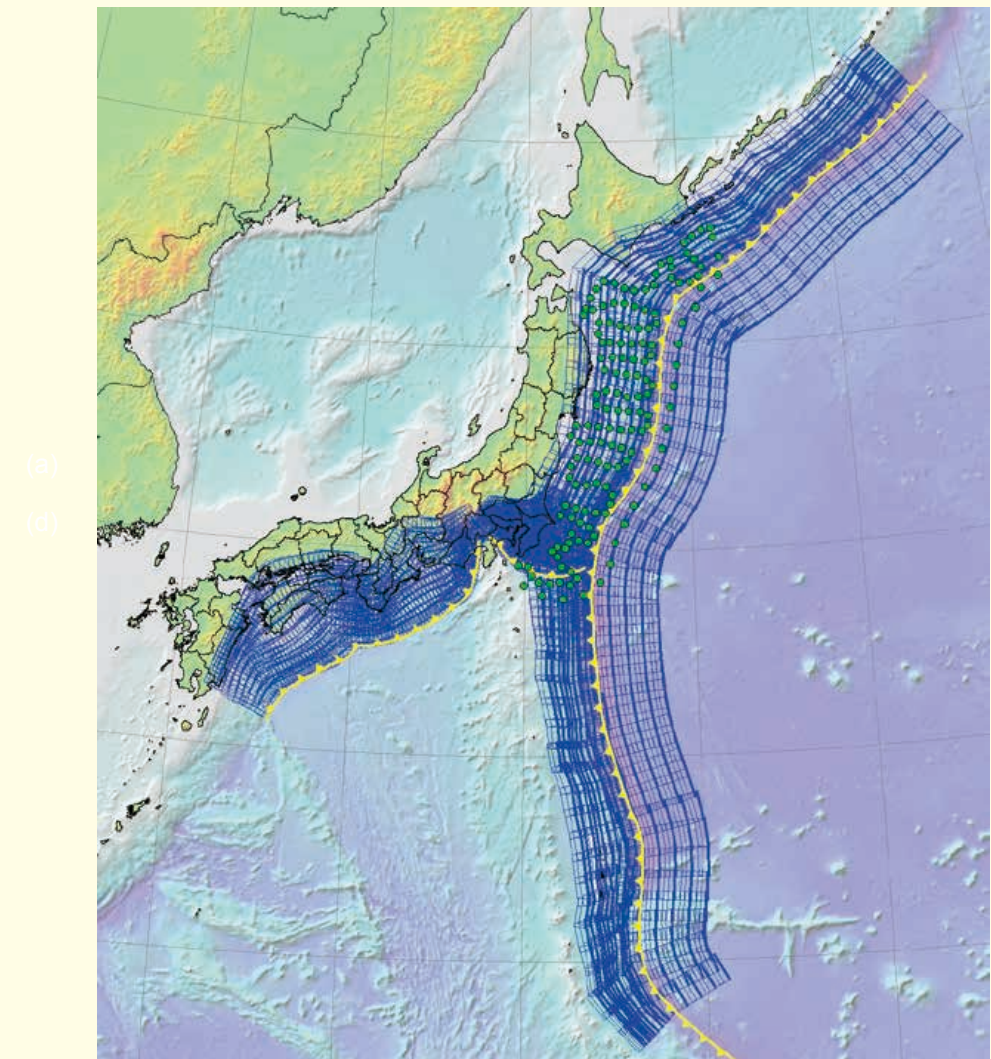


津波浸水の即時予測を目的とした 津波シナリオバンクの構築

Design of Tsunami Scenario Bank for Real-Time Tsunami Inundation Forecast



防災科学技術研究所研究資料 第四三〇号

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

防災科学技術研究所

防災科学技術研究所研究資料

- 第 362 号 地すべり地形分布図 第 49 集「旭川」16 葉(5 万分の 1)．2011 年 11 月発行
- 第 363 号 長岡における積雪観測資料(33) (2010/11 冬期) 29pp. 2012 年 2 月発行
- 第 364 号 新庄における気象と降積雪の観測(2010/11 年冬期) 45pp. 2012 年 2 月発行
- 第 365 号 地すべり地形分布図 第 50 集「名寄」16 葉(5 万分の 1)．2012 年 3 月発行
- 第 366 号 浅間山高峰火山観測井コア試料の岩相と層序(付録 CD-ROM) 30pp. 2012 年 2 月発行
- 第 367 号 防災科学技術研究所による関東・東海地域における水圧破砕井の孔井検層データ 29pp. 2012 年 3 月発行
- 第 368 号 台風災害被害データの比較について(1951 年～2008 年，都道府県別資料)(付録 CD-ROM)19pp. 2012 年 5 月発行
- 第 369 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験研究報告書-実在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験及びその解析-(付録 DVD) 64pp. 2012 年 10 月発行
- 第 370 号 強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部地盤統合モデルの検討(付録 CD-ROM) 410pp. 2013 年 3 月発行
- 第 371 号 野島断層における深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果(平林・岩屋・甲山)(付録 CD-ROM) 27pp. 2012 年 12 月発行
- 第 372 号 長岡における積雪観測資料(34) (2011/12 冬期) 31pp. 2012 年 11 月発行
- 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ーディフェンス加振実験 報告書 ー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ー 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溪の長期変動観測(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ー現状の課題と新技術ープロシーディング 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

防災科学技術研究所研究資料

- 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 ー改訂版ー 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 ー改修されたため池堤体の耐震性能検証ー 87pp. 2017 年 2 月発行
- 第 411 号 土砂災害予測に関する研究会ー熊本地震とその周辺ープロシーディング 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 ー多時期ペアの差分干渉 SAR 解析による地震後の変動抽出ー 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 ー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ー 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
- 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 ー不飽和化液状化対策模型地盤を用いた模型振動台実験ー 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 ー液状化による浮き上がり防止に関する排水性能の確認ー 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ー原位置液状化強度の評価に向けた土槽実験の試みー 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ー被災調査から現地への適用に至るまでー 114pp. 2019 年 2 月発行
- 第 427 号 津波シミュレータ TNS の開発 70pp. 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

－編集委員会－		防災科学技術研究所研究資料 第 430 号
(委員長)	浅野 陽一	平成 31 年 3 月 28 日 発行
(委 員)		
三輪 学央	下瀬 健一	編集兼 国立研究開発法人
河合 伸一	平島 寛行	発行者 防 災 科 学 技 術 研 究 所
中村 いずみ	市橋 歩	〒 305-0006
(事務局)		茨城県つくば市天王台 3－1
白田 裕一郎	前田 佐知子	電話 (029)863-7635
池田 千春		http://www.bosai.go.jp/
(編集・校正)	樋山 信子	印刷所 前 田 印 刷 株 式 会 社
		茨 城 県 つ く ば 市 山 中 152-4

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience 2019

※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。

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

近貞直孝^{*1}・鈴木 亘^{*1}・三好崇之^{*1}・青井 真^{*1}・根本 信^{*2}・大嶋健嗣^{*2}・
松山尚典^{*2}・高山淳平^{*3}・井上拓也^{*3}・村田泰洋^{*3}・佐竹次郎^{*3}・阿部雄太^{*4}・
是永真理子^{*4}・橋本紀彦^{*4}・赤木 翔^{*5}

Design of Tsunami Scenario Bank for Real-Time Tsunami Inundation Forecast

Naotaka Chikasada^{*1}, Wataru Suzuki^{*1}, Takayuki Miyoshi^{*1}, Shin Aoi^{*1}, Makoto Nemoto^{*2}, Kenshi Oshima^{*2},
Hisanori Matsuyama^{*2}, Jumpei Takayama^{*3}, Takuya Inoue^{*3}, Yasuhiro Murata^{*3}, Jiro Satake^{*3}, Yuta Abe^{*4},
Mariko Korenaga^{*4}, Norihiko Hashimoto^{*4}, and Sho Akagi^{*5}

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

naotaka@bosai.go.jp

^{*2} *OYO Corporation*

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

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

^{*5} *Mitsubishi Space Software Co., Ltd.*

Abstract

We have developed a new algorithm for a real-time tsunami inundation forecast in the Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program (SIP) titled “Enhancement of societal resiliency against natural disasters” using ocean bottom pressure changes taken by the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis along the Japan Trench (S-net). In this algorithm, we need to prepare the Tsunami Scenario Bank (TSB), which contains offshore tsunami waveforms at the observatory locations and the maximum tsunami height distributions, inundation depths and arrival times along the target coastal region. Ideally, TSB should contain tsunami information for all possible tsunami sources that may affect the target region, but it is impossible to prepare them in a finite time and computer resources. This technical note provides how we designed TSB for real-time tsunami inundation forecast and constructed the TSB for the Pacific coast of Chiba prefecture. Furthermore, to evaluate the propriety of our algorithm called the Multi-index method, we investigate pseudo tsunami scenarios represented paleo-tsunamis.

Key words: Tsunami, Real-time tsunami inundation forecast, Tsunami Scenario Bank, S-net, SIP

^{*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

^{*5} 三菱スペース・ソフトウェア株式会社

目 次

1. 津波遡上即時予測手法の概要	1
1.1 予測手法開発の経緯および目的	1
1.2 予測手法の仕組み	2
1.2.1 S-net 観測網および観測データの概要	2
1.2.2 予測手法と津波シナリオバンクの概要	3
1.2.3 津波シナリオバンクの構成	4
1.2.4 予測結果の例	4
2. 津波の計算手法と各種データ	6
2.1 計算手法	6
2.1.1 初期水位の計算手法	6
2.1.2 沖合津波の計算手法	7
2.1.3 陸域浸水の計算手法	10
2.1.4 津波到達時間の計算手法	12
2.2 基礎データの作成方法	13
2.2.1 計算領域	14
2.2.1.1 沖合津波の計算領域	14
2.2.1.2 陸域浸水の計算領域	15
2.2.1.3 概観津波の計算領域	16
2.2.1.4 遠地津波の計算領域	16
2.2.2 地形標高データ	17
2.2.3 粗度係数データ	21
2.2.4 構造物ラインデータ	22
2.2.5 陸判定マップデータ	24
2.2.6 沿岸水位抽出点データ	24
2.2.7 堤外マスクデータ	25
2.2.8 領域マスクデータ	25
2.2.9 市区町村判定マップデータ	25
2.2.10 人口データ	26
2.2.11 観測点データ	26
2.3 波源断層データ	27
2.3.1 断層パラメータ	27
2.3.2 動的震源特性パラメータ	27
2.3.3 鉛直地殻変動量の計算手法	27
2.3.4 水平地殻変動による水位変化量の計算手法	27
2.3.5 初期津波高の計算手法	27
2.4 津波シナリオデータ	28
2.4.1 時系列水位データ	28
2.4.2 時系列全水深データ	28
2.4.3 最大水位および最大相対水位データ	29
2.4.4 水位到達時間および相対水位到達時間データ	29
2.4.5 最大浸水深および浸水深到達時間データ	29

3. 津波シナリオバンクの構築	30
3.1 対象とする波源	30
3.1.1 対象とする波源のタイプ	30
3.1.2 対象とする波源域	30
3.1.2.1 近地津波の波源域	30
3.1.2.2 遠地津波の波源域	31
3.1.3 対象とする津波の規模	31
3.2 プレート上面形状モデルの設定	32
3.2.1 太平洋プレート上面形状モデル	32
3.2.2 フィリピン海プレート上面形状モデル	33
3.3 波源断層モデルの設定	34
3.3.1 波源断層モデルの基本的な考え方	34
3.3.2 M_0 -S 関係式	34
3.3.3 プレート間地震の波源断層モデルの設定	36
3.3.3.1 設定範囲	36
3.3.3.2 地震規模	36
3.3.3.3 断層長さ、幅	36
3.3.3.4 断層すべり量	37
3.3.3.5 断層すべり角	37
3.3.3.6 断層設定範囲の下限深さ	39
3.3.3.7 深さ方向の断層配置間隔	39
3.3.3.8 走向方向の断層設定間隔	39
3.3.3.9 要素断層の設定	39
3.3.3.10 矩形断層モデルの設定	42
3.3.3.11 要素断層モデルの設定	43
3.3.3.12 矩形断層モデルと要素断層モデルの比較	45
3.3.3.13 規模の大きい地震の矩形断層モデルの評価	47
3.3.3.14 設定した波源断層モデル	49
3.3.4 アウターライズ地震の波源断層モデルの設定	54
3.3.4.1 設定範囲	54
3.3.4.2 地震規模	54
3.3.4.3 断層配置間隔	54
3.3.4.4 断層傾斜方向	54
3.3.4.5 その他の断層パラメータ	54
3.3.4.6 設定した波源断層モデル	55
3.3.5 大陸プレート内地震の波源断層モデルの設定	57
3.3.6 遠地地震の波源断層モデルの設定	60
3.3.6.1 設定範囲	60
3.3.6.2 地震規模	60
3.3.6.3 $M_w8.5$ および $M_w9.0$ の波源断層モデルの設定	60
3.3.6.4 $M_w9.5$ の波源断層モデルの設定	61
3.3.6.5 設定した波源断層モデル	62
3.4 シナリオの分析	63
3.4.1 類似性の指標	63

3.4.1.1 沖合水圧分布比較用の Variance Reduction (VR)	63
3.4.1.2 沿岸波高分布比較用の Variance Reduction (HVR)	63
3.4.1.3 浸水深および浸水域比較用の Variance Reduction (DVR および SVR)	64
3.4.2 最大相対水位の最大値および平均値.....	66
3.4.3 地震規模に関する感度分析.....	70
3.4.4 走向方向の位置に関する感度分析.....	71
3.4.5 深さ方向の位置に関する感度分析.....	74
3.4.6 断層の走向角・傾斜角・上端深さおよび形状に関する感度分析.....	76
3.4.7 大陸プレート内地震の感度分析.....	78
3.4.8 M_0 -S 関係式の係数に関する分析	81
3.4.8.1 波源断層モデルの設定.....	81
3.4.8.2 計算結果の比較.....	82
3.4.9 断層すべりの不均質性に関する分析.....	86
3.4.9.1 波源断層モデルの設定.....	86
3.4.9.2 計算結果の比較.....	87
3.4.10 波源断層モデルの動的特性に関する感度分析.....	91
3.5 構造物条件の設定.....	93
3.5.1 3 種類の構造物条件.....	93
3.5.1.1 構造物が損傷しない場合 (BC1)	93
3.5.1.2 構造物が大きく損傷する場合 (BC2)	93
3.5.1.3 津波の高さに応じて構造物の損傷率を考慮する場合 (BCF)	94
3.5.2 構造物条件と浸水の関係.....	95
3.5.2.1 地震規模による浸水傾向.....	95
3.5.2.2 浸水面積の大小関係の分析.....	96
3.5.2.3 浸水分布の類似度.....	102
3.5.2.4 構造物条件の設定の考え方.....	102
3.6 構築した津波シナリオバンク.....	103
3.6.1 津波シナリオバンクの種類と対象地域.....	103
3.6.2 千葉県九十九里・外房地域の即時予測のための津波シナリオバンク.....	103
3.6.3 房総半島～根室半島の太平洋沿岸の概観的な予測のための津波シナリオバンク.....	105
4. 津波遡上即時予測システムの適用性の検証	107
4.1 シナリオ選別アルゴリズム.....	107
4.1.1 Multi-index 法によるシナリオ選別	107
4.1.2 指標の定義.....	108
4.1.3 シナリオ選別の条件.....	108
4.2 既往地震モデルの疑似観測シナリオによる検証.....	109
4.2.1 シナリオ選別の結果.....	109
4.2.1.1 869 年貞観地震.....	110
4.2.1.2 500 年間隔地震.....	112
4.2.1.3 1677 年延宝房総沖地震.....	114
4.2.1.4 1896 年明治三陸地震.....	116
4.2.1.5 1933 年昭和三陸地震.....	118
4.2.1.6 1968 年十勝沖地震.....	120

4.2.1.7	2003 年十勝沖地震.....	122
4.2.1.8	2011 年東北地方太平洋沖地震.....	124
4.2.1.9	1703 年元禄地震.....	126
4.2.1.10	1923 年大正関東地震.....	127
4.2.2	シナリオ選別結果の概要.....	128
4.3	2016 年福島県沖の地震の観測データによる検証.....	134
4.3.1	地震および津波の概要.....	134
4.3.2	観測波形の整理.....	135
4.3.2.1	S-net の観測波形	135
4.3.2.2	沿岸域の津波観測施設の観測波形.....	136
4.3.3	再現モデルの検討.....	137
4.3.4	先行研究の断層モデルを用いた計算.....	140
4.3.5	観測データを用いたシナリオ選別.....	142
4.3.6	検証用津波シナリオによるシナリオ選別.....	147
4.3.6.1	検証用津波シナリオの設定.....	147
4.3.6.2	S-net 観測点における津波波形の計算	148
4.3.6.3	シナリオ選別の実施.....	148
4.4	ニューラルネットワークを用いた二段階シナリオ選別.....	151
4.4.1	ニューラルネットワークによる回帰.....	151
4.4.1.1	入力データ.....	151
4.4.1.2	活性化関数.....	151
4.4.1.3	損失関数.....	153
4.4.1.4	陸域評価地点の設定.....	153
4.4.2	予測精度の検証.....	154
4.4.2.1	浸水深分布の比較方法.....	154
4.4.2.2	予測精度の検証方法.....	154
4.4.2.3	ハイパーパラメータの設定.....	154
4.4.2.4	予測精度の検証結果.....	156
4.4.3	浸水深予測結果の例.....	156
4.4.4	Multi-index 法との併用について	161
	参考文献.....	165
	付録電子データ.....	168

