

# 塩水楔形状に与える潮汐の影響

## TIDAL EFFECT ON THE SALT WEDGE SHAPE

吉田 静男<sup>1</sup>・横尾啓介<sup>2</sup>・西田修三<sup>3</sup>・荻原 清<sup>4</sup>

Shizuo YOSHIDA, Keisuke YOKOO, Shuzo NISHIDA and Kiyoshi OGIWARA

<sup>1</sup> 正会員 工博 北海道大学助教授 工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

<sup>2</sup> 正会員 福田水文センター 水工部 (〒001-0024 札幌市北区北 24 条西 15 丁目)

<sup>3</sup> 正会員 工博 大阪大学助教授 工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市 2-1)

<sup>4</sup> 北海道開発局 石狩川開発建設部 (〒060-0001 札幌市中央区北 2 条西 19 丁目)

The salt wedge in the Ishikari River has become very long due to dredging activity. Studies of the salt wedge have suggested a new coefficient in addition to the interfacial friction coefficient, which has been widely used in research. On the basis of detailed observations of time-dependent changes in the interface of long salt wedges, the method we are proposing can be used not only to explain how the shape of the salt wedge changes due to tide, but also will allow useful predictions of time-dependent changes in the shape of the interface in response to flowrate and sea level.

**Key Words :** Estuary, Two-layer flow, Interfacial friction coefficient, Tidal river, Salt wedge

### 1. 序文

潮差の小さい日本海に河口を有する河川で見られる塩水楔に関しては過去数多くの観測がなされ、得られた知見も多い。たとえば、特別な河川地形でない限り、流量一定下の、概略の、塩水楔形状を予測することは比較的容易である<sup>1)</sup>。非定常現象に関しても潮汐による界面水位の変動が界面重力波速で伝播すること<sup>2)</sup>や特定位置での界面変動の振幅が潮汐振幅の数倍あることなどが古くから知られている<sup>3,4)</sup>。しかしながら、非定常現象に関する知見は定性的であって実用的には十分でなく、最近、栽培漁業の観点から期待されているような精度の高い塩水楔の挙動予測は困難である。本研究はこうした問題点を解消する目的で、過去数年間に石狩川で実施された広域多地点長期観測の結果をもとに、塩水楔形状に対する潮汐の影響を明らかにするとともに、それに基づく界面形状予測の可能性の検討と、浚渫が進んだ最近の石狩川河口二層流における界面抵抗係数の再評価を行う。

続的に表層塩分、界面水位、表面水位、風向風速、塩水楔の形状、特定位置での流向流速、等の観測をしてきたが、97, 98 年度の観測においては、それまで、St. 3 でのみ実施されてきた超音波測深機による界面位置の長期間計測を St. 7 と St. 11 でも実施した。また、一昼夜ごとの観測を数回にわたって、河口や上記 3 基点の中間点でも超音波による界面の観測を遂行し、従来、不明であった塩水楔全域にわたる界面水位の時間変動を解明するためのデータを得た。なお、調査項目の一例を表 1 に示す。

