

2層モデルにおける鉛直循環流の評価と密度流の数値計算法

村 上 和 男*

1. ま え が き

閉鎖性の内湾域は、その静穏であるという地形的な特性から古くから漁業あるいは港湾に利用されてきた。そのために周辺からの汚濁負荷も多く、また海水交換も小さいことから汚染された海域であることが多い。このような内湾域の海水交換を論じる際に、潮汐残差流による水平循環流と密度流による鉛直循環流の海水交換への効果が大きいことが知られている(村上ら, 1988)。内湾域の鉛直循環流は、例えば、河川から淡水の流入、吹送流、あるいは夏場の成層期などの密度流より発生する。

近年の電子計算機の目覚ましい発達により、潮流や拡散のような問題を流れの3次元性を考慮した多層モデルによって検討することが多くなってきた。従来の潮流計算は、潮流が表層から底層まで比較的均一な流速を持つことから、2次元単層での計算例(金子ら, 1975)が多かった。しかし、吹送流の問題や密度流の問題を考慮する場合、また底泥の移動、底泥からの栄養塩の溶出のような場合には、流れも3次元性を考慮する必要がある。

多層モデルによる流れの計算の場合、取扱いの容易さ及び計算の安定性から内部境界面の位置が固定されたレベルモデルによる計算例が多い。しかし、密度の水平・鉛直分布を考慮した計算において、レベルモデルによる計算はかなり強い鉛直循環流が生じ、上層では常に流出、下層では常に流入という流れのパターンが示されることがある。図-1に示すのは、2レベルモデルで計算した須崎湾での潮流計算結果である。この計算例は、周辺からの淡水の流入量が全体でも2.4 m³/sと僅かであるのに対し、鉛直循環流が強すぎるものと判断される。河川水の流入があるので、平均的にはこのようなパターンは見られるが、現地での流況観測結果(運輸省3建, 1986)に比べても大きすぎると思われる。このような観点から、本研究では密度流を考慮した流れの数値計算において、種々の仮定による計算法での流れの計算を実施し、密度流による鉛直循環流の特性について検討した。

2. 2層モデルにおけるレベルモデルとレヤーモデル

多層モデルの中で最も簡単な2層モデルによって鉛直循環流の検討を行う。2レベルモデルと2レヤーモデルにおける潮流の基本方程式を x 方向について示す。

2レベルモデル:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u_1(\zeta + h_1)] + \frac{\partial}{\partial y} [v_1(\zeta + h_1)] = \frac{1}{\rho_1} (\rho w) \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} + \frac{(\rho w)}{2\rho_1(\zeta + h_1)} (u_1 - u_2) \\ = v_1 f - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) \\ - \frac{g}{2} \frac{(\zeta + h_1)}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \\ - \frac{\gamma^2 (u_1 - u_2)}{(\zeta + h_1)} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} [u_2 h_2] + \frac{\partial}{\partial y} [v_2 h_2] = -\frac{1}{\rho_2} (\rho w) \quad \dots\dots\dots (3)$$

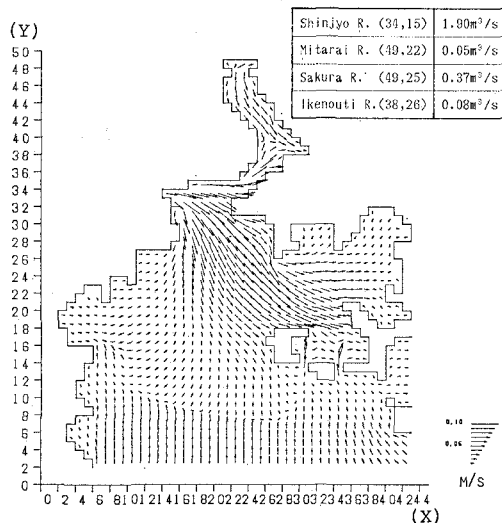


図-1 潮流ベクトル図(2レベルモデル, 上層, 上げ潮最盛時, $f=0.0$)

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所 海洋水理部海域環境研究室長

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{(\rho w)}{2\rho_2 h_2} (u_1 - u_2) \\
& = v_2 f - g \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \right) \\
& \quad - \frac{g(\zeta + h_1)}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - \frac{g h_2}{2\rho_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \\
& \quad + \frac{\gamma_i^2 (u_1 - u_2)}{h_2} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \\
& \quad - \gamma_o^2 \frac{u_2}{h_2} \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \dots\dots\dots (4)
\end{aligned}$$

