

PTV による風波発生時の水表面近傍の気流・水流計測法

竹原 幸生*・江藤 剛治**・前田 崇雄***・相武 克彦****

1. はじめに

海域で水表面を通した気体輸送現象を規定する主要因は風である。地球規模での大気-海洋間の炭酸ガス収支量を見積もる段階で、Liss・Merlivat (1986) が提案した風速と気体輸送係数の関係式が使われた。しかし、最近の研究結果 (例えば Jähne・Haußecker (1998)) では、気体輸送係数は風速の関数で表現するのは困難であることが明らかとなり、他にどのようなパラメータが気体輸送に影響を及ぼすのかが問題となっている。現段階では、どのようなパラメータが気体輸送現象に影響を及ぼすかを、実験および現地観測を通して明らかにしていくことが急務となっている。

これまでの水表面を通した気体輸送量の計測では、水中バルク濃度と代表風速とが関係付けられてきた。しかし、水表面を通した気体輸送のパラメタリゼーションを行うには、現象を規定している水表面極近傍の気体輸送現象を明らかにする必要がある。そのため、最近の電子機器、光学機器等を用いて、水表面を通した気体輸送現象を詳細に計測する技術の開発が活発に行われている。

水表面近傍の気体および水の流速計測は、水表面という移動境界が存在するため、LDV (Laser Doppler Velocimetry) やホットワイヤー流速計など点計測法では困難であった。最近開発された粒子画像を用いた流速測定法 (Particle Imaging Velocimetry, PIV) は移動境界が存在しても、画像領域内に対象とする流れ場が存在すれば計測できる。

本研究では、風波発生時の水表面を通した気体輸送現象に関連する流れ場計測を対象としている。風波による炭酸ガス溶入過程の解明には、水表面極近傍の炭酸ガス溶入過程、気体の動き、および水の動きを同時計測する必要がある。竹原ら (1999) はすでに炭酸ガス溶入過程を直接可視化することに成功している。今回、風波発生時における水表面付近の気体および水の運動を PIV の 1 手法である PTV (Particle Tracking Velocimetry)

により、詳細に計測する手法について報告する。

2. Super-Resolution KC 法

2.1 概 説

PIV には、画像からの速度算出原理に基づいて大きく分けて 2 つの方法がある。1 つの方法は、ある検索小領域内のトレーサー粒子分布パターンの移動を求める PMV (Pattern Matching Velocimetry) であり、もう 1 つは、個々のトレーサー粒子を追跡する PTV (Particle Tracking Velocimetry) である。PMV の代表的なものは相関法である。すでに標準的なソフトとして市販化されている。PTV に関しても、いくつかの方法が提案されており、一部市販化されているものもある。

PMV の長所の 1 つは、2 時刻間の画像から流速を求めることができることである。PTV でも 2 時刻間に対応付け可能なアルゴリズムも提案されているが、粒子数が増せば誤対応の確率も増す。誤対応の確率を減少させるには、対応付けに用いる画像数を増加させるしかない。

PTV の長所として、PMV に比べて空間解像度が高いことが上げられる。PMV は検索領域内にある数個~十数個の粒子の平均移動量を計測しているものであり、個々の粒子の移動を求めた PTV に比べて原理的に解像度が低い。PMV でも、検索領域をオーバーラップすることで、見かけ上、多数のベクトルを得ることができるが、実質的な空間解像度は検索領域のサイズで決まる。

PMV と PTV の長所を組み合わせた Super-Resolution 法が Keane ら (1995) によって提案されている。Super-Resolution 法では、まず、PMV により粗い格子点上の流速ベクトルを求め、その格子点の速度情報を元に各粒子に速度を内挿し、PTV で 2 時刻間の同一粒子の同定を行う。これにより、2 時刻間で粒子を追跡することができ、解像度の高い流速場の計測が可能となる。

