

風洞における流体計測装置の活用法

佐藤 浩*

How to Use and Choose the Flow Measurement System for Wind Tunnel Testing

Hiroshi Sato

1. はじめに

風洞における定量的な流体計測装置としてはピトー管に始まり、熱線風速計、レーザードップラー流速計、そして近年の PIV といった各種の手法が開発され使用されている。筆者はこれまでユーザーの立場と、装置を提供する側の立場の両方で流体計測装置を取り扱ってきた。その経験を踏まえ、計測技術を提供する側の立場で今現在取り扱っている、熱線風速計(以下 CTA と略)、レーザードップラー流速計(以下 LDA と略)、PIV(粒子画像計測装置)の三種類の流体計測手法について、それぞれの特徴と風洞での活用法について改めて整理してまとめることとする。

2. 各計測手法の特徴と現況

実際に風洞を利用して様々な実験解析を行なっている方々にとっては今さら釈迦に説法の趣ではあるが、最初に CTA, LDA, PIV の各計測手法について特徴をまとめる。

2.1 CTA(定温度型熱線風速計)¹⁾

CTA の動作原理は流れの中に通電加熱された金属線を置き、周囲の流れにより熱が奪われる時の、その熱量を検出することで流れの速度を間接的に測ることである。

間接測定なので速さが分かっている流れを用いて先に較正值を求めておく必要がある。流速の速い流れに対する適応性は高いが、一方で極低速域では金属線周囲の流体の浮力の影響を受けて誤差が生じやすい。

金属線それ自体が計測領域ということになるので、空間分解能は金属線の大きさそのものである(数ミリ×数マイクロ)。センサーとブリッジ回路を含めて速度変動に対する応答性は高くできる(数百 Hz 程度まで)。

データは電圧のアナログ値で出力されるので、その

扱い方次第で時間分解能は高められる(PC で取り込む場合、使用する A/D コンバータのスペックで決まる)。つまり高い周波数の速度変動に追従できるのがこの手法の大きな特徴である。

金属線 1 本で 1 成分の速度が測れる。2 本の金属線を近接させて X 型に設置すれば、2 成分の速度が測れる。3 本を立体的に組み合わせて設置すれば 3 成分の速度が測れる。ただしワイヤー型のセンサーでは逆流成分が強い流れでは流れの方向を誤って検出する可能性が高くなる。

流れの中にセンサーという異物を入れることになるので、それ自体が流れを乱すことは否めない。また、気流中の微細なゴミや混相流の場合には微粒子が金属線に当たると断線してしまい計測は困難である。

Fig.1 は CTA システムの一例である。メインフレームにブリッジ回路が組み込まれ、PC から制御できる。メータを見ながらつまみを調整したりといった作業は不要で、ほとんどの操作は接続された PC 上のソフトウェアから行うことができる。専用の較正装置はソフトウェアで制御され、自動的にセンサーの較正ができる。

最近では DC 電源で駆動できる、より簡便な装置もある。それをひとつの筐体に複数チャンネル搭載して同時多点測定に対応したものもある。

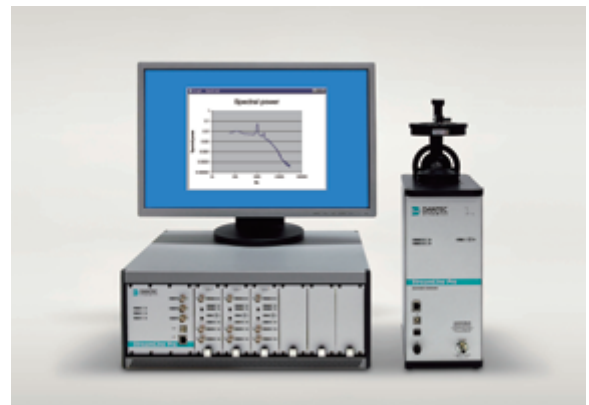


Fig.1 Sample of a CTA system.

