

ラングミュアー循環流の3次元構造に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDIES ON THREE-DIMENSIONAL STRUCTURE OF LANGMUIR CIRCULATION

秋谷優¹・瀬津家久²・山上路生³
Yu AKIYA, Iehisa NEZU and Michio SANJOU

¹学生員 修士課程 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

³正会員 博(工) 京都大学准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

Langmuir circulation is a large-scale secondary current, which is generated under the presence of wind-induced water waves. Previous researchers have done many theoretical studies and numerical simulations, but only few laboratory experiments have been done. The main reason for this was due to the difficulty of the experimental set up, and most of the experiments were conducted with a point measurement such as LDA and ADV. Therefore the instantaneous and phase averaged cross-sectional structure of Langmuir circulation remains unknown. In this study, PIV measurements were carried out to measure the cross sectional plane and the horizontal plane to reveal and understand the three-dimensional structure of Langmuir circulations.

Key Words : *Langmuir circulation, three dimensional structure, wind-induced wave and PIV*

1. はじめに

ラングミュアー循環流は風波が存在する海洋や湖沼等で発生する大規模2次流である。水面上に風が吹くと、気液間の摩擦によって吹送流が生じる。境界層乱流で高速および低速流体が並ぶストリーク構造が存在するように、吹送流でも水面上で主流速のストリーク構造が形成される。これまでの海洋観測や室内実験によって、低速ストリークから高速ストリークに流体塊が輸送されることが知られている。高速ストリークに集まった流体塊は連続式を満たすべく下降流となる。一方で、低速ストリークでは上昇流となり、縦渦であるラングミュアー循環流が形成されと考えられている。

海洋や湖沼などでは低速ストリークから高速ストリークに流体塊が輸送されることに伴い、浮遊砂や海藻などの物質が高速ストリークに堆積する。アメリカの化学者 Langmuir(1938)¹⁾がニューヨーク州のLake Georgeで海藻などが堆積したストリーク構造を野外観測して、その結果を1938年に科学雑誌Scienceで発表したことからラングミュアー循環流という名前が定着した。

Langmuirによる大規模2次循環流の発見以降は、その発生機構や存在条件に着目した理論的研究が先行している。例えば、ラングミュアー循環流の発生機構について

最も有力なものがCL2機構であり、これは Craik(1977)²⁾と Leibovich(1977)³⁾によって提唱された。CL2機構は波とせん断流の非線形相互作用によって縦渦生成を説明するものである。

1970年代後半からは Faller&Caponi(1978)⁴⁾や Mizunoら(1992)⁵⁾(1998)⁶⁾などが実験的な考察を行っている。例えば、Faller&Caponi(1978)⁴⁾は風洞水槽で風波を発生させ、表層と底層の流れを可視化してビデオ撮影した。その結果、表層と底層のどちらにもストリークが確認され、ストリーク間隔が水深に依存することを見出した。Mizuno & Cheung(1992)⁵⁾は風洞水槽でラングミュアー循環流を発生させて、3成分電磁流速計と3成分超音波流速計を用いて点計測を行った。彼らは流速分布の空間的な偏差をラングミュアー循環流による効果と見なし、せん断応力に対する縦渦の寄与特性を考察した。更に運動量輸送が半水深領域で卓越することを実験的に示した。また Mizunoら(1998)⁶⁾は室内実験結果から、1対の縦渦が圧力勾配と側壁効果によって支配されていることを示し、アスペクト比が小さい場合には2つのCLモデルとは異なる生成機構が存在することを報告した。更に松永ら(2002)⁷⁾らは水深を系統的に変化させ、水平面の流速ストリーク構造を可視化し、循環流の生成には波の役割は大きくない可能性があることを示唆した。

表-1 実験条件

H (cm)	U_a (m/s)	U_s (cm/s)	U_* (cm/s)	f_p (Hz)	H_s (cm)	H_s/H	y_L/H
20	7.78	39.6	3.35	2.05	4.61	0.23	0.15
							0.30
							0.45
							0.60
							0.75
							0.90