竹原ら (2000) は Keane らの方法をさらに改良するために、カルマンフィルターと χ^2 検定を用いた PTV アルゴリズム (KC 法)、および粒子画像抽出のための粒子マスク相関法 (PMC 法) を用いた新しい Super-Resolution 法を提案した (以降、Super-Resolution KC 法と呼ぶ)。以下に、各手法について簡単に説明する。

* 正会員 博(工) 近畿大学講師 理工学部土木工学科

** 正会員 工 博 近畿大学教授 理工学部土木工学科

*** (株) 森組

**** (株) 土屋組

2.2 KC法 (江藤・竹原 (1989))

KC法はPTVのためのアルゴリズムとして提案された。カルマンフィルタにより、ある時刻の粒子情報(粒子位置、速度ベクトル、粒子画像サイズ、粒子画像中心輝度、等)をもとに、次時刻の粒子情報を予測する。予測された粒子位置周りに検索領域を設け、その中に含まれる実測粒子との対応付けを行う。予測された粒子情報と検索領域内の数個の実測された粒子の情報から、 χ^2 検定を用いて同一粒子の同定を行う。

KC法は、KeaneらのPTV法と違い、はじめから検索領域内に多数の候補粒子が存在した場合を想定している。KC法では、同一粒子の対応付けを予測粒子位置と実測粒子位置のみの関係で判断するのではなく、粒子画像サイズや中心輝度等の粒子情報の予測値と実測値との関係も含めて、客観的に判断する。KC法をSuper-Resolution法のPTV部分に適用することにより、Keaneらの方法で問題となった点を解消することができる。

2.3 PMC法 (江藤ら (1996))

PMC法は、粒子画像を画像中から効率よく抽出するための方法である。1個の粒子画像のテンプレート(粒子マスクと呼ぶ)を作り、得られた画像と粒子マスクとの相関を取る。画像中の各画素を中心に粒子マスクとの相関値を計算し、相関値画像を作る。計算された相関画像に対して、ある閾値により2値化し、粒子画像をピックアップする。ここでは、粒子マスクとして2次元のガウス分布を仮定している。PMC法の利点を以下に示す。

- (1) 粒子マスクとの相関を取るため、輝度の低い粒子画像でも、ガウス分布に近い形をしていれば、高い相関値を取り、粒子画像をピックアップすることができる。
- (2) 粒子画像が近づきすぎると团子状になり、通常の2値化では分離が困難になる。粒子マスク相関法では、中心輝度が等しければ、粒子間距離が粒子直径の場合まで分離が可能である。
- (3) 水槽端やセンサーの支持棒などの線形画像は、輝度が高くて粒子マスクとの相関値は低くなるため自動的に消去できる。

2.4 Super-Resolution KC法の手順

以上の2つの方法をSuper-Resolution法のPTV部分に適用する。Super-Resolution KC法の手順を示す。

- ① 2時刻の画像より、標準相関法を用いて粗な格子点上の流速ベクトルを求める。
- ② PMC法により画像から粒子画像をピックアップする。
- ③ ピックアップされた粒子の流速を、①で求めた格子点上の流速ベクトルから内挿する。

④ 内挿された情報を元に、第1時刻と第2時刻間の同一粒子の対応付けをKC法により行う。

- ⑤ 対応付いた各観測ベクトルに対して、それぞれのベクトル位置を中心に、観測ベクトルの空間平均を取る。その空間平均ベクトルを観測ベクトルと置き換える。
- ⑥ 再度、KC法による同一粒子の対応付け(④)を行う。
- ⑦ 上記④、⑤、⑥の手順を対応付け個数が最大になるまで繰り返す。

PMVにおける誤対応ベクトルの除去には統計量を用いた方法やニューラルネットワークを用いた方法等が提案され、実用化されている。ここでは統計的手法を用いた誤ベクトル除去法を用いた。

