

水中物体の背後に形成される後流域より発生する質量力

| | |
|-------|---------------------------|
| 誌名 | 日本水産學會誌 |
| ISSN | 00215392 |
| 著者 | 瀬戸, 雅文 糸刈, 長敬 中村, 充 |
| 巻/号 | 57巻2号 |
| 掲載ページ | p. 201-207 |
| 発行年月 | 1991年2月 |

水中物体の背後に形成される後流域より発生する質量力

瀬戸雅文, 糸洌長敬, 中村 充

(1990年6月20日受付)

Study on Unsteady Force Generating the Wake behind
a Body Immersed in Viscous Fluid

Masabumi Seto,* Chohei Itosu,* and Makoto Nakamura*

Large-scale wake is generated behind a bluff body being widely used elements of submerged structure.

Until now, added mass component of unsteady force acting on the body was generally calculated by potential theory. However, the real flow that has the wake behind a body is different from the potential flow.

Unsteady force is calculated more accurately by using a new dimensionless number, we designate as "wake mass coefficient" which can be calculated by the change of the wake momentum.

Judging from the experimental result of a normal plate, wake mass coefficient comes to the values of 0.17 by way of a universal constant independent of Reynolds number and acceleration of principal flow.

It suggests that the generation of added mass is largely related to the growth of the wake behind a body.

作り育てる漁業の振興に伴い、日本沿岸の漁場整備開発が重要となり、有用魚種の保護育成礁や生産礁など人工魚礁による漁場整備が緒についた。これに伴い、海中および海底漁場施設の設計のための流体力の評価が重要な課題となってきた。非定常流場における流体力の特性は、海岸・海洋構造物においては、主として波による流体力について研究され、構造物の代表径が入射波長に比べて十分小さければ Morison の式¹⁾によって流体力係数の形で評価される場合が多い。流体力係数の詳細については、実験的に波周期内における時間変化²⁾、設定波の条件による変化³⁾など Morison の式の適用限界⁴⁾も含めて多角的に議論されているが結論が出るには至っていない。一方、その発生機構について Sarpkaya および Garisson⁵⁾は渦系モデルを用いることにより振動流中の円柱に働く流体力の計算方法を提案し、樫木ら⁶⁾はこの理論を波動流中の円柱に適用し、後流渦の挙動と発生流体力、主として揚力特性との関連性について理論的に検討しているが、依然として実験結果と比較すると定量的検討の余地がある。これら波による非定常流体力に関する研究は、主として低レイノルズ数より遷移レイノルズ数域についてのものである。一方、Hurlbut⁷⁾は MAC 法を用いて、柵橋ら⁸⁾は離散フーリエ級数法を用

いてナビエ・ストークスの式を数値的に解析検討しているが、いずれも、剝離渦が物体近傍に限られる初期状態のみに留まっている。

現行の漁場造成整備の設計指針においては、人工魚礁の設置に際して発生する着底時の衝撃力や設置後の安定については中村ら⁹⁾による算定式が用いられているが、これに含まれる魚礁の流体力係数については依然として上記の問題を含んだままである。このため、現場海域に十分適用可能な設計指針を提供するためには、低レイノルズ数域より比較的高いレイノルズ数域に至るまでの非定常流体力の特性を包括的に説明できる理論が必要とされている。

魚礁など海中構造物の部材として多用される円柱・平板などは定常流場における実験結果より臨界レイノルズ数領域においてその背後に大規模な後流域を伴っていることが報告されている。^{10,11)} 本研究は、背後に大規模な後流域を伴った流体力学的に鈍い物体を主対象とし、物体に生じる付加質量力を、物体の背後に発生・発達する後流域により生ずる後流質量力という新たな発想に立って評価することによって、低レイノルズ数域より実用上必要となる臨界レイノルズ数域までの流体力、主として質量力の発生機構を説明することを目的として理論的に

* 東京水産大学海洋生産学科 (Department of Marine Science and Technology, Tokyo University of Fisheries, Konan, Minato, Tokyo 108, Japan).

