

超高速流の内部構造に関する実験的研究*

(乱れ挙動についての考察)

Experimental Study on Internal Structures of Ultra-Rapid Flow
(A Consideration on Turbulence Behaviors)

室田 明 ・ 宮島 昌弘
Akira MUROTA ・ Masahiro MIYAJIMA

On Steep slope channel beds, it is well known that thin sheet flow has periodic Roll-Wave trains, but experimentally derived data is scant to this date. In this paper, periodicities of Roll-Waves is considered and mean velocity, Reynolds stress and correlation coefficients of Reynolds stress are compared to corresponding Uniform flow data. In addition, a consideration of Internal structures of Roll-Waves by a general Shear equation for Uniform flow is attempted. The results indicate Roll-Wave flow's mean velocity is similar to Uniform flow's mean velocity, but differs in regard to turbulence. It is hypothesized that Roll-wave frequency is under the influence to velocity gradient and to viscous layer and mean water depth ratio, velocity gradient term on shear stress equation is important for Roll-Waves structures and turbulence are controlled by changing water depth, surface, and Roll-Waves fronts.

Keywords : Roll-Wave, steep slope channel, thin sheet flow, surge, rapidly varied flow, turbulence

1. はじめに

急勾配水路や急斜面を流下する薄層流は、フルード数がほぼ2を越えたいわゆる超高速流になると自発的に発生する転波列を伴うことはよく知られている。これらの特性を知ること、水路設計や土砂輸送に関する知見を得る上で非常に重要である。しかしながら、これまで転波列の議論に関しては、その発生について論じられたものは数多くあるが、転波列を伴う流れの水理学的な特性を論じたものは、Dressler¹⁾、石原、岩垣、岩佐、^{2),3)}、Vide⁴⁾程度と数少ない。これは、水深が非常に浅く数mmオーダーであるにもかかわらず、平均流速が1 mオーダーと高速流であること、そして水位変動スケールが水深規模の数倍程度にまで達し周波数も数 Hz 程度にまで及ぶほど激しく大きいことから、これらの水理量の実測はかなり難しかったためであると思われる。そしてこれら水理量の実測(特に流速・水位の測定)がままならないために、非常に基本的に物理量に対して幾つかの仮定を設ける必要があったものと考えられる。

一方転波列を伴う流れについて、これまでの著者ら^{5),6)}の実測・検討の結果が示すものは、『転波列を伴う流れは、見かけ上対数則に近い平均流速分布で、波頂部付近で転波列の波速

*平成7年5月 原稿受理

大阪産業大学 工学部 土木工学科

に相当する流体粒子速度を伴って流れており、流れは平均的に水路床から波頂部まで連続していると考えられ、乱れの大きさが水深の変動に大きく影響を受けている。』というものである。そしてこのことは、転波列は位相が伝播する波動と言うより、転波列の速度と波頂部付近の流速の一致という実験結果から、流れの非常に卓越した場を形成していることを示すものであり、転波列流れを特徴づける非常に重要な事柄であると考ええる。そこで本研究では、まず転波列の周期性についての検討を行った上で、定常流と比較して転波列流れの特徴を検討し、流れのせん断力を考える見地から内部構造についての考察を試みた。これらの結果、転波列の発生段階では粘性底層あるいは層流抵抗および速度勾配が転波列流れについては重要な因子であること、そして転波列流れの平均的な流れ場を考えると、いわゆる層流せん断力項が一般の定常流に比べて大きな意味を持つことが示されるとともに、転波列流れの水深変動と転波列フロントによる碎波の効果が乱れに大きく関与していることが推察された。

2. 実験条件

実験は水路長5.0m、水路幅0.2mの亚克力製可変勾配水路を使用し、水路上流端より3.9m下流位置を測定位置とした。実験条件は周期性、レイノルズ応力と相関係数に関して各々、表-1から表-2に示す。水面変動は超音波水位計を、そして主流速 U を、レーザー・ドップラー流速計で測定した。

ここに、 h_0 は、 $h_0 = (h_{max} + h_{min}) / 2$ 、Fr数： $U_0 / \sqrt{gh_0}$ 、Re数： $U_0 \cdot h_0 / \nu$ 、 h_{max} ：最大水深、 h_{min} ：最小水深、 U_0 ：平均流速、 ν ：動粘性係数、 u_m は測定点での平均流速値、 u' 、 v' は瞬間乱れである。

