

## II-17

造波水路の重複波波動場における定常流の  
3次元構造について

北見工業大学工学部

北海道大学工学部

北見工業大学工学部

正 員 佐 藤 幸 雄

正 員 浜 中 建 一 郎

正 員 鰐 目 淑 範

## I. まえがき

粘性が要因で振動流によって底面に境界層が発達すると、その境界層の影響により境界層外部の流体内に質量輸送が発生することは、古くはSchlichting<sup>1)</sup>の境界層理論の中の円柱のまわりに発生する循環流等の記述から明確である。また、振動流が特に完全重複波の場合には、定常波の腹と節の位置の断面と底面、水表面によって囲まれた内部の流体内に質量輸送を伴った循環流を形成することがLonguet-Higgins<sup>2)</sup>によって理論的に導かれ、図-1に示すような循環流の流線図の一例が描かれている。図-1のような場合は水槽幅については幅の影響を受けない程度に広い場合であって循環流は完全に2次元的な場合と考えられる。

しかし、実験室内で普通使用される2次元造波水槽は特に幅が広いという水槽はあまり見受けられない。そこで、水槽の幅が特に広い場合でなく、水槽幅が使用水深と同程度の場合でもLonguet-Higginsが示すような2次元の循環流が発生するものか否かは、多分に疑問をいだかざるを得ないことであり、本研究では、染料ならびに浮子を用いて定常波の場合に発生する循環流の様相を調べてみることにした。以下は実験により若干得られた結果を述べたものである。図-1 2次元循環流の流線図( $kh=2\pi h/L=1.0$ の場合)

Longuet-Higginsによる。

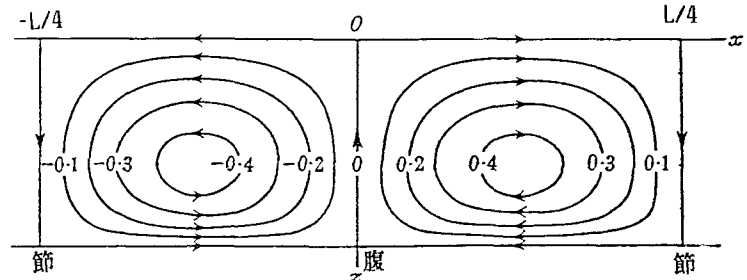
## II. 実験方法

造波水槽の大きさは、幅25cm、深さ50cm、長さ22mであり、片面はガラス張りであり、他面と底面は塩ビ板を張ったものである。造波板から11.5mのヶ所に直立壁を設置し、直立壁と造波板の間で定常波(完全重複波)を発生させた。

染料には過マンガン酸カリウムを用いた。流れの様子を調べようとするヶ所に、底面上では固形の小さい粒を2-3個を置き、また、流体中の場合は針金の先に数個を接着し、流体中に挿入することとし、染料の発生源とした。測定は流体中に溶け出し流れに沿って流動する染料を主に可視的に、写真撮影をした。水表面の場合は染料の他に浮子の移動の様子を写真撮影した。

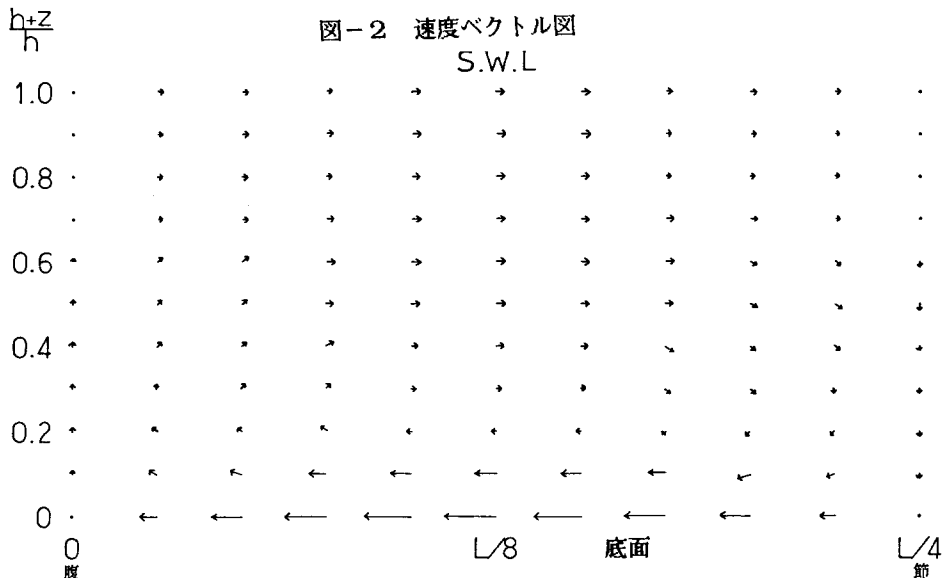
実験に使用した波は1種類のみであり、その実験波の諸元は表-1に示した。

つぎに、実験波の諸元を用いて計算したLonguet-Higginsの2次元循環流の速度ベクトルを図示してみると図-2のようになり、図をみると底面付近に強い循環流が発生しており、その中でも $x=L/8$ (腹と節の中間点)の断面で大きな値を示している。

