

熱塩密度流のカライドスコープ
Kaleidoscope of Salt and Heat Density Currents

東京工業大学 日 野 幹 雄
杉 本 信 策^{*)}

M. Hino & S. Sugimoto, Tokyo Institute of Technology

要 旨

従来水理学の分野で密度流現象として研究されてきたものは、④塩水楔のような塩分濃度差によるもの、貯水池への侵入濁水のように浮遊砂濃度差によるもの、つまり溶解物質もしくは浮遊物質の濃度差によるものか、⑤温排水のように温度差によるもの、つまり熱の拡散に関するものであった。しかし、物質の分子拡散係数と熱の分子拡散係数は一般にオーダー的に異なるので、密度差が物質濃度と温度の双方に依る場合には現象は一層複雑になる。このような現象は salt-finger や double-diffusive convection とし知られている (Turner, 1978)。

本報告は、こうした物質濃度と温度の双方が関与する密度流現象についての二三の予備的実験の結果を述べるもので、詳しい測定や解析は今後に行う部分も少なくない。そうした意図で表題を Kaleidoscope (万華鏡) と名付けて見た。

1. 熱塩対流と Rayleigh-Taylor 不安定

下層に塩分濃度が小さく温度の低い水、上層には逆に塩分濃度は大きい温度が高く塩分と熱の2つの効果による密度が上層より小さい水の層を作る。つまり、塩分濃度のみでは密度分布の不安定な流体が、温度差により安定化している状態である。

ところで、このような場合にも上下層の界面に微小な攪乱が生じると、熱の伝達が塩分の拡散よりも遙かに大きいために、温度差効果が局所的に打ち消されて塩分効果のみが残ることになる。その結果、界面にはツララ状に上層の水が下層に、下層の水が上層にと互に入り込む。この現象はいわゆる salt-finger 現象として良く知られている (Stern 1960, Turner 1978)。

表 - 1 : 濃度と温度による安定・不安定性と現象

	C (塩分濃度)	T (温度)
Salt-finger	不安定	安定化
Double-diffusive convection	安定	不安定化
R-T 不安定	安定	不安定化

これに対して、塩分濃度のみによる密度分布が安定な場合に、下層を加熱するか、もしくは上層を冷却して温度による密度分布を不安定化する場合は、double-diffusive convection と呼ばれ、加熱により密度分布が段階的に成長する (Turner 1973, Tamai & Asada 1980)。

メスシリンダーの下層に塩水を上層には淡水を入れる。これを下から加熱すると、下層内には盛んに対流が生じ下層水の温度は上昇する。しかし、上層水の温度の上昇は、下層から分子伝達率の速さでの熱しか受け取らないため無視しうる。このとき、下層の加熱率や最初の下層の塩分濃度と厚さの関係で次の2つのケースが生じる。

(a) 二重拡散対流

上層と下層の界面は下層内の激しい対流の結果、界面は波立ち時々波の谷部が下層の対流に食い千切られ、その結果徐々に下層は厚さを増し上層は薄くなる (Fig. 1)。

*) 現在: 住友商事㈱

(b) Rayleigh-Taylor 不安定

下層の塩分濃度が高く、底部からの加熱率が急激な場合には、上層の連行は比較的少なく対流により下層の温度は上昇し、これに反し上層温度はほぼそのままに保たれるため、遂に下層の密度と上層の密度はわずかに逆転する。対流により下層は一樣温度であり、上層への熱伝達は少くこれも一樣温度であるので、ゆっくりと界面全体が傾き、理論上 Rayleigh-Taylor 不安定として知られる上下層の入れ替えと混合が生じる (Fig. 2)。R-T 不安定は界面に垂直方向に加速される場合 (Lewis, 1950) やコンピューター・シミュレーションにより視覚化されている (Daly, 1969) が、通常の流体場でも実験的に生じることがわかった。春秋に湖沼の上層水と下層水の逆転・混合が起ることが知られているが、これもこの種の現象(a)(b)と考えられる。

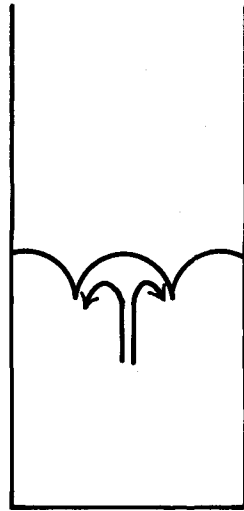


Fig. 1

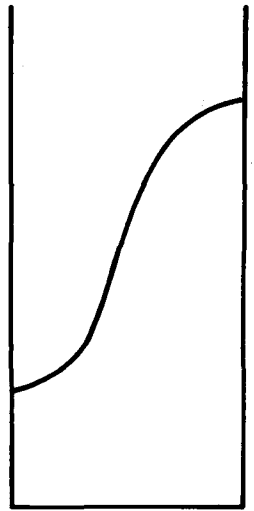


Fig. 2

2. 非定常熱塩ブルーム

従来は密度差が濃度のみあるいは温度のみによるブルームが主として研究されて来た。ここでは、この双方の効果により密度差の生じている場合および密度差がこれらの一方による場合でも濃度差ブルームと温度差ブルームとの差異の有無について調べる。まず実験装置・計測法は次のようである。

【実験装置と計測法】

実験装置は幅 40 cm × 深さ 40 cm × 長さ 198 cm の透明アクリル板製水槽で、その一端から距離 28 cm の所にゲートを設けこの内部を流出ブルームの貯留槽とした (Fig. 3)。ゲートを瞬時に引き上げるとブルームの流出がはじまる。

