

首都直下地震による東京湾内津波の挙動と 災害危険度の評価

A STUDY ON TSUNAMI BEHAVIOR IN TOKYO BAY AND ESTIMATION
OF DAMAGE UNDER EARTHQUAKE OF TOKYO METROPOLITAN

柴山知也¹・大平幸一郎²

Tomoya SHIBAYAMA, Koichiro OHIRA

¹フェロー 工博 早稲田大学教授 理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保3丁目4-1)

²学士 (工) 早稲田大学創造理工学研究科建設工学専攻 (同上)

The purpose of this study is to calculate tsunami behavior in Tokyo Bay and to estimate the damages under a earthquake in Tokyo Metropolitan. Kanto region which has many faults has a big possibility of occurring M7 class earthquake. The earthquake under the Tokyo bay is related to the second disaster due to tsunami. The target earthquakes are North Tokyo Bay (M7.3) and East Metropolitan (M6.9) and the coupled earthquake of these two. Tsunami propagation and overland inundation height are calculated under the impacts of target earthquakes. First the tsunami sources are calculated by using a model of Mansinha and Smylie (1971) and tsunami propagation and overland inundation are calculated by differentiating nonlinear long wave equation with *Leap-frog* method. For the overland inundation calculation, the 5m mesh topography data are used. The 5m mesh for the overland inundation calculation enables to display the micro scale overland inundation.

Key Words : *Tsunami, Tokyo bay, leap-frog method, numerical calculation, inundation, earthquake of Tokyo metropolitan*

1. はじめに

多くの断層が存在する関東地方においては、首都直下でマグニチュード (M) 7クラスの地震が発生する切迫性が高いとされている。特に東京湾周辺の断層による地震は、二次災害である津波の影響も考慮する必要がある。東京湾沿岸には、建設後40年以上経過した高潮防潮堤等の海岸構造物が多く存在しており、地震時にその機能を減じることで、津波の被害が拡大することも考えられる。本研究では首都直下地震による津波の挙動を数値計算を用いて解析し、その津波による東京湾沿岸域での浸水被害予測を行う。本研究では内閣府中央防災会議の設定している断層パラメータを用いる。対象とする地震は首都直下地震であり、しかも断層が海域で発生する、すなわち津波を発生させる危険性のある地震とし、東京湾北部地震 (M7.3) と都心東部地震 (M6.9)、さらにこれら2つの地震が同時に発生する双子地震の3つの地震を設定した。これらの地震による津波の伝播計算を行い、さらに陸上氾濫の計算を行った。計算法については、波源はMansinha and Smylie¹⁾の

モデルを用いて断層パラメータから計算し、津波の伝播・氾濫計算は、非線型長波方程式をLeap-frog法によって差分化し計算を行った。陸上氾濫計算では、地形データのメッシュサイズを5mとし、河川や運河などの微地形を再現した。これにより詳細な地形での浸水被害予測を可能にした。地震発生時刻を満潮時および平均潮位時の2つに設定し、防護構造物をないものと設定して算定した。これは水門等の防護構造物が地震による倒壊や故障によりその機能を失うことを想定するためである。機能を失う可能性は、地盤が流動化することによりさらに高くなる (濱田ら²⁾)。

2. 対象地震

東京湾北部地震 (M7.3) と都心東部地震 (M6.9) の2つの地震の断層パラメータ、断層の位置を図-1、図-2に示す。さらにこれら2つの地震が連動し同時に発生する双子地震を想定した。双子地震を想定した理由は、対象とした2つの地震のうち、東京湾北

部地震は北米プレートとフィリピン海プレートの境界の地震、都心東部地震は北米プレートの地殻内の浅い地震であり、位置関係が前者の地震の断層の上に後者の地震の断層が存在しているという近接した断層であるためである。一方の地震の発生がもう一方の地震を誘発し、連動型の地震になる可能性がある。

3. 津波の伝播計算

(1) 計算方法

波源モデルは、Mansinha and Smylie¹⁾のモデルを用いて、計算領域内の地震発生直後の初期水位変動量 η を求めた。断層の地上からの上端深さを $d(\text{km})$ 、断層の長さを $L(\text{km})$ 、断層の幅を $W(\text{km})$ 、走向を $\theta(^{\circ})$ 、傾斜を $\delta(^{\circ})$ とした各断層のパラメータを用いる。

