



Title	4. 石狩川塩水楔の遡上
Author(s)	福島, 久雄; FUKUSHIMA, Hisao; 柏村, 正和 他
Citation	北海道大学地球物理学研究報告, 7, 37-44
Issue Date	1960-03-07
DOI	<a href="https://doi.org/10.14943/gbhu.7.37">https://doi.org/10.14943/gbhu.7.37</a>
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/13820">https://hdl.handle.net/2115/13820</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	7_p37-44.pdf



## 4. 石狩川塩水楔の遡上

福島久雄・柏村正和

八 鍬 功・高 橋 将

(北海道大学工学部理学第一研究室)

一昭和34年5月受理一

### I. 緒 言

水面勾配の小さい下流河川では、河口外の海水が河水との密度差により河床にそつて河口内に流入し、河口から上流へ相当の距離まで淡水と塩水の二重層を形成する事をしばしば経験する。このような塩水の状態はその縦断形状から塩水楔と称せられる。河口内の乱流混合の程度が大きくなると楔形状はくずれて鉛直の密度差は減少し、かつ河口から上流にむかつて次第に密度を減少するような型に移つて行く。このような強混合の場合は欧米大陸の estuary によく見られるものである<sup>1)</sup>。我が国の大河川における型は殆んど楔状を維持する弱混合型か又はそれに近いものである。

一つの河川については塩水楔の長さは河川の流量の関数と見做され、或る限界の流量以上では楔は全く河口外に押し出される。逆に河水流量が減少すると楔は発達し、淡水は薄い層となつてその上を流下する。このように楔が発達した場合には、下流に行くにつれて下の塩水層からの塩分拡散により淡水の塩分濃度は次第に高くなる<sup>2),3)</sup>。この状態が非常に発達すると、灌漑用水として表面の河水を使用した場合に農作物に塩害を及ぼすことが認められている<sup>4)</sup>。

塩水楔の理論的な取扱いはしばしば行われ、或る流量に対する定常的な楔の釣合に関してかなりの成果が報告されている<sup>5)</sup>。しかし非定常の場合は、例えば潮汐による楔の変動に関する観測結果の報告<sup>6)</sup>はあるが、楔の発達過程のような問題に関しては観測結果が乏しく、かつ理論的取扱いも困難な事から未だ見るべき成果が得られていない。

1958年8月、筆者等は石狩川河口付近で塩水楔が徐々に遡上する状況を観測した際、楔先端の遡上の過程が後述の如く二段構造を有するという興味ある現象を見出した。非定常楔のこのような観測は今迄に殆んど見られなかつたものであるが、以下にその詳細を述べ更に測定結果について考察する。

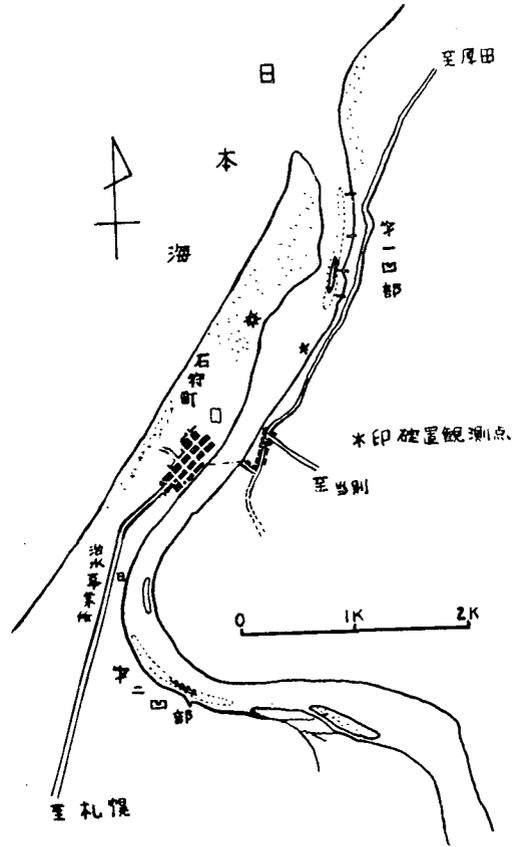
- 1) Stommel, H.; The Role of Density Currents in Estuaries, Proc. Minnesota International Hydraulics Convention. Sept. 1953.
- 2) 福島久雄; 河口二重水層に於ける渦動拡散について. 北大工学部研究報告, 第12号(昭和30年6月).
- 3) 大坪喜久太郎, 岸 力; 河口における海水の浸入. 技術資料, 第15号(昭和34年2月).
- 4) 堂腰 純; 石狩川下流かんがい排水障害調査. 北海道庁(昭和31年, 32年).
- 5) Farmer, H. G. and G. W. Morgan; The Salt Wedge, Proc. 3rd Conf. Coast. Eng. Oct. 1952.
- 6) 柏村正和; 河口に於ける二重水層 (1). 北大工学部研究報告, 第15号(昭和31年12月).