流れの様子をみるためにフルオレセソナトリウムあるいはローダミンによる着色を行った。また、塩分濃度分布は導電率計、温度分布は径 0.32 mm 銅-コンスタンタン熱電計で行った。導電率計の校正曲線は温度の影響が大きく次に述べる CASE B にのみ使用した。熱電対温度計 (ETO 電機製) はチャンネル切替えによって 20 点の温度測定が可能である。熱電対は水銀温度計により実験ごとに校正した。

【対岸壁の影響】

ブルームの進行にはブルームの進行方向前面にある境界(壁)の影響のある場合が報告されている (Toda・Nagata 1980, 稲葉・福岡 1981)。ここで、水槽の中央 ($x=130.5$ cm) に壁面を挿入した場合とそうでない場合 (対岸壁は $x=198$ cm) について、CASE A ($\Delta T=8^{\circ}\text{C}$) のブルームの進行状況を比較したのが Fig. 4 である。これより、対岸壁の直前までその影響はないと考えて良いであろう。

2.1 塩分濃度安定のケース

まず、温水ブルームの CASE A および水槽中に塩水の上に貯水部から淡水のブルームを流出させる塩分濃度に関して安定な CASE B, C について実験結果を比較する。これらのケースはいずれもブルームの進行冷却後も密度的には安定な場合で互に似た条件のもとにあるが、その進行速度やブルーム・ヘッドの形状には相当の差異がみられた。

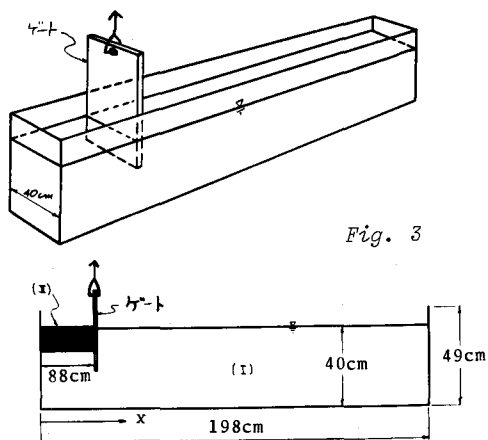


Fig. 3

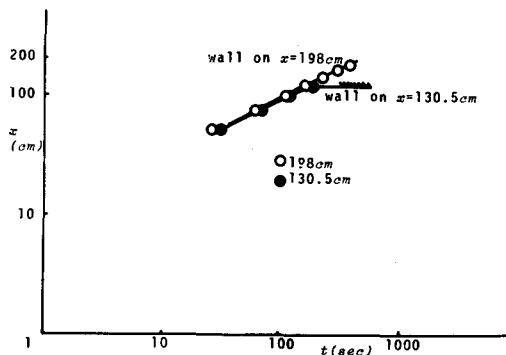


Fig. 4

表-2: 各ケースにおける温度・塩分濃度効果

	T_u (上層温度) / T_ℓ (下層温度)	C_u (上層濃度) / C_ℓ (下層濃度)	
CASE A	$T_u > T_\ell$	$C_u = C_\ell$ (淡水)	温度密度流
CASE B	$T_u = T_\ell$	C_u (淡水) < C_ℓ (塩水)	濃度密度流
CASE C	$T_u > T_\ell$	C_u (淡水) < C_ℓ (塩水)	濃度安定
CASE D	$T_u < T_\ell$	$C_u < C_\ell$	
CASE E	$T_u > T_\ell$	C_u (塩水) > C_ℓ (淡水)	濃度不安定

表-3: 各ケースの実験条件(1)

CASE	温度効果	濃度効果	総合効果
	$\varepsilon_T (\times 10^3)$	$\varepsilon_C (\times 10^3)$	$\varepsilon (\times 10^3)$
A 1	0.70	—	0.70
A 2	0.72	—	0.72
A 3	1.1	—	1.1
A 4	1.8	—	1.8
A 5	1.42	—	1.42
A 6	1.5	—	1.5
A 7	2.3	—	2.3
A 8	2.3	—	2.3
A 9	2.58	—	2.85
A 10	4.0	—	4.0
A 11	4.1	—	4.1
A 12	6.0	—	6.0
A 13	8.35	—	8.35
A 14	30	—	30
A 15	87	—	87
B 1	—	1.1	1.1
B 2	—	1.25	1.25
B 3	—	2.0	2.0
B 4	—	3.79	3.79
B 5	—	6.9	6.9
C 1	1.7	1.2	2.9
C 2	1.8	1.1	2.9
C 3	3.4	1.2	4.6
C 4	2.9	7.5	10.4

表-4: 各ケースの実験条件(2)

CASE	温度効果	濃度効果	
	$\varepsilon_T (\times 10^3)$	$\varepsilon_C (\times 10^3)$	$\varepsilon (\times 10^3)$
D 1	-1.0	1.3	+0.3
D 2	-1.2	7.7	+6.5

表-5: 各ケースの実験条件(3)

CASE	温度効果	沈度効果	密度効果
	$\varepsilon_T (\times 10^3)$	$\varepsilon_C (\times 10^3)$	$\varepsilon (\times 10^3)$
E 1	3.1	0	3.1
E 2	3.0	-0.87	2.2
E 3	3.0	-2.0	1.0
E 4	1.4	0	1.4
E 5	2.9	-1.5	1.4
E 6	1.2	0	1.2
E 7	2.6	-1.0	1.6
E 8	1.4	0	1.4
E 9	2.8	-1.5	1.3

a) ブルームの進行速度

時々刻々(t)のブルーム・ヘッドの長さ(x_t)を Hoult (1972) と同様に無次元化したのが, **Figs. 5, 6, 7** である。ここに,

$$\left. \begin{aligned} \tilde{x}_t &= x_t / L \\ \tilde{t} &= (\varepsilon g / L)^{1/2} t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$L = S^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\varepsilon = (\rho_w - \rho_o) / \rho_w \div (\rho_w - \rho_o) / \rho_o \dots\dots\dots (3)$$

