

風洞試験による構造物の対風振動の評価

朝倉 悠太^{*1} 上島 秀作^{*2}
Asakura Yuta Uejima Hidesaku

大型構造物は風による変形や振動などの耐風性問題に配慮する必要がある、設計段階において風洞試験や解析による検討が行われている。最近ではCFD（流れ解析：Computational Fluid Dynamics）で検討可能な領域が増えたが、複雑な構造物の対風振動については風洞試験による検討が不可欠となる。PIV（粒子画像流速計測法：Particle Image Velocimetry）による流れの可視化手法は進歩し、流体现象の理解を助ける有効なツールとなっている。本稿では、当社が提供する構造物の耐風性、特に振動問題に関する風洞試験について概説し、最近実施したPIVによる可視化試験の一例を紹介する。

キーワード：風洞試験、PIV、CFD

1. はじめに

風速に着目した場合、風洞試験は航空機などを対象とした高風速風洞での試験、大気中の諸問題を対象とした低風速風洞の試験に分類される。低風速風洞で取り扱われる代表的なものは、構造物の風荷重や振動などの耐風性の問題、プラントや工場などからの汚染物質の大気拡散の問題などが挙げられる。当社ではIHIが所有する3つの低風速風洞設備（図1）を運用して試験の計画・実施などのエンジニアリングを提供している⁽¹⁾。

大型大気乱流風洞の測定胴は幅6m、高さ3m、長さ24mの大型で、自然風を模した境界層を生成するために十分な長さを有する。最大風速は15m/sである。本風洞は橋梁、高層ビルなどの構造物全体を再現した模型の風洞試験に適している。加えて、拡散問題を対象とした環境風洞風試験にも用いられる。構造物安定性風洞は高さ2.5m、幅1.5m、

長さ8.0mの縦長の計測胴を持ち、最大風速は20m/sである。この風洞は主に2次元模型による要素試験に用いられる。大型温度成層風洞は幅5.0m、高さ1.8m、長さ20mの測定胴を持ち、最大風速は8.0m/sである。この風洞は大気拡散を取り扱うための風洞で計測胴内に温度分布を持つ気流を生成することができる。また、回流型の風路を持つため、常温でも低風速域において安定した気流を実現することができる。

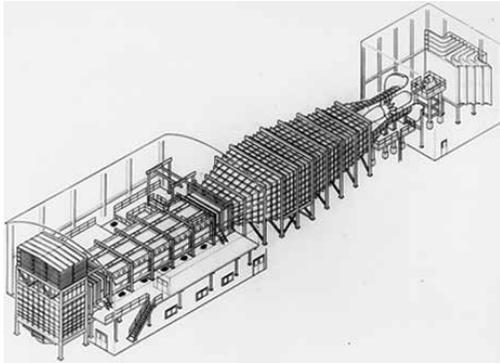
本稿では、当社が提供する構造物の耐風性、特に振動問題に関する風洞試験について概説し、最近実施したPIVによる可視化試験の一例を紹介する。

2. 構造物の風による振動現象⁽²⁾

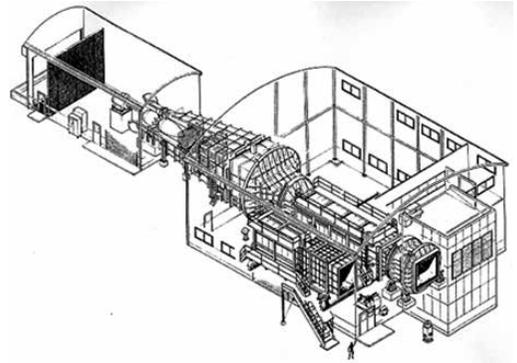
図2は風による振動現象の原因を示すために、橋樑など構造物の基本断面である矩形断面を例にとり、断面周辺の剥離流れや渦などの流れの状況を模式的に示したものである。