次に津波の伝播計算を行う。津波の数値計算は長波に近似した基礎方程式によって行うことができる。この場合、運動の鉛直成分は圧力分布に影響を及ぼさず、圧力は静水圧分布となり、さらに鉛直線に沿った水平方向の流速分布は一樣となる。また、本研究で扱う東京湾のように水深が外洋に比べ全体的に浅い場合には海底摩擦の影響が無視し得ない。よって海底摩擦に対してManningの抵抗則が適用できるとしてエネルギー損失を考慮する。長波近似の下で、連続式及び運動方程式は次式ようになる。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u(h+\eta)] + \frac{\partial}{\partial y} [v(h+\eta)] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (3)$$

ただし、 x, y ：水平座標、 t ：時間座標、 h ：静水深、 η ：静水面からの水位上昇量、 u, v ： (x, y) 方向の流速、 g ：重力加速度、 $\tau_x/\rho, \tau_y/\rho$ ： (x, y) 方向の海底摩擦である。

次に、全水深 $D = (h + \eta)$ を用いて (x, y) 方向の流量flux (M, N)を導入すると、

$$M = u(h + \eta) = uD, \quad N = v(h + \eta) = vD \quad (4)$$

である。式(1)～(3)を海底から水表面まで積分し、この流速flux (M, N)を用いると、鉛直方向に積分された方程式として、

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{1/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (6)$$

地震の種類	プレート境界 北米プレート・フィリピン海プレート
上端深さ d (km)	約30
面積 (km^2)	2057
走向 θ ($^{\circ}$)	315
滑り角 ($^{\circ}$)	45(北東下がり)
平均滑り量 (m)	1.5

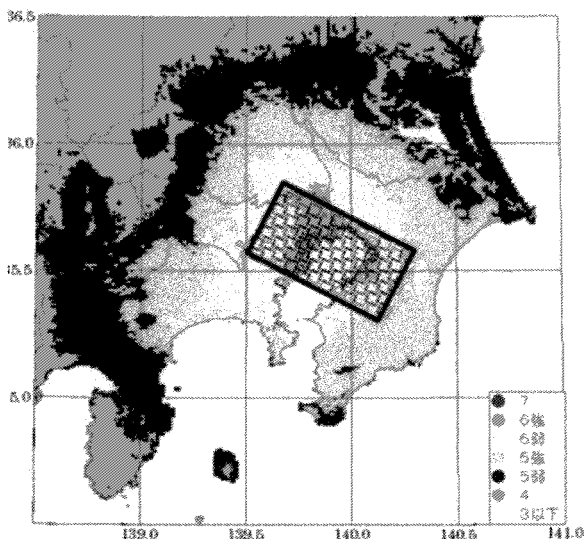


図-1 東京湾北部地震の断層パラメータと断層位置
(出典：中央防災会議³⁾)

地震の種類	プレート内 北米プレート
上端深さ d	6
面積 (km^2)	195
走向 θ ($^{\circ}$)	296
滑り角 ($^{\circ}$)	48(北東下がり)
平均滑り量 (m)	1.6

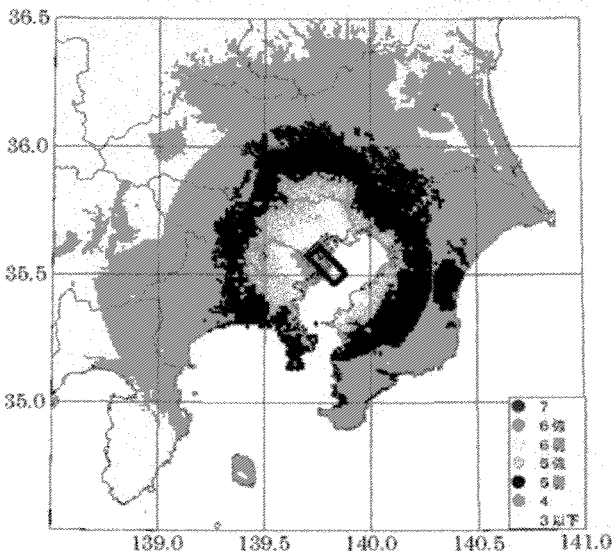


図-2 都心東部地震の断層パラメータと断層位置
(出典：中央防災会議³⁾)

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

が導かれる．この式(5)～(7)が数値計算の支配方程式となる．上記の非線型長波方程式をLeap-frog法によって差分化し計算を行った(後藤・小川⁴⁾)．

内湾の計算では計算時間を2時間とし，地形データのメッシュサイズは450mである．水際線では護岸の構造物が直立堤の場合が多いことを考慮して水際線で波を完全反射させた．

