

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006-2008

課題番号：18360082

研究課題名(和文) 大気流動の時空間構造測定に向けた PIV 技術の開拓研究

研究課題名(英文) Pioneering Study of PIV Technology for Large Scale Airflows

研究代表者 武田 靖 (TAKEDA YASUSHI)

北海道大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90108481

研究成果の概要：

気流の空間的構造を定量計測するPIV(Particle Image Velocimetry)を技術開発することを目的とし3年間の研究の実施を通じて多面的な成果を上げた。大規模な気流計測における主要な問題は、環境負荷の少ないトレーサを開発すること、ならびに三次元非定常構造を定量捕獲するための光学設計、さらには速度ベクトルデータの高密度化であった。平成18年度は、トレーサの開発としてWatermist法、Soap Bubble法、ならびに Tuft Resonance法について検討を行い、さらにPIVに適合したトレーサの注入方法を設計・検定した。これと同時に300m規模の大気流動場を三次元計測する問題点提起実験を実施した。平成19年度は開発したトレーサ注入法と光学系を実例計測によりデモンストレーション実験した。計測対象は竜巻のPIV計測、樹木や鉄塔をモデル化した透過性物体の周囲空間流動のPIV計測である。平成20年度は大気ダウンバーストを室内モデル実験置換し、カラートモグラフィックPIV技術の実証実験を実施した。これらの開発の結果、従来まで低密度データの2次元計測に制約されてきた気流構造計測が、3次元高密度データ取得が可能となるに至った。また応用実験から気流のもつ固有の流動場が新たに発見され、これらについてのダイナミクスを論文等で発表した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
2007年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：可視化、流動場、PIV、画像処理、竜巻、ダウンバースト、気流

1. 研究開始当初の背景

流動の空間的を定量計測する PIV(Particle Image Velocimetry) (粒子画像流速測定法) の開発研究が進展している。しかしレーザー利用や高度幾何光学キャリブレーションに基づく手法であり、計測対象の殆どは室内実験に制限されてきた。しかしながらエネルギー

ーおよび自然災害対応の分野では、大規模な流動現象の定量把握に社会的ニーズがある。ところが PIV を大規模流動場に応用するとき、2つの難題のため即時的成果を上げにくくなっている。本研究は、既に20年以上の開発の歴史をもつ PIV に対して、新たな応用体系の開拓に向けた大規模流動場の定量計

測の実現を目指すものである。

2. 研究の目的

流動の空間的を定量計測するPIVを大規模な気流を計測対象とできるよう技術開発する。対象とする流動現象の実次元スケールは、約1m~1kmのレンジである。このレンジの流動は、A: 工業地帯における環境汚染物質の拡散、B: 生活地帯における対人障害物質の抑制、C: 輸送機械や風車における空力性能、D: 自然気象による建築物・倒木災害において重要となる。過去においてこれらの問題は点計測をベースとした経験則による数理モデル補間に依存している。大規模流動PIVが実現すれば、流速は点情報から面情報および三次元情報に発展する。本研究では最終的に時間軸を含めた4次元時空間流動構造をこれまでにない手法でデータマイニングすることを目的とする。具体的な技術開発は、以下の3項目からなる。①環境無害の気流用トレーサ粒子の開発、②自然光・自発光型の粒子によるPIV/PTV計測スキームの開発、③希薄データ濃度情報に対する時空間4次元の流動場復元スキームの開発。これらの項目の開発を通して、気流計測のデモンストレーション実験とし、底層域における気流の風速分布計測、人工竜巻による旋回流の発生・消滅過程の計測を行う。

