

# 潮汐による塩水くさびの応答(1)

柏村正和\*・吉田静男\*\*

## 1. 序 文

塩水くさびの定常状態に関する研究は、形状とか、くさびの長さについてはほとんど完成に近い。近年は淡塩境界面の安定不安定、混合、連行、抵抗係数の水理的理解などに、大方の研究が集中している。一方、潮差の大きい海に面する川で観測される強混合の型については、潮流による拡散、あるいはタイダルエクスカージョンによる分散効果をあわせて一応の理解が得られている。しかし、弱混合から強混合への遷移条件とか、弱混合ながら潮汐の影響を受けて周期的に変化している塩水くさびの実態とかになると、現象の理解さえまだ緒についていない感がある。

筆者らは、過去に天塩川で塩水くさびの周期的変動を観測した時の経験から<sup>1)</sup>、この現象が非常に興味深いものであり、しかもこの研究が弱混合から強混合へ遷移する条件を探るための重要な手がかりになることを直感したので、実験室で再現し研究することを計画するに至った。実験室内で海面に相当する水槽水位を自由に变化せしめることは、なかなか技術的にむずかしいが、どうやら、目的にかなうものを作り上げることができたので、実験に着手した。まだ資料の数は多くないので、とうてい全貌を示すには至らないが、潮汐に相当する水面の上下動周期が比較的短い場合で、しかも淡水流量の少ない場合についての実験結果をここに報告したい。なお装置については、その後改良した部分はあるが、大体は、昨年度の論文集に紹介したとおりである<sup>2)</sup>。

## 2. 周期変動をする塩水くさびの実験

水槽の大きさは、海に相当する部分が  $2\text{ m} \times 3\text{ m}$ 、深さ  $40\text{ cm}$ 、川に相当する水路が、幅  $8\text{ cm}$ 、深さ  $15\text{ cm}$ 、長さ  $7\text{ m}$  である。潮汐にตอบสนองする塩水くさびの変化をとらえるために、水路開口部から上流  $50\text{ cm}$ 、 $350\text{ cm}$  の2箇所に  $8\text{ mm}$  カメラを据え、淡塩二層の変動をコマ撮りし、あとで解析した。水位および二層境界面の上下動のほかに、時々色素を注入することにより二層の流速分布も測定した。

第一段階として、周期は比較的短い  $33\text{ 秒}$  と、 $100\text{ 秒}$  の

2種類に選んだ。潮差は前者が  $3\text{ mm}$ 、後者は約  $4\text{ mm}$  である。水路の流量は、 $0\text{ cc/s}$ 、 $12.0\text{ cc/s}$  (密度差  $\epsilon=0.0091$ )、 $11.04\text{ cc/s}$  ( $\epsilon=0.0584$ )、 $14.0\text{ cc/s}$  ( $\epsilon=0.024$ )、 $156.8\text{ cc/s}$  ( $\epsilon=0.024$ ) の5種類にした。実験条件のファクターが多いのと、1回の準備に要する時間が大きいので、全貌を明らかにするまでには今後ともかなりの期間を要するものと思われる。

最初の実験結果を図-1に示す。このときは淡水を流さず、塩水のみを挙動を調べる実験で、周期  $33\text{ 秒}$  と、 $100\text{ 秒}$  の場合の両方を同時に図示してある。左側の  $33\text{ 秒}$  の場合を仔細に見ると、まず河口の水位があまり変化していないのにもかかわらず上流  $350\text{ cm}$  の水位は潮汐と逆位相でしかも大きく変動していることが注目される。流速が河口近くでは早く、上流になるほど遅いのは当然であるが、右側に示した周期  $100\text{ 秒}$  の場合と比較すると、全く逆の位相になっており、漲潮期に流出し、落潮期に遡上する流れを示している。これは、容易に推察されるように、潮汐が水路の固有振動に共振したためである。開口部から上流  $5\text{ m}$  の水路床に、実験の都合上傾斜をつけて水路を区切ってあるので、長方形の湾のセイシュと同様の振動が発生したのであろう。念のために確かめると、固有周期は、 $T=4l/\sqrt{gh}$  (水路長  $l=5\text{ m}$ 、平均水深  $h=4\text{ cm}$ ) を用いて計算すれば、 $31.9\text{ 秒}$  となり、

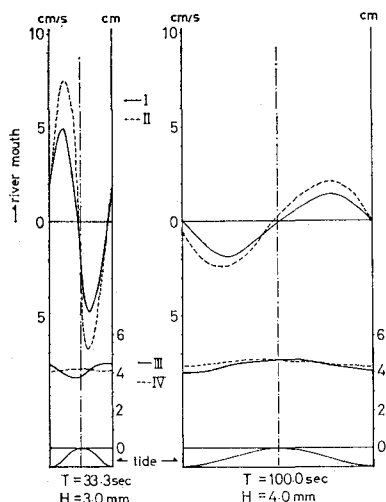


図-1 淡水流量 0 の場合の応答

$T$ : 周期,  $H$ : 潮差

(上は流速 I:  $350\text{ cm}$ , II:  $50\text{ cm}$ , 下は水位)

