

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

○ 酒井 健太郎 (農工大) [機] 中出 孝次 (鉄道総研) [機] 鈴木 昌弘 (鉄道総研)

A Basic Study on Control of Unsteady Aerodynamic Force Acting on Train

Running Inside Tunnel Using Air Blowing

○ Kentaro Sakai (Tokyo University of Agriculture and Technology)

Koji Nakade (Railway Technical Research Institute)

Masahiro Suzuki (Railway Technical Research Institute)

As the maximum speed of high-speed trains increases, flow-induced vibration of the trains in tunnels has become a subject of discussion in Japan. A basic study of flow controls using jets were conducted to reduce unsteady aerodynamic forces acting on the trains in the tunnels. We performed a wind tunnel experiment with a model train equipped with unsteady jet devices to estimate the effect of the jets. The wind tunnel experiment showed the effectiveness of the feedback control for the jets. We also conducted a numerical simulation to investigate a mechanism of the reduction of the unsteady aerodynamic force by the jets.

Key Words: High-speed train, Aerodynamic force, Flow control, Jet.

1. 背景および目的

近年, 新幹線速度向上に伴い, 乗り心地の面から, 空気力によるトンネル走行中の車両の左右動揺, 特にヨーイング成分が問題になりつつある. そのメカニズムを解明するために, これまで多くの列車において, 車両に働く空気力の測定が行われてきており, 以下のような特徴がわかってきている¹⁾.

(1) トンネル壁に面した車両側面で大きな圧力変動が発生する. トンネル内で車両に働く空気力は, 主にこの圧力変動に起因する.

(2) 圧力変動は, 相対速度(列車に対する気流速度)の二乗に比例して大きくなる.

(3) 列車側面で観察される圧力波形は, 一定のパターンを維持しながら, 先頭から後尾に向かって移動していく.

この現象の対策として噴流の利用による, トンネル内走行中の列車に加わる変動空気力低減方法が考えられている. これは, 噴流をトンネル壁に面した車両側面下部からトンネル壁に向けて吹き出すことで圧力変動を低減しようというものであり, 風洞実験によりその効果が確認されている²⁾. しかし, トンネル内で噴流を吹き続けるためには, 大量の圧縮空気を貯めておく大きなタンクが必要となり, 現車への適用は難しい.

そこで, 本研究では, より少量での噴流による変動空気力低減の可能性を探るため, 電磁バルブを用いて噴流を断続的に噴出し, その開閉のタイミングを変化させることで, 最も効率的な噴出方法を模索する. また, 数値計算により, 噴流による変動空気力低減のメカニズムを解明することを目的とする.

2. 実験方法

鉄道総研の小型低騒音風洞(回流式, 測定部断面寸法: 720×600 mm)において実験を行った. 使用する風洞模型

は, 新幹線列車と複線トンネルをモデルにした縮尺 32 分の 1 のものを用いた. 列車は 4 両編成である. トンネルは透明アクリル製で中の様子が観察できるようになっている. この風洞模型は現車で観察される現象が定性的に再現できることが確認されている³⁾. 図 1 に模型の概要を示す.

トンネル壁に面した車両側面で観察される圧力変動は編成全体にわたって発達する. そのため, 噴流の効果を調べるには, 編成のすべての車両から圧縮空気を噴出させたい処であるが, これを実施するには実験に用いる電磁弁の数が不足していた. そこで, 圧力変動は 3 両目以降で顕著になってくることが現車試験や風洞試験から判明しているので, 3 両目のトンネル壁に面した車両側面下部から圧縮空気を噴出させた. 噴出孔(直径 0.7mm)は, トンネル壁に面した底面下部に 8 点設けた(図 2). コンプレッサで圧縮した空気を小型タンクに貯めておき, レギュレータで供給圧を 0.4MPa に調節した後, チューブで車両内に設置した電磁バルブ(SMC 製エア用直動形 2ポート電磁弁 DXT414-5G-C6)へ導いた. さらに, 電磁バルブから車両側面の孔に導き, 車外に噴流を吹きだした.

噴流の効果は, 3 両目の車両の両側面(各側面 4 点ずつ, 図 2 参照)での圧力変動により評価する. 車両に加わる空気力は, 以下のように推定した. 車両側面を 4 つに分割し, その各面積部分に加わる圧力をその中央部分にある圧力センサーの測定値で代表させる. それらの左右側面の圧力の差に各部の面積と車両中心(前後台車間の中間位置)からの距離(モーメントの腕の長さ)をかけて, 空気力のヨーイング成分を求める.

電磁バルブの制御及び圧力データの収録は LabVIEW(National Instruments 社製)で行った.