1. 津波遡上即時予測手法の概要

1.1 予測手法開発の経緯および目的

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震は、地震の規模がMw9.0の超巨大地震であり、震源域は岩手県沖から茨城県沖にかけての長さ約500 km、幅約200 kmの広範囲の領域にわたった。この地震によって非常に大規模な津波が発生し、岩手県、宮城県、福島県の沿岸に設置された津波観測施設では8～9 m以上の津波を観測し（気象庁、2012a）、遡上高は高いところで40.1 mに達したことが確認されている（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ、2012）。仙台平野では、この津波により最大で海岸から6 km内陸まで浸水が生じ、浸水範囲面積は東日本の太平洋沿岸の合計で561 km²以上となるなど、未曾有の甚大な被害が発生した。

東北地方太平洋沖地震では、初期段階において推定・予測した津波規模が実際と比較して大きく下回ったことや停電などにより津波情報が住民に十分に伝わらなかったことが被害を拡大したと言われている。気象庁による現行の津波警報・注意報は、主に陸域における地震観測データを用いて推定される震源の諸元（位置・深さ・地震規模など）にもとづいて間接的に推定される津波の沿岸波高や到着時刻によるものである。一般的に、M8程度を超えるような大地震では地震規模を即時的に決定することは現状では困難であり、東北地方太平洋沖地震の津波警報第1報は地震発生後の3分後に発表されたが、過小に推定された地震規模M_j7.9にもとづいていたため、予想される津波の高さが宮城県で6 m、岩手県と福島県で3 mと大幅に過小な発表にとどまった。また、地震発生約15分後に計算されるべきモーメントマグニチュード（Mw）が、地震波が解析に用いられる国内のほぼすべての広帯域地震計の測定範囲を超えたため計算されず、それにもとづく津波警報の続報が迅速に発表できなかった（気象庁、2012b）。このように、陸域の地震観測データから震源に立ち戻って警報を行うことには一定の限界があることが露呈した。

一方、沖合のGPS波浪計のデータによって津波の規模が警報第1報で予想したものより大きいものであることを認識し、気象庁は地震発生から28分後に警報を更新した。また、東京大学地震研究所が釜石沖に設置したケーブル式水圧計では、地震発生

の約5分後より水圧の異常な変化を捉えていたことが分かっている（Maeda *et al.*, 2011）。このような沖合における津波の情報を津波警報へ活用することで、より正確な津波警報を迅速に発表できる可能性があったことから、津波即時予測における沖合での津波の直接観測の重要性があらためて確認された。

そこで防災科学技術研究所では、沖合において津波を直接観測する大規模かつ緻密な海底観測網として日本海溝海底地震津波観測網（S-net）を構築するとともに、S-netから得られるデータを用いて沖合で津波の発生を直接検知し、津波の沿岸波高および陸域への津波遡上を即時推定するための手法（以下、予測手法と呼ぶ）の開発に取り組んだ。S-netは、全長約5,500 kmの海底ケーブルで接続された150点の観測装置からなり、房総沖から釧路沖・根室沖にかけての海底に整備されている。面的に配置された津波計で観測することにより、津波の発生および伝播の過程をリアルタイムにモニタリングすることができ、津波を従来の津波観測網よりも最大20分程度早く検知し、また津波波源の位置や規模をより正確に把握することができると期待される。

住民が津波から適切に避難するための情報としては、沿岸での津波高さだけではなく陸域での浸水範囲や浸水深の分布、津波の到達時間などの正確な情報が必要となるため、本予測手法ではシミュレーションにより津波遡上の予測を行う。非線形現象である津波遡上のシミュレーションは計算負荷が高いため、事前に数多くの震源シナリオに対する浸水状況をデータベースとして用意し、観測データと時空間マッチングを行うことによりシナリオを絞り込むことで遡上予測を実現する。このようなデータベース検索型手法と稠密な沖合観測データの組み合わせにより、大きな推定誤差の原因になり得る震源情報に立ち戻ることなく津波遡上の推定を直接行うことが本予測手法の特徴の1つである。

1.2 予測手法の仕組み

1.2.1 S-net 観測網および観測データの概要

S-net は房総沖から釧路沖・根室沖にかけての海底に設置された、ケーブル式観測機器による地震・津波のリアルタイム観測網である。全長約 5,500 km の海底ケーブルで接続され海底に設置された金属製の耐圧容器の観測装置 150 点からなり、各々には水圧計 2 式および地震計 4 式が設置されている。水圧計は水深換算で数 mm の分解能を有している。

観測点は日本海溝軸に直交する方向に約 30 km 間隔、海溝軸に沿う方向に 50 ～ 60 km 間隔に配置されている。これは、マグニチュード 7.5 相当の地震の震源域に観測点を少なくとも 1 点は配置する、という考えに基づいて配置したものである。図 1.2-1

に S-net の観測点および S-net 以外の海底津波計、沿岸観測点（検潮所、験潮場など）、NOWPHAS の GPS 波浪計の位置を示す。S-net 観測網は 6 つのサブシステムからなり、サブシステムの位置と観測点数は以下の通りである。

- ・ S1 房総沖（観測点数 22 点）
- ・ S2 茨城・福島沖（観測点数 26 点）
- ・ S3 宮城・岩手沖（観測点数 26 点）
- ・ S4 三陸沖北部（観測点数 28 点）
- ・ S5 釧路・青森沖（観測点数 23 点）
- ・ S6 海溝軸外側（観測点数 25 点）

S-net 観測網およびその他の津波観測施設の位置情報は付録の 1.2_ 観測点位置情報（表）にまとめた。

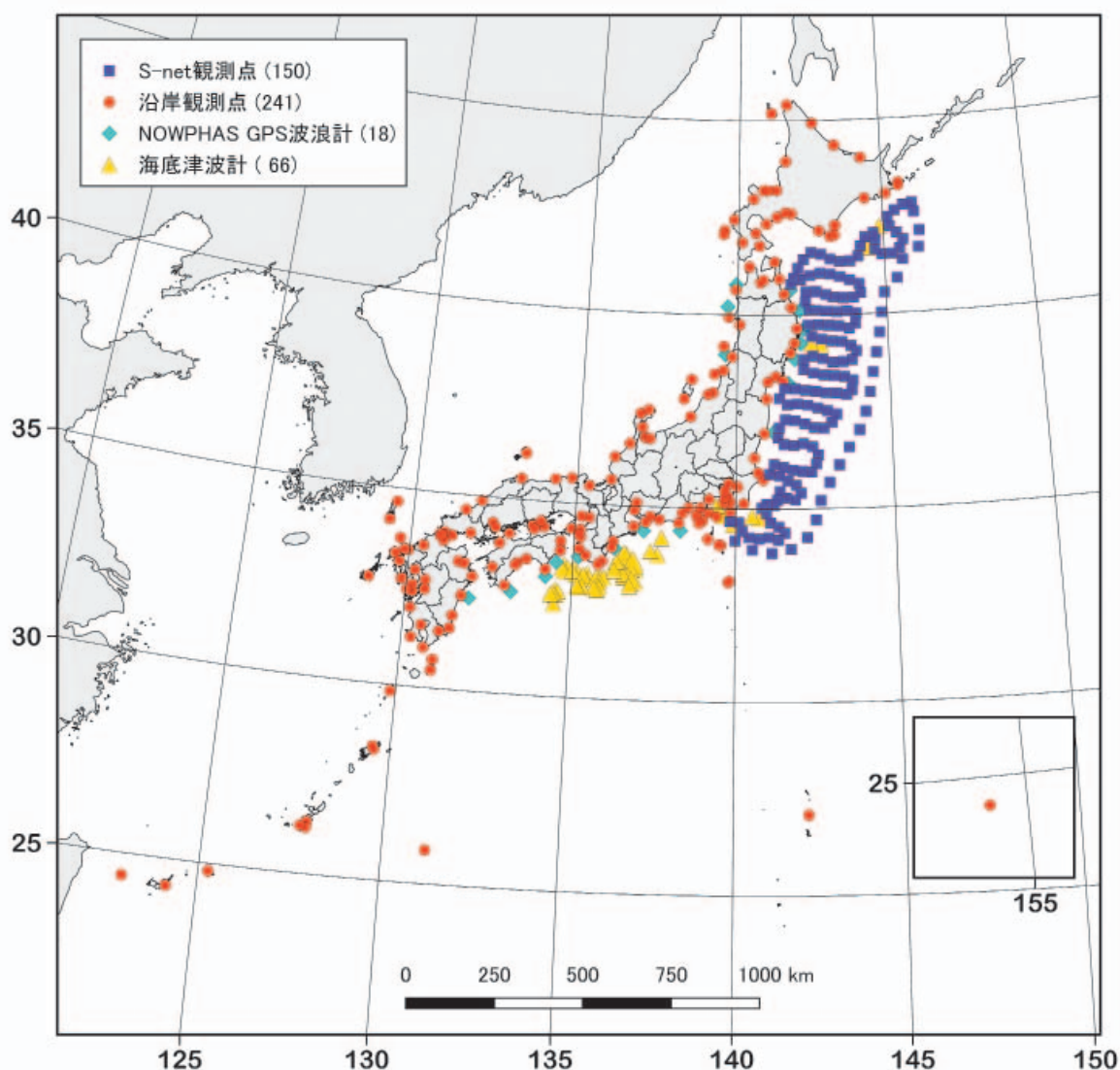


図 1.2-1 S-net 観測網とその他の津波観測施設の位置図

1.2.2 予測手法と津波シナリオバンクの概要

沖合での津波観測データを用いた津波即時予測手法としては、逆解析で推定した津波波源からフォワード計算により沿岸での水位や対象都市での浸水を予測する手法 (Tsushima *et al.*, 2012 ; 辰巳・富田, 2013; Tsushima *et al.*, 2014), 沖合観測波高などに基づくデータベース検索より浸水予測を行う手法 (阿部・今村, 2012), 沖合津波波高と沿岸波高の経験的もしくは数値シミュレーションによる関係式を用いる手法 (高山, 2008 ; Baba *et al.*, 2014) などが提案されている。しかし、広範な領域に対して非線形現象である津波遡上のシミュレーションをするには膨大な計算コストがかかるため、即時予測として計算が間に合わないことが想定される。そのため、本研究ではデータベース検索型の手法を採用し、震源情報に立ち戻ることなく、津波を引き起こす震源域の直上や近傍で観測された水圧データより、迅速かつ確実に沿岸波高および津波遡上を予測する手法を開発した。

本予測手法では、比較的時間がかかる津波遡上の計算を考え得る津波シナリオに関して網羅的に事前に行った結果をもとに「津波シナリオバンク」を構築し、津波発生時には適切なアルゴリズムにより観測記録をよく説明するシナリオを選別することで、近地津波の遡上の即時予測を実現する。この津波シナリオバンクは、予測対象地域に影響を及ぼす津波を生じうる津波波源断層モデルを網羅的に設定して津波シミュレーションを行い、S-net 観測点における沖合津波波形、沿岸での津波高と到達時間、浸水深分布と到達時間などを一連の津波シナリオとして登録することで構築する。

まず、即時予測システムのプロトタイプ構築の対象地域としている千葉県の上総・外房地域を中心とした地域 (南房総市から銚子市) について、千葉県から貸与された地形モデルや国土地理院による航空レーザ測量データ等をもとに、東北地方太平洋沖地震による地盤変動を考慮した「沖合地形モデル」と「沿岸・陸域地形モデル」を構築した (2.2 節)。沖合地形モデルは、日本海溝、千島海溝、伊豆・小笠原海溝、南海トラフ (駿河トラフを含む)、相模トラフを震源域とする地震に対して、即時予測に用いる S-net 観測点 150 点での津波時刻歴波形の計算と、予測対象地域についての沿岸の津波波高を得るため

の沖合津波計算を目的としており、当該海域において格子間隔 90 m ~ 2,430 m の地形データを作成した。沿岸・陸域地形モデルについては、津波の遡上範囲や浸水深分布を得ることを目的とした浸水・遡上計算を実施するため、格子間隔 10 m および 30 m の地形データを作成し、浸水・遡上計算に必要な防潮堤などの津波防護施設については、地震動や津波による破壊や変形を適切に考慮できるようにラインデータとしてモデル化した。

シナリオの検索元となる津波シナリオバンクが、発生しうるあらゆるパターンの津波を網羅していれば予測精度向上につながる一方で、時間的・計算資源的には準備できる津波シナリオの数には限りがあるため、予測対象地域に影響を及ぼす津波シナリオをいかに過不足なく設定することが出来るかが重要となる。そこで設定すべきシナリオを検討するために、まず日本海溝、千島海溝、伊豆・小笠原海溝、南海トラフ、相模トラフに様々な種類の波源断層モデルを設定し (3.3 節)、これらに対して沖合津波計算を行って沿岸波高や陸域への浸水深などへの影響の度合いを見積もる感度解析を行った (3.4 節)。詳細な津波遡上計算を外房地域全域に対して計算するには計算コストがかかるため、感度解析を行う際には、比較的計算コストの小さい沿岸津波波形についてのシミュレーションにより津波遡上計算を実施すべき波源断層モデルの絞り込みを行った。以上の方法で構築した津波シナリオバンクには、合計 16,787 個の津波シナリオを登録した。

沖合で津波が発生した際に津波シナリオバンクからシナリオを選別するアルゴリズムには、Yamamoto *et al.* (2016) の Multi-index 法を用いる (4.1 節)。この方法では、観測された水圧波形と予め計算して津波シナリオバンクに登録されている計算波形を比較することで、沖合における津波の類似度を定量的に評価する。2つの波形をそのまま比較すると位相のずれの影響が生じるため、これを避けるために観測波形と計算波形の絶対値の最大値 (以下、水圧変化量最大値) を比較している。沖合における津波の類似度の評価には、観測と計算の水圧変化量最大値の分布から計算される相関係数と Variance Reduction を用いる。Variance Reduction は観測の水圧変化量最大値で規格化した VRO と計算の水圧変化量最大値で規格化した VRC の 2 種類の Variance Reduction を用

い、合計 3 種類の指標により評価する（指標の定義は 3.4 節に詳述する）。相関係数は観測と計算の水圧変化量最大値の分布形状に強く依存するため津波が生じている位置に感度がある。また、VRO は過大評価に、VRC は過小評価に感度があるため、2 種類の Variance Reduction を同時に用いることで、津波の規模を適切に評価可能となる。以上のように、異なる性質を持つ 3 つの指標を同時に選別条件として用いることで、適切な津波シナリオを選別することが可能となる（4.2 節）。

Multi-index 法により観測データを説明可能な複数の津波シナリオが選別されることで、不確実性を取り込んだ予測が可能となるが、一方で予測結果を発表する際にはどの津波シナリオに基づいた結果を示すのか、といった問題がある。そこで沖合の水圧変動量最大値の分布から陸域の浸水深を推定する回帰分析を行い、回帰モデルによる予測浸水深の分布に基づいて選別されたシナリオ群を順位付けする、二段階の選別方法を開発した（4.4 節）。回帰分析では、津波遡上の非線形性や陸域の地形の複雑さの影響を考慮して多層ニューラルネットワークによる回帰を行った。疑似観測シナリオに対して二段階シナリオ選別の手法を適用した結果、本手法によって浸水深の予測精度が向上する可能性が示された。

1.2.3 津波シナリオバンクの構成

以下では、津波シナリオバンクに登録したデータ構成の概要について説明する。

1.2.3.1 津波計算のための基礎データ

沿岸の津波波高を得ることを目的とした沖合津波計算と、津波の遡上範囲や浸水深分布を得ることを目的とした陸域浸水計算を行うために必要となる基礎データを登録した。基礎データは、海域から陸域にかけての地形標高のデータや粗度係数のデータ、構造物のラインデータなどからなる。基礎データの作成方法は 2.2 節で詳しく説明する。

1.2.3.2 波源断層モデルのデータ

本研究では、日本海溝、千島海溝、伊豆・小笠原海溝、南海トラフ（駿河トラフを含む）、相模トラフを震源域とする地震を対象として、様々な種類、様々な規模の地震の波源断層モデルを作成した。津波シ

ナリオバンクは作成した波源断層モデルのデータを登録した。波源断層モデルについての説明は 2.3 節、津波シナリオバンクに登録した波源断層モデル群の作成方法については 3 章で説明する。

2.1 節で説明する津波計算手法に基づいて、基礎データと波源断層モデルのデータを用いることで、津波シナリオバンクに登録されているシナリオの津波計算が可能となる。

1.2.3.3 津波計算結果のデータ

シナリオ選別のための沖合での津波波形の比較では、S-net 観測点において観測される水圧変化の時系列波形を比較対象とする。そのため各シナリオの津波計算結果のデータとして、S-net 観測点の位置における全水深の時系列波形を登録した。

津波遡上即時予測では、予測結果として

- ・ 沿岸における津波高さ
- ・ 陸域における浸水深
- ・ 津波の到達時刻

などが必要となる。そのため沿岸や陸域における津波計算結果のデータとしてこれらのデータを登録した。

津波シナリオのデータの説明は 2.4 節に記す。

1.2.4 予測結果の例

本予測手法を用いることで、どのような結果が得られるのか、手法の適用結果例を以下に示す。

ここでは、実際に観測された津波ではなく、津波シミュレーションにより疑似観測シナリオを作成して、これに対して本予測手法を適用した結果を示す。疑似観測シナリオの波源断層モデルには、内閣府（2012）による 2011 年東北地方太平洋沖地震の再現モデル（Mw9.07）を用いた。波源断層モデルのすべり量分布図を図 1.2-2 に示す。

