

多相流モデルへの不規則波の造波機能の組み込みとその精度の検証について

名古屋大学工学部 学生会員 ○吉村一樹
 名古屋大学大学院工学研究科 正会員 中村友昭, 趙 容桓
 名古屋大学大学院工学研究科 フェロー 水谷法美

1. はじめに: 海岸・港湾構造物の機能や効果の評価を行う際、水理模型実験の実施には多くの費用と時間が必要となることから、高度な数値計算モデルを用いた数値解析の活用が進められている。そのような数値計算モデルの一つとして、本研究では、3次元流体・構造・地形変化・地盤連成数値計算モデル (FS3M; 中村ら, 2016) に着目する。同モデルは、規則波作用下や津波作用下における海岸・港湾構造物の検討を行う際に有用なモデルであることが確認されているものの、より実現象に即した検討を行うためには不規則波を用いた検討が不可欠であることから、不規則波の造波機能の追加が求められている。本研究では、不規則波が造波できるよう FS3M の改良を行うとともに、その妥当性を周波数スペクトルの観点から検証する。

2. FS3M への不規則波の造波機能の追加: 単相流モデルである CADMAS-SURF (沿岸技術研究センター, 2008) と同等の不規則波の造波機能を多相流モデルである FS3M に組み込んだ。具体的には、 M 個の微小振幅波の重ね合わせにより、以下のように不規則波の水位変動 $\eta(t)$ と水平流速 $u(z, t)$ を評価できるものとする。

$$\eta(t) = \sum_{m=1}^M a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m), \quad u(z, t) = \sum_{m=1}^M \left\{ 2\pi f_m \frac{\cosh k_m (h+z)}{\sinh k_m h} a_m \cos(2\pi f_m t - \varepsilon_m) - \alpha \bar{U}_m \right\}$$

ここで、 z は静水面を原点とした鉛直座標、 h は静水深、 a_m 、 f_m 、 k_m 、 ε_m 、 \bar{U}_m はそれぞれ m 番目の成分の振幅、周波数、波数、位相、Stokes drift であり、 $E(f_m)$ を周波数スペクトル、 Δf_m を周波数の刻み幅としたとき、振幅 a_m は $a_m^2 = 2E(f_m)\Delta f_m$ と表される。また、 $\alpha \bar{U}_m$ は計算領域内の水量の変化を抑えるために導入された項であり、 Ur を有義波の Ursell 数としたとき、 α は $\alpha = 0.62 Ur^{0.08}$ と表される。

3. 計算条件: 計算領域の概略図を図-1 に示す。同図に示すように、有義波の波長を L としたとき、減衰領域を除く計算領域の長さを $5L$ とし、その沖側と岸側に約 $5L$ の長さの減衰領域を設けた。また、計算領域の高さは 1.0 m とした。そして、静水深 h が 0.3 m、有義波高 H が 0.04 m、有義波周期 T が 1.0、1.5、2.0 s の不規則波を造波させ、計算開始 $200T$ 秒後まで計算を行った。ここで、周波数スペクトル E は修正 Bretschneider・光易型とした。また、CADMAS-SURF に倣って、有義波の周波数の 0.5 倍から 6.0 倍までの $M=500$ 個の成分を考慮し、その間を等間隔に分割した。位相 ε_m は乱数によりランダムに決定し、乱数を 2 パターン変化させた。計算格子は、減衰領域を除く計算領域では水平方向に $L/100$ の等間隔格子を、 $-0.3 \leq z \leq 0.1$ m では鉛直方向に 0.005 m の等間隔格子を用い、それ以外の領域では不等間隔格子を用いた。境界条件として、底面には Slip 条件、沖側面と岸側面には Sommerfeld 放射条件、上面には圧力一定の条件を課した。

