

## 網走川大湾曲部における計測結果と数値計算結果との比較

北海道大学	学生員	大森	隆裕
北海道大学	正員	清水	康行
開発局土木研究所	正員	金高	州吾
開発局土木研究所	正員	斉藤	大作

## 1. はじめに

北海道東部に位置する網走湖は、近年の降雨量の減少、及び網走川を通じてオホーツク海より遡上し湖に流入する海水に起因し、上層が淡水、下層が塩水である汽水湖を形成している。そのため、強風時には無酸素状態の塩水層が水面付近に巻き上げられる青潮が発生する。この塩水層に起因する青潮、他アオコといった現象は、湖の漁業及び環境に大きな影響を与えるため深刻な社会問題となっている。この網走湖網走川の水理的な特性の把握を試みる研究は数年来各研究者の間で行われているが、著者らは網走川を遡上する塩水の挙動に着目し、それを解明するため過去3年間に計5回に及ぶ現地観測を実施した。いずれの観測も河口より5kmの網走川大曲地区に存在する180度にも及ぶ大湾曲部で行い、湾曲部特有の二次流や、網走港の潮位変化による流動の変化、及びそれに伴う塩水の遡上の様子をとらえることを試みた。<sup>1)</sup> これらの流動は非定常性を示しているので実態を把握するのは容易ではなかったが、実に興味深い現象が判明されている。

本研究では、主として1997年4月、8月に行われた融雪期観測及び大潮期観測のデータの結果、及び網走川を対象に作成された三次元数値計算モデルによる計算結果と観測結果との比較を報告する。観測は開発局網走開発建設部、同土木研究所、中央大学、北見工業大学等の協力の下、前述の湾曲部において測線を設置し、2～3日間で集中的に行われた。観測項目は主に流速及び塩分濃度であり、ADCP(Acoustic Doppler Current Profilers)で流速分布を、クロロテック ACL1180-DKで塩分濃度を少人数乗りボートにて同時計測した。また、各水位は後日網走開発建設部及び海上保安庁から入手した。これらのデータの主流、二次流の動きを、密度流等、流れの状態に考慮しつつ考察を試みた。結果、融雪時観測では、ほぼ全域において強度の主流、二次流の分布が確認された事、主流の流速分布は腹出し型等、場所や時間によって独特の分布形を形成する傾向があるが、それでも強度かつ標準な形の二次流分布が得られた事、数値計算との比較において、その流速分布が、場所にもよるが実測値と一致する事等がわかった。また、大潮時観測では、塩水の遡上に対応した、密度流の各状態による主流や二次流の動きが確認された。数値計算では、塩水遡上時に形成される複雑な現象は再現できなかったが、他の時間帯ではほぼ実測値を再現できた。また、両観測とも主流が潮位に対応し、カウンターフローが存在することが確認された。

## 2. 数値計算について

今回用いる三次元数値計算モデルは、ナビエストークス方程式、連続式、及び拡散方程式を基礎式として導いたものである。その導出過程については以前に報告したので、参照にされたい<sup>2)</sup>。境界条件として網走湖水位、網走港潮位の時間変化を与えた。その他諸条件については表-1に示す。

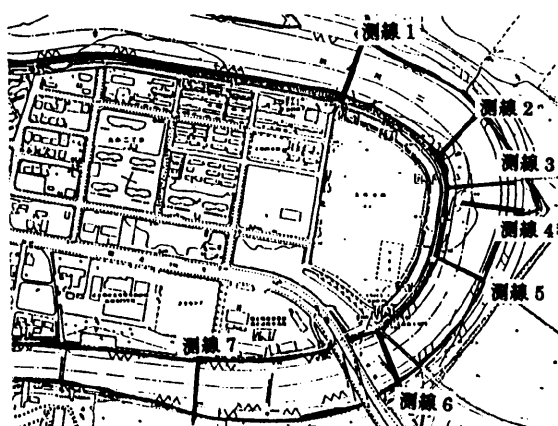


図-1 融雪時観測の測線位置

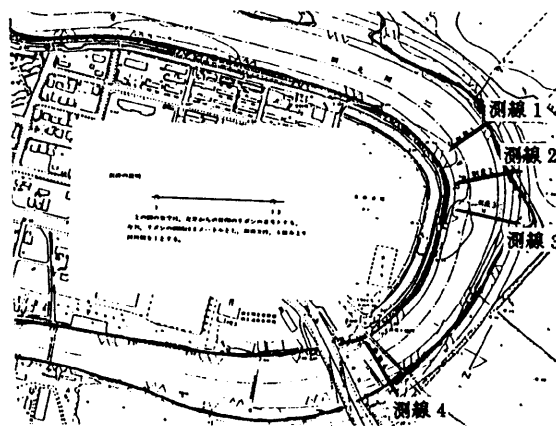


図-2 大潮時観測の測線位置

Comparison between the observed values and the calculated values at a river bend of the River Abashiri  
by Takahiro OMORI, Yasuyuki SHIMIZU, Shugo KANETAKA and Daisaku SAITO

