

2 レベルモデルを用いた東京湾の高潮計算

横浜国立大学工学部建設学科 正 会 員 柴山知也
 同 上 同 上 岡安章夫
 東京工業大学大学院理工学研究科 学生会員 土岐道夫

1. はじめに

近年、東京湾のウオーター・フロントにおける開発構想、計画が次々に提案されている。こうした臨海部のさらなる開発と高密度化の動きに対応して、防災的な観点からは、強力な台風に伴う高潮時の東京湾岸地域の安全性を体系的に検討することが改めて重要となる。

従来、高潮の数値計算には、Navier-Stokes の方程式を水深方向に積分平均した平面 2 次元長波の方程式を基礎式とする単層モデル (1 レベルモデル) が一般に用いられてきた [例えば宇野木・磯崎 (1966)、村上ら (1985)]。これに対して土屋ら (1981) は、水深の浅い海域での高潮の数値計算を行う場合には、強風による吹き寄せによって水面近くに生じる吹送流の流速分布を考慮する必要があるという観点から、2 レベルモデルを提案した。これは固定された内部境界面を考え、その上を吹送流が生じている上位層、その下を下位層と定めて、境界面に剪断応力を考えることによって、高潮の数値計算を行うモデルである。

本研究では、上述の 2 レベルモデルに若干の修正を加えたものを用いて、東京湾における高潮の挙動を数値シミュレーションによって解析し、さらに、柴山ら (1989) による 1 レベルモデルによる結果と比較して、その適用性を検討する。

2. 2 レベルモデルを用いた高潮の数値計算

(1) 浅海域における 2 レベルモデルの効果

従来の高潮数値計算では海水の流動に対して長波理論を適用し、どのような深さの場合にも最上層から最下層に至るまで一様な運動として扱う平面 2 次元モデルが用いられてきた。これに対し土屋ら (1981) は、剪断流的特性を有する吹送流の影響が強い湾内の高潮の場合には、この効果を加味できる 2 レベルモデルが適当であると考え、これによる大阪湾での数値シミュレーションを行い、実測値との比較検討も行った。その結果、2 レベルモデルが吹き寄せの効果をよく反映し、実測値との一致度も良いことを確認した。

本研究においても、東京湾のように浅い海域が広がっており吹送流が重要な要因となる場合には、2 レベルモデルを用いて計算することが妥当であると考え、水域を上下 2 層に分割しそれぞれの層の流れを計算することにより、流れの鉛直分布を考慮した。この際、上下層の分割はある程度水深に依存するように設定し、計算を行った。

(2) 基礎方程式

本研究における高潮の数値計算は、適当なモデル台風の強さおよび進路を設定し、まずその台風による風の場の計算を行う。計算された風の場から、風応力による海水の吹き寄せと気圧による海面の吸い上げを考えて、流量および水位に計算を行う。2 レベルモデルとは、強風による吹き寄せの影響が大きい上位層とその下の下位層とに分けて、流量および水位の計算を行うものである。

2 レベルモデルを用いた高潮の伝播計算における基礎方程式は、上、下位層各々について Navier-Stokes の方程式を水深方向に積分し、平均化した運動方程式、および連続式である。これらは、図-1 に示す座標系を用いて以下のように記述される。

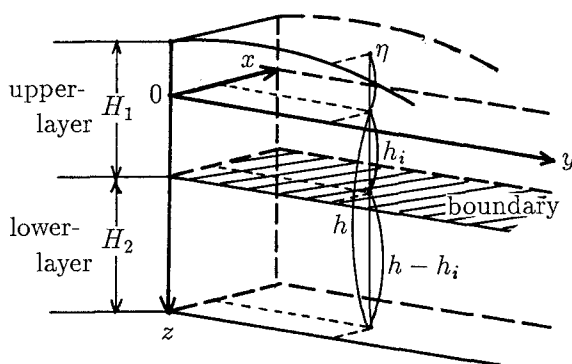


図-1 座標系および記号

連続式：

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(M_1 + M_2) + \frac{\partial}{\partial y}(N_1 + N_2) = 0 \quad (1)$$

上位層における運動方程式：

$$\frac{\partial M_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1^2}{H_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_1 N_1}{H_1} \right) + g H_1 \frac{\partial \eta}{\partial x} - f N_1 + \frac{H_1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\tau_{sx}}{\rho_w} - A_h \left(\frac{\partial^2 M_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_1}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{ix}}{\rho_w} + (uw)_i = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_1 N_1}{H_1} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_1^2}{H_1} \right) + g H_1 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f M_1 + \frac{H_1}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\tau_{sy}}{\rho_w} - A_h \left(\frac{\partial^2 N_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_1}{\partial y^2} \right) + \frac{\tau_{iy}}{\rho_w} + (vw)_i = 0 \quad (3)$$

