



# HOKKAIDO UNIVERSITY

|                  |   |
|------------------|---|
| Title            | 河口二重水層に於ける渦動拡散について  |
| Author(s)        | 福島, 久雄; Fukushima, Hisao  |
| Citation         | 北海道大學工學部研究報告, 12, 157-188   |
| Issue Date       | 1955-06-15  |
| Doc URL          | <a href="https://hdl.handle.net/2115/40557">https://hdl.handle.net/2115/40557</a> |
| Type             | departmental bulletin paper   |
| File Information | 12_157-188.pdf  |



# 河口二重水層に於ける渦動拡散について

福 島 久 雄

(昭和30年2月28日 受理)

## On the Eddy Diffusion in the Water Layers of Estuary

Hisao FUKUSHIMA

### Abstract

The eddy diffusion in the water layers observed at the estuary Ishikari river is investigated. The compound chemical tube invented by the author is used to observe and to record the daily variation of the depth of the "Sprungschicht". The relation between the chlorinity of the surface layer and the depth of the Sprungschicht is cleared. The eddy diffusion coefficient of the surface layer is obtained from the values of the chlorinity distributions and was compared with one which was obtained from the dynamical observations.

The horizontal and vertical distributions of the transparency are also obtained and discussed.

### 1 序 論

河川は陸上殆どすべての部分に分布し吾々の生活に密接な関係のあること海洋湖沼に劣らぬにかゝらず、その研究は主として工学にゆだねられ、河川工学の顕著な進歩にもかゝらず物理学の対象たるものが甚だ稀であつたことは、海洋物理学、或は湖沼学の發達に比べて著しい事実と云わなければならない。近來洪水の防災の見地から、また水力利用の必要から、洪水予報、河水統制に關し物理学的研究も亦アメリカ及日本等に於て次第に行われるようになった。

然しながらこれ等を以て河川の物理学的研究のすべてとすることは出来ない。例えば河川水温に關する熱学的諸問題、河川用測器の問題、河口に於ける諸現象、河川浮泥量の問題等、何れも基礎的な問題であつて現在なお研究の途上にあるものである。

筆者は石狩川について主として河口内部に於ける河水と海水とがなす層重構造の研究を行いました同時に河川の結氷、水温、浮泥量等の研究も行つて来たのであるが、由來河口の研究は河川学、海洋学でも所謂境界分野の問題として近年までは比較的等閑にされていた部分であつたようである。ただ河口に於ける潮汐については古くから理論的研究が見られるがこの場合にも層重構造は考えられていないようである。

河口と云う言葉は使用する人によつて種々の場合があり定つていない。海岸線を外れて了つた

外でも広い外洋から見て河口とよぶことも多く、また海岸線が河を横断する狭い箇所を云うこともあり、陸上から見てその地点を含めて更に上流を云うこともある。こゝで河口とは最後の意味である。

河口の現象はその変動が複雑で興味深くまた流体力学の上からもこの様に密度の相異なる二層の水層が相接して流下し逆流する現象は他に類を見ないものである。戦後海岸の侵蝕に関しての信濃川河口に於ける研究<sup>1)</sup>等も行われ、また廃水による海水の汚染等の問題もあつて近時この方面も次第に注目せられ、料も次第に蓄積されつゝある様子である。

著者は以下に於いて主として石狩川河口内部に於ける流速分布、塩素量の分布、光透過率の分布の測定を基とし、二層の水層間に行われる渦動拡散の現象を中心として河口の構造を明らかにしたいと思う。なおこの研究に際し著者は複式測深管を考案して躍層深度を簡単に記録し、また光電池による濁度計 (Turbidimeter) を製作して濁度及び躍層の検出に使用した。

附表第1図に石狩川河口の地図を示した。河中約200米以上で深度は一定でないが Station A の附近で10米、制水堤の先で13米あり、上流の Station で4~5米である。平均流量は700 m<sup>3</sup>/sec である。

河口は浅い砂浜で東北方に発達し勝な砂嘴を左岸にもつている。従て河口の縦断面はペリカン口状をなし内部が深くなつている。二重層は河口の内外で存在するが、今は河口内部を主として述べる。

## 2 複式測深管

河口に於ける躍層の深度は時間的に変化する。潮汐による変動は比較的少いけれども、河川流量による変動は緩徐であるが甚だ大きく増水時には全く河口内部に躍層を見出せないことさえある。また気圧の低下や強風が沖から吹き寄せる場合、河口の海面が上昇するわけであるが、その場合の躍層の変化はどうなるであろうか。かように躍層の深度変化を長い間にわたつて研究するには次のようなことが必要である。

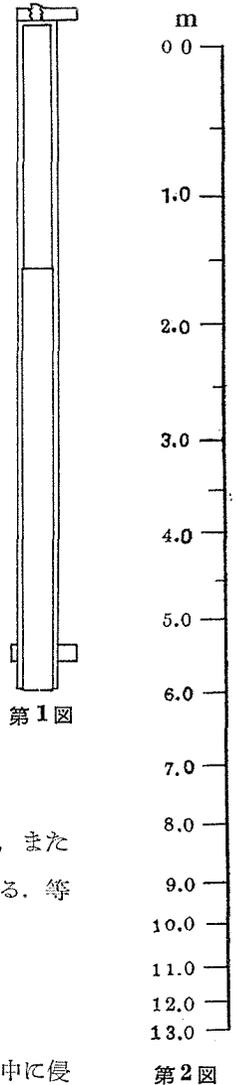
第一に躍層の深度と云つても地点により異なるから観測地点を定めて少くとも1日1回決定し、これを1年を通じて行うことが望ましい。第二に観測は研究者が毎日行うことが出来ないから、現場に居住する技術員に依託する外はない。また観測値は自記され他日研究者がこれを利用出来るような客観的記録であると便利である。第三に以上の事情により観測の器械は取扱い簡単で故障の起らぬものであることが必要である。従て電気計器を使用することは適当でない。著者はこれ等の条件を充す躍層深度の観測法を種々考えた末次のような装置を製作し複式測深管(または複式化学管)と名付けた。

躍層深度の決定には水に固有な量、例えば温度、光の透過率、塩素量、電気伝導度、流速、比

1) 新潟港技術調査報告 I—III

重等の中で躍層を構成している量について深度を細かくして測定すればよいが何れも測定に時間を要するものである。

複式測深管は塩素量による方法で躍層を記録する。その構造は第1図に示す。内径 1.6 cm、長さ 36 cm の真鍮の閉管で内側の直径の両端に留る管壁の部分に軸に平行に深さ 1 mm、巾 0.6 mm の溝を切り、これが開口端から奥に 22 cm の所までつづいている。別に巾 17 mm、長さ 22 cm の Kent 紙を多数用意してこの片面にクロム酸銀を塗布し、他面には先づ鉄明礬の 5~10% 溶液を塗布し乾燥をまつて黄血塩の微粉末を塗擦しておく。この試験紙は湿気をさけるため常時ブリキ罐に保存しておく。測定の際は試験紙 1 枚を管中の溝に装填し開口端を下側にして鉛直に水中に吊下げて沈めてゆけば河水は閉管内に徐々に侵入して内部の空気の気圧と釣り合う。開口端が海水層に達すればそれ以後侵入するのは海水で試験紙に塗布したクロム酸銀は塩化銀の白色に変わる。またもう一方の面は河水、海水にかゝわらず水に遇えば青変する。試験紙の両面に記せられたこれ等の記象を別に作製した scale で読めばその時の躍層の深度を知ることが出来る。この試験紙は乾燥して日光を遮れば少くとも数年の保存に耐える。



第1図

今管の中に試験紙を装填した場合の管の空間部分の体積を  $v_0 \text{ cm}^3$  とし、また  $z \text{ m}$  だけ開口端が水面から入った場合の管中の空気の体積を  $v \text{ cm}^3$  とする。等温変化を考えれば

$$1 + \frac{z - h/10^2}{10} \cdot 0.987 = \frac{v_0}{v}$$

但し  $z$  は水面から測深管の最下端までの深さ (meter で表す)、 $h$  は管中に侵入した水の高さ (cm で表す) である。

$s$  を試験紙を装填した部分の管中の空間断面積とし

$$l_0 = \frac{v_0}{s}$$

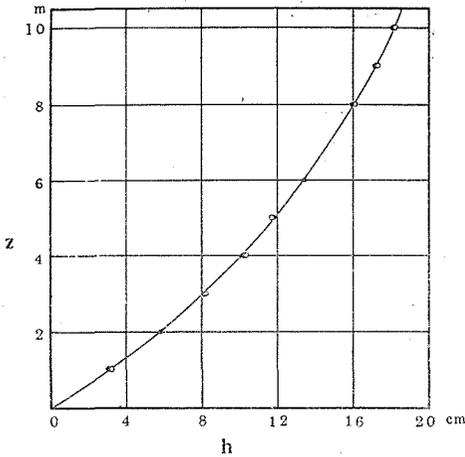
なる  $l_0$  を以て有効管長とすれば

$$z = 10.13 \frac{sh}{v_0 - sh} + \frac{h}{10^2}$$

なる故

$$z = h \left( \frac{10.13}{l_0 - h} + 0.01 \right)$$

有効管長を決定するには測深管を水中に入れてその深度と侵入水の高さ  $h$  とを各々の深度に応



第 3 図

じて測定すればよい。淡水についてこの測定を 10 m の深さまで行つて結果有効管長として。

$$l_0 = 36.65 \text{ cm}$$

を得た。第 3 図は  $h$  のよみをそのまま深さに換算する scale である。躍層の深度はクロム酸銀を白変した境界をこの scale で読めばよい。

この場合に誤差を生ずると考えられる原因が数種ある。管を予め水温に近づけぬと管中の空気が水中で冷却されまたは暖められ（冬

季）の場合である。また管中の水の対流及び攪乱により管中にて海水及び河水が層重状態のままにならぬため、クロム酸銀の側に記録される管の河水と海水の境界がぼけてしまうこともあり得

第 1 表

| $z$<br>(m) | $h$<br>(cm) |      | $z$<br>(m) | $h$<br>(cm) |      |
|------------|-------------|------|------------|-------------|------|
| 1          | 3.2         | 3.1  | 6          | 13.4        | 13.4 |
| 2          | 5.8         | 5.8  | 7          | —           | 15.5 |
| 3          | 8.2         | 8.1  | 8          | 16.1        | 15.9 |
| 4          | 10.8        | 10.2 | 9          | 17.3        | 17.2 |
| 5          | 11.7        | 11.8 | 10         | 18.2        | 18.1 |

る。この後者は 1 年中の記録を通じてみると多少存在する。然し中間層が実際に厚い場合も他の精密な観測から屢々存在するので記録のみを以ては中間層の発達によるものか乱れによるものかは判定が困難である。

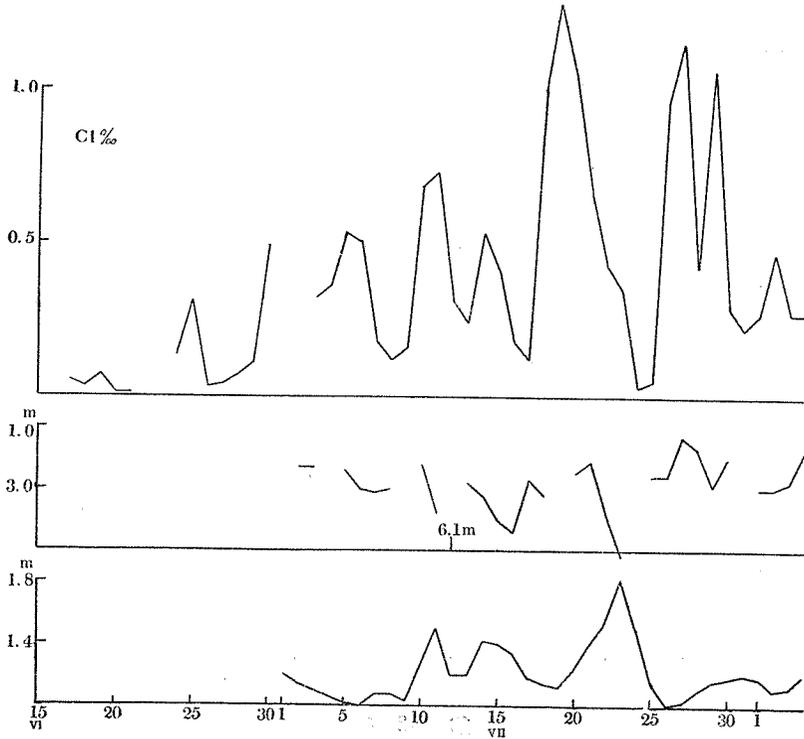
第 1 表は実験的に得た  $z$  と  $h$  との関係で第 3 図のようになる。