S は貯水部上層水の縦断面積, ρ_w, ρ_o は下層および上層水の密度, g は重力加速度である。

Hoult (1972) は次元解析により oil slick の場合について, 次の関係を示している。

[重力・慣性領域]

$$x_t = \eta (\varepsilon g)^{1/2} L^{2/3} t^{2/3} \dots\dots\dots (4)$$

すなわち

$$\tilde{x}_t = \eta \tilde{t}^{2/3} \dots\dots\dots (4a)$$

図中の実線は上式 $\eta=1.6$ とした場合である。

[重力・粘性領域]

$$x_t \sim \nu_w^{-1/6} (\varepsilon g)^{1/4} L^{1/2} t^{3/4} \dots\dots\dots (5)$$

[表面張力・粘性領域]

$$x_t \sim \sigma^{1/2} (\rho_w^2 \nu_w)^{1/4} t^{3/4} \dots\dots\dots (6)$$

これらの図 (**Figs. 5, 6, 7**) から, 3つのケースは相互に似たような条件であり, 流出初期には共に oil slick の場合に可成り近い進行を示すが, やがて $\tilde{t} = 10$ 位から遅れ出し, 互の間の差異がはっきりする。

最も進行が速いのは, 温水密度流の CASE A である。これに反し, 濃度密度流である CASE B の進行は最も遅く, しかも, $\tilde{t} = 70$ を境に進行速度はさらに遅くなる。この2つの密度ブルームの差は次に述べるようにブルーム・ヘッドでの下層水との混合とその結果としてのヘッドの形状による。

CASE B の塩分濃度差効果にさらに CASE A の温度差効果を合せた CASE C では進行速度は

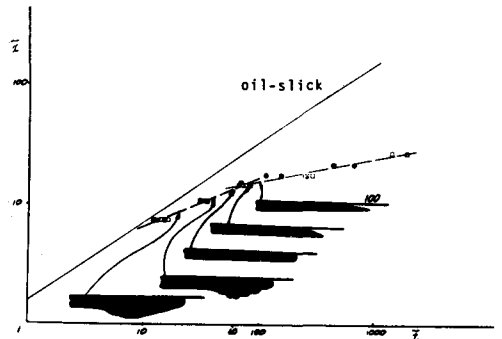


Fig. 5

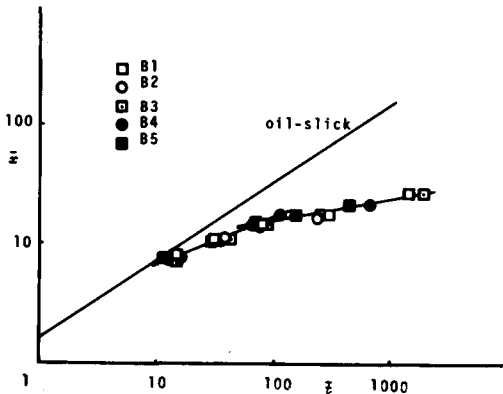


Fig. 6

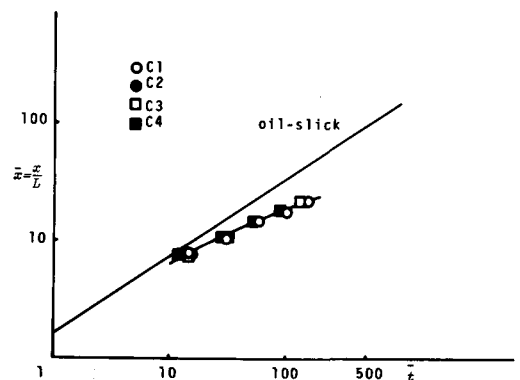


Fig. 7

CASE A に近づくものの、これをやゝ下回る。これはCASE B の場合にはブルーム・ヘッドでの下層塩水の混入による密度の増加が温度効果を打ち消すためである。

CASE C の場合のフロントの進行の無次元表示では、4つのケースの差はほとんどなく、全体として温度ブルームのCASE A に近い挙動を示している。総合密度差はかなりの開きがあるにもかかわらず、ブルームの進行にほとんど差異がみられないのは、温度効果の方が早くきいているためではないだろうか。

b) ブルーム・ヘッドの形状とその効果

ブルーム・フロントの形状は、密度的に同じような安定ブルームであっても濃度ブルームか温度ブルームかにより大きな差異がみられた。

温水ブルーム・ヘッドにおける渦： CASE A の温水ブルームの場合のヘッドには、他のケースには見られない特徴が生じる。進行するブルーム・ヘッドを水槽の側方から見ると先端は下に巻き込んで渦を形成している (Fig. 8a)。このような渦の形成は流れの様々な場によく見られるものであるが、上方から見た形はこれらとは著しく異っている。

この状態をより明瞭にするために貯水部を厚くしヘッドを大きくした結果が Fig. 8b である。これはブルームを上から観たものであるが、幅 40 cm ブルームは 4 列の渦から成り、それぞれの渦糸は巻き上がってブルームの根本の方へと延びている。温水ブルームの場合には、上下層が等濃度のため渦の巻き込みが十分行われ、塩分の混入による密度の増加は生じないため、ヘッドのもぐり込みによる抵抗はない。

染料により着色した温水ブルームの進行停止後そのまま放置しておく、と、大気との熱交換によりさらに別の現象が観察された。まず、表面に染料による細い縞が多数見られる。これを進行方向の横から観測すると

