

平板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*・糸洸長敬**・中村 充***・田北博司****

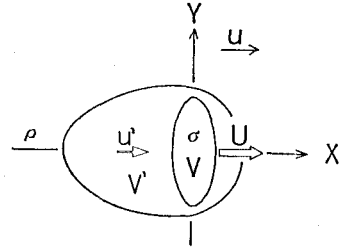
1. はじめに

近年、我が国水産業を取り巻く情勢は200海里時代の定着化に加えて国際的な漁業規制の強化、近海資源状態の悪化等極めて厳しくこれを打開すべく、作り育てる漁業・資源管理型漁業を両軸とする沿岸漁場整備開発事業が各地で実施され、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展開されている。現行の漁場造成整備の設計指針(1984)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中村ら(1975)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質量力係数についてはなお不明な点が多く、海岸・海洋構造物においても、主として波による流体力に関して質量力係数の詳細について波周期内における時間変化(林ら, 1977), 設定波の条件による変化(土屋ら, 1972)など Morison の式の適用限界(岩田ら, 1987)も含めて議論されているが統一的な結論が出るには至っていない。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うことが報告されている(樫木ら, 1979; Bradbury, 1976)。

本研究は、背後にハク離後流域を伴う流体力学的に鈍い物体を主対象とし、物体に作用する質量力を、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。それによって、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質量力の発生機構を解明することを目的として理論的に考察し水理実験によって検証する。

2. 付着後流モデル

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。これを流動形態より定義することは渦構造の



図一 後流域のモデル化

詳細(田中ら, 1985), 分散機構(木谷ら, 1986)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。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図一に示す。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 、付着後流内の逆流速度を 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に後流域内の逆流速度を考慮してその時間変化として作用し

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

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 $C_W \rho (V+V')(U-u)$ 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

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

の力が働く。ここで、比例定数 C_W は付加質量係数に相当する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

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

ここに、(1)、(2)式を代入し、さらに、物体の容

* 水産修 東京水産大学大学院 海洋生産学科
** 正会員 農博 東京水産大学助教授 海洋生産学科
*** 正会員 農博 東京水産大学教授 海洋生産学科
**** (株)大林組 エンジニアリング本部

積、密度が一定の場合

$$\begin{aligned} & \{(C_W+1)\rho V' + (\sigma + C_W\rho)V\}\dot{U} + \rho\dot{V}'(C_W+1)U \\ & = (C_W+1)\rho(\dot{V}'u + (V+V')\dot{u}) \\ & - \rho(\dot{V}'u' + V'\dot{u}') + F_f + F_D \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

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 $F_{U=0}$ は F_f の反作用として

$$\begin{aligned} F_{U=0} & = \rho(C_W+1)V\dot{u} + \rho(C_W+1)(\dot{V}'u + V'\dot{u}) \\ & - \rho(\dot{V}'u' + V'\dot{u}') + F_D \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

また、静止流体中を物体が運動している場合に物体に作用する流体力 $F_{U=0}$ は、 F_f より物体自体に生じる慣性力を差引いた力の反作用として

$$\begin{aligned} F_{U=0} & = -\rho C_W V \dot{U} - \rho(C_W+1)(\dot{V}'U + V'\dot{U}) \\ & - \rho(\dot{V}'u' + V'\dot{u}') + F_D \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

(5)、(6) 式は共に右辺第1項の Morison の式における質量力項に第2項以降が新たに付加された形となっており、このような形であれば板材のような実容積が実質上無視されるような部材についても付加質量成分を合理的に表現することが可能となる。

3. 実験方法

等加速度流場に物体が静止している場合、および静止流体中を物体が等加速度運動する場合について平板部材を用いて本モデルの妥当性を水理実験によって検証した。試供部材は縦横共に 15.9 cm、20.0 cm、25.2 cm で厚さ 2 mm のアルミ製の平板で、板面を主流（曳行）方向に対して直角に配置した。等加速度流場内に固定された平板に作用する質量力に関する実験には東京水産大学所有の回流水槽（測定部流路長さ 7 m、幅 1.45 m、常用水深 1.2 m）を使用した。ここに、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、加速度 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および定常流場について実験を行った。静止流体内を平板が等加速度運動する場合の作用質量力に関する実験の概要図を図-2 に示す。

