

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

阿部郁男¹・今村文彦²

¹東北大学大学院工学研究科附属災害制御研究センター 共同研究員
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

E-mail:i-abe@tsunami2.civi.tohoku.ac.jp

²東北大学大学院工学研究科教授 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

E-mail:imamura@tsunami2.civi.tohoku.ac.jp

数値計算により予測された津波情報は、計算機のパフォーマンス向上により避難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。気象庁の量的津波予報はその実例であるが、今回、より詳細な津波情報を提供する可能性を検討することを目的とする。まず、複数CPUによる並列計算環境(ITBL)やPCを利用した津波数値計算のパフォーマンス評価を行い、特有のアルゴリズムの中で計算機のパフォーマンス向上による可能性を検討した。さらに、格子間隔と支配方程式という計算結果の精度を左右する項目に関して、具体的に計算時間と計算結果について比較検討を行った。その結果、格子間隔50mの30分の予測計算を、線形計算で2分33秒、非線形計算(遡上あり)で6分07秒で終了することが出来た。

Key Words : Real-time Tsunami Simulation, Detail information, Parallel computation

1. はじめに

これまで津波数値計算技術は、主に事前準備(被害想定、構造物による抑止力の検証など)および事後の検証に用いられているが、近年の計算機のパフォーマンス向上により計算時間も短縮され、リアルタイムで情報を提供することにより、避難に役立てる事中情報としての期待も高まりつつある。津波数値計算技術の津波予報への応用は、首藤ら(1988)により報告済みである。この報告によれば、津波の数値予報には、計算精度と速度の関係から線形長波理論を用いることが適切とされていた。

このような背景の下、津波数値計算技術を事中情報として活用した実例が1999年4月より気象庁が行っている量的津波予報である。量的津波予報は、日本近海に4000箇所の震源(津波の波源)を仮定した10万件のデータベースを予め構築し、データベースを検索することでほぼ都道府県単位に具体的な(数値での)津波情報を発信するものである。しかし、日本全国を対象とした広域性、断層をある程度限定しているため、そのサイズや位置などの精度に問題があり初期値に誤差が含まれている点、情報の早期発信という迅速性を優先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が依然として残ったままである。

また、仮に「予想される津波の高さ2m」との情報が出されても、現在の海面から2m上昇するのか、基準海面から2m上昇するのか、標高2mのところまで津波が押し寄せるのか等、明らかなイメージを持つことがし難い情報となっている。

実際に、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の際も、警報が発令されたにも関わらず避難行動を取らなかったり、海岸に見物人さえ出たことが報じられている。同様に2003年5月三陸南地震の際も、津波有無情報を待たずに海岸へ確認に行く人、避難準備をして津波警報を待っていた人が相当数居ることが、当センターを中心としたヒアリング調査により明らかになりつつある。

津波による人的被害を軽減するためには、早期避難が重要であるが、現状は上記の通りである。我々は、この課題を解決するために、より身近な情報、具体的な危機イメージを持つ事ができる情報の提供を提唱してきた(今村, 2003)。これまでのようなほぼ都道府県ごとの数値情報から、市町村・港湾・地区ごとのより身近な情報へ、更には点の情報から線の情報、そして具体的な浸水危険地域を示すこと

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
対象領域の範囲	N37.5-40, E140.75-145		
領域のサイズ	798 x 633 (比率 1.0)	436 x 574 (比率 0.5)	1012 x 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 1.0×10^{-5} m)		遡上条件 (小谷ら, 1998)

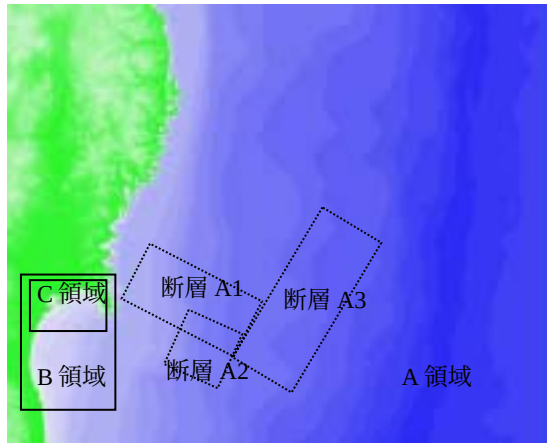


図-1 計算対象領域と断層モデル

のできる面の情報を提供することが必要である。

そのためには、線形長波理論による予測だけではなく、浸水予測などの被害想定に利用されている非線形浅水理論による遡上計算を含めたリアルタイム予測の可能性を明確化する必要がある。