\* 正会員 理博 北海道大学教授 工学部

\*\* 正会員 北海道大学助手 工学部

偶然にも水槽に加えた周期 33 秒と同程度になっている。しかし、実際の河川では潮汐に共振する場合はほとんど考えられない。たとえば、水深 10 m とすれば感潮域の長さが 100 km 以上にもおよぶ河川でなければならないからである。もっとも潮汐以外ならば、たとえば津波の場合はこのような共振をおこす河川もあり得ることである。

周期 100 秒の場合は、共振によるサージンは発生せず、常識的な結果を与えている。水位も流速もともに、その変化は上流の方が下流より若干位相がおくれている。両者の距離を長波の伝播速度で除し、時間差を算出すると約 4.8 秒となり、大体合致していると思われる。

以上の塩水のみの実験は、二層流の予備実験として、装置や測器のテストを兼ねて行なわれたものである。

次に二層の場合の一例を 図-2 に示す。密度差  $\epsilon = 0.0091$ 、流量 12.0 cc/s、周期は同じく、33 秒、100 秒の場合である。表層の水質の変動を検出するため、開口部に、常に水面下 1 mm を維持するように電導度、および水温の検出プローブを設置した。それらによる測定記録も 図-2 に一緒に記載されている。

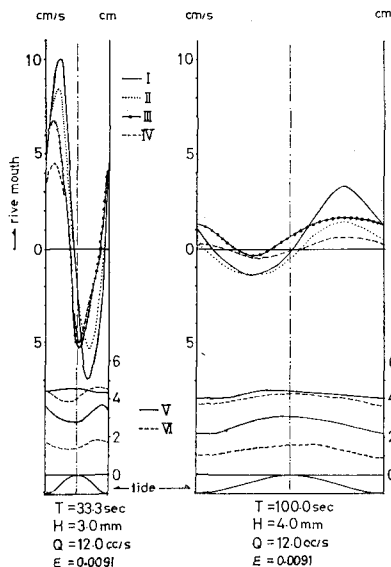


図-2 流量 12.0 cc/s のときの応答

(上の図は流速, I: 50 cm 地点淡水, II: 同塩水, III: 350 cm 地点淡水, IV: 同塩水。下の図は, 上が水位, 下が境界面高さ。V: 50 cm, VI: 350 cm 地点)

周期 33 秒では、前と同様に共振現象が見られる。開口部が節になっていると思われ、上流 50 cm の水位はわずかに変化しているだけであるのに対し、上流 350 cm では大きく変化し、しかも逆位相である。また 50 cm 地点では、表面水位の変動に対し、二層境界面が逆位相をもって変動しているのが注目される。

流速の点では、流量があまり大きくないこと、比較的振動周期が短いことから流れは二層とも流出、流入を繰

返す型である。当然ながら、淡水層には定常流が加わっているため、流出速度が流入速度より大きいものに対し、塩水層では流出流入とも速度はほぼ等しい。

周期 100 秒の場合は、図-1 と同様に共振現象はなく潮汐とはほぼ同じ位相で水位も境界面も上下している。流れはこの場合も往復流で、周期 33 秒のときと比較して流速変動が淡水、塩水両層とも逆位相であるのが注目すべき点である。その他淡水層は流出時に早く、流入時におそいが、塩水層はどちらの場合もほぼ等しい早さであることは 33 秒の場合と似ている。この図を見ると、河口付近では、落潮期に上下二層の相対速度が最大であり、この時期に最も混合が発達すると考えられる。開口部表面の電導度の変化は潮汐に応じた流出、流入の流況とよく合致しており、落潮期には淡水の流出が優勢になるために電導度が低下するのが見られる。また全水路にわたって水位と境界面が同位相で変化することは、この変動が外部波動的な波動によるものであって、内部波動的な波動はこの場合存在していないことを示している。すなわち、河口外の変動が内部波として河口内に侵入することはないとする考え方に合致している。

図-3 は、流量は今の場合とほぼ同じであるが、塩水の濃度を  $\epsilon = 0.0584$  に増加せしめたものである。周期 100 秒のときの流速変動はフィルムの解像力が悪くて求められなかったで、周期 33 秒の方のみを検討してみる。

流況は、図-2 と大きな差はない。ただ、注意してみると、河口近くの淡水流の速度が早くなったことがわかる。一般的に、二層の密度差が大きくなると、重力によって界面を水平にしようとして働く力が増加し表層は早

