

1112 単線トンネルを高速走行する列車が受ける圧力変動

— 第 3 報 対向列車の運行状態が圧力変動に及ぼす影響 —

Fluctuation of Atmospheric Pressure in a Train Running in a Long, Single-Track Tunnel at High Speed - Influence of Operational Conditions of Train Running to the Opposite Direction upon Behavior of Atmospheric Pressure -

正 [機] ○中島 円 (金沢工業大学) 岸 裕 (JR 西日本) 学 [機] 大平 見彦 (金沢工業大学院)

準 [機] 不破 邦博 (JR 西日本) 学 [機] 笠原 純 (金沢工業大学院)

正 [機・電] 平間 淳司 (金沢工業大学) 正 [機・電] 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

Madoka NAKAJIMA, Kanazawa Institute of Technology 7-1 Ohgigaoka, Nonoichi, Ishikawa
Hiroshi KISHI, West Japan Railway Co.
Akihiko OHIRA, Kanazawa Institute of Technology
Kunihiro FUWA, West Japan Railway Co.
Jun KASAHARA, Junji HIRAMA, Kazuhiro NAGASE, Kanazawa Institute of Technology

The fluctuation of Atmospheric pressure of "Hakutaka", a limited express of JR, which is running in a long, single-track tunnel with a signal station at high speed is measured to investigate the influence of the shock wave generated when the opposite train rushes into the tunnel. As a result, it is clarified that the higher level fluctuation of the pressure is generated in the case that the train measuring a pressure receives the shock wave generated by the opposite train at the neighborhood area which the pressure wave reflected at the tunnel exit returns to the measuring train.

Keyword: Railway, Tunnel, Rolling-stock, Pressure Fluctuation, Shock wave,

1. はじめに

列車が高速でトンネルに突入する際に生じる気圧変動は、「耳つん」現象や車両機器箱の呼吸につながるため多くの研究や対策¹⁾が行われてきた。しかしながら、長い単線トンネルに列車が高速突入する際の気圧変動に関する報告、特にトンネル内部にある信号所で列車交換が行われる場合に生じる問題に関しての研究はあまり行われていない。著者らは J-Rail'99²⁾において単線長大トンネルを高速走行する列車は対向列車がトンネル突入する際に生じる衝撃波の影響を大きく受けること、信号所で対向列車と交換した後、両列車間にいわゆる「ひきあい現象」が生じて車内気圧が顕著に低下することを明らかにした。また、J-Rail'02³⁾において、単線長大トンネル内で交換する2列車のうちの一方の列車で得られた測定結果から相手方列車の挙動を調査する方法を提案し、この方法を用いて「ひきあい現象」の詳細を明らかにした。

本研究では、北越北線の単線長大トンネル内にある信号所で交換が行われる列車について、対向列車がトンネル突入時に形成する衝撃波の影響を調べた。同線最長の長さ 10.9km の赤倉トンネル内赤倉信号所で列車交換が行われる金沢行下り「はくたか」4号に注目し、対向列車である「はくたか」3号の運転状況に応じ「はくたか」4号が受ける気圧変動の詳細を明らかにする。

2. 測定装置

実験装置は先の J-Rail'02 で報告したものと同一である。

実験に使用した JR 標準形 485 系 8 両編成の M' 車 4 号車客室内自動扉上部には、絶対気圧を測定するコパル電子製の気圧センサを取り付けた。なお、この編成の車体は機密構造となっていない。センサの測定範囲は 0~1200hPa であり、測定サンプリング時間は 1.2s である。昼間のトンネル在線状況を検知するために可視領域の光のみに反応するセンサを 4 号車車販準備室の明かり窓付近に設置した。

3. 調査方法

3.1 調査対象線区のトンネル構造と運行列車

本研究の調査対象トンネルである赤倉トンネルの構造概況を図 1 に示す。トンネル断面は複雑に変化し、途中複線断面となる信号所と交換設備はないがトンネル断面が複線になっている美佐島駅が存在する。

