

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

著者	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
雑誌名	SENAC : 東北大学大型計算機センター広報
巻	53
号	2
ページ	10-18
発行年	2020-04
URL	http://hdl.handle.net/10097/00128114

[共同研究成果]

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

撫佐昭裕^{1,5,8)}, 岸谷拓海²⁾, 阿部孝志³⁾, 佐藤佳彦^{6,8)}, 田野邊睦^{7,8)}, 鈴木崇之^{7,8)},
村嶋陽一^{3,7,8)}, 佐藤雅之²⁾, 小松一彦¹⁾, 伊達 進⁴⁾, 越村俊一³⁾, 小林広明²⁾

- 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) 大阪大学サイバーメディアセンター
- 5) 日本電気株式会社
- 6) NEC ソリューションイノベータ
- 7) 国際航業株式会社
- 8) 株式会社 RTi-cast

リアルタイム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 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。本研究では、本シミュレーションプログラムにおいて最新のスーパーコンピュータである SX-Aurora TSUBASA に加え、Intel 製の Xeon Gold と Xeon Phi (Knights Landing) を用いて性能評価を行い、全国規模の被害推計を行うためのコンピュータ資源量の算出を行った。その結果、SX-Aurora TSUBASA と Xeon Gold を用いた場合、10m 格子を用いて 5 分以内に国内の太平洋全沿岸の被害推計のシミュレーションが可能であることを明らかにした。

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、関東地方から北海道にかけて津波が襲来し、その被害範囲は沿岸距離 2,000km、浸水面積 500km² を超えるものであった[1, 2]。政府・自治体はこの広範囲に及ぶ被害把握に多くの時間を要し、発災直後の救援活動や被災者への支援活動の初動に遅れが生じてしまった[3]。この教訓をもとに、本研究グループでは、発災直後に津波被害の全体像を把握するため、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開発を行っている。本システムは、東北大学サイバーサイエンスセンターと大阪大学サイバーメディアセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE を用いて、津波を起こす地震が発生してから 20 分以内に沿岸部の浸水範囲や被害状況を 10m 格子を用いて推計することができる[4, 5]。本システムは内閣府の総合防災情報システムの一機能として採用され、2017 年 11 月から南海トラフ地震を対象に鹿児島県から静岡県までの被害状況をシミュレーションする体制を整えている [6]。内閣府のシステムでは被害推計を行う範囲が広いため、推計精度を 30m、処理時間を 30 分以内としている。今後、推計精度を 10m に向上させ、推計範囲を全国に拡大するためには、より高い計算性能が必要になる。

本稿では、津波浸水被害推計シミュレーションを様々な特徴を持つスーパーコンピュータを用いて性能評価を行う。そして、その結果から日本の太平洋全沿岸を推計するために必要なコンピュータ資源量について明らかにする。ここで性能評価に用いたシステムは SX-ACE, SX-Aurora TSUBASA[7], Xeon Gold, Xeon Phi (Knights Landing) である。

2. リアルタイム津波浸水被害推計システム

(1) システムの概要

リアルタイム津波浸水被害推計システムは、図1に示したように断層設定サーバ、スーパーコンピュータ、データ処理サーバからなる。断層設定サーバは、気象庁の地震・津波情報と国土地理院の衛星測位情報をもとに、津波発生 の判定と断層の動きを推計する。スーパーコンピュータは津波発生が予測された場合に断層設定サーバの断層推定結果をもとに津波浸水被害推計シミュレーションを実行する。この時、スーパーコンピュータで動作していたジョブは一時的に停止し、津波浸水被害推計シミュレーションを最優先で実行する。そして、データ処理サーバは、津波浸水被害推計シミュレーションで得られた津波浸水の範囲や建屋被害について地図上に可視化し、その情報を政府や自治体等に配信する。これらの処理時間は、南海トラフ地震発生時の高知県の例において、断層設定サーバで約7分、スーパーコンピュータで約5分、可視化・配信で約4分、そしてトータル処理時間は約16分である[5]。