II. 観測方法及びその結果

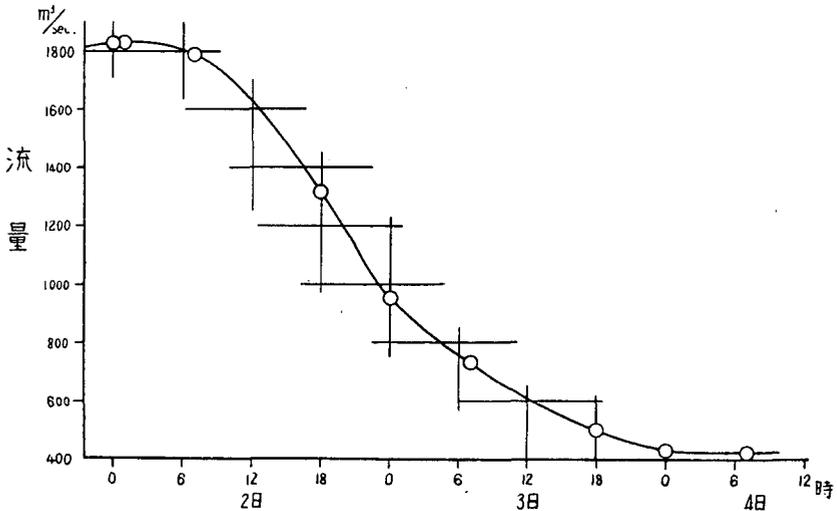
石狩川は大雪山に源を發して、空知、石狩の平野を南下し、河口附近で大きく迂回して日本海石狩湾にそそぐ、延長 320 km、流域面積 14400 平方 km を有する日本屈指の大河川であり、渇水期には塩水楔の先端は河口より上流 20 数 km に及ぶといわれている。

筆者等の観測開始時 (8月2日10時)には、数日前に石狩川上流域にあつたかなりの降雨のため河水は増水して塩水楔は河口外に押し出されていた。江別に於ける水位観測の結果 (第2図) から水位-流量曲線によつて算出した流量は8月2日10時約 1800 m<sup>3</sup>/secであつて、その後徐々に減少し、8月3日午前10時、流量約 700 m<sup>3</sup>/sec のときにはじめて河口内部に楔先端が浸入しているのが認められた。

