

原著論文

パーソナルコンピュータによる津波の数値シミュレーション

—Linuxを用いた広域格子—

岡本 義雄*

1. はじめに

北海道南西沖地震の津波について前稿(岡本, 1999)では被害が集中した奥尻島の周辺海域をモデルに, PC(パーソナルコンピュータ)を用いた津波の数値シミュレーションを行い, その計算結果は地学教材として一定の効果を上げることを論じた。しかし, プログラム言語としてN88BASICを用いたため, 計算に使用する格子の大きさには限界が生じ, 広い海域での伝播計算は難しかった。また, 最近教室に多く導入されているDOS/V機(IBMのPC及び互換機)ではBASIC言語の使用は一般的でない。本稿ではより精密な津波伝播再現のために, 計算格子を拡大すること。DOS/V機でも計算が実行できることの2点を踏まえて, PC用のOS(オペレーションシステム)として最近急速に人気が出てきたPC-UNIX(PC上で使用できるUNIX互換のOS)の1つであるフリーウェアのLinuxを選択した。これと共に, 水深データは比較的入手が簡単なものを2つ選び, そのデータ処理に用いる地形データ処理ツールもフリーウェアのGMT(後述)を使用した。本稿では広域化させると共に改良を加えた津波伝播計算の詳細を報告すると共に前稿では省略した水深データ作成の過程も詳述する。

2. 水深データ

2.1 水深データの概要

水深データは津波計算の差分方程式の重要な境界条件であり, 水深に大きく依存する津波伝播の概要はこれでは決定される。本稿では以下の2種類の比較的入手しやすい水深データを選んで使用する。なお, この2つの水深データは範囲や格子間距離が異なるほか, データ格納形式と, 緯度経度に対する格子のとり方も異なるのでその取り扱い上の留意点についても解説する。

<奥尻島周辺水深データ(1 km メッシュ)>

まず, 前稿で津波計算に用いた水深データについて記す。(元データはインターネット上の<http://www.aist.go.jp/GSJ/dMG/free/japan/Intro.html>)に置かれた駒澤・岸本(1995)によりコンパイルされたJPN.1960.2680.grdという名のファイルをインターネットのftpでダウンロードしてきて用いる。これは約1 kmのメッシュ(格子)で日本列島周辺の海域をほぼ網羅している。全体で20 Mバイトを超える水深数値データファイルであり, 研究目的の使用に限定して公開されている。ただ, 残念ながらnetCDF(<http://www.unidata.ucar.edu/packages/netcdf>)という特殊なバイナリ形式でデータが格納されているので, 汎用エディタなどでのデータの切りはりや内容の確認を行うことは難しい。このデータ処理にはフリーウェアソフトGMTを用いる(後述)。次にもう1つの水深データを紹介する。

<ETOPO5 水深データ(10 km メッシュ)>

上記1 kmメッシュの水深データは大変有用なものであり前稿(岡本, 1999)の計算はこのデータの奥尻島周辺海域を切り出して用いた。しかし残念ながらこのデータの範囲は日本列島の周囲に限定され, 例えば日本海全域までは網羅していない。このような広いエリアを解析する目的に用いる水深データとしては, メッシュ間隔がかなり粗くなるが, ETOPO5という名の汎地球標高・水深データが用意されている(NOAA, 1988, <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo5.html>)。この数値データはNOAA(米国大気宇宙局)のNational Geophysical Data Center(<http://www.ngdc.noaa.gov>/"Global Relief CD-ROM")という名で販売しているCD-ROMの中に他の多数の地球物理関係諸データと共に入っている(価格はCD-ROM本体が約\$100でオンラインでの注文も可能)。約10 km(経緯度にしてちょうど5分)のメッシュで陸域, 海域を問わず世界中を網羅した標高

及び水深データである（水深は－で記載）。

このデータは基本的に2バイトの汎用バイナリ形式で標高値（水深値）が格納されており、テキストファイルに変換すれば汎用エディタや表計算ソフトで加工可能となる。このためのユーティリティソフトはCD-ROMにも入っているが、筆者はN88BASICによる自作ソフトで切り出しとテキストデータへの変換を行った。

2.2 GMTによる水深データの切り出し

ここでは、上記2種類の水深データのうち、有用であるが取り扱いに、やや専門的知識を要する前者(JPN.1960.2680.grd)のデータ処理について詳しく述べる。後者(ETOPO5水深データ)のデータ処理は一般的なシーケンシャルファイル処理の知識で行えるので省略する。なお次項での津波計算において、1993年北海道南西沖地震津波の日本海への伝播計算にはETOPO5水深データを用い、仮想東海地震津波の伝播計算にはここで説明するJPN.1960.2680.grdを加工したものをを用いている。

<GMT>

JPN.1960.2680.grdのようにnetCDF仕様のバイナリ形式で格納された地図データを加工したり、表示したりするには、前述したようにハワイ大学で開発されたフリーウェアのソフトであるGMT(Generic Mapping Tool, Wesselほか1991,1995)が用いられる。数値地図を様々に加工及び表示するほか、同梱されている世界の海岸線データなどのライブラリを組み合わせた美しい立体地形図や等値線(コンター)図などが作成できる。地学教材の開発に用いれば大変便利なツールであるが、残念ながら、ワークステーション(以下WSと略記)で用いられるOSであるUNIX上での使用が前提になっているため、学校現場でポピュラーなWindows95,MS-DOSやMacOSには対応が遅れている。従って、使用にあたってはまずUNIXの使用できる環境を整える必要がある。さらに利用にあたって前述のnetCDFライブラリもインストールされている必要がある。

<PCの環境設定>

UNIX(WS用のOS)では商用のものとしてSUN(SUN Microsystems社)のWSで使用されるSolarisが代表的な位置をしめるが、高価でありインストールなどにも、かなり専門的な知識を必要とする。また、WS本体も簡単に購入やリース可能な価格とはなっていない。ところが幸い、最近PC(主にDOS/V

機)上で使えるUNIX互換のLinuxというOSが急速に注目を集めるようになった。Linuxの詳細については多くの文献が出始めているのでここでは省略し、筆者が用いている環境を述べるに留める。筆者の環境は自作Pentium II 300MHz機(DOS/V互換機仕様)にTurbo Linux日本語版Ver.2.0(パシフィック・ハイテック社,1998)をベースOSとしてインストールしている(現在はこれをVine Linux Ver.1.0に変更しているが環境に大きな変化はない)。UNIXでは今日、X-WindowというWindows95やMacOSなどと同様なGUI(グラフィカルユーザーインターフェイス)環境を使うのが主流であり、このTurbo LinuxのX-Window環境下でプログラム開発と実行を行う。プログラム開発言語として、C言語のコンパイラ(gcc)を、またエディタとしてXemacsを、さらにプログラム実行の際のグラフィック表示には上記X-Window環境下でXlibを用いている。これらの環境はデフォルトでOSに付属しており、OSも含めて、基本的には無料で配布が原則となっている(製本マニュアルやCD-ROM製作経費等は有料)。

2.3 GMTのインストール

この環境下でGMTVer3.0本体およびnetCDFのライブラリをインストールする。上記、SOEST,University of Hawaiiのanonymous FTPサイト(<ftp://kiawe.soest.hawaii.edu/pub/gmt/>)から、LINUX用のソースファイルやマニュアルを入手し、PCのLinux環境下でtar展開した後makeコマンドでソースコンパイルとインストールを行う。このあたりの詳細は付属するマニュアル(英語)に詳しいが1カ所だけLinux用にMakefileを修正する記述があり、注意がいる。