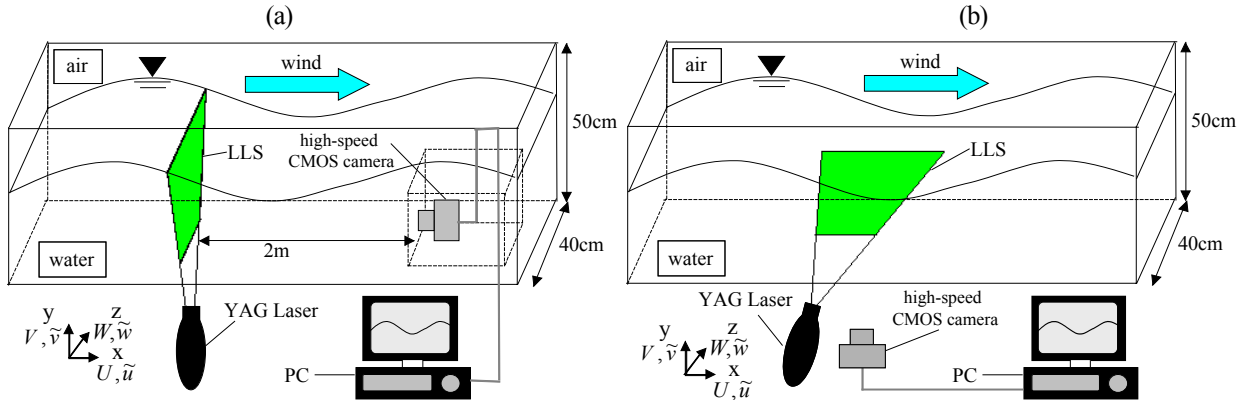


図-1 実験装置図 (a: 横断面計測, b: 水平面計測)

最近では、山上ら(2009)⁸⁾はラングミュアー循環流が発生する水理条件下における横断面内の2次流分布を、2次元PIV計測データに連続式を適用して間接的に計算した。しかし、これでは時間平均された横断面の2次流分布の情報は得られるが、瞬間的な渦の発生および発達特性は解明できない。

CO₂の吸収や赤潮・青潮の集積など海洋や湖沼等の水環境問題を詳しく検討するためには、3次元的な物質輸送メカニズムを把握することが必要である。そこで本研究では特殊PIVを用いて風波を伴う閉鎖性水域の乱流計測を行い、ラングミュアー循環流の3次元的な構造を考察する。また、位相解析を行い波の位相ごとのラングミュアー循環流の特性も解明する。

2. 実験方法と解析手法

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風洞である。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て湖沼のような閉鎖性水域を再現した。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。水路は側面および底面ともに強化ガラス製である。図中の x は流下方向座標である。 y は水路底面を原点として水面側に向かう鉛直座標である。 z は水路のセンターラインを原点として水路の左岸側に向かう横断座標である。 U, V および W はそれぞれ x, y および z 方向における時間平均流速であり $\tilde{u}, \tilde{v}$ および $\tilde{w}$ はそれぞれ瞬間流速を示す。計測部は水路上流端より約7m下流で行われた。

水路下流端には消波板を設置し反射波による流体の振動乱れを抑制した。流速の計測には以下のPIVを用いた。

図-1(a)は横断面計測の装置図であり、水路を断層するように4Wの連続YAGレーザーを水路の横断面にシート状（レーザーライトシート、以下LLS）に4mmの厚さで照射した。水面変動による影響を避けるためにLLSの出射レンズはガラス製の水路底から入射した。LLS上のトレーサー粒子（100 μ m径、比重1.02のポリスチレン）をLLSより2m下流の水路内に設置した高速度CMOS小型カメラによって撮影した。流れに小型カメラの及ぼす影響がほぼ無視できることを予備実験で確認した。100Hzのフレームレートで2画像を連続撮影した。この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鉛直方向と横断方向の瞬間流速成分（ $\tilde{v}, \tilde{w}$ ）を計算した。

