

BEM と VOF の結合解析法による構造物近傍波動場の解析

鄔 曙 光*・山城 賢**・吉田明徳***・入江 功****

著者らはこれまでに沖合から汀線までの広範囲にわたる波動現象を、精度良く、且つ、比較的短時間で解析できる数値モデルの開発を目的に、計算精度に優れ、計算機の記憶容量や計算に要する時間が少ない境界要素法 (BEM) と砕波等の強非線形現象を解析できる VOF 法を結合した解析法を提案した。本研究では、より実用的な問題として、構造物近傍の複雑な波動場を対象に有限振幅波 (第 5 次ストークス波) を用いて、結合解析法の妥当性と適用性について実験結果との比較により検討するとともに、BEM および VOF の単独手法との比較により結合解析法の優位性について検討した。さらに、幅広い周波数の成分波からなる不規則波を対象に解析を行い、その有用性を示した。

1. まえがき

波と構造物との干渉問題を取り扱う数値解析手法は現在までに数多く開発されており、そのうち、強非線形ポテンシャルモデル (例えば大山・灘岡, 1991) と Navier-Stokes 方程式モデル (例えば川崎, 1998; (財) 沿岸開発技術研究センター, 2001) がよく利用されている。前者は精度良く解析でき、しかも、計算時間と計算機の記憶容量が少なく済むという利点があるが、砕波などの極めて非線形性の強い現象が再現できない。後者は砕波などの複雑な現象を再現できるものの、膨大な計算時間と記憶容量を必要とする。このように各々の解析手法には利点と欠点があり、単一の手法で広領域の現象を解析することは事実上困難である。

以上のことから、著者ら (2003a, 2003b) は、砕波などの強非線形現象が生じる構造物のごく近傍のみを VOF (Nichols ら, 1980) で計算し、構造物からある程度離れた領域については、VOF に比べ精度が良く、計算時間が格段に短くて済む境界要素法 (BEM) を適用して、両者の計算領域に双方向に波を伝播できる結合法を提案し、微小振幅波の進行波と完全反射波を対象に、BEM-VOF 結合解析法の妥当性を確認した。本研究では、より実用的な問題として、構造物近傍の複雑な波動場を対象に有限振幅波 (第 5 次ストークス波) を用いて、結合解析法の妥当性と適用性について実験結果との比較により検討するとともに、BEM および VOF の単独手法との比較により結合解析法の優位性について検討した。さらに、幅広い周波数成分からなる不規則波への適用性について実験結果との比較により検討した。

2. 結合解析法の概略

BEM-VOF 結合解析法では、接続境界における流速と圧力の連続性をもとに、図-1 に示すように BEM の計

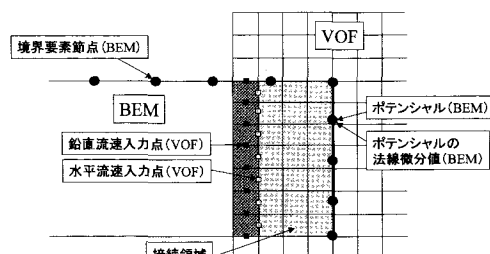


図-1 BEM と VOF の結合

算領域と VOF の計算領域をある幅で重複させて結合する。VOF では入力境界において、鉛直流速と水平流速が必要なため、BEM 領域内のポテンシャルを求め、水平方向および鉛直方向の差分をとって VOF の入力値とする。一方、BEM では、境界条件として、VOF 領域内にある仮想境界上のポテンシャルとその法線微分値が必要なため、VOF で算定される圧力と流速からベルヌーイの圧力方程式をもとにポテンシャルを算定し、水平流速をポテンシャルの法線微分値とする。これにより双方向への波動の伝播が可能な結合解析法となる。具体的な処理については鄔ら (2003a, 2003b, 2004) に説明されている。

3. 有限振幅波の伝播

本解析法を構造物近傍波動場へ適用する前に、有限振幅波の伝播について妥当性を確認するため、第 5 次ストークス波の進行波と完全反射波を対象に計算を行い理論値との比較を行った。計算領域は図-2 に示すように、BEM を沖側に、VOF を岸側に配置し、BEM 領域では沖側に数値消波フィルター (大山・灘岡, 1991) を、VOF 領域では岸側に減衰帯 (川崎, 1998) を設置した。また、造波ソースを BEM 領域のスポンジ層前面に設け入射波を発生させた。BEM 領域の幅を $4.8L$ (スポンジ層幅 $2.0L$, L は入射波の波長)、VOF 領域の幅を $4.5L$ (減衰帯幅 $2.0L$)、接続領域の重複幅を $0.3L$ とした。水深 h を 1 m とし、入射波は周期 $T=3.0\text{ s}$ ($kh=0.72$)、波高 $H=$

