

越流と越波を考慮した高潮浸水の数値計算

NUMERICAL SIMULATION OF STORM SURGE INUNDATION INCORPORATING OVERFLOW AND OVERTOPPING

柴木秀之¹・鈴山勝之²・江崎竜夫³

Hidenori SHIBAKI, Katsuyuki SUZUYAMA and Tatsuo EZAKI

¹正会員 博(工) 株式会社エコー 防災・水工部(〒110-0014 東京都台東区北上野2-6-4)

²工修 株式会社エコー 防災・水工部(〒110-0004 東京都台東区北上野2-6-4)

³国土交通省中部地方整備局 四日市港湾事務所(〒510-0051 三重県四日市市千歳町9-1)

A new scheme of numerical simulation of storm surge has been developed recently. With this simulation model, abnormally high storm surges generated by large typhoons around the coasts of Japan were well reproduced. Furthermore, numerical simulation model for storm surge inundation is developed to study and prevent storm surge disasters on Japanese coasts. Inundation simulation method induced by overflow, overtopping and dike breach is incorporated into this model. With this inundation simulation, coastal protection works consisted of hard and soft countermeasures can be designed. This paper presents the application to Ise Bay.

Key Words : Storm surge, inundation, wave, overflow, overtopping, typhoon, coast, port

1. はじめに

2004年に日本沿岸で多発した高潮災害や2005年8月末にアメリカ合衆国南東部を襲ったハリケーン・カトリーナによる高潮災害を契機に、ゼロメートル地帯に資産が集中する三大湾(東京湾、伊勢湾、大阪湾)を中心に、高潮による浸水の危険性が注目を集めている。高潮災害は、高潮による潮位上昇と同時に、高波も発生する複合災害であり、浸水被害は越流と越波に起因して発生する。このような高潮と高波の同時発生に伴う浸水現象を表現した実用的な数値計算法を構築し、高潮浸水域の予測を行うことが急務となっている。本報告は、高潮ハザードマップを作成する基礎技術として、既存の高潮シミュレーション技術を融合し、高潮と高波の同時発生に伴う越流と越波現象を考慮した高潮浸水計算の方法について提案する。

2. 高潮浸水計算の概要

(1) 高潮数値計算モデル

高潮数値計算モデルは、4つの高潮の発生要因を考慮している。第1は気圧低下に伴う吸上げ効果、第2は海上風による吹寄せ効果、第3は密度成層による水位増幅効果、第4は砕波による水位上昇効果である。高潮の基本方程式は、多層の連続式と運動方程式であり、運動方程式は海面せん断応力、層間

の内部せん断応力、底面せん断応力の3種類の応力項と、気圧勾配、水位勾配、密度勾配の3種類の圧力勾配項から構成される。また、ラディエーション応力の発散項を考慮している。

本報告で使用する高潮推算モデルは、表面から水深10m、水深10mから50m、水深50mから海底までの3層のレベルモデルであり、高潮計算の基本方程式、差分化の詳細及び伊勢湾台風時の高潮の再現性に関して、柴木・渡辺¹⁾に詳述している。

(2) 波浪計算モデル

波浪計算は、波の発達、減衰、変形を考慮したスペクトル法の浅海波浪推算モデルを採用する。このモデルにより、風波とうねりが混在する波浪場が計算できる。また、平面波浪場からラディエーション応力が計算できる。このモデルの方向スペクトルは、47周波数成分と16方向成分の総数752成分波により構成される。海岸付近や港湾内の浅海域の波浪変形の計算は、波の回折と反射の効果を考慮したエネルギー平衡方程式法を採用する。この波浪変形計算モデルは、5周波数成分と岸向きの180°の範囲を32方向成分のスペクトルで分割する。

(3) 浸水計算モデル

陸域を対象とする高潮の浸水計算は、津波浸水計算で知られる岩崎・真野の方法²⁾を採用し、海域の高潮計算と同時に計算を行う。また、浸水現象は、構造物等からの越流、越波と破堤により生じるもの

