

入駅及び速度制限区間通過時の 適正なブレーキ扱による列車遅延防止法

第1報 入駅時のブレーキ扱が運転時分に及ぼす影響

別所 雅章* 生田 憲人 浅井 浩史
林 太郎 (西日本旅客鉄道) 永瀬和彦 (金沢工業大学)

Skillful Train Deceleration to Keep On-time Performance
—The 1st report, Brake Handling on the Approach of Stations—

Masaaki Bessho*, Norihito Ikuta, Hiroshi Asai

Taro Hayasi (West Japan Railways Co.), Kazuhiko Nagase (Kanazawa Institute of Technology)

The crudely brake handling on the approach of stations is said to seriously affect the on-time performance, however, the method to quantitatively evaluate the driver's skill has not established yet. To investigate the brake handling skill, an event recorder was installed to a JR West narrow gauge Ltd express EMU. At the same time, data accumulated in the recorder of the ATP of the EMUs operated on the same line were investigated. Using newly proposed evaluation method, the drivers' skill was evaluated. As the result of investigations, the authors found that the on-time performance deterioration was caused by the inappropriate train decelerate at low speed range.

キーワード：鉄道, 輸送, 列車, 運転, ブレーキ

(Keywords, Railway, transportation, train, train operation, braking)

1. はじめに

乗務員の技量が性能に支配的な影響を及ぼす蒸気機関車とは異なって、定量的な性能が常時期待できる電車やディーゼル動車のような近代車両では、運転士の技量によって運転時分や消費電力に大きな差が出るのは急勾配と急曲線とが連続する急峻な山岳線区などの特別な区間に限られる。このため、通常の線区で運転操縦技量の差異が列車の運行に影響を及ぼすような場面は限定され、その多くは入駅及び速度制限区間通過時のブレーキ操作に限られる。しかし、このような区間でのブレーキ操作に関わる技量を定量評価する手法は確立されておらず、さらに、技量の差異が運転時分に及ぼす影響なども明らかではなかった。

筆者等はこれらのブレーキ扱が運転時分に及ぼす影響を調べ、更にブレーキ操作の良否を定量評価する新たな手法を提案した。さらに、提案した手法を用い特定区間で実際に在来線特急列車のブレーキ操作の定量評価を行うとともに、この手法で評価した結果と運転時分との関係をも調べた。その結果、この手法を用いることによってブレーキ操

作の良否をある程度、定量評価できることが分かった。さらに、ブレーキ操作の評価と運転時分との間には密接な関係があることも明らかにした。本報では入駅時のブレーキ扱評価法を提案するとともに、当該手法に基づいて特定駅入駅時の運転操縦法を評価した結果について概説する。

2. 在来線における停止ブレーキ扱と問題点

在来線における駅停車時のブレーキ扱は鉄道、線区及び運転士などによって多様に異なっている。多くの鉄道では運転時分を査定するに際し減速度 β を一定と見做す方法を採用しており、 β は概ね $2.0 \sim 3.5(\text{km/h})/\text{s}$ 程度の値となっている。一方、実際の操縦では制輪子摩擦係数の速度依存性及び車両間のブレーキ力不均衡に起因する衝動の発生を防止するために「1段ブレーキ、複数段緩め」が慫慂されている。しかし、階段緩めの回数、緩めを行う速度及びブレーキ力減減の割合は運転士の裁量に委ねられている。このため、実際のブレーキ操作は線路の状態、入駅速度、車両形式、編成両数、乗車効率、天候及び衝撃発生状況などを勘案しながら全て運転士の判断で行われているのが実情で

ある。

このように多数の因子が関与する停止ブレーキ操作について、その良否を定量評価しようとするれば必然的に「停止位置目標へ合致したか」、「運転時分をクリアしたか」が主体となり、操縦実務の審査などが行われる場合に限っては停止時の衝動発生状況等などが付加されているに過ぎない。しかし、停止ブレーキは減速度及び階段緩め速度の僅かな差異が直ちに数秒程度の運転時間の増減に結びつくため、駅間が短い大都市圏の普通電車ではブレーキ扱の良否によって 1 仕業又は 1 運行の間で数分の差異が生ずる場合がある。