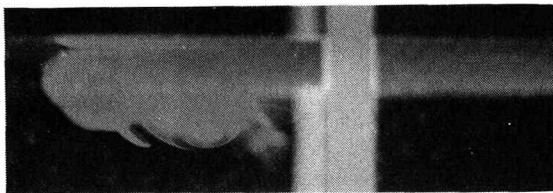


Fig. 8a

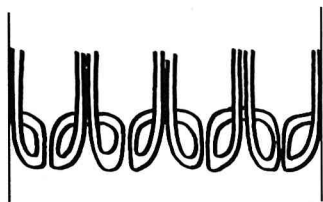


Fig. 8b

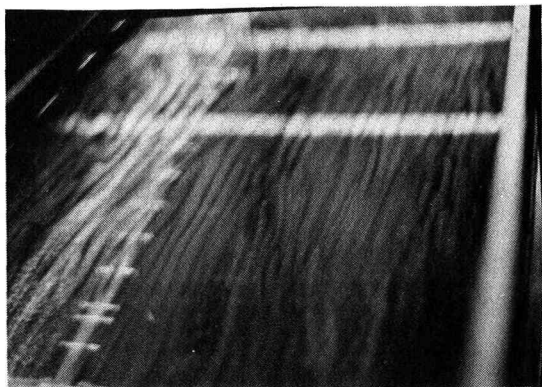


Fig. 9a

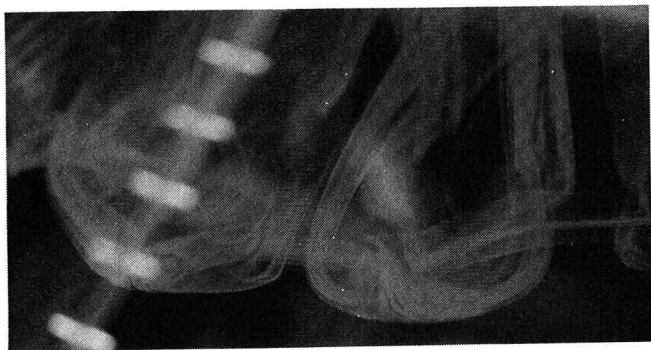


Fig. 9b

Fig. 9 のようにいわゆる finger 状の界面変化がみられ、やがて粒状の流塊が筋を引いて落下しはじめる。これは、染料による極くわずかの密度差に帰因する一種の salt-finger 現象であろう。

塩水ブルーム・ヘッド： 塩分による濃度ブルームの成長の初期には、ブルームの上流（槽側）からの淡水の補給もありまた塩水の混合により、形状は貯水池への濁水侵入の場合のように典型的な Karman head を形成する。しかし、前述の温度ブルームの場合のような渦の形成は見られない。

フロントの進行とともに、 $\tau = 60$ 付近から head は崩れ、楔形にやゝ塩水に突っ込む形となり進行速度も急に減少する。

淡水ブルームは流出とともに下層の塩水もかなりの程度曳行し（槽内の塩水中の染料系がブルームとともに進行している - Fig. 10）、またブルーム本体（淡水部）が進行を減じたのちも進行を続ける。

貯水槽内の濃度分布の変化 (Fig. 11) と貯留槽内の水を二色二層に着色した場合のブルームの横方向の様子 (Fig. 10) から、淡水上層は互に混合せずブルームとして流出し、その分だけ槽内の淡水が押し上げられていることがわかる。

c) 非定常温度密度流フロントの温度分布

低温淡水上に高温淡水を流出させた温度密度流フロントの場合について、熱電対によるやゝ精しい温度分布の測定を行った。

(i) 貯留槽内の温度分布

流出前の貯留槽内の高温淡水の温度分布およびゲートを開放し高温ブルームが流出したのちの貯留槽内の各深さでの温度の時間変化の代表例をそれぞれ Fig. 12 a と Fig. 12 b に示す。ブルーム流出後、貯留槽の淡水の温度は特に表面から深さ 2 cm 位までは急に降下するが、ある時間（この場合には 120~200 sec）後にはほぼ一定値となり、深さ 1~2 cm の層ではむしろやゝ上昇傾向を示す。これは、貯留槽内の表層部の高温水が高温ブルームとしてまず流出し、それを捕償するために下層水が上昇するためである。また、ブルームの速度の減少とともに深さ 1~2 cm 層の流出は止るが、その後も表面近くの流出は続き大気との熱交換のためもあり温度は低下しつづける。

(ii) ブルーム進行方向の温度分布

表面から 0.2~0.4 cm の深さの各点の温度変化を熱電対により測定した。その例を Fig. 13 に示す。任意点の温度はまずブルームフロントの到達とともに急上昇し始める。フロントでの冷却のためブルーム温度の最高はフロントの通過のやゝ後に生じる。最高温度に到達するまでの時間はゲートからの距離 x が大きくなるにつれて大きくなる。ブルーム温度は最高温度に達した後ゆるやかに減少する。

