

風波発生時における水面近傍の気流・水流の PTV 同時計測

竹原 幸生* ・真木正弘**・辻本 剛三***
江藤 剛治****・高野 保英*****

大気-海洋間の物質、熱および各種物質の輸送現象を明らかにするには、水表面近傍の気相および水相の詳細な流れ構造を明らかにする必要がある。画像流速測定法 (Image Velocimetry, IV) の中で最も空間解像力の高い粒子追跡速度計測法 (Particle Tracking Velocimetry, PTV) を用いた、風波発生時の水表面極近傍の気流・水流の同時計測法を開発した。開発した手法を用いて、これまで計測されていない風波発生時における水表面近傍の気流および水流の PTV 同時計測に成功し、水表面近傍の流れ構造を詳細に計測することができた。

1. はじめに

大気-水域間の気体、物質、熱、運動量等の収支は、水域環境を考える上で最も重要な因子の 1 つであり、水表面を通した収支量を正確に予測、評価する必要がある (角野ら, 2000)。特に海洋や湖沼では風が水表面に作用する主要な外的擾乱であり、自然界での大気-水域間の輸送現象を促進させる。そのため、これまで多くの研究が風波下における輸送現象の解明に向けられてきた。

水表面を通した輸送現象を明らかにするためには、現象を規定している水表面近傍の気相、および水相の詳細な流れ構造を明らかにする必要がある。しかし、水表面という移動する相界面が存在するため、これまでの固定点での計測法では水面近傍の詳細な測定が困難であった。例えば、水面直下の流速測定を目的に、水面下極近傍にセンサーをセットしても、水面変動によりセンサー部分が大気中に曝露されてしまい、間欠的なデータしか得られない。また、水面と運動してセンサーを移動させる方法も考えられるが、周波数の高い移動に追従させる場合、メカニカル的な点で問題が生じる可能性がある。

以上のような理由により、これまで水表面を通した輸送現象を議論する場合、水表面から離れたバルクな諸量を用いて議論されることが多かった。特に、海洋や湖沼等の自然水域では、従来の輸送係数推定式では、上空の平均風速と輸送係数を直接結びつける経験式が用いられている (Liss and Marlivat, 1986)。しかし、現地計測技術や室内実験の計測技術の発達に伴い、多くの高精度な計測データが集まるにつれ、単に上空の平均風速のみと輸送係数を直接結び付けた予測式では、十分な精度で予測できない可能性が示された (Donelan ら, 2002)。

著者らは、風波発生時における水表面を通した輸送現象を規定している水表面近傍の気流および水流の詳細な構造を PTV (Particle Tracking Velocimetry) により

解明することを目指している。風波下における乱流の詳細な計測は、Komori ら (1993) によって行われている。しかし、彼らの計測では LDV (Laser Doppler Velocimetry) による点計測であり、空間的な流れ構造を考える上では、統計量をもとに推定せざるを得なかった。

PTV による計測の利点を以下に挙げる。

- ①瞬時の空間的な流速分布を得ることができる。
- ②移動境界が存在しても計測が可能である。
- ③非接触計測が可能である。

これまで著者らは、風波発生時における水面近傍の気流および水流の PTV 計測法の基礎となる部分の開発を行ってきた (竹原ら 2000)。今回、それらの技術を統合し、風波における水面近傍の気流・水流の PTV 同時計測を行うことに成功した。筆者らの知る限りでは、これまで行われたことのない計測であり、本報告は速報としてその計測方法と計測結果の 1 例を紹介する。

2. 実験装置

2.1 風洞水槽

実験に用いた風洞水槽の全体図を図一 1 に示す。長さ 16 m、高さ (内径) 45.3 cm、幅 (内径) 50 cm の気流循環式風洞水槽である。風はインバータ型ファン送風装置を用いて発生させている。風速はインバータの周波数によって制御されており、周波数を連続的に変化することで風量を変化させることが出来る。

これまでの炭酸ガスの溶入過程の直接可視化実験 (竹原ら 1999) では水深を 32 cm に固定して実験を行ってきた。本実験でも水深は 32 cm に固定した。

