

河口部での混合の強さが異なるときの塩水くさびの挙動

On the Behaviour of a Saline Wedge due to Distinctions of Mixing Intensity in a River Mouth

東京工業大学 正員 福 岡 捷 二 兵庫県 正員 坪 田 勝 幸
○ 同上 角 田 学 日本工営 正員 作 中 秀 行
学生員 間 辺 本 文

1. はじめに

非定常状態の塩水くさびは、自然界でしばしば観測されているが、その運動のメカニズムについては必ずしも十分に解明されているとはいえない。塩水くさびが非定常運動をおこす原因は幾つか考えられるが、その中のひとつは河口部における河川水と海水との混合である。この混合により、河口では密度場が変化し、くさびの侵入を規定する河口での境界条件が変化すると考えられる。著者ら¹⁾²⁾は、河口での密度場が変化するとくさび内に中間層が侵入し、そのためくさびが後退する機構を明らかにしてきた。本研究の目的は、前報に続いて河口部での海水と淡水の混合の強さが異なるときの塩水くさびの運動特性を明らかにすることにある。すなわち、中間層の形成、くさびの内部構造およびくさびの応答が混合の強弱によりどのように異なるか比較、検討し、塩水くさびの挙動を解明する。

2. 中間層の存在に関する従来本研究の位置づけ

第27回水講¹⁾では、河口での境界条件の変化とそれに対するくさびの応答の間には中間層の形成、発達が重要な役割を果たすことを明らかにした。すなわち、河口での淡・塩水の混合により河口での密度が減少し、圧力分布が変化する。その結果、くさびの界面付近より中間層が侵入し、それに伴いくさびは後退する。河口での淡・塩水の混合が大きくなると、中間層の侵入速度、侵入量は増大し、くさびの後退は急激となる。これより、中間層の侵入がくさび運動の非定常性の程度に密接に関係していると考えられる。そこで、中間層が塩水くさびの挙動に及ぼす影響について従来の研究を述べ、本研究の位置づけを行う。

密度界面付近に形成されている中間層は、淡・塩水界面でのエネルギー消費に関係しており、質量輸送、運動量輸送が活発に行われている層と考えられている。そのため、中間層の層厚が上、下層の層厚に比べて無視できない場合には、中間層の存在は塩水くさびの挙動に影響を及ぼすこととなり、この場合には、中間層を考慮したモデル³⁾⁴⁾⁵⁾による解析が試みられている。しかし、中間層の形成、発達および中間層内での輸送現象に関しては未解明な点が多く、解析が先行しているのが実状であり、現地観測および室内実験による検討が望まれている。

須賀・高橋⁶⁾⁷⁾⁸⁾は、最上川、長良川の現地観測から、内部渦特に、河口付近で生じる大規模渦により希釈流体が形成され、それが河道内へ侵入し、中間層を形成することを明らかにした。上原・岩崎⁹⁾は七北田川での現地観測から、潮汐および河川流量の大きさによって緩混合型、成層型の塩分分布が生じることを示した。いずれの型でも、中間層と思われる密度の小さな塩水が河道内に存在し、発達していく状況が認められる。上原らは、潮位の上昇により塩分が河道内へ侵入するときに一気に侵入することができず、河道内の塩水と均衡をとりながら侵入していく場合があることを指摘している。

以上の調査研究から判断すると中間層の形成がくさびの挙動に及ぼす影響を明らかにするためには、次の点についてより詳細な研究が必要と思われる。

- ① 中間層の形成原因
- ② 中間層の形成、発達のメカニズム
- ③ 中間層の形成、発達と塩水くさびの応答との関係

中間層の形成原因は数多く考えられるが、本研究では、河口での淡・塩水の混合も有力な原因のひとつであるとの前提のもとに、上述の②、③に着目し、これらを明らかにするための実験、検討を行う。具体的には、河口での淡・塩水の混合の強さが異なるとき、中間層の侵入速度、侵入量がどのように異なるかをくさび内の流速分布、密度分布の時間的、空間的变化および流動状況から調べ、くさびの内部構造およびくさびの応答を明らかにする。

3. 実験結果および考察

実験は、河口の外25 cmの位置に超音波発生装置を設置し、混合の強さを調整することにより行われた。実験装置および方法の詳細は第27回水講¹⁾と同様である。表-1に実験条件を示す。

