

斜面上の波動場における組織渦構造と気体交換機構

Organized Vortex Structures and Air-Water Gas Transfer in the Wave Field on a Sloping Bed

杉原裕司*・河津那由他**・桜木幸司***
Yuji SUGIHARA, Nayuta KAWAZU and Koji SAKURAGI

*正会員 博士(工)九州大学大学院准教授 総合理工学研究院(〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

**非会員 修士(工)新日本製鐵株式会社(〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

***非会員 修士(工)JFE スチール株式会社(〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-3)

The gas transfer of CO_2 at the air-water interface when regular surface waves run up a sloping flat bed is investigated experimentally. The CO_2 absorption process is visualized by using a laser-induced fluorescence technique (LIF). We found out in the vicinity of the air-water interface, organized vortices whose rotation direction is opposite to that of the offshore vortex train, which was reported by Matsunaga et al. The counter-rotating vortices are found to promote efficiently the gas transfer at the wavy air-water interface in the offshore zone. The local gas transfer velocity is obtained from an image processing for LIF images. It is quantitatively confirmed that the transfer velocity increases due to the organized vortices.

Key Words: gas transfer, organized vortex, offshore vortex, air-water interface, LIF

1. 序論

気液界面での気体交換量を定量化することは、地球温暖化に代表されるような環境変動の予測手法を確立する上で重要な課題である。 CO_2 や O_2 などの低溶解性の気体の交換は、主として液相側の流体運動に支配されている。海洋に風が吹くと水表面にせん断力が作用し、それに起因する流速シアによって水表面近傍に乱流渦が形成される。Kamran et al.¹⁾は、風洞水槽において、PIV を用いて風波下の流速場を計測し、得られた流速データから気体交換を促進する大規模な乱流秩序構造を抽出した。そのような大規模な乱流渦が存在する領域は、その他の領域に比べて気体交換速度が 2.8 倍も大きく、全気体交換のおおよそ 60% を担っていることが示された。このように、風応力が作用する風波下の水中は乱流的であり、そのことが気体交換を促進する大きな要因になっている。

風応力の作用しない非碎波波動場には、気体交換を促進させる機構は特に存在しないように思われる。しかし、斜面上を波が伝播する場合、碎波帯外においても、碎波点で生成された乱れが定常循環流に乗って移流してくることにより、波動場が渦動的になることが知られている。Matsunaga et al.^{2,3)}は、そのような斜面上の碎波帯外において組織的な渦列(offshore vortex train)が形成することを実験的に見出した。碎波点から放出された乱れが沖向きの定常流に乗って碎波帯外に移流し、定常循環流のシアから渦度が供給されることで、組織的な渦列が形成されると考えられている。ここで、この碎波帯外の渦運動により、波動

気液界面での気体交換が促進されているのではないかと、いう仮説が成り立つ。このような組織渦が、気液界面での CO_2 輸送にどのような役割を果たしているのかを調べることは、環境流体力学の立場からも極めて興味深い問題である。

Woodrow and Duke⁴⁾は、 O_2 をトレーサー気体とするレーザー誘起蛍光法(Laser-induced fluorescence technique: LIF)を用いて規則波による波動場の濃度境界層厚さを計測し、波の位相によって境界層厚さが変化して、気体交換速度が波の谷の部分で最大になることを示した。これは、波動運動によって水表面が伸縮し、それに伴い境界層厚さが変動することに起因していると考えられる。従って、波動気液界面には、層流的な気体交換の促進機構も存在していると思われるが、そのような機構についての研究例が少なく、より多くの実験的知見が求められている。

本研究の目的は、斜面上を伝播する 2 次元規則波動場において、組織渦による気体交換過程をレーザー誘起蛍光法(以下 LIF)を用いて直接可視化することである。また、得られた LIF 画像から、波の位相に沿った局所的な気体交換速度を算出し、組織渦がどの程度気体交換に寄与しているのかについても定量的に検討する。

2. 実験装置および実験方法

図-1 に、本研究で用いた実験装置の概略図を示す。実験には透明アクリル板で作られた長さ 6.2m、深さ 0.5m、幅 0.15m の 2 次元造波水槽を用いた。水槽の一端には造波

