

開水路乱流の 3 次元同時計測結果とDNSの比較

Comparison of 3-D Experimental Database with Direct Numerical Simulation

欄津家久*・中山忠暢**・伊藤禎将***

By Iehisa NEZU, Tadanobu NAKAYAMA and Yoshimasa ITO

In an open-channel flow, a turbulent structure is affected by the presence of a free surface, and therefore, its characteristics are quite different from those of duct flow near the free surface. Many researchers have suggested that the turbulence redistribution changes complicately near the free surface. In this study, turbulence measurements were three-dimensionally conducted in open-channel flows by using two sets of two-component fiber-optic LDA. Some comparisons of the experimental LDA data with a direct numerical simulation (DNS) were conducted. Then, the peculiar characteristics in open-channel flows were clarified in detail.

Key Words : *Open-Channel Flow, 3-D Experiment, DNS, Duct Flow, Free Surface*

1. はじめに

開水路に特有な自由水面の存在は乱れの再配分率の複雑化に大きな影響を及ぼすことが従来より指摘されている。このような乱れに対する自由水面の影響は開水路流れにおいて非常に重要であり、自由水面が一種の弱い壁となるために鉛直方向の乱れ変動が境界層や管路流れの中央軸付近に比べて抑制され、乱れの非等方性が大きくなる¹⁾。Komoriら(1987)²⁾は、乱れ強度の変化特性を求めており、自由水面近傍では主流方向の乱れ強度 u' は鉛直方向の乱れ強度 v' とは対照的に若干増加し、乱れエネルギー間の再配分が自由水面の減衰効果のために相似則に従わないことを示している。

このような自由水面付近の乱流構造について従来より振動格子乱流について多くの研究がなされてきた。浦ら(1984)³⁾、小松ら(1995)⁴⁾はこのような振動格子乱流について、水面近傍における乱れエネルギー、逸散率、渦動粘性係数、および乱れの長さスケールの定量化を行っている。Jirkaら(1987)⁵⁾も同様に自由水面近傍を対象として乱れ強度、逸散率やスペクトル分布等を求め、鉛直方向の乱れ強度 v' や逸散率の低減特性の考察を行っている。

一方、数値計算を用いて、主流速、乱れ強度、エネルギー収支等の考察が数多くなされてきた^{6,7)}。これらの研究において、特に壁面近傍領域が重点的に取り扱われており様々な計算手法の比較が行われている。しかし、開水路の実験値をもとにして開水路に特有な自由水面近傍の特性を論じたものはほとんどない。

本研究の目的は、このような開水路の自由水面近傍の特性を解明することである。その際に、Kimら(1987)⁸⁾による閉管路のDNS(Direct Numerical Simulation)データとの比較を行うことによって本実験値の壁面近傍における検証をまず行う。次に、管路対称面近傍のDNSと比較することによって、自由水面が開水路乱流に及ぼす影響を考察するものである。

* 正会員 工博 京都大学大学院工学研究科教授 環境地球工学教室

(〒606 京都市左京区吉田本町)

** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

*** 学生員 京都大学大学院 環境地球工学専攻修士課程

2. 実験および解析方法

表-1 水理条件

本実験で使用した水路は、全長10m、幅40cm、高さ30cmの可変勾配型循環式直線水路である。計測部は水路側壁と底面下方がガラス製となっており(特に計測区間3mは一枚強化ガラス製)、流れが十分に発達している水路上流端から約6mの地点を計測部とした。2台の4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザ流速計(LDA, Dantec社製)を用いて、水路側壁と底面下方から単断面開水路流れの水路中央部における3次元同時計測を行った。座標は、流下、鉛直、横断方向をそれぞれ x , y , z とした。LDAのトラバース装置は、水路にじか付けで1/100mmの高精度を持つ。測定時間は60秒、測定周波数は約200Hzのもとで計測を行った。表-1に水理条件を示す。2次流が発生しにくいようなアスペクト比が大きく($B/h > 5$)、Reynolds数 $Re = U_m h / \nu$ が約8000、摩擦Reynolds数 $R_s = U_* h / \nu$ が約450と比較的小さい流れに対して、Froude数 $Fr = U_m / (gh)^{0.5}$ のみを0.5程度まで変化させて実験を行った。この一定のReynolds数を選んだ理由は、Kimら(1987)⁹⁾による管路流のDNSデータが $Re = 8000$ 及び $R_s = 400$ であり、これにできるだけ一致させ、相互の比較検討を可能にするためである。

case	S	h (cm)	B/h	U_m (cm/s)	U_* (cm/s)	Fr	Re ($\times 10^3$)
L-FR01	1/25000	8.0	5.0	10.0	0.59	0.12	8.0
L-FR02	1/6000	5.0	8.0	16.0	0.99	0.23	8.0
L-FR03	1/3000	4.0	10.0	20.0	1.14	0.32	8.0
L-FR04	1/2000	3.5	11.4	22.9	1.33	0.39	8.0
L-FR05	1/1500	3.0	13.3	26.7	1.49	0.49	8.0

