

1.2 津波シミュレーションによる浸水予測図の作成

資料 1-2

パシフィックコンサルタンツ株式会社

1.2.1 検討対象領域

検討対象領域は、図 1.2-1 に示すように、千葉県の沿岸部全域とし、以下の 3 つの区域に分割して津波シミュレーションの予測を行うものとする。

- ① 千葉県九十九里・外房 (犬吠埼～野島崎)
- ② 千葉県内房 (野島崎～富津岬)
- ③ 東京湾内湾 (千葉県) (富津岬～浦安市)

ここで、千葉県の沿岸部全域の分割法は、気象庁の津波警報・注意報等の予報発表区域に準拠した。これは、気象庁による津波予報が、図 1.2-1 に示した沿岸 3 区域において、区域内での最大津波高として公表されることから、これに対応して領域を設定した。

第 4 回の本専門委員会では、千葉県九十九里・外房区域に着目し、津波シミュレーションによる浸水予測図の作成法などについて示すものとする。

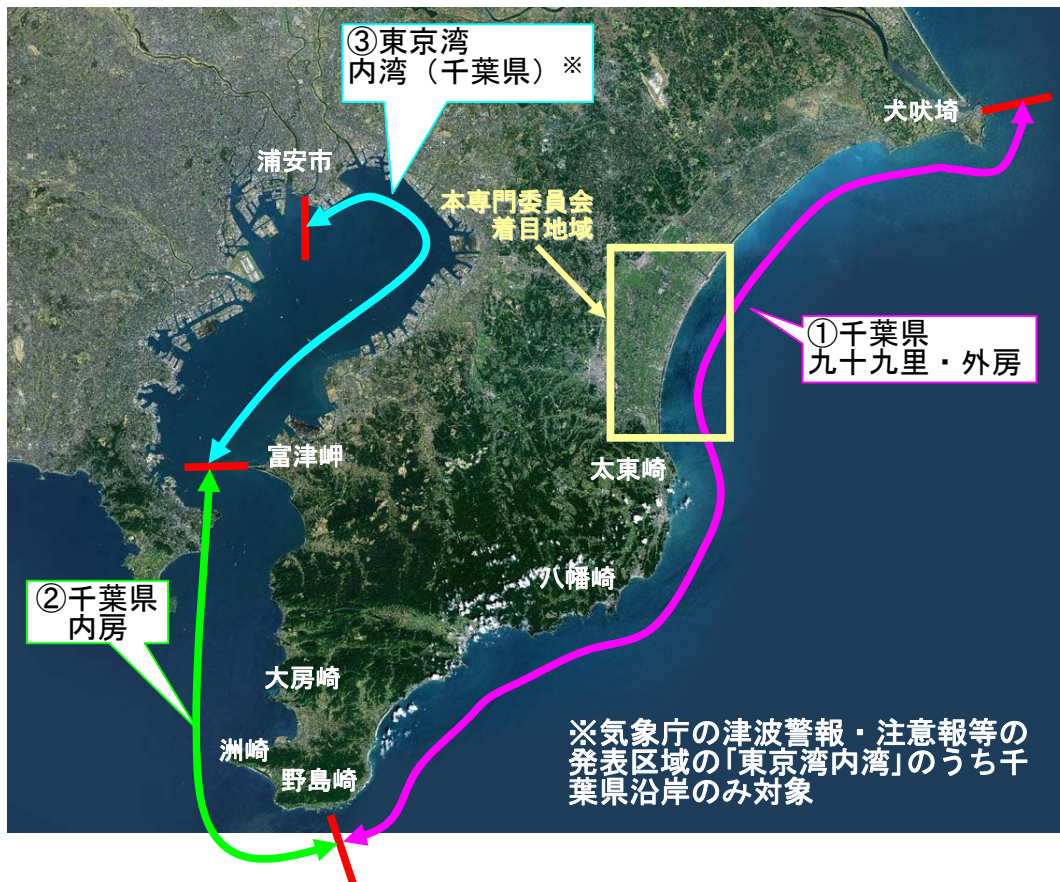


図 1.2-1 検討対象領域

1.2.2 検討対象地震

(1) 検討ケース

千葉県における地震予知は単純に過去の地震を統計処理しても非常に難しいと考えられる。

本業務における対象地震は、過去において千葉県に最も大きな津波被害を与えた**延宝地震（1677）**、**元禄地震（1703）**が再来した場合の地震を選定する。

検討ケースは、気象庁津波警報との対応や、比較的津波高が小さいと思われる東京湾内での危険警報を考慮し、表 1.2-1 に示すようなケース数を行う。

検討対象地震である元禄地震においては、平成 17 年度以降断層モデルの研究が進み、新たな地震モデルが提案されている産総研モデル（行谷ほか、2011）のパラメータを使い津波シミュレーションを実施する。また、延宝地震に関しては、新たな地震モデルの提案などの研究が進んでいないため、平成 17 年度に県土整備部で実施された津波解析業務で示されているモデルを活用する。

検討の一覧を下記に示す。

表 1.2-1 検討ケース一覧

予報区	延宝地震（1677）	元禄地震（1703）
③東京湾内湾	—	○（産総研モデル）
①九十九里・外房 ②内房	<ul style="list-style-type: none">・ 気象庁津波予報区分改訂案のうち、波高の大きな3区分（3m、5m、10m）に対応した津波高さを沿岸部で生じるように3ケースとする・ 2つの地震津波に対して、沿岸域の浅い海域地点での津波波高が大きくなる地震津波を選択し、両地震津波のいずれかの周期性は確保する	

(2) 検討対象津波の波源モデル

1) 対象地震津波の被害規模

延宝地震（1677）と元禄地震（1703）の断層位置図を図 1.2-2 に、被害規模を表 1.2-2、
図 1.2-3 にそれぞれ示す。

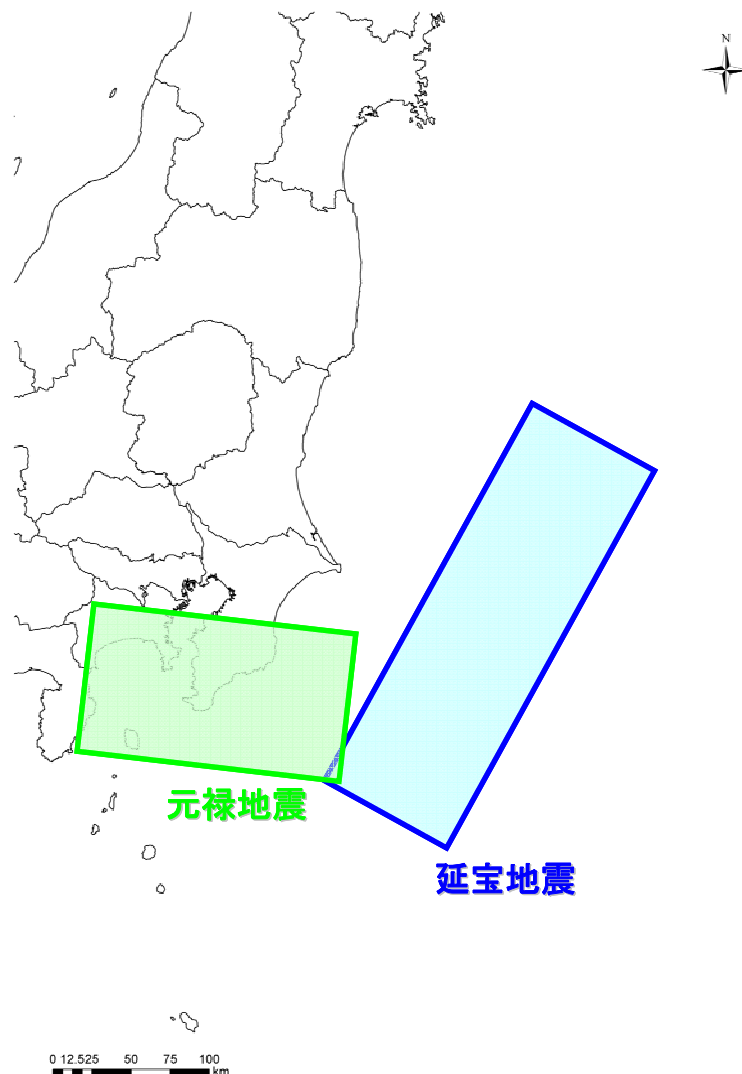
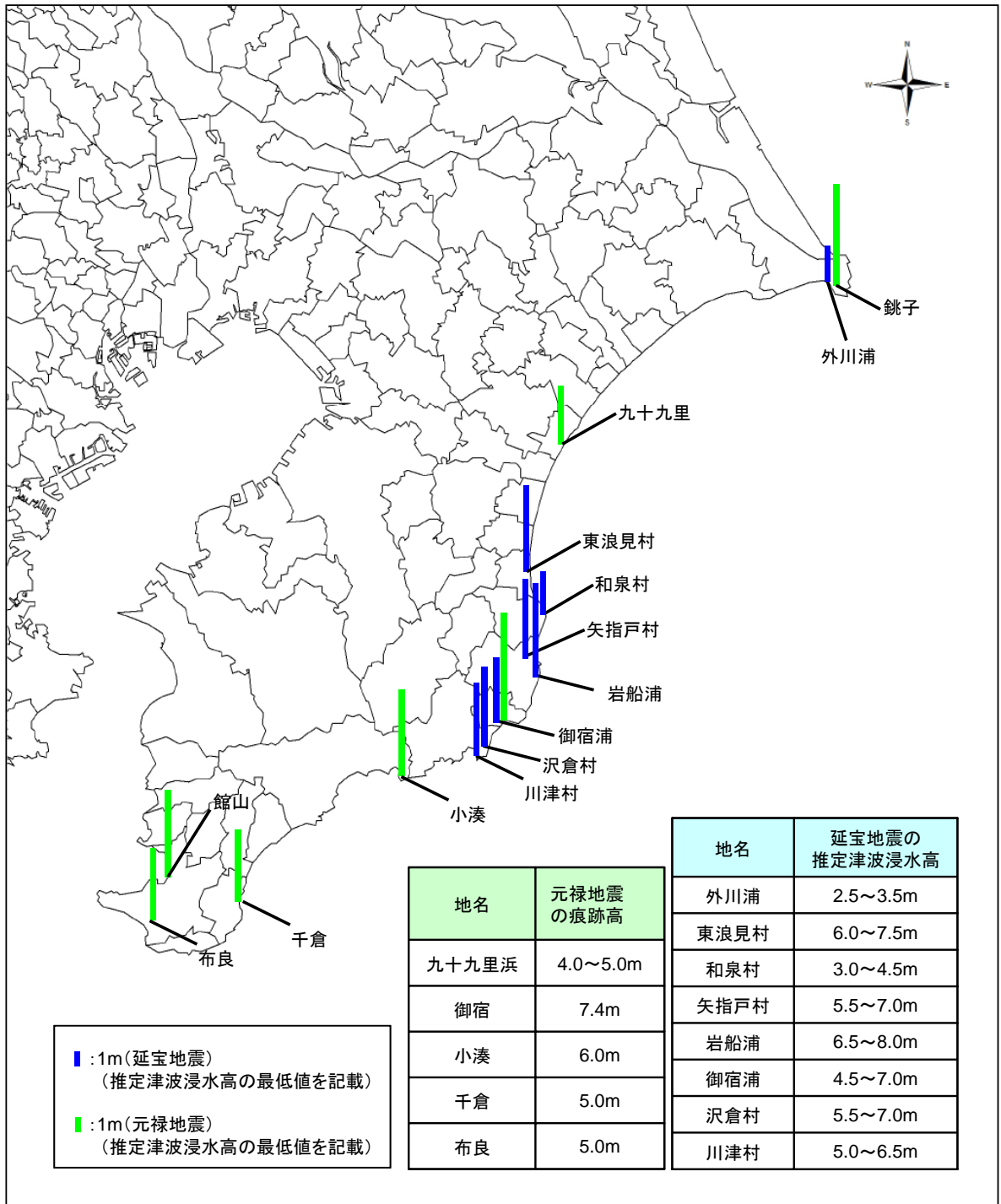