楔の先端の探知には、一對の白金電極にコードを附して水中に吊し、極間の水の電気



第1図 石狩川河口附近略図



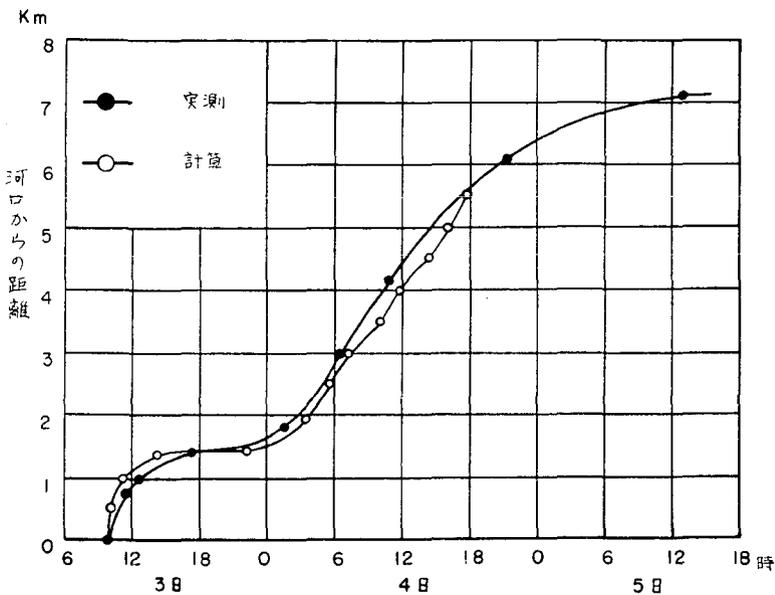
第2図 江別、石狩大橋における流量

抵抗を Kohlrausch's Bridge にて読取る装置を用いた。水に含まれる塩分によつて電気抵抗が非常に変化することが知られている<sup>7)</sup>から、逆にこの装置によつて淡水と塩水を識別すること、或いは塩分濃度を求めることは容易である。電極を舟で曳きながら移動し、河底の電気抵抗を刻々読み取ることにより、極めて鋭敏に楔の先端位置を知ることが出来た。

第1表 楔先端位置及び時刻

河口よりの距離	場 所	時 刻	備 考
0 (km)	河 口 右 岸	8月3日 9 <sup>h</sup> 32 <sup>m</sup>	楔 ナ シ
0	河 口 左 岸 寄	10. 05	楔 後 部
0.7	第 三 水 制	10. 55	楔 先 端
1.02	第 二 水 制	12. 30	〃
1.70	第 一 水 制	8月4日 1. 40	〃
3.00	左 岸 渡 船 場	6. 21	〃
4.37	治 水 事 業 所 前	10. 37	自 記 計 記 録
5.55	生 振 運 河 水 門 附 近	20. 17	楔 ナ シ
6.1	放 牧 場 境 界	20. 55	楔 先 端
7.2	矢 白 場 右 護 岸 上 流 端より57m下流	8日5月13. 50	〃

第1表に示すように、8月3日から5日迄数回にわたつて楔先端の位置を測定し、上流に遡上する状況を観測したのであるが、8月5日13時には先端は河口上流7kmの点に達した。この間の先端の位置と時刻との関係を図示すると第3図のようになる。この図から明らかなよ



