

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)

Experimental Study on Internal Structures of Ultra-Rapid Flow
(On 2 Dimensional Behaviors of Turbulence)

室田 明* ・ 宮島 昌弘**

By Akira MUROTA and 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. The hydraulic characteristics of Roll-Wave flow are experimentally reproduced and mean velocity, turbulence intensity, Reynolds stress and correlation coefficients of Reynolds stress are compared to corresponding Uniform flow data. In addition, a structural definition of Roll-Wave flow is attempted using instantaneously obtained values of main flow u , vertical flow v to the bed. The results indicate Roll-Wave flow's mean velocity is similar to Uniform flow's mean velocity, but differs in regard to turbulence pattern. It is hypothesized that velocity fluctuations and Reynolds stress are strongly influenced by water depth variance and Roll-Wave front.

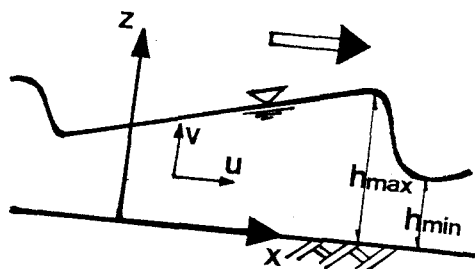
Keywords : Roll-Wave, steep slope channel, thin sheet flow, surge, rapidly varied flow, turbulence

1. まえがき

これまで転波列を伴う流れに関して、その発生について論じたものは数多いが、水理学的特性を実験的に示して論じられたものは数少ない。そこでここでは著者らの若干の知見に基づいて話しを進めることとする。転波列を伴う流れについて、これまでの著者ら¹⁾²⁾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、転波列の波速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られる。そこで本研究では、定常流との比較の上で転波列流れの特徴を検討し、また内部構造については、水深変化に伴う主流速 u 、主流に垂直な流速 v およびレイノルズ応力の瞬間値がどのような挙動や特性を示すのかを調べた。その結果、転波列が一見、定常流に近い流れを形成しているが、後述する図-5、図-7に示されるように、定常流と比べて、一定の特徴ある流れを出現させていることが見受けられた。そして水深変化に伴う非常に特徴的な乱れの瞬間値分布に関する知見が得られたのでこれについて述べる。

* 正会員 工博 大阪産業大学教授 工学部土木工学科
(〒574 大阪府大東市中垣内3-1-1)

** 正会員 大阪産業大学助手 工学部土木工学科
(〒574 大阪府大東市中垣内3-1-1)



図－１ 実験の諸元

表－１ 実験条件

水路勾配 S	流量 Q(l/s)	平均水深 h ₀ (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

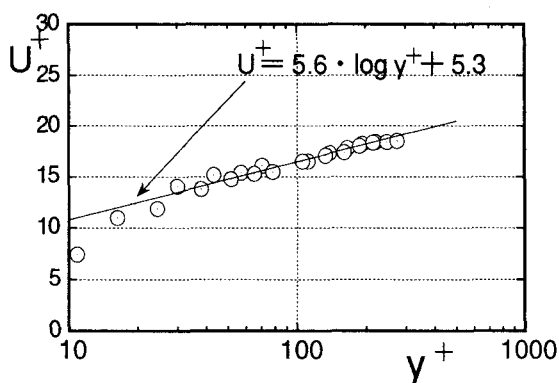
2. 実験装置と方法

実験は、長さ5m、幅20cmの亚克力製可変勾配水路を用い、測定位置は、水路上流端より3.9m下流とした。定常水深はポイントゲージで、水面変動は超音波水位計を、流速及び流速変動は2次元レーザー・ドップラ流速計を用いて測定した。実験諸元および条件を図－1、表－1に示す。

