

海面上昇後の東京湾沿岸における 高潮浸水の予測計算

PREDICTION OF FLOOD DUE TO STORM SURGE UNDER SEA LEVEL RISE
IN COASTAL AREA OF TOKYO BAY

磯部 雅彦*

三島 英敬†

筒井 純一‡

Masahiko ISOBE Hidetaka MISHIMA Jun'ichi TSUTSUI

ABSTRACT; Inner bays have often suffered from storm surge disasters. If the sea level rise and typhoon intensification under global warming happen, the frequency of storm surge disaster will increase. In the present paper, we predicted storm surge and sea waves in Tokyo Bay considering sea level rise and typhoon intensification. Hazard maps of storm surges were presented due to the prediction. Then, we simulated the inundation due to overtop and overflow at Urayasu and Makuhari. At Makuhari, major buildings were considered as a boundary condition by using finite element method. As a result, we suggested the method for the prediction of storm surge and sea wave disaster accelerated by the sea level rise and typhoon intensification under global warming.

KEYWORDS; *sea level rise, storm surge, inundation, numerical calculation*

1 はじめに

一般に内湾の沿岸域は高潮災害の危険性が高い。地球温暖化にともなう海面上昇が起こったり、さらに台風の強度・規模が増大した場合には、現在の高潮防災態勢では不十分になり、高潮災害の危険性が増大すると考えられる。

本研究ではまず、過去において高潮災害を受けてきた東京湾を対象として、海面上昇が生じたと仮定した場合の、現状および巨大化した台風の通過時の高潮および波浪の予測計算を行った。その結果に基づき、東京湾沿岸の高潮時の水位の分布図を作成し、高潮に対する危険地区の特定を行った。さらに、高潮に対する危険性が高い地区で、護岸および砂浜の海岸の代表として浦安地区および幕張地区を取り上げ、陸上への浸水計算を行った。そこでは、最初に高潮と波浪にともなう海岸線から陸上への越波・越流量の算定を行い、続いてそれを境界条件として越波・越流水の陸上での平面的氾濫計算を行った。特に幕張地区では建物の影響を精度高く取り入れるため、有限要素法を用いて主要な建物が境界条件として取り入れられるようにした。

2 高潮および波浪の予測計算

2.1 解析手法

解析手法は筒井・磯部(1992)に従っており[5]、ここでは概要のみを示す。

*東京大学工学部土木工学科 Department of Civil Engineering, Univ. of Tokyo

†日本放送協会 NHK

‡(財)電力中央研究所 Central Research Institute of Electric Power Industry

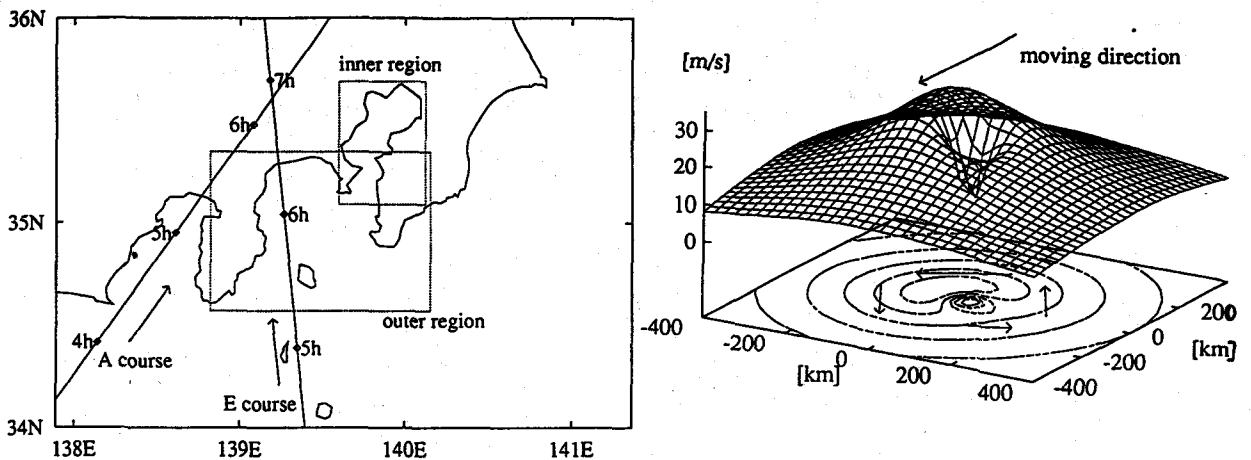


図 1: 台風進路および計算領域 (左) とモデル台風の風速分布 (右)