* ダンテック・ダイナミクス(株)
(〒105-0013 東京都港区浜松町 1-8-6,
E-mail: hiroshi.sato@dantecdynamics.com)

2.2 LDA²⁾

LDA はレーザー光線の干渉性を利用した手法である。レーザー光線を2本の平行なビームに分け、それらのビームを凸レンズで絞込みながら交差させて空間に回転楕円体状（ラグビーボール状）の干渉縞の領域（測定点）を形成させる。

測定対象の流体には予め光を散乱させる粒子（一般にシーディングと呼ぶ）を流入しておいて、流体の流れに乗って動く粒子が測定点を通過するとき生じる散乱光を受光系で検出し、そこから速度情報を含んだドップラー信号を抽出して速度を算出する手法である。

速度はドップラー信号の周波数に比例し、その換算値はレーザーの波長とビーム交差角で一意的に求まるため、較正を必要としないことがこの手法の大きな特徴である。

光で計測するので計測行為自体で流れを乱すことはない。ただし流れに粒子を混入させることが必要なので、それを嫌う測定対象には使用できない。また流体の速度自体を計測しているのではなく、流体中の粒子の速度を測定する間接測定なので、流体に対する粒子の追従性を検討しておく必要がある。

測定点の大きさが空間分解能となるが、光学系の設定で、ある程度自由に決められる。一般的に回転楕円体の短径が数十ミクロン程度のもがよく用いられる。

時間分解能だが、信号は基本的に測定点を粒子が通過したときにしか得られないため離散的になる。したがって粒子密度を上げたり信号の SN 比を最適化するなどしてデータの取得率を上げることで時間分解能を高めていく。一般に気流の場合、状況次第で数十 kHz オーダーまで上げることもできる。

ブラグセルなど周波数シフト機構を用いることで、片方のビームに周波数を上乗せして、測定点の干渉縞に方向性を持たせることができるため、速度ゼロも含めて逆流も測れるのがこの手法のもう一つの大きな特徴である。

2本のビームで1成分の速度が測れるので、2成分を測るには3本または4本のビームで光学系を形成すればよい。同様に3成分を測るには5本または6本のビームで光学系を形成すればよい。各速度信号の分離は、測る成分ごとにビームの波長を変えて行うのが一般的である。

Fig.2はLDAシステムの一例である。DPSSレーザーを用いて本体光学系を小型化したことで管体はラックマウント可能なサイズである。本体光学系と光学プローブは光ファイバーでリンクされている。

このタイプの装置では光学プローブ部は調整不要であり、また本体光学系内の各部の微調整の頻度も少なく使用できる。処理器はFFTアナライザー型で、壁面近傍などノイズの多い状況でも信号を抽出して処理できる。