(3) 計算結果

対象とした3つの地震に対する東京湾内の津波の挙動を図-3に示す．津波高の予測値は，東京湾北部地震では0.7m，都心東部地震では0.2m，東京湾北部地震と都心東部地震による双子地震では0.7mである．これらの津波は，1703年の元禄地震により房総半島沖で発生して湾内に伝播した東京湾内の津

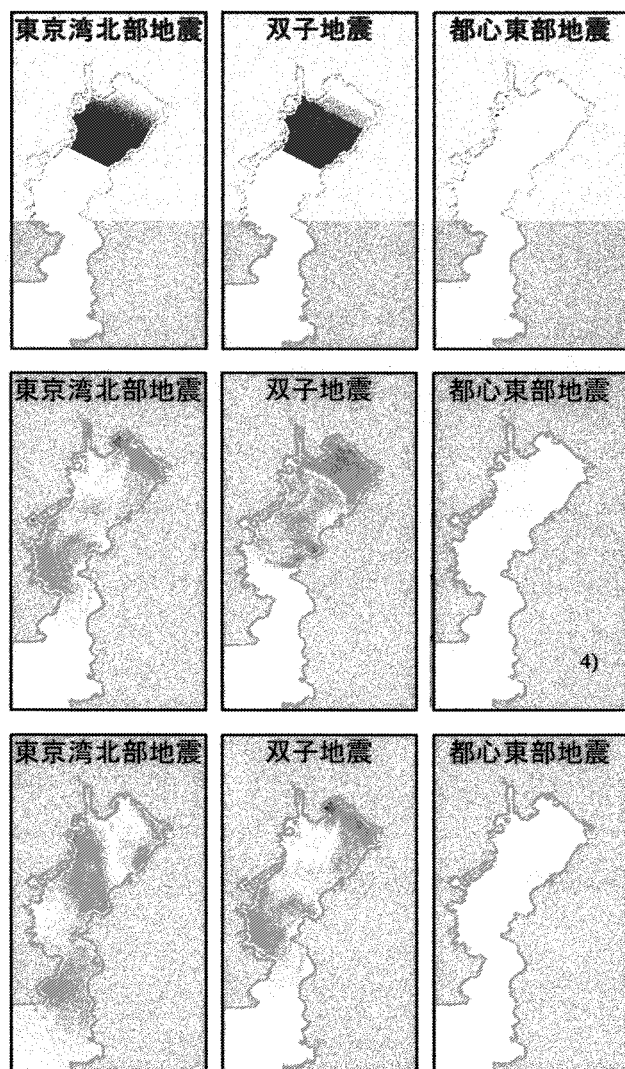


図-3 東京湾内の津波の挙動

(上) 地震発生直後

(中) 地震発生30分後 (下) 地震発生1時間後

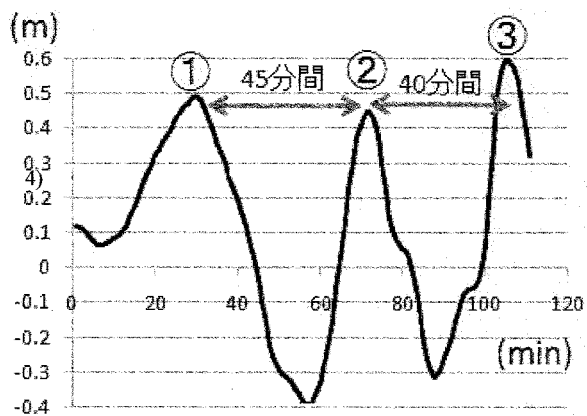


図-4 浦安における津波高の時間的変化と到着波

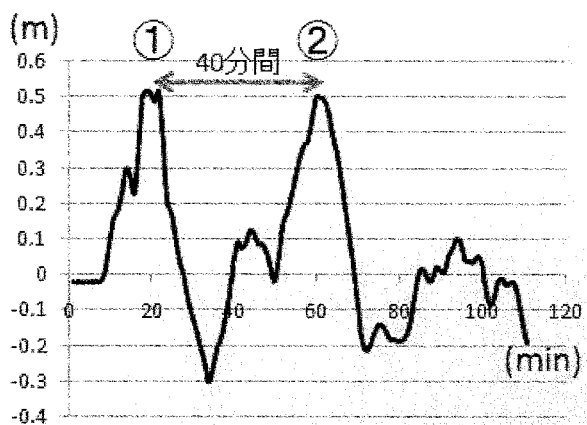


図-5 木更津における津波高の時間的変化と到着波

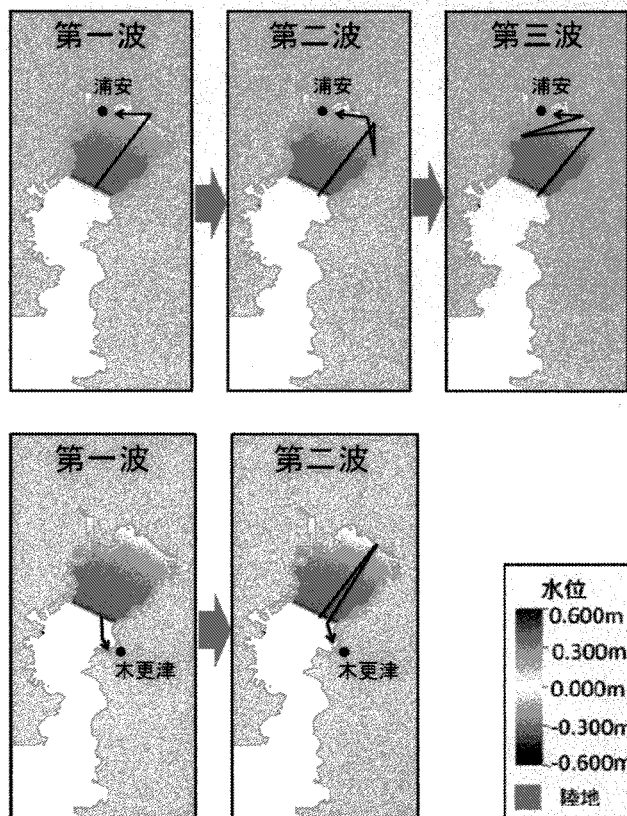


図-6 津波の反射の様子

(上) 浦安到着波 (下) 木更津到着波

波高 (2.0m) と比較すると低い。特に都心東部地震による津波高は小さいと考えられる。

図-4、図-5に浦安と木更津での水面の時間変化、図-6に東京湾北部地震による津波の反射の様子を示す。津波が地震発生から2時間で複数回襲来していることがわかる。このように東京湾内の津波の特徴として、複数回の津波の襲来があげられる。この要因として東京湾の形状が袋型であるという地理的条件、さらに沿岸部が直立護岸等により形成されており津波が水際線において高い反射率で反射することが挙げられる。なお、東京湾北部地震と都心東部地震による双子地震の津波高は、東京湾北部地震の津波高とほぼ等しいという結果が得られたことから、同時に発生することによる津波高の大きな増幅はないと考えられる。

