

営業線環境を考慮したブレーキ性能調整 (制御・ブレーキ・車輪踏面・制輪子の協調)

○ [機] 大橋 聡* 鮫島 博 野村 仁

下村 雄祐 伊藤 吉勝 見澤谷 慶一 (東京地下鉄株式会社)

The Adjustment of Vehicle Brake System considering for Service Line Condition

○ Satoru Ohashi, Hiroshi Sameshima, Hitoshi Nomura,

Yusuke Shimomura, Yoshikatsu Ito, Keiichi Misawaya, (Tokyo Metro Co.,Ltd)

The adjustment of vehicle brake system is important to run in the service line. The vehicle brake systems chiefly compose the control system, the brake system, the shoe pad, adhesion, and the wheel surface conditions. But until now, these components have not concerned mutually to adjust the vehicle brake system for service line. In fact, many running conditions (rain, oil, how to drive the vehicle, etc.) concern the vehicle brake system in service line. The authors investigated the running conditions and we tried to adjust the brake system components in many trial runs. In this paper, we introduce to the best vehicle brake system adjusting method for service line.

キーワード: 鉄道車両システム, 制御, ブレーキ, 回生ブレーキ, 制輪子, 粘着

Key Words: Railway vehicle system, control system, brake system, regeneration brake, shoe pad, adhesion

1. はじめに

鉄道車両の加減速性能を司る車両部品・機器として, 制御・ブレーキ・車輪(踏面)・制輪子等があげられる. 近年これらの機器について回生率向上, 空転・滑走防止制御, 増粘着制輪子等, 各々の研究が進み報告されている.

一方, 実際に営業線で走行する環境も含めて, それぞれの部品・機器の相互作用・影響について, 横断的に実使用上の「鉄道車両システム」として総合評価・調整されることがこれまであまり取り組まれてこなかった.

本稿では 2002 年に誕生した東京地下鉄 08 系車両において, 新車製造時の「仕様通り」に営業開始してから, 各機器同士及び実営業環境と相互協調のとれた車両に調整するまでの背景・調整内容等を紹介し, その重要性を述べる.

2. 08 系車両営業開始後の問題とその原因

08 系車両は半蔵門線押上延伸の増備車両として 2002 年に登場した. 当時の最新機器を搭載し仕様通りに各種調整を行い営業開始したが, 乗務員から「ブレーキが甘い・不安定」との声があがり, またフラットが多発していた.

当初の試運転にて減速度の確認を行うと設計値を満足していたが, 空制補足比率の高い 80km/h 以上の高速域及び雨天時には, 制輪子摩擦係数(μ)が特性上低下するため, 中低速域と比較すると減速度が低下することが確認された. また乗務員の体験談から他車両の減速度が仕様より高いこと(推定)や仕様自体が高い車両が存在するため, 相対的にブレーキが甘く感じられるのだと推察した.



図 1. 東京地下鉄 08 系車両

一般に鉄道車両の制御装置には, 架線電圧が高い場合, 現状以上に架線電圧を跳ね上げないように回生トルク電流を絞る制御特性(以下, 回生電圧リミッタ)を有している. 東京メトロが運転状況記録装置のデータを分析したところ, 架線電圧が高い状況下で回生電圧リミッタ(図 2 参照)の動作により回生ブレーキ力を絞り制御ブレーキ力を補足する状態が頻発していることが判明した. 同状況下では, 架線電圧の上下に応じ回生ブレーキ力が変動し, その不足分について空制補足されるが, 両者の応答速度差, 回生フィードバック時素等のため, 実際の減速度は変動してしまう. つまり, 回生電圧リミッタ特性が減速度変動要因の一

*現在, 国土交通省鉄道局技術企画課車両工業企画室へ派遣

つになっていることが分かった。

また、08系車両の減速度を他社車両と比べた場合、乗務員が相対的に低く感じていたことにより、晴天時を含め非常ブレーキの多用に至ることも確認された。結果として、雨天時の非常ブレーキの使用による車輪のロックを直接原因とするフラットも発生していた。

