

風外力を考慮可能な 3 次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D の開発に向けた一検討

岐阜工業高等専門学校 学生会員 ○ 服部 聖也
岐阜工業高等専門学校 正 会 員 菊 雅美
ハイドロソフト技術研究所 正 会 員 川崎 浩司

1. はじめに：近年，水理模型実験を補う手段として，数値計算モデルの利用が活発になっている．これに伴い，現在までに様々な数値計算モデルが開発・提案され，波の挙動や波が構造物に及ぼす影響などの検討に活用されている．このうち，多くの研究者と技術者によって共同開発された断面 2 次元数値波動水路 CADMAS-SURF (SUper Roller Flume for Computer Aided Design of MAritime Structure) (以下，CS) ¹⁾ や，CS を 3 次元に拡張した 3 次元数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D (以下，CS/3D) ²⁾ は，様々な現象に対する精度検証がされており，実務への適用実績が高い．一方，沿岸域の実現象を考えたとき，風の作用を考慮することは重要である．しかし，CS や CS/3D は，液相のみを計算する単相流モデルであるため，気相を取り扱うことができない．そのため，風の作用を受けた物体の漂流挙動や，越波に作用する風の影響など，風を考慮した検討に CS や CS/3D を適用できないのが現状である．そこで，本研究では，川崎・菊 ³⁾ を参考に，波浪に作用する風を外力として，自由表面に作用する風応力と風による水滴の加速度運動の 2 種類を取り上げ，CS/3D へ導入することを目的とする．

2. 風作用を受けた水滴の加速度運動：CS/3D は単相流モデルであるため，砕波や越波の際に生じる水中の気泡や空気中の水滴を直接的に解くことはできない．そこで，CS/3D には，気泡や水滴が生じた場合に，隣接する格子へ移動するまでの時間 t を算出し， t 秒後に隣接セルへ強制的に移動させる TimerDoor 法が採用されている．一方，水滴に風が作用すると，水滴の挙動は風の影響を受けた加速度運動になると考えられる．そこで， x 方向ならびに y 方向において，風の作用を受けた水滴の加速度運動が計算できるよう，既存の TimerDoor 法を改良した．本研究では，風によって水滴に作用する加速度を，水滴に作用する抗力から求めた．空気中に放出された水滴の質量 m は，次式によって求められる．

$$m = \Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z \cdot F \cdot \rho_w \quad (1)$$

ここに， Δx ， Δy ， Δz は各方向の格子間隔， F は VOF 関数の値， ρ_w は水の密度である．水滴に作用する x 方向および y 方向の抗力 D_x ， D_y は，それぞれ式(2)および式(3)で表される．

$$D_x = \frac{1}{2} \rho_a (U_x - u_0)^2 C_{DW} \cdot \Delta y \cdot \Delta z \quad (2) \quad D_y = \frac{1}{2} \rho_a (U_y - v_0)^2 C_{DW} \cdot \Delta x \cdot \Delta z \quad (3)$$

ここに， ρ_a は空気の密度， U_x と U_y は x 方向および y 方向の風速， u_0 と v_0 は x 方向および y 方向の水滴の初速度である．また， C_{DW} は風に対する水滴の抗力係数であり，本研究では 1.0 とした．上式より， x 方向および y 方向における風の作用を受けた水滴の加速度 a_x ， a_y は，式(4)と式(5)から算出される．

$$a_x = \frac{D_x}{m} \quad (4) \quad a_y = \frac{D_y}{m} \quad (5)$$

上式により得られた水滴の加速度 a_x および a_y と初速度 u_0 および v_0 の関係から，水滴の挙動は図-1 と図-2 にそれぞれ示すように，各方向で 8 パターンに分類することができる．そこで，これらのパターン分けに基づいた水滴の移動計算が行えるよう，既存の TimerDoor 法を改良した．

3. 改良した TimerDoor 法の妥当性の検証：風が作用した場合の水滴の挙動に対する本計算手法の妥当性を検証した．表-1 に，計算条件を示す．本検討では，計算領域中の $x=2.5\text{m}$ ， $y=2.5\text{m}$ ， $z=4.5\text{m}$ の位置に初速度を持った水滴を 1 つ設定し，風速を作用させたときの水滴の挙動を計算した．計算結果と解析解の比較を図-3 に示す．同図より，計算時間間隔 Δt を 0.001s とした場合， $t=0.45\text{s}$ 付近までは初速度の影響で，それぞれ x 正

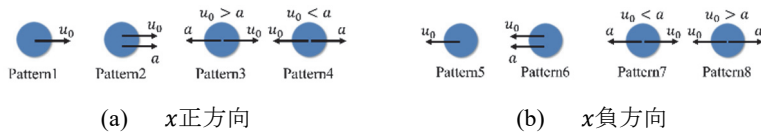


図-1 x方向のパターン分け

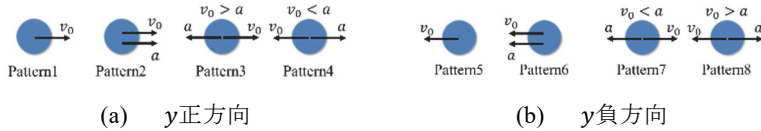
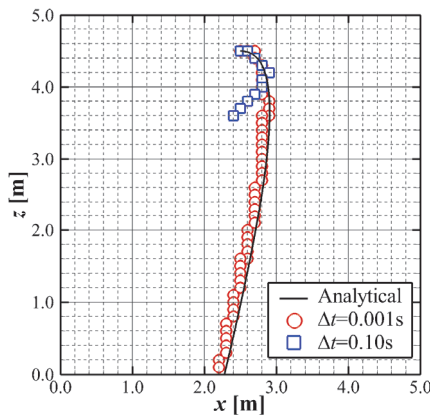


