風波流れの発達過程と3次元構造に関する 実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DEVELOPING PROCESS OF WIND-WAVE AND THREE DIMENSIONAL FLOW STRUCTURE

小松峻也¹・山上路生²・瀬津家久³

Takaya KOMATSU, Michio SANJOU, and Iehisa NEZU

¹学生会員 京都大学修士課程 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)

³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)

Wind-induced water waves play a vital role in the mass and momentum exchange across interface between air and water. They are closely related to various scaled problems such as global warming and water environment, and it is thus important to know the flow structure of them. So, many researchers have conducted intensively theoretical, experimental and numerical studies on this flow. In particular, Langmuir circulation is well highlighted, which is a large-scale secondary current with longitudinal axis-wave. However, most of previous studies using laboratory flume could not cover the longitudinal variations of current structure which has fetch-depending properties. Therefore, in the present study, stereoscopic PIV measurements were conducted at several fetches in order to reveal the fetch dependency of three dimensional current property and related turbulence structure.

Key Words : wave developing process, Langmuir circulation, fetch-depending property and wind-induced waves

1. はじめに

風が吹くところで立つ波は「風波」と呼ばれ、これは空気と水の界面の摩擦力が生じることにより発生する。海洋や湖沼上の風波は空気層と水層の物質や運動量交換、ガス交換を促進し、水の内部構造に大きな影響を及ぼすことが知られている。そのため、風波によって発生する流れ(以下、風波流れとする)の解明は、地球温暖化、水層環境、水性生態系への影響といった環境問題と密接するきわめて重要な研究テーマといえる。特に地球規模のスカラー循環過程において、大気、海洋間の運動量やエネルギー、ガス輸送現象や風波内部および界面付近の乱流構造の評価が不可欠であり、多くの研究者や技術者の関心を集めている。

風波流れにはラングミュア循環流と呼ばれる風下方向に軸をもつ大規模2次循環流が発生し、風波内部の水層内の物質や気体の混合や拡散を促進し、水中環境問題に大きく影響することが知られている。Tejada-Martinez et al.¹⁾はLESを用いてラングミュア循環流がガス交換速度に与える影響を考察した。特にラングミュア循環流の強度が増加するにつれて、ガス交換速度も増加し、またラングミュア循環流のない風による流れと比較する

と交換速度が60%増加することを指摘している。このラングミュア循環流はLangmuir(1938)²⁾がニューヨーク州のLake Georgeで海藻などが収束したストリーク構造を野外観測し、その結果を科学雑誌Scienceで発表し、この名前がついた。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風波流れでも水面上で主流速のストリーク構造が形成される。低速域から高速域に流体塊が輸送され、高速域に集まった流体塊は下降流、低速域では上昇流となり、縦渦であるラングミュア循環流が形成されると考えられている。ラングミュア循環流の発生機構について最も有力なものがCL2機構で Craik(1977)³⁾と Leibovich(1977)⁴⁾によって提唱された。

ラングミュア循環流に関する研究は、実験的にも多く行われており、例えば、Faller&Caponi(1978)⁵⁾は風洞水槽で風波を発生させ、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指摘している。Mizuno&Cheung(1992)⁶⁾は風洞水槽でラングミュア循環流を発生させ、流速分布の空間的な偏差をラングミュア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。Mizuno et al.(1998)⁷⁾は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

表-1 実験条件

x (m)	H (cm)	B/H	U_a (m/s)	U_s (cm/s)	U_* (cm/s)	H_s (cm)	f_p (Hz)	λ_w (cm)	T_a (°C)	T_w (°C)
2	13.3	3	8.33	22.64	1.73	1.48	2.96	16.24	24.0	23.8
4			8.52	24.59	1.78	1.92	2.78	21.95	25.1	24.0
6			8.82	27.11	2.24	2.85	2.56	23.90	24.6	24.2
8			9.52	28.63	2.18	3.09	2.20	27.95	24.3	23.0
10			7.98	27.99	2.23	3.66	1.98	27.90	26.6	27.3

図-1 実験装置図

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。松永・鶴崎(2002)⁸⁾は水深を系統的に変化させてストリーク構造を可視化した。また風波の発達を抑えた場合の流れを考察し、波がなくても循環流が形成されることを指摘した。山上ら(2011)⁹⁾はラングミュアー循環流の形成を渦度方程式を用いて考察し、渦度方程式のクロスレイノルズ項と非等方性項が卓越してセル形成を誘起することを提案した。

