

新地球シミュレータによる高分解能・量的津波シミュレーション

今任嘉幸^{1,a)} 石橋正信^{2,†1} 馬場俊孝^{3,2} 安藤和人^{1,†2} 上原均¹ 加藤季広⁴

概要: 2015年より本格稼働した新地球シミュレータ(SX-ACE)で南海トラフ地震を想定した大規模津波シミュレーションを実施し、多数のシナリオに基づく和歌山県沿岸域における津波浸水データベースを構築した。津波シミュレーションを効率的に実施するために、津波シミュレーションコード(JAGURS)の最適化やスケーラビリティの評価、マルチジョブコントロールを実施した。津波シミュレーションの効率化により、3万ケースを超える津波シミュレーションを3か月という短期間で完了させた。津波浸水データベースは和歌山県が運用している津波浸水予測システムに組み込まれ、気象庁以外で初めて和歌山県が独自に津波予報業務をはじめている。

キーワード: 新地球シミュレータ, SX-ACE, JAGURS, 津波浸水予測システム

High-resolution, Quantitative Tsunami simulation on New Earth Simulator

YOSHIYUKI IMATO^{1,a)} MASANOBU ISHIBASHI^{2,†1}
TOSHITAKA BABA^{3,2} KAZUTO ANDO^{1,†2}
HITOSHI UEHARA¹ TOSHIHIRO KATO⁴

Abstract: We carried out the large-scale tsunami simulation that assumed a Nankai trough earthquake with a new Earth Simulator (SX-ACE) which operated from 2015 and built the tsunami inundation database in the coast of Wakayama based on a lot of scenarios. For efficiency of the tsunami simulation, we carried out the optimization of the tsunami simulation code (JAGURS), the evaluation of the scalability, and multi-job control. More than 30,000 cases of the tsunami simulation were completed in a short term of about 3 months. The tsunami inundation database is incorporated in the Tsunami Inundation Prediction System which Wakayama Prefecture applies, and Wakayama Prefecture has begun a tsunami warning originally for the first time any place other than the Japan Meteorological Agency.

Keywords: new Earth Simulator, SX-ACE, JAGURS, Tsunami Inundation Prediction System

1. はじめに

現在、日本では気象庁により津波警報システムが整備されており、津波警報・注意報を地震発生の数分後に発表している。気象庁は、予め多数の震源モデルによる津波計算を実施し、津波予測結果を保存したデータベースを、津波警報・注意報の発表に活用している。地震発生後に得られる震源情報を基に、データベースから検索し、迅速な津波警報・注意報の発表を実現している[1]。しかし、津波警報・注意報は沿岸部の津波の高さ情報のみであり、住民が住む

住居まで津波が到達するかどうかの情報はないため、「自分は大丈夫だろう」と思いこみ、避難が遅れ津波の犠牲となるケースは多い。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波警報が3分後に出されたにも関わらず、避難をしなかった人もしくは避難が遅れた人は、犠牲者のうち約半数を占めるという報告もある。このため、沿岸部の津波の高さの予測だけでなく、陸上への高分解能な浸水予測を即時に提供できれば、避難行動が促進されるものと期待される。ただ、広域・高分解能な津波浸水計算をリアルタイムで完了するのは難しい。しかし、気象庁が運用する津波警報システムの方法で、多数のシナリオに基づく津波浸水データベースを予め準備しておくことで、地震発生後即時に浸水予測を提供することが可能である。多数のシナリオを浸水が評価できるほどの高分解能、広域に実施するには膨大な計算資源が必要で今まで実現困難であった。そこで本研究では、2015年より本格稼働した新地球シミュレータ(新ES)[2]で南海トラフ地震を想定した大規模津波シミュレーションを実施し、多数のシナリオに基づく和歌山県沿岸域における津波浸水データベースを構築することを目的としている。本研究の実施は2015年3月から5月に地球シミュレータ特別推進課題で行われた[3]。この3か月という短期間で3万ケースを超える多数の津波シミュ

1 海洋研究開発機構 地球情報基盤センター
Center for Earth Information Science and Technology,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
2 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター
Research and Development Center for Earthquake and Tsunami,
Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology
3 徳島大学大学院理工学研究部
Graduate School of Science and Technology, Tokushima University
4 日本電気株式会社 ITプラットフォーム事業部
第三ソリューション基盤統括部
3rd Solution Platform Department IT Platform Division, NEC Corporation
†1 現在、和歌山県 総務部危機管理局防災企画課
Disaster prevention division, Wakayama prefectural government
†2 現在、理化学研究所 計算科学研究機構
フラッグシップ2020プロジェクト アプリケーション開発チーム
(兼) 研究部門 複合系気候科学研究チーム
Application Development Team Flagship 2020 Project,
Computational Climate Science Research Team,
RIKEN Advanced Institute for Computational Science
a) imatoy@jamstec.go.jp

ュレーションを完了させるために津波シミュレーションコード (JAGURS) の最適化やスケーラビリティの評価, マルチジョブコントロールを実施した. この津波シミュレーションにより得られた成果は和歌山県が運用している津波浸水予測システムに組み込まれ, 和歌山県の津波予報業務に活用されている.