2台の4ビーム後方散乱型2成分ファイバーレーザ流速計(LDA, Dantec社製)を用いて、水路側壁と底面下方から単断面開水路流れの水路中央部における3次元同時計測を行った。座標は、流下、鉛直、横断方向をそれぞれ x , y , z とした。LDAのトラバース装置は、水路にじか付けで1/100mmの高精度を持つ。測定時間は60秒、測定周波数は約200Hzのもとで計測を行った。表-1に水理条件を示す。2次流が発生しにくいようなアスペクト比が大きく($B/h > 5$)、Reynolds数 $Re = U_m h / \nu$ が約8000、摩擦Reynolds数 $R_s = U_* h / \nu$ が約450と比較的小さい流れに対して、Froude数 $Fr = U_m / (gh)^{0.5}$ のみを0.5程度まで変化させて実験を行った。この一定のReynolds数を選んだ理由は、Kimら(1987)⁹⁾による管路流のDNSデータが $Re = 8000$ 及び $R_s = 400$ であり、これにできるだけ一致させ、相互の比較検討を可能にするためである。

3. 実験結果および考察

3.1 対数則の適用性の検証

本研究では、まず、対数則の適用性の検証を行った。図-1はReynolds応力分布 $-\overline{uv}$ より求めた摩擦速度 U_* を平均主流速に適用して求めた κ の分布である。また、これまでに得られたデータも併記した。これより、 κ はFroude数に無関係な普遍定数 $\kappa = 0.41$ であると言える¹⁾。また、 $\kappa = 0.41$ のもとでの対数則、等流公式、Reynolds応力分布の3通りから求めた U_* を比較した結果、1%以内で相互に一致したので、以下の解析では対数則から求めた U_* を用いる。

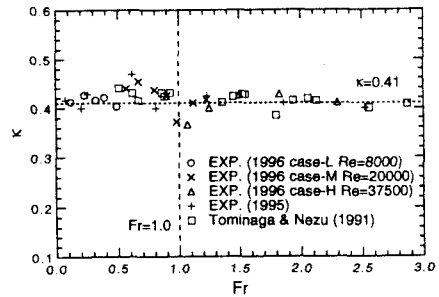


図-1 カルマン定数 κ の変化特性

3.2 平均主流速分布および乱れ強度分布

図-2は $y^+ = U_* y / \nu$ に対する平均主流速 $U^+ = U / U_*$ の分布であり、閉管路に対するDNSデータも併示した。全てのケースについて両者は非常に良く一致しており、特にFroude数が小さいケースでは粘性底層のかなり下部まで一致した分布を示した。これより、壁面近傍においては開水路流れの特性は管路流れの特性と類似しており、自由水面の影響はあまり受けないと言える。なお、本実験では低Reynolds数のためwakeパラメータ Π はゼロであり、自由水面まで対数則が成立する¹⁾。図-3は y/h に対する乱れ強度 u', v', w' 、乱れエネルギー k の分布である。図にはDNSデータ、欄津の普遍関数¹⁾も併示した。壁面領域、中間領域においては4つとも管路の値と良く一致しているが、特に v' に関しては $y/h > 0.8$ において水面に近づくにつれて開水路の値は管路の値よりも大きく低減していく特性が明瞭に見られる。このような自由水面の存在による低減特性は開水路流れの大きな特徴であり、水面の変動が大きくなるにつれて低減が弱まっていくと考えられるが、本研究におけるFroude数が0.5程度までの範囲内では水面変動も0.2mm程度と小さく、そのような増加特性は見られない。 u', w' についてはKomoriら(1987)²⁾も指摘しているように水面近傍において若干増加する特性が見られる。 k については u', v', w' の増減が打ち消しあって管路の値とほぼ一致することになる。このような乱れの再配分の複雑化は乱れのエネルギー収支と大きく関連していると考えられ、以降の節で検討していく。一方、