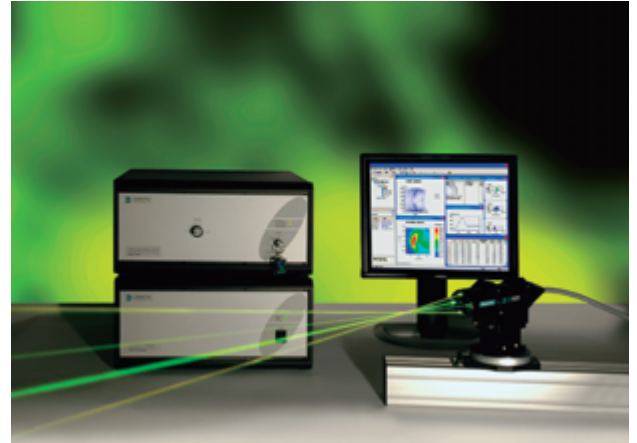


Fig.2 Sample of an LDA system

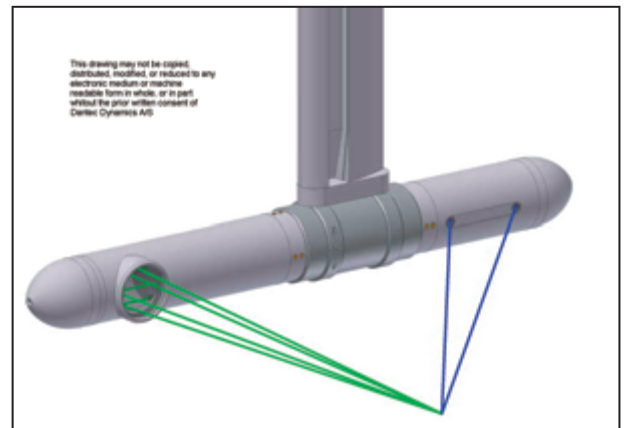


Fig. 3 3D Integrated LDA probe

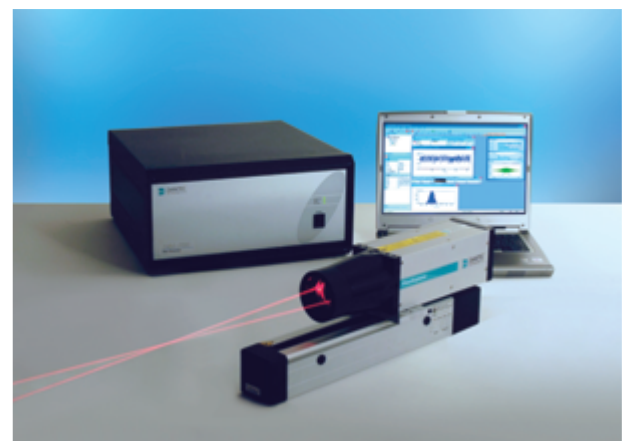


Fig. 4 Sample of an LDA system

Fig. 3 は風洞での使用を想定したインテグレート型3次元LDAプローブの模式図である。トラバース装置に取り付けて風洞内の任意のポイントでの3成分の速度データを得ることができる。

Fig. 4 は半導体レーザーを用いて光学系をさらに小型化して、本体と光学プローブを一体化したタイプの例である。

2.3 PIV³⁾

PIV は流れの可視化技術を応用，発展させたものと見ることができる。

流体中に光を散乱させる粒子を予め流入させておいて，シート状に広げた光を流体に照射して，その可視化像をカメラで撮影して，デジタル画像処理を行なって粒子の移動量を算出する手法である。

装置の構成は，可視化用の光源，カメラ，同期装置，パソコンとソフトというものがごく一般的である。

標準的な PIV では光源にダブルパルスの Nd:YAG レーザーを用い出射ビームをシリンダカルレンズでシート状に広げて流れに照射する。カメラにはダブルエクスポージャーのデジタルビデオカメラを用いる。シーディングは煙発生装置による液体噴霧粒子を用いるのが風洞では一般的である。

画像はフレームグラバーを使用して PC に取り込み，ソフトウェアで画像処理を行ってベクトルマップなど必要な情報を得る。

測定エリアの大きさは，使用するレーザーの出力とカメラの画素数，さらに使用するレンズの組み合わせで任意に決められるが，実質的には撮影された画像上で噴霧粒子が粒子として解像できるかどうかで撮影画角すなわち測定エリアの大きさが決まる。

時間分解能，この場合速度ベクトルマップを取得できる単位時間あたりの回数という意味だが，標準的なダブルエクスポージャーのカメラの場合は，取り込みレートは数 Hz～数十 Hz 程度が上限で，一般的な Nd:YAG レーザーも発光の繰り返しレートは 30Hz 程度が上限である。したがって，時間分解能はカメラかレーザーの低い方の繰り返しレートで決まる。

近年では高繰り返しレートのレーザーあるいは高出力の連続波レーザーと，ハイスピードカメラを組合せて用いることで，数 kHz からそれ以上のレートで画像取得が可能となってきている。

