

浅場・干潟域における波浪場を考慮した 潮流シミュレーションに関する研究

小澤 宏樹*・増田 光一**・大塚 文和***・居駒 知樹****

浅場・干潟域を対象とした潮流計算では、干出・水没を考慮することによる流況の再現性の検討は数例報告されているが、更に汀線近傍の恒流系の形成にとって重要な沿岸波浪に起因する海浜流系統の影響を考慮した検討については報告されていない。本研究では radiation stress の空間分布を考慮した潮流モデルを構築し、エネルギー平衡方程式による波浪場解析結果をもとに潮流計算を実行した。東京湾の三番瀬海域を対象とした従来手法との 25 時間平均流の比較では、流速値は波高減少が著しい領域を中心に 50~200%前後の範囲で増減し、流況は反時計回りの循環流が卓越した。この結果から潮流計算において波浪影響を考慮することの有意性を確認した。

1. 緒 言

内湾における海域環境の評価や予測のために潮流シミュレーションが数多く行われている。潮流のシミュレーションにおいては内湾の流動に寄与する主な外力として、傾圧的な海水構造の場では生じる密度流、海面に働く風の剪断応力によって生じる吹送流などが物質輸送に関わる重要な恒流成分として考慮される。これらは時として湾のスケールと同規模の恒流系の形成に支配的な要因となる。一方、これと比較して汀線近傍の局所的な流動を励起する物理的要因としては radiation stress の空間勾配があげられる。この応力勾配によって生じる流動成分は海浜流系統と呼ばれ沿岸流や離岸流などの局所的な場で卓越する恒流成分的な流れとして物質輸送能力を有していると考えられる。汀線近傍の浅海域としてはリンや窒素といった栄養塩類の循環や、多種多様な生物が生息し海水浄化の基盤となる浅場・干潟域が存在することから、海水の流れの強さや向きといった物理的要素を正しく評価することは海洋環境の予測や評価にとって非常に重要である。

これまで浅場・干潟域の潮流シミュレーションでは、潮汐による海底面の干出・水没現象を考慮するため移動境界手法(加藤ら, 1979; 経塚・川浪, 1993; 岡本ら, 2000)を適用して流況再現性について数値的な検討を行っているが、こういった地形条件のみでなく沿岸波浪が干潟上の潮流場へ与える影響度について検討した例はない。従って、本研究では波浪影響を考慮する試みとして radiation stress の空間分布を考慮した潮流モデルを構築し、東京湾の三番瀬海域に適用し従来手法による流況との比較、評価を行うことを目的とする。

2. 潮流計算における radiation stress の考慮

(1) 計算方法

波浪影響を考慮した潮流計算手法は、波浪場と潮流の 2 つの計算モデルから成り立っている。潮汐による長周期の海面の昇降現象は、沿岸に打ち寄せる短周期の波浪の碎波位置に周期的な変動をもたらすほか、種々の波浪変形に密接に関係していると考えられる。特に浅場・干潟域では干出・水没が起こり 1 潮汐周期間に地形が大きく変化する海域においては、潮汐によって水位が時々刻々と変化していく過程が波浪場に与える影響についても考慮していく必要がある。そこで本計算では次のような順序で計算を行うこととした。

- ① 潮汐による水位変動を考慮した波高・波向分布を計算するために通常の潮流計算を実行し、予め設定した波浪データ入力開始時間に合わせて波浪場計算領域内の全計算点における毎時の水位をデータベース化し、波浪場解析用の水深データを作成する。
- ② ①で作成した水位データを用いて、波浪データ入力数分の波浪場解析を行い、全計算点の毎時の波高・波向をデータベース化する。
- ③ ①と同条件下で再度潮流計算を実行し、波浪データ入力開始時間、入力時間間隔に合わせて逐次波高、波向データを更新して最終的に 1 潮汐周期間の平均流を得る。

(2) 波浪場の計算手法

一般に radiation stress の空間分布を得るためには波浪変形計算を行い各計算点における波高および波向を知る必要がある。本研究では波浪場解析手法として、広領域の計算に適し屈折・反射・碎波現象による波浪変形や近似的に回折現象を取り扱える不規則波のエネルギー平衡方程式法(高山ら, 1991)を採用した。基礎方程式を式(1)に示す。

$$\frac{\partial(Du_x)}{\partial x} + \frac{\partial(Du_y)}{\partial y} + \frac{\partial(Du_\theta)}{\partial \theta} = -\epsilon_b D \cdots \cdots (1)$$

