

田辺湾における海況変動の観測 (第4報)

西 勝 也・国 司 秀 明

SOME OBSERVATIONS ON COASTAL PROCESSES IN TANABE BAY (IV)

By Katsuya NISHI and Hideaki KUNISHI

Synopsis

In the third report of the same title, it was discussed that a density flow due to the density difference between inside and outside Tanabe Bay was not controlled by Coriolis' force but by the stress terms. In this report, in order to confirm that postulation, we carried out a series of oceanographic survey using STD system in the bay in August 1972. The result shows that the values of the velocities are reasonable, but that the salt flux calculated from the velocity profiles does not explain the time change of the chlorinity observed. It is necessary to introduce more genuine method and technique of calculating velocity distributions.

1. ま え が き

筆者らは、以前に、田辺湾の白浜海洋観測塔における連続観測記録上に、しばしば水温の急激な一方向な変移がみられ、これが湾外水の湾内へのつっこみによるもので、田辺湾における海水交流の実態は、拡散というよりもむしろこのような密度流による交換によっているということを示す観測例¹⁾を示し、さらにその同じ観測資料を用いて、この田辺湾程度の規模の湾では、密度分布による圧力勾配項がコリオリの項よりもむしろ摩擦項とバランスするとする方が適当であるという計算結果²⁾を報告した。しかし、その計算に用いた塩素量の観測は、各測定点で鉛直方向に3点しかないというかなり不十分なものであったので、今回は STD 観測をおこない、その観測資料を用いた計算をおこなったので、その結果について報告する。

2. 観測結果の概要

計算に用いた観測資料は、1972年8月2日と3日に行なった観測によるもので、観測点の配置を Fig. 1 に示してある。測点番号はテンソル形式でつけてある。各観測点について、表面から海底にいたる水温と塩素量の鉛直分布測定を、STD (鶴見精機製)を用いて行なった。観測は8月2日の第1回目の満潮時と引き続く干潮時、および8月3日の第1回目の満潮時の3回、それぞれ、各潮時をはさんで、全観測点の観測を1時間以内で完了した。

Fig. 2 に、8月2日の第1回目の満潮時 (これを Aug. 2 No. 1 と記す) 前後の各観測点における塩素量、水温および両者から計算で求めた密度の1m毎の値を示す。これをみてすぐ気がつくことは、st. 11 から st. 14 までと、st. 21 から st. 22 までの水深11mから20m位までの中間層に、高温高かんな水がはいりこんでいることである。また、st. 11 の表層には低かんな水があることがわかるが、これらをよりあきらかな形でみるために、塩素量の分布の立体図を描いたものが Fig. 3 である。手前の方が湾口で、奥の方が湾奥である。明らかに、湾口の表層、白浜よりのところに低かんな水があり、その中間層には高かんな水がはいりこんでいる様子がわかる。この時の密度分布を同様に立体図化したものが Fig. 4 で、塩素量の分布とほとんど同様の分布を示している。

それが5時間後の干潮時（これを Aug. 2 No. 2 と記す）にはどのようなになったかを示したのが Fig. 5 である。これをみると、Fig. 2 の st. 21 ではわずかにしかみられなかった中間層の高温高かん部が、かなり強くあらわれていて、Fig. 2 の st. 11 とほとんど同様な分布をしていることがわかる。また、st. 22 でも、この中間層のあらわれ方は Fig. 2 におけるより強いが、一方、st. 11 から st. 13 では、前の満潮時よりも弱くなった形の分布をしている。このことは、おそらく中間層にある高温高かんな水が、湾口から湾奥へむかって進んでいったことを意味すると考えられる。この時の塩素量の立体図を示したものが Fig. 6 である。これをみてもそのことがうかがわれる。一方、満潮時に湾口表層の白浜側にあった低かんな水は、この図ではどこにも見られなくなっており、たぶん湾外へ出ていったものと考えられる。Fig. 7 はこの時の密度分布の立体図である。表層を除くと、前の満潮時とほとんど変わらないようにみえるが、湾奥の方で成層状態がより強くなった様子がみられる。

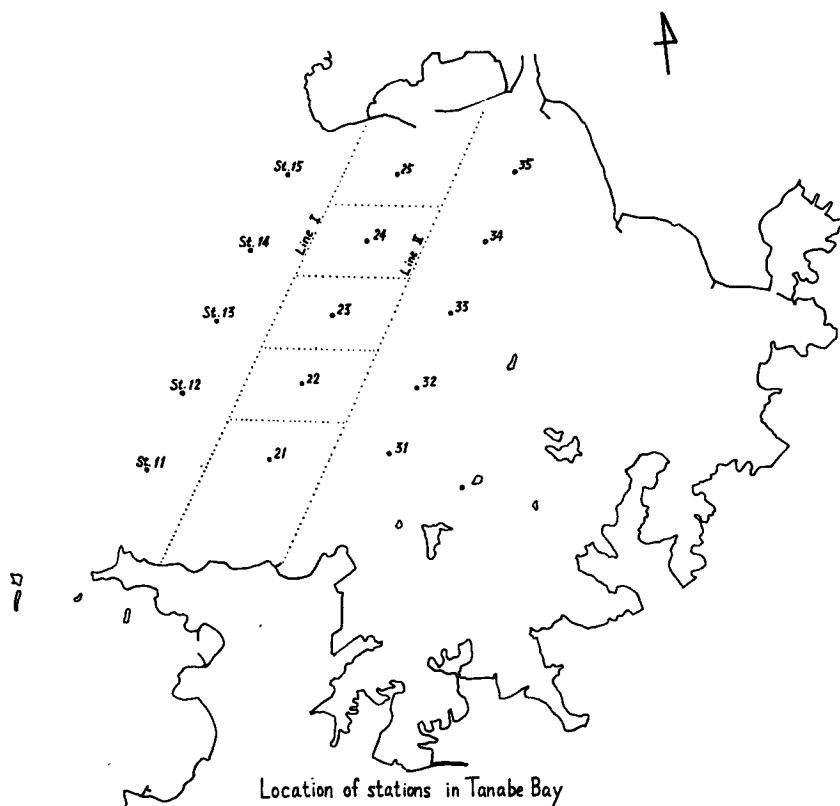


Fig. 1 Location of STD observation stations in Tanabe bay.

