

水工学シリーズ 09-B-8

津波を対象とした防災アセスメント  
～原子力発電所などを例として～

秋田大学 工学資源学部土木環境工学科 准教授

高橋 智幸

土木学会  
水工学委員会・海岸工学委員会

2009 年 8 月

# 津波を対象とした防災アセスメント ～原子力発電所などを例として～

## Tsunami Hazard Assessment: The Case of Nuclear Power Plant

高 橋 智 幸

Tomoyuki TAKAHASHI

### 1. はじめに

自然災害によって引き起こされる被害の規模は、低頻度で発生する自然現象（外力）とそれに対する人間側の備え（防災力）の力関係により決定される。一般的には発生する外力そのものを抑制することは困難であるから、防災力を向上させることが被害軽減にとっては重要となる。防災力の向上にはハードウェアとソフトウェアの両面からの対策が必要であり、そのためには事前に来襲する外力を予測し、その影響を評価しておくこと、すなわち防災アセスメントが不可欠である。

しかし、自然災害は多くの要因が複雑に影響を及ぼし合う自然現象であるから、対策を施せるほど以前に、必要十分な精度で外力を予測することは不可能である。もちろん、最新の知見を基にその時点で最も発生する可能性が高いと考え得る外力モデルを推定することはできる。しかし、予測した通りのメカニズムで災害が発生するとは誰も断言できない。そこには不確かさが存在する。不確かさには、自然現象そのものが本質的に有する不確かさと、我々の知見が十分ではないがために生じる不確かさの2種類がある。前者については外力モデルにおける各パラメータをふるることにより対応しなくてはならない。また、後者についてはベンチマーク問題等により解析方法の信頼性を確認しておくことが必要である。

以上の防災およびそのためのアセスメントに関する考え方は津波災害についても同様にあてはまる。津波の場合、プレート境界や海域活断層などの発生域から実際に被害が発生する沿岸域までの全てを含む模型実験を行うことは現実的に困難であるため、数値計算が主な解析方法となっている。数値解析においては、津波の発生、外洋伝播、沿岸域への来襲の3段階に現象を分けて扱うことができ、各段階で支配方程式や境界条件、計算スキーム、アルゴリズム、コードが異なるのが一般的である。さらに地形モデルが必要であり、特に浅海域の地形モデルの精度は計算全体の再現性に大きく影響を与える。

このような津波シミュレーションは既に国や自治体などの多くの機関で実施され、防災実務に応用されている。特に、津波ハザードマップの作成においては数値解析による評価技術は重要であり、沿岸開発技術研究センター（2004）から津波・高潮ハザードマップマニュアルなどが発行されている。現在、津波に対して極めて高いレベルの安全評価を求められる対象として原子力発電所がある。そこで原子力発電所を例として取り上げ、津波の評価技術を紹介することが本稿の目的である。ただし、原子力発電所を対象とした評価技術については、既に土木学会原子力土木委員会津波評価部会（2002）が「原子力発電所の津波評価技術」という詳細なマニュアル（以下、津波評価マニュアル）を発行している。よって、具体的な評価技術については津波評価マニュアルを参照していただくこととして、本稿では全体の構成や重要事項を中心に説明する。また、現在課題となっており、今後研究の進展が期待されるものについてもあわせて述べる。

### 2. 津波評価マニュアルの位置付け

このマニュアルは2002年2月時点において最も妥当と考えられる評価技術を土木学会原子力土木委員会津波評価部会が取りまとめたものである。本編、付属編、レビュー編の3部構成になっており、本編では

津波に対する安全性を評価するにあたって必要となる手法や条件などがよく精査され、体系的に説明されている。また、付属編では本編に関連した資料が網羅され、レビュー編では将来への課題が具体的に示されている。このマニュアルは原子力発電所だけでなく、国や自治体が行う津波防災においても大変有効な内容となっている。

しかし、津波評価マニュアルが発行された2002年2月以降、2004年インド洋津波や2007年新潟県中越沖地震などが発生して大きな被害を与えた反面、地震および津波に対する新たな知見も多く得られている。このように津波研究およびその成果である解析技術、さらにリモートセンシングや地形モデルなどの解析に必要な環境も日進月歩で進歩している。既に最近の実務においては、津波評価マニュアルで示されているよりも詳細な数値計算が実施されている事例もある（例えば、図-1、図-2）。したがって、原子力発電所の津波に対する安全評価を行う際には、同マニュアルで示されているのは最低要件であると捉え、積極的に新たな知見や手法を導入していく姿勢が求められる。我が国のみならずの全世界において、地球温暖化問題を踏まえた上で、長期的かつ安定した電力供給の実現のために原子力発電の果たすべき役割は極めて大きい。原子力発電がその責任を果たしていくためには、最高水準の安全評価が行われていることが必須であり、それによって始めて市民の安心感と理解、そして協力が得られる。したがって、自治体によるハザードマップ作成用シミュレーションより簡易な解析などは原子力発電所の安全評価では許されない。むしろ、人的・予算的に大きな制約のある自治体の防災部門が目標とし、参考とするような防災アセスメントを原子力発電所では実施されていない。図-1

