

開水路自由水面近傍の乱流構造と水面変動との関連に関する研究

Relationship between Turbulence Structure near the Free-Surface and Surface-Wave-Fluctuations

欄津家久*・中山忠暢**・喜多亮史***

By Iehisa NEZU, Tadanobu NAKAYAMA and Akifumi KITA

It has been pointed out that a turbulence structure near the free-surface has a close relationship with surface-wave fluctuations and the Froude number. In particular, a critical flow occurs when the Froude number is close to one, and the turbulence structure may become unstable. This phenomenon can be seen in the complexity of turbulence redistribution and the undulation property of surface-wave fluctuations. In this study, turbulence measurements were three-dimensionally conducted in open-channel flows by using two sets of fiber-optic LDA system, and simultaneously, the surface-wave fluctuations were measured by an ultrasonic depth-meter instrument. The aim of this study is to clarify the relationship between the turbulence structure near the free-surface and the surface-wave fluctuations.

Key Words : Free Surface, Surface-Wave-Fluctuations, Turbulence Redistribution, Froude Number

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。特に、自由水面の状態はFroude数 Fr に大きく依存し、水面の穏やかな状態で見られる自由水面近傍における乱れの低減特性は水面の変動の増大とともに失われる。特に、 $Fr=1$ の限界流近傍では、流れが波状特性を示し不安定になるために乱れが普遍関数から大きくずれることが従来より指摘されている¹⁾。このため、 Fr 数は自由水面近傍の乱流構造の解明の1つの大きな尺度になると考えられる。その際に、従来より、Bradshaw (1967)²⁾が提示した「乱れは普遍的特性を示すactive成分と、そうではないinactive成分とから構成される」という考えが用いられてきているが、開水路に特有な自由水面が乱流構造に及ぼす影響を考えるには低周波成分の渦運動や水面変動というようなinactive成分の挙動を把握することが必要である。

自由水面近傍の乱流構造に関して、従来より振動格子乱流に関する研究が多く行われてきており³⁾⁴⁾、水面近傍における乱れエネルギー、スペクトル分布、逸散率、および乱れの長さスケール等の評価が行われている。しかし、振動格子乱流では Fr 数に対する変化特性を考えることは不可能であり、また、管路流れとの比較による自由水面の影響を考えるには主流速を有する流れを取り扱う必要がある。

Tamburino & Gulliver (1994)⁵⁾は回転式のベルトを用いることによって移動床流れに発生する水面近傍の表面更新渦の構造を考察し、スペクトル解析や相関解析を用いて大規模渦と表面更新の関連性について論じている。また、玉井ら (1975)⁶⁾は開水路流れの乱れに及ぼす Fr 数の影響について考察を行っており、水面変動と逸散率の関連性を述べている。しかし、乱れエネルギー間の再配分率と水面変動の関連性について詳細に検討を行った例はない。

本研究の目的は、このような開水路の自由水面近傍の乱流構造と水面変動の相関関係を検討することである。その際に、レーザ流速計と超音波高計との同時計測を行うことによって、乱れの再配分率、流速と水面変動それぞれの自己相関、両者の相互相関、スペクトル解析を行い、自由水面の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 京都大学工学部 土木工学専攻

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長さ3mの一枚強化ガラス製となっており、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。また、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。また、水路上方には水面に非接触型の超音波波高計(Keyence社製)を設置し、レーザ流速計と同期するようにした。水理条件を表-1に示す。本実験は2次流が発生しにくいようなアスペクト比が大きい流れ($B/h > 5$)で行われた。ケースLはReynolds数 $Re = U_m h / \nu$ が約8000、かつ、Froude数 $Fr = U_m / (gh)^{0.5}$ が小さい常流状態、ケースMはRe数が約20000で限界流付近を対象とし、ケースHはRe数が約38000で射流状態を対象とした。