本稿では、ITBLなどの新しい計算環境を考慮しながら、非線形浅水理論に基づく遡上計算を含めたリアルタイム津波予測の可能性と、それを実現するための改善を検討する。

2. リアルタイム津波予測のための評価条件

(1) 対象領域

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、計算機的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手法が提唱されている。

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 ²)	全体	3,200	2,400	6,500
	アスペリティ	40x40	20x20	39x35
	背景領域	1,600	2,000	5,135
走向 (degree)		200	200	205
傾斜角 (degree)		20	20	5~8
滑り角 (degree)		90	90	90
平均すべり量 (cm)	全体	200	200	200
	アスペリティ	400	400	400
	背景領域	146	159	146

表-3 計算機の緒言

名称	緒言	
ITBL Server (PrimePower)	CPU	SPARC V 準拠 675MHz
	利用可能 CPU 数	64
	OS	Solaris 8
	コンパイラ	Fujitsu Fortran 5.4
PC	CPU	Pentium4 2.4GHz (256MB)
	利用可能 CPU 数	1
	OS	Vine Linux 2.6CR1
	コンパイラ	GNU F77 Fortran 2.95.3

今回の検討では、図-1に示したような三陸沖を中心とする領域に対して、格子間隔450m, 150m, 50mと1/3ずつ細分化した3つの領域（表-1）を設定して、想定される宮城県沖地震の震源データ（表-2）を利用した数値計算を行うことで非線形浅水理論による遡上計算を含めたリアルタイム予測の可能性を評価した。なお、表-1中の領域サイズに関する比率は、A領域を基準としたB領域およびC領域の格子点数の比率である。

(2)計算環境

計算機の性能向上とリアルタイム予測の可能性を検証するために2台の計算機を利用した。利用した計算機の緒言を表-3に示す。ITBLは、Information Technology Based Laboratoryの略であり、平成12年度e-Japan計画の下、日本原子力研究所を含めた旧科学技術庁の6機関で推進される全国規模の統合研究環境である。平成17年度までに、全国にある大学、研究機関のスーパーコンピュータ資源を仮想的に統合したグリッドコンピューティング環境が実現される予定である。ITBL Serverは、このITBLの中核をなすUNIXサーバである。1ノード128CPUの4筐体を高速クロスバネットで接続した理論ピーク性能1TFlops、1TBのメモリを持つ共有メモリ型並列計算機である。共有メモリを利用したコンパイラによる自動並列化機能のほか、MPI（Message Passing Interface）ライブラリによる分散メモリ並列化にも対応した計算機である。

3．津波数値計算プログラムの構造

前述のように津波数値計算は、計算精度と計算効率の両方の点から格子間隔の異なる複数領域の接続計算によって行われる。今回の評価に利用したプログラムも同様の構成となっている（表-4）。

再現時間÷時間間隔で与えられる計算ステップの数だけ、③以降の処理が繰り返行われるようになっている。また、水位・全水深および流量の算定は、各領域ごとに独立に計算され⑤および⑦の接続処理にてデータの接続計算が行われる方式となっている。

4．性能評価とプログラム改良に関する考察

計算資源の有効利用という観点からはCPU時間（表-4の③～⑨に相当）を評価するべきであるが、避難に役立てる事中情報としての活用のためには最終的に計算結果が得られるまでの経過時間（表-4の①～⑨）で評価することが重要である。

今回の性能評価ではITBL Serverを利用した。三陸沖で地震が発生してから沿岸に津波が到達すると言われている30分間の再現時間を目安とし、時間間隔0.1秒でコンパイラによる自動並列化を利用して性能測定を行った（図-2）。また、経過時間に占める処理ごとの処理時間の割合を図-3に示す。