送風装置から送られた気流は、パイプを通して縮流部を通り、送風口から風洞水槽内に入る。観測部を通った気流は、下流端の吹き出し口からパイプに入り送風装置に戻り、循環するようになっている。

送風口から 7.5 m 下流位置に、側壁、上下面全て透明材料で作成された観測部 1 m を設けている。観測部以外では、水槽底部以外が透明材料となっている。

水表面での気体輸送現象の計測を目的としているため、パイプ、送風装置、および水槽内の気体は外気との

* 正会員 工 博 近畿大学助教授 理工学部社会環境工学科
** 正会員 工 博 奈良県技師 土木部砂防課
*** 正会員 修 (工) 神戸市立高等専門学校教授 都市工学科
**** 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 修 (工) 近畿大学助手 理工学部社会環境工学科

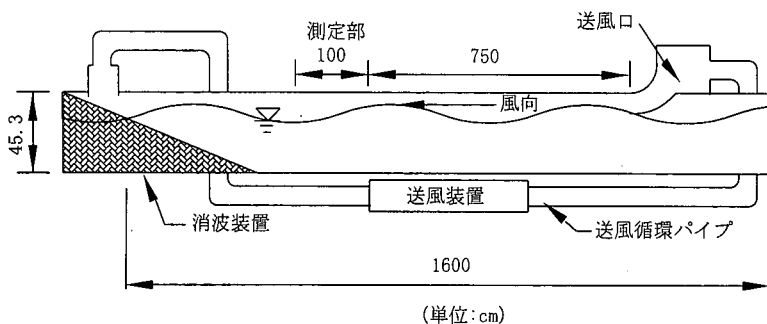


図-1 実験に用いた風洞水槽

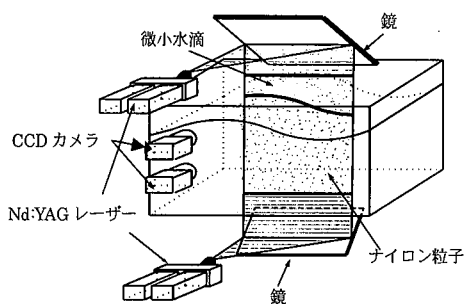


図-2 観測部概略および PTV 装置の配置図

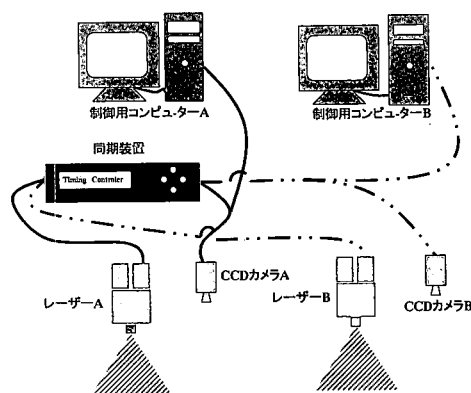


図-3 同期の仕組み

出入りがないように極力気密性を高めている。

本実験での計測は、全て観測部で行う。

2.2 PTV 計測装置

観測部概略および PTV 装置の配置図を図-2 に示す。

実験では、気流トレーサとして用いる微小水滴の発生装置、2 台の PIV 計測セット(ダブルパルス Nd: YAG レーザー、制御用コンピュータ、CCD カメラ)、および 2 台の PIV 計測セットの同期装置を用いた。1 台は水流計測用、もう 1 台は気流計測である。

微小水滴発生装置は、送風口の前に設置した。微小水滴発生装置としては医療用に用いられるネブライザーを用いた。発生原理は霧吹きで、圧縮空気を細いノズルから吹き出し、水を吸い上げ、霧状の水滴を吹き出すものである。発生する水滴径は $1\sim 10\ \mu\text{m}$ の範囲である。医療用ネブライザー 1 台では発生する水滴量が少ないため、20 台の微小水滴発生部を用い、エアコンプレッサーにより圧縮空気を送り込む装置を作成した。水流の PTV トレーサ粒子としては、ナイロン 12 粒子(比重 1.02、粒径 $50\ \mu\text{m}$)を用いた。