図-1(b)は水平面計測の装置図であり、4Wの連続YAGレーザーを水路の側壁からシート状に照射した。また、高速度CMOSカメラは水路底側にセットし、輝度相関法によって瞬間流速成分（ $\tilde{u}, \tilde{w}$ ）を50Hzの時間間隔で計測した。

表-1は実験条件である。水深 H は20cmで、アスペクト比をMizunoら(1992)⁹⁾と同じ2.0に合わせた。水面形状が2次元重力波になる風速（ $U_a = 7.78$ m/s）で実験を行った。風速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。 U_s は自由表面におけるストークスドリフト値であり、30サンプルのフロート計測から求めた。 U_* は水側の界面摩擦速度で対数則より評価した。

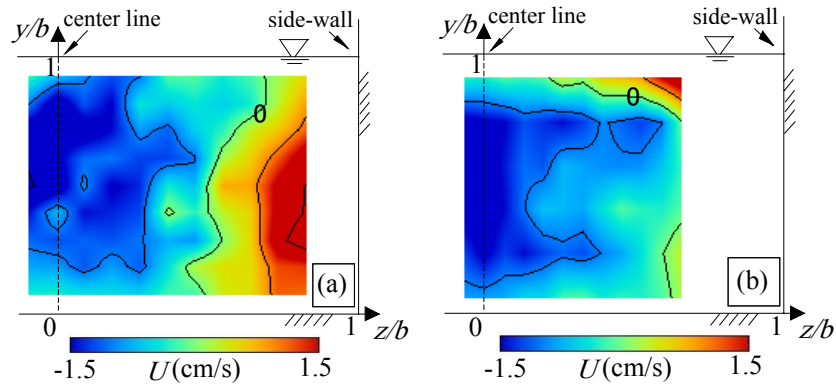


図-2 横断面の U コンター (a: LDA計測, b: PIV計測, 風は裏から表の方向に吹く)

