

- 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

車両まわりの 空気の流れをみる

車両が空気中を走行することによりさまざまな空力現象が発生します。たとえば、車両には抗力や横力などの空気が働きます。また、車両のトンネル突入時には圧力変動が発生します。鉄道の安全性、経済性や快適性の向上のため、この空気が圧力変動のさらなる低減が望まれます。空気は目に見えないため、実験的または計算的な手法を用いて流れを可視化することにより、現象解明や低減対策効果の比較が可能となります。ここでは、風洞試験、実車試験、模型試験、数値シミュレーションにより車両まわりの流れを可視化した例について紹介します。



佐久間 豊
Yutaka Sakuma
環境工学研究部
車両空力特性研究室
主任研究員(上級)
[専門分野] 空気力学,
流体関連振動



野口 雄平
Yuhei Noguchi
環境工学研究部
車両空力特性研究室
研究員
[専門分野] 横風下の車
両の空力特性



中出 孝次
Koji Nakade
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員
[専門分野] 流体工学,
計算流体力学

はじめに

車両まわりの流れの可視化には、タフト(糸)や煙などを用いてそれらの動きを観察する実験的な手法や、コンピューターによる計算的な手法があります。ここでは流れの可視化例として、車両先頭部まわりの流れの剥離抑制対策の風洞試験、実車試験、模型試験を、また、車両の横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーションを紹介します。

先頭部まわりの流れの可視化に関する風洞試験および実車試験

先頭部端部に丸みのほとんどない角張った切妻型車両の場合、丸みの大きい車両と比較して、車両の空気抵抗、列車風、トンネル突入時の圧力変動などが増大する傾向にあります。これは

先頭部端部からの大規模な流れの剥離が原因です。そこで、この流れの剥離を効果的に抑制する空力的付加物(フィン)を開発しました。その際に行った風洞試験および実車試験における流れの可視化について説明します¹⁾(なお可視化結果は実車試験のみ示します)。

最初に風洞試験を行い、流れの剥離を効果的に抑制するフィン形状を検討しました。図1(a),(b)に車両模型を示します。模型の縮尺は1/5、可視化のため車体側面と上面にタフト(綿糸を使用)を約100mm間隔で計385点設置し、タフトの動きをカメラで記録しました。そしてタフトが風洞の主流方向を向いている場合を剥離なしの領域、タフトの動きが乱れるかまたは流れと逆方向を向いている領域を剥離領域と、それぞれ見なしました。この

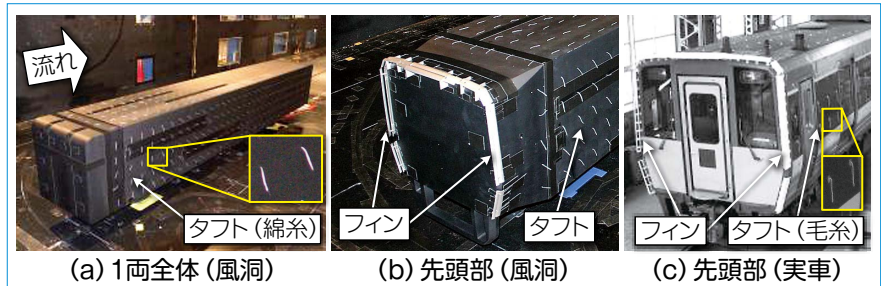


図1 模型および実物車両へのタフトおよびフィン設置状況

ようにして風洞試験でフィン形状を色々変えて剥離抑制効果を調べました。そして、風洞試験にて剥離抑制効果が大きかったフィン形状の実車での効果を確認するため、フィンを実物大で製作し、先頭部上面および側面(図1(c)), または、上面のみに仮設して、営業線で走行試験を行いました。

実車試験では、タフト(毛糸を使用)を車両先頭部まわりの屋根面および側面に先頭部から約6mの範囲に50cm間隔で貼り付け、車外からカメラで撮影しました。図2に実車試験による車両先頭部まわりの可視化結果を示します。流れの剥離の有無は、風洞試験と同様に、車体に貼り付けたタフトの動きから判断しました。フィンがない場合(図2(a))は、先頭部端部から流れが大きく剥離していることが、一方、フィンを設置した場合(同(b)(c))は、広い範囲で剥離が抑制されていることがそれぞれ確認されます。図2(c)のフィン断面図に示すように、車両前面に当たった流れを、フィンにより車両上面または側面へスムーズに導くことにより、剥離が抑制されると考えられます。

