

河川遡上を考慮した安定化有限要素法による東京湾の高潮解析

中央大学 学生会員 ○ 常包 真里奈
中央大学大学院 学生会員 中村 光太郎
中央大学 正会員 檜山 和男

1. はじめに

東京湾は伊勢湾や大阪湾と並んで、高潮の被害を極めて受けやすい地形である。湾奥に高潮が到達し、河口に侵入すると、河川を伝って内陸部まで遡上し、大都市に甚大な被害を与えることが予想される。高潮災害の対策を講じる上で、数値シミュレーション手法は有効に用いられている。数値解析手法の一つである有限要素法は任意形状への適合性に優れるため、実地形のように複雑な領域の解析に適している。

本報告では、東京湾での高潮現象を有限要素法によって再現し、湾内の水位変動及び、湾に接続している河川での遡上を解析した。また、台風の経路を複数パターンで解析することで、台風の経路の違いによる影響について考察した。

2. 数値解析手法

(1) 気象式

高潮とは、台風通過時に吸い上げ効果と吹き寄せ効果によって潮位が大きく上昇する現象である。

吸い上げ効果に伴う静水位上昇量と吹き寄せ効果による海面での摩擦応力は次のように表される。

$$\zeta_0 = 0.991(1013 - P(r)) \times 10^{-2} \quad (1)$$

$$\tau^s = \rho_a C_d ||W||W \quad (2)$$

ここで、 ζ_0 は静水位上昇量、 $P(r)$ は台風中心から距離 r 離れた地点での気圧、 τ^s は海面摩擦応力、 ρ_a は空気密度、 W は風速、 C_d は水面摩擦係数を示す。 C_d は抗力係数であり、本多・光易¹⁾によると次のように与えられる。

$$C_d = (1.290 - 0.024W) \times 10^{-3} (W \leq 8)$$

$$C_d = (0.581 - 0.063W) \times 10^{-3} (W > 8)$$

(2) 風速

台風域内の風速 W を次のように示す。

$$W_x = \frac{C_1 V_{gr}}{r} (-0.5(x - x_c) - 0.866(y - y_c)) + C_2 V_t x e^{-\frac{r\pi}{500 \times 10^3}} \quad (3)$$

$$W_y = \frac{C_1 V_{gr}}{r} (0.866(x - x_c) - 0.5(y - y_c)) + C_2 V_t y e^{-\frac{r\pi}{500 \times 10^3}} \quad (4)$$

ここで、 W_x 、 W_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の台風域内の風速、 V_{gr} は傾度風速、 V_t は台風の移動速度、 x_c 、 y_c は台風の中心座標、 C_1 は超傾度風を考慮するための風速低減係数²⁾である。 C_2 は定数であり、本研究では 0.7 を用いた。

表-1 主要4分潮

略称	分潮	振幅 A(m)	周期 T(h)	遅角 k(rad)
M2	主太陰半日周期	0.36	12.42	2.5656
S2	主太陽半日周期	0.17	12.00	3.0369
K1	日月合成周期	0.23	23.93	3.1015
O1	主太陰日周期	0.18	25.82	2.7454

