

第54回

トンネル内走行時の 高速列車の変動空気力

はじめに

1964年、東海道新幹線は営業最高速度210km/hで開業しました。1980年代半ば、新幹線の営業最高速度が210km/hから220km/hに向上したとき、トンネル内走行時の高速列車の車両動揺が顕在化しました。つまり、トンネル以外の区間（以下、明かり区間）では見られない車両動揺が、トンネル区間において観測されるようになりました。このトンネル内車両動揺は、新幹線の高速化において乗り心地の面から重要な課題となります。トンネル内車両動揺を低減し快適な乗り心地を確保するため、現在までに、現象解明および低減対策に関する研究開発が実施されてきました。ここでは、主として空気力学的な側面について、この問題に対するこれまでの研究開発の経過と得られた知見を紹介します。

なお、現在、車体振動制御技術によ

る対策（車体間の連結部に設置される車体間ヨーダンパー（図1）¹⁾、車体を支える台車部に設置されるセミアクティブサスペンションおよびフルアクティブサスペンション（図2）²⁾など）が実用化されており、現在の営業列車速度においては、トンネル内車両動揺による乗り心地の問題が生じることはありません。しかし、新幹線のさらなる高速化が検討されており、トンネル内車両動揺による乗り心地悪化の可能性を排除するため、さらなる低減対策の検討を進めていく必要があると考えられます。

トンネル内車両動揺の特徴

1986年11月に東海道・山陽新幹線が210km/hから220km/hに速度向上したことにともない、車両の左右動揺が増加し、乗り心地改善の要請が生じました（図3）³⁾。この車両動揺の現象解明のため、新幹線（0系、100系、

100N系）の左右動揺加速度の測定が行われ、以下のことが判明しました^{3),4)}。

- ・明かり区間よりトンネル区間の方が車両動揺が大きい。
- ・後尾車両は、ほかの編成位置の車両より大きく揺れる場合が多い。
- ・車両動揺は、左右並進成分に対してヨーイング成分が顕著であり、その振動周波数は1.2～1.6Hzが卓越している（これは列車速度に依存し、後の現車試験における列車速度300km/hでは2Hz程度の振動周波数が卓越）。