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
M-FR06	1/1200	5.0	8.0	40.0	2.10	0.57	20.0
M-FR07	1/900	4.5	8.9	44.4	2.32	0.67	20.0
M-FR08	1/600	4.0	10.0	50.0	2.50	0.80	20.0
M-FR09	1/455	3.7	10.8	54.1	2.78	0.90	20.0
M-FR10	1/316	3.5	11.4	57.1	2.90	0.98	20.0
M-FR11	1/273	3.2	12.5	62.5	3.24	1.12	20.0
M-FR12	1/250	3.0	13.3	66.7	3.36	1.23	20.0
H-FR11	1/300	5.0	8.0	75.0	3.80	1.07	37.5
H-FR13	1/240	4.5	8.9	83.3	4.00	1.25	37.5
H-FR15	1/167	4.0	10.0	93.8	4.75	1.50	37.5
H-FR18	1/111	3.5	11.4	107.1	5.42	1.83	37.5
H-FR23	1/77	3.0	13.3	125.0	6.09	2.30	37.5

3. 実験結果および考察

3. 1 Fr 数の変化に対する乱れ成分の変化特性

本研究を行うにあたって、まず予備的に、対数則分布におけるKarman定数 κ の普遍性の評価を行った。その際にReynolds応力分布 $-\overline{uv}$ から求めた摩擦速度 U_τ を平均主流速に適用することによって κ を評価した結果、 Fr 数にほぼ無関係に $\kappa=0.41$ が良好に成立したので、以降の解析には対数則分布から求めた U_τ を適用した。また、対数則、等流公式、Reynolds応力分布の3通りから求めた U_τ は1%以内で良好に一致したので、対数則分布から求めた U_τ の適用には妥当性があると言える。

管路と比較しての開水路の顕著な特性は、鉛直方向の乱れ強度 v に顕著に現れ、特に Fr 数が小さく流れが穏やかな状態では自由水面近傍において v が大きく低減するのに対して、水面の揺動が増加すると v は増加していく。一方、水平方向の乱れ強度 u は若干増加していく特性が見られた。図-1はケースM, Hに対する乱れ強度比 v/u' の分布である。この値は U_τ に左右されない生の計測データである。この図より Fr 数の増加とともに v/u' は増加していき、 $Fr=1$ の限界流付近を境にして再び減少していくのがわかる。これより、水面変動が鉛直方向の乱れ変動と大きな関連性があり、開水路に特有な現象であると言える。図-2はケースM, Hに対する乱れ強度比 w/u' の分

