

天塩川河口二層流と潮汐 Tidal Two-Layer Flow at The Mouth of The Teshio River

北海道大学 工学部 正会員 吉田 静男
北海道栽培漁業振興公社 正会員 谷 藤 康 造

1. 序 文

弱混合河口密度流における界面抵抗係数は、今日では様々な規模にわたって成立する経験則を通して得ることができる。この事実は定常河口二層流の成層構造の予測が可能であることを意味し、河口流の研究も新たな段階を迎えたといつてよい。今後の研究方向としては、界面抵抗係数の物理的意味をきわめることや非定常問題の解明等が考えられるが、実用上の問題としては、後者に属する、各潮時における成層構造の予測を可能にすることが急務である。この種の問題に関しては、強混合型式をも含めて、 $\frac{u_0}{U_0}$ (U_0 は河口での上層平均流速、 u_0 は潮汐による流速変動振幅)等で示し得る潮汐の強さと全水深、及び、河床粗度が重要な因子となることが定性的に明らかになっており¹⁾ 今後の研究指針も与えられている。しかし、上記諸因子についての定量的な検討は容易ではなく、未だ実用的な経験則を得る糸口さえ見出されていない。

本報告は、従来の非定常流の観測結果をふまえ、さらに広範囲にわたる天塩川河口での観測結果をもとに、潮汐に対する弱混合河口密度流の応答性を検討したものである。

2. 観測方法

従来、1地点での鉛直方向水理量を計測する場合、少なくとも15分を要し、1断面内の計測となるとその5倍以上の時間を費してきた。従って昼夜観測におけるサンプリング間隔もせいぜい30分とするのが限度になっている。ところが、各水理量の変動幅は予想以上に大きく、昼夜観測のデータをもってしても、一朝時にわたる水理量の変化傾向を見出すことは容易ではない。たとえば、過去、天塩川での昼夜観測例は4例²⁻⁴⁾ 程あるが、これらを検討しても一般的傾向は把握し難いのが実状である。そこで筆者らは、この事実をふまえ、従来よりかなり多くの地点に自記記録計を設置し、常設水位計も利用した詳細な観測を遂行した。その設置地点は図-1に示すとうり、常設水位計地点を含め11箇所にわたっている。なお、各地点における i) 河口からの距離 ii) 地名 iii) 設置計器名は以下のとおりである。

St. 1. i) 1.4km (左岸より160m, 右岸より80m) ii) 私作観測塔。iii) LDV, CMII, EST-3型塩分水温計, 光電式微風速計 (牧野), 私作表面波高計, 水中テレビカメラ。
St. 2. i) 1.6km左岸 ii) 河口水位観測所 iii) 常設水位計。
St. 3. i) 5.3km ii) 河口橋 iii) MTCM 5流向流速塩分水温計 (流速センサー部位置は8月8日満潮時水面下2.2m, 水質センサー部は同1.2m), フィルム式流向流速計 (センサー平均位置は8月8日満潮水面下3.0m)。
St. 4. i) 18.7km ii) 天塩大橋 iii) 常設水位計。
St. 5. i) 11.8km ii) サロベツ川河口上流200m iii) アンデラー流向流速塩分水温計 (センサー部位置は8月8日満潮水面下2.5m)。
St. 6. i) 14.6km ii) ハマサト iii) 常設水位計。
St. 7. i) 18.3km ii) オトノレイ橋 iii) アンデラー流向流速塩分水温計 (センサー部位置は8月8日満潮水面下, 1.2m)。
St. 8. i) 21.9km ii) サロベツ川上流 iii) リシャル水位計。
St. 9. i) 22.2km ii) パンケ沼口外 iii) アンデラー流向流速塩分水温計 (センサー部位置は8月8日満潮水面下1.5

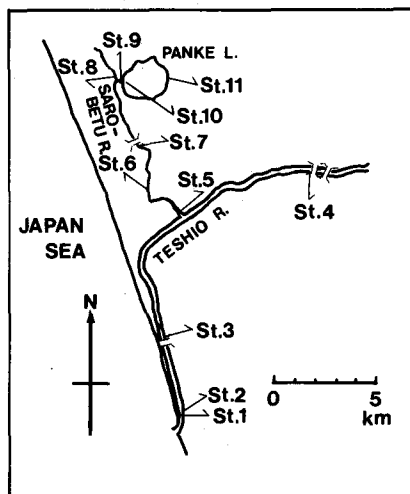


図-1 天塩川河口部地形及び観測地点

m), リシャル水位計。St.10, i)22.6km ii)パンケ沼口内 iii) MTCTM 5 塩分水温計として使用。St.11, i)24.6km ii)パンケ沼奥, iii)常設水位計。