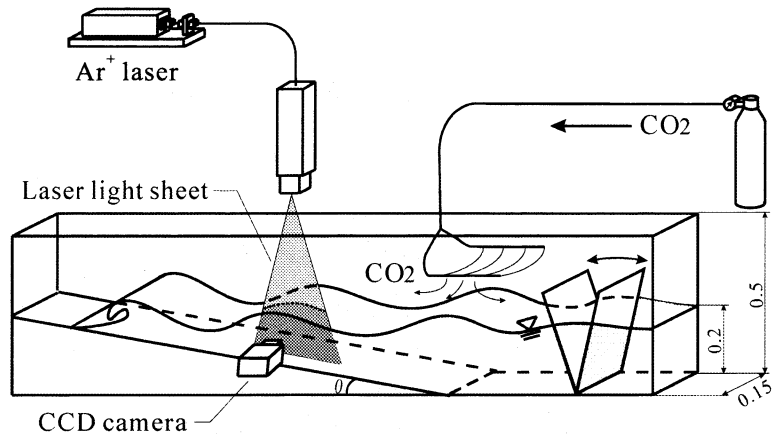


図-1 LIFに関する実験装置の概略図

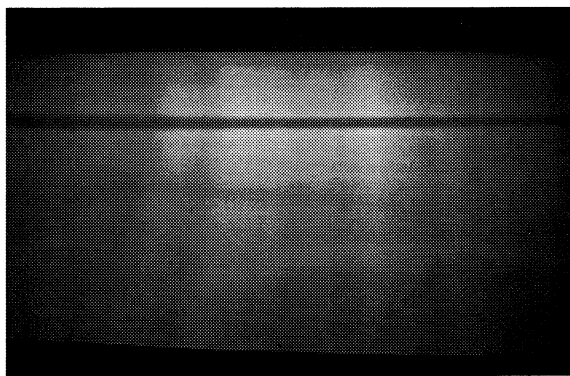


図-2 LIFによる可視化の一例
(撮影領域：横 18cm×縦 12cm)

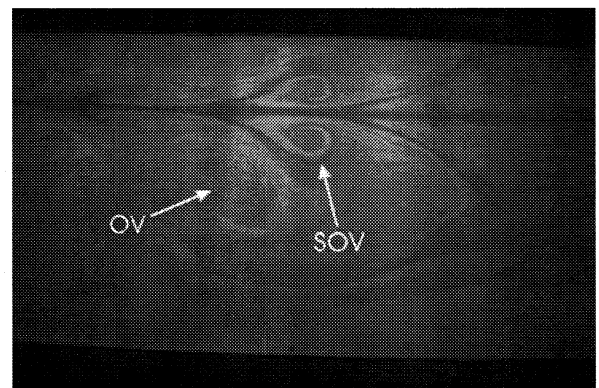


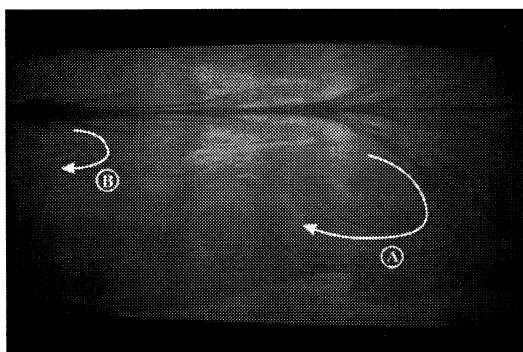
図-3 offshore vortex と surface offshore vortex
(撮影領域：横 18cm×縦 12cm)

機が取り付けられており、他端には長さ 5.0m の斜板が設置されている。斜板の勾配 θ は 2.68° に固定されており、水平床における平均水深は 0.20m である。造波板の振動周期 T は 1.25s であり、斜板上に入射する規則波の沖波波長 L_0 と沖波波高 H_0 は、それぞれ 2.4m および 0.06m である。 L_0 は $gT^2/2\pi$ から、 H_0 は水平床部で撮影された水面変動のデジタルビデオ画像を解析することによって評価した。ここで、 g は重力加速度を示す。なお、これらの実験条件は、Matsunaga et al.³⁾ によって報告された組織渦の形成条件を満足していることに注意する。また、組織渦が形成されているか否かを確認するために、この条件に加えて $T=0.71s$, 2.50s の条件の可視化実験も別途行った。

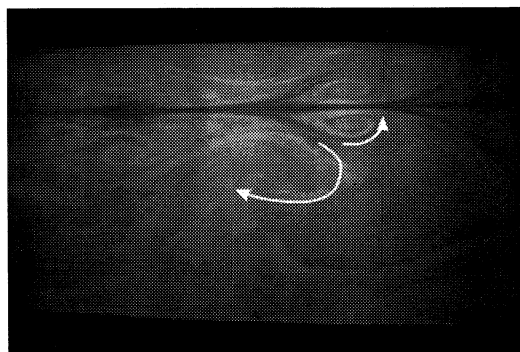
LIF を行う際に作業流体に溶解させる蛍光物質として水溶性蛍光染料のフルオレセインナトリウム ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$) を用いた。フルオレセインナトリウム水溶液が CO_2 を吸収するとその部分の pH が局所的に低下し、その結果蛍光強度が低下する性質を利用して溶存 CO_2 の濃度分布を定性的に可視化できる。すなわち、流体中にレーザー光を挿入した場合、高い CO_2 濃度の流体塊は相対的に暗くなり、低い流体塊は明るく見えることになる。なお、水溶液のフルオレセインナトリウム濃度が $2.5 \times 10^{-6} mol/l$ の場合に蛍光強度が最大になることが過去の研究³⁾ からわかっているため、本研究でもフルオレセインナトリウム水溶液の濃度が

その値になるように調整した。本実験では、アルゴンイオンレーザーのスリット光を水槽直上から水表面に挿入し、水槽に対して固定されたデジタルビデオカメラによって水表面の下から角度をつけて撮影を行った。その際、 CO_2 を水槽の奥行き方向に一樣に 5l/min の流量で供給した。また、デジタルビデオカメラの解像度は $640 \times 480 pixels$ 、フレームレートは 30frames/s であった。撮影領域は 18cm×12cm であり、本実験ではカメラの角度による画像の歪み補正は行っていない。カメラのレンズには透過限界波長が 520nm のシャープカットフィルターを装着し、蛍光のみを撮影するようにした。本実験では規則波を対象としており、レーザーシート光は波の伝播方向に沿って挿入しているため、レーザーの屈折・散乱の影響はかなり小さく、カットフィルター以外の特別な補正は行っていない。撮影は、砕波点から沖側 1.3m の位置において、静水状態から開始して造波後 10 分程度まで連続的に行った。なお、造波開始から数分程度経過後には、乱流場はほぼ動的安定状態に達することを確認している。以下で示す全ての画像において左側が岸方向で右側が沖方向に対応している。

