

内部波ソリトンの挙動

九州大学・総理工○松永信博 杉原裕司 坂井一樹 本地弘之

1. はじめに

二成層密度界面に中間密度の流体塊を貫入させるとヘビが卵を飲み込んだような膨らみが界面に沿って伝播し、内部波ソリトンが形成される。このソリトンは、形成初期においてその内部は渦対で構成され、閉じた定常流線パターンを持つ。渦対は伝播の進行とともに縮退し、ソリトンは開いた定常流線パターンを持つ内部孤立波へ変化する。このように多様な性格を持つ内部波ソリトンの基本特性を可視化実験に基づいて調べた。

2. 実験装置および実験方法

実験には、長さ4.0m、深さ0.3m、幅0.15mの透明アクリル製水槽を用いた。水槽の底に塩水を溜め、その上に同量の真水をのせることにより二成層状態をつくった。水槽の一端を仕切板で区切り、中の真水と塩水を十分に攪拌することによって中間密度の流体塊をつくる。その仕切板を素早く引き抜くことにより中間密度の流体塊が密度界面に貫入し、その後内部波ソリトンとして伝播していく。貫入させる流体はあらかじめアニリンブルー染料によって着色されており、ソリトンの挙動はVTRカメラを用いて撮影された。ソリトンの伝播速度、振幅はVTR画像より求めた。密度の鉛直分布は流体の導電率を測定することで求め、

$$\rho = \bar{\rho}(1 - \omega \tanh \alpha z) \quad (1)$$

で近似することによって密度界面の厚さの代表長さスケールの逆数 α を算定した。ここで、 $\bar{\rho}$ と ω は上層と下層の密度 ρ_1 、 ρ_2 を用いることにより、 $\bar{\rho} = (\rho_1 + \rho_2)/2$ 、 $\omega = (\rho_2 - \rho_1)/(\rho_1 + \rho_2)$ と定義されている。 z は中間密度の位置から鉛直上向きに取られた座標である。図1に鉛直密度分布の測定結果の一例が示されている。図中の実線は

(1)式を示している。両者はよく一致しており、密度の鉛直分布は(1)式でよく近似されることがわかる。

3. 実験結果および考察

写真1(a)～(b)は、染料によって可視化された内部波ソリトンの伝播の様子を示したものである。ソリトンの振幅を a とすると、(a)のソリトンの場合 $\alpha a = 3.88$ であり(b)の場合は $\alpha a = 1.09$ である。Kamachi & Honji¹⁾によると $\alpha a \geq 1.3$ の場合にソリトン内の定常流線は閉じたパターン(Closed type)となる。従って、

(a)は内部が渦対で構成された閉じた定常流線パターンを持ち、(b)は開いた定常流線パターン(Open type)を持つものと思われる。

図2は、内部波ソリトンの伝播速度と振幅の関係を示したものである。図中の λ はDavis & Acrivos²⁾によって導入された無次元速度パラメータで、 $\lambda = g \ln(\rho_2/\rho_1)/(2\alpha c^2)$ で定義されている。ここで g は重力加速度であり、 C はソリトンの伝播速度である。図中の直線は、Davis & Acrivosによって求められた αa の比較的小さな場合に成り立つ理論式 $\lambda = 2.0 - 1.2\alpha a$ であり、もう一方の曲線はBenjamin^{3,4)}によって求められた理論式 $\lambda = 2/(1 + 0.6\alpha a)$ である。本実験データから得られる収束値 $\lambda = 0.2$ は、Benjaminにより求められた理論値とは異なるが、本実験のデータはDavis & Acrivosの実験データと連続的に接続することがわかる。

図3は、内部波ソリトンの振幅が伝播の進行に伴ってどのように変化するかを示したものである。 $\hat{x}$ 、 $\hat{a}$ はそれぞれ x/x_0 、 a/a_0 で定義されている。 x は水槽の端から水平方向に取った座標であり、 a_0 は a の分布を外挿することによって求められた $x=0$ における振幅である。この図から、ソリトンの振幅の変化の割合は $\hat{x}$ が増加

するに従って次第に緩やかになることがわかる。これは形成初期においては内部の渦運動が激しいため粘性散逸によって失われるエネルギーが大きいが、渦対の縮退とともにソリトンの運動も波動的になり形成後時間が十分に経過すると振幅の減衰率も相対的に小さくなるためと思われる。

