複雑境界の解析のために１プロセスに複数立方体領域を割り当てる並列計算法

中央大学研究開発機構　正会員　○福田　朝生
中央大学研究開発機構　ﾌｪﾛｰ　福岡　捷二

１．序論

巨石の運動や衝撃力を適切に推定できる解析法の構築が土石流対策において求められている．著者らは既往の研究[1),2)]において，小球を重ねて作った石礫形状粒子を Lagrange 的に，その周りの水の流れを，粒子よりも小さな直交計算格子を用いて Euler 的に解析する Interface-resolved large eddy simulation (IRLES)の解析法を構築し，この手法で高濃度土砂流の運動を適切に説明できることを示してきた．しかし IRLES は計算負荷が大きくこのことが現地を対象とした解析の妨げとなってきた．多量の粒子群の運動解析に関して，直方体領域内の粒子群の解析を対象とした動的負荷分散[3)]などの研究例は多い．しかし，現地土石流の IRLES の実現のためには，複雑境界形状に適した並列化法を構築することがより重要になると考えられる．著者らがこれまでに構築した IRLES の並列化方法では，複雑境界形状のみを計算領域とすることができず直方体領域全体を対象とせざるを得ない並列計算法であった．以降この並列化法を直方体法とぶ．また，任意の領域を指定して計算できる並列計算法を任意形状法とよぶ．本研究では IRLES に適した新しい任意形状法を構築した．構築したプログラムは MPI と OpenMP のハイブリド計算であるが，本稿では MPI のプロセス並列部分について説明する．この手法は，対象領域を複数の立方体ブロックに分割し，1 プロセスに複数のブロックの計算を担当させるものである．本稿ではこの並列計算法を説明し，また著者らの従来の直方体法の並列化法との計算速度の比較等を行い構築した任意形状法の並列化法の有効性を示す．

２．計算対象領域のみに適切に計算資源を割り当てることの計算コスト上の重要性

計算コスト上の直方体法の課題および任意形状法の優位性について説明する．著者らの既往の研究[1),2)]では IRLES で粒子と水の運動を適切に解析するためには，概ね礫の大きさの 1/4 程度以下の計算格子スケールで解析することが必要である．**図-1 (a)** に示す横断面内のオレンジの枠のブロックはおよそ数メートルのスケールとして示したが IRLES の場合，数十センチの石礫を 4 分割するとこの大きさのブロック 1 個あるいは数個程度で数十 GB から百 GB 程度のメモリを確保する必要がある．このメモリの大きさは多くのスパコンの 1 計算機（ノード）の主メモリに匹敵する．したがって，無駄な領域を含まざるを得ない直方体法では，計算時に確保するノード数を不必要に増やさざるを得ない状況となる．**図-1 (b)** のように渓流の幅bに対して計算領域の蛇行の幅Bが大きい場合や，実際には縦断的な起伏も大きいことから計算時に最低限確保しなければならない計算ノード数Nは任意形状法に対し直方体法は容易に数十倍のオーダーになりうる．計算コストCは，$C = TN = N/S$と評価し得る．ここにTは計算時間，$S(= 1/T)$は計算速度である．直方体法で不必要に確保されたノードは計算が必要な領域に割り当てられていないため，計算速度の向上とならない．したがって不必要に確保されたノードはコストの増加に直結する．また，直方体法で計算ノード数を増やすと速度は向上するが計算コストにノード数が含まれるためコスト低下とはならず，一般には並列化の効率が落ちるため逆にコスト増となる．したがって現地土石流の IRLES の実現には計算コストの低減，すなわち適切な任意形状法の開発が不可欠といえる．