表1 転波列周期性に関する実験条件

勾配 S	流量 Q(l/s)	平均水深 h ₀ (mm)	フルード数 F _r	レイノルズ数 R _e
1/6.54	0.294	2.5	3.8	1300
	0.492	3.0	4.7	2200
	0.720	3.8	5.0	3300
	1.009	3.9	6.5	4500
	1.268	4.3	7.1	5700
1/10.1	0.298	2.9	3.0	1300
	0.496	3.7	3.6	2200
	0.691	3.8	4.8	3100
	1.012	4.6	5.1	4500
	1.235	4.4	6.7	5500
1/16.0	0.288	2.9	3.0	1300
	0.532	3.5	4.2	2500
	0.712	3.8	4.9	3300
	1.085	5.2	4.7	5100
	1.185	5.3	4.9	6000
1/20.6	0.320	2.5	4.0	1400
	0.513	4.4	2.8	2300
	0.702	4.0	4.5	2900
	0.810	4.8	3.9	3300
	1.068	6.5	3.3	4800
1/24.5	0.298	2.6	3.6	1300
	0.504	3.5	3.8	2200
	0.710	3.8	4.7	3100
	1.065	5.2	4.5	3900
	1.221	6.2	4.0	4500

表2 レイノルズ応力と相関係数に関する実験条件

水路勾配 S	流量 Q(l/s)	平均水深 h0(mm)	フルード数 Fr	レイノルズ数 Re
1/174	0.838	11.3	1.1	4500
1/10.3	1.008	5.2	4.3	3900

3. 転波列の周期性

実験・観測の結果および転波列は定常流から出現してくると言う事実からいま、周期Tが次式で示されると仮定する。

$$T = F(h, U, \rho, \mu, g, S) \dots\dots(1)$$

ここは、hは平均水深、Uは平均流速、 ρ は密度、 μ は粘性係数、gは重力加速度、Sは水路勾配である。

これに次元解析を施すと

$$T \cdot U / h = F(Fr, Re, S) \dots\dots(2)$$

が導かれる。

さて(2)式の左辺のU/hについて考えると、前述したが、hは数mm程度と非常に小さく、一方Uが1 mのオーダーとかなり大きいことから、河床面で流速が0であること考えると、これは流れの平均的な速度勾配を表現していると考えられる。この速度勾配で無次元化された周期がFr、Re、Sの関数で現されるといっているのであるが、ここでたとえばDresslerは“転波列は、摩擦抵抗がなくてもあるいは大きすぎて存在しえない。そして摩擦抵抗の増減に伴い波の振幅も増減する。”と指摘しているように乱流に関する転波列においては、水深が非常に小さく先に述べた波頂部から水路床部まで連続し流速分布もあわせて考えると、摩擦抵抗が重要でしかも支配的な存在と考えられる。

そこで(2)式の右辺が摩擦抵抗係数に関わる無次元量と考え、さらに室田・宮島^{5),6)}が指摘しているように流れが層・遷移流と乱流とのいわば交互に出現するともいえる流れの場が存在していることや、転波列流れにおいては、水深の変化に伴い乱れの大きさも変化し、水深の小さい所では乱れが小さくなっていること、そして転波列発生初期段階においては、レイノルズ数も比較的小さな1500から6000程度の範囲にあるため、層流状態を無視できないと考えられる。ここになんらかの外部擾乱あるいは、内部的な擾乱があつて、これに激しい速度勾配の存在した流れを想定する。こうした状態から転波列が発生していると考えられる。ここで左辺の転波列の速度勾配に関わる無次元周期はこれらの摩擦抵抗係数の層流形式と乱流形式の比として捕らえることができると仮定する。すると、乱流の摩擦抵抗係数形式 $(U_* / U)^2$ 、層流の抵抗係数形式が $(1/Re)$ で表されることを思い起こすと右辺は Fr^2/SRe の関数で表されることになる。図-1にこの実験結果を示す。この結果は相当な範囲にわたつ