図 1.2-2 検討対象地震の断層位置図

表 1.2-2 対象地震津波の被災状況と地震規模一覧

西暦 (年月日)	和暦 (年月日)	地震の名称	被災地域	規模 (M)
1677.11.04	延宝 05.10.09	延宝地震	磐城・常陸・安房・ 上総・下総	8.0
1703.12.31	元禄 16.11.23	元禄地震	江戸・関東諸国	7.9～8.2

※出典：千葉県 HP（所属課室：防災危機管理監防災危機管理課政策調整班）



0 3.5 7 14 21 28 Km

図 1.2-3 延宝地震（1677）と元禄地震（1703）の津波痕跡記録図

※出典（延宝地震）：竹内ら、延宝房総沖地震津波の千葉県沿岸～福島県沿岸での痕跡高調査

※出典（元禄地震）：千葉県総務部消防防災課：元禄地震 九十九里浜大地震の記録、1975

2) 波源モデル

地震発生から沿岸に津波が到達するまでの時間や津波浸水範囲を踏まえ、市町村の避難計画立案に寄与することを念頭に対象津波を選定する。

避難計画立案の観点からは、千葉県沖合近傍で発生する大規模津波の採用を基本とする。なお、今次津波については千葉県より震源が遠く津波到達まで時間を要することから対象外とする。

千葉県で痕跡記録のある津波としては、表 1.2-3 に示した千葉県に大きな被害を与えた津波が知られており、本検討では「延宝地震（1677）」、「元禄地震（1703）」を基本に検討を行うものとする。

「延宝地震（1677）」については、平成 17 年度に県土整備部での検討^{※1}において使用された波源モデルを用いる。この波源モデルは中央防災会議モデル^{※2}のすべり量を調整した波源モデルである。

「元禄地震（1703）」は、産総研モデル（行谷ほか、2011）^{※3}により構築された波源モデルを用いる。

それぞれの波源モデルから算出した初期地盤変動量分布図を図 1.2-4、図 1.2-5 に示す。

表 1.2-3 検討対象波源モデル

対象地震	波源モデル	備考
延宝地震（1677）	H17 検討での波源モデル	県土整備部での検討条件を踏襲
元禄地震（1703）	産総研モデル（行谷ほか、2011）	

※1 出典 : 平成 17 年度 県単海岸調査委託（津波対策・シミュレーション業務）報告書 H18.9

※2 出典 : 中央防災会議「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」第 10 回資料

※3 出典 : 行谷ほか（2011）、南関東沿岸の地盤上下変動および九十九里浜の津波浸水域から推定した 1703 年元禄地震の断層モデル

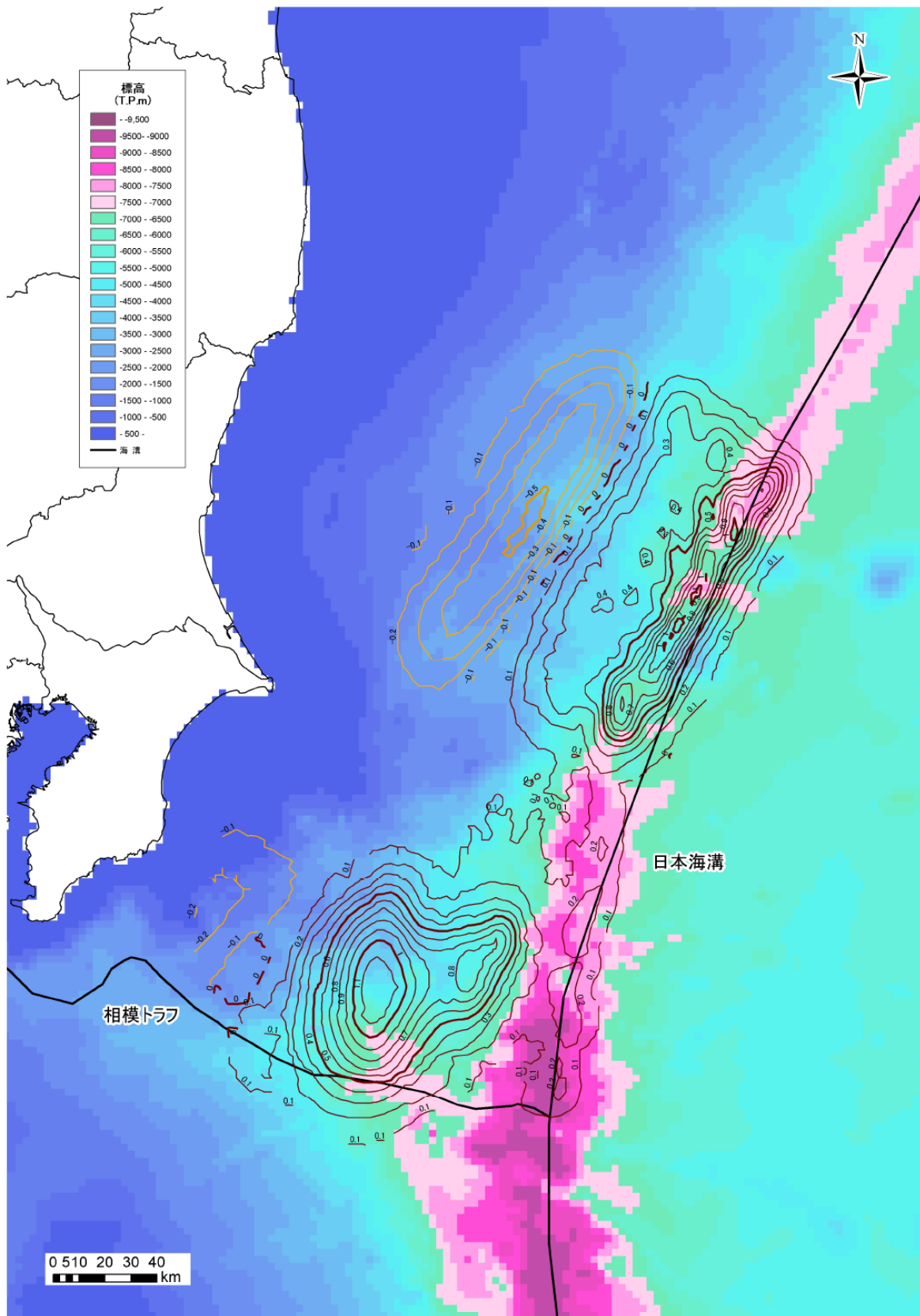


図 1.2-4 延宝地震の初期地盤変動量分布図

※「平成 17 年度 県単海岸調査委託（津波対策・シミュレーション業務）報告書」にて使用された断層パラメータより作成

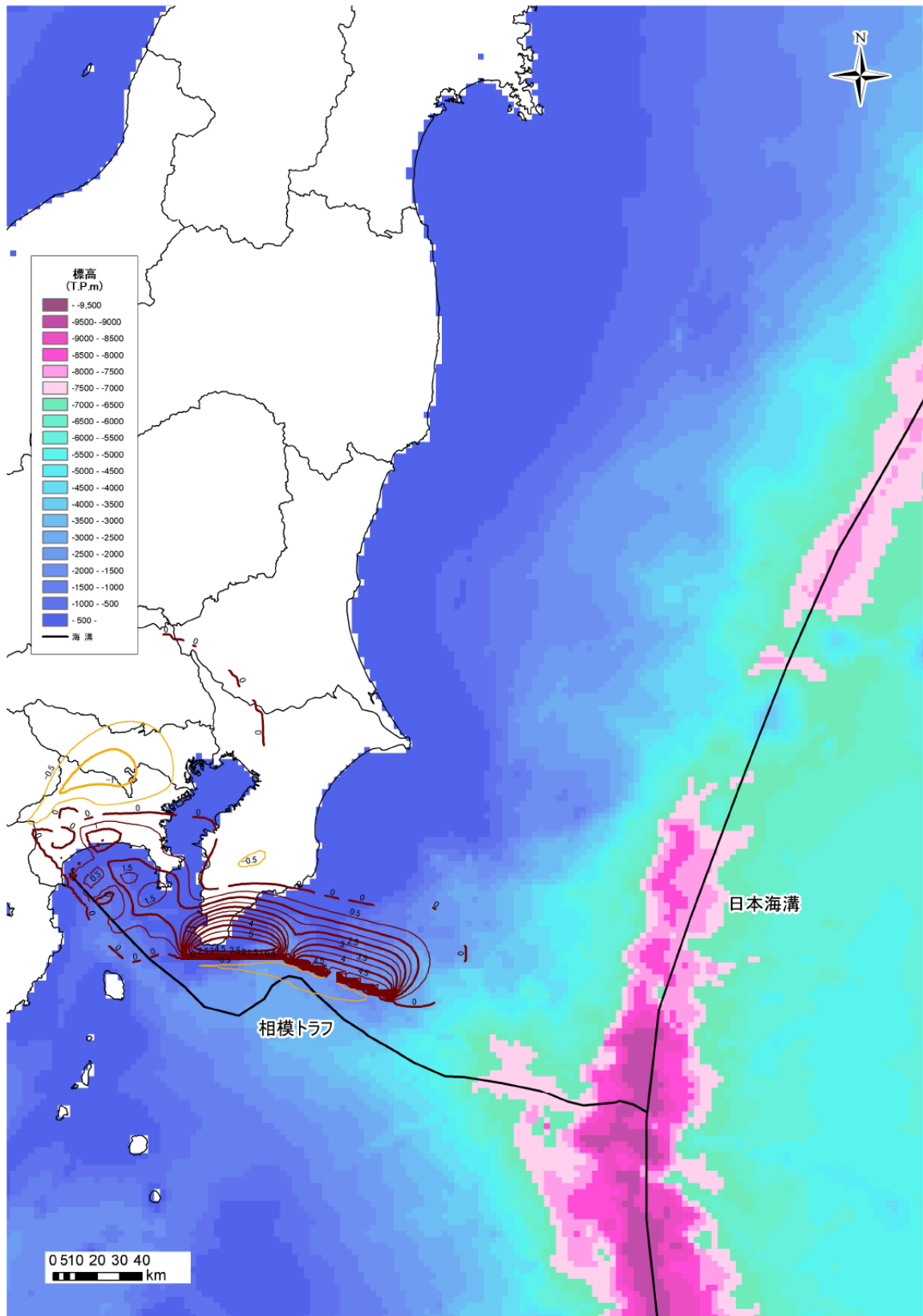


図 1.2-5 元禄地震の初期地盤変動量分布図

※行谷ほか (2011)、「南関東沿岸の地盤上下変動および九十九里浜の津波浸水域から推定した 1703 年元禄地震の断層モデル」より作成

1.2.3 気象庁の津波警報に対応した津波浸水予測図の作成方法

気象庁の津波警報発令までのプロセスを考慮し、気象庁津波警報と津波シミュレーションとの整合性を図るものとする。

(1) 津波予報区域図

気象庁の津波予報は、千葉県沿岸を「千葉県九十九里・外房」、「千葉県内房」、「東京湾内湾」の3区分に分割し、地震発生直後に既往の津波シミュレーション結果と照らし合わせ、各区分で発生する最高津波高さ（沿岸の水深1m地点の値）を発表するシステムとなっている。

