

ADCPを用いた河口二層流の観測

Measurements of Two-layer Flow System at River Mouth Using ADCP

西田 修三*・吉田 静男**

By Shuzo NISHIDA and Shizuo YOSHIDA

The velocities of two-layer flow system at the river mouth of the Ishikari River were measured by ADCP, which enable to estimate the river discharges. The present measurements show that the density interface can be discriminated from the profiles of echo intensity; hence the mean velocities and the resulting flow rates of upper and lower layer can be estimated correctly. The gradient Richardson number calculated from vertical profiles of velocities and densities changes every moment and the tendency is found to be different from that of the overall Richardson number. The measurements provide important results in analyzing stability and mixing at the density interface.

Keywords : field observation, salt wedge, density interface, ADCP

1. はじめに

全国の主要河川では、河川情報システムにより水位の経時データが採取され、H-Q曲線をもとに河川流量がかなりの精度で得られている。しかし、河口部感潮域では塩水の進入により水面勾配が極めて小さいことに加え、潮汐による水位変動の非定常性が強い。そのため、水位と流量に一価の関係が見出せなく、河口流現象の最も重要な因子である河川流量の把握がなされていないのが現状である。その結果、例えば、石狩川では数十km以上に及ぶ感潮域で、最も重要かつ基本的な水理量である河川流量の有意な経時データが得られていない。

近年、海洋学の分野では超音波ドップラー流速分布計(ADCP)による海流の計測が盛んに行われている。また、最近では土木工学や陸水学の分野においても沿岸域や閉鎖性水域の流況解析に利用されるようになり、その特性と有用性が明らかになってきた^{1)~5)}。そこで、本研究では、海域で使用されてきたADCPを用いて河口二層流場の計測を実施し、その適用性について評価・検討する。さらに、ADCPの反射強度特性を利用して流速と界面情報を同時に採取し、今まで得ることのできなかった河川供給流量と塩水流入流量の経時変化を捉えるとともに、無次元パラメタであるRichardson数の算定も行う。

* 正会員 工博 八戸工業大学助教授 工学部土木工学科
(〒031 八戸市妙字大開 88-1)

** 正会員 工博 北海道大学大学院助教授 工学研究科機械科学専攻
(〒060 札幌市北区北13条西8丁目)

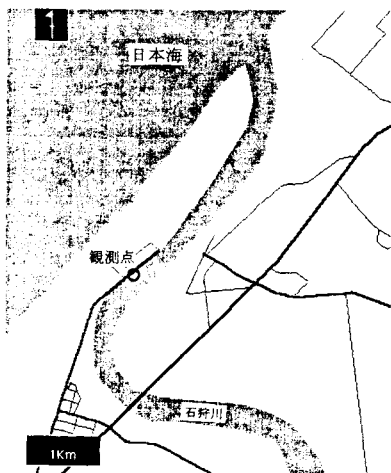


図-1 観測地点

2. 観測方法

計測は、これまでの現地観測によってその巨視的な水理特性が明らかとなっている北海道の石狩川において実施した。石狩川は渇水期には20 kmにおよぶ塩水の進入がある典型的な弱混合河川であり、また、河床勾配が緩く感潮域は40 km以上におよぶこともある。当初、観測は河口上流9 km地点の流心に設置された観測塔において実施する予定であったが、例年に比して塩水の進入長が短かったため、河口上流3.5 km左岸の栈橋を利用した観測に変更して実施した。ADCP本体を、岸から20 mの河床（全水深8.5 m）に設置し、96年7月16日～8月6日の21日間の計測を実施した。計測は、層厚0.25 m、発信間隔0.5秒の40回平均測定を150秒インターバルで行った。