Fig. 8 は8月3日の第1回目の満潮時前後の各観測点における塩素量、水温および密度の鉛直分布を示したもので、8月2日のNo. 2より20時間後のものである。これを見ると、中間層にあった高温高かんな水のつっこみはもはやみられず、表層に高かんな水がはいりこんできているようにみえる。この時の塩素量を立体図化したものがFig. 9である。全域にわたって、表層下の数mに、表層よりも塩素量の低い水が田辺側から白浜側へ舌状にはいりこんでいる様子がうかがわれる。一方、底層にあった19.0‰以上の領域は、ここではわずかにみられるだけで、湾外へ出ていったものと思われる。Fig. 10はこの時の密度分布で、前のものに比べて大きな変化はみられないが、どちらかという、一様化の方向に現象が進んだというよりは、むしろ中間層および表層でより複雑になったという印象の方が強い。

以上8月2日から3日にかけての田辺湾内の海況の変化の様子をみたのであるが、全体としては、大きな変化はみられなくても、以前に報告したような湾外水の流入による静的にみた密度場の不安定な状態が

1972 Aug. 2 No. 1

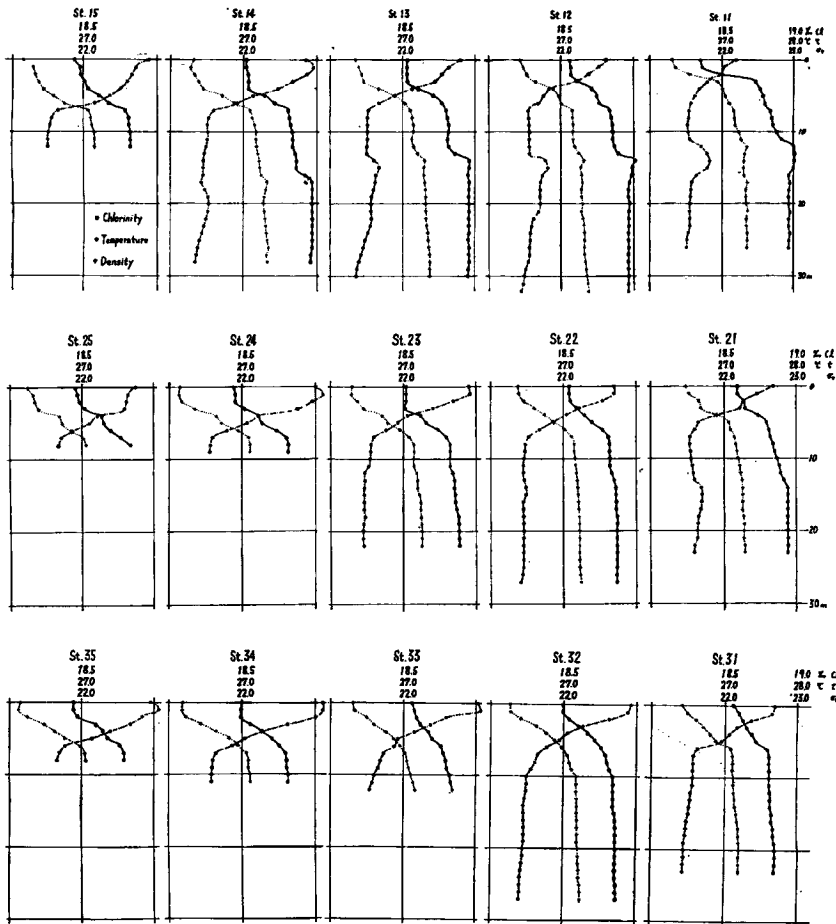


Fig. 2 The vertical profiles of chlorinity, water temperature and density in Tababe bay at the first high water on Aug. 2.

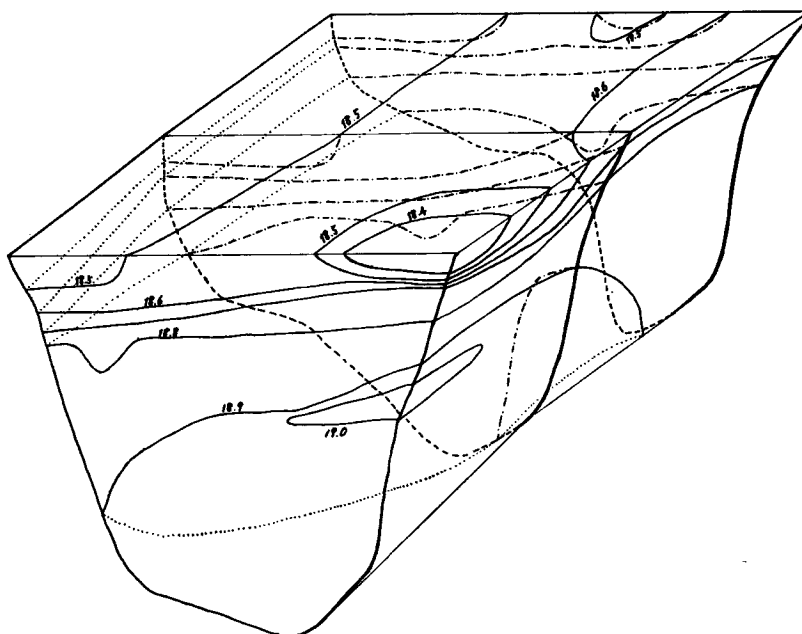


Fig. 3 Distribution of chlorinity in Tanabe bay at the first high water on Aug. 2.

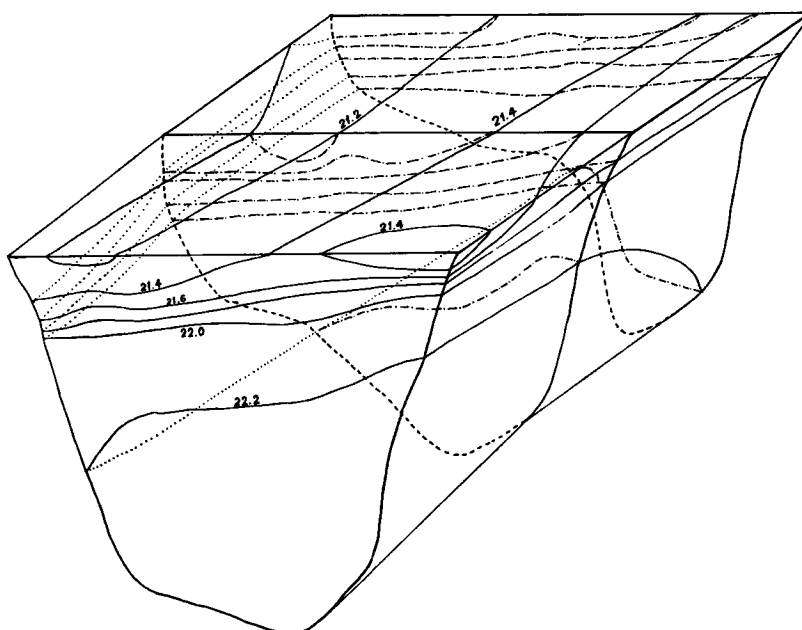


Fig. 4 Distribution of density in Tanabe bay at the first high water on Aug. 2.

