

海域における鉛直流れの数値解析法について

Numerical Analysis on Vertical Flow in Estuaries

港湾技術研究所海洋水理部 正 員 堀 江 毅

1. はじめに

海上交通、水産業やレクリエーションの場として幅広い利用空間を提供している海域において、海水の流れは周辺の自然条件を特徴づける極めて重要な役割を果している。ところが、海域の流れは、対象とする領域が広範囲に及ぶほか、境界の条件や支配因子が多く、複雑となり、実測によっても一般的な流れを把握することは容易でない。このため、海域流れの調査研究はその目的に応じて対象範囲や時間スケール、流れに及ぼす要因を採択し、精度的にバランスのとれた解析方法を見出していく必要がある。海域の流れは通常の場合、水平方向が鉛直方向に比して卓越しているため、多くの現象は層的に一樣とみなした平面二次元流れの解析によってかなりの程度まで説明されるが、吹送流、密度流や水質分布などを扱う場合にはより局所的な渦流や鉛直流れを伴った三次元的な流れの解析が要求される。

したがって本文では、三次元流れの解析に伴う2、3の問題点の紹介とその対処法について提案することとした。

2. 沿岸海域における鉛直流把握の実態

沿岸海域において定常的に行われている流れの観測のほとんどは水平流であって海面近傍に限られ、鉛直流については極めて乏しい¹⁾²⁾。これは、鉛直流が水平流に比べて小さいことと、現場の計測技術が十分確立していないこと、およびこのような微弱流が物質の拡散、生物過程、水質を決定する上においてどの程度重要であるかに対する認識が弱いためと考えられる。

図-1は、大阪湾泉南沖5kmの固定点において超音波流速計により測定された上層および下層付近の水平流速2成分および鉛直流速の記録例を示したものである¹⁾。この例からも明らかなように、水平流2成分(X成分、Y成分)は振幅5~15cm/s、周期的12時間の周期流れの成分が顕著であるのに対し、上下層とも鉛直流の絶対値は小さく明確な周期性もみられない。25時間の連続観測値から平均をとると0.01cm/s程度のオーダーとなり、これは現在の現場用流速計の精度や計測技術の水準をはるかに越えている。また、鉛直流の標準偏差は、単純平均や2時間の移動平均などから算出すると1cm/s程度となり、鉛直拡散係数に対する寄与も水平のそれに比して2桁程度小さい。

このように、鉛直流は水平流に対しても、またその絶対値からいっても小さいため、現地海域においてこれを正確に把握することは極めて難しい状況にある。ところが、単粒子としてとらえた10ミクロン径級の微細粒子の沈降速度や、表-1

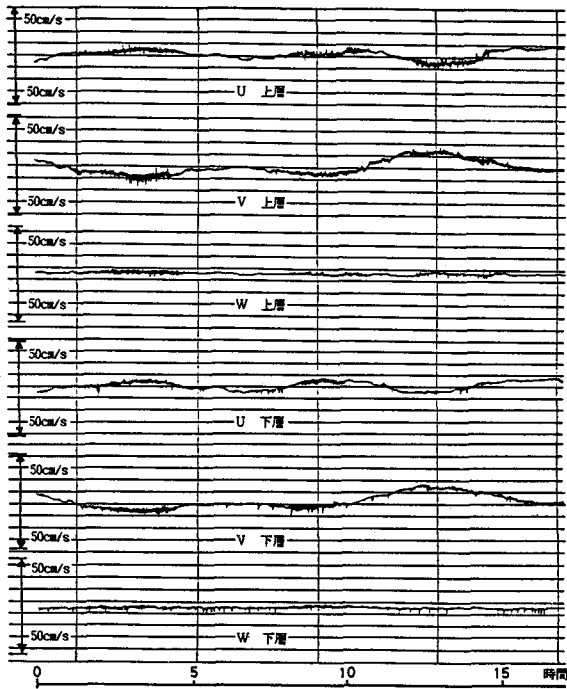


図-1 潮流実測値記録例¹⁾ (春の観測より)

に示されるように、日当りに移動するプランクトンの移動速度³⁾とこの鉛直流の大きさはほぼ同一のオーダーとなることから、沈降や生物過程をとり込んだ解析では鉛直流の影響を無視することができなくなる。さらに、流れや物質分布の解析において鉛直的にはmの空間スケールに対し、平面的にはKmオーダーの空間スケールで考えることが多く、この意味から、水平流より3桁程度小さい鉛直流もそのフラックスからみれば十分水平成分に対応するオーダーとなる。