4. 氾濫計算

(1) 計算方法

基礎方程式は慣性項・摩擦項を含んだ浅水長波の運動方程式と連続式であり、4 (1)と同様である。また、氾濫計算においても基礎方程式をLeap-frog法を用いて差分化し計算を行った。

(2) 計算条件

陸上氾濫計算では、対象地震を東京湾北部地震 (M7.3)、対象地域を東京湾内沿岸部に設定し、特に大きな浸水被害が予測される地盤高が海面下の江東デルタ地区や稲谷地区などを含めた全14地域に設定した。なお、計算において建物などの人工構造物や、樹木などの植生などを除去している。対象地域は高密度居住地域 (建物密度50%以上) であることより、Manningの粗度係数に0.08 (小谷ほか⁹⁾) を用いた。また、東京湾の潮汐による海水面の変動値は、気象庁のデータ (2008年) を基にしている。また、地形データは国土地理院の数値地図の5mメッシュを用いている。対象地域の計算範囲、津波の侵入位置、また計算結果である満潮時、平均潮位時の浸水高の予測値を表-1に示す。

(3) 計算結果

図-7に江東デルタ地区西部、図-8に品川駅東部の高浜運河の氾濫の様子を例を示す。江東デルタ地区西部では、隅田川を遡上してきた津波が上流の支流の入口に到達し、地震により機能を減じている水門を通過して侵入したシナリオを想定している。その結果として、北十間川、竪川、小名木川に津波が侵入し、河川沿いの地盤高の低い地点より水が地上に溢れ出し陸上氾濫をすることがわかった。また陸上に氾濫した水は、地盤高の低い場所に滞留するため、局所的に窪地になっているところでは、浸水高が局所的に大きくなる地点もある。図-7では、小名木川沿いの千田付近において最大で1.5mの浸水高が予測される。