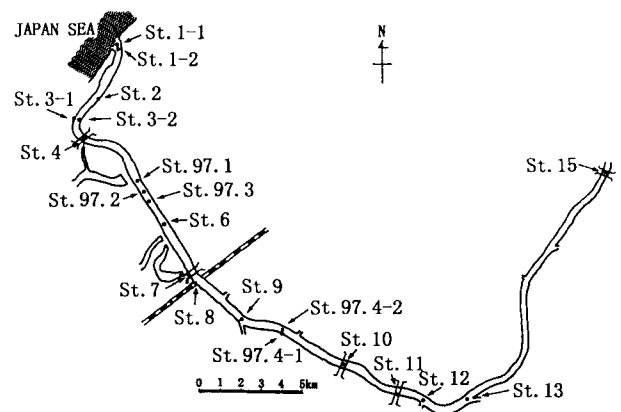


図 1 観測地点名

### 2. 観測方法

97 年度の観測地点を図 1 に示す。過去数年にわたり継

表1 観測地点および観測項目

| St. (Name of Obs. Pt., Dist. From Mouth km)            | Parameter                        | Per. of Obs                |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| St. 1-1 (Mouth, 0)                                     | Interface Level                  | July. 24-25                |
| St. 1-2 (Raisatsu, 1.6)                                | Water Level                      | Whole period               |
| St. 2 (Ishikari Kako, 3.0)                             | Water Level                      | Whole period               |
| St. 3-1 (Near IDCB, left bank, 4.5)                    | Interface Level                  | Whole period except winter |
|                                                        | Surface Level                    | Whole period               |
| St. 3-2 (Near IDCB, center of r., 4.5)                 | Record-1, Water Temp. & Conduct. | June. 25-Aug. 26           |
| St. 4 (Kakokyo Bridge, 5.4)                            | No observations taken            |                            |
| St. 97.1 (No Name, ctr. of r., 9.0)                    | Record-2, Water Temp. & Conduct. | June. 25-Aug. 26           |
| St. 97.2 (No Name, ctr. of r., 10.0)                   | Surface Level                    | June. 17-Aug. 13           |
| St. 97.3 (No Name, ctr. of r., 11.8)                   | Record-3, Water Temp. & Conduct. | June. 25-Aug. 26           |
| St. 6 (Bitoi Sewage Pumping Station, 14.0)             | Record-4, Water Temp. & Conduct. | June. 25-Aug. 26           |
| St. 7 (Sapporo Bridge, left bank, 14.5)                | Interface Level                  | Whole period except winter |
| St. 8 (Railway Bridge, left bank, 15.0)                | Surface Level                    | Whole period               |
| St. 9 (Mouth of Toyohira River, 17.9)                  | No observations taken            |                            |
| St. 97.4-1 (Kakuyama Sluice Gate #1, left of r., 20.0) | Surface Level                    | June. 17-Aug. 26           |
| St. 97.4-2 (Kakuyama Sluice Gate #1, ctr. of r., 20.0) | Record-5, Water Temp. & Conduct. | June 25-Aug. 26            |
| St. 10 (Shin Ishikari Bridge, 23.5)                    | No observations taken            |                            |
| St. 11 (Ishikari Bridge, left bank, 26.6)              | Interface Level                  | Whole period except winter |
|                                                        | Surface Level                    | Whole period               |
| St. 12 (Mouth of Chitose River, 27.9)                  | No observations taken            |                            |
| St. 13 (Mouth of Yubari River, 30.7)                   | No observations taken            |                            |
| St. 15 (Iwamizawa Bridge, 44.5)                        | Surface Level                    | Whole period               |

### 3. 観測結果

図2は1997年度の観測結果である。1998年度と1996年度以前にも、それぞれの年の7～8月に同様の観測結果が得られているが、一例として97年度7月分のみ示してある。同図の上から順に気圧、海域（小樽港）の実測水位と予測水位の差、4地点での表面水位（実際は9地点で観測しているが煩雑さを防ぐためデータを一部割愛した）、4地点での界面水位、3地点での表層塩分（実際は5地点で観測されたが上記と同じ理由でデータを一部割愛した）、St. 8における風速（含む16方位風向）を示す。なお、図の一部に界面水位データの欠落が見られるが、これは出水により塩水楔がSt. 3-1より下流に後退したことを示す。

