

京都大学工学部 正 員 欄津家久  
 京都大学大学院 学生員 ○中山忠暢  
 京都大学大学院 学生員 藤田正樹

1. はじめに 開水路流れではフルード数が増加すると水面変動が発生するが、沿岸流や離岸流などの波と流れが共存する流れ場での乱流構造とは大きく異なる。本研究はレーザ流速計と超音波波高計を用いた同時計測を行うことにより、「水面変動の発生する開水路流れ」と「強制的に周期波を発生させた場合での波と流れの共存場」の乱流構造、水面変動と流速変動の相関構造の比較を行い、開水路流れに発生する水面変動について評価を行ったものである。

2. 実験方法および水理条件 本実験で使用した水路は長さ10m、幅40cm、高さ40cmの可変勾配型循環式水路である。表-1に示す水理条件の流れに対して、1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(Dantec社製)と水面に非接触型の超音波波高計(Keyence社製)の同時計測を行った。ケースH15Rは底面に粗度高さ $k=1.7\text{cm}$ の一樣粗度を配置したケースであり、ケースLA1S, LA2Sは比較的振幅の小さい正弦波を水路上流端に強制的に付加したケースである。

表-1 水理条件

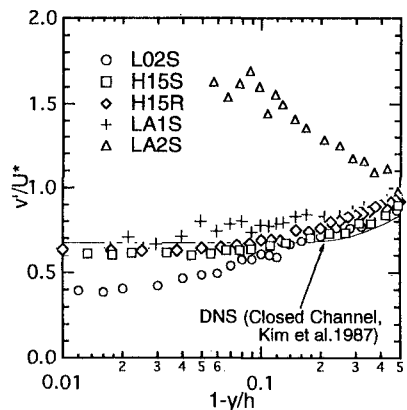
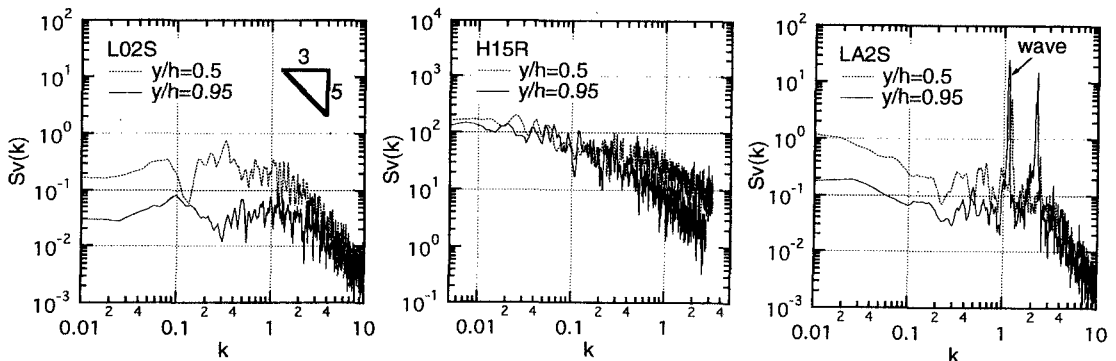
| case | condition | $S_b$  | $h$<br>(cm) | $B/h$ | $h/k_s$ | $A_m/h$<br>( $\times 10^{-2}$ ) | $U_m$<br>(cm/s) | $U_*$<br>(cm/s) | $Fr$ | $Re$<br>( $\times 10^3$ ) |
|------|-----------|--------|-------------|-------|---------|---------------------------------|-----------------|-----------------|------|---------------------------|
| L02S | S         | 1/6000 | 5.0         | 8.0   | -       | 0.0                             | 16.0            | 0.99            | 0.23 | 8.0                       |
| LA1S | W         | 1/6000 | 5.0         | 8.0   | -       | 1.0                             | 16.0            | 0.95            | 0.23 | 8.0                       |
| LA2S | W         | 1/6000 | 5.0         | 8.0   | -       | 2.5                             | 16.0            | 0.94            | 0.23 | 8.0                       |
| H15S | S         | 1/167  | 4.0         | 10.0  | -       | 2.5                             | 93.8            | 4.75            | 1.50 | 37.5                      |
| H15R | R         | 1/34   | 4.0         | 10.0  | 2.35    | 5.0                             | 93.8            | 10.72           | 1.50 | 37.5                      |