以下、 $h_0 = (h_{\min} + h_{\max}) / 2$

u, v はそれぞれ瞬間流速値、 u', v' は瞬間乱れ

u_m は u のアンサンブル平均である。



図－２ 定常流の流速分布

3. 定常流れと転波列

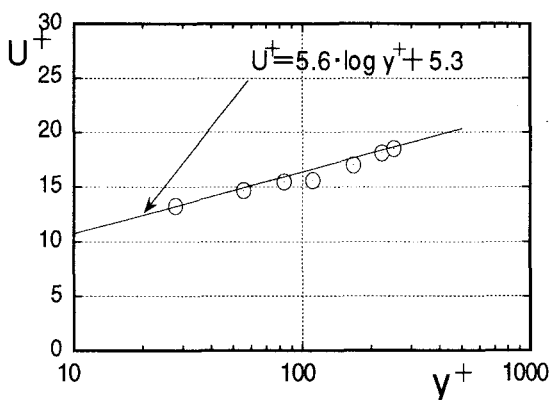
急勾配水路の薄層流に関する実験は石原ら³⁾、岩垣⁴⁾、富永ら⁵⁾によって詳細な結果が示されている。岩垣はフルード数の増大に伴って対数則の積分定数の減少を見だし、富永らは混合距離理論に基づく考察から、底面せん断力の増大に伴う底面近傍の混合距離の増大を説明している。そこで本実験における転波列の条件に比較的近いレイノルズ数条件でしかも一般に言われている定常流に近いと考えられるフルード数条件を選んで実験を行い、この定常流れとの比較によって転波列の特徴を明らかにしようと考えた。

3.1 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 $U^+ (u_m / U_* ; U_* = \sqrt{gh_0 S}$ 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 $y^+ (U_* h_0 / \nu)$ をとってある。図－2からは、平均水深 $h_0 = 1.0$ cm 程度しかない薄層流といえども、近年欄津ら⁶⁾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、対数則からの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転波列の波速に相当しているのである。