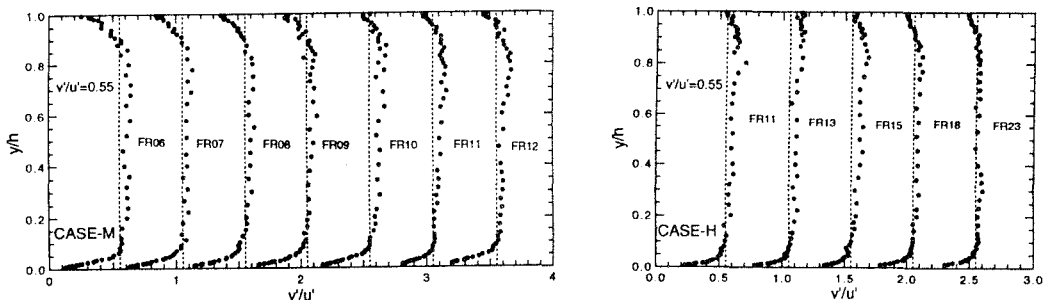


図-1 乱れ強度比 v/u' の分布

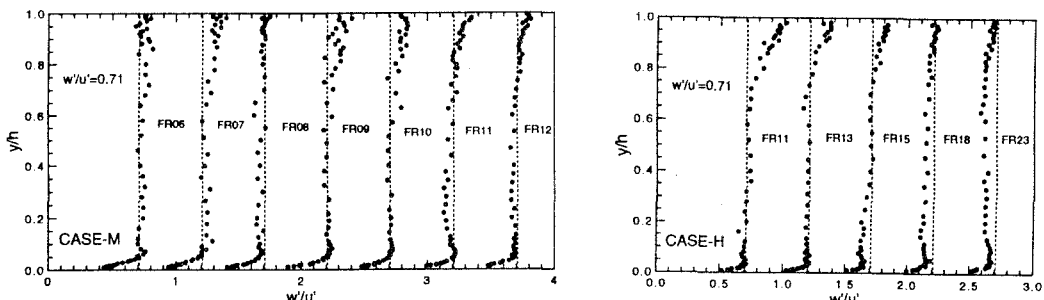


図-2 乱れ強度比 w/u' の分布

布である。この値については、常流状態ではあまり変化しないのに対して、射流状態ではFr数の増加とともに減少していく。このように、 $Fr=1$ の限界流付近を境にして自由水面近傍の乱流構造が大きく変化すると考えられる。図-3, 4は図-1, 2についてケースM-FR06($Fr=0.57$), H-FR11($Fr=1.07$)を基準にして、それからの差を表示したものである。曲線は3次以下の多項式による近似関数である。これより、先ほどの特性がより明確に見られ、特に、 w/u' については射流状態で大きく減少していき、水面変動によって横断方向の乱れは主流方向の乱れに比べて抑制されることになる。

以上のように、Fr数の変化に対して水面近傍では乱れ特性に大きな変化が見られた。図-5はケースL, M, Hに対する水面近傍での乱れ再配分率 $\overline{u^2}/2k$, $\overline{v^2}/2k$, $\overline{w^2}/2k$ の、Fr数に対する変化特性である。 $\overline{v^2}/2k$ については、常流では