### 4. 観測結果の解析

#### (1) 海域の水位変動の偏差と気圧変動

図2の上2つの時系列はそれぞれ気圧と小樽港水位の推算値からの偏差である。この結果からは海域の水位変動の偏差と気圧変動の間の明確な相関が確認できる。いま、気圧の上昇 $\Delta P$ による水位偏差（降下量）を $\Delta h$ と置く。次式が成立する。

$$\Delta h(\text{cm}) = a\Delta P(\text{hPa}) \quad (1)$$

ここに、 $a$ は小樽港固有の係数で、従来も得ているとおり1.5であった。これは、河口の水位は気圧が10 hPa上昇すると15cm降下することを意味している。

#### (2) 界面変動の伝播速度

潮汐による界面の変動は界面重力波として上流に向かって伝播することが知られている<sup>5)</sup>。この事実は二層流の界面重力波速を次式で求め、実測値と比較すれば確かめられる。

$$c_1 = \frac{U_{2m}h_1 + U_{1m}h_2}{h_1 + h_2} + \sqrt{\left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2}g\right)\frac{h_1h_2}{h_1 + h_2} - \frac{(U_{1m} - U_{2m})^2h_1h_2}{(h_1 + h_2)^2}} \quad (2)$$

ここで、 $c_1$ 、 $g$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $U_{1m}$ 、 $U_{2m}$ 、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ はそれぞれ界面重力波の波速、重力加速度、上層厚さ、下層厚さ、上層の断面平均流速、下層の断面平均流速、上層密度、下層密度である。実際にこの式を用いて7月24日11時から翌25日11時の間の界面変動が各測定地点に到達する時刻を求め、その時間だけ遅れた時刻の界面水位を比較すると図3を得る。この結果からはSt. 1-1、3-1、7における界面変動の位相が、概略、一致すること、すなわち、確かに界面変動は界面重力波速で上流に向かって伝播することが分かる。しかし、St. 11のデータには潮汐によるとみなせる界面変動が見出せない。この理由は次節に述べるように界面波の減衰が著しいことによる。

#### (3) 界面水位変動の振幅

本節では図3の結果をもとに界面変動振幅が河口における表面水位変動振幅に対しどのように応答するかを調べる。今回の観測期間中の石狩湾における潮汐はその波形から図4に示すように4つのstageに分け得る。このstageの分割は石狩川河口には適用できても他の河口で有効とは限らず実態に即したモデルを選択すべきものである。

