

直立壁に作用する衝撃波力を対象とした 気液二相流体シミュレーションの精度と計算効率に関する研究 A study on accuracy and efficiency of gas-liquid two phase flow simulations for impulsive pressure acting on vertical wall

16N3100001G 五十嵐 宏夢 (海岸・港湾研究室)
Hiromu IGARASHI/ Coastal Engineering Lab.

Key Words : Multiphase flow, Impulsive wave pressure, Hybrid parallelization, PBiCGSTAB

1. はじめに

巨大津波に対する防護の一つとして、直立型の海岸堤防がある。このような直立堤に対する津波波力は、古くから多くの研究者たちによって検討されてきた。そのなかで、高橋ら¹⁾は衝撃砕波圧の予測には砕波面と壁面のぶつかる角度と気体の圧縮性が重要であることを水理模型実験により示している。そのため、このような現象を数値シミュレーションを用いて予測する場合、複雑な界面の変形を取り扱える気液二相流モデルを使う必要がある。しかし、常温において水と空気の密度は約800倍異なり、運動方程式中の圧力勾配は密度に反比例することから、液相側のわずかな圧力の攪乱が気相側に過剰な圧力を発生させ、液相界面に数値的不安定が生じる。本研究で使用する気液2相数値波動水槽では、移流項の離散化に1次精度風上差分と2次精度中央差分のハイブリッドスキームが用いられているが、先述した数値的不安定を解消するために数値粘性を大きくすると、波の伝播に伴って波形が鈍り、計算精度が悪化するといった問題がある。そこで、本研究では気相領域に対しては風上差分を用いて数値振動を抑制し、気液混合領域には占める水の体積率によって数値粘性を調整するようスキームの改良を行うことによって、計算の安定性と精度を向上することを目的とする。

また、気液二相流の計算では離散化によって得られる係数行列が単相流に比べて複雑であり、反復法で計算を行った際に収束性が悪化することが知られている。それに加えて、気液二相モデルは液相領域だけでなく気相領域についても計算を行うため、係数行列の非ゼロ非対角成分数が増加し、行列計算に時間を要する。そのため、本研究では行列計算の並列化手法や前処理手法を変えることで、計算の効率化を図る。

2. モデルの概要

気液2相数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D-2F)²⁾は、有川ら²⁾によって、単相モデルである3次元数値波動水槽(CADMAS-SURF/3D)の計算手法を元に開発された。本モデルは基礎方程式の離散化に時間方向にはEuler法および

SMAC法、空間方向には1次精度風上差分および2次精度中央差分が採用されている。また、自由表面はVOF法に基づき、VOF関数の移流方程式を解くことによって決定している。

(1) 基礎方程式

CADMAS-SURF/3D-2Fの基礎方程式は3次元非圧縮性粘性流体を対象とした連続式およびNavier-Stokes方程式をポーラスモデルに基づいて拡張した式(2.1)と(2.2)である。

$$\frac{\partial \gamma_x u}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_y v}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_z w}{\partial z} = \gamma_v S_p - \frac{1-F}{\rho_G} \dot{\rho}_G \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} \lambda_v \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial \lambda_x uu}{\partial x} + \frac{\partial \lambda_y vu}{\partial y} + \frac{\partial \lambda_z wu}{\partial z} \\ = -\frac{\gamma_v}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - u \frac{1-F}{\rho_G} \dot{\rho}_G \\ + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \gamma_x v_e \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \gamma_y v_e \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right\} \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \gamma_z v_e \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right\} \\ - \gamma_v D_x u - R_x + \gamma_v S_u \end{aligned} \quad (2.2)$$

ここで、 t : 時間、 x, y : 水平方向座標、 z : 鉛直方向座標、 u, v, w : x, y, z 方向の流速成分、 ρ : 規準密度、 ρ^* : 浮力を考慮する密度、 p : 圧力、 v_e : 分子動粘性係数 ν と渦動粘性係数 ν_t の和、 g : 重力加速度、 γ_v : 空隙率、 $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$: x, y, z 方向の面積透過率を示す。また、

$$\dot{\rho}_G = \frac{D\rho_G}{Dt} \quad (2.3)$$

y 方向および z 方向のNavier-Stokes方程式は省略する。

(3) 行列解法

行列解法にはKrylov部分空間法のひとつである前処理付きBiCGSTAB法(PBiCGSTAB法)を用いている。

(4) プロセス並列化手法

プロセス並列化手法には領域分割法を採用している。CADMAS-SURF/3D-2Fでは波浪計算に特化しているため、造波境界や放射境界で鉛直方向(z 方向)に関する処理を行っている。よって、領域分割は水平方向(x 方向と y 方向)のみとしている。