### 3 測深管による躍層深度の測定と考察

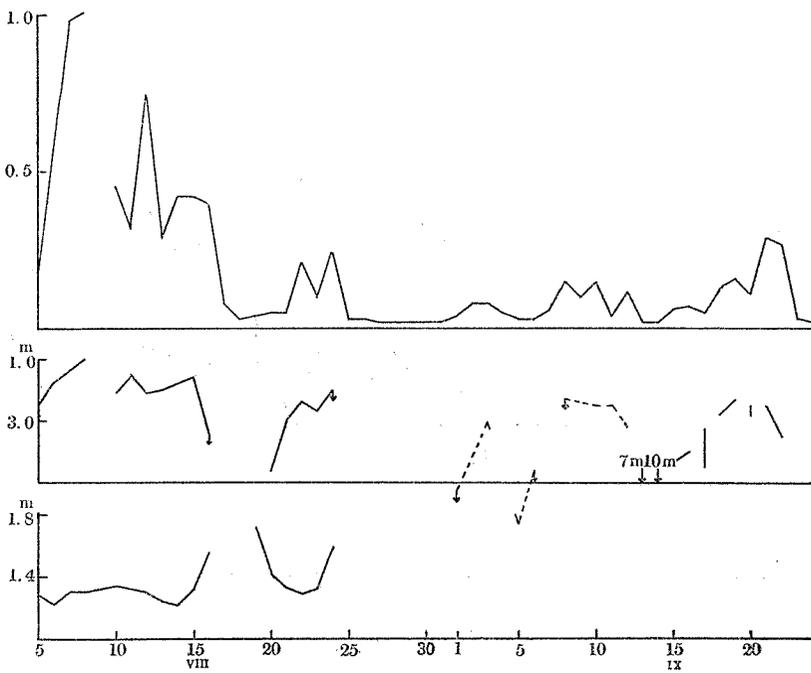
前章に述べた複式測深管を使用して、1942 年 4 月から翌 1943 年 4 月まで石狩河口の定点を選んで毎日 13~16 時の間に躍層の表面からの深度を記録せしめ同時に表面から採水して表面塩素量を測定した。これにより 1 年を通じての河口に於ける塩素量拡散の状況が明かになった（第 4.1~4.6 図）。

観測のため選んだ地点は石狩川河口から 4.4 km 遡つた箇所で、河中約 200 m、深度は最大 10 m である。この最大深度で凡そ流心に当る部分に浮標を碇置し、こゝで小舟により採水、測温、躍層深度の観測を行つた。これ等は左岸にある石狩川治水事務所石狩治水工場の橋場常吉氏に依頼した。氏の忠実な努力によつて欠測殆どなく、無事 1 ケ年の観測を完了することが出来た。採水瓶は十分に蒸留水で清浄した 250 cc のガラス瓶を用い表面水を一度採水した後これを捨て 2 二度目の採水を封入した。この採水瓶は実験室に運び Mohr 氏法による塩素の定量を行い所謂塩素量を決定した。

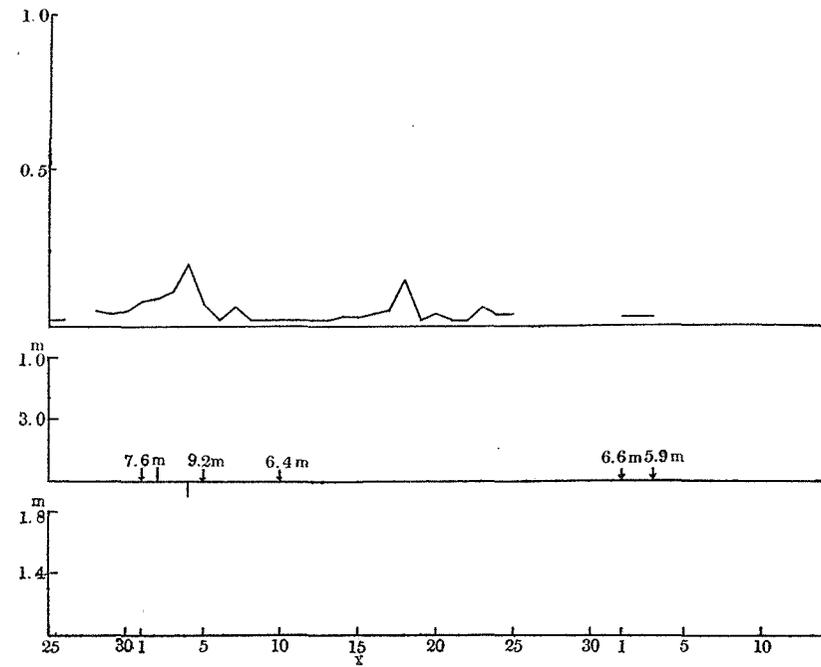
例年この地点は結氷するのであるが結氷はこの年はこゝよりも数軒上流に始つた。またこの地



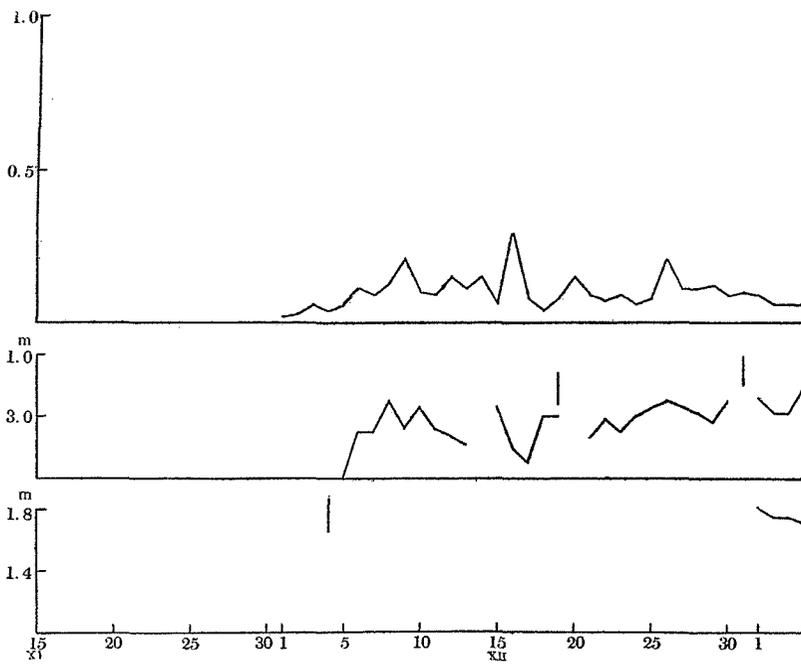
第 4.1 図 上: St. A の塩素量, 中: 躍層深度, 下: 江別水位



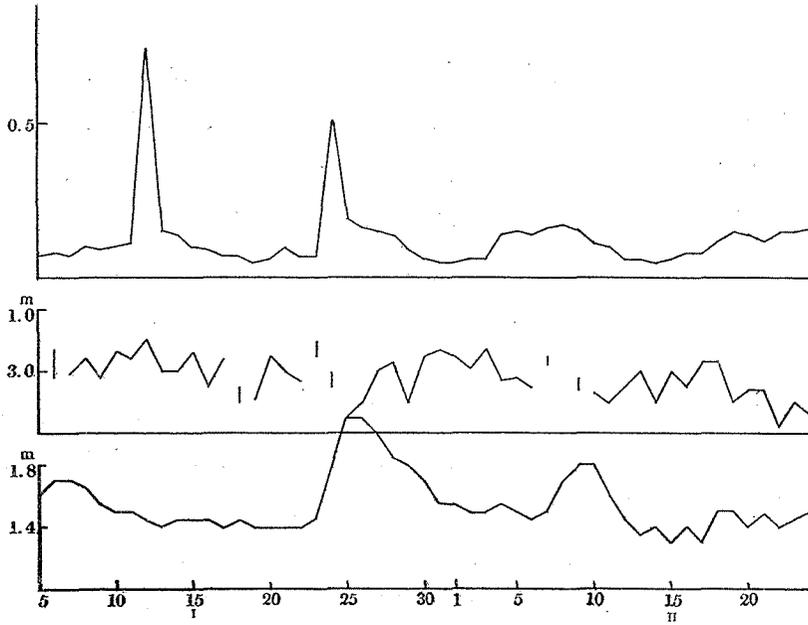
第 4.2 図



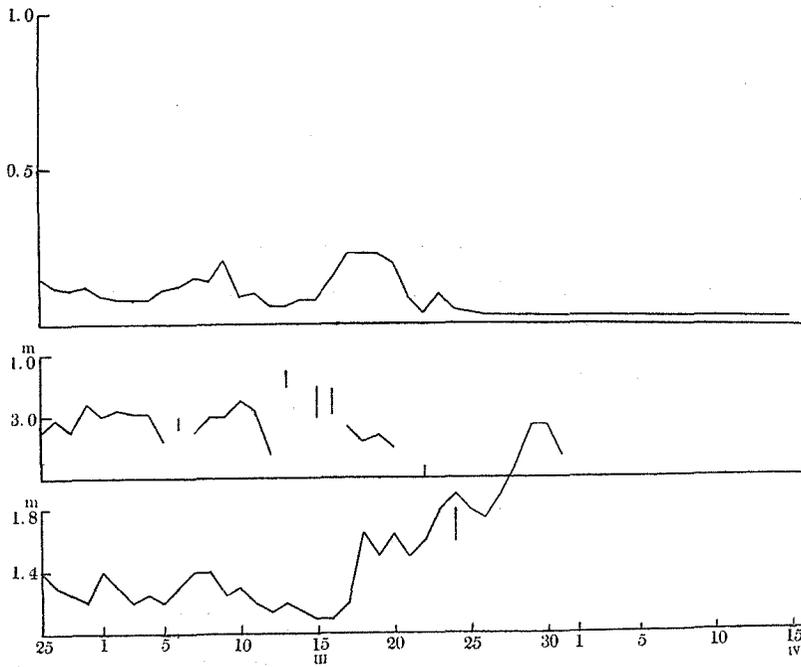
第 4.3 図



第 4.4 図



第 4.5 図



第 4.6 図

点から下流には勿論凍結がなかつた。従て表面塩素量は全期間を通じて自由表面に於ける値である。

筆者はかつて石狩河口に於て横断面の河口構造を論じた際、定性的には季節によつて4つの型に分類されることを論じたが、今の場合もやはりこの分類に従つてよいことが判つた。即ち全期間を通じて見ると躍層の全く現れないのは春から6月末まで、それ以後は急激に躍層が顕著になり、7月27日は深度1.3m、8月8日僅に1mに達している。然し8月18日の増水の後には躍層は現れない日が多くなり、10月中は深度が増大して6~7mとなつた。而も全く出現せぬ日も多い。12月3日以降はまた次第に回復し安定となつて2~4mを上下し3月24日突然消失するまでつゞいている。

表面塩素量をしらべてみると1年を通じて0.03%以上出現しているのは先づ6月中旬の0.5%を最初として0.0%の日を含みながら次第に値を増し7月19日には最高値1.28%に達した。日較差も甚だ多く0.06% dayに及んでいることも珍しくない。然し8月18日以後は日較差も少く絶対値も減少して11月2日に0.3%に急昇した後は殆ど0となつて12月1日までつゞいている。12月2日以後は僅かながら増大を見、平均0.1%を上下しているが、冬の間は変化は夏に比べて緩やかで一般に曲線の形が数日にわたりなだらかなのが特徴である。ただ1月24日の1.00%突発的な上昇が僅に目立つているのみである。即ち躍層の深度と塩素量とは甚だ密接な関係にあり、これを時季的に4つに大別すると(I)春季融雪時の増水の型は躍層が全くみられず表面塩素量も殆どない。(II)夏季の渇水時の型は躍層が顕著で深度も浅く塩素量も甚しく多い日があり日差が大である。(III)秋季の増水型は躍層が低下し、不安定で少く塩素量も減少し検出されぬ日も多い。(IV)冬季減水すると躍層の発達は夏季について顕著になり深度4~5mの附近を上下し塩素量の日変化も少い。

いま上層を流下する淡水層の流速垂直分布 $u$ は近似的に一定で、淡水層の實質部分が下層から質量交換によりうける海水の實質に関する遷移率を $\alpha$ とし全流下区間を通じて一定であるとす。交換係数 $K$ も全区域を通じて一定とする。然る時は第章(1)式により表面塩素量の或地点に於ける値 $S_a$ は $h \equiv \alpha/K$ として

$$S_a - S_\infty = 2\theta_0 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_s}{\left(1 + \frac{ha}{h^2 a^2 + \delta_s^2}\right)} \frac{1}{\delta_s} e^{-\frac{\gamma \delta_s^2}{a^2}}$$

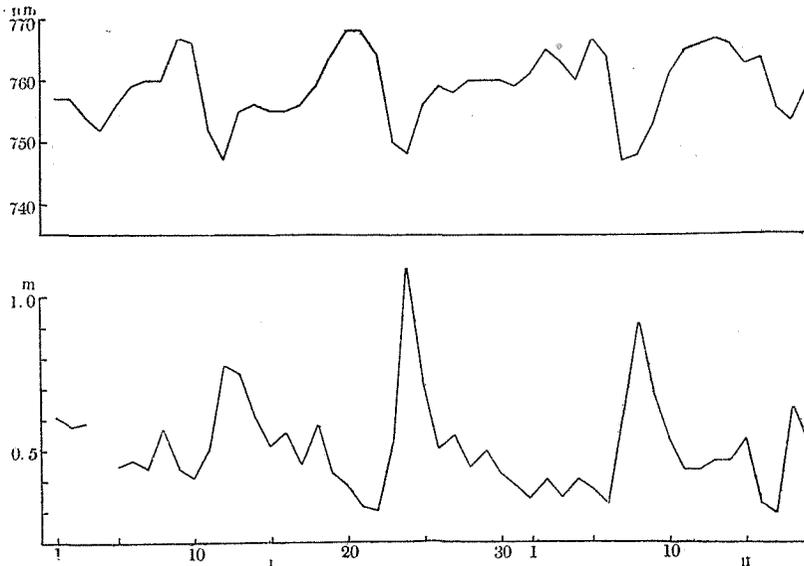
但しこゝに $a$ は上層淡水層の厚さとし、 $x$ は下層海水の侵入している尖端から考えている地点までの距離であるとする。また $S_\infty$ は下層海水の塩素量とする。上式に於いて $aa/K = C_1$ 、 $Kx/a^2 u = C_2$ 。とおけば $C_1$ 、 $C_2$ は無次元でこれ等が一定値をもつ限り表面塩素量はいつも同じ値を有するであろう。仮りに $a$ が減少した時 $K$ も同じ割合で減少するとすれば $C_1$ に変化な