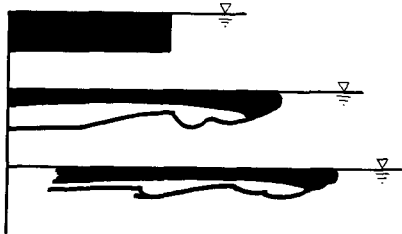


Fig. 10

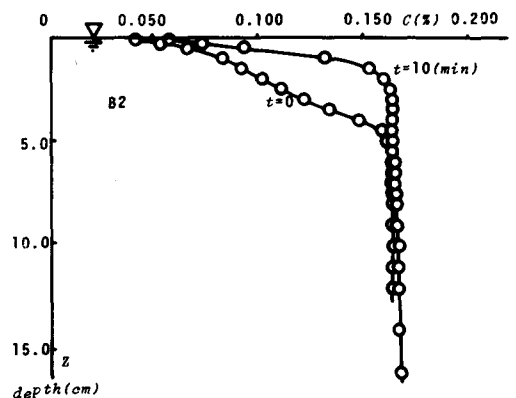


Fig. 11

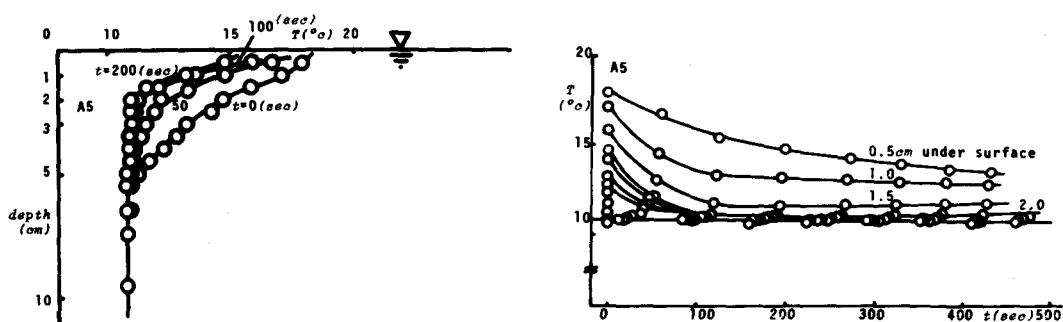


Fig. 12

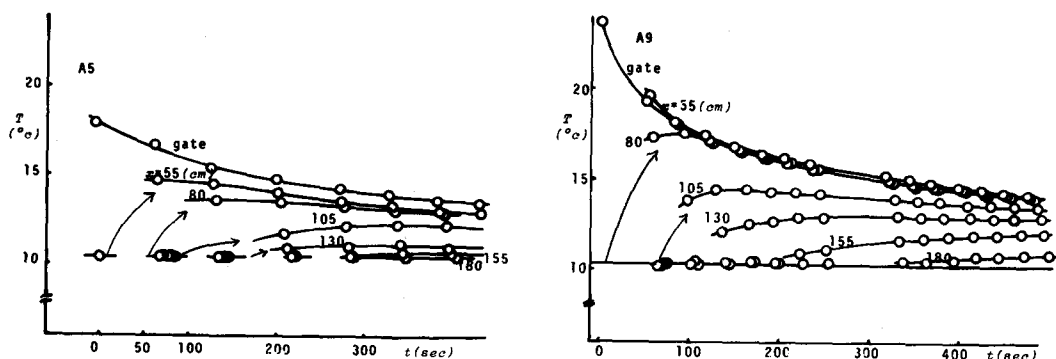


Fig. 13

これらの図から、ブルーム放出後の同一時刻におけるブルーム軸に沿う温度の分布図に直したのがFig. 14である。Fig. 13のように一点でブルーム温度を記録すると、一見ブルーム・フロントのすぐ背後に高温部があるように見えるが、そうではなくブルームはフロント部から後方に向けて温度が上昇していることがわかる。

温水ブルームと塩淡水ブルームの混合型である高温低濃度ブルーム (CASE C) については密度化効果は温度と塩分濃度によるが両者はほぼ等しい程度とした。ブルーム軸上の各点での温度変化と、同一時刻でのブルーム軸上の温度分布はFig. 15とFig. 16に示す通りであるが、CASE Bと同一の傾向を示している。

2.2 単因不安定ブルーム

濃度もしくは温度のみによる密度差のみでは不安定であるが、他の要因が流体を安定化している場合を取扱う。これには、高温塩水の上に低温淡水が流出する場合 [CASE D; $T_u < T_\ell$ ($-\epsilon_T$ 効果), $C_u < C_\ell$ ($+\epsilon_C$ 効果)] と低温淡水の上に高温塩水が流出する場合 [CASE E; $T_u > T_\ell$ ($+\epsilon_T$ 効果), $C_u > C_\ell$ ($-\epsilon_C$ 効果)] がある。

a) 低温淡水ブルーム (CASE D)

この場合には、貯留槽内の下層の高温塩水の上に低温淡水を注ぐ過程で、貯留槽内の下層水の上面の冷却が始まりその結果すでに冷却された塩水の沈降が始まる。それゆえ、実験条件をうまく設定し得なかった。

さらに、ゲートの開放後のブルームの進行の先端は他のケースと著しく異りFig. 17に示すように両側壁

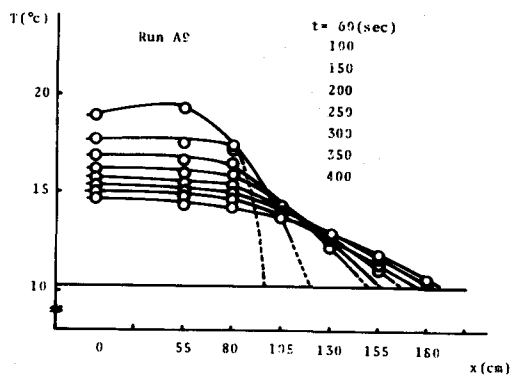
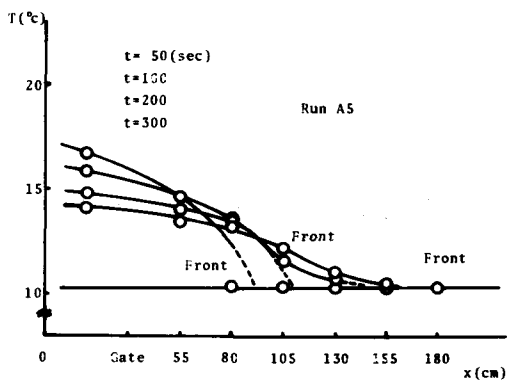


