

風の変動を考慮した湾水流動多層モデルの開発と東京湾への適用

佐藤 慎司*・植田 耕一郎**

1. はじめに

東京湾などの多くの内湾では湾水の汚染が進み、それに伴い赤潮や青潮の発生が深刻な問題となっている。近年これらの環境問題の機構解明や予測に数値計算が頻繁に用いられるようになってきた。

東京湾の湾水流動に関しては、今までに多くの調査・研究がなされている。組織的な流動観測は、運輸省第二港湾建設局 (1966, 1967), 港湾技術研究所 (1983) が行ったものがある。これらによると、東京湾の恒流は底層では湾内に流入し、上・中層では湾外に流出する傾向にあり、さらに湾奥部で上層は時計回り、下層は反時計回りの循環流が生じているということが報告されている。さらに湾口付近で複雑な流況となることも指摘されている。また潮流の数値計算としては、金子ら (1975), 堀江ら (1976) による ADI 法による計算, 村上 (1981), 村上・森川 (1984) による有限要素法による解析例などがあり、最近では、児玉・川原 (1992) の有限要素解析, 藤野・多田 (1992) の leap-frog 差分スキームを用いた多層モデルによる解析例などがある。

本研究では、Maa (1990) によって提案された効率的な計算法を多層モデルに拡張し、潮汐のみならず、風の変動や河川水の流入を全て取り込んだ湾水流動の数値計算モデルを開発し、実測データにより直接これを検証する。また、将来の湾口航路整備構想に伴う流況の変化については、運輸省第二港湾建設局 (1980) で検討されているものの局所的な流況の変化については未知の部分が多いので、さらに詳細な検討を行なう。

2. 数値計算の方法

2.1 基礎方程式

図-1 に示すような座標系を定義し、 x, y 軸を平均海面上に、 z 軸を鉛直上向きにとる。水深を鉛直方向に n 層に分割し、最上層を $i=1$ として第 i 層の厚さを d_i とすると、連続式と第 i 層の運動方程式は次式で表される。

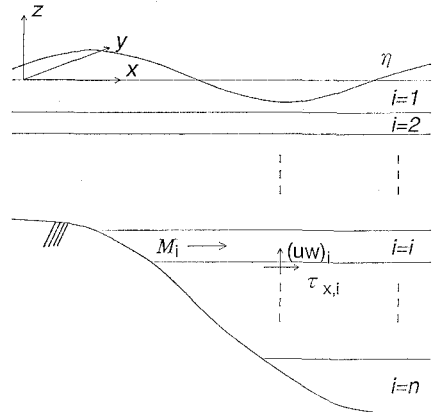


図-1 記号の定義

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^n M_i + \frac{\partial}{\partial y} \sum_{i=1}^n N_i = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_i^2}{d_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{M_i N_i}{d_i} \right) \\ + (uw)_{i-1} - (uw)_i - f N_i + g d_i \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{d_i}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial x} \\ - \frac{\tau_{x,i-1}}{\rho} + \frac{\tau_{x,i}}{\rho} - \epsilon \left(\frac{\partial^2 M_i}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad \dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M_i N_i}{d_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N_i^2}{d_i} \right) \\ + (vw)_{i-1} - (vw)_i + f M_i + g d_i \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{d_i}{\rho} \frac{\partial p_0}{\partial y} \\ - \frac{\tau_{y,i-1}}{\rho} + \frac{\tau_{y,i}}{\rho} - \epsilon \left(\frac{\partial^2 M_i}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} \right) = 0 \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここで、 η は水面変動、 M_i , N_i は第 i 層の x, y 軸方向の線流量、 p_0 は海面における大気圧、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度、 f はコリオリ係数、 ϵ は水平渦動粘性係数である。本研究では境界面の位置を固定して考える。従って図-1に示すように層の分割数は水深によって変化するため、各格子で底面と接している層を第 i_b 層とし、第 (i_b+1) 層以深の線流量は便宜上 0 とおく。また、 $(uw)_i$, $(vw)_i$, $\tau_{x,i}$, $\tau_{y,i}$ はそれぞれ、第 i 層と第 $i+1$ 層の境界面における運動量交換値と剪断応力であり、土屋 (1981), 運輸省第二港湾建設局 (1980) らにならって定式化し、例えば $\tau_{x,i}$ については以下のよ