調査期間は 2001 年 5 月 1 日~2001 年 10 月 31 日とした。

3.2 列車の運行状況

「はくたか」4号と「はくたか」3号の双方の列車は共に信号所で停車して列車交換を行う。ダイヤ上で先に赤倉トンネルに突入するのは「はくたか」4号で、遅れて「はくたか」3号がトンネルに突入する。始発駅の越後湯沢からトンネルまでの距離に近い「はくたか」4号はほぼ定時にトンネルに突入する。しかし、始発駅の金沢からトンネルまでの間に長距離走行する「はくたか」3号は遅延によって突入時刻が若干変動する場合がある。十日町方のトンネル入口には 90km/h の曲線速度制限があるため、トンネル突入速度はほぼ一定である。

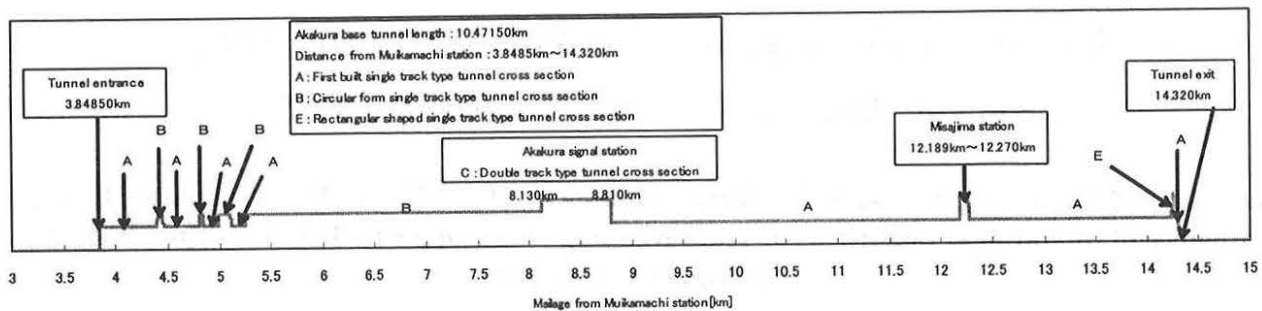


Fig.1 Schematic sketch of cross-section area of Akakura Tunnel

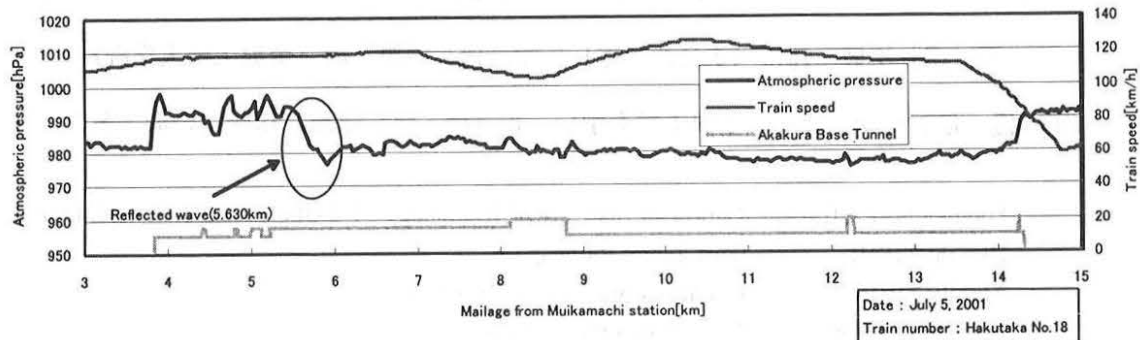


Fig.2 Running curve and behavior of atmospheric pressure of Ltd. Express "Hakutaka No.18" running in Akakura Tunnel (July 5, 2001)

