

吹送流中の二次循環流形成に果たす風波の役割

松 永 信 博*・鶴 崎 賢 一**・浦上由紀子***

1. 緒 論

ラングミュア循環流は、海洋や湖沼における風成循環のひとつとして古くから研究がなされてきた。この循環流は、吹送流中に生起する風の吹送方向に軸を持つ二次循環流であり、その水面近傍の収束流によって、気泡や海藻などの浮遊物が水面に何本もの規則的な筋を描くことが知られている。ラングミュア循環流の形成機構については、これまで幾つもの説が提案されてきた。今日では、波と流れの相互作用に基づく CL II 機構が有力視されているが、未だ検証が十分とは言えない (Leibovich, 1983)。Li & Garrett (1993) は CL II 機構に従って数値計算を行い、1 対の渦の形成を再現したが、他の観測例や実験結果との比較検討などは行っていない。近年、灘岡ら (1997) は、数値計算によってシア不安定による形成機構を提案した。このように、ラングミュア循環流の形成機構は未だ完全に解明されたとは言えないのが現状である。ラングミュア循環流は、その発生を予測することが難しく、計測自体も困難であることから、現地観測から有用な知見を得ることは困難である。Leibovich (1983) も、この二次循環流の特性を把握し、その形成機構を明らかにするためには理論と系統的な水理実験による研究が重要であると指摘している。ラングミュア循環流に関する水理実験は意外に数少ないが、Faller & Caponi (1976) や水野ら (1992, 1998) による研究が挙げられる。Faller & Caponi (1976) は幅の広い平面水槽を用いて可視化実験を行い、CL II 機構に基づいてその実験結果をまとめたが、最終的な二次循環流の波長が水深によって規定されることにひとつの疑問を呈している。また水野ら (1992, 1998) は、1 対の二次循環流について流速計測実験を行い、CL II 機構は支持するものの、幅の小さい水槽ではその形成において側壁などの水槽壁面の影響が大きいと述べている。そこで、著者らは風洞水槽を用いて可視化実験と計測実験を行ない、吹送流中に形成される循環流の特性を調べた (松

永ら, 1998; Uzaki et al., 2000)。その結果、二次循環流の波長は風波のパラメータに依存せず、水深に比例することが明らかとなった。この結論は Craik & Leibovich による CL II 機構に疑問を投げかけるものである。そこで本研究では吹送流中の二次循環流の形成に果たす風波の役割について明らかにするため、風波が十分発達した場合と風波の発達を抑えた場において実験を行なった。そしてその形成機構について検討した。

2. 可視化実験

2.1 実験手法ならびに実験条件

実験には、観測部の長さ 5 m, 幅 1.2 m, 高さ 0.4 m の風洞水槽を用いた。可視化のトレーサーにはコンデンス・ミルクを用いた。可視化手法の詳細については前報を参照されたい。静水時に、水槽の横断方向にトレーサーの線を引き、これを静水線とする。その位置は水槽の風下端から 1.8 m 風上側であった。図-1 に水槽ならびに実験の概要を示す。実験は、風波を伴う場合および界面活性剤を用いて風波を抑えた場合について行われた。そして、水深 h を前者で 4 通り、後者で 2 通り変化させた。実験条件を表-1 に示す。風速の測定は、ペーン式風速計、波高の測定には容量式波高計を用いて、静水線上の水槽中央部において行われた。水の摩擦速度 u_{*w} は、風速の鉛直分布に対数則を適用し、 $\rho_a u_{*a}^2 \cong \rho_w u_{*w}^2$ として算出された。ここで u_{*a} : 空気摩擦速度、 ρ_a : 空気の密度、 ρ_w : 水の密度である。表中、 B は水槽幅、 S は安定して形成されるトレーサーの筋の間隔である。 η_{rms} は水位変動の rms 値である。 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ は 1/3 有義波高、1/3 有義周期である。

