

緩混合河川における流量と塩分輸送量の算定

MEASUREMENTS OF DISCHARGE AND SALINITY FLUX AT PARTLY MIXED RIVER

西田修三¹・中辻啓二²
Shuzo NISHIDA and Keiji NAKATSUJI

¹正会員 工博 大阪大学助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

²正会員 工博 大阪大学教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

It is very difficult to evaluate the river discharge at a tidal portion, because the discharge can not be calculated directly from the water level due to influence of tide. A new measurement system of discharge and salinity flux at a tidal portion using an acoustic Doppler current profiler is proposed in this paper. To estimate the system, field measurements were carried out at 5.5km from the mouth of the Takase River. The results show that velocities measured by the acoustic Doppler current profiler near the center point of cross section are proportional to mean velocities, and that mean salinities can be also calculated from the salinities of upper and lower layers near the center point. Amounts of salinity intrusions evaluated by this system agree well with the results observed in lake Ogawara.

Key Words : Tidal portion, Partly mixed river, River discharge, Salinity flux, ADCP

1. はじめに

河口部感潮域では、水位は潮汐の影響を受けて大きく変動し、さらに流速は淡塩水の混合に伴う密度構造の変化により一流体の開水路流れとは異なった特有な構造を示す。その結果、上流の非感潮域のようにH-Q曲線を基に一地点の水位から流速または流量を算定することはできない。一部の河川では超音波流量計を用いた断面平均的な流速の測定と流量の算定が行われているが、塩水が遡上する感潮域では、密度の成層化の影響によりデータが散乱し、有意な流量データの取得が難しい。そこで、本研究では感潮域の新しい流量観測方法として、超音波ドップラー流速分布計を用いたシステムを提案し、現地観測データを基にその適用性についての検討を行う。

超音波ドップラー流速分布計は、三次元の流速の鉛直分布が計測できる流速計で、主に海洋において使用されてきた^{1) - 3)}。最近では浅水域用のものも開発され、湖沼や沿岸域の観測も行われるようになってきた^{4) - 6)}。今回観測を実施した高瀬川には、河口上流5.5km地点(高瀬橋)の流心近くの河床に浅水域用の超音波ドップラー流速分布計(ADP 3MHz)が設置され、流速モニターシステムによる流速分布の観測が行われている。本研究では、この観測データと現地観測によって得られた断面平均量との

関係を明らかにし、感潮域における流量と塩分通過量の算定を試みるとともに、上流に位置する小川原湖への塩水流入の実態を定量的に明らかにする。

高瀬川は、河口を太平洋に有し、上流6kmには汽水性の湖である小川原湖(湖面積63km², 最大水深2.5m)を抱える緩混合河川である。この小川原湖の塩分循環過程を明らかにするためにも、高瀬川における塩水の流入流出量を正確に把握する必要がある。高瀬川では、河道部3地点と湖内において水位のテレメータ観測もなされているが、上述のように水位と流量に一価の関係が見出せず流量の把握は未だなされていない。また、2地点(例えば河口と小川原湖)の水位差より高瀬川の流速を算定する試みもなされているものの⁷⁾、気象や地形変化等の影響を受けてデータは大きく散乱し、精度の良い流量の算定には至っていないのが現状である。

2. 現地観測

1995年から1997年の秋季、高瀬川の流況と塩分の断面構造を把握し、実流量と塩分通過量を求めるために、河口上流5.5kmの高瀬橋において横断7地点(図-2 ▽地点)で水深方向0.5mピッチの流速測定と0.2mピッチの塩分・水温測定を実施した。観測は、広範囲の流況データが採取できるように、潮