このように衝動の発生防止に留意しつつ基準運転時分をクリアするために本来あるべき停車ブレーキ操作について、査定減速度 β に対しどの程度ブレーキを上乗せすべきかなどの解析に基づく定量的な指導法は確立されていない。このため、蒸気機関車の時代に比べて格段に性能が向上した近代車両に対し今でも運転操縦指導は、蒸気機関車の時代と同じような徒弟制度の下で行われているのが実情である。

3. 停止ブレーキ操作の評価方法

(3・1) 望ましいブレーキ扱

優れた停止ブレーキ扱の一般的要件は「停止位置目標(以下「目標」という)に一致する」、「衝動がない」、「運転時分を超えない」、「車輪が滑走しない」、「省エネ運転の趣旨に沿っている」であろう。これに沿った具体的運転方法は、車輪が滑走せず、しかも、乗り心地を害しない範囲内で出来るだけ強いブレーキを衝動が起きないように速やかに立ち上げ、衝動発生の可能性がある編成では途中で速度や勾配変化などに応じ最小限の階段ユルメを実施し、停止直前に衝動の起きない範囲でなるべく急激にブレーキを緩めて目標に一致させる方法ということになる。

一方、改善が臨まれる運転の様態は多様であるが、一般的には目標合わせに拘るあまり、早めにブレーキをとって減速度や入駅速度も低めに抑え、停止直前には更に減速度を下げて位置合わせを行うのが典型的なパターンであろう。

(3・2) 停止ブレーキ操縦のモデル

前述の巧みな又は改善が臨まれる停止ブレーキ扱をモデル化して定量的に表した一例を図 1 に示す。

図は列車が駅の「制動開始点」付近から目標に停止するまでの間の運転状況を示し、横軸は距離、縦軸は速度である。図中の「標準運転」は標準運転時の減速開始点(以下「減速開始点」という)から初速 V_1 、標準減速度 β_1 (以下減速度は省略)による一段ブレーキを用い、ブレーキ距離 L_1 で目標に到達した運転曲線、「巧みな運転」は減速開始点を過ぎ、目標外方 L_3 地点で β_1 より高い β_2 で初期の減速を開始し、目標外方 L_2 地点で速度 V_2 の時に衝動防止等のため階段ユルメを実施して減速度を β_3 に下げて目標に停車した運転曲線、「改善が臨まれる運転」は減速開始点外方から

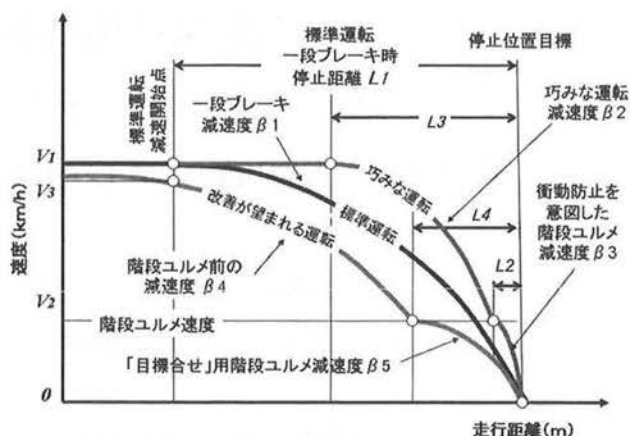


図 1 停止ブレーキの定量評価用モデルの例

β_1 より低い β_4 で初期の減速を開始し、前記地点を V_3 で通過し、目標外方 L_4 の地点で更にブレーキを緩めて β_5 で目標合わせを行った運転曲線を示す。なお、実際の運転では衝動防止のために停止間際に大幅な階段ユルメを実施している例が多いが、最近の電気指令ブレーキの応答性は極めて優れ、その値は多くの場合 0.7~0.9s 程度であり、このような階段ユルメが運転曲線に及ぼす影響は無視できるものとした。