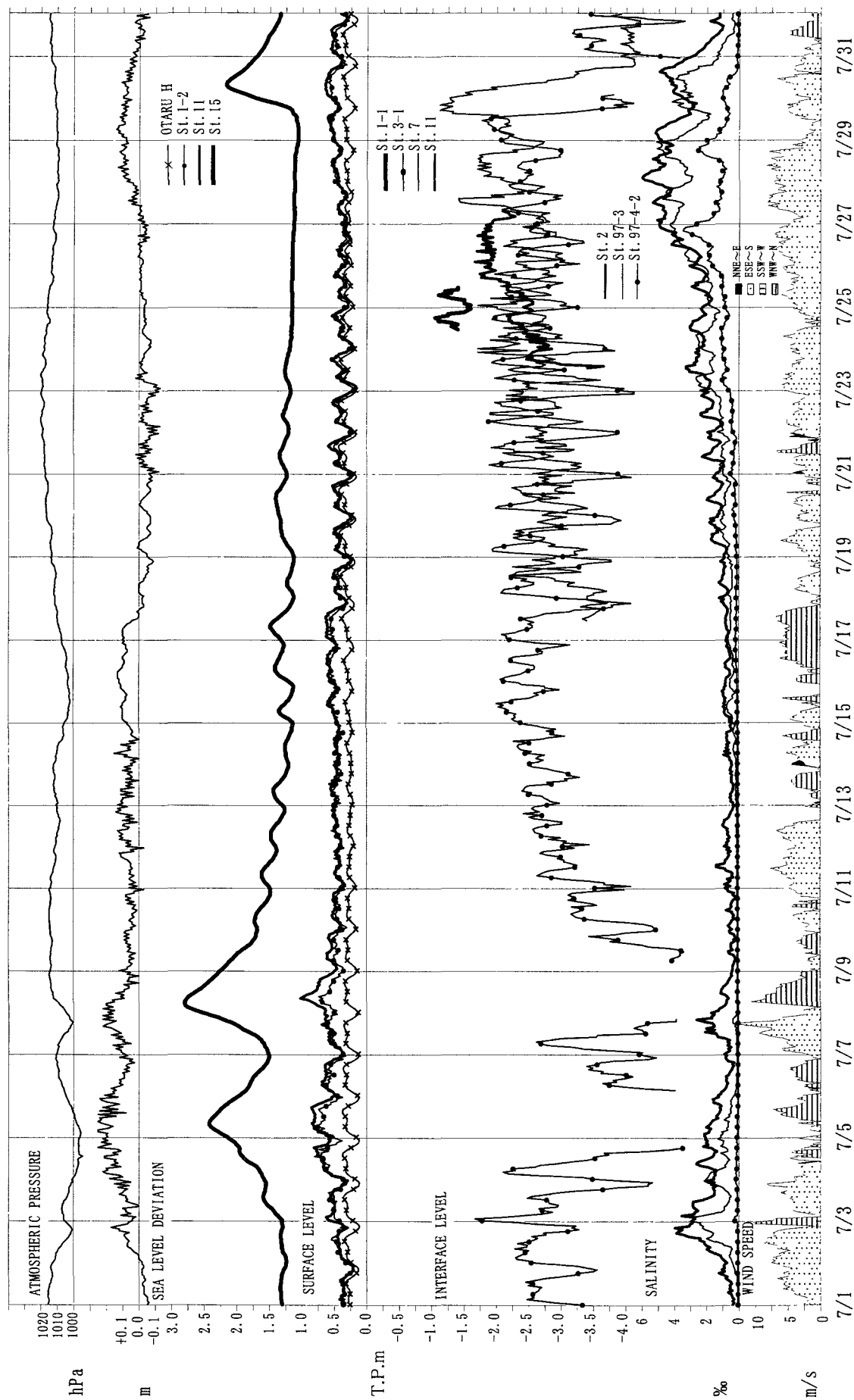


図2 観測データ (97年7月)