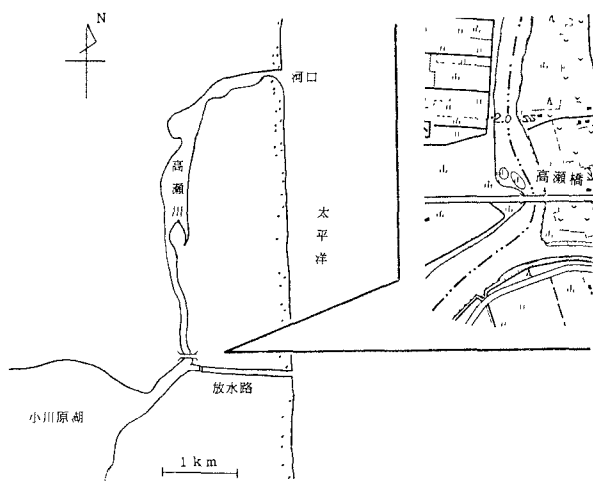


図-1 高瀬川略図

汐を考慮して流速の異なる日時を選んで実施した。また、2 mピッチの横断深淺測量も併せて実施した。

小川原湖の成層構造と塩水貯留量の変化を把握するために、1月～3月の冬期間を除き過去数年にわたり、小川原湖最深部（水深約25m）においてSTDを用いたピッチ0.2mの水温・塩分の鉛直分布測定を実施している。さらに湖水の流動と水温成層の変動を把握するための超音波ドップラー流速分布計（ADCP-WH 1200Hz）とメモリー式水温計（MDS-T）を用いた約3週間の定置観測も実施している。

流量観測システムの評価・検討には、建設省で観測されている高瀬川の流速（高瀬橋）、塩分（高瀬橋）、水位（河口、高瀬橋、湖口、小川原湖）の各データを用い、平均化等の統計処理を行い解析に利用した。

3. 観測結果

(1) 河床地形

図-2は、深淺測量によって得られた高瀬橋地点の河床横断地形である。橋脚は、右岸基点から12.2, 24.5, 36.7, 51.0, 61.3, 73.5, 85.8m、また、右岸矢板護岸は3.7mに位置し、幅約6mにわたりブロックが設置されている。河道の湾曲により右岸寄りに最深部が存在する特徴を有しているが、経年的な河床変化はほとんど認められず、安定した河道を保っていると言える。

横断深淺測量によって得られた河床地形をもとに、TP水位と流水断面積の関係を求めたのが図-3である。流水断面積は、広範囲にわたり水位の二次関数で表現されることがわかる。

(2) 流速・塩分構造

図-4は、高瀬橋において逆流時に観測された流速と塩分の断面分布の一例である。河床形状が異なるのは、観測位置が若干異なることと、左岸では水深不足による塩分測定の実測がなかったためである。

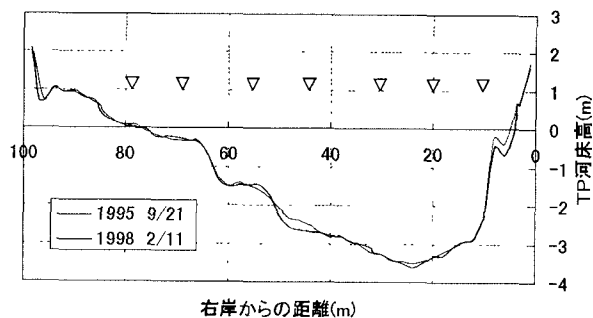


図-2 高瀬橋河床横断形状

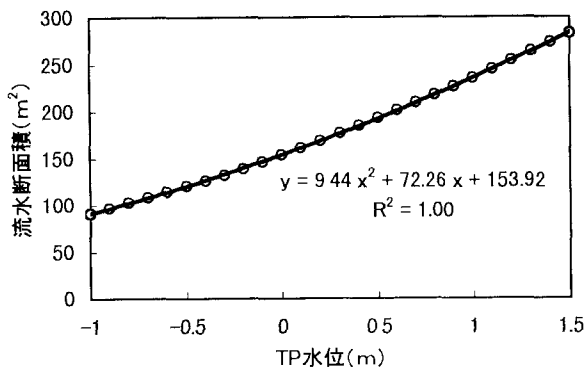


図-3 水位と流水断面積

流速は、高瀬橋の直交成分を示し、逆流を負値で表している。上層部で高い流速を示す順流時と異なり、逆流時には密度流効果により最深部の中層で高い流速値を示している。また、密度分布も河道の湾曲にともなう流心の右岸偏位とその傾圧効果により、等塩分線が左岸側で大きく上昇していることがわかる。