3. 三次元流れの解析に基づく鉛直流の算出方法

(1) 支配方程式

このように実測や水理模型実験において鉛直流そのものを測定することが困難な状況のもとでは、数値シミュレーション法により推定するののも一つの方策である。流れを表す支配方程式はつぎの水平2成分および鉛直成分の運動方程式および連続の式である。

すなわち、

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f u - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \nu_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f v - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu_x \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \nu_z \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g + \nu_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \nu_z \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \dots\dots\dots (3)$$

および、

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

である。

式(3)はz方向の運動方程式であるが、ここにおいて $w \approx 1$, $u, v \approx 10$, $x, y \approx 10^3$, $z \approx 10^3$, $g \approx 10^3$, $p \approx 10^6$ (いずれもC. G. S.) として各項のオーダー比較をすると、右辺第1, 2項が他の項に比して圧倒的に大で、ほぼこの2項で均合っているものと仮定できる。さらに、

$$p = 0 \quad (at \quad z = \zeta : \text{海面}) \dots\dots\dots (5)$$

表-1 植物プランクトン, デトライタス等の沈降速度測定値

対 象	研究者 (年)	沈降速度
植物プランクトン		(m/d)
藻 (algae)	Imboden (1974)	0.1 ~ 0.4
植物プランクトン	Smayda (1970)	0 ~ 30
珪藻		
Nitzschia seriata	Smayda (1965)	0.26 ~ 0.5
Skeletonema costatum	Smayda (1966)	0.31 ~ 1.35
Thalassiosira nana	Smayda (1965)	0.10 ~ 0.28
死細胞	Smayda (1970)	< 1 ~ 500
動物プランクトン		
コペポダ類	Gardner (1933)	36 ~ 720
デトライタス		
デトライタス	U. S. Army (1975)	0 ~ 2
糞 粒	Smayda (1971)	72 ~ 210
糞 粒	Turner (1977)	550 ~ 860
糞 粒	Fowlerら (1972)	53 ~ 411
けん濁物質		
新生けん濁物	Burns ら (1980)	
1 ~ 10μm		0.24
10 ~ 64μm		1.54
64 ~ μm		2.32
平 均		0.6
夏期三陸沖けん濁物	西沢 ら (1981)	1

とすれば式(3)は、

$$p = \rho g (\zeta - z) \dots\dots\dots (6)$$

となり静水圧分布の式となる。

式(6)を式(1), (2)に代入し、さらに式(1), (2)を z に関し海底から海面まで積分して u, v を鉛直断面平均流速 U, V に置きかえ、海底および海面の条件式と式(4)を用いることにより、水平二次元の u, v, ζ (水位) に関する3つの関係式が得られる。これらの3式を離散化して解くのが水平二次元のモデルであり、多くの流れはこの方法により求められる。潮汐流や高潮のように広範囲に及ぶ二次元流れの特性はこの種の解析により再現することができる。

(2) 水平流が鉛直流に対して卓越する場合の流れの解析

内海、内湾のような大領域においては、吹送流、密度流などが時として海域の流れを強く支配している。この場合には、2層またはそれ以上の層を設けて塩分、水温、風などの分布を外力として付加する。風の流れに対する効果は大であるが、風の方向、強さ、頻度をどうとり入れるかについて判断を要する。また最近では生物過程をとり入れた水質解析が行われるようになり、上下層での生物作用や鉛直移送混合をとり入れるため多層流れの解析が要求される。既述のように、絶対値からみれば小さい鉛直流も物質の移送拡散や水質分布に対する影響力は決して小さくないため、鉛直流の算定法はこれらの解析の精度を支配する重要なポイントとなる。

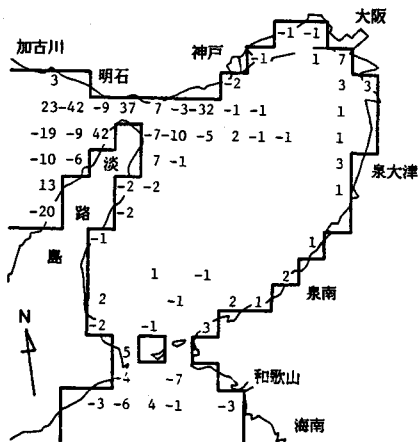
一般海域に対する三次元流れのモデルでは、鉛直方向の運動量保存は無視し、式(1), (2)および(4)を各層毎に z に関して層厚で積分した式により各層の u, v, w および水位 ζ を算出する。

