

新幹線車両周りの流速・圧力の車上および地上測定

○ [機] 佐久間 豊 [機] 鈴木 昌弘 [機] 井門 敦志 梶山 博司 (鉄道総研)

Measurement of Air Velocity and Pressure Distributions Around High-Speed Trains on Board and from the Ground

○Yutaka Sakuma, Masahiro Suzuki, Atsushi Ido, Hiroshi Kajiyama (Railway Technical Research Institute)

Air velocity and pressure distributions on the sides of 16-car high-speed trains both in open and tunnel sections have been measured to investigate the flow structure. For on-board measurement, hot-film probes, pitot tube rakes and pressure gauges are used. For on-the-ground measurement, ultrasonic anemometers and pressure gauges are installed inside a tunnel. Flow velocity distributions both in open and tunnel sections are obtained. It was found that the air velocity in the narrow space between the train side and the tunnel wall gradually decreases from the head toward the tail of the train while that in the other wide space increases, and that the coherent velocity and pressure fluctuations observed on board in tunnel sections can be also detected from the ground.

キーワード：新幹線，高速列車，明かり区間，トンネル区間，流速分布，圧力変動

Key Words：Shinkansen, high-speed train, open air, tunnel section, velocity distribution, pressure fluctuation

1. はじめに

列車の速度が向上するにしたがって、空気力学的現象が顕著となる。鉄道に関する空気力学的現象として、例えば、列車通過時の列車風・圧力変動、トンネル微気圧波、空気抵抗、変動空気力によるトンネル内走行中の車両動揺などがある¹⁾。さらなる高速化のためには、空気力学的現象の解明や低減対策が必要不可欠であり、そのためには、列車周りの流れ場の把握が重要である。

近年、新幹線の速度向上に伴い、乗り心地の面から、車両側面に働く変動空気力によるトンネル内走行時の車両動揺が問題になりつつある。変動空気力の原因となる列車側面に働く圧力変動の発生メカニズム解明のため、高速列車周りの流れ場を把握する目的で、過去に現車試験が実施された。それらの試験結果から、列車速度、対向列車の有無、編成中の車両位置や床下形状等の様々な要因により、圧力変動の大きさや周波数が変化することが分かってきた²⁾。圧力変動の発生は、列車床下付近の流れの不安定性により生じた乱れが、トンネル壁との干渉により列車側面に広がるのが原因と推測された。車両側面を丸めることやフィンを取り付けることにより、この圧力変動が低減する可能性が風洞実験と数値シミュレーションにより確認されている³⁾。さらに、変動空気力と車両運動の関係について解析的なアプローチもなされている⁴⁾。

トンネル内走行時の車両動揺に関するこれまでの試験で

は、車上における圧力測定が主に行われており、地上における圧力・流速測定や、車上における流速測定⁵⁾はほとんど実施されていない。そこで本研究では、新幹線車両周りの流れを調べるため、地上(トンネル区間)および車上(明かり区間およびトンネル区間)において圧力と流速を測定した。(なお、測定自体は約10年前に行なわれた。過去10年間においても、本研究の様な試験はほとんど実施されていないようであり、今回発表することとした。)

2. 試験概要

試験列車は16両編成(全長約405m)、走行速度 U は約250~290 km/hの範囲である。車上測定および地上測定を行った列車について、両列車の形式は異なり、かつ、同時計測ではない(ここで車上測定は列車I、地上測定は列車IIとそれぞれ呼ぶ)。しかし、列車IとIIの車体断面形状はほぼ同じであること、また、複数の異なる車両形式における過去の圧力測定の試験結果²⁾から、本研究で着目している流れ場のスケールでは両列車周りに作られる流れ場はほぼ同じと見なせることが分かっている。

2.1 車上測定

16両編成3号車の車両側面の位置にて流速と圧力を測定した。図1に示す様に車両側面の2箇所の窓ガラスを鉄板と交換し、その鉄板に熱線流速計、ピトー管、圧力計を各1個ずつ取り付け付けた。熱線流速計、ピトー管の向きを上下

