

並列計算によるリアルタイム津波（浸水）計算の高速化

阿 部 郁 男*・今 村 文 彦**

本研究では、より詳細な津波情報を迅速に提供できるようにするため、負荷均等割付手法による津波数値計算アルゴリズムの改良によって並列化効率を高め、コンパイラによる自動並列化だけでは解決することができなかった津波数値計算の高速化を実現することができた。その結果、 50×27 km (格子間隔 50 m) の領域での 30 分間の浸水予測計算を 4 分完了できることが分かった。また、新しい計算環境 (ITBL) の利用により、更なる広域化が可能であることが分かった。この結果は、気象庁の量的津波予報の詳細化と高速化に貢献できると考える。

1. はじめに

津波数値計算技術は、事前評価（被害想定、構造物効果の検証）および事後の再現・検証だけではなく、避難行動に役立てるリアルタイム情報としての期待が高まりつつある。津波数値計算技術のリアルタイム津波予報への応用は、首藤ら（1988）により提唱され、1999 年 4 月より気象庁の量的津波予報としても運用されているが、2つの課題があると考えている。1つは、津波の波源となる断層を日本近海に 4000 箇所仮定した限定されたデータベース検索となっているために、そのサイズや精度などの初期値に誤差が含まれているという課題であり、もう1つは、日本全国を対象とした広域性および情報の早期発信という迅速性を重視しているために地域ごとの詳細な情報提供が乏しいという課題である。実際に、2003 年 9 月 26 日の十勝沖地震の際は、岩手県沿岸に予想される津波の高さ 0.5 m の津波注意報が発表されたが、県北部の久慈市では 1.32 m の最大波高が観測されている（高橋ら、2004）。また、津波の高さだけによる予報では、避難行動の促進に結びつかないという課題も報告されている。2002 年 3 月 31 日に沖縄県宮古八重山地方に発令された津波警報では、警報が発令されたにも関わらず避難行動が正しく行われなかった（亜熱帯総合研究所、2001）。

従って、津波による人的被害の軽減のためには早期避難に役立つ情報を提供することが必要であり、提供される情報が避難行動を促進させる危機感のある具体的で高度化された情報が必要となっている（今村、2003）。これまでのようなほぼ都道府県単位の数値情報から、市町村・港湾・地域ごとの身近な情報へ、更には点の情報から線の情報、そして具体的な浸水危険区域を示すことができる面の情報へと情報の高度化を進める必要がある（図-1）。

一方、計算科学の分野では、ITBL (Information Tech-

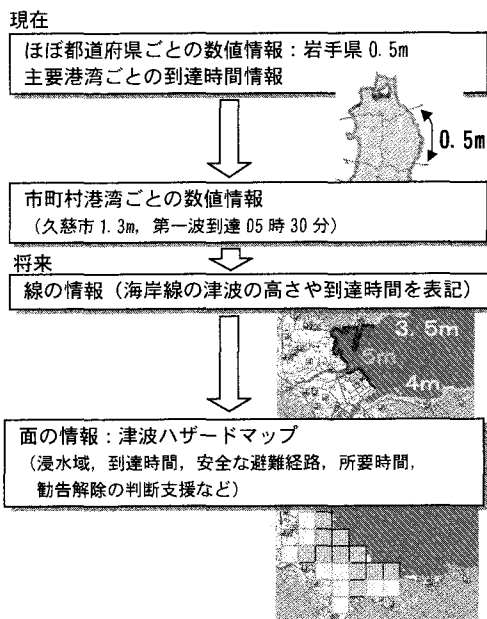


図-1 津波防災情報の高度化

nology Based Laboratory) や地球シミュレータのような大規模計算環境が整備され、これまで行えなかった複雑で高度な問題を解決することができるようになっていく。そこで本研究では、現在の量的津波予報の課題を克服し、より短時間で高度化された情報を提供するために、ITBL のような計算科学分野で培われた大規模計算環境を利用し、その効果と実現の可能性について具体的に検討する。