3. 精度検証

(1) 流体の体積率に応じたスキームの適用

CADMAS-SURF/3D-2Fでは移流項の離散化に1次精度風上差分と2次精度中心差分のハイブリッドスキームが用いられており、風上差分の数値粘性項を0から1の範囲でユーザーが任意で重み付けをする。本研究では気相領域の安定性と液相領域の精度を確保するため、気相領域に対しては風上差分、気液混合領域には各要素に占める水の体積率 F に応じた差分スキームとなるよう図-1のアルゴリズムを加える。ここに、 α は1以上の実数であり、ユーザーが任意に設定する。 α の値を大きくすると気液混合領域への数値粘性項の影響が少なくなる。

(2) 計算条件

本研究では有川³⁾が行った水理模型実験を対象に計算を行った。実験断面図および水位計設置位置は図-2に示す。直立壁前面の波圧計は静水面から高さ+5, +15, +25, +35, +45, +55, +65, +75, +85, +95 cmに設置していた。

計算ケースはCADMAS-2Fのオリジナルと(1)のスキームを適用したプログラム($\alpha = 1.0, 2.0, 5.0, 8.0, 10.0$)および液相単相モデルであるCADMAS-MGの7ケースとした。格子条件は表-1に示すとおりであり、 x 方向の格子には0.0m~27.1mの範囲で初項0.040815, 公比0.999として等比分割を行った。圧力および流速の境界条件は単相モデルでは全境界においてSLIPとし、二相モデルでは z 方向上端においてのみFREEを与えた。

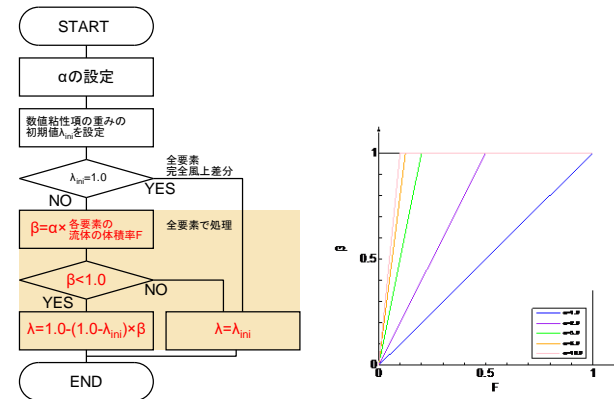


図-1 流体体積率に応じた差分スキーム

(3) 計算結果

図-3は最大水位の比較であり、WG1からWG6ほどのケースもよく一致している。WG7ではORG.のケースで過大評価となっている。これは数値粘性の影響が少ないために計算が不安定となり、過剰流速の発生によって波面が荒れたことが原因である。WG8は直立壁前面に設置しており、水塊が壁面に衝突して鉛直方向に跳ね上がったため水位が高くなっている。単相のケースで過小評価となっているのは、直立壁の直前で砕波を生じたため、実験よりも衝突する際の流速が小さかったことが原因であると考えられる。

また、波圧に関しては図-3、図-4にPG1とPG3の時系列波圧を示す。(1)のスキームを適用していないケースでは過剰な圧力値が発生した。実験では、波面の衝突より先に砕波ジェットに着水後に生じた二次ジェットがPG3付近に衝突しており、PG3に見られる衝撃波圧の発生要因となっている(図-6)。この現象を $\alpha = 8.0$ および10.0のケースではよく再現している。一方、 $\alpha = 1.0$ の場合、波形が鈍り、砕波が生じなかったため、衝撃波圧の発生を確認できなかった。 $\alpha = 8.0$ のとき、水の体積率 $F < 0.125$ の要素に対して(1)のスキームが適用されているため、液体に比べて気体の割合が多い要素に対して本スキームの適用が有効であると考えられる。

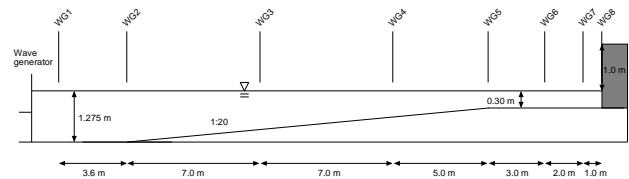


図-2 実験断面図および水位計設置位置

表-1 格子条件

x方向格子			z方向格子		
範囲 [m]	格子間隔 [m]	格子数	範囲 [m]	格子間隔 [m]	格子数
-0.6~0.0	0.05	12	0.0~3.4	0.005	680
0.0~27.1	最大: 0.0408 最小: 0.0100	1090			
27.1~29.5	0.01	240			
x方向総格子数			z方向総格子数		
1342			680		
総格子数			912560		