(3・2) ブレーキ扱の差異による運転時分の変化

前記の操縦の差異が時分に及ぼす影響を考察する。

標準運転時の減速開始点から目標までの運転時分を t_1 、巧みな運転を行った時の同じ時間を t_2 、両時分の差異を T_1 とすれば、

$$T_1 = t_1 - t_2$$

$$t_2 = \frac{L_1 - L_3}{V_1} + \frac{V_1 - V_2}{\beta_2} + \frac{V_2}{\beta_3}$$

$$\text{一方、} L_3 = \frac{V_1^2 - V_2^2}{7.2 \beta_2} + \frac{V_2^2}{7.2 \beta_3} \quad \text{なので}$$

$$t_2 = \frac{3.6}{V_1} \left(\frac{V_1^2}{7.2 \beta_1} - \frac{V_1^2 - V_2^2}{7.2 \beta_2} - \frac{V_2^2}{7.2 \beta_3} \right) + \frac{V_1 - V_2}{\beta_2} + \frac{V_2}{\beta_3}$$

よって、

$$T_1 = t_1 - t_2$$

$$= \frac{V_1}{\beta_1} - \frac{3.6}{V_1} \left(\frac{V_1^2}{7.2 \beta_1} - \frac{V_1^2 - V_2^2}{7.2 \beta_2} - \frac{V_2^2}{7.2 \beta_3} \right) - \left(\frac{V_1 - V_2}{\beta_2} + \frac{V_2}{\beta_3} \right)$$

となる。

次に、改善が臨まれる運転を行った時の同じ時間を t_3 、標準運転との差異を T_2 とすれば、

$$T_2 = t_3 - t_1$$

$$t_3 = \frac{V_3 - V_2}{\beta_4} + \frac{V_2}{\beta_3}$$

所定運転での停止距離 L_1 は

$$L_1 = \left(\frac{V_1^2 - V_2^2}{7.2 \beta_1} \right) + \frac{V_2^2}{7.2 \beta_3}$$

減速開始点を稚拙な運転で進入した速度 V_3 は

$$V_3^2 = 7.2 \beta_4 \left(L_1 - \frac{V_2^2}{7.2 \beta_3} \right) + V_2^2$$

よって V_3 は

$$V_3 = \sqrt{7.2\beta_4(L_1 - \frac{V_2^2}{7.2\beta_5}) + V_2^2}$$

よって t_3 は

$$t_3 = \frac{1}{\beta_4} \left(\sqrt{7.2\beta_4(L_1 - \frac{V_2^2}{7.2\beta_5}) + V_2^2} - V_2 \right) + \frac{V_2}{\beta_5}$$

従って、増加した運転時分 T_2 は

$$T_2 = \frac{1}{\beta_4} \left(\sqrt{7.2\beta_4(L_1 - \frac{V_2^2}{7.2\beta_5}) + V_2^2} - V_2 \right) + \frac{V_2}{\beta_5} - t_1$$