図-2は、大阪湾に対し、この種の3層モデルにより上層厚3m、中層厚5m、格子長4Km×4Kmで、境界よりM₂分潮の潮汐振幅と淡水流入による塩分希釈による密度変化を考慮して求めた流れの鉛直流について、図-1とほぼ同一地点の経時変化を示したものである。4~5潮汐(48~60時間)以降では流れはほぼ周期的となり計算値は安定状態に達しているものと判断される。-3m層、-8m層ともに同位層で、図上では大きさもほとんど同じで0.01 cm/s以下の周期流れとなっている。このような鉛直流計算値を計算が十分安定に達したと考えられる84時間から96時間の1潮汐間において平均したものが図-3である。図中の数字は1/1000 cm/sを単位とする鉛直流の大きさで、正は上昇流を、負は下降流をそれぞれ表している。明石付近では局所的・一時的に0.1 cm/sを超える鉛直流も現れるが、湾内部は大概0.01 cm/s以下であり、また、湾奥部で上昇、明石海峡と紀淡海峡付近では下降の大きな鉛直循環流の生じていることがよみとれる。図-1の実測値と比較すると、流れの大きさのオーダーはほぼ同じといえるが、計算値にみられるような明確な周期性は実測では認め難く、再現性の良否をこれだけの結果のみから判定することは適切でない。

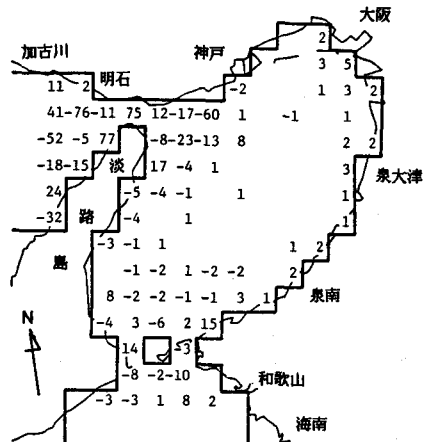
一方、計算値の方においても、モデルの種類に依存することはもちろんのこと、同一モデルであっても層数や層厚のとり方によって算出される結果は異ってくる。その一例として、2層レベルモデルに対し、上層厚を3mとした場合と、上層厚を8mとした場合とについて流れの計算を行



図-2 鉛直流計算値経時変化(3層レベルモデル, 夏季)



(1) 上層-中間層 (-3 m 層)



(2) 中層-下層間 (-8 m 層)

図-3 鉛直流分布 (1 潮汐平均, 単位 1/1000 cm/sec. 3 層モデル)

ってみる。その他の条件は先の3層レベルモデルによる計算条件と同一のものを用いる。図-4はこうして算出された鉛直流の経時変化を示したものである。図-4でみる限り-3 m層と-8 m層の鉛直流の大きさ、位相ともにはほぼ同じで、また図-2に示す先の3層レベルモデルによる結果とも大差ないようであるが、これらの鉛直流を1潮汐間にわたって時間平均すると図-5のようになる。

図-5によると、上層厚3 mの場合も8 mの場合も3層モデルによる場合と同様共に湾奥で上昇、明石・紀淡両海峡側では下降となる

大きな鉛直循環流がみとめられるが、その強さは3層の場合に比して2層の場合の方が幾分小さくなっている。これは層数が減少することにより海水の運動が抑えられるためと思われる。

上述のように計算される鉛直流は層数や層厚によって変化するほか、基本式の離散化(ここでは差分方式)の相違によっても算出される鉛直流は異なり、これを検証するデータも少ない。この場合、鉛直流を評価するにはこれらの流れによって決定される水質分布の再現性から間接的に確認