* 正会員 工博 横浜国立大学助教授 工学部建設学科

** 正会員 (株)鹿島

うに評価した。

$$\tau_{x,i} = \rho \gamma_i^2 (u_i - u_{i-1}) \sqrt{(u_i - u_{i+1})^2 + (v_i - v_{i+1})^2}$$

ここで、 $u_i (= M_i/d_i)$ 、 $v_i (= N_i/d_i)$ は上下層の平均流速、 γ_i^2 は境界面の摩擦係数である。海面および海底面では運動量の交換はなく、摩擦応力だけを評価すれば良い。海面における剪断応力は次式で与えられる。

$$\tau_{x,0} = \rho_a \gamma_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

ここに、 W_x 、 W_y は海上における風速、 $\gamma_a^2 (= 0.026)$ は海面の抵抗係数、 ρ_a は空気の密度である。また、海底剪断応力は、Manning の粗度係数 n を用いて次式で与えられる。

$$\tau_{x,i_b} = \frac{\rho g n^2}{d_{i_b}^{1/3}} M_{i_b} \sqrt{M_{i_b}^2 + N_{i_b}^2}$$

2.2 数値積分の方法

従来から潮流計算に用いられてきた代表的な差分法には、leap-frog 法、ADI 法などがある。Maa (1990) は、ADI 法を改良してさらに効率的な計算法を提案した。この方法を本論文では、修正 ADI 法と呼ぶことにする。修正 ADI 法においては連続式のみ時間ステップを二分し、運動方程式については一つの時間ステップごとに x, y 方向それぞれを交互に差分化を行なうことに特徴がある。このため ADI 法よりさらに時間ステップを大きくとることができ、計算時間の短縮につながる。Maa (1990) の論文で提案されているものは単層モデルであるが、本研究ではこれを多層モデルに拡張して計算を行なった。多層モデルに拡張すると線流量の未知数が層の数だけ増えるため、この解き方が問題となる。本研究では、まず通常の ADI 法のアルゴリズムで η と $\sum M_i$ あるいは $\sum N_i$ について解を求めた後、求めた η を用いて各層の M_i あるいは N_i を順次決定していくことにした。

2.3 計算領域

今回の計算で採用した計算領域を図-2に示す。久里浜付近で入射境界をとり、東西 48 km、南北 62 km の領域を対象とした。図中の丸印は後述する現地観測における観測点を示している。全体的には 1 km 四方の計算格子を設定するが、図中に網掛けで示した湾口部の 6 km × 8 km の領域では 200 m 四方で設定する。さらに、第三海堡周辺の 600 m × 600 m の領域は 40 m 四方にし、急変する地形を忠実に再現する。各地点の水深は海図から読みとった。海陸の境界では境界を横切る方向の線流量を 0 とし、遡上は考えない。河口地点では、河川の流軸方向の線流量を与えた。

2.4 数値計算法の検証

まず、図-3 の上段に示したような緩勾配水路に対して、二層モデルにおける吹送流の計算を行なった。湾奥から湾口に向けて風速 10 m/s の風を与え、定常状態の水面形、流速ベクトルの様子を調べた。水面形は一層モ

