

VOF法と境界要素法を結合した波動場解析法の開発

九州大学大学院 学生員 ○エン 曙光 正会員 山城 賢
正会員 吉田 明德 正会員 入江 功

1. まえがき

近年のコンピューターの急速な発達に伴い、CFD(数値流体力学)を海岸工学の分野に取り入れ、数値シミュレーションにより構造物近傍の波動現象を解明しようとする研究が活発に行われている。

当初から発達した数値シミュレーションの主な手法は、波動理論やポテンシャル理論に基づく支配方程式を、有限要素法、境界要素法、差分法などを用いて解くものである。これらの手法は、それぞれに利点と欠点を有しているが、共通していることは、砕波などの極めて非線形性の強い現象が原理的に再現できないということである。

これに対し、非圧縮粘性流体を対象とするNavier-Stokesの運動方程式を差分化し、何等の仮定も導入せずに計算領域内の流速と圧力を直接解く方法、いわゆるDirect Simulationが近年発達し、現在も多くの研究がなされている。この手法は、前述の数値モデルでは難しい構造物近傍における砕波などの強非線形な現象を再現することができる点で非常に優れた手法といえる。

ところが、Direct Simulationは、領域全体を多数の格子で分割し、その格子に設定した流速や圧力などを時間発展的に求めていくため、膨大な計算時間と記憶容量を必要とする問題がある。この問題については、今後のコンピューターの発展に伴い改善されることが予想されるが、詳細なシミュレーションを行う場合や試行的なシミュレーションを数多く行う場合などの実用的な適用を考えると、コンピューターの相当な発達を待つ必要があると思われる。

このような波動場解析法の現状をふまえ、本研究では海岸構造物近傍の複雑な波動場を十分再現することができ、且つ、計算時間や記憶容量の面で実用に耐えうる数値解析モデルを開発することを試みる。具体的には、Direct Simulationに比べ計算精度が良く、記憶容量や計算時間が格段に少なく済む境界要素法と、Direct Simulationの一手法で、自由表面の解析に実績のあるVOF法を結合し、両手法の利点を十分に活かした数値解析モデルを開発する。なお、境界要素法とVOF法を結合した数値解析モデルのアルゴリズムについては、現在、開発段階にあるため、本文では、主に両計算モデルの結合手法の概念について述べる。

2. 結合手法の概念と留意点

境界要素法(以後、BEMと記す)は、計算精度が良く、計算対象領域の境界でのみ線分要素を配置して計算する

ため記憶容量や計算時間が少なく済む利点があり、潜堤上における波の分裂現象などを対象とした非線形波動解析法が開発されている¹⁾。ただし、ポテンシャル理論に基づくため構造物近傍で生じる渦や砕波といった極めて非線形性の強い現象は原理的に再現できない。

一方、VOF法は渦や砕波などの非線形性の強い現象を再現することが可能であるが、全計算領域で計算格子を配置するため、膨大な計算時間と記憶容量を必要とする。

水理実験等で実際の現象を観察すると、構造物のごく近い範囲では急激な波浪変形が生じるものの、構造物からある程度離れた海域では、ポテンシャル理論に基づく解析法で十分表現できるものと思われる。したがって、全計算領域のうち、構造物のごく近傍ではVOF法を適用し、構造物からある程度離れた領域では境界要素法を適用することで、互いの欠点を補い、且つ、両者の利点を活かした数値解析モデルとなると考える。

VOF法と境界要素法を結合したハイブリッド数値計算モデルの概念を図-1に示す。構造物近傍の砕波などが生ずる強非線形の領域(領域2)にはVOF法を適用し、入射領域(領域1)と通過領域(砕波後の波が再生した領域3)には境界要素法(BEM)を適用する。この両者の結合は、接続境界で流速、圧力、水位を受け渡すことにより行う。

計算手順は図-2に示すとおりである。初期設定として境界条件、構造物条件等の計算条件を設定した後、入力境界から波入力を行い、領域1についてBEMにより境界上のポテンシャルを求める。次いで、接続境界1上の流速、圧力、水表面位置を算定し、これを境界条件として領域2の流速、圧力、水面変動をVOF法により算定する。さらに、VOF法で求めた接続境界2上の流速、圧力、水表面位置をBEMの境界条件として領域3の境界のポテンシャルを求め、全領域の水面波形を決定する。以上の手順を時間ステップを更新しつつ設定した計算時間に達するまで繰り返す。

本計算モデルを開発するうえで、留意すべき点が幾つか挙げられる。第1に接続境界で流速や波形等の物理量を滑らかに接続する工夫が必要である。第2に時間ステップ、領域の広さ、計算点の間隔(BEMの場合は要素幅、VOF法の場合はセルの大きさ)などの影響について検討が必要である。BEMとVOF法では、同程度の計算精度を確保するために必要な空間分解能と時間分解能が必ずしも一致しないため、例えば、BEMでの1ステップの計算に対