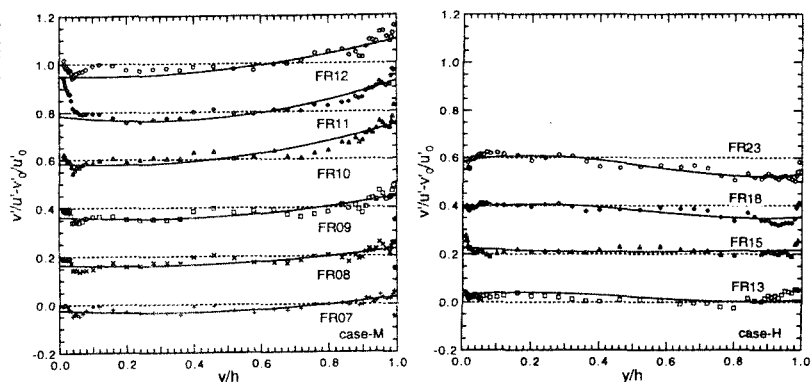


図-3 乱れ強度比 v/u' の差の分布

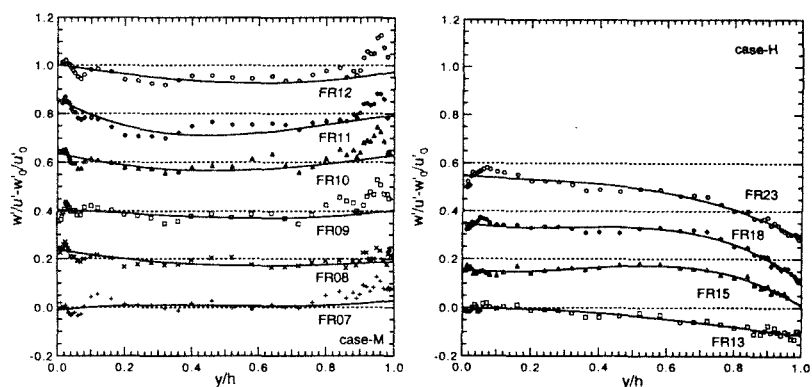


図-4 乱れ強度比 w/u' の差の分布

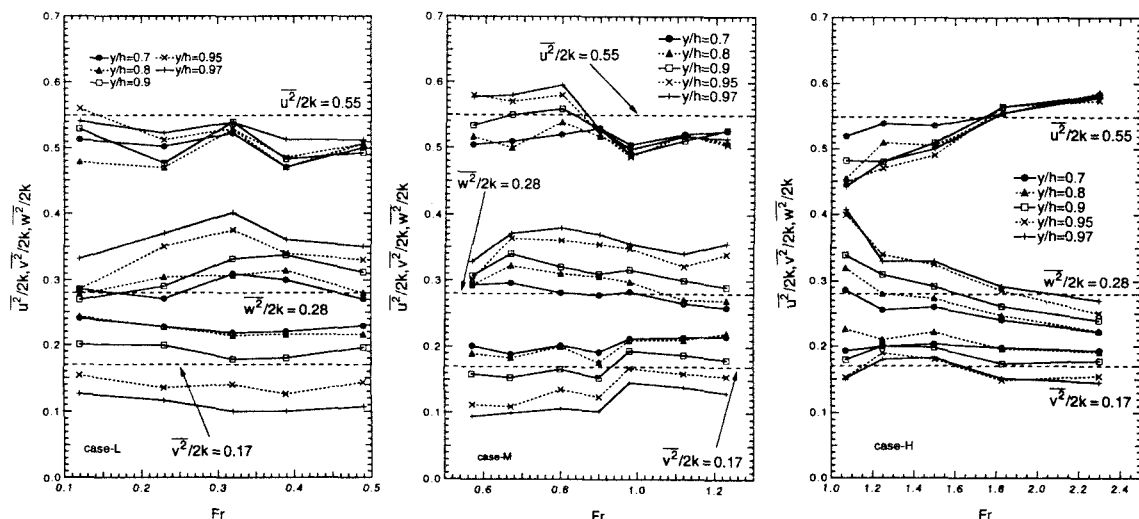


図-5 乱れ再配分率 $\overline{u^2}/2k$, $\overline{v^2}/2k$, $\overline{w^2}/2k$ の分布

ほぼ不変であるが、限界流を境にして急増し、射流で再び緩やかに減少していく特性が見られる。一方、 $\overline{u^2}/2k$ については限界流近傍で最小値となり、射流状態では急増する。 $\overline{w^2}/2k$ については射流状態で急減していく。このように乱れ再配分率はFr数に対して複雑に変化し、自由水面の変動特性が大きな影響を及ぼしていると考えられる。

3. 2 限界流近傍における水面変動および流速変動の周波数特性

前節で述べた乱れの変化特性は Fr 数の変化に対する水面変動特性と大きな関連がある。一方、Reynolds応力分布 $-\overline{uv}$ などは Fr 数に全く左右されず普遍的な直線分布を示していた。このような特性は、inactiveな渦運動による流れの不安定性と大きな関連があることは従来より指摘されており、限界流近傍での波状特性は前節で見られた鉛直方向の乱れ成分の急増特性と大きな関連があると推測される。

水面変動の計測には水面に非接触で流れに擾乱を与えない超音波高計を用い、50Hz以上のノイズがフィルターされた。図-6はケースM, Hに対する瞬間水面変動の時系列 $\tilde{h}(t)$ (cm)である。これより、限界流付近で変動の振幅自体は最大になり、射流になると再び減少している。このことは水面変動のFlatness factor $F_h = \overline{h^4}/\overline{h}^4$ が $Fr=1$ 近傍で急増して極大値をとることからも確認された。図-7はケースL, M, Hに対する水面変動強度 h' および相対水面変動強度 h'/h の Fr 数に対する変化特性である。これより、 $Fr=1$ 近傍で h'/h が急増し、テラス状になって、射流では再び増加していく様子が見られる。この急増現象は前節における v' の急増領域に対応しており、 h' と v' には密接な相関関係があると考えられる。

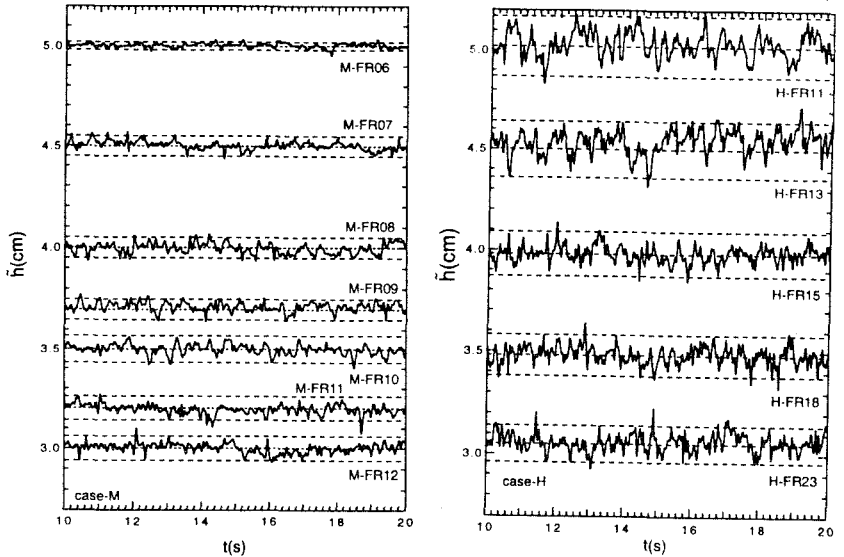


図-6 瞬間水面変動の時系列 $\tilde{h}(t)$ (case-M, H)

