

長大単線トンネル内の走行抵抗

[機] ○中根 秀起 (JR 西日本)

[機] 井関 一隆 (JR 西日本)

[機] 田中 秀昌 (JR 西日本)

[機] 安本 俊之 (JR 西日本)

[機] 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

An Investigation into Running Resistance of EMUs in Long Single Track Tunnels

Hideki NAKANE, Kazutaka IZEKI, Hidemasa TANAKA, Toshiyuki YASUMOTO

(West Japan Railway Co.)

Kazuhiko NAGASE (Kanazawa Institute of Technology)

West Japan Railway Co. 2-4-24, Shibata, Kita-ku, Osaka City, Osaka Pref.

Kanazawa Institute of Technology 7-1, Ohgigaoka, Nonoichi Town, Ishikawa County, Ishikawa Pref.

To investigate the running resistance dependency upon the train velocity and the tunnel cross section when trains pass through both of single and double track long tunnels, an experimental EMU was operated on Hokuriku Main Line, Hokuetsu Express Line, and Jouetsu Main Line. The train was composed 2 type of head end car, the one having a streamlined head, and the others having the gangway door. As the result of the investigation, the authors found that the result shows obvious dependency upon the velocity. On the speed around 130km/h, there were no obvious influence something like a cross section of the tunnel or figure of the head of the train besides the speed of the train, although we observed twice or four times of the usual standard value both at the single-track-tunnels and dual-track-tunnels.

Keywords: Long single track tunnel, Running resistance, Tunnel resistance

1. はじめに

弊社では特に運転操縦の面で科学的な側面からも適切な指導を行う観点から、今までその複雑さから経験工学的な暗黙知に依ることが多かった列車の運行に伴う物理的な諸現象について議論を行い、走行試験を含めた実態調査を行っている。

国鉄時代より在来線の運転時分査定に用いられているトンネル抵抗は、昭和 30 年代の測定結果より単線 2N/kN、複線 1N/kN を走行抵抗に付加している。

しかし、トンネル抵抗、とりわけ単線のトンネル抵抗は空気抵抗の問題であるにもかかわらず一定値を付加したものであり、かつ最高速度 95km/h の時代において運転速度 80km/h の領域で行われた測定結果に基づいたものである。¹⁾当時としてはこのような長大トンネルを高速で通過する事例は限られていることから、実用上の問題は些少であったものの、空気抵抗が主要素となる高速域の環境が十分考慮されているとは言い難い。

一方、明かり区間が殆どない地下鉄、超高速の新幹線では走行試験によりトンネル用の走行抵抗式を用いるのが一般的である。更に、海外でも理論的にトンネル形状も考慮した走行抵抗の解析を試みられている。²⁾

トンネル抵抗は北越急行の開業時における運行計画を策定する際にも議論されており、その時点では走行抵抗式を区別せず、10N/kN 程度のトンネル抵抗として付加することにより運転曲線図を作成している。³⁾

また、2000 年前後に金沢工業大学の永瀬教授を中心とし、精力的に各種の測定や考察が加えられ⁴⁾⁵⁾⁶⁾、トンネル内に信号場や駅を介した場合における対向列車との走

行関係による相互干渉なども報告された。⁷⁾

昨今、線形改良による抜本的な設備改良を検討する際において、長大トンネルによる短絡線の建設が一般化していることから、現状の運行計画策定時の前提と乖離が大きいと推察されるトンネル抵抗、とりわけ単線長大トンネルにおけるトンネル抵抗について、関係会社との理解と金沢工業大学の助言の元で測定した結果について報告する。

2. 計測対象について

2.1 計測対象区間

試験列車として、2010 年 2 月 8 日 (月) の営業時間帯に北陸本線金沢駅～越後湯沢間の特急「はくたか号」と同様の経路の臨時試験列車を一往復設定した。北陸本線は複線 (一部上下別線)、北越急行線は構内を除き単線である。単線と比較するため、複線トンネルについても測定を実施したが、線路条件で有効な測定点を取り難いため、北陸本線では殆どが複線トンネルの試験となった。