2. リアルタイム津波数値計算の評価条件

(1) 計算手法

津波は、浅水域ほど先端部での伝播速度が遅くなり、後方の波が追いつくようになるため波長は短くなる。津波の一波長に対する分解能（格子がいくつ含まれるか）を一定に保つためには、浅水域の領域ほど細かな格子サイズの計算領域を設定する必要がある。また、沿岸に近

* 正会員 (株)日立東日本ソリューションズ

** 正会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

づくにつれ、地形も複雑になるために、格子による近似度を上げるためには、細かなサイズを選ばなければならない。しかし、計算機の大幅な性能向上が図られた現在でも、計算機利用上の制約や計算作業の効率化のために、計算領域全てに対して細かな格子間隔で計算することは行われていない。一般的には、深海域を大きな格子間隔とし、浅くなるに従って格子間隔を次第に小さくした領域を内包して領域間の接続計算を行う接続計算手法が利用されている（首藤ら，1988）。

今回の検討でも、リアルタイム津波数値計算の評価を行うために、図-2および表-1に示す三陸沖を中心とした領域について、表-2に示す震源データを利用した接続計算手法を利用している（阿部・今村，2003）。

(2) 計算環境

ITBL (<http://www.itbl.jp>) は、e-Japan 重点計画「高度情報通信ネットワーク社会の形成に関する重点計画」に基づくプロジェクトであり、日本原子力研究所など文部科学省の研究機関により推進されている全国規模の統合計算環境である。2005年までに、国内すべての研究機関のスーパーコンピュータを大容量ネットワーク上に共有化し、高度なシミュレーション環境が実現される予定である（山口・武宮，2001）。材料科学、生命科学などの分野において、これまで行うことができなかった複雑で高度な問題を解決する大規模シミュレーション技術の開発に役立っている。海岸工学の分野においても、これまで行うことができなかった様々な問題を解決できることが期待できるが、今回の検討では、リアルタイム津波情報の提供について検討を行った。利用した計算機を表-3に示す。

3. 津波数値計算への並列化技術の適用

(1) 津波数値計算プログラムの構造

津波数値計算は、「各格子点での水位計算」→「各格子点間の水位差による流量計算」を再現時間÷時間間隔で求められる計算ステップの数だけ繰り返して計算を行うことで、沿岸部での津波の高さを求めるようになっている。これまで主に利用されている領域接続法を用いる場合は、更に接続処理が必要となる（図-3）。

(2) 自動並列化による高速化

ITBL Server などの並列計算機の多くには、附属しているコンパイラに高度な自動並列化機能が備わっているために、コンパイルオプションの指定などにより、自動並列化によるプログラム実行の高速化を容易に実現できるようになっている（桧山，2003）。この自動並列化は DO ループなどのループ処理を並列化するものであり、津波数値計算においても、格子点の水位、全水深および格子点間の線流量を決定する処理において、処理ごとに高速

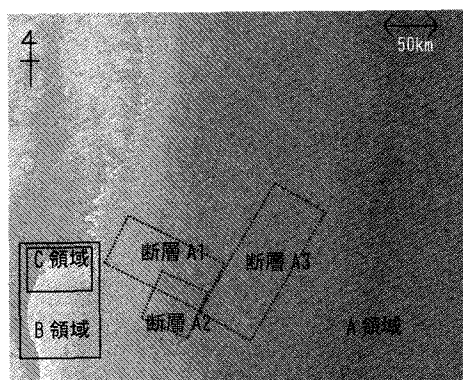


図-2 計算対象領域と断層モデル

表-1 対象領域の条件

領域	A 領域	B 領域	C 領域
計算格子間隔	450 m	150 m	50 m
計算時間間隔	0.9 秒	0.3 秒	0.1 秒
対象領域	N 37.5°-40°, E 140.75°-145°		
領域のサイズ	798×633 (比率 1.0)	436×574 (比率 0.5)	1012×544 (比率 1.09)
支配方程式	線形長波理論		浅水理論
陸側境界条件	完全反射, 打ち切り水深 $1.0 \times 10^{-5} \text{m}$		遡上条件 (小谷ら, 1998)