* 正会員 博(工) 九州共立大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 博(工) 九州大学助手 大学院工学研究院

*** 正会員 工 博 九州大学助教授 大学院工学研究院

**** 正会員 工 博 九州大学名誉教授

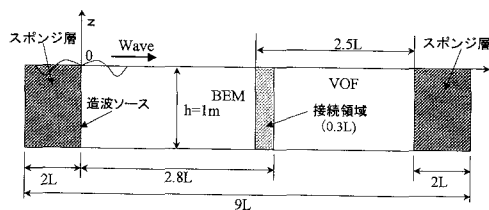


図-2 計算領域の設定

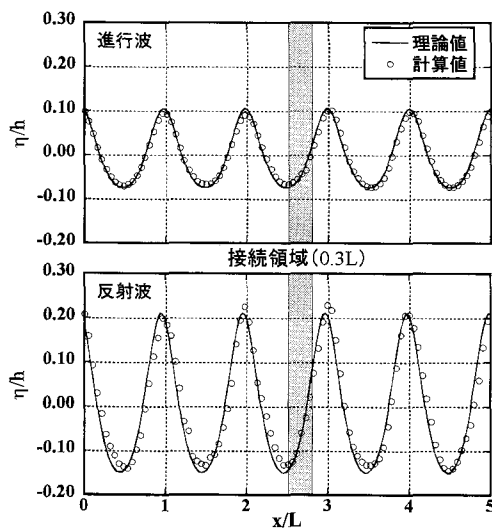


図-3 空間波形の比較

0.18 m とした。計算時間は $30T$ であり、計算時間間隔は BEM を 0.015 s 、VOF は 0.0015 s (BEM の $1/10$) とした。したがって、BEM の 1 ステップにつき、VOF は 10 ステップの計算を行う。BEM の沖側および岸側仮想境界と水面境界の要素数はそれぞれ 10, $192 (L/\Delta S = 40)$ とし、VOF の水平方向と鉛直方向のセルの数はそれぞれ $540 (L/\Delta x = 120)$ 、 $50 (h/\Delta z = 50)$ と設定した。なお、進行波の計算については VOF 領域端の減衰帯を機能させ、完全反射条件では造波ソースから $5.0L$ の位置 (減衰帯前面) を壁面境界として取り扱っている。図-3 に $t = 30T$ (計算終了時) における進行波と反射波の空間波形を示す。図中にはストークス波の第 5 次近似解を併せて示している。図より進行波の計算値と理論値はよく一致しており、また、造波開始後 30 周期経過しても破綻することなく精度良く計算している。反射波においては進行波に比べて、計算値と理論値に若干の差が見られるが、全体的に良く一致しており、このことから、本解析法は非線形波 (第 5 次ストークス波) の進行波のみではなく反射波についても十分に伝播することが可能であるといえる。

4. 構造物近傍波動場への適用

(1) 有限振幅波に対する適用性

構造物を対象とした場合の本解析法の適用性について検討する。対象とする構造物として、波浪制御、海域の有効利用、景観面において優れた波浪制御構造物であり、現地における適用事例が多数ある潜堤を選択した。潜堤は没水構造物であるため、潜堤上で砕波が生じやすく、また、波と潜堤との非線形干渉による高次の周波数成分波も発生し、潜堤背後の波動場は複雑となることが知られている。このため、砕波や非線形干渉効果に対する数値解析法の適用性を調べるには適した構造物である。

