

進行波表面に沿う流れの速度分布

種子田, 定俊
九州大学応用力学研究所 : 教授

友成, 義正
九州大学大学院学生, 工学部

<https://doi.org/10.15017/4743492>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 39, pp. 57-65, 1973-03. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



進行波表面に沿う流れの速度分布†

種子田 定 俊*
友 成 義 正**

概 要

一様流の中で進行波運動を行なう物体表面に沿う流れの速度分布を熱線流速計で測定した。波速が増大するにしたがい平均速度分布は次第に肥えた形になり、波速が一様流よりも大きい場合には表面近くに一様流よりも早い流れが形成される。境界層内の各瞬間の速度分布および乱れは波速によって多彩に変化する。先端平板部の境界層も後方の進行波運動の影響を受けて周期的に変化する。一般に進行波運動は流れを綺麗にする作用を持つ。

1. 結 言

「いるか」や「かます」は普通の動物の筋肉の能力から予想されるよりもはるかに早く泳ぐことが知られているが、これらの動物が泳ぐときのレイノルズ数は 10^7 の程度である¹⁾。よく知られているように、このように高いレイノルズ数においては剛体表面に沿う定常流の境界層は乱流である。しかし魚は泳ぐとき身体全体で進行波運動を行なうのでその非定常性の影響が境界層に現われることが予想される。もし進行波運動の作用により境界層が高いレイノルズ数まで層流を保つならば、あるいは乱流境界層の乱れの性質が変わるならば、表面摩擦抵抗が減少する可能性が期待される。

進行波表面に沿う流れの境界層の遷移については Wehrmann²⁾ が、乱流境界層の乱れの変化については Kendall³⁾ がそれぞれ実験を行なった。これらの研究は進行波の波長、振幅が境界層の厚みの程度の場合について行なわれたものである。しかしながら、魚が泳ぐとき身体全体で行なう進行波のスケールは境界層の厚みにくらべてはるかに大きい。そのような場合についての境界層に関する研究は全く行なわれていないように思われる。本論文は波長、振幅が境界層の厚みにくらべてけた違いに大きい進行波運動が表面近傍の速度分布および乱れにおよぼす影響をくし形熱線流速計で測定した結果の報告である。

2. 実験装置と方法

実験は大型低速風洞（測定部 $4\text{ m} \times 2\text{ m}$ ）で行なわれた。進行波発生装置は進行波に沿う流れの可視化実験⁴⁾ に使用されたものと同じである。図 1 において X_0, X_1, X_2, X_3 は流速を測定したステーションの位置を示し、前端から測ってそれぞれ 32 cm, 92 cm, 152 cm, 212 cm である。

† 日本物理学会（1972 年 10 月）において講演

* 九州大学教授，応用力学研究所

** 九州大学大学院学生，工学部

み込まれ、出力は直記式電磁オシログラフにより記録された。測定の前直前に各熱線の感度は揃えられ、風速とガルバの光点のふれの関係が検定された。くし型熱線プローブは粘着テープで進行波表面にとりつけられ、進行波とともに運動する。

3. 実験結果

図3は進行波後端の振幅ゼロ、一様流の速度 $U_0 = 0.5 \text{ m/s}$ のときの X_0 における熱線流速計のシグナルである。前縁からの距離でとったレイノルズ数 $U_0 x_0 / \nu$ は 10^4 で、進行波がないとき流れは完全に定常な層流である(図3(a))。この状態で後方が進行波運動を開始すると、前方平板部の流れは周期的に変動する。そして C/U_0 の値が大きいくほど流速の変動量も大きい(図3(b))。