* 学生会員 修(工) 日本大学大学院理工学研究科海洋建築工學専攻
.. 工 博 日本大学教授 理工学部海洋建築工學科
*** 正 会 員 工 博 三洋テクノマリン(株)
**** 博(工) 日本大学助手 理工学部海洋建築工學科

$$\begin{cases} v_x = Cg \cos \theta \\ v_y = Cg \sin \theta \\ v_\theta = Cg/C(\partial C/\partial x \sin \theta - \partial C/\partial y \cos \theta) \end{cases} \quad \dots\dots (2)$$

$$\varepsilon'_b = \varepsilon_b C / \sqrt{\delta x \cdot \delta y} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 D はエネルギー密度、 θ は波向角、 v_x 、 v_y 、 v_θ はエネルギー密度の輸送速度、 ε'_b は単位時間内に碎波によって失われるエネルギー逸散率、 C は波速、 Cg は群速度、 ε_b は計算格子内で碎波する波のエネルギーの割合、 δx 、 δy は x 、 y 方向の計算格子間隔である。

(3) radiation stress を考慮した潮流の基礎方程式
流体運動は連続方程式および静水圧近似を仮定した Navier-Stokes 方程式を水深方向に積分して得られた式 (4)～(6) を支配方程式とする。

・連続方程式

$$\begin{cases} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = w_1 - \frac{\partial M_1}{\partial x} - \frac{\partial N_1}{\partial y} \\ w_{k-1} = w_k - \frac{\partial M_k}{\partial x} - \frac{\partial N_k}{\partial y} \quad (k=2, 3, \dots, K) \end{cases} \quad \dots\dots (4)$$

・ x 方向運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_k}{\partial t} = & -u \frac{\partial M_k}{\partial x} - v \frac{\partial M_k}{\partial y} - (uw)|_{z=-H_{k-1}} + (uw)|_{z=-H_k} \\ & + fN_k + \frac{\partial P_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 M_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 M_k}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho} \tau_x^{k-1} - \frac{1}{\rho} \tau_x^{k+1} \end{aligned} \quad \dots\dots (5)$$

・ y 方向運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_k}{\partial t} = & -u \frac{\partial N_k}{\partial x} - v \frac{\partial N_k}{\partial y} - (vw)|_{z=-H_{k-1}} + (vw)|_{z=-H_k} \\ & - fM_k + \frac{\partial P_k}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 N_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 N_k}{\partial y^2} + \frac{1}{\rho} \tau_y^{k-1} - \frac{1}{\rho} \tau_y^{k+1} \end{aligned} \quad \dots\dots (6)$$

式 (5) の右辺第 6 項の $\partial P_k / \partial x$ については、

$$\begin{cases} \frac{\partial P_x}{\partial x} = \frac{h_k}{\rho_k} \left\{ [\tilde{P}_x]_k - \frac{1}{2} g h_k \frac{\partial \rho_k}{\partial x} \right\} \\ [\tilde{P}_x]_1 = -\frac{\partial P_A}{\partial x} - \rho_1 g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad (k=1) \\ [\tilde{P}_x]_k = [\tilde{P}_x]_{k-1} - g h_{k-1} \frac{\partial \rho_{k-1}}{\partial x} \quad (k \geq 2) \end{cases} \quad \dots\dots (7)$$

と表わされる。式 (6) についても同様である。ここで、 ζ は自由表面変位、 M 、 N は線流量成分、 u 、 v 、 w は流速成分、 f はコリオリパラメータ、 h は層厚、 H は水深、 ρ は海水密度、 A は水平渦動粘性係数、 τ は各境界面に働く剪断応力を表し、表層では風応力、層間では内部摩擦応力、最下層では海底摩擦応力でそれぞれ式 (8)～(10) のように定式化される。

$$\tau_x^a = \rho_a \cdot \gamma_s^a \cdot W_x \cdot \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad \dots\dots (8)$$

$$\tau_x^i = \gamma_i^i \cdot \delta u \cdot \sqrt{\delta u^2 + \delta v^2} \quad \dots\dots (9)$$

$$\tau_x^b = \gamma_b^b \cdot u_K \cdot \sqrt{u_K^2 + v_K^2} \quad \dots\dots (10)$$

