

北海道大学大学院工学研究科 学生会員 西田 修三
北海道大学工学部 正会員 吉田 静男

§1 はじめに

河口密度流の混合機構としては、河道で見出せる cusped -breaking タイプの界面破壊によるものや、河口沖合の一時加速域に見出せる Thorpe 型の巻波によるものなどをあげることができる⁽¹⁾。混合機構を明らかにするためには、まず、これらの不安定波の発生条件を知らねばならない。ここでは本問題に対して従来の理論解析の結果を適用し、これがどの程度現実を説明し得るかを考察してみる。現実の河口密度流においては、上下層の混合により常に中間密度層が形成されていることが知られている。本論文においては、界面で密度が急変し、中間密度層の厚さがほとんど無視され二層系と見なし得る場合を扱うこととし、さらに深さ方向速度分布が tanh 型に近いことなどを考慮し、Holmboe モデル⁽²⁾ (H-モデル) を適用し、室内実験の結果との比較検討がなされる。

§2 実験

実験装置は河道に相当する水路(幅 8cm, 深さ 15cm, 長さ 600cm, 成層深さ 9cm)と海洋部に相当する水槽(300cm x 200cm x 30cm)よりなり、予め水路及び水槽に塩水(密度 ρ_2)を満たしておき、上流より一定流量の淡水(密度 ρ_1)を供給して河口二成層を形成させ実験が行われた。流速及び不安定波の波数、波速の測定は、色素(ウラン)をトレーサーとして用い、写真の連続撮影によってなされた。なお、本実験は $\epsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_2$ が 0.02, 0.04, 0.06 の場合についてそれぞれ流量をいろいろと変化させて行われた。

§3 結果及び考察

H-モデルは、図 1 に示すような二成層反対称速度分布を有する流れで表わされる。流れ場がこのような場合、線形安定性理論より得られる固有値方程式は次式となる。

$$4\alpha^2 C^2 - C^2 \{ (2\alpha - 1)^2 - e^{-4\alpha} + 4\alpha J_0 \} + (J_0 / \alpha) (2\alpha - 1 + e^{-2\alpha})^2 = 0$$

ここで、 α , $C (=C_r + iC_i)$ はそれぞれ ℓ , ΔU によって無次元化

された波数及び複素波速、 J_0 はリチャードソン数とよばれる無次元量である。これより中立曲線は $J_0 - \alpha$ 平面上で図 2 のようになる。実験より得られた速度・密度分布を Holmboe に従ってモデル化し、 J_0 に対し実際に観測される α をプロットしたのが図中の $\circ \bullet \square$ である。これより次のことが言える。(1) 沖合で観測される不安定波はすべて H-モデルの不安定域にプロットされる。(2) 不安定波の発生は $J_0 < 0.3$ の場合に限られ、 $J_0 > 0.3$ では巻波は見出せない。(3) 不安定波は図 3 に示す増幅率(田城の数値計算による)が最大となる $J_0 = 0.1 \sim 0.2$ 付近に集中している。以上より H-モデルでは不安定域に、ある上限の $J_0 (=J_{0c})$ が存在し、それ以上の J_0 では流れ場は安定化され