計算条件は、比較に用いる実験結果 (山城, 2000) の実験条件に合わせた。計算領域を図-4 に示す。解析対象領域の両端にスポンジ層を設置し、また沖側のスポンジ層と解析対象領域の接続位置に造波ソースを設け、領域の中央に設置した潜堤に対し、 x の負の方向から波を入射させた。図中の B , qh , h はそれぞれ潜堤の天端幅、潜堤の天端水深、水槽の静水深である。計算領域の長さ、造波ソースの位置およびスポンジ層の幅はそれぞれ $40h$, $x = -20h$, $2L$ とした。入射波は $T = 1.79\text{ s}$ ($kh = 0.75$) で $H = 4\text{ cm}$, 6 cm の規則波とし、第 5 次ストークス波理論により与えた。計算時間は $30T$ とした。なお、解析は BEM, VOF および BEM-VOF 結合解析法の 3 手法でおこなった。十分な計算精度を得るために必要な計算時間間隔 (タイムステップ) と要素の分割幅 (VOF の場合セルのサイズ) は各解析法で異なるため、次のように設定した。BEM のみでは水面境界の要素数、左右の仮想境界の要素数および潜堤を含む底面境界の要素の数をそれぞれ $200 (L/\Delta S = 23)$, $5, 115$ に設定し、タイムステップを 0.01 s とした。なお、BEM の計算では、通常、底面境界は一定水深における鏡像の原理を用いて計算から除いているが、底面境界も全て境界要素で分割した場合に、計算がより安定していたため、潜堤を対象とする本計算では、一定水深の底面境界についても要素分割し計算に考慮することにした。VOF では BEM に比べてより細かい領域分割とタイムステップが必要となるため、水平方向のセルの長さ Δx を $L/\Delta x = 80$ ($\Delta x = 3.42\text{ cm}$) とし、

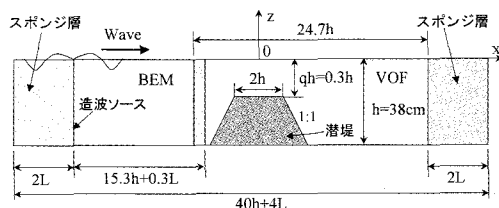


図-4 計算領域の設定

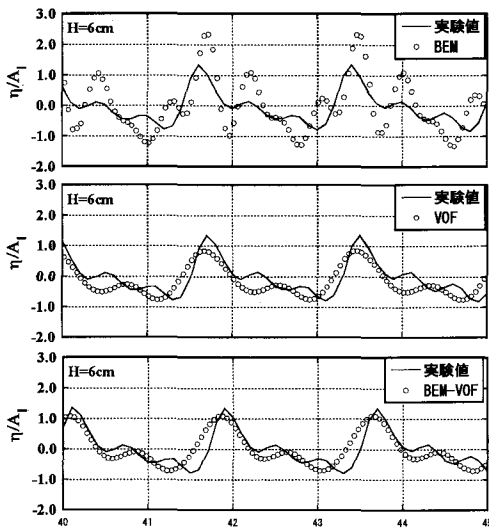


図-5 潜堤背後における水面変動の時間波形

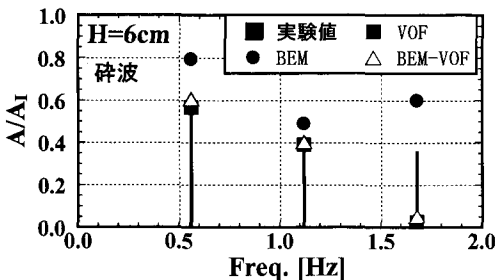


図-6 各周波数成分の振幅比

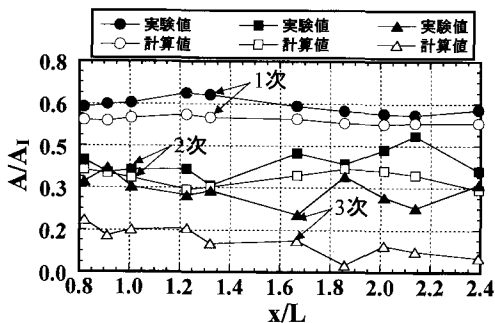


図-7 各周波数成分の振幅の空間分布

鉛直方向のセルの長さ Δz を $h/\Delta z = 20$ ($\Delta z = 1.9$ cm) とし、全セルの数を 820×40 に設定し、タイムステップを BEM のタイムステップの $1/10$ の 0.001 s に設定した。BEM-VOF 結合解析法では、図-4 に示すように、BEM の計算領域を $15.3h + 0.3L$ 、VOF の計算領域を $20h + 4.7h$ に取っておこなった。接続領域の重複幅は $0.3L$ とした。また、BEM 領域の水面の要素数は 120 ($L/\Delta S = 30$) とし、仮想境界の要素数は 10 とした。VOF 領域のセ

ルの大きさは VOF 単独の計算と同じに取り、セルの数を 460×40 とした。タイムステップは BEM を 0.01 s とし、VOF を BEM のタイムステップの $1/15$ とした。

