

○日 本 工 営 正員 西野 謙
電力中央研究所 正員 松梨 史郎
早稲田大学理工学部 正員 吉川 秀夫

1. はじめに

乱流境界層が充分に発達した状態にある滑面上の流れが、粗面領域に流入すると、図1のように新たに粗面の影響により内部境界層が発達する。内部境界層に関してはまだ未知の部分が多く、その取扱いに關して様々な研究が行なわれている。石川・吉川等は境界層理論による内部境界層の取扱いに對し、いくつかの問題点を指摘している。また松梨等は本研究の前期段階として、内部境界層に関する物理的諸現象について考察している。本研究では、対象とする流れにいくつかの仮定を設け、粗度急変点の境界条件のみで計算出来るよう、境界層理論を基に解析することを試みた。

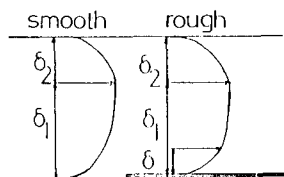


図1: 内部境界層説明図

2. 実験装置及び方法

図2に示すような風洞、および開水路において実験をおこなった。滑面には塗装したベニヤ板、粗面にはビーズ玉($d = 0.8\text{cm}, 1.6\text{cm}$)を利用した。滑面及び粗面領域は、それぞれの境界層が充分に発達するという条件のもとにその長さを決定した。

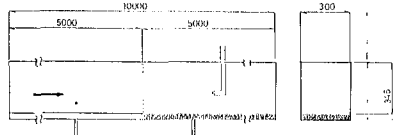


図2: 実験装置(風洞)

実験は、内部境界層の発達特性を明らかにするため滑面で1断面、粗滑度境界断面、粗面で4～5断面を選び、各断面において流速分布・内部境界層厚を求めた。風洞においては、2ch-ホットワイヤーにより流れの測定も同時におこなった。

3. 実験結果

流速分布をベキ乗則で表わすと変曲点が見られる、また、風洞において実験されたレイノルズ応力分布図(図3)においては、より顕著にその現象が見られる。これらの折れ点を内部境界層とした。

底面せん断力は開水路においては対数分布則から求め、風洞においてはレイノルズ応力分布から求めた。

4. 内部境界層の発達機構

図4に内部境界層の発達の様子を示す。この図において、▲はRAJARATNAMの噴流における実験結果、○は本研究風洞における結果、△は石川・吉川等の実験結果である。Mは δ の大きさを表わす間数であり、これより内部境界層の発達長さにより決定すると言え、BAUERの実験結果と一致している。

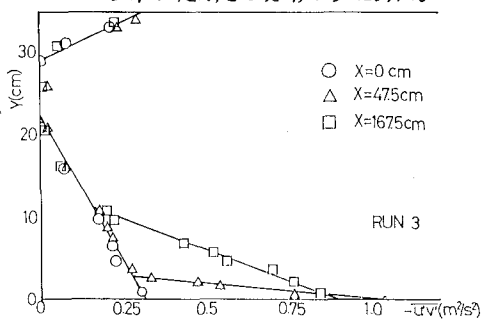


図3: レイノルズ応力分布図

5. 内部境界層及び底面せん断力の理論的算定式

まず、次のような仮定を設ける。

①開水路における水深は一定とし、風洞における上面からの境界層と、滑面から発達した境界層との接点も一定とする。

② 風洞において、最大流速以下の断面での流れに、上面からの境界層の影響は全くないものとする。

③ 摩擦抵抗則を決定する際、内部境界層が発達した状態における平均流速公式か、粗面領域全体にわたり成り立つ。とする。

④ 粗面領域において $m=7$ とする。(m は流速分布のべき数)

以上のような仮定のもとに、カルマンの運動量方程式を基礎にして、抵抗則とエネルギー式を連立させ、粗度急変点の境界条件を代入して、内部境界層厚 δ 、底面せん断力 u_* を求めていく。

