

二成層流体中の内部ソリトン Internal Soliton in Two-Layered Stratified Fluids

杉原裕司*、松永信博**、坂井一樹***、本地弘之****

By Yuji SUGIHARA, Nobuhiro MATSUNAGA, Kazuki SAKAI and Hiroyuki HONJI

An internal soliton in two-layered stratified fluids has been investigated by means of flow visualization. The relationship between the phase speed of soliton and its amplitude has been obtained experimentally. It has been also found that steady waves form behind the internal soliton traveling along the interface of a stratified fluid. The waves are of similar characteristics to the lee waves which are observed behind a mountain in stratified atmospheric flow.

Key words: Internal soliton, stratified flow, flow visualization, steady wave, lee wave

1. まえがき

成層流体中の内部ソリトンは非線形物理学の分野を中心に活発に研究されている^{1)、2)}。内部ソリトンが湖沼・内湾・海洋等に発生した場合、その高速・長距離移動能力から考えて、水域の水質環境へ多大な影響を与えることが予想される³⁾がこの内部ソリトンを水理学的問題として研究した例はほとんどない。著者の一人⁴⁾は、二成層密度界面に機械的に攪乱を与えることによって内部ソリトンを発生させ、その内部構造を可視化手法を用いて実験的に調べた。その結果、内部の流線パターンは密度界面の厚さとソリトンの振幅の比によって変化することを明らかにした。

今回著者らは、この内部ソリトンの後方に、トラップされた定常波が形成されることを実験的に見い出した。この波はソリトンに対して位相が静止しており、成層大気中のリー波⁵⁾の形成と類似の現象であると考えられる。これは自己誘導速度をもつソリトン後方のリー波であるということから流体力学的に極めて興味深い現象である。

本研究では二成層密度界面に中間密度の流体塊を貫入させることによって内部ソリトンを発生させ、その挙動の基本的性質を可視化手法を用いて実験的に調べた。さらにソリトンの伝播速度を定量的に評価し、他の研究者によって得られた理論解と比較・検討した。そしてソリトン後方に誘起される定常波の定性的特性を調べている。

* 正会員 工修 九州大学助手 大学院総合理工学研究科
(〒816 福岡県春日市春日公園6-1)
** 正会員 工博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科
*** 九州大学大学院総合理工学研究科 修士課程
**** 理博 九州大学教授 大学院総合理工学研究科

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の全透明アクリル水槽が用いられた。水槽の底に塩水を溜め、その上に同量の真水をゆっくりとのせることによって二成層状態をつくった。成層が完了した後、水槽の一端に仕切り板を差し込み、仕切り板内の塩水と真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。仕切り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、内部ソリトンとその後方の定常波の挙動はVTRカメラを用いて撮影された。内部ソリトンの伝播速度、振幅はVTR画像から求めた。密度の鉛直分布は流体の導電率を測定することによって求め、

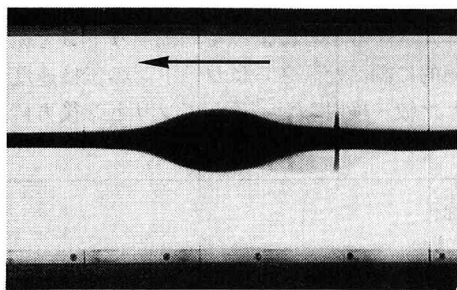
$$\rho = \bar{\rho}(1 - \omega \tanh \alpha z) \quad (1)$$

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。塩水の密度 ρ_2 は1.05～1.10 g/cm³の間で変化させた。また上層および下層の水深 h_1 、 h_2 は11.5cmであった。

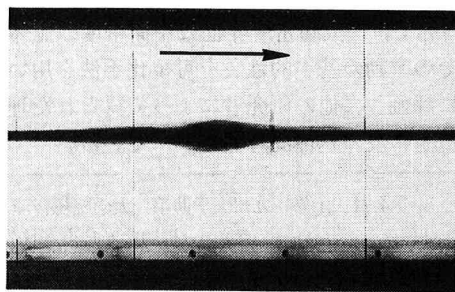
3. 実験結果および考察

写真-1 (a)～(b)は、アニリンブルー染料によって可視化された内部ソリトンの伝播の様子を示したものである。(a)に示されたソリトンは $\alpha a = 3.88$ であり、密度界面の厚さに比べてソリトンの振幅が十分に大きい場合に相当する。Kamachi & Honji⁴⁾によると $\alpha a \geq 1.3$ の場合にソリトン内の流線は閉じたパターン(Closed type)となる。従って、写真-1 (a)に示されたソリトンは内部に渦対を伴って伝播していると考えられる。(b)は水槽の端まで達したソリトンが壁から反射して逆方向に伝播している様子である。この場合 $\alpha a = 1.09$ であり、1.3よりも小さく、内部の流線は開いたパターン(Open type)となっている。