3.2 乱れ強さ分布

図－4、図－5にはそれぞれ乱れ強さの分布を示してある。縦軸は u および v の rms を U_* で無次元化



図－３ 転波列流れの流速分布

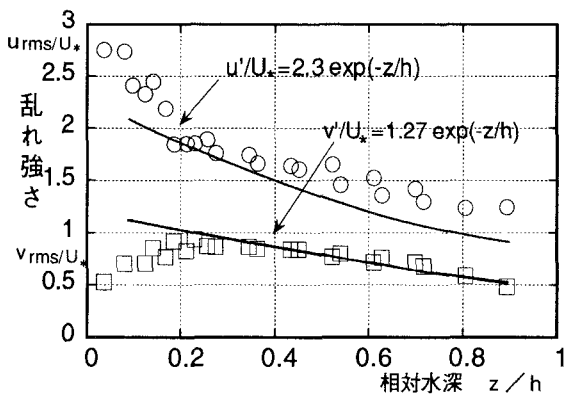


図-4 定常流の乱れ強さ

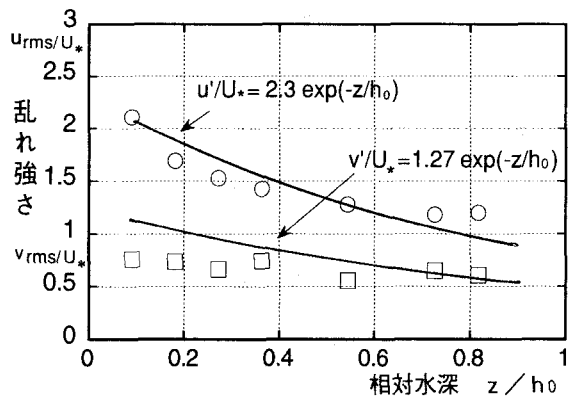


図-5 転波列流れの乱れ強さ

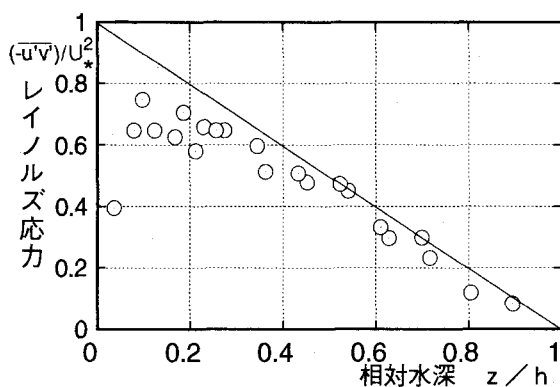


図-6 定常流のレイノルズ応力

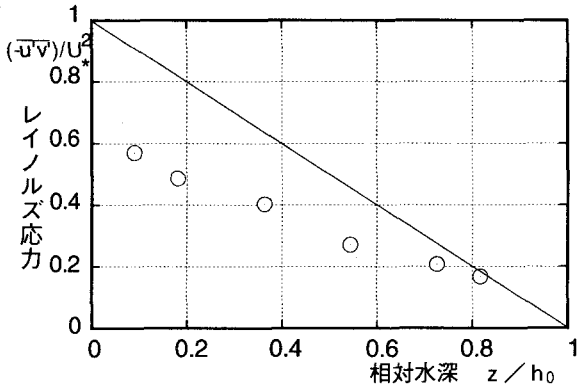


図-7 転波列流れのレイノルズ応力

し、横軸は水路からの測定位置高さ z を平均水深 h_0 で無次元化してある。図中の曲線は欄津の普遍関数表示である。ここでもさきほどと同様に概略的には z/h_0 の増大に伴い、乱れ強度が減少するという、通常の開水路乱れ特性分布に類似した傾向が示されている。さて図-5であるがここでは u_{rms} については普遍関数表示に比較的近い傾向を示しているようである。しかし v_{rms} については底面から水深中央部あたりまでが普遍関数表示と比べて低く離れている点、さらに v_{rms} 全体を通じて一様化の傾向という2つの特徴が示されている。これは転波列を伴う流れの1つの特徴であると考えられる。乱れを平均化して考える際に、転波列流れの最小水深が3mm程度となるため、水面の効果による乱れの抑制が作用していると考えられる。また一様化の傾向はいまのところ転波列フロントの碎波の影響によるものと考えている。

3.3 レイノルズ応力について

図-6、図-7には定常流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以内にとも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_*^2 で無次元化してある。横軸は相対水深 (z/h) である。図-6ではここでも一般の平均的な開水路乱流の結果と同様の傾向が示されている。一方、図-7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。これまでみてきたことを整理するとまず、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。乱れの強さについてはいはゆる乱れの一様化と比較的水路床部に近い所での v_{rms} の低減化で示されるように若干傾向を異にしている。おそらくこのことがレイノルズ応力の見かけの低減化につながっているものと思われる。つまり v_{rms} の低減化と一様化がレイノルズ応力に大きく影響を及ぼしていることが考えられる。

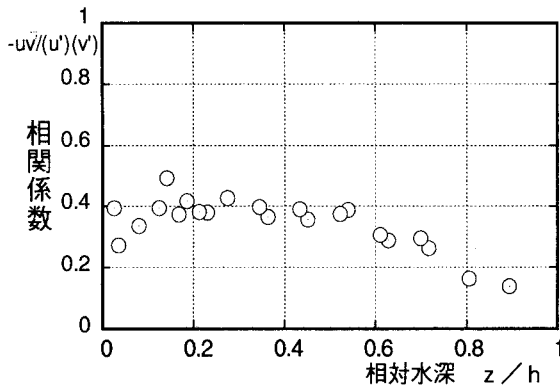


図-8 定常流の相関係数

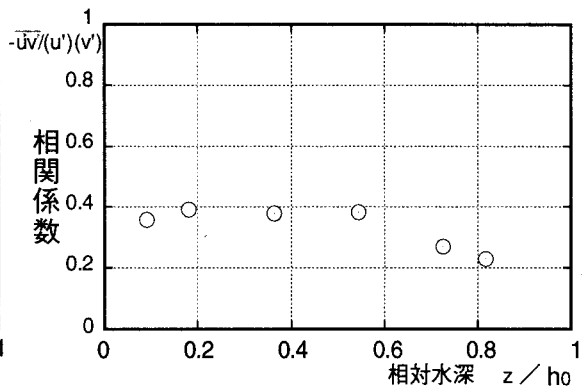


図-9 転波列流れの相関係数

3.4 相関係数について

図-8, 図-9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。 u' , v' の図-8, 図-9で示された相関係数の傾向と値が等しいということは、アンサンブル平均してレイノルズ応力を求めていることを考慮すると、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なのである。しかしながらこれらの議論はさきの図-7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。

そこでこのあたりの様子をもう少しはっきりさせるために、以下に水深変化に伴って乱れがどういった振る舞いをするのかを見ていきたい。

4. 水深と流速

ここでは水深変化に伴う平均量と乱れの挙動について比較的底面に近くの底から1mmの位置で得られた結果について述べる。

4.1 水深変化と主流流速

図-10は、変化する水深と主流速の関係を示したものである。ここではある瞬間の水深とそのときの流速についての個々のデータが集められた結果が示されている。縦軸は流速、横軸は変化する水深である。平均的には水深が増大するに伴い流速も大きくなる傾向が示されている。ここでは、平均流速 $U_0(t)$ を水深 $h(t)$ のべき関数として図中に示しておく。比較的乱れが大きく、あとでもう少し詳しく述べるが相対乱れ強度 $u'/U_0(t)$ も12%程度となっている。

