

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

レーザーを用いて 空気の流れを測定する

高速走行する列車では、車両まわりの空気の力が作用して空力音やトンネル微気圧波などが引き起こされます。このような空気力学的な諸現象の解明を進めるには、空気の流れを可視化して測定する技術が必要不可欠です。ここでは、風洞試験において、レーザー光を用いて流れの可視化を行った事例を紹介し、また、可視化した流れの画像をもとに、定量的な計測技術まで発展させた粒子画像流速計測法と光の偏光の性質を活用した高度な計測技術についても実際の測定事例を交えて紹介します。



宇田 東樹
Toki Uda
環境工学研究部
騒音解析研究室
副主任研究員
【専門分野】 鉄道騒音



光用 剛
Takeshi Mitsumoji
鉄道力学研究部
集電力学研究室
副主任研究員
【専門分野】 架線／パンタグラフ系に関わる空力現象

はじめに

新幹線などの高速走行する鉄道車両では、列車まわりの空気の流れが、乗り心地や空力音（※参照）に影響を与えます。列車のトンネル突入時に観測されることがある「微気圧波」と呼ばれる現象（※参照）もトンネル内の空気が重要な役割を担っているなど、鉄道に関わる空気力学的な現象は少なくありません。このような空力現象に対して低減対策を講じるには現象を正しく把握することが重要ですが、空気は目に見えず、直感的な理解が容易ではありません。このため、空気の流れを可視化する何らかの手段が必要です。ここでは、このような空気の流れを可視化

する手法としてレーザー光を用いた事例を紹介し、また、可視化画像をもとに定量的な計測法に発展させた粒子画像流速計測法（PIV）と呼ばれる計測技術についても紹介します。

