

気象庁の津波の予測手法に関する技術情報

平成 25 年 10 月 21 日
気象庁

改訂履歴

改訂年月日	改訂内容
平成 2 5 年 1 0 月 2 1 日	初版

利用にあたって

図版作成の一部には、GMT(Generic Mapping Tool[Wessel,P., and W.H.F.Smith, New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS Trans. Amer. Geophys. U., vol.79 (47), pp.579, 1998]) を使用した。

目次

第1章 津波予報の技術の概要

- 1. 1 津波予報の概要
- 1. 2 量的津波予報の導入
- 1. 3 気象庁の津波警報に必要とされるシステムの条件
- 1. 4 数値シミュレーションとは
- 1. 5 津波予報データベース構築の流れ

第2章 津波予報データベースの構築（1）

～数値シミュレーションの実施と予測値の格納～

- 2. 1 支配方程式
- 2. 2 断層パラメータの設定
- 2. 3 数値シミュレーションに与える初期値
- 2. 4 数値シミュレーションの実施
- 2. 5 沿岸での津波の高さの取得（グリーンの法則の適用）
- 2. 6 高さに関する計算値のデータベースへの格納
- 2. 7 到達時刻に関する計算値のデータベースへの格納

第3章 津波予報データベースの構築（2）

～データベースから震源情報に対応した予想高さや到達予想時刻の算出～

- 3. 1 津波予測に用いる最適な予測値の取得
 - 3. 1. 1 概要
 - 3. 1. 2 手法の選択
 - 3. 1. 3 震源の深さとマグニチュードに関する内挿
 - 3. 1. 4 深さ 100km 以上の場合の外挿に代わる処理
 - 3. 1. 5 震源位置に関する内挿法と最大危険度法
 - 3. 1. 5. 1 内挿法
 - 3. 1. 5. 2 最大危険度法
 - 3. 1. 6 到達予想時刻の算出
- 3. 2 地震発生メカニズムを活用したデータベースの構築

第4章 遠地津波予報

- 4. 1 遠地津波予報の概要
- 4. 2 遠地津波データベースを用いた遠地津波予報
 - 4. 2. 1 遠地津波データベースを用いた遠地津波予報の概要
 - 4. 2. 2 遠地津波データベースの予測値を求めるための数値シミュレーション
 - 4. 2. 3 遠地津波データベースにおける想定断層の配置
 - 4. 2. 4 想定断層の深さとマグニチュード
 - 4. 2. 5 想定断層の断層パラメータ
 - 4. 2. 5. 1 断層の走向と傾斜
 - 4. 2. 5. 2 断層面とすべり量
 - 4. 2. 6 遠地津波データベースからの検索手法
- 4. 3 津波の観測値を用いた遠地津波予報

- 4. 3. 1 津波の観測値を用いた遠地津波予報の概要
- 4. 3. 2 海外検潮データの活用
 - 4. 3. 2. 1 利用可能な海外検潮データ
 - 4. 3. 2. 2 海外検潮データの活用方法
- 4. 4 リアルタイムシミュレーションを用いた遠地津波予報
 - 4. 4. 1 CMT 解等を用いたリアルタイムシミュレーション
 - 4. 4. 2 津波の観測波形を用いたリアルタイムシミュレーション
- 4. 5 過去記録の活用
- 4. 6 津波伝播図の活用

第5章 津波警報等の発表

- 5. 1 津波警報等の発表
 - 5. 1. 1 マグニチュード過小評価判定による津波警報等の発表
 - 5. 1. 2 第1波の到達予想時刻
 - 5. 1. 2 予想される津波の高さ
 - 5. 2 津波警報等の切替え及び解除
- <参考> M8 を超える巨大地震に対する津波警報についての補足

別紙 沖合予測地点および津波予報データベースの設定位置

第1章 津波予報の技術の概要

1. 1 津波予報の概要

気象庁の津波警報や注意報は、1999年4月から数値シミュレーションの技術を活用し、津波の高さの予測値を用いる方法を採用している。この方法は1999年4月以前の津波判定図による経験的な手法と比べる形で「量的津波予報」と呼ぶこともある。

気象庁の津波予報は、数値シミュレーションを、あらかじめ日本周辺に断層を設定して数万通りについて行い、データベース化しておき、地震が発生した際には、地震観測データの解析結果から求められた地震の発生場所（緯度・経度・深さ）・マグニチュードに対応するデータベースを検索し、沿岸の津波予測値を求めるものである。この予測値に基づいて、日本の沿岸を66に区分した津波予報区毎に津波警報・注意報等を発表している。

本章では、この量的津波予報の原理について述べる。

1. 2 量的津波予報の導入

従来の津波判定図による予測では、震央距離別の予測しか行えず、現実の津波の指向性や地形による特性を考慮するのが困難であった。また、地域ごとの予測ができないため津波予報区の細分化ができないことから、地域によっては過大な防災対応を行うことになり、津波予報に対する信頼性が損なわれるおそれがあった。

量的津波予報導入により、津波予報区を従来の18から66区分に細分化したことにより、主に県単位での防災対応に資することが可能となった。

1. 3 津波予報に必要とされるシステムの条件

数値シミュレーションによる方法は、コンピュータの能力、震源要素の不確定性、計算格子の条件や境界条件など、さまざまな制限を受けている。また、平成5年（1993年）北海道南西沖地震の際に奥尻島へ約3分で津波が来襲し被害を被ったように、日本は周囲を海に囲まれた環太平洋地震帯に位置しているため、地震発生後すぐに津波の来襲を受ける状況にある。こうした中、必要とされるシステムとしては、地震発生後迅速に発表できるシステムであるとともに、効率的な津波の予測方法を用いる必要がある。

1. 4 数値シミュレーションとは

津波は海水の運動で、物理の運動の方程式に従う。それをコンピュータで数値計算して解を求め、予測値を求めるのが数値シミュレーションである。

海底で地震が発生し、海底の断層運動などにより海水面に与えられた擾乱は、そのままとどまることはなく、大気と海洋の密度差があるために、重力にしたがって海面を元に戻そうとする力が働く。この運動は、運動量保存則と質量（流量）保存則という物理の運動方程式に基づいて決まる。簡単な場合では、初期条件と境界条件のもとで運動方程式が一意に決まり、解析的に水面の形状が決定される。

実海底地形のもとで解析的に解くことは、非常に単純な地形の場合を除いて簡単な事ではない。そこでコンピュータを用いて数値的に解くことが必要となる。わずかな時間が経過したときの運動量保存と流量保存則を解いていき、これを積み重ねていくことで数時間経過後の水面の予測とする。このような数値解（数値シミュレーションで得られた解）をデータベースに保存し、津波の予測に用いている。

1. 5 津波予報データベース構築の流れ

津波予報データベース構築の流れを図 1. 1 に示す。各内容については、第 2 章以降で説明する。

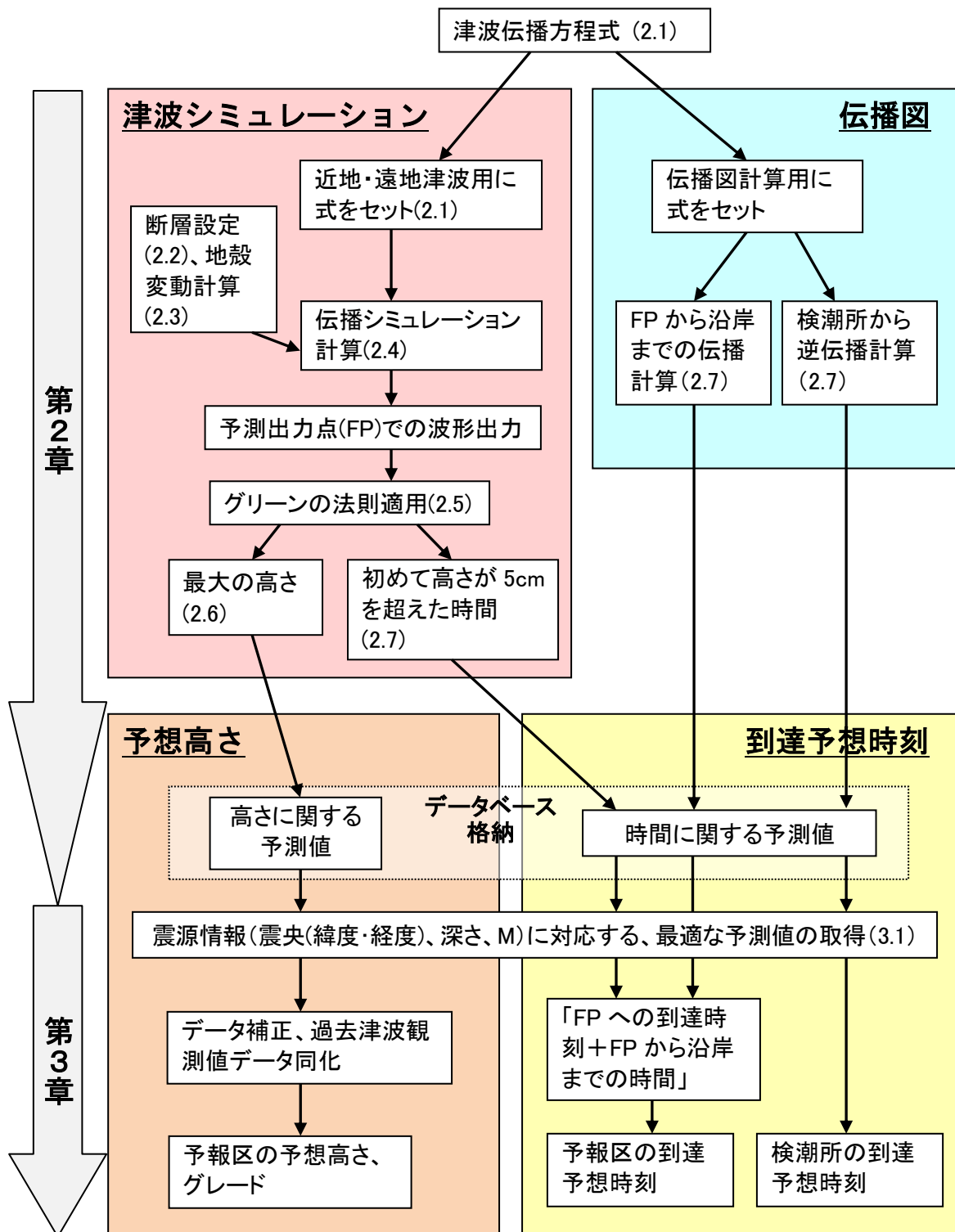


図 1. 1 津波予報データベース構築の流れ (括弧内の数字は対応する節の番号を示す)
※FP とは、沖合予測地点 (Forecast Point、2. 4 節で後述) を意味する

第2章 津波予報データベースの構築（1）

～数値シミュレーションの実施と予測値の格納～

2. 1 支配方程式

実際に数値シミュレーションに用いられる津波の方程式を示す。方程式は、移流項と海底摩擦項を含む非線形長波近似の運動方程式、水平方向の2方向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。

$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -fV_y - g \frac{\partial h}{\partial x} - C_f \frac{V_x \sqrt{V_x^2 + V_y^2}}{d+h} \quad (2-1)$$

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

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{V_x(h+d)\} + \frac{\partial}{\partial y} \{V_y(h+d)\} = 0 \quad (2-3)$$

ここで、座標軸の x 方向を東向き、y 方向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である。また、 C_f は海底摩擦係数であり、マンニングの粗度係数 n （ここでは一律に 0.03 とする）を用いて以下のように表される。

$$C_f = \frac{gn^2}{(d+h)^{1/3}} \quad (2-4)$$

移流項と摩擦項は水深が 100m 以下の場合にのみ考慮し、コリオリ力は遠地津波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津波予報データベース、遠地津波データベースともに、球面（地球）座標系のデータを使用しているため、方程式系も球面座標系に変形して適用している。

2. 2 断層パラメータの設定

地震は断層運動により生じると考えられている。この断層運動を規定するためのパラメータがいくつかある。断層パラメータを設定し、地震発生を模して津波のシミュレーションを行い、過去の地震での津波の検潮記録などの観測値と比較することで、設定した断層パラメータを検証することができる。

津波予報のため、前もって、これから生じる地震津波についてシミュレーションしておく必要があるが、それに必要となる、その地震の特徴に合った実際の精密な断層パラメータが事前には分からない。そこで、マグニチュードによる地震の平均像や最も津波を発生しやすい断層を設定しておくことにする。

図 2. 1 に、数値シミュレーションに必要とされる断層パラメータを示す。

まず、断層の長さ L (km)、幅 W (km)、すべり量 D (m) は、マグニチュードの関数として経験式で、宇津(1984)により、

$$\log L = 0.5M - 1.9 \quad (L/W=2) \quad (2-5)$$

$$\log D = 0.5M - 3.2 \quad (2-6)$$

で表す。

また、地震モーメント M_o (Nm) は次の(2-7)式で定義されるとともに、モーメントマグニチュード M_w との間には(2-8)式の関係が知られている。

$$M_o = \mu LWD \quad (2-7)$$

$$\log M_o = 1.5 M_w + 9.1 \quad (2-8)$$

ここで、 $M=M_w$ と仮定し、(2-5)式から(2-8)式を組み合わせることで計算することにより、剛性率 $\mu \doteq 2.5 \times 10^{10}$ (N/m²)となる。

断層の傾斜角(dip angle)、走向(strike angle)、すべり角(slip angle)は、過去の地震の地域特性を加味して地震の平均像で与えられることが良いが、不確かであるので、防災上の観点から、最も津波を発生させる、傾斜角 45 度、すべり角 90 度の純粋な逆断層とする。また、走向については海溝軸に沿う方向とし、付近に海溝軸のない場合には、同じく防災上の観点から海岸線に沿った方向とする。また、データベースを作成するためのマグニチュード、深さについては、表 2. 1 の間隔とする。図 2. 2 には近地の津波予報データベースのための地震の断層の場所を示す(日本周辺では 0.5 度間隔、その他の領域では 1.0 度間隔)。なお、深さは断層中心で設定し、断層上端が 0 km 未満になった場合には、断層上端が 0 km となるまで押し下げてシミュレーションを実施する処理をとっている。

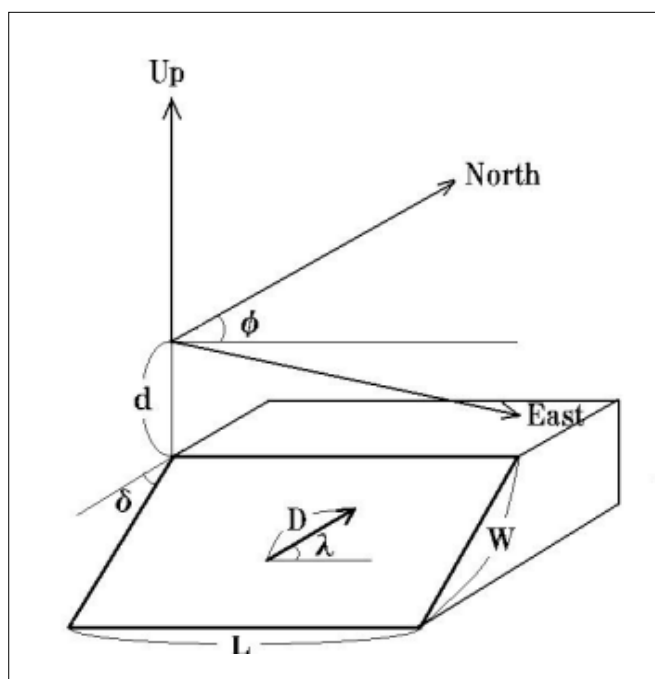


図 2. 1 断層パラメータ

L:断層長さ(km)、W:幅(km)、D:すべり量(m)

d:断層上端深さ(km)、 ϕ :走向(度)

δ :傾斜角(度)、 λ :すべり角(度)

表 2. 1 データベースの 1 つの [緯度・経度・走向] に対するパターン数

マグニチュード (4 通り)	M8.0、 M7.4、 M6.8、 M6.2
深さ(断層中心位置) (6 通り)	0km、 20km、 40km、 60km、 80km、 100km
メカニズム (1 通り) 傾斜角、すべり角の組合せ	45 度、90 度 (純粋な逆断層)