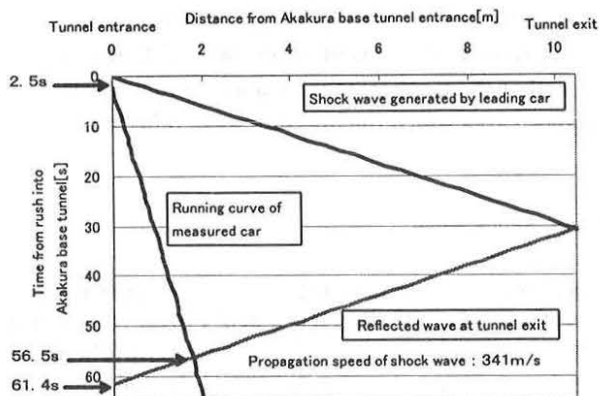


Fig.3 Shock wave propagation diagram

3.3 衝撃波と反射波の到達地点の定義

対向列車がトンネル突入時に引き起こした衝撃波にトンネル内に在線している列車（以下「先行列車」という）が遭遇する地点（以下「到達地点」という）は、衝撃波の挙動を解析するに際して重要なポイントになる。先行列車内に急激な圧力上昇が起こる直前の地点を当該地点と見做した。衝撃波が反対側出口に到達し、この部分を開口部と見做し、ここで反射して生じた圧力波（以下「反射波」という）に先行列車が遭遇する地点は急激な圧力低下が起こる直前の地点とした。また、先行列車が衝撃波に遭遇したことによって受ける圧力上昇値は、衝撃波に遭遇した地点の値と衝撃波の最高圧力との差とし、反射波に遭遇したことによる圧力低下値は、衝撃波の最高圧力と急激に圧力低下した後の最小値の差とした。

3.4 衝撃波伝播時間の計算

「トンネル内気温の外気温依存性」、「トンネル内の列車風」及び「空気密度の変化」は無視できると見做し、衝撃波の伝播速度を 341m/s とし、伝播にかかる時間を算出し

た。

4. 測定結果および考察

4.1 単線長大トンネルを列車交換せずに通過する時の気圧変動

図2は金沢行「はくたか」18号が図中に示す日時に対向列車と交換せずに赤倉トンネルを走り抜けた時の車内気圧変動を示す。図の横軸はキロ程にトンネル位置を併記し、縦軸は列車速度と車内の気圧を示す。図3は「はくたか号」がトンネル突入時に生成させた「衝撃波」及び衝撃波が十日町方トンネル出口で反射して起きた「圧力波」（以下「反射波」という）のトンネル内伝播の状況並びに圧力計の設置位置を基準とした「はくたか」の運行状況を示す。電車に搭載された気圧計は前から4両目の最後部（前頭から約80m後方）に取り付けられているので、衝撃波が発生した地点と電車がトンネルに突入した時点との間には図示のような遅れがある。

図3から電車が反射波に遭遇する地点はトンネル入口1.78km（六日町起点5.63km）の地点となる。一方、この地点の気圧変動の挙動をみると、顕著な圧力の低下が起きており、この現象は反射波によるものであると判断される。この反射波を受ける以前においても、気圧の低下上昇が繰り返し見られるが、その解析は今後の課題である。

4.2 トンネル内部の信号所停車中に対向列車から受ける衝撃波

列車突入時に形成される衝撃波については新幹線に関して多くの研究が行われている。しかし、在来線の単線トンネルで発生する衝撃波をトンネル内に在線する先行列車が受ける事例についての研究は見当たらない。とは言っても、衝撃波とその周辺の気圧変動をトンネル内で静圧で測定することは実際には容易ではない。今回の研究では幸いにして、このデータを繰り返し測定することが出来た。「はくたか」4号はほとんどの場合走行中に対向列車の衝撃波を受けるが、時折、信号所停車中に衝撃波を受ける場合がある。この場合、トンネル壁面と車体外板の間の気流は先行列車

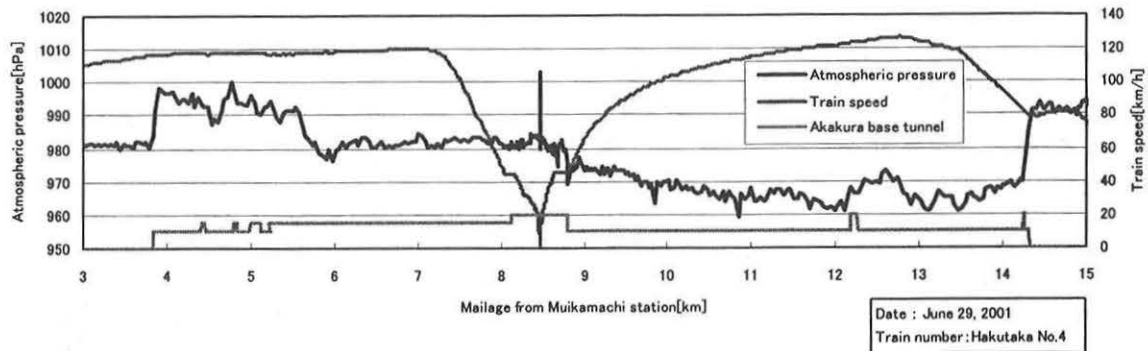


Fig.4 Running curve and behavior of atmospheric pressure of Ltd. Express "Hakutaka No.4" running in Akakura Tunnel (June 29, 2001)