図-5 に $H = 6$ cm のケースにおける潜堤背後海域での水面変動の時間波形について計算値と実験値との比較を示す。このケースは実験では潜堤上で砕波を生じており、加えて、波と潜堤との非線形干渉により潜堤背後には、2 倍、3 倍周波数の高次の成分波が生じるため、複雑な波形となっている。図よりポテンシャル理論に基づく BEM では妥当な結果が得られていないことがわかる。一方、結合解析法 (BEM-VOF) による計算値は実験値と概ね一致し、VOF 単独による計算と同程度の精度である。図-6 に図-5 の時間波形より求めた各周波数成分の入射波に対する振幅比 (A/A_1) を示す。当然ながら BEM では基本仮定が成立せず妥当な解が得られていない。VOF および結合解析法では砕波が生じても破綻することなく計算でき、基本周波数成分や 2 倍周波数成分の振幅は適切に表せている。しかし、3 倍周波数成分はほとんど表せていない。図-7 は潜堤背後における入射波の振幅に対する各周波数成分の振幅比の空間分布について、計算値と実験値を比較したものである。図より、基本周波数成分と 2 倍周波数成分は計算値と実験値は概ね一致している。しかし、3 倍周波数成分の振幅は空間的に大きく変化しており、全体的には、潜堤から離れるにつれ、振幅が減少している。これは本計算に用いた通常推奨されているセルサイズ ($L/80$) では 3 倍周波数に対するセルの幅が大きすぎるのが原因と考えられるが、3 倍周波数成分を十分に表せるほど、細かくセルを分割すると、VOF による計算は膨大な時間を必要とし、現実的ではない (鄒ら, 2004)。なお、BEM、VOF および結合解析法の計算に要した時間の比は $1:8:3$ であり、結合解析法は VOF に比べ格段に計算時間を短縮できる。

(2) 不規則波に対する適用性

これまで規則波を対象に構造物近傍波動場について、BEM-VOF 結合解析法の妥当性を検討してきた。しかし、現実の波は単一成分ではなく、多数の周波数成分を含む不規則波であるため、不規則波と構造物との非線形干渉について本結合解析法の適用性を検討する。

本結合解析法では接続領域をある幅に固定して計算を行うため、幅広い周波数帯にエネルギーを有する不規則波を対象とする場合、低周波数成分に対しては接続領域は相対的に短く、逆に高周波数成分に対しては相対的に長くなる。これまでの研究で接続領域幅が計算精度に影響することがわかっており (鄒ら, 2003a)、不規則波を対象に計算を行う場合には、できるだけ幅広い周波数帯で一定の精度を確保できるよう接続領域幅を適切に設定する必要がある。このため、まず不規則波の計算をおこ

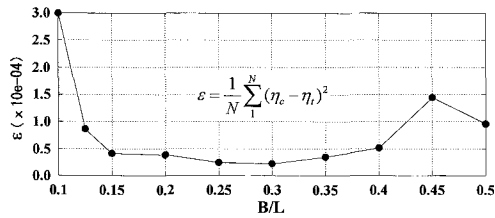


図-8 接続領域の幅による空間波形の自乗誤差

なう際の最適な接続領域幅について検討した。検討のための計算領域は前述の図-2 と同じに設定し、接続領域の幅のみを変化させた。水深 h を 1 m とし、入射波は後述する不規則波の有義波を想定し、周期 $T=2.3$ s ($kh=1.0$)、波高 $H=0.1$ m として、 $30T$ 間計算した。図-8 は計算終了時 ($t=30T$) の空間波形 (図-3 に示すような波形) における計算値 (η_c) と理論値 (η_i) との自乗誤差 (ϵ) を求め、接続領域幅に対して示したものである。図より、接続領域の幅 (B) が $0.15L$ 以下になると急激に計算精度が低下していることが分かる。逆に、 $0.4L$ 以上でも計算精度が多少低下している。 $0.5L$ で若干精度が良くなっているが、これ以上接続領域の幅を長くすると計算が破綻した。したがって、接続領域の幅を $0.15L$ から $0.4L$ で設定すれば一定の計算精度が確保できるものと思われる。なお、接続領域の幅が計算精度に影響する理由は、VOF の入力境界付近では圧力の算定値がしばしば異常な値となるため接続領域が短いと計算精度が低下し、逆に接続領域が長い場合は、VOF の計算領域を波が進行するにつれ波高が減衰することにより BEM への入力値が小さくなるためと考えられる (鄒, 2004)。以上の検討の結果、不規則波を対象とする計算においては、できるだけ幅広い周波数帯で精度良く計算できるように、接続領域幅を有義波の波長の 0.2 倍 ($B=0.2L_{1/3}$) とした。

