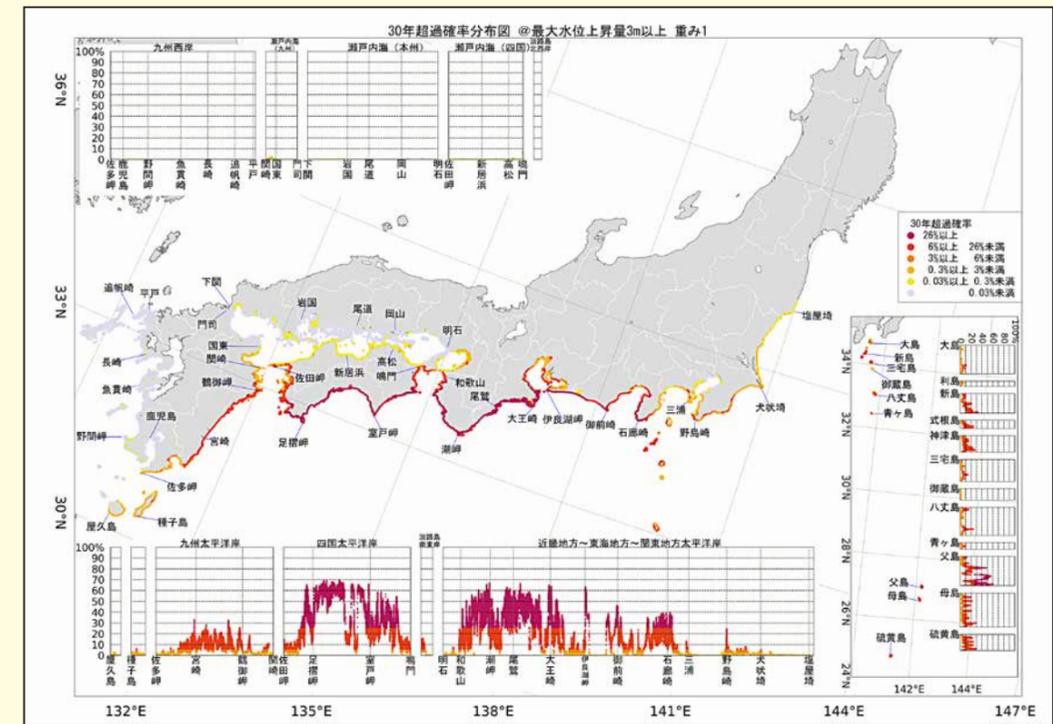


南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価 — 第一部 本編 —

Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Earthquakes Occurring along the Nankai Trough — Volume 1 Part I —



防災科学技術研究所研究資料 第四三九号

南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価 | 第一部 本編 |

防災科学技術研究所

防災科学技術研究所研究資料

- 第 373 号 阿蘇山一の宮および白水火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 48pp. 2013 年 2 月発行
- 第 374 号 霧島山万膳および夷守台火山観測井コア試料の岩相記載(付録 CD-ROM) 50pp. 2013 年 3 月発行
- 第 375 号 新庄における気象と降積雪の観測(2011/12 年冬期) 49pp. 2013 年 2 月発行
- 第 376 号 地すべり地形分布図 第 51 集「天塩・枝幸・稚内」20 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 377 号 地すべり地形分布図 第 52 集「北見・紋別」25 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 378 号 地すべり地形分布図 第 53 集「帯広」16 葉(5 万分の 1). 2013 年 3 月発行
- 第 379 号 東日本大震災を踏まえた地震ハザード評価の改良に向けた検討 349pp. 2012 年 12 月発行
- 第 380 号 日本の火山ハザードマップ集 第 2 版(付録 DVD) 186pp. 2013 年 7 月発行
- 第 381 号 長岡における積雪観測資料(35)(2012/13 冬期) 30pp. 2013 年 11 月発行
- 第 382 号 地すべり地形分布図 第 54 集「浦河・広尾」18 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第 383 号 地すべり地形分布図 第 55 集「斜里・知床岬」23 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第 384 号 地すべり地形分布図 第 56 集「釧路・根室」16 葉(5 万分の 1). 2014 年 2 月発行
- 第 385 号 東京都市圏における水害統計データの整備(付録 DVD) 6pp. 2014 年 2 月発行
- 第 386 号 The AITCC User Guide –An Automatic Algorithm for the Identification and Tracking of Convective Cells– 33pp. 2014 年 3 月発行
- 第 387 号 新庄における気象と降積雪の観測(2012/13 年冬期) 47pp. 2014 年 2 月発行
- 第 388 号 地すべり地形分布図 第 57 集「沖縄県域諸島」25 葉(5 万分の 1). 2014 年 3 月発行
- 第 389 号 長岡における積雪観測資料(36)(2013/14 冬期) 22pp. 2014 年 12 月発行
- 第 390 号 新庄における気象と降積雪の観測(2013/14 年冬期) 47pp. 2015 年 2 月発行
- 第 391 号 大規模空間吊り天井の脱落被害メカニズム解明のための E-ディフェンス加振実験 報告書 –大規模空間吊り天井の脱落被害再現実験および耐震吊り天井の耐震余裕度検証実験– 193pp. 2015 年 2 月発行
- 第 392 号 地すべり地形分布図 第 58 集「鹿児島県域諸島」27 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 393 号 地すべり地形分布図 第 59 集「伊豆諸島および小笠原諸島」10 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 394 号 地すべり地形分布図 第 60 集「関東中央部」15 葉(5 万分の 1). 2015 年 3 月発行
- 第 395 号 水害統計全国版データベースの整備. 発行予定
- 第 396 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震)における災害情報の利活用に関するヒアリング調査 58pp. 2015 年 7 月発行
- 第 397 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震)における建物被害に関する情報収集調査速報 16pp. 2015 年 9 月発行
- 第 398 号 長岡における積雪観測資料(37)(2014/15 冬期) 29pp. 2015 年 11 月発行
- 第 399 号 東日本大震災を踏まえた地震動ハザード評価の改良(付録 DVD) 253pp. 2015 年 12 月発行
- 第 400 号 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討(付録 DVD) 216pp. 2015 年 12 月発行
- 第 401 号 全国自治体の防災情報システム整備状況 47pp. 2015 年 12 月発行
- 第 402 号 新庄における気象と降積雪の観測(2014/15 年冬期) 47pp. 2016 年 2 月発行
- 第 403 号 地上写真による鳥海山南東斜面の雪渓の長期変動観測(1979～2015 年) 52pp. 2016 年 2 月発行
- 第 404 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震)における地震の概要と建物被害に関する情報収集調査報告 54pp. 2016 年 3 月発行
- 第 405 号 土砂災害予測に関する研究会 –現状の課題と新技術– プロシーディング 220pp. 2016 年 3 月発行
- 第 406 号 津波ハザード情報の利活用報告書 132pp. 2016 年 8 月発行
- 第 407 号 2015 年 4 月ネパール地震(Gorkha 地震)における災害情報の利活用に関するインタビュー調査 –改訂版– 120pp. 2016 年 10 月発行
- 第 408 号 新庄における気象と降積雪の観測(2015/16 年冬期) 39pp. 2017 年 2 月発行
- 第 409 号 長岡における積雪観測資料(38)(2015/16 冬期) 28pp. 2017 年 2 月発行
- 第 410 号 ため池堤体の耐震安全性に関する実験研究 –改修されたため池堤体の耐震性能検証– 87pp. 2017 年 2 月発行
- 第 411 号 土砂災害予測に関する研究会 –熊本地震とその周辺– プロシーディング 231pp. 2017 年 3 月発行
- 第 412 号 衛星画像解析による熊本地震被災地域の斜面・地盤変動調査 –多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出– 107pp. 2017 年 9 月発行
- 第 413 号 熊本地震被災地域における地形・地盤情報の整備 –航空レーザ計測と地上観測調査に基づいた防災情報データベースの構築– 154pp. 2017 年 9 月発行
- 第 414 号 2017 年度全国市区町村への防災アンケート結果概要 69pp. 2017 年 12 月発行
- 第 415 号 全国を対象とした地震リスク評価手法の検討 450pp. 2018 年 3 月発行予定
- 第 416 号 メキシコ中部地震調査速報 28pp. 2018 年 1 月発行

■ 表紙図 … 南海トラフ沿いの地震に対する 30 年超過確率分布図の例(最大水位上昇量 3 m 以上、重み 1 の場合)。

防災科学技術研究所研究資料

- 第 417 号 長岡における積雪観測資料(39)(2016/17 冬期) 29pp. 2018 年 2 月発行
- 第 418 号 土砂災害予測に関する研究会 2017 年度プロシーディング 149pp. 2018 年 3 月発行
- 第 419 号 九州北部豪雨における情報支援活動に関するインタビュー調査 90pp. 2018 年 7 月発行
- 第 420 号 液状化地盤における飽和度確認手法に関する実験的研究 –不飽和化液状化対策模型地盤を用いた模型振動台実験– 62pp. 2018 年 8 月発行
- 第 421 号 新庄における気象と降積雪の観測(2016/17 年冬期) 45pp. 2018 年 11 月発行
- 第 422 号 2017 年度防災科研クライシスレスポンスサイト(NIED-CRS)の構築と運用 56pp. 2018 年 12 月発行
- 第 423 号 耐震性貯水槽の液状化対策効果に関する実験研究 –液状化による浮き上がり防止に関する排水性能の確認– 48pp. 2018 年 12 月発行
- 第 424 号 パイプロを用いた起振時過剰間隙水圧計測による原位置液状化強度の評価手法の検討 –原位置液状化強度の評価に向けた土槽実験の試み– 52pp. 2019 年 1 月発行
- 第 425 号 ベントナイト系遮水シートの設置方法がため池堤体の耐震性に与える影響 102pp. 2019 年 1 月発行
- 第 426 号 蛇籠を用いた耐震性道路擁壁の実大振動台実験および評価手法の開発 –被災調査から現地への適用に至るまで– 114pp. 2019 年 2 月発行
- 第 427 号 津波シミュレータ TNS の開発 67pp. 2019 年 3 月発行
- 第 428 号 長岡における積雪観測資料(40)(2017/2018 冬期) 29pp. 2019 年 2 月発行
- 第 429 号 配管系の弾塑性地震応答評価に対するベンチマーク解析 72pp. 2019 年 3 月発行
- 第 430 号 津波浸水の即時予測を目的とした津波シナリオバンクの構築 169pp. 2019 年 3 月発行
- 第 431 号 土砂災害予測に関する研究会 2018 年度プロシーディング 65pp. 2019 年 3 月発行
- 第 432 号 全国を概観するリアルタイム地震被害推定・状況把握システムの開発 311pp. 2019 年 3 月発行
- 第 433 号 新庄における気象と降積雪の観測(2017/18 年冬期) 51pp. 2019 年 3 月発行
- 第 434 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –南西レスキュー 30 における活動報告– 158pp. 2019 年 6 月発行
- 第 435 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –みちのく ALERT2018 における活動報告– 140pp. 2019 年 7 月発行
- 第 436 号 平成 30 年 7 月豪雨(西日本豪雨)の被災自治体における災害情報システムの活用実態に関する調査 60pp. 2019 年 9 月発行
- 第 437 号 SIP4D 利活用システム技術仕様書・同解説 142pp. 2019 年 10 月発行
- 第 438 号 SIP4D を活用した災害情報の広域連携に関する取り組み –かもしか RESCUE2019 における活動報告– 46pp. 2019 年 12 月発行

| | | |
|-----------|--------|---|
| – 編集委員会 – | | 防災科学技術研究所研究資料 第 439 号 – 第一部 本編 – 令和 2 年 4 月 30 日発行 編集兼 国立研究開発法人 発行者 防災科学技術研究所 〒305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1 電話 (029)863-7635 http://www.bosai.go.jp/ 印刷所 前田印刷株式会社 茨城県つくば市山中 152-4 |
| (委員長) | 浅野 陽一 | |
| (委員) | | |
| 三輪 学央 | 加藤 亮平 | |
| 河合 伸一 | 三浦 伸也 | |
| 山崎 文雄 | 平島 寛行 | |
| 中村 いずみ | 市橋 歩 | |
| (事務局) | | |
| 三浦 伸也 | 前田 佐知子 | |
| 池田 千春 | | |
| (編集・校正) | 樋山 信子 | |

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2020

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (<http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/>) をご覧下さい。

南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価

—第一部 本編—

藤原広行^{*1}・平田賢治^{*1}・中村洋光^{*1}・森川信之^{*1}・河合伸一^{*1}・前田宜浩^{*1}・大角恒雄^{*1}・
土肥裕史^{*1}・松山尚典^{*2}・遠山信彦^{*2}・鬼頭直^{*2}・大嶋健嗣^{*2}・村田泰洋^{*3}・
齊藤龍^{*3}・澁木智之^{*3}・秋山伸一^{*4}・是永真理子^{*4}・阿部雄太^{*4}・
橋本紀彦^{*4}・袴田智哉^{*4}・大野哲平^{*4}

Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Earthquakes Occurring along the Nankai Trough

— Volume 1 Part I —

Hiroyuki FUJIWARA^{*1}, Kenji HIRATA^{*1}, Hiromitsu NAKAMURA^{*1}, Nobuyuki MORIKAWA^{*1},
Shinichi KAWAI^{*1}, Takahiro MAEDA^{*1}, Tsuneo OHSUMI^{*1}, Yuji DOHI^{*1}, Hisanori MATSUYAMA^{*2},
Nobuhiko TOYAMA^{*2}, Tadashi KITOU^{*2}, Kenshi OHSHIMA^{*2}, Yasuhiro MURATA^{*3}, Ryu SAITO^{*3},
Tomoyuki SHIBUKI^{*3}, Shinichi AKIYAMA^{*4}, Mariko KORENAGA^{*4}, Yuta ABE^{*4},
Norihiko HASHIMOTO^{*4}, Tomoya HAKAMATA^{*4}, and Teppei ONO^{*4}

^{*1} *National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience*

^{*2} *OYO Corporation*

^{*3} *Kokusai Kogyo Co., LTD.*

^{*4} *Itochu Techno-Solutions Corporation*

^{*1} 国立研究開発法人 防災科学技術研究所

^{*2} 応用地質株式会社

^{*3} 国際航業株式会社

^{*4} 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

目次

| | |
|--|------|
| 1. はじめに..... | 1-1 |
| 1.1 本研究資料(第一部本編)をまとめた背景..... | 1-1 |
| 1.2 本研究資料(第一部本編)の構成..... | 1-1 |
| 1.3 本研究資料(第一部本編)における確率論的津波ハザード評価の概要..... | 1-2 |
| 1.4 本研究資料(第一部本編)において用いた主な用語..... | 1-3 |
| 1章の参考文献..... | 1-4 |
| 2. 確率論的津波ハザード評価手法のレビュー..... | 2-1 |
| 2.1 確率論的地震ハザード評価手法..... | 2-1 |
| 2.2 確率論的津波ハザード評価手法..... | 2-3 |
| 2.2.1 確率論的津波ハザード評価の概要..... | 2-3 |
| 2.2.2 波源断層モデル設定の考え方..... | 2-4 |
| 2.2.3 地形モデルの作成..... | 2-14 |
| 2.2.4 数値計算手法..... | 2-29 |
| 2.2.5 津波ハザードカーブの計算..... | 2-33 |
| 2.2.6 発生確率の評価方法..... | 2-34 |
| 2.2.7 不確定性の扱い..... | 2-34 |
| 2.3 海外での研究事例..... | 2-37 |
| 2章の参考文献..... | 2-40 |
| 3. 地震活動に関するデータ..... | 3-1 |
| 3章の参考文献..... | 3-6 |
| 4. 津波痕跡に関するデータ..... | 4-1 |
| 4.1 津波痕跡に関するデータベースのレビュー..... | 4-1 |
| 4.2 南海トラフ沿いの地震による津波痕跡データ..... | 4-7 |
| 4章の参考文献..... | 4-15 |
| 5. 本研究資料(第一部本編)で用いる確率論的津波ハザード評価手法..... | 5-1 |
| 5.1 確率論的津波ハザード評価の基本的な考え方..... | 5-1 |
| 5.2 評価手法..... | 5-2 |
| 5.2.1 確率論的津波ハザード評価の流れ..... | 5-2 |
| 5.2.2 ハザードカーブの算定..... | 5-3 |
| 5.3 津波高さに関わる不確定性..... | 5-4 |
| 5.3.1 不確定性の考え方..... | 5-4 |
| 5.3.2 ばらつきの設定..... | 5-4 |
| 5.3.3 ばらつきの打ち切り範囲の検討..... | 5-7 |
| 5章の参考文献..... | 5-8 |
| 6. 確率論的津波ハザード評価のためのプレート間地震の波源断層モデルの設定..... | 6-1 |
| 6.1 津波の発生要因..... | 6-1 |
| 6.2 プレート間地震の波源断層モデルのパラメータの検討..... | 6-2 |
| 6.2.1 地震モーメント M_0 と断層面積 S の関係式..... | 6-2 |
| 6.2.2 すべり角..... | 6-3 |
| 6.2.3 震源域の剛性率..... | 6-4 |
| 6.2.4 大すべり域, 超大すべり域の面積比..... | 6-12 |
| 6.2.5 大すべり域, 超大すべり域の形状..... | 6-21 |
| 6.2.6 超大すべり域のすべり量..... | 6-22 |
| 6.3 南海トラフ沿いで設定したプレート間地震の波源断層モデル群..... | 6-25 |
| 6.3.1 波源断層モデルとして設定すべき項目..... | 6-25 |
| 6.3.2 プレート形状, 対象領域および要素断層の設定..... | 6-27 |
| 6.3.3 波源断層モデル群..... | 6-29 |
| 6章の参考文献..... | 6-41 |

| | |
|--|------|
| 7. 確率論的津波ハザード評価のための津波伝播遡上計算..... | 7-1 |
| 7.1 地形モデル..... | 7-1 |
| 7.1.1 地形モデルの作成手順..... | 7-1 |
| 7.1.2 南海トラフ沿いの地震による津波伝播遡上計算に用いる地形モデル..... | 7-6 |
| 7.2 初期水位分布の計算..... | 7-10 |
| 7.2.1 海底地形の水平変動を考慮した初期水位分布計算手法..... | 7-10 |
| 7.2.1.1 変動量と初期水位..... | 7-10 |
| 7.2.1.2 地殻変動の補間計算手法の検討..... | 7-11 |
| 7.2.1.3 海岸の最大水位上昇量の定義..... | 7-22 |
| 7.2.2 梶浦フィルター..... | 7-24 |
| 7.3 本研究資料で用いる津波伝播遡上計算..... | 7-28 |
| 7.3.1 計算手法..... | 7-28 |
| 7.3.2 評価点の設定..... | 7-30 |
| 7.3.3 計算時間の検討..... | 7-31 |
| 7.4 計算結果..... | 7-43 |
| 7章の参考文献..... | 7-65 |
| 8. 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価..... | 8-1 |
| 8.1 確率論的津波ハザード評価の概要..... | 8-1 |
| 8.1.1 地震の多様性の表現形式..... | 8-1 |
| 8.1.2 地震の発生確率の設定..... | 8-2 |
| 8.1.3 計算された最大水位上昇量の確率論的取扱い..... | 8-3 |
| 8.1.4 最大水位上昇量の補正..... | 8-4 |
| 8.1.5 計算された最大水位上昇量の不確かさ..... | 8-5 |
| 8.2 想定する震源域パターン..... | 8-6 |
| 8.2.1 次の地震サイクル..... | 8-6 |
| 8.2.2 E領域の破壊..... | 8-6 |
| 8.2.3 Z領域(日向灘領域)の破壊..... | 8-7 |
| 8.2.4 傾斜方向の破壊..... | 8-7 |
| 8.2.5 設定した震源域パターン, 地震パターンのまとめ..... | 8-8 |
| 8.3 震源域パターン, 地震パターンへの重み配分..... | 8-11 |
| 8.3.1 震源域パターンの走向方向および傾斜方向の連動規模に関する分類と重み配分..... | 8-11 |
| 8.3.2 震源域パターンの傾斜方向の拡がり方に関する重み配分..... | 8-12 |
| 8.3.3 震源域パターンの走向方向の拡がり方と組合せに関する重み配分..... | 8-12 |
| 8.3.3.1 グループ I の地震群..... | 8-12 |
| 8.3.3.2 グループ II の地震群..... | 8-12 |
| 8.3.4 震源域パターンへの重み配分..... | 8-13 |
| 8.3.5 地震パターンへの重み配分..... | 8-13 |
| 8.4 確率論的津波ハザード評価の結果..... | 8-14 |
| 8.4.1 ハザード評価標本点に対するハザードカーブ..... | 8-14 |
| 8.4.2 ハザードカーブの観察..... | 8-34 |
| 8.4.2.1 ハザードカーブにおいて観察される基本的なハザードの特徴..... | 8-34 |
| 8.4.2.2 ハザード再分解からわかること..... | 8-34 |
| 8.5 異なる重み配分が確率論的津波ハザード評価に与える影響..... | 8-36 |
| 8.5.1 重み配分の認識論的不確定性..... | 8-36 |
| 8.5.2 最大クラスの地震に対する重み配分の認識論的不確定性の影響..... | 8-37 |
| 8.5.3 震源域パターンの傾斜方向の拡がり方および走向方向の拡がり方と組合せに対する重み配分の認識論的不確定性の影響..... | 8-59 |
| 8章の参考文献..... | 8-82 |

| | |
|---------------------------------------|-------|
| 9. 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的な津波ハザード分布図..... | 9-1 |
| 9.1 30年超過確率分布図..... | 9-1 |
| 9.2 確率論的な最大水位上昇量分布図..... | 9-7 |
| 9.3 最大クラスの地震等を考慮した影響..... | 9-13 |
| 10. 特性化した波源断層モデルの妥当性の検討..... | 10-1 |
| 10.1 検討方法..... | 10-2 |
| 10.2 1707年宝永地震の津波痕跡を用いた再現性の検討..... | 10-3 |
| 10.3 1854年安政東海地震の津波痕跡を用いた再現性の検討..... | 10-6 |
| 10.4 1854年安政南海地震の津波痕跡を用いた再現性の検討..... | 10-9 |
| 10.5 1944年昭和東南海地震の津波痕跡を用いた再現性の検討..... | 10-12 |
| 10.6 1946年昭和南海地震の津波痕跡を用いた再現性の検討..... | 10-14 |
| 10.7 まとめ..... | 10-16 |
| 10章の参考文献..... | 10-16 |
| 11. 平均応力降下量の津波高さへの影響の検討..... | 11-1 |
| 11.1 背景..... | 11-1 |
| 11.2 検討モデルの設定..... | 11-1 |
| 11.3 津波伝播遡上計算に基づく検討..... | 11-4 |
| 11.4 結果の検証..... | 11-21 |
| 11章の参考文献..... | 11-21 |
| 12. まとめと今後の課題..... | 12-1 |
| 12.1 まとめ..... | 12-1 |
| 12.2 今後の課題..... | 12-2 |
| 12章の参考文献..... | 12-3 |
| 謝辞..... | i |
| 編集後記..... | ii |

<巻末資料>

1. 南海トラフ 波源断層モデルリスト
2. 南海トラフ 波源断層モデル図
3. 南海トラフ ハザード評価点, ハザード評価標本点, 水位時系列抽出点

<DVD 資料 1>

1. 南海トラフ 波源断層モデルリスト
2. 南海トラフ 波源断層モデル図(震源域 Nos.1~83)
3. 南海トラフ ハザード評価点, ハザード評価標本点, 水位時系列抽出点
4. 南海トラフ 最大水位上昇量分布図(震源域 Nos.1~20)

<DVD 資料 2>

4. 南海トラフ 最大水位上昇量分布図(震源域 Nos.21~83)
5. 南海トラフ 30年超過確率分布図および確率論的な最大水位上昇量分布図
6. 南海トラフ ハザードカーブ図

1. はじめに

1.1 本研究資料(第一部本編)をまとめた背景

平成 23 年 3 月 11 日、日本海溝沿いで M_w 9.0 の東北地方太平洋沖地震が起きた。この超巨大地震に伴い、巨大な津波が発生し、東北地方太平洋岸一帯に甚大な被害を及ぼした。「東日本大震災」と名付けられたこの甚大被害の影響は 9 年が経過した現在も現地にその爪痕を残している。

この大災害を契機として翌平成 24 年度、防災科学技術研究所は、津波ハザード評価研究プロジェクトを開始した。東日本大震災が起きる前の我が国の津波評価はいわゆる決定論的な津波評価が主流であった。決定論的な津波評価では、評価対象の海岸施設等に被害を及ぼす可能性のある、当該海域で発生し得る地震を津波波源として考慮し、津波伝播遡上計算を実施、計算された津波の高さあるいは浸水高や浸水範囲を推定する。そこでは、津波を過小評価しないという方針のもと、例えば津波伝播遡上計算に用いる潮位を評価対象海域の平均海面ではなく朔望平均満潮位に設定するなどの工夫がなされていたものの、津波波源として考慮するのは当該海域の既往最大の地震であった。すなわち、過去経験したことがない(それが起きたことが知られていない)規模を超える巨大地震が起きる可能性は考慮されていなかった。

東日本大震災の津波を適切に予想することができなかったという反省に基づき、本研究プロジェクトでは、過去発生したことは知られていないが、もしも発生したならば甚大な被害が発生し得る、既往最大を超える規模の地震も科学的知見に基づき合理的に想定し、将来の津波ハザード評価に取り込むことを 1 つの目標とした。

一般に、将来起こり得る自然現象の予測や評価は、不確定性を無視して行うことはできない。過去の自然現象に学び、その決定論的なシミュレーションモデルを持つことは将来の予測や評価には不可欠であるが、それだけでは十分ではない。我々はまだ未経験の「将来」に由来する不確定性、あるいはシミュレーションモデルの不完全性などに由来する予測誤差という問題に必ず直面することになる。確率論的なアプローチは、将来の予測や評価と不可分な各種の不確定性を系統的に整理・導入し、あるいは予測誤差を合理的に導入し、組織的論理構造のもとで

的確な工学的判断を行うための手段を提供する。このような認識のもと、本研究プロジェクトでは従来採用されてきた決定論的な津波評価ではなく、確率論的な津波評価手法 (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) を採用することにした。

確率・統計の概念に基づき、既にいくつかの津波評価手法が提案されている (Geist and Parsons, 2006 ; Annaka *et al.*, 2007 ; 土木学会原子力土木委員会津波評価部会, 2009 ; 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会, 2016 ; 杉野・他, 2011)。とりわけ地震性の津波の確率論的津波評価手法は、今後も検討・解決すべき課題はいくつか残っているものの、実用に供しても差し支えないレベルに達していると考えられる。実際、わが国の原子力発電所に対する基準津波の評価に、確率論的な評価手法が導入され、津波に対する原子力発電所施設の安全性の審査に活用され始めている (岩淵・他, 2014)。

1.2 本研究資料(第一部本編)の構成

本研究資料(第一部本編)(研究資料第 439 号第一部本編のこと)は、1. はじめに、2. 確率論的津波ハザード評価手法のレビュー、3. 地震活動に関するデータ、4. 津波痕跡に関するデータ、5. 本研究資料(第一部本編)で用いる確率論的な津波ハザード評価手法、6. 確率論的津波ハザード評価のためのプレート間地震の波源断層モデルの設定、7. 確率論的津波ハザード評価のための津波伝播遡上計算、8. 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的津波ハザード評価、9. 南海トラフ沿いの地震に対する確率論的な津波ハザード分布図、10. 特性化した波源断層モデルの妥当性の検討、11. 平均応力降下量の津波高さへの影響の検討、12. まとめと今後の課題、の 12 章で構成されている。

本研究資料(第一部本編)を取りまとめる前段階として、防災科学技術研究所では、日本海溝沿いで発生する地震に伴う津波を対象に、確率論的な津波ハザード評価手法の試案を公表した(藤原・他, 2015)。そこで検討された、プレート間地震に対する特性化波源断層モデルの設定方法、津波伝播遡上計算の方法および、海域・陸域の地形モデルの設定方法は、それぞれ本研究資料(第一部本編)の 6 章および 7 章の基礎部分を構成している。

本研究資料(第一部本編)における主題は南海トラ

フ沿いの大地震に対する確率論的津波ハザード評価である。その評価結果のみを知りたければ 8 章および 9 章を参照すると良い。南海トラフ沿いに設定した特性化波源断層モデル群についての詳細が知りたければ 6 章を、津波伝播遡上計算の詳細が知りたければ 7 章を、南海トラフ沿いの地震を特性化するのに使用した特性化波源断層モデルの妥当性について知りたければ 10 章を、それぞれ参照すると良い。

1.3 本研究資料(第一部本編)における確率論的津波ハザード評価の概要

本研究資料(第一部本編)では、「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)」(地震調査委員会, 2013)(以下, 長期評価と省略)に基づき, 南海トラフ沿いで発生する大地震の多様性を表現するために, 断層すべり量やその空間的不均質性を特性化した断層モデル群(本研究資料(第一部本編)では「特性化波源断層モデル群」と呼ぶ)を構築した(6 章)。なお, 本研究資料(第一部本編)では, 南海トラフ沿いで発見されている分岐断層を確率論的津波ハザード評価に加えていない。分岐断層については知見の蓄積を待ちたい。

本研究資料(第一部本編)において構築された特性化波源断層モデル群の地震規模は M 8 クラスから最大クラス(長期評価で設定された南海トラフ沿いおよび日向灘沿いの地震発生領域が全域にわたり同時に破壊した場合)をカバーしており, まれにしか起こらない極低頻度の巨大津波ハザードも評価に含んでいる。他方, 地震調査委員会(2020)では, M 8 クラスから M 9 までの地震規模の津波を評価対象としており, 極低頻度の巨大津波ハザードの評価が含まれていない。両者の評価を比べる場合に, 評価対象としている地震規模の範囲が異なっていることに注意しなくてはならない。なお, 地震調査委員会(2020)と等価な確率論的津波ハザード評価は, 本研究資料(第一部付録編)に掲載しているので, 必要に応じて参照されたい。

特性化波源断層モデルの断層すべり量の空間的不均質性に関しては, 平均すべり量の 2 倍のすべり量を持つ大すべり域および背景すべり領域の 2 種類のすべり量を与えることで表現した(一部に例外あり。詳しくは 6 章を参照のこと)。また, 断層上端がトラフ軸に到達し, 規模が極端に小さくない地震の場

合は, 上記の 2 種類のすべり不均質に加え, 平均すべり量の 4 倍のすべり量を持つ超大すべり域も設定することとした(6 章)。なお, 地震調査委員会(2020)では, 断層上端がトラフ軸に到達している場合においても, 波源断層モデルに超大すべり域は設定されていないことに注意されたい。

過去, 南海トラフ沿いでは南海地震と東南海地震が時間的に近接して発生していることから, 1 つの大地震だけを評価対象とするのではなく, 複数の大地震が時間的に近接して発生する可能性も考慮し, 南海トラフ沿いの大地震活動 1 サイクル中で起こり得る大地震の組合せパターン群(本研究資料(第一部本編)では「震源域パターン群」あるいは「地震パターン群」と呼ぶ)を多数設定することとした(8 章)。

地震活動 1 サイクル中で発生し得る大地震の組合せパターン 1 つ 1 つに対する重み(大地震の起こりやすさの相対確率)配分については, 地震調査委員会(2020)の確率論的津波ハザード評価における考え方を基本的に採用することとした。残念ながら, 地震調査委員会(2020)では極低頻度事象として考慮され得る最大クラスの地震群をその評価対象から除いており, その地震群に対する重みが検討されていない。そのため本研究資料(第一部本編)では, 「全国地震動予測地図 2014 年版」(地震調査委員会, 2014)と同様な考え方を採用し, 最大クラスの地震群に対して重みを設定することとした(8 章)。

本研究資料(第一部本編)では, 海岸(汀線)に沿って設けられた数十万点を超えるハザード評価点において推定されたハザードカーブ群から, 30 年超過確率分布図および確率論的に予想される最大水位上昇量分布図を作成した(9 章)。南海トラフに面した太平洋沿岸地域のどこの海岸が他に比べて相対的に津波に襲われる可能性が高いか低いかわりたければ, このような分布図を見るとわかりやすい。

今回, 確率論的津波ハザード評価を行うため, 異なる地震規模, 異なるすべり不均質性を有する多種多様な多数のプレート間地震を, 特性化した波源断層モデルで表現した。その特性化手法は, 地震調査研究推進本部地震調査委員会から公表された「波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシピ)」(地震調査委員会, 2017)に基づいている。本研究資料(第一部本編)では, 18 世紀から 20 世紀にかけて南海トラフ沿いで発生した大地震による津波の痕跡高分

布と、津波レシピに基づき計算された津波の計算高分布を比較することによって、今回用いた特性化手法が妥当であることを検証している(10 章)。

1.4 本研究資料(第一部本編)において用いた主な用語

本研究資料(第一部本編)で用いた主要な科学技術用語を表 1.4-1 に示す。

表 1.4-1 本研究資料(第一部本編)で用いた主要な科学技術用語(50 音順)

| 用語 | 定義・意味 | 用語 | 定義・意味 |
|---------------|--|------------|---|
| 偶然的ばらつき | ハザード評価の枠組みにおいて、偶然的な不確定性(次段参照)を内包する現象は、偶然的ばらつき(aleatory variability)によって表現される。なお、偶然的ばらつきは、単に、ばらつき(variability)とも呼ばれる。本研究資料(第一部本編)の確率論的津波ハザード評価では、1本のハザードカーブを計算する際にばらつきが考慮される。 | 超過確率分布図 | 海岸線に沿って定義された複数のハザード評価点に対して推定された超過確率の分布図。 |
| 偶然的な不確定性 | 現象の偶然性に起因する不確定性。本研究資料(第一部本編)の津波ハザード評価の枠組みにおいては、地震規模、断層の不均質すべり量分布など、現在の科学的知見では一意に予測することが不可能なパラメータを偶然的な不確定性(aleatory uncertainty)として扱う。 | 津波高さ | 最大水位上昇量、最大水位(T.P.)、津波高、津波波高など特定せず、これらを含めて、一般的な津波の高さを表現したい場合に使用する。 |
| 最大水位(T.P.) | T.P.を基準面とし測定した最大の水位。 | 津波伝播遡上計算 | 本研究資料(第一部本編)では、流体の運動方程式と連続の式から導かれる非線形長波式を差分法で解いて津波伝播遡上計算を行った。詳細は7章を参照のこと。 |
| 最大水位上昇量 | 最大水位(T.P.)から地震発生によるその地点での地盤変動量を差し引いた相対的な水位の上昇量。 | 特性化波源断層モデル | 断層すべり不均質性が特性化された波源断層モデルを「特性化波源断層モデル」と呼ぶ。 |
| 最大水位上昇量分布図 | 海岸線に沿って定義された複数のハザード評価点における、最大水位上昇量の分布図。 | 認識論的不確定性 | 現象に関する知見が不十分または不完全であるため、専門家の間でも意見が対立するなど、その現象を完全にモデル化できないことに起因する不確定性。現象に関する科学的知見が増え理解が進めば、偶然的な不確定性として扱うことができる可能性がある。本研究資料(第一部本編)の津波ハザード評価の枠組みにおいては、震源域パターンに与える一部の重み(相対的な起こりやすさ)を認識論的不確定性(epistemic uncertainty)として扱う。認識論的不確定性を考慮するという事は、手続き的には、複数のハザードカーブ群が計算されることに等しい。 |
| σ 計算誤差 | 真の波源断層モデルを用いて計算した場合でも必ず生じる海岸での津波高さの計算誤差。確率論的津波ハザード評価では、偶然的ばらつきとして表現する。詳細は5章を参照のこと。 | 波源域 | 津波が発生した領域、すなわち、地震津波の原因となる海底の隆起や沈降を起こした領域。 |
| 地震パターン | 波源断層モデルの組合せパターン。波源断層モデルは断層すべり不均質が指定されたものとして定義されていることに注意。なお、地震調査委員会(2020)ではこのような表現は用いられていない。 | 波源断層モデル | 特性化波源断層モデルを意味する省略形の用語。特に、断層面の位置・形状が与えられ、断層すべりの不均質性が指定された場合に、「波源断層モデル」と呼ぶ。なお、本研究資料(第一部本編)では、震源域すなわち断層面の位置・形状のみが指定された状態のものは、波源断層モデルと呼ばないことに注意。 |
| 震源域 | 地震によって破壊された領域。本研究資料(第一部本編)の確率論的津波ハザード評価では、長期評価(地震調査委員会, 2013)において南海トラフから沈み込んだフィリピン海プレート上面に設定された18個の地震発生領域要素を最小分割単位とし、隣合う地震発生領域要素の任意の組合せによって、任意の震源域を表現する。詳細は6章を参照のこと。 | ハザード評価点 | 津波ハザードを評価する汀線メッシュ。 |
| 震源域パターン | 震源域の組合せパターン。なお地震調査委員会(2020)では、「震源域の組合せのパターン」と呼んでいることに注意。 | ハザード評価標本点 | 本研究資料(第一部本編)では、ハザード評価点が数十万点存在するため、ハザード評価点の中から概ね一定の間隔で選別したハザード評価点を、ハザード評価標本点として定義し、ハザードカーブを例示する。 |

1 章の参考文献

- 1) Annaka, T., Satake, K., Sakakiyama, T., Yanagisawa, K., and Shuto, N. (2007) : Logic-tree approach for probabilistic tsunami hazard analysis and its applications to the Japanese coasts, *Pure and Applied Geophysics*, **164**, 577-592.
- 2) 藤原広行・平田賢治・中村洋光・長田正樹・森川信之・河合伸一・大角恒雄・青井真・松山尚典・遠山信彦・鬼頭直・村嶋陽一・村田泰洋・井上拓也・齊藤龍・秋山伸一・是永真理子・阿部雄太・橋本紀彦 (2015) : 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討. 防災科学技術研究所研究資料 第 400 号, pp.1-190.
- 3) Geist, E., and Parsons, T. (2006) : Probabilistic analysis of tsunami hazards, *Natural Hazards*, **37**, 277-314.
- 4) 岩淵洋子・杉野英治・蛭沢勝三 (2014) : 確率論的手法に基づく基準津波策定手引き, 原子力安全基盤機構, 1-134.
- 5) 地震調査推進研究本部地震調査委員会 (2013) : 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版) について, https://www.jishin.go.jp/main/chousa/13may_nankai/index.htm.
- 6) 地震調査推進研究本部地震調査委員会 (2014) : 全国地震動予測地図 2014 年版～全国の地震動を概観して～, https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2014/
- 7) 地震調査推進研究本部地震調査委員会 (2017) : 波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ), https://www.jishin.go.jp/main/tsunami/17jan_tsunami-recipe.pdf.
- 8) 地震調査推進研究本部地震調査委員会 (2020) : 南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価. https://www.jishin.go.jp/evaluation/tsunami_evaluation/#nankai_t
- 9) 杉野英治・是永真理子・坂上正治・海老沢勝三 (2011) : 南海トラフの地震発生の連動性を考慮した確率論的津波ハザード評価, 土木学会論文集 B2(海岸工学), **67-2**, I_306-I_310.
- 10) 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会 (2016) : 原子力発電所の津波評価技術 2016, <http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/84>
- 11) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会 (2009) : 確率論的津波ハザード解析の方法, 1-145. <http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/39>

2. 確率論的津波ハザード評価手法のレビュー

2.1 確率論的地震ハザード評価手法

本節では、地震調査研究推進本部地震調査委員会（以下、地震調査委員会と呼ぶ）による地震の確率論的ハザード評価の手法について説明する。

地震調査委員会は「確率論的地震動予測地図」を作成する過程で確率論的地震ハザード評価の手法を議論してきた（地震調査委員会，2014）。日本国内には多くの活断層や海域で発生する大地震のほか，どこで起きるか特定しにくい地震もあり，これらの地震によって生じる強い揺れ（強震動）に見舞われる危険性は全国どこにでもある。確率論的地震動予測地図作成における確率論的地震ハザード評価は，ある地点において将来発生する地震動の強さ，評価期間，ある地震動強さを超える確率の3つの関係性を評価するものである。そして，3つのうち2つを固定し，残る1つを求め，その空間的分布を地図上に表現したものが確率論的地震動予測地図となる。