図-1は、内部ソリトンの伝播速度と振幅の関係を示したものである。 λ はDavis & Acrivos⁶⁾によって導入された無次元速度パラメータであり、 $\lambda = g \ln(\rho_2/\rho_1)/(2\alpha c^2)$ で定義されている。ここで C はソリトンの伝播速度であり、 g は重力加速度である。本実験で得られたデータは図中において○でプロットされており、△、□はDavis & Acrivos⁶⁾の実験データである。図中の直線は、Davis & Acrivosによって求められた αa の比較的小さい弱非線形性が成り立つ場合の理論式 $\lambda = 2.0 - 1.2\alpha a$ である。また、もう一方の曲線はBenjamin^{7), 8)}によって得られた理論解 $\lambda = 2/(1 + 0.6\alpha a)$ である。



(a) Closed type



(b) Open type

写真-1 内部ソリトンの伝播 (矢印の向きは伝播方向を示す)

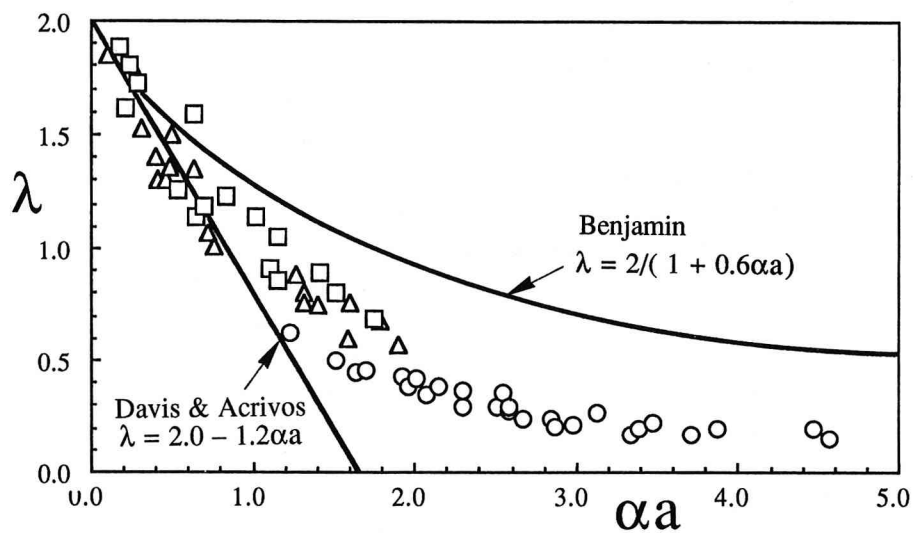


図-1 無次元速度パラメータ λ と αa の関係
 (○は本実験のデータ、△、□はDavis & Acrivosのデータで
 それぞれ $\rho_2 = 1.052\text{g/cm}^3$, $\rho_2 = 1.095\text{g/cm}^3$)

