

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

○岡田 健志 (東京農工大学) [機] 中出 孝次 (鉄道総研)

[機] 鈴木 昌弘 (鉄道総研, 東京農工大学)

A basic study of countermeasure
for reducing aerodynamic force acting on train using jet○Kenji Okada, (Tokyo University of Agriculture and Technology)
Koji Nakade, (Railway Technical Research Institute)
Masahiro Suzuki, (Tokyo University of Agriculture and Technology ,
Railway Technical Research Institute)

A basic study on flow controls using jets was conducted to reduce unsteady aerodynamic forces acting on trains running through tunnels. The study was performed using a 1/32 scale model train consisting of four cars and a tunnel. We installed air jet devices on the lower side of the car facing the tunnel wall and measured pressure fluctuations on the side of the vehicle in a wind tunnel. An effect of intermittent jets was generated utilizing electromagnetic valves. The aerodynamic force acting on the car was estimated by integrating pressure data. The results show that a) the jets reduce the unsteady aerodynamic force, and that b) the intermittent jet with the same frequency as the unsteady aerodynamic force reduces the aerodynamic force in a manner similar to the steady jet.

キーワード：高速列車，流体関連振動，流体制御，ジェット

Key Words : High-speed train, Flow-induced vibration, Flow control, Jet

1. 背景及び目的

近年，新幹線の速度向上に伴い，乗り心地の面から，空気力によるトンネル内走行中の車両の左右動揺が問題になってきている．この現象の特徴として以下のようなものがある¹⁾．

(1) トンネル区間走行時の方が，明かり区間走行時よりも動揺が大きい．

(2) 先頭から後尾車両に向かって，動揺が増大する．

この動揺の原因として，当初，軌道狂いや蛇行動特性の影響が考えられた．しかし，これらの要因のうち，軌道狂いはトンネル区間において動揺との相関が小さく¹⁾，また蛇行動特性では明かり区間との揺れ方の違いが説明できなかった²⁾．そこで，空気力の影響が注目された．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，車体に働く空気力の測定が行われてきており，以下のような現象の特徴がわかってきている³⁾．

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

(2) 圧力変動は，相対流速（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．その移動速度は，相対流速の70%程度になる．

(4) 編成全体でみた場合，列車側面での圧力変動の大きさは，先頭から6～8両目程度にかけて増大し，その後，後尾車両まではほぼ一定のまま維持し，最後に最後尾部で急激に大きくなる．

このような編成全体の圧力変動の発生要因として，車体底面からの渦の発生とその移流が示唆されている³⁾．また，最後尾部の急激な圧力変動は，流れの剥離に起因するものであることも明らかになっている⁴⁾．

この圧力変動の対策法としては，車両側面下部にフィンを取り付けることにより変動空気力が低減できることが風洞実験，現車試験により確認されている⁵⁾．しかし，車両限界による制限や整備性の問題から大きなフィンを車両全体にわたって取り付けることは難しい．

一方，流体制御技術により物体の空力特性を改善する研究が行われてきている．Choiは，自動車をイメージした物体の空気抵抗を噴流により低減することに成功している⁶⁾．

この Choi の研究は定常力として空気抵抗を低減することを目的としたものであるが、噴流の利用は、非定常力であるトンネル内走行中の列車に加わる空気力低減にも期待が持てる。また、新幹線列車には空気ばね等、空気圧を利用した機器があり、コンプレッサと空気貯めを搭載しており、噴流の利用は現実的であると思われる。

これまで、著者らは噴流による変動空気力の低減方法の研究を行い、定常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することが可能であること、その低減率は噴流の運動量に比例することを明らかにしている⁷⁾。しかし、トンネル内で定常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、現車への適用を考えると障害となる。

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、変動空気力低減の効果を調べることを目的とした。

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を定性的に再現できることが確認されている⁷⁾。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るのが望ましいが、これを実施するには実験に用いるコンプレッサの能力及び電磁バルブの数が不足していた。そこで、現車試験や風洞試験から圧力変動は 3 両目以降で顕著になってくることが判明している⁷⁾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（0.3 MPa）を調節した後、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、車外に噴流を吹き出す。噴出孔一点当たりの噴出量は約 $2 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ （大気圧下）となる。電磁バルブの動作周波数は最高 35 Hz 程度まで可能である。

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。圧力測定は、8 点同時計測できる圧力センサー（Scanivalve 製 ZOC23B：圧力レンジ $\pm 2.5 \text{ kPa}$ 、精度 $\pm 0.20 \% \text{ F.S.}$ ）を用いて行った。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