S:smooth, R:rough, W:wave-induced,

$S_b$ :channel slope,  $h$ :flow depth,  $B$ :channel width,

$A_m$ :amplitude,  $U_*$ :friction velocity,  $k_s=1.7(\text{cm})$ ,

$$Fr=U_m/(gh)^{0.5}, Re=U_m h/\nu, R_*=U_* h/\nu$$

図-1 乱れ強度 $v/U_*$ の分布図-2 波数スペクトル $S_v(k)$ 

3. 実験結果および考察 従来より指摘されているように、水面の穏やかな開水路流れでは自由水面の低減特性によって鉛直方向の乱れ強度 $v$ が水面近傍で大きく低減する。図-1は水面が穏やかなケースL02S ( $Re=8000$ ,  $R_*=450$ )、水面変動の激しいケースH15S, H15R及び強制波を発生させたケースLA1S, LA2Sについて $v$ を摩擦速度 $U_*$ で無次元化して表示したものであり、Kim et al.<sup>1)</sup>による管路流れのDNSデータ ( $Re=8000$ ,  $R_*=400$ )も併示した。同図より、水面の穏やかなケースL02Sでは水面近傍で $v$ が大きく低減するが、水面変動が発生すると $v$ は大きく上昇する(ケースH15S, H15R及びケースLA1S, LA2S)ことがわかる。図-2はケースL02S, H15R及びLA2Sについての鉛直方向流速変動 $v$ の波数スペクトル $S_v$ である。これより、水面の穏やかなケースL02SではHunt and Graham<sup>2)</sup>が理論的に解析を行っているように水面に近づくにつれて低波数部が低減する。しかし、ケースH15Rでは水面に近づいても低波数部は低減せずHuntの理論

