このような状況が発生しても計算が破綻しないようにするための工夫である。一方、STOC-ICの場合、Fセルの周りにあるSセルやEセルの圧力を次のように設定した。下側にFセルがあるSセルの B_2 の圧力は、セル B_2 の圧力とセル B_3 内の水位面の大気圧とから線形補間によって設定した。下にFセルがないSセルの C_1 では、セル C_1 内の水位に基づいた静水圧である。FセルやSセルに隣接するEセルの C_2 や C_3 では、FセルやSセルとの間で圧力勾配が不連続になることを避けるために、Eセルの下側境界面に仮想的に設定した水位に基づいた静水圧分布からEセルの圧力を定めた。これらの圧力から全てのFセルの圧力が計算できることになる。

3. 長方形堰の越流実験との比較

STOC-IC、STOC-ML(多層)およびSTOC-ML(単層)の精度検証を目的として、本間(1940)による長方形堰の越流の実験結果および実験公式との比較を行った。

数値計算で使用した水路を図-2に示す。図中の q は単位幅当たりの流量(m^2/s)、 h_1 および h_2 はそれぞれ堰の堤頂を基準とした上流側および下流側の水位(m)である。水路中央に堰を配置し、堰の大きさ(幅0.20m、高さ0.15m)や流量のオーダーは本間の実験と同じにした。

流量は上流側および下流側の底面から流入出させ、初期値0から設定流量まで100s間で線形に増加させ、その後一定値とした。設定流量は0.01, 0.02, 0.03および0.04 m^2/s の4種類である。初期水位は水路全域で一様とし、それぞれの設定流量に対して初期水位 h_1 を $z=0.01\sim0.09$ mの間の0.01m間隔で与えた。

解析対象とした計算時間は、流れが十分に定常になっ

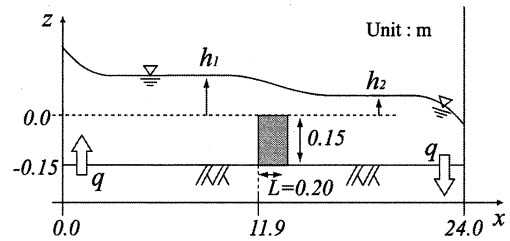


図-2 数値水路の概要

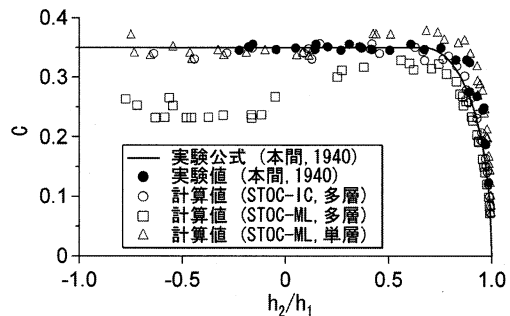


図-3 流量係数の比較

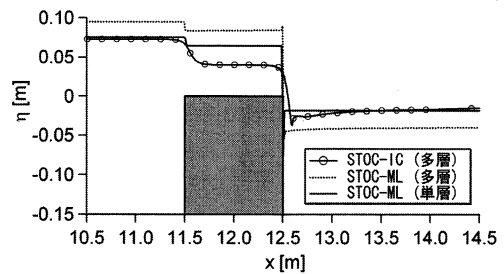


図-4 広頂堰の計算結果の比較

た450~500sであり、計算時間間隔は0.002sである。水平方向の計算格子間隔は、堰の前後2mの範囲では0.01mとし、そこから水路両端に向かって段階的に大きくして水路両端では1mとした。多層計算する場合は鉛直方向の計算格子間隔(層厚)を0.01mとし、計算対象範囲は $z=-0.15\sim0.15$ mとした。

図-3は、流量係数 C について、計算結果、実験結果および実験公式を比較したものである。STOC-ICおよびSTOC-ML(単層)の計算結果は、実験結果や実験公式と良く一致している。一方、STOC-ML(多層)は、上流側と下流側の水位の間に大きな差がある場合に精度が低い。これは、2章で述べた水表面の処理方法に起因すると考えられる。STOC-MLでは、図-1(b)のセル B_2 の圧力はセル B_3 にある水位に基づいた静水圧近似により求められるが、実際にはセル B_2 とセル C_2 の間に勾配をもった水面が存在し、その境界条件の下でセル B_2 の圧力が定まる。したがって、複数の層にわたって水面形状が切り立