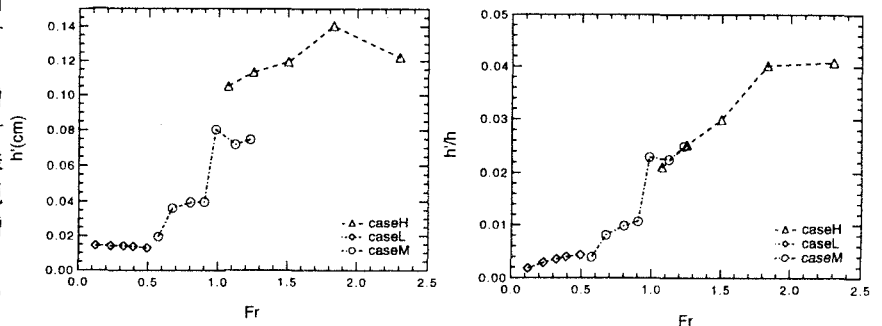


図-7 水面変動強度 h' 及び相対水面変動強度 h'/h

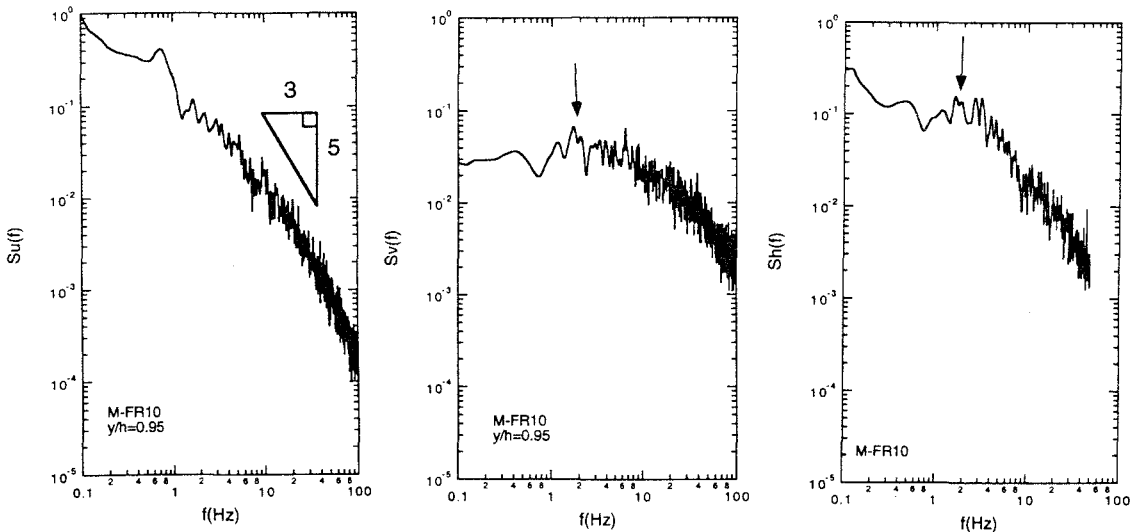


図-8 スペクトル $S_u(f)$, $S_v(f)$, $S_h(f)$ の分布 (case-M-FR10, $y/h=0.95$)

前節では限界流近傍において乱れ強度 u, v に顕著な変化が見られた。これより、限界流近傍ではこの両者は水面変動と大きな関連性があると考えられる。図-8は限界流近傍であるケースM-FR10の水面近傍 ($y/h=0.95$) における主流速, 鉛直方向流速, 水面変動のスペクトル $S_u(f), S_v(f), S_h(f)$ の分布である。スペクトル解析にはFFT法が用いられ、それぞれのスペクトルについて $\int_0^f S(f)df = 1$ という規格化条件は2~3%の誤差内で満足されており、解析最大周波数 f_m のとり方が妥当であることが確認された。 $S_h(f)$ は $f=2\sim 3$ (Hz) で明確なピークを有しており、目視観察されたさざ波に相当すると考えられる。 $S_v(f)$ についても $f=2$ (Hz) 付近において小さなピークがみられ、水面変動のピークとはほぼ一致する。しかし、 $S_u(f)$ については対応する周波数領域に明確なピークは見られない。これらより、自由水面近傍では波と乱れが密接で、かつ、複雑な関係にあることが推測される。

