

## 遠地津波用量的津波予報データベースの改善(2)

### —新しい遠地津波用量的津波予報データベース構築に向けて—

#### 1. はじめに

現在の遠地津波用量的津波予報データベースは、1999年(平成11年)に整備され、これまで遠地地震による津波の予測に用いてきたものであるが、2009年(平成21年)1月4日のニューギニア付近の地震のように、現行の5分格子(検潮所付近は1分、20秒接続)計算によるデータベースでは、予測精度が不十分な事案があることが判明した。この問題に対処するため、資料1-1で示したように計算格子サイズを細かくするなどの必要な改善を図る。このため、現行の遠地津波用量的津波予報データベースの不十分な点を見直し、以下の①～④を考慮した遠地津波用量的津波予報データベースを構築する。

##### ① 計算格子サイズを小さくするための海底地形データの使用

現行の計算格子サイズを5分格子(波形出力点付近は1分に20秒格子を接続)から1.5分格子(波形出力地点付近は30秒格子)にする。

##### ② 想定断層モデルの追加

2009年1月4日のニューギニア付近の地震では、震央近くに断層モデルが想定されていなかった。想定断層の空白地点を見直し、想定断層を追加する。また、マグニチュードについては、7.5と8.5の2種類であったが、8.0を追加する。

##### ③ 計算波形出力地点の追加

遠地津波では、津波が日本に到達するまでに時間があるので、途中の海外の検潮所での観測波形と計算波形を比較し、日本への津波の影響を推測することができる。より多くの地点で波形を比較できるように計算波形の出力地点を増やす。

##### ④ 沿岸での津波の高さの予測手法の改善

現行のデータベースはマグニチュードについては、7.5と8.5の2種、震源深さについては、0kmの1種類である。近年、IRIS等のグローバルな地震観測網のデータが利用できるようになり、遠地地震の震源やCMT解の精度が向上した。これ以外のマグニチュードや深さに適合する津波の高さを計算できるようにする。

## 2. 数値計算モデル

津波の伝播を計算するための式は次のとおりとする。

方程式は移流項と海底摩擦項を含む非線形長波近似の水平2方向の運動方程式に連続の式を加えた3式、変数は水平2方向の流速と水位の3つである。ここで、鉛直方向の運動方程式は長波を仮定しているため考えない。以下に式を示す。

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -fV_y - g \frac{\partial h}{\partial x} - C_f \frac{V_x \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{d+h}$$

$$\frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = fV_x - g \frac{\partial h}{\partial y} - C_f \frac{V_y \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{d+h}$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{V_x(h+d)\} + \frac{\partial}{\partial y} \{V_y(h+d)\} = 0$$

ここで、座標軸を x を東向き、y を南向きに向かう向きを正の向きにとると、 $V_x$ 、 $V_y$  はそれぞれ東向き、南向きに水粒子の動く速度（水深方向に平均した流速）で、 $h$  と  $d$  はそれぞれ水位と水深、 $f$  はコリオリパラメータ、 $C_f$  は海底摩擦係数である。移流項と摩擦項は水深が 100m 以下の場合にのみ考慮し、コリオリ力は外洋の計算の場合にのみ考慮している。なお、使用する海底地形データは球面（地球）座標系のデータを使用しているため、方程式系もこの座標系に変換して適用する。

この方程式を Satake(1995 あるいは 2002) の方法で差分化（スタッガードリーブフロッグ法）し計算を実施する。この方法は、今村ほか（1986）で行われているものと同様な方法である。

### 参考文献

Satake, K.(1995): Linear and nonlinear computations of the 1992 Nicaragua earthquake tsunami, PAGEOPH, 144: 455-470.

Satake, K.(2002):Tsunamis, in W.H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, and C. Kisslinger (eds.) International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology, 81A, 437-451.

今村文彦,ほか(1986): 津波数値予報の可能性に関する研究—津波数値シミュレーションの精度, 東北大学工学部津波防災実験所研究報告, 3,23-88.

### 3. 計算格子サイズと海底地形データ

#### 3. 1 太平洋全域をカバーする海底地形データ

津波の数値計算を太平洋全域に渡って実施するためには、太平洋全域をカバーする格子点の海底地形データが必要となる。また、検潮所付近での波形の出力を行うためには、検潮所付近でのできるだけ詳細な海底地形データを確保することが必要となる。

現在整備されている海底地形データとしては、表 3.1 に示す以下の2機関が提供しているものがある。

表 3.1 太平洋全域をカバーする海底地形の格子点データ

海底地形名	格子サイズ	データ	最新バージョン	提供機関
GEBCO* <sup>1</sup>	30"	全世界の陸及び海	Nov. 2009	IOC* <sup>3</sup> and IHO* <sup>4</sup>
ETOPO* <sup>2</sup>	1'	全世界の陸及び海	Mar. 2009	NGDC* <sup>5</sup>

GEBCO、ETOPO とともに旧来より整備されており、年々データの格子サイズや参照するデータは更新されてきている。以前は、GEBCO は海図を元にしており海岸付近のデータについては利点があるが、衛星データを取り込んでおらず、空間的に不連続なデータとなっていることが指摘されていた。しかし、現在の GEBCO では衛星データを取り込んでいる (IOC and IHO, 2009)。そこで、格子サイズが小さく、検潮所付近をより良く再現できることから、海底地形データには GEBCO を用いることにする。

観測波形と比較する計算波形を出力する検潮所付近の格子サイズは 30 秒にすることにし、また、外洋は計算時間を考慮し、30 秒より粗くすることにする。30 秒に接続する格子サイズは、接続の比率を 1:3 のように、奇数の比にするのが、津波シミュレーションのプログラムでの取り扱いが容易であることから、外洋は 1.5 分格子とする。1.5 分格子データは、GEBCO の 30 秒格子データを間引いて作成する。

\*1 GEBCO: General Bathymetric Chart of the Oceans

\*2 ETOPO: ETOPO1 is a 1 arc-minute global relief model of Earth's surface that integrates land topography and ocean bathymetry.

\*3 IOC: International Oceanographic Commission

\*4 IHO: International Hydrographic Organization

\*5 NGDC: National Geophysical Data Center

### 3. 2 日本付近の海底地形データ

日本付近の空間 30 秒の海底地形データは、表 3.2 に示す JTOPO30 がある。  
(日本水路協会(MIRC),2003)

表 3.2 日本付近をカバーする海底地形の格子点データ

海底地形名	格子サイズ	データ	バージョン	発行機関
JTOPO30	30"	日本付近の陸と海	2003 年	MIRC

JTOPO30 は最近では Google Earth へデータが提供される(MIRC, 2009)など、他機関のデータに取り込まれている例があり、GEBCO にも JTOPO30 が取り込まれている可能性が考えられるが、GEBCO の日本付近の海底地形データの参照先として、JTOPO30 とは記載されていない(GEBCO, 2009)。そのため、日本付近の海底地形として GEBCO と JTOPO30 のどちらが良いデータかを確認する必要がある。そこで、JTOPO30 のデータが存在する北緯 18 度～48 度、東経 120 度～150 度の範囲について両者のデータを比較した。

両者を比較した結果、JTOPO30 の方が GEBCO よりも精度が良いと考えられる特徴が見られた。検潮所付近の形状は JTOPO30 の方が良い地点が多く、GEBCO には図 3.1 や図 3.2 に見られるような不自然な海底地形が存在する。また、JTOPO30 の方が GEBCO よりも等水深線の形状が滑らかである、千島列島付近で、両者の違いが大きいなどの傾向が見られた。

以上のことから、日本付近の海底地形データには、JTOPO30 を使うことにし、北緯 46 度～23 度、東経 122 度～150 度の矩形の外周で、太平洋全域を計算する GEBCO に接続する。図 3.3 に使用する海底地形データの全体図を示す。