なお、実際のデータベースの設定位置と断層の走向のデータの入手方法については、別紙を参照。

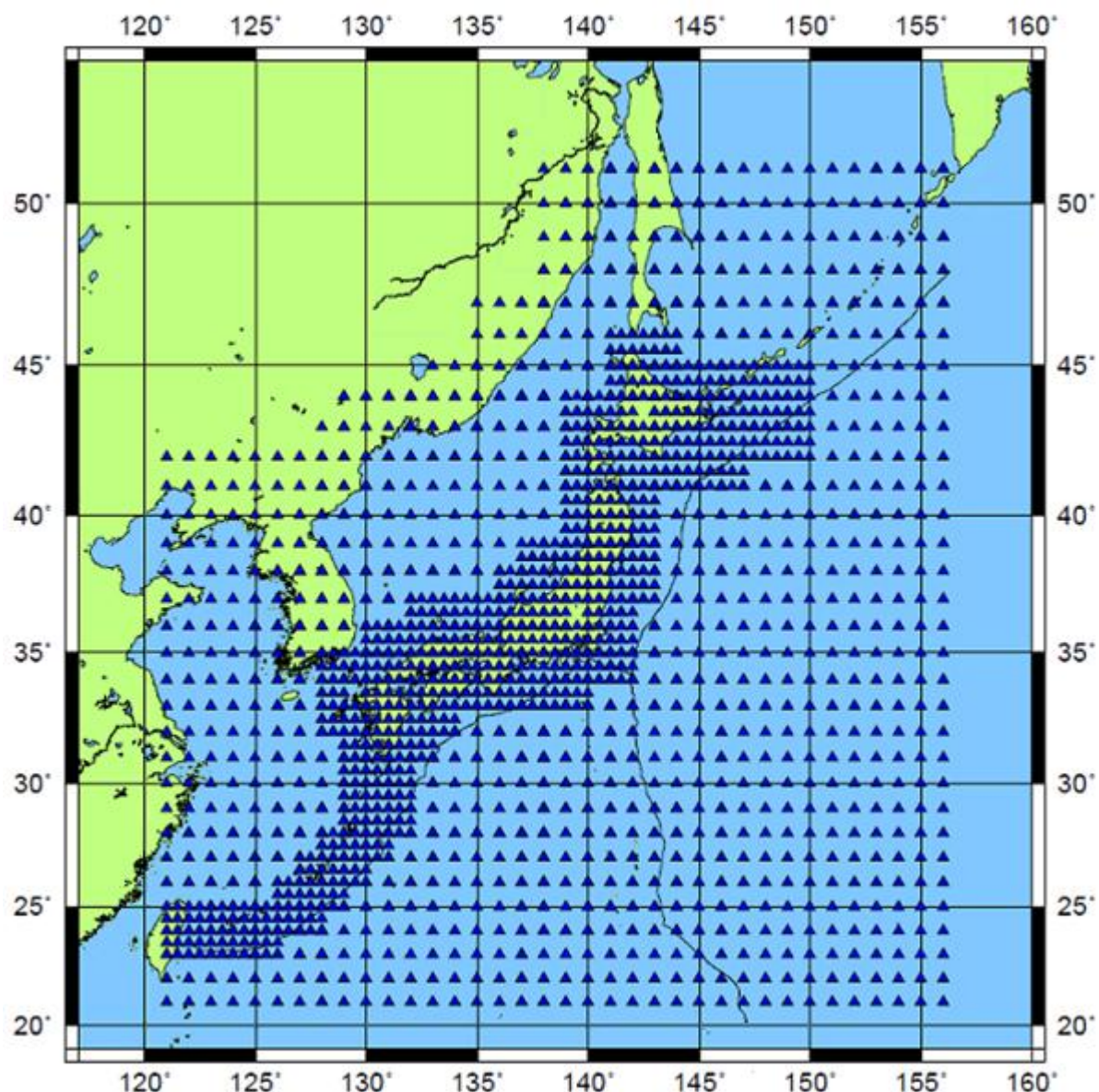


図 2. 2 データベースの断層設定場所
日本列島周辺は 0.5 度間隔、そのほかの領域は 1.0 度間隔で設定

2. 3 数値シミュレーションに与える初期値

津波シミュレーションを実施するには、まず、地震の断層運動により生じる海面の初期の変化（盛り上がり、下がり）を与える必要がある。

2. 2 節で設定した断層パラメータを用いた場合の断層運動による海底面の鉛直変形は、弾性体理論により計算することができる (Okada (1985))。断層破壊の伝播速度は津波伝播速度よりもはるかに速い場合が多いため、たいていの場合、海底面の鉛直変形がそのまま海面の初期変形となる、と考えて良い (例えば、チリ津波の場合、破壊伝播速度は 16200km/h (4.5km/s) である (宇津 (1984)) 一方で、津波伝播速度は水深 4000m とした場合、約 720km/h である)。こうして得られる海面の初期変形を 1 分かけて海面を盛り上げて、津波シミュレーションをスタートさせている。

2. 4 数値シミュレーションの実施

(2-1)式から(2-3)式を、差分法で数値的に時間発展の解を求める(Satake(1995))。差分スキームとしては、陽解法のスタッガードリーブフロッグ法とする。

図2. 3に計算領域を示す。空間格子サイズは計算全領域で1分、時間間隔は3秒、積分時間は8時間分としている。境界条件は、陸との間は鉛直壁とし、計算領域の端では自由透過条件としている。

沿岸付近の水深の浅い領域で津波波形を正確に得るには、1波長あたり20個かそれ以上の格子を確保(Shuto(1986))し、非常に細かい格子間隔の海底地形データを用いて計算を行う必要があるが、それには非常に時間がかかる。この困難を克服するために、沿岸での予測値は、沿岸から数kmから数十kmの沖合予測地点(Forecast Point、以下FPと呼ぶ)での値(後述する2. 5節の方法で最大値をとる)をグリーンの法則で沿岸での値に換算する。ここで、シミュレーションは陸側境界まで行っている。グリーンの法則の適用については次節で述べる。また、実際に設定しているFPの場所については、別紙を参照のこと。

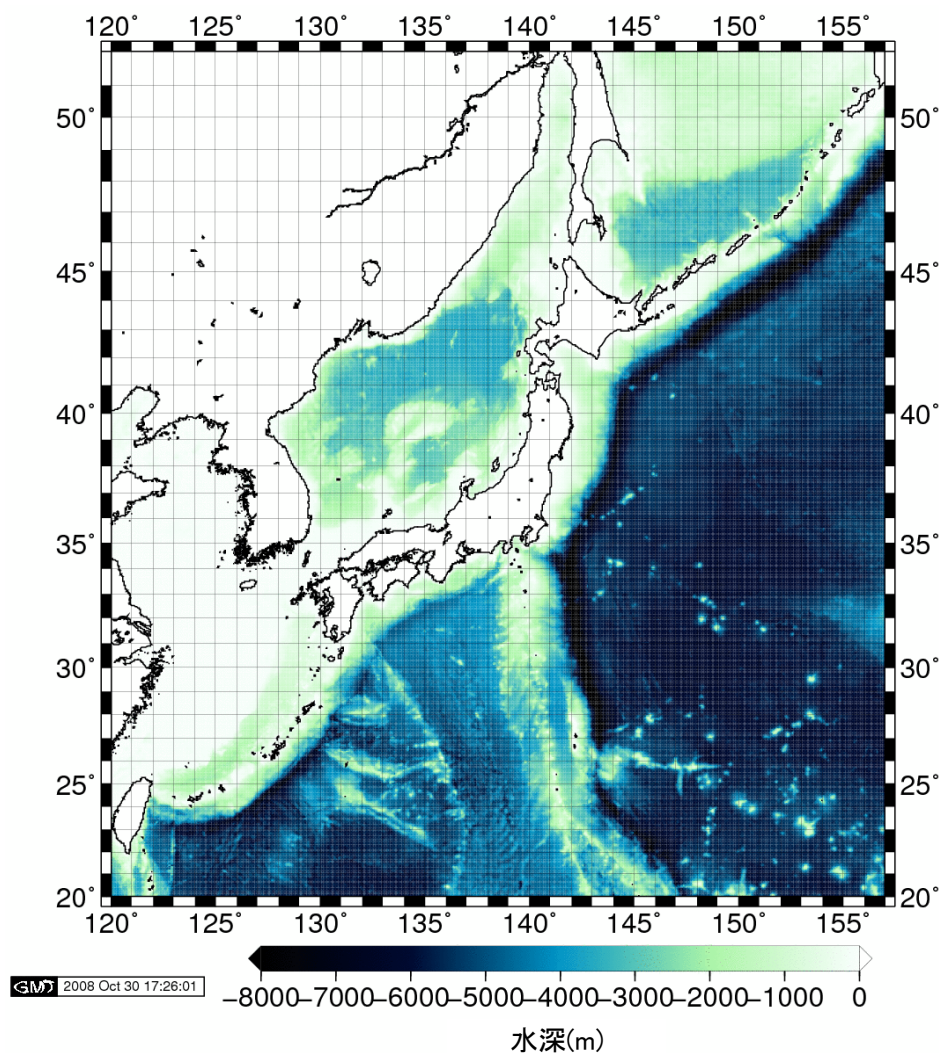


図2. 3 計算領域 (北緯20度から52度、東経120度から157度の範囲)

2. 5 沿岸での津波の高さの取得（グリーンの法則の適用）

沿岸での津波の高さを推定するため、FP で推定された高さにエネルギー保存則であるグリーンの法則を適用する。津波の波面は海岸線にほぼ平行で幅方向に変化のない場合を考えると、図 2. 4 に示すように、グリーンの法則は沖合の FP での高さに沿岸と FP との水深の比の 4 乗根を掛けたもので表される。

$$H = \sqrt[4]{\frac{h_1}{h}} H_1 \quad (2-9)$$

FP は数値シミュレーションの計算波形がある程度正確に得られ、かつ沿岸にできるだけ近づけた点を設定している。また、沿岸として仮想的に水深 h が 1 m の地点を想定している。

なお、この方法は FP が波源域に含まれない場合の適用方法を想定している。FP が波源域に含まれる場合は、津波の波面が海岸線に並行であるという前提条件が大きく崩れることになる。断層設定位置が、FP の真上にあたる場合には注意が必要である。（2. 7 節も参照のこと）

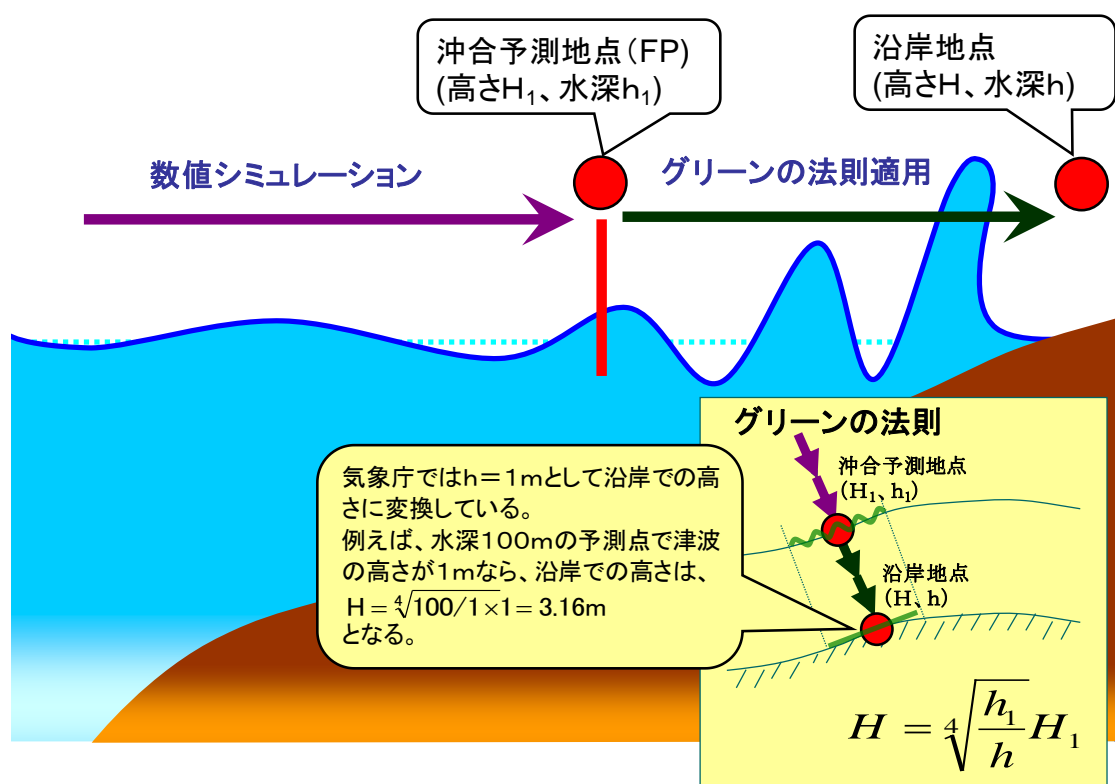


図 2. 4 グリーンの法則の適用

沿岸での津波の高さ推定のためにグリーンの法則を適用することの妥当性を、TUNAMI-N2(Imamura(1997))プログラムを用いて調査した。このプログラムは、津波予報データベースを作成するために用いている気象庁のプログラム (Satake(1995)) と物理の方程式の表現は同様なもので、差分格子を段階的にネスティング計算を行い、陸側境界で遡上させたものである。計算格子(メッシュ)は 150m メッシュまで使用してネスティングし、沿岸に沿ったメッシュでの津波の高さを「真値」とみなす。計算

領域全体を 1350m メッシュ（≒ 1 分メッシュ）でも計算し、この結果の FP での値にグリーンの法則を適用して沿岸での津波の高さを推定し、「真値」と比較した。

津波予報データベース構築に用いられている FP の例を図 2. 5 に示す。この図には、北海道の南東沖に M8.0 と M6.8 の 2 つの震源断層モデルをそれぞれ赤色と紫色の四角で描いている。比較した結果を図 2. 6 に示す。両方の地震に対して、1350m メッシュを用いて FP での値にグリーンの法則を適用して求めた沿岸での津波の高さ（青四角）と、150m メッシュを用いて計算した各沿岸の区切り内の津波の高さの平均値（橙四角）と中央値（赤丸）はだいたい一致している。ここで沿岸の区切りは、FP 同士の間接点で与えており（図 2. 5、上方の拡大図）、中央値や平均値は沿岸の区切り内の中心への投影の代表値である。

この結果は、海底地形データの細かいメッシュで膨大な時間をかけて沿岸での平均的な津波の高さを求める代わりに、沖合の FP での津波の高さにグリーンの法則で換算して求めても同程度の値が得られることを意味する。これが、気象庁の津波警報・注意報に用いる高さの予測値の意味である。ただし、この結果は北海道南部の平坦な海岸線での結果であることに注意しておく必要がある。岩手県沿岸のリアス式海岸の複雑な海岸線で同様に行った結果では、FP での津波の高さにグリーンの法則を適用した値は、直接の沿岸での高さの代表値に比べて大きい値となり、この傾向はマグニチュードが大きくなるほど顕著であった（図は省略）。

また、図 2. 6 には、1350m の粗いメッシュを用いて沿岸での津波の高さを直接推定した結果は過小評価となってしまうことを合わせて示している。この傾向は、波長の短い津波を発生させるマグニチュードの小さい地震で顕著である（図 2. 6、下図）。したがって、メッシュサイズが典型的な津波の波長に比べて十分に細くない場合には、沿岸に沿ったメッシュの値を直接津波の高さとするのは適当ではない。

