

トンネル走行中の車両に加わる 変動空気力を減らす

鈴木 昌弘
環境工学研究部
(空気力学 研究室長)

中出 孝次
同
(同 主任研究員)

井門 敦志
同
(同 主任研究員)



すずき まさひろ



なかで こうじ



いど あつし

車両を揺らす変動空気力

新幹線の速度が増すに従い、トンネル内を走行中の列車において、空気力による車両の動揺(特にヨーイング成分(図1))が問題になることがあります。これまで多くの列車において空気力の測定が行われ、次のような現象の特徴がわかっています。

- 新幹線のトンネルは複線トンネルで、列車は上りか下りのどちらか、片側を走行します。このとき、トンネルの壁に面した側の車両の側面で大きな圧力変動が発生します。この大きな圧力変動が車両を揺らす変動空気力の原因となります。

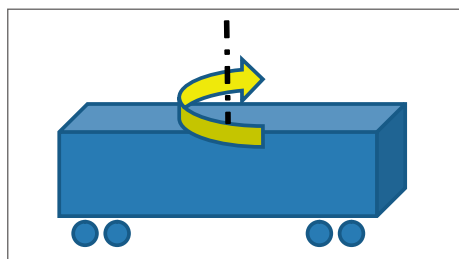


図1 車両動揺のヨーイング成分

- この圧力変動は、列車に対する気流速度(トンネル内では列車速度よりも大きくなり、トンネル内を対向列車が走行中はさらに大きくなります。)のほぼ二乗に比例して大きくなります。

- 編成全体をみた場合、列車側面での圧力変動の大きさは、先頭から6~8両目程度まで大きくなり、その後、後尾車両まで一定になります。そして、最後に最後尾部で急激に大きくなります。

それでは、このような圧力変動はどのようにして生まれるのでしょうか? コンピュータを使ったシミュレーションを行うことで、その原因を調べました。その結果、車両底面付近から気流の乱れが発生し、その乱れが車両側面に巻きあがっていく様子がわかりました(図2)。巻きあがった乱れは後尾車両に向かって移動しながら広がっていきます。また、列車最後尾部では、それまで列車表面に沿って流れていた気流が表面から離れ、それに伴って圧力が大きく変動していることもわかりました。