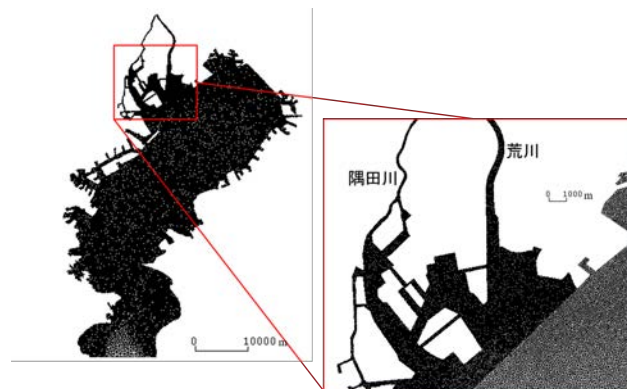


図-1 東京湾メッシュ

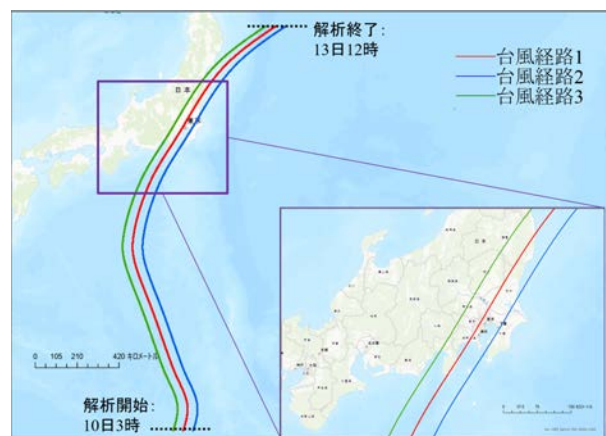


図-2 台風の経路

(3) 支配方程式

高潮を考慮した非線形長波理論に基づく支配方程式 (5) を以下に示す。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{A}_i \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} (\mathbf{N}_{ij} \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x_j}) + \mathbf{G} \mathbf{U} = \mathbf{R} + \mathbf{W} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{U}$ は未知ベクトル、 $\mathbf{R}$ は勾配ベクトル、 $\mathbf{A}_i$ は移流行列、 $\mathbf{N}_{ij}$ は拡散行列、 $\mathbf{G}$ は摩擦行列、 $\mathbf{W}$ は海面摩擦行列である。空間方向の離散化に SUPG 法に基づく安定化有限要素法³⁾、時間方向の離散化に Crank-Nicolson 法を適用する。

KeyWords： 安定化有限要素法、東京湾、高潮解析、河川遡上

連絡先： 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 TEL：03-3817-1815 E-mail a18.efb6@g.chuo-u.ac.jp

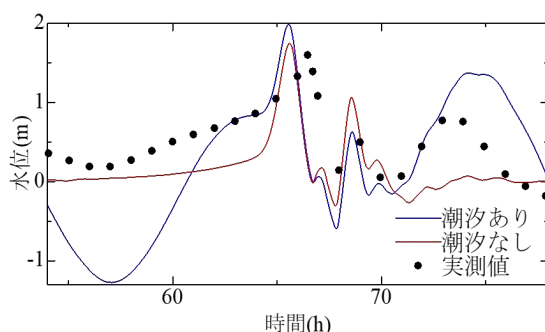


図-3 潮汐の有無による東京港での水位の時刻歴

3. 数値解析例

解析対象を東京湾とし、表-1 に示す潮汐の有無による湾の水位変動、及び接続している河川への遡上の様子を解析した。また、台風経路の違いによる結果の比較を行った。

(1) 解析条件

a) 潮汐の有無による比較

図-2 の台風経路 1 の令和元年台風 19 号のデータ⁴⁾を用い、10月10日3時から13日9時までの解析を行った。図-1 の東京湾メッシュを用い、時間増分を 10.0s、境界条件として湾口に開境界条件と下記に示す潮汐式⁵⁾を与え、その他の境界に non-slip 条件を与える。

$$\eta = \sum_{i=1}^4 A \sin\left(\frac{2\pi t}{T} - k_i\right) \quad (6)$$

ここで、 η は波高、 A は振幅、 T は周期、 k_i は遅角である。

b) 台風の経路の影響による水位の比較

台風 19 号の経路 (経路 1) を基準とし、経路を東に 50km (経路 2)、西に 50km (経路 3) 平行移動させ解析を行う。その他の解析条件は a) と同様。

4. 解析結果

(1) 潮汐の有無による比較

東京港での水位の時刻歴を図-3 に示す。この図から、潮汐の考慮によって実測値に近づくことが確認できた。また、解析開始から 65 時間付近の荒川・隅田川における遡上の様子を図-4 に示す。台風の通過時に約 50cm の波が遡上していく様子が確認できた。川幅が広く、河口からの距離が近い荒川では隅田川よりも早く遡上現象が発生し、遡上した水が川の分岐点で隅田川に流入する様子が確認できた。