Iehisa NEZU, Tadanobu NAKAYAMA and Masaki FUJITA

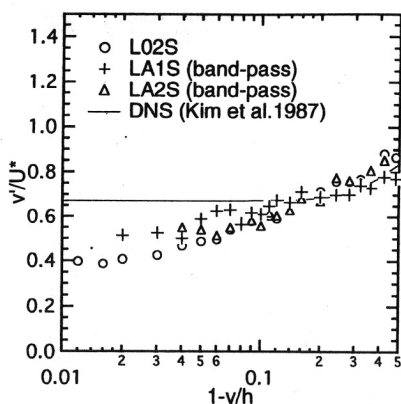


図-3 バンドパスを与えた $v/U_*$ の分布

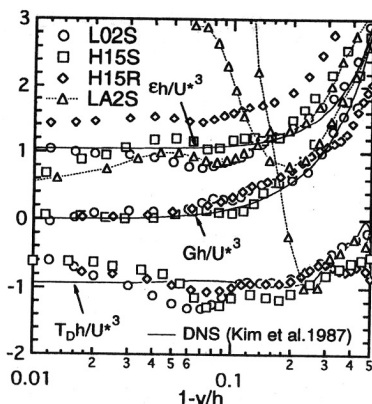


図-4 水面近傍でのエネルギー収支

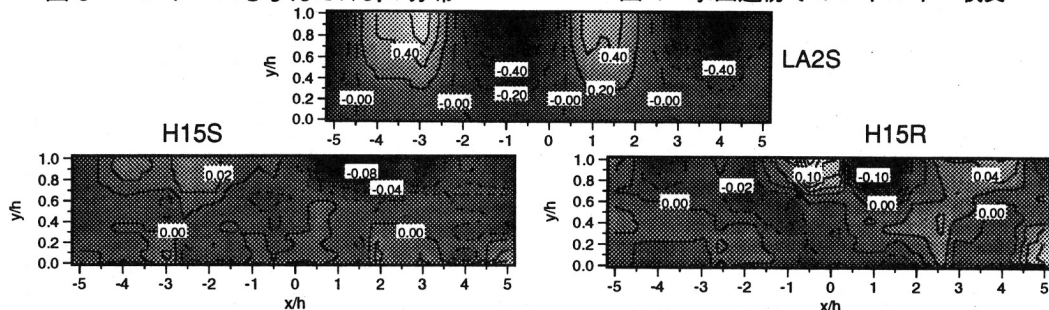


図-5 相互相関係数 $C_{hv}$  (上:LA2S, 左下:H15S, 右下:H15R)

が成立しなくなり、水面近傍での乱れを有する渦が $v$ を増加させる原因となる。一方、ケースLA2Sでは $k=1.2$ 及び $2.2$ 付近に顕著なピークが見られ、特に $k=1.2$ は強制波(周期 $T=0.3s$ )に対応している。しかし、このような強制波の場合にも水面の穏やかなケースL02Sと同様に低波数部の低減が見られる。すなわち、ケースH15RとLA2Sでは乱流構造が大きく異なる。そこで、ケースLA1S及びLA2Sのスペクトルに対して、強制波によると考えられるピーク領域にバンドパスを与えて求めた $v$ の分布が図-3である。図には図-1と同様にKim et al.のデータを併示した。これより、ケースLA1S、LA2Sともに水面の穏やかなケースL02Sと非常に類似した $v$ となる。以上から、本研究のような振幅の小さい強制波を流れに付加しても流速変動には特定の周波数領域に影響が及ぶだけで、エネルギーカスケード自体には大きな影響がないことが予想される。

図-4はケースL02S、H15S、H15R及びLA2Sに対する水面近傍でのエネルギー収支を対数表示したものである。同図には発生率 $G$ 、逸散率 $\varepsilon$ 及び拡散率 $T_D$ に対するDNSデータも併示した。 $G$ についてはケースL02S、H15S及びH15Rでは半経験式にほぼ一致するのに対して、ケースLA2Sでは水面近傍で値が大きくなる。これより、強制波ではエネルギーが生成されるのに対して、水面変動の発生する開水路流れではほとんど生成されないことがわかる。一方、 $\varepsilon$ についてはケースLA2Sのような崩壊しない場合にはそれほど大きくないに対して、ケースH15S及びH15Rでは水面近傍で若干増加しておりフルード数の増加とともに大きくなる。また、ケースLA2Sの $T_D$ は水面近傍で大きく増加することになる。すなわち、砕波しない強制波の存在する流れ場では乱れエネルギーがそのまま移流されるのに対して、水面変動が自然的に発生する開水路流れではエネルギーが乱れエネルギーに付加されることになる。

図-5はケースH15S、H15R及びLA2Sについての水面変動 $h$ (fixed;  $x=0$ )と鉛直方向流速変動 $v$ の相互相関係数 $C_{hv}$ のコンターである。これより、ケースLA2Sでは相関値が比較的大きく、正弦波に対応した規則的な正負の値が流下方向に見られる。一方、ケースH15S及びH15Rでは相関値がかなり小さく、固定点から水深程度離れた所では $h$ と $v$ にはほとんど相関が見られなくなる。特に、ケースH15Rでは $x/h < 0$ において正の相関領域が見られ、水面下の流速変動が水面変動に影響を及ぼしていることがわかる。

4. おわりに 本研究は、強制波を付加した開水路流れと水面変動が自然に発生する流れの比較を通して、開水路流れにおける水面変動と流速変動の相互関係についての考察を行ったものである。

#### 参考文献

- 1) Kim, J., Moin, P. and Moser, R. : *J. Fluid Mech.*, vol.177, pp.133-166, 1987.
- 2) Hunt, J. C. R. and Graham, J. M. R. : *J. Fluid Mech.*, vol.84, pp.209-235, 1978.