3. 実験装置および方法

3.1 気流用トレーサー発生装置

PTVによる流れ場計測ではトレーサー粒子が必要となる。これまで気流のPTV計測では、数ミクロンから数十ミクロン程度の油滴が一般的に使われてきた。しかし、油滴をトレーサーとして用いると、水面に落下した油滴が水面を汚し、水面の特性を変化させる。風波のような水面の特性が現象に大きく影響を及ぼすような場には適用が困難である。

水表面での気体輸送現象を対象とした気流用トレーサー粒子としては以下の点が要求される。

- ① 気体の流れを妨げず、比重が空気に近く微小なもの。
- ② PTVにより速度場を求めるため、画像上で粒子として確認できる大きさの粒子であること。
- ③ 水面での気体輸送の実験を目的としているため、水面を汚さないもの。
- ④ PTV解析で多くの情報を得るため、かつ風洞水槽内で実験を行うため大量に必要。

水表面での気体輸送現象を対象とした気流計測のためのトレーサー粒子として、医療用に用いられる噴霧装置(ネブライザ)を利用して、数ミクロン～数十ミクロンの微小水滴トレーサーを多量に発生させる装置を試作した。気流用微小水滴トレーサー発生装置の概略図を図-1に示す。装置は、微小水滴発生部、圧縮空気分割部、エアコンプレッサー部の3つの部分からなる。

微小水滴発生部は医療用噴霧装置であるコンプレッサー式吸入器(オムロン社NE-C13)の発生部分だけを用いた。200 kPaで1~10ミクロン微小水滴を発生させることができる。発生原理は、圧縮空気を細いノズルから吹き出し、水を吸い上げ霧状にして吹き出すものである。1個あたりの水滴発生量は、医療用で1人用に設計されている(噴霧能力0.3 l/min)ため、今回実験に用いる風洞水槽内の気流を計測するには少なすぎる。最大20個の微小水滴発生装置を取り付けられるようし、多量の微小

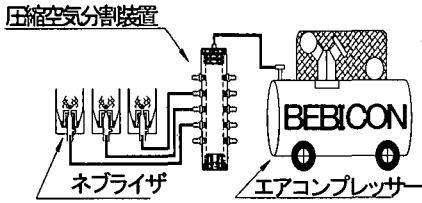


図-1 気流トレーサー発生装置の概略図

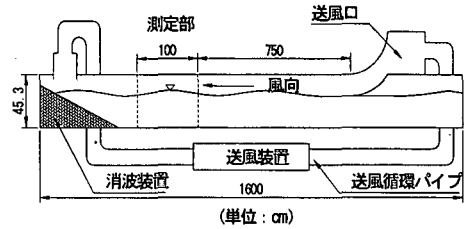


図-2 実験に用いた風洞水槽

水滴を発生できるようにした。

20 個の微小水滴発生部に圧縮空気を送るため、大型のエアコンプレッサー ((株) 日立製作所製ベビコン、最高圧力 9.5 kgf/cm²、吐出し空気量 165 l/min) により圧縮空気を発生させ、圧縮空気分割部で圧縮空気を 20 分割する。

3.2 PTV 計測装置

PTV 計測装置は、レーザー照明部、カメラ部、制御・解析部からなる。

レーザー照明部にはダブルパルス Nd:YAG レーザー (New Wave 社製) を用いた。YAG レーザーの波長は 532 nm、パルス幅は 5~7 ns、出力は約 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。

カメラ部として、今回は Kodak 社製 ES 1.0 (解像力 1008(H) × 1018(V) pixel) を用いた。今回用いたビデオカメラは一般的にコリレーションカメラと呼ばれているものであり、ダブルパルス・レーザーと同期させて任意の時間間隔 (最高で 5 μs) で 2 枚の画像を取ることができる。2 組の画像の取得周波数は最高 15 Hz である。撮影された画像は 8 bit (256 階調) のデジタル画像として制御・解析部へ転送される。

制御・解析部はパーソナルコンピュータより成り、レーザー部の発光タイミング、およびカメラ部の撮影タイミングを同期させる。また、CCD ビデオカメラで撮影された画像をデジタル画像として取り込み、Super-Resolution KC 法により流速場を算出する。