3. 観測結果

3.1 ADCP計測データ

得られたデータは、平滑化と他の観

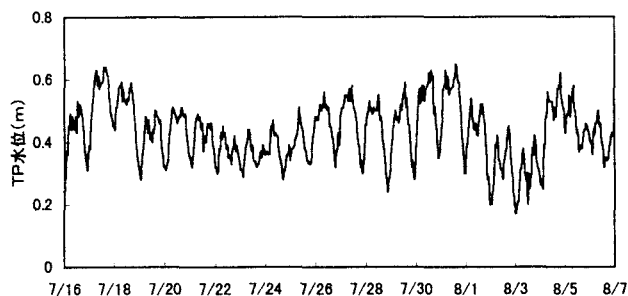


図-2 水位変動

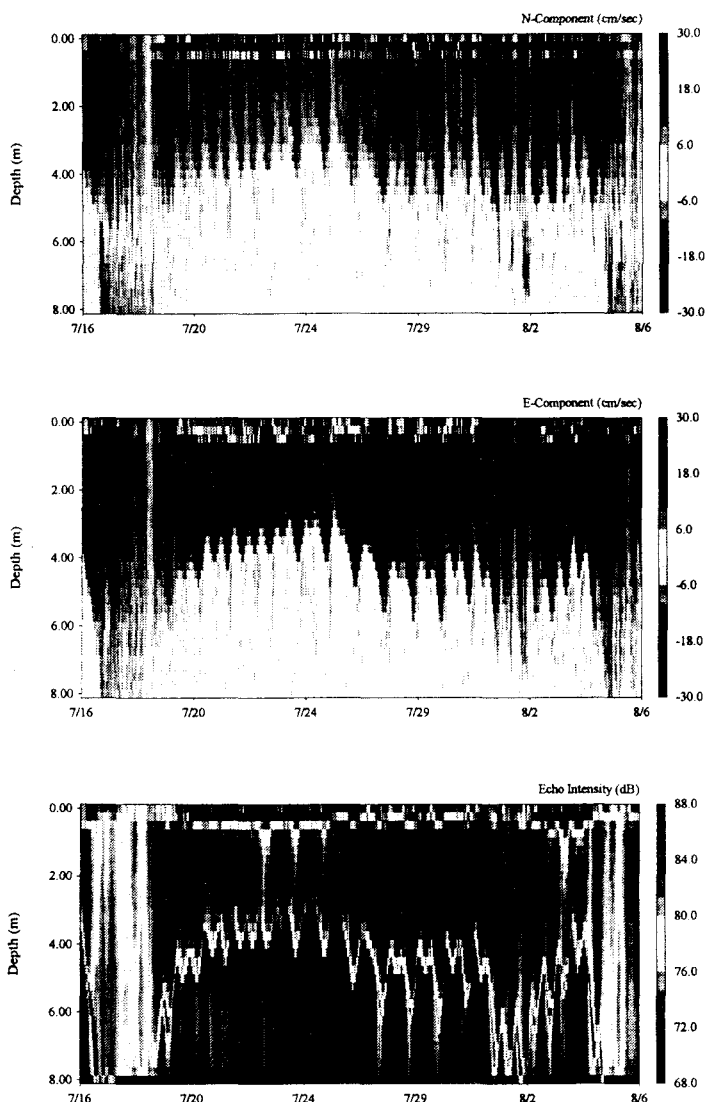


図-3 北方、東方流速および反射強度

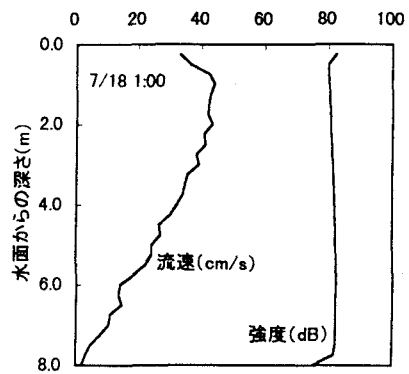
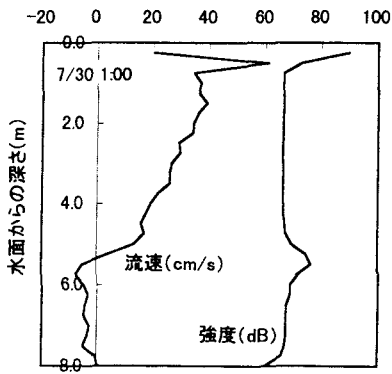


図-4 主流方向流速と反射強度の鉛直分布

測データとの併用のために30分（13データ）の平均化処理を行い、以下の解析に使用した。

図-2は観測点上流0.7 km地点で観測された水位変化、また、図-3はADCPにより計測された北方流速、東方流速、反射強度の経時変化である。反射強度は表面において最大値を示し、淡塩水境界面による反射強度の極大箇所が内部に存在していることがわかる。また、降雨出水のあった7月17日と8月5日には、全層にわたり