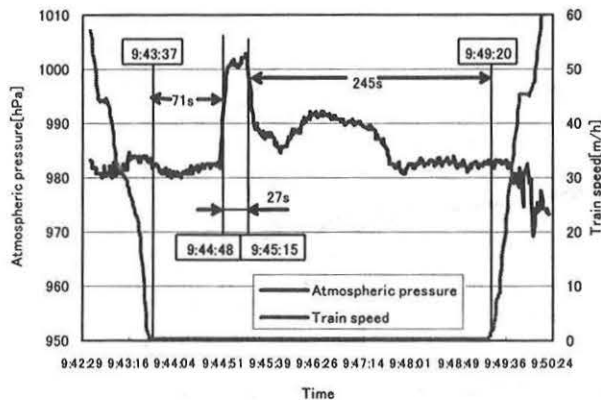


Fig.5 Running curve and behavior of shock wave observed at signal station

の列車風の残余効果があったとしても、信号所構内は単線トンネル断面の約2倍の断面を持つ広い複線断面であるため、その影響は少なく、車内で居ながらに静圧に近い状態の衝撃波を測定していると推定される。図4にこのような事例の結果を示す。図4は図示の日時に「はくたか」4号が受けた気圧変動と速度の変化を示す。

信号所停車時において気圧の大きな変化が見られたため、図4の結果について赤倉信号所停車時の気圧変動の時間変化を調べたものが図5で、横軸は時間、縦軸は気圧変動値を示す。時刻9:44:49に約20hPaの圧力の急激な上昇が見られるが、これは「はくたか」3号が十日町方入口に突入した時に形成された衝撃波が信号所停車中の列車に伝播した時点と判断した。根拠となる第一の理由は、トンネル内で列車交換しない状態で運転される列車が受ける大きな気圧変動は図2に示すように自車が引き起こした衝撃波の反射波だけで、これ以外に顕著な圧力変動は観測していない。第二の理由は、図5に示す圧力波を受けてから272秒後の時刻9:49:20に「はくたか」4号は恐らくは「はくたか」3号の到着を受けて同信号所を発車している。4号が高い圧力波を受けてから信号所を発車するまでの経過時間272秒に衝撃波が到達するまでの時間17秒を足した値は、3号が通常の運転状態で赤倉トンネルに突入し、赤倉信号所に停車し、そして、発車するまでの経過時間とほぼ等しいからである。なお、当日以外にも4号が信号所停車中に大きな気圧変動を記録した日があり、その時の圧力波形は全て図5とほぼ同様であった。

図5に示す衝撃波は9:45:15に急激に約13hPa程度低下している。衝撃波が信号所から六日町方入口で反射して同じ位置まで戻ってくる所要時間は約27秒で、この時点は圧力上昇から低下開始までの経過時間27秒と一致している。よ

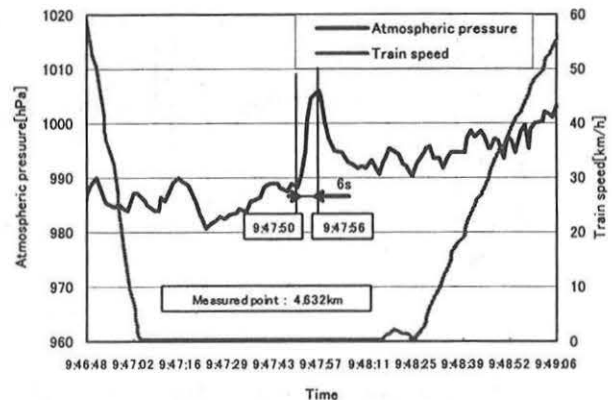


Fig.6 Running curve and behavior of shock wave observed in temporary stalling train

