

(I-22) 非構造格子を用いた陽的浅水長波解析の並列化効率に関する検討

中央大学 学員 ○大場 慶夫
中央大学 正員 榎山 和男

1. はじめに

近年の数値計算は、問題の複雑化及び3次元化などにより大規模化してきている。このため、現実的な計算を行うには、従来の単一プロセッサの計算機では計算時間及び計算機容量に限界が生じている。そこで、近年急速に発達してきている並列計算機が注目を浴びている。並列計算機には大きく2種類、SIMDタイプ（単一命令複数データ処理）とMIMDタイプ（複数命令複数データ処理）とがある。並列計算機を有効に用いるには、それぞれの性質にあった並列処理の解法アルゴリズムを採用する必要がある。本報告は、SIMDタイプであるAP1000(AP1000+)とMIMDタイプであるSP2(RS/6000 SP)の異なる2種類の並列計算機を用い、非構造格子を用いた高潮解析をモデルとした陽的な並列計算を行い、その並列化効率について比較及び検討を行った。

2. 基礎方程式と離散化

高潮解析の基礎方程式には、非圧縮粘性流体を仮定した非定常非線形の浅水長波方程式を用いる。

$$\begin{aligned} \ddot{u}_i + u_j u_{i,j} + g(\zeta - \zeta_0)_i + \frac{\tau_{ib}}{\rho(h + \zeta)} \\ - \frac{\tau_{is}}{\rho(h + \zeta)} - A_t(u_{i,j} + u_{j,i})_j = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\dot{\zeta} + ((h + \zeta)u_i)_i = 0 \quad (2)$$

ここに、 u_i は平均流速、 ζ は水位変動量、 h は水深、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 A_t は渦動粘性係数である。また、 ζ_0 は低気圧の通過に伴う気圧降下による海面上昇量を表し、 τ_{is} は低気圧圏内の風の吹き寄せ効果による海面摩擦力、 τ_{ib} は海底面でのせん断応力を表す。上記の基礎方程式に対して、空間方向の離散化には、ガラーキン法に基づく有限要素法を、時間方向の離散化には3段階陽的解法を用いる。なお、要素としては、三角形一次要素を用いている。

3. 並列計算機

今回使用する並列計算機は、富士通社のAP1000とAP1000+、及びIBM社のSP2(RS/6000 SP)である。

3.1 AP1000(AP1000+)

AP1000は、メッセージ通信を基本とし、各プロセッサにメモリーが搭載された分散メモリー型並列計算機である。セルと呼ばれるプロセッサとホストと呼ばれるホストコンピュータからなり、3種類のネットワーク(T-Net, B-Net, S-Net)を介して通信を行う。セルではホストあるいはセル間でのデータ送受信や、同期取りを行いながら並列実行を行う。ホストでは全セルの実行環境設定、セルでのタスクの生成、セルとのデータ送受信、セルの状態監視などの処理を行う。

3.2 SP2

SP2は、AP1000同様分散メモリー型並列計算機である。各ノード（プロセッサ）はフレーム内のドロワーに入っており、それぞれはイーサネットあるいはハイパフォーマンススイッチ（HPS）を介して通信を行う。

AP1000とSP2が基本的に異なるところは、AP1000では、それぞれプロセッサはホストに管理されており、異なるデータで同一のプログラムを実行する（SIMDタイプ）。それに対し、SP2では、それぞれのプロセッサは独立しており、異なるデータで異なるプログラムを実行できる（MIMDタイプ）という点である。

表-1：計算機諸仕様

	AP1000(AP1000+)	SP2
分類	SIMDタイプ (Single Instruction Multiple Data)	MIMDタイプ (Multiple Instruction Multiple Data)
プロセッサ	SPARC+FPU[5MHz]	POWER2[66~74MHz]
メモリ	16MB(16~64MB)	64~2048MB
単体性能	8.33Mflops(50Mflops)	266Mflops
システム性能	8.53Gflops (51.2Gflops)	11.17Gflops
プロセッサ数	1024台	42台
転送速度	50MB/sec[B-Net] 25MB/sec[T-Net]	40MB/sec[HPS]

4. 並列計算

4.1 領域分割

並列計算の前処理として、全体の解析メッシュ（非構造格子）を使用するプロセッサと同数の小領域に分割する必要がある。これについては、Farhatにより提案された自動領域分割法を用いて行う[1]。これにより、各プロセッサでの計算負荷の均等化が可能になり、並列計算の効率を上げることができる。

4.2 並列計算の手順

並列計算の手順を示すと以下ようになる。

- 1) 解析メッシュを領域分割し、分割領域データ及び領域境界節点データを作成する。
- 2) 各プロセッサは担当領域のデータを入力する。
- 3) 各プロセッサは担当領域の各時刻レベルの計算を行う。
- 4) 同期をとりながらプロセッサ間の境界上のデータを送受信する。計算が終了するまで3)、4)を繰り返す。
- 5) 各プロセッサの計算結果を親プロセッサ（AP1000ではホスト）に集める。
- 6) 親プロセッサ（ホスト）は計算結果を出力する。