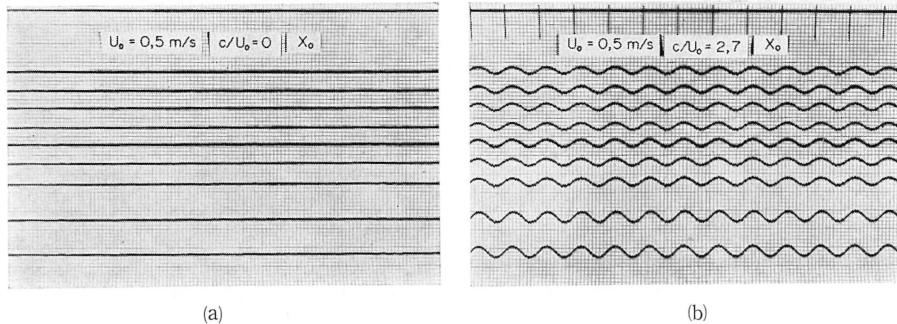


図 3 先端平板部における熱線シグナル、(下方から順に、進行波表面からの高さ $y = 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 \text{ cm}$ の位置における風速を示す。最上位の1本のシグナルは進行波の山が X_1 の位置を通過する瞬間にピークを出そうになっている)、 $U_0 = 0.5 \text{ m/s}$, ゴム膜の全長でとった Reynolds 数 $Re_L \sim 10^5$, (a) $C/U_0 = 0$, (b) $C/U_0 = 2.7$ 。

図4は同じく $U_0 = 0.5 \text{ m/s}$ のときの X_3 の位置における熱線シグナルを示す。 $U_0 x_3 / \nu = 7 \times 10^4$ で、進行波運動がない場合には気流はすべての位相で大きく乱れている(図4(a), (b))。それは最初の山の背後で境界層が剥離するからである。この状態から $C/U_0 > 1$ の進行波運動を開始すると気流の乱れは消滅して綺麗な層流になる(図4(c), (d))。興味あることは表面からの高さが異なるにつれて波形、位相が複雑に変化していることである。

次に図5は $U_0 = 1.2 \text{ m/s}$, X_1 , $U_0 x_1 / \nu = 7.2 \times 10^4$ における熱線シグナルを示す。 $C/U_0 = 0$ のときには山の位置で層流(図5(a))、谷の位置でははげしい乱流の状態にある(図5(b))。進行波運動が開始されると表面近くで層流と乱流が周期的に交替する。波速の増大とともに乱れている時間が層流状態の時間に比べて減少し、 $C/U_0 \sim 1$ のときには乱れがほとんど消失する(図5(c), (d))。図からわかる通り、表面付近では波形が正弦波から大きく崩れて複雑な形をしている。興味深いのは $C/U_0 \sim 1$ の場合山の位置で乱れが発生、谷の位置では綺麗な層流を保つことである(図5(d))。

図6は $U_0 = 7 \text{ m/s}$, X_0 , $U_0 x_0 / \nu = 1.5 \times 10^5$ の熱線シグナルを示す。 $C/U_0 = 0$ のとき境界層は乱流境界層である(図6(a))。この状態で後方が進行波運動を開始すると、進行波と同じ周期で X_0 の境界層