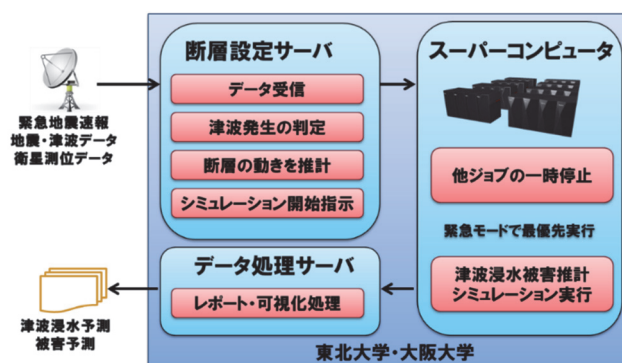


図1 リアルタイム津波浸水被害推計システム構成

(2) 津波浸水被害推計シミュレーション

津波浸水被害推計シミュレーションは、式(1)から(5)の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[8, 9]。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (3)$$

$$M = \int_{-h}^{\eta} u dz = \bar{u}(\eta + h) \quad (4)$$

$$N = \int_{-h}^{\eta} v dz = \bar{v}(\eta + h) \quad (5)$$

ここで、 η は静水面からの垂直変位、 M と N は x と y 方向の全量流量、 D は全水深、 g は重力加速度、 n は粗度係数、 u と v は x と y 方向の流速、 h は静水深である。

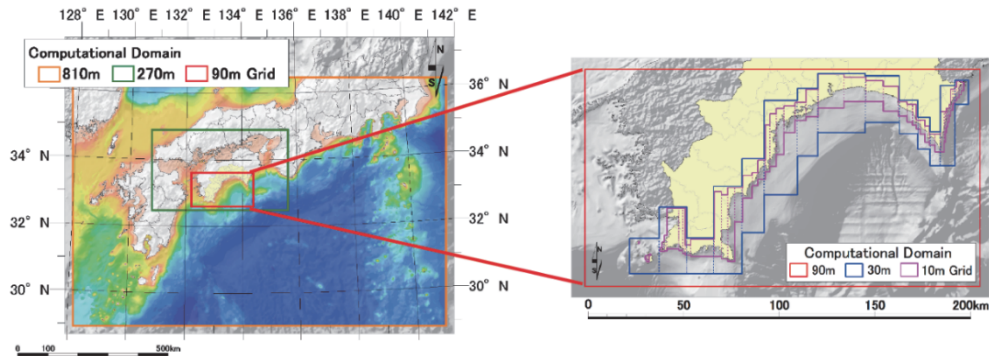


図 2 高知県をシミュレーションした格子構造

本シミュレーションでは計算格子において階層型格子を用いているが、シミュレーションの時間刻み Δt を大きくするため、水深の深い領域を避けるように格子を組んでいる[10]。図2が本評価で用いている格子構造である。格子サイズが30m、10mの領域では水深の深いところを避けるように多角形になっている。

本シミュレーションプログラムの並列化はMPIライブラリを用いて領域分割法で行った。図2における10mから810mの計算格子において南北方向をベクトル化し、東西方向を分割して並列化を行った。計算負荷を均一にするために、格子810m、270m、90mの領域は長方形になっているのでその長方形を均等に分割した。また、格子30mと10mの領域は複数の長方形を組み合わせた多角形になっているので、図3に示したような領域分割を行った。図3は多角形の領域を5つのプロセスで分割した例である。P0~P4はプロセス番号であり、各プロセスが演算する格子数を等しくするように長方形を跨いで分割している(茶色の領域が長方形を跨がった分割)。ここで、シミュレーションの諸条件を表1に示す。

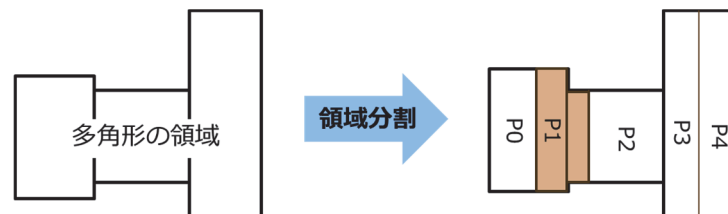


図 3 多角形領域の領域分割の仕方

表 1 シミュレーションの諸条件

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	多角形格子
格子サイズ	810m, 270m, 90m, 30m, 10m
総格子数	3.5×10^7
Δt	0.2 秒
再現時間	6 時間
潮位	朔望平均満潮面
実数データ型	単精度浮動小数点

3. 評価システム

本シミュレーションの性能評価対象として、SX-ACE, SX-Aurora TSUBASA, Xeon Gold, Xeon Phi の4つのシステムを用いた。それぞれのシステム諸元を表2に示す。なお、Xeon Phi のMCDRAMはFLATモードで利用した。

