

二次元レーザー流速計による砂漣モデル上の流れの測定

池田 駿介*・堀川 清司*・中村 廣昭**・野口 賢二***

1. 序 論

波動下で発生する砂漣近傍において発生する剝離渦や定常循環流は土砂の浮遊、波のエネルギー逸散あるいは砂漣自身の形成に重要な役割を果している。このような往復流中の複雑な乱流境界層を把握するために離散渦法や $k-\epsilon$ 乱流モデルによる理論的研究が行なわれ、又熱線流速計やレーザー流速計を用いて流速場の測定が行なわれている。レーザー流速計による測定では、Du Toit・Sleath(1981)、沢本ら(1983)による一次元方向成分の測定、あるいは佐藤ら(1986)による二次元成分の測定が挙げられるが、研究は端緒についたばかりであり、測定データの蓄積は不十分である。本研究は高性能二次元レーザー・ドップラー流速計を用いて、振動流中に置かれた砂漣モデル上の流れ場の測定を行ない、平均流速、レイノルズ応力、乱れ強度、渦動粘性係数、定常循環流等について詳細なデータを取得し、このような流れの場を解明することを目的とする。

2. 実験装置及び実験結果

本実験において使用した振動流実験装置はU字管型の矩形水路であり、その諸元は水路断面の内径、30×30 cm、水路長 13 m である。水路中央部付近に観測部があり、観測部長は 120 cm、材質は取りはずしの出来る天井部は硬質プラスチック、側面部は強化ガラスである。流体（水）はピストンにより駆動され、水粒子の振幅は 0~70 cm、周期は 0~20 sec の間で可変である。

砂漣モデルの形状は次式により与えられる（池田ら、1989）。

$$k_r(y-y_0)=\ln[\sec k_r(x-x_0)] \quad \cdots \cdots \cdots (1)$$

ここに、

$$k_r y_0 = \ln[\cos(\pi/P_r)], \quad k_r x_0 = 2\pi(j-1/2)P_r \quad \cdots \cdots \cdots (2)$$

であり、 k_r は波数、 $j=1, 2, \cdots P_r$ である。 P_r の値は実砂漣形状との比較により定められる。実砂漣の波高・波

長比の代表値は 0.18 程度であるが、 $P_r=5$ のとき式(1)から求められる波高・波長比は 0.17 となる。従って、本実験では $P_r=5$ とし、波長 30 cm、波高 5 cm とした。このような砂漣モデルを 7 個設置し、中央の模型の回りの流れを測定した。実験では実砂漣とストローハル数が一致するよう流れのストロークを選び、流れの周期を 6 および 9 sec とした。実砂漣との比較及び実験条件を表一に示す。

流速の測定には二次元レーザー・ドップラー流速計を用いた。レーザー光は 2 w アルゴン・レーザー発信器から 4 ビーム光ファイバーによって導かれ、観測点間の移動は三次元自動トラバース装置（移動精度 0.5 mm）により行なわれた。測定は流速の水平・鉛直成分について後述のように砂漣 1 波長内の 316 点で行ない、サンプリングはプログラムの都合上、測定点 1 点で 1 波につき一つの位相で行なった。1 点における測定波数は 30 波であり、サンプリング時間は 0.02 sec とし、その間に 5 個のサンプリングを行なった。従って、一つの測定点、一つの位相に対し、150 個データが得られた。位相については負方向への流れから正方向（ピストン方向）への転流時を位相 0 として、 $0\pi, \pi/8, \cdots, 7\pi/8$ と 8 つの位相について測定を行った。これらのデータはリアルタイムでコンピューター（HP 9000-300）に転送、記録され、位相平均流速、位相平均乱れ強度、レイノルズ応力、定常循環流を求め、更にこれらの結果から渦動粘性係数を計算した。

