

波動周期の増加に伴う準定常境界層への漸近挙動に関する実験的研究

川村 育男*・アーマド サナ**・田 中 仁***

1. 研究の目的

波浪による流速場や底面せん断力を知ることは地形変動や土砂移動の算定のために重要である。そこで現在までに、波動境界層に関して数多くの研究がなされている。

通常、「波動境界層」と言えば、暗黙の内に水深に比べ境界層厚がきわめて薄い状態を想定している。しかし、汀線に近い極浅海域や長周期性の波動下においてはこのような仮定が満たされず、むしろ準定常的な流れ場が形成される。そこで、著者らはこのような境界層を対象として理論的研究を行い、通常の波動抵抗則域から準定常抵抗則域への遷移限界や、一様勾配海浜上を伝搬する波動下における抵抗特性の変化に関する検討を行った (Tanaka and Shuto, 1994; サナ・田中, 1995)。ただし、これらの研究は単純化された乱流モデルに基づくものであり、その理論自体の検証は行われていなかった。

そこで、本研究では通常の波動境界層から準定常状態の境界層までを発生させることの出来る U 字管振動流装置を作製して実験を行い、これら二種の境界層の間での遷移特性に関する検討を行った。なお、同様な現象を扱ったものとしては、波動水槽を用いて行われた Yalin and Russell (1966) による実験的研究がある。

2. 実験装置と実験方法

図-1 に実験装置の概略を示す。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、内部の水に振動を発生させる。測定部の壁面には高さ 5.4 mm の三角粗度を 12 mm 間隔で貼り付けた (図-2 参照)。ピストンのモーターの速度及び振幅を変えることにより、通常の波動境界層から準定常波動境界層に至る広範囲での実験が可能である。流速測定は U 字管水平部のアクリル部 (長さ 2.5 m, 幅 0.36 m, 高さ 0.06 m) の中央部において、粗度の頂部から管路中央までの 18~26 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 ms または 20 ms で 50 波のデータを

とり、アンサンブル平均して 1 周期内の速度分布や乱れ強度分布を得た。

実験は定常流を 5 ケース、振動流を 14 ケース行った。なお、粗度の大きさ、間隔から Δz (仮想底面高さ)、 z_0 (粗度長さ) を求める普遍的な公式などは確立されていない。そこで本研究では各ケース毎に壁面近傍の速度分布に対数則を当てはめ実験的にこれらを求めた。その結果、 z_h/z_0 (z_h : 壁面から管中心までの高さ) は 15.6 から 21.3 であり、平均値は 18.7 であった。

図-2 に、以下に用いる記号の定義を示す。

摩擦係数 f は (1) 式の数則を用いて得られた摩擦速度 U_* の最大値と実験から求められた断面平均流速 U_0 の最大値を (2) 式に代入することにより得られる。

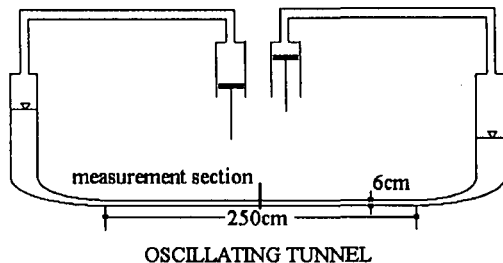


図-1 実験装置

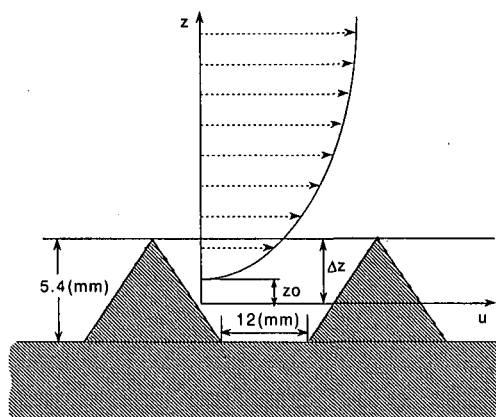


図-2 記号の定義

* 学生会員 東北大学大学院工学研究科
 ** 正会員 M.Eng. 東北大学助手 大学院工学研究科
 *** 正会員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科