表-1 3次元数値計算モデルの諸条件

項目	値
格子数 (s×n×z)	58×13×13
計算時間(融雪時)	72(hour)
計算時間(大潮時)	96(hour)
渦動拡散係数(水平方向)	0.01 (m <sup>2</sup> /s)
渦動粘性係数(水平方向)	0.00015 (m <sup>2</sup> /s)
河床摩擦係数	0.012

$$\psi = \frac{1}{H} \int_0^H |v| dz \quad (1) \quad H: \text{水深}$$

### 3. 観測概要

今回の報告に用いる観測は1997年4/26～28に実施された融雪時観測及び同年8/18～20に実施された大潮時観測の二期間のものである。観測地は前述の通り網走川大曲地区の大湾曲部である。観測方法としては、図-1,2に示す通り、河道中心線にはほぼ直角方向にワイヤーを設置し、ワイヤーに沿ってボートを微小速度で移動しつつ計測する連続観測

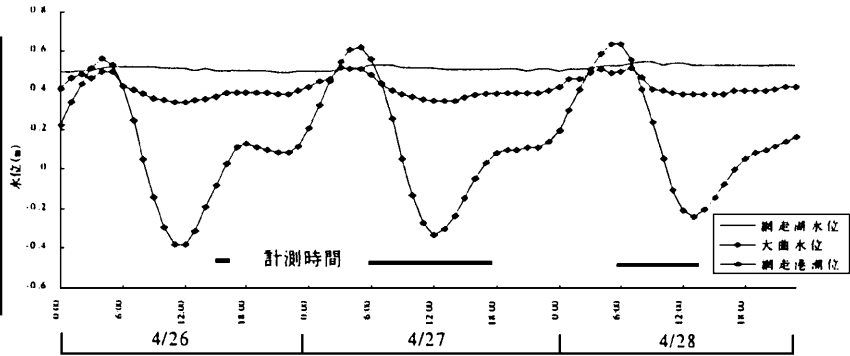


図-3 '97 4/26～4/28の網走港潮位及び計測時間

塩分の状態	淡水	塩水	淡水	塩水	淡水
流向	順流	逆流	順流	逆流	順流

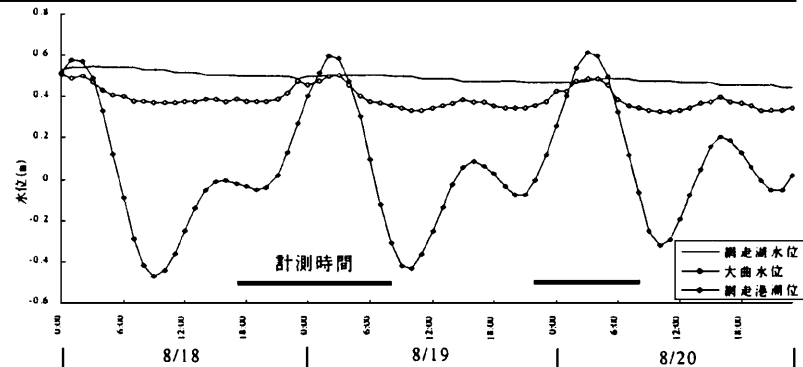


図-4 '97 8/18～8/20の網走港潮位、計測時間及び大曲における流況

と、5～10mの間隔で2,3分毎に観測点を移動する定点観測の二方法で流速及び塩分濃度を同時計測した。流速データのサンプリングは各測線上の観測点にて行われ、ADCPにて水深方向12～15cm間隔(ADCPの特性上水面下約60cmは計測不可)の深度及び北方、東方、鉛直方向流速成分を計測した。これら北方、東方流速は、それぞれ主流方向流速  $u$  及び二次流方向流速  $v$  に変換された<sup>1)</sup>。また、塩分濃度のデータは各地点において水深方向に10cm間隔で深度及び塩分濃度のサンプリングを行った。また、図-3,4はそれぞれ融雪時観測と大潮時観測における観測時間を網走港潮位等の各水位と大曲蛇行部における流況とともに表したものである。