って、この急激な気圧の減少は「はくたか」3号が生成した衝撃波が六日町方出口で反射して膨張波が形成され、これが到達したことにより起きたと判断した。

4.3 トンネル内に臨時停車した際に遭遇した衝撃波の挙動

図6は赤倉トンネル六日町方入口と信号所との中間地点の六日町起点4km632mの地点に「はくたか」4号が臨時に停車した際に、対抗列車により生成された衝撃波を受けたときの気圧の時間変化を示す。時刻9:47:50に信号所停車中で遭遇したと同じような約18hPaの急激な気圧上昇が起きた。さらに、その7秒後の9:47:56には、同じ列車が別の日に赤倉信号所停車中で遭遇した図5に示すと同じような約11hPaに及ぶ圧力低下現象が起きている。圧力低下の現象は衝撃波がトンネル六日町方の入口で反射して膨張波となって列車が停止した地点に到達した時点で起きた現象と判断した。と言うのは、高圧力持続時間と衝撃波及び反射波が列車停止地点とトンネル入口との間を往復伝播するに要する時間がほぼ一致するからである。

4.4 衝撃波と反射波との重畳による顕著な気圧変動の発生

図7及び図8に先行列車である「はくたか」4号が図示の日時にトンネル内を走行中に衝撃波を受けた場合の気圧変動と速度の変化を示す。図7は六日町起点約5.4kmで、図8はよりトンネル内方の約5.9kmで衝撃波を得たデータを示す。図7の上昇値は約19hPaであるのに対し、図8に示す値は約31hPaと極めて大きい。信号所停車中又はトンネル内で臨時停車した際に受けた衝撃波を静圧に近い状態で観測した圧力上昇値はいずれも約20hPaであった。これと比較しても値が極めて大きい。その原因を調べるために図3に示す「はくたか」4号反射波の伝播状況と同じ図を作成した。その結果、図8の圧力変動データは自車が生成した衝撃波の反射波に遭遇して気圧が低下した直後に、「はく

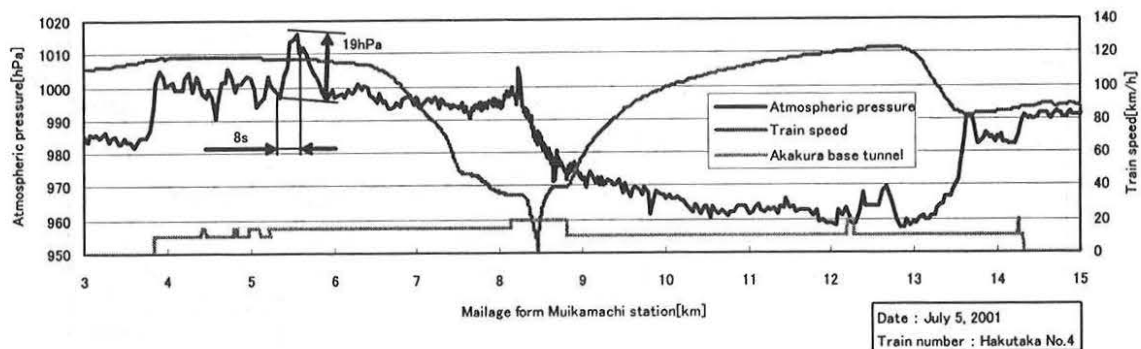


Fig.7 Running curve and behavior of atmospheric pressure of Ltd. Express "Hakutaka No.4" running in Akakura Tunnel (July 5, 2001)