以上をまとめると、本数値計算を実施する際の海底地形データとして、  
1) 太平洋全域は、GEBCO の 30 秒格子データを間引いて 1.5 分にする。2) 海外検潮所付近は間引く前の GEBCO のデータを用いる。  
3) 日本付近は、JTOPO30 のデータを用いる。

#### 参考文献

(財)日本水路協会海洋情報研究センター(MIRC) (2003): JTOPO30(<http://www.mirc.jha.jp/products/JTOPO30/>)

(財)日本水路協会海洋情報研究センター(MIRC) (2009): <http://www.mirc.jha.jp/> (20100207 参照)

IOC and IHO (2009): GEBCO\_08 grid  
([http://www.gebco.net/about\\_us/news\\_and\\_events/updated\\_gebco\\_08\\_release.html](http://www.gebco.net/about_us/news_and_events/updated_gebco_08_release.html))

*Amante, C. and B. W. Eakins, ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model:*

*Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS  
NGDC-24, 19 pp, March 2009.*

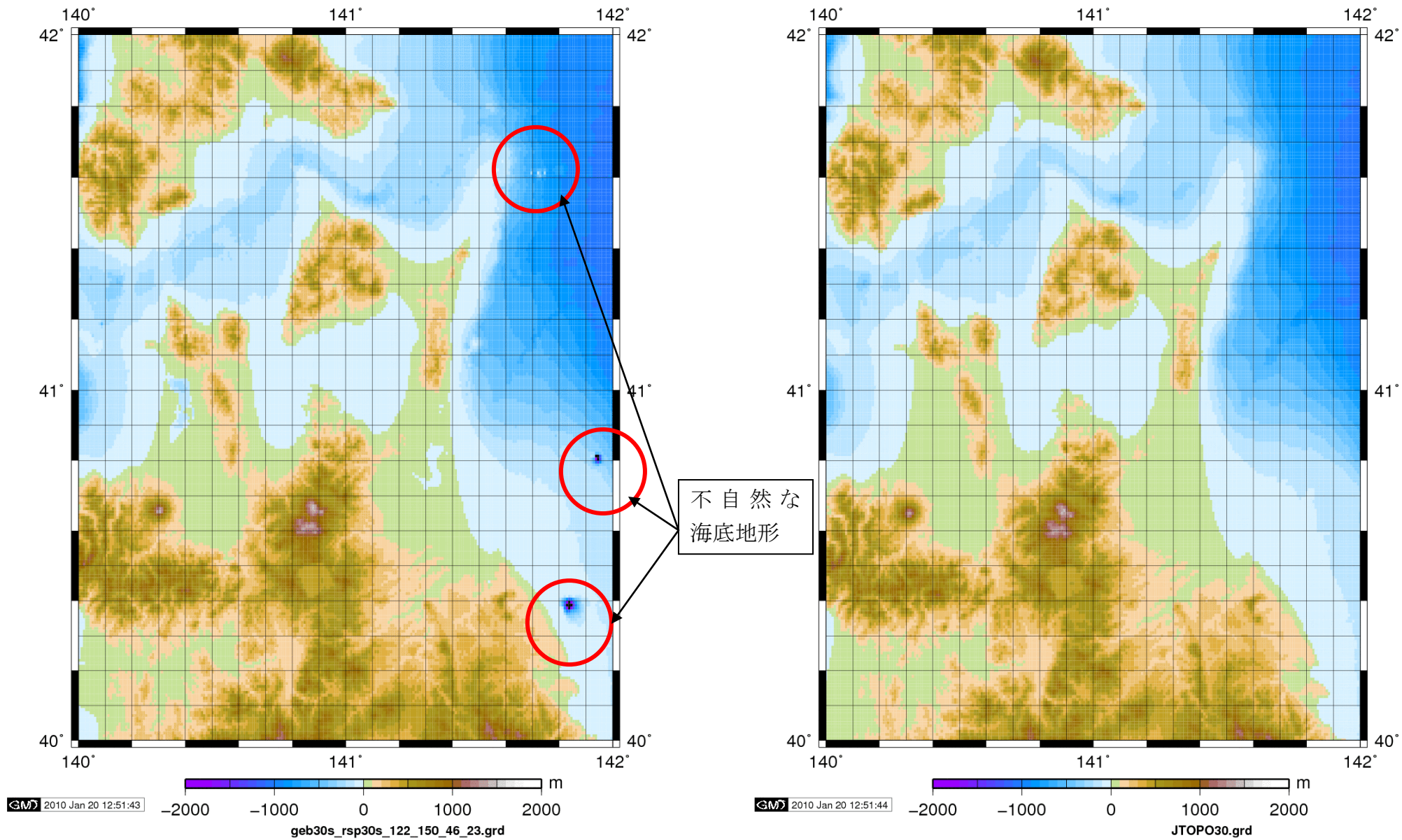


図 3.1 GEBCO30 秒データ (左図) と JTOPO30 秒データ (右図) の比較① GEBCO データには不自然な海底地形が現れている。



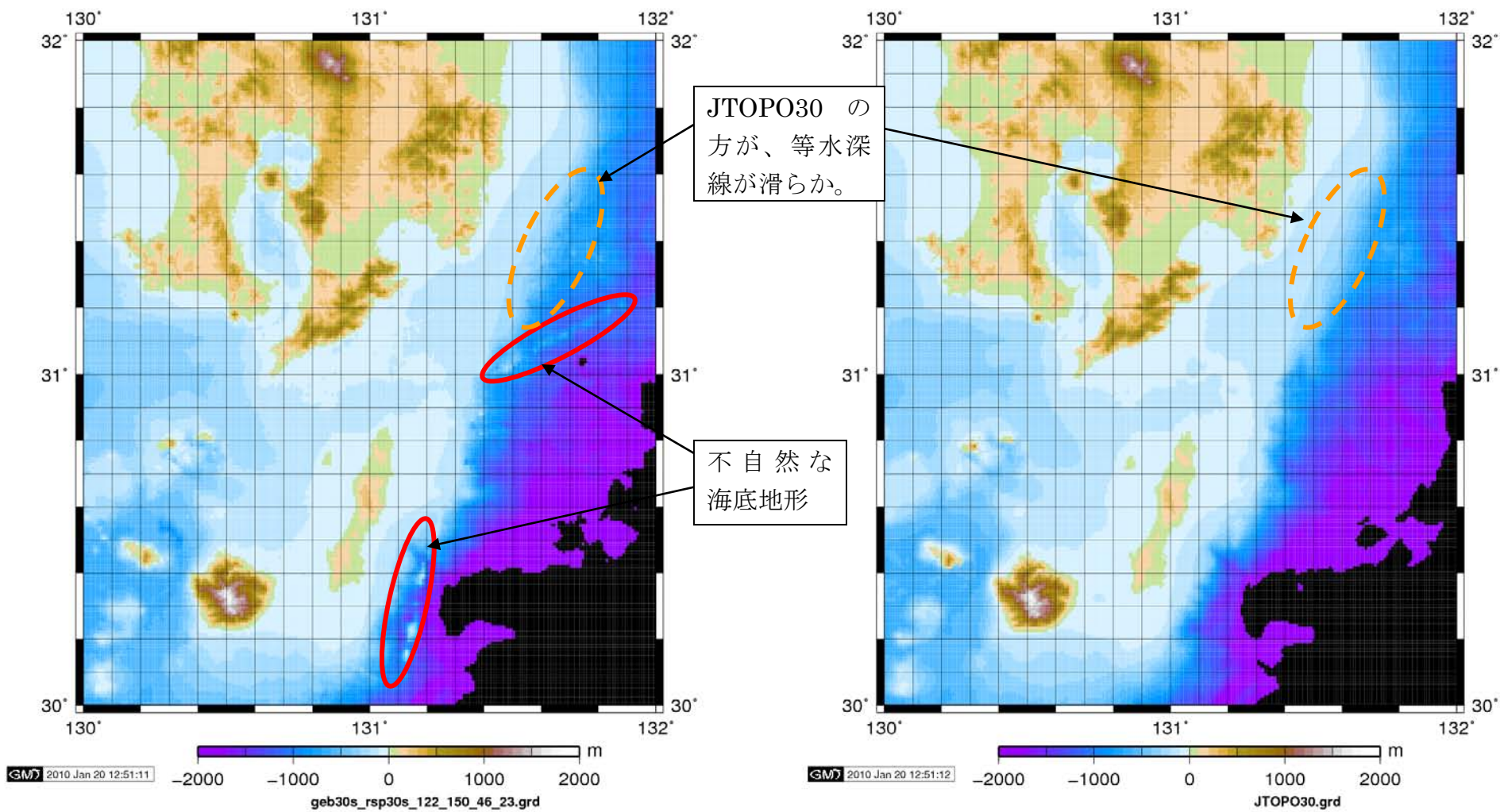


図 3.2 GEBCO30 秒データ (左図) と JTOPO30 秒データ (右図) の比較② GEBCO データには不自然な海底地形が現れている。

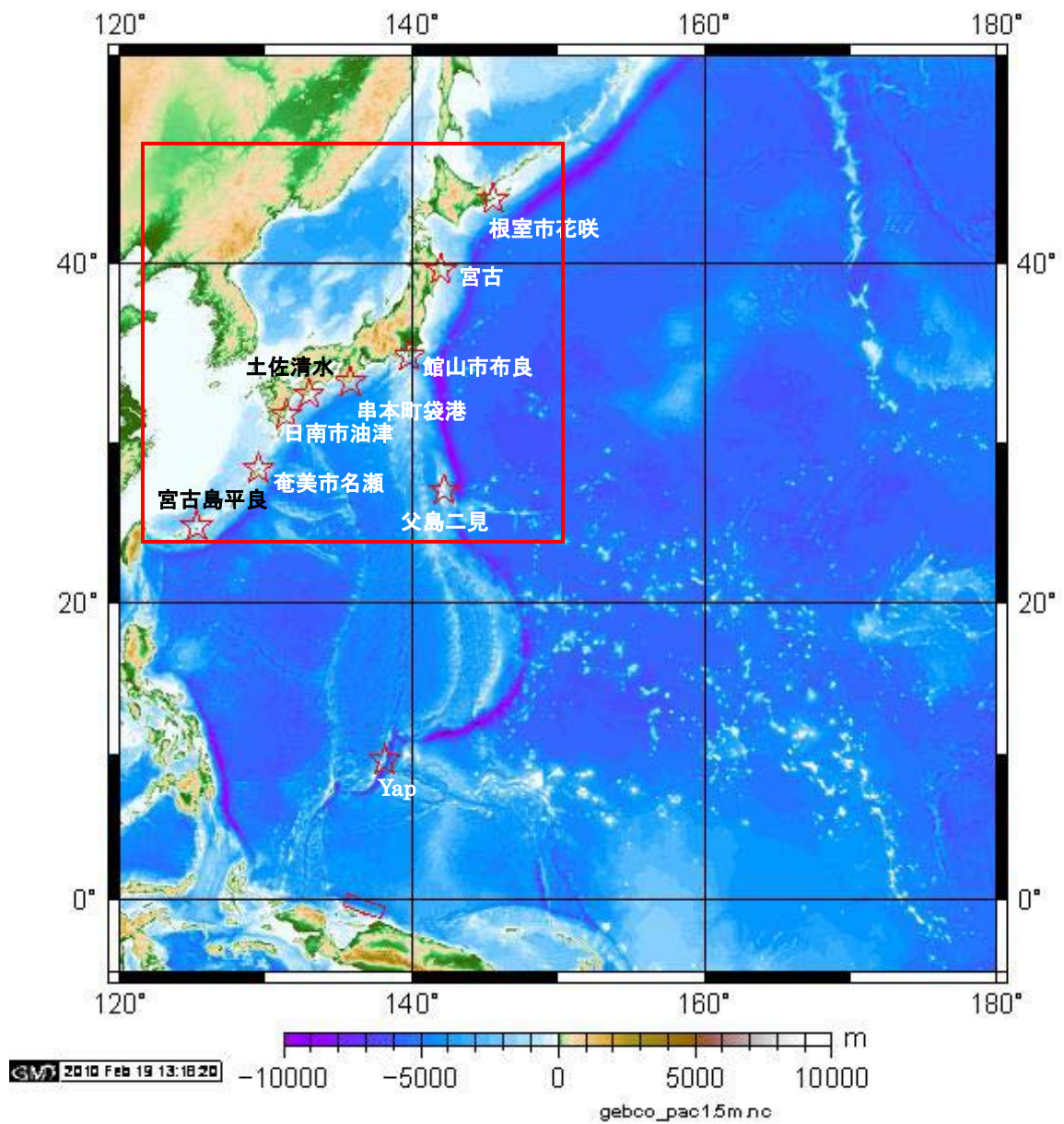