高潮の支配方程式には浅水方程式を用いており、連続式および運動方程式はそれぞれ次のようである。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} = -\frac{\partial(q_x^2/d)}{\partial x} - \frac{\partial(q_x q_y/d)}{\partial y} + f q_y - g d \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_x^s - \tau_x^b) + \nu_h \left(\frac{\partial^2 q_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} = -\frac{\partial(q_x q_y/d)}{\partial x} - \frac{\partial(q_y^2/d)}{\partial y} - f q_x - g d \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{d}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_y^s - \tau_y^b) + \nu_h \left(\frac{\partial^2 q_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q_y}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

ここで、 q は線流量、 d は水深、 η は静水面からの水位上昇量、 p_a は大気圧、 ρ は海水密度、 g は重力加速度、 f はコリオリ係数、 τ^s および τ^b はそれぞれ海面および海底でのせん断応力、 ν_h は水平混合係数、 t は時間であり、水平座標 x および y が添字で用いられた場合はそれぞれ x 成分および y 成分であることを表す。

主要な外力である海面せん断応力については、モデル化した台風内風速場 (図 1) より海面抵抗係数を用いて計算する。風速場は、台風内の気圧に同心円上の分布を仮定し、それに対応する気圧傾度力による風を摩擦の影響分だけ補正したものと、台風の進行に伴う風とを加えたものとする。台風の強度は中心気圧に反映させる。ここでは、台風の水平的な大きさは一定とし、風速のみが中心気圧の低下に伴って強くなる。境界条件は、海側境界では気圧降下による水位上昇分を強制水位として与え、陸側境界では法線方向の流速のみを 0 とする。計算開始時には台風は十分遠方にあり、初期の気圧分布に応じた水位上昇を与えておく。

2.2 計算条件

高潮の計算では、湾口での水位・流速を適切に与えるために図 1 に示すように外洋域から計算を開始する。湾内、湾外の格子サイズはそれぞれ 900m、2700m とし、湾外の計算では基礎方程式のうち運動方程式中の移流項を省略した簡略化を行っている。また、東京湾の最重要域ともいえる東京港周辺については、その複雑な地形を精度よく表現するために、さらに細かい 300m 格子を用いた計算も行った。これに対して波浪の計算では東京湾を閉じた湾とみなし、外洋からのうねりは考慮せず湾内の風波のみを対象とした。

現在、東京湾における設計高潮偏差を決定するのに用いられている台風は伊勢湾台風をモデル化したものであり、本研究ではこれを標準台風として扱う。地球温暖化後の台風規模については、本研

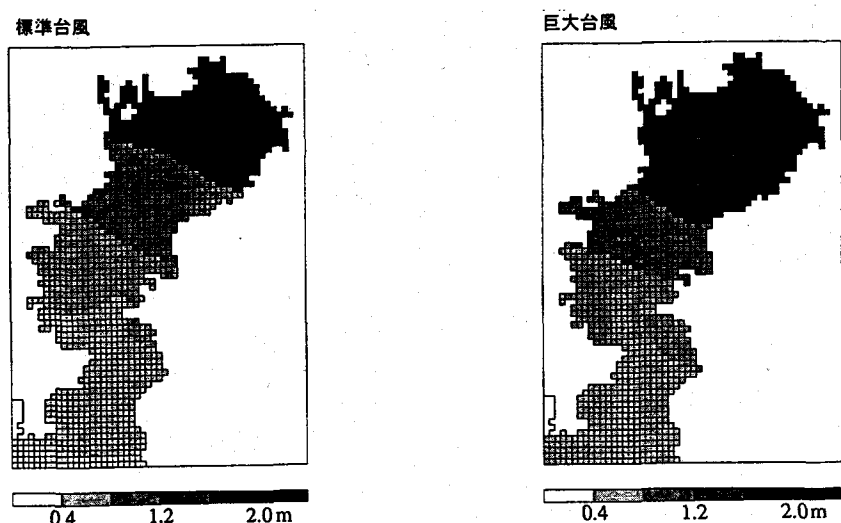


図 2: 現状および巨大化した台風に対する高潮偏差

究では、温暖化時の巨大台風の規模として、895hPa まで降下した場合の検討を加えた。なお、中心気圧以外のパラメタは標準台風と同じものを使用している。湾に対してどのように台風が進行するかは高潮偏差に重大な影響を及ぼすが、ここでは過去の東京湾の被災例を参考に図 1 のような 2 種類のコース (以降 A コース、E コースと呼ぶ) を設定した。

海面上昇については、1990 年の IPCC では、CO₂ 放出量に特に規制を加えないという条件で、2100 年までの海面上昇量の最確値として 65cm という値を報告しており、ここでは海面上昇量をこの 65cm と仮定して検討を行った。