現在、この変動空気力による車両の動揺を抑える手立てとして、アクティブサスペンションや車体間ヨーダンバが

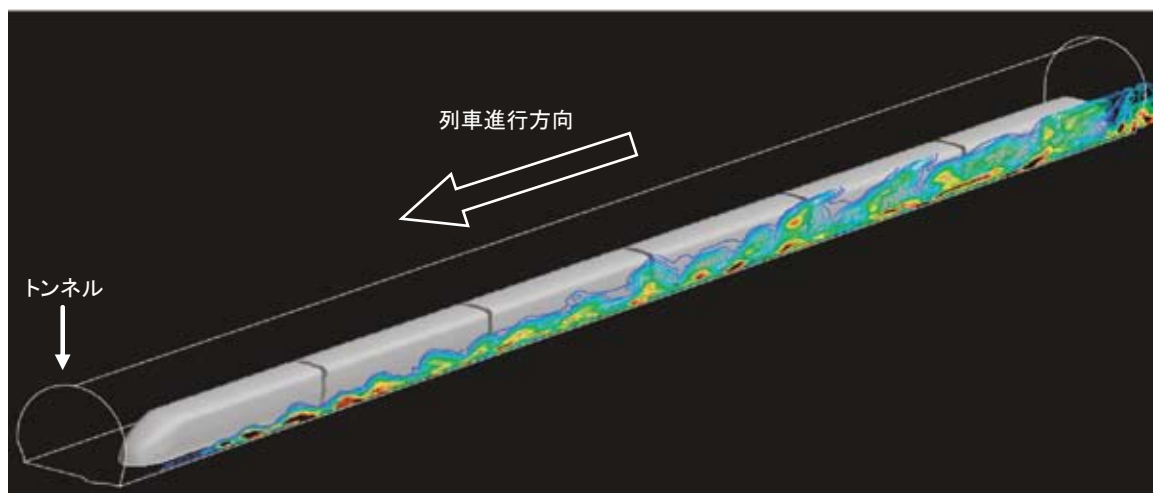


図2 数値シミュレーションで示された列車側面に発達する気流の乱れ

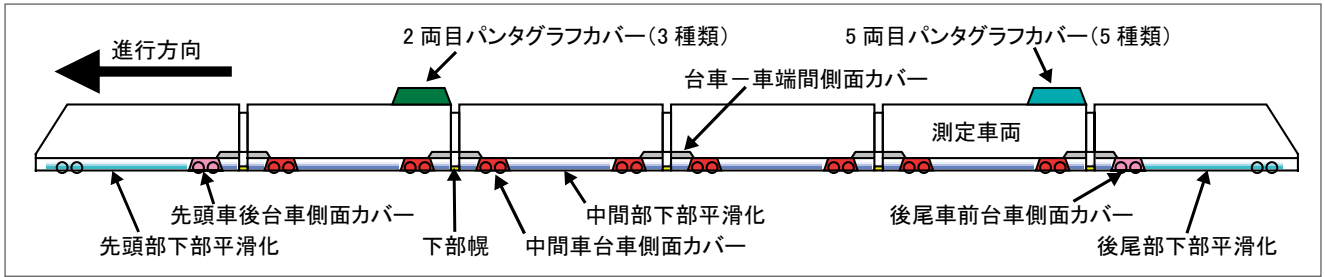


図3 試験列車で形状変更を行っていた箇所

新幹線に取り付けられ効果を上げています。これらは、空気力によって車両が揺れようとするとき、アクチュエータで揺れと逆方向に力を加えたり、ダンパーで揺れを抑えたりしています。すなわち、原因である空気力を取り除いているわけではありません。今後、さらに列車速度を上げようとする時には、空気力そのものを低減する方法も併せて考える必要があります。

変動空気力を減らす車両のかたちを求めて

車両の形を工夫することで変動空気力を減らすことができます。しかし、変動空気力の小さい形を求めるのは簡単ではありません。一発で最適な形が得られるような便利な方法はありません。何度も形を変えて試す、試行錯誤が必要です。コンピュータを使ったシミュレーションでこれができるでしょうか？残念ながら現在のコンピュータでは大まかな現象のメカニズムを求めることはできても、細かい形状の違いを比べるには能力不足です。では、実際の車両を使って調べますか？ホンモノを使うのですから、間違いありません。でも、試験には膨大な時間と費用が必要ですから、いくつもの形を試すわけにはいきません。それならば、模型を使った風洞試験を行う？おそらく、これが現状では一番現実的な選択です。しかし、模型は本物とは違います。どうしても現実との差がでてきます。

そこで、ここでは、次のような方法で、変動空気力の小

さい形を探索しました。まず、以前に行った実際の列車を使った試験の結果を統計的に処理しました。それにより、変動空気力発生に関わりのありそうな箇所を抜き出しました。つぎに、その結果を参考に風洞試験で変動空気力低減に効果のありそうな形状を検討しました。そして風洞試験で効果のあった形を実際の列車に取り付けて調べました。では、具体的に見ていきましょう。

変動空気力発生に関わりのありそうな箇所の推定

様々な列車について空気力の測定が行われてきています。でも、列車によって先頭、屋根、床下などの形が違い、空気力を測定した号車も違っていました。ですから、これらの試験データから、変動空気力発生に関わりのありそうな箇所を推定するのは、パラメータが多すぎて困難です。そこで、同じ列車で形状を変更しながら試験した列車がないかと探したところ、6両編成の試験列車の5両目において、2年間の長期にわたり空気力を測定していたものがありました。この試験列車はパンタグラフや碍子のカバー(以降、併せてパンタグラフカバーと呼びます。)、台車カバーなどを様々に変更して行っていました(図3)。でも、残念ながら、これらの形状変更は変動空気力を小さくするために行われていたわけではありません。ほかの目的のために形状を変更していたものがほとんどです。ですから、いくつかの箇所の変更が色々な組み合わせで行われています(表1)。も

表1 形状変更の組み合わせ(a~gはパンタグラフの形状種類を示す。)

車両形状パターン	下部平滑化			台車側面カバー			パンタグラフ部カバー		台車-車端間側面カバー	下部幌
	先頭部	中間部	後尾部	先頭車後部	中間車	後尾車前部	2両目	5両目		
A	有	有	有	有	有	有	a	d	有	有
B	無	無	無	無	無	無	a	d	有	無
C	有	無	有	有	無	有	a	c	有	無
D	有	有	有	有	有	有	a	c	有	無
E	有	有	有	無	無	無	b	e	有	有
F	有	有	有	無	無	無	b	e	有	無
G	有	有	有	無	無	無	c	f	無	無
H	有	有	有	無	無	無	c	g	無	無
I	有	有	有	無	無	無	c	c	無	無
J	有	有	有	有	有	有	c	g	有	無

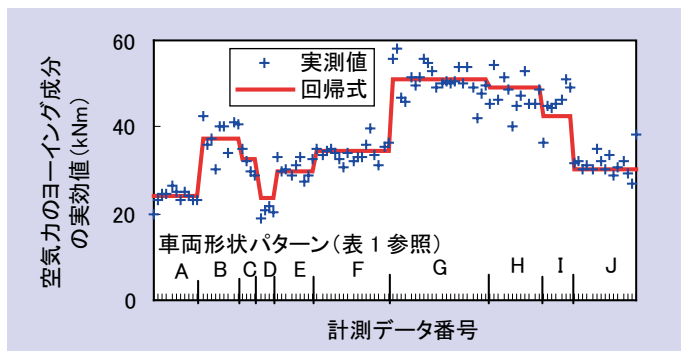


図4 実測値と回帰式(270km/h換算)



