

二次循環流を伴う吹送流の実験的研究

松 永 信 博*・ 樋 田 操**・草 場 浩 平***・ 鷗 崎 賢 一****

1. 緒 論

海面に風応力が作用する際、吹送流中には、Langmuir 循環流と呼ばれる風方向に軸を持つ二次流れが形成することが古くから知られている (Langmuir, 1938 ; Craik, 1976). 水野ら (1992, 1998) は、二次元風洞水槽においても Langmuir 循環流に類似した二次循環流が存在することを見出し、その形成機構を明らかにしているが、循環流に及ぼす水深の効果についてはそれ程詳細に検討していない。Faller and Caponi (1978) は、水深が浅い場合にこのような二次流れのセルが複数個発生することを可視化実験に基づいて見出した。一方、灘岡ら (1997) は実海域において形成された沿岸境界付近のストリーク状の流れを数値シミュレーションによって再現し、せん断不安定による循環流の生成機構を提示した。このような風応力作用下で生ずる二次流れは流体力学的に興味深い現象であるばかりでなく、沿岸海域における浮遊砂の輸送過程や海面を通しての気体輸送過程において重要な役割を果たすものと思われる。本研究では、二次元風洞水槽を用いて風応力作用下で生ずる吹送流の可視化実験と流速計測実験を行い、吹送流に及ぼす水深の効果について調べた。また風方向に軸を持つ二次循環流の特性に

ついて実験的に明らかにした。

2. 可視化実験

(1) 実験装置および実験方法

図-1 a), b) に実験装置の模式図を示す。実験には長さ 6.2 m, 高さ 0.46 m, 幅 $B=0.15$ m の二次元風洞水槽を用いた。水槽の風下側には消波板を設置した。図中の実線で示されるように、水平板を挿入することにより水路床を 10 cm 底上げした。撮影地点を風の吸い込み口から風下側に 3.5 m の位置に設定した。トレーサーには、比較的粘性の大きな白色のコンデンスミルクを用いた。コンデンスミルクを黒く塗装した底面上に注射器で注入することにより、水槽横断方向にトレーサーのラインが描かれた。送風開始時刻を $t=0$ として、定常状態になるまでの 3 分間、2~10 秒毎に水槽鉛直上方より写真撮影を行った。二次流れに及ぼす水深の効果を調べるため、水深 h を 2, 3, 6 cm と変化させて実験を行った。これによって風洞部の高さも 34, 33, 30 cm と変化した。実験条件を表-1 に示す。表中、 U_m は断面平均風速を、 u_{*w} は水表面における水の摩擦速度を表す。風速の測定は、ペーン式風速計を用いて水路幅中央において行われた。測点は 14 点で、1 分間の水平方向の平均風速を取得

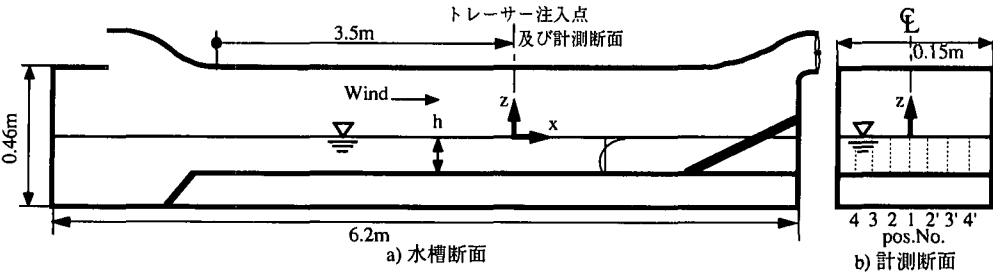


図-1 実験装置の模式図

表-1 可視化実験条件

	h (m)	h/B	U_m (m/s)	u_{*w} (cm/s)
Run I	0.06	0.40	8.47	0.865
Run II	0.03	0.20	9.78	0.987
Run III	0.02	0.13	9.55	0.754

* 正 会 員 工 博 九州大学助教授 大学院総合理工学研究科
** 正 会 員 工 修 日本文理大学教授 工学部土木工学科
*** 学生会員 九州大学大学院総合理工学研究科
**** 学生会員 工 修 九州大学大学院総合理工学研究科