津波予報では、各区分の最高津波高さを発表するため、それを受け取る住民は、発表された津波高さに応じて避難行動を行うことと想定されることから、各海岸において発表される津波高さに対応した浸水範囲・浸水深情報を提供することが必要である。



図 1.2-6 気象庁の津波警報・注意報等の発表区域（気象庁 HP より一部抜粋）

(2) 津波予報との整合性の確保

千葉県民の大多数が地震発生後に知りうる防災情報は TV、ラジオ、携帯電話等を通じて 3 分以内での気象庁発表の津波予報と考えられることから、発表される津波予報に対応する浸水範囲情報をあらかじめ提供し、適切な避難を促すことが必要である。

津波高は沿岸地形や波源位置、波の重なり等により沿岸での最大波高が変わるため、必ずしも対象区域全域で発表される津波高が襲来する訳ではない。しかし、津波予報は前述の通り沿岸 3 区域での最大津波高で公表されることから、県民の安全確保が最優先であるため、各領域において発表される津波高の津波が襲来した場合の浸水範囲をあらかじめ提供しておき、地震発生後津波来襲前に住民を安全な場所まで避難を促すことが必要である。

このような観点から、県内の各海岸で気象庁発表予定の津波予報レベルに応じた津波を与え、それによる浸水範囲図を作成・公表する。気象庁の津波予報改訂案では表 1.2-4 に示した 5 区分が検討されており、このうち沿岸での津波被害発生が想定される 3 つの津波高さを対象とする。

具体的には、前述の延宝地震・元禄地震波源モデルをベースにすべり量等の波源パラメータを変化させることで各海岸の沿岸域（浅い場所）での最大津波高を津波予測高と合わせるものとする。その際、対象区域以外の海岸での津波高が津波予報よりも高くなる場合・低くなる場合が想定されるが、すべり量を変化させることで極力合わせるものとする。

津波高の評価は海岸沿いの水深 1m の箇所とし、そこでの津波高が気象庁の津波警報・津波注意報での発表高さに相当する規模となるように津波高を設定する（表 1.2-4）。

設定領域は、津波シミュレーションの最小領域（第 7 領域、12.5m メッシュ）を基本とし、それぞれの領域毎で海岸沿いの最高津波高を表 1.2-4 の対象津波高に合わせるものとする。

表 1.2-4 津波予報での津波の高さ予想区分

法規上の区分	分類	津波の高さ表現 (丸括弧内は予想される範囲)	想定される津波の リスクととるべき行動	本検討で設定する津波高さ
警報	大津波 警報	10m 以上 (10m 以上)	<ul style="list-style-type: none"> ・巨大な津波が襲い破滅的な被害が生じる。 ・木造家屋が全壊・流失し、人は津波によるながれに巻き込まれる。 ・ただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難。 	検討しない
		10m (5~10m)	<ul style="list-style-type: none"> ・巨大な津波が襲い甚大な被害が生じる。 ・木造家屋が全壊・流失し、人は津波によるながれに巻き込まれる。 ・ただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難。 	約 10m (7~10m)
		5m (3~5m)	<ul style="list-style-type: none"> ・巨大な津波が襲い甚大な被害が生じる。 ・木造家屋が全壊・流失し、人は津波によるながれに巻き込まれる。 ・ただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難。 	約 5m (3~5m)
	津波 警報	3m (1m~3m)	<ul style="list-style-type: none"> ・標高の低いところでは津波が襲い被害が生じる。 ・浸水被害が発生し、人は津波による流れに巻き込まれる。 ・ただちに高台や避難ビルなど安全な場所へ避難。 	約 3m (1~3m)
注意報	津波 注意報	1m (0.2~1m)	<ul style="list-style-type: none"> ・海中や海岸付近では津波による被害が生じる。 ・海中にいと速い流れに巻き込まれる。 ・養殖筏の流出や小型船舶の転覆などが生じる。 ・ただちに海から離れること。 	検討しない

※出典：『津波警報の発表基準等と情報文のあり方に関する検討会』（第2回会合） 資料-2

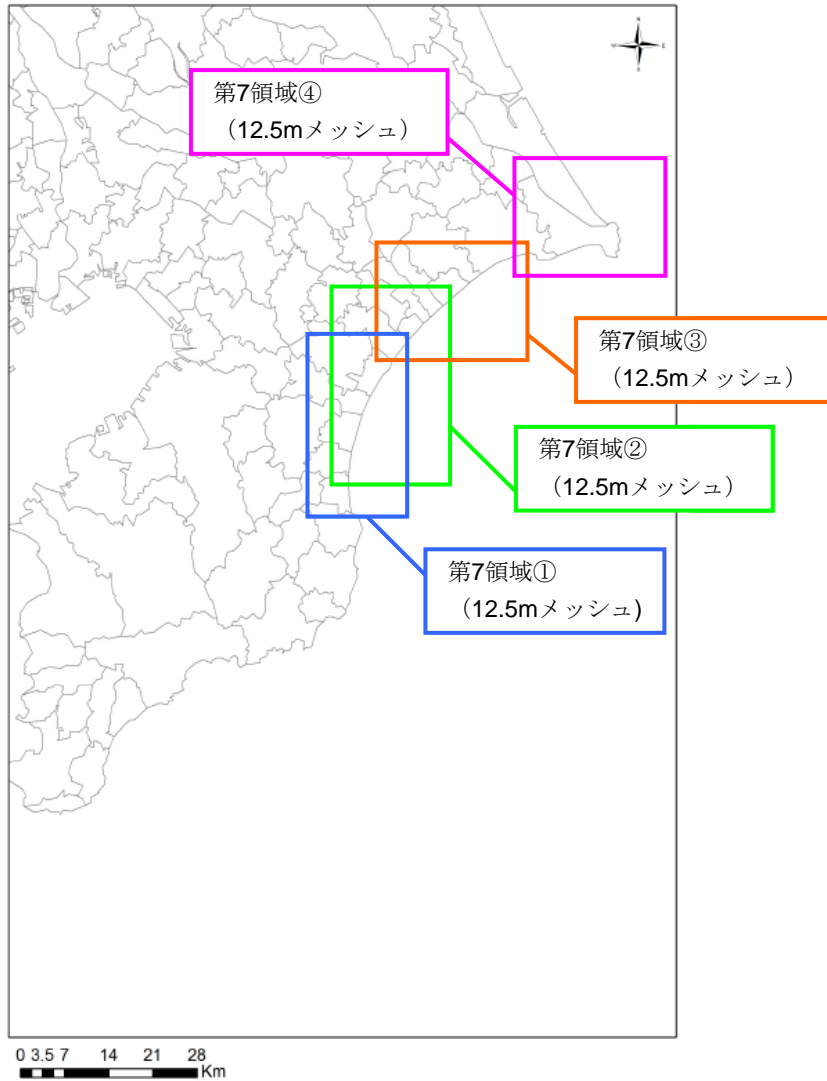


図 1.2-7 津波解析でのメッシュ領域分割例

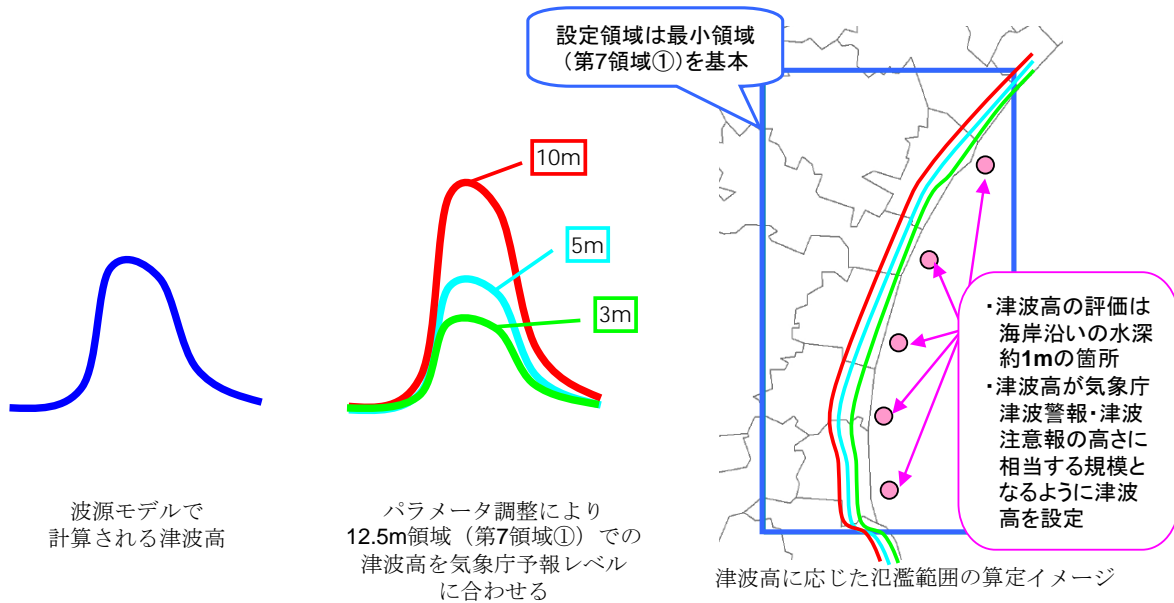


図 1.2-8 気象庁の津波予報との整合性確保のイメージ (第7領域①を例として)

1.2.4 津波シミュレーションモデルの構築

(1) 津波シミュレーション手法

津波シミュレーションモデルは、基礎方程式系を連続式と非線形長波方程式とし、数値計算スキームを有限差分法とし、津波の発生・伝播から遡上までを一連で計算するモデルである。

1) 基礎方程式系

津波シミュレーションモデルの基礎方程式系は、連続式と非線形長波方程式である。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

運動方程式（非線形長波方程式）

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \gamma_b^2 \frac{M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \\ \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) &= -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \gamma_b^2 \frac{N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^2} \end{aligned}$$

