

風況を考慮した東京湾の浅海流有限要素解析

2007年3月修了

人間環境学専攻 56784 佐伯 達哉

指導教員 吉村 忍 教授

There are complicated phenomena such as a red tide and a blue tide that cause serious problems and food chain at a coastal zone. It is extremely difficult to clarify interaction processes in those phenomena only by using experimental approaches. We focus on a flow in a shallow water area and we develop a finite element analysis code with a shallow water long wave equation for solving the problem. In this research, we especially implement a function of considering observed wind flow precisely in the simulation. To validate fundamental reliability of the simulation, it is applied to sea water flow in Tokyo bay. Furthermore, I pay attention to a shape change in Sanbanze and wrestle with these sensitivity analyses.

Key words : shallow water equation, tidal currents, finite element method, wind, Tokyo Bay, Sanbanze

1. 緒言

環境問題が重要な課題になっているが、海洋環境も例外ではなく、特に沿岸海域で、生態系を脅かす変化が起きている。生態系などの変化は、埋め立てによる沿岸域の地形変化から来る潮流の変化が一番の要因である。また、物質輸送や生態系を考える上でも潮流計算の元で解析が進められる。沿岸域の潮流現象を見る場合、時間や空間スケールが非常に大きいので実験的にそれらを再現するのは極めて困難である。そこで数値シミュレーションにより現象を再現することが考えられる。沿岸海域での現象は、現在海洋シミュレーションにおいて多くの手法が提案されているが、ここでは、特に干潟などの浅海域に絞りシミュレーションを行う。浅海域は、比較的水深が浅く、浅水長波と呼ばれる水深に対して波長が十分に大きな波に支配的な影響を受ける。浅水長波流れは、鉛直方向の流れに対して水平方向の流れが卓越するという仮定のもとで導かれる浅水長波方程式を用いて解析される。本研究の目的では、数値粘性の混入が少なく長時間の積分に対して高精度の計算を行える擬似気泡関数要素を用いた混合型有限要素法による潮流計算モデルを用いて東京湾内部の地形変化による流れの変化を見ることである。そこで、より現実に近い条件での計算の信頼性の評価を行うため、風の観測データを取り込む機能開発を行い、そのモデルの精度の検証を行う。また東京湾三番瀬の形状の変化に注目し、形状4種、夏、冬における合計8パターンの感度解析を行いそれぞれが三番瀬近辺の流況に与える影響を考察する。

2. 浅海域の有限要素定式化

2.1 2次元浅水長波方程式

運動方程式、連続の式は以下の3式である。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fv - \tau_{sx} + \tau_b u - M_x = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fu - \tau_{sy} + \tau_b v - M_y = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{u} = (u, v)$ は水平方向断面平均流速、 g は重力加速度、 ζ は水位である。 f はコリオリパラメータであり、 $\omega (\cong 7.269 \times 10^{-5})$ を、地球角速度、 ϕ を緯度とすると、 $f = 2\omega \sin \phi$ となる。 τ_{sx} 、 τ_{sy} は、それぞれ x 方向、 y 方向の表面摩擦力であり、空気の密度 ρ_a 、表面摩擦係数 γ 、風速 $\mathbf{w} = (w_x, w_y)$ を用いて表される以下のモデルを用いる。

$$\tau_{sx} = \frac{\rho_a \gamma \omega_x \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho h}, \quad \tau_{sy} = \frac{\rho_a \gamma \omega_y \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}}{\rho h} \quad (4)$$

τ_b は底面摩擦係数である、マンニングの粗度係数 n を用いて表される次のモデルを用いる。

$$\tau_b = \frac{n^2 \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} \quad (5)$$

また、 M_x 、 M_y はそれぞれ x 方向、 y 方向の粘性項である。

2.2 擬似気泡関数法

ここでは、計算手法として擬似気泡関数要素

を用いた混合型有限要素法を採用した。擬似気泡関数法¹⁾は、 ζ 及び ζ^* を3角形1次要素で内挿し、 u, v, u^*, v^* の内挿には、擬似気泡関数要素を用いる。擬似気泡関数要素は、3角形の3つの頂点に加えて、その重心にも節点を配置し、重心と、各頂点とを結ぶことで、配置した重心節点によって3角形を3分割する。できた3つの小さな3角形それぞれを3角形1次要素とみなすことによって計算を進める。