考察し水理実験によって検証している。

理論的考察

流体内に設置された平板など流体力学的に鈍い物体の背後には逆流部および渦列群を伴った大規模な後流域が発生する。このような後流域を流動形態より定義することは渦構造の詳細,¹²⁾ 分散機構¹³⁾とも関連してなお不明な点が多く困難を伴うが, 運動量則の立場から, 物体に付着して物体と共に運動する仮想的な後流(以後付着後流と呼ぶ)を仮定しその容積を V' , 物体の体積を V として $(V+V')$ に作用する流体力について考える。このように付着後流を仮定した場合の物体周辺の流れ場の模式図を Fig. 1 に示す。

ここで, 静止座標系に対して, 物体による摂動を受けない主流流速を u , 物体の移動速度を U , また, 流体および物体の密度をそれぞれ ρ および σ とする。まず, 物体が流体と同一速度で運動する場合, 付着後流を伴った物体に働く非定常力 F_1 は, 物体がない場合に物体と同じ体積を占める流体塊の保有する運動量 $\rho(V+V')u$ の時間変化として作用し

$$F_1 = \frac{d}{dt} \rho(V+V')u \quad (1)$$

また, 物体が周辺流体に対して相対運動を行う場合には, 新たに $C\rho(V+V')(U-u)$ の運動量が周辺流体内に発生し, その反作用として付着後流を伴った物体には

$$F_2 = -\frac{d}{dt} C\rho(V+V')(U-u) \quad (2)$$

の力が働く。ここで, 比例定数 C は付加質量係数と同様

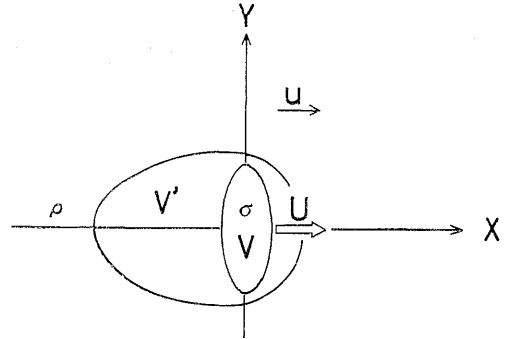


Fig. 1. Schematic definition of used model with wake behind a body. u : Velocity of principal flow. U : Velocity of a body. V : Volume of a body. V' : Capacity of wake. σ : Density of a body. ρ : Density of fluid.

に慣性力係数としての意味を持つ。さらに, 流体力に占める抗力成分を F_D 物体に作用する重力や推力などの強制外力を F_f とすると, 付着後流を伴った物体 $(V+V')$ に関する運動方程式は

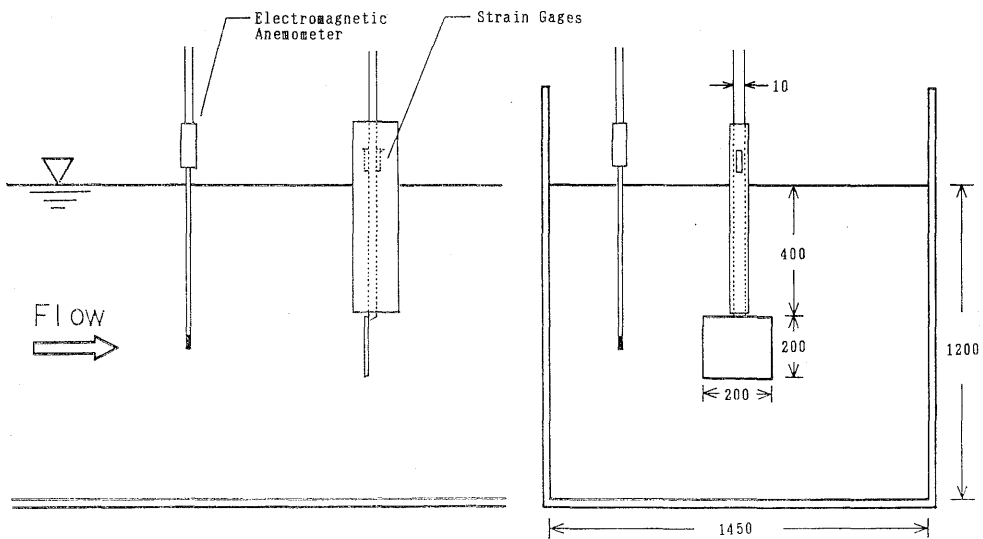
$$\frac{d}{dt} \{(\sigma V + \rho V')U\} = F_1 + F_2 + F_f + F_D \quad (3)$$

