第24回水理講演会論文集　1980年２月

淡塩二成層からの表層取水における混合効果
THE EFFECT OF MIXING FOR SELECTIVE WITHDRAWAL FROM A FRESH-SALT WATER SYSTEM

北海道大学　正会員　○吉田　静男
塚田　昌司

1．はじめに

表層取水の問題は、水平に流れている密度成層流が何らかの構造物を越える直前までの流れ構造を明らかにするそれと同じである。構造物を越えた後の流れの問題としては lee wave があげられる。この両者の流れ場を支配する方程式は、u, wをそれぞれ主流方向(x)、及び、鉛直方向(z) の流速成分とし、非粘性を仮定すれば次式で与えられる。

$$\frac{d^2\tilde{\Psi}}{dx^2}+\frac{d^2\tilde{\Psi}}{dz^2}+\frac{gz}{\rho_s}\frac{d\rho}{d\tilde{\Psi}}=\frac{1}{\rho_s}\frac{dH}{d\tilde{\Psi}}=f(\tilde{\Psi}) \tag{1}$$

ここでρは密度、ρ_sは基準の位置での密度、$(\rho/\rho_s)^{1/2}u=\partial\tilde{\Psi}/\partial z$, $(\rho/\rho_s)^{1/2}w=\partial\tilde{\Psi}/\partial x$, $H=\mathrm{p}+(u^2+w^2)/2+\rho gz$である。(1)式は Yih[1] によって導出されたものであるが、彼は、さらに $d\rho/d\tilde{\Psi}$ と$dH/d\tilde{\Psi}$ が$\tilde{\Psi}$の一次式で与えられる場合の解析を行ない、これを底部 line sink の場合にあてはめた。この場合の支配方程式は次式で表現できる。

$$\frac{d^2\Psi}{d\xi^2}+\frac{d^2\Psi}{d\zeta^2}-F^{-2}\zeta=-F^{-2}\Psi \tag{2}$$

ここで $F=U/d\sqrt{\beta g}$, $U=\sqrt{\rho/\rho_0}\,U'$, $\xi=x/d$, $\zeta=z/d$, $\Psi=\tilde{\Psi}/Ud$, $\rho=\rho_0(1-\beta y)$, $\beta=(\rho_0-\rho_1)/\rho_0 d$, ρ_0, ρ_1 は水底及び水表面での密度，d は全水深，g は重力加速度，U'は上流遠方でのx方向流速である。Yihは(2)式の解の形式から $F\leqq 1/\pi(\fallingdotseq 0.318)$ において sink 上部によどみ領域が発生し、流動層との間に dividing line が発生すると推論した。これに対しDebler[2]は、実験的にこの臨界値が0.24であることをたしかめており、粘性効果を考慮するならば、Yih の理論結果は、ほぼ立証されたといってよい。

我が国では、大西・日野[3] が(2)式を軸対称の成層流にまで拡張し、吸込高さによる流れ構造を解析した。吉田[4] は彼らの模型実験における取水時間がきわめて短いことに注目し、取水時間が長くなることによって何らかの混合効果が生じるのではないかと考え、以下の検討を行なった。

まず、長時間取水を可能ならしめるため、塩水の上に淡水を流し、せきを用いて表層を取水した。仮に、混合が無視できるとしたなら、流線に沿って(1)式中のHが一定となるから、水表面、及び、界面において次式が成立するはずである。

$$\text{水表面}\quad \frac{q_s^2}{2}-\frac{U_s'^2}{2}=g\{h_\infty-(h_1+h_2)\} \tag{3}$$

$$\text{界　面}\quad \frac{q_i^2}{2}-\frac{U_i'^2}{2}=\varepsilon g(h_2-h_\infty) \tag{4}$$

ここに$q^2=u^2+v^2$，hは水深，$\varepsilon=(\rho_2-\rho_1)/\rho_2$，$\rho$は密度，添字1, 2は上，下層、$i$, sは界，表面、h_∞ は$x=\infty$における全水深である。(3)式右辺は水表面の降下量にgをかけたものであり、(4)式右辺は界面の上昇量に εgをかけたものと見ることができる。(3)式を使用して実験結果との比較を行なう場合、水表面の降下量があまりにも小さすぎて解析が困難である。そこで、(4)式と実験結果を比較すると図－１に示す結果を得る。図－１の結果はq_iのかわりに断面内の最大流速値を用いて得られているが、それでも(4)式は、現実の界面よりはるか下方に位置する dividing line しか与えない。