表一 実験条件

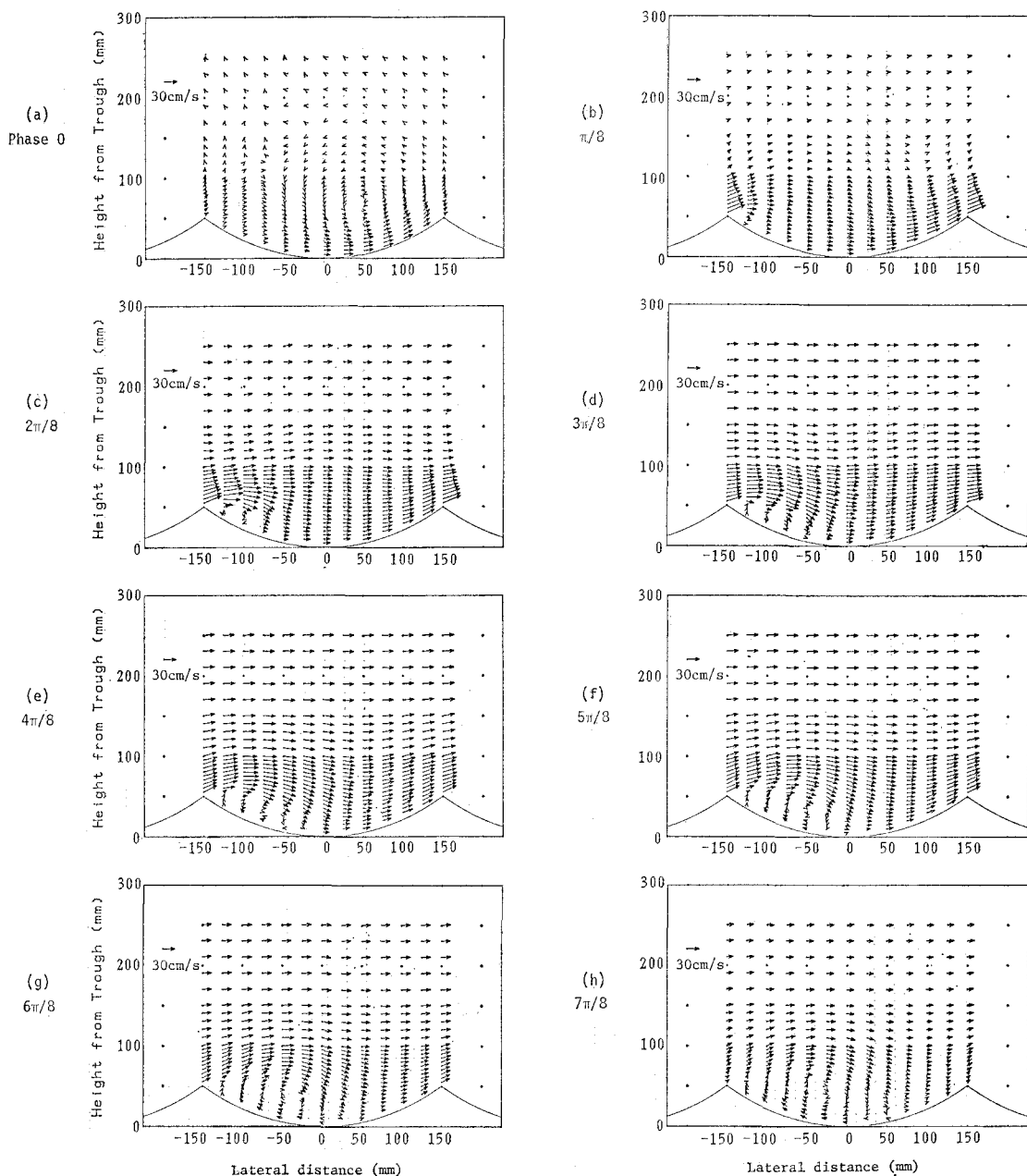
	砂漣の実験データ No.2549(Du Toit ・Sleath, 1981)	今回の条件	
砂 漣 の 波 長 L_r (cm)	3.67	30.0	
砂 漣 の 波 高 H_r (cm)	0.63	5.0	
H_r/L_r	0.172	0.167	
ピストンの振幅 A_p (cm)	-	14.3	
水粒子の振幅 $d_0/2$ (cm)	2.52	20.0	
周 期 T (sec)	1.01	9.0	6.0
代表流速の振幅 $\hat{U}$ (cm/sec)	15.8	13.9	20.9
ストローハル数 $L_r/(T\cdot\hat{U})$		0.232	

