

画像計測による風波界面での気流・水流の相互作用に関する 実験的研究

竹原 幸生* ・大塚 直** ・江藤 剛治***
高野 保英**** ・辻本 剛三***** ・水谷 夏樹*****

風波発生時における気流と水流の相互作用を解明するために、画像計測を用いた水表面近傍の気流・水流の同時計測を行った。本研究では、著者らが独自に開発した画像計測技術を用いて、風波が生じた条件下で流れ場の計測を行った。画像計測上問題となる移動する水表面が存在する場合でも、水表面極近傍まで流速を計測できる粒子追跡速度計測法 (PTV) を適用した。白波が生じない範囲で、3つのケースについて計測を行った。計測された流速分布図より、渦度分布、せん断変形分布を求め、それぞれのケースにおける流れ場の特徴的な構造を明らかにした。

1. はじめに

海面を通した物質や運動量等の輸送現象は、主に風によって引き起こされる。海面上に風の応力が作用すると、吹送流が生じ、ある風速以上で風波が発生し、さらに発達すると波が砕け、白波 (以下、whitecap と呼ぶ) を生じる。吹送流や風波は水面を乱し、大気-海洋間の物質や運動量の輸送を促進する。

海面を通した輸送現象を明らかにするには、風波の発生、発達、砕波機構を明らかにする必要がある。風波の発生、発達、砕波機構に関する研究は、海洋波の予報を目的に半世紀ほど前から始められ、統計学的手法を用いて比較的高精度に予測できるようになってきた (例えば、光易, 1995; 鳥羽, 1996)。しかし、海面に風応力が作用したときの風波の発生機構、風から波への運動量の輸送機構や砕波機構については、移動する海面の存在するという計測上の困難さから、不明な点が多く残されている。

最近、画像速度計測法 (Imaging Velocimetry, IV) による風波下の流速場計測が行われ始めた (例えば、Banner and Peirson, 1998; 水谷ら, 2002; 竹原ら, 2002)。著者らはこれまで海面における物質や運動量の輸送現象の解明を目的に、風波界面近傍の気流場と水流場の同時画像計測技術の開発を行ってきた。開発された計測技術により、これまで計測が困難であった水表面極近傍の流れ場の空間構造を詳細に計測することができる。また、ビデオ画像を用いるため 2 次元空間データを時系列として入手できる。得られた 2 次元空間の時系列データを解析することにより、これまでの点計測データでは推定できなかった風波機構を明らかにできる可能性があり、強力なツールとして期待されている。

本研究では著者らが開発した計測技術を用いて、whitecap が発生しない範囲の風速条件下で、気流・水流

の同時画像計測を行った。本報告では、計測結果より気流場と吹送流および風波の相互作用に関して得られた知見を報告する。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽

実験には小型の風洞水槽 (長さ 16 m, 高さ 0.5 m, 幅 0.5 m) を用いた。全ての実験において水深は 0.32 m に固定した。風はインバータ型ファン送風装置を用いて発生させた。インバータによりファンの周波数が制御されており、周波数を変化することで風量を連続的に変化させることが出来る。測定部は、送風口より 7.5 m 風下位置に設置し、1 m 区間を側壁、上下面全て透明材料で作成した測定部を設けている。

風洞水槽内の風量は予め計測されている。今回の実験での気流の条件として、さざ波が発生する状態から白波が発生しない範囲で、平均風速 $U_a = 4.0, 6.0, 10.0$ m/s の 3 ケースを選んだ。計測は風を吹かせ始めてから波を十分に発達させた後行った。

風波の特性量に関しては画像から求めたため、主要な波の波高 H 、波速 C のみを求めた。各実験ケースについて画像計測を行った連続する 20 組の画像から求めた。得られた風波の基本的な特性量は既往の研究による統計的な実験結果と比較することができないが、基本的な風波の特性を示すことができる。

(2) 気流・水流の画像同時計測法

計測にはこれまで著者らが開発してきた方法を用いた。以下では、簡単に計測手法の概要を述べる (竹原ら, 2002)。

2 式の PIV 計測装置 (Nd: YAG レーザー, CCD カメラ, 制御用 PC) を用いた。レーザービームはシリンドリカルレンズによりシート光に変換され、観測部に照射される。1 台のレーザーを水槽上部から照射し、1 台の CCD カメラで気流速を計測した。同様に、もう 1 台のレーザーを水槽下部から照射し、もう 1 台の CCD カメラにより水流速を計測した。レーザーによって照射される断面は、風向きに沿った鉛直 2 次元断面であり、気流