2.3 解析結果

海面上昇が生じたと仮定した場合の、現状および巨大化した台風通過時の高潮偏差の予測結果を、図 2 に示す。東京湾の湾奥部において高潮に対する危険性が高いと言える。そこで、高潮に対する危険性が高い地区で、護岸および砂浜の海岸の代表として、浦安地区および幕張地区 (図 3) を取り上げ、陸上への浸水計算を行うこととする。

3 氾濫流の浸水計算

3.1 解析手法

浸水解析を行う際、境界条件となるのは堤防護岸からの越波である。ここでは以下のようにして高潮時の越波流量を算定した [6]。前節の高潮および波浪の予測結果を利用して、東京湾岸域における高潮偏差、有義波高の経時変動を算定する。ただし満潮時刻と高潮偏差が最大値をとる時刻が同時に becoming するように設定する。これにより海面上昇による平均水位の上昇分 (65cm) と潮位および高潮偏差を加えた高潮時の水位の経時変化を算定する。越波量の経時変化は、高潮時の水位と有義波高の経時変化を用いて、合田ら (1975) の不規則波に対する越波流量公式 [3] および高山ら (1982) の不規則波に対する越波流量算定近似式 [4] を用いて求める。また平均水位が堤防天端高を越える場合は、越流公式として Govinda Rao (水理公式集:1971) の式を用いることにする。

越波浸入水の基礎方程式として以下に示す非圧縮性粘性流体の Navier-Stokes 方程式を水深方向に

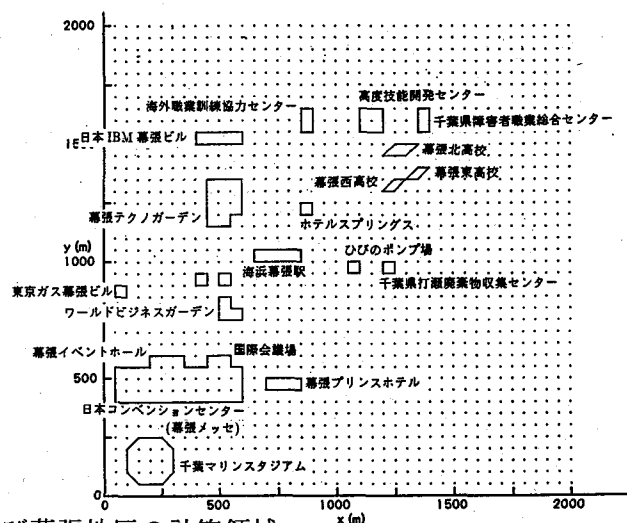


図 3: 浦安地区および幕張地区の計算領域

積分し、乱流拡散を無視した平面 2 次元 (x - y 平面) の連続式および運動方程式を用いる.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{x(b)}}{\rho} \quad (5)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{y(b)}}{\rho} \quad (6)$$

ここに、 h : 水深、 H : 水位 (水深+地盤高)、 u および v : 水深方向に平均化した流速、 $M(=uh)$ および $N(=vh)$: 水深方向に平均化した x および y 方向の線流量、 $\tau_{x(b)}$ および $\tau_{y(b)}$: 路床において作用する x および y 方向のせん断応力、 g : 重力加速度、 ρ : 浸入水の密度である。路床でのせん断力は Manning の抵抗則を用いて次のように表されたとする。

$$\begin{pmatrix} \tau_{x(b)} \\ \tau_{v(b)} \end{pmatrix} = gn^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし, n : Manning の粗度係数である.

計算の初期条件は計算対象領域全域で、水深、線流量ともに0を与える。その後の越波浸入水の挙動は、基礎方程式を離散化し、与えられた境界条件のもとに連続式と運動量式を交互に解くことで算定できる。

基礎方程式は、浦安地区では、スタaggerドメッシュを用いて、陽的なスキームを用いて差分法により離散化する。ただし摩擦項については数値計算上の不安定を避けるために陰的に解くこととする。計算のタイムステップは、CFL 条件を満たす範囲で、1.0s にとる。幕張地区では、主要な建物の影響を精度高く取り入れるため、有限要素法を用いて、Galerkin 法により離散化する。時間項の処理については2段階陽的解法を適用する。

3.2 計算条件

境界としては堤防と越波浸入水の先端がある。河川堤防及び越波のない堤防護岸においては常に直角方向の線流量はないものとする。越波・越流のある堤防護岸の陸側隣接格子では、計算タイムステップ毎に、越波量に相当するわきだしが発生するものとして扱う。越波量は、その経時変動値を堤