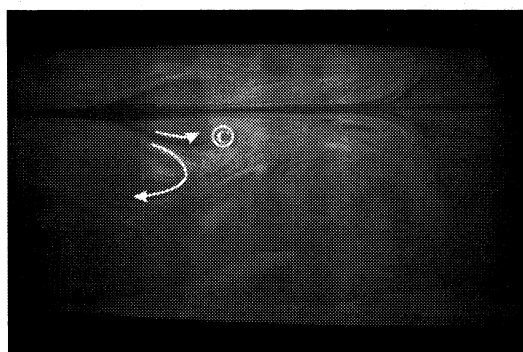
図-2 に LIF による CO_2 吸収過程の可視化画像の一例を示す。画像内の中心よりやや上に見えている黒い線が濃度境界層を示しており、その中心線が水表面の位置に相当する。水表面より上側に写っている部分は、レーザーシート



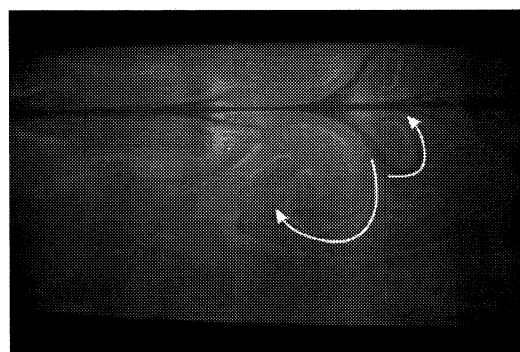
(a) $t=0\text{ s}$



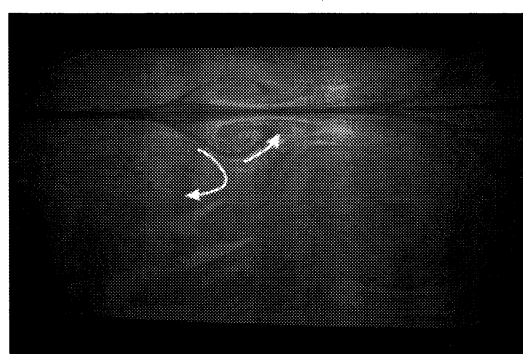
(e) $t=25\text{ s}$



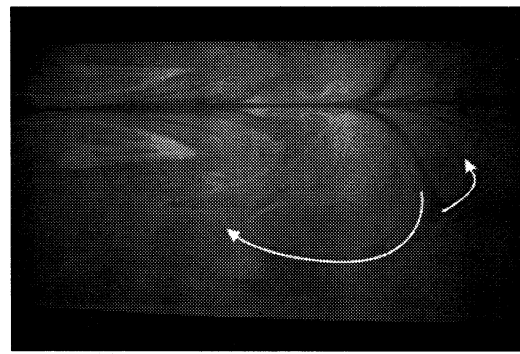
(b) $t=5\text{ s}$



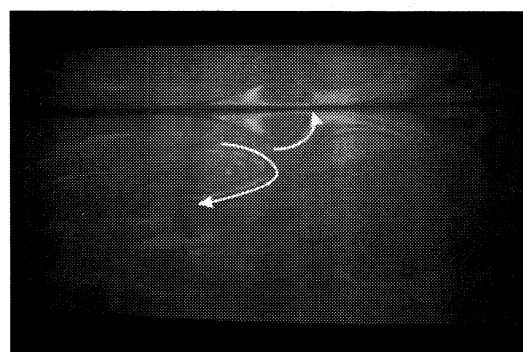
(f) $t=30\text{ s}$



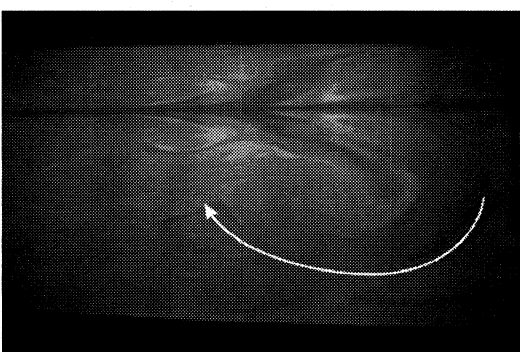
(c) $t=10\text{ s}$



(g) $t=35\text{ s}$



(d) $t=15\text{ s}$



(h) $t=45\text{ s}$

図-4 組織渦構造による気体交換過程 (撮影領域：横18cm×縦12cm)

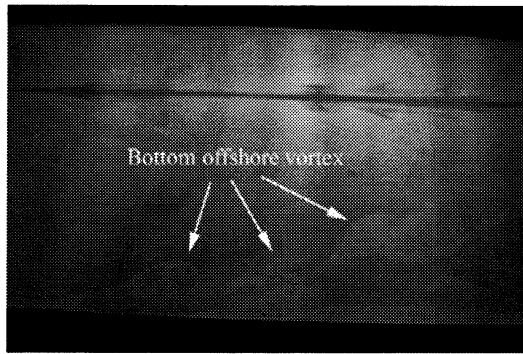


図-5 bottom offshore vortex
(撮影領域：横 18cm×縦 12cm)

