

風波による乱流生成機構の wavelet 解析

京都大学
京都大学
京都大学学生員 ○秋谷優
フェロー 棚津家久
正会員 山上路生

1. はじめに

海洋や湖沼のような閉鎖性水域では風波に伴い気液界面で運動量輸送が促進されることが知られている。最近では PIV 計測による時空間的な現象解明が主流である。Hussain & Reynolds (1970)¹⁾は波動場の解析として、波と乱れを分離する3重分解法を提案した。その後現在までに LFT 法や SFM 法など、分離手法の改良開発や計測データへの適用例が多く、研究者によって進められてきた。3重分解法により、波と乱れ成分の相互作用や成分間のエネルギー輸送特性に関する研究は進展しているが、現状として必ずしも統一的な見解は得られていない。

本研究では PIV によって風波を伴う閉鎖性水域の乱流計測を行い、平均流成分、波動成分と乱れ成分間のエネルギー輸送および乱れ生成特性を考察する。また位相解析を行い、波のクレストとトラフにおける乱流構造の違いに注目して、考察する。

表-1 水理条件

Case	H (cm)	$U_{a,max}$ (m/s)	U_s (cm/s)	U_* (cm/s)	f_p (Hz)	H_s (cm)	H_s/H
C04	4	6.80	28.1	1.85	2.49	0.40	0.29
C12	12	6.63	22.6	1.28	2.05	0.57	0.31
C20	20	7.78	41.0	2.40	1.47	4.61	0.23

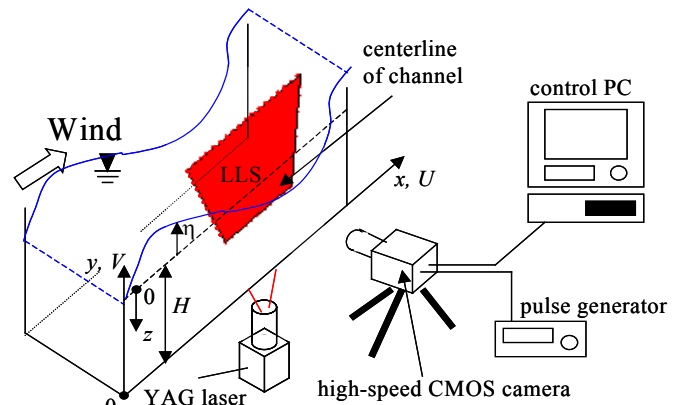


図-1 実験装置

2. 実験手法および水理条件

図-1 は、本実験の装置図である。全長 16m、幅 40cm、高さ 50cm の可変勾配型開水路である。水路部は循環式で、今回は循環パイプのバルブを全閉とし、湖沼のような閉鎖水域を再現した。水路上流側には大型ファンが取り付けられており、これによって風波を発生させた。水路上流端から計測部までのフェッチ距離は 7m とした。水路下流端には消波板を設置し、反射波を抑制した。流速の計測には PIV を用いた。水路のセンターライン位置に 2W の連続 YAG レーザーをシート状に照射し、レーザーライトシート(LLS)上のトレーサー粒子を水路側方に設置した高速度 CMOS カメラによって撮影した。100Hz のフレームレートで 2 画像を連続撮影し、2 画像のペアを 50Hz のサンプリングレートで制御 PC に記録する。得られた画像ペアから輝度相関法によって主流方向と鉛直方向の瞬間流速成分を 50Hz の時間間隔で計算した。

表-1 に実験条件を示す。水深 H は 4cm、12cm 及び 20cm の 3 通りに変化させ、いずれも 2 次元重力波が発生するように水面上に風を吹かせた。 $U_{a,max}$ は風洞断面における最大風速で熱線風速計によって計測した。 f_p は風波の卓越周波数である。 H_s は有義波高で容量式波高計により求めた。 U_* は水・空気界面における水側の摩擦速度で開水路の対数則から評価した。

3. 実験結果および考察

波と乱れの分離には様々な方法があるが、最近の報告として、吉田・棚津²⁾は wavelet 解析を適用している。wavelet 解析による多重解像度解析はスペクトル解析と異なり、時間情報を保持したまま測定データを周波数帯ごと分離できる特徴を持つ。また、LFT 法は波・乱れの相関がゼロと仮定し、SFM 法は波動せん断応力がゼロと仮定してそれぞれ適用するのに対し、wavelet 解析ではこれらの仮定の妥当性も評価できる利点がある。そこで本研究では離散 wavelet 法を適用して、以下のように解析した。