ここに, (1), (2) 式を代入すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \{C+1\} \rho V' + (\sigma + C\rho) V \} U \\ = (C+1) \rho \frac{d}{dt} (V+V')u + F_f + F_D \end{aligned} \quad (4)$$

ここで, 物体の容積, 密度が一定であれば

$$\begin{aligned} \{ (C+1) \rho V' + (\sigma + C\rho) V \} \dot{U} + \rho \dot{V}' (C+1) U \\ = (C+1) \rho \{ \dot{V}' u + (V+V') \dot{u} \} + F_f + F_D \end{aligned} \quad (5)$$



(unit: mm)

Fig. 2. Schematic drawing of experimental equipment.

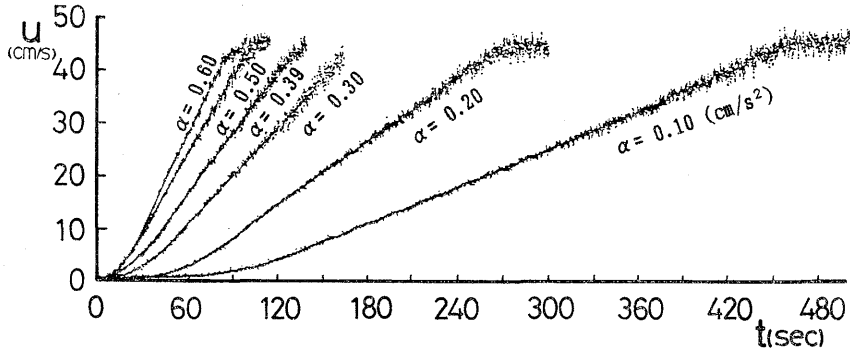


Fig. 3. Uniformly accelerated velocity fields of principal flow generated on the experiment.

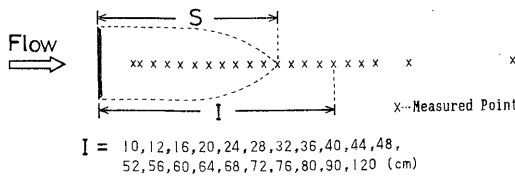


Fig. 4. Measured points of velocity in wake.
 S: Length of reversed flow field along center line of wake.
 I: Distance between a plate and measured point.

ここに、上付きのドットは時間に関する微分を示す。さらに物体が静止座標系に対して静止している場合には物体に作用する流体力 F は F_f の反作用として

$$F_{U=0} = \rho(C+1)\{(V+V')\dot{u} + \dot{V}'u\} + F_D \quad (6)$$

によって表される。

実験装置および実験方法

等加速度流場に物体が静止している場合の物体に作用する流体力と後流域の発達過程との関連性を調べるために水理実験を行った。実験の概要図を Fig. 2 に示す。

本実験には、東京水産大学所有の測定部流路長さ 7 m, 幅 1.45 m, 常用水深 1.2 m で側方片面および底面にガラス張りの観測部をもつ境界層吸収装置付き大型回流水槽を使用した。本水槽は流速操作盤上で任意のダイヤルを設定することにより、これに対応する定常流場を作るものであるが、ダイヤルをある時間間隔をもって連続的に増加させることによって試行錯誤の結果、数パターンの等加速度流場を発生させるためのダイヤルの上昇時間間隔を求めた上で、これを基に主流流速 5 cm/s~35 cm/s までの範囲において 0.10 cm/s²~0.60 cm/s² の範囲で任意の等加速度流場を発生させるプログラムを開発した。これにより発生させた等加速度分布の一例を Fig. 3 に示す。

本実験は定常流場、および加速度 (α) 0.20 cm/s², 0.39 cm/s², 0.60 cm/s² の 3 パターンの等加速度流場を用いて

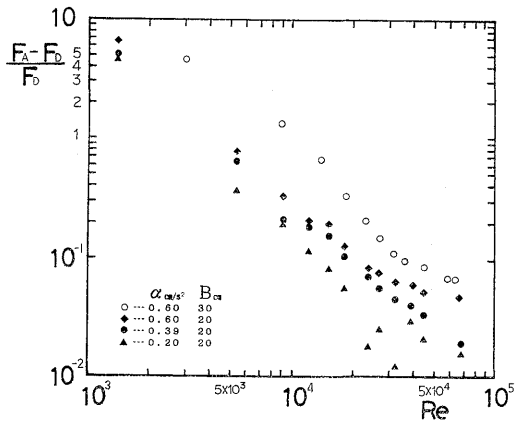


Fig. 5. Changes on the added mass forces of a plate against the Reynolds number (Re) as accelerated velocity (α) and the width of a plate (B).

