

津波予測解析と応用例

エンジニアリング本部 防災情報部

原井 光一郎

濱 和義

1. はじめに

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による津波によって、東北地方の太平洋沿岸域は甚大な被害を受けた。今後、被災地域の復旧・復興計画の策定等を支援するための基礎資料を作成するに当たり、津波解析(浸水深、到達時間等)が重要なツールとなっていくことが考えられる。

今回発生した東北地方の津波は、中央防災会議専門調査会で検討されていた想定を超えた外力規模であったことが報告されている。東北地方太平洋沖地震による津波発生後の専門委員会では、従来の比較的発生確率が高いとされている津波規模を基準とした海岸保全施設や水門の整備方針に加えて、1000 年に一度程度の低頻度で発生する巨大津波を含めた今後の津波対策の検討もおこなっていくと発表されている。海岸保全施設復旧と設計の方針としては、津波の規模に応じて次の 2 パターンを設定している。

①津波防護レベル(L1):すべての人命を守れることを前提とし、主に海岸保全施設で対応する津波レベル。

②津波減災レベル(L2):海岸保全施設のみならず、まちづくりと避難計画をあわせて対応する津波レベル

今後 30 年以内に高い確率で発生するとされて

いる南海トラフ(東海・東南海・南海地震)等の地震津波についても想定規模(津波到達高)を見直していくことが進められている。

このような背景を踏まえて、本稿では、まず中央防災会議で公開されている解析データ(地形、外力条件等)をベースに津波モデルを構築し、次に今後、様々な規模の津波検討を支援することが可能となるよう、想定規模を超える外力での津波解析を行った。また、得られた結果を利用した応用事例について検討した。

2. 津波モデルの構築

2.1 予測モデルの概要

津波の数値解析は地震に伴う地盤変位を初期条件として海面の変位分布に与え、Navier-Stokes の運動方程式ならびに連続式を基礎式として解析した。津波のように、波長の長い波の運動では、水中の圧力は静水圧分布によりほぼ近似が可能であり、水平流速成分(u , v)は鉛直方向にほぼ一様な分布と仮定することができる。このような近似により、津波予測の基礎方程式は、海底から海面までの流速を鉛直方向に積分する浅水理論によって表される。この浅水理論は、波高 H と波長 L の比で表される波形勾配 H/L と水深 D と波長の比 D/L がいずれも小さいものとして導かれる。このような沿岸部から海岸にかけての津波予測(非線形

長波理論式)の基礎方程式は次の様に表される。

【連続式】
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

【運動方程式】

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

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

$$D = \eta + h$$

$$M = \int_{-\zeta}^D u dz = u(\eta + h) = uD$$

$$N = \int_{-\zeta}^D v dz = v(\eta + h) = vD$$

t : 時刻 (s)、 D : 水深 (cm)、 η : 水位上昇量 (cm)

u, v : x, y 軸方向の流速 (cm/s)、

x, y : 水平方向 x, y 座標、 g : 重力加速度 (cm/s²)

f : コリオリの係数 (1/s)、 n : 粗度係数

2.2 予測モデルの条件

津波予測解析の一連の手順を図 1、予測条件を表 1 に示す。本津波予測解析にて実施する検討範囲は、「1. はじめに」で述べたとおり、発生確率が高く、今後到達津波高と浸水範囲を見直していくことになる南海トラフを震源域として設定した。

津波予測解析に必要な水深データおよび初期地盤変動量データは、中央防災会議『東南海・南海地震等に関する専門調査会』『日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会』に公開されているデータを用いた。想定地震は、中央防災会議想定地震(東北地方太平洋沖地震発