風速は密閉洞入口に取り付けたピトー管で測定し, 20m/s に設定する. この風速と列車幅(106mm)を基準としたレイノルズ数は, 1.4×10^5 となる.

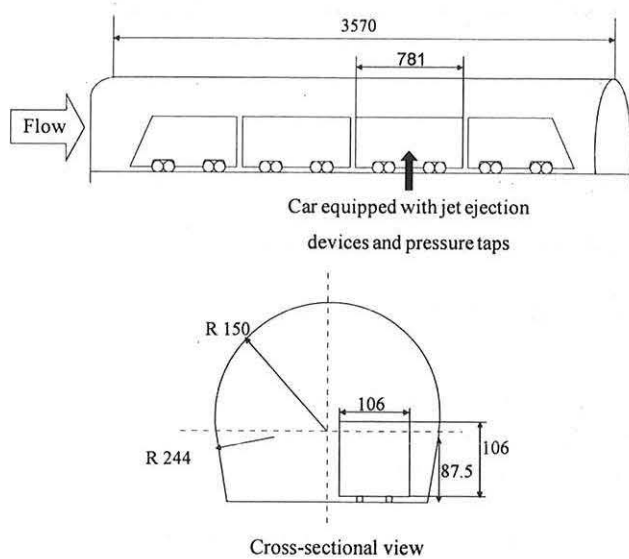


Fig.1 Experimental apparatus (unit: mm)

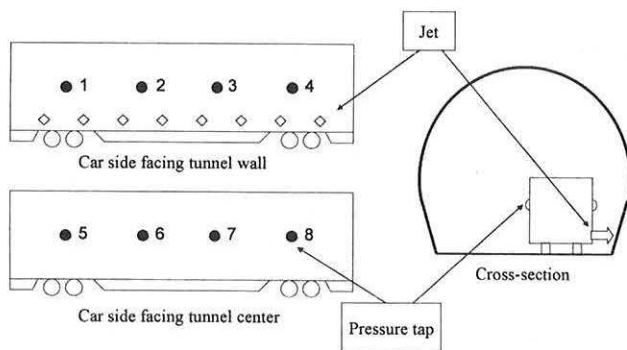


Fig.2 Jets and pressure taps installed on the 3rd car

3. 実験結果と考察

3.1 開閉比の効果

電磁バルブが開いている時間と閉じている時間の比（以降、開閉比と呼ぶ）を変更した時の、変動空気力低減効果を調べた。開閉比の変更は Fig.3 に示すように各周波数において 1 周期における電磁バルブが開放する時間の割合を変化させることで行った。過去の実験から、変動空気力のピーク周波数と同じ周波数の間欠噴流を用いた場合に最も変動空気力低減効果が高くなることがわかっている⁴⁾。Ref.4 によると流速 20m/s における変動空気力のピーク周波数は 29Hz であるが、この周波数で開区間を短くした場合電磁弁の応答性能が不足しており、期待する開閉比を実現できない。そのため、5Hz において開閉比 1:1~1:5 まで実験を行うことにした。各開閉比における変動空気力の実効値の比較を Fig.4 に示す。

Fig.4 の黒塗りの棒グラフは噴流なしの場合を 1 としたときの変動空気力のヨーイング成分の実効値を示しており、一方、白抜きの棒グラフは定常噴流の噴出流量を 1 としたときの噴出流量を示している。噴出流量は、水を満たした容器中へ単位時間噴流を放出し、水の減少量から簡易的に測定した。Fig.4 を見ると、噴出時間を短くする（開閉比 1:1→1:5）につれて変動空気力の低減効果が