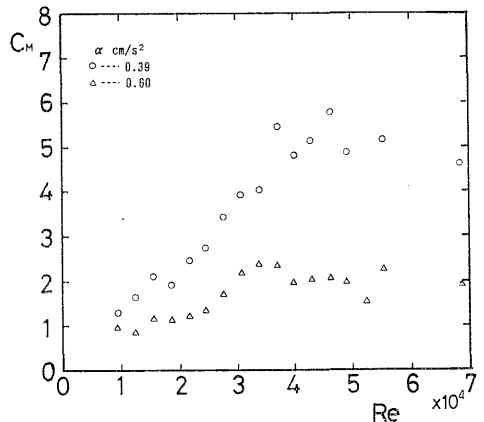


Fig. 6. Changes on the virtual mass coefficients (C_M) of a plate against Reynolds number (Re).

行った。試供物体は縦・横の幅 (B) 共に 20 cm, 厚さ 2 mm のアルミ製の平板で、これを、主流方向に対して直角に向け、防水形フードでカバーされた直径 10 mm のステンレス製角柱センサーで水路中央に設置した上で、

これに生じる歪値より平板に作用する非定常流体力を測定した。また, Fig. 4 に示すように主流と平行な中心線に沿って板幅の6倍後まで計 21 測点において, 電磁流速計を用いて後流域の変動流速を各加速度場ごとに測定した。計測データはいずれも 20 Hz で AD 変換後, フロッピーディスクに記録しパーソナルコンピュータで解析した。

実験結果

非定常流体力の変動特性 今回の実験は比較的low加速度流場で実施されたが, 主流流速値に対する平板部材の作用流体力は定常流場と非定常流常において同一レイノ

ルズ数の条件下で相違が認められる。平板部材に作用する流体力の定常流場と加速度流場における差異を Fig. 5 に示す。ここで, 加速流場におけるレイノルズ数の変化は時々刻々変化する主流の流速値を用いて算出した。図の縦軸は同一レイノルズ数における加速度流場の流体力 (F_A) と定常流場の流体力 (F_D) との差 (F_M) を F_D で基準化した値であり, そのレイノルズ数による変化を示している。これより, 低レイノルズ数域においては加速度流場における流体力が同一レイノルズ数域の定常流場のそれと比較して数倍程度顕著に作用しており, レイノルズ数の増加と共に F_M は急激に減少すること, および主流の加速度が大きい程概して F_M が大きいことがわか