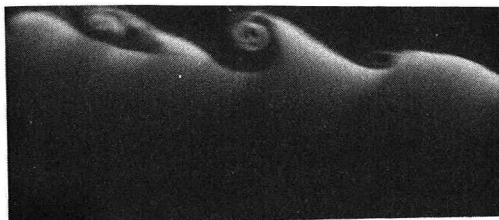


写真 1

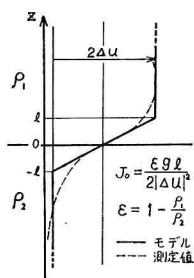


図 1

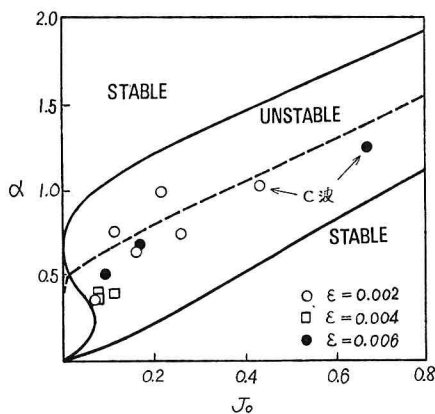


図 2

てしまう。この上限値 J_{oc} は実験設置及び水理条件によって異なる値を示すと思われるが、本実験に関する限りおおむね $J_{oc} = 0.3$ 程度と見なし得る。ちなみに本実験における $J_0 = 0.3$ の水理条件はクーリガン数 $\theta = (Eg\lambda)^{1/3}/U$ を用いて表現すれば $\theta = 0.06 \sim 0.09$ に相当する。局所的な不安定を、流れの規模に依存する overall な量 θ で議論することは問題があるが、この $\theta = 0.06 \sim 0.09$ という値は本実験と実験規模の近い時に見出された Thorpe の巻波の発生条件とほぼ一致している⁽³⁾。図4にはH-モデルにおける J_0 と波速 C_r の関係が示され観測された波数がプロットされている。実験結果に多少のバラツキはあるものの、ある程度、理論との一致を見ることができる。河口沖合では以上のようなことが言えるが、ここで注意しておきたいのは、 $J_0 < 0.3$ で不安定波を見出すことができないが、この範囲の J_0 であっても安定と観測される場合がしばしば起こるということである。つまり、 $J_0 < 0.3$ の同じ J_0 で安定な場合と不安定な場合が生じ得るのである。これは J_0 値が同じであっても水理条件が異なるため、(1) 流水厚が薄く、自由表面の影響を無視できなくなる場合や、(2) 加速域で界面の急激な上昇によって平行流と見なし難くなる場合などには、これらの効果が大きく現れてしまうためと思われる。

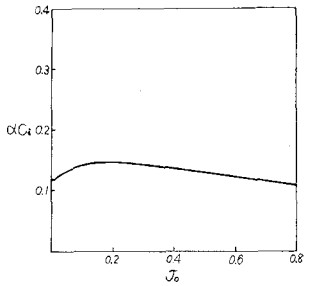


図 3

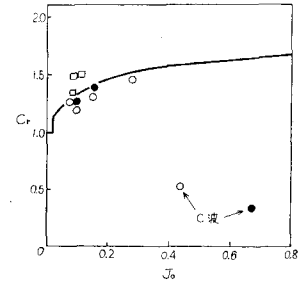


図 4

次に河道部の現象について述べておこう。河道部においては、ある J_0 (E によって異なるが) になるとまず C 波が発生し、さらに流量を増すと cusped-breaking 現象が見出されるけれども、いつして Thorpe 型の巻波の形成には至らない。河道部に見出される C 波の発生が H-モデルで説明され得るかどうか調べるために、C 波の発生限界を示すと図1のごとくになる。C 波の場合も巻波同様、不安定域に含まれている。この結果をみる限り、C 波の発生も K-H 不安定によると考えられないではない。しかし、波速 C_r について検討してみると(図4)、巻波では H-モデルより得られた C_r に近い値を示すのに対し、C 波は極端に小さい波速をもっている。このことから C 波の発生機構は K-H 波のそれと異なるものであることがわかる。

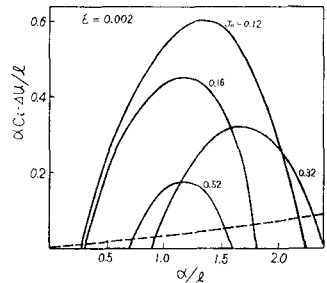


図 5

最後に H-モデルを用いた場合の非粘性増幅率を図5に示した。図中破線は粘性減衰率、増幅率曲線に添えた数値は J_0 の値を示している。 $J_0 = 0.52, 0.32, 0.12$ は安定な場合、 0.16 が不安定な場合の増幅率である。いずれの場合も増幅率が粘性減衰率を大きく上回り、不安定波の発生を示唆しているが、実際には J_0 が 0.16 の場合のみ巻波が観測される。これより、H-モデルでは不安定波の増幅率十分に説明し得ないことがわかる。また J_0 が大きくなるに従い、増幅率が急激に減少していることから、大きな J_0 に対しては粘性の効果が大きく現われ、粘性減衰が不安定波の線形増幅率を上回り、流れ場が安定化する場合が存在すると予想される。この理論上の上限値は $J_0 = 0.3$ よりもはるかに大きいものであることは図より明らかである。

以上述べてきたように河道における C 波の発生のみならず、河口沖合の巻波についても、その増幅率や不安定域の上限 J_{oc} の存在など H-モデルでは説明できない部分がある。これらの原因としては、(1) 実際の流れ場の密度・速度分布と H-モデルの不一致、(2) 河口一時加速域における流れの非平行性及び三次元性などが考えられる。しかしながら、発生する K-H 波の波数及び波速については H-モデルの結果がほぼ適用可能であると言えてよいだろう。さらに今後、より現実に近い流れ場のモデル化による安定性理論の展開と、いろいろな水理条件での実験を行う必要がある。

参考文献:

- (1) 吉田, 田城, 西田: 河口二層流の混合機構に関する実験的研究 I, 26 回水理論文集, 1979
- (2) Drazin, Howard: Advances in Applied Mechanics, Vol. 9, 1966
- (3) 吉田: 密度界面における波動の発生と破壊条件, 23 回水理論文集 1979