測れる速度成分だが，ごく標準的にはシート光と 1 台のカメラの組み合わせで，シート光で照射した 2 次元平面内の速度ベクトルマップが求められる。

異なる方向から 2 台のカメラを同期させて撮影することで，その視差からシート光の面外速度成分が検出できる。このことをもって 3 次元の速度ベクトルマップが測れると考えがちだが，あくまでシート光で可視化したごく薄い空間内の各点の 3 次元ベクトルが得ら

れるだけであることに注意されたい。

実験室レベルであれば，トモグラフィック PIV という手法が確立されており，3 次元の流れを検出できるようになってきているが，風洞実験で実用的に使えるようになるのはまだ先ではないかと筆者は考える。

ここまで述べた 3 つの手法の主な特徴について Table. 1 にまとめた。太字は特徴的な部分を示す。

3. 計測手法の選択と活用法

ここまで述べてきた 3 種類の流体計測手法のなかでも，近年は PIV に対するニーズが特に高いと筆者は感じている。PIV はマップ状の面的なデータが比較的短時間で得られるため，そのことに魅力を感じるユーザーが多いのが理由の一つであろう。

だが PIV で全てが賄えるかと言うと必ずしもそうではないことは，前述の各計測手法の特徴を見れば明らかである。つまり従来からの CTA や LDA も現役の計測手法として活用のあると言える。

以下に流れの解析方法の観点から各計測手法を分類し，その選択と活用法について記述する。なお解析方法とその優先順位は諸説あるかと思うが，以下は一般論ではなく筆者の考えである。

3.1 「点」か「面」か

測定対象を「点」ごとに細かく解析するのか，ある領域を一度に「面」として捉えるかを最初に決めることが重要であろう。

「点」ごとに細かく捉えたとした場合は，CTA，LDA が選択肢となる。両手法ともに各点ごとの平均値と統計値が得られ，2 次元，3 次元タイプの場合にはレイノルズ応力などの乱流諸量も得られる。

PIV の場合も繰り返し画像データを取得して，点ごと，つまり各検査領域ごとの統計量を計算することができる。ただし有意な統計値を得ようとするデータ量が増えそれに伴って計算時間もかかる。だが近年の計算機の能力向上によりデメリットとは言えなくなりつつある。

「面」的にデータを得ようとした場合は PIV がその原理と特徴から圧倒的に優位である。だが，CTA も LDA も通常はトラバース装置とともに使用することが多いので時間平均値としての面的なデータも取得できる。

つまり面的にデータを取得するには，時間平均値が

Table 1 Comparison of the measurement methods.

	CTA	LDA	PIV
較正	必要	不要	必要
空間分解能	ミリオーダー	短径数十ミクロン程度	画角とカメラのピクセル数次第
時間分解能	最高数百 kHz 程度まで (A/D の性能次第)	空気流で数 kHz 程度以上まで (シーディングの状態などによる)	標準型で 30Hz 程度以下 高速型で十数 kHz 程度まで
逆流測定	困難	可能	可能

取れば良いのか瞬時値も必要なのかによって PIV の採否が決まる。

3.2 時間分解能

次に考慮すべきは、現象を解析するときの時間分解能ではないだろうか。

CTA はアナログ値としてデータが出力されるので、この点では最も高いポテンシャルを持つと言える。

LDA はシーディングの状況や信号の SN 比などによってデータレートが左右されるので、気流の場合には測定点によらず一定の状態でデータを取ることは不可能ではないが難しい。したがって予備測定などによって事前に必要なデータレート (= 時間分解能) が得られるかどうかを見極めておく必要がある。

PIV の場合は、装置のスペックで時間分解能は決まってしまうので、乱流現象を解析したいとなれば、それなりのものが必要となる。ハイスピードカメラの場合、画像処理を行うためカメラ内のメモリに取り込んだ画像データをコンピュータに転送する必要があるが、ここでもデータ量の多さが実用面でのネックになることがある (たとえば、データの転送に数十分かかる場合がある)。