PIV の照明用として用いられるダブルパルス Nd: YAG レーザーの波長は 532 nm、パルス幅は $5\sim 7\ \text{ns}$ 、出力は 1 パルス当り約 25 mJ である。2 本のパルス遅延間隔は任意に変化させることができ、繰り返し周波数は 15 Hz である。レーザー光出力部にはシリンドリカルレン

ズが装着されており、ビーム光はシート状に広げられ、2 次元断面を照射することができる。

CCD カメラは、解像度が $1008\ (\text{H}) \times 1018\ (\text{V})$ ピクセルで、Nd: YAG レーザーと同期させて任意の時間間隔(最高 $5\ \mu\text{s}$)で 2 枚の画像を得ることができる。2 枚の画像の組は 15 Hz でサンプリングすることができる。得られた画像は 8 bit のデジタル画像としてコンピュータへ転送される。

Nd: YAG レーザーの発光タイミング、および CCD カメラの撮影タイミングは制御されており、同期させることができる。

2.3 気相部と水相部の流れ場の同時計測

図-2 に示すように測定部において、鏡を用いて上下から照明光である Nd: YAG レーザーのシート光を照射する。シート光面は同一面になるようにセットする。CCD カメラによる撮影では水表面近傍を撮影するため、水面の変動が撮影の邪魔にならないように、気相側は若干上方から、水相側は若干下方から計測部分を撮影する。

気流および水流の PTV 同時計測では、2 台の PIV 計測セットの同期を取る必要がある。図-3 に PIV 計測システムの同期法の概略図を示す。それぞれの PIV 計測システムは、制御コンピュータ、Nd: YAG レーザー、CCD

カメラから成る。同期装置により Nd:YAG レーザーと CCD カメラの同期を取る。特に、一般的な PIV 計測では撮影は暗室で行い、レーザーパルスが照明されている瞬間だけ CCD カメラで撮影される。よって撮影タイミングはレーザーパルスのタイミングによって決定される。同期装置によるレーザーパルス発光の同期タイミングの精度は μsec 以下である。

画像取り込み・記録は、制御用コンピュータにより行う。画像取り込みの制御はソフトで行われるが、2 台の制御用コンピュータのソフトを制御するのは現時点では困難であった。今回は手動でソフトを開始し、計測開始時点でストロボを画像中に写し込むことにより、2 台のシステム間の計測スタート時点を認識できるようにした。

2.4 水面位置決定法

画像中で変動する水面位置を決定する必要がある。パルスレーザーの照射だけでは画像から水面位置を決定するのは困難である。今回は、檀ら (2000) と同様な方法である。蛍光染料を用いて画像中から水面位置決定を決定する方法を用いた。水溶性蛍光染料として、Nd:YAG レーザーでも十分蛍光を発するフルオレセインナトリウム (最大励起波長 494 nm) を用いた。

まず、蛍光染料を水槽内の水全体に溶入する。フルオレセインナトリウムの濃度はこれまでの結果 (竹原ら, 1999) より、最大励起輝度を生じる $2.5 \times 10^{-6} \text{mol/l}$ とした。Nd:YAG レーザーにより励起される蛍光は水相部分に限られ、水相-気相界面に大きな輝度差が生じる。この輝度情報をもとに、ある判断基準 (例えば今回は輝度変化率の最も大きい位置) 等を基に水面位置を決定する。

水相側の画像では水面に蛍光が反射し、気相-水相界面の判断が困難となる。今回は水面の決定には気相側の画像を用いた。

2.5 PTV アルゴリズム

PTV アルゴリズムとしては、著者らが開発した Super-resolution KC 法を用いた (Takehara ら 2000)。Super-resolution KC 法はパターンマッチング PIV の 1 つである相関法 PIV と PTV アルゴリズムである KC 法 (竹原ら, 1996) から成る。相関法 PIV により、粗いメッシュ上の流速ベクトルを計測した後、KC 法により個々の粒子の移動を計測する。Super-Resolution KC 法は現在提案されている PIV アルゴリズムの中で最も空間解像力の高いものの 1 つである。