本稿では, 2章で2015年から本格稼働している新ESの概要について, 3章で津波シミュレーションの手法とデータについて, 4章で津波計算の効率化に対する検討内容の詳細とその成果について, 5章では本研究で得られた津波浸水データを活用して実施されている和歌山県での津波予報業務について, 最後に6章で今後の展望等を述べる.

2. 新地球シミュレータ (新ES) の概要

新地球シミュレータ (新ES) は, 2015年3月にサーバシステム, 6月にはフルシステムが稼働した (図1参照). 新ESはNEC社製のSX-ACE 5,120ノードから構成され, 2015年2月まで稼働していたNEC社製SX-9で構成された2世代目の地球シミュレータ (ES2) のさらに10倍の計算能力を持つ. ES2 (SX-9) と新ES (SX-ACE) とのスペックの比較を表1に示す. 表1のADB (Assignable Data Buffer) とは, NEC社製SXシリーズ独自のコアメモリ間にあるキャッシュである.



図1 新地球シミュレータ
Figure 1 New Earth Simulator.

表1 ES2 (SX-9) と新ES (SX-ACE) の比較
Table 1 Comparison between ES2 and New ES.

		ES2(SX-9)	新ES(SX-ACE)
コア	ピーク性能	102.4 GFLOPS	64 GFLOPS
	ADB 容量	256 KB	1 MB
CPU	コア数	1	4
	ピーク性能	102.4 GFLOPS	256 GFLOPS
	メモリバンド幅	256 GB/s	256 GB/s
ノード	CPU 数	8	1
	メモリ容量	128 GB	64 GB
システム	ノード数	160	5,120
	CPU (コア)数	1,280 (1,280)	5,120 (20,480)
	ピーク性能	131 TFLOPS	1.3 PFLOPS
	ネットワーク性能	8 x 8 GB x 2	4 GB x 2

3. 津波シミュレーションの手法とデータ

3.1 計算手法

地震は地殻変動を伴い, 地盤の水平移動や昇降が発生する. これが海底において生じた場合, 海底の昇降によって津波が励起される. 震源の情報を元に作成した波源を初期条件とし, 地形情報を境界条件として入力して, 水位と流量の時間発展を評価することで津波をシミュレーションする. 本計算では, 津波シミュレーションコード (JAGURS) [4]を利用した. JAGURS は, ナビエ・ストークス方程式を長波として近似した式 (長波方程式) を使用し, その時間発展を有限差分法により解くことで, 津波の波源から沿岸までの伝搬, および陸地への浸水や河川への遡上を計算することができる. 移流項 (空間の移動に起因する速度の変化量) および海底面の摩擦を考慮した非線形式, またはこれらを考慮しない線形式の2つに対応しており, また太平洋を伝搬するような津波計算も扱えるように座標系は球面座標を採用している. 図2にJAGURSで用いている支配方程式を示す. 変数として流速で扱う場合[5]もあるが, 本研究では, 変数として流量で扱った2つの時間発展方程式と1つの連続の式に基づいた計算が行われている. また, 長距離にわたって伝播する遠地津波の場合には, 分散項やコリオリ力を考慮する必要があるが, 本研究では考慮しない.

<p>運動方程式</p> $\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{M^2}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN}{d+h} \right) = - \frac{g(d+h)}{R \sin \theta} \frac{\partial h}{\partial \varphi} - \frac{gn^2}{(d+h)^3} M \sqrt{M^2 + N^2}$ $\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{MN}{d+h} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2}{d+h} \right) = - \frac{g(d+h)}{R} \frac{\partial h}{\partial \theta} - \frac{gn^2}{(d+h)^3} N \sqrt{M^2 + N^2}$ <p>連続の式</p> $\frac{\partial h}{\partial t} = - \frac{1}{R \sin \theta} \left(\frac{\partial M}{\partial \varphi} + \frac{\partial (N \sin \theta)}{\partial \theta} \right)$	<table border="1"> <thead> <tr> <th>記号</th> <th>意味</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>t</td> <td>時間</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>地球半径</td> </tr> <tr> <td>φ</td> <td>経度</td> </tr> <tr> <td>θ</td> <td>余緯度</td> </tr> <tr> <td>u</td> <td>水平流速 (緯度)</td> </tr> <tr> <td>v</td> <td>水平流速 (経度)</td> </tr> <tr> <td>M</td> <td>線流量 (緯度)</td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>線流量 (経度)</td> </tr> <tr> <td>d</td> <td>静水深</td> </tr> <tr> <td>h</td> <td>水位</td> </tr> <tr> <td>g</td> <td>重力定数</td> </tr> <tr> <td>n</td> <td>マンニングの粗度係数</td> </tr> </tbody> </table> <p>ここで, M = u(d+h), N = v(d+h) とする.</p>	記号	意味	t	時間	R	地球半径	φ	経度	θ	余緯度	u	水平流速 (緯度)	v	水平流速 (経度)	M	線流量 (緯度)	N	線流量 (経度)	d	静水深	h	水位	g	重力定数	n	マンニングの粗度係数
記号	意味																										
t	時間																										
R	地球半径																										
φ	経度																										
θ	余緯度																										
u	水平流速 (緯度)																										
v	水平流速 (経度)																										
M	線流量 (緯度)																										
N	線流量 (経度)																										
d	静水深																										
h	水位																										
g	重力定数																										
n	マンニングの粗度係数																										

図2 津波シミュレーションで使用する基礎方程式
Figure 2 Basic equations for tsunami simulation.