3,4,5項ではこれらの原因と調整内容を、これに密接に関連する実営業での環境も含めて述べる。

3. 設計減速度と実際の状況

【仕様と実情】 08系車両の設計減速度(常用最大)は3.5km/h/sである。これをもとにブレーキ力計算しBC圧を決定するが、その式の中に一次の積として制輪子摩擦係数 μ があり通勤車では一般に定数として扱う。しかし高速域や雨天時にこの摩擦係数 μ は数%低下するので空制減速度は低下する。一方回生ブレーキ力には同要素は無く、減速度は概ね安定する。試運転結果では表1の通りであった。

【実営業環境】 08系車両の走行する区間では80km/h以上の高速域から停車する駅が多い。つまり実使用上では減速度低下の要素がある速度域からのブレーキが多いことになる。また他社車両の中に減速度3.5km/h/s以上の仕様の車両が存在することもあり、08系車両は相対的にブレーキが甘いと感じられたと推定される。

【調整内容】 同一線区内で複数事業者での相互直通運転を実施しており、同一事業者内でも複数の車両形式を保有することもあり、それぞれの“実営業中での車両仕様”は異なる可能性を孕んでいる。これは、今日鉄道事業を行うあらゆる事業者において起こりうることである。現実的には、こういった仕様を出来る限り統一することが望ましい。

今回は他車両の減速度の考慮と、高速域・雨天時の状況下でも仕様を十分満足するよう、結果的には5%のブレーキ力向上策をメーカーと協議の上施した。調整前後の減速度を以下の表1に示す。

表1. 調整前後の減速度(回生全制動) [km/h/s]

初速度	40km/h		70km/h		100km/h	
	晴天	雨天	晴天	雨天	晴天	雨天
調整前	3.8	3.7	3.7	3.6	3.6	3.5
調整後	3.9	3.8	3.8	3.7	3.7	3.6

なお、空制については、急激な回生絞込みで一瞬所定減速度が得られず、制動距離が延びた際を考慮して、概ね回生減速度+0.1として調整を行った。なお表1の調整後、乗務員談より概ね他社車両と同等の減速度となっている。

4. 回生電圧リミッタ

【仕様と実情】 【実使用環境】 の両者を考慮し、車両としてのありべき姿の検討を行った。また図2に08系車両の調整前および他車両の回生電圧リミッタ仕様を示す。

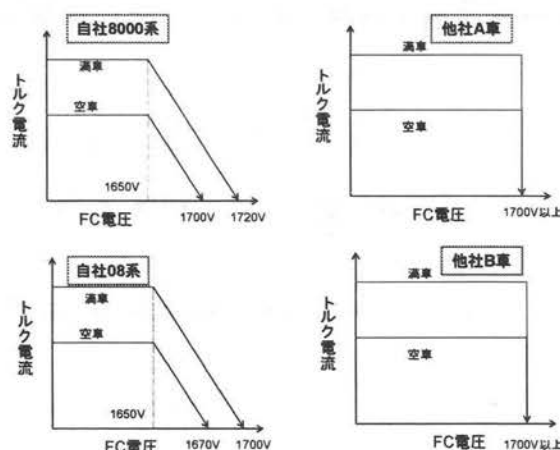


図2. 各車両の回生電圧リミッタ

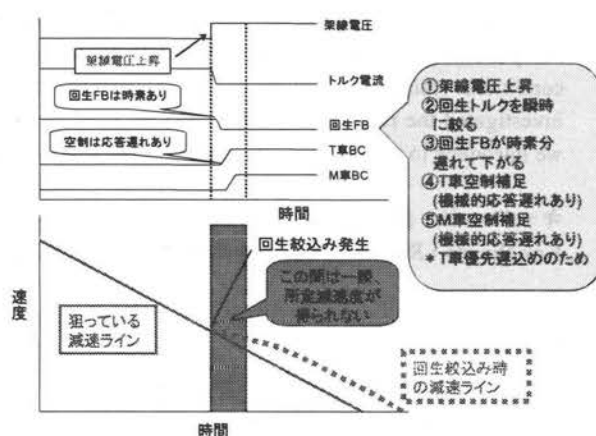


図3. 回生電圧リミッタ動作時の挙動と減速度

08系車両においては調整前、既存の自社8000系車両(電機子チョッパ)に合わせて図2左下の仕様としていた。しかしほぼ同時期に導入された他社A車や他社B車の仕様及び変電容量等の関係から、架線電圧の上昇度合い・頻度が高く、回生電圧リミッタによる回生絞込みが頻繁に起きていることを確認した。