実験には、水産庁水産工学研究所所有の漁船推進性能実験棟曳行水槽（全長 137 m、幅 6 m、標準水深 3 m）

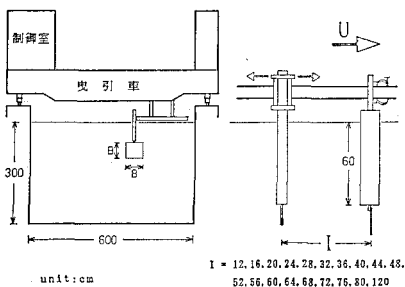


図-2 実験概要図（曳行実験）

を使用し、曳行速度 150 cm/s 以内の範囲で4パターンの等曳行加速度 4.9 cm/s²、9.8 cm/s²、14.7 cm/s²、19.6 cm/s² および等曳行速度場について実験を行った。実験では、主流（曳行）速度、および平板の中心線に沿って板幅の主として6倍後方までの19測点（図-2参照）における後流域の流速変動、うち数パターンについて平板周辺の平面流速分布を電磁流速計を用いて測定した。また、平板に作用する非定常流体力の測定には歪ゲージを用いた片持ち梁式の2分力流体力センサー（測定範囲 10 gr～5000 gr および 1 gr～500 gr の2種類）を試作し使用した。計測データは、何れも 50 Hz で AD 変換後、回流水槽においては主流流速を、曳行水槽においては曳行台車速度を基準信号として、同一時系列上にデータの位相を合わせた上でパーソナルコンピュータで解析した。本実験での全収集データは約 60 Mbyte であった。

4. 実験結果とその考察

4.1 定常流場後流域の変動特性

定常流場（亜臨界レイノルズ数領域）における平板周辺の時間平均平面流速分布の一例を図-3 に示す。

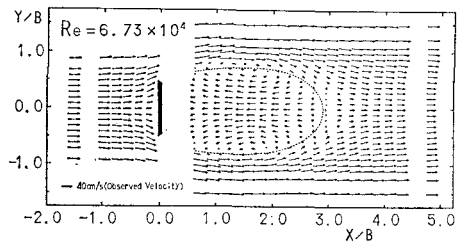
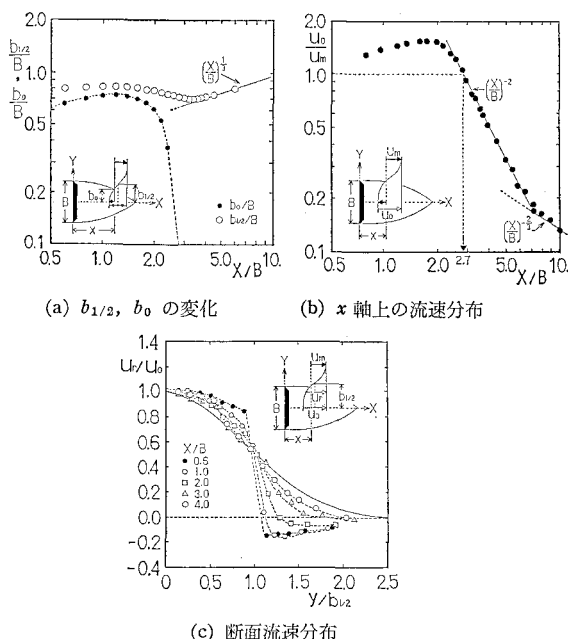
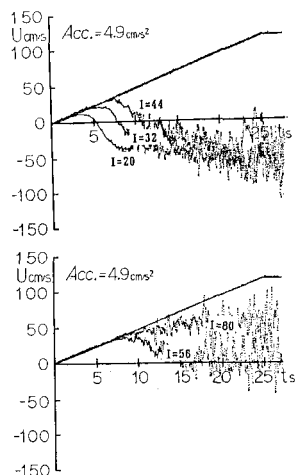


