

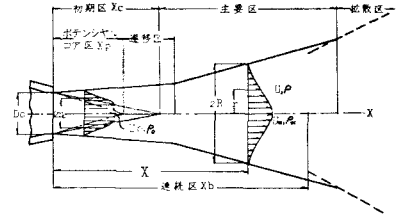
大阪府立工業高等専門学校

柳井田勝哉

柳 鴻池組 技術研究所 正員○ 大橋 昭

1. まえがき 近年各方面で注目されている高速水噴流による破碎機構について知見を得るためには、自由噴流の力学特性と各種試料における掘削面或いは掘削孔内での複雑な気水混合流れによる破碎過程を解明することが重要となる。前報⁽¹⁾においては、自由噴流の流圧計測結果より噴流特性（ノズル性能）及びモルタル試料の掘削実験により破碎モードを実験的に論じた。本報では運動量理論と霧化理論を導入することにより噴流の構造を明らかにして破碎効果を推論し、これまでの実験成果をより詳細に考察する。

2. 噴流構造 気中液噴流の構造を模式化すれば次のような三領域に特徴づけられる。(i) 初期区；ノズル出口流圧を保持するポテンシャルコア区においては、噴流速度が一定な水流相、ノズル口と与えられる擾乱による不規則な微小表面波を拡大しながら発達するせん断流れの気水混合相及び噴霧相からなる三相構造を形成。ポテンシャルコア区より下流域では二相構造。(ii) 主要区；連続区内では、表面波が著しく増巾され流れ全体が非定常な振動流となる気水混合相と表面波の崩壊によつて発生する微小な液滴を含む噴霧相の二相構造。そして、より下流における液滴群の流れと噴霧相の二相構造域。(iii) 拡散区；一様に噴霧化され拡散する流れ。なお遷移区はポテンシャルコア区が消滅した点より主要区にかけての過渡領域を示す。(図1)



D_0 : ノズル径
 R_0 : ノズル半径
 X : ノズルと任意断面間距離
 r : X における任意点半径
 $2R$: 噴流外径
 X_p : ポテンシャルコア長
 X_c : 初期区長
 X_b : 連続区長
 $2r_c$: ポテンシャルコア部直径
 η : r/R

$\eta_c = r - r_c / R - r_c$
 U_0, P_0, ρ_0 : ノズル出口の速度, 流圧, 密度
 U_m, P_m, ρ_m : X における軸上の速度, 流圧, 密度
 U, P, ρ : X, r における速度, 流圧, 密度
 Q_0 : ノズル出口流量
 Re : レイノルズ数
 k : 実験定数

図1 噴流構造

3. 噴流特性の運動量解析⁽²⁾ 主要区における噴流構造を周囲流体の巻込みによる気水混合流れと考えずに連続水流の発達過程とみなし、運動量理論を適用して噴流の基本特性を導く。本解析に重要な要素として、従来の実験データを検討した結果、次に示す噴流拡がりの関係式を得た。(図2)

$$R = k X^{1/2} \quad \dots \dots (1)$$

また動径方向の流圧分布については前報で確認された Schlichting の $3/2$ 乗則により、(図3)

$$P/P_0 = f(\eta_c) = (1 - \eta_c^2)^2, P/P_m = f(\eta) = (1 - \eta^2)^2 \quad \dots (2)$$

いまノズル口と主要区に検査面をとれば次の運動量式が示される。

$$2\pi \int_0^R \rho u^2 r dr = \pi R_0^2 \rho_0 u_0^2 = \text{const.} \quad \dots \dots (3)$$

$$f(\eta) = \rho u^2 / \rho_m u_m^2 \text{ とし、} (\rho_m u_m^2 / \rho_0 u_0^2)_{X=X_c} = 1 \text{ と仮定すれば、}$$

$$R_0^2 = 2 k^2 X \int_0^1 f(\eta)_{X=X_c} \eta d\eta \quad \dots \dots (4)$$

$$\therefore \frac{\rho_m u_m^2}{\rho_0 u_0^2} = \frac{X_c}{X} \cdot \frac{\int_0^1 f(\eta)_{X=X_c} \eta d\eta}{\int_0^1 f(\eta)_{X=X} \eta d\eta} \quad \dots \dots (5)$$

