

潮流計算における水位制御と流速制御

堀 江 毅*・金子 安雄**・村上 和 男*

1. はじめに

海岸や港湾の整備に伴う流動、水質の影響予測手段として、数理モデルによるシミュレーションが頻繁に利用されるようになった。

本研究は、この種の数値シミュレーションの基本である潮流計算に対して、とくに境界における水位制御と流速制御に着目し、これらを計算領域の流動特性に応じて適当に使い分けることにより、流動現象の再現性の向上をはかることができることを示したものである。

2. 潮流計算の基本方程式と差分式

図-1 に示す座標系において、流体の連続方程式および運動方程式を立て、海底 ($z=-h$) および海面 ($z=\zeta$) の条件式などを用いて各式を $-h \leq z \leq \zeta$ の間で積分すれば次の 3 式が得られる^{1),2)}。

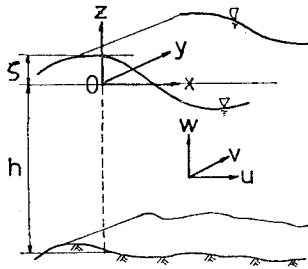


図-1 座標系

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\zeta+h)u] + \frac{\partial}{\partial y}[(\zeta+h)v] = 0 \quad \dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - f v + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

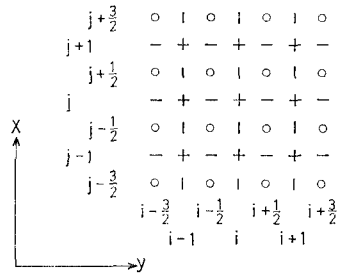
$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + f u + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 ζ : 水面の高さ、 h : 水深、 g : 重力加速度、 C : シェジャー係数、 f : コリオリ係数 ($=2\omega \sin \varphi$, ω : 地球自転の角速度、 φ : 緯度)、 u, v : x および y 方向の $-h \leq z \leq \zeta$ 間の平均流速をそれぞれ示す。

上記 3 式の基本式の差分解法は、従来陽解法によるものが大半を占め、その中でもリーブ・フログ法 (中央差

分法)³⁾ が主体をなしてきた。これに対し、最近陰解法による潮流計算法が開発され、解の収束性、演算時間、流れ (とくに潮汐残差流) の再現性などで優れた点が見出されている。このうち、ADI 法 (Alternating Direction Implicit Method) と呼ばれるものは、Leendertse, J. J.⁴⁾ によって初めて潮流、拡散計算に応用されたもので、筆者らもこの数年この方法による計算をいくつか実施している。このため、以下においては ADI 法による数理モデルを考える。

いま対象海域を図-2 のように格子分割し、点 (i, j) 、 $(i+1/2, j)$ および $(i, j+1/2)$ において式 (1), (2) およ



+ 水位 (ζ), 粗度 (C)
○ 水深 (h)
— 流速 (u)
! 流速 (v)

図-2 格子分割と変数位置

び (3) を差分式に変換する。ADI 法では、時間ステップを 2 分し、まず前半の時間ステップ $(k+1/2)\Delta t$ において式 (1), (2) より

$$\zeta_{i,j}^{(k+1/2)} = -P_{i,j} u_{i+1/2,j}^{(k+1/2)} + Q_{i,j} \dots\dots\dots (4)$$

$$u_{j-1/2,j}^{(k+1/2)} = -R_{i-1,j} \zeta_{i,j}^{(k+1/2)} + S_{i-1,j} \dots\dots\dots (5)$$

なる漸化式に変換して ζ, u を順次求め、これらの値を用いて式 (3) より v を計算する。次に後半の時間ステップ $(k+1)\Delta t$ においても同様に式 (1), (3) より

$$\zeta_{i,j}^{(k+1)} = -p_{i,j} v_{i,j+1/2}^{(k+1)} + q_{i,j} \dots\dots\dots (6)$$

$$v_{i,j-1/2}^{(k+1)} = -r_{i,j-1} \zeta_{i,j}^{(k+1)} + s_{i,j-1} \dots\dots\dots (7)$$

なる漸化式に変換して ζ, v を順次求め、これらの値を用いて式 (2) より u を計算する。ここに、 $P_{i,j}, Q_{i,j}, R_{i-1,j}, S_{i-1,j}, p_{i,j}, q_{i,j}, r_{i,j-1}, s_{i,j-1}$ は $(k+1/2)\Delta t$,

