[共同研究成果]

津波浸水被害推計シミュレーションの

-1 -

ベクトル・スカラーハイブリッド MPI の評価

撫佐昭裕^{1,4,5)},阿部孝志³⁾,佐藤雅之²⁾,小松一彦¹⁾,小林広明^{1),2),5)},越村俊一^{3),5)}
 1)東北大学サイバーサイエンスセンター
 2)東北大学大学院情報科学研究科

- 3) 東北大学災害科学国際研究所
 - 4) 日本電気株式会社
 - 5) 株式会社 RTi-cast

津波浸水被害推計シミュレーションは、スーパーコンピュータ SX-ACE や SX-Aurora TSUBASA を 用いて津波発生から 20 分以内に浸水範囲やその被害状況を推計することを目的に開発されたもの である.本稿では、本シミュレーションプログラムにおいて SX-Aurora TSUBASA で新たにサポート されたベクトル・スカラーハイブリッド MPI (x86 プロセッサとベクトルエンジン間の MPI 通信を 可能にしたもの)による性能評価を報告する.評価結果として、ベクトル・スカラーハイブリッド MPI を使用することによって、津波浸水被害推計シミュレーションの実行時間が約半分に短縮され たことを示す.また、今まで大規模システムとして開発してきたリアルタイム津波浸水被害推計シ ステムの小型化についても言及する.

1. はじめに

著者らの研究グループは,2011年3月11日に発生した東日本大震災での津波災害を教訓として, 発災直後に津波被害の全貌を短時間で把握可能とするため,コンピュータシミュレーションを活用 したリアルタイム津波浸水被害推計システムの研究開発を行っている[1].本研究開発では津波の 伝播,遡上,被害推計のシミュレーションにおける高速化が一つの研究テーマであり,東北大学サ イバーサイエンスセンターと共同研究を継続的に実施している.津波のような広域災害では高精度 で広範囲の被害推計を短時間で行うことが求められており,本共同研究ではスーパーコンピュータ AOBAを用いた大規模シミュレーションにおいて高速化を実現し,国内の太平洋全沿岸を10mの精度 で5分以内にシミュレーションを行うことを可能にしている[2].また,本システムは2017年より 内閣府総合防災システムの一機能として採用され[3],東北大学 AOBA-A と大阪大学 SQUID のスーパ ーコンピュータシステムで稼働している.一方,自治体や企業からは担当地域の狭い範囲の津波浸 水被害推計を行うことを望む声もあり,リアルタイム津波浸水被害推計システムのダウンサイジン グ化に向けた検討も行っている.

サイバーサイエンスセンターAOBA-A システムとして昨年度導入された SX-Aurora TSUBASA には, ダウンサイジングしたモデルとしてエッジモデルとオンサイトモデルがあり,大学の研究室や企業 のサーバとして導入されている[4]. これらモデルでは特別な施設を設けることなく,一般的なサ ーバとして導入することができ,AOBA-A で開発したプログラムをそのまま実行することができる. また,現在,SX-Aurora TSUBASA の MPI ライブラリは,x86 系のプロセッサとベクトルエンジンと の MPI 通信をサポートしており,x86 系プロセッサとベクトルエンジンの両方を用いた MPI 並列(以 下,ベクトル・スカラーハイブリッド MPI)が可能となっている.本稿では,津波浸水被害推計シ ミュレーションを SX-Aurora TSUBASA のオンサイトモデル上でベクトル・スカラーハイブリッド MPIを用いて実行した場合の性能について報告を行う.尚,本報告は昨年度 SC2020 で発表を行った ものをベースにしている[5].

2. 評価環境

(1) 評価システム

SX-Aurora TSUBASA はベクトルホストとベクトルエンジンから構成され,本評価に使用したシス テムはベクトルホストに Intel Xeon プロセッサ2式とベクトルエンジン1式を搭載したものであ る.図1にシステムイメージ,表1にシステム諸元を示す.本シミュレーションプログラムはFortran で開発されたものであり, Xeon プロセッサ用のモジュール作成には Intel 製 Fortran コンパイラを 使用した.また,ベクトル・スカラーハイブリッド MPI を実行するため, NEC MPI/Scalar-Vector Hybrid パッケージを使用した.