生前に想定されていた最大規模)である『東海+東南海+南海地震の3連動モデル』とした。

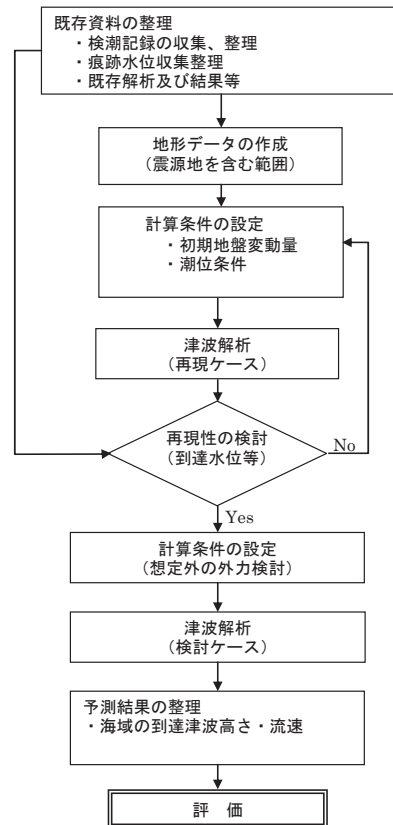


図 1 予測解析フロー図

予測範囲の計算格子は可変接続を用い、格子幅は 1350m→450m→150mの3領域とし、150m格子の領域で瀬戸内海全域を表現できるように設定した。

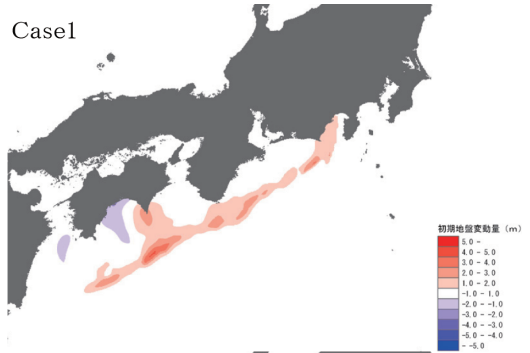
沖合の境界条件は、境界部分で波が内側に反射せず、境界の外側に透過する自由透過条件とした。領域間の境界は、外側の領域の水位・流量を引き継ぐように設定した。また、陸との境界条件は、陸側の遡上計算は行わず、陸部分で波が反射する完全反射条件とした。

津波予測解析の実施ケースは、今後の動向を踏まえ、中央防災会議想定地震である『東海+東南海+南海地震の 3 連動モデル』(Case1)と現在の想定を越える規模として、仮にCase1 の初期地盤変動量を 2 倍に設定したケース(Case2)の 2 ケースとした(表2)。

表1 予測条件一覧表

項目	設定内容
基礎方程式	非線形長波理論式を基礎方程式とした平面 2 次元津波伝播モデル
予測範囲	図 2 参照 東海+東南海+南海地震の震源域を含む範囲
水深	図 2 参照
初期地盤変動量	図 3 参照
想定地震	東海+東南海+南海地震
格子幅	1350m→450m→150m(可変格子)
沖合境界条件	・自由透過 ・接続領域の境界は、外側の領域の水位・流量を引き継ぐ
陸側境界条件	完全反射
潮位条件	平均潮位(M. S. L)
時間間隔	0.50(sec)
計算時間	5.0 時間

Case1



Case2

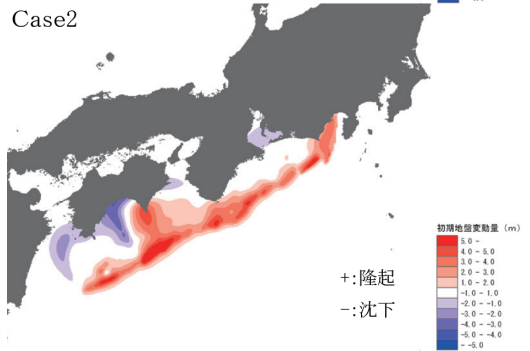


図 3 初期地盤変動量図

表 2 実施ケース一覧表

ケース名	想定地震	備考
Case1	中央防災会議想定地震 (東海+東南海+南海地震:3 連動モデル)	既往想定
Case2	Case01 の初期地盤変動量を 2 倍に設定 (図 4 参照)	想定を超える外力 (仮に 2 倍で検討)

