

閉鎖性海域の潮流場における底面摩擦応力の特性に関する実験的研究

高木不折*・和田 清**・富田孝史***

1. 緒 論

沿岸海域の潮流現象の中で、循環流などの定常流（恒流）が長期的な物質輸送に重要となることが知られている。特に地形条件と潮流の弱非線形過程に従う潮汐残差流は、内湾域で卓越する恒流形態のひとつである。潮汐残差流は潮流の1周期時間平均値として移流項から生じる2次流であり、基本振動成分の振幅および位相の空間的变化、すなわち渦度変化により生成される¹⁾。汚濁予測としての物質輸送モデルを精度高く確立するためにはその実態を把握するとともに、2次流を含めた潮流場の流動構造の把握が必要不可欠である。

従来、潮汐残差流の発生機構については、潮汐振動流から残差流への渦度輸送の立場からその発生機構が論じられている²⁾。さらに、この研究はその3次元的構造を調べる方向へと発展し、長方形湾でも陸岸境界層が水平循環流を、底面境界層が鉛直循環流を生成するという循環流の構造が理論的に指摘された。この指摘は、潮汐振動流による定常的2次流の生成機構を理解する上で重要なものである。しかし、定量的には、底面摩擦係数の評価など未解決の問題を残している。

本研究では、底面境界層に起因する潮汐残差流の生成機構を明らかにする基礎として、まず閉鎖性海域において、従来よりあまり検討されていない底面摩擦応力および流速の鉛直分布を直接測定し、底面摩擦応力の特性を流況の特性と関連づけて検討を加える。ついで、これらの定常成分を含めた底面摩擦係数の定式化を行い、従来の底面摩擦係数に対する提案式と比較検討する。

2. 水 理 実 験

2.1 底面摩擦応力測定装置 (shear meter)

本研究で用いた shear meter は、既往の研究成果³⁾を参考に、安定性および感度を考慮して試作したものである。その原理は、shear plate (アルミ製、 $8 \times 8 \times 0.02$ cm) に作用する力を plate 下面の鉛直支柱でモーメントに変

換し、支柱下端部に貼り付けられた防水型歪ゲージで測定する方法である。plate に作用する力は底面摩擦力以外に i) 圧力勾配により plate 両端に作用する力、ii) plate の周りの流体が加速度をもつ運動することによる仮想質量力、iii) plate 下の空隙内の流体が運動することにより plate に及ぼす力があると指摘されている³⁾。これらについて考えると、まず i) については、潮汐波のように周期が長く、波長が plate の幅に比べて十分大きい現象を対象としているので、plate 両端での圧力勾配による力は無視できる。また ii) について、plate に仮想質量力が働くか否かは疑問であるが、対象とする流れ場は緩慢に変化するので、ここでは無視し得るものとする³⁾。さらに iii) については、粗度を適当に配置し、plate 下の流れを停止させ、これによる力も無視できる。その流れの停止状況はメチレンブルーの水溶液を plate 下に注入し、トレーサーとして可視化することにより確認した。したがって、plate に作用する力は、底面摩擦力のみであるとして取扱い、以後の実験値の解析を行っていく。なお shear meter の固有振動数は 1.3 Hz であり、対象とする潮汐波の振動数はこの値よりも十分小さいため、shear meter の固有振動数による補正は行っていない。

2.2 実験装置と実験方法

実験は、一端に潮汐発生システム（マイコン制御の水供給式）を備えた両面アクリルの鋼製水槽（ $0.6 \times 0.9 \times 6.5$ m）内に水平床を設置して行った。また他端は不透過な鉛直壁であり、水槽内では安定した完全重複波が得られるようになっている。底面摩擦応力は、shear meter を開口部から 1 m の地点の水平床下部に取り付けて計測した。流速の鉛直分布は水素気泡法で計測し、水位および底面摩擦応力の時間波形と対応するように、カメラによる撮影時刻をタイマーと連動して同時記録した。また撮影間隔は、潮汐周期に応じて1周期を24~36位相に分割した。なお水位はサーボ式水位計により計測した。実験条件は、水深を7種類（ $h=2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15$ cm）、周期を3種類（ $T=60, 90, 120$ s）および潮位差（ $H=0.2 \sim 1.0$ cm）を種々変化させた合計59種類である。記録は潮汐波始動開始から10周期までとし、解析は第5周期目から第9周期目までの5周期に対して行っ

* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 名古屋大学助手 工学部土木工学科

*** 学生員 名古屋大学大学院 工学研究科

た。

2.3 解析方法

水素気泡法では流れが微流速のとき、気泡同士が接触・合体する危険があり、この影響を無視できない⁴⁾。実験に際してはパルス周期とその幅を調節して、この影響を最小にして浮力補正を行った。浮力による上昇速度 v_b は、気泡の大きさが白金線の直径 D と同程度であれば、Stokes の解を近似的に適用して評価される⁵⁾。すなわち、 $D=0.05 \text{ mm}$ で $v_b=0.1 \text{ cm/s}$ 程度となる。水素気泡データは、撮影されたフィルムを1コマごとに19倍に拡大し、0.5 mm の読み取り精度をもつデジタル座標読み取り装置で読み取り、マイコンで処理された。

流速の鉛直分布構造の詳細を把握するために、これらの離散的流況データから、各水深における流速の時間波形を求め、調和解析を行い各流速成分についての振幅と位相を求めた。

さらに、shear meter の潮汐波に対する実験条件下での動的検定を行う目的で、流速の鉛直分布から底面摩擦応力も算定した。底面ごく近傍の流速については、その鉛直分布形を底面境界層理論から求まる形状と仮定し、その理論値の絶対値が底面近傍の位置 ($z=1/\beta$, β : 後出) で、実験値と一致するように補正した。この流速分布から算定された底面摩擦応力の時間波形の全振幅と shear meter で測定されたものとを比較し、shear meter の動的補正係数を定めることによって動的な状態での底面摩擦応力を求めた。ここで、理論値は鉛直粘性を考慮した運動方程式を振動展開したときに次式で与えられる2次のオーダーまでの各流速成分である^{6),7)}。

i) 基本成分

$$u_T(x, z; t) = \frac{U_1(1-x^*)}{\omega} (\sin t^* - e^{-z^*} \sin(t^* - z^*)) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ii) 定常成分

$$\begin{aligned} u_s(x, z) = & \frac{U_1^2(1-x^*)}{\omega L} \\ & \times \left[\frac{1}{4} e^{-2z^*} - \frac{1}{2} z^* e^{-z^*} (\cos z^* - \sin z^*) \right. \\ & + e^{-z^*} \left(\frac{1}{2} \cos z^* + 2 \sin z^* \right) \\ & \left. + \frac{18h^* - 39}{8h^*} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z^*}{h^*} \right)^2 + \frac{z^*}{h^*} \right\} - \frac{3}{4} \right] \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

iii) 2倍周波数成分

$$\begin{aligned} u_2(x, z; t) = & \frac{U_1^2(1-x^*)}{\omega L} \left[-\frac{1}{2} e^{-\sqrt{2}z^*} \sin \sqrt{2}z^* \right. \\ & + \frac{1}{2} e^{-z^*} \sin z^* \\ & \left. + \frac{1}{2} z^* e^{-z^*} (\cos z^* - \sin z^*) \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \frac{3}{4\sqrt{2}h^*} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z^*}{h^*} \right)^2 + \frac{z^*}{h^*} \right\} \Big] \\ & \times \cos 2t^* \\ & + \left[-\frac{1}{2} e^{-\sqrt{2}z^*} \cos \sqrt{2}z^* \right. \\ & + \frac{1}{2} e^{-z^*} \cos z^* \\ & - \frac{1}{2} z^* e^{-z^*} (\cos z^* + \sin z^*) \\ & \left. + \frac{3}{4\sqrt{2}h^*} \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{z^*}{h^*} \right)^2 + \frac{z^*}{h^*} \right\} \right] \\ & \times \sin 2t^* \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