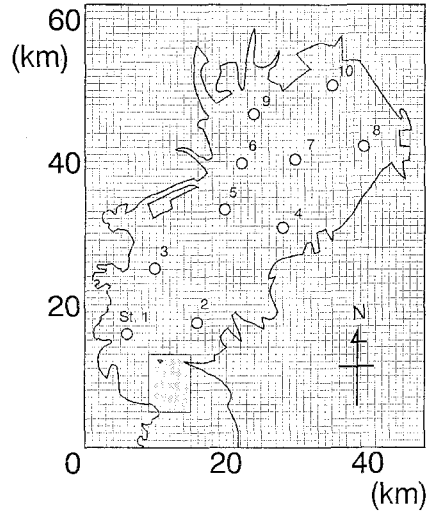


図-2 計算領域

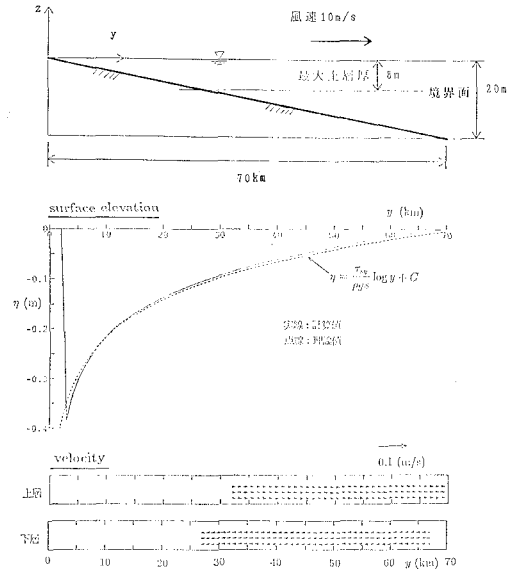
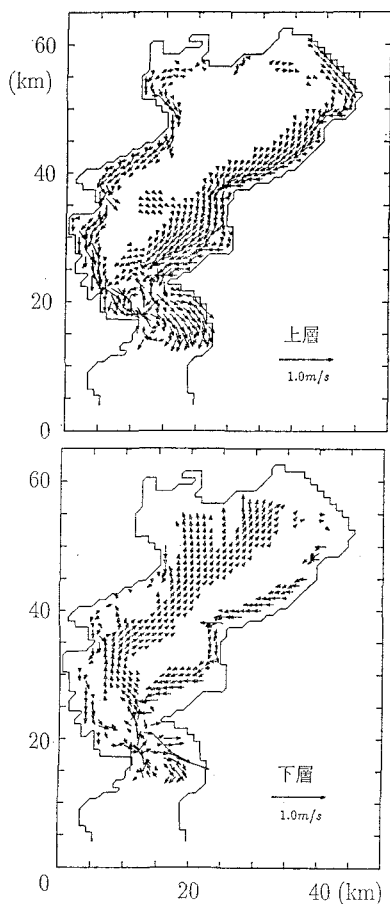


図-3 緩勾配水路における計算結果

デルに対する基礎式から導かれる水位と比較した。理論値と二層モデルによる計算結果とを 図-3 の中段に示す。二つの曲線はほぼ一致している。また、上下層の流速ベクトルを図-3 下段に示す。風の吹き寄せの影響により、実際現象としても観察される鉛直循環流が生じており、数値モデルの再現性は良いと言える。

東京湾の恒流については従来の調査報告 (1967, 1980) などで、冬季に時計回りの循環流が発達することが確認されている。この循環流は、湾口部の地形や冬季に卓越する北風の影響が大きいものとされている。また鉛直的に見ると、上層で流出、下層で流入となる傾向が強いことも指摘されている。そこで、湾口強制潮流を M_2 分潮



図—4 北風作用下の恒流成分

として与え、風を風速 10 m/s の北風として与え、試算を行った。定常状態に達した後の上下層の恒流図を図—4 に示す。これを見ると、湾奥で大きな時計回りの流れが確認できる。また、上層で流出、下層で流入という傾向もよく表現されており、東京湾の流況に関しても本計算の妥当性が確かめられた。

3. 湾水流動の追算

3.1 観測データの概要

1983年に港湾技術研究所によって実施された約2カ月間の現地観測データを用いて計算の再現性を検討した。この調査では、潮流・潮位だけでなく、東京湾周辺地域の風・気圧などの気象データ、さらに降水量・河川流量などのデータの収集・解析を行っている。計算を行なう期間は5日間とするが、計算が平衡状態となるまでに2日程度必要なため、3日目から3日間の計算結果を出力し、該当する期間の観測値と比較・検討する。この調査における東京湾内の観測点を図—2 に示す。

本計算では、湾水流動に果たす風の場の影響を検討するため、強い風が継続して吹いている期間と、風が弱く

穏やかな日が続いている期間とに分けて検討した。調査期間における風のデータを検討し、合計4つの期間を選定して計算を行った。本論文では紙数の都合上、9/15～9/17の期間の計算結果を中心に議論を進める。当期間は上弦の月直後で小潮の時期にあたり、10 m/s 近い北北東の強い風が継続して吹いた期間である。

3.2 潮汐・風・河川流入条件等の設定

入力潮汐は久里浜沖で主要四分潮 (M_2, S_2, K_1, O_1) の和として与えた。それぞれの分潮の天文引き数、振幅と遅角は、潮位表などに調定数表として定められているものを用いた。

観測期間中の風の特性をみると、空間的な変動は小さいものの、時間的な変動はかなり大きいことがわかった。そこで風の変動を考慮する簡単な方法として、風を半日周期で変化させて入力した。河川水の流入は、江戸川、荒川、多摩川、隅田川、鶴見川の5河川を選定し、観測結果から計算対象期間の平均流量を求め入力した。