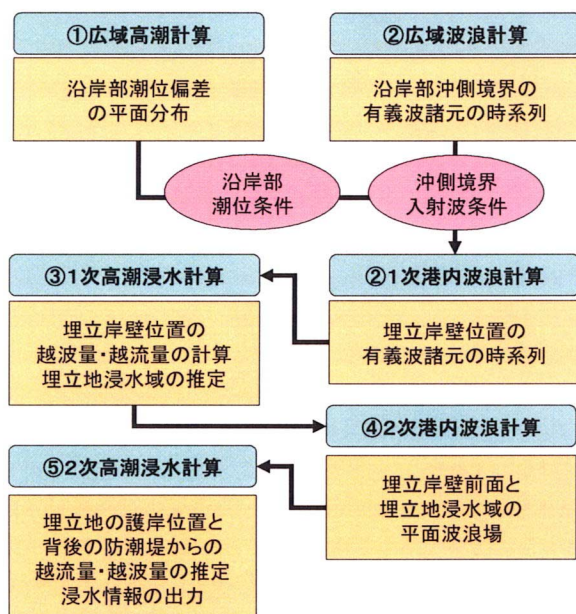


図-1 高潮浸水計算の手順を表すフロー

とする。時間発展型の浸水計算としては、陸上の浸水先端部の進行は、水位の先端高さと地盤高との比較により判定する。進行する先端水位が地盤高よりも高いとき、陸域の格子は浸水格子に変化する。一方、水位が地盤高よりも低くなると、浸水格子は干出した陸域格子に変化する。浸水域の範囲と浸水深は、この処理を繰り返すことにより計算する。水位が防波堤、防潮堤及び海岸堤防等の構造物の天端高を超過する場合は、本間公式³⁾を用いて越流量を計算し、運動方程式中の流量を越流量に置き換える。

越流による浸水現象を表現するための数値計算法は、既に津波計算により確立されている。しかし、越波による浸水現象を、浸水シミュレーションの時間進行と同時に実行する実用的な方法は少ない。そこで、高潮計算及び波浪推算や、波浪変形計算より求まる各構造物前面での潮位と波浪を入力条件として、合田の期待越波流量算定図⁴⁾に基づく越波流量の計算を採用する。そして、その越波量を構造物境界から陸域への流量条件として与える。高潮浸水計算への組み込みは、アナログの越波流量算定図をデジタル化し、無次元パラメータを入力することにより、越波流量を算定するように工夫する。また、無次元パラメータが0.5を超過する場合には、実験成果を参照して算定図を外挿し、越流量の算定値と連続性を保たせた。ここで、本報告の越波による浸水量の計算は、数分程度で変化する潮位と波浪情報から、時間平均量としての越波流量を近似的に求めるものであり、実用化に主眼を置いたことを付記する。

(4) 高潮浸水計算の流れ

高潮浸水計算の手順は、図-1のフローにまとめられ、5段階の高潮・波浪計算で構成する。湾全域の高潮計算は、湾奥沿岸の高潮時の潮位を推定する

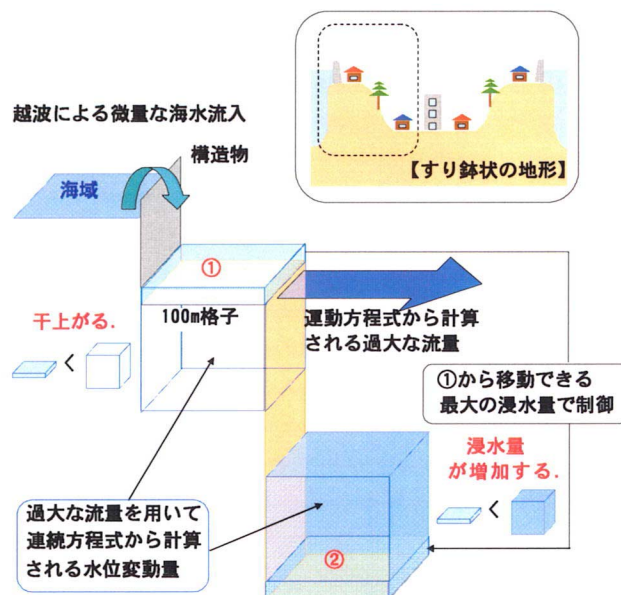


図-2 干拓地等の地形に流入する越波流量の計算で生じる問題点の模式図

ために行い、波浪計算は、湾奥水域への侵入波や防波堤伝達波の沖波条件を求めると行う。波浪計算は、湾外の外洋も計算範囲に含み、湾内の波の発達・減衰と波浪変形を考慮したスペクトル法モデルによる浅海波浪推算を行う。フロー中の港内侵入波・防波堤伝達波・護岸反射波の計算は、回折を考慮したエネルギー平衡方程式法を、港内発生波の計算はパラメータ法を採用し、30分毎に成分波の平面波浪場を推定する。これら成分波はエネルギー合成波として、高潮計算の時間間隔毎に補間する。高潮の浸水計算は、埋立地の岸壁及び防潮堤等の構造物位置において、越流公式に基づく越流量と、期待越波流量の算定図に基づく越波流量を求める。