* 正会員 運輸省港湾技術研究所
** 正会員 前運輸省港湾技術研究所

または $(k+1)\Delta t$ 時刻より低レベルの時間において決定される既知数である。

以下、この順序で計算を繰返し、解が安定するまで継続する。なお本法の詳細については他文献^{1),2)}に譲る。

3. 水位制御と流速制御

(1) 境界での取扱い⁴⁾

対象海域の中央領域については式(4)~(7)によって計算できるが、境界においては特別の取扱いを要する。前半の時間ステップのみに注目し、水位制御と流速制御の両ケースの取扱いをまとめると表-1のようになる。

表-1 境界における水位制御と流速制御

境界制御 境界条件	水 位 制 御	流 速 制 御
左端開境界	$R_{IS-1,j} = \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} g$ $S_{IS-1,j} = \varphi_1^{(k)} + \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} g \cdot \zeta_{IS-1,j}^{(k+1/2)}$ 強制水位	$R_{IS-1,j} = 0$ $S_{IS-1,j} = U_{IS-1/2,j}$ 強制流速
右端開境界	$U_{IE+1/2,j} = \frac{1}{\varphi_2^{(k)}} \left\{ \varphi_3^{(k)} + \frac{1}{2} \frac{dt}{ds} \zeta_{IE+1/2,j}^{(k+1/2)} \right\}$ 強制水位	$U_{IE+1/2,j} = u_a$ 強制流速

(注) IS, IE : 第 j 行の水点の始点、終点の x 座標, ds : 格子間隔, $\varphi_1^{(k)}, \varphi_2^{(k)}, \varphi_3^{(k)}$: 時間レベル k において決定される既知数

なお、後半の時間ステップに対しても全く同様の取扱いができる。

(2) 計算例による検討

a) 閉塞性内湾の場合

従来、潮流計算と呼ばれてきたものの大多数は境界において潮汐の干満を与えるいわゆる水位制御方式である。図-3、図-4は、それぞれ東京湾、伊勢湾を2km

メッシュに分割し、湾口より平均大潮 (M_2+S_2) 相当の 0.519m, および 0.633m の正弦波を与えて計算したものの下げ潮最強流時付近を示すものである。これらの図より明らかなように、計算される潮流の流向流速は現地観測結果の傾向をよく再現している。これらの例のように、開境界が1~2面の閉塞性内湾で、海洋など外海の影響をほとんど受けない場合には水位制御方式が適合する。

b) 外海の影響を強く受ける場合

海流(恒流)の影響を強く受ける海域の場合、または、計算機の容量や演算時間などの制約から十分な計算領域が確保できない場合などでは、水位制御のみでは所期の流速、流向を再現することが困難となる。このような場合には、開境界(外海との境界)で流速(または流量)を制御した方が計算は容易となる。

たとえば、加熱期の志布志湾においては湾内水が大きな左回りの環流を形成することがある⁵⁾。これは外海を北上するためと考えられる。そこで、図-5に示されるように、計算領域を ABCD で囲

まれた海域まで拡張し、左右の境界においてそれぞれ、

$$AB: u = -0.45 \text{ m/sec}$$

$$CD: u = -0.64 \text{ m/sec}$$

の一定流速を与え、時間ステップ30秒、格子間隔1kmにて計算し、十分安定した後の流況を示すと同図のようになる。湾内の循環が顕著である。

一方、図-6に示す高松港の例では、計算目的の関係上、格子間隔を200mと小さくする必要があった。このため、計算機性能の制約から十分な計算領域が確保でき

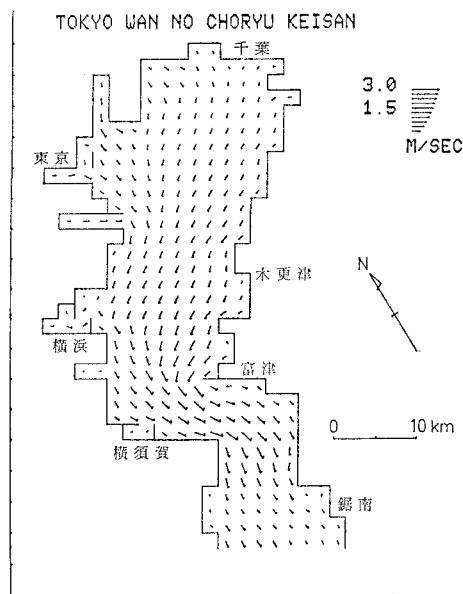


図-3 東京湾潮流 (水位制御)

