

大型低騒音風洞で空気の流れをみる

宇田 東樹

研究開発推進室(風洞技術センター 課員)

近藤 善彦

同(同 所長)



うだ とうき



こんどう よしひこ

はじめに

空気の流れは人間の目には見えません。この直接見ることのできない空気の流れを捉えようとして、古来より数多くの可視化実験がなされてきました。

1883年にイギリスのレイノルズ (Reynolds) が行った有名な可視化実験では、横にしたパイプの中に水を流し、染料を注入して流れの様子を観察すると、ある流速まではきれいに流れるが、それより流速が上がると染料は急激に拡散し、いわゆる乱流へと遷移することを発見しました。この可視化実験による発見は流体力学の歴史において非常に重要であり、後に流体力学の世界ではあまりにも有名なレイノルズ数とよばれる無次元数として広く知られるようになります。今日では、流れを定性的に「見る」だけの可視化技術から、流れを可視化した上でさらに一歩進んで定量的に「見て測る」という計測法の1つとして可視化技術は躍進を遂げています。

さて、物体周りの空気の流れをみる際、動いている物体周りの流れをみるよりも、物体が静止して空気が動いているという状態の方が都合が良く、物理量の計測という点からも便利です。そこで、静止した物体に高速の人

工的な気流を当てて、物体に働く力や発生する騒音の測定を行う「風洞実験」がしばしば活用されてきました。本稿では、煙によるトレーサ法や気流糸法(タフト法)に始まり、近年急速に発達している光学的可視化法として、Pressure Sensitive Paint (PSP)法、Particle Image Velocimetry (PIV)法、さらに広義の可視化技術としてマイクロホンアレイによる音源探査法にいたるまで、滋賀県米原市にある鉄道総研の大型低騒音風洞(米原風洞)で培われてきた空気の流れを可視化するための技術をいくつかピックアップしてご紹介します。

トレーサ法(煙による可視化)

トレーサ法は、流れの中に煙や染料、アルミ粉などを入れてそれらの粒子(トレーサ粒子)が流れに追従する様子を観察する手法です。図1は、風洞の気流の中に6本の煙を導入し、鉄道車両模型周りの流跡を可視化したものです。煙がより見やすくなるように、模型の上方からアルゴンイオンレーザーをシート状に照射しています。この写真からわかるように、流れは車両模型の先頭形状に沿ってやや上方に曲げられ、先頭部以降ではきれいに直線状に流れていることがわかります。

このように、トレーサ法では供試体周辺の大まかな気流の様子を直接視覚的に捉えられ、流れの基礎的な特徴を容易に知ることができます。

タフト法

流れの様子を観測するのに使う糸などをタフトと呼びます。タフト法は、主にタフトの動きによって表面近傍流れや離れ領域・不安定領域の有無を確認するのに利用されます。

図2は実車の1/5スケールの鉄道車両模型の表面にタフトとして縞りのない絹糸を埋め込み、風速50m/sにおいて写真を撮ったものです。これより、模型上面のタフトは、

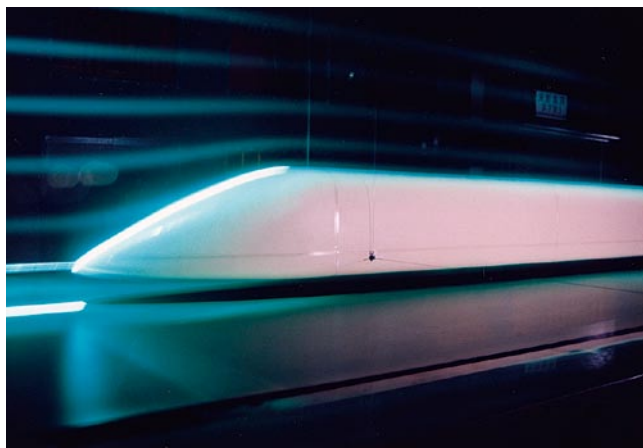


図1 アルゴンイオンレーザーを用いた煙による可視化



図2 1/5車両模型の表面近傍流れのタフトによる可視化 (風速50m/s, 環境工学研究部 空気力学研究室にて実施)

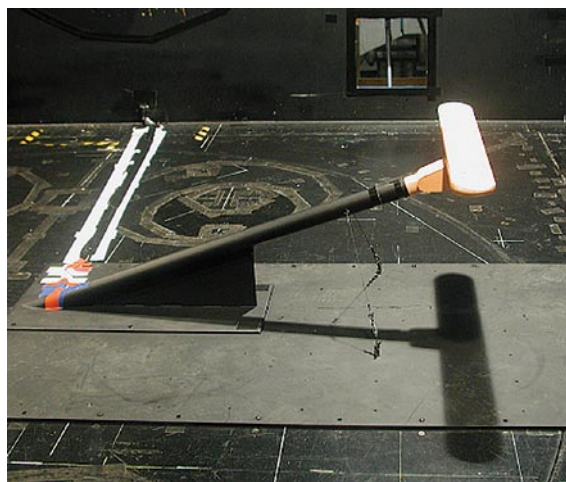


図3 感圧塗料を塗った舟体と舟支え (黒い棒状の部分は主柁)