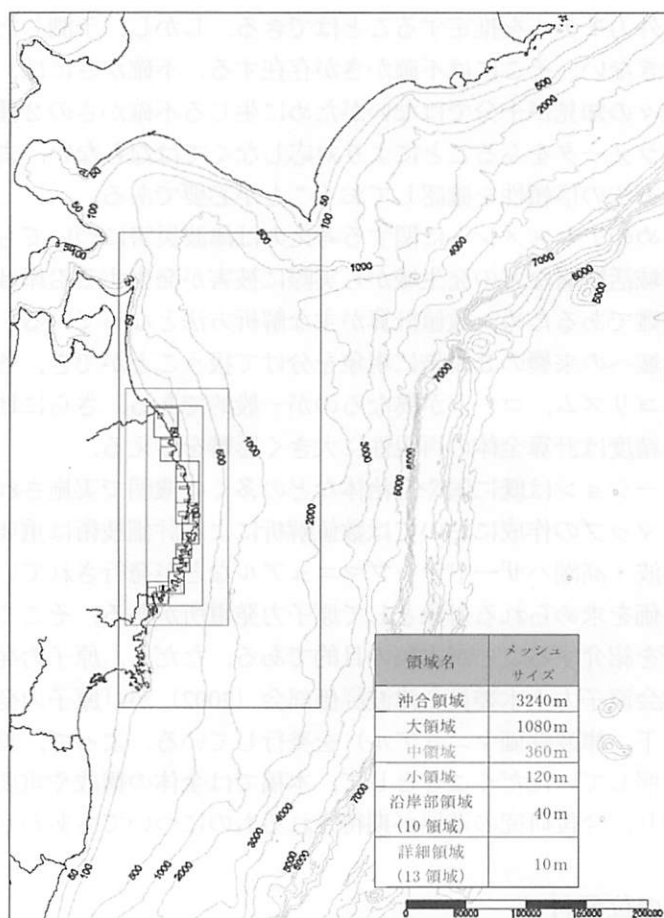


図-1 岩手県（2004）が実施した津波シミュレーションの格子配置（最小格子は10m）

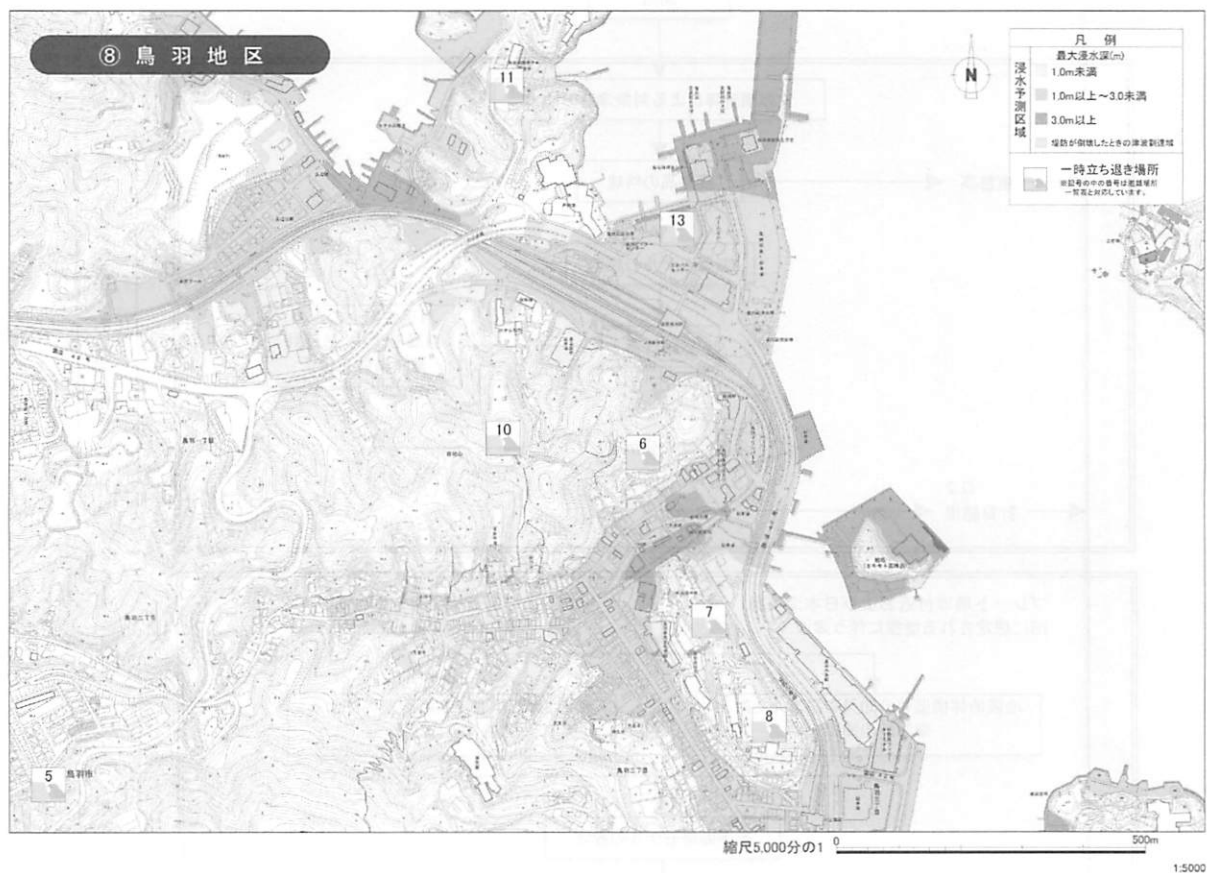


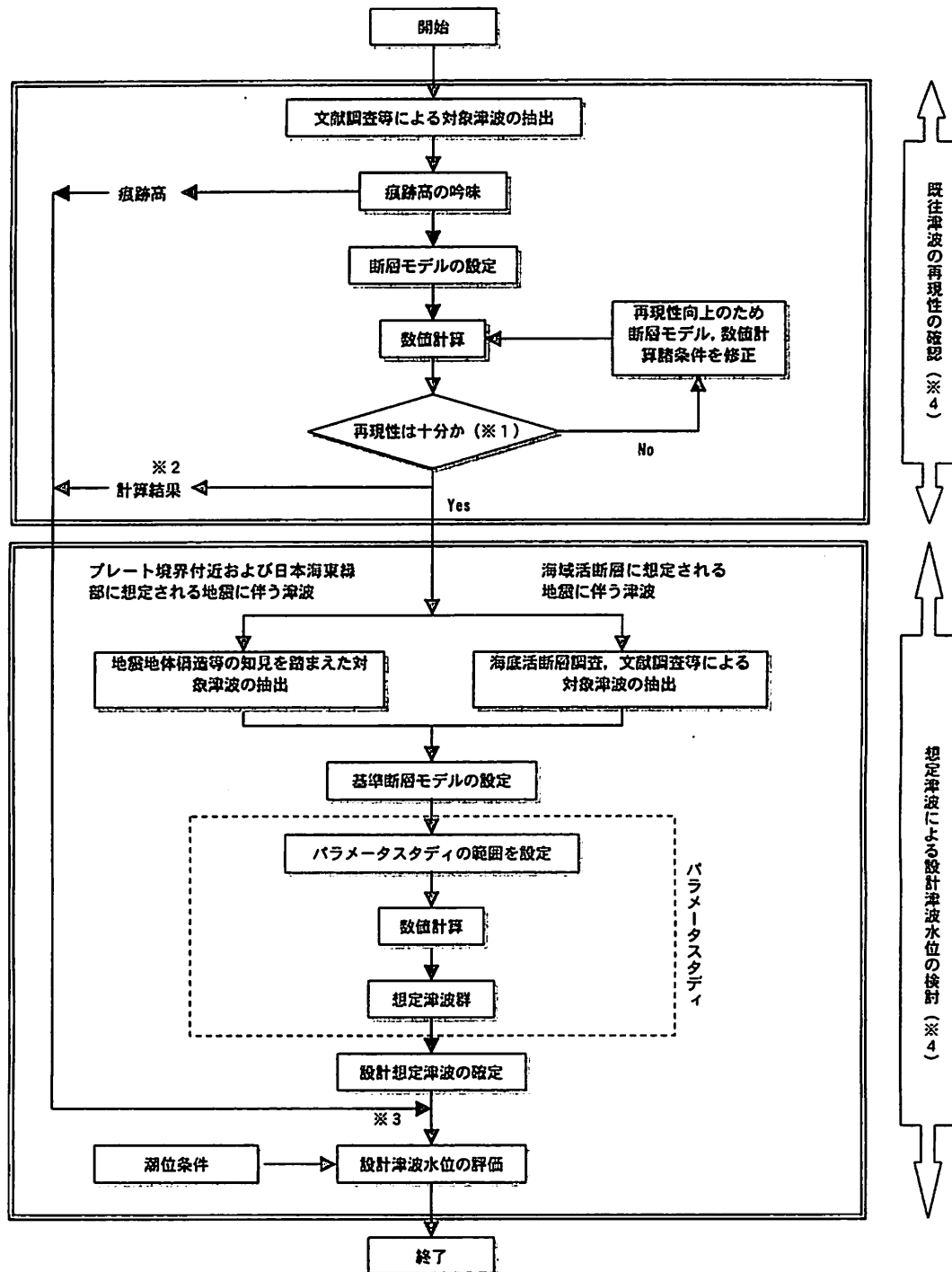
図-2 三重県が作成した津波ハザードマップの一例（最小格子は6.25 m でシミュレーションを実施）

### 3. 評価の流れ

津波による被害に関連する変量としては水位や流速，流体力，砂移動などがあるが，原子力発電所においては設備や取水に支障をきたさないことが最重要であるため，最高水位と最低水位の評価が中心となる．よって，津波評価マニュアルでも，評価地点に最も大きな影響を与える津波モデルを想定し，それから計算される評価地点での水位変化に潮位条件を加えたものを設計津波水位として安全評価を行っている．なお，最高水位と最低水位を与える津波モデルが同一であるとは限らない．

津波の発生原因は地震や火山噴火，地滑りなど多岐にわたり，それぞれの評価地点において発生する危険性の高い原因について適切に外力モデルを想定しなくてはならない．ただし，津波評価マニュアルでは地震による津波の評価技術についてまとめられており，地震以外の発生原因についてはレビューが示されているのみである．よって，地震以外によって発生する津波については，それぞれの分野における最新の研究成果をレビューし，適切に評価しなくてはならない．我が国においては地震以外で津波が発生する危険性は低いと考えられるが，例えば電源開発株式会社の大間原子力発電所の設置審査においては北海道の恵山火山の山体崩壊によって津波が発生した場合の安全評価も行われている（経済産業省，2007）．

津波評価マニュアルにおける設計津波水位評価の流れを図-3 に示す．「既往津波の再現性の確認」と「想定津波による設計津波水位の検討」の2段階に大きく分けることができる．前者の目的は使用する数値計算法の妥当性を確認することである．すなわち，適切な断層モデルが設定されれば，評価地点へ来襲する津波を十分な精度で予測できることを確認しなくてはならない．後者の目的は各地域周辺のプレートテクトニクスや地質構造，地形などの特性を踏まえた設計津波水位を求めることである．



- ※1：再現性は十分か  
・広域の  $K$ ,  $\kappa$  について次の条件を目安とする。 $(K, \kappa$  はそれぞれ相田による幾何平均と幾何標準偏差)  
 $0.95 < K < 1.05, \quad \kappa < 1.45$
- ※2：計算結果  
・地点周辺の  $K$  が 1.0 から離れている場合は計算結果を  $K$  倍する。
- ※3：既往津波との比較検討  
・評価地点において、設計想定津波の計算結果が既往津波の計算結果および痕跡高を上回っていること。  
・評価地点付近において、想定津波群の計算結果の包絡線が既往津波の痕跡高を上回っていること。
- ※4：遠地津波の扱い  
・近地津波より遠地津波のほうが大きくなることが予想される場合は、遠地津波についても検討する。