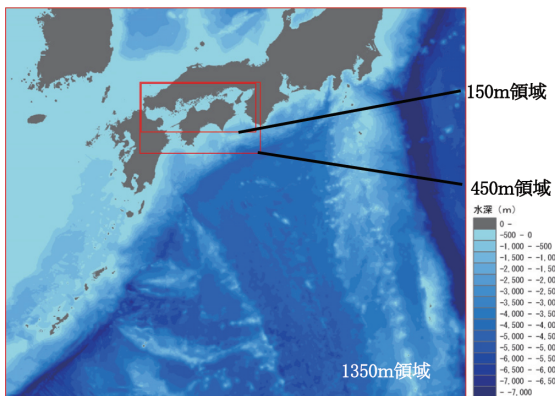


図 2 予測範囲および水深図

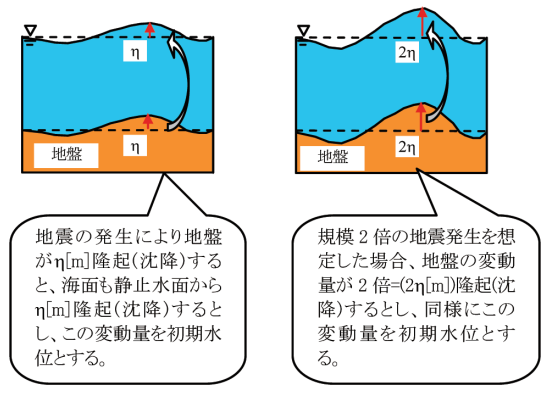


図 4 初期地盤変動断面イメージ

2. 3 津波モデルの整合性

本津波予測解析モデルの整合性を図るために、Case1 の解析結果と、中央防災会議で公開されている既存解析結果(東海+東南海+南海地震: 3 連動モデル)との比較を行った。検証地点は瀬戸内海内の任意の地点で、地点ごとの最大津波高を比較することにより整合性の検証を行った。

図 5 を見ると、各地点の既存解析の到達津波高さの傾向を概ね表現できている。また、図 6 を見ると、計算結果と既存解析の相関性を示す R^2 は 0.93 と高いことから、本モデルの整合性は良好であると判断した。

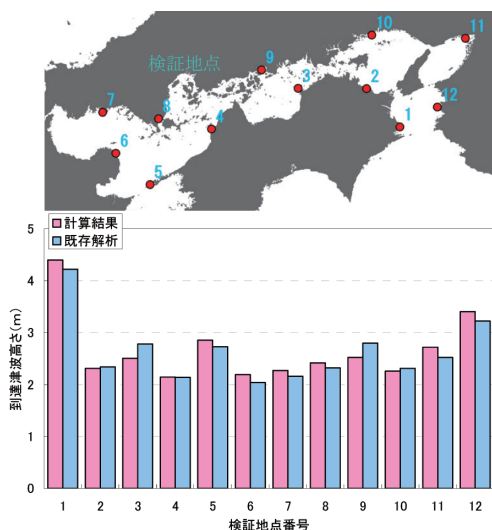


図 5 既存解析との整合比較図

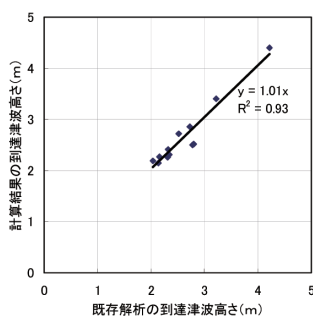


図 6 既存解析との関係式

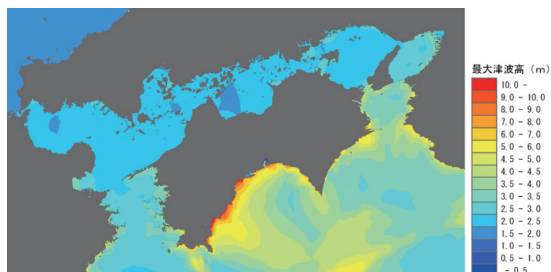


図 7 最大津波高分布図(Case1)

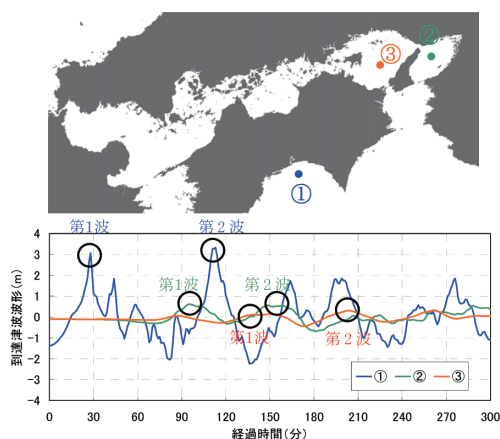


図 8 任意地点における到達津波波形図

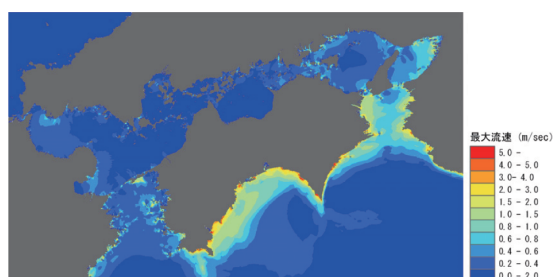


図 9 最大流速分布図(Case1)