* 正 会 員 博 (工) 近畿大学助教授理工学部社会環境工学科
** 学生会員 近畿大学大学院総合理工学研究科環境系工学専攻
*** 正 会 員 工 博 近畿大学教授理工学部社会環境工学科
**** 正 会 員 博 (工) 近畿大学助理工学部社会環境工学科
***** 正 会 員 工 博 神戸市立工業高等学校教授都市工学科
***** 正 会 員 博 (工) 国土技術政策総合研究所沿岸海洋研究部

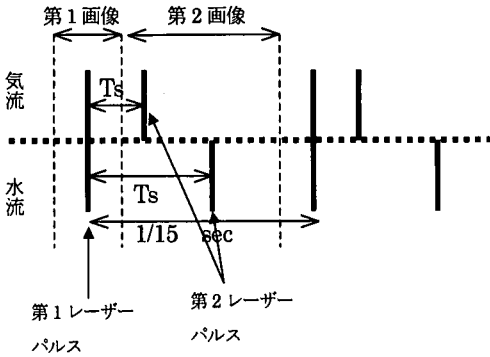


図-1 レーザー発光タイミング

部と水流部の観測位置が正確に一致するように設置した。2式の PIV 計測装置は同期装置により完全に同期しており、気流部と水流部との同時計測が可能となる。

気流に比べ水流は約1オーダー遅いので、2台のレーザーの発光、および2台の CCD カメラの撮影タイミングを変化させる必要がある。今回使用した PIV 計測装置は連続する2枚の画像をダブルパルスレーザーのパルス間隔を短くすることにより、高速流でも計測可能にしたものである。短い時間間隔で撮影された連続する2枚の画像の組は、15 Hz 間隔で入手できる。比較的風速が遅い場合、水流の計測は1/15秒間隔の2枚の画像を用いても流速場を計測できる。しかし、高風速になると1/15秒間隔の2枚の画像では移動量が大きくなり計測が困難となり、また気流用のレーザーパルス間隔では粒子が移動せず、パルス間隔を気流用と水流用で変化させる必要が生じた。今回はタイミングディレイ装置を用いて、レーザー発光タイミングを調整した(図-1参照)。具体的には、気流部の計測用のレーザー発光間隔 T_s を $250 \mu\text{s}$ を固定し、水流の計測では、 $T_s=1/15 \text{ s}=66.6 \text{ ms}$ ($U_a=4.0 \text{ m/s}$, 6.0 m/s)、および $T_s=3.25 \text{ ms}$ ($U_a=10.0 \text{ m/s}$) とした。

水流のトレーサー粒子としてナイロン12粒子(平均粒径 $50 \mu\text{m}$, 比重 1.02)、気流のトレーサーとして微小水滴(粒径 $1\sim 10 \mu\text{m}$ 程度)を用いた。微小水滴は、医療用ネブラザーを改良した微小水滴発生装置から発生させた。水面決定のため蛍光染料であるウラニン(フルオレセインナトリウム)を混入した。ウラニンの蛍光励起波長域は 494 nm 付近にあり、YAG レーザー (532 nm) でも十分に蛍光を発する。水面位置は蛍光強度の変化が最も大きい位置とした。

画像座標から実空間座標への変換には2次関数変換を用いた。変換係数の決定では、直径 1 mm の標定点を 1 cm 間隔でマークした標定板を撮影し、25点の計測値を用いて最小二乗法により求めた。

(3) 特性量の算出方法

PTV により得られる流速ベクトルは粒子が存在する位置で定義される。よって、得られた結果はランダムな位置における流速分布図となる。渦度、せん断変形速度を比較的求め易くするため、ランダムな点上の流速分布を格子点上の流速分布に変換する。格子点への変換は、ガウス分布の重み付き平均操作を用いた。重み関数であるガウス分布関数の分散値には、PTV により求められた粒子数から求められる平均的な粒子間隔の2倍を用いた。変換された格子点状の流速分布を用いて渦度、およびせん断歪み速度を求めた。渦度、およびせん断変形速度は4点の格子点で囲まれる領域の中心点で定義し、4点の流速データを用いて求めた。具体的な計算には以下の式を用いた。

$$\frac{\partial v}{\partial x} \pm \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{(v_{i+1,j} + v_{i+1,j+1}) - (v_{i,j} + v_{i,j+1})}{2\Delta x} \pm \frac{(u_{i+1,j} + u_{i+1,j+1}) - (u_{i,j} + u_{i,j+1})}{2\Delta y}$$