不規則波を対象とした計算の条件は、比較に用いた実験結果の実験条件 (山城, 2000) を参考に設定した。計算領域を図-9 に示す。水深 h は 38.6 cm で、潜堤は矩形潜堤の両端に半径 26.2 cm の四分円を取り付けた形のものを用いている。潜堤は高さ 26.2 cm ($q=0.3$)、幅 73.4 cm ($B/h=2.0$) である。入射波は $T_{1/3}=1.43$ s ($k_{1/3}$

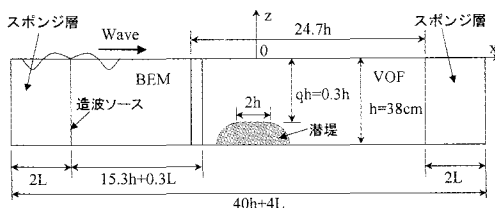


図-9 計算領域の設定

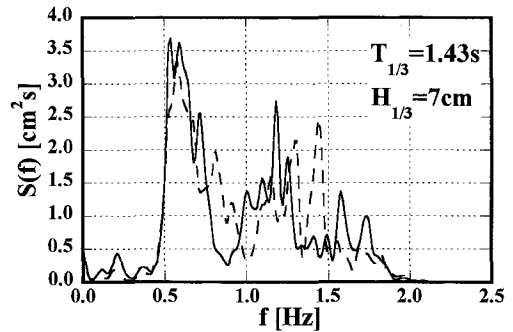


図-10 入射波成分の位相の組み合わせによる潜堤背後における水面変動のスペクトルの違い

$h=1.0$), $H_{1/3}=7$ cm の Bretschneider-Mitsuyasu 型スペクトルを有する不規則波 (100 成分波) で、計算時間は $100T_{1/3}$ とした。他の条件については前述した規則波の計算 (図-4 参照) と同じとした。

ところで、不規則波と潜堤との干渉により生じるある特定の周波数成分を考えると、これは入射波 (不規則波) を構成する多くの基本周波数成分波が相互に干渉して発生する同一周波数の個々の波が重合したものである。したがって、入射波を構成する成分波間の位相差により、大きく現れる周波数成分や、逆に、相殺して小さくなる周波数成分がある。図-10 は、同一のスペクトルから成分波間の位相差が異なる入射波を作成し潜堤に作用させた場合の潜堤背後における水面変動のスペクトルを計算したもので、前述の理由により、潜堤との干渉により生じる高周波数成分のピークが大きく異なっている。

このことから、不規則波と潜堤との干渉問題においてスペクトルを計算値と実験値とで比較するためには、入射波 (不規則波) を構成する成分波間の位相の関係を、実験と数値計算とで同じに取ることが必要である。しかし、実験では造波信号と実際の造波板との間で位相差が生じることや、計算と実験では対象とする流体域の大きさが異なることから、両者を一致させることは難しい。通常は、成分波間の位相の組み合わせが互いに異なる入射波を数多く用意し、それらについて実験および数値計算をおこなって得られるスペクトルの平均値についての比較がなされる。しかし、ひとつの入射波でさえ多くの計算労力を要する VOF の計算を数多くおこなうことは非常に労力を要する。すなわち、不規則波と構造物との非線形干渉について、統計的に信頼性の高い数値計算結果を得るためには、規則波に比べて格段に大きな計算労力を要することになる。