2.4 GMTの使用法

使い方は最近一般的なGUIではなく、X-Window上に開いたXterm(端末エミュレータ)の窓で、目的に応じたコマンドとターゲットのファイル名、パラメータなどを打ち込む方法をとる(CUI,コマンドユーザーインターフェイスと呼ばれる。従来のMS-DOSコマンドの使用感覚に近い)。これはUNIXのアプリケーションでは従来から用いられてきた一般的な方法である。GMTとはこれら多数のコマンド群(下記,grdcut,grd2xyzなど)の総称である。例えば、上記水深ファイルからのデータの一部切り出しは

```
grdcut /home/gmt/data/JPN.1960.2680.grd
-R137/142/32/35 -Gtokai.grd
```

などとコマンドラインから打ち込むことで新たなデータファイルが作られる。ここで /home/gmt/data は水深ファイルを置いたディレクトリへのパス, JPN.1960.2680.grd は元データ的水深ファイル, -R の後の数字は切り出す範囲指定 (東経, 北緯), -G の後の tokai.grd は作られるデータファイル名である。

さらにこれを grd2xyz コマンドで

```
grd2xyz tokai.grd > tokai.xyz
```

といった風に整理した北緯東経格子のテキストデータファイル (tokai.xyz) に直す。UNIX (Linux) 上で C 言語を用いるときや N88BASIC のプログラム上で水深データとして用いるときはこれでシーケンシャルファイルとして読めるようになる。これらのコマンドの使用法はインターネット上の幾つかのサイトで紹介されている (例えば, 地質調査所の棚橋学氏のサイト, <http://www.aist.go.jp/GSJ/dMG/free/gmt/Intro.html> など)。GMT による地形表示例として, 東海沖を中心とする海底地形図を図 1 に示す (この図の作成には上記サイトの GMT スクリプトの記述を参考にし

た)。

3. 数値計算プログラム

岡本 (1999) は, 線形長波近似の津波の基本式を差分で解く方法 (阿部, 1971 及び Abe ほか, 1992) で津波の数値計算を行った。本稿でも計算式の概略は前稿と同じ式を用いているが, 広域の格子計算では格子の形の正方形からのずれが無視できなくなる。これを調整するには, 水深データを正確な正方格子に展開し直すか, 水深データの格子の形式に合わせて, 津波の差分式を改良するかのいずれかである。本稿では後者の方法をとることにする。すでに述べたように ETOPO5 は緯度・経度方向で同じ分割数の格子を用いているため, 格子が正方格子とならず, 経度方向に短くなる不等格子となる。また, JPN.1960.2680.grd も正方格子に近い分割を行っているとはいえ, それでも, 緯度 35 度付近で経緯度方向の長さの差が約 18% ある (後述)。そこで前稿の数値計算の差分式に少し手を入れた。

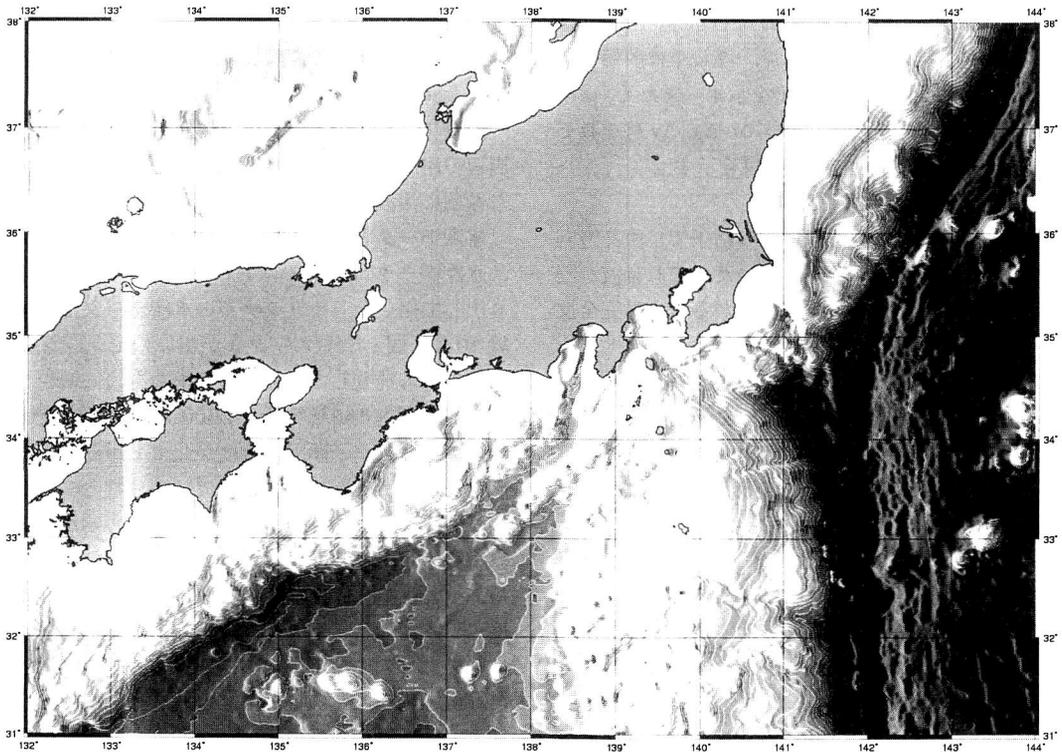


図 1 GMT による海底地形図 (原図はカラーで等深線が引かれ陰影処理がなされる。元データとして JPN.1960.2680.grd を使用, 実行の際のスクリプトは <http://www.gsj.go.jp/dMG/free/japan/script.html> を参考にした)。

3.1 不等格子の差分式

計算に用いる差分式 [岡本 (1999)] を格子間隔を x, y 方向で $\Delta x, \Delta y$ と異なる間隔として扱う次の式に変更した。ここで、格子の縦横比は計算する伝播域の緯度に適応するよう近似した値を用いる。

運動方程式:

$$\begin{aligned} u(i, j, k) &= u(i, j, k-1) - g \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ \eta(i, j, k) \\ &\quad - \eta(i-1, j, k) \} \\ v(i, j, k) &= v(i, j, k-1) - g \frac{\Delta t}{\Delta y} \{ \eta(i, j, k) \\ &\quad - \eta(i, j-1, k) \} \end{aligned}$$

連続の式:

$$\begin{aligned} \eta(i, j, k) &= \eta(i, j, k-1) \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta x} \{ hu(i+1, j) u(i+1, j, k-1) \\ &\quad - hu(i, j) u(i, j, k-1) \} \\ &\quad - \frac{\Delta t}{\Delta y} \{ hv(i, j+1) v(i, j+1, k-1) \\ &\quad - hv(i, j) v(i, j, k-1) \} \end{aligned}$$

ここで、 u, v は流速の x, y 成分、 η は水位、 hu, hv は u, v の定義点 (水深格子の中間点、詳しくは前稿 (岡本, 1999) を参照) での水深値を示す。また i, j は格子番地、 $k, k-1$ は時間ステップ、 $\Delta t, \Delta x, \Delta y$ はそれぞれ時間と空間 (x, y 方向) の差分値を示す。

3.2 海岸線での境界条件

本稿でも前稿と同じく、海岸線の格子では直交方向の流速 (u, v いずれか) を 0 と置いた。これは波が陸に遡上せず、そこで防波堤にぶつかるように完全反射を起こす条件である。

3.3 透過境界条件

計算格子の端が海面であるとき、計算格子外の変数の未定義による無用のゴーストの反射波が発生するが、これを押さえるため、透過境界条件を設定した (前稿参照)。

3.4 プログラミング言語

前稿では N88BASIC を用いたコーディングによる配列メモリの制限から、約 128×128 以上の広い計算格子を用いることは難しかった。そこで本稿ではこの BASIC のプログラムを前述したように Linux 上の C 言語 (GNUC コンパイラ、コマンド名 gcc) によるプログラムに移植し、配列制限の壁をクリアして巨大な格子による計算を行った。計算結果は X-Window 環境で Xlib (X-Window 専用のグラフィックライブラ