離散 wavelet 解析はその特性上、計測サンプリング周波数の 1/2, 1/4, 1/8, 1/16・・・倍の周波数によって周波数帯に分ける。本実験ではサンプル周波数は 50Hz なので、25~50, 12.5~25Hz, 6.25Hz~12.5Hz, 3.125~6.25Hz・・・の周波数帯に分離した。瞬間流速 $\tilde{u}(t)$ は式(1)のように時間平均成分 U 、波動成分 u_w および波動を除く乱れ成分 u_t に 3 重分解できると仮定する。このように 3 重分解を用いると通常のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ は式(2)のように分類される。

$$\tilde{u} = U + u_w + u_t \quad (u = u_w + u_t) \quad (1)$$

$$-\overline{uv} = -\overline{u_w v_w} - \overline{u_t v_t} - \overline{u_w v_t} - \overline{u_t v_w} \quad (2)$$

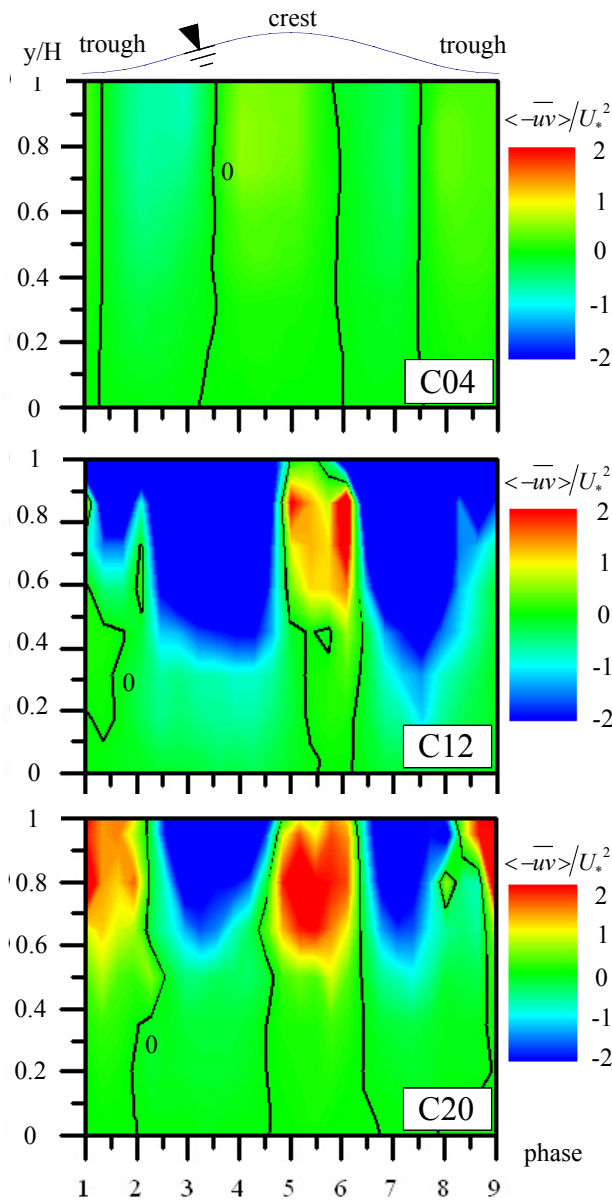


図-2 レイノルズ応力の位相変化

したがって、平均流エネルギー $U_i^2/2$ (i は縮約記号、以下同様) の輸送方程式における主要エネルギー損失 $E = \overline{uv} \partial U / \partial y$ は式(3)のように分解される。

$$E = (\overline{u_w v_w} + \overline{u_t v_t} + \overline{u_w v_t} + \overline{u_t v_w}) \times \partial U / \partial y \quad (3)$$