となる。

(3.3) 停止ブレーキ操縦のモデル

以上の理論式に実際の運転に沿った諸数値を導入し、ブレーキ扱の差異に応じた運転時分の変化を試算した結果を次に示す。

図2は巧みな運転実施時の試算例で、ブレーキ初速度 V_3 は図示の如く 80km/h、初期減速度 $\beta_2 = 3.0(\text{km/h/s})$ (以下、原則として減速度の単位を省略し数値のみ記載する)、階段ユルメを図示のように $V_2 = 5 \sim 25\text{km/h}$ の速度域で $\beta_3 = 1.0 \sim 3.0$ の間で実施した場合、標準運転時間 t_1 に対しての運転時分の増減を示す。階段ユルメなし(一段ブレーキ)で停止した場合は標準運転に対し 2.5s 短縮される。しかし、階段ユルメによる減速度 β_3 を 2.0 より低い値で実施し、ユルメ速度を 18km/h 以上とした場合には、運転時分は標準運転のそれより増加する。さらに、減速度 $\beta_3 = 1.00$ 程度の極めて弱いブレーキによる階段ユルメを 5km/h 程度の低い速度域で行った場合も、運転時分は標準運転より増加する。従って、初期減速度を高くにとって入駅しても、高い速度域で階段ユルメを行うか又は低速域で大幅にブレーキを緩めると、運転時分は標準運転より増加することがわかる。

多くの現場で衝動防止等の観点から比較的高速域での階段ユルメが行われているが、このような事実を踏まえれば、衝動防止と運転時分確保との間で調和のとれた階段ユルメの手法を研究する必要がある。

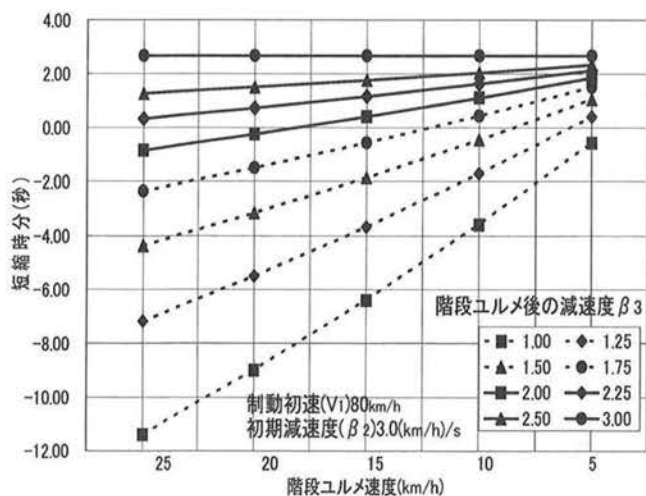


図2 巧みな運転実施時の運転時分変化の例

—ブレーキ初速 80km/h, $\beta_2 = 3.0$ で入駅後、多様な速度域で多様な階段ユルメを実施した場合の運転時分増減—

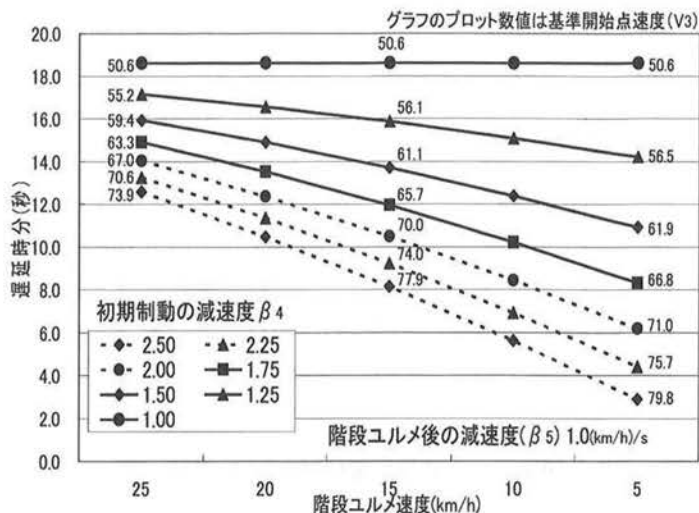


図3 改善が臨まれる運転実施時の運転時分変化の例

—初期減速度が低いブレーキで入駅後、目標合わせのために大幅な階段ユルメを行って減速度を低下させた場合の階段ユルメ実施速度と運転時分増との関係を示す—

図3は初期減速度が低いブレーキで入駅後、目標合わせのために大幅な階段ユルメを行って減速度を低下させる改善が望まれる運転実施時の試算例で図中に示すように減速開始点の外方で初期減速度 $\beta_4 = 2.5 \sim 1.0$ の間で多様に変化させ、さらに、目標外方 L_4 の地点で極端に弱い階段ユルメブレーキ(減速度 $\beta_5 = 1.0$)をとって目標合わせを行った場合、階段ユルメを行った速度 V_2 に応じた遅延時分の変化を示す。図中には減速開始点における速度 V_3 が併記されている。図示のように初期減速度 β_4 が低く、階段ユルメ速度 V_2 が高いと列車は大幅に遅延することがわかる。