表一 実験条件

実験 ケース	T (s)	U_0 (cm/s)	$U_0/\sigma z_0$	f
Q01	4.86	80.8	394	0.094
Q02	3.33	36.8	149	0.119
Q03	5.39	19.7	129	0.127
Q04	2.61	55.4	176	0.111
Q05	3.52	104.4	327	0.103
Q06	7.28	50.8	360	0.089
Q07	4.06	100.8	373	0.093
Q08	5.50	69.8	363	0.090
Q09	3.08	145.4	427	0.097
Q10	4.32	77.3	363	0.091
Q11	3.61	81.9	330	0.091
Q12	3.57	65.7	271	0.096
Q13	3.54	50.0	215	0.104
Q14	3.55	19.3	48	0.745

$$u = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \dots\dots\dots (1)$$

$$f = 2 \left(\frac{U_*}{U_0} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 κ :カルマン定数(=0.4), z :鉛直座標である。
振動流の実験条件と得られた f の値を表一に示す。
表中での σ は角振動数である。

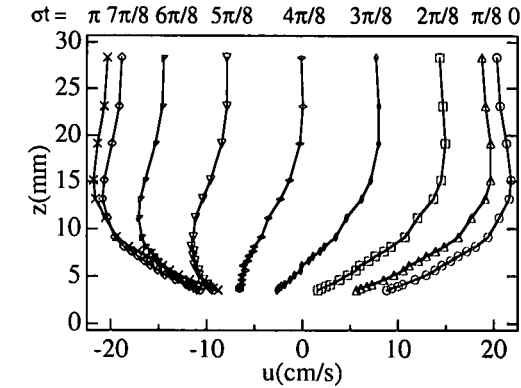
3. 実験結果と考察

(1) 流速分布

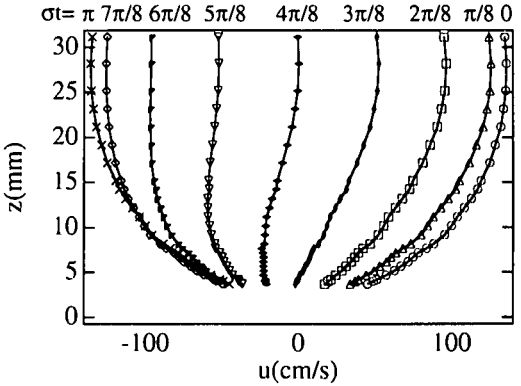
図-3(a)~(c)に最も非定常性が強く波動的な振る舞いを示すものと、反対に定常的な挙動を示すもの、及びその中間のケースでの速度分布を示す。図-3(a)は周期が短い、非定常性の強い時の流速分布であり、overshoot現象や位相のずれ、また管路中央付近で速度勾配がゼロになる領域が見られるなど、波動境界層に特徴的な現象が現れている。一方、図-3(c)には周期が長い、定常性の強いときの流速分布が示されている。図-3(a)と異なり、境界層が管路中央まで発達し、位相差のズレも小さいなど、準定常的な特徴が見られる。図-3(b)の実験では、上記のケースの中間的な振る舞いをしている。現在までにこのような速度分布の変化を報告した実験例はない。

(2) 乱れ強度

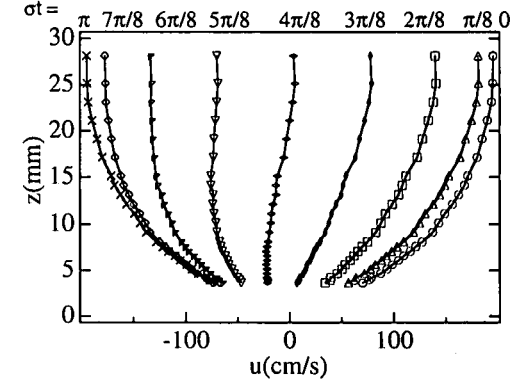
図-4(a), 図-4(b)に図-3(a), (c)で示した平均流速分布に対応する乱れ強度のコンター図を示す。図-4(a)は周期が短いときの変動成分であるが、これを見ると非定常性が強いときの乱れ強度の分布は、特に管路底