そして運動量一定という仮定から次式が得られる。

$$P_m / P_0 = (\rho_m u_m^2 / \rho_0 u_0^2) = X_c / X \quad \dots \dots (6)$$

上式より主要区における軸上流圧分布が与えられる。なお本解析は気液境界面での抵抗損失及び振動流れ等によるエネルギー消費は考慮せず、かつ気液境界面上での圧力状態を大気圧とみなしている。

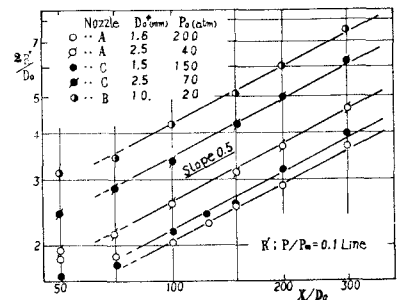


図2 噴流拡がり

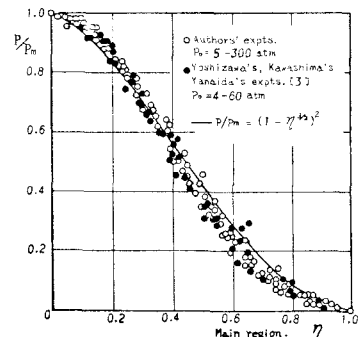


図3 動径方向流圧分布

4. 噴流中心軸上の流圧分布

ピトー管計測は主噴流の

外周に形成される噴霧層をとらえられないが、混合流れがもつ外径の平均値は把握できる。しかし前報で述べたごとく主要区における軸上流圧の計測には、ピトー管形状とノズル形状の適合性及び波状流の測定に起因する問題点を伴う。そこでLeachらが用いた計測手法と同様な、平面受板(150φmm)に細孔(0.25φmm)を設けて圧力変換器に導く装置で流圧分布を精査した。この測定では平板上に境界層を形成させ軸上流圧をより安定な岐点圧として計測する。図4は従来の実験結果を再整理したものであり運動量解析による流圧分布特性とよく一致している。ここで初期区長 X_c を前報で用いた噴流核長と比較すれば定性的な意義は同じであつて、より下流側の十分発達した主要区がもつ軸上流圧分布の外挿点として定義される。

5. 霧化理論と連続長 (Breakup length)

噴流が霧化拡散された状態に注目して気流の密度分布が変化する空気噴流とみなすことによつて更に噴流特性が明確にされる。解析法は講演時に報告するが、噴流の任意断面における速度分布と液流部分の重量濃度分布を与え運動量解析を適用するものである。この解析から重要な知見として(i) 連続長 $X_b = 260 \cdot D_0$, (ii) ポテンシャルコア区終端部における噴流拡がり $R/R_0 = 1.97$, 等が得られた。連続長については従来より多くの実験的研究があり、報告されている値と本解析結果とはよく近似している。例えば横田らによると、金属、岩石の壊食実験において試料の中央残丘部分が消滅する位置として $X/D_0 = 250 \sim 300$ が得られこの位置を連続長と推論している。楠井は低 Re 数域の研究においてノズル損失係数と連続長の安定性について言及しており、損失係数 $\xi < 0.26$ では連続長が ξ に影響されず安定であると結論している。 ξ 値を流出係数に換算すれば $C_f > 0.89$ で、本実験の供試ノズル群のうち理論との斉合性が確かめられ良好な噴流特性を維持するノズルの C_f 値と一致する。コア終端部の拡がり値については X_p でなく遷移区の中央付近の値と考えられ実験結果においても認められる。