つほど、セルB₂のタイプのセルが多くなり、圧力の評価の誤差が大きくなる。

長方形堰周辺における水面形を詳しく調べてみると、STOC-ICとSTOC-ML(単層)の計算結果にも差異が認められた。そこで、長方形堰の幅を1mに変更し、広頂堰上の限界水深による評価を行った。設定流量は $q=0.03 \text{ m}^2/\text{s}$ 、初期水位は $h_0=0.03\text{m}$ である。この条件における水平勾配水路での限界水深は $h_c=0.045\text{m}$ である。図-4に水面形状の計算結果を示す。このケースでは、堰より遠方で両者の計算結果は一致しているが、堰上ではSTOC-ML(単層)の結果は限界水深に一致しない。一方、STOC-ICの結果はよく一致し、その妥当性が示された。

4. 津波防波堤に関する模型実験との比較

富田・柿沼(2005)は、釜石湾口防波堤の模型実験(谷本ら, 1988)を対象にSTOC-ICの精度検証を実施した。しかし、原論文文中にも指摘されているように、計算における鉛直方向の解像度が不十分であったため、防波堤背後の水面形状の再現性に課題が残された。そこで、計算の解像度を上げて再計算を実施した。さらに、STOC-ML(多層)およびSTOC-ML(単層)との比較を行った。

数値計算において再現した模型実験水槽の概要を図-5に示す。水深は1.2mで一様である。水平方向の解像度は、図-5中の点線で囲った範囲では $0.040\sim 0.044\text{m}$ とし、それ以外では 0.12m とした。鉛直方向の計算格子間隔(層厚)は、静水面を基準として $z=-1.20\sim -0.60\text{m}$ および $0.12\sim 0.24\text{m}$ では 0.12m 、 $z=-0.60\sim 0.12\text{m}$ では 0.04m である。防波堤開口部の潜堤の断面形は図-6に示すよう

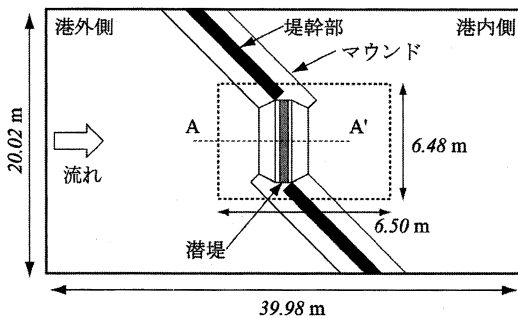


図-5 数値水槽の概要

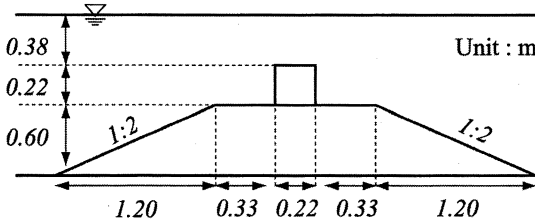


図-6 防波堤開口部潜堤の概要

である。実験では津波を定常流によって模擬しているため、開口部での平均流速が実験値と概ね一致するように、図-5の左側からの流入量および右側への流出量を調整して計算を実施した。解析対象とする計算時間は、流れが十分に定常になった $400\sim 450\text{s}$ である。

各モデルの計算結果と実験結果を比較する前に、STOC-ICおよびSTOC-ML(単層)の乱流モデルに含まれる係数 C_s および ν_{eh} の違いによる乱れの運動量散逸の差異が水面形の計算結果に及ぼす影響を検討した。図-7にSTOC-ML(単層)において、水平方向の渦動粘性係数を $\nu_{eh}=1.0\times 10^{-3}$ 、 1.0×10^{-4} 、 1.0×10^{-5} および $1.0\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ とした場合の防波堤開口部周辺での水位変化を示す。これは、図-5中のAA'断面における水位変化であり、 $x=1.60\text{m}$ が防波堤開口部の潜堤の天端中央、 x 軸正方向が港内側である。また、図-8は、STOC-ICにおいて、 $C_s=0.13$ 、 0.20 および 0.25 とした場合の水位変化を比較したものである。 ν_{eh} や C_s の違いによる水面形状の差異は小さく、今回の計算ではこれらの係数は水位変化に大きな影響を与えないことが判明した。