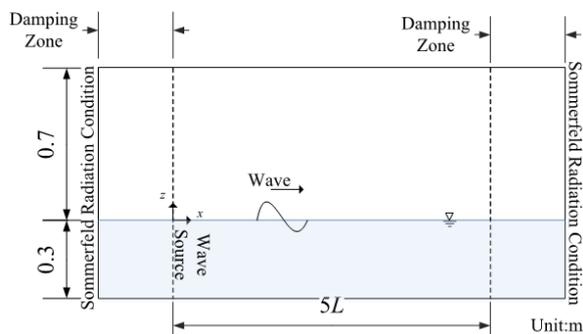


図-1 計算領域の概略図

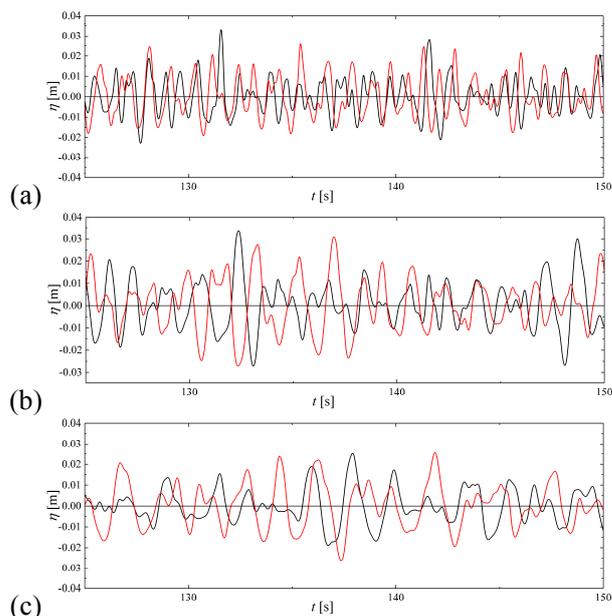


図-2 水面変動 η の時間変化 ($x/L = 0$):
 (a) $T = 1.0$ s, (b) $T = 1.5$ s, (c) $T = 2.0$ s

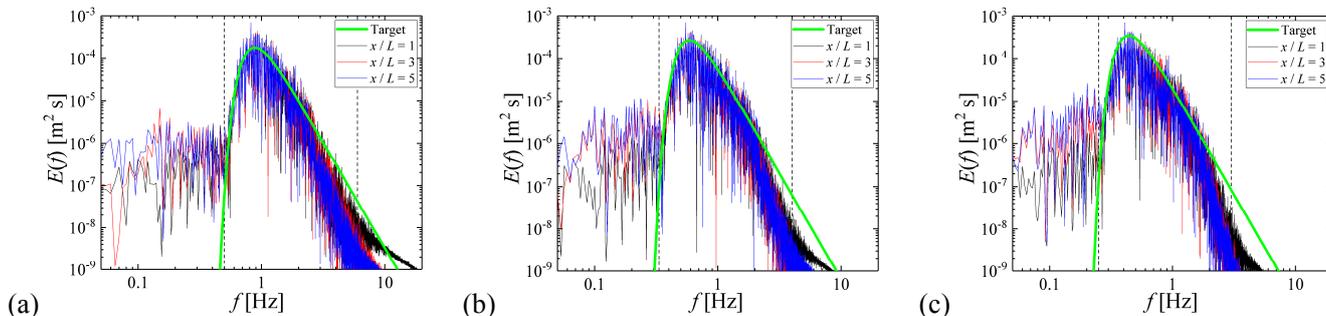


図-3 周波数スペクトルの比較 : (a) $T=1.0$ s, (b) $T=1.5$ s, (c) $T=2.0$ s

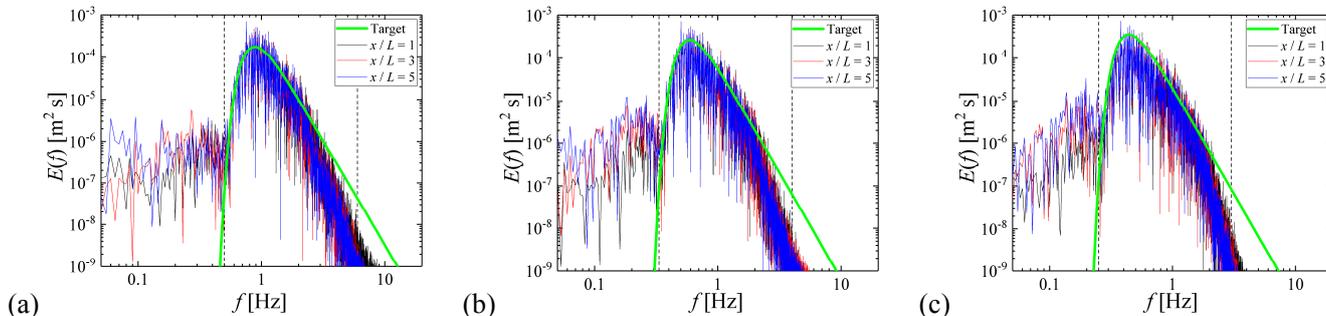


図-4 位相 ϵ_m が異なる条件での周波数スペクトルの比較 : (a) $T=1.0$ s, (b) $T=1.5$ s, (c) $T=2.0$ s

4. 計算結果および考察 : 造波ソースの位置 ($x/L=0$) での水面

変動 η の時間変化を図-2 に例示する. ここで, 黒線と赤線は位相 ϵ_m を決める乱数が異なるケースを示す. 図-2 より, 多相流モデルである FS3M においても单相流モデルである CADMAS-SURF と同様の手法で不規則波の造波が行えることが分かる. 続いて, 水面変動から求めた $x/L=1, 3, 5$ の位置での周波数スペクトル E を図-3 と図-4 に示す. ここで, 緑色の実線は目標とした修正 Bretschneider・光易スペクトル, 黒色の破線は上述した造波時に考慮した周波数の範囲を示す. 同図より, 造波時に考慮した周波数の範囲内であれば, 位相 ϵ_m によらず目標とした周波数スペクトルと概ね一致した不規則波を造波できていることが確認できる. ただし, 造波時に考慮した周波数の範囲内であっても, 周波数スペクトルが目標値よりも全体的に若干小さい傾向があることから, 目標とする周波数スペクトルを得るために通過波検定を行うことの重要性が示唆される. 