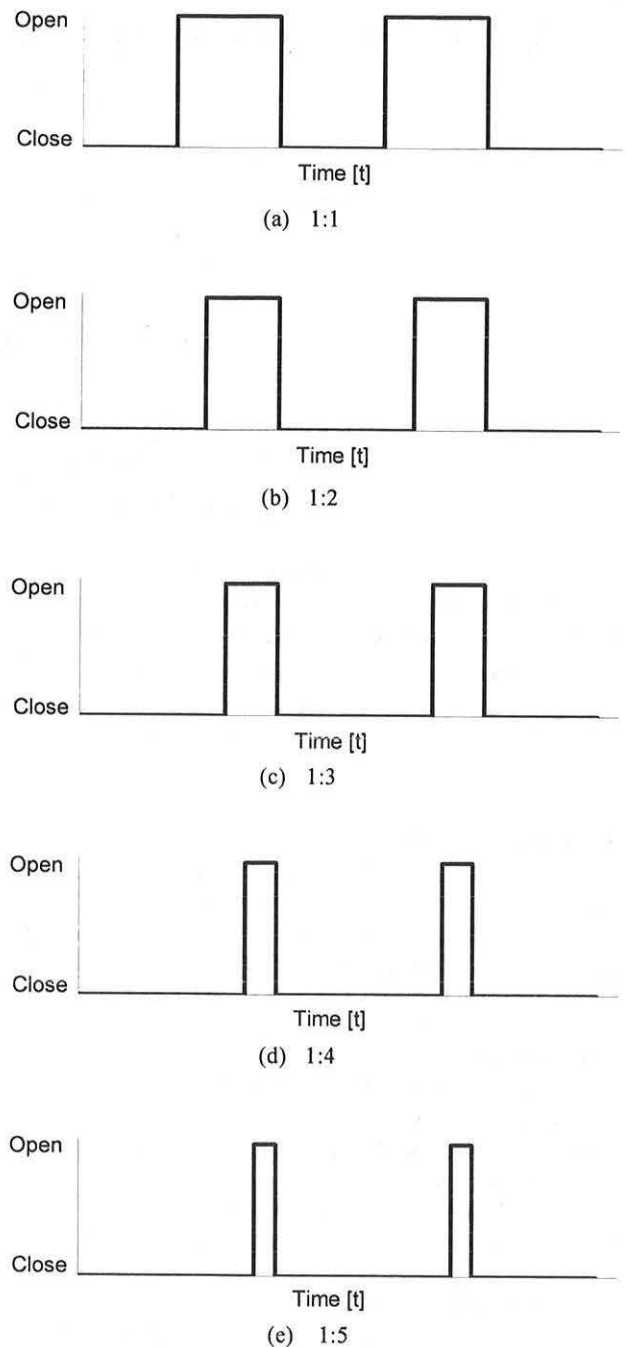


Fig.3 Open-time ratio

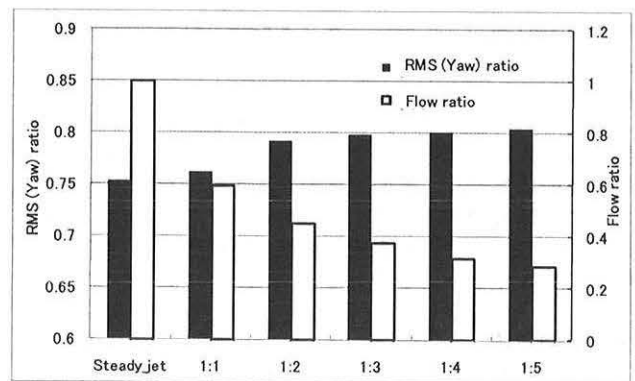


Fig.4 Effect of open-time ratio

小さくなっていることが分かる。それと同時に圧縮空気の噴出流量も減少しており、両者には関係性があることが分かる。しかしながら、同図を見ると噴出流量が定常噴流の3割程度となる開閉比1:5においても、2割程度変動空気が低減されていることがわかる。以上より、圧縮空気の必要量を低減するためのアプローチとして開閉間隔の変更は有効であると考えられる。

3.2 フィードバック制御の効果

より効率的な噴流の制御を模索するため、車両に設置した圧力センサーを用いたフィードバック制御を行った。圧力センサーの値が閾値を下回った場合に電磁弁を開放し、噴流が噴出するようにプログラムを作成することで、低圧部が噴出口を通過した時だけ圧縮空気を噴出させるようにした。ただしこのプログラムは圧力センサーの値が閾値を下回ってから電磁弁を開放するまでのタイムラグがあった。そこで、圧力波形は一定のパターンを維持しながら先頭から後尾に向かって移動するという本現象の性質を利用して、トリガ感知から電磁弁開放までのタイムラグを考慮しつつ、低圧部が噴出口前を通過するときに電磁弁を開放するよう Fig.5 に示すように圧力センサーを上流側に設置した。電磁弁は8点すべて同時に開閉する。閾値は噴流を用いずに実験を行った際の前方車両に設置した圧力センサーの値から、その平均値(A)と標準偏差(S)を用いて決定した。用いた閾値を Fig.6 に示す。但し、ここで圧力波形は実際のものでなく、模式的なものを示している。

Fig.7 に実験結果を示す。噴流なしの場合を1としたときの変動空気のヨーイング成分の実効値を示している。また、単位時間当たり電磁バルブが開いている時間の割合を Table.1 に示す。実験結果を見ると、Level A,B においては定常噴流を用いた場合よりも実効値が低くなっていることがわかる。このことから、フィードバック制御はより効率的に動揺を低減することが出来ると考えられる。ただし、噴出流量が少なくなる(表1の Open-time ratio が小さくなる) Level C~E においては、変動空気の低減効果も小さくなることがわかる。