3.3 実験水槽および実験方法

実験には、長さ 16 m、高さ 50 cm、幅 50 cm の気流循環式風洞水槽を用いた (図-2 参照)。今回の実験では水深は 32 cm に固定した。風はインバータ型ファン式送風装置を用いて発生させた。今回の実験では、送風装置のインバータの条件を 15 Hz に固定して行った。

送風装置から送られた気流は、パイプを通して送風口から風洞水槽内に入り、下流端の吹き出し口からパイプに入り送風装置に戻るようになっている。送風口から

7.5 m 下流位置に測定部 1 m を設けている。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出入りがないように極力気密性を高めている。

測定部は側壁、上下面全て透明材料で作成されている。これによりあらゆる方向から、レーザー光を照射し、ビデオカメラで撮影することが可能である。気流の計測では、上方からレーザーシート光を照射し、側壁から CCD ビデオカメラにより、気流方向に沿った鉛直 2 次元断面を撮影した。水流の計測では、上方からレーザーシート光を照射すると水面の揺らぎにより水中での光面が乱れるため、底面を通してレーザーシート光を照射した。気流用トレーサーである微小水滴発生装置は送風口付近に設置した。水流の流速計測では、トレーサー粒子としてナイロン 12 粒子 (比重 1.02、粒径 50 μm) を使い、実験開始前に予め混入しておいた。

撮影された画像座標から実空間座標への変換では以下の 2 次変換式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} x &= a_x X^2 + b_x XY + c_x Y^2 + d_x X + e_x Y + f_x \\ y &= a_y X^2 + b_y XY + c_y Y^2 + d_y X + e_y Y + f_y \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

ここで、(x, y) は実空間上の座標、(X, Y) は画像上の座標、 $a_x, b_x, c_x, d_x, e_x, f_x, a_y, b_y, c_y, d_y, e_y, f_y$ は係数ある。係数の決定には最小自乗法を用いた。実験開始前に標定点をプロットした板をレーザーシート光が照射される位置に設置し、撮影位置に固定した CCD ビデオカメラで標定点の画像を撮影する。撮影された画像上での標定点位置 (X, Y) と実空間上での標定点位置 (x, y) から、最小自乗法により 2 次変換式の係数を決定する。

今回の測定では、気流測定時の測定誤差は 0.25 mm であり、水流測定時の測定誤差は 0.094 mm であった。

4. 実験結果

4.1 気流場の計測結果

a) Super-Resolution KC 法による測定結果

気流測定では、ダブルパルス・レーザーの遅延時間間隔を 450 μs とし、2 枚 1 組の画像を 15 Hz 間隔で撮影し、連続 37 組の画像を取得した。

気流測定では水表面近傍を撮影するため、水面よりやや上方から斜め下方に向けて撮影している。水表面近傍では、水面にトレーサー粒子の像が写り、正確な水面位置を決定するのが困難であり、正確な水面位置決定法は今後の課題である。

図-3 に得られた流速分布図の 1 例を示す。図-3 のケースでは約 2200 個のベクトルが計測された。図-3 中の流速ベクトルの平均値は 240.2 cm/s であった。水面位置は水槽底面からの距離が 32 cm 付近にあるが、今回は正確に決定できないために表示していない。

b) 空間平均操作

流れ場の渦構造をより明瞭にするため、得られた流速ベクトル図に対して空間平均操作を行い、メッシュ上の流速分布に変換し、平均流速を差し引く。これにより平均流速で移動する座標系からみた流速分布が得られ、詳細な渦構造を計測することができる。