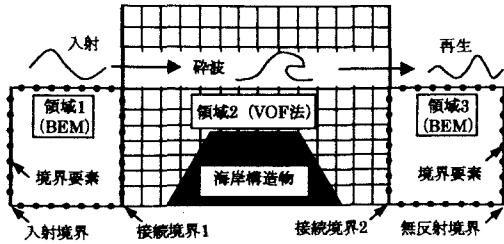


図1: ハイブリッド数値計算モデルの概念図

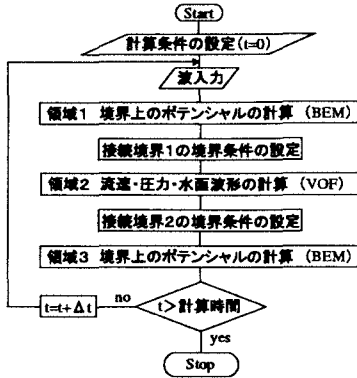


図2: 計算フロー

しVOF法では数ステップの計算が必要になるものと思われる。したがって、接続境界で物理量を滑らかに接続するうえでも、BEMとVOF法のそれぞれについて時間ステップや計算点間隔による計算精度を十分に検討する必要がある。また、VOF法によって計算すべき領域については、領域が広過ぎると計算時間が増大し、狭過ぎると構造物近傍の擾乱を精度良く再現できないため、適切に領域を設定するためには、事前に試行計算を行う必要がある。第3の留意点として、オリジナルのSOLA-VOF法²⁾では、気泡の発生、領域全体の水量の変化、波形の乱れなどが生じることが指摘されており、これらの点について改良が必要となることである³⁾。

3. 境界要素法とVOF法の計算時間の比較

BEMは、境界条件のもとで導出される境界上のポテンシャルに関する連立一次方程式を解く手法である。したがって、境界要素の数により連立一次方程式の元数が決まるため、境界要素の数により計算時間はほぼ決定する。一方、VOF法では、各時間ステップで全てのセルが連続の式を満足するために行われる収束計算に最も時間を費やす。したがって、セル(計算点)の数のみではなく、収束速度により計算時間は大きく増減する。そこで、簡単な波の伝播を対象に、両計算法における計算時間の比較を行った。

図-3は、図中に示す矩形の計算領域に微小振幅波($kh=1.0$, $H/h=0.2$)を入射させ、波の伝播計算を行った際

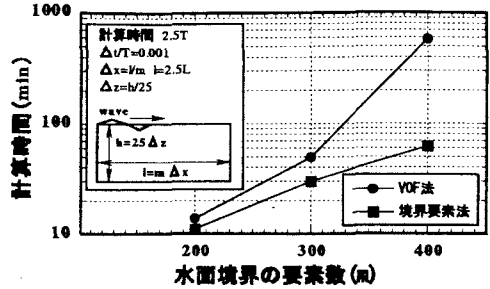


図3: 境界要素法とVOF法による計算時間の比較

の計算時間を比較したものである。計算領域は水深1m、水平方向距離を2.5波長と一定とし、計算時間は2.5周期とした。計算点(BEMの場合は境界要素、VOF法の場合はセル)の分割幅は水深方向を水深/25で固定して、水平方向の分割幅のみを変化させた。したがって、計算点数が200であれば水平方向の分割幅は波長/80、400であれば波長/160となる。なお、VOF法では水表面上の領域についてもセルを設定する必要があるため、VOF法の場合は、鉛直方向に50個のセルを配置した。また、計算は全てのケースを同一のパソコン(OS: Windows2000, CPU: AMD Athlon 1.9GHz)で行った。図-3の横軸は水平方向の計算点数を示している。図より、水面境界の要素数が200の場合は、比較的空間分解能が粗く、BEMとVOF法で大きな計算時間の差は生じていない。しかし、計算点数が増加すると、BEMに比べてVOF法では爆発的に計算時間が増加している。これは、セル数が増えることにより、各時間ステップにおける収束計算の回数が格段に増加したことによる。

ここで行った比較計算は、単純に計算点数による計算時間を比較したものであり、計算格子の設定等が波の計算としてはあまり現実的ではないが、VOF法ではセル数の増加による計算時間の増加のみではなく、複雑な波動場を対象とすることで、より収束計算に費やす時間が増加すると推測されるため、VOF法とBEMとの結合数値計算モデルの開発は計算時間を短縮するという点および高精度の解を得るという点で大きな意味があるものと思われる。

4. あとがき

境界要素法(BEM)とVOF法を結合した数値計算モデルの概念と計算手順を述べた。具体的な数値計算アルゴリズムは現在開発中であるため、本数値計算モデルによる計算結果および考察については講演時に説明する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会(1994), 海岸波動, pp.162-167
- 2) Nichols, B. D., Hirt, C. W. and Hotchkiss, R. S.(1980), SOLA-VOF: A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory report LA-8355
- 3) (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