表-2 断層モデルのパラメータ

		A1	A2	A3
断層原点	緯度 (度)	38.44	38.3	38.9
	経度 (度)	142.52	142.4	143.5
	深さ (km)	20	20	10
断層長さ (km)		40	60	130
断層幅 (km)		80	40	50
断層面積 (km)	全体	3,200	2,400	6,500
	アスベリティ	20×40	20×20	39×35
	背景領域	1,600	2,000	5,135
走向 (degree)		200	200	205
傾斜角 (degree)		20	20	5~8
平均すべり量 (cm)	全体	200	200	200
	アスベリティ	400	400	400
	背景領域	146	159	146

化を図ることが可能である。例えば、並列化によるデータ分配・収集のオーバーヘッドが無視できるほど小さい場合には、格子点数 10,000 の領域において 100 CPU による並列計算を行えば、計算時間は 100 分の 1 となる。実際に、図-2, 表-1 の条件下で ITBL Server を利用して自動並列化計算を行った場合には、1 CPU で 5 時間 06

表-3 利用した計算機の緒言

名 称	緒 言		30分再現計算に要するCPU時間
ITBL Server (Prime Power)	CPU	SPARC V 準拠 675 MHz	5時間06分13秒 (1 CPU)
	CPU 数 (同時利用可能数)	512 (64)	6分07秒 (64 CPU)
	OS	Solaris 8	コンパイラによる自動並列化を利用
	コンパイラ	Fujitsu Fortran 5.4	
p-Series 690	CPU	IBM Power 4 (1.3 GHz)	22分04秒 (16 CPU)
	CPU 数 (同時利用可能数)	16 (16)	コンパイラによる自動並列化を利用
	OS	AIX5L	
	コンパイラ	XL Fortran for AIX	

分13秒の計算時間が必要であるが、64 CPU ならば6分07秒で計算を完了することができる(表-3, 図-4)。並列化効果率とは、CPU 数の増加と計算時間の短縮の比であり、値が1未満になるとオーバーヘッドの影響が大きくなるために、CPU 数を増やしても処理時間は大幅に短縮されなくなることを示している。並列化効果率は格子点数によって変わってくるが、表-1の格子点数の条件下では、32 CPU の利用が最も効果的であり、これ以上の大幅な高速化は期待できないことが分かった。

また、今回の対象領域が三陸沖という限られた領域だけであるため、広範囲のリアルタイム情報を単一の計算機で発信することは不可能であることが分かった。

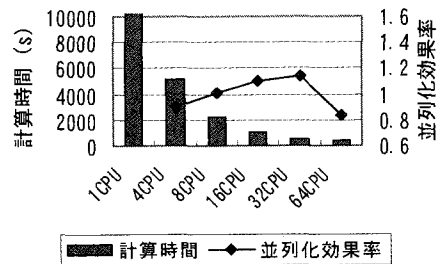


図-4 処理時間と並列化効果

(3) MPI を利用した並列化による高速化

コンパイラによる自動並列化は、DO ループのみを並列化対象としているため、津波数値計算全体の並列化効率を高めるために MPI (Message Passing Interface) ライブラリを利用することによって複数の処理を並列化することを検討した(桧山, 2003)。データの依存関係のない処理は並列化することが可能であるが、図-3に示すように、津波数値計算は各領域の処理(水位計算、線流量計算)がそれぞれ独立しているため、並列化することによって高速化の効果が期待できる。この場合、各 CPU に割り当てる負荷を均等化する負荷均等割付手法を適用しないと CPU の利用効率に無駄が生じて、並列化効率が上がらない。津波数値計算の中でも沿岸遡上域における非線形の線流量計算過程において負荷均等割付手法の適応が必要であることが分かった。図-5は格子点数100