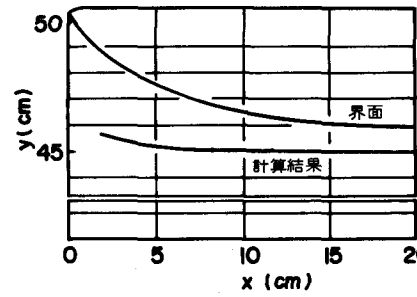
この結果から、ただちに混合効果の存在を認めることはできないが、とにかく理想流体の結果をそのまま適用し得ないことは明白である。同様のことは、現実のダム取水の場合のように長時間取水し続ける場合にもお

こりうることが予想された。事実、柏村ら[5] が上述の大西・日野の解析手法をダムの取水塔近傍に適用したところ、吉田の実験結果と同じ傾向、すなわち、予測される dividing line が現実のものに比べてはるかに低いことが明らかにされた。その後、吉田[6~8] は、一連の実験を通じて、上述の実験結果に関しては、混合によって生じた中間密度層が diving line を押し上げる結果となっていることをつきとめた。中間密度層は、勿論、混合を無視しては考えられない存在であり、かくして、取水に対する混合効果の存在は明白となった。ここでは、この中間密度層の水理特性、及び、その形成維持機構についてのべることにする。

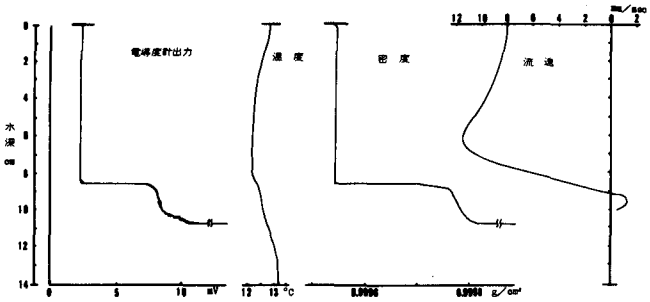
2．中間密度層の水理特性

本節では、巨視的な中間密度層の特性についてのべる。今、一端にせきを有し他端が閉じられた15cm×20cmの矩形断面を有する長さ300 cmの直線水路を水平におき、あらかじめ、塩水を3.0 cmの深さだけためておく。次に、混合をできるだけおさえる方法で淡水をこの塩水の上に重ね、せきを越流させて取水すると、2時間後には図－2に示すような流速ならびに密度分布を得る。なお、密度分布は白金電極とガラスサーミスターの対になった素子を用いて測定し、流速分布は図－3に示す系からなる LDV を用いて測れている。このときの取水開始寸前の密度分布は図－4に示されている。図－2には明らかに中間密度層が認められ、図－4との比較から、この層が取水後に形成されたものであることが分かる。この事実は、同時に、中間密度層が時間の経過とともに成長するものであることを示唆しているが、その様子を見るために中間密度層の時間的成長を追ってみると図－5のごとくである。なお、この場合の使用水路は 8cm×15cm×700cm である。この成長過程を見ると、中間密度層内の成層状態の変化が落着くまでに2時間程度必要であることが分かる。勿論この傾向は、流れの規模によって様々に変わることが予想されるが、この点を検討するため、せきから60cm離れた位置での中間層と淡水層との境界を時間的に追ってみると図－6の結果を得る。この結果は先の例より流動層が厚い場合のもので、定常化するに要する時間もかなり長くなっている。一方、中間密度層内の密度を調べると図－7が示すように、取水量の増加につれて全体的に高くなってゆくことが分かる。これに対し、取水量を一定とし、下層の密度を変化させた場合の中間密度層内の密度構造は、図－8が示すようにあまり変化しない。