3. 予測結果の考察

3. 1 既往条件での結果

最大津波高分布図(図 7)を見ると、高知県や和歌山県などの太平洋側では最大津波高が 5m 以上となっているのに対し、瀬戸内海では 2~3m 程度で

分布している。また、到達津波波形図(図 8)を見ると、太平洋側の地点①(高知沖)では第 1 波が地震発生後 30 分後に到達しているのに対し、内海にあたる地点②(大阪湾)や地点③(播磨灘)では地震発生後 90 分後以降に到達しており、1 時間以上遅れて第 1 波が到達している。第 2 波目についても同様に 1 時間以上遅れて到達している。最大到達津波高は、第 2 波が第 1 波と同等もしくは最大となる傾向にある。地点②、③への津波は、鳴門海峡、紀淡海峡、明石海峡によって、進入を阻害され、直接津波が到達する太平洋側と比べると、最大津波高は低く、津波が到達するまでに時間を要する結果になったと考えられる。

また、最大流速分布図(図 9)を見ると、太平洋側では最大流速が 0.1~2.0m/sec 程度で分布しており、沿岸部では 5.0m/sec 以上となる地点もあった。瀬戸内海では 0.1~0.5m/sec 程度で分布しており、大阪湾内では 1.0m/sec 以上となる地点もあった。

3. 2 想定外の外力検討

解析条件は、初期地盤変動量を想定地震であるCase1 の 2 倍とし、その他の条件はCase1 と同じとした。最大津波高分布図を図 10 に示す。また、Case2 の最大津波高をCase1 の最大津波高で除して比率を算出した最大津波高比分布図を図 11 に示す。外力が増すことにより、太平洋側では最大津波高が 1.4~1.7 倍程度となったのに対し、瀬戸内海では 1.1~1.2 倍程度であった。また、Case1 とCase2 の到達津波波形を比較すると(図 12)、津波到達時間は第 1 波、第 2 波目ともに、外力が 2 倍によるずれはほとんど見られなかった。

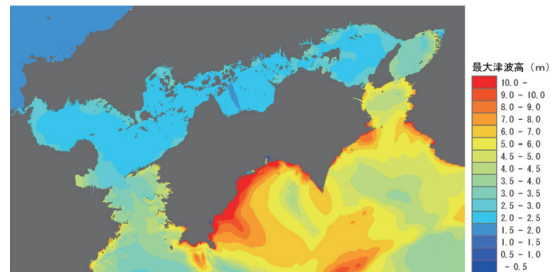


図 10 最大津波高分布図(Case2)

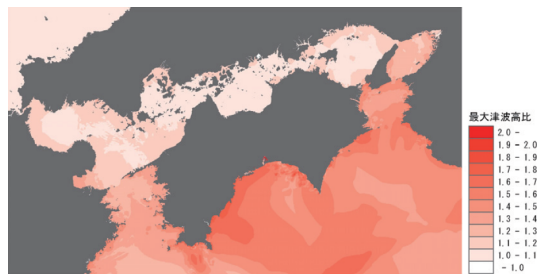


図 11 最大津波高比分布図

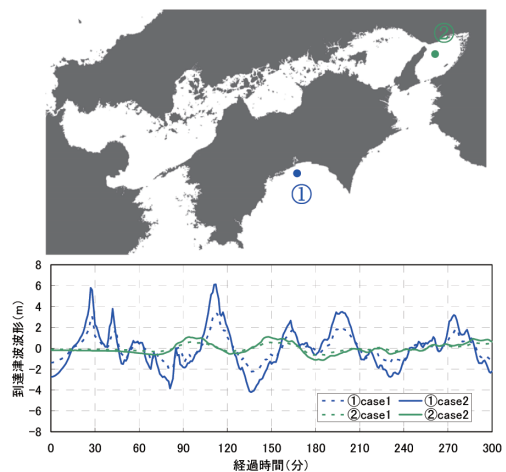


図 12 到達津波波形比較図

また、図 13、14 に示す最大流速の比率を見ると、太平洋側では 1.8~2.0 倍程度の分布となり、沿岸部では 2.5 倍以上となる地点もあった。瀬戸内海では 1.4~1.9 倍程度の分布となった。