最後に, 減衰領域を除く計算領域内の初期の水量 ($5L \times 0.3$ m) に対する計算領域全体の水量の変化の割合を ΔV_w としたとき, ΔV_w の時間変化を図-5 に示す. 同図より, ΔV_w は徐々に増加する傾向があるものの, $t/T=200$ における ΔV_w の増加は位相 ϵ_m によらず 1%程度と小さく抑えられており, 長時間の計算を安定して行えていると考えられる.

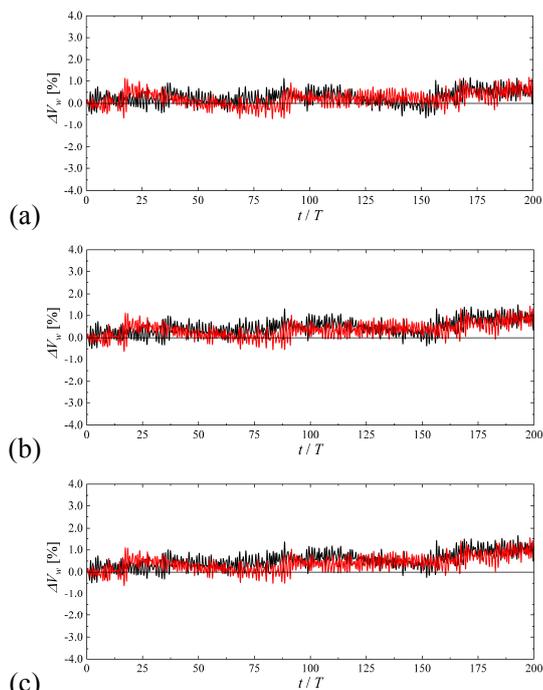


図-5 計算領域内の水量の変化割合 ΔV_w : (a) $T=1.0$ s, (b) $T=1.5$ s, (c) $T=2.0$ s

5. おわりに : 本研究では, 多相流モデルである FS3M に单相流モデルである CADMAS-SURF と同等の不規則波の造波機能を組み込み, 目標とした周波数スペクトルと概ね一致する不規則波を造波できること, 計算領域内の水量の変化の観点から長時間の計算を安定して行えることを確認した. 今後は, 不規則波の造波機能のさらなる検証を行うとともに, 不規則波を対象とした様々な現象への適用を進めていく所存である.

参考文献 : [1] 沿岸技術研究センター (2008) : CADMAS-SURF 実務計算事例集 数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会中間報告書, 沿岸技術ライブラリーNo. 30, 364 p. [2] 中村友昭, 鈴木愛美, 趙容桓, 水谷法美 (2016) : 浮遊砂による流体の粘度の変化と一様流および津波による流動場に与える影響に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第 72 巻, 第 2 号, pp. I_163-I_168.