3. １プロセスに複数立方体計算領域を割り当てた並列計算法

本研究で開発した任意形状法の概念図を**図-2** に示す．本並列化手法は，**図-2** 右図のように空間を立方体で分割し，計算対象となる立方体のみを Processing Element (PE) に割り当てる．ブロックは，ブロック座標(ib,jb,kb)で管理され，各プロセスは全てのブロックの割り当て先のプロセスを把握し，自身が分担するブロックに関連するプロセスと MPI で送受信を行う．また，各計算ノードは 1 つまたは複数プロセスの処理を分担する．土石流を解析する場合，計算前にどの領域まで流れが及ぶかを的確に推定することが難しい．そのため，渓岸の上方など土石流が及ぶか不明な場合は，当該部分に計算資源を割り当てざるを得ない．1 プロセスあたり単一ブロックのみしか分担しない場合，この部分に割り当てられたプロセスは計算を行わずに計算資源だけ確保されてしまう場合がある．これを回避するために，本研究ではプロセスあたり複数ブロックを割り当てている．これにより，土石流が到達するかわからないブロックと必ず水や土砂を解析しなければならないブロックを同一プロセスが分担することができ，計算負荷が極端に小さなプロセスを作ってしまうことを回避することが可能となる．

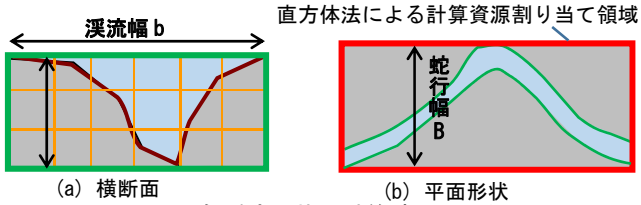

図-1 対象渓流形状と計算境界の関係

キーワード　並列計算，MPI，計算速度，メモリ，計算コスト，負荷分散
連絡先　〒112-8551　東京都文京区春日 1-13-27 中央大学研究開発機構　TEL：03-3817-1617

4. 計算性能の確認

本研究で開発した並列化法の計算性能を他の領域分割の並列化法との比較によって考察する．**図-3** に計算性能確認のために実施した粒子沈降計算の条件を示す．粒子が多い箇所は砂防堰堤直上流をイメージし，粒子がほぼ存在していない箇所は，渓岸の上方などをイメージして設定した．また，計算性能比較を行った異なる計算領域分割のパターンを**図-4** に示す．色の違いは領域を分担するプロセスの別を示す．使用した計算ノードはintel社製 Xeon E5-2697 v2 (12 コア)を 2 基積んでおりメモリは 128GB である．(a)の二次元の分割方法は，著者らが既往の研究[2]で用いていたものである．(b)と(c)は本研究で開発した並列化法であり，(b)ではプロセスあたり 1 ブロックを，(c)ではプロセスあたり 1 または 2 ブロックを分担させている．この問題に対し，1 時間ステップ（$dt = 10^{-4}$ s：流体計算 1 回分，粒子運動計算 50 回分)を 20 ステップ分計算し，1 ステップ当たりに要した時間を計測し，対象 15,000 石礫粒子をこの時間で除して計算速度を算出した．また，計算に要した全メモリ（プロス当たりの使用メモリ×プロセス数）も調べた（**図-5** 参照）．

図-5 の計算速度に着目すると(a)の二次元分割に対し(b)のプロセスあたり単一ブロックを分担させた三次元分割では，計算速度がほぼ倍となった．これはブロック座標 $kb = 3$段目以下で多数の粒子が存在する領域に対し，(a)では黄色のプロセス（PE2）の 12 コアが割り当てられるのに対し，(b)では PE1，PE2，PE3 の計 24 コア（8 コア×3 プロセス）と(a)の倍のコア数が割り当てられているためである．さらにプロセスに複数ブロックを分担させた(c)は，検討した 3 ケースの中で最も速く，(b)に対し速度が 1.1 倍となった．(c)では，PE3 は$kb = 4$と$kb = 2$の 2 つのブロックを分担しているが，$kb = 4$の方のブロックは水も粒子もほぼなく，計算量の大部分は$kb = 2$のブロックとなる．すなわち(c)では$kb = 3$以下の領域を 36 コア (12 コア×3 プロセス)で計算している状況に近くなり，(b)よりも速度が速くなった．

