

吹送流中に生起する二次循環流の特性とその形成機構に関する実験的研究

九州大学大学院総合理工学府 学生会員 ○浦上 由紀子
九州大学大学院総合理工学研究科 学生会員 鶴崎 賢一
九州大学大学院総合理工学研究院 正会員 松永 信博

1. はじめに

Langmuir 循環流と呼ばれる吹送流中の二次循環流に関してはこれまで多くの研究がなされてきたが、その形成機構については諸説が入り乱れ、完全に解明されたとは言えないのが現状である。今日有力視されている説としては、Craik¹⁾と Leibovich²⁾が提唱した、波と流れの相互作用による CL II mechanism が挙げられるが、この説についても実験や観測などによる検証例が未だ充分とは言えず、今日なお様々な研究がなされている。Faller & Caponi⁴⁾は、幅の広い平面水槽を用いて CL II mechanism を検証する可視化実験を行ったが、最終的な循環流のスケールが水深のみで規定されることにひとつの疑問を呈している。また澁岡ら⁵⁾は、数値計算によって内因的なシア不安定による形成機構を示唆している。Langmuir 循環流は、二次循環流とは言え吹送流の 1/3~1/4 程度の比較的強い鉛直流速を持つことから、表層混合層の形成や混合層内の物質輸送、あるいは浅海域における漂砂過程において重要な役割を果たすと考えられる。従って、その特性を詳細に調べ、形成機構を明らかにすることは流体力学のみならず海岸工学・海洋物理学においても重要なテーマである。そこで本論文は、風洞水槽を用いた可視化実験の結果を基に、この二次循環流についていくつかの特性を明らかにし、その形成機構の検討を行うものである。

2. 実験装置および実験方法

実験には、水槽幅の異なる二種類の風洞水槽を用いた。図-1に実験装置の概要を示す。(a)に示されるのが narrow tank であり、長さ 6.2m、幅 0.15m、高さ 0.46m である。(b)に示されるのが wide tank であり、長さ 5m、幅 1.2m、高さ 0.40m である。可視化のトレーサーには、粘性の高い白色のコンデンス・ミルクを用いた。静水時に、コンデンス・ミルクの線を黒く塗装された水槽底面上に横断方向に引いておく。水面に風応力を作用させると、トレーサーは底面付近の補償流によって風上方向に流されながら、数分後には安定したストリークを描く。水槽底面の高さを変えることで水深を変化させ、形成されるストリーク・パターンを水槽上部から撮影した。また、界面活性剤を用い、風波を極力抑えた状態でも同様の実験を行った。実験条件を表-1に示す。Run1~7が風波を伴った実験であり、以降「波浪場」と呼ぶ。また、Run8~12が界面活性剤を用いて風波を抑制した実験であり、以降「波なし場」と呼ぶ。表中、水面における水の摩擦速度 u_{*w} は、風速の鉛直プロファイルに対数分布則を適用して求められ、Run4を除いてはば一定の値に調節された。S ならびに B は、それぞれストリークのスペーシングと水槽幅である。また、H、 T_p 、L はそれぞれ平均波高、卓越波の周期、波長を示している。

3. 実験結果と考察

図-2に波浪場と波なし場での水面変位の比較を示す。破線が Run2、実線が Run9 における水面変位の時系列データである。縦軸において $\eta=0$ はセットアップ

面を示し、横軸は風応力を作用させてからの経過時間である。図より、Run2では波高約 2cm の風波が発生しているのに対し、界面活性剤を使用した Run9では水面変位がごく微小である。他の条件での比較においても同様の結果が得られており、界面活性剤を用いた実験は充分波なし場とみなし得る。

図-3(a),(b)に、narrow tank での実験結果を示す。それぞれ Run2,9 におけるストリーク・パターンである。ともに 2本のストリークが形成され、2対の二次循環流が存在していることがわかる。

図-4(a)~(d)に、wide tank での実験結果を示す。順に Run4,11,5,12 におけるストリーク・パターンである。(a),(b)では 3本のストリークが横断方向にほぼ一定の間隔で並んでおり、3対の二次循環流が存在している。同様に、(c),(d)では 6対の二次循環流が形成されている。これらの結果より、水面波が存在しなくても同様の二次循環流が形成されることがわかる。

全ての実験結果について、ストリークのスペーシングと水深との関係を示したものが図-5である。縦軸は水槽幅 B で無次元化された相対スペーシング、横軸は B で無次元化されたアスペクト比である。この図より、波浪場・波なし場の実験結果とも S/B と h/B は線形関係で表されることがわかる。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。このことから、ストリークのスペーシングは波や風のパラメータによらず、平均水深 h にのみ依存することがわかる。また、narrow tank, wide tank の実験結果が一意に示されることがわかる。水槽の側壁の存在はスペーシングに影響しないことがわかる。

4. 結論

以上の実験から、得られた主な結論を以下に示す。

1. 風波を抑制した状態でも、波浪場と同様の二次循環流が形成される。
2. ストリークのスペーシングは、風や波のパラメータには依存せず、平均水深にのみ依存する。その関係は、波浪場で $S=2.5h$ 、波なし場で $S=2.0h$ 程度である。
3. narrow tank, wide tank での実験結果が波浪場・波なし場とも一意に示されることが、水槽の側壁の存在はスペーシングに影響しないことが示唆される。