下位層における運動方程式：

$$\frac{\partial M_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2^2}{H_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_2 N_2}{H_2} \right) + g H_2 \frac{\partial \eta}{\partial x} - f N_2 + \frac{H_2}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\tau_{bx}}{\rho_w} - A_h \left(\frac{\partial^2 M_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{ix}}{\rho_w} - (uw)_i = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_2 N_2}{H_2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_2^2}{H_2} \right) + g H_2 \frac{\partial \eta}{\partial y} + f M_2 + \frac{H_2}{\rho_w} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\tau_{by}}{\rho_w} - A_h \left(\frac{\partial^2 N_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_2}{\partial y^2} \right) - \frac{\tau_{iy}}{\rho_w} - (vw)_i = 0 \quad (5)$$

ここで、 η ：静水面からの水位変動量、 M_1, N_1 ：上位層の x, y 方向の線流量、 M_2, N_2 ：下位層の線流量、 H_1, H_2 ：上、下位層の厚さ、 P ：大気圧、 ρ_w ：海水の密度、 f ：コリオリのパラメータ（ $f = 2\omega \sin \phi$, ω ：地球の自転角速度、 ϕ ：緯度）、 A_h ：水平混合係数である。また、 τ_{sx}, τ_{sy} はそれぞれ x, y 方向に働く海面剪断応力で各々次式で与えられる。

$$\tau_{sx} = \rho_a C_d W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (6)$$

$$\tau_{sy} = \rho_a C_d W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (7)$$

ここに、 W_x, W_y ：海上10mの風速、 C_d ：海面の抵抗係数（ $=0.0026$ ）、 ρ_a ：空気密度である。 τ_{bx}, τ_{by} は海底剪断応力で、

$$\tau_{bx} = \frac{\rho_w g n^2}{(H_2)^{7/3}} M_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \quad (8)$$

$$\tau_{by} = \frac{\rho_w g n^2}{(H_2)^{7/3}} N_2 \sqrt{M_2^2 + N_2^2} \quad (9)$$

と表され、 g ：重力加速度、 n ：Manningの粗度係数（ $=0.026$ ）である。 τ_{ix}, τ_{iy} は上、下位層の境界面に作用する剪断応力であり、次式で与えた。

$$\tau_{ix} = 2A\rho_w\epsilon_v \frac{U_1 - U_2}{h_i} \quad (10)$$

$$\tau_{iy} = 2A\rho_w\epsilon_v \frac{V_1 - V_2}{h_i} \quad (11)$$

ここに、 A ：抵抗係数（ $=0.5$ ）、 ϵ_v ：鉛直方向の渦動粘性係数、 U, V ： x, y 方向の平均流速である。また、 $(uw)_i, (vw)_i$ は境界面における運動量流束を表し、

$$(uw)_i = \frac{U_1 - U_2}{2} \left(\frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \right) \quad (12)$$

$$(vw)_i = \frac{V_1 - V_2}{2} \left(\frac{\partial M_2}{\partial x} + \frac{\partial N_2}{\partial y} \right) \quad (13)$$

である。

(3) 差分スキーム

基礎方程式の空間差分には、後藤・小川(1982)にならってスタッカード・メッシュを用い、時間差分にはLeap-frog法を用いた。移流項の計算には風上差分を用い、距離間隔 Δs に対して時間間隔 Δt は上位層、下位層の全領域における最大(静)水深 $h_{\max}$ と