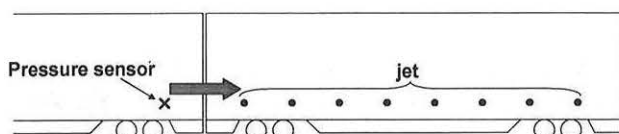


Fig.5 Diagram for feedback control

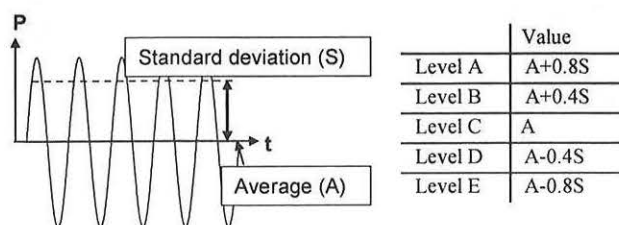


Fig.6 Threshold levels

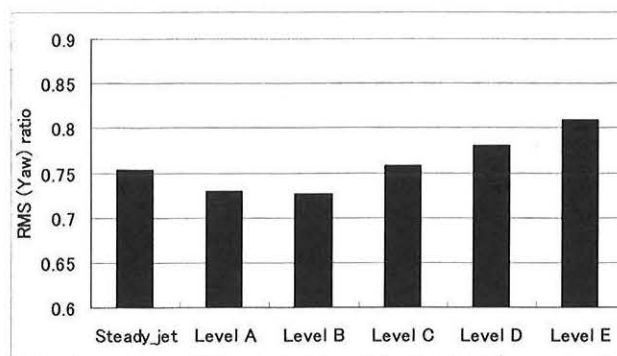


Fig.7 Effect of feedback control on each threshold

Table.1 Open-time ratio of feedback control

	Open-time ratio [%]
Level A	75
Level B	57
Level C	41
Level D	31
Level E	21

4. 数値計算

4.1 方法

流体解析ソフト FLUENT を用いて、トンネル内を走行する鉄道車両周りの流れ場を計算する。今回は噴流がない状態での流れ場と、噴流を用いた場合の流れ場を比較することで、噴流による変動空気の低減効果のメカニズムを解明することを目的とした。計算法としては有限体積法を使用した。はじめに、 $k-\epsilon$ 法を用いて定常計算を行う。次に、その計算結果を初期値として LES(Large-Eddy Simulation)による非定常計算を行う。車両の計算モデルは Fig.8 上段に示すような、実際の車両の車体と台車を直方体で模擬したものを用いた。また、Fig.8 の下段に示す流入・流出境界は実際の車両における中間車両を模擬するため、周期境界条件とした。車両・トンネルの寸法は風洞模型と同様である。レイノルズ数は風洞試験に合わせて、 1.4×10^5 とした。風洞実験に用いる模型と同じ位置に、噴出口を8点設けた。噴出口は簡単のために正方形型としている。Fig.9 に噴出口付近の格子の拡大図と車両表面の格子を示す。図に示されているように、格子には非構造格子を用い、物体表面にはプリズム格子を、そのほかは四面体格子を用いた。格子のセル数は2,852,512である。

4.2 計算結果

噴流がない場合のトンネル壁面に隣接する車両側面における圧力分布を0.2秒間隔で、Fig.10 に示す。圧力変動が車体の下側から発生していることがわかる。これにより変動空気が発生し、車体の動揺に影響しているものと思われる。

噴流を用いた場合の結果については発表時に述べる予定である。

5. まとめ

高速列車がトンネル内走行中に発生する変動空気力を低減するために、間欠噴流を列車側面から吹きだす方法の基礎的な検討を行った。風洞実験において電磁バルブの開閉比の変更を行ったところ、噴出流量の減少とともに、変動空気力の低減効果も小さくなることがわかった。さらに、噴流のフィードバック制御を行ったところ、定常噴流を用いた場合よりも変動空気力の低減効果が高いことがわかった。

また、噴流による変動空気力低減メカニズムを解明するために数値シミュレーションを行った。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 鈴木昌弘，中出孝次：噴流を用いたトンネル内走行中の列車まわりの流れ制御の試み，日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集 CD-ROM, 2006.
- 3) 鈴木昌弘，中出孝次，藤本裕：トンネル内の高速車両の同様と空気力の相互作用，鉄道総研報告，vol15, No.5, pp. 19-24, 2001.
- 4) 岡田健志：噴流を用いた列車に加わる変動空気力低減方法の基礎的検討，東京農工大学修士論文，2009