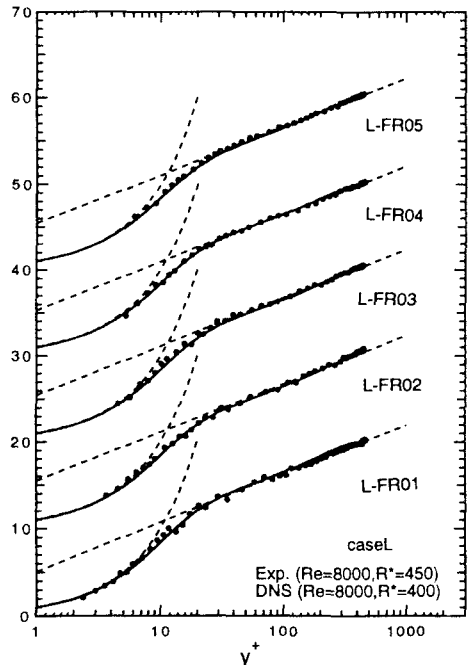


図-2 平均主流速 U の分布

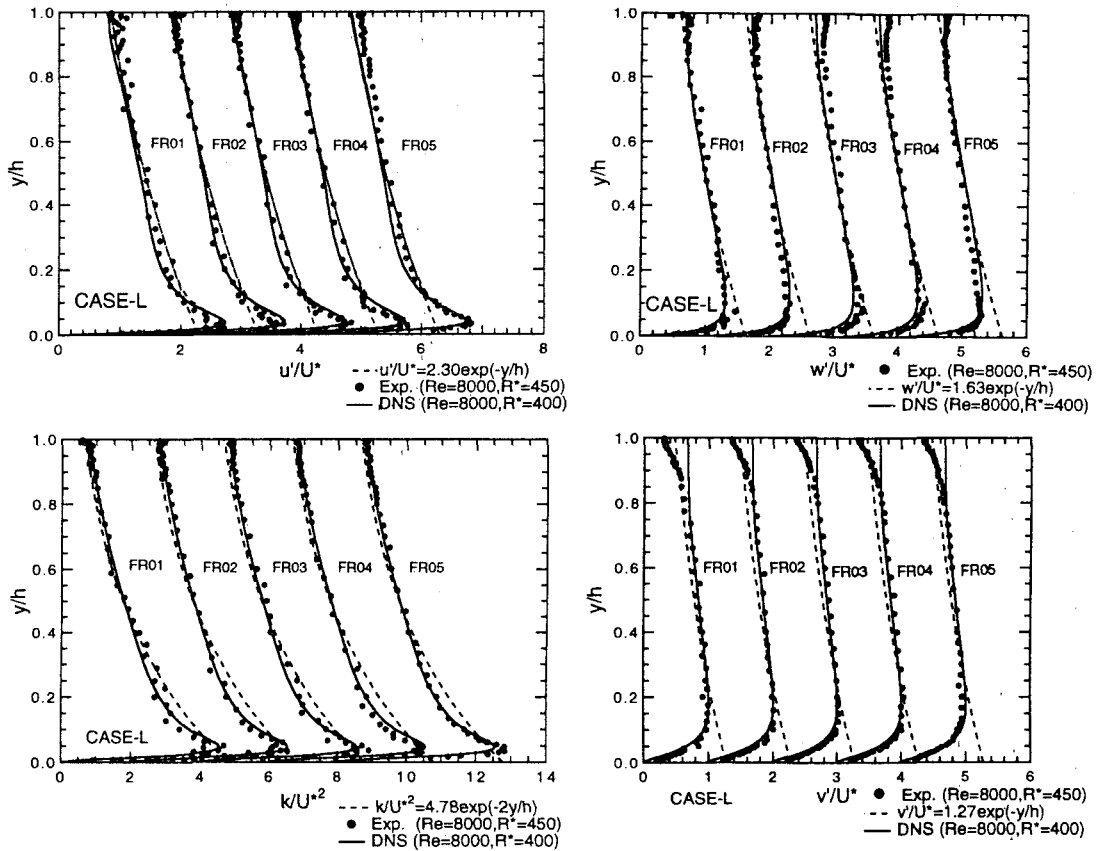


図-3 乱れ強度 u , v , w 及び乱れエネルギー k の分布

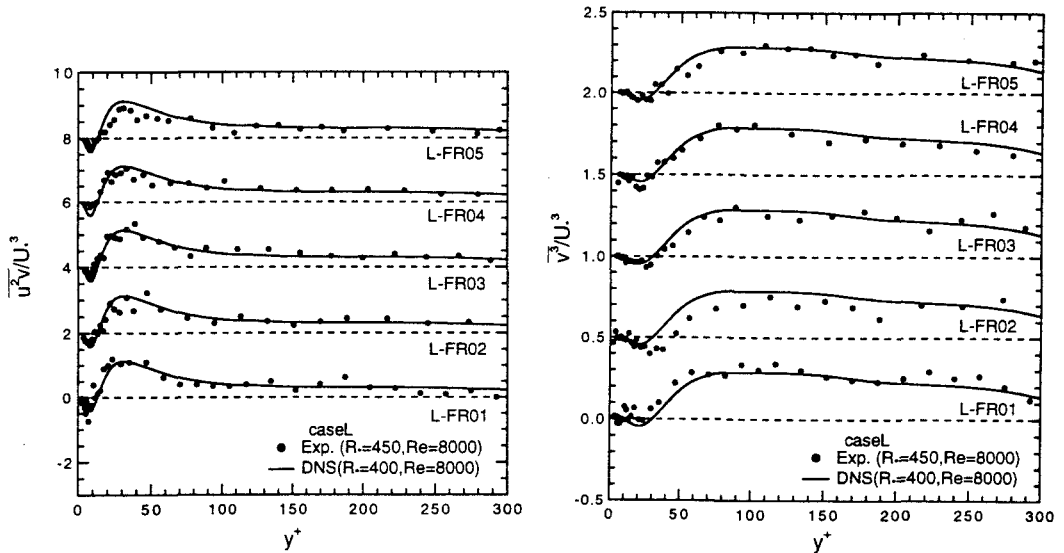


図-4 高次相関項 u^2v , v^3 の分布

図-3の壁面領域では実験値とDNS値は比較的良好に一致しており、壁面近傍では開水路流れにおいても自由水面の影響をあまり受けないと考えられる。図-4は内層表示の y^* に対する高次相関項 u^2v , v^3 の分布である。