確率論的地震ハザード評価は不確定性の存在を前提として地震動を評価している。不確定性は，偶然的な不確定性（aleatory uncertainty）と認識論的不確定性（epistemic uncertainty）の2つに大別される。偶然的な不確定性は，現象固有のランダム性（偶然性）によるもので，極めて精緻な予測モデルを用いてもそれ以上減じることができないという性質といえる。一方，認識論的不確定性は，現象に関する知識の不足によるもので，より優れた予測モデルが将来得られれば減じることが期待される。確率論的地震ハザード評価において，研究者間の意見の相違は認識論的不確定性に分類され，予測すべき現象のモデル化やそのハザード評価プロセスに含まれる不確定性等を表現している。

以下に，「確率論的地震動予測地図 2014 年版」（地震調査委員会，2014）における確率論的地震ハザード評価の全体的な流れを説明する。具体的には，①地震の発生可能性の評価，②震源モデルの設定，③地下構造モデルの設定，④強震動の評価，⑤ハザードカーブの作成という手順を踏む（図 2.1-1）。

① 地震の発生可能性の評価

活断層調査や過去の地震発生記録および研究成果等に基づいて，どこでどのような地震が発生するか想定する。想定する各地震の発生確率は，基本的に地震調査委員会の長期評価を参考にして設定する

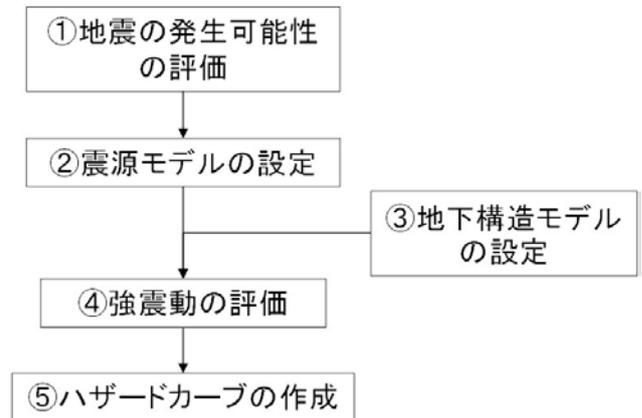


図 2.1-1 確率論的地震ハザード評価の流れ

（例えば，地震調査委員会，2011；地震調査委員会，2013）。長期評価がなされていない地震については，地震が発生する地域の過去の地震活動の規模別頻度分布から，規模別の確率モデルを作成して設定する。発生確率のモデルとしては，発生確率が時間の経過に対して一定である定常ポアソン過程と，前回の地震発生からの経過時間によって発生確率が変化する更新過程がある。更新過程の場合，ハザード評価を行う基準日の設定により，発生確率が変化することとなる。発生する地震の規模のばらつきや手法そのものに含まれる誤差は，現状では予測不可能と考えられる不確定性である。適当な確率モデルを適用してばらつきを与えることで，最終的に作成されるハザードカーブにおいてその誤差を表現できる。

② 震源モデルの設定

地震動の強さは，一般的に地震規模が大きいほど，また震源断層に近いほど大きくなる。強震動の評価を行うために，①で想定したすべての地震に対し，長期評価に基づいて，震源となる断層面の位置形状，地震規模等のモデルを設定する。長期評価がなされていない規模の小さい地震については，評価領域の特徴に応じて一様に震源を設定する。

③ 地下構造モデルの設定

地震動の強さは，一般的に伝播する距離とともに減衰するが，地下浅部の速度構造の影響により大きく変化する。そこで，震源から地震基盤までの広域的な速度構造モデル，地震基盤から工学的基盤までの深部地盤構造モデル，さらに強震動評価に最も影響の強い地表付近の浅部地盤構造モデルを作成し，それらのモデルを用いて強震動を評価する。

④ 強震動の評価

地表の揺れの推定は 2 段階の計算で行う。まず、評価対象領域の工学的基盤上面での揺れを推定し、次に③で得られた浅い地盤構造の影響を加えて地表の揺れの強さを算出する。「確率論的地震動予測地図 2014 年版」(地震調査委員会, 2014)では、工学的基盤での揺れの推定において、経験的に得られた距離減衰式によって推定する方法を用いている。

⑤ ハザードカーブの作成

各地震による強震動の推定には、地震発生位置や震源メカニズムの不確定性や距離減衰式の誤差、地下構造モデルの誤差など、様々な不確かさが内在している。これらの不確定性は偶然的な不確定性として考慮する。個々の強震動予測結果から確率分布へ変換し、得られた確率分布に①で設定した発生確率を反映することで、個々の地震について強震動の超過確率分布が得られる。最後に、すべての地震の影響を統合した超過確率を計算し、対象地点のハザードカーブを作成する。

以上の手順に基づいて、各評価地点においてハザードカーブを計算する。「確率論的地震動予測地図 2014 年版」(地震調査委員会, 2014)はこのハザードカーブから、例えば「今後 30 年の超過確率が 6% となる地震動強さ」や「今後 50 年間に震度 6 弱以上となる確率」などを分布図として作成している。詳細は防災科学技術研究所の「J-SHIS 地震ハザードステーション」(<http://www.j-shis.bosai.go.jp>)を参照されたい。

2.2 確率論的津波ハザード評価手法

本節では、津波の確率論的ハザード評価の手法について、既往研究に基づいてレビューする。

2.2.1 確率論的津波ハザード評価の概要

日本国内における確率論的津波ハザード評価手法の既往研究の一例として、以下の研究が挙げられる。

- 土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)
- 杉野ほか(2015)
- 藤原ほか(2015)
- 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016)
- 地震調査委員会(2020)

土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)(以下、土木学会(2011)と呼ぶ)は原子力発電所における津波ハザードを具体的に評価する場合に活用されることを目的とし、確率論に立脚した津波ハザード評価手法を取りまとめている。「平成 21 年までに検討された中間的なまとめであり、東北地震津波を踏まえた津波想定とはなっていない」との記載があり、東北地方太平洋沖地震の知見は反映されていない。土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016)(以下、土木学会(2016)と呼ぶ)は東北地方太平洋沖地震の知見を踏まえ、土木学会(2011)の手法を高度化したものである。

杉野ほか(2015)は東北地方太平洋沖地震で発生した津波による福島第一原子力発電所事故を教訓とし、確率論的津波ハザード評価手法の高度化を目的として、岩淵ほか(2014)の評価手法をもとに、杉野ほか(2014)の特性化波源モデルを適用した津波想定方法を提案している。

藤原ほか(2015)は広域的な確率論的津波ハザード情報(超過確率、海岸の最大水位上昇量等)を提供することを目的として、地震調査委員会(2011)による「三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価(第二版)」および地震調査委員会(2014)による「全国地震動予測地図 2014 年版」を踏まえた、日本海溝沿いの沈み込み帯の地震に対する確率論的津波ハザード評価方法を提案している。

地震調査委員会(2020)は南海トラフに沿いの沈み込みプレート境界で発生する多様な地震に対する津波の評価を行うため、地震調査委員会(2013)による

「南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)」および地震調査委員会(2017)による「波源断層を特性化した津波の予測手法(津波レシビ)」に基づき、南海トラフ沿いで発生する大地震に対する確率論的津波ハザード評価を実施している。対象とする地震規模は M_w 7.6~9.0 であり、最大クラス(南海トラフの地震活動の長期評価(第二版)(地震調査委員会, 2013)で設定された南海トラフ沿いおよび日向灘沿いの地震発生領域が全域にわたり同時に破壊した場合)の地震は評価の対象外としている。

藤原ほか(2015)の手法は、基本的に確率論的地震ハザード評価手法を踏襲しており、地震調査委員会による地震活動の長期評価(例えば地震調査委員会, 2011; 地震調査委員会, 2013)に基づき、地震群とその発生確率を設定し、津波高さを評価している。

既往研究における確率論的津波ハザード評価の全体の流れを図 2.2.1-1 に示す。以下に、①地震の発生可能性の評価、②波源断層モデルの設定、③海底・陸域地形のモデル化、④津波高さをの評価、⑤ハザードカーブの作成の各ステップについて説明する。

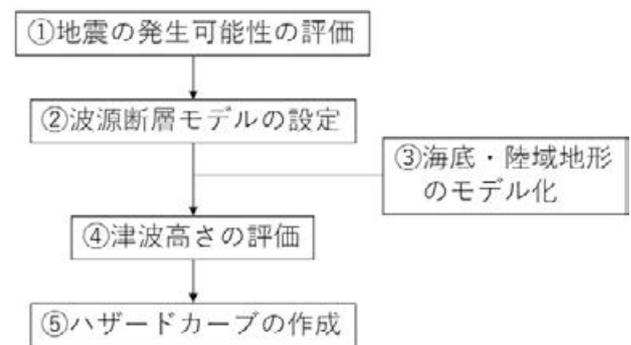


図 2.2.1-1 確率論的津波ハザード評価の流れ

① 地震の発生可能性の評価

確率論的地震ハザード評価手法(2.1 節)と同様に、どこでどのような地震が発生するか想定する。

津波の発生要因は、地震のみならず、海底での地すべり、斜面崩壊、火山活動、隕石の影響などが挙げられるが、ここでは、地震によって生じる津波を対象とする。

杉野ほか(2015)、藤原ほか(2015)、土木学会(2016)および地震調査委員会(2020)では、海域で発生する地震を対象に、主に地震調査委員会の長期評価(例えば、地震調査委員会, 2011; 地震調査委員会, 2013)を参考に、地震の発生可能性を評価している。

② 波源断層モデルの設定

津波の規模は、一般的に、地震規模が大きいほど、また震源域に近いほど大きくなる。ここでは津波の評価を行うために、地震調査委員会による長期評価（例えば、地震調査委員会，2011；地震調査委員会，2013）に基づいて津波の波源となる断層面の位置・形状，地震規模等を設定する。

近年では，断層面のすべり量を一様に設定した矩形断層モデルのみならず，東北地方太平洋沖地震の知見を踏まえ，すべり量の不均質性を考慮した矩形断層モデルも多く用いられている。土木学会（2011）では前者，杉野ほか（2015），藤原ほか（2015）および地震調査委員会（2020）では後者，土木学会（2016）では両方が用いられている。

③ 海底・陸域地形のモデル化

確率論的津波ハザード評価では，海底および陸地の地形をメッシュデータとしてモデル化し，有限差分法などを用いて決定論的な津波高さが計算される。これは，津波は海底地形の影響を強く受けるため，地震動の場合とは異なり，距離減衰式などの簡易的手法によって推定することが難しいためである。メッシュのサイズは要求される精度に応じて決定する。

杉野ほか（2015），藤原ほか（2015），土木学会（2016）および地震調査委員会（2020）では，海底および陸地の地形データとしてメッシュデータを用いている。

④ 津波高さの評価

津波ハザードを表す指標としては，沖合または海岸の津波高さや流速・波力，陸地での津波の遡上域や浸水深，さらに津波到達時間などがある。

土木学会（2011）では，評価サイト前面での最大水位上昇量を用いた確率論的津波ハザード評価を行っている。杉野ほか（2015）では，海岸の構造物の影響が小さくなる水深 150 m の沖合における最大水位上昇量を用いた確率論的津波ハザード評価を行っている。藤原ほか（2015）および地震調査委員会（2020）では，陸域側から追跡して最初に水面下（メッシュの標高が T.P. ±0 m 以下）となる 50 m メッシュ（「汀線メッシュ」と呼んでいる）における最大水位上昇量を用いた確率論的津波ハザード評価を行っている。

津波高さの評価の一例として，藤原ほか（2015）による津波伝播遡上計算の概念図を図 2.2.1-2 に示す。まず，海底の地盤変動量を算出する。波長が水深に比べて十分に大きい場合，津波は長波で近似できる

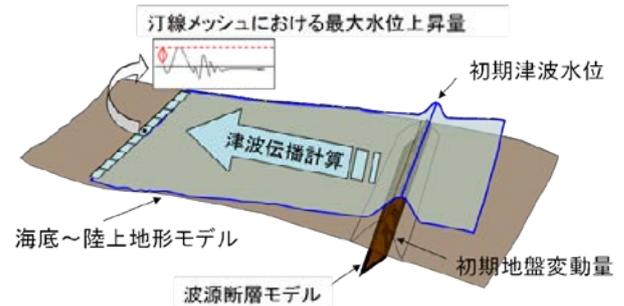


図 2.2.1-2 津波伝播遡上計算の概念図。藤原ほか（2015）を修正

ことを踏まえ，地盤変動量を津波の初期水位と仮定し，地形データを用いて津波の伝播遡上計算を行う。

津波波力や陸域の遡上を正確に推定するためには，3次元流体解析のような計算負荷の非常に高い数値計算が必要になる。これらを指標とした確率論的津波ハザード評価は現在一部で基礎的研究として行われているが，一般的な評価方法とはなっていない。最大水位上昇量以外の指標の必要性については今後検討される必要がある。

⑤ ハザードカーブの作成

ある評価地点における津波高さの推定には，地震の発生位置や震源メカニズムの不確かさや津波伝播遡上計算の再現誤差など，様々な不確実性が内在している。これらの不確実性の要因は先述した認識論的不確実性と偶然的な不確実性に分類される。不確実性の扱いは 2.2.7 項で述べる。

確率論的地震ハザード評価と同様に，個々の津波伝播遡上計算結果と①で設定した地震の発生確率を組み合わせることで個々の地震について最大津波高さの超過確率分布が得られる。最後に，最大津波高さの超過確率分布をすべての地震について確率論的に統合し評価地点のハザードカーブが計算される。

2.2.2 波源断層モデル設定の考え方

本項では，国と地方自治体の津波浸水予測における波源断層モデルの設定について，公表資料や検討事例を整理する。

まず，国の動向として内閣府，中央防災会議，および国土交通省の専門調査会や検討会による，海域ごとの公表資料を表 2.2.2-1 に整理する。また，同表に記載した各海域の想定波源断層モデルをそれぞれ図 2.2.2-1 ～図 2.2.2-6 に示す。

表 2.2.2-1 内閣府，中央防災会議，および国土交通省による海域ごとの公表資料

| 対象海域 (対象地震) | 機関 | 地形 | 粗度 | 構造物 | 波源断層 モデル | 地殻 変動量 | 計算 結果 |
|-----------------------|------------------|----|----|-----|----------------|-----------|----------|
| 南海トラフ (東海地震) | 中央防災会議 (2001) | ○ | ○ | ○ | ○ 図 2.2.2-1 | ○ | ○ |
| 南海トラフ (東南海・南海地震) | 中央防災会議 (2003) | ○ | ○ | ○ | ○ 図 2.2.2-2 | ○ | ○ |
| 南海トラフ (南海トラフの巨大地震) | 内閣府(2015) | ○ | ○ | ○ | ○ 図 2.2.2-3 | ○ | ○ |
| 千島海溝・日本海溝 | 中央防災会議 (2006) | ○ | ○ | ○ | ○ 図 2.2.2-4 | ○ | ○ |
| 日本海溝 (東北地方太平洋沖地震) | 内閣府(2015) | - | - | - | ○ 図 2.2.2-5 | ○ | - |
| 日本海東縁 | 国土交通省 (2016) | ○ | ○ | ○ | ○ 図 2.2.2-6 | ○ | ○ |

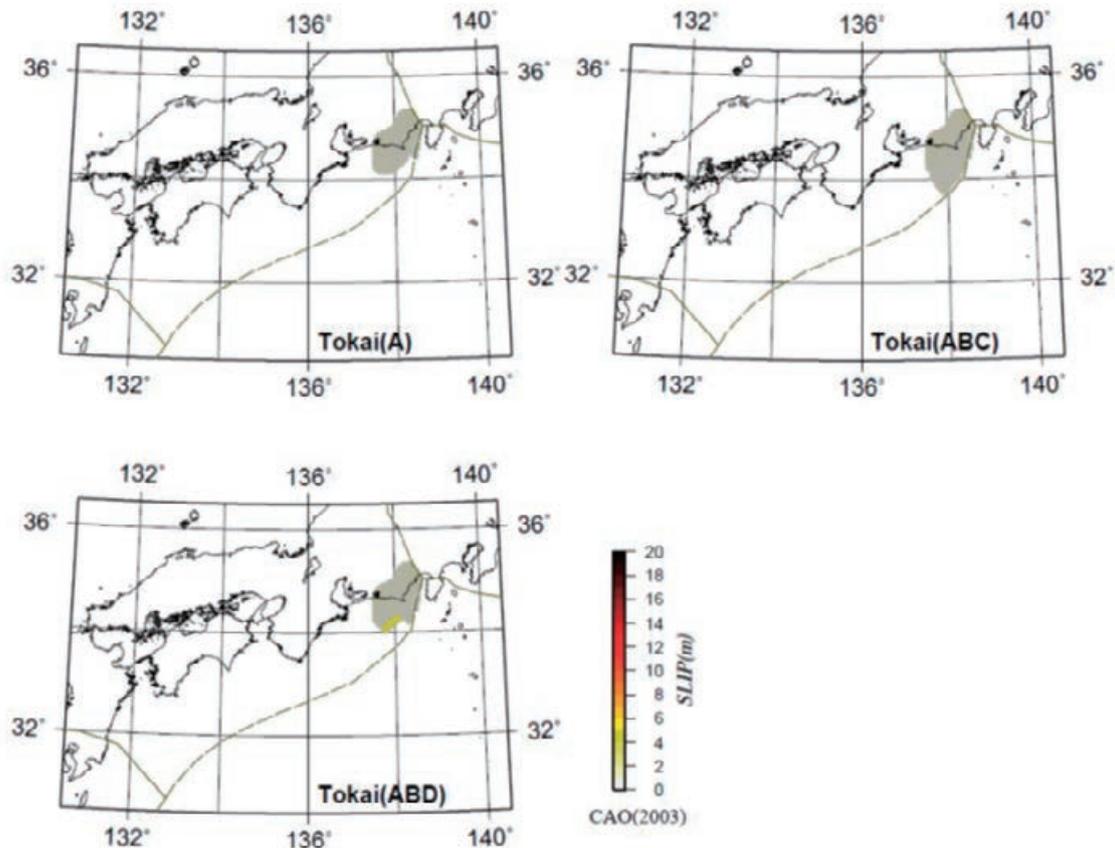


図 2.2.2-1 東海地震を対象とした波源断層モデル(中央防災会議，2001)

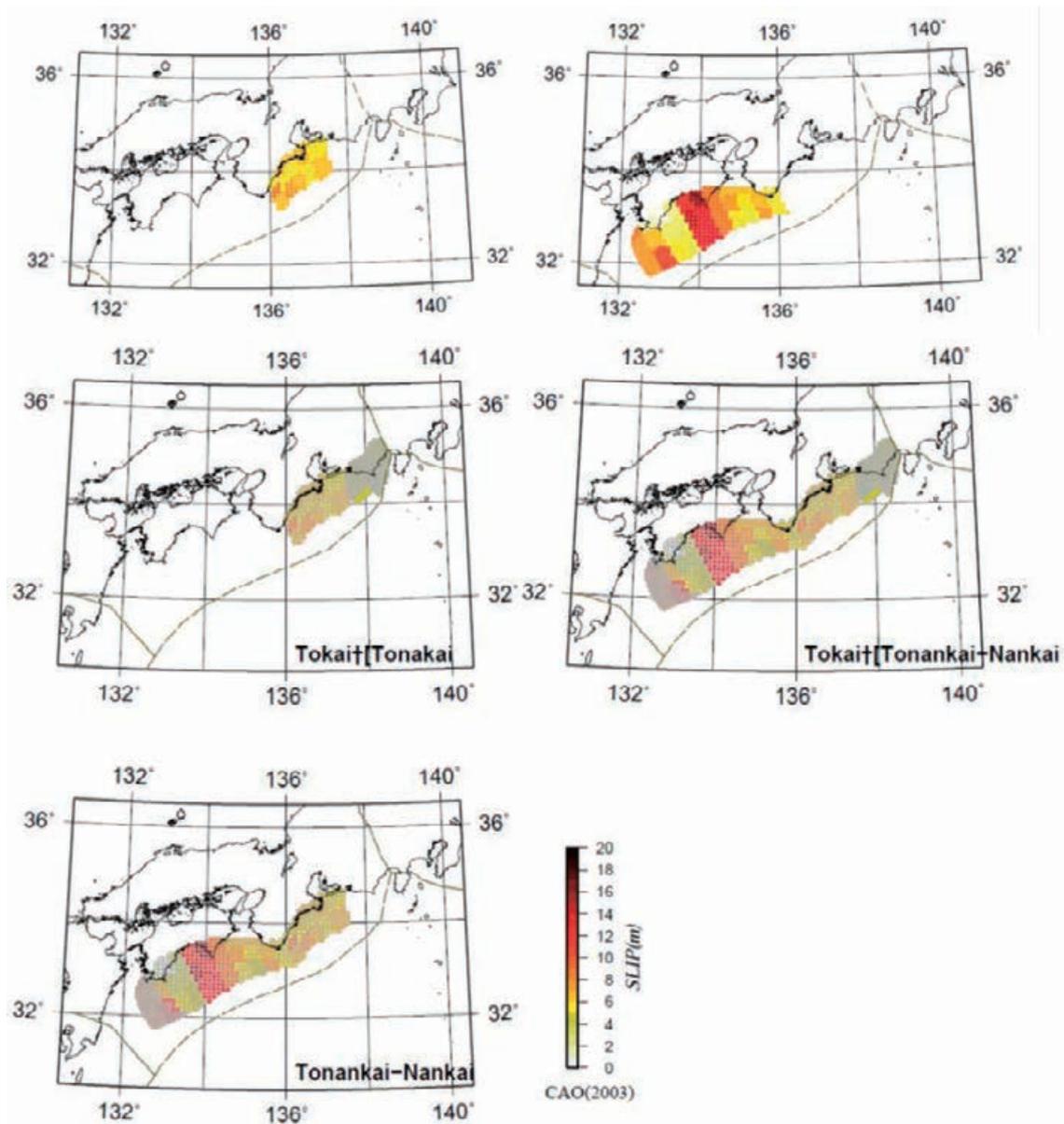


図 2.2.2-2 東南海・南海地震を対象とした波源断層モデル(中央防災会議, 2003)

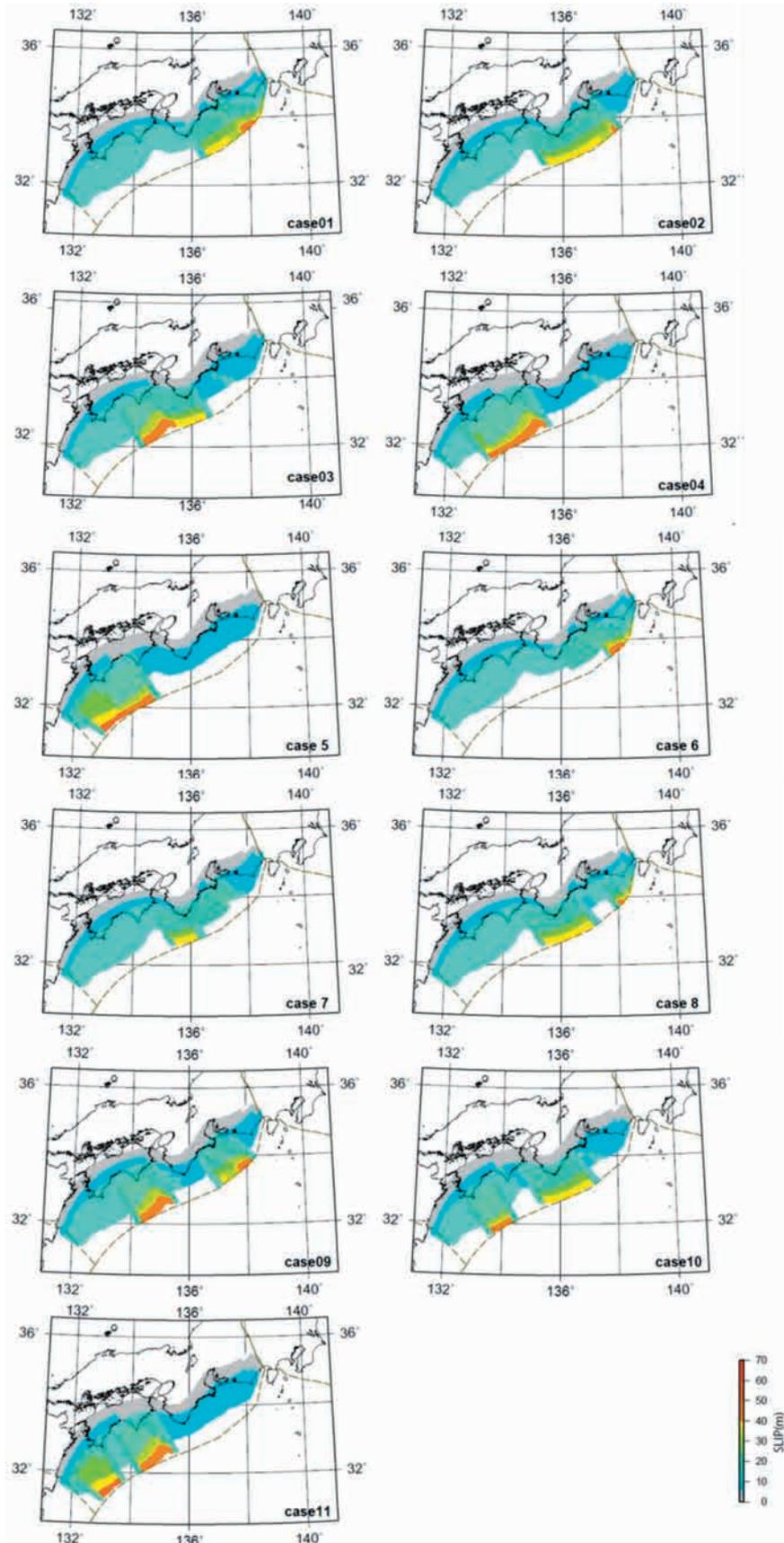


図 2.2.2-3 南海トラフの巨大地震を対象とした波源断層モデル(内閣府, 2015)

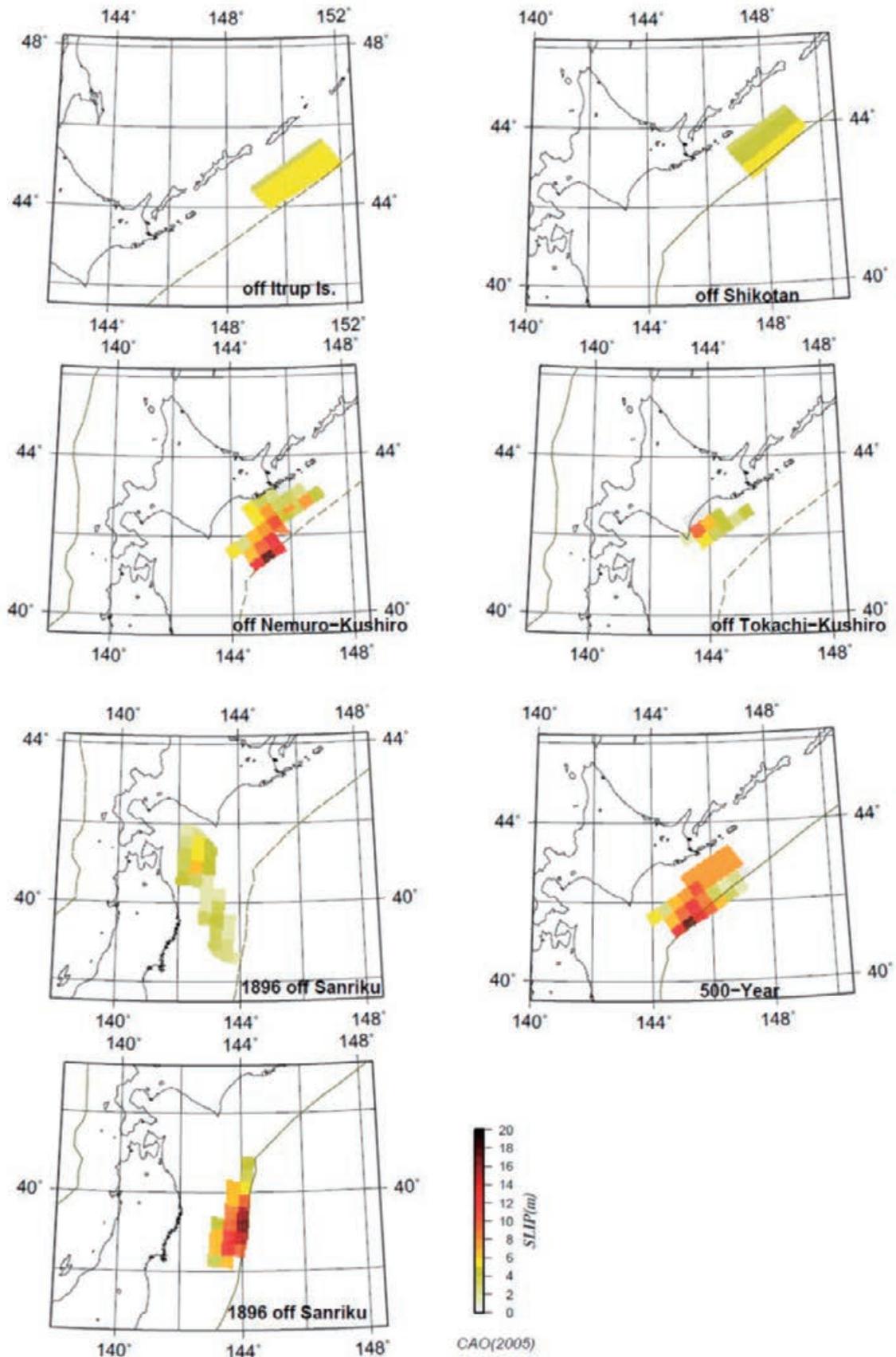


図 2.2.2-4 千島海溝・日本海溝を対象とした波源断層モデル(中央防災会議, 2006)

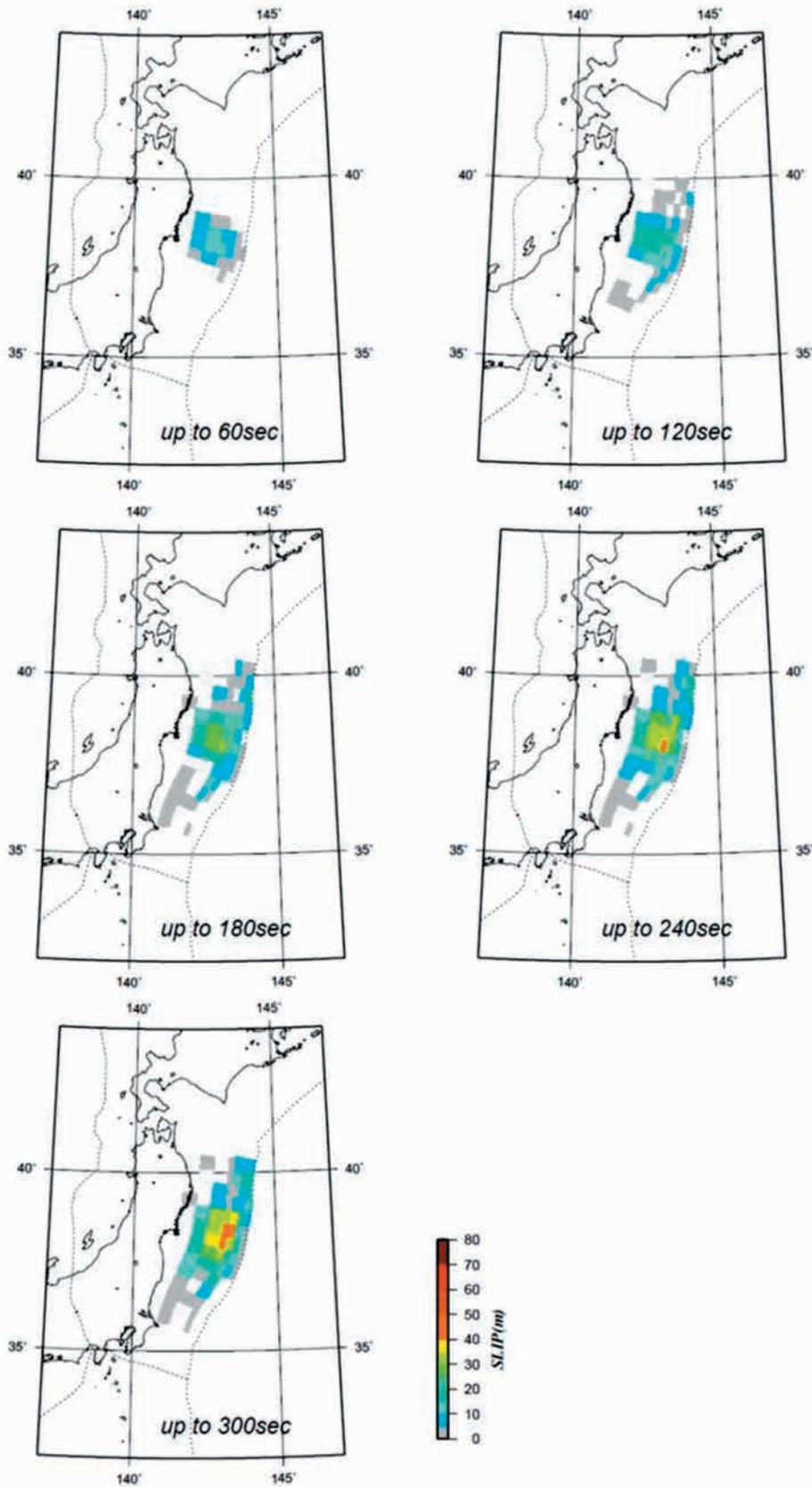


図 2.2.2-5 東北地方太平洋沖地震を対象とした波源断層モデル(内閣府, 2015)

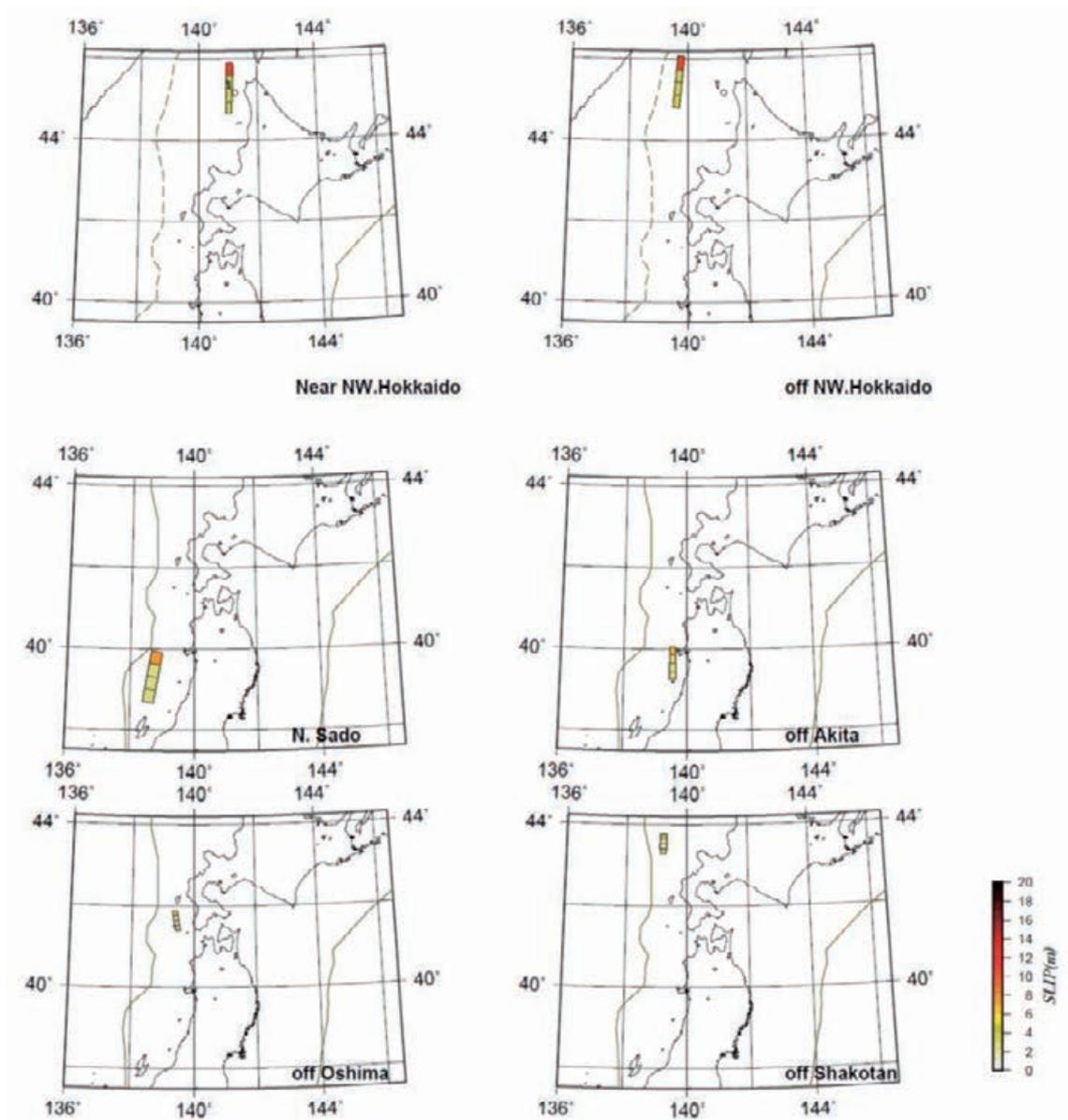


図 2.2.2-6 日本海東縁を対象とした波源断層モデル(国土交通省, 2016)

次に、地方自治体による津波に関する検討事例を表 2.2.2-2 に示す。各自治体における想定波源断層モデルの傾向は以下のようにまとめられる。

千島海溝—日本海溝、南海トラフに面している自治体では、東北地方太平洋沖地震の発生以前は、それぞれの自治体への影響があると考えられる特定のシナリオ地震を想定し、中央防災会議(2001, 2003, 2006)などが例示した地震を参考としている。その結果、複数の自治体がほぼ同じ波源断層モデルを採用している事例も見られた。

しかし、東北地方太平洋沖地震以後は国土交通省(2012)に則り、各自治体における最大クラスの津波を想定することとなり、最大クラスの津波を引き起こす地震として、東北地方太平洋沖地震の波源断層モデルや、内閣府の南海トラフモデル検討会における最大級の津波となる波源断層モデルをもとに、各自治体における津波が最大級となる波源断層モデルを採用するといった変化が見られた。

なお、徳島県、高知県、宮崎県などのように、内閣府(2015)の想定をもとに独自にモデルを調整している自治体もある。また、広島県、熊本県、大分県、宮崎県などのように、全国地震動予測地図をもとに独自にモデルを設定している自治体もある。

一方、日本海側の自治体および琉球海溝に面した自治体では、自治体周辺の実地活断層について、主に国土交通省(2016)から複数選定し、その中から、防災上の観点から影響の大きい断層系を選択、調整して津波の推定を行っている。

波源断層モデルのパラメータのうち、すべり分布の表現様式について、2011年以前では調査した自治体の7割以上が一樣すべりモデルを採用していたが、2011年以降はすべり分布の不均質性を考慮したモデルを採用している自治体が増加していた。

断層上端の深さについて、海底面に断層が出現することを念頭に置いているケースが多い。

断層の傾斜角について、日本海側の場合、活断層を想定していることから、30度、45度、60度および90度としているケースが多い。沈み込み帯での地震を想定している場合には、沈み込むプレートの形状を考慮している。