第3図 塩水楔遡上状況

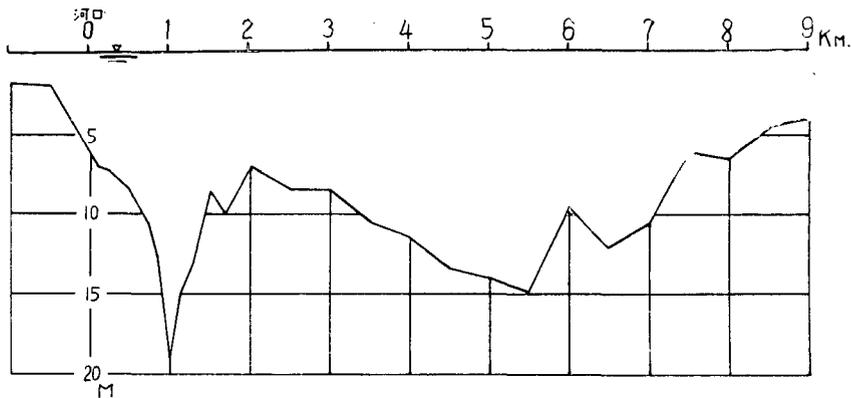
7) 日本海洋学会； 海洋観測常用表。

8) 八鍬 功； 天塩川河口附近の濁度について。昭和28年～31年天塩港調査報告(昭和34年6月)。

うに楔先端遡上の過程は二段になっているのであるが、これは河水流量の減少速度が単調である場合に一樣水路では考えられないことである。実際に第2図によれば観測期間中の河水流量は次第に減少しており、流量の変化の経過がこのような楔先端遡上の二段構造の原因となり得ないことは明らかである。故に筆者等はその原因が河床の縦断形状の特殊性にあるとの予想のもとに、石狩川治水事務所の測量になる深淺図をもとにして河床縦断形状を調べたところ、河口内1 kmと5.5 kmの附近に二つの大きな凹部のあることを知り、これが二段構造の原因となり得るか否かを検討した。その結果次に述べる如く、この二つの凹部によつて二段構造をよく説明することが出来た。

### III. 結果の考察

石狩川河口部の河床の縦断形状は第4図に示す通りで、前述の如く河口内1 kmと5.5 kmの点を最深部とする二つの大きな凹部が見られる。この凹部が如何にして出来たものか現在の所明らかではないが、恐らく洪水時の河床洗掘が原因であろうと思われる。河口内部の河口に



第4図 河床縦断形状

近い部分に凹部があることは天塩川に於いても観測されており<sup>9)</sup>、このような特徴をもつ河川は多いものと思われる。次に注目すべきことは河口附近が非常に浅くなっていることである。これは洪水時の流出土砂の為もあるが、それよりも河口外沿岸漂砂が大きな原因であると思われる。

塩水楔の遡上の性質に上述の凹部と河口の浅いことが関与していることは明らかである。このような河床縦断形状から、筆者等は楔遡上の過程を次の如く模型化して考えた。1) 塩水楔を理想流体と仮定する。2) 河口から流入する塩水流量は、河口が極めて浅いことから淡水流量のみの関数で、流入後の河床勾配、塩水と淡水の境界面の勾配等には関係しない。3) 河口から流入した塩水は第一の凹部に流れ込み、これを満たして後更に第二の凹部に流入し、次第にこ

9) 八木 実；天塩港について。技術資料，第12号（昭和32年1月）。

れを満たして更に前進する。

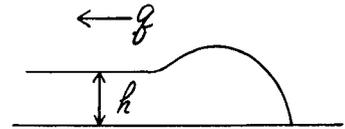
以上の模型に従つて、一応定性的に楔の遡上を考察する。先ず河口から流入した塩水は、負勾配を下つて第一の凹部に入るので前進速度が早い。先端が凹部の最深点に達した後は、凹部にたまる塩水の量によつて先端は徐々に正勾配をはい上つて行く。従つてこの間の先端前進速度はおそくなる。第一凹部を海水が満たした後は、同じ過程を第二凹部にてくり返し、負勾配では早く、正勾配にかかるとおそくなる。以上の考えは、第2図に示した楔先端の遡上の二段構造をよく説明していると思われる。

次に定量的にどの程度この考えが適合しているか検討を試みよう。第2図から明らかなように、観測期間を通じて淡水流量は少しづつ次第に減少しているので、流入する海水流量はそれに応じて増加した筈であるが、この期間の海水流量の変化は実測されていない。第1図の\*で示した地点に於いて、8月4日10時から24時間、1時間おきに淡水流速と共に海水の流速を測定した結果によれば、海水の流速、流向及び塩水層の厚さは潮汐によりかなり変動している。この期間の平均海水流速は上流方向に5.0 cm/secとなるので、この値に平均の海水有効断面面積260 m<sup>2</sup>を乗じて平均海水遡上流量13 m<sup>3</sup>/secを得た。この値はその後増加したと考えられるが、以後計算の便宜上、観測期間を通じて流入海水の流量を13 m<sup>3</sup>/secで一定であつたと仮定する。

