

重複波波動場の定常循環流の3次元構造について

佐藤 幸雄*・鰐目 淑範**

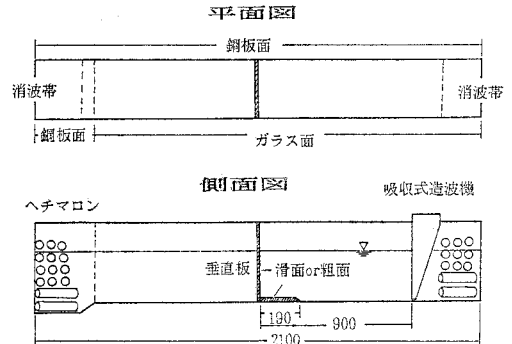
1. ま え が き

波動場内に底面あるいは側壁等がある場合、その壁面の極く近傍においては波動の水平振動流速により壁面境界層が発達する。つづいてその境界層内の流れの非線形性が要因となって境界層内に振動流に付加されて定常流が発生する。さらにこの定常流は次第に境界層外側の流体内部にも新たな定常流すなわち質量輸送を誘発させる要因となっている。この事実は古くより Schlichting (1955) の円柱のまわりの流れ、および Longuet-Higgins (1952) の質量輸送に関する理論等からも明確であり良く知られている現象である。流体場が重複波波動場の場合についても Longuet-Higgins (1952) は底面と水表面との境界層の影響を考慮した場合に波動場の腹と節の断面および底面と水表面で囲われた一つの流体 cell の中で定常的循環流を形成する様相を理論的に示している。しかしこの理論は完全に2次元流であり、水槽巾が水深に比して狭い実験水槽のような場合の側壁境界層による影響等は考慮されていない。いま底面以外に側壁および反射壁面がある場合にはこれらの壁面上にも当然境界層は発達する。その時これらの境界層の影響が2次元的循環流の様相をどのように変化させるかを知ることが非常に興味深いことと考えられる。

本研究では Longuet-Higgins の2次元的循環流を実験的に検証すると共に、この2次元流が側壁の影響を受けた場合、さらにこれに反射壁面の影響が加わった場合の定常循環流の流れ構造を染料を用いて可視的に実験を行ない流れの追跡を行った。そしてこのような定常循環流が形成される事実を知ることが壁面で囲われた流体内部あるいは港内等における質量輸送、浮遊物質の移動および海水交流等の問題に基礎的知識が提供できることと思う。

2. 実験装置および方法

図—1に示すような巾25 cm、深さ50 cmの2次元造波水槽を使用し、造波板から距離9.0 mの位置に直立壁



図—1 実験水槽と直立壁の位置

を設置した。実験水深は25.0 cmで一定とした。このような造波水槽に吸収式造波装置により表—1に示す各種実験波を発生させて重複波波動場を形成させた。また、実験は滑面の場合と粗面の場合の2CASEを行った。

滑面のCASEは直立壁の壁面に塗装なしの合板を使用し、底面と側壁の片側は銅板に塩ビ板を張り付けた状態で、側壁の片方はガラス面である。粗面のCASEでは直立壁面と直立壁前面の長さ1.9 mの底面に、粒径0.4 mmの浜砂を張り付けた板を用いた、側壁部は滑面の場合と同じである。

実験は主として染料に過マンガン酸カリウム(KMnO₄)を用いてカメラ撮影により可視的に行ない、KMnO₄の粒が水に溶けて紫色の染料が定常流の流れに沿って流れる様子を流れの細部に渡って追跡した。染料の発生源としては底面付近の流れに対してはKMnO₄の2～3粒を底面上に置き、また、水表面および水中の測定るときはKMnO₄の数粒をガーゼに小さく包み、それを針金の先端に取り付け、水表面に接触させたり、あるいは水中に挿入する方法を用いた。染料による流れの様子は

表—1 実験波の諸元

CASE	CASE	水深	周期	重複波波高
滑面	粗面	<i>h</i> cm	<i>T</i> sec	<i>H</i> cm
1	1'	25	1.0	4.2
2	2'	25	1.0	6.5
3	3'	25	1.2	4.2
4	4'	25	1.2	6.5

* 正会員 北見工業大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 北見工業大学助手 工学部土木工学科