断層のすべり角について、日本海側の場合、防災上の観点から鉛直方向の地殻変動量が大きくなる90度としている事例が多い。沈み込み帯での地震を想

定している場合には、沈み込むプレートの大陸側プレートに対する相対的な沈み込み方向を考慮している場合が多い。

すべり量について、2011年以降に検討が行われた事例においては、波源断層モデルの地震モーメント M_0 もしくは、モーメントマグニチュード M_w を設定した上で、それを説明できる平均すべり量としている事例が多い。2011年以前に検討が行われた事例においては、断層形状(面積)を既往の大地震の再来を念頭に設定した上で、スケーリング則に基づいて、面積から地震モーメント M_0 およびモーメントマグニチュード M_w を求め、すべり量を設定している。

設定した波源断層モデルの妥当性を検証する場合、過去の津波事例における津波高さ(遡上高さ)と津波伝播計算による推定値の差異を、相田(1977)による幾何平均 K 、およびその対数標準偏差 κ により評価することが多い。この検証結果は、津波推定手法の妥当性の確認、海岸における津波増幅特性の調整、といった目的にも利用されている。

各自治体による検討事例を概観すると、東北地方太平洋沖地震後に実施された検討においては、最大規模の津波を想定する傾向が見られた。一方で、日本海側の自治体や熊本県など、活断層による津波を想定する自治体では、波源断層モデルの設定に苦慮している様子がうかがえる。

表 2.2.2-2 地方自治体による津波に関する検討事例(1/2)

| No. | 機関 | 公表年 | 業務名・委員会など |
|-------|------|-----|--|
| 1-1 | 北海道 | H18 | 津波シミュレーションおよび被害想定調査業務 (北海道太平洋沿岸東部・中部) |
| 1-2 | 北海道 | H22 | 津波シミュレーションおよび被害想定調査業務 (北海道日本海沿岸) |
| 1-3 | 北海道 | H23 | 平成 22 年度 津波シミュレーションおよび被害想定調査業務 (オホーツク海沿岸) |
| 1-4 | 北海道 | H24 | 太平洋沿岸にかかわる津波浸水予測図作成業務 |
| 2-1 | 青森県 | H24 | 青森県海岸津波対策検討会 |
| 2-2 | 青森県 | H27 | 青森県海岸津波対策検討会(日本海) |
| 3-1 | 岩手県 | H16 | 岩手県地震・津波シミュレーションおよび被害想定調査に関する報告書 |
| 3-2 | 岩手県 | H24 | 平成 23 年度 岩手県津波災害復旧方針検討業務委託 |
| 4-1 | 宮城県 | H16 | 宮城県第 3 次地震被害想定調査 |
| 4-2 | 宮城県 | H23 | 宮城県第 4 次地震被害想定調査 |
| 5-1 | 秋田県 | H24 | 秋田県地震被害想定調査業務委託 |
| 6-1 | 山形県 | H24 | 山形県津波浸水域予測図等作成業務 |
| 7-1 | 福島県 | H19 | 福島県津波想定調査 |
| 11-1 | 茨城県 | H19 | 茨城沿岸津波浸水想定区域調査業務委託 |
| 11-2 | 茨城県 | H24 | 茨城沿岸津波浸水想定区域調査業務 |
| 12-1 | 千葉県 | H24 | 東日本大震災千葉県調査検討専門委員会 |
| 13-1 | 東京都 | H24 | 「首都直下地震等による東京の被害想定」報告書 |
| 13-2 | 東京都 | H25 | 南海トラフ巨大地震等による東京の被害想定 |
| 14-1 | 神奈川県 | H24 | 津波浸水想定検討部会 |
| 14-2 | 神奈川県 | H27 | 津波浸水想定検討部会 |
| 15-1 | 新潟県 | H24 | 平成 24 年度 津波浸水想定図 |
| 16-1 | 富山県 | H24 | 富山県津波調査研究業務 |
| 17-1 | 石川県 | H24 | 平成 23 年度 石川県津波浸水想定調査 |
| 18-1 | 福井県 | H24 | 平成 23 年度福井県津波浸水想定調査業務 |
| 2.2.2 | 静岡県 | H13 | 第 3 次地震被害想定結果 |
| 22-2 | 静岡県 | H25 | 静岡県第 4 次地震被害想定調査 第 1 次報告 |
| 22-3 | 静岡県 | H27 | 津波浸水想定 |
| 23-1 | 愛知県 | H15 | 愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査報告書－平成 14 年度版－ |
| 23-2 | 愛知県 | H16 | 愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査報告書－平成 15 年度版－ |
| 23-3 | 愛知県 | H26 | 津波浸水想定 |
| 24-1 | 三重県 | H24 | 津波避難対策検討のための基礎資料整備に関する共同研究 |
| 24-2 | 三重県 | H27 | 津波防災地域づくりに関する法律に基づく津波浸水想定 |

(注) 資料名を「津波浸水想定」としたものは Web 等で公表されたものである。

なお、資料番号は都道府県コード+連番とした。

表 2.2.2-2 地方自治体による津波に関する検討事例(2/2)

| No. | 機関 | 公表年 | 業務名・委員会など |
|------|------|-----|-------------------------|
| 27-1 | 大阪府 | H16 | 大和川以南津波浸水シミュレーション業務委託 |
| 27-2 | 大阪府 | H25 | 津波浸水想定 |
| 28-1 | 兵庫県 | H23 | 「津波防災対策の推進」 |
| 28-2 | 兵庫県 | H25 | 津波浸水想定 |
| 30-1 | 和歌山県 | H18 | 和歌山県地震被害想定調査 |
| 30-2 | 和歌山県 | H25 | 津波浸水想定 |
| 31-1 | 鳥取県 | H24 | 鳥取県津波対策検討委員会報告 |
| 32-1 | 島根県 | H24 | 島根県地震被害想定調査 |
| 33-1 | 岡山県 | H16 | 平成 16 年度 津波浸水予測図作成業務 |
| 33-2 | 岡山県 | H25 | 津波浸水想定 |
| 34-1 | 広島県 | H17 | 平成 16 年度 広島県津波浸水予測図作成業務 |
| 34-2 | 広島県 | H24 | 広島県地震被害想定検討委員会 |
| 34-3 | 広島県 | H25 | 広島県地震被害想定調査報告書 |
| 35-1 | 山口県 | H24 | 山口県地震・津波防災対策検討委員会 |
| 35-2 | 山口県 | H27 | 山口県津波浸水想定図(日本海沿岸) |
| 36-1 | 徳島県 | H24 | 徳島県津波浸水想定公表について |
| 37-1 | 香川県 | H17 | 香川県南海地震被害想定調査 |
| 37-2 | 香川県 | H24 | 香川県地震津波被害想定調査委員会 |
| 37-3 | 香川県 | H26 | 香川県地震・津波被害想定調査報告書 |
| 38-1 | 愛媛県 | H25 | 愛媛県地震被害想定調査 |
| 39-1 | 高知県 | H24 | 南海トラフ巨大地震による震度分布・津波浸水予測 |
| 40-1 | 福岡県 | H24 | 津波に関する防災アセスメント調査 |
| 41-1 | 佐賀県 | H22 | 第 3 回地震・津波等減災対策検討委員会資料 |
| 42-1 | 長崎県 | H24 | 長崎県地域防災計画見直し検討委員会 |
| 42-2 | 長崎県 | H26 | 津波浸水予測 |
| 43-1 | 熊本県 | H24 | 熊本県地域熊本県防災計画検討委員会 |
| 44-1 | 大分県 | H16 | 大分県津波浸水予測等業務 |
| 44-2 | 大分県 | H24 | 大分県地域防災計画再検討委員会有識者会議 |
| 44-3 | 大分県 | H26 | 津波浸水想定 |
| 45-1 | 宮崎県 | H24 | 宮崎県防災会議地震専門部会 |
| 45-2 | 宮崎県 | H25 | 津波浸水想定 |
| 46-1 | 鹿児島県 | H25 | 鹿児島県地震等災害被害予測調査中間報告 |
| 47-1 | 沖縄県 | H25 | 沖縄県津波被害想定調査報告書 |

(注) 資料名を「津波浸水想定」としたものは Web 等で公表されたものである。
なお、資料番号は都道府県コード+連番とした。

2.2.3 地形モデルの作成

津波伝播遡上計算に用いる入力データは、数値計算手法(2.2.4 項参照)にも依存するが、一般的には地形データ(海域および陸域)、粗度データ、構造物データの3つで構成される。計算対象となる空間を格子状に分割し、これらの3つの情報をその格子上に近似して表現したものが入力データとなる。

津波伝播遡上計算では、海底地形および陸域の地表面を再現するため、地盤高(標高および水深)を格子化したメッシュデータを用いる。

地形データの精度は最終的な計算結果に影響を与え、場合によっては外力条件より重要となる(高橋, 2004)。格子間隔を小さくすると計算精度も向上するが、計算負荷、データ作成の必要資源も増大し、津波伝播遡上計算の大部分がこの地形モデルの作成作業となることも多い。また、小さな空間格子間隔のデータから大きな空間格子間隔のデータを作成することは可能であるが、逆の手順においては補間作業が必要となる。地形データは、目的・用途に応じた空間格子間隔を決定し、その格子間隔に応じた地形の基礎データを収集する必要がある。

本項では、津波伝播遡上計算に用いる地形モデルの作成方法、使用データおよびデータ精度に関する既往の研究・文献等を整理した結果について報告する。

(1) 空間格子間隔

津波伝播遡上計算の地形データは、陸域データと海域データで構成される。

海域の水深データは、外洋と沿岸部に分けて考えることができる。外洋では津波の発生を計算するため、断層面が余裕をもって設定できるように広域での設定が要求されるが、水深が深いため津波の波長は数 10 km ~ 数 100 km のオーダーであり、津波の伝播速度も速くなることから、比較的大きな格子間隔で十分である。それに対して、水深が浅くなり波長が短くなる沿岸部では、津波の伝播速度も遅くなるために、局所的な地形が再現されている格子間隔の小さい地形モデルが要求される。この計算に要求される空間スケールの違いのため、津波の波長および地形条件に応じて、異なる計算格子間隔の領域を接続して同時に計算する方法(ネスティング)が用いられることが多い。

ネスティングを用いた計算では、格子間隔の異なる領域を接続すると計算誤差が蓄積する場合があるため、空間格子間隔の選定に注意が必要である。これは、各領域で再現できる限界波長は格子間隔の2倍となるため、小領域で発生した津波の短波長成分の一部が大領域へ接続できずに小領域内部に残ってしまうためである。この影響を低減するため、格子間隔を 1:3 あるいは 1:2 の割合で小さくして領域を結合するネスティング手法が用いられる(図 2.2.3-1; 後藤・佐藤, 1993)。

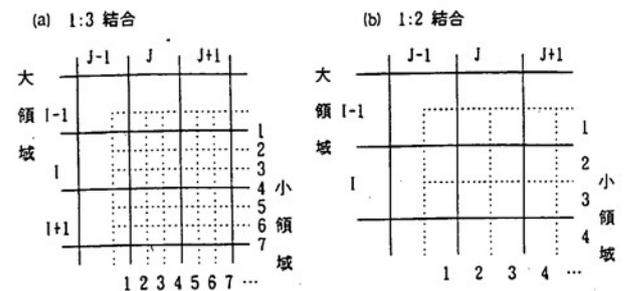


図 2.2.3-1 空間格子間隔の異なる領域の接続 (後藤・佐藤, 1993)

なお、各計算領域を接続する際に、接続境界が陸地と鋭角に交わる場合は、陸からの反射波がすぐ接続境界に達し、地形条件が粗いまま得られた外側の大領域での計算結果との差が大きく、計算が不安定化する可能性もある。そのため、複数のテスト計算により安定性をチェックし、領域の接続位置等を調整するなど、不安定化を極力抑えるための作業が行われる。

(2) 海域地形

海域の空間格子間隔の設定に関して、長谷川ほか(1987)は、一様水深の一次元水路における波の伝播計算において、一波長に含まれる格子点数が 20 点以上必要であると述べており、格子分割が津波の計算水位に与える影響が極めて大きいことを示している(図 2.2.3-2)。

また、一次元水路に単位振幅の正弦波を入射波とした線形長波計算を行い、空間格子間隔 Δx に対する波長 L の比 $L/\Delta x$ (Δx の空間分解能) と、計算時間間隔 Δt の C.F.L. 条件に対する充足度を検討した結果、空間分解能の影響の方がはるかに大きい事を述べ、数値散逸を回避するためには波長に対する空間

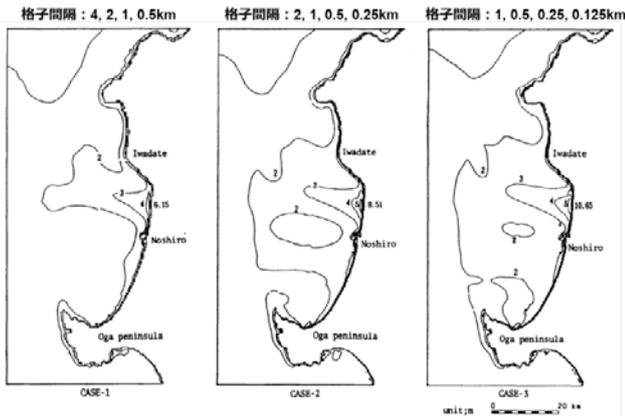


図 2.2.3-2 格子間隔による最大水位の比較
(長谷川ほか, 1987)

分解能 $L/\Delta x$ を 20 以上にすることが必要であることを示した。この検討は津波の伝播距離を波長の 10 倍程度までで評価しており、より長い伝播を考える場合、さらに細かい空間分解能が必要である。今村 (1989) はこの条件について、初期水位条件から求められる波長での分解能として設定する必要性を指摘している。

以上より、以下のように定式化できる。

C.F.L 条件(差分スキームの安定条件)：

$$\Delta t \leq \Delta x / \sqrt{2gh_{max}} \quad (2.2.3-1)$$

長谷川ほか(1987)、今村(1989)による Δx の条件：

$$L/\Delta x = (T_0\sqrt{gh})/\Delta x \geq 20 \quad (2.2.3-2)$$

ここで、 g は重力加速度、 h_{max} は最大静水深、 T_0 は初期水位での津波周期、 h は静水深である。

佐山ほか(1986)は、屈折の影響の大きい近海計算域において格子間隔を 800 m, 400 m, 100 m と変化させた検討を実施し、格子幅が小さいほど水位が高く細かな変動になることを示している(図 2.2.3-3)。

今村(1989)は深海域ならびに浅海域において、2次元津波伝播計算を行い、計算格子間隔の違いによる計算結果の差について検討している。結果として、深海域においては 5.4 km (2.7 km, 10.8 km との比較)、沿岸域(海岸線まで)では 0.2 km (0.3 km, 0.6 km との比較)での計算が望ましいとしている(図 2.2.3-4, 図 2.2.3-5)。

同様に、長谷川ほか(1987)は、秋田県北部域沿岸を対象とした、1983年日本海中部地震津波の陸域遡上計算について、空間解像度 60 m と 30 m での比較計算を実施した結果、平坦で単調な地域ではこれらの差は少ないが、地形的に複雑な地域では差異が大きくなることを指摘している。

Goto (1983) は、沿岸の遡上計算の空間格子間隔について、以下の指標を提案している。

$$\Delta x / \alpha g T^2 \leq 4 \times 10^{-4} \quad (2.2.3-3)$$

ここで、 T は津波周期、 α は地形勾配である。この条件の場合、周期 20 分の津波で海底勾配が 1/200 の場合、25m の計算格子間隔で条件を満足できることになる。

また、土木学会(2002)は下田沖の実地形を対象に、伝播過程の海域における空間格子間隔が最大水位上昇量に与える影響を実証的に検討しており、水深 100 m で深では格子間隔を 800 m としても影響はほとんど見られないが、水深 100 m ~ 50 m では格子間隔を 200 m 以下に、50 m 以下では格子間隔を 50 m 以下まで細かくする必要があるとしている(図 2.2.3-6)。

海域の地形データソースについて、公的機関等で既に整備されている情報を図 2.2.3-7、図 2.2.3-8 に示す。

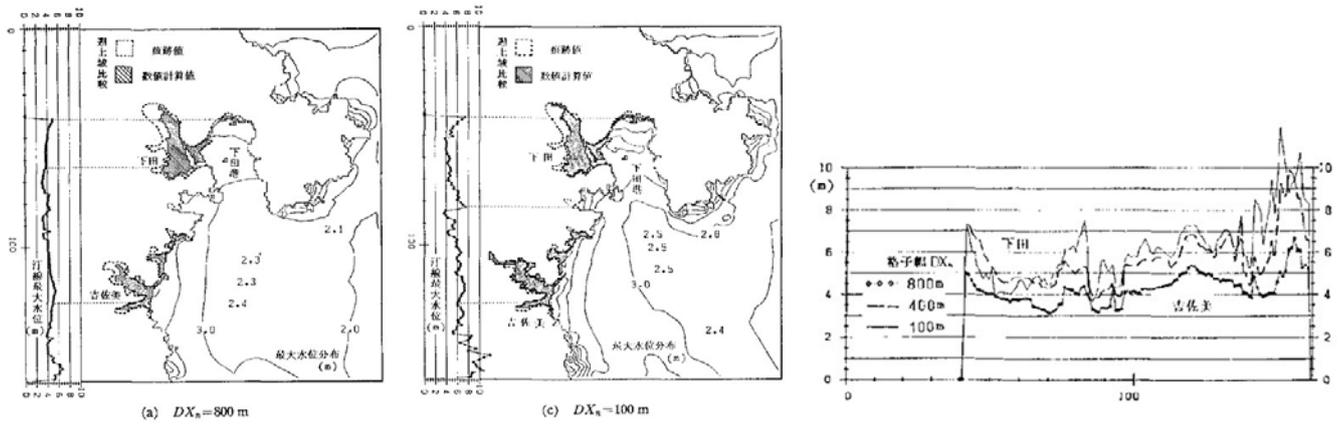


図 2.2.3-3 最大水位分布および遡上域の比較，汀線最大水位比較(佐山ほか，1986)

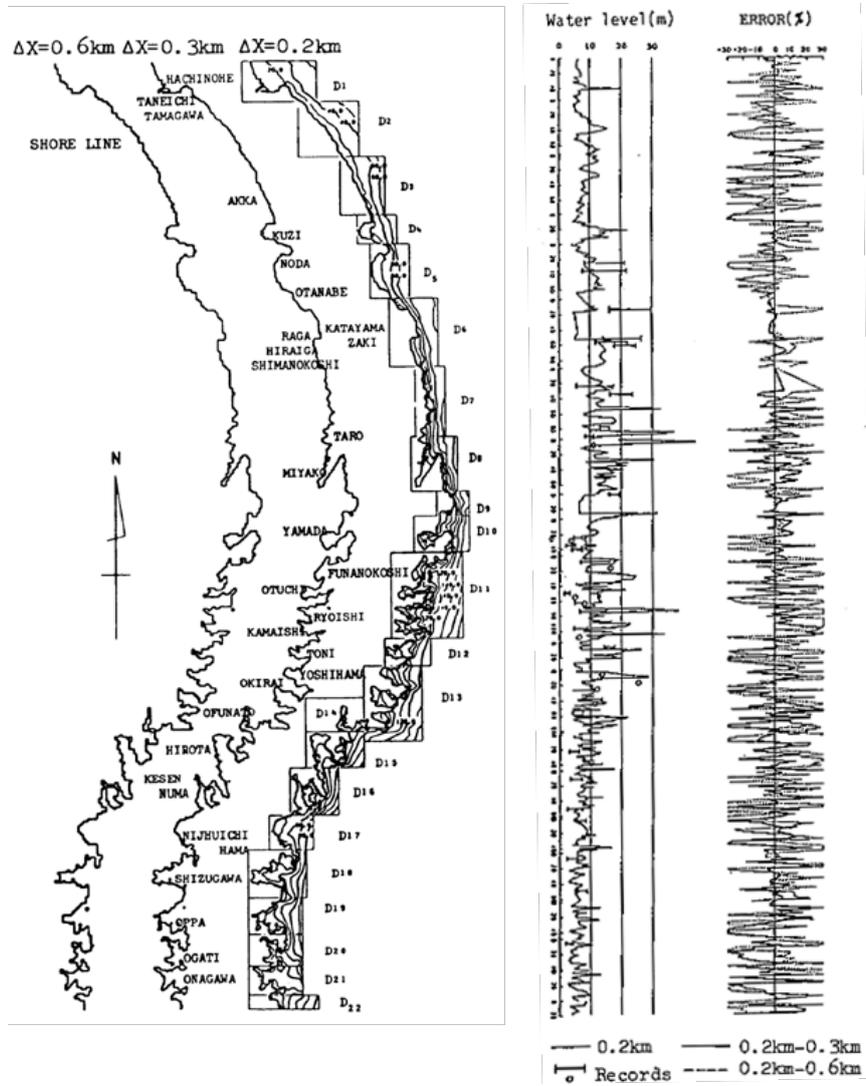


図 2.2.3-4 浅海域での海岸線近似と計算結果の比較(今村，1989)

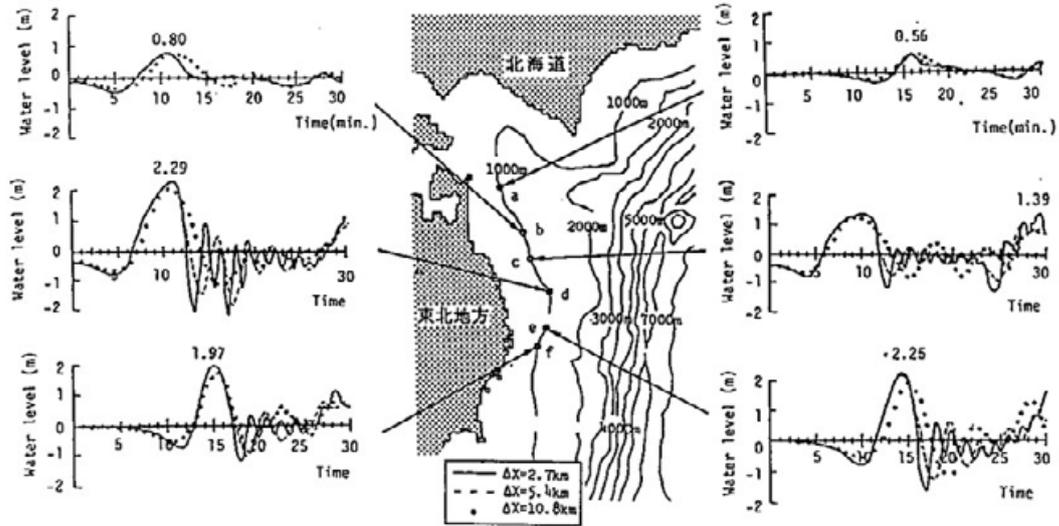


図 2.2.3-5 深海域での格子間隔の違いによる時間波形の比較(明治三陸大津波)(今村, 1989)

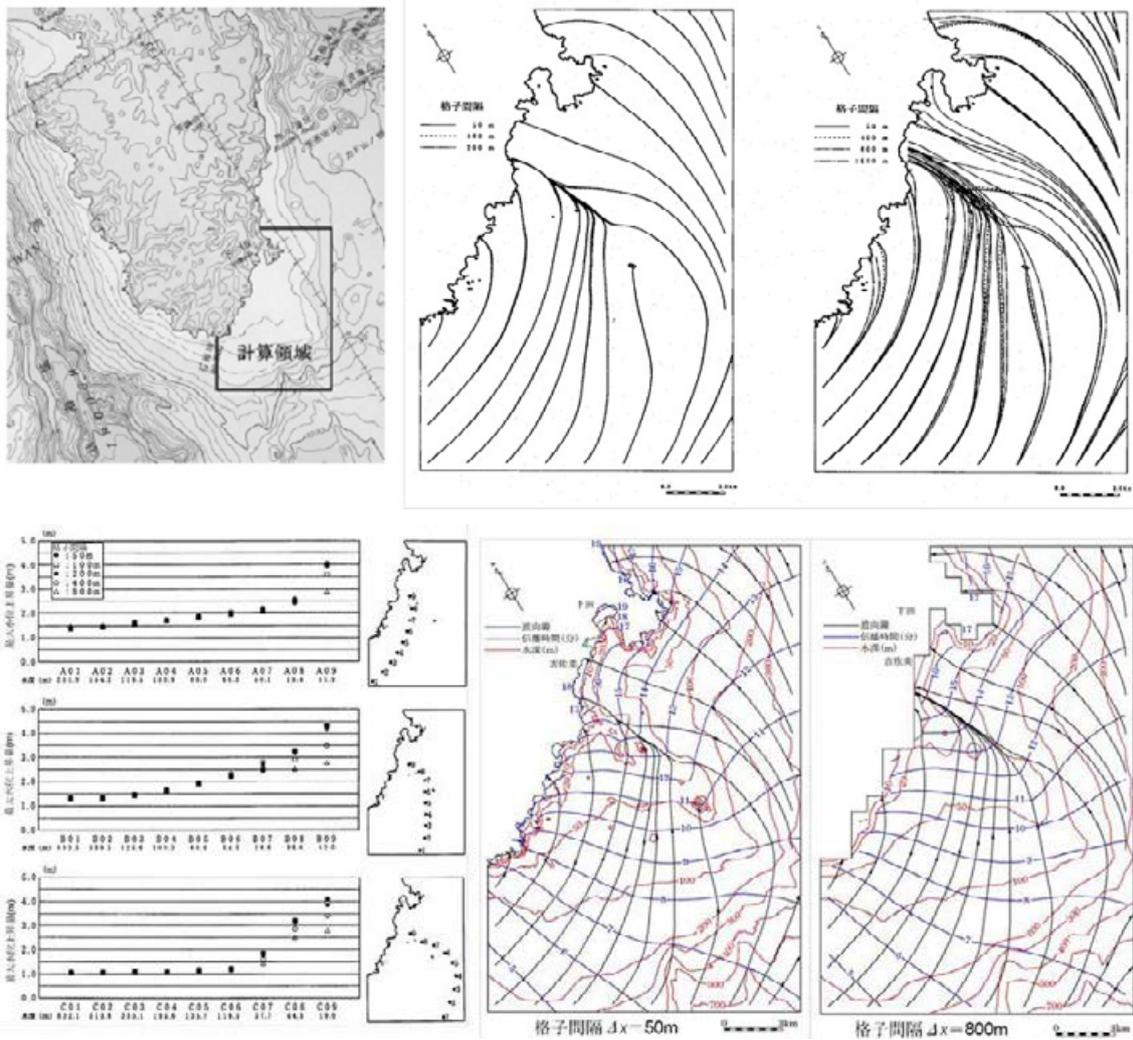
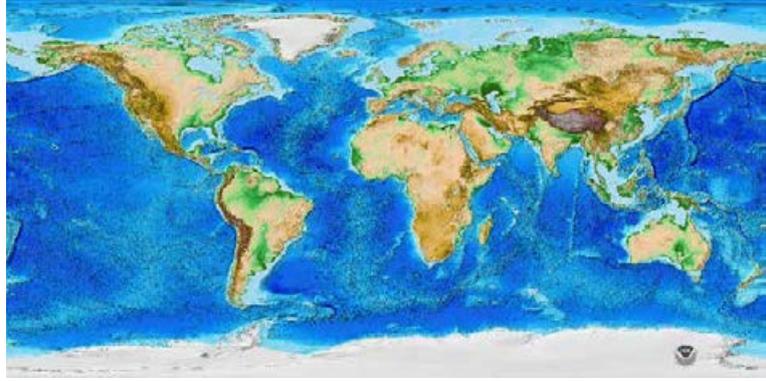
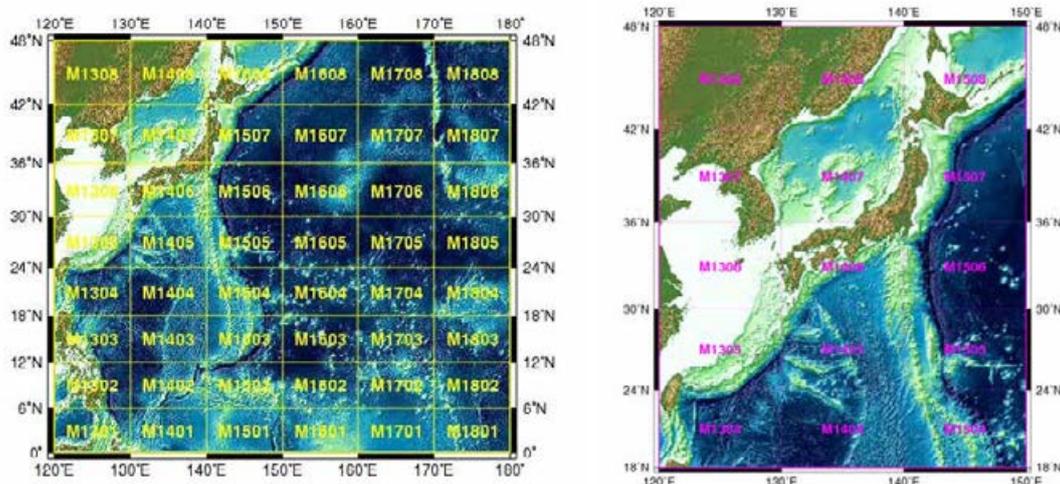


図 2.2.3-6 浸水深・伝播時間、経路および最大水位上昇量と格子間隔の関係(土木学会, 2002)

| 資料名 | 機関名 : Web サイト | 概要 | 適用 |
|--|--|---------------------------------|-----|
| ETOP02 | 米国地球物理学データセンター (National Geophysical Data Center) http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo2.html | 2 分格子の水深データ | 外洋部 |
| ETOP01 | 米国地球物理学データセンター (National Geophysical Data Center) http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html | 1 分格子の水深データ | 外洋部 |
|  | | | |
| GEBCO | 英国海洋センター (British Oceanographic Data Center) http://www.bodc.ac.uk/ | 1 分格子, 30 秒格子 15 秒格子のデータ | 外洋部 |
| JTOP001 | (財) 日本水路協会 http://www.mirc.jha.or.jp/products/finished/JTOP01/ | 北西太平洋における緯度経度 1 分グリッド | 外洋部 |
| JTOP030 | (財) 日本水路協会 http://www.mirc.jha.jp/products/JTOP030v2/ | 日本周辺海域における緯度経度 30 秒グリッド (第 2 版) | 外洋部 |



(左図) JTOP01 : 人工衛星 (Geosat/ERM, Geosat/GM, ERS, ERS-1/GM, TOPEX/POSEIDON) のデータから 1 分グリッドで推定した水深値を日本海洋データセンター JODC 保有の測量データに基づいて補正したデータ
(右図) JTOP030 (第 2 版) : 品質管理済みの測量データや水深データセット, および新規に作成した等深線図の数値データを基に, 精度の高いデータを優先して統合編集. 日本周辺における緯度経度 30 秒グリッドの水深データファイルで, 基データが存在しない海域には近傍の水深データから補完した推定値を挿入したデータ. 本データの作成に用いたデータは, 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震以前の調査結果に基づいている.

図 2.2.3-7 海域に関する地形データソース (外洋部)

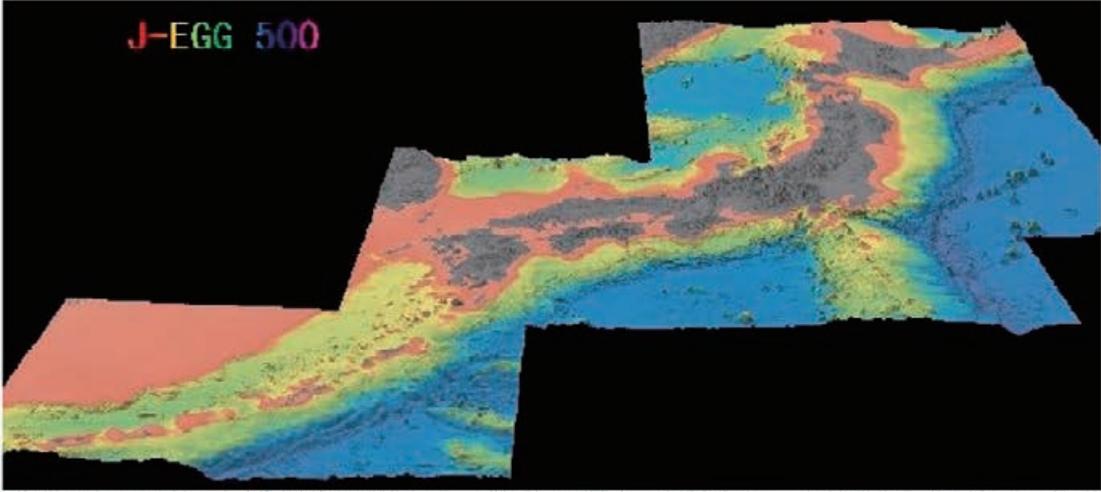
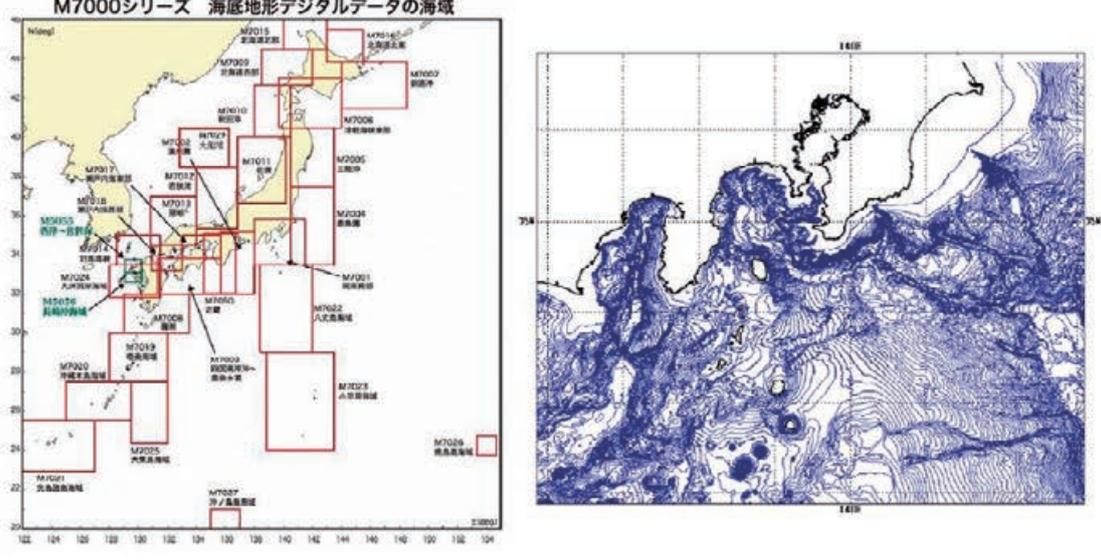
| 資料名 | 機関名 : Web サイト | 概要 | 適用 |
|--|---|---|------------|
| J-EGG500 | 日本海洋データセンター (JODC) http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_detail.html | 日本周辺の 500m メッシュ海底地 形データ | 外洋部 沿岸部 |
|  <p>海洋情報部をはじめとした各種海洋調査機関によって得られた膨大な量の水深測量データを統合し、等間隔で格子化した水深のデータセット。品質の異なる様々なデータが混在していること及び海域によって水深データに粗密があることから、計測水深が存在する区域についても平滑処理を行い、品質の違いによる段差が出来ないように配慮している。(その反面、小さい起伏が表現できない等の弊害もあり。) また、データ空白域付近や水深変化が激しい区域等(沿岸部や海山付近)では、実測された水深値との差が大きいところがあるため、データを利用する上で留意が必要。</p> | | | |
| 海底地形デジタルデータ M7000、M5000 シリーズ | (財) 日本水路協会 http://www.iha.or.jp/ip/shop/products/btdd/index.html | 日本沿岸全域に わたって海底地 形データが整備。 取得水深データ で求められる最 大限の高密度等 深線を収録。 | 外洋部 沿岸部 |
|  | | | |
| 深淺測量成果 漁港平面図 港湾平面図 | 海岸管理者、漁港、港湾管理者 | 極浅海部の詳細 水深データ | 極浅海部 |

図 2.2.3-8 海域に関する地形データソース(沿岸部)

(3) 陸域地形

陸域における津波伝播遡上計算では、地形データの地形近似精度が重要である。用いた地形データにより結果が左右されるため、ハザードマップなどの利用目的に応じた地形データの作成、格子間隔の選定が重要となる。

地方自治体によるハザードマップ作成・活用を支援することを目的とした内閣府ほか(2004)では、計算精度に関して、計算格子間隔よりも標高データの精度が重要であることを記述している。特に津波による浸水が予測される地域の陸域標高データは、浸水深の評価のため 1 m より詳細な精度が必要であり、国土地理院の 1/25,000 地形図から作成されている 50 m メッシュ標高データではなく、都市計画図 1/2,500 を用いてデータを作成し、計算格子間隔は 12.5 m を基本とすることを示している(図 2.2.3-9)。

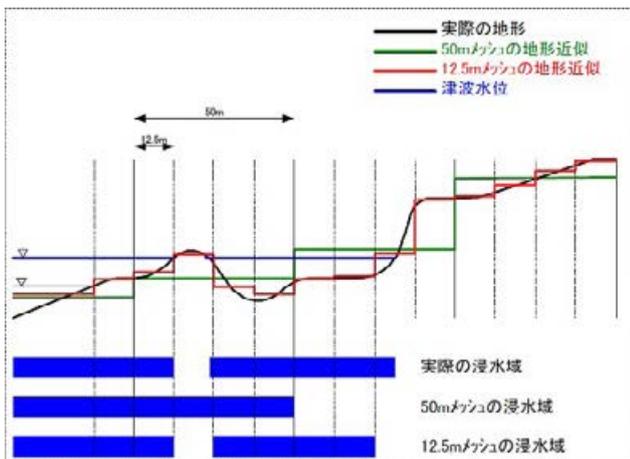


図 2.2.3-9 標高が浸水深に与える影響模式図
(内閣府ほか, 2004)

50 m メッシュ標高データは、全国で整備されている安価な地形データであるが、津波による浸水が懸念される沿岸部におけるデータ精度が低く、数 m オーダーの誤差を含む場合もある。一方で、すべて 12.5 m 格子間隔で計算することは多くの時間・経費を必要とする。そのため、内閣府ほか(2004)は「国・県等の広域な範囲を対象に津波・浸水挙動を把握することが目的である場合においては、目的と対象範囲の広さに応じて、50 ~ 100 m などの適切な格子間隔により浸水域を把握するものとする」と提案している。

都市計画図 1/2,500 を利用した検討例として、劉ほか(2001)は、5.5 m 格子と 50 m 格子による数値計

算の比較検討を実施している。構造物等の影響が小さい条件で実施した場合であれば粗い格子間隔で津波遡上を予測できるが、市街地氾濫流の流況を詳細に調べる場合には格子間隔を細分化して家屋などの土地利用の影響を考慮した数値計算を行うことが有効であると示している(図 2.2.3-10)。

近年では、国土地理院や国土交通省等による航空レーザスキャナ測量(図 2.2.3-11)による精密地盤高計測を用いた 5 m メッシュの数値標高モデルが整備・公表されている。航空レーザスキャナ測量では、固定翼や回転翼などの航空機に搭載したレーザスキャナから地表に向けてレーザパルスを連続的に照射し、反射光を捕捉してその往復時間から距離を測定する。レーザスキャナにより得られたデータから、雲・空気中の塵・ビル等による乱反射等に起因するノイズを除去した、樹木や建物・構造物等の地物の表面における高さを計測したデータを DSM (Digital Surface Model) と呼ぶ。対して、DEM (Digital Elevation Model) は、DSM から地物の表層面での反射により得られたレーザスキャナデータをフィルタリングにより除去した、地表面の高さを表したデータである。なお、計測された点群データの精度は、計測時の航空機の高度や調整用基準点の状況により異なるが、水平方向に ± 30 cm、鉛直方向に ± 15 cm 程度の誤差となる。

日下部ほか(2006)は、航空レーザスキャナ測量データを用いた空間格子間隔の違いによる地形再現状況や使用用途、データの収集手法について検討結果をまとめている(表 2.2.3-1, 表 2.2.3-2, 図 2.2.3-12)。