上記の常設水位計を除く St. 5 と St. 10 は 1983 年 8 月 31 日～9 月 2 日の期間のみの観測点で他は 1983 年 8 月 8 日～8 月 12 日の期間に遂行された本観測の地点である。又, St. 1 の観測塔の設置状況は写真-1 に示すとおりで, この地点で使用されるすべてのセンサーが取付けられる。そのセンサーのうち LDV については, 吉田⁵⁾のブローブタイプ LDV を野外観測用に改良したもので写真-2 に示す構造を有している。なお, 以上の定置観測の他に, 超音波測深機, CMII, 塩分水温計による移動観測も行ない, 二層流全域の流況を把握する上に必要な補助データも得ている。

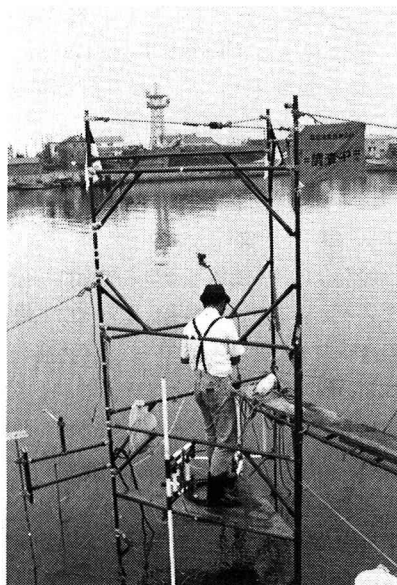


写真-1 河口部観測塔設置状況

3. 観測結果及び考察

1) 潮汐の伝播状況

まず本観測期間中 (流量 $110\text{m}^3/\text{s}$) に測定された各位置での水位記録から, 潮汐の伝播状況を検討してみる。図-2 は各地点における 8 月 9 日 10 時からの水位記録と留萌潮位で, St. 2 の水位は, ほぼ天塩川河口潮位とみなしてよいと思われる。この結果からは, 天塩川河口での水位変動は, 留萌潮位に対して約 60 分ほど遅れるが, ほぼ同一波形と波高を有すること, St. 2 と本流の最上流地点 St. 4, 及び, 支流の St. 8 間の水位変動の位相遅れは, 長波が両地点間を通過するのに要する時間にほぼ等しいことが分かる。この傾向は, 観測区間における流路断面がほぼ一定であることや, 河床レベルが平均潮位のレベルと等しくなる地点が, 本流で 40km, 支流で 25km であることから予想通りといえる。

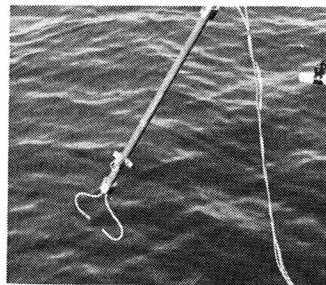


写真-2 LDVブローブ

ただ, パンケ沼を背後にひかえた St. 9 や沼内部の地点での水位は St. 8 に対して 2 時間の遅れを示しており, この地域での水理量の変動を考察する際にはこの事実の考慮が必要となる。

2) 各地点での水位と流速変動の対応

図-3 には St. 3, St. 7, St. 9 における上層の流向, 東西及び南北方向流速成分, 塩分値 (S 値), 水温, 及び St. 2 における水位が示されている。なお, 各地点での水理量の変動はそれぞれの地点での水位記録を用いて議論するが, 図には紙面の関係で河口水位変動のみ示してある。まず, 水位と流速の関係についてみると, 各地点での漲潮平均潮時に上げ潮最盛時刻が対応し, 落潮平均潮時に下げ潮最盛時刻が対応することに気付く。この傾向は, 潮差が比較的大きく緩混合型式を示す常呂川⁶⁾でも見出されるもので, 潮汐が定常波性を有して上流に伝播するときの状況と一致する。今, 従来の常呂川と, 潮差が今回の半分程度であった天塩川の昼夜観測の結果から得る, 河口と上流部の水位と流速の対応を簡単に示すと図-4 となる。同図が示す様に潮差の小さい天塩川では, 定常波性よりはむしろ進行波性に近くなっている。今回の観測結果とこの様に差異を生じた理由としては, 潮差の相異があげられる。実際に図-3 の例であっても潮差の小さい 2 回潮については, むしろ進行波性が見出される。