(a) Run Q03



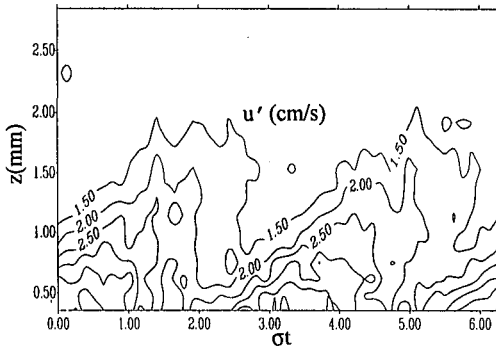
(b) Run Q05



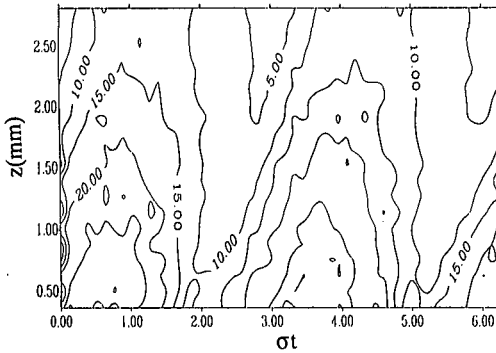
(c) Run Q09

図-3 流速分布

面部付近において顕著だが位相のズレが大きい。また、管路中央付近で乱れ強度の大きさがかなり小さくなっている。一方、図-4(b)に示されるように周期の長いときの乱れ強度の分布では、全体的に位相のズレがあまりみられず、速度の大小に応じて乱れ強度が増減している様子が窺える。

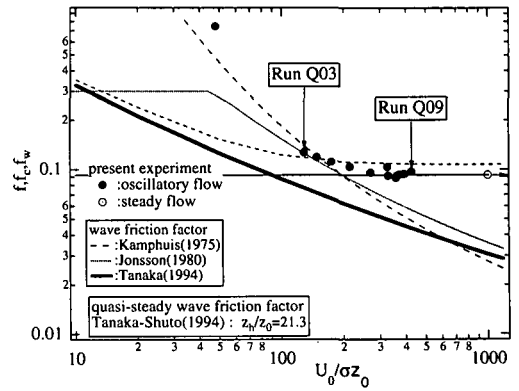


(a) Run Q03

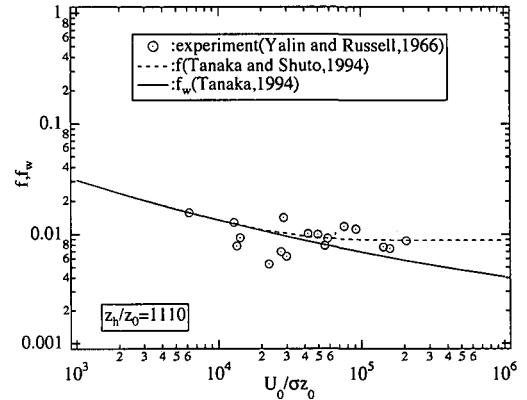


(b) Run Q09

図-4 乱れ強度



(a) 本研究の実験結果



(b) Yalin and Russell の実験結果

図-5 摩擦係数

(3) 摩擦係数

図-5(a)に本研究による摩擦係数 f を示す。図には Jonsson(1980), Kamphuis (1975), 及び Tanaka (1992) の波動摩擦係数式並びに Tanaka ら (1994) による波動抵抗則から定常抵抗則への遷移摩擦係数の理論値も示した。周期が短い時, すなわち $U_0/\sigma z_0$ の値が小さい時の実験値は, Jonsson, Kamphuis の式に比較的近い値を示す。 $U_0/\sigma z_0$ の増加に伴い定常流の実験値(○印)に漸近して行くことが判る。 $U_0/\sigma z_0$ 付近で Tanaka の摩擦係数は他の二者と差が大きい。このため, 実験に現れた遷移の様子は Tanaka and Shuto の理論と異なっている。

図-5(b)には比較のために Yalin and Russell (1966) のデータを示した。これは図-5(a)に比べて $U_0/\sigma z_0$ の値ははるかに大きいものとなっている。図-5(a)に比べばらつきが大きいものの, 理論と同様な遷移を示している。

(4) 境界層厚さ

境界層厚さ δ の変化を図-6 に示す。本研究では, 流速振幅が最大となる点の壁面からの距離を境界層厚さとする Jensen et al. (1989) の定義を用いた。図で a_m は水粒子の軌道振幅である。波動下でのデータとして, Jonsson and Carlsen (1976), Jensen et al. (1989), Sleath (1987)