く  $C_2$  は  $K$  の他に  $x$  も同じ割合だけ減少すれば  $C_2$  の変化なく塩素量に変化がない。然し実際の場合には  $a$  が減少すれば  $x$  は更に増大し同時に  $u$  は減少する。何故ならば河水の断面の減少することは表面の水位の傾斜の減少することを意味し流速の減少を結果するからである。  $x/u$  の項の増大は塩素量を増大する方向に働くから  $a$  の減少は甚だ利いて来ることになる。実際の測定によると（第7章参照）表面塩素量は海水層の尖端では距離  $x$  に対して直線的に増しているが、これは上式の  $x$  のうちで極めて微少な部分に相当するからである。海水層からの海水の混合が5%にならぬ中に  $x$  の長さは河口をすぎてしまうのである。

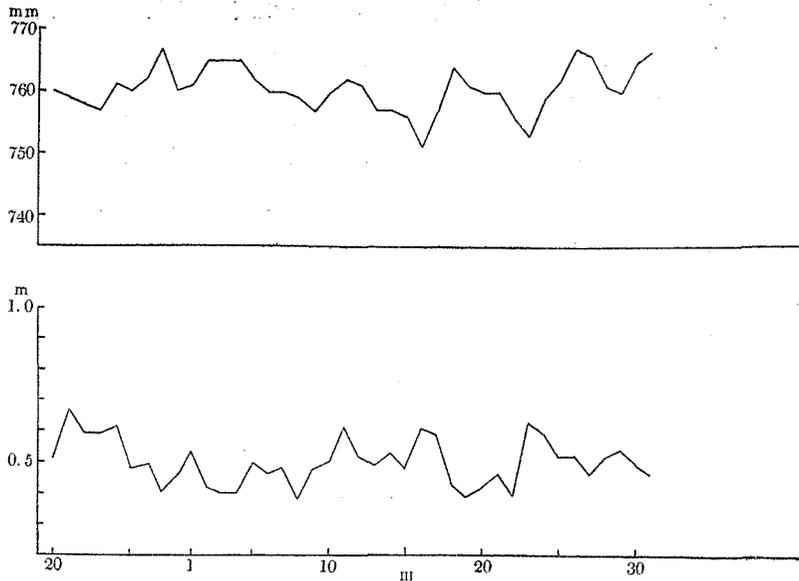
$a$  の値が小で変動の割合が大きいのは夏の渇水期である。7月3日～8月17日の変動はよくこの状態を表している。躍層深度の日変化と塩素量の日変化とは平行している。所が冬季の塩素量変化は躍層の深度の変化とは位相が反対であることが注目される。石狩川の結氷が大よそ完成し、塩素量の日変化がなめらかな曲線となつて来たのは12月26日以降であるが1月からの曲線のやまをしらべてみると次のようになる。

1月12日, 1月24日, 2月8日, 2月19日, 2月24日, 3月7日前後

この中2月19日までの4つの場合は何れも水位の甚だしい上昇があり同時に北西の卓越風が強いため河口に於ける海面の上昇が甚しかつたことが推察出来る（第5図）。このような場合表層の河水はどう云う状態にあるかと云えば水面傾斜の減少と風による表面の剪断力のため河口の内部に一部貯溜されるであろう。躍層深度の低下していることがこのことを裏書している。 $u$  の減少は勿論起つているが一方うねりによつて誘発される内部波があるから遷移率及び渦動拡散は甚しく増大し、その表面塩素量は急激に増大しているものと思われる。夏季の渇水型の場合にも



第5.1図 上：札幌の毎日平均気圧（1943） 下：St. Aの毎日平均水位（1943）



第 5-2 図

勿論このようなことは起るであろうが、殆どどこかの流域で降雨があり、ついでに増水が起るからこの方の変化が大きく cover してしまうのであると考えられる。冬季の低気圧の通過には増水が見られず江別に於ける水面上昇(第4図)も河口のそれに比べると時間がおくれ更にこれについて河口の躍層の深度がふえぬこと等から考えて海面上昇の背水と思われる。潮差は 20 cm 位で天候による変化がずつと大きくまた躍層の深度変化と塩素量のそれとは潮汐の場合に比べて位相が反対であるから、冬季の表面塩素量の変化と潮汐の間に密接な変化があるとは思われない。

2月24日、3月7日前後の極大は水位の上昇がないが躍層の低下はかなり顕著で(1~2m)ある。気圧の低下も観測されているから(第5図2)或は前同様の原因かも知れぬ。

最後の3月17日の極大は気温、水温が上昇し始めている所から解氷期と考えられる。海面上昇もなく逆に躍層は下り始めているからこの場合の塩素量の増加は出水前期によく起るそれである。

第 2 表

| 月 日      | 測 定 刻 (h) | 水 温 (°C) | 表 面 塩 素 量 (Cl%) | 躍 層 深 度 (m) | 月 日      | 測 定 刻 (h) | 水 温 (°C) | 表 面 塩 素 量 (Cl%) | 躍 層 深 度 (m) |      |  |
|----------|-----------|----------|-----------------|-------------|----------|-----------|----------|-----------------|-------------|------|--|
| 6 (1942) | 17        | 18.3     | 0.05            |             | 6 (1942) | 26        | 19.6     | 0.03            |             |      |  |
|          | 18        | 19.1     | 0.03            |             |          | 27        | 14       | 19.4            | 0.04        |      |  |
|          | 19        | 17.9     | 0.07            |             |          | 28        | 14       | 18.9            | 0.07        |      |  |
|          | 20        | 14       | 17.6            | 0.01        |          |           | 29       | 16              | 19.7        | 0.11 |  |
|          |           |          |                 |             |          |           | 30       | 16              | 19.5        | 0.49 |  |
| 21       | 14        | 15.5     | 0.01            |             | 7        | 1         |          |                 |             |      |  |
| 22       | 14        | 16.3     |                 | 2           |          |           |          |                 | 2.3         |      |  |
| 23       | 15        | 16.9     |                 | 3           |          | 17        | 20.9     | 0.32            | 2.3         |      |  |
| 24       | 15        | 17.6     | 0.13            |             |          | 4         | 16       | 22.2            | 0.36        |      |  |
| 25       | 14        | 18.8     | 0.32            |             |          | 5         | 14       | 22.6            | 0.53        | 2.4  |  |

| 月日          | 測定時刻 (h) | 水温 (°C) | 表面塩素量 (Cl‰) | 躍層深度 (m) | 月日    | 測定時刻 (h) | 水温 (°C) | 表面塩素量 (Cl‰) | 躍層深度 (m) |      |
|-------------|----------|---------|-------------|----------|-------|----------|---------|-------------|----------|------|
| 7<br>(1942) | 6 14     | 23.1    | 0.50        | 3.0      | 8 31  | 17       | 20.5    | 0.02        | —        |      |
|             | 7 15     | 23.8    | 0.18        | 3.1      | 9     | 1 16     | 20.1    | 0.04        | 5.3      |      |
|             | 8 15     | 23.5    | 0.12        | 3.0      |       | 2 16     | 20.6    | 0.08        | —        |      |
|             | 9 15     | 24.8    | 0.16        | —        |       | 3 16     | 20.8    | 0.08        | 3.0      |      |
|             | 10 16    | 23.2    | 0.68        | 2.2      |       | 4 15     | 20.0    | 0.05        | —        |      |
|             |          |         |             |          |       | 5 16     | 19.4    | 0.03        | 6.3      |      |
|             | 11 14    | 21.6    | 0.73        | 3.8      | 6     | 14       | 18.8    | 0.03        | 4.6      |      |
|             | 12 13    | 21.6    | 0.31        | 6.1      |       | 7 18     | 18.2    | 0.06        | —        |      |
|             | 13 16    | 21.1    | 0.24        | 2.8      |       | 8 7      | 18.15   | 0.15        | 2.3      |      |
|             | 14 14    | 19.8    | 0.64        | 3.2      |       | 9 16     | 19.2    | 0.10        | —        |      |
|             | 15 14    | 19.6    | 0.41        | 4.0      |       | 10 13    | 19.9    | 0.15        | 2.5      |      |
|             | 16 15    | 20.6    | 0.18        | 4.4      | 11    | 15       | 19.9    | 0.04        | 2.5      |      |
|             | 17 14    | 21.8    | 0.12        | 2.7      |       | 12 16    | 19.4    | 0.12        | 3.2      |      |
|             | 18 14    | 20.8    | 0.97        | 3.2      |       | 13 15    | 18.2    | 0.02        | 7.0      |      |
|             | 19 14    | 21.6    | 1.28        | —        |       | 14 14    | 17.7    | 0.02        | 微かに底にあり  |      |
|             | 20 14    | 23.0    | 1.04        | 2.5      |       | 15 8     | 17.0    | 0.06        |          | 4.35 |
|             | 21 17    | 24.3    | 0.66        | 2.0      | 16    | 16       | 16.4    | 0.07        | 4.0      |      |
|             | 22 15    | 23.6    | 0.43        | 3.8      |       | 17 17    | 16.3    | 0.05        | 3.2—4.5  |      |
|             | 23 14    | 21.9    | 0.36        | 5.2      |       | 18 16    | 15.3    | 0.13        | 2.8      |      |
|             | 24 16    | 21.6    | 0.03        | —        |       | 19 15    | 15.1    | 0.16        | 2.3      |      |
|             | 25 14    | 24.8    | 0.05        | 2.6      |       | 20 16    | 15.6    | 0.11        | 2.5—2.8  |      |
|             | 26 16    | 23.9    | 0.96        | 2.6      | 21    | 14       | 15.9    | 0.29        | 2.5      |      |
|             | 27 12    | 23.5    | 1.16        | 1.3      |       | 22 11    | 16.3    | 0.27        | 3.5      |      |
|             | 28 14    | 24.5    | 0.42        | 1.7      |       | 23 12    | 14.9    | 0.03        | —        |      |
|             | 29 16    | 23.4    | 1.06        | 2.9      |       | 24 15    | 14.6    | 0.02        | —        |      |
|             | 30 13    | 22.7    | 0.29        | 2.0      |       | 25 16    | 14.9    | 0.02        | —        |      |
|             | 31 17    | 23.3    | 0.22        | —        | 26    | 16       | 15.1    | 0.02        | —        |      |
|             | 8        | 1 14    | 23.2        | 0.27     |       | 3.0      | 27 —    | —           | —        | —    |
|             |          | 2 16    | 22.4        | 0.47     |       | 3.0      | 28 14   | 14.4        | 0.05     | —    |
|             |          | 3 14    | 22.6        | 0.27     |       | 2.2—2.8  | 29 15   | 14.2        | 0.04     | なし   |
|             |          | 4 16    | 23.7        | 0.27     |       | 1.6      | 30 15   | 14.2        | 0.05     | 〃    |
| 5 12        |          | 24.6    | 0.18        | 2.5—1.6  | 10    | 1 16     | 14.6    | 0.08        | 7.6      |      |
| 6 14        | 24.4     | 0.55    | 1.75        | 2 15     |       | 15.1     | 0.09    | 4.4—5.0     |          |      |
| 7 17        | 22.9     | 0.98    | 1.4         | 3 14     |       | 15.2     | 0.11    | 3.0         |          |      |
| 8 15        | 21.1     | 1.01    | 1.0         | 4 15     |       | 14.1     | 0.20    | 5.0—5.5     |          |      |
| 9 —         | —        | —       | —           | 5 15     |       | 13.2     | 0.07    | 7.4—9.2     |          |      |
| 10 12       | 20.9     | 0.45    | 2.1         | 6        | 16    | 12.7     | 0.02    | —           |          |      |
| 11 16       | 21.6     | 0.32    | 1.5         |          | 7 16  | 11.9     | 0.06    | 8.0         |          |      |
| 12 16       | 22.6     | 0.75    | 2.1         |          | 8 16  | 11.8     | 0.02    | —           |          |      |
| 13 16       | 24.7     | 0.29    | 2.0         |          | 9 16  | 11.7     | 0.02    | —           |          |      |
| 14 15       | 23.0     | 0.42    | 1.8         |          | 10 15 | 11.5     | 0.02    | 6.4         |          |      |
| 15 14       | 23.2     | 0.42    | 1.6         | 11       | 16    | 13.3     | 0.02    | —           |          |      |
| 16 14       | 22.2     | 0.40    | 3.5         |          | 12 16 | 9.6      | 0.02    | —           |          |      |
| 17 17       | 19.5     | 0.08    | —           |          | 13 16 | 10.2     | 0.02    | —           |          |      |
| 18 15       | 20.9     | 0.03    | 4.          |          | 14 16 | 10.8     | 0.03    | —           |          |      |
| 19 14       | 20.7     | 0.04    | —           |          | 15 16 | 11.1     | 0.03    | なし          |          |      |
| 20 12       | 20.9     | 0.05    | 4.6         | 16       | 16    | 11.1     | 0.04    | —           |          |      |
| 21 8        | 20.7     | 0.05    | 3.0         |          | 17 16 | 11.0     | 0.05    | —           |          |      |
| 22 7        | 20.6     | 0.21    | 2.4         |          | 18 14 | 11.1     | 0.15    | 4.8         |          |      |
| 23 7        | 21.1     | 0.10    | 2.7         |          | 19 16 | 10.8     | 0.02    | —           |          |      |
| 24 15       | 20.7     | 0.25    | 2.0         |          | 20 17 | 10.4     | 0.04    | —           |          |      |
| 25 10       | 18.2     | 0.03    | —           | 21       | 16    | 10.4     | 0.02    | —           |          |      |
| 26 1        | 17.1     | 0.03    | —           |          | 22 16 | 10.5     | 0.02    | —           |          |      |
| 27 7        | 17.2     | 0.02    | —           |          | 23 15 | 10.5     | 0.06    | なし          |          |      |
| 28 7        | 16.8     | 0.02    | —           |          | 24 11 | 9.6      | 0.04    | —           |          |      |
| 29 7        | 17.3     | 0.02    | —           |          | 25 15 | 7.3      | 0.04    | —           |          |      |
| 30 18       | 20.4     | 0.02    | —           |          |       |          |         |             |          |      |