一方, 水質については, 水位の変動というよりは速度の変動に対応すると考えられるが, 界面近傍以外での変動が小さく, 明確な対応は見出し難い。しいて対応を述べるならば, いずれの場合も界面水位が最高になると予想される満潮時に塩分値が高く, 落潮最盛時刻の 2～3 時間前に低いといえる。ただ, St. 9 に

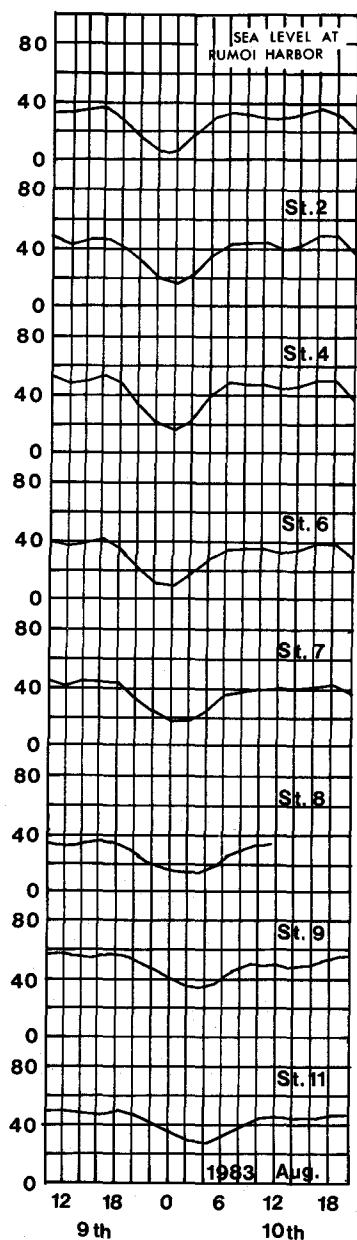


図-2 各地点における水位変動
記録(8月9日, 10:00~)