ているが、速度勾配と抵抗比により、周期性のある傾向が示されているものと考えられる。

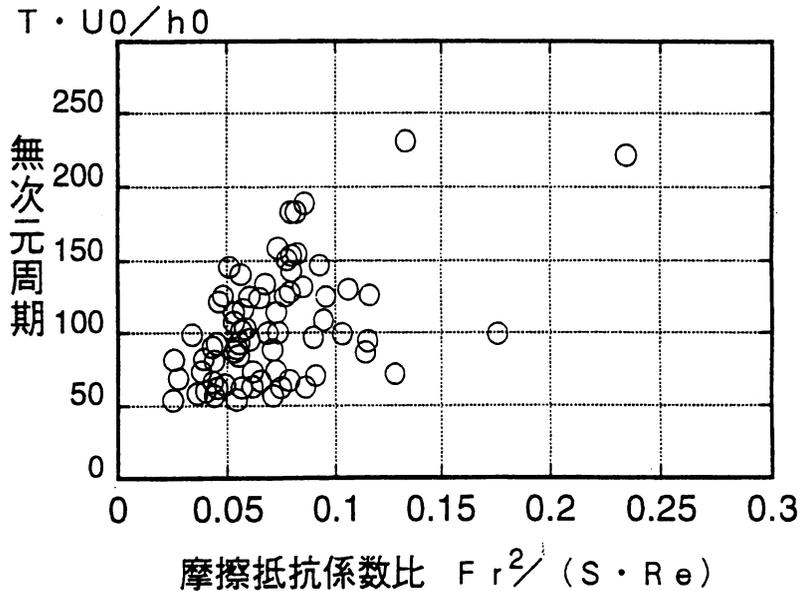


図-1 転波列の周期性

この Fr^2/SRe をもう少し吟味してみると $\frac{U^2}{U_*^2} \cdot \frac{1}{Re} = \frac{U^2}{U_*^2} \cdot \frac{\nu}{Uh_0} = \frac{U}{U_*} \cdot \frac{\nu}{U_*} \cdot \frac{1}{h_0}$ となり $\frac{\nu}{U_*}$ が粘性底層厚 δ に対応する項であることから $(\frac{1}{\sqrt{f}}) \cdot (\frac{\delta}{h_0})$ の形になり、乱流形式の抵抗係数の項と粘性底層厚 δ と平均水深 h_0 の比で構成されていると考えてもよいことが判る。これはつまり転波列周期が速度勾配、粘性底層厚と平均水深比、および乱流形式の抵抗係数で表現されうことを示しており非常に興味深い。

このことは非常におおざっぱであるが、現象論的に転波列の周期が推定できる可能性を示しているものと言える。

さてここでは転波列の発生に関わる平均流速・周期の問題について検討してきたが、こうして発生してきた転波列が平均的にどんな挙動を示し、どういった乱れ特性を持っているかを以下に述べて行きたい。

4. 定常流れと転波列

急勾配水路の薄層流に関する実験は石原ら⁷⁾、岩垣⁸⁾、富永ら⁹⁾ によって詳細な結果が示されている。岩垣はフルード数の増大に伴って対数則の積分定数の減少を見だし、富永らは混合距離理論に基づく考察から、底面せん断力の増大に伴う底面近傍の混合距離の増大を説明している。そこで本実験における転波列の条件に比較的近いレイノルズ数条件でしかも一般に言われている定常流に近いと考えられるフルード数条件を選んで実験を行い、この定常流れとの比較によって転波列の特徴を明らかにしようとする。

4.1 平均的流速分布

図-2、図-3はそれぞれ実験で得られた平均流速分布について示したものである。縦軸に流速 U^+ (u_m/U_* ; $U_* = \sqrt{gh_0S}$ で無次元化したもの)、横軸に平均水深 h_0 で無次元化した y^+ ($U_* h_0 / \nu$) をとっている。図-2からは、平均水深 $h_0 = 1.0\text{cm}$ 程度しかない薄層流といえども、近年禰津ら¹⁰⁾ が示した開水路乱流の平均流速分布と同様の実験結果が示されていることが判る。図-3をみると、対数則から中央部付近の低減化傾向はあるものの、見かけ上は量的にも開水路乱流の対数則分布に近似している。この図-3の最大の流速に対応する値がほぼこの転波列の波速に相当しているのである。