なお、トンネル内車両動揺の問題は、欧州においては報告されていません。日本と比較して、車両に対するトンネル断面積が大きいためと考えられます。

トンネル内車両動揺の要因

トンネル内車両動揺の要因として、「軌道不整による外力」と「車体側面に



図1 新幹線電車に装備された車体間ヨーダンパー¹⁾

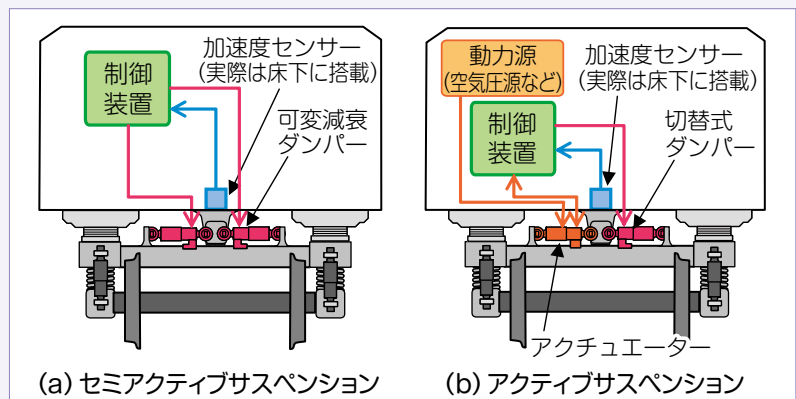


図2 左右の振動制御システムの構成例²⁾

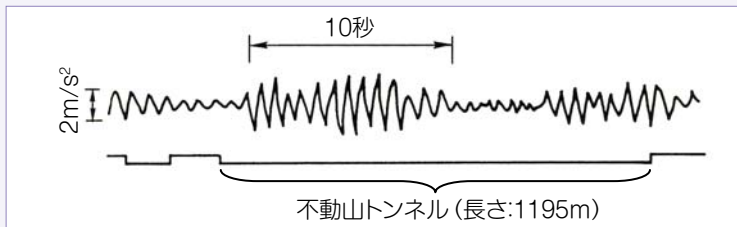


図3 車両の左右動揺の測定波形例
(16両編成の最後部運転台で測定)³⁾

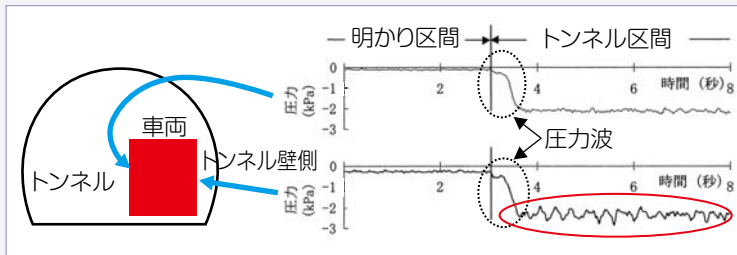


図4 車体側面の圧力変動の測定波形例(列車速度:300km/h)⁶⁾

加わる空気力」が検討されました。軌道不整と車両動揺の相関を調べたところ、明かり区間では相関が大きく、トンネル区間では相関が小さいことが明らかになりました。つまり、トンネル内車両動揺の主たる原因は「軌道不整」ではないことが示されました⁵⁾。一方、「空気力」と車両動揺の相関を調べたところ、トンネル区間で相関が高いことがわかりました。つまり、トンネル内車両動揺は、車体側面に加わる空気力と関連性が高いことが示されました。

車体に加わる変動空気力の性質

車体に加わる変動空気力を調べるために、さまざまな新幹線車両を用いた現車試験が10年以上にわたり実施されました。ここでは、現車試験で明らかにされた変動空気力の主な性質⁶⁾を紹介します。

変動空気力を調べる現車試験では、車体側面に圧力センサーを設置し、車体側面の圧力変動を測定します。トンネル突入前後の測定波形例を図4に示します。トンネルに列車が突入すると圧力波が形成され、トンネル内を伝播

し、車体側面の圧力が変化しますが、圧力波は主として1次元の(車体の左右両側面の圧力変動が同じ)であり、車体の左右方向に対して力を及ぼしません。波形例を観察すると、そのような圧力波による圧力の変化以外に、トンネル壁側で周期的な圧力変動が生じていることがわかります。つまり、車体に生じる変動空気力はこのトンネル壁側の圧力変動に起因することがわかりました。

車体側面に複数個(通常、1車両の片側側面に4個ずつ)圧力センサーを取り付け、車体の左右両側面の圧力値の差に代表面積および車体中心からの距離を乗じたものを足し合わせることで、車体に作用する空気力のヨーイング成分を求めることができます。車体に生じる変動空気力のヨーイング成分の実効値を整理したところ、明かり区間に比べ、トンネル区間で大きな空気力が生じ、その大きさは列車速度(正確には、列車に対する相対流速)が増すにつれて大きくなり、変動空気力の大きさは相対流速の二乗に比例することが

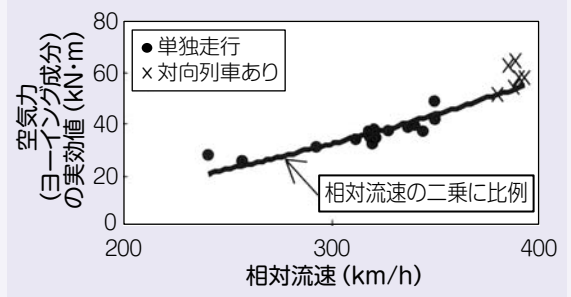


図5 相対流速と空気力の関係⁶⁾

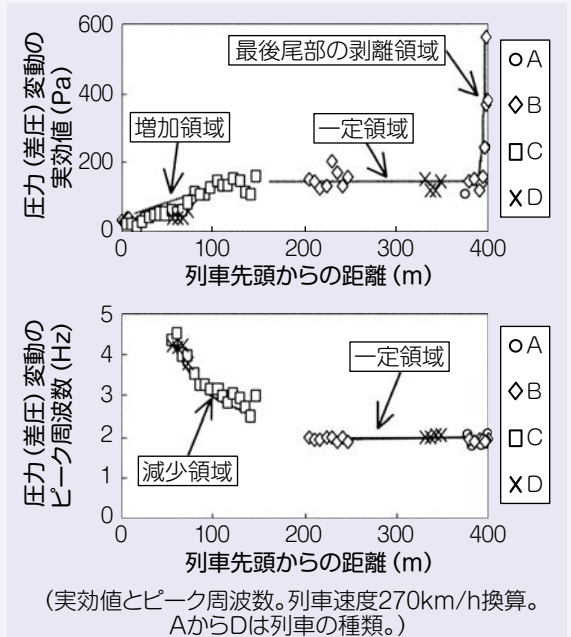


図6 編成全体にわたる圧力変動の様子⁶⁾
(差圧:車体両側面の圧力差)