2.2 実験結果ならびに考察

図-2(a)~(d)に、Run 1~4 における実験結果を示す。水面に作用させた風応力の方向は、図中に矢印で示すように上から下である。静水線の長さは水槽幅に対応している。(c) や (d) に認められるように、水深が小さい場合、水平二次循環流の形成によりトレーサーは水槽中央部で風下側に流されるが、それ以外は表層の吹送流に対する底面近傍の補償流によって、トレーサーは風上側に流される。そして、順に 3, 6, 12, 24 本の安定した筋が

* 正 会 員 工 博 九州大学大学院総理工 助教授
** 学生会員 工 修 九州大学大学院総理工
*** 学生会員 九州大学大学院総理工

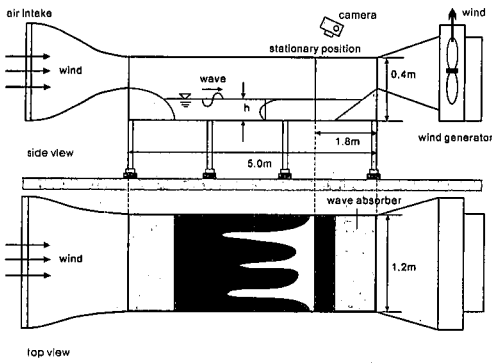


図-1 風洞水槽ならびに実験の概要

表-1 使用した衛星データ

風波を伴う場合

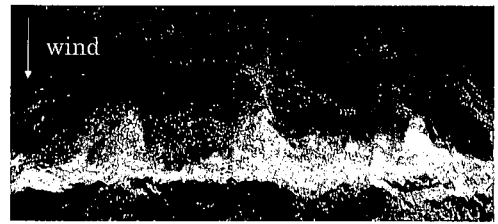
Run	h (cm)	B/h	U_m (m/s)	u_{*w} (cm/s)	S (cm)	S/B
1	16	7.5	11.5	3.81	40.0	0.333
2	8	15	8.74	1.96	20.0	0.167
3	4	30	7.86	1.26	10.0	0.0833
4	2	60	7.52	1.01	5.00	0.0417

風波を抑えた場合

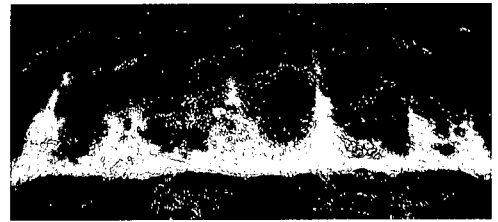
Run	h (cm)	B/h	U_m (m/s)	u_{*w} (cm/s)	S (cm)	S/B
5	16.5	7.27	9.55	0.846	40.0	0.333
6	9	13.3	9.75	1.10	20.0	0.167

波の諸元

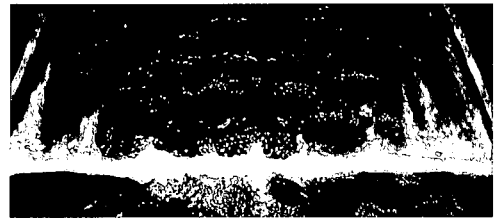
Run	η_{rms} (cm)	$H_{1/3}$ (cm)	$T_{1/3}$ (s)	c (m/s)	L (cm)	h/L
1	0.415	1.75	0.420	0.714	0.275	0.582
2	0.438	1.68	0.366	0.588	0.199	0.402
3	0.362	1.37	0.362	0.476	0.149	0.269
4	0.297	1.12	0.245	0.476	0.0905	0.221
5	0.0278					
6	0.0389					



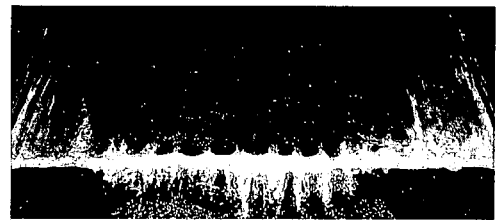
(a) Run 1



(b) Run 2



(c) Run 3



(d) Run 4

図-2 風波を伴う場合の可視化実験結果

明瞭に形成された。安定した筋状パターンが得られるまでの時間は、風応力を作用させてから 220 秒程度であった。

図に示された筋状パターンは、鉛直断面内における複数の二次循環流対の形成を示している。トレーサーは底面近傍の補償流によって風上方向に流されながら、二次循環流の底面近傍の収束流によってこうした筋を描くようになる。従って、(a)～(d)の順に 3, 6, 12, 24 対の二次循環流が形成していることがわかる。Faller & Caponi (1976) は、水深スケールの渦が形成されるまでの時間を 2～3 分と報告しており、本実験結果の形成時