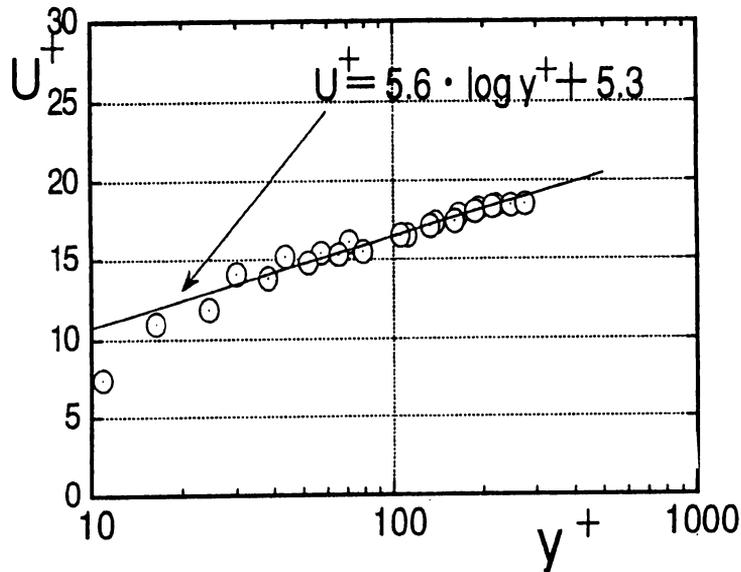


図-2 定常流の平均流速分布

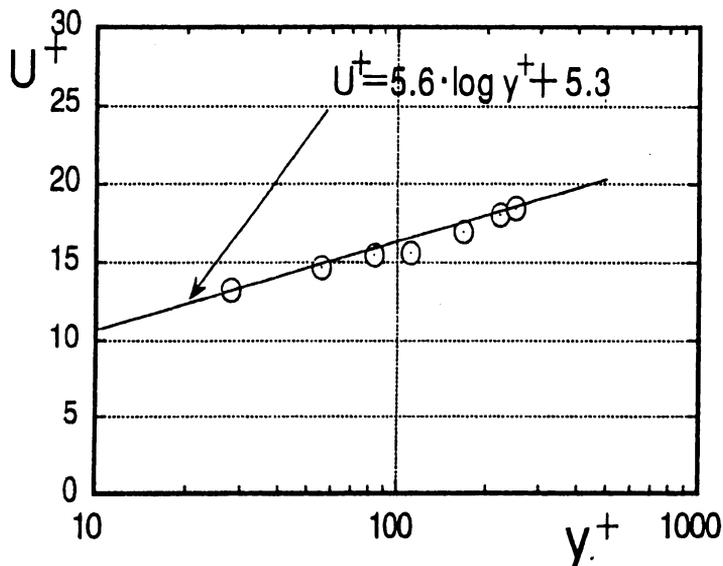


図-3 転波列の平均流速分布

4.2 レイノルズ応力について

図-4には定常流と転波列のレイノルズ応力を示した。縦軸は時系列データがうまく得られなかったため、 u' 、 v' が10msec以内にもとに計測できたデータを対象に1000個程度集めて得られた $-u'v'$ のアンサンブル平均を U_* で無次元化してある。図-4であるが見かけ上レイノルズ応力が定常流に比べて2/3程度しかない結果が現れている。図-3より平均主流流速分布は定常流と転波列とで見かけ上顕著な差はない。するとレイノルズ応力の見かけの低減化につながっているのはどういう現象を現しているのだろうか。あとで若干検討を加えてみたい。