### 4. 観測結果と数値計算結果

#### 4.1 融雪時観測の概要と結果

前述の期間中に、網走港の干潮前後の時間に注目して観測は実施した(図-3)。この時期は融雪出水に起因する淡水一層の順流が形成されるので、この主流及び二次流をとらえ、また上流網走湖の下層に存在する塩水の出水を計測する事を目的とした。方法は、測線1～7についての連続計測、及び測線3,6についての定点観測(総計測地点数約220点)であった(図-1)。計測した結果、塩水出水こそ得られなかったが、河口潮位に対応した主流と二次流の動きが確認された。それらのデータをグラフで示す。まず、連続観測で得られたデータを用いて、図-5～8に各測線毎の二次流強度  $\psi$  を示す。二次流強度とは、各水深毎に定まる二次流  $v$  の絶対値を水深平均し、さらに同一測線上の全ての観測地点においても平均化したものである(式(1))。これら

の図では、主として測線2～4の間の二次流強度が大きな値を示している。つまり、湾曲部の上流側入口からそ

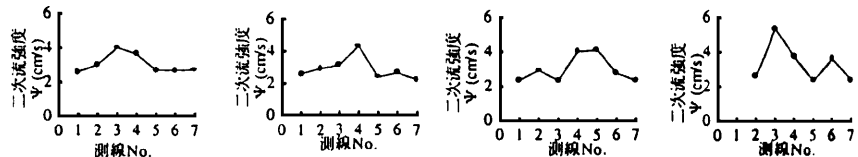


図-5 測線別二次流強度 図-6 測線別二次流強度 図-7 測線別二次流強度 図-8 測線別二次流強度  
(4/27 16:27-17:39) (4/27 17:33-18:29) (4/28 7:43-9:07) (4/28 9:04-10:06)

の頭頂部にかけての範囲で二次流が発達していることを示している。次に測線6(4/27), 測線3(4/28)での定点観測結果について示す。図-9, 10, 11は各測線での流速  $u, v$  の実測値(点印・)を計算結果(直線-)と比較しつつ, 断面的に表したものである。測線6では, 全ての計測地点で強度の主流  $u$  及びやや発達した二次流  $v$  の分布形が確認でき, 同条件下における計算結果も, 観測結果にはほぼ一致した分布形となっている。しかしながら, 測線3に関しては, 実測の主流  $u$  の分布形が腹出し型の形状を成す地点が存在しているが, 計算結果ではその傾向が見られない。実測値がこの分布形となる理由は, 測線3の左岸より20m以内の範囲で河床が急に深くなっている複雑な地形のためと考えられる。次に, 各測線における主流  $u$  の分布形の時間変化を表す。図-12, 13は測線6の左岸から25m地点における流速  $u$  の時間変化を, 同様に図-14は測線3の左岸から10m地点における流速  $u$  の分布形の時間変化を表している。図-12, 13より, 干潮に向かう時間帯においては対数則形の分布形状が多いのに対し, 干潮後は突っ立った分布形状となるのがわかる。また, 流速の大きさも強弱の振動を繰り返しつつ変化するカウンターフローの効果が見られる。これより流速  $u$  と潮位との間の対応関係を示している。また, 図-14より, 干潮前後のどの時間帯においても同様な腹出し型の分布形となっている。流速の大きさには潮位との対応が見られるが, この場合, 分布形と潮位とは対応しないことを示している。これらの流速  $u$  及びそれと同地点同時間の流速  $v$  とを, 数値計算結果と比較したものが図-15~24である。これより, 測線6での実測値は, 流速  $u, v$  とも計算値と比較的によく一致しているが, 干潮後の流速  $u$  については, 実測値でやや立ち上がった分布形を成しているものの, 計算値の分布形では見られなかった。また測線3では, 流速  $u, v$  とも計算値との近似は

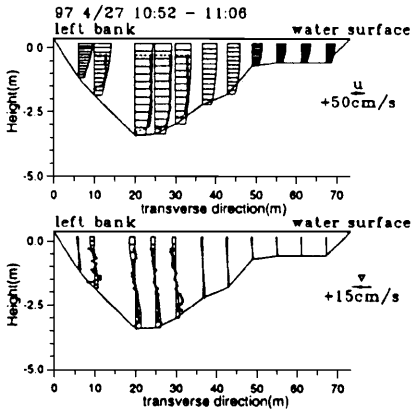


図-9 流速  $u, v$  の断面図

(測線6:干潮前)