KC 法では、PTV のための粒子画像抽出法として粒子マスク相関法 (江藤ら, 1996) を用いており、高精度で粒子抽出を行うことができる。

3. 実験結果および考察

3.1 平均風速

風洞内の平均風速を予め調べるために、PTV により気流のみ計測を行った。送風装置は、装置内のファンモーターをインバータ (Hz 表示) で制御している。今回は送風装置の Hz 数と平均風速の関係を調べた。

本実験では、風を吹かせ波が十分発達した状態で、微小水滴発生装置を用いて気相部に微小水滴を流し、気流を可視化撮影した。

実験方法は以下の通りであり、気流・水流の PTV 同時計測でも同じである。

①画像座標から実空間座標への変換のため、水槽内の撮影断面に評定点をプロットしたメッシュ板を設置し撮影する。

②レーザー光を鏡に反射させ、水槽上部より風向と平行な水槽中央部鉛直断面に照射する。

③微小水滴発生装置にコンプレッサーで 2 気圧の圧縮空気を送り、微小水滴を発生させる。

④送風装置の周波数を所定の値に設定し、風を吹かせ、波を十分に発達させた後、気流を撮影する。

送風装置の周波数は 5 Hz から 30 Hz まで 5 Hz 刻みで変化させ、計 6 種類で実験を行った。

平均流速の算出方法としては以下の方法を用いた。

① 250 μsec 間隔で撮影された 2 枚の画像の組に対して、Super-resolution KC 法を適用し、画像座標上での流速場を求める。15 Hz で撮影された 2 枚の画像の 24 組に対して全て行う。

②評定点を用いて、画像座標から実空間に変換する。変換式は 2 次式を用い、係数は最小自乗法により求める。

③実空間に変換した PTV 結果を空間重み付き平均操作によりメッシュ上の流速ベクトルに変換する。重み関数としてガウス分布関数を用いた。

④ 1 組の画像の結果に対して、水槽底面からの高さに対する風速分布を算出する。また、24 組の画像データも同様に処理し、さらに時間平均により、水槽底面からの高さに対する風速分布を算出する。

平均風速に対する実験結果は以下の通りである。

水槽底面からの距離と各周波数での風速分布の関係を図-4 に示す。風速は、水槽底面からの距離 31 cm 付近で極小値を示した後、水槽底面からの距離が小さくなるにつれ増大している。おそらく光の乱れや波面に映る微小水滴が影響を及ぼしているものと思われるが、はっきりとした原因は不明である。