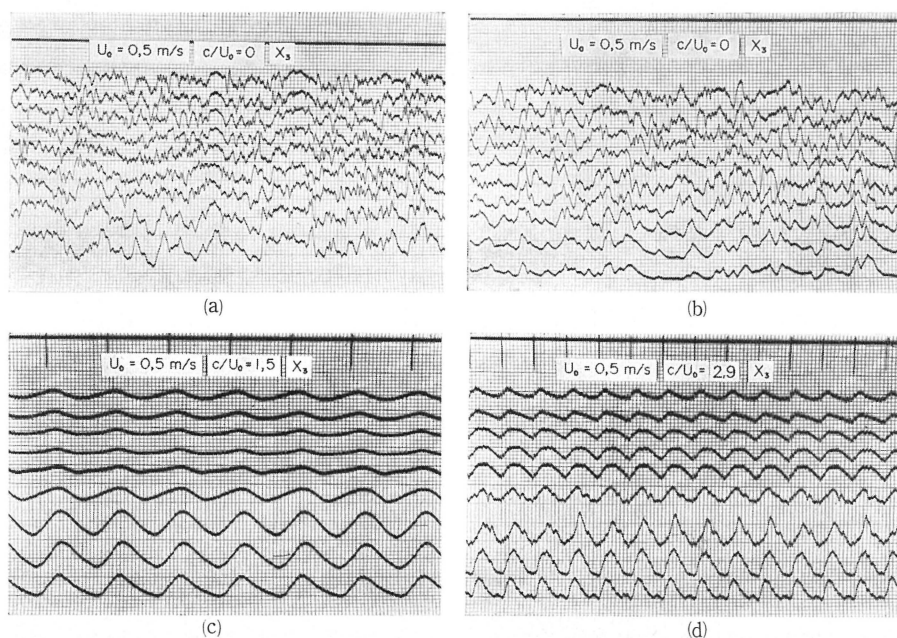


図 4 進行波の後端付近の熱線シグナル, $U_0 = 0.5 \text{ m/s}$, $R_L \sim 10^5$, (a) $C/U_0 = 0$, 山の位置, (b) $C/U_0 = 0$, 谷の位置, (c) $C/U_0 = 1.5$, (d) $C/U_0 = 2.9$.

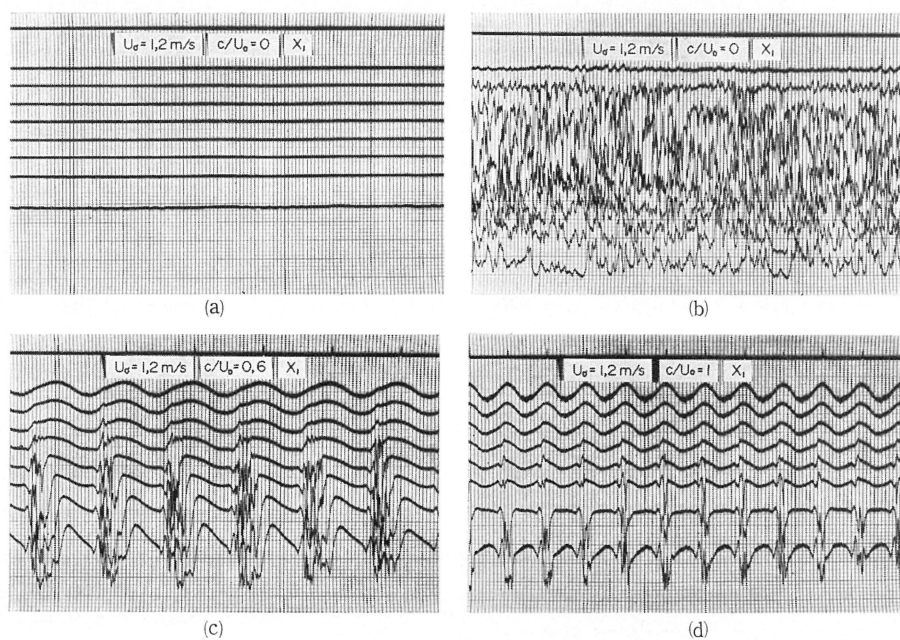


図 5 進行波の前端付近の熱線シグナル, (この図の場合だけは熱線の高さは $y = 0.5, 1, 2, 3, 5, 7, 9, 12 \text{ cm}$), $U_0 = 1.2 \text{ m/s}$, $R_L \sim 2 \times 10^5$, (a) $C/U_0 = 0$, 山, (b) $C/U_0 = 0$, 谷, (c) $C/U_0 = 0.6$, (d) $C/U_0 = 1$.

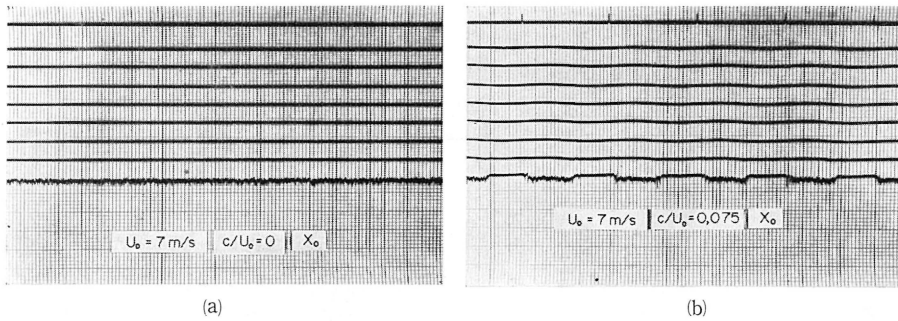


図 6 先端平板部における熱線シグナル, $U_0 = 7 \text{ m/s}$, $R_L \sim 1.4 \times 10^6$,
 (a) $C/U_0 = 0$, 乱流境界層, (b) $C/U_0 = 0.075$, 乱流境界層が
 周期的に層流になる.