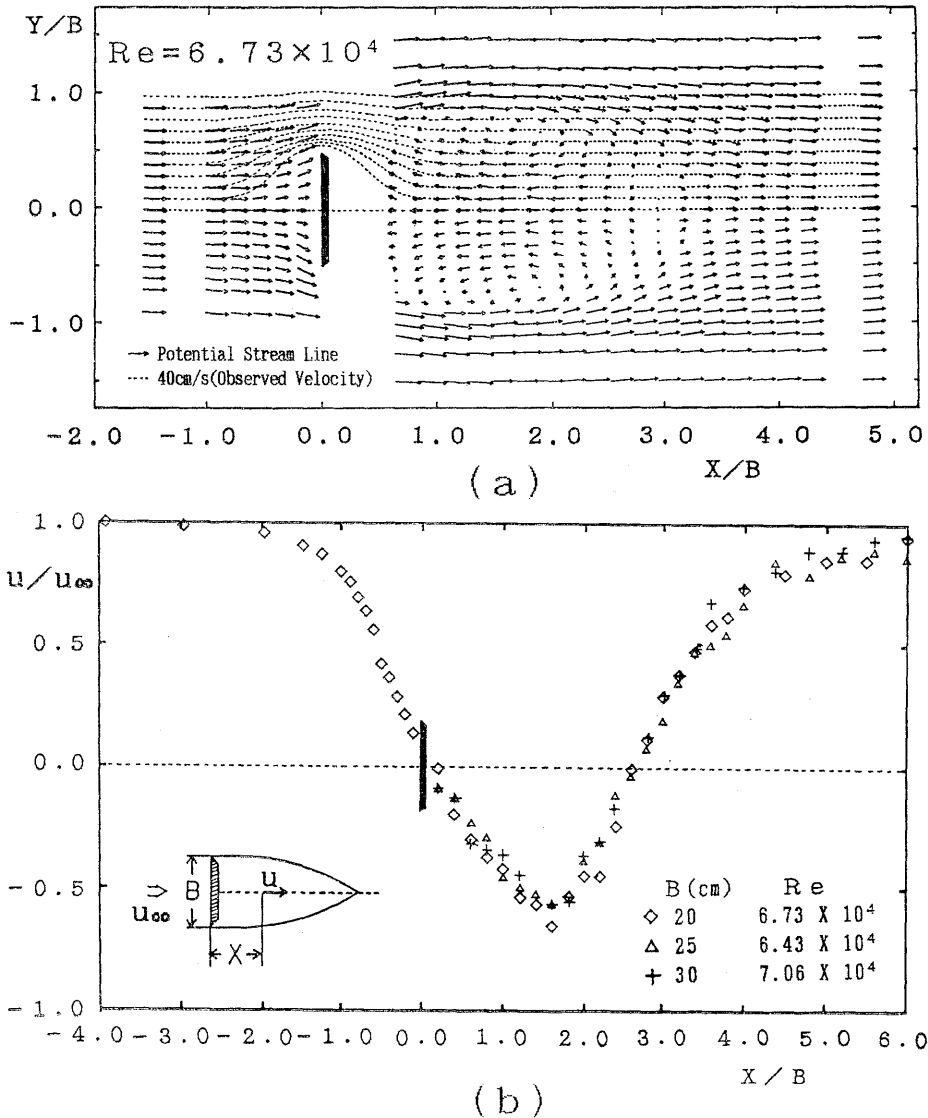


Fig. 7. Mean velocity distribution for the steady flow as measured at equally spaced points (a), and mean velocity measurements downstream of a flat plate ($Y/B=0$) (b).

る。また、図中の白丸は部材の板幅を縦横共に 30 cm に拡大した場合についての同様な実験結果であるが、これより部材の板幅を拡大することによっても F_M が大きくなることわかる。

一般に、非定常流常における物体に作用する流体力の評価には、Morison の式が適用される場合が多く、これは次式で表される。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A u |u| + C_M \rho V \dot{u} \quad (7)$$

ここに、 C_D : 抗力係数、 C_M : 仮想質量係数、 A : 物体の射影面積である。一般に、仮想質量力成分は流れのポテンシャル理論より計算される仮想質量を物体の適当な体積で基準化することにより、形状に依存する定数 C_M によって評価される。二次元平板の場合は $V=0$ となるため、便宜上板幅を直径とする円柱を基準体積として $C_M=1$ としているが、¹⁴⁾ この場合、(7) 式の物理的意味が曖昧になる。

Fig. 6 は縦横共に 20 cm の平板に作用する、等加速度場 0.39 cm/s²、0.60 cm/s² における仮想質量力を Morison の式に当てはめた場合の仮想質量係数 C_M のレイノルズ数による変化を示したものである。これより、 C_M はレイノルズ数、加速度値のいずれにおいても変動しており、Morison の式によって、このレイノルズ数域における平板の仮想質量係数 C_M を定数として決定することは困難である。これは、Morison の式の仮想質量力項が、ポテンシャル理論を対象とした形になっているのに対して、一般に実際の流動場はポテンシャル理論によるものとかかなりの差異を生じていることによるためと考えられる。

後流逆流域の変動特性 Fig. 7 にレイノルズ数 6.73×10^4 (亜臨界レイノルズ数領域) の定常流場における平板周辺の時間平均流速の平面分布、及び主流方向成分の平板の中心線に沿った分布を示す。ここに、図中の点線はポテンシャル理論より計算される流線を示している。これより明白なように、実際の粘性流体では平板背後には板幅の約 2.7 倍にも及ぶ大規模な後流逆流域が形成されており、非定常流場においては後流逆流域の発生・発達に伴う後流質量の変化が主として質量力形で物体に作用してることが予想される。