図1 評価に利用した SX-Aurora TSUBASA の構成イメージ

	ベクトルホスト	ベクトルエンジン			
型名	Intel Xeon Gold 6148	Type 20B			
CPU 数(カード数)	2	1			
全コア数	20×2	8			
総理論性能	1.4 \times 2 Tflop/s	2.4 Tflop/s			
メモリ容量	192 GB	48 GB			
コンパイラ	Intel ifort 19.0.4.243 NEC nfort 2.1				
MPI ライブラリ	NEC MPI/Scalar-Vector Hybrid (MPI Version 2.6.0)				

表1 性能評価を行ったシステムの諸元

(2) シミュレーションモデル

津波浸水被害推計シミュレーションは、非線形長波理論式を Staggered Leap-frog 法と移流項の 風上差分を用いて差分化し、津波波源を求める Okada の式と建屋等の被害推計を行うモデルを組み 込んでいる[6,7]. 表 2 が本評価に用いたシミュレーションの条件であり、本シミュレーションは 高知県沿岸(海岸線総距離 712km)を 30m の格子間隔でシミュレーションを行うものである. 図 2 がシミュレーションに用いた階層型格子の形状である. 階層型格子では格子サイズ 810m の Domain 1 から 30m の Domain 4 までの 4 階層の格子からなり、多角形格子を採用している[8]. また、本シ ミュレーションでは図 2 の各 Domain を領域分割法で分割し並列化を行っている.

-2 -

項目	内容	
対象地域	高知県	
範囲	1,288km × 1,025km	
座標系	直角座標系	
格子構造		
格子サイズ	810m, 270m, 90m, 30m	
総格子数	1.0×10^{7}	
Δ t	0.5 秒	
再現時間	6 時間	

表2 シミュレーションの条件



図2 シミュレーションの格子構造

3. ベクトル・スカラーハイブリッド MPI 用プログラムの構築

(1) プログラム修正

ベクトル・スカラーハイブリッド MPI は、一つのプログラムをベクトルエンジンと Xeon プロセッサで実行するため、ベクトルエンジンと Xeon プロセッサ用の実行モジュールが必要になる. そのため、ベクトルエンジン向けに開発した本シミュレーションプログラムを Xeon プロセッサ向けに修正したプログラムを用意した. 修正を行ったのは図 3 に示したファイル入出力の OPEN 文と図 4 に示した Intel コンパイラがサポートしていない組み込み関数 CBRT である.

SX用: OPEN (N, FILE=NAME, FORM='UNFORMATTED', ACCESS='STREAM', STATUS='OLD') Intel用: OPEN (N, FILE=NAME, FORM='BINARY', STATUS='OLD')

図3 プログラムの修正内容



図4 組み込み関数の修正内容

(2) コンパイル

本シミュレーションプログラムは図5に示した2重のD0ループ構造になっており,内側D0ルー プをベクトル実行,外側D0ループをMPI並列で実行するようになっている. Xeon プロセッサでも 同様に内側D0ループをAVX512命令によるベクトル実行,外側D0ループをMPIによる並列実行と した.表3が使用したコンパイルコマンドとオプションである.ここで,Xeon プロセッサのコンパ イルでは環境変数 NMPI_FC_Hを指定している.これはベクトルエンジン向けのコンパイルコマンド mpinfort から Intel コンパイラ ifort を呼び出すためである.そして,コンパイルオプションで は、-vh がベクトル・スカラーハイブリッド MPI ライブラリをリンクすることを,-03 が最適化レ ベル、-finline-functions と-ipo が D0 ループ内のサブルーチンをインライン展開することを示し ている.-vec-threshold0 は D0 ループのベクトル化においてスカラー実行とベクトル実行のコス ト推定を用いてベクトル化の可否を判断しないことを指定している.この指定によりベクトル化で きるループをすべてベクトル化した方が速いにもかかわらず、ベクトル化をしないケースが多く あるからである.また、-xCORE-AVX512 は AVX512命令を使用することを示している.

subroutine nlmnt2		
do j=jsta,jend do i=ista,iend call xmmt end do end do	! ! !	Parallelized Vectorized Inlined
end subroutine nlmnt	:2	

図5 主なプログラム構造

表3 コンパイル環境

プロセッサ	コマンド	コンパイルオプション		
ベクトルエンジン	mpinfort	-03 -finline-functions		
Xeon プロセッサ	export NMPI_FC_H=ifort			
	mpinfort	-vh -O3 -ipo -vec-threshold0 -xCORE-AVX512		

(3) ロードバランスの調整

並列実行を行うときにはベクトルエンジンと Xeon プロセッサの各コアでの実行時間が均一になっていることが望ましい. そこで、ベクトルエンジンと Xeon プロセッサで本シミュレーションプログラムの実行時間を計測し、その結果から各コアに割り当てる演算量がなるべく均一になるように図2の Domain を分割した. 図6 がベクトルエンジンと Xeon プロセッサで本シミュレーションプ