平均風速を求めるのに、次の 2 通りの方法を用いた。

①水槽底面から 32 cm 以上のデータの平均風速

風速が強くなるにつれ波も荒くなり、水面の決定が困

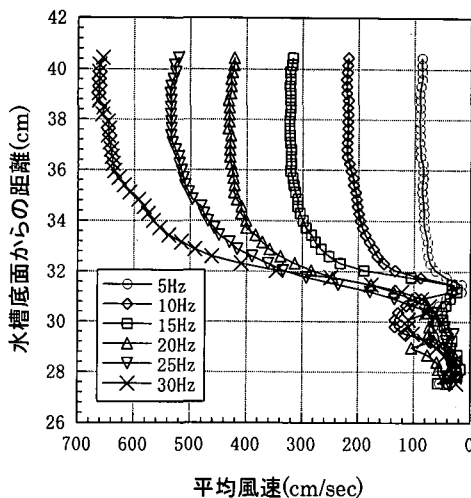


図-4 平均風速の鉛直分布

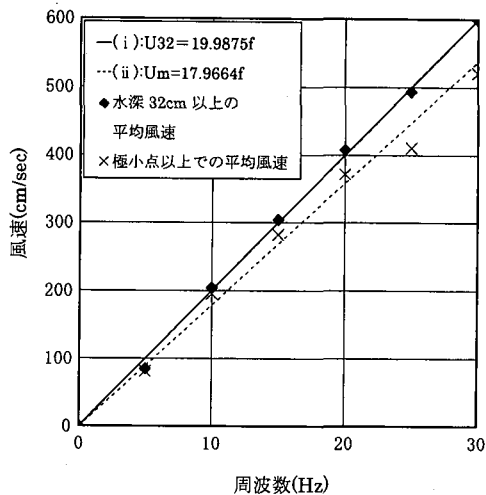


図-5 周波数と平均風速の関係

難となる。そのため静水面である水槽底面からの距離 32 cm を水面と固定し風速の平均をとった。図-5 中の◆印に示す。

②各々の極小値から上部の平均風速

風速は水面付近で極小値を示す。そのため、一度極小値を示した位置から上部の風速の平均をとった。図-5 中の×印に示す。

図-5 中の実線 (i)、波線 (ii) に示す風速と周波数の関係式は、①水槽底面から 32 cm 以上の平均風速、および②各々の極小値から上部の平均風速で求められたデータをもとに最小自乗法を用いて算出した。ただし、波線 (ii) の関係式では、25 Hz の値を除いた。図-5 から分かるように、25 Hz の値が他と比べ低い値を示している。これは、25 Hz のケースは他のケースに比べ、水槽底面からの距離 31 cm 以下で、得られたベクトルが少なかったためである。

なお、最小自乗法による平均風速推定式の当てはめ誤差の標準偏差は、それぞれ、7.394 cm/s(実線(i)), 12.48 cm/s(波線(ii))であった。

本風洞水槽を用いた実験では、実線 (i) の関係式から風速を求めることとした。

3.2 気流と水流の同時 PTV 計測

今回得られた PTV による気流および水流の同時計測結果の 1 例として、平均風速 407.7 cm/s (送風装置 20 Hz) の場合の計測結果を示す。図-6 は同時刻における気流および水流の PTV の結果を 1 つの図にまとめて示したものであり、実空間座標に変換後の結果である。気相流速と水相流速のオーダーが 1 桁違うので、表示では気相および水相の流速スケールを同程度になるようにしている。

水相側では水表面極近傍まで流速が測定されているこ

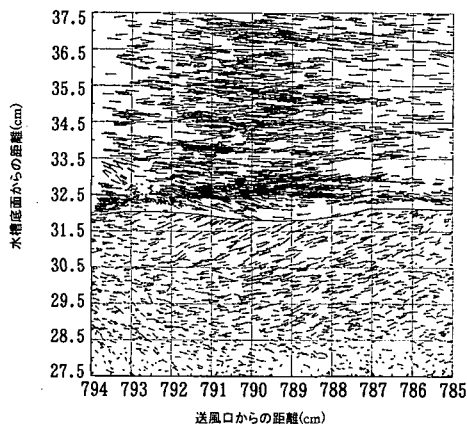


図-6 PTV により得られた流れ場分布

とがわかる。気相側では送風口から 787~790 cm の水面極近傍で流速ベクトルが観察されていない。この領域は波の背面にあたり、トレーサーが入り込みにくい場所であると考えられる。

気相部および水相部の水表面近傍の組織的な流れ構造を知るため、まず空間重み付き平均操作を行い、メッシュ点上の流速ベクトル分布図に変換した。さらに、メッシュ状の流速分布図から、平均水深 32 cm での平均流速 (気相部では 200 cm/s, 水相部では 2.9 cm/s) を差し引いた。その結果を図-7, 8 に示す。

図-7 では、波の山 (送風口からの距離 785 cm 付近) で上向きの流れが見られ、その後、波に沿った下向きの流れとなる。次の山に移る辺り (送風口からの距離 790~793 cm 付近, ○印で囲んだ領域) で強い上向きの流れが見られる。一方、水相側 (図-8) では、強い上向きの気流が存在するあたり (送風口からの距離 790 cm 付近, ○印で囲んだ領域) で、水表面から下方に向かう流

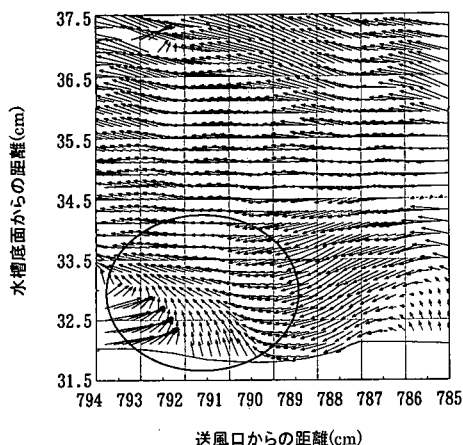


図-7 空間変換操作から境界面流速を差し引いた流速分布 (気相部)