構造格子として, スタッガード格子を採用し, 水位および静水深を格子中央, 線流量を1/2格子分ずらし格子境界上にとっている (図3参照). 基礎方程式はリープフロッグ法のスキームを用いて差分化するが, 数値不安定を避けるため移流項のみ1次の風上差分で解いている. 1次風上差分では, 数値粘性の影響により流量の減衰が顕著であるため, より高次の差分スキームを検討する必要も考えられ

る。しかし、津波の波長は格子分解能に比べて非常に長く、
 ならぬに変化するため、数値粘性の強い1次風上でも、
 検潮記録の再現程度であれば問題にならない。浅水変形、
 海岸での反射や地形による屈折、沿岸近傍で短波長成分が
 卓越してきた場合において、沿岸付近での波形は少し変形
 するが、計算目的である陸地に流れ込んでくる水の総量は
 変化しないため、浸水域や浸水深の評価には影響がないと
 考えた。しかしながら、高次の差分スキームでの評価は今
 後の課題である。

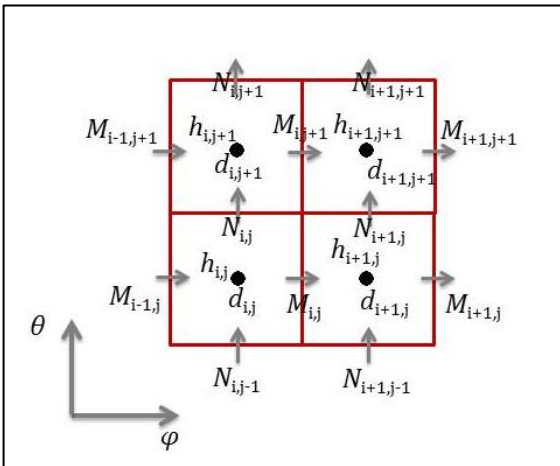


図3 スタaggerド格子
 Figure 3 Staggered grid.

さらに JAGURS は多階層のネスティングにより、計算領域
 内の特定の領域について格子解像度を上げた計算が可能と
 なっている (図4 参照)。ネスティング境界において水位
 および流量が非連続とならないように、ネスティング階層
 内では双方向の通信を行っており、親ドメインから子ドメ
 インに対しては親ドメインのデータを内挿し、子ドメイン
 から親ドメインに対しては、子ドメインのデータをそのま
 まコピーする。MPI 並列化については、ネスティング階層
 それぞれに対して、全プロセスでの東西、南北方向2次元
 領域分割を行う (図5 参照)。ネスティング階層内の分割
 領域間の通信は1対1の袖通信、またネスティング階層間
 の通信は全プロセスによる集団通信を利用する。JAGURS
 における並列津波計算のフローチャートを図6に示す。

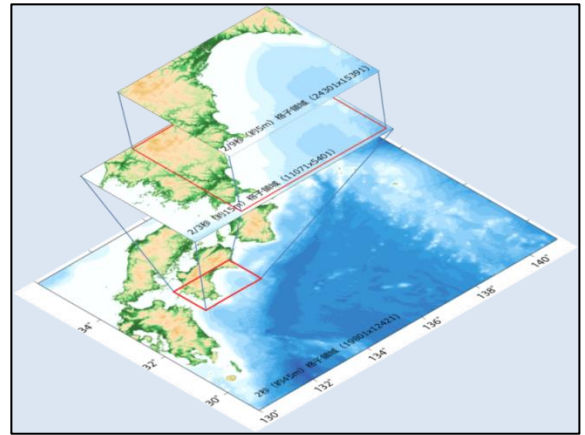


図4 多階層のネスティング手法
 Figure 4 Variable nested-grid scheme.

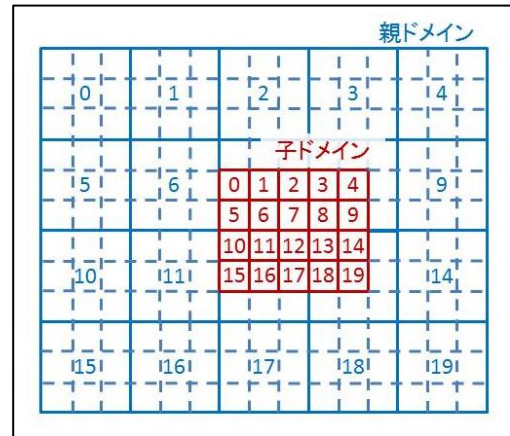


図5 MPI 領域分割とネスティング階層
 Figure 5 Domain decomposition and nested-grid.