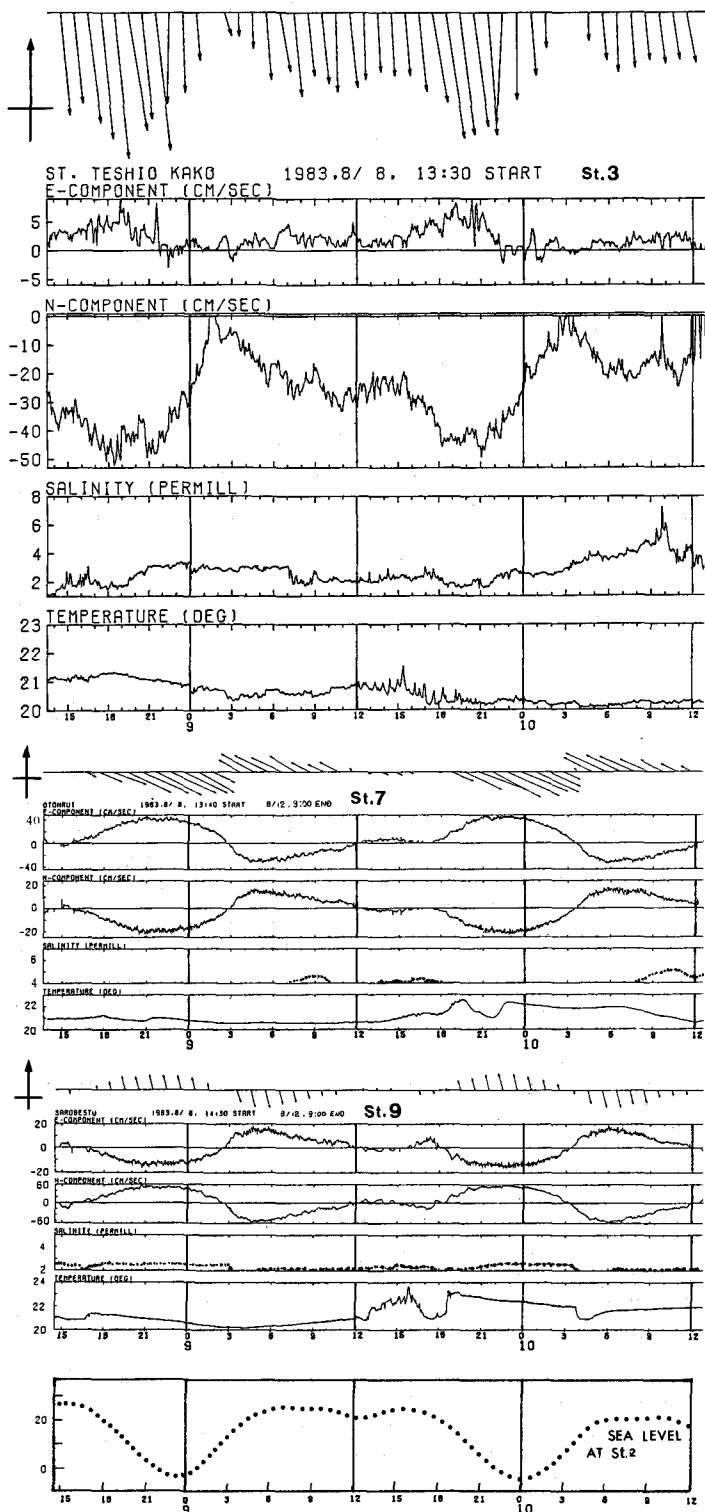


図-3 各地点における諸量の時間変動記録

については、当時塩水楔の侵入が無く、同様の対応は見出せない。

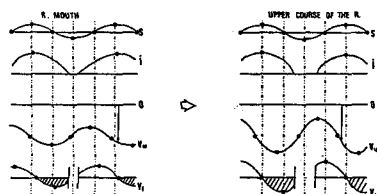
3) 鉛直方向 2 点間の速度変動の比較

図-5 には St.3 の下層に取付けられたフィルム式流向流速計による記録が、図-3, St.3 に示した南北方向の流速変動記録とともに示されている。前者と後者の測点の鉛直方向の差は60~80cmであり、水平方向には200m程ある。従って、同一時刻の瞬間速度を比較することはあまり意味がないが、低周波成分について議論することは許される。このことに注意して両記録を比較すると下層の下げ潮最盛時刻は上層のそれに比べ3時間程遅れ、下層の転流時刻は上層の上げ潮最盛時に生じ、下層の上げ潮最盛時刻はその時刻から3時間遅れていることが読み取れる。すなわち、下層の流速は上層の流速に比べ全体的に3時の位相遅れを生じているわけであるが、この結果は、従来の、潮差が今回よりかなり小さい観測で見出された結果とほぼ一致する。従来の水位と流速の対応に関する知見は図-4 下図のとおりで、河口では諸変動が同相となるが上流域では界面水位変動が界面重力波の速度で伝播するため下層流速もこれに同調するとされてきた。今回得た3時間の位相差もやはり河口から、P.

3地点まで界面重力波が伝播するのに要する時間に等しく、上記と同様の現象が生じたものと解釈できる。

界面の上昇が界面波速をもって上流に伝播するという上記の現象は、さらに、9月1日(流量 $90\text{ m}^3/\text{s}$) St.5における流速と水質の記録からも裏づけられる。図-6に示すこの記録は界面のごく近傍に設置されたア

TOKORO RIVER



TESHIO RIVER

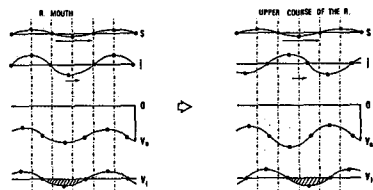


図-4 常呂川及び天塩川の従来の観測結果から得る表面・界面水位 ($s \cdot i$) 及び上・下層平均流速 ($u \cdot v$) の対応。斜線部は下げ潮区間を示す。