流向に関しては、左岸において地形の影響を受け偏向していたものの、ほぼ断面内で安定した高瀬橋直交方位を示していた。

(3) モニターシステムと流速特性

高瀬橋に設置された超音波ドップラー流速分布計（ADP）のモニターシステムは、観測地点の河床に設置されたセンサー部と、信号ケーブルによって接続された処理・記録部（パソコン）からなっている。センサーは高瀬橋下流側（右岸から約32m、欄干から下流3m）の河床（センサー面：約TP-2.9m）に設置され、表層まで鉛直上方に0.25m間隔で流速流向が測定されている。ただし、センサー直上は流速計の特性上、非測定領域であるとともに、水面の反射により水面上方には偽データが現れる。さらに、超音波ドップラー流速計の特性として表層部は水面の影響を受けて正しい流速値を示さないことにも注意を要する。計測は1 Hzの連続計測で10分毎（600データ）に平均化処理がなされ、時刻と各水深毎の

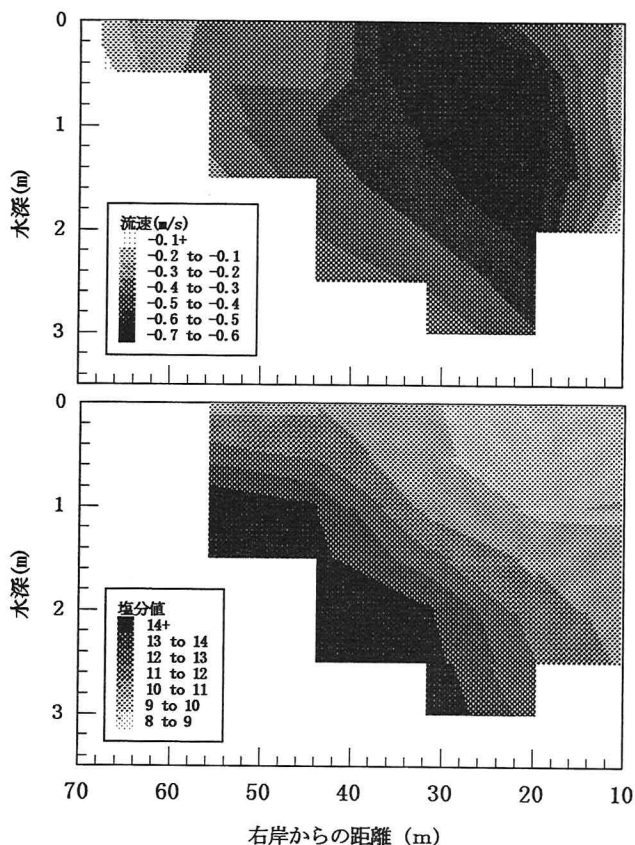


図-4 流速・塩分の横断構造 (逆流時)

平均流速が順次ハードディスクに記録される。図-5は、モニターシステムにより計測された代表的な逆流時と順流時の流速分布と音響強度分布である。600データの平均化処理によりなめらかな分布形状を示すとともに、連続計測のため時系列も良好な連続性を有していた。流速は順流時に上層部で、また逆流時には中層部で高い値を示し、河床に向けて徐々に低下しており、現地観測結果と同様の分布形状を示している。また、水表面で音響強度が極大値を示し、上述のように水表面より上方で偽データが現れていることもわかる。平均流速の算出に際しては、このような偽データを削除するために、水位データより水面位置を算出し、水表面以下の有意なデータのみを用いた平均化を行った。

計測が開始された1996年9月17日から1997年1月7日まで (一部、機器調整のため欠測) のモニターデータに上記の水深方向平均を施し、さらに1時間 (6データ) の時間平均をして得られた高瀬橋直交流速の頻度分布が図-6である。順流の30~40cm/sが最多頻度を示しているが、最大流速は逆流時に生じ-91cm/sであった。大きな順流速が生じないのは、水深が浅く複断面構造を有することによる抵抗の増加と、狭窄した河口地形によるものと考えられる。観測期間の順流平均流速は26cm/s、逆流平均流速は-28cm/s、全流速平均は順流となり8.5cm/sであった。