| 月日           | 測定時刻 (h) | 水温 (°C) | 表面塩素量 (Cl%) | 躍層深度 (m)         | 月日     | 測定時刻 (h) | 水温 (°C) | 表面塩素量 (Cl%) | 躍層深度 (m) |
|--------------|----------|---------|-------------|------------------|--------|----------|---------|-------------|----------|
| 10<br>(1942) | 26 16    | 6.0     |             |                  | 12     | 21 13    | 0.3     | 0.09        | 3.7      |
|              | 27 15    | 7.0     |             |                  |        | 22 13    | 0.2     | 0.07        | 3.1      |
|              | 28 15    | 8.7     |             |                  |        | 23 14    | 0.2     | 0.09        | 3.5      |
|              | 29 15    | 9.1     |             |                  |        | 24 14    | 0.2     | 0.06        | 3.0      |
|              | 30 15    | 8.3     |             |                  |        | 25 14    | 0.2     | 0.08        | 2.7      |
|              | 31 14    | 7.7     |             |                  |        | 26 14    | 0.2     | 0.21        | 2.5      |
| 11           | 1 13     | 6.9     | 0.03        | 6.6              | (1943) | 27 14    | 0.2     | 0.11        | 2.7      |
|              | 2 13     | 6.8     | 0.30        | 4.3              |        | 28 14    | 0.2     | 0.11        | 2.9      |
|              | 3 13     | 6.9     | 0.03        | 5.9              |        | 29 13    | 0.3     | 0.12        | 3.2      |
|              | 4 13     | 6.9     |             |                  |        | 30 13    | 0.2     | 0.09        | 2.5      |
|              | 5 13     | 7.0     |             |                  |        | 31 13    | 0.2     | 0.10        | 1.1—2.0  |
|              | 6 13     | 6.0     |             |                  |        | 1 12     | 0.2     | 0.09        | 2.4      |
|              | 7 15     | 5.8     |             |                  |        | 2 12     | 0.2     | 0.06        | 2.9      |
|              | 8 16     | 5.2     |             |                  |        | 3 14     | 0.2     | 0.06        | 2.9      |
|              | 9 13     | 4.4     |             |                  |        | 4 14     | 0.8     | 0.06        | 2.2      |
|              | 10 16    | 2.7     |             |                  |        | 5 14     | 0.27    | 0.07        | 2.0      |
|              | 11 14    | 2.0     |             |                  |        | 6 14     | 0.2     | 0.08        | 2.3—3.2  |
|              | 12 16    | 3.2     |             |                  |        | 7 14     | 0.2     | 0.07        | 3.1      |
|              | 13 15    | 4.0     |             |                  |        | 8 14     | 0.2     | 0.10        | 2.6      |
|              | 14 15    | 4.8     |             |                  |        | 9 14     | 0.2     | 0.09        | 3.2      |
|              | 15 13    | 5.2     |             |                  |        | 10 14    | 0.2     | 0.10        | 2.4      |
|              | 16 13    | 4.2     |             |                  |        | 11 13    | 0.2     | 0.11        | 2.6      |
|              | 17 13    | 3.5     |             |                  |        | 12 14    | 0.2     | 0.74        | 2.0      |
|              | 18 13    | 3.7     |             |                  |        | 13 14    | 0.2     | 0.15        | 3.0      |
|              | 19 14    | 4.1     |             |                  |        | 14 14    | 0.2     | 0.14        | 3.0      |
|              | 20 13    | 3.5     |             |                  |        | 15 14    | 0.2     | 0.10        | 2.4      |
| 21 15        | 3.0      |         |             | 16 14            | 0.2    | 0.09     | 3.5     |             |          |
| 22 13        | 2.9      |         |             | 17 15            | 0.2    | 0.07     | 2.6     |             |          |
| 23 16        | 2.6      |         |             | 18 15            | 0.2    | 0.07     | 3.5—4.0 |             |          |
| 24 13        | 3.6      |         |             | 19 15            | 0.2    | 0.05     | 3.9     |             |          |
| 25 13        | 4.4      |         |             | 20 16            | 0.2    | 0.06     | 2.5     |             |          |
| 26 13        | 2.2      |         |             | 21 13            | 0.2    | 0.10     | 3.0     |             |          |
| 27 13        | 3.7      |         |             | 22 13            | 0.2    | 0.07     | 3.3     |             |          |
| 28 13        | 1.3      |         |             | 23 13            | 0.3    | 0.07     | 2.0—2.5 |             |          |
| 29 13        | 1.1      |         |             | 24 12            | 0.3    | 0.50     | 3.0—3.5 |             |          |
| 30 15        | 1.0      |         |             | 25 15            | 0.3    | 0.19     | 4.5     |             |          |
| 12           | 1 13     | 0.1     | 0.02        |                  | 26 14  | 0.4      | 0.16    | 4.0         |          |
|              | 2 13     | 1.4     | 0.03        |                  | 27 14  | 0.4      | 0.15    | 3.0         |          |
|              | 3 13     | 1.7     | 0.06        | 6.1              | 28 14  | 0.3      | 0.14    | 2.7         |          |
|              | 4 13     | 1.6     | 0.04        | 5.6—7.0          | 29 14  | 0.3      | 0.09    | 4.0         |          |
|              | 5 13     | 1.1     | 0.06        | 5.0              | 30 13  | 0.4      | 0.06    | 2.5         |          |
|              | 6 13     | 0.6     | 0.11        | 3.5              | 31 14  | 0.3      | 0.05    | 2.3         |          |
|              | 7 13     | 0.5     | 0.09        | 3.5              | 2 1    |          | 0.05    | 2.5         |          |
|              | 8 13     | 0.3     | 0.13        | 2.5              | 2 14   | 0.3      | 0.06    | 2.9         |          |
|              | 9 13     | 0.5     | 0.21        | 3.4              | 3 14   | 0.3      | 0.06    | 2.3         |          |
|              | 10 15    | 0.2     | 0.10        | 2.7              | 4 14   | 0.4      | 0.14    | 3.3         |          |
|              | 11 15    | 0.3     | 0.09        | 3.4              | 5 14   | 0.4      | 0.15    | 3.2         |          |
|              | 12 14    | 0.2     | 0.15        | 3.6              | 16 14  | 0.3      | 0.14    | 3.5         |          |
|              | 13 13    | 0.2     | 0.11        | 3.9              | 17 14  | 0.3      | 0.16    | 2.5—2.8     |          |
|              | 14 13    | 0.4     | 0.15        |                  | 18 13  | 0.3      | 0.17    | 4.0         |          |
|              | 15 13    | 0.3     | 0.06        | 2.7              | 19 14  | 0.38     | 0.15    | 3.2—3.6     |          |
|              | 16 16    | 0.3     | 0.30        | 4.               | 20 14  | 0.3      | 0.11    | 3.7         |          |
|              | 17 13    | 0.2     | 0.08        | 4.5              | 21 13  | 0.3      | 0.10    | 4.0         |          |
|              | 18 13    | 0.2     | 0.04        | 3.0              | 22 13  | 0.3      | 0.06    | 3.5         |          |
|              | 19 14    | 0.2     | 0.08        | 1.6—2.6          | 23 14  | 0.3      | 0.06    | 3.0         |          |
|              | 20 13    | 0.2     | 0.15        | 3.0 10以下微かに全体にある | 24 13  | 0.25     | 0.05    | 4.0         |          |
|              |          |         |             | 25 14            | 0.2    | 0.06     | 3.0     |             |          |

| 月日          | 測定時刻 (h) | 水温 (°C) | 表面塩素量 (Cl‰) | 躍層深度 (m) | 月日      | 測定時刻 (h) | 水温 (°C) | 表面塩素量 (Cl‰) | 躍層深度 (m) |        |          |   |
|-------------|----------|---------|-------------|----------|---------|----------|---------|-------------|----------|--------|----------|---|
| 2<br>(1943) | 16       | 14      | 0.8         | 0.08     | 3.5     | 3        | 16      | 14          | 1.1      | 0.15   | 2.1—2.9  |   |
|             | 17       | 14      | 0.6         | 0.08     | 2.7     |          | 17      | 15          | 1.2      | 0.23   | 3.3      |   |
|             | 18       | 14      | 0.5         | 0.12     | 2.7     |          | 18      | 15          | 1.3      | 0.23   | 3.8      |   |
|             | 19       | 14      | 0.3         | 0.15     | 4.0     |          | 19      | 14          | 1.4      | 0.23   | 3.6      |   |
|             | 20       | 14      | 0.6         | 0.14     | 3.6     |          | 20      | 14          | 1.2      | 0.20   | 4.0      |   |
|             | 21       | 14      | 0.26        | 0.12     | 3.6     |          | 21      | 14          | 1.4      | 0.09   | 汚染       |   |
|             | 22       | 14      | 0.2         | 0.15     | 4.8     |          | 22      | 16          | 1.3      | 0.04   | 4.5—5.0  |   |
|             | 23       | 14      | 0.2         | 0.15     | 4.0     |          | 23      | 14          | 1.4      | 0.10   | 4.5      |   |
|             | 24       | 14      | 0.25        | 0.16     | 4.4     |          | 24      | 14          | 1.2      | 0.05   | 6.0—7.0  |   |
|             | 25       | 14      | 0.2         | 0.15     | 3.5     |          | 25      | 15          | 1.5      | 0.04   | 8.5      |   |
|             | 26       | 15      | 0.2         | 0.12     | 3.1     |          | 26      | 14          | 1.5      | 0.03   | 10.8 以下微 |   |
|             | 27       | 14      | 0.2         | 0.11     | 3.5     |          | 27      | 14          | 1.8      | 0.03以下 | —        |   |
|             | 28       | 14      | 0.3         | 0.12     | 2.6     |          | 28      | 15          | 1.9      | 0.03   | —        |   |
|             | 3        | 1       | 14          | 0.3      | 0.09    |          | 3.0     | 29          | 14       | 0.03   | 0.03     | — |
|             |          | 2       | 14          | 0.3      | 0.08    |          | 2.8     | 30          | 14       | 1.6    | 0.03     | — |
| 3           |          | 14      | 0.3         | 0.08     | 2.9     | 4        | 1       | 14          | 3.3      | 0.03   |          |   |
| 4           |          | 14      | 0.4         | 0.08     | 2.9     |          | 2       | 14          | 3.7      | 0.03   |          |   |
| 5           |          | 14      | 0.5         | 0.11     | 3.8     |          | 3       | 14          | 3.9      |        |          |   |
| 6           |          | 14      | 0.4         | 0.12     | 3.0—3.4 |          | 4       | 14          | 3.3      |        |          |   |
| 7           |          | 14      | 0.5         | 0.15     | 3.5     |          | 5       | 14          | 3.4      |        |          |   |
| 8           |          | 14      | 0.40        | 0.14     | 3.3     |          | 6       | 14          | 3.6      | 0.03   |          |   |
| 9           |          | 14      | 0.50        | 0.21     | 3.0     |          | 7       | 14          | 3.9      | 0.03   |          |   |
| 10          |          | 16      | 0.2         | 0.09     | 2.5     |          | 8       | 15          | 3.5      | 0.02   |          |   |
| 11          |          | 14      | 0.5         | 0.10     | 2.8     |          | 9       | 16          | 3.6      | 0.02   |          |   |
| 12          |          | 14      | 0.5         | 0.06     | 4.2     |          | 10      | 15          | 3.7      | 0.03   |          |   |
| 13          |          | 15      | 0.6         | 0.06     | 1.5—2.0 |          | 11      | 14          | 4.2      | 0.03   |          |   |
| 14          |          | 14      | 0.8         | 0.08     | 2.6     |          |         | 12          | 15       | 4.1    | 0.03     |   |
| 15          |          | 14      | 0.8         | 0.08     | 2.0—3.0 |          |         | 13          | 15       | 4.1    | 0.03     |   |
|             |          |         |             |          | 14      |          |         | 15          | 4.1      | 0.02   |          |   |
|             |          |         |             |          |         |          |         |             |          |        |          |   |

