

海面上昇に伴う日本の沿岸域の浸水影響予測

松井貞二郎*・立石英機**・磯部雅彦***
渡辺 晃***・三村信男****・柴崎亮介*****

1. はじめに

IPCC, WG 1 (1990) 等の検討によれば, 地球温暖化の影響で2100年までに 30~110 cm の海面上昇が起こる可能性があると言われている. そこで長い海岸線 (約 34,000 km) と大きな経済集積を特徴とする日本の沿岸域にも相応の影響が予想される. 本研究では, まず各沿岸域の潜在的な脆弱性 (vulnerability) を調べるために, 堤防護岸の存在を考慮しない場合の全国の沿岸域での海面上昇による浸水影響を, 面積, 人口, 資産の三項目からなる社会経済的側面から検討した. 従来から同様な検討が, おもに運輸省 港湾局 (竹下ほか, 1991), 建設省 河川局 (1989) 等によりなされているが, 今回は特に海面上昇の影響の地域特性と気象学的頻度に注目した. 続いて東京湾岸域を取り挙げ, 伊勢湾台風級の台風を想定し, 堤防護岸の存在も考慮した場合の高潮に伴う越波による浸水予測を行った. この際には, 気候変動後に排水設備や堤防の天端高が, 予測される水位, 波浪に対して十分であるかどうかを検討した.

2. 全国の沿岸域の潜在的な脆弱性評価

(1) 検討手法

a) 使用データ 浸水域内面積の算定には「国土数値情報 (国土庁 国土地理院)」磁気テープの標高 (ファイル名: KS-110-1), 土地利用別面積 (同 KS-200) の各メッシュデータ, 浸水域内人口の算定には昭和60年度国勢調査結果による人口メッシュデータ, 資産の算定には国民経済計算 (経済企画庁) の「土地および森林資産額の都道府県別内訳 (民有地)」および「国民資産」を使用した.

b) 設定水位および地域区分の設定 今回の計算では現象の気象学的頻度という視点から, 設定水位を三種類の気象条件 (平均海面時, 満潮時, 高潮または津波時) に対応させた. このうち満潮時, 高潮および津波時

の水位は, 主に地形学的要因から地域ごとに異なる値をとる. そこで全国の沿岸域を朔望平均満潮水位の大小から, 日本海, 太平洋北部, 太平洋南部, 潮位差の小さい閉鎖性内湾 (東京湾と大阪湾と伊勢湾等), および潮位差の大きい閉鎖性内湾 (瀬戸内海と有明海) の5地域に分類することにした. 実際の作業においては, 国土数値情報の1次メッシュコード単位 (約 80 km 四方) でどの区分に該当するかを判断した. まず, 平均海面の地域差は無視し, すべて T. P. 0 m とした. 次に, 満潮位は, 島を除く各海岸での農林水産省ほか (1990) の朔望平均満潮位のデータを地域ごとに単純平均した値を採用した. 高潮または津波発生時の水位偏差については, 農林水産省ほか (1990) の資料による既往最大潮位偏差と, 村上・森川 (1985) がとりまとめた過去100年での最大高潮偏差を比較して大きい方の値を採用した. また波による水位上昇は, 菅原ら (1986) の資料による既往最大有義波高の 10% 相当に設定した. 表-1 に, 各気象条件下での地域区分別水位偏差を示した. 以上により, 海面上昇を無視した場合の平均海面時とは, T. P. 0 m, 満潮時とは T. P. 0 m + 朔望平均満潮位, および高潮または津波発生時とは T. P. 0 m + 朔望平均満潮位 + 高潮または津波偏差 + 有義波高 $\times 10\%$ を意味することになる. これに予測される海面上昇の値として, 0.3 m, 0.5 m, および 1.0 m のシナリオを設定し, 各シナリオに対して気象条件別に水位を設定する.