品川駅東部の地域における氾濫の開始場所は、高浜運河の行止り地点であり、この周辺の500m四方の範囲に浸水被害の予測がされる。氾濫が広がっている地域は写真-1のように、運河には屋形船などの小型船舶が停まっており、そのすぐ隣には木造建築が存在し、住宅密集地域であるため、家屋の倒壊などにより、漂流物が発生する可能性がある。また目黒川河口付近においても浸水被害を予測したが、東京湾から目黒川に至るまでには水門が存在しないため、津波が侵入しやすい構造になっているといえる。

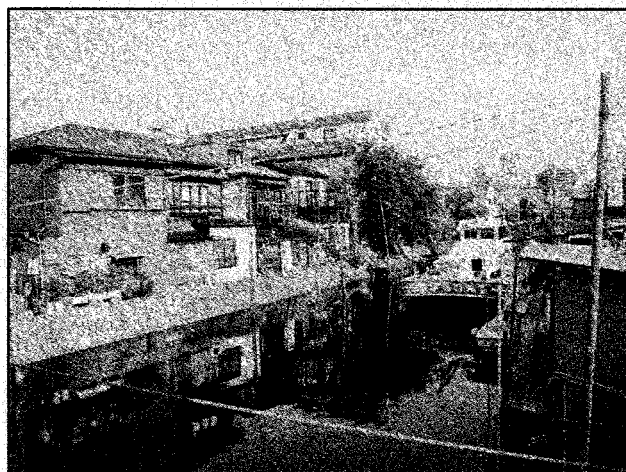


写真-1 品川駅東部の運河の行き止まり地点

表-1 対象地域の計算範囲・浸水予測値・津波侵入位置

対象地域			計算範囲(km)		満潮時		平均潮位時			津波侵入場所	
					浸水予測値		住宅地への 浸水被害	浸水予測値			住宅地への 浸水被害
			南北方向	東西方向	最大浸水高(m)	平均浸水高(m)		最大浸水高(m)	平均浸水高(m)		
東京都	江東デルタ地帯	隅田水門周辺	6.000	4.000	0.4	0.3	あり	-	-	なし	隅田水門
		旧中川南部	4.000	1.500	1.2	0.7	あり	0.7	0.5	あり	荒川ロックゲート
		北十間川西部	1.250	3.500	0.5	0.3	あり	0.2	0.1	あり	源森水門
		竪川西部	0.875	4.000	0.5	0.3	あり	-	-	なし	竪川水門
		小名木川西部	1.250	3.300	1.5	0.7	あり	0.5	0.3	あり	小名木水門
		新砂水門・曙水門周辺	3.500	3.150	1.2	-	なし	-	-	なし	新砂水門・曙水門
	品川駅周辺	辰巳水門周辺	2.500	3.000	0.6	0.5	あり	-	-	なし	辰巳水門
		品川駅東部	4.500	3.150	1.5	1.2	あり	-	-	なし	高浜運河
		目黒川河口周辺	2.000	4.500	0.8	0.7	あり	-	-	なし	京浜運河
		多摩川河口北部	2.500	1.150	-	-	なし	-	-	なし	海老取川
神奈川県	稲谷地区	多摩川河口南部	1.500	3.500	-	-	なし	-	-	なし	大師運河
千葉県		浦安地区	0.800	0.600	-	-	なし	-	-	なし	猫実川河口
		木更津港	9.450	4.450	0.2	0.2	あり	0.2	0.1	なし	鳥田川河口
		富津岬	4.700	2.550	0.2	0.1	なし	-	-	なし	岬北部沿岸