#### 4 河川の渦動粘性係数

最初に密度にも時間的変化のある乱流の方程式を求める。密度  $\rho$ 、速度  $V(u, v, w)$ 、圧力  $p$  の水が

$$\rho = \bar{\rho} + \rho' \quad V = \bar{V} + \bar{V}' \quad \bar{p} = p + \bar{p}'$$

の如く平均値のまわりに変動する場合を考えると

$$\bar{\rho}' = 0 \quad \bar{V}' = 0 \quad (\bar{u}' = \bar{v}' = \bar{w}' = 0)$$

$$\bar{p}' = 0$$

但し  $\rho'$ ,  $V'$  は夫々各瞬間に於ける圧力、密度、速度の平均値  $\bar{p}$ ,  $\bar{\rho}$ ,  $\bar{V}$  からの偏りとする。運動方程式及連続の式

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \Delta \cdot V = 0$$

より分子粘性の項を省略して

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} = \rho \mathbf{K} - \Delta p - \operatorname{div} [[\rho \mathbf{V} \mathbf{V}]]$$

を得る。又平均値を連続の式に入れて

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \Delta \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{V}}) + \Delta \cdot \bar{\rho}' \bar{\mathbf{V}}' = 0$$

之等の式から

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}' \mathbf{u}') + \bar{\rho} \bar{\mathbf{V}} \cdot \Delta (\bar{\mathbf{V}} = \bar{\rho} \mathbf{K} - \Delta \bar{p} - \operatorname{div} [[\bar{\rho} \bar{\mathbf{V}}' \bar{\mathbf{V}} + \bar{\rho}' \bar{\mathbf{V}}' \bar{\mathbf{V}} \\ + \rho' \mathbf{V}' \mathbf{V}']]) - (\bar{\rho}' \bar{\mathbf{V}}' \cdot \Delta) \bar{\mathbf{V}} \end{aligned}$$

を得る。或は  $x$  成分として

$$\begin{aligned} \bar{\rho} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho}' u') + \bar{\rho} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{\rho} \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{\rho} \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} &= \bar{\rho} X \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} (\bar{\rho} \bar{u}' u' + \bar{u} \bar{\rho}' u' + \bar{\rho}' u' u') - \bar{\rho}' u' \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{\rho} \bar{u}' v' + \bar{v} \bar{\rho}' u' + \bar{\rho}' u' v') - \bar{\rho}' v' \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \\ &\quad - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{\rho} \bar{u}' w' + \bar{w} \bar{\rho}' u' + \bar{\rho}' u' w') - \bar{\rho}' w' \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}. \end{aligned}$$

を得る。この密度にも偏倚ある場合の乱流の方程式である<sup>1)</sup>。

今河底を水平と仮定し座標の  $x$  軸を流心に於て流向の方え正とし、 $z$  軸を鉛直上方にとるものとし、河幅方向の量の変化を無視すれば二次元的扱いが可能である。普通河川の場合として  $\rho = \text{const.}$  にとれば、運動方程式は簡単となり

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = X - \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} - \left( \frac{\partial \bar{u}' u'}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}' w'}{\partial z} \right)$$

ここに外力  $X$  は車力の加速度を  $g$  として

$$X = g \sin i \doteq g i$$

で時間的変化はないものとする。 $i$  は水面傾斜の角とする。又  $x$  方向の圧力変化、速度変化等は他の鉛直方向の変化に比べ微小であるから無視すると

$$g i = \frac{\partial \bar{u}' w'}{\partial z}.$$

1) 浜田徳一(前掲)

Prandtl によれば  $-\rho \overline{u'w'} = \mu \frac{d\bar{u}}{dz}$  (但  $\mu$  は渦動粘性係数) であるから従つて

$$gi = - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)$$

これを積分すれば

$$z_0 - z = \frac{1}{gi} \left[ \eta \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right]_{z_0} \quad \left( \eta = \frac{\mu}{\rho} \right)$$

即ち

$$\eta_z \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_z - \eta_{z_0} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{z_0} = (z_0 - z) gi$$

$$\eta_z = \frac{1}{\left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_z} \left\{ (z_0 - z) gi + \eta_{z_0} \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)_{z_0} \right\}$$

即ち  $\eta_{z_0}$  及び  $(\partial \bar{u} / \partial z)_{z_0}$  が判らなければ任意の深さ  $z$  に於ける  $\eta$  の値は判らない。  $\bar{u}$  は一般に  $x$  の 2 次 の 拋物線にて近似される場合が多いので  $z_0$  として  $(\partial \bar{u} / \partial z) = 0$  の点を選ぶのがよくとられる方法である。然し流速分布の中にはその様な  $z_0$  が存在しない場合もある。野満博士は速度の垂直分布曲線を延長してこれを求め、浜田博士は水面上に仮定的に求めた。この様にして求められた粘性係数はどの程度のものかと云えば、例えば東中博士が揚子江で求めたものは 100~1000 (c.g.s.) で平均 408, 信濃川河口では 28~68 (c.g.s.) 程度である。又野満博士等の世界各河川の渦動粘性の垂直分布をしらべたものには相対値で、水面傾斜のないためか絶対値は求められていない。

渦動粘性係数  $\mu$  の値が (又は  $\mu/\rho = \eta$ ) dimension によりその数値を異にするのは当然であるが、一方では渦動拡散をしらべる場合に如何なる量を用いるかによつても異なることがあるのはよく海洋学等で知られている事実である。然し河川では専ら水面傾斜と流速分布によつて求めていることが多い。

## 5 塩素量拡散による渦粘性係数

著者は石狩川河口に於て河口断面の一昼夜観測を行つた際表面層の比重が僅かな連続的変化を示したことから比重の精密な測定が河口構造の研究の上に何等かの手掛りとなることを知り 1942 年以來比重の観測よりも塩素量の観測を行うことにした。その後の縦断の測定にも塩素量の測定により好結果を得た。

河口内部の層重水の場合には下層の海水から躍層を通じて渦動拡散により表層水に海水が混入する。一方に於いて表層の河水は河口に向つて流下するから次第に海水の混入量がふえ、観測点を固定すると塩素量の垂直分布は勿論下方に向つて多くなる。この塩素量の垂直分布を適当に離

れた2点間測定し、同時に流速の垂直分布を知れば、その2地点間に於ける Austausch Coefficient の平均の値を知ることが出来る。以下にその概要を述べる。

流水中の或一点に於ける流水の平均速度を  $V$  とする。その成分を夫々  $u, v, w$  とする。流水中の微小面積  $\Delta x \Delta y \Delta z = \Delta \tau$  に出入する塩素の濃度即ち単位体積中の塩素の量を  $S$  で表すとすれば、 $x$  軸に垂直な面から出入する量は

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_x}{\rho} \frac{\partial S}{\partial x} \right) \Delta x - \frac{\partial(uS)}{\partial x} \Delta x \right\} \Delta y \Delta z$$

である。同様にして  $\Delta z \Delta x$  の面、 $\Delta x \Delta y$  の面から出入する量は夫々

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_y}{\rho} \frac{\partial S}{\partial y} \right) \Delta y - \frac{\partial(vS)}{\partial y} \Delta y \right\} \Delta z \Delta x$$

$$\left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_z}{\rho} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \Delta z - \frac{\partial(wS)}{\partial z} \Delta z \right\} \Delta x \Delta y$$

である。この項の和は  $\Delta \tau$  中に於ける塩素量の増加であるから

$$\frac{\partial S}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z$$

に等しかるべきである。即ち

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_x}{\rho} \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_y}{\rho} \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_z}{\rho} \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \left[ \frac{\partial(uS)}{\partial x} + \frac{\partial(vS)}{\partial y} + \frac{\partial(wS)}{\partial z} \right] \quad (5.2)$$

ここに  $\mu_x/\rho, \mu_y/\rho, \mu_z/\rho$  は乱れによる拡散 tensor の分素であつて一般には9個の分素から成る。或は書き直して

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}(SV - (k) \text{grad} S) = 0 \quad (5.2)$$

又は

$$\frac{DS}{Dt} + S \text{div} V - \text{div} \{(k) \text{grad} S\} = 0$$

さて河口の水層に上式を使用するため河底水流の方向に  $x$  軸をとりこれに垂直に水平面に  $y$  軸をとるものとする。又  $z$  軸を鉛直上方にとる。 $z=0$  なる水面は厳密には傾斜をなすけれどもその量は数千又は数百万分の一であるから今の場合水面が  $xy$  面に平行であるとして差支えない。一般流は  $x$  方向の成分  $u(z)$  のみが存在し、 $z$  方向及び  $y$  方向の流速は  $u$  に比べて微小な

りとする。この場合は tensor ( $k$ ) の成分は  $\eta_{zz}(=\mu_z/\rho)$  のみが他の成分に比して卓越するから

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_z}{\rho} \frac{\partial S}{\partial z} \right) - \frac{\partial(uS)}{\partial x}.$$

となる。今  $S$  の時間的変化が甚少ない場合を考えれば左辺を省略して

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_z}{\rho} \frac{\partial S}{\partial z} \right) = \frac{\partial(uS)}{\partial x}. \quad (5.3)$$

$z$  について積分すれば

$$\left[ \frac{\mu_z}{\rho} \frac{\partial S}{\partial z} \right]_a^z = \int_a^z \frac{\partial(uS)}{\partial x} dz \quad (5.4)$$

を得る。然るに  $z=a$  では水中の  $S$  は水上に出ることがないから

$$\left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_{z=a} = 0.$$

故に上式は

$$\eta = \frac{\mu_z}{\rho} = \int_a^z \frac{\partial(uS)}{\partial x} dz / \left( \frac{\partial S}{\partial z} \right)_z.$$

であつて右辺は何れも測定が可能である。即ち右辺の分子は河の流心に沿う 2 点で  $u$  及び  $S$  を測定し、2 点間の  $(uS)$  の傾度から求められ、分母は  $S$  の鉛直分布から求められる。

## 6 渦粘性係数の実測値

後述の如く著者は石狩川河口夏季の減水型の時期に河口内部の縦断測定を流心に沿うて行い、躍層の深度の分布、塩素量の流向に於ける分布、及び垂直分布、流速の分布等を測定したので前章の方法により塩素量の測定値からする Austausch Coefficient を決定することが出来た。次表(第3表)にその結果を示す。

著者の用いたのは塩素量の重量比であるが、測定値を使用したのは河水の中が多いから塩素量は少く實際上単位体積中の塩素量と殆ど同じと考へてよいと思われる。又 0.01% 以下の桁については知ることが出来ないのので実際に  $\partial S/\partial z \neq 0$  の時でも測定上は  $\partial S/\partial z = 0$  の如く見られる場合も多い。然しそのために測定の精度を上げて、元來河川の流は必ずしも一様に理想的でなく、河川の屈曲、表面に及ぼす風力等によつて歪曲されがちであるから無暗と精密にしても測定の効果は上るかどうかは疑問である。

Austausch の値は最も大きいのは観測 (II) の時に得られた 77.3 c.g.s. で 10~30 c.g.s. の間が最も多く見られる。この値は例えば信濃川河口で力学的方法で得られた値に非常によく似て