*1：研究開発センター 研究開発グループ 一般計量士

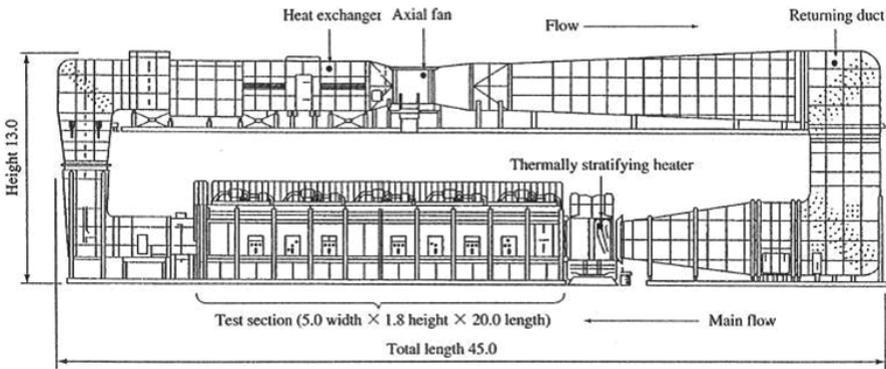
*2：計測事業部 計測技術部 部長 博士(工学) 技術士(建設部門)



(a) 大型大気乱流風洞



(b) 構造物安定性風洞



(c) 大型温度成層風洞

図1 風洞設備

図2のように橋桁断面に風が作用すると、流れは断面前縁で上下方に剥離し、断面の上下に剥離渦や後流に渦流れを形成する。このような流れの変動が、橋桁断面に変動風力として作用する。また、橋桁断面が振動すると、それがさらなる流れ場の変化を引き起こし、振動と同調する変動風力(自励空気力)が生じる。これらの要素が合わさった変動風力が、振動の原因となる励振力となる。

構造物の風による振動は、上述した構造物まわりの流れ特性、すなわち、剥離流れや後流渦から作用を受けて生じる振動と自然風自体が持つ乱れによって生じる不規則振動に分類される。

渦励振は図3のように、限定的な風速域で発生する現象である。前縁剥離渦や後流渦は上下方向の交番的な空気力を橋桁に作用させるが、ある風



図2 断面まわりの流れの模式図

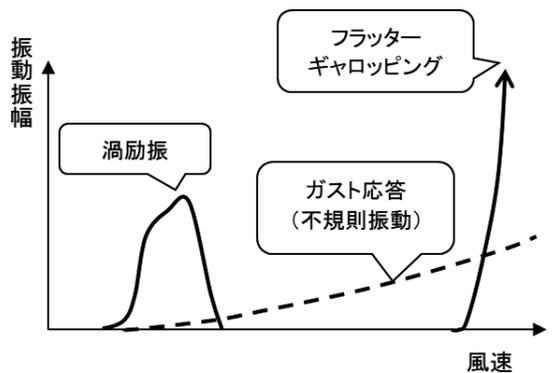


図3 橋桁の風速と振動振幅関係の例

速領域において、橋桁の上下方向やねじれ方向の固有振動数と一致する。共振状態に達し、振動が大きく励起される現象が渦励振である。

一方、フラッターは自励振動の一種である。フラッターは図3のように風速の増加に対して振動が急速に大きくなる破壊的な振動現象であり、旧タコマ橋(米国)を落橋させた現象である⁽³⁾。橋桁のフラッターは通常、ねじれ振動や、ねじれと上下たわみの連成振動を示す。フラッターと区別して辺長比(=幅B/高さD)の小さい比較的縦長の橋桁で発生する上下方向1自由度の自励振動は特にギャロッピングと呼ばれる。

図3において破線で示したガスト応答は自然風に含まれる乱れによる強制振動で、不規則な振動応答を示す。また、風速が大きくなるに従って応答振幅も次第に大きくなる傾向がある。上下方向のたわみ振動も当然ながら発生するが、風向方向の乱れ成分に対して水平方向の振動も顕在化することが多い。