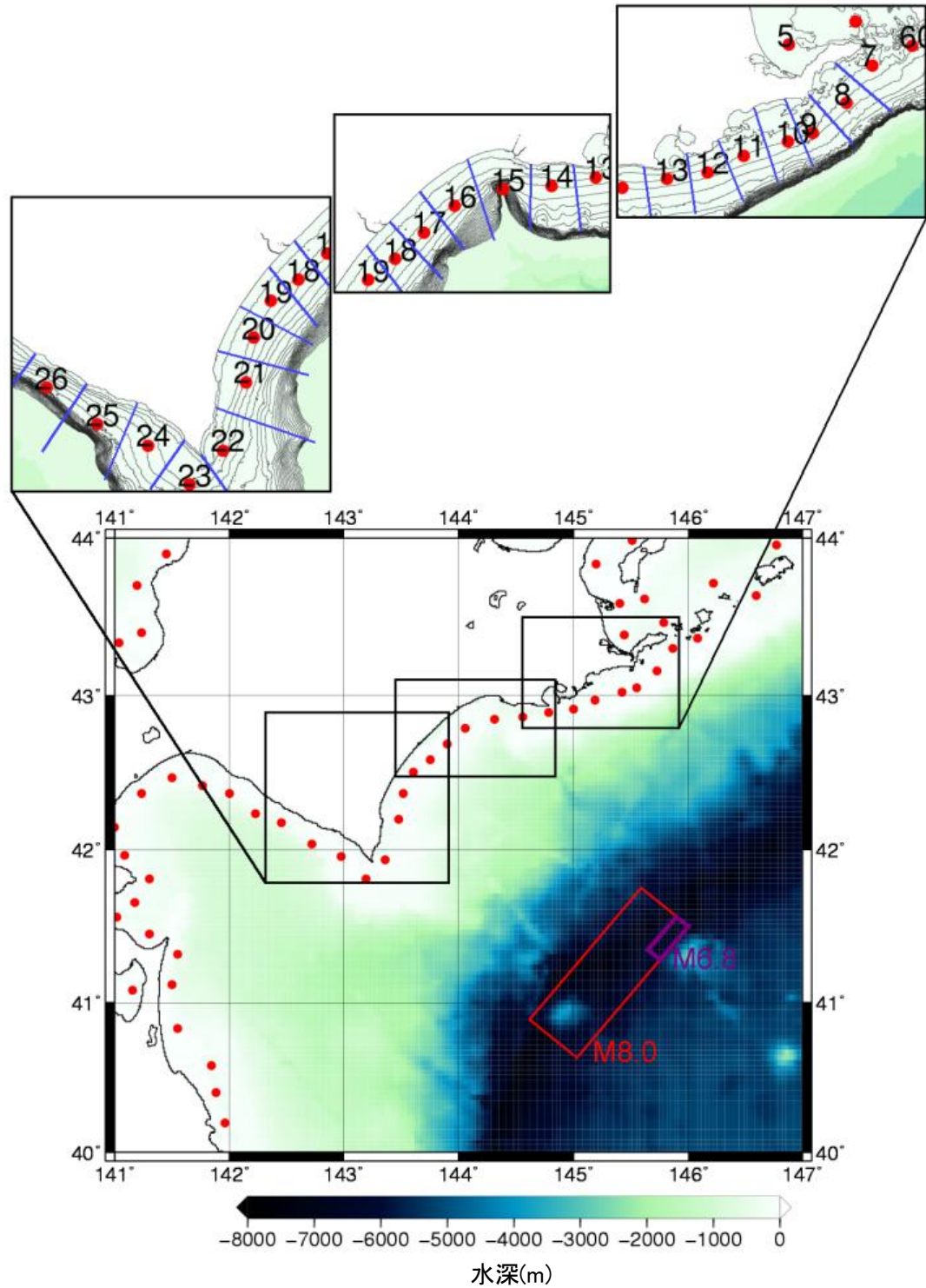


図 2. 5 グリーンの法則の妥当性の調査に用いた断層と FP
 想定断層を、赤四角 (M8.0) と紫四角 (M6.8) で設定
 FP を赤丸で示し、図の上方には FP どうしの中点の区切り線 (青線) を示す
 黒線は水深の等値線を示す

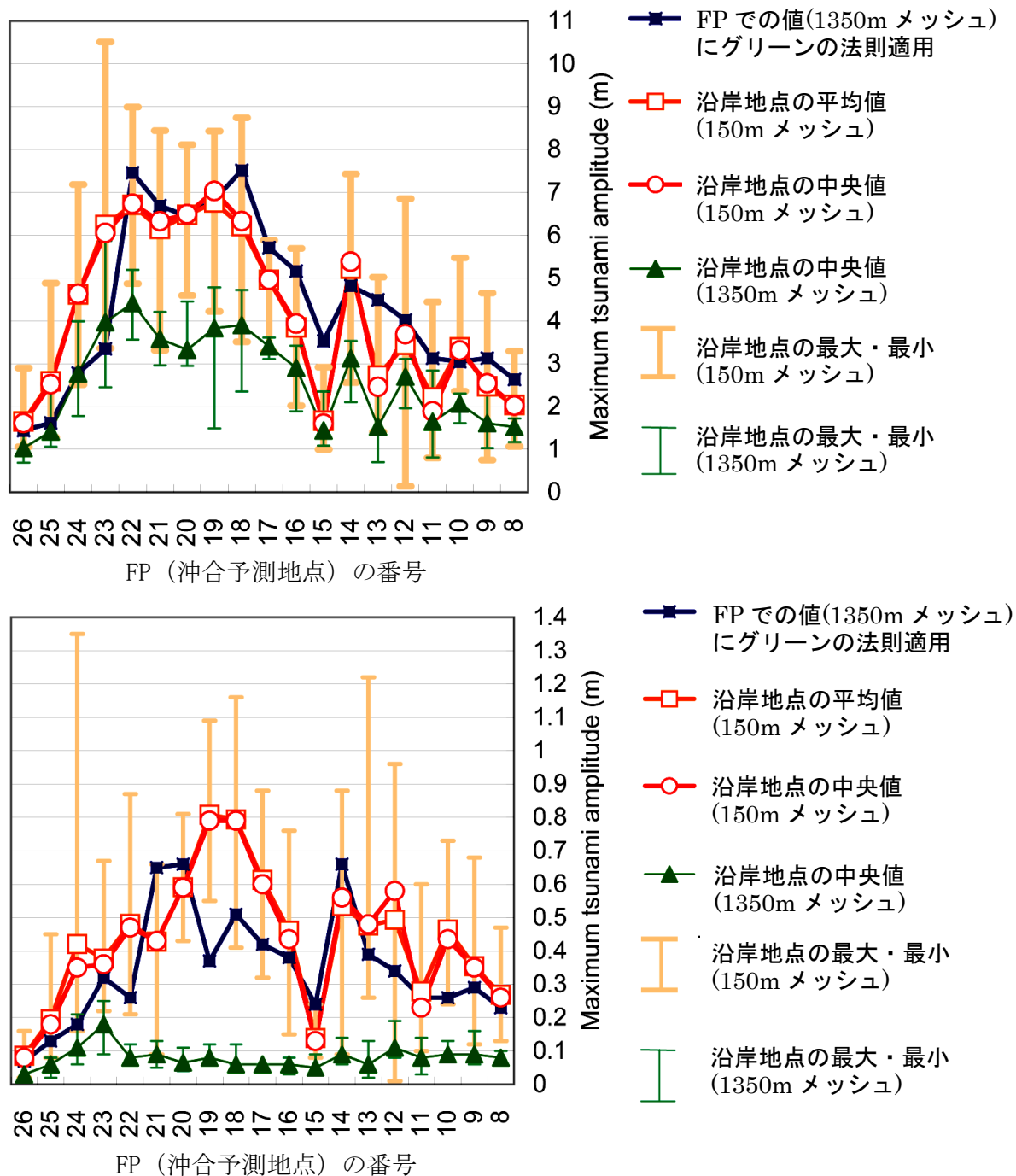


図 2. 6 グリーンの法則の妥当性の調査結果

FP での津波の高さ値をグリーンの法則で換算して沿岸の値（青四角）と、直接の沿岸点の値（沿岸に沿った計算メッシュの値）の図 2. 5 で与えられる FP 区切り内の代表値（平均値（橙四角）、中央値（赤丸））の比較

2. 6 高さに関する計算値のデータベースへの格納

シミュレーション結果の FP での出力波形から FP での最大の高さを得て、データベースに格納するプロセスを説明する。

FP での最大の高さは、波形が単調増加（減少）から単調減少（増加）に転じた変曲点を検出し、その時刻から 6 時間分の波形についての最大値・最小値の絶対値を取り出し、高さとする。ここで、波形全体での最大の高さを取り出しているわけではない

ことに注意する。この最大の高さを取り出すロジックは、FP が波源域に入った場合に、地殻変動の値にグリーンの法則を適用してしまうのを回避するための手段としている。この処理によってすべて回避できるわけではないが、波源域の中心にある FP については初期水位から単調減少するため回避が可能となる。図 2. 7 は FP が波源域付近にある場合について、波源と FP の関係を模式的に表したものである。このような場合、波形 C の一番影響の大きいものが回避される。

この処理を全 FP に対して行い、得られたデータをデータベースに格納する。

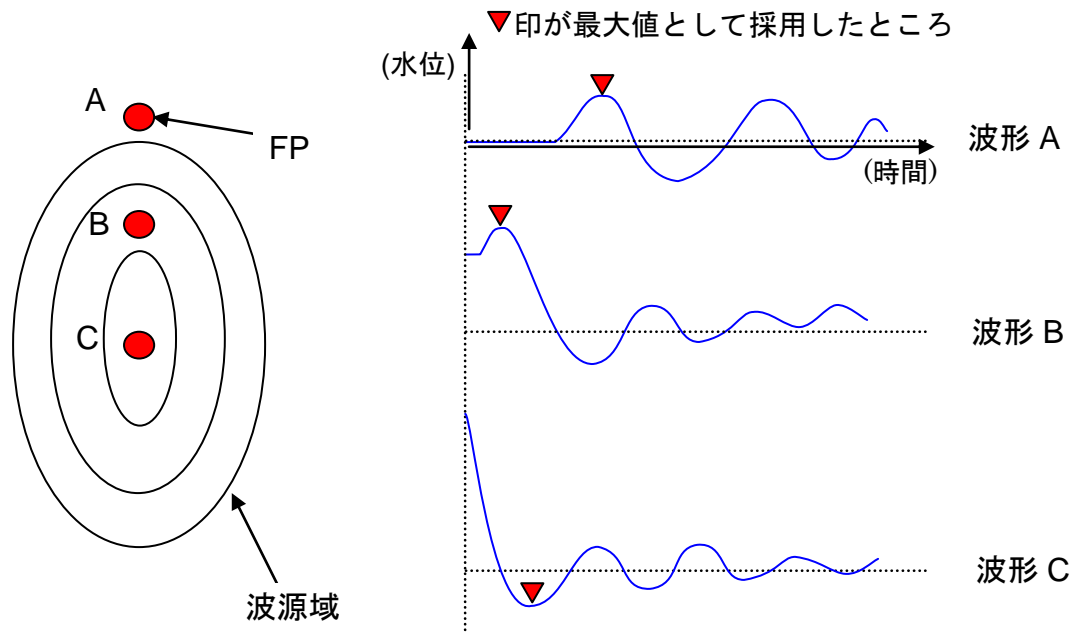


図 2. 7 FP (赤丸) が波源域に入る場合の FP と波源域の位置関係と得られる波形の模式図
 波形 A は FP が波源域から外れる場合
 波形 B は FP が波源域内だが中心を外れた位置にある場合
 波形 C は波源域の中心にある場合

2. 7 到達時刻に関する計算値のデータベースへの格納

津波の到達時刻は、津波の第一波の立ち上がり（下がり）の始まる時刻である。この予想は、津波の高さの情報とともに重要な情報である。

この値を算出する方法として、FP での高さにグリーンの法則を適用した値が初めてプラス 5 cm を超えた、シミュレーション開始からの時間を記録（5 cm を超えなかった場合には、未到達として未到達を示す値を記録）し、この値を到達時刻と見なす。この時間は、第一波の波の形状をみて第一波の立ち上がり時刻を読み取ったものではないが、津波が有意の高さを現す時間であることから、これを津波の波源域から FP までの到達時間と見なすことは合理的である。この時間のデータをデータベースへ格納し、津波予報区に対する到達予想時刻に用いる。

FP は沖合にあるため、近くの沿岸まで到達するまでに、さらに数分から十数分かかかる。精度良く沿岸への到達時刻を求めるため、FP から沿岸までの伝播時間を加える必要がある。この時間を得る方法として、次に述べる「津波伝播図」を用いる。これにより得られた伝播時間(図 2. 8)をデータベースへ格納しておく。

津波伝播図とは、ある波源から津波の伝播速度として、長波の位相速度である \sqrt{gh} (g : 重力加速度、 h : 水深) (この式は (2.1) 式から (2.3) 式で移流、コリオリ、摩擦

を無視した場合に得られる波動方程式の位相速度である（もしくは分散関係を求めればよい）として、ホイヘンスの原理により、伝播経路をたどることで津波の伝播時間を求めるものである。

また、検潮所に対する到達予想時刻は、予報区に対する到達予想時刻と異なり、伝播図の情報のみで算出している。検潮所を波源とし、海域に対して伝播図を作成し、海域の各格子点での検潮所までの伝播時間をデータベースに格納する。

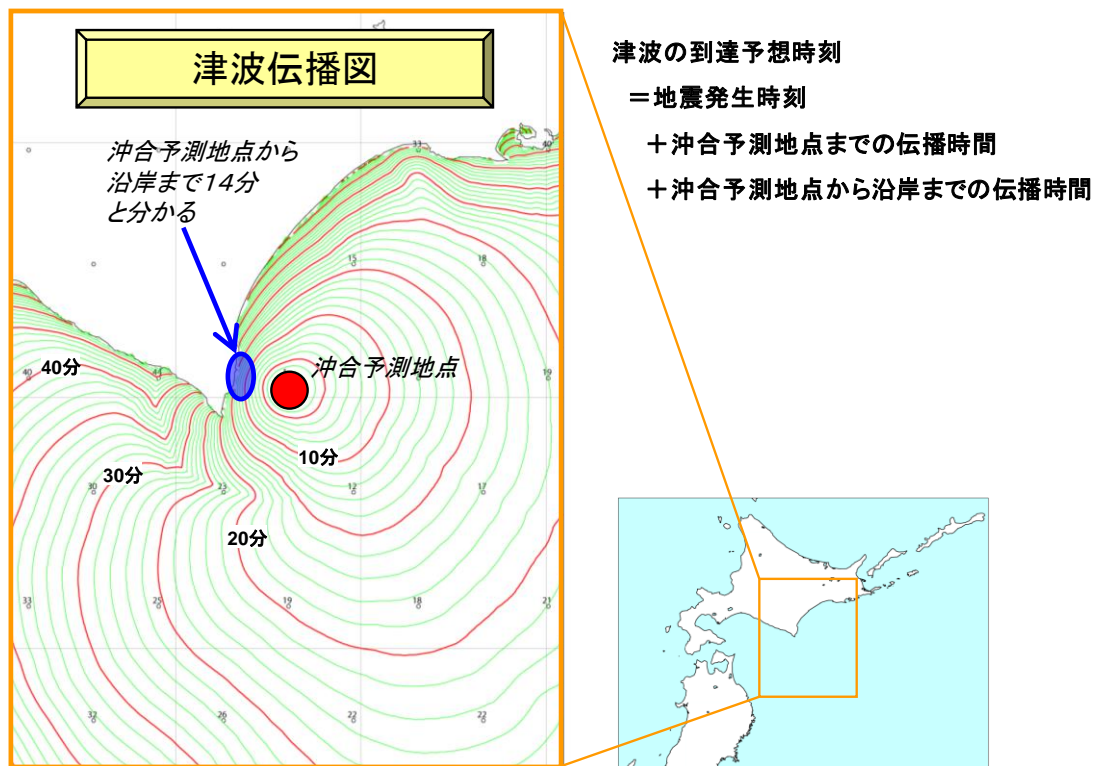


図2. 8 FP から沿岸までの伝播時間の算出

<参考文献>

宇津徳治(1984)：地震学(第2版)，共立出版，249.

Imamura, F.(1997) IUGG/IOC TIME PROJECT Numerical method of tsunami simulation with the leap-frog scheme, part 3(Programme lists for near field tsunami), IOC manuals and guides, vol.35.

Okada, Y.(1985) Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 1,135-1,154.

Satake, K.(1995) Linear and nonlinear computations of the 1992 Nicaragua earthquake tsunami., *Pure Appl. Geophys.*, **144**, 455-470.

Shuto, N. et al (1986) A study of numerical techniques on the tsunami propagation and run-up, *Sci. Tsunami Hazard*, **4**, 111-124.