Fig. 8 は、等加速度 0.60 cm/s² の流れ場に設置された平板の後方 (距離 I) 10 cm, 20 cm, 28 cm, 52 cm, 120 cm の測点における流速変動と主流後速の変動と共に示したものである。これより、平板背後の流影は、板の比較的近傍 ($I=10$ cm, 20 cm, 28 cm) においては主流流速の上昇とともに一度主流と同じ方向へ成長するものの、やがて後流域の発達とともに逆流方向へと転流している。この際、板より測点までの距離が増加するにつれて

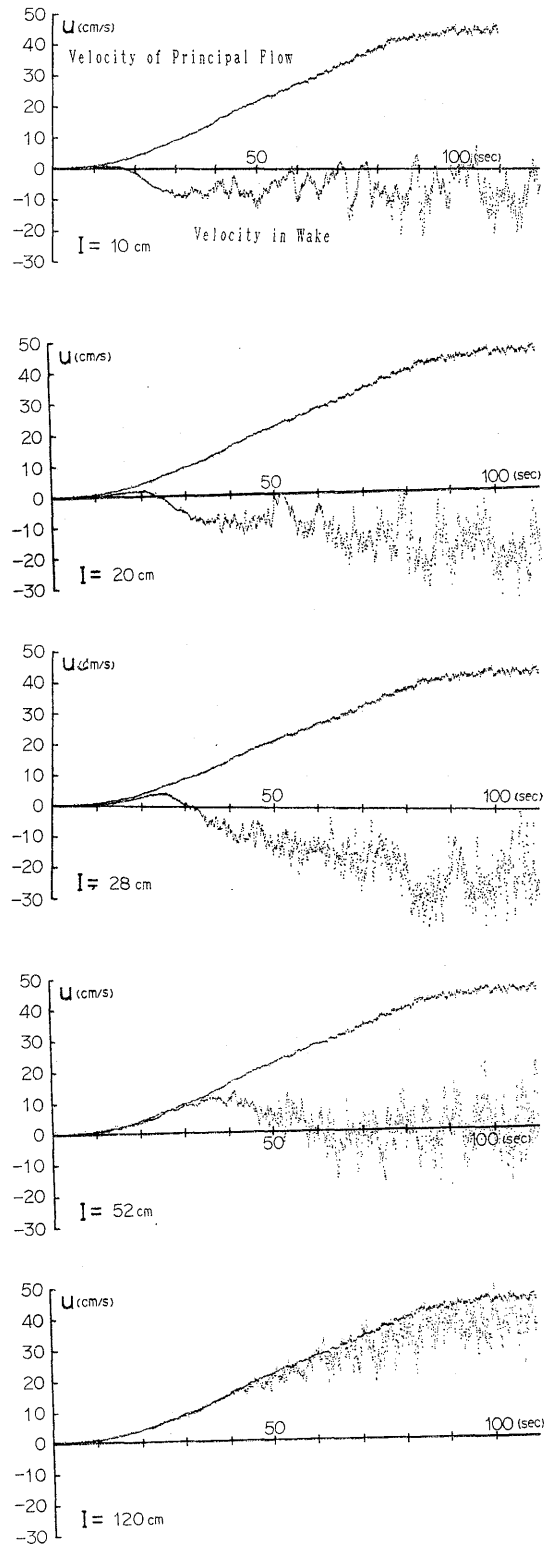


Fig. 8. Unsteady flow velocity in wake at points $I=10, 20, 28, 52, 120$ (cm). Notation as in figure 4.

