

非正弦振動流の境界層特性

東北大学大学院工学研究科 学生員 ○川村 育男
 東北大学大学院工学研究科 正会員 山路 弘人
 東北大学大学院工学研究科 正会員 田中 仁

1. はじめに

波動下での底面近傍における流速場や底面せん断力を知ることは、土砂移動やこれに伴う海浜変形などの算定のために非常に重要である。そこで現在までに波動境界層に関する研究が数多くなされてきたが、そのほとんどは正弦振動流を対象としたものである。しかし砂移動が活発な浅海域においては波動の非線形性が卓越してくるために、このように単純化された流体場に対する知見では実際の現象を十分に説明できない。そこで本研究では、新たに提案された非対称振動流装置(田中ら¹⁾)を用いた実験結果と既往の実験データ、さらにはk-εモデルによる数値計算の結果をもとに非対称振動流の乱流遷移特性を調べた。また、砕波帯内での前傾化した波動運動の近似式としてよく用いられるsaw-tooth waveについても数値計算により同様な検討を行った。

2. 実験装置及び方法

先に提案された機構(田中ら¹⁾)に基づく非対称振動流発生装置を製作し、風洞実験を行った。このシステムによりモータの回転速度が一定でも、ピストンを往と復とで異なる移動速度で運動させ、風洞内にクノイド波にほぼ一致する流速場を発生させることができる。モータの回転速度を変えることにより異なるレイノルズ数について実験が行える。また、田中ら¹⁾により流速波形の非対称度を表すパラメータ $A_s = U_c / (U_c + U_t)$ はディスクの回転半径、支点と直線移動部までの距離、ディスクの中心から支点までの距離と関連づけられているので、様々な非対称度についても実験が行える。ただし、 U_c 、 U_t はそれぞれ峰位相及び谷位相での流速の最大値である。流速測定は水平管路部（長さ5m、幅0.2m、高さ0.1m）の中央部において、管路底面から管路中央までの24点についてレーザードップラー流速計を用いて行った。なお管路内壁面は滑面とし、サンプリング間隔は10msで50波分のデータを取り、アンサンブル平均して1周期内の速度分布、乱れ強度を得た。

現在のところ非線形波動下における乱流遷移限界を判定するためのレイノルズ数は提案されていないので、灘岡ら²⁾にならい、波の峰位相と谷位相を正弦振動の半分とみなし波の峰位相、谷位相それぞれに対して(1)式、(2)式に示すように $R_{\delta c}$ 、 $R_{\delta t}$ の二つのレイノルズ数を求めた。

$$R_{\delta c} = U_c \sqrt{2t_c \nu / \pi} / \nu \quad (1)$$

$$R_{\delta t} = U_t \sqrt{2t_t \nu / \pi} / \nu \quad (2)$$

ここで t_c 、 t_t はそれぞれ峰と谷との継続時間、 ν は動粘性係数である。表-1に振動流の実験条件を示す。Hino et al.³⁾ によれば正弦振動流の乱流遷移レイノルズ数 $R_{\delta} (= U_c \sqrt{2\nu / \omega}) = 550$ であるから Case 1 は完全な層流下での実験であると言える。ここで ω は角振動数である。

表-1 実験条件

Exp.	T(s)	ν (cm ² /s)	A_s	$R_{\delta c}$	$R_{\delta t}$
Case1	2.12	0.1402	0.68	502	283
Case2	1.70	0.1416	0.69	545	303
Case3	1.84	0.1412	0.67	569	324
Case4	1.58	0.1434	0.70	601	304

3. 数値計算法

先述の水理実験データを補完するために、k-εモデルによる数値実験を行った。サナラ⁴⁾の研究によれば、波動場においては Jones・Lauder model⁵⁾ の精度が優れているとされているので、これを参考にして、Jones・Lauder のモデルを用いた。このため、計算は滑面の場合のみに限られる。

3. 実験結果

3.1. 乱れ強度分布

図-1(a)、(b)に Case 1、Case 3 の乱れ強度分布を示す。

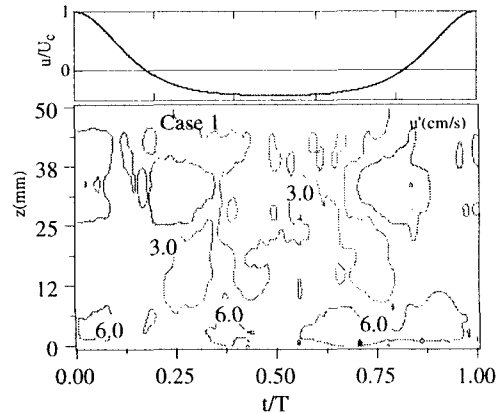


図-1(a) 乱れ強度分布 Case 1

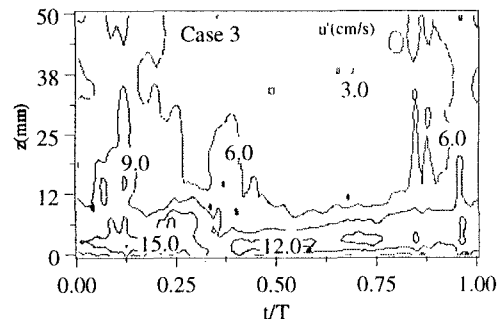


図-1(b) 乱れ強度分布 Case 3

図-1(a)には U_c により無次元化された主流速波形も示されている。この図より Case 1 では乱れがほとんどないのに対し、Case 3 では壁面近傍に乱れが発生しているの