ここに、 $x^*=x/L$, $t^*=\omega t$, $z^*=\beta z$, $h^*=\beta h$, x : 湾口からの座標, L : 湾長, t : 時間, ω ($=2\pi/T$): 角周波数, T : 周期, z : 底面から鉛直上向きの座標, β ($=\sqrt{\omega/2\nu}$): 境界層厚を表すパラメーターの逆数, ν : 動粘性係数, U_1 : 境界層外の潮汐振動流の振幅である。

境界層厚は、ここでは $\tau_{\max}$ が底面での摩擦応力の最大値 $\tau_{b\max}$ に比べて無視し得るほど小さくなる高さで定義する。すなわち、 $\tau_{\max}$ が $\tau_{b\max}$ の0.01倍となる高さ δ ($=4.6/\beta$) を境界層外縁位置とした。

3. 実験結果とその考察

3.1 底面摩擦応力の時間波形

図-1は、Reynolds数: $Re_{\max} (=u_{\beta\max}^2 T/\nu, u_{\beta\max}$: 底面近傍の流速) と相対水深比 βh の関係を示したものである。同図から βh が減少するほど、 Re 数は増加する傾向にある。本実験は、底面が滑面状態および $10^4 < Re_{\max} < 10^5$ の範囲で行われたものである。この領域は Jonsson⁸⁾ が示した振動流境界層内部の遷移状態区分にしたがうと、層流および層流から滑面乱流への遷移領域となる。このことは、染料による可視化により確認した。なお同図には、参考のために層流境界層から乱流境界層への移行限界として、限界 Re 数を、また、式(1)~

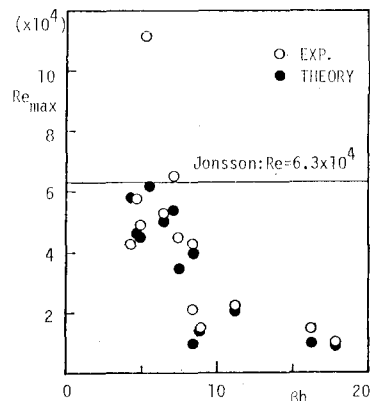


図-1 $Re_{\max}$ と βh の関係

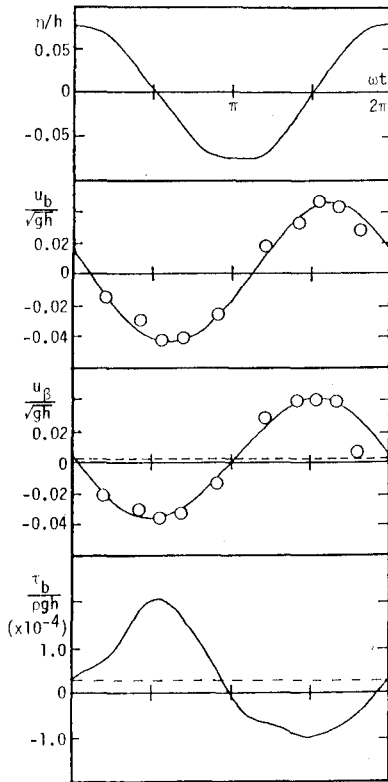


図-2 計測波形の一例

(3) より求まるそれぞれの実験条件に対応する理論値を併記している。したがって本実験においては、 βh の小さい範囲を除いて底面境界層理論が適用可能であるものと考えられる。

底面摩擦力の流れに対する効果を評価するには、底面流速の時間的変化を求めておかなければならない。図-2は、水位 η 、底面近傍 ($z=1/\beta$) と境界層外縁近傍 ($z=4.6/\beta$) の流速 u_β , u_b および底面摩擦応力 τ_b の時間波形の一例を示している。同図から、 u_β と u_b の位相差は顕著ではなく、境界層内ではほぼ同位相である。また、 u_b と τ_b の位相差 θ は、底面境界層理論値では $\pi/4$ となるが、多くの実験データは βh の増加とともに、この位相差 θ が $0 \sim \pi/9$ 程度増加することを示している。なお、表面流速 u_s と τ_b の位相差 θ' については、Kajiura⁹⁾ は θ' が βh の増加とともに、 $0 \sim \pi/4$ に漸近することを理論的に示している。