ここで ρ_a は空気密度、 γ_s^a は海面摩擦係数、 γ_i^i は内部摩擦係数、 δu 、 δv は上層または下層との流速との差、 γ_b^b は海底摩擦係数である。 y 方向の定式化についても同様である。

radiation stress の勾配による流動成分を考慮するため、式 (7)、(8) の右辺に外力項として新たに radiation stress 項を付加し、式 (11)、(12) のように定式化した。

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} = R.H.S. - \frac{1}{\rho_k} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} = R.H.S. - \frac{1}{\rho_k} \left(\frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \quad \dots\dots (12)$$

S_{xx} 、 S_{xy} 、 S_{yx} 、 S_{yy} はそれぞれ x 軸方向、 y 軸方向、およびそれぞれに垂直な面に作用する radiation stress であり次式で計算される。

$$\begin{cases} S_{xx} = E \cdot (n \cdot (1 + \cos^2 \theta) - 1/2) \\ S_{xy} = S_{yx} = 1/2 \cdot E \cdot n \cdot \sin 2\theta \\ S_{yy} = E \cdot (n \cdot (1 + \sin^2 \theta) - 1/2) \end{cases} \quad \dots\dots (13)$$

ここで E は波のエネルギー、 n は波速と群速度の比、 θ は x 軸と波の進行方向との角度である。式 (4) および式 (11)、(12) が本研究で用いる潮流の基礎方程式である。

(4) 計算モデル

計算モデルは準三次元鉛直多層位モデル (中田ら、1983) を用い、基礎方程式を差分法により離散化する。波浪場計算では全てエネルギー密度 D 、輸送速度 v 、水深 h などの変数を 1 つの計算点に配置するレギュラーグリッドを採用しておりスタッガードグリッドを採用している潮流モデルとは計算点の取り方が若干異なる。これについてはスタッガードグリッドの中央に波浪場計算の計算点を一致させることにより radiation stress の空間勾配を計算し易くした。図-1 に変数配置を示す。実線は潮流モデルの計算グリッド、破線は波浪場解析のグリッドを示している。

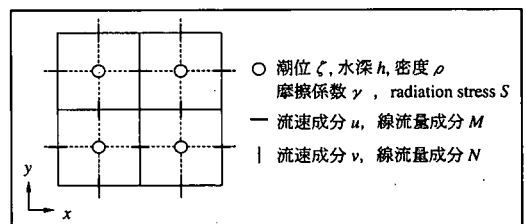


図-1 変数配置

3. 対象海域の地形と波浪・流動環境

(1) 地形条件

本研究の対象海域は東京湾湾奥部に位置する三番瀬海域とした。三番瀬海域は周囲を直立護岸、階段護岸に囲まれ浅場や海浜の造成が行われるなどの人為的な影響を強く受けた浅場・干潟域である。図-2に千葉県が行った深浅測量結果(1998)を基に作成した水深コンター図を示す。浅場の海底勾配は1/1000程度と非常に緩勾配の傾斜地形となっている。岸から約3 km 沖合いには水深の浅い砂堆が帯状に広がっており、さらに沖側は勾配の大きな浅海域斜面となっている。浅場は水深7 m 前後の市川航路によって二分され西側の浅場には水深4, 5 m 程度の人工渚が存在し、全般に起伏に富んだ複雑な地形が特徴である。

(2) 流 況

三番瀬海域の調査報告書(千葉県, 1998)を要約すると次のような流動特性が考察されている。

- ・流況パターンは市川航路にほぼ平行な岸-沖方向の流れが中心となっており、一般に海岸線において卓越すると思われる岸に平行な流れはほとんどみられない。
- ・数値シミュレーション結果より、夏季の三番瀬では流速は上げ潮時、下げ潮時ともに浅海域の奥部ほど遅く、特に猫実川河口から市川市の護岸沿いおよび船橋海浜公園前においては流速が約 0.05 ms^{-1} 以下と最も遅い。一方、浅海域南部では流速が速く、特に浦安市の埋立地突端は $0.30 \sim 0.40 \text{ ms}^{-1}$ と三番瀬内で最も速い。

(3) 波浪環境

同報告書による流動に影響を及ぼす沿岸波浪に関する知見は次のように述べられている。

- ・浅海域南端の砂堆から斜面上部にかけては砕波帯となっており、この部分では波浪の影響が大きい。しかし、沖からの波浪がこの部分において砕波し、減衰することによって陸側には波浪の影響の比較的小さい静穏域が形成されている。また、三番瀬における波浪は、南南西方向からのものが大きい。浅海域西部の市川側奥部はこの方向からの波高に対して浦安市埋立地の陰になっている。このため、この海域では波浪による影響が三番瀬内で最も小さい。