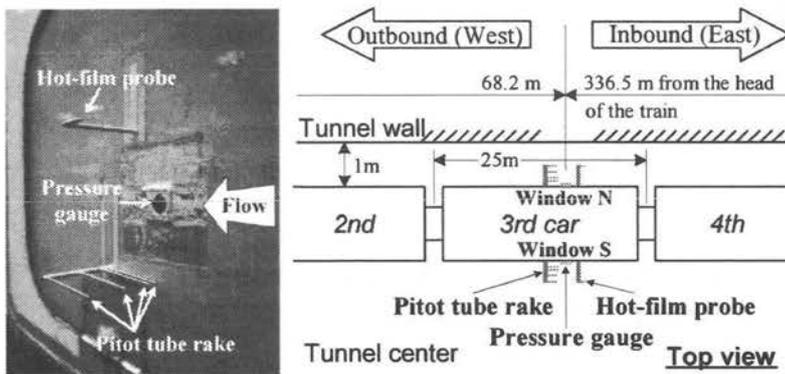


図1 新幹線車両側面窓部の流速計と圧力計設置概要

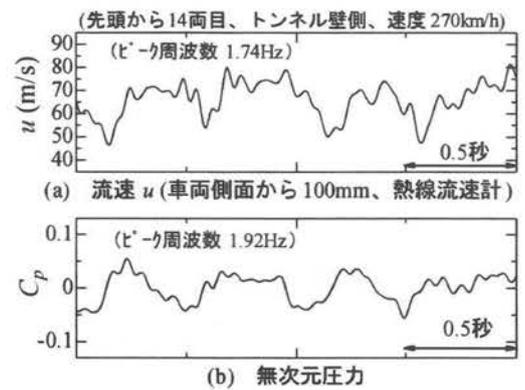


図3 車上測定での流速・圧力 (列車 I)

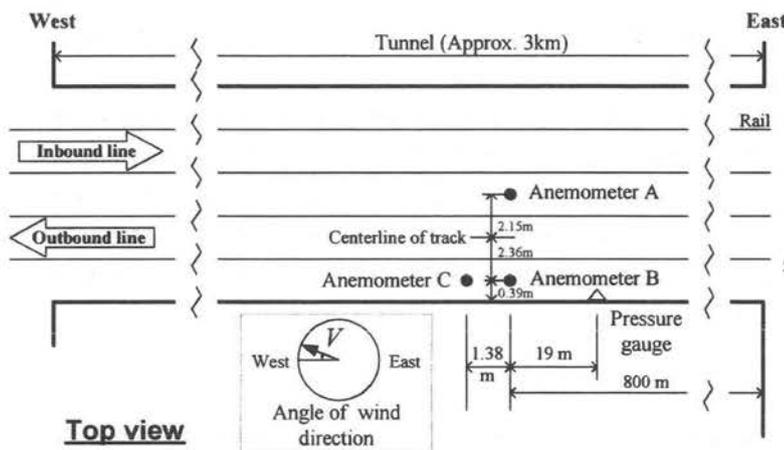
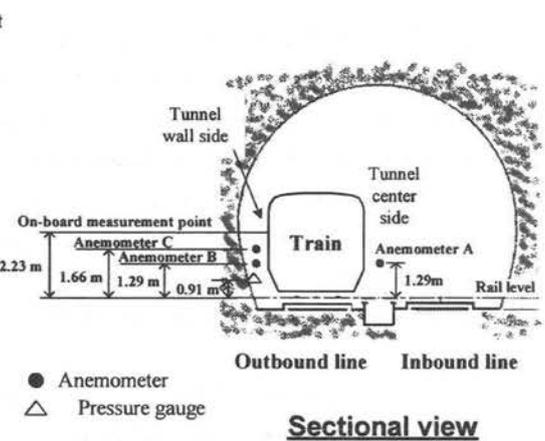


図2 トンネル内の風速および圧力測定の概要



Sectional view

走行で変えられる構造とすることにより、上り走行 (Inbound) 時は先頭から3両目 (先頭車先端から68.2 m)、下り走行 (Outbound) 時は14両目 (同336.5 m) で測定した。熱線流速計はダンテック社製2次元ホットフィルムプローブ (TYPE55R71) を使用し、鉄板窓表面上からの長さ y を5, 15, 50, 100 mm に車内から調節可能な機構とした。ピトー管は、鉄板窓表面上からの長さ y を5, 15, 50, 100 mm を同時測定出来る、4本のプローブを持つ櫛形タイプを使用した。熱線流速計、ピトー管ともに車内から着脱可能な機構とした。圧力センサは三計エンジニアリング社製圧力計 P325-01 (± 1000 mAq) を使用し、アルミテープで鉄板表面に固定した。

データ解析区間として、トンネル区間では列車後尾部がトンネル (全長約3 km, 複線) 突入直後の、明かり区間では直線区間の約10秒間の測定データをそれぞれ選んだ。

2.2 地上測定

トンネル坑口から内部800 mの位置において流速と圧力を測定した。図2にセンサーの取り付け位置および測定点番号等を示す。流速は3箇所、圧力は1箇所測定した。流速計は2次元超音波流速計 (トーヨー電子, WA-200型) を、圧力計はST研究所 PD80HAを用いた。なお地上測定点は車上測定区間に含まれており、両者の位置は対応している。