図-3 平板周辺の時間平均流速分布（定常流場）

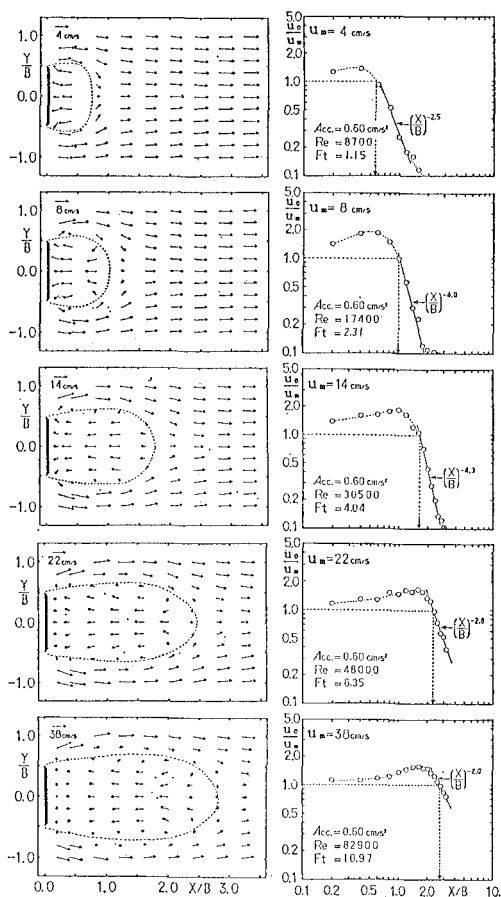
また、図-4 は後流域の代表幅として半値幅 $b_{1/2}$ 及び後流逆流域の幅 b_0 をとった場合の各平板からの距離 x による変化 (a)、平板の中心線に沿った流速の主流相対値 u_0 の距離 x による変化 (b)、さらに u_0 、 $b_{1/2}$ で基準化された x 軸上各断面流速分布 (c) を示す。後流域のような自由せん断乱流では平板後方の後流が十分発達した領域においては速度分布や変動の挙動に相似性が認められる。平板の後流域においても距離 x が増すにつれて断面流速の分布型は次第に正規曲線型に漸近しており、さらに軸対称伴流の特性と同様に半値幅は距離 x の $1/3$ 乗で拡大し、 u_0 は距離 x の $-(2/3)$ 乗で減衰してゆく傾向が認められる。一方、平板近傍の展開領域における流況は、渦運動など時空間的に極めて複雑であるが、平均的に扱えば図-3 に示されるように主流部分と1つの不連続面で隔てられた付着後流域を仮定することが出来て、平板の場合その規模は顕著で板幅の約2.7倍後方にまで及ぶ大規模なものであることがわかる。

図—4 後流域の諸性質 (定常流場・亜臨界 Re 数領域)

図—5 後流域測点の流速変動

4.2 等加速度場後流域の変動特性

図—5 は、等加速度 4.9 cm/s^2 で曳行される板幅 20 cm の平板の後方 (距離 I) 20 cm , 32 cm , 44 cm , 56 cm , 80 cm の流速計測点における経時流速変動を曳行速度変動と共に示したものである。平板背後の流影は、板の比較的近傍 ($I=20 \text{ cm}$, 32 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 I が増加するにつれて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



図—6 平板周辺の平均流速分布 (等加速度場)

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 $I=56 \text{ cm}$ ($I/B=2.8$) の測点における流速変動は、時間の経過とともにその平均値がほぼゼロ付近に収束しており、さらに後方 ($I=80 \text{ cm}$) 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いる。このような各測点における経時データに周波数平滑化処理を行い高周波成分を除去した上で再現された等加速度場における平板周辺の平面流速分布の一例を図—6 に示す。

図は等加速度 0.6 cm/s^2 で主流が加速する場合の平板 (板幅 20 cm) 周辺の流況を主流流速の経時変化と共に示したものである。主流流速の上昇と共に平板背後に発生した後流逆流域は徐々に発達し、主流流速 $u=38 \text{ cm/s}$ において平板中心線上的後流流速分布形状はほぼ定常流場のそれに漸近し後流逆流長も定常流場と同様に約 2.7 倍まで成長している。主流 (曳行) 速度より算出されるレイノルズ数の変化に伴う後流逆流長の発達過程を示すと図—7 となる。何れの等加速度においても後流逆流長は主流 (曳行) 速度にはほぼ比例して発達し、定常流場と