このように風波の流れ構造に関しては数多くの研究がなされているが、風波は吹送距離によって大きく変化し、吹送距離が大きいほど、風波が発達して波高も大きくなることは明らかである。しかしながら、これまでの風波流れの研究では吹送距離を変化させて流れ構造を比較することはあまり行われておらず、関連する知見も十分得られているとはいえない。そこで本研究では複数の各吹送距離における流速計測を行い、風波の発達と流れ構造の変化についての関係性を検討する。

2. 実験方法と水理条件

図-1は本実験で使用した実験装置図と計測システムである。使用した水路は全長12m、幅40cm、高さ50cmの可変勾配型風洞付き開水路である。水流部は循環式であり、今回は循環パイプのバルブを完全に閉め、湖沼のような閉鎖性水域を再現した。水路は側面および底面ともに強化ガラス製である。水路上流部にはインバータモーターで駆動する大型ファンが取り付けられており、ファンを稼働させて水層上に風を吹かせることで風波を発生させた。下流端には消波板を設置し、反射波による流れの乱れを抑制した。 x は最上流側を原点として主流方向に、 y は水路底面を原点にして鉛直上向きに、 z は水路中央を原点として主流方向に対して左岸方向にそれぞれ正となるようにした。 U, V, W はそれぞれ x, y, z 方向に対応

図-2 波の特性

する時間平均流速であり、 $\tilde{u}, \tilde{v}, \tilde{w}$ は対応する瞬間流速を、 u, v, w はそれぞれ時間平均値からの変動である。

計測手法に関しては、最大出力4Wの連続YAGレーザーを水路横断面にシート状(レーザーライトシート, LLS)に4mmの厚さで水路側壁側から照射し、2台の高速CMOSカメラ(Ditect)を用いてステレオ撮影し、LLS上の流速3成分を計測した。カメラ光軸間角度は 90° になるようにカメラを設置した。本研究では風波流れの発達過程を考察するので、LLSの照射断面位置を上流から下流へと移動させ、それぞれの位置で計測を行った。計測位置は後にも述べるが、最上流位置から2, 4, 6, 8, 10m離れた横断面位置とした。水中にはトレーサー粒子($100\mu\text{m}$ 径、比重1.02のポリスチレン粒子)を十分に混入してLLSで可視化し、100Hzのフレームレートでそれぞれ2画像を連続撮影し、25Hzのサンプリングレートで制御PCに記録した。1回の計測時間は120(s)である。

表-1は実験条件を示す。 x はLLSの照射位置(計測断面位置)を示しており、既述したように、本研究では風波の発達過程を考察するため、計測位置を $x = 2, 4, 6, 8, 10$ (m)と変化させ、それぞれの位置で計測を行った。 H は水深、 B/H は水槽のアスペクト比であり、今回は全ケースで統一した。 U_a は空気層での流速を表し、全ケースにおいてファンを最大にした。 U_s は自由表面におけるストークスドリフトである。 U_* は水・空気界面における水側の摩擦速度で、対数則より評価した。 H_s は有義波高で容量式波高計の時系列データから求めた。 f_p は波の卓越周波数であり、波高計データで得られた水位信号をFFT解析することで求めた。 λ_w は波長である。 T_a, T_w はそれぞれ空気層、水層での温度を表す。

3. 実験結果

(1) 波の特性

図-2に主流方向における有義波高分布と波の卓越周波数分布を示す。縦軸に有義波高を水深で無次元化したものと卓越周波数を取り、横軸は水路長 L で無次元化した主流方向位置 x を示す。この結果から明らかなように、下流ほど有義波高が増加し、風波が発達することがわかる。また、卓越周波数も下流側ほど減少し、主流方向に伸張した、すなわち波長の大きな風波になることが示唆される。また、 $x/L \geq 0.75$ では有義波高や卓越周波数ともにほぼ一定となり、風波がこの領域で十分に発達していることが理解できる。