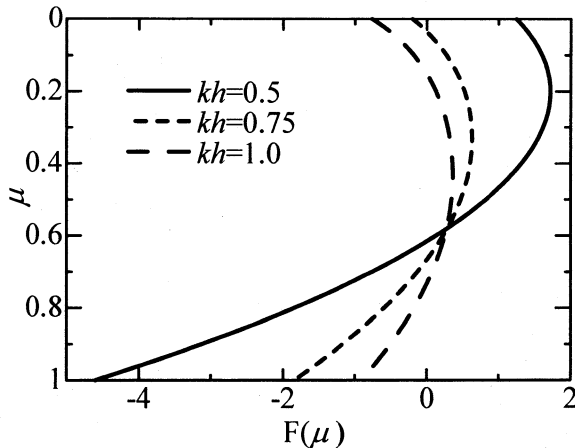


図-7 無次元定常流速場の鉛直分布

上の LIF パターンがレーザーシート面によりも手前の水表面で反射して写り込んでいるものであり、本研究では水表面から下側に見える領域のみを検討対象とする。画像下方には斜板が写っている。

3. 組織渦構造と気体交換過程の可視化結果

本章では、LIF によって可視化された組織渦構造を示し、組織渦がどのように気体交換を促進しているのかについて明らかにする。本研究において、従来認識されていた offshore vortex (以下 OV) とは逆向きの半時計周りの渦度を持つ、水表面付近に形成される組織渦構造を見出した。この渦を、ここでは surface offshore vortex (以下、SOV) と呼ぶこととする。図-3に SOV の構造を示す。画像中央付近に時計周りの渦度を持つ OV があり、その右上に OV とは逆向きの、半時計周りの渦度を持つ SOV が確認できる。SOV は多くの場合 OV と対で観察された。本実験の可視化位置においては、OV は半水深程度の比較的大きなスケールを有しているが、SOV は OV と水表面の間に形成するためそのスケールは相対的に小さく、OV によって伸張されてスケールを増大させながら渦度を失い消滅する。しかし、SOV は水表面付近に形成されるため、気液界面での気体交換において重要な役割を担っていることが推察される。図-4 (a)～(h)に、組織渦構造による気体交換過程の一例を示す。これらの図は、乱流渦が濃度

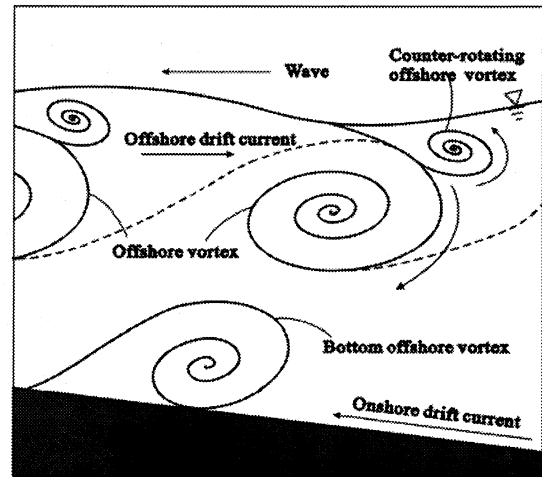


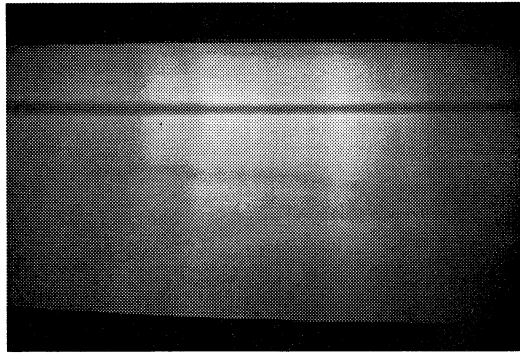
図-6 組織渦構造の模式図

境界層を更新する過程を LIF によって可視化したものであり、それぞれの画像の時間間隔は 5s である。図 (a)において、中央右側に OV(A)が、中央左側に OV(B)(以下(B))の存在が確認できる。図 (b)では、(B)が沖方向に移流しながら成長し、その右上部分に SOV(C)(以下(C))が発生し始めているのがわかる。図 (c)では、さらに沖方向に移流しつつ、(C)が境界層を界面から剥ぎ取りながら巻き取っている様子が確認できる。図 (d)～(g)の一連の画像において、(B)によって(C)が引き伸ばされ、界面近傍の高い CO_2 濃度の流体がバルク領域へと引きずり込まれている過程が可視化されている。そして、図 (h)では(C)はもはや原型をとどめておらず、バルク領域に拡散してしまっていることがわかる。以上のように、中央付近の OV と共に SOV が形成し、溶存濃度境界層を剥ぎ取っていくことで気体交換を行っていることが明らかとなった。また、SOV が OV によって移流・伸張されることによって CO_2 がバルク領域に効果的に拡散・混合していくことがわかる。