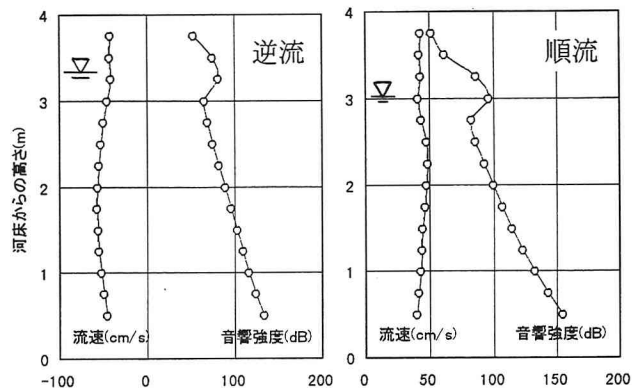


図-5 流速分布と音響強度分布

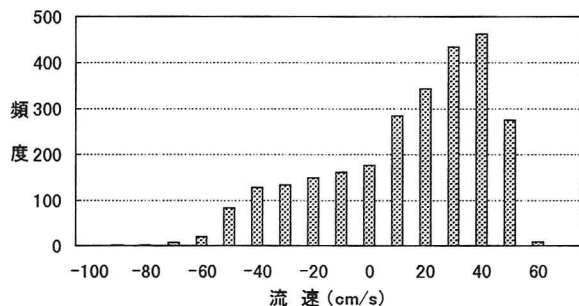


図-6 モニター順逆流速の頻度分布

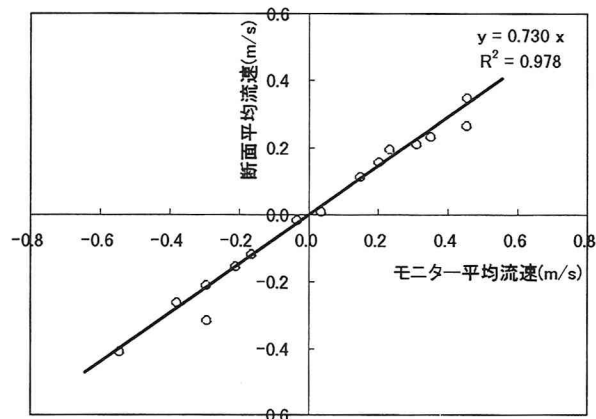


図-7 断面平均流速とモニター平均流速の関係

(4) 断面平均流速とモニター流速

図-7は、現地観測で得られた断面平均流速とモニター平均流速の関係を示したものである。現地観測には、1横断約40分の時間を要するため、10分間隔で得られているモニター流速値を水深方向に平均化するとともに横断観測に要した時間で平均化して比較をしている。

断面平均流速とモニター平均流速には、順流逆流ともに明瞭な相関関係が認められる。散乱がみられるのは、観測時間内の潮位変化や水面の動揺による場の強い非定常性が大きな原因と考えられる。