2 レヤーモデル:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u_1(\zeta + h_1 - \xi)] + \frac{\partial}{\partial y} [v_1(\zeta + h_1 - \xi)] \\
& = \frac{\partial \xi}{\partial t} \dots\dots\dots (5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} \\
& = v_1 f - g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} \right) \\
& \quad - \frac{g}{2} \frac{(\zeta + h_1 - \xi)}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} \\
& \quad - \frac{\gamma_i^2 (u_1 - u_2)}{(\zeta + h_1 - \xi)} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \\
& \quad \dots\dots\dots (6)
\end{aligned}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [u_2(h_2 + \xi)] + \frac{\partial}{\partial y} [v_2(h_2 + \xi)] = 0 \dots\dots (7)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \frac{\partial u_2}{\partial x} + v_2 \frac{\partial u_2}{\partial y} = v_2 f - g \frac{\rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\
& \quad - g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{\partial \xi}{\partial x} + A_h \left(\frac{\partial^2 u_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_2}{\partial y^2} \right) \\
& \quad - \frac{g(\zeta + h_1 - \xi)}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial x} - \frac{g(h_2 + \xi)}{2\rho_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial x} \\
& \quad + \frac{\gamma_i^2 (u_1 - u_2)}{(h_2 + \xi)} \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2} \\
& \quad - \gamma_o^2 \left(\frac{u_2}{h_2 + \xi} \right) \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \dots\dots\dots (8)
\end{aligned}$$

ここに、Suffix 1 は上層の、Suffix 2 は下層の値であることを示す。これらの記号の定義は図-2 に示す。また、 γ_o^2 は底面の摩擦係数、 γ_i^2 は境界面での抵抗係数、 g は重力加速度、 f はコリオリ係数である。

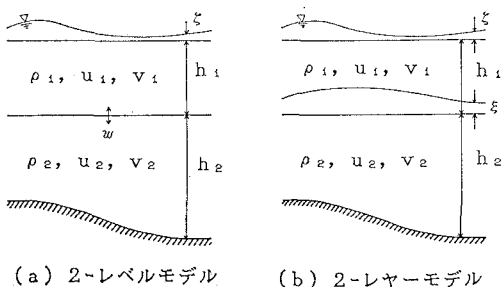


図-2 変数の定義 (左: レベル, 右: レヤー)

2 レベルモデルと 2 レヤーモデルの相違点は、下層の連続条件式において流入出量の差を、鉛直流 (式-3) で表すか内部境界面の変動 (式-7) で表すかであり、本質的には大差ないものと考えられる。運動方程式においても、式(8)の右辺第 3 項が式(4)にはないこと、境界面の変動による層厚の変化等が大きな相違点である。しかし 2 レヤーモデルの場合、内部境界面の変動というきわめて不安定な現象を再現するために計算が非常に難しくなる。そこで、内部境界面の変動の代わりに鉛直流によって水塊の上下運動を表現する 2 レベルモデルが一般に用いられている。しかし、本来は 3 次元の流れの支配方程式を、それぞれの物理的な根拠を持った仮定により簡単化されたものが単層、2 レベル、2 レヤーモデルである。したがって、それぞれのモデルにはそのモデルに合った利用の方法があるものと考えられる。そこで、各々のモデルについて数値実験によりその特徴について検討した。なお、密度の拡散に関しては上層・下層でそれぞれ拡散方程式をといている。上下間の混合は、2 レベルモデルの場合は鉛直流と鉛直拡散係数、2 レヤーモデルの場合は式 (9) の連行量を考慮している。

$$E = 2 \times 10^{-3} \left[\frac{|u_1 - u_2|}{\sqrt{\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} g h_1}} \right]^3 \dots\dots\dots (9)$$

3. 矩形湾における密度分布を考慮した流れの計算

密度分布を考慮した場合の 2 レベルモデルと 2 レヤーモデルでの流れの比較を、簡単な形状の矩形湾での計算を実施して行なった。表-1 に矩形湾での流れの計算条件を示す。

