

II-67

河口二層流に与える潮汐効果

(株) 福田水文センター 正会員 横尾啓介  
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 吉田静男  
 北海道大学大学院理学研究科 中道陽文  
 北海道開発局石狩開発建設部 橋本隆司

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、得られた知見も決して少なくない。たとえば、特別な河川地形でない限り、流量一定下の塩水楔の形状を予測することは比較的容易である<sup>1)</sup>。非定常現象につい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判明している<sup>3,4)</sup>。しかしながら、非定常現象に関しての知見は実用的にも十分ではなく、きわめて重要と思われる塩水楔全体の潮汐応答でさえ未だ観測されたことがない。この理由はきわめて長大に発達した塩水楔の全域で、しかも、長時間にわたって界面水位を観測する事が困難なためであった。本研究はこの問題点を解消する目的で昨年度石狩川で実施された観測結果をもとに、塩水楔全域の潮汐に対する応答とその応答が表層塩分などにもたらす効果などについて考察する。

2. 観測方法

観測地点を図1に示す。過去数年にわたり同様な領域で継続的に表層塩分、界面位置、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、昨年度の観測においては、従来、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計測をSt.7とSt.11でも実施した、また、さらに、一昼夜ではあるがSt.1においても観測に取り付けた超音波測深機を用いて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が得た。なお、その他の観測項目と観測位置等については表1に記されている。

3. 観測結果

図2には上から順に気圧、海域(小樽港)の実測水位と予測水位の差、9地点での表面水位、4地点での界面水位、5地点での表層塩分、風速(含む16方位風向)が示されている。図中、界面水位と表層塩分の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。また、後半再び界面水位のデータが復活しているにもかかわらず表層塩分データが欠落しているのは塩分計の撤去による。なお、風速の欠落部は計測上の問題によるが当面の関心が塩

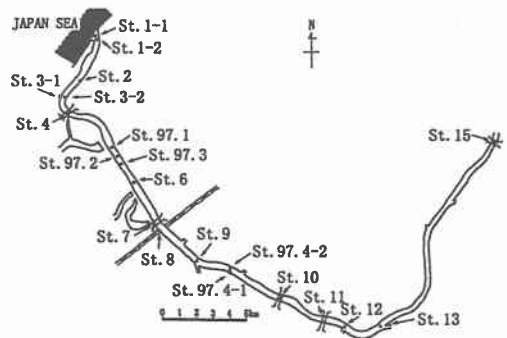


図1 観測地形及び地点

Tidal response of very highly stratified flow at a river mouth.