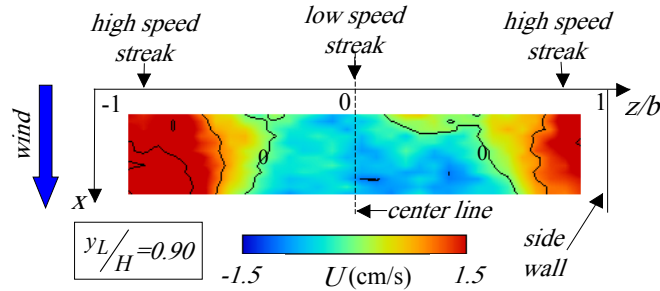


図-3 ストリーク構造

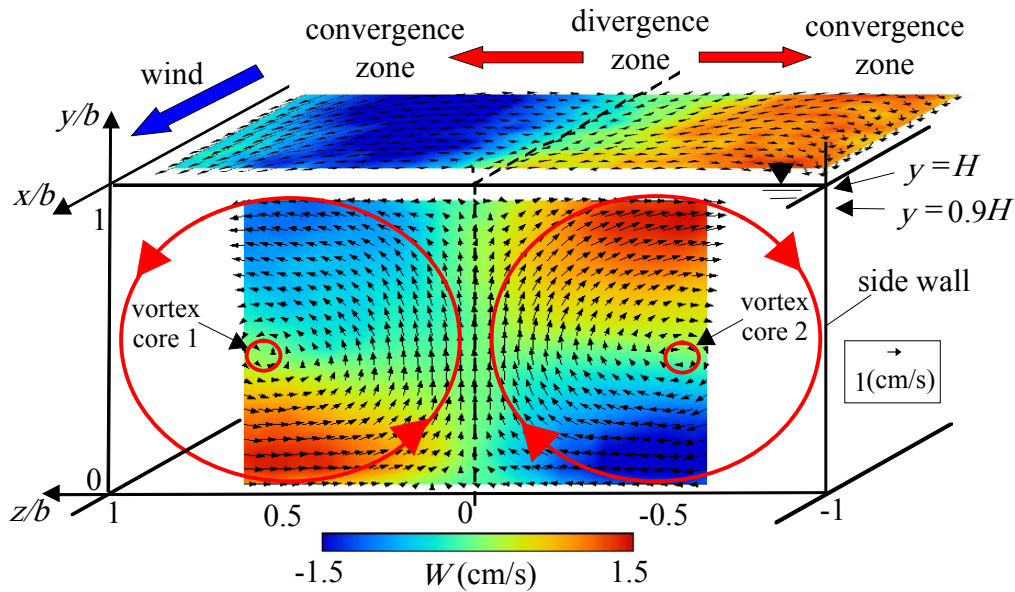


図-4 ラングミュアー循環流の三次元構造

f_p は波の卓越周波数, H_s は有義波高であり容量式波高計から求めた. y_L は水平面計測でのLLSの照射高さであり, 6通りに変化させた.

3. 実験結果

(1) 時間平均流速分布

図-2は時間平均した主流速の横断面コンターを示す. 図-2(a)はLDA計測, 図-2(b)はPIV計測したものであり, PIV計測の精度検証のために両者の結果を表示した. ここで, $b = B/2$ は水路半幅である. 水路中央では逆流

($U < 0$)が発生していることがわかり, 一方, 側壁付近では順流($U > 0$)になる. この傾向はMizunoら(1992)⁵⁾の結果とも一致する. なお, 側壁近傍でPIVデータが欠落するのは水路のフレームによって死角になるからである.

図-3は水面に最も近い計測面 $y_L/H = 0.9$ におけるPIVによる時間平均主流速の水平面コンターを示す. 水路中央では低速ストリーク, 側壁付近では高速ストリークが観察できる. 松永ら(2002)⁷⁾など既往研究の多くではストリーク構造を通じてラングミュアー循環流の存在やその発生数を考察しており, 本研究でも風波下でストリーク構造が確認でき, ラングミュアー循環流が発生し