2.3 時間方向の離散化

時間方向の離散化については、2段階陽解法⁶⁾を採用した。方程式を時間依存項と非依存項とに分け、時間微分項を $n, n+1/2, n+1$ の3つの時刻ステップにおいて離散化する。まず、 $n+1/2$ のステップの方程式を解くことで、 $\zeta^{n+1/2}, u^{n+1/2}, v^{n+1/2}$ が得られる。さらに $n+1$ の方程式を解くことで次のステップの値 $\zeta^{n+1}, u^{n+1}, v^{n+1}$ を得ることができる。

2.4 境界条件

本研究の計算では2種類の境界条件を想定する。1つ目は、海岸線で設定する陸境界 Γ_l であり、2つ目は、全海域から計算領域を切り取る際に海洋中に設置する仮想的な境界(開境界) Γ_s である。陸境界 Γ_l 上では次式で表されるslip境界条件を与えることにする。(一定水深水槽内の吹送流問題はslip境界とする)

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad \text{on } \Gamma_l \tag{6}$$

ここで \mathbf{n} は、境界上の法線ベクトルである。また、開境界 Γ_s 上では潮汐による流れを駆動するために水位の境界条件を次のように与える。

$$\zeta = A \sin(2\pi t/T + \theta) \quad \text{on } \Gamma_s \tag{7}$$

ここで A は潮汐による水位変動の振幅、 t は時刻、 T は潮汐の周期、 θ は位相遅れである。

3. 潮流計算

ここでは、Fig1, Fig2に示した、一定水深水槽内の吹送流モデルと東京湾モデルについて潮流計算を行う。

3.1 一定水深水槽内の吹送流

Fig. 1に示した一定水深の水槽を解析領域とし、そこに一定の風応力が働く場合の水位変動

を考える。コリオリ力、海底摩擦を考慮しない場合、この問題には式(6)に示される非定常の解析解が存在する。

$$\zeta = \frac{\tau_s}{\rho gh} x - \frac{4l\tau_s}{\pi^2 \rho gh} \left\{ \cos \frac{\pi ct}{l} \sin \frac{\pi x}{l} - \frac{1}{3^2} \cos \frac{3\pi ct}{l} \sin \frac{3\pi x}{l} + \frac{1}{5^2} \cos \frac{5\pi ct}{l} \sin \frac{5\pi x}{l} + \dots + \frac{(-1)^{n+1}}{(2n-1)^2} \cos \frac{(2n-1)\pi ct}{l} \sin \frac{(2n-1)\pi x}{l} + \dots \right\} \tag{6}$$

ここに、 g は重力加速度、 h は水深、 $c = \sqrt{gh}$ で定義される長波の速度、 l は水槽の長さである。また、 τ_s は式(4)で定義された風による表面摩擦力である。計算条件はTable1の通りであり、計算で用いた非構造格子をFig. 2に示す。境界は、全てslip境界とした。

Table1 Computational parameters for wind-driven currents in a rectangular pool

wind speed	2.0m/s in y-direction
l	10m
d	5m
h	2m
Δt	1.0×10^{-2} sec
A_h	0.0
γ	1.0×10^{-3}
n	0.0
ρ	1.02×10^3 kg/m ³
ρ_a	1.2kg/m ³