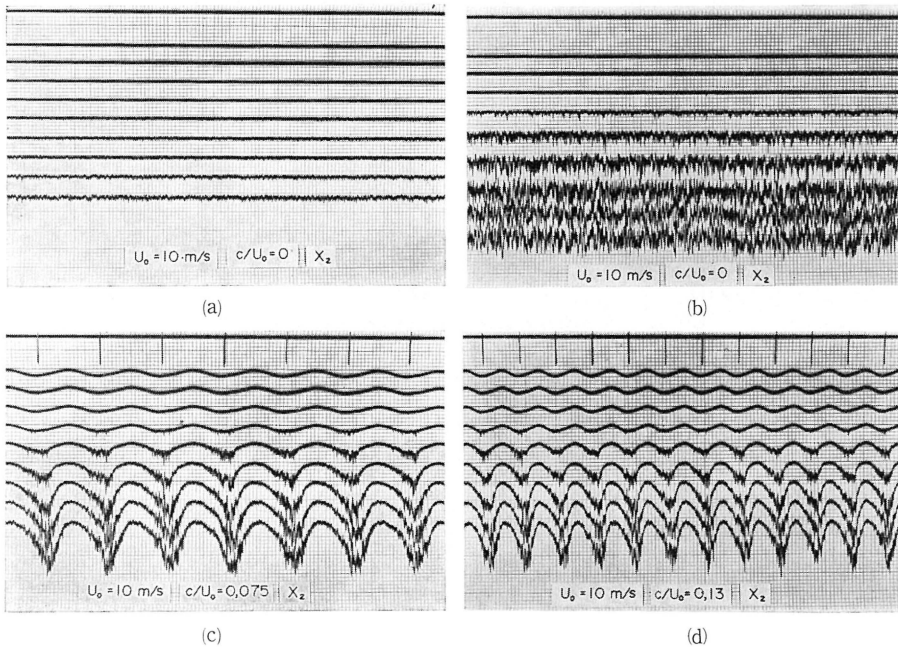


図 7 高レイノルズ数における熱線シグナル, $U_0 = 10 \text{ m/s}$, $R_L \sim 2 \times 10^6$,
 (a) $C/U_0 = 0$, 山, (b) $C/U_0 = 0$, 谷, (c) $C/U_0 = 0.075$,
 (d) $C/U_0 = 0.13$.

は層流にもどる (図 6 (b)).

図 7 は進行波の後端の振幅 10 cm , $U_0 = 10 \text{ m/s}$, X_2 , $U_0 X_2 / \nu = 10^6$ における熱線シグナルを示す. 境界層は前方平板部から全部乱流であるが, 進行波を与えることにより境界層は綺麗な流れに変化する.

図 8 ~ 12 は進行波表面の平均速度分布を示す. 進行波の波速を上げてゆくと平均速度分布 $\bar{U}(y)$ は一般に段々肥えた形になり, $C/U_0 \geq 1$ では進行波表面から少し離れた位置に一樣流よりも早い流れが発生する. 注目すべきことは波速が大きく変化しても表面の平均速度勾配 $(\partial \bar{U} / \partial y)_{y=0}$ はほとんど変化