35 mm カメラで撮影し、写真より循環流の形成状況を図化することとした。

3. 実験結果および考察

(1) 2 次元的循環流の発生

Longuet-Higgins (1952) は底面境界層の外縁流速に微小振幅波理論を用いて、境界層内定常流について求め、さらに境界層外側の流体内部に発生する定常流について、進行波および重複波について解いている。図-2 はその中の重複波波動場内の定常循環流の様子を示したものである。

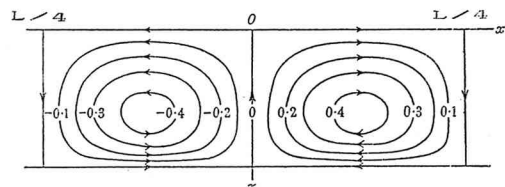


図-2 重複波波動場の2次元定常循環流
(Longuet-Higgins による.)

図-2 からも分かるように境界層外側の流体内部に発生する循環流は底面境界層外縁の水平流速が速い節方向から遅い腹方向へと流れ、その結果流体 cell 内全体の循環流を形成することになる。したがって、造波水槽の中が水深に比して狭く、側壁を有する場合に側壁境界層の影響を考えると、側壁近傍においては水表面と底面共に節から腹へ向う流れとなる。しかし腹の断面においては鉛直方向流速成分が大きい水表面から水底へ向う流れが発生し得ると考えられる。また、造波水槽中央部に向うに従い側壁境界層の影響も小さく、ほぼ図-2 に示す2次元的流れとなる。すなわち中央部水表面では腹から節へ向う流れである。

一方、直立壁（反射壁）面の近傍では境界層外縁の鉛直方向流速成分は水槽巾方向に一樣で水表面で大きいため水槽巾方向に一樣に水表面から下方へ向う流れが発生することとなる。以上の流れの様子はもちろん水槽中央部に対して左右対称の流れ構造を示すと考えられる。

(2) 直立壁（反射壁）面より遠い位置の流れ

写真-1 は水槽中央部底面の節と腹の中間に投入した染料が次第に腹の位置へ流れ、上昇した後節方向へ向う様子を示している。写真-2 では底面のガラス面沿いの流れを示し、中央部と同様に染料は腹の位置で上昇するが先端部は側壁の影響を受けて次第に水槽中央部へ向う流れとなっている。

写真-3 はガラス面に沿った水表面において節と腹の中間に投入した染料がガラス面に沿って腹の方向へ流れ、腹の位置に到達した後ガラス面から離れ、若干水中

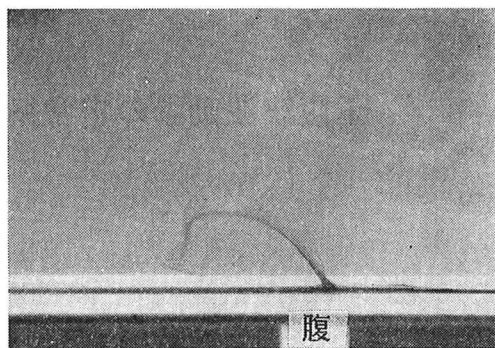


写真-1 滑面, 中央部底面 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm

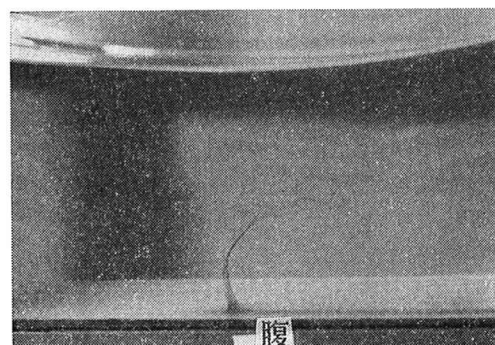


写真-2 滑面, ガラス面底面 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm



写真-3 滑面, ガラス面水表面 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm

にもぐりながら水槽中央部方向へ流れる、さらに中央部を節方向へ流れ循環流を形成する様子を示している。

部分的にはガラス面の水表面、腹では写真-4 に見られるように側壁の影響で染料が若干下方へ流れ、その後は中央部へ上昇しながら流れる。しかし中央部の水面では写真-5 に示すように腹の位置では下向き流れはほとんど発生していないといえる。