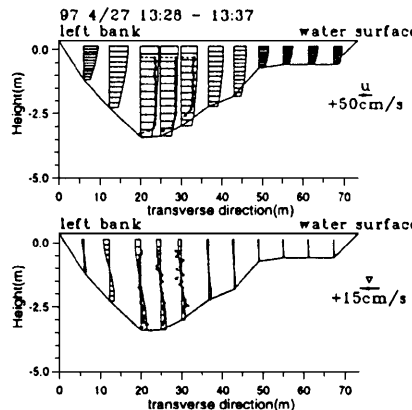


図-10 流速  $u, v$  の断面図

(測線6:干潮後)

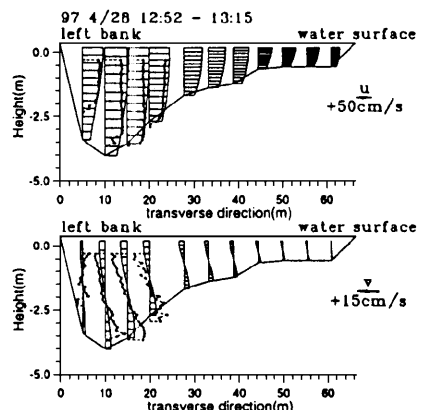


図-11 流速  $u, v$  の断面図

(測線3:干潮時)

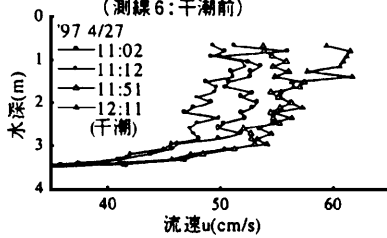


図-12 測線6左岸より25m地点における流速  $u$  の時間別変化(干潮前)

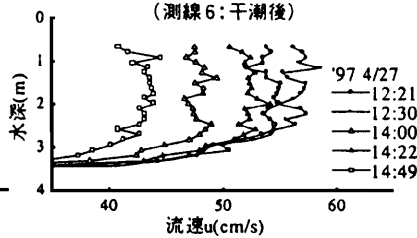


図-13 測線6左岸より25m地点における流速  $u$  の時間別変化(干潮後)

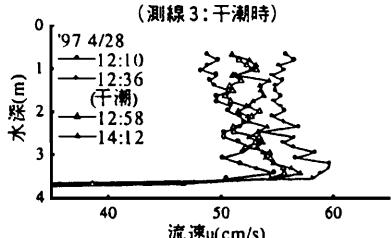


図-14 測線3左岸より10m地点における流速  $u$  の時間別変化(干潮時)

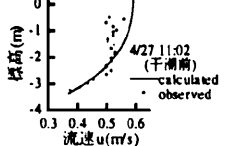


図-15 計算値との比較(測線6 流速  $u$ )

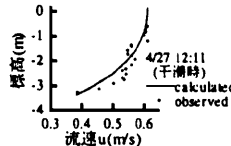


図-16 計算値との比較(測線6 流速  $u$ )

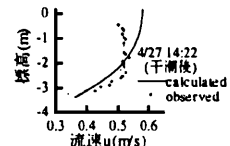


図-17 計算値との比較(測線6 流速  $u$ )

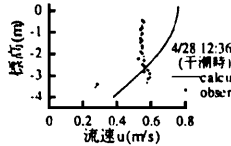


図-18 計算値との比較(測線3 流速  $u$ )

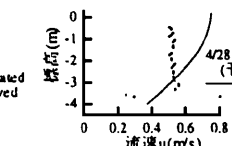


図-19 計算値との比較(測線3 流速  $u$ )

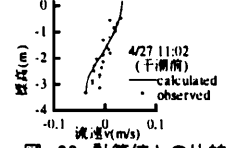


図-20 計算値との比較(測線6 流速  $v$ )

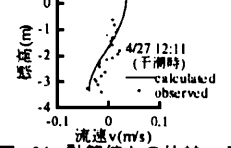


図-21 計算値との比較(測線6 流速  $v$ )

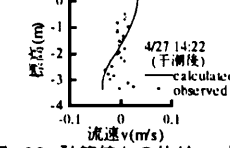


図-22 計算値との比較(測線6 流速  $v$ )

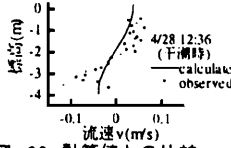


図-23 計算値との比較(測線3 流速  $v$ )

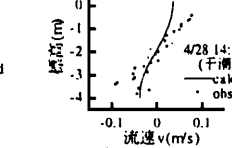


図-24 計算値との比較(測線3 流速  $v$ )