図-2は③から⑨の処理に要する時間を示している。並列化効果率とは、CPU数増加に対する処理時間向上の比率である。改善率1以上は、並列化による効果が表れていることを示している。なお、「①地形データの読み込み」や「②初期波形の決定」についてはCPU数とは無関係に概ね25秒程度であった。

CPU数ごとに性能測定を行った結果、64CPUならば非線形遡上計算を含めても6分07秒で計算を完了

表-4 津波数値計算プログラムの処理過程

①	地形データの読み込み	繰り返される
②	断層パラメータによる初期波形決定	
③	水位・全水深の算定 (A,B,C 領域それぞれ)	
④	領域外接続処理	
⑤	水位接続処理(A→B,B→C)	
⑥	線流量の算定(A,B,C 領域それぞれ)	
⑦	流量接続処理 (外挿, 内挿それぞれ A→B,B→C)	
⑧	データ整理(最大波高, 到達時間 など必要な情報保持)	
⑨	データ入れ替え (次の時間ステップの準備)	

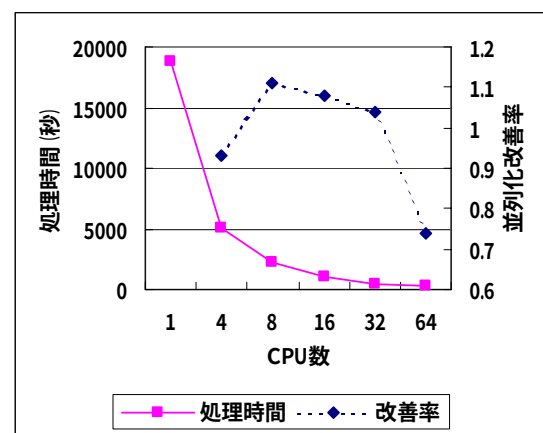
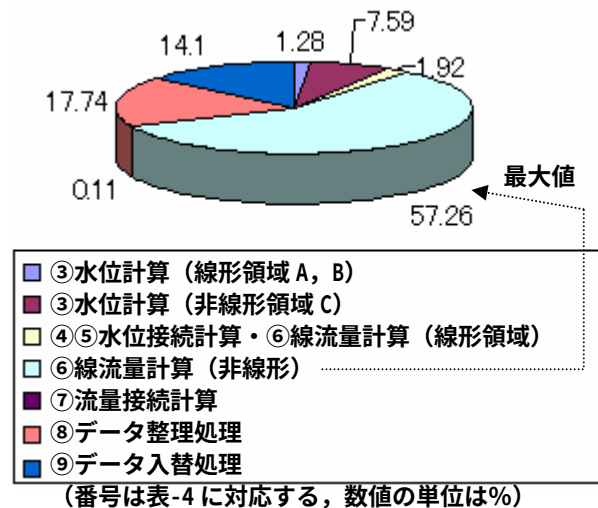


図-2 処理時間と並列化改善効果



(番号は表-4 に対応する, 数値の単位は%)

図-3 処理時間の割合

できることが分かった。また、格子間隔50mのC領域を線形計算に変更した場合は2分33秒で計算を完了させることができる。並列化効率に着目した場合、32CPUから64CPUにかけて並列化効率が落ちており、コンパイラ自動並列化によるこれ以上の性能改善効果はあまり期待できないと考えられる。

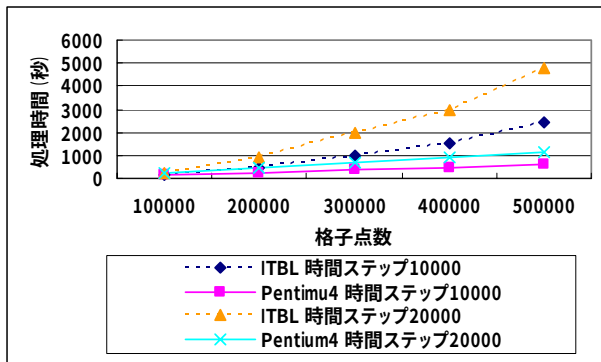


図-4 計算機による処理時間の差

次に、CPU性能比を評価するため、全く同一のプログラムと仮想的なデータを用いてITBL Server 1CPUとPCで性能評価を行った(図-4)。性能比較は線形計算のみで行ったが、格子点数が増えるほど性能比は大きくなっている。格子点数500000でPentium4-2.4GHzがITBL Serverの1/4以下となっている。これは、CPU単体性能が更に良い並列計算機を利用できれば非線形遡上計算も含めたリアルタイム予測が可能であることを示していると考ええる。