図-3 に 2 レベルモデルでの計算結果の流速ベクトル図を示す。(a) が上げ潮最強時の上層と下層の、(b) が下げ潮最強時の上層と下層の流速ベクトル図である。同様の図面を、2 レヤーモデルについては図-4 に示す。

図-3 の 2 レベルモデルの結果をみると、湾奥部は潮時に関係なく上層で流出、下層で流入となっており、そ

表-1 矩形湾での流れの計算条件

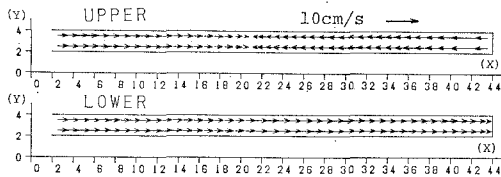
湾の規模	幅 1 km, 奥行 20 km
格子間隔	500 m
タイムステップ	20 s
層厚	$h_1 = 5$ m, $h_2 = 15$ m
潮位振幅	$\zeta = 20$ cm, $\xi = 15$ cm
境界密度	$\rho_1 = 1.020$, $\rho_2 = 1.022$
河川流量	上層に $40 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\rho_0 = 1.0$)
拡散係数	$E_x = 10 \text{ m}^2/\text{s}$, $E_z = 0.001 \text{ m}^2/\text{s}$
コリオリ係数	$f = 0.0$

の大きさも他のモデルに較べて大きい。これに対して、図-4 の2 レヤーモデルの場合は、上層では河川水の流入の影響を受けて潮時に関係なく流出しているが、下層では上げ潮時に流入、下げ潮時に流出している。下層から上層への連行を考慮しているので平均的には上層流出・下層流入の鉛直循環流はみられるが、その程度は2 レベルモデルに比べるとかなり小さい。また従来から用いられている単層モデルの場合は、上げ潮時に流入、下げ潮時に流出と潮時に即した流れのパターンであり、平均的には河川流量分だけ流出している。

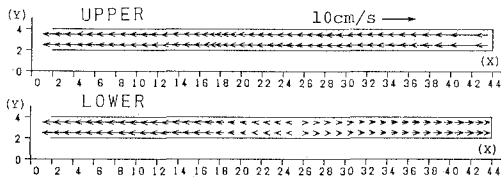
図-5 に示すのは、比較的湾奥部の格子での1 周期間の流速の変動を見たものである。どのケースも潮時に従って変動する傾向は同じであるが、2 レベルモデルの上層での流出速度が大きく、この結果からも鉛直循環流が大きく算定されているのがわかる。2 レベルモデルと2 レヤーモデルにおいて、上下層の密度差は存在するが、

各々の層での密度を固定した場合の計算結果は単層モデルの場合とほとんど同じ結果を示している。このことから、鉛直循環流の形成に寄与するのは上下間の密度差ではなく、密度の水平分布であることがわかる。

このような流れの計算結果のモデルによる差が何故に生じるのかについて考察した。その模式を図-6 に示す。この図において、① 初期状態として上層の密度 ρ_1 と下層の密度 ρ_2 ($\rho_2 > \rho_1$) を一定とする。この海域に湾奥側から淡水 (ρ_0) が流入する場合を考える。② 湾奥の上層に淡水が流入した結果として、上層の流体に水位勾配と密度勾配が生じる。この水位勾配と密度勾配から生じる圧力の大小比較を行なうと、式 (6) においては $g(\partial\zeta/\partial x) > (g/2\rho_1) \cdot (\zeta + h_1 - \xi) \cdot (\partial\rho_1/\partial x)$ となり、また式 (8) においては $g \cdot (\rho_1/\rho_2) \cdot (\partial\zeta/\partial x) < (g/\rho_2) \cdot (\zeta + h_1 - \xi) \cdot (\partial\rho_1/\partial x)$ となる。したがって、これらの大小の関係を上下層の運動方程式に代入すると、上層では流出 ($u_1 < 0$)、下層では流入 ($u_2 > 0$) 流れが発生する。③ 下層において湾奥向きの流れ (流入) が生じた場合、下層の連続条件式より、2 レベルモデルでは上向きの鉛直流が生じ、2 レヤーモデルでは内部境界面の上昇が生じる。④ 2 レベルモデルの場合、鉛直流によって移送された下層の密度の重い水塊は上層において密度の軽い流体と完全混合する。したがって上層の密度勾配が減少する。このことは、式 (2) の右辺第4項の $\partial\rho_1/\partial x$ が小さくなることを意味し、この密度勾配の変化は上層での流出速度を増加させる方向に働くことを意味する。これに対して2 レヤーモデルでは、内部境界面の上昇から生じる圧力勾配の変化は、式 (8) の右辺第4項の $\partial\zeta/\partial x$ が大きくなることを意味し、この圧力勾配は下層の流入速度を抑えるように働く。このようなプロセスの差から、2 レベルモデルと2 レヤーモデルでの鉛直循環流の大きさに違いが生じてくるものと考えられる。