4. おわりに

二成層流体中に形成される内部波ソリトンの基本特性を可視化実験によって調べた。その結果、内部波ソリトンは渦的性質と波的性質を兼ね備えた特殊な流体現象であることがわかった。今後は、ソリトン内部の流速分布および渦

度分布を明らかにし、さらにソリトンのスケールと混合拡散能力の関係を定量化していく予定である。

参考文献

- 1) Kamachi, H. and Honji, H. : Steady flow patterns of internal solitary bulges in a stratified fluid, Phys. Fluids, 25, pp.1119-1120.
- 2) Davis R. E. and Acrivos A. : Solitary internal waves in deep water, J. Fluid Mech., 29, pp.593-607.
- 3) Benjamin, T. B. : Internal waves of permanent form in fluids of great depth, J. Fluid Mech., 29, pp.559-592.
- 4) Hurdiss, D. A. and Pao, H.-P. : Experimental observation of internal solitary waves in a stratified fluid, Phys. Fluids, 18, pp.385-386.

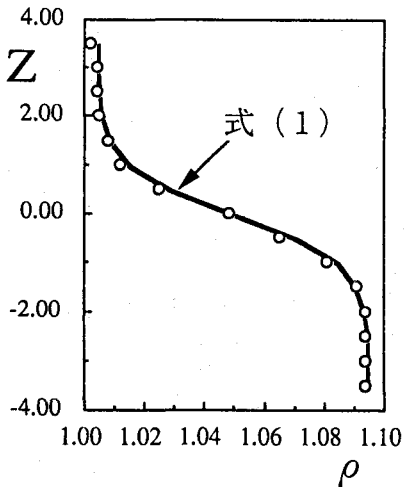


図1 鉛直密度分布の測定結果の一例

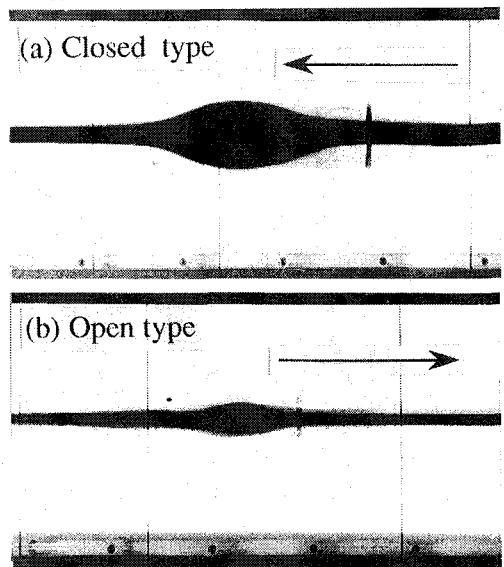


写真1 内部波ソリトンの伝播
(図中の矢印は伝播方向を示す)

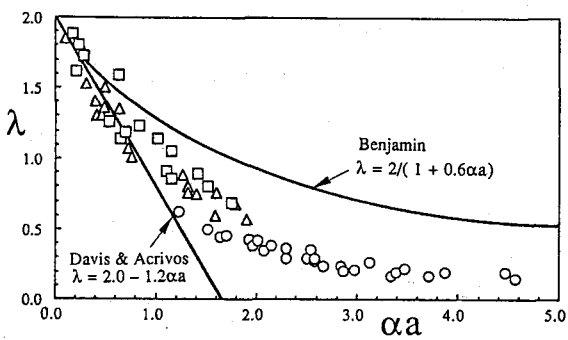


図2 無次元速度パラメータ λ と αa の関係
(○は本実験データ、△、□はDavis & Acrivos のデータ
でそれぞれ $\rho_1=1.052\text{g/cm}^3$ 、 $\rho_2=1.095\text{g/cm}^3$)

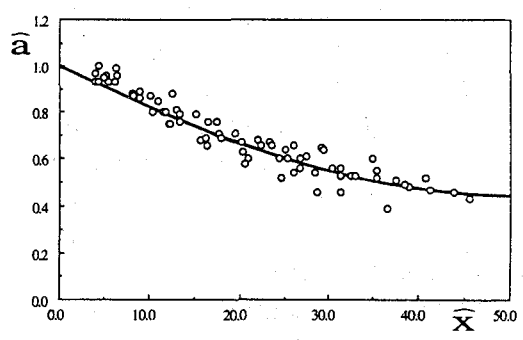


図3 伝播に伴う内部波ソリトンの振幅の変化