表 2 性能評価を行ったシステムの諸元

		SX-ACE	SX-Aurora TSUBASA	Xeon Gold	Xeon Phi
CPU	CPU 型番	—	10AE	6126	7210
	動作周波数(GHz)	1	1.584	2.6	1.3
	コア数	4	8	12	64
	理論コア性能(Gflop/s)				
	・単精度	64	608.25	166.4	83.2
	・倍精度	64	304.13	83.2	41.6
	理論CPU性能(Gflop/s)				
	・単精度	256	4866.0	1996.8	5324.8
	・倍精度	256	2433.0	998.4	2662.4
	メモリ容量 (GB)	64	48	96	192
メモリバンド幅(GB/s)	256	1350	128	115.2	
MCDRAM 容量 (GB)	—	—	—	16	
MCDRAM バンド幅 (GB/s)	—	—	—	490	
ノード	CPU 数	1	8	2	1
	メモリ容量 (GB)	64	384	192	192
	ノード間バンド幅 (GB/s)	8	25	12.5	12.5

ここでは、新しいシステムであるSX-Aurora TSUBASA (Type 10AEは2019年度リリース) について概要を説明する。SX-Aurora TSUBASAはSX-ACEの後継システムで図4に示したカード型のベクトルスーパーコンピュータである。この赤色のカードにメモリやベクトルプロセッサ1台が実装されていて、このカードをLinuxサーバにPCI接続して利用する。図4の右図がLinuxサーバに8つのカードを搭載したもので、本評価で使用したモデルである。一つのカードが1ノード(1CPU)に相当し8コアからなる。利用者は今までのベクトル処理が利用でき、OpenMPや自動並列化により8コアまでの並列実行が行える。また、カード間やLinuxサーバ間を跨がった並列実行もでき、その場合にはMPIによる並列化が必要になる。特徴的なのは、カード上で実行しているプログラムがLinux

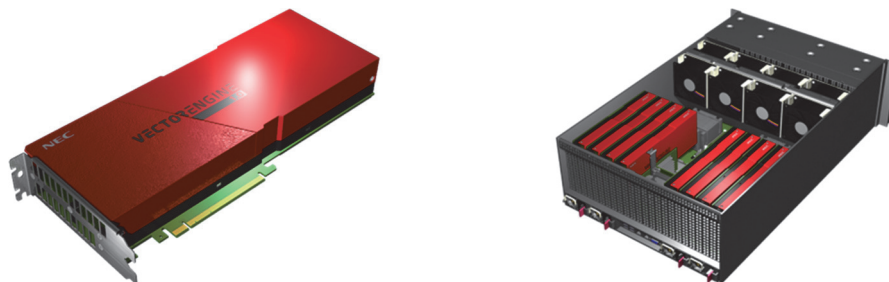


図 4 SX-Aurora TSUBASA : 左が本体のカード, 右がLinuxサーバに8カード装備したモデル

サーバのCPUを呼び出して利用できることであり、その逆としてLinuxサーバ上のプログラムがカード上のベクトルプロセッサを呼び出して利用することもできる。この機能を利用することによって、ベクトル化しているルーチンはカード上のベクトルプロセッサで、ベクトル化できないルーチンはLinuxサーバ上のCPUで実行することができる。なお、本評価ではカード上のベクトルプロセッサで津波浸水被害推計シミュレーションを実行した。

また、表3に使用したFortranコンパイラのバージョンとコンパイルオプションを示した。ここでXeon GoldとXeon PhiはIntel製のFortranコンパイラを使用した。Intel製のコンパイラは自動ベクトル化機能を有し、D0ループに対してベクトル化を行うことができる。しかし、コンパイラがベクトル化によって性能が低下すると判断した場合にはベクトル化を行わない仕様になっている。そのため、本プログラムの主要なD0ループはベクトル化可能であるにもかかわらずベクトル化されなかった。ベクトル化はコンパイラ指示行「vector always」をプログラムに挿入することによりコンパイラの判断を無視してベクトル化が行えるので、本評価ではベクトル化を行わなかった場合と指示行を挿入してベクトル化を行った場合の性能を比較した。なお、SX-ACEとSX-Aurora TSUBASAでは、コンパイラ指示行を使用しなくても効果的にベクトル化が行われている。

