

京都大学
京都大学
京都大学

学生員 ○小松峻也
正会員 山上路生
フェロー 楠津家久

1. はじめに

水・空気界面を通しての気体輸送は水中環境や水質に大きな影響を及ぼすことが考えられる。この気液界面での気体輸送が活発に行われる流れ場の一つに風波現象が挙げられる。風波は水面上に風が吹くことによって発生する波動であり、一般に吹送流が誘起される。これにより気液界面での物質・運動量交換が促進され、水層部の構造に大きな影響を及ぼすことが知られている。そのため、風波は地球温暖化、水中環境構造、水性生態系への影響といった環境問題と密接するきわめて重要なテーマであると考えられる。

風波流れによって発生する現象として近年注目されているのがラングミュアー循環流であり、風下方向に軸をもつ大規模 2 次循環流である。このラングミュアー循環流が海洋や湖沼などにおいて混合層の生成および生態系の維持に寄与するなど、気液界面下の影響に大きな影響を与えているとともに、気液界面でのガス交換の促進にも大きく寄与することが知られている。しかし、ラングミュアー循環流はアスペクト比によって大きく構造が異なるため、この構造変化がガス交換にどう影響するのかについても考察する必要があると考えられる。そこで、本研究はアスペクト比を系統的に変化させた室内実験を行い、ラングミュアー循環流構造のガス交換現象への寄与について考察した。

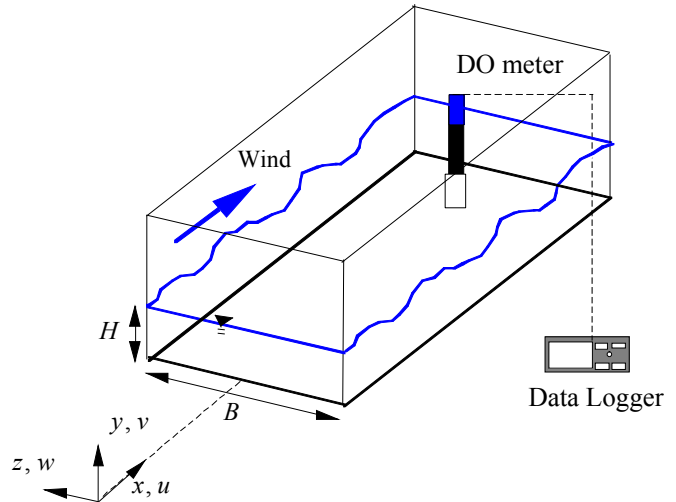


図-1 実験方法

表-1 実験条件

| case name | H (cm) | B/H | Ua (m/s) | Tw (°C) | Ta (°C) |
|-----------|--------|-----|----------|---------|---------|
| C20 | 20.0 | 2.0 | 10.05 | 26.3 | 28.0 |
| C18 | 18.0 | 2.2 | 10.52 | 26.4 | 28.3 |
| C16 | 16.0 | 2.5 | 10.60 | 27.6 | 28.5 |
| C13.3 | 13.3 | 3.0 | 10.32 | 25.4 | 27.7 |
| C10 | 10.0 | 4.0 | 9.54 | 26.4 | 27.9 |
| C8 | 8.0 | 5.0 | 9.96 | 26.7 | 28.5 |
| C6.67 | 6.7 | 6.0 | 9.42 | 26.3 | 28.0 |
| C5 | 5.0 | 8.0 | 9.49 | 27.4 | 29.3 |
| C4.4 | 4.4 | 9.1 | 9.21 | 26.9 | 28.2 |

2. 実験手法および水理条件

図-1 は本実験の装置図である。使用した水路は全長 16m, 幅 40cm, 高さ 50cm の可変勾配型風洞付き開水路である。水流部は循環式であり、今回はこの水路を閉水路として扱うため、循環パイプのバルブを完全に閉め、湖沼のような閉鎖性水域を再現した。水路上流部にはインバータモーターで駆動する大型ファンが取り付けられており、水層上に風を吹かせることで波を発生させた。下流端には消波板を設置し、反射波による影響を抑制した。フェッチ距離 7m の位置の水路内に酸素濃度計(TOADKK DM-32P)を設置し、水中の溶存酸素濃度を計測した。計測方法については、まず、水路中に無水亜硫酸ソーダを十分に混入して無酸素状態にした。その後、風波を発生させ、飽和濃度に達するまで酸素濃度を計測した。計測は 1 秒ごとにロガー(mini LOGGER GL220)に記録した。図中の x, y, z はそれぞれ主流方向、鉛直方向、横断方向の座標を表す。

x は主流方向を、y は水路底面を原点にして鉛直上向きを、z は水路中央を原点として主流方向に対して左岸方向をそれぞれ正とした。u, v, w はそれぞれ x, y, z 方向に流れる流速の正の方向である。図中の H は水深、B は幅を表す。

表-1 は実験条件を示す。H は水深、B/H は水槽のアスペクト比である。アスペクト比に伴う 2 次循環流構造の変化とそれがガス輸送に与える影響を実験的に解明するために、H を 9 通りに変化させた。Ua は空気層での風速を表し、全ケースで風速 10(m/s)前後になるようにモーターを調節した。Tw, Ta はそれぞれ水層、空気層での温度を表す。

