

1. はじめに

転波列流れの特性を把握することは、流体力学的あるいは環境工学的な観点から重要であると考えられる。本研究では転波列流れの支配パラメータについての考察を試みる。転波列流れは波動というより、流速場が卓越していると考えられることや、転波列フロントでの碎波のため、フロント前後で跳水現象が出現しているものと考えられる。¹⁾ そこでまず、跳水によるエネルギー損失のオーダーを概観し、続いて次元解析を施して転波列流れの支配因子について考察する。

2. 実験方法と条件範囲

表-1 実験条件

実験は、長さ5m、水路幅Bが20cmの亚克力性可変勾配水路を用いて行い、水路上流端より3.9m下流付近の水路中央部を測定地点とした。河床面は滑面とし、水位は超音波水位計を用いた。実験条件範囲を表-1に示す。また、今回の実験は、レイノルズ数による影響を避けることを考えて、レイノルズ数を約3000程度のほぼ一定で行った。

Run No.	Channel Slope(S)	Mean flow depth h(mm)	Froude number(Fr)
1	1/5.96	3.9	5.7
2	1/7.78	3.7	5.9
3	1/8.25	3.1	6.0
4	1/10.1	3.3	5.9
5	1/12.3	3.5	5.2
6	1/12.7	4.0	4.6

ここに、 $Fr=U/\sqrt{gh_m}$ 、 g : 重力加速度、 $U=Q/(Bh_m)$ 、 B : 水路幅、 Q : 流量、 h_m : 平均水深、 $Re=Uh_m/\nu$ 、 ν : 動粘性係数である。

3. フロントでのエネルギー損失

転波列フロントの観測やフロントでの碎波条件を考慮すると、波速に乗った立場からは、フロントで跳水現象が出現していると考えられる。そこで、この跳水によるエネルギーの損失がどの程度であるかを、式(1)を用いてエネルギーの損失を見積もったのが図-1である。

$$\Delta H = (h_{\max} - h_{\min})^3 / 4 h_{\max} h_{\min} \quad \text{---- (1)}$$

ここに、 $h_{\max}$ 、 $h_{\min}$ は転波列フロント前後の最大水深、最小水深である。

図-1は、横軸にフルード数を、縦軸に式(1)の結果を平均水深で無次元化したものを示した。この結果は、フルード数の増大に伴いエネルギー損失もかなり大きくなることを示している。そしてこのエネルギーロスオーダーが水深規模にまで達することが示されている。このことは、転波列流れを考える上で非常に重要なことを示していると考えられる。こうしたフロントでの跳水現象と同時に、Dressler²⁾が指摘しているように、転波列流れは底面の摩擦抵抗の影響を強く受けている。そしてその結果、転波列流れは平均的に大きな速度勾配を出現させて流下していると考えられる。ここでは、以下に次元解析的なアプローチを試みて、転波列流れにおける支配的なパラメータを考察する。

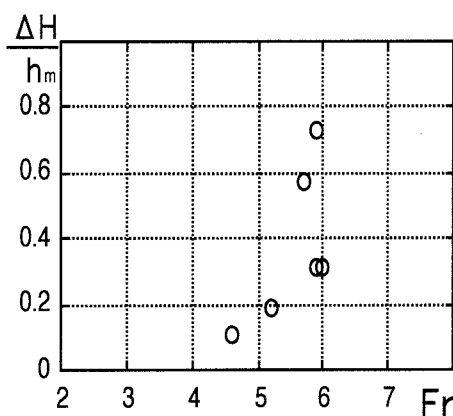


図-1 フロントでのエネルギー損失

4. 流れの次元解析

いま、転波列流れを支配する物理量として、水深 h 、流速 U 、密度 ρ 、転波列の周期 T 、重力加速度 g 、摩擦速度 U_* 、波長 L 、粘性係数 μ を考える。

$$f(h, U, \rho, g, T, U_*, L, \mu) = 0 \quad \text{---- (2)}$$

とする。これに次元解析を施すと、

$$F(Fr, U/h_m \cdot T, U_*/U, L/h, Re) = 0 \quad \text{---- (3)}$$

が得られる。つまり、重力効果としてのフルード数、無次元周期としてストローハル数型のもの、そして底面摩擦の効果として摩擦損失係数 f および波長・水深比、そして Re 数の 5 つの無次元量が得られることになる。ここで、これらの挙動について検討する。実験