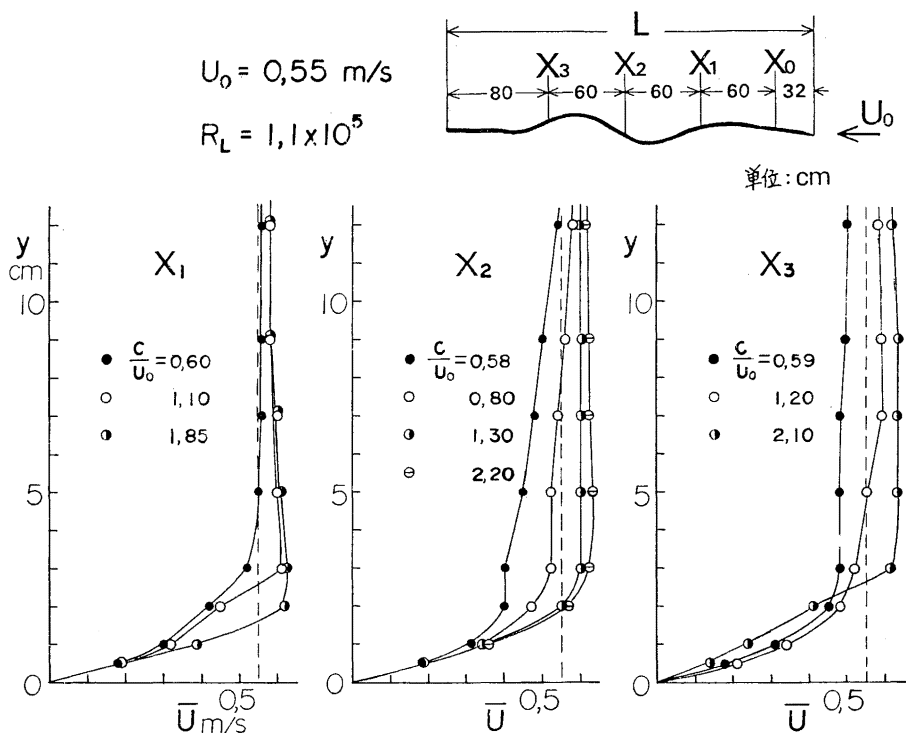


図 8 平均速度分布 ($R_L = 1.1 \times 10^5$, 後端固定)

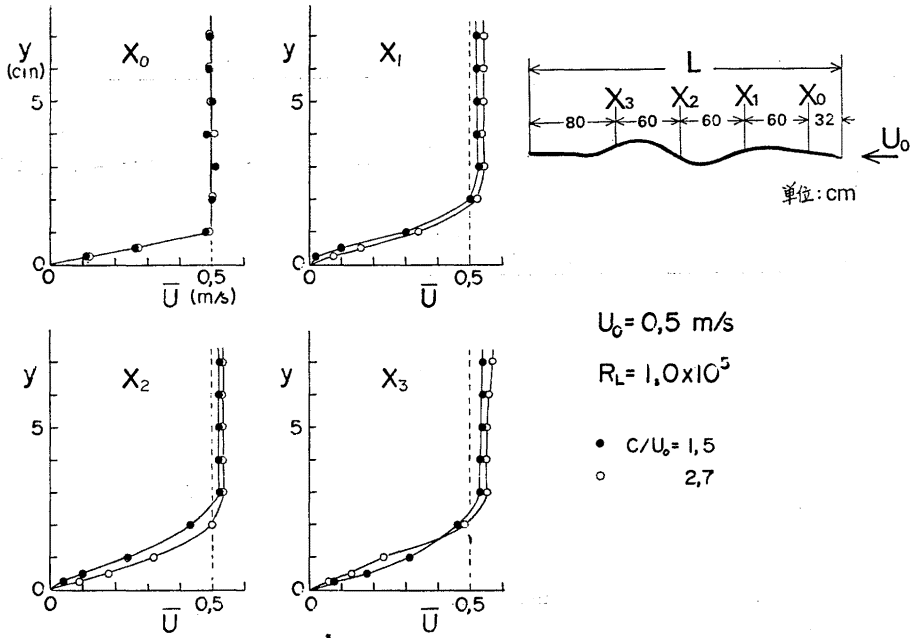
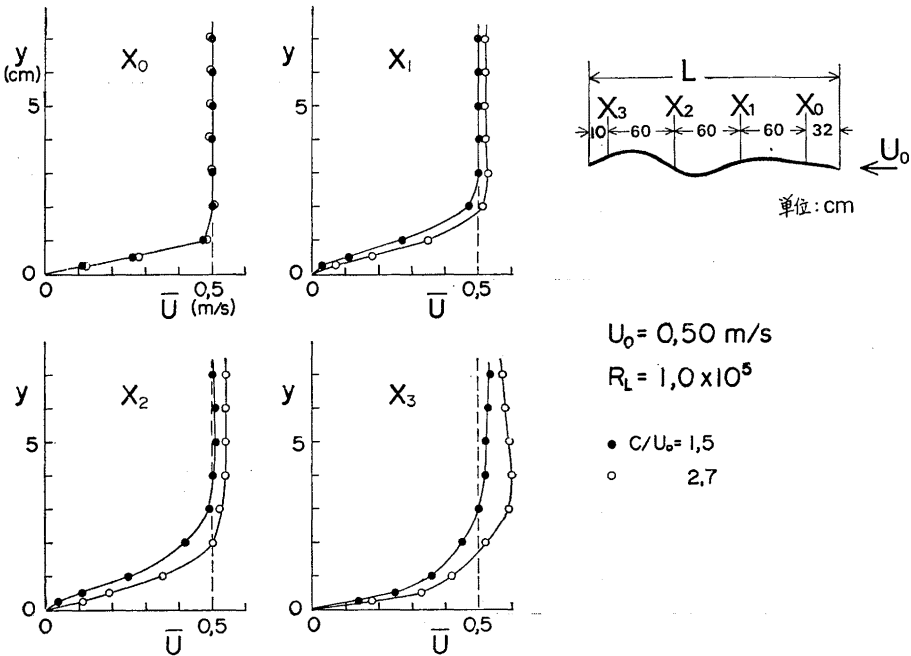
しないことである。図 8, 9 に見られる通り, 後端の振幅がゼロのとき X_3 の点における速度分布の形には $C/U_0 \geq 2$ のときに異常が現われる。このとき C/U_0 を増大するとかえって $(\partial \bar{U} / \partial y)_{y=0}$ が減少するのが認められる。この異常は後端が振動する場合には現われない (図 10)。また, 図 9 と図 10 をまた図 11 と図 12 をそれぞれ比較すると, 後端の振幅ゼロの場合にくらべて後端が大きく振動する場合は X_3 の点における $(\partial \bar{U} / \partial y)_{y=0}$ の値が増大することがわかる。このように後端の条件の変化の影響はその近傍に大きく現われる。しかし, それ以外の場所にはほとんど現われない。