リ) を使用して新たな窓 (Window) を開き計算経過をグラフィック表示している。ただし本稿の計算では、Xlib を直接操作せずに、MS-DOS 上の Turbo C と互換をとるヘッダファイル (石川, 1994) を用いて Turbo C 風のグラフィック関数を用いた。計算ステップは 1 ないし 2 秒毎で、5 分毎の画面 (Window) のキャプチャー処理 (スナップショットを手動でファイルに落とす)、もしくは海面変位を表す数値データファイルの出力を行い、これを保存して活用する。特に画面のキャプチャーファイル (UNIX 上のシェアウェア画像ツール XV にて X-Window をキャプチャーし、Gif 形式にして保存) は最近出回っている Windows95 上でのフリーの画像ビューワー (例えば Irfanview) で簡単にアニメーションのようなスライドショーにして津波伝播の時間経過を見ることができ、教材として有用である。

4. 数値計算例とその結果

上記、数値計算プログラムにより、幾つかの津波計算を行った中でここでは次の 2 つの計算例を紹介する。

4.1 1993 年北海道南西沖地震津波の日本海全域への伝播

前稿 (岡本, 1999) では奥尻島周辺海域を中心に島周辺の津波伝播を調べたが、本稿では日本海全域を含む領域に津波伝播計算を拡大した。

<水深データと初期海面>

水深データはここでは ETOPO5 から当該区域を切り出して用いた。オリジナルの水深データは格子間隔約 10 km 弱とややメッシュが粗いのでメッシュ間の水深を線形補間して、縦横の格子数を倍に増やし、格子数を 460×460 とした。2000 km 四方に近い計算領域である。格子間隔は緯度が北に上がる程、経度方向が $\cos \delta$ (δ は緯度) の割合で短縮されるので本来は格子間隔を計算格子の南北で調整する必要があるが、本稿の計算では、簡略化して $\Delta x = 3.55$ km, $\Delta y = 4.64$ km と定数に置いて固定している。これは緯度 $\delta = 40$ 度 (日本海のはほぼ中央部) の緯度を基準に格子の長さを決めたものである。なお、震源域の面積に比して、計算格子の範囲が広いので、地殻変動による震源域の初期海面の微細な構造が津波伝播の全体像に与える影響は小さいと仮定し、ガウス関数状の簡略化した初期海面隆起 (図 3a 参照) を震源海域に初期条件として与えることとした。

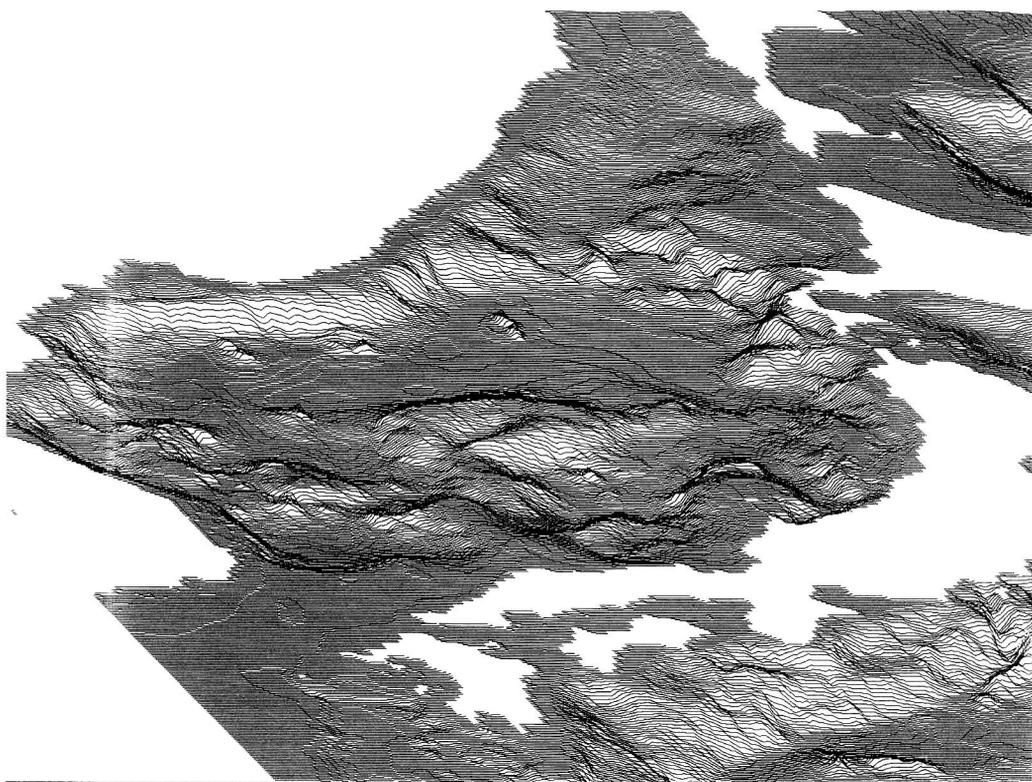


図2 1993年北海道南西沖地震の津波計算に使用した海底地形 (ETOPO5 から抜き出した水深データを線形補間して格子間距離を半分にした). 日本海中央部の大和堆や大陸棚の地形がよくわかる).

<計算時間>

計算に用いた海底地形を図2に, 計算結果を図3a~dに示す. 現象の再現計算には計算の時間刻みを2秒として, 現実の津波伝播所要時間の約2倍の時間で済む (自作 DOS/V 機の Pentium II 300 MHz の CPU での計算). ここで格子数が前稿 (岡本, 1999) の BASIC (Pentium 150 MHz) による計算に比べ30倍強大さくなっているにもかかわらず, 計算時間が思ったほど増大しないのは, CPUのクロックが速くなったのとLinux上のCコンパイラの作成する実行コードの計算速度によるところが大きい.

<計算結果>

以下に計算結果から見られる特徴を列記すると,

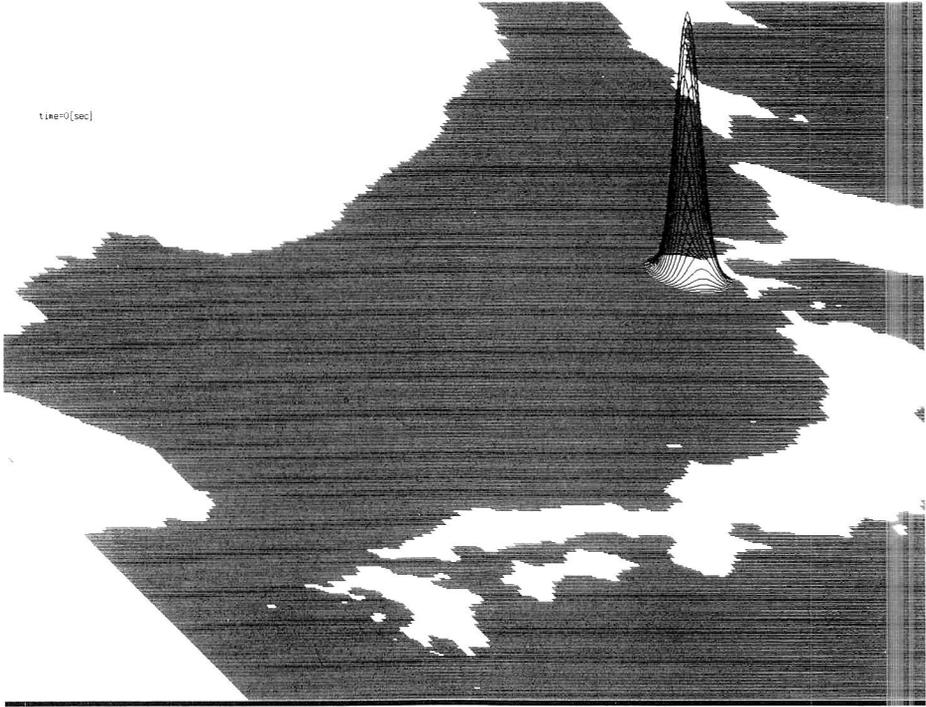
i) 最初同心円状だった津波の波紋の輪郭が海底地形の深浅に応じて, 次第に変形して行く (津波の速さ v はこの時, g を重力加速度, h を水深とすると $v = \sqrt{gh}$ で表され, 水深にのみ影響を受ける). 震源域に近い奥尻島や北海道西岸では精度は落ちるが波高が大きくなる様子が観察できる (図3b). さらに時間が

経過すると波高の高い場所は海岸に沿って次第に南北に伸びてゆく.