した。 u_{*w} は平均風速分布に対数則をあてはめ、水表面に作用するせん断応力を算定することによって求められている。

(2) 実験結果および考察

図-2 は底面上に引かれたトレーサーのパターンの時間変化を示したものである。風は写真において左から右に吹いている。形成された風波はほぼ2次元であった。送風開始後、トレーサーはわずかに風下方向に流れ出すが、吹送流系が定常状態に達した後は、風上方向に流れる補償流によってトレーサーは風上方向に輸送される。送風開始後30秒を過ぎた頃から、風上方向に流れていたトレーサーは2本のストリークを描き始める。1分以上経過すると、2本の安定なストリークが形成される。底面に沿って風上方向に輸送されたトレーサーは、やがて底面から剝離して巻き上げられる。

これらの可視化実験に基づいて流れのパターンを描いたものが図-3である。水槽の側壁付近および水槽の中心付近では下降流が存在し、ストリークが現れる部分では上昇流が形成され、風の方向に平行な軸を持つ循環流が2対形成されていることが推測される。

図-4 はアスペクト比の異なる Run I, IIIにおける定

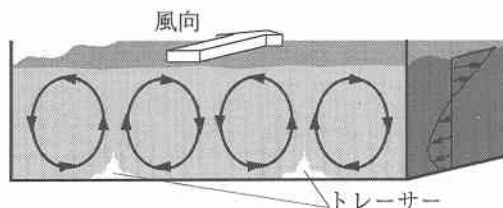


図-3 循環流の模式図 (Run II)



a) Run I



b) Run III

図-4 水深変化に伴う循環流の変化



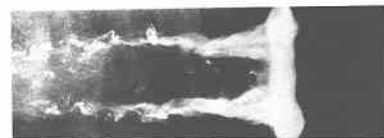
a) 0 sec < 静水時 >



b) 23 sec



c) 57 sec



d) 90 sec

図-2 二次循環流の形成過程 (Run II)

常状態の流れのパターンを示す。a)では水槽の中心で1本のストリークが発生している。従って、この部分で上昇流となる1対の循環流が形成されていることがわかる。またb)では3本のストリークが形成されており、それぞれの部分で上昇流となる3対の循環流が生起していることが推測される。Run I, IIIにおける風波もほぼ2次元であり、Run IIと同様、トレーサーは風下方向に輸送されることはなかった。また、30秒経過した後からストリークを形成し始め、1分以上経過するとこれらのストリークパターンは安定した。Run I～IIIの3つの実験結果から、循環流の水平スケールに対する鉛直スケールの比は0.8であることがわかる。この値は灘岡らの数値シミュレーションの結果ともほぼ一致している。さらに水深を小さくしていくと、このアスペクト比を維持しながら形成される循環流の個数は増加し、トレーサーのストリークの本数も増加するものと推測される。

3. 流速計測実験

(1) 実験装置および実験方法

計測実験においても図-1で示される二次元風洞水槽を用いた。風が吹く断面積を等しくするため、風洞部の高さを0.26 mに固定した。水深 h は、水平床を挿入し底上げ高さを変化させることにより、0.05 m, 0.10 m, 0.15 m, 0.20 mと変化した。これにより、水深と水槽幅の比 h/B はそれぞれ1/3, 2/3, 3/3, 4/3と変えられた。各

表-2 流速計測実験条件

	h (m)	h/B	U_m (m/s)	u_{*a} (cm/s)	u_{*w} (cm/s)	H (cm)	T (s)	c (m/s)	L (m)
Run 1-1	0.05	1/3	4.66	33.0	1.14	0.377	0.205	0.383	0.0784
Run 1-2			7.04	50.5	1.75	0.975	0.264	0.459	0.121
Run 1-3			9.33	74.5	2.58	1.19	0.364	0.536	0.195
Run 2-1	0.10	2/3	5.15	34.1	1.18	0.551	0.207	0.393	0.0816
Run 2-2			7.79	60.3	2.09	1.04	0.278	0.514	0.143
Run 2-3			10.3	99.7	3.45	2.01	0.348	0.593	0.207
Run 3-1	0.15	3/3	5.29	32.0	1.11	0.550	0.193	0.376	0.0725
Run 3-2			8.08	59.0	2.05	1.08	0.293	0.462	0.135
Run 3-3			10.6	89.3	3.09	2.29	0.364	0.735	0.268
Run 4-1	0.20	4/3	5.67	35.1	1.21	0.490	0.224	0.436	0.0979
Run 4-2			8.70	60.4	2.09	0.983	0.293	0.576	0.169
Run 4-3			9.97	79.8	2.76	2.93	0.390	0.720	0.281