3. 多様な地形条件下への適用方法

(1) 埋立地護岸等の浸水量の算定

埋立地護岸のように、護岸天端高と地盤高の差が小さい地形では、護岸上の浸水位よりも護岸前面の水位が低いと、護岸上の水塊が前面海域に戻る排水状況が生じる。護岸位置の境界条件として、越波流量のみを与えると、埋立地の浸水量は過剰に評価される。そこで、高潮浸水計算において、越波による流量と海域に戻る流量の量的な比較を行い、護岸位置の流量の移動方向を判定し、越波流量を制御する。

(2) 干拓地等のすり鉢状地形の浸水量の算定

浸水計算は、運動方程式と連続方程式を交互に解き、運動方程式からは流量（流速）が計算され、この流速を連続方程式に代入して水位変動が計算される。浸水先端部は、岩崎・真野の方法により時間追

跡する。このとき、すり鉢状の地形条件下において、微小な越波による流入を堤防境界で与えると、陸域の総浸水量と流入量の間に不整合が発生し、堤防背後の浸水量を過大に計算する問題が発生する。図-2は問題の発生過程を模式的に表す。

今、すり鉢状の地形を100m格子で地形近似すると、急激な段差を有する箇所が生じる。図中の上流側の格子を①、下流側の格子を②とする。堤防からの微小な越波による流入に伴い、堤防背後の格子①で浅い浸水が生じる。その後、格子①の浸水が地盤の低い格子②に拡大するとき、①の水位と②の地盤高（浸水後は水位）との差を水面勾配力とし、①から②へ移動する流量が計算される。このとき、急激な段差を流れ落ちる流量は格子①の浸水量を超過する。この過大な流量により、①は干上がり、②は①の浸水量を超過する浸水が計算される。この過程が繰り返えされるため、時間の経過とともに陸域の総浸水量は過大となる。

この問題に対し、連続方程式から計算される①と②の水位変動量が保存されるように、計算時間間隔毎に、①からの移動最大水量の上限を浸水量以下となるように流量制御を行い、特殊な条件下で生じる浸水量の誤差を防ぐ処理が必要となる。

図-3 に表す平坦な地形と段差地形の2種類で、流量制御の機能を検証する。平坦な地形は地盤高T.P.+1.0m、段差地形は堤防直背後の地盤高をT.P.+1.0m、他の地盤高をT.P.-2.0mとする。図中の3箇所から時間一定の越波流量 $0.001\text{m}^3/\text{s}$ と $0.05\text{m}^3/\text{s}$ の2種類を与える。図中のグラフは、流入する総水量と浸水量の時間変化の比較である。平坦な地形では陸域において浸水量が過大になる傾向は見られない。時間経過とともに浸水量が総流入量より小さくなるのは、計算を行う過程で、浸水格子を判定する閾値として 10^{-5}m を設定するために生じ、この閾値を小さくすると誤差は解消する。一方、段差地形では、浸水量が総流入量よりも過大となる。特に、流入する総水量が微量の場合に誤差は顕著となる。この問題に対し、流量制御を行うと誤差は抑えられ、平坦な地形と同様となる。

(3) 埋立地背後の防護施設からの越波量の算定

図-4 は、名古屋港を50m格子で近似した地形であり、浸水計算領域を表す。図中、高潮防波堤と海岸保全施設及び埋立地護岸の位置を表す。名古屋港のように、海岸保全施設の前面に埋立地がある場合、埋立地が冠水すると、埋立地を波浪が伝搬し、防護施設前面に波浪が到達することにより越波は生じる。この現象を表現するために、第1段階で、護岸からの越流・越波による浸水計算を行い、埋立地上の浸水域を推定する。その後、埋立地上の浸水域を考慮した港内波浪計算を行う。第1段階の高潮浸水計算で推定した埋立地の浸水域を反映させた地形データ