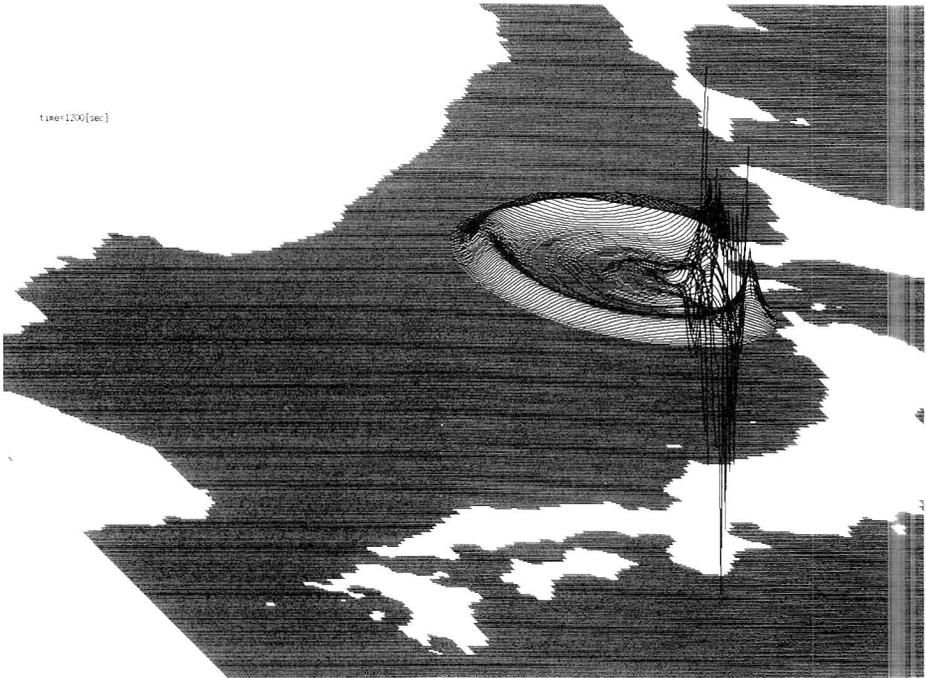
ii) 日本海中央部の浅い「大和堆」による波の遅延や高まりがよくわかる (図3c). さらに時間が経過すると, その背後の隠岐及び島根半島付近の海岸に波高の大きな津波が集中する様子が見て取れる (図3d). 前稿で述べた島や浅海部のレンズ効果 (阿部, 1996a, 1996b) の現れと考えられる. さらに時間が経過すると対馬海峡北部の大陸棚で津波の速度が急に落ちる様子も観察される.

iii) 津軽海峡及び宗谷海峡の海峡部は水深が浅く, 波が一旦かなり遅延した後, 海峡部を突きぬけて速度が増し, 同心円の貝殻状の波紋を形作るのが見える (図3d).

iv) 震源域対岸のロシア極東の沿岸には波高の高い波が何度も打ち寄せる. また, その沿岸からの反射波が逆に日本の方向に戻ろうとして, 震源域から遅れて伝わる波と複雑に干渉した波紋を描く. これは特に図をアニメーション表示すると顕著に観察できる.



a



b

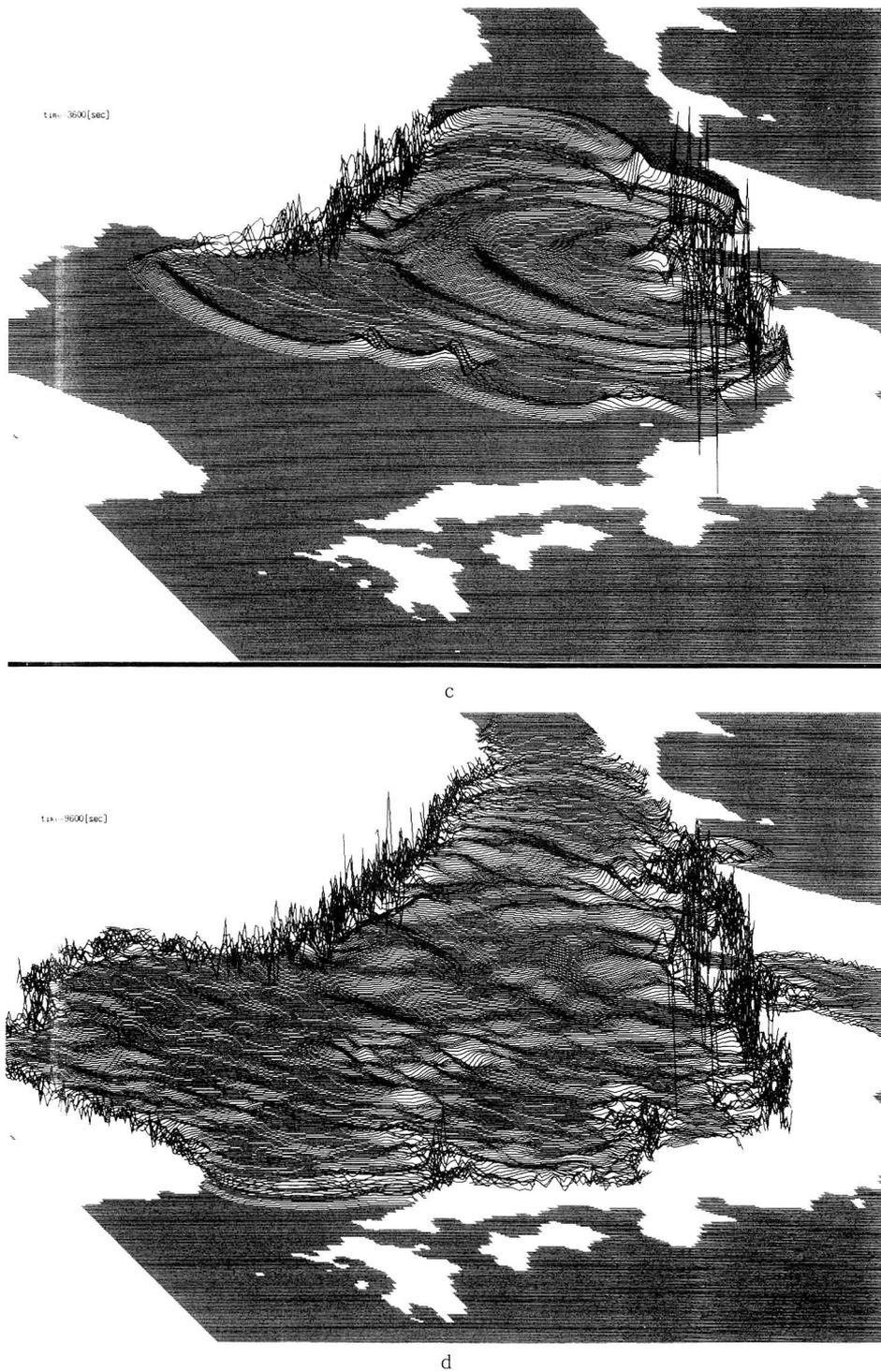


図3 1993年北海道南西沖地震の津波伝播の計算結果. 表示した時間は地震発生後の時間経過を秒で示す. aはガウス関数状の初期海面隆起を示す. b~dにいたる過程で水深に応じて津波伝播の様子が変化するのがわかる. cでは大和堆による波の遅延と高まりが, またdでは隠岐~島根半島にかけての海岸や能登半島付近での高い波高が観察される.