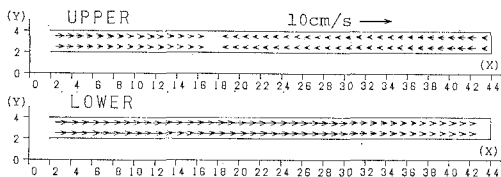


(a) 上げ潮最強時

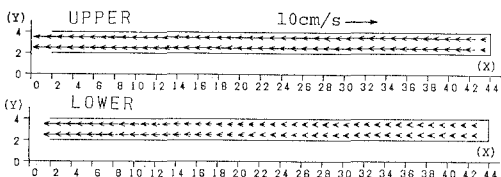


(b) 下げ潮最強時

図-3 潮流計算結果 (2レベルモデル)



(a) 上げ潮最強時



(b) 下げ潮最強時

図-4 潮流計算結果 (2レヤーモデル)

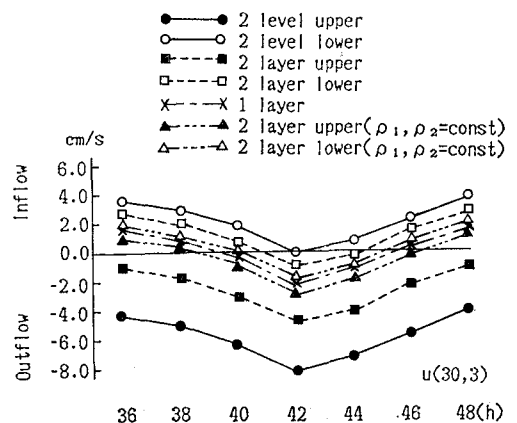


図-5 一周期間の流速の時間変化曲線

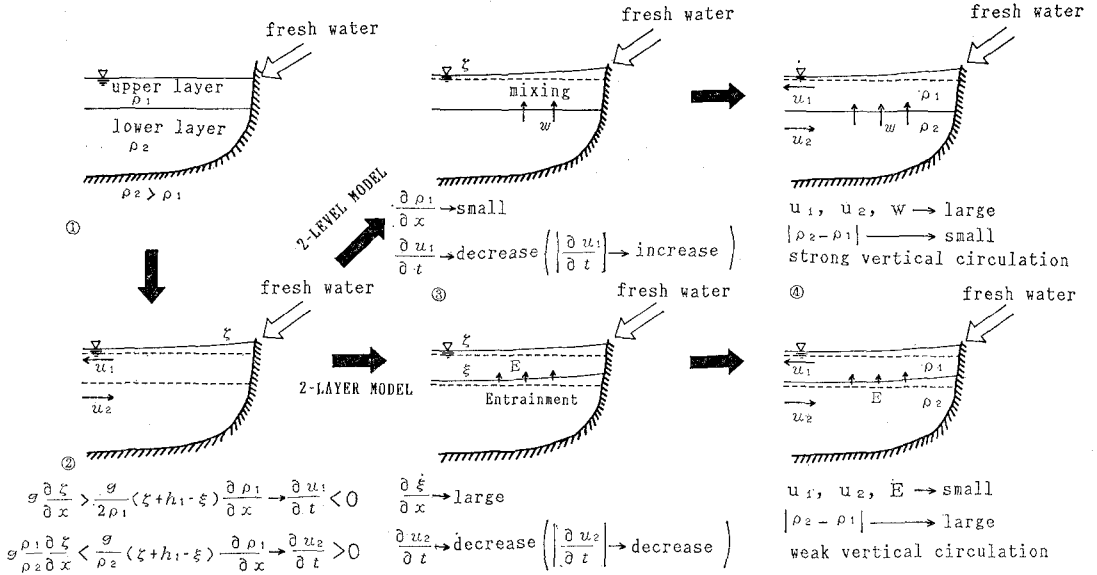


図-6 鉛直循環流の発生プロセスの模式図

以上のような観点から、密度流を考慮した流れの数値計算結果から、各々の数値をそれぞれの支配方程式の各項に代入して、鉛直循環流に寄与する項あるいは内部境界面の挙動に寄与する項は何なのかについての検討を行なった。その結果を図-7に示す。右側が2レベルモデルの場合で左側が2レイヤーモデルの結果である。この結果は、簡単のために境界での潮位振幅がない場合の計算結果について示してある。この図から両者のモデルの結果において、上層の密度分布と内部境界面の水位に大きな差異があることがわかる。上層に関しては、両者とも僅かではあるが水面勾配による