今回の評価は、非線形遡上計算をC領域1箇所でのみ行ったが、リアルタイム浸水予測に利用する場合には、更に広い範囲に対して同様の計算を行う必要がある。特に、全体の処理時間の57%を占める非線形線流量計算の対象領域が増えることはリアルタイム予測に大きな障害となる。そこで、次のステップとして非線形線流量計算を複数並列で処理するプログラムを提案する。現在の津波数値計算プログラムは、表-4で示すように水位、線流量を個別に計算して、後で領域間接続計算を行うような手法を用いている。これらの水位および線流量計算処理共に、領域を分割した場合でも情報の依存関係はない。この点からも、MPIライブラリを利用して非線形線流量計算を明示的に並列処理できるプログラムの開発がリアルタイム予測に不可欠と考えている。この改良成果については今後、検証する。

5. 情報の精度

広い格子間隔、再現時間の短縮または時間ステップ間隔を長くすることで計算時間は短縮される。しかし、それらの過程で計算される情報の精度に十分留意する必要がある。計算所要時間と情報の精度は常にトレードオフの関係にあるため、リアルタイム予測を実現するためには、適切な格子間隔、再現時間および時間ステップ間隔を明確にする必要がある。

ここでは、格子間隔が津波情報の精度に与える影響を明確にするために、格子間隔および計算条件を変えたプログラムを実行し、次の点を評価した。

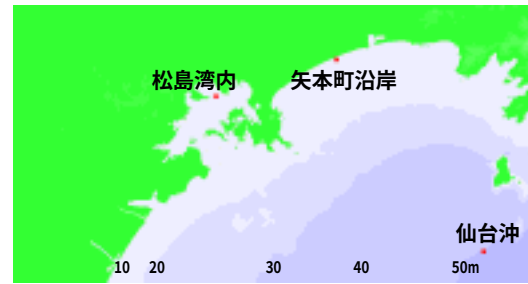


図-5 計算結果出力地点

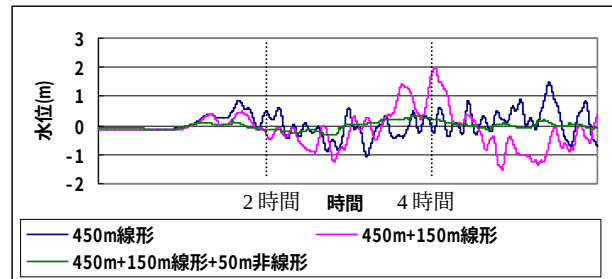


図-6 松島湾内での水位変化

評価ポイント1：第一波の波高および到達時刻

評価ポイント2：最大波高および出現時刻

評価ポイント3：減衰

計算条件1：格子間隔450mデータを利用した線形計算

計算条件2：格子間隔450mと150mの接続を行った線形計算

計算条件3：格子間隔50m非線形遡上計算も含めた計算

津波からの避難に役立てる情報としては第一波の情報が重要でありこれまでもリアルタイム予警報への活用について報告されてきた。しかし、第一波が必ずしも最大波高(最大浸水)を記録するとは限らない。また、海岸は様々な社会的活動に使われているために、津波の減衰をいち早く捕らえ、社会生産活動の低下を抑える必要がある。そのため、今回は最大波高と減衰についても着目した。

今回、計算精度の評価に利用した計算結果出力地点は図-5に示した。この中で松島湾内は水深1m程度の極めて浅い海であり非線形遡上計算を行ったケースでは波高が著しく小さく出ているが、それ以外は類似した特徴を持っていることが分かる(図-6)。