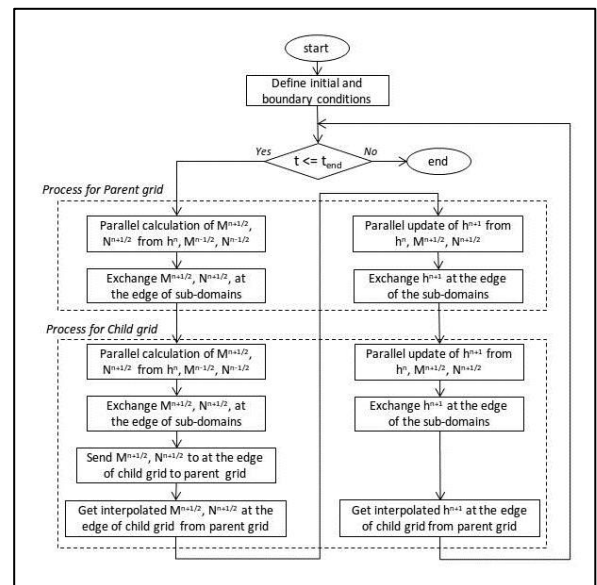


図6 並列津波計算のフローチャート(2重ネストの例)
 Figure 6 Flowchart of parallel tsunami calculation.
 (this example uses two nesting grids.)

3.2 データ

南海トラフで発生する地震群より、Mw7.6~Mw8.5 の 1,506 の断層シナリオを選択し(図 7 参照)、高分解能・量的津波シミュレーションを実施した。津波の計算時間は 6 時間、時間ステップは 0.05 秒とした。津波シミュレーションでは、近い将来、津波襲来の危険性のある和歌山県沿岸部全域を計算対象とした。計算の効率を上げるため、和歌山県沿岸域を 24 の地域に分割した 7 重ネストの 10m 分解能の地形データを使用した(図 8, 表 2 参照)。24 の地域の内、新 ES では、20 地域計約 3 万ケースの計算を実施した。

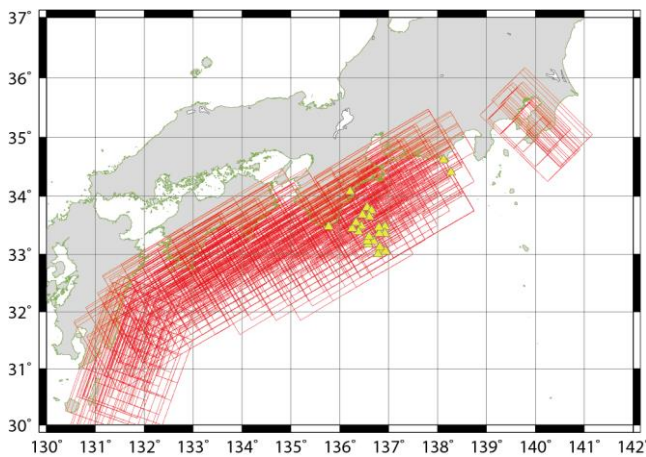


図 7 南海トラフの断層モデル
Figure 7 Fault model under the Nankai Trough.

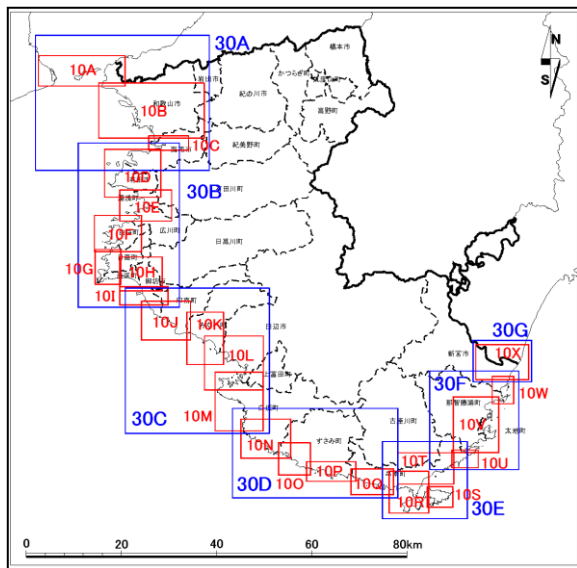


図 8 計算対象の和歌山県沿岸域
Figure 8 Target region of this study.

表 2 地形データの例 (図 8 中の 10R)

Table 2 Example of topography data (10R shown in Figure 8).

ドメイン	親ドメイン	東西方向 グリッド数	南北方向 グリッド数
2,430m グリッド	2,430m グリッド	1,036	1,066
810 m グリッド	2,430m グリッド	1,501	766
270 m グリッド	810 m グリッド	721	571
90 m グリッド	270 m グリッド	1,261	871
30 m グリッド	90 m グリッド	1,036	916
10 m グリッド	30 m グリッド	1,036	1,066
3.3 m グリッド	10 m グリッド	2,896	3,076

4. 津波計算の効率化と成果

4.1 チューニング

津波シミュレーションコード(JAGURS) は、スーパーコンピュータ「京」及び Intel CPU を搭載した PC クラスタでの動作実績はあったが、当初、ES での動作実績はなく、ES 向けにチューニングが施されていない。ここでは、性能向上の効果が見られた 2 つのチューニング(本稿では tune1, tune2 と記す)について報告する。地形データは表 2 を使用し、実計算で使用する南海トラフ地震を想定した断層モデルの津波計算を実施する。並列手法は FlatMPI とし、ノード内 4 プロセスで測定を実施した。地形データ等の領域分割は、大部分の処理で東西方向のループが最内ループとなっているため、東西方向の分割数を可能な限り小さくし、ループ長(ベクトル長)をより長くすることにより、ベクトル化の効率を高める必要がある。そこで東西方向に 2 分割、南北方向に 32 分割とし、64MPI で測定した。