防波堤開口部周辺での水面形状の計算結果と実験結果との比較を図-9に示す。STOC-ICの計算結果は、開口部の平均流速が 1.01m/s の場合のものであり、STOC-ML(多層および単層)は、STOC-ICと同じ流量の場合のも

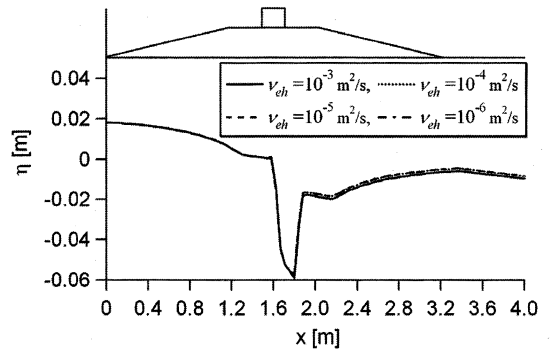


図-7 渦動粘性係数の違いによる計算結果の比較

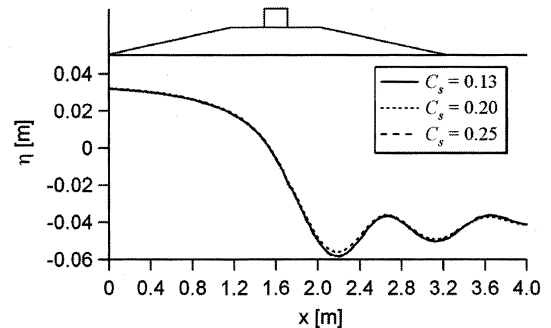


図-8 C_s の違いによる計算結果の比較

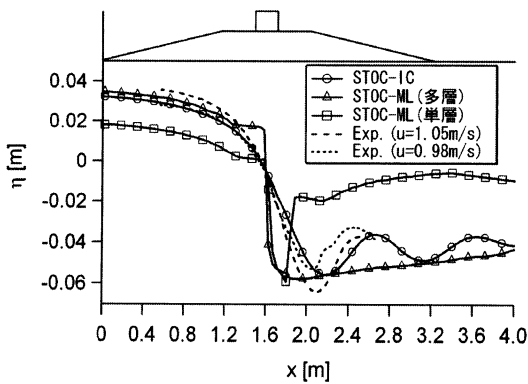


図-9 実験結果と計算結果の比較

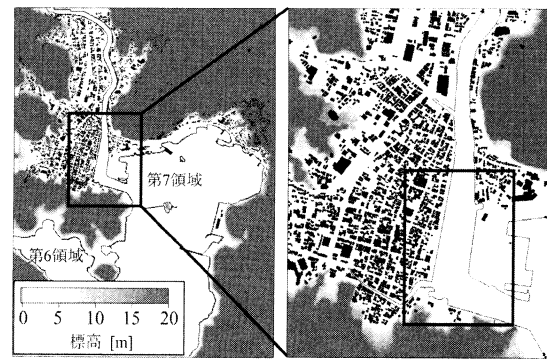


図-10 対象港湾の概要

のである。STOC-ICおよびSTOC-ML(多層)では $C_s=0.20$ とし、STOC-ML(単層)では $\nu_{eh}=1.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ とした。

STOC-MLでは、多層の場合も単層の場合も、水面形状の再現性が低い。しかし、鉛直方向の空間解像度をあげたSTOC-ICは、開口部背後の水位の変動状況も再現した。今回の計算では、防波堤開口部を0.04mの層厚で再現しており、この現地スケール換算値は2mである。したがって、実スケールを対象とした計算では、2m程度以下の計算格子とすることにより、防波堤周辺の津波を精度良く計算できると考えられる。