1972 Aug 2 No 2

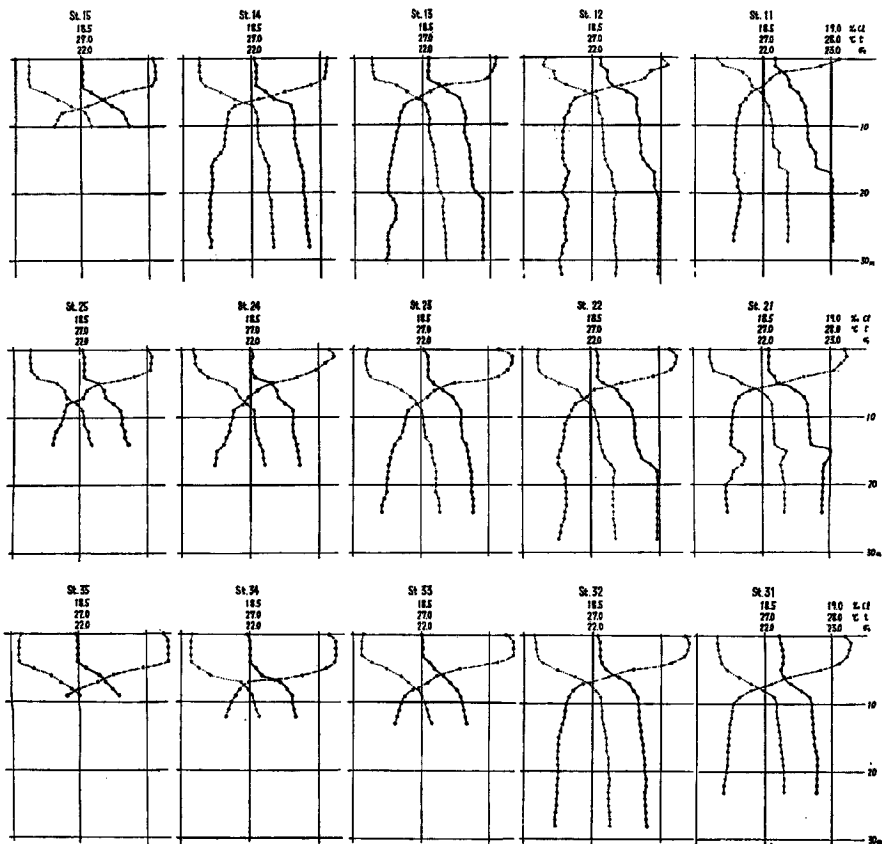


Fig. 5 The vertical profiles of chlorinity, water temperature and density in Tanabe Bay at the first low water on Aug. 2.

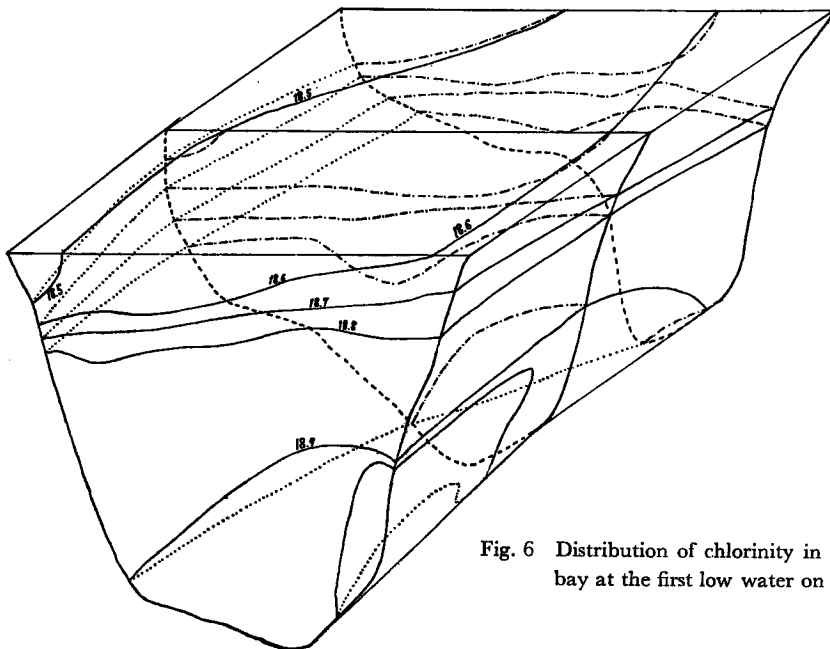


Fig. 6 Distribution of chlorinity in Tanabe bay at the first low water on Aug. 2.

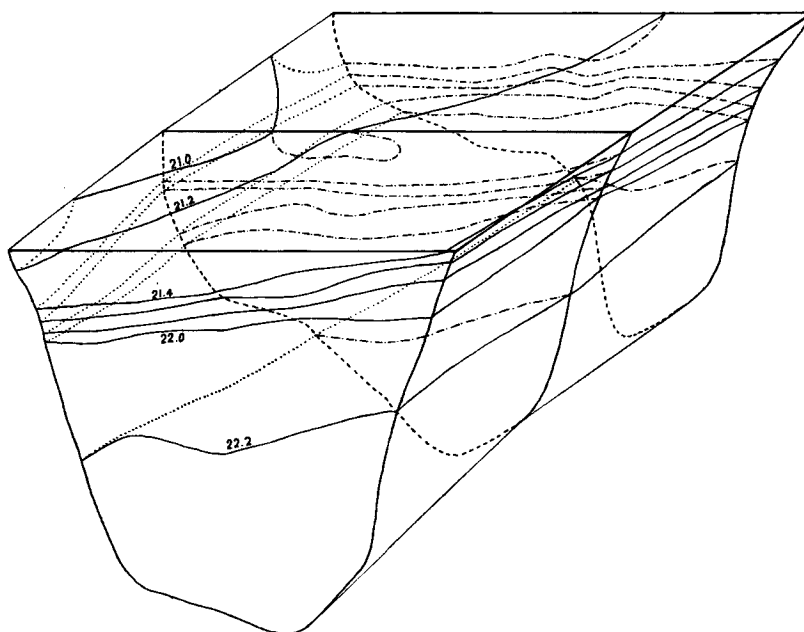


Fig. 7 Distribution of density in Tanabe bay at the first low water on Aug. 2.