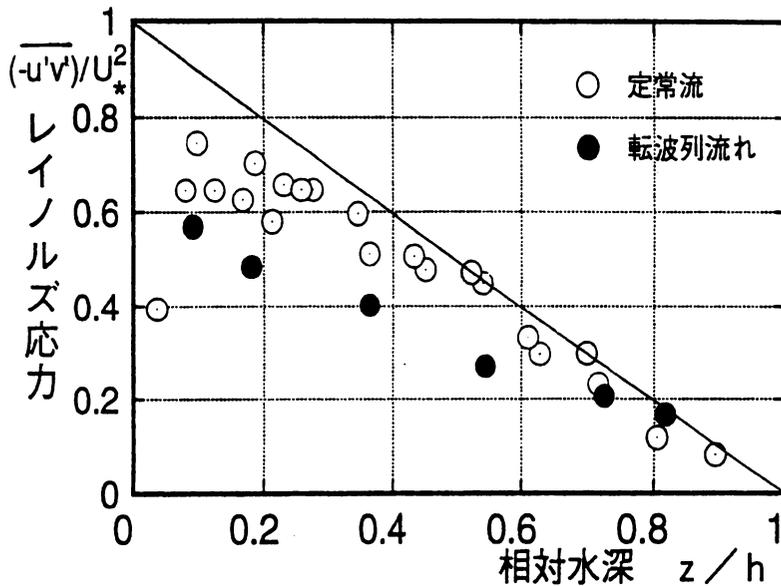


図-4 定常流と転波列のレイノルズ応力分布

4.3 相関係数について

図-5にはそれぞれさきに得られたレイノルズ応力を u_{rms} と v_{rms} を用いて無次元化した相関係数を示してある。さてこれらの相関係数は相対水深の変化とともに水路床付近で0.4程度をとり、水面に近づくとともに低減するという同様の傾向を示している。これは流れの構造が空間的に定常流れと相似であるということになり、転波列を伴う流れであっても平均水深 h_0 を用いた平均流速場においては、それに相当する定常流れが出現していると受け取れる。これはすこし飛躍して考えると時間的・空間的に変動している転波列流れであっても、転波列流れがある平均水深 h_0 に関する平均量回りに出現しているかのようである。しかしながらこれらの議論はさきの図-4に示されたレイノルズ応力のところで述べた結果と矛盾する。これは平均流速については平均水深 h_0 での表現がある程度可能であるかもしれないが、乱れについては、転波列フロントの碎波と水深の変動の効果を平均水深 h_0 で平均化することに少し無理があると考えられるし、また、流れに段波構造とそのフロントの碎波の影響が入り込んできているために、乱れ構造に変化を起こさせているのかもしれない。あるいは他

の要因が存在している可能性も大きい。

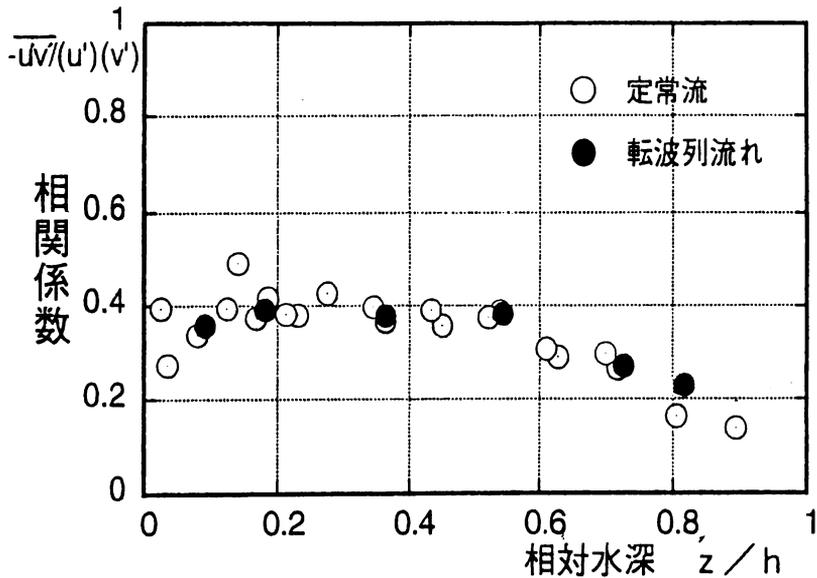


図-5 定常流と転波列の相関係数分布

5. 転波列流れの内部構造に対する一考察

いま転波列流れに対しても平均的には、せん断力が一般的な定常流の内部せん断力を示す次式で現されると考えると

$$\tau = \mu \frac{du_m}{dy} - \rho \overline{u'v'} \dots\dots(3)$$

ここに τ : 内部せん断力、 μ : 粘性係数である。

転波列発生初期に関わる周期性が、粘性底層、あるいは層流抵抗に強く影響を受けていると考えられることから、先の定常流との比較におけるレイノルズ応力の低減化傾向は形式的には(3)式右辺第1項が寄与するためと考えられることになる。