まず Multi-index 法の 3 種類の指標を用いて、津波シナリオバンクに登録されたシナリオ群と疑似観測シナリオの S-net 観測点における津波波高の比較を行う。図 1.2-3 に地震発生から 10 分経過した後の VRO と VRC の分布図を示す。次に、 $R \cdot VRO \cdot VRC$ の 3 つの指標がそれぞれ設定したしきい値を満足するシナリオを選別する。本適用事例では、3 つの指標のしきい値を

$$R(t) \geq 0.7$$

$$VRO(t) \geq 0.0$$

$$VRC(t) \geq 0.0$$

とし、46 シナリオが選別された。選別されたシナリオ群と疑似観測シナリオの沿岸における最大相対水位分布を比較すると(図 1.2-4)，選別されたシナリオ群の最大相対水位分布にばらつきはあるものの、それらの平均値は疑似観測シナリオの最大相対水位分布を良く説明できていることが分かる。本適用事例を含めた既往地震モデルによる検証は 4.2 節に詳述する。

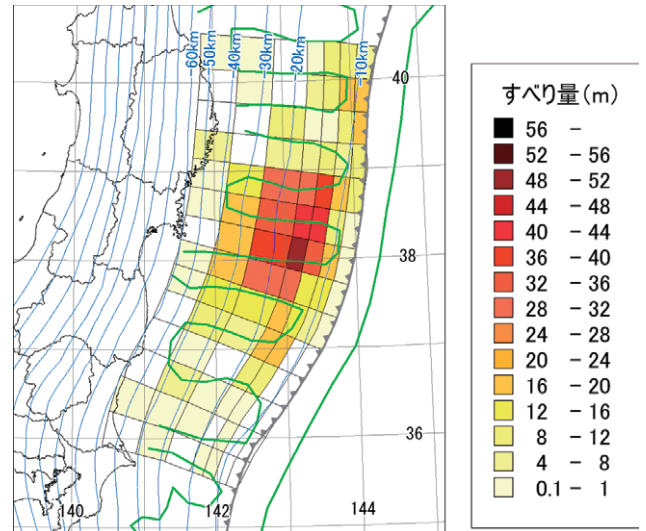


図 1.2-2 内閣府(2012)による 2011 年東北地方太平洋沖地震の再現モデルのすべり量分布図

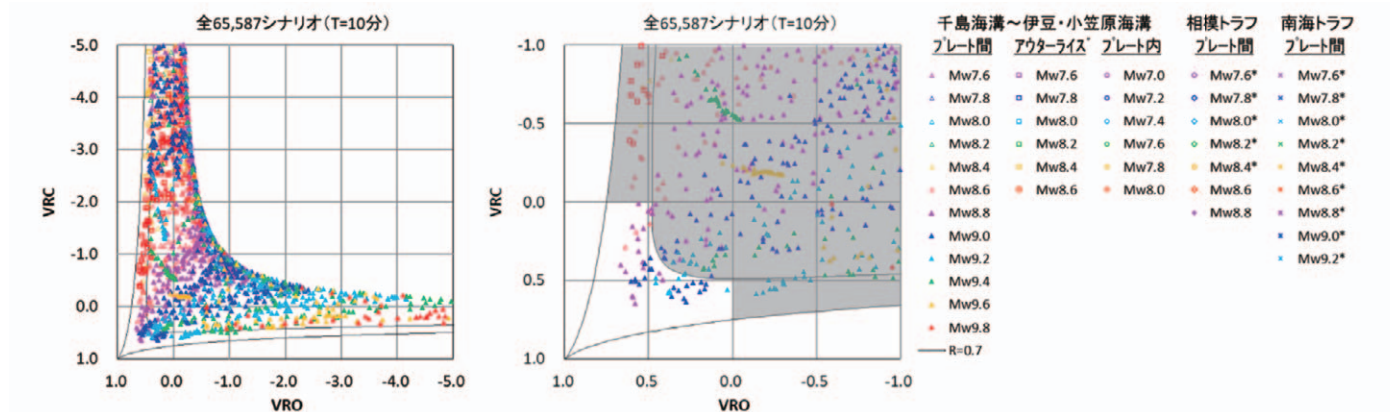


図 1.2-3 2011 年東北地方太平洋沖地震を疑似観測シナリオとした場合の VRO-VRC ダイアグラム。右は拡大図

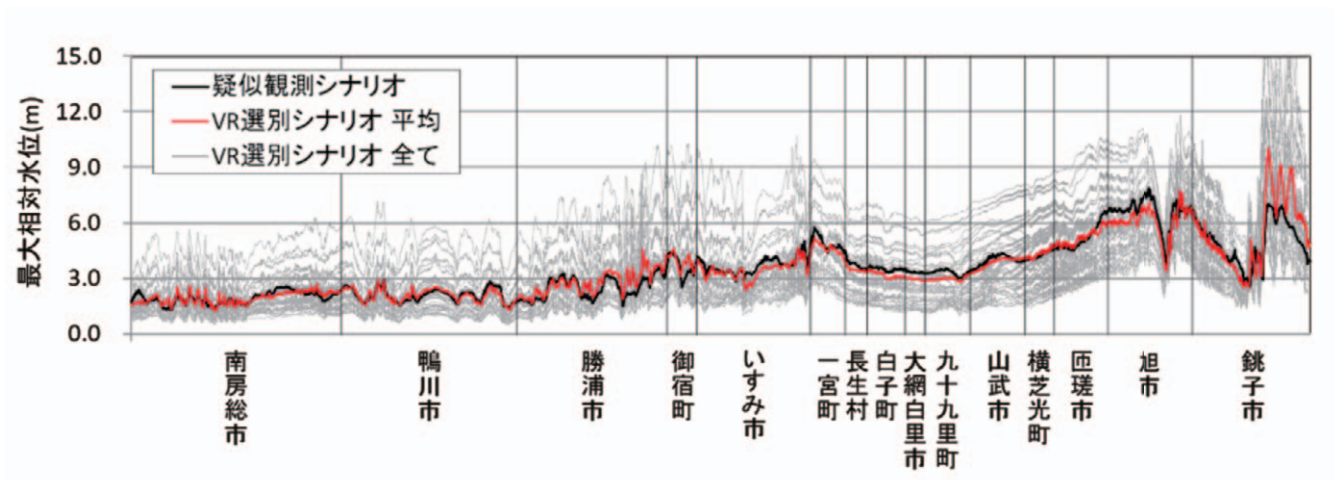


図 1.2-4 疑似観測シナリオと Multi-index 法で抽出されたシナリオ群の沿岸における最大相対水位分布の比較の例

2. 津波の計算手法と各種データ

2.1 計算手法

津波は、沖合で発生した地震等による海底面の変動に伴って海水が昇降することで発生し、重力を復元力として周囲に伝播する。ここでは、検算用津波シナリオバンクを構築するために行う津波の数値シミュレーションの方法を説明する。

2.1.1 初期水位の計算手法

津波の計算においては、波源断層モデルから計算される海底の鉛直変位量をそのまま初期水位として与える場合が多く、国土交通省(2012)でも、この方法を基本としている。しかし、検算用津波シナリオバンクは S-net の海底水圧計を観測データとして用いるため、震源に近い海底に設置してある海底水圧計での水圧変化を正しく再現する必要がある。そのため、以下のように海底の鉛直変位量以外の変化量も考慮して初期水位を求めた上で津波の計算を実施した。

海底の鉛直変位量は、Okada (1992) の方法で算出した。ただし、3.3 節で後述するように、波源断層モデルには、断層面全体を 1 枚の矩形断層で表現する「矩形断層モデル」と、断層面全体を約 5 km×5 km の小断層の集合として表す「要素断層モデル」の 2 つのタイプがあり、それぞれで断層の深さの扱いを変えた。矩形断層モデルは比較的規模が小さい地震に対する波源断層モデルであり、図 2.1-1 に示すように断層上辺端点の位置における水深を差し引いた上で、平面上の地殻変動量を計算した。この方法は簡便である反面、断層の面積が大きい場合には地形条件によって断層上端部以外の地点では断層までの深さが変わる可能性がある。そのため、本検討では地震規模が小さい場合に限定して矩形断層モデルを用いた。一方、比較的規模が大きな地震に対して適用する要素断層モデルの場合には、図 2.1-2 に示すように各要素断層の上辺と各地点の相対深さを断層上辺の深さとして平面上の地殻変動量を計算している。相対深さをを用いるため、計算を行う位置によって断層の上端深さを変えることになる。このようにすることで、要素断層と計算地点の相対的な深さが保たれるため、より現実的な計算結果が得られる。

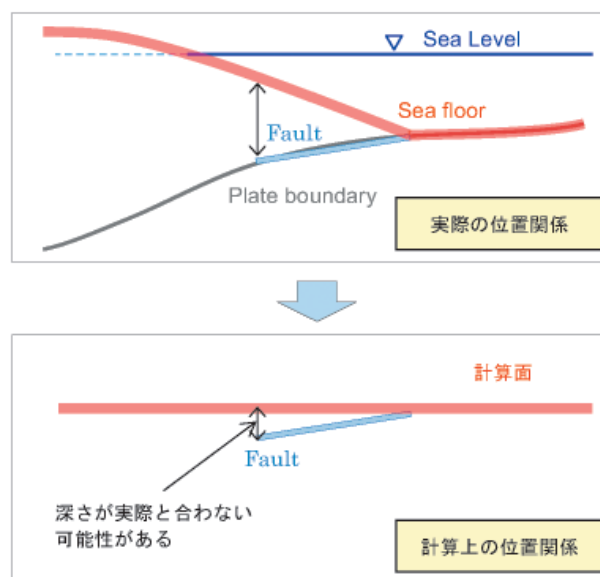


図 2.1-1 矩形断層モデルの場合の断層深さの扱い

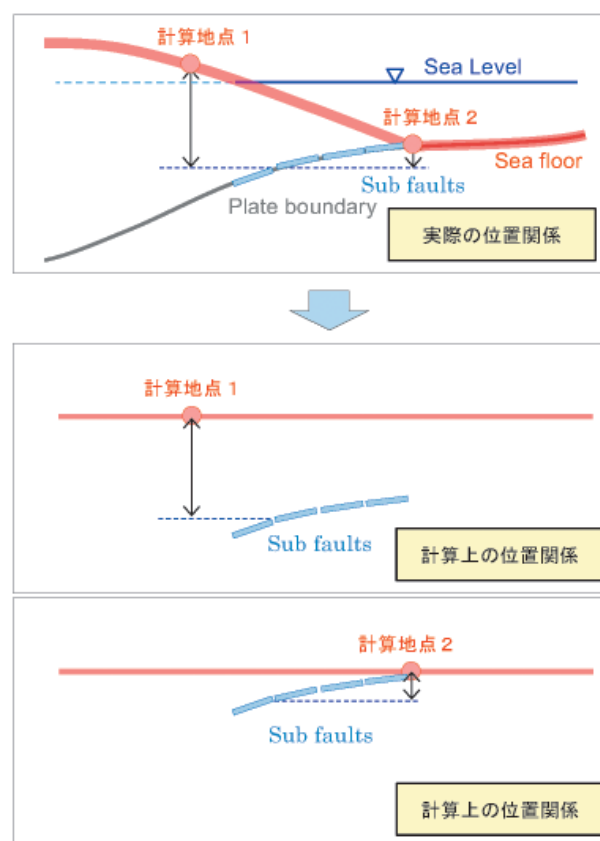


図 2.1-2 要素断層モデルの場合の断層深さの扱い。
計算地点と断層深さの相対深さを計算上の深さとする。

初期水位の算出にあたっては、まず海底の各地点における鉛直方向の変動量を算出した。地震に伴って、海底では水平方向および鉛直方向の海底地殻変動量が生じる。上述のように国土交通省(2012)ではこの鉛直地殻変動量をそのまま津波の初期水位とすることとしている。しかし、Tanioka and Satake(1996)で示されているように、海底が傾斜している場合には水平方向の地殻変動によって見かけ上海底が鉛直方向に昇降するため初期水位の計算として考慮する必要がある(図 2.1-3 参照)。そのため、海底の鉛直変位量に加えて勾配地形における水平地殻変動による水位変化を考慮した(2-1)式を用いて、同一地点における鉛直方向の海底変動量とした。

$$u_h = u_z + u_x \frac{\partial H}{\partial x} + u_y \frac{\partial H}{\partial y} \quad (2-1)$$

ここで、

u_h : 同一地点の鉛直方向の海底変動量、

u_x, u_y, u_z : x, y, z 方向の海底地殻変動量、

H : 水深、

である。

得られた鉛直方向の海底変動量に対して、Kajiura(1963)の水理フィルタを適用して、初期水位データとした。Kajiura(1963)の水理フィルタを適用することにより、海底地殻変動量の短波長の成分が消えて、長波長成分のみが初期水位として表現される(図 2.1-4 参照)。適用した Kajiura(1963)の水理フィルタの式は Tanioka and Seno(2001)に従い、(2-2)式および(2-3)式とした。

$$\eta = \iint_S u_h(x_0, y_0) R dx_0 dy_0 \quad (2-2)$$

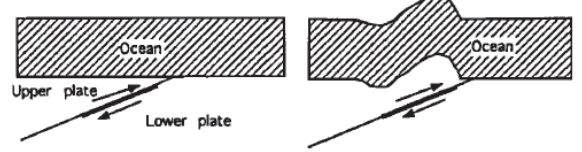
$$R = (1/\pi) \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (2n+1) \{ (2n+1)^2 + (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 \}^{-3/2} \quad (2-3)$$

ここで、(2-2)式の積分範囲は、水深を d として x_0, y_0 、ともに $-5d \sim +5d$ の範囲とし、(2-3)式のテーラー展開の次数 n は $n=10$ とした。

図 2.1-5 に、房総沖に設定した波源断層モデルに対して、Kajiura(1963)の水理フィルタを適用した場合と適用しない場合でどのように水位分布が変化するかを示す。Kajiura(1963)の水理フィルタをかけることによって、短波長の凹凸が除かれていることが分かる。

Initial condition of tsunami

a) vertical movement due to faulting



b) horizontal movement of slope

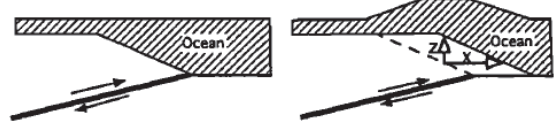


図 2.1-3 水平方向の地殻変動量による見かけ上の海底面の変動
Tanioka and Satake(1996)より引用

1) Elastic deformation due to faulting

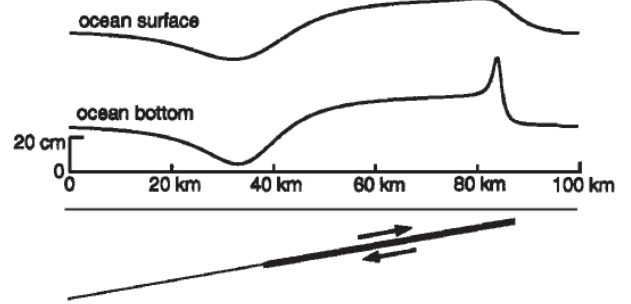


図 2.1-4 海底地殻変動量と Kajiura(1963)の水理フィルタを適用した初期水位の比較
Tanioka and Seno(2001)より引用

2.1.2 沖合津波の計算手法

S-net 観測点における津波波形および即時予測対象地域(千葉県九十九里・外房地域)の沿岸全域にわたる最大相対水位や津波の到達時間を算出するために、最小 90 m 格子の沖合津波計算を実施した。S-net 観測データから津波シナリオバンクのシナリオを検索する際には、この計算で得られた沖合津波波形が用いられ、沿岸の最大相対水位および到達時間もこの計算結果に基づいて予測を行う。また、後述するように、大きな浸水が生じうるシナリオについては最小 10 m 格子の陸域浸水計算を実施しているが、この陸域浸水計算を行うシナリオは、最小 90 m 格子の沖合津波計算の計算結果に基づいて選定する。

津波の計算には、(2-4)～(2-6)式に示す非線形長波式の基礎方程式を差分方程式で近似して解く IOC

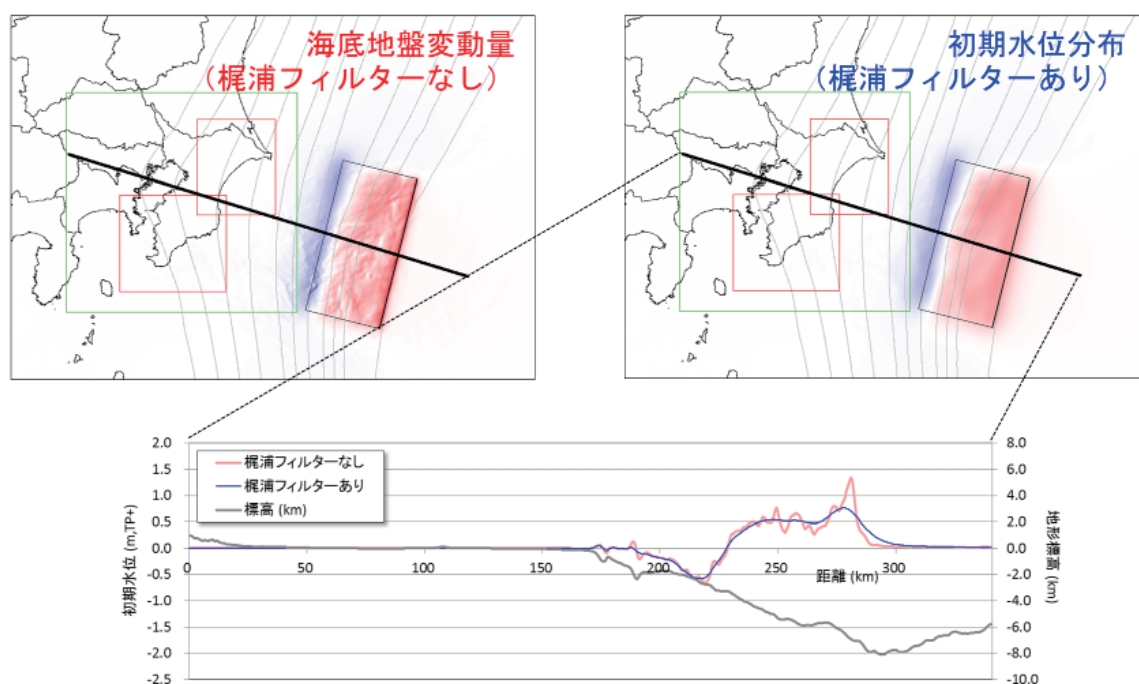


図 2.1-5 鉛直方向の海底変動量とそれに Kajiura (1963) の水理フィルタを適用した初期水位分布の比較

(1997) のシミュレーションプログラムをベースとした計算コードを用いた。

運動方程式

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0 \quad (2-4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0 \quad (2-5)$$