3. 3 水面変動と流速変動の相関関係

特性値 $x(t)$ と $y(t)$ の相互相関係数 $C_{xy}(\tau)$ は次式で定義される。

$$C_{xy}(\tau) = \overline{x(t)y(t+\tau)} / (\overline{x^2} \overline{y^2}) \tag{1}$$

x, y はそれぞれの乱れ強度である。また、ここでは前節のスペクトルにおいてピークの見られた周波数がせいぜい2~3(Hz)程度の低周波領域のinactive成分を対象とするので、5(Hz)以上をフィルターを用いてカットした。図-9はケースMにおける水面変動の自己相関係数 C_{hh} の遅れ時間 τ (s)に対する分布である。これより、限界流に近づくにつれて相関が減少していく特性が見られ、従来より指摘されている、限界流近傍での波状特性を示す不安定な流れと大きな関連がある。図-10はケースMの水面近傍($y/h=0.95$)における流速変動成分の自己相関係数

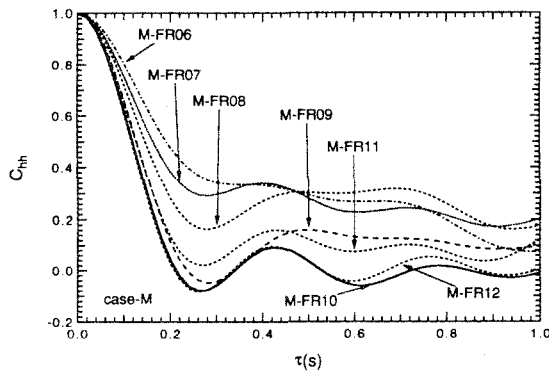


図-9 自己相関係数 C_{hh} の変化特性 (case-M)

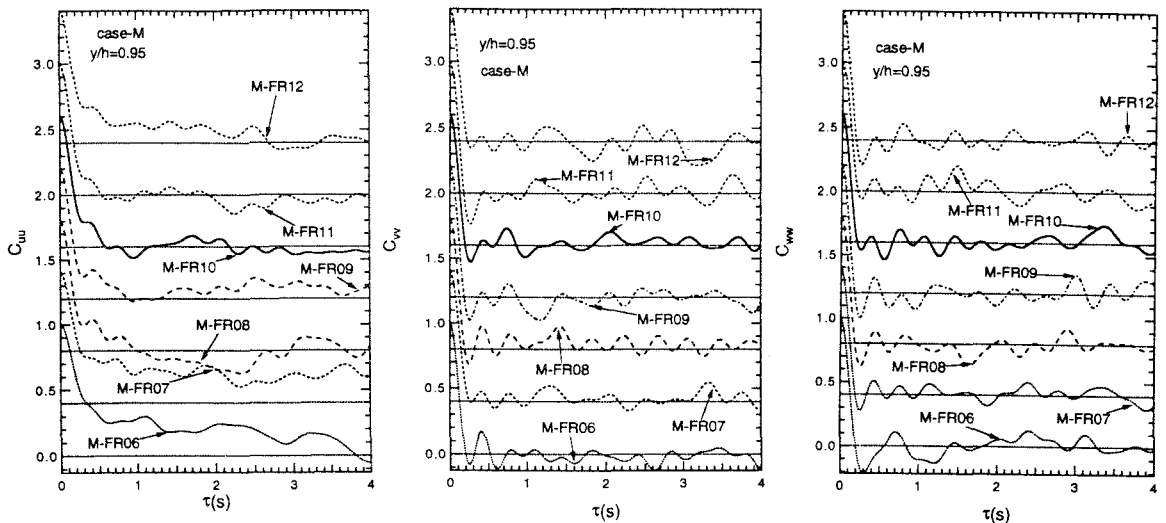


図-10 自己相関係数 C_{uu}, C_{vv}, C_{wv} の変化特性 (case-M, $y/h=0.95$)