ここで、 $(x, y) = (i, j)$ は格子点位置を表し、 Δx , Δy は格子間隔を表している。

3. 実験結果および考察

(1) ケース1 (平均風速 4.0 m/s)

風波の平均波高 $H=0.48 \text{ cm}$ 、平均波速 $C=68.4 \text{ m/s}$ であった。さざ波が生じている状態である。図-2に連続する3時刻の渦度分布を、図-3に図-2と同時刻のせん断変形速度分布を示す。

以下のすべての図について、風は右から左へ吹いている。渦度は、負(黒色)で時計回り、正(白色)で反時計回りを示す。せん断変形速度は、負(黒色)の場合、風による順方向のせん断変形となる。

図-2, 3より得られた結果を以下に箇条書きにする。

- ① 水流部の水表面近傍に強い時計回りの渦度のパッチが生じている(図-2(a)矢印)。
- ② 時計回りの渦の下方に反時計回りの渦帯が存在する。
- ③ 水流部の左下部分に大きな反時計回りの渦が存在する。これは吹送流と補償流のせん断によって生じた大規模な渦であり、安定して存在する(図-2(c)矢印)。
- ④ 気流部の水表面近傍にも強い反時計回りの渦度の帯が生じている。
- ⑤ せん断変形では吹送流と補償流の界面あたりに強い帯状の分布が見られる(図-3矢印)。

(2) ケース2 (平均風速 6.0 m/s)

風波の平均波高 $H=1.12 \text{ cm}$ 、平均波速 $C=89.3 \text{ m/s}$ であった。風波が発達し始めている状態で比較的規則性

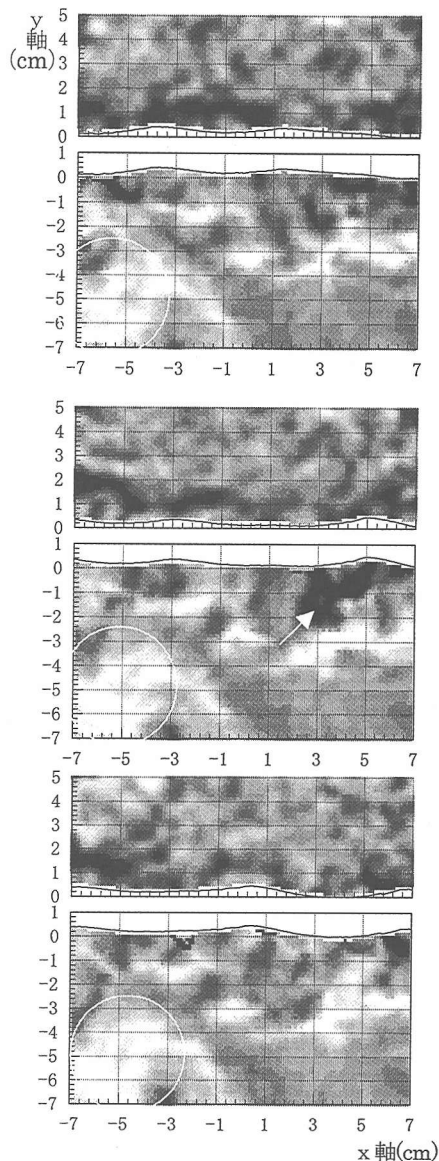


図-2 平均風速 4.0 m/s の場合の渦度分布

凡例：黒→白 気流；-200 → 200(1/s)，水流；-15 → 15(1/s)