以上のように風洞試験および実車試験において、タフトを用いて車両先頭部まわりの流れをみることにより、フィンの剥離抑制効果を比較検証することができました。なお、このフィン設置により、車両の空気抵抗やトンネル突入時の圧力変動が低減することが実車試験にて確認されました(実車試験はJR西日本のご協力により実施されました)。

先頭部まわりの流れの可視化に関する模型試験

次に、模型試験による車両のトンネル突入時の、煙を用いた流れの可視化について紹介します。

前述のように、切妻型車両の場合、

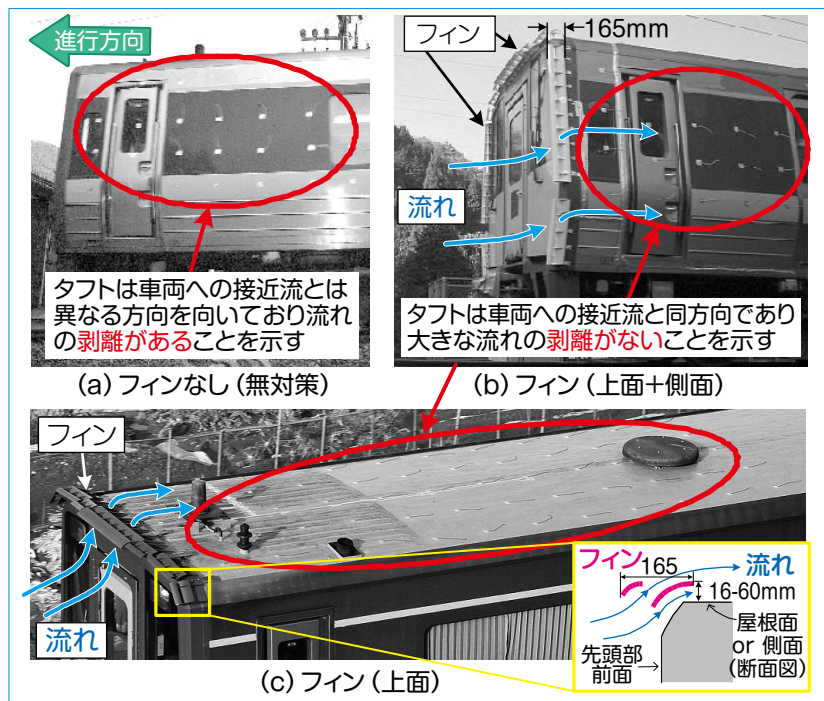


図2 実車試験による車両先頭部まわりの可視化

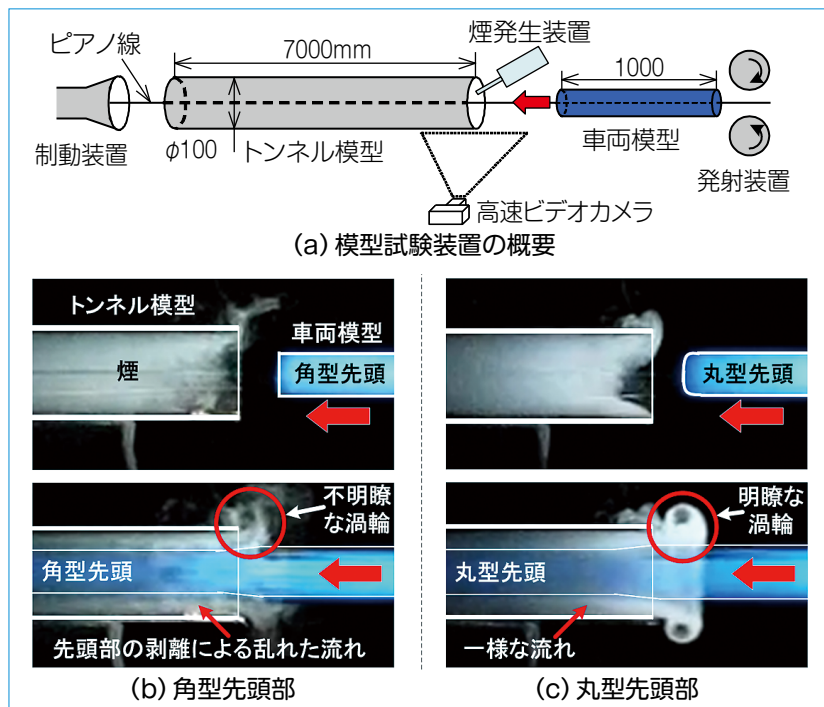


図3 車両模型のトンネル突入時における流れの可視化

丸みの大きい車両よりもトンネル突入時の圧力変動が大きくなる傾向にあり、これも先頭部の大きな剥離に起因すると推定されます。しかし、この流れのメカニズムの詳細については不明のままです。そこで現象解明のため、車両のトンネル突入時における流れの可視化に関する模型試験を行いました²⁾。