の値もプロットした。 $U_0/\sigma z_0$ が小さい時, 本実験の値は Jensen らのデータを左に外挿した直線上に位置する。このことから, 本実験の結果は過去の実験データと良い一致を見せていることが分かる。横軸の値が増加するにつれて実験値はこの直線からはずれ, 定常流で成立する $\delta = z_h$ に移行して行く様子が認められる。同図から得られる遷移限界での $U_0/\sigma z_0$ 値は約 300 であり, 図-5(a)で定常流抵抗則への移行がほぼ完了する点でのそれに一致している。なお, 図中には遷移後の直線として, 本実験の z_h/z_0 の平均値 18.7 に対するもののみを示したが, この直線は各実験での z_h に対応して異なるものである。 Jensen や Jonsson の用いた U 字管実験では $z_h/z_0 = 18.7$ の直線より右側の領域に遷移が表れることになる。

(5) 準定常抵抗則域の判定条件

以上に示した遷移現象は急激な変化を伴うものではなく, 緩慢に生じる。このため, 遷移点を明確に定義することは困難であるが, ここでは, 図-5 に示された準定常流域の摩擦係数を横軸に平行に外挿し, 波動摩擦係数と

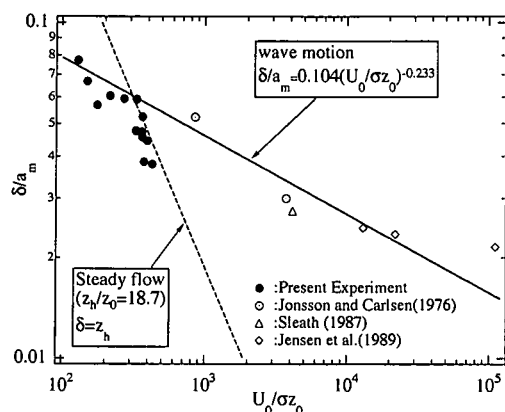


図-6 境界層厚さ

交わる点をもって遷移点と定義する。この定義によれば、以上に示した今回の実験結果より、 $z_h/z_0=18.7$ の時、 $U_0/\sigma z_0=134$ が遷移点となる。一方、図-5(b) に示した Yalin and Russell (1966) によれば、 $z_h/z_0=1100$ の時、 $U_0/\sigma z_0=24000$ となる。これらを図-7 に示す。図中には Tanaka and Shuto (1994) による条件式 (3) も示した。

$$\frac{z_h}{z_0} = 0.05 \frac{U_0}{\sigma z_0} \quad (3)$$

上式は、波動境界層に定常流抵抗則を当てはめたとき、10% の誤差が生じる限界を示している。今回の実験結果と式 (3) との対応は良好ではない。そこで、以下のように新たな判定条件の導出を試みる。すなわち、Tanaka and Shuto (1994) による定常流抵抗則式と Jonsson (1980) による波動抵抗則式とを等置することにより次式を得、 $U_0/\sigma z_0$ と z_h/z_0 との関係が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{A}{4\sqrt{2} \kappa \left(\frac{z_h}{z_0} - 1 \right)} + \log_{10} \frac{A}{4\sqrt{2} \kappa \left(\frac{z_h}{z_0} - 1 \right)} + 0.08 \\ & = \log_{10} \left(\frac{U_0}{30 \sigma z_0} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

ここで

$$A = 2 - 1.5 \frac{z_h}{z_0} + \frac{z_h}{z_0} \ln \frac{z_h}{z_0} - 0.5 \frac{z_0}{z_h} \quad (4a)$$

これは、図-5(a) において鎖線と細い実線との交点を探すことに対応する。この結果を図-7 に示した。実験値と良い一致を示すことが分かる。ただし、式 (4) は幾分複雑なので、これを近似する陽的な式として次式が得られる。

$$\frac{z_h}{z_0} = 0.343 \left(\frac{U_0}{\sigma z_0} \right)^{0.797} \quad (5)$$