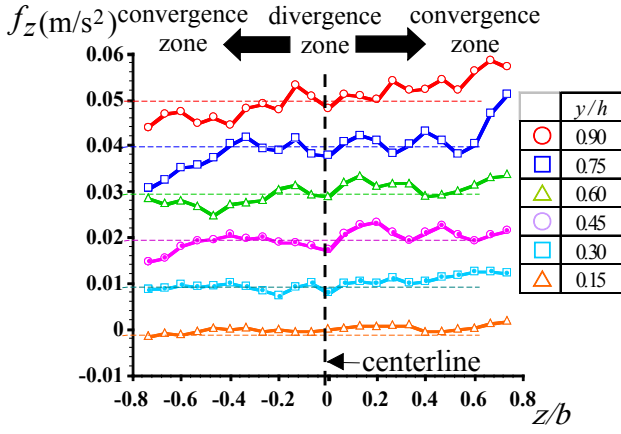


図-5 ストークスドリフトによる付加応力

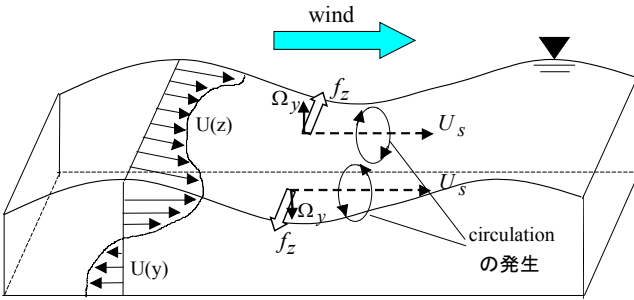


図-6 CL2機構の模式図

ていると予測される。

図-4はラングミュア循環流の三次元的な構造を立体的に示す。水平面の図は $y = 0.9H$ における時間平均されたベクトル(U, V)とコンター(W)である。横断面の図は時間平均されたベクトル(V, W)とコンター(W)である。水平面の図より、水路中心部でdivergence zone, 側壁付近でconvergence zoneが存在している。これより、流体は赤矢印に示されるように水路中心部より左右の側壁部分に輸送される。横断面の図より一対のラングミュア循環流が確認できる。また、水平面と横断面の W の分布は良好に一致し、図-1(a)の特殊PIVの有効性が確認できる。各循環流における中心部の赤丸部分では渦コア(vortex-core)が明確である。後述の解析のために左をvortex-core 1, 右をvortex-core 2とする。これより、風波下の流体運動は2次循環流に似た構造をしていることがわかった。

(2) Craik-Leibovich方程式における付加応力の評価

Leibovich(1977)³⁾はストークスドリフト U_s によって発生する付加応力を式(1)として運動方程式に加えた。この応力を考慮した運動方程式(Craik-Leibovich(CL)方程式)からラングミュア循環流の生成が説明できる。

$$f = U_s \times \Omega \quad (1)$$

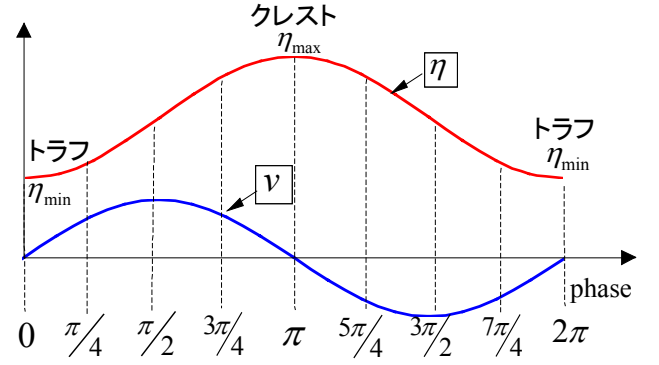


図-7 位相の定義

横断方向の付加応力を計算するために、渦度の y 成分を式(2)のように近似すると式(1)は式(3)に単純化できる。

$$\Omega_y = \partial U / \partial z - \partial W / \partial x \cong \partial U / \partial z \quad (2)$$

$$f_z \cong U_s \partial U / \partial z \quad (3)$$

PIVによる流速分布結果からストークスドリフトは定義に従い式(4)で計算することができる。

$$U_s = \omega a^2 k \exp(2k(y-H)) \quad (4)$$

ここで、 ω は角振動数、 a は振幅であり、波高計のデータより $\omega = 2\pi f_p$ および $a = H_s/2$ として計算した。 $k = 1/\lambda_w$ は波数である。式(4)で得られた値を式(3)に代入することで付加応力が評価できる。

図-5は各水平面高さにおいて算出した付加応力 f_z の横断面分布を図示した(上方に0.01ずつシフトしている)。水平軸の点線は各水深に対応した色でのゼロ値($f_z = 0$)を示す。鉛直点線は水路センターラインを示す。各高さで水路中央から右側に向かって正值、左側に向かって負値をとる。この傾向は水面に近いほど顕著である。

図-6はラングミュア循環流の発生メカニズムで現在最も支持されているCL2機構の模式図である。主流速の高速および低速ストリークが交互に分布すれば、式(3)より横断方向に付加応力が発生する。この様に図-5で示した本研究より得られた結果は図-6のCL2機構と傾向が一致し、注目される。

(3) 位相解析

図-7に位相の定義を示す。 η は水面変動である。鉛直流速 v の負値から正值への遷移時刻はトラフに対応しており、この位相を0とする。同様に正值から負値への遷移時刻はクレストに対応しており、この位相を π とする。