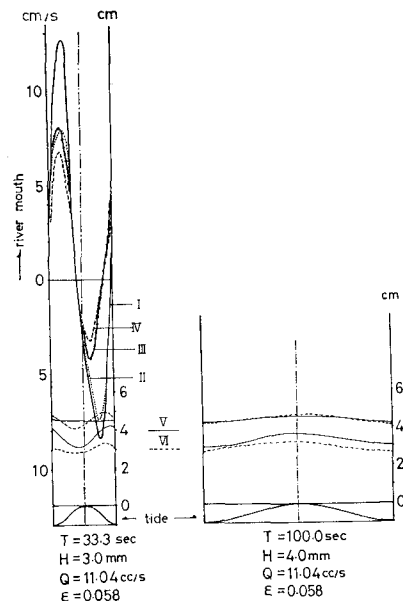


図-3  $\epsilon = 0.0584$  のときの応答  
(線の区別は 図-2 参照)

くなる。この場合、淡水流量は図-2のときとほぼ同じなので、当然このときの淡水の厚さは前の場合よりもうすくなければならないであろう。図-2と比較してみると、開口端上流 50 cm の点の平均淡水厚さは、図-2では約 1.3 cm、図-3では約 0.8 cm で上記の判断を裏書きしている。

図-4は、密度差を再び若干下げ、流量を 14.0 cc/s にしたときのことで、周期は 100 秒だけの場合である。流量が多少増加したが全体の流れの様子はほとんど図-2の場合と同じである。ただし、密度差が図-2より大きいので、この場合も、図-2より表層流速は早く、同時に淡水厚さがうすくなっている。

これまで述べた実験は、比較的流量の少ない場合であって、淡水は水路に発生する潮流に支配されて、いずれの場合も往復流の形態をしていた。通常の感潮河川、たとえば天塩川の実測によると、下層の海水が潮汐によって流出、流入を繰返していても、上層の淡水は常に流出しているのが普通である。したがって次の実験の段階としては、淡水流量を次第に増加してこれを実現させる計画である。これについては次回にゆずりたい。ただ一例として、流量を増大したときの興味ある状況を述べておこう。図-5 がそれである。周期 100 秒の潮汐を与えておき、流量を増して 156.8 cc/s に達したときの、潮汐 1 サイクルの応答を示している。流速は塩水層も全部流出の方向を示しているの、塩水くさびはまだ定常位置に落ちついてはいないことがわかるが、境界面の振動と、塩水層の流速変動に倍周期波が現われているのが注目される。開口部の上流 50 cm の位置における水面は、ほぼ潮汐と同位相の変動を示しているが、境界面の変動周期は半分である。このことは内部波の発生を示唆している。

すなわち、流量の変動が長周期内部波を誘発する原因になり得ることを知ることができる。

最後に、塩水くさびの長さの変動とその先端の形状について簡単に述べておく。周期を今までの他の実験に比べてかなり長い 5 分 33 秒にとり、流量が 27.82 cc/s という条件下で、潮差を変えていくとくさび先端はどこまで到達するかを調べたものである。図-6によると、この条件下では先端の到達距離は潮差に大体比例するものようである。これについても条件を種々変えて完全なものにする計画である。なお、くさび先端の位置は、くさびが遡上中では先端と淡水が明瞭に区切られているので問題なく求められるが、くさびの後退中には水路床にいつまでも塩水の薄膜が残るので非常に識別しにくい。右側の図で、頂点から右のグラフがないのはそのためである。

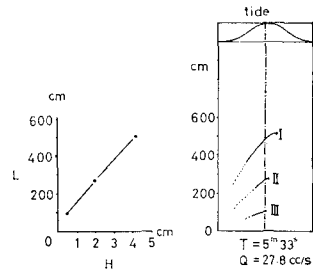


図-6 くさび先端の位置

右の図は潮時に応じて動く先端の位置を示す  
(I : 潮差 4.16 cm, II : 1.98 cm, III : 0.46 cm)  
左の図は潮差 (H) に対応させた図