図-7に示した関係を用いれば、断面内一地点で連続計測されているモニター流速より断面平均流速

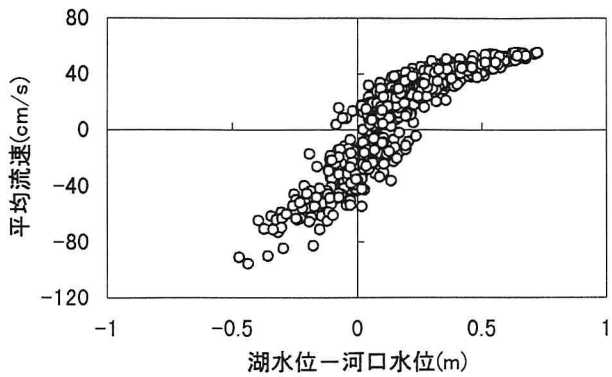


図-8 水位差とモニター平均流速の関係

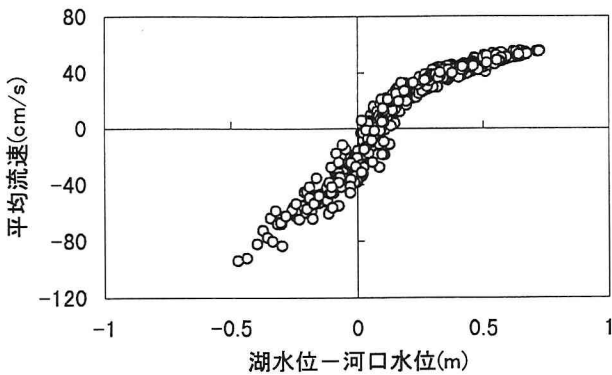


図-9 水位差とモニター平均流速の関係

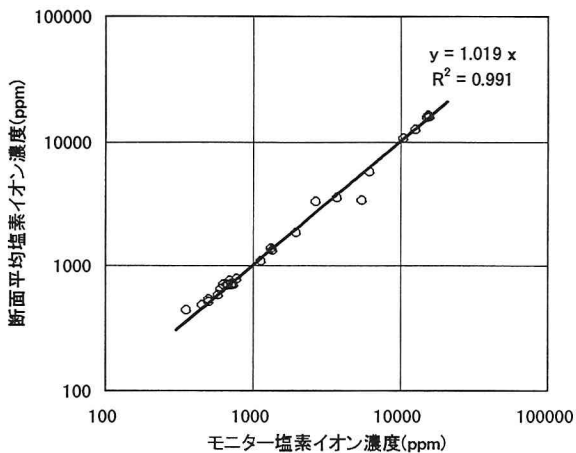


図-10 断面平均Cl⁻濃度とモニターCl⁻濃度

が得られ、さらに、高瀬橋の水位データより求まる流水断面積を乗ずることにより、高瀬橋地点における時々刻々の流量変化がかなりの精度で把握できる。

(5) 流速と水面勾配

感潮域の流速や流量は、2地点の水位差つまり水面勾配によってほぼ決定される。そこで、河口水位と小川原湖水位を用いて、河口部両端の水位差とモニター流速の関係を求めたのが図-8である。

水位差と流速には相関関係が認められるものの、データの散乱が大きい。この原因としては、位相遅れを考慮していないことと、風や波浪による水位変

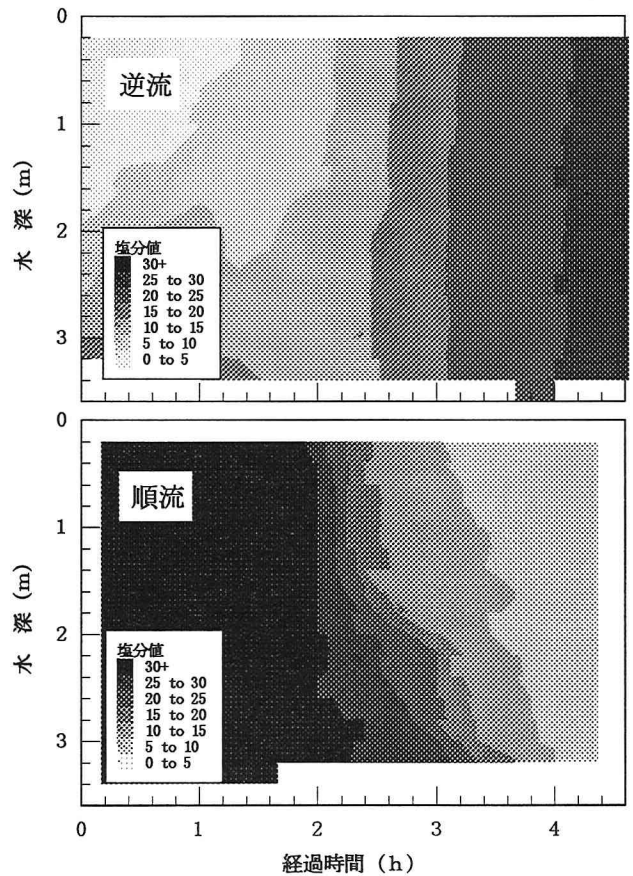


図-11 流入・流出時の塩分分布の経時変化

化が考えられる。水位差と流速の関係を経時的に追ってみると、反時計回りのループを描いており、位相差が散乱の大きな要因となっていることがわかった。その位相差を算定したところ、水位差の変動に対して流速変動は40分の遅れを有していた。そこで、この時間遅れを考慮して水位差とその40分後の流速の関係を求めたのが図-9である。散乱は低減し、明瞭な関係が認められ、水位差を基に河道内の流速がかなりの精度で予測できると言える。ただし、図から明らかなように、前述の地形効果により水位差の増加に伴う流速の増加が、逆流速に比して順流速の方が鈍化しており、順流と逆流ではその関係が異なることに注意を要する。