3. 研究の方法

以下の3項目について並行して研究を実施する。

A: 環境インパクトの少ないトレーサの撮像技術の確立、

B: テレスコピック PIV を主体とする大規模可視化技術の確立

C: 制限された速度ベクトルデータからの流動場の復元手法の確立

4. 研究成果

4-1. 気流用トレーサの開発

環境ネガティブインパクトの少ない気流用トレーサの開発検討を優先課題とし、食品材料で構成される Soap bubble をトレーサとする気流の定量的可視化方法の具体的な性能を調査した。翼周りの流れにおける試験から対流加速度ならびに圧力勾配が大きな領域で完全なトレーサに対する偏差が拡大することが示された(図 1)。ただし直径が小さいと実効比重が高くなりスリップが拡大した。この点でサイズが小さいことは返ってトレーサビリティを悪化させることが判明した。一方、小さな径の場合は並進運動方程式の適用による逆解析から気流構造の復元が可能であることも同時に示された(図 2)。即ちスリ

ップが大きくても最終的に気流構造を精度高く計測するのは小径のシャボン玉であると結論された。

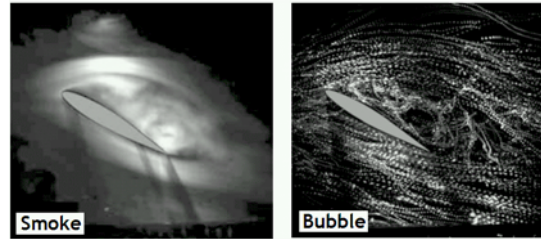


図 1. スモークとバブルの対比

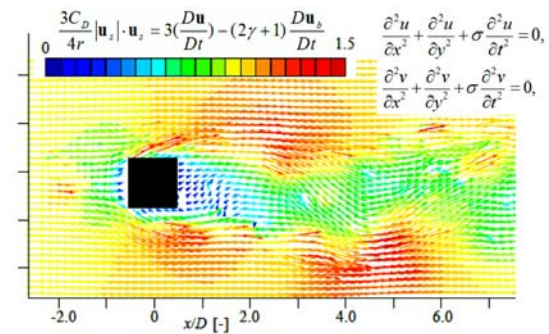


図 2. バブルからの逆解析による気流場の復元

次に Watermist の供給方法について PIV の相関窓サイズとの対比から検討した。この結果、空間解像度を上げるためには低濃度でも空間高波数の濃度ユラギを積極的に付与するのが効果的であることが示された(図 1)。このことは濃度空間スペクトルと PIV 精度に明瞭な因果関係が存在することで立証された。またタフトの固有振動数から気流速度を逆算する手法は、タフトが2自由度以上のたわみをもたなければ高精度なキャリブレーションが可能であることが示された。

4-2. 気流用三次元 PIV 技術

300m の立体空間における花火のステレオ PTV 計測を実施し、微小な粒子を漏れなく撮像するには意図的な defocus 条件を採用することが効果的であることが示された。また慣性の大きな粒子速度ベクトルの運動方程式逆解析により大気流動場が復元可能であることや、粒子サイズが推定可能であることが理論的・実験的に示された。さらに強力な LCP 光源を用いたカラー PIV 法の導入によりテニスコートサイズの気流構造の3次元構造の計測を実現した。また CT で採用される後退投影積分原理をカラー PIV に適用することで、単視点で詳細な3次元気流構造場を計測することができることを示した(図 4)。さらに自然背景からの移動体の高速検出システムを製作し、屋外気流場における光の不可制御性に対する問題も解決することができた。