by Keisuke Yokoo, Shizuo Yoshida, Youbunn Nakamichi and Ryouji Hashimoto

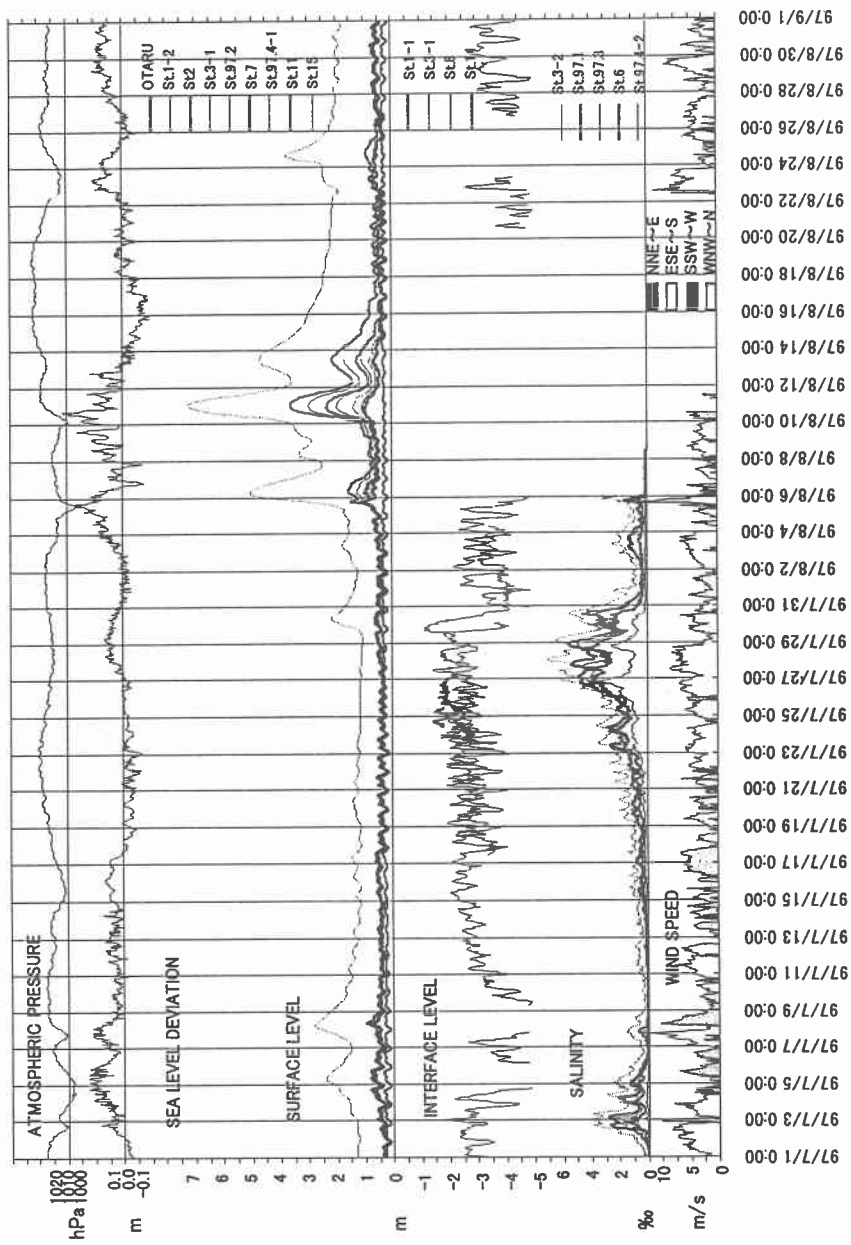


図 2 観測データ

表 1

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 (Mouth, 0.3)	Water Level	Whole period
St. 2 (Raisatsu, 2.9)	Surface 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 (Mitoi Sewage Pumping Station, 14.0)	Record-4, Water Temp. & Conduct.	June. 25-Aug. 26
St. 7 (Sapporo Bridge, left bank, 14.6)	Surface Level	Whole period
St. 8 (Railway Bridge, right bank, 15.0)	Interface Level	Whole period except winter
St. 9 (Mouth of Toyohira River, 27.9)	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, 23.4)	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 Yuhari River, 30.7)	No observations taken	
St. 15 (Iwamizawa Bridge, 44.6)	Surface Level	Whole period

水楔の存在期間にあることから、本質的な問題にはならない。

#### 4 観測結果の解析

##### 4.1 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。この結果からは従来も確認されている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  $\Delta h$  とおくと次式が成立する。

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

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 10hPa 上昇すると 15cm 降下することを意味している。

##### 4.2 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。

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

ここで、 $c_i$ 、 $g$ 、 $h_1$ 、 $h_2$ 、 $U_{1m}$ 、 $U_{2m}$ 、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$  はそれぞれ波速、重力加速度、上層厚さ、下層厚さ、上層の断面平均速度、下層の断面平均速度、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ほぼ一致すること、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 のデータには位相の一致が確認できない。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。

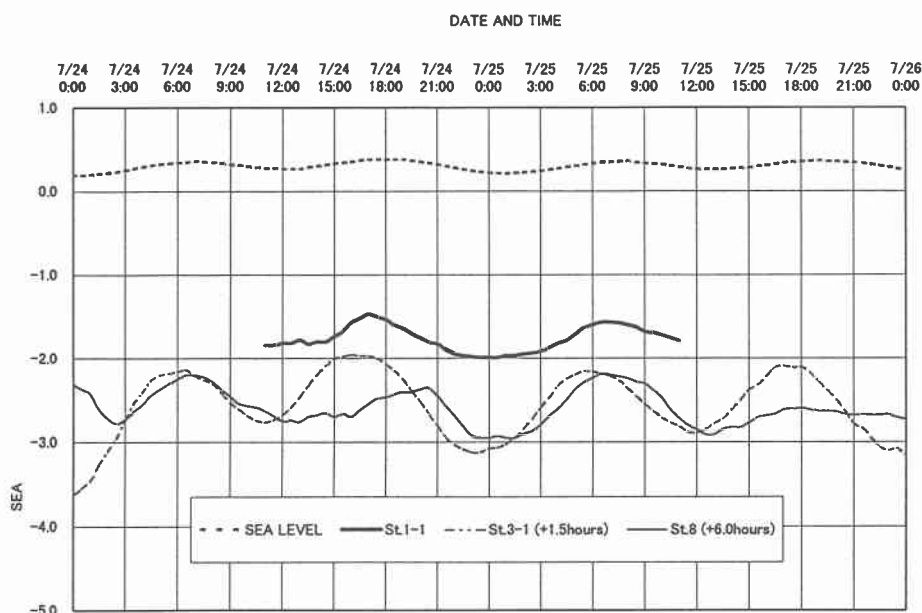


図3 4地点における界面水位の位相関係

### 4.3 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の分類は別の期間にも常に適用できるとは限らない。波形によっては更に付加すべきstageがあるかもしれない。

さて、各stageごとの潮汐変動量に対する界面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。図中 $A_{stg1-4}$ はstage1~4における縦座標の値、 $x$ は横座標の値である。また、 $A_{stg1,3,4}/x$ を求めると5~12を得る。しかし、 $A_{stg2}/x$ は時には $\infty$ になる。この理由はstage2の振幅が0になっても実際の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。そこで図5、6のstage2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、 $A_{stg1,3,4}$ はそのまま界面変動振幅を示すが、 $A_{stg2}$ 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。なお、St.1-1についても同様の解析を行ったがデータが24時間分しかないためまた、St.11では界面変動振幅が極めて小さく0とみなせるので図化を省略した。