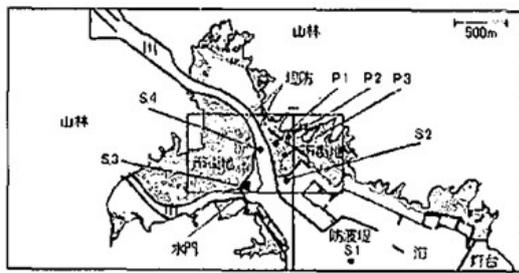
同様に、村嶋ほか(2006, 2007)は、航空レーザスキャナの津波遡上計算への適応性および地形モデルの空間格子間隔の影響について検討しており、空間格子間隔による浸水範囲の比較結果を示している。格子間隔を小さくするにつれて、浸水面積も小さくなる傾向があり、防潮堤背後の市街地における最大浸水深 2 m 以上のエリアの浸水範囲全体に占める割合が 30% (40 m 格子) から 4% (5 m 格子) に大きく減少する。これは、大きな格子間隔では津波遡上を阻害する地形の凹凸が少ないのに対し、詳細な地形モデルは、地形の凹凸をより正確に再現しており、氾濫水が窪地に早めに集積することなどによるとしている。レーザデータを用いた 5 ~ 10 m 間隔程度の地形モデルを用いた津波の数値計算は、市街地の

起伏、堤防、盛土の効果を表現でき、浸水範囲の予測や堤防等の効果検証において有効であることを示している(図 2.2.3-13)。また、詳細な地形モデルを用いることにより、津波氾濫水の挙動を考慮した面的な防護方法の効果検証が可能であり、対象地の状況に応じて適切な格子間隔を用いた検討が必要であることを示している(図 2.2.3-14)。

国土交通省(2012)では、陸域における地形データ作成にあたって、航空レーザスキャナ測定の成果等を活用することを基本とし、最小計算格子間隔は 10 m 程度より小さくすることを目安とすることが示されている。

表 2.2.3-3 に代表的な津波の数値計算マニュアルにおける、地形モデルの空間格子間隔および地形データソースについて整理した。なお、地形データソースに関しては、それぞれの作成時において入手可能な地形データから設定されていることに留意されたい。国土地理院は、航空レーザスキャナ測量データ等をもとに微細で同一精度の地形データの整備に取り組んでいる。

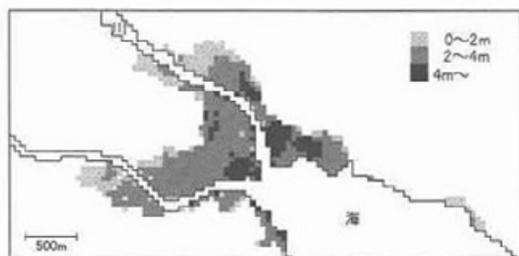
陸域の地形データソースについて、公的機関等で既に整備されている情報を図 2.2.3-15 に示す。



(a) 対象計算領域



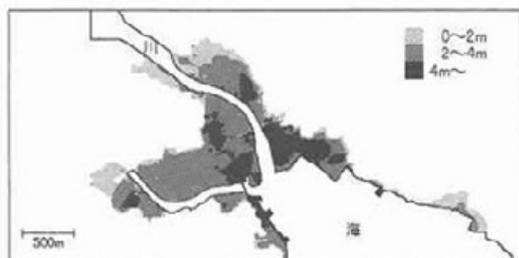
(d) 構造物の影響が大きい場合(50 m 格子)



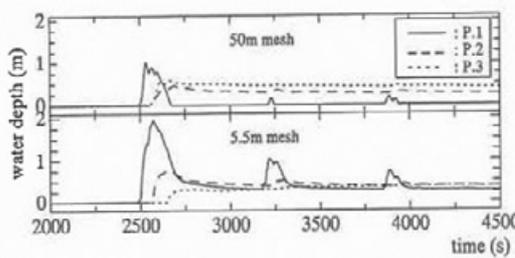
(b) 構造物の影響が小さい場合(50 m 格子)



(e) 構造物の影響が大きい場合(5.5 m 格子)



(c) 構造物の影響が小さい場合(5.5 m 格子)



(f) 格子間隔の違いによる浸水深の時間的変化

図 2.2.3-10 津波最大浸水範囲と最大浸水深の比較(劉ほか, 2001)

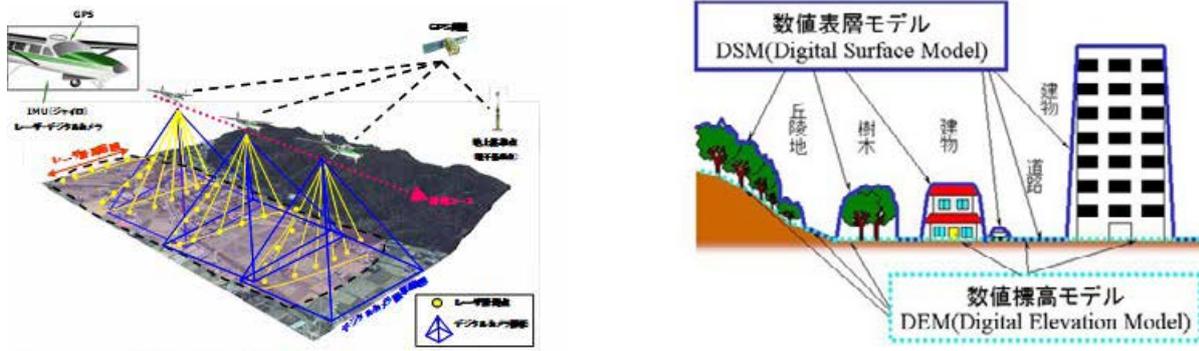


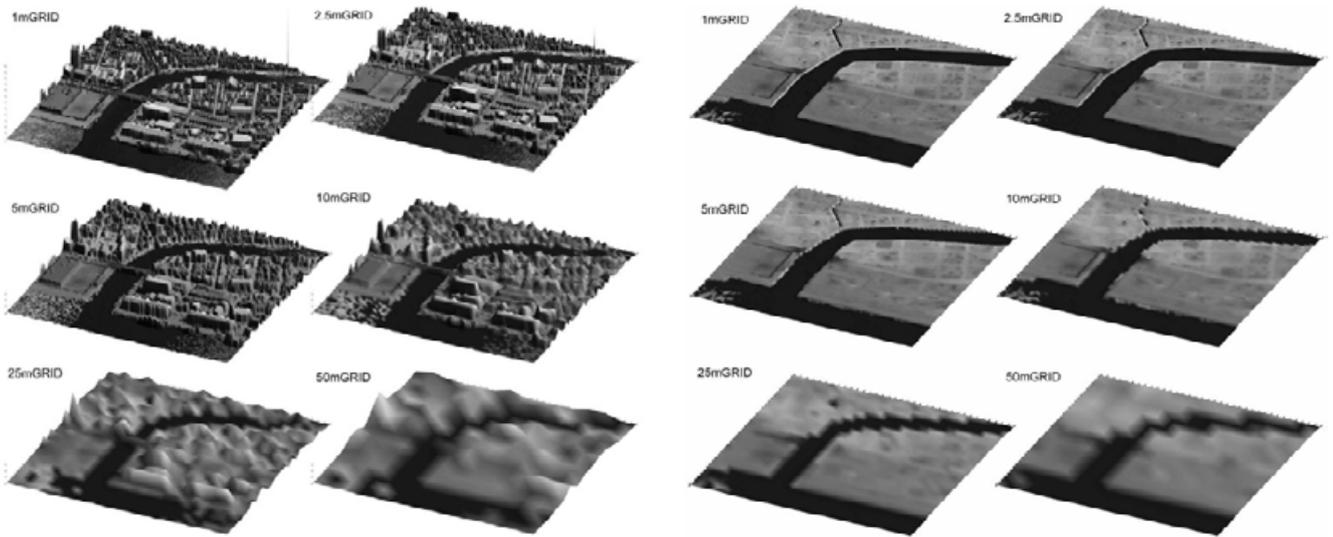
図 2.2.3-11 航空レーザスキャナ測量の模式図

表 2.2.3-1 空間格子間隔と地物表現の再現程度(日下部ほか, 2006)

| メッシュ | 建物 | 道路 | 浸水シミュレーションの用途 |
|------|----------------------------------|----------------|------------------------------|
| 1m | 低層建物も一戸単位での再現可能 | 街区内の幅4m道路 | 住民個々の避難シミュレーション |
| 2.5m | 中高層建物の再現可能であるが、低層建物の一戸単位での再現は不可能 | 街区を区切る幅4m～6m道路 | 街区単位での避難シミュレーション。構造物への影響評価 |
| 5m | 中高層建物の再現可能であるが、街区内の低層建物は再現できない。 | 街区を区切る幅6m以上の道路 | 市町村単位での防災計画(街区を基本にした被害想定が可能) |
| 10m | 高層建物の再現は可能 | 街区をつなぐ幅15m～の道路 | 県単位での防災計画(メッシュを基本にした被害想定が可能) |
| 25m | 建物の表現は不可 | 幅20m以上の道路 | 被害予測 |
| 50m | 建物の表現は不可 | 道路の再現は不可 | おおまかな被害予測 |

表 2.2.3-2 メッシュデータの収集手法の検討(日下部ほか, 2006)

| | メッシュサイズ | データ名 | 備考 |
|----------|---------|------------------|--|
| 伝播計算 | 500m | J-DOSS | 日本海洋データセンター(JODC)のオンラインサービス座標系はWGS84で提供されている。 |
| | 250m | 大陸棚の海の基本図 | 大陸棚の海の基本図(海上保安庁)は縮尺が1:1000000～1:200000で整備されている。各基本図より250mメッシュが作成可能 |
| | 125m | 大陸棚の海の基本図 | 大陸棚の海の基本図(海上保安庁)は縮尺が1:1000000～1:200000で整備されている。 |
| | 50m | 沿岸の海の基本図 | 沿岸の海の基本図(海上保安庁)は縮尺が1:100000～1:50000で整備されている。1:50000の基本図より50mメッシュが作成可能。 |
| 河川遡上浸水計算 | 25m | 沿岸の海の基本図 | 1:25000～1:10000の沿岸の海の基本図(海上保安庁)より25mメッシュが作成可能 |
| | 10m | 深浅測量結果 | 特に河口付近で必要な場合には、ナローマルチビーム等を利用した面的な深浅測量結果を利用することも可能 |
| | 50m | 数値地図50m | 国土地理院より1/25000地形図をベースに作製されている。 |
| | 25m | 1/25000地形図 | 1/25000地形図より、25mメッシュが作成可能である。 |
| | 10m | 数値地図10m | 国土地理院より1/10000及び1/5000をベースに作成されている。主に火山地域で作成されている。 |
| | 5m | 数値地図5m | 国土地理院により航空レーザスキャナ測量による精密地盤高計測により求めた数値標高モデル。現在、関東と中部の一部エリアが公開されている。 |
| 浸水計算 | 2.5m | 国土基本図 都市計画図など | 1/2500～1/5000の大縮尺の実測図、たいていの市町村の都市計画図区域内で整備されている。 |
| | 2.5m以下 | | 特に浸水計算で必要な場合には、航空レーザスキャナ測量等を利用した面的な測量結果を利用することも可能 |



(a) 地形データおよび構造物データ

(b) 地形データのみ

図 2.2.3-12 空間格子間隔毎の地形表現(日下部ほか, 2006)

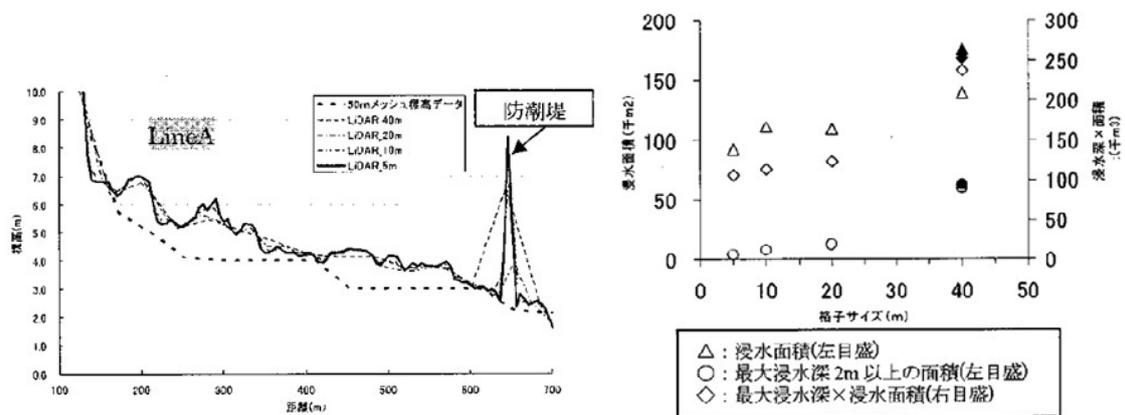


図 2.2.3-13 断面図および空間格子間隔による浸水面積比較(村嶋ほか, 2006)

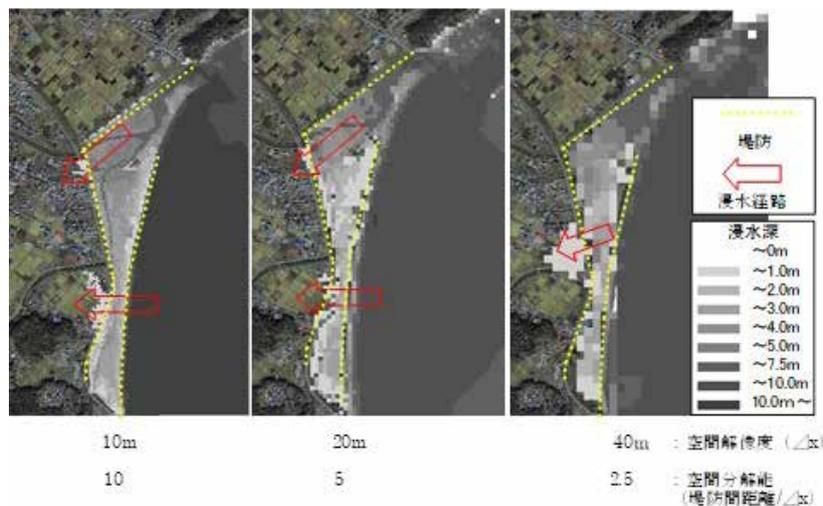


図 2.2.3-14 空間格子間隔による堤防配置効果の違い(村嶋ほか, 2007)

表 2.2.3-3 津波の数値計算マニュアルにおける地形モデルに関する記述

| マニュアル (発行年) | 土木学会 原子力土木委員会津波評価部会「原子力発電所の津波評価技術」(2002) | 内閣府等「津波・高潮ハザードマップマニュアル」(2004) | (財)国土技術研究センター「津波の河川灘上解析の手引き(案)」(2007) | 国土交通省「津波浸水想定の設定の手引き Ver. 1.20」(2012) |
|----------------|---|--|---|--|
| 空間格子間隔 | $\Delta x / \alpha g T^2 \leq 7 \times 10^{-4}$ | 12.5m | 波長の 1/100 河道の横断方向を 5 分割以上 河川のソリトン分裂波再現では 2m 格子で計算 | $\Delta x / \alpha g T^2 \leq 7 \times 10^{-4}$ マンングの粗度係数 n =0.03 の場合 または 10m以下 |
| 地形データソース | ・数値地図 (精度は十分でないことに留意) | ・地形図等高線・標高値 (1:2,500 地形図など) ・数値地図 (50m 格子) ・航空写真測量 | 河川縦横断測量結果 (河川内) | ・LIDAR (航空レーザー測量) |

| 資料名 | 機関名 : Web サイト | 概要 | 適用 |
|----------------------------|--|--|--------------------------|
| 数値地図 50m メッシュ標高 | 国土地理院 http://www.gsi.go.jp/kibanjoho/kibanjoho40027.html | 1/25000 地形図に描かれている等高線を計測してベクトルデータを作成し、それから計算によって求めた数値標高モデル | 汀線付近の低い平地の標高再現性に留意する必要あり |
| 基盤地図情報 (数値標高モデル) 5m レーザー測量 | 国土地理院 http://www.gsi.go.jp/kiban/index.html | データ精度は ±30cm 以下 | |
| 基盤地図情報 (数値標高モデル) 5m 写真測量 | | データ精度は ±数十 cm~1m 程度 | |
| 基盤地図情報 (数値標高モデル) 10m | | 1/25000 地形図の等高線に基づくデータであり、場所により数 m の誤差あり | |
| 1/2500 地形図 (国土基本図) | 地方自治体, 等高線や個々の単点標高情報 | 1m ごとの等高線が記載, 標高値の掲載密度が高い | |

図 2.2.3-15 陸域に関する地形データソース (沿岸部)

(4) データ補間方法

収集した水深・標高データが同一のメッシュサイズで規則的に配置されたデータではない場合や、等深線上の水深・標高データなど空間的に不規則に配置されたデータである場合がある。また、座標系についても、緯度経度、平面直角座標系等さまざまな座標系のデータである場合がある。津波の数値計算に利用可能な地形モデルとするためには、同一の座標系に変換した上で、これらのデータを統合・補間して規則的なメッシュデータを作成する必要がある。地形データは二次元である上に海岸線などの複雑な形状を有しているため、高度な補間技術が必要となる。特に、海域と陸域の境界である汀線の形状は補間が難しく、注意を要する。

高橋 (2002) は、地形条件により補間法を整理したうえで、仮想地形に対して各補間法を適用し、地形条件の再現性について比較している (表 2.2.3-4, 図 2.2.3-16)。表 2.2.3-4 の各補間法から再現された地形を図 2.2.3-17 に示す。陸を含む地形の場合、スプライン補間が最もよく仮想地形を再現しており、続

いてクリギング法、Natural Neighbors 補間法が比較的良好な結果となっている。島を含む地形の場合には、スプライン補間が最も元地形を再現しており、続いて逆距離加重法、Natural Neighbors 補間法が比較的良好な結果を示している。クリギング法では、島情報が抜け落ちてほとんど海域になっている。また、Natural Neighbors 補間法はアルゴリズム上の制約から補間処理対象領域の端部付近での補間が行えないため、補間処理対象領域を計算対象領域より広く設定する必要がある。

内閣府 (2015) は不規則に配置された収集データから三角形不規則網 (Triangulated Irregular Network ; TIN) を作成し、三角形の頂点のデータの線形補間により各格子に対して格子中心の標高を与える補間法を用いている。村嶋ほか (2006) も同様に TIN を作成し、メッシュデータを作成して TIN の内挿計算により格子中心の値を求める手法を用いている。

図 2.2.3-18 に TIN によるメッシュデータ作成の概念図を示す。

表 2.2.3-4 補間法の分類 (高橋, 2002)

| 補間法 | 入力点の考慮範囲 | 入力点の精度 | 入力点の任意性 | 計算負荷 |
|-----------------------|----------|-------------|---------------|---------|
| スプライン補間法 | Local | Exact | Deterministic | 中 |
| クリギング法 | Local | Exact | Stochastic | 考慮範囲に依存 |
| 逆距離加重法 (IDW) | Local | Exact | Deterministic | 小 |
| Natural Neighbors 補間法 | Local | Exact | Deterministic | 小 |
| トレンド・サーフェース解析法 | Global | Approximate | Stochastic | 次数に依存 |
| 最近隣法 | Local | Exact | Deterministic | 小 |

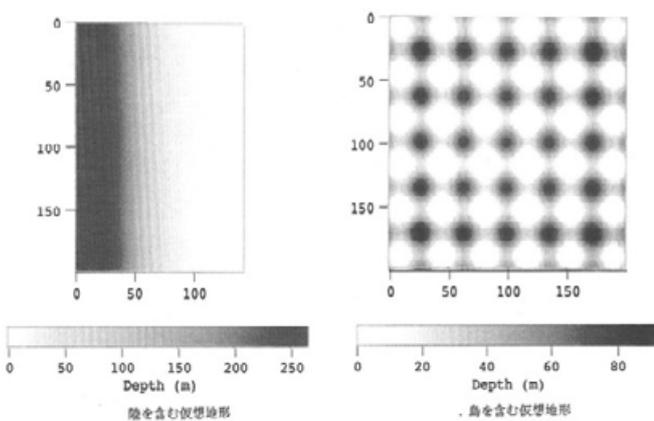


図 2.2.3-16 補間法比較に用いた仮想地形 (高橋, 2002)

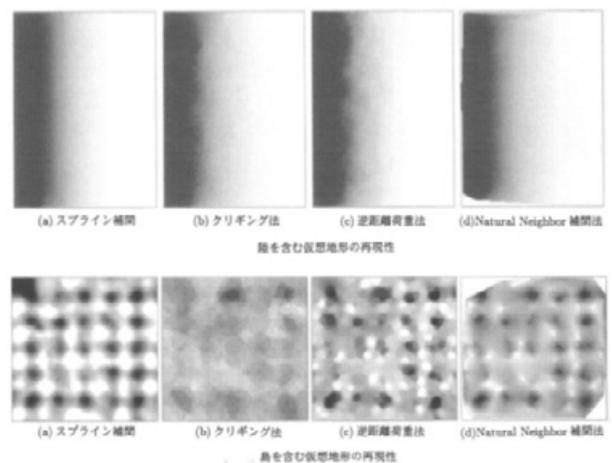


図 2.2.3-17 補間法による仮想地形 (図 2.2.3-16) の再現性比較 (高橋, 2002)

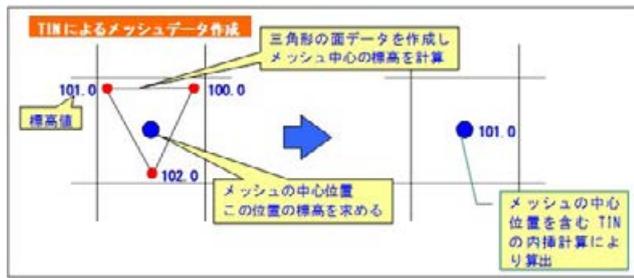


図 2.2.3-18 TIN の概念図

(5) 粗度データ

津波が伝播し浅海域や陸域に進入すると、海底や遡上域の底面摩擦による抵抗が無視できなくなる(今村ほか, 1986; 図 2.2.3-19). そのため、浅海域や陸域で使用される浅水理論(非線形長波理論)や非線形分散波理論による解析モデルでは、海底摩擦項を考慮しなければならない。田中ほか(1998)は波動境界層の摩擦係数に関して検討を行い、周期が長く水深が浅い場合、海底摩擦係数は水深によって決まり、定常流に類似した性質を示すことを明らかにしている。通常、津波伝播遡上計算における海底摩擦項には、定常流の抵抗項が用いられ、海底摩擦項の表現としては、以下に示す Manning 則をもとにした抵抗項を用いることが一般的で、式(2.2.3-4)は x 方向、式(2.2.3-5)は y 方向の海底摩擦項である。

$$\frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.2.3-4)$$

$$\frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.2.3-5)$$

ここで、 n は Manning の粗度係数、 D は全水深、 M 、 N は x 、 y 方向の流量フラックス、 g は重力加速度を表す。海域での粗度係数としては $n=0.025$ の値を用いることが多い(首藤ほか, 2007)。

正村ほか(2000)は、実用的な摩擦係数として、Manning 則を使う時に海底勾配や水深、周期の影響も受けず、底質の等価砂粒粗度 K_s のみから粗度係数 n を決定する次の関係式を提案している。この式から、 $K_s = 2 \text{ cm}$ の場合、 $n = 0.025$ となる。

$$n = \frac{0.15K_s^{-1/6}}{\sqrt{g}} \quad (2.2.3-6)$$

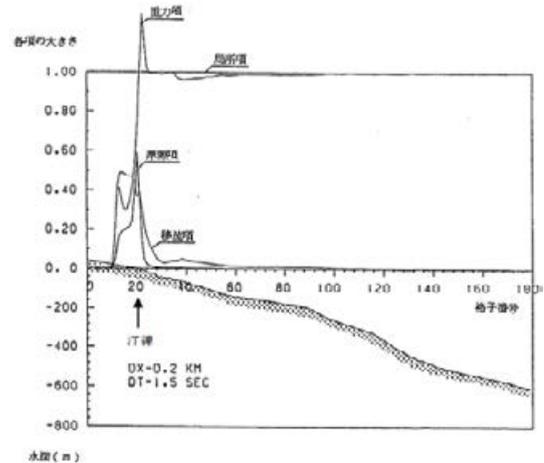


図 2.2.3-19 浅水理論式における各項の大きさの比較 (今村ほか, 1986)

一方、陸域での抵抗・粗度係数の考え方としては、土地利用状況を考慮し用途に応じた粗度係数の設定が必要である。これまで津波・洪水の数値計算における粗度係数は経験的に与えられており、その妥当性を与える基準に課題が残されていた。河川洪水氾濫においては、水理模型実験から密集市街地における粗度係数を直接推定した福岡ほか(1994)の結果があり、津波氾濫計算においては、経験的に用いられている相田(1977)の係数や、基礎的な水理実験の研究例として Goto(1983)の結果がある。これらの過去の研究結果を踏まえ、小谷ほか(1998)は土地利用を 6 種類に分類し、それぞれ対応する粗度係数を設定・提案している(表 2.2.3-5)。

表 2.2.3-5 Manning の粗度係数の比較 (小谷ほか, 1998)

| 福岡ら(1994) | | 相田(1977) | | 渡邊&百藤(1983) | | 本研究 | |
|-----------|-------|-------------|------|-------------|------|----------------|-------|
| 区分 | 推定粗度 | 区分 | 等価係数 | 区分 | 推定係数 | 区分 | 設定粗度 |
| 80%以上 | 0.1 | | | 高密度 | 0.11 | | |
| 50~80% | 0.096 | 密集地域 | 0.07 | | | 高密度居住区 | 0.080 |
| 20~50% | 0.084 | やや密度の高い地域 | 0.05 | 中密度 | 0.05 | 中密度居住区 | 0.060 |
| 0~20% | 0.056 | | | 低密度 | 0.03 | 低密度居住区 | 0.040 |
| 道路 | 0.043 | その他陸地 | 0.02 | | | 森林域(果樹園・防潮林含み) | 0.030 |
| | | | | | | 田畑域(荒れ地含み) | 0.020 |
| | | 汀線付近(防潮林含み) | 0.04 | | | 海域・河川域(防潮林含み) | 0.025 |

内閣府ほか(2004)においても、遡上計算時の土地利用状況に応じた粗度係数を考慮することが記述されており、小谷ほか(1998)の設定値は国土交通省(2012)などで用いられている。

土地利用に関する基礎データとしては、全国を対象として国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ(国土交通省国土政策局, 2014)が整備されており、首都圏, 中部圏, 近畿圏を対象として細密数値情報(国土交通省国土地理院, 2005)が整備されている(表 2.2.3-6)。

表 2.2.3-6 土地利用に関する基礎データソース

| 対象範囲 | データ名 | 作成・整備機関 |
|-------|---------------------|---------|
| 全国 | 国土数値情報(土地利用) | 国土交通省 |
| 三大都市圏 | 細密数値情報(10mメッシュ土地利用) | 国土地理院 |
| — | 都府県提供メッシュデータ | 各都府県 |

家屋を考慮した津波遡上計算手法としては、小谷ほか(1998)の方法のように家屋を抵抗要素として扱う抵抗モデルと、高い地盤として扱う地形モデルの考え方がある(油屋・今村(2002); 図 2.2.3-20)。

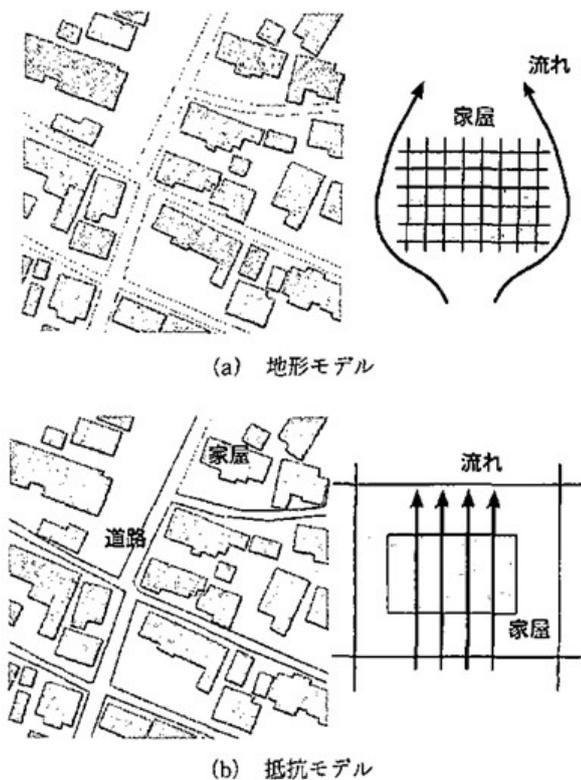


図 2.2.3-20 地形モデルと抵抗モデルの概念図
(油屋・今村, 2002)

地形モデルにおいては、正方格子で複雑な土地利用状況を近似することは難しく、数 m 程度の細かい格子間隔が必要となる。

油屋・今村(2002)は津波に対する家屋の抵抗を合成等価粗度を用いてモデル化し津波遡上計算に取り入れ、浸水深や遡上距離がどの程度変化するかを空間格子間隔に着目し、一定粗度モデルおよび一様粗度モデルである従来手法と比較検討をしている(表 2.2.3-7)。

表 2.2.3-7 粗度モデルにおける粗度係数の比較
(油屋・今村, 2002)

| 計算方法 | 粗度係数 n | |
|----------------------------|--|-------|
| | 居住区域 | その他 |
| (a) 合成等価粗度モデル | $n = \sqrt{n_0^2 + \frac{C_e}{2gk} \times \frac{\theta}{100 - \theta} \times D^{1/3}}$ | 0.025 |
| (b) 一定粗度モデル (小谷ら, 1998) | 0.06 | 0.025 |
| (c) 一様粗度モデル | 0.025 | |

モデル居住区の遡上計算では、格子間隔が 50 m(家屋スケールの 5 倍程度)よりも小さい場合には、合成等価粗度モデルの方が最大浸水深と最大遡上距離の精度が高く、それよりも大きな格子間隔では、従来モデルを用いた方が精度が高いことがと示されている(表 2.2.3-8)。また、格子幅を 25 m とした実地形での津波遡上計算例では、家屋と樹木の抵抗を合成等価粗度により評価した計算結果は、従来の一定粗度を用いた計算結果と比較すると遡上域が大きく減少することが報告されている(図 2.2.3-21)。

表 2.2.3-8 粗度モデルによる最大浸水深および最大遡上距離の評価(油屋・今村, 2002)

(a) Case-1 (津波規模・大, 居住区規模・小)

| 格子幅 (m) | 合成等価粗度 | | 一定粗度(小谷ら) | | 一様粗度 | |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 最大 浸水深 | 最大 遡上距離 | 最大 浸水深 | 最大 遡上距離 | 最大 浸水深 | 最大 遡上距離 |
| 5 | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | △ |
| 10 | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | △ |
| 20 | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | △ |
| 50 | ○ | ○ | ○ | △ | ○ | △ |
| 100 | ○ | × | ○ | ○ | ○ | △ |
| 200 | × | × | ○ | ○ | ○ | ○ |

(b) Case-2 (津波規模・大, 居住区規模・大)

| 格子幅 (m) | 合成等価粗度 | | 一定粗度(小谷ら) | | 一様粗度 | |
|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | 最大 浸水深 | 最大 遡上距離 | 最大 浸水深 | 最大 遡上距離 | 最大 浸水深 | 最大 遡上距離 |
| 5 | ○ | ○ | △ | × | △ | × |
| 10 | ○ | ○ | △ | × | △ | × |
| 20 | ○ | ○ | △ | × | △ | × |
| 50 | ○ | ○ | ○ | × | △ | × |
| 100 | × | × | ○ | △ | △ | × |
| 200 | × | × | ○ | △ | △ | × |

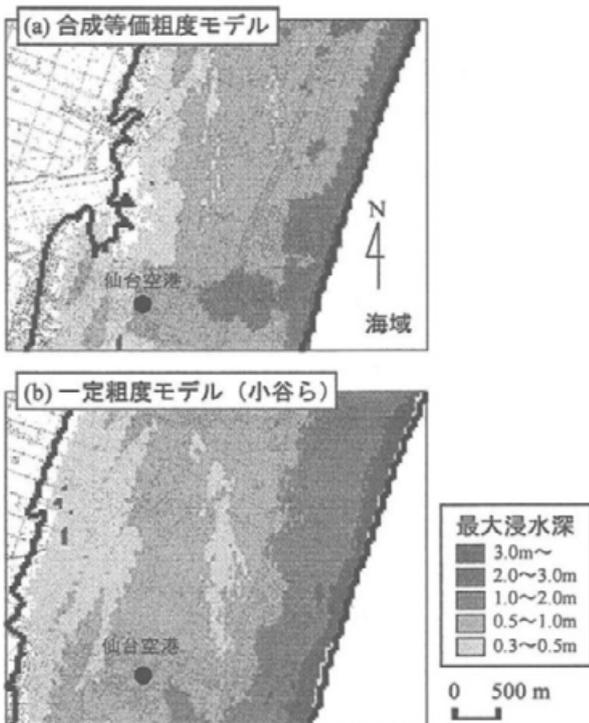


図 2.2.3-21 最大浸水深分布比較(油屋・今村, 2002)

(6) 構造物データ

国土交通省(2012)では, 津波の伝播過程や遡上過程にあって地盤高より高い線の構造物(海岸堤防, 港湾・漁港施設, 河川堤防, 道路や鉄道盛土等)について, 計算格子間隔より幅が広いものは地形データとして表現し, 計算格子間隔より幅が狭いものは, 格子辺上にて越流条件を考慮することを基本とすると示されている(図 2.2.3-22).

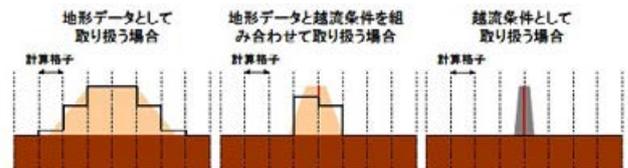


図 2.2.3-22 津波伝播遡上計算における構造物の取り扱いの例(国土交通省, 2012)

国土交通省(2005)では, 平均地盤高から比高が 50 cm 以上のものは, モデル化する必要があるとしている. 具体的には堤防, 二線堤, 鉄道, 主要な道路やその他の盛土等である.

構造物条件設定の考え方としては, 内閣府ほか(2004)では, 水門・陸こう等の防災施設の機能状況(閉鎖・開放)について, 基本的には, 津波到達時間が短いため閉鎖が困難な場合や地震動に起因する変形で十分に機能しない恐れがあるため, 開放状態であるとして取り扱われている. ただし, 耐震性を有し自動化された施設, 常時閉鎖の施設, 耐震性を有し津波到達時間より早く閉鎖できると考えられる施設についてはその限りではない.

また, 構造物の被災条件の考え方としては, 東北地方太平洋沖地震による津波で見られたような海岸堤防や河川堤防等の破壊事例を踏まえ, 国土交通省(2012)は最大クラス津波に対して, 津波が越流し始めた時点で「破壊する」ものとし, 破壊後の形状は, 「構造物なし」と想定して設定することを基本としている.