測定箇所の選定においては、他の抵抗要因を排除する意味から、測定区間で同一勾配であること、半径の小さい曲線が介在しないことに加え、設備図により、トンネル断面形状が編成長も加味した測定区間で極力変化しないことを確認している

また、ダイヤ構成上の工夫としては、トンネル内の信号所において対向列車との列車交換を行う場合において、2 列車の押し合い・引き合いによる特異な挙動を示すことが示されているが、今回の試験列車においては、列車交換は全て明かり区間で行う設定としている。

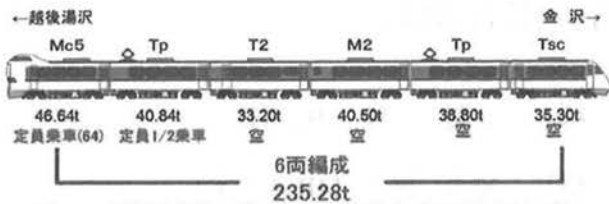


図 1：試験編成の構成（金沢総合車両所 681 系）

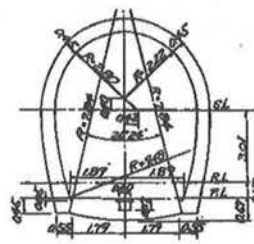


図 3 A単線1号型

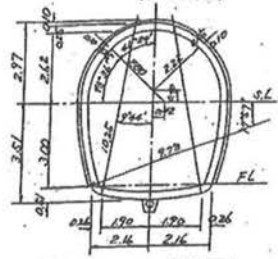


図 4 A1単線型

表 1 北越急行線内測定結果

断面	中間速度	勾配	前面	名称	トンネル抵抗
A	87.9	-5.0	貫通	HEA	4.55
A	92.3	5.0	貫通	HEA	4.87
A	125.4	-10.0	貫通	HEB	5.64
A	92.4	-13.0	非貫通	HEC	4.34
A	104.9	-10.0	非貫通	HIEC	6.16
A	117.5	10.0	非貫通	HED	7.20
A1	125.3	-3.0	貫通	HEE	6.55
A1	125.2	-12.0	貫通	HEF	9.11
A1	106.6	12.0	非貫通	HEF	5.45
A1	126.8	-3.0	非貫通	HEG	-0.24
A3	114.0	10.0	貫通	HHH	7.49
A3	154.2	-10.0	非貫通	HHH	10.17

(単位 中間速度:km/h, 勾配%, 抵抗 N/kN)

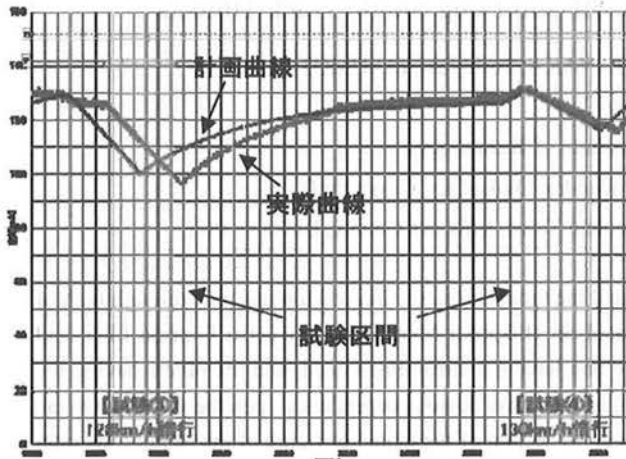


図 2：北越急行における走行試験曲線例（計画・実際）

2.2 計測対象車両

本研究は、金沢～越後湯沢間をほぼ線内において国内在来線最高速度の 160km/h（北陸本線内は最高速度 130km/h）で結ぶ金沢総合車両所所属の 681 系の基本編成（2M4T）を用いて行った（図 1）。前面形状は、往路（図 1 左側の越後湯沢方）が断面変化率の高い貫通運転台、復路（同図右側の金沢方）は断面変化率の低い非貫通運転台であり、異なる形状を有している。また、床下は豪雪区間を走行することから、着雪防止等のため平滑化構造となっている。