4. 結 言

一様流の中で進行波運動を行なう物体表面に沿う流れをくし形熱線プローブを用いて測定した。

波速が増加するにしたがい平均速度分布は次第に肥えた形になり, 波速が一様流の速度の程度よりも大きいとき表面近くに一様流よりも早い流れが形成される。しかし表面の平均速度勾配は波速が大きく変化してもほとんど変化しない。境界層内の各瞬間の速度分布および乱れは波速によって複雑に変化する。先端平板部の境界層も後方の進行波運動の影響をうけて周期的に変化する。一般に進行波運動は流れを綺麗にする作用を持つ。

今後はさらに広いレイノルズ数の範囲で速度分布, 圧力分布, 乱れ, 表面摩擦などについて実験を進める予定である。

図 9 平均速度分布 ($R_L = 1.0 \times 10^5$, 後端固定)図 10 平均速度分布 ($R_L = 10^5$, 後端振動)

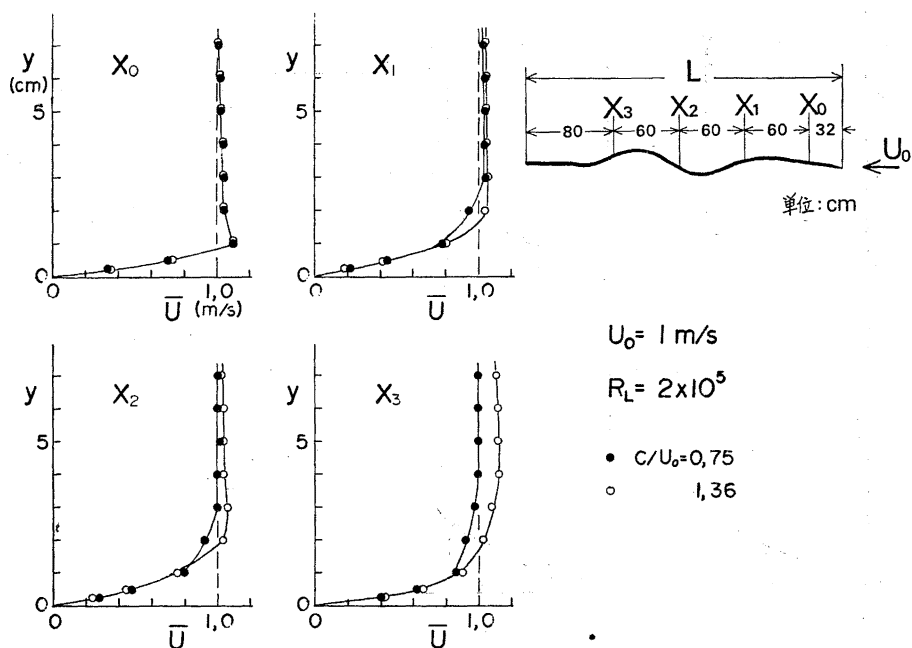


図 11 平均速度分布 ($R_L = 2 \times 10^5$, 後端固定)

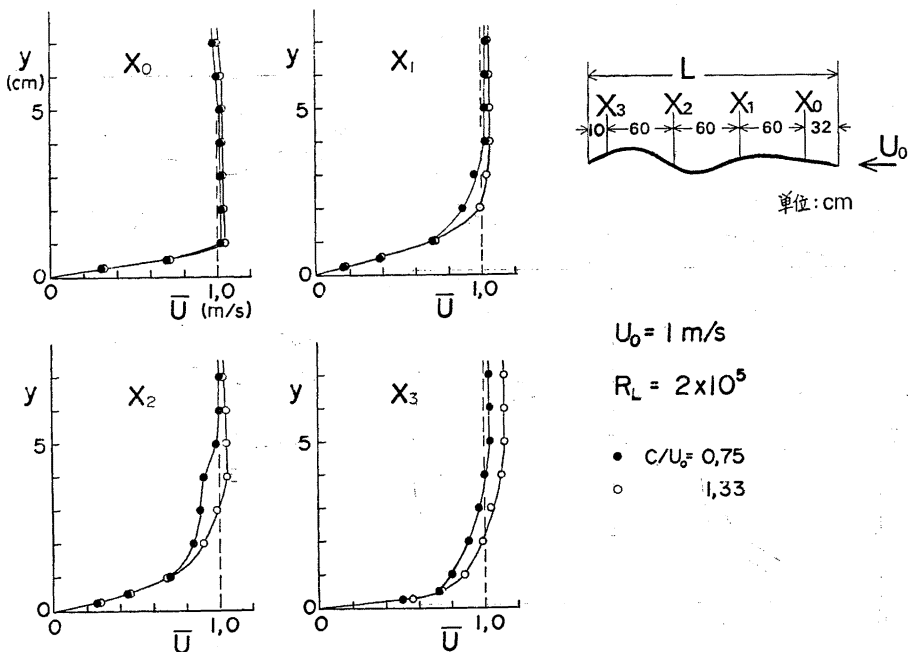


図 12 平均速度分布 ($R_L = 2 \times 10^5$, 後端振動)

謝 辞

実験を補助して下さった天本肇助手, 石井幸治技官, 高田三郎技官, 深町信尊技官, 渡辺公彦技官ならびに原稿を浄書して下さいました岡世以子嬢および実験中お世話になった方々に対して感謝する。本研究は文部省科学研究費によって行なわれた。

文 献

- 1) 谷一郎, 科学, Vol. 34, No. 9, 1964, pp. 471-476.
- 2) Wehrmann, O. H., Phys. Fluids, Vol. 8, No. 7, 1965, pp. 1389-1390.
- 3) Kendall, J. M., J. Fluid Mech., Vol. 41, part 2, 1970, pp. 259-281.
- 4) 種子田・天本・石井・友成, 応用力学研究所所報, 第39号, 1972, pp. 67-75.

(昭和47年10月31日 受理)