また、三番瀬海域は東京湾の最奥に位置するという条件もあり、波浪は1年を通じて非常に静穏で航路上の2点の観測データ(2000)によれば夏季、冬季いずれにおいても波高 0.20 m 以下、周期 $2.0 \sim 4.0 \text{ s}$ 程度の波浪が6割から7割を占めている。以上の記述から得られる三番瀬海域の領域ごとの波浪・流動環境のゾーニングを図-3に示す。

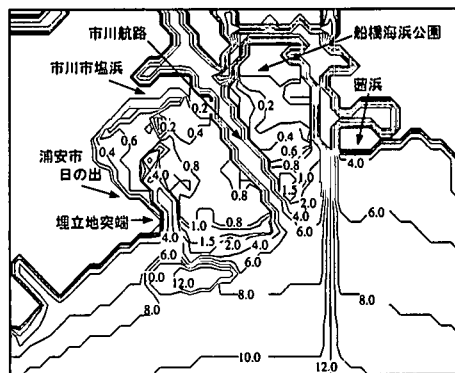


図-2 三番瀬の地形条件 [m] (A.P 面基準)

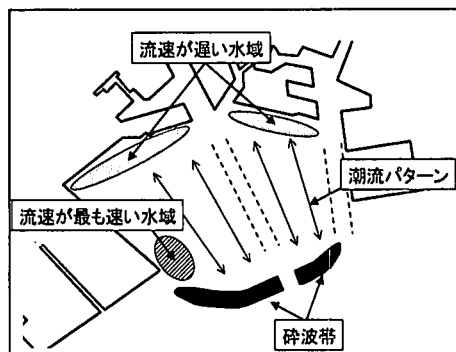


図-3 波浪・流動環境のゾーニング

4. 数値シミュレーション

(1) 潮流の予備計算

2章(1)節の①で述べたように潮汐による水面変動を考慮した波浪場の計算を行うために予め潮流計算を行う。計算領域は図-4に示す間口、保田以北の東京湾全域とした。本計算では移動境界手法(2003)を用いて干潟域の干出、水没を考慮するため、入力潮汐波については主要4分潮(O1, K1, M2, S2)を与えた。計算条件を表-1に示す。図-5は計算による三番瀬沖の潮候曲線で黒丸は波浪計算を実行する時間とそのときの水面変位量を示している。本研究では波浪影響を考慮した50時間分

表-1 潮流計算諸条件

タイムステップ	20 sec
水平格子間隔	250 m
	250~500 m
コリオリ係数	$3.446 \times 10^{-8} \text{ sec}^{-1}$
水平渦動粘性係数	格子規模の4/3乗に比例
海面摩擦係数	0.0013
海底摩擦係数	0.0026

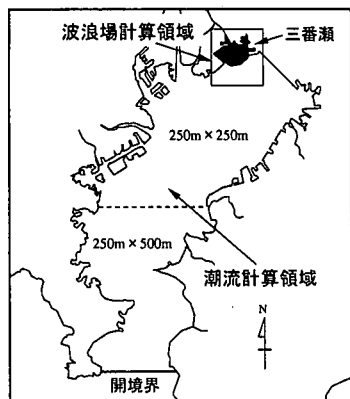


図-4 波浪・潮流計算領域

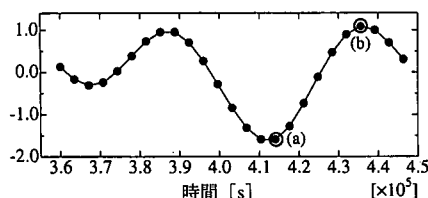
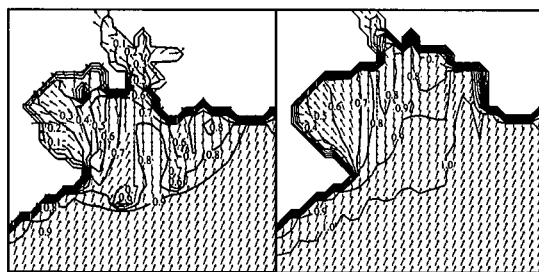


図-5 三番瀬沖の潮候曲線 [m]