逆流域へ転流するまでの時間間隔も徐々に延長されており、これより後流逆流域が主流流速の成長と共に平板後方に発達してゆく様子がわかる。さらに、平板の後方 $I = 52 \text{ cm}$ ($I/B = 2.6$) の測点における流速変動は、時間の経過とともに流速平均値がほぼゼロ付近に収束している。さらに後方 ($I = 120 \text{ cm}$) においては、もはや後流逆流域は存在せず次第に主流の流速に漸近してゆく。Fig. 4 に示した平板後方の各流速計測点において、Fig. 8-1~Fig. 8-3 のように逆流域の存在するものについて主流が加速されはじめてから測点の流速が逆流するまでの時間を、平板背後の後流逆流域がその測点まで発達するのに要した時間と解釈して、各加速度場ごとに板背後より逆流域の後端までの距離 S の時間的な発達過程を板幅で基準化して整理すると Fig. 9 のようになる。図中の点線は定常流場における平板の後流逆流長を示しているが、等加速度場においても定常流場と同様に板幅に対する後流逆流長が 2.7 倍付近においてその発達が収束していることがわかる。後流逆流域の発達速度 ($W = \dot{S}$) は主流の加速度 (α) ごとにはほぼ一定で Fig. 9 の $t-S/B$ の勾配の B 倍として、 $\alpha = 0.20 \text{ cm/s}^2$ で $W = 0.51 \text{ cm/s}$ 、 $\alpha = 0.39 \text{ cm/s}^2$ で $W = 0.87 \text{ cm/s}$ 、 $\alpha = 0.60 \text{ cm/s}^2$ で $W = 1.16 \text{ cm/s}$ となり、Fig. 9 中の $\alpha-W$ の図となる。これを最小 2 乗近似すると $W = 1.74\alpha^{3/4}$ の関係が得られる。一方、主流のレイノルズ数に対する後流逆流域の発達過程を示したものが Fig. 10 である。

後流逆流域は低加速度ほど主流速度が小さい時期より成長をはじめ、さらに加速度が小さくなると次第に図中の黒丸で示した定常流場における後流逆流域のスケールに漸近してゆくものと考えられる。

理論の実験的検証および考察

後流域の流速測定結果より、後流逆流域の発達過程は比較的容易に推算できることがわかった。そこで、後流逆流域の容積を理論的展開における付着後流容積の指標として採用する。実容積が無視できる板材の場合、(1) 式における定数 C は付着後流の容積変化に伴って発生する付加質量力を後流逆流域の容積で基準化した場合の比例定数としての物理的な意味を持つことになり、これを今回新たに後流質量係数 (C_W) と定義すると (6) 式は

$$F_M = F_{U=0} - F_D = \rho C_W (V'u + \dot{V}'u) \quad (8)$$

ここで、後流逆流域の容積を半楕円体を射影図形とする柱体で近似すると、後流質量係数は次式のように簡単化される。

$$C_W = \frac{3}{2} \rho^{-1} B^{-2} (Su + Wu)^{-1} F_M \quad (9)$$

ここに、 B : 板幅、 S : 後流逆流域の長さ、 W : 後流発達速度である。式中の各状態量に本実験で計測した後流

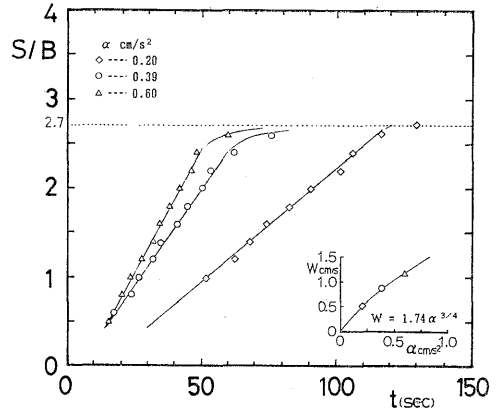


Fig. 9. Time dependent length (S) of reversed flow field along center line of wake, and relation between accelerated velocity (α) and developed velocity ($W = \dot{S}$) of reversed flow field.

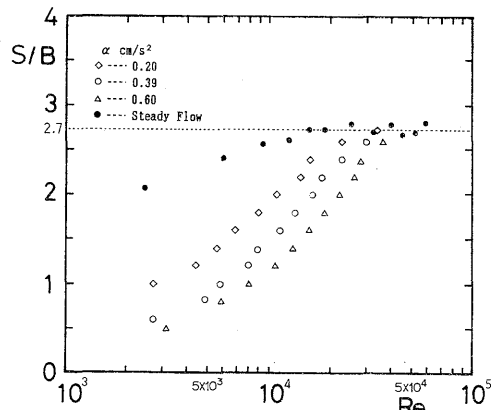


Fig. 10. Changes on the length (S) of reversed flow field against Reynolds number (Re).