図 3.3 海底地形の構成。赤枠内が JTOPO30、その外側が GEBCO。



### 3.3 試験計算結果

3.1 および3.2 で設定した計算格子サイズ及び海底地形データの設定で、試験計算を実施した。過去地震の事例の最適な断層モデルを用いて、実際に検潮所での出力で妥当な計算波形が得られるか確認する。事例には表3.3の2つの地震を用いた。

表3.3 検潮所波形を出力した事例

事例	用いた断層モデル
2009年1月4日 ニューギニア付近の地震	東北大,2009
2009年9月30日 サモア諸島の地震	大阪管区気象台技術部地震火山課・他,2009

#### ● 2009年1月4日ニューギニア付近の地震

津波の計算結果を図3.4(今回の計算方法(1.5分-30秒接続計算))、図3.5(現行の計算方法(5分-1分-20秒接続計算))、本勉強会資料1-1の図1再掲)に示す。津波の高さは妥当な値で計算され、現行の串本町袋港や土佐清水に見られるような津波が減衰しないことも改善されている。

#### ● 2009年9月30日サモア諸島の地震

震源近くの海外検潮所(Pagopago, Apia)の津波計算波形を新しい海底地形データで計算し、観測された津波と比較したものが図3.6である。この結果でも比較的良く再現されていることを確認できた。

#### 参考文献

大阪管区気象台技術部地震火山課・気象庁地震津波監視課(2009):2009年9月30日のサモア諸島の地震の津波について,2010年地震学会ポスター発表

東北大学津波工学研究室(DCRC, Disaster Control Research Center)HP:  
2009年1月4日インドネシア・ニューギニア島地震による津波の暫定解析結果([http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/indonesia\\_090104/event\\_j.html](http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/indonesia_090104/event_j.html)  
2009年1月参照)