$$\frac{\Delta s}{\Delta t} > \sqrt{2gh_{\max}} \quad (14)$$

を満たすように設定した。

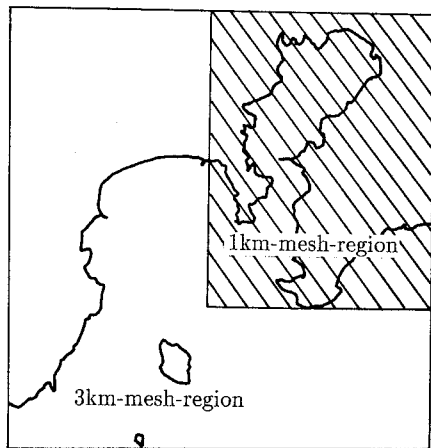


図-2 計算領域と細分化領域

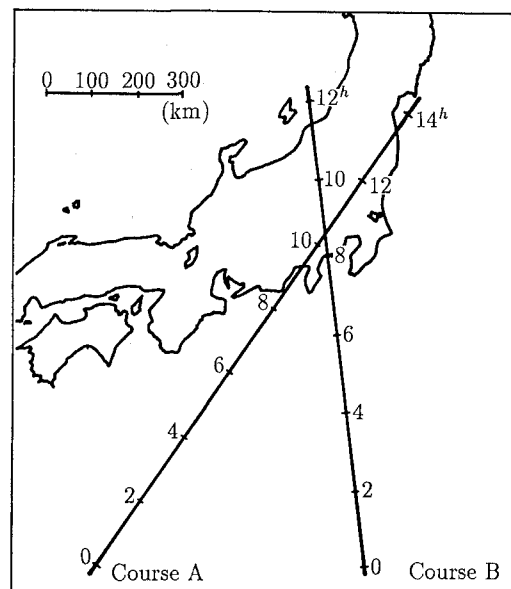


図-3 各計算時におけるモデル台風的位置

(4) 初期条件および境界条件

本計算における計算領域は、図-2に示す範囲に設定した。また、東京湾の内と外で空間メッシュと時間メッシュの間隔を変えて計算を行い、東京湾内は1km間隔の空間メッシュと3秒の時間メッシュを用い、湾外は3km、9秒とした。図中、斜線部は1km間隔メッシュの小領域を、それ以外は3km間隔メッシュの大領域を示している。領域の空間的、時間的接続方法は、後藤・小川(1982)の数値計算方法に従った。初期条件としては、計算開始時の初期水位をすべて0とした。また、高潮は陸上に遡上しないものとし、陸地と海との境界は完全反射を仮定し、外洋と接続される沖側境界は透過境界として、ここでの水位 η は気圧による吸い上げ効果により

$$\eta = 0.00991 \Delta P \quad (15)$$

で与えるものとした。ここに、 ΔP は気圧低下量(mb)である。

(5) 計算に用いたモデル台風

計算条件としては伊勢湾台風と同じ勢力を持つ台風(中心気圧940mb)が、東京湾に記録史上最大の高潮をもたらした1917年10月台風と同様のコースを進行する場合及びそのほかのケースについて行い、東京湾13号埋立地、東京港、千葉港、横浜港、そのほかの地域について、潮位、流速などを計算した。図-3にモデル台風の経路を経過時間と共に示す。経路は、図-3に示すようにAコースとBコースの2通りを用いた。Aコースは東京湾に最も甚大な被害をもたらした1917年10月の台風8506号の経路、Bコースは2番目に大きな高潮をもたらした1949年8月のキティ台風の経路である。気圧分布と風速分布については柴山ら(1989)と同様にMyersの式を用いて計算している。

(6) 計算条件

計算に用いた諸条件を表-1に示す。上位層の厚さは、強風による吹き寄せを考慮して8.0mとした。しかし、東京湾の湾奥では水深が浅いため、水深20.0m未満の所では、表-1に示したように、段階的に層厚を減少させた。

表-1 計算条件

	大 領 域	小 領 域
計算領域	図-2 参照	同 左
格子間隔	3000m	1000m
タイムステップ	9 秒	3 秒
水平混合係数	100.0m ² /s	同 左
マニングの粗度係数	0.026	同 左
鉛直方向の渦動粘性係数	0.02	同 左
上位層の厚さ h_i	$h \geq 20.0\text{m}$ の時 $h_i = 8.0 \text{ (m)}$ $h < 20.0\text{m}$ の時 $h_i = (20.0 - h)/50.0 + 0.4 \text{ (m)}$	同 左
諸定数	$C_1 = 0.6$ $C_2 = 0.6$ $C_d = 0.0026$	同 左

3. 計算結果

(1) 水位分布

2. で述べた方法に従って計算を進め、東京湾内での主要な地点についての水位および流速の経時変化を得た。また、1 レベルモデルについても同様の計算を行い、2 レベルモデルとの比較を行った。2 レベルモデルによる計算結果の一例として、モデル台風が A コースを通過した場合の 11 時間半後の湾内の水位分布を図-4 に示す。湾奥において最大 2.0m 程度の水位上昇が認められる。