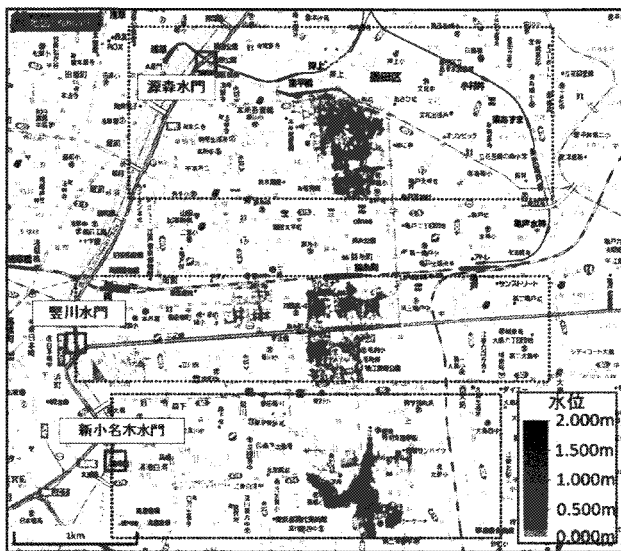


図-7 江東デルタ地区西部の氾濫の様子

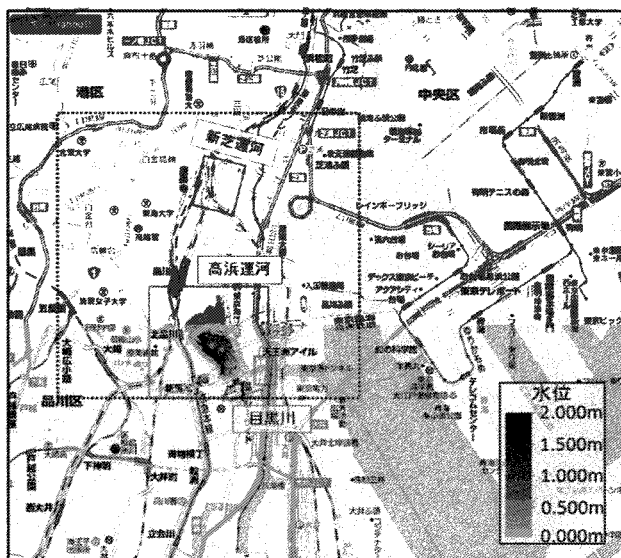


図-8 品川駅東部の氾濫の様子

5. 結論

計算結果より、満潮時には 1.5m、平均潮位時に 0.7m の最大浸水高となることを予測した。陸上に氾濫しやすい場所として、次のような地域が挙げられる。

- 1) 地盤高が低い場所（例えば、江東デルタ地区）
- 2) 運河の行止り（例えば、品川駅東部）
- 3) 水門が未整備の場所（例えば目黒川河口）
- 4) 防潮堤が未整備の場所（例えば、木更津港）

陸上氾濫計算では計算条件を地震により防護構造物が機能を失い、そこから水が侵入してくることを想定して行った。したがって地震時にも防護構造物が機能していれば氾濫被害を抑制できると考えられる。しかし逆に防護構造物が地震時に機能を失えば浸水被害がでることが予測されるため、対策として沿岸部の防護構造物の耐震性の補強が有効である。また、浸水被害が予測された地域の浸水予測値は最大で 1.5m であり、該当地域において災害時には鉄筋コンクリートの建物の 2 階以上に避難するなどの適切な避難行動を行えば、人的被害は抑制できると考える。ただし、浸水被害が予測された地域の中には、木造住宅の密集地も存在し、地震による家屋の倒壊が発生した際には漂流物により被害の拡大が考えられるため、該当地域では漂流物の対策が必要である。

謝辞：東京湾の水深データなど貴重な資料を提供していただいた内閣府防災担当室の山本洋子氏に謝意を表す。本研究は日本学術振興会科学研究費補助金・基盤（B）No. 22404011（代表者：早稲田大学 柴山知也）による研究であることを付記する。

6. 参考文献

- 1) Mansinha, L. and Smylie, D. E.: The displacement fields of inclined faults, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 61, No. 5, pp. 1433-1440, 1971.
- 2) 濱田政則, 島村一訓, 柳瀬和俊, 中村正樹, 田中淳寛: 液状化土の流動特性に関する研究, 第 2 回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文, pp. 261-266, 2001.
- 3) 中央防災会議: 首都直下地震対策専門調査会(第 12 回)資料 2-3, pp. 1-33, 2004.
- 4) 後藤智明, 小川由信: Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学資料, pp. 1-52, 1982.
- 5) 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集第 45 巻, pp. 356-360, 1998.
- 6) 柴山知也, 佐藤慎司, 和田雅人: 東京湾の津波計算と海上交通の安全性, 日本沿岸域会議論文集 No. 1, pp. 37-42, 1989.
- 7) 岡安章夫, 柴山知也, 後藤僚一: 臨海部大規模地下空間における氾濫水伝播の数値シミュレーション, 日本沿岸域学会研究討論会 講演概要集 No. 5, 1992.

