

密度流先端部の挙動に関する研究

京都大学防災研究所 正員 芦田 和男
 京都大学防災研究所 正員 江頭 進若
 京都大学大学院 学生員 ○中川 一

1. まえがき 土砂輸送や水質現象を解明する立場から、密度流の研究は活発に行われている。その結果、定常部の流動特性はかなり明らかにされてきた。しかし、先端部の特性、すなわち、移動速度、波高、および密度などが時間的、場所的に、どのように変化するか、あるいは、どのような条件下で定常状態を保持するのか、という問題については、ほとんど解明されていない。本報においては、先端部で成り立つと思われる連続式、密度保存則および運動量方程式を提案するとともに、これらの数値解と実験値を比較することにより、上述の問題に対して考察する。

2. 先端部の特性量の解析モデル 先端部の挙動は、体積、密度保存則および運動量保存則の3つの支配方程式によって表示される。図1には、先に提案された福岡らの解析モデル(破線)や先端部の形状に関する研究成果を参考にして考案された解析モデルが模式的に示されている。定常部や先端部とその周囲との間で支配方程式を統一的に適用するには、境界の定義が重要な意味をもち、ここでは定常部の境界面(密度勾配の最大値)と同様の定義で先端部とその周囲を区別(図1実線)する。この定義とせり出し構造(DC面)を考慮した点が福岡らのモデルと異なる。

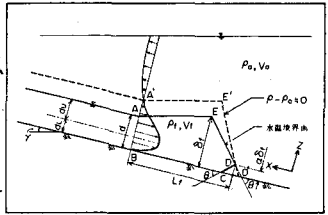


図1 先端部の形状と解析モデル

さて、図1を参考にして、解析モデルの主な条件を示すと次のようである。流れは二次元で静水圧分布である。先端部の移動速度は重心の移動速度 V_f とし、密度 ρ は一様とする。表面抵抗はBC, DEおよびEA面で考慮し、BC面では境界層的な扱いをし、DE, EA面では連行による付加応力³⁾、また、せり出した面すなわち、CD面では、周囲水の直接的な取り込みによる付加応力を考え、それ以外の抵抗を形状抵抗とする。以上の条件のもとで、支配方程式は次に示すように表示できる。

$$\frac{dQ}{dt} = \int_0^L \{u(z) - V_f\} dz + \alpha \delta_f (V_f - V_a) - W_{DE} \overline{DE} - W_{EA} \overline{EA} \dots (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho Q) = \int_0^L \{ \rho_a u(z) - \rho_f V_f \} dz + \rho_a \alpha \delta_f (V_f - V_a) - \rho_f (W_{DE} \overline{DE} + W_{EA} \overline{EA}) \dots (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\rho_f Q V_f) = & \int_0^L \{ \rho_a u(z) - \rho_f V_f \} dz - \int_0^{L_f} \{ C_f \rho_f V_f^2 dz - \rho_a \alpha \delta_f (V_f - V_a)^2 - \rho_a W_{DE} \overline{DE} (V_f - V_a) \\ & - \rho_a W_{EA} \overline{EA} (V_f - V_a) + [\frac{1}{2}(\rho_a g d^2 \cos \theta + \rho_f g d^2 - \rho_a g d^2) - \rho_a g \delta_f \{ \frac{1}{2} \cos \theta \sin(\theta + r) \\ & - \alpha \delta_f \sin r \cot \theta \} + \rho_f Q \sin r - \frac{1}{2} C_d \rho_a V_f^2 (1 - \alpha) \} \dots (3) \end{aligned}$$

ここに Q ; 先端部ABCDEの面積, V_f ; 移動速度, V_a ; 周囲水の流速, δ_f ; 最大波高, $u(z)$; 定常部の流速分布, W_{DE} , W_{EA} ; 連行速度, ρ_a ; 周囲水の密度, ρ_f ; 定常部の密度, ρ ; 先端部の密度, L_f ; 先端部の長さ, C_f ; 底面の抵抗係数($C_f = 1.328 / \sqrt{Re}$)

(1)~(3)式において、 $\frac{dQ}{dt} = 0$ かつ $\frac{d}{dt}(\rho Q) = 0$ のとき、支配方程式の特殊解の一つが次式のように得られる。

$$V_f = \{(\rho_a - \rho_f) / (\rho_f - \rho_a)\} (d / \alpha \delta_f) \cdot V_a \dots (4)$$

上式は、 ρ_f が与えられたとき V_f が定常部の特性量およびせり出し高さによって規定され

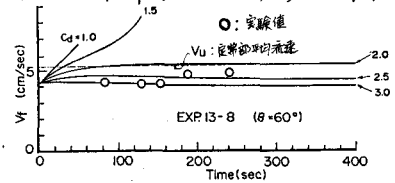


図2(a) 先端部移動速度 ($\theta = 60^\circ$)