R=60mmの円弧で丸みをつけた上辺の効果で流れ方向(左から右方向)に沿って真直ぐに並び、はく離は存在しないことがわかります。一方、車端部の丸みづけを行っていない側面は、上面とは異なり、上流側から5~6列目付近まで流れが乱れ、はく離による逆流が生じており、その後流れが再付着していることがわかります。また、他の先頭形状で風洞試験を行った結果、風速10m/s程度の低速時には存在したはく離領域が、風速50m/sでは消滅し、乱れの少ない流れとなるようなケースもあることがわかりました。これは、流速が10m/sから50m/sへ大きくなるとレイノルズ数が5倍に大きくなり、先頭部の丸みを持つ端部付近での流れの状態が変化するためと考えられます。こういった、強いレイノルズ数依存性がみられる現象を解析するうえでは、流速と模型の大きさを大きくすることのできる大型風洞は優位であり、より実車に近い状態を作り出すことが可能となります。

感圧塗料法 (PSP法)

複雑形状まわりの表面圧力分布を計測する手法の1つとして、感圧塗料 (PSP) による方法が挙げられます。この塗料には周囲の酸素分圧、すなわち表面圧力に応じて発光強度が変化する性質があります。これを利用して、塗料を塗った供試体に励起光源 (キセノンランプ) を照射し、供試体表面をCCDカメラで撮影することで面の発光強度から表面の圧力分布を測定することができます。

図3はこのPSP技術を実寸のパンタグラフを模擬した模型に適用した例です。実寸大模型の舟体と舟支え部分に感圧塗料を塗布し、架線と直接摺動する部材である舟体とこれを支持する主柁との間の、強い空力干渉部分の表面圧力分布を測定しました。

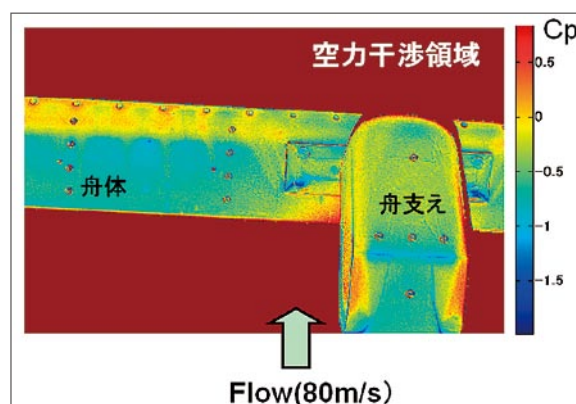


図4 下面からみた舟体と舟支え部分の圧力係数分布

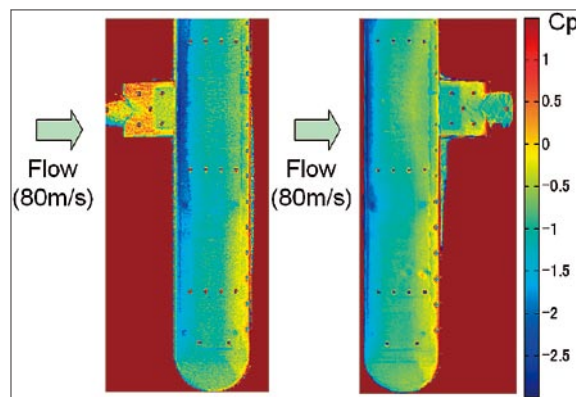


図5 舟体上面の圧力係数分布 (左:なびき, 右:反なびき)

図4は風速80m/sにおける舟体下面側の表面圧力係数分布Cpの測定結果です。圧力係数とは、測定された圧力値を動圧値で割って無次元化したものです。舟体中央部では、舟支えや主柁との強い空力干渉のために流れの3次元性が顕著であり、舟体側方部と圧力分布が異なっていることがわかります。図5に、なびき(舟体が下流側になる向き)と反なびき(舟体が上流側になる向き)の圧力係数分布

の比較を示します。主柱との空力干渉が及ばない領域では、舟体上面の圧力分布はなびき、反なびきでほぼ同じ分布となっていることがわかります。しかし舟体中央部の圧力分布は、なびき・反なびきで異なり、反なびきの方が舟体中央部の後縁部付近で空力干渉の影響を強く受けています。一般に、反なびきの方が舟体部の揚力が大きくなる傾向にあります。本測定結果はこれを裏付けるものです。