同現象発生時は、図3の通り一時的に所定減速度が得られない状況となる。また架線電圧が絞込み開始セット値を上下するような場合は回生ブレーキ力が変動し、補足の空制との応答速度差により減速度が若干上下してしまう。これにより、減速度低下等の変動が発生し、制動距離が不足し非常ブレーキの使用に至っていたものと考えられる。

【調整内容】 メーカーと協議し、他車両に近づく形の絞込み開始電圧1750Vの高電圧対応化を実施した。性能的には1850V程度まで制御可能であることは確認したが、地上側設備・他車への影響、自車パンタグラフ仕様を考慮して1750Vとして当面は運用することとした。セット値を上げれば回生有効率・安定性は高くなるが、他への影響や実使用環境を考慮して必要最小限の高電圧化とした。

【副次的効果】 回生電圧リミッタを高電圧化したため、

回生率が上昇している。また、これに伴い制輪子の摩耗量抑制が期待できる。本調整による回生率の上昇、これによる省エネ・電気代削減効果について以下の表 2、3 に示す。

表 2. 08 系車両の回生電力量の変化(上:調整前, 下:調整後)

力行電 力 量 kWh	回生電 力 量 kWh	回 生 率 %	消費電力 量(力行 一回 生) kWh/ 編成	走行キ ロ(3ヶ 月)km/編 成	原 単 位 kWh/C /km
519602	208245	40.1	311357	27230	1.14
602929	272309	45.2	330620	30849	1.07

表 3. 省エネ・電気代削減効果

原単位差 (kWh/C/k m)	電 気 代(円 /kWh)	両 数 (両)	月平均走 行 距 離 (km)	今後の 予想走 行月数	削減額 (百万)
0.07	13	60	10000	240	131.04

5. フラットの多発

【仕様と実際】 08 系車両の非常減速度は 4.5km/h/s である。これと車重から期待粘着を計算すると先頭 CT 車(空車)では 13.5% となり、一般的に雨天時の期待粘着限界であり、滑走・ロックを十分起こしうる数値である。雨天時の添乗でも、滑走・ロックを起こしていることが確認された。

【実使用環境】 東京メトロが運転状況記録装置のデータを確認すると、非常ブレーキの使用は、急激な回生絞込時と電空ブレンディング中の減速度が安定しない時に集中していた。図 3 のように、駅停車へ向け減速中にこれらが発生すると制動距離が不足する。しかしここで重要なのがまさに「実使用環境」である。これらの発生時にブレーキステップが低ければ、常用追いブレーキで間に合うはずである。しかし他車両の減速度が 08 系車両より高めであること、運転曲線、多客による慢性遅延回復運転、雨天時の空転による加速度低下等により、高ブレーキステップの使用頻度が高いことが確認された。本路線が有するこのような環境のため、同現象発生時には常用追いブレーキでは追いつかず、非常ブレーキの使用に至っていることが判明した。

【調整内容】 滑走防止制御がない車両での期待粘着限界を超えての滑走・ロックであり、対策は「非常ブレーキの使用回避」が唯一有効である。この観点から 3 項、4 項の実営業環境を考慮した減速度調整、回生電圧リミットの調整が有効であり、調整後フラットの発生は減少し乗務員談からも運転しやすくなったことが確認できた。

6. 新たな問題 ～機器間調和への影響～

3,4 項の調整後、フラットは減少し当面は快調に思われた。しかし数ヵ月後の 2 点の新たな問題が発生した。

1 点目は雨天時の減速度低下がこれまでより大きくなっ

たことである。東京メトロによる調査の結果、雨天時の減速度低下と空転の増大による加速度低下が確認された。更なる制輪子メーカとの合同調査で M 車の車輪踏面の「粗さ」が以前より不足し粘着が低下したことが判明した。なお、T 車の車輪踏面は以前と変化はなかった。

原因は 4 項で述べた回生電圧リミットの調整で回生安定性が上がり、回生中に初込め圧(50kPa 程度)のみで制輪子を極軽く車輪踏面に当てる頻度が増え、車輪踏面の鏡面化が発生・進行したためと東京メトロでは推定した。