図3(a)に模型試験装置の概要を示

します。可視化のため、トンネルは円形の透明アクリルパイプとし、その内部に煙を充満させた後、円柱(軸対称)形状の車両模型を速度120km/hで突入させました。実車の現象を定性的に確認するため、図3(b)(c)に示すように、先頭部形状は、剥離が発生する角型(切妻型)先頭と、大きな剥離が発生しないように角を丸く面取りした丸型(流

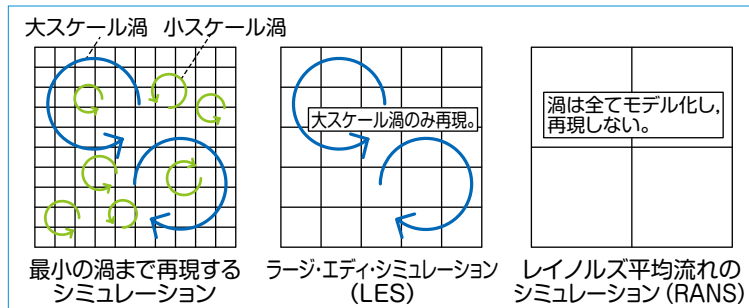


図4 乱流モデルのイメージ

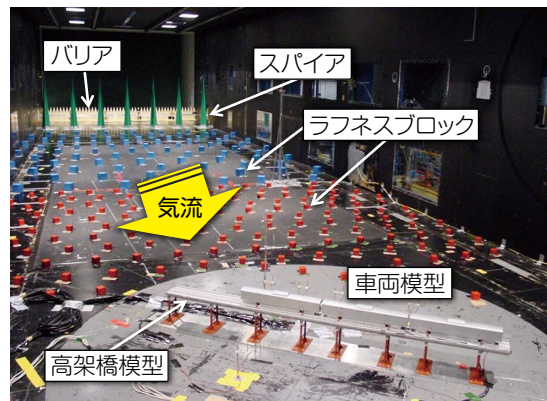


図5 横風下の車両に関する風洞試験

線型) 先頭の2種類で実験を行いました。

図3 (b) (c) に先頭部のトンネル突入前後の可視化結果を示します。車両がトンネルに突入後、先頭形状に関わらずトンネル入口と車両側面の間からトンネル外側に空気が噴出します。丸型先頭ではトンネル内の空気が車両表面に沿ってほぼ一様に流れて車両まわりに明瞭な渦輪ができています。一方、角型先頭では車両表面に沿った流れは先頭部端部からの剥離により乱れた状態になっており、その影響で不明瞭な渦輪になっていると考えられます。

このように模型試験において、煙を用いてトンネル突入時の車両まわりの流れをみることににより、先頭部が角型と丸型で流れのメカニズムが大きく異なることが明らかになりました。

横風風洞試験を再現する数値シミュレーション

これまで述べてきた実験的な手法によって空気の流れをみることに加えて、近年は飛躍的な計算機性能の向上により、数値流体シミュレーションにより車両まわりの空気の流れをみるが多くなっています。一昔前では、数値流体シミュレーションの対象は角柱など形状が単純な物体に限られていましたが、近年では計算機性能の向上とともに複雑形状を取り扱う手法の発達³⁾により、より実車に近い形状を持つ対象にも数値流体シミュレーションを適用可能となっています。