* 正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設基礎工学科
** 正会員 埼玉大学助手 工学部建設基礎工学科
*** 建設省土木研究所河川部海岸研究室

図—1 (a)～(h) に周期 6 秒の場合の各位相における平均流速場の様子を示す。(a) 位相 0π においては $x=50$ mm, $y=70$ mm 付近に中心を持つ、流れが反転する前に右側の砂漣頂部から発生した剝離渦が残っているのが見られ、(b) $\pi/8$ においては底面に近い砂漣頂部前面で大きな流速が見られるが、砂漣背後の剝離渦は発生していない。この剝離渦は (c) $2\pi/8$ でその発生が認められ、次第にその大きさを増しながら、次第にその中心を上方・右方に移し、渦の大きさは (g) $6\pi/8$ 付近で最大とな

り、その後急激に減衰する。但し、渦の強さの指標である循環の最大値は後述のように位相 $5\pi/8$ において現れ、渦の大きさの最大値よりも若干早い位相において出現するが、断面平均流速が最大となる $4\pi/8$ よりも少し遅れて現われる。

図—2 (a)～(h) に乱れ強度の測定結果(周期 6 秒)を示す。乱れ強度は各瞬間流速と位相平均速度の差 (u' , v') を求め、自乗平均平方根 $\sqrt{u'^2 + v'^2}$ として求められている。平均流速の分布図と対比して見ると、一般に渦が存