3. 測定結果と考察

3.1 車上から見た流速および圧力

図3に、列車Iの先頭車から14両目のトンネル壁側の側面における、流速および圧力の時系列波形を示す。流速・圧力波形ともに、約0.4~0.5秒の周期的変動が見られる。両波形の周波数解析結果よりピーク周波数 f は約2 Hz (列車幅 D を基準としたときの無次元周波数 $St = fD/U = 2 \times 3.4/75 = 0.09$) 弱である。この特徴は他の測定結果²⁾と合致し、トンネル壁側の列車側面で観測される典型的な波形である。

図4に、解析区間で時間平均した車両側面の流速分布を示す。縦軸は車両側面からの距離 y を、横軸は列車速度 U で列車長手方向の測定流速 u を除した無次元化速度をあらわす。図中の実線および破線は以下のべき乗則 (壁面の乱流境界層の流速分布) で表した時のデータの最小二乗近似曲線である。

$$(u/U) = (y/\delta)^{1/n} \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 δ は境界層厚さ、 n は実数である。なお、図4中の全ての近似曲線のべき乗係数 n は、約8~10の値の範囲で求められ、これは過去の研究⁵⁾と合致する。

明かり区間 (破線) では、3両目から14両目にかけて流速分布が減少している (図中[I])。これは、境界層厚さが

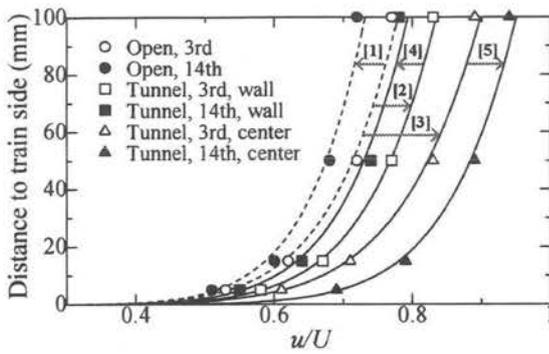


図 4 列車 I 側面の流速分布 (ピトー管)

増加したためである。明かり区間(破線)からトンネル区間(実線)に入ると流速が増大する。その際、トンネル壁側(図中[2])よりも、トンネル中央側(図中[3])の方が流速の増加が大きい。トンネル区間内において、壁側より中央側の方が流速は大きい。3両目と14両目で流速の変化を比較すると、壁側では減速している(図中[4])が、トンネル中央側では逆に増速しており(図中[5])、両側面で傾向が異なっている。すなわち、列車が存在するトンネル断面内の流速分布は3両目と14両目で異なる。いま、列車速度 U は音速の20%程度であり、列車周りの流れは非圧縮性流れと見なせることから、列車固定座標系から見たトンネル内の体積流量分布はどの断面内でもほぼ同じである。ゆえに、この3両目と14両目の流速分布の差異より、トンネル壁側の狭い空間からトンネル中央(対向線路)側の広い空間へ、列車の先頭から後尾にかけて3次元的な空気の流れが存在すると推測される。

3.2 地上から見た流速および圧力

(1) 下り走行の場合

図5に、列車IIの下り走行、測定点通過時の風速および圧力の時系列波形を示す。列車先頭部通過直前の任意の時刻を0秒とし10秒間を示す。列車が測定点の脇を通過する約0.7秒から6.2秒の間は、圧力が減少する。

トンネル壁側の流速について、測定点B(レールレベルより1.29m)と測定点C(同1.66m)でほぼ同じ変化傾向を示すものの、測定点Cの方がやや小さい傾向を示す。ゆ

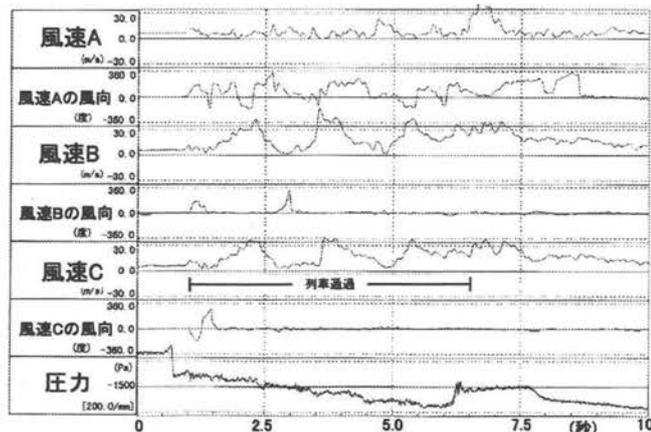


図 5 トンネル内通過時の風速・圧力(下り, 列車II)