防波堤や堤防等の越流境界条件の取り扱いとして, 後藤・佐藤(1993)は, 水位がその天端高を越えた場合には, 以下の本間公式を用いて単位幅当りの越流量 Q を計算している.

$$Q = 0.35H_1\sqrt{2gH_1} \quad H_2 \leq \frac{2}{3}H_1 \quad (2.2.3-7)$$

$$Q = 0.91H_1\sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad H_2 > \frac{2}{3}H_1 \quad (2.2.3-8)$$

ここに、 H_1, H_2 は、図 2.2.3-23 に示すように天端高を基準とした堤前後の水深で、 $H_1 \geq H_2$ とする。

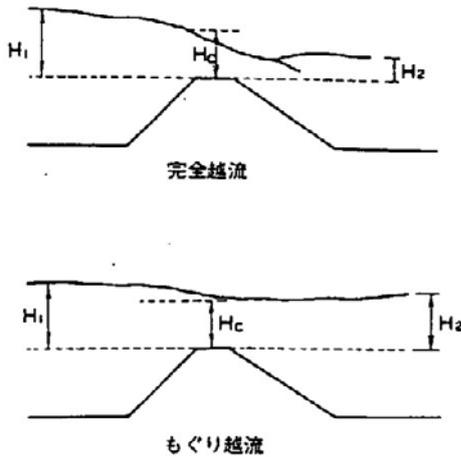


図 2.2.3-23 防波堤からの越流に関する模式図
(後藤・佐藤, 1993)

2.2.4 数値計算手法

津波伝播遡上計算を行うにあたり、考慮すべき現象、費やすことができる計算資源等の条件の下で、適切な理論、計算手法を選定することが必要となる。本項では、既往研究で多く用いられてきた数値計算手法について概説する。

(1) 基礎方程式

津波による波動現象は、一般的に長波理論の仮定のもとで記述される。長波理論とは、波長に対する水深の比が小さく、重力加速度に比べ水粒子の鉛直加速度が小さい場合に適用される水面波の理論の総称である。長波理論の中でも適用性に依じて様々な理論展開が行われており、以下の4つの理論が多く用いられている。

- ・ 線形長波理論
- ・ 線形分散波理論
- ・ 非線形長波理論
- ・ 非線形分散波理論

ただし、近年では津波波力評価など波先端の詳細検討が必要とされる分野において、長波理論の仮定を導入せず、Navier-Stokes 方程式を VOF (Volume of Fluid) 法や粒子法によって直接解くことも行われている。また、静水圧の仮定を導入し、Navier-Stokes 方程式を差分法で解くことによって、三次元津波計算を実施する試みも行われている (Furumura and Saito, 2009)。

ここから前述した4つの長波理論について展開を進める。各理論における支配方程式は非回転・非圧縮性流体の支配方程式に対して、それぞれの仮定を適用することで導出することができる。簡単のため、二次元 XZ 平面における Euler の運動方程式を出発点とした場合、以下の2点の仮定によって4つの長波理論の支配方程式が求められる。

- ・ 波高水深比： ε 、相対水深： $\sqrt{\sigma}$ の値
- ・ Euler の運動方程式に対する近似度

波高水深比 ε (津波水位変動量 / 静水深) は波の非線形性の強さ、相対水深 $\sqrt{\sigma}$ (静水深 / 津波波長) は波の分散性の強さの目安とされている。以下に各理論の支配方程式の導出手順を示す。連続の式、Euler の運動方程式は以下の通りである。

$$\text{grad}v = 0, \quad \frac{Dv}{Dt} = \frac{1}{\rho} \text{grad}p \quad (2.2.4-1)$$

ここで、 v は流速ベクトル、 ρ は単位体積質量、 p は圧力である。

また、非回転の条件式(渦なし流れ)、水表面、および水底の条件は次式で表せる。

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (2.2.4-2)$$

$$p = 0 \quad \text{on} \quad z = \eta \quad (2.2.4-3)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \text{on} \quad z = \eta \quad (2.2.4-4)$$

$$w = -u \frac{\partial h}{\partial x} \quad \text{on} \quad z = -h \quad (2.2.4-5)$$

ここで、 η は水位変動、 h は静水深、 u, w はそれぞれ x, z 方向の流速である。

次に無次元化を考える。左辺側の小文字変数は有次元量、右辺側の大文字変数は無次元量を表す。

$$x = l_0 X, \quad z = h_0 Z, \quad t = \frac{l_0}{c_0} T$$

$$u = c_0 \frac{\eta_0}{h_0} U, \quad w = c_0 \frac{\eta_0}{l_0} W, \quad p = \rho g h_0 P$$

$$\eta = \eta_0 N, \quad h = h_0 H, \quad c_0 = \sqrt{g h_0} \quad (2.2.4-6)$$

ここで、 l_0 は水平方向特性長(波長)、 h_0 は鉛直方向特性長(水深)、 η_0 は波の運動の大きさを表す特性(津波水位)、 c_0 は波の伝播速度を表す特性(波速)である。

無次元パラメータとして波高水深比 η_0 / h_0 を ε 、相対水深 h_0 / l_0 を $\sqrt{\sigma}$ と表すと、アーセル数は $Ur = \varepsilon / \sigma$ となる。これらの関係を用いて無次元化すると連続の式、運動方程式は次式のようになる。

$$\varepsilon \frac{\partial U}{\partial X} + \varepsilon \frac{\partial W}{\partial Z} = 0 \quad (2.2.4-7)$$

$$\varepsilon \frac{\partial U}{\partial T} + \varepsilon^2 U \frac{\partial U}{\partial X} + \varepsilon^2 W \frac{\partial U}{\partial Z} + \frac{\partial P}{\partial X} = 0 \quad (2.2.4-8)$$

$$\sigma \left[\varepsilon \frac{\partial W}{\partial T} + \varepsilon^2 U \frac{\partial W}{\partial X} + \varepsilon^2 W \frac{\partial W}{\partial Z} \right] + 1 + \frac{\partial P}{\partial Z} = 0 \quad (2.2.4-9)$$

また、非回転の条件、水表面、水底の条件は次式のようになる。

$$\varepsilon \frac{\partial U}{\partial Z} = \sigma \left[\varepsilon \frac{\partial W}{\partial X} \right] \quad (2.2.4-10)$$

$$P = 0 \quad \text{on} \quad Z = \varepsilon N \quad (2.2.4-11)$$

$$\varepsilon \frac{\partial N}{\partial T} + \varepsilon^2 U \frac{\partial N}{\partial X} = \varepsilon W \quad \text{on} \quad Z = \varepsilon N \quad (2.2.4-12)$$

$$\varepsilon U \frac{\partial H}{\partial X} + \varepsilon W = 0 \quad \text{on} \quad Z = -H \quad (2.2.4-13)$$

後藤(1984)の方法にしたがって Peregrine(1967)の式を誘導する。 $\varepsilon \sim \sigma \ll 1$ と仮定する。連続の式(2.2.4-7)、運動方程式(2.2.4-8)、(2.2.4-9)を鉛直方向に積分する。連続の式(2.2.4-7)に水表面連続の条件(2.2.4-12)、水底の条件(2.2.4-13)を適用すると次式のように表せる。

$$\varepsilon \frac{\partial N}{\partial T} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} U dZ = 0 \quad (2.2.4-14)$$

鉛直方向の運動方程式(2.2.4-9)に水表面圧力条件(2.2.4-11)を適用すると以下の関係が得られる。

$$P = \varepsilon N - Z - \sigma \int_{\varepsilon N}^Z \frac{dW}{dT} dZ$$

$$\frac{dW}{dT} = \varepsilon \frac{\partial W}{\partial T} + \varepsilon^2 U \frac{\partial W}{\partial X} + \varepsilon^2 W \frac{\partial W}{\partial Z} \quad (2.2.4-15)$$

上式の関係と、水表面波形連続条件(2.2.4-12)、水底条件(2.2.4-13)から、水平方向の運動方程式(2.2.4-8)は以下のようになる。

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial}{\partial T} \int_{-H}^{\varepsilon N} U dZ + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} U^2 dZ + \varepsilon(H + \varepsilon N) \frac{\partial N}{\partial X} \\ & = \sigma \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} \int_{\varepsilon N}^Z \frac{dW}{dT} dZ dZ + \sigma \frac{\partial H}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} \frac{dW}{dT} dZ \end{aligned} \quad (2.2.4-16)$$

また、鉛直方向流速は連続の式 (2.2.4-7) と水底条件 (2.2.4-13) から以下のように表せる。

$$\varepsilon W = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^Z U dZ \quad (2.2.4-17)$$

水平方向流速 U を断面平均流速 \bar{U} とずれ U' に分ける。このとき、非回転の条件 (2.2.4-10) から U' は σ または ε のオーダーの量であると考えられるため、次のように仮定できる。

$$U = \bar{U} + \sigma U' \quad (2.2.4-18)$$

$$U = \bar{U} + \varepsilon U' \quad (2.2.4-19)$$

式 (2.2.4-19) の関係を式 (2.2.4-14), (2.2.4-16), (2.2.4-17) に代入すると、積分形の式が得られる。

- 連続の式

$$\varepsilon \frac{\partial N}{\partial T} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial X} [(H + \varepsilon N) \bar{U}] = 0 \quad (2.2.4-20)$$

- 水平方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & \varepsilon \frac{\partial}{\partial T} [(H + \varepsilon N) \bar{U}] + \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial X} [(H + \varepsilon N) \bar{U}^2] \\ & + \varepsilon^4 \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} U'^2 dZ + \varepsilon (H + \varepsilon N) \frac{\partial N}{\partial X} \\ & = \varepsilon \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} \int_{\varepsilon N}^Z \frac{dW}{dT} dZ dZ + \varepsilon \frac{\partial H}{\partial X} \int_{-H}^{\varepsilon N} \frac{dW}{dT} dZ \end{aligned} \quad (2.2.4-21)$$

- 鉛直流速

$$\varepsilon W = -\varepsilon \frac{\partial}{\partial X} [(Z + H) \bar{U}] - \varepsilon^2 \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^Z U' dZ \quad (2.2.4-22)$$

上式において、 ε^1 のオーダーまで考慮し、有次元化すると、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.2.4-23)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.2.4-24)$$

なる線形理論、 ε^2 までのオーダーからは

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.2.4-25)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{3} P_1 + \frac{h^2}{2} P_2 \right] - \frac{\partial h}{\partial x} \left[\frac{h^2}{2} P_1 + h P_2 \right] \\ & P_1 = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t \partial x}, \quad P_2 = \frac{\partial}{\partial t} \left[\bar{u} \frac{\partial h}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (2.2.4-26)$$

なる積分された Peregrine の式が得られる。また、この式を線形化することで、以下に示す線形分散波理論の方程式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{h^3}{3} P_1 + \frac{h^2}{2} P_2 \right] - \frac{\partial h}{\partial x} \left[\frac{h^2}{2} P_1 + h P_2 \right] \end{aligned} \quad (2.2.4-27)$$

同様にアーセル数が大きい場合 ($\varepsilon \sim 1, \sigma \ll 1$) の展開を示す。式 (2.2.4-14), (2.2.4-16), (2.2.4-17) に式 (2.2.4-18) の関係を代入することで以下の連続の式、運動方程式が得られる。

- 連続の式

$$\frac{\partial N}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} [D \bar{U}] = 0 \quad (2.2.4-28)$$

- 水平方向の運動方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial T} [D \bar{U}] + \frac{\partial}{\partial X} [D \bar{U}^2] + \sigma^2 \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^N U'^2 dZ + D \frac{\partial N}{\partial X} \\ & = \sigma \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^N \int_N^Z \frac{dW}{dT} dZ dZ + \sigma \frac{\partial H}{\partial X} \int_{-H}^N \frac{dW}{dT} dZ \end{aligned} \quad (2.2.4-29)$$

- 鉛直流速

$$W = -\frac{\partial}{\partial X} [(H + Z) \bar{U}] - \sigma \frac{\partial}{\partial X} \int_{-H}^Z U' dZ \quad (2.2.4-30)$$

ここで、 $D=H+Z$ であり、全水深を表す。水平方向の運動方程式中の定積分項は以下のように求められる。

$$\int_{-H}^N \frac{dW'}{dT} dZ = - \left[\frac{D^2}{2} F_1' + D F_2' \right] O(\sigma) \quad (2.2.4-31)$$

$$\int_{-H}^N \int_N^Z \frac{dW}{dT} dZ dZ = - \left[\frac{D^3}{3} F_1' + \frac{D^2}{2} F_2' \right] O(\sigma) \quad (2.2.4-32)$$

$$F_1' = - \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial X} \right) + \bar{U} \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial X^2} - \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial X} \right)^2 \quad (2.2.4-33)$$

$$F_2' = \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial}{\partial X} \left(\bar{U} \frac{\partial H}{\partial X} \right) + \bar{U} \frac{\partial^2}{\partial X^2} - \left(\bar{U} \frac{\partial H}{\partial X} \right) - \frac{\partial \bar{U}}{\partial X} \frac{\partial}{\partial X} \left(\bar{U} \frac{\partial H}{\partial X} \right) \quad (2.2.4-34)$$

そのため、 σ^0 のオーダーで式(2.2.4-29)を有次元化して書き直すと、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.2.4-35)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (2.2.4-36)$$

なる浅水理論、 σ^1 のオーダーで式(2.2.4-29)を有次元化して書き直すと、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (2.2.4-37)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{D^3}{3} F_1 + \frac{D^2}{2} F_2 \right] - \frac{\partial h}{\partial x} \left[\frac{D^2}{2} F_1 + D F_2 \right] \end{aligned} \quad (2.2.4-38)$$

なるアールセル数が大きい場合の非線形分散波理論の方程式が求められる。ここで F_1, F_2 は以下の通りである。

$$F_1 = \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t \partial x} + \bar{u} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} - \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right)^2 \quad (2.2.4-39)$$

$$F_2 = \frac{\partial}{\partial t} \left(\bar{u} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{u} \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (2.2.4-40)$$

以上の式展開からわかる各長波理論の主な特徴を表 2.2.4-1 にまとめる。

表 2.2.4-1 各々の長波理論の特徴

| 理論式 | 式の適用範囲 | 特徴 |
|----------|---------|-------------|
| 線形長波理論 | 深海域 | 近地津波で適用 |
| 線形分散波理論 | 深海域 | 遠地津波で適用 |
| 非線形長波理論 | 浅海域・遡上域 | 津波の遡上を計算可能 |
| 非線形分散波理論 | 浅海域・遡上域 | ソリトン分裂を計算可能 |

(2) 離散化解析手法

津波の数値計算において、広く用いられている離散化解析手法は有限差分法であるが、他にも様々な手法が提案されている。例えば有限要素法は差分法と同様に古くから研究が行われてきたものの(例えば、川原ほか(1976))、境界条件の設定法、計算誤差および演算時間などを踏まえ、有限差分法と比較すると多用はされていない。有限体積法、境界要素法についても大規模な津波解析事例は少ない。MAC (Marker and Cell) 法、VOF 法など流体解析分野で用いられてきた手法について、かつては演算時間の問題から津波解析に用いられることは現実的ではなかった。しかし、コンピュータの演算性能向上に伴い現在では、構造物に対する津波波力の検討といった目的で VOF 法、粒子法等が用いられる事例もある。表 2.2.4-2 に離散化解析手法の特徴をまとめる。

表 2.2.4-2 津波解析手法と特徴

| 手法 | 特徴 |
|------------|--|
| 有限差分法 | <ul style="list-style-type: none"> 詳細地形モデルが再現困難 津波解析事例が豊富 |
| 有限要素法 | <ul style="list-style-type: none"> 詳細地形モデルが再現可能 境界条件設定方法が困難 計算誤差が大きい 演算時間が若干長い |
| 有限体積法 | <ul style="list-style-type: none"> 津波解析事例が少ない |
| 境界要素法 | <ul style="list-style-type: none"> 津波解析事例が少ない |
| VOF 法, 粒子法 | <ul style="list-style-type: none"> 高精度 演算時間が長い |

2.2.5 津波ハザードカーブの計算

津波のハザードカーブは、着目する評価地点において想定する全ての地震によって t 年間に少なくとも 1 回の最大水位上昇量 H がある値 h を超える確率 $P(H > h; t)$ の分布関数である。 $P(H > h; t)$ は次式で算出される。

$$P(H > h; t) = 1 - \prod_k \{1 - P_k(H > h; t)\} \quad (2.2.5-1)$$

ここで、 $P_k(H > h; t)$ は k 番目の地震グループによって t 年間に少なくとも 1 回最大水位上昇量が h を超える確率である。ハザードカーブ算定の概念図を図 2.2.5-1 に示す。ここで地震グループとは、後述する地震発生のタイプ別に区分した波源断層モデルの集合である。

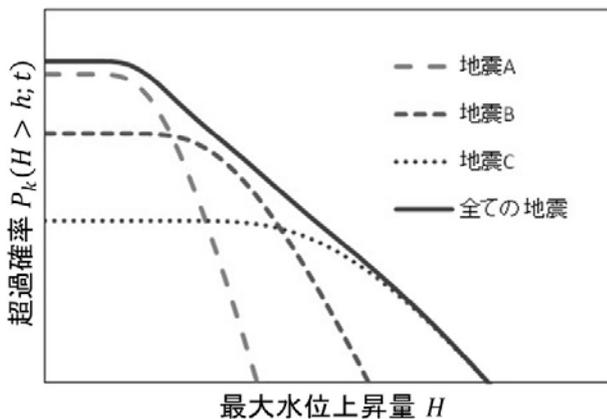


図 2.2.5-1 ハザードカーブ算定の概念図

各地震グループのハザードカーブの計算方法は、地震調査委員会によって震源を特定して評価されている場合と震源を特定して評価されていない場合とで異なる。震源を特定して評価されている地震グループでは、発生確率や発生位置・規模の情報がある程度特定されているため、その地震グループの地震が起こった場合の最大水位上昇量の条件付き超過確率分布を求めて、その地震グループの地震の t 年間の発生確率を乗じてハザードカーブを求める。1 つの地震グループに対して多様な震源域やすべり分布を持つ複数個の波源断層モデルを考慮している場合には、その地震グループの中で各波源断層モデルによる地震の発生を排反事象と考えて条件付き確率を分配し、ハザードカーブの計算を行う。震源を特

定して評価されている地震グループのハザードカーブの計算は次式によって行う。

$$P_k(H > h; t) = P(E_k; t) \sum_l P_k(M_l) P(H > h; M_l) \quad (2.2.5-2)$$

ここで、 $P(E_k; t)$ は k 番目の地震グループの地震が t 年間に発生する確率、 $P_k(M_l)$ は k 番目の地震グループの地震が発生した場合に l 番目の波源断層モデルが発生する条件付き確率、 $P(H > h; M_l)$ は l 番目の波源断層モデルによる地震が発生した時に沿岸の最大水位上昇量 H が h 以上となる確率である。

地震調査委員会によって震源を特定して評価されていない地震グループおよび地震調査委員会による評価がないが確率論的津波ハザード評価のために設定した地震群について、設定した複数個の波源断層モデルによる地震の発生は独立事象と考える。そのうえで、地震規模に応じた地震発生頻度を G-R 式 (Gutenberg-Richter law) から推定して、その頻度を各波源断層モデルに分配し、それぞれの t 年間の発生確率を設定する。この場合、ハザードカーブの計算は次式で行う。

$$P_k(H > h; t) = 1 - \prod_l \{1 - P(M_l; t)P(H > h; M_l)\} \quad (2.2.5-3)$$

ここで、 $P(M_l; t)$ は l 番目の波源断層モデルによる地震が t 年間に発生する確率である。

2.2.6 発生確率の評価方法

確率論的津波ハザード評価では、地震の長期的な発生評価に基づき、地震発生の時系列を更新過程または定常ポアソン過程に従うと仮定して地震の発生確率を評価する。更新過程は前回の事象からの経過時間によって発生確率が変化する確率モデルである。更新過程の確率モデルとしては、物理的解釈が理解しやすいことから BPT 分布 (Brownian Passage Time 分布) を採用することが妥当であると考えられている (地震調査委員会, 2001)。繰り返し発生する固有地震は基本的に BPT 分布を用いて発生確率を評価する。一方、定常ポアソン過程は発生確率が時間変化しない確率モデルであり、偶発的に起こる事象を表している。過去の活動データが乏しく BPT 分布を適用できない地震や、震源を特定しにくい地震に対しては定常ポアソン過程が適用される。

BPT 分布の確率密度関数は次の式で表される。

$$f(t; \mu, \alpha) = \sqrt{\frac{\mu}{2\pi\alpha^2 t^3}} \exp\left\{-\frac{(t-\mu)^2}{2\mu\alpha^2 t}\right\} \quad (2.2.6-1)$$

ここで、 t は経過時間であり、分布の平均は μ 、分散は $(\mu\alpha)^2$ である。地震発生の時系列が BPT 分布を用いた更新過程に従う場合、時刻 T から ΔT 年後までに次の地震が起こる確率は、

$$P(T, \Delta T) = \frac{\int_T^{T+\Delta T} f(t) dt}{\int_T^{\infty} f(t) dt} \quad (2.2.6-2)$$

である。(2.2.6-1) 式および (2.2.6-2) 式より、BPT 分布による更新過程に地震の発生に従う場合の地震の発生確率は、平均発生間隔 μ とばらつき α 、経過時間 T 、評価期間 ΔT の 4 つの値から求められることがわかる。

定常ポアソン過程では、1 年間あたりの地震発生頻度 λ の逆数で表現される平均発生間隔 μ を用いて ΔT 年間の発生確率は次の式で表される。

$$P(\Delta T) = 1 - \exp(-\Delta T/\mu) \quad (2.2.6-3)$$

2.2.7 不確定性の扱い

本項では土木学会 (2016) および杉野ほか (2015) による、確率論的津波ハザード評価における不確定性の扱いについて述べる。

(1) 土木学会 (2016)

土木学会 (2016) では、不確定性を偶然的な不確定性と認識論的不確定性の 2 つに分け、偶然的な不確定性は確率モデルで、認識論的不確定性はロジックツリー手法によるハザード曲線群によって考慮している。ロジックツリー手法では、専門家の意見を反映させてロジックツリーの分岐毎に重み付けをする。分岐毎に設定した重みの積から各ハザードカーブの重みが設定される。重み付けされたハザード曲線群から、重みが平均となるハザードカーブや、専門家のコンセンサスがどれくらいの割合で得られるかを表すフラクタイルハザードカーブを作成し、認識論的不確定性を考慮する。

土木学会 (2016) の確率論的津波ハザード評価手法で認識論的不確定性に分類された不確定性は以下の 6 点である。

① 地震発生領域

一般的に、過去の地震に基づき、今後発生する地震の発生領域が設定されている。ただし、領域の設定において、地震が発生する領域が完全に分割されているか、あるいは連続しているかが議論となる場合、ロジックツリーの分岐で対処する。

② マグニチュードの範囲

地震規模の不確定性を考慮するため、マグニチュードに幅を与えている。具体的には、過去の固有地震の地震規模を基準とし、その分布幅は 0.3 または 0.5 として分岐させる。マグニチュードの範囲はロジックツリーの分岐で対処する。

③ 断層パラメータ

津波の数値計算結果は、断層面積、深さや走向・傾斜角などの断層パラメータの影響を受ける。観測値と計算値の残差のばらつき (以下、計算誤差のばらつき) に対して断層モデルの変動によるばらつきを付与するか、断層モデルの変動を考慮して計算を行うか、ロジックツリーの分岐で対処する。

④ 平均発生間隔

固有地震の平均発生間隔が過去の地震の発生情報に基づいて設定される場合に、平均発生間隔の誤差

(信頼度)を考慮し、誤差の大きさに基づいて分岐を設定する。BPT 分布を用いた更新過程で発生確率を求める場合には、平均発生間隔のばらつき α も設定する必要があり、 α の値も誤差を考慮して分岐を設定する。

⑤ 計算誤差

確率論的津波ハザード評価では、ある特定の地震が繰り返し発生した場合に、数値計算による津波高さの推定値が特定地点でどの程度ばらつくかを、計算誤差の時間的なばらつきとして、確率モデルで評価する。土木学会(2016)では、エルゴード性を仮定することで、既往津波の観測値と数値計算による最大津波高さの比の空間的なばらつきを示す相田(1977)の指標 κ によって、計算誤差のばらつきに置き換える考えを導入している。また、エルゴード仮定が成立せずに時間的なばらつきが空間的なばらつきよりも小さくなるという可能性も考慮して、 κ の値は 1.25, 1.35, 1.45, 1.55 の 4 通りの分岐を用いる方法(土木学会, 2011)と、東北地方太平洋沖地震以降の知見を反映して 1.3, 1.4 の 2 通りの分岐を用いる方法それぞれについて、ロジックツリーの分岐を設定している。

⑥ ばらつきの打ち切り範囲

計算誤差のばらつきは対数正規分布で表現するが、この際に分布の打ち切り範囲を設定する必要がある。土木学会(2016)では「打ち切りを行わない」場合と「分布の両端 1% に入る現象は実際には起こらない」と判断し対数標準偏差の ± 2.3 倍で打ち切る場合の 2 通りを考慮し、ロジックツリーの分岐で対処している。なお「打ち切りを行わない」場合には実際の計算では対数標準偏差の ± 10 倍で打ち切っている。

また、偶然的な不確実性として、以下の 5 つの不確実性を挙げている。

① マグニチュード

マグニチュードの不確実性の確率モデルとして、規模が小さく頻度が高い「背景的地震」に対しては G-R 式が用いられる。一方で、固有地震のマグニチュードの不確かさには、認識論的不確実性②で設定したマグニチュード範囲の中で一様分布の確率モデルを適用する。

② 波源位置

背景的地震および固有地震は発生領域内を敷き詰めるように、複数の波源を設定する。波源位置のば

らつきには、一様分布の確率モデルを適用する。

③ 潮位

潮汐を確率過程として考慮に加え、平均潮位などを仮定して計算した結果に、潮位の確率モデルで表現された潮汐を合成することで津波高さを推定する。過去の潮位記録から潮位出現頻度分布を求め、潮位の確率密度関数を作成し確率モデルとして適用する。

④ 計算誤差

計算値と観測値の残差のばらつきは、対数正規分布に従うものとしてモデル化する。ばらつきの大きさは、相田(1977)の指標 κ の値を基にして求める。

⑤ すべり分布

津波高さの推定は、一様すべりの矩形モデル、または大すべり域・超大すべり域を有する不均質すべりのモデルを用いて、津波伝播遡上計算を行う。不均質モデルのすべり分布パターンとして、大すべり域を移動させて設定する。

(2) 杉野ほか(2015)

杉野ほか(2015)の評価手法は、先行して実施された土木学会(2011)の手法を参考に行っている。土木学会(2011)との相違点としては、

- 地震発生領域やマグニチュード範囲、断層パラメータは地震調査委員会の地震評価に基づいて設定し、不確実性は考慮しない、
- 地震発生時の破壊伝播の影響を考慮している、
- 固有地震のみを対象としている、
- 計算誤差のばらつきの分布は対数標準偏差の ± 2.3 倍で打ち切り、不確実性は考慮しない、
- 潮汐の影響は考慮しない、
- すべり不均質を考慮した特性化波源断層モデルを用いる、

などが挙げられる。認識論的不確実性はロジックツリーの分岐によりハザード曲線群を作成することで考慮しているが、分岐の重みは基本的に一様重みとしている。

杉野ほか(2015)の確率論的津波ハザード評価で認識論的不確実性に分類された不確実性は以下の 1 点である。

① 計算誤差

正断層型地震に対しては、土木学会(2011)に示される、0.223, 0.300, 0.372, 0.438 の 4 通りの値で分岐

させている。海溝型地震に対しては、杉野ほか(2014)の検討結果を参考にして自然対数標準偏差で 0.20, 0.25, 0.30 の 3 通りの値で分岐させている。

また、偶然的な不確定性に分類された不確定性は以下の 4 点である。

① マグニチュード

地震調査委員会(2004, 2011)に掲載された、千島海溝から日本海溝にかけての領域区分をもとに、各領域が最小単位となるように震源域を設定し、領域の組合せによりマグニチュードの不確定性を考慮する。

② 波源位置

上記のマグニチュードの不確定性と同様に、領域の組合せにより様々な震源域のパターンを作成して、波源位置の不確定性を考慮する。

③ 計算誤差

計算誤差のばらつきは対数正規分布の確率モデルで考慮し、ばらつきの大きさは相田(1977)の指標 κ を参考としている。

④ すべり分布

東北地方太平洋沖型の地震の場合には、不均質すべりモデルを適用する。一様すべり、大すべり域を有する不均質すべりモデル、これに加え超大すべり域を有する不均質すべりモデルの 3 種類の不均質すべり分布を設定した上で、一様分布の確率モデルを適用している。

以上を踏まえ、土木学会(2016)および杉野ほか(2015)の確率論的津波ハザード評価における不確定性の分類を表 2.2.7-1 にまとめる。

表 2.2.7-1 土木学会(2016)および杉野ほか(2015)の確率論的津波ハザード評価における不確定性の分類

| | 認識論的不確定性 | 偶然的な不確定性 |
|------------|--|---|
| 土木学会(2016) | <ul style="list-style-type: none"> ・地震発生領域 ・マグニチュードの範囲 ・断層パラメータ ・平均発生間隔 ・計算誤差 ・ばらつきの打ち切り範囲 | <ul style="list-style-type: none"> ・マグニチュード ・波源位置 ・潮位 ・計算誤差 ・すべり分布 |
| 杉野ほか(2015) | <ul style="list-style-type: none"> ・計算誤差 | <ul style="list-style-type: none"> ・マグニチュード ・波源位置 ・計算誤差 ・すべり分布 |

2.3 海外での研究事例

本節では、確率論的津波ハザード評価に関する海外での研究事例を紹介する。

確率論的津波ハザード評価の基礎研究として、Geist (2002) は数値計算を用いて断層面の不均質なすべり分布による沿岸津波高さの調査研究を行った。Geist (2002) は世界中の津波記録から、津波マグニチュード M_l と M_w の関係を調べ、両者が簡単な比例関係になく、津波の場合にはマグニチュードだけでなく断層パラメータの影響が強いことを示した。そして、確率論的津波ハザード評価を行う上での不確定性の 1 つとしてすべり分布の不均質を挙げ、すべり分布が沿岸津波高さに与える影響を調べるパラメータスタディを行った。津波の数値計算は 1995 年メキシコ Colima-Jalisco 地震を対象とし、線形長波理論を用いて解いている。地震断層のメカニズムは Colima-Jalisco 地震を基に固定した上で、Herrero and Bernard (1994) によるすべり分布の波数スペクトルモデルを用いて、ランダムに 100 ケース作成している。すべり不均質による沿岸波高のばらつき大きさは観測地点によって大きく異なり、ばらつき大きさを示す COV (標準偏差/平均値) の値は観測点によって 2 倍程度の差があった。この研究に引き続き、Geist (2005) はアメリカ・カリフォルニアのカスケード沈み込み帯で、ランダムなすべり分布による沿岸波高のばらつきの調査研究を行っている。

Geist and Parsons (2006) は確率論的津波ハザード評価手法のアウトラインを提案するべく、メキシコ・アカプルコとアメリカ・カリフォルニアのカスケード沈み込み帯においてハザード評価のケーススタディを実施した。彼らの提案した手法は、Cornell (1968) による確率論的地震ハザード解析の手法を基にしており、近地津波のみを対象としている。まずアカプルコでのケーススタディでは、プレート境界面に $720 \text{ km} \times 60 \text{ km}$ の地震発生域を作り、その領域内にマグニチュード・位置・すべり分布の異なる 200 個の地震を作成し、線形長波理論を用いて数値計算を行った。地震のマグニチュードは、 $M 7$ から $M 8.5$ までの範囲で G-R 則に従ってモンテカルロ手法により地震規模モデルを作成した。地震の発生位置はランダムとし、すべり分布は Geist (2002) と同様にすべり分布の波数スペクトルモデルからランダ

ムに作成した。200 個の地震の発生は定常ポアソン過程に従ってランダムに発生するとし、過去の対象地震発生域での活動履歴から発生頻度を求めた。得られたハザードカーブは、観測によって得た沿岸波高の超過頻度分布によく整合していた。カスケード沈み込み帯でのケーススタディも、アカプルコの場合と同様の手法により、 $M 7$ から $M 9$ の地震を 100 個作成して実施した。遠地津波の観測記録による 1 m 以上の沿岸波高の頻度とハザードカーブの結果を比較したところ、 1 m のレベルでは遠地津波の方が頻度が高いことが分かった。

複数の地震を想定した統合的な確率論的津波ハザード評価は Tsunami Pilot Study Working Group (2006; 以下、TPSWG と呼ぶ) によって行われた。TPSWG はアメリカ合衆国連邦緊急事態管理庁 (FEMA) による洪水保険料率マップ作成のためのガイドラインとして、近地地震・遠地地震・海底地すべりなど様々な要因から生じる津波に対してのリスク評価をすることを目的として、アメリカ・オレゴン州を対象に確率論的津波ハザード評価を実施した。ただし、海底地すべりに関しては発生モデルの検討などが進んでいないこともあって将来導入するとして、近地津波と遠地津波に限ったハザード評価を行っている。評価手法は Geist and Parsons (2006) を基にしているが、津波の数値計算手法は非線形長波理論を用いた 10 m メッシュの地形データでの数値計算で、遡上も含めて計算することで浸水評価を行っている。近地津波の震源としては、Geist and Parsons (2006) が設定したカスケード沈み込み帯を震源域として、 $M 9.1$ の地震を想定している。遠地津波の震源については、アメリカ海洋大気庁 (NOAA) による震源データベース (FACTS) を参考に、アラスカーアリュシャン地震、カムチャッカ地震、千島列島地震、チリ地震などの $M 8.2$ から $M 9.5$ の地震を想定している。アラスカーアリュシャン地震は震源域の区分を 2 つに分けるか 3 つに分けるか議論が分かれるため、これは認識論的不確定性としてロジックツリーの分岐で考慮している。各地震の発生確率はアメリカ地質調査所 (USGS) の National Seismic Hazard Mapping Program を参考にし、定常ポアソン過程を仮定して設定している。陸域も含めたすべてのメッシュでハザードカーブを作成し、超過発生頻度が $1/100$ または $1/500$ となる津

波高さ(100年津波, 500年津波と呼ばれる)についての地図を作成した。今後の検討課題として, 津波地震やカスケード沈み込み帯でのより小規模の地震をハザード評価に加えることを挙げている。

Sørensen *et al.* (2012) は地中海の沿岸全域を対象に, 地中海で想定しうる地震によって発生する津波のハザードを確率論的に評価している。地中海の場合には, 閉鎖的な海域であることから特定の地点でのハザードには特定の海域の地震の影響が強いことを示したうえで, その海域で地震が発生した場合に最大津波水位が出現する時間帯についても検討している。

Leonard *et al.* (2014) はカナダの沿岸(太平洋沿岸, 大西洋沿岸, 極北地方, およびハドソン湾などの内湾を含む)における津波ハザード評価を試みている。太平洋沿岸地方ではプレート境界での地震活動が活発であることから主にプレート境界地震によって発生する津波を考慮しているが, 大西洋沿岸地方については, プレート境界型の地震(カリブ海溝沿いの地震)による津波, 1929 Grand Banks 地震などにみられる大陸棚斜面での地すべりによる津波, さらにセントローレンス川沿いの地殻内で発生する大地震による津波などを評価の対象に含めている。

以上のような研究事例を踏まえ, 近年では国としての確率論的津波ハザード評価が諸外国で実施されている。1例として, アメリカにおける事例を紹介する。

アメリカ土木学会(American Society of Civil Engineers)(以下, ASCE と呼ぶ)の津波荷重・影響評価小委員会(Tsunami Loads and Effects Subcommittee)は「アメリカ土木学会 7 標準(2016年版)」(ASCE 7 standards, edition of 2016)に新たに第6章「津波荷重・影響」(Tsunami Loads and Effects)を設け, 津波による構造物への影響やリスクなどを対象とした技術基準を示している。「アメリカ土木学会 7 標準(2016年版)」はアラスカ州, ワシントン州, オレゴン州, カリフォルニア州, ハワイ州に適用されており, 近い将来にグアム, 米領サモア, プエルトリコで適用される予定である。ASCE の予算支援の下で, ワシントン大学のワーキンググループ(University of Washington Working Group, 以下 UW と呼ぶ)は沖合の水深 100 m の地点における 2,500 年間の津波の最大振幅を対象とした確率論的津波ハザード解析

(Probabilistic Tsunami Hazard Analysis)を行っている(UW (2017), 図 2.3-1)。また, ASCE は確率論的津波ハザード解析の結果として, アラスカ州, ワシントン州, オレゴン州, カリフォルニア州, ハワイ州の沿岸において想定される津波の遡上高や浸水範囲を“ASCE Tsunami Design Geodatabase”として地図上で公表している(図 2.3-2)。



図 2.3-1 カリフォルニア州クレセント市における沖合の津波の最大振幅を対象とした確率論的津波ハザード解析(UW, 2017)

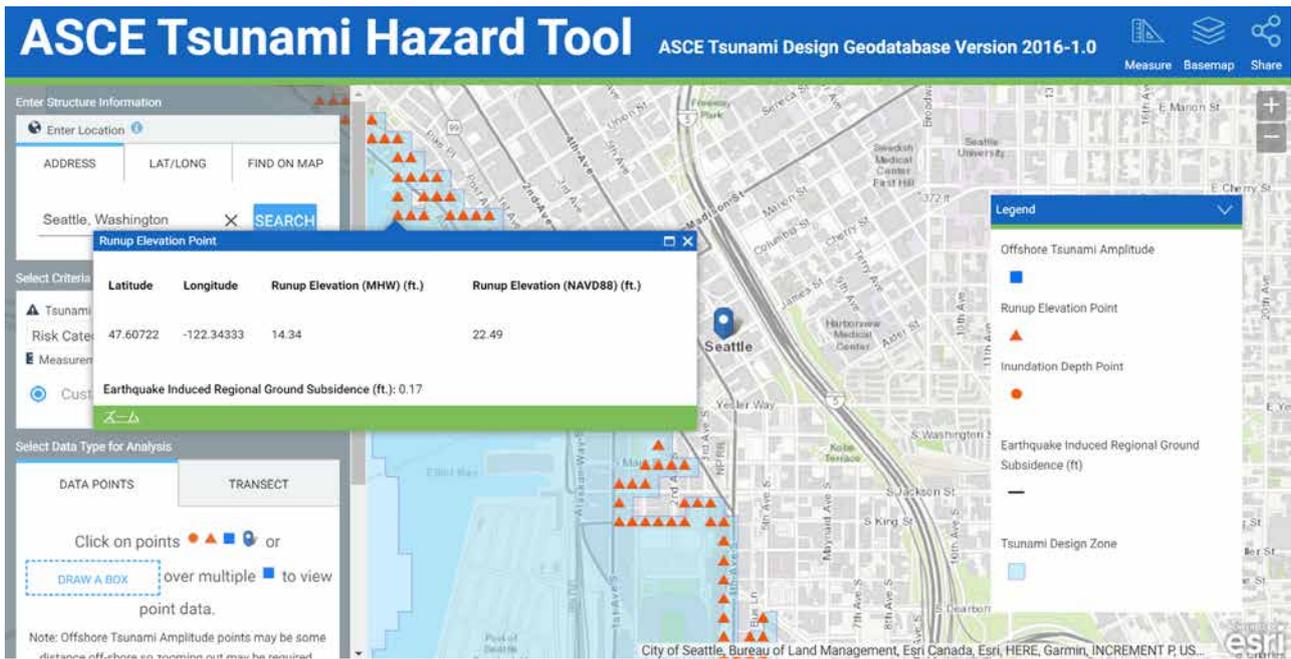


図 2.3-2 ASCE Tsunami Design Geodatabase (ASCE) の表示例(図はワシントン州シアトル市を示している)

2 章の参考文献

- 1) 油屋貴子・今村文彦(2002)：合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案，海岸工学論文集，第 49 巻，pp.276-280.
- 2) 相田勇(1977)：陸上に溢れる津波の数値実験—高知県須崎および宇佐の場合，地震研究所彙報，Vol.52，pp.441-460.
- 3) American Society of Civil Engineers：ASCE Tsunami Design Geodatabase Version 2016-1.0，<https://www.asce7tsunami.online/> (2019 年 12 月 15 日参照).
- 4) 防災科学技術研究所(2011)：J-SHIS 地震ハザードステーション，<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2019 年 1 月 18 日参照).
- 5) Cornell, C. A. (1968)：Engineering seismic risk analysis, Bull. Seismol. Soc. Am., 58, pp.1583-1606.
- 6) 中央防災会議(2001)：東海地震に関する専門調査会，<http://www.bousai.go.jp/jishin/tokai/senmon/index.html> (2019 年 4 月 18 日参照).
- 7) 中央防災会議(2003)：東南海・南海地震等に関する専門調査会，http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/tounankai_nankaijishin/index_nankai.html (2019 年 4 月 18 日参照).
- 8) 中央防災会議(2006)：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会，http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/index.html (2019 年 4 月 18 日参照).
- 9) 中央防災会議(2011)：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会，http://www.bousai.go.jp/kaigirep/chuobou/senmon/nihonkaiko_chisimajishin/index.html (2019 年 4 月 18 日参照).
- 10) 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.
- 11) 土木学会原子力土木委員会津波評価部会(2011)：確率論的津波ハザード解析の方法.
- 12) 土木学会原子力土木委員会津波評価小委員会(2016)：原子力発電所の津波評価技術 2016.
- 13) 藤原広行・平田賢治・中村洋光・長田正樹・森川信之・河合伸一・大角恒雄・青井真・松山尚典・遠山信彦・鬼頭直・村嶋陽一・村田泰洋・井上拓也・斎藤龍・秋山伸一・是永真理子・阿部雄太・橋本紀彦(2015)：日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討，防災科学技術研究所研究資料，400，216pp.
- 14) 福岡捷二・川島幹雄・松永宜夫・前内永敏(1994)：密集市街地の氾濫流に関する研究，土木学会論文集，No.491，II-27，pp.51-60.
- 15) Frumura T. and T. Saito (2009)：Three dimensional simulation of tsunami generation and propagation:Application to intraplate events. Journal of Geophysical Research, 114, B02307.
- 16) Geist, E. L. (2002)：Complex earthquake rupture and local tsunamis, J.G.R., 107, B000139.
- 17) Geist, E. L. (2005)：Local tsunami hazards in the Pacific Northwest from Cascadia subduction zone earthquakes, U.S. Geological Survey Professional Paper, 1661-B.
- 18) Geist, E. L. and Parsons, T. (2006)：Probabilistic analysis of tsunami hazards, Natural Hazards, 37, pp.277-314.
- 19) 原子力安全基盤機構(2012)：確率論的津波評価に基づく設計基準津波の作成に関する JNES モデル．原子力安全・保安院 地震・津波に関する意見聴取会 津波関係第 1 回配布資料.
- 20) Goto, C. (1983)：Numerical simulation of Tsunami propagations and run-up, Tsunamis:Their Science and Engineering, pp 439-451.
- 21) 後藤智明(1984)：アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式，土木学会論文集，Vol.351，pp.193-201.
- 22) 後藤智明・佐藤一央(1993)：三陸沿岸を対象とした津波数値計算システム開発，港湾技術研究所報告，第 32 巻，第 2 号，pp.18.
- 23) 長谷川賢一・鈴木孝夫・稲垣和男・首藤伸夫(1987)：津波の数値実験における格子間隔と時間積分間隔に関する研究，土木学会論文集第 381 号，II -7，pp.111-120.
- 24) Herrero, A. and Bernard, P. (1994)：A kinematic self-similar rupture process for earthquakes, Bull. Seismol. Soc. Am., 84, pp.1216-1228.
- 25) 今村文彦(1989)：数値計算による津波予警報の可能性に関する研究，東北大学博士学位論文.
- 26) 今村文彦・後藤智明・首藤伸夫(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.
- 27) 岩渕洋子・杉野英治・蛭沢勝三 (2014) : 確率論的手法に基づく基準津波策定手引き, 原子力安全基盤機構, JNES-RE-2013-2041.
- 28) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2001) : 長期的な地震発生確率の評価手法について.
- 29) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2004) : 千島海溝沿いの地震活動の長期評価 (第二版) について.
- 30) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2011) : 三陸沖から房総沖にかけての地震活動の長期評価 (第二版).
- 31) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2013) : 南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版).
- 32) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2014) : 全国地震動予測地図 2014 年版~全国の地震動ハザードを概観して~.
- 33) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017) : 波源断層を特性化した津波の予測手法 (津波レシピ).
- 34) 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2020) : 南海トラフ沿いで発生する大地震の確率論的津波評価.
- 35) 川原睦人・竹内則雄・首藤伸夫 (1976) : 2 段階ラックス・ウエンドロフ有限要素法による潮汐流解析, 土木学会海岸工学講演会論文集, Vol.23, pp.498-501.
- 36) 国土交通省 (2005) : 浸水想定区域図作成マニュアル.
- 37) 国土交通省 (2012) : 津波浸水想定の設定の手引き.
- 38) 国土交通省 (2016) : 日本海における大規模地震に関する調査検討会, http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/daikibojishinchousa/ (2019 年 4 月 18 日参照).
- 39) 国土交通省国土地理院 (2005) : 細密数値情報 10m メッシュ土地利用. (<http://www.gsi.go.jp/kankyochiri/lum-saimitsu.html> (2019 年 1 月 21 日参照)).
- 40) 国土交通省国土政策局 (2014) : 国土数値情報土地利用細分メッシュデータ. (<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> (2019 年 1 月 21 日参照)).
- 41) 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫 (1998) : GIS を利用した津波遡上計算と被害想定手法, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.356-360.
- 42) Leonard, L.J., G. C. Rogers, and S. Mazzotti (2014): Tsunami hazard assessment of Canada. *Nat. Hazards*, 70, 237-274.
- 43) 日下部毅明・渋谷研一・片岡正次郎 (2006) : 津波による道路施設の被災度と経済的損失の評価手法に関する現況等の調査と基礎的検討, 国総研資料, 第 316 号, pp.114-15.
- 44) 正村憲史・藤間功司・後藤智明・重村利幸 (2000) : 底面境界層の構造を考慮した長波理論解と海底摩擦による波高減衰に関する考察, 土木学会論文集, No.663, II -53, pp.69-78.
- 45) 村嶋陽一・今村文彦・竹内仁・鈴木崇之・山崎正幸・松田健也 (2006) : 津波浸水予測における航空機搭載型レーザーデータの適応性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.1336-1340.
- 46) 村嶋陽一・今村文彦・越村俊一・中村茂・北沢良之・並川和敬 (2007) : 津波防災施設計画への高精度地形モデルの利用と必要精度, 海岸工学論文集, 第 54 巻, pp. 1371-1375.
- 47) 内閣府 (2015) : 南海トラフの巨大地震モデル検討会, <http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/index.html> (2019 年 4 月 18 日参照).
- 48) 内閣府・農林水産省・水産庁・国土交通省 (2004) : 津波・高潮ハザードマップマニュアル.
- 49) Peregrin, D.H. (1967) : Long waves on a beach, *J.F.M.*, Vol.27, Part4.
- 50) 劉曉東・堺茂樹・小原忠和・三上勉・岩間俊二・今村文彦・首藤伸夫 (2001) : 市街地への津波遡上・氾濫に関する数値解析, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp. 341-345.
- 51) 佐山順二・後藤智明・首藤伸夫 (1986) : 屈折に関する津波数値計算の誤差, 海岸工学論文集, 第 33 巻, pp. 204-208.
- 52) 首藤伸夫・今村文彦・越村俊一・佐竹健治・松富英夫 (2007) : 津波の事典, 朝倉書店, 350pp.
- 53) Sørensen, M. B., M. Spada, A. Babeyko, S. Wiemer, and G. Grünthal (2012): Probabilistic tsunami hazard in the Mediterranean Sea. *J. Geophys. Res.*, 117, B01305.