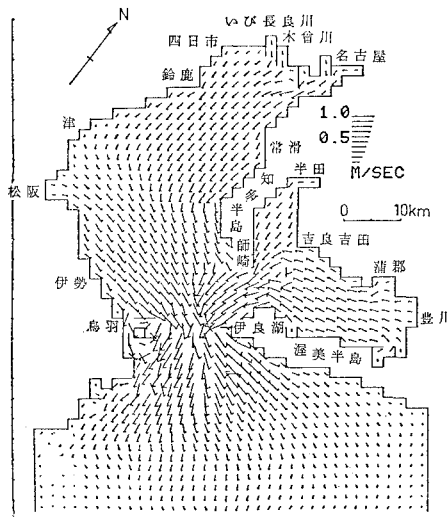
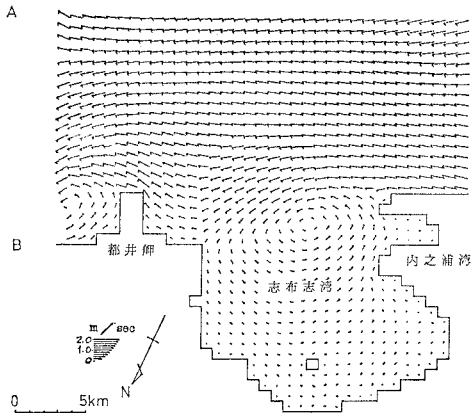


図-4 伊勢湾潮流 (水位制御)



図—5 志布志湾潮流（流速制御，定常流）

ない。ところが，同海域は複雑な地形を形成している瀬戸内海の一部海域であり，複雑な地形に基づく恒流成分が卓越しているものと考えられる。このような海域に対し，境界 AB, AC, および DE において

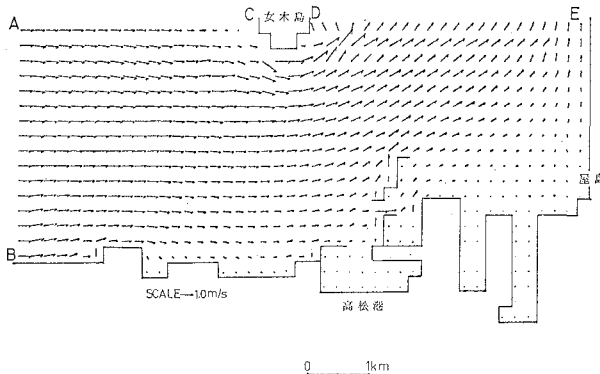
$$AB: u = 1.1 \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \frac{\Delta t}{2}\right) \text{ m/sec}$$

$$AC: v = 0$$

$$DE: v = 0.5 \sin\left(\frac{2\pi k}{T} \frac{\Delta t}{2} - 4 \times \frac{\pi}{180}\right) \text{ m/sec}$$

T : 潮流の周期 (=12 時間), $k=0, 1, 2, \dots$

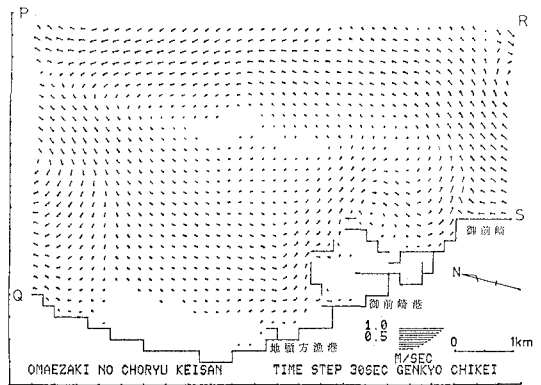
の振動流を与え，時間ステップ ($\Delta t/2$) 15 秒，格子間隔 200 m にて計算したものが図—6 である。本例では，水位制御では得られない速い流速 (1.1 m/sec 程度) が発生し，内部の流向流速はよく制御され，潮位振幅 0.6611 m (高松港検潮所 M_2 潮) の再現性も良好であった。