c) 算定手順 浸水域内面積の算定の際には, 前述の標高データのメッシュ間隔が約 250 m であるため, そのポイントでの標高値が, 設定浸水水位以下であれば 250 m 四方全て浸水域になると考える. ただし標高値は 1 m 単位で測定されているため浸水の判断精度もこれに依存する. また土地利用別面積データの最小メッシュが, 3次コード (約 1 km 四方) であるためにこれを算定規準ユニットにする. その結果ユニットに $16(1000/250=4, 4 \times 4=16)$ 個の標高データが存在することになり, 浸水域面積は, 16個のうち何ポイントが, 設定浸水水位以下にあるかの割合をユニット面積に乗じて算定した. ただし, 標高データのうち, 層性が埋立地であり, かつ標高値が与えられていない場合は標高値を 0 m と

* 学生員	東京大学大学院	土木工学専攻
** 正会員	三井不動産	
*** 正会員	工博 東京大学教授	工学部土木工学科
**** 正会員	工博 茨城大学助教授	工学部都市システム工学科
***** 正会員	工博 東京大学助教授	生産技術研究所

みなした。浸水域内人口は面積の算定と同様にユニットの浸水割合を用いて、ユニット内人口に浸水割合を乗じて算定した。浸水域内資産は、再生不可能有形資産（地価）と純固定資産（国民資産）に大別される。減少地価は、各都道府県別の、土地利用別地価のデータ（国民経済計算）と前述の過程で算出された各都道府県別土地利用別浸水域内面積を用いて計算した。減少国民資産については、一人当りの固定資産額は全国一律の値をとると考えて、全国合計の国民資産額と前述の過程で算定された各都道府県別浸水域内人口を用いて算定した。

(2) 検討結果

海面上昇の影響評価の基礎データとして、図-1に地盤高5m以下の地域をプロットし、図-2に1m毎にその地盤高未満に含まれる面積、人口、資産の全国および地域別合計値を示した。表-2に海面上昇の各シナリオ値に対する、気象条件別浸水域の面積、人口、資産の全国合計値を示した。また表-3には、海面上昇1mで高潮または津波発生時の浸水域について、土地利用形態と資産の内訳を示した。図-1から標高が低く浸水の危険が高い地域として根釧台地、仙台平野、新潟平野、関東平野、濃尾平野、大阪平野、播磨平野、岡山平野、筑紫平野等が挙げられる。図-2から、面積、人口、資産が標高に対してほぼ2次的に増加していることが読み取れる。また特に人口、資産については東京湾、大阪湾、伊勢湾が支配的である。例えば5m未満に含まれる資産の全国合計値約420兆円のうち、約300兆円がこれらの地域に集まっている。表-2から全国の沿岸域に関して、現状満潮時で水面下面積850km²、人口200万人、資産54兆円であるのが、1mの海面上昇で水面下面積が2.5倍以上の2400km²、人口410万人、資産109兆円に増

大し、高潮または津波発生時には水面下面積8900km²、人口1542万人、資産378兆円になることが予測された。

さらに、高潮または津波発生時の水面下の土地利用形態の内訳は、田畑(3940km²)、可住地(1680km²)、森林・荒地(1300km²)、河川地(660km²)等が主要なものとなった。地域的な特性としては、朔望平均満潮位が高いために有明海沿岸等に大きな浸水域面積が認められる。しかし浸水域内の人口および資産は、東京湾、大

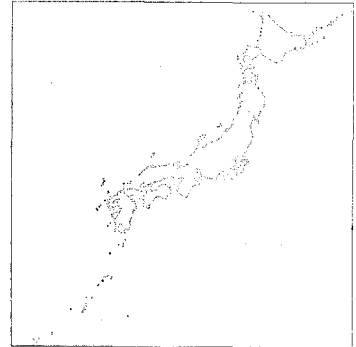


図-1 地盤高5m未満の地域のプロット
(1ドットは250m四方)

表-1 気象条件別水位偏差

	朔望平均満潮位	高潮または津波偏差	有義波高の10%
日本海	0.6	0.6	0.6
太平洋北	0.6	2.4	0.6
太平洋南	1.0	1.1	0.7
東京湾、大阪湾等	0.9	2.8	0.3
瀬戸内海等	1.6	2.5	0.5

単位(m)