表-1 実験条件

Run No.	Q m ³ /s	ρ_w kg/m ³	ρ_s kg/m ³	ε	W WATT	Re	Ar
1	$\times 10^4$ 2.0 0	$\times 10^3$ 0.9 9 8 9	$\times 10^3$ 1.0 1 2 1	$\times 10^{-2}$ 1.3 2	15 0	3 0 1 4	0.7 4
2	2.0 0	0.9 9 9 8	1.0 1 3 3	1.3 5	2 0 0	2 5 2 7	0.7 3
3	1.0 0	0.9 9 9 6	1.0 0 2 8	0.3 2	1 5 0	1 3 3 8	0.7 4

実験は、淡水流量Q、相対密度差 ε ($= (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$, ρ_s : 塩水の密度、 ρ_w : 淡水の密度)、レイノルズ数 $Re (= Q / \nu \cdot B$, B: 水路幅、 ν : 動粘性係数) および混合の強さの程度を示す超音波出力Wを系統的に変化させて行った。河口での淡、塩水深を同じにするため、3つのRunとも、幅・水深比 $Ar (= (Q^2 / \varepsilon g B^3)^{1/3})$ をほぼ一致させている。

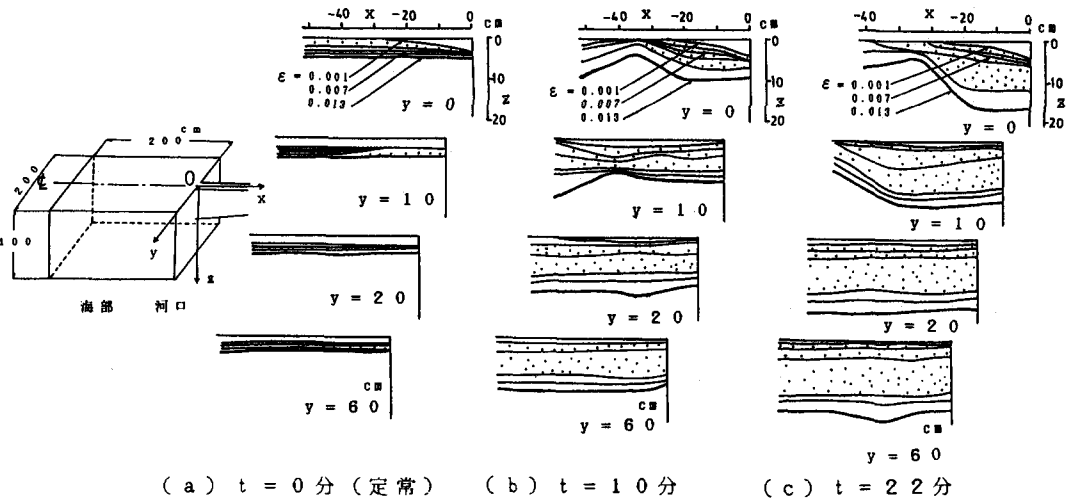


図-1 海部の等密度線 (Run 1)

3-1 海部の密度場

潮汐や河川水が河口を流出する際に生じる大規模な渦などにより河川水は海水と混合する。このような大規模な混合を室内実験で再現することは必ずしも容易でない。そのため、本研究では超音波発生装置により上昇流れを発生させて淡・塩水の混合を起こしている。図-1は、この混合により河口部の海水が次第にうすまり、希釈流体が河口近傍に滞留していく様子を等密度線で示したものである。t = 0は混合を開始する前で塩水くさびは定常状態にある。この状態の等密度線はx方向、y方向ともに界面近傍に密集しており、界面下方の流体は同密度 ($\varepsilon = 0.013$) の塩水で占められている。定常状態では、写真-1(a)に示すような巻波が川幅の2~3倍ほど沖側に形成されている。一方、強制的な混合を起こすと等密度線は図-1(b)のような状態になる。河口から $x = -20$ cm地点までの領域では、海水の密度はx方向、y方向ともにほぼ平行を保ちつつ低下していくことがわかる。 $x = -20$ cm地点より沖の領域では等密度線は急激に変化してお

り、上昇流れの影響を受けていることがわかる。しかし、この上昇流れの影響の著しい地点は巻波の発生地点よりも沖側にあり、混合開始後も写真-1(b)のように巻波は定常時(写真-1(a))とほぼ変わらない位置に存在している。このため、上昇流れが河口位置での密度場の変化とその変化に伴うくさびの応答に直接影響を及ぼしていないと判断される。さらに時間が経過すると、図-1(c)に示すように、希釈流体は厚さを増して河口近傍に滞留していく。本研究では、このような海部の密度場の変化を次に示すように河口位置での密度場の変化で代表させて考える。