以上の染料の追跡結果から水槽中央部の底面付近では側壁境界層の影響も小さく、ほぼ Longuet-Higgins が示す2次元循環流を確認することができる。

また、水表面近くになると側壁（ガラス面）に沿って

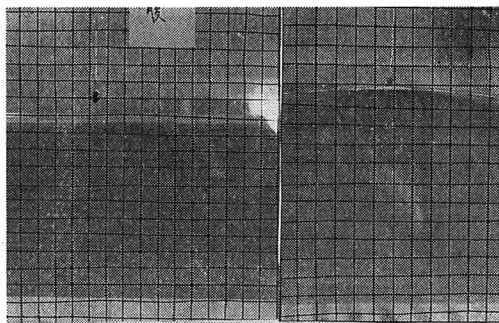


写真-4 ガラス面

写真-5 水槽中央部

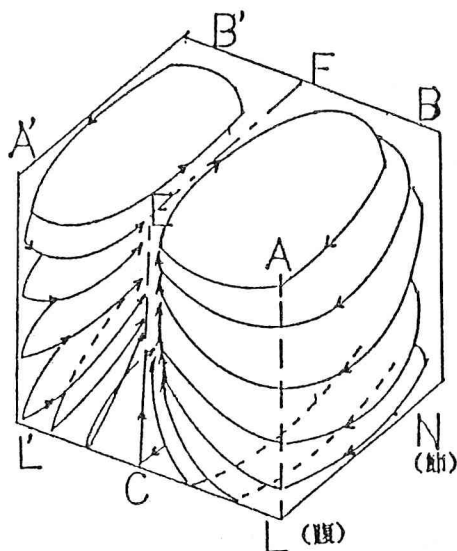
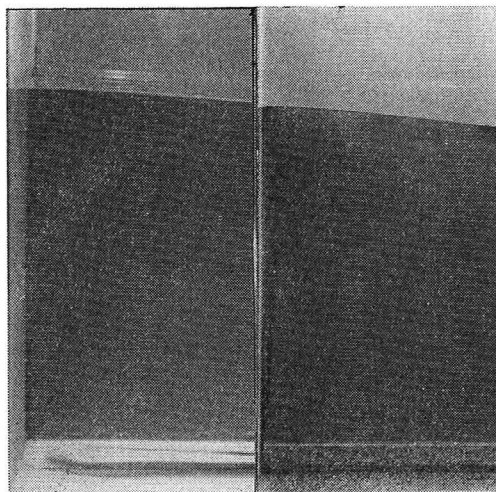
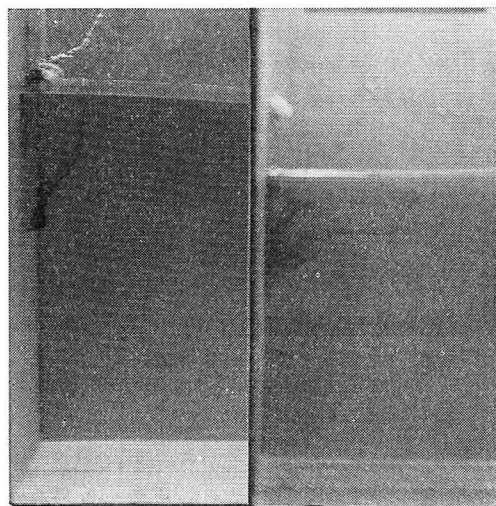


図-3 定常的循環流の基本形

写真-6 水槽中央部
 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm (滑)写真-7 水槽中央部
 $T=1.0$ s, $H=6.5$ cm (粗)写真-8 水槽中央部表面
 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm (滑)写真-9 水槽中央部表面
 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm (粗)

節から腹へ向う強い水平流れが生じるため、次第に水表面に平行な循環流を形成するようになる。したがって、循環流は2次元的というよりむしろ3次元的な流れ構造を形成し基本的には図-3に示すような形状となることが考えられる。なお底面が滑面と粗面の場合の差異による流れの違いについては、定性的な状況に限っては、ほとんど相違は見られなかった。

(3) 直立壁（反射壁）面近傍の流れ

直立壁前面の流れの様子についてはまず底面の状況について写真-6に水槽中央部の滑面の場合、写真-7に粗面の場合を示した。滑面、粗面のいずれの場合も節の方から腹（直立壁面）の方向に流れた染料は壁面に沿って上方へ鉛直に立ち上がって流れる。そして壁面上のある高さにおいて、染料は壁面から離れて水表面の節方向へ向かう。この染料が壁面を離れる高さは滑面より粗面の場合若干高いのが特徴として見られた。（註：写真-6, 7の波のデータが異なるため、高さの差異はやや大

