超音波ドップラー流速プロファイラー (ADCP) を用いた 感潮水域における流動観測例

藤井 智康・吉村 亮・三村 敬・奥田 節夫・横山 康二

Test Application of Acoustic Doppler Current Profiler to Current Measurements in Tidal Water Areas

Tomoyasu FUJII, Makoto YOSHIMURA, Takashi MIMURA,
Setsuo OKUDA and Koji YOKOYAMA

Abstract

An Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) recently developed to measure current distribution in the ocean based on the Doppler shift principle has been tested for limnological studies. We had a chance to test the ADCP in brackish lakes, Nakaumi and Shinjiko, and a tidal river Ohashigawa on 25~27 Aug. 1992, and succeeded in continuous measurements of current distribution in those water areas.

From our test observation, we found that the employment of ADCP in tidal water areas is very effective for rapidly recording current patterns in stratified double layers.

However, ADCP is not so applicable to measurements in shallow water areas or weak current fields, because we cannot measure currents in the layers near the water surface and bottom due to limitations in the acoustic method, and we found that a low current speed relative to navigational speed may result in a large error.

Key words: ADCP, current measurement, brackish lake and tidal river, current visualization

1. はじめに

湖沼・河川において水の流れの場の空間的分布や時系列変化を細かく追求するためには、従来の流速計を用いての定点観測や航走観測では、多数の流速計を用いた同時多点連続観測や観測船による移動観測の繰り返しが必要であった。

しかし、現実的には人力的・経費的な制約あるいは航路上の船のひんぱんな往來のために、近年では長時間にわたる定点観測あるいは航走観測の実施はきわめて困難な場合が多くなってきた。

そこで、最近開発された超音波のドップラーシフトを利用した流速計である超音波ドップラー流速プロファイラー (Acoustic Doppler Current Profiler; 略称 ADCP) の利用が注目されてきた。

この方法によると、瞬時に鉛直方向の多層にわたる流速の3成分を測定して、水域の三次元的流

れの流れを調べることが可能である。このため近年海洋観測において、大洋や海峡などの強流域の海流および潮流の分布また海水の交流状態などを対象とした可視化あるいは迅速な数値データの処理を可能にし、ADCPが有効な手段であることが確かめられている (高杉ほか, 1987, 1990; 藤原ほか, 1989)。

しかしながらこの手法を沿岸や内陸の感潮水域で適用することは未だ行われていなかった。このため、われわれは今回中海、宍道湖および大橋川で ADCP を利用しての流れの場の観測を実施し、その適用の効果あるいはその問題点を調べた。

なお、ADCPの測流原理についてはすでに海洋学分野の文献 (例えば高杉ほか, 1987; 藤原ほか, 1989) に紹介されているので記述は省略し、われわれの試みた感潮水域での観測の方法と成果についてのみ報告する。

Fig. 1. Map of Lake Shinji, Lake Nakaumi and Sakai channel. Dotted lines of map show ship tracks for current measurement with ADCP. Measurement results along lines 1~3 are shown in Figures 2~5.

2. 観測地点および観測方法

Figure 1 に示すように、中海は長さ約 7.5 km の境水道を通じて日本海とつながり、また中海・宍道湖は長さ約 7.7 km、平均水深 4.5 m の大橋川によって結ばれており、これらの水域は連系汽水域を構成している。

この水域における流れの観測は、島根県および岡山理科大学の調査グループによって施行されているがまとまった資料としては未だ報告されていない。これまでの経験によると、長い測線に沿って流速の鉛直分布を従来の流速計を用いて測定するには長い時間を要し、時間的に変動の速い感潮水域での変動特性を捉えることはきわめて難しい。

そのうち大橋川においては潮汐とともに往復流が発生し、中海、宍道湖の塩分分布の差のために両水域の水の接触混合によって複雑な流速分布を呈している (吉村, 1993)。

そこで特定の測線に沿った航走によって流れのパターンを短時間に測定できる ADCP の利用を試みた。

観測は、1992 年 8 月 25 日に中海 (5 測線)、26 日に大橋川 (1 測線 3 回)、27 日に宍道湖 (3 測線) において、米国 RD Instruments 社製の ADCP を用いて行われた (Fig. 1)。測定精度は $\pm 2 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度である。

この観測測線の選択は島根県水産試験場の今後

の水域調査計画を配慮して定められた。

ADCP の取付けについては、穏やかな水域で小回りのきくよう、今回は船の舷側に取りつける方法を採用した。

ADCP トランスデューサー発信音波は 1200 kHz で、発信のインターバルを 4.5 sec とし、測定は水深 1.16 m 以深を 0.5 m 間隔で 1 地点 44 層の記録を行った。つまり、水深 23 m まで測定可能である。これは、ADCP データ管理・処理プログラム “Transect” により各水域の観測航路の水深変化を考慮し、試験的に設定を行った。