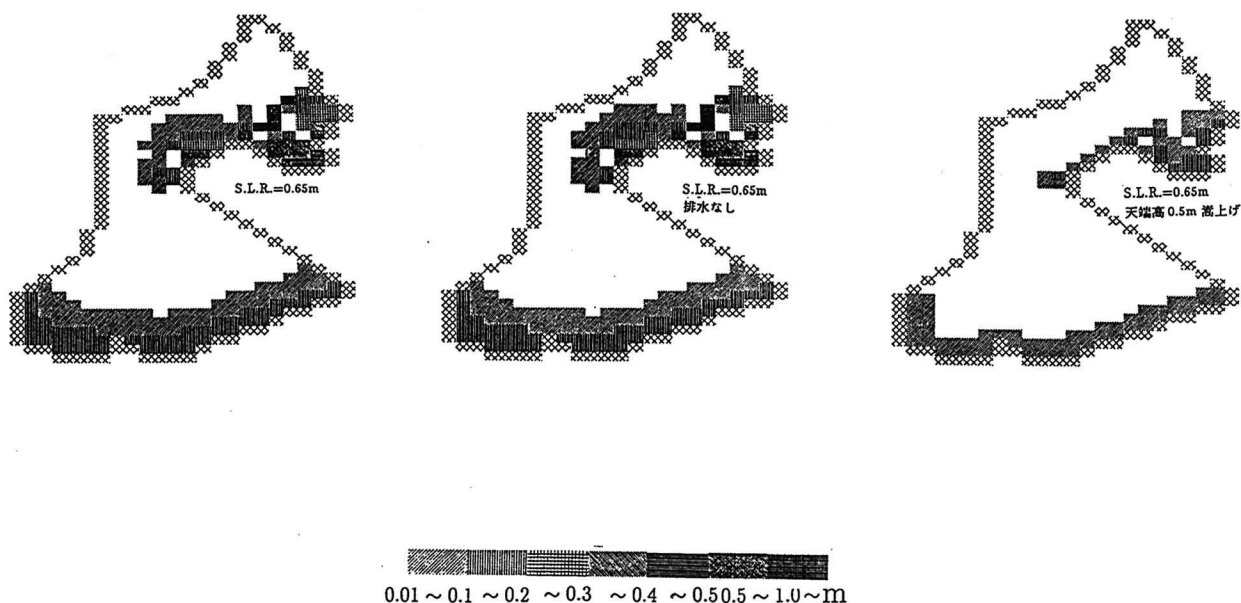


図 4: 浦安地区の最大深水深

防護岸での境界条件として与える。実際の計算においては、越波量を 30 分ごとに平均化した値を用いた。

浦安地区については、計算領域は図 3 に示す通りであり、計算格子点の地盤高は国土数値情報 (国土地理院) から読み取り、計算格子サイズは縦横 250m の正方形にとる。またこの地域には、湊および中江川に排水機場が存在する。排水機場の処理能力は、湊が $5.67(\text{m}^3 \times \text{m} \cdot \text{s}) \times 2$ 機、中江川が $2.00(\text{m} / \text{m} \cdot \text{s}) \times 3$ 機である。排水機場は、その存在する格子の浸入水から能力に応じた水量を吸い込む。この吸い込みは連続式を解くときに考慮する。粗度係数は、密集した都市域を対象としていることから計算対象領域全域に 0.05 を与えた。また浸入水の先端については岩佐 (1987) にならって以下のように扱う [1]。すなわち限界水深 (ここでは 1mm) 以下の格子からの流入フラックスは無視でき、その同じ格子の地盤高が周辺格子の水位よりも大きければ、流出フラックスも無視できるものとする。

幕張地区については、計算領域は図 3 に示す通りであり、計算格子点の地盤高は数値地図 50m メッシュ (国土地理院) および 1:2500 都市計画図 (千葉市) から読み取る。大きな建物による影響を考慮するため、建物の壁面に対して直角方向の流れはないとし、境界条件として扱う。氾濫流の先端は洪水の消長に伴って移動するため、岡 (1992) にならって移動境界として扱う [2]。なお排水機場は考慮していない。

3.3 解析結果

浦安地区については、現状の堤防護岸で排水機場が機能する場合、排水機場が機能しない場合、堤防護岸を 50cm 嵩上げした場合についての最大浸水深を図 4 に示す。最大浸水深は 1m を越えることになったが、ポンプによる排水や外郭堤防の 50cm 程度の嵩上げが有効であると言える。

幕張地区については、越波水の浸入する様子を示すため、越波が始まってから 3 時間後の流速ベクトル図と 3 時間後の水深コンター図を図 5 に示す。砂浜海岸からの越波水が建物の間を通して内陸側に進入する様子がシミュレートされ、最終的に海岸線から 1km 程度まで浸水することがわかった。