きく見える。）

底面のガラス面沿いについては掲載写真はないが、中央部の場合とほぼ同様である。ただし、この場合は立ち上がった染料の先端は水槽中央部の水表面へ向い(2)で述べた状況と同様である。

つぎに、水槽中央部の水表面から壁面に沿って投入した染料の流れを写真-8、写真-9に示した。水表面に接触させた染料は鉛直下向きに下降し、水中のある高さの点より壁面から離れて流体内部を水表面に向って上昇する。この場合写真-8の滑面と写真-9の粗面の場合とは若干の差異が見られ、離れる点の高さは粗面の方がやや高く現われるのが見られる。またこの事は写真-6, 7の底面からの立ち上がり方が滑面の方が低い事

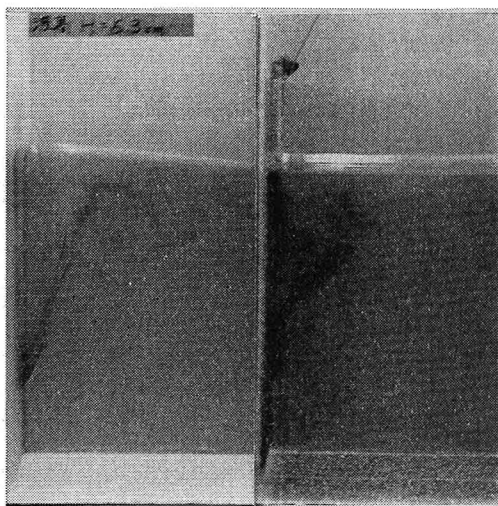


写真-10 水槽中央部
表面, $T=1.2$ s, $H=6.5$ cm(滑)

写真-11 水槽中央部
表面, $T=1.2$ s, $H=6.5$ cm(粗)

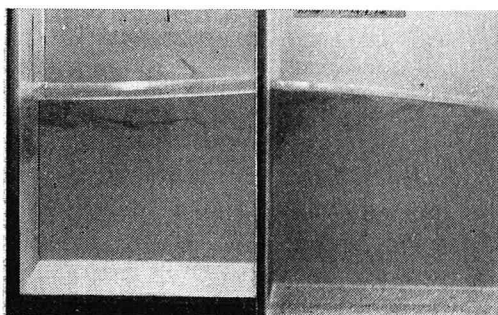


写真-12 滑面
 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm

写真-13 粗面
 $T=1.0$ s, $H=4.2$ cm

と整合した流れの状況となっている。同様の状況を波高がやや大きい波について示したのが写真-10, 写真-11であり, この場合でも, 壁面から離れる染料の高さは粗面の場合が高く現われている。

以上のような滑面と粗面の定性的な差異については粗面の方が壁面から離れる度合いが大きいことから, 壁面上の乱れあるいは渦構造の規模が大きいことが考えられるが, 本研究では定量的な測定を行っていないため, 明確には結論付けられない。

写真-12, 写真-13は滑面と粗面についてガラス面に沿って直立壁方向に流れた染料が直立壁面とガラス面の交線に沿って下方へ流れる様子を示したもので, この場合は滑面, 粗面のいずれも下方へ流れるのと同時に直立壁面に沿って水槽中央部へ斜めに流れ, 中央部に近づくに従って, 壁面から離れ水面方向へ向って流れる。以上の流れの様子を模式的に図化したのが図-4である。図より染料が直立壁面を離れる点付近は流れが剝離を起こしていることが考えられる。さらに, ガラス面から水