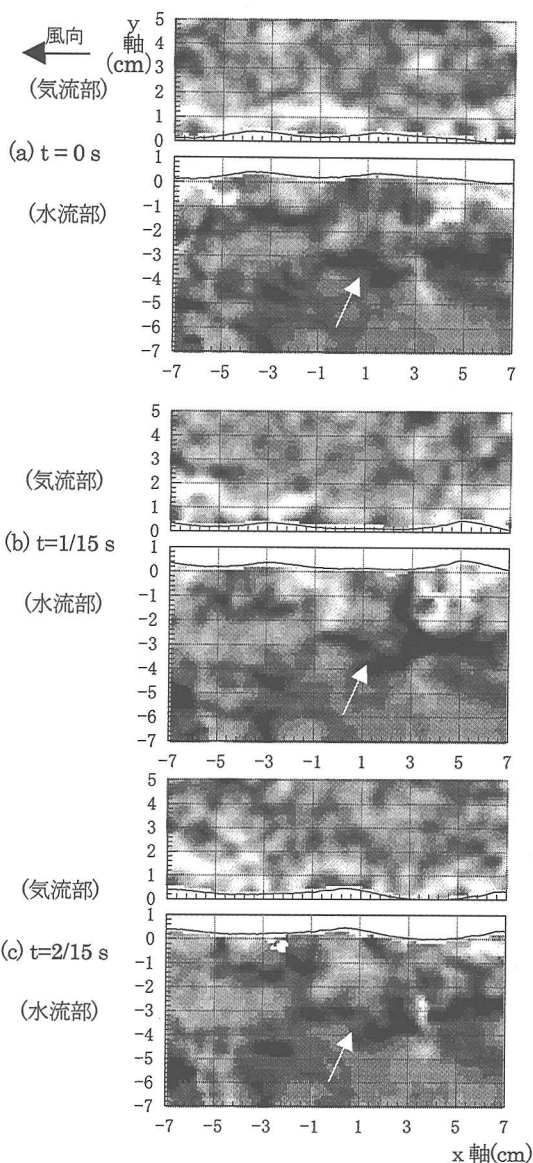


図-3 平均風速 4.0 m/s の場合のせん断変形速度分布

のある波が生じている。図-4に連続する3時刻の渦度分布を、図-5に図-4と同時にせん断変形速度分布を示す。図-4, 5より得られた結果を以下に箇条書きにする。

- ① 水流における渦度分布では、表面に沿って正負の渦塊が対になって生じている（図-4中の楕円部分）。
- ② 水流のせん断変形速度分布では波峰の移動と共に移動している（図-5中の矢印）。これは波動運動によるせん断変形速度と考えられる。
- ③ 気流部では、渦度分布およびせん断変形速度分布の

双方において、風下側に上昇する構造（図中では左上がりの構造、図中点線）が全般的に見られる。

(3) ケース3 (平均風速 10.0 m/s)

風波の平均波高 $H=2.37$ cm, 平均波速 $C=127.7$ m/s であった。風波が発達した状態である。図-6に連続する3時刻の渦度分布を、図-7に図-6と同時にせん断変形速度分布を示す。

図-6, 7より得られた結果を以下に箇条書きにする。

- ① 図-6(a)の水流部において、風波前面に強い反時計回転の渦がいくつか見られる。これは風波のマイク

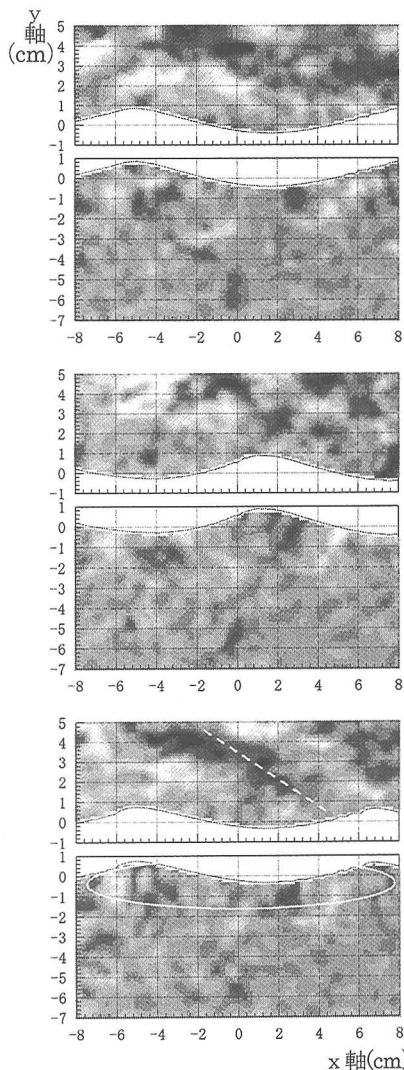


図-4 平均風速 6.0 m/s の場合の渦度分布

凡例：黒→白 気流；-600 → 600 (1/s)，水流；-15 → 15 (1/s)