ログラムを実行した時の実行時間である.ここで VE はベクトルエンジンを示している.測定は, それぞれ1コアで実行した場合と,すべてのコアを使用した場合で行った.1コアで実行した結果 からベクトルエンジンと Xeon プロセッサのコア実行性能は,ベクトルエンジンの方が約4倍高い ことがわかる.また,すべてのコアを利用した場合には,Xeon プロセッサ40コアの実行時間がベ クトルエンジン8コアの約1.2倍であることから,その時のベクトルエンジン1コアの実行性能は Xeon プロセッサ1コアの約6倍であることがわかる.以上より,ベクトルエンジンのコアに割り当 てる演算量はXeon プロセッサのコアの4倍から6倍となる.この結果をもとに図2のDomain分割 を5倍を基準に前後複数パターンを作成し,演算時間のもっとも短時間なものを測定値とした.



図6 各コア数での実行時間

4. ベクトル・スカラーハイブリッド MPI の測定結果

(1) MPI 通信

ベクトル・スカラーハイブリッド MPI では図7 で示した MPI 通信が発生する. ①はベクトルエン ジン内のコア間通信 (VE内), ②は Xeon プロセッサ内のコア間通信 (Xeon 内), ③は2 式の Xeon プ ロセッサ間の通信 (Xeon 間), ④がベクトルエンジンと Xeon プロセッサ間の通信 (VE・Xeon 間) で ある. それぞれの通信パターンにおける経路の通信バンド幅を表4に示す. ただし, ②については 公表された数値はない. この通信について PingPong ベンチマークプログラムを用いて 8 バイトか ら 2M バイトまでの転送時間を測定した.



表4 各通信経路の通信バンド幅						
通信パターン	①VE 内	②Xeon 内	③Xeon 間	④VE・Xeon 間		
通信バンド幅(GB/s)	409.6	N/A	20.8	12.5		

図 8 が測定結果である.転送データの大きさが 32k バイトで③Xeon 間の転送時間が伸び始め, 64k バイト以降で②Xeon 間と④VE・Xeon 間の時間がそれぞれ長くなっている.一方,①VE 内の通信 時間はほとんど一定している.この①VE 内の結果は表4に示した通信バンド幅 409.8GB/sの大きさ によるものである.また,表4の③Xeon間の通信バンド幅20.8GB/sはXeon相互を接続している UPIのバンド幅を示しているが,本測定の2Mバイトのデータ転送が5.6GB/sであったことから, MPIの1対1通信ではUPIの帯域を十分に使い切れていないことを示している.しかしながら,本 シミュレーションプログラムにおける最大データ転送量は64kバイトであり,③Xeon間の転送でも 一回当たり1.3×10⁵秒であることから,MPI通信がボトルネックにならないことが判明した.



図8 通信時間

(2) 実行時間

本シミュレーションプログラムのベクトル・スカラーハイブリッドMPIの評価として、ベクトル エンジン8コアに対し Xeon プロセッサ10コア、20コア、30コア、40コアの4ケースの実行を行 った. ここでプログラムを実行するコマンドを図9に示した. -vh -np 40は Xeon プロセッサ40コ アで実行することを指定し、tsunami_vh. exe が Xeon プロセッサで実行するモジュールである. -ve 0 -np 8はベクトルエンジン8コアで実行することを指定し、tsunami_ve. exe がベクトルエンジン で実行するモジュールである.

mpirun -vh -np 40 tsunami vh.exe -ve 0 -np 8 tsunami ve.exe

図9 ベクトル・スカラーハイブリッドモデルの実行コマンド

図 10 が測定結果である. ここでベクトルエンジン 8 コアと Xeon プロセッサ 40 コアで実行した 結果もプロットした. Xeon プロセッサのコア数を増加させると徐々に実行時間の短縮される割合が 減少してきているが、ベクトルエンジンと Xeon のすべてのコアを使った 48 プロセスでのシミュレ ーション時間は、ベクトルエンジンまたは Xeon プロセッサだけで実行した場合に比べて、約半分 の実行時間でシミュレーションが行えていることがわかる. これは、SX-Aurora TSUBASA において ベクトルエンジンだけでなく、ベクトルホストに搭載している汎用プロセッサを利用することによ ってシミュレーション時間が短縮できることを示している. そして、海岸線総距離 712km の津波現 象を 30m の精度で 6 時間分の再現を 4.5 分で完了していることから、SX-Aurora TSUBASA のオンサ イトモデルにおいて自治体レベルのリアルタイム津波浸水被害推計シミュレーションが可能であ ることも示している.