表-2 波浪計算諸条件

波高	0.35 m
波周期	2.5 s
主方向	SSW
周波数分割数	5
方向分割数	36
方向集中度パラメータ	10

図-6 波高比の分布と波向ベクトル図
(左) 干潮時, (右) 満潮時

の潮流計算から最終的に 25 時間平均流を算定するため、50 個の波高・波向データを計算によって取得する。

(2) 波浪場解析

波浪場の計算では図-4 に示すように砕波帯の沖側 7.5 km 地点に入射境界を設定したため波浪条件としては東京灯標における観測値 (1999) を湾奥の代表値として利用した。本研究では平時の波浪条件が潮流場に与える影響の評価を主眼とするため出現頻度の最も高い波高 0.25~0.50 m, 周期 2.0~3.0 s より選定した。また、浅場内と砕波帯周辺の波高比分布に着目するため埋立地の後背地は簡略化した。

図-5 に示した (a), (b) の潮位における波高比と波向ベクトルの計算結果を図-6 に示す。図-6 左図では市川航路両側の砕波帯付近において急激な波高の減少がみられ、船橋海浜公園前面や市川市塩浜地先に点在する干出域の存在によって複雑な波高分布になっている。全般に浦安の埋立地先端を中心に回折現象に類似した反時計回りの波高の減少がみられ波向も顕著に変化していることがわかる。一方、三番瀬の中心を縦断する市川航路では水深が大きいため比較的波高比の減少が小さい。従って航路両側の浅場では波あたりの強い領域であることが推測される。

(3) 波浪影響を考慮した潮流シミュレーション

波浪場解析によってデータベース化した波高・波向データを用い、運動方程式 (11), (12) を基礎方程式として計算を行う。波浪データは流場がほぼ定常に至る 75

時間後から毎時間更新し、式 (13) より逐次 radiation stress を計算する。計算条件は予備計算と同様である。

図-7 に示す流況特性の異なる 4 つの領域毎に算定した潮位別の流速の増減率を図-8 に示す。尚、増減率は各領域 3 点の平均から算定した。図の横軸は左から下げ潮、干潮、上げ潮、満潮を意味し図-5 の二重丸の潮位と対応している。砕波帯付近の Area-1 では、干潮時に従来手法の 2 倍近い増速となっており図-6 左図に現れた同領域における急激な波高の減少が強く影響していることが分かる。上げ潮時についても 5% 程度の増速となっているが、逆に下げ潮時には 5%、満潮時には約 50% と大きく減速した。市川航路上の Area-2 では他の領域に比べて波高分布が緩やかに変化するという特性がある。この領域では下げ潮時、上げ潮時では増減は殆どみられないが、干潮時では 20% 程度減速し、満潮時では 15% 程度の増速となった。干出域となる Area-3 では下げ潮時に 10% 程度の減速がみられるが、その他の潮位では 10~25% 程度の増速となった。三番瀬海域で最も静穏な Area-4 では減速はみられず干潮、満潮時では 15% 前後の増速となった。これらの流速の増減については潮流の流向と radiation stress の分布が関わっていると考えられる。三番瀬海域のようにおおそ波高が沖から浅場へ様に減少する波浪場では、radiation stress の勾配により定常的に北流成分が強められることになる。従って任意地点の潮流の流向がこれと近い場合は増速となり、逆にこれを打ち消す流向の場合は減速となると推察される。実際の増減域は起伏に富んだ地形条件の影響を受けて流速、流向が一様にならないため複雑な分布となっている。

図-9 に本手法と従来手法との 25 時間平均流の差分

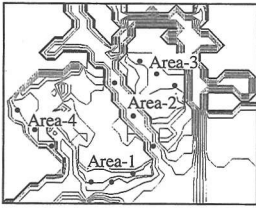


図-7 選定領域

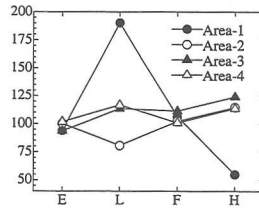


図-8 領域別の流速増減率 [%]