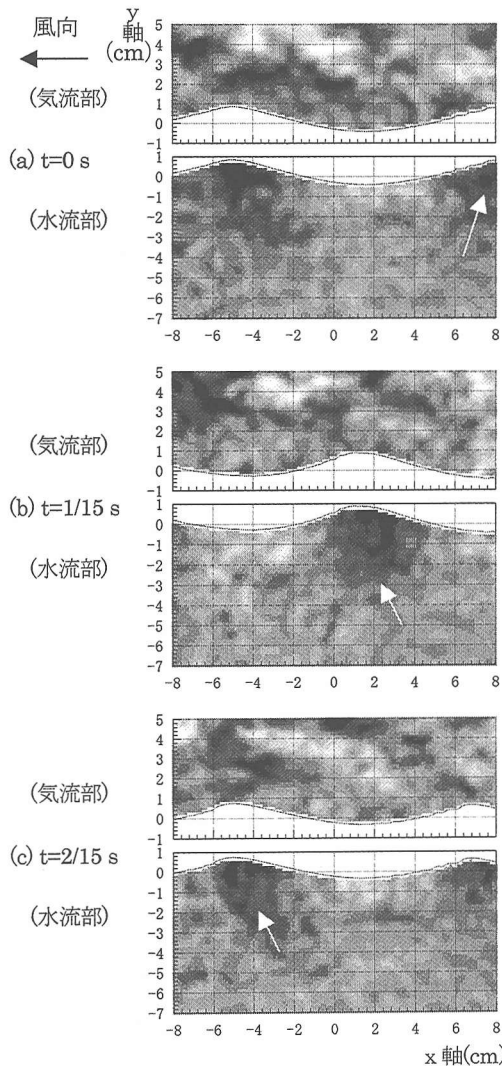


図-5 平均風速 6.0 m/s の場合のせん断変形速度分布

- ロプレーキングにより生成されたものと考えられる。
- ② 図-6 中の白矢印で示した反時計回りの渦は吹送流によって移流されて、下方に取り込まれて行く様子が観察された (図-6(a), (b), (c))。
 - ③ 波の峰付近から背面にかけて、水流部に強いせん断の帯が生じている (図-7(b))。これは風が強く当たる部分に対応している。
 - ④ 波の谷の部分の気流部では、剥離に対応した強い時計方向の渦度、およびせん断変形速度が見られる。

4. ま と め

本研究では著者らが開発した計測技術を用いて、風波

発生時の気流と水流の相互作用を明らかにすることを目的に気流・水流の同時画像計測を行った。本研究より得られた結果を以下に示す。

- ① 平均風速 4.0 m/s の場合 (さざ波が生じている状態) では、間欠的な渦のパッチが生じている。また、吹送流と補償流の間に強いせん断層が生じている。
- ② 平均風速 6.0 m/s の場合 (風波が発達し始める状態) では、表面に沿った渦対が生じる。また波動成分が卓越し始める。
- ③ 平均風速 10.0 m/s の場合 (風波が発達した状態) では、波背面に強いせん断層を形成する。またマイクロプレーキングによって生じたと考えられる渦が吹送流で移流され、下方に取り込まれる過程が確認さ