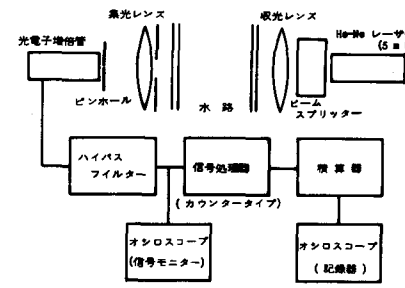
ここで内部フルード数の分布を調べておこう。勿論、最下層の密度を下層密度として採用できない故、中間層内の平均密度をもってこれにかえると図－9の結果を得る。これより、せきのごく近傍で内部フルード数が1になることは



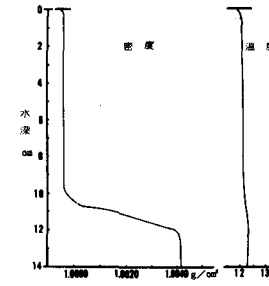
図－1



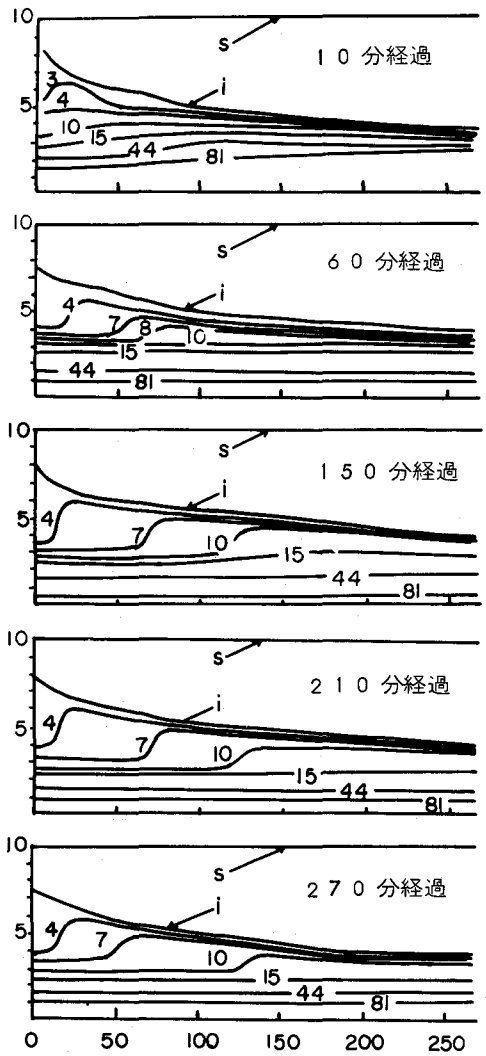
図－2



図－3

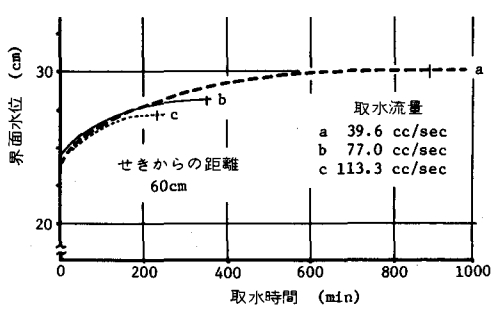


図－4

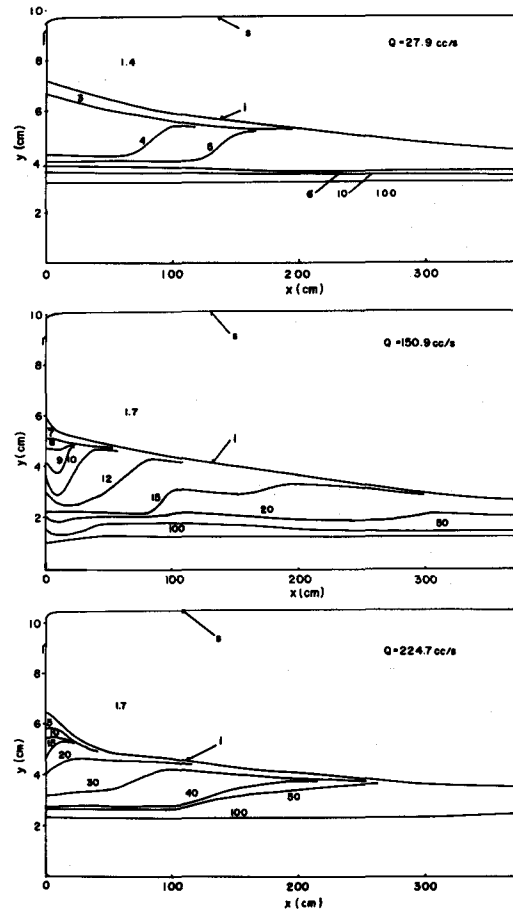


図－5　図中横軸はせきからの距離($x$cm) 縦軸は水位($y$cm), s, iは表, 界面を示す。図中の数値をnとすれば、密度ρは次式で与えられる。

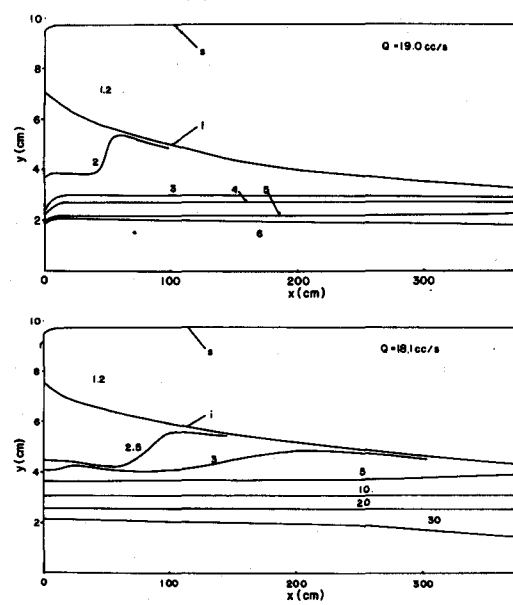
