

VOF と BEM を結合した波動場解析法の開発

九州大学 学生員 ○鮎川慶一朗 エン曙光
正会員 山城賢 吉田明徳

1. はじめに 水面波動の数値計算法のうち境界要素法(BEM)は、計算精度が良く計算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と計算時間が少なくて済む。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碎波等の強非線形性現象は原理的に再現できない。これに対し VOF 法は、渦や碎波などの強非線形性現象計算が可能であるが、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。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ことが見てとれる。そこで本研究では、図-1 に示すような計算領域のうち、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 BEM 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の開発を試みた。



図-1 ハイブリッド数値計算モデルの概念図

2. 接続方法と計算条件 BEMとVOF法の接続方法の概略を図-2に示す。接続は、流速と圧力の連続条件を元に行う。BEMからVOFへの接続では、VOFの入射境界の水平流速と鉛直流速をBEM領域内のポテンシャルの差分から求める。VOFからBEMへの接続では、VOFで計算される圧力からBEMの通過境界上のポテンシャルの法線微分値とする。なお、VOF法の入力境界付近における圧力の計算値が不安定になりやすいことから計算領域を一部重複させて連結している。

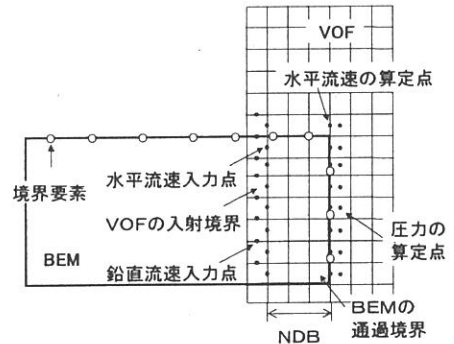


図-2 接続方法図

上述の接続方法に従い境界要素法と VOF 法を結合したプログラムを作成し計算を行った。計算条件を図-3に示す。入射波は $kh=0.5$, $T=4.174s$, 振幅 $A/h=0.05$ の微小振幅波で BEM 側から入射させた。VOF 領域端の条件は透過条件(放射条件)と完全反射の二通りとした。計算時間は 10 周期であり、時間ステップは BEM を $1/100T$, VOF 法を $1/200T$ とした。また、接続境界における重複セルの個数(NDB)を x 方向に 50 個とした。

$kh = 0.5$ $Amp = 0.05 h$
 $DT_{BEM} = 0.01T$ $CYL = 10.0T$
 $DT_{VOF} = 0.0005T$ $h = 1m$
NDB=50

3. 計算結果と考察 図-4~7に透過、完全反射それぞれの境界条件での空間波形($t=6T$)および時間波形($x/h=17.58$, $x/h=35.15$)の計算結果と微小振幅波理論による理論値との比較を示す。図-4の空間波形の比較から波長はほぼ一致しているが計算値は平均水位が上昇しており、また、谷の部分で若干波形が乱れていることがわかる。図-5は図-4の矢印の位置(VOF 領域)における時間波形である。図より波の峰に比べ、谷の部分で誤差が大きいものの、周期についてはほぼ一致している。図-6は完全反射の条件における空間波形を示しており、計算値は計算領域端からの反射波の先端が $x/h=15$ 付近まで到達している状態を示している。図より計算値は安定した