4.2 水深変化と u の乱れ

図-11は、縦軸に $U_0(t)$ と個々に得られる測定流速 u の偏差 u' の絶対値を $U_0(t)$ で無次元化したものを、横軸には変動水深 $h(t)$ を測定位置 z で無次元化したものを示した。ここでは z を水路床から1mmの位置に固定してあるため、 $h(t)$ の変化に伴い平均水深付近で乱れの変動がピークを示している特徴的な三角型

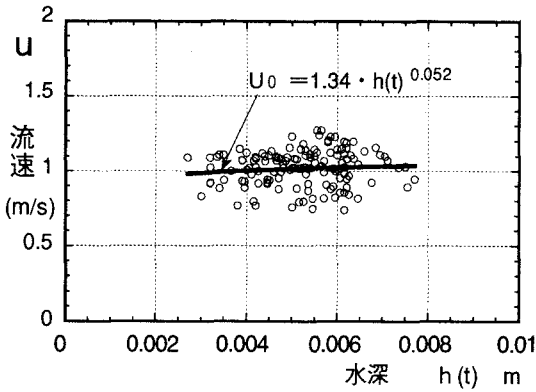


図-1 0 水深と主流速（個々の瞬間値）

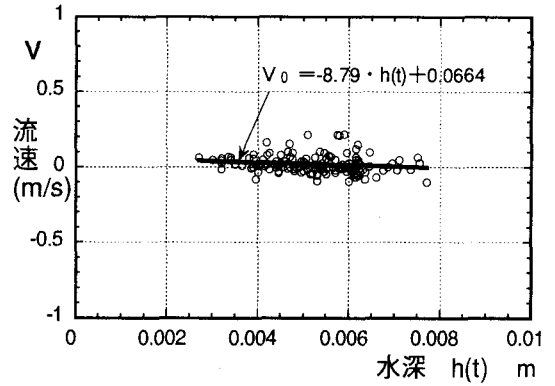


図-1 2 水深と流速 v （個々の瞬間値）

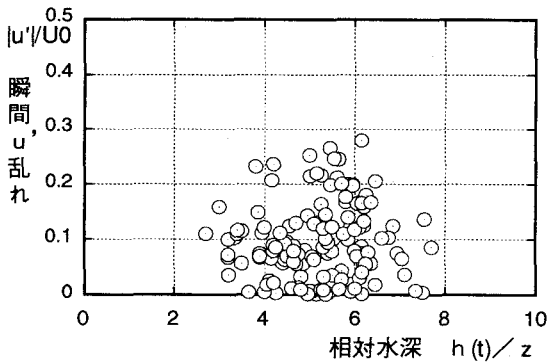


図-1 1 相対水深と u'

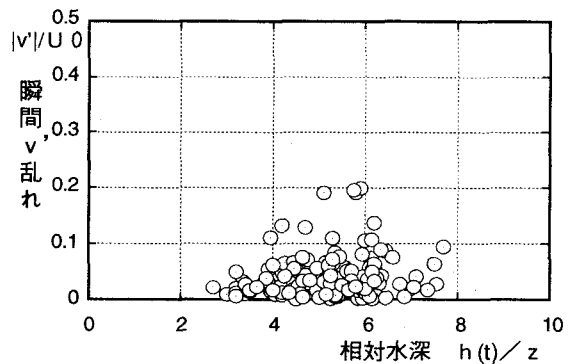


図-1 3 相対水深と v'

の流速変動データの散布形状が示されている。ここで最小水深、平均水深、最大水深のそれぞれの中間点を境界として主流方向に3つの領域に区分してみると考えやすい。そしてこれらの領域での相対乱れ強度を計算してみると、小さい水深領域からそれぞれ10.1%, 12.3%, 10.3%程度となっており、量的にはそれほど顕著な特徴は示されていないものの図-1 1の乱れの瞬間値分布が水深変化に伴い特徴的な分布形状を示していると考えることができる。これは水深が非常に小さい流れ場での水深・流速変動の特性が示されているものと考えられる。この瞬間値主流速乱れの水深に関する分布挙動が三角型散布形状を示すことは、転波列低層部での瞬間乱れパターンが水深変動と深く関わっていることを窺わせるものである。また、各領域でのレイノルズ数はそれぞれ2800, 3900, 5400程度と考えられ、最大水深領域の転波列フロント部においては、比較的大きな乱れの発生と発達、平均水深領域では活発な乱れの持続が、最小水深領域では、相対的に流速が小さく水深が小さいため完全に発達した乱れが形成されないことと、小さい水深のため水面の効果で乱れが抑制されるため、 $h(t)$ の減少に伴う乱れ分布範囲の減少が示されていると考えられる。