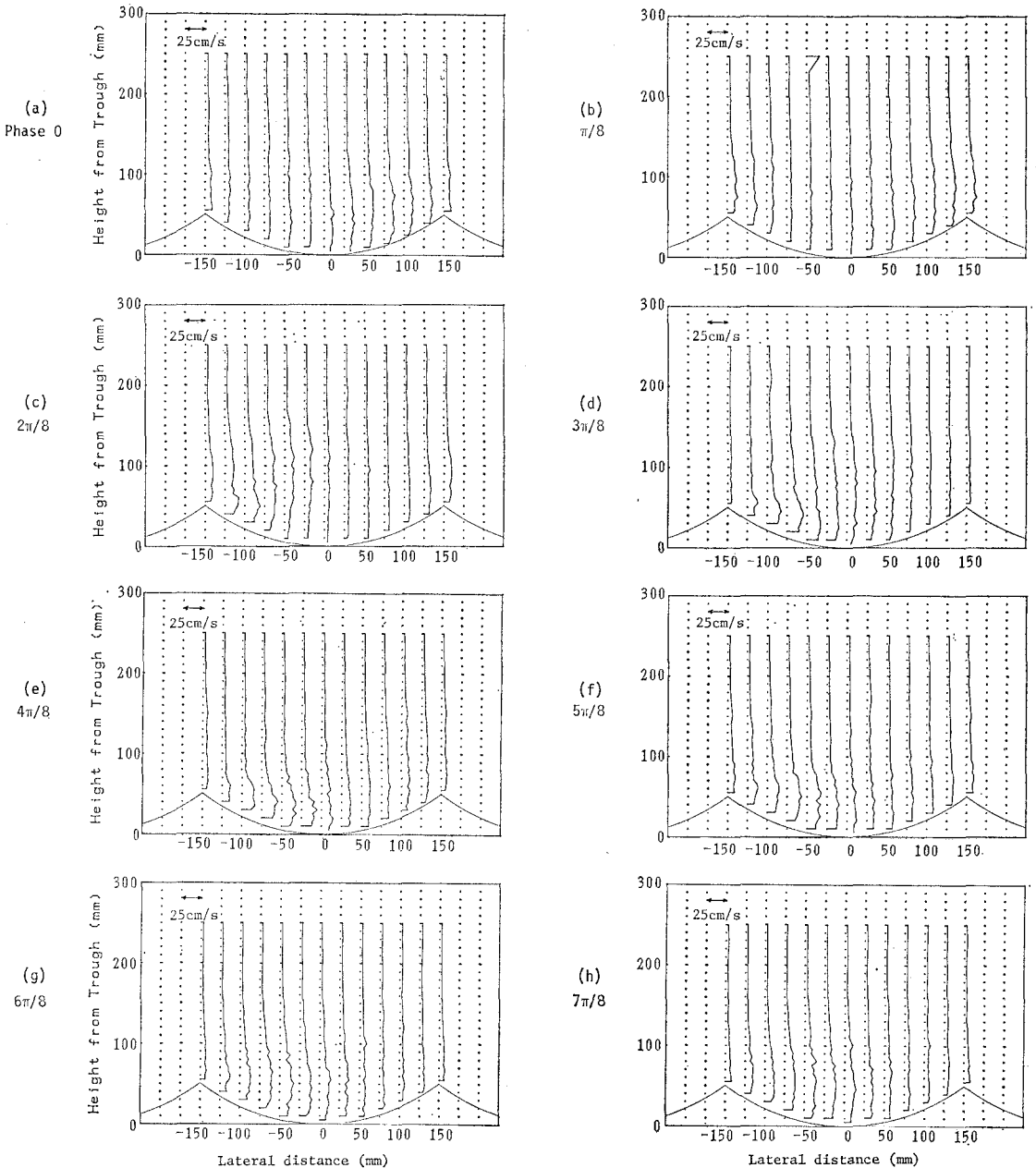


図—1 平均流速場 (周期 6 秒)

在している領域において激しい乱れが存在していることがわかる。(a) 位相 0π においては、前に右側の砂漣頂部から発生し、残っている弱い渦に対応して、乱れが大きくなっている領域が右側の砂漣頂部とトラフの間に存在している。左側の砂漣から斜離渦がまだ発達していない (b) $\pi/8$ においては乱れが特に顕著である領域は存在しないが、斜離渦が発達し始める (c) $2\pi/8$ では、砂漣背後に強い乱れが見られる。乱れ強度は、この斜離渦の領域において既に (d) $3\pi/8$ において最大に達し、

(e) $4\pi/8$, (f) $5\pi/8$ とその様子は余り変化しない。乱れ強度の最大値は (d) $3\pi/8$ において約 20 cm/sec となっており、表—1 に示されている平均流速振幅とほぼ等しい値となっている。乱れはその後 (g) $6\pi/8$, (h) $7\pi/8$ と急激に減衰している。

動レイノルズ応力、 $-\overline{u'v'}$ の分布を図—3(a)~(h)に示す。(a) 位相 0π においては、残留している渦内で負のレイノルズ応力が見られる。(b) $\pi/8$ ではレイノルズ応力の様相が若干異なっている。底面に近い砂漣頂部近



図—2 乱れ強度 (周期6秒)

傍では、大きな平均流速が存在し、その値は上方に向かって急激に減少している。これに対応して、負のレイノルズ応力が砂漣頂部付近に発生している。(c) $2\pi/8$ では剝離渦の発生に伴うレイノルズ応力の発生が見られる。例えば、 $x=-100$ mm の線上では $y=60$ mm 付近に流速の最大値が見られるが(図-1(c))、これに対応して上方では負のレイノルズ応力が、下方では正のレイノルズ応力が発生している。レイノルズ応力が最も広い分布を示すのは (d) $3\pi/8$ の位相であり、(e) $4\pi/8$ 、(f)

$5\pi/8$ では負のレイノルズ応力は消え、正のレイノルズ応力のみが剝離渦内で見られる。これは平均流速の分布によく対応している。(g) $6\pi/8$ 、(h) $7\pi/8$ においても同様なレイノルズ応力の分布を示しているが、絶対値は小さくなっている。

流れの定常流成分は以下のようにして求めた。今回の実験では、前出のように流れの半周期間の8つの位相で測定を行なったので、残りの半周期間(位相 $8\pi/8 \sim 15\pi/8$)の流速は、流れが順流時と逆流時で対称と仮定し、位