連続の式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2-6)$$

ここで、 η は水位、 M および N は x および y 方向の線流量、 D は全水深、 n はマンニングの粗度係数である。

IOC (1997) のプログラムは差分格子として staggered 格子を用い、時間方向に leap-frog 法を用いて積分を行う平面 2 次元のプログラムであり、津

波浸水予測に広く用いられている。計算にはネスティング格子を用い、津波の波長が長い沖合では大きい格子を、波長が短い沿岸部では細かい格子を設定し、各格子領域を接続させて計算を行った。具体的には、沖合の最も大きい格子を 2,430 m として、沿岸に近づくにつれて 810 m, 270 m, 90 m の格子領域を設定し、最小 90 m 格子で計算を行った。計算のタイムステップ (積分時間間隔) は、計算の安定条件である CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) 条件に基づいて設定した。

最小 90 m 格子の沖合津波計算の計算条件を表 2.1-1 に、計算範囲を図 2.1-6 に示す。この計算では津波の陸域への浸水状況を調べることを目的としていないため、海岸構造物は考慮せず、粗度係数は 0.025 の一定値として計算を行った。また、計算時間 (再現時間) は遠方からの津波の到達時間を考慮して 6 時間とした。なお、波源断層のライズタイムおよび破壊伝播は考慮せず、断層すべりによる海底地盤変動および海水の昇降が瞬間的に起こるものと仮定した。これは、ライズタイムおよび破壊伝播を考慮した場合であっても、沖合の津波波形の振幅

や沿岸の最大相対水位に大きな違いが生じないためである。ただし、ライズタイムや破壊開始時間による断層すべりの遅れに伴って、津波波形の位相にはズレが生じる(3.4.10 項参照)。また、沖合津波計算は陸域への浸水进行评估することを目的としていないため、計算の初期潮位は T.P.+0.0 m とした。遡上先端の打ち切り水深は、国土交通省(2012)に従い、0.01 m とした。

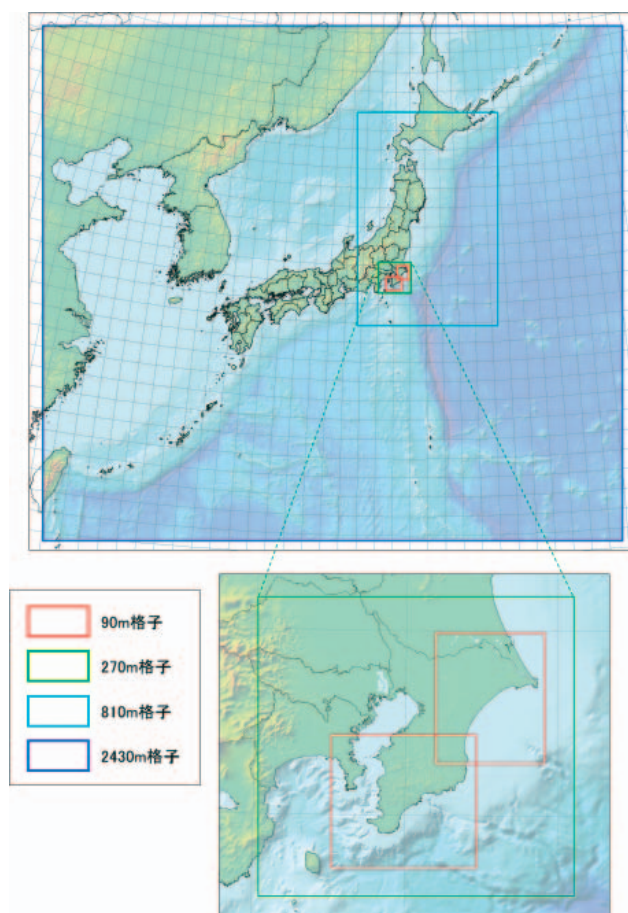


図 2.1-6 沖合津波計算(最小 90 m 格子)の計算範囲

表 2.1-1 沖合津波計算(最小 90 m 格子)の計算方法および計算条件

項目	計算条件等
支配方程式	非線形長波方程式
数値解法	Staggered grid Leap-frog スキームを用いた差分法
計算格子間隔	2,430m, 810m, 270m, 90m である 4 領域を、沖合から順に 1:3 の割合で接続
境界条件	・陸側：陸域への遡上を考慮 ・海側：完全無反射の透過境界
施設条件	構造物条件：なし
計算時間	6 時間
計算時間間隔	CFL 条件を満たす中で適切に設定
初期水位	Okada (1992) で算出した海底地盤変位量の鉛直成分に海底地形傾斜による水平成分の寄与を付加 Kajiura (1963) の水理フィルタ：考慮する ライズタイム：考慮しない、破壊伝播：考慮しない
潮位条件	T.P.+0.0m
打ち切り水深	0.01m
粗度係数	一律 0.025

2.1.3 陸域浸水の計算手法

即時予測対象地域の沿岸における津波の浸水域、浸水深および浸水到達時間を算出するため、最小 10 m 格子の陸域浸水計算を実施した。津波の計算には、最小 90 m 格子の沖合津波計算と同様に、非線形長波式に基づく IOC (1997) のプログラムを用いた。

陸域浸水計算の計算条件を表 2.1-2 に、計算範囲を図 2.1-7 に示す (2.2 節参照)。陸域浸水計算では、沖合津波計算と異なり陸域への遡上・浸水の評価することを目的としているため、海岸構造物として現実的な施設条件を考慮するとともに、現実の土地利用に合わせた粗度係数を用いて計算を実施した。考慮した施設条件は、以下の 3 条件であり、1 つの波源断層モデルに対してそれぞれの条件で別々に計算を実施した。

- ・ 構造物が損傷しない場合 (BC1) : 地震時にコンクリート構造物および盛土構造物が沈下せず、津波が越流しても破壊しない (健全)
- ・ 構造物が大きく損傷する場合 (BC2) : コンクリート構造物は地震時に全破壊し、盛土構造物は地震時に比高が 75% 沈下して津波が越流すると破

壊する (破壊)

- ・ 津波の高さに応じて構造物の損傷率を考慮する場合 (BCF) : 有川ほか (2017) のフラジリティカーブを用いて、津波規模に応じて構造物の損傷率を考慮する条件

構造物条件の詳細は、2.2.4 項を参照されたい。また、潮位条件は国土交通省 (2012) に従って朔望平均満潮位とした。朔望平均満潮位の値は、千葉県 (2014) に基づき、内房地域 (計算領域 1 ~ 3) は T.P.+0.77 m、九十九里・外房地域 (計算領域 4 ~ 13) は T.P.+0.70 m とした。

なお、設定した計算範囲は図 2.1-7 に示す 13 領域であるが、津波シナリオバンクの即時予測対象地域は千葉県九十九里・外房地域であるため、領域 4 ~ 13 の範囲を計算した。

図 2.1-8 に、最小 90 m 格子の沖合津波計算と最小 10 m 格子の陸域浸水計算の沿岸最大相対水位の比較例を示す。最小 10 m 格子の陸域浸水計算の方が局所的な水位の変化が大きいものの、おおむね一致していることが分かる。

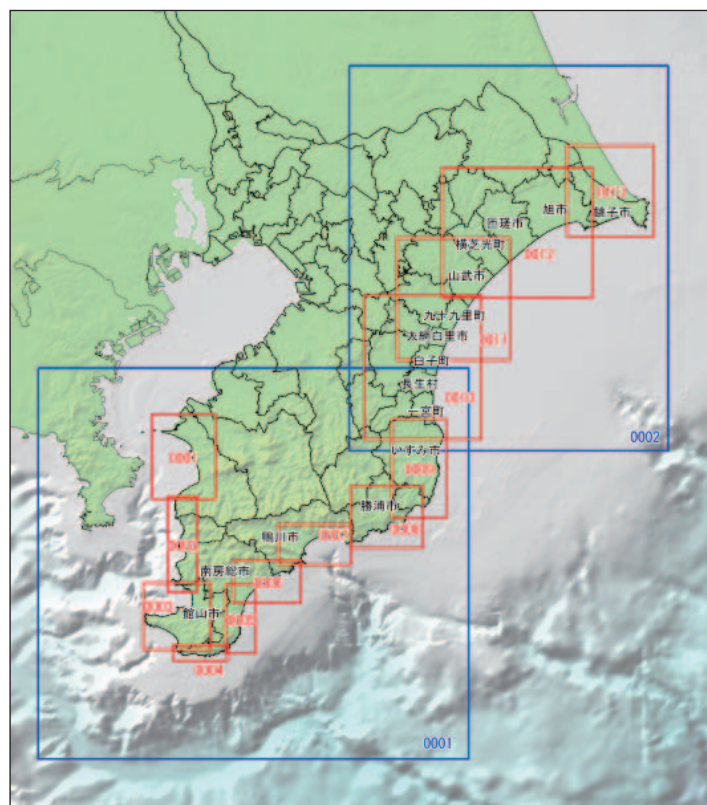


図 2.1-7 陸域浸水計算 (最小 10 m 格子) の計算範囲 (赤枠)

表 2.1-2 陸域浸水計算(最小 10 m 格子)の計算方法および計算条件

項目	計算条件等
支配方程式	非線形長波方程式
数値解法	Staggered grid Leap-frog スキームを用いた差分法
計算格子間隔	2,430m, 810m, 270m, 90m, 30m, 10mである6領域を, 沖合から順に1:3の割合で接続
境界条件	・陸側: 陸域への遡上を考慮 ・海側: 透過境界
施設条件	・構造物が損傷しない場合 (BC1) ・構造物が大きく損傷する場合 (BC2) ・津波の高さに応じて構造物の損傷率を考慮する場合 (BCF)
計算時間	6 時間
計算時間間隔	CFL 条件を満たす中で適切に設定
初期水位	Okada (1992) で算出した海底地盤変位量の鉛直成分に海底地形傾斜による水平成分の寄与を付加
	Kajiura (1963) の水理フィルタ: 考慮する
	ライズタイム: 考慮しない, 破壊伝播: 考慮しない
潮位条件	朔望平均満潮位 (T.P.+0.77m): 領域 1~3
	朔望平均満潮位 (T.P.+0.70m): 領域 4~13
打ち切り水深	0.01 m
粗度係数	・10m 計算格子においては, 土地利用に基づく値で設定 ・30m より粗い格子間隔の計算領域においては, 粗度係数を一律 0.025 で設定

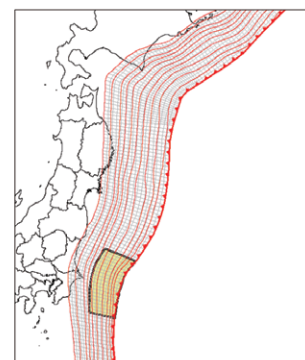
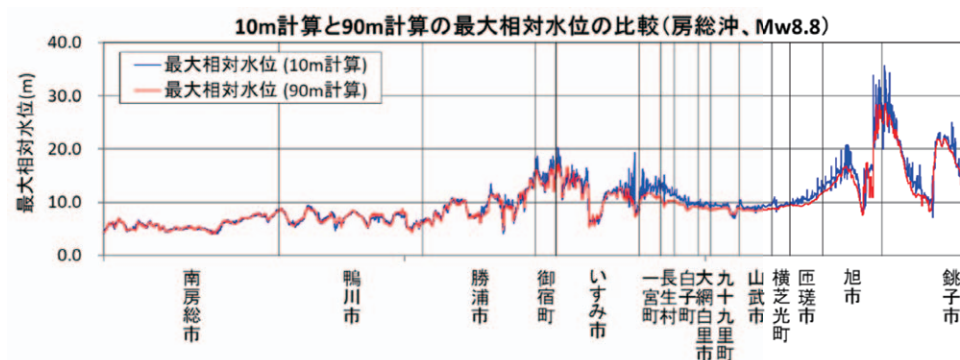


図 2.1-8 陸域浸水計算(最小 10 m 格子)と沖合津波計算(最小 90 m 格子)の最大相対水位の比較(波源断層モデル: 房総沖, Mw8.8) ただし, 90 m 沖合津波計算の最大相対水位は, T.P.+0.0 m の潮位条件で計算した最大相対水位に 10 m 陸域浸水計算の計算時潮位 T.P.+0.70 m を加算した。

2.1.4 津波到達時間の計算手法

沿岸の津波到達時間は、沿岸抽出点において水位および相対水位が予め定めた閾値以上または以下となった時間を抽出した。本研究資料では、その閾値は、 ± 20 cm, ± 50 cm, ± 100 cm の 6 つとした。

しかし、2.1.1 項に記した初期水位データを用いると、Tanioka and Satake (1996) による水平地殻変動の水位変化によって、津波波源となる断層が沿岸から離れているにも関わらず、津波発生直後に沿岸で水位変動が生じてしまい、それによって非常に早い津波到達時間が算出されるという問題点がある。

津波到達時間が場所により極端に早くなっている例として、房総沖に設定した Mw9.0 の波源断層モデルの最小 90 m 格子の沖合津波計算における +20 cm 相対水位到達時間を図 2.1-10 に示す。この計算例では、沿岸の多くの地点で計算開始から 100 秒以内に +20 cm の相対水位が到達している。

このような地震発生直後の沿岸における水位変化は、2011 年東北地方太平洋沖地震で実際に観測されている。図 2.1-9 に気象庁(2012a)に報告されている 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波波形を示す。各観測点で地震発生直後から水位変動が生じ、大船渡では地震発生から 5 分程度で 50 cm 程度の水位変化が生じていることがわかる。根本ほか(2015)は、この水位変化を水平地殻変動の水位変化で説明出来ることを示している。

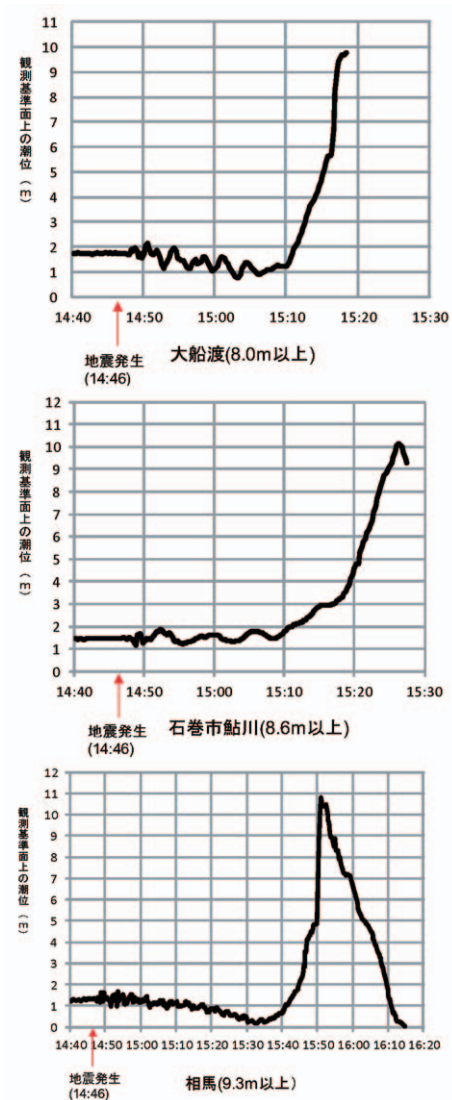


図 2.1-9 2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された地震発生直後の沿岸の潮位変動
気象庁(2012a)より引用

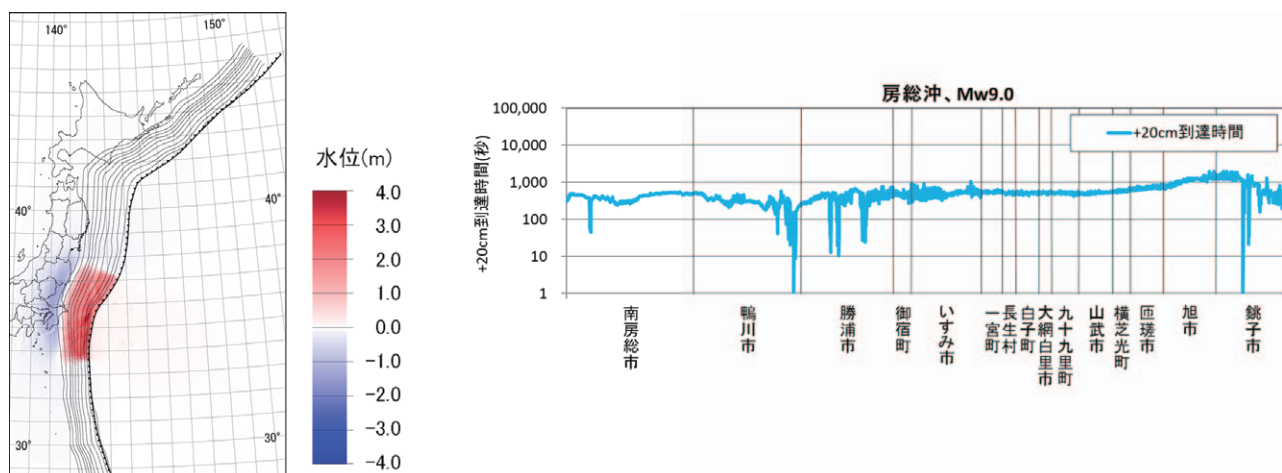


図 2.1-10 Mw9.0 の波源断層モデルによる即時予測対象地域の +20 cm 相対水位到達時間
水平地殻変動による水位変化を考慮した場合(青太線)