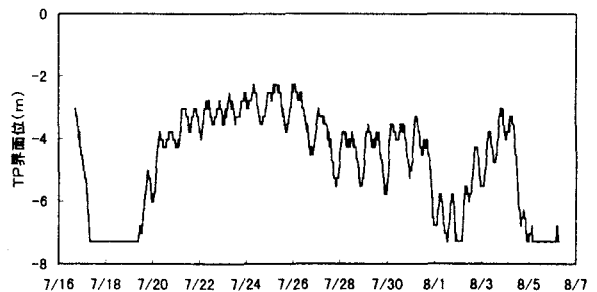


図-5 淡塩水境界面の変動

反射強度が増大し、境界面が消失していることもわかる。流速は上層内ではほぼ一樣に大きな値を示し、下層内で急激に低下しているようすもよくわかる。また、出水時には境界面の低下にあわせて流動層が底層に向けて広がっていることもわかる。図-4は、塩水層が存在する場合と、流出した場合の反射強度と主流方向流速の鉛直分布の一例を示したものである。音波の反射強度は、密度の急変箇所やSS等の浮遊物質濃度に関係して変化することが知られているが、今回の観測結果では淡塩水境界面において大きな反射強度を示しており、ADCPの計測により境界面の変動をも捉えることが可能であることがわかる。塩水層の流出時には、反射強度に際だったピークはみられず、全層にわたってSSの増加によると考えられる反射強度の増大がみられる。また、流速分布をみると表面付近で急変しているが、これはADCPの特性から生じるもので有意なデータではない。そこで、表面付近を除いて考えると、二層流場の流速は上層内においては境界面に向けて徐々に減少し、境界面付近で急激に流速を減じ、下層内では僅かな流動を示すにとどまり底面付近のシアも極めて小さいことがわかる。

3.2 淡塩水境界面の変動

淡塩水境界面において音波の反射強度が大きくなることを利用して、反射強度の鉛直分布より極大を示す水深を抽出し、界面位の経時変化を求めたのが図-5である。測定層厚が0.25 mのため、それ以下の小さな変動は捉えられないものの、出水による境界面の低下と塩水の再流入による上昇、さらに潮位変動に対応した振幅1 m以上におよぶ日周期変動のようすがよく現れており、十分な精度で境界面変動の抽出が可能であると言える。

3.3 平均流速と流量の算定

上述のように ADCP によって計測される流速は、水表面（上方から計測した場合）は底面）においてビーム角の関係でデータの精度が大きく低下する。そのため、ここでは表層部のデータを削除した解析を行った。図-6 は、水深 1 m 毎に描いた流速ベクトルの経時変化である。上層では流向が安定しほぼ河道に沿った流れを示しているが、下層では流速が小さく流向は安定していないことがわかる。図-5 に示した境界面変動のデータをもとに、流路方向の上層および下層平均流速を算出したのが図-7 である。また、図-8 は層厚と層平均流速より計算された上層と下層の単位幅流量の変化を示したものである。7 月 16 日の降雨により、流量は 3 倍近く急増したが、境界面の低下により流水断面積が増加し、その結果として平均流速は 1.5 倍程度の増加におさまっていることがわかる。降雨がおさまり流量の低下が始まっても、掃流された塩水層が再遡上するまでの期間、平均流速は低下を続け塩水フロントが到達する直前には 0.1 m/s にまで減少していることもわかる。また、平均流速、流量ともに潮汐の影響を受けた日変動と、さらに短周期の変動を有する強い非定常性を示し、短時間のうちに値が半減または倍増するほど大きく変動していることがわかる。

3.4 Richardson 数

上層厚と平均流速が求められたことにより、層平均 Richardson 数を算定することができる。図-9 は、塩水層が安定して存在

した期間の Richardson 数の変化を示したものである。なお、相対密度差は観測地点の上流 0.7 km (KP4.2) と下流 0.4 km (KP3.1) 地点で観測された電気伝導度より算出した。また、解析からは除外したが、出水後の塩水再進入時には、前述のように流速が小さく、上層厚が大きい非平衡状態が生じ、Richardson 数は極めて大きな値を示していた。供給流量が安定していても、図に示されるように場の非定常性により Richardson 数は大きく変動している。今回の観測期間では、Richardson 数は $3 \sim 12$ 程度の値を示し、平均値は 7.5 であった。ちなみに、Froude 数に換算するとその平均値は 0.37 となる。ADCP による計測では、流速の鉛直分布が得られるため、境界面の安定性を表すパラメタである勾配型 Richardson 数の算定も可能である。図-9 には、層平均 Richardson 数と併せて勾配型 Richardson 数の経時変化も図示した。なお、ここでは上層