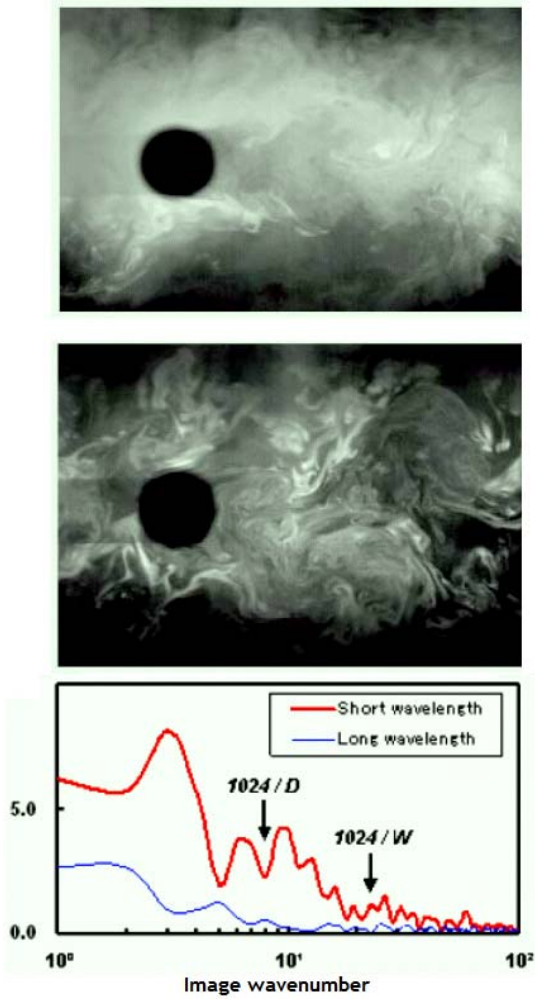


図3. スモークの空間高波数成分付与

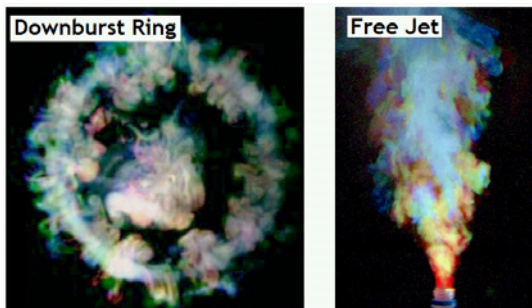


図4. カラートモグラフィック PIV

4-3. 気流構造のダイナミクス

大規模気流空間において希薄なデータ密度で取得される3次元離散速度ベクトルデータを最も小さな誤差で補間・復元する時空間補間法を開発した。樹木・鉄骨構造を模擬した半透過性物体をモデルとし、その後流構造の特異性を計測した。この結果、透過性物体が通常の直観とは逆で中実物体よりも大きな抗力係数をもつことが明らかとなった(図5)。また透過性物体の後流における乱流エネ