表-1  
実験波の諸元

|               |       |
|---------------|-------|
| 水深<br>h cm    | 30.0  |
| 周期<br>T sec   | 0.8   |
| 波高<br>H cm    | 3.9   |
| 波長<br>L cm    | 96.0  |
| $kh=2\pi h/L$ | 1.963 |

Behavior of Three Dimensional Steady Streaming in a Standing Wave was generated  
in a Wave Flume by Yukio SATOH, Kenichiro HAMANAKA and Yoshinori YONOME



また、腹と節ならびに水面では速度が零となっていて、境界面に近づくに従い速度は次第に小さい値となっている。計算式は次式である。

流れ関数  $\Psi = A \cdot \sin kx \cdot Z^{(s)}(z)$   $k = 2\pi/L$   
 $A = \sigma H^2 / (8 \cdot \sinh^2 kh)$   $\sigma = 2\pi/T$   
 $Z^{(s)}(z) = \frac{3 \cdot (2kh \cdot \cosh 2kh \cdot \sinh 2kz - 2kz \cdot \cosh 2kz \cdot \sinh 2kh)}{\sinh 4kh - 4kh}$

水平方向流速  $U = \partial \Psi / \partial z = A \cdot \sin kx \cdot (\partial Z^{(s)}(z) / \partial z)$

$$\frac{\partial Z^{(s)}(z)}{\partial z} = \frac{3}{\sinh 4kh - 4kh} (4k^2 h \cdot \cosh 2kh \cdot \cosh 2kz - 2k \cdot \sinh 2kh \cdot \cosh 2kz - 4k^2 z \cdot \sinh 2kh - \sinh 2kz)$$

鉛直方向流速  $V = -\partial \Psi / \partial x = -kA \cdot \cos kx \cdot Z^{(s)}(z)$

### III. 実験結果

各断面の記号の説明を図-3に示した。

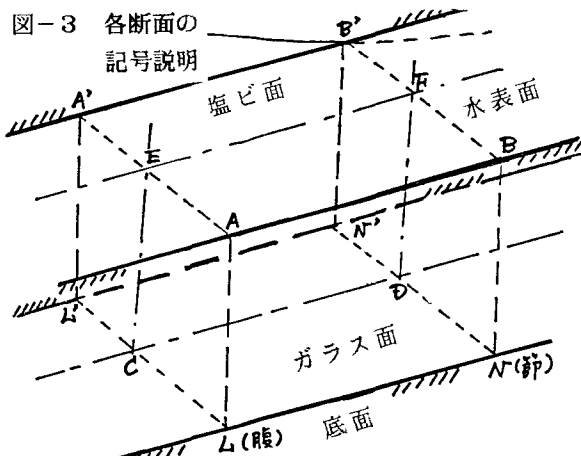
また、染料の投入ヶ所（染料の発生源）を写真上に矢印で示した。

つぎに流線の様相について各断面毎に説明することとする。

#### (1) 底面について

水槽中央部ならびにガラス面側共に節から腹へ向かってガラス面に平行な流れが発生している。

(図-4, 写真-1, 2) また、腹の位置では底面から上方へ向かう流れとなる。(図-6, 写真-1, 2) さらに、腹の付近では水槽中央部



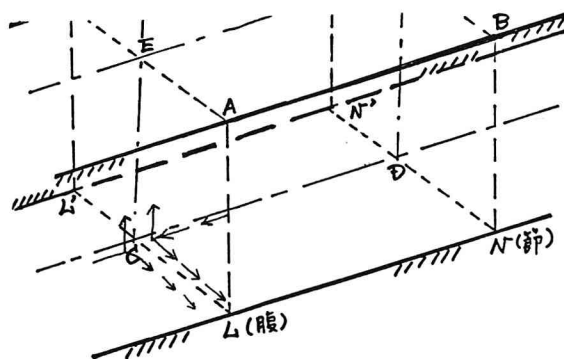
からガラス面へ向かう流れが存在しているようである。  
 (図-5, 写真-2, 3) ガラス面に到達後は流れは上方へ向かう。節の位置においては上方への立ち上がりがなく、また、ガラス面方向への染料の広がりもない状態である。(図-7, 写真-2)