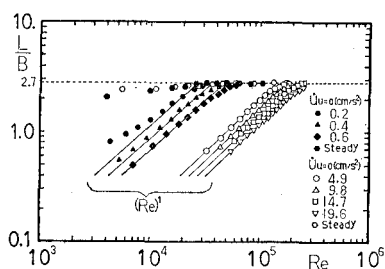


図-7 後流逆流長の Re 数による変化

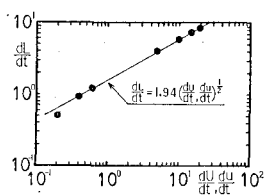


図-8 後流発達速度

同様板幅の約 2.7 倍後方でその発達が収束し、また後流逆流長は低加速度ほど主流(曳行)速度が小さい時期より成長を開始し、さらに加速度が小さくなると次第に図中に示した定常流場における後流域のスケールに漸近している。図-8 に主流(曳行)の等加速度値と後流逆流域の発達速度の関係を示す。非定常流場における物体周辺の流況は乱流レイノルズ数と新たな無次元数 $F_t (=v/\sqrt{\alpha l})$ (v : 流体と物体の相対速度, α : $\dot{v}$, l : 物体の代表長さ) に支配されることが次元的考察より導かれるが、図-8 より後流域は、主流(曳行)等加速度の $1/2$ 乗にはほぼ比例して発達しており、後流逆流長が無次元数 F_t に依存していることが示唆される。後流逆流長の発達過程を加速度ごとに F_t で整理し板幅で基準化して示すと図-9 となる。後流逆流長は、等加速度が 0.2 cm/s^2 より 19.6 cm/s^2 と極めて広い範囲において、また、静止平板周辺で流体が等加速する場合及び静止流体内を平板が等加速する場合の何れにおいても F_t で整理するとほぼ同一の曲線上にプロットされ、 $F_t = 6 \sim 8$ 付近で最大値に達し板幅の約 2.7 倍をとることがわかる。一方、付着後流内の逆流速に着目して、定常流場における逆流域内最大逆

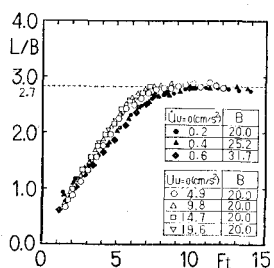


図-9 後流逆流長の F_t による変化

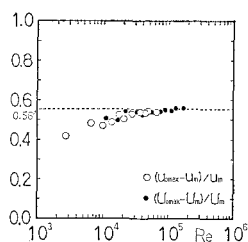


図-10 逆流域代表流速 (定常流場)

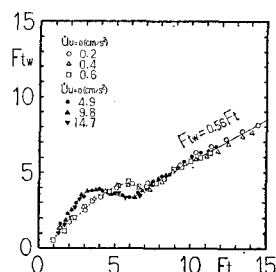


図-11 逆流域代表流速 (等加速度場)

流速 ($u_{0 \max} - u_m$) のレイノルズ数に伴う変化、および、等加速度流場における逆流域内最大逆流速の F_t に伴う変化を示すと各 図-10、図-11 となる。ここに、 F_{tw} は F_t における相対速度に ($u_{0 \max} - u_m$) を用いて逆流速を基準化した無次元数である。定常流場においては静止物体周辺で流体が運動する場合、静止流体内を物体が運動する場合の何れにおいてもレイノルズ数の増加とともに一樣に逆流速値は主流(曳行)速度の約 0.56 倍に収束している。等加速度場においても、 F_t が十分大きくなると、両者一樣に主流(曳行)速度の 0.56 倍で推移するが、後流逆流域の発達領域である $F_t < 7$ において両者の変動形態に差異が認められる。

4.3 非定常流体力の変動特性

今回の実験において平板に作用する流体力の質量力成分は流体の加速(物体の曳行)と共に経時作用する非定常流体力 (F) より、予め計測された同一流速(曳行速度)における抗力成分 (F_D) を差し引くことにより算出した。図-12 は時々刻々変化する主流(曳行)速度

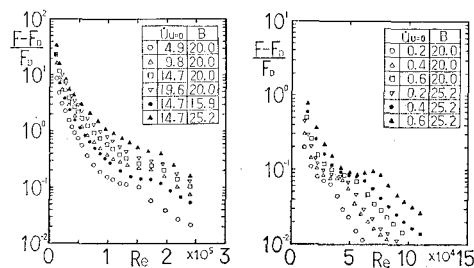
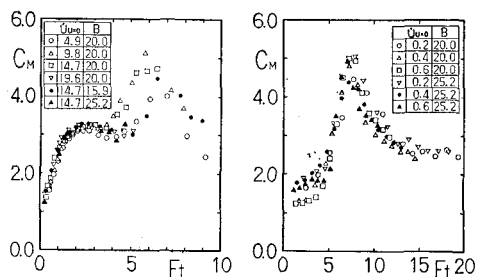