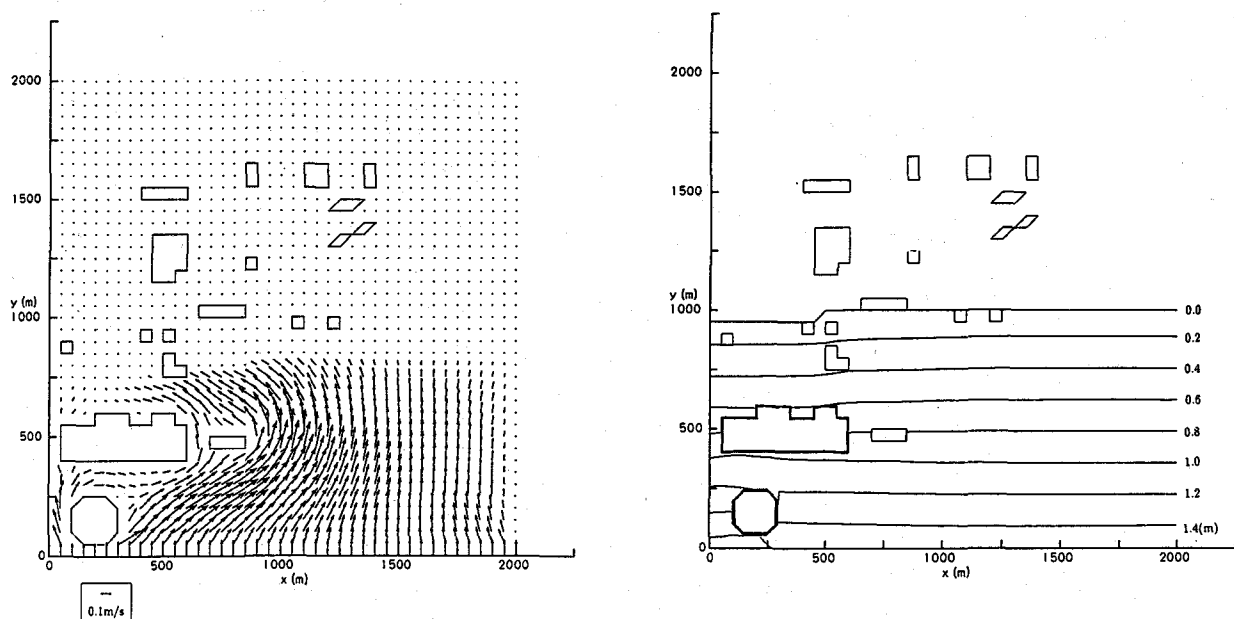


図 5: 幕張地区の流速ベクトル図 (左) と水深コンター図 (右)

4 おわりに

本研究における予測計算の結果、65cmの海面上昇後に、台風が変化した場合としない場合の台風通過時の東京湾沿岸の水位分布が得られた。また、浦安地区では、海面上昇により浸水地域が増大し、最大浸水深が1mを越えることになったが、ポンプによる排水や外郭堤防の50cm程度のかさ上げが有効であることが明らかになった。また、幕張地区では、砂浜海岸からの越波水が建物の間を通して内陸側に進入する様子がシミュレートされ、最終的に海岸線から1km程度まで浸水することがわかった。以上を通じ、地球温暖化にともなう海面上昇と台風強度・規模の変化に対して、高潮・波浪災害の予測手法が提案でき、また、対応策を講じた場合の効果の評価も可能となった。

参考文献

- [1] 岩佐義朗：高潮及び洪水の氾濫による都市水害とその予測に関する研究，第24回自然災害科学総合シンポジウム要旨集，pp.12-22，1987.
- [2] 岡太郎：ガラーキン・反復型有限要素法による洪水氾濫解析，水工学論文集，第36巻，pp.331-336，1992.
- [3] 合田良実・岸良安治・神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量，港湾技術研究所報告第14巻第3号，pp.4-39，1975.
- [4] 高山知司・永井紀彦・西田一彦：各種消波工による越波流量の減少効果，港湾技術研究所報告第21巻第2号，pp.151-205，1982.
- [5] 筒井純一・磯部雅彦：地球温暖化後の東京湾における高潮の予測，日本沿岸域会議論文集，No.4，pp.9-19，1992.
- [6] 松井貞二郎・立石英機・磯部雅彦・渡辺晃・三村信男・柴崎亮介：海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測，海岸工学論文集，第39巻，pp.1031-1035，1992.