3-2 河口での密度場の変化

以上のような海部の密度場の変化により、河口位置での密度分布形および河口淡水深は時間とともに図-2のように変化する。Run1の場合、密度は時間とともに界面近傍から連続的にかつゆるやかに変化していく。Run1よりも超音波出力の大きいRun2の場合、密度は底面近くに至るまで急激に減少し、それ以後、密度の減少は緩慢になる。

Run3はRun1と超音波出力は同一であるが相対密度差は小さい。そのため、Run1よりも密度の変化速度は大きく、密度はRun2のように底面近くまで急激に減少する。そこで本研究では、このような密度分布の変化状況を2つに大別しRun1を混合の弱い場合、Run2、Run3を混合の強い場合と呼ぶことにする。

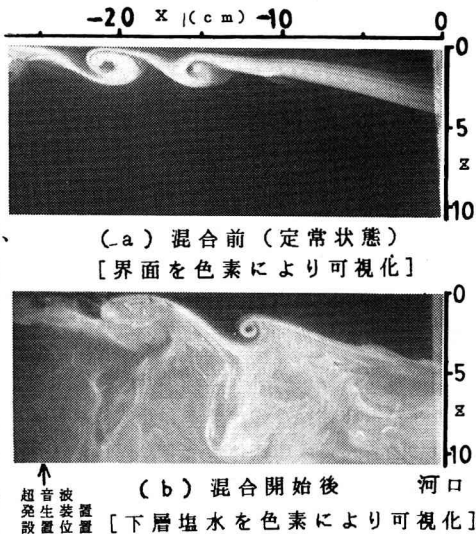


写真-1 河口を流出した密度流の流況

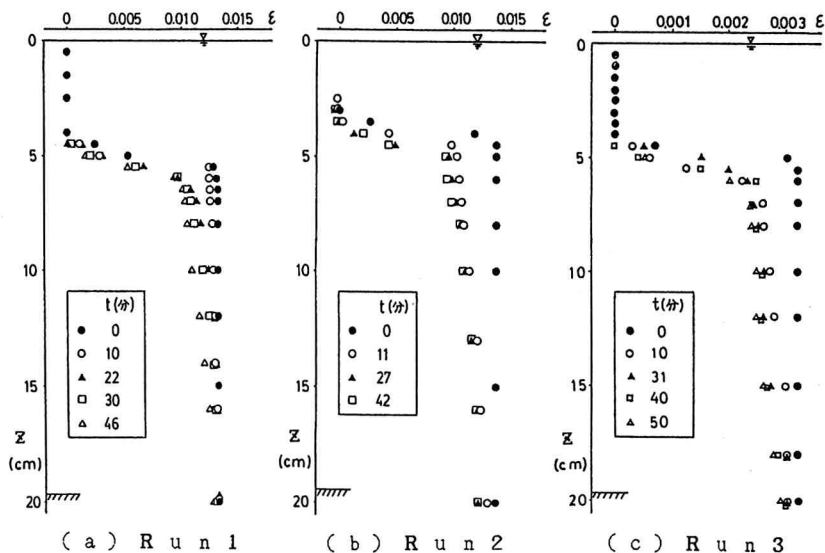


図-2 河口での密度分布

3-3 河口での圧力低下に伴う塩水くさびの後退

河口での密度が減少すると、塩水くさびの河口断面に働く圧力は低下し、それに伴いくさびは図-3のように後退する。白丸はくさび先端部の位置 L^* を示しており、定常時のくさび長 L_{max} と最小のくさび長 L_{min} により無次元化されている($L^* = (L - L_{min}) / (L_{max} - L_{min})$)。黒丸は密度分布形より静水圧分布を仮定して算定した圧力 P^* を示す。ここで、淡水の圧力は除いている。 P^* は定常時の圧力 P_{max} と最小の圧力 P_{min} により無次元化されている($P^* = (P - P_{min}) / (P_{max} - P_{min})$)。Run1、2、3のいずれも、混合開始後くさびは急激に後退し、次第にその後退は緩やかになっていく。しかし、Run1、2、3の間では、河口圧力の低下とく