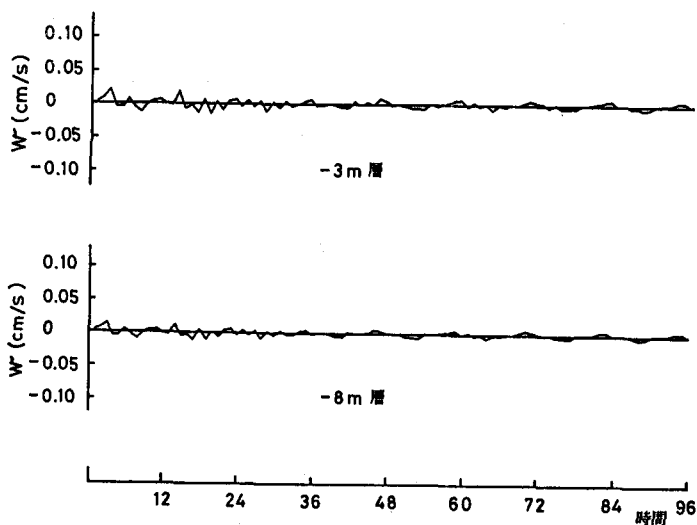
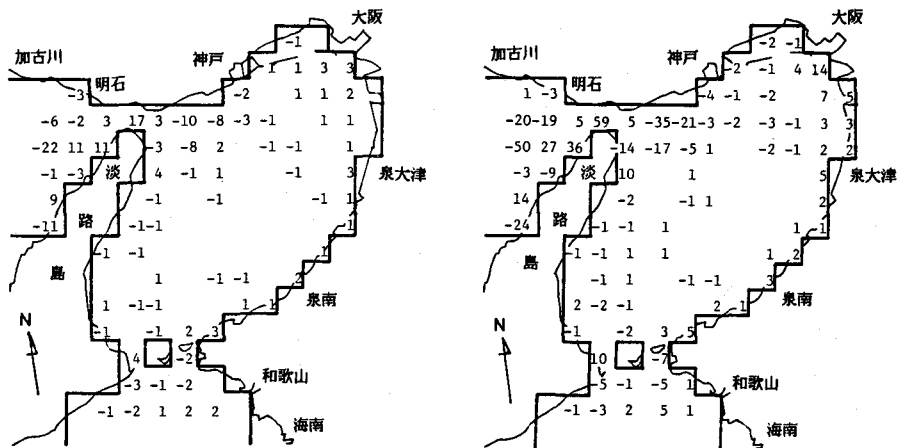


図-4 鉛直流経時変化 (2層レベルモデル, 夏季)



(1) - 3 m 層

(2) - 8 m 層

図-5 鉛直流分布 (1 潮汐平均, 単位 1/1000 cm/sec. 2 層モデル)

することができる。

水質分布を求めるモデルとして、植物プランクトンの光合成による内部生産、バクテリアによる分解・溶出過程などに物理的な移流拡散過程をとりこんで COD, $\text{PO}_4\text{-P}$, O-P , DO などと計算する物質循環モデル^{5),6)}を考える。このモデルに先の 3 層モデルによる流れを用いて大阪湾の現況水質計算を行い、湾全体としての物質フラックスと現存量を示したものが図-6 である。図中に示される各値は物質循環モデルの組立てに依存することはいうまでもないが、各水質項目ともに鉛直フラックスは沈降、分解、溶出、消費などの項に比しても大きく、鉛直移流の項、すなわち鉛直流がいかに重大なはたらきをしているかが理解できよう。

(3) 鉛直流が水平流と同規模

または卓越する場合

一般の海域において天然の条件の下で鉛直流が水平流より卓越するのは稀であるといつてよい。ここでは人工エアレーションや海上工事などにより鉛直流が生起または助長される場合の流れを対象とする。このような流れにおいては数十 cm/s から m/s におよぶ鉛直流が発生するため、水平流に対して無視しがたく、(2)で述べたような解析法では不都合が生ずる。