## (2) 底面より上方へ水深1/3程度の範囲

腹の位置から立ち上がった流れはガラス面にほぼ平行に節の方へ向かい、この領域ではLonguet-Higginsが述べているように底面境界層の影響で生ずる循環流が存在することが確認された。(図-8, 写真-4)

さらに上方の領域では流速値も小さいと考えられ、流況は明確でなくなっている。

図-5 水路中央部(腹の位置)C点の流況



## (3) 水表面について

水面を上からみた場合、腹の位置ではガラス面から水槽中央部へ向かう強い流れが存在する。(図-9, 写真-5)、中央部へ流れた後は中央部を節の方向へ流れ、さらに、節の付近へ近づくと、今度は中央部からガラス面方向に流れる。つまり、ガラス面沿いに節から腹の方向へ流れる循環流を形成する。

図-6 底面(腹の位置)L-C上の流況

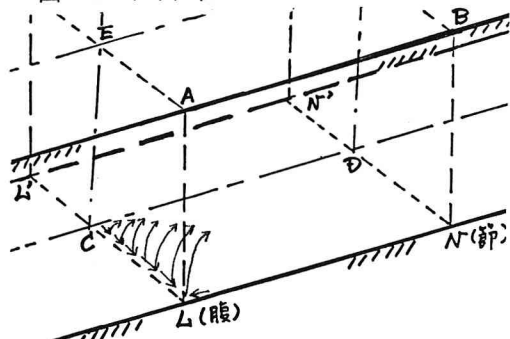


図-4 底面付近流況(L-N-D-C面)

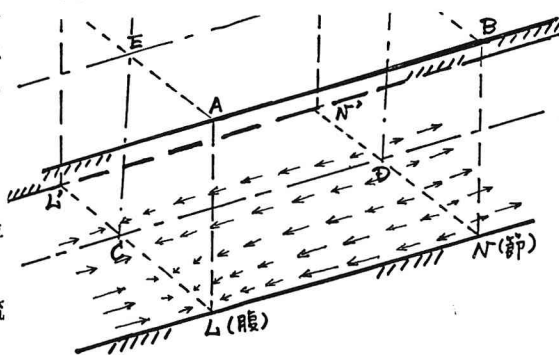


写真-1 (ガラス面)

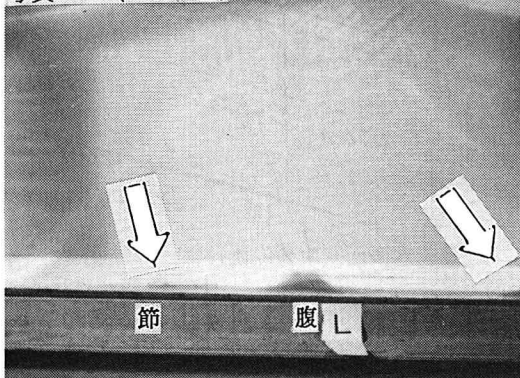


写真-2

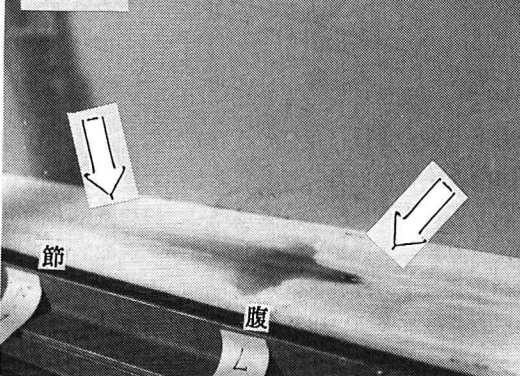


写真-3 水路中央部

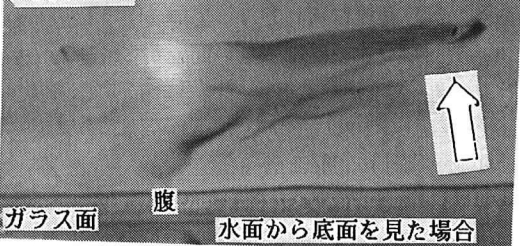


写真-5は節方向から壁に沿って腹方向に流れた染料が腹の位置で中央部へ流れて行く様子を示しているが、染料の他に浮子を水面に浮かべた場合（写真は未掲載）浮子が循環流に乗って移動するのがより明確に解る。

しかし、このような水表面付近に発生する循環流についてはLonguet-Higgins が示す底面境界層の影響のみでは発生し得ないことから、水表面の循環流は側壁に発達する境界層の影響が強く作用して発生するものと考えられる。したがって、ガラス面および塩ビ面の両側壁がある場合は循環流も水槽中央部に対して対称的に発生していると云える。

