

建設省土木研究所 正員 〇高橋 晃
建設省土木研究所 正員 須賀亮三

1. はじめに

河道のなかの成層流における密度分布をみると、縦断的な波動や急変部があつて、それが時間的に変化している。それらの外的な要因の概要は別報告¹⁾においてもふれているが、単純な実験水路内の現象とは相違する。それらの主なものは、三次元性、履歴効果および不定流効果などであり、互いに重って作用する。その結果は、中間層の発達密度分布と流速分布の問題、ならびに内部渦の発達などとなつて現われる。今回は、このうち内部渦をとりあげ、二層流の不安定性との関連事項について考察する。ここでいう二層流の不安定性とは内部波の発達や界面の安定問題ではなく、数値計算において不安定を起すような規模の大きい現象をさす。

計算における不安定原因は、内部フルード数 $F_i=1$ となることと他の原因による発散である。前者に関連して、その上流端において $F_i=1$ となる主要内部渦の存在については、すでに報告した²⁾。内部渦には、このほかにも、必ずしもその先端において $F_i=1$ とならないものが多数存在し、差分理論ではなく、現象面として発散の引き金となったり、混合の促進や中間層の発達に寄与するものがある。ここでは、長良川における実測資料などに基づいて、玉井池田³⁾の例にならつて検討し、特に二層流に大きな条件を与える主要内部渦の関連事項について考察する。

2. 内部渦の種類と特性

二層流には大別して三種の内部渦がある。先端渦、内部渦、および主要内部渦⁴⁾である(これらのスケールと内部波のスケールの渦、および河床のくぼみなどに基づく局所渦などを除外する)。これらは、いずれも密度効果に基づくものであり、成層度と上下層の相対速度の増大と共に発達する。一層流では射流から常流に変化するときに跳水するが、二層流では通常、常流から射流に変わるときに主要内部渦が発生している。渦をはさんだ上下層の流れは連続変化とみなしうるが、基礎式ではこの付近で不連続となる。ただし、遡上時は上層流がほとんど零のとき、下層流の跳水現象が生じることがある。著者らの実験では、逆流時に、狭窄部の上流において二層流の跳水がみられた。このように主要内部渦は、モデル計算上に重要な条件を与えるが、二層流にはこれより弱い内部渦や先端渦が存在する。主要内部渦以外の内部渦では $F_i < 1$ であるが、密度の鉛直分布や界面位置に変化を与える不安定要素となる。これらは、主要内部渦や先端渦が移動し残存したもの、あるいは河道形状と不定流効果の総合作用の結果生じたものと考えられ、単純断面で水路中変化が緩慢な位置ではみられないと思われる。先端渦は定常状態でも存在するが、特に遡上時に発達し、引き潮に減衰する。先端渦では淡水を塩水層にとり入れ、また塩水を淡水層に混入させる。その結果、中間層の発達に寄与し、塩水くさび先端部の一次元性の仮定を問題とし別途の検討を要求する。

3. 等流水深、ならびに限界水深曲線と内部渦の関係

等流水深 h_0 、および限界水深 h_c は、それぞれ次式の分子および分母を零とする条件から得られる。

$$\frac{\partial h_1}{\partial x} = \frac{f_1(h_0)}{g(h_c)} = \frac{-f_1(1 + k_1/h_2) + (k_2/\beta) \partial^2/\partial x^2 + E(1/F_1^2 - 1)}{(1 - F_1^2)/F_1^2} \quad (1)$$

ここに、 $f_1 = 0.05(Re \cdot F_1^2)^{-0.5} + 2E$ ⁵⁾、および $E = 2 \times 10^{-3} F_1^3$ とされている。検討例として、長良川における緩混合状態(月令11月)の海水侵入運動をとりあげる。実測ならびに数値計算結果⁶⁾に基づき、簡単のため不定流項を無視して得られた結果は図-2⁷⁾に示すようである。限界水深 h_c と h_1 の関係は容易に求められるが、等流水深は $\partial^2/\partial x^2$ が正で大きい範囲内で、最大2つ存在するが、通常その範囲は限られる。 $\partial^2/\partial x^2 < 0$ ではほとんど存在し得ない。 h_0 が2つ存在する理由は $E(1/F_1^2 - 1) = 2 \times 10^{-3}(F_1 - F_1^3)$ より、 F_1 が0と1のとき零で $F_1 = 1/\sqrt{3}$ のときピーク値をとる上

に凸となる曲線を描くからである。図-1では一例として長良川の6kmと4km地突の例を記している。 $F_1=1$ となる κ は下流ほど小さくなるが、2つの κ も共に小さくなりながら両者の差を縮め、 κ_c に近づきつつ一致する。