図-3 津波評価マニュアルにおける設計津波水位評価の流れ

前者においては、まず対象とする既往津波およびその津波の痕跡高を抽出する必要があるが、その方法は文献調査が中心となっている。次に断層モデルを設定し、Mansinha and Smylie (1971)や Okada (1985)の方法により津波波源を計算する。断層モデルは図-4 に示す断層パラメータで構成されるが、津波波源の計算に用いられるパラメータは断層深さ (depth), 断層長 (length), 断層幅 (width), 走向 (strike), 傾斜角 (dip), すべり方向 (slip), すべり量 (dislocation), そして断層位置である。計算された津波波源を初期条件として伝播計算が行われるが、支配方程式としては浅海域で非線形長波理論 (浅水理論), 深海域で線形長波理論が一般的に用いられる。計算スキームとしてはスタガード格子を用いたリーブフロッグ法が用いられ、特に移流項については一次の風上差分が適用される場合が多い (高橋, 2002)。そして、計算された沿岸部での津波高と痕跡高を比較して再現性を検証し、不十分な場合は断層モデルの設定から繰り返すことになる。再現性の確認には次式の相田 (1977) による幾何平均  $K$  と幾何標準偏差  $\kappa$  が用いられる。

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i \quad (1)$$

$$\log \kappa = \left[ \frac{1}{n} \left\{ \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - n(\log K)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $n$ : 地点数,  $K_i = R_i / H_i$ ,  $R_i$ :  $i$  番目の地点の痕跡高,  $H_i$ :  $i$  番目の地点の計算値である。広域を対象とした計算においては、次の条件を満たすことが必要とされている。

$$0.95 < K < 1.05 \quad (3)$$

$$\kappa < 1.45 \quad (4)$$

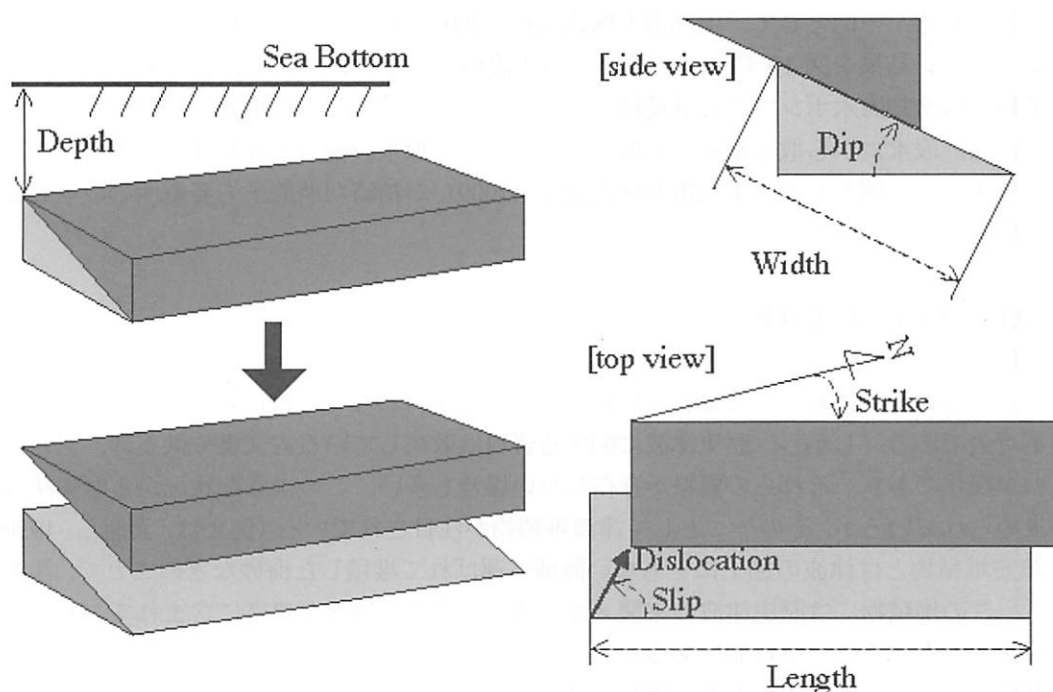


図-4 断層パラメータ

以上のように使用する数値計算法の妥当性が確認されたら、後者の設計津波水位の検討に入る。津波評価マニュアルでは、プレート境界付近で発生する地震と海域活断層で発生する地震を検討し、評価地点に大きな影響を与える津波を抽出する。その際、阿部（1989）による簡易予測手法が良く用いられる。抽出された評価対象津波については基準断層モデルを設定する必要がある。基準断層モデルとは、各海域における地震の特性等を踏まえて適切に設定された断層モデルであり、図-5 から 8 に示す方法が津波評価マニュアルにより提案されている。ここに、 $M_w$  と  $M_0$  は Kanamori (1977) によるモーメントマグニチュードおよび地震モーメントである。

基準断層モデルが設定されれば、上述の津波波源の計算および伝播計算を実施することにより、設計津波水位を求めることが方法的には可能である。しかし、基準断層モデルのみで設計津波水位を決定することは危険である。なぜならば、基準断層モデルはその時点で最も発生の可能性が高いと予想された地震であるが、そこには必ず不確かさが存在する。したがって、断層モデルの各パラメータを変化させて津波の数値計算を実施するパラメータスタディが必要となる。そして、基準断層モデルとパラメータを変化させた複数の断層モデルから計算された津波のうち、最も評価地点に影響を与えるものを設計津波水位として決定する。ただし、この設計津波水位は潮位条件を加えて既往津波の痕跡高および再現計算結果との比較を行い、それらを上回っていることを確認しなくてはならない。

以上の津波評価マニュアルに示されている設計津波水位の評価方法は、実際の原子力発電所の安全審査においても参考にされている。一例として、北陸電力株式会社（2009）が志賀原子力発電所に対して実施した津波に対する安全評価の流れを図-9 に示す。この例に示されているように実際の安全審査においては、上述の評価内容に加えて二次的な影響に対する評価が行われている。これは津波が来襲することによって発生する設計津波水位以外の評価項目である。その内容は原子力発電所によって異なるが、一般的には津波による砂移動や取水設備などの安全性が評価される。津波による砂移動については、藤井ら（1998）や高橋ら（1999）などのモデルにより砂の移動量および地形変化が計算され、取水口埋没などが生じず、取水に支障をきたさないことが確認される。一例として、中部電力株式会社（2007）が浜岡原子力発電所に対して実施した砂移動のシミュレーション結果を図-10 に示す。また、取水設備の安全性については、津波による水位低下が発生しても原子炉補機冷却海水ポンプの設計最低水位以下は下回らず、安全に取水し続けられることが確認される。具体的には、取水口から取水路を経て取水ピットに至る取水設備の水理特性を踏まえてポンプ室内の水位変動を計算する。一例として、東京電力株式会社（2009）が柏崎刈羽原子力発電所の取水設備に対し実施した安全評価を図-11 に示す。

#### 4. 研究の進展が期待される課題

##### （1）津波堆積物を用いた歴史津波の評価

図-3 に示した評価の流れにおいては最初に既往津波の抽出を行わなくてはならない。そのためには歴史津波の調査が不可欠である。しかし、歴史津波に関する資料は散在している古文書や供養碑、言い伝えなどに頼っているのが現状であり、それらの資料が存在しない場合も多い。このような状況から歴史津波の新たな解析手法が求められているが、その一つとして津波堆積物が注目されている（例えば、箕浦ら、1990；Dawsonら、1991）。津波堆積物とは津波の遡上にともない陸域へ運ばれて堆積した海砂などのことで、津波来襲の物的証拠となる。この堆積物には歴史津波の来襲メカニズムに関する情報が豊富に含まれており、歴史津波の発生頻度や来襲状況を知ることが可能であると考えられる。

しかし、津波堆積物に関するこれまでの研究は現地調査が中心であり（例えば、今村ら、1996）、堆積物が形成される過程や分布傾向に関しての定量的な評価はほとんど行われていなかった。津波堆積物への水理学的なアプローチは現在のところ長谷川ら（2001）による水理実験などに限られている。津波堆積物に含まれている情報をより有効に活用するためには今後さらに水理学的モデルの構築が必要である。