図-11 に、潜堤近傍波動場の水面変動のスペクトルについて、計算値と実験値との比較を示す。なお、実験値は入射波成分の位相の組み合わせが異なる 5 ケースにつ

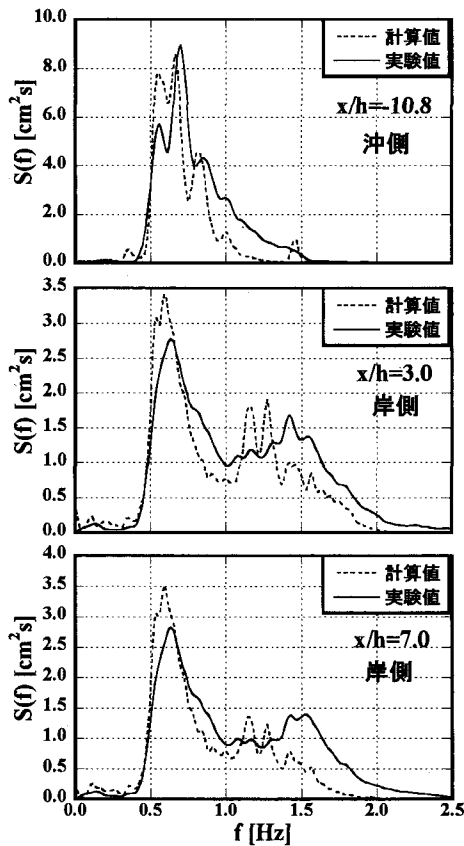


図-11 潜堤近傍の水面変動のパワースペクトルの比較
($T_{1/3}=1.43$ s, $H_{1/3}=7$ cm)

いて実験を行って得られたスペクトルの平均値であり、計算値は同様に10ケースの計算を行って得られたスペクトルの平均値である。実験では、潜堤上で激しく碎波が生じ、また、潜堤背後では、非線形干渉により高次の周波数成分が現れている。図より、潜堤の沖側では、ほぼ基本周波数成分のみが存在し、また、潜堤からの反射により、スペクトルには凹凸が現れている。計算値と実験値を比較すると、計算値は0.8 Hz以上の周波数で実験値に比べ小さいが、0.5 Hz～0.8 Hzの主たる周波数帯については、凹凸の様子が異なるものの、スペクトルの大きさはほぼ同程度といえる。一方、潜堤の岸側では、計算値は実験値に比べ基本周波数成分では大きく、1.3 Hz以上の高周波数では小さい。計算では碎波によるエネルギー損失を考慮していないため、基本周波数成分で計算値が大きくなっているものと思われる。高周波数成分では、前述したようにVOFのセルのサイズが相対的に

大きいということ、およびVOF領域における波高の減衰の程度が大きくなることから、計算値が実験値より小さくなっていると思われる。また、高周波数帯で計算値は1.2 Hzおよび1.3 Hz付近にピークがあり、実験値のピークと周波数がずれている。この主な理由は、先述した高周波数成分ほど計算値における減衰の程度が大きいことに加え、入射波成分の位相の組み合わせが異なるケースについて計算および実験を行って平均のスペクトルを求めているが、平均するケース数が少ないことも挙げられる。

5. あとがき

BEM-VOF結合解析法は非線形波の進行波および反射波を十分に再現できることを確認した。BEM-VOF結合解析法により、VOF単独での計算に比べ計算時間を格段に短縮できることから、VOFのみでは実質的に困難な不規則波に対する非線形干渉の解析が実質的に可能とでき得る。また、計算時間の短縮が図れることから、VOFの計算領域により細かいセルとタイムステップを用いることで、計算精度をより高め得ることも期待できる。加えて、VOFの計算領域を最小限に設定し、例えば、BEM-VOF-BEMの3領域結合とすることで、更なる計算時間の短縮が可能である。

参 考 文 献

- 鄺 曙光・山城 賢・吉田明徳・鮎川慶一郎・入江 功 (2003a): BEMとVOFを結合した波動場解析法の開発。海洋開発論文集, 第19巻, pp. 83-88.
- 鄺 曙光・山城 賢・吉田明徳・入江 功 (2003b): BEMとVOFを結合した波動場解析。海岸工学論文集, 第50巻, pp. 11-15.
- 鄺 曙光 (2004): BEMとVOFを結合した断面2次元波動場解析法に関する研究。九州大学学位論文, 122 p.
- 鄺 曙光・山城 賢・吉田明徳・井ノ口洋平・入江 功 (2004): BEM-VOF結合解析法の構造物近傍波動場への適用。海洋開発論文集, 第20巻, pp. 689-694.
- 大山 巧・灘岡和夫 (1991): 非線形不規則波動場を対象とした数値波動水槽の開発。土木学会論文集, No. 429, pp. 77-86.
- 川崎浩司 (1998): 潜堤構造物による碎波変形と再生過程に関する基礎的研究。名古屋大学学位論文, 186 p.
- (財) 沿岸開発技術研究センター (2001): 数値波動水路の研究・開発, 296 p.
- 山城 賢 (2000): 不規則波と構造物との非線形干渉解析法と潜堤背後の波動場特性に関する研究。九州大学学位論文, 210 p.
- Nichols, B. D., C. W. Hirt, and R. S. Hotchkiss. (1980): SOLA-VOF, A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries. Los Alamos Scientific Laboratory report LA-8355, 119 p.