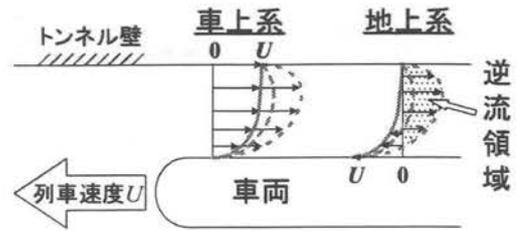


図 6 車上系と地上系の流速分布の概念図

えに、車上測定点(同2.23m)では、さらに小さい値になることが推定される。風向は先頭車が通過する際に一時的に変化するものの、以降は列車進行方向とほぼ同じである。これらの結果より、地上系から見たトンネル壁側の流速分布は逆流(列車進行方向と逆向きの流れ)領域が存在しない、または、存在しても風速測定点B、Cよりもトンネル壁に近い位置になると考えられる。さらに、車上測定結果で3両目から14両目にかけて流速分布が減速(図4中の[4])することと合わせて考察すると、逆流領域が存在する場合は、列車先頭部から後尾部にかけてその領域は徐々に小さくなる可能性を示唆する。図6に、車上系および地上系から見た流速分布の概念図を示す。逆流領域が存在しない場合の流速分布を実線で、存在する場合は破線および点線で示す。いまの測定結果から、トンネル壁側の流速分布は図6中の実線または破線の様な状態になっていると推定される。

測定点Cの場合、先頭車から約4両目にかけて(約1.0秒から2.2秒)流速は約5m/sから約35m/sに増加する。これは列車側面に発達する境界層の影響と推測される。その後、6,7両目にかけて5m/sまで減速するものの、再び増速、減速を繰り返す。測定点脇を通過時の流速と圧力の変動の周波数解析より、ピーク周波数は流速、圧力ともに約0.5Hz(図8(a)参照)と計算される。

トンネル中央側の流速(測定点A)は、トンネル壁側とは傾向が異なり、通過中は、流速はほぼ5m/s程度の大きさを保ち、風向は列車進行方向および逆方向に小刻みに変動する。このことから、列車側面の中央通路付近では列車進行方向に引きずられる流れと、その反対方向に逆流する

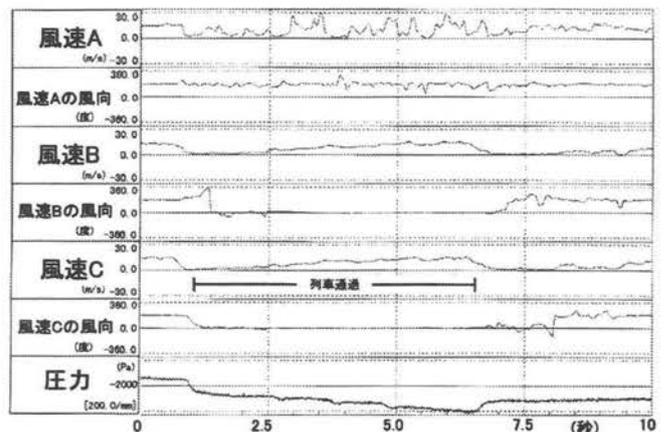


図 7 トンネル内通過時の風速・圧力(上り, 列車II)

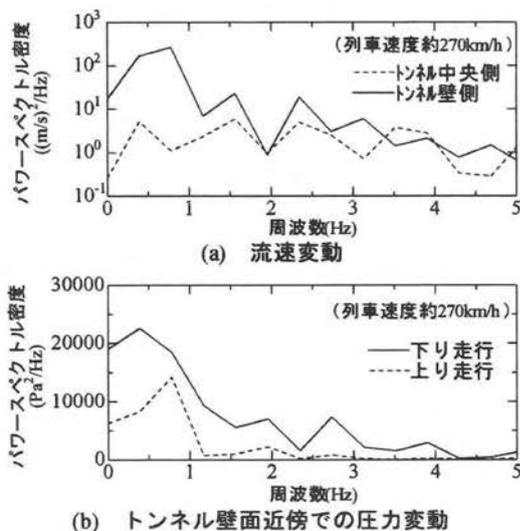


図 8 地上における列車Ⅱ通過時の周波数解析

流れが混在していると考えられる。ゆえに、トンネル中央側では対向線路の空間が存在するため、流速分布がトンネル壁側と異なることが分かる。これは、図 6 中で破線または点線の流速分布に対応する。なお、車上から見た流速(図 4)においても、中央通路側の方がトンネル壁側より速くなっている。