第 3 表

| $z$ (m)     | $n$<br>(cm/sec) | $S$<br>(Cl‰) | $uS$ | $uS$ | $\left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)_z$ | $\left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)_{\text{mean}}$ | $\eta$<br>(c.g.s.) |
|-------------|-----------------|--------------|------|------|--|--|--------------------|
| (I) St. B   |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 67              | 0.03         | 2.01 | 4.5  | $0.04 \times 10^{-2}$                          | $0.02 \times 10^{-2}$                                      | 11.5               |
| 0.5         | 59              | 0.05         | 2.95 | 3.4  | 0.05 "   | 0.03 "   | 19.0               |
| 1.5         | 49              | 0.10         | 4.90 | 1.3  | 0.04 "   | 0.05 "   | 15.8               |
| 2.5         | 38              | 0.14         | 5.32 | 2.2  | 0.04 "   | 0.16 "   | 20.0               |
| 3.0         | 32              | 0.16         | 5.12 | 14.9 | 0.04 "   | 0.15 "   | 36.7               |
| 3.5         | 26              | 0.18         | 4.68 | 19.7 | 0.08 "   | 3.59 "   | 29.8               |
| 4.0         | 20              | 0.22         | 4.40 | 22.6 |  |  |                    |
| St. A       |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 65              | 0.10         | 6.5  | 5.7  | $0.0 \times 10^{-2}$                           | $0.0 \times 10^{-2}$                                       | —                  |
| 0.5         | 64              | 0.10         | 6.4  | 5.2  | 0.0 "  | 0.08 "   | 8.5                |
| 1.5         | 62              | 0.10         | 6.2  | 14.7 | 0.05 "   | 0.37 "   | 45.6               |
| 2.5         | 60              | 0.15         | 7.5  | 19.5 | 0.28 "   | 0.53 "   | 59.2               |
| 3.0         | 59              | 0.29         | 23.0 | 13.9 | 0.26 "   |  |                    |
| 3.5         | 58              | 0.42         | 24.4 | 33.5 | 7.24 "   |  |                    |
| 4.0         | 57              | 4.04         | 230  |      |  |  |                    |
| St. J       |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 58              | 0.21         | 12.2 |      | $-0.02 \times 10^{-2}$                         |  |                    |
| 0.5         | 58              | 0.20         | 11.6 |      | 0.16 "   |  |                    |
| 1.5         | 58              | 0.36         | 20.9 |      | 0.68 "   |  |                    |
| 2.5         | 26              | 1.04         | 27.0 |      | 0.78 "   |  |                    |
| 3.0         | -5              | 1.82         | -9.1 |      |  |  |                    |
| (II) St. A  |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 67              | 0.38         | 25.5 |      | $-0.02 \times 10^{-2}$                         |  |                    |
| 0.5         | 64              | 0.37         | 20.7 |      | -0.01 "  |  |                    |
| 1.5         | 59              | 0.36         | 21.2 |      | 0.11 "   |  |                    |
| 2.5         | 55              | 0.47         | 25.9 |      |  |  |                    |
| 3.0         | 52              |              |      |      |  |  |                    |
| St. B       |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 37              | 0.14         | 5.2  | 20.3 | $0.02 \times 10^{-2}$                          |  | 46.0               |
| 0.5         | 36              | 0.15         | 5.4  | 15.3 | 0.03 "   |  | 76.6               |
| 1.5         | 335             | 0.18         | 4.1  | 15.1 | 0.29 "   |  | 12.6               |
| 2.5         | 31              | 0.47         | 16.6 | 11.3 | 0.64 "   |  | 7.3                |
| 3.0         | 30              | 0.79         |      |      |  |  |                    |
| St. A       |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 49              | 0.37         | 18.1 | 4.9  | $0.02 \times 10^{-2}$                          |  | 9.2                |
| 0.5         | 47              | 0.38         | 17.9 | 1.0  | 0.00 "   | $0.04 \times 10^{-2}$                                      | 6.5                |
| 1.5         | 44              | 0.38         | 16.7 | 1.0  | 0.05 "   | 0.25 "   | 1.3                |
| 2.5         | 41              | 0.43         | 17.6 | 4.5  |  |  |                    |
| 3.0         | 39              | —            |      |      |  |  |                    |
| St. J       |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 48              | 0.48         | 23.0 |      | $-0.08 \times 10^{-2}$                         |  |                    |
| 0.5         | 43              | 0.44         | 18.9 |      | 0.08 "   |  |                    |
| 1.5         | 34              | 0.52         | 17.7 |      | 0.44 "   |  |                    |
| 2.5         | 23              | 0.96         | 22.1 |      |  |  |                    |
| 3.0         | 20              | 12.51        | 25.0 |      |  |  |                    |
| (III) St. A |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 59              | 0.81         | 48   | 17   | $0.00 \times 10^{-2}$                          | $0.03 \times 10^{-2}$                                      | 21.0               |
| 0.5         | 59              | 0.81         | 48   | 16   | 0.01 "   | 0.03 "   | 60.5               |
| 1.5         | 59              | 0.82         | 48   | 22   | 0.39 "   | 0.53 "   | 6.8                |
| 2.5         | 59              | 1.21         | 71   | 66   |  |  |                    |
| St. J       |                 |              |      |      |  |  |                    |
| 0           | 64              | 1.02         | 65   |      | $0.06 \times 10^{-2}$                          | $0.03 \times 10^{-2}$                                      | 7.4                |
| 0.5         | 64              | 1.05         | 67   |      | 0.04 "   | 0.03 "   | 26.2               |
| 1.5         | 64              | 1.09         | 70   |      | 0.67 "   | 0.53 "   | 0.5                |
| 2.5         | 64              | 2.14         | 137  |      |  |  |                    |

| $z$ (m)    | $u$<br>(cm/sec) | $S$<br>(Cl‰) | $uS$  | $\Delta uS$ | $\left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)_z$ | $\left(\frac{\partial S}{\partial z}\right)_{\text{mean}}$ | $\eta$<br>(c.g.s.) |
|------------|-----------------|--------------|-------|-------------|--|--|--------------------|
| St. K      |                 |              |       |             |  |  |                    |
| 0          | 45              | 1.72         | 77.4  | 12.4        | $0.04 \times 10^{-2}$                          |  |                    |
| 0.5        | 45              | 1.74         | 78.3  | 11.3        | 0.04 "   |  |                    |
| 1.5        | 45              | 1.78         | 80.0  | 10.0        | 4.04 "   |  |                    |
| 2.5        | 45              | 5.82         | 262.  | 125.        |  |  |                    |
| (IV) St. A |                 |              |       |             |  |  |                    |
| 0          | 59              | 0.06         | 3.54  | 3.14        | $0.00 \times 10^{-2}$                          | $0.02 \times 10^{-2}$                                      | 11.6               |
| 1.0        | 56              | 0.06         | 3.36  | 3.31        | 0.00 "   | 0.02 "   | 23.9               |
| 2.0        | 53              | 0.06         | 3.18  | 2.37        | 0.00 "   | 0.21 "   | 3.1                |
| 3.0        | 50              | 0.05         | 2.75  | 4.18        | -0.005 "                                       | 0.47 "   | 2.1                |
| 4.0        | 47              | 0.05         | 2.35  | 5.55        | -0.005 "                                       | 0.78 "   | 1.4                |
| 5.0        | 11              |              |       |             |  |  |                    |
| St. J      |                 |              |       |             |  |  |                    |
| 0          | 47              | 0.14         | 6.58  | 4.4         | $0.04 \times 10^{-2}$                          | $0.02 \times 10^{-2}$                                      | 13.1               |
| 1.0        | 37              | 0.18         | 6.67  | 3.8         | 0.04 "   | 0.02 "   | 24.5               |
| 2.0        | 25              | 0.22         | 5.55  | 4.3         | 0.41 "   | 3.26 "   | 0.0                |
| 3.0        | 11              | 0.63         | 6.93  | 235         | 0.95 "   |  |                    |
| 4.0        | 5               | 1.58         | 7.90  |             | 1.56 "   |  |                    |
| 5.0        | -2              | 3.14         | -6.28 |             |  |  |                    |
| St. K      |                 |              |       |             |  |  |                    |
| 0          | 45              | 0.25         | 11.0  | 6.8         | $-0.005 \times 10^{-2}$                        | $0.08 \times 10^{-2}$                                      | 11.5               |
| 1.0        | 43              | 0.245        | 10.5  | 48.5        | -0.005 "                                       | 0.39 "   | 19.3               |
| 2.0        | 41              | 0.24         | 9.9   |             | 6.11 "   |  |                    |
| 3.0        | 38              | 6.35         | 242   |             |  |  |                    |
| St. L      |                 |              |       |             |  |  |                    |
| 0          | 81              | 0.22         | 17.8  |             | $0.16 \times 10^{-2}$                          |  |                    |
| 0.5        | 70              | 0.38         | 26.6  |             | 0.62 "   |  |                    |
| 1.0        | 59              | 1.00         | 59.0  |             | 0.56 "   |  |                    |
| 1.5        | 48              | 1.56         | 74.9  |             |  |  |                    |

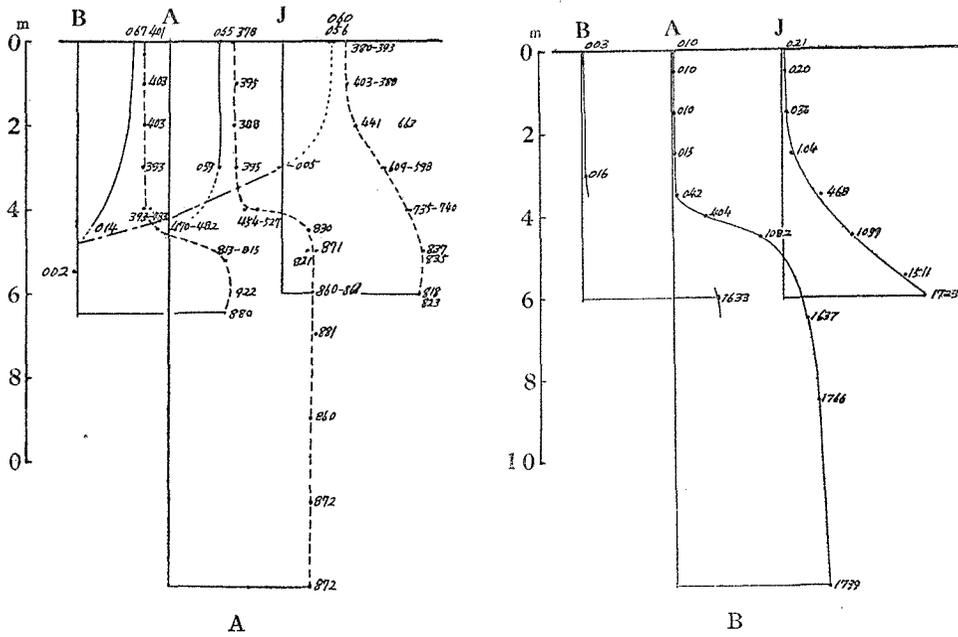
居り、揚子江で得られた値の二、三十分の一位である。河水が海水層を流下する如き底面の摩擦が甚しく減ずる場合には勿論渦動粘性の値も減ずるが、これ等の値は海洋に於ける 2~3 程度のものと上流河川の値との中間をとつていようである。

又測定値は塩素量から得られたものであるが河川層重水の今の場合は力学的に得られた信濃川の値と（河川は異なるけれども）よく一致しているのは興味あることである。

## 7 縦断面に於ける拡散

既に述べたように著者はかつて石狩川河口に於ける横断面で流速、比重、水温等の季節的な変化をしらべたが<sup>1)</sup>、河口内部が二重層で出来ている場合、その底層となつている海水層から上層の淡水層への渦動拡散によつて、どのような塩素量分布、どのような躍層分布が出来ているであろうか。この問題をしらべるため発動機船により、Ekman-Merz 流速計で流速を、光電池による濁度計で浮泥量分布及び躍層深度を、採水器（北原式B号中層用）で採水を行い、この試料は実験室で塩素量を測つた。第6・1図乃至第6・6図はその結果を図示したものである。これ等の図

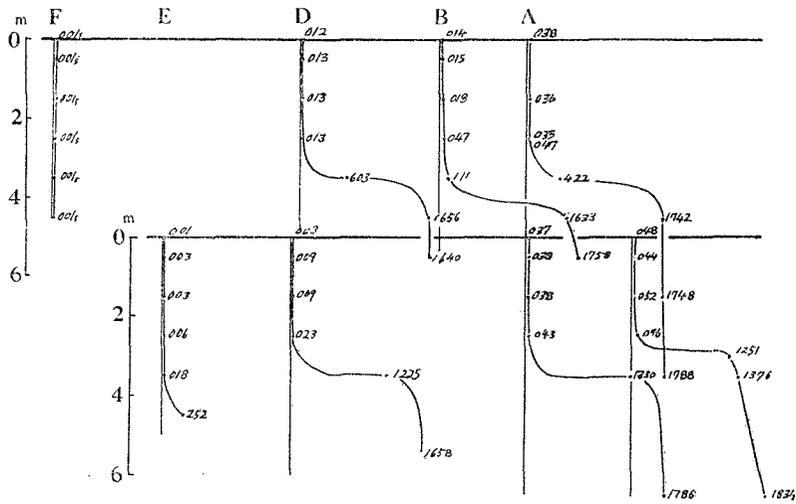
1) 日本海洋学会誌，第1巻第1号。



第 6.1 図 観測 I (1942 年 6 月 29 日)

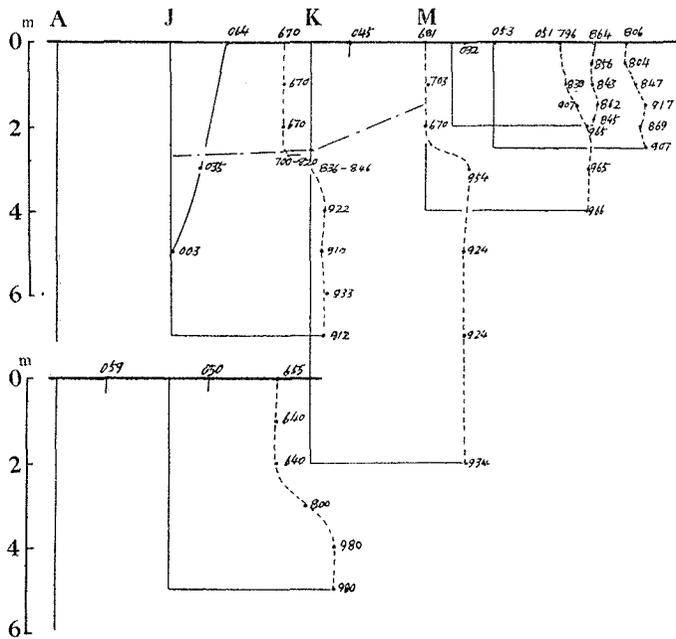
に於いて A 図は  $Cl\% \times 100$  の分布を, B 図は実線で流速 (cm/sec), 破線で光透過量を表わす. その一部分は既に前章に於て Austausch の決定に用いたものである.