図-8は横断面における時間平均されたベクトル(V, W)とコンター(W)である。山上ら(2009)⁹⁾により水深と

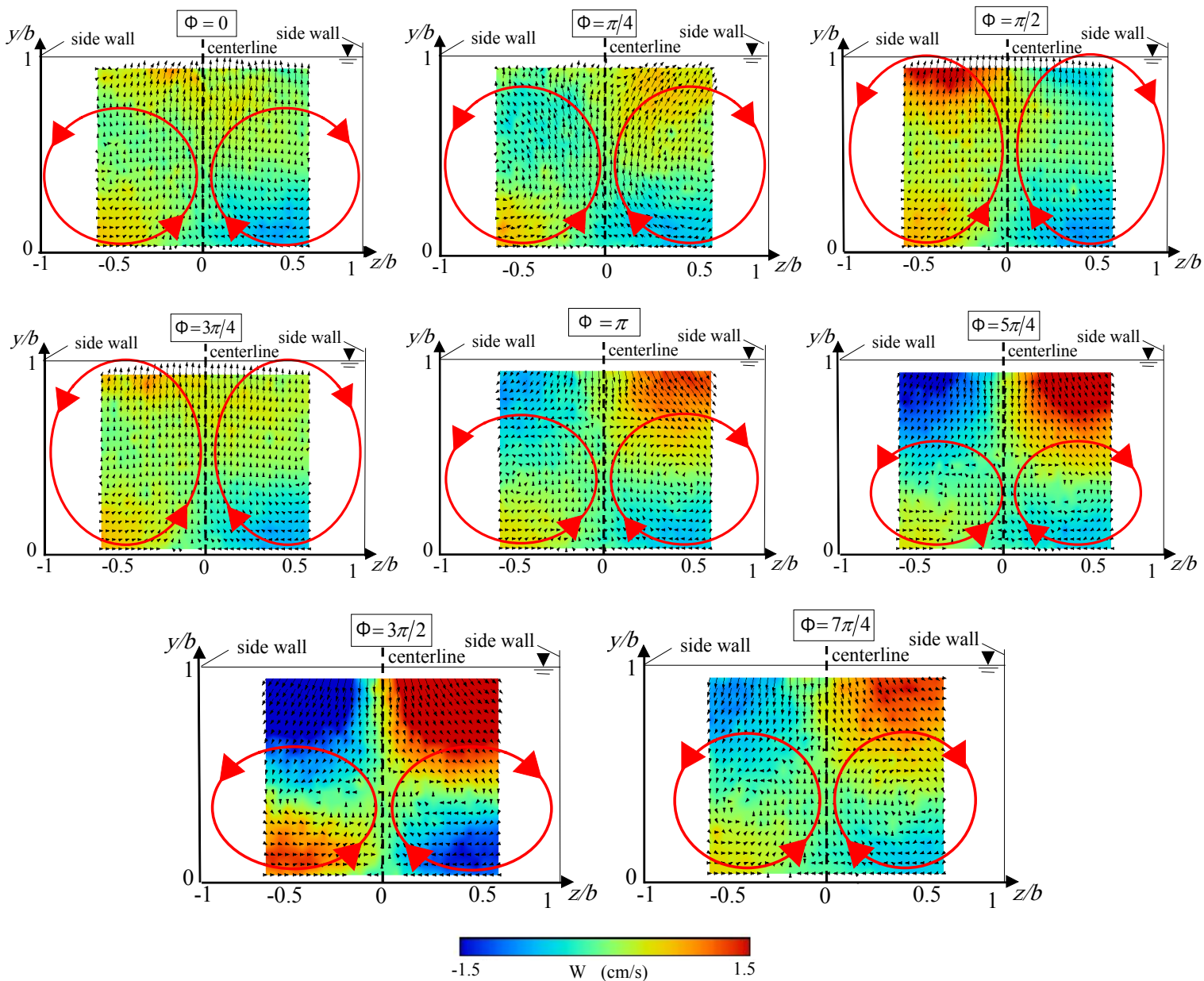


図-8 位相ごとのラングミュア循環流パターン

流速の位相には強い相関関係があり、今回の位相解析ではセンターラインの v の変動を η の位相解析の基準とした。位相解析の結果より、位相によって循環流の形状特性が異なることがわかった。波の増水時で上昇流の速度 v が最大になる $\phi = \pi/2$ ではラングミュア循環流は水面方向に引き伸ばされると同時に水面領域では流れがセンターラインに集まる傾向がある。一方、減水期で下降流の速度が最大になる $\phi = 3\pi/2$ では河床方向に押しつぶされるとともにセンターラインでは水面で流れの分散、底面で流れの集積が認められる。それ以外の位相ではこの遷移的なプロセスがされる。この様に位相解析によって、時間平均特性ではキャンセルされて考慮できない波とラングミュア循環流の関係が明らかになった。今回の横断面の直接計測によってラングミュア循環流の位

相毎の特性を理解することが可能となった。

(4) 相関解析