レーザーを用いた流れの可視化

流れの可視化では、風洞の気流中に煙を流入させ、物体まわりにシート

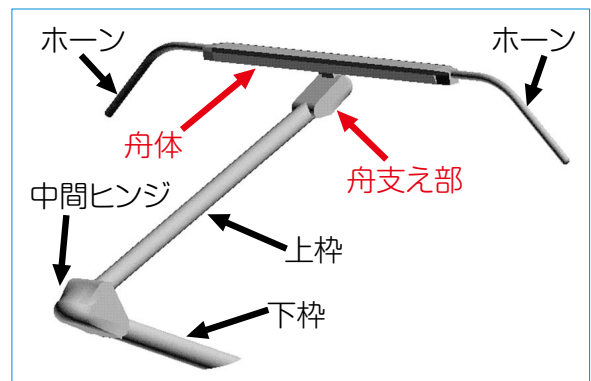


図1 新幹線用パンタグラフ

※ 空力音

空気力学的な要因によって発生する音。新幹線では、列車まわりの高速気流がパンタグラフや台車に衝突して空力音が発生します。

※ トンネル微気圧波

列車がトンネルに突入する際、トンネル内に形成される圧縮波のエネルギーの一部が、パルス状の圧力波としてトンネル出口側から放射される現象¹⁾。

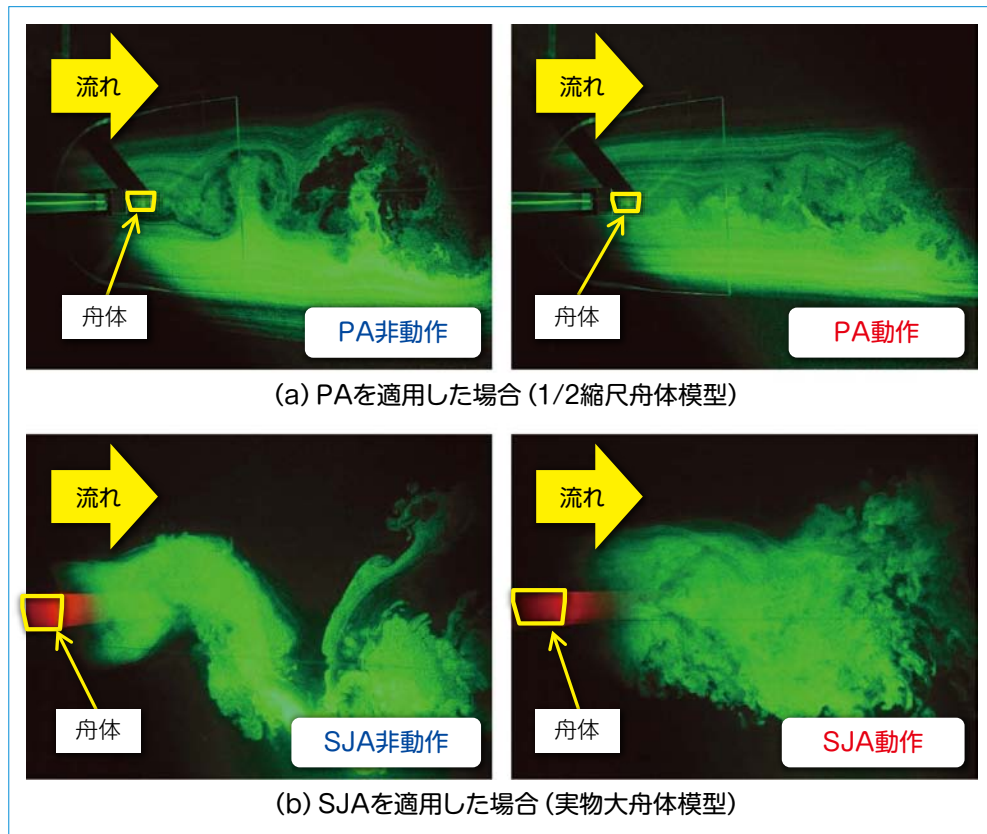


図2 舟体に流れ場制御を適用した場合の流れの可視化結果(風速5m/s)

レーザーを照射して、煙の様子をカメラで撮影します。定量的な計測と異なり、流れの可視化では、煙の様子を定性的に観察して現象理解の助けとすることが主眼となります。また、可視化における試験風速については、煙が拡散しない程度の低い風速でしか撮影を行えないという制約があります。しかし、流れ場の様子を直感的に理解できる点や、後述するPIVのような高度な光学系の調整が不要であり、容易に実施可能であるという利点があります。こういった特徴から、流れ場のおおよその性状把握や、定量計測の予備検討、試験条件の絞り込みなどにおいて、流

れの可視化は有用な流れ場観測手法となっています。ここでは、パンタグラフの空力音低減に関する研究²⁾のなかで実施した、流れの可視化事例を紹介します。

パンタグラフ舟体まわりの流れ

図1に一般的な新幹線用シングルアームパンタグラフ(☞参照)の概要図を示します。パンタグラフ各部材のなかでも、舟体および舟支え部は主要な空力音源であることがわかっています。このうち、とくに舟体については、後流領域に生じる強いカルマン渦(☞参照)によって、大きな空力音が発生します。

図2は現用舟体に対して流れ場制御を適用し、空力音の発生要因となるカルマン渦の生成を抑制した事例を示しています。図2(a)では、プラズマの作用によって周囲の流体を引き寄せるアクチュエーター(プラズマアクチュエーター、以下PA)を適用し、流れ

の剥離を制御した例を示しています。「PA非動作」の場合には、舟体後流に強いカルマン渦が発生している一方で、「PA動作」の場合には、カルマン渦の巻き込みが弱まっていることが確認できます。また、図2(b)では吹き出しと吸い込みを交互に行い、流れ場に対して乱れ(擾乱)を付与するアクチュエーター(シンセティックジェットアクチュエーター、以下SJA)を適用しており、「SJA動作」の場合には、舟体後流に細かい渦が発生する一方で、カルマン渦のような大規模な渦の巻き込みが抑制されていることがわかります。