表3 使用したFortranコンパイラとオプション

システム	バージョン	オプション
SX-ACE	FORTRAN 90/SX Rev. 536	-Chopt -pi
SX-Aurora TSUBASA	Fortran compiler for Vector Engine 2.5.20	-O3 -msched-block -finline-functions
Xeon Gold	Intel Fortran 18.0.3.222	-O3 -ipo -xCORE-AVX512
Xeon Phi	Intel Fortran 18.0.3.222	-O3 -ipo -xMIC-AVX512

4. 評価結果

(1) シングルコアの評価

性能評価はシミュレーションの実行時間を計測して行った。各システムにおけるシングルコアでの実行時間を図5に示す。ここで、図中の「メモリストール」はメモリからデータを読み込む間にCPUがストールしている時間、「CPU」はCPUでの処理時間である。なお、本プログラムはファイルの入出力は少なく、無視できる程度である。「Xeon Phi + direc.」と「Xeon Gold + direc.」は前章で説明した通り、プログラムのベクトル化を行うためにコンパイラ指示行を挿入したものである

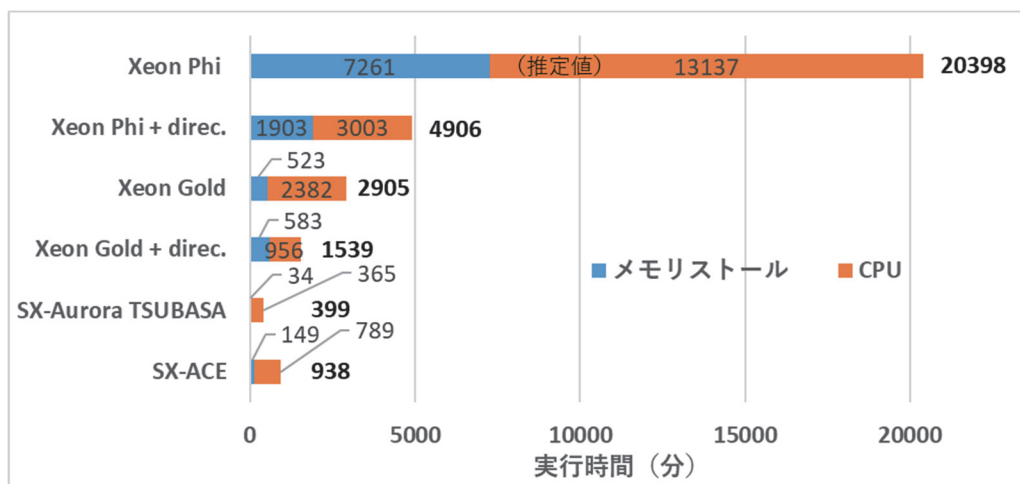


図5 シングルコアでの実行時間

また、「Xeon Phi」は実行時間が長く、計測に使用したシステムの運用時間内に処理が終わらなかったため、津波の再現時間を6時間から2時間に短縮して、その結果から6時間分のシミュレーション実行時間を推定したものである。

Xeon GoldとXeon Phiにおいて、ベクトル化を行わなかった場合（「Xeon Gold」と「Xeon Phi」）と行った場合（「Xeon Gold + direc.」と「Xeon Phi + direc.」）を比較すると、ベクトル化を行った場合の処理時間の方が短いことがわかる。Xeon Goldで約1/2、Xeon Phiで約1/5の実行時間になっている。この結果から一般にスカラーCPUと呼ばれているIntel製のCPUでも高速化を行うためには、プログラムのベクトル化が必要であることがわかる。また、ベクトル化については、Intelのコンパイラの判断に任せず、コンパイラ指示行を用いてベクトル化を行うことが重要である。

次にメモリストール時間を見してみる。ベクトル型スーパーコンピュータSX-ACEとSX-Aurora TSUBASAの「メモリストール」時間は、Xeon GoldやXeon Phiに比べて短いことがわかる。特にSX-ACEの「メモリストール」時間は「Xeon Gold + direc.」の約1/4、SX-Aurora TSUBASAでは約1/17であった。これは2つの要因があり、一つ目はSX-ACEとSX-Aurora TSUBASAのメモリバンド幅がXeon GoldやXeon Phiに比べて大きいことである（ここでXeon Phiはバンド幅の高いMCDRAMを利用したが、本プログラムのメモリ使用量が17GBでMCDRAMの容量を超えたため、メインメモリのメモリバンド幅で律速されてしまった）。また、もう一つは両SXのベクトル処理のベクトル長が256と長く、ベクトル演算パイプラインの処理とメモリからのデータ転送をオーバーラップさせ、メモリレイテンシを隠蔽できていることである。