(2) 各吹送距離における時間平均流構造

図-3に各吹送距離における流速全3成分に関する時間平均流速横断面図を示す。流速は時間平均流速横断面ベクトル(V, W)とコンターに時間平均主流速 U の3成分を5つの吹送距離について示した。縦軸に底面を原点とした鉛直方向を、横軸に水路中央を原点とし、左岸側を正にとった横断方向をそれぞれとり、ともに水路半幅 $b (=20\text{cm})$ で無次元化した。また、各横断面図内にある黒色の線上は主流速がゼロの値であることを示している。赤色の縦、横の点線はそれぞれ、 $z/b = 0, y/b = 0.67$ の直線を表す。なお、今回の計測はトラフ以下の水層の流速に焦点を当てているため、 $y/b = 0.67$ の赤色の点線よりも少し下は空白になっている。これらの横断面図から、 $x = 2, 4, 6, 8, 10$ (m)のケースすべてにおいて、横断面の流れ構造の変化は小さく、水路中央を軸に対称な循環流が形成されており、側壁付近で下降流が発生し、主流速が大きく、逆に水路中央で上昇流が発生し、主流速が小さいことがわかる。既往研究では本研究のような風波流れの横断面計測が行われているが、計測断面が最上流位置から十分離れて十分風波が発達した位置がほとんどであるため、今回の結果のように吹送距離ごとの流速構造の比較については新しい試みといえる。フェッチ距離2mの地点ですでに大規模な2次循環流が形成されることは大変興味深い。以上のように風波の発達距離に関係なく循環流が形成されることがわかった。松永・鶴崎(2002)⁸⁾は風波の発達を抑えた場合でも循環流が形成されることを指摘しており、本結果は彼らの指摘に矛盾しないといえる。一方で主流速の大きさや主流速ゼロの線のフェッチ間の差異も無視できない。そのため、次節以降ではこの点を詳細に考察する。

図-3 各吹送距離における3次元時間平均流速横断面図

(3) 各吹送距離における時間平均鉛直分布

図-4に各吹送距離 $x = 2, 4, 6, 8, 10$ (m)における水路センターライン位置 ($z/b = 0$)の時間平均主流速鉛直分布を示す。縦軸に水深 H で無次元化した鉛直方向 y をとり、横軸に時間平均主流速 U をとり、それぞれのケースにおける水側の摩擦速度 U_* で無次元化した。それぞれのフェッチにおいて、底面側で逆流が強く水面に近づくにつれて主流速が増加しており、同様の分布形状をもつことがわかるが、 $y/H = 0.7$ あたりに注目すると、下流ほど主流速が小さいことが伺える。これは風波が発達する下流ほど波高が増大し、高速流層も大きくなるため、連続式から考えて、トラフ以下の主流速が小さくなったためと予想される。

(4) 各吹送距離における時間平均流速横断面分布図

図-5に各吹送距離 $x = 2, 4, 6, 8, 10$ (m)における高さ

$y/H = 0.4$ での時間平均主流速横断分布を示す。横軸に水路半幅 b で無次元化した横断方向 z をとり、縦軸に時間平均主流速 U をとり、それぞれのケースでの水側の摩擦速度 U_* で無次元化した。なお、黒色の点線はそれぞれのケースでの主流速がゼロである位置を表しており、白抜サークルは主流速がゼロとなる箇所を示す。なお、縦軸のメモリは0.4の値の間隔にとっている。この結果から、5つのフェッチとも水路中央で負の主流速で、両側壁付近で正の主流速となることがわかるが、下流ほど主流速のゼロ位置が側壁付近に近づくことが理解できる。すなわち、下流の方が負の主流速層の幅が大きいといえる。この結果からも、3. (3) で述べたように風波の発達によって水面付近の高主流速層が大きくなり、トラフ以下では逆に負の流速層が大きく占めるようになると考えられる。また今回は示していないが、トラフ近傍 ($y/H = 0.8$) や底面付近 ($y/H = 0.1$) でも、 $y/H = 0.4$ とほぼ同様の結果が得られた。

(5) 各吹送距離における乱れ特性

図-6に各吹送距離 $x = 2, 4, 6, 8, 10$ (m)における水路中央位置での流速3成分の乱れ強度分布を、図-7に水路中央位置での乱れエネルギー分布を示す。縦軸に水深 H で無次元化した鉛直分布 y を、横軸に流速3成分の乱れ強度と乱れエネルギーをとり、それぞれのケースにおける水側の摩擦速度 U_* を用いて無次元化した。乱れエネルギーは以下のように定義できる。