空間平均操作に関しては、(2) 式のようなガウス分布の重み付き空間平均化を行った。 u, v は x 軸方向の流速、 v は y 軸方向の流速である。 $w(x, y)$ は重み関数である。 σ は重み関数であるガウス分布のサイズであり、空間平均領域サイズを意味する。 (x_0, y_0) はあるメッシュ点の座標であり、 (x_i, y_i) は PTV により得られたランダムな粒子位置における粒子座標である。

$$u(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w(x_i - x_0, y_i - y_0) u(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w(x_i - x_0, y_i - y_0)}$$

$$v(x_0, y_0) = \frac{\sum_{i=1}^n w(x_i - x_0, y_i - y_0) v(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n w(x_i - x_0, y_i - y_0)}$$

$$w(x_i - x_0, y_i - y_0) = \exp\left\{-\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}{\sigma^2}\right\}$$

..... (2)

今回は、約 2200 個のベクトルが得られているため、50(縦)×50(横)の 2500 個のメッシュデータに変換した。1 個のベクトルの占める領域は 0.22 cm(縦)×0.44 cm(横)となり、 $\sigma=0.5$ cm で空間平均操作を行った。

図-4 はメッシュ点における流速分布から平均流速 240.2 cm/s を差し引いた流速分布である。つまり、平均流速で移動する座標系で流速分布を示したものである。流れは右から左に流れており、流下方向に発達する組織的な構造が見られる。

4.2 水流場の計測結果

a) Super-Resolution KC 法による測定結果

水流の流速は気流に比べ、1～2 オーダー流速が小さいため、レーザーのパルス間隔を 66 ms (15 Hz) とした。よって画像は 15 Hz で連続的に 37 枚取得された。

図-5 に得られた水流の流速分布図の 1 例を示す。気

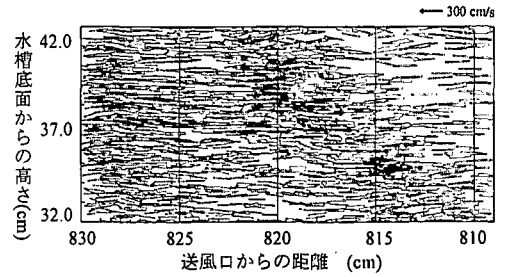


図-3 Super-Resolution KC 法により得られた気流速分布

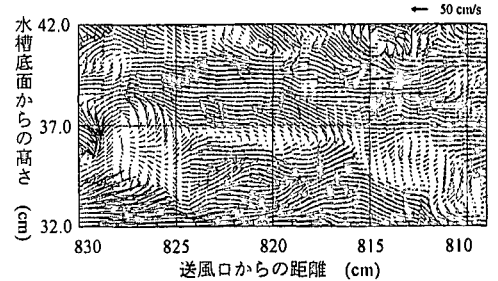


図-4 空間平均操作より求めたメッシュ点流速より平均流速を差し引いた流速分布

流の計測で問題となったように、水表面位置を決定するのは困難であるため、図中には水表面位置を記入していない。1 組の画像より約 6200 個のベクトルが計測された。

b) 空間平均操作

気流の計測で施した空間平均操作 (2) 式を用いて、同様にメッシュ上の流速分布を求めた。約 15×15 cm² の領域に約 6200 個のベクトルが計測されているため、ベクトル 1 個あたりの占める平均領域は約 0.2×0.2 cm² である。よって空間平均操作における空間サイズ σ を 0.2 cm として、50×50 のメッシュ点の流速を求めた。水表面近傍の流れ場の渦構造を見るため、求めたメッシュ点流速から吹送流が影響していると思われる水槽底面から 25 cm 以上の平均流速 1.58 cm/s を差し引いた。

結果の 1 例を図-6 に示す。図中の中央上部に斜め上方に向かって強い上昇流が見られる (図中矢印)。また、吹送流による渦パターンも見られる。

5. 結 論

風波発生時の水表面での気体輸送現象解明を目的とした気流・水流の画像流速計測法について検討を加えた。水表面のような移動境界が存在する流れ場の計測には、PIV が適している。特に詳細な境界極近傍の計測が必要な場合、PTV が適している。竹原らが開発した高精度 PTV アルゴリズムである Super-Resolution KC 法により、水表面極近傍の気流、および水流を計測した。