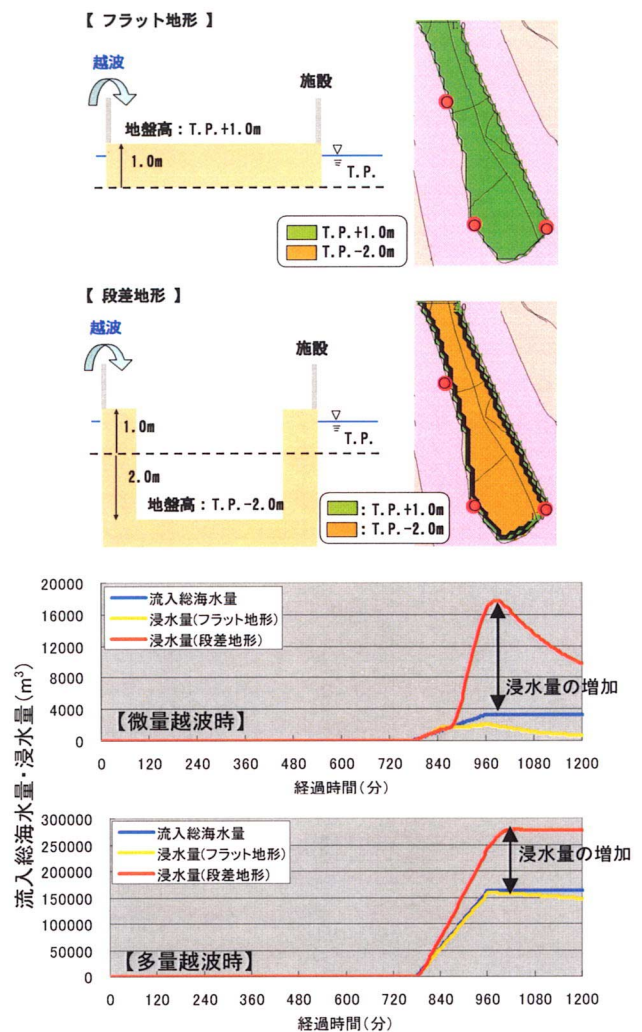


図-3 テスト計算に用いた地形と流入海水量及び浸水量の時間変化

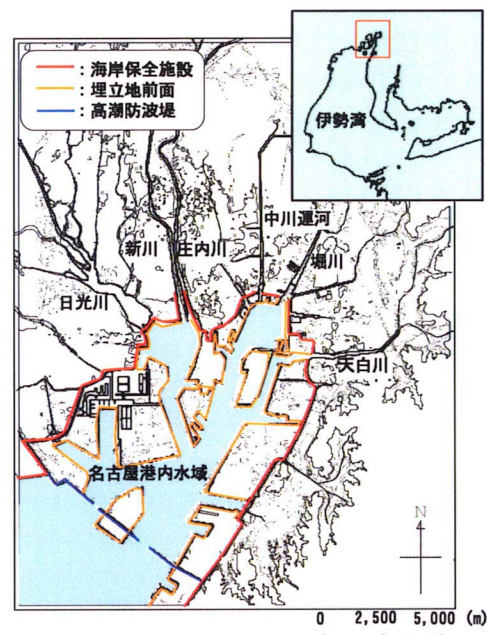


図-4 名古屋港の地形及び高潮防護施設の位置

を基に、侵入波、伝達波、反射波および港内発生波を計算し、各成分のエネルギー合成から埋立地上の浸水域の波浪を含めた港内の波浪を算定する。その後、再度、埋立地護岸および海岸保全施設からの越流と越波による高潮浸水計算を行う。ここで、侵入波、伝達波、反射波の計算は回折及び碎波を考慮したエネルギー平衡方程式法を、港内発生波の計算はパラメータ法を採用し、30分毎に合成波の平面波浪場を算定する。これらの結果は、高潮浸水計算の時間間隔毎に補間し、越波計算の入力データとする。

図-5 に埋立地の浸水域を反映した港内波浪計算の地形を表す。ここで、波浪伝搬の妨げとなる大型構造物等はあらかじめ非計算点とする。また、浸水深に応じて、碎波の有無を判定し、波浪変形計算を実施する。港内の波浪は、高潮防波堤開口部からの侵入波、防波堤から港内に侵入する伝達波、埋立地護岸からの反射波、港内発生波を合成する。図-6 は、最大の高潮による潮位発生時に計算した合成有義波高の分布を示す。埋立地上の浸水域でも波高が算定され、海岸保全施設前面への波浪の伝搬が確認でき、侵入波の影響や反射波の影響が強い埠頭で、0.5m程度の波高が計算される。