このように、舟体周りの流れを可視化することで、流れ場制御デバイスによって流れ場がどのように変化するかを定性的に把握することができます。

「見る」から「測る」へ

流れの可視化は空気の動きを定性的にとらえて物理的な理解の助けとすることが目的です。一方、近年の撮像性

☞ シングルアームパンタグラフ

外形形状が「く」の字状のパンタグラフのことで。

☞ カルマン渦

鈍頭な部材背後において周期的に生じる渦のことで、空力音や振動の発生要因となります。

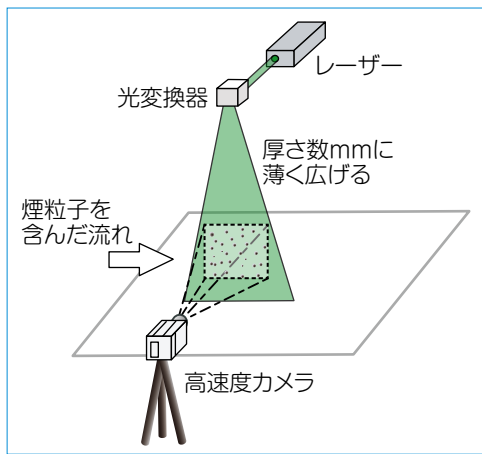


図3 PIV測定の様式図

能の向上により、レーザー光を照射した可視化画像を解析して定量的な計測を行う粒子画像流速計測法 (PIV)³⁾として利用できるようになってきました。ここではPIVの測定原理と解析事例を紹介します。

粒子画像流速計測法 (PIV) の原理

PIVはレーザー光とカメラを使って空気の流れを定量計測する技術です。通常、流速測定は流れの中にセンサーを入れ、1回の計測で特定の一点のみを計測します。また、センサー自身が流れを乱してしまうという問題を抱えています。これに対してPIVは、レーザー光を用いた非接触の光学的計測手法であるため、流れの中にセンサーを入れる必要がなく、1回の計測のみで測定領域全体の2次元的な速度分布を算出できます。さらに、速度ベクトルをもとに空間的な速度勾配や流れの中に含まれる渦の分布などの物理量も副次的に求めることが可能です。PIVの測定原理は以下ようになります(図3)。

- ①気流の中に追従性に優れた微細な煙粒子を混入する
 - ②測定したい領域にシート状にしたレーザー光を数十マイクロ秒の短時間に2回照射する
 - ③2回のレーザー光の照射タイミングに合わせてカメラで粒子画像を撮影する
 - ④得られた2枚の粒子画像を画像処理して測定領域の速度ベクトルを算出する
- 可視化画像の例が図4(a)で

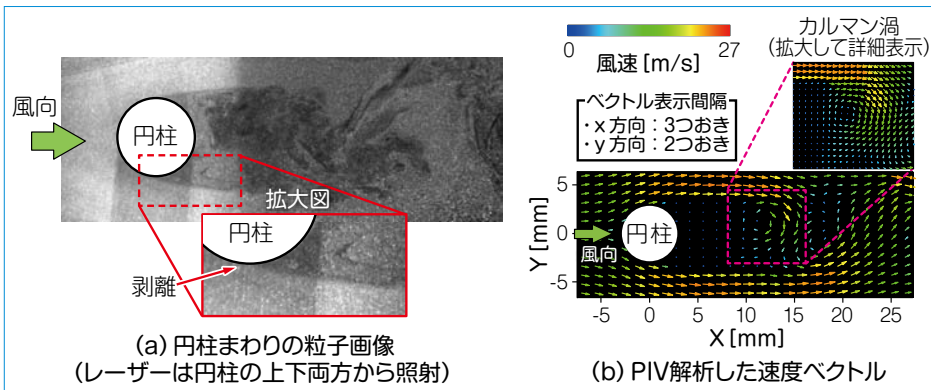


図4 PIVによる円柱まわりの測定例(風速18m/s)