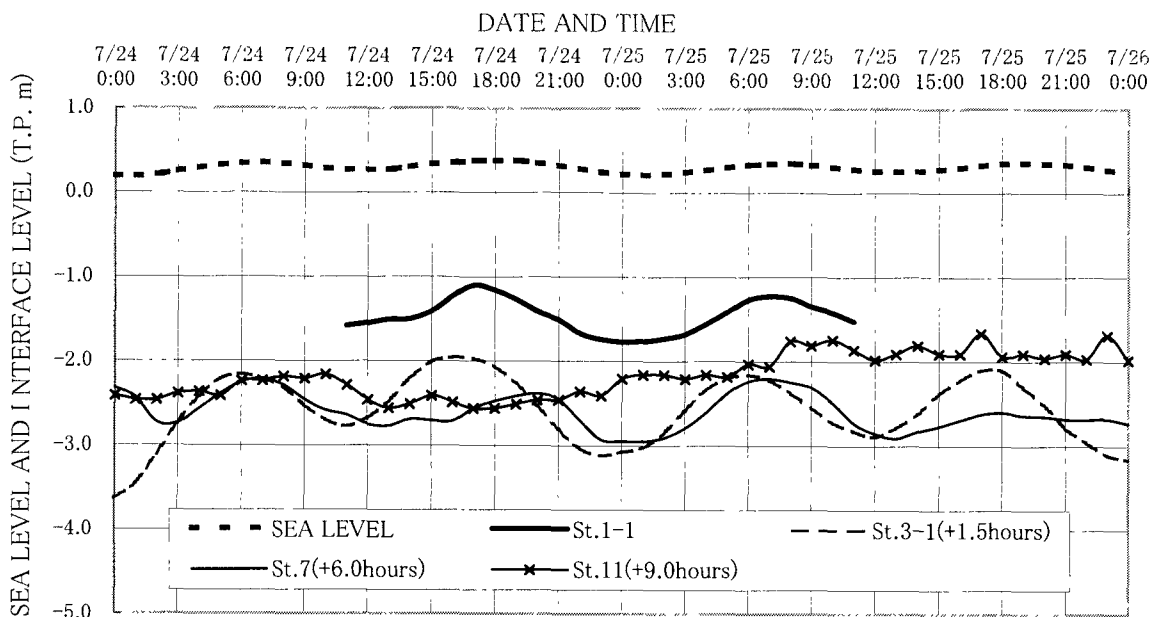


図3 4地点における界面水位の位相関係

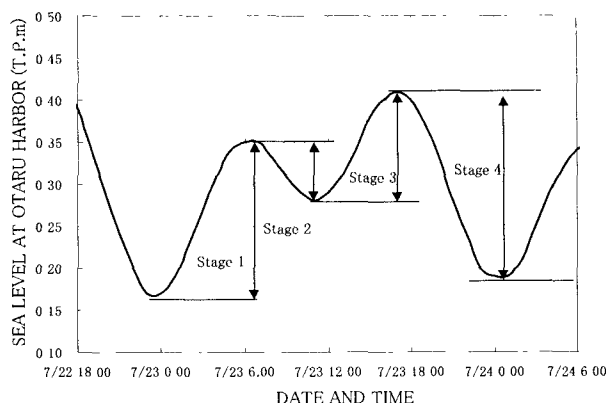


図4 潮汐の分割

さて、各 stage ごとの界面水位の変動量を流量の一定な期間について求めると St. 3-1 では図5, St. 7 では図6 を得る。なお、測定誤差は最大 10cm 程度であり、潮汐より短い波長の界面波の分離は行っていない。また、紙面の関係で地点を2ヶ所に限定した。図中  $A_{\text{stage}1\sim4}$  は stage 1~4 における縦座標（界面変動の全振幅）の値、 $x$  は横座標（潮差）の値である。また、データは  $N_{sd} = A_{\text{stage}2} / A_{\text{stage}4}$  の値を用いて2種に区別されている。たとえば、白抜きデータは  $N_{sd} \geq 0.5$  を、黒塗りデータは  $N_{sd} < 0.5$  を満たしている。ここに、 $N_{sd}$  は石狩川においては完全な二回潮であれば1に、一回潮に近くなると0の値に近づく。さて、各データについて  $A_{\text{stage}1,3,4} / x$  を

求めると 5~12 を得る。しかし、 $A_{\text{stage}2} / x$  は時には $\infty$ になる。この理由は stage 2 の振幅が0になっても実際の界面水位はオーバーシュートを修正するため降下することによる。このオーバーシュート現象は、従来、認識されておらず、楔形状の予測時には欠かすことのできない重要な知見であると考え。なお、図5, 6の stage 2 に関してはオーバーシュート分をはじめに差し引いて評価してある。そのため、 $A_{\text{stage}1,3,4}$  はそのまま界面変動振幅を示すが、 $A_{\text{stage}2}$  から振幅を求める場合は図5では0.43mを、また、図6では0.36mを加算する必要がある。さて、各地点における  $A_{\text{stage}1\sim4}$  の値は図5, 6からも分かるように決して同一ではない。特に、 $A_{\text{stage}1}$  の相違が他と比較して大きい。一方、 $A_{\text{stage}2\sim4}$  については一つの回帰曲線で表現できそうに見えるが、現段階では流量依存が判明しておらず、これを控えるべきであろう。これに対し、 $N_{sd} \geq 0.5$  のデータのみに注目すると、およそ、一つの回帰線で表現できそうである。そこで河川流量が  $121 \sim 164 \text{ m}^3/\text{s}$  の範囲内で界面水位変動の振幅を stage の区別なく求めると図7を得る。なお、同図の縦軸  $A$  は各 stage の表面水位振幅に対する界面変動振幅の比であり横軸  $L$  は河口からの距離を感潮距離 44.5km で割った値であっていずれも無次元である。この相対振幅分布の平均値（同図の実線）と界面の伝播速度を使用すれば刻々変化する界面形状を知ることが出来る。たとえば、7月24日10時30分~13時30分にソナーで、別途、観測した界面形状からスタートし7月24日11時以降の界面変動を河口における表面水位（実測または潮汐の予報値と気圧の変動値から得る）だけから予測してみると図8を得る。同図には予測曲線と4地点での実測値が同時にしめされているが、実測間隔が1時間であることと水