図-9は横断面における流速ベクトル $(\tilde{v}, \tilde{w})$ とカウンター $(\tilde{v})$ の瞬間値である。図-9(a)は上昇流の速度 v が最大になる $\phi = \pi/2$ 、図-9(b)は下降流の速度が最大になる $\phi = 3\pi/2$ における代表的な瞬間値を示す。 $\phi = \pi/2$ ではラングミュア循環流は上昇流と共に水面に向かって引き伸ばされる。一方、 $\phi = 3\pi/2$ では、水面から半水深までは下降流となっているが、それ以下ではラングミュア循環流は下降流によって圧縮されて小規模な渦が確認できた。

図-10は、図-4で示した縦渦のvortex-coreにおける流速の時系列分布の一部である。図-10(a)は各vortex-coreにお

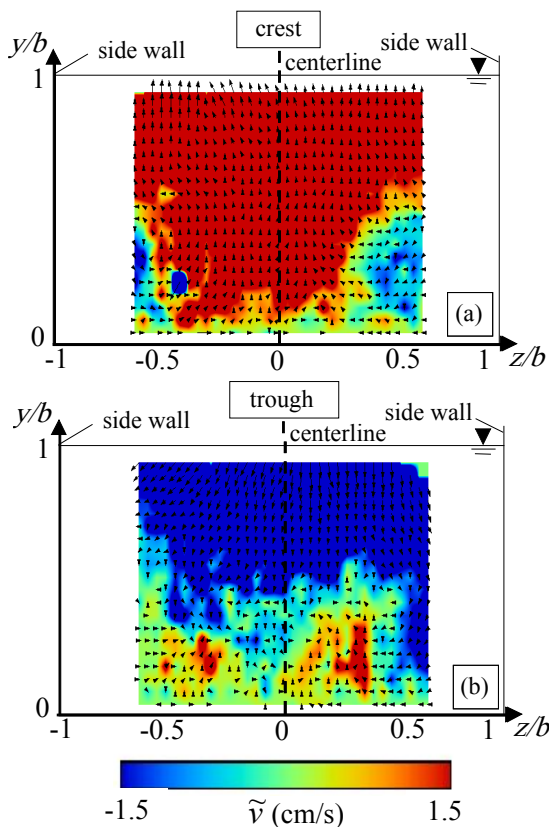


図-9 ラングミュア循環流の瞬間構造

(a: $\phi = \pi/2$, b: $\phi = 3\pi/2$)

ける横断方向流速の時系列分布であり、常に正負が逆位相であることが観察される。これは2つの縦渦が互いに反対方向に回転していることを表している。図-10(b)は各vortex-coreにおける鉛直流速 $\tilde{w}$ の時系列分布である。2つのvortex-coreの鉛直流速は同位相である。これらの結果より2つの縦渦は強い相関を持つことがわかる。