ルギーは通常のソリッド物体よりも3倍以上上下流で最大となることなど、大規模流動(高Re数乱流)の特徴を捕らえた(図6)。

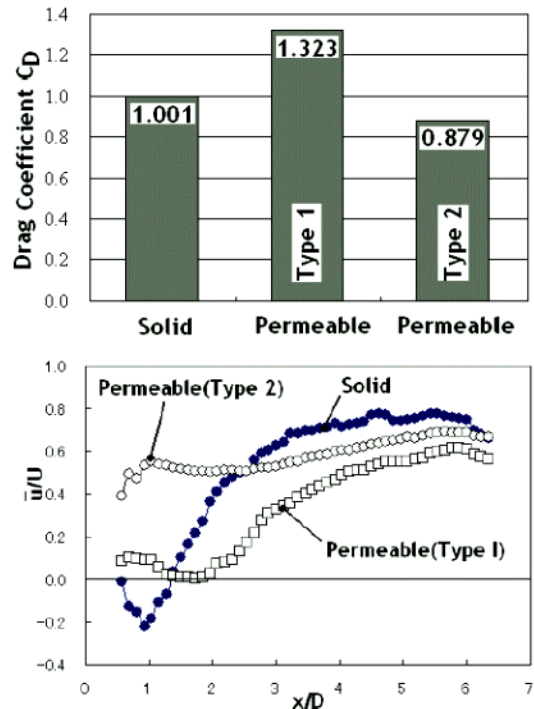


図5. 透過性円柱の抗力と後流計測

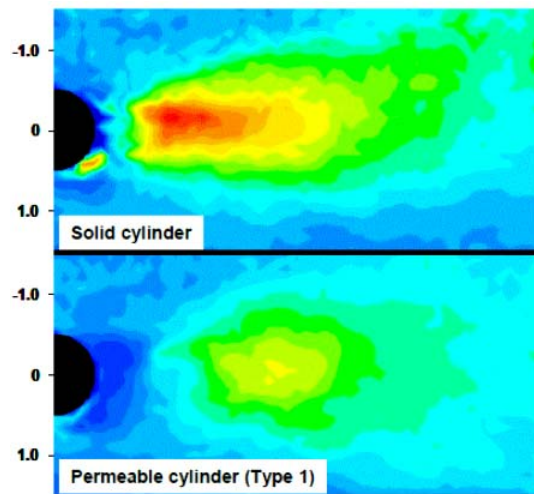
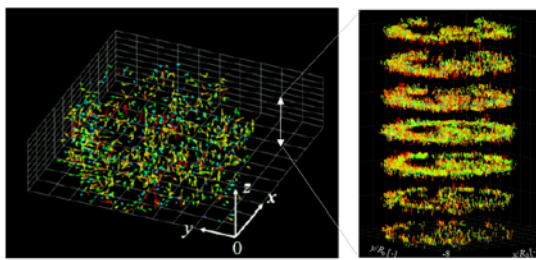


図6. 透過性円柱の後流の乱流エネルギー分布

これに関して後流カルマン渦の低周波数モード成長や物体の回転の影響などについても明らかにした。これからヒントをえて垂直軸風車の並列配置におけるカップリング作用についてもPIVによって詳細な知見が得られた。さらに人工トルネード発生装置の製作を行った。この試験の結果、トルネードのふれ回り運動と渦核での粒子集積軌跡、上部での粒子飛散構造を可視化した。特に2つの吸引口をもつ並列竜巻の相互作用を明ら

かにした．次にダウンバーストのカラーPIVによる計測を実施し，地表での逆ロール渦による衝撃的な高せん断力の発生を明らかにした（図7）．



Recursive Cross Correlation Voxel PIV

$$C = \frac{\iiint \phi(x, y, z, t) \phi(x - \Delta x, y - \Delta y, z - \Delta z, t + \Delta t) dx dy dz}{\sqrt{(\iiint \phi(x, y, z, t)^2 dx dy dz) (\iiint \phi(x - \Delta x, y - \Delta y, z - \Delta z, t + \Delta t)^2 dx dy dz)}}$$

図7. 三次元ボクセル PIV による三次元流動場

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 6 件）

- ① 神田哲志, 村井祐一, 田坂裕司, 武田 靖, 手塚英昭, 森 治嗣, ステレオ撮影を用いた鳥の三次元軌跡計測システムの開発, 日本機械学会論文集, B1 編, Vol.75, No.751, pp.561-563(2009)[査読有]
- ② Y.Murai, T.Kanda, Y.Tasaka, Y.Takeda, 3-D Measurement of Smoke Density Distribution by Backward Projection of Integral Colour Information, Proc. 3rd International Workshop on Process Tomography (IWPT-3), Book of Abstracts, pp.21-21, CDROM papper No.27, pp.1-8 (2009) [査読有]
- ③ Y.Murai, T.Nakada, T.Suzuki, F.Yamamoto, Particle tracking velocimetry applied to estimate the pressure field around a Savonius turbine, Measurement Science and Technology, Vol.18, pp.2491-2503 (2007) [査読有]
- ④ Y.Murai, Y.Oishi, Y.Tasaka, Y.Takeda, Particle tracking velocimetry applied for fireworks - A demonstration of vector field measurement in hundreds meter space -, Journal of Visualization, Vol.11, No.1, pp.63-70 (2008) [査読有]
- ⑤ H.Takeuchi, Y.Tasaka, Y.Murai, Y.Takeda, H.Tezuka, M.Mori, Particle Image Velocimetry for Air Flows Behind Permeable Cylinders, Proc. 5th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference- San Diego, USA, No.37035, pp.1-8(2007) [査読有]