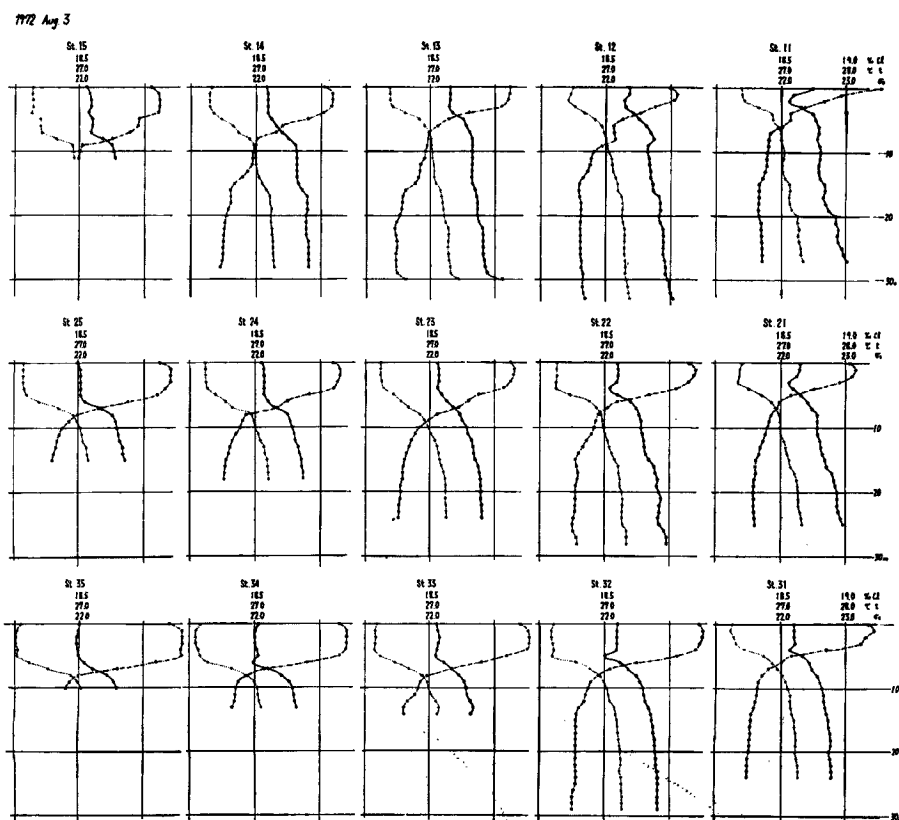


Fig. 8 The vertical profiles of chlorinity, water temperature and density in Tanabe bay at the first high water on Aug. 3.

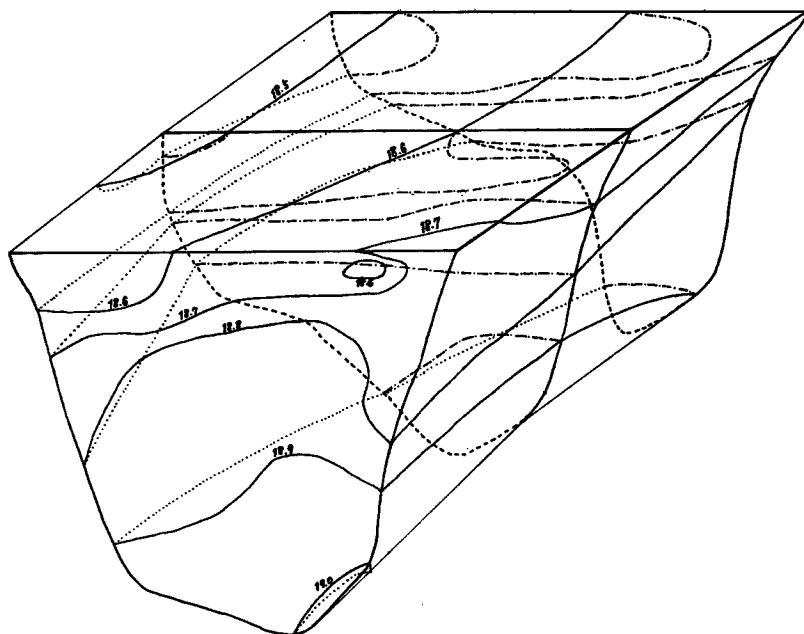


Fig. 9 Distribution of chlorinity in Tanabe bay at the first high water on Aug. 3.

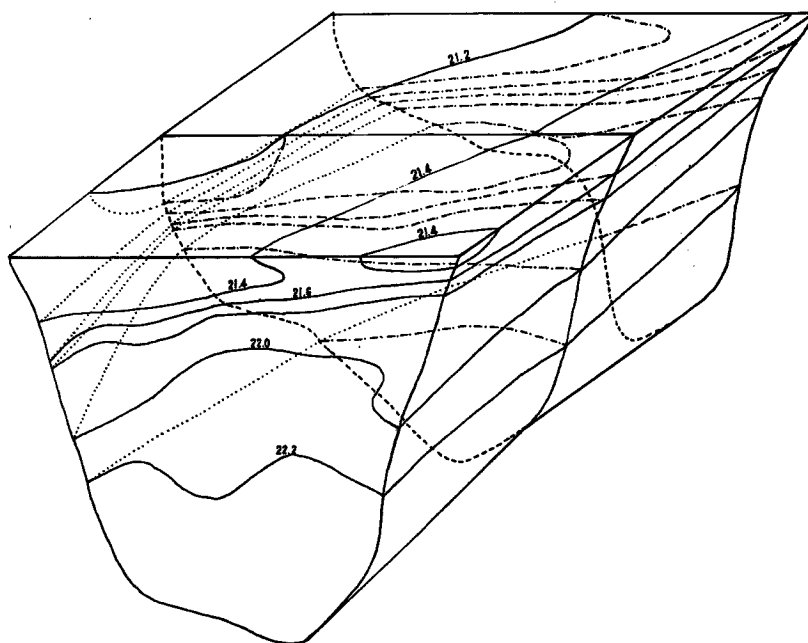


Fig. 10 Distribution of density in Tanabe bay at the first high water on Aug. 3.

ら安定な状態へ移行していくというような、一方方向へ進行していく現象ではなさそうである。現象はやや複雑であって、このあと、2, 3日観測を続けていれば、あるいは、もう少し何等かの見通しが得られたかもしれないが、3日の観測のあと、観測艇に故障があったため、観測不可能となり、打切らざるをえなかった。

3. 流速分布の計算 (I)

前節に述べた観測資料を用いて、まず、第3報と全く同じ方法で計算を行なってみた。考える領域は、Fig. 1のLine IおよびLine IIで示される点線で囲まれた部分である。用いた式は第3報に述べた通りであるが、ここにもう一度まとめて示しておく次のようである。すなわち、湾奥に向う方向を x 、湾口線に平行な方向を y とし、流速場の状況は近似的に定常で、密度分布による圧力勾配項と鉛直渦動粘性による摩擦項とのバランスによって表わされ则认为、さらに y 方向の鉛直積分流量は零であると仮定することによって、 x 方向の流速 u および y 方向の流速 v が

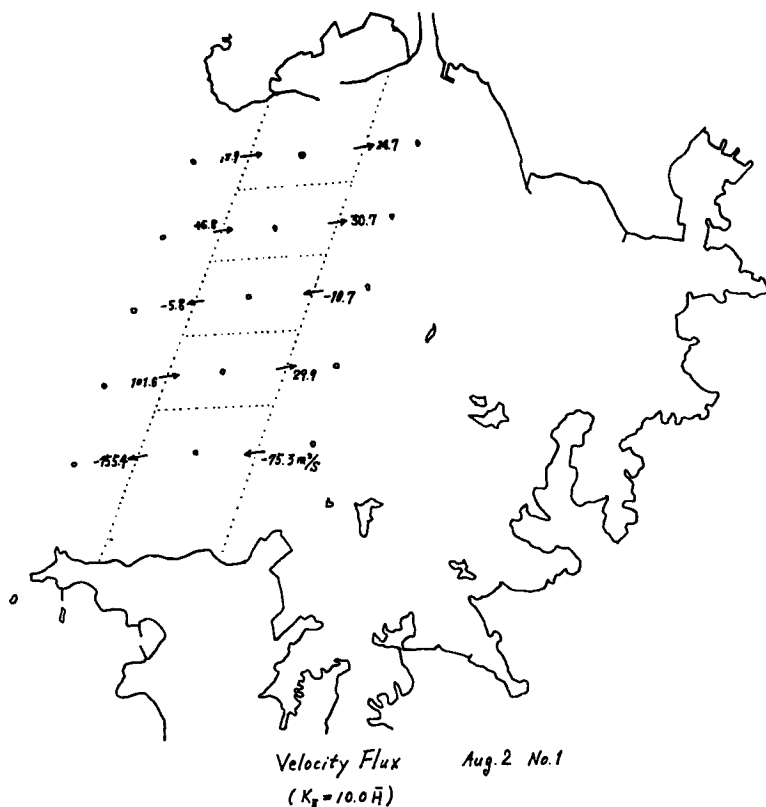


Fig. 11 The volume transport at the first high water on Aug. 2.