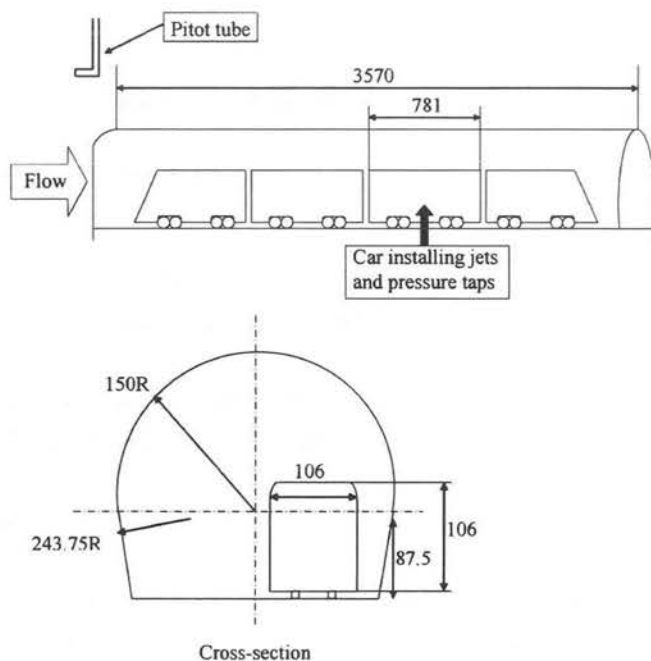


図 1 試験トンネル概要図（単位 mm）

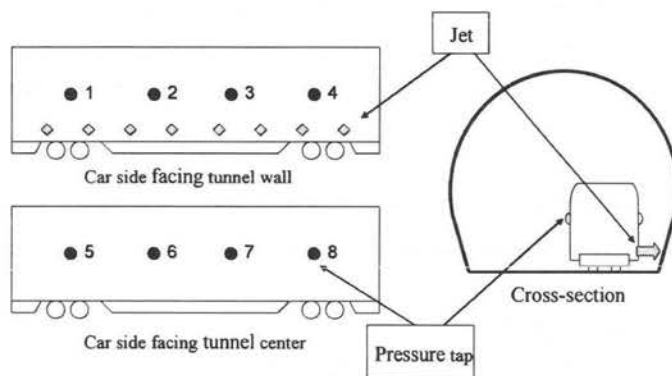


図 2 噴出孔及び圧力孔（3 両目車両）

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をかけて、空気力の左右成分を求める。さらに車両中心（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）をかけると、空気力のヨーイング成分が求まる。

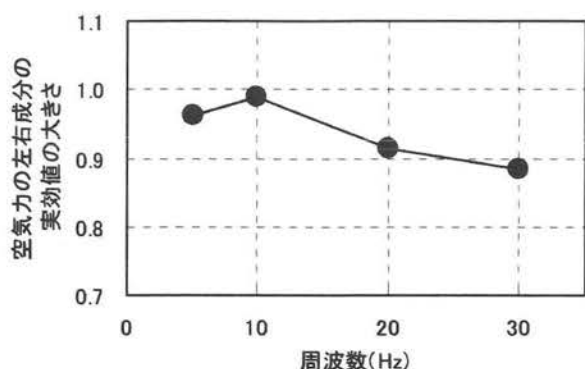
電磁バルブの制御及び圧力データの収録は LabVIEW（National Instruments 社製）で行った。

風速はトンネル入口上方に取り付けたピトー管で測定し、30 m/s に設定した。このときの列車幅（106 mm）を基準としたレイノルズ数は、 2.1×10^5 となる。

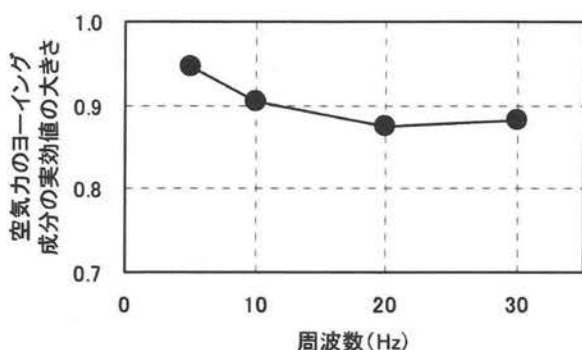
3. 結果と考察

3.1 間欠噴流の周波数の影響

まず、電磁バルブの開閉周波数を 5, 10, 20, 30 Hz と変化させ、その影響を調べた。電磁バルブは全 8 点を同時（位相差 0°）に開閉した。それぞれの場合の空気力の左右成分とヨーイング成分の実効値を図 3 に示す。噴流なしの場合を 1 として、その比率を示している。空気力の左右成分に



(a) 空気力の左右成分の実効値



(b) 空気力のヨーイング成分の実効値

図3 間欠噴流の周波数の影響

(噴流なしの場合を1とする.)