4. 伊勢湾奥の高潮浸水計算

(1) 浸水計算の諸条件

a) 計算の対象範囲と浸水計算領域の地形

計算範囲の海底地形は海図及び海底地形図をもとにデータ化し、北西太平洋と日本南岸を網羅し、日本沿岸に來襲する台風の経路が含まれるように設定する。高潮浸水計算を行う伊勢湾は、日本南岸の中央に位置する。計算範囲内は複数の領域に分割し、浸水計算を行う周辺の浅海域は小格子で、外洋領域は大格子で海底地形及び陸上地形を近似する。これら複数領域の計算を同時に行うことにより、数値計算精度の向上を図る。伊勢湾全域は 600m 以下の格子で近似し、伊勢湾奥の名古屋港周辺水域と陸域を 100～50m 格子により地形近似する。図-7 は高潮浸水計算を行う伊勢湾奥部と陸域の計算領域を表す。海岸地形は伊勢湾台風來襲時の 1959 年地形であり、先に示した図-4 は現状の地形（2006 年）を表す。

b) 台風の条件

図-8 は 2 種類の台風経路と台風諸条件を表す。伊勢湾台風（T5915号）は伊勢湾に顕著な高潮を発生した台風である。図は毎時の台風中心位置と台風中心気圧を表す。想定台風は、伊勢湾台風よりも台風規模が大きく、スーパー伊勢湾台風と呼ぶ。この台風の上陸時の中心気圧は910hPaであり、伊勢湾台風の929hPaよりも低い。設定気圧は、日本に上陸した歴史台風のうち、中心気圧が最も低い室戸台風級を想定する。台風の上陸位置は、伊勢湾台風の上陸位置から東側に0.4°移動させ、台風移動方向を反時

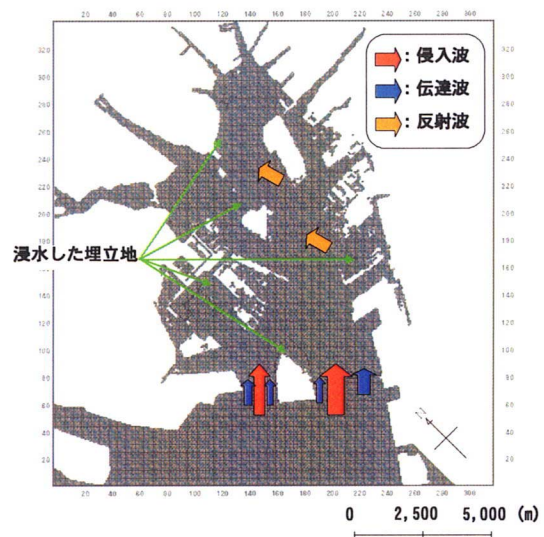


図-5 埋立地上の浸水を反映させた港内波浪計算に用いる計算格子データの一例

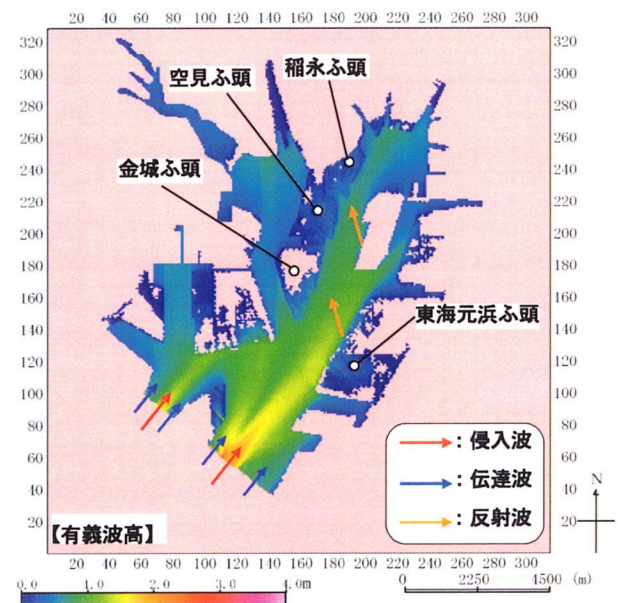


図-6 埋立地上の浸水を反映させた港内波浪計算の結果例

計回りに22.5°回転させた。図によれば、2つの台風は、上陸後北上し、伊勢湾の西側を通過している。このような条件により、伊勢湾奥部の海岸方向へ継続的に吹寄せる南系の風を発生させる。そのため、高潮発生要因となる気圧低下による吸い上げと海上風による吹寄せの効果が顕著になる。スーパー伊勢湾台風の経路は、複数の台風経路により湾奥で発生する高潮による潮位偏差をもとに選定された。なお、スーパー伊勢湾台風の台風経路の選定は、同様の高潮推算の結果に基づくものである。