Fig. 14

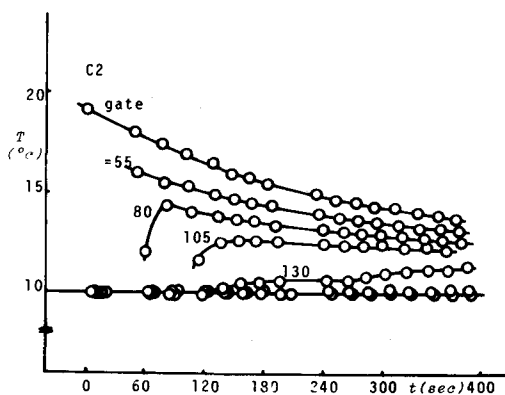


Fig. 15

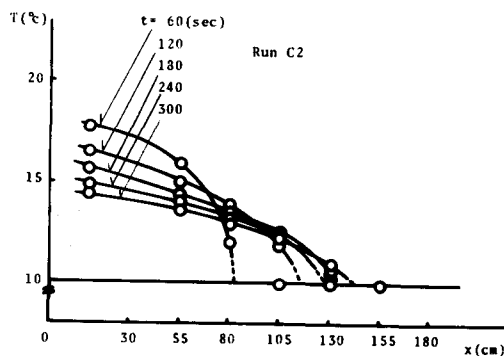


Fig. 16

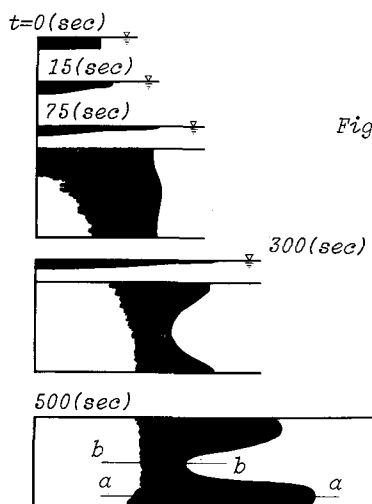


Fig. 17

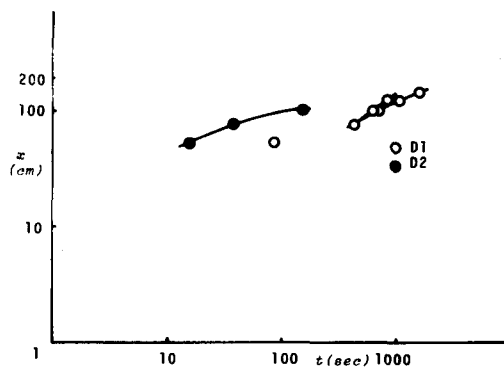


Fig. 18

に沿ってブルームは速く進み一様性はみられない。これは側壁よりの伝熱のため壁面附近の上層流体が高温淡水化するためであろう。Fig. 18 にブルーム・フロントの進行状況を示す。

b) 高温塩水温度逆転ブルーム (CASE E)

濃度的には上層が濃い濃度逆転の場合がCASE Eである。ただし、温度は上層が高く初期密度分布は安定状態($\rho_u < \rho_l$)にある。貯留部に高温の塩水を静かに流入させると、二層の境界面では直ちに熱交換が起り密度逆転が生じるから、高温塩水を蓄める前にゲート内の淡水をフラッドランプで照射して温度の中間層を作る必要がある。上層と下層との初期密度差を等しくした高温淡水ブルームと高温塩水ブルームを比較した。

高温塩水ブルームの進行速度： この場合の進行密度流の先端位置を測定した例が Fig. 19 である。

高温塩水ブルームの形状： 初期密度差は等しくとも高温塩水の場合には、ブルームは進行とともに下層により冷却される。その結果、密度逆転が生じ重くなった上層塩水が多数の筋を下層水中に斜め後に曳きながらブルームは進行し、ちょうど salt-finger 現象を伴ったブルームとなっている (Fig. 20)。これが高温塩水ブルームの進行速度が同じ初期密度差の高温淡水ブルームより遅い原因である。

上層から落下する冷却塩水の筋の先を詳しく見ると Fig. 21 のような不思議な形状を示している。

進行するブルームの先端では下層淡水との混合による温度低下と塩分低下による密度逆転が帖消しにされるためそのまゝ進行する。下層による冷却と密度逆転とそれによる塩水の落下はヘッドの後で生じている。

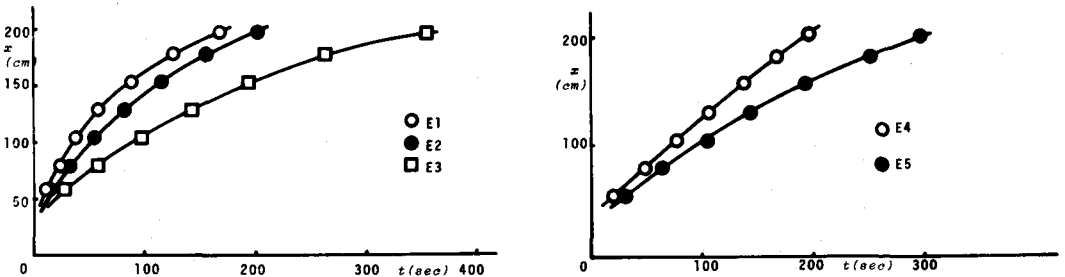


Fig. 19

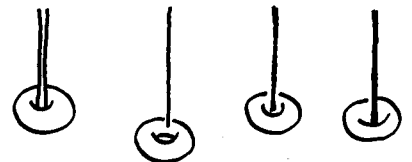
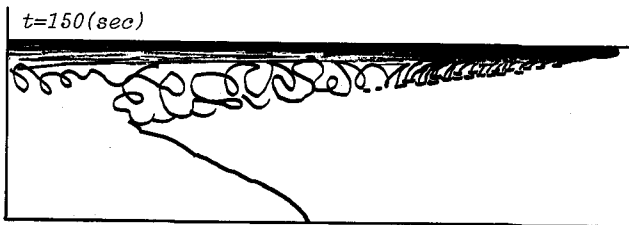
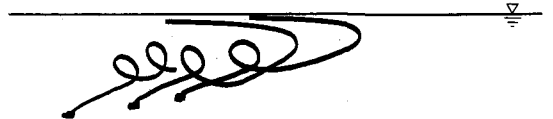
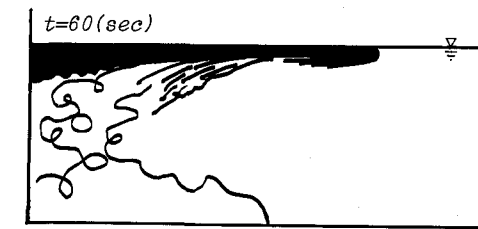