高次相関項においても両者は良く一致しており、本実験の精度が非常に良いことがわかる。図-5は相対乱れ強度 u/U の分布であり、この値には U が含まれておらず、生の計測データである。この特性値に対しても管路との相違は見られず、また、Froude数の影響もほとんど見られない。

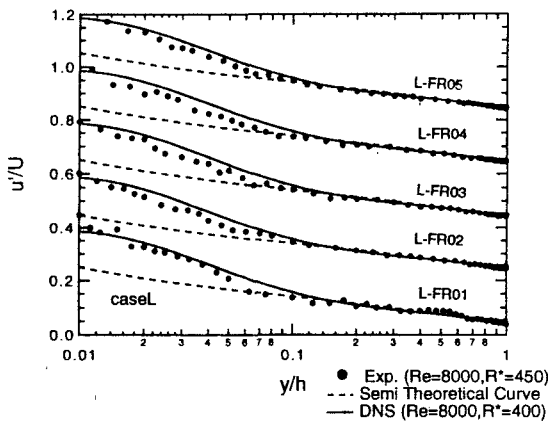


図-5 相対乱れ強度 u'/U の分布

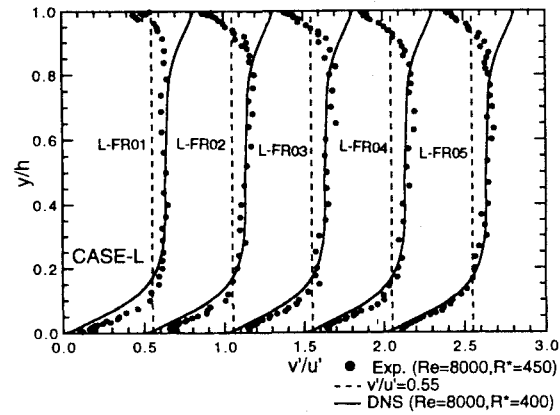
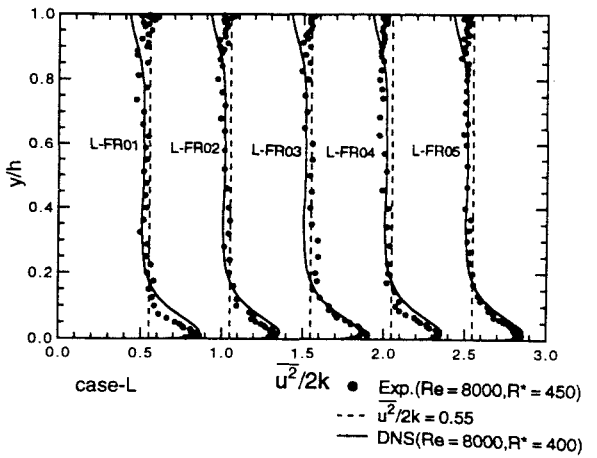