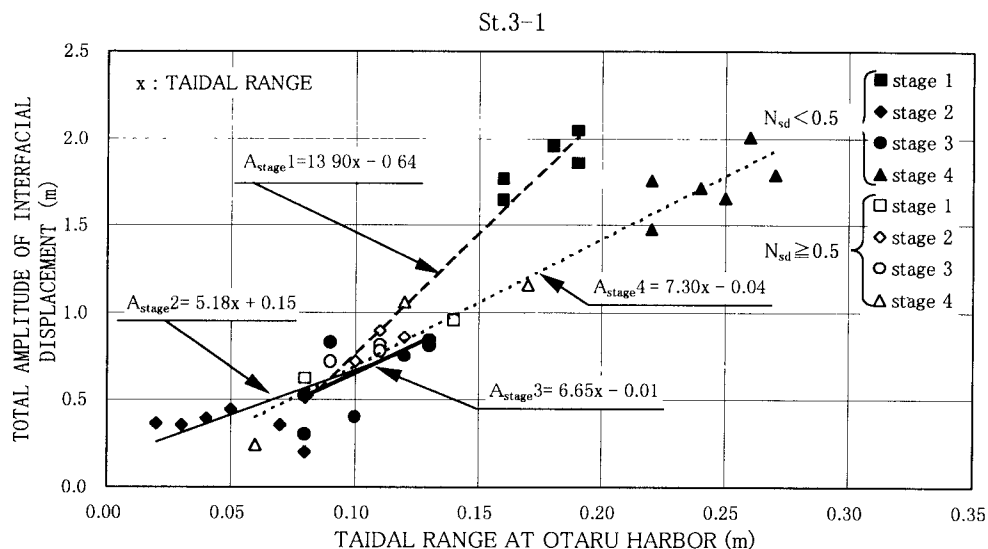


図5 各ステージごとの界面変動全振幅 (ST3-1)

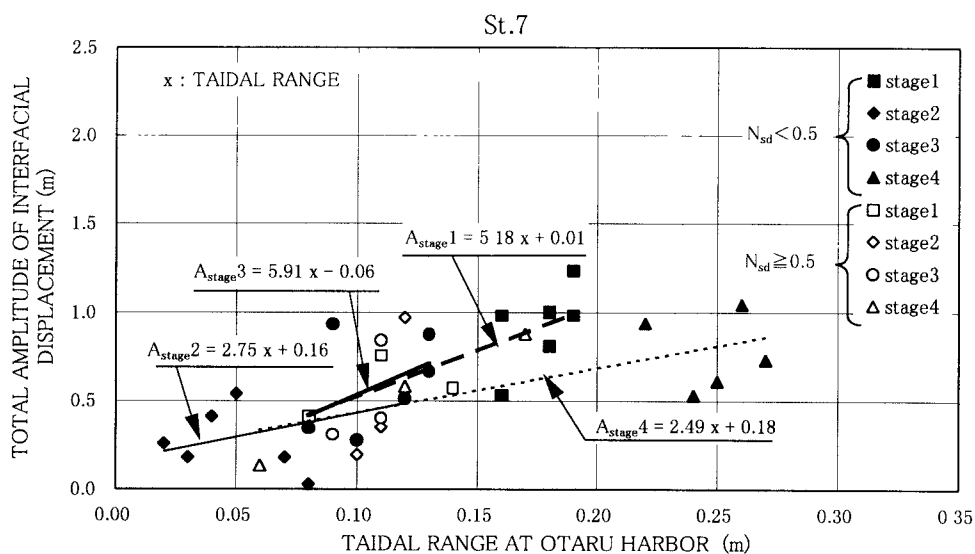


図6 各ステージごとの界面変動全振幅 (ST.7)