Course A : 11.5 hours passed

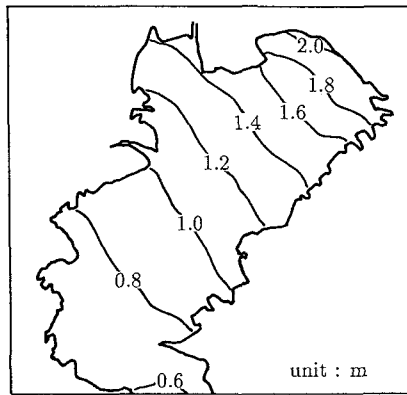


図-4 水位分布図

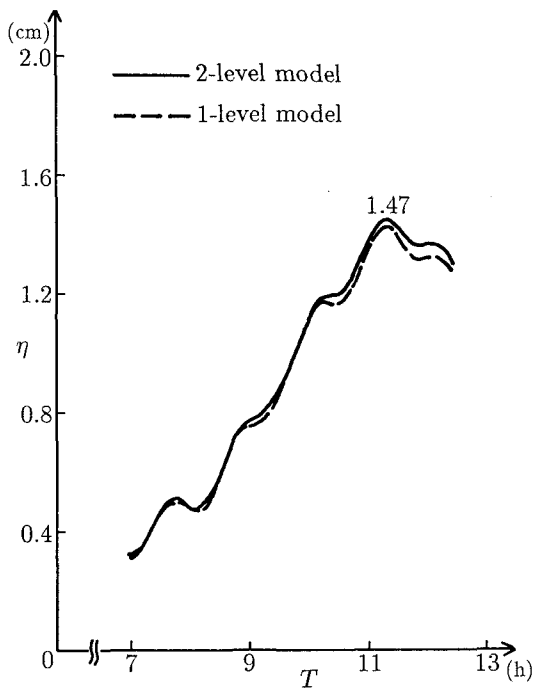


図-5 経時水位変化図 (Aコース：東京港)

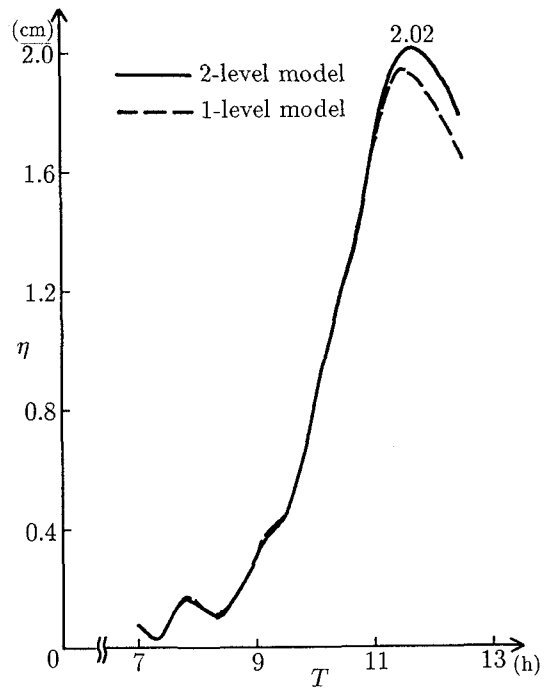


図-6 経時水位変化図 (Aコース：千葉港)

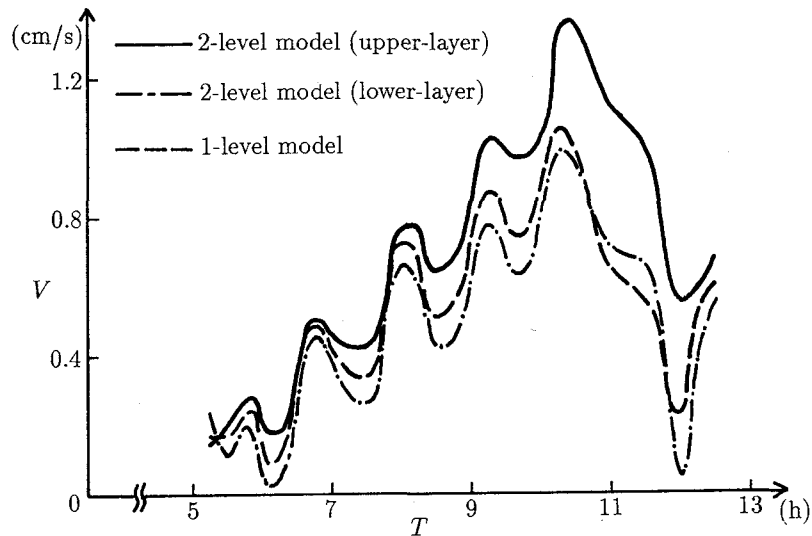


図-7 経時流速変化図（浦賀水道）

(2) 経時水位変化

図-5はモデル台風がAコースを通過した場合の東京港における経時水位変化を示しており、図-6は同じく千葉港の経時水位変化を示している。図には1レベルモデルによる計算結果も併せて表示した。東京港、千葉港ともに両モデルの間で顕著な相違はみられないが、2レベルモデルによるものの方が1レベルモデルによるものより若干大きな値を示しており、湾内高潮計算において吹送流の影響を十分考慮する必要があることがわかる。