図-6 乱れ強度比 v'/u' , w'/u' の分布

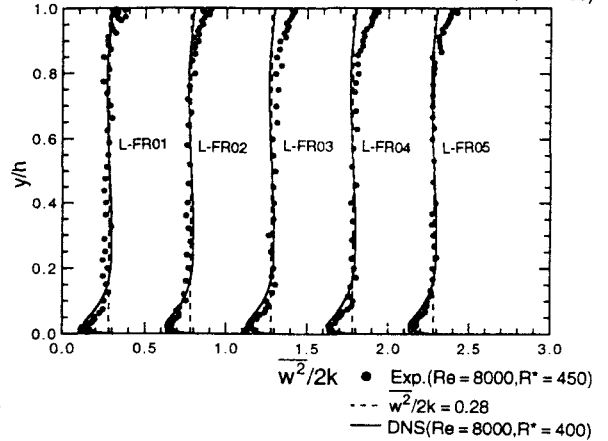
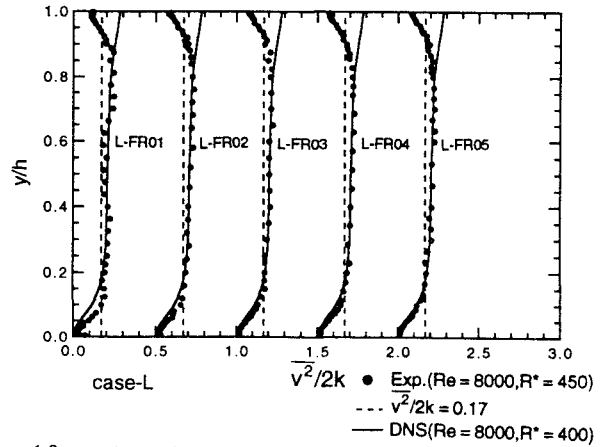


図-7 乱れ配分率 $\overline{u^2}/2k$, $\overline{v^2}/2k$, $\overline{w^2}/2k$ の分布

3. 3 乱れ再配分率の分布

前節で示した乱れ強度成分 u' , v' , w' 間における再配分率の検討を行った。図-6は乱れ強度比 v'/u' , w'/u' の分布を示したものである。 w'/u' については開水路と管路の変化特性は類似しているが、 v'/u' では $y/h=0.8$ 付近を境にして両者は正反対の特性を示しており、水面に近づくにつれて差は大きくなる。このような乱れ強度比は本実験における Froude 数の範囲内では不変であり、水面変動の比較的小さい状態では乱れの配分率はほとんど Froude 数に無関係であると考えられる。言い換えると、開水路を特徴づける自由水面の存在が乱れの再配分率に大きな影響を及ぼしているといえる。

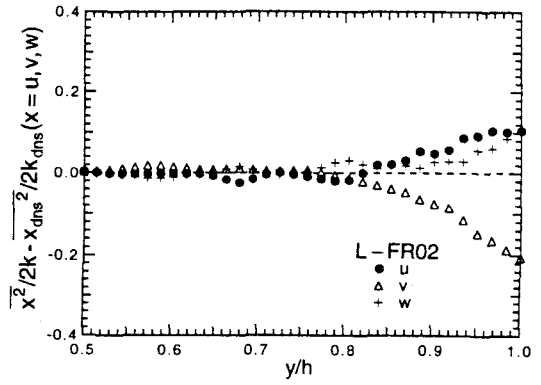
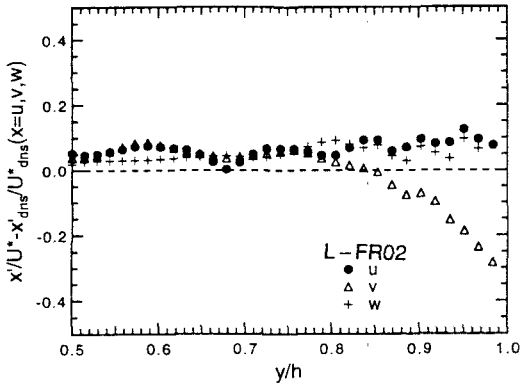