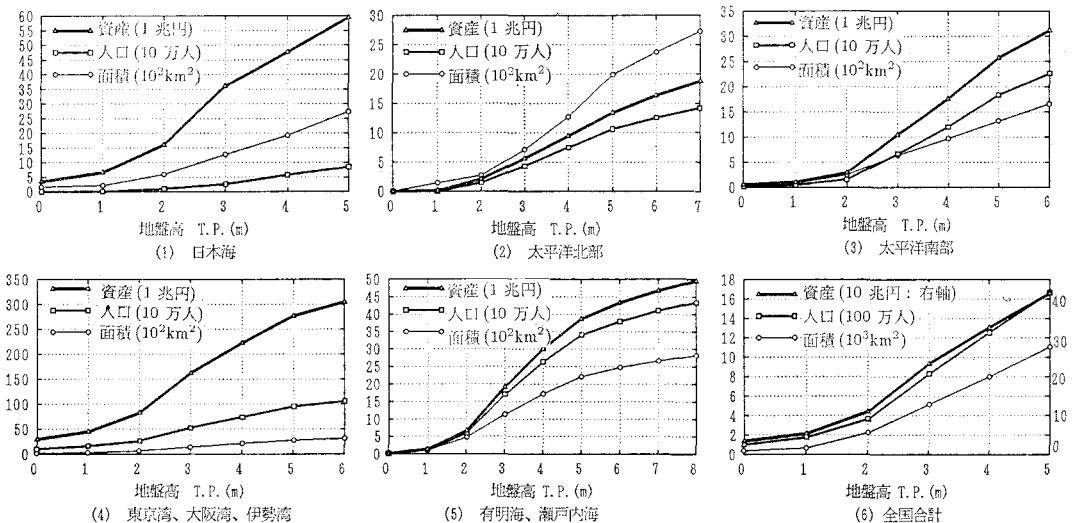


図-2 ある地盤高未満に含まれる面積、人口、資産

表-2 海面上昇の各シナリオ値に対する気象条件別浸水域の面積, 人口, 資産の全国合計値

単位: 面積 (km²), 人口 (万人), 資産 (兆円)

	現状			0.3m上昇			0.5m上昇			1.0m上昇		
	面積	人口	資産	面積	人口	資産	面積	人口	資産	面積	人口	資産
平均海面時	364	102	34	411	114	37	521	140	44	679	178	53
満潮時	861	200	54	1192	252	68	1412	286	77	2339	410	109
台風または津波発生時	6268	1174	288	6662	1230	302	7583	1358	333	8898	1542	378

表-3 高潮または津波時 (S.L.R.=1.00 m) の全国合計浸水域の面積, 資産の内訳

氾濫域内面積 (km²)

田	畑	果樹園	その他の樹木園	その他の用地	湖沼	河川地 (A)	河川地 (B)
3257.565	679.067	100.776	14.201	840.345	98.089	614.783	50.046
森林	荒地	建物用地 (A)	建物用地 (B)	幹線交通用地	海浜	海水域	合計
786.425	508.351	562.983	1118.875	126.29	108.067	31.876	8897.739

氾濫域内資産 (億円)

地価	固定資産
2878196	906387
合計	
3784583	

阪湾, 伊勢湾岸沿岸に集中している。

3. 東京湾域における高潮時の越波に伴う浸水予測

(1) 高潮時の越波流量の算定

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。ここでは越波量を以下のようにして求めた。

東京の西方 250 km, 南方 190 km の地点から伊勢湾台風級 (中心気圧 940 mb, 台風の規模を表す半径 75 km) の台風を北進させる。この台風に対して筒井ほか (1991) の高潮モデルを用いて, 図-3 に示す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。ただし満潮時と高潮偏差が最大値をとる時刻が同時になるように設定する。これにより海面上昇による平均水位の上昇分 (0.0 m および 0.65 m) と潮位 および 高潮偏差を加えた高潮時の水位の経時変動を算定する。越波量