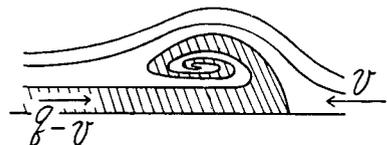
河口を入つた楔の先端が、負勾配を下つて凹部に流入するときの流速には種々の要素、例えば淡水との密度差、淡水との境界又は河床に於ける摩擦力、河床勾配等が関与するのであるが、ここでは楔の先端速度がかなり遅いことを考慮してすべて無視し、先端は楔の先端水頭が重力によつて崩れる力によつて進行するという理想流体に於けるKármánの模型にもとづいて定常化して考察を進める。第5図の如く楔と共に移動する座標系については、上層の流体の流速 $q$ は

$$q = \sqrt{2gh(\rho_1 - \rho_2)/\rho_2} \quad (1)$$

で表される<sup>10)</sup>。但し $\rho_1$ 、 $\rho_2$ は下層及び上層の流体密度、 $h$ は下層流体の厚さである。この場合逆に上層水を静止して考えれば、楔先端は流速 $q$ を以て前進することになる。楔が形状を変えずに進行するならば、楔内部の塩水流速は $q$ に等しい。一般にこのように塩水楔が淡水の下に潜入して行く現象は、気象現象に於ける寒冷前線と同様に考えられるがその場合先端は第6図のように上にめくられて渦を発生することが知られている<sup>11)</sup>。塩水楔の先端にも同様の



第5図



第6図

10) von Kármán, T.; The Engineer grapples with Non-Linear Problems, Bull. Am. Math. Soc., 46 (1940).

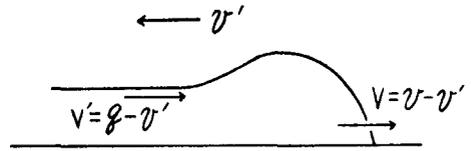
11) Prandtl, L.; The Essentials of Fluid Dynamics, (1953) P. 369.

ことが予想されるが、その時には楔の先端速度  $v$  は楔内部の流体の流速  $q$  とは等しくならず

$$v = q / \left( 1 + \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \right) \doteq \frac{1}{2} q \tag{2}$$

となる<sup>11)</sup>。実際には淡水流速  $v'$  が存在するから、楔先端附近をモデル化すると第7図のようになる。 $V$  は楔先端の進行速度、 $V'$  は楔内流体速度、 $v$  は楔先端の淡水に対する相対速度を夫々表すものとする。(1)式から