- ⑥ T.Kanda, Y.Murai, Y.Tasaka, Y.Takeda, Dynamics and Optics of Bubble Tracking Velocimetry for Airflow Measurement, Proc. 5th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference- San Diego, USA, No.37036, pp.1-8(2007) [査読有]

〔学会発表〕（計 11 件）

- ① 田中大樹, 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖, 回転透過性円柱の後流特性, 日本機械学会北海道支部学生会第 38 回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, pp.139-140, 北見工業大学, 北見, 2009.3.7 [査読無]
- ② 神田哲志, 村井祐一, 田坂裕司, 武田 靖, Color PIV によるダウンバーストの 3 次元計測, 第 36 回可視化情報シンポジウム講演論文集, pp.17-18, 工学院大学, 東京, 2008.7.22 [査読無]
- ③ 吉本貴弘, 村井祐一, 田坂裕司, 武田 靖, 人工トルネードにおける断面粒子濃度分布, 第 36 回可視化情報シンポジウム講演論文集, pp.413-414, 工学院大学, 東京, 2008.7.22 (2008) [査読無]
- ④ 竹内智朗, 村井祐一, 都市ガス管路におけるトレーサーガスを用いた流量計測, 日本機械学会第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集[No.08-8], pp.221-222, 北海道大学, 札幌, 2008.6.19-20 [査読無]
- ⑤ 村井祐一, サボニウス風車まわりの二次元位相平均圧力場について, 日本機械学会第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 [No.08-8], pp.163-164, 北海道大学, 札幌, 2008.6.19-20 [査読無]
- ⑥ 神田哲志, 村井祐一, 田坂裕司, 武田 靖, 手塚英昭, 森 治嗣, ステレオ撮影を用いた鳥の三次元軌跡計測システムの開発, 日本機械学会第 13 回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集 [No.08-8], pp.405-406, 北海道大学, 札幌, 2008.6.19-20 [査読無]
- ⑦ 竹内寛貴, 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖, 透過性円柱の後流構造, 第 85 期日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集 [No.07-16], pp.56-56, CD-ROM 版講演論文集, No.308, pp.1-4, 広島大学, 東広島, 2007.11.17 [査読無]
- ⑧ 神田哲志, 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖, 微小中空液滴による物体後流場の PIV, 可視化情報全国講演会 (岐阜 2007) 講演論文集, Vol.27, No.2, pp.91-92, 岐阜大学, 岐阜, 2007.9.26 [査読無]
- ⑨ 村井祐一, 井戸健敬, 離散ベクトルデータの時空間グローバル補間スキーム, 日本機械学会創立 110 周年記念 2007 年度

年次大会講演論文集, Vol. 2, pp. 101-102,
関西大学, 吹田市, 2007. 9. 12 [査読無]

- ⑩ 神田哲志, 村井祐一, 田坂裕司, 武田 靖,
シャボン玉トレーサによる翼周りの流れの PTV 計測, 第 35 回可視化情報シンポジウム講演論文集, pp. 161-162, 工学院大学, 東京, 2007. 7. 25 [査読無]
- ⑪ 神田哲志, 田坂裕司, 村井祐一, 武田 靖,
シャボン玉トレーサによる気流 PTV 計測法, 日本機械学会北海道支部卒研発表会 2007 講演要旨集, pp. 230-231, 室蘭工業大学, 室蘭, 2007. 3. 3 [査読無]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 靖 (TAKEDA YASUSHI)
北海道大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号 : 90108481

(2) 研究分担者

村井 祐一 (MURAI YUICHI)
北海道大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号 : 80273001
田坂 裕司 (TASAKA YUJI)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号 : 00419946

(3) 連携研究者

なし