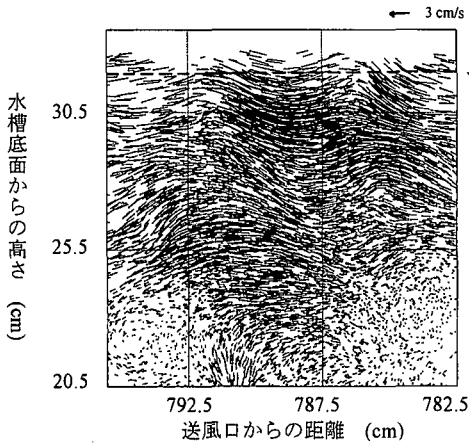


図-5 Super-Resolution KC 法により得られた水流速分布

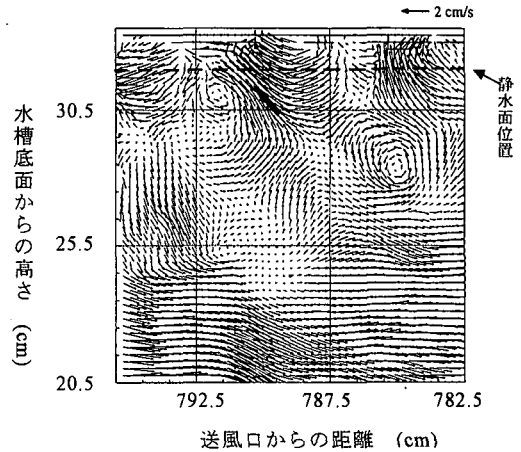


図-6 空間平均操作より求めたメッシュ点流速

水表面での気体輸送現象を対象としたとき、これまで気流のトレーサーとして使われた油滴は水表面を汚し、水表面の特性を変化させ、流れ場を変えてしまう。気流トレーサーとして、医療用で用いられているネブライザーを利用し、多量に微小水滴(1~10 ミクロン)を発生させる装置を開発した。

上記の手法を風洞水槽内の流れ場に適用し、水表面近傍の気流および水流の詳細な流れ構造が計測できた。今回提案した手法により、風波発生時における水表面近傍の気流・水流の同時画像計測技術の基礎的技術は確立した。2台のダブルパルス・レーザーおよび2台のCCDビデオカメラを同期させ、気流と水流を同時に撮影、計測することは可能である。また、すでに開発した炭酸ガス溶入過程の可視化技術も組み合わせると、どのような流れ場の構造が気体輸送現象に大きく影響を及ぼしているのかを明らかにすることができる。

現段階では、水面の反射の影響で水表面位置を正確に決定することができなかった。今後、画像により正確な水表面位置決定法の開発が必要である。

謝辞：本研究は、平成11~12年度文部省科学研究費補

助金(奨励研究(A)、課題番号11750462)の補助を受けて行われたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 江藤剛治・竹原幸生 (1990): 多数のトレーサー粒子の自動追跡のための新しいアルゴリズムの開発, 水工学論文集, 第34巻, pp. 686-694.
- 江藤剛治・竹原幸生・道典康治・久野悟志 (1996): PTVのための粒子画像抽出法に関する検討, 水工学論文集, 第40巻, pp. 1051-1058.
- 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・R. J. Adrian・江藤剛治 (2000): KC法を用いた Super-Resolution PIV の提案, 水工学論文集, 第44巻, pp. 431-436.
- Jähne B. and Haußecker, H. (1998): Air-water gas exchange, Annu. Rev. Fluid Mech., pp. 443-468.
- Keane, R. D., Adrian, R. J. and Zhang, Y. (1995): Super-Resolution particle imaging velocimetry, Meas. Sci. Technol., 6, pp. 754-768.
- Liss, P. S. and Merlivat, L. (1986): Air-sea exchange rate: introduction and synthesis. In The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling, ed. P. Buat-Menard, Reidel, pp. 113-127.