これまで述べた風洞試験、実車試験ともに、車両まわりの流れ場は乱流で

あり、数値流体シミュレーションでも乱流の効果を反映させなければなりません。ここで、乱流とは、大小さまざまな三次元的な渦が存在し、時間的、空間的に不規則性を持つ流れをいいます。たとえば、強風下の車両まわりの流れをシミュレートするにあたり、車両まわりに存在する最も小さい渦のスケールはマイクロメートル (= 10^{-6} m) スケールと見積もられ、最小の渦まで計算機上で再現するのは、計算負荷が膨大となり、スーパーコンピュータをもってしても、今なお難しい状況にあります。したがって、数値流体シミュレーションでは、渦を計算機上で直接再現せず、乱流の効果を反映させる乱流モデルを用いることが一般的です。乱流モデルを用いたシミュレーション手法としては、主に「ラージ・エディ・シミュレーション (LES)」と「レイノルズ平均流れのシミュレーション (RANS)」の2種類があります (図4) (参照)。LESは、スケールの大きな渦のみを直接の計算対象とし、小さなスケールの渦をモデル化する手法です。大きな渦といっても、先ほど述べた最小の渦スケール (マイクロメートルスケール) と比べて大きいということなので、実際にLESによりシミュレーションを行う際には、空間を十分に細かく分割する必要があります。一方でRANSは、乱流における全ての渦をモデル化の対象とし、乱れない平均流れのみを直接の計算対象とします。そのため、LESと比較して空間を細かく分割す

る必要がありません。そのためRANSはLESと比べて計算負荷が小さいという利点を持つ一方で、乱流における全ての渦をモデル化の対象とするため、LESと比べてシミュレーションの精度が劣る場合があります、その適用には注意を要します。

以下では、これまで鉄道総研が実施した風洞試験を再現するシミュレーションの例を示していきます⁴⁾。横風下における列車走行安全性を評価するにあたり車両に加わる空気力を精度よく評価することが大変重要で、これまで鉄道総研では1/40の縮尺模型を用いた風洞試験により空気力を評価してきました。図5に風洞試験の様子を示します。高架橋上の車両模型の上流側に、バリア、スパイア、ラフネスブロックと呼ばれる障害物を設置し、わざと気流を乱し、乱流境界層と呼ばれる自然風と似た性質を持つ気流を作っていま

LESとRANS (図4)

数値流体シミュレーションでは、計算領域内の空間を分割し、分割した小さな領域ごとに空気の流れを支配する方程式を解き、空間上の流れの情報を得ます。LESでは空間の分割幅に応じて、再現可能な大きな渦のみを直接の計算対象とし、空間の分割幅より小さく再現不可能な渦については、その影響をモデル化し、シミュレーションに反映します。それに対し、RANSでは空間の分割幅によらず全ての渦をモデル化し、その影響を加味した平均流れを直接の計算対象とします。

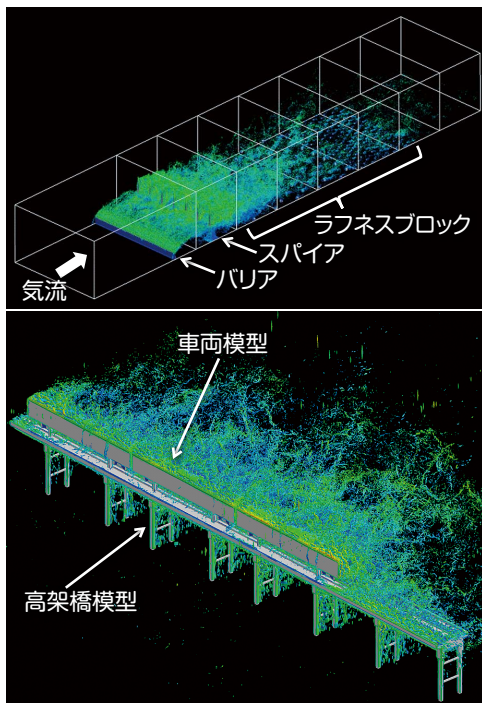


図6 LESで得られた流れの様子

す。図6に、図5の風洞試験を再現した、LESを用いた数値シミュレーションによる、渦構造を可視化した結果を示します。LESでは、風洞試験と同様に計算領域内にバリア、スパイア、ラフネスブロックを設置し、乱流境界層を生成しました。バリア、スパイアにより大きなスケールを持つ乱れが生じていることが可視化結果からわかります。真横から風を受けた車両模型では、流れが車両の屋根で剥離し、車両風下側の流れの剥離領域では、微細な渦構造が現れています。なお、このシミュレーションでは、車両模型まわりの空間をおよそ10億に分割してシミュレーションを実施しました。このようにLESでは、時間的、空間的に変化する細かな渦構造まで再現できるため、流れを詳細に観察し、現象を深く調べる際に非常に有効です。それに対し、細かな渦構造までは立ち入らず、車両まわりの平均流れの様子を知りたいときには、計算負荷の小さいRANSが有効です。図7に図6と同じ高架橋上の車両模型まわりの流れをRANSによりシミュレーションした結果を示します。コンター図の色は流速を表し、赤が高速、青が低速であること