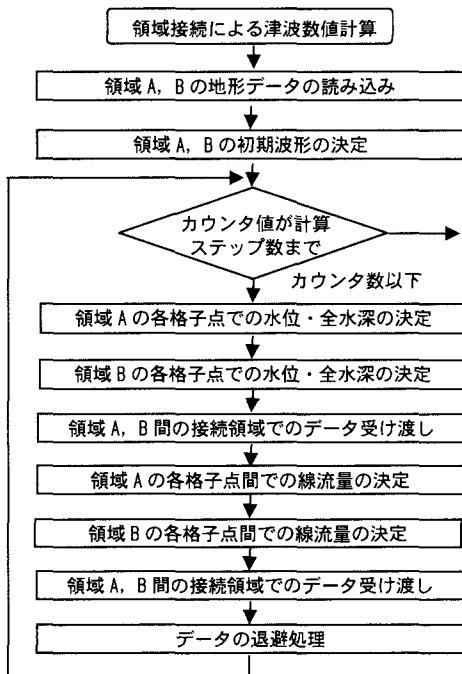


図-3 領域接続手法による津波数値計算の流れ

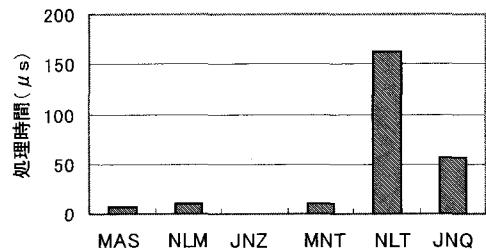


図-5 サブルーチンごとの処理時間

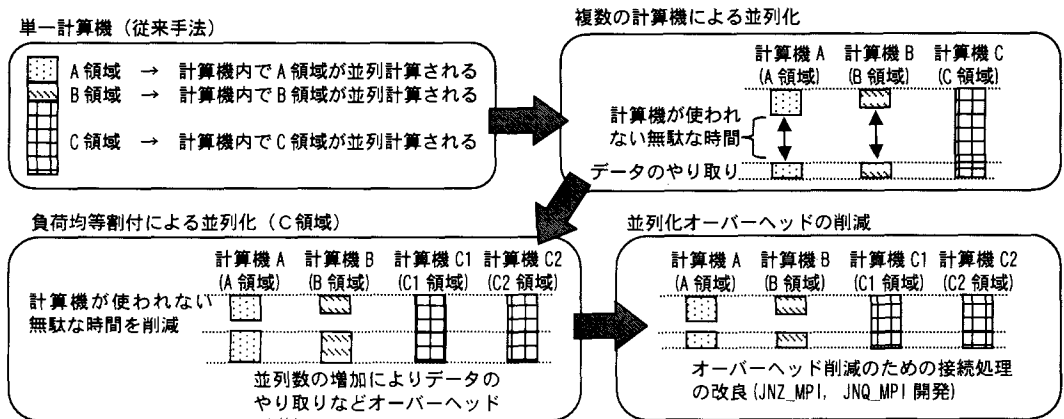


図-6 並列効果を高めるための手法の改良

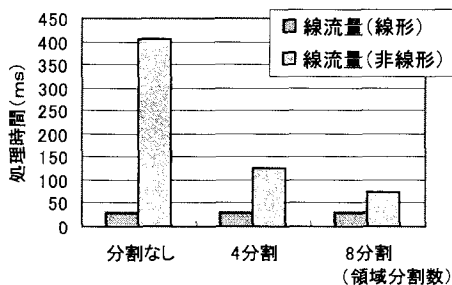


図-7 線流量計算における領域分割の効果

あたりのサブルーチンごとの処理時間である。MAS は線形による水位計算、NLM は非線形による水位計算、JNZ は水位の接続処理、MNT は線形による線流量計算、NLT は非線形による線流量計算、JNQ は線流量の接続処理である。

格子点数を同一条件とした場合の線形計算と非線形計算の処理時間比率は、水位計算で約 1.8、線流量計算では約 16 となっており、高速化のためには非線形の線流量計算を、複数の CPU を利用した並列計算を行う必要がある。

(4) 沿岸遡上域における非線形線流量計算の並列化

仮想的な境界を設けて領域分割を行うことは、複数の計算機を接続した並列計算環境における処理の高速化に大変有効である (恒川, 1996)。ただし今回の検討でも、図-2、表-1 の条件下で沿岸遡上域における非線形計算の対象領域を 4 分割して、負荷均等割付を行った結果、データ交換による 173 秒ものオーバーヘッドが追加されることとなり、大幅な高速化は期待できないことが分かった。そこで、オーバーヘッドを削減するために、津波数値計算アルゴリズムを再検証し、遡上しない範囲や津波が到達しない範囲においてはこれらの接続処理を行