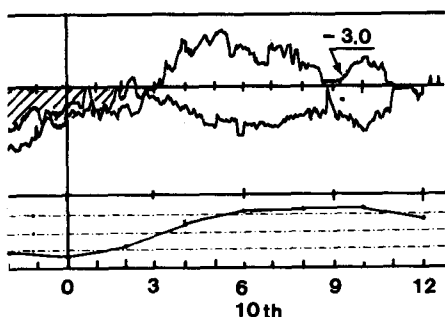
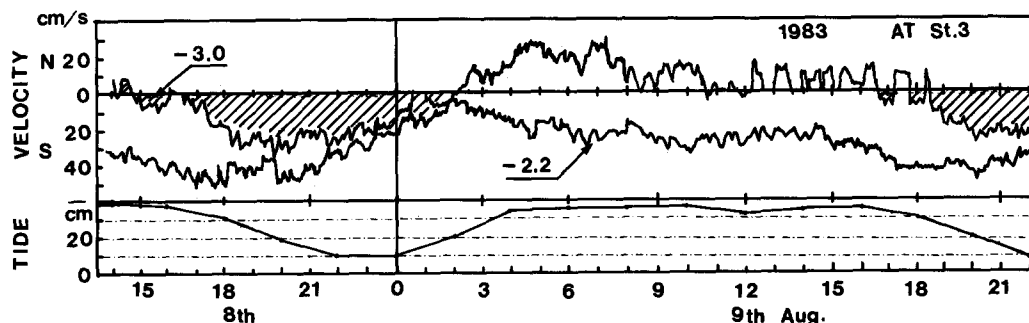


図-5 St.3における上層及び下層の流速変動記録(8月8日14:00~)

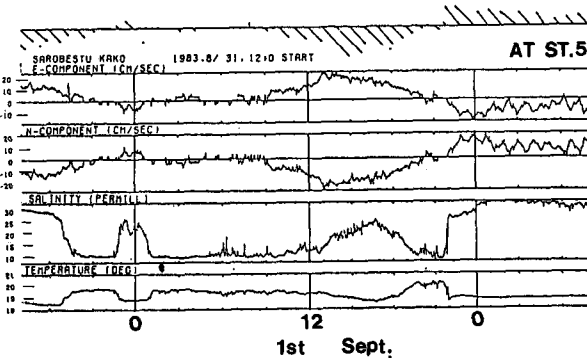


図-6 サロベツ川河口部 (St.5) における界面近傍の流速及び水質の時間変動記録

ンデラー流速計にもとづくものであり、塩分の極端な上昇と転流時刻の一致した時が界面上昇の開始時刻とみなせる。この時刻は St.2 における水位上昇時刻の約 6 時間後に生じている。この位相遅れは、上流ほど上層流速が小さいことを考慮するならば、ほぼ、界面重力波が St.2 と St.5 の間を通過するのに要する時間に等しく、やはり上記の解釈が支持される。ただ、従来の実験結果⁷⁾が教えている様に、潮差が著しくなると、満潮や干潮の頃のみ界面変動が界面波速をもって伝播し、他の潮時には、表面水位とほぼ同位相で界面も上昇すると思われ、今後、潮差に注目した観測が望まれる。

図-5 からは、いまひとつ重要な現象が見出せる。それは潮汐周期より短い時間周期の変動の中に上下層でちょうど逆位相となるものが幾つも認められることである。この現象は界面重力波が伝播するときに生じる流速変動と酷似している。当日の超音波測深機による界面記録を調べると、同程度の周期のきわめて長い波長の界面波が生じており、上記の現象については、やはり、この界面波にもとづくものと解釈できる。

以上、流速変動の原因として、進行波性、又は、定常波性の潮汐にもとづく表面水位だけではなく、潮汐周期の界面変動が界面重力波の位相速度と同じ速度で上流に伝播すること、及び、潮汐周期よりかなり短い周期の界面波の伝播等のあることが指摘された。しかし、LDV により計測された流速変動記録(図-7)から分かりますと、数分、あるいはさらに短い流速変動があり、どの程度の周期までが界面波にもとづき、剪断流不安定にもとづく流速変動といかに区別されるかについて、今後詳細な検討を加える必要がある。

4) 鉛直方向 2 点間の速度差

図-8 は 3) に述べた 2 点間の速度差の時間変動である。同図からは二層間の位相速度が漲潮時や落潮時に、むしろ小さくなる傾向が見出せ興味深い。特に、9 日 10~15 時には水位変動が小さく、定常流に近い流れが認められるが、いずれの潮時においても、この定常状態下の上下層速度差をほとんど上まわらない。この結果は、界面を通じた混合が Shear instability に起因するとして考察を進める場合、重要な情報となる。又、この情報を採用すると、緩混合、及び、強混合型の成因としては潮汐にもとづく下層流動と粗度を考えるとよいことにもなり、この種の研究の発展は従来より容易となろう。