(6) 断面平均塩分濃度

図-10は、現地観測で得られた高瀬橋の断面平均塩素イオン濃度と高瀬橋でモニターされている2水深の平均塩素イオン濃度の関係を示したものである。ここに、断面平均濃度は断面フラックスを断面流量で除して求めている。流速と同様に、塩素イオン濃度に関しても良好な相関が認められ、横断1地点における上下層の塩分観測によって、かなりの精度で断面平均塩分量が算定できると言える。しかし、淡塩水の混合が弱く水深方向に塩分濃度が急変するような場合には、上下2点の塩分データから算定さ

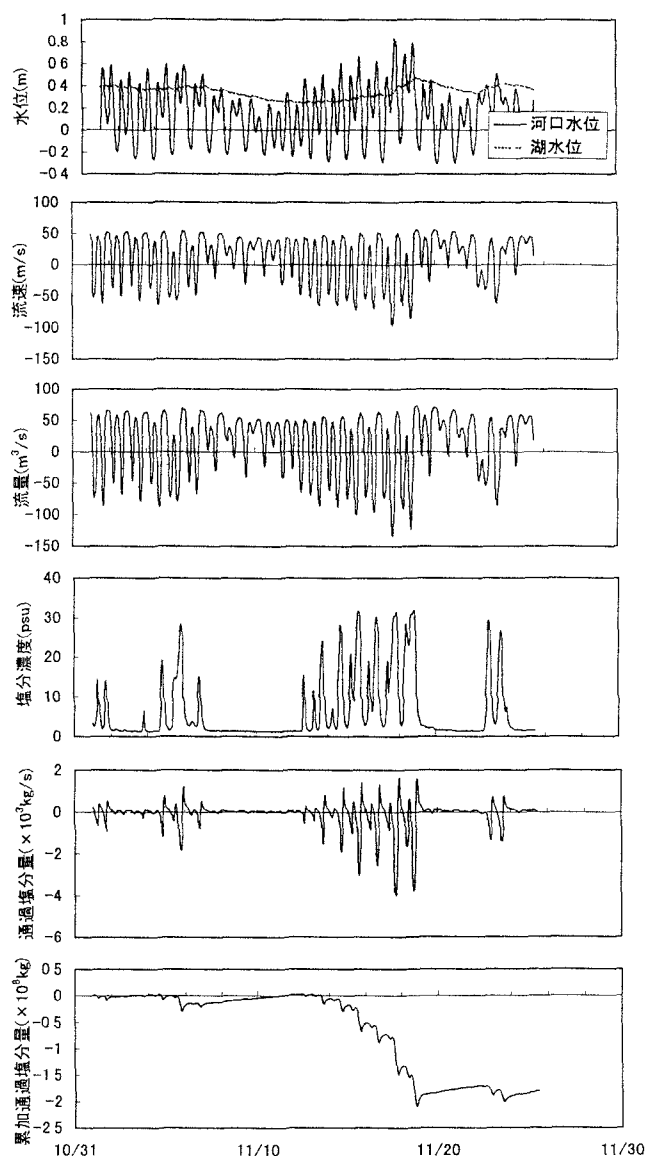


図-12 水理量の経時変化

れた断面平均濃度には大きな誤差が伴い、水深方向により多くの計測点が必要となる。

図-11は、STDによって観測された塩水の流入時と流出時の塩分分布の経時変化を示したものである。特に、流入時には塩分構造が大きく変動し、2水深の塩分データが、十分な断面代表量とはならないことがわかる。

4. 流量と塩分通過量の算定

(1) 計算手順

高瀬橋地点においてモニターされている定時観測データは、①流速流向の鉛直分布、②上層・下層塩素イオン濃度、③水位、の3項目である。これらの計測データと上述の解析によって得られた断面平均量との関係を用いて、高瀬橋地点の流量と塩分通過量の算定を行った。

