

シュリーレン法による内部波の可視化とその特性について

大阪大学工学部 正員 室田 明
大阪大学工学部 正員 平田 健正
大阪大学大学院 学生員 道奥 康治

1. はじめに：成層密度流の界面連行は当然のことながら界面を通し，下層から上層へ，或いはその逆方向になされる．その為界面に発生・発達する内部波が界面連行を支配しているのは明白であり，筆者らは内部波の régime毎に連行量および界面抵抗係数を整理することを提案してきた¹⁾．そこで本研究はシュリーレン法を用いて界面近傍を可視化し，内部波の挙動を調べ，界面連行の解明の一助とするものである．

2. 実験装置と方法：実験に用いた水路は前報¹⁾と同じで，密度差 $\varepsilon (=1-\rho_2/\rho_1)$ は $0.017 \sim 0.024$ の4ケース，内部フルード数は $0.41 \sim 0.56$ の範囲である．流速分布は水素気泡法により，内部波形はサーボ式水位計で測定した．

シュリーレン法は光の回折現象を利用して密度分布を有する流体を可視化するものである．本実験に用いたシュリーレン装置を図-1に示す．点光源（ハロゲンランプ）より発した光束は，凹面鏡（150中， $f=100\text{cm}$ ）で反射し被写体を通過する．被写体の密度差により光の屈折率が異なる為，凹面鏡の焦点上に置かれた刃先で幾何光学的像が遮断され，回折像だけが通過し，フィルム面上に密度差が明暗の縞として記録される．本実験のシュリーレン装置の可視化範囲は直径6cmの円形であり，0.5秒毎に撮影を行なった．

3. 内部波形の特性：サーボ水位計より得られた内部波時間波形を図-2に，シュリーレン写真を写真1・2に示す．図-2より周期3～5秒の内部波とそれに重畳した周期1～2秒のカスプ状の短周期波が見られる．シュリーレン写真によれば，前者の長周期波は波長が2～5cmで，波速はせいぜい3cm/sec程度である．さらに，かなり大きい波形勾配（0.2～0.4）を有しているエネルギー含有波にもかかわらず波速も一定せず，その寿命時間は数秒から10秒程度で，その間に発生→成長→減衰を繰返し，本実験の範囲ではそれ以上発達することはなかった．また頂は平らで谷は深く一般の重力波の性質とは著しく異なる．特に谷で上層の淡水を下層の上流側へと巻き込み，模式的に示せば図-3の様である．この図を見る限りでは Crapper²⁾らが理論的に誘導した

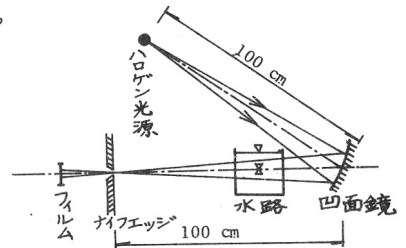


図-1 シュリーレン装置

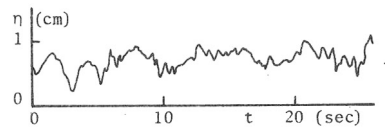


図-2 内部波時間波形

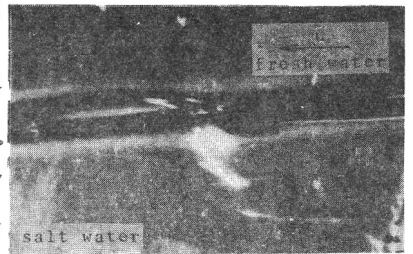


写真-1



写真-2

表面張力波と形状および特性が酷似しており、以後この内部波を *internal capillary wave* と名付ける。一方、短周期波は波速が $6 \sim 7 \text{ cm/sec}$ かそれ以上あり *internal ripple* と呼ぶ。

4. 表面張力波の適用: Crapper は重力効果を無視し、表面張力波の厳密解を求め、波速 C を次式で示した。

$$C = (2\pi\Gamma/\rho\lambda)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + \pi^2 a^2/4\lambda^2)^{-\frac{1}{4}} \quad (1)$$

ここに、 Γ : 表面張力, ρ : 密度, a : 波高, λ : 波長である。また Antonoff の法則³⁾によれば、表面張力 γ_A , γ_B を有する液体の界面張力 Γ は次式で与えられる。

$$\Gamma = \gamma_A - \gamma_B \quad (2)$$

さらに、淡水の表面張力は 74 dyne/cm であり、35% の塩水の表面張力は 76 dyne/cm であるので本実験の上層と下層の界面に働く張力は(2)式より $1 \sim 2 \text{ dyne/cm}$ と考えられる。そこで、 $\Gamma = 1.5 \text{ dyne/cm}$ として(1)式より得られる波速 C_i と実験の波速 C_o を比較したのが図-4である。実験の波速は頂が明確でないため谷の移動速度を波速とした。図からわかる様に C_o と C_i は若干のばらつきはあるがかなり良く一致している。理論波形は図-3に破線と併記したが理論値の方が頂で平になっている。また理論的には限界波形勾配は 0.73 であるが、本実験の範囲では 0.20 程度でも谷での碎波が見られた。しかしながら Schooley⁴⁾ が表面波の実験で確認した表面張力波も波形勾配が $0.2 \sim 0.4$ であり、表面張力波の適用を否定するものではない。本研究で確認された内部波が表面張力を復元力とする波であれば、複雑と見えた内部波の挙動も以下の様に旨く説明できる。

Capillary wave の寿命がせいぜい 10 秒程度であるのは谷での碎波によるエネルギーの消耗が大きいからである。

また線形理論から水深が十分大きい場合の波速 C は

$$C = (\epsilon g \lambda / 2\pi + \Gamma \cdot 2\pi / \rho \lambda)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

で与えられるが、 $\epsilon = 0.020$ とし、かりに表面張力効果が重力効果の $1/2$ ($\epsilon g \lambda / 2\pi = \Gamma \cdot 2\pi / \rho \lambda$) とおくと、 $\lambda = 6 \text{ cm}$ が得られ、波長がこれ以上になると重力効果が卓越し、表面張力波としては存在し得ない。界面からの連行量に直接関与する ripple は波速が $6 \sim 7 \text{ cm/sec}$ 以上であり、ripple が単独に存在しないことから、Capillary wave の谷での碎波による密度不連続性に起因する内部重力波の分散とも考えられる。

参考文献

- 1) 室田・平田・沢田 第31回年次学術講演会
- 2) Crapper G. D. J. of Fluid Mech. Vol. 2 P. 532~540 (1957)
- 3) Antonoff J. of chem. phys. Vol. 5 P. 372~ (1907)
- 4) Schooley A. H. J. of Mar. Res. P. 101~ (1958)

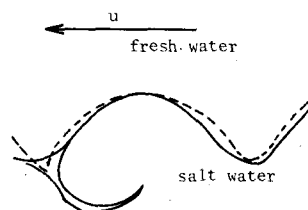


図-3 表面張力波

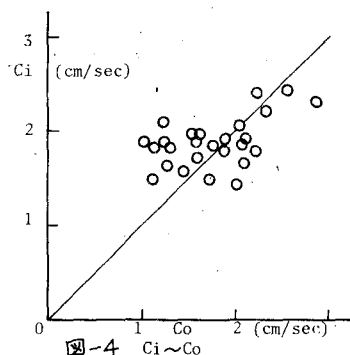


図-4 $C_i \sim C_o$