図—6 高松港潮流（流速制御，往復流）

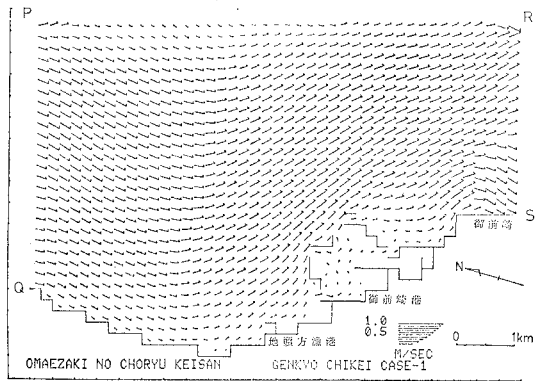
c) 潮汐と海流とが混在している場合

御前崎港を中心とした 9 km×7 km の海域を考える。同海域は駿河湾の南西部に位置し，黒潮分岐流の逆流のため，湾奥から外海に向う 0.05~0.15 m/sec の南流成分が卓越している。さらに同海域では，海流と同規模程度



図—7 御前崎港平均流（水位制御）

の半日周潮流成分が認められる。図—7 は，境界 P,Q,R, および S において振幅は全て同じく 0.607 m，位相は P, Q を R, S に対して 1° 遅れの正弦波水位振幅を与え，タイムステップ 30 秒，格子間隔 200 m にて潮汐計



図—8 御前崎港恒流（流速制御）

算を行い，第 4 周期の平均流を求めたものである。この結果より明かなように水位制御のみによる流動計算では，発生する流速が過小で，現地にみられる南向きの卓越流も再現されていない。そこで，志布志湾の例と同様に，境界 PQ, PR, および RS においてそれぞれ，PQ: $u=0.05$ m/sec, PR: $v=0$, RS: $u=0.0526$ m/sec なる強制定常流速を与えた時の流動計算を行った。その十分安定したと思われる 19 時間後の流況を示すと図—8 のようになり，南流成分が顕著である。次に，潮汐による潮流と海流による恒流との再現性を同時に高めるため，水位制御により得られる流動と流速制御により得られる流動 (図—8) とを合成する。図—9 および 図—10 は，このようにして得られた流況の南流最強時付近，および北流最強時付近を示すものである。さらに，図—11 は合成流の 1 周期間の平均流を示すものである。これらの結果から，潮汐，海流の影響を受ける海域に対しては，水位制御と流速制御

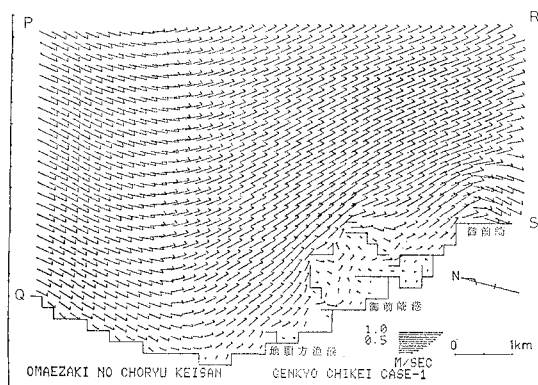


図-9 御前崎港潮流 (水位, 流速制御の合成流)

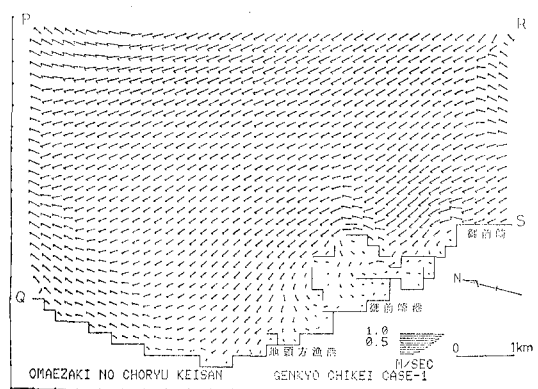


図-10 御前崎港潮流 (水位, 流速制御の合成流)

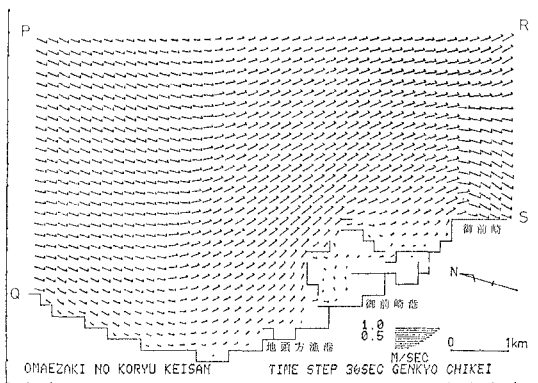


図-11 御前崎港平均流 (水位, 流速制御の合成流)