5. 実地形を対象とした津波計算

(1) 計算方法

図-10に示す実際の臨海部の地形を対象として、STOC-ICとSTOC-ML(多層)の適用性の検討を行った。地形および建物データは、国土地理院の航空レーザ測量によって得られた空間解像度1m程度のデータに基づいて作成した。なお、図-10の黒塗り部分が建物である。

計算領域は、津波波源を含む第1領域から計算格子サイズを1:1/3の比で小さくしながら7段階に分けて接続した。最も計算格子の細かい第7領域の広さは900m×1200mであり、水平方向の計算格子間隔は2mである。その鉛直方向の計算格子間隔(層厚)は、初期水位以下で2.5m(3層)、初期水位以上で1.0m(5層)とした。

第6領域および第7領域では、陸上の建物を津波伝播に対する障害物として再現した。使用した計算モデルは、第1～6領域にはSTOC-ML(単層)を適用し、第7領域にSTOC-ICとSTOC-ML(多層)を適用した。計算の対象時間は、第7領域において押しで始まる第1波による水位変動が初期水位の高さに戻るまでの地震発生後1560s間である。

(2) 非静水圧効果の出現箇所

図-11(a)は、第7領域におけるSTOC-ICによる最大浸水深分布を示しており、浸水面積は0.391km²である。図示

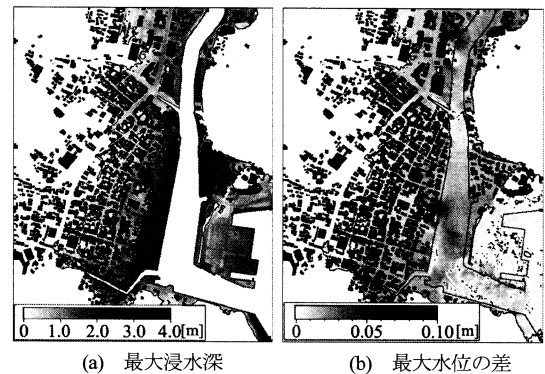


図-11 最大浸水深およびSTOC-ICとSTOC-ML(多層)により計算された最大水位の差の絶対値



図-12 最大圧力偏差および最大流速の差

しないが、STOC-ML(多層)でも同様な地域が浸水し、その面積は0.390km²である。また、図-11(b)に示すように、両モデルで計算される最大水位の差も小さく、最大の差は0.1m程度である。したがって、今回の計算対象では、浸水域や最大浸水深に非静水圧の効果は顕著に生じない結果となった。

しかし、STOC-ICにおいて静水圧とは異なる圧力が計算される所やSTOC-ICとSTOC-ML(多層)で異なる流

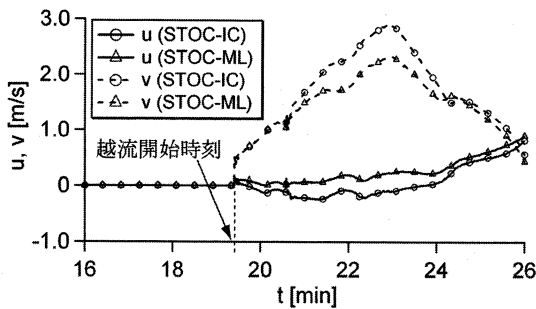


図-13 地点Aにおける流速の比較

速になる所があった。それらの差異が顕著に認められた図-10(b)の四角囲いの範囲を拡大して図-12に示す。

図-12(a)は、STOC-ICにおける圧力偏差の絶対値の最大値(鉛直分布かつ時間変化の中での最大値)を示したものである。ここで、圧力偏差とは、静水圧を基準とした圧力の偏差である。図-12(b)は、両モデルのそれぞれの最大流速(鉛直分布かつ時間変化の中での最大値)の差の絶対値を示したものである。したがって、この圧力偏差や最大流速の差は、平面位置において非静水圧の効果が現われている場所を示すと同時に、その程度を示す指標と考えることができる。また、図-13は、図-12(a)中に示す地点Aにおける高さ $z=+1.6\text{m}$ の護岸前面の流速($z=+2.0\text{m}$)の時系列変化を示したものである。ここで、図-13中の u は護岸に垂直な方向の水平流速、 v は護岸に沿った水平流速であり、それぞれ図-12(a)の右向きおよび上向きが正である。