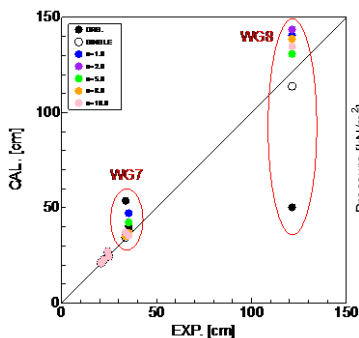


図-3 最大水位比較

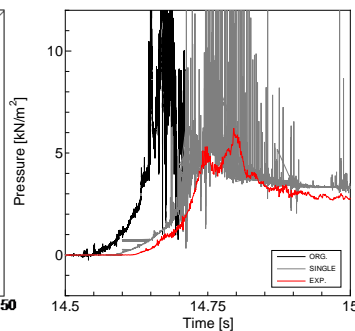


図-4 PG1 (左: 単相&二相, 右: $\alpha = 1.0, 8.0, 10.0$)

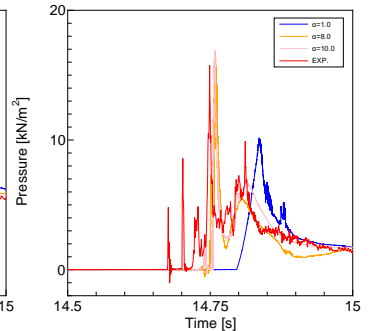
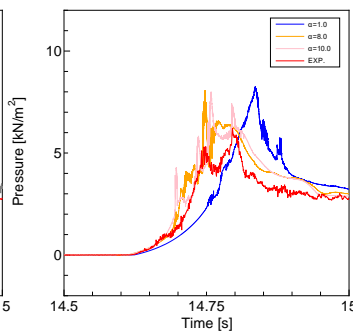


図-5 PG3

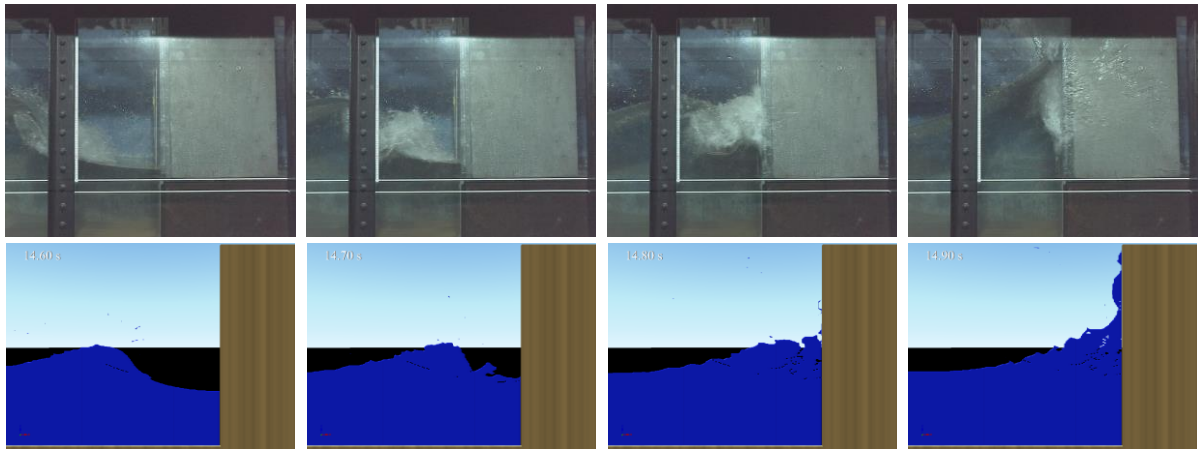


図-6 孤立波の衝突状況 (上段：実験，下段： $\alpha = 10.0$)

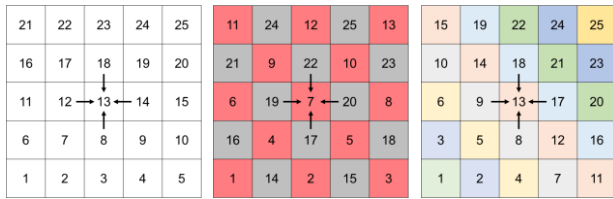


図-7 計算順序

(左からオリジナル，マルチカラー，ハイパーライン)