圧力が密度勾配による圧力よりも大きく、これが上層での流出の原因となっている。下層に関しては、2レベルモデルの場合、表面水位からの圧力勾配よりも上・下層での密度勾配による圧力の和の方が若干大きいので流入になるのに対し、2レイヤーモデルの場合は、上層の密度勾配による圧力が大きく、表面と境界面の水位勾配から

2-LAYER MODEL

2-LEVEL MODEL

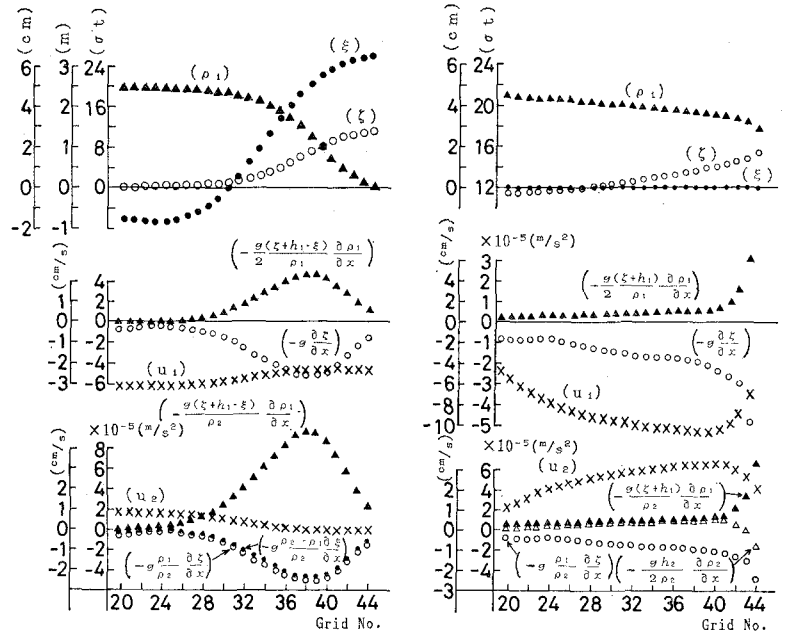
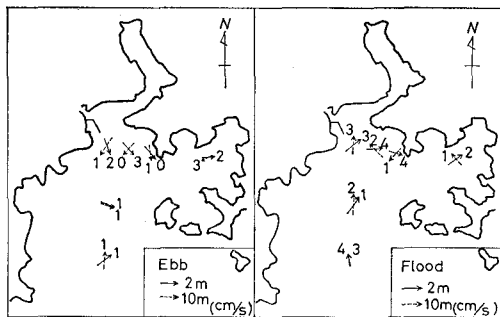


図-7 支配方程式における各項の比較 (左: 2レイヤー, 右: 2レベル)

生じる圧力の和よりも若干大きく、これが流入の外力となる。なお、支配方程式には水位勾配と密度勾配からの圧力項ばかりでなく、加速度項、粘性項も存在する。また、図-7の値は初期状態から48時間経過後の計算結果からの各項の算定値であるので、必ずしも全ての現象を説明しているものとは思われないが、2レイヤーモデル



図—8 須崎湾での流況観測結果 (運輸省3建, 1986)