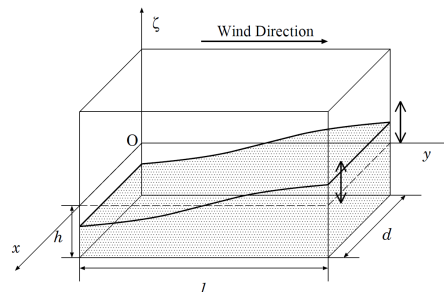


Fig.1 Wind-driven currents in a rectangular pool with constant depth

計算結果をFig. 3に示す。数値粘性により計算が進むに連れて減衰が見られるものの誤差率1%未満に抑えられていることからよく一致し

ているといえる。

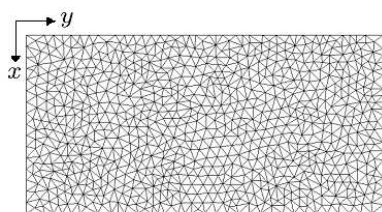


Fig.2 Wind-driven currents in a rectangular pool with constant depth

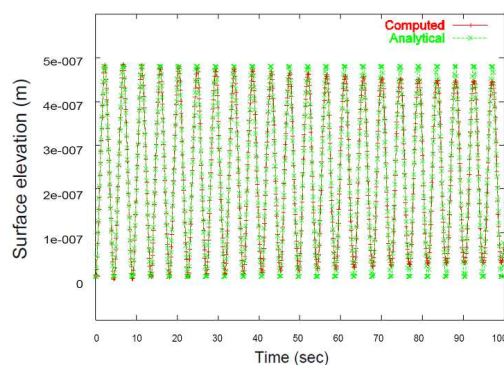


Fig.3 Analytical and computed surface elevations at $(x, y) = (2.5, 9.0)$.

3.2 東京湾の潮流計算

次に、東京湾全域の解析を行い、観測値との比較を行う。

3.2.1 計算格子

解析対象として Fig.4 に示す東京湾モデルを用いる。Fig.4 の点は、様々なデータの観測地点である。

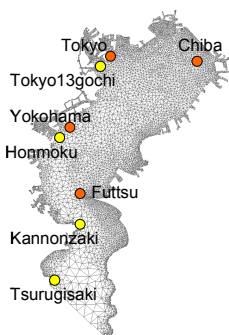


Fig.4 Unstructured grid for the tidal current computation and observation stations.

(Number of Nodes :8472, Number of Element: 14418)

3.2.2 風況データ

日本海洋データセンター²⁾を用いての東京湾における観測値を用いる。風況の観測点として、

Fig. 4 で示した東京 13 号地、本牧、観音崎、釧崎の 4 観測点を用いている。各点の観測値は 16 方位で 15 分毎に平均化されたデータである。導入において、まず 16 方位で表されたデータを xy 座標系に変換する。次に、少ない観測点からより良い効果を得るため全ての節点において、空間方向には観測値データがある最も近い 2 点の距離を用いて線形補間し、時間方向には 15 分毎の観測値を線形補間する。そのようにして計算された風応力を全ての節点にそれぞれ導入し計算を進める。

3.2.3 潮流計算

ここでは、2006 年 12 月 23 日の風の観測データを空間、時間方向に補間した計算①、同日の平均風速を用いた計算②、風を考慮しない計算③をそれぞれ行った。また、横方向の渦動粘性係数 $A_h=10.0m^2/s$ 、マンシングの粗度係数 $n=3.0 \times 10^{-2}m^{-\frac{5}{3}}/s$ 、水の密度 $\rho = 1.02 \times 10^3kg/m^3$ とする。(以下考察は①~③を用いて述べる)

3.2.4 計算結果

水位の振幅について計算結果と Fig.4 で示した富津、横浜、東京、千葉の観測値との比較を Fig.2 に示した。水位の変化については、②、③の場合にはあまり変化がなかった。これは、平均風速を導入することは水位にあまり変化を与えないことを意味している。①のケースは、東京では②、③とあまり変化がないものの他の地点では一番良い精度を示しており、誤差率も全ての観測地点において 3.6%未満であることから①の精度が一番良い。

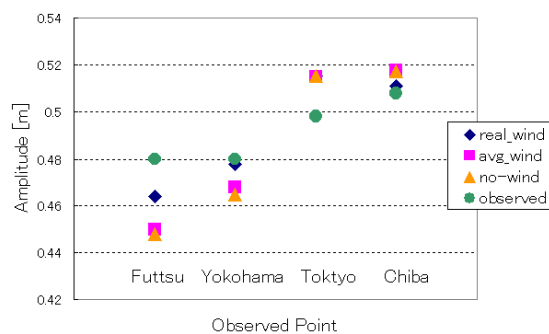


Fig.5 Comparison of Sea Water Level

流速について、計算結果と Fig.4 で示した千葉の観測値との違いについて比較したものを Fig.6 に示した。①~③において観測値とのばらつきはある。②、③においては多くの時間で流

速が弱く出ている．それに対して①では、観測値の流速が大きい時間で比較的大きい流速を示していることから時間ステップにおける影響があるといえる．今後も引き続き精度向上のためモデルの改良等を行う必要があるが、誤差率についても①が一番小さいことから①の解析を行う意義は示すことができた．