圧力偏差が生じる所は、護岸前面や水路の分岐点といった場所(図-12(a))である。この圧力偏差も場所により異なり、図-12(a)中に示した地点Aでは静水圧よりも高くなるが、逆に地点Bでは低くなった。また、流速に関して非静水圧の影響が生じたのは、護岸を津波が乗り越える所や水路の屈曲部であり(図-12(b))、圧力に関して非静水圧の効果が現れた範囲よりも広がった。特に、図-13に示す護岸に沿った流速 v において差異が顕著である。このような現象は、複断面蛇行水路において、鉛直方向流速や圧力偏差が影響する低水路から高水敷に乗り上げる流れ(福岡・渡辺, 1998)に類似している。

今回の計算対象のような港湾域、すなわち陸上地形は平坦であるが、護岸などの鉛直構造物がある地域に2~3m程度の津波が来襲する場合、水位や浸水深には非静水圧の効果が顕著に生じないようであるが、護岸などの配置状況により特に流速に非静水圧の効果が生じる場合があると考えられる。したがって、津波による漂流物の挙

動を推定する際には、非静水圧モデルと静水圧モデルでは計算結果に差異が生じることに注意が必要である。

(3) 渦動粘性係数

今回の実地形を使った計算では、式(1)に示すSGSタイプモデルの場合は、渦動粘性モデルを取り入れてない場合($\nu_e=0.0\text{m}^2/\text{s}$)よりも陸上浸水面積が約1割減少し、 $\nu_e=1.0\text{m}^2/\text{s}$ とした場合よりも約1割増大した。各モデルにおいて海域の津波高には大差はないので、SGSタイプモデルは $\nu_e=0.0\sim 1.0\text{m}^2/\text{s}$ 程度の値を計算内で自動的に定めている結果となった。

6. おわりに

本研究では、STOCにおける3次元非静水圧モデルSTOC-ICや静水圧近似を使用したモデルSTOC-MLの妥当性と精度を、長方形堰を越流する流れや津波防波堤周りの津波に関する模型実験結果により検証し、津波が構造物を乗り越えるような所では、STOC-ICは実験結果を精度良く計算することを明らかにした。また、STOCを実地形に適用して、非静水圧の効果の現れ方を調べた結果、護岸前面や水路の屈曲部において、非静水圧的な現象が現れることを示した。

複雑に構造物が配置されている地形におけるSTOC-IC等の精度の検証を行う必要があり、今後模型実験結果との比較を行う所存である。

最後に、航空レーザ測量の測量成果を使用させて頂いた国土地理院地理調査部社会地理課に謝意を表する。

参考文献

- 榊山 勉・阿部宣行・鹿島達一 (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.
- 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, 港研報告, 第27巻, 第4号, pp.93-121.
- 富田孝史・柿沼太郎 (2005) : 海水流動の3次元性を考慮した高潮・津波シミュレータSTOCの開発と津波解析への適用, 港空研報告, 第44巻, 第2号, pp.83-98.
- 中辻啓二・栗田秀明・狩野晋一 (1992) : SGS渦動粘性係数を用いた大阪湾潮流の有限要素法解析, 水工学論文集, 第36巻, pp.693-696.
- 福岡捷二・渡辺明英 (1998) : 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集, 586/II-42, pp.39-50.
- 本間 仁 (1940) : 低溢流堰堤の流量係数 (第二編), 土木学会誌, 第26巻, 第9号, pp.846-862.
- 米山 望・松山昌史・田中博好 (2002) : 1993年北海道南西沖地震津波における局所遡上の数値解析, 土木学会論文集, 705/II-59, pp.139-150.
- Fujima, K., K. Masamura and C. Goto (2002) : Development of the 2D/3D hybrid model for tsunami numerical simulation, Coastal Eng. J., Vol.44, No.4, pp.373-397.