粒子画像流速計測法 (PIV法)

PIV法の測定原理について簡単に説明します。気流の中に微細な粒子を混入させ、シート状にしたNd-YAGレー

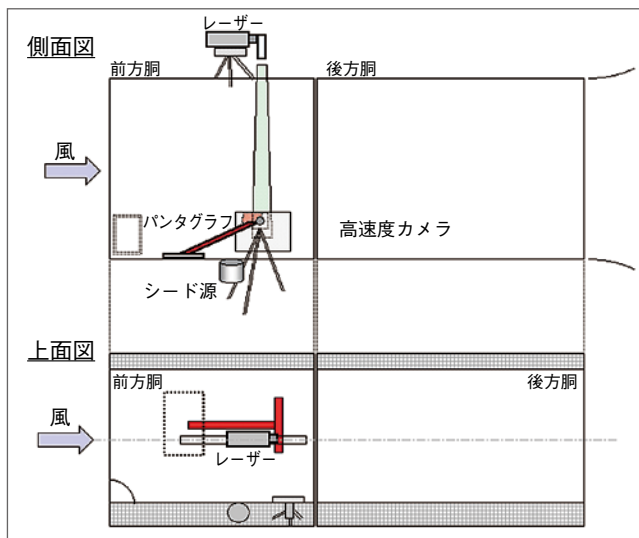


図6 PIV測定時の概略図

ザーをごく短い時間に2回照射します。この2時刻の粒子の散乱光をCCDカメラにて記録し、それらのペア画像間で粒子の濃淡分布の相関係数を求め、速度ベクトルを決定します。なお、粒子の濃淡分布ではなく、粒子そのものの動きを追跡する手法はParticle Tracking Velocimetry (PTV)と呼ばれています。

計測法としてのPIV自体は、実験室レベルの対象領域・速度領域においてはほぼ確立されておりますが、大型風洞への適用例は多くはありません。しかし、近年のレーザー技術および高速度カメラの進歩・価格の低下等を受け、PIV測定はより一般的なものとなり、その技術も成熟してきております。また、実スケールに近い供試体を利用できる大型風洞で流れ場を直接測定できれば、より詳細にせん断応力や渦度場の算出が可能であり、理想化された環境である風洞試験の解析結果を現車試験へと密接につなぐことができると考えられます。

実機パンタグラフを模擬した模型の舟体周りを測定領域として、PIV測定を実施した例の概略図を図6に示します。図7(a)は、風速50m/sで模型に上からレーザーシートを照射し、トレーサ粒子の画像を撮影している様子です。これを解析し、速度ベクトルを示したのが図7(b)になります。レーザーシートは測定部の天井から床面に向かって照射しているので、レーザーが舟体の影に遮られる舟体下方の速度ベクトルは描けません。舟体上面では流れが大きく離れている一方で、舟体後部ははく離領域の中にあり、小さな渦構造も見られます。また、図中の右下部分における速度ベクトルが流れにほぼ平行になっており、パンタグ