さびの後退との時間遅れは異なっている。Run1の場合には、河口圧力の低下がすぐにくさびの後退とはならず、時間遅れが存在するのに対し、Run2、3の場合には、河口圧力の低下にほぼ追従してくさびは後退している。この時間遅れの相違は、中間層の形成機構と密接に関係しているので、最初に中間層の形成機構について説明する。

3-4 中間層の形成機構

河口での淡、塩水の混合により希釈流体が生産される。希釈流体は周囲の重い流体から浮力を受けており、河口では淡、塩水の境界面は上昇する。くさび内の界面近くには海側向きの流れが存在する。従って、この流れに逆らって希釈流体がくさび内に侵入するためには、図-4に示されるように希釈流体が河口近傍にある厚さ以上滞留する必要がある。この状態に至ると、河口近傍二断面の圧力分布は図ようになる。斜線部は二断面の圧力差を示している。すなわち、海側の圧力と河側の圧力の大きさは、界面近傍では海側の方が大きく、底面近傍では河側の圧力が大きくなる。その結果、希釈流体は界面の下側を通りくさび内に侵入して中間層を形成し、底面近傍の塩水は海側に流出する。

このように、希釈流体がくさび内へいつ侵入するかは、河口部での希釈流体の滞留速度と河側の流れの条件に依存する。図-3のRun1、2、3において前述の時間遅れが生じているのは次のように説明される。

希釈流体がくさび内に侵入するとくさびは後退する。¹⁾

Run1の場合には、混合が弱く、希釈流体の滞留に時間を要するため、くさびの後退に時間遅れが生じる。一方、Run2の場合には、混合が強く、Run3の場合には密度差が小さいため、いずれもRun1の場合よりも短時間に希釈流体は滞留する。そのため、Run2では河口圧力の低下とくさびの後退はほぼ同時に行われている。Run3では、河口圧力の低下と塩水くさびの後退とに少しの時間遅れは存在するものの、Run1の場合よりも遅れは小さくなる。

3-5 くさび内の密度場および流速場

中間層の侵入にともない、くさび内の密度場および流速場は、それぞれ、図-5、図-6のように変化する。(a)は混合の弱いRun1の場合、(b)は混合の強いRun2の場合である。図-5の等密度線は、河道部中央断面の5地点($x = 0, 10, 30, 70, 120\text{cm}$)の密度分布を測定することにより求められている。なお、Run3はRun2と同様の傾向にあるため、ここでは省略する。中間層下側の界面(図の破線)は目視により定めた。以下に混合の弱い場合、強い場合についてそれぞれ説明する。

(a) 混合の弱い場合

図-5(a)の(I)、(II)、(III)より、等密度線の勾配は全般的にゆるやかであり、くさび内の密度の減少は比較的遅いと判断できる。(I)は中間層がまさに侵入し始める前後にあり、くさびはまだ後退していない。この時期

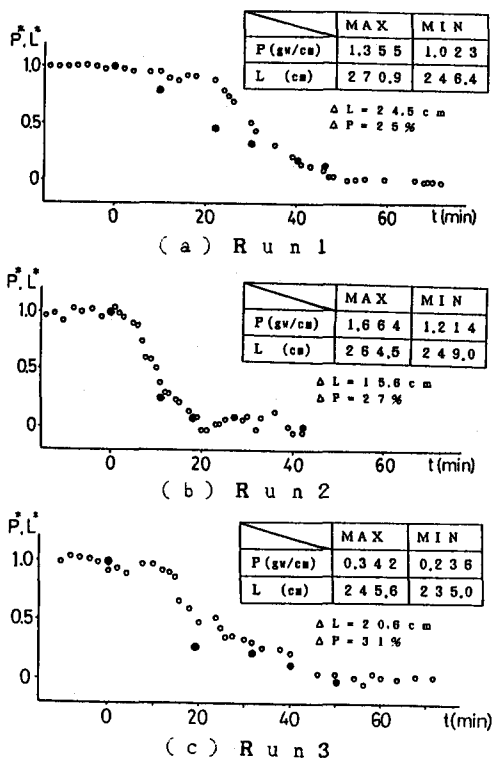


図-3 河口部での圧力低下と塩水くさびの後退との関係

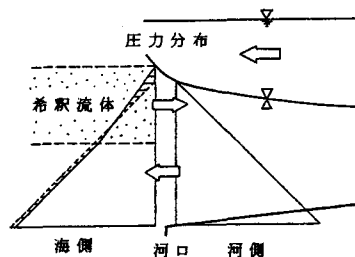


図-4 中間層の形成機構

は、中間層がくさび内の塩水と均衡をとりながら侵入しようとしている状態にある。しかし、混合が弱く、十分な希釈流体が河口近傍に滞留されていないため、中間層はわずかにくさび内へ侵入したり、再び海側へ後退したりしている。混合を開始してから中間層がくさび内へ明確に侵入したことが認められるまでに、このような状態がしばらくの間継続する。