$$\left. \begin{aligned} u_{ij} &= u_{ij_0} + \frac{10^4}{K_s \Delta x_{ij}} \left\{ \Delta_i \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} + 10^5 \frac{\Delta_i \varepsilon_{ij}}{2} z^2 \right\} \\ u_{ij_0} &= - \frac{10^4}{K_s \Delta x_{ij}} \left\{ \Delta_i \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} + 10^5 \frac{\Delta_i \varepsilon_{ij}}{2} \bar{H}^2 \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} v_{ij} &= v_{ij_0} + \frac{10^4}{K_s \Delta y_{ij}} \left\{ \Delta_j \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} + 10^5 \frac{\Delta_j \varepsilon_{ij}}{2} z^2 \right\} \\ v_{ij_0} &= - \frac{10^4}{K_s \Delta y_{ij}} \left\{ \Delta_j \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} + 10^5 \frac{\Delta_j \varepsilon_{ij}}{2} \bar{H}^2 \right\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。ここで δD_{ij} は各測点における dynamic-depth anomaly, K_s は鉛直渦動粘性係数で、深さ方向には変らないとする。 ε_{ij} は各測点における水面の基準面からの高さをあらわし、 $\Delta_i \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{i+1,j} - \varepsilon_{ij}$, および $\Delta_j \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{i,j+1} - \varepsilon_{ij}$ はそれぞれ

$$\Delta_i \varepsilon_{ij} = \Delta_i \varepsilon_i + \Delta_i \varepsilon'_{ij}$$

$$10^5 \Delta_i \varepsilon_i = \frac{\sum_j \frac{10^6 \Delta y_{ij}'}{K_s \Delta x_{ij}} \left\{ \sum_0^{\bar{H}} \Delta_i \sum_0^z \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} - \bar{H} \Delta_i \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} - 10^5 \Delta_i \varepsilon_{ij}' \frac{\bar{H}^3}{3} \right\}}{\sum_j \frac{10^6 \Delta y_{ij}'}{K_s \Delta x_{ij}} \frac{\bar{H}^3}{3}} \dots\dots\dots (3)$$

$$10^5 \Delta_j \varepsilon_{ij} = \frac{3}{\bar{H}^3} \left\{ \sum_0^{\bar{H}} \Delta_j \sum_0^z \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} - \bar{H} \Delta_j \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^z 10^5 \delta D_{ij} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

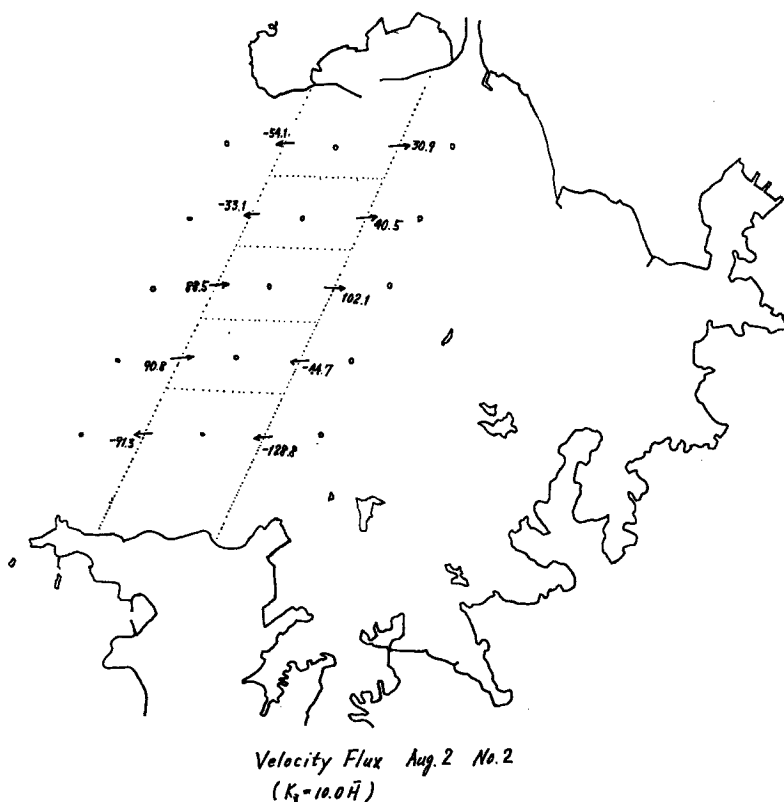


Fig. 12 The volume transport at the first low water on Aug. 2.

によって求められる。ここで $\Delta_i \varepsilon_{ij}'$ は測点11と測点21および測点21と測点31の間の海面差を零においた時の x 方向の各対応測点間の海面差であり、 $\Delta_i \varepsilon$ は測点11と測点21および測点21と測点31の間の海面差である。 K_s の値としては、 $K_s = \alpha \bar{H}$ ($\bar{H}$ はそれぞれ対応する測定点間の平均水深) を仮定し、 α の値としては 10^{-1}cm/sec を使用した。 u_{ij0} および v_{ij0} はそれぞれ、 x 方向および y 方向の表面流速である。

以上の式を用いて求めた流速の大きさは、8月2日の No. 1 および No. 2 において、ともに、ただか 2cm/sec の程度で、田辺湾で期待される流速としては適当であると考えられる。しかし、流量フラックスのバランスを考えてみると、8月2日の No. 1 では、Fig. 11 に示したように、流入量と流出量の間に2倍から3倍位の差があることがわかるし、8月2日の No. 2 では、Fig. 12 に示したように、流入量と流出量に差があるというより、流入、流出量の向きが逆になっているという結果が出た。このような結果が出てくる理由として考えられることは、 y 方向の鉛直積分流量が零になるという仮定が正しくないからだろうということである。

4. 流速分布の計算 (II)

y 方向の流量フラックスが零にならない事が考えられるので、次には、この仮定をしないで計算することにする。この計算では、 x 方向および y 方向いずれの鉛直断面においても、任意の深さに無流面が存在し、Line I および Line II における鉛直断面での流量フラックスは前の計算と同じく、それぞれ零になるような流速分布を求めるという考え方で進めていく。そして、Line I と Line II とで囲まれた海域内を5つに分けた各ブロック (Fig. 1 参照) 内で、流量フラックスがそれぞれ零となるような y 方向の流速分布を求めることにする。