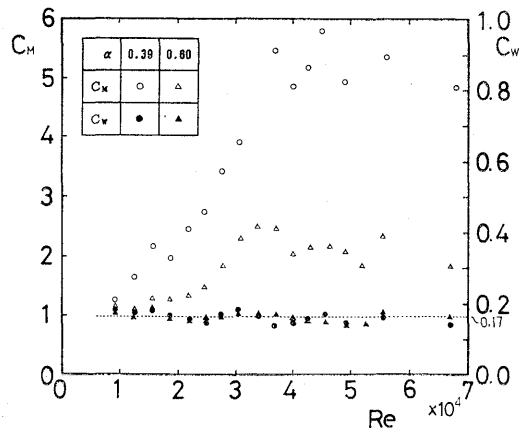


Fig. 11. Relation between the wake-mass coefficient (C_W) and the virtual mass coefficient (C_M) against Reynolds number (Re).

逆流域の特性値を代入してレイノルズ数による C_W の変動特性を計算すると Fig. 11 のようになる。

ここでは、Morison の式より計算された付加質量係数 C_M も示してあるが、これらを比較すると明白のように、後流質量係数 C_W は、多少の変動は認められるものの、主流の加速度 0.39 cm/s^2 , 0.60 cm/s^2 のいずれの場合においてもレイノルズ数によらない普遍定数として、ほぼ一定値 0.17 に収束しており、このことは

(1) 後流逆流域が付着後流の変動特性を把握するための十分な指標となりうること。

(2) 付加質量力が後流逆流域の運動量の変加に比例する形で作用していること。

すなわち、付加質量の発生機構が後流の発達と極めて関連性を持ち、今回新たに導入した後流質量係数によると主流のレイノルズ数、および加速度によらない普遍定数の形で付加質量力を評価・推定できることがわかった。

結 語

本研究は、物体背後に発生・発達する後流域の形成維持機構と言った自由せん断乱流の本質的な問題には立ち入らず、さらに一步発想を進めて、複雑な機構の末に発生した後流域が物体にどのような影響を与えているかについて、後流質量力という新たな発想に立って付加質量力を考察した。その結果、付加質量力は、物体と共に運動する流体塊として仮想的に定義した付着後流の運動量の変化に応じて発生しており、これを後流逆流域の容積で基準化した場合の比例定数、すなわち後流質量係数は主流の速度、加速度によらず、物体の形状のみに依存する普遍定数として算出され、今回実験に使用した平板部材においては 0.17 となることがわかった。

文 献

- 1) J. R. Morison, J. W. Johnson, M. P. O'Brien, and S. A. Schaaf: *Petroleum Trans.*, **189**, 149-154 (1950).
- 2) 林 建二郎, 重村利幸, 竹内俊雄: 第 24 回海岸工学講演会論文集, 337-341 (1977).
- 3) 土屋義人, 山口正隆: 第 19 回海岸工学講演会論文集, 379-383 (1972).
- 4) 岩田好一郎, 水谷法美, 川角伸彦: 第 34 回海岸工学講演会論文集, 601-605 (1987).
- 5) T. Sarpkaya and C. J. Garisson: *J. Applied Mech.*, **30**, 16-24 (1963).
- 6) 榎木 亨, 中村孝幸, 喜田 浩: 第 22 回海岸工学講演会論文集, 525-530 (1975).
- 7) S. K. Hurlbut: *J. Fluid Eng.*, **104**, 214-221 (1982).
- 8) 棚橋隆彦, 澤田達男, 金井恵理也, 先野 晃, 安藤常世: 日本機械学会論文集 (B 編), 3142-3149 (1984).
- 9) 中村 充, 上北征男, 飯野達夫: 第 22 回海岸工学講演会論文集, 483-487 (1975).
- 10) 榎木 亨, 後野正雄: 第 26 回海岸工学講演会論文集, 673-676 (1979).
- 11) L. J. S. Bradbury: *J. Fluid Mech.*, **77**, 473-497 (1976).
- 12) 田中周治, 村田 進: 日本機械学会論文集 (B 編), 2838-2845 (1985).
- 13) 木谷 勝, 松村昌典: 日本機械学会論文集 (B 編), 266-275 (1986).
- 14) 今井 功: 流体力学 (前編), 第 1 版, 裳華房, 東京, 1973, pp. 404-415.