5) 潮汐による塩分侵入状況の変化

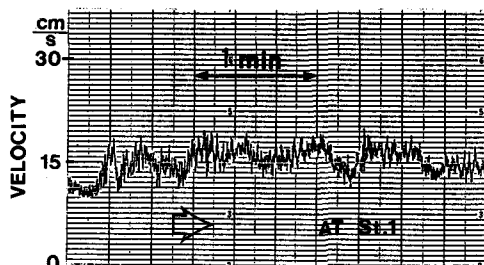


図-7 LDV による流速測定結果

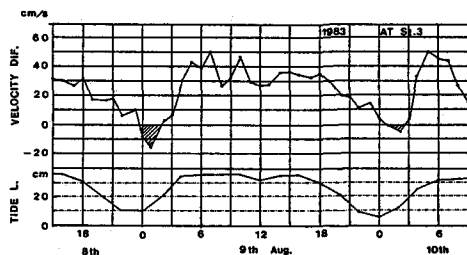


図-8 上下層 2 点間の速度差の時間変動記録

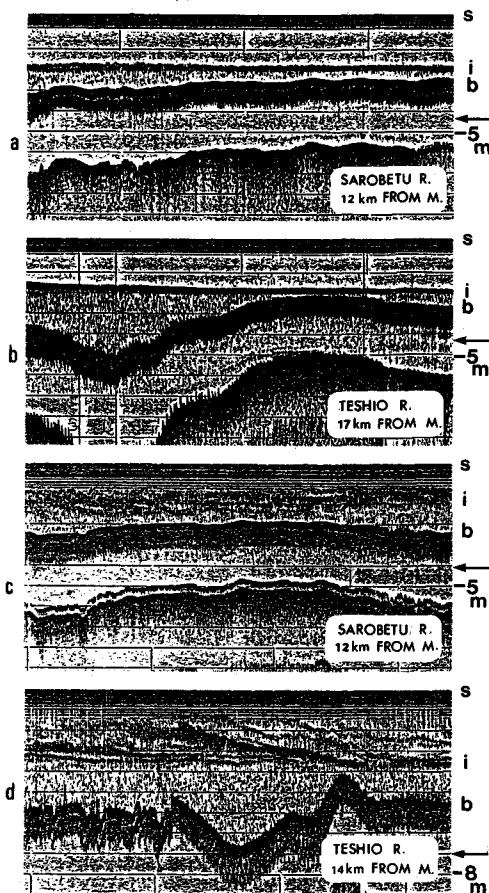


写真-3 天塩川本流及び支流(サロベツ川)における界面破界状況

天塩川は典型的な弱混合型式の河川として知られており、一般に、写真-3a, bに示すとおり本流、支流とも明瞭な界面を有している。しかし、今回の調査時の様に潮差が30cmと比較的大きく流量が $90\sim 110\text{ m}^3/\text{s}$ と比較的小さい場合には塩水楔も17~18kmまで発達し、その先端部では、落潮最盛期に写真-3c, dに示す様な著しい界面破壊を見出すことができる。勿論、この時点で塩分を検出するならば、緩混合に近い型式が得られ、天塩川を常に強混合型式河川と見なすことは誤りであることに気づくであろう。ただ、混合領域は支流では、ほぼ全域であるが、本流では上流域に限られ、河口近傍では弱混合型式が再生されるのが常である。

この様に、界面現象を大きく変容させ得る潮差のもとでは塩水楔の長さや厚さも著しく変化する。たとえば、図-9は8月11日、10:30~11:00(非感潮域流量 $110\text{ m}^3/\text{s}$)、及び、8月31日、14:00~15:00(非感潮域流量 $90\text{ m}^3/\text{s}$)における河口上流10kmを越す本流上流部での界面水位を比較したものであるが、その水位の差20cmに対し界面水位差は約1mに達している。なお、8月31日の観測例³⁾では、下流部のデータが欠如しているが、石狩川での例を参考にすると河口部でも上流部と同程度の界面の昇降があるとみてよい。又、図-10は実験により得られた一潮時にわたる界面変動の様子である。実河川における非定常現象の多くが室内規模の河口流にも見出せることから、天塩川での界面の挙動もこれと大きく相異なることはないと思われる。