c) 潮位及び浸水域の条件

陸域の地形は、国土地理院の数値データをもとに設定する。港湾区域は、都市計画図をデジタル化して格子データを作成する。防波堤、防潮堤、海岸堤

防等の港湾・海岸構造物の位置及び天端高は、管理者の施設台帳をもとに、計画条件を設定する。これらのデータは、越流と越波計算の境界条件となる。

高潮浸水計算の設定潮位は、東京湾中等潮位 T.P. を基準とし、地盤高も同様である。計算上の潮位は、天文潮位と高潮による潮位偏差の和で定義される。天文潮位は、伊勢湾台風により発生した最大潮位偏差の発生時刻について T.P.+0.30m を、伊勢湾内の海岸保全施設の計画値として T.P.+0.97m を設定し、湾奥の H.W.L. は T.P.+1.22m を設定する。地盤上の浸水深は、T.P.基準の地盤高と高潮により発生する潮位との差から求める。海域と陸域の底面粗度は、底面摩擦による運動量損失として評価する。海域の底面摩擦はマンニングの粗度係数 $0.025\text{m}^{-1/3}\text{s}$ を、陸域の底面摩擦は土地利用状況別に設定する。

(2) 伊勢湾沿岸の高潮・波浪計算

伊勢湾台風来襲時に発生する伊勢湾内の高潮時の潮位偏差及び有義波高は、柴木・渡辺¹⁾による伊勢湾台風時の高潮再現計算結果をもとに、1959年の再現地形及び2006年地形において計算する。最大潮位偏差の分布から、湾奥の海岸において、高潮災害の浸水危険度は高いことが確認できる。また、有義波高の分布は、外洋と連続した伊勢湾の特徴が現れ、湾口周辺の波高が相対的に高く、湾奥の海岸で発生する波高は2.0～2.5m程度となる。

(3) 伊勢湾奥の浸水計算

a) 伊勢湾台風による高潮浸水の再現

図-9は、伊勢湾台風の来襲時に湾奥で発生する高潮と高波による浸水域の再現結果と、災害後の現地調査から明らかにされた浸水域の範囲との比較である。現地調査結果は、気象庁報告⁵⁾にまとめられ、浸水範囲と浸水深及び海岸堤防の破堤箇所が確認できる。高潮浸水の再現計算で設定した天文潮位は、T.P.+0.30mである。図中の△地点は、破堤箇所を表す。これら破堤箇所は、伊勢湾台風による高潮災害後の現地調査から整理されたものである。

b) 伊勢湾台風と超過外力による高潮浸水の予測

図-10は、伊勢湾台風の来襲を想定した高潮と高波による現状地形の浸水予測結果を表す。天文潮位はT.P.+0.97mで設定する。海岸保全施設は災害後整備され、防潮堤背後の浸水範囲及び浸水深はわずかであり、許容越波流量より小さい越波により小規模な浸水の発生が予測され、これを除けば、浸水域は発生しないと予想される。再現当時と比べて、低平地前面の海岸保全施設の整備に伴い、明らかに浸水範囲は減少し、高潮の浸水危険度は改善する。

図-11はスーパー伊勢湾台風の来襲を想定した場合の高潮と高波による浸水範囲及び浸水深の予測結果である。天文潮位はH.W.L.のT.P.+1.22mで設定する。この条件は、海岸保全施設の計画条件を超過し、浸水範囲は陸域に大幅に拡大する。この広範囲の浸水状況は、海岸堤防の破堤を仮定しない条件でも、越流と越波のみにより発生すると予測される。