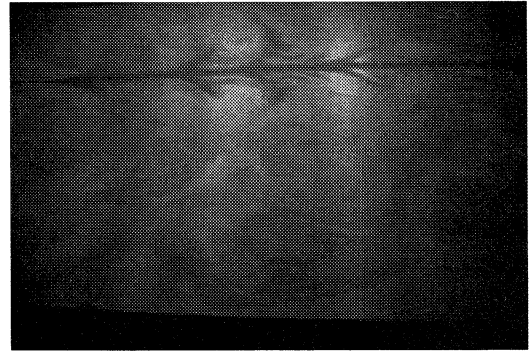
本研究ではまた、底面付近に OV と同じ方向の時計周りの渦度を持つ組織渦構造を見出した。この組織渦構造をここでは bottom offshore vortex (以下 BOV) と呼ぶこととする。図-5に BOV の構造を示す。画像中央の底面に沿って、BOV が 3 つ連なって形成していることがわかる。この組織渦構造は OV と同じ回転の渦度を持っているため OV とマージングすることができ、バルク領域の拡散・混合に大きな役割を果たしていることが予想される。また、ここでは BOV が相対的に明るく可視化されているが、底面近傍には砕波点方向に向かって遡上する定常流が形成されており、BOV が沖側底層のより CO_2 濃度の低い流体から構成されているためであると考えられる。

4. 組織渦構造の形成機構

図-6に、砕波帯外の組織渦構造の模式図を示す。この図のように、底面付近には規則波の進行方向に向かう強い岸向き定常流があり、その補償流として、水表面に沿って



(a) 規則波の入射直後



(b) 十分時間が経過した後（5分程度経過後）

図-8 砕波帯外における規則波入射直後と十分時間が経過した後の様子（撮影領域：横 18cm×縦 12cm）

沖向きの定常流が形成されている。この定常流速場によって底面付近に形成する BOV は岸方向に移流し、水表面付近に形成する OV と SOV は沖方向に移流する。ここで、定常流速場の鉛直分布について考える。Longuet-Higgins⁶⁾によって示された、水平床上を波が伝播するときの質量輸送速度を表す理論式は次のように表される。

$$U(z) = \left(\frac{\pi H}{L} \right)^2 CF(\mu) \quad (1)$$

$$F(\mu) = -1/(4 \sinh^2 kh) [2 \cosh \{2kh(\mu - 1)\} + 3 + kh \sinh \{2kh(3\mu^2 - 4\mu + 1)\} + 3(\sinh 2kh / 2kh + 3/2)(\mu^2 - 1)]$$

ここで、 $U(z)$ は質量輸送速度、 H は波高、 L は波長、 C は波速、 h は水深、また $\mu = zh$ を示す。本研究では斜面を波が伝播する場合について調べているが、定性的には斜面上でもこの式で表される流速場と類似した流速場になると仮定して、便宜的にこの式を用いて考察する。図-7に、 $(\pi HL)^2 C$ で規格化された無次元定常流速 $F(\mu)$ の鉛直分布を示す。底面から鉛直上向きに z 軸をとっているため、 $\mu = 0$ が底面に相当し、 $\mu = 1$ が水表面に相当する。 $F(\mu)$ が正のときが沖向きの流速を、負のときが岸向きの流速を示すことに注意する。ここで k は波数であり、本実験での kh の値は0.5である。式(1)は、 kh の値に関係なく、水表面付近で正の最大値を取るような速度分布を示しており、この最大値より底面側の部分の流速シアによって OV と BOV が形成・強化され、水表面側の部分の流速シアによって SOV が形成するものと考えられる。また、 kh の値が大きくなるにつれて、OV に関与する流速シアは小さくなり、SOV に関与する流速シアは若干ではあるが大きくなる。OV は、沖向きに移流しながら、マージングによりそのスケールを増大させるため、1つの渦構造の寿命時間を定義するのは難しい。ただし、砕波点からの到達距離（形成区間長）については既往研究⁷⁾で明らかにされている。一方、SOV について、OV の形成機構と密接に関わっているため、その形成領域も OV のそれと類似している

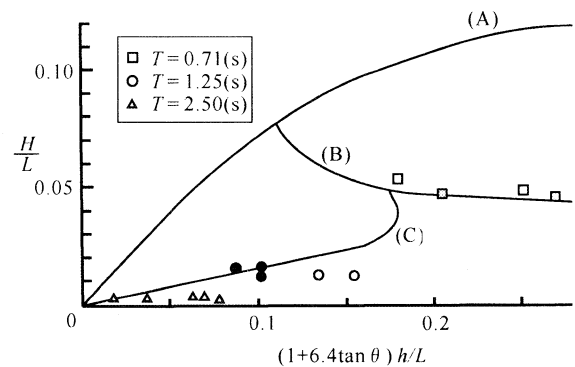


図-9 組織渦構造の形成領域

ものと思われる。また、SOV の寿命時間は、図-4でも示されたように、およそ数十秒のオーダーであると考えられる。

図-8 (a), (b)に、砕波帯外において規則波を入射した直後と、ある程度時間が経過した後の LIF の可視化結果を示す。規則波を入射した直後の (a)では濃度境界層はほぼ一様な厚さを示しており、水中には乱流的な構造はほとんど存在しないことがわかる。一方、規則波を入射して十分時間が経過した後（5分程度経過後）の (b)では組織的な渦構造の存在が確認できる。このことから、規則波を入射してから一定時間が経過することで、定常流速場が形成され、砕波点付近で発生した乱れが岸向き定常流によって移流し、砕波帯外の定常流の流速シアによって渦度が強化されることによって気体交換を促進する組織渦構造が形成されるものと考えられる。また、これらの組織渦構造は一時的に形成されるものではなく、発生・消滅を繰り返しながら同様の構造が維持されることを確認している。以上のように、波動があるだけでは渦動的な構造は発生しないが、斜面上に波が入射する場合には、風応力の作用しない砕波帯外においても渦動的な構造が形成されることが確認された。