(1) 非線形流量計算ルーチンのベクトル化促進(tune1)

図 10 の original に示す通り、計算の大部分は非線形流量計算ルーチンが占めている。この非線形流量計算ルーチンについて、主要演算ループがベクトル化されていなかったため、ループ分割を適用しベクトル化を実施した。当該ルーチンはループボディが大きく、条件分岐が複数あり、ベクトル化を阻害していた。表 3 の条件 1 を満たすケースが大部分を占めているため、条件 1 の条件分岐を削除し、全条件に対して、処理 1 のベクトル演算処理を行った後、その他条件に適合する場合のみ変数を更新するように変更を加えた。その結果、非線形流量計算ルーチンの実行時間が大幅に短縮されており、それに伴って本ルーチンにおけるインバランスを含む子ドメインから親ドメインへのネスト間通信、及び袖領域の隣接通信の実行時間も短縮された(図 10 参照)。全体として、平均ベクトル演算率が 75.9% から 97.9% に、平均 ADB ヒット要素率が 36.4% から 67.8% に向上し、計算時間が 6.1 倍高速化した(表 4 参照)。

表 3 非線形流量計算ルーチンの最適化

Table 3 Optimization of the non-linear flow computation routine.

最適化前	最適化後
<pre> do i = ist, ind do j = jst, jnd if (条件 1) then 処理 1 else if (条件 2) then 処理 2 else if (条件 3) then 処理 3 else 処理 4 end if end do end do </pre>	<pre> do i = ist, ind do j = jst, jnd do 処理 1 end do end do do i = ist, ind do j = jst, jnd if (条件 2) then 処理 2 end do end do : : </pre>

(2) ネスト間通信手法の変更 (tune2)

津波シミュレーションコード (JAGURS) におけるネスト間通信の手法としては, MPI_Allreduce を用いる手法と MPI_Alltoallv を用いる手法が選択できる (図 9 参照). MPI_Allreduce を用いる場合は, 全プロセスがネスト間通信の対象となるバッファを一様に保持する. このバッファの全域を 0 で初期化した後, 各プロセスが自身の送信する要素のみについて値を入れ, その後 MPI_Allreduce 通信を行うことで全プロセスが結果を共有する. この手法は, 並列数に拠らず通信バッファサイズが常に一定であり, 各プロセスがアクセスする必要がない要素についても共有のための通信が行われるため, 通信量に無駄が多いというデメリットがある. 一方, MPI_Alltoallv を用いる場合は, 各プロセスが, 自身が送受信すべき最低限の要素について送受信を行う. この手法では, 並列数の増加に伴って各プロセスの通信量が減少し, 必要最低限の通信が行われるというメリットがある.

また, ネスト間通信における子ドメインから親ドメインの内挿処理については, 「親ドメインの領域端のみを対象とする」か「親ドメインの全領域を対象とするか」を選択できる. 後者の場合, 前者と比較して MPI 通信量が増加する. 本研究では, 親ドメインの領域端のみを内挿対象とした.

スーパーコンピュータ「京」における高並列計算では, MPI_Alltoallv の 3次元論理トラス形状に特化した手法[6, 7]が効果的だったが, 新 ES で行う本研究では MPI_Alltoallv (tune1) よりも MPI_Allreduce (tune1+2) の方が計算時間で 1.8 倍高速であった (表 4 参照). これは並列規模が小さく, 通信量が少ないため, MPI_Allreduce の方が高速となったと考えられる.

最終的に tune1 と tune2 のチューニングの結果, 実行時間が 58,582.430 秒から 5,378.160 秒と, 10.9 倍の性能向上が得られた (表 4 参照).

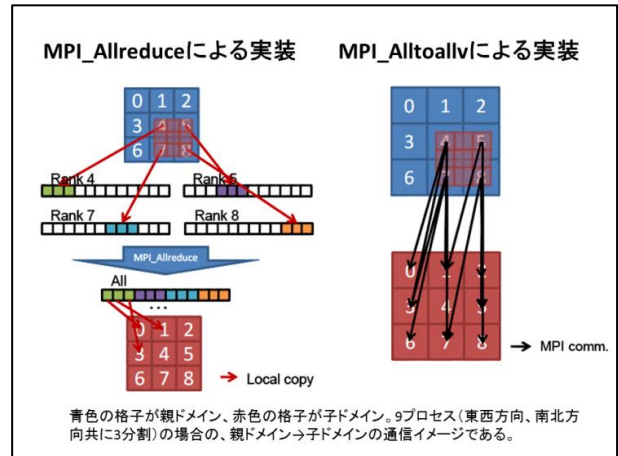


図 9 MPI_Allreduce と MPI_Alltoallv の比較
Figure 9 Comparison between MPI_Allreduce and MPI_Alltoallv.