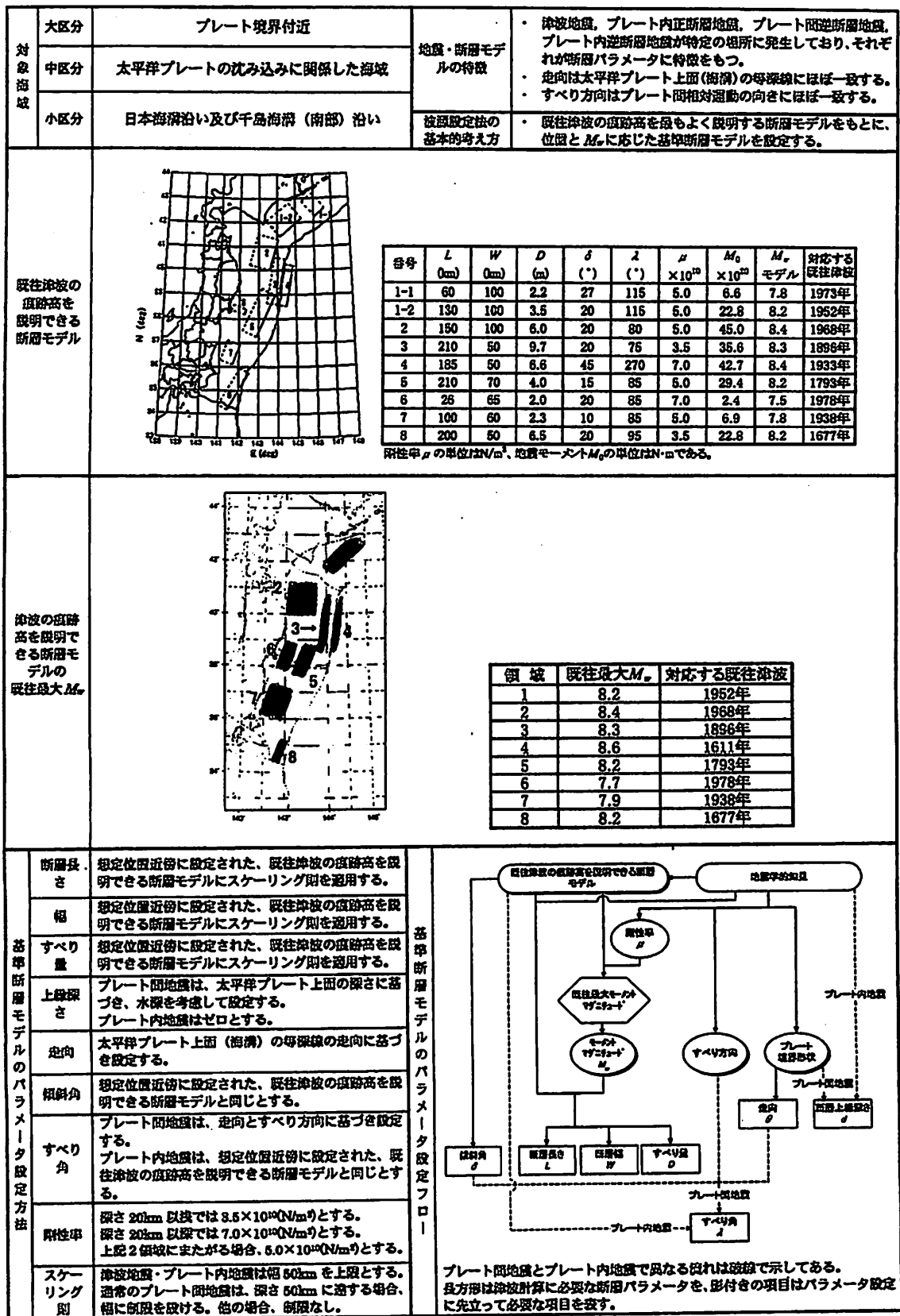


図-5 津波評価マニュアルにおける基準断層モデルの設定方法 -日本海溝沿いおよび千島海溝（南部）沿い-

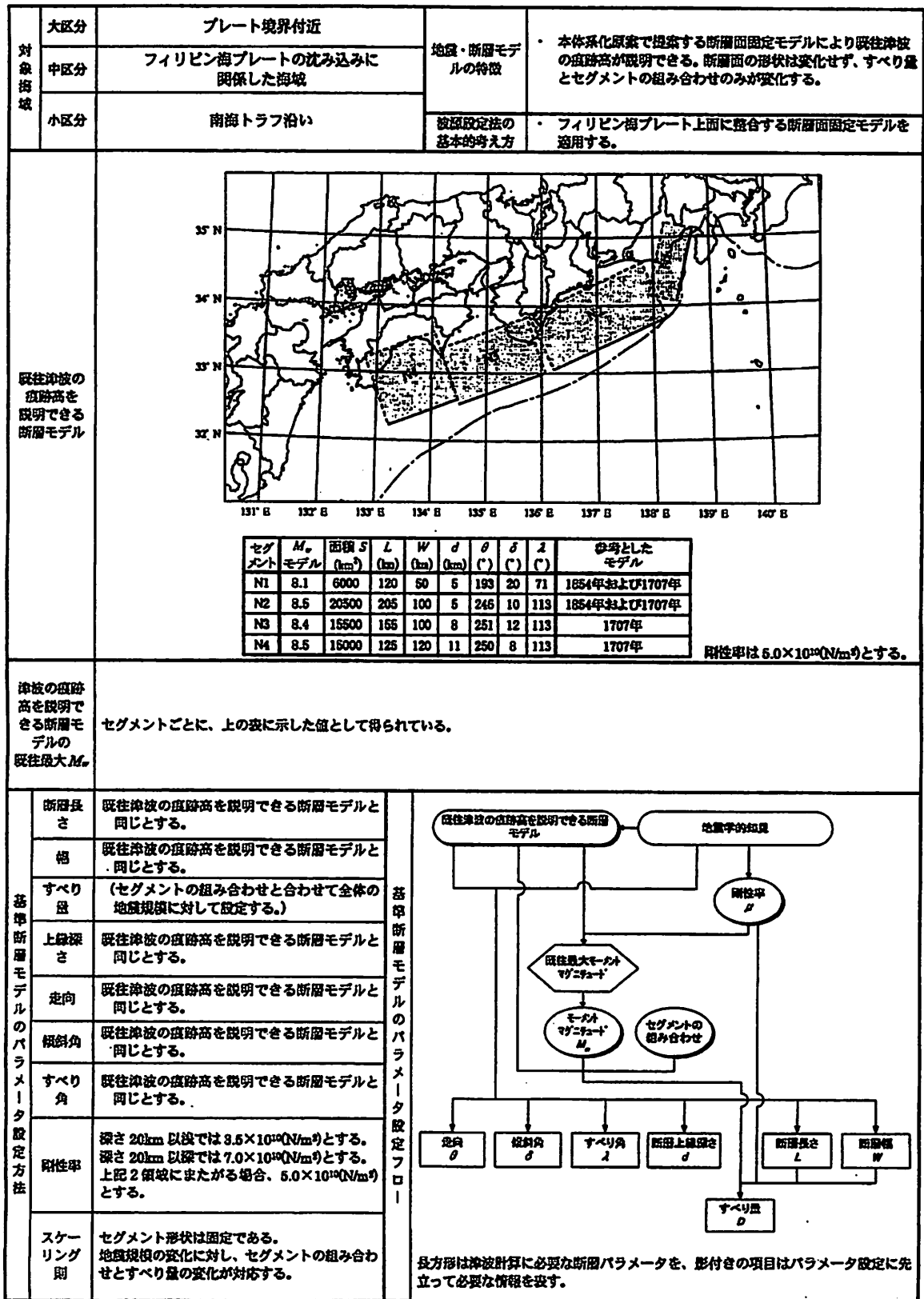


図-6 津波評価マニュアルにおける基準断層モデルの設定方法 -南海トラフ沿い-

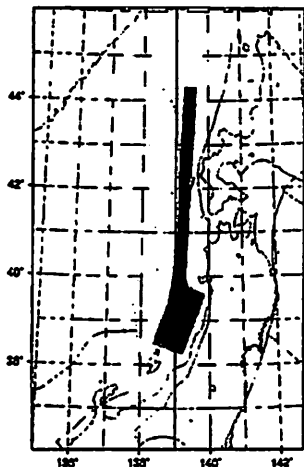
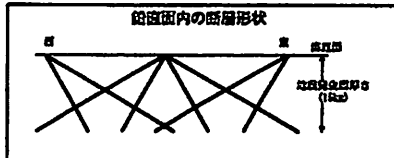
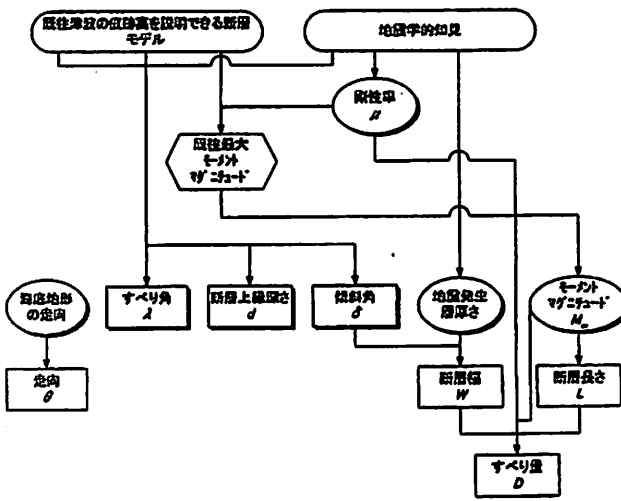
|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |                                                                                                                                                                         |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 対象海域                         | 大区分                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 日本海東縁部                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 地震・断層モデルの特徴 | 津波の痕跡高を説明できる波源モデルのモーメントマグニチュードと断層長さの間に内陸地震に対する武村(1998)の関係が適用できることが、本報告において明らかとなった。<br>・浅い地震で、地震発生層の厚さが限られている。<br>・西傾斜、東傾斜の両方のタイプが発生する<br>・走向は等水深線にほぼ一致し、ほぼ純粋な縦ずれ逆断層である。 |
|                              | 中区分                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             | 波源設定法の基本的考え方                                                                                                                                                            |
|                              | 小区分                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |                                                                                                                                                                         |
| 位置                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  <p>地震の活動域<br/>(黒く塗った活動域内に断層モデルを設定する。)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>鉛直面内における位置と傾斜方向・傾斜角の関係<br/>(傾斜方向、傾斜角は東西方向の位置に連動する。)</p> </div> </div> |             |                                                                                                                                                                         |
| 津波の痕跡高を説明できる断層モデルの既往最大 $M_w$ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 上図の黒く塗った活動域全体で、1993年北海道南西沖地震津波が最大であり、 $M_w 7.8$ である。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |             |                                                                                                                                                                         |
| 基準断層モデルのパラメータ設定方法            | 断層長さ                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | スケーリング則に基づき、 $M_w$ から求める。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | 幅                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 地震発生層の厚さ(16km)を考慮し傾斜角に応じて決める。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | すべり量                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $\log M_0 (N \cdot m) = 1.5 M_w + 9.1$<br>$D = M_0 / \mu L W$ により算出する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | 上縁深さ                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 0km とする。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | 走向                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 海底地形の走向に基づき設定する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | 傾斜角                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $30 \sim 60^\circ$ とする。<br>西傾斜と東傾斜の双方を考慮する。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | すべり角                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | $90^\circ$ とする。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | 附性率                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | $8.5 \times 10^{-10} (N/m^2)$ とする。                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | スケーリング則                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 幅(地震発生層厚さ)に上限あり。<br>スケーリングの変曲点を境に、 $M_w$ が大きいとき武村(1998)の関係<br>$\log L(km) = 0.75 M_w - 3.77$ ,<br>$L \propto D, W \propto const.$<br>が、 $M_w$ が小さいとき<br>$W = 2L/3, L \propto W \propto D$<br>の関係が成り立ち、両者が連続的に接続するものとする。                                                                                                                                                                                                                                 |             |                                                                                                                                                                         |
|                              | <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 45%;"> <p>基準断層モデルのパラメータ設定フロー</p>  </div> <div style="width: 50%;"> <p>長方形は津波計算に必要な断層パラメータを、影付きの項目はパラメータ設定に先立って必要な情報を表す。</p> </div> </div> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |             |                                                                                                                                                                         |

図-7 津波評価マニュアルにおける基準断層モデルの設定方法 -日本海東縁部-