- 54) 杉野英治・岩渕洋子・橋本紀彦・松末和之・蛭澤勝三・亀田弘行・今村文彦 (2014) : プレート間地震による津波の特性化波源モデルの提案, 日本地震工学会論文集, 第 14 巻, 第 5 号, pp.1-18.
- 55) 杉野英治・岩渕洋子・阿部雄太・今村文彦 (2015) : 確率論的津波ハザード評価における津波想定の影響, 日本地震工学会論文集, 第 15 巻, 第 4 号, pp.40-61.
- 56) 高橋智幸 (2002) : 津波の解析技術—南海地震津波を例として—, 土木学会海岸工学委員会・水理委員会, 水工学シリーズ 02-B-5.
- 57) 高橋智幸 (2004) : 津波防災における数値計算の利用, 日本流体力学学会数値流体力学部門 Web 会誌, 第 12 巻第 2 号, pp.23-32.
- 58) 田中仁・アーマドサナ・川村育男 (1998) : 波動境界層の準定常性に関する理論および実験. 土木学会論文集. 593/11-43, 155–164.
- 59) Tsunami Pilot Study Working Group (2006) : Seaside, Oregon Tsunami Pilot Study -Modernization of FEMA Flood Hazard Maps, USGS Open-File Report 2006-1234.
- 60) University of Washington Working Group (2017): Probabilistic Tsunami Design Maps for the ASCE 7-16 Standard, <https://doi.org/10.1061/9780784480748.001>. (2019 年 12 月 15 日参照)

3. 地震活動に関するデータ

本章では、日本周辺における地震活動と、地震に伴う津波に関するデータから、津波の発生の程度、規模別分布などを整理する。整理にあたっては、以下のカタログを参照した。

- 地震に関するカタログ

S-1) 気象庁による地震月報(カタログ編)

(1923 年～ 1996 年に海域で発生した地震)

- 津波に関するカタログ

T-1) 渡辺(1998)による「日本被害津波総覧(第2版)」
(684 年～ 1996 年に日本およびその周辺で発生した津波)

T-2) 阿部による「日本付近に発生した津波の規模(1498 年～ 2006 年)」

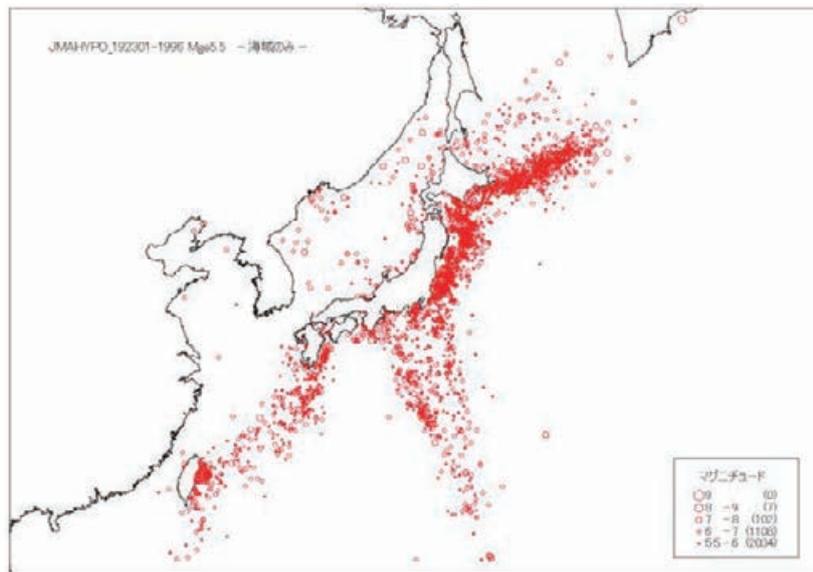


図 3-1 地震月報(気象庁)に記載された 1923 年から 1996 年に海域で発生した M_j 5.5 以上の地震の震央分布

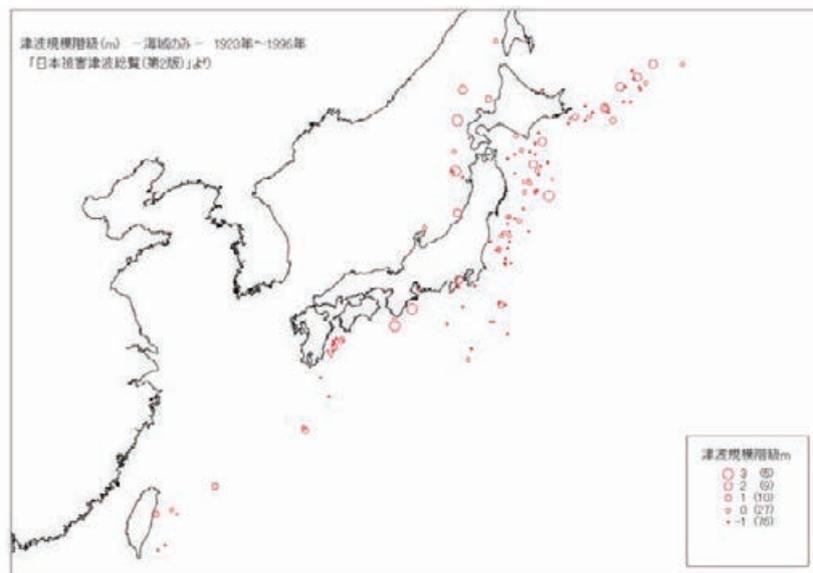


図 3-2 「日本被害津波総覧(第2版)」(渡辺, 1998)に記載の 1923 年から 1996 年に海域で発生した地震の震央分布

表 3-1 1923 年から 1996 年に日本周辺の海域で発生した地震の数

| 地震規模 | 度数 (地震月報) | 津波規模階級別の度数 (日本被害津波総覧) | | | | | | |
|----------------------|--------------|--------------------------|----|---|---|---|---|-----|
| | | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 小計 |
| $5.5 \leq M_j < 6.0$ | 2034 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| $6.0 \leq M_j < 6.5$ | 845 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12 |
| $6.5 \leq M_j < 7.0$ | 263 | 36 | 8 | 2 | 1 | 0 | 0 | 47 |
| $7.0 \leq M_j < 7.5$ | 83 | 21 | 14 | 5 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| $7.5 \leq M_j < 8.0$ | 19 | 0 | 3 | 2 | 3 | 3 | 0 | 11 |
| $8.0 \leq M_j < 8.5$ | 7 | 0 | 0 | 0 | 4 | 2 | 0 | 6 |
| $8.5 \leq M_j$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 合計 | 3251 | 69 | 26 | 9 | 8 | 5 | 0 | 117 |

表 3-2 1923 年から 1996 年に日本周辺の海域で発生した地震の津波発生割合

| 地震規模 | 度数 (地震月報) | 津波規模階級別の発生割合 (日本被害津波総覧) | | | | | | |
|----------------------|--------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 小計 |
| $5.5 \leq M_j < 6.0$ | 2034 | 0.0000 | 0.0005 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0005 |
| $6.0 \leq M_j < 6.5$ | 845 | 0.0142 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0142 |
| $6.5 \leq M_j < 7.0$ | 263 | 0.1369 | 0.0304 | 0.0076 | 0.0038 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1787 |
| $7.0 \leq M_j < 7.5$ | 83 | 0.2530 | 0.1687 | 0.0602 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.4819 |
| $7.5 \leq M_j < 8.0$ | 19 | 0.0000 | 0.1579 | 0.1053 | 0.1579 | 0.1579 | 0.0000 | 0.5789 |
| $8.0 \leq M_j < 8.5$ | 7 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.5714 | 0.2857 | 0.0000 | 0.8571 |
| $8.5 \leq M_j$ | 0 | - | - | - | - | - | - | - |
| 合計 | 3251 | 0.0212 | 0.0080 | 0.0028 | 0.0025 | 0.0015 | 0.0000 | 0.0360 |

まず、カタログ S-1 と T-1 に基づいて、1923 年～1996 年に日本周辺の海域で発生した地震の地震規模と津波発生割合について検討する。

カタログ S-1 に記載された、日本周辺の海域で発生した $M_j 5.5$ 以上の地震の震央分布を図 3-1 に示す。同様に、カタログ T-1 に記載された、今村・飯田の津波規模階級 m (今村, 1949 ; Iida, 1958) が定まっている地震、すなわち、津波を発生させた地震の震央分布を図 3-2 に示す。さらに、表 3-1 に、図 3-1 の地震のうち、津波を発生させた地震(図 3-2 の地震)の個数をマグニチュード M_j の範囲毎に集計し、それに基づき 1923 年～1996 年に日本周辺の海域で発生した地震によって津波が発生した割合を表 3-2 にまとめた。

図 3-3 下段の黒三角印をみると、 $M_j 7$ 以上の地震のほぼ半数以上で津波が発生しているのに対し、 $M_j 7$ 未満の地震では津波が発生する割合は小さいことがわかる。また、表 3-3 から現行の「津波警報レベル」(津波の予想高さが 1 m を超え、3 m 以下) (気象庁, 2013) に相当するとみられる津波規模階級 m が 1 よりも大きな規模の津波は、概ね $M_j 7$ 以上の地震によって発生している傾向が図 3-3 から読み取れる。

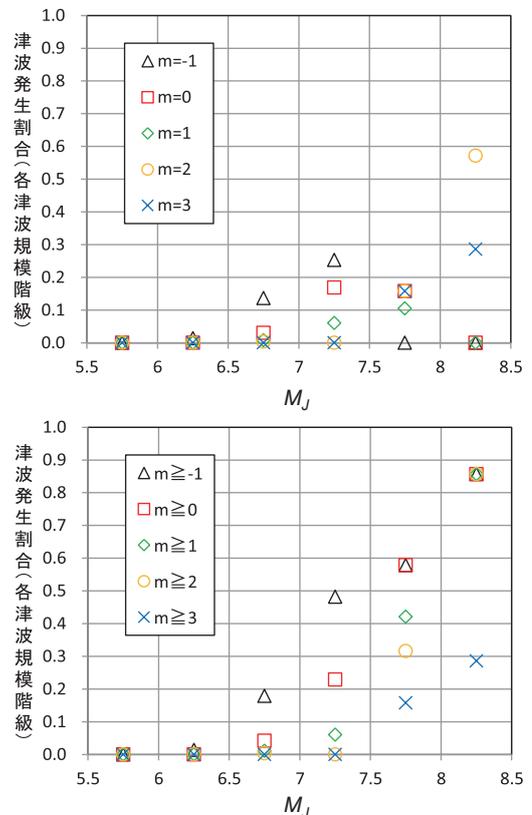


図 3-3 気象庁および渡辺 (1998) に基づく海域で発生した地震 (1923 年～1996 年) の津波を発生させた地震規模別の割合。上: 津波規模階級別割合, 下: 累積津波規模階級別割合 (津波規模階級 m がある階級以上となる割合)

次に、カタログ T-1 と T-2 に基づいて、1498 年～1996 年に日本付近で発生した津波に対する、地震規模と津波規模階級の関係について検討する。

カタログ T-2 に掲載された、1498 年～2006 年に日本周辺で発生した津波のリストに、カタログ T-1 に記載された津波規模階級 m および震源深さを追加したものを表 3-4 に示す。また、津波規模階級 m が 0 以上のものについて、地震規模 M_J 別の度数分布および累積比率を図 3-4 に示す。なお、同図では津波規模階級 m 別に色分けして示した。同図から、 M_J 6.7 以上になると m が 1 以上となる地震が出現し始めることが読み取れる。

表 3-4 にはカタログ T-2 から算出した M_T - M_S の値も記載している。阿部 (1988) では M_T - M_S が 0.5 以上の地震を津波地震としていることから、参考としてこの基準に該当する地震を表 3-4 では黄色のハッチを掛けて示した。図 3-4 において $M_J = 6.8$ で $m = 4$ となっている地震は、「津波地震」である 1896 年明治三陸地震である。

表 3-3 今村・飯田の津波規模階級(「日本被害津波総覧(第 2 版)」(渡辺, 1998)より転記)

| 規模階級(m) | 津波の高さ(H) | 被害程度 |
|-------------|--------------|--------------------|
| -1 | 50cm 以下 | なし |
| 0 | 1m 程度 | 非常にわずかの被害 |
| 1 | 2 " " | 海岸および舟(船)の被害 |
| 2 | 4~6 " " | 若干の内陸までの被害や人的損失 |
| 3 | 10~20 " " | 400km 以上の海岸線に顕著な被害 |
| 4 | 30 " 以上 | 500km 以上の海岸線に顕著な被害 |

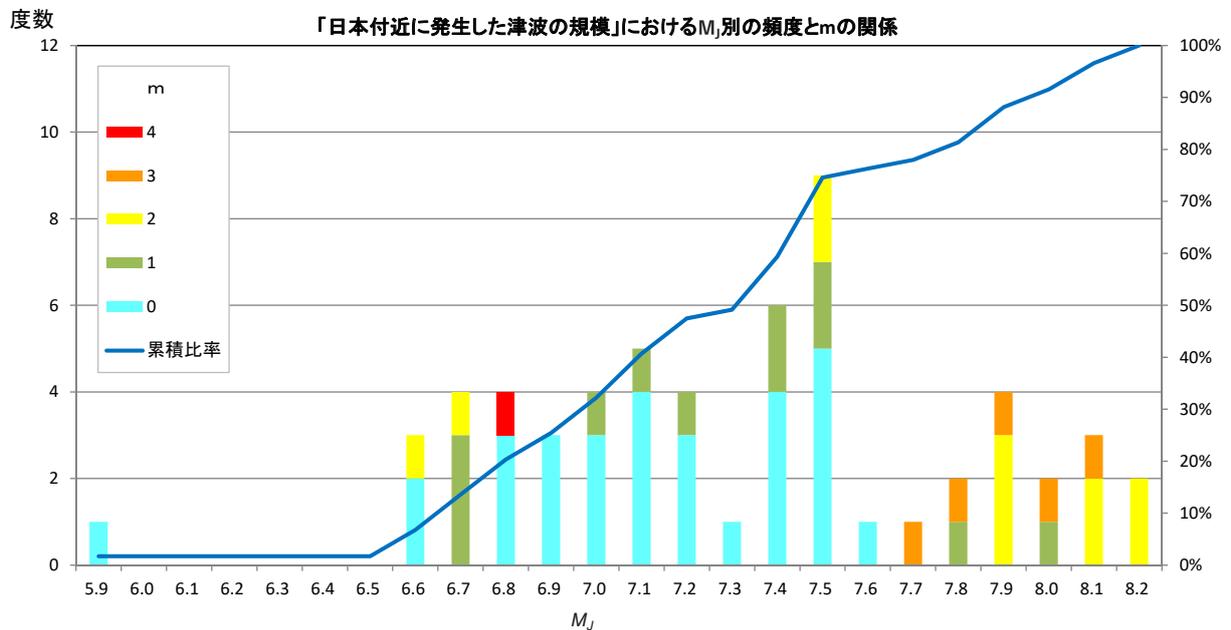


図 3-4 表 3-4 の地震のうち、津波規模階級 m が 0 以上の地震の度数分布および累積比率。津波規模階級 m 別に色分けした。

表 3-4 1498 年～1996 年に日本付近で発生した津波 (1/2)

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 北緯 | 東経 | REGION | Mt | Mw | Ms | Mj | Mt-Ms | m | 深さ (km) |
|------|----|----|----|----|------|-------|---------|-----|-----|-----|-----|-------|-----|---------|
| 1498 | 9 | 20 | | | | | 東海 | 8.5 | | | | - | | 3 |
| 1596 | 9 | 1 | | | | | 別府湾 | 8 | | | | - | | |
| 1605 | 2 | 3 | | | | | 東海・南海 | 8.2 | | | | - | | 3 |
| 1611 | 12 | 2 | | | | | 三陸沖 | 8.4 | | | | - | | 4 |
| 1662 | 10 | 31 | | | | | 日向灘 | 7.7 | | | | - | | 2 |
| 1677 | 4 | 13 | | | | | 十勝沖 | 7.7 | | | | - | | 2 |
| 1677 | 11 | 4 | | | | | 房総沖 | 8 | | | | - | | 3 |
| 1703 | 12 | 31 | | | | | 関東 | 8.4 | | | | - | | 3 |
| 1707 | 10 | 28 | | | | | 東海・南海 | 8.4 | | | | - | | 4 |
| 1741 | 8 | 29 | | | | | 渡島半島沖 | 8.4 | | | | - | | |
| 1763 | 1 | 29 | | | | | 十勝沖 | 7.9 | | | | - | | 2 |
| 1769 | 8 | 29 | | | | | 日向灘 | 7.2 | | | | - | | 1 |
| 1771 | 4 | 24 | | | | | 八重山群島 | 8.5 | | | | - | | 4 |
| 1792 | 6 | 21 | | | | | 島原湾 | 7.6 | | | | - | | 3 |
| 1793 | 2 | 17 | | | | | 宮城県沖 | 7.6 | | | | - | | 2 |
| 1804 | 7 | 10 | | | | | 山形・秋田県沖 | 7.7 | | | | - | | 1 |
| 1833 | 12 | 7 | | | | | 山形県沖 | 8.1 | | | | - | | 2 |
| 1843 | 4 | 26 | | | | | 十勝沖 | 8 | | | | - | | 2 |
| 1854 | 12 | 23 | | | | | 東海 | 8.3 | | | | - | | 3 |
| 1854 | 12 | 24 | | | | | 南海 | 8.3 | | | | - | | 3 |
| 1856 | 8 | 23 | | | | | 十勝沖 | 7.6 | | | | - | | 2 |
| 1894 | 3 | 22 | 19 | 23 | 42.5 | 146.0 | 根室沖 | 8.2 | | 8.1 | 7.9 | 0.1 | | 2 |
| 1896 | 1 | 9 | 22 | 17 | 36.5 | 141.0 | 茨城県沖 | 7.3 | | 7.2 | 6.6 | 0.1 | | 2 |
| 1896 | 6 | 15 | 19 | 32 | 39.5 | 144.0 | 岩手県沖 | 8.6 | | 7.2 | 6.8 | 1.4 | | 4 |
| 1897 | 2 | 20 | 5 | 50 | 38.1 | 141.9 | 宮城県沖 | - | | 7.3 | 7.4 | - | | 0 |
| 1897 | 8 | 5 | 9 | 10 | 38.3 | 143.3 | 宮城県沖 | 7.8 | | 7.7 | 7.7 | 0.1 | 1~2 | |
| 1898 | 4 | 23 | 8 | 37 | 38.6 | 142.0 | 宮城県沖 | 6.7 | | 7.4 | 7.2 | -0.7 | | -1 |
| 1899 | 11 | 25 | 3 | 43 | 31.9 | 132.0 | 宮崎県沖 | 7 | | 7.2 | 7.1 | -0.2 | | -1 |
| 1901 | 6 | 24 | 16 | 2 | 28.0 | 130.0 | 奄美大島沖 | 7.6 | | 7.3 | 7.5 | 0.3 | | 0 |
| 1901 | 8 | 9 | 18 | 23 | 40.5 | 142.5 | 青森県東方沖 | 7.3 | | 7.3 | 7.2 | 0.0 | | 0 |
| 1901 | 8 | 10 | 3 | 33 | 40.6 | 142.3 | 青森県東方沖 | 7.2 | | 7.5 | 7.4 | -0.3 | | 0 |
| 1911 | 6 | 15 | 23 | 26 | 28.0 | 130.0 | 奄美大島付近 | - | | - | 8 | - | | 1 |
| 1914 | 1 | 12 | 18 | 28 | 31.6 | 130.6 | 鹿児島県中部 | - | | 6.7 | 7.1 | - | | 1 |
| 1915 | 11 | 1 | 16 | 24 | 38.3 | 142.9 | 宮城県沖 | - | | 7.6 | 7.5 | - | | 0 |
| 1918 | 9 | 8 | 2 | 16 | 46.5 | 152.0 | ウルップ島沖 | 8.5 | | 8.2 | 8 | 0.3 | | |
| 1918 | 11 | 8 | 13 | 38 | 44.5 | 150.5 | ウルップ島沖 | - | | 7.7 | 7.7 | - | | |
| 1923 | 6 | 2 | 2 | 24 | 35.9 | 142.0 | 茨城県沖 | 7.4 | | 7.2 | 7.3 | 0.2 | | -1 |
| 1923 | 9 | 1 | 11 | 68 | 36.1 | 139.5 | 相模湾 | 8 | 7.0 | 8.2 | 7.0 | -0.2 | | 2 |
| 1923 | 9 | 2 | 11 | 46 | 34.9 | 140.2 | 房総半島沖 | 7.5 | | 7.7 | 7.3 | -0.2 | | -1 |
| 1927 | 3 | 7 | 18 | 27 | 35.5 | 135.2 | 京都府北部 | - | 7.2 | 7.6 | 7.3 | - | | 0 |
| 1927 | 8 | 6 | 6 | 12 | 37.9 | 142.1 | 宮城県沖 | 6.8 | | 7.1 | 6.7 | -0.3 | | -1 |
| 1927 | 8 | 10 | 4 | 27 | 34.0 | 142.0 | 房総半島沖 | 7.4 | | 6.8 | 6.9 | 0.6 | | 0 |
| 1928 | 5 | 27 | 18 | 50 | 40.0 | 143.3 | 岩手県沖 | 7.1 | | 7.1 | 7 | 0.0 | | -1 |
| 1931 | 3 | 9 | 12 | 48 | 41.2 | 142.5 | 青森県東方沖 | 7.2 | | 7.8 | 7.6 | -0.6 | | 0 |
| 1931 | 11 | 2 | 19 | 3 | 32.3 | 132.6 | 宮崎県沖 | 7.3 | | 7.6 | 7.1 | -0.3 | | -1 |
| 1933 | 3 | 3 | 2 | 30 | 39.2 | 144.5 | 岩手県沖 | 8.3 | 8.4 | 8.5 | 8.1 | -0.2 | | 3 |
| 1933 | 6 | 19 | 6 | 37 | 38.1 | 142.5 | 宮城県沖 | 7.1 | | 7.3 | 7.1 | -0.2 | | 0 |
| 1935 | 7 | 19 | 9 | 50 | 36.6 | 141.4 | 茨城県沖 | 6.6 | | 6.9 | 6.9 | 0.1 | | -1 |
| 1935 | 10 | 13 | 1 | 45 | 40.0 | 143.7 | 岩手県沖 | 7.2 | | 7.2 | 6.9 | 0.0 | | -1 |
| 1935 | 10 | 18 | 9 | 11 | 40.8 | 144.4 | 青森県東方沖 | 6.9 | | 7.2 | 7.1 | -0.3 | | -1 |
| 1936 | 11 | 3 | 5 | 45 | 38.2 | 142.1 | 宮城県沖 | 7 | | 7.2 | 7.5 | -0.2 | | 0 |
| 1938 | 5 | 23 | 16 | 18 | 36.7 | 141.6 | 茨城県沖 | 7.5 | 7.7 | 7.6 | 7 | -0.1 | | 0 |
| 1938 | 6 | 10 | 18 | 53 | 26.3 | 126.2 | 宮古島北方沖 | - | | 7.7 | 6.7 | - | | 1 |
| 1938 | 11 | 5 | 17 | 43 | 37.3 | 142.2 | 福島県沖 | 7.6 | 7.8 | 7.7 | 7.5 | -0.1 | | 0 |
| 1938 | 11 | 5 | 19 | 50 | 37.3 | 141.7 | 福島県沖 | 7.6 | 7.7 | 7.7 | 7.3 | -0.1 | | 0 |
| 1938 | 11 | 6 | 17 | 53 | 37.4 | 141.9 | 福島県沖 | 7.3 | 7.6 | 7.6 | 7.4 | -0.3 | | 0 |
| 1938 | 11 | 7 | 6 | 38 | 37.0 | 141.6 | 福島県沖 | 7.4 | 7.0 | 7 | 6.9 | 0.4 | | 0 |
| 1938 | 11 | 14 | 7 | 31 | 37.0 | 141.5 | 福島県沖 | 7.1 | | 7 | 6 | 0.1 | | -1 |
| 1938 | 11 | 22 | 10 | 14 | 36.7 | 142.1 | 茨城県沖 | 6.7 | | 6.6 | 6.9 | 0.1 | | -1 |
| 1938 | 11 | 30 | 11 | 29 | 37.0 | 142.2 | 福島県沖 | 7 | | 6.9 | 6.9 | 0.1 | | -1 |
| 1939 | 3 | 20 | 12 | 22 | 32.3 | 132.0 | 宮崎県沖 | 6.7 | | 6.5 | 6.5 | 0.2 | | -1 |
| 1939 | 5 | 1 | 14 | 58 | 40.1 | 139.5 | 秋田県沖 | 6.9 | | 7 | 6.8 | -0.1 | | -1 |
| 1940 | 8 | 2 | 0 | 8 | 44.3 | 139.5 | 横丹半島沖 | 7.7 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 0.2 | | 2 |
| 1941 | 11 | 19 | 1 | 46 | 32.0 | 132.1 | 宮崎県沖 | 7.6 | | 7.8 | 7.2 | -0.2 | | 1 |
| 1943 | 6 | 13 | 14 | 11 | 41.3 | 143.4 | 青森県東方沖 | 7.3 | | 7.2 | 7.1 | 0.1 | | -1 |
| 1944 | 12 | 7 | 13 | 36 | 33.8 | 136.6 | 三笠県沖 | 8.1 | 8.1 | 8 | 7.0 | 0.1 | | 3 |
| 1945 | 1 | 13 | 3 | 38 | 34.7 | 137.1 | 宮崎県南部 | - | 6.6 | 6.8 | 6.8 | - | | 0 |
| 1945 | 2 | 10 | 13 | 57 | 41.0 | 142.1 | 青森県東方沖 | 7.1 | | 7.1 | 7.1 | 0.0 | | -1 |
| 1946 | 12 | 21 | 4 | 19 | 33.0 | 135.6 | 紀伊半島沖 | 8.1 | 8.1 | 8.2 | 8 | -0.1 | | 3 |
| 1947 | 11 | 4 | 9 | 9 | 43.8 | 141.0 | 留萌沖 | 7.3 | | 7.1 | 6.7 | 0.2 | | 1 |
| 1948 | 4 | 18 | 1 | 11 | 33.3 | 135.6 | 紀伊半島沖 | - | | 7.3 | 7 | - | | 0 |
| 1952 | 3 | 4 | 10 | 22 | 41.8 | 144.1 | 十勝沖 | 8.2 | 8.1 | 8.3 | 8.2 | -0.1 | | 2 |
| 1952 | 3 | 10 | 2 | 3 | 41.7 | 143.7 | 日高関東沖 | 7.3 | | 7.1 | 6.8 | 0.2 | | -1 |
| 1953 | 11 | 26 | 2 | 48 | 34.0 | 141.7 | 房総半島沖 | 7.8 | 7.9 | 7.9 | 7.4 | -0.1 | | 1 |
| 1956 | 3 | 6 | 8 | 29 | 44.3 | 144.1 | 網走沖 | 6.2 | | 6 | 6.3 | 0.2 | | -1 |
| 1958 | 11 | 7 | 7 | 58 | 44.3 | 148.5 | エトロフ島沖 | 8.2 | 8.3 | 8.1 | 8.1 | 0.1 | | 2 |
| 1959 | 1 | 22 | 14 | 10 | 37.5 | 142.2 | 福島県沖 | 6.9 | | 7.1 | 6.8 | -0.2 | | -1 |
| 1959 | 10 | 26 | 16 | 35 | 37.5 | 143.3 | 福島県沖 | 6.5 | | 6.5 | 6.8 | 0.0 | | -1 |
| 1960 | 3 | 21 | 2 | 7 | 39.8 | 143.4 | 岩手県沖 | 7.5 | | 7.7 | 7.2 | -0.2 | | 0 |
| 1960 | 3 | 23 | 9 | 23 | 39.4 | 143.7 | 岩手県沖 | 7.1 | | 6.8 | 6.7 | 0.3 | | -1 |
| 1960 | 7 | 30 | 2 | 31 | 40.3 | 142.5 | 岩手県沖 | 7 | | 6.7 | 6.7 | 0.3 | | -1 |

注: M_t : 津波マグニチュード, M_w : モーメントマグニチュード, M_s : 表面波マグニチュード, M_j : 気象庁マグニチュード(いずれも阿部による表による). m : 津波規模階級(渡辺(1998)による). 震源の深さは渡辺(1998)による. $M_t-M_s \geq 0.5$ (阿部(1988))となる地震を津波地震として黄色で, 津波規模階級 m の記載がない地震を灰色で示した.

表 3-4 1498 年～1996 年に日本付近で発生した津波 (2/2)

| 年 | 月 | 日 | 時 | 分 | 北緯 | 東経 | REGION | Mt | Mw | Ms | Mj | Mt-Ms | m | 深さ (km) |
|------|----|----|----|----|------|-------|---------|-----|-----|-----|-----|-------|----|---------|
| 1961 | 1 | 16 | 16 | 20 | 36.0 | 142.3 | 茨城県沖 | 7.2 | - | 6.9 | 6.8 | 0.3 | -1 | 40 |
| 1961 | 1 | 16 | 21 | 12 | 36.2 | 142.0 | 茨城県沖 | 7.1 | - | 6.5 | 6.5 | 0.6 | -1 | 20 |
| 1961 | 2 | 13 | 6 | 53 | 43.2 | 147.0 | エトロフ島沖 | 6.0 | - | 6.0 | 6.6 | 0.0 | -1 | 80 |
| 1961 | 2 | 27 | 3 | 10 | 31.6 | 131.9 | 宮崎県沖 | 7.5 | - | 7.6 | 7 | -0.1 | 0 | 40 |
| 1961 | 7 | 18 | 23 | 3 | 29.6 | 131.8 | 鹿児島県東沖 | 6.0 | - | 6.0 | 6.6 | 0.0 | -1 | 60 |
| 1961 | 8 | 12 | 0 | 51 | 42.9 | 145.6 | 福島沖 | 6.8 | 7 | 7.1 | 7.2 | -0.3 | -1 | 80 |
| 1961 | 11 | 15 | 16 | 17 | 42.7 | 145.6 | 福島沖 | 6.9 | - | 6.8 | 6.9 | 0.1 | -1 | 60 |
| 1962 | 4 | 12 | 9 | 52 | 38.0 | 142.8 | 宮城県沖 | 6.8 | - | 7.1 | 6.8 | -0.3 | 0 | 40 |
| 1962 | 4 | 23 | 14 | 58 | 42.2 | 143.9 | 十勝沖 | 6.7 | - | 6.9 | 7 | -0.2 | -1 | 60 |
| 1963 | 10 | 12 | 20 | 26 | 43.0 | 148.0 | エトロフ島沖 | 6.0 | - | 7 | 6.3 | -0.1 | -1 | 0 |
| 1963 | 10 | 13 | 14 | 17 | 43.8 | 150.0 | エトロフ島沖 | 8.4 | 8.5 | 8.1 | 8.1 | 0.3 | 2 | 0 |
| 1963 | 10 | 20 | 9 | 53 | 44.1 | 150.1 | ウルップ島沖 | 7.9 | - | 7.2 | 6.7 | 0.7 | 2 | 26 |
| 1964 | 5 | 7 | 16 | 08 | 40.3 | 139.0 | 秋田県沖 | 7.1 | 7 | 6.6 | 6.9 | 0.5 | -1 | 0 |
| 1964 | 6 | 16 | 13 | 1 | 38.4 | 130.2 | 新潟県沖 | 7.0 | 7.6 | 7.5 | 7.5 | 0.4 | 2 | 40 |
| 1964 | 7 | 24 | 17 | 14 | 45.8 | 153.4 | 千島列島 | 7.2 | - | 6.8 | 6.4 | 0.4 | | |
| 1964 | 12 | 11 | 0 | 11 | 40.4 | 138.9 | 秋田県沖 | 6.5 | - | 6.5 | 6.3 | 0.0 | -1 | 40 |
| 1965 | 6 | 11 | 12 | 33 | 43.7 | 148.8 | エトロフ島沖 | 7 | - | 7 | 6.4 | 0.0 | -1 | 0 |
| 1968 | 1 | 29 | 19 | 10 | 43.2 | 147.0 | 色丹島沖 | 7.3 | 7.3 | 7.3 | 6.0 | 0.0 | -1 | 30 |
| 1968 | 4 | 1 | 9 | 42 | 32.3 | 132.5 | 宮崎県沖 | 7.7 | 7.4 | 7.6 | 7.5 | 0.1 | 1 | 30 |
| 1968 | 5 | 16 | 9 | 48 | 40.7 | 143.6 | 香森県東方沖 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 7.9 | 0.1 | 2 | 0 |
| 1968 | 5 | 16 | 19 | 39 | 41.4 | 142.9 | 香森県東方沖 | 7.7 | - | 7.7 | 7.5 | 0.0 | 0 | 40 |
| 1968 | 6 | 12 | 22 | 41 | 39.4 | 143.1 | 岩手県沖 | 7.4 | 7.1 | 7.3 | 7.2 | 0.1 | 0 | 0 |
| 1969 | 4 | 21 | 16 | 10 | 32.2 | 132.1 | 宮崎県沖 | 6.7 | - | 6.8 | 6.5 | -0.1 | -1 | 10 |
| 1969 | 8 | 12 | 6 | 27 | 43.3 | 147.8 | 色丹島沖 | 8.2 | 8.2 | 7.8 | 7.8 | 0.4 | 1 | 30 |
| 1970 | 7 | 26 | 7 | 41 | 32.1 | 132.0 | 宮崎県沖 | 7.1 | 7 | 6.8 | 6.7 | 0.3 | -1 | 10 |
| 1971 | 8 | 2 | 16 | 24 | 41.2 | 143.7 | 日南東沖 | 7.1 | - | 7.1 | 7 | 0.0 | -1 | 60 |
| 1971 | 9 | 6 | 3 | 35 | 46.7 | 141.4 | サハリン西方沖 | 7.5 | 7.3 | 6.9 | 6.0 | 0.6 | 0 | 0 |
| 1972 | 2 | 29 | 18 | 22 | 33.2 | 141.3 | 八丈島東方沖 | 7.4 | - | 7.4 | 7.1 | 0.0 | -1 | 70 |
| 1972 | 12 | 4 | 10 | 16 | 33.2 | 141.1 | 八丈島東方沖 | 7.6 | - | 7.5 | 7.2 | 0.1 | -1 | 50 |
| 1973 | 6 | 17 | 12 | 55 | 43.0 | 146.0 | 福島沖 | 8.1 | 7.8 | 7.7 | 7.4 | 0.4 | 1 | 40 |
| 1973 | 6 | 24 | 11 | 43 | 43.0 | 146.8 | 福島沖 | 7.6 | 7.5 | 7.3 | 7.1 | 0.3 | 0 | 30 |
| 1973 | 6 | 27 | 7 | 32 | 42.7 | 146.6 | 福島沖 | 6.9 | - | 6.5 | 6.5 | 0.4 | | |
| 1974 | 5 | 9 | 8 | 33 | 34.6 | 138.8 | 伊豆半島沖 | 6.5 | 6.5 | 6.3 | 6.9 | 0.2 | -1 | 10 |
| 1974 | 9 | 27 | 14 | 47 | 42.8 | 146.7 | 福島沖 | 7 | - | 6.5 | 6.6 | 0.5 | -1 | 30 |
| 1975 | 6 | 10 | 22 | 47 | 42.8 | 148.2 | 色丹島沖 | 7.9 | - | 6.8 | 7 | 1.1 | 1 | 0 |
| 1976 | 1 | 21 | 19 | 5 | 43.7 | 149.2 | エトロフ島沖 | 7.1 | - | 6.8 | 6.5 | 0.3 | -1 | 0 |
| 1978 | 1 | 14 | 12 | 24 | 34.8 | 139.3 | 伊豆大島付近 | 6.7 | 6.6 | 6.4 | 7 | 0.3 | -1 | 0 |
| 1978 | 3 | 23 | 9 | 31 | 44.4 | 140.7 | エトロフ島沖 | 7.1 | 7.3 | 7.1 | 6.7 | 0.0 | -1 | 40 |
| 1978 | 3 | 23 | 12 | 15 | 44.8 | 149.4 | エトロフ島沖 | 7.5 | 7.4 | 7.4 | 7 | 0.1 | -1 | 60 |
| 1978 | 3 | 25 | 4 | 47 | 44.3 | 149.8 | エトロフ島沖 | 7.7 | 7.6 | 7.5 | 7.3 | 0.2 | -1 | 40 |
| 1978 | 6 | 12 | 17 | 14 | 38.2 | 142.2 | 宮城県沖 | 7.4 | 7.6 | 7.5 | 7.4 | -0.1 | 0 | 40 |
| 1979 | 2 | 20 | 15 | 32 | 40.2 | 143.0 | 岩手県沖 | 6.9 | 6.6 | 6.7 | 6.6 | 0.2 | -1 | 0 |
| 1980 | 2 | 23 | 14 | 51 | 43.5 | 146.6 | 色丹島沖 | 6.8 | 7.1 | 6.8 | 6.8 | 0.0 | -1 | 30 |
| 1980 | 6 | 29 | 16 | 20 | 34.9 | 139.2 | 伊豆半島東方沖 | 6.3 | 6.4 | 6 | 6.7 | 0.3 | -1 | 10 |
| 1981 | 1 | 19 | 3 | 17 | 38.6 | 143.0 | 宮城県沖 | 7 | 7 | 6.9 | 7 | 0.1 | -1 | 0 |
| 1982 | 3 | 21 | 11 | 32 | 42.1 | 142.6 | 日向沖 | 7.1 | 6.9 | 6.7 | 7.1 | 0.4 | 0 | 40 |
| 1982 | 7 | 23 | 23 | 23 | 36.2 | 142.0 | 茨城県沖 | 7 | 7 | 6.8 | 7 | 0.2 | -1 | 30 |
| 1982 | 12 | 28 | 15 | 37 | 33.9 | 139.5 | 三宅島南方沖 | - | 6.2 | 6.1 | 6.4 | - | -1 | 20 |
| 1983 | 5 | 26 | 11 | 59 | 40.4 | 139.1 | 秋田県沖 | 8.1 | 7.9 | 7.7 | 7.7 | 0.4 | 3 | 14 |
| 1983 | 6 | 21 | 15 | 25 | 41.3 | 139.0 | 香森県西方沖 | 7.3 | 7 | 6.9 | 7.1 | 0.4 | 0 | 6 |
| 1984 | 3 | 24 | 18 | 43 | 44.4 | 148.9 | エトロフ島沖 | 7.1 | 7.1 | 7 | 6.8 | 0.1 | -1 | 40 |
| 1984 | 6 | 13 | 11 | 29 | 31.4 | 139.8 | 鳥島近海 | 7.3 | 6.6 | 6.5 | 6.9 | 1.8 | 0 | 0 |
| 1984 | 8 | 7 | 4 | 6 | 32.4 | 132.2 | 宮崎県沖 | 6.0 | 6.0 | 6.7 | 7.1 | 0.2 | -1 | 33 |
| 1984 | 9 | 19 | 2 | 2 | 34.1 | 141.6 | 房総半島沖 | 7.3 | 6.8 | 6.9 | 6.6 | 0.4 | -1 | 13 |
| 1986 | 11 | 15 | 6 | 20 | 24.0 | 121.8 | 台湾付近 | 7.6 | 7.3 | 7.8 | 7.5 | -0.2 | 1 | 33 |
| 1987 | 2 | 6 | 22 | 16 | 37.0 | 141.9 | 福島県東方沖 | 6.8 | 6.8 | 6.3 | 6.7 | 0.5 | | |
| 1987 | 3 | 18 | 12 | 36 | 32.0 | 132.1 | 日向灘 | 6.8 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 0.0 | | |
| 1989 | 10 | 29 | 14 | 25 | 30.6 | 143.8 | 三陸はるか沖 | 6.8 | 6.0 | 6.6 | 6.5 | 0.2 | -1 | 0 |
| 1989 | 11 | 2 | 3 | 25 | 39.8 | 143.1 | 岩手県沖 | 7.5 | 7.2 | 7.4 | 7.1 | 0.1 | 0 | 0 |
| 1990 | 2 | 20 | 15 | 53 | 34.7 | 139.3 | 伊豆大島近海 | 6.5 | 6.2 | 6.4 | 6.5 | 0.1 | -1 | 6 |
| 1990 | 9 | 24 | 6 | 13 | 33.1 | 136.6 | 東海連はるか沖 | 6.8 | 6.5 | 6.5 | 6.6 | 0.3 | -1 | 60 |
| 1991 | 12 | 22 | 17 | 43 | 45.8 | 152.4 | 千島列島 | 7.5 | 7.5 | 7.4 | 6.8 | 0.1 | 0 | 10 |
| 1992 | 7 | 18 | 17 | 36 | 39.4 | 143.7 | 三陸はるか沖 | 7.2 | 6.8 | 6.9 | 6.9 | 0.3 | 0 | 0 |
| 1992 | 8 | 12 | 0 | 14 | 32.6 | 142.1 | 八丈島東方沖 | 7.1 | 6.4 | 6.3 | 6.1 | 0.8 | -1 | 50 |
| 1993 | 2 | 7 | 22 | 27 | 37.7 | 137.3 | 船島半島沖 | 6.7 | 6.6 | 6.2 | 6.6 | 0.5 | 0 | 25 |
| 1993 | 7 | 12 | 22 | 17 | 42.8 | 130.2 | 北海道南西沖 | 8.1 | 7.7 | 7.6 | 7.8 | 0.6 | 3 | 36 |
| 1993 | 8 | 8 | 4 | 42 | 42.0 | 139.9 | 北海道南西沖 | 6.4 | 6.5 | 6.1 | 6.3 | 0.3 | -1 | 24 |
| 1994 | 4 | 8 | 10 | 10 | 40.6 | 144.0 | 三陸はるか沖 | 7 | 6.4 | 6.3 | 6.5 | 0.7 | -1 | 9 |
| 1994 | 5 | 24 | 13 | 0 | 24.0 | 122.4 | 台湾付近 | 6.5 | 6.5 | 6.7 | 6.6 | -0.2 | -1 | 37 |
| 1994 | 6 | 5 | 10 | 9 | 24.3 | 121.7 | 台湾付近 | 6.6 | 6.3 | 6.6 | 6.7 | 0.0 | | |
| 1994 | 10 | 4 | 22 | 22 | 43.4 | 147.7 | 北海道東沖 | 8.2 | 8.1 | 8.1 | 8.2 | 0.1 | 2 | 23 |
| 1994 | 10 | 9 | 16 | 55 | 43.6 | 147.8 | 北海道東沖 | 6.9 | 7.1 | 7.1 | 7 | -0.2 | | |
| 1994 | 12 | 28 | 21 | 19 | 40.5 | 143.7 | 三陸はるか沖 | 7.7 | 7.7 | 7.5 | 7.6 | 0.2 | 0 | 0 |
| 1995 | 1 | 17 | 5 | 46 | 34.6 | 135.0 | 兵庫県南部 | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 7.3 | -0.4 | -1 | 16 |
| 1995 | 10 | 18 | 19 | 37 | 28.0 | 130.4 | 奄美大島近海 | 7.6 | 6.9 | 6.9 | 6.7 | 0.7 | 1 | 38 |
| 1995 | 10 | 19 | 11 | 41 | 28.1 | 130.3 | 奄美大島近海 | 7.3 | 6.7 | 6.9 | 6.6 | 0.4 | 0 | 34 |
| 1995 | 12 | 4 | 3 | 1 | 44.5 | 150.3 | 千島列島 | 7.6 | 7.6 | 7.9 | 7.2 | -0.3 | -1 | 57 |
| 1996 | 9 | 5 | 3 | 15 | 31.4 | 140.0 | 鳥島近海 | 7.5 | 5.7 | 5.1 | 6.2 | 2.4 | -1 | 13 |
| 1996 | 10 | 18 | 19 | 50 | 30.6 | 131.2 | 種子島近海 | 6.7 | 6.6 | 6.6 | 6.2 | 0.1 | -1 | 40 |
| 1996 | 10 | 19 | 23 | 44 | 31.8 | 132.0 | 日向灘 | 6.9 | 6.6 | 6.6 | 6.9 | 0.3 | -1 | 39 |
| 1996 | 12 | 3 | 7 | 17 | 31.8 | 131.6 | 日向灘 | 6.7 | 6.7 | 6.6 | 6.7 | 0.1 | -1 | 43 |