図-9に Matsunaga et al.³⁾が示した OV の形成領域図に、本実験の結果をプロットしたものを示す。ここで、 H と L はそれぞれ局所的な波高と波長を示す。また、この図に限り、規則波の周期 T が0.71s, 2.5sの実験結果も併せて示

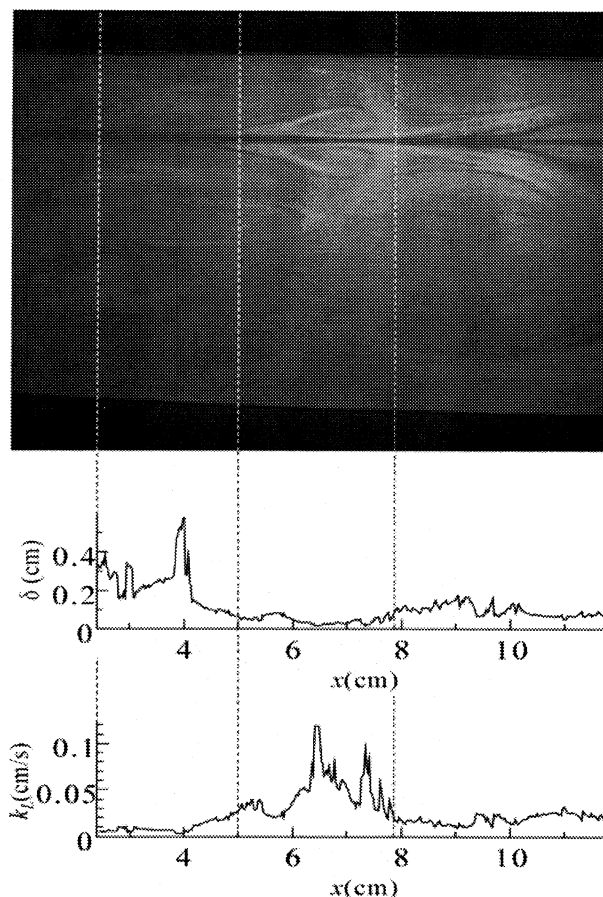


図-10 δ と k_L の関係

していることに注意する。この図において、原点より右上方向に向かって描かれている実線(A)は砕波限界を表しており、原点より図の中央に向かって描かれている一番下の実線(C)は組織渦が沖側で消滅する境界を表している。また、図の中央から右下に向かって描かれている実線(B)は斜面上に入射する波の沖波波形勾配が 4.0×10^2 以下でなければ組織渦が形成しないという形成限界を示している。 $T=1.25s$ の左側の3点(黒色)においては組織渦が形成されていることが確認された。 kh の一番小さい左の点ではOVが支配的であり、 kh の大きい右の2点ではSOVが支配的であることがわかった。このことは、先の質量輸送速度の流速場の依存性と矛盾しない結果となっている。なお、規則波の周期 T を $0.71s, 2.5s$ とした実験、また周期 $T=1.25s$ のうち図-9の右側2点の実験においては、OV、SOVの両方とも見出すことはできなかった。

5. 組織渦構造と気体交換速度の関係

境膜モデル⁸⁾によれば、気体交換速度 k_L は、境界層厚さ δ を用いて次のように表される。

$$k_L = \frac{D}{\delta} \quad (2)$$

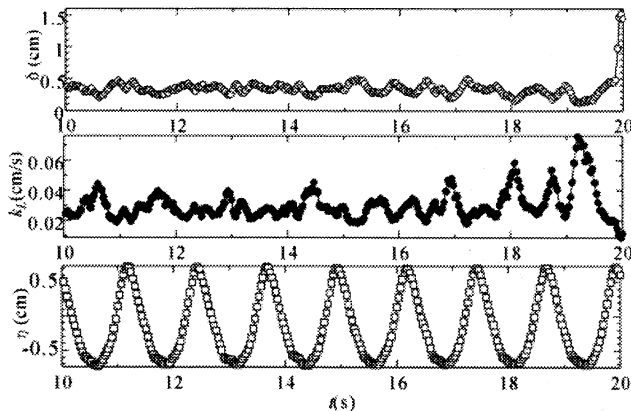
ここで、 D は溶存気体の分子拡散係数である。従って、 k_L を求めるためには境界層厚さ δ を求めれば良いことがわかる。濃度境界層は、水表面近傍で濃度が急激に変化する領域である。LIFの可視化画像において、 CO_2 の濃度変化は輝度の変化に対応するので、LIFによって得られた輝度データから、輝度が急激に変化する領域を判定し、その厚さを求めることで境界層厚さ δ を求めることができる。水面直上から入射するレーザー光が水中で徐々に減衰する効果(ランバート減衰)を補正後に、濃度分布から境界層厚さを算定した。境界層厚さと輝度値の間には、次のような関係がある。