h/B に対して 3 種類の断面平均風速を作用させ、合計 12 種類の実験を行った。表-2 に実験条件を示す。表中、 U_m は断面平均風速、 u_{*a} は風の摩擦速度、 u_{*w} は水の摩擦速度である。 H 、 T 、 c 、 L は、それぞれ卓越波の波高、周期、波速、波長である。 z 軸は風の吸い込み口から風下側に 3.5 m の断面において、平均水面から鉛直上向きにとられている。b) に示すように 7 本の測線に沿って流速計測を行った。流速計測には二次元レーザードップラー流速計を用いた。流速の水平成分と鉛直成分が各測線上 8~16 点において計測された。平均風速の鉛直分布と波高の測定は、レーザードップラー流速計と容量式波高計を用いて水槽中央において行われた。流速データ、風速データおよび波高データは、それぞれサンプリング周波数 100 Hz、100 Hz および 50 Hz で 8192 個ずつ取得した。

(2) 実験結果および考察

a) 平均流速分布

図-5 は、Run 3-2 における水平方向の平均流速 U の各測線における鉛直分布を示している。図中、 $U > 0$ の方向は風の吹送方向に一致している。これらの図から、水表面近傍では風下方向に吹送流が形成されており、底面付近ではその補償流が生じていることがわかる。また、流速の向きが変わる $U = 0$ の高さは側壁に近づくに従って深くなっている。水表面近傍における流速は側壁付近で最大となる。側壁付近における平均流速分布は水槽中央における分布形と大きく異なり複雑な分布形を示すことが分かる。

図-6 は、Run 3-2 における鉛直方向の平均流速 W の各測線における鉛直分布を示している。図中、 $W > 0$ は鉛直上向きの流れを示す。図によれば、水槽中央では上昇流が生じ、側壁付近では下降流が生じていることがわか

る。このことは、水槽の横断面内に 1 対の循環流が形成されていることを示唆している。この循環流の回転方向は、水野らの実験結果 (1992, 1998) ならびに可視化実験 (Run I) と一致する。 $z/h < -0.8$ の領域では鉛直流速はほぼ 0 となり、二次循環流の影響はほとんど見られない。

図-5、図-6 において U 、 W の最大値及び最小値はそれぞれおよそ ± 4 cm/s、 ± 2 cm/s であった。循環流の大きさを表す W の値が、主流 U の 50% の大きさに達していることがわかる。また、Run 1-3、Run 2-3 のように水深が浅くて風が強い場合には、二次流の上昇流は主流の最大流速に達することが明らかとなった。

図-7 は、Run 1-3、2-3、3-3、4-3 における、水槽中央での平均流速 W の鉛直分布である。これにより、作用する風応力がほぼ等しい場合におけるアスペクト比の効果が比較できる。最大流速が現れる位置は、形成される 2 次循環流の渦の中心とみなすことができる。アスペクト比が小さい場合 (Run 1-3、2-3) は水深の約半分あたりで最大値をとるが、アスペクト比が大きくなる (Run 4-3) と最大点が水表面近傍へ移動し、その分布形は大きく異なる。つまり、水深が増加するにつれ二次循環流の鉛直スケールは増加せず、シアの卓越したある高さに閉じこめられる傾向がある。

図-8 はアスペクト比 3/3 の場合の 3 実験における Pos. 1 の W を比較したものである。図によれば、水表面に作用する風応力が大きくなると、鉛直流速 W も大きくなっている。また、最大流速の位置はあまり変化しないことが分かる。これは、循環流の中心位置が作用する風応力にほとんど依存しないことを示している。これらの結果から、水深は二次流の中心軸位置に大きく影響しており、可視化実験で示されたように、循環流の形成個数