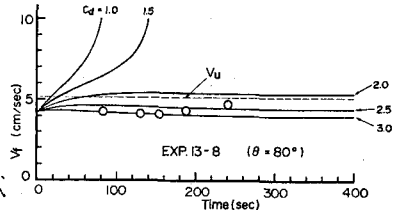


図2(b) 先端部移動速度 ($\theta = 80^\circ$)

ここに V_a ; 定常部の平均流速

ることを示している

3. 数値解と実験値の比較 セリ出しの高さ $0.1\delta_f$ ($\alpha=0.1$) および前面傾斜角 θ が 60° と 80° (実験値) の場合について、種々の形状抵抗係数 C_d を与えて移動速度を算定したものが図-2 (a), (b) である。計算初期の段階では、加速、減速が見られるが、100秒程度経過すると、一定値になり、実験値の傾向と一致する。これは、福岡らが得た結果との大きな相違点である。また、傾斜角が形状抵抗に及ぼす影響を考慮していないので、計算値に関する θ の影響は顕著にみられない。図-3は先端部の密度変化に関するもので、図-2の加速・減速領域に対応して、初期の段階に急激に変化し、その後定常部の断面平均密度 ρ_m より若干小さい値に収束する。これは、定常部からの密度供給と、特にCD面における周囲水の取り込みによる密度稀釈とが平衡を保つことによる。図-4は、先端部の波高変化を示したもので、時間とともに常に増加傾向にある。これは、AB, CD面からの水の供給が、DE, EA面からの流出量より大きいため、常に先端部の体積が増加することによる。

4. あとがき 先端部の特性量に関して略述したが、この解析モデルでは、(1)~(3)式から明らかなように、先端部の形状および連行速度 W_{DE}, W_{EA} をいかに的確に設定するかが極めて重要である。先端部の形状のモデル化の方法は、とくにセリ出し高さ δ_f , (3)式右辺第

6項以下の推進力の設定などと密接に関連しており、また、形状抵抗係数とも不可分に関係している。図-5には、一例として、先端部の水温分布の測定結果が示されているが、水路底面に対して前面の傾斜角が 90° 近い値を示し、後方是非常に複雑で、可視化法で得られているものと非常に異なった形状をしている。連行速度 W_{DE}, W_{EA} に関して、ここでは、成層流の連行速度が適用されているが、実際は、これよりもかなり大きな値をもつことが推察される。図-4に示す先端部の波高の増加率が、実験で通常観察されているものより大きく算定されているのは、このためであろう。

このように、今後検討すべき重要な問題が残されているが、先端部の移動速度や密度は、かなり定常性の強い現象であることが明らかにされた。これは、先端部の特性量が、定常部の流れによって、ほぼ規定されることを示唆するものであり、(4)式が重要な意義をもってくるように思われる。

参考文献 1) 福岡健二・木村和正・加納敏行: 密度流先端部の流動機構に関する基礎的研究, 工学論文報告集, 第274号, 1978, PP. 41~55

2) John E. Simpson: Effects of the Lower boundary on the head of a gravity current, J. Fluid Mech., vol. 53, part 4, 1972, PP. 759~768

3) 芦田和男・江頭進名: 密度躍層のある場における濁水の挙動に関する研究(1) — 躍層における抵抗係数を中心として —, 京都大学防災研究所年報, 1975, PP. 495~512.

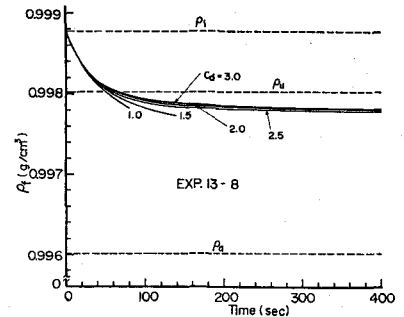


図-3 先端部平均密度 ($\theta=80^\circ$)

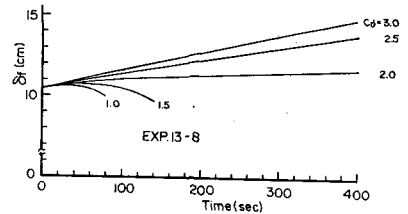


図-4 先端部最大波高

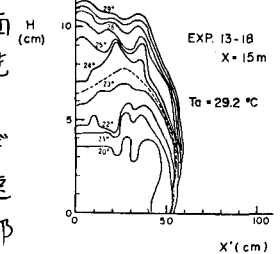


図-5 先端部の水温分布