なお、実際の地震では一定の時間をかけて断層すべりが生じるのに対して、本研究資料の津波計算方法では、2.1.2 項および 2.1.3 項の計算条件で記したようにライズタイムや破壊伝播を考慮しないため、海底地形勾配による水位変化を地震発生直後に一度に与えることになり、実際の現象に比べて沿岸における地震発生直後の水位変化が起こりやすくなっており、そのために非常に早い到達時間が算出されやすくなっている可能性がある。

図 2.1-9 に示すように、地震発生直後の微小な水位変動は実際に観測される現象ではあるものの、その後の沖合津波波源からの主要な波に比べるとその振幅は小さい。津波遡上即時予測システムにおける津波シナリオバンクの津波到達時間としては、沖合からの主要な波の到達を示す時間を登録することが適当であるため、地震発生直後の微小な水位変動を除いた方が適切と考えられる。そこで、水平地殻変動による水位変化を除いた初期水位データを用いて沖合津波計算を行い、津波の到達時間データとした。

図 2.1-11 に、水平地殻変動による水位変化を考慮した場合と考慮しない場合の 90 m 沖合津波計算による津波到達時間 (+20 cm 到達時間) の比較を示す。水平地殻変動を考慮しないことにより、津波到達時間の分布が連続的になり、房総半島の前面に Mw9.0 の波源がある場合でも極端に早い到達時間が現れなくなっていることがわかる。

2.2 基礎データの作成方法

ここでは、以下に示した基礎データの作成方法について記載する。以下のデータ名の前に付したのは、これらのデータを以降で説明する項番号である。

これらのデータは、沿岸水位抽出点データおよび観測点データを除いて格子データであり、必要となる格子間隔に対して作成した。沿岸水位抽出点データおよび観測点データは、観測点位置を示した点データとして作成した。データのフォーマットに関しては、付録の 2.1_津波シナリオバンクシステムデータ規約集を参照されたい。

- 入力データ
 - 2.2.2 地形標高データ
 - 2.2.3 粗度係数データ
 - 2.2.4 構造物ラインデータ
 - 2.2.5 陸判定マップデータ
 - 2.2.11 観測点データ
- 計算結果を解析する際の補助データ
 - 2.2.6 沿岸水位抽出点データ
 - 2.2.7 堤外マスクデータ
 - 2.2.8 領域マスクデータ
 - 2.2.9 市区町村判定マップデータ
 - 2.2.10 人口データ

以降では、上記の各データに関する作成方法について記す。

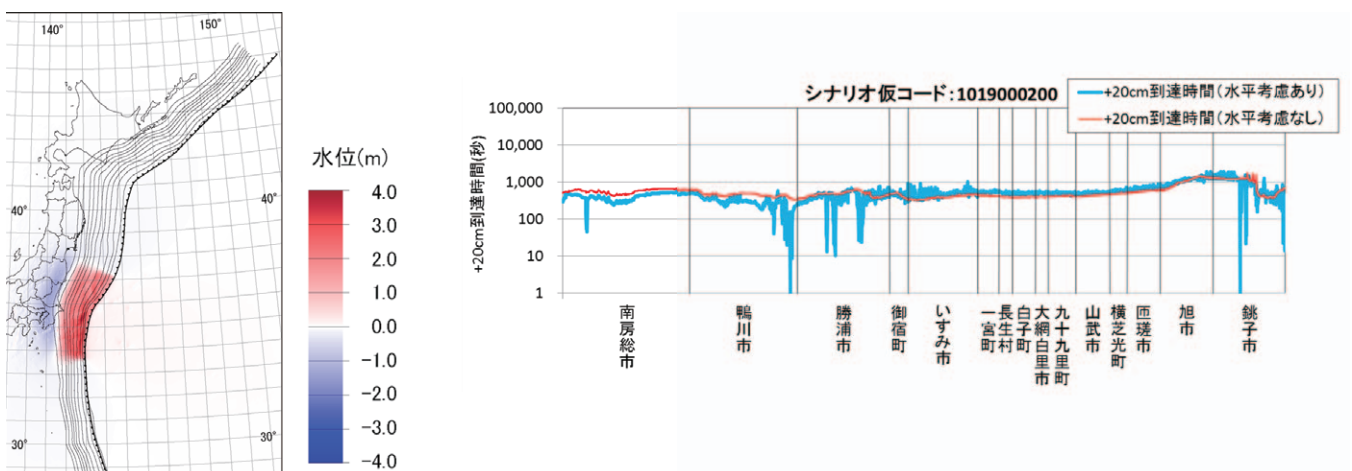


図 2.1-11 Mw9.0 の波源断層モデルによる即時予測対象地域の +20 cm 相対水位到達時間
水平地殻変動による水位変化を考慮した場合(青太線)と考慮しない場合(赤線)

2.2.1 計算領域

本研究資料では 4 種類の津波計算を実施した。そのうち、3 種類は日本近海で発生した津波を想定した津波計算であり、1 種類は日本沿岸に対しての遠地で発生した津波を想定した津波計算である。

日本近海で発生した津波を想定した津波計算のうち、S-net 観測点位置での沖合津波水位を評価するための計算と、また即時予測対象地域における津波の浸水評価のための計算として、沖合津波計算と陸域浸水計算を実施した。また、即時予測対象地域よりも北側の千島海溝・日本海溝沿いの沿岸地域にどの程度の津波が来襲するかを把握するために概観津波計算を実施した。

即時予測対象地域を含む日本近海で発生する津波を想定した場合には、広範囲にわたる海域に対して波源断層モデルを設定する。そのため、広い範囲でも歪みが比較的小さくなる平面投影座標系の UTM 座標系を用いて計算領域を設定することとした。あくまで日本近海を対象として波源断層モデルを設定するため、ここでは地理座標系ではなく、平面投影座標系を用いる。本研究資料においては、即時予測対象地域が千葉県沿岸の一部であるため、日本近海で発生する津波を対象とした津波計算に用いる座標系を UTM 座標系 54 帯とした(図 2.2-1)。

また、日本沿岸に対しての遠地で発生した津波の影響を把握するために遠地地震津波計算を実施した。ここでは、環太平洋のプレート沈み込み境界において発生する可能性のある地震津波を対象とし

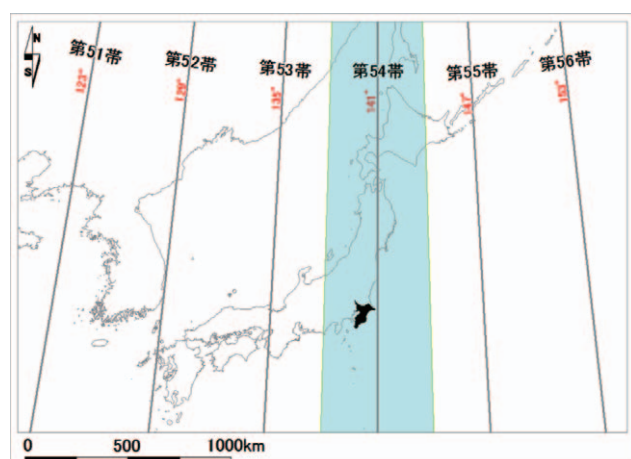


図 2.2-1 UTM 各ゾーンの中央経線と第 54 帯。東経 141°を中心とし、東西に 3°ずつの範囲において縮尺誤差が 4/10,000 以内に収まる座標系である。千葉県の位置を黒く塗りつぶした。

た。太平洋全域といった広域を対象とした津波伝播を計算する場合、平面投影座標系では歪みが大きくなり、適切な評価ができないと考えられる。そのため、波源域から日本近海までの広域の津波伝播を評価する地域に対しては、地理座標系で計算を実施することとした。

以上のように、それぞれの計算における目的にあわせた計算領域を設定した。以下に、それぞれについて記述する。

本研究資料で設定した計算領域の設定(位置、範囲、解像度など)は電子ファイルに一覧で整理した。

2.2.1.1 沖合津波の計算領域

沖合津波計算のために、格子間隔が 2,430 m, 810 m, 270 m, 90 m の計算領域を設定した。

2,430 m 格子として、以下に示す 6 つの計算領域を設定した。本研究資料では複数の震源域を対象とした計算を実施する。このため、震源域に合わせて必要な範囲のみ計算を行えるように計算領域を選択することで、計算負荷を軽減することがこの目的である。

図 2.2-2 は設定した 2,430 m 格子の計算領域の範囲である。

- 2430-001
日本海溝に設定される波源断層モデル対象
- 2430-002
千島海溝に設定される波源断層モデル対象
- 2430-003
伊豆・小笠原海溝に設定される波源断層モデル対象
- 2430-004
南海トラフ・相模トラフに設定される波源断層モデル対象
- 2430-005
本研究資料では波源断層モデルが設定されないが南西諸島周辺海域を含んだもの
- 2430-006
伊豆・小笠原海溝、日本海溝、千島海溝沿いに設定される波源断層モデルを合わせて対象とできるもの

沖合津波計算では、沖合の観測点における水位時

系列データを取得することが主要な目的であるので、S-net 観測点を解像度 810 m の領域で包含するように設定した(図 2.2-3)。

また、図 2.2-3 には、2,430 m 格子(上記の 2430-001 領域)から 90 m 格子までの各計算領域の範囲を示した。即時予測対象地域として、沿岸水位の結果を得るために、千葉県九十九里・外房地域に 2 つの 90 m 格子領域を設定した。これら 2 つの 90 m 格子の領域を包含するように 270 m 格子の領域を設定した。

なお、ここで作成した地形モデルを「沖合地形モデル」と称す。

2.2.1.2 陸域浸水の計算領域

陸域浸水計算では、2,430 m 格子領域から 10 m 格子領域までの計算領域を設定した。ここでは、前述した沖合津波計算において、伝播する津波が陸域に浸水するまでの計算を実施する。陸域浸水計算では、陸域への浸水の評価をより解像度が高い 10 m 格子領域で行う。そこで、沖合津波計算で設定した 90 m 格子領域の内側に、30 m 格子領域と 10 m 格子領域を新たに作成した。

浸水の評価する際の最小格子間隔の設定においては、国土交通省(2012)において、「局地的な地形も再現されていることが必要となることから、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。」と記載されている。これを参考に浸水の評価する格子間隔を 10 m 格子領域とした。90 m 格子領域から 10 m 格子領域への接続領域として 30 m 格子領域を設定した(図 2.2-4)。

格子間隔が小さくなることで計算格子数が多くなる。また、計算の安定条件により、格子間隔が同じ場合、水深が深いほど時間積分の間隔を小さくする必要がある、計算負荷が大きくなる。そこで、10 m 格子および 30 m 格子の計算領域を複数設定することにより、一度に計算する範囲を狭め、さらに最大水深が小さくなるように考慮することで計算の負荷を軽減し、同時に、各々の計算間の負荷の平準化を図った。10 m 格子の計算領域は、標高が高い地域や河川などの地形的な特徴に着目し、一連の浸水域が 1 つの計算領域で評価できるように分割した。合計 13 領域となった。なお、ここで作成した地形モデルを「沿岸地形モデル」と称す。

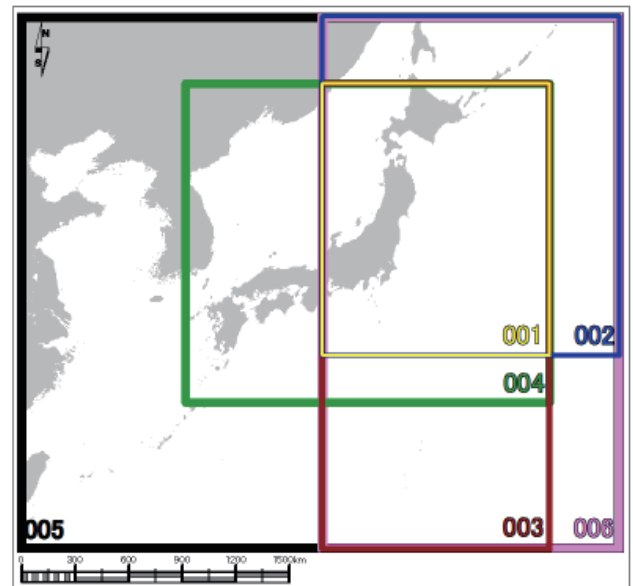


図 2.2-2 2,430 m 格子領域を設定した範囲。2,430 m 格子の計算領域は全部で 6 領域設定した。図中の数字は設定した 2,430 m 格子の計算領域番号であり、001(黄色枠)、003(赤色枠)、004(緑色枠)の北東端は同じ位置である。また、002(青色枠)、005(黒色枠)、006(桃色枠)の北東端も同じ位置である。

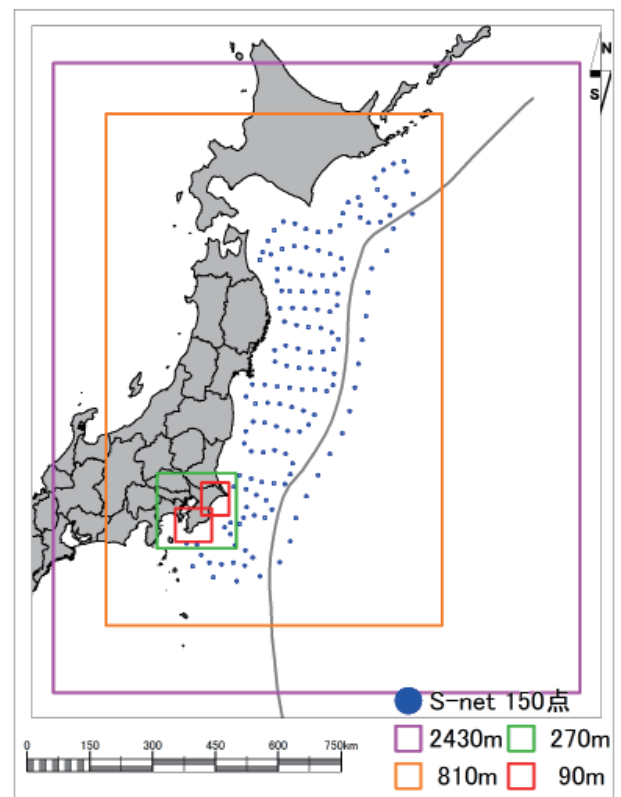


図 2.2-3 2,430 m 格子(2430-001)領域から 90 m 格子領域までの設定範囲

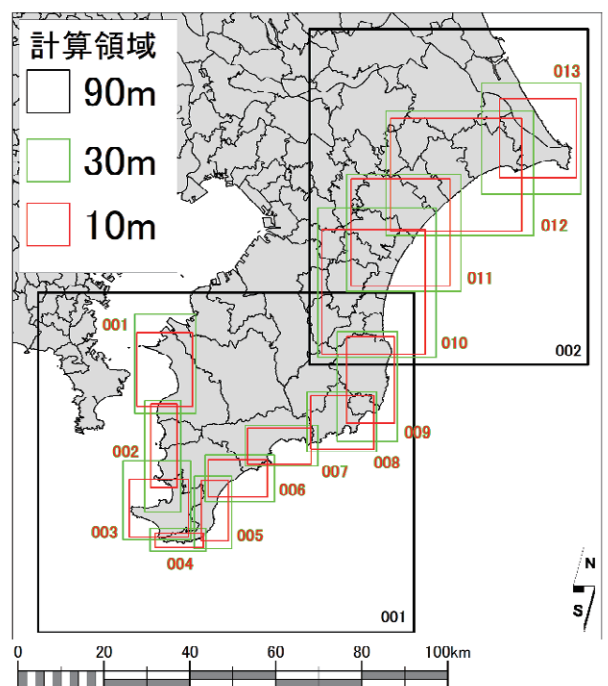


図 2.2-4 90 m 格子領域から 10 m 格子領域までの設定範囲。茶色数字は 10 m 格子の領域番号

2.2.1.3 概観津波の計算領域

概観津波計算では、千葉県館山市から青森県大間町および北海道函館市から根室市までの地域（以降、「概観予測対象地域」と称す）を対象に最小 90 m 格子の津波計算を実施した。

そのため、概観予測対象地域に、それぞれ 270 m 格子および 90 m 格子領域を設定した。このとき、2,430 m 格子と 810 m 格子、90 m 格子の 001 領域と 002 領域は沖合津波計算と同じ範囲を用いた。

2.2.1.4 遠地津波の計算領域

前述した 3 種類の津波計算とは異なり、太平洋全域の広範囲を計算対象とするため、震源域から日本近海に至るまでの津波伝播の範囲に地理座標系を用いた。ここでは格子間隔 10 分を基本とし、日本近海へ接続する計算領域として 3.3 分格子領域も設定した。日本近海での津波伝播および浸水計算は前述した平面投影座標系で計算するものとし、3.3 分格子領域から、2,430 m 格子の 004 領域へ接続させることとした。