における内部境界面, 2 レーモデルにおける上層の密度勾配, それにともなう鉛直循環流等にそれらの特徴が出ているものと思われる。

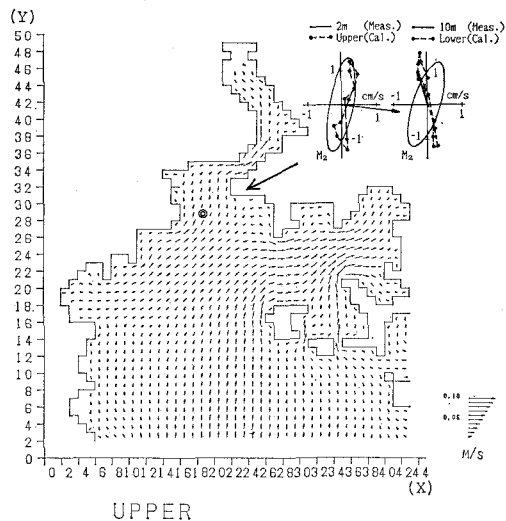
4. 須崎湾での計算と現地データとの比較

図—8 に須崎湾での潮流の観測結果を示す (運輸省3建, 1986)。また, 須崎湾における2レベルモデルの結果を既に図—1 に示した。この結果は, 河川からの流入量が僅かであるにもかかわらず, 非常に大きな鉛直循環流を示しており, これは現地の観測結果と比較してみても不自然である。そこで, 2 レーモデルによる須崎湾の潮流計算を実施した。その結果を図—9 に示す。この図は上げ潮時の上層のベクトル図であるが, 全体的に湾奥に向かう流れとなっている。また, 平均的には上層で流出, 下層で流入というパターンを示している。また図中には, ある地点での計算結果と現地観測結果の比較がホドグラフによって示されている。この計算結果は完全に満足できるものではないが, 傾向は比較的合っているものと考えられる。

5. まとめ及び今後の問題点

矩形湾及び須崎湾を対象として, 密度分布が存在する場合の2レベルモデルと2レーモデルによる鉛直循環流の評価を数値実験により検討した。本研究においては, 密度分布が存在する場合の2レベルモデルによる計算で過大な鉛直流が算定され, これによる過大な鉛直循環流が形成されるプロセス (図—6) が知られた。この点に関しては, 2 レーモデルによりかなり改善された。

しかし, 本研究における2レーモデルは, 便宜上上層と下層に分けており, その各々で密度の拡散を仮定しているが, この内部境界面が物理的に何を意味するのかは不明である。また, 上層と下層の密度差 ($\rho_2 - \rho_1$) が小さくなると, 内部境界面の振幅が非常に大きくなって計



図—9 潮流ベクトル図 (2 レーモデル, 上層, 上げ潮最強時)

算が不安定になる性質を持っている。また連行量の算定に関しても, 風・波等による乱れエネルギーとの関連, 河口部での取り扱い等の難しい問題がある。更に, 2 層以上の多層モデルを考えた場合には, レベルモデルによる計算を余儀なくされる。このような場合に, 密度分布の影響を計算にどう反映させるかが重要な問題となる。

以上のことから, 潮流計算におけるモデルの選択法としては, 全般的にある海域の平均的な流況を知る目的であれば単層モデルで十分である。また, 鉛直方向の運動を考慮した問題に関しては, 密度流を考慮した場合には2レーモデルで, 考慮しない場合には2レベルモデルで計算するのがよいものと考えられる。

河口付近の流れの問題は, 河川水の流出, 河口の土砂の堆積, シルテーション, 内湾域の環境問題等数多い。密度流の局所的な運動のメカニズムに関してはいくつかの優れた研究例 (例えば, Nakatsuji, 1989) があり, これらの成果を広域の数値計算に取り入れる必要があるであろう。

参考文献

- 運輸省第3港湾建設局他 (1986): 須崎地区水質影響予測調査報告書, 539 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, 港研報告, 14 巻, 1 号, pp. 1~61.
- 村上和男・白井正生 (1988): 密度流を考慮した海水交換に関する水理模型実験, 港研資料, No. 625, 29 p.
- Nakatsuji, K. (1989): Turbulent entrainment in internal hydraulic jumps and buoyant surface jets, Rep. for the MEC, Grant No. 62550375, 1987-8, 89 p.