$$\frac{Ib - I(z)}{Ib - Ii} = \exp\left(\frac{-z}{\delta}\right) \quad (3)$$

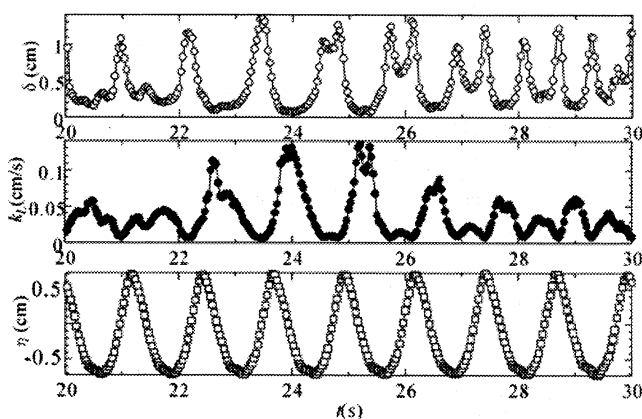
ここで、 Ib 、 Ii および $I(z)$ は、それぞれバルク層、水表面、水深 z における輝度値を示す。この式の両辺に対数を取り、 $\ln(Ib - I(z)/(Ib - Ii))$ を X とおくと、

$$z = -\delta X \quad (4)$$

と表せる。水深 z と X の関係に最小二乗法を用いて直線関係を適合させ、その傾きから境界層厚さ δ を求めた。式(3)の関係は水表面付近でよく成り立つと考えられるので、ここでは $(Ib - I(z))/(Ib - Ii) < 0.3$ の範囲のデータに対して最小二乗法を適用している。このようにして得られた境界層



(a) $t = 10 \sim 20$ s



(b) $t = 20 \sim 30$ s

図-11 δ , k_L および η の時系列

厚さ δ の値を式(2)に代入して気体交換速度 k_L を算出した。

図-10に、LIFによって可視化された組織渦と、 δ および k_L の関係を示す。画像の両端でレーザーの減衰により輝度が小さくなるので、両端を除いた10cmの範囲について δ と k_L を算定した。ここで画像の左端を $x=0$ としている。画像の中央付近にOVが2つ並んでおり、その間にSOVの存在が確認できる。この画像では、中央のSOVが活発に運動しており、画像からもSOVの領域($x=6.3$ cm)における境界層が最も薄くなっている。 k_L の分布を見ると、その領域で k_L が局所的に大きくなっていることがわかる。一方、画像左側の境界層が剥ぎ取られている領域($x=3.9$ cm)では、境界層が局所的に厚くなっている。

図-11(a), (b)に、 $x=7.2$ cmにおける δ , k_L および水面変動 η の時系列を示す。ここでは、約20秒間の時系列を10秒分ごとに(a), (b)に分けて示している。図(a)を見ると、10~17sの時間帯においては組織渦構造による境界層の剥ぎ取りはなく、 δ は波の位相に合わせて周期的に変動していることがわかる。 $t=20$ s付近から、 δ は大きく変動し始めており、 k_L についても $t=17$ s くらいから徐々に大きくなっていることから、このあたりの時間帯に組織渦が接近してきたものと考えられる。図(b)を見ると、 $t=24$ s

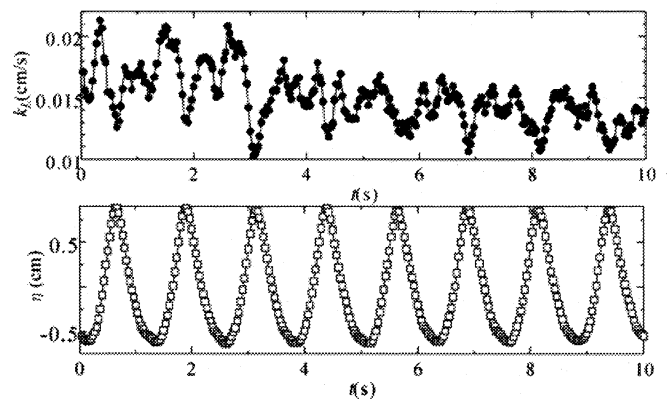


図-12 規則波入射直後の k_L と η の関係

付近で k_L が最大値を示しており、その時間に組織渦による気体交換が最も促進されていることがわかる。 δ や k_L が波の周期 T よりも十分大きなタイムスケールで変動しているのは、Woodrow and Duke⁴⁾の示した波動界面の伸縮による機構とは別に、組織渦に起因した渦動的な気体交換の機構が作用しているためである。

図-12に規則波を入射した直後の k_L と η の関係を示している。ここでは組織渦はまだ存在していないことに注意する。多少時間の経過した5s以降に着目すると、 η が極大の位相で k_L が小さくなり、極小の位相で大きくなるという逆相関の関係が見られる。このような関係は、Woodrow and Duke⁴⁾によって報告された結果の妥当性を支持している。このような挙動は、図-11の組織渦が通過する前の時間帯でも確認できる。従って、Woodrow and Duke⁴⁾が報告したこのような挙動は、波動気液界面が示す普遍的な特性であると考えられる。