以上の結果より、最大津波高および最大流速とともに、外力が増加することによる増加率が、太平洋側に比べ瀬戸内海側では小さくなる傾向となった。3.1 でも述べたとおり、瀬戸内海では鳴門海峡、紀淡海峡、明石海峡によって、津波の進入阻害による影響が大きく、外力増加による増加率が小さくなったことが考えられる。

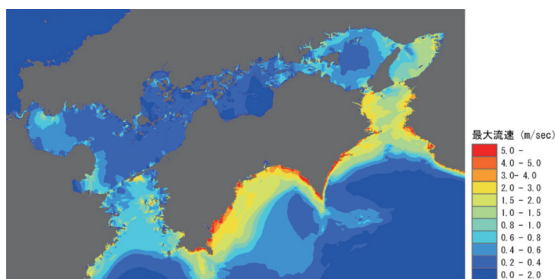


図 13 最大流速分布図 (Case2)



図 14 最大流速比分布図

4. 予測結果の応用(漂流物の移動検討)

「2. 津波モデルの構築」で構築した津波解析結果から得られる要素は以下に示すとおりである。

- ・水位(波高)
- ・流速
- ・到達時間
- ・波圧(流速×水深より算定)

これらの要素を基礎として、次に挙げる検討への適用が可能と考える。

○津波想定解析

- ・海岸部背後地への浸水被害区域の想定
- ・津波災害によるハザードマップの作成

○費用便益解析

- ・施設整備前後の津波被害軽減額算定

○構造物耐震解析

- ・陸上構造物に作用する津波波力評価
- ・河川構造物の耐震性能の照査

○漂流物解析

- ・港湾内の津波漂流物対策検討

本稿では、上記に示す一応用例として、漂流物解析をおこなった。

東北地方太平洋沖地震による津波が来襲した地域では、漁港付近では係留している漁船やタンカーが市街地へ流出する、陸上車両等の漂流物が港内へ散乱する等の被害が報告されている。また、沖合では養殖施設(筏等)のロープが切れて流されてしまうといった被害も報告されている。このような津波漂流物の移動検討を行う上で、津波シミュレーション結果(流向・流速)を利用した解析(挙動の追跡計算)が可能である。

ある時刻 $t(x_t, y_t)$ に存在した漂流物の Δt 時間後の位置 (x_{t+1}, y_{t+1}) は次式により予測することができる。

【オイラー法】
$$X_{t+1} = X_t + v \cdot \Delta t$$

Δt : 時間(s)、 X : 漂流物の位置(x,y)

v : 流速(cm/s)

ただし、漂流物を質点として仮定し、その挙動を解いている。

Case1 の津波予測解析結果を用いて漂流物の追跡計算を行った。検討場所は、カキ筏等の養殖施設が数多く存在する広島湾を設定した。追跡結果(図 15)を見ると、地震発生直後(1 から 2 時間まで)は小さな引き波と押し波の数度繰り返してあったが、第 1 波が到達する 2 時間後頃から(図 16)、漂流物の移動傾向に変化が見られた。津波により、0 時間目の位置から最大で約 1.9km 西側(陸側)に移動した。

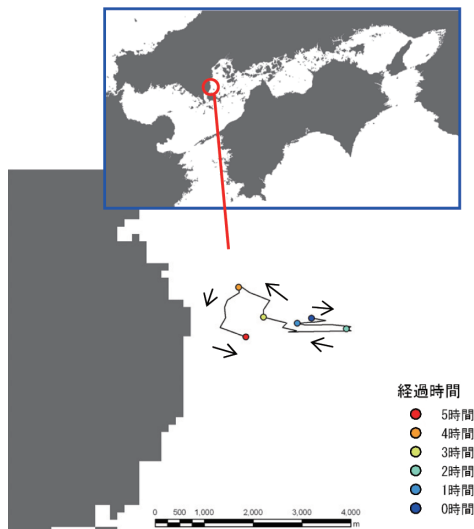


図 15 漂流物の追跡結果

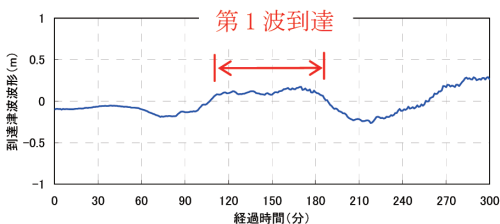


図 16 追跡地点付近における到達津波波形図

5. 今後の課題

今回、実施した津波予測解析は、海岸域までの津波伝播計算であったが、実際の検討では対象域付近の陸上への遡上を対象とする必要があると考える。護岸等の現状を条件として設定し、想定する津波の陸上への遡上範囲や浸水深から、被害の想定や対策検討の効果を定量的に把握できる。