図5 風洞試験の方法

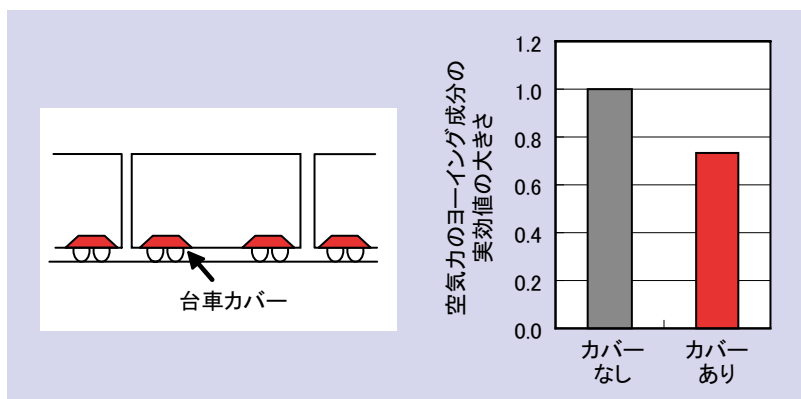


図6 台車カバーの効果
(風洞試験結果。縦軸は「カバーなし」を1とした場合の値。)

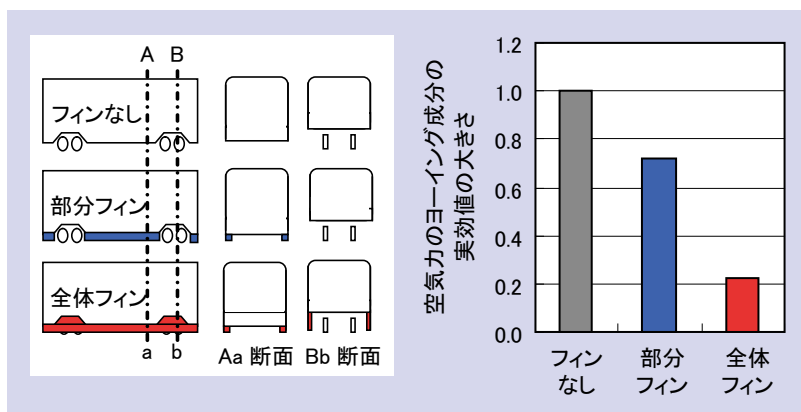


図7 フィンの効果
(風洞試験結果。縦軸は「フィンなし」を1とした場合の値。)

し、ひとつずつ変更が行われていれば、その変更した箇所による変動空気力への影響がすぐにわかりますが、同時にいくつかの箇所の変更が行われていると簡単に個々の箇所の影響を求めることはできません。そこで、数量化分析I類という統計的な方法で、個々の箇所の変動空気力への影響を推定しました。数量化分析I類では、質的データである形状を数値化して扱います。そして、これらの数値化した形状データ(説明変数)を組み合わせ、目的変数である変動空気力を一番うまく表せる回帰式を求めます。このとき組み合わせた形状データが、変動空気力への影響が大きい箇所と言えるわけです。

以上の統計分析を行った結果、説明変数として、「5両目パンタグラフカバー」、「中間車両台車側面カバー」、「下部幌」、「台車一車端間側面カバー」を用いると実測値とよく一致する回帰線が得られました(図4)。主に、車両の底面近くの形状が変動空気力発生に影響しているようです。これは数値シミュレーションで得られた、車両底面付近から発生する気流の乱れが変動空気力の原因であるとの推測とも一致するものです。

風洞試験による検討

つづいて、以上の結果を参考にして、風洞試験で変動空気力低減に効果のありそうな形状を検討しました。風洞の中に40分の1の縮尺のトンネルと車両模型を設置します。車両は5両編成です。その中の4両目の車両に加わる空気力を測定しました(図5)。

まず、台車側面にカバーをつけたときの効果を調べてみました(図6)。この結果、台車側面カバーをつけると変動空気力は減少することがわかりました。

つぎに、車両底面付近から発生する気流

の乱れが車両側面に巻き上がるのを防ぐために、車両側面下部にフィン（鉛直板）を取り付けることを思いつき、その効果を調べてみました。すべての車両において台車部も含めて車両側面全域にわたりフィンを取り付けたもの（全体フィンと呼びます。）と、台車部を除いてフィンを取り付けたもの（部分フィン）と、フィンを取り付けないものの3種類について比較してみました（図7）。全体フィンは大きな効果が認められます。部分フィンでも、全体フィンほどではありませんが、空気力は減少しています。