|                   |         |                                                                                                                                                                                                |                                                                                           |                                                                                              |
|-------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 対象海域              | 大区分     | 海域活断層<br><br>* 海域活断層による津波が沿岸で最大規模と考えられるのは、ほぼ西南日本周辺海域に限定されるため、以下は主に西南日本周辺海域に関する記述である。                                                                                                           | 地震・断層モデルの特徴                                                                               | ・ 活断層による大規模な既往の地震津波はない。<br>・ 地震発生層の厚さが限られている。<br>・ 地殻構造は陸域から連続すると考えられる。<br>・ 傾斜角は高角側に集中している。 |
|                   | 中区分     |                                                                                                                                                                                                |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | 小区分     |                                                                                                                                                                                                | 波源設定法の基本的考え方<br>・ 地震発生層の厚さを考慮し、武村(1998)に基づくスケーリング則を適用する。<br>・ 不確定性の大きいパラメータは、現実的な範囲を設定する。 |                                                                                              |
| 位置                |         | ・ 位置は活断層調査結果に基づいて設定する。                                                                                                                                                                         |                                                                                           |                                                                                              |
| モーメントマグニチュード      |         | ・ 断層長さから、スケーリング則を適用して設定する。                                                                                                                                                                     |                                                                                           |                                                                                              |
| 基準断層モデルのパラメータ設定方法 | 断層長さ    | 基本的には活断層調査結果に基づいて設定する。<br>$M_w$ から長さを決定する際には、スケーリング則にしたがう。                                                                                                                                     |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | 幅       | 地震発生層の厚さを考慮し傾斜角に応じて決める。地震発生層厚さは15km。                                                                                                                                                           |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | すべり量    | $\log M_0 (N \cdot m) = 1.5 M_w + 9.1$<br>$D = M_0 / \mu L W$ により算出する。                                                                                                                         |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | 上縁深さ    | 0km とする。                                                                                                                                                                                       |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | 走向      | 活断層調査結果に基づいて設定する。                                                                                                                                                                              |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | 傾斜角     | 発震機構解の分析等により設定する。45°～90° とする。                                                                                                                                                                  |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | すべり角    | 断層面の走向・傾斜角と主応力軸方向範囲に基づき設定する。                                                                                                                                                                   |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | 剛性率     | 8.5×10 <sup>10</sup> (N/m <sup>2</sup> )とする。                                                                                                                                                   |                                                                                           |                                                                                              |
|                   | スケーリング則 | 幅（地震発生層厚さ）に上限あり。スケーリングの変曲点を境に、 $M_w$ が大きいとき武村(1998)の関係 $\log L(km) = 0.75 M_w - 3.77$ , $L \propto D, W = const.$ が、 $M_w$ が小さいとき $W = 2L/3, L \propto W \propto D$ の関係が成り立ち、両者が連続的に接続するものとする。 |                                                                                           |                                                                                              |

基準断層モデルのパラメータ設定フロー

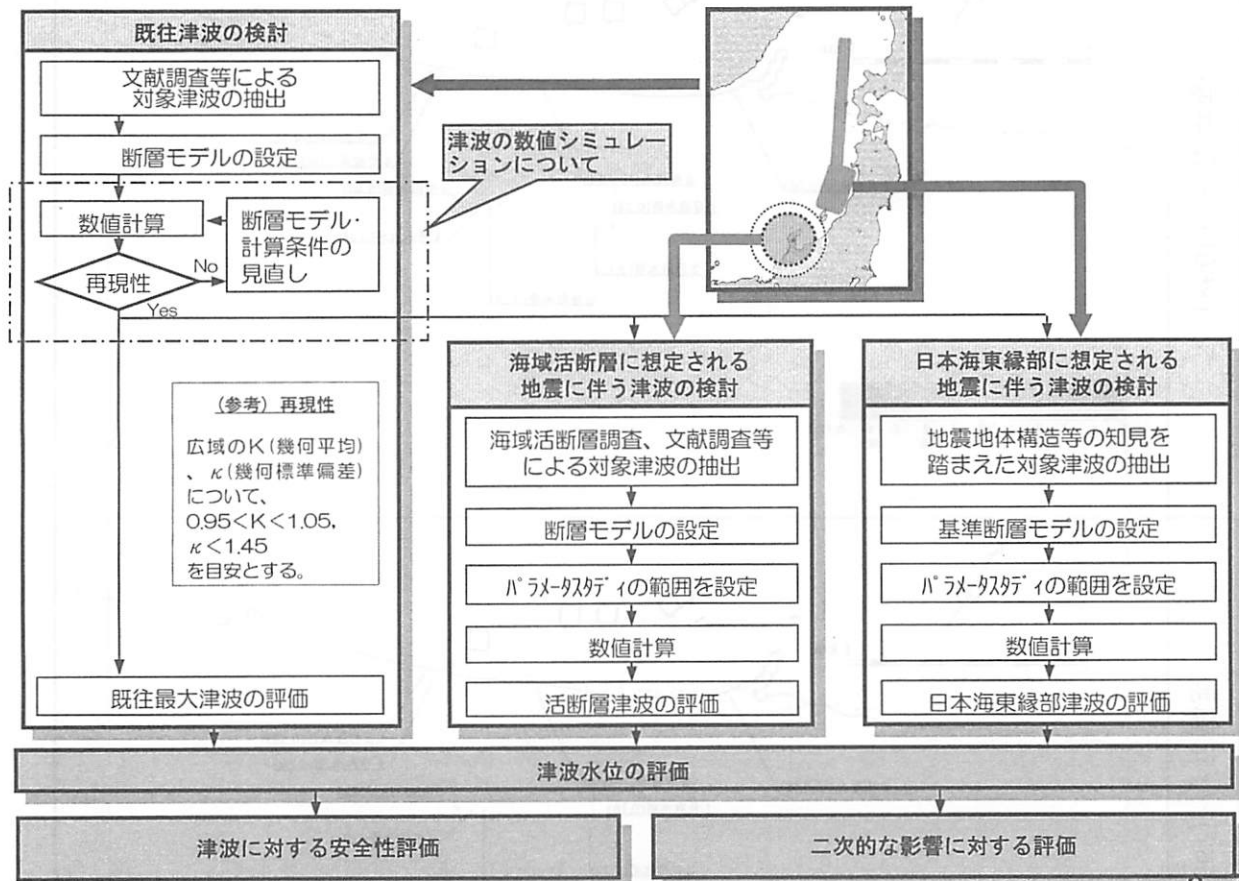
長方形は津波計算に必要な断層パラメータを、影付きの項目はパラメータ設定に先立って必要な情報を表す。モーメントマグニチュードを断層長さより先に設定する場合は、破線で示した流れにより、モーメントマグニチュードから断層長さを算出する。