の経時変動は, 高潮時の水位と有義波高の経時変化を用いて, 合田ほか (1975) の不規則波に対する越波流量公式を用いて求める。ただし, 堤防護岸はすべて直立とし, 堤前水深は一律 6.0 m の値を与えた。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) の式を使うことにする。

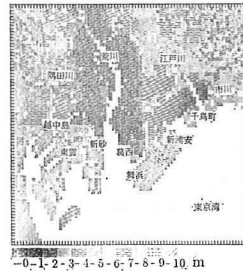


図-3 東京湾岸域地盤高 T.P. (m) (1 メッシュ 250 m 四方)

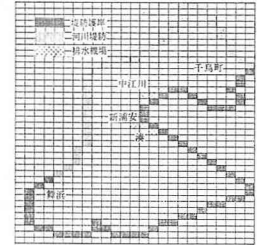
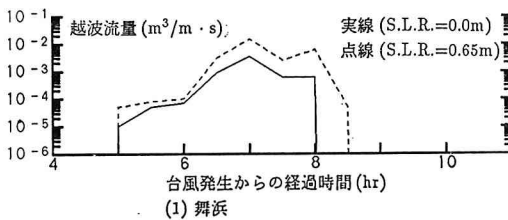
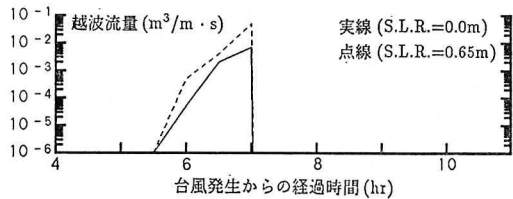


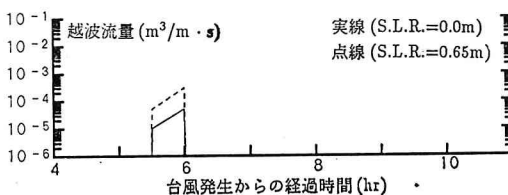
図-5 計算対象領域 (1 メッシュ 250 m 四方)



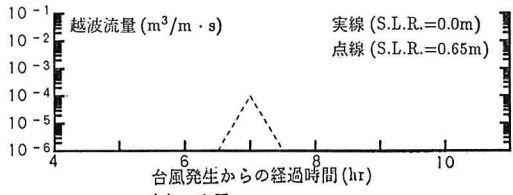
(1) 舞浜



(2) 千鳥町



(3) 新潟安



(4) 東雲

図-4 東京湾岸域代表地点における高潮時の越波量

この越波流量の各代表地域における計算結果を図-4に示す。これらの図から東京湾岸域においては、東雲等の江東地区では、越波は無視できる程度であり、舞浜、千鳥町等で大きくなっている。またどの地区についても海面上昇の影響は顕著であり、ピーク時で約5倍程度の越波量が予測されている。

(2) 越波浸水域の計算

a) 計算領域 前節の越波量の計算の結果、東京湾岸域で、浸水被害が問題になるのは、舞浜、千鳥町である。したがって、ここでは浸水解析の計算領域として図-5に示す通り、舞浜、新浦安、千鳥町を含み東京湾、旧荒川、江戸川に囲まれた地域を選んだ。計算格子点の地盤高は前述の国土数値情報から読みとり、計算格子サイズは縦横 250 m 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 $2.00 (\text{m}^3 \times \text{m} \cdot \text{s}) \times 3$ 機である。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。

b) 計算モデル 越波侵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。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uM) + \frac{\partial}{\partial y}(vM) \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x(b)}{\rho} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uN) + \frac{\partial}{\partial y}(vN) \\ = -gh \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y(b)}{\rho} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 h : 水深、 H : 水位 (水深+地盤高)、 u, v : 水深方向に平均化した速度、 $M(=uh)$ 、 $N(=vh)$: 水深方向に平均化した x および y 方向の線流量、 $\tau_x(b)$ 、 $\tau_y(b)$: 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 : 侵入水の密度である。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るとする。

$$\begin{pmatrix} \tau_x(b) \\ \tau_y(b) \end{pmatrix} = gn^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (4)$$

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。その後の越波侵入水の挙動は、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。