Fig. 20

Fig. 21

3. 塩淡水界面でのフロキュレーション

河口では上流より流れにより運ばれる有機物の小塊が塩水との電気化学的反応により凝集し大塊化により沈下する。すなわち、 Na^+ イオンにより粒子相互に作用する反発力が小さくなり、Van der Waals 力により互に接近し団粒化し、自重により沈降堆積する。これが底生動物を養い、さらに食物連鎖の上位の大型の動物を養う。したがって、河口部や干潟は最も生産性の高い場所として知られる(栗原, 1980)。こゝでは熱塩密度流ではないが、塩分にもう一つの相が関与するという意味でこの現象を取り上げる。こゝで問題としたのは、小粒子が凝集するためには、唯単に塩水に混じることで良いのか塩淡水界面が存在する方が良いのかという問題である。

a) 懸濁液によるフロキュレーションの差

懸濁液として川崎粘土(比重2.69, 成分: 砂/シルト/粘土/ 2μ 以下の粘土分=16.1/61.6/22.3/14.8%)およびベントナイト(比重2.42, 平均粒径 1μ , 主要鉱物はモンモリナイト)の二種類を取った。この懸濁液をメスシリンダー中の塩水の上に注ぎ、凝集状態を調べた。濃度等の条件は表-6の通りである。

粘土懸濁液: この場合には何の変化も生じなかった。また、上層を攪拌したのちも凝集は起らなかった。

ベントナイト懸濁液: この場合には約10分後に突然雪のような沈降が始まり、シリンダー側面に沿って沈降の道が出来るが、その道筋は一定していない(Fig. 22)。一方、強い沈降流を補償するために弱い

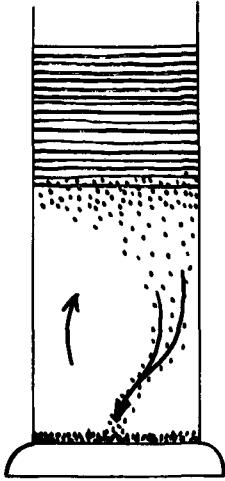


Fig. 22

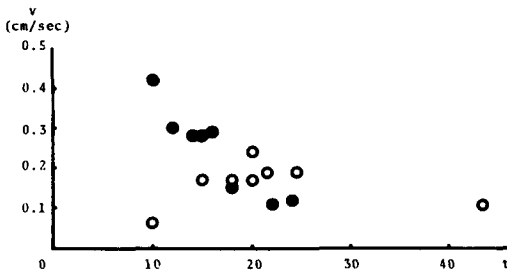


Fig. 23

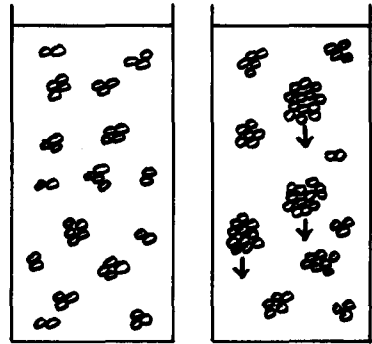


Fig. 24

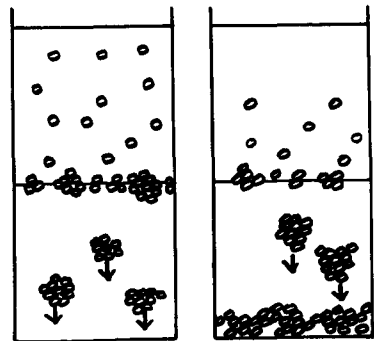


Fig. 25

上昇流が生じ、これがフロック粒子の一部を上昇させる。

フロック粒子の沈降速度と凝集開始後の時間の関係を Fig. 23 に示す。フロック粒子の径は 0.5 ～ 1mm 程度である。粒子の沈降速度が Stokes の法則に従うものとして、比重を

$$r_f = \left(\frac{18 \nu v}{g} \cdot \frac{1}{d^2} + 1 \right)$$

より求めると、径の大きさに対して表-7 のようになる。また、間隙比 e はベントナイトの比重を G_s として

$$e = (G_s - r_f) / (r_f - 1)$$

より、 $e = 140$ という非常に大きな値となり、フロック粒子が綿や羽根のように隙間の大きい構造であることがわかる。

表-6：凝集実験の条件（水温は約 16℃）

CASE	上 層			下 層		
	コロイド分散媒	濃度(%)	体積(%)	溶質	濃度(%)	体積(%)
1	川崎粘土	0.5	300	食塩	1	700
2	川崎粘土	0.1	100	食塩	3	400
3	ベントナイト	0.1	400	食塩	3	400
4	ベントナイト	0.1	400	食塩	3	350

表-7：粒径と比重と R_e 。

d (cm)	r_f	$R_e = vd/\nu$
0.05	1.016	1
0.07	1.008	1.4
0.1	1.004	2

b) 塩淡水界面の効果

それでは凝集沈降に塩淡水界面は何んらかの効果果しているのであろうか。これを調べるために、ベントナイトの場合について実験を行った。

混合液： 淡水と懸濁液の場合には、当然のことながら変化はない。塩水と懸濁液との混合液の場合には、まず凝集の開始が実験開始後 30 分と長びくだけでなく、凝集フロックは浮遊状態にあり、沈降しない (Fig. 24)。