わないように改良した。一連の高速化の流れを図-6 に示す。

その結果、図-7 に示すように、対象領域を 8 分割することで線形計算と同程度の時間で処理を完了することができるようになった。これによって、図-2、表-1 の条件下で ITBL Server を利用し、30 分間の再現計算を 4 分以内の CPU 時間で完了することがわかった。

(5) ITBL の効果

ITBL は複数台のスーパーコンピュータが仮想的に統合された大規模計算環境であり、計算機を跨って複数 CPU を利用した並列計算が可能な MPI ライブラリ STAMPI を装備している。鈴木・齋 (2003) によれば、一台の計算機では計算資源が十分でないときに、複数の計算機資源を併せて利用することで全体の処理時間を短縮することができる。つまり、ITBL を利用することで、浸水予測を含めたリアルタイム津波数値計算をより広範囲で行えるようになる。

4. 結 論

表-1、図-2 のような限られた領域であれば、コンパイラによる自動並列化だけでも浸水予測を 6 分程度で完了することが可能であることが分かった。また、CPU ごとの負荷に配慮した領域分割を行い、分割した領域を並列計算される手法を適用した場合には、より広範囲で迅速な情報を提供できることが分かった。特に ITBL などの大規模並列計算環境を利用することで、より広範囲の浸水予測を高速化できる可能性があることが分かった。

計算時間の短縮化により、現在の量的予測では沿岸での津波波高を県単位で提供するに留まっているが、遡上計算を実施することが出来、リアルタイムの津波情報内容を格段に向上することができる。

ただし、最終的に避難に役立てる情報を発信するため

には、浸水開始時間、最大浸水までの時間、安全な避難に必要なとなる時間を地域ごとに明確にし、必要な計算資源を判断することが不可欠である。科学技術的な性能と地域での要求性能のすり寄せが必要である。

謝辞：今回の検討にあたり日本原子力研究所から計算設備を借用させて頂いた。特に、中島憲宏氏をはじめとする計算科学技術推進センターの方々には、計算設備の借用手続や参考文献の提供でお世話になった。なお、本研究はITBLプロジェクトおよび科研費基盤(B)(2)(12574016)の一環として実施した。ここに記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 亜熱帯総合研究所 (2001): 津波警報発令時における住民の避難行動に関するアンケート調査, 報告書, 213 p.
- 阿部郁男・今村文彦 (2003): リアルタイム津波予測実現に向けた計算方式の評価と改良, 地震工学論文集, Vol. 27, pp. 319-325.
- 今村文彦 (2003): 防災における情報化—被害を最小限に抑える情報, 港湾, Vol. 80, pp. 32-33.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998): GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海工論文集, 第 45 巻, pp. 356-360.
- 首藤伸夫・後藤智明・今村文彦 (1988): 津波予警報に対する数値シミュレーションの利用, 土木学会論文集, 第 393 号/II-9, pp. 181-189.
- 鈴木喜雄・齋 和憲 (2003): 地球シミュレータにおける並列可視化システムとITBL におけるグリッド対応型可視化システムの研究・開発, 全 NEC C&C システムユーザー会, 平成 15 年度論文集, pp. 211-229.
- 高橋智幸・今村文彦・谷岡勇市郎・西村裕一・松富英夫・越村俊一・原田賢治・富田孝史・長谷川洋平・七山 太 (2004): 2003 年十勝沖地震津波に関する現地調査, 海工論文集, 第 51 巻, pp. 1356-1360.
- 恒川裕史 (1996): ワークステーションクラスタによる EDEM の並列化, 竹中技術研究報告, No. 52, pp. 9-15.
- 桧山澄子 (2003): 並列計算いろは, EIC ニュースレター No. 14-No. 18, 東京大学地震研究所情報センター, 9 p.
- 山口勇吉・武宮 博 (2001): 仮想研究環境 ITBL 基盤ソフトウェアの開発, 日本数値流体力学会誌(解説), Vol. 9 No. 3, pp. 83-88.
- ITBL 連絡調整委員会 (2004): <http://www.itbl.jp>