20 河口二層流界面の可視化観測

北大工学部 吉田 静男・田城 徹雄

Flow Visualizations of the Interfaces in Two Layer
Flows of Ishikari and Teshio Rivers

Shizuo YOSHIDA * and Yoshio TASHIRO *

Interfacial phenomena in the two layer flow at the Ishikari River and the Teshio River were visualized through a dye method and an ultrasonic technique. In the former, Uranin solution and halogen light source were used. This method has been successful for observations of the flow near the interface and small scale interfacial breaking. Since the dispersion of dye line was weak, it was also possible to observe small interface displacements. The latter was very useful for observations of interfacial gravity waves and salt wedge shape. From sonographs obtained by this method the existences of Thorpe's waves, interfacial wave packets and large scale interfacial breaking caused by river bed roughness were confirmed.

1. はじめに

河口二層流は河川水が海に流出すると河口付近に形成される成層密度流であり、特に石狩川の様に潮位差の少ない内海に流入する河川の河口部においては、明瞭な密度界面を持つ典型的な形態が見られる。このとき河道水路内に存在する塩水層をその形状から塩水楔と呼んでいる。この水理現象は、河口付近で農・工業用水の取水を行なうときに生じる塩害等を防止する目的で早くから研究されてきた。⁽¹⁾ 他方、河口二層流の界面現象は安定性理論上興味ある物理現象として研究報告が相次いでいる。著者等はこの界面現象について実験的及び理論的研究⁽²⁾⁽³⁾を行ない、併せてフィールド観測⁽⁴⁾を行ってきた。これ等の研究の進展によって界面現象が解明されるにつれて、特に界面不安定破の発生形態と界面破壊の構造が同一の大域的物理量の下においても、水理模型実験と実河川とでは著しく異なることが明らかとなった。この研究にあたって、従来フィールド観測に用いられていた測定器機では実河川の界面現象を観測すると重大な限界性を持つため、著者等は独自に測定器機を設計製作し可視化観測システムを構成した。この観測手段を用いたフィールド観測によって河口二層流界面の可視化観測に成功したので報告する。

なお、河口二層流界面の今一つの可視化法ともいえる超音波探深機の出力図をフィールド観測で得ている。本論文では、可視化観測と関連するより巨視的な河口二層流の界面現象についての観測結果を述べる。

Fig. 1 Two layer flow system at the river mouth under the condition of small tide range

* Faculty of Engineering, Hokkaido University, North 13 West 8, Kitaku 060 Japan

2. 河ロニ層流界面の可視化観測システムとフィールド観測

著者等⁽⁵⁾は1979年に水中TVカメラを試作し、河ロニ層流界面の可視化観測を試みた。観測を行なった河川はいづれも河川水が著しく濁っており界面下の塩水は通常1m程度の透明度があるものの、照明なくしては界面を観察することは不可能である。そこでFig-2に示す様に、水中TVカメラ、スリット光源、色素液流出ノズルを配置して可視化装置の水中部分を構成した。水中TVカメラはカラーであることが解像上望ましく、スリット光源は細管ハロゲンランプを用いて製作されており、色素はウランを用いている。また、この可視化装置の支持方法は幾通りか試みたが、著者等の製作した観測塔により絶対静止系から観測することが可能となり遠隔操作を行なっている。Fig 3へちは、この可視化観測システムによって初めて得られた奥河川の河ロニ層流界面の可視化画像の写真である。

Fig-3においては、界面表が伝播するとき、界面付近に絶対静置したノズルから流出する色素液の流跡が映し出されている。色素液は界面に沿って流れ、しばしばその流跡が破断する。しかしこの場合、色素の流跡は流線を表わして居らず、従って渦はどの様な流線の破断、即ち、界面破壊を示す画像では無いことに注意しなければならない。このときの主流の流速は60cm/sec以上にも達するが、界面は一樣に安定である。

他方、Fig-4に見る様に、長表長界面重力波の破断が観測されており、奥河川における界面破壊の一端を伺い知ることができる。

Fig. 2 Waterproof TV camera capsule and position control system

Fig. 3 Dye line affected by interfacial gravity wave

Fig. 4 Breaking stage of interfacial gravity wave

Fig. 5 Dye cloud spreaded on weak mixing interface

Fig-5は、界面付近の流速が数cm/sec程度であるところの安定した界面の再生画像の写真であり、不定定波は勿論見られない。

しかし、このとき界面位が非常に長い周期の変動をするこ

とが見出された。この界面位変動をTVの再生画像から読み取り、実空間スケールに変換して出力したのがFig-8である。その変動は±6cmで、約30秒程度の卓越周期が見られる。