第3章 津波予報データベースの構築（2）

～データベースから震源情報に対応した予想高さや到達予想時刻の算出～

3. 1 津波予測に用いる最適な予測値の取得

3. 1. 1 概要

2. 2節のと通りの断層位置（緯度、経度）、マグニチュードや深さの間隔でデータベースのデータが作られているが、一般に実際に震源決定した位置（緯度、経度、深さ）とマグニチュードと同じケースはデータベースにはない。したがって、最適なデータベースを選択するために、いくつかルールが必要となる。本章ではこの方法について述べる。

3. 1. 2 手法の選択

取得方法には、震源に最も近いデータベースを用いる方法、データベースの値の大きい方をとる方法など、いくつか方法が考えられる。ここでは、震源の深さとマグニチュードに関しては内挿を用い、震央位置に関しては、内挿を用いる手法と断層の水平位置の不確定性を考慮して、震央位置からマグニチュード等に応じた範囲のデータベースすべてのうち FP で最大となる位置をとる方法（最大危険度法）の2種類を用いている。

これらの方法を採用する理由としては、以下の内容が挙げられる。

- ① 浅い海域での非線形性の強い現象を含まないので、沖合出力点での値は内挿が可能であると考えられること
- ② データベースを内挿することにより任意の場所のデータは調整できるため、データベースの間隔は比較的広くてよいこと（例えば、最も近いデータベースを採用するという場合には、データベースの間隔が広いと誤差が大きくなってしまう）
- ③ 津波の高さの値を知るのが目的であり、津波の波形を観測記録に時系列としてフィッティングさせるものではないこと。

津波予報区ごとの津波警報・津波注意報のグレードは、上記の手法によって得られた予測値から決定する。1つの予報区に FP は単純に平均すると8個存在する。予報区の予測値は、内挿法・最大危険度法で得られた FP の値の中で、津波予報区で最大のものを採用する。

3. 1. 3 震源の深さとマグニチュードに関する内挿

FP で推定される津波の高さの対数の値は、概ねマグニチュードに関して正の相関、震源の深さに関して負の相関をもつ。4つのケース（2つの震源の深さと2つのマグニチュード）についての津波の高さの対数を計算して、それを2次元的に線形内挿し、最後に対数の値を津波の高さへ戻す。

データベースで作成してある津波の高さ η_1 と η_2 から η を求める際、高さ η の対数に、マグニチュード M 、深さ D が線形に対応させ、以下の式を用いる。図で示すと、図3. 1のとおり。

$$\log \eta = (1 - A) \log \eta_1 + A \log \eta_2 \quad (3-1)$$

ここで A は、深さに関して内挿する場合 $A = \frac{D - D_1}{D_2 - D_1}$ 、マグニチュードに関して内挿

する場合 $A = \frac{M - M_1}{M_2 - M_1}$ である。

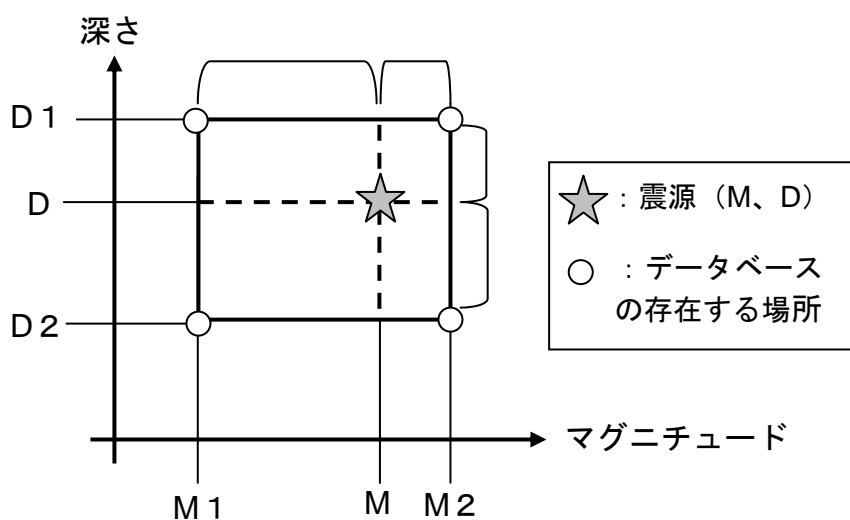


図3. 1 高さ η の深さ D とマグニチュード M に関する内挿

データベースの範囲外のデータを求めるには、図3. 2、図3. 3のように外挿を行う。

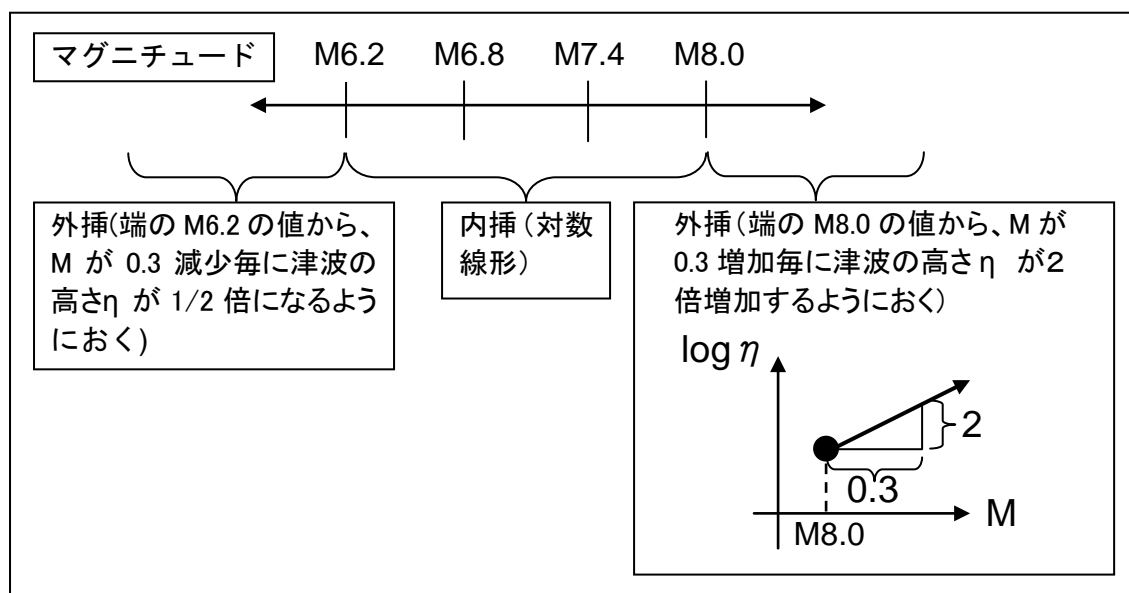


図3. 2 M に関する外挿

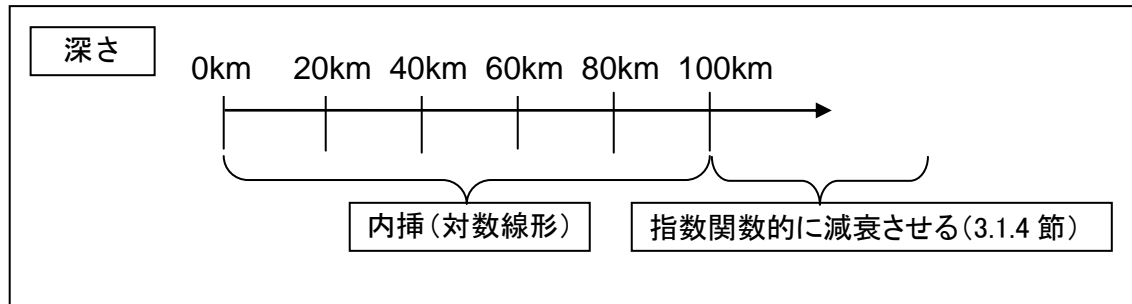


図 3. 3 深さに関する外挿

3. 1. 4 深さ 100km 以上の場合の外挿に代わる処理

震源の深さが 100 km 以上の場合には、(3-2) 式により、 z_0 を 100 km として任意の深さの震源での津波の高さを求める。

$$H(z) = \exp(\alpha \cdot (z - z_0) + \log(H_{z_0})) \quad (3-2)$$

$H(z)$: 震源の深さ z km のときの津波の高さ (m)

H_{z_0} : 震源の深さ z_0 km のときの津波の高さ (m)、データベースより求める

$\alpha = -0.0101$

3. 1. 5 震源位置に関する内挿法と最大危険度法

3. 1. 5. 1 内挿法

内挿法は、発生した地震の震源要素のうち緯度・経度について、水平面上で震央をとり囲むように配置された地震断層モデルのうち、もっとも水平距離の近い 4 つの想定断層による予想される津波の高さについて 2 次元の線形内挿を行う (図 3. 4)。震央位置や地震断層破壊領域の変化による予想される津波の高さの変化が比較的ゆるやかな、沿岸より離れた沖合の領域 (図 2. 2 のデータベース配置で 1.0 度間隔にモデル配置している領域) で発生した地震に対して適用する。

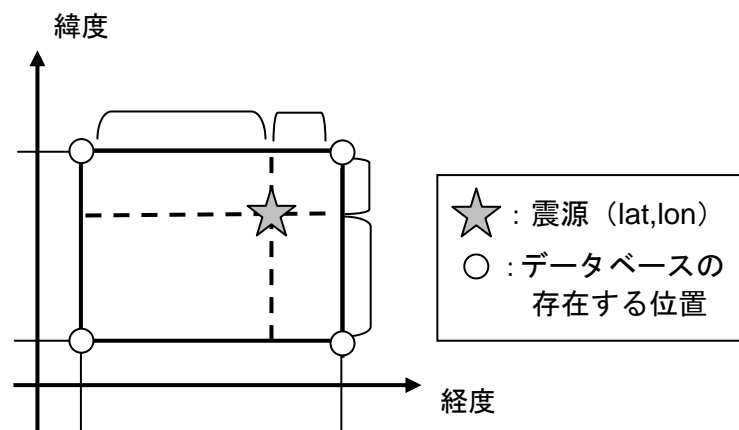


図 3. 4 高さの位置に関する内挿

3. 1. 5. 2 最大危険度法

沿岸近傍で発生した地震については、断層の推定位置が実際と異なった場合、震源近傍の沿岸においては津波の高さが予想と大きく異なる可能性がある。震源が断層面

上のどの位置にあるかを推定することは困難であることから、断層の相対位置について不確定性が残されている時点においては、防災上の安全を考慮し、とり得る断層（津波の波源）の広がりやを考慮したうえで津波の予測を行い、最悪のケースをもって津波警報・注意報を発表することとしている。

最大危険度法で選択される津波予測データベース内の想定断層の位置の模式図を図3. 5に示す。

震源は破壊開始点であるが、震源が矩形断層面の4隅のいずれかに位置する場合（赤い点線の範囲）が最も極端な場合に相当し、実際の地震断層は震源を中心とした場合との中間に位置する。そのため、震源位置から想定し得る全ての津波予測データベースの想定断層モデルを選択するため、震源（★）に最も近い検索用断層モデル（▲）の走向に応じて、震源を中心とした(2-5)式で与えられる長さや幅の長方形の検索対象範囲（橙色の領域）とする。そして、この範囲内に入るすべての想定断層モデル（●）を中心とした水色の範囲の津波予測データベースを検索し、沖合予測地点毎に最大となる津波の高さを抽出して、当該地点での予想される津波の高さとする。

なお、検索対象範囲内に入る想定断層の中心の数が4点に満たない場合（断層の長さが断層設定位置の平均的間隔よりも十分に小さい場合に対応）は、水平距離が最も近い4隅の地震断層を検索対象とする。

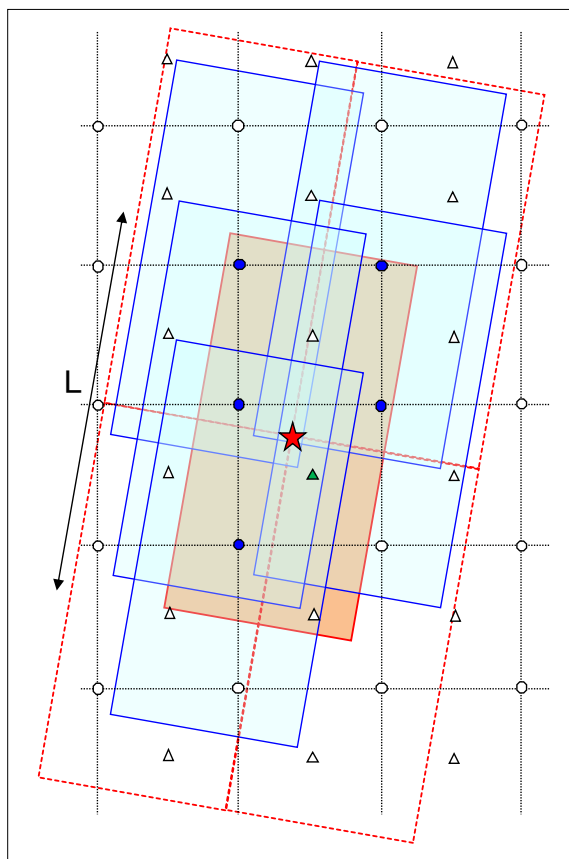


図3. 5 最大危険度法で選択される津波予測データベース内の想定断層の位置の模式図

L : (2-5)式で決まる想定断層の長さ

★ : 震源の位置

△ : 最大危険度法で使用する断層モデル((中心位置(●))を決めるための検索用断層モデルの中心位置

▲ : 震源(★)に最も近い検索用断層モデルの中心位置

○ : 津波予測データベースの想定断層モデルの中心位置

● : 震源(★)を中心とした検索対象範囲（橙色の領域）に入る想定断層モデルの中心位置

3. 1. 6 到達予想時刻の算出

予報区への到達予想時刻は、以下の方法で算出する。

- ① 3. 1. 3節や3. 1. 5節で示した方法で、震央（緯度、経度）、震源の深さ、マグニチュードに対応した、シミュレーションの断層が複数選択される。
- ② それらの断層によるFPでの到達時刻（2. 7節でデータベースに格納したFPでの到達時刻の計算値）が得られる。
- ③ 防災上の観点から、②で得られた時刻のうち、最も早い時刻を選択し、「FPへの最早到達時刻」とする。これを各FPについて行う。
- ④ さらに、予報区内のFPに対して、「FPへの最早到達時刻+FPから沿岸までの時間（同じく2. 7節でデータベースに格納した値）」が最も早い時刻を選択し、予報区の到達時刻とする。