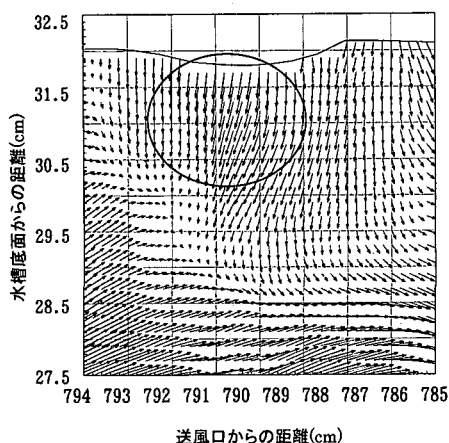


図-8 空間変換操作から境界面流速を差し引いた流速分布 (水相部, 図-7 と同時刻)

れが強いことが分かる。以上の観測結果は、Komori ら (1993) の点計測による結果から推定された流れ構造 (図-9 参照) と同様な流れ構造となった。しかし、計測結果は一例に過ぎず、今後計測データを積み重ねて行く必要がある。

4. 結 言

大気-海洋間の輸送現象解明を目的として、風波発生時における水表面近傍の気流および水流の PTV 同時計測法を開発し、実際の計測に適用した。実験では、2 台のレーザー、および 2 台の CCD カメラを同期させることにより、気相部、水相部、同時刻の流れ場を計測する技術を開発した。また、蛍光染料を水相部に混入することによる気相部と水相部の輝度差を利用した境界面の決定技術を開発した。

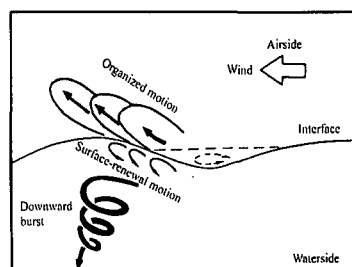


図-9 Komori による仮説 (Komori et al., 1993 より引用)

今回は速報として、結果の 1 例を示し、これまで観察できなかった現象を計測することができた。今後より多くのデータを蓄積して風波発生時における水表面極近傍の流れ構造の解明する必要がある。

謝辞：本研究は科学研究費補助金基盤研究 B：(課題番号 10450185, 代表者：角野昇八) の補助を受けた。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 角野昇八・他 (2000): 水表面での気体輸送に関する研究の最新の動向, 土木学会論文集, No. 656/II-52, pp. 269-287.
- 江藤剛治・竹原幸生・道奥康治・久野悟志 (1996): PTV のための粒子画像抽出法に関する検討-粒子マスク相関法について-, 水工学論文集, 第 40 巻, pp. 1051-1058.
- 竹原幸生・江藤剛治・村田 滋・道奥康治 (1996): PTV のための新アルゴリズムの開発, 土木学会論文集, No. 533/II-34, pp. 107-126.
- 竹原幸生・加藤明秀・江藤剛治 (1999): 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.
- 竹原幸生・江藤剛治・前田崇雄・相武克彦 (2000): PTV による風波発生時の水表面近傍の気流・水流計測法, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 101-105.
- 檀 和秀・森田和男・藤津寛之 (2000): レーザライトシート法を利用した波の可視化計測, 明石工業高等専門学校研究紀要, 第 43 号, pp. 24-33.
- Donelan, M. A., W. M. Drennan, E. S. Saltzman and R. Wanninkhof (editors) (2002): Gas Transfer at Water Surfaces, American Geophysical Union.
- Liss P. S. and L. Merlivat (1986): Air-Sea exchange rate: introduction and synthesis. In role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling, ed. P. Buat-Menard, Reidel, pp. 113-127.
- Komori S., R. Nagaosa and Y. Murakami (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 Christensen, K. T. (2000): A Kalman tracker for super-resolution PIV, Experiments in Fluids, [Suppl.] pp. S 34-S 41.