境界としては堤防と越波侵入水の先端がある。河川堤防およ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・越流量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、堤防護岸の位置を舞浜付近南部、新浦安付近、千鳥町付近に3分類し、それぞれの堤防護岸での経時変動値を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る。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。すなわち限界水深 (ここでは 1 mm) 以下の格子からの流出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大きければ、流入フラックスも無視できるものとする。

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。

基礎方程式化は、スタaggerドメッシュを用いて、陽的なスキームを用いて離散化する。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、1.0 s とする。

c) 計算結果 海面上昇の影響評価のため、海面上昇 (0.65 m) を考慮しないケースと、考慮したケース、さらに海面上昇 (0.65 m) を考慮したうえで排水機場が機能しないとしたケース、堤防護岸を 0.5 m 嵩上げしたケースについて最大浸水深をそれぞれ図-6に示した。また海面上昇を考慮したケースについて浸水深と線流量の経時変動を 図-7 に示す。

海面上昇により浸水域は全体に 250 m 程度陸側に進

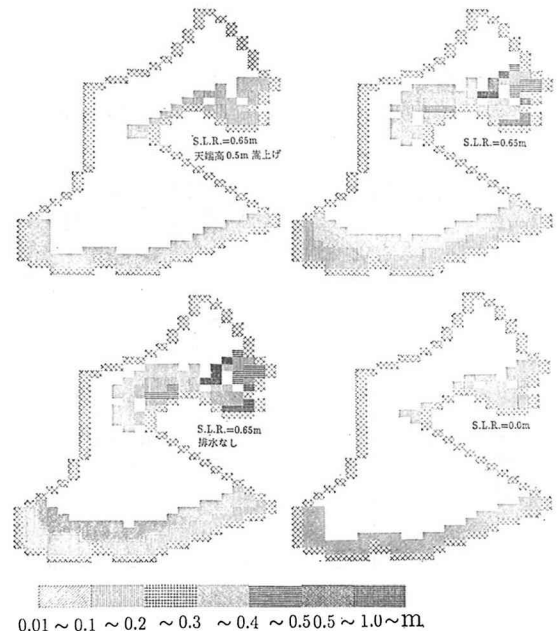


図-6 各ケースでの最大浸水深

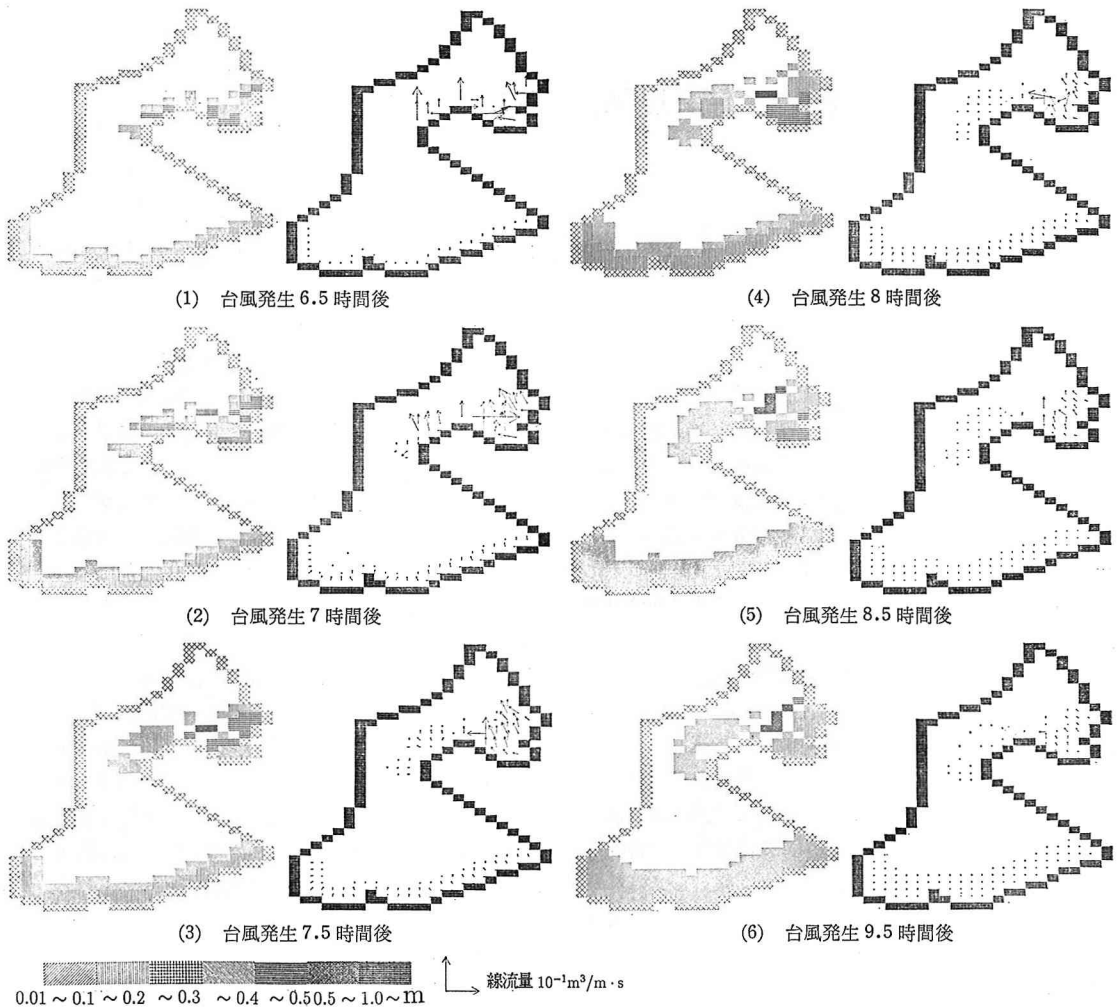


図-7 浸水深と線流量の経時変動