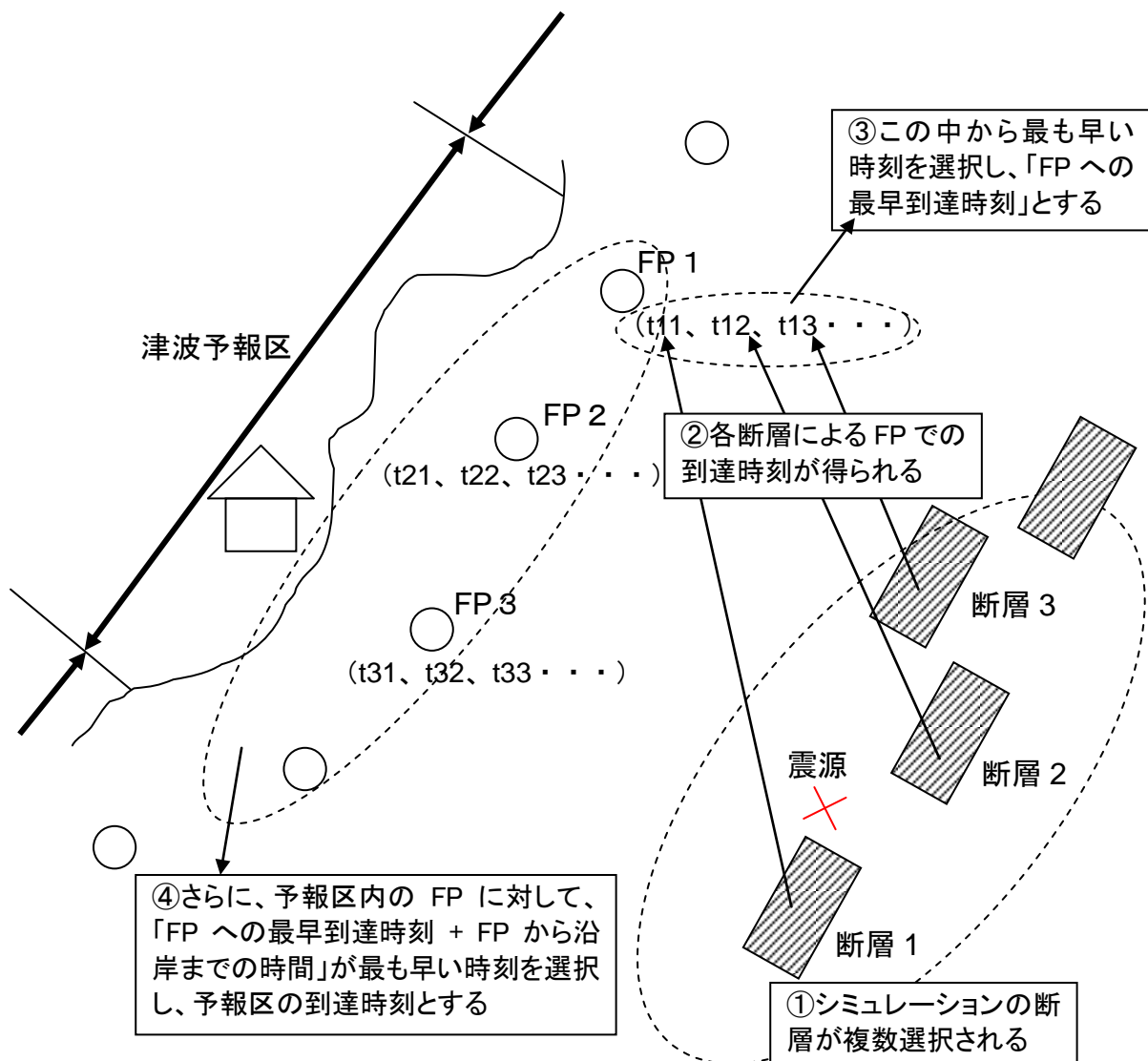


図 3. 6 予報区の到達時刻の算出

検潮所への到達予想時刻は、以下の方法で算出する。

2. 7節で、各検潮所に対する海域の格子点ごとの伝播時間が用意されている(図 3. 7左図)。地震発生時に震源が求まると、津波の波源域を過去の経験に基づくマ

グニチュードによるスケーリング則に従って、円を描いて波源域とする。そして描いた波源域と交差する地点の最小の伝播時間を読み取る。この値を、対象の検潮所への到達時刻とする。(図3. 7右図)

伝播図は、津波の高さの情報を持たないため、高さがごく小さくても、到達時刻は算出される。そこで、実際に求められた検潮所の到達時刻を津波情報へ使用するかどうかは、検潮所のある予報区が津波注意報以上を発表する場合とする。この時点で、高さが有意でない地点の到達時刻は除外される。

この方法での留意点としては、伝播図は、目的地への最も早い到達時間（最も水深の深い経路を通して津波の伝播する時間）を算出するものであることである。そのため、津波エネルギーの放射方向によっては、到達予想時刻よりもやや遅れて津波を検測できるような有意な津波が現れることがある（例として、2008年9月11日の十勝沖地震において、浦河検潮所への到達時刻は09時50分と算出されたが、実際に有意な津波を検測できたのは、10時過ぎになってからであったことが挙げられる）。

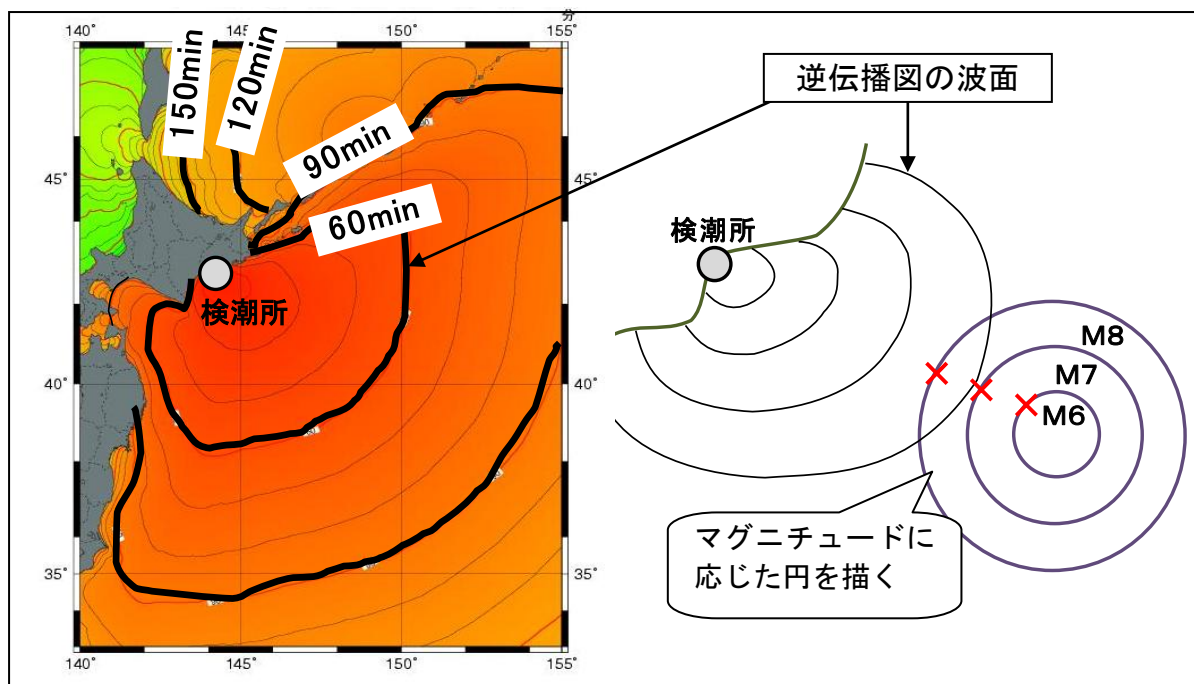


図3. 7 検潮所の到達予想時刻の算出

3. 2 地震発生メカニズムを活用したデータベースの構築

本データベースは、地震発生から数十分で得られる地震発生メカニズム(CMT解析)を活用し、より地震のメカニズムに合った予測を用いて津波警報を更新するために用いるものである。

津波警報の第1報を発表するための津波予報データベースは、2. 2節で述べたとおり津波を最も効率良く発生させる傾斜角45度の純粋な逆断層(すべり角90度)の断層モデルで構築しているが、実際には断層のメカニズムにより断層面のすべり方向が水平になるにしたがい、津波が発生しにくくなる。

例えば、2005年3月20日の福岡県西方沖地震のような地震発生メカニズムが横ずれの地震の場合には、津波の高さはかなり過大に予測されたが、実際には津波が観測

されなかった。このような場合にも、本データベースを用いて適切な津波の予測を得ることを目的とする。

図3. 8は、長さ70km、幅35km、すべり3.5m（M7.5相当）をもつ断層を上辺の深さ10kmに置き、横軸に断層の傾斜角、縦軸にすべり角を取り、断層の傾斜、すべり角を5度毎に変えた時の地殻変動の最大鉛直変位をコンターで表示したものである。

最大の鉛直変位は傾斜40度、すべり角90度のとき155cmとなる。

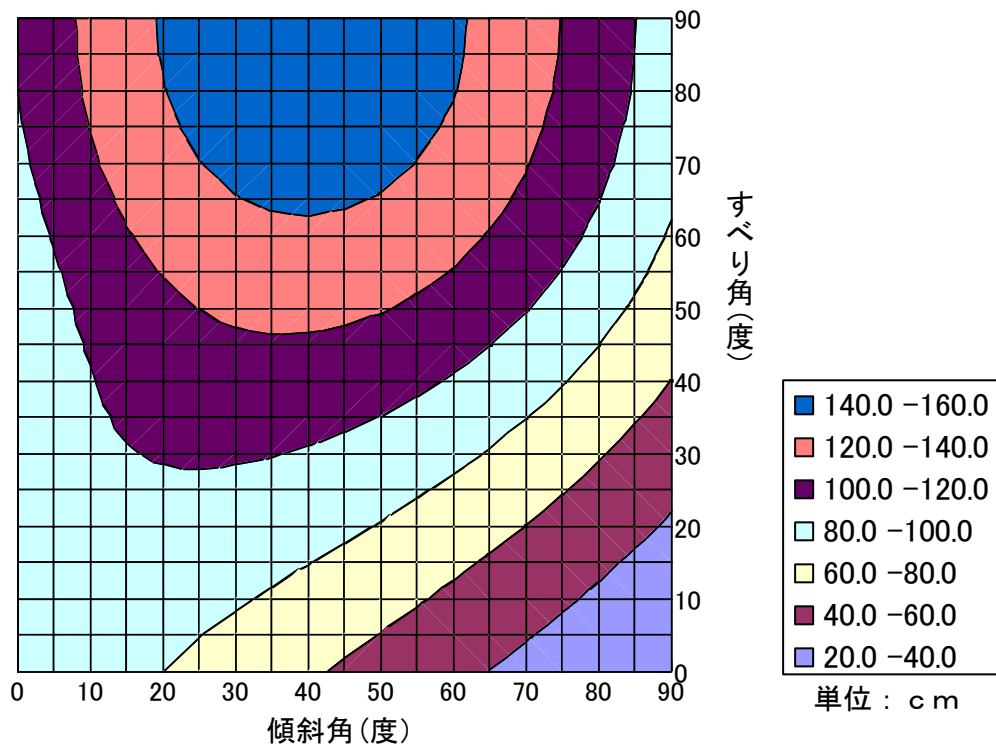


図3. 8 断層の傾斜角とすべり角を変化させたときの地殻変動の最大鉛直変位
長さ70km、幅35km、すべり3.5m（M7.5相当）をもつ断層を上辺の深さ10kmに置き、横軸に断層の傾斜角、縦軸にすべり角を取り、断層の傾斜、すべり角を5度毎に変えた場合のコンターを表示している

構築するデータベースは、(傾斜角、すべり角)が(90 度、0 度)の横ズレ、(10 度、90 度)の低角逆断層、(80 度、90 度)の高角逆断層である。それぞれ、傾斜角 45 度のデータベースと比較した図が図 3. 9 と図 3. 10 である。

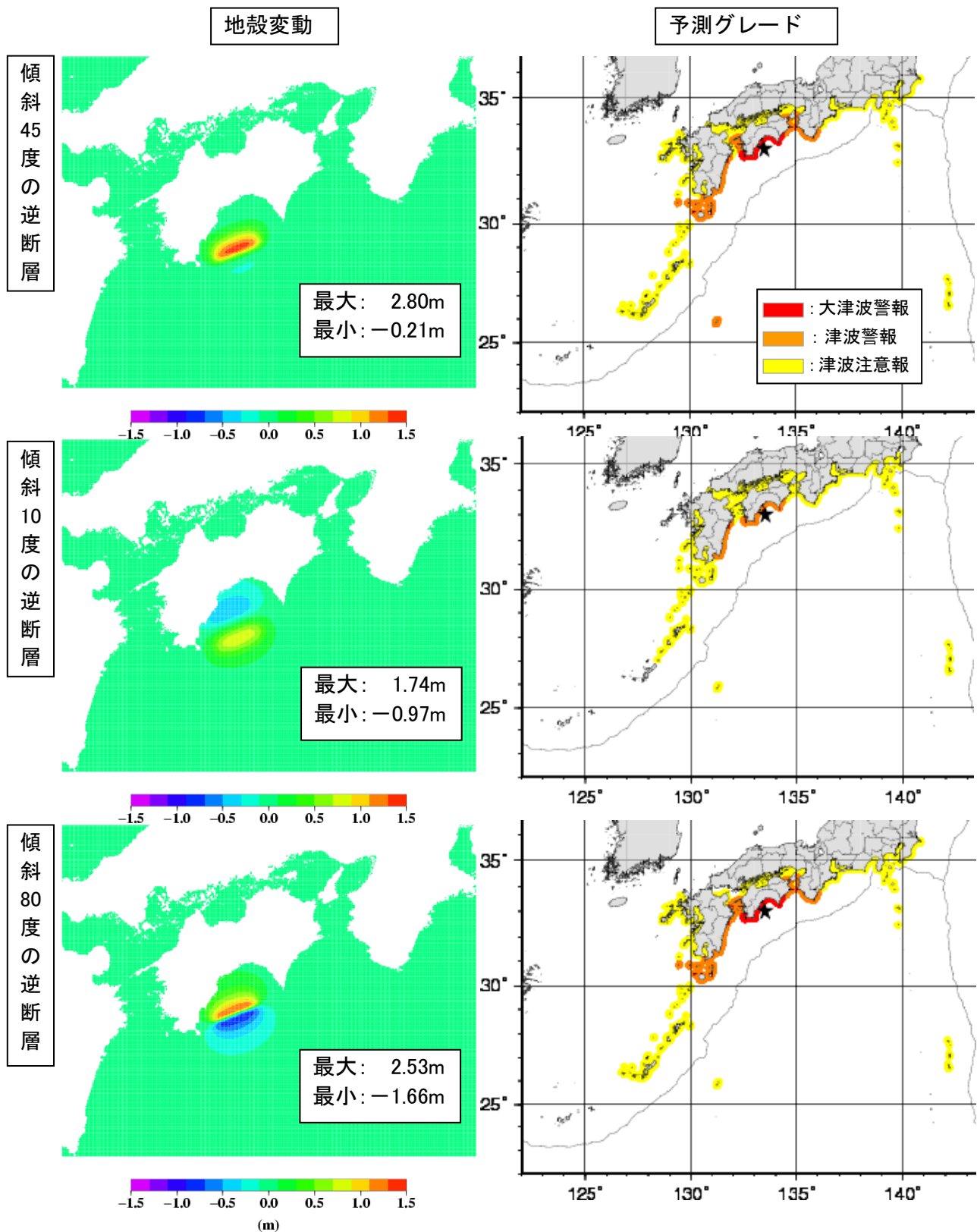


図 3. 9 メカニズムによる予測グレードの違い (マグニチュード 7.4、深さ 20km)

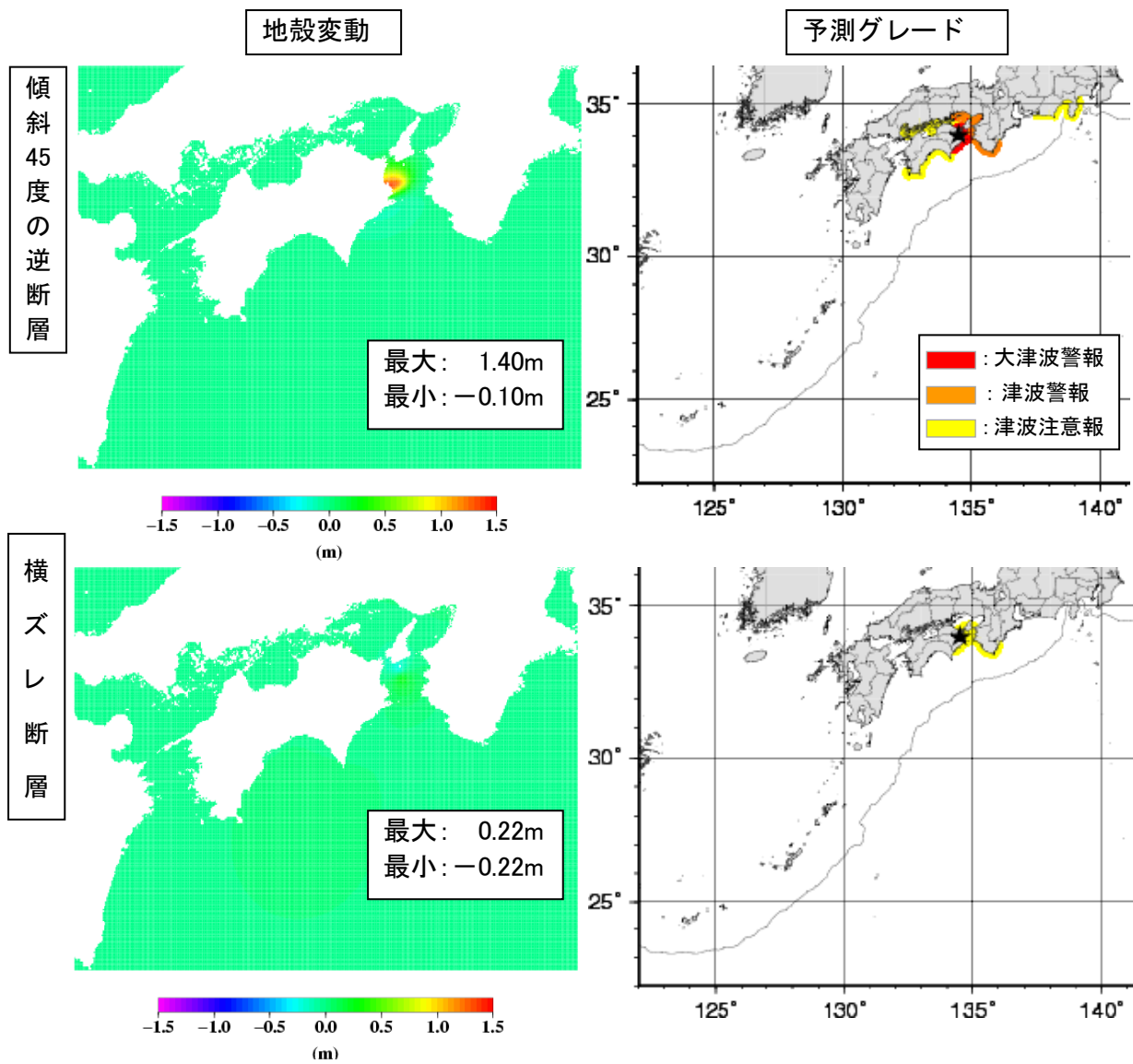


図3. 10 メカニズムによる予測グレードの違い (マグニチュード7.4、深さ20km)