図-8 乱れ強度、乱れ再配分率の管路の値との差

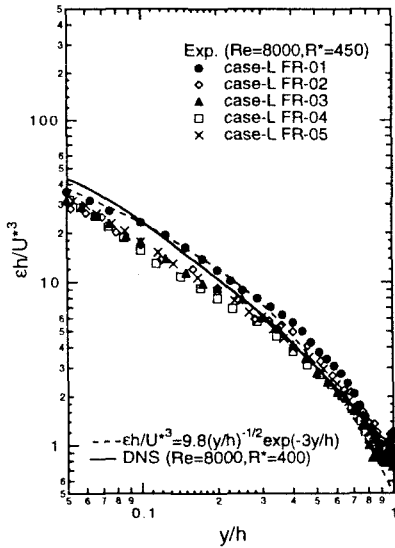


図-9 逸散率 ε の分布

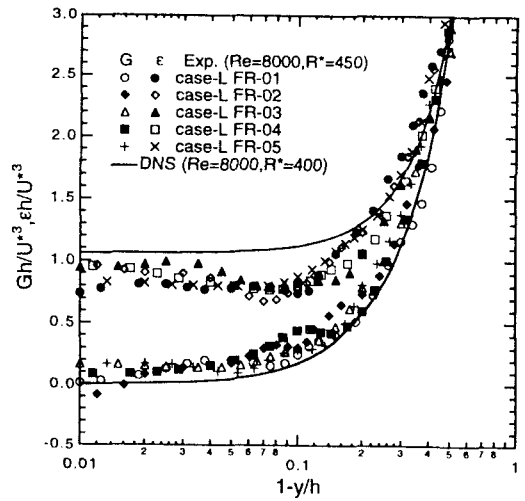


図-10 自由水面近傍における逸散率 ε と発生率 G の分布

図-7は乱れ再配分率 $\overline{u^2}/2k$, $\overline{v^2}/2k$, $\overline{w^2}/2k$ の分布である。管路との比較では、乱れエネルギーに対して $\overline{u^2}$ と $\overline{w^2}$ の寄与する比率の変化特性は類似しており、その分 $\overline{v^2}$ には正反対の顕著な変化特性が見られる。図-8はケースFR02について、 $y/h > 0.5$ を対象として開水路の乱れ強度 u , v , w 、および乱れ再配分率 $\overline{u^2}/2k$, $\overline{v^2}/2k$, $\overline{w^2}/2k$ とそれらに対応する管路の値との差を示したものであり、 $y/h = 0.8$ 付近を境に u , w と v が逆の特性を示すことがわかる。

3. 4 乱れエネルギーの収支関係

前節までに示した結果より、管路流れと比較した場合における開水路流れの特徴は主に水面近傍に現れることがわかった。このような乱れの非等方性の増大による再配分率の複雑化は、乱れエネルギーの収支関係を考察することによってさらに明らかになるものと考えられる。

逸散率 ε 、発生率 G は次式で計算される。

$$\varepsilon = (1/c)^{3/2} \cdot u'^3 \cdot (2\pi/U) \cdot f^{5/2} \cdot F(f)^{3/2}, c = 0.5 \quad (1)$$

$$G = -\overline{uv} \cdot \partial U / \partial y \quad (2)$$

図-9は ε を平衡領域以上の主流域に注目して無次元表示したものである。本研究においてはスペクトル分布 $F(f)$ の慣性小領域に明確な $(-5/3)$ 乗則が成立していたので、それを用いて式(1)より ε を計算した。図にはNezuら

(1993)¹⁾ による半経験式, DNSデータも併示した。壁面近傍の小領域を除けば比較的管路流の特性と一致している。自由水面近傍においては従来より指摘されているように, 開水路の値は管路のものよりも小さめになっている¹⁾。図-10は自由水面近傍を対象にして, 逸散率 ε と発生率 G の関係を示したものである。乱れ強度における関係と同様にFroude数による相違はほとんど見られない。この領域では $\varepsilon > G$ となってエネルギーが不足しており, 管路との比較では ε が小さめとなるのに対して G は大きめになる。このような管路との相違がどのような機構で生じるのかは不明だが, 自由水面近傍では管路よりも開水路の方がエネルギーの不足量が小さくなるのは非常に興味深いことである。