2.3 トンネル断面形状について

一般的にトンネル断面は馬蹄形であるが、北越急行内のトンネルでは難工事区間における TBM 工法等に起因する円形・卵形断面、土被が小さく開削工法を採用した区間では箱形断面を有している。また、トンネル内に存在する信号所等の駅部は副本線や駅設備のために複線トンネルに近い広い断面形状になっている。同一トンネル内に異なる工法が混在していることから、本試験においては、これらの断面形状の相違による影響を排除するため、測定中に同一の断面形状となるよう、試験箇所を慎重に選定した。

一般的傾向を得るため、試験を行ったトンネルは特殊な形状のトンネルを避け、A 単線 1 号型と、A1 単線型を選択した。A3 型トンネルの断面形状は壁面の厚みが異なるだけで、断面的には A1 単線型とほぼ同一である。

3. 走行抵抗推定の方法

3.1 計測装置

速度情報は、各運転方向の先頭となる台車の車軸に取り付けた運転台速度表示用の速度発電機からの速度情報（0.5 秒周期）を用いた。

3.2 実験方法・走行抵抗算出方

営業列車における走行抵抗の測定方法については、海外では定速保持をした動力車の出力から求める方法も提案されているが⁸⁾、今回の測定には一般的な惰行法（約 30 秒）を採用した。実際の測定曲線例を図 2 に示す。なお、計画曲線の作成にはトンネル抵抗を $9(N/kN)$ として計画した。

速度発電機から直接得られる速度情報には一定のばらつきが認められたため、初速・終速は、計測開始・終了点における測定値 6 点の平均を採用した。この初速・終速における走行抵抗を運転曲線図に用いている国鉄式により求め、速度差を計測時間で除して減速度を求め、減速力を算出した。

得られた減速力から測定区間内の平均走行抵抗と勾配補正を行い、トンネル抵抗部分のみを抽出した。

試験開始点における計画初速は、営業時間帯に走行する事から、30,80（北越急行内 90）,110,130,160km/h とした。

表 2 北陸本線内測定結果

単複	中間速度	勾配	前面	名称	トンネル抵抗
単線	30.3	-2.0	貫通	JWA	1.29
単線	70.2	6.0	貫通	JWA	-0.62
複線	23.7	9.0	貫通	JWB	-0.14
複線	26.4	9.0	貫通	JWB	-0.84
複線	24.9	9.0	貫通	JWB	-0.17
複線	25.5	7.0	非貫通	JWC	-1.00
複線	27.2	7.0	非貫通	JWC	-0.64
複線	33.0	-3.5	非貫通	JWC	-1.16
複線	77.0	-3.0	貫通	JWB	2.93
複線	80.7	-3.0	貫通	JWB	-0.42
複線	76.0	-2.0	貫通	JWD	-0.51
複線	73.8	-2.0	貫通	JWD	-0.68
複線	79.1	-7.0	非貫通	JWE	-0.70
複線	81.9	-3.0	非貫通	JWE	-0.81
複線	76.2	7.0	非貫通	JWC	-0.47
複線	114.7	7.0	貫通	JWF	0.67
複線	124.9	2.5	貫通	JWD	0.88
複線	124.8	2.5	貫通	JWD	1.31
複線	127.3	-2.0	貫通	JWD	2.88
複線	123.7	2.0	非貫通	JWD	3.15
複線	124.4	2.0	非貫通	JWD	2.46
複線	127.2	-2.5	非貫通	JWD	1.52
複線	127.8	-2.5	非貫通	JWD	1.88

(単位 中間速度:km/h, 勾配%, 抵抗 N/kN)