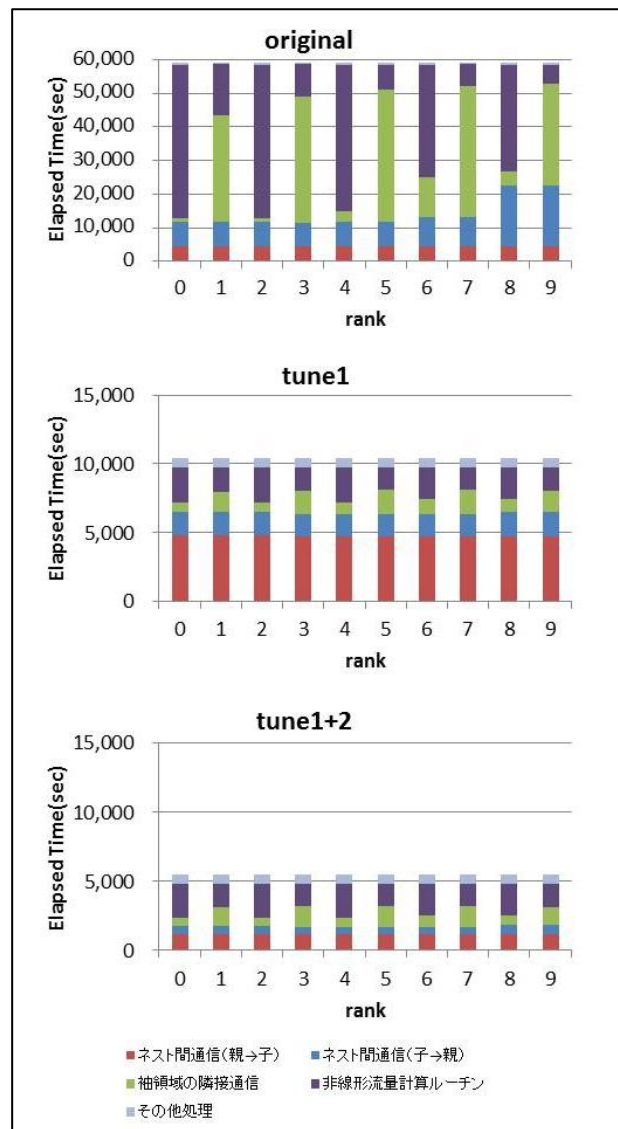


図 10 チューニング前後の実行時間(rank0-9)
Figure 10 Elapsed time before and after the optimization(rank0-9).

表 4 チューニング前後の性能測定結果

Table 4 Performance measurement results before and after the optimization.

	Real Time (sec)	GFLOPS	平均ベクトル長	平均ベクトル演算率(%)	平均ADBヒット要素率(%)
original	58,582.430	22.314	226.549	75.869	36.389
tune1	9,597.318	172.276	211.332	97.898	67.803
tune1+2	5,378.160	310.311	216.491	98.962	68.729

4.2 スケーラビリティ

4.1 でチューニングしたコードについて、スケーラビリティを調査し、実計算での最適な実行条件について検討した。測定データは表 2 を使用した。地形データ等の領域分割は、4.1 と同様に東西方向の分割数を可能な限り小さくした (図 11 の並列数に東西×南北の分割数を記載)。新 ES (SX-ACE), ES2 (SX-9)でのスケーラビリティを図 11 に示す。新 ES ではノード内 4 並列, ES2 ではノード内 8 並列で測定した。

新 ES の SX-ACE (64GFLOPS/コア) より ES2 の SX-9 (102.4GFLOPS/コア) の方がピーク性能は高く、新 ES (4 コア/ノード)より ES2 (8 コア/ノード)の方がノード間通信が減るにもかかわらず、同コア数で計算時間は同程度もしくは SX-ACE の方が高速といった結果が見られた。これは、コアとメモリ間のキャッシュとして利用できる ADB 容量が増強 (表 1 参照) され、さらにメモリレイテンシが短縮されたことにより、高い実行効率を実現できるようになったためと考えられる。

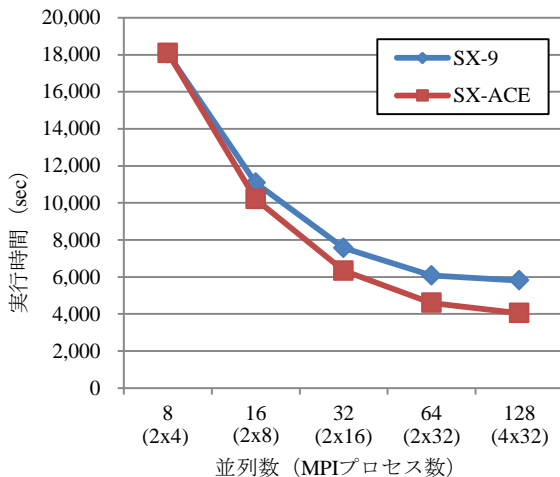


図 11 ストロングスケーリング測定結果

Figure 11 Strong scaling benchmark.