そこで、底辺近傍のせん断力について考えてみると

$$\frac{\tau_0}{\rho} = \nu \frac{du_m}{dy} - \overline{u'v'} \dots\dots(4)$$

ここで

$$\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = U_* = \sqrt{gh_0S} \dots\dots(5)$$

よりオーダーを考慮して(4)、(5)式に水路勾配 $S=1/10$ 、代表流速 100cm/sec 、水深を 0.5cm 、 $\nu=0.01\text{cm}^2/\text{sec}$ を代入すると(4)式右辺第1項がせん断力にしめる割合が平均的に4-5%程度になっていることが推定されることになる。これは無視できない値であるが、先の図-4に示された定常流に比べて20%を越えるレイノルズ応力の低減化傾向は説明できない。このことは転波列流れの大きな水深変動および転波列のフロント部の碎波の影響が無視できな

いことを示しているものと思われる。このため今後フロントの碎波と流れのせん断力について詳細な検討を加えていきたいと考えている。

6. 結論

以上、本研究では、周期性については、速度勾配と（粘性底層厚 δ / 平均水深 h_0 ）比が非常に重要なパラメータであること、せん断力式に関する速度勾配項が無視できないことなどが示された。そして周期特性の傾向と転波列の存在領域がある程度明示できたものとする。また転波列を伴う流れについて、比較的薄層流に近い条件での定常流との比較を行った結果、転波列流れは流速平均量については平均水深 h_0 を用いることで見かけの平均化が可能であり、見かけ上定常流に近似した流れ場を持つようであることが判った。しかし乱れについては小さい水深や水位変動などを無視できないと考えられるため、簡単な平均化は難しいように思われる。これらを考えあわせると間接的には転波列フロントが非常に重要であることが推察される。しかしデータ数が少ないため定量的な議論ができていない。このため、今後、さらに詳細な実験を行い水位・流速変動・転波列フロント・流れのせん断力に関する定量的な検討を行っていききたいと考えている。

尚、本研究の実験に用いたレーザードップラー流速計は、平成4年度文部省私立大学学術研究助成金（代表 室田明）の交付を、測定装置の一部は平成6年度大阪産業大学産業研究所の個人研究特別助成金（宮島）の交付を受けたものであることを記して謝意を表わす。

参考文献

- 1) Dressler, R. F.: "Mathematical solution of the problem of roll-waves in inclined open channels", Communication on Pure and Applied Mathematics, Vol. II, No. 2/3, pp. 149~194, 1949
- 2) 石原藤次郎ほか: "急斜面上の層流における転波列の理論", 土木学会論文集, 第19号, pp. 47~57, 1954
- 3) 岩垣雄一, 岩佐義朗: "転波列の水理学的特性について", 土木学会誌40-1, pp. 5~12, 1955
- 4) Vide J. P. M.: "Open channel surges and roll waves from momentum principle", Journal of Hydraulics Research, Vol. 30, pp. 183~196, 1992, No. 2
- 5) 室田明, 宮島昌弘: "超高速流の内部構造に関する実験的研究（主として平均流と波動特性について）", 水工学論文集, 第37巻, pp. 563~568, 1993年2月
- 6) 室田明, 宮島昌弘: "超高速流の内部構造に関する実験的研究（2次元乱れ挙動について）", 水工学論文集, 第39巻, pp. 379~384, 1995年2月
- 7) 石原, 岩垣, 合田: "薄層流に関する研究（第1報）", 土木学会論文集第6号, pp. 31~38, 1951年8月
- 8) 岩垣雄一: "滑面開水路における乱流の抵抗法則について", 土木学会論文集第16号, pp. 22~28, 1953年4月
- 9) 富永, 江崎, 藤川: "急勾配開水路流の流速分布特性", 水工学論文集, 第34巻, pp. 439~444, 1990年2月
- 10) I. Nezu, W. Rodi: "Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer" J. Hydraulics Eng., ASCE, Vol. 112, No. 5, pp. 335-355, 1986. May