ここで、 t は時間、 (x, y) は直角座標系、 (M, N) は (x, y) 方向の線流量、 D は全水深、 η は水位、 γ_b は摩擦係数（ $\gamma_b^2 = \sqrt{gn^2/D^{1/3}}$ 、 n はマンニングの粗度係数）をそれぞれ表す。

また、本検討では、検討対象地震を近海で発生した場合を想定しているため、コリオリ力は無視した。

2) 数値計算スキーム

本津波シミュレーションモデルは、東北大学工学部土木工学科で開発されたプログラムである。このプログラムは、連続式と運動方程式に対する数値解法として有限差分法を採用し、各変数の配置についてはスタaggerドメッシュ系を採用している。空間差分スキームは二次精度中央差分を用いている。時間差分スキームには Leap-Frog 法を採用している。

3) 接続計算（ネスティング手法）

ここでは、外洋から沿岸部・陸地にかけて津波浸水シミュレーションを行う。その際、河口部や市街地のような小領域で津波の遡上を計算するには、より細かい空間格子間隔が必要となる。しかしながら、そのような細かいメッシュを用いて外洋から沿岸部・陸地を含む広範囲を計算することは困難である。

従って、水深の深い外洋において空間格子間隔を粗くし、沿岸域に近づくに従って空間解像度を細かくすることにより地形特性を反映させることが可能なネスティング手法を用いた。

ネスティング手法では、空間格子間隔の異なる領域を接続するため、大領域と小領域で水位及び流量の受け渡しを行い、計算値に連続性を持たせる。

a) 水位の接続方法

大格子と小格子の境界に位置する大格子の水位 ZX は図 1.2-9 のように周辺の小格子 (9 メッシュ) の平均水位に置き換えられる。ただし、小格子の水深 HY が $HY > 0$ (水深が存在) であるメッシュ数 L が過半数 (5 メッシュ) を超えない場合は、大格子の水位は置き換えられない。 $HY > 0$ である小格子が L 個あった場合の大格子の水位は以下の式で表される。

$$ZX = \frac{\sum_{i=1}^L ZY_i}{L} \quad (5 \leq L \leq 9)$$

ここで、 ZY_i は小格子の水位である。

b) 流量の接続方法

大格子と小格子の境界に位置する小領域の値は大領域の値に置き換えられる。流量の置き換えは、1 つの大領域の流量から複数の小領域の流量を作成するため、空間的な補完が必要となる。図 1.2-10 に 1/3 空間接続を行った場合の小領域の流量の補完概念を示す。

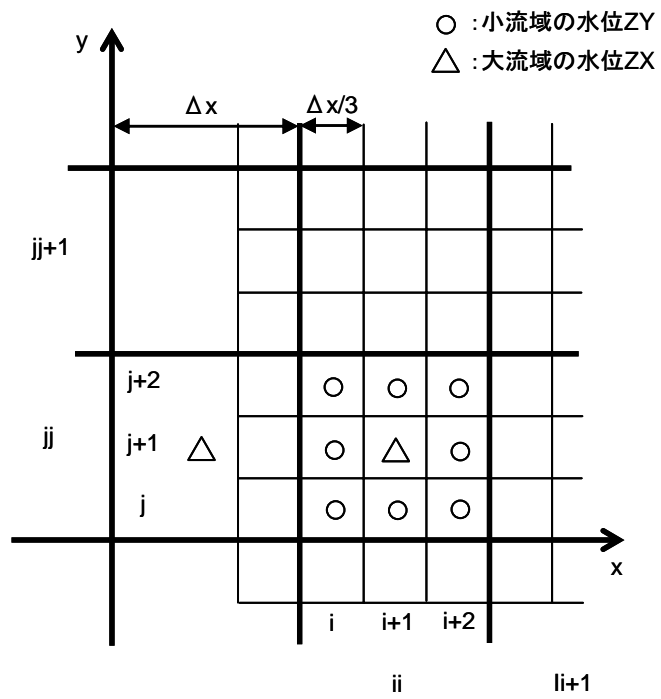


図 1.2-9 水位接続のイメージ図（左端境界、空間接続 1/3）

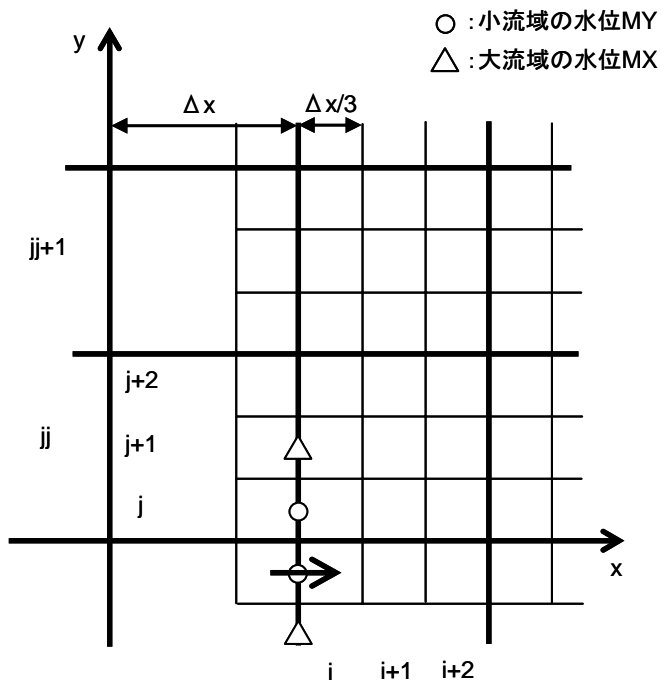


図 1.2-10 流量接続のイメージ図（左端境界、空間接続 1/3）

(2) 津波シミュレーションモデルの基本条件の設定

津波シミュレーションの実施においては、千葉県沿岸域の地形特性（海域・陸域）や海岸保全施設の緒元等を適切に表現し、地震発生時に生じる津波の海岸への伝播を適切に表現できることが最も重要であることから、表 1.2-5 に示す津波シミュレーションモデルの基本条件を用いる。

表 1.2-5 津波シミュレーションモデルの基本条件設定

設定項目	設定内容
計算領域	地震発生源より評価対象海岸・陸域までを対象とする。
モデル方程式	非線形 2 次元モデル ・運動方程式（流量、流速を計算） ・連続式（水位を計算）
数値解法	有限差分法（Leap-frog 法）
境界条件	沖合：自由透過境界 海岸：第 1～第 7 領域 移動境界（遡上）
計算時間	津波波源に応じて設定
計算格子間隔 計算時間間隔	計算格子間隔・計算時間間隔は県土整備部で検討中のモデルと同一とする ・波源より氾濫流域に向けて格子間隔を縮小、 <u>氾濫域で 12.5m 間隔に設定</u> ・計算時間間隔は、計算安定性・格子間隔に応じて設定 【計算格子間隔】 【計算時間間隔】 第 1 領域： $\Delta x_1=2700m$ $\Delta t_1=2.7$ 秒（波源付近） 第 2 領域： $\Delta x_2=900m$ $\Delta t_2=0.9$ 秒 第 3 領域： $\Delta x_3=300m$ $\Delta t_3=0.3$ 秒 第 4 領域： $\Delta x_4=100m$ $\Delta t_4=0.3$ 秒 第 5 領域： $\Delta x_5=50m$ $\Delta t_5=0.3$ 秒 第 6 領域： $\Delta x_6=25m$ $\Delta t_6=0.1$ 秒 第 7 領域： $\Delta x_7=12.5m$ $\Delta t_7=0.1$ 秒（氾濫対象区域周辺）
初期潮位条件	千葉県沿岸の各海岸の朔望平均満潮位とする→津波襲来時に最も危険側の評価
流域地形条件	県土整備部で構築中のモデルの条件を基本とし、一部最新の LP データで更新
海域地形条件	県土整備部で構築中のモデルの条件を基本とする
構造物条件	県土整備部で構築中のモデルの条件を基本とする
地表面・海底面の抵抗（粗度係数）	「小谷ほか、1998」の方法に準じて設定 住宅地 : $n=0.040$ 、工場地 : $n=0.040$ 農地 : $n=0.020$ 、林地 : $n=0.030$ 水域（河川・海域） : $n=0.025$ 、その他（空地、緑地） : $n=0.025$
河道条件	河道横断データより河床高相当まで格子地盤高を切り下げることで反映 ・ 一級河川：利根川・江戸川 ・ 二級河川：九十九里地区の主要河川、東京湾内の都川
検討対象地震	・延宝地震 ・元禄地震（産総研モデル 行谷ほか、2011）

1.2.5 津波シミュレーションモデルの構築

千葉県県土整備部で別途検討中の津波シミュレーションとの整合を保つため、同モデルで設定された計算対象領域の設定、地形条件、粗度係数、構造物条件等を踏襲したモデルの構築を行うものとする。

地盤高データについては、県土整備部検討業務で反映されていない今次地震後に計測された最新のLP測量データやその他のLPデータ等を確認の上、最新の地形条件を反映する。