4.3 マルチジョブコントロール

津波シミュレーションコード (JAGURS)には入力データが異なる複数ケース (複数のシミュレーション) を単一の MPI ジョブとして実行する機能を有している。全ケースのシミュレーションが完了するまでケース間の通信、同期は

一切発生せず、完了したケースは他の全ケースが完了するまで待つため、ジョブ全体として実行時間が最も実行時間が長いケースのものとなる。本研究で使用するデータは、どのケースでも実行時間はほとんど変わらず、ケース数が増えることによるオーバーヘッドもほとんどなかった。

システムの利用状況 (ジョブスケジュール) にあわせて、1 ジョブ当たりのケース数を工夫することで計算効率性が向上する。例えば、既に実行中のジョブが多い状況では、1 ジョブ当たりのケース数を少なくした方がジョブスケジュールの空きを効率良く利用することが出来る。一方、実行中のジョブがない、もしくは少ない状況では、1 ジョブ当たりのケース数を増やすことで同時に複数ケースの結果を得ることができ、システムの最大同時ジョブ実行数が少ない場合に有効である (図 12 参照)。新 ES は、複数のクラスタ (高速ネットワークが接続されている単位) で構成されており、2,048 ノードといった大規模クラスタもある。大規模クラスタを占有すれば、1 ケース 16 ノード 64 並列実行の場合、一度に 128 ケースを実行することも可能である。

本研究では、スケーラビリティの検証結果とシステムの利用状況から、2 ケース 32 ノードジョブを採用した。また、新 ES のシステム制限値である同時実行数を緩和することで、大量ジョブを効率良く実行できるように調整した。

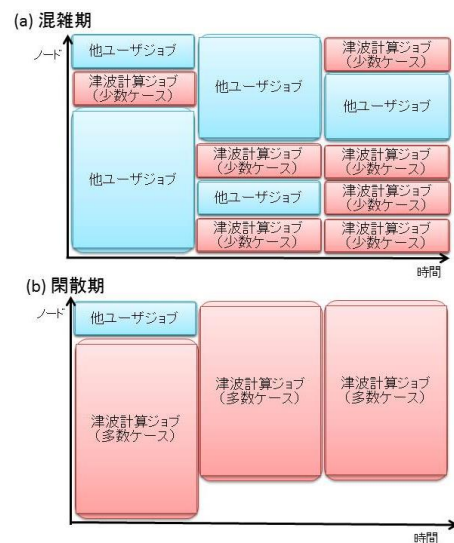


図 12 複数ケースジョブのジョブスケジューリング

Figure 12 Job scheduling for multicase job.

4.4 計算効率化による成果

4.1, 4.2, 4.3 により、新 ES で津波データベースの構築を効率良く実施することができた。津波データベースの構築は、新 ES の利用前には海洋研究開発機構の Intel CPU を搭載した分散メモリ型スーパーコンピュータ (表 5 参照) を利用していた。1 地域の 1,506 シナリオの計算に約 3 か月要していたが、新 ES では残り 20 地域の全ての計算を同期間で完了することができた。津波データベース構築の高

速化は、リアルタイム津波予測システムの構築の高速化に直結し、地域の津波防災の高速化に貢献すると期待される。

表 5 分散メモリ型スーパーコンピュータのスペック

Table 5 Specifications of the dispersed memory type super computer.

計算ノード	SGI 社製 ICE X
CPU	Intel Xeon E5-2670 2.6 GHz 8 cores/CPU, 2CPUs/node 143.7TFLOPS
メモリ	DDR3 SD-RAM 64 GB/node 27TB
ノード間 インターコネクト	4x FDR InfiniBand Enhanced Hypercube
計算ノード数	432 (6,192core)

5. 和歌山県における津波予報

津波計算の効率化を実施後、和歌山県沿岸部全域の 10m 分解能の地形データを作成し、南海トラフで発生する地震群から 1,506 の断層シナリオに対して高分解能な津波シミュレーションを実施した。その和歌山県沿岸部の津波シミュレーションの例を図 13 に示す。この津波シミュレーションの結果から、熊野灘沖東南海震源域における地震・津波観測監視システム DONET(Dense Oceanfloor Network system for Earthquakes and Tsunamis)[8]の海底水圧計の設置位置や検潮所の設置位置での計算波形、大きな被害が想定される 98 地点の最大津波水位、津波到達時間及び 20 地域の最大浸水深分布のデータ等を作成した。本データは津波データベースとして 2015 年より和歌山県が独自に運用している津波浸水予測システムに組み込まれている(図 14 参照)。気象業務法の定めにより、気象庁の許可なく津波予報を発することはできない。そのため、和歌山県では 2015 年 3 月に、まず紀伊半島の南端の串本地域に対する津波予報業務の許可を取得し、さらに 2015 年 12 月には気象庁の施設がある田辺市、紀伊半島の東に位置する那智勝浦や太地などの 5 地域の業務許可を取得し、合計 6 地域の津波予報を行っている。この津波浸水予測システムでは、地震発生時に地震・津波観測監視システム DONET の観測情報を基にデータベースから最も津波被害が出る可能性のある 5 地点を抽出し、最大津波水位が最も高くなる断層シナリオを検索する。それに基づいて浸水予測を行い、甚大な津波が予測された場合は、エリアメールなどで県民に避難を呼びかけるほか、予想される津波の高さや到達時刻などを市町村に提供している。これにより、津波予報を受けた自治体は浸水予測をもとに適切な災害対策を進めることができるようになっている。