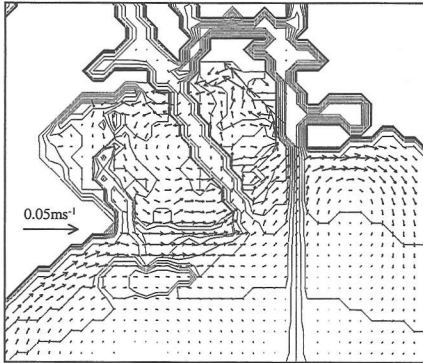


図-9 25時間平均流の差分流速ベクトル

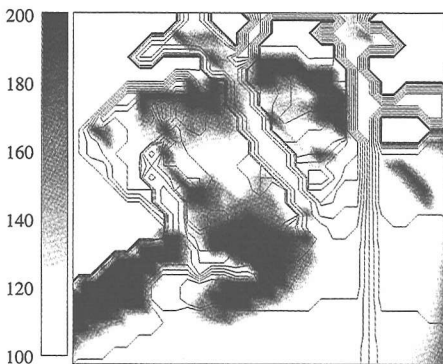


図-10 25時間平均流の増速海域 [%]

流速ベクトルを示す。この流況ベクトルは radiation stress の空間勾配に起因した流動成分であるため、三番瀬海域の平均的な海浜流場を表しているものと考えられる。波浪影響を考慮することで全般に東流成分の増速が明瞭にみられた。特に浦安市の埋立地前面海域から砕波帯前面の斜面を横切る東流成分が卓越し、この流れの一部が北側へ分岐して市川航路を中心とする反時計回りの循環流を形成している。航路東側ではこの東流成分が船橋航路を越えて茜浜の東側へ抜けているが一部は北上し海浜公園前面へ向かう強い北西流となっていることが分かる。また図-10 より 200%前後の増速域は浦安市埋立地前面、市川航路西側の砕波帯、海浜公園前面、市川塩浜前面と人工渚東側に分布し、循環流の形成場所と増速域の分布はほぼ一致していることが分かる。循環流の中

心部と浦安市日の出地先の大部分では 100%前後となり変化が小さいことが分かる。尚、沖側の増速域については、従来手法における平均流成分が微小な値であったため著しい差が表れていると考えられる。

5. 結 言

本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 従来の潮流の基礎方程式中に新たに radiation stress 項を付加することにより、波浪影響を考慮した潮流モデルを構築した。
- (2) 従来の潮流計算手法と波浪場を考慮した潮流計算手法では、流速は潮流の流向および流速によって著しく増減した。この変化は三番瀬海域では砕波帯において最も顕著であった。
- (3) 25 時間平均流の差分流況ベクトルより、三番瀬海域では砕波帯以北の浅場において反時計回りの海浜流場が形成されると推定される。
- (4) 本研究では静穏な波浪条件での検討を行ったが、これが浅場・干潟域および周辺海域の流況に与える影響は大きく、流況計算において潮流のみでなく波浪場の影響を考慮することの有意性を確認した。

今後は、現地観測結果との整合性を踏まえて、水質等の環境質及び生態系への影響を検討する。

謝辞：本研究を遂行するに際し、(株)アルファ水工コンサルタントの平井豊規氏には多くの御助言を頂き大変お世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 岡本強一・森岡 豊・佐久田昌昭 (2000): 移動・無反射境界を用いた海水流動の数値シミュレーション, 日本建築学会構造系論文集, 第 531 号, pp. 197-204.
- 海上保安庁水路部 (1992): 日本沿岸潮流調和定数表, 書誌第 742 号, pp. 133-137.
- 加藤一正・田中則夫・灘岡和夫 (1979): 干潟上の潮流計算および干潟変形予測の手法, 港湾技術研究所報告, 第 18 巻, 第 4 号, pp. 11-14.
- 経塚雄策・川浪健治 (1993): 干潟を考慮した有明海の潮流解析, 西部造船会々報, 第 86 号, pp. 134-141.
- 高山知司・池田直太・平石哲也 (1991): 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, 第 30 巻, 第 1 号, pp. 21-67.
- 千葉県企業庁・(財)港湾空間高度化センター (1999): 市川二期・京葉港二期地区海浜・干潟創出基礎調査業務委託報告書, pp. 29-33.
- 千葉県企業庁 (2000): 市川二期・京葉港二期地区人工海浜・干潟検討 (その 2) 業務委託報告書, pp. 2-100-2-138.
- 千葉県土木部・企業庁 (1998): 市川二期地区・京葉港二期地区計画に係る環境の現況について (要約版), pp. 152-159.
- 中田喜三郎・堀口文男・田口浩一・瀬戸口泰史 (1983): 追波湾の三次元潮流シミュレーション, 公害資源研究所集報, 第 12 巻, 第 3 号, pp. 17-36.
- 増田光一・居駒知樹・大塚文和・小澤宏樹 (2003): 移動境界手法を用いた潮流シミュレーションに関する研究, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp. 309-314.