v) さらに計算を継続すると、上記 iv) の理由から、日本海を挟んで津波の行き来が続き、長い時間にわたる沿岸の潮位の異常が再現される。など。

<計算結果の評価>

これぐらい広い範囲になると、地球の丸みに伴う効果やコリオリ力の効果が無視できなくなる。専門家のシミュレーションではその効果を入れて、球座標などを用いた例もある(後藤ほか, 1988)。例えば太平洋をはるばる渡ってきたチリ地震津波(1960年)などの再現にはそういった配慮も必要となろう。しかし、そういった効果を捨象した上記のシミュレーションでも、現実の津波伝播図(岡田ほか, 1994)と比較して伝播の概略はかなりの程度正確に再現されている。教材で用いる第1次近似としてならば十分すぎる精度であるといえよう。ただ、沿岸での波高は同種の数値計算と同様、正確な再現には問題が多いと考えられる。例えば、都司ほか(1994)の報告にある、韓国東海岸の一部での突出した被害に相当する波高の高まりなどは確認できない。この原因を作ったとされるウツリョウ島の周囲の地形などがメッシュの粗さからよく表現されていないためかもしれない。

4.2 「仮想東海地震」による津波の伝播

次に、発生が懸念され、日本で唯一直前予知計画が実行に移されている駿河湾を震源とする、いわゆる想定「東海地震」について、その津波計算を行ってみた。すでにこの地域の同種の津波数値計算は相田(1981)に詳しいが、伝播する津波の形状が図でわかりやすく示されたわけではないので、ここで教材として、この仮想東海地震の津波計算の経過を詳細に示しておくことも意味があると考え。

<水深データと透過境界条件>

まず、水深データは4.1とは異なり、よりメッシュが細かい JPN. 1960. 2680. grd から当該水域を GMT で切り出して用いた。この格子のフォーマットはすでに述べたように、緯度方向1度につき80分割、緯度方向1度につき120分割で、正方格子に近い値をとるようにしてある。それでも実距離は緯度34度を基準にとると、緯度方向(4.1における Δx)約1150 m、経度方向(Δy)約930 mとなり、18%だけ経度方向が長い。そこで計算には上記 Δx , Δy の値をそのままあてはめた。格子数は480×480で、東は銚子沖の太平洋、西は紀伊水道、南は東海道はるか沖を計算境界とする約500 km四方の海域(陸域を含む)となる。透過境界条件等は前述したとおりである。

<初期海面と地殻変動>

この計算では4.1とは異なり、計算する津波伝播エリアに比べ、震源域が相対的に大きい。そのため、津波の初期条件として与える海面変動は地震の際の地殻変動の効果を詳しく取り込んだ方がよいと考え、地震断層変位モデルにより計算することにした。地震時の断層のずれに伴う地殻変動の計算式は Mansinha and Smylie(1974)や松浦(1996)の式があり、本稿では後者の式を用いた。これは地震時の断層の走向方向や傾斜、ずれの方向及び大きさなどのパラメータから、任意の地表(津波計算では海底)上の点の上下、水平方向の地殻変動の変位量を計算できる。このうち、海底の上下方向の変位成分を、海面の変化に等しいと置いた初期条件を与えている。この条件が津波の数値計算で妥当なことは佐竹(1991)などに詳しい。

実際には、地震の際の断層のずれによる地殻変動は瞬間ではなくある継続時間が考慮される。これをライズタイムとよび、一般に τ で表す。しかし、本稿では簡単のため $\tau=0$ と考え、計算スタート時の海面変動を断層モデルによる海底変位と等しいと置き、計算を行うことにした。

<断層モデル>

次に、この地域で予想される地震の断層モデルとしては相田(1984)の計算に習って、石橋(1976)による1854年安政東海地震の震源と推定される2面ある断層モデルのうち、駿河湾側の推定断層を採用することにした。この断層モデルの諸元を以下の表1で示す。

この計算に用いた水深データによる海底地形を図4に、また、断層モデルによる初期海面を図5aに、計算経過のスナップショット(画面キャプチャー)を図5b~dに示す。

<計算結果>

計算結果から見られる津波の特徴を列記すると、

i) 地殻変動が陸域まで及んでいるので、駿河湾沿岸での津波到達が極めて速い(図5b)。駿河湾奥では

表1 石橋(1976)の安政東海地震の断層モデルのうち北東側(駿河湾側)断層の断層パラメータ

断層の長さ	115 km
断層の幅	70 km
断層の上縁の深さ	2 km
断層傾斜方向	N72W
断層傾斜角	34°
断層の縦ずれ成分	3.8 m
断層の横ずれ成分	1.3 m

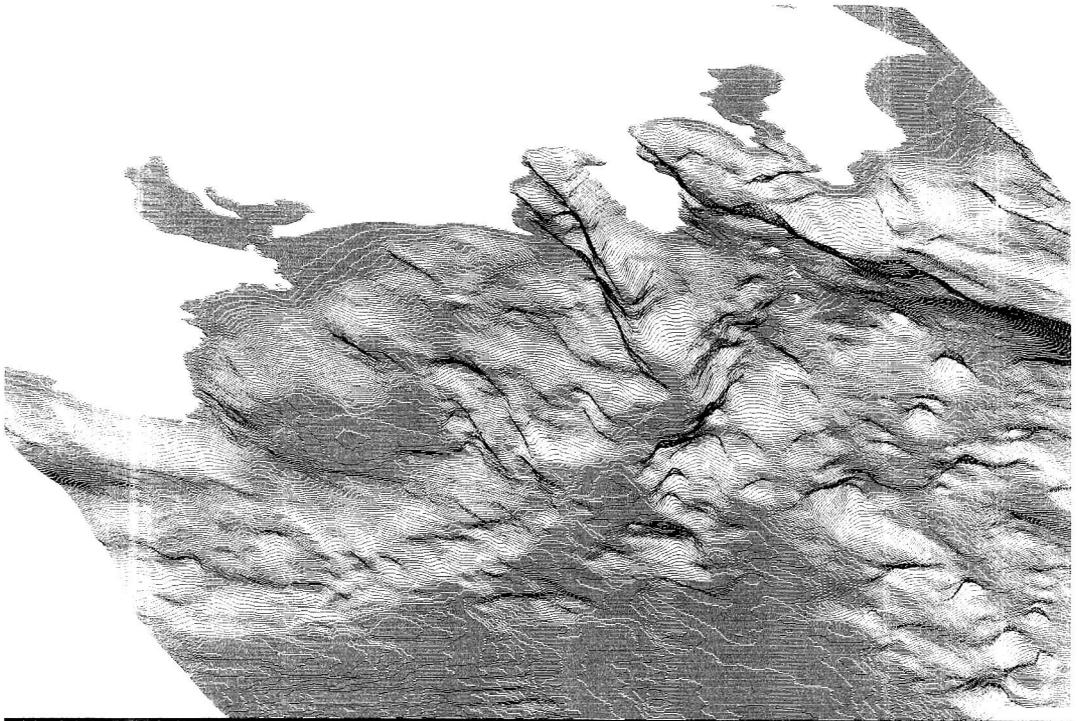


図4 仮想「東海地震」の津波計算に用いた海底地形 (JPN. 1960. 2680. grd より当該地域をGMTで切り出して使用, 駿河湾から南海トラフにいたる海底谷地形が明瞭にみえる. また伊勢湾, 東京湾がそれに比べると非常に浅いこともよくわかる).