【2009年1月4日パプアニューギニアの地震】  
断層モデル:東北大case-2 計算モデル:1.5m-jtp30s

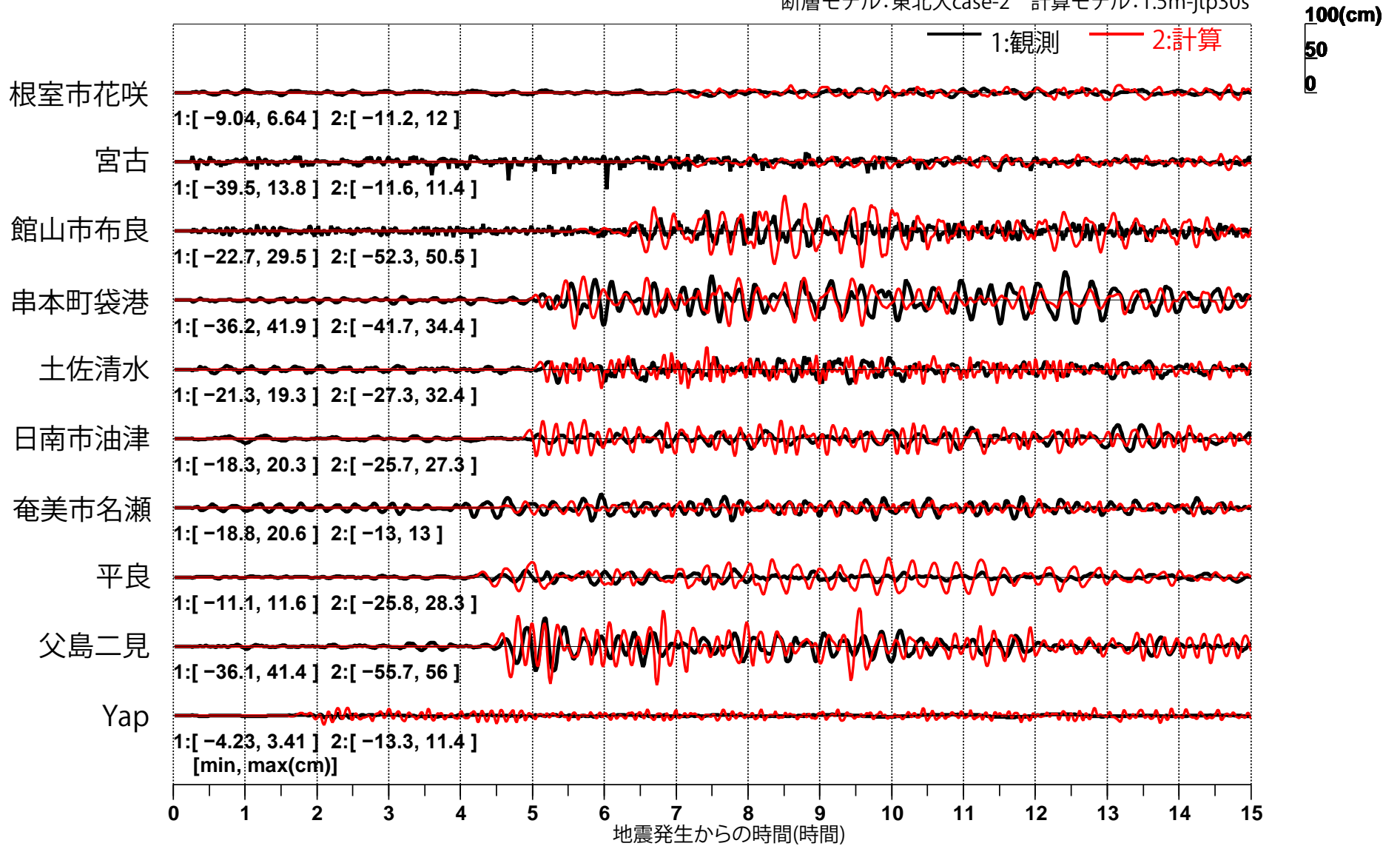


図 3.4 最適な断層モデル(東北大 case2)での、1.5分-30秒 (JTOPO30 使用) 計算結果

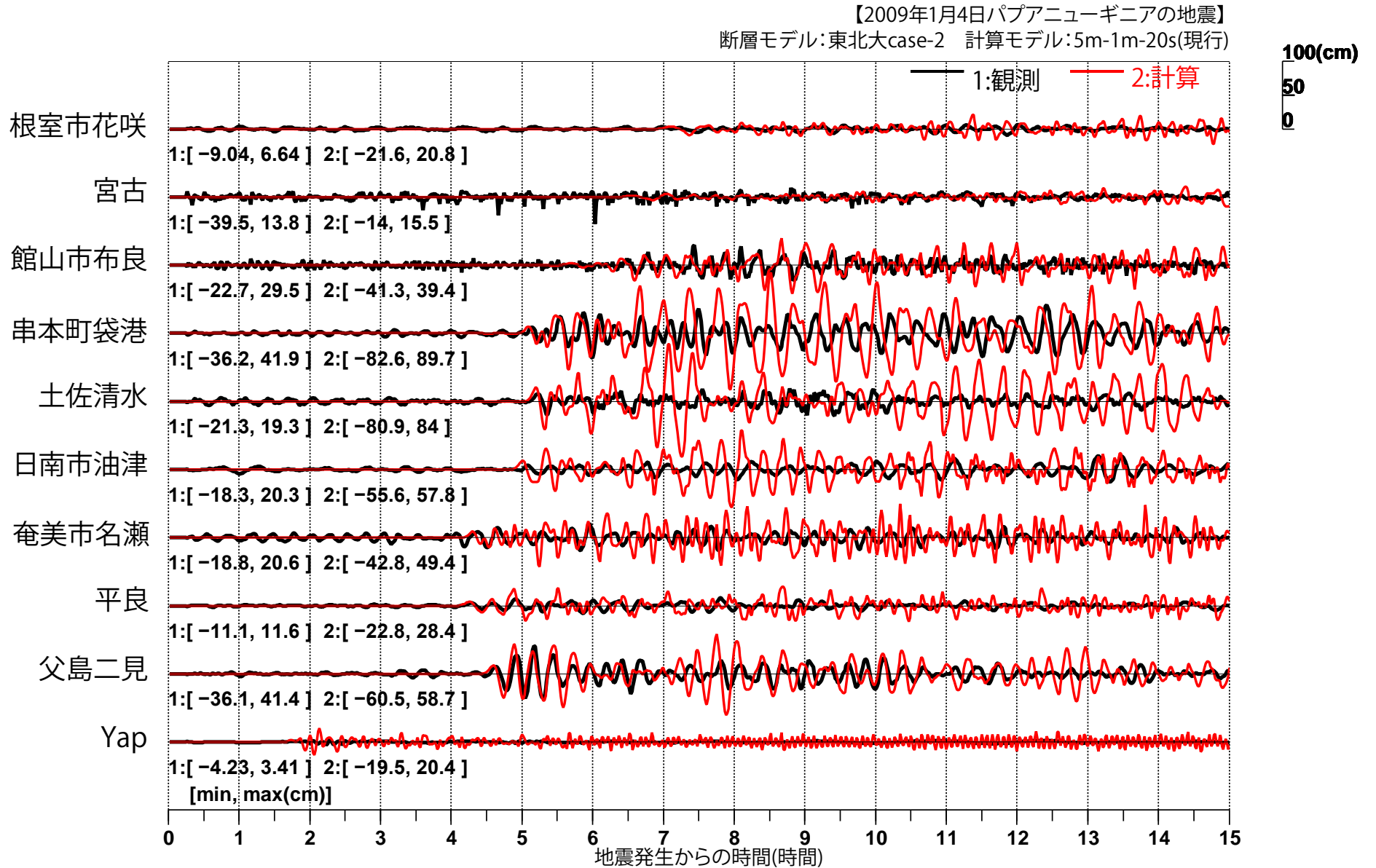


図 3.5 最適な断層モデル(東北大 case2)での、現行 (5分-1分-20秒接続) 計算結果 (本勉強会資料1-1の図1再掲)