全処理時間では、SX-Aurora TSUBASAが最も短く、SX-ACEの約2/5、「Xeon Gold + direc.」の約1/4、「Xeon Phi + direc.」の約1/11になっている。しかし、SX-Aurora TSUBASAとSX-ACEの理論コア性能の比から見ると、SX-Aurora TSUBASAの実行効率は低下している。これはSX-Aurora TSUBASAのキャッシュメモリのバンド幅が律速となり、ベクトル処理ユニットを十分に活用できていないからである。一方、SX-ACEは評価したシステムの中で最も理論コア性能が低いが、全処理時間は「Xeon Gold + direc.」の約2/3、「Xeon Phi + direc.」の約1/4になっており、実行効率が高いことがわかる。

(2) マルチコアの評価

図6が各システムにおけるマルチコアでの実行時間である。左図がコア数で実行時間を比較したもの（SX-ACE、SX-Aurora TSUBASA、Xeon Phiはコア数を 64×2^n （ n は0以上の整数）、Xeon Goldは 72×2^n でデータをプロットした）、右図がCPU数で実行時間を比較したものである（SX-ACEはCPU数を 16×2^n 、SX-Aurora TSUBASAとXeon PhiはCPU数を 8×2^n 、Xeon Goldは 6×2^n でデータをプロットした）。右図にはSX-ACE、SX-Aurora TSUBASA、Xeon Goldそれぞれにおいて実行時間が5分以下になった時のCPU数を記載した。

図6の左図においてXeon Phiは他のシステムより実行時間が長いように見える。しかし、Xeon Phiは、もともとコア性能を抑え、CPU内に多くのコアを搭載することによってCPU全体の性能をあげることを目的に作られたものである。そのため、右図のCPU数による実行時間を見ると、Xeon PhiはXeon GoldとSX-ACEより実行時間が短くなっている。これはコア数が多いだけでなく、プログラムが使用するメモリが各CPUに分散され、MCDRAMの容量を超えなかったため、図5のシングルコア実行より効率的に処理が行われたためである。しかし、32CPUでは演算粒度が小さくなり並列効果が低下している。さらにXeon PhiのCPU数を増やして、どこまで実行時間が短縮できるか評価したかったが、測定に利用したシステムが44CPUまでであったため調査はできていない。

次にSX-ACEでは、左図において同じコア数ではXeon Goldより実行時間が短くなっている。しかし、右図では逆転し、同じCPU数ではXeon Goldの方が実行時間が短い。これは、SX-ACEのCPU当たりのコア数がXeon Goldの1/3の4であり、SX-ACEとXeon GoldのCPU性能に差があるからである。また、右図においてSX-ACEとXeon Goldが5分を達成するCPUを見ると、Xeon GoldはSX-ACEの約3/5のCPU数で良いことがわかる。

最も新しいシステムである SX-Aurora TSUBASA では、コア数 (左図) と CPU 数 (右図) において、共に実行時間が最も短いことがわかる。左図のコア数 512 では SX-Aurora TSUBASA の実行時間は SX-ACE の約 1/3, Xeon Gold の約 1/5, Xeon Phi の約 1/30 である。また、右図の実行時間 5 分では CPU 数として Xeon Gold の約 1/3 である。SX-Aurora TSUBASA は今回評価したシステムの中で、もっともコンピュータ資源として CPU 数が少なく、かつ短時間で津波浸水被害予測が行えるシステムであることがわかる。これは、SX-Aurora TSUBASA は高いメモリバンド幅と高性能のベクトルコアを有しているからである。