松島湾内では、他にも5地点での水位変化を比較したが、今回の比較を行った全ての地点で、類似する水位変化結果が得られた。松島湾は水深が非常に浅いので、陸上だけではなく湾内での摩擦が大きく影響して、特に第2波以降の成分からその特徴が顕著に現れている。また、島が入り組んだ複雑な地形となっているために、線形計算だけの場合でも格子間隔の違いにより計算結果が大きく異なっている。

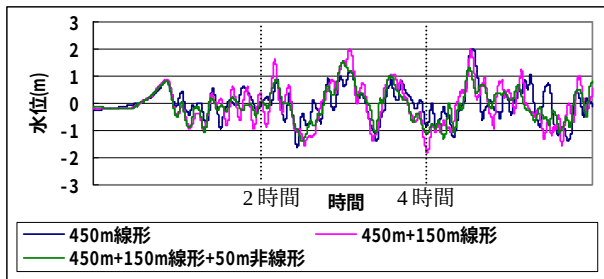


図-7 矢本町沿岸での水位変化

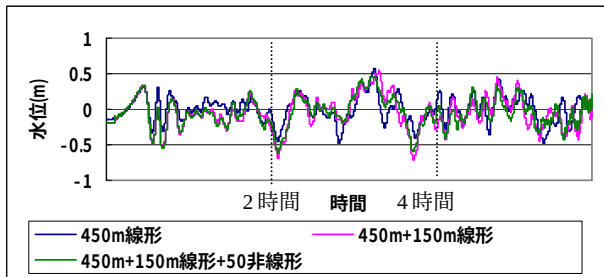


図-8 仙台湾での水位変化

図-7は矢本町沿岸、図-8は仙台湾の沖合いであるが、この両地点では、第一波の最大波高や出現時刻も極めて類似している。最大波出現時刻の差はあるが、非線形遡上計算に比べて計算負荷の少ない線形計算の方が波高が高く出る傾向にある。点や線の情報で十分であれば、首藤ら（1988）の報告のように、より危機感ある（波高が高く出る）、且つ短時間で計算できる線形計算を行うことが望ましいと思われる。一方、減衰に着目すると6時間程度の数値計算では減衰の傾向を捕らえられていない。減衰の判断には数値計算以上に津波監視システムなどによる潮位変動の監視が重要になると思われる。

また、リアルタイム性には直接関係しないが、何れの地点でも最大波高出現時刻が3時間前後に現れている点、継続時間が長い点が類似している。今後、検討を行う必要はあるが、基本的には地形の影響が大きいと考えている。また、矢本町沿岸では2時間以内の最大波高と4時間以内の最大波高が0.5m程度も異なる。更に、再現時間によって遡上範囲も大きく異なる（図-9）。このことから、被害想定の際に十分な再現時間を取る必要があることが分かった。

6. リアルタイム津波予測実現への課題

点や線の情報であれば計算負荷の少ない線形計算で十分であるが、地形によっては正確な値が求まらないケースがある。図-10は同じプログラム（格子間隔450m線形計算）で気仙沼湾の水位変動を計算したものであるが、気仙沼湾奥の津波情報としては役に立たないことが分かる。これは、湾奥の地点が外洋と陸地で隔てられた構造となっており流量計算が行われなためであるが、この部分も格子間隔を