見られない。流速 $u$ については、実測値の分布形は、前述のように河床付近で流速が大きくなり腹出し型の分布となっているが、計算値の場合は対数則のような分布となっており、観測結果とは異なる分布形となっている。流速 $v$ については、実測値、計算値ともにその分布形状は似ているものの、流速の大きさは実測値が計算値を上回っている。通常、二次流(流速 $v$ )は、主流(流速 $u$ )が対数則の分布形となる時に、その水面付近と河床付近との遠心力の差によって発生するものである。しかし、この場合流速 $u$ は対数則の分布を形成してないにも関わらず、強い二次流が発生している。これは、主流の分布形のみが二次流の発生原因ではない事を推察させる。

#### 4.2 大潮時観測の概要と結果

前述の通り、観測期間は干満潮の差が約1mにも達する8月の大潮時であったので(図-4)、大曲地区の大湾曲部では逆流により遡上した塩水を確認する事ができた。そこで、密度流時の湾曲部における主流、二次流の状態及び塩淡水境界との関係を知る事を観測の目的とし、観測時間を満潮前後の時間を中心に設定した。観測方法は融雪時観測での定点観測(総計測値点数約270点)と同様にし、測線は2,4を選択した(図-2)。観測数日前の降雨により湖からの流量が増大したため、観測初日は塩水が湾曲部まで遡上しても常に塩淡水二層の状態となり、翌日は全層で塩水が分布している、という二種の密度流の状態が確認された。それらの結果をグラフ化し、この複雑な流動を報告する。図-25～36は、観測で得られた各データを、流速 $u, v$ については融雪時観測同様の断面図で、塩分濃度は密度に変換しコンター図で断面的に、それぞれ数値計算結果と比較と併せて表した図である。コンター図は、上図が実測値、下図が計算値をそれぞれ表している。

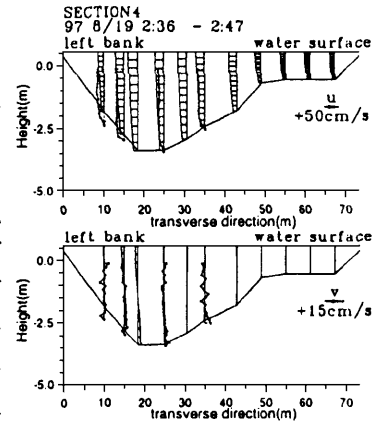


図-25 流速 $u, v$ の断面図  
(測線4: 淡水一層の逆流)

図-25～29は8/19の深夜から早朝にかけて計測されたデータである。図-25は逆流かつ淡水一層の流れである。実測値の流速 $u$ は突立ち型の分布形となっており、流速 $v$ はあまり発達していない二次流となっているが、計算値でもほぼ同様な分布が再現されている。図-26, 27は塩水遡上が確認されたときの図である。コンター図との比較から、実測では塩水層が逆流となり淡水層が停滞している様子がわかる。計算値を見ると、流速 $u$ が腹出し型の分布となり塩水もほぼ同様の遡上程度であるため、実測値が再現されている。図-28, 29は、順流

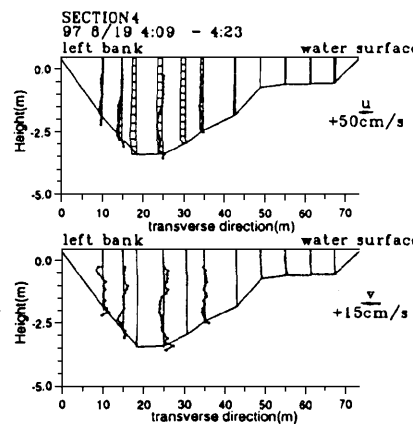


図-26 流速 $u, v$ の断面図  
(測線4: 塩水遡上時)

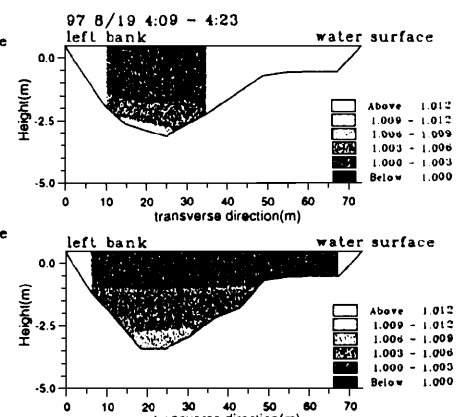


図-27 実測値(上図)と計算値(下図)の断面内密度(測線4 塩水遡上時)