4. 本線上での評価の実施

(4.1) 調査などの方法

以上の結果を踏まえ、実際の列車について入駅時ブレーキ扱の定量評価を行った。調査線区、地点、調査対象列車の種別及び編成並びに調査実施時期などは以下の通りである。現場はほぼ平坦で場内信号機付近に交通量の多い多数の踏切が存在し、さらに、分岐器もあって降雨時には滑走が起き易い地点でもある。

- 調査線区 北陸本線
- 調査地点 高岡駅(米原起点 226k460m)
- 調査列車 特急「はくたか12号」越後湯沢発金沢行 681系9両編成(3M6T)
(最高速度 130km/h 電気指令式ブレーキ装置)
- 調査期間 2010.9.14・15・17～19・21

(4.2) 調査結果と考察

図4には上記列車の運転記録装置から取得した情報例を列車速度を縦軸に、横軸を移動距離として示す。この図はブレーキ扱いモデルの「巧みな運転」に属するものであり、「減速開始点」よりも内方へ進入し、 $V_1 = 84\text{km/h}$ で β_2 は β_1 よりも大きな 3.13 で制動開始、 $V_2 = 50\text{km/h}$ から2段の

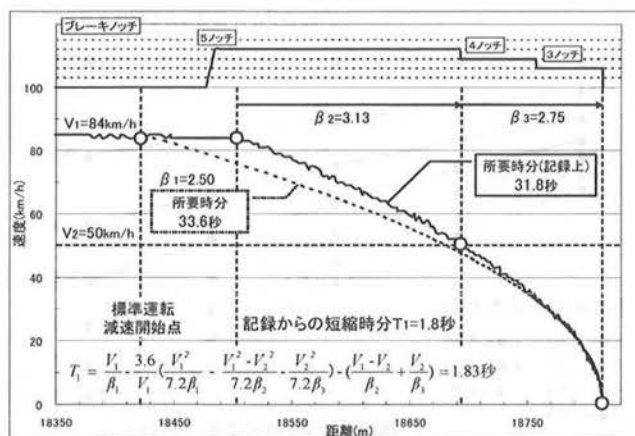


図4 巧みな運転による時間短縮(2009.9.18 天候：晴)

階段ユルメで目標に停止させている。

「減速開始点」から停止位置までの所要減速時分を記録から計測すると 31.8 秒であり、基準所要制動時分である 33.6 秒より 1.8 秒の時間短縮となっている。

一方、運転記録から各数値を割り出し、前述の「巧みな運転」による短縮時間を算出する理論式に代入すると 1.83 秒の短縮結果となり両値は一致し、ブレーキ扱いを定量的に現すことができた。(理論式は階段ユルメ1段の理論式であるため、階段ユルメ後の減速度 β_3 は1段目の階段ユルメから停止するまでの平均減速度をデータから割り出し代入している。)

この図例では $V_2=50\text{km/h}$ とかなり高い速度で1回目の階段ユルメを行っているが、小幅な階段ユルメにより停止に至るまで $\beta_1=2.5$ を上回る減速度を維持したことから時間短縮となったことが解ると同時に V_2 が更に低ければ更なる時間短縮が期待できる。

図5は「改善が臨まれる運転」モデルであるが、調査期間中のデータには該当例がなく、2006年に金沢工業大学で調査したデータ^①を参照したが、ブレーキ扱いモデルに該当するような基準減速度以下で制動開始、更に階段ユルメで目標合わせ行うデータは得られなかったため、それに近似したデータを用いて作図を行った。