傾斜角等のパラメータについても、活断層調査等から明らかな場合は、随時的に取り扱うことができる。

図-8 基津波評価マニュアルにおける準断層モデルの設定方法 -海域活断層-

# 1. 津波評価の流れ

3. 地震随伴事象(原子炉建屋基礎地盤等・津波)の評価  
(2) 津波に対する安全性評価



3-7

図-9 北陸電力株式会社(2009)による志賀原子力発電所での津波評価の流れ

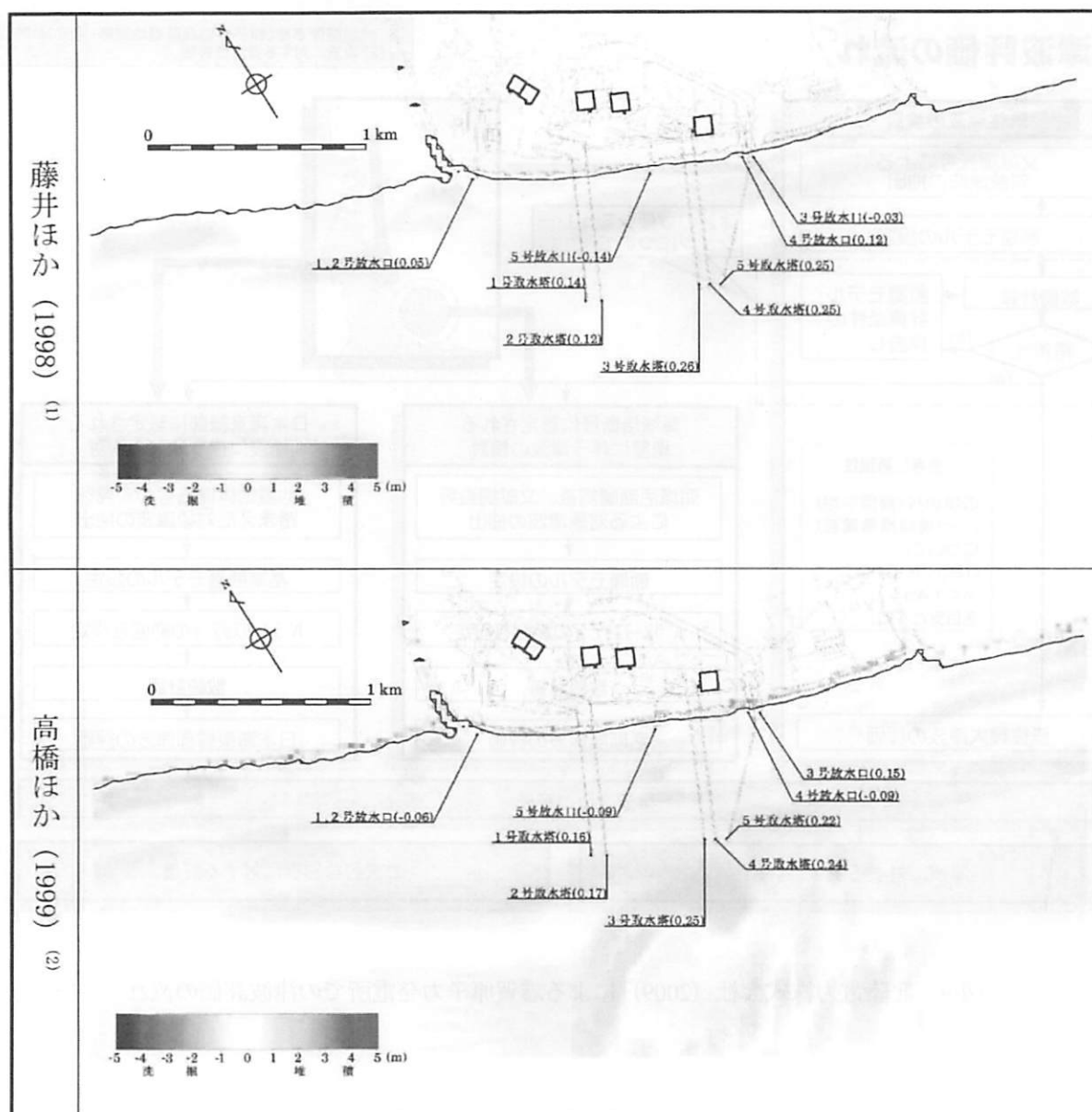


図-10 中部電力株式会社 (2007) による浜岡原子力発電所での砂移動シミュレーション結果

### 3.2 取水設備の水利特性による水位変動の影響評価

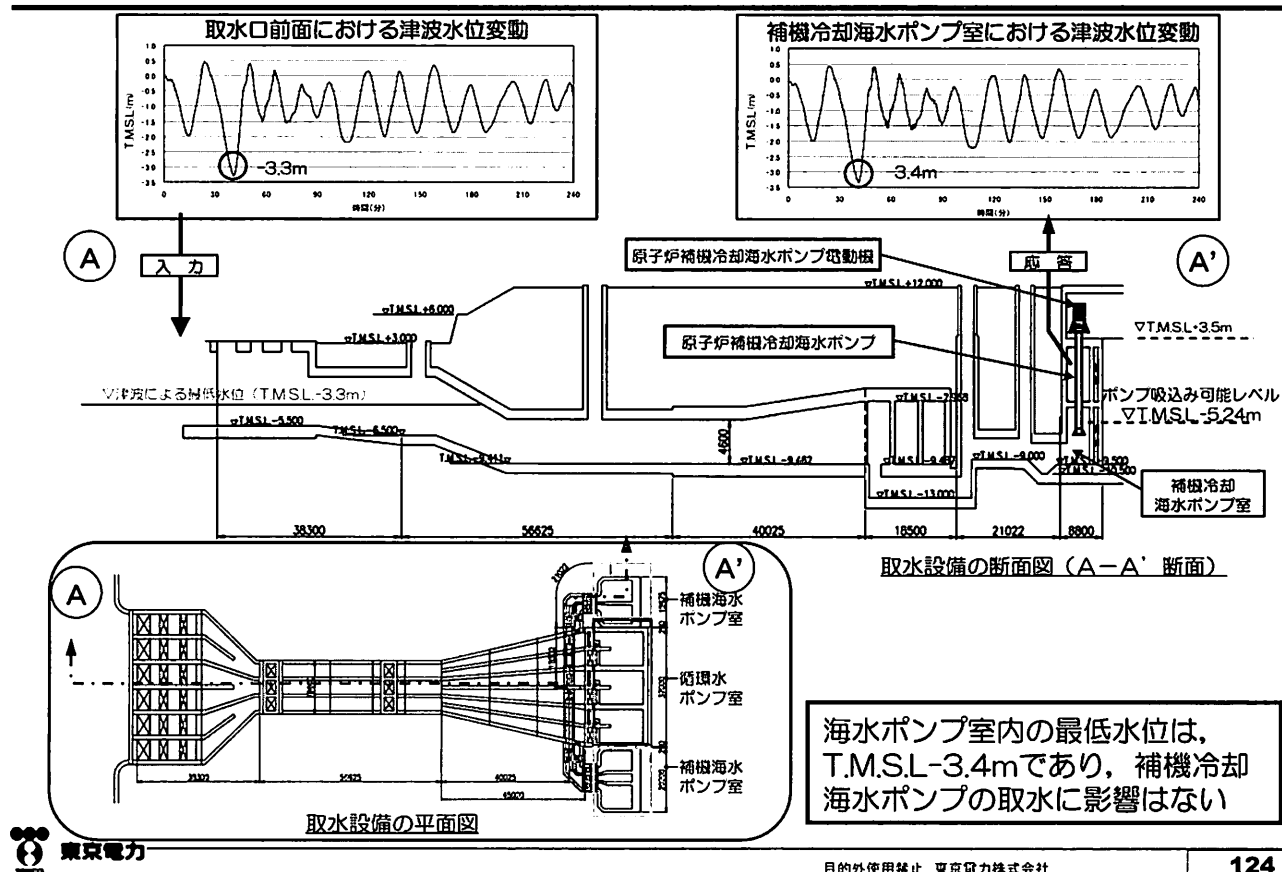


図-11 東京電力株式会社（2009）による柏崎刈羽原子力発電所の取水設備の安全評価

#### (2) 痕跡高と比較するための陸側境界条件

一般的に痕跡高は陸域における記録であるから、これと比較するための数値計算においては陸側境界条件として遡上を考慮しなくてはならない。しかし、計算負荷の軽減や陸域での地形モデルが十分に整備されていないために、汀線を鉛直な無限壁と仮定して、完全反射の条件で数値計算を行っている事例は多く見られる。痕跡高の持つ情報をより有効に活用するため、高い信頼性が確認されている痕跡高については遡上計算を行った上で比較していくことが望ましい。また、完全反射および遡上という2種類の境界条件の相違が地形や来襲する津波とどのように関係しているのかを調べ、完全反射による計算結果を遡上による計算結果へ換算する手法が提案されることも期待される。

#### (3) 地震モデルと津波モデルの整合性

一般的に、地震動を説明できる断層モデルをそのまま使用して津波を計算した場合、痕跡高に比べて津波が過小評価になることが多い。すなわち、地震動を説明するための断層モデルと津波を説明するための断層モデルが整合していない場合がよくある。たとえ両モデルに相違があったとしても、津波を説明するための断層モデル自体は津波の規模を表しているため、津波に対する安全評価を行う上では問題がない。

しかし、断層運動という同じ自然現象を断層モデルという同じ方法で表記しているにも関わらず、地震動と津波で異なってしまうことは奇異に感じられてもしかたがない。特に原子力発電所の場合、その安全性を国民に説明する義務があり、評価技術への信頼性が疑われることがあってはならない。したがって、その相

違を合理的に説明できる原因を明らかにすることが必要であり、また原因が数値解析法にあるのならば改善していくことも必要である。

#### (4) 不確かさの範囲

評価マニュアルでは、パラメータスタディを行うべきパラメータを表-1のようにまとめている。それぞれのパラメータを変化させる範囲については「合理的と考えられる範囲を設定することを基本とする」とあり、地域ごとに具体的な範囲が示されている。しかし、それらの範囲は既往地震データから求められたものであり、十分な知見が得られていない地震も多数存在する。また、日本海東縁部などのように知見自体が少ない上、地質年代的に新しいため明確なプレート境界が形成されていないと考えられる地域もある。よって、パラメータスタディを行った結果、基準断層モデルよりも津波が大きく増大する傾向がみられた場合は、津波評価マニュアルで示されている以上の不確かさを考慮し、安全性の確認をすることが重要である。