6. 掘削効果と有効射程

図5にアルミニウム供試板の壊食実験結果と、図6には本報の特殊モ

ルタル試料の掘削結果を示す。噴流の連続長は不安定現象(X_b が変動)を示しており掘削量が最大の位置、即ち有効射程を考える際にはその確率分布を評価することが必要となる。Phinneyによれば、ガウス分布とされ $X_b(0\%) / X_b(50\%) : X_b(100\%) / X_b(50\%) = 0.7 : 1.3$ の結果を得ており、この値を理論連続長に適用して液滴流への遷移範囲を推定すると $X_b = 180 \sim 340 \cdot D_0$ の値が算出される。破砕機構は供試体の物性に特有なパターンを色々現わすが、液滴群の繰返し衝撃或いはキャビテーション壊食の効果で破砕が進むタイプの試料については、 X_b 範囲内或いは下流側の一定領域に有効射程が存在するといえる。また水力採炭技術で提唱されている有効射程($400 \sim 450 \cdot D_0$)も理論的に妥当なものと認められる。

7. むすび

(省略)

参考文献

1. 柳井田, 大橋 土木学会, 関西支部講演 (3, 48) 頁-44
2. K. Yamaoka, 2nd Int. Symp. Jet Cutting Tech., Paper A3 (1974), BHRA.
3. 吉沢, 川島, 柳井田 東北電大 Vol. 11, No. 2 (S. 39), 日経誌 Vol. 83, No. 950 (S. 42)
4. Leach & Walker, "Some aspects of rock cutting by high speed water jets" Phil. Trans. R. Soc., A260 (1966).
5. Phinney, "The breakup of a turbulent liquid jet in a gaseous atmosphere" J. of Fluid Mechanics, vol. 60, Part 4 (1973).
6. 楠井 気中液噴流の研究 第1〜3報 "機軸学会論文集 Vol. 33-248(S. 42), Vol. 34-260(S. 43)
7. 横田, 山門 機軸学会論文集 Vol. 33, No. 249 (S. 42-5)
8. 吉沢, 川島, 柳井田 日経誌 Vol. 84, No. 960 (S. 43-10)
9. A. A. Семерчан, И. Л. Веточагин; Инж.-физ. Жур. Том 3 No. 3 (1960), стр. 87-90
10. ムーニク, イブナトフ編 (外訳) "水力探炭と水力掘削" 上巻, 炭大出版会
11. Abramovich "The theory of turbulent jet" MIT Press (1963).
12. Shukurov "Basic factor and fracturing ability of water jet" Akad. Nauk SSSR, Otdel'nyiye Filial. 3, (1969).
13. Sharlovsky, 1st Int. Symp. Jet Cutting tech., Paper A6 (1972), BHRA.

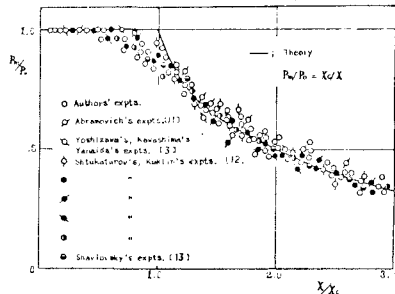


図4 軸上流圧分布

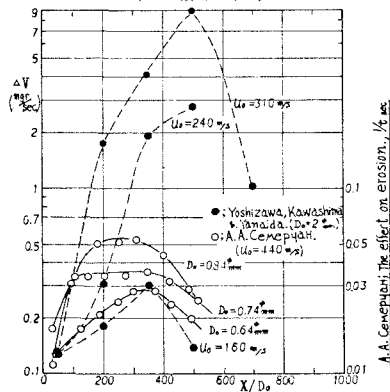


図5 試料距離と壊食量

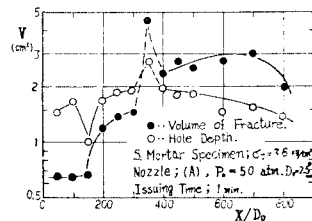


図6 試料距離と掘削量