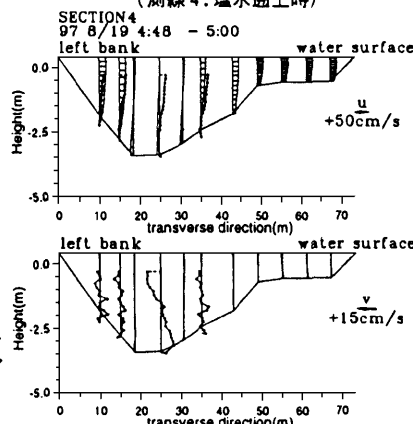


図-28 流速 $u, v$ の断面図  
(測線4: 順流への遷移時)

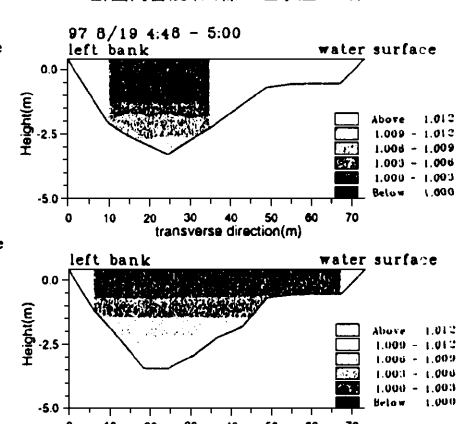


図-29 実測値(上図)と計算値(下図)の断面内密度(測線4: 順流への遷移時)

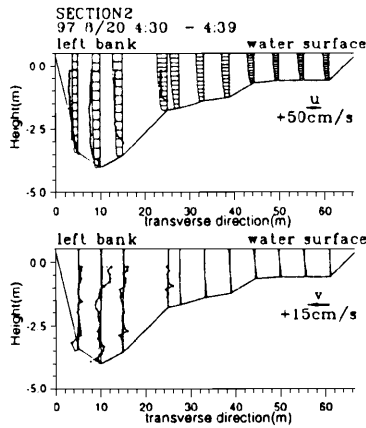


図-30 流速  $u, v$  の断面図  
(測線2:塩水遡上直前)

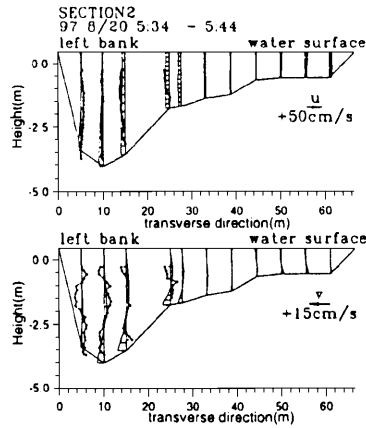


図-31 流速  $u, v$  の断面図  
(測線2:ほぼ全層に塩水が分布)

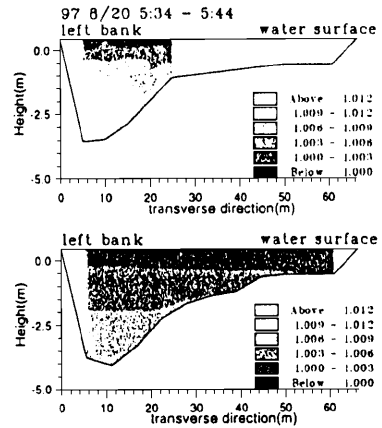


図-32 実測値(上図)と計算値(下図)の断面内密度(測線2:ほぼ全層に塩水が分布)

へと遷移する時間であり、流速  $u$  では、実測値、計算値ともに上層の淡水が順流で下層の塩水が逆流である流れを形成している。また、流速  $v$  では25m地点でオーダーが流速  $u$  と1:1となる大きな二次流が発生しているが、計算では再現できていない。8/19は、全体的に二層流の流れが観測されたが、計算も同様な流れが再現できた。次に、図-30～36は8/20の深夜から早朝にかけて計測されたデータである。図-30は、図-25と同様、逆流かつ淡水一層の流れであるが、流速  $v$  を見ると、上部で時計回り、下部で反時計回りという二つの二次流が発生している。著者らは以前、塩淡二層の流れで上層では通常の、下層ではそれと反対の二次流が発生することを指摘したが<sup>1)</sup>、この場合はそれと全く逆向きの二次流であり興味深い。図-31、32は、塩水がほぼ全層に分布した時の図である。流速  $v$  は上部で反時計回り、下部で時計回りという二つの二次流が発生し、計算値も似た分布となっている。図-33、34は、順流へ流れ