条件で述べたように、 Re 数がある程度固定して実験を行い、その摩擦損失係数 f を (4) 式で求めると、

$$U = \sqrt{2/f} \cdot U_* \quad \text{---- (4)} \quad \text{ここに、} U_* = \sqrt{g h_m S}, \quad S \text{ は水路勾配である。}$$

f が 0.007 前後でほぼ一定であること、さらに L/h_m の値も 130 程度とほぼ一定に近いことから、(3) 式第 1 項と第 2 項についての関係示したのが、図-2 である。縦軸に無次元周期、横軸にフルード数を示してある。データ数の不足とフルード数の範囲が狭いことから、詳細な議論はできないが、 Fr 数の増大とともに無次元周期の増大といった、ある程度の傾向が示されている。ここで、 $Fr = U/\sqrt{g h_m}$ を用いていることから、周期 T と $\sqrt{(h_m/g)}$ の関係が想定されるが、ここでは平均水深の代わりに転波列の波長 L を用いて整理した結果を以下に述べる。

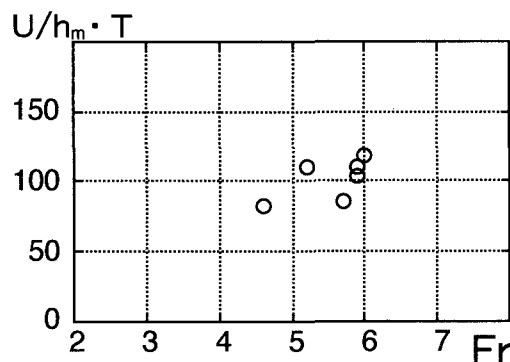


図-2 フルード数と無次元周期

5. 転波列の周期

図-3には、転波列の周期をその波長の単振り子の周期で無次元化したものを縦軸に、横軸には、転波列フロント前後の水深比を用いたものを示した。この図から、水深比の増大に伴い、無次元化された周期が0.3から0.2程度までなめらかに減少する傾向が示されている。ここから、転波列の周期と波長および、フロント前後の水深比との関係が推察される。つまり、転波列の周期が、単振り子といった固有な周期と対比され、それが転波列のフロント前後の水深比との関係で示されており、転波列流れがこれらのバランスの上に出現していることが推察される。

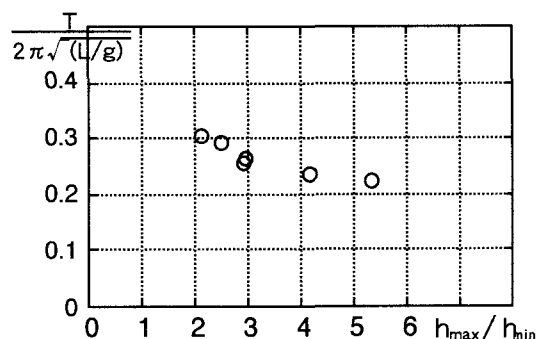


図-3 転波列の周期とフロント水深比

6. 転波列流れの支配パラメータ

本文では、転波列流れを規定する支配パラメータについて若干検討した。その結果、転波列流れを規定する主な無次元量は、フルード数、無次元周期（ストローハル数型）、摩擦損失係数、波長・水深比、レイノルズ数の 5 つがまず考えられる。そして、転波列の周期と固有な振動周期との対比およびフロント前後の水深比から、この周期と波長とフロント前後の水深比のバランスの上に転波列が存在していることが推察された。このことから、改めて転波列流れを表現するパラメータとして (5) 式を示すことができる。

$$F(Fr, U/h_m \cdot T, h_{\max}/h_{\min}, f, L/h_m, Re) = 0 \quad \text{---- (5)}$$

特に滑面の乱流では、(5) 式の第 1 項、2 項、3 項が重要なパラメータになると考えられる。

今後は、もっと多くの実験データを得て、もう少し詳細な検討を進めたい。

(参考文献) 1) 室田、宮島；超高速流の内部構造に関する実験的研究、水工学論文集、第 39 巻、1995。

2) Dressler.R.F.: Communication on Pure and Applied Mathematics, Vol.2, No.2/3, pp.149~194, 1949.