以上に橋桁を例として風による振動応答の概要を示したが、他の陸上構造物でも同様な現象が起こり得るので、柔な構造物については設計上配慮が必要である。

3. 風洞試験

図4に橋梁の風洞試験状況の一例を示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾。全体模型試験は橋梁構造全体について模型化した弾性模型を用いる試験である。静的現象のみならず振動現象も対象とするため、弾性模型では幾何学的に加え、振動特性も相似する必要がある。同時に外力としての風特性の相似性、例えば自然風の乱流特性の相似性などを考慮することで、図4(a)のように全体模型試験は実橋の現象を精緻に再現することが可能となる。

部分模型試験は構造物の一部分を抜き出した要素模型を用いる試験である。図4(b)はその一例で橋梁ケーブルの部分模型試験である。模型自体は剛体であるが、上下振動が可能となるように両端部をばね支持し振動状態を相似することで、風による振動現象を再現することが可能である。部分模型試験は全体模型試験に対して、使用する模型が簡易であり、風向、模型形状、振動特性など試験条件の変更が容易なため、パラメータ検討を目的とした試験などに適している。



(a) 全体模型試験⁽⁴⁾



(b) 部分模型試験⁽⁵⁾

図4 風洞試験(橋梁)の例

4. 流れの可視化

構造物の風洞試験では、風荷重低減策や振動抑制策を検討するために、形状や振動特性などを幅広く変化させ、風荷重や振動が小さくなる最適形状を求める検討が行われる。このとき、試行錯誤的に試験を繰り返すのではなく、振動の原因となる流れの構造やメカニズムを推測し、その流れ場の変化に着目しながら最適な形状を探すのが合理的である。そのツールとして、CFDや風洞試験による流れの可視化は近年実用性が向上している。風洞試験については、PIVなど可視化手法が進化し、当社でもその高度化に取り組んでいる。以下、基本的なPIVによる可視化事例を紹介する。

4.1 PIVの基本原則

PIVの計測原理を図5に示す。PIV計測とは、流れ場とほぼ同じ比重の微小トレーサ粒子を均一に拡散させ、レーザなどの光源を瞬間的にシート状に照明し、高速度カメラで2つの時刻の瞬間的なトレーサ粒子の散乱光を撮影することで流れの速度場を得る手法である。2つの時刻で連続的に撮

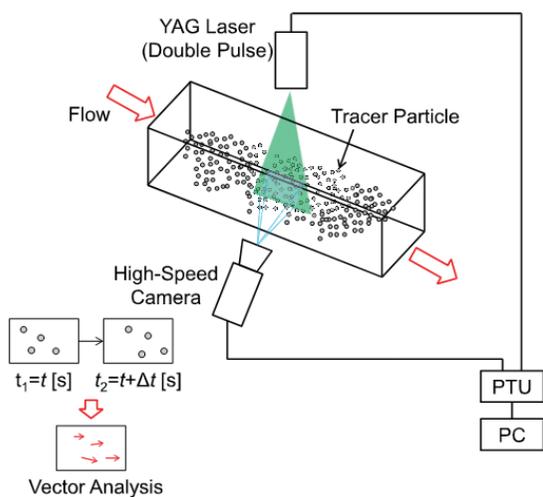


図5 PIV計測原理

影することにより、最初に撮影した時刻 t と次に撮影した $t + \Delta t$ では、 Δt の分だけトレーサ粒子が移動することになる。したがって、時刻 t および時刻 $t + \Delta t$ にて撮影されたトレーサ粒子画像から画像上の計測対象領域にある粒子群の移動量 Δx と2つの時刻の撮影間隔 Δt より流れ場の局所速度を求める。このとき、トレーサ粒子は、この計測対象領域内の局所速度にて移動していると仮定している。この局所速度を撮影した画角全体について計算し、速度ベクトルを算出する手法がPIVの基本原則である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。

PIV計測のメリットは、着目する2次元平面内、さらには高速度カメラを複数使用することにより、3次元空間の速度分布を一度に計測できることである。従来の熱線風速計やレーザドップラ流速計のように1点ずつ空間中の流速を計測するものと比較すると、計測時間を大幅に短縮することが可能である。しかし、適切な計測条件を設定することは必ずしも容易ではない。例えば、計測範囲にトレーサを十分にシーディングすることは難しく、満足できる結果を得るためには、ノウハウや工夫を重ねる必要がある。