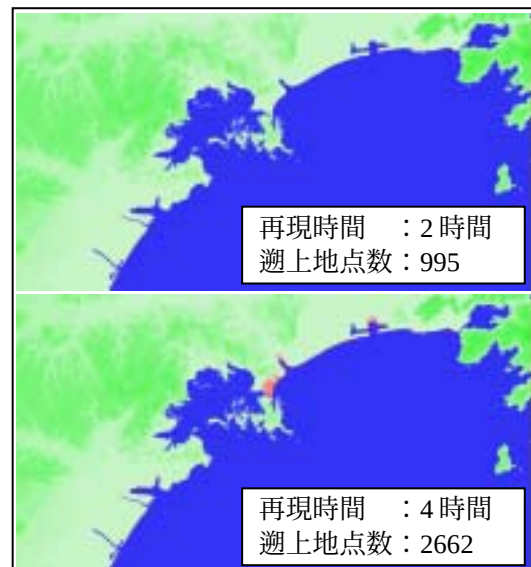


図-9 再現時間による遡上範囲の比較

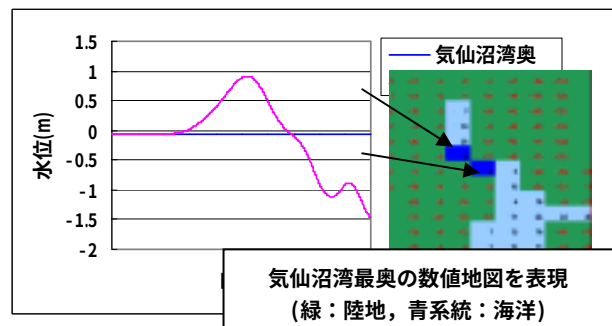


図-10 気仙沼湾の水位変化と地形（450m 格子間隔）

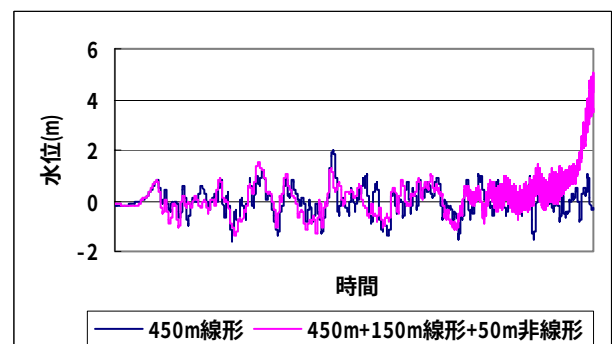


図-11 矢本町沿岸での10時間再現による水位変化

細かくして行けば正しく計算されるようになる。このように格子間隔と地形の再現性についても、今後の検討で十分に留意する必要がある。

また、5.で減衰について触れたが、再現時間を10時間に延長したところ、一旦収束し始めた値が8時間を過ぎた頃から大きく変動しだしている（図-11）。今後、この原因も明らかにする必要がある。

7. 結論

従来のような点の津波情報ではなく、面の津波情報の提供の可能性を、計算所要時間、計算機の性能および情報の精度から検討した。その結果、従来の認識通りに津波の最大波高に主眼を置く、点の予報には線形計算でも十分であることを確認できた。但し、それと共に問題点も明らかとなった。

また、面の情報をリアルタイムで提供することについては、検討すべきことが残されているが、昨今の計算機の進歩により実現の可能性があることを明らかにできた。

更には、リアルタイム性を要求されない被害想定についても、十分な再現時間が必要であることを明らかにできた。

謝辞：

今回の検討にあたり日本原子力研究所殿から計算設備を借用させて頂いた。特に、計算科学技術推進

センターの中島憲宏志、樋口健二氏、大谷孝之氏には計算設備の利用手続き等でご尽力頂いた。ここに記して厚く謝意を表する。

参考文献

- 1) 首藤伸夫：津波はどこまで解明されているか，ながれ 21，pp.474-480，2002
- 2) 今村文彦：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.32-33，2003
- 3) 首藤伸夫，後藤智明，今村文彦：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.181-189，1988
- 4) 小谷美佐，今村文彦，首藤伸夫：GISを利用した津波遡上計算と被害推定法，海岸工学論文集，第45巻，pp.356-360，1998

(2003. 6. 30 受付)

Improvement of the Numerical Simulation for Real-time Tsunami Information by using the New Parallel Computer System (ITBL) and Personal computer

Ikuo ABE, Fumihiko IMAMURA,

Development of the computer ability is going to enable a forecast of a tsunami by numerical simulation in real time, which is essential for the evacuation system. Actually, JMA (Japan Meteorological Agency) started the quantitative tsunami information system in 1999. But, we have problem in the accuracy and the detail on the results. Therefore, the present study intends to improve the system by using the last technology of the computation such as parallel (ITBL) and PC. Then, we obtain the result that the computation for the forecast of 30 minutes with the fine grid system and ITBL can be completed with the CPU time of 2 min. 33 sec. for the linear and 6 min. 7 sec. for the non-linear including the runup.