間は彼らの実験結果とおおよそ一致する。また、これらの図から、安定した循環流対の数は水深によって大きく変化することがわかる。

図-3 に、Run 1 と 5 における水面変位の時系列データを示す。横軸 t (s) は風応力を作用させてからの経過時間、縦軸 η (cm) はセット・アップ面からの変位である。図から明らかなように、Run 1 では波高 2 cm 弱の水面波が形成されている。一方、Run 5 では Run 1 と比較して波高が極めて小さい。この結果は他の実験条件との比較においても同様に認められた。従って、風波を伴う実験に対し、界面活性剤を用いて風波を抑えた実験は、十分波なし状態であるとみなすことができる。

図-4(a), (b) に Run 5, 6 における実験結果を示す。水面に作用させた風応力の方向は、図中に矢印で示すよ

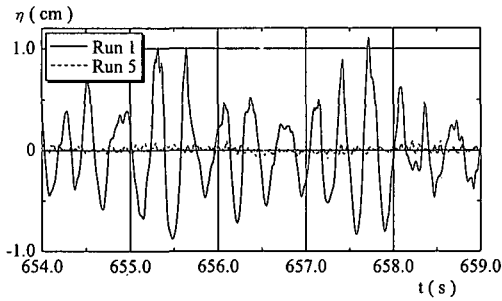


図-3 水面変位の時系列データ

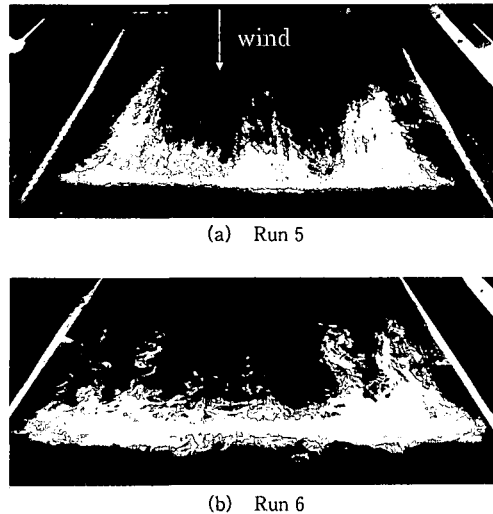


図-4 風波を抑えた場合の可視化実験結果

うに上から下である。静水線の長さは水槽幅に対応している。風波を抑えた場合には、筋状パターンが安定するまでに要する時間がやや長く、パターン自体もやや安定性に欠けるが、(a) で3本、(b) で6本の明瞭な筋が形成され、図-2(a), (b) と同様の筋状パターンが認められた。従って、風波を抑えた場合においても風波を伴う場合と同様の二次循環流が形成されることがわかった。また、その形成を示唆する筋状パターンは水深に強く依存することが認められた。

図-5に、前報も含めたこれまでの可視化実験結果における筋の間隔と水深との関係を示す。縦軸は無次元化された筋の間隔 S/B 、横軸はアスペクト比 h/B である。凡例において、水槽Nは前報で使用した幅15cmの風洞水槽、水槽Wは本報で使用した水槽である。従って、本論文の実験結果は□印と■印で示されている。この図によれば、風波を伴う場合、風波を抑えた場合、いずれの場合も S/B は h/B によって一意にまとめられる。両者の関係は簡単な線型関係で表され、最小自乗法によれば、前者は $S=2.5h$ 、後者は $S=2.0h$ 程度である。