成層液： これに対し懸濁液と塩水を混合せず成層状態にするときは、実験開始後約 10 分で界面に懸濁粒子が凝集しはじめ、ついで沈降が盛んになる。凝集沈降と共に上層の懸濁の濃度は低下するが、ベントナイト粒子の濃度は界面付近で高く凝集作用はそのまゝ進行する。混合液の場合に較べて、二層状態の場合には凝集粒子の生成場所が限られ、しかも常に上方からベントナイト粒子の供給を受ける結果、粒子の巨大化と沈降が促進される (Fig. 25)。

以上の事実から、河口で塩淡水が塩水楔を形成していることが、上流からの有機物の凝集沈降に始まる生態系食物連鎖に有利に作用していると云えるであろう。

参 考 文 献

- 1) Abbott, M. B. (1961): On the spreading of one fluid over another, La Houille Blanche.
- 2) 栗谷陽一・楠田哲也・古賀憲一 (1978) : フロックの最大成長度と急速攪拌継続時間との関係, 第83回年講, II-172, p.333-4.
- 3) Benjamin, T. B. (1968) : Gravity current and related phenomena, J. Fluid Mech.
- 4) Buckmaster, J. (1973) : Viscous-gravity spreading of an oil slick, J. Fluid Mech., vol. 59.
- 5) Chandrasekhar, S. (1961) : Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability, Oxform University Press.
- 6) Daly, B. (1967) : Numerical study of two fluid Rayleigh-Taylor instability, Phys. of Fluids, vol. 10, no. 2, 297-307.
- 7) DiPietro, N. D., Huh, C. & Cox, R. G. (1978) : The hydrodynamics of the spreading of one liquid on the surface of another, J. Fluid Mech., vol. 84, Part 3, 529-549.
- 8) Fannelop, T. K. & Woldman, G. D. : Dynamics of oil slicks, AIAA, J., vol. 10, no. 4.

- 9) 福岡捷二・水村和正・加納敏行(1978): 密度流先端部の流動機構に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, №274.
- 10) 福岡捷二・福岡祐介・村田和夫・荒井健(1980): 成層化した二次元貯水池に流入する密度流の実験的研究, 土木学会論文報告集, №293.
- 11) Hoult, D. P. (1972): Oil spreading on the sea, *Ann. Rev. on Fluid Mech.*, vol. 4, 341–368.
- 12) 稲葉清美・福岡捷二(1981): 二次元成層化貯水池の下流端で反射し遡上する段波の挙動, 第36回年講, II-217, p.432–3.
- 13) 古賀憲一・栗谷陽一・楠田哲也・萬久光(1980): 塩水中における微粒子の凝集沈降特性に関する基礎的研究, 第35回年講, II-385, 766–7.
- 14) 栗原 康(1980): 干潟は生きている, 岩波新書
- 15) 楠田・古賀・栗谷: 塩水中における粘土粒子の凝集, 用水と廃水, vol.26(3).
- 16) Lewis, D. J. (1950): The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes, II, *Proc. Roy. Soc. (London) A*, vol. 202, 81–96.
- 17) 松添剛・松本忠生・住友恒(1978): フロックの粒径変化と攪拌条件について, 第33回年講, II-175, p.338–9.
- 18) Maxworthy, T. (1972): Experimental and theoretical studies of horizontal jets, *Proc. Int. Symp. on Stratified Flows*, Nobosibirsk, ASCE, 611–618.
- 19) McNown, J. S. (1980): Sinkage, density currents and oil slicks, *Proc. Second IAHR Symposium on Stratified Flows*, vol. 1, 196–202.
- 20) 大野 操・首藤伸夫(1976): 海面上の石油の拡がり(第Ⅲ報), 第31回年講, II-212, p.389–90.
- 21) 埜口英昭・早川典生(1978): 静水面上での油の拡がり, 第33回年講, II-216, p.419.
- 22) 首藤伸夫・大野 操(1975): 海面上の石油の拡がり(第Ⅱ報), 第30回年講, II-47, 99–100.
- 23) Stern, M. E. (1960): The 'salt fountain' and thermohaline convection, *Tellus*, vol. 12, 172–175.
- 24) 玉井信行・福島祐介(1975): 瀬戸内海における流出油の拡がりについて, 第3回環境問題シンポジウム講演集, 88–93.
- 25) Tamai, N. & Asaeda, T. (1980): Stability criterion and the behaviour of mixed layers in double diffusive process, *Proc. Second IAHR Symposium on Stratified Flows*, vol. 1, 354–361.
- 26) Taylor, G. I. (1950): The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. I, *Proc. Roy. Soc. (London), A*, vol. 201, 192–196.
- 27) Toda, I. & Nagata, Y. (1980): End wall effects in experiments on water intrusion along the interface between two homogeneous layers, *J. of Oceanogr. Soc. Japan*, vol. 36, 15–22.
- 28) Turner, J. S. (1973): *Buoyancy Effects in Fluids*, Cambridge Univ. Press.
- 29) 上原忠保(1978): 塩水くさび先端付近における淡水中の懸濁粒子の沈降, 土木学会, 第33回年講, II-219.
- 30) 浦 勝・児玉英信・西村直人(1980): 吹送流による密度境界面の混合に関する研究(2), 第35回年講, II-255, 506–7.
- 31) Wilkinson, D. L. (1972): Dynamics of oil slick, *J. Hydr. Div., ASCE*, vol. 98, no. HY6, 1013–1030.
- 32) Wilkinson, D. L. & Wood, I. R. (1972): Some observations on the motion of the head of a density current, *J. Hydr. Res.*, vol. 10, no. 3, 305–324.
- 33) Wilkinson, D. L. (1973): Limitations to length of contained oil slick, *J. Hydr. Div., ASCE*.