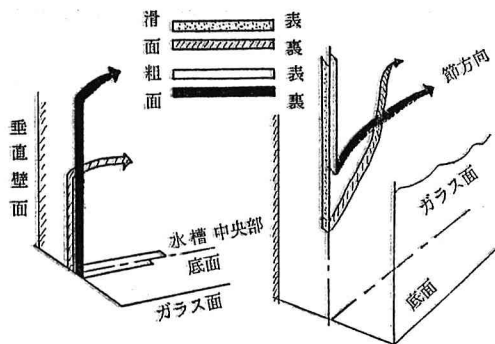


図-4 水槽中央部水表面の流れの模式図

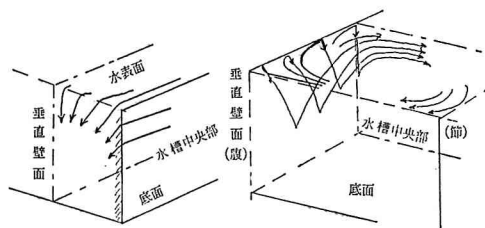


図-5 直立壁面沿いの流れの模式図

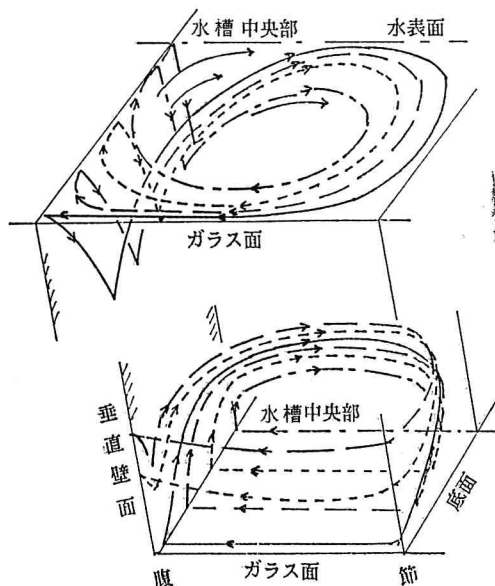


図-6 直立壁近傍の流れの模式図

槽中央部にかけて壁面上およびその近傍の流れの様子を模式図で示したのが図-5であり, 流れは直立壁面を離れて水面へと上昇しながら, (2)の図-3に示した基本形に類似した水平方向に循環する流れ構造を形成することが考えられる。

以上の染料を使用した可視的な流れの追跡結果をまとめると, 図-6に示すような全体的な模式図が考えられ

る。直立壁近傍であっても底面付近は直立壁面の影響が小さいため(2)で述べた直立壁から離れた箇所の定常循環流の基本形(図-3)とほぼ等しい流れ構造となっていると考えられる。また直立壁面上で一旦水中に流れ込み、その後壁面から離れ水面へと浮上した流れは節の断面近くを回わり再度腹方向へ戻る循環流を形成し、やはり水面近くでも図-3の基本形に沿った流れ構造を示すことが考えられる。したがって、流体の中間位置における流れの様子は未だ明確に把握されてはいないが、直立壁近傍の流体 cell 内の全体の流れは、およそ底面付近と水面付近の流れ構造を重ね合わせた構造を形成しているものと考えられる。

4. 結 言

(1) 重複波波動場の任意断面において Longuet-Higgins が理論的に示した2次元の循環流の存在を確認すると共に、さらに側壁の影響を受けた場合の3次元の循環流の基本的流れ構造がおおよそ明確となった。

そして、腹の断面の水面における下向き流れが基本形に付加され局所的に若干複雑な構造を示すと考えられる。

(2) 直立壁面近傍では直立壁面に沿って下降した流れが途中で壁面から剝離するという興味深い現象が見出された。また、Longuet-Higgins(1952)によると境界層内の渦構造あるいは乱れは直接境界層外側の流れの状態

には関係ない訳であるが滑面と粗面で若干流れの様子が異なるのは、さらに検討に値する事柄と考えられる。しかし、壁面の極く近傍を除くと、他の領域では任意断面の3次元構造に沿った流れ構造になっていると考えられる。

(3) 可視的な実験からは大略的に定常循環流の構造は見出されたが、さらに流れの構造を解析的に解く場合には底面付近は解析が可能であるが、水面では振動する水面と側面あるいは直立壁面との交線、すなわち、Moving Contact Line 箇所の境界条件の与え方が難しい問題となる。Dussan ら (1976) は Moving Contact Line の境界条件として slip condition を仮定して水面と固体壁面とが接触する近傍の流れの様子を解いているが、本研究における定常的循環流の発生過程にも、この Moving Contact Line 近傍の流れ構造が大きく関与することが考えられ、今後、検討を行なう必要があると考える。

参 考 文 献

- Dussan, V, E. B. (1976): The moving contact line: the slip boundary condition, *J. Fluid Mech.* Vol. 77, Part 4, pp. 665-684.
- Longuet-Higgins, M. S. (1952): Mass transport in water waves, *Phil. Trans. Roy. Soc., Ser. A*, Vol. 245, pp. 535-581.
- Schlichting, H. (1955): *Boundary Layer Theory*, Fourth Edition, McGraw-Hill, pp. 28-29.