

II-81

乱流遷移域近傍での波動境界層内の速度分布

東北大学工学部 学生員 ○杉木 直
 東北大学工学部 正会員 Ahmad Sana
 東北大学工学部 正会員 山路 弘人
 東北大学工学部 正会員 田中 仁

1. はじめに

波動境界層内における速度分布を知ることは、底面での砂質移動を知る上で重要である。波動境界層は水深・波長に比べ極めて薄いため波の動きを振動流に置き換えることが可能である。本実験では遷移域近傍の諸水理量に着目して、U字管振動流装置を用いて実験を行った。さらに $k-\epsilon$ モデルによるシュミレーションとの比較を行い、モデルの適応性を検討した。

2. 実験装置及び方法

図-1に実験装置の概略図を示す。2つの連動するピストンによりU字管の左右に交互に空気を出入りさせ、内部の水に振動流を起こしている。ピストンの速度及び振幅を変化させることにより振動流の Re 数を変化させることが可能である。また、今後波と流れの共存場についての実験を行うために定常流を起こすためのポンプを設けている。実験条件を表-1に示す。ここで、 T は周期、 U_w は境界層外の流速の振幅、 $Re = U_w a_m / \nu$ 、 a_m は流体粒子の軌道振幅、 ν は水の動粘性係数である。

速度測定はU字管下部のアクリル部（長さ2.5m、幅0.36m、高さ0.06m）の中央部において、各実験条件それぞれ高さ3cmまでの13～19点についてレーザードップラー流速計を用いて行った。サンプリング間隔10～40msで50波または100波のデータを取り、AD変換したものをアンサンブル平均して1周期の平均流速を求め、これらより速度分布を得た。

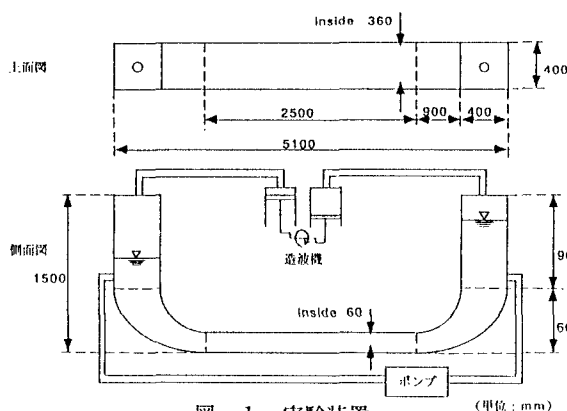


図-1 実験装置

(単位: mm)

表-1 実験条件

	T (s)	U_w (cm/s)	RE
Case 1	4.72	30.6	6.26×10^4
Case 2	4.35	34.1	7.09×10^4
Case 3	3.04	57.1	1.38×10^5
Case 4	2.58	74.4	1.99×10^5
Case 5	3.48	67.8	2.23×10^5
Case 6	3.03	84.0	2.98×10^5
Case 7	3.61	79.5	3.19×10^5
Case 8	2.84	115.8	5.31×10^5

3. $k-\epsilon$ モデル

$k-\epsilon$ モデルは様々なタイプの流れにおける諸水理値を予測するのに優れていると言われている¹⁾。ただし、振動流とりわけ遷移域近傍の適用性は十分に明らかにされていない。よって、本実験においては $k-\epsilon$ モデルによるシュミレーションとの比較を行った。

4. 実験結果

4-1 速度分布

図-2にCase 2における実験値と層流理論の断面流速分布の時間変化を示す。Case 2は $Re = 6.26 \times 10^4$ であり層流状態であると考えられるが、底面近くにおいてわずかな誤差がみられるものの層流理論による速度分布との一致がよく、本実験で作成した装置の波動境界層への適応性が確かめられた。底面近くでは、測定の際底面アクリル板からのレーザ光反射などによるノイズが大きく、測定結果に誤差が出たと考えられる。

図-3にCase 6における実験値と $k-\epsilon$ モデルによるシュミレーションの結果を示す。この場合の Re 数は 2.98×10^5 であり遷移域であると考えられる。 $k-\epsilon$ モデルの分布との一致は自由流においてはよいが、境界層内では底面の極めて近くで誤差が大きい。これは、層流の場合と同じ理由だけでは考えにくく、遷移域においては $k-\epsilon$ モデルの予測が底面の極めて近くで誤差が大きくなるようである。

4-2 摩擦係数

摩擦係数の算定結果を図-4に示す。図中には、層流の厳密解($f_w = 2/\sqrt{Re}$)、過去の実験値とシュミレ

ーションの値も示した。本実験で摩擦係数は、速度分布から運動量積分により剪断力分布を求め、その最大値から算定している。遷移域において幾分大きなばらつきが見られるが、過去の研究成果との対応は比較的良好である。