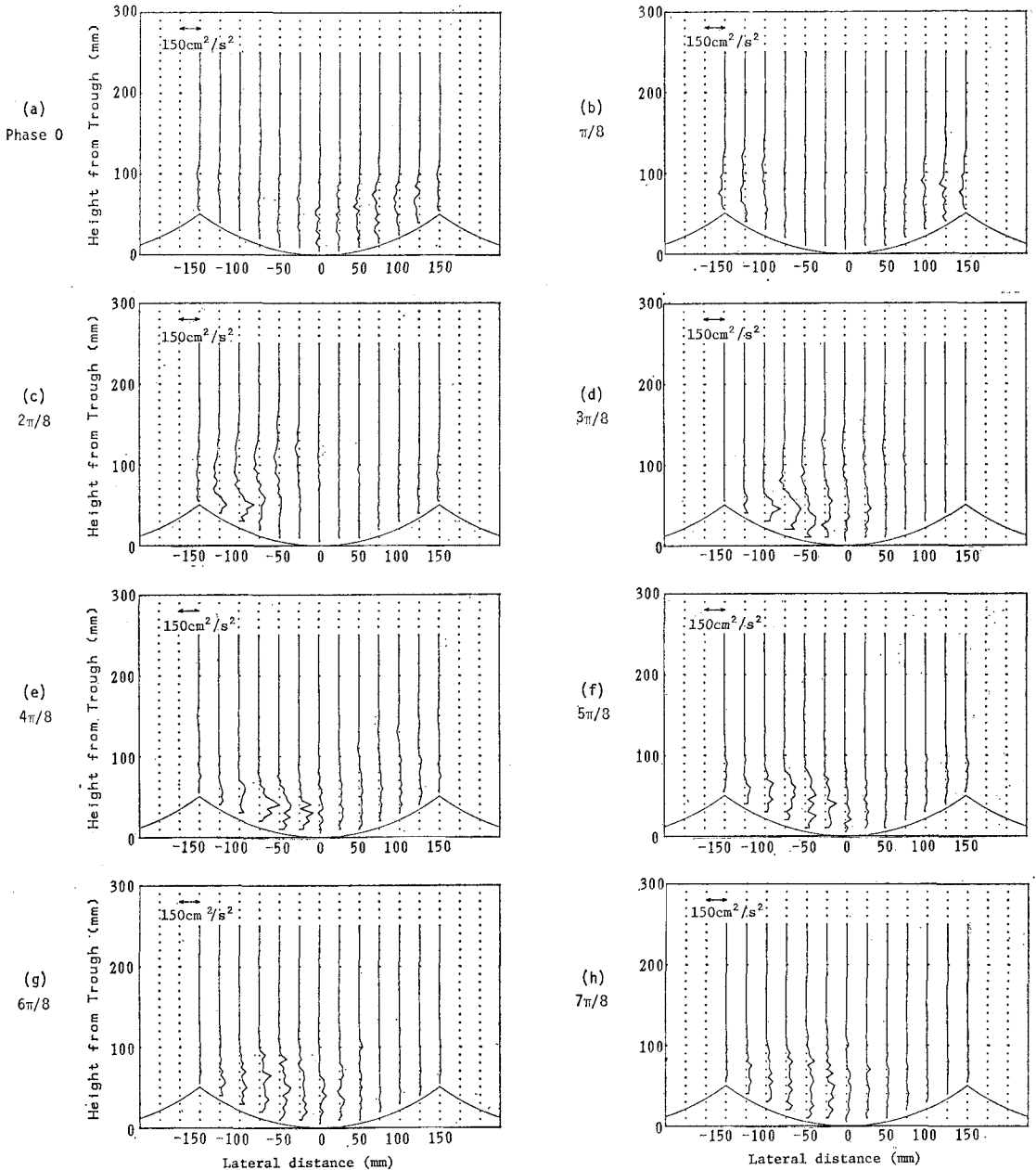


図-3 動レイノルズ応力 (周期6秒)

相 $0\pi \sim 7\pi/8$ の時の流速を反転し、それをトラフ部 ($x=0$) に対して対称な位置における $8\pi/8 \sim 15\pi/8$ の時の流速であると仮定して、1 周期間の平均値を求めることにより算出した。このようにして求められた周期 6 sec の場合の定常流成分を図-4 に示す。対称性の仮定により、流れは $x=0$ に関して完全に対称となり、砂漣頂間に 2 個の顕著なセル構造が見られる。その最大流速は砂漣頂直前で約 13 cm/s にも達し、断面平均流速振幅 ($\bar{U}=20.9$ cm/s) の約 60% になっている。従って、このような流れが砂漣の形成に大きな役割を果たしていることが示唆される。