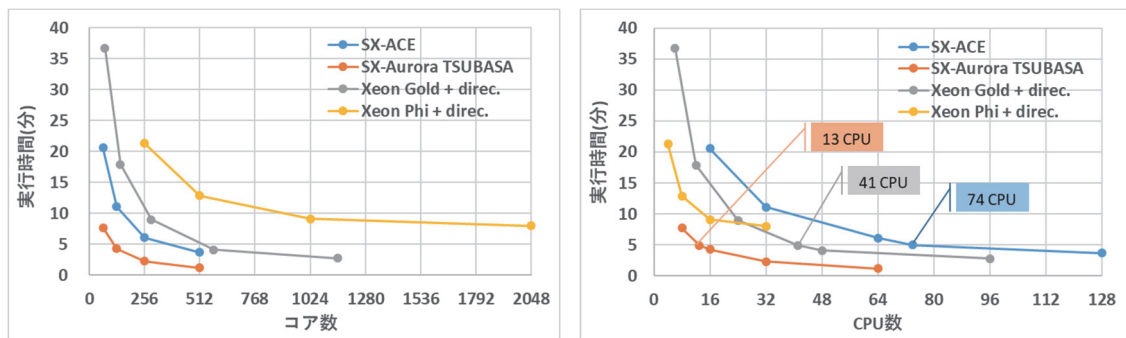


図 6 マルチコアでの実行時間：(左) コア数, (右) CPU 数

(3) システム拡張のためのコンピュータ資源

リアルタイム津波浸水被害推計システムは、現在、南海トラフ地震をターゲットとして図7の「西日本の810m格子の範囲」(西日本地域と記載する)を30m格子を用いてシミュレーションしている。そして、このシミュレーションを5分以内に完了させるためにSX-ACE 388 CPU を利用している。今後、シミュレーションの精度を上げるため格子サイズを10m、そして国内の太平洋全沿岸をシミュレーションするためにどの程度のCPU数を必要とするかについて、SX-ACE, SX-Aurora TSUBASA, Xeon Goldで見積もりを行った。

西日本地域を10mの格子サイズでシミュレーションを行うことを考える。リアルタイム津波浸水被害推計シミュレーションは直交座標系を用い、かつ潮位の計算を行っていることから、西日本地域を座標系と潮位を考慮した15の領域に分割し、その領域ごとにシミュレーションを行っている。各領域はその地形に合わせて多角形格子を組み、また海域の水深に合わせた Δt を設定している。西日本地域の演算量は、式(6)より本評価で実施した高知県の約27倍の演算量になる。

$$\text{演算量の倍率} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\text{領域}i\text{の格子数}}{\text{高知県の格子数}} \cdot \frac{\text{高知県の}\Delta t}{\text{領域}i\text{の}\Delta t} \right) \quad (6)$$

次に、国内の太平洋全沿岸のシミュレーションでは、南海トラフ地震だけでなく、相模トラフ、日本海溝、千島海溝などで発生する地震による津波のシミュレーションを行う必要がある。そのため、東日本地域での810m格子の範囲を相模トラフ、日本海溝、千島海溝を含むように設定する(図7の赤色の矩形)。東日本領域での座標系と潮位を考慮すると、東日本地域も15の領域に分割してシミュレーションを行うことになる。そして、地形に合わせた多角形格子と水深に合わせた Δt から式(6)より、太平洋全沿岸の演算量は西日本地域の約3倍になる。また、西日本地域で発生した津波の東日本地域への伝搬やその逆もシミュレーションする必要があるために、日本全体を取り囲む計算領域(図7の2430m格子の範囲)も設定した。