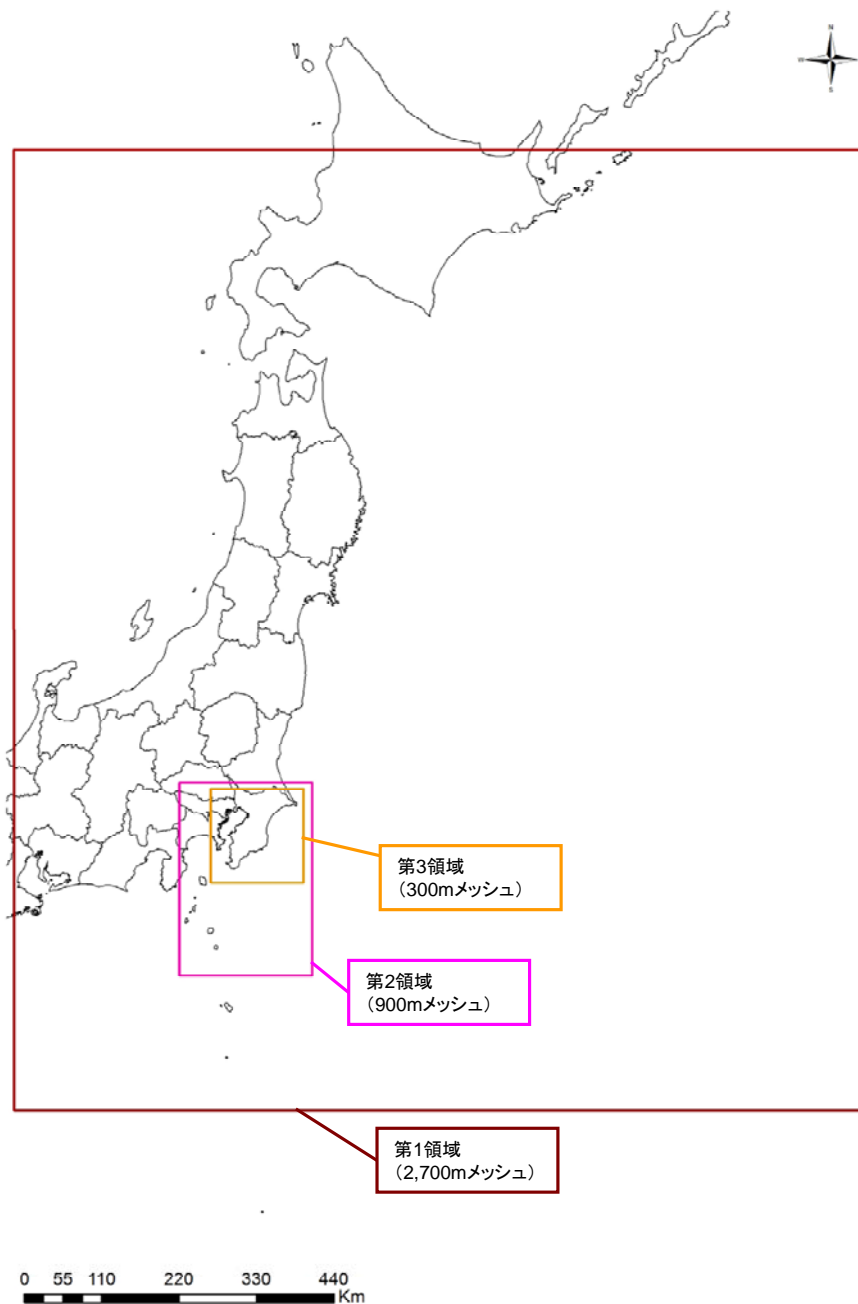


図 1.2-11 計算対象領域図（第1領域～第3領域）

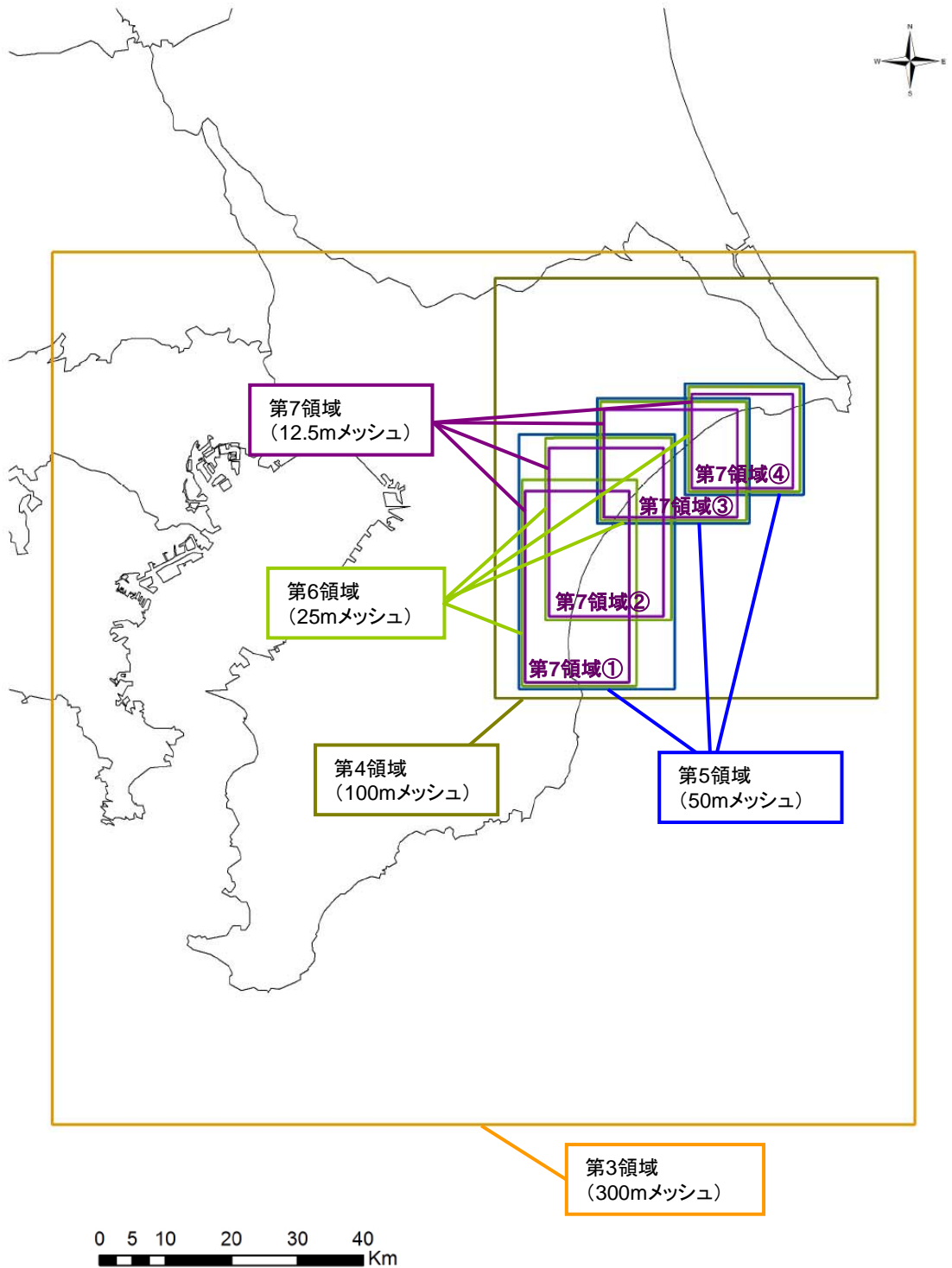


図 1.2-12 計算対象領域図 (第 3 領域～第 7 領域)