採水器による試料からの塩素量は一点一瞬間の値であるが, 図に見られるようによくそろつていて渦動による混合がよく行われていることを示している. 濁度計は読みが直ちに得られ測定点の極めて小範囲の部分の濁度 (又は光透過量) を測定するのであるから, 二重層の境界の決定には最も都合のよいものである. 然し水中に入っている scalar 量の測定としては体積との関係が



第 6.2 図 A





第 6.3 図 B 観測 III (1942 年 7 月 1 日)

linear でないため、濁度の大小により測定精度が異つて来る。

5 回の観測は何れも二重層の場合であつて、淡水層の深度は勿論 station の位置により異なるが、標準とする station A については (V) の 5 m が最も深く、(VI) の 2.2 m が最も浅い。海水層の尖端迄達した観測 (II), (IV) 及び (VI) であつて、(II) の場合には河口から 5 m, (IV) 及び (VI) の場合には 15 km まで海水が侵入している。侵入した海水層は表層の水と明確な躍層を形成して区別されるが、表層水が流下してゆく際、極めて微量の海水が境界面を通じて表層水中に拡散してゆく実際の様子は全部の観測を通じてよく観察される。

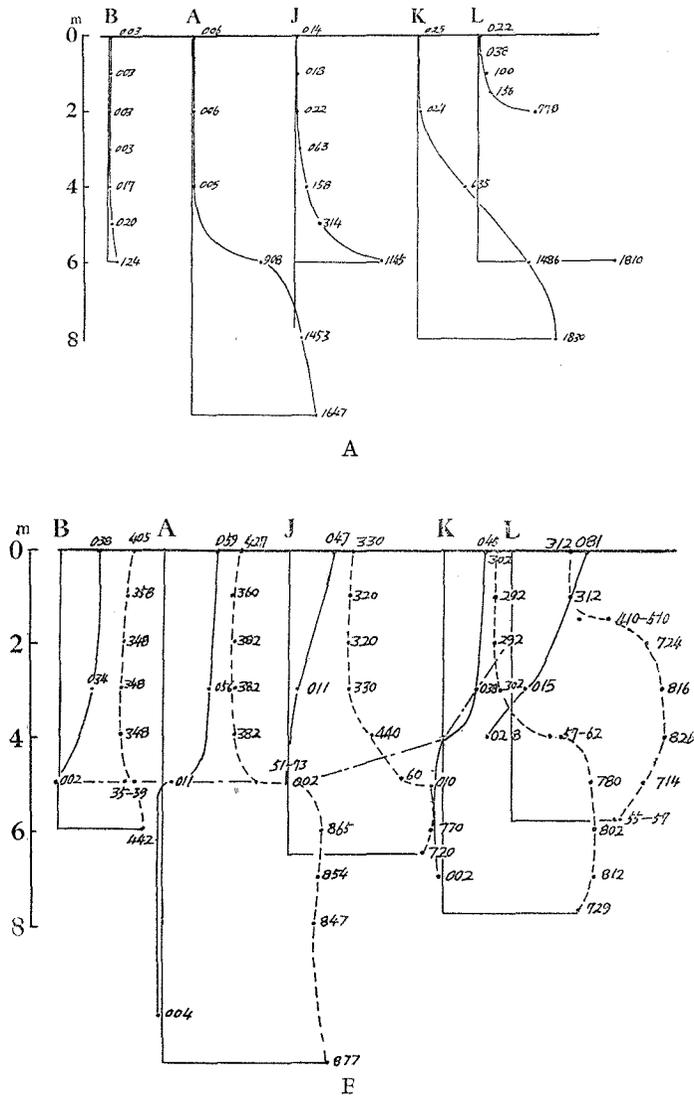
河水は 0.01% 或は以下の塩素量であるが、海水の上層を流れると 2 km 内外で表面に微量の塩素が検出される。実際に連続的な観測を行えばこの距離はもつと短縮されるであろう。例えば (II) では 1.75 km で既に 0.08% に増加し、(VI) では 4.3 km で 0.08 の増加である。後の場合に躍層深度が深く且海水層の侵入が河口から近いことからみて増水の場合に近いことが推測される。

表面 (に近い所) では塩素量分布は自由表面より上に塩素が出ないと云う当然の条件に従つて

$$\frac{\partial S}{\partial z} = 0. \quad z = a$$

であるが、観測の結果はこの条件は殆ど完全に充たされていると云つてよい。然し河口の外に出た場合には必ずしもこうはならないが河口を過ぎて更に 1 m も出れば再び  $\partial S / \partial z = 0$  となつて





第 6.5 図 観測 V (1942 年 8 月 20 日)

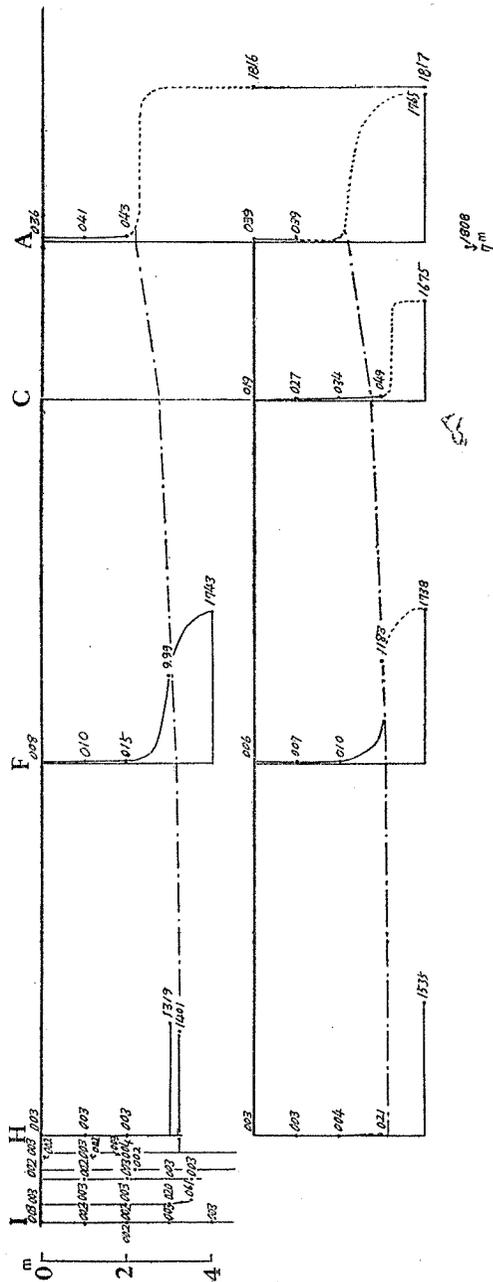
いる。河口では表層水の厚さが急にうすくなり、表面採水に際して 0.5 m も深度をとれば大部分海水層が入り採水範囲が 30 cm に及ぶ北原式はこの場合細かな深度をとれぬことが原因である。

表層の塩素量は満水時には 2~3 m の深度で急に増加して海水層のそれに近づくが、海水のそれは河の底層をなして層る今の場合には 14~18% のことが多く、異なる地点の間では傾度がやはり存在し、例えば (II) では station A と B との間では 0.9%/km の位であるが、所によりかなりまちまちで表層水程の明瞭な結果は出て来ない。これはむしろ当然のことであつて、底層を通過して侵入する逆流海水は密度流によつて流速も数 cm/sec 程度で極めて徐々に上流へ進む。

然しその間に微弱乍ら潮汐が存在するからこの方が密度流に卓越する場合もあつて海水層の薄い上流では  $u$  の変動がかえつて劇しいことも考えられる。そして河口外から供給される海水層の密度は、河口附近の風浪、潮流によつて著しく河水に混合する割合を異にする故、河口内を逆流する海水の密度（従つて塩素量）も多分に変動することが考えられる。又河水は時々刻々新鮮に供給されるにかかわらず、海水は増水によつて排泄されぬ限り貯溜されているから深淺屈曲等の地形の影響による上面及び側面よりの Austausch の不規則性も考えられ、これ等の影響もあつて底層の水層は甚しく河水に比べて一様性を欠くものと思われる。

境界面の分布はどうかと云えば奥地に於ける尖端の海水の近くでは殆ど水平になつていとみてよく、第6図 IV 及び VI に於ける場合も江別（河口から約 20 km）との水位差 0.5 m の order であるから殆ど問題とならない。即ち表面の傾斜は境界面の傾斜を考える時には無視してよいと思われる。河口に近くなると境界面の傾斜は次第に急になり上向きになり河口をすぎると浅く水平になる。その形状は下に凸であることは (I), (III), (IV), (V) 等数次の観測で極めて明瞭

である。これは河幅が河口で急になり始め水平方向の剪断応力の減少によると考えられるが、この部分では中間層の厚さが甚だ厚く観測されているのが目立つている。即ち (I) の渡船場に於ける塩素量の値は中間層の厚さ 3 m に及ぶように見られる。実際に採水をする場合、採水器の有効な長さ如何によつて明瞭な不連続面でも境界がボケる方に傾くことは後述するが、測定器の有効長さが僅か数種の透光率の曲線を見てもやはり変化がゆるやかであるから観測上の誤



第 6.6 図 観測 VI (1943 年 8 月 6 日)

差ではなく実際にこの様な分布をしていると考えてよいであろう。同じ例は (IV) に於ける透光率曲線, (V) に於ける渡船場の塩素量垂直分布及び透光率の曲線 (V) に於ける来札制水堤に於ける曲線等があり何れもこれの型に属する。又 1953 年夏天塩川河口で行われた電気伝導度の垂直分布, 透光率の垂直分布曲線も河口の附近で同様な厚い中間層を形造っている。

縦断面に於ける表層の光の透過率  $\rho$  の分布は位置の点から云えば若干の変化を示しているがそれが観測地点に対して一定の傾向を示す場合と、そうでない場合とがある。(IV) の観測では上流に行くに従つて透光率が減少し、恰も河底の摩擦がなくなつた河水が泥粒子を Suspend することが出来ず次第に沈降してゆくように見える。然し乍ら底層の海水は必ずしも一定の傾向を示していない。観測 (V) では上流透明な傾向が強く、(II) では上流への往途では次第に透過率が大きく、復途は次第に減じている。

この様にして表層水の光透過率が塩素量と異り簡単に渦動拡散の表示量とすることは適當でないことがわかつた。又進入海水の場合も外海の風浪のため河口外での渦粘性が増すと suspension はそのまま密度流のつて侵入して来るから海水中の透光率も必ずしも上層からの沈降とも考えられぬこともある。又 station A に於ける表層水の透光率を 1952 年に時間的変化を測つたものによると、この問題は簡単でないようである。河川の岸に於ける風波の消長、潮汐による（僅かであるが）水位の差等の影響も併せて考えなければならぬ。

境界面即ち躍層に於ける光の透過率の変化は極めて敏感で縦断観測の全部に於ける躍層の深度はすべてこの測定で決定したものである。躍層では不連続の箇所は常に上下に動く不規則性が見られ、数秒～数十秒の周期の振動がみられる。

尙中間層の厚さの測定について注意すべきことは前にも述べた測定する部分の大きさと測定に要する時間である。中間層と称すべき部分がなく境界面で二層の流体が接していても測定部分の大きさが上下の方向に  $l$  なる長さをもつ時は  $l$  なる厚さの中間層をもつ様な結果が出て来るであろう。例えば北原式 B 号では  $l$  は凡そ 30 cm である。

又測定時間の長い流速計、顛倒寒暖計等是一種の時間的平均値を示すと考えられる。河川二重層の如き比較的小規模の観測にはこの様な誤差にも注意を払う必要がある。抵抗寒暖計、光電池による濁度計はこの誤差が少ないので躍層の研究には適していると云うことが出来る。採水による試料の測定は測定箇所がとびとびであとから埋めることが出来ないから海水の混入の割合を簡単に知る器械が望ましい。電気伝導度の測定は水温の急変化もあるので塩素量の直接測定ほど精度が上らないようである。

最後に表面塩素量について考察する。今二層の水層から成る流れを考え下層の水層は停止して居り、上層の水は  $x$  軸方向に水平に流れてゆくものとする。 $z$  軸を鉛直上方にとり河幅の方向に

1) 前出。日本海洋学会誌、第1巻第1号。

$y$  軸をとること前と同様であるが流れに属している scalar 量を  $S$  とすれば前述のように定常状態に於て

$$\frac{\partial(Su)}{\partial x} = \eta \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$$

$\eta$  は動粘性 (渦動) 係数とする.  $z=a$  を自由表面とすれば境界条件として

$$z=0 \quad \frac{\partial S}{\partial z} - h(S - S_\infty) = 0 \quad \text{但し } S_\infty \text{ は下層の } S$$

$$z=a \quad \frac{\partial S}{\partial z} = 0$$

$$x=0 \quad S=0$$

が成立つ. 但し  $h$  は境界面に於ける遷移率  $\alpha$  と  $\mu$  との比である.

$$S - S_\infty \equiv \theta \quad x/u \equiv \xi \quad \text{とおけば上式は}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \eta \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}$$