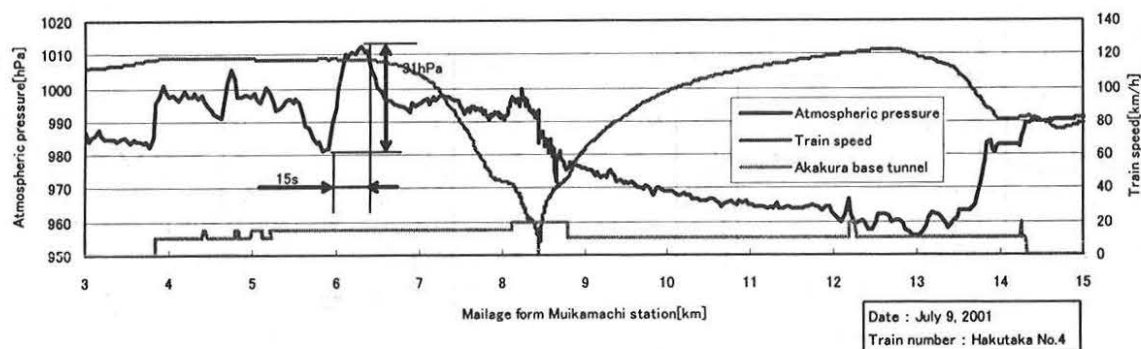


Fig.8 Running curve and behavior of atmospheric pressure of Ltd. Express "Hakutaka No.4" running in Akakura Tunnel (July 9, 2001)

たか」3号の衝撃波を受けて大きな圧力差が計測されたものと判断した。他日の測定データを調べたところ、「はくたか」4号のほとんどはキロ程 5.7km 付近で自車が起こした反射波に遭遇しており、この地点付近で重ねて「はくたか」3号の衝撃波に遭遇すると、双方の圧力波が重畳して顕著な圧力変動が起こる可能性があることがわかった。

4.5 車内で測定した衝撃波の評価

前節で述べた図 7 に示す衝撃波による圧力上昇値は電車が赤倉信号所及び 4.6km 付近で停車中に受けた衝撃波の値と大きく変わらない。このことは、単線トンネルを高速走行中の電車客室内で計測する圧力はこの形式(485系)で組成される「はくたか号」に限っては、停車中に車内で計測する値とほぼ同じ値を計測できること、さらに、その値はトンネル内に設置したセンサで得られる静圧値とも大きくかわらない可能性を示唆している。さらに、図 6 に示す 4.6km 付近に臨時停車した際に得た衝撃波の値と、赤倉信号所停止中に得た値とはほぼ同じであることを踏まえると、この二地点間の距離約 3.8km の間のトンネル内を伝播することによる衝撃波の減衰は大きくないと推定される。

5. 結論

JR標準形 485 系 8 両で組成された「はくたか号」の 4 号車客室内自動扉上部に設置された気圧センサを用いて、列車交換のための信号所がある長さ 10.9 km の赤倉トンネルを走行中の車内気圧変動を長期間測定した結果、以下のようなことがわかった。

(1) トンネル断面が多様に変化する長大単線トンネルに列車が高速で突入した際に形成される衝撃波がトンネル内部を伝播する挙動などを調べた結果、反射波の主体は反対側入口で反射して形成される圧力波であって、トンネル内信号所などのトンネル断面の急激な拡大部分で形成される反

射波の成分は大きな値となっていないことを確認した。

(2) トンネル内の信号所で列車の交換が行われる場合、先に突入した列車は対向列車がトンネル突入時に形成する衝撃波およびその反射波に遭遇した時点で車内圧力が急激に変化する。

(3) 自車が形成した衝撃波の反射波に遭遇する地点付近で対向列車が形成した衝撃波に重ねて遭遇すると、双方の圧力波が重畳して顕著な圧力変動が起こる場合がある。

(4) 車内が気密構造となっていない 485 系電車の場合は、高速走行中の電車客室内で測定する圧力波の変動値と停車中に車内で測定する圧力波の変動値はほぼ同じであることを確認した。

(5) 485 系車両客室内で測定した気圧は、トンネル内に設置したセンサで得られる静圧値と大きく変わらない可能性がある。

(6) 単線トンネル内部に形成された圧力波が数キロ程度の距離を伝播する間に減衰する割合については、赤倉トンネルでみる限りは大きくはない。

参考文献

- 1) 小林實、鈴木康文、阿久津勝則、小澤智：新幹線列車トンネル走行時の車外・車内圧力変動解析、機論 B 編 61 巻 591 号、pp.40544060、1995
- 2) 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、pp295-298、1999.
- 3) 笠原純、田邊永吾、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圧力変動、J-Rail'02、pp.295-298、2002.