各地点における $A_{stg1-4}$ の値は図5、6からも分かるように決して同一ではない。たとえば、7月24日11時から翌25日11時にかけての界面変動の振幅を各地点で調べると図7を得る。未だデータが十分とはい

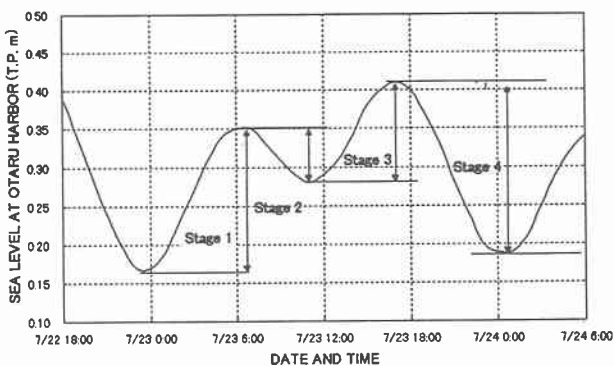


図4 潮時の分割

えないが、かろうじて、塩水楔全域にわたる界面変動振幅が推定できる状況を迎えた。実際に、7月24日11時の潮汐波形を初期条件として採用し、その時刻以降の界面変動を予測してみると図8を得る。今後、様々な潮汐波形に対し図5~7を作成すれば少なくとも石狩川河口における塩水楔形状の予測が可能になる。

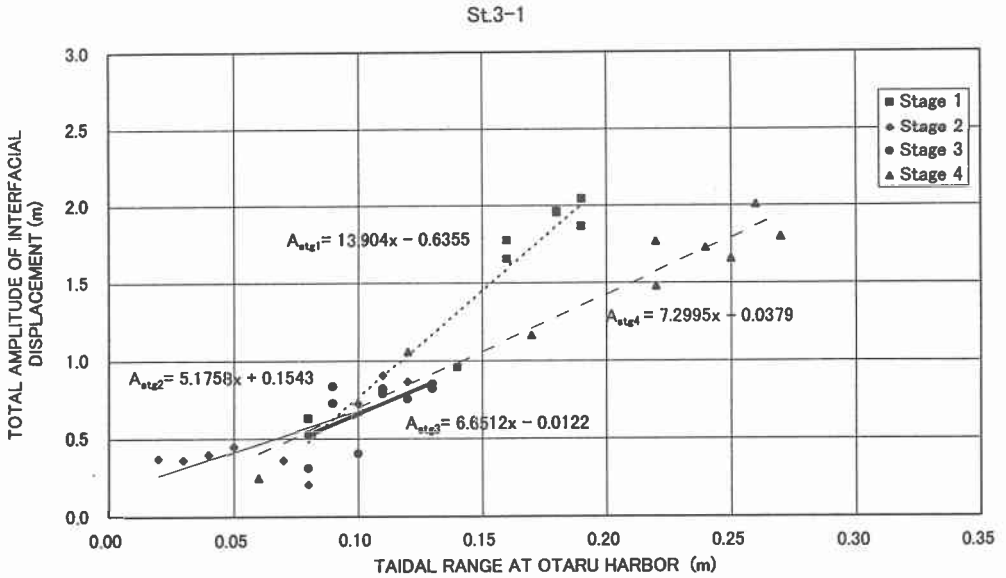


図5 各ステージ毎の界面変動全振幅 (St.3-1)