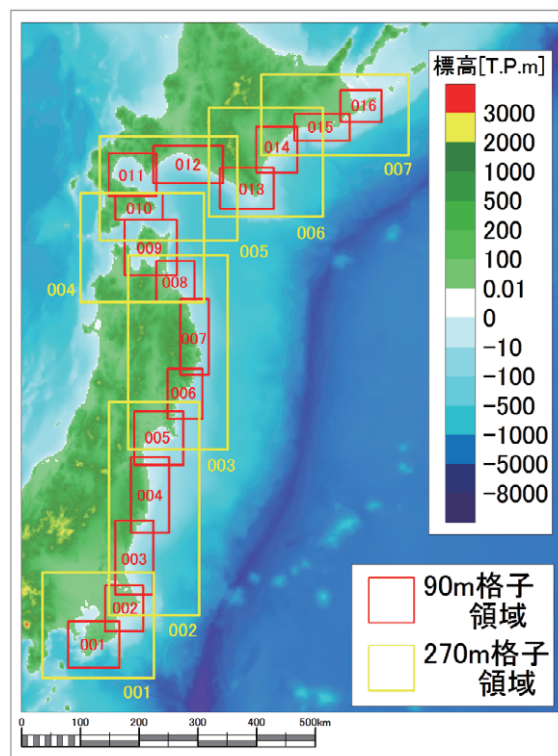


図 2.2-5 概観予測対象地域における 270 m 格子領域および 90 m 格子領域を設定した範囲。図中の数字は、各格子間隔における計算領域番号である。赤色字は 90 m 格子、黄色字は 270 m 格子である。

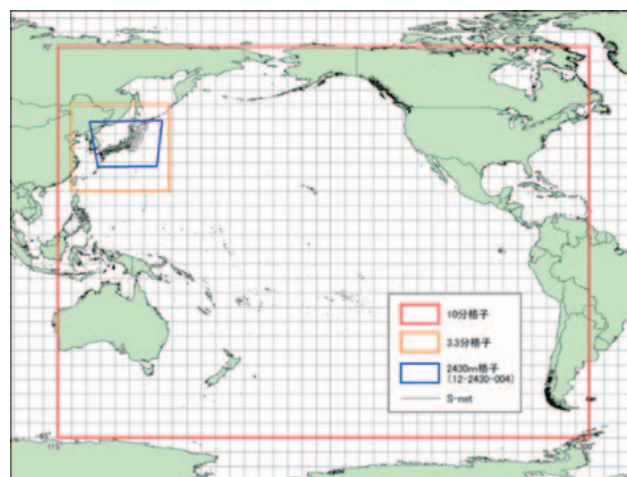


図 2.2-6 遠地津波地震計算における計算領域。10 分格子領域（赤枠）、3.3 分格子領域（橙枠）を設定した範囲。2,430 m 格子領域（青枠）

2.2.2 地形標高データ

ここでは、地形標高データの作成方法について記載する。地形標高データは各計算領域で用いる計算格子に合わせて、2次元格子の中心に標高値を持つ格子データとして作成した。

計算の種別ごとに、地形標高データに関するデータソースを表 2.2-1 から表 2.2-4 に整理した。計算領域とデータソースの座標系は異なる場合があるため、座標変換により計算領域の座標系に統一する必要がある。また、各格子中心における標高値が必要であるので、座標変換を施した地形データに対して、TIN (Triangulated Irregular Network, 三角形不規則網) 法によるデータ補間を行い、格子中心の標高を取得することとした。TIN 法は線形補間法であり、データソースから三角形要素による面を構築し (図 2.2-7 左)、格子中心にあたる位置の標高データを線形に内挿補間して格子データを生成する (図 2.2-7 右)。

本研究資料では、陸域の浸水进行评估するための最小 10 m 格子の地形標高データを作成する際に、データソースとして自治体の津波浸水想定を検討データを優先的に使用することとした。すなわち、本研究資料の即時予測対象地域においては、千葉県津波浸水想定で用いられたデータを参照した。千葉県の資料では不足する範囲や経年による地形変化については、より解像度の高い基盤地図情報数値標高モデル等を用いて補完した。

沖合津波計算において最小格子領域となる 90 m 格子領域については、10 m 格子領域の地形標高データを作成し、対応する 9×9 格子を平均することで高精度かつ整合的な地形標高データを作成した。

図 2.2-8 は平面投影座標系の地形標高データにおいて最も格子間隔が大きい 2,430 m 格子領域でのデータ作成結果の一例である。図 2.2-9 は、90 m 格子領域でのデータ作成結果、図 2.2-10 は、10 m 格子領域でのデータ作成結果である。

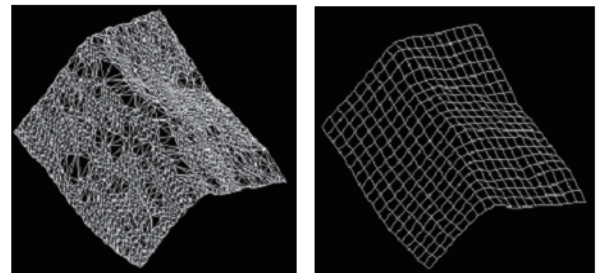


図 2.2-7 TIN(左)と格子データ(右)のイメージ

表 2.2-1 地形標高データのデータソース(沖合津波計算)

データソース				
データ名	データ提供	座標系	格子間隔	作成元データ諸元
ETOPO1	NOAA (2015)	地理座標系	1 分格子	• GTOPO30 • J-EGG500 • ETOPO2 • ETOPO5
確率論的 津波ハザード評価 (日本海溝)	防災科学技術研究所 (2014)	UTM54 帯	1,350m~50m 格子	• 数値地図 (国土数値情報) • 沿岸の海の基本図デジタルデータ • 海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ, M5000 シリーズ [縮尺:1 : 50,000] • 海図
確率論的 津波ハザード評価 (南海トラフ)	防災科学技術研究所 (2015)	UTM53 帯	1,350m~50m 格子	• 基盤地図情報 [数値標高モデル] • 精密基盤標高データ • 公共測量成果 (河川 LP データおよび砂防 LP データ) • 航空レーザ測量 • 自治体浸水想定データ • 海底地形デジタルデータ M7000 シリーズ, M5000 シリーズ • JTOPO30 • 海図

表 2.2-2 地形標高データのデータソース(陸域浸水計算)

データソース				
データ名	データ提供	座標系	格子間隔	作成元データ諸元
自治体 浸水想定 の検討データ	千葉県 (2012a) 千葉県 (2012b) 千葉県 (2012c) 千葉県 (2015a) 千葉県 (2015b) 千葉県 (2015c)	平面直角座 標系 IX系 (JGD2011)	最小 12.5m 格子, 最小 10m 格子	• 航空レーザ測量 • 数値地図 (国土数値情報) • 沿岸の海の基本図デジタルデータ • J-EGG500 • 海図
基盤地図情報数値 標高モデル 5m メ ッシュ (標高)	国土地理院 (2015)	地理座標系	5m 格子	• 航空レーザ測量と写真測量

表 2.2-3 地形標高データのデータソース(概観津波計算)

データソース				
データ名	データ提供	座標系	格子間隔	作成元データ諸元
中央防災会議 (2006) の地形データ	中央防災会議 (2006)	地域ごとの 平面直角座 標系 (日本測地系)	1,350m~50m 格子	• 海の基本図 • 海図 • 北方四島港湾測量図 • 50m メッシュデジタル標高データ • 一級河川横断断面図 • 主要な二級河川横断断面図及び海岸構造物の資料

表 2.2-4 地形標高データのデータソース(遠地地震津波計算)

データソース				
データ名	データ提供	座標系	格子間隔	作成元データ諸元
GEBCO_2014 Grid	General Bathymetric Chart of the Oceans (2014)	地理座標系	30 秒格子	- 各国の測量成果 - 日本近海は海上保安庁海洋情報室のグリッドデータを使用

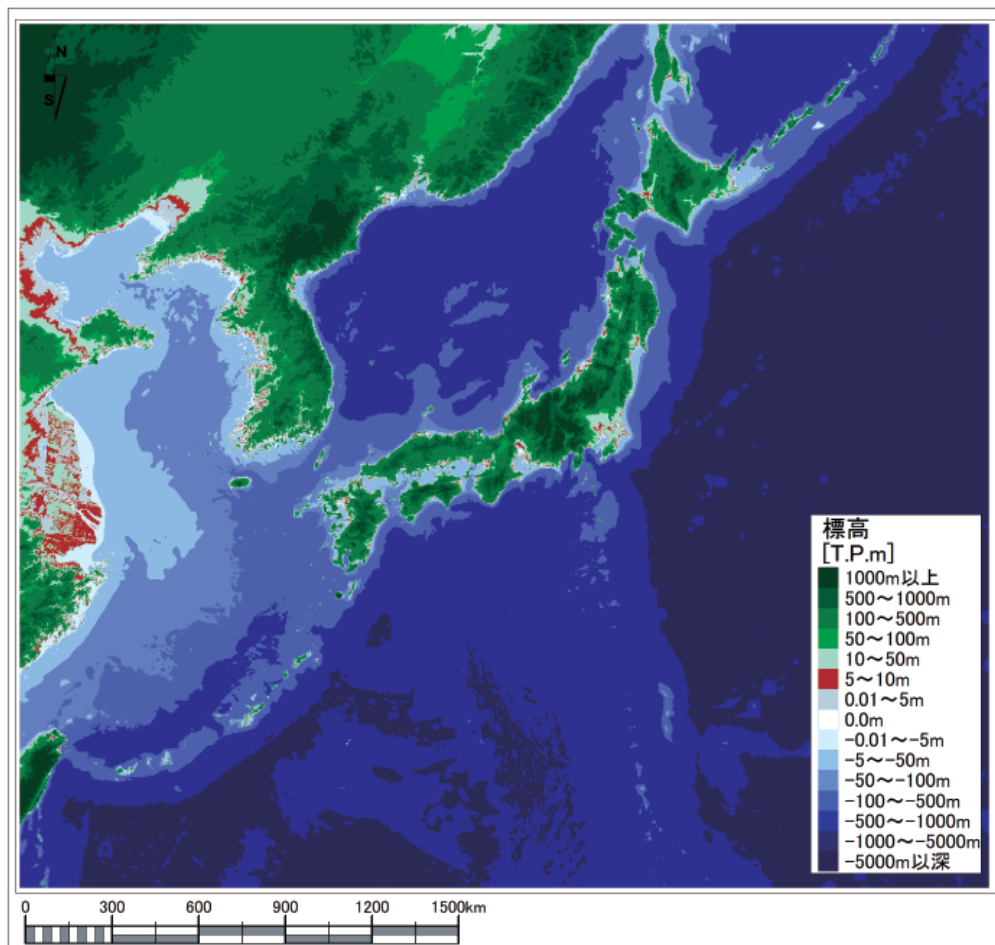


図 2.2-8 沖合地形モデルの作成結果 計算領域005(2,430 m 格子領域)

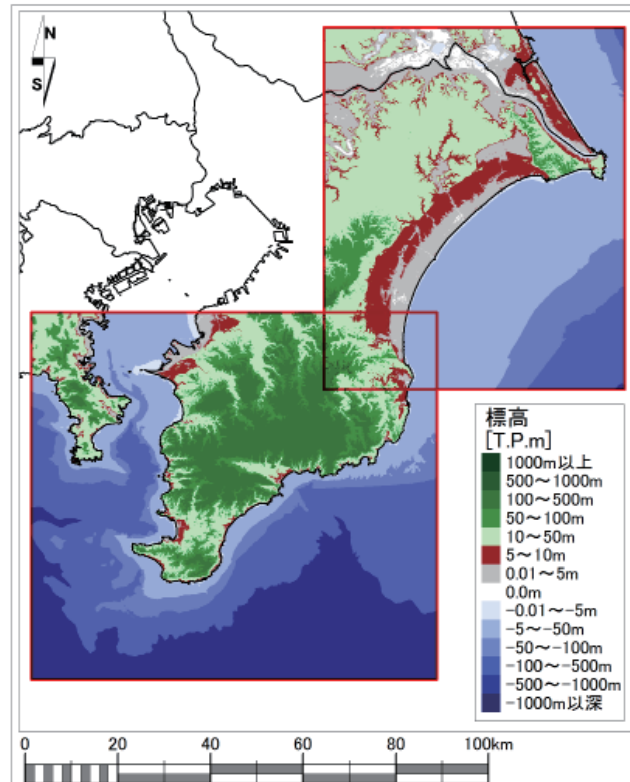


図 2.2-9 沖合地形モデルの作成結果. 計算領域 1 と計算領域 2(90 m 格子領域).
図中の赤枠は、90 m 格子の計算領域枠

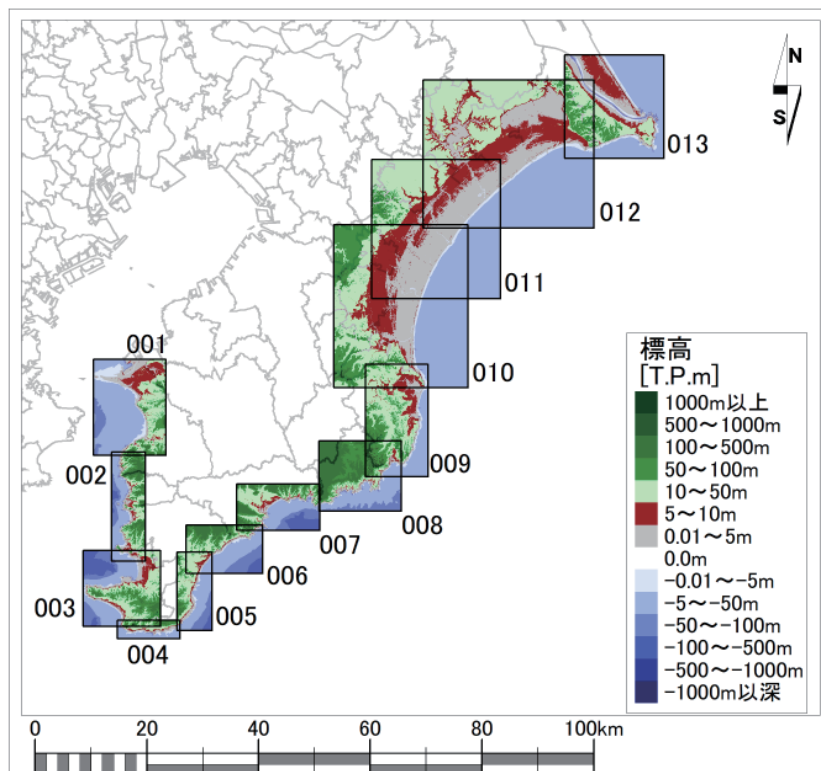


図 2.2-10 沿岸地形モデルの作成結果 計算領域 1 から計算領域 13(10 m 格子)

2.2.3 粗度係数データ

津波が伝播し、水深が浅くなるにつれて海底や浸水域の底面摩擦による抵抗が無視できなくなる。

平面2次元の津波解析における運動方程式(2.1.2項)のうち、この抵抗について一般的にマニング則による海底摩擦項によって表現され、x方向は以下の式(2-7)となる。

ここで、 n はマニングの粗度係数 [$\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$]、 D は全水深 [m]、 M 、 N はx、y方向の線流量 [m^2/s]、 g は重力加速度 [m/s^2]を表す。

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

このときの粗度係数の値は表2.2-5に示すように、小谷ほか(1998)にならい、土地利用区分に応じて設定する方法が広く用いられている。また、土地利用区分の分布については表2.2-6に示したデータを参照することが一般的である。自治体等により浸水評価対象地域における津波解析が既に実施されている場合は、そこで用いられた粗度係数データを利用する方法もある。土地利用変化を踏まえた修正は、航空測量等によるオルソ画像を参照することで実施することができる。

本研究資料においては、粗度係数データは、千葉県(2014a)、千葉県(2014b)、千葉県(2014c)で千葉県が作成した粗度係数データを用いて、各計算領域の格子データとして作成した。これらのデータは平面直角座標系IX系で作成されており、本研究資料の陸域浸水計算に合わせるためにUTM54帯に変換した。UTM54帯への変換においては、UTM54帯での各10m格子の中心座標に最も近い、平面直角座標系IX系における格子中心の値を採用することを基本とした。また、経年による土地利用状況の変化などについては、オルソ画像等をもとに視覚的に土地利用を判断し、各格子に対して表2.2-5を参照して粗度係数の値を修正した。

陸域浸水計算の対象としない2,430m格子から30m格子までの計算領域においては、一律の値 $0.025[\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}]$ を与え、作成した。

図2.2-11は、粗度係数データの作成結果の一例である。

表2.2-5 粗度係数の設定例(小谷ほか, 1998)

土地利用区分	粗度係数 [$\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$]
住宅地(高密度)	0.080
住宅地(中密度)	0.060
住宅地(低密度)	0.040
工場地等	0.040
農地	0.020
林地	0.030
水域	0.025
その他(空き地, 緑地)	0.025

表2.2-6 土地利用区分のデータソース

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
—	自治体の津波浸水想定検討データ	各自治体

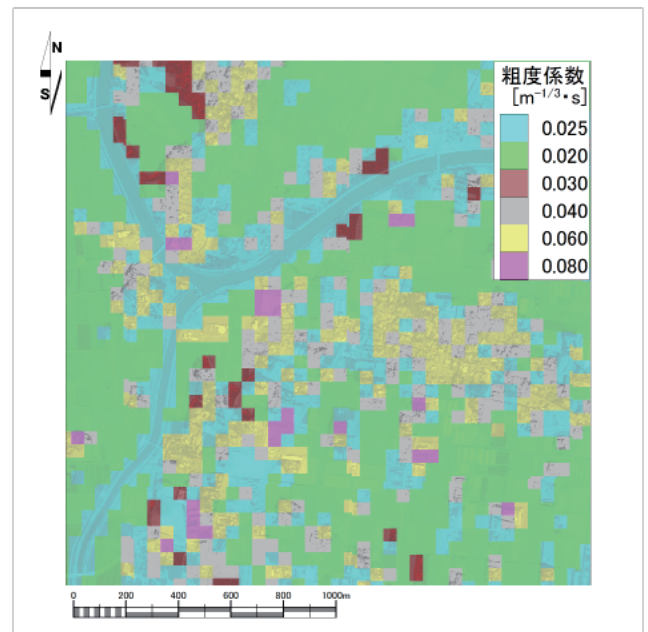


図2.2-11 粗度係数データ作成例。粗度係数分布図と航空写真の重ね合わせ。

2.2.4 構造物ラインデータ

漁港、港湾および海岸においては防波堤や防潮堤などの構造物が整備されている。また、河川においては堤防などの構造物が整備されている。これらの構造物が地震や津波により損傷することで、陸域への浸水被害は大きく変わる。そのため、陸域浸水計算では、構造物の損傷状態に関する「構造物条件」が重要となる。