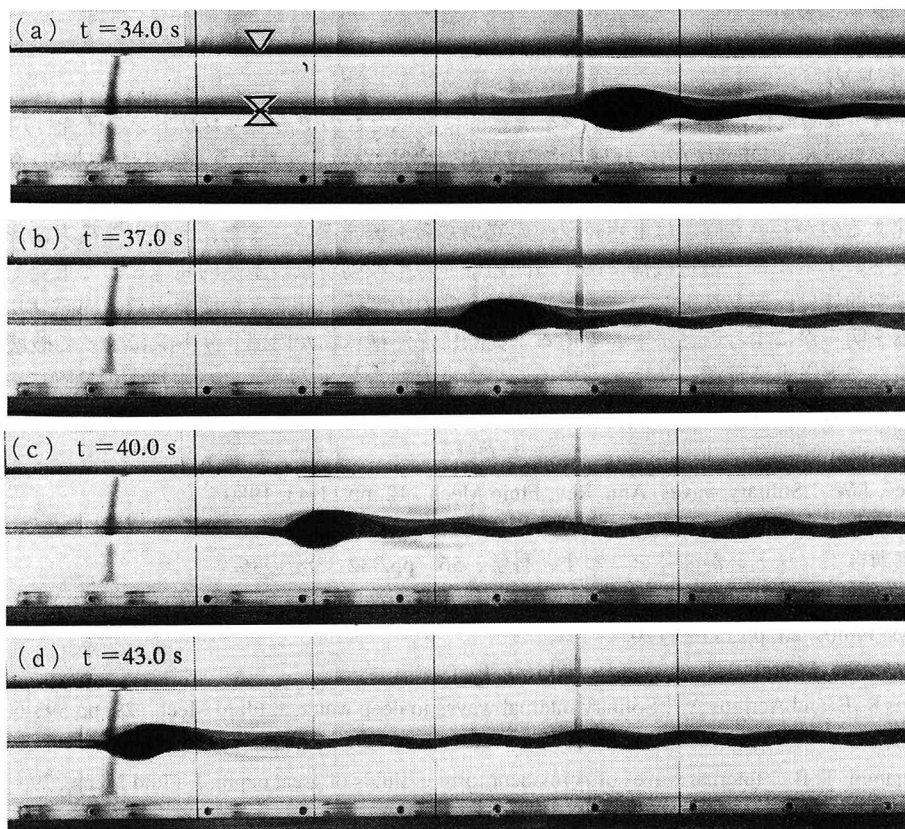


写真-2 内部ソリトンの後方に誘起される定常波
 (tは内部ソリトン形成後の経過時間)

αa が小さい場合には、実験結果はDavis & Acrivosの理論解に漸近する。しかしながら、 αa が大きくなるに従って非線形性が増し、Davis & Acrivosの理論解から外れてくる。そして十分に αa が大きい領域で、 $\lambda=0.2$ に収束する。本実験データから得られる収束値は、Benjaminにより求められた理論値とかなり異なるが、本実験データはDavis & Acrivosの実験データと連続的につながる。これは、 αa が十分に大きい非線形領域での内部ソリトンの伝播特性が弱非線形性の内部ソリトンの伝播特性と連結した形で表されることを実験的に示すものである。

写真-2 (a) ~ (d) は内部ソリトンの後方に誘起される定常波の一例を示したものである。ソリトン後方の波は写真から分かるようにソリトンと全く同じ伝播速度を持っており、ソリトンに対して位相が静止している。すなわちソリトンにトラップされた定常波が形成していると考えられる。このようにある種の物体にトラップされた波の典型的なものとして、成層大気流中の山岳部において観察されるリー波が挙げられる。リー波は流れが物体に衝突することによる攪乱で発生した様々な周波数の波のうち、流れと同じ速度で上流に向けて伝播するものだけが物体の近傍にトラップされる現象である。これは大気物理学の分野ではかなり基本的な現象であり、これまでに数多くの研究が行われている。本実験条件におけるソリトンは内部に渦対を伴っていることから、流れの中に置かれたある種の物体であると見なすことができ、後方に形成される定常波はリー波であると考えることができる。しかしながらこれまでに観察されてきたリー波のほとんどが流れの中の物体後方に形成されるもので、本研究のように自己誘導速度をもつソリトンによって発生するという例はこれまで報告されていない。これは水理学的問題だけでなく、非線形物理学の立場からも極めて興味深い現象である。

4. まとめ

本研究は二成層流体中の内部ソリトンを実験的に調べたものである。ソリトンの研究は理論研究がほとんどであり、実現象の中には理論で汲み取られていないものも数多く残されている。例えば、Closed type のソリトンからOpen typeのソリトンへ遷移する際、内部の流線パターンはどの様に連続的に変化するかという問題はトポロジーの立場からも興味深い。また、ソリトン後方に形成される定常波へのエネルギー輸送機構に関する問題は非線形波動現象の基礎的問題として重要である。環境水理学的には内部ソリトンのスケールと混合能力の関係そして自然環境中での内部ソリトンの形成機構を明らかにすることが重要である。実際に海洋構造物が内部ソリトンによって破壊されるという事例や海洋水産資源に及ぼす影響等についての報告³⁾もあり、今後水理学の分野における研究の必要性が高まるものと思われる。

参考文献

- 1) Miles, J.W. : Solitary waves, Ann. Rev. Fluid Mech., 12, pp.11-43, 1980.
- 2) 渡辺慎介 : ソリトン物理入門、培風館、1985.
- 3) 薩摩順吉 : ソリトンが油井をこわす、科学、56, pp.332-338, 1986.
- 4) Kamachi, H. and Honji, H. : Steady flow patterns of internal solitary bulges in a stratified fluid, Phys. Fluids, 25, pp.1119-1120.
- 5) Yih, C. S. : Stratified flows, Academic Press, 1980.
- 6) Davis R. E. and Acrivos A. : Solitary internal waves in deep water, J. Fluid Mech., 29, pp.593-607, 1967.
- 7) Benjamin, T. B. : Internal waves of permanent form in fluids of great depth, J. Fluid Mech., 29, pp.559-592.
- 8) Hurd, D. A. and Pao, H.-P. : Experimental observation of internal solitary waves in a stratified fluid, Phys. Fluids, 18, pp.385-386.