さらに、水表面に発生する循環流はガラス面に垂直な

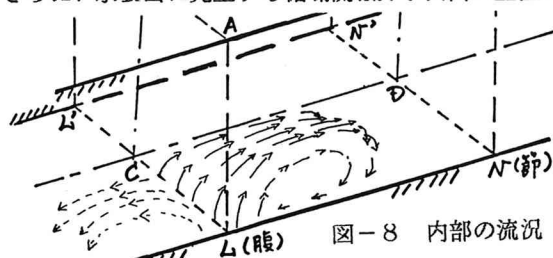
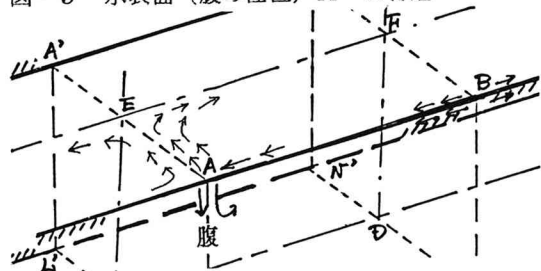


図-8 内部の流況

図-9 水表面（腹の位置）A-E付近



ABEF面に平行に存在する訳ではない。この事はA点に挿入した染料が下方にもぐり込む流れとなり（図-9，写真-6）、また、節の位置B点ではほぼ水平方向に流れる（図-9，写真-7）、以上の事から概略的に水表面付近の循環流は腹の付近では水深方向にもぐり込み、また、節の付近では水表面に現れるような、ある傾斜した循環流となっているように推測される。したがって、底面付近の循環流と表面付近の循環流との2重構造を呈し、いずれにしても、かなり複雑な流れとなっているように思われるが、今後、解明しなければならぬ問題が多く含んでいると考えられる。

1)Schlichting; Boundary Layer Theory

Fourth Edition McGRAW-HILL

2)Longuet-Higgins; Mass Transport in Water Wave

Philosophical Transaction of Royal Society of London

図-7 底面（節の位置）N-D上の流況

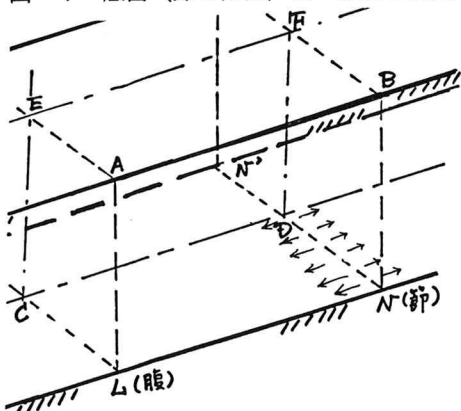


写真-4

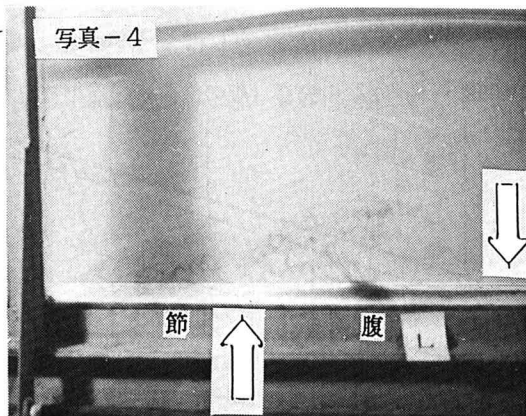


写真-5

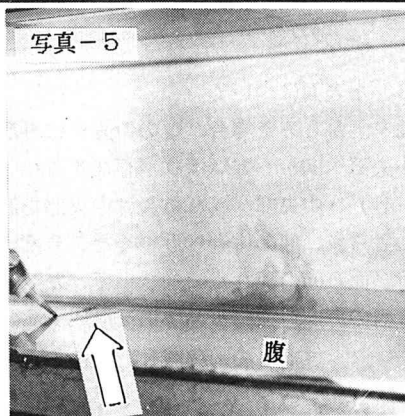


写真-6

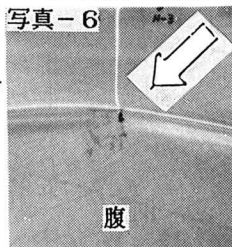
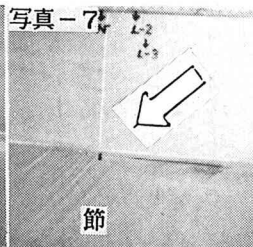


写真-7



series A, 245(903)pp535 ~ 581