格子間隔よりも狭い構造物は地形標高データとして表現することが難しい。そのため、図 2.2-12 の赤枠で示した図のように、格子間隔よりも狭い構造物は線境界条件としてモデル化することが一般的である。

図 2.2-13 は、線境界条件のモデル化における位置のイメージである。構造物が格子に対して、北側のみ、東側のみ、北側と東側の両方に位置する 3 パターン用いて、図 2.2-14 のように構造物の平面的な位置を表現し、線境界条件として設定することができる。

構造物の高さや位置は、自治体等が整備している河川施設台帳、海岸保全施設台帳や航空写真などを用いて把握する。また、自治体等により当該地域において津波浸水想定が検討されている場合、陸域浸水計算のために構造物データが作成されている場合があり、それを利用することもできる。ただし、データの作成時点以降に、施設整備等により施設の位置や高さに変更になる場合も考えられ、それらの変更情報を反映して最新のデータとすることが望ましく、必要に応じて現状の構造物の状況を踏査により確認する必要がある。

本研究資料では、千葉県(2015a)、千葉県(2015b)、千葉県(2015c)の構造物データを参照した。

これらの既往検討では、10 m 格子領域に対してのみ構造物データが作成されている。本研究資料では、浸水遡上を評価する 10 m 格子領域に対してのみ構造物ラインデータを作成することとした。

千葉県(2015a)、千葉県(2015b)、千葉県(2015c)の構造物データは本研究資料における座標系や計算領域の範囲とは異なる計算格子に対して作成されているため、そのまま利用することができない。そこで、オルソ画像を参考に構造物の位置を特定し、UTM54 帯の 10 m 格子辺上に再設定し直した。ここに、千葉県(2015a)、千葉県(2015b)、千葉県(2015c)の構造物データの高さを割り当てることで構造物ラ

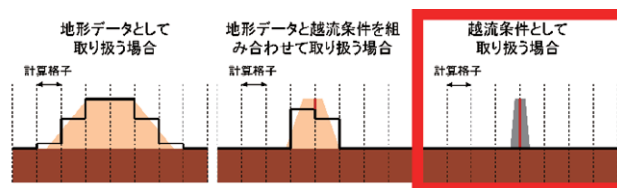


図 - 11 津波浸水シミュレーションにおける構造物の取り扱いの例

図 2.2-12 線境界としてモデル化するイメージ。国土交通省(2012)の図 -11 (p.34)を引用

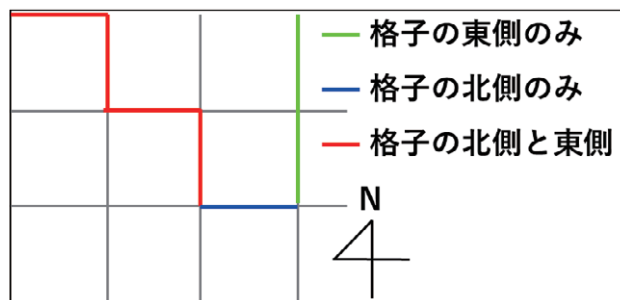


図 2.2-13 構造物ラインデータの種類

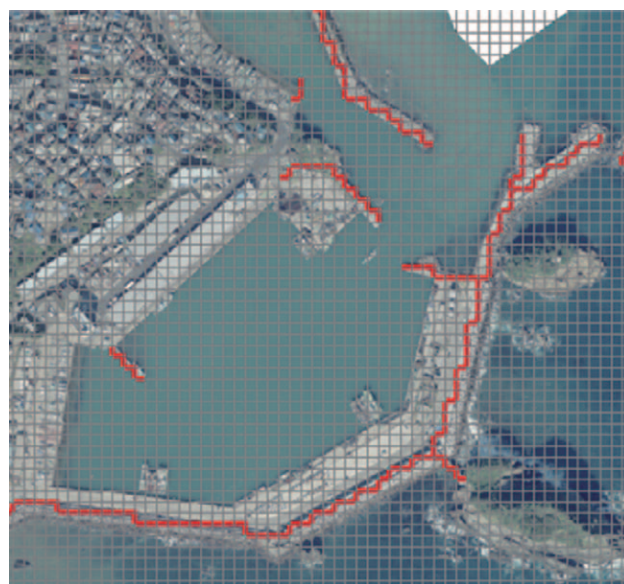


図 2.2-14 構造物ラインデータを 10 m 格子に設定するイメージ。赤線は、構造物ラインデータであり、灰色格子が 10 m 格子の格子辺である。背景は航空写真である。

インデータを作成した．さらに本研究資料では計算を実施するのに不足する範囲について，航空写真や現地踏査によって構造物の位置を特定し，基盤地図情報 5 m メッシュなどの測量成果から高さ推定することでデータを補完した．

なお，国土交通省 (2012) に準拠し，離岸堤等，津波が来襲した際に透過することが明らかな構造物は，構造物ラインデータとして表現しないようにした．また，内陸にある幅の広い道路盛土などは壊れないことを想定し，構造物ラインデータではなく，地形標高データとして表現した．

本研究資料では地震や津波による損傷状態を想定した 3 つの構造物条件を設定した．これらの構造物条件の詳細は 3.5 節に記載した．3 つの構造物条件には，地震動による沈下を考慮するものとししないものがあるため，2 種類の構造物ラインデータを作成した．地震動による沈下が生じる条件では，国土交通省 (2012) を参考に，コンクリート構造物は地震動によって比高 (地盤面からの高さ) が 0 まで沈下し，土堤は比高が 75% 低下する条件とした．なお，地震動による沈下が生じない場合には構造形式を区分しないこととした (図 2.2-15)．

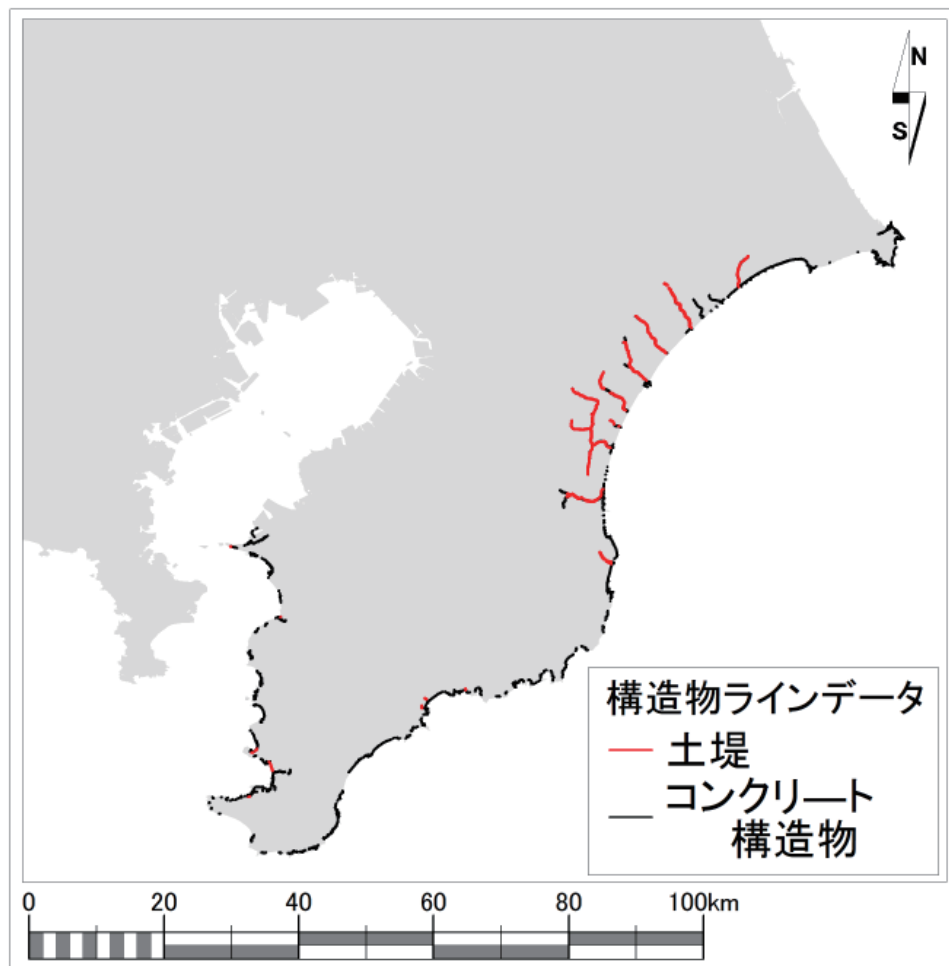


図 2.2-15 構造物ラインデータ作成結果 (10 m 格子)．赤線が土堤，黒線がコンクリート構造物の区間である．

2.2.5 陸判定マップデータ

沖合津波計算や陸域浸水計算の計算開始時点における陸域と水域の区別を定めたデータである。

沿岸の低地には、満潮位や平均潮位より標高が低い土地も存在する。津波計算に用いる潮位条件より低い土地に対して、水がない状態で計算を開始するため、陸域と水域の区別を定めたデータを用いる必要がある。その作成には、地形標高データ、構造物ラインデータ、航空写真などを用いる(図 2.2-16)。

本研究資料においては、各計算領域の格子データとして整備し、陸域は 1、水域は 0 とした。

沖合津波計算に関して、潮位条件が T.P.+0.0 m における陸判定マップデータを作成した。

陸域浸水計算に関しては、潮位条件を朔望平均満潮位とした陸判定マップデータを作成した。即時予測対象地域の朔望平均満潮位は T.P.+0.70 m である。

2.2.6 沿岸水位抽出点データ

最小 90 m 格子と最小 10 m 格子の津波計算における沿岸での最大水位、最大相対水位および到達時間の取得位置を定めたデータである。

ここでは、震源断層破壊開始時刻を到達時間の原点(0 秒)として、沿岸水位抽出点における水位または相対水位が、最初に ± 20 cm, ± 50 cm, ± 100 cm に達した時間を到達時間として抽出することとした。

図 2.2-17 は作成結果の一例である。標高 0 m 以上と 0 m 未満となる境界に沿って、標高 0 m 未満となる格子に沿岸水位抽出点を設定した。

沖合津波計算および陸域浸水計算において沿岸水位抽出点が必要となるため、それぞれの最小格子間隔である 90 m 格子と 10 m 格子における沿岸水位抽出点を作成した。

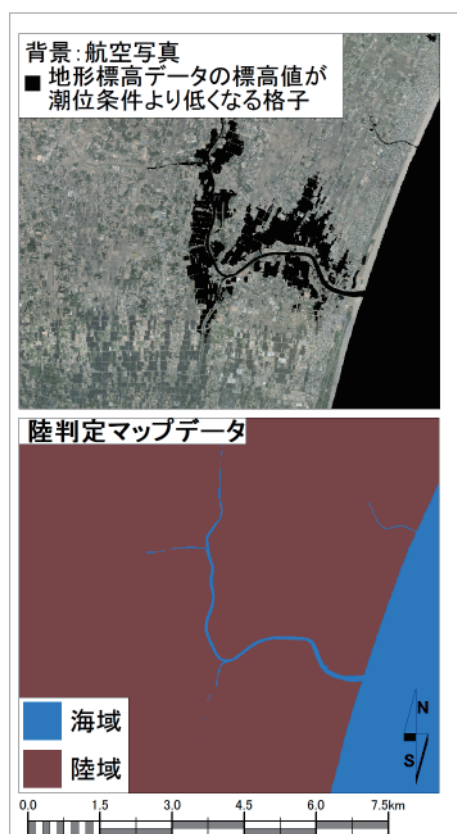


図 2.2-16 陸判定マップデータの作成イメージ。
上：航空写真および地形標高データの標高値が潮位条件より低くなる格子(黒色), 下：作成した陸判定マップデータの一例

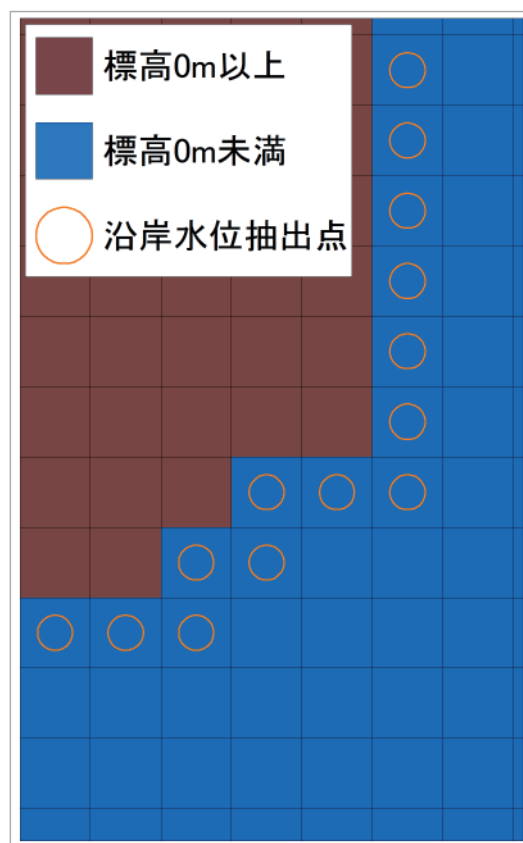


図 2.2-17 沿岸水位抽出点データの一例。茶色：標高 0 m 以上の格子，青色：標高 0 m 未満の格子であり，橙円が沿岸水位抽出点の位置を表している。図中の黒線は，1 辺 10 m の格子線である。

2.2.7 堤外マスクデータ

陸域浸水計算では、津波による水位上昇がほとんどない場合でも防潮堤等の海側に位置する堤外地、水際の岩場や砂浜といった場所では、浸水が生ずる場合がある。このため、陸域浸水計算結果を評価しようとする場合、津波浸水による被害が生じる可能性の高い範囲（堤内地）を特定して、その範囲の浸水状況を評価する方が好ましい場合がある。

そこで、陸域の浸水进行评估する 10 m 格子の計算領域に対して、浸水进行评估する格子を定義する堤外マスクデータを格子データとして作成した。このとき、堤内地（浸水評価対象）とする格子を 1、堤外地とする格子を 0 とした。

作成する際には、構造物ラインデータの位置と航空写真を参考とした。

図 2.2-18 は、堤外マスクデータにおける堤内地と堤外地の設定範囲を示した図である。図 2.2-18 の桃色の網掛け範囲が堤外地とし、それ以外は堤内地とする。

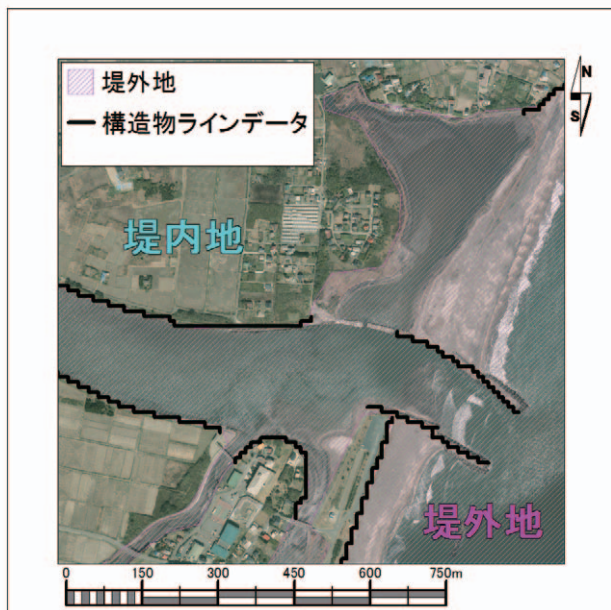


図 2.2-18 堤外マスクデータにおける堤内地と堤外地の範囲を示した例。桃色の網掛けは堤外地とする範囲である。

2.2.8 領域マスクデータ

90 m 格子領域としては計算領域を 16 領域、10 m 格子領域としては計算領域を 13 領域設定した。これらの計算領域では、隣接する計算領域と重複する範囲が存在するように領域を設定した。

90 m 格子および 10 m 格子の計算領域の重複する範囲内の各格子に対して、いずれか 1 つの計算結果で代表させて評価する必要がある場合がある。そのため、重複範囲を分割して、計算領域ごとに評価する範囲を定めた領域マスクデータを作成した。

評価対象の格子の場合は 1、評価対象外の格子は 0 とした。図 2.2-19 は 10 m 格子の計算領域における領域の境界を示した図である。

領域マスクデータの範囲は、岬や崖地、河川等の地形的特徴をもとに、一連の浸水域が 1 つの計算領域で評価できるように設定した。

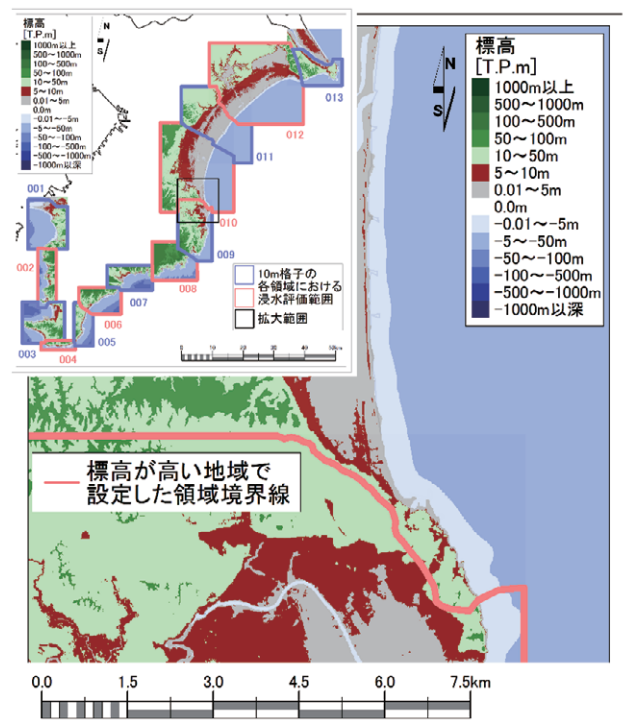


図 2.2-19 領域マスクデータ作成結果（10 m 格子の計算領域）。黒枠は、計算領域 9 と計算領域 10 の領域マスクデータの境界部分の拡大図である。当該領域は浸水に影響がない標高が高い地域をもとに、設定した。

