# シンプレクティック時間積分を用いた粒子法による護岸前面砕波・越波の数値計算

(㈱神戸製鋼所 正会員〇中川 知和, ㈱神戸製鋼所 正会員 竹鼻 直人, ㈱神戸製鋼所 正会員 片岡 保人, 富士通㈱ 諏訪多聞, 富士通㈱ 風間正喜

# 1. まえがき

護岸前面の砕波・越波の数値解析ソフトウェアは、CADMAS-SURF<sup>1)</sup>など差分法に基くものが主流であるが、 数値粘性の発生や自由表面処理の煩雑さなどEuler座標系における解析固有の問題を抱えている.一方,粒 子法はLagrange座標系で運動方程式を解くためにこのような問題が生じ難く,また漂砂など複雑な物理現象 もモデル化し易いので近年注目されている.粒子法による護岸越波予測として後藤ら<sup>2)</sup>のMPS法を用いた解 析が挙げられるが、MPS法は半陰解法に基く手法であり、1ステップ当りの計算負荷が高くプログラムも複雑 化するという弱点を有する.そこで、本研究ではアルゴリズムが単純で並列化が容易な陽解法に着目し、こ れに symplectic 時間積分法を導入して、従来問題であった数値的波高減衰を大幅に低減することができた. この手法を用いて、直立護岸およびフレア護岸前面の砕波・越波現象を解析し水槽実験と比較した.

### 2. 数值解析手法

陽解法を検討するに当り、運動方程式の離散化手法として SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法を採用したが、主に以下の点で標準的 SPH 法<sup>3)</sup>と相違する.

①運動方程式として以下の式を用いる.

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sum_b m_b \left(\frac{p_b + p_b}{\rho_a \rho_b}\right) \vec{\nabla}_a W_{ab} + \vec{g} \tag{1}$$

ここに、添字 a,b は粒子インデックス、t:時間、m:質量、 $\rho$ :密度、 $W_{ab}$ :カーネル関数、 $\vec{v}$ :速度 ベクトル、p:圧力、 $\vec{\nabla}$ :空間微分演算子、 $\vec{g}$ :外力ベクトルである、上式は仮想仕事の原理から導かれ エネルギ保存則を満たすものである.

②時間積分法として,エネルギ保存性に優れた symplectic Euler 法<sup>4)</sup>を用いる.アルゴリズムは次の通りで, 単純な陽解法になる.1)式(1)により加速度  $d\vec{v}_a/dt = \vec{F}_a^n$ を算出,2) $\vec{v}_a^{n+1} = \vec{v}_a^n + \Delta t \vec{F}_a^n$ ,3) $d\rho_a/dt = D_a^{n+1}$ を 算出,4) $\rho_a^{n+1} = \rho_a^n + \Delta t D_a^{n+1}$ ,5) $\vec{r}_a^{n+1} = \vec{r}_a^n + \Delta t \vec{v}_a^{n+1}$  (n:ステップ No., $\Delta t$ :時間増分, $\vec{r}$ :位置ベクトル).

# 3. 水理実験

本解法の有効性を検証するために, 図-1 に示す水理実験を行った.実験では,1)護岸なし,2)直立護岸設置,および3)フレア護岸設置の3種類に対して規則波を与え,波高ならびに越波量を測定した.実験の諸条件を表-1 に示す.解析においては,波高計①から護岸までの領域をモデル化し,波高計①の波高履歴が計測と一致するように仮想造波板の移動速度を制御した.



#### 4. 実験と解析の比較

### 4.1 護岸なしの場合の実験との比較

まず護岸を設置しない状態で波の遡上の実験を行い、本解法と標準的 SPH 法の比較を行った.両解法と も粒子数 12 万 1980 体、初期粒子間隔 1cm、カーネル影響半径 3cm、時間刻み 6×10<sup>-5</sup>sec とした.また、

キーワード:粒子法,フレア護岸,砕波・越波予測

連絡先:〒651-2271 神戸市西区高塚台1丁目 5-5 神戸製鋼所機械研究所 Tel.078-992-5641 Fax.078-993-2056

境界は free slip 条件とした. 図-2 に波高計⑥の位置における水位変動の比較を示す. 同図によると,標準的 SPH 法では波高の減衰が大きく実験と乖離しているのに対し,改良 SPH 法では実験と波高が良く一致して いることがわかる. これは,エネルギ保存性に優れた時間積分法と式(1)とを組合せた結果である.

### 4.2 護岸設置の場合の実験との比較

護岸前面での砕波形状や越波量の算定精度を検証する ために,直立護岸およびフレア護岸<sup>5)</sup>を設置した場合の実 験を行い,改良 SPH 法と比較した.粒子数は両者約 10 万 6500 体で,他の解析条件は護岸なしと同様である.

図-3に,直立護岸とフレア護岸の解析から得られた粒子 分布,並びに同時刻の実験結果を示す.両者の比較から, 解析は砕波の状況を概ね表現出来ていることがわかる.ま た,護岸前面の波高計⑥の位置での平均波高を表-2示す. 解析の誤差は20%以内であり,測定位置が波動の非線形 性が極めて強い領域であることを考慮すると,比較的良 好な結果と言える.

次に, 表-3 に護岸岸側天端を越えた粒子数から求めた 越波量を示す.実験においては,20 波分の蓄積越波量を 5 回計測してその平均値を越波量とした.この表から, 直立護岸については誤差15%以内で越波量を予測出来て いることがわかる.しかし,フレア護岸では実験の60% 程度の予測値になる.この理由として,本計算の解像度 不足が挙げられる.フレア護岸は、直立護岸よりも越波 流量が少ないため小さな水塊の比率が高く,誤差が増大 したものと考えられる.

### 表-2 護岸前面の波高比較(波高計⑥)

華出	波高 cm		解析/実験
設件	解析	実験	%
直立	19.2	16.4	117
フレア	17.7	16.5	107
注:波高は			

### 5. あとがき

波高減衰の小さい改良 SPH 法を提案し,これにより護 岸前面の砕波・越波現象を精度良く予測できる可能性を示 した.

# 参考文献

1)長谷川巌,稲垣茂樹,川崎浩司:規則波・不規則波作用下における直立堤の越波伝達波に対する数値波動水路の適用性,海 洋開発論文集,第24巻, pp.1011-1026,2008.

2)後藤仁志,林稔,目見田哲,酒井哲郎:粒子法による直立護岸前面砕波・越波の数値シミュレーション,土木学会論文集, No.726/II-62, pp.87-98, 2003.

3) Monaghan, J. J. : Smoothed Particle Hydrodynamics, Annual Rev. Astron. Appl., 30 pp.543-574, 1992.

4) Ruth, R. D., : A canonical integration technique, IEEE Trans. Nuclear Science, NS-30, pp.2669–2671, 1983.

5)勝田貴志,片岡保人,塙洋二,濱崎義弘,竹鼻直人,村上啓介:マウンド上に設置されたフレア型護岸の水理特性に関する 実験と数値解析,海洋開発論文集,第20巻, pp.713-718,2004.



図-3 粒子分布

表-3 護岸越波量の比較

羅出	越波量 cm <sup>3</sup> /cm/s		解析/実験	
設片	解析	実験	%	
直立	27.0	31.4	86	
フレア	10.4	18.2	57	
注:解析の越波量は20-60secの平均値				