4.3 並列算法

離散化された有限要素方程式を陽的に解く並列算法を考える。今、図-1において、節点AではAを共有する各要素はすべてプロセッサ1内に含まれており、節点Aに関

する物理量の求解は、プロセッサ1のみの情報で行え、プロセッサ間の通信は必要ない。

しかし、節点BではBを共有する各要素はプロセッサ1とプロセッサ2の両方に含まれているので、節点Bに関する物理量の求解は、プロセッサ1及びプロセッサ2両方の情報が必要となる。ここでプロセッサ間の通信を行わなければならない [2]。

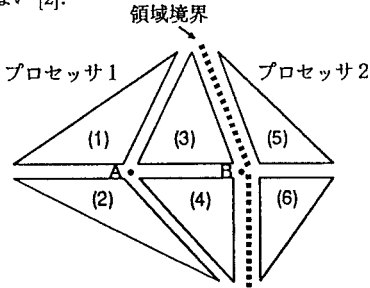


図-1：メッシュモデル図

5. 数値解析例

数値解析例として、伊勢湾台風（1956年9月26日）による高潮の解析を行った。図-2に有限要素分割図及び台風の経路を示す。この有限要素メッシュについて領域分割を行いAP1000、AP1000+及びSP2を用いて同一の解析を行い、計算時間及び並列化効率について検討を行った。使用プロセッサ数を変化させたときの演算速度倍率を図-3に、並列化効率を図-4に示す。いずれの計算機でもプロセッサ数の増加に伴い速度性能が向上しており、8プロセッサ使用時にAP1000では約8.3倍、AP1000+では約7.3倍、SP2では約6.5倍の速度性能がでており、効率の良い並列計算が行えている。また、表-2にCPU時間と通信時間（データ送受信+同期待ち）の内訳を示す。AP1000及びAP1000+に対してSP2の並列化効率が下がっているのは、全体の計算時間に対する通信時間の占める割合がAP1000に比べてSP2の方が多いためである。これは、SP2のプロセッサ性能はAP1000の約30倍であるのに対し、転送速度は両者ともほぼ同等であることに起因すると言える。

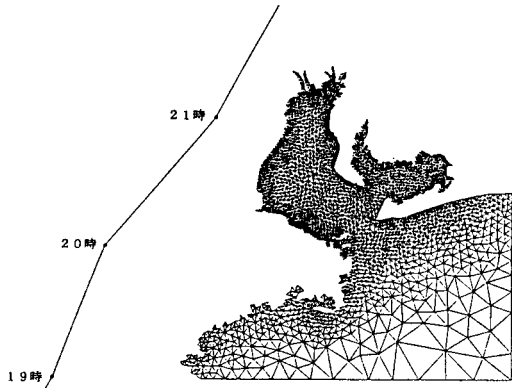


図-2：解析領域及び台風の経路

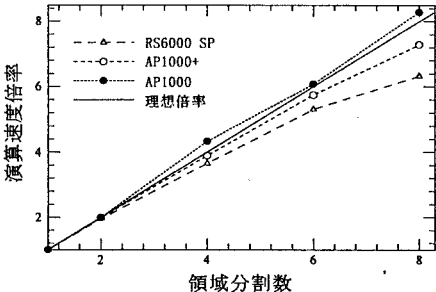


図-3：演算速度倍率

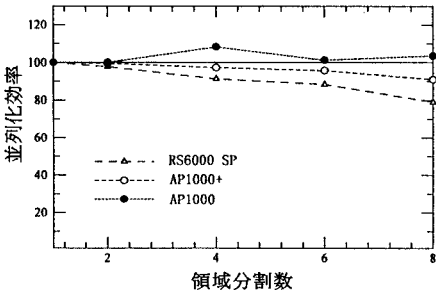


図-4：並列化効率

表-2：CPU時間と通信時間

PE	AP1000		SP2	
	pure CPU	com.&wait	pure CPU	com.&wait
2	288.078 (98.32%)	4.921 (1.68%)	7.215 (97.37%)	0.195 (2.63%)
4	130.001 (96.07%)	5.328 (3.93%)	3.537 (89.16%)	0.430 (10.84%)
8	65.136 (92.10%)	5.589 (7.90%)	1.688 (73.66%)	0.603 (26.34%)

(sec)

6. おわりに

非構格子に基づく陽的な並列計算法を構築し、異なる2種類の並列計算機を用いたときの並列化効率に関する検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 使用する並列計算機がSIMDタイプ及びMIMDタイプいずれのものであっても、本手法は有効であり、効率のよい並列化が行えた。
- (2) 同数のプロセッサを用いた計算では、性能のよい計算機ほど並列化効率が劣る。従って、効率のよい並列計算を行うためには、使用する計算機性能に応じたプロセッサ数を選択する必要がある。

今後は、並列計算機の有効性が更に発揮される大規模問題に適用させていき、その効果を検討していく所存である。謝辞：本研究を行うにあたり、並列計算機の使用を許可された富士通並列処理研究センターに感謝の意を表します。

参考文献

[1] Farhat,C.: A simple and efficient automatic FEM domain decomposer, *Computers & structures*, 28(1988), pp576-602.
[2] 斉藤克矢ら：”非構造格子に基づく浅水長波流れの大規模超並列有限要素計算法”，第1回計算工学講演会論文集,1996,pp77-80