(2) 上り走行の場合

図 7 に、列車Ⅱの上り走行、測定点通過時の流速および圧力の時系列波形を示す。列車が測定点の脇を通過する際、圧力が減少する(約 0.9 秒から 6.7 秒の間)。なお、測定点 B, C は、下り走行時とは異なり、対向線路側のトンネル壁近傍のデータになることに注意されたい(図 2 参照)。

列車通過時、中央通路側(測定点 A)と対向線路側のトンネル壁付近(同 B, C)の流れの変化傾向は異なる。対向線路側のトンネル壁付近(同 B, C)では、先頭車通過直後に、風向は列車進行方向から逆方向に 180°変化し、0 m/s から徐々に増加し、後尾車近くでは 15 m/s 程度に達する。後尾車通過後、風向は列車進行方向に再び戻る。一方、中央通路側(同 A)では、風向はほぼ列車進行方向であり、流速が約 0 m から 30 m の間で小刻みに変動する。これは下り走行時とはやや異なるものの、図 6 中の破線または点線の流速分布の様に、列車側面の中央通路付近では列車進行方向に引きずられる流れとその反対方向に逆流する流れが存在すると推定される。中央通路側の測定点脇を通過中の流速と圧力の変動のピーク周波数は、圧力で約 0.8 Hz(図 8(b))であるものの流速では目立ったピークは存在しない(図 8(a))。車上測定においても中央通路側の圧力変動は、壁側よりも振幅が小さくかつ不規則²⁵⁾なことから、地上側でもそれらの傾向を示していると考えられる。

以上の結果から、地上測定点を列車が先頭から後尾にかけて通過する際、トンネル中央(対向線路)側の広い空間では、先頭車が通過直後、列車進行方向とは逆向きの流れが誘起され、徐々に逆流領域の流速が増加する流速分布(図

6 中で破線から点線へ)をとることが推定される。

3.3 車上と地上の測定データの比較

車両動揺の変動空気力を生み出す車両側面の圧力変動のピーク周波数 f は、列車速度が約 270 km/h (75 m/s) 時、図 3 に示す様に車上測定では約 2 Hz である²⁾。圧力変動は、車上から見て列車速度の約 80% で列車進行方向と逆向きに移動することが分かっている²⁵⁾。この場合、地上系ではその約 20% で列車進行方向へ移動すると考えられる。圧力変動の波長 λ は車上と地上のどちらから観測しても不変であることから、列車速度が 270 km/h の場合、次の換算式: $\lambda = 0.8 \times 75 / 2$ (車上系) = $0.2 \times 75 / f_g$ (地上系) が成り立つ。ここで f_g は地上から見た圧力変動のピーク周波数である。この式より $f_g = 0.5$ Hz と求まる。図 8(b) の地上測定(下り走行)結果よりトンネル壁面近傍での圧力変動のピーク周波数は 0.5 Hz 程度であり、この換算結果と一致する。さらに流速変動についても同様に換算可能である。以上より、車上で観測される圧力・流速の周期的変動は、地上においても観測されることが確認された。

4. まとめ

新幹線車両周りの流れを調べるため、車上(明かり区間およびトンネル区間)および地上(トンネル区間)において、流速と圧力を測定した。本測定により次の結果が得られた。(1) 列車とトンネル壁の間隙部の流速は、列車に固定した座標系から見た場合、列車先頭から後尾にかけて減少する、一方、対向線路側の部分では増加する。(2) トンネル区間において、車上で観測される流速と圧力の周期的な変動が地上でも観測される。

参考文献

- 1) 小澤 智: 高速列車の空気力学的諸問題, ながれ, 21, pp. 346-353, 2002.
- 2) Suzuki, M., et al.: Full-Scale Measurement and Numerical Simulation of Flow Around High-Speed Train in Tunnel, J. of Mechanical Systems for Transportation and Logistics, Vol. 1, No. 3, pp. 281-292, 2008.
- 3) 鈴木 昌弘・ほか 2 名: トンネル内走行中の高速列車に加わる変動空気力の低減対策法, 交通・物流部門大会講演論文集, Vol.2002, No.11, pp. 277-278, 2002.
- 4) Sakuma, Y., et al.: Dynamics of Trains and Train-Like Articulated Systems Travelling in Confined Fluid—Part 1 and Part 2, J. of Fluids and Structures, Vol. 24, No. 7, pp. 932-976, 2008.
- 5) Sakuma, Y., et al.: Measurement of Flow Around a High-Speed Train, Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Engineering Conference, pp. 177-180, 1998.
- 6) Hoerner, S. F.: Fluid-Dynamic Drag, Published by the Author, 1958.