まず、 x 方向について考える。任意の深さ $\bar{H}'$ を考え、この深さにおける流速 $u_{ijz=\bar{H}'}=0$ とすると、(1)式より

$$10^5 \Delta_i \varepsilon_{ij} = \frac{2(\Delta_i \sum_{j=0}^{\bar{H}'} \sum_{j=0}^{\bar{H}'} 10^5 \delta D_{ij} - \Delta_i \sum_{j=0}^{\bar{H}'} \sum_{j=0}^{\bar{H}'} 10^5 \delta D_{ij})}{\bar{H}^2 - \bar{H}'^2} \dots\dots\dots (5)$$

が(3)式の代りにもとまる。

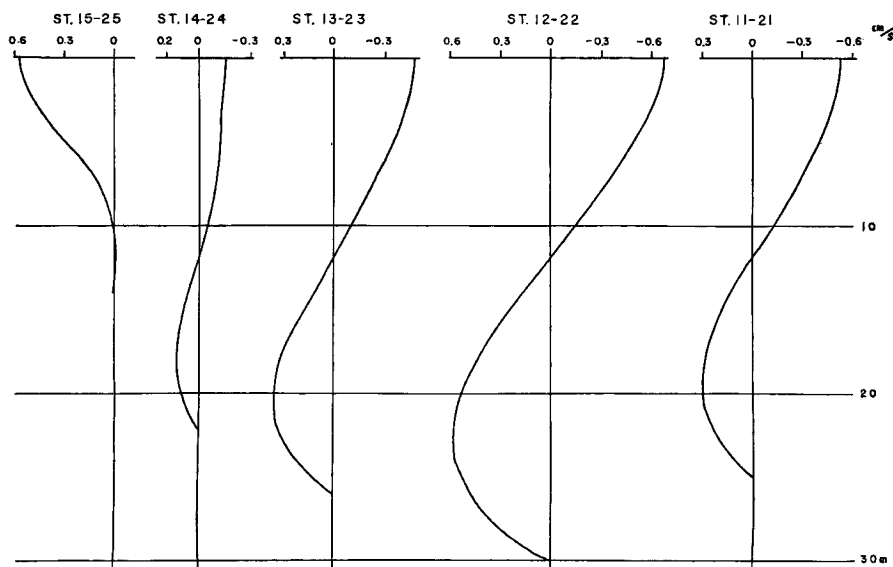


Fig. 13 The velocity profiles of the X-direction on Line-I at the first high water on Aug. 2.

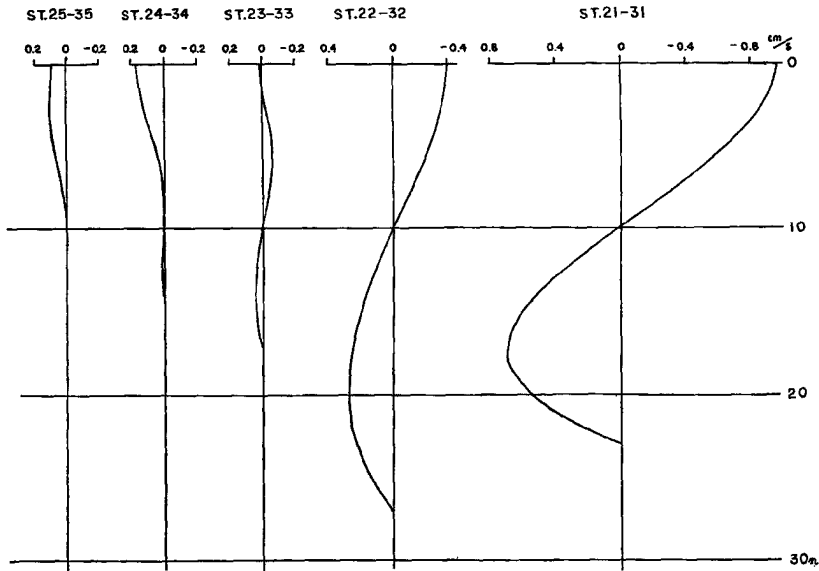


Fig. 14 The velocity profiles of the X-direction on Line-II at the first high water on Aug. 2.

8月2日の No. 1 について、(5) 式と(1) 式から任意の深さ $\bar{H}'$ に対する u_{ij} の分布を求め、Line I および Line II において、鉛直断面における流量フラックスがそれぞれ零となるような流速分布を選び出したものが Fig. 13 および Fig. 14 である。次に、今 x 方向の流速分布が求まったので、各ブロック毎の流量バランスがとれるように y 方向の流速分布を求める。この計算方法は、 x 方向のそれと同様である。任意の深さ $\bar{H}'$ における流速 $v_{ij|z=\bar{H}'}=0$ とすると、(2) 式より

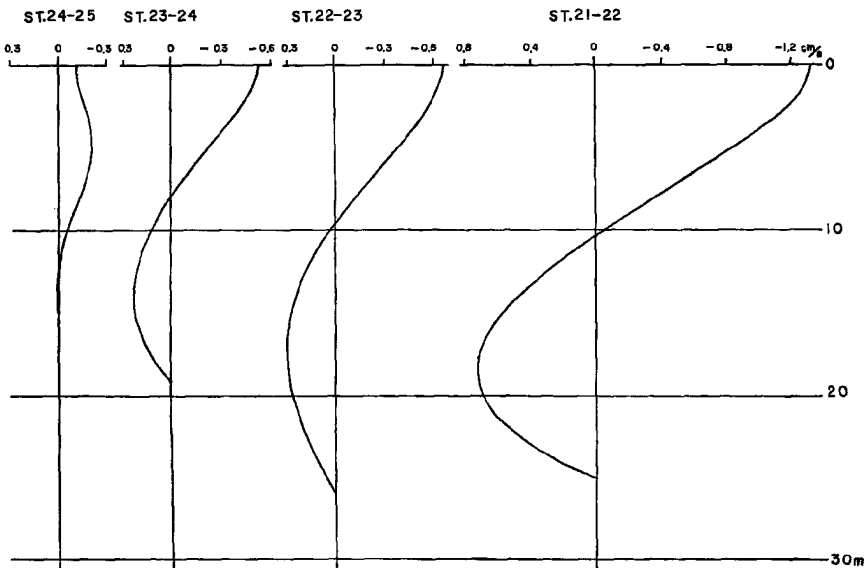


Fig. 15 The velocity profiles of the Y-direction at the first high water on Aug. 2.

$$10^5 \Delta_j \varepsilon_{ij} = \frac{2(\Delta_j \sum_0^{\bar{H}'} \sum_0^{\bar{H}} 10^5 \delta D_{ij} - \Delta_j \sum_0^{\bar{H}} \sum_0^{\bar{H}'} 10^5 \delta D_{ij})}{\bar{H}^2 - \bar{H}'^2} \dots\dots\dots (6)$$