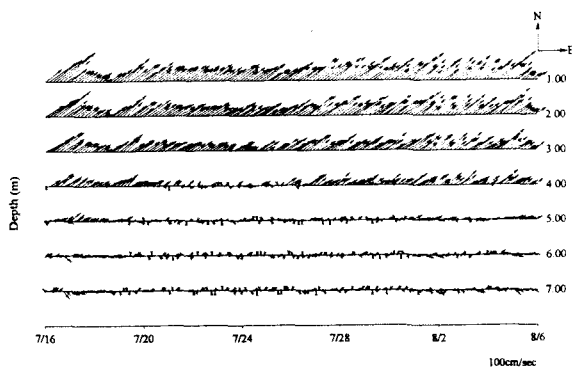


図-6 流速ベクトルの変化

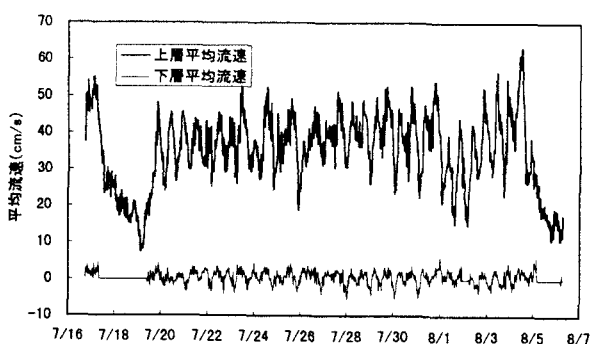


図-7 平均流速の変化

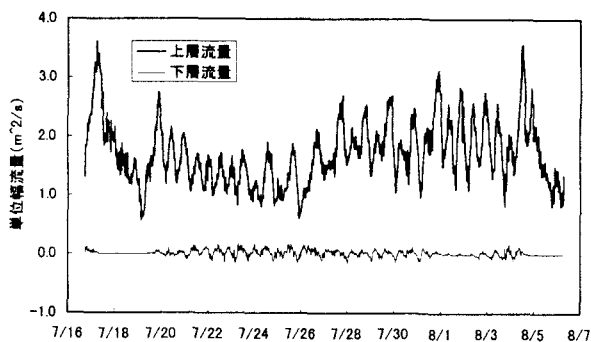


図-8 単位幅流量の変化

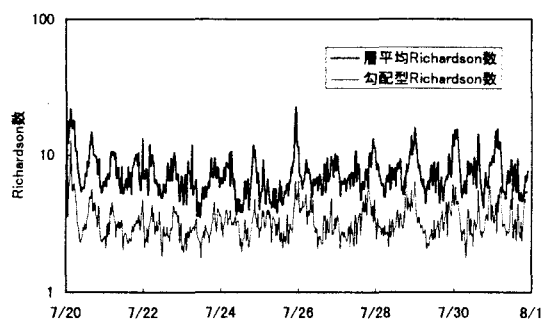


図-9 Richardson数の変化

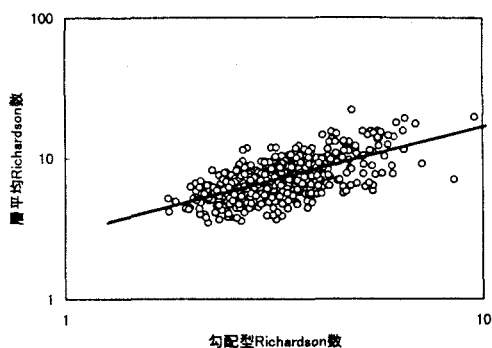


図-10 Richardson数の関係

内水深 1 m と下層内 1 / 3 水深の流速差の 1 / 2 を速度スケールに、また、境界面における流速勾配を用いて得られる流速遷移層厚の 1 / 2 を長さスケールとして、勾配型 Richardson 数を定義している。勾配型 Richardson 数は 2 ～ 5 程度の値を示し、塩水くさびの室内実験とほぼ同程度の範囲にある。また、大域的な量である層平均 Richardson 数と局所的な量を含んだ勾配型 Richardson 数の関係を示したのが図-10 である。両者には線形の相関関係がみられるものの、散乱は大きい。これは、流速分布形状が時々刻々と変化し、大域的なスケールが同じであっても、局所スケールの値が種々変化するためである。ゆえに、せん断型の境界面破壊現象の詳細を議論するような場合にはスケールの取り方に注意を要する。