については、30 Hz の時、最も低減効果があることがわかる。ヨーイング成分は、20 Hz で最も低減効果があり、30 Hz においてもほぼ同等な低減率が得られることがわかる。

噴流なしの場合の空気力のピーク周波数は左右成分が 33 Hz、ヨーイング成分が 38 Hz であり (図6 参照)、このピーク周波数近辺で間欠噴流を吹きだすことにより、低減効果が大きくなると考えられる。

3.2 各噴流間の位相差の影響

次に、各噴流間の位相差を変化させて、その影響を調べた。前節より、間欠噴流の周波数が非定常空気力のピーク周波数付近の時、大きな低減効果が得られることがわかったので、電磁バルブの開閉周波数は空気力の左右成分のピーク周波数と同一の 33 Hz に設定した。隣り合う電磁バルブの位相差は $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 135^\circ, 180^\circ$ とした。たとえば、位相差 30° では、1 番目の電磁バルブ (2 両目寄り、最上流位置、図2 参照) が開いてから、 $(1/33) \times (30/360) \approx 0.0025$ 秒後に 2 番目の電磁バルブが開くことになる (図4(a))。また、位相差 180° では、ある電磁バルブが開くと隣の電磁バルブは閉じることになる (図4(b))。

変動空気力の実効値を比較したものを図5に示す。噴流なしの場合を1として、その比率を示している。比較のため

めに、定常噴流を用いた場合も示している。位相差による違いは大きくないが、いずれも定常噴流とほぼ同様の空気力低減効果が認められる。位相差 120° の左右成分の実効値が若干小さくなっている。1 章で述べた圧力波形の移流速度から、各噴出孔に到達する圧力波形の位相差を算出するとほぼ 120° となり、このことと何らかの関係がある可能性があるが、詳細は不明である。

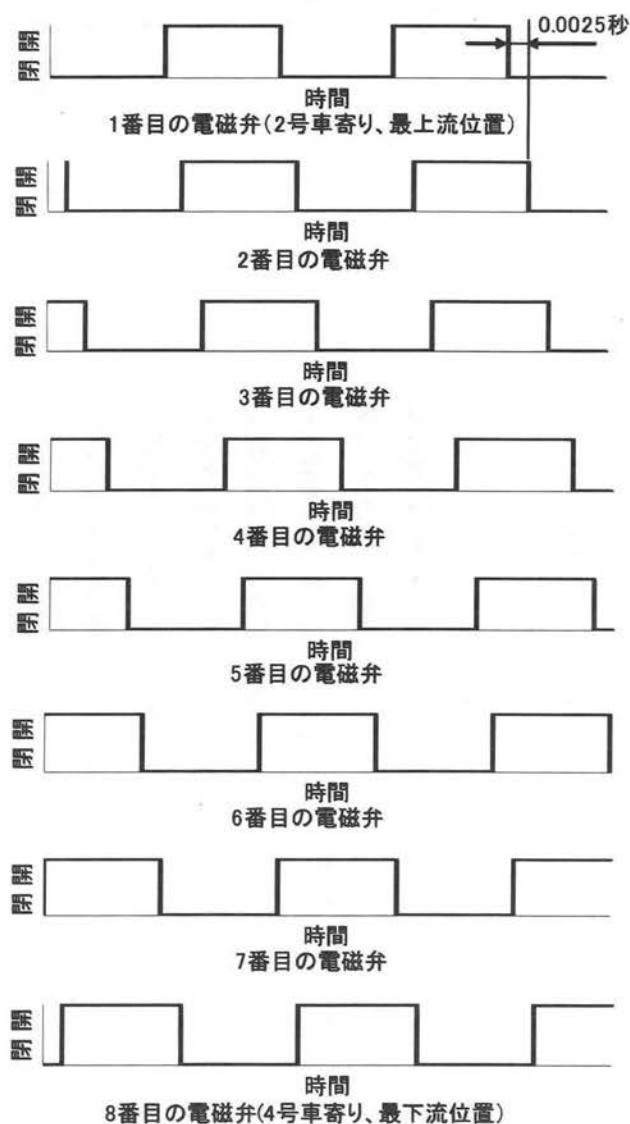
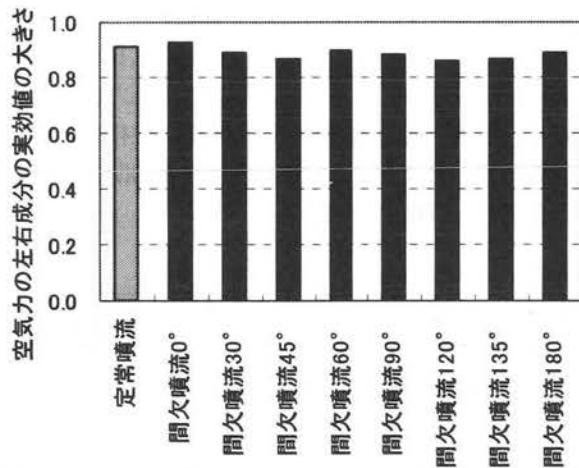
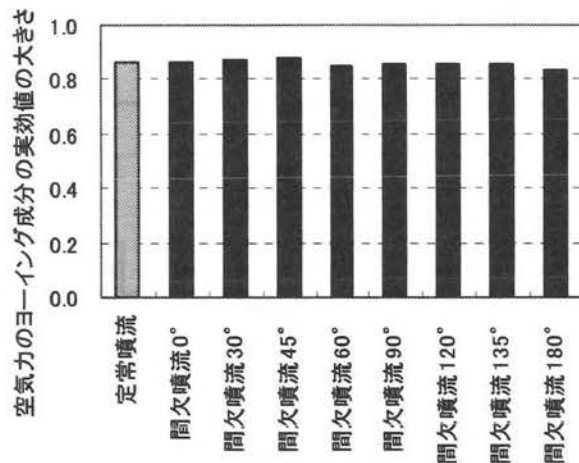
(a) 位相差 30° (b) 位相差 180°