図-11は ε と G の関係を $(G-\varepsilon)/\varepsilon$ の形で表示したものである。点線は, 図-9における ε の半経験式, および式(2)に対数則, $-\overline{uv}$ の三角形分布を考慮して求めた G から得られる半経験式である。壁面近傍において2本に分離しているが, 上方が粘性応力を考慮しない場合, 下方が考慮した場合である。この特性値に関しても開水路と管路では類似している。これより, 自由水面のごく近傍を除いては開水路と管路では乱流構造が類似しており, 水面の擾乱が無い状態では, 数値計算上で自由水面のかわりに v の低減特性を考慮した仮想壁面を用いて管路と同様に取り扱う手法にもある程度の妥当性があると言える。

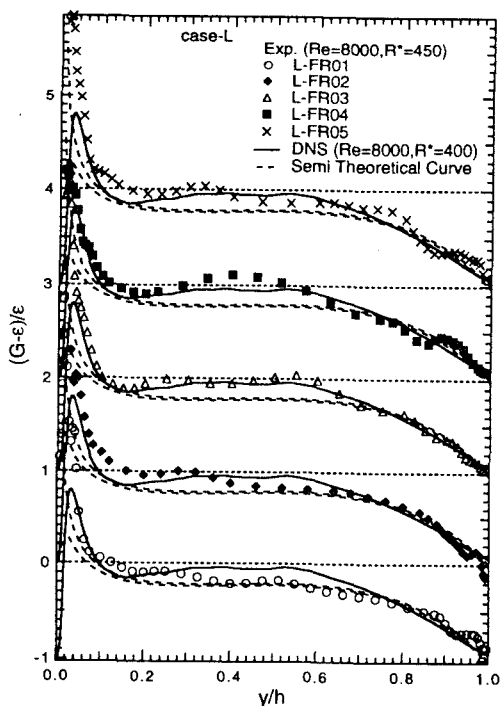


図-11 $(G-\varepsilon)/\varepsilon$ の分布

4. おわりに

本研究は, Reynolds数, およびFroude数の小さい単断面開水路乱流を対象として3次元同時計測を行い, これとはほぼ同一のReynolds数をもつ管路流のDNSデータとの比較を通して, 開水路流に特有な自由水面が乱流構造に及ぼす影響を考察したものである。得られた結果は, 以下のようにまとめられる。

- (1) 平均主流速, 乱れ強度分布に関して, 壁面および中間領域では管路と開水路の相違があまり見られない。しかし, $y/h > 0.8$ では乱れ強度分布に変化が見られる。特に, v は自由水面に近づくにつれて大きく低減していく。
- (2) そのような乱れ強度の変化特性は乱れの再配分率が自由水面の影響を大きく受けるためである。自由水面が存在することによって u , w は v と逆の特性を示すことになる。
- (3) 乱れエネルギー収支関係において自由水面近傍では $G < \varepsilon$ となりエネルギーが不足状態にあるが, 開水路では管路ほど不足量は大きくなく, 自由水面の影響によるものと考えられる。
- (4) 水面変動がほとんどない開水路流では, 乱れ特性値はFroude数にほとんど無関係であり普遍的な性質を有する。

参考文献

- 1) Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993) : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema.
- 2) Komori, S., Hiraga, Y., Murakami, Y. & Ueda, H. (1987) : Proc. of 2nd. Int. Symp. on Transport Phenomena in Turbulent Flows, Tokyo, pp.75-85.
- 3) 浦勝, 小松利光, 松永信博 (1984) : 土木学会論文集, 第345号/II-1, pp.91-99.
- 4) 小松利光, 柴田敏彦, 朝井孝二, 高原健太郎 (1995) : 水工学論文集, 第39巻, pp.819-826.
- 5) Jirka, G. H. & Brumly, B. H. (1987) : J. Fluid Mech., vol.183, pp.235-268.
- 6) Kim, J., Moin, P. & Moser, R. (1987) : J. Fluid Mech., vol.177, pp.133-166.
- 7) Speziale, C. G., So, R. M. C. & Zhang, H. S. (1991) : J. AIAA, vol.29, pp.2069-2076.