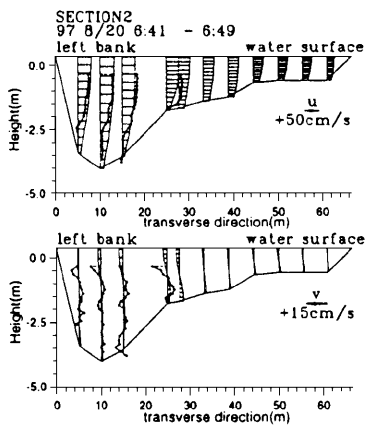


図-33 流速  $u, v$  の断面図  
(測線2:順流への遷移時)

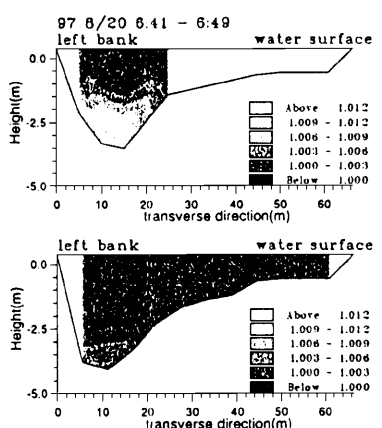


図-34 実測値(上図)と計算値(下図)の断面内密度(測線2:順流への遷移時)

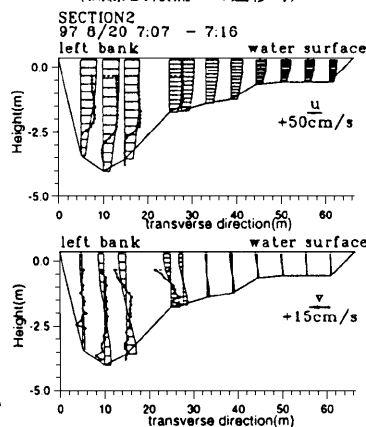


図-35 流速  $u, v$  の断面図  
(測線2:順流への遷移時)

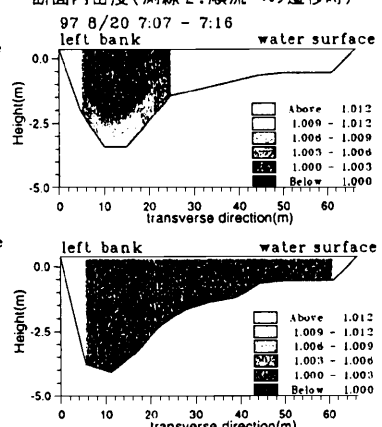


図-36 実測値(上図)と計算値(下図)の断面内密度(測線2:順流への遷移時)

が遷移している時間である。流速  $v$  の実測値を見ると、極めて複雑な分布を形成しているが、横断的に見ると、どの地点でも同じような分布形状となっている。これより、塩水層内の密度差によって作られる各層内で、それぞれ二次流が発生している事が推察できる。図-35、36も同じく遷移時であるが、図-36の上図を見ると塩水層が右岸(内岸)に押し寄せ上げられている。これは二次流の影響によるもの、と推察できる。また、図-33、35では、図-28同様淡水層が順流、塩水層が逆流である様子が示されている。図-32、34、36では、実測値ほど計算値の塩水は遡上していない事、実測では、塩水は強混合で遡上した事を示している。次に、満潮直後からの流速  $u$  の分布形の時間変化を、図-37～41に表す。融雪時同様、潮位に対応して分布形が変化している。図-37、38は8/19の測線4の左岸から25m地点の流速分布である。

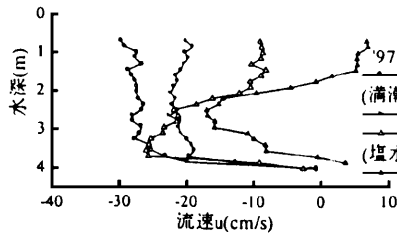


図-37 測線4左岸より25m地点における流速uの時間別変化(塩水を確認)

図-37より淡水から成る逆流の状態ならば、突っ立った分布形となる事、また、塩水が確認された時には下層で強度の逆流が存在しており、塩水層の遡上が明確である。図-38は上層(淡水)と下層(塩水)とで、それぞれ順流と逆流から成る分布から全層順流になる様子が示されている。全層順流になった後、分布形が急勾配から緩勾配へと変化しているが、これは流速の減速が影響しているため、と考えられる。

図-39～41は8/20の測線2の左岸から10m地点の流速分布である。

この流速分布の一連の時間変化は、前出8/19の場合とほぼ同様であるが、図-39,40には、分布形変化が潮位変化と対応していない箇所がみられ、カウンターフローの存在が推察される。