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right) \quad (1)$$

図-4 各吹送距離における時間平均流速鉛直分布図

図-5 各吹送距離における時間平均流速横断分布図

これらの結果から、3成分乱れ強度や乱れエネルギーともに水面に向かうに従って大きくなり、松永ら(2002)⁸⁾の結果と一致する。また下流のケースほど、乱れ強度や乱れエネルギーが大きくなることがわかり、風波が発達するとともに乱れ強度や乱れエネルギーが大きくなることを確認できる。底面付近における鉛直方向の乱れ成分

(a)

(b)

(c)

図-6 各吹送距離における乱れ強度分布

(a) 主流成分, (b) 鉛直成分, (c) 横断成分

に関しては、主流速や横断流速と比較してフェッチ間の差異が小さいが、これは底面付近の鉛直流速が他の流速成分と比べて小さいことに起因する。さらに、 $x=8$ (m) と $x=10$ (m) のケースでは比較的近い値をプ

図-7 各吹送距離における乱れエネルギー分布

ロットしており、この2ケース間での増加は目立たないことがわかるが、図-2の結果から $x/L \geq 0.75$ で風波が十分に発達したことを考えると、この2ケースでのフェッチ間での風波の発達がほとんどないために乱れの増加も小さくなっているのではと考えられる。主流速、鉛直流速、横断流速それぞれの乱れ強度を比較すると、どの鉛直方向においても主流速方向よりも鉛直流速方向、横断流速方向の乱れのほうが強いことがわかり、これは風波流れによる横断面の循環渦構造により、横断方向流れの乱れが大きくなっているということが考えられる。

4. おわりに

本研究では風波流れにおける3次元流れ構造について室内水理実験によって調べ、吹送距離の増加による風波流れの発達とそれによる流れ構造や乱れ特性の違いについて考察した。以下に本研究の結論を述べる。

- 1) 吹送距離を変化させたときの全3成分の時間平均横断面構造について比較したところ、いずれの吹送距離においても、循環流が生成されることがわかった。
- 2) 吹送距離を変化させたときの水路中央での時間平均主流速鉛直分布について比較してみたところ、どのケースも底面側で逆流が強く、水面に近づくにつれて主流速が大きくなっているが、 $y/H = 0.7$ あたりに注目すると、下流側のケースほど主流速が小さいことがわかった。
- 3) 各吹送距離での時間平均主流速横断分布について比較したところ、水路中央で負の主流速で、両側壁付近で正の主流速となっているが、下流ほど、負の主流速層の幅が大きいことがわかった。

- 4) 吹送距離を変化させたことによる乱れ強度と乱れエネルギーの大きさの違いについて比較したところ、水面に向かうに従って大きくなるとともに、下流ほど、乱れ強度や乱れエネルギーが大きくなっていることがわかった。

なお、本研究では実験的考察が中心であるため、今後は理論的考察も行い、本計測結果を十分に比較および検証し、風波流れの普遍的な流れ構造の解明へつなげていきたいと考えている。また、本研究では吹送距離の違いによる3次元乱流構造の変化を中心に見ており、今後はラングミュア循環流の形成特性の吹送距離依存性を考察し、湖沼などの実フィールドにおける大規模循環流現象との対応を研究していく予定である。

謝辞

本研究は科研費(基盤研究(C)、課題番号23560609、代表：禰津家久)による助成の下で遂行された。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Tejada-Martinez, A.E, Akan, C and Grosch, C.E.: Mass transfer at the surface in LES of wind-driven shallow water flow with Langmuir circulation, GAS TRANSFER AT WATER SURFACES 2010, pp.177-192, 2010.
- 2) Langmuir, I.: Surface motion of water induced by a wind, *Science*, Vol.87, pp.119-123, 1938.
- 3) Craik, A.D.D.: The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism, *J.Fluid Mech.*, Vol.81, pp.209-223, 1977.
- 4) Leibovich, S.: Convective instability of stably stratified water in the ocean, *J.Fluid Mech.*, Vol.82, pp.561-581, 1977.
- 5) Faller, A.J. and Caponi, E.A.: Laboratory studies of wind-driven Langmuir circulations, *J.Geophysical Res.*, Vol.83, pp.3617-3633, 1978.
- 6) Mizuno, S. and Cheung, Z.: A pair of Langmuir cells in laboratory tank (I) Wind only experiment, *Oceanography*, Vol.48, pp.37-57, 1992.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 山上路生, 禰津家久, 小松峻也: 3台同時カメラ計測法によるラングミュア循環流の形成特性に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.67, No.3, pp.121-132, 2011.

(2012. 9. 30受付)