計算は二層モデルとして行ない、上層の厚さは佐藤ら(1991)の計算例を参考にして、8 m に固定した。時間ステップは計算の効率さと安定さを満足させる値とし、 $\Delta t = 180$ s とした。拡散係数については、分潮を用いた試算において、その値が小さい程分潮の振幅と位相の分布を忠実に再現することが確かめられたため、計算の安定性も考慮して $\epsilon = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。境界面の摩擦係数については、 $\gamma_i^2 = 0.02, 0.002$ の2ケースで検討を行った。計算結果は、北向きおよび東向きを正として、各地点の分速曲線として観測値と比較・検討した。

3.3 計算結果の比較

図—5 (a), (b), (c) に 9/15～9/17 の期間における測点3, 4, 8の分速曲線を示す。実線・点線・破線はそれぞれ、観測値・ $\gamma_i^2 = 0.02$ の計算値・ $\gamma_i^2 = 0.002$ の計算値を表す。ただし、測点8では隣接する南側の格子点の水深が浅く単層となっているため、下層の北方分速は計算では常に0となっている。また、観測値が流速の転向点付近で急激に変化しているのはアンダーレイ流速計の特性と考えられる。

流れの鉛直分布をみると、上層は風の向きに流れ、中下層は逆方向へ流れることが多く、計算でもほぼ同様の傾向が再現されている。ただし、水面付近の強い剪断流は計算では再現できず、上層の流速値は過小評価となっている。表面極く近くの流れを評価するためにはさらに鹽の分割数を増す必要がある。また、観測結果と比較すると、摩擦係数 $\gamma_i^2 = 0.002$ のケースの方が、観測結果に近い値を示していることがわかる。