図 10 ベクトル・スカラーハイブリッド MPI の実行時間

5. システムのダウンサイジング

リアルタイム津波浸水被害推計システムは、津波浸水被害推計シミュレーション以外に以下の処 理を行っている.

① 断層処理(地震情報等の受信,津波発生の判断,断層の推定)

② 可視化処理(シミュレーション結果の可視化,可視化結果の配信)

全国規模の被害推計をリアルタイムに行う場合には②の可視化処理のために複数台の汎用サーバ とシミュレーションに AOBA-A クラスのスーパーコンピュータが必要になる.しかし,自治体クラ スの被害推計では本評価で使用した SX-Aurora TSUBASA オンサイトモデル(ベクトルエンジン1式, Xeon プロセッサ2式)でシミュレーションができることが明らかになり,また,可視化範囲も狭い ことから,図11に示したように①断層処理と②可視化処理を SX-Aurora TSUBASA のベクトルホス トで処理を行えば,SX-Aurora TSUBASA オンサイトモデル1台でリアルタイム津波浸水被害推計を 実施できることになる.これにより,自治体や企業において本システムを活用した独自の津波被害 の推定が可能となるのである.



図11 ダウンサイジングシステムのイメージ

6. まとめ

本稿では、リアルタイム津波浸水被害推計システムに実装されているシミュレーションプログラ ムを用いて、SX-Aurora TSUBASA のベクトル・スカラーハイブリッド MPI での性能評価を行った. ここで、ベクトル・スカラーハイブリッド MPI はベクトルエンジンと x86 プロセッサ間の MPI 通信 を可能にするものである.本評価では、ベクトルエンジンで実行していた津波浸水被害推計シミュ レーションがベクトル・スカラーハイブリッド MPI を利用することで、実行時間が約半分に短縮で きることを示した.また、従来、リアルタイム津波浸水被害推計システムは大規模なシステム構成 になっていたが、自治体や企業向けにダウンサイジングしたシステムが構築できることも示した.

今後は、本評価で得られた知見を用いて、ダウンサイジングしたシステムの設計開発を行ってい く予定である.

謝辞

研究にあたってサイバーサイエンスセンターの関係各位にご指導とご協力を頂いたことに感謝 いたします.また、本研究の一部は、科研費(17H06108, 18K11322, 21H05001),文部科学省「次 世代領域研究開発」(高性能汎用計算機高度利用事業費補助金)の助成のもとに行われた.

参考文献

- [1] 越村俊一,阿部孝志,撫佐昭裕,村嶋陽一,鈴木崇之,井上拓也,太田雄策,日野亮太,佐藤 佳彦,加地正明,小林広明,スーパーコンピュータによるリアルタイム津波浸水被害予測,SENAC Vol. 51, No. 1、2018.
- [2] 撫佐昭裕,岸谷拓海,阿部孝志,佐藤佳彦,田野邊睦,鈴木崇之,村嶋陽一,佐藤雅之,小松 一彦,伊達進,越村俊一,小林広明,リアルタイム津波浸水被害推計シミュレーションの性能 評価, SENAC, Vol. 53, No. 2, 2020.
- [3] 東北大学,大阪大学,日本電気株式会社,国際航業株式会社,株式会社エイツー,"東北大・大阪大・NEC・国際航業・エイツー 世界初,地震発生から30分以内にスーパーコンピュータを用いて津波浸水被害を推計するシステムが内閣府「津波浸水被害推定システム」として採用,2017(広報).
- [4] NEC SX-Aurora TSUBASA WEB サイト. https://jpn.nec.com/hpc/sxauroratsubasa/index.html
- [5] A. Musa, T. Soga, T. Abe, M. Sato, K. Komatsu, S. Koshimura, H. Kobayashi, "Evaluation of Tsunami Inundation Simulation using Vector-Scalar Hybrid MPI on SX-Aurora TSUBASA," The poster presentation at The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC20), November 2020.
- [6] Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., Imamura, F., "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Ache, Indonesia," Coastal Engineering Journal, JSCE, 51(3), 243-273, 2009.
- [7] Y. Okada, "Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space," Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2), 1018-1040, 1992.
- [8] Inoue, T., T. Abe, S. Koshimura, A. Musa, Y. Murashima, H. Kobayashi, "Development and Validation of a Tsunami Numerical Model with the Polygonally Nested Grid System and its MPI-Parallelization for Real-Time Tsunami Inundation Forecast on a Regional Scale", Journal of Disaster Research, Vol. 14, No. 3, pp. 416-434, 2019. doi: 10.20965/jdr.2019.p0416

— 8 —