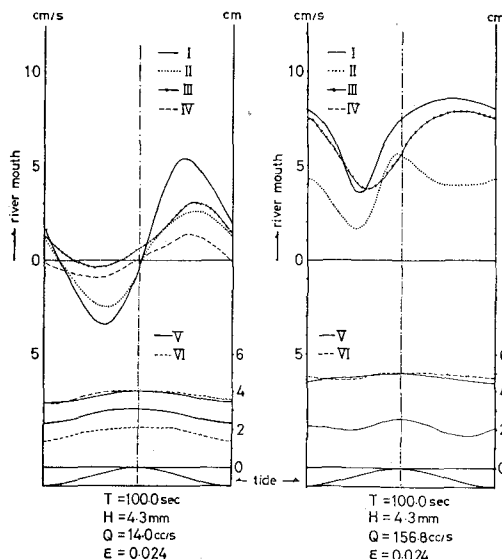


図-4

流量 14 cc/s の場合

図-5

流量大の場合

くさびの侵入時に、しばしば先端が丸く、そして小高くなる。ことが、従来よく知られているが、実際の河川の塩水くさびでは普通それは見られない。カルマンがこれについての簡単な解析をしているので<sup>3)</sup>、この形をかりにカルマンヘッドと呼んでおく。水路を中央で左右に仕切り、片方に塩水、別の片方に淡水を入れ、仕切り板を急に取り去ると、淡水は塩水の上へ乗り上げ、塩水は淡水の下に潜入するが、そのときの塩水くさびの先端に必ず現われるものである。しかし、今まで述べた諸実験ではカルマンヘッドは決して形成されない。種々条件を変えて調べてみると、これが形成されるのは漲潮期に逆流が生じて塩水塊が水路に入り、淡水塊を上流に向かってせきあげるような形で押し込んでいく場合に、やがて発生することがわかった。両水塊の境がある程度上流に達すると、ちょうど上に述べた仕切り板を取り去る時のように、今まで上流に向かって押されていた淡水が、急に塩水上にのり上げて流下を開始し、一方塩水はカルマンヘッドを形成しながら上流に向かうようになる。その場合の先端の変形、およびヘッドの形成の過程を図-7に示す。これらのうちから典型的な形のものを一つ選んで、その周辺の流線、あるいは流速分布を測定したが、

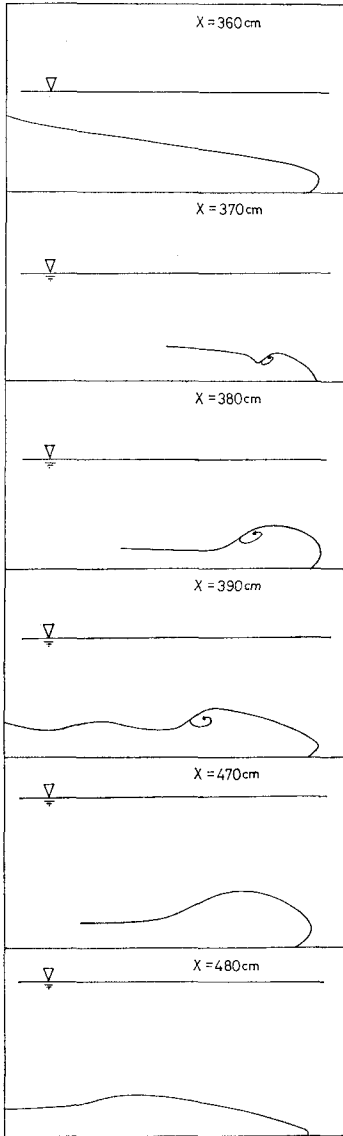


図-7 カルマンヘッド形成の過程

それを図-8に示す。ただしカルマンの示したヘッドの高さ $y$ を与える式、つまり $y=u^2/2\epsilon g$  ( $u$ はヘッドの進行速度)は、あまり適合しない。この式を用いて算出した値よりも、実際のヘッドは数倍も高い。

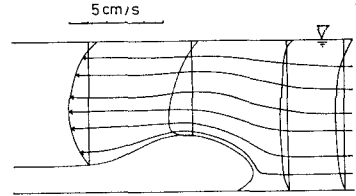


図-8 カルマンヘッド周囲の流況  
(ヘッドの高さは2.5cm, 先端の進行速度は1.43 cm/s)

### 3. おわりに

潮汐に応答する塩水くさびの変動を明らかにする目的をもって開始した実験の第1報である。まだ緒についたばかりではあるが、新しい二、三の知見が得られた。今回の実験では認められなかったが、図-9の天塩川の例のように、水位の変動と、境界面の変動(図では淡水厚の変化で示してある)には普通位相差を生ずるもので、今後の実験でこの点も明らかにしたい。また潮汐が加わると、塩水くさびの実効長が短くなる現象も従来認めてきたが、これについては次回に本格的に取扱いたい。

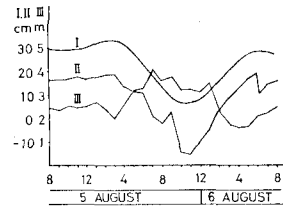


図-9 天塩川河口内300mにおける水位と淡水厚さの変動(I:小樽潮位, II:水位, III:淡水厚さ)  
昭和27年8月5日~6日

### 参考文献

- 1) 柏村: 天塩川河口の二重水層, 天塩港調査報告, 天塩町, 北大工学部, 昭和34年6月.
- 2) 柏村・吉田: 潮汐による河口のflow patternの変化, 第19回海岸工学講演会論文集, 昭和47年11月.
- 3) von Kármán, T.: The engineer grapples with non-linear problems, Bull. Am. Math. Soc., 46, 1940.