湾の地形の影響で一段と波高が高くなり, また長時間水位変動が継続する. 湾奥の特に伊豆半島側の東岸と御前崎周辺の波高が共に高くなる様子が観察され, 前稿で少し触れた湾奥と岬地形による被害の集中の2つのパターンと関係するようと思われる.

ii) 西落ちに傾斜した逆断層という断層モデルの特性により, 初期海面変動には断層の東側だけでなく西側にも背後に沈降域が見える. これが顕著な津波の前に, 極めて弱い前駆的な波を生じさせる. しかしそれが引き波になるか押し波になるかの地理的パターンは結構複雑なようである.

この点は単純な釣鐘状の初期海面隆起変位を与えた4.1の計算とは大きく異なる点である. 逆に津波の最初が引き波か押し波かの地理的分布は, 地震が発生した後, その震源断層モデルを決定する上で重要な手がかりとなるとされる (例えば Abe and Noguera, 1992).

iii) 伊豆諸島を越えるとき, 島の列が一種の波よけ (例えば港におけるテトラポット) のような役割を果たし, 島の背後の相模湾方面への波が弱まるのが確認

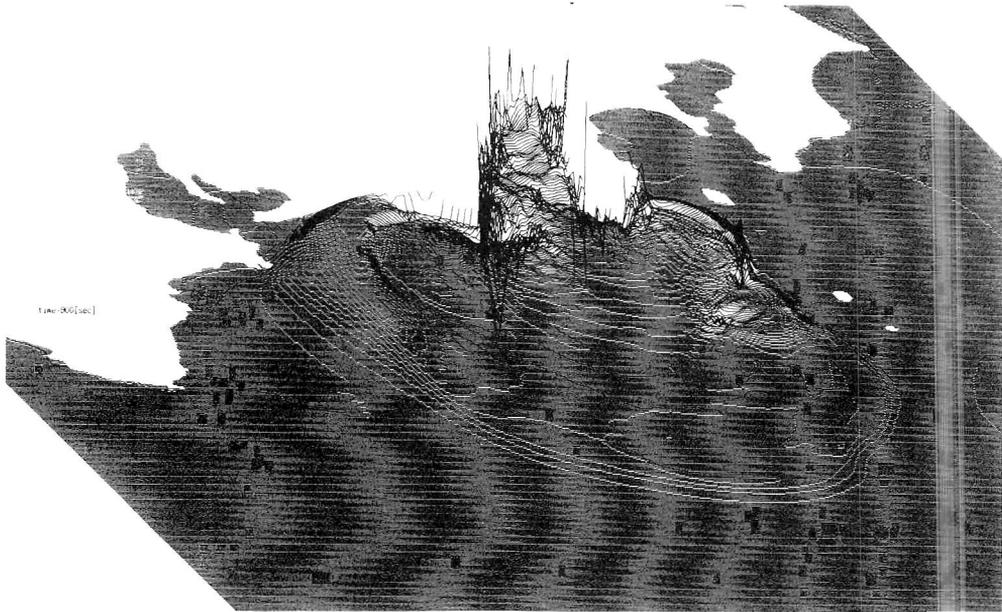
できる. 従って相模湾及び東京湾方面では震源域への距離が近いにもかかわらず, 時間が経過しても余り大きな波高が見えない. ただし, これには初期海面の形が東西で非対称になっていることも関係すると思われる.

iv) 逆に伊勢湾方面へ向かう波は, 障害もなく, 水深が浅くなると共に遅延し, 波長が短くなると共に, 振幅が大きく成長していく (図5b). 伊勢湾の入り口では一旦絞り込まれるが, 再び湾内で貝殻状の同心円を描いて波が広がる様子が見える (図5c). 一方, 震源域に向かって突き出た志摩半島の先端付近では, 岬地形の効果と思われるが, 高い波高が何度も観察される.

v) 房総半島の東側では外海の方の水深が深いため, 東京湾沿岸などよりずっと早く津波の第1波が到達する. 伊勢湾に対する紀伊半島の関係もこれと同様である. また, 東京湾奥, 伊勢湾奥に顕著な津波の第1波が到達するのはほぼ同時刻であることが観察できる (図5d). また, 湾奥の名古屋市に面した海岸付近の狭い領域でひととき波が高まる時刻がある. これは