尚、解析は次の手順による。

★1. 摩擦抵抗則の決定

$\delta = h$ となっている断面における平均流速公式を基に、近似的に次のような抵抗則を与える。

$$u_* = \frac{v}{6 + 5.75 \log(\delta/k_s)} \quad \text{--- ①}$$

これに境界条件の v , δ を代入し、 u_* を導く。

★2. エネルギー式・カルマンの運動量方程式

断面全体について考えたエネルギー式

$$\frac{dv^2}{ds} = 2gI - \frac{2u_*}{h} \quad \text{--- ②}$$

およびカルマンの運動量方程式

$$\frac{m}{(m+1)(m+2)} v^2 \frac{\partial \delta}{\partial s} + \frac{3m+2}{(m+1)(m+2)} v \delta \frac{\partial v}{\partial s} = u_*^2 \quad \text{--- ③}$$

②, ③をそれぞれ差分化し、計算を進めていくことにより、流れ全体の δ , u_* を導くことが出来る。尚、③における主流速 v は平均流速 v を換算した値を代入した。

以上の方法により求めた u_* , δ は、図5~7で示す通り実験値と比較的一致するという結果を得た。

6. 結論および今後の課題

本研究において、以上のように内部境界層も境界層理論により解析できるという結論を得た。また、

① 内部境界層は開水路の場合水深の5倍程度の距離、また風洞の場合 h の15倍程度で発達しきる。

② せん断力計算値は、粗度急変点付近 ($X=0 \sim 20\text{cm}$) では、実験値よりやや大きな値となる。

という結論を同時に得た。今後はさらに実験を重ね、種々の仮定および v の取扱いを考察する必要がある。

(参考文献) ① 吉川清夫・石川忠晴・吉川勝彦「開水路の内部境界層に関する研究」土論第235号。

② 吉川清夫・石川忠晴・吉川勝彦「開水路の内部境界層に関する研究」年報第38回(3) Rajaratnam, N. "The Hydraulic Jump as a Wall Jet"

④ Bauer, W.J. "Turbulent Boundary Layer to a Step Change in Surface Roughness" Part 1. etc.

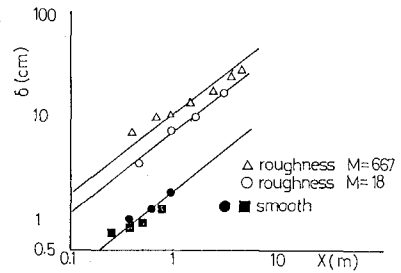


図4: 内部境界層発達機構。

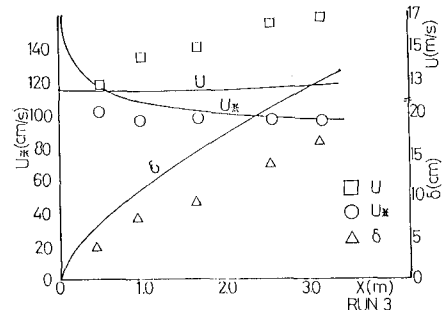


図5: 計算値と実験値との比較(風洞)

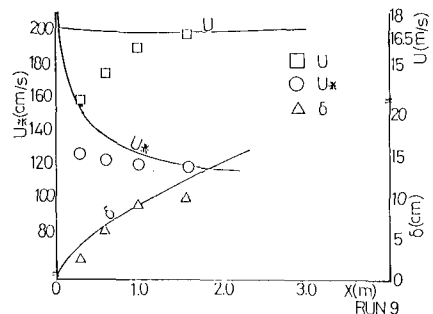


図6: 計算値と実験値との比較(風洞)

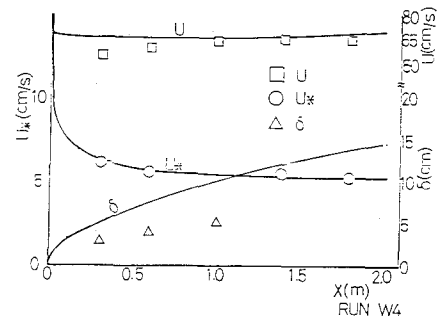


図7: 計算値と実験値との比較(開水路)