4. 長大トンネルにおける走行抵抗の結果と考察

4.1 単線長大トンネルにおける走行抵抗

北越急行区間における測定結果を表 3 に示す。また、プロットした結果を図 5 に示す。一部測定ミスと思われる結果も得られているが、速度に対してトンネル抵抗は概ね比例関係を示している。

なお、図 5 に示した北陸本線 JRA トンネルによる中間速度 70.2km/h でのトンネル抵抗値は 1.29N/kN であり、速度に対して一次関数的にトンネル抵抗成分が増大することがわかった。

同図においてトンネル断面形状による抵抗の違いを比較するために A 単線 1 型 (図 3) と A1 単線型 (図 4) を区別してプロットしたが、断面の差が小さいからか、測定結果として有意な差を認めることは出来なかった。

4.2 先頭形状における相違

越後湯沢側はお玉杓子形状の貫通運転台、金沢側は卵形形状の非貫通運転台で構成されている。

速度 115km/h 程度のトンネル抵抗成分は、非貫通運転台では 7.2 (N/kN)、貫通運転台では 7.5 (N/kN) の結果が得られており、同一トンネル形状では非貫通運転台の方が全般的に若干速度依存性自体は低い傾向にあった。しかしながら図 5 における測定結果の分散を考えると、絶対値は有意な差とまではいえない。

直感的には非貫通側が流線型に近く、前面抵抗が小さいと理解できる。しかしながら、非貫通運転台においても、その前面形状は 3 次元的な丸みがあるため、今回の測定条件下では前面から側面へと流れる過程で気流が剥離し、見かけ上の車両断面積が大きくなって走行抵抗が著大化する現象⁹⁾にまでは至っていないため、結果として有意な差とはならなかったと考えられる。

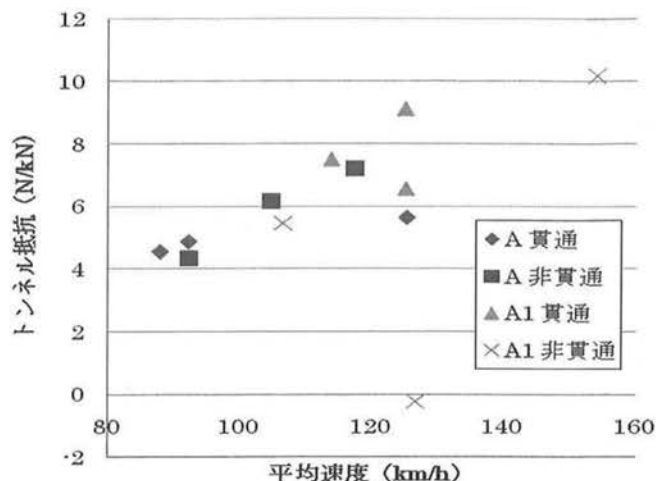


図 5 : 北越急行線単線トンネルのトンネル抵抗

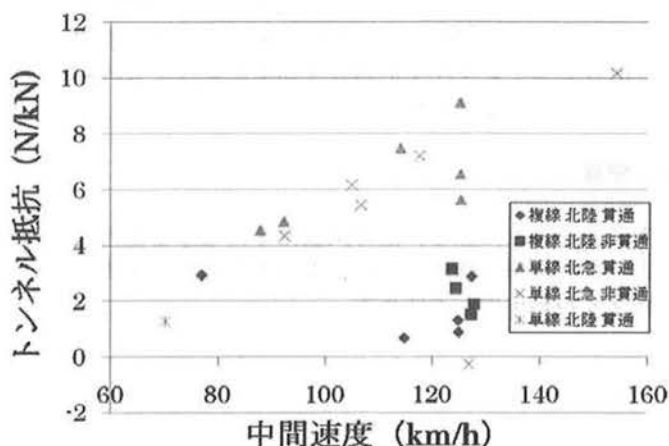


図 6 単線トンネルと複線トンネルとの走行抵抗比較

4.3 複線トンネルにおける走行抵抗

現状、複線トンネルの査定上の抵抗は 1N/kN としているが、単線トンネルほど顕著ではないにしろ、列車に対して完全な開放空間ではないことから高速における抵抗値は速度とともに増大することは容易に想像できることから、今回の走行試験で複線トンネルについても測定を行った。