注: M_t : 津波マグニチュード, M_w : モーメントマグニチュード, M_s : 表面波マグニチュード, M_j : 気象庁マグニチュード(いずれも阿部による表による). m : 津波規模階級(渡辺(1998)による). 震源の深さは渡辺(1998)による. $M_t-M_s \geq 0.5$ (阿部(1988))となる地震を津波地震として黄色で, 津波規模階級 m の記載がない地震を灰色で示した.

カタログ T-1 における 1926 年～1996 年までの 71 年間のデータについて、津波規模階級別の津波の発生度数および累積度数を図 3-5 上段に、年頻度および累積年頻度を図 3-5 下段に示す。同図から津波規模階級が -1 (津波の高さが 50 cm 以下) 以上となる津波は 1 年に約 2 回の頻度、津波階級規模が 1 (津波の高さが 2 m 程度) 以上となる津波は 3 年に 1 回程度の頻度で発生していることがわかる。

津波を伴う地震の震源深さは、岡田・谷岡 (1998) によれば概ね 90 km よりも浅いことが示されている (図 3-6)。また、地震によって津波が発生する割合も震源の深さが概ね 50 km 以浅の場合に 30% を超え、規模の大きな津波も震源の深さが概ね 50 km 以浅の地震に集中して発生していることが読み取れる。

3 章の参考文献

- 1) 阿部勝征 (1988) : 津波マグニチュードによる日本付近の地震津波の定量化, 東京大学地震研究所彙報, **63** (3), 289-303.
- 2) 阿部勝征 : 日本付近に発生した津波の規模 (1498 年 - 2006 年), <http://www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/tsunamiMt.html>, 2019 年 12 月 5 日閲覧.
- 3) Iida, K. (1958): Magnitude and energy of earthquakes accompanied by tsunami, and tsunami energy, J. Earth Sci., Nagoya Univ., **6**, 101-112.
- 4) 今村明恒 (1949) : 本邦津波年代表, 地震 **2**, 23-28.
- 5) 気象庁 : 地震月報 (カタログ編), <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>, 2019 年 12 月 5 日閲覧.
- 6) 気象庁 (2013) : 津波警報が変わりました, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/books/tsunamikeihou/tsunamikeihou2013.pdf>, 2019 年 12 月 29 日閲覧.
- 7) 岡田正実・谷岡勇市郎 (1998) : 地震の規模・深さと津波の発生率, 月刊海洋, 号外 No.15, 18-22.
- 8) 渡辺偉夫 (1998) : 日本被害津波総覧 (第 2 版), 東京大学出版会, 248pp.

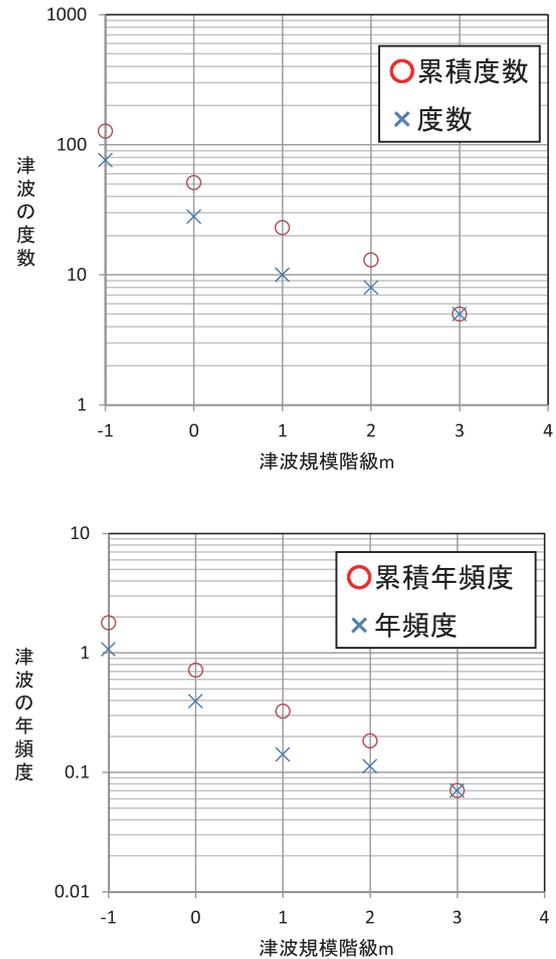


図 3-5 津波規模階級 m 別の津波の発生度数と年頻度。上：度数および累積度数。下：年頻度および累積年頻度 (1926 年～1996 年の 127 事例)

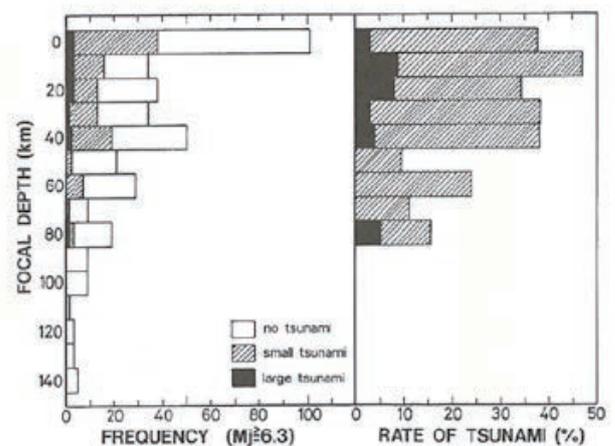


図 3-6 地震の深さ別の津波発生度数 (左) と発生率 (右) (岡田・谷岡 (1998) より抜粋)

4. 津波痕跡に関するデータ

4.1 津波痕跡に関するデータベースのレビュー

本節では、津波痕跡に関する資料を整理した、以下4点のデータベースを紹介する。

- (1) 産業技術総合研究所地質調査総合センター(以下、産総研と呼ぶ)の「津波堆積物データベース」
- (2) 東北大学災害科学国際研究所津波工学研究分野・原子力安全基盤機構(現原子力規制委員会)(以下、東北大・原子力安全基盤機構と呼ぶ)の「津波痕跡データベース」
- (3) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(以下、合同調査グループと呼ぶ)の「痕跡調査結果」
- (4) 米国国立海洋大気庁(National Oceanic and Atmospheric Administration)(以下、NOAAと呼ぶ)の「NGDC/WDS グローバル歴史津波データベース」(NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database)

(1) 産総研「津波堆積物データベース」

https://gbank.gsj.jp/tsunami_deposit_db/index.html

産総研は過去の巨大津波の規模や発生時期を解明するため、津波堆積物の調査・研究を実施し、その成果を「津波堆積物データベース」として公表している。本データベースは、地形判読などによって決定した調査地点において柱状堆積物試料を採取し、多くの試料に対する分析結果などを総合的に判断した結果をまとめたものである。なお、迅速に成果を公表することを目的として、掘削地点の位置情報のみ、掘削地点の位置情報と調査の結果、掘削地点の位置情報と産総研の解釈による津波堆積物の有無にわけて公表されている。「津波堆積物データベース」の表示例を図 4.1-1 に示す。

(2) 東北大・原子力安全基盤機構「津波痕跡データベース」

<http://irides.tohoku.ac.jp/project/tsunami-db.html>

東北大・原子力安全基盤機構は原子力発電所等の安全性評価に活用するため、津波専門家との協働で「津波痕跡データベース」を整備し、約3万件の津波痕跡データを公表している。なお、本データベースは2018年11月1日以降、サーバーメンテナンスのため運用を停止している(2019年10月26日時点)。

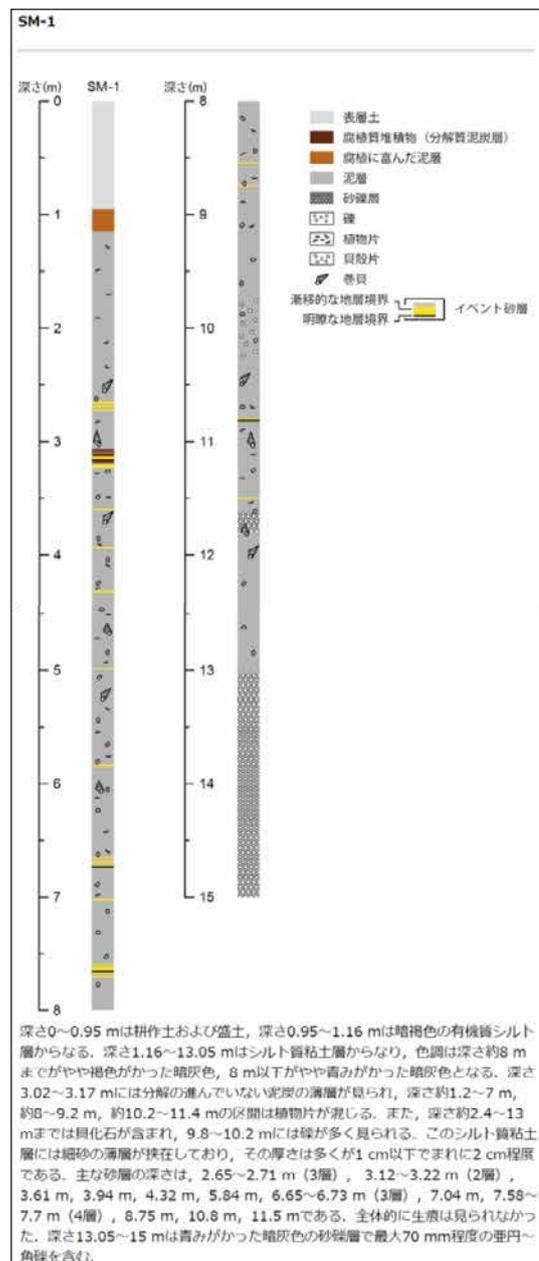


図 4.1-1 「津波堆積物データベース」(産総研)の表示
(高知県四万十町における津波堆積物調査結果)

ここでは、藤原ほか(2015)で記載された、「津波痕跡データベース」における文献(古文書・史料集)の信頼度を表 4.1-1 に、津波痕跡高の信頼度の分類を表 4.1-2 に、津波痕跡データ登録数集計(2014 年 7 月 30 日時点)を表 4.1-3 に示す。

(3) 合同調査グループ「痕跡調査結果」

<http://www.coastal.jp/ttjt/index.php?> 現地調査結果

合同調査グループは 2011 年東北地方太平洋沖地震津波を対象に、津波痕跡調査結果を公表している。東北大・原子力安全基盤機構の「津波痕跡データベース」と同様に、表 4.1-2 に示す基準で分類した津波痕跡高の信頼度が示されている。津波遡上高および浸水高の分布図を図 4.1-2 に示す。

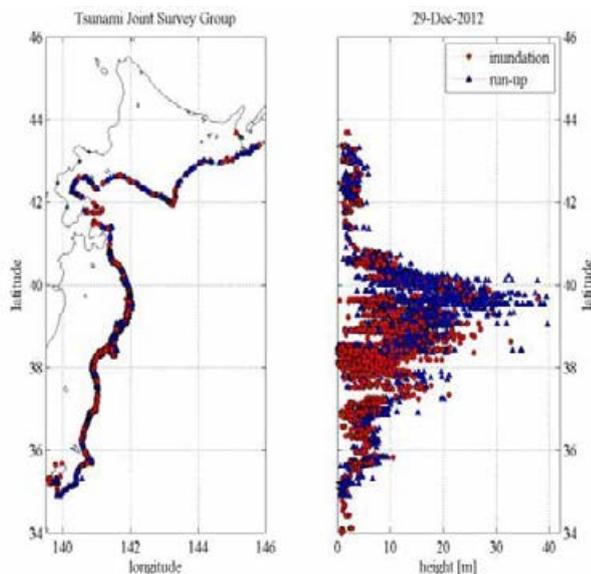


図 4.1-2 2011 年東北地方太平洋沖地震津波の遡上高および浸水高の分布図(合同調査グループ)

(4) NOAA「NGDC/WDS グローバル歴史津波データベース」

https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml

NOAA は紀元前 2000 年以降に世界各地(主に大西洋, インド洋, 太平洋, 地中海, カリブ海)で発生した津波を対象に、津波の波源(Tsunami source event)と遡上(Tsunami runup)に関するデータを整備し、「NGDC/WDS グローバル歴史津波データベース」(NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database)を公開している。「NGDC/WDS グローバル歴史津波データベース」の検索例(日本国内の津波痕跡を対象に古い順に表示)を表 4.1-4 に示す。

本研究資料では、日本国内における津波痕跡のデータを網羅した「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)を用いて、過去に南海トラフ沿いで発生した地震を対象に、特性化した波源断層モデルの妥当性の検討を行う。検討に使用する津波痕跡データについては 4.2 節を、妥当性の検討については 10 章を参照されたい。

表 4.1-1 「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)における文献(古文書・史料集)の信頼度(藤原ほか(2015)を転載)

| 文献自体の信頼度 | 判断基準 |
|----------|--|
| ◎ | A1: 直接目撃者が被災直後に記したもの。 A2: その地点の公的な立場の人(各主, 代官, 支配領主など)が記録したもの。津波被害による免税文書など。 A3: 寺院での過去帳(死者リストなど) B3: 寺院などで石段○段目などと明確に言い伝えられている記述を集めたもの。 |
| ○ | B1: A1 から A3 に基づき、江戸から明治期の公的史料編纂者がまとめた文書。インテリの随筆など。 B2: 個人の年代記など、直接体験者の伝記であるが、体験から文章化までに年代が経っている記述を集めたもの。 C1: 明治から昭和・平成までに編集された市町村史編纂者が地元伝承を集めたもの。 |
| △ | C2: 被災時に旅行者が風聞を文章化したもの。 C3: 被災時に遠方の地方の人がニュースとして記録したもの。 D: C より劣るもの。昭和・平成の現代人が憶測によりまとめたもの。 |
| × | E: 偽書である(東日流三郡誌など) |

表 4.1-2 「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)における津波痕跡高の信頼度の分類(1960 年チリ地震以降, 藤原ほか(2015)を転載)

| | | 判断基準 | |
|-----|---|-----------|--|
| 信頼度 | A | 信頼度大なるもの | 痕跡明瞭にして、測量誤差最も小なるもの |
| | B | 信頼度中なるもの | 痕跡不明につき、聞き込みにより周囲の状況から信頼ある水位を知るもの。測量誤差小 |
| | C | 信頼度小なるもの | その他砂浜などで異常に波がはい上がったと思われるもの、あるいは測点が海辺より離れ測量誤差が大なるもの |
| | D | 信頼度極小なるもの | 高潮, 台風などの影響で痕跡が重複し、不明瞭なもの、など |

表 4.1-3 「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)における津波痕跡データ登録数集計(2014年7月30日時点, 藤原ほか(2015)を転載)(1/3)

| 津波番号 | 津波名 | 文献数 | 痕跡件数 | 検潮記録 | 痕跡信頼度の内訳 | | | | | | | |
|---------|--------------------|-----|------|------|----------|-----|-----|----|----|-----|-----|---|
| | | | | | A | B | C | D | X | Z | 精査中 | |
| 0002 | 869 卓親地震津波 | 23 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 13 | 0 |
| 0003 | 887 仁和(紀伊半島沖)地震津波 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0004 | 1096 嘉保東海地震津波 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0006 | 1361 正平南海地震津波 | 8 | 6 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 0008 | 1498 明応南海地震津波 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0009 | 1498 明応東海地震津波 | 33 | 290 | 0 | 0 | 4 | 21 | 74 | 21 | 170 | 0 | 0 |
| 0010 | 1596 慶長豊後地震津波 | 13 | 119 | 0 | 5 | 3 | 12 | 3 | 25 | 71 | 0 | 0 |
| 0012 | 1605 慶長東海地震津波 | 25 | 180 | 0 | 1 | 4 | 22 | 37 | 15 | 93 | 8 | 0 |
| 0013 | 1611 慶長三陸地震津波 | 23 | 105 | 0 | 2 | 2 | 23 | 15 | 1 | 62 | 0 | 0 |
| T015-01 | 1640 駒ヶ岳噴火津波 | 7 | 8 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 0016 | 1662 日向灘地震津波 | 3 | 18 | 0 | 0 | 0 | 7 | 1 | 1 | 9 | 0 | 0 |
| 0018 | 1677 延宝三陸地震津波 | 9 | 23 | 0 | 0 | 0 | 3 | 17 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 0019 | 1677 延宝房総地震津波 | 18 | 135 | 0 | 0 | 11 | 33 | 48 | 3 | 40 | 0 | 0 |
| W003 | 1700 元禄(北米カスケード)津波 | 8 | 9 | 0 | 0 | 1 | 3 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 |
| 0020 | 1703 元禄地震津波 | 48 | 331 | 0 | 2 | 15 | 17 | 83 | 3 | 209 | 2 | 0 |
| 0021 | 1707 宝永地震津波 | 67 | 1157 | 0 | 70 | 101 | 168 | 82 | 22 | 712 | 2 | 0 |
| 0025 | 1741 寛保(渡島大島)噴火津波 | 16 | 247 | 0 | 7 | 9 | 42 | 38 | 5 | 146 | 0 | 0 |
| 0026 | 1762 宝暦佐渡地震津波 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0027 | 1763 宝暦青森県東方沖地震津波 | 8 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 |
| 0029 | 1768 明和沖繩本島西南沖地震津波 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0030 | 1769 日向灘地震津波 | 3 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| 0031 | 1771 八重山地震津波 | 21 | 214 | 0 | 77 | 8 | 65 | 8 | 0 | 56 | 0 | 0 |
| W006 | 1780 千島列島津波 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0032 | 1780 鹿児島湾北部海底噴火津波(| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0033 | 1780 鹿児島湾北部海底噴火津波(| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0034 | 1781 鹿児島湾海底噴火津波 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0036 | 1792 豊仙普賢岳山体崩壊津波 | 10 | 183 | 0 | 89 | 26 | 1 | 0 | 0 | 67 | 0 | 0 |
| 0037 | 1792 寛政北海道西方沖地震津波 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0038 | 1793 寛政西津軽地震津波 | 8 | 24 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 19 | 0 | 0 |
| 0039 | 1793 寛政三陸地震津波 | 9 | 135 | 0 | 0 | 3 | 10 | 40 | 4 | 78 | 0 | 0 |
| 0040 | 1804 象潟地震津波 | 7 | 78 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 | 1 | 73 | 0 | 0 |
| 0041 | 1833 天保(山形県沖)地震津波 | 21 | 89 | 0 | 1 | 5 | 22 | 29 | 1 | 31 | 0 | 0 |
| W007 | 1837 天保チリ南部沖地震津波 | 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

(注)「津波痕跡データベース」は 2018 年 11 月 1 日以降, サーバメンテナンスのため運用を停止している(2019 年 10 月 26 日時点). そのため, 藤原ほか(2015)が 2014 年 7 月 30 日に「津波痕跡データベース」を参照して作成した表を転載することとした.

表 4.1-3 「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)における津波痕跡データ登録数集計(2014年7月30日時点,藤原ほか(2015)を転載)(2/3)

| 津波番号 | 津波名 | 文献数 | 痕跡件数 | 検潮記録 | 痕跡信頼度の内訳 | | | | | | |
|------|----------------------|-----|------|------|----------|-----|-----|-----|----|------|-----|
| | | | | | A | B | C | D | X | Z | 精査中 |
| 0043 | 1843天保根室沖地震津波 | 21 | 21 | 0 | 3 | 4 | 6 | 5 | 1 | 2 | 0 |
| 0044 | 1854安政東海地震津波 | 56 | 1885 | 0 | 35 | 70 | 135 | 200 | 25 | 1420 | 0 |
| 0045 | 1854安政南海地震津波 | 52 | 541 | 0 | 62 | 35 | 123 | 35 | 18 | 268 | 0 |
| 0048 | 1856安政三陸(八戸沖)地震津波 | 16 | 149 | 0 | 4 | 10 | 42 | 69 | 2 | 22 | 0 |
| W008 | 1868チリ(アリカ)地震津波 | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| W009 | 1877チリ(イキケ)地震津波 | 4 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 11 | 0 |
| 0053 | 1894根室半島南東沖地震津波 | 10 | 85 | 5 | 0 | 0 | 6 | 15 | 0 | 64 | 0 |
| 0055 | 1896明治三陸地震津波 | 19 | 1007 | 1 | 291 | 3 | 364 | 0 | 0 | 160 | 189 |
| 0057 | 1897三陸はるか沖地震津波 | 3 | 53 | 0 | 0 | 0 | 40 | 0 | 0 | 13 | 0 |
| 0059 | 1899宮崎県沖地震津波 | 2 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0063 | 1911喜界島地震津波 | 6 | 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| W014 | 1918千島列島ウルツブ島東方沖地震津波 | 6 | 27 | 24 | 6 | 2 | 3 | 1 | 0 | 15 | 0 |
| W016 | 1922チリ(アタカマ)地震津波 | 1 | 4 | 3 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| 0067 | 1923大正関東大地地震津波 | 19 | 319 | 13 | 6 | 20 | 140 | 12 | 1 | 140 | 0 |
| T001 | 1929日向灘地震津波 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0074 | 1931日向灘地震津波 | 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0075 | 1933昭和三陸地震津波 | 17 | 2376 | 23 | 897 | 229 | 789 | 3 | 0 | 458 | 0 |
| 0083 | 1938宮古島付近地震津波 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0091 | 1939日向灘地震津波 | 4 | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 0 |
| 0093 | 1940積丹半島沖地震津波(神威岬) | 10 | 116 | 14 | 3 | 2 | 24 | 27 | 0 | 60 | 0 |
| 0094 | 1941日向灘地震津波 | 7 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 0096 | 1944昭和東南海地震津波 | 26 | 796 | 76 | 136 | 13 | 81 | 13 | 0 | 553 | 0 |
| W020 | 1946アリユンジャン津波 | 7 | 26 | 21 | 12 | 0 | 2 | 0 | 0 | 15 | 0 |
| 0099 | 1946昭和南海地震津波 | 30 | 1693 | 35 | 322 | 264 | 289 | 10 | 0 | 721 | 87 |
| 0102 | 1952十勝沖地震津波 | 10 | 382 | 59 | 38 | 40 | 160 | 41 | 0 | 103 | 0 |
| W021 | 1952カムチャツカ津波 | 6 | 224 | 19 | 11 | 18 | 37 | 70 | 0 | 88 | 0 |
| 0109 | 1953房総半島南東沖地震津波 | 6 | 59 | 42 | 9 | 5 | 2 | 3 | 0 | 38 | 2 |
| W022 | 1957アリユンジャン地震津波 | 8 | 24 | 24 | 10 | 11 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 0111 | 1958エトロフ島沖地震津波 | 4 | 61 | 55 | 4 | 11 | 1 | 0 | 0 | 45 | 0 |
| W023 | 1960チリ地震津波 | 44 | 1980 | 229 | 358 | 512 | 371 | 37 | 0 | 697 | 5 |
| 0121 | 1961日向灘地震津波 | 6 | 12 | 12 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| 0128 | 1963エトロフ島沖地震津波 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| W025 | 1964アラスカ地震津波 | 6 | 61 | 59 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 33 | 0 |
| 0131 | 1964新潟地震津波 | 14 | 998 | 162 | 147 | 159 | 219 | 24 | 0 | 401 | 48 |

(注)「津波痕跡データベース」は2018年11月1日以降,サーバーメンテナンスのため運用を停止している(2019年10月26日時点). そのため,藤原ほか(2015)が2014年7月30日に「津波痕跡データベース」を参照して作成した表を転載することとした.

表 4.1-3 「津波痕跡データベース」(東北大学・原子力安全基盤機構)における津波痕跡データ登録数集計(2014年7月30日時点,藤原ほか(2015)を転載)(3/3)

| 津波番号 | 津波名 | 文献数 | 痕跡件数 | 検潮記録 | 痕跡信頼度の内訳 | | | | | | | |
|------|--------------------|------|-------|------|----------|------|------|------|-----|-------|-----|-----|
| | | | | | A | B | C | D | X | Z | 精査中 | |
| 0136 | 1968日向灘地震津波 | 6 | 105 | 70 | 27 | 5 | 15 | 0 | 0 | 0 | 58 | 0 |
| 0137 | 1968十勝沖地震津波 | 11 | 1986 | 271 | 173 | 130 | 852 | 45 | 0 | 0 | 784 | 2 |
| 0140 | 1969日向灘地震津波 | 2 | 9 | 9 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 0 | 5 | 0 |
| 0142 | 1970日向灘地震津波 | 3 | 39 | 39 | 3 | 0 | 17 | 0 | 0 | 0 | 19 | 0 |
| 0148 | 1973根室半島沖地震津波 | 5 | 193 | 143 | 85 | 18 | 35 | 2 | 0 | 0 | 53 | 0 |
| 0152 | 1975北海道東方沖(色丹島沖)地震 | 6 | 84 | 74 | 46 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 0 |
| 0158 | 1978宮城県沖地震津波 | 2 | 28 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 | 0 |
| 0167 | 1983日本海中部地震津波 | 29 | 3748 | 377 | 861 | 1284 | 566 | 7 | 0 | 0 | 883 | 147 |
| 0171 | 1984日向灘地震津波 | 2 | 12 | 12 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 |
| 0173 | 1986台湾東方沖地震津波 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0181 | 1993能登半島沖地震津波 | 2 | 13 | 13 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | 0 |
| 0182 | 1993北海道南西沖地震津波 | 16 | 2115 | 235 | 404 | 464 | 456 | 62 | 0 | 0 | 716 | 13 |
| 0186 | 1994北海道東方沖地震津波 | 6 | 353 | 98 | 87 | 116 | 49 | 8 | 0 | 0 | 89 | 4 |
| 0189 | 1995奄美大島近海津波 | 5 | 120 | 102 | 83 | 7 | 1 | 0 | 0 | 0 | 29 | 0 |
| 0190 | 1995奄美大島近海津波(余震) | 4 | 64 | 60 | 39 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 0 |
| W047 | 1996イリアンジャヤ地震津波 | 8 | 135 | 135 | 85 | 16 | 1 | 0 | 0 | 0 | 33 | 0 |
| 0194 | 1996日向灘地震津波 | 2 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 |
| 0195 | 1996日向灘地震津波 | 2 | 7 | 7 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| W051 | 2001ペルー南部地震津波 | 4 | 63 | 63 | 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 32 | 0 |
| 0201 | 2001与那国島近海津波 | 1 | 6 | 6 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0202 | 2002石垣島南方沖津波 | 1 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0203 | 2002台湾東方沖津波 | 1 | 4 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0204 | 2003十勝沖地震津波 | 11 | 263 | 0 | 177 | 53 | 31 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 0207 | 2004紀伊半島沖地震津波 | 5 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0208 | 2004東海道沖地震津波 | 7 | 16 | 16 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0215 | 2006千島列島東方沖地震津波 | 6 | 114 | 111 | 61 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 49 | 0 |
| 0216 | 2007千島列島東方沖地震津波 | 6 | 97 | 94 | 52 | 2 | 2 | 0 | 0 | 0 | 41 | 0 |
| 0217 | 2007能登半島沖地震津波 | 4 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0218 | 2007新潟県中越沖地震津波 | 7 | 3 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 225 | 2009駿河湾地震津波 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| W057 | 2010チリ地震津波 | 3 | 336 | 1 | 199 | 92 | 61 | 0 | 0 | 0 | 48 | 0 |
| 214 | 2011東北地方太平洋沖地震津波 | 5 | 5907 | 1 | 4721 | 958 | 115 | 17 | 1 | 118 | 1 | 1 |
| | 合計 | 1048 | 32156 | 2885 | 9850 | 4770 | 5506 | 1185 | 156 | 10277 | 511 | |

(注)「津波痕跡データベース」は2018年11月1日以降,サーバーメンテナンスのため運用を停止している(2019年10月26日時点)。そのため,藤原ほか(2015)が2014年7月30日に「津波痕跡データベース」を参照して作成した表を転載することとした。

表 4.1-4 「NGDC/WDS グローバル歴史津波データベース」(NOAA) の検索例
(日本国内の津波痕跡を対象に古い順(本表では 1361 年までに発生した津波)に表示した)



NOAA's NESDIS is the primary source of natural hazards

Tsunami Runup Search - sorted by Date, Country, Location name

Tsunami Runups where Runup Country = JAPAN

View parameter descriptions and access statistical information by clicking on column headings. For additional information about the basinwide earthquake, tsunami runup, or source event, click on the links in the Tsu Src, EQ Name, Volcano, or Tsu Runup column.

Table with columns: Date (Year, Mo, Dy, Hr, Min, Sec), Tsunami Source (Tsu Code, Vol, Sec, EQ Name, Vol, Tsu Runup), Doubtful Runup, Country, State/Province/Prefecture, Name, Latitude, Longitude, Distance from Source, Arrival Time (Day, Hour, Min), Travel Time (Hrs, Min), Max Water Height, Max Inundation Distance, Type, Jct, Injuries (Num, De), Deaths (Num, De), Damage (\$Mill, De), Houses Destroyed (Num, De), Houses Damaged (Num, De). Rows list various tsunami events in Japan from 1361 to 1381.

4.2 南海トラフ沿いの地震による津波痕跡データ

本節では、過去に南海トラフ沿いで発生した 5 つの地震 (1707 年宝永地震, 1854 年安政東海地震, 1854 年安政南海地震, 1944 年昭和東南海地震, 1946 年昭和南海地震) について, 10 章「特性化した波源断層モデルの妥当性の検討」で使用する津波痕跡の選別について説明する. なお, 津波痕跡高と計算津波高の比較方法については 10 章を参照されたい.

表 4.2-1 に対象とする 5 つの地震それぞれについて, 使用する津波痕跡の選別条件と選別後のデータ数をまとめて示す. 津波痕跡のデータは東北大・原子力安全基盤機構の「津波痕跡データベース」(2015 年 8 月 4 日時点)を使用した.

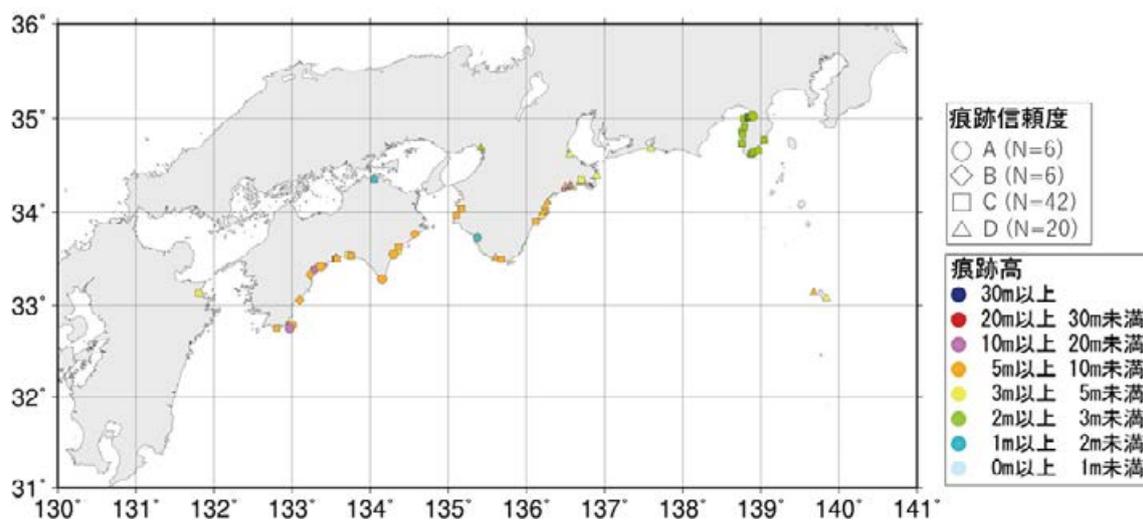
10 章「特性化した波源断層モデルの妥当性の検討」では, 汀線における計算最大水位 (T.P.) と津波痕跡高を比較する. このため, 是永ほか (2013) による津波痕跡データの選別方法を参考に, 痕跡高 50 cm 以上, 汀線からの遡上距離 100 m 以内の津波痕跡データのみ選別して用いることとした. また, 1946 年昭和南海地震については信頼度が最も高い痕跡信頼度 A のデータのみを使用した. 一方, その他 4 つの地震について, 痕跡信頼度 A のみの条件でデータを選別すると, データ数が少なくなり地理的な分布に偏りが生じるため, 痕跡信頼度 A ~ D で選別したデータも使用した.