の作用により海域の流動の再現性を高め得ることがわかる。

以上のような流れの合成は、運動方程式の擬似線型性の仮定に基づいている。周知のように式(2),(3)で表わされる運動方程式は非線型である。そこで、上記計算例のような比較的流れの小さい長波に対してこの仮定がど

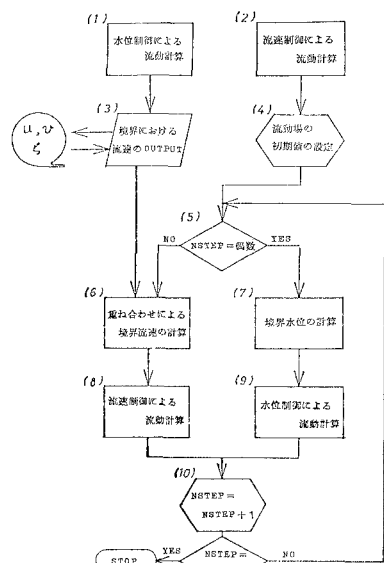


図-12 水位, 流速兩制御の交互使用による計算フロー

の程度合理性を有するかを検証するため、図-12に示す方法によって検討した。すなわち、図示のように(4)で初期値に流速制御による流動場(すなわち図-8)を与え、偶数ステップには(7)で境界水位を計算して(9)の水位制御による流動計算を、さらに奇数ステップにおいては、(6)で境界流速を計算し、それを用いて流速制御による流動計算を行った。この際の境界流速には、図-8で使用した流速値と、水位制御のみの流動計算により発生する境界流速とを重ね合わせたものを使用した。以上の手順によって計算される流動は先の重ね合わせによって得られた結果とほとんど変化なく、両者の間の誤差は高々数パーセントであった。したがって、本計算例のように、潮汐流や海流が比較的弱い場合には、図-12に示したような水位, 流速兩制御を1ステップごと交互に計算するという余分な流動計算を経なくても、個々の制御により得られる流動の重ね合わせで代用できることがわかる。

4. まとめ

以上の結果をまとめると次のとおりである。

(1) 東京湾, 伊勢湾などのような閉塞性内湾に対しては、水位制御による計算が適している。

(2) 海流(恒流)を強く受ける海域, または計算機能力の制約から十分な計算領域が確保できない場合などでは、流速制御による計算が適している。

(3) 流速制御方式として、一定の流向, 流速を与える定常流計算法と、往復流などの非定常流計算が可能である。

(4) 外洋性が強く、海流や潮汐作用が混在している場合には、水位制御と流速制御によるそれぞれの計算結果を重ね合わせるとよい。運動方程式の擬似線型性の仮定は計算例のような長周期で流れの弱い場合には、実用上問題ない。

以上の解析に用いた数理モデルは、差分解法の一つである ADI 法によるものであるが、ここに取扱った項目は他の数理モデルにも共通する問題点であり、今後この種の数値シミュレーションを行うに際して有益な指針になるものと考ええる。

最後に、本文をまとめるに当たり協力頂いた港湾技術研究所海洋水理部 佐藤昭二部長、同 細川恭史君、亀山豊君に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) Leendertse, J. J.: Aspects of a computational model for long-period water wave propagation, RM-5295-PR, The Rand Corporation, May 1967.
- 2) 金子安雄・堀江 毅・村上和男: ADI 法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合について——, 港湾技術研究所報告, 14 巻, 1 号, pp. 3~61, 1975. 3.
- 3) 堀江 毅・金子安雄・村上和男: 潮流の数値シミュレーションについて——特に境界条件と支配因子の取扱い——, 港湾技術研究所講演会講演集, pp. 53~90, 1975. 12.
- 4) 堀江 毅・金子安雄・村上和男・細川恭史・亀山 豊: 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, 15 巻, 2 号, 1976. 6.
- 5) 志布志湾海況調査委員会: 志布志湾海況調査報告書, 鹿児島県, 1970. 3.