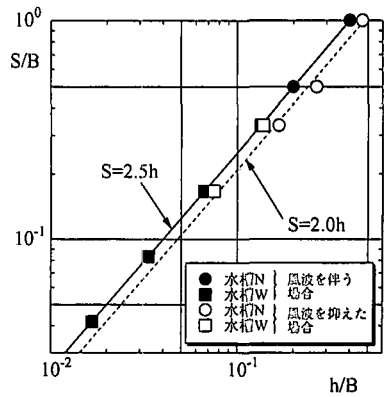


図-5 S/B と h/B の関係

この結果は、安定した筋の間隔が波や風のパラメータによらず水深のみに依存することを示している。また、筋の間隔には水槽幅も影響しないことを表している。Faller & Caponi (1976) は、実験結果から外挿して、水面波がない場合の λ_c/H の値を2.0と類推しており、本実験結果と一致する。ここで λ_c : 風向きに直角方向の二次循環流対の波長、 H : 実験水深である。

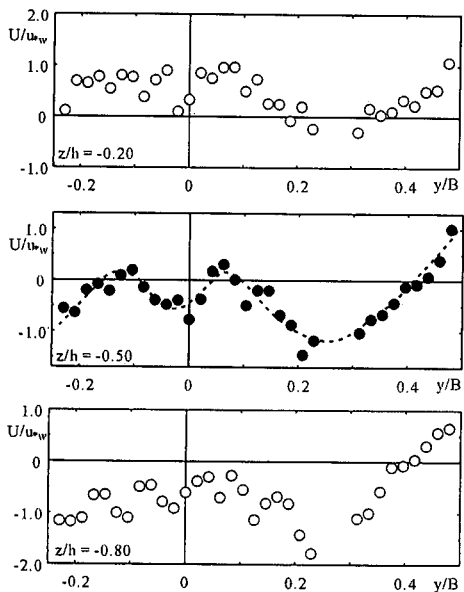
3. 流速計測実験

3.1 実験手法ならびに実験条件

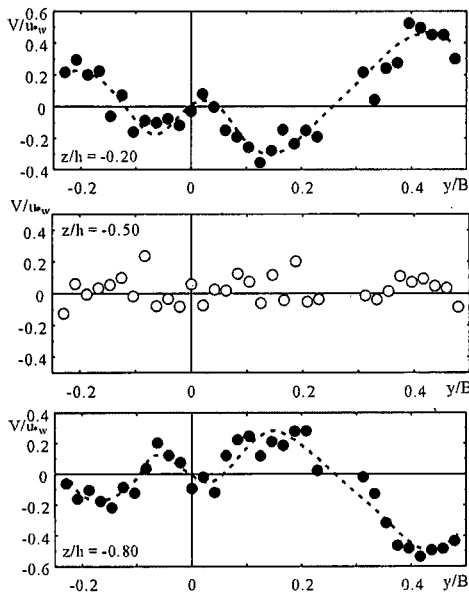
流速計測は、Run 1, 2ならびに5, 6において行われた。測定断面は、可視化実験における静水線の位置に設定された。風下方向に x 軸、静水面から上向きに z 軸を設定し、水槽中央に y 軸の原点を設定した。測定断面内において、 y 方向に2.5cm間隔で測線を設定し、各測線上で鉛直方向に9点の測定点を設定した。断面のほぼ半分にあたる $-0.25 < y/B < 0.5$ の各測定点において、二次元LDVを用い、流速の x 成分 u ならびに y 成分 v を同時測定した。サンプリング周波数は100 Hzで、21504個のデータを取得した。なお、 $0.25 < y/B < 0.29$ の範囲は、水槽の構造による欠測範囲である。

3.2 実験結果ならびに考察

図-6(a), (b)に、Run 1における表層 ($z/h = -0.20$)、中層 ($z/h = -0.50$)、底層 ($z/h = -0.80$) における平均流速の x 成分 U ならびに y 成分 V の y 方向分布を示す。(a) では、中層において $y/B = -0.12$ 付近で高速域、 -0.04 で低速域、 0.06 で高速域、 0.25 で低速域というように、 y 方向に交互に高速域と低速域が認められる。また各層とも、側壁近傍では流速が正の大きな値を示す。一方(b)では、表層と底層において正から負、負から正といった明瞭な周期性が認められる。また、側壁近傍でやや絶対値が大きくなる。 U と V の y 方向分布を比較すると、底層の V は、 U の高速域において正から負へ、 U の