(2) 台風の経路の影響による水位の比較

図-5 に台風の経路別での東京港での水位の時刻歴を示す。この図において台風の通過に伴って水位変動がみられた。台風が通過する 65 時間後付近において、台風が湾の東に位置する経路 2 では、吹き寄せられた水が湾外に流出し水位が低下、一方、台風が湾の西に位置する経路 1・3 では、水は湾奥に吹き寄せられ、湾内の水位が大きく上昇した。このことから、陸地に危険が及ぶのは台風が湾の西側に位置する場合であることがわかる。また、経路 3 の解析では台風通過後も吹き寄せ効果の影響が残り、長時間にわたって水位が高くなることで、より深刻な高潮被害が発生すると思われる。

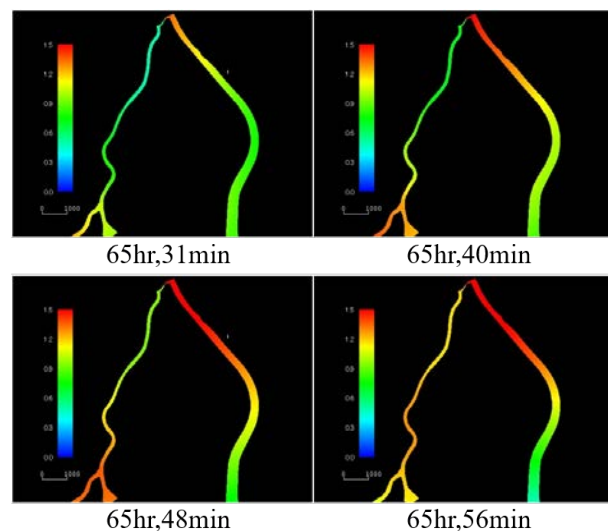


図-4 各時刻の河川部での水位図

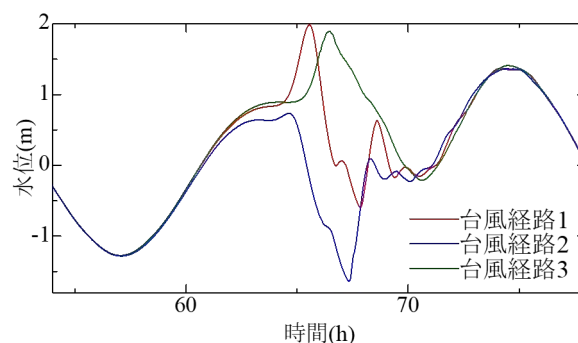


図-5 経路別での東京港における水位の時刻歴

5. おわりに

本発表では東京湾での高潮解析を行い、湾内における水位変動の挙動と、河川遡上及び、台風の経路が水位に与える影響について考察し、以下の結論を得た。

- 潮汐の考慮により実測値と近い値を得ることができた。
- 台風が東京湾の西側を通過する場合には、通過時に大きく水位が上昇し、湾奥や河川沿いに危険が及ぶ。また、通過経路の差異により結果は大きく変化する。

今後の予定として、河川の氾濫を考慮した解析を行う予定である。

参考文献

- 1) H.Mitsuyasu and T.Honda : The High Frequency Spectrum of Wind-generated Waves, J.Oceanog.Soc.Japan, 30, pp185-198, 1974
- 2) 藤井健, 光田寧 : 台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 29, B-1, pp229-239, 1974
- 3) T.E.Tezduyar : Stabilized finite element formulations for incompressible flow computations, advance in Applied Mechanics, 28, 1-44, 1991
- 4) 気象庁 : 2019 年台風第 19 号 HAGIBIS (1919) 位置表 <https://www.data.jma.go.jp/yoho/data/typhoon/T1919.pdf> (2021.12.4 閲覧)
- 5) 村上和男 : 有限要素法による潮汐流の数値計算, 港湾空港技術研究所 資料 No.404, pp21-31, 1981.12.