最後に、従来の観測例も加え、潮汐振幅と界面水位変動の振幅の関係を図-11に示す。地点や流量が必ずしも一致していないが、今後分類を厳密にし、この種の経験則を得ることは可能と考える。この経験則が河口水質構造の時間変動を予想する上に決定的な意味を有していることは、上記の議論から自明であろう。

4. 結 語

本報告では、今回観測し得たデータの一部のみ採用し、専ら潮汐要因が河口流に与える影響について考察を加えた。しかし、今回の観測は、河口流を多くの視点から検討すべく、風と波と流れにまで及んでいる。今後解析を進め、順次報告する考えである。本報告を終るにあたり、今回の観測に対し御助力を賜った北海道大学工学部大川原 馨先生、ならびに工業力学第二講座の学生諸君に心から感謝するとともに、水位データの提供を御快諾いただいた北海道開発局留萌開発建設部に御礼を申し上げたい。

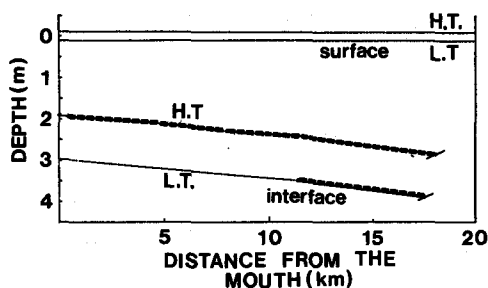


図-9 天塩川本流における満潮及び干渉時の表面界面水位比較

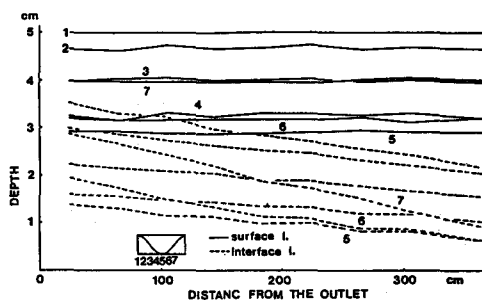


図-10 一潮時にわたる界面形状の変遷(実験)
周期605秒, 潮汐振幅1.05cm, 流量9.7cc/sec,
下層密度1.0067 (12℃), 水路幅8cm, 平均水深4cm

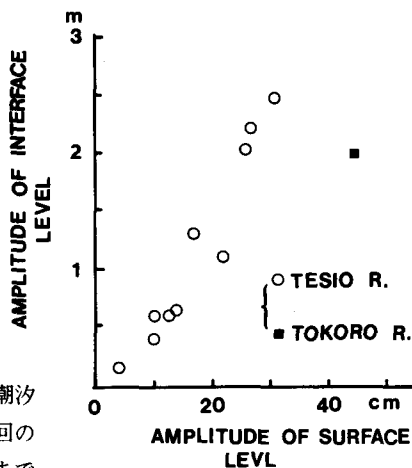


図-11 潮汐振幅と界面水位変動振幅の関係

文 献

- 1) 吉田静男・藤井浩之：感潮河口流の密度構造，第27回海岸工学講演会論文集，pp. 419-423, 1980.
- 2) 柏村正和：天塩川河口の二重水層，天塩港調査報告，天塩町・北大工学部理学第一研究室，1959.
- 3) 吉田静男・柏村正和：潮汐による塩水くさびの応答，第22回海岸工学講演会論文集，pp. 167-171, 1975.
- 4) 柏村正和・吉田静男：天塩川の河口密度流，第23回海岸工学講演会論文集，pp. 477-481, 1976.
- 5) 吉田静男：マイクロLDVプローブの開発，第一回流れの計測大阪シンポジウム予稿集，流れの計測懇談会，pp. 135-141, 1983.
- 6) 吉田静男・柏村正和：河口二成層の流れ構造の解析，第25回海岸工学講演会論文集，pp. 460-464, 1978.
- 7) Yoshida, S. and M. Kashiwamura: Tidal Response of two-layer flow at a river mouth, Pro. 15th Coast. Eng. Conf. (Honolulu), Vol. 4, pp. 3189-3207, 1976.
- 8) 吉田静男：河口密度流に及ぼす地形の影響，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 585-589, 1983.