示されました(図5)。

次に、編成車両全体の圧力変動の性質を示します。ひとつの列車で同時に編成車両全体(16両)にわたって圧力測定したものはなかったため、数種の列車で測定したデータを元に、編成全体の圧力変動の発達の様子が調べられました(図6)。その結果、列車の種類によらず、圧力変動の実効値およびピーク周波数は、先頭からの距離によりある一定の傾向が見られることが示されました。つまり、圧力変動の実効値は、先頭から6~8両目ぐらいにかけて増大し、その後、一定の大きさになり、最後尾のところ急増することが示されました。また、ピーク周波数も、3両目から6~8両目ぐらいにかけて低下し、その後、一定になること

が示されました。

以上の現車試験の測定結果より、トンネル壁側と列車側面の間の空間に、渦などの大規模な流れの構造が存在し、その流れの構造が先頭から6~8両目ぐらいにかけて成長し、その後安定に移動していることが推測されました。また、最後尾においては大きな圧力変動をともなうはく離が発生していることが予想されました。

変動空気力の発生要因

現車試験により、車体に加わる変動空気力の性質が明らかにされましたが、トンネル内走行時のみに生じる空気力はどのように発生しているのかという疑問は依然として残されたままでした。この回答を得るために、さまざまな検討が実施されました。その主な検討例を紹介します。

- (1) 車体の左右振動が車体側面圧力変動の原因となる可能性、つまり自励振動の可能性について検討されました。現車試験のデータ解析、回流水槽を用いた水槽実験、編成車両の運動解析、移動境界の流体シミュレーションにより検討されました^{7)・8)}。
- (2) 走行模型装置が開発され、列車走行によるトンネル壁と列車との相対運動が忠実に再現された実験が実施されました⁹⁾。車両模型がトンネル突入時に形成される圧力波が再現さ

れるとともに、車体側面の圧力変動が測定されました。

- (3) 風洞実験による検討が実施されました(図7)。風洞実験では、風洞測定部にトンネル模型と車両模型が設置され、車体側面の圧力測定が行われました。ここで測定された圧力変動は、現車試験で得られた圧力変動の性質を良く再現することが示されました。この風洞実験は変動空気力の現象を実験的に初めて再現できた画期的なものとなりました。風洞実験はさらに進められ、列車走行を模擬する三面ムービングベルト(移動地面板だけでなく左右の側壁の移動も模擬)を用いた風洞実験、長大編成車両(10両編成)の風洞実験(車両模型として市販の鉄道車両模型(大きさはHOゲージ)を利用)、トンネルを車両近傍側壁に簡略モデル化した風洞実験などが実施されました。いずれも、現車試験の圧力変動の特徴を良好に再現するとともに、その特徴をもとに現象解明が進められました。そして、トンネル内で左右振動加振された車両模型を用いた風洞実験が行われ、車両の振動によって生じる空気力は大きくないことが示されました¹⁰⁾。
- (4) 風洞実験では把握することが困難な車両周りの流れ場は、流体シミュレーションによって検討されました(図8)^{11)・12)}。流体シミュレーシ

ョンにより、車両床下付近で発生した渦がトンネル壁と干渉し、先頭から後尾車両に向かうにしたがい車両側面全体に拡がっていく様子が示されました。この渦の移流にともない車両に変動空気力が発生するという変動空気力発生要因の仮説が提案されました。