4.2 PIVによる振動角柱の流れの可視化

4.2.1 PIVシステム

図6は本試験で用いたPIV計測システムの構成である。ダブルパルスレーザ、高速度カメラ、プログラミングタイミングユニット(PTU)、計測用PCから構成されている。ダブルパルスレーザはKANOMAX社製のNd:YAGレーザを使用し、1~14Hzまで可変、かつ、最大50mJのパルスエネルギーのレーザを発振することが可能である。高速度カメラ、PTU、計測用PCはLaVision社製のものを使用した。高速度カメラの解像度は1600×1200pixelである。PTUは、計測用PCからの信号をダブルパルスレーザと高速度カメラに伝達し、レーザと

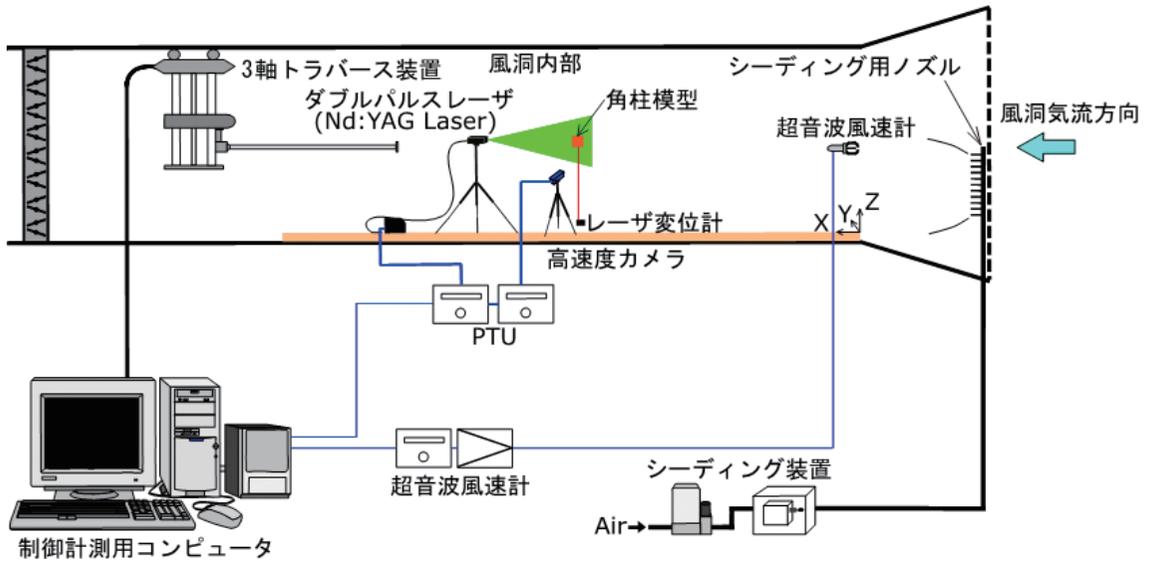


図6 実験装置構成

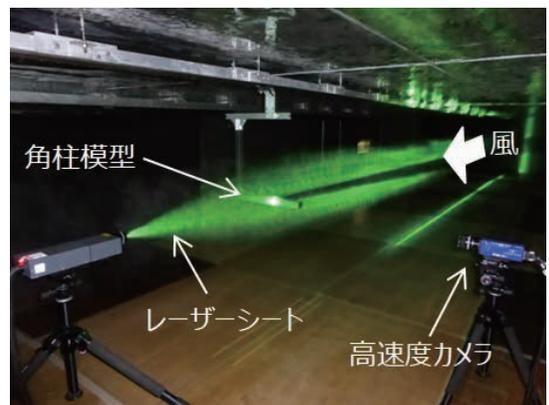
カメラを同期させるものである。計測用PCは、PIVの計測および流速を算出するための解析に使用した。シーディング装置は、専用のオイルを加熱し気化させることで、白色かつ粒径 $1\mu\text{m}$ 程度のオイルミストを発生させ、ノズルを使用して風洞内に混入させた。シーディング装置のノズルは、風洞上流の整流板位置に設置し、気流の一様性に極力影響を与えないように配慮した。