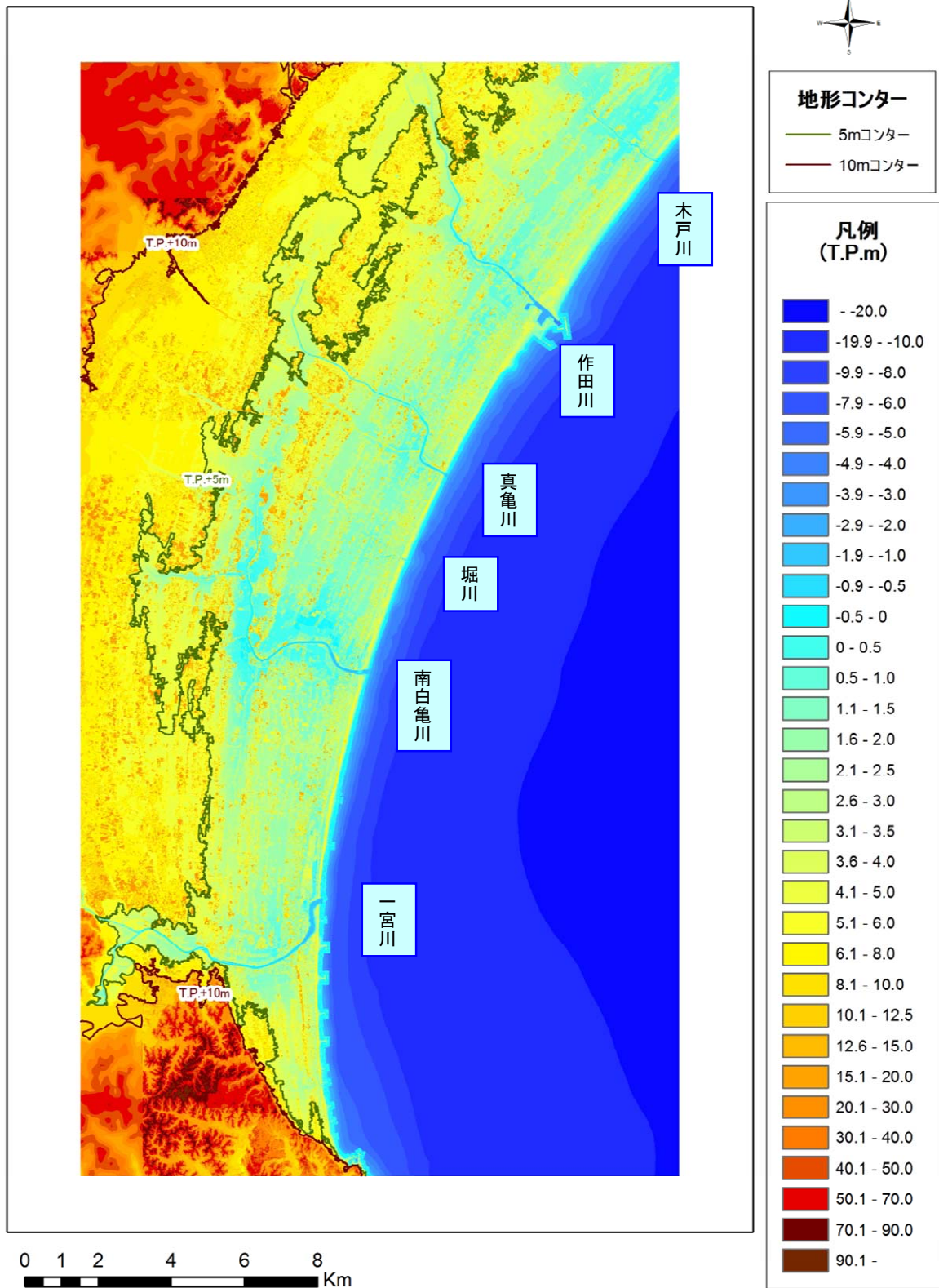


図 1.2-13 計算領域地形図（「銚子～一宮町」領域の第7領域①）

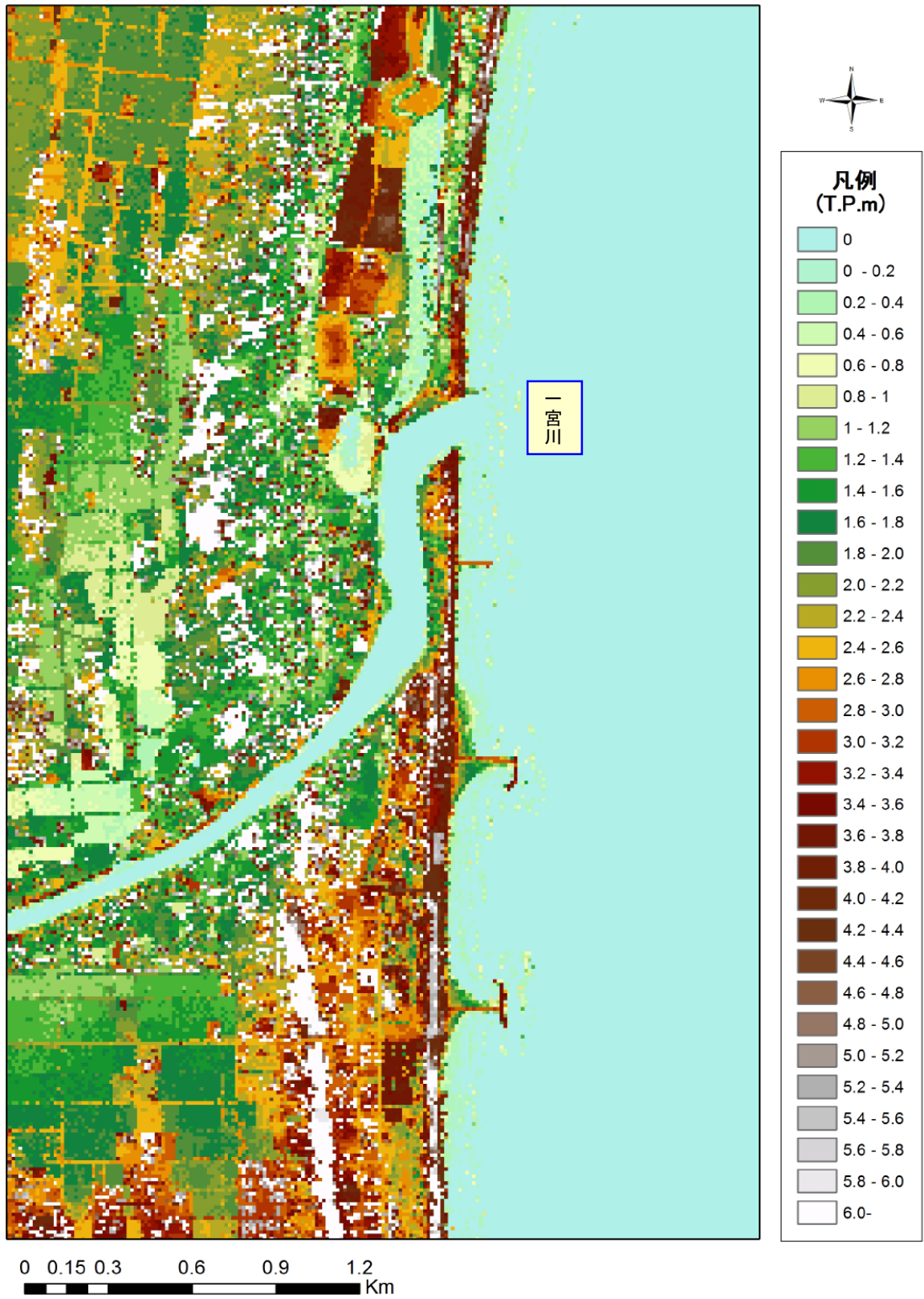


図 1.2-14 計算領域地形図（「銚子～一宮町」領域の第7領域① 一宮川付近拡大）

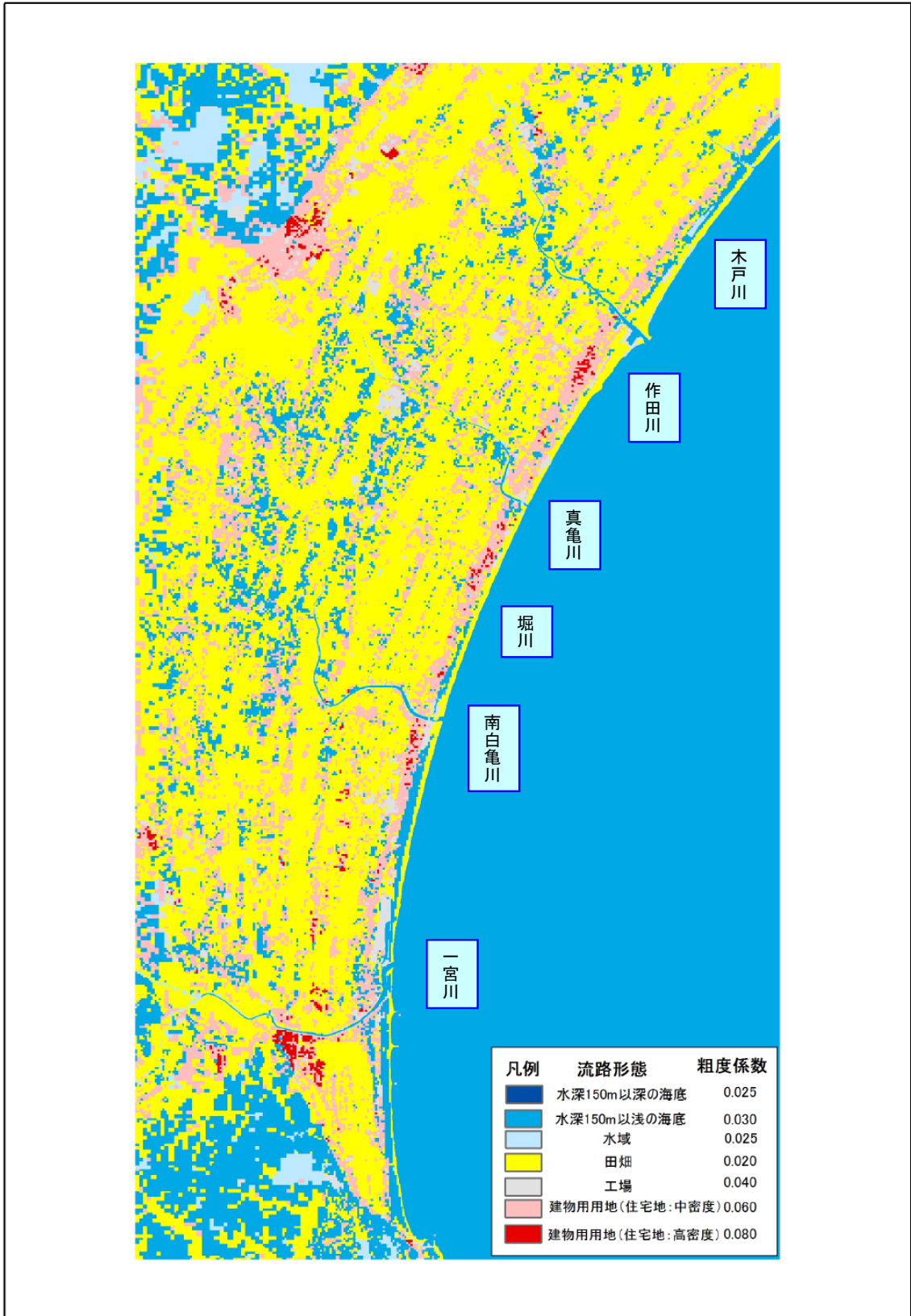


図 1.2-15 粗度係数の平面分布図（「銚子～一宮町」領域の第7領域①）

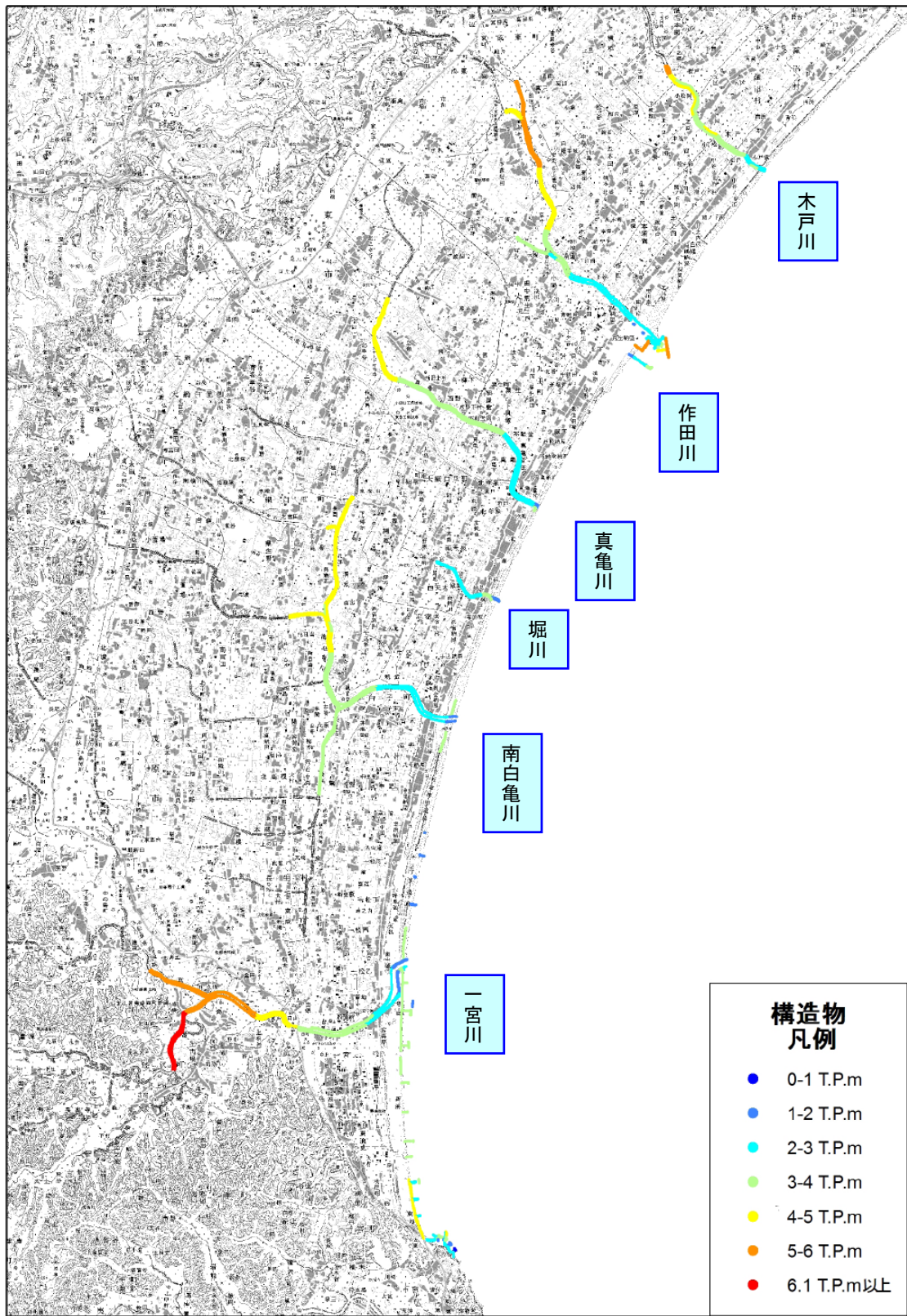


図 1.2-16 構造物天端標高図（「銚子～一宮町」領域の第7領域①）

1.2.6 津波浸水予測図作成

延宝地震（1677）と元禄地震（1703）を対象とした場合、津波浸水予測図及び最大津波高の空間分布を示す。ここでは、「銚子～一宮町」領域の第7領域①の結果のみを示す。

ただし、試算でもあり、解析の潮位を T.P.+0.0m と仮定し、結果は現在精査中である。

【津波に関する主な用語の説明】

- **最大遡上高** : 各地区で津波が到達する最高の標高
- **最大津波高** : 各地区の沖合いにおける最も高い標高
- **浸水深** : 各地の地表面からの水面の高さ