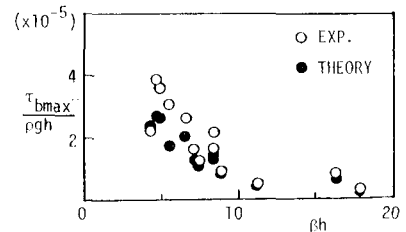
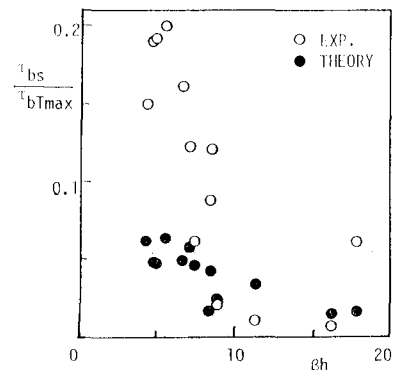
流速の鉛直分布を1周期間にわたって調べてみると、相対水深比 βh の大きい場合には、流速の分布形状は、理論値とほぼ対応し、shear waveの様子を表している。一方、相対水深比が小さくなる場合、底面付近の流速は理論値よりも大きくなり、したがって底面摩擦応力も増加する傾向にある。さらに、表層付近では中層よりも位相が進んでいた。この現象は、安田の水理実験⁹⁾、外洋

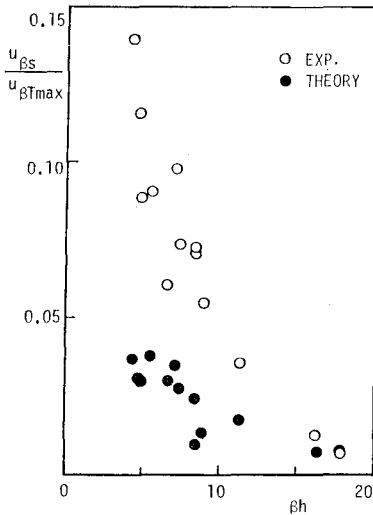
に注ぐ水路内の長周期波の観測時に測定された¹⁰⁾程度で、ほとんど知られていない。ただし、安田は、この境界層外における振動成分の上下層間での位相差は、大きい残差流成分の鉛直シアーと基本振動成分の相互作用が高次の基本振動成分を形成した結果であると述べているが、本実験においてその影響は明らかではない。著者らは、式(1)の誘導過程において、水面における境界条件を $(\partial u / \partial z)_{z=h} = \alpha(u)_{z=h}$ (α : 定数) として、式(1)を修正するとともに、流速の鉛直分布に与える α の影響を検討した結果、修正式はほぼ実測値に近い流速分布を与えることがわかった。

3.2 最大底面摩擦応力

無次元最大底面摩擦応力 $\tau_{b\max}/\rho gh$ と相対水深比 βh の関係を示したものが図-3である。なお同図には比較のため式(1)~(3)で与えられる底面境界層理論値が併記されている。底面が流体に及ぼす $\tau_{b\max}/\rho gh$ は全体を通じて湾奥向きに作用し、 βh の減少とともに増加する傾向は理論値と同様である。しかし、その程度は特に $\beta h < 10$ の範囲では理論値に比べて実験値の方が大きくなる傾向にある。これは前節でも述べたように、 βh が小さくなると流速の鉛直分布が歪むことに起因している。すなわち、 βh が小さい場合には自由表面近傍に現れる流速の位相差が境界層に影響を及ぼし、これが $\tau_{b\max}/\rho gh$ の増大を引き起こしている。

図-4は底面摩擦応力について定常成分と振動成分の最大値の比 $\tau_{bs}/\tau_{b\max}$ と βh の関係を示したものである。図-3と同様な傾向を示しているが、 $\beta h=5$ ではそ