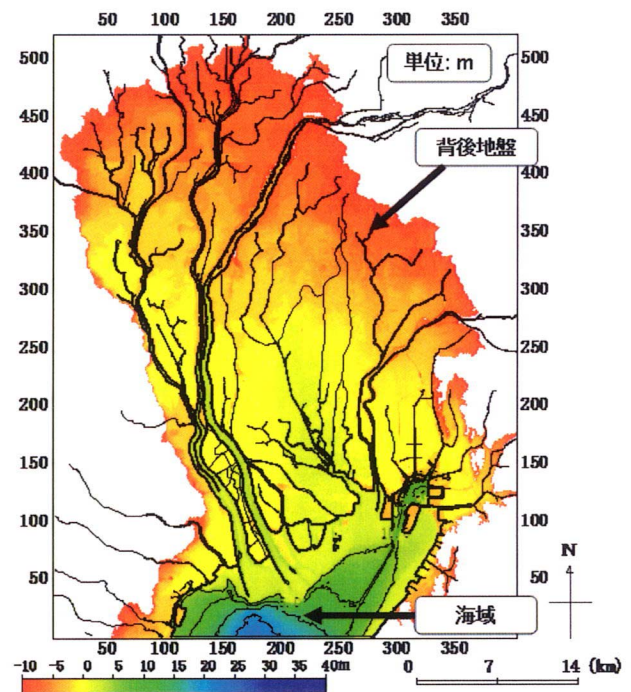


図-7 高潮浸水計算を行う伊勢湾奥の名古屋港周辺海域と陸域の1959年当時の地形

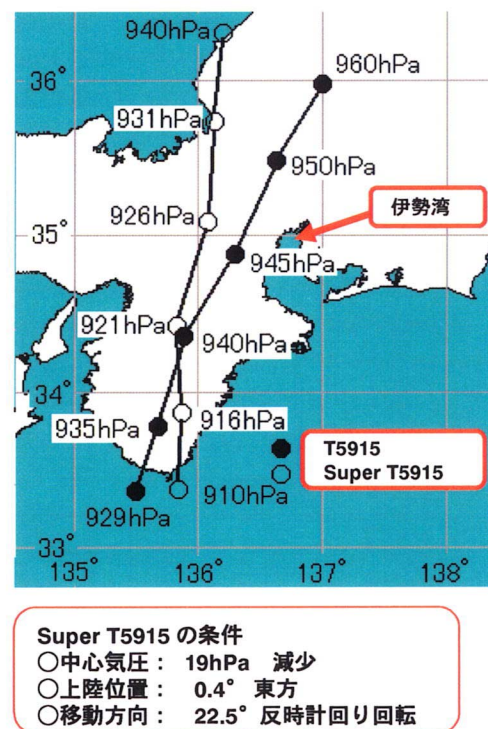


図-8 伊勢湾台風とスーパー伊勢湾台風の台風経路及び伊勢湾接近時刻の台風中心気圧

5. おわりに

本報告は、越流と越波を考慮した高潮浸水計算法を提案した。高潮浸水計算は、港内のように防波堤

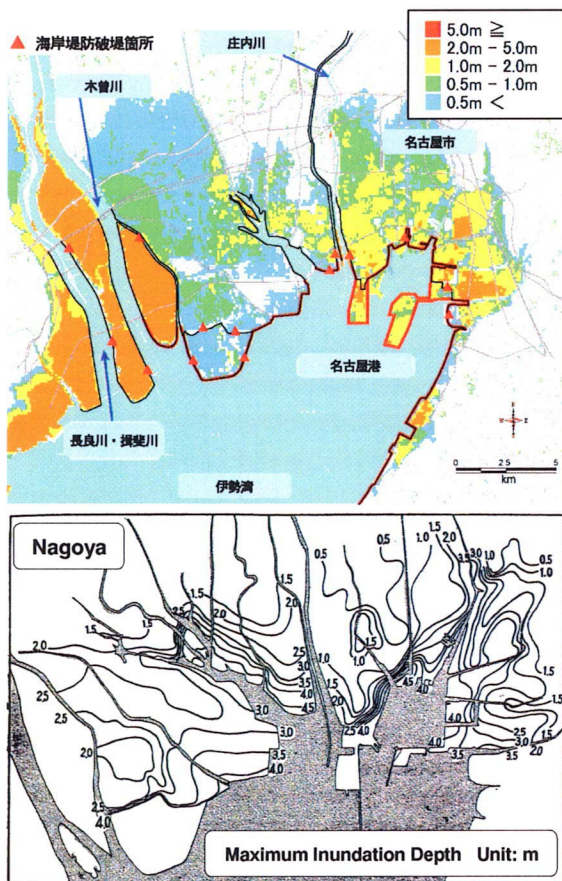


図-9 伊勢湾台風時の高潮浸水計算による湾奥部の浸水の再現と現地調査との比較

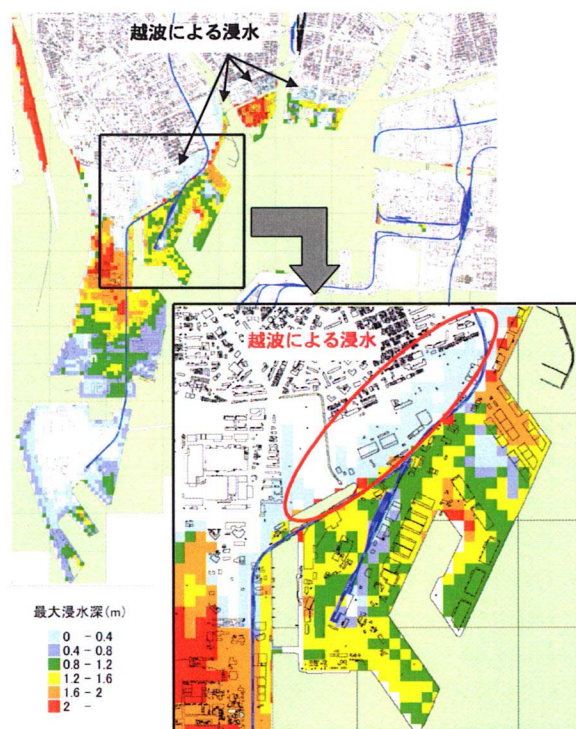


図-10 伊勢湾台風の来襲を想定した現状地形の浸水計算から予測される浸水域の分布

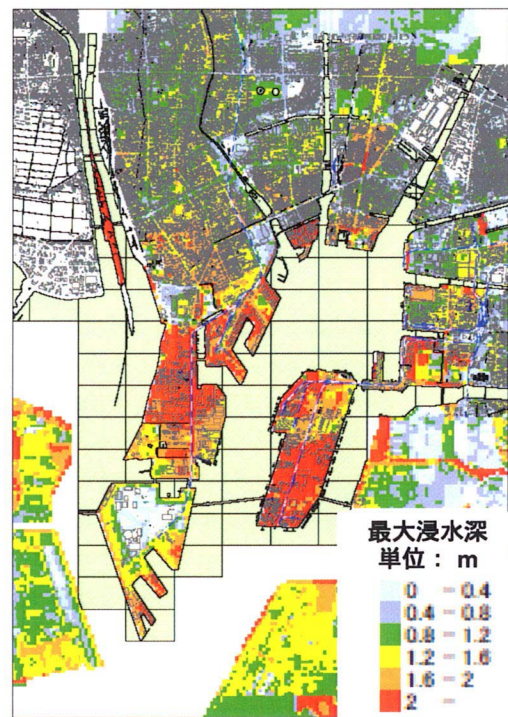


図-11 スーパー伊勢湾台風時に想定される伊勢湾奥の名古屋港港湾区域及び背後地で予測される浸水域状況

により遮蔽された水域の岸壁や埋立地背後の防潮堤からの越流と越波を考慮するもので、既往の高潮シミュレーション技術を融合した実用的な方法である。この方法では、冠水する埋立地上も計算対象となる。伊勢湾奥の名古屋港とその背後地で、伊勢湾来襲時（1959 年）の高潮と高波による浸水状況の再現と、現状地形において、伊勢湾台風とスーパー伊勢湾台風が来襲した場合を想定した浸水予測を行った。これらの計算情報と地図情報との重ね合わせを行うことで、高潮ハザードマップへの活用が期待できる。

謝辞：本報告の作成にあたり、（株）エコ顧問の合田良實博士、服部昌太郎博士、ならびに加藤一正博士からご助言をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 柴木秀之、渡辺 晃：密度成層と Wave Setup を考慮した多層高潮推算に関する研究，土木学会論文集，No.719/II-61，pp.47-66，2002。
- 2) 岩崎敏夫・真野 明：オイラー座標による二次元津波遡上の数値計算，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 70-74，1979。
- 3) 土木学会編：水理公式集 昭和 60 年度版，pp. 287-288，1985。
- 4) 合田良實：港湾構造物の耐波設計，pp. 118-125，1975。
- 5) 気象庁（1960）：高潮の総合調査報告書，気象庁技術報告，第 4 号，286pp，1960。