3.5 連行係数

観測地点の上流 0.7 km と下流 0.4 km 地点で観測された電気伝導度計のデータをもとに、1.1 km 区間の塩分拡散量を求め、上層平均流速を速度スケールとした連行係数を算定してみた。通常、連行係数は Richardson 数の関数として表されると考えられている。そこで、連行係数 E と層平均 Richardson 数 Ri の関係を求めたのが図-11 である。やはり散乱が大きい、概ね右下がりの傾向が認められる。一般に淡塩水の場合には $-3/2$ 乗に比例することが多くの研究によって明らかにされている。そこで、 $E \cdot Ri^{1.5}$ の経時変化を調べたのが図-12 であり、定数とされる比例係数の変動を示している。係数は $10^{-4} \sim 10^{-3}$ の範囲で変動しているが、平均して 0.0005 程度の値を示しており、塩水くさびの場合に提案⁶⁾されている 0.002 に比してかなり小さい値となっている。河川流が本来もっている連行能はそれほど小さくなく、実河川では河床地形や構造物、さらに風や波浪等の気象因子による影響がかなり大きいものと考えられる⁷⁾。

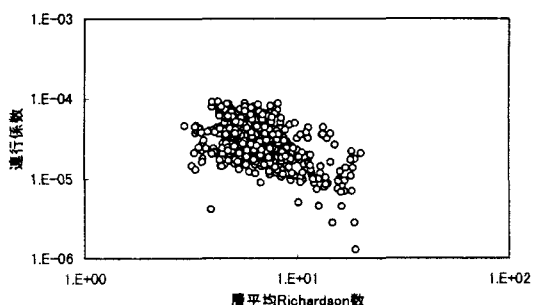


図-11 連行係数とRichardson数の相関

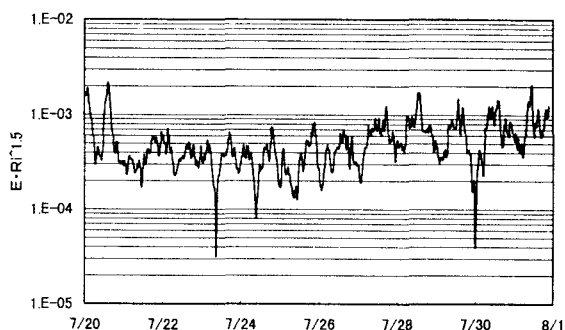


図-12 連行パラメタの変化

3.6 問題点

ADCPを用いた今回の観測において生じた計測および解析上の問題点をまとめると以下ようになる。

- ①ADCPの特性上、河床に設置した場合は設置水深の約10%にあたる表層部では有意なデータは得られず、表層部の流動解析には利用できない。
- ②さらに、表層部では波動等の影響によりさらに有効層数が減少する。
- ③センサー直上約0.5m（発信周波数に依存）は計測できない。そのため、底面近傍の流速データの採取は難しい。
- ④センサーをほぼ鉛直に設置する必要がある、河床に固定する場合にはその姿勢の確認が必要である。
- ⑤出水時の流失を防ぐために強固に固定する必要がある。
- ⑥生データは変動が大きく、ある程度の平均化処理が必要である。

4. おわりに

ADCPを用いた河口二層流の観測を実施し、境界面情報の抽出と今まで得ることのできなかった淡水流量の経時変化を捉えることができた。このことは、河道部横断面内の代表点においてADCPによる連続観測を行うことによって、感潮域においても精度の高い流量の把握が可能なることを示唆し、河川管理上大きな意味をもつと考えている。また、Richardson 数等、大域のおよび局所的な水理量の算定も可能であり、理論解析や室内実験によって得られている多くの知見の検証も可能になると思われる。今後、さらにデータの蓄積と解析を進め、感潮域における最適な流量観測システムの構築や密度流現象の解明に向けて、ADCPの利活用と評価を続けていく予定である。

本研究を進めるにあたり、八戸工業大学環境工学研究室の学生諸君の多大な助力と、(株)福田水文センターの御協力をいただいた。また、本研究の一部は文部省科学研究補助金（基礎研究（A）：代表 東北大学澤本正樹教授）によってなされた。ここに、記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- (1) 金子新・伊藤集通：海の研究，vol.3，pp.359-372，1994.
- (2) 杉山陽一 他：海岸工学論文集，vol.42，pp.1096-1100，1995.
- (3) 中辻啓二 他：水工学論文集，vol.40，pp.467-472，1996.
- (4) 藤井智康 他：陸水学雑誌，vol.55(1)，pp.1-6，1994.
- (5) 藤原建紀 他：海洋調査技術，vol.1(1)，pp.57-65，1989.
- (6) 土木学会：水理公式集，p.62，1985.
- (7) 西田修三 他：水工学論文集，vol.40，pp.487-492，1996.