上記に示した津波浸水遡上の検討には、陸上の地形を表現できる高解像度で詳細なメッシュ(10 m程度、又はそれ以下)の設定が必要となる。ただし、メッシュサイズを小さくすると、計算メッシュ数が増え、条件設定に要する作業量や計算機の負荷が増大し、検討に多大な時間を要するといった課題がある。今後、並列化計算などの技術を導入し、計算時間の短縮を行うことにより、さらなる作業効率の向上につとめる必要がある。

また、今後の津波対策検討では、海岸施設だけではなく、避難計画とあわせた検討も今後の課題のひとつとなる。

解析試行例として、津波遡上結果と GIS を活用した津波の避難可否リスクの評価を図 17 に示す。高台等の避難地点を設定することで(解析手順①)、避難に要する時間が算出でき(解析手順②)、それを津波解析結果の浸水開始時間(解析手順③)と比較することにより、ある想定津波の避難可否リスク(解析手順④)を知ることができる。

以上のように避難可否リスク解析を行うことで『避難行動が遅れた場合の避難可否リスクの変化』、『避難場所の検討』、『避難所設置の検討』などの検討に津波解析結果を活用し、より有効な対策判断に貢献できるようにしたい。

解析手順① 避難地点の設定



・標高 20 以上の地点への避難を想定

■ 地盤高20m以上

<参考文献>

1)「内閣府中央防災会議、東南海・南海地震等に関する専門調査会」ホームページ

http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/taisaku_nankai/nankai_top.html

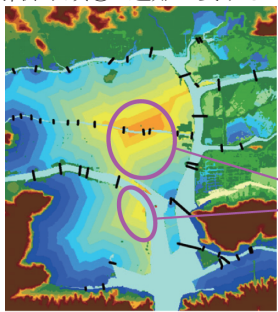
2)「内閣府中央防災会議、東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」ホームページ

http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinihon/index_higashi.html

3)「水理公式集 [平成 11 年版]」(平成 11 年, (社)土木学会)

4)「沿岸海洋学-海の中でのものはどう動くか- 改訂版」(柳 哲雄, 平成 6 年, 恒星社厚生閣)

解析手順② 避難に要する時間の算定

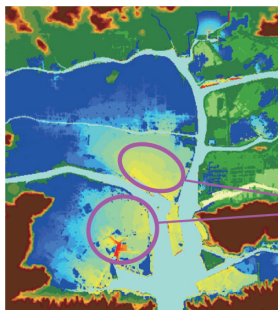


・水域は移動不可
・橋は移動可能
・陸上は平面的な直線距離
・移動は徒歩を想定し、移動速度 80m/分

避難時間 (分)
30 - 30
24 - 28
20 - 22
18 - 20
16 - 18
14 - 16
12 - 14
10 - 12
8 - 10
6 - 8
4 - 6
2 - 4
2

避難に時間を要する

③浸水開始時間

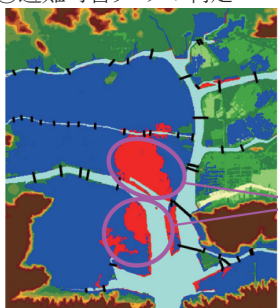


・津波解析結果より浸水開始時間を整理

浸水開始時間 (分)
120.0 -
110.0 - 120.0
100.0 - 110.0
90.0 - 100.0
80.0 - 90.0
70.0 - 80.0
60.0 - 70.0
50.0 - 60.0
40.0 - 50.0
30.0 - 40.0
20.0 - 30.0
10.0 - 20.0
0.0 - 10.0
0.0 - 5.0

浸水開始が早い

④避難可否リスクの判定



・②避難に要する時間と③浸水開始時間を比較し避難可否リスクを判定
・地震発生から 30 分後に避難開始した場合を想定

橋
■ 避難可能
■ 避難困難

避難が困難となる恐れがある

図 17 避難可否リスクの評価