$$\rho=(9992+n)\times10^{-4}\ g/cm^3$$



図－6



図－7

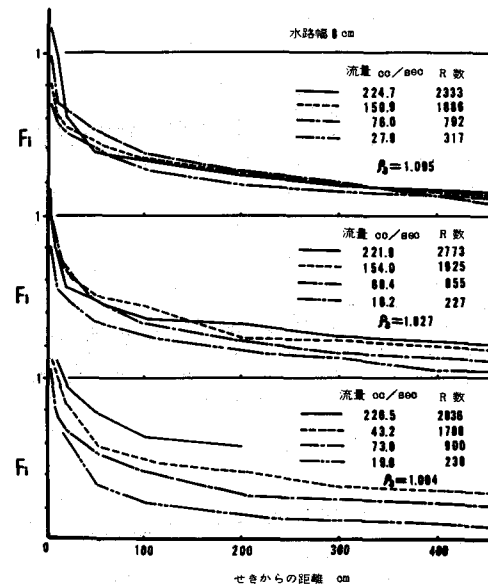


図－8

明白である。ただ、細部を検討すると、界面に波動を生じない取水量（30cc/sec）のもとではせきの位置でも1に達していない。この理由が中間密度層の未発達にもとずくものかどうか、今のところ不明である。

以上の結果を総合すると、中間密度層の水理特性が塩水楔のそれとよく似ていることが分かる。このことから、dividing line の形成は、非粘性的に生じたものではなく、界面抵抗が関係しているのではないかという予想が立つ。この予想が正しいかどうかは、界面抵抗係数 f_i と Ψ（θ^{-3}, θ はKeulegan数）との関係を、塩水楔のそれと比較することにより判断できる。中間密度層のように鉛直ならびに水平方向に密度が分布している場合の f_i は近似的に次式で与えられる[7]。