$$V' = \sqrt{2gh(\rho_1 - \rho_2)/\rho_2} - v' \tag{3}$$



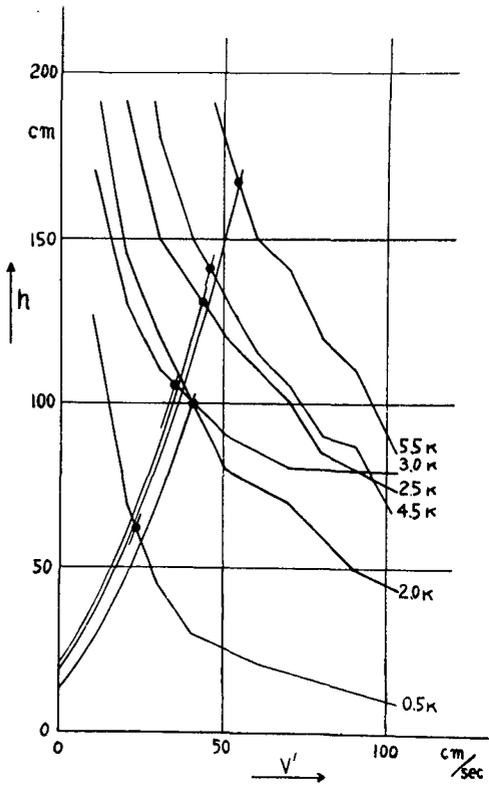
第7図

を得る。

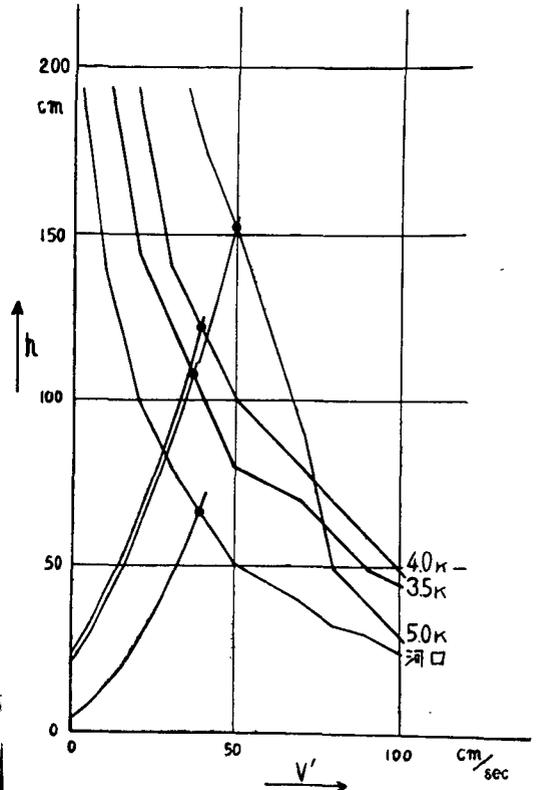
又河川の横断面積  $A$  は河床からの高さ  $h$  で表されるから、これを  $A=f(h)$  とおけば、流入海水の流量を  $Q$  として

$$V' = Q/kf(h) \tag{4}$$

となる。但し  $k$  は断面形状による常数である。今横軸に楔内流体速度  $V'$ 、縦軸に塩水層の厚さ  $h$  をとつて、式(3)及び(4)を数カ所の断面について同一グラフ上に画けば第8図に示すよう



第8図(1)



第8図(2)

な二群の曲線が得られる。夫々の群に属する曲線のうち同一断面を表す二曲線の交点を図の上から求めれば、その地点の  $V'$  が得られる。更に楔先端の前進速度  $V$  は

$$V = v - v' = \frac{1}{2} (V' - v')$$

で表されるから、 $V'$  に上記の如く求めた値を代入して、楔先端の速度  $V$  を算出することが出来る。(1) 式中の  $k$  の値は 1 より小さいものと思われるが、正確な値は明らかでないので、ここでは簡単に 1 に等しいとして計算した。以上の方法によつて、河口内の河床負勾配に於ける塩水楔先端の流下速度を算出した。

次に正勾配を楔がはい上るときの速度  $V$  は、その河床凹部に海水がたまって淡水と海水の境界面が上昇して行く速度を河床勾配で除せば求まる。即ち

$$V = Q/A(h) I \quad (5)$$

によつて得られる。但し  $A(h)$  は河床凹部に海水が最低点から  $h$  の高さまでたまったときの海水の表面積であつて、勾配  $I$  と共に深淺図から容易に求めることが出来る。ここでは前に述べたように  $Q=13 \text{ m}^3/\text{sec}$  と仮定してあるから、(5) よりただちに  $V$  を計算することが出来る。

このようにして各断面に於ける塩水楔先端遡上速度  $V$  を、負勾配の式より求め、それを更に楔先端の位置と時刻との関係に計算し直した結果は、第 3 図中に白点を以て記入してある。第 3 図によれば、計算結果はかなりよく実測結果と一致しており、少なくとも楔先端の遡上機構が二段になつていることは、計算結果によつても認められたと云うことが出来る。