行し、特に千鳥町付近で 50 cm 以上の浸水深が予測される。また排水機場は、越波に比べて排水能力が小さいため、ほとんど効果はない。天端高の嵩上げは、海面上昇を相殺する効果があるため、65 cm の海面上昇があっても天端高を 50 cm 嵩上げすれば、境界値である越波量を減少させ、浸水域はほとんど増えない。

4. おわりに

東京湾岸域は、堤防護岸を考慮しないと、高潮時には、ほぼ全域が水面下になるわけだが、堤防護岸を考慮すると東雲等の江東地区では、越波量は無視できる程度である。したがってこの地域では、堤防護岸が十分に気候変動後も機能するといえる。しかし浦安や千鳥町では浸水域が大きく拡がることが確認された。これらの地域は、高い経済集積があるため浸水時の被害も非常に大きいことが予測される。そこで堤防護岸の天端高を増加する、または排水機場の能力・数量を増加する等の対策が

必要である。

参考文献

- 岩佐義朗 (1987): 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.
- 建設省河川局 (1989): 地球環境問題に関する河川行政上の課題中間報告.
- 合田良実・岸良安治・神山 豊 (1975): 不規則波による防波護岸の越波流量, 港研報告, 14 巻, 3 号, pp. 4-39.
- 菅原一昭・小舟浩治・佐々木弘・橋本典明・亀山 豊・成田 明 (1986): 沿岸波浪観測 15 年統計, 港研資料, No. 554, 874 p.
- 竹下正俊・高津宣治・大神孝明・泉 浩二・宮崎祥一 (1991): 海面水位の上昇による臨海部への影響に関する研究, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 941-945.
- 筒井純一・磯部雅彦・渡辺 晃 (1991): 地球温暖化後の東京湾における高潮の予測, 日本沿岸域会議研究討論会講演概要集, No. 4, pp. 26-27.
- 土木学会編 (1971): 水理公式集, pp. 262-263.
- 農水省・運輸省・建設省 (1990): 全国海岸域保全利用計画調査報告書, pp. 98-106.
- 村上和夫・森川雅行 (1985): ADI 法による高潮の数値計算方法, 運輸省港湾技術研究所資料, No. 529, 35 p.