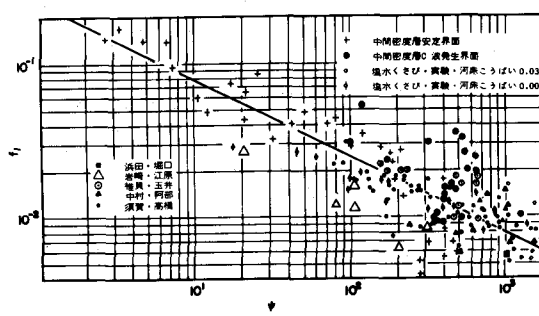
$$f_i=-\frac{2g}{U_1|U_1|}\left(\frac{h_1h_2}{h_1+h_2}\right)\left\{\frac{\partial h_1}{\partial x}\left(\varepsilon-\frac{U_1^2}{gh_1}\right)-\frac{h_2}{2\rho_{2m}}\frac{\partial\rho_{2m}}{\partial x}\right\}\cdots\cdots(5)$$



図－9

ここで x は水平方向上流に向かってとった座標、$h_{1,2}$ は淡水及び中間層の厚さ、U_1 は淡水平均流速、g は重力加速度、ρ_{2m} は中間層鉛直断面の平均密度である。(5)式を用いて実際に f_i, Ψ の関係を求めると図－10のごとくで、筆者の一人[7]が提案した $f_i=0.25\Psi^{-0.5}$ の延長線上に分布する。ただ、塩水楔の場合と同様、ψ の係数0.25は0.2～0.35 の範囲であれば何を採用してもよい程のバラツキを有している。以上のことから、中間密度層の形状（dividing line）維持には塩水楔のそれと同じ原因、すなわち（厳密な証明はなされていないが、多くの研究者が信じている）界面抵抗にもとずいているといえる。

さて、中間密度層が、塩水楔とほぼ同様の水理特性を有しているということは、取水流量がきわめて大なるときに、中間密度層が消滅することを暗示している。これは事実であって、その場合でも、せき近傍の内部フルード数はほぼ1の値を保持している。勿論、このときの下層密度としては最下層の平均密度を採用しており、dividing lineは、取水前の界面に一致することになる。かくして、今度は、下層塩水が塩水楔の形状特性を示し、いたるところで内部フルード数が1以上になると、下層塩水さえもせきをこえて流出する結果となる。



図－10

3．取水中への塩分混入機構

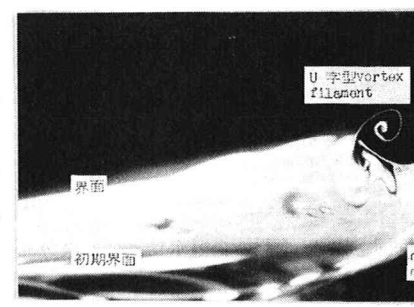
取水条件によっては、取水中の塩分量がせきを越える寸前の淡水中の塩分量よりはるかに多い場合がある。たとえば、表－1が示すように、下層密度にはあまり関係せずに、取水量の増加に伴って、この特徴が明確に現われる。この意味するところは、取水中の塩分のすべてが界面を通じて淡水層内に拡散したものではないということであり、中間層の塩水が直接、せきを越流する機構も存在するということである。この機構としては、現在のところ2つ存在することが分かっている。いずれも定常流の場合であるが、1つは界面波の山がせきを越えるタイプで、せきのほぼ中央で見出され、他は側壁近くでせきを越える連続流出タイプである。前者についてはすでに報告していることでもあるので[7]、ここでは後者のタイプについてのみふれておく。後者の塩水流

出機構を知るには、まず、せき近傍の流れを調べる必要がある。未だ完全な把握には至っていないが、せき近傍での微細な流れ構造はおよそ、次のとうりである。前節に述べたψ値が500をかなり下まわるときは、dividing line 上の淡水流れはポテンシャル流に近い流線を有している。しかし、Ψ値が500程度になると、せきから遠い界面では、サイクロイド波[9]を生じ、せき近傍では、淡水内に、写真－1に示す回転流が見出されるようになる（ただしΨ値については本研究で用いた規模の水路にしかあてはまらない）。この回転流の流線を追跡してみると、写真－2に示されるU字型のvortex filament を形成しており、filamentは両側壁に近いせきを越えて流出している。一方、中間密度層は常にこの filament に隣接しており、流心におけるせき直下では filament の存在のために、くぼむ形を強いられる。そして、界面波によって時おり攪乱されるごとに、この filament に塩水が連行され、U字型の vortex filament 内の流線に沿って輸送される（写真－1にこの連行の様子がタイミングよくとらえられている）。この輸送機構は、むしろ、間けつ的であり、刻々作り出される中間層内の希釈塩水が連続的にせきを越流する機構は別にある。それは、U字型 vortex に隣接する中間層自体が vortex filament（写真－3）を形成し側壁近くのせきを流出する機構である。写真－4には、このような filament が2本存在する例がとらえられている。なお、この写真は、せき近傍の水表面と界面のほぼ中間位置における水平断層写真である。