使用メモリを見ると 3 次元分割の(b),(c)に対し(a)の使用メモリは大幅に大きい．本検討では全てのケースが 2 ノードのメモリ内に収まっているが，2 章でも議論したように計算規模がより大きくなる場合は，このメモリの比が使用する計算ノード数の比に直結する．また，形状が複雑となるとこの比はより大きくなる．したがって境界形状が複雑な場合は，(a)は，(b)，(c)に対し速度，メモリの両面で計算コスト上不利となる．また，(c)は(b)に対し使用メモリが多少（1.33 倍）大きくなっている．(c)は 1 ブロックを分担するプロセスと 2 ブロックを分担するプロセスがあり，1 ブロックしか分担していない PE1 や PE2 は 2 ブロック目のメモリを余分に確保している状況となるためである．しかし，今回の検討と同様に，同一計算ノード内に複数ブロックのメモリが収まるようブロックサイズを設定すれば，使用するノード数を増加させることなくプロセスあたり複数ブロックを分担させることによって計算速度を向上させることが可能となる．特に計算対象領域内で負荷が大きく偏る際に本手法はより効果を発揮するものと考えられる．

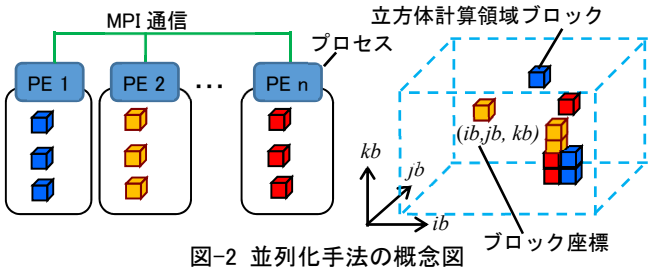

図-2 並列化手法の概念図

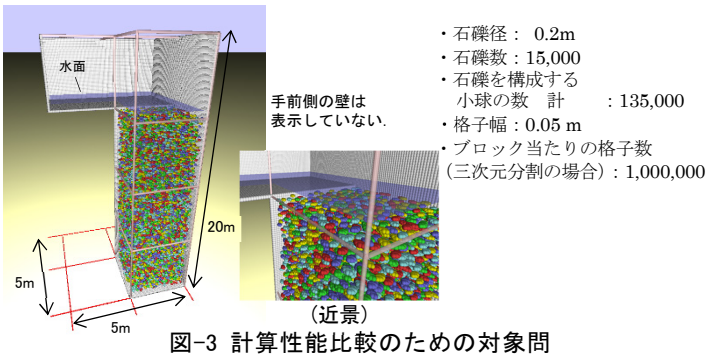

図-3 計算性能比較のための対象問

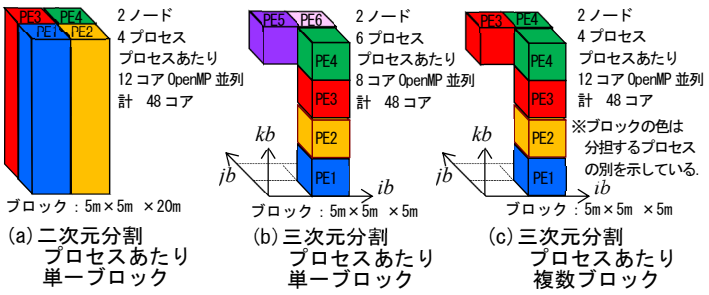

図-4 計算性能を比較した領域分割ケース

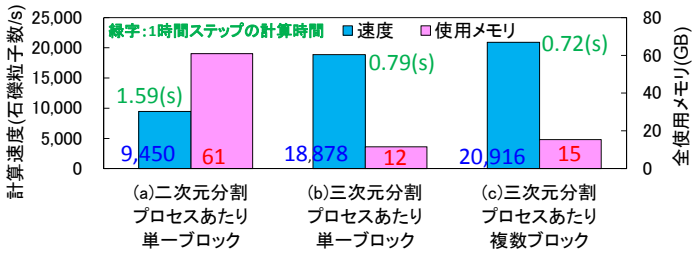

図-5 計算速度および計算に使用したメモリ

5. 結論

本研究では，プロセスあたり複数立方体計算ブロックを分担させる複雑境界形状の解析に適した新たな並列計算法を構築した．プロセスあたり単一ブロックしか分担できない並列化法と比較して，本手法は負荷の集中する箇所に計算資源を集中化できるため速度が向上することを示した．

参考文献

1) Fukuoka et al., *Adv. Water Resour.*, 72:84-96, 2014.
2) Fukuda, Fukuoka, , *Adv. Water Resour.* https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.037
3) 丸山，牛島：土木学会論文集 B1(水工学), 70,4, I_835-I_840, 2014.