位の測定誤差が 10cm 程度であることを考慮すると両者の一致は、おおむね、良いといえる。今後、観測を進め様々な潮汐と流量について各 stage に対する振幅特性が明らかになれば、更に、高い精度で界面水位の予測が可能になると思われる。

#### (4) 界面抵抗係数

従来、界面抵抗係数に関しては幾つかのモデル<sup>6)</sup>が提案されてきたが、いずれが現実をよく説明するか判断できない状況にある。そこで、今日では、実測された塩水楔形状から界面抵抗係数  $f_1$  をいわゆる岩崎数  $\Psi$  で整理して経験則を得る手法が一般化している。その手法が考えられた当時、石狩川における塩水楔の  $f_1$  もデータのの一つに数えられたが、その時点における楔の長さは河床地形の

関係でせいぜい 15km であった。しかし、今日では、浚渫が進みその全長は 30km に達することがあり、 $f_1$  に関して再評価する必要がある。今回の観測によれば  $\Psi$  は  $3 \times 10^4 \sim 1.5 \times 10^5$  で、河口から上流 5km 近傍までの  $f_1$  は経験則

$$f_1 = C \Psi^{-0.5} \quad (C = 0.2 \sim 0.35) \quad (3)$$

と良い一致を示す。しかし、それより上流では実測される  $f_1$  は(3)式で予測される値を著しく下まわる。また、(3)式と水理公式集(昭和 60 年版)第 1 編(8.22)式とを用いて予測される界面形状と実測結果を比較すると図 9 を得る。従来、(3)式の  $C$  として 0.2~0.35 を採用すれば、全長 15km 以下の塩水楔形状がある程度予測できた。しかし、図 9 が示す通り、全長が 30km に達する