#### (5) 津波波源の不均一性

従来、津波ハザードマップ作成のためのシミュレーションでは図-4に示したような単純な矩形断層を仮定して津波波源を求めている。これは断層が一様に運動することを意味しており、断層面上ではどの地点も同じすべり量が発生していることになる。しかし、Somerville et al. (1999)などにより、断層面上には局所的にすべり量が大きくなる部分（アスペリティ）があることが明らかにされている。我が国周辺で発生する地震についてもアスペリティに関する研究は進んでおり、例えば東海地震・東南海地震・南海地震については図-12に示すようなアスペリティモデルが提案されている。しかし、それぞれの地域におけるアスペリティの位置や大きさ、応力降下量、すべり量などにはまだ不確かさが存在し、地震動の評価においてはパラメータスタディが行われる場合もある。

表-1 津波評価マニュアルにおけるパラメータスタディ（本編参考資料1～4は図-5から8に対応）

| 海域                | 地震の発生様式     | 位置 | 断層面上縁深さ $d$          | 走向 $\theta$ | 傾斜角 $\delta$         | 傾斜方向             | すべり角 $\lambda$              | セグメントの組合せ |
|-------------------|-------------|----|----------------------|-------------|----------------------|------------------|-----------------------------|-----------|
| 日本海溝沿い～千島海溝沿い（南部） | 典型的なプレート間地震 | ○  | ○                    | ○           | ○                    | -                | ○<br>（すべり方向のばらつきを考慮して走向に連動） | -         |
|                   | 津波地震        | ○  | ○                    | ○           | ○                    | -                | ○<br>（すべり方向のばらつきを考慮して走向に連動） | -         |
|                   | プレート内正断層地震  | ○  | ○                    | ○           | ○                    | -                | -<br>（270°に固定）              | -         |
| 南海トラフ沿い           | 典型的なプレート間地震 | ○  | ○                    | ○           | ○                    | -                | ○<br>（すべり方向のばらつきを考慮して走向に連動） | ○         |
| 日本海東縁部            | 陸域の浅い地震     | ○  | ○                    | ○           | ○                    | ○<br>（西傾斜、東傾斜）   | -<br>（90°に固定）               | -         |
| 海域活断層             | 陸域の浅い地震     | -  | ○<br>（調査により明確な場合は固定） | -           | ○<br>（調査により明確な場合は固定） | ○<br>（不明な断層は両方向） | ○<br>（応力場のばらつきを考慮して傾斜角に連動）  | -         |

○は原則実施する因子。断層面上縁深さ  $d$ 、走向  $\theta$ 、傾斜角  $\delta$ 、すべり角  $\lambda$  等については、本編参考資料1～4参照。セグメントの組合せについては本編参考資料2参照。