(a)

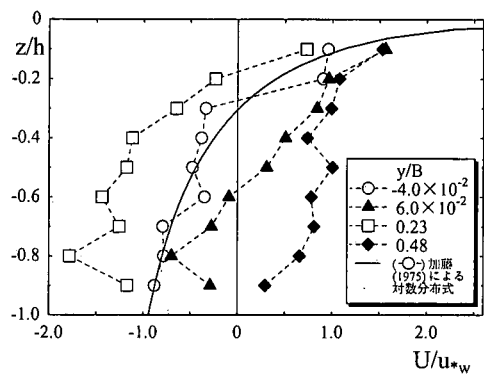


(b)

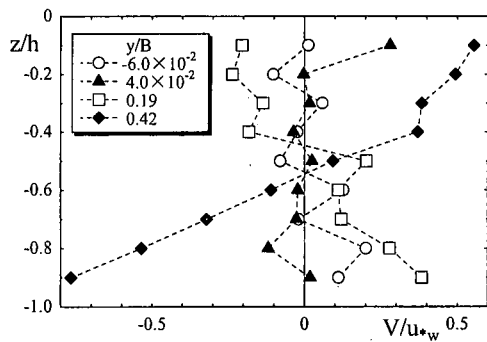
図—6 U/u_{*w} と V/u_{*w} の y 方向分布 (Run 1)

低速域において負から正へ符号が反転する傾向が認められる。表層の V はその逆である。

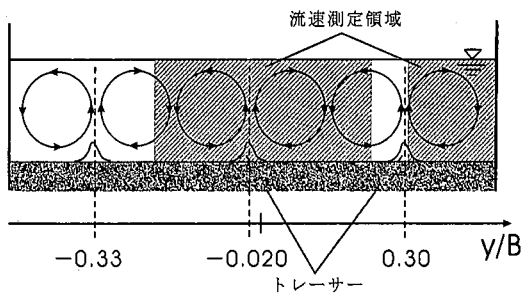
まず、前報で述べたように、 U の y 方向分布における高速域と低速域の形成は二次循環流の運動量輸送によるものである。 U の低速域で底層の V の y 方向分布が負から正へ反転することは、その位置で二次循環流の上昇流が生じていることを示している。図—2(a) の可視化実験結果から、Run 1 では 3 対の二次循環流が形成しており、



(a)



(b)

図—7 U/u_{*w} と V/u_{*w} の鉛直分布の y 方向変化

図—8 二次循環流列の模式図

筋の形成位置はおおよそ $y/B = -0.33, -0.02, 0.30$ である。これらは、 U の低速域ならびに底層の V が負から正に反転する位置とおおよそ一致する。中層での U の y 方向分布において高速域・低速域が顕著に認められることは、中層で最大鉛直流速が示されるためである。さらに、 V の y 方向の周期性が表層と底層で顕著であることから、二次循環流が水深全域にわたって形成されていることがわかる。

図—7(a) に、図—6(a) の高速域と低速域における U の鉛直分布、(b) に図—6(b) の極値における V の鉛直分布を示す。(a) における実線は $y/B = -0.04$ のデータに

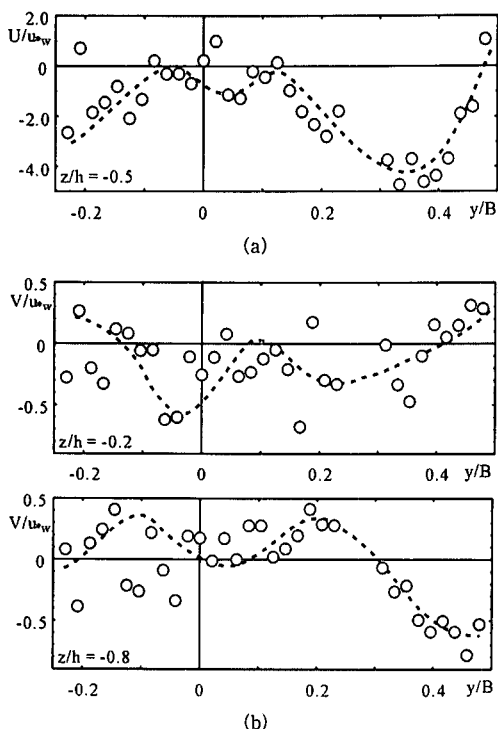


図-9 U/u_{*w} と V/u_{*w} の y 方向分布 (Run 5)