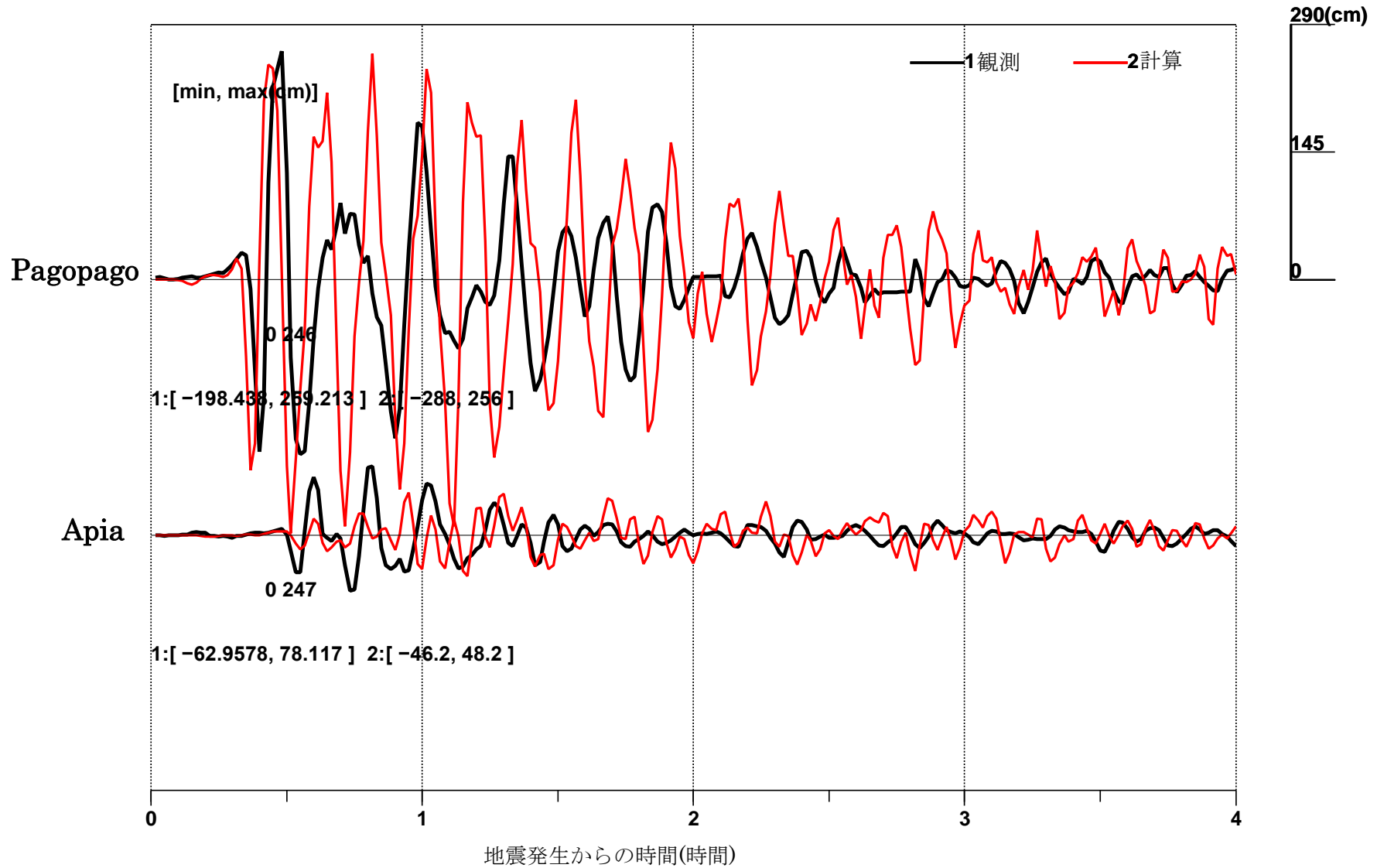


図 3.6 1.5 分格子に 30 秒格子を接続したモデルによるサモア諸島の地震による津波の計算結果。断層モデルは大阪管区気象台技術部地震火山課・他(2009)による。

## 4. 想定断層モデル

ここでは、データベースを構築する際の断層モデル設定について述べる。

### 4.1 断層位置

2009年1月4日のニューギニアの地震では、現行の量的津波予報データベースの想定断層は、実際の地震の約400km東側に置かれていた。地震の断層位置が異なると、津波の放射方向や海山列等を伝播する伝播経路が変化し、日本沿岸での津波の高さの予測結果が違ってくることが有る。このため、想定断層を適切な間隔で設置しておく必要がある。断層の設置方法は、図4.1のとおりとし、M8.5の断層内にM8.0の断層を2つ、M8.0の断層内にM7.5の断層を2つ設置し、各M8.5、M8.0、M7.5の断層で長さ方向に隙間なく設置する。更にM8.5の断層は隣の断層に半分ずつ重なるように設置する。この方法で配置するM8.5の断層の数は320になる。断層は地震の発生領域を覆うように配置する。

### 4.2 メカニズム

地震のメカニズムについては、配置したすべての断層について、傾斜角45度、すべり角90度の純粋な逆断層で計算するとともに、過去に横ずれ断層や正断層の地震が発生した場所では、その地震の最適な断層モデルでも計算を行う。

データベース計算のために設定する逆断層タイプの断層パラメータは表4.1のとおりである。(参考として、現行データベースの断層パラメータも表4.2に示す)。

表4.1 次期データベース計算に用いる断層パラメータ (逆断層タイプ)

M	断層基準(上端 左上)位置		断層 長さ (km)	断層 幅 (km)	す べ り 量	上端 深さ (km)	走行	傾 斜	す べ り 角	剛性率 (GPa)
	緯度	経度								
8.5	各地点で設定		300	100	7.0	10	地域の値を設定	45	90	33
8.0	各地点で設定		150	65	3.9	10	地域の値を設定	45	90	33
7.5	各地点で設定		75	37.5	2.4	10	地域の値を設定	45	90	33



表 4.2 現行データベース計算に用いている断層パラメータ

M	断層基準(上端 左上)位置		断層 長さ (km)	断層 幅 (km)	す べ り 量	上端 深さ (km)	走行	傾 斜	す べ り 角	剛性率 (GPa)
	緯度	経度								
8.5	各地点で設定		300	100	7.0	0	地域の値を設定		90	33.7
7.5	各地点で設定		70	35	3.9	0	地域の値を設定		90	33.8