ここで、この界面位変動が、長波長の界面重力波の振幅に相当するものであると仮定すれば、その波動が上層流に反ばす速度変動量 u_1 を次の理論式によって知ることができる。

$$u_1 = \frac{1}{\beta - 1} \cdot \frac{C_i}{h_1} \sum_i \cos K(C_i t - x) \quad (1)$$

$$C_i^2 = g h_1 \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \quad (2)$$

ここに、 $\beta = C_i / g h_1$ であり、 C_i は界面重力波の伝播速度であり、 h_1 は層厚、 ρ は密度であり、添字1,2はそれぞれ上層と下層に対応する。試算を行なうと $u_1 = 2.0 \cos K(C_i t - x)$ cm/secとなり、 $C_i = 70.8$ cm/secである。

この試算結果を、同様の流況時に計測したフィールド用LDVによる界面付近の流速データと比較検討した。Fig-6に示すのがその流速データであり、その流速変動の域値は上に示した計算結果とよく一致する。一方、Fig-8の界面位変動のデータについてその変動成分のパワースペクトルを求めたのがFig-9である。同様にFig-6の流速変動データについてその変動成分のパワースペクトルを求めたのがFig-7である。

Fig. 8 Oscillogram of interface displacements read from reproduced images

Fig. 6 Oscillogram of velocity measured by LDA probe

Fig. 7 Power spectrum of velocity

Fig. 9 Power spectrum of interface displacements

両者のパワー・スペクトルは、いずれも $2 \sim 4 \times 10^{-2} \text{ Hz}$ 付近にスペクトルピークを持っている。従って、この界面位変動と流速変動とは、外洋のうねりに起因し河口から逆戻りする界面重力波によるものである可能性を指摘することができる。しかし、なお分明ではない。

3. 超音波探査機による河口二層流の観測

超音波探査機による河口二層流の観測は福島⁽⁷⁾等によって行われていたものを嚆矢とするが、この観測方法は二層流の巨視的の構造を研究するのに適している。

Fig-10 の出力図 (a), (b) は定常観測により、(c) は航行観測によって得たものである。(a) は洪水流量時の石狩川河口で観測された K-H 不安定による巻波である。(b) は天塩川で観測された界面重力波の wave packet であり、その存在形態と伝播の様子が分る。(c) は、吉田によって発見された実河川でのみ見出される界面破壊現象であり、界面近傍に達する河床の突起などの後方にカルマン渦の効果によって発生するものである。

Fig.10 Sonographs obtained at the following distances from the river mouth and dates: (a) 0 km, 31st Aug. 1982; (b) 0.1 km, 17th Sep. 1982; (c) 3.5 km, 29th Aug. 1982.

4. まとめ

河口二層流の界面現象について、可視化観測システムと超音波探査機を用いてフィールド観測による解明を行ない、新たな諸事象を見出し、可視化観測の有効性を立証した。また、水理模型実験の諸結果と比較検討するとき、実河川の主流は発達した乱流場を持つにもかかわらず界面は非常に安定で、河口付近にわずかに K-H 不安定波が見出されるのみであり、水理模型実験において種々の不安定波が発生しその破壊によって容易に界面が破壊されるのと著しく異なっている。著者等はこの問題を解明しつつあるが、安定性理論及び流体力学的相似則においても重要な課題となることが予想されている。

< 文 献 >

- (1) 柏村正和;「河川下流部における塩水の影響」, 水利科学, No.74, pp.1~20, 1970
- (2) 田城徹雄・吉田静男;「河口二層流における主流の乱流構造と界面現象」, 第30回水理学講演会論文集, pp.580~584, 1983
- (3) 西田修三・吉田静男;「二層流の安定限界」, 第27回水理講演会論文集, pp.549~553, 1983
- (4) 吉田静男・谷藤康道;「天塩川河口二層流と潮汐」, 第28回水理講演会論文集, pp.51~57, 1984
- (5) 吉田・谷藤・田城・西田;「弱混合河口二層流の特性」, 第26回水理講演会論文集, pp.507~512, 1982
- (6) 田城・吉田・米谷;「成層密接流における界面波の発生機構」, 第27回水理講演会論文集, pp.523~530, 1983
- (7) Fukushima, H., M. Kashiwamura, I. Yakuwa, and S. Takahashi, 1964, A study on salt water wedge at river mouth by ultrasonic method, Coastal Engineering in Japan, 7, 101-107.