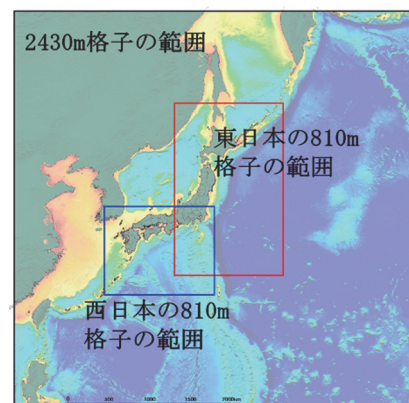


図 7 太平洋全沿岸の計算範囲

この計算領域を増やしたことにより太平洋全沿岸の演算量は西日本地域の約 3.5 倍となる。

以上から各システムの CPU 数は表 4 のようになる (1 の位を切り上げた)。現在, SX-ACE において西日本領域の 30m 格子を 388 CPU でシミュレーションをしているが, 約 5 倍の CPU 数で 10m 格子のシミュレーションができることがわかる。例えば, サイバーサイエンスセンターの SX-ACE の CPU 数は 2,560 であるので, このシミュレーションを実行することが可能である。しかし, 10m 格子の太平洋全沿岸のシミュレーションは, サイバーサイエンスセンターの SX-ACE の全 CPU 数を超えるため実行できない。(ちなみに, SX-ACE の最大構成を持つ海洋研究開発機構の地球シミュレータも CPU 数が 5,120 なので実行することはできない)。Xeon Gold においては, 西日本地域で 1,110 CPU なので学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点[11]のスーパーコンピュータなどで実行可能である。太平洋全沿岸では 3,900 に近い CPU 数が必要であり, この規模のシステムを有する機関は少なく, 国内では気象庁のスーパーコンピュータシステムなどになる。SX-Aurora TSUBASA では, まだ大規模システムの導入がないが, 太平洋全沿岸のシミュレーションは図 4 の右図のサーバ 154 台で実行可能であり, 今回評価したシステムの中でもっと小規模なシステム構成で実現可能である。

表 4 実行時間 5 分を達成するための CPU 数

	高知県 10m	西日本 10m	太平洋全沿岸
SX-ACE	74	2,000	7,000
SX-Aurora TSUBASA	13	350	1,230
Xeon Gold	41	1,110	3,880

5. 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-ACE, SX-Aurora TSUBASA, Xeon Gold, Xeon Phi の 4 つの代表的なスーパーコンピュータで性能評価を行った。SX-ACE は, シングルコアでの実行時間で Xeon Gold の約 2/3, Xeon Phi の約 1/4 であり, Xeon Gold や Xeon Phi に比べて実行効率が高いことを示した。また, 2018 年にリリースされた SX-Aurora TSUBASA では, シングルコアでの実行時間は SX-ACE の約 2/5, Xeon Gold の約 1/4, Xeon Phi の約 1/11 であり, さらに, 512 コアでの実行時間は SX-ACE 512 コアの約 1/3, Xeon Gold 576 コアの約 1/5, Xeon Phi 512 コアの約 1/30 の時間であった。SX-Aurora TSUBASA は, 評価したスーパーコンピュータの中でもっと高速にシミュレーションを処理できることを明らかにした。また, リアルタイム津波浸水被害推計システムの今後の拡張として, 10m 格子による国内の太平洋全沿岸の 5 分以内のシミュレーションに必要なコンピュータ資源量は, SX-ACE が約 7,000 CPU, Xeon Gold が約 3,900 CPU, SX-Aurora TSUBASA が約 1,230 CPU となり, Xeon Gold と SX-Aurora TSUBASA で実現できることが示せた。

今後は, 本評価で得られた知見を用いてさらなる高速化を行うために, 各システムにおいて命令レベルの最適化と, 並列数の拡大による MPI 通信の最適化を行っていく予定である。

謝辞

本研究は東北大学サイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システム SX-ACE と大阪大学サイバーメディアセンターの大規模計算機システム OCTOPUS を利用した。研究にあたって両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), 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 (jh190030-NAH), 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] Imamura, F., Anawat, S., “Damage due to the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami and its Lessons for Future Mitigation,” In Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake, Tokyo, Japan, March 2012.
- [2] Mori, N., Takahashi, T., Yanagisawa, H., “Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation,” *Geophysical Research Letters*, 38 L00G14, 2016.
- [3] Koshiyama, K., “Characteristics of Emergency Response at the Great East Japan Earthquake,” In 5th International Disaster and Risk Conference Davos 2014 [poster], Davos, Switzerland, August 2014.
https://idrc.info/fileadmin/user_upload/idrc/documents/IDRC14_PosterCollection.pdf
- [4] 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.
- [5] Musa, A., Watanabe, O., Matsuoka, H., Hokari, H., Inoue, T., Murashima, Y., Ohta, Y., Hino, R., Koshimusa, S., Kobayashi, H., “Real-time tsunami inundation forecast system for tsunami disaster prevention and mitigation,” *J. Supercomput.*, 74(7), 3093-3113, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2363-0>.
- [6] 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).
- [7] NEC SX-Aurora TSUBASA WEB サイト <https://jpn.nec.com/hpc/sxaurooratsubasa/index.html>
- [8] Okada, Y., “Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 1018-1040, 1992.
- [9] 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.
- [10] 井上拓也, 阿部孝志, 越村俊一, 撫佐昭裕, 村嶋陽一, 小林 広明, “多角形領域接続・MPI並列による広域津波解析の効率化”, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, Vol. 72, No. 2, I_373-I_378, 2016.
- [11] 学祭大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点 WEB サイト <https://jhpcn-kyoten.itc.u-tokyo.ac.jp/ja/>