4. 湾口航路整備に伴う流況の変化

4.1 詳細計算領域の設定

東京湾は湾口部に富津岬と観音崎が入り組み、さらに

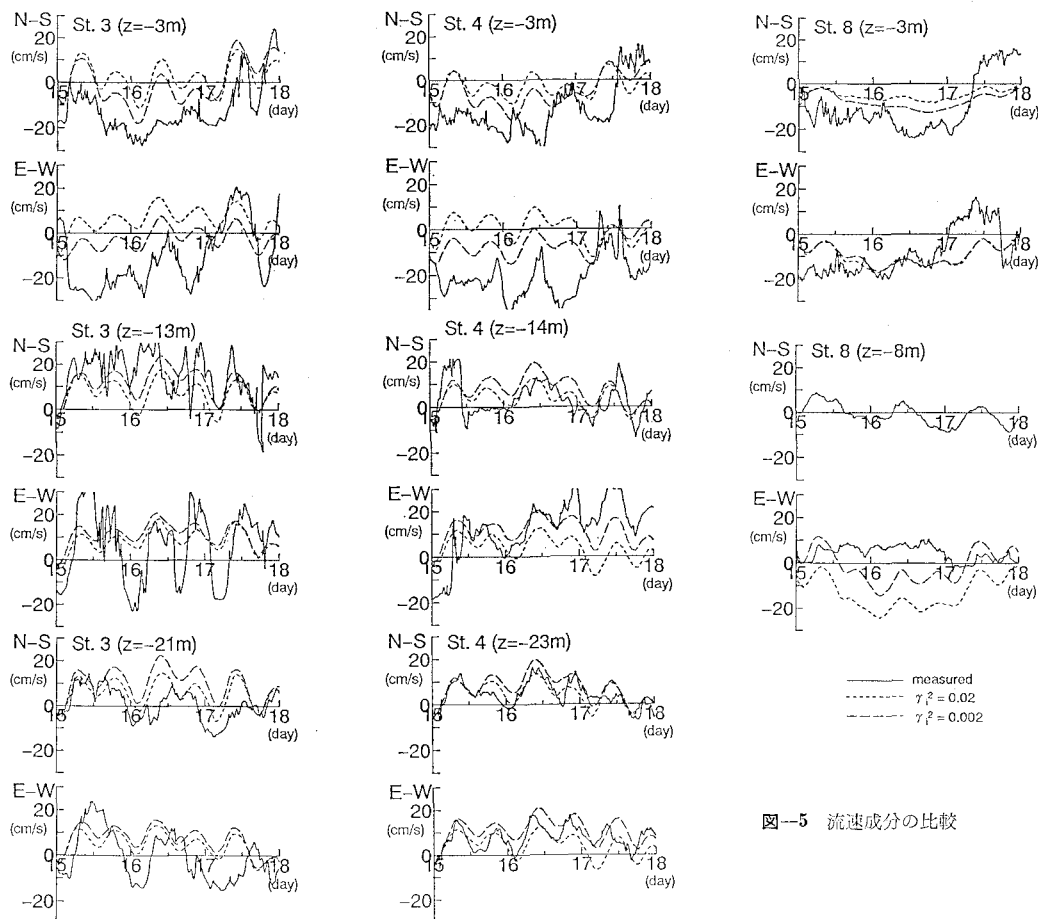


図-5 流速成分の比較

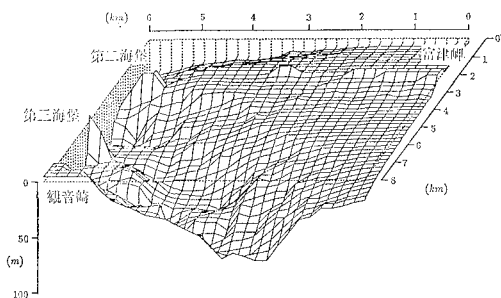


図-6 湾口部の地形

浦賀水道航路と海堡が存在する複雑な地形となっている。図-6は湾口部の地形を200 m格子で読みとり、図化したものである。従来の潮流計算ではせいぜい1 km四方の粗い計算格子が用いられることが多いため、これらの地形の影響を十分に反映できていない。本計算では湾口部に詳細計算領域を設け、その部分の計算格子を最小40 mとすることにより、これらの複雑な地形が潮流計算に与える影響を検討した。

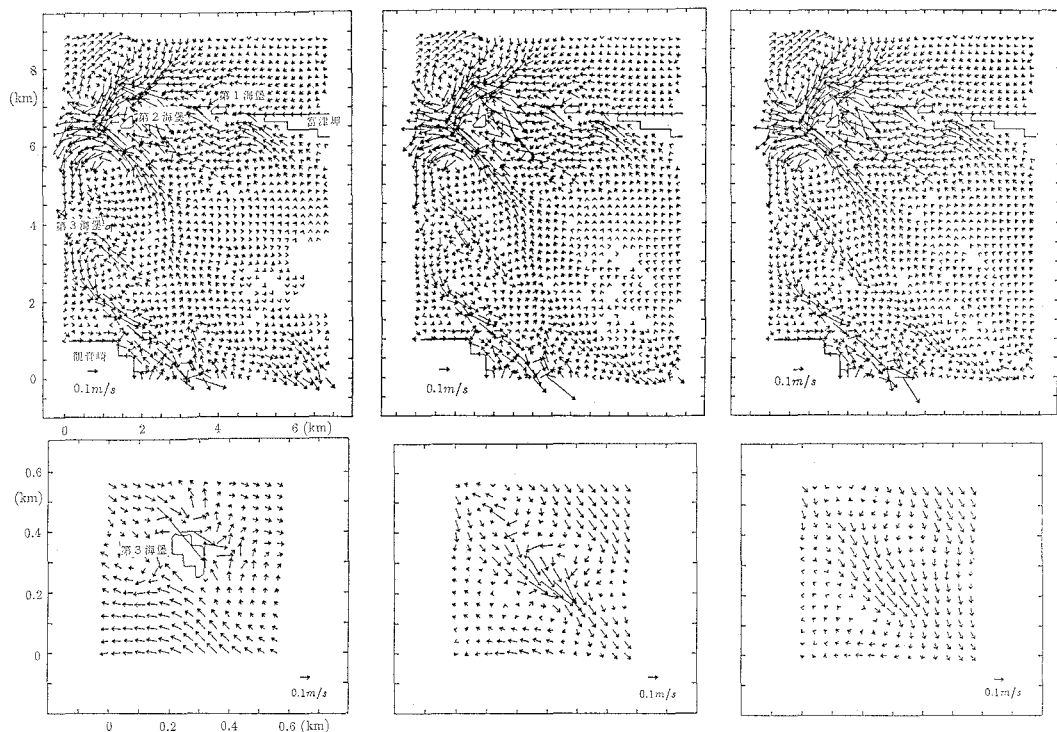
まず、現況地形で M_2 分潮に対して計算したところ、詳細計算領域を導入すると、詳細領域を導入しない計算