測定結果を図 6 に示す。単線トンネルでの測定結果同様、結果にばらつきはあるものの、120km/h 超の高速域では抵抗値が速度に依存して増大していることがわかった。しかしながら、130km/h までの領域であれば 2~3 (N/kN) の値である。これを勾配換算にすると 2~3% 相当の抵抗であり、681 系の上り 10% 勾配における均衡速度が理論上 150km/h 程度であることを考えれば、運転時分査定においては現状のトンネル抵抗値でも、連続上り勾配を走行するといった特殊な条件を除き、致命的な問題とはなり難いと考えられる。

一方、表 4 において、中速域及び低速域においてトンネル抵抗成分が一律に負の値となっている。全面的に負の値となることは考えにくい、勾配との相関もなく、原因については現時点で推定する手がかりを得ることが出来なかった。

5. 結論

長大トンネル通過時の走行抵抗とトンネル断面及び車両前面形状等との関係を調べるために、681 系電車を北陸、北越急行及び上越線などを走行させて試験を行った結果、以下のようなことが分かった。

- 1) 単線トンネルにおけるトンネル抵抗は速度の上昇とともに直線的に増加し、155km/h 付近では 10N/kN 程度になると見られる。これは北越急行開業時の計画検討値と同等である。
- 2) 130km/h の速度域における走行抵抗について、車両前面形状の貫通・非貫通の相違による変化は認められなかった。
- 3) トンネル断面形状の違いによる走行抵抗の差異は今回の試験では認めることが出来なかった。

今後の課題として、開削区間の箱形断面及び TBM 工法による円形断面区間などでの走行抵抗の測定及び中間に信号所のあるトンネルで対向して列車が走行する時の抵抗の調査などが挙げられる。

6. 謝辞

本研究を行うに際し、走行試験に多大なるご協力を賜りました北越急行株式会社殿、東日本旅客鉄道株式会社殿に厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 鉄道車両の走行抵抗調査分科会：鉄道車両の走行抵抗, 日本機械学会誌, p98-108, 1964 Apr.
- 2) C.W.Pol C.W.Pole, R.H. Green : Analysis of train drag in various configurations of long tunnel, 3rd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Vol.1, p257 ~ 280 NDC 516.92-B, 19th-21st March 1979
- 3) 日本鉄道建設公団高速化研究会 編：三セク新線高速化の軌跡 (交通新聞社) , p169-174, 1998
- 4) 永瀬和彦, 平間淳司, 阿部剛, 田邊永吾, 上村哲司: 「単線長大トンネルを高速で走行する列車が受ける圧力変動」, J-Rail'99, S5b-4, pp295-298
- 5) 田邊永吾, 上村哲司, 徳田健, 平間淳司, 永瀬和彦: 「単線長大トンネルを高速で走行する列車が受ける走行抵抗」, J-Rail2000, No.1404, pp247-250
- 6) 田邊永吾, 上村哲司, 徳田健, 平間淳司, 永瀬和彦: 「単線長大トンネルを高速で走行する列車が受ける走行抵抗」, J-Rail2001, S1-4-1, pp749-752
- 7) 兵頭信彦, 吉田伸司, 嶽拓郎, 平間淳司, 永瀬和彦: 「内部に信号場のある長大単線トンネル内で離合する列車が受ける圧力変動—第 4 方 (最終報) 著大な圧力変動が起きる事例—」, J-Rail2007, S1-4-3, pp439-442-
- 8) Heinz Voegeli ; ENOTRAC AG. : Fahrwiderstände im Lötschberg-Basistunnel, Elektrische Bahnen vol.106 No.6 (2008-6) p260-271
- 9) 佐久間豊, 井門敦志, 林太郎: 「切妻型車両のトンネル突入時に発生する圧縮波の低減」, J-Rail2009, No2706, pp195-198