3. アスペクト比変化に伴うラングミュアー循環流構造の変化

図-2 は過去の研究において得られたラングミュアー循環流の 3 次元構造である。縦軸が底面を y = 0 として鉛直方向にとり、横軸に水路中央を

$z=0$ として左岸方向にとり、それぞれ水路半幅 $b(=B/2)$ で無次元化している。流速は平均流横断ベクトル (V, W) とコンター U の3成分を表示している。アスペクト比 $B/H=2.0$ のケース(a)では、流れ場が左右対称な1対の循環セルが見られる。循環セルによって上昇流が発生している領域では低速ストリーク構造、一方で、下降流が発生している領域では高速ストリーク構造が見られる。次に、アスペクト比 $B/H=6.0$ のケース(b))に着目すると、循環セルが2対に増加している。また、ストリーク構造の数も増加しているが、上昇流が発生している領域では低速ストリーク構造、下降流が発生している領域では高速ストリーク構造が見られるという特性は変わらない。山上ら(2011)¹⁾は $B/H=5$ 付近を境に、 $B/H \leq 5$ で1対の循環セル、 $B/H \geq 5$ で2対の循環セル構造となることが示されている。

4. ガス交換係数の理論

水層内の溶存酸素の変化は以下の収支式で表される。

$$\frac{\partial VC}{\partial t} = Ak_L(C_s - C) \quad (1)$$

ここで、 C はある時刻 t における水層内の溶存酸素濃度、 C_s は飽和溶存酸素濃度、 V は水層体積、 A は界面の表面積、 k_L はガス交換係数を表す。 V を一定にすると、(1)式は

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{A}{V} k_L (C_s - C) = k_2 (C_s - C) \quad (2)$$

となり、 k_2 は再曝気係数と呼ばれる。初期濃度と時間経過後の溶存酸素濃度の分布から、この式での再曝気係数 k_2 が求められ、再曝気係数 k_2 とガス交換係数 k_L の関係は

$$k_L = Hk_2 \quad (3)$$

であるため、再曝気係数 k_2 が求められれば、水深 H を乗じることによってガス交換係数 k_L を求めることができる。

5. アスペクト比と溶存酸素濃度の関係

図-3 は各ケースにおいて得られた k_L 値の分布を水深に対してプロットしたものである。この図は横軸にアスペクト比を、縦軸にガス交換係数 k_L をとる。ここで、それぞれのケースにおいて水温に少しばらつきがあるため、以下の式を用いてすべての k_L 値を 20°C 時の値に変換して求めた。

$$k_L(20) = k_L(t)\theta^{t-20} \quad (4)$$

ここで、 t はケースごとの水温 ($^\circ\text{C}$)、 θ は温度影響係数で、 $\theta=1.027$ とする。アスペクト比が小さいケース(セル個数少)ではほぼ比例関係にあることがわかる。この近似直線を図-7に青色で追加した。しかし、アスペクト比が大きくなると直線からずれ、直線上の k_L 値

よりも大きなガス交換速度が計測された。このことはラングミュアーセルの個数やストリーク数の増加がガス輸送や拡散を促進することを意味し大変興味深い結果大といえる。

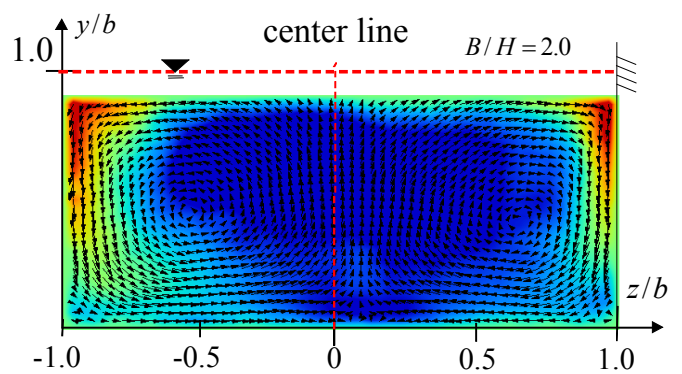
4. おわりに

本研究では風波によって生成されるラングミュアー循環流がガス輸送・拡散にもたらす影響について考察を行い、ラングミュアー循環流の構造変化がガス交換現象に大きく影響していることがわかった。

参考文献

- 1) 山上路生, 禰津家久, 小松峻也: 3台同時カメラ計測法によるラングミュアー循環流の形成特性に関する研究, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.67, No.3, pp.121-132, 2011.

(a) アスペクト比 $B/H=2.0$



(b) アスペクト比 $B/H=6.0$

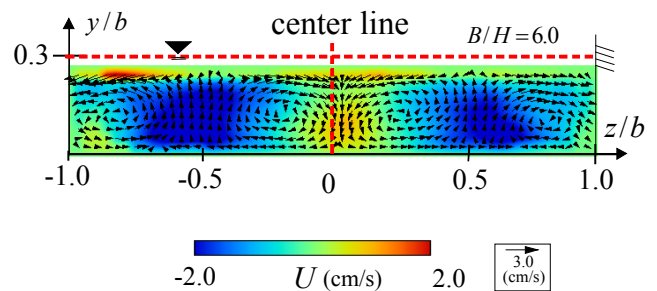


図-2 ラングミュアー循環流の概要図

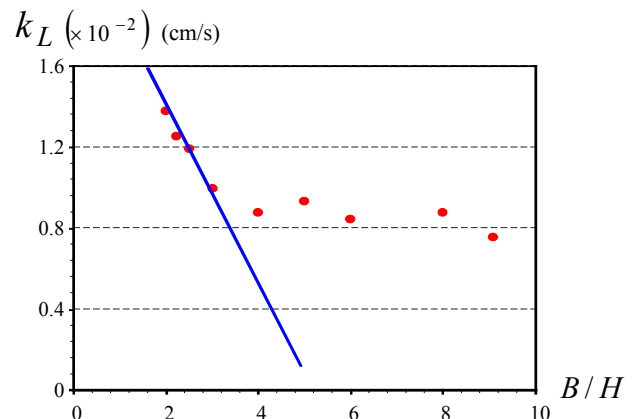


図-3 ガス交換係数 k_L の分布