中間層のくさび内への侵入が確認された状態が(II)である。この時期は、くさびがまさに急激に後退する直後にある。これ以降、くさび内の流速分布は、図-6(a)の $t=26$ 分、 $t=37$ 分の分布へと移行していき、くさび内の中間層下側の塩水が海側へ最も顕著に流出している状態となる。中間層がさらに侵入すると(III)の状態となり、くさび内全体が中間層で占められるようになる。この時期からくさびの後退は次第に緩慢になっていく。

(b) 混合の強い場合

図-5(b)の(I'), (II'), (III')より、河口付近の等密度線の勾配は、混合の弱い場合に比べてかなり急である。これは、混合が強いため、ある密度の希釈流体がくさび内へ侵入したときには河口部においてさらに密度の小さい流体が生産され、その流体が連続的にくさび内へ侵入するためである。このプロセスが繰り返されるため、河口近傍の等密度線は急であり続ける。

中間層は、(I')に示すように侵入開始からかなりの侵入速度、侵入量をもってくさび内に入る。その結果、くさび内の塩水は急激に中間層と入れかわり、くさび内の密度は急激に減少する。

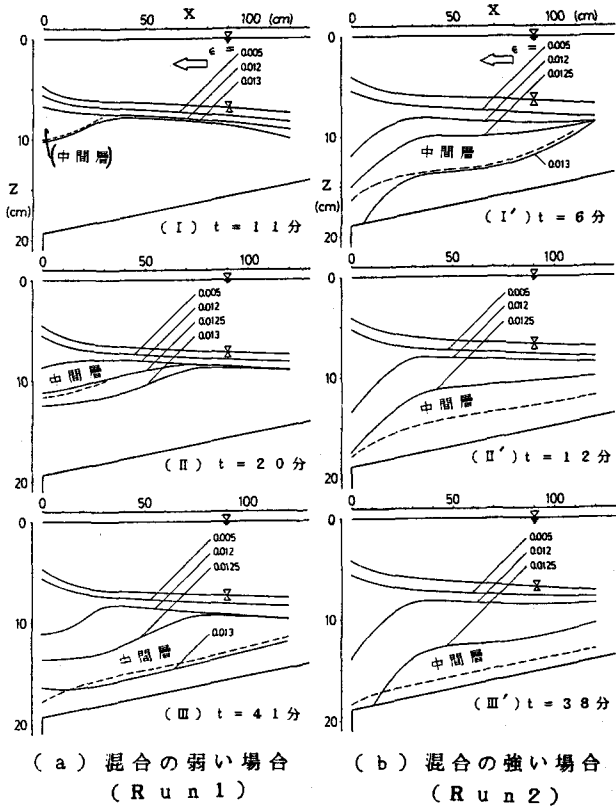


図-5 くさび内の等密度線

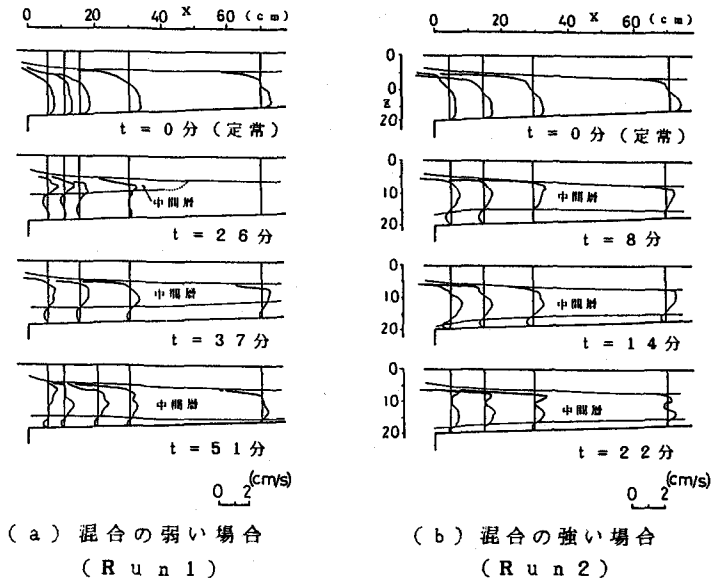


図-6 くさび内の流速分布

このとき、くさびは著しく後退しており、くさび内の流速分布は 図-6(b)の $t = 8$ 分の状態ようになる。中間層がさらに侵入すると、(II')になる。この状態に移行すると、当初くさびを構成していた $\varepsilon = 0.013$ の線がすでに消滅していることから、くさび内はすべて中間層で占められたと判断できる。このときの中間層下側の界面は無流速面になっている。さらに時間が経過し、等密度線が(III')のようになると、くさびの後退はほとんど停止する。

3-6 くさびの内部構造とくさびの後退量

図-3の Run1 と Run2 とを比較すると、河口での圧力の減少量 ($\Delta P = (P_{\max} - P_{\min}) / P_{\max}$) はいずれもほぼ同じであるのに対し、くさびの後退量 ΔL は Run2 の方が Run1 よりも 9 cm 程度小さくなっている。また、Run1 と Run3 とを比較すると Run3 の方が Run1 よりも河口での圧力の減少量が大きいかかわらず、くさびの後退量は 4 cm 程度小さい。このようなくさびの後退量の相違は、くさびの内部構造の相違によるものであり、次のように説明される。図-5、図-6 に示したように、混合の強い場合には、弱い場合よりも短時間のうちにくさび内が中間層で占められるため、くさび内の密度は混合の強い場合の方が小さくなる。その結果、混合の強い Run2 の方が Run1 よりも、くさびに働く重力の斜面方向成分が小さくなり、くさびの後退量は小さくなる。また、Run3 は Run1 よりもくさび内の密度が始めから小さく、しかも中間層の侵入速度、侵入量が大きい。そのため、Run3 の方が Run1 よりもくさび内の密度が小さくなり、先と同様の理由でくさびの後退量は小さくなる。