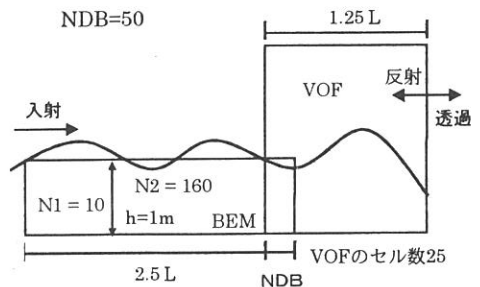


図-3 計算条件

重複波となっていないが、壁面近傍では波の峰と谷の位置および大きさが理論値に近い値となっている。図中の矢印の位置における時間波形を図-7に示す。計算値は5周期付近から反射波が含まれ波高が増大しているが、理論値に比べると若干小さい。また、計算値は計算終了間際になると振動している。これは入射境界における再反射を抑える処理を行っていないため、反射波が入射境界に到達すると計算が破綻することによる。図-8、9は波高と周期について計算結果と理論値の比較を示したものである。図-8より、進行波(透過条件)では、進行波はBEM領域の $x/h=20$ 付近から波高が減衰していることがわかる。しかしそれ以降はVOF領域においても波高の減衰はなく一定である。重複波について見ると、計算値の入射境界近傍の値は、重複波が安定する前に計算が破綻しているため正確な値ではないが、全体的には腹や節のパターンは理論値と合っている。しかし波高の大きさは透過条件の計算に比べ誤差が大きい。図-9に示す周期は各点の時間波形からゼロアップクロス法で読み取った周期を入射波の周期で無次元化して表示している。進行波(透過条件)における周期の変動は、波が伝播するにつれて短くなる傾向が見られ、接続領域付近で最も短くなっている。重複波については周期が空間的に変動しており、特にVOF領域では最大で5%程度変動している。

4. 終わりに 上述の条件での計算時間は同領域をVOF法のみで計算した場合に比べ約6割程度であり、計算時間の短縮という点で本解析法は優れているといえる。しかしながら現段階では改善の余地が多く、今後の課題として以下のようなことが挙げられる。

- ① 入射境界での再反射を防ぐため造波ソースと吸収帯を設置する。これにより安定した長時間の計算を行う。
- ② 現段階では、BEMの線形要素は一定要素としており、これが波高の減衰する原因となっている。したがって要素を線形要素とし計算精度の向上を図る。
- ③ 計算時間間隔、要素の大きさなどについて最適条件の検討。本解析法に上記の改良と検討を行った後、構造物がある場合について本解析法を適用し実験結果による妥当性の検証を行う予定である。

〈参考文献〉1) 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 2) エン曙光 (2003) : VOF法と境界要素法を結合した波動場解析法の開発, 平成13年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, pp. B-14-B-15

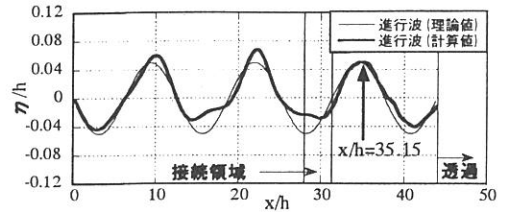


図-4 空間波形($t=6T$, 透過条件)

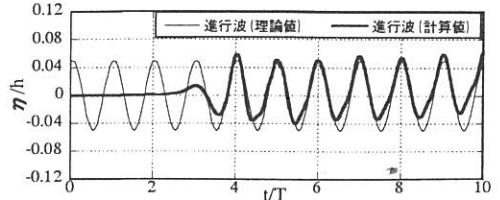


図-5 時間波形($x/h=35.15$, 透過条件)

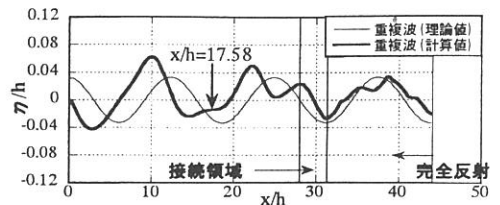


図-6 空間波形($t=6T$, 完全反射)

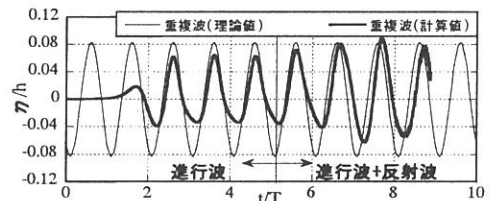


図-7 時間波形($x/h=17.58$, 完全反射)

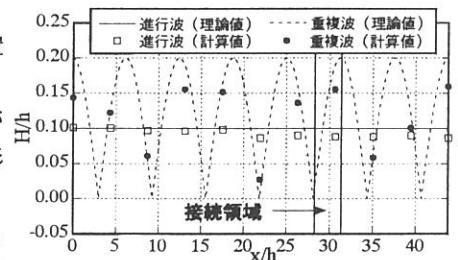


図-8 波高の比較

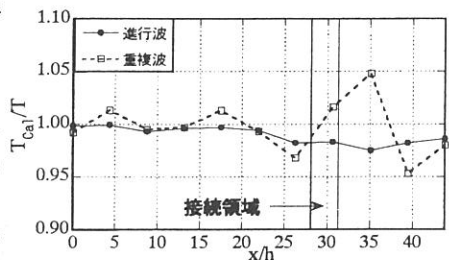


図-9 周期の比較