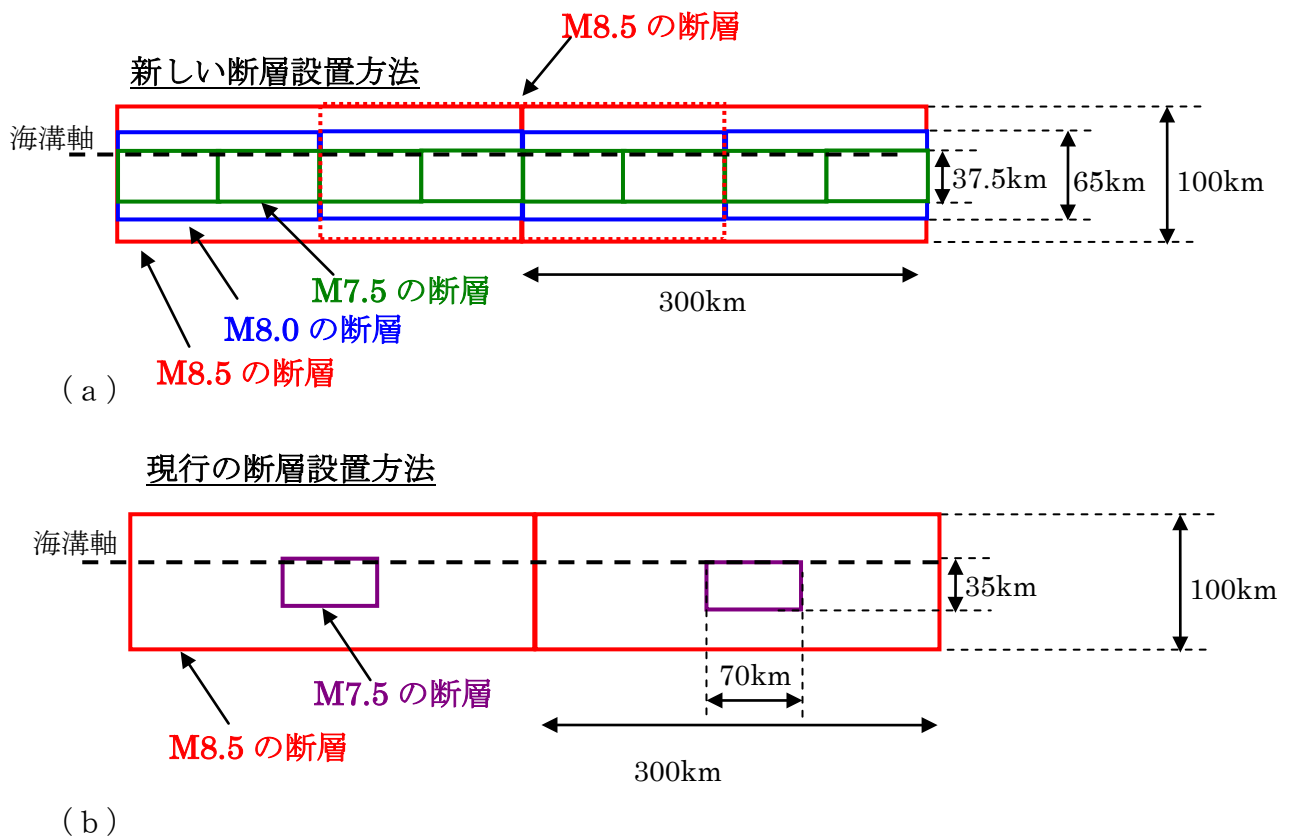


図 4.1 新しい断層設置方法 (a) と現行の断層設置方法 (b)

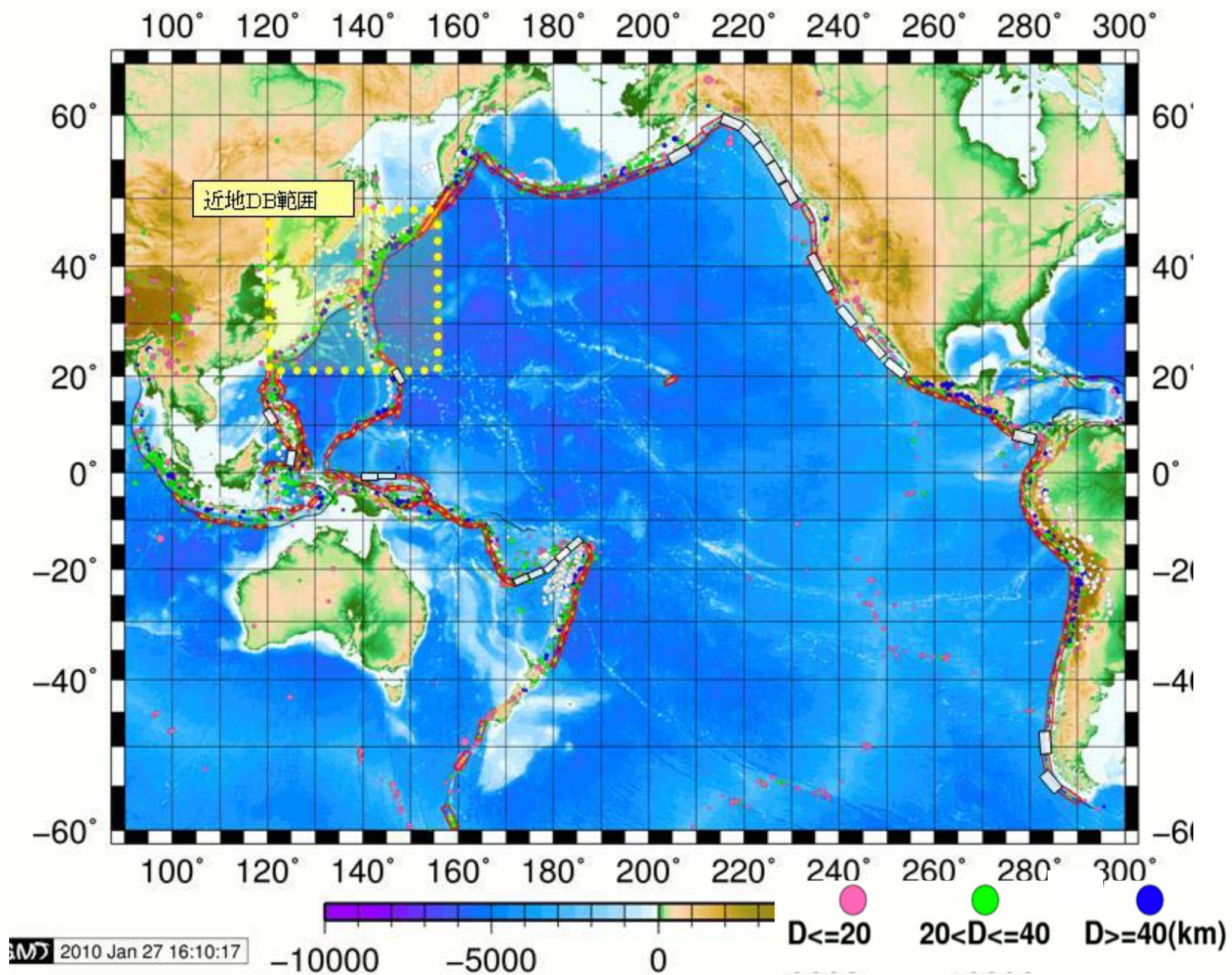


図 4.2 現行遠地データベースの断層 (赤四角(M8.5)、追加する断層 (白四角(M8.5)および過去震源 (USGS PDE 震源(1973年~2009年)

## 5. 観測値との比較地点の追加

気象庁では、1990年頃よりリアルタイムに海外の検潮所の潮位データをGTS回線を通して収集し、遠地津波の監視に用いている(浜田,2009)。遠地津波は、近地津波に比べて日本沿岸へ到達するまでの時間的猶予があるので、日本の沿岸へ津波が到達する前に海外の検潮所の観測値と比較して予測値を修正することで、日本沿岸での津波高さを、より適切に予測することができる。現在、海外検潮所の監視地点は、現行データベースの構築時よりも大幅に増加している。そこで、図5.1に示す現在の海外検潮監視地点での計算波形を出力し、観測値と比較できるようにする。

また、国内検潮所地点についても、計算波形があれば解除の目安等に参考にできる。次期モデルの計算波形は、現行の計算モデルに比べて後続波の減衰過程が改善しており、このような目的への利用が期待される。現在、国土交通省港湾局、海上保安庁、国土地理院所管の検潮所やGPS波浪計の波形データを共有できるようになり、津波観測情報の発表地点を増強している(気象庁,2008,2009)。これらの地点について計算波形を出力する(図5.2)。表5.1に計算波形の出力地点数を示す。

表 5.1 計算波形出力地点数

		現行データベース	次期データベース
海外	検潮所	5	61
	DART	7	38
	小計	12	99
国内	検潮所	10	163
	GPS 波浪計	0	12
	海底津波計	9	12
	小計	19	187
合計		31	286

### 参考文献

津波観測値発表地点の増強,気象庁,津波警報・注意報の改善に関する最近の取り組み,平成20年,(気象庁HP:

<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/known/tsunami/newmethod.html#GPS>)

津波情報で発表する津波観測地点が増えます,気象庁,報道発表資料,平成21年3月17日(気象庁HP:<http://www.jma.go.jp/jma/press/0903/17c/20090317.html>)

津波予報の半世紀(1)我が国の津波予報業務,浜田信生,「地震ジャーナル」,2009,No.47,p1-12.