境界条件は

$$\theta_{\xi=0} = -S_\infty = \theta_0$$

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=a} = 0$$

$$\left\{ \frac{\partial \theta}{\partial z} - h\theta \right\}_{z=0} = 0$$

となりこれをとけばよい.

$$\theta \equiv e^{p\xi + qz}$$

とおけば

$$\theta = e^{-\gamma m^2 \xi + miz}$$

即ち

$$\theta = e^{-\gamma m^2 \xi} (A \cos mz \sin mz)$$

但し

$$q \equiv mi \quad p \equiv -m^2 \eta$$

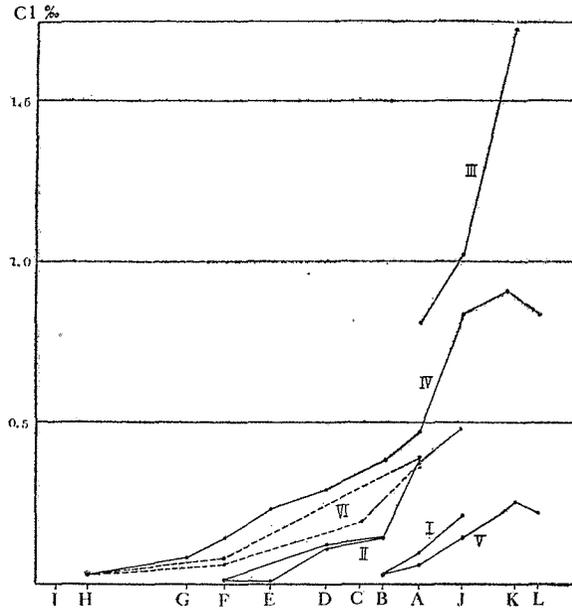
これに表面の条件を入れると

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)_{z=a} = e^{-\gamma m^2 \xi} (-Am \sin ma + Bm \cos ma) = 0$$

即ち  $\theta = Me^{-\gamma m^2 \xi} \cos m(a-z)$  但し  $A = M \cos ma, B = \sin ma.$

$z=0$  に於ける条件は

$$\left( \frac{\partial \theta}{\partial z} - h\theta \right)_{z=0} = M e^{-\gamma m^2 \xi} (m \sin ma - h \cos ma) = 0$$



第 7 図

であるから  $ma \equiv \delta_s$  とおけば上式より得た所の  $\tan ma = h/m$  から  $\cot \delta_s/ha$  を得る.

即ち 
$$\theta = \sum_{j=1}^{\infty} M_s e^{-\frac{\gamma \delta_s^2 \xi}{a^2}} \cos \frac{\delta_s}{a} (a - z)$$

次に  $M_s$  を決定するには  $\xi=0$  の場合の  $\theta$  の値

$$\theta_{\xi=0} = \theta_0 = \sum_{s=1}^{\infty} M_s \cos \frac{\delta_s}{a} (z - a)$$

の両辺に  $\cos \frac{\delta_n}{a} (a - z)$  を乗じて積分すると

$n \neq s$  の場合には 
$$I = \int_0^a \cos \frac{\delta_s}{a} (a - z) \cos \frac{\delta_n}{a} (a - z) dz = 0$$

$n = s$  の場合には 
$$I = \int_0^a \cos \frac{\delta_n}{a} (a - z) dz \frac{a}{2} \left( 1 + \frac{ha}{h^2 a^2 + S_n^2} \right)$$

又は 
$$I = \frac{a}{2} \frac{\delta_n + \sin \delta_n \cos \delta_n}{\delta_n}$$

$$\therefore M_n = \frac{2}{a} \frac{1}{\left( 1 + \frac{ha}{h^2 a^2 + \delta_n^2} \right)} \int_0^a \theta_0 \cos \frac{\delta_n}{a} (a - z) dz$$

$$\therefore \theta = \theta_0 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\left( 1 + \frac{ha}{h^2 a^2 + \delta_s^2} \right)} e^{-\frac{\gamma \delta_s^2}{a^2} \xi} \frac{1}{\delta_s} \sin \delta_s \cos \frac{\delta_s}{a} (a - z)$$

特に表面の scalar 量は

$$\theta_a = S_a - S_\infty = 2\theta_0 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{1}{\left(1 + \frac{ha}{h^2 a^2 + \delta_s^2}\right)} \frac{\sin \delta_s}{\delta_s} a^{-\frac{\gamma \delta_s^2}{a^2} \xi} \quad (7.1)$$

或は

$$\theta_a = 2\theta_0 \sum_{s=1}^{\infty} \frac{\sin \delta_s}{\delta_s + \sin \delta_s \cos \delta_s} e^{-\frac{\gamma \delta_s^2}{a^2} \xi}$$

で与えられる。

上式を使用して既に第3章で定性的な考察を行つたが、station 間の表層塩素量の測定値を第7図に示す。(IV), (VI) の観測で尖端の方で  $0.04\% / 4.3 \text{ km} \approx 0.01\% / \text{km}$  の場合は最も少い方であつて  $0.71\% / 1.67 \text{ km} \approx 0.425\% / \text{km}$  が最大値である。他は主に  $0.05\% / \text{km}$  の附近のものが多い。即ち海水の塩素量を  $18\%$  とすれば  $1 \text{ km}$  について  $1/360$  の海水を表層に混じているわけで海水と河水の混合は我々が想像しているよりも遙に少ないものであることが判つた。

Station A よりも下流にあつては、塩素量傾度が強く、即ち海水の混合の割合が甚だしいことは特に渦水の折に強く、淡水層の厚くなるに従い曲線は右方に移る。又来札から聚富に至る間に塩素量の急激な上昇が見られる場合が2回あるが、これは何れも非常に淡水層の厚さの薄い場合のことであつて、このあたりから河幅が次第にひろくなること、従つて流速が減じ又淡水層の厚さが非常に減少したためである。淡水層が station A での厚さ  $4 \text{ m}$  以上の時 (観測 I) 或は  $5 \text{ m}$  以上の時 (観測 V) は station J で厚さが減ずるけれども流量は多く減水の型ではない。この様な時は右下の曲線となるが傾度の比較的大きいのは、やはり厚さの減少が利いているためであると思われる。

著者は上述のように河口二重層に於ける渦動拡散の状態を、光透過率、流速、塩素量の垂直分布並びに縦方向の分布から論じたのであるが、ここにその結果を要約する。

(I) 二重水層の日変化を記録する装置として一種の測深管を試作しこれを複式測深管と名づけた。これを使用して河口二重層の境界面の毎日の深度を記録した。又同時に表面採水により塩素量を決定した。

(II) 表層水に対する底層水の混合は表層流量の多い時と少ない時とに區別出来るが、前者で表層水の深度が  $1 \sim 2 \text{ m}$  の場合には拡散の割合は後者の数倍に上り、流量が少い程その割合は急激に上昇する。特に流量に鋭敏でジグザグの変化をする。これに反して表層水量の比較的多い場合 (冬季) 即ち  $3 \sim 4 \text{ m}$  以深では混合は安定で日変化曲線は滑らかな変化を示す。

(III) 流速分布が一定で底層からえず一定の遷移が行われる場合の式を導出し準定常の状態で

は厚さの効果が、他の遷移率、渦動伝導率、流速、流下距離に比べて表層水に及ぼす効果が大きい。厚さの比較的大きい時には実際には遷移率、渦動伝導率が利く場合が多い。

(IV) 光電池による濁度計 (Turbidimeter) を製作し河川の濁度及び境界面の位置決定に使用した。これの測定によると河川が海水の層上に流れて来たために、乱流が減衰しそのために浮泥が沈降すると云う現象は二重層の発達している時は石狩川河口では顕著ではないことが認められた。又これは境界面の決定には最も有用な装置であることも証明された。

(V) 濁度計, Ekman-Merz 流速計, 採水器等により河口二重層上を 15 km にわたり縦断観測を行い, 13 カ所の地点で塩素量, 光透過率, 流速, 躍層深度の垂直分布を測定し, 塩素量, 流速の結果を用い, 表面条件を利用して河水層の渦動粘性係数を決定した。その結果は従来流速と水面傾斜から出された少数の他河川の数値と一致している。石狩川に於ける渦粘性係数の値はこれが最初である。渦動粘性係数の垂直分布は表面から 1 米層あたりで最大となり二重層の境界面にゆくに従い急激にその値を減少する。二層間の摩擦応力の極めて小さいこと, 又河水海水間の混合の甚だしく少ない事実を別の面からも説明するものである。

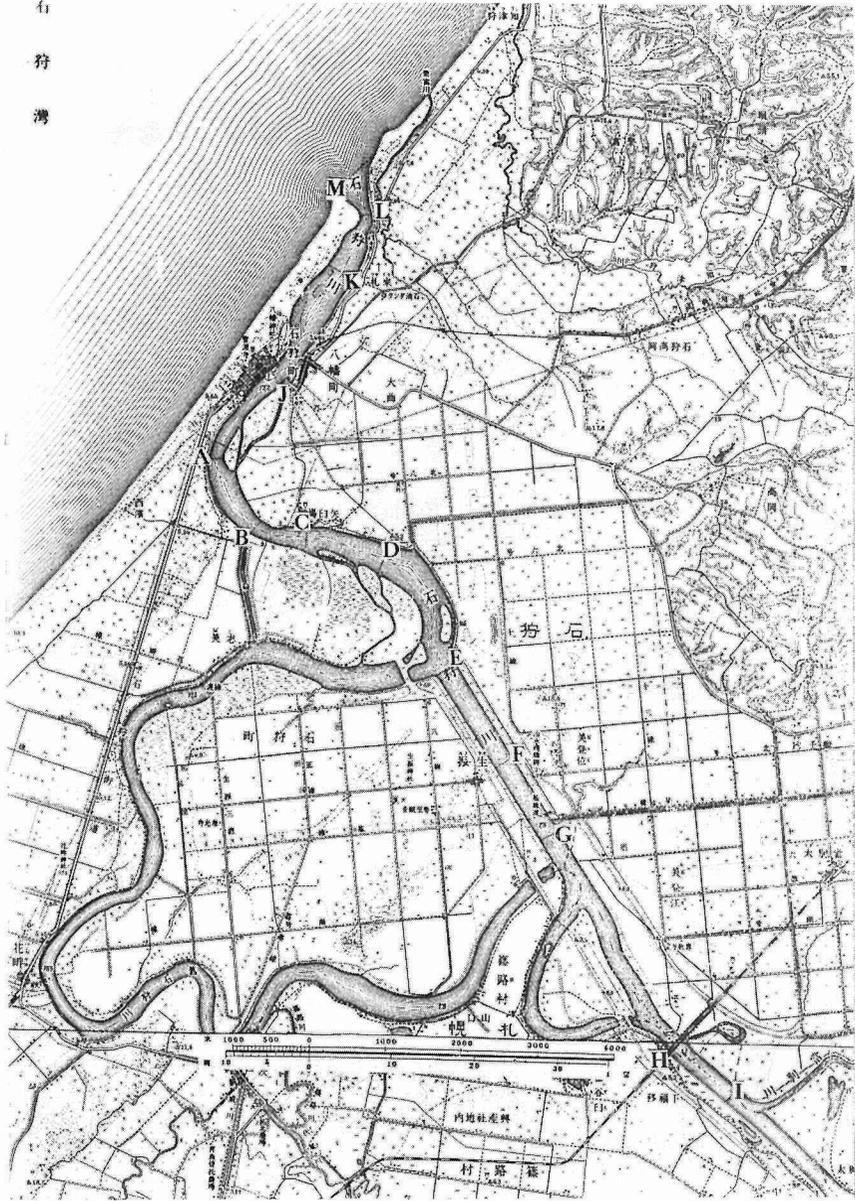
(VI) 境界面は表層流量の多少によつて河口を去る最大 15 km から始まることもあり, 多くはそれ以下で始まる。表層水の少い時は尖端に於いて境界面は略水平, 河口に近づくに従い急激に上昇する。境界面の縦断線は上に凹である。進水した底層からの遷移率は  $10^{-6}$  の order (c. g.s.) である。

(VII) 表面塩素量傾度は略直線的に上昇し河口近くで更に直線状に急昇する。

終りに臨み著者は池田芳郎教授の本研究に寄せられたるたえざる御激励に対し深い感謝を捧げるものである。又この研究の一部は學術振興会によつたことも附記する。

附 図 一 I

有  
狩  
灣



附表一 II

| 観測地点 | 隣接地点間距離            | St. A よりの<br>距離    | 通 称     |
|------|--------------------|--------------------|---------|
| M    | 0.65 <sup>km</sup> | 4.41 <sup>km</sup> | 河 口     |
| L    | 0.74               | 3.76               | 聚富川口口   |
| K    | 1.67               | 3.02               | 来 札     |
| J    | 1.35               | 1.35               | 渡 船 場   |
| A    | 1.11               | 0.00               | 石狩治水工場  |
| B    | 0.74               | 1.11               | 運 河 橋   |
| C    | 1.05               | 1.85               | 六 戸     |
| D    | 1.75               | 2.90               | 5,3 三角点 |
| E    | 1.40               | 4.65               | 新 川 入 口 |
| F    | 1.20               | 6.05               | 生 振 工 場 |
| G    | 3.10               | 7.25               | 神 社 前   |
| H    | 1.00               | 10.35              | 札沼線鉄橋   |
| I    |                    | 11.35              | 鉄 塔     |