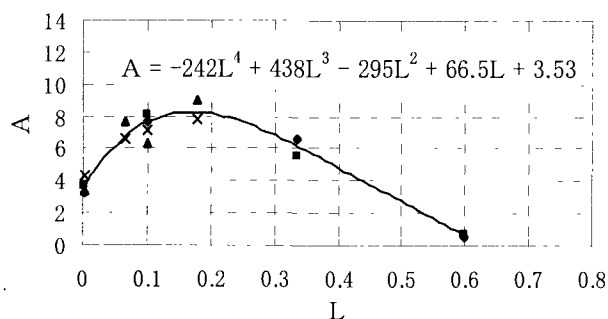


図7 Aの縦断分布

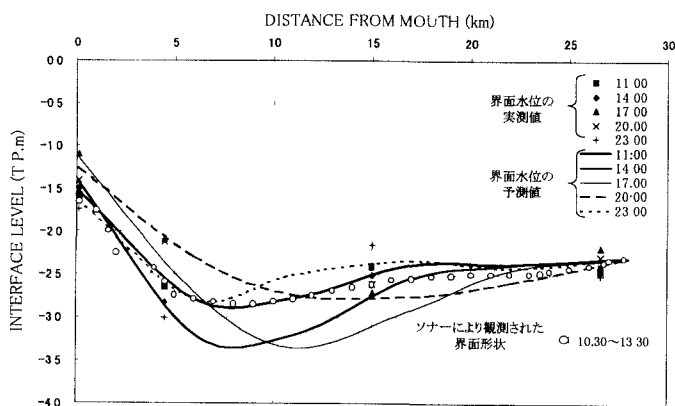


図8 界面水位の時間変動予測結果

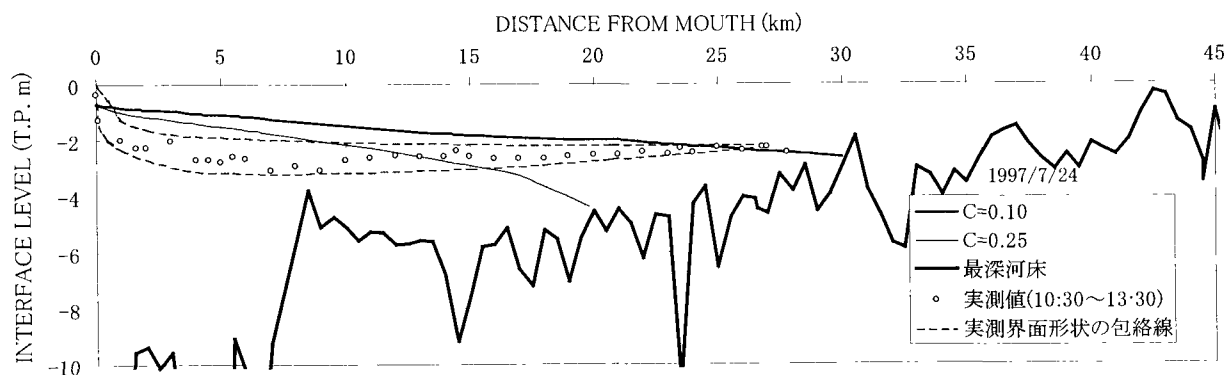


図9 塩水楔形状と予測結果の比較

現時点の楔については、河口を除いて予測精度が不十分であることが分かる。仮に、楔の全長を実態に合わせようとすれば(3)式右辺の $C$ を0.10に修正する必要がある。図9にはその場合の予測結果が示されているが、結果的には、河口と楔先端を除いて予測精度は向上しない。(3)右辺の $C$ や指数を定数と見て種々変化させ計算を繰り返した限りでは、現実をよく表わす経験則を得難く、同式右辺の関数構成を検討し直す必要があると思われる。

## 5. 結論

- (1) 界面水位の変動振幅の縦断分布を実測し、これと潮汐の予報値と気圧の実測値から塩水楔形状の時間変動を予測する実用的な方法を示し得た。この予測法によれば、少なくとも、典型的な二回潮に関しては界面変動を精度良く予測できることを示した。
- (2) 界面の水位変動の中に潮汐に追従できないオーバーシュート現象を見出した。この知見は、界面変動の予測に重要である。
- (3) 石狩川における、全長が30kmに達する塩水楔の形状予測に界面抵抗係数の経験則  $f_i = C \psi^{0.5}$  ( $C = 0.2 \sim 0.35$ )

を適用してもその予測精度は不十分なものとなる。実態に合う  $f_i$  を得るためには上式右辺の関数構成を検討し直す必要があると思われる。

**謝辞：**本研究は一部文部省科学研究費補助金（基盤研究B(2)，課題番号 09450186）を得て実施された。記して感謝する。

## 参考文献

- 1) 土木学会水理委員会編：水理公式集例題集（昭和60年版），土木学会，pp. 292-293, 1988.
- 2) 吉田静男・柏村正和：潮汐による塩水くさびの応答（2），第2回海溝論文集，pp. 167-171, 1975.
- 3) 吉田静男：河口密度流とその解析方法，土木学会水理委員会水工学シリーズ，88-B-2，pp. B-2-1- B-2-1, 1988.
- 4) 西田修三：河川の密度流と乱流，土木学会水理委員会水工学シリーズ，93-A-9，pp. A-9-1-A-9-10, 1993.
- 5) 2)に同じ。
- 6) 玉井信行：密度流の水理，新体系土工学，技報堂，1980.

(1998.9.30 受付)