水深の上限で 1.16 m とした理由は、ADCP の反射時間の短い表層部分 (水深約 1 m) で測定不可能なためである。また一般に水底からの乱反射によるビーム強度増大によって音響ビームの鉛直方向からの傾きが 30° のとき $H \cos 30^\circ = 0.8 H$ (H : 全水深) 以深の底層部分で測定できない。観測において航走速度は平均 4 ノット (約 $2 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}$)、従って 4.5 sec 間隔のパルス発信によって約 9 m 間隔でデータが得られる。また生データではその数が非常に多く図化するのに非常に手数がかかるので、データは航走距離に応じて 10~50 個のデータの平均を行い図化した。

原理的に測定できない表層付近のデータは、他の観測船が ADCP 観測船に併行して航走し、アレック電子製電磁流向流速計 (測定精度 $\pm 0.5 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$) を用いて測定した。また底層のデータは、水底で流速ゼロとなるように線形補間を行っ

た。

電気伝導度測定には塩分・水温・水深の同時測定を行うアレック電子製メモリーSTD (Salinity, Temperature, Depth meter; 測定精度: 水温 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$, 塩分 $\pm 0.05\%$, 深度 $\pm 0.11\%$)を用い, アレック電子データ処理プログラムにより電気伝導度(測定精度: $\pm 0.1\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)に換算される。また, 航走中の現在位置は, 全地球測位システム (Global Positioning System: 略称 GPS)を用いて決定し, この測定精度は, この水域では15 m程度である。

3. 観測結果

3-1. 大橋川

宍道湖と中海とをつなぐ大橋川は, 両湖の水位変動や塩分分布の影響を受けて複雑な流動を示す。特に宍道湖からは流れ出る淡水と中海から遡上する塩水の混合によって, 強混合状態, 緩混合状態, 弱混合状態あるいはそれらが全て出現する複合混合状態とも言うべき状態がしばしば観測される(島根県衛生公害研究所, 1991; 吉村, 1993)。

また, 大橋川を遡上する塩水の挙動は, 宍道湖

Fig. 2. Velocity distribution map with ADCP analysis along line 2 at R. Ohashi (shown in Fig. 1) on 26 August 1992. Positive values of velocity correspond to the direction from L. Shinji to L. Nakaumi in line 2 (shown in Fig. 1).

に供給する塩分フラックスを決定する重要な要因である。その挙動を知るためには大橋川の詳細な電気伝導度分布状況・流速分布状況を迅速に観測しなければならない

われわれは、1992年8月26日に3回にわたり大橋川を縦断して ADCP による流速観測を行ない、同時に他の一隻の観測船が ADCP 観測船に併行して航走し、STD を用いて電気伝導度分布状態を観測した。ADCP 観測結果に上層部分では電磁流向流速計測定データを加え、水底の流速をゼロとして線形補間を行った結果を Figure 2 に示し、電気伝導度分布図を Figure 3 に示す。宍道潮大橋下 (Fig. 1 の Pt. S) の水面を原点とし横軸に宍道湖から中海に向かう河道に沿った航走距離 (km)、

縦軸に水深 (m) をとった。

流速分布図では河道に沿って宍道湖から中海に向かう流れを正值 (プラス) に、中海から宍道湖に向かう流れを負値 (マイナス) に示した。

Figure 2 によると、時間経過とともに徐々に流向が逆転してゆく様子がわかる。1 回目の観測では中海側の下層部分にのみ負の流速値を示す領域が存在し、2 回、3 回目の観測でこの領域が中海から宍道湖に範囲が広がってゆき、水塊が遡上していく過程が観測された。

同時に観測した電気伝導度の分布図 (Fig. 3) によると、1 回目の観測では中海側の下層に高い値 $30 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ (塩分濃度に換算するとほぼ 17 ‰) を示しているが、2 回目、3 回目になるにしたがい徐々に高い電気伝導度を示す部分が底に沿って楔状に宍道湖に向かって遡上していることが分かる。

電気伝導度分布と流速分布図を対比すると、1 回目の観測では高塩分水が存在する部分において流速の負値が対応し、淡塩水混合部分 (7~8 km 付近) においては密度躍層の存在が確認できる。しかし、2 回目、3 回目の観測では流速の“マイナス”域と高い電気伝導度を示す部分は一致していない。

このことは、大橋川を遡上する塩水は、まず中海側入口の下層においては鉛直混合の程度が弱い塩水楔を形成するが、塩水が遡上するにしたがい、次第に大橋川全体の流れを弱め、低い電気伝導度を示す低塩分水を宍道湖に押し戻しながら徐々に塩水が遡上することを示している。

大橋川における塩水挙動を知るために行ったわれわれの従来の観測では、電気伝導度分布を重視して、鉛直混合の程度の異なる状態が大橋川内に同時に存在し得ることを指摘しているが、流速分布が解明できた今回の ADCP 利用の観測によって、新たな視点から大橋川の淡塩水の往復流を捉える可能性が示された。