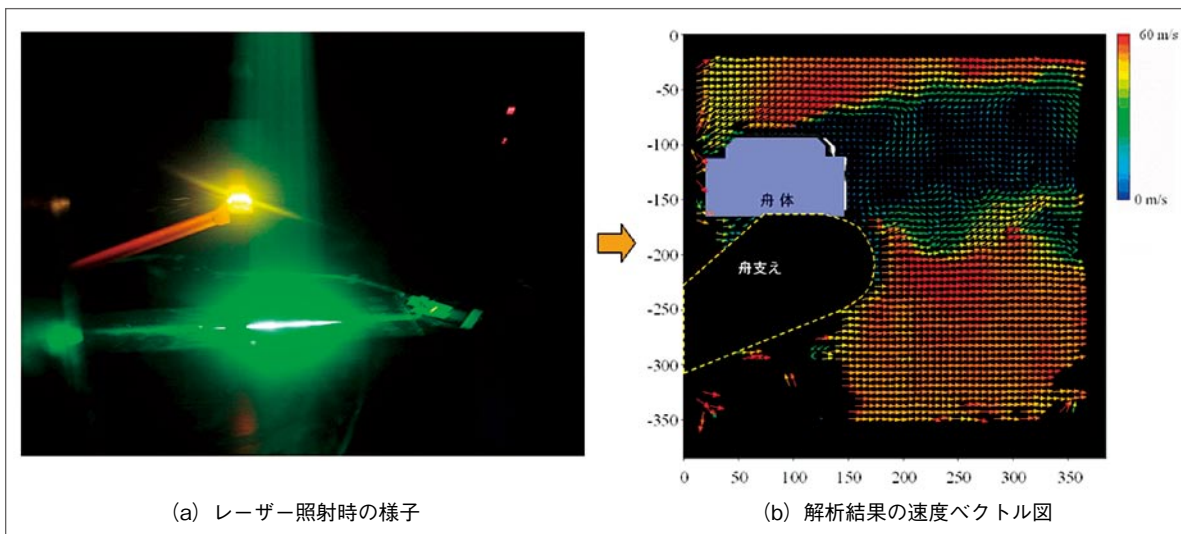


図7 PIVによる舟体周りの流れ場測定結果

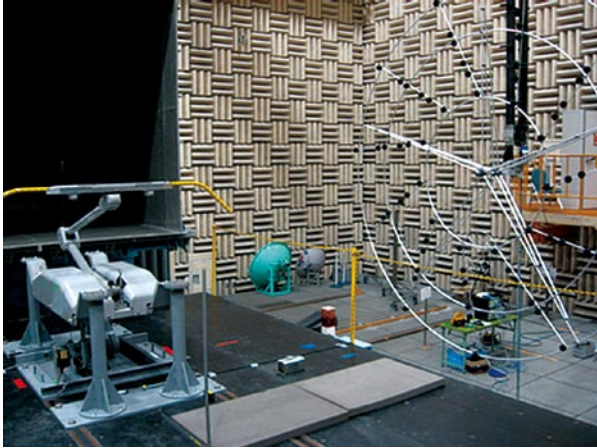


図8 φ4mアレイによる測定の様子



図9 パンタグラフ周りの音源分布
風速:300km/h, 周波数帯:1.25kHz~1.6kHz

ラフ中心より側方に220mm離れた本測定点では、主枠による乱れの影響が少ないことがわかります。

マイクロホンアレイによる音源分布の可視化

音は空気の振動が伝わったものといえます。空気の振動とはすなわち空気の密度変化であり、それが空気中を伝播して私たちの耳に到達し、音として認識されるのです。したがって、音を測定するという事は空気の密度変化を測定していることとなります。

空力音を測定するには、通常マイクロホンを使用します。マイクロホン1本のみだと空間中のあらゆる方向から到来する音を計測することになりますが、最近では供試体のどの部分からどの程度の音が出ているかを精度良く把握したいという要望が高くなってきております。そこでよく用いられるのが、マイクロホンを多数配列したマイクロホンアレイです。全マイクロホンで同時に騒音測定を開始し、得られた時間信号を解析処理することで騒音源の分布を描くことができます。

本手法により、騒音源がどのように分布しているかを視覚的に捉えられ、騒音源の把握と低減というプロセスを非常に効率的に達成できるため、物理現象のより詳細な把握を通じた研究開発に役立ちます。また、単一のマイクロホンを多数の測定点に移動させ、その結果を統合して音源分布を描く従来の方法に比べて、計測時間も大幅に短縮されます。

図8は、米原風洞にある直径4mの巨大なマイクロホンアレイで実機パンタグラフの音源分布測定をしている様子です。測定結果は周波数ごとに分析されますが、1.25~1.6kHzについて表示したのが図9になります。この周波

数では舟体部分および主枠のヒンジ部分に大きな音源の存在がみとめられます。

おわりに

米原風洞における可視化技術として、代表的なものをご紹介しました。前半で紹介しました煙によるトレーサ法やタフト法はおおまかに流れを可視化して定性的な知見を得るのに主に使用され、後半で紹介しましたPSP法やPIV法は光学的手法に基づき、可視化をベースとした計測法として発展してきている方法です。流れ場の面的な2次元情報がわずか1回の測定で求まるのは流体計測法としても非常に魅力的であり、さらに完全な3次元の流れ場測定へとつながるものと考えられます。

可視化技術は、計測法としてますますの発展が望まれる分野ですが、そのためにはそれらを取り巻く技術の発達が必要不可欠です。米原風洞では、これら周辺技術にも引き続き注目し、今後も流れの可視化技術の導入とスキルアップを図り、より詳細に目と耳で流れをみられるよう努めてまいります。RRR

文献

- 1) 日本機械学会：技術資料 流体計測法，日本機械学会，1994
- 2) 笠木伸英，他：流体実験ハンドブック，朝倉書店，1997
- 3) 池田充，他：感圧塗料を用いたパンタグラフの舟体・枠組間における空力干渉の影響評価，第33回可視化情報シンポジウム，2005
- 4) 池田充，他：感圧塗料を用いたパンタグラフ舟体の表面圧力分布測定，第11回鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail2004)，S8-2-7，pp.127-130，2004