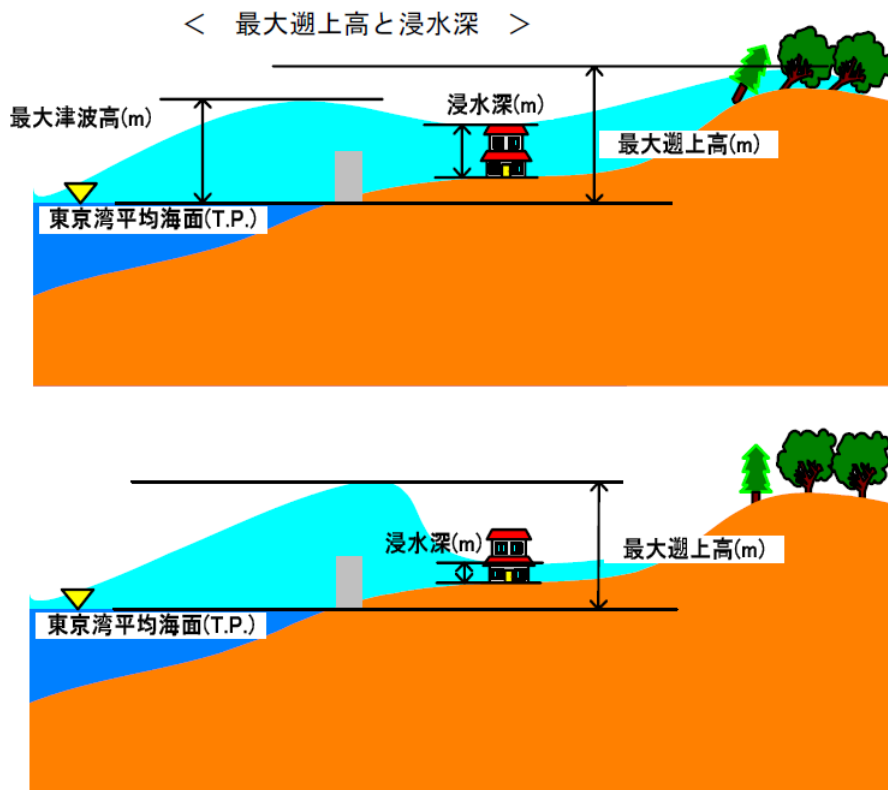


図 1.2-17 最大遡上高と浸水深の概念図

※東日本大震災千葉県調査検討専門委員会 第3回 資料-2 より抜粋

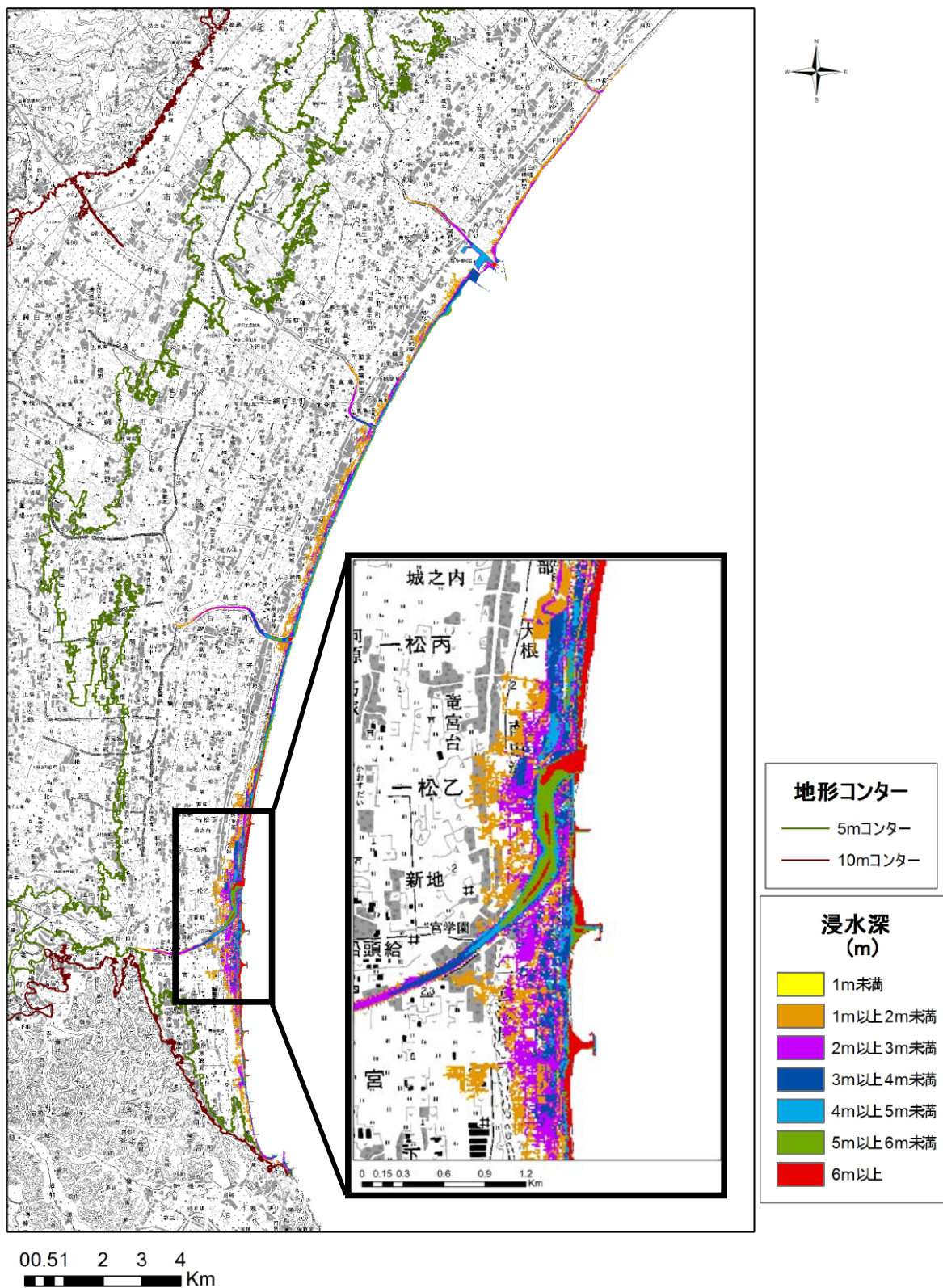


図 1.2-18 津波浸水予測図（延宝地震（1677）） [現在精査中]

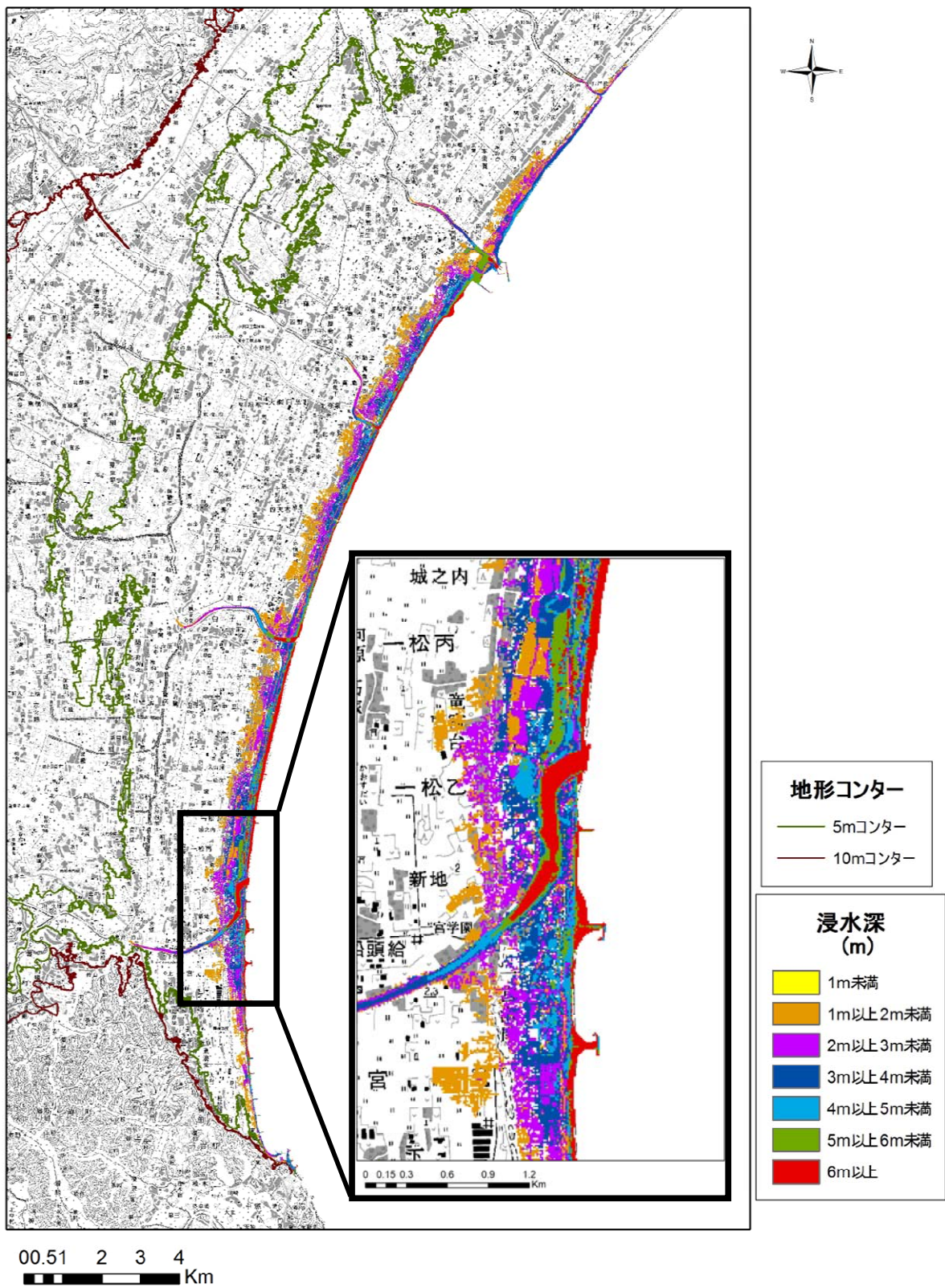


图 1.2-19 津波浸水予測図（元禄地震（1703）） [現在精査中]

また、津波高の評価は、気象庁の津波警報・津波注意報では、原則、海岸沿いの水深 1m の箇所としていることから、「銚子～一宮町」領域の第 7 領域①における沿岸の津波高を密に把握できるように図 1.2-20 に示す評価地点を設定した。