が(4)式の代りにもとまる。

8月2日の No. 1 の y 方向の流速分布 v_{ij} を任意の深さについて (6) 式と (2) 式を使って求め、そのなかから、各ブロックごとの流量フラックスが零となるようなものを選び出して示したものが **Fig. 15** である。**Fig. 13, 14, 15** をみて気がつくことは、Line I における無流面は、st. 15-25 を除いて、各ブロックとも 12m の深さにあり、Line II では 10m の深さにあることである。ただ、 y 方向の無流面の深さは各ブロックで異なり、st. 21-22 から st. 23-24 にかけて浅くなり、それから st. 24-25 にかけて急に深くなっている。これらの流速分布から各ブロックごとの流量を求めたものが、**Fig. 16** の括弧をつけない数字で示してある。

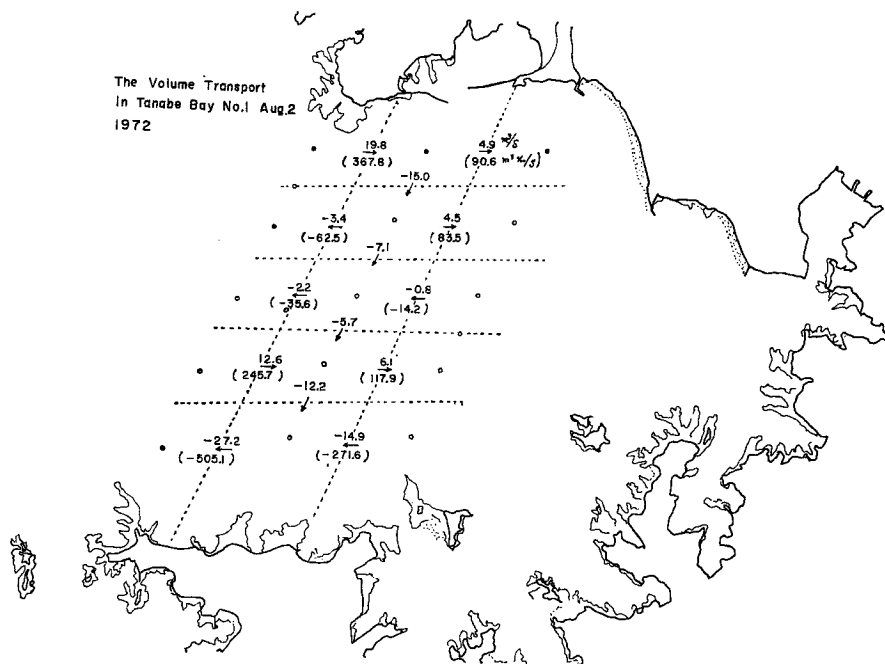


Fig. 16 The volume transport and chlorinity flux at the first high water on Aug. 2.

次に、同様な方法で8月2日の No. 2 について計算した流速分布が、**Fig. 17, Fig. 18** および **Fig. 19** である。これらを見ると、No. 1 の流速にくらべて、全体として大きい、それでもたかだか 2cm/sec の程度である。この時の流量を各ブロックごとに求めたものが、**Fig. 20** の括弧をつけない数字で示してある。

Fig. 17 の Line I における無流面は、①から③にかけて 2 m 程深くなり、④から⑤にかけて再び浅くなっているが、9 m から 11 m の範囲の深さにある。**Fig. 18** の Line II においては、①から順次浅くなって、④では 2 m 程浅くなっているが、④から⑤にかけては更に 3 m 程浅くなって、水深 3 m のところにある。①から④までは 8 m から 6 m までの深さにある。

流速分布の形そのものは、No. 1 と No. 2 とをくらべてみても大きくかわっていないけれども、なかには、流れの向きが逆になっているものもある。しかし、全体としてみれば、 x 方向については、無流面より浅い部分の水は、湾内から湾外へ流出し、深い部分の水は湾外から湾内へ流入している。一方、 y 方向につ

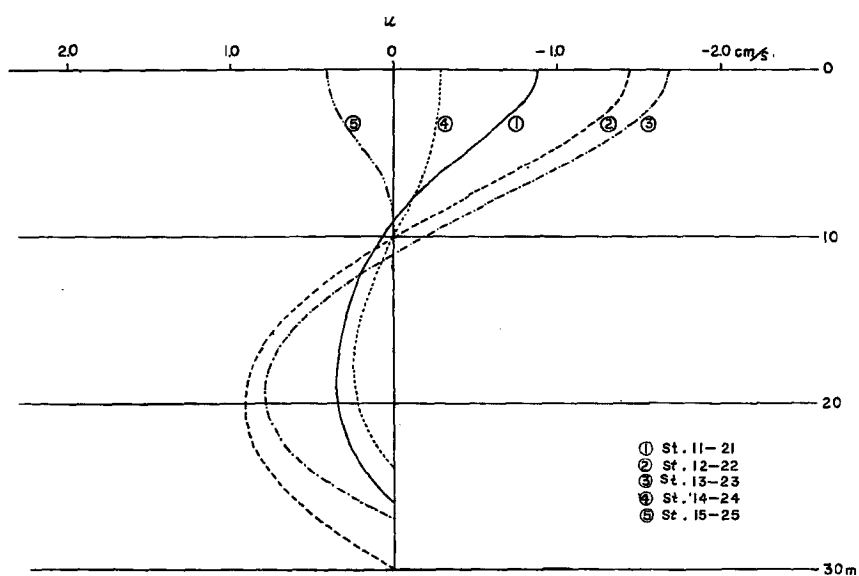


Fig. 17 The velocity profiles of the X-direction on Line-I at the first low water on Aug. 2.

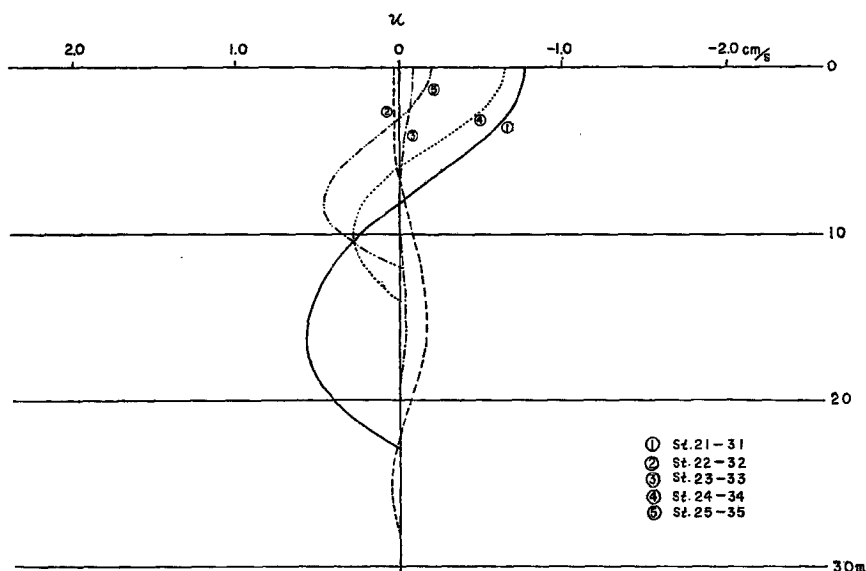


Fig. 18 The velocity profiles of the X-direction on Line-II at the first low water on Aug. 2.