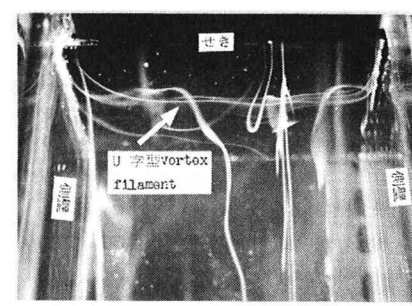
表－1

Run	下層密度 (g/cm^3)	流　量 (cc/sec)	取水中の塩分混入率(g/ℓ)	$x=2$ cmでの淡水内塩分混入率 (g/ℓ)	水　温 (℃)
1	1.0040	19.0	0.029	0.023	15.3
2	1.0039	72.0	0.034	0.013	13.6
3	1.0040	143.2	0.045～0.052	0.022	12.6
4	1.0040	226.9	0.085～0.090	0.020	12.2
5	1.0104	19.8	0.030～0.034	0.023	16.1
6	1.0104	70.9	0.042	0.026	14.2
7	1.0104	148.0	0.040	0.022	12.8
8	1.0104	225.0	0.062～0.079	0.019	12.5
9	1.0284	221.9	0.048～0.055	0.007	12.7

毎秒せきをこえる塩分量(S_g)は上記混入率(g/ℓ)をMとすると、次式で与えられる。　$S=QM/1000$　ここにQは取水流量(cc/sec.)である。

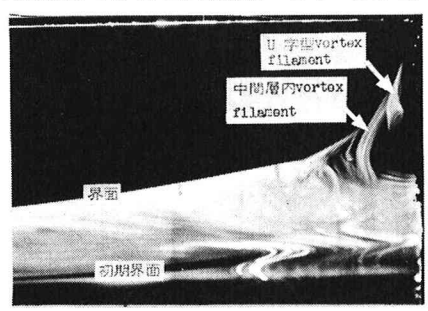


写真－1　流れに沿う鉛直面の断層写真

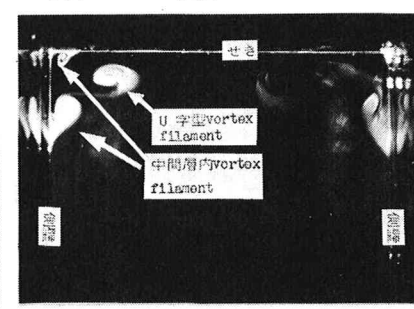


写真－2　U字型vortex filament

以上のことから、中間密度層の形状の維持機構が明らかとなる。すなわち、何らかの機構によって刻々生成される希釈塩水が中間層の界面を押し上げ、せきの位置における内部フルード数が1を上まわることがあれば、上述の機構を通じて過剰な