4. 計算効率

(1) 行列解法の並列化

領域分割によって分けられた各プロセスの局所データをスレッド並列により処理を行う。行列ベクトル積演算を並列化する場合，前進代入や後退代入，前処理行列の生成時にメモリの書き込みと参照が同時に生じてしまわないよう，要素間のデータ依存性を排除する必要がある。

そこで，図-7に示すマルチカラー法およびハイパープレーン法（2次元計算の場合はハイパーライン法）によって要素間のデータ依存性を排除し，係数行列の非ゼロ非対角成分や未知変数を入れ替えることで並列化を可能にする。なお，図中の矢印はデータ依存性を表している。

a) マルチカラー法

マルチカラー法（MC法）⁴⁾ではグラフ理論の彩色問題に基づいて各要素を依存性を持たない互いに独立な要素ごとに分類する。各色に属す要素同士はデータ依存性が無いため，同色の要素に対しては並列して演算が可能である。また，色付けのみでは処理する要素番号が連続でないため，各色内で要素番号が連続となるようにリオーダーリングも行う。

図-7では色数が2（Red-Black）の場合を示しており，赤色の要素を計算する際は黒色の要素のみ依存性があることがわかる。前処理行列用の不完全LU分解と前進代入および後退代入処理にはDoiら⁹⁾の手法を用いた。

表-2 格子条件

ケース名	x方向格子数	y方向格子数	z方向格子数	総格子数
1 billion	3600	3600	80	1,036,800,000
130 million	1800	1800	40	129,600,000
13 million	800	800	20	128,000,000

今回の検討では，色数はループ長を確保するため，2色（Red-Black）とした。

b) ハイパープレーン法（超平面法）

ハイパープレーン法⁶⁾では各要素の x, y, z 座標の和が同値となる要素を探索し，それらの要素同士が接する平面を考える。各平面に接する要素同士はデータ依存性が無いため，並列計算が可能である。

c) J-K面ハイパープレーン法

J-K面ハイパープレーン法では各プレーンに接する要素が x 方向に連続となるように平面をとる。このため， x 方向にはデータ依存性があるが，多重ループの最内側である x 方向ループでメモリアクセスが連続となる。

(2) 実行環境および計算条件

ハイブリッド並列化の有効性を検討するために複数の格子条件および並列規模で計算を行った。実行環境は理化学研究所の京コンピュータを使用し，付属の基本プロファイルによって性能解析をした。なお，性能解析時の計測区間はBiCGSTAB法のルーチンを対象とした。

計算領域は津波浸水計算を想定して x 方向1800 m， y 方向1800 m， z 方向に40 m（水深20 m）を設定し，波高2 m，周期10 sの規則波を造波条件とした。格子条件は表-2に示す。また，領域分割時の並列ノード数は16, 100, 1600, 10000とし，各プロセスの担当する格子数が均一となるようにした。ノード内の並列は富士通社製Fortranコンパイラによって自動並列化をした。

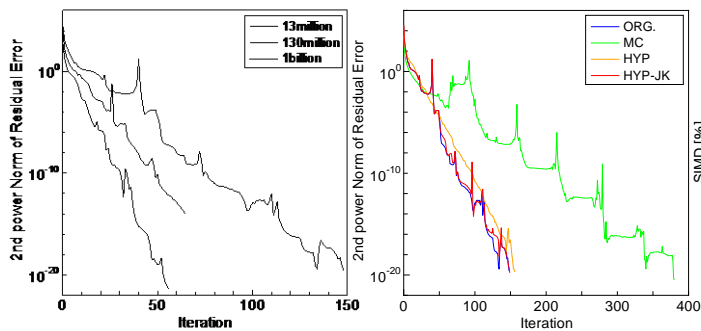


図-8 収束状況(格子数別)

図-9 収束状況(並列化手法別)

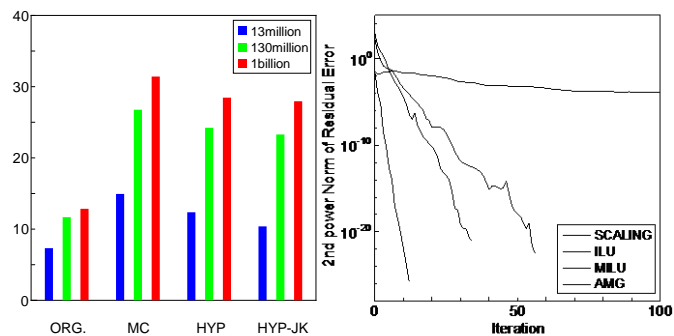


図-10 SIMD化率

図-11 収束状況(前処理別)