#### IV. 結 論

上に述べたように、楔先端の遡上速度の計算は、河床に二つの凹部のあることに着目して行われたものであつて、その結果が実測値とよく一致したことにより、石狩川の塩水楔遡上に二段の過程があるのは、河床に二つの凹部がある為であると思われる。

尚河口が非常に浅くなつていることも、この計算を行う上に非常に有利な点であつて、もし河口が深くなつている場合には、流入海水の流量は淡水の流量によつて変化するのみでなく淡水と海水の境界面の勾配にも関係し、更に流入海水流量が多ければ、境界面の渦動粘性による抵抗や河床の粗度による抵抗をも考慮しなければならないものと思われる。更に石狩湾の潮差がさほど大きくないことも解析を非常に容易にした。実際潮位表によれば、小樽港の最大潮差は 8 月 1 日に 19 cm で、以後減少し 3 日及び 4 日は夫々 13 cm, 9 cm であつた。潮差が大きい場合は海水流入の状況は複雑となり、淡水と塩水との間にそれらの混合層が発達して、模型を上記の如く簡易化することは難かしい。流入海水流量が時間的に漸増するものとして計算すれば、計算値は更に実測値に近づくものと思われる。

一般に河川の河口部は水深が一様でない所が多いと思われるので、塩水楔の遡上問題を取扱う場合には、ここで述べた様に河床形状がその大きな要素となつている事を考慮する必要

がある。

以上の塩水楔遡上の観測は、塩水楔の碇置観測や表層及び底層の塩分濃度、河口外に流出する淡水の分布測定等と共に、北大農学部堂腰助教授、工学部岸助教授、北海道庁池田技官及びその他の方々と協力して行われたものである。筆者等がこの研究を遂行するに当つて、これらの方々の示された御厚意に対し深く感謝の意を表するものである。

#### 4. On the Growth of a Salt Wedge in the Ishikari River

By Hisao FUKUSHIMA, Masakazu KASHIWAMURA,  
Isao YAKUWA and Susumu TAKAHASHI

(Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, Hokkaido University)

When salt water invades upstream from a river mouth due to a density difference, there are three different types according to the degree of turbulent mixing between fresh water and salt water. In the type of invasion of the Ishikari River, the effect of mixing is usually negligible and salt water lies beneath fresh water generally with a shape of a wedge. The layer of salt water thus formed is called a 'salt wedge'. In a stationary state, the length of a salt wedge is understood as a function of a discharge of the river. Stationary problems of a salt wedge including this problem have been investigated theoretically and experimentally by many research workers. Concerning to a non-stationary state, however, there are few investigations because of the difficulty of a theoretical treatment and a field observation.

In August 1958 the present authors conducted an observation of a salt wedge which was driven out by flood water from the river mouth for a few days. The salt wedge made a gradual growth upstream as the discharge of fresh water decreased. The front of the salt wedge was clearly determined by the method of measuring the electrical conductivity of water with a Kohlrausch's bridge. As a result of these observations, it was noticed that there exist two steps in the curve of the relation between the length of the wedge and time as shown in Fig. 3. The purpose of this report is to clarify the mechanism of showing these two steps existing in the progressive salt wedge in the Ishikari River. As the longitudinal profile of the river bed was examined, it was found that there are two large hollows on the river bed inside the mouth. It is assumed that, when the salt wedge flows down into each hollow, the velocity of the front can be computed in the manner already suggested by T. von Kármán for an ideal fluid. When the wedge progresses up on the positive bed slope, on the other hand, it is also assumed that the velocity of the wedge front can be determined by the rising rate of the surface of salt water accumulated in each hollow and the slope of the river bed.

Since the calculated results thus obtainable are in good agreement with the observed ones, it is concluded that those two hollows caused the mechanism of showing the two steps as the salt wedge progresses upstream the Ishikari River.