a



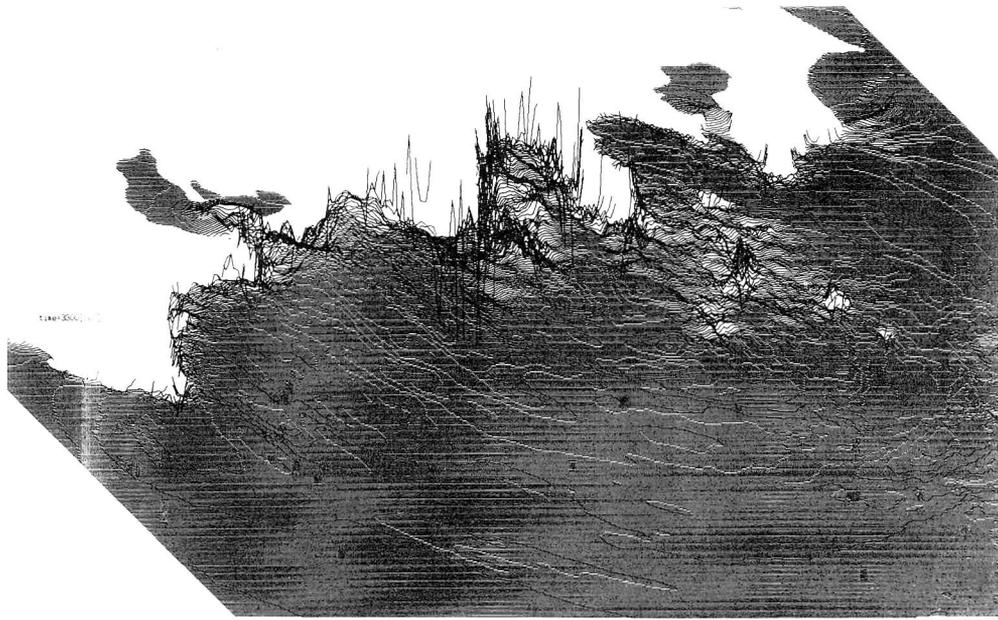
b

東京湾での同時刻の様子とは少し異なる点である（同図 5d）。

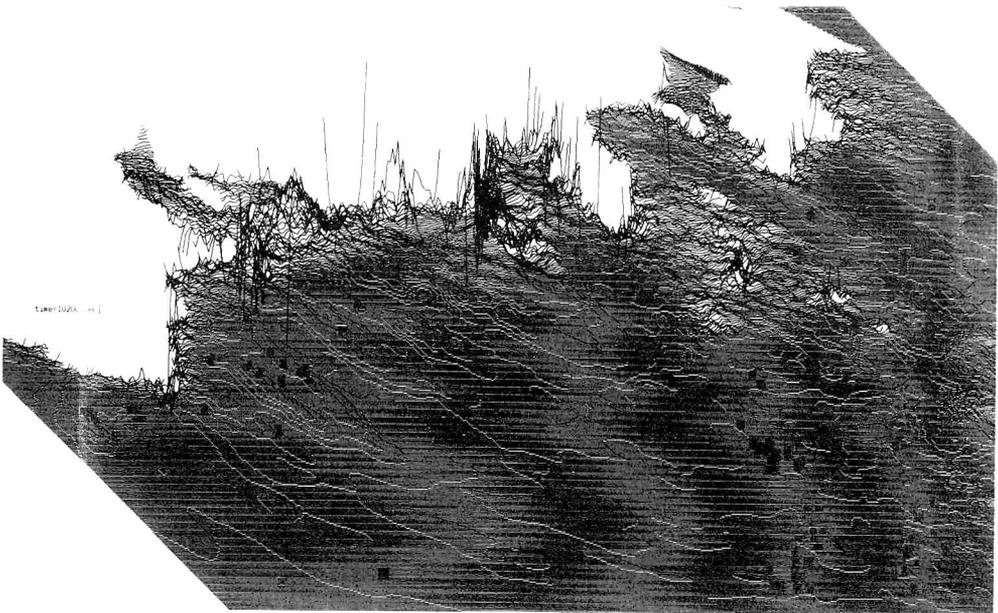
vi) さらに時間が経過すると駿河湾や東京湾などで陸地での波の反射等の影響で、湾全体が固有振動するような波が生じるのが観察される。などの特徴が明瞭である。

＜計算結果の評価及び留意点＞

この計算では駿河湾の陸地に隣接した場所が震源と予想されるため、海岸線の凹凸と初期海面変動との関係が興味深い。水深データもそのためかなり細かく、初期海面変動も詳しく計算されている。駿河湾の海底地形や御前崎の岬地形など、細かな地形に応じた津波



c



d

図5 仮想「東海地震」の津波計算の結果（経過時間を秒で示す。aは計算で初期条件として使用した断層モデルによる海面変位を示す。御前崎側が隆起する逆断層に対応している。bでは駿河湾奥の高い波高と東西での非対称な波の伝播の様子がわかる。cでは伊勢湾と東京湾に侵入する津波が見える。全体に伊豆半島を挟んで西側で波高が高いことがわかる。dでは伊勢湾奥の高潮位や知多半島、志摩半島付近の高い波高も観察される）。

の伝播の様子を詳細に観察することができる。4.1の結果と同じく、津波の伝播の特性を、教室でわかりやすく示す教材として生徒の関心をひくと思われる。

ただ、実際の東海地震が上記断層モデルのとおり生じる保証はどこにもなく、また、断層モデル自体も長方形の断層が全面で同じ量すべるとするなど、理想化された仮定に基づいている。その変動にかかる時間(ライズタイム τ)も考慮されていない。浅い湾での海水と海底の摩擦や海岸に遡上する海水の効果などもすべて捨象されていることなどを考え合わせると、計算結果の細かい点まで、そのまま鵜呑みにすることは大変危険である。さらに現実には人々の生活している地域に、近い将来起こるかも知れない災害を扱うことであり、興味本位な扱いに陥らないよう注意したい。

5. 議論と今後の展望

5.1 議論

最後に本稿の数値計算に限って論点を整理しておく。本稿の計算の特徴は

- i) 前稿に比べ広域の格子を計算に用いた。
- ii) 計算式を不等格子に対応させた。
- iii) 津波の波源として断層モデルを用いた。
- vi) フリーウェアのデータやOSを用いた

の4点に集約できる。以下に2つの論点に絞ってやや一般論になるが議論しておく。

<再現精度と教材としての有効性>

上記4点のうちi)~iii)は津波のより現実に近い再現、つまり自然現象への近似の精度を向上させることに寄与した。この結果、水槽や水路のような“実物”を用いた実験では再現が難しい広い地域と複雑な地形を対象にした津波の伝播を、精度良く、しかもくり返し再現できるようになった。自然現象に対する関心を高めたり、そのメカニズムの理解を深めると言う面では、前稿(岡本, 1999)の計算よりさらに大きな効果を上げると期待される。

ただ、自然現象のメカニズムをわかりやすく抽出する教材という点に注目すると、再現精度だけを向上すればよいという単純な見方にならない場合があることは授業での経験が教えている。複雑な現象の再現の精度を上げたからといって、それが現象の本質を解り易くしたかどうかは別の問題だからである。前稿で仮想地形を用いた計算を行ったように、極端なモデル化が効果を上げる場合も少なくない。

また、再現の精度をどこまで上げるかということ

も、計算式の複雑化や計算機の能力を考えると、現状ではまだ限界がある。本稿の計算については不等格子の式を用いずに、より簡単な正方形の式(前稿)に本稿の水深データをそのままあてはめた計算も行ってみた(前稿の奥尻島周辺の津波計算はこう表現している)。さらに地殻変動を考慮しない簡単な初期海面変動(例えばガウス関数状の海面隆起)を仮定した計算も東海地震の例で行ってみた。このような間略化した計算でも、津波の速度と水深との関係など津波のメカニズムの重要点は十分つかむことができる。計算精度が問題となる専門家が行う防災に直結した計算と本稿のような教材としての計算との違いはそのあたりにも存在すると考えている。

このような数値計算の再現精度と教材としての有効性をめぐる議論は、自然現象についてさらに近似を高めて高精度な実験を行うか、逆に自然現象から重要なメカニズムのみ抽出する単純なモデル化を行うかという2つの相反する概念が軸になる。この問題は重要であるが、ここでは今後の議論の展開を期待して、問題提起だけを行っておく。

<フリーウェア使用上での問題>

次にiv)について、少し議論する。

データやOSがフリーウェア(つまり無償配布のもの)であることは、商用のデータやOSの導入費用と著作権の扱いに苦慮していたことから考えれば、教材として大きな利点である。また、作成したプログラムも当然作者が了解すれば同じ扱いとすることができる。しかし、その反面、そのデータやOSに商用のものと同等の親切な取り扱いマニュアルやデータ運用後の責任等は求められなくなる。フリーの科学関係のデータやソフトウェアは基本的に研究者が自分の仕事に便利のように作業した結果をいわば善意で公表しているものが多く、商用データやソフトウェアと同じ使い勝手は要求できない。自ずと使用者側で使いやすいように環境構築する作業が必要となり、その作業は結構知識と時間を必要とする場合が多い。その上付随するOSのインストールや計算環境の構築だけでも、PC全般へのかなりの知識と経験を必要とし、教員が授業の傍ら行うにはまだ高い敷居が残っている。関連情報も書籍等ではまだ極めて少なく、どうしてもインターネット上の情報にたよる必要があり、その環境整備と運用にも結構費用と知識が必要であり、誰でもすぐに取り組める状況とはとても言えない。ここでも商用vs.フリーウェアのことごとく相反した状況が見え

る。

しかし、PC 関連の多くの技術がそうであったようにこれらの問題はやがて時間と、開発に携わる多くの人々の熱意が解決すると楽観している。本稿のような数値計算が極めて高価なスーパーコンピュータの独壇場であったのは、ほんの一昔前の出来事に過ぎないからである。なお、関連して、選択した OS である Linux の教育の場での有効性については重要な問題であるが、この議論もここでは割愛する。