4.3 水深変化と流速 v

図-1 2は水深の変動に伴う個々の v の関係を示してある。ここでも主流速と同様ある瞬間の水深と流速 v の個々のデータが集められた結果が示されている。縦軸は流速、横軸は変化する水深である。平均的には水深が増大するに伴い若干ではあるが、流速 v の減少傾向が示されている。ここでは、平均流速 $V_0(t)$ を水深 $h(t)$ の1次関数として図中に示しておく。またあとで述べるが相対乱れ強度は5.8%程度となっている。

4.4 水深変化と流速 v の乱れ

図-13は v の乱れについて、縦軸に個々の流速 v の $V_0(t)$ からの偏差 v' の絶対値を $U_0(t)$ で無次元化したものを示し、横軸には上述と同様 $h(t)/z$ で示したものである。三角型の分布形状など先の議論がもう少し顕著に当てはまるようである。上述した領域での相対乱れ強度を計算してみると、最小水位領域では3.7%,平均水位で6.2%,最大水位では5.4%程度となっている。転波列の流れのように水深が非常に小さい場での水面の効果が、特に v に顕著に示されていると考えられる。

4.5 水深変化とレイノルズ応力

図-14には縦軸に $-u'v'/U_0(t)^2$ 、横軸に $h(t)/z$ で整理した水深変化に伴う瞬間値のレイノルズ応力分布を示した。ここでも z を固定していることから、水深の変化に伴い瞬間レイノルズ応力分布が特徴的なパターンを示していることが判る。これは乱れの生産に関わる発生・発達が最大水深領域で行われ、平均・最小水深領域で、水深の減少に伴う乱れの減衰傾向が示されているものと考えられる。この傾向は一般定常流での相対水深 h/z と比較して考えると比較的 z の小さな所、これは図-14では比較的水深の大きい所に対応すると考えられるが、ここでの大きな乱れの発生と対応づけられるように思われる。つまり水路床から1mm上方位置での乱れ挙動は水路底面起因が支配的であるように思われる。そしてこの乱れの挙動に間接的に影響を与えているのが転波列フロントの存在であり、直接的に影響を与えているが小さい水深の存在であると考えられる。

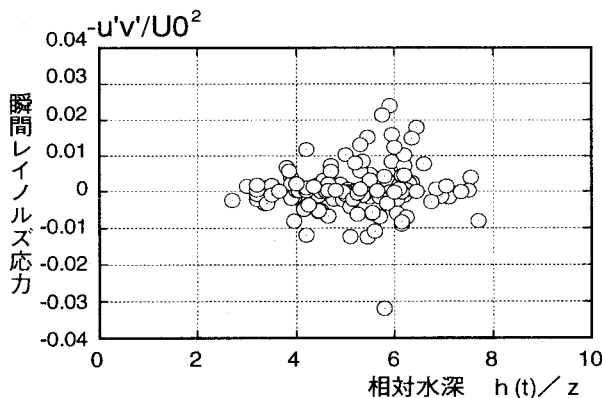


図-14 相対水深とレイノルズ応力分布

5. 結論

以上、本研究では、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。その結果、転波列流れは流速平均量についてはある程度、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が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。乱れに関しては u' 、 v' の分布挙動およびレイノルズ応力の水深変化に関する分布傾向の一端が明らかにされたと考える。そして水路床から1mmの位置での結果は、 u' 、 v' やレイノルズ応力の水深に関する瞬間値分布から、転波列を伴う流れの乱れ挙動については、直接的には水路底面起因の乱れと水深スケールが、また乱れの平均特性から考え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・流速変動に関わる定量的な検討を行っていきたいと考えている。

尚、本研究の実験遂行に際しては、当時大学院生津田宏君の協力を得た。また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の交付を、測定装置の一部は平成6年度大阪産業大学学術研究助成金の交付を受けたものであることを記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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, 1993年2月
- 2) 室田, 宮島ら: "超高速流の内部構造に関する実験的研究 (主に水位変動と流速について)" 土木学会第48回年講, II-297, 1993, 9月
- 3) 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, pp31-38, 1951, 8月
- 4) 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, 1953.4月
- 5) 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, 1990.2月
- 6) I.Nezu, W.Rodi: "Open-Channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer" J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol.112, No.5, pp335-355, 1986. May