すなわち、(2)で述べた方法で

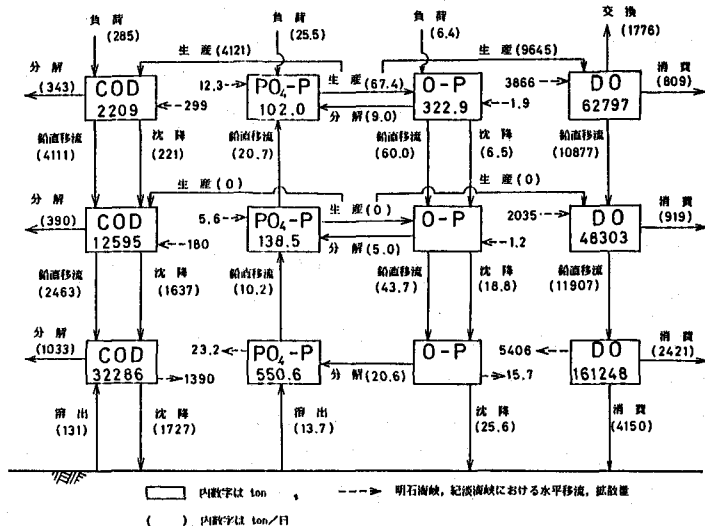


図-6 物質循環フラックスおよび物質現存量

は散気管直上の上昇流，または土砂投下点直下の下降流はそのすぐ隣の格子のそれぞれ下降流，上昇流と補償し合い，鉛直循環流が水平方向に拡がらない。これは，式(3)の右边第3項以下の寄与が大きくこれを無視していることに起因していると考えられる。

鉛直方向の運動量を考慮する例として簡単のため鉛直二次元系で考えるとすると，式(1)，(3)および(4)より

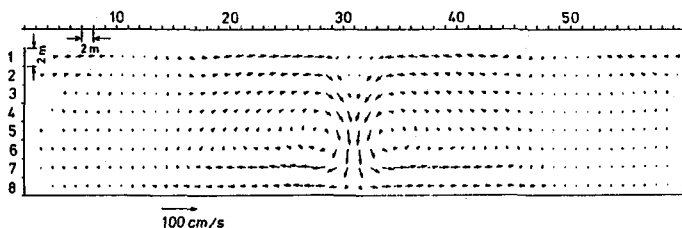


図-7 直投土砂による誘起流れ(投下後60秒)

$$u_{i,k}^{n+1} = \xi_{i,k} + \frac{dt}{dx} (p_{i-1,k} - p_{i,k}), \quad w_{i,k}^{n+1} = \eta_{i,k} + \frac{dt}{dz} (p_{i,k-1} - p_{i,k}) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここに， ξ ， η は時間ステップ n において既知の定数である。 u ， w の未知数2個に対して式(7)，(8)で計3つの条件式となり，式(7)より求められる u ， w が式(8)を満たすとは限らない。このため圧力の第 ℓ 回反復値 $p_{i,k}^{\ell}$ を次式

$$p_{i,k}^{\ell} = p_{i,k}^{\ell-1} - \beta D_{i,k} = p_{i,k}^{\ell-1} - \frac{\beta_0}{2dt} \left(\frac{1}{dx^2} + \frac{1}{dz^2} \right) \left\{ \frac{1}{dx} (u_{i+1,k} - u_{i,k}) + \frac{1}{dz} (w_{i,k-1} - w_{i,k}) \right\} \dots\dots (9)$$

で表し，式(7)，(9)を反復使用することにより式(9)の D が所定の収束定数より小さくなるまで繰返す。

竹内⁷⁾，堀口⁸⁾らはそれぞれ非定常密度流，およびエアレーションによる鉛直流れの解析に対し上記のような手法を適用している。

本法適用例として，水平2m格子，鉛直2m層(全8層)の鉛直二次元系において，厚さ1cm当り32kgの土砂(沈降速度50cm/s相当分)を海面より投下した場合に生ずる流れを投下後60秒について示したものが図-7である。投下直後では2m/s以上の鉛直流が算出され，また鉛直循環流は大きくなって(2)の解法に比しより実態に近いと思われるが，このような強い鉛直流についても未だその実態が確認されているわけではなく，実際の現地調査や工事中の計測を通じて今後明らかにしていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) 村上和男・森川雅行，港湾技術研究所報告，Vol.22，№2，1983.6. pp175 - 211.
- 2) 鷺見栄一，公害資源研究所い報，Vol.4，№1，1974.5. pp21 - 31.
- 3) 細川恭史・堀江 毅・三好英一・加藤道康，港湾技術資料，№433，1982.9. 26p.
- 4) 堀江 毅，港湾技術資料，№360，1980.12. 222p.
- 5) 堀江 毅，細川恭史，港湾技術研究所報告，Vol.22，№3，pp159 - 205.
- 6) 堀江 毅・細川恭史，第30回海岸工学講演会論文集，1983.11. pp546 - 550.
- 7) 竹内智行，水産工学研究所報告，第3号，1982.
- 8) 堀口孝男，第31回海岸工学講演会論文集，1984.11. pp710 - 714.