結果と比較して、潮汐の振幅はほとんど変化しないものの、遅角には湾内で約0.5度の遅れが生じることがわかった。従って、特に潮汐の位相を精度良く評価したい場合には、湾口部の地形を忠実に表現する必要がある。

4.2 恒流ベクトル分布の変化

図-7に湾口地形の違いによる恒流図を示す。図は左からそれぞれ、現況地形、第三海堡を10 mの水深まで撤去した場合、20 mまで撤去した場合の恒流ベクトルであり、下段には第三海堡周辺の詳細な流況を示してある。現況地形における恒流図(左上図)を見ると、富津岬と第二海堡を結んだ線以北では時計回り、以南では反時計回りの流れが卓越している。第三海堡周辺でも渦の存在は確認でき、第三海堡と观音崎の間に強い南向きの流れが見られる。さらに、第三海堡周辺の詳細図(左下図)を見ると、海堡周辺で流速や流向が急変している様子を確認できる。このように湾口部では複雑な地形の影響によって、いくつもの渦が複雑な流況を形成している。

次に上段中央および右側の図を現況の図と比較すると、第三海堡南側で生じていた北西方向の流れに代わり、南東方向への流れが卓越するようになっていること



図—7 湾口部の流況変化 (恒流成分)

がわかる。また、図の右下の部分での流速が、現況と比較してかなり小さくなっていることがわかる。海堡撤去の影響がこれほど距離のはなれた地点にも現れることは注目に値する。第三海堡周辺の詳細図を見ると、海面下10 m まで撤去した場合は、流速にばらつきが見られ、乱れが残っているが、20 m まで撤去した場合は、乱れも流速値もいくらか小さくなるのがわかる。

5. おわりに

本研究で開発した修正 ADI 法による多層モデルは、効率的で高精度な計算法であるため詳細計算領域を容易に導入でき、複雑な地形を有する海域においても長期間の計算を行うことができる。東京湾に適用した結果、観測値と計算結果の一致度は良好であった。第三海堡の撤去を検討したところ、20 m の水深まで撤去すれば周辺海域の流況に与える影響は小さくなるのがわかった。

本研究の遂行に際し、運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所の協力を受けた。また、(財)東電記念科学技術研究所から研究費の助成を受けたことを付記する。

参考文献

- 運輸省第二港湾建設局 (1966): 東京湾潮流調査報告書第一報, 107 p.
- 運輸省第二港湾建設局 (1967): 東京湾潮流調査報告書第二報, 111 p.
- 運輸省第二港湾建設局 (1980): 東京湾口航路に係わる潮流計算調査報告書, 217 p.
- 運輸省第二港湾建設局 (1980): 東京湾潮流観測記録解析調査報告書, 413 p.
- 金子安雄・堀江 毅・村上和男 (1975): ADI 法による潮流と汚染拡散の数値計算, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第1号, pp. 3-61.
- 児玉敏雄・川原睦人 (1992): 無反射性開境界条件を用いた多層有限要素法による潮流解析, 土木学会論文集, No. 446/I-19, pp. 89-99.
- 佐藤慎司・岡安章夫・中川 哲 (1991): 東京湾の湾水流動と物質拡散に関する数値シミュレーション, 第4回日本沿岸域会議研究討論会講演概要集, pp. 10-11.
- 土屋義人 (1981): 高潮の発生機構とその極値に関する研究, 科研費報告書, pp. 20-38.
- 藤野正隆・多田 茂 (1992): 多層モデルによる海水流動の数値解析, 日本造船学会論文集, 第10号, pp. 379-393.
- 堀江 毅・金子安雄・村上和夫・細川恭史・亀山 豊 (1976): 潮流計算における境界等の取扱い——特に ADI 法による検討——, 港湾技術研究所報告, 第15巻, 第2号, pp. 251-287.
- 村上和男 (1981): 有限要素法による潮汐流の数値計算, 港湾技術研究所資料, No. 404, pp. 1-95.
- 村上和男・森川雅行 (1984): 有限要素法による二層の潮流及び拡散計算, 港湾技術研究所資料, No. 495, pp. 1-45.
- Maa, J. P.-Y. (1990): An efficient horizontal two-dimensional hydrodynamic model, Coastal Engineering, Vol. 14, pp. 1-18.
- 運輸省港湾技術研究所 (1983): 昭和58年度東京湾潮流調査報告書, 53 p.