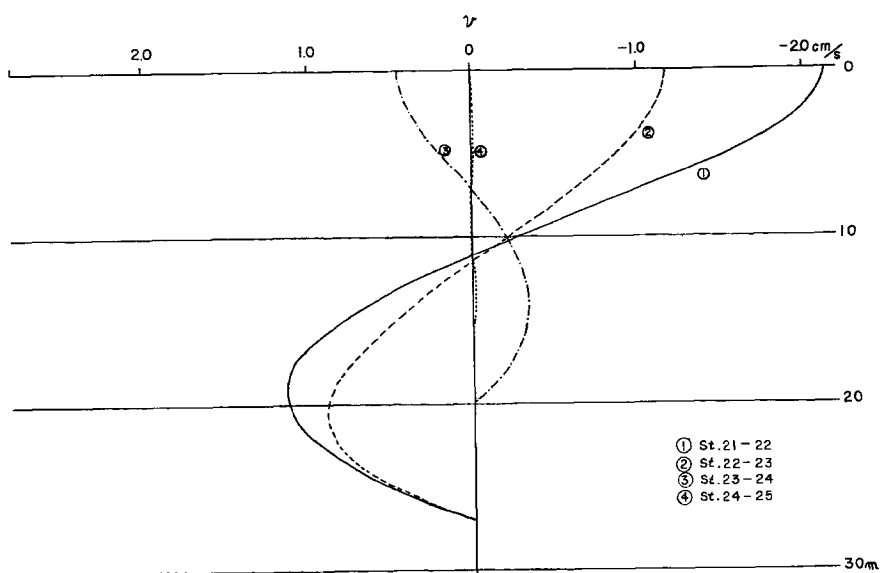


Fig. 19 The velocity profiles of the Y-direction at the first low water on Aug. 2.

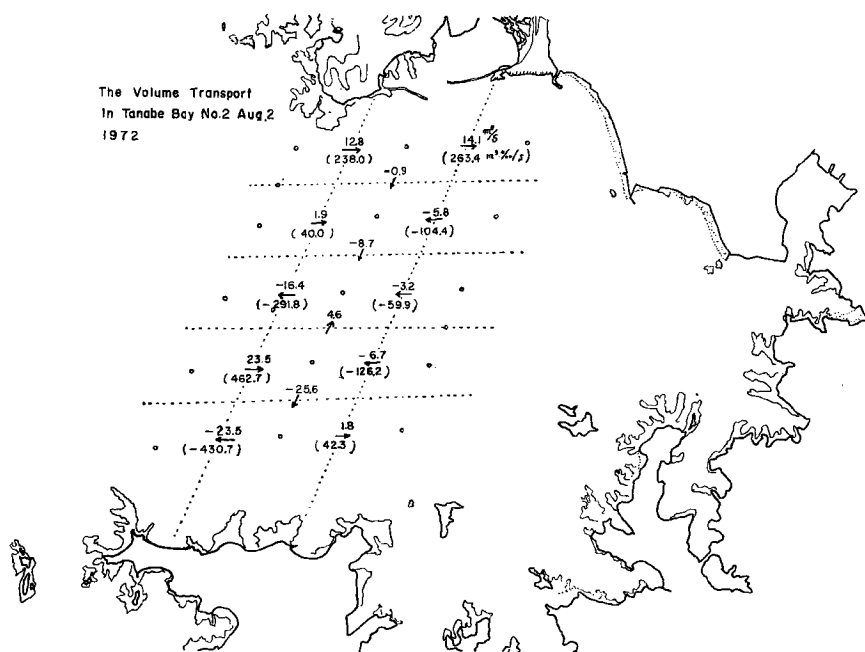


Fig. 20 The volume transport and chlorinity flux at the first low water on Aug. 2.

いてみると、No. 1 では無流面より浅いところの水は全体として南へ流れ、深いところの水は北向きに流れている。No. 2 においては、湾の南半分では、上層は南流、下層の水は北流であるが、湾の真中にあたる③では逆に、上層は北流、下層は南流になっている。5時間の間に大きな変化はみられないけれども、細かくみると、流れの向きや無流面の深さが変わっていることがうかがわれる。

そこで次に、この流速分布と塩素量の鉛直分布とから塩素量のフラックスを求めてみる。Fig. 16 および Fig. 20 において括弧つきの数字で示したものが各ブロックにおける x 方向の塩素量フラックスで、Line I と Line II とで囲まれた領域におけるトータルの塩素量フラックスは、8月2日の No. 1 では $4.1\text{m}^3\text{‰}/\text{sec}$ の増加であり、No. 2 では $3.0\text{m}^3\text{‰}/\text{sec}$ の増加となっている。これらの量の塩素量フラックスが1観測時から次の観測時まで一様にふえ続けたとすれば、8月2日の No. 1 から No. 2 までに、Line I と Line II とで囲まれた領域全体で平均して、 0.001‰ の増加となり、8月2日の No. 2 から8月3日までには、 0.004‰ の増加となることが期待される。ところが、平均塩素量の増減を調べてみると、両者とも減少している。すなわち、前者では -0.007‰ 、後者では -0.022‰ となり、塩素量フラックスは増加するのにも、平均塩素量は減少するという逆の結果になった。

このような結果になった原因を考えてみると、一つには、平均塩素量の値が、求め方によってかなり変わることがあげられる。田辺湾のように比較的水深が浅く、湾の規模が小さいところでは、海底の傾斜がかなりきついで、その傾斜した海底をどのように考えるかによって、平均塩素量の値が違ってくる。Line I と Line II とで囲まれた領域内にある観測点の水深でもって、そのブロックにおける平均水深とみなして計算する場合と、ブロック内の傾斜した部分の水平断面積を深さごとに求めて計算した場合とでは、平均塩素量の値が 0.1‰ も違ってきた。今回は後者の方法で求めた値を使っている。また、海底傾斜のかなり急な2観測点間の流速を計算する場合には、Mohn (1885) や Helland-Hansen (1934) 等によって用いられた手法³⁾を援用しておこなっているが、等温線や等塩素量線が水平面に対してかなり急激に傾いている場合には問題があると思われる。今回の観測にも、等塩素量線が、ほとんど鉛直になるようなところもあった。これらの点は今後さらに検討してみる必要があると思われる。

5. む す び

田辺湾程度のスケールにおける海況変動現象が密度流という形でとらえられ、その流れを規制するものが摩擦項であるという考えをおし進めるために、STD を用いた観測を実施したが、結果は十分この方法が有効であるというところまでは至らなかった。検討をしなければならない項目もいくつかあげられたので、これらの考察を深める必要もあるが、現象の機構をもっと正確にとらえる方法や流速分布の計算をより正確なものにしていく技術を取り入れていくことが今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) 国司秀明・西 勝也・鈴木 徹：田辺湾における海況変動の観測（第2報），京都大学防災研究所年報，昭43，第11号B，pp. 327-335.
- 2) 西 勝也・鈴木 徹・国司秀明：田辺湾における海況変動の観測（第3報），京都大学防災研究所年報，昭46，第14号B，pp. 533-550.
- 3) Fomin, L. M.: The Dynamic Method in Oceanography, 1964, pp. 141-151.