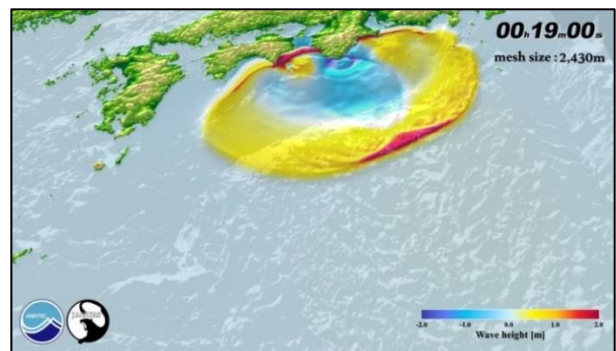


図 13 津波シミュレーションの例

Figure 13 Example of Tsunami simulation.

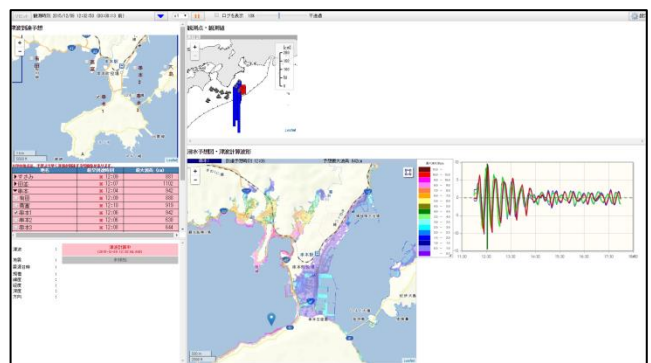


図 14 津波浸水予測システム

Figure 14 Tsunami Inundation Prediction System.

6. おわりに

新 ES を使い、津波シミュレーションコード (JAGURS) のチューニング、実行条件、マルチジョブコントロールを検討することにより、効率良く高性能・量的津波シミュレーションを実施することができた。3 万ケースを超える津波シミュレーションを 3 か月で完了したというのは驚異的な速さである。また、チューニング後にスケーラビリティを評価したところ、新 ES (SX-ACE) は ES2 (SX-9) よりも CPU コアのピーク性能は低いにもかかわらず、新 ES (SX-ACE) の方が同コア数でも高速であり実行効率が高いこともわかった。

ここで得られた計算結果から構築された津波浸水データベースは、和歌山県独自で運用している津波浸水予測システムに組み込まれ、津波予報業務に活用されている。現在は、稼働中の DONET1 の範囲である紀伊半島の南東地域のみが予報対象となっている。今後、さらに DONET2 が本格稼働すれば、紀伊半島の西側沿岸部に位置する市町村でも、津波予報が可能になると思われる。高精度津波浸水データベースを活用した津波の高さだけでなく津波浸水の即時予測は、南海トラフ地震における津波被害の軽減に資すると期待される。

本研究から、新 ES は実行性能が高く、効率的にパラメ

トリックスタディを行える特長があることがわかった。今後、新ESと津波シミュレーションコード(JAGURS)を活かして、さらに津波被災地域のデータベース構築を進めることも検討していきたい。

謝辞 本研究では地球シミュレータを運用している海洋研究開発機構の地球情報基盤センター情報システム部関係各位にも多大なご協力を頂いた。さらに同センター先端情報研究開発部の松岡大祐氏には津波計算結果の可視化で多大なご協力を頂いた。謹んで感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 気象庁, 津波を予測するしくみ
<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/tsunami/ryoteki.html>
- 2) 海洋研究開発機構, 地球シミュレータ
<http://www.jamstec.go.jp/es/jp/>
- 3) 海洋研究開発機構, 地球シミュレータ特別推進課題
http://www.jamstec.go.jp/es/jp/project/list_jamstec_prj_toku2015.html
- 4) Baba, T. et al.: "Tsunami Inundation Modeling of the 2011 Tohoku Earthquake using Three-Dimensional Building Data for Sendai, Miyagi Prefecture, Japan", Tsunami Events and Lessons Learned, Advances in Natural and Technological Hazards Research, 35, pp.89-98, DOI 10.1007/978-94-007-7269-4_3 (2014).
- 5) Satake, K.: "Linear and Nonlinear Computations of the 1992 Nicaragua Earthquake Tsunami", Pure Appl. Geophys, Vol.144, pp.455-470 (1995).
- 6) 安藤和人, 馬場俊孝, 松岡大祐, 加藤季広: "「京」コンピュータによる大規模津波シミュレーション—津波伝搬遡上コードの超高並列向け最適化", 情報処理, Vol.55, No.8, pp.817-822 (2014).
- 7) Baba, T. et al.: "Large-scale, high-speed tsunami prediction for the great Nankai trough earthquake on the K computer", Inter. Jour. of High Per. Comp. App., doi:10.1177/1094342015584090 (2015).
- 8) 地震・津波観測監視システム
<http://www.jamstec.go.jp/donet/j/donet/>