図-3 $\tau_{b\max}/\rho gh$ と βh の関係図-4 $\tau_{bs}/\tau_{b\max}$ と βh の関係

図-5 $u_{\beta s}/u_{\beta T \max}$ と βh の関係

の比は0.2程度で、理論値の3倍にも達する。また図-5には、流速についての比 $u_{\beta s}/u_{\beta T \max}$ と βh の関係を示した。底面摩擦応力と同様に βh 減少すると実験値の方が理論値よりも大きく、 $\beta h=5$ ではその比は0.1程度である。

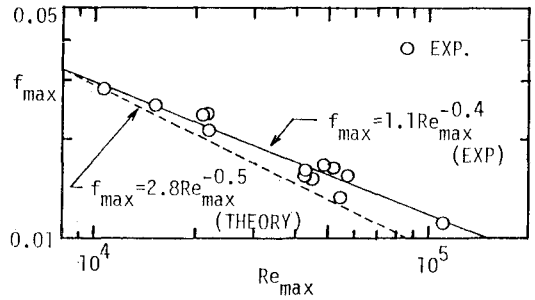
以上の事実から、水深が理論的に求まる境界層厚 δ よりも小さい場合、あるいは自由表面と内部の流速の位相差が大きく、かつ βh が比較的小さい場合には、流速の鉛直分布が歪むことによって、底面摩擦応力の定常成分が底面境界層理論値よりも大きく生成されるものと考えられる。したがって、定常成分を含んだ最大摩擦応力も理論値に比べ増大する。

3.3 底面摩擦係数

従来、潮流などの長周期波現象を対象とする場合、底面摩擦係数 f には、流れ場が層流あるいは乱流状態であるかによって、一方向流における Blasius や Manning の抵抗則が準用されている¹¹⁾。Manning の抵抗則で代用される式は、

$$f' = n^2 g / h^{1/3} \quad \dots\dots\dots (4)$$

であり、 h の減少とともに f' は増加するが、この考えによる f' は、明らかに内湾に進入する長周期波の外的条件にかかわらず、いわば h と n のみの内的条件によって決定されるものである。しかし、潮流現象は浅海では、憩流すなわち流速ゼロを中心に周期的に変化する。このため、Manning の抵抗則では実際の流れ場の構造を十分に表現することはできない。そこで、ここでは f を底面摩擦応力 τ_b と底面近傍流速 u_β の、i) 位相を無視した振動成分の最大値 ($\tau_{bT \max}$, $u_{\beta T \max}$)、ii) 定常成分を含めた最大値 ($\tau_{b \max}$, $u_{\beta \max}$) を用いて次のように定義した¹²⁾。

図-6 $f_{\max}$ と $Re_{\max}$ の関係

$$f_{T \max} = \frac{\tau_{bT \max}}{\rho u_{\beta T \max}^2}, \quad f_{\max} = \frac{\tau_{b \max}}{\rho u_{\beta \max}^2} \quad \dots\dots (5)$$

ここに、 ρ : 水の密度である。

i) について見ると、実験値は理論値よりも若干大きい。全体として f は理論的に求まる Re 数の $-1/2$ 乗則に従う傾向にある。一方、ii) については図-6に f の理論値と実験値、さらにその近似曲線を示す。同図によると、 Re 数が多い、すなわち βh が小さい場合には $10^4 < Re_{\max} < 10^5$ の範囲で、 f は理論値よりも2割程度大きくなり、 Re 数が小さくなると理論値と同程度の値となる。これは前述したように、 βh の減少とともに底面摩擦応力の定常成分が増加することに起因している。なお、限られたデータではあるが、実験的に得られた f は次式のようにである。

$$f_{\max} = 1.1 Re_{\max}^{-0.4} \quad \dots\dots\dots (6)$$

以上述べてきたようなデータの蓄積と検討を進めることによって、定常成分を含めた Re 数および底面摩擦応力 τ_b を βh の関数で表現することができ、さらに f についても βh の関数として定式化が可能となろう。

4. 結 論

以上、閉鎖性海域において従来あまり検討されていない底面摩擦応力および流速の鉛直分布を直接測定して、底面摩擦応力の特性を流況との関連で検討を加えた。本研究によって得られた主要な結論は、以下の通りである。