参考文献:

- 1) Craik, A. D. D., The generation of Langmuir circulations by an instability mechanism, J. Fluid Mech., 81, 209-223, 1977.
- 2) Leibovich, S., On the evolution of the system of wind drift currents and Langmuir circulation in the ocean. Part 1. Theory and averaged current, J. Fluid Mech., 82, 561-581, 1977.
- 3) Leibovich, S., Convective instability of stably stratified water in the ocean, J. Fluid Mech., 82, 561-581, 1977.
- 4) Faller, A. J. and E. A. Caponi, Laboratory studies of wind-driven Langmuir circulations, J. Geophys. Res., 83, 3617-3633, 1978.
- 5) Nadaoka, K. and Y. Uchiyama, 吹送流に関す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検討, Proc. Coastal Eng., JSCE, 44, 421-425, 1997

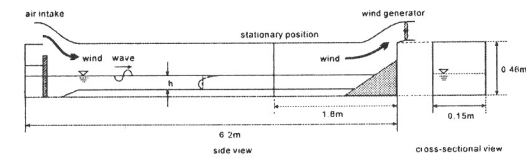
表-1 実験条件

波浪場

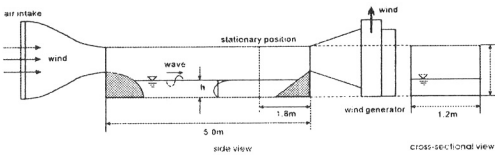
Run	Tank	h (cm)	B/h	U _m (m/s)	u _∞ (cm/s)	S (cm)	S/B	H (cm)	T _p (s)	L (m)
1	N	6	2.5	8.47	0.865	15	1.00	2.81	0.458	0.352
2		3	5	9.78	0.987	7.5	0.500	1.59	0.362	0.201
3		2	7.5	9.55	0.754	5	0.333	0.902	0.254	0.098
4	W	16	7.5	11.6	3.81	40	0.333	1.70	0.385	0.275
5		8	15	8.74	1.96	20	0.167	1.66	0.339	0.199
6		4	30	7.86	1.26	10	0.083	1.35	0.313	0.149
7		2	60	7.52	1.01	5	0.042	1.10	0.190	0.091

波なし場

Run	Tank	h (cm)	B/h	U _m (m/s)	u _∞ (cm/s)	S (cm)	S/B	H (cm)	T _p (s)	L (m)
8	N	7	2.14	10.4	0.573	15	1.00	0.11		
9		4	3.75	10.8	0.891	7.5	0.50	0.12		
10		2.5	6	10.6	0.901	5	0.33	0.12		
11	W	16.5	7.27	9.55	0.846	40	0.33	0.09		
12		9	13.3	7.95	1.03	20	0.17	0.14		



(a) narrow tank



(b) wide tank

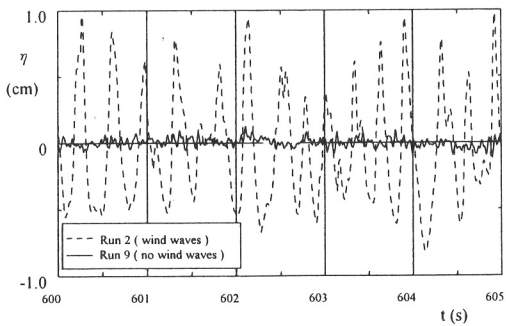


図-2 水面変位の時系列データ(Run2, 9)

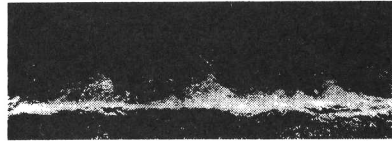


(a) Run2

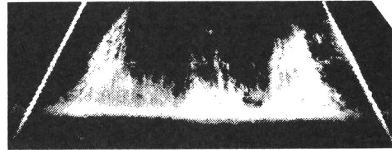


(b) Run9

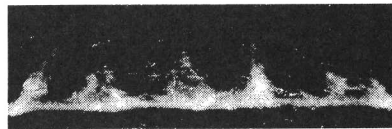
図-3 ストリーク・パターン (narrow tank)



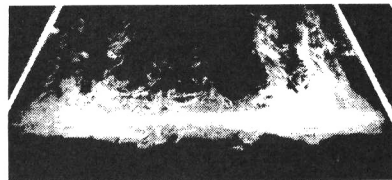
(a) Run4



(b) Run11



(c) Run5



(d) Run12

図-4 ストリーク・パターン (wide tank)

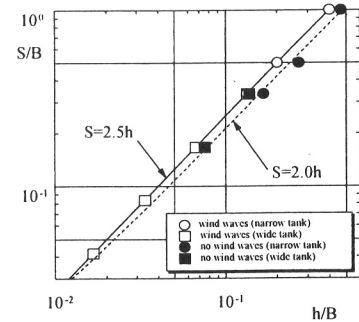


図-5 無次元スペーシング S/B とアスペクト比 h/B の関係