5.2 今後の展望

上記議論を考慮し、津波計算の今後の展望として以下の2点を考えている。

i) 海底地形等を思い切って単純化した仮想地形によるモデル実験

ii) コンピュータグラフィックス(CG)を活用したよりリアルな波の表現

ii) については前稿(岡本, 1999)で少し述べた表計算ソフトにより作成した仮想モデル地形とさまざまな仮想波源(初期条件)を組み合わせた「津波モデル実験」の計算を行い、その結果をいずれ詳細に報告したい。また ii) については現状では、計算の便宜を考え、津波波高の表現は単純に点や線を CRT の X-Window 上に記すだけの簡単なグラフィック処理しか行っていないが、最近 3D レイトレーシングが簡単にできるフリーソフト(例えば povray 3)が開発されてきており、これを計算結果表示に駆使して津波のよりビジュアルな表示に取り組みたいと考えている。また、プログラム上で、初期条件、水深データ等の変更を簡単にできるようなユーザーインターフェイスの改良を目指したいと考えている。

6. おわりに

やっと、日本海全域や東海沖の広大なエリアまで、筆者の PC 内の“箱庭”では再現が可能となってきた。巨大な自然現象の中で津波は、制限があるとは言え、比較的簡単な基本方程式で主要な特徴が記述できる数少ない現象の1つである(佐竹, 1991)。PC の技術進展がこのような計算を机上で可能にしたことを今でも信じられない思いがする。しかし、その他の地学的現象に目を向けると基本方程式が複雑であったり、メカニズムそのものがまだよくわかっていないものも多い。

「火砕流」、「津波」、「震災」と近年立て続けに地学関連の災害が生じているが、火山学者の小山真人氏(静

岡大学教育学部助教授)は「恐怖を植え付けるばかりの防災教育ではなく自然と共存し自然を愛でる防災教育を望む」(小山, 1999)と書かれている。災害に関わる一連の数値シミュレーションの開発に携わってきた筆者にとって心打たれる提言であった。災害に関わる教材を“脅し”や“興味本位”に墜することなく、自然のメカニズムを解剖し、自然の懐に迫る手段としてさらに洗練させていく必要性を痛感している。なお、本稿の計算結果の画像については CD-ROM 等での配布も検討しており、興味ある方は筆者あて問い合わせいただきたい。

謝辞・付記

前稿に続いて、日本歯科大学新潟短期大学の阿部邦昭教授には、不等格子の計算式や断層変位計算及び、草稿全般についても有益なコメントをいただいた。水深データの取り扱いについては、工業技術院地質調査所岸本清行氏に多くの有益なアドバイスを頂いた。GMT の使用にあたっては同じく地質調査所棚橋学氏の WWW 上のドキュメント(http://www.gsj.go.jp/dMG/free/gmt/how_to_use_GMT.html)を参考にさせていただいた。匿名の査読者の意見も本稿の改善に有益でした。お礼を申し述べます。さらに、Linux カーネルを独力で開発し、商用ではなくフリーウェアとして提供された Linus Torvald 氏を始め、Linux OS の開発に携わられている方々、GMT、GNU プロジェクト等各種科学技術計算用フリーソフトを開発し無償で提供されている方々の見識の高さに敬意を表したい。本研究には文部省科学研究費補助金基盤研究(C) No. 09680207 の一部を使用しました。なお、日本海の津波計算で用いた ETOPO5 データの取り扱いは商用データに準じているので注意されたい。

引用・参考文献

- 阿部邦昭(1971): 津波の数値計算と波高の予測. 海洋科学, 3, 258-264.
- 阿部邦昭(1996a): 津波に対する島のレンズ効果 その1. 1993年北海道南西沖地震津波. 地震, 49, 1-9.
- 阿部邦昭(1996b): 津波に対する島のレンズ効果その2. 1983年日本海中部地震津波. 地震, 49, 11-17.
- Abe, K. and Noguera, B. E. (1992): A Fault Model of the Sanriku Earthquake on March 21, 1960. Derived from Tsunami Waveforms. *Bull. Nippon Dental Univ., General Education*, No. 21, 25-38.
- Aida, I. (1969): Numerical Experiment for the Tsunami Propagation—the 1964 Niigata Tsunami and the

- 1968 Tokachi-oki Tsunami. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **47**, 673-700.
- 相田 勇 (1981): 東海道沖におこった歴史津波の数値実験. *地震研究所彙報*, **56**, 367-390.
- 石橋克彦 (1976): 東海地方に予想される大地震の再検討—駿河湾大地震について—. *地震学会講演予稿集*, No. 2, 30-34.
- 石川 宏 (1994): Cによるシミュレーションプログラミング, ソフトバンク, 263-285.
- 後藤智明・今村文彦・首藤伸夫 (1988): 遠地津波の数値計算に関する研究—その1 支配方程式と差分格子間隔—. *地震* **2**, **41**, 515-526.
- 加藤健二・都司嘉宣 (1994): 1993年北海道南西沖地震の断層要素の推定とその津波の特性. *地震研究所彙報*, **69**, 39-66.
- 駒澤正夫・岸本清行 (1995): 日本列島周辺域の地形データ (1 km メッシュ). *地震学会ニュースレター*, **7**, 3-4.
- 小山真人 (1999): 地震学や火山学は、なぜ防災・減災に十分役立たないのか. *科学*, **69**, 256-264.
- Mansinha, L. and Smylie, D. E. (1971) The Displacement Fields of Inclined Faults. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **61**, 1433-1440.
- 松浦充宏 (1998): 地球連続体力学, 岩波書店, 地球科学講座 **6**, 197-205.
- NOAA, National Geophysical Data Center (1988): Data Announcement 88-MGG-02, Digital Relief of the Surface of the Earth.
- 岡田正美・中村浩二 (1994): 奥尻津波と検潮記録. 月刊海洋号外, No. 7, 123-131.
- 岡本義雄 (1995): 地学教材としての数値シミュレーション 1 —火砕流と津波—. 平成7年度地学教育学会第49回鳥取大会要項, 36-37.
- 岡本義雄 (1998): 地学教材としての火砕流シミュレーション. *地学教育*, **51**, 97-105.
- 岡本義雄 (1999): パーソナルコンピュータによる津波の数値シミュレーション —奥尻島周辺海域—. *地学教育*, **52**, 53-62.
- パシフィック・ハイテック (1998): Turbo Linux 日本語版 2.0 インストールマニュアル.
- Rew, R. K., Davis, G. P., Emmerson, S. and Davies, H. (1997): Net CDF User's Guide for C, An Interface for Data Access, Version 3, April.
- 佐竹健治 (1991): 最近の津波研究. *地震* **2**, **44**, 99-112.
- 棚橋 学 (1996): GMT (ver. 3) の特徴と使用法, <http://www.gsj.go.jp/dMG/free/gmt/how-to-use-GMT.html>
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1991): Free software Helps map and display data. *EOS Trans. AGU*, **72**, 441.
- Wessel, P. and Smith, W. H. F. (1995): New version of the Generic Mapping Tools released. *EOS Trans. AGU*, **76**, 329.

岡本義雄: パーソナルコンピュータによる津波の数値シミュレーション —Linux を用いた広域格子—. *地学教育* **52** 巻, **5** 号, 177-190, 1999

〔キーワード〕 津波, 数値シミュレーション, 水深データ, Linux, GMT, 断層変位, 高校

〔要旨〕 津波伝播を表示する計算を Linux 上の広域の格子で行った. 水深データに合わせて計算式を不等格子の式に改良した. 水深データの作成についても詳述した. 1993年北海道南西沖地震津波の計算では, 日本海をわたる津波が海底地形により変化する様子が再現された. 仮想「東海地震」の津波計算では, 水深のほか, 初期海面の形や細かい海岸線の凹凸と津波の関係がわかりやすく再現された.

Yoshio OKAMOTO: Numerical Simulation of Tsunami Propagation Using Personal Computer —Extended Grid with Linux Operation System—. *Educat. Earth Sci.*, **52**(5), 177-190, 1999