(2) 計算結果

一例として、上記方法により計算された1997年11月の高瀬橋における水理量の経時変化を図-12に示す。符号は、流出を正、流入を負で表している。また、図には水位データもあわせて示している。

流速、流量ともに潮汐による水位変化に対応した変動を示し、大潮から中潮にかけて大きな逆流を生じるとともに、気圧や波浪の影響による河口水位の上昇時に大量の塩水流入があったことがわかる。また、前述の河道地形と河口断面の影響による順流速と逆流速の差異も、時系列に明瞭に現れている。

順流時、また逆流時においても進入した塩水フロントが高瀬橋に到達するまでは、高瀬橋地点の塩分濃度が約1‰と非常に低いいため塩分通過量は小さな値を示し、塩水フロントが高瀬橋地点に到達するとともに急激に大きな負値を示している。その後、逆流速の低下と順流への転流により塩分通過量は負から正へと変化する。この際、高瀬橋から湖口浅水域に流入した高濃度水塊が再び高瀬川を流下するために、順流に転じた後も高い塩分通過量を示している。その結果、1潮汐の間に小川原湖に貯留される実質塩分量は、流入流出塩分量の残差量で与えられる。

累加塩分通過量は、11月1日0:00を始点に塩分通過量の時間積分として計算され、正值は流出を、負値は流入（湖内への貯留）を表している。流出する湖水の塩分濃度が約1‰であるために累加塩分量は徐々に上昇するのに対し、逆流時には高濃度の外海水が流入するため、短時間のうちに急激に変化しているのが特徴的である。また、逆流時間が短い場合は、塩分量の僅かな変動となって現れているが、その変化は極めて小さいこともわかる。11月13日～19日には大量の塩水流入があり、最大約 2×10^9 kgもの塩分が湖内に貯留されたことが示されている。

図-13は、大量の塩水の流入があった期間の前後（11/6、11/25）に湖内最深部において計測された塩分分布である。水深17～21mの層で塩分濃度の増加がみられ、高瀬川より流入した塩水が淡塩境界付近に貫入したことが窺える。さらに、この塩分分布より湖水塩分の増加量は 1.41×10^9 kgと算定され、高瀬橋のモニターデータより得られたこの期間の累加流入量 1.65×10^9 kgとほぼ同程度の値を示し、本システムによる塩分量算定の妥当性が確認される。

図-14は、最深部での塩分観測データをもとに計算された湖水の全塩分量の年変動を示したものである。塩分貯留量は 10×10^9 kg程度の値を示し、塩分の流入流出により約10%の変動が生じている。

(3) 問題点と精度向上の方策

以上の解析により、断面内一地点における流速分布と塩分の観測により、高瀬川の流量算定が十分可能であることが明らかとなった。一方、塩分通過量

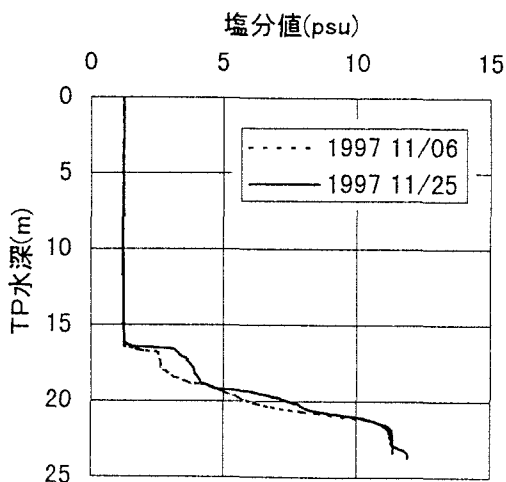


図-13 塩分分布の変化 (小川原湖最深部)