写真－3　流れに沿う鉛直面の断層写真

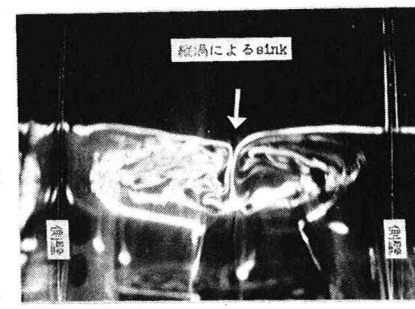


写真－4　水平面の断層写真

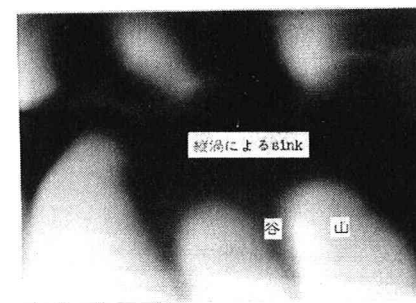
塩水が排除されるのである。

4．中間密度層の形成機構

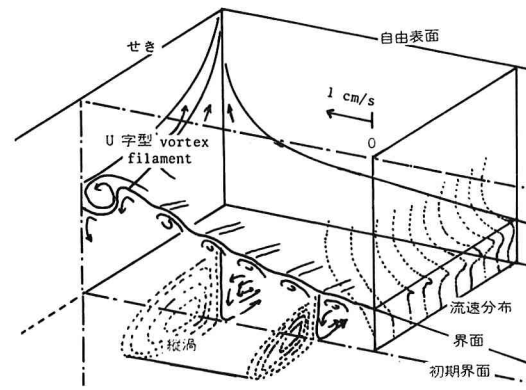
中間層の形成には、主として、縦渦と、サイクロイド波直下のスパイラル渦、そして淡水流れにひきずられる流れとそれによって失なわれる体積を補なう counter flow が寄与している。このうち渦は中間層内に淡水及び塩水を連行し、二次流は、それによって生じた新たな密度構造の流体を水平方向に輸送する役目を主としてになっている。紙面の関係で詳細な議論はできないが、図－11の流れ図を用いれば、もう少し立入った機構の説明ができる。まず、淡水輸送経路から述べよう。淡水は、縦渦とサイクロイド波直下のスパイラル渦、そして上には述べなかったが、前節で述べたU字渦に接する中間層内に生ずる vortex filament の連行作用により、中間層内に輸送される。その量はせきに近い剪断流の強いところほど多く、上流に向かうにつれて漸減する。ここで注意すべき点は、サイクロイド波直下のスパイラルの鉛直方向の径に比べて、縦渦のそれは大きく、中間層の厚さにほぼ一致していることである。すなわち、サイクロイド波直下のスパイラルは淡水を中間層に輸送するものの、その淡水が dividing line 下、わずかの水深にとどまるのに対し、縦渦による輸送は中間層底部にまで及んでいる。一方、下層の塩水は主として縦渦の連行作用によって中間層内に輸送される。この他、せき近傍では、二次流の counter flow の剪断流不安定にもとづき下層から塩水を連行する場合もあるが、これについては無視し得る程度であると考えている。なお、縦渦は塩水楔のそれとまったく同じ流れ構造を有しており[10]、写真－5に示すように、一対の渦からなっている。写真－6にはサイクロイド波の平面的な形状がとらえられているが（白い部分が山）、この写真が示すように、縦渦により生じた谷から発して側壁に向かうに従って振幅が小さくなるのが普通である。以上のような機構を通じ、せきに近いほど淡水混入量の多い、塩水楔とは密度分布の傾向が逆な中間密度層が形成されることになる。



写真－5　たて渦



写真－6　サイクロイド波



図－11　中間層内の流れ構造

文　　献

1）Yih, C-S.：Dynamics of Nou Homogeneous Fluids, New York and London, Macmillan, pp. 75－140, 1965.

2）Debler, W.R.: Stratified flow into a line sink, J.Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, 85, pp.51－65, 1959.

3）大西・日野: 深層取水の流れへの考察, 海工, 14, pp.246－252, 1967.

4）吉田: 二成層からの取水に関する研究, 応用物理学会北海道支部学術講演会概要集, pp. 5～6, 1972.

5）柏村ほか: 石狩川の流出解析と流砂に関する研究, 北大委託研究, pp. 120－131, 1973.

6）吉田・北越・福田: 土木学会北海道支部論文報告集, 30, pp. 97－100, 1974.

7）吉田: 年講, 29, pp. 425－426, 1974.

8）吉田: 土木学会北海道支部論文報告集, 31, pp.195－198, 198, 1975.

9）吉田: 土木学会論文報告集, 273, pp. 59－68, 1978.

10）吉田・田城・西田: 海工論文集, 26, pp. 554－558, 1979.