3-2 中海・宍道湖

中海での観測の一例として、大根島亀崎沖 (Fig. 1 の Line 1 の西端 Pt. D) から米子空港沖 (Fig. 1 の Line 1 の東端 Pt. Y) に向かう測線沿いの上げ潮時の観測 (Fig. 4) では、測線の西端付近で全体的に流速ゼロの領域が存在し、測線の東端に近づくにしたがって流れが強くなり、また水深が深くなる東端で流れも特に強くなっていることが認められた。

これは、測線の西端付近は島や岩礁の影響で水の運動が妨げられているのに対して、測線の東端

Fig. 3. Electric conductivity distribution measured with STD along line 2 of R. Ohashi (shown in Fig. 1) on 26 August 1992.

Fig. 4. Velocity distribution map with ADCP analysis along line 1 in Lake Nakaumi (shown in Fig. 1) on 25 August 1992. Positive values of velocity correspond to the direction of arrow in line 1 (shown in Fig. 1).

Fig. 5. Velocity distribution map with ADCP analysis along line 3 in Lake Shinji (Shown in Fig. 1) on 27 August 1992. Positive values of velocity correspond to the direction of arrow in line 3 (shown in Fig. 1).

は水深が深く湖岸地形も平滑で流水に対する抵抗が少ないためと考えられる。

宍道湖での観測の一例として、宍道湖湖心を南北に横断する測線 (Fig. 1 の Line 3) 沿いの観測で、中央部と湖岸付近で流れが逆向きになっていることが認められた (Fig. 5)。

これは恐らく斐伊川の河川流入による流れ、風

の吹走作用および潮汐干満による流れとが結びついて湖内にいくつかの環流が形成されていることを示唆するが、その確認は今後の調査をまたねばならない。

4. ま と め

以上のような観測例から分かるように、ADCPを用いると従来の流速計による測定と異なり、比較的短時間にかなり広い水域の流速の空間的分布を測り得ることができる。

今回の観測より ADCP を利用した湖沼・河川における流速分布測定の利用点と欠点は次のようにまとめられる。

(1) 流速の空間的変動が激しい場所やかなり広い水域では、空間的に連続した航走観測によって、場所的特異性がその場で明らかとなる利点がある。

(2) 湖沼・河川において、現在可能な ADCP の装置では底層 (水深 80% 以深) と水面近く (水深約 1 m) の流速が測定不能であり、浅水域での測定範囲がかかなり限定される。(ただし、ビーム角度の減少によってこの範囲を広げることは可能)

また、測定精度が $\pm 2 \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$ 程度のために弱流に対しては大きな相対誤差を生じる。

摘 要

最近開発された超音波ドップラー流速プロファイラー (ADCP) は、海洋観測においては実用化されているが、陸水学的研究にはいまだ利用されていない。われわれは、1992 年 8 月 25 日～27 日にわたって、汽水湖である中海、宍道湖、および感潮河川である大橋川において、ADCP を流速測定のために試行的に利用する機会を得た。今回の ADCP を用いた試験的観測結果によって、迅速かつ連続的な測定が可能であり、とくに成層構造をもった二重層の流れを記録することが出来るという点で、このような水域での観測にはきわめて効果的であることが認められた。また、この方法は、簡単なデータ処理によって、流れのパターンを可視化するのにも非常に便利である。ただし、この方法は表層と水底近くでの測定が不可能であり、また船速に対して弱い流れの場では測定誤差が大きくなるので浅い水域や流れの弱い場では有効に利用できない。

文 献

FUJIWARA, T., Y. TAKASUGI and T. HIGO (1989): Visualization of flow in coastal waters with Acous-

tic Doppler Current Profiler, Jour. Japan Soc. Mar. Surv. Tech. 1, 1: 57-65.

TAKASUGI, Y., T. HIGO and H. NOGUCHI (1987): Characteristics of velocity distributions in a strait: Current measurement by Doppler Current Profiler, La Mer, 25: 167-174.

島根県衛生公害研究所(1991): 大橋川における栄養塩フラックス調査報告書

吉村 亮(1993): 感潮河川における塩水の遡上について. 岡山理科大学大学院理学研究科修士論文

(著者: 藤井智康・吉村 亮・三村 敬, 岡山理科

大学大学院理学研究科, 奥田節夫, 岡山理科大学理学部, 〒700 岡山市理大町 1-1; 横山康二, 京都大学防災研究所, 〒611 京都府宇治市五ヶ庄; Tomoyasu FUJII, Makoto YOSHIMURA, Takashi MIMURA and Set-suo OKUDA, Faculty of Science, Okayama University of Science, 1-1 Ridaicho, Okayama, 700; Koji YOKOYAMA, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Gokasho Uji, Kyoto, 611)

1993 年 5 月 14 日 受付

1993 年 10 月 1 日 受理