4. 3 位相差

流速の位相差分布から求めた位相の進み θ の算定結果を図-5に示す。層流解は $\theta = 4.5^\circ$ である。今回の実験の結果は過去のデータとよく一致しており、遷移域付近での位相の急激な減少が見られる。特に $k-\varepsilon$ モデルとの一致はよいようである。同図から得られる限界レイノルズ数は摩擦係数から得られるそれよりも小さい。その理由は、遷移域近くで剪断力は最大値が現れる直後まで層流解に一致し、その後減速期の乱れにより二つのピークが現れるためである。これにより、摩擦係数は層流解と一致するが、位相差は 4.5° と異なる¹⁾。

4. 4 境界層厚さ

境界層の定義としては、Jonsson²⁾、Jensen³⁾、Sleath⁴⁾による3種類の定義があるが、ここではJonssonとSleathの定義によるものを図-6、図-7に示した。図には層流解と $k-\varepsilon$ モデルの結果も示している。縦軸の δ^* は境界層厚さ δ を無次元化したもので $\delta^* = \delta / a_m$ である。双方の定義において $k-\varepsilon$ モデルや理論との一致についてよい結果が得られた。これらから得られる限界レイノルズ数は、図-4から得られるものに比較的近い。

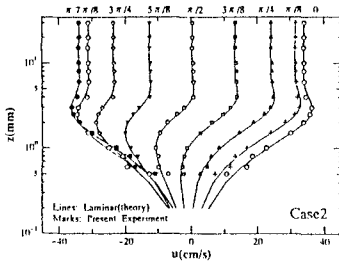


図-2 速度分布 (層流)

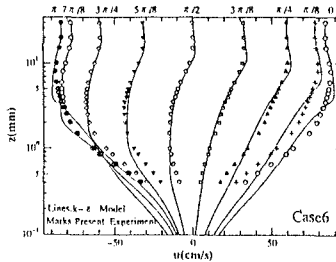


図-3 速度分布 (遷移域)

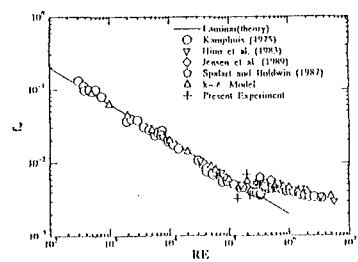


図-4 摩擦係数

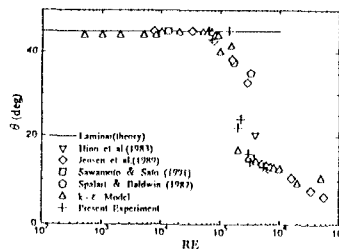


図-5 位相差

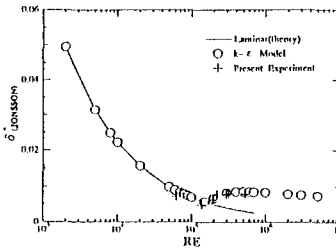


図-6 境界層厚さ (その1)

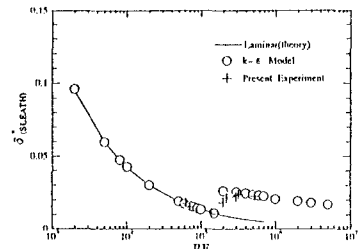


図-7 境界層厚さ (その2)

5. おわりに

本研究においては層流域から遷移域にかけてのデータを得ることを目的として行ったが、過去のデータや $k-\varepsilon$ モデル等とよく一致した。速度分布においては遷移領域の底面の極めて近くで $k-\varepsilon$ モデルの予測が悪いようである。また、実験装置の性能や強度の点から完全乱流域に至るまでの測定が行えなかった。今後これらの点を考慮し、実験装置の改良やホット・フィルム平面センサーによる剪断力の直接測定などを試みる予定である。

参考文献

- 1) 田中 仁・Ahmad Sana (1994): 低レイノルズ数 $k-\varepsilon$ モデルによる波動境界層の計算、水工学論文集、第38巻、pp. 481-486.
- 2) Jonsson, I. G. (1966), Wave Boundary Layers and Friction Factors, Proceeding of the 10th Conference on Coastal Engineering, Tokyo, ASCE, pp. 127-148.
- 3) Jensen, B. L. (1989), Experimental Investigation of Turbulent Oscillatory Boundary Layers, Series Paper No. 45, ISVA, Lyngby, Denmark.
- 4) Sleath, J. F. A. (1987), Turbulent Oscillatory Flow over Rough Beds, J. Fluid Mech. 182, pp. 369-409.