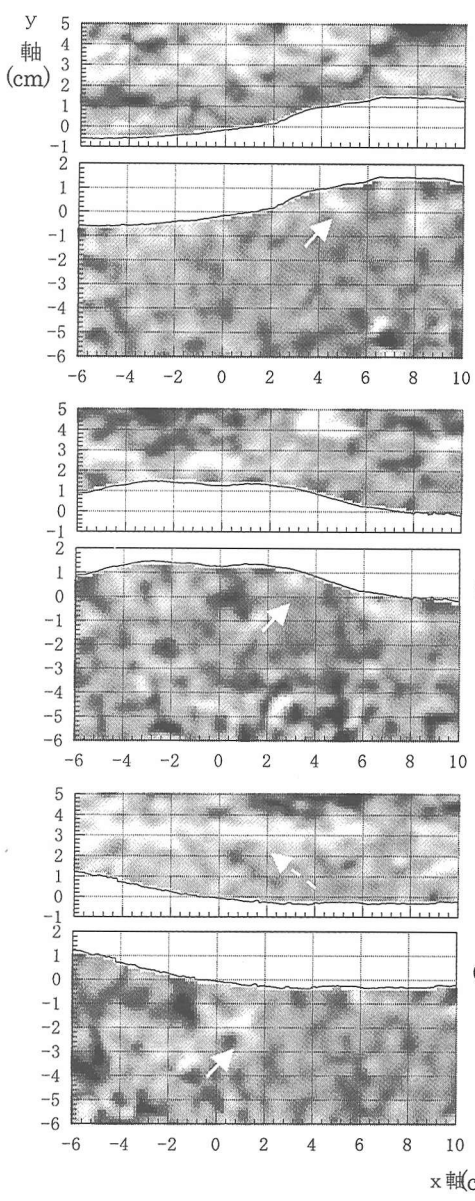


図-6 平均風速 10.0 m/s の場合の渦度分布

凡例：黒→白 気流；-600 → 600 (1/s)，水流；-15 → 15 (1/s)

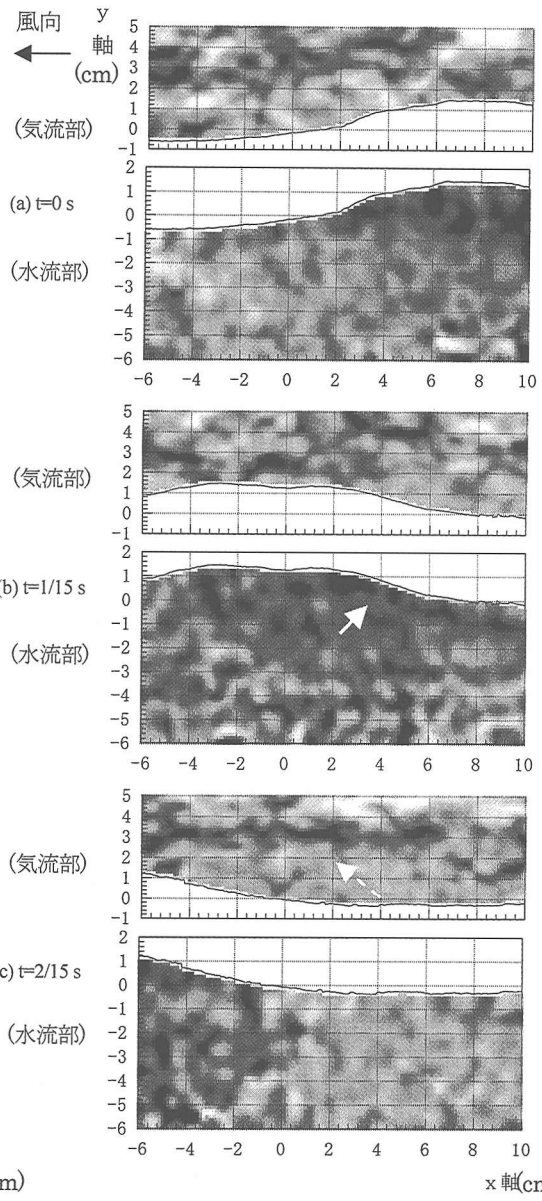


図-7 平均風速 10.0 m/s の場合のせん断変形速度分布

れた。

参 考 文 献

竹原幸生・真木正弘・辻本剛三・江藤剛治・高野保英 (2002): 風波発生時における水面近傍の気流・水流の PTV 同時計測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 66-70.
鳥羽良明 編 (1996): 大気・海洋の相互作用, 東京大学出版会, 336 p.
水谷夏樹・佐藤裕司・橋本典明 (2002): PIV 計測による白波碎波上の気流剥離特性, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp. 61-65.
光易 恒 (1995): 海洋波の物理, 岩波書店, 210 p.
Banner, M. L. and W. L. Peirson, (1998): Tangential stress

beneath wind-driven air-water interfaces, J. Fluid Mech., Vol. 364, pp. 115-145.
Dean, M. A., W. M. Drennan, E. S. Saltzman and R. Wanninkhof, eds (2002): Gas transfer at watern surfaces, AGU, 383 p.
Komori S. et al. (1993): Turbulence structure and mass transfer across a sheared air-water interface in wind-driven turbulence, J. Fluid Mech. Vol. 249, pp. 161-183.
Takehara, K., R. J. Adrian, T. Etoh and K. T. Christensen (2000): A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids, [Suppl.] pp. S 34-S 41.