図4 各電磁バルブの噴出パターン



(a) 空気力の左右成分の実効値



(b) 空気力のヨーイング成分の実効値

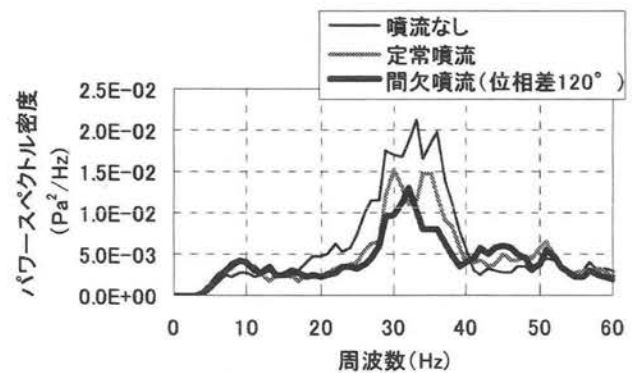
図 5 各噴流間の位相の影響

(噴流なしの場合を 1 とする.)

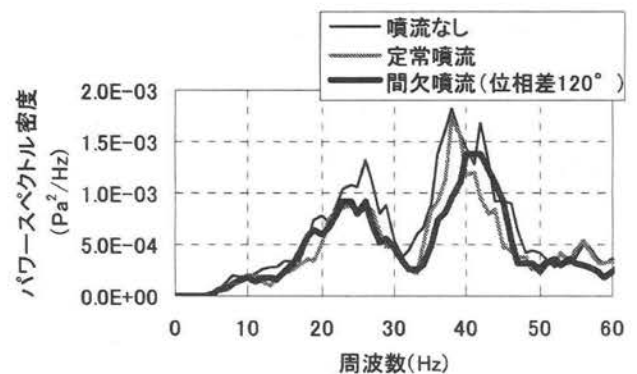
低減効果が高かった位相差 120° の場合の FFT 解析結果を図 6 に示す。比較のために、噴流なしの場合と定常噴流を用いた場合も示している。ピーク周波数の付近において、スペクトル密度が低減しており、定常噴流と同程度以上の効果があることがわかる。

4. 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。その結果、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ると、定常噴流と同程度以上の低減効果が得られることがわかった。



(a) 左右成分



(b) ヨーイング成分

図 6 空気力の FFT 解析結果

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 藤本裕, 宮本昌幸：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.
- 3) Suzuki, M., Ido, H., Sakuma, Y. and Kajiyama, H.: Full-scale measurement and numerical simulation of flow around high-speed train in tunnel, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 1, No. 3, pp. 281-292, 2006.
- 4) 鈴木昌弘, 前田達夫, 新井紀夫：列車まわりの流れの数値シミュレーション(第 2 報 後尾車両に加わる非定常空気力), 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 62, No. 595, pp. 1061-1067, 1996.
- 5) 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.
- 6) Choi, H.: Active controls of flow over bluff bodies for drag reduction, Proc. of the 4th symposium on smart control of turbulent, pp. 1-12, 2003.
- 7) 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.