図-2には閉じた曲線の等流水深、限界水深、界面形状のほか、以前判定した主要内部渦およびその他の内部渦の範囲を示している。等流水深は $\frac{\partial \kappa}{\partial x}$ を零とする条件であるが、二例とも κ が1つになるために κ_c に近づき、かつ界面形もそのあたりで収束する傾向を有する。2つの κ が1つの κ になるあたりでは F_1 が0.5~0.6程度であり、これより下流の $\frac{\partial \kappa}{\partial x}$ の分母は非常に小さくなる。いっぽう、界面位置を示す縦断曲線と κ 曲線との交点では分子が零になるわけであるから、界面位置は計算を真とすれば、水平に交わるのが真である。実際にはその上流に存在する内部渦や不定流の効果を考えなければならない。さて、図-2^(b)の場合には、7~9kmにかけて弱い渦の存在が考えられるが、4kmあたりでは κ が1つになって F_1 が大きくなり、界面位置も κ_c に近づいて、その下流では内部ジャンプがみられる。主要内部渦の予測を確証する一つの根拠でもある。内部ジャンプ発生条件は $\frac{\partial \kappa}{\partial x}$ の分母が零となることであるが、この場合に分子までを零とすることはありえない。 $\frac{\partial \kappa}{\partial x}$ がほとんど大きくない限り、 κ_c 曲線と κ 曲線とは交わることはなく、 $\frac{\partial \kappa}{\partial x}$ が ∞ とはならない。図-2^(a)の場合の25~45kmの渦は主要内部渦に近い渦であり、0kmより下流に存在する渦がおそらく主要内部渦なのであろう。

4. まとめ

^(a)上層水深は、常流の一層流とは逆に、下流に向かって小さい方の κ に近づく。そして、 F_1 の増大と共に連行が数増し2つの κ が1つになる直下流で急速に κ_c に近づき内部ジャンプが発生する。等流水深に対しては $\frac{\partial \kappa}{\partial x}$ の影響が大きい。長良川で、成層時に主要内部渦が0~4kmに安定するのはこの効果も考える必要があろう。^(c) $\frac{\partial B}{\partial x}$ が負であると、界面形が下流に向かって上昇し、 F_1 や E の増大となって不安定になる。図-1 $f(\kappa)$ と κ の関係

^(a)主要内部渦以外の渦は、直接モデル計算の障害とはならない。しかし、 κ_c を小さくして κ_c に近づけるようであると不安定となる。以上は、二層流を κ と κ_c の差から考察したものであるが、ここでは非定常効果を除外している。

(参考文献)

- 1) 須賀：年講 S 54.
- 2) 須賀：水講 S 54.2
- 3) 玉井池田：年講 S 53
- 4) 須賀・高橋：海講 S 54
- 5) 須賀・高橋：年講 S 51
- 6) 須賀：海講 S 54

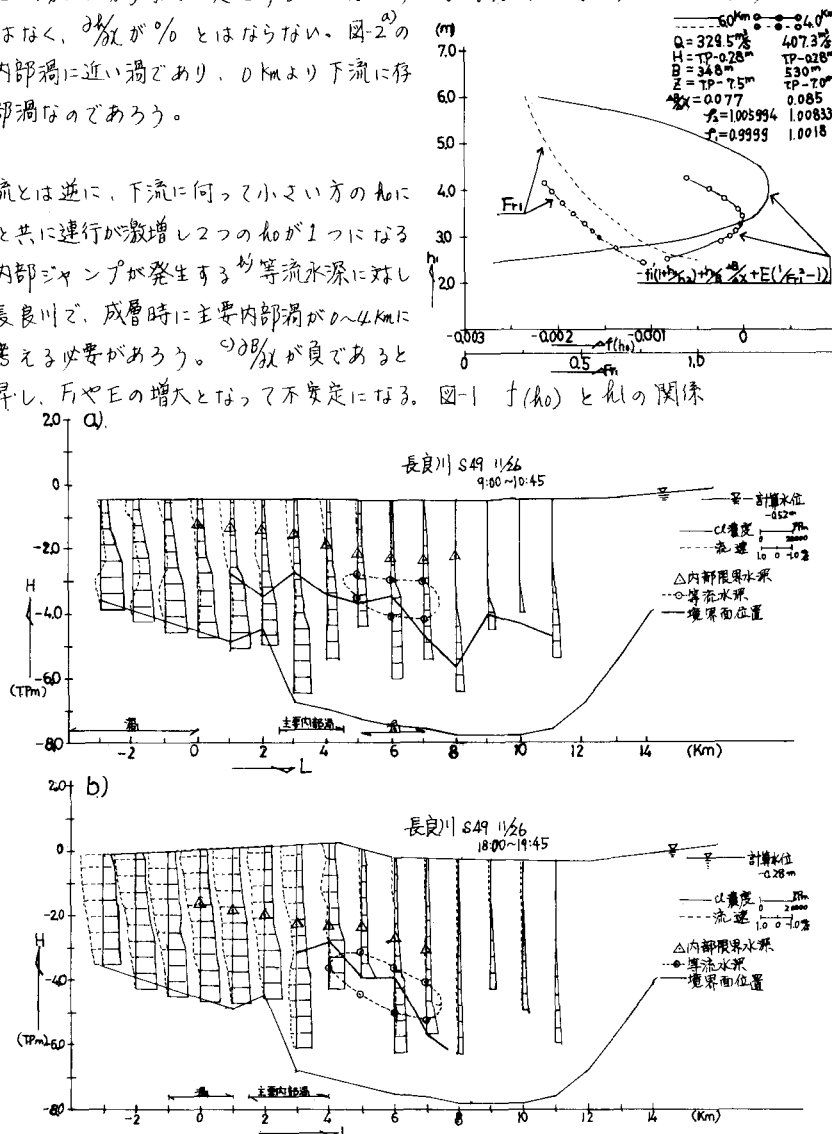


図-2 等流水深、限界水深、および界面形状などと内部渦位置の関係(長良川)