4. おわりに

本研究は、河口部での海水と淡水の混合の強さが異なるときの中間層の形成とそれに伴う塩水くさびの挙動を明らかにすることを目的として行われた。得られた主要な結果を以下に示す。

- ①河口での淡・塩水の混合により生産された希釈流体は、周囲の濃い塩水から浮力を受け、河口での淡・塩水の境界面は上昇する。このとき、河口断面でくさびに及ぼす圧力の分布形が変化し、希釈流体の上側では海側の圧力が相対的に大きくなり、下側では河側の圧力が大きくなる。従って、海部に滞留していた希釈流体はくさび内へ侵入して中間層を形成し、同時にくさび内の密度の大きい塩水は海へ流出する。
 - ②河口での淡・塩水の混合が強い場合には、河口の密度分布の変化速度が大きく、希釈流体の生産が速くなり、その流体がくさび内にたえず侵入する。そのため、河口付近の等密度線の勾配は急であり続ける。
 - ③河口での淡・塩水の混合が強い場合には、河口圧力の低下に追従してくさびは後退する。一方、混合の弱い場合には河口圧力の低下がすぐにくさびの後退とはならず、時間遅れが存在する。
- また、混合が強くなると、中間層の侵入速度、侵入量が大きくなり、くさび内は急激に中間層で占められ、くさび内の密度は速く減少する。その結果、くさびに働く重力の斜面方向成分が小さくなる。このため、河口での圧力低下量が同じでも、混合の強い場合の方がくさびの後退量が小さくなる。

本研究は昭和58年度文部省科学研究費総合研究(A)(代表者：堀川清司東大教授)の補助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 福岡・角田・坪田ら：第27回水講、1983、PP.517~522、2) 間辺・福岡・角田ら：第38回水講、1983、PP.403~404、3) 須賀：土木研究所資料、1537号、1979、4) 日野・灘岡：第24回海講、1979、PP.190~197、5) 玉井：土木学会論文集、第324号、1982、PP.95~102、6) 須賀：土木技術資料23-9、1981、PP.15~20、7) 須賀・高橋：第28回海講、1980、PP.540~544、8) 須賀：第23回水講、1979、PP.369~374、9) 上原・岩崎：第27回水講、1983、PP.504~510、10) L.D.WRIGHT and J.M.COLEMAN: The Journal of Geology, Vol. 82, 1974, PP. 751~778.