図-12 質量力成分の Re 数による変化

図-13 質量力係数 C_M の F_L による変化

より算出されるレイノルズ数の変化に伴い発生する流体力における抗力成分に対する質量力成分の変化を示したものである。これより、加速度値および板幅が大きいほど流体力に占める質量力成分も大きな値をとり、何れの加速度値においてもレイノルズ数の増加と共にその比率が急激に減少し、その過程において何れの場合も $(F - F_D)/F_D$ が 0.1 付近に変曲点が存在し、さらに静止流体内を平板が加速する場合の方が主流が加速する場合に比べて若干早めに変曲する傾向が認められる。このような平板に作用する質量力を従来のモリソンの式によって質量力係数 C_M の形で評価し、後流逆流域の場合と同様に無次元数 F_L で整理すると 図-13 となる。平板においては実体積はほぼゼロとなるため、ここでは便宜上板幅を直径とする円柱を Morison の式における基準体積として C_M を計算している。質量力係数 C_M は、主流が加速する場合、物体が加速する場合のそれぞれについて、加速度および板幅に依らずほぼ同一の曲線パターンで変動し、後流逆流域の発達収束する $F_L = 6 \sim 8$ 付近で何れもピークを生じている。すなわち平板における C_M は F_L 全般において定数値としては存在しないこと、および、後流逆流域の発達過程と質量力の変動状況との間には F_L を介して密接な関係が認められることがわかるが、さらに $F_L < 7$ の領域においては、後流逆流域最大速度の変動と同様に両者の変動形態に差異が認められる。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、後流逆流域の最大流速値を付着

後流の逆流速の代表値として、さらに簡単化の為に付着後流域を半楕円体を射影図形とする柱体で近似した上で、後流逆流域長の計測結果をもとに各 (5) 式、(6) 式より後流質量力係数 C_W を計算し、その F_L による変化を示すと 図-14 となる。これより、 C_W は物体が加速する場合、あるいは流体が加速する場合の何れの場合においても、加速度値、板幅、さらに流速（曳行速度）値にも依らない物体（付着後流）の形状のみに依存する普遍常数としてほぼ一定値 0.8 をとる。

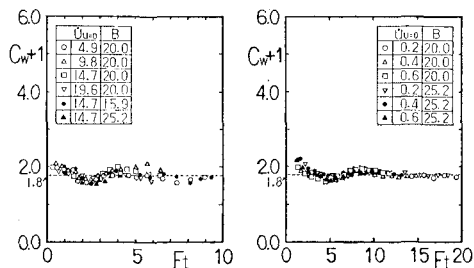
5. 結 語

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及ぼす影響について、後流質量力という新たな発想に立って質量力を考察した。その結果、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常数として統一的に評価できることがわかった。

最後に、曳行水槽における実験に際しては水産庁水産工学研究所漁船工学部山越康行氏・升也利氏をはじめ関係各位に大変お世話になった。また、当時学生の古川靖君・川下康範君には多大な尽力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 岩田好一朗・水谷法美・川角伸彦 (1987): 没水球体に作用する波力の特性に関する実験的研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 601-605.
- 木谷 勝・松村昌典 (1986): 二次元うず列後流の分散構造に関する研究, 日本機械学会論文集 (B 編), pp. 266-275.
- 樺木 亨・後野正雄 (1979): 人工魚礁の背後流況変化の数値シミュレーションについて, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 673-676.
- 全国沿岸漁業振興開発協会 (1984): 沿岸漁場整備開発事業構造物設計指針, 129 p.
- 田中周治・村田 進 (1985): 計算機援用可視化法による円柱の後流構造の研究, 日本機械学会論文集 (B 編), pp. 2838-2845.
- 土屋義人・山口正隆 (1972): 波による円柱の抗力係数および質量力係数について, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp. 379-383.
- 中村 充・上北征男・飯野達夫 (1975): 海中落体の着底衝撃に関する研究, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 483-487.
- 林建二郎・重村利幸・竹内俊雄 (1977): 波力算定式の抗力係数および質量力係数の時間変化について, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 337-341.
- Bradbury, L. J. S. (1976): Measurements with a pulsed-wire anemometer in the highly turbulent wake of a normal flat plate, J. Fluid Mech., Vol. 77, part 3, pp. 473-497.

図-14 後流質量力係数 C_W の F_L による変化