4.2.2 可視化条件

本試験では正方角柱模型を対象に振動時の断面まわりの流れの可視化を行った。図7に計測状況を示す。温度成層風洞の計測胴に一边が $D=50\text{mm}$ 、 $L=600\text{mm}$ の正方角柱模型を上下(鉛直)1自由度系にばね支持した(図7(a))。角柱模型の振動変位はレーザー変位計を用いて計測し、基準流速の計測のために超音波風速計を計測胴流入口に設置した。図7(b)にPIV計測状況を示す。図7のよう



(a) 角柱の支持状態



(b) PIV計測状況の一例

図7 計測状況

に角柱模型の中央断面にレーザーシートを照射し、ハイライトされたトレーサ粒子を含む気流を高速カメラで計測した。高速カメラにて撮影する範囲(画角)は、角柱断面を含み、流れ場についてはやや後流側にシフトした480×360mmとした。

振動時の1周期の流れの変化を十分に把握するために、模型の振動数($f=1.9\text{Hz}$)の約7倍でPIVの計測を行うこととし、ダブルパルスレーザおよび高速カメラのサンプリングレートを14Hzとした。レーザのダブルパルスの間隔 dt は、トレーサ粒子がダブルパルスの間隔 dt の間に5~10pixel程度粒子が移動するような間隔とするため1000 μs とした。レーザ変位計は、サンプリングレートを140Hzで計測し、PIVとの同期をとった。

4.2.3 試験結果

(1) 角柱の対風応答

風洞風速 $U=0.1\sim 1.0\text{m/s}$ までの角柱の鉛直方向の応答を計測した。1回あたりの応答計測は10秒間とし、その間の平均値から風速と振幅を評価した。図8は角柱模型の風速と応答振幅の関係である。横軸は風洞内風速 U を振動数 f と断面寸法 D

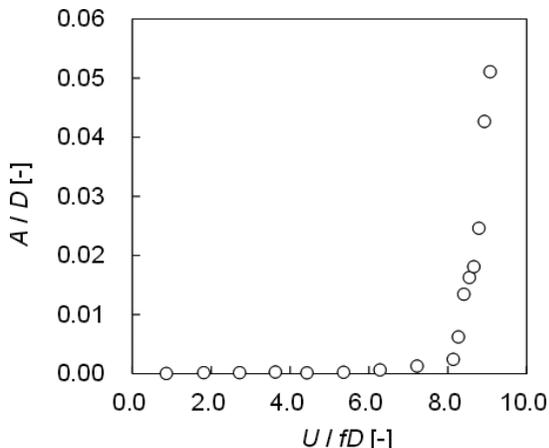


図8 角柱模型の風速と振幅の関係

で除した無次元風速とし、縦軸も振幅 A を断面寸法 D で除した無次元振幅としている。 $U/fD=8.0$ 付近よりギャロッピングが発生し、図8のように応答振幅が急増している。正方角柱では渦励振は顕在化せずにギャロッピングが発現することが知られているが⁽⁷⁾、本試験でも同様の応答特性が得られている。