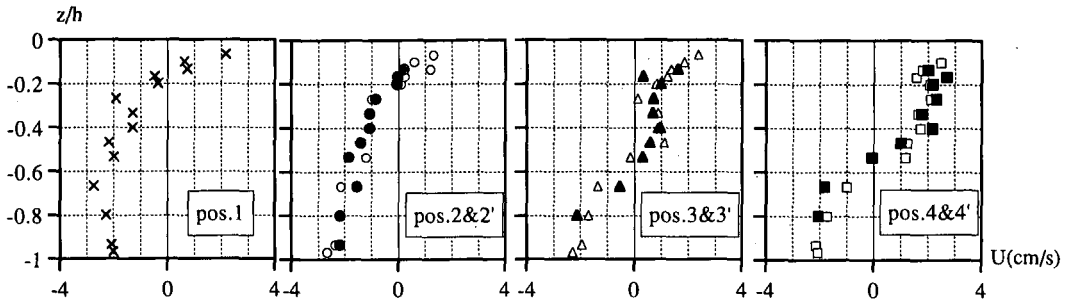


図-5 平均流速 U の鉛直分布 (Run 3-2)

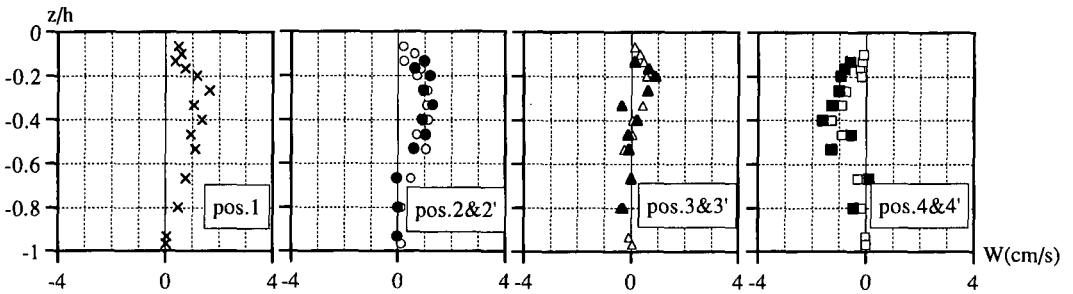


図-6 平均流速 W の鉛直分布 (Run 3-2)