地震発生メカニズムに対応したデータベース登録範囲を図3. 11に示す。

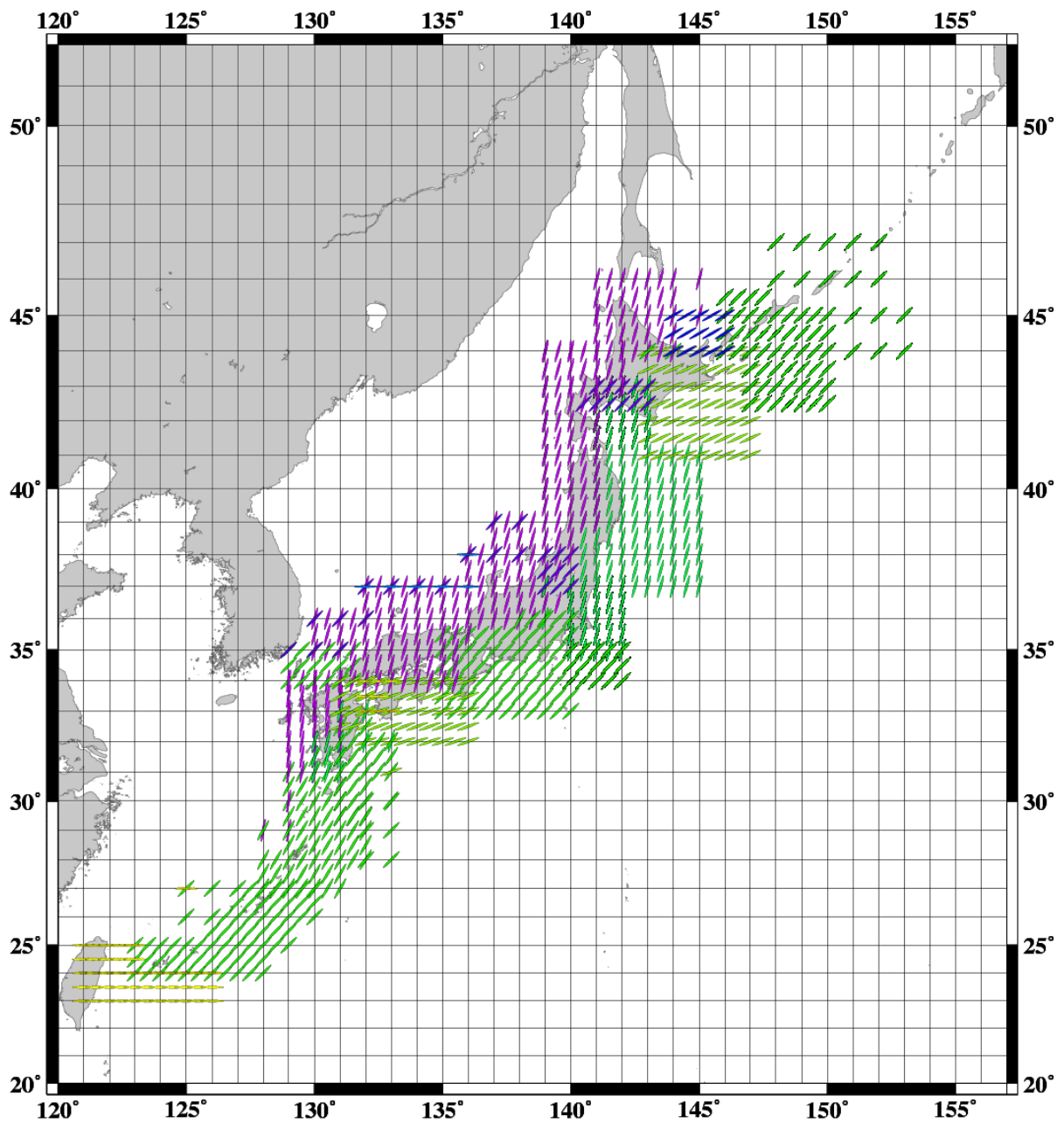


図3. 11 地震発生メカニズムに対応したデータベースの断層設定場所
(棒の向きは断層の走行の向きを表す)

第4章 遠地津波予報

4. 1 遠地津波予報の概要

日本近海のみならず、外国で発生した地震が津波を励起し、その津波が大洋を横断し、我が国に被害をもたらすこともある。例として、1960年のチリ地震津波がある。気象庁は、こうした津波（遠地津波）に対しても、津波警報・津波注意報や海面変動を周知する津波予報等（以降、「遠地津波予報」という）の発表を行っている。

しかし、遠地津波には、震源決定精度が低いことや、日本に到達するまで時間的余裕がある等、近地津波にはない特徴があることから、その予報手法についても近地津波とは異なる点がある。本章では、こうした遠地津波予報に係る手法について解説する。

遠地津波予報に係る作業は、大きく以下のとおり分類することができる。

- (1) 遠地津波データベースを用いる方法（4. 2節）
- (2) 津波の観測値を参考にする方法（4. 3節）
- (3) リアルタイムシミュレーションを用いる方法（4. 4節）
- (4) 過去の記録を参考にする方法（4. 5節）
- (5) 津波伝播図の活用（4. 6節）

なお、遠地で地震が発生した場合には、遠地津波に関する津波警報・津波注意報等を直ちに発表するのではなく、「遠地地震に関する情報」を発表した後、然るべきタイミングで警報等を発表している。

実際の緊急作業においては、日本への到達予想時間やその時点で利用可能なデータ・情報を分析した上で、適切な手法を組み合わせ、国内への遠地津波予報に活用することになる。

4. 2 遠地津波データベースを用いた遠地津波予報

4. 2. 1 遠地津波データベースを用いた遠地津波予報の概要

遠地津波データベースを用いれば、遠地地震の震源要素のみから直ちに遠地津波予報を行うことが可能である。

原理・手法は基本的には近地の津波予報データベースと同じであり、津波の予測結果をデータベースに保存しておき、得られた震源要素を基にデータベースから最適な結果を検索して情報等の発表に活用するというものである。ここで、津波の高さ予測については、長波近似の運動方程式を差分化して解く津波の数値シミュレーションにより作成したデータを使用し、到達予想時刻については長波を仮定した津波の伝播速度 \sqrt{gh} （ g :重力加速度、 h :水深）の計算により作成したデータを使用している。

4. 2. 2 遠地津波データベースの予測値を求めるための数値シミュレーション

遠地津波データベースには、津波の数値シミュレーションにより計算された、日本沿岸における津波の高さが保存されている。シミュレーションに関する技術的詳細は、第2章を参照されたい。遠地用のシミュレーションにおける特記すべき事項は以下のとおりである。

計 算 領 域： 東経 90 度－西経 65 度、南緯 60 度－北緯 65 度
計 算 格 子： 外洋 1.5 分、海外検潮所付近及び日本付近は 30 秒の領域とし

境界で接続して計算。日本付近 30 秒メッシュの領域(東経 122 度ー東経 150 度、北緯 23 度ー北緯 46 度)を図 4. 1 に示す。

計算時間間隔： 1 秒きざみ
積分時間： 36 時間
境界条件： 陸側は反射、沖側は透過
支配方程式： 球面座標系でのコリオリ力を含み、沿岸付近のみ非線形長波、
沖合では線形長波
グリーンの法則： 使用しない

日本沿岸の津波予報区における津波の高さの予測値は、各 FP 近傍の複数の沿岸の計算格子点の中央値を FP の代表値とし、その値を用いて近地の予報と同様の処理を行うことで得られる。

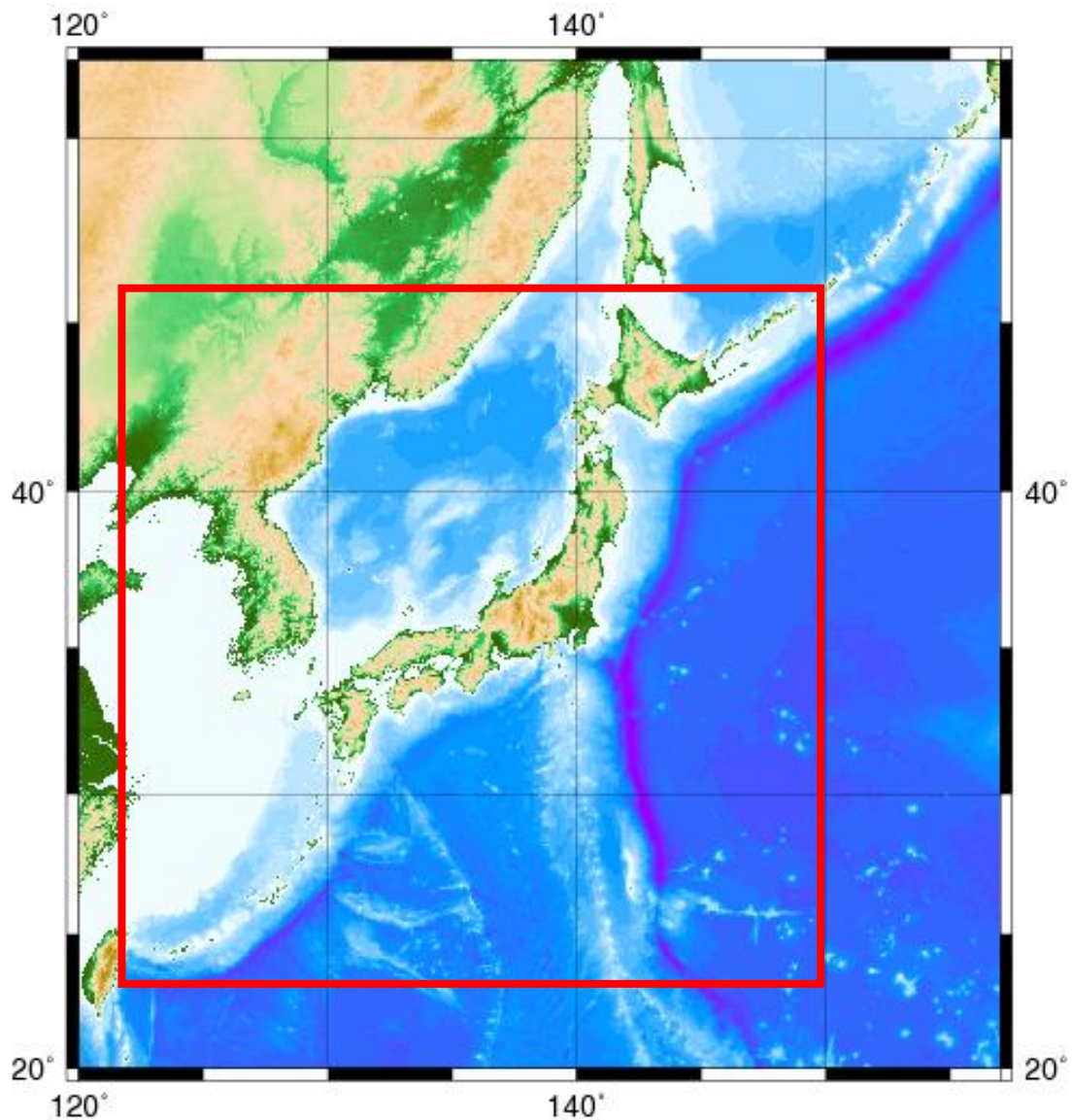


図 4. 1 遠地津波データベースのためのシミュレーションにおける日本付近の 30 秒メッシュ領域
(東経 122 度ー東経 150 度、北緯 23 度ー北緯 46 度、赤線の矩形領域内)

4. 2. 3 遠地津波データベースにおける想定断層の配置

遠地津波データベースに搭載されている想定断層は 496 あり、Mについて 3 種類あるため、想定断層数は全部で 1488 となる。海溝軸に沿って、M7.5 の断層が重ならないように敷き詰め、その断層の中心位置と同じ位置に M8.0 及び M8.5 の断層を配置した。図 4. 2 には M8.5 の断層の配置を示す。主に過去に発生した地震の記録から、それらの震央に相当する位置に、想定断層を配置している。

津波予報データベースは日本近海をくまなくカバーするよう格子状に想定断層を配置しているのに対し、遠地津波データベースでは、当該図を見て分かるように、位置を限定して配置している。これは、主に以下の理由による。

- (1) 遠地地震においては、日本に影響を及ぼす程の津波を発生させるような規模の大きな地震が発生する領域は限られている。このため、当該領域のみ想定断層を配置すれば十分であり、海洋全域をくまなくカバーする必要はない。
- (2) 遠地地震は日本からの震央距離が大きい。また、日本へ到達するまでの過程で、伝播経路中の海底地形や陸地により屈折・反射等を繰り返すことにより形態が変化するので、日本へ到達した時点において、震源の誤差による影響は相対的に小さくなる。このため、日本へどのような津波が到達するのかを推定する目的においては、近地地震ほど密に想定断層を配置する必要はない。
- (3) 緊急作業において得られる遠地地震の震源の精度は、近地地震に比べて低い。このため、遠地津波データベースの想定断層についても、近地のように稠密にする効果は低い。
- (4) 4. 4 節で後述するとおり、CMT 解が得られた後は、その解を用いて震源断層を設定してリアルタイムシミュレーションを実施し、より現実に近い予測を得ることができる。

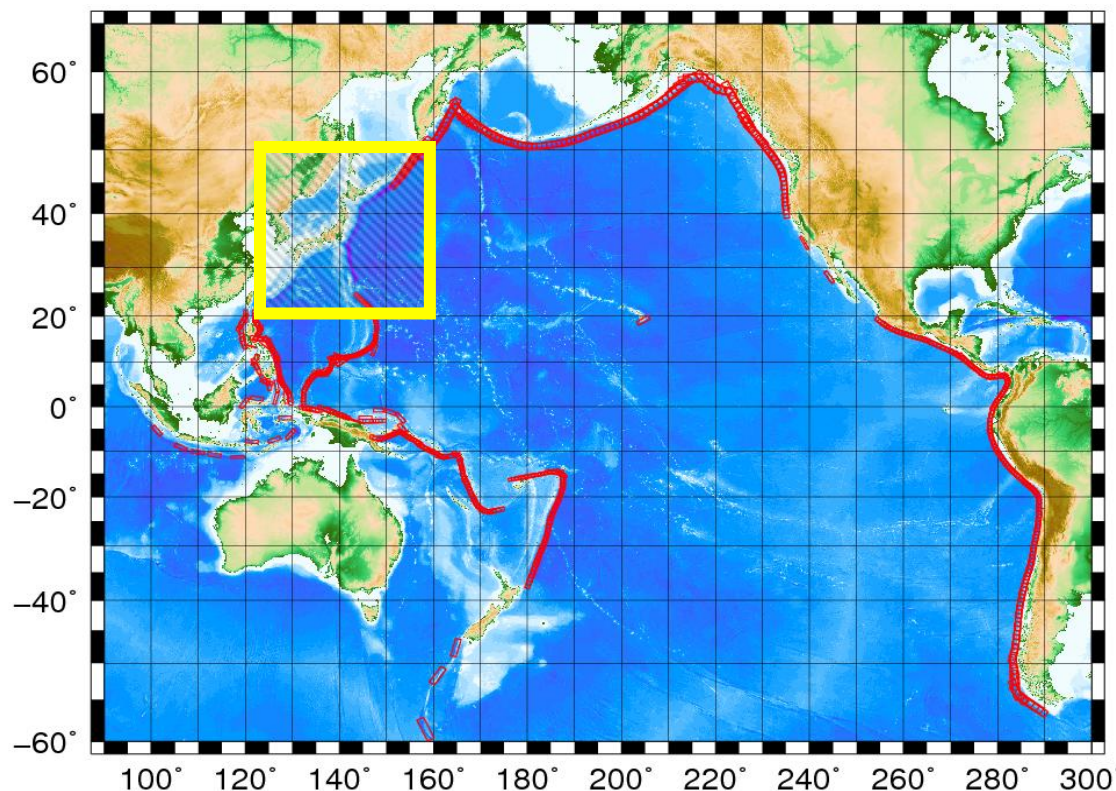


図 4. 2 遠地津波データベースの位置
M8.5 の断層の分布を赤色の矩形で示す
黄色枠内は近地津波データベースがカバーしている領域

なお、実際のデータベースの設定位置と断層パラメータの入手方法については、別紙を参照。

4. 2. 4 想定断層の深さとマグニチュード

遠地津波データベースに搭載されている想定震源の全てについて、深さは 10km のみ、Mは 7.5、8.0、8.5 の 3 種類である。

深さについては、緊急作業における遠地地震の震源決定精度が低いことは前述したが、特に深さについては、津波予報に用いるだけの精度が無いため、10km のみとしている。