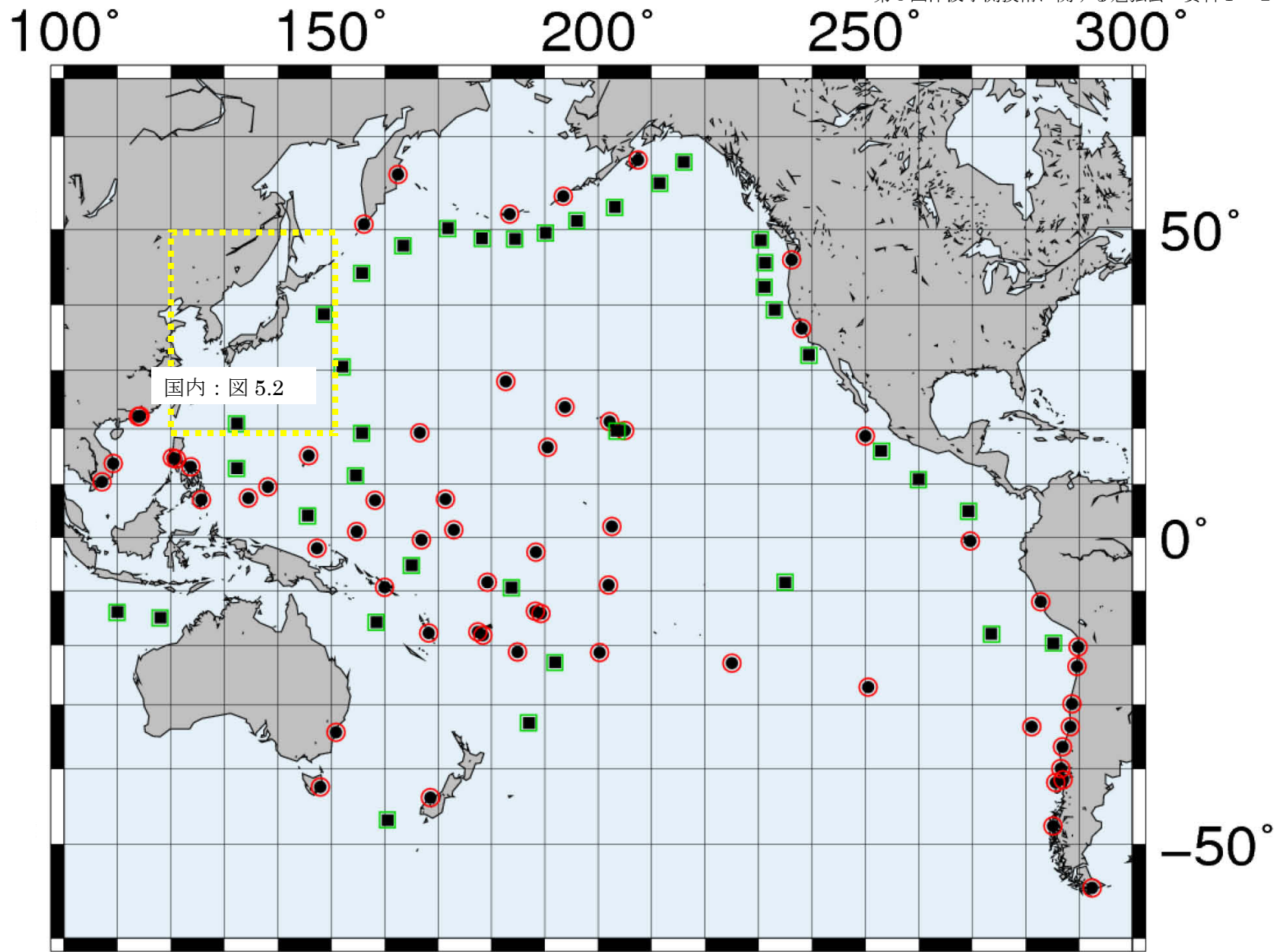


図 5.1 海外の計算波形出力地点 ( 検潮所(赤丸)、DART(緑四角) )

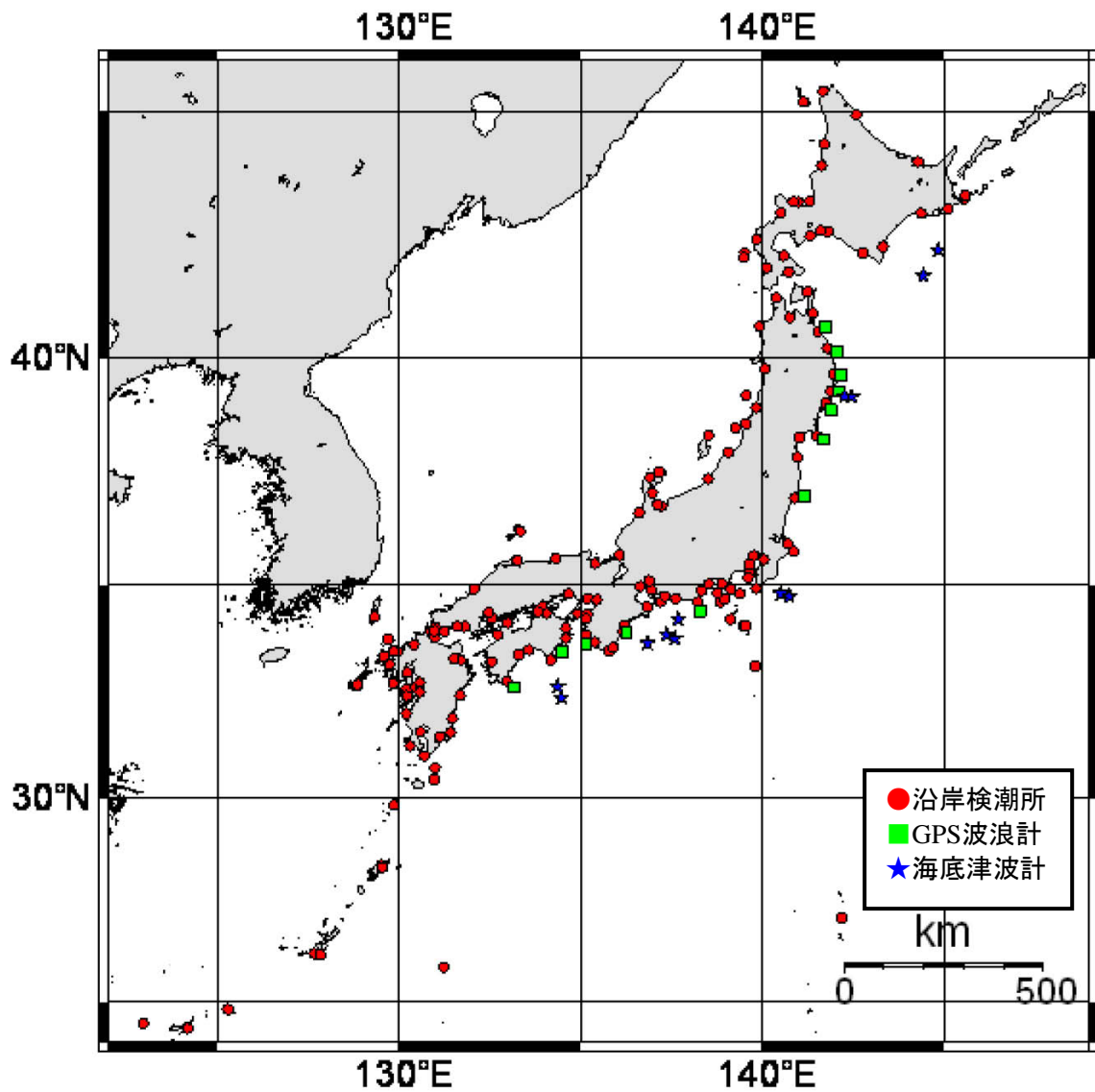


図 5.2 国内の計算波形出力地点（沿岸検潮所、GPS 波浪計、海底津波計）



## 6. 沿岸での津波高さの予測手法

日本の沿岸の各津波予報区の津波高さを予測する手法としては、近地津波の量的津波予報データベースでも採用されている、沖合に設定した予測地点の値からグリーンの法則を使い沿岸の値に変換する方法を用いる。図 4.2 で設定した想定断層モデルのうち、決定した震央から震央距離が最も近い断層モデルを選び、各予測地点での津波の高さは、その断層モデルによる高さとする。