(3) 経時流速変化

図-7は浦賀水道における経時流速変化を、2レベルモデルの上位層と下位層、および1レベルモデルについて示したものである。浦賀水道は東京湾における交通の要所であると同時に、最も大きな流速の現われる地点である。2レベルモデルの上位層の流速と、1レベルモデルの流速を比較すると、明らかに前者の方が大きく、ピーク時で0.31m/sの差がある。全般に、水位上昇よりも流速変化に吹き寄せの効果が顕著に現われる。また、流速が振動しているのは、浦賀水道の両岸で高潮の長波が反射を繰り返すためとみられる。この振動は水平拡散係数を大きくすることにより減衰させることが可能であるが、水平拡散係数を不用意に大きくすることには根拠がなく、実際の高潮についても、陸地と海の境界ではほぼ全反射をすると考えられるので、同様の現象が起きる可能性がある。

(4) 鉛直方向の流速分布

図-8は浦賀水道における上、下位層の流速分布である。これによっても吹き寄せによって、上位層の流速が大きくなっていることが確認できる。ここで、上、下位層の流速分布に最も大きな影響を与えるのは境界面における剪断応力である。これは、式(10)、(11)に示されるように、鉛直方向の渦動粘性係数 ϵ_v の値によって、その大きさが左右される。渦動粘性係数を大きくすると、境界面における剪断応力が大きく評価されて、両層の間での相互作用が強まり、上、下位層が一様に近い流速分布を示すようになる。渦動粘性係数の大きさについてはここでは土屋ら(1981)にならない $\epsilon_v = 0.02$ を用いた。

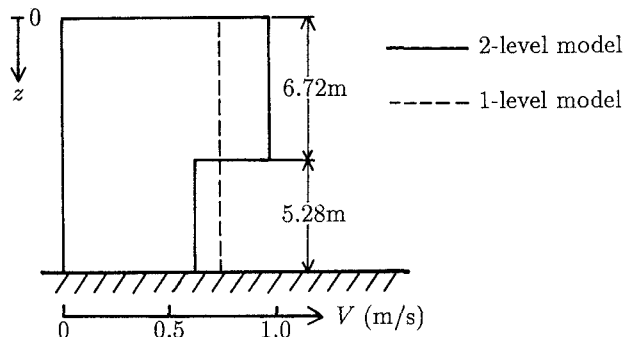


図-8 鉛直方向における流速分布図（浦賀水道）

4. 結論

本研究では、東京湾を対象として、2レベルモデルによる高潮の数値計算を行い、1レベルモデルと比較して、その妥当性を検証した。その結果、水位変化については1レベルモデルとほぼ同様の結果が得られ、ピーク時にやや高めの値を示すことが分かった。また、流速分布については、上位層の流速が下位層の流速よりもかなり大きくなり、2レベルモデルの有用性が確認された。しかしながら、2レベルモデルの結果は上下層界面での渦動粘性係数の値に大きく依存しており、今後は渦動粘性係数の評価について検討していく必要がある。また、モデルの信頼性をより向上するためには、数値計算の結果と比較できる実測データの収集が重要である。

なお、本研究の一部は、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所よりの委託研究として行ったものであり、記して謝意を表する。

参考文献

- (1) 宇野木早苗・磯崎一郎 (1966) : 高潮における気圧と風の効果の比較, 第13回海岸工学講演会論文集, pp.248-253.
- (2) 後藤智明・小川由信 (1982) : Leap-frog 法を用いた津波の数値計算法, 東北大学工学部土木工学科報告, 52p.
- (3) 柴山知也・高梨記成・佐藤慎司 (1989) : 東京湾の高潮計算, 日本沿岸域会議研究討論会講演概要集, No.2, pp.5-6.
- (4) 土屋義人・山下隆男 (1981) : 高潮の発生機構とその極値に関する研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究報告, No.A-56-4, pp.20-38.
- (5) 土屋義人・山下隆男・岡扶樹 (1981) : 2レベルモデルによる高潮の追算, 第28回海岸工学講演会論文集, pp.54-58.
- (6) 村上和夫・森川雅行・堀江毅 (1985) : ADI 法による高潮の数値計算法, 運輸省港湾技術研究所資料, No.529, 35p.