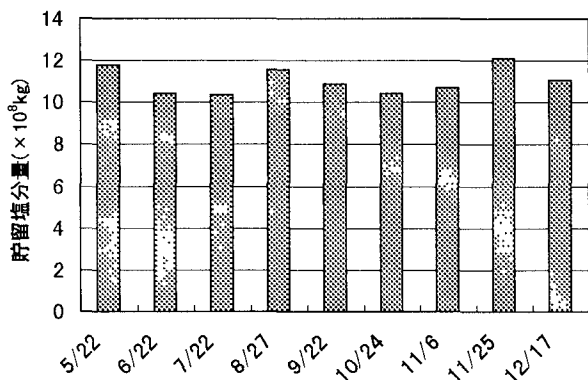


図-14 湖水塩分量の年変化

の算定においては、簡単のために2水深の平均濃度で断面濃度を代表させ、断面流量を乗じて塩分の通過量とした。そのため、上下層で流向が異なる場合には大きな誤差を生じる。上下層を分離して各層毎に通過量を求め、その合計をもって塩分通過量とすることが望ましい。さらに精度を向上させるためには、流速測定と同様に、塩分が多層観測が必要である。また、湖内の貯留塩分量の変化は時間積分によって算出されるため、塩分計の精度が結果に大きく影響する。特に、塩分計の分解能と低濃度における精度を向上させる必要がある。

5. 感潮河川の流量算定方法

高瀬川は感潮域に深大な汽水性の小川原湖を抱える感潮河川であるが、河道部における流況と密度構造は緩混合河川の特徴を示し、今回得られた流量算定手法は他の緩混合河川でも十分に適用が可能であると考えられる。ただし、流速計の設置点が場の代表点であることが要求される。順流逆流時に流況が異なるような強い湾曲部や河床地形が急変するような箇所は観測点としては不適である。また、流速計には非測定領域が存在するため1m程度の水深が必

要と言える。

塩水くさびが存在する弱混合河川の場合には、淡塩水の境界面位置で上下2層に分けた流量計算が必要なうえ、境界面位置(上層厚)の測定精度がそのまま流量の精度に影響を及ぼすため、水深方向に分解能の良い塩分観測が要求される。淡塩水境界面では、密度が急変するために音波の反射強度が増大する。そのため、流速と同時に計測される反射強度分布を利用して、境界面位置の感知と抽出が可能である。このように、弱混合河川では塩分が多層計測を行わなくても、超音波ドップラー流速分布計を用いれば流速と境界面位置の同時測定が可能である。実際に塩水くさびが存在する河口二層流場において、上下層の流量算定も試みられている⁶⁾。

強混合河川では、塩分濃度は水深方向にほぼ一様化しているため、水深方向に構造が急変することではなく高瀬川と同様のシステムを用いれば十分な精度で流量と塩分通過量の算定が可能と言える。

6. おわりに

観測データを基に、モニターシステムによる高瀬川感潮域の流量と塩分通過量の算定を試み、良好な結果が得られた。今後、データの蓄積による係数の精度向上やシステムの最適化により、流量の算定精度がより向上するものと考えられる。また、上述のようにこのシステムは、他の感潮河川における流量計測にも適用が可能であり、河川管理上最も重要な水理量である流量の算定が、感潮域においても可能になると考えられる。

謝辞: 本研究を実施するにあたり、建設省高瀬川総合開発工事事務所からは貴重なデータの御提供と観測に際し御高配を頂いた。記して感謝の意を表するとともに、本研究の一部は文部省科学研究助成の補助を受けて実施できたことを付記する。

参考文献

- 金子新・伊藤集通：ADCPの普及と海洋学的发展，海の研究，vol. 3, pp. 359-372, 1994.
- 杉山陽一 他：ADCPによる伊勢湾の流動構造調査，海岸工学論文集，vol. 42, pp. 1096-1100, 1995.
- 中辻啓二 他：陸奥湾の湾口部における密度構造と流れ，水工学論文集，vol. 40, pp. 467-472, 1996.
- 若岡圭子 他：湖沼・貯水池におけるADCP観測の問題点と誤差補正に関する研究，水工学論文集，vol. 41, pp. 1041-1048, 1997.
- 大森隆裕 他：ADCPを用いた河川湾曲部の密度流の計測，水工学論文集，vol. 41, pp. 1035-1040, 1997.
- 西田修三・吉田静男：ADCPを用いた河口二層流の観測，水工学論文集，vol. 41, pp. 1029-1034, 1997.
- 長尾正之 他：小川原湖への塩分侵入現象の確率統計的考察，水工学論文集，vol. 40, pp. 583-588, 1996.

(1998. 9. 30受付)