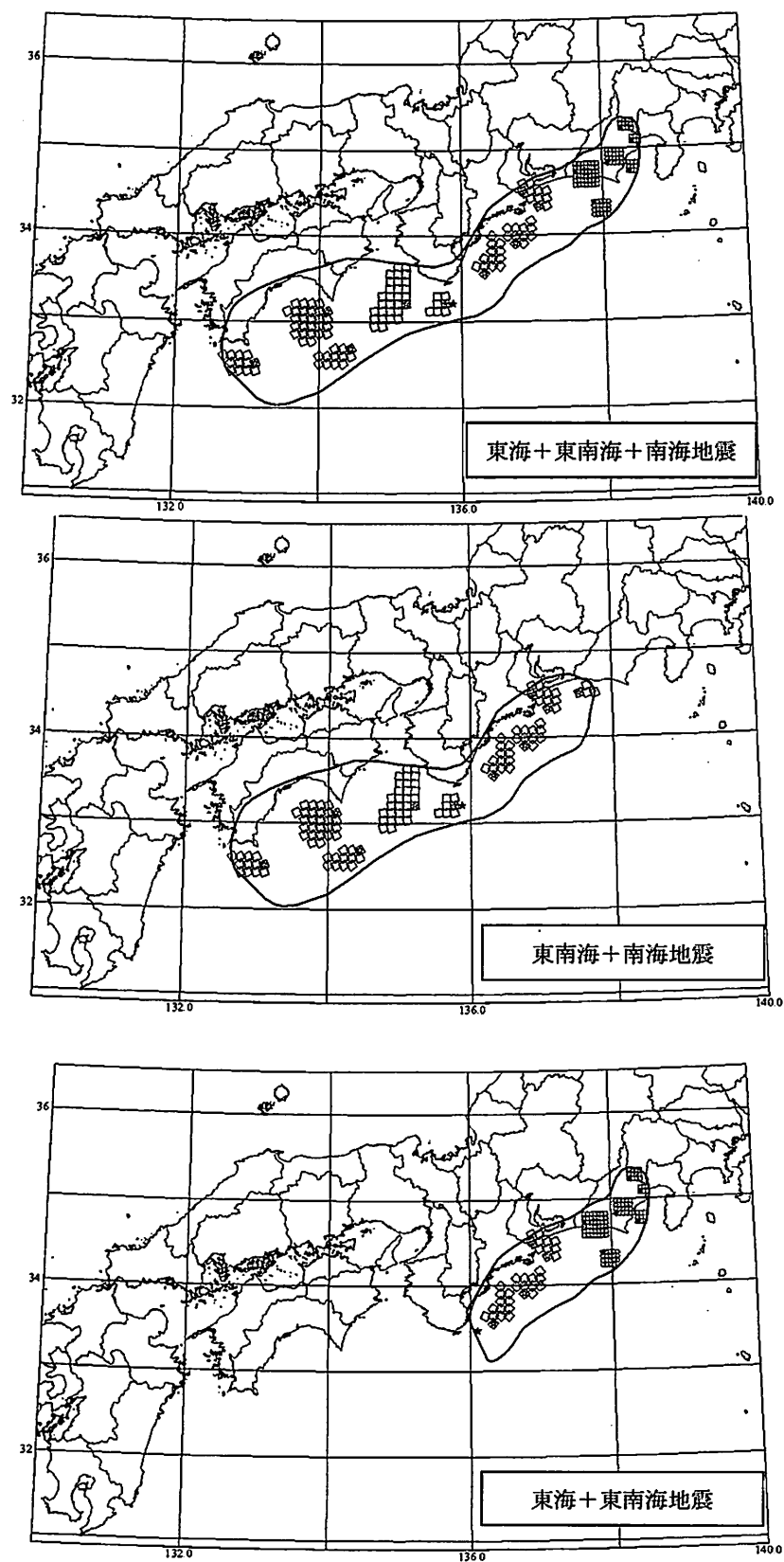


図-12 中央防災会議（2003）によるアスペリティモデルの一例

アスペリティとそれ以外の背景領域ではすべり量が異なるため、断層運動により引き起こされる津波波源にも不均質性が生じてしまう。したがって、各地域において最大となる津波高が変わってくることになる(河田ら, 2003) ため、原子力発電所のように局所的な地域の安全性を評価する際には重要な評価項目となる。しかし、津波の場合、アスペリティの位置に関する不確かさの考慮には技術的な課題がある。地震動の場合は評価地点の直下にアスペリティが存在する配置が最も危険な想定となる。ところが、津波の場合はアスペリティの発生する場所の水深やアスペリティの面積、評価地点までの津波の伝播経路などにより最悪となる想定は変化する。残念ながら現時点では、津波が最も大きくなるアスペリティの配置を求める普遍的な方法は得られておらず、今後の研究が期待される。津波に対して明らかに危険となるアスペリティを選定できない場合は、地震モデルとの整合性を踏まえて地震動評価で検討しているアスペリティの不確かさについては津波においても最低限検討すべきであろう。

#### (6) ベンチマーク問題の必要性

津波の安全性評価においては津波波源の計算および伝播計算が実施されるが、それには支配方程式や境界条件、計算スキーム、アルゴリズム、コーディング、地形モデルにより構成される解析システムが必要となる。この解析システムが妥当なものであるかどうかは、既往津波の再現性により確認される。しかし、その確認で用いられるデータの多くは痕跡高であり、痕跡高自体の信頼性や痕跡が得られた当時の地形モデルの再現性などに誤差が含まれている可能性は絶えず存在する。よって、より客観的で信頼性の高いベンチマーク問題が望まれる。津波を対象としたベンチマーク問題としては Yeh et al. (1995) などがあるが、提供されているのは小規模の水理実験データや痕跡高などであり、原子力発電所に来襲する津波に対するベンチマーク問題としては不十分である。また、各評価地点の地形の特性は計算で用いられる地形モデルに反映されていることが必要であるが、一般的に提供されているベンチマーク問題にはこのような地形モデルは含まれていない。

そこで、各原子力発電所に特化したベンチマーク問題が期待される。例えば、2007 年新潟県中越沖地震では小規模の津波が発生し、港湾空港技術研究所の NOWPHAS (全国港湾海洋波浪情報網) や各地の検潮所において波形が観測されている。また、地殻変動や地質構造などのデータが得られており、信頼性の高い地震モデルも提案されている。したがって、地震モデルから計算される津波波源を初期条件として、詳細な地形モデルを用いたシミュレーション結果を実際の観測波形と比較することができ、評価技術の信頼性を確認することができる。このような小規模の津波に対しても観測データを蓄積していくことにより、数値計算法の発展への大きな貢献が期待できる。さらに、将来の評価技術の高度化を目的として、各原子力発電所においても津波の観測システムの整備が望まれる。

#### 5. おわりに

極めて高いレベルの安全評価が求められる原子力発電所を例として、津波を対象とした防災アセスメントを紹介してきた。これらの評価技術については、既に土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2002)により整理され、詳細なマニュアルとして発行されている。よって、本稿では全体の構成や重要事項を中心に説明を行っており、各手法の具体的な内容については同マニュアルを是非参照していただきたい。このマニュアルは原子力発電に関わる実務者のみならず、津波防災に携わる多くの方々に益するところが大きい内容となっている。ただし、2002 年以降も津波研究およびその成果である解析技術は日進月歩で進歩していること、また多くの課題がまだ存在していることを理解しておく必要もある。今後、津波の評価技術がより発展し、さらに津波防災へ貢献がなされることを期待して本稿のまとめとする。

## 引用文献

- 相田勇 (1977) : 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究所彙報, Vol.52, pp.71-101.
- 阿部勝征 (1989) : 地震と津波のマグニチュードに基づく津波高の予測, 東京大学地震研究所彙報, Vol.64, pp.51-69.
- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫 (1996) : 1992 年フローレス島地震津波による堆積作用に関する現地調査, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.686-690.
- 岩手県 (2004) : 岩手県地震・津波シミュレーション及び被害想定調査委に関する報告書, 191p.
- 沿岸開発技術研究センター (2004) : 津波・高潮ハザードマップマニュアル, 128p.
- 河田恵昭・奥村与志弘・高橋智幸・鈴木進吾 : アスペリティに起因する南海地震津波の波源不均一性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.306-310, 2003.
- 経済産業省 (2007) : 電源開発株式会社大間原子力発電所の原子炉の設置に係わる安全性について, 220p.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔 (1999) : 掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.606-610.
- 高橋智幸 (2002) : 津波の解析技術—南海地震津波を例として—, 水工学に関する夏期研修会講義集, Vol.38, B-5-1-20.
- 武村雅之 (1998) : 日本列島における地殻内地震のスケーリング則—地震断層の影響および地震被害との関連—, 地震, 第 2 輯, 第 51 巻, pp.211-228.
- 中央防災会議 (2003) : 東南海、南海地震に関する報告 (案) 図表集, 東南海、南海地震等に関する専門調会 (第 16 回) 資料, p.32.
- 中部電力株式会社 (2007) : 浜岡原子力発電所 3, 4 号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価に関わる報告のうち地震随件事象に対する考慮 津波に対する安全性 (補足説明) (その 2), 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ (第 2 回) 資料, 40p.
- 東京電力株式会社 (2009) : 柏崎刈羽原子力発電所 6 号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ (第 29 回) 資料, 136p.
- 土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (2002) : 原子力発電所の津波評価技術, 321p.
- 長谷川史郎・高橋智幸・上畑義行 (2001) : 津波遡上に伴う陸域での堆積物形成に関する水理実験, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.311-315.
- 藤井直樹・大森政則・高尾誠・金山進・大谷英夫 (1998) : 津波による海底地形変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.376-380.
- 北陸電力株式会社 (2009) : 志賀原子力発電所 敷地周辺・敷地近傍の地質・地質構造、基準地震動及び地震随件事象 (原子炉建屋基礎地盤等・津波) の評価, 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ (第 28 回) 資料, 85p.
- 箕浦孝治・中谷周 (1990) : 津軽十三湖及び周辺湖沼の成り立ち, 地質学論集, 第 36 号, pp.71-87.
- 三重県 (2004) : 鳥羽市ハザードマップ, <http://www.city.toba.mie.jp/kakuka/soumu/bousai/map/map.html>, 参照 2009-07-10.
- Dawson, A. G, I. D. L. Foster, S. Shi, D. E. Smith and D. Long (1991) : The identification of tsunami deposits in coastal sediment sequences, Science of Tsunami Hazards, Vol. 9, No.1, pp.73-82.
- Kanamori, H. (1977) : The energy release in great earthquakes, Journal of Geophysical Research, Vol.82, No.20, pp.2981-2987.
- Mansinha, L. and D. E. Smylie (1971) : The displacement field of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society

of America, Vol.61, No.5, pp.1433-1440.

Okada, Y. (1985) : Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.75, No.4, pp.1135-1154.

Somerville, P., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada (1999) : Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, Vol.70, No.1, pp.59-80.

Yeh, H. P. Liu and C. Synolakis (1995) : Long-Wave Runup Models, World Scientific, p.403.