対して、対数分布式を基に最小自乗法によって得られた近似曲線である。(a)に示されるように、吹送流とその補償流の鉛直分布は横断方向に顕著に変化する。従来よく用いられる対数分布式とよく一致するのは主に低速域での鉛直分布であり、高速域での鉛直分布は線型、さらには鉛直方向に一樣ともみなせる分布を示す。(b)において、 V は、表層と底層で符号が逆転し、それぞれ水表面近傍と底面近傍で最大値を示す。これらの結果をまとめると、図-8に示されるような二次循環流列が形成されていることがわかる。

図-9(a), (b)に、Run 5における中層の U と表層・底層の V の y 方向分布を示す。図-6と比較して、 U , V ともRun 1と類似した分布傾向を示す。従って、3対の二次循環流が形成されていることがわかり、可視化実験結果と一致する。しかしながら、Run 1と比べて U における高速域と低速域、また V における正負の反転といった y 方向の周期的特徴がやや明瞭でない。このことは可

視化実験において筋状パターンが若干不安定になることと符合する。

4. 結 論

水槽側壁の影響がほとんど無視できると思われる幅の広い風洞水槽を用いて実験を行なった結果、風波が十分発達している場においても風波の発達を抑えられた場においても明瞭な二次循環流列が吹送流中に提起されることが明らかとなった。二次循環流の形成を示すトレーサーの筋の間隔 S は水深 h にのみ依存し、風波を伴う場合で $S=2.5h$ 、風波を抑えた場合で $S=2.0h$ 程度であることがわかった。これらの結果は、風波自体の存在は二次循環流の形成にそれ程重要な役割を果たしていないことを示唆するものである。しかしながら、風波の存在は二次循環流の流速を強め、その安定性を向上させる傾向があることが示された。以上の結果から、吹送流中の二次循環流は波と流れの相互作用というよりは水表面上の小さな攪乱を契機に吹送流が不安定化し生ずるという形成機構も否定できない様に思われる。今後、さらに詳細な研究を行い、検討を重ねていく必要がある。

参 考 文 献

- 鎌岡和夫・内山雄介 (1997): 吹送流による沿岸境界近傍の縦渦構造の形成と物質混合過程に関する研究, 海岸工学論文集, 第44巻, pp. 421-425.
- 松永信博・植田 操・草場浩平・鶴崎賢一 (1998): 二次循環流を伴う吹送流の実験的研究, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 426-430.
- Faller, A. J. and E. A. Caponi (1978): Laboratory studies of wind-driven Langmuir circulations, J. Geophys. Res., Vol. 83, pp. 3617-3633.
- Leibovich, S. (1983): The form and dynamics of Langmuir circulations, Ann. Rev. Fluid Mech., 15, pp. 391-427.
- Li, M. and C. Garrett (1993): Cell merging and the jet/downwelling ratio in Langmuir circulation, J. Mar. Res., Vol. 51, pp. 737-769.
- Mizuno, S. and Z. Cheng (1992): A pair of Langmuir cells in a laboratory tank (I) wind-only experiment, J. Oceanography, Vol. 48, pp. 37-57.
- Mizuno, S., H. Noguchi and Y. Kimura (1998): A pair of Langmuir cells in two laboratory tanks (II) on generation mechanism, J. Oceanography, Vol. 54, pp. 77-100.
- Uzaki, K. and N. Matsunaga (2000): Wind-driven currents with Langmuir circulations in a shallow water region, Proc. of 4th International Conference on Hydro-science & Engineering (CD-ROM Proc.)