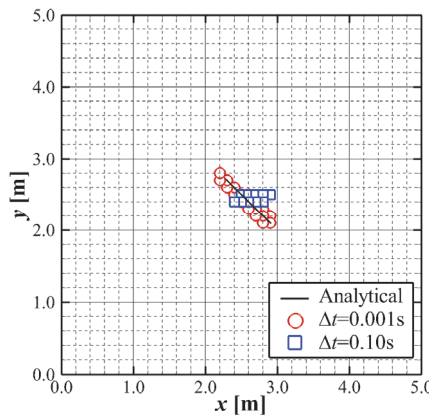
図-2 y方向のパターン分け

表-1 計算条件

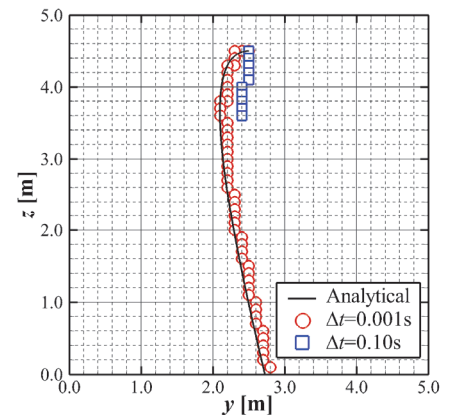
計算領域 $x \times y \times z$	5.0 m $\times$ 5.0 m $\times$ 5.0 m
格子間隔 $\Delta x \times \Delta y \times \Delta z$	0.1 m $\times$ 0.1 m $\times$ 0.1 m
時間間隔 Δt	0.001 s, 0.10 s
x方向の初速度 u_0	+2.0 m/s
風速 U_x	-30.0 m/s
y方向の初速度 v_0	-2.0 m/s
風速 U_y	+30.0 m/s



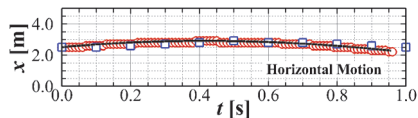
(a) x-z方向における水滴の位置変化



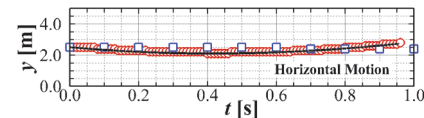
(b) x-y方向における水滴の位置変化



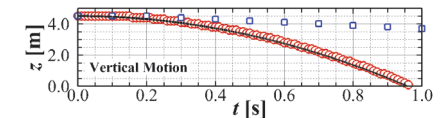
(c) y-z方向における水滴の位置変化



(d) x方向における水滴の時間的变化



(e) y方向における水滴の時間的变化



(f) z方向における水滴の時間的变化

図-3 計算結果と解析解の比較

方向およびy負方向に移動していた水滴が、風の影響を受けてx負方向およびy正方向に移動している様子が確認できる。また、計算結果と解析解は概ね一致しており、導入した解析手法による水滴挙動の計算が正しく行われていることを確認した。一方、同図から、計算時間間隔 Δt を0.10sとした場合、計算結果は解析解を再現できない。これは、計算時間間隔が粗いことによって、本来隣接セルに移動する時間を超過するためであり、格子間隔が大きい場合も同様の問題が生じるものと考えられる。したがって、風的作用を受けた水滴の加速度運動を計算する際には、格子間隔と計算時間間隔に留意する必要があるといえる。

4. おわりに：本研究では、単層流モデルである数値波動水槽 CADMAS-SURF/3D を風的作用を考慮した現象に適用できるようにするため、モデルの改良を行った。その結果、既存の TimerDoor 法を改良することにより、x方向およびy方向において、風的作用を受けた水滴の加速度運動が計算できることを示した。今後は、自由表面に風応力を導入する予定である。

謝辞：本研究の一部は、科学研究費補助金・若手研究 (A) (研究代表者：岐阜工業高等専門学校・菊 雅美，課題番号：26709035) の助成を受けたことをここに付記し、感謝の意を表する。

参考文献：1) 財団法人沿岸技術研究センター，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.30，306p.，2008. 2) 財団法人沿岸技術研究センター，CADMAS-SURF/3D 数値波動水槽の研究開発—数値波動水槽の耐波設計への適用に関する研究会報告書—，沿岸技術ライブラリーNo.39，235 p.，2010. 3) 川崎浩司・菊 雅美，風外力を考慮した護岸越波解析のための数値波動水路の提案，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.67，No.2，pp.58-63，2011.