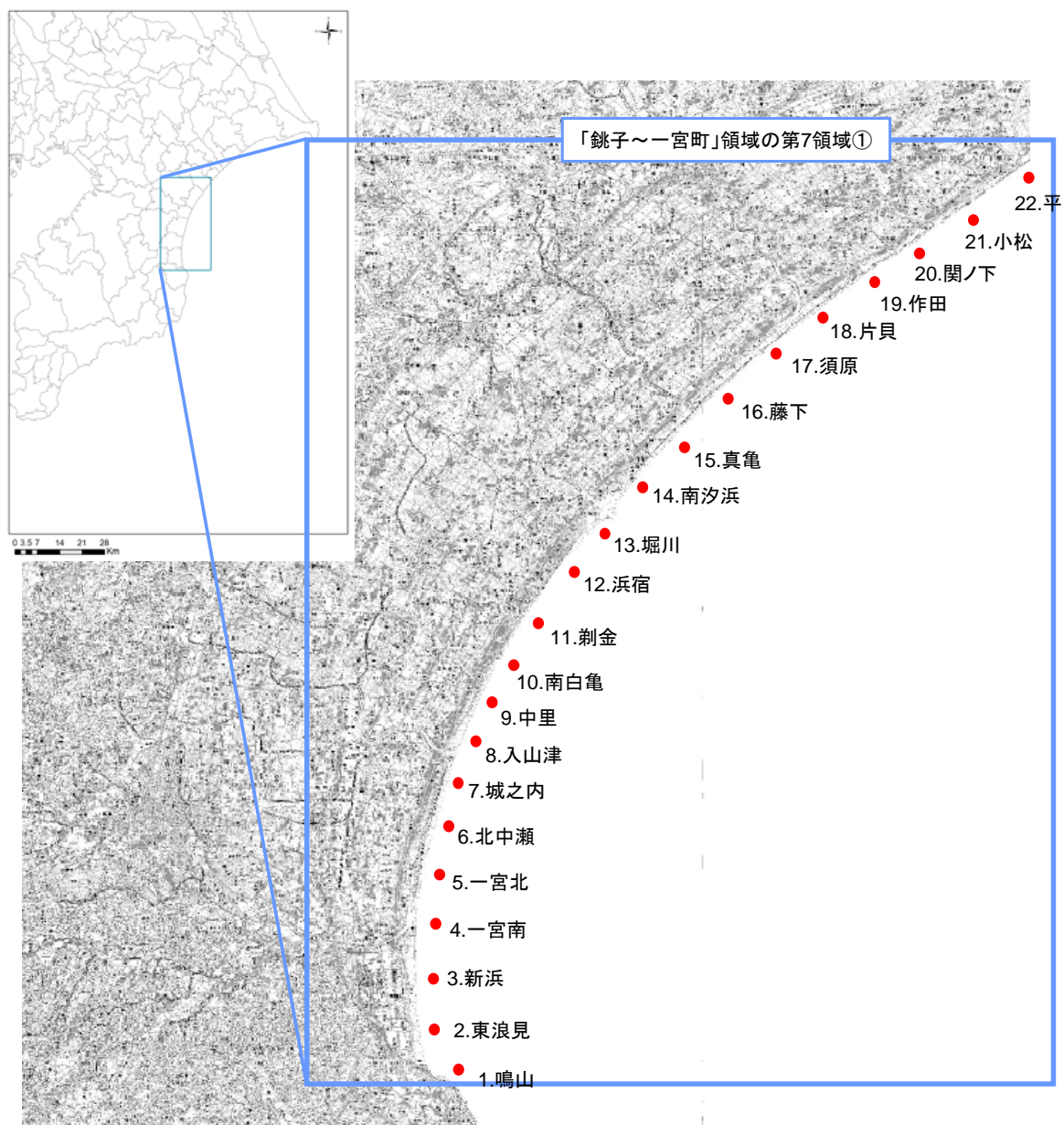


図 1.2-20 「銚子～一宮町」領域の第 7 領域①における津波高評価地点位置図

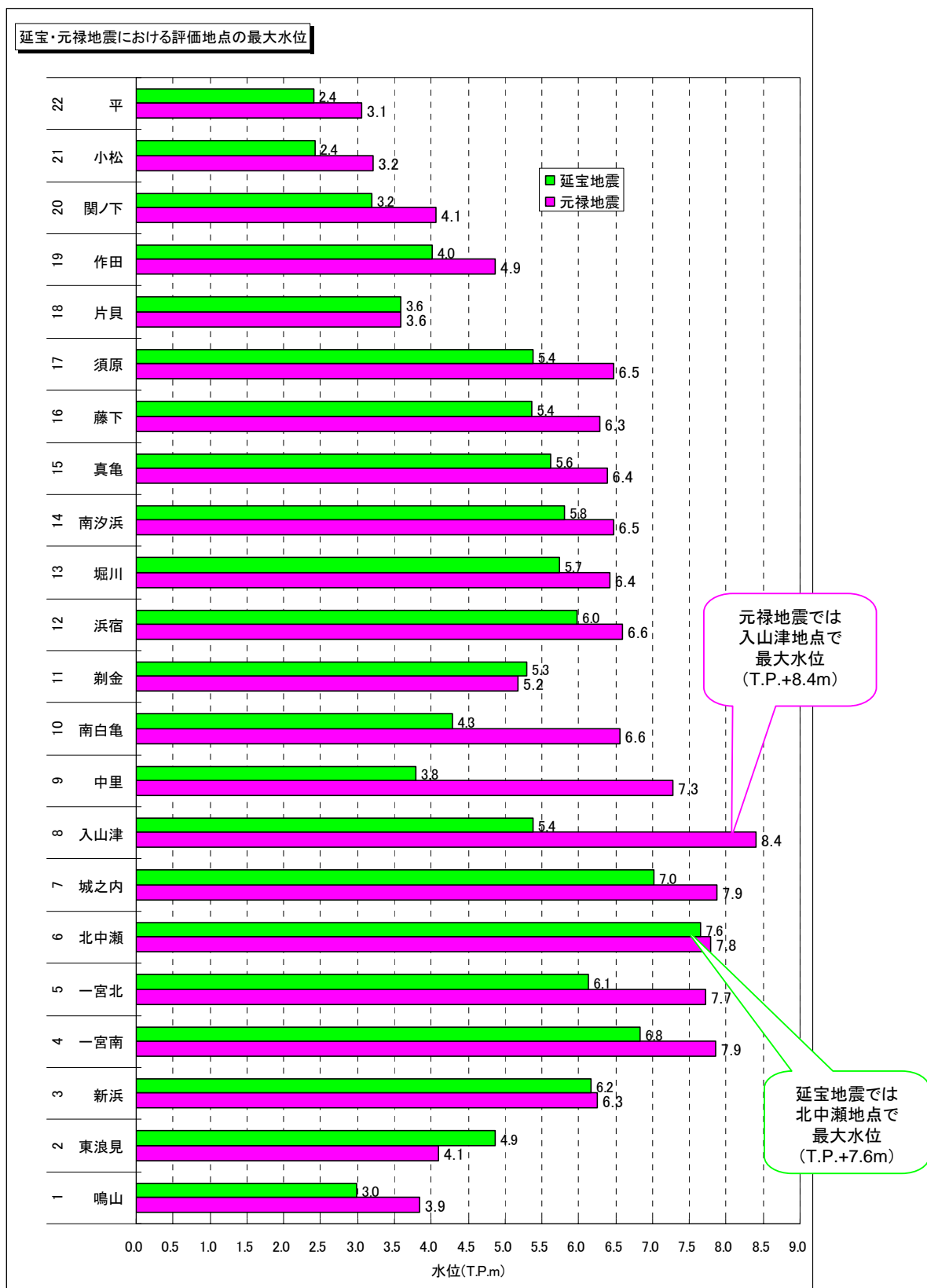
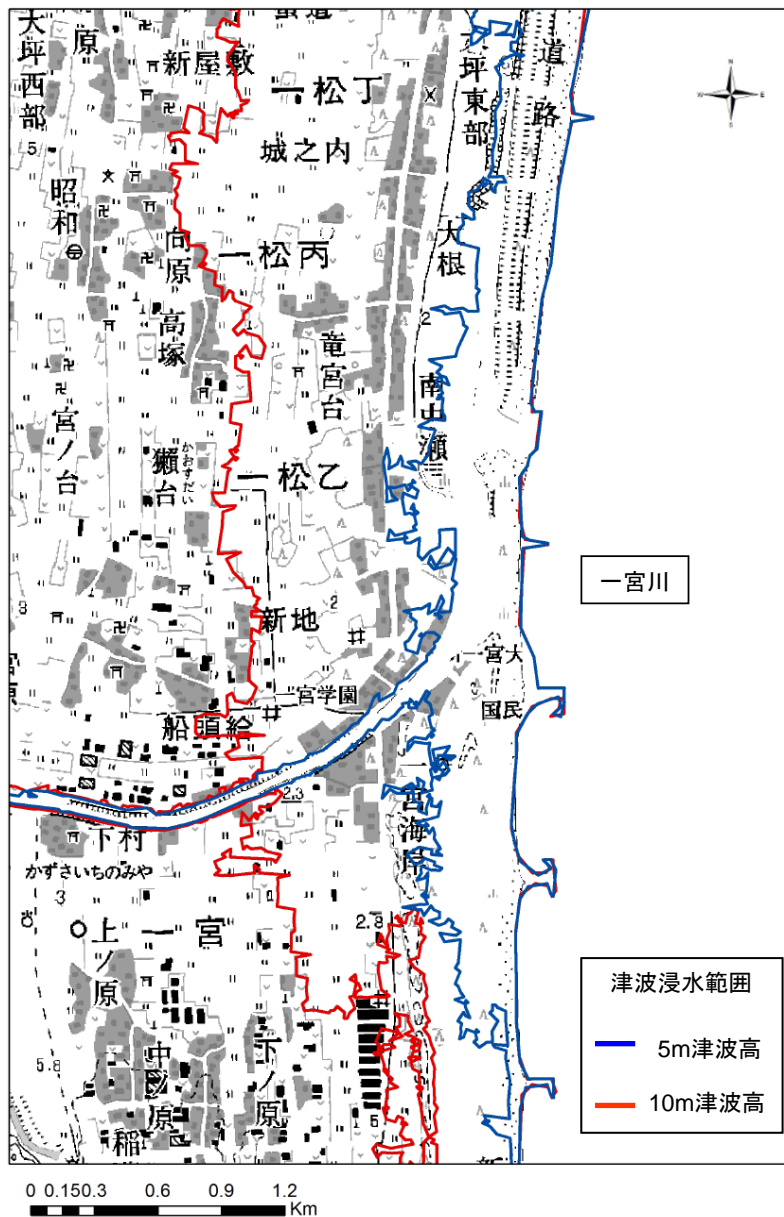


図 1.2-21 津波高評価地点における最大津波高（延宝地震、元禄地震） [現在精査中]

1.2.7 気象庁の津波警報に対応した津波浸水予測図の一例

気象庁の津波予警報に対応した津波浸水予測図を作成する際、設定領域は津波シミュレーションの最小領域（第7領域、12.5mメッシュ）を基本とし、津波高の評価は海岸沿いの水深1mの箇所とする。そこでの津波高が気象庁の津波警報・津波注意報での発表高さのうち、3m（1～3m）、5m（3～5m）、10m（7～10m）に相当する規模となるように津波高を設定する。

以下に、元禄地震の波源モデルを代表とし、すべり量等の波源パラメータを変化させることで各海岸での最大津波高を気象庁予報の津波高（5m、10m）に合わせた場合、一宮川周辺の津波浸水予想図の一例を下記に示す。



[現在精査中]

図 1.2-21 元禄地震の津波高 5m、10m 来襲時における津波浸水予想図の一例