(2) PIVによる角柱の流れ計測結果

可視化時の無次元風速はギャロッピングが発現している風速域($U/fD=10$)とした。図9に振動状態での可視化時の角柱模型の変位の時刻歴を示

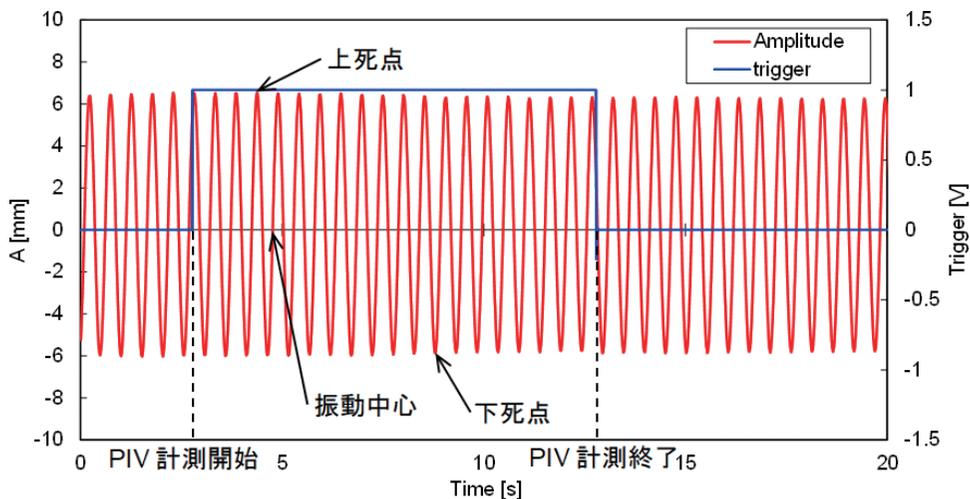


図9 “振動状態”の変位時刻歴とPIVのタイミング

す。これは、片振幅=6mm ($A/D=0.12$) で一定振幅での強制加振し、ギャロッピングを再現した状態である。PIV 計測は図 9 のとおり 10 秒間実施した。また比較のため、模型の静止状態についても同様に計測した。図 10 に PIV 計測結果から求められた流線図を比較した。これらは (a) 静止状態、(b) 振動状態における上死点に達したとき、(c) 中央に達したとき、(d) 下死点に達したときの PIV 計測結果の瞬時値データに基づくものである。カラーコンタは速度の大きさを示している。

振動状態において、その 1 周期の間に上死点、下死点、中央点での流れの違いが明確に表れている。

一方で、静止状態と振動状態の中央点の流れ場はよく似ていることがわかる。このとき前縁で剥離した流れが上下面に再付着せず後流に放出されカルマン渦を形成する過程が良く捉えられている。今回の可視化で得られた流れ特性は、同種角柱を対象にした既往の試験結果⁽⁸⁾とも整合している。PIV を用いてそのギャロッピング時の非定常流れ場を明確に可視化できることがわかった。今回は正方角柱の 1 断面の 1 風速での可視化結果であるが、断面の違いが流れ場にどのように影響を与えて、応答がどのように変化するかの評価への有効性が期待できる。