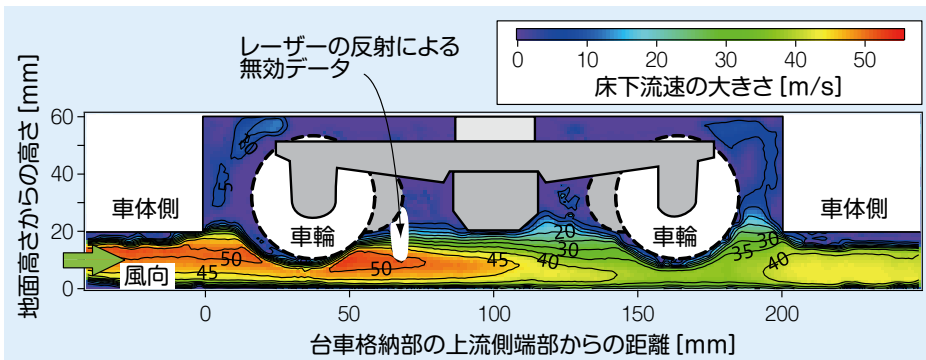


図5 台車格納部付近の流れの速度分布 (風洞試験におけるPIV測定、測定断面は台車中心、風速56m/s)

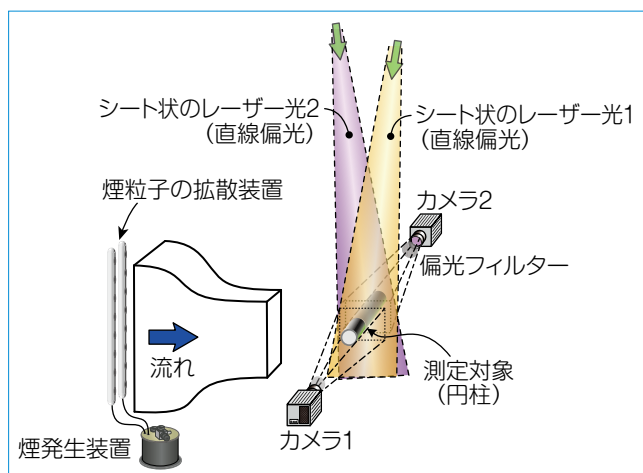


図6 偏光を利用した二断面における流速分布の同時測定の様式図

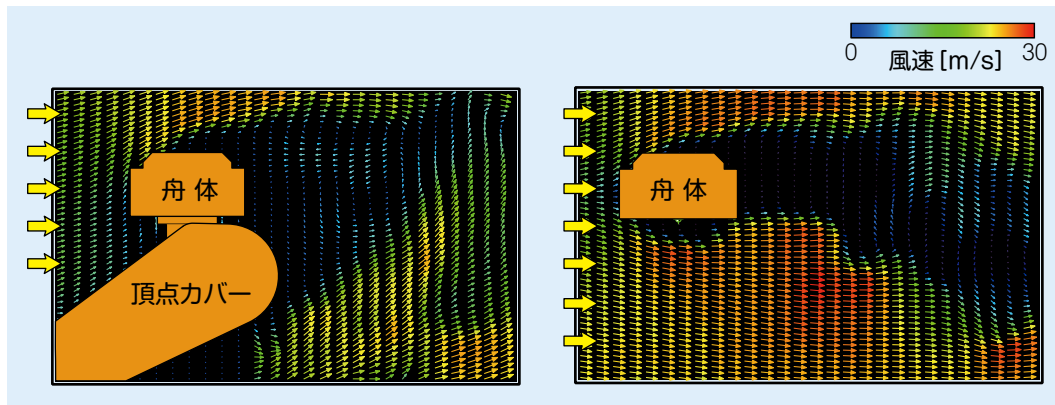


図7 1/10縮尺パンタグラフ模型の中心(左)および舟体のみ部分(右)における速度ベクトル

す。PIVでは、④の画像解析の段階で、測定領域を一定のブロックに分割して相互相関解析により、粒子像のパターンを追跡し、流速分布を算出します。このため、定性的な可視化画像(図2)と異なり、煙粒子の濃淡が明確には認識できず、図4(a)のように測定領域全体に煙粒子が一樣に充満している画像が理想的です。この可視化画像をPIV解析して速度ベクトルを描画した結果が図4(b)です。円柱の上下で流れが剥離する様子や円柱の後方に形成されるカルマン渦が明確にとらえられています。

台車格納部付近の流れ

新幹線車両の台車部付近から発生する空力音の分析を目的として、PIVにより、台車を格納する床下空間の空気の流れを計測した例が図5です。測定領域全体にわたって2次元的速度分布が測定できています。これにより、床下流速は前側の車輪近傍が速く、後側の車輪付近では大きく減速している様子が確認できます。鉄道総研では、このような流れの速度情報から渦の分布あるいはその時間微分を算出して、空力音の定量予測を行う手法も開発しています⁴⁾。

レーザー光の偏光特性を利用

光の性質の1つに「偏光」があります。

偏光とは、光がもつ電場と磁場が特定の方向のみに振動する光を指します。身近な例では、液晶モニターから出てくる光はモニター内の各画素がもつ偏光素子を透過した後の直線偏光、太陽光はいろいろな方向の偏光成分が入り交じった無偏光です。この偏光の性質を使ってPIVで2つの測定断面を同時測定することを考えます³⁾。