式 (3) には無次元表示のために両辺に z_0 が含まれているが、実質的に判定式 (3) は z_0 に依存しない。これ

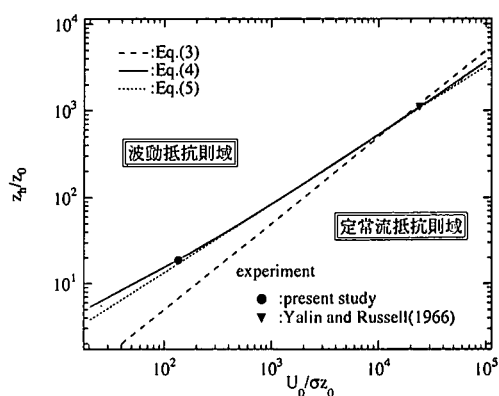


図-7 準定常抵抗則域の判定図

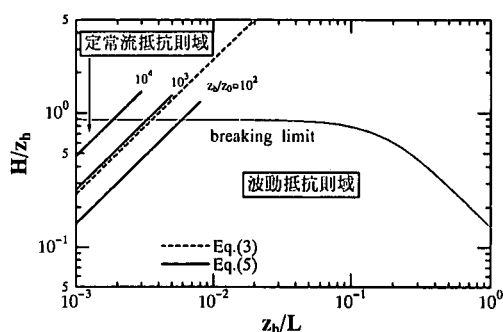


図-8 波の諸元で表された準定常抵抗則判定図

に対して、今回新たに得られた式 (5) は粗度長さの関数になっている。

式 (5) で表された判定条件を波の諸元で置き換えることにより (6) 式を得る。

$$\frac{H}{z_h} = 47.9 \left(\frac{z_h}{z_0} \right)^{0.25} \frac{z_h}{L} \quad (6)$$

これを碎波指標とともに図-8 に示す。ここで、 H : 波高、 L : 波長である。図中にはすでに提案した理論による準定常判定条件式と先に示した近似式も示してあるが、差異が見られる。また、長波の領域においても準定常境界層とはならない領域が広いことに注意しなければならない。これは、抵抗則の準定常性は水深と境界層の比に支配されるのに対し、波動の分類は全く異なる指標 (水深/波長) によっているためである。

4. ま と め

波動運動の水粒子軌道振幅を徐々に増加させることにより、時々刻々の境界層内の速度分布が波動運動に特徴的なものから準定常的な振る舞いを示すものに変化する

ことが実験的に示された。また、乱れ強度の時空間特性についても同様な変化が見られた。実験により得られた摩擦係数と境界層厚さを調べることにより、この様な遷移過程をより明瞭に示すことができた。実験結果をもとに、波動抵抗則と準定常抵抗則とを使い分けるための判定基準が得られた。

謝辞：本研究の実験に際し、東北大学工学部山路弘人技官より多大な助力を得た。また、本研究に対して文部省科学研究費の補助を受け、本論文の公表に際し、小川基金の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 田中 仁・Ahmad Sana (1995): 長周期性波動下における底面摩擦の特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 36-40.
Jensen, B. L., B. M. Sumer and J. Fredsoe (1989): Turbulent oscillatory boundary layer at high Reynolds numbers, J.

- Fluid Mech., Vol. 206, pp. 265-297.
Jonsson, I. G. (1980): A new approach to oscillatory rough turbulent boundary layers, Ocean Eng., Vol. 7, pp. 109-152+567-570.
Jonsson, I. G. and N. A. Carlsen (1976): Experimental and theoretical investigation in an oscillatory turbulent boundary layer, J. Hydr. Res., Vol. 14, No. 1, pp. 45-60.
Kamphuis, J. W. (1975): Friction factor under oscillatory waves, J. Waterways, Harbors and Coast. Eng. Div., Vol. 101, No. WW2, pp. 135-144.
Sleath, J. F. L. (1987): Turbulent oscillatory flow over rough beds, J. Fluid Mech., Vol. 182, pp. 369-409.
Tanaka, H. (1992): An explicit expression of friction coefficient for wave-current coexistent motion, Coastal Eng. in Japan, Vol. 35, No. 1, pp. 83-91.
Tanaka, H. and N. Shuto (1994): Quasi-steady property of bottom friction in a wave boundary layer, Proc. Int. Symp.: Waves-Physical and Numerical Modelling, pp. 1570-1579.
Yalin, M. S. and R. C. H., Russell. (1966): Shear stresses due to long waves, J. Hydr. Res., Vol. 4, No. 2, pp. 55-98.