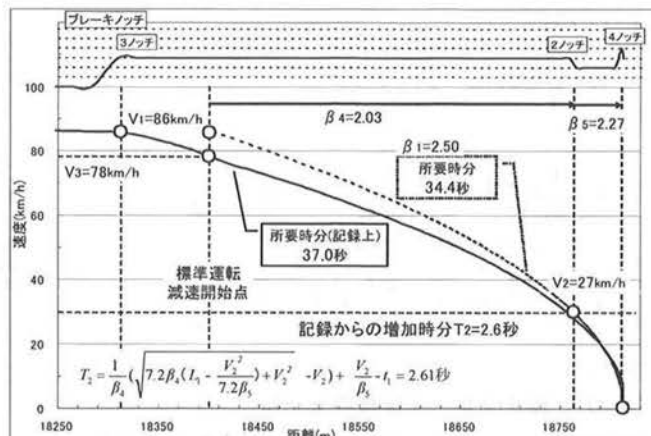
同図では「減速開始点」の外方から $V_1=86\text{km/h}$ で β_4 は β_1 よりも小さな 2.03 で制動開始、 $V_2=27\text{km/h}$ から階段ユルメと追加ブレーキで目標に停止させている。

「巧みな運転」同様に行った分析結果は基準所要制動時分に対し記録上では 2.6 秒、理論式においても 2.61 秒とこのモデルにおいても両値が一致することが確認できた。

「巧みな運転」と「改善が臨まれる運転」との両者の時間差は 4.4 秒であり時間の蓄積である列車運転においては停車毎にその差は増大して行くため、「改善が臨まれる運転」を行う運転士には理論等に基づく制動開始位置決定方法等の遅延増加を減少させる技術指導が必要となる。

5. 結論

入駅のブレーキ操作は運転時分に大きな影響を及ぼすとなされながら操縦技量を定量評価する手法は確立されてい

図5 改善が望まれる運転による時間増加
(2006.7.22 天候：曇)^①

かったことに鑑み、これらの技量を定量評価する手法を提案するとともに、提案した手法を用いて在来線特急列車の特定区間におけるブレーキ操作を定量評価し、さらに、評価結果と運転時分との関係等を調べた。その結果、明らかとなった要旨を述べると以下の通りである。

1) 新たに提案した手法に実態に沿った多様なブレーキ扱いに関わるデータを入力し、ブレーキ扱が運転時分の増減に及ぼす影響を調べた。その結果、階段ユルメの実施速度が運転時分に大きな影響を及ぼすことが分かった。

2) 高速域での階段ユルメが衝動発生防止に有用であることに鑑み、この目的のために階段ユルメが懲添されている状況を踏まえれば、衝動防止と運転時分確保との間で調和のとれた階段ユルメの手法を研究する必要がある。

3) この手法を用い、在来線特急列車の特定区間におけるブレーキ操作良否の定量評価を試みた結果、提案した手法によって実際の操縦技量がある程度、定量評価できることを確認した。

4) 前記の手法で行った評価の結果と運転時分との関係を調べた結果、両者の間には密接な関係があることが分かった。

5) この研究の過程を通じて得た知見は、乗務員の操縦指導に有用であることを確認した。

減速度と滑走との関係及び衝動防止などの観点からみたブレーキ扱いを評価する手法の研究は今後の研究課題である。本研究の実施に際しては、JR西日本本社運輸及び車両部、金沢支社関係各位に多大な協力を賜った。本線で得たデータの一部は元金沢工大永瀬研究室研究生各位が行った研究・調査の結果を参照させて頂いた。関係各位に深謝の意を表します。

文 献

- (1) 柴田、中村、渡辺：「運転線区の沿線環境が高速走行列車に及ぼす影響」、金沢工業大学工学設計Ⅲプロジェクトレポート、平成18年度、pp42 (平成19年)。