Mについては、日本に影響を及ぼすような津波を発生させる地震の規模として M7.5 以上を仮定し、7.5、8.0、8.5 の 3 種類を用意した。

4. 2. 5 想定断層の断層パラメータ

4. 2. 5. 1 断層の走向と傾斜

断層の走向については、過去の地震記録を参考に、震央によって異なる値が設定されている。主な断層の種類及び走行については、図 4. 3 に示す。

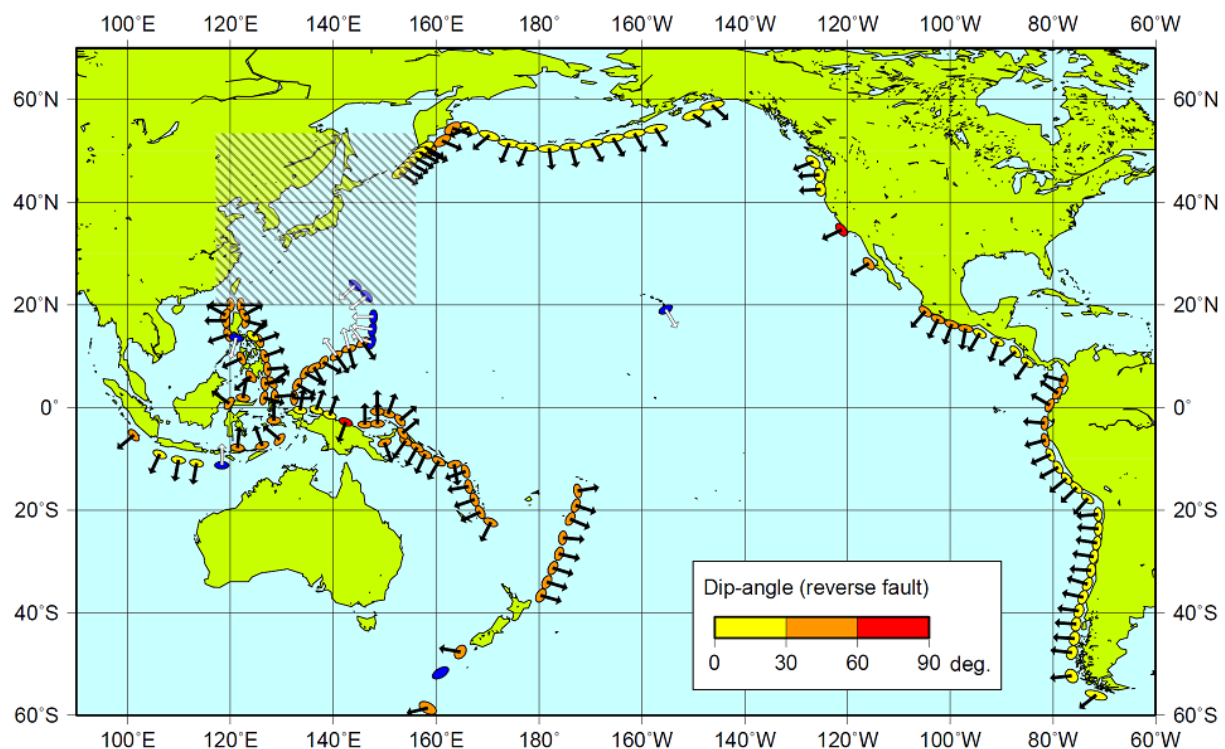


図 4. 3 遠地津波データベースの断層の種類及び走行

遠地津波データベースのうち主な断層の位置を楕円で示す。

長軸の方位角を走向と一致させている。

楕円の色は逆断層の傾斜を表している（正断層と横ずれ断層は一律に青で表示）。

矢印は断層の上側の地殻のずれ方向。

（黒が逆断層、白が正断層、矢印のない断層は横ずれ断層）

斜線矩形領域は、近地津波データベースの領域。

4. 2. 5. 2 断層面とすべり量

断層面については、長辺が走向方向に平行な長方形とし、その大きさ及び断層のすべり量は以下のとおり固定している。

- | | | | |
|-------------|----------|-----------|-----------|
| (1) M7.5・・・ | 長辺 75km | 短辺 37.5km | すべり量 2.4m |
| (2) M8.0・・・ | 長辺 150km | 短辺 65km | すべり量 3.9m |
| (3) M8.5・・・ | 長辺 300km | 短辺 100km | すべり量 7.0m |

参考までに、津波予報データベースで用いている経験式を適用すると、M7.5において長辺 71km 短辺 35km すべり量 3.5m となる。

4. 2. 6 遠地津波データベースからの検索手法

実際に遠地地震が発生した場合の遠地津波データベースからの検索手法は、震央から最も近い位置にある想定断層を適用する手法を用いている。Mについては、近地地震の場合と同様、データベースで作成している M7.5、M8.0、M8.5 のシミュレーション結果から、実際に発生した地震のMに合うように津波の予測結果を対数で内挿・外挿を行って算出している。(3. 1. 3～3. 1. 5を参照)

日本の津波予報区における予想される津波の高さについては、近地地震の場合と同じ基準・手法に基づき決定する。一方で「各地の満潮時刻・津波到達予想時刻に関する情報」における各地の到達予想時刻は、近地地震では逆伝播図を用いて算出するのに対し、遠地では、 \sqrt{gh} (g:重力加速度、h:水深)の位相速度で震源位置と太平洋の水深データを元に FP まで順伝播計算した結果を使用している。ここで、近地地震の場合とは異なり FP から沿岸までの伝播時間は加算しない。また、情報発表における到達予想時刻は伝播時間の計算誤差も考慮して 30 分単位 (30 分未満は切捨て) としている。

4. 3 津波の観測値を用いた遠地津波予報

4. 3. 1 津波の観測値を用いた遠地津波予報の概要

遠地津波は近地津波に比べ、日本に到達するまでに時間的余裕がある。このため、津波が日本に到達する前に、伝播経路にある海外の検潮所等における観測値を確認し、津波の発生・伝播の様子を把握することができる。そして、これらの観測値を、国内への遠地津波予報へ活用することができる。

4. 3. 2 海外検潮データの活用

4. 3. 2. 1 利用可能な海外検潮データ

気象庁がオンラインで観測データを入手している海外検潮所等を、図 4. 4 に示す。これらは、概ね 1 分～6 分サンプリングのデータが 3 分～1 時間間隔で更新される。海外の検潮データのほとんどは、沿岸に設置された検潮儀による観測データであるが、この他、水深 1000～6000m の深海底に設置された水圧センサーによる観測値を報じる DART ブイ※ (ブイ式海底津波計) による観測データも入手している。

※ DART (Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis) : 深海底に設置した水圧センサーにより津波の高さを測定し、海上のブイと上空の衛星を経由してデータを伝送するシステム。米国海洋大気庁 (NOAA) により開発・運用されている。(http://www.ndbc.noaa.gov/dart.shtml)

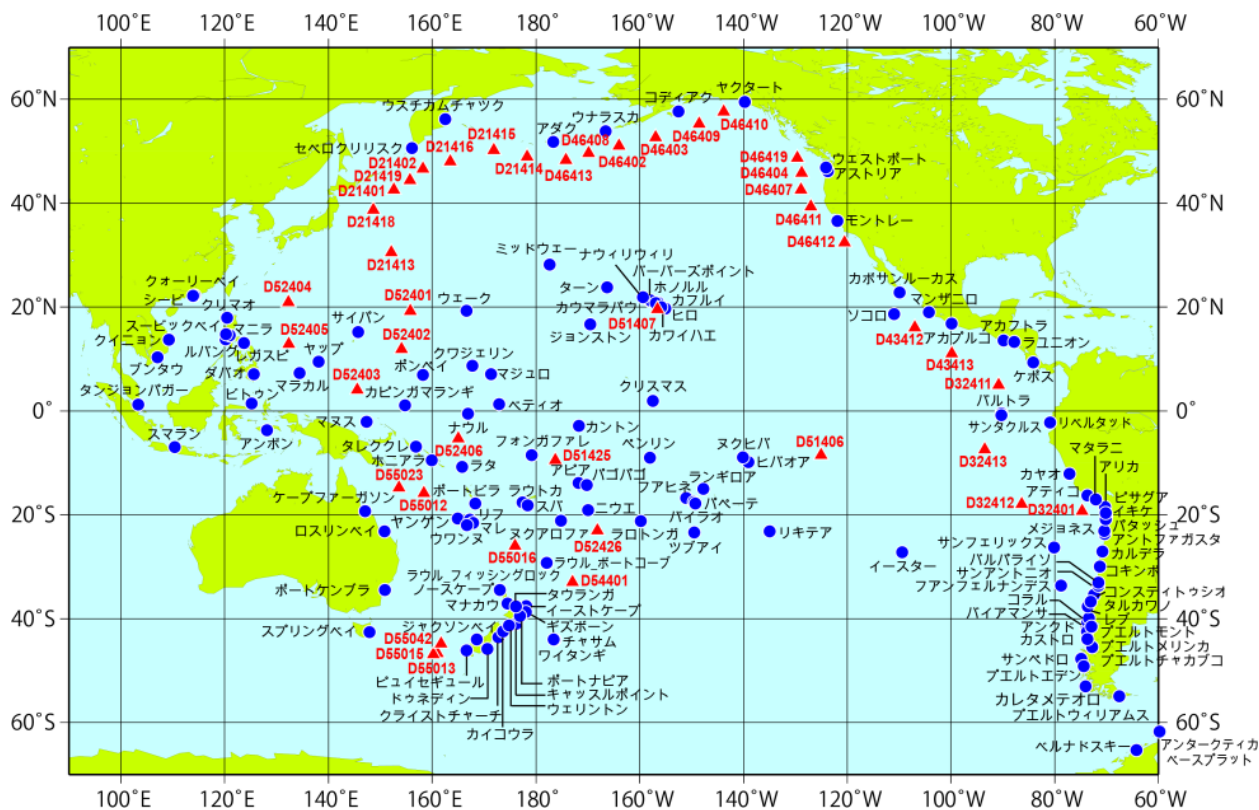


図 4. 4 気象庁が準リアルタイムで観測データを取得している海外の検潮所等
(平成 24 年 12 月現在)

- : 沿岸検潮所
- ▲ : DART ブイ (ブイ式海底津波計)

4. 3. 2. 2 海外検潮データの活用方法

海外検潮データの活用については、主に以下の目的・方法がある。

- (1) 津波発生の有無の確認
- (2) 津波の伝播状況の確認
- (3) 海外での観測値を基にした国内予測値の調整
- (4) 海外観測波形をリアルタイムシミュレーションにデータ同化し、国内予測値を調整する
- (5) 海外での観測状況と、過去の同様の地震による津波における観測状況とを比較することにより、国内津波警報・津波注意報の参考とする

上記のうち、(4) 及び (5) については、4. 4 節及び 4. 5 節で説明する。また、(1) 及び (2) については特に説明の必要がないことから、ここでは (3) について解説する。

国内予測値の調整については、まず海外の DART ブイ (ブイ式海底津波計) 観測地点で実際に観測された津波の高さと遠地津波データベースにより同地点で予想される津波の高さを比較し、前者に対する後者の割合を計算する。そして、その割合 (倍率) を遠地津波データベースによる国内の予測値に掛け算して行う。DART ブイ地点は、沖合の深海にある観測地点であり、海岸に設置されている検潮所に比べて浅海や複雑な海岸の影響等を受けにくいいため、観測値と数値シミュレーションによる予測値の結

果を比較するのに適している。可能な限り多くの DART ブイ地点について当該割合（観測値／予測値）を求め、その平均を r 、安全係数を a とすると、係数 c を、

$$c = r / a$$

として求め、国内の予測値に一律に c を掛けることで調整する。安全係数 a は、防災上の観点から 0.7 を設定している。なお、ここで使用する DART ブイ地点での予測される高さや国内の予測値は、4.4 節で後述するリアルタイムシミュレーションの予測結果を使用する場合もある。

近年、DART ブイ地点は数多く設置されてきたため、このような比較に使用できる観測点が増えてきたが、震源から日本沿岸への伝播経路上に設置されている DART ブイの数が少ない地域や、DART ブイがあっても観測停止中であることもある。その場合には、海外検潮所での観測値を用いて同様の比較を行って参考とする。

4.4 リアルタイムシミュレーションを用いた遠地津波予報

地震発生直後は、緯度・経度や M 等の限定的な情報しか得られず、遠地津波データベースによる遠地津波予報のみ適用可能である。しかし、ある程度時間が経つと、CMT 解等の地震断層に関する具体的な情報や、海外検潮所における観測データなど、より詳細なデータが利用可能になる。また遠地津波では、日本に津波が到達するまで時間的な余裕もあるため、これら詳細なデータを用いた津波の数値シミュレーションを実行し、その結果を遠地津波予報に活用することも可能な場合がある。

4.4.1 CMT 解等を用いたリアルタイムシミュレーション

気象庁では、地震発生後 30 分程度で、地震波形データを詳細に解析し遠地地震の自動 CMT 解を得ることができる。CMT 解によって、津波の規模を推定するのに適した M であるモーメントマグニチュード (M_w)、実際の地震による断層の走向、傾斜、すべり量を見積もることができる。そしてそれらの値を基に津波の数値シミュレーションを実行すれば、実際に発生している津波に、より近い状況を再現できる。そして当該シミュレーション結果を基に、国内への遠地津波予報を行うことができる。

4.4.2 津波の観測波形を用いたリアルタイムシミュレーション

海外検潮所での津波の観測波形を、シミュレーションに同化させることによって、シミュレーションの精度を上げることが可能となる。同化手法にはいくつかあるが、最も分かりやすい方法として、シミュレーションにより得られた波形を実際の観測波形に合うように時間方向にシフトし、振幅方向に振幅比を倍率として掛けるという方法がある。また、NOAA/PMEL（アメリカ大気海洋庁太平洋海洋環境研究所（National Ocean and Atmosphere Administration, Pacific Marine Environmental Laboratory））が開発しているような、あらかじめ単位断層毎にシミュレーションした結果をデータベースに保存しておき、観測波形に合うように単位断層の線形結合を求めるという方法もある。

シミュレーション波形との比較を行うにあたっては、遠地津波データベースの場合と同様に沿岸付近の局所的な海岸地形や水深分布の影響を受けている検潮儀のデータよりも、DART ブイ等沖合における津波の観測波形を用いるのが望ましい。

4.5 過去記録の活用

遠地津波は、日本に影響を与えた過去の記録が少なく、過去記録の活用を実際に行

える事例は限られる。しかし、遠地津波を起こすような大きな地震は主に海溝付近で発生し、断層のメカニズムも地理的位置により絞込みが可能なので、過去に遠地津波を起こしている場所で再び大きな地震が発生すれば、過去とほぼ同様な津波が発生する可能性が考えられる。また、遠地津波は、日本に到達するまで時間的に余裕があることから、過去の記録を十分に精査・検討し、遠地津波予報の参考とすることができ