図-41では、逆流から順流に移る際、途中で完全に突っ立った分布形を経ているのが示されている。次に、これら密度流の状態を詳しく知るために、リチャードソン数(Ri数)の時間変化を表したのが図-42,43である。図-42では8/19の測線4の左岸から25m地点を、図-43では8/20の測線2の左岸から10m地点をそれぞれ対象とし、式(2)でRi数を求めている。図-42によれば、この日の塩水が確認され始めた時間においてRi数は大きな値を示しており安定な状態になっているが、その後上層が順流、下層(塩水)が逆流という流れを形成したためか、Ri数は小さな値になり不安定な状態となっている。図-43は、遡上した塩水が強混合の状態を経て、二層流の傾向がみえた時点からのRi数を表している。当初、Ri数は大きな値となり安定な状態であるが、次第に値は小さくなり不安定な状態になる。

## 5. まとめ

本研究は、1997年の融雪時及び大潮時に、網走川大曲地区に存在する大湾曲部において行われた観測の結果報告と、それら実測値と3次元数値計算モデルとの計算値との比較の報告を主な目的としたが、融雪時観測、大潮時観測ともに、主流方向流速、二次流方向流速、塩分濃度のそれぞれが潮位と対応した現象を形成し、数値計算においても一部の複雑な現象を除けばほぼ実測値を再現することができた。

謝辞 観測及びデータの提供においては、開発局開発土木研究所、同網走開発建設部、中央大学、北見工業大学、(株)北開水工コンサルタント、海上保安庁の方々に御協力いただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1)大森隆裕、清水康行、崇田徳彦:ADCPを用いた河川湾曲部の密度流の計測、水工学論文集、第41巻、pp1035-1040、1997
- 2)大森隆裕、清水康行、崇田徳彦:河川湾曲部における密度流の運動特性、土木学会北海道支部論文報告集、第53号(B)、pp252-255、1997

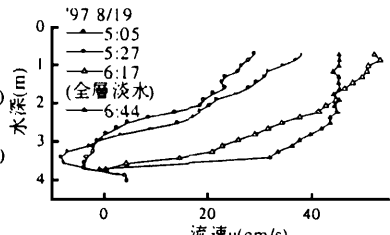


図-38 測線4左岸より25m地点における流速uの時間別変化(順流への移行)

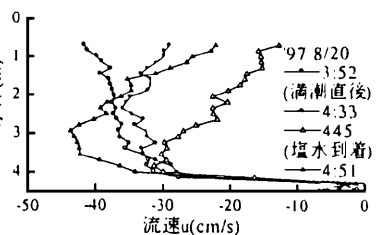


図-39 測線2左岸より10m地点における流速uの時間別変化(塩水を確認)

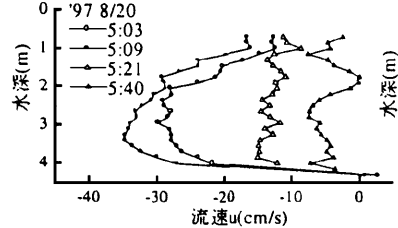


図-40 測線2左岸より10m地点における流速uの時間別変化

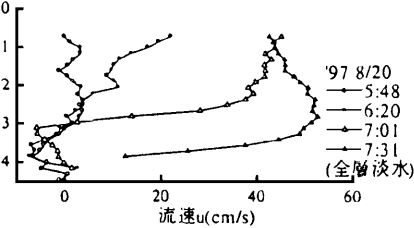


図-41 測線2左岸より10m地点における流速uの時間別変化(順流への移行)

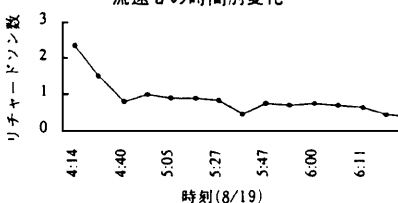


図-42 測線4の左岸より25m地点におけるリチャードソン数の時間変化

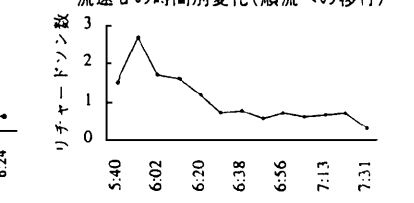


図-43 測線2の左岸より10m地点におけるリチャードソン数の時間変化

$$Ri = \frac{\epsilon g h_i}{\rho \Delta u^2} \quad (2)$$

$\Delta \rho$ : 上層と下層の密度差  
 $\rho$ : 全層の平均密度  
 $g$ : 重力加速度  
 $h_i$ : 上層水深  
 $\Delta u$ : 上下層の平均流速差  
 $\epsilon = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$