以上は周期 6 sec の場合の結果であるが、周期 9 sec の場合についてもほぼ同様な結果が得られた。

図-1 に示される平均流速成分 (u, v) 及び図-3 に示されているレイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ を用いて半周期間の渦動粘性係数を以下の式から各測定点について算出した。

$$\nu_t = -\overline{u'v'} \left/ \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right. \dots\dots\dots (3)$$

レイノルズ応力の分布図からも知られるように、実際に意味があるレイノルズ応力の発生は剝離渦内に限られているので、左側の砂漣頂から発生した渦の中心付近における渦動粘性係数を求め、半周期にわたってプロットしたものが図-5 である。渦動粘性係数は顕著な消長を示し、平均流速成分が最大となる $4\pi/8$ の位相において最大値をとっている。更に、周期 6 sec の場合は周期 9 sec の場合に対し、平均流速は 1.5 倍であるにもかかわらず、渦動粘性係数は 2 倍以上になっている点が注目される。

3. 結 論

高精度二次元レーザー・ドップラー流速計の使用により砂漣モデル上の振動流の詳細な測定が可能となり、以下のような結果を得た。

(1) 砂漣頂部から発生する剝離渦の発生・発達・減衰の様子が示され、この渦が乱れエネルギー、レイノルズ応力の発生機構となっている。

(2) 定常循環流成分は非常に大きく、砂漣の発達や流れ場の解析を行なう上で無視しえない。

(3) 渦動粘性係数は渦の発生・発達・減衰とともに正弦的に相当顕著に変化する。従って、このような流れ場を取り扱う上で渦動粘性係数を一定と仮定することは困難であり、流れ場の解析を行なうに際しては渦動粘性係数を未知量とする $k-\varepsilon$ モデル、あるいは応力方程式

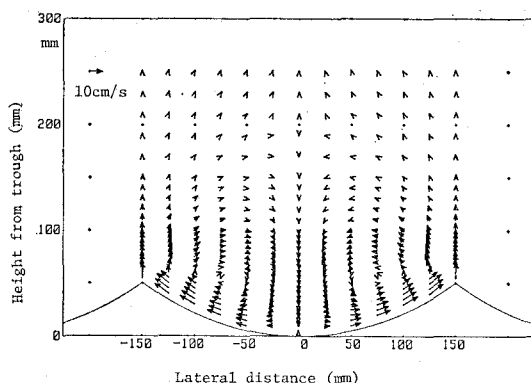


図-4 定常循環流 (周期 6 秒)

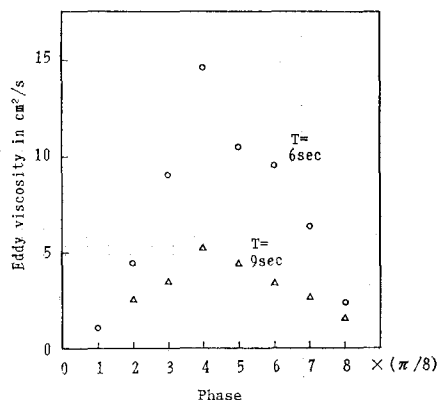


図-5 渦中心における渦動粘性係数の変化

モデルの採用が必要である。

謝 辞

本研究に際しては鹿島学術振興財団の研究助成を受けた (課題名: 海域構造物周辺の波浪予測手法に関する研究, 代表者: 磯部雅彦 東大工学部助教授)。

参 考 文 献

- 池田駿介・木崎 茂・石井修一・栗林俊一 (1989): 波動下の砂漣近傍の流れとエネルギー逸散, 土木学会論文集, 405 号, pp. 155~164.
- 佐藤慎二・下迫健一郎・渡辺 晃 (1986): レーザー・ドップラー流速計による砂漣上の乱流境界層の解明, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp. 223~227.
- 沢本正樹・山下俊彦・山口修一 (1983): 拡大相似模型を用いた砂漣上の振動流の測定, 東工大土木工学科研究報告, 31 号, pp. 157~168.
- Du Toit, C. G. and J. F. A. Sleath (1981): Velocity measurement close to rippled beds in oscillatory flow, JFM, Vol. 112, pp. 71~96.