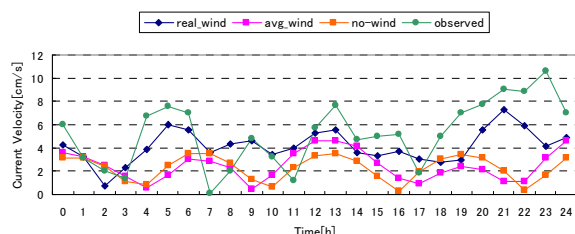


Fig.6 Comparison of a Current Speed

4. 感度解析

ここでは、このモデルを用いて東京湾三番瀬における地形変化による感度解析を行う．三番瀬は、東京湾最北部に位置する干潟であり、魚類をはじめとする海の生物や鳥類の貴重な生息地である．しかし、東京湾は埋め立て等の工事が盛んに行われていたためそこでの環境破壊も問題になっている．東海大の近藤らは東京湾のシミュレーションを行い埋め立てによる特殊な三番瀬の北西部の形状により三番瀬全体の水互換が行われにくいことを示し以下で示す case3の形状が水互換性が良いことを述べた³⁾．ここではそれらの形状に加えて Fig.7 で示す 4 パターンの東京湾全域のメッシュを作成した．Case1 は現在の形状, Case2 は道路を通す計画時の形状, Case3 は弧状に埋立てた形状, Case4 は陸地を削った形状である．これらに夏, 冬における卓越した風²⁾ (夏場は南南東, 冬場は北北西の風 6.4 m/s) を導入することで感度解析を行った．

計算結果についてまず流速場を抽出する．次に、三番瀬のメッシュで示した三番瀬の範囲にトレーサーを配置し潮汐の周期ごとに三番瀬に残るトレーサーの数値を計測した．その割合を Fig. 8 に示す．

結果から三番瀬という浅い場においては、夏場と冬において風の影響が大きく出ていることから風況の考慮がとても重要なことが示される．形状に関しては、夏場も冬場 Case4,3,2,1 の順に水の互換が良いことが示された．

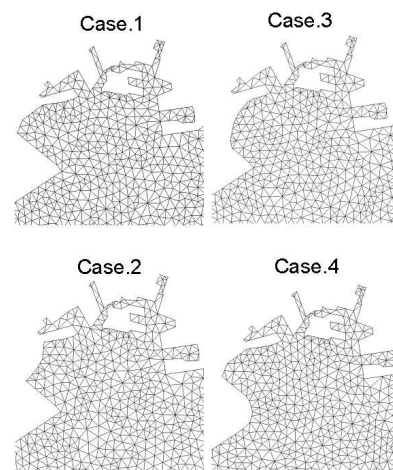


Fig.7 mesh of Sanbanze in Tokyo Bay

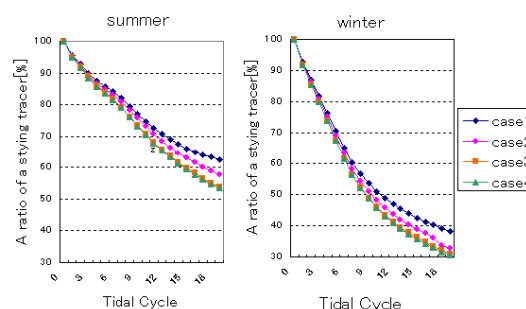


Fig.8 Numerical comparison of a tracer of the summer & winter

5. 結 言

本研究では、擬似気泡関数要素を用いた有限要素法の実現象における風データを入れた比較、三番瀬の形状変化による流れの考察を行った．

東京湾解析では、引き続き精度向上に努める必要性はあるが、風データの導入により計算結果を観測値に近づけることができた．

三番瀬の形状について実際の形状を決めるにあたっては水循環だけでなく様々要因を考え慎重に決めていく必要があるが、水互換性については case3,4 が良いことを示した．

文 献

- 1) 文屋信太郎, 吉村忍: Quasi bubble-function 要素を用いた混合型有限要素法, Transaction of JSCE, Paper No.20060032
- 2) 日本海洋データセンター <http://www.jodc.go.jp/>
- 3) 千葉漁場修復協議会報告書, 2000