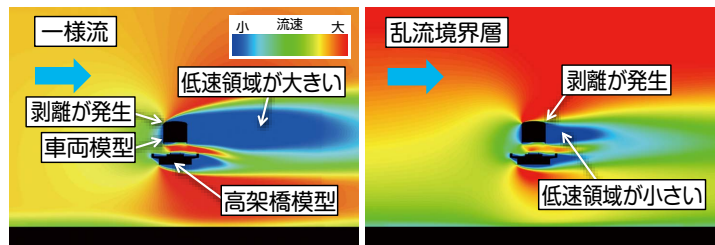


図7 高架橋上の車両まわりの流速分布 (RANS)

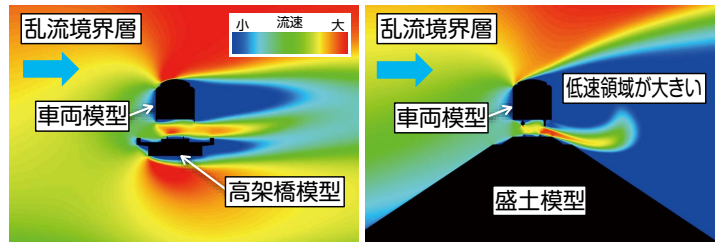


図8 各構造物における車両まわりの流速分布 (RANS)

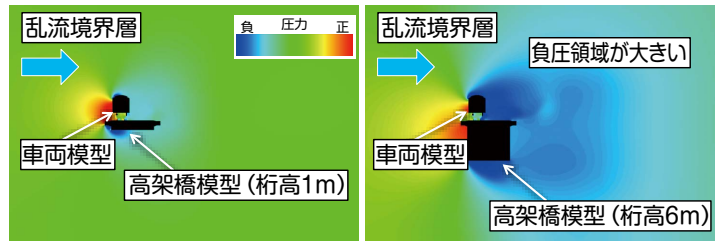


図9 桁高の異なる高架橋上の車両まわりの圧力分布 (RANS)

を意味します。 airflowを乱れのない一様流と、乱れの大きい乱流境界層とした2種類の条件のもとでシミュレーションを実施しました。両条件ともに車両の屋根部で流れが剥離しますが、一様流では乱流境界層と比べて剥離がより風上側で生じていることがわかります。また、それにともない車両風下側に生じる低速領域が乱流境界層と比べて一様流では大きく広がっています。図8に高架橋上および盛土上に置かれた車両模型まわりの流速分布を示します。車両形状は両条件ともにほぼ同一ですが、車両まわりの流れは、地上構造物の影響も大きく受けるため、車両風下側に広がる低速領域の大きさが両条件で大きく異なることが一目瞭然です。図9に桁高1mおよび6m (模型寸法では25mmおよび150mm) の高架橋上に置かれた車両模型まわりの圧力分布を示します。赤が正圧、青が負圧の領域であることを意味します。車両模型は同一ですが、高架橋の桁高により車両風下側の圧力分布が大きく異なり、桁高

6mの場合には負圧領域が風下側に大きく広がることが確認できます。

おわりに

ここでは実験的または計算的な手法による車両まわりの流れの可視化例について、いくつか紹介しました。今後も、実験的または計算的な手法を適切に用いて車両まわりの流れをみることで、車両空力特性に関する現象解明や低減対策に取り組んでいく予定です。RRR

文献

- 1) 佐久間豊：車両先頭部における流れのはく離を抑制する, RRR, Vol.68, No.8, pp.18-21, 2011
- 2) 三日月敬郎, 佐久間豊：切妻型車両のトンネル突入時に発生する噴流の可視化, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.844, 2016
- 3) 中出孝次, 光岡剛：複雑形状に対応した空気流・空力音シミュレーション, RRR, Vol.72, No.12, pp.22-25, 2015
- 4) 野口雄平, 中出孝次：横風空力特性に関する風洞試験を模擬した数値シミュレーション, 鉄道総研報告, Vol.31, No.9, pp.11-16, 2017