流体シミュレーションによる検討は、最近のスーパーコンピュータを用いた大規模数値流体解析によって深度化が進められ、上記の仮説が導かれたときの流体シミュレーションと比較して、より詳細な流れ場が観察できるようになりました(図9)¹³⁾。図9では、車両床下の左右方向流速と車両側面の上下方向流速の等値線(コンター)を示しています。これにより、明かり区間走行時には車両床下で左右方向に蛇行流れが生じること、トンネル内走行時には車両床下の蛇行流れが車両側面(トンネル壁に近い側)にまで拡がること、そして、この蛇行流れによって圧力変動が生じることが明らかになりました。さらに、蛇行流れの左右方向の振幅に相当する「車体幅+車体高さ」を代表長さとする、車体側面圧力変動の周波数特性(300km/h走行で2Hz程度の圧力変動発生)が説明できることが示されました。なお、流体シミュレーションによって示唆された車両床下の蛇行流れの存在は、移動地面板を用いた風洞実験によって検証されました¹⁴⁾。



図7 風洞実験(トンネル内の車両)

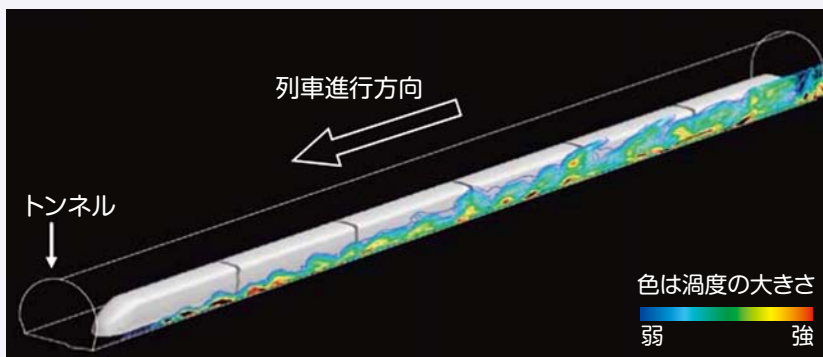


図8 流体シミュレーション
(列車側面に発達する空気の乱れ)¹²⁾

変動空気力の低減法の提案

風洞実験により、変動空気力を低減する車両形状の検討が行われました¹⁵⁾。風洞実験において変動空気力低減効果が得られた、車両側面下部に取り付けられたフィンについて、実際に現車に設置しその効果が調べられました。現車試験結果より、フィンを取り付けることによって、変動空気力が小さくなることが示されました¹⁵⁾。

フィンのような車両から突起物を出す方法以外も検討されました。基礎的な検討ではありますが、車両側面下部からトンネル壁に向かって水平方向に空気を噴出することで、車両まわりの流れを制御する方法が検討され、風洞実験で変動空気力が低減することが確認されました¹⁶⁾。

今後の課題

現在の新幹線の営業列車速度では、トンネル内車両動揺に対する乗り心地改善は車体振動制御技術により行われていますが、将来のさらなる高速化においては、変動空気力の低減も期待されます。車両周りの流れ場の詳細な情報は低減法開発のヒントを与えてくれます。そこで、流れ場を把握しつつ低減