マグニチュードは 7.5、8.0、8.5 の 3 種類のみのため、これ以外のマグニチュードが決定された場合は、図 6.1 で示すように、予測地点での津波の高さの対数がほぼマグニチュードに比例することから、次式を用いて、内挿・外挿を行なうことにより、津波の高さを推定する。

$$\log_{10}(H(i)) = (\log_{10}(H2(i)) - \log_{10}(H1(i))) / (M2 - M1) * (M - M1) + \log_{10}(H1(i))$$

ここで、

$H(i)$  : 求める  $i$  予測地点での津波高さ

$M$  : 地震のマグニチュード

$M2, M1$  : データベースのマグニチュード

$H1(i), H2(i)$  : マグニチュード  $M1, M2$  のデータベースの  $i$  予測地点の津波の高さ

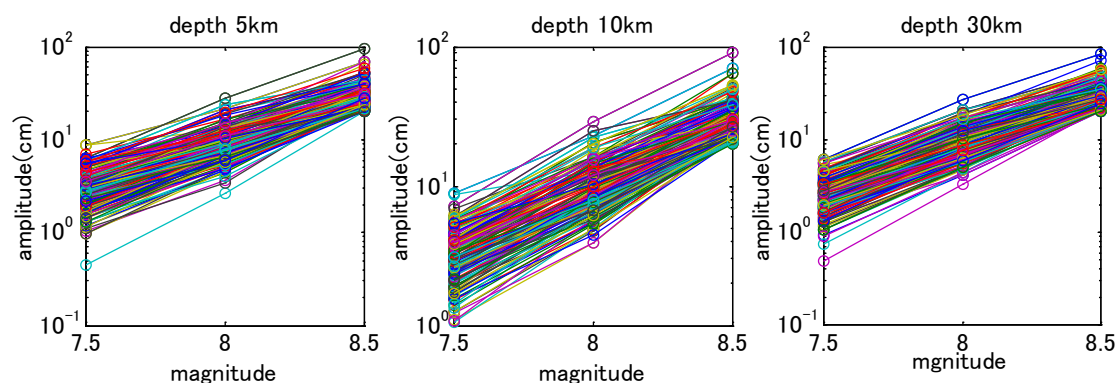


図 6.1 ニューギニア付近の想定断層 (図 3.3 に示した断層が M8.5 相当) による日本の予測地点 (20cm 以上) の津波高さとの関係。左から断層上端の深さ 5, 10, 30km の場合。

図 6.2 は断層の上端の深さにより、予測地点の津波の高さの変化を示したものである。M8.0 以上になると、深さ 60km までは、津波の高さの地震の深さへの依存は大きくないと考えられる。

一方、マグニチュードが 7.5 の場合では、地震の深さにより津波の高さは異なり、また、深さと高さとの関係を線形とみるのは難しい。一般に深さの精度は震央、マグニチュードに比べてよくはないが、近年のグローバル地震観測網の活用や CMT 解の精度向上により、遠地地震の深さについての情報も得られつつある。このため、ニューギニア付近だけでなく、他の場所についても、震源の深さと津波の高さとの関係を調査し、津波の高さと深さとの経験式を作成し、

地震の深さに応じた津波の高さを予測することを考えている。

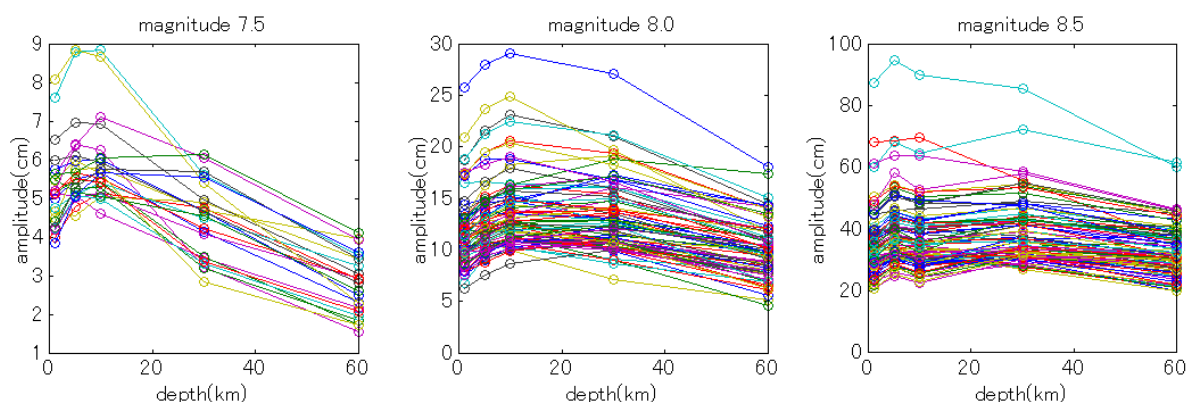


図 6.2 ニューギニア付近の想定断層による日本の予測地点の津波高さとの関係。左からマグニチュード 7.5、8.0、8.5 の場合。

### 7. まとめ

各章で述べてきたデータベースの内容を、現行データベースの内容との比較の形で、表 7.1 にまとめる。新しいデータベース構築は、平成 22 年度中に開始する予定である。

表 7.1 現行データベースと次期データベースとの違い

		現行データベース	次期データベース
発生(想定断層モデル)	場所	M8.5 の断層で 130 地点 (過去に大きな地震の発生した場所)	M8.5 の断層で 320 地点 (過去に大きな地震の発生した場所+その間を埋める)
	断層の置き方	図 4.1(b)参照 (断層中心をそろえる)	図 4.1(a)参照(M8.5 の中に M7.5 を 4 つ、M8.0 を 2 つ設定する)
	マグニチュード	M8.5、M7.5	M8.5、M7.5、M8.0
	メカニズム	走向、傾斜角: 過去地震を参考に設定、すべり角: 90 度(固定)	
	深さ	0km(1 通り)	10km(1 通り)
	断層総数	260 個	1280 個
地殻変動計算方法	Okada(1985)		
伝播	支配方程式	非線形長波 (100m 以浅で移流項、摩擦項考慮。コリオリ項は 5 分格子領域で考慮。)	非線形長波 (100m 以浅で移流項、摩擦項考慮。コリオリ項は 1.5 分格子領域で考慮。)
	数値解法	差分法(スタッガード・リーブフログ差分、陽解法)	

	座標系	球面座標	
	計算格子間隔	5分+1分+20秒接続計算 (外洋:5分 日本付近:1分 検潮所付近:20秒)	1.5分+30秒接続計算 (外洋:1.5分 海外検潮所付近、日本付近:30秒)
	海底地形データ	5分格子:ETOPO5分 1分格子:500m格子水深データ(海上保安庁)他 20秒格子:海図読み取り	1.5分格子: GEBCO30秒データ(2009年11月版)から1.5分へ間引いて使用。 30秒格子:JTOPO30データ
出力	津波波形出力地点数(海外)	検潮所:5地点、DART:7地点	検潮所:61地点、DART:38地点
	津波波形出力地点数(国内)	検潮所:10地点(南鳥島を含む)、GPS波浪計:0地点、海底津波計:9地点	検潮所:163地点(南鳥島を含む)、GPS波浪計:12地点、海底津波計:12地点
	津波予報区のグレード予測方法	沖合予測地点の出力値を沿岸の高さにグリーンの法則を用いて換算	