る。

このため、過去の遠地津波記録を整理・蓄積し、例えば、特徴のある地域毎に分類しておくことが重要である。

4. 6 津波伝播図の活用

遠地津波予報作業において、津波伝播図は重要な資料である。津波伝播図は、震央が分かれば作成することができ、これを活用することによって、日本沿岸はもとより、海外検潮所までの津波の伝播時間を推定することができる。これにより、津波監視において注視すべき海外検潮所の特定、情報発表のタイミングを検討する目安を得ることができる。平成 19 年 8 月のペルー沿岸の地震時の津波伝播図を図 4. 5 に示す。

なお、遠地津波は、伝播経路が長く、海岸地形や水深変化の影響を受けて屈折・反射を繰り返すため、沿岸における第 1 波の特定は困難である。一方、津波伝播図は、最前線の波の伝播時間を計算して描画するため、潮位観測データから視覚的に特定できる津波の到達時刻と厳密に一致することまで期待できない。

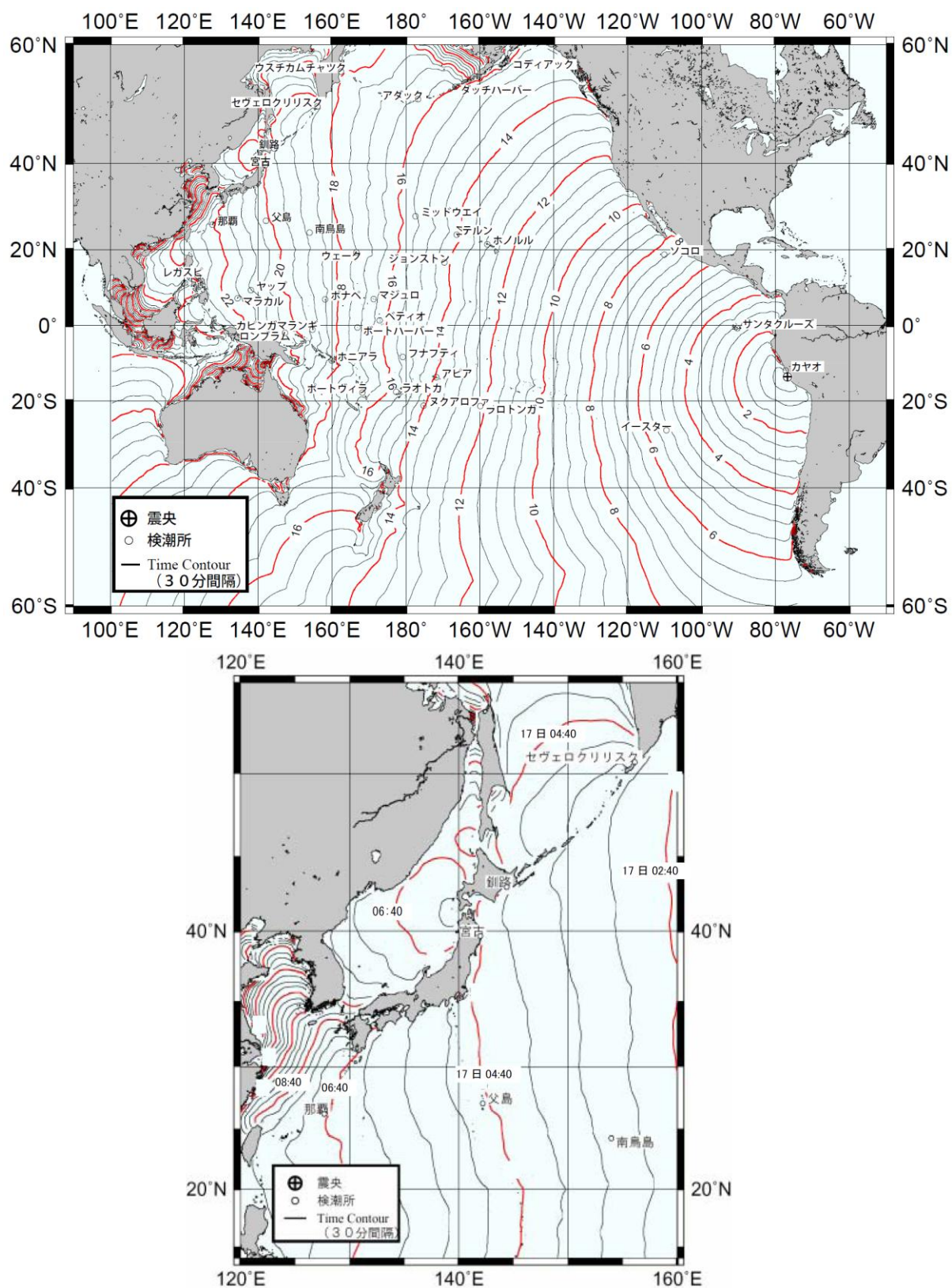


図4. 5 平成19年8月のペルー沿岸の地震における津波伝播図
(下図は日本周辺の拡大図)

第5章 津波警報等の発表

5. 1 津波警報等の発表

地震発生後、推定した地震の震源及び規模に基づき、津波予報データベースを用いて津波予報区毎に、津波警報・津波注意報のグレード（種類）、第1波の到達時刻、予想される津波の高さを発表する。

5. 1. 1 マグニチュード過小評価判定による津波警報等の発表

地震発生後の震源決定作業で得られる気象庁マグニチュードは、8.0程度で飽和する性質がある。また、津波地震についても気象庁マグニチュードが過小評価となる可能性がある。このため、地震発生後に求められた気象庁マグニチュードについて過小評価判定を行い、その結果、過小評価の可能性があると判定した場合は、当該海域で想定されている地震の想定断層、又は想定最大マグニチュード等を用いて津波警報の第1報を発表する。また、この場合の予想される津波の高さは、数値ではなく、定性表現で発表（5. 1. 3節参照）し、地震の規模は、M8を超える巨大地震と推定される旨を発表する。

過小評価の可能性が無い場合は、得られた気象庁マグニチュードをもとに津波警報等を発表する。

5. 1. 2 第1波の到達予想時刻

津波の第1波の到達時刻の予想は、津波予報区ごと及び地点ごとに発表する。

- （1）津波予報区への第1波の到達予想時刻は、津波予報データベースを用いて津波予報区内の各地点における到達時刻の予測値を得て、最も早い時刻を当該津波予報区の予測値とする。
- （2）地点ごとの第1波の到達予想時刻は、近地津波の場合は、地点ごとにあらかじめ計算された津波逆伝播計算の結果を用いて予測を行う。遠地津波の場合は、遠地津波データベースを用いて対応する地点の予測値とする。
- （3）上記（1）及び（2）で得られた予測値に対し、近地津波の場合は10分単位で早いほうに繰上げ、遠地津波の場合は30分単位で早いほうに繰上げた時刻を第1波の到達予想時刻として発表する。なお、津波予報（若干の海面変動）の場合は、第一波の到達予想時刻を発表しない。

5. 1. 3 予想される津波の高さ

予想される津波の高さは、津波予報区ごとに次の手順で得るものとする。

- （1）震源およびマグニチュードをもとに津波予報データベースから、各地点における津波の高さの予測値を得る。
- （2）津波予報区内の各地点で予想される高さのうち、最も高いものを当該予報区の予測値とする。
- （3）得られた予測値をもとに、予想される津波の高さに応じて津波警報・津波注意報のグレードと発表する高さを決定する（表5. 1）。なお、平成25年3月7日より運用を開始した津波警報の改善により、防災上の観点から発表する高さの数値は、予想される津波の高さの区分のうち高い方の数値としている。

表 5. 1 予想される津波の高さと警報・注意報

津波の高さ	発表する高さ		グレード
	数値表現※1	定性表現	
～ 5 c m	(高さは発表しない)		津波なし
5 c m ～ 2 0 c m	(高さは発表しない) ※2		若干の海面変動
2 0 c m ～ 1 m	1m	(表記なし)	津波注意報
1 m ～ 3 m	3m	高い	津波警報
3 m ～ 5 m	5m	巨大	大津波警報
5 m ～ 1 0 m	10m	巨大	大津波警報
1 0 m ～	10m超	巨大	大津波警報

※1：観測されている津波の減衰等によるグレードダウンや解除の場合は、予想される津波の高さ（数値表現）を発表しない。

※2：XML 電文では予想される津波の高さを「0. 2 m未満」で発表する。

5. 2 津波警報等の切替え及び解除

地震波形の解析結果や津波の実況等は、時間の経過とともにより正確かつ詳細なデータが得られる。津波警報等の第一報を発表した後、震源や津波に関する新たな情報が得られ、これらの解析結果から既に発表した津波警報等の内容が適切でないと判断された場合は、津波警報等の切替え、又は解除を行う。

津波警報等の切替え、又は解除を行う条件は以下のとおり。

(1) 震源要素の精査に基づく切替え

津波警報等の発表後に震源要素を精査する。精査した震源要素にもとづき津波の予報を再評価し、予想される津波の高さがより大きくなるなど、津波警報等の切替えの必要性に応じて津波警報等を切替える。

(2) CMT解析の結果に基づく切替え

地震発生後、近地地震であれば約15分後までに、遠地地震であれば約30分後までに算出できるCMT解（Mwを含む）に基づき、津波の予報を再評価し、予想される津波の高さがより大きくなるなど、津波警報等の切替えの必要性に応じて津波警報等を切替える。

(3) 沿岸での津波観測に基づく切替え及び解除

沿岸で観測された津波の推移から、予想される津波の高さより高い津波となる可能性が高いと判断した場合、又は、予想される津波の高さより高い津波が観測された場合には津波警報等を切替える。

また、津波到達予想時刻から十分な時間が経過しても、津波が観測されない、又は観測されても微弱な津波の場合は、津波警報等を解除する

なお、遠地津波の場合においては、海外の津波観測点における観測結果も考慮する。

(4) 沖合での津波観測による推定に基づく切替え

G P S 波浪計、ケーブル式海底津波計、ブイ式海底津波計等の沖合に設置された観測点で得られた観測結果から、沿岸での津波の高さを推定する。その推定結果が発表されている津波警報等の津波の高さに比べて高い場合は、津波警報等の切替えを行う。

<参考> M8 を超える巨大地震に対する津波警報についての補足

1 過小評価判定を行う気象庁マグニチュード (Mj) の基準

- (1) Mj が 8 程度で飽和することを踏まえ、 $Mj \geq 7.9$ の場合に過小評価判定を行う。
(図 6-1)
- (2) 津波地震のおそれのある海域(海溝軸沿い深さ 20km 程度まで)は、 $7.0 \leq Mj \leq 7.8$ の地震についても過小評価判定を行う。(図 6-2)

2 想定最大マグニチュード

マグニチュード過小評価判定により、震源決定で得られた気象庁マグニチュードが過小と判定した場合に津波警報に用いる想定断層や想定最大マグニチュードは、内閣府の想定断層及び地震調査委員会の長期評価の想定断層のマグニチュードである。
(図 6-1)

また、明確な想定がない海域については、いずれかの津波予報区において、予想される津波の高さが「10m超」または「大津波警報」となるマグニチュードの下限を設定し、それを用いる。これは、津波警報の第1報において、予想される津波の高さを「巨大」、警報文の見出しでは「東日本大震災クラスの津波が来襲します」と発表することで、迅速な避難の呼びかけなど防災対応に資するためである。

気象庁マグニチュードを過小と判定した場合に用いる想定断層及び想定最大マグニチュードは下表のとおり。また、これらの領域及び津波地震の想定される海域を図に示す。

海域又は地震の種類	想定断層または想定最大 M	警報設定方法※
南海トラフ巨大地震	南海トラフの巨大地震モデル検討会〔第二次報告〕(内閣府) 津波断層モデル (M9.1)	プリセット
500 年間隔地震	500 年間隔地震 (内閣府) (M8.6)	プリセット
択捉島沖	海溝型地震の長期評価(地震調査委員会) 択捉島沖 (Mw 8.5)	津波 DB (M8.5)
三陸沖北部～房総沖海溝寄り津波地震(東北地方太平洋沖地震の震源域を除く)	海溝型地震の長期評価(地震調査委員会) 三陸沖北部房総沖海溝寄り津波地震(東北地方太平洋沖地震の震源域を除く) (Mt 8.6～9.0前後)	津波 DB (M9.0)
その他	8.4 ($Mj \geq 7.9$ が過小評価と判定した場合) 8.1 ($7.0 \leq Mj \leq 7.8$ が過小評価と判定した場合〔津波地震〕)	津波 DB (M8.4 または M8.1)

表 6-1 海域毎の想定地震と最大マグニチュード

※プリセット： 内閣府等の想定地震断層による津波の予測結果をもとに設定

津波 DB： 震源決定で得られた震源と想定最大マグニチュードにより津波予報データベースを検索した結果をもとに設定

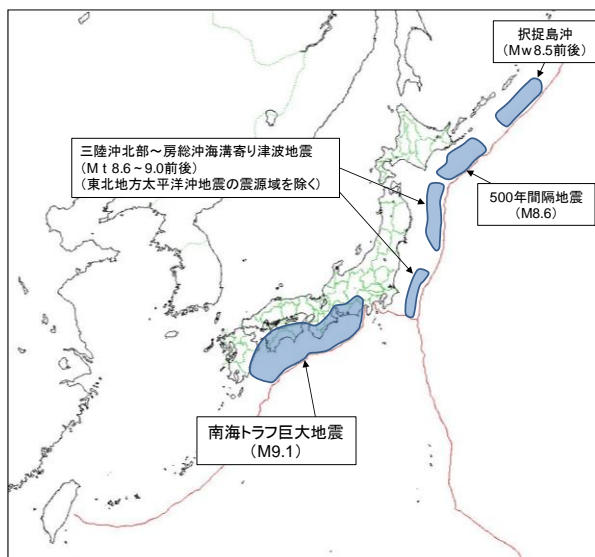


図 6-1 海域又は地震の種類毎の想定最大M
(Mtは津波マグニチュード)

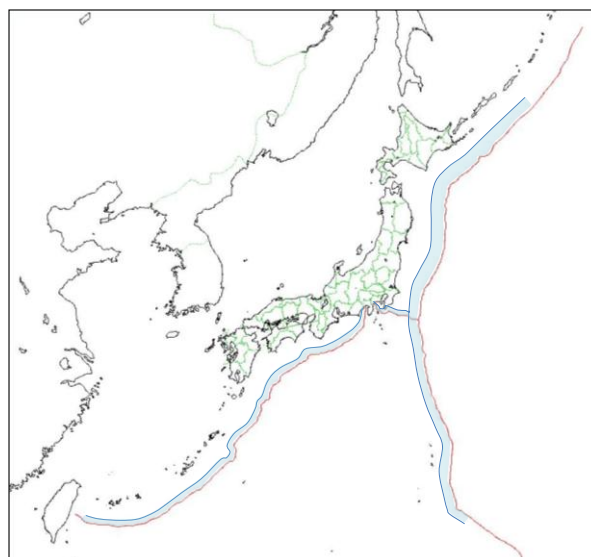


図 6-2 津波地震の想定される海域
(海溝沿い陸側、深さ 20km 程度まで)

3 定性表現で発表した津波警報等の更新

プリセット方法を用いた津波警報は、内閣府の中央防災会議専門調査会および文部科学省の地震調査委員会が公表した津波の高さを用いていることから、精査した地震規模 (Mw) に基づき津波の高さを数値表現へ更新する場合、次のように津波警報等の更新を行う。

(1) 南海トラフ巨大地震

$8.3 \leq Mw \leq 9.1$: 先に発表したプリセット方法で用いた内閣府による津波の予測にもとづき数値表現で発表

$Mw \leq 8.2$: 津波予報データベース検索結果の値にもとづき数値表現で発表

(2) 500 年間隔地震

$8.2 \leq Mw \leq 8.6$: 先に発表したプリセット方法で用いた内閣府による津波の予測にもとづき数値表現で発表

$Mw \leq 8.1$: 津波予報データベース検索結果の値にもとづき数値表現で発表

(3) 上記以外の地震

精査した地震規模 (Mw) に基づき津波予報データベースを検索し、その結果にもとづき数値表現で発表する。