表-3 約1000万格子の実行時間[s]

	13million	16nodes	100nodes	1600nodes	10000nodes
ORG.	8.7312	1.994	0.7297	0.9555	
MC	16.9703	3.1385	1.1508	1.4705	
HYP	15.2083	3.0704	0.8184	1.0998	
HYP-JK	6.1299	1.5725	0.7666	0.9525	

表-4 約1億格子の実行時間[s]

	130million	16nodes	100nodes	1600nodes	10000nodes
ORG.	190.7052	21.7521	3.0794	2.0172	
MC	457.8419	62.2602	6.9181	2.9142	
HYP	561.301	53.533	4.4648	2.0526	
HYP-JK	131.6975	16.8197	2.7665	1.9201	

表-5 約10億格子の実行時間[s]

	1billion	16nodes	100nodes	1600nodes	10000nodes
ORG.			280.0421	33.312	7.9403
MC			852.1077	72.0609	15.7412
HYP			1306.7234	51.2573	10.4635
HYP-JK			202.0907	25.5396	6.9212

(3) 性能測定

各ケースで10STEP計算したときの所要時間を表-3, 4, 5に示す。また、この際に用いた前処理はILU(0)である。図-8から、格子数を多くしたときの計算時間の増加は単純に1プロセスが受け持つ要素数が増えたことだけでなく、収束性の悪化も起因していることが分かる。並列化手法別の比較ではHYP-JKの場合に計算速度が最も速くなるケースが多く、最大では30.94%の計算時間を削減している。MCやHYPでは要素同士の依存性を排除しているためSIMD化率(図-10)がHYP-JKより良いが、独立した要素同士が点在しているためアクセス時に遅延が発生して計算が遅くなったと考えられる。このことから、依存性がある場合でも連続アクセス処理が可能な部分(多重ループの最内側等)にはループ長を確保して演算をした方が計算速度が速くなる可能性がある。また、MC法で計算が特に遅くなったのは収束性の悪さが大きく影響していると考えられる(図-9)。MC法(特にRed-Black)では並列性は良いが、incompatible node⁷⁾が多く存在するため、大規模な計算格子数を設定する場合は色数を増やす必要がある。

(4) 前処理手法の検討

前処理手法の検討には対角スケーリング、Fill-in無し不完全LU分解(ILU(0))、修正不完全LU分解(MILU(0))、代数的マルチグリッド法(AMG)を用いた。なお、AMG前処理にはみずほ情報総研のライブラリを使用した。

計算条件は先述の約1000万格子と同様で、並列数は16とした。収束判定値には絶対誤差 10^{-15} 、相対誤差 10^{-12} を設定した。図-11は前処理別の収束状況を示したものであり、対角スケーリングでは収束に7714回、ILUで56回、MILUで34回かかったが、AMGでは12回で収束している。

5. まとめ

本研究では気液二相流体シミュレーションの精度と計算効率に着目した。直立壁に作用する衝撃波力の推定には、気相領域には完全風上差分、気液混合領域には各要素の流体の体積率に応じた差分スキームを適用することで計算精度を向上した。計算効率には、行列解法内の前進代入、後退代入処理時の要素間の依存性を排除し、領域分割法と合わせてハイブリッド並列化することで計算時間の短縮が得られた。

参考文献

- 1) 高橋重雄, 谷本勝利, 鈴木諭司: 直立壁に作用する衝撃波圧の発生機構に関する一考察, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 22, No. 4, 1983.
- 2) 有川太郎, 山野貴司: スパイクノイズ処理を有する数値波動水槽による衝撃砕波圧の計算, 港湾空港技術研究所, No.1175, 2009.
- 3) 有川太郎: 水理模型実験による防潮壁に作用する孤立波の波圧特性に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.71, No.2, I_889-I_894, 2015.
- 4) 中島研吾: OpenMPによるプログラミング入門(II)
- 5) Doi, S. and Hoshi, A.: Large-numbered multicolor MILU preconditioning on SX-3/14, International Journal of Computer Mathematics, Vol.44, pp.143-152, 1992.
- 6) 藤野清次, 森正武, 竹内敏己: 超平面法のベクトル計算機上の性能, 数理解析研究所講義録, 第746巻, pp.11-21, 1991.
- 7) 岩下武史, 島崎真昭: 同期点の少ない並列化ICCG法のためのブロック化赤-黒順序付け, 情報処理学会論文誌, Vol. 43, No.4, 2002.