① 水位、流速（境界層外縁近傍、底面近傍）および底面摩擦応力の時間波形から、水位と境界層外縁近傍の流速の位相差は $\pi/2$ 程度で、完全重複波の様子を示しているが、境界層外縁近傍の流速と底面摩擦応力の位相差は理論値 ($\pi/4$) よりも小さくなる。

② $10^4 < Re$ 数 $< 10^5$ の範囲では、 βh の減少につれて底面近傍流速で定義した Re 数は増加するが、実験値は理論値（底面境界層理論）よりも上回る傾向にある。特に $\beta h < 10$ では、自由表面付近とその下部領域の流速の位相差が、その傾向に大きく寄与している。また、底面近傍流速の定常成分と振動成分の最大値の比は βh の

減少とともに指数的に増加する傾向にあるが、そのオーダーは $\beta h=5$ で 0.1 程度である。

③ 底面摩擦応力の無次元振動成分 ($\tau_{bT\max}/\rho gh$) は、 βh によって大きく支配される。その実験値と理論値を比較すると、 βh が減少するとともに $\tau_{bT\max}/\rho gh$ が指数的に増加する傾向は流速の場合と同様であるが、その程度は $\beta h < 10$ の範囲では実験値の方が大きくなる。また、この増加傾向は定常成分については顕著になり、その定常成分と振動成分の最大値の比は、 $\beta h=5$ で 0.2 程度である。

④ 実験によって得られた底面摩擦応力と底面近傍の流速から、底面摩擦係数 (f) を Re 数の関数として求めた。その結果、 f を (a) 位相を無視した振動成分の最大値 ($\tau_{bT\max}$, $u_{bT\max}$)、(b) それに各定常成分を考慮した場合について求めたが、両者は理論値よりも大きくなり、(b) は (a) よりも若干大きくなることが明らかにされた。

⑤ 定常成分を含めた Re 数および底面摩擦応力は βh の関数で表現可能となるため、 f についても βh の関数として定式化がされ得ることを示した。

⑥ 以上、相対水深比 βh が流況および底面摩擦応力を支配し、残差流を考える上で、重要なパラメーターとなることが示された。

最後に、本研究を進めるに当たり、終始有益な助言を

頂いた名古屋大学工学部土木工学科岩田好一朗教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 今里哲久・他：沿岸の潮汐・潮流の数値実験，海洋科学，Vol. 18, No. 7, pp. 464~469, 1986.
- 2) 柳 哲雄・西 勝也：日本における海洋学最近 10 年の歩み——海洋物理学，日本海洋学会誌，第 37 巻，第 6 号，pp. 311~312, 1981.
- 3) 榎木 亨・他：砕波後の波の底面摩擦力に関する実験的研究——砕波の内部機構に関する基礎的研究 第 4 報——，第 21 回海岸工学講演会論文集，pp. 33~38, 1974.
- 4) 福津家久：開水路流の乱流構造に関する基礎的研究，京都大学学位論文，pp. 25~32, 1977.
- 5) 浅沼 強編：流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，377 p., 1977.
- 6) 安田秀一：密度の均質な湾内の潮汐による鉛直循環流，中国工業技術試験所報告，No. 16, pp. 21~39, 1982.
- 7) 安田秀一：境界層による潮汐残差流——その方程式と湾長が任意の場合の解——，中国工業技術試験所報告，No. 19, pp. 67~86, 1983.
- 8) 榎木 亨：漂砂と海岸侵食，森北出版，195 p., 1982.
- 9) Kajiura, K.: On the bottom friction in an oscillatory current, Bulletin of the Earthquake Research Institute, Vol. 42, pp. 147~174, 1964.
- 10) 松田義弘：流れのある場における波の特性，東海大学海洋学部紀要，No. 6, pp. 29~42, 1972.
- 11) 樋口明生：潮流水理模型実験における世界の動向，中国工業技術試験所報告，No. 2, pp. 406~423, 1974.
- 12) 出口一郎：漂砂移動と海浜変形に関する基礎的研究，大阪大学学位論文，178 p., 1984.