選別の結果, 1707 年宝永地震, 1854 年安政東海地震, 1854 年安政南海地震, 1944 年昭和東南海地震, 1946 年昭和南海地震それぞれについて, 74, 72, 82, 82, 97 の津波痕跡データを使用することとした. 選別した津波痕跡データの分布図を図 4.2-1 に, リストを表 4.2-2 に示す.

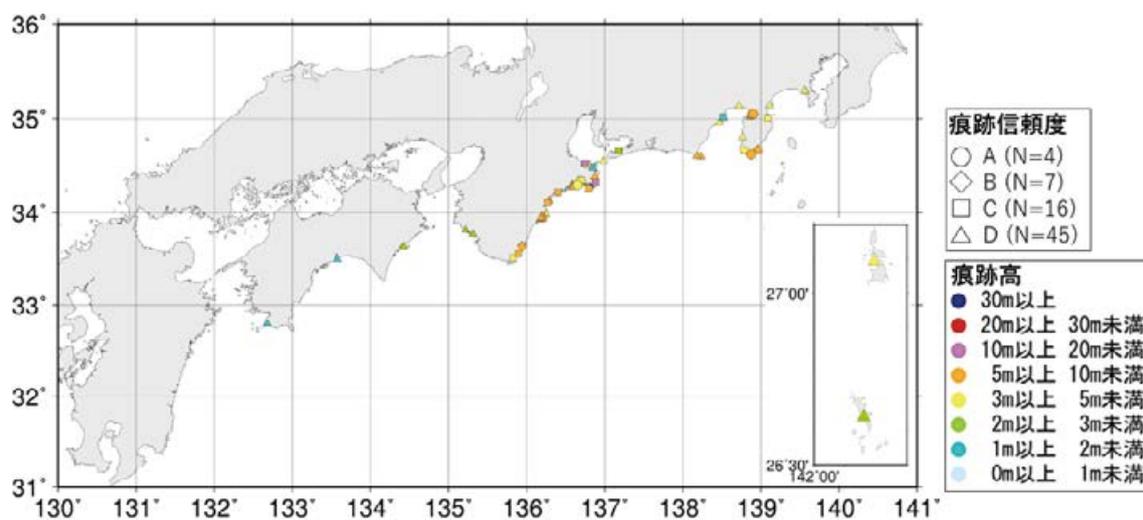
表 4.2-1 10 章「特性化した波源断層モデルの妥当性の検討」で使用する津波痕跡の選別

| 対象とする地震 | データの出典 | データの選別条件 | | | 選別後のデータ数 |
|---------------|---------------|----------|----------|-----------|----------|
| | | 痕跡信頼度 | 痕跡高 | 汀線からの遡上距離 | |
| 1707 年宝永地震 | 「津波痕跡データベース」* | A~D | 50 cm 以上 | 100 m 以内 | 74 |
| 1854 年安政東海地震 | 「津波痕跡データベース」* | A~D | 50 cm 以上 | 100 m 以内 | 72 |
| 1854 年安政南海地震 | 「津波痕跡データベース」* | A~D | 50 cm 以上 | 100 m 以内 | 82 |
| 1944 年昭和東南海地震 | 「津波痕跡データベース」* | A~D | 50 cm 以上 | 100 m 以内 | 82 |
| 1946 年昭和南海地震 | 「津波痕跡データベース」* | A | 50 cm 以上 | 100 m 以内 | 97 |

* 2015 年 8 月 4 日時点のデータを使用した。

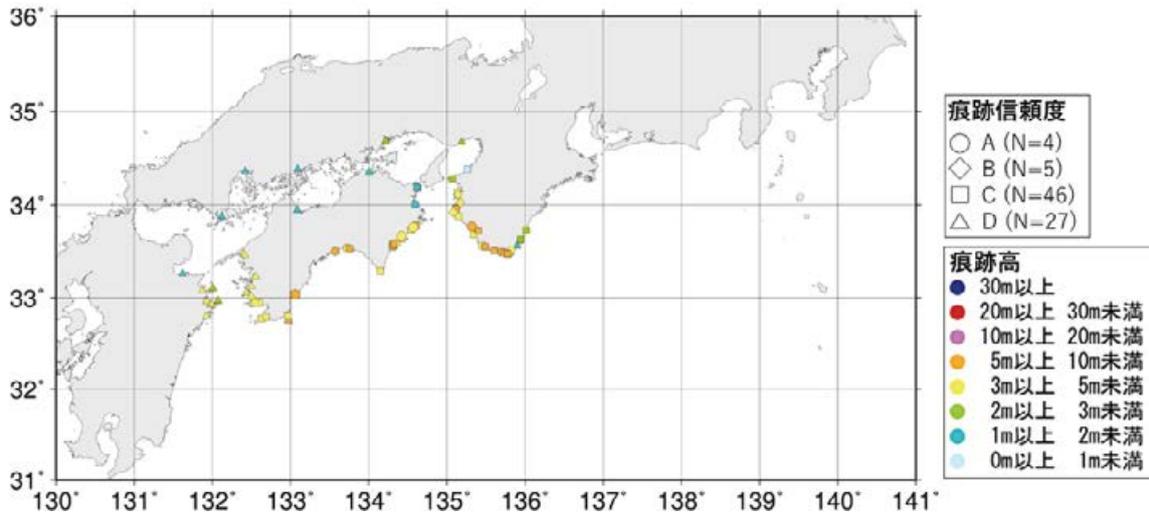


(a) 1707 年宝永地震

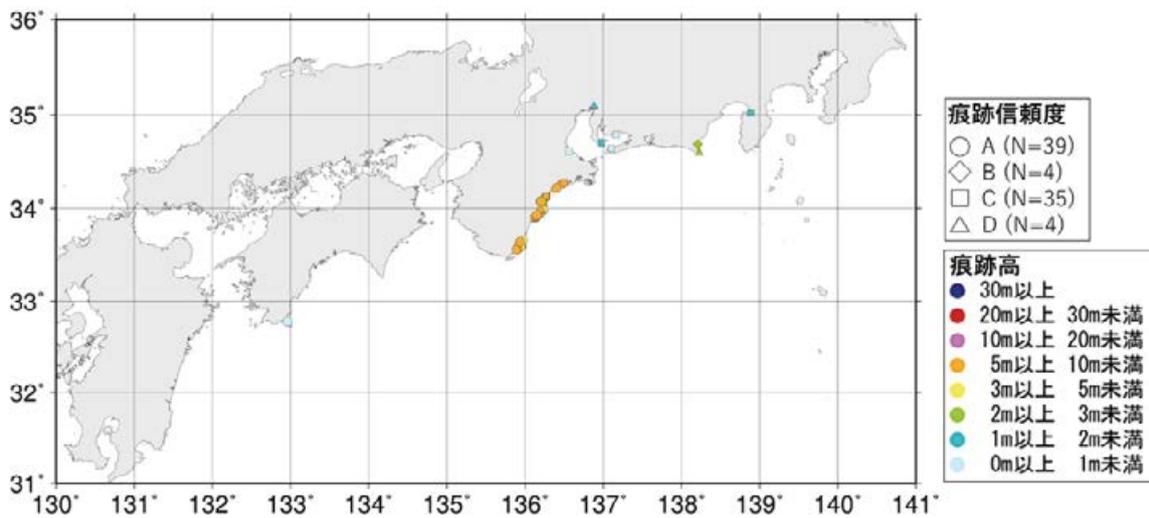


(b) 1854 年安政東海地震

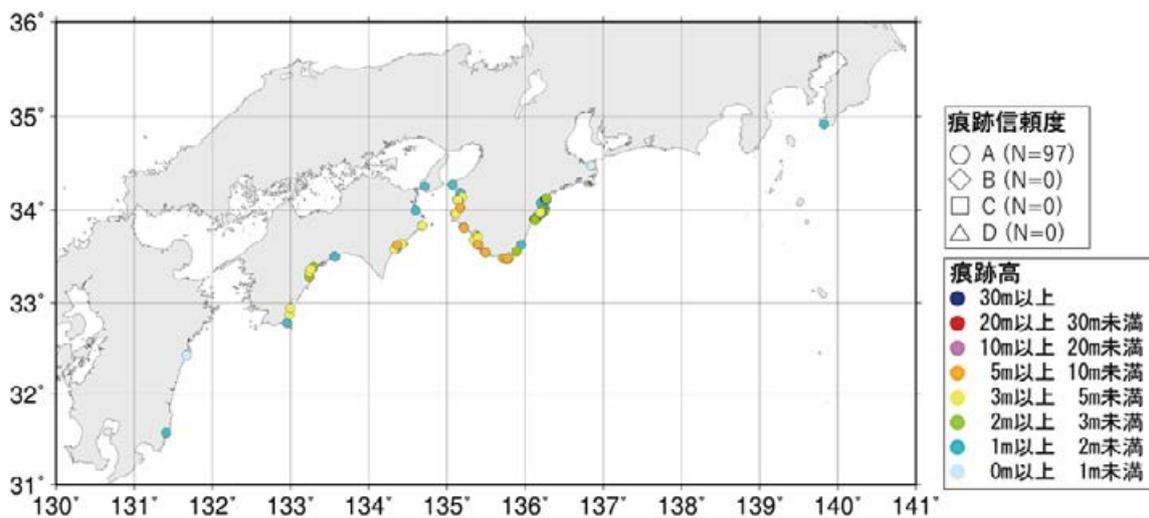
図 4.2-1 選別した津波痕跡データの分布図(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構) (2015 年 8 月 4 日時点)をもとに作成) (1/2)



(c) 1854 年安政南海地震



(d) 1944 年昭和東南海地震



(e) 1946 年昭和南海地震

図 4.2-1 選別した津波痕跡データの分布図(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)(2015年8月4日時点)をもとに作成)(2/2)

表 4.2-2 選別した津波痕跡データのリスト(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)(2015年8月4日時点)
(1/5)

(a) 1707 年宝永地震

| No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 |
|-----|------------|-----------|--------|-------|
| 1 | 138.899002 | 35.025398 | 2.2 | A |
| 2 | 133.369003 | 33.414200 | 5.5 | A |
| 3 | 134.154007 | 33.282398 | 7.1 | A |
| 4 | 134.296997 | 33.548000 | 7.5 | A |
| 5 | 132.996994 | 32.785599 | 8.5 | A |
| 6 | 132.968002 | 32.752701 | 10.1 | A |
| 7 | 135.373001 | 33.730301 | 1.9 | B |
| 8 | 134.570999 | 33.766102 | 6.5 | B |
| 9 | 134.151001 | 33.285198 | 7.5 | B |
| 10 | 133.231003 | 33.327499 | 9.25 | B |
| 11 | 133.098007 | 33.056198 | 9.5 | B |
| 12 | 133.294006 | 33.390800 | 12.6 | B |
| 13 | 134.048996 | 34.354301 | 1.8 | C |
| 14 | 138.755997 | 34.732101 | 2.25 | C |
| 15 | 138.759003 | 34.869900 | 2.25 | C |
| 16 | 138.761993 | 34.738098 | 2.25 | C |
| 17 | 138.768005 | 34.827400 | 2.25 | C |
| 18 | 138.779999 | 35.000702 | 2.25 | C |
| 19 | 138.791000 | 34.910400 | 2.25 | C |
| 20 | 138.837006 | 35.017200 | 2.25 | C |
| 21 | 138.845001 | 35.013401 | 2.25 | C |
| 22 | 138.852997 | 35.015999 | 2.25 | C |
| 23 | 138.856003 | 35.019100 | 2.25 | C |
| 24 | 138.869003 | 35.021500 | 2.25 | C |
| 25 | 138.873001 | 34.619400 | 2.25 | C |
| 26 | 138.878006 | 35.019901 | 2.25 | C |
| 27 | 138.888000 | 34.628799 | 2.25 | C |
| 28 | 138.897003 | 35.026501 | 2.25 | C |
| 29 | 138.914001 | 34.640598 | 2.25 | C |
| 30 | 138.966995 | 34.657398 | 2.25 | C |
| 31 | 139.041000 | 34.772800 | 2.25 | C |
| 32 | 134.360001 | 33.591900 | 3.0 | C |
| 33 | 135.162994 | 34.040298 | 3.0 | C |
| 34 | 133.363007 | 33.426102 | 3.1 | C |
| 35 | 131.804993 | 33.126400 | 3.25 | C |
| 36 | 135.373001 | 33.729900 | 3.5 | C |
| 37 | 133.722000 | 33.540001 | 4.5 | C |
| 38 | 136.701004 | 34.348301 | 4.5 | C |
| 39 | 135.171005 | 34.031101 | 5.0 | C |
| 40 | 135.677994 | 33.490002 | 5.0 | C |
| 41 | 133.557007 | 33.502800 | 5.5 | C |
| 42 | 133.565002 | 33.501701 | 5.5 | C |
| 43 | 133.567993 | 33.498600 | 5.5 | C |
| 44 | 133.574997 | 33.497200 | 5.5 | C |
| 45 | 135.102005 | 33.966599 | 5.5 | C |
| 46 | 136.117996 | 33.900002 | 5.5 | C |
| 47 | 133.757004 | 33.529400 | 6.5 | C |
| 48 | 134.145004 | 33.287498 | 6.5 | C |
| 49 | 134.149002 | 33.285702 | 6.5 | C |
| 50 | 134.360992 | 33.626400 | 6.5 | C |
| 51 | 132.802994 | 32.752499 | 7.0 | C |
| 52 | 133.281006 | 33.385601 | 8.0 | C |
| 53 | 132.968994 | 32.752800 | 8.6 | C |
| 54 | 132.964005 | 32.799702 | 10.0 | C |
| 55 | 135.419006 | 34.687599 | 2.5 | D |
| 56 | 134.052002 | 34.351898 | 3.0 | D |
| 57 | 139.839005 | 33.075001 | 3.0 | D |
| 58 | 136.554993 | 34.614700 | 3.5 | D |
| 59 | 137.597000 | 34.678902 | 3.5 | D |
| 60 | 139.042999 | 34.770901 | 3.5 | D |
| 61 | 136.242004 | 34.063202 | 4.0 | D |
| 62 | 136.723999 | 34.334702 | 4.0 | D |
| 63 | 136.899002 | 34.388100 | 4.0 | D |
| 64 | 136.197998 | 33.964401 | 4.5 | D |
| 65 | 136.565994 | 34.286701 | 4.5 | D |
| 66 | 136.589996 | 34.272301 | 4.5 | D |
| 67 | 135.604004 | 33.509399 | 5.0 | D |
| 68 | 136.244003 | 34.016499 | 5.5 | D |
| 69 | 136.268005 | 34.102901 | 5.5 | D |
| 70 | 139.677002 | 33.134701 | 5.5 | D |
| 71 | 138.964996 | 34.671799 | 6.7 | D |
| 72 | 136.501007 | 34.276299 | 7.0 | D |
| 73 | 136.210999 | 34.000401 | 7.5 | D |
| 74 | 136.556000 | 34.283001 | 10.0 | D |

表 4.2-2 選別した津波痕跡データのリスト(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)(2015年8月4日時点)
(2/5)

(b) 1854 年安政東海地震

| No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 | No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 |
|-----|------------|-----------|--------|-------|-----|------------|-----------|--------|-------|
| 1 | 136.652054 | 34.293610 | 3.6 | A | 51 | 136.980835 | 34.549938 | 4.5 | D |
| 2 | 138.891525 | 35.052090 | 6.0 | A | 52 | 138.879562 | 35.059189 | 4.5 | D |
| 3 | 138.873947 | 34.622940 | 6.4 | A | 53 | 142.194717 | 27.093889 | 4.5 | D |
| 4 | 138.902481 | 35.050751 | 7.2 | A | 54 | 138.763611 | 34.804150 | 4.75 | D |
| 5 | 136.652008 | 34.293949 | 4.0 | B | 55 | 138.791107 | 34.660000 | 4.8 | D |
| 6 | 138.784683 | 34.669361 | 4.4 | B | 56 | 136.791794 | 34.507389 | 5.0 | D |
| 7 | 135.936920 | 33.644169 | 6.0 | B | 57 | 136.873245 | 34.385109 | 5.0 | D |
| 8 | 135.942581 | 33.633781 | 6.0 | B | 58 | 138.232498 | 34.600559 | 5.0 | D |
| 9 | 138.962769 | 34.674648 | 6.7 | B | 59 | 138.860275 | 35.019169 | 5.0 | D |
| 10 | 138.963135 | 34.674419 | 6.7 | B | 60 | 138.868942 | 35.021530 | 5.0 | D |
| 11 | 138.964310 | 34.672951 | 6.7 | B | 61 | 136.217773 | 33.964722 | 5.5 | D |
| 12 | 136.843887 | 34.483608 | 1.05 | C | 62 | 136.287582 | 34.128220 | 5.5 | D |
| 13 | 138.515564 | 35.020279 | 1.06 | C | 63 | 136.172546 | 33.926701 | 6.0 | D |
| 14 | 137.176926 | 34.659859 | 2.7 | C | 64 | 138.180283 | 34.607220 | 6.0 | D |
| 15 | 139.093079 | 35.008331 | 3.0 | C | 65 | 138.901413 | 35.043152 | 6.0 | D |
| 16 | 135.826385 | 33.514999 | 4.0 | C | 66 | 138.959747 | 34.676441 | 6.4 | D |
| 17 | 136.771973 | 34.509720 | 4.5 | C | 67 | 136.587784 | 34.272499 | 6.5 | D |
| 18 | 138.904999 | 35.045921 | 4.5 | C | 68 | 138.883743 | 35.053261 | 6.5 | D |
| 19 | 136.699829 | 34.346470 | 4.75 | C | 69 | 138.964523 | 34.670841 | 6.7 | D |
| 20 | 135.896393 | 33.558331 | 5.0 | C | 70 | 136.196426 | 33.965408 | 7.5 | D |
| 21 | 136.266937 | 34.103329 | 5.0 | C | 71 | 136.209442 | 33.932331 | 7.5 | D |
| 22 | 136.401184 | 34.218300 | 6.0 | C | 72 | 136.180893 | 33.939510 | 8.5 | D |
| 23 | 136.882217 | 34.321671 | 6.1 | C | | | | | |
| 24 | 136.793976 | 34.257381 | 9.0 | C | | | | | |
| 25 | 136.747223 | 34.525002 | 10.6 | C | | | | | |
| 26 | 136.883286 | 34.320099 | 10.6 | C | | | | | |
| 27 | 136.884018 | 34.319118 | 10.6 | C | | | | | |
| 28 | 132.684174 | 32.793892 | 1.0 | D | | | | | |
| 29 | 133.575287 | 33.497501 | 1.65 | D | | | | | |
| 30 | 134.425568 | 33.635559 | 2.0 | D | | | | | |
| 31 | 136.581528 | 34.297020 | 2.0 | D | | | | | |
| 32 | 142.160828 | 26.639780 | 2.0 | D | | | | | |
| 33 | 135.219177 | 33.811192 | 2.4 | D | | | | | |
| 34 | 136.597153 | 34.287971 | 2.5 | D | | | | | |
| 35 | 135.313675 | 33.769440 | 2.55 | D | | | | | |
| 36 | 136.582275 | 34.276131 | 3.0 | D | | | | | |
| 37 | 138.719498 | 35.135761 | 3.0 | D | | | | | |
| 38 | 139.110474 | 35.141579 | 3.0 | D | | | | | |
| 39 | 139.574112 | 35.287941 | 3.0 | D | | | | | |
| 40 | 136.241302 | 33.986641 | 3.5 | D | | | | | |
| 41 | 136.685669 | 34.346062 | 3.5 | D | | | | | |
| 42 | 136.719650 | 34.327950 | 3.5 | D | | | | | |
| 43 | 139.556061 | 35.297249 | 3.5 | D | | | | | |
| 44 | 136.672989 | 34.314320 | 4.0 | D | | | | | |
| 45 | 136.724457 | 34.335060 | 4.0 | D | | | | | |
| 46 | 138.470596 | 34.960388 | 4.0 | D | | | | | |
| 47 | 138.519165 | 35.013062 | 4.0 | D | | | | | |
| 48 | 138.876755 | 34.624081 | 4.0 | D | | | | | |
| 49 | 136.656677 | 34.342781 | 4.5 | D | | | | | |
| 50 | 136.658386 | 34.321011 | 4.5 | D | | | | | |

表 4.2-2 選別した津波痕跡データのリスト(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)(2015年8月4日時点)
(3/5)

(c) 1854 年安政南海地震

| No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 | No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 |
|-----|------------|-----------|--------|-------|-----|------------|-----------|--------|-------|
| 1 | 134.419006 | 33.666599 | 3.6 | A | 51 | 134.608002 | 33.779999 | 5.5 | C |
| 2 | 134.570007 | 33.760101 | 4.8 | A | 52 | 134.425995 | 33.635601 | 6.0 | C |
| 3 | 135.317993 | 33.768101 | 5.6 | A | 53 | 135.774994 | 33.478100 | 6.75 | C |
| 4 | 133.059006 | 33.039700 | 7.5 | A | 54 | 133.035995 | 33.037800 | 8.5 | C |
| 5 | 135.078995 | 33.919201 | 4.0 | B | 55 | 135.401001 | 33.720600 | 9.0 | C |
| 6 | 135.143005 | 34.109402 | 4.5 | B | 56 | 132.119003 | 33.875801 | 1.0 | D |
| 7 | 135.169998 | 34.025600 | 4.5 | B | 57 | 132.419006 | 34.359901 | 1.0 | D |
| 8 | 135.171997 | 34.027302 | 4.8 | B | 58 | 133.087997 | 33.946098 | 1.0 | D |
| 9 | 133.567993 | 33.498600 | 5.0 | B | 59 | 134.007004 | 34.353699 | 1.3 | D |
| 10 | 135.261002 | 34.380299 | 0.9 | C | 60 | 131.619995 | 33.258999 | 1.5 | D |
| 11 | 134.621002 | 34.182499 | 1.05 | C | 61 | 133.091003 | 34.382999 | 1.5 | D |
| 12 | 133.574997 | 33.497501 | 1.32 | C | 62 | 135.895996 | 33.558300 | 1.5 | D |
| 13 | 134.617004 | 34.186298 | 1.5 | C | 63 | 132.007004 | 33.104198 | 2.0 | D |
| 14 | 135.373001 | 33.729698 | 1.5 | C | 64 | 132.072006 | 32.966702 | 2.0 | D |
| 15 | 134.593002 | 34.006401 | 1.75 | C | 65 | 134.214996 | 34.683601 | 2.0 | D |
| 16 | 135.070999 | 34.275398 | 2.0 | C | 66 | 135.188995 | 34.671101 | 2.0 | D |
| 17 | 135.944000 | 33.626999 | 2.0 | C | 67 | 131.867996 | 33.076302 | 3.0 | D |
| 18 | 136.013000 | 33.726898 | 2.0 | C | 68 | 131.921997 | 32.800598 | 3.0 | D |
| 19 | 134.149002 | 33.285702 | 3.0 | C | 69 | 131.923996 | 32.964401 | 3.0 | D |
| 20 | 132.628998 | 32.772202 | 3.3 | C | 70 | 131.975998 | 32.921700 | 3.0 | D |
| 21 | 134.307999 | 33.571701 | 3.3 | C | 71 | 131.994003 | 32.921902 | 3.0 | D |
| 22 | 132.591003 | 32.946098 | 3.5 | C | 72 | 132.397003 | 33.476898 | 3.0 | D |
| 23 | 134.360001 | 33.591900 | 3.5 | C | 73 | 132.417007 | 33.457298 | 3.0 | D |
| 24 | 135.149002 | 33.879700 | 3.5 | C | 74 | 132.432999 | 33.053101 | 3.0 | D |
| 25 | 134.300995 | 33.547501 | 3.6 | C | 75 | 132.496002 | 33.016701 | 3.0 | D |
| 26 | 132.602997 | 32.944099 | 3.75 | C | 76 | 132.500000 | 33.123299 | 3.0 | D |
| 27 | 132.684998 | 32.789700 | 4.0 | C | 77 | 132.511002 | 32.939701 | 4.0 | D |
| 28 | 133.722000 | 33.540001 | 4.0 | C | 78 | 132.550995 | 32.964199 | 4.0 | D |
| 29 | 135.132996 | 34.131901 | 4.0 | C | 79 | 132.552994 | 33.229801 | 4.0 | D |
| 30 | 135.445999 | 33.561501 | 4.0 | C | 80 | 132.602997 | 32.946400 | 5.0 | D |
| 31 | 134.541000 | 33.731899 | 4.05 | C | 81 | 132.968002 | 32.752201 | 5.0 | D |
| 32 | 132.548004 | 32.945801 | 4.5 | C | 82 | 134.307999 | 33.562801 | 7.0 | D |
| 33 | 132.964005 | 32.799702 | 4.5 | C | | | | | |
| 34 | 135.343994 | 33.682499 | 4.5 | C | | | | | |
| 35 | 135.716003 | 33.485001 | 4.5 | C | | | | | |
| 36 | 135.781006 | 33.468300 | 4.5 | C | | | | | |
| 37 | 135.792999 | 33.486698 | 4.5 | C | | | | | |
| 38 | 133.574997 | 33.497200 | 4.75 | C | | | | | |
| 39 | 135.824997 | 33.515301 | 4.75 | C | | | | | |
| 40 | 133.757004 | 33.529400 | 5.0 | C | | | | | |
| 41 | 134.313004 | 33.557800 | 5.0 | C | | | | | |
| 42 | 135.490997 | 33.549301 | 5.0 | C | | | | | |
| 43 | 135.604004 | 33.509399 | 5.0 | C | | | | | |
| 44 | 135.701004 | 33.493599 | 5.0 | C | | | | | |
| 45 | 135.737000 | 33.485600 | 5.0 | C | | | | | |
| 46 | 135.117996 | 33.959400 | 5.25 | C | | | | | |
| 47 | 133.072006 | 33.037800 | 5.5 | C | | | | | |
| 48 | 134.306000 | 33.561401 | 5.5 | C | | | | | |
| 49 | 134.322998 | 33.582802 | 5.5 | C | | | | | |
| 50 | 134.593994 | 33.773602 | 5.5 | C | | | | | |

表 4.2-2 選別した津波痕跡データのリスト(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)(2015年8月4日時点)
(4/5)

(d) 1944年昭和東南海地震

| No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 | No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 |
|-----|------------|-----------|--------|-------|-----|------------|-----------|--------|-------|
| 1 | 132.958893 | 32.779171 | 0.5 | A | 51 | 136.107040 | 33.890869 | 3.0 | C |
| 2 | 135.945724 | 33.627998 | 2.0 | A | 52 | 136.254166 | 34.113789 | 3.0 | C |
| 3 | 135.946777 | 33.633331 | 2.0 | A | 53 | 136.261703 | 34.122749 | 3.0 | C |
| 4 | 135.940994 | 33.621422 | 2.1 | A | 54 | 136.212265 | 34.063110 | 3.41 | C |
| 5 | 135.942169 | 33.622139 | 2.1 | A | 55 | 136.218887 | 34.080391 | 3.52 | C |
| 6 | 135.901367 | 33.563251 | 2.4 | A | 56 | 136.211243 | 34.000450 | 3.9 | C |
| 7 | 135.950562 | 33.624969 | 2.4 | A | 57 | 136.241104 | 33.986641 | 3.9 | C |
| 8 | 135.923355 | 33.576920 | 2.5 | A | 58 | 136.128265 | 33.893639 | 4.2 | C |
| 9 | 136.202774 | 34.077301 | 2.5 | A | 59 | 136.200714 | 33.945190 | 4.65 | C |
| 10 | 135.905365 | 33.564999 | 2.6 | A | 60 | 136.204376 | 34.077469 | 4.95 | C |
| 11 | 135.904144 | 33.559811 | 2.7 | A | 61 | 136.200775 | 34.071999 | 5.08 | C |
| 12 | 135.899567 | 33.557220 | 3.0 | A | 62 | 136.206787 | 34.077759 | 5.25 | C |
| 13 | 135.932388 | 33.594471 | 3.0 | A | 63 | 136.466675 | 34.256939 | 5.25 | C |
| 14 | 135.944504 | 33.632832 | 3.0 | A | 64 | 136.195236 | 33.966789 | 5.3 | C |
| 15 | 135.951187 | 33.627281 | 3.0 | A | 65 | 136.128326 | 33.893002 | 5.5 | C |
| 16 | 135.958221 | 33.653309 | 3.0 | A | 66 | 136.138367 | 33.898849 | 5.5 | C |
| 17 | 135.969284 | 33.655560 | 3.0 | A | 67 | 136.197174 | 33.965149 | 5.5 | C |
| 18 | 135.947586 | 33.589691 | 3.1 | A | 68 | 136.172623 | 33.926128 | 5.9 | C |
| 19 | 135.897858 | 33.561970 | 3.2 | A | 69 | 136.399399 | 34.219810 | 6.0 | C |
| 20 | 135.896362 | 33.560780 | 3.5 | A | 70 | 136.461395 | 34.254440 | 6.0 | C |
| 21 | 135.935776 | 33.593529 | 3.5 | A | 71 | 136.501114 | 34.277500 | 6.0 | C |
| 22 | 135.944824 | 33.591969 | 3.5 | A | 72 | 136.146957 | 33.925339 | 6.1 | C |
| 23 | 135.945816 | 33.589939 | 3.5 | A | 73 | 136.148239 | 33.924278 | 6.1 | C |
| 24 | 135.897308 | 33.556999 | 3.6 | A | 74 | 136.272354 | 34.126732 | 6.65 | C |
| 25 | 135.894577 | 33.556221 | 3.7 | A | 75 | 136.267197 | 34.127861 | 6.8 | C |
| 26 | 135.934067 | 33.593189 | 4.0 | A | 76 | 136.271667 | 34.128429 | 7.32 | C |
| 27 | 135.936676 | 33.596939 | 4.0 | A | 77 | 136.267883 | 34.129570 | 7.65 | C |
| 28 | 135.895493 | 33.556358 | 4.2 | A | 78 | 136.149445 | 33.931900 | 8.4 | C |
| 29 | 135.943054 | 33.592972 | 4.4 | A | 79 | 136.880829 | 35.091389 | 1.25 | D |
| 30 | 135.894943 | 33.558670 | 4.6 | A | 80 | 138.225449 | 34.595131 | 2.0 | D |
| 31 | 136.199936 | 34.074890 | 4.62 | A | 81 | 136.217209 | 33.964581 | 4.55 | D |
| 32 | 135.891418 | 33.558170 | 4.8 | A | 82 | 136.247223 | 33.985561 | 9.09 | D |
| 33 | 135.891220 | 33.557140 | 5.3 | A | | | | | |
| 34 | 135.890747 | 33.556252 | 6.2 | A | | | | | |
| 35 | 136.400146 | 34.216541 | 6.2 | A | | | | | |
| 36 | 135.936279 | 33.637501 | 6.3 | A | | | | | |
| 37 | 136.147263 | 33.924839 | 6.71 | A | | | | | |
| 38 | 136.206955 | 34.075699 | 6.8 | A | | | | | |
| 39 | 136.207214 | 34.076542 | 6.8 | A | | | | | |
| 40 | 138.207855 | 34.686729 | 2.0 | B | | | | | |
| 41 | 135.936554 | 33.644089 | 3.8 | B | | | | | |
| 42 | 135.892227 | 33.558331 | 4.1 | B | | | | | |
| 43 | 136.205566 | 34.077419 | 5.32 | B | | | | | |
| 44 | 137.103806 | 34.639561 | 0.5 | C | | | | | |
| 45 | 137.163696 | 34.786621 | 0.5 | C | | | | | |
| 46 | 136.557846 | 34.610809 | 0.6 | C | | | | | |
| 47 | 136.975830 | 34.701389 | 1.0 | C | | | | | |
| 48 | 138.890274 | 35.017220 | 1.1 | C | | | | | |
| 49 | 136.241623 | 34.063469 | 2.89 | C | | | | | |
| 50 | 135.977783 | 33.658611 | 3.0 | C | | | | | |

表 4.2-2 選別した津波痕跡データのリスト(「津波痕跡データベース」(東北大・原子力安全基盤機構)(2015年8月4日時点)
(5/5)

(e) 1946 年昭和南海地震

| No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 | No. | 経度 | 緯度 | 痕跡高(m) | 痕跡信頼度 |
|-----|------------|-----------|--------|-------|-----|------------|-----------|--------|-------|
| 1 | 136.845993 | 34.477901 | 0.68 | A | 51 | 135.891006 | 33.556900 | 2.73 | A |
| 2 | 136.845993 | 34.477299 | 0.69 | A | 52 | 136.197998 | 33.964401 | 2.77 | A |
| 3 | 136.845993 | 34.478600 | 0.7 | A | 53 | 136.197006 | 33.965401 | 2.83 | A |
| 4 | 136.246002 | 34.016102 | 0.73 | A | 54 | 135.139008 | 34.118900 | 2.9 | A |
| 5 | 136.242996 | 34.106201 | 0.78 | A | 55 | 133.292999 | 33.388100 | 2.96 | A |
| 6 | 136.264999 | 34.102001 | 0.82 | A | 56 | 136.195007 | 33.973099 | 3.02 | A |
| 7 | 131.669006 | 32.428299 | 0.85 | A | 57 | 135.169998 | 34.025799 | 3.03 | A |
| 8 | 136.259003 | 34.096901 | 0.89 | A | 58 | 135.386993 | 33.716900 | 3.15 | A |
| 9 | 133.557007 | 33.504398 | 0.92 | A | 59 | 134.423004 | 33.636700 | 3.17 | A |
| 10 | 139.824997 | 34.918900 | 1.0 | A | 60 | 135.373001 | 33.730000 | 3.23 | A |
| 11 | 136.268005 | 34.102901 | 1.11 | A | 61 | 132.985001 | 32.867500 | 3.29 | A |
| 12 | 136.253006 | 34.014702 | 1.12 | A | 62 | 133.238998 | 33.333099 | 3.3 | A |
| 13 | 136.244003 | 34.016499 | 1.25 | A | 63 | 135.395996 | 33.715599 | 3.31 | A |
| 14 | 131.408997 | 31.576900 | 1.3 | A | 64 | 134.684998 | 33.831100 | 3.36 | A |
| 15 | 136.242996 | 34.015202 | 1.4 | A | 65 | 132.996002 | 32.939201 | 3.5 | A |
| 16 | 136.117996 | 33.899399 | 1.46 | A | 66 | 135.136002 | 34.111401 | 3.5 | A |
| 17 | 136.201004 | 34.075199 | 1.48 | A | 67 | 135.195999 | 34.142799 | 3.58 | A |
| 18 | 136.151001 | 33.923901 | 1.49 | A | 68 | 135.343994 | 33.680801 | 3.61 | A |
| 19 | 135.947006 | 33.628300 | 1.57 | A | 69 | 135.141006 | 34.111401 | 3.65 | A |
| 20 | 136.257004 | 34.117599 | 1.59 | A | 70 | 135.794998 | 33.489700 | 3.67 | A |
| 21 | 135.072006 | 34.275002 | 1.6 | A | 71 | 134.326996 | 33.581902 | 3.73 | A |
| 22 | 135.947006 | 33.627602 | 1.6 | A | 72 | 135.143005 | 34.109699 | 3.75 | A |
| 23 | 134.360001 | 33.592499 | 1.61 | A | 73 | 135.393005 | 33.718300 | 3.77 | A |
| 24 | 135.945999 | 33.627701 | 1.62 | A | 74 | 135.789001 | 33.482498 | 3.78 | A |
| 25 | 134.598007 | 34.000801 | 1.66 | A | 75 | 135.395996 | 33.714401 | 3.8 | A |
| 26 | 136.218002 | 33.967400 | 1.67 | A | 76 | 135.139008 | 34.110600 | 3.88 | A |
| 27 | 135.141998 | 34.109402 | 1.7 | A | 77 | 135.102997 | 33.965801 | 4.0 | A |
| 28 | 134.714996 | 34.255299 | 1.76 | A | 78 | 135.113998 | 33.960602 | 4.02 | A |
| 29 | 136.218994 | 33.968300 | 1.78 | A | 79 | 135.714005 | 33.485802 | 4.05 | A |
| 30 | 133.569000 | 33.498901 | 1.79 | A | 80 | 135.792999 | 33.485802 | 4.58 | A |
| 31 | 132.955994 | 32.778599 | 1.86 | A | 81 | 135.492004 | 33.548901 | 4.6 | A |
| 32 | 136.261002 | 34.121498 | 1.87 | A | 82 | 133.259003 | 33.364700 | 4.7 | A |
| 33 | 136.240997 | 33.986401 | 1.89 | A | 83 | 135.487000 | 33.549999 | 5.0 | A |
| 34 | 135.171997 | 34.185600 | 1.9 | A | 84 | 135.167007 | 34.026699 | 5.03 | A |
| 35 | 136.149994 | 33.931499 | 1.91 | A | 85 | 134.362000 | 33.625900 | 5.09 | A |
| 36 | 136.264008 | 34.125198 | 1.96 | A | 86 | 134.363007 | 33.624298 | 5.09 | A |
| 37 | 136.121002 | 33.898800 | 2.0 | A | 87 | 135.397995 | 33.628101 | 5.25 | A |
| 38 | 136.128006 | 33.893600 | 2.12 | A | 88 | 135.738998 | 33.484402 | 5.3 | A |
| 39 | 136.242996 | 33.986000 | 2.14 | A | 89 | 135.395996 | 33.630798 | 5.55 | A |
| 40 | 136.272995 | 34.127602 | 2.16 | A | 90 | 135.733994 | 33.485001 | 5.57 | A |
| 41 | 136.268005 | 34.128601 | 2.22 | A | 91 | 135.494003 | 33.545601 | 5.8 | A |
| 42 | 136.270996 | 34.128799 | 2.29 | A | 92 | 135.399002 | 33.630798 | 5.83 | A |
| 43 | 136.214005 | 34.001400 | 2.31 | A | 93 | 135.397003 | 33.631401 | 5.84 | A |
| 44 | 136.205994 | 33.976002 | 2.35 | A | 94 | 135.774994 | 33.475800 | 5.96 | A |
| 45 | 133.240997 | 33.278099 | 2.4 | A | 95 | 135.216003 | 33.814400 | 6.11 | A |
| 46 | 133.240997 | 33.279999 | 2.5 | A | 96 | 135.218002 | 33.810001 | 6.11 | A |
| 47 | 136.203003 | 33.971802 | 2.53 | A | 97 | 135.772995 | 33.478901 | 6.6 | A |
| 48 | 136.210999 | 34.000099 | 2.59 | A | | | | | |
| 49 | 133.242004 | 33.277199 | 2.7 | A | | | | | |
| 50 | 135.171005 | 34.026798 | 2.72 | A | | | | | |

4 章の参考文献

- 1) 藤原広行・平田賢治・中村洋光・長田正樹・森川信之・河合伸一・大角恒雄・青井真・松山尚典・遠山信彦・鬼頭直・村嶋陽一・村田泰洋・井上拓也・斎藤龍・秋山伸一・是永真理子・阿部雄太・橋本紀彦 (2015) : 日本海溝に発生する地震による確率論的津波ハザード評価の手法の検討. 防災科学技術研究所研究資料, **400**, 216pp.
- 2) 是永真理子・阿部雄太・橋本紀彦・秋山伸一・藤原広行 (2013) : 確率論的津波ハザード評価における不確実さの取り扱いについて, 日本地球惑星科学連合同学会, SSS35-P06.
- 3) National Oceanic and Atmospheric Administration: NGDC/WDS Global Historical Tsunami Database, https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml (2019 年 10 月 26 日参照).
- 4) 産業技術総合研究所地質調査総合センター : 津波堆積物データベース, https://gbank.gsj.jp/tsunami_deposit_db/index.html (2019 年 10 月 26 日参照).
- 5) 東北大学災害科学国際研究所津波工学研究分野・原子力安全基盤機構 : 津波痕跡データベース, <http://irides.tohoku.ac.jp/project/tsunami-db.html> (2015 年 8 月 4 日参照).
- 6) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ (2012) : 痕跡調査結果, <http://www.coastal.jp/ttjt/index.php?> 現地調査結果 (2019 年 10 月 26 日参照).