4. 結論

本研究はラングミュア循環流の3次元の構造を実験的に明らかにした。従来の水平面の計測に加えて、横断面の直接PIV計測という新しい手法を用いることで、以下の結論を得ることができた。

- (1) 水平面計測と横断面計測の結果より、ストリーク構造とラングミュア循環流の関係を示すことができた。すなわち、高速ストリークでは下降流、低速ストリークでは上昇流になった。
- (2) 実験データを用いてCL方程式におけるストークスドリフトによる付加応力を評価した。これよりdivergence zoneでは上昇流、一方convergence zoneでは下降流となることが確認され、CL2機構を支持する結果が得られた。
- (3) 波の位相ごとの横断面流速分布を評価した。その結果、ラングミュア循環流は位相によってその形状が大きく変化する。このことからラングミュア循環

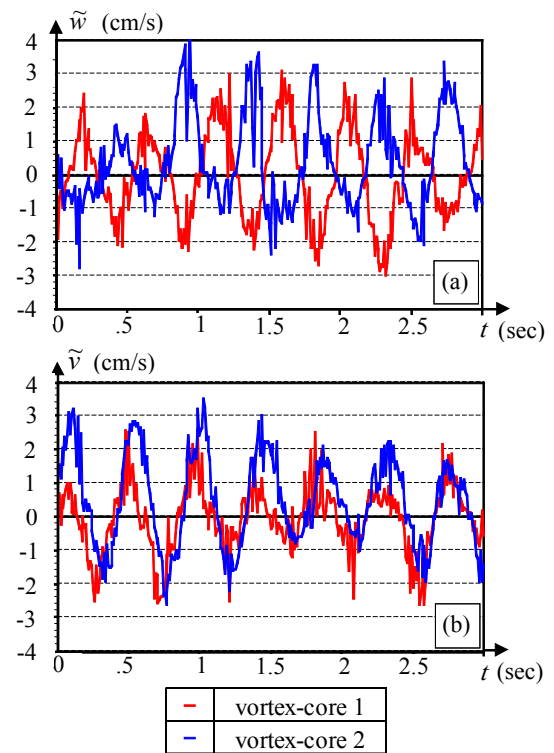


図-10 2つのvortex-coreの相関性

環流は波の存在に大きな影響を受けることがわかる。

参考文献

- 1) Langmuir, I.: Surface motion of water induced by a wind, *Science*, Vol.87, pp.119-123, 1938.
- 2) Craik, A.D.D.: The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism, *J. Fluid Mech.*, Vol. 81, pp.209-223, 1977.
- 3) Leibovich, S.: On the evolution of the system of wind drift currents and Langmuir circulations in the ocean. Part1, *J. Fluid Mech.*, Vol. 82, pp.561-581, 1977.
- 4) Faller, A.J and Caponi, E.A.: Laboratory studies of wind-driven Langmuir circulations, *J. Geophysical Res.*, Vol. 83, pp.3617-3633, 1978.
- 5) Mizuno, S. and Cheung, Z.: A pair of Langmuir cells in laboratory tank (I) Wind only experiment, *J. Oceanography*, Vol. 48, pp.37-57, 1992.
- 6) Mizuno, S., Noguchi, H. and Kimura, Y.: A pair of Langmuir cells in two laboratory tanks (II) On generation mechanism, *J. Oceanography*, Vol. 54, pp.77-100, 1998.
- 7) 松永信博・鶴崎賢一：吹送流中に生起する二次循環流の実験的研究, 土木学会論文集, No.705, pp.67-82, 2002.
- 8) 山上路生・瀬津家久・秋谷優：ラングミュア循環流の生成特性に関する実験的研究, 応用力学論文集, 第12巻, pp. 779-786, 2009.
- 9) 山上路生・瀬津家久・戸田瑛大：水面と流速の同時画像計測法による風波の乱れ構造に関する研究, 応用力学論文集, 第12巻, pp. 759-768, 2009.

(2009.9.30受付)