現車試験による確認

風洞試験ではフィンが効果的であることがわかりました。そこで、フィンを実際の車両に取り付けてその効果を調べてみました。16両編成の新幹線列車の先頭車から4両目までの車両側面下部にフィンを取り付けました（図8）。風洞試験では、フィンは台車側面カバーも併用して車両の両側面全体を覆うように取り付けたら大きな効果がありました。しかし、メンテナンス性を考えると、台車部を覆うことは好ましくないため、今回は部分フィンを取り付けました。フィンのついた車両のうち、一番後ろの車両（4両目）に加わる変動空気力を示したのが、図9です。フィンを取り付けることで変動空気力が小さくなっているのがわかります。

変動空気力低減のための他の試み

車両に加わる変動空気力を減らす方法は他にないのでしょうか。まだ、基礎的な検討段階ですが、車両形状を変えることなく変動空気力を低減する方法があります。噴流を利用して車両まわりの気流の乱れを制御する方法です。車両の底面下部からトンネル壁に向かって水平方向に噴流を噴出することで、変動空気力が低減することを風洞試験で確認しています（図10）。

おわりに

ここでは、トンネル走行中の車両に加わる変動空気力のうち、主に中間車両に加わる変動空気力の低減対策法をご紹介しました。トンネル走行中には、後尾車両にも大きな変動空気力が加わりますが、その低減には後尾形状の検討が必要となります。それについては、別の機会に報告したいと思います。[RRR]

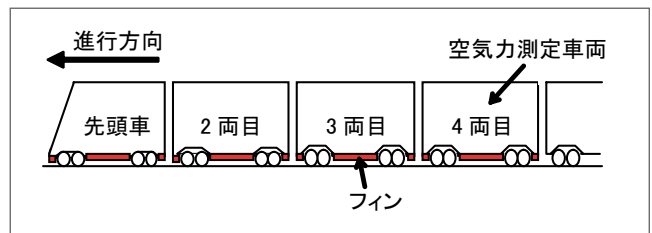


図8 現車によるフィンの効果確認試験

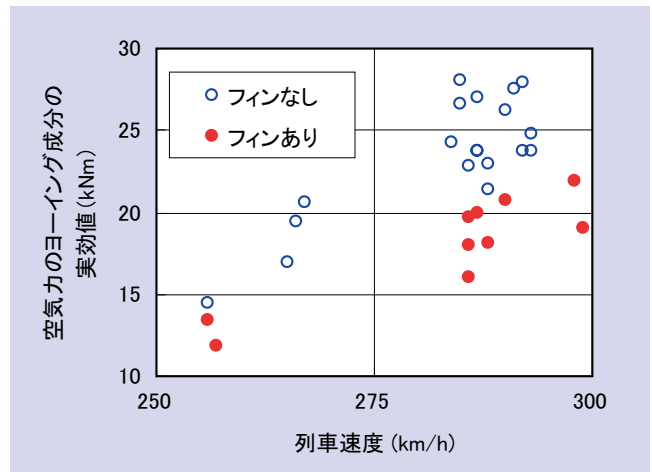


図9 フィンの変動空気力低減効果の確認結果（現車試験結果）

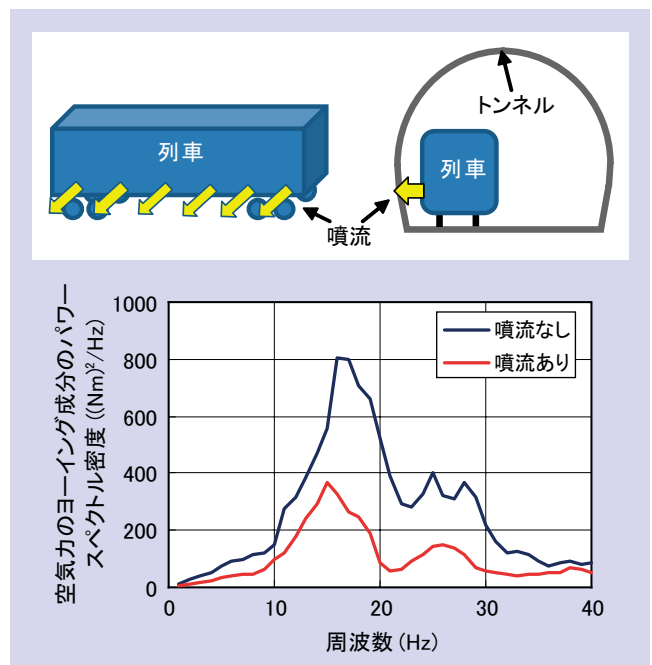


図10 噴流による変動空気力低減効果（風洞試験結果。模型縮尺：1/32，風速：20m/s）