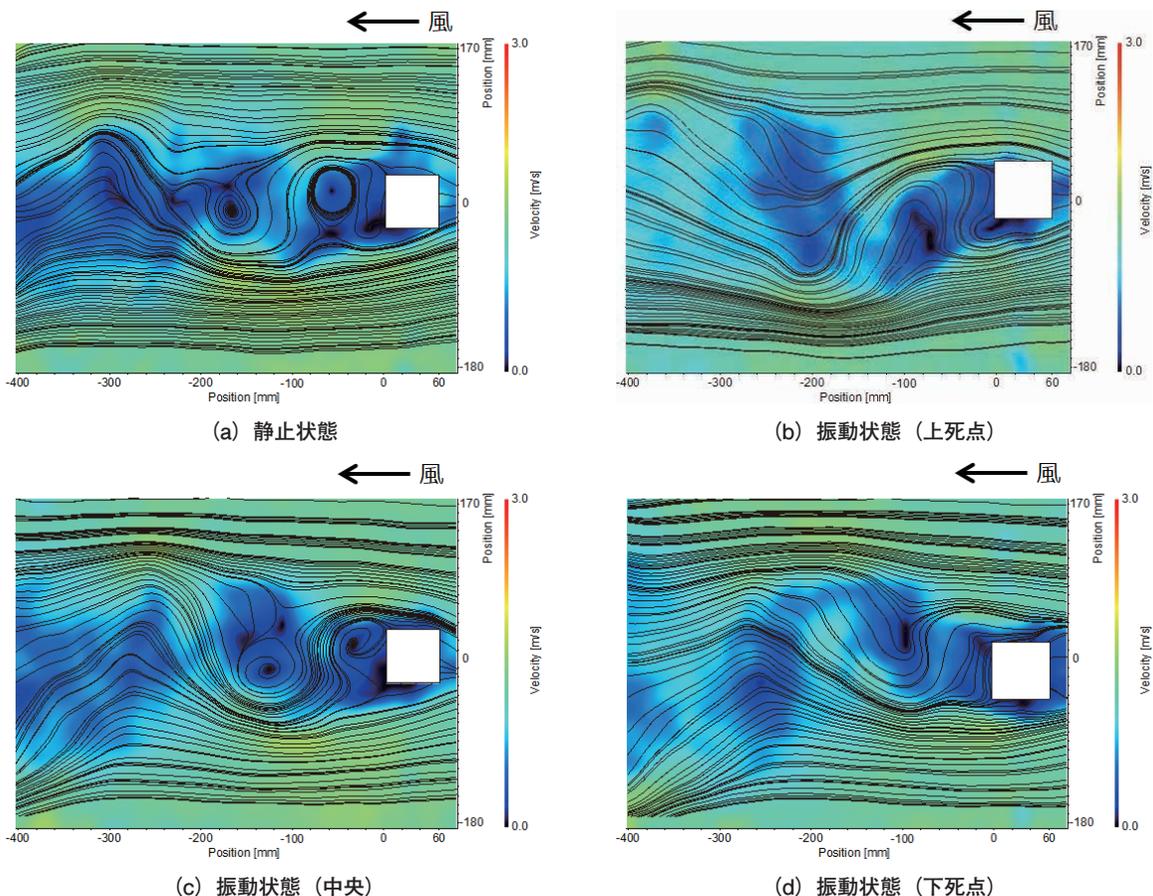


図 10 PIV 計測による流線の比較 ($U/fD=8.0$)

5. 今後の課題

PIVによる可視化結果は構造物の対風現象を流れ場の面からの考察を行う上で有用なツールである。今後流れ場の解析技術が進み、流れ場を計測することは従来以上に流体现象解明に有効となると考えられる。振動現象と流れの関連を分析し振動現象の改善などに結びつけるために、位相平均処理して振動の同調成分を抽出する処理や、POD解析(固有直交分解:Proper Orthogonal Decomposition)など現象に影響を与える流れ構造を抽出する試みなども行われている。今後は、それらも含め、PIVをはじめとする流体可視化技術を向上させていく予定である。

参考文献

- (1) 研究開発支援のための技術：IIC REVIEW、No.40、2008/10、pp.75-101
- (2) 日本道路協会：道路橋耐風設計便覧、2008
- (3) Richard Scott 著、勝地弘、大橋治一、鳥海隆一、花井拓 訳：タコマ橋の航跡 吊橋と風との闘い、三恵社、2005
- (4) 上島秀作、松田一俊、藪野真史：「ビン橋」(ベトナム)の風洞試験、石川島播磨技報、第46巻、第1号、2006、pp.24-30
- (5) 中村純生：風洞の高風速化への一例、IIC REVIEW、No.51、2014/04、pp.60-64
- (6) 可視化情報学会編：PIVハンドブック、森北出版、2002
- (7) 山崎裕大、杉本高志、遠山直樹：PIV(粒子画像流速測定法)による流れ計測、IIC REVIEW、No.31、2004/04、pp.40-46
- (8) 溝田武人、岡島厚：振動する角柱まわりの流れと非定常流体力に関する実験的研究、土木学会論文報告集、第327号、1982、pp.49-60



研究開発センター
研究開発グループ
一般計量士

朝倉 悠太

TEL. 045-791-3522
FAX. 045-791-3547



計測事業部
計測技術部 部長
博士(工学) 技術士(建設部門)

上島 秀作

TEL. 045-791-3518
FAX. 045-791-3542