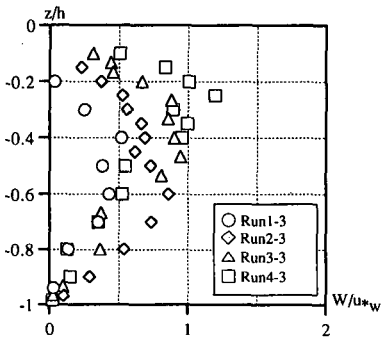


図-7 水深の変化による W/u_{*w} 分布の比較

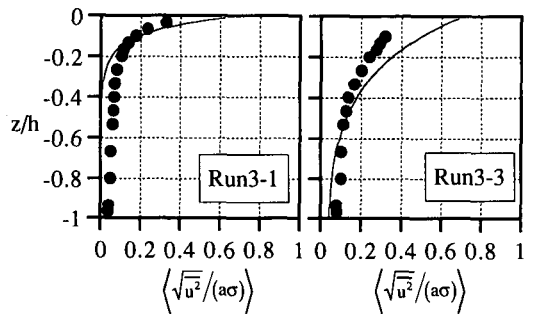


図-9 $\langle \sqrt{u^2}/(\alpha\sigma) \rangle$ の鉛直分布

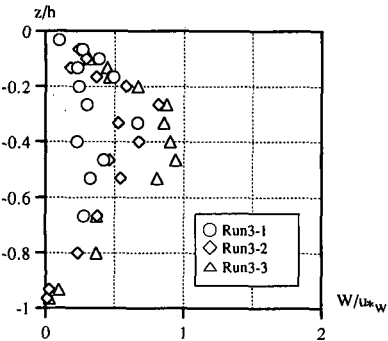


図-8 平均風速の変化による W/u_{*w} 分布の比較

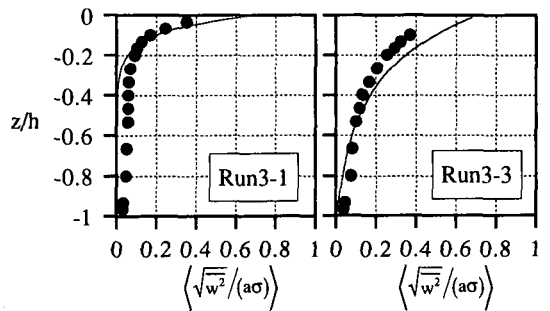


図-10 $\langle \sqrt{w^2}/(\alpha\sigma) \rangle$ の鉛直分布

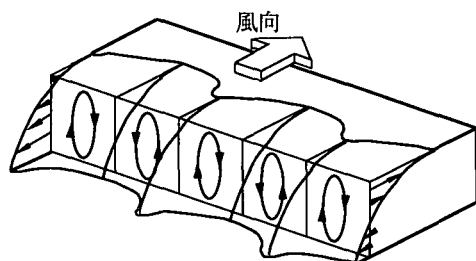


図-11 流速分布と循環流の構造

にも大きな影響を及ぼすものと考えられる。

b) 乱れ強度分布

図-9 は $\langle \sqrt{u^2}/(a\sigma) \rangle$ の鉛直分布が風速の違いによってどのように変化するかを示したものである。 $\langle \sqrt{u^2}/(a\sigma) \rangle$ は流速の変動成分の r.m.s. 値 $\sqrt{u^2}$ を波の振幅 a と角振動数 σ で無次元化した値を水槽奥行き方向で平均したものである。図-10 は $\langle \sqrt{u^2}/(a\sigma) \rangle$ を z/h に対してプロットし、風速の違いによって鉛直分布がどのように変化するかを示したものである。図中の実線は、波のデータに基づいて微小振幅波理論から求めたものである。測定された流速変動 u は風波による波動成分 $\bar{u}$ と吹送流による乱れ u' の和で表される。この場合

$$\sqrt{u^2} = \sqrt{(\bar{u} + u')^2} = \sqrt{\bar{u}^2 + 2\bar{u}u' + u'^2}$$

となる。底面付近では波動による変動強度の理論値が 0 に近い値をとるにもかかわらず、変動強度が値をもっている。これは、吹送流による乱れの生成および拡散によるものと考えられる。一方、水表面付近では風速が大きくなるにつれ、変動強度が波動による変動強度の理論値よりも小さい値をとる傾向が認められる。これは、波動による変動と吹送流による乱れとの間に強い負の相関があることを示唆しており、大変興味深い現象である。

4. 結 論

可視化実験では、トレーサーが描いたストリークから、風の吹送方向と平行な軸を持つ二次循環流の形成が確認された。循環流の個数は水深に強く依存し、循環流の水平スケールに対する鉛直スケールの比は 0.8 であること

が明らかとなった。本実験では 1～3 対の循環流が確認された。

流速計測実験では、1 対の 2 次循環流が形成される場合について、流速分布と乱れの特性を明らかにした。平均流速 W の分布から、水槽中央では上昇流、側壁付近では下降流がみられ、2 次循環流の形成が確認された。水深が大きくなると無次元化された循環流の中心位置は鉛直上方に移動する傾向がみられる。 $\langle \sqrt{u^2}/(a\sigma) \rangle$ と $\langle \sqrt{w^2}/(a\sigma) \rangle$ の鉛直分布において、水面に作用する風応力が弱い場合には、水表面近傍の変動流速成分は微小振幅波による理論値に良く一致するが、風応力が強くなると波動成分と乱れの成分が強い負の相関を持つという興味深い現象がみられた。

2 つの実験から、風応力作用下の流れとして、図-11 に示されるような流速分布と二次流構造が考えられる。水表面近傍の流速は鉛直循環流が上昇している付近で遅く、下降している付近で速い。底面付近では、上昇流が存在するところで補償流の流速が大きく、下降流が存在するところで流速は小さい。このような流れのパターンは水深に大きく依存していると考えられる。

本研究は、平成 10 年度文部省科学研究費補助金萌芽的研究（代表者：植田 操，課題番号：08875095）の援助を受けて行われたことを記し、ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 灘岡和夫・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検討, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 421-425.
- Craik, A. D. D. and S. Leibovich (1976): A rational model for Langmuir circulations, J. Fluid Mech., Vol. 73, pp. 401-426.
- Faller, A. J. and E. A. Caponi (1978): Laboratory studies of wind-driven Langmuir circulations, J. Geophys. Res. Vol. 83, pp. 3617-3633.
- 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.
- Langmuir, I. (1938): Surface motion of water induced by wind. Science, 87, pp. 119-123.