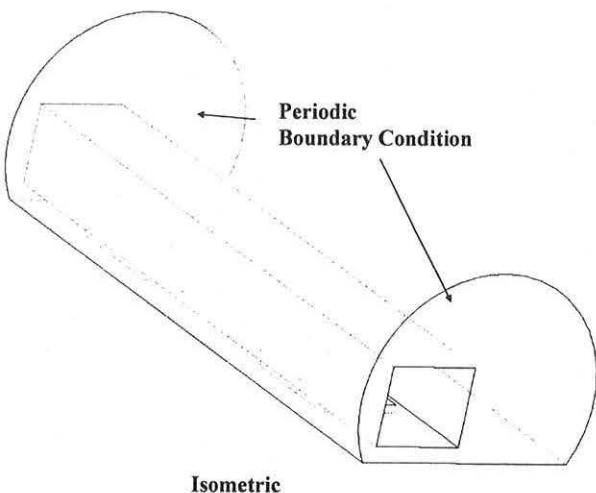
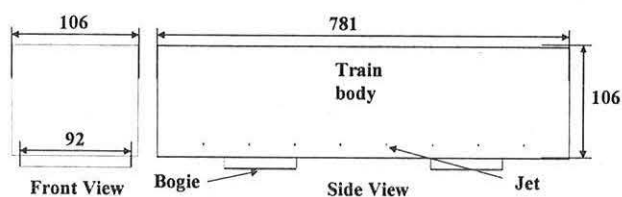


Fig.8 Computational model

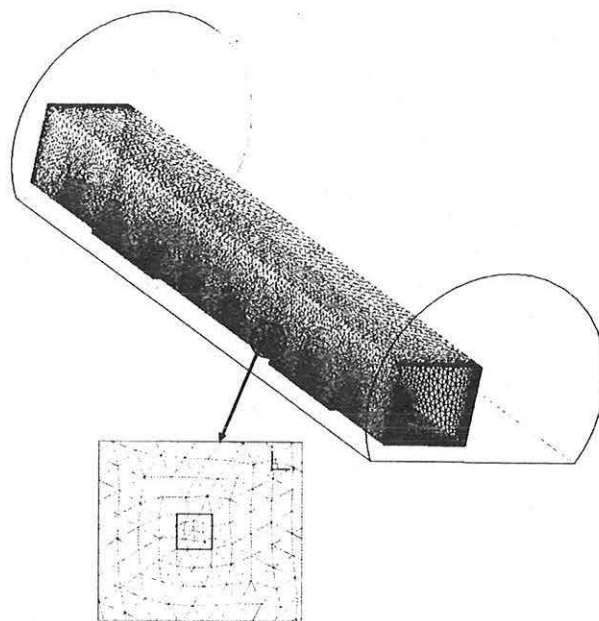


Fig.9 Grid system

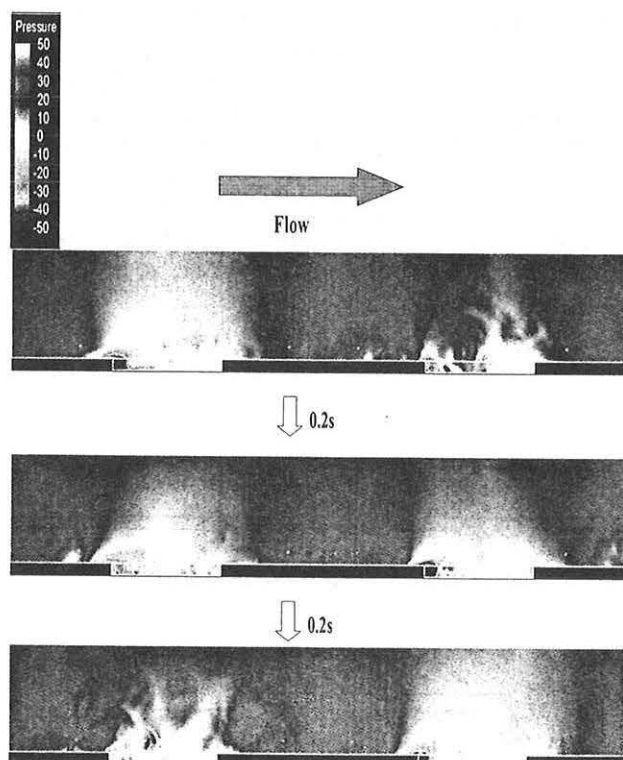


Fig.10 Pressure distribution