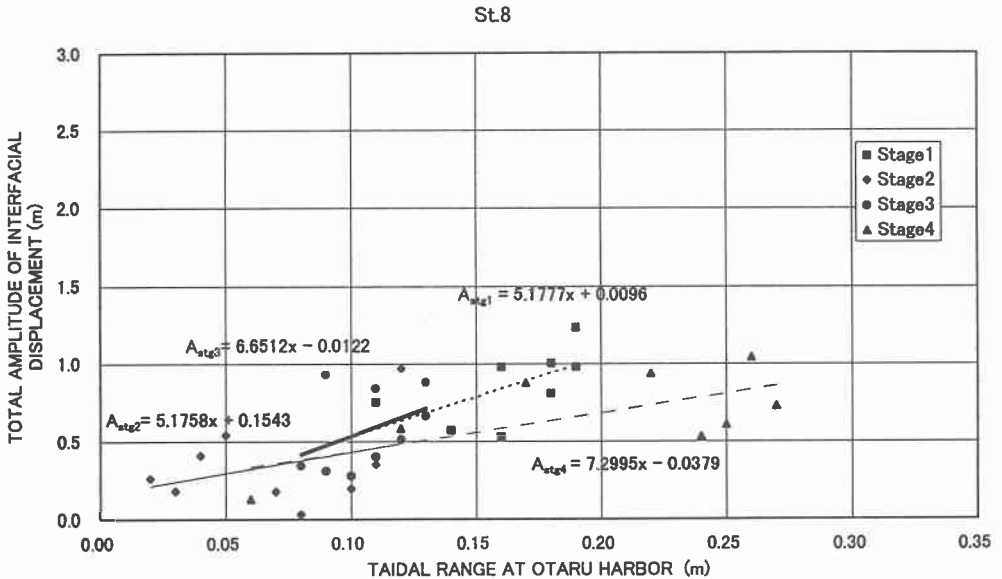


図6 各ステージ毎の界面変動全振幅 (St.8)

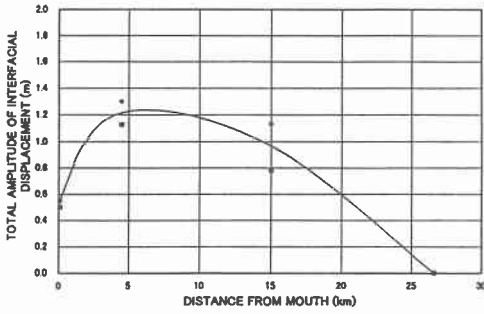


図7 界面変動振幅の縦断分布

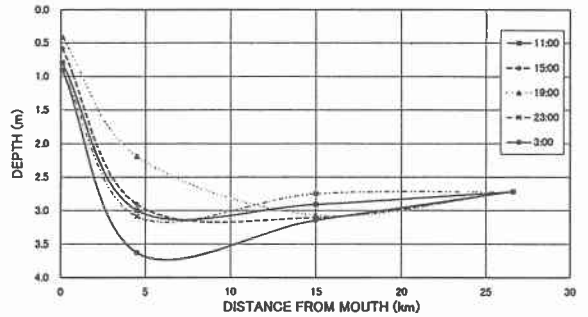


図8 塩水楔形状の予測結果

#### 4.4 表層塩分に与える潮汐効果

図2の水位記録からも分かるように昨年度の7~8月には降雨のきわめて少ない期間があった。この期間には潮汐とは異なる非定常要因の風によって表層塩分が著しく影響を受けることが分かっている。その効果を定量的に示すには連行係数の評価が有効であるが参考のためその実測結果を図9に示す。なお、同図には比較のため97年(160 m<sup>3</sup>/s)の他に93年(142 m<sup>3</sup>/s), 94年(118 m<sup>3</sup>/s), 96年(240 m<sup>3</sup>/s)のデータも掲載してある。

さて、潮汐効果を検討するため図2の小樽港潮位と表層塩分の時系列の半日周期成分を検討するとSt.3-1において極めて相関がよいことが分かる。さらに、詳細な検討を加えると塩分の増加は干潮の少し前に出現している。この潮時は界面変動でもほぼ同じフェーズである。しかし、流量の増加時や風の効果が著しいときはその相関が消滅する程度のも(最大で1パーミル程度)であって表層塩分を与える潮汐効果は小さいといえる。ただ、さらに一段と流量が小さくなって上層の厚さが極端に薄くなる時は無視できなくなる可能性がある。なお、同様な傾向はSt.97.1やSt.97.3などでも見られるが上流域ほど相関は小さい。

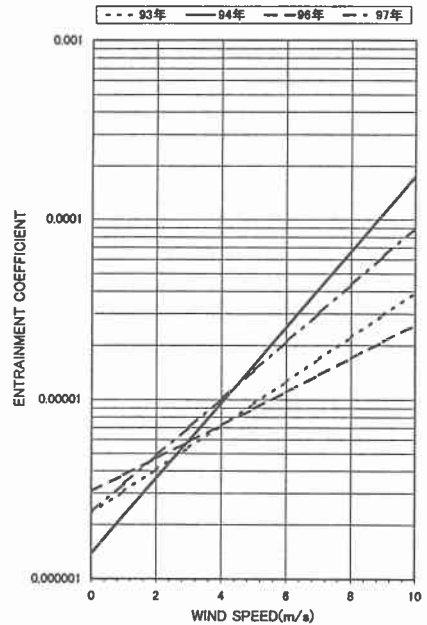


図9 連行係数

#### 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-2-15, 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