また現状では取り込みレート高いタイプのシステムでは、その性能を必要としない場合の測定に適応しにくいことが多い。要するにハイスペックの装置を導入しても、汎用性があまり高くないという状況に陥ることもある。しかしながら面的な時系列データを得ようとした場合には、高速タイプの PIV の一択である。

3.3 測定領域の大きさ

風洞内に領域を設定して測る場合、CTA や LDA ではトラバース装置と組み合わせる必要があるが、それが設備的に実現可能かどうかを考慮する必要がある。トラバース装置が無い場合新たに導入せねばならない。

PIV では測定領域の大きさは使用するレーザーの出力とカメラの解像度の選択に直接的に関わってくる。

たとえば、自動車実車サイズの風洞で数十センチ四方の領域に対して、シーディングにスモークジェネレータを用い、Nd:YAG パルスレーザで 120~200mJ の出力、カメラの解像度は 4~11Mpixel を使用すれば、比較的良好なベクトルマップが得られる。

3.4 測定精度

手法自体の精度と実運用面での精度の 2 つがあるが、どちらも現状で最も高いのは LDA だと筆者は考える。

CTA は正しく較正を行えば測定条件によっては高い精度で使用できるが、極低速流や逆流のある場での精度を考えると LDA の精度までには至らないと筆者は考える。

PIV は較正が測定精度に直接的に影響を与えることに加え、可視化自体とソフトウェア上での解析パラメータの設定の仕方などにおいてユーザーの習熟度が強く作用して測定精度に影響を与えることがある。

Table 2 Application examples.

手法	代表的な活用例
CTA	<ul style="list-style-type: none"> 乱流場の渦構造解析 乱流場のスペクトル解析 物体後流の速度欠損の測定 風洞自体の特性測定 ウェークサーベイ (多点型でセンサーをレイク状に組んだ場合) など
LDA	<ul style="list-style-type: none"> 自動車 (実車, 模型⁴⁾、鉄道車両模型、航空機模型、建築模型、その他の一般的な物体周りの逆流を含む流れ場の解析 逆流を含む乱流場のスペクトル解析 風洞風速のモニター用 など
PIV	<ul style="list-style-type: none"> 自動車模型^{5,6)}、鉄道車両模型、航空機模型、建築模型、その他の一般的な物体周りの逆流を含む流れ場の解析 (瞬時値および統計値) 物体周りの面外速度を含むクロスフロー計測 (ステレオ PIV の場合)

解析方法に前述の各種法の特徴を併せて考慮し、各手法の風洞における代表的な活用例を Table. 2 にまとめた。

4. まとめ

以上述べたように、現状では一つの計測装置で風洞での全ての定量計測に汎用的に使用できるものを実現することはまだ難しい。

したがって、自分が何を測りたいかを明確にしてそれに相応しい計測装置を選ぶことが重要である。それが結果として無駄な出費を抑え、なおかつ使いやすい装置になると言える。ハイスペックでも結果として扱いにくい装置だと、ユーザーは敬遠して使わなくなるということをししばしば目にする。

すでに計測装置を持っている方々だけでなく、今後導入を考えている方々にも装置選択の際の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) Bruun, Hans H.: Hot Wire Anemometry: Principles and Signal Analysis, Oxford University Press (1995).
- 2) 流れの計測懇談会: LDV の基礎と応用, 日刊工業新聞社 (1980).
- 3) 可視化情報学会: PIV ハンドブック, 森北出版 (2002)
- 4) Sato, H., Takagi, M.: Airflow Measurement Around Passenger Car Models Using a Two-Channel Laser Doppler Velocimeter, SAE Technical Paper, 930297 (1993).
- 5) Ishima, T., et al.: 3D-PIV Measurement on Flows around a Standard SAE Vehicle Model, 9th Int. Symp. On Particle Image Velocimetry (2011).
- 6) 中川雅樹, 原本誉剛, 南方利城: F1 車両開発における PIV の実用化, 可視化情報 VOL. 31 Suppl. No. 1 (2011 年 7 月).