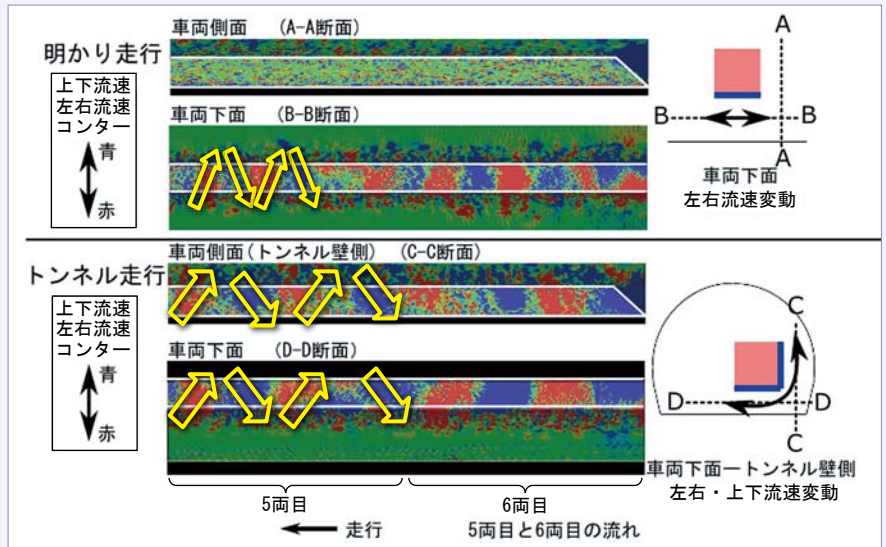


図9 最近実施された大規模流体シミュレーション(蛇行流れ現象を示唆)¹³⁾

法検討が進められる手法となる流れの数値シミュレーションが有力なツールになると考えられます。また、実用的な変動空気力低減法の開発を進めるためには、低減法についての定量的な把握が必要となるため、営業列車の形状を忠実に再現した検討が求められます。今後、台車部の複雑形状などを再現できる長大編成車両の流れの数値シミュレーションの開発が重要な課題になります。

おわりに

高速列車がトンネル内を走行するときに生じる変動空気力の研究を紹介し

ました。本研究の最新結果より、今まで知られていなかった、編成車両周りに生じる大規模な流れの構造が示唆されました。これは、トンネル内走行時には空力動揺の問題に直結します。また明かり区間走行時には車両床下に蛇行流れが生じることが示唆されました。この大規模流れは鉄道車両の床下流れの問題(たとえば、通過時圧力変動などの環境問題、台車への着雪の問題、床下流れによる空気抵抗など)に関係する可能性が考えられます。蛇行流れ現象のさらなる知見の深度化を進めつつ、有効な対策法が提案されることが期待されます。

(中出孝次/環境工学研究部
車両空力特性研究室)

文献

- 1) 藤本裕：鉄道技術アラカルト-71- 車体間ヨーダンパー, RRR, Vol.67, No. 4, pp.42-43, 2010
- 2) 菅原能生, 中川千鶴：新幹線車両の振動を制御する, RRR, Vol.68, No.3, pp.6-9, 2011
- 3) 佐々木浩一, 下村隆行：乗り心地改善のための新幹線台車の改良, 鉄道総研報告, Vol.3, No.12, pp.10-17, 1989
- 4) 藤本裕, 宮本昌幸, 島本洋一：新幹線電車の左右振動とその振動対策, 鉄道総研報告, Vol.9, No.1, pp.19-24, 1995
- 5) 高井秀之：新幹線の長波長軌道狂い管理, 鉄道総研報告, Vol.3, No.4, pp.13-20, 1989
- 6) 鈴木昌弘：トンネル内走行時の車両に加わる空気力, 鉄道総研報告, Vol.14, No.9, pp.37-42, 2000
- 7) Ueki,K., Nakade,K. and Fujimoto,H. :Lateral Vibration of Middle Cars of Shinkansen Train in Tunnel Section, Proc. 16th IAVSD Symposium, 1999
- 8) 佐久間豊, 鈴木昌弘：トンネル内走行時の中間車両に働く空気力と左右運動の解析, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.41-46, 2006
- 9) 芳賀昭弘, 舟木豊明, 下村隆行：走行模型試験装置を用いた壁面に作用する圧力変動, 第8回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2001
- 10) Nakade,K., Suzuki,M. and Fujimoto,H. :Interaction between Vehicle Vibration and Aerodynamic Force on High-Speed Train Running in Tunnel, Proc. 18th IAVSD Symposium, 2003
- 11) Suzuki,M. :Computational study on flow-induced vibration of high-speed train in tunnel, Proc. 7th International Conference on Flow-Induced Vibration, 2000
- 12) 鈴木昌弘, 中出孝次, 井門敦志：トンネル走行中の車両に加わる変動空気力を減らす, RRR, Vol.67, No.5, pp.10-13, 2010
- 13) 中出孝次, 佐久間豊：トンネル内を走行する鉄道車両周りの流れのLES, 日本流体力学会年次大会講演論文集, 2014
- 14) 中出孝次, 井門敦志：鉄道車両床下の非正常流れに関する風洞実験, 日本機械学会年次大会講演論文集, 2015
- 15) 鈴木昌弘, 中出孝次, 井門敦志：トンネル内車両動揺の車両形状変更による低減方法, 鉄道総研報告, Vol.22, No.5, pp.45-50, 2008
- 16) 酒井健太郎, 中出孝次, 鈴木昌弘：噴流によるトンネル内走行中の鉄道車両に加わる変動空気力制御方法の基礎的検討, 第16回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, 2009