が分かる。

3.2. 摩擦係数

図-2に本実験から得られた摩擦係数とk-εモデルによる数値計算の結果を示す。図中においてk-εモデルによる計算結果は $A_s=0.6$, 0.7 のときのものである。ここで、摩擦係数の定義は田中ら⁶⁾に従っており、代表速度としては峰での流速を用いている。また、図中にはJonsson⁷⁾の正弦振動流における摩擦係数も示されている。この図から、実験と数値計算の結果は良好な一致を示していることがわかるが、Case 3は壁面近傍に乱れがみられたの乱流域には達していないことがわかる。

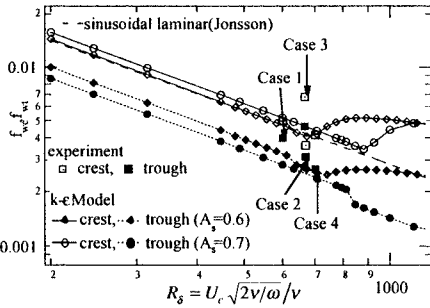


図-2 摩擦係数

3.3 乱流遷移判定図

以上の本水理実験の実験データ、数値実験さらには灘岡ら²⁾、灘岡ら⁸⁾、サナら⁹⁾、田中ら¹⁾の実験データを用い図-5の乱流遷移図を得た。図中における白ぬきのマークは層流状態にあることを示し、黒印は乱流状態にあるものである。ここで図中の実線と鎖線は、式(1)、(2)で定義される $R_{\delta c}$ 、 $R_{\delta t}$ を550としたときの線である。 A_s が与えられたとき、これより t_c/T 、 t_t/T が一定値で定まるため、 $R_{\delta c}=R_{\delta t}=550$ の関係を $R_{\delta} \sim A_s$ の図中に描くことが出来る。

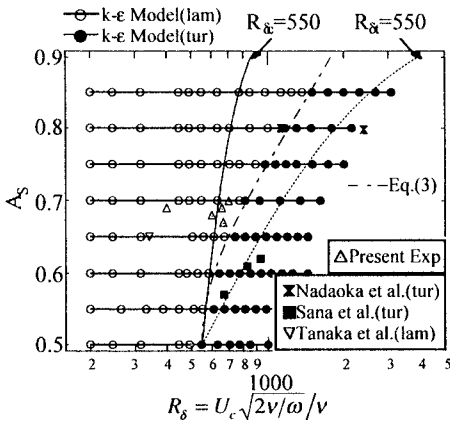


図-3 乱流遷移判定図

非対称振動流の遷移限界 R_{δ} 数は正弦振動流の550よりも高いことがこの図から分かる。特に、 A_s が大きく非対称性がより顕著なケースではかなり高いレイノル

ズ数まで層流が保持されている。また、 $R_{\delta t}=550$ では遷移レイノルズ数は過大評価され、 $R_{\delta c}=550$ では過小評価になることが分かる。そこでこの図から、遷移限界を表す実験式として式(3)を求めた。

$$R_{\delta} = 550 + 8880(A_s - 0.5)^{2.16} \quad (3)$$

4. Saw-tooth wave

k-εモデルにより得られたせん断力波形を図-5に示す。図には主流速波形も示されているが、せん断力は圧力勾配が急激に変化する谷位相の減速周期に大きく層流解からはずれ、乱流に遷移していく様子が分かる。

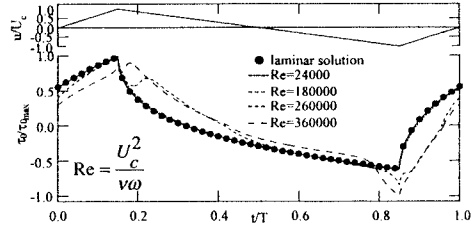


図-5 saw-tooth wave のせん断力波形

5. 結論

簡単な仕組みによる非対称振動流発生装置を作製して実験を行い、このシステムの有効性を示した。また、k-εモデルを用いた数値実験により、クノイド波とsaw-tooth waveの層流から乱流への遷移が確認された。

謝辞:本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 田中 仁・山路 弘人・アーマド・サナ・首藤 伸夫(1997a): クノイド波を模擬する非対称振動流発生装置の提案とその基本的特性の検討, 土木学会論文集, No.565/I1-39, pp.111-118
- 2) 灘岡 和夫・八木 宏・二瓶 泰雄・野本 康介(1994): 非対称振動流の乱流構造特性について, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.141-145.
- 3) Hino, M., M. Sawamoto and S. Takasu (1976): Experiments on transition to turbulence in an oscillatory pipe flow, J. Fluid Mech., Vol.75, part 2, pp.193-207.
- 4) アーマド・サナ・田中 仁(1996): 低レイノルズ数k-εモデルの管内振動流への適用性に関する研究, 第40回水工学論文集, pp.779-785.
- 5) Jones, W.P. and B.E. Launder (1972): The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.15, pp.301-314.
- 6) 田中 仁・ムトゥル・スーマー・ヨルゲン・フレッソー(1997b): クノイド波動下における層流底面境界層の解析解とその実験的検証, 土木学会論文集, No. 572/I1-40, pp.85-90.
- 7) Jonsson, I.G.(1966): Wave boundary layers and wave friction factors, Proc. 10th Int. Conf. Coast. Eng., pp.127-148.
- 8) 灘岡 和夫・八木 宏・二瓶 泰雄・野本 康介(1996): 非対称振動流の乱流構造特性一特にレイノルズ数依存性について一, 海岸工学論文集, 第43巻, pp.441-445.
- 9) アーマド・サナ・田中 仁・山路 弘人(1997): Transitional behavior of asymmetric oscillatory boundary layers, 水工学論文集, 第41巻, pp.651-656.