$C_{uh}(\tau)$, $C_{vh}(\tau)$, $C_{ww}(\tau)$ の分布である。流速変動成分に関しても限界流近傍において相関が小さくなっており、不安定な流れの影響によるものと考えられる。

上記のように限界流近傍において水面変動と流速変動の両方の相関が減少する。これより、両者には密接な関係があると考えられ、このことを検証するためには水面変動と流速変動の相互相関係数を求める必要がある。特に、この特性は鉛直方向流速変動成分と水面変動の相関に顕著に現われると考えられる。図-11はケースMの水面近傍($y/h=0.95$)における相互相関係数 $C_{vh}(\tau)$ の分布である。 $C_{uh}(\tau)$, $C_{ww}(\tau)$ にはそれほど顕著な特性は見られなかったが、 $C_{vh}(\tau)$ ではケース間での形状が比較的類似している特性が見られる。ケース間でピークとピークを結んでみると、限界流付近での位相のずれが最大になっている。この位相のずれが限界流近傍において不安定な流れを生みだし、乱れ特性、および水面変動に急激な変化をもたらしたと考えられる。

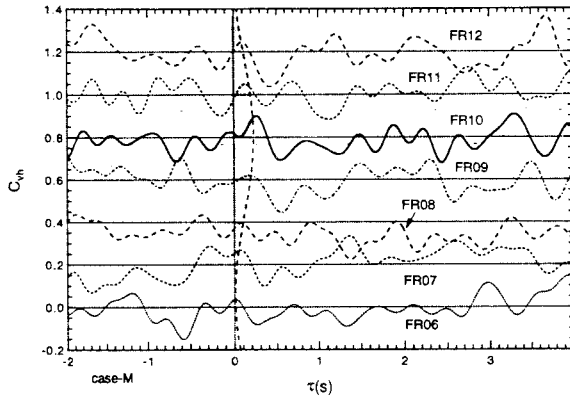


図-11 相互相関係数 C_{vh} の変化特性 (case-M, $y/h=0.95$)

4. おわりに

本研究は、単断面開水路乱流を対象として2台のレーザ流速計および超音波高計を用いて3次元同時計測を行い、開水路流れに特有な自由水面の近傍における乱流構造とFr数、および水面変動の関連性について考察を行ったものである。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、およびReynolds応力 $-\overline{uv}$ はFr数にはほぼ無関係に普遍的特性を有するのに対して、乱れ成分 u', v', w' は水面近傍において大きく変化し、乱れの再配分率は自由水面の影響を大きく受ける。特に、限界流付近で v' は極大値を持ち、乱流構造が大きく変化する。
- (2) 限界流近傍において水面変動は急増する。この現象は乱れ特性値の顕著な変化特性と大きく関連している。また、水面変動のスペクトルと水面近傍での流速変動成分のスペクトル分布には、ほぼ同じ周波数領域にピークが見られ、このことから水面変動と鉛直方向の乱れ特性の間には密接な関係がある。
- (3) 水面変動には若干周期性が見られ、特に限界流近傍では相関が低くなる。このことはマクロスケールの減少を示しており、限界流近傍において不安定な流れが生じる原因と推測される。水面変動と鉛直方向の流速変動の相互相関係数においては限界流付近で位相のずれが大きくなっており、この位相のずれが原因となって限界流付近では乱れ成分と水面変動に急激な変化が生じると推測され、今後この解明を行う必要がある。

参考文献

- 1) Nezu, I. & Nakagawa, H. (1993) : Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema.
- 2) Bradshaw, P. (1967) : J. Fluid Mech., vol.28, pp.593-616.
- 3) Jirka, G. H. & Brumly, B. H. (1987) : J. Fluid Mech., vol.183, pp.235-268.
- 4) Komori, S., Hiraga, Y., Murakami, Y. & Ueda, H. (1987) : Proc. of 2nd. Int. Symp. on Transport Phenomena in Turbulent Flows, Tokyo, pp.75-85.
- 5) Tamburrino, A. & Gulliver, J. S. (1994) : ASME, FED vol.181, pp.103-112.
- 6) 玉井信行, 林博一, 広沢祐輔 (1975) : 第30回土木学会年講, II-195, pp.406-408.