組織渦構造の気体交換への寄与について50秒間のデータを基に検討した。図-11の結果に基づいて、明らかに組織渦構造が気体交換を促進していると考えられる $k_L > 0.035$ の場合を、組織渦構造による気体交換への寄与部分と定義した。全時間帯の k_L の平均値と比較すると、組織渦構造の影響を受けた時間帯の局所的な k_L の値はその約5倍の値をとることが明らかとなった。ただし、このように局所的には大きく気体交換が促進されるが、全時間帯の k_L の時間積分値に対する組織渦構造が寄与した時間帯の k_L の寄与は、高々15%程度であった。なお、この寄与率は界面とバブル領域の CO_2 濃度差の時間変化が無視できるとすれば、そのままフラックスの寄与率と見てもよいことに注意する。これは、組織渦構造が30sという長周期で発生するために、時間平均で見ると気体交換への寄与が相対的に小さくなってしまったためであると考えられる。しかし、組織渦構造は、水面付近での境界層の剥ぎ取りと、渦のマーキングによるバブル領域の拡散機構とを併せて気体交換を促進する重要な役割を担っていると考えられる。

6. 結論

本研究では、LIFを用いて、砕波帯外に形成する組織渦がどのように気体交換を促進するのかについて実験的に検討した。また、砕波帯外における組織渦の形成機構について考察した。LIFで得られた画像から、局所的な k_L を算出し、組織渦構造がどの程度気体交換に寄与しているかを明らかにした。本研究で得られた結果を要約すると以下のようになる。

(1) 斜面上を波が遡上するとき、砕波帯外では、surface offshore vortex, offshore vortex, bottom offshore vortex から成る組織渦構造が形成されることがわかった。

(2) 水表面付近に形成する時計回転の surface offshore vortex と時計回転の offshore vortex が連動して境界層を剥ぎ取り、offshore vortex と bottom offshore vortex がマージングすることでバレル領域を効果的に混合し、気体交換を促進していることがわかった。

(3) LIFの画像から気体交換速度 k_L を算出した結果、組織渦構造の通過時には平均値の5倍程度の値をとることがわかった。また、全時間帯の k_L の積分値に対する組織渦領域の局所的な k_L の寄与は15%程度であることが明らかになった。

OVの形成については、Li and Dalrymple⁹⁾が、水槽実験と理論解析に基づいて、OVの形成が定常戻り流れの不安定性に起因するとした形成機構を提案している。また、彼らは、水深に渡って2つのせん断層が存在することを示しており、水表面近傍にはOVと逆向きの渦が形成するとしている。この渦と、本研究で報告したSOVは同様の構造である可能性があるが、この点については今後の検討課題としたい。

本研究では、水表面に風応力が作用しない規則波動場を対象としているが、風応力が作用して風波が形成する場合の気体交換も興味深い現象である。例えば岸向きの風応力により吹送流が発生する場合、本実験とは異なる定常シア一帯が形成するものと思われる。そのような場合、本研究で見られた組織渦構造が安定的に形成されないかもしれない。また、風応力の作用により水表面極近傍に高シア一帯が形成されることから、より微細な表面更新乱流渦が気体交換を支配することが予想される。

謝辞

本研究を行うにあたり、九州大学教授の松永信博先生に貴重なご助言を頂きました。また、(株)神戸製鋼所の三木達也君(当時九州大学大学院修士課程)には実験に際して多大な協力を頂きました。本研究の一部は、平成18-20年度科学研究費補助金(基盤研究(C):代表者杉原裕司)の援助の下で行われたものです。また、査読者の方から既往研究に関して有益な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) H. K. Siddiqui and M. R. Loewen.: Coherent structures beneath wind waves and their influence on air-water gas transfer, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 109, pp. 1559-1573, 2004.
- 2) N. Matsunaga, K. Takehara and Y. Awaya.: The offshore vortex train, *J. Fluid Mech.*, Vol. 276, pp. 113-124, 1994.
- 3) N. Matsunaga, K. Takehara and Y. Awaya.: Coherent Eddies Induced by Breakers on a Sloping Bed, *Proc. 21st Conference on Coastal Engineering*, pp. 234-245, 1988.
- 4) P. T. Woodrow and S. R. Duke.: Laser-induced fluorescence studies of oxygen transfer across unsheared flat and wavy air-water interfaces, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 40, pp. 1985-1995, 2001.
- 5) 竹原幸生, 加藤明秀, 江藤剛治: 風波による炭酸ガスの取り込み過程の可視化, *海岸工学論文集*, 第46巻, pp. 101-105, 1999.
- 6) M. S. Longuet-Higgins.: Mass transport in water waves, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 245, pp. 535-581, 1953.
- 7) 松永信博, 竹原幸生, 栗谷陽一: Offshore vortex train の特性に関する定量的評価, *土木学会論文集*, 第417号/II-13, pp. 157-164, 1990.
- 8) W. K. Lewis and W. G. Whitman.: Principles of gas absorption, *Industrial and Chemistry*, Vol. 16, pp. 1215-1220, 1924.
- 9) L. Li and R. A. Dalrymple.: Instabilities of the undertow, *J. Fluid Mech.*, Vol. 369, pp. 175-190, 1998.

(2008年4月14日 受付)