2.2.9 市区町村判定マップデータ

90 m 格子および 10 m 格子の計算領域において、各格子がどの市区町村に属するかを判定するため、格子ごとに総務省地域力創造グループ地域情報政策室(2016)の都道府県コードおよび市区町村コード（以降、「市区町村コード」と称す）を与えた。市区町村コードは 6 桁からなり、左 2 桁が都道府県、右 4 桁が都道府県内の市区町村を表すコードになっている。

例) 千葉県いすみ市の場合

市区町村コード：122386

12：千葉県

2386：いすみ市

格子ごとに市区町村のコードを作成する際には、国土数値情報の行政界を参照し、格子の中心が含まれる市区町村の市区町村コードを与えた。また、海域は“-999”とした。

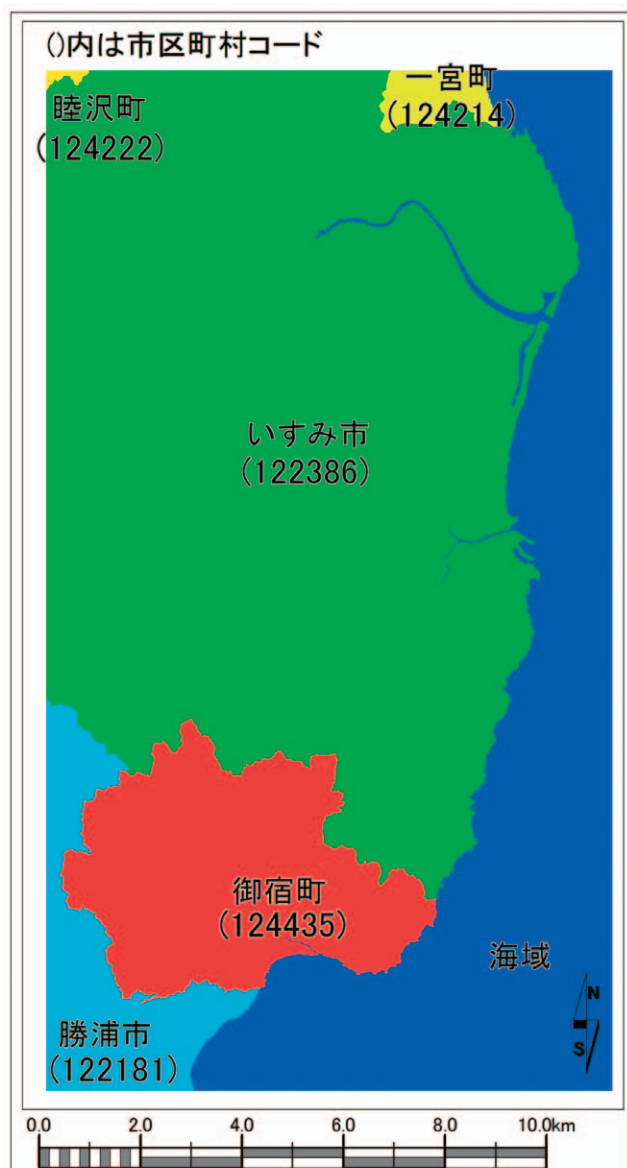


図 2.2-20 市区町村判定マップデータ作成。例として 10 m 格子の計算領域 9 の範囲を市区町村コードごとに色付けした。

2.2.10 人口データ

津波による人的な被害を推計するために格子ごとの人口を整理したデータである。

人口データの作成には、統計情報研究開発センター国勢調査(2010)および統計情報研究開発センター経済センサス基礎調査(2009)による地域メッシュ統計(第1次地域区画コード別)を用いる。これらのデータは、約 500 m の格子で作成されており、格子間隔に合わせて按分することで作成した。按分する際には、国土地理院が提供している基盤地図情報に含まれる建築物データを参照し、分割率を定義して実施した。

本研究資料では、10 m 格子の計算領域においてのみ作成した。

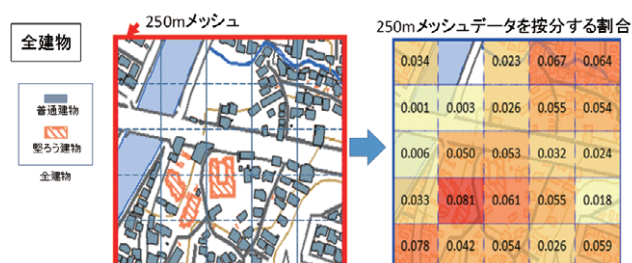


図 2.2-21 建築物データを使用し、分割率を定義して按分するイメージ

2.2.11 観測点データ

津波の時系列変化を抽出するための観測点位置を示した点データである。

沖合の観測点として S-net の他、その他の海底水圧計などの沖合にある観測点、NOWPHAS 等の観測機器の位置を採用した。沿岸に近い観測点として、即時予測対象地域および概観予測対象地域における検潮所や験潮場等の沿岸観測点の位置を採用した。

これらの観測点数は、S-net については 150 地点である。その他のデータを含めると計 274 地点を電子ファイルにまとめた(付録の 1.2_観測点位置情報(表))。

2.3 波源断層データ

本節では、津波の計算に用いる断層データの作成方法について整理する。断層データに含まれる各種データの概要について以下に記す。

2.3.1 断層パラメータ

断層パラメータは、矩形の波源断層モデルもしくはある程度の規模以上の波源断層モデルを構成する要素断層の幾何学的特徴を記述するパラメータのことであり、津波の初期水位の計算の入力データとして用いられる。表 2.3-1 に 10 個の断層パラメータを示す。ここで、断層原点とは図 2.3-1 に示すとおり断層面を手前に傾き下がるようにおいた場合の左上端位置を指す。それぞれのデータの意味合いの詳細は 3.3 節を参照のこと。

2.3.2 動的震源特性パラメータ

動的震源特性パラメータは 2.3.1 項に示す静的断層パラメータでは表現できない動的特性を記述するものである。動的破壊を考慮した計算では、波源断層モデルを構成する要素断層を瞬間で破壊させるのではなく、破壊開始点を中心に断層面上で同心円状に破壊領域が広がるように設定する。初期水位計算の便宜上、設定するパラメータとしては破壊作用の順番や、グルーピングした要素断層ごとに破壊を作用させる適用時間を指定する。また、個々の要素断層面内で有限の破壊伝播速度で破壊が進展すると仮定し、破壊開始時間の違いを考慮する場合には、立ち上がり時間を設定する。

2.3.3 鉛直地殻変動量の計算手法

初期水位の計算のため、2.3.1 項で定義された断層パラメータを入力値として Okada (1992) の方法で鉛直地殻変動量を算出したものを準備する。

2.3.4 水平地殻変動による水位変化量の計算手法

断層運動に伴う海底面付近の水位の変動は 2.3.3 項の鉛直成分の地殻変動量に加えて、2.1.1 項で述べたとおり、水平地殻変動による見かけの海底変動を準備する。

2.3.5 初期津波高の計算手法

2.3.3 項および 2.3.4 項で計算された地殻変動に伴

う水位変化は海底面付近の水の移動であり、海面においては短波長成分を取り除いた水位分布を初期津波高として与える。よって、2.1.1 項で記述したとおり鉛直地殻変動と水平地殻変動による見かけの海底変動の合算に対して Kajiura (1963) の水理フィルタを施した。

表 2.3-1 静的断層パラメータ

記号	意味
Y	断層原点 Y 座標
X	断層原点 X 座標
D	断層原点の T.P. 基準の深さ
Dcor	断層原点の補正後深さ。各断層位置での D から水深を差し引いた値
θ	北向きを 0° として時計回りに測った角度
δ	断層面の水平からの傾斜角
λ	上盤の下盤に対する食い違方向を、断層面で走向方向より反時計回りに測った角度
L	断層の長さ
W	断層の幅
U	断層の全すべり量

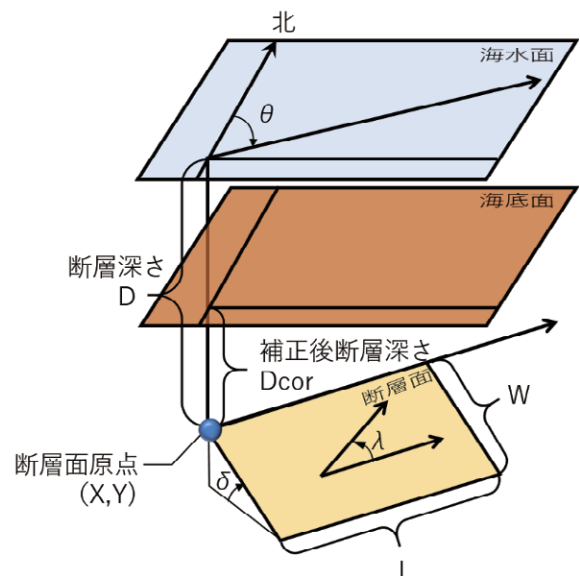


図 2.3-1 断層パラメータ

2.4 津波シナリオデータ

本節では、津波解析により得られるシナリオデータについて整理する。シナリオデータに含まれる各種データの概要について以下に記す。

2.4.1 時系列水位データ

時系列水位データは、あらかじめ設定した観測点位置における水位の時系列波形を等時間間隔で出力するものである。基準とする水位は T.P.+0 m である。設定された観測点については 2.2.11 項を参照のこと。

図 2.4-1 に示すように 2.3.2 項で記述した動的震源特性パラメータで表現される断層運動の考慮の有無で時系列データに違いが現れる。地震発生時を 0 秒として 5 秒間隔で出力した。時系列水位データの出力例を図 2.4-2 に示す。

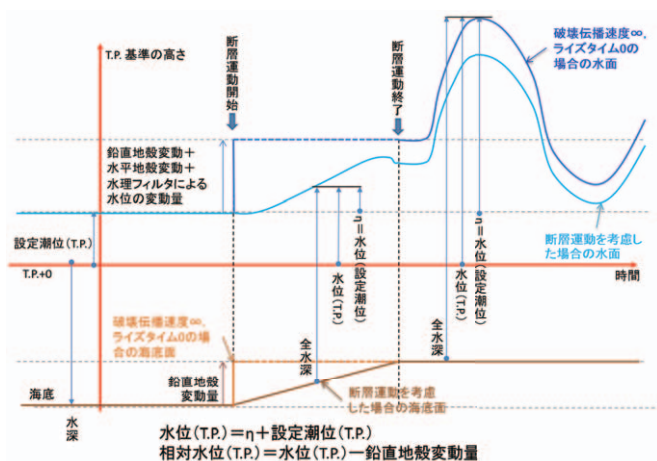


図 2.4-1 津波高の定義模式図

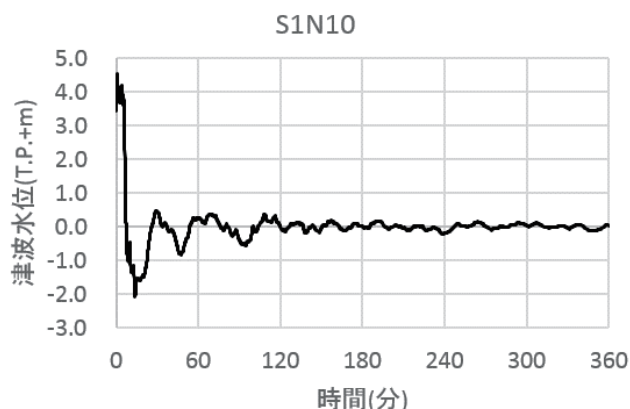


図 2.4-2 時系列水位データの例

2.4.2 時系列全水深データ

時系列全水深データは、あらかじめ設定した観測点位置における全水深の時系列波形を等時間間隔で出力するものである。通常の津波計算においては2.4.1項の津波水位のみが出力されるが、S-net 観測網で実際に得られる物理量は海底水圧であり、観測値と直接比較できる値は以下の式により算出される。

$$P = \rho g H \quad (2-8)$$

ここで、

P : 海底水压 (Pa),

ρ : 海水の平均密度 (kg/m^3),

 H : 全水深 (m),

である.

そのため、本研究資料ではシナリオデータとして全水深の時系列データを出力した。図 2.4-1 に示すように津波伝播計算開始時に地盤変動が終わっている場合(破壊伝播速度 ∞ , ライズタイム 0)には、津波水位に初期の水深を足した値が全水深として利用できるが、本研究資料で扱う動的な断層破壊運動では、水深の値は初期値から変動するため、全水深の時系列を出力した。時系列全水深データの出力例を図 2.4-3 に示す。

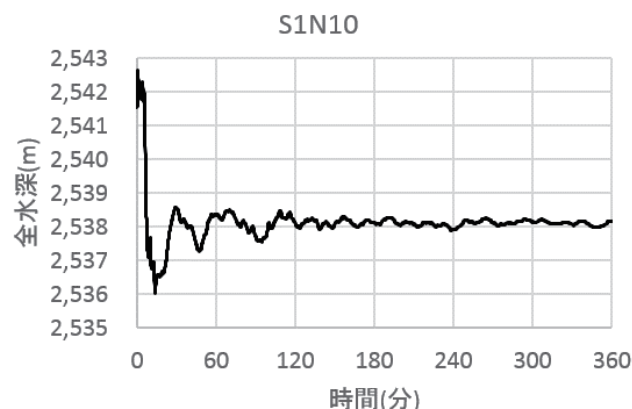


図 2.4-3 時系列全水深データの例

2.4.3 最大水位および最大相対水位データ

最大水位は津波解析時間内においてある地点（格子）の水位最大値である。最大相対水位ではその地点の鉛直地殻変動量を差し引くことにより、地震後の基準面からの水位の最大値を示す。（図 2.4-1 参照）

2.4.4 水位到達時間および相対水位到達時間データ

水位到達時間は津波解析時間内においてある地点（格子）の水位が正の閾値（cm）を超えたとき、もしくは負の閾値（cm）以下となった計算開始時刻からの経過時間である。相対水位到達時間ではその地点の鉛直地殻変動量を加減して地震後の基準面からの相対水位が正の閾値（cm）以上、もしくは負の閾値（cm）以下となった震源断層破壊開始時刻からの経過時間である。

到達時間の閾値の例は表 2.4-1 を参照のこと。

表 2.4-1 水位到達時間および相対水位到達時間の閾値の種類

名称	閾値
到達時間閾値	+ 20, - 20, + 50, - 50, + 100, - 100

2.4.5 最大浸水深および浸水深到達時間データ

最大浸水深は津波浸水計算時間内においてある地点（格子）での浸水深の最大値である。浸水深は各格子の水位（T.P.+0 m）から地盤高さ（T.P.+0 m）を差し引いて算出する。浸水深到達時間は、ある地点（格子）で計算開始時刻から最初に浸水深が閾値を超えた時間を指す。MAX の場合は最大浸水深の到達時間となる。

浸水深到達時間の閾値の例は表 2.4-2 を参照のこと。最大浸水深の分布図の例を図 2.4-4 に示す。

表 2.4-2 浸水深到達時間の閾値の種類

名称	閾値
到達時間閾値	+ 1, + 20, + 30, + 50, + 100, + 200, MAX

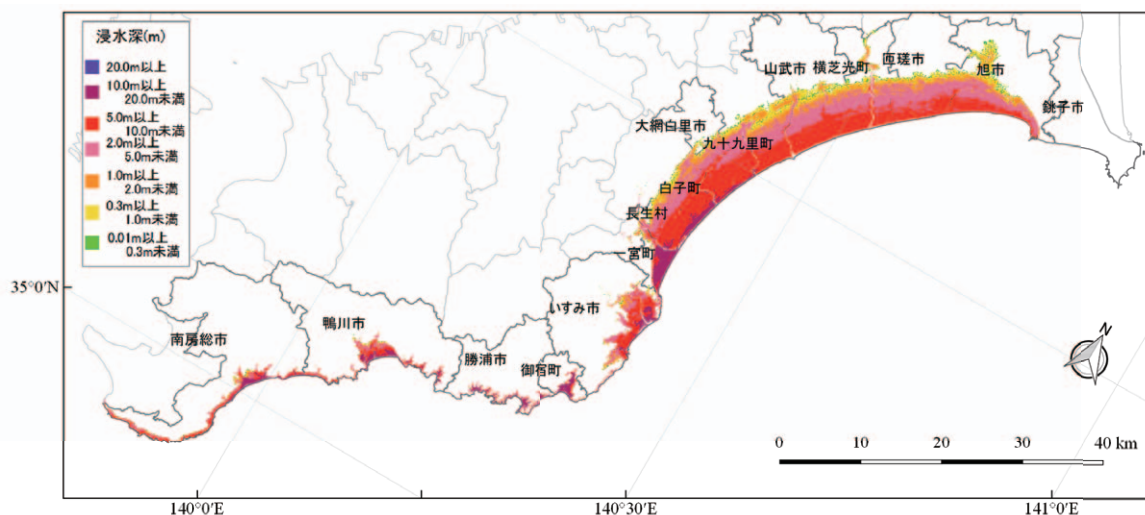


図 2.4-4 最大浸水深分布図