式(3)の第1項の符号を反転した $-\overline{u_w v_w} \partial U / \partial y$ は波動エネルギー $\overline{u_w^2}/2$ の輸送方程式の生成項となる。同様に第2項の符号を反転した $-\overline{u_t v_t} \partial U / \partial y$ は乱れエネルギー $\overline{u_t^2}/2$ の輸送方程式の生成項となる。

まず分解前のレイノルズ応力 $-\overline{uv}$ の位相特性を考える。ケース C04, C12 及び C20 におけるレイノルズ応力の位相ごとのコンター表示を図-2 に示す。〈〉は位相平均を示す。ケース間に共通する特性として、トラフ・クレストでレイノルズ応力の正値が卓越し、波の増大・減少時には負値が卓越する。これよりエネルギー輸送に位相特性が現れることが予測される。式(3)における乱れ成分による生成項と

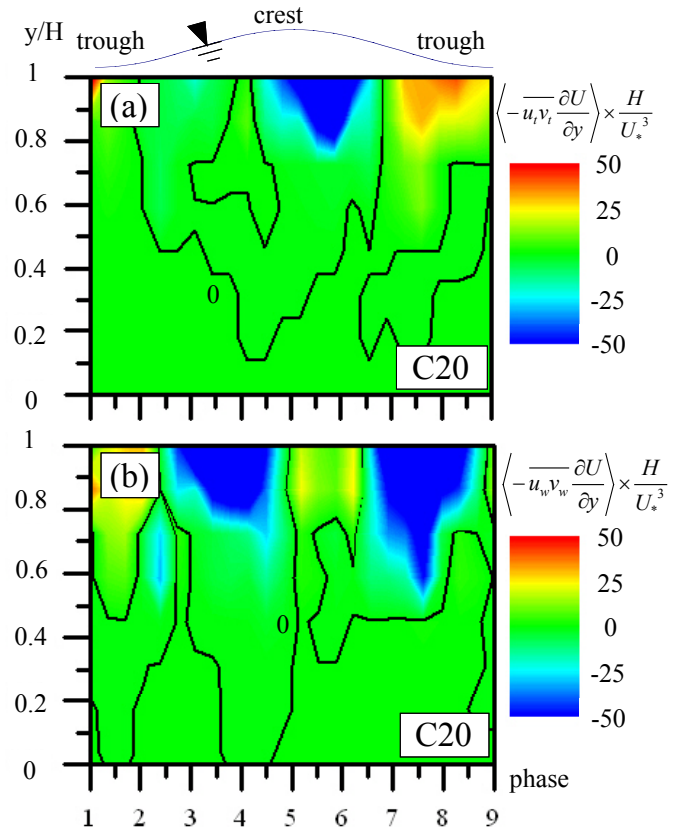


図-3 生成項の位相変 (a)乱れ成分, (b)波動成分

波動成分による生成項の分布を図-3 にそれぞれ示す。乱れ成分による生成項は水面付近で波高の増大期からクレストの時間帯の大部分で負値をとるがその他の位相では正値となる。一方、波動成分の生成項はトラフおよびクレスト時に正の分布をもち、波高の増大期および減少期では負の分布をもつ。特に、乱れエネルギーの生成はクレストよりもトラフで行われ、村上³⁾らの結果と定性的に一致する。

4. おわりに

本研究では風波発生下の乱流構造をエネルギー輸送と位相特性の点から考察・検討した。wavelet 解析により波と乱れを分離した結果、平均流・波・乱れの3者間には位相に応じたエネルギー輸送形態が存在することがわかった。今後の課題として、これらの特性が物質拡散に及ぼす影響に注目するとともに、ラングミュラー循環流と関連する横断方向の物質拡散についても検討したい。

参考文献

- 1) Hussain, A.K.M.F. and Reynolds, W.C.: The mechanism of an organized wave in turbulent shear flow, J. Fluid Mech., Vol.41, part2, pp.241-258, 1970.
- 2) 吉田圭介・棚津家久：風シアーと底面シアーが共存する開水路混成流における組織乱流構造と気液界面輸送過程に関する研究，土木学会論文集，No.803/II-73，pp.57-67，2005.
- 3) 村上晴通・加藤始・信岡尚道：PTV を用いた風波の表面付近の流速場に関する実験的研究—主として軌道速度の分離について—，海岸工学論文集，第48巻，pp.381-385，2001.