直線偏光のレーザー光を2つに分解し、片方の振動方向を90°回転させると、互いに振動方向の異なる2つのレーザー光が作り出せます。この光を測定したい2つの測定領域に照射し、それぞれの偏光方向に応じた偏光フィルターを通して観測すると、2つの測定断面の光を互いに排除することができ、2つの測定断面の同時測定が実現できます(図6)。

二断面の同時測定例

実際の測定例を紹介します。1/10縮尺の単純化したパンタグラフ模型の舟体部分にまくらぎ方向と直交するレーザー光を照射し、風速20m/sでPIV測定を行いました。パンタグラフの中心と少し離れた舟体のみ断面で同時測定した速度ベクトルが得られています(図7)。舟体の上面付近の流れは二断面で類似していることから、舟体の上面はまくらぎ方向に相関の高い流れが形成されていると推定できます。このような同時測定を行うと、空気

の流れの3次元の構造に関する分析もできるようになります。

おわりに

空気の流れをレーザー光で可視化した事例と可視化した空気の流れをもとに定量計測を行う計測技術、さらに偏光の性質を利用した高度な計測技術について紹介しました。見えない空気の流れに光を当てて可視化する技術は空気力学的な諸現象の直感的な理解には必要不可欠な技術です。今後も、光の干渉を利用した流速計測や音波の直接観測など、光のもつ多様な性質を駆使して、鉄道に関わる空気力学的な諸現象の解明に役立てていきます。[RRR]

文献

- 1) 福田傑, 斉藤実俊: 列車のトンネル突入時の空気力学的現象を再現する, RRR, Vol.68, No.9, pp.18-21, 2011
- 2) 光用剛, 佐藤祐一, 臼田隆之, 山崎展博, 宇田東樹, 若林雄介: 舟体・舟支え部の形状改良によるパンタグラフの空力音低減, 鉄道総研報告, Vol.31, No.4, pp.5-10, 2017
- 3) 光用剛: PIVを用いた流速測定システム, RRR, Vol.72, No.10, p.40, 2015
- 4) 宇田東樹, 山崎展博, 高石武久: 風洞試験における流れ場の非定常測定と音源構造の推定, 鉄道総研報告, Vol.24, No.9, pp.17-22, 2010