2 点目は、M 車も含めフラットの発生頻度が再度上がり始めたことである。T 車のフラットは雨天時の減速度低下による非常ブレーキの使用が原因と考えられるが、M 車のフラットは粘着低下、減速度向上策の影響により、制御(回生)の滑走制御が当初調整した各種定数では最適となくなり、電空ブレンディング中に過大ブレーキ力が発生し滑走・ロックしたためと東京メトロでは推定した。

これらの新たな問題点に対し、滑走制御および増粘着制輪子の項に分け、その対策について述べる。

6.1 制御装置による滑走制御の最適化

東京メトロと制御メーカにて試運転を実施し、過走制御が最適でないことを確認したため、調整することとした。

図 4 に滑走制御のプロセス、図 5 に調整前、図 6 に調整後の滑走制御を示す。

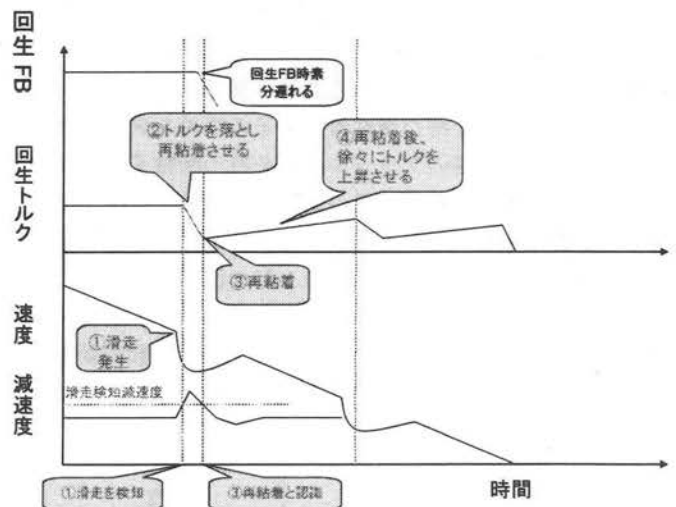


図 4. 滑走制御のプロセス

今回の場合は粘着の低下と減速度の上昇で、より低い減速度でかつ急峻に滑走が起こるようになっていた。このため、図 4 の①の滑走検知が遅く、かつ回生トルク絞込みが遅くなり、持続的滑走となり制御は回生トルクを絞り続けるが、空制補足により再粘着に至らない状況が発生していた。また回生トルクを絞り再粘着できた場合も、粘着が低下しているので所定トルクへの復帰速度が早く、すぐに再度滑走に至る悪循環に陥っていた。

これらを踏まえ調整としては、①滑走検知減速度を見直し、早めに滑走を検知させる、②トルク絞込み時定数を見

直し、トルク絞込みを早める、③再粘着後のトルク復帰をよりなだらかに行うよう調整した。調整後は図 6 の通り、連続的な滑走を起こさず、また再粘着後もすぐに再滑走せず、乗り心地も含めて良好であることを確認した。

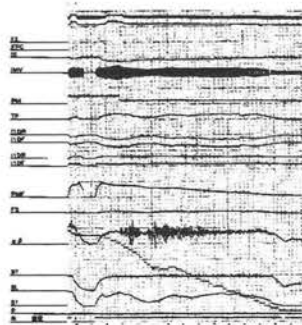


図 5. 調整前の滑走制御

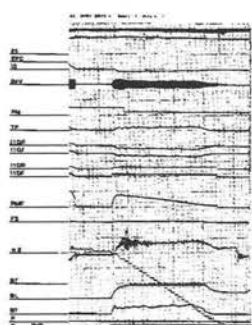


図 6. 調整後の滑走制御

6.2 M 車への増粘着制輪子の導入 ～車輪踏面の適正化～

東京メトロと制輪子メーカーの調査から M 車は車輪踏面の鏡面化により、車輪－レール間の粘着の低下が起こっていると推定した。このため、制輪子内の鋳鉄ブロック量を増加させることで粘着向上が期待できると考え、制輪子メーカーに依頼し新制輪子の設計・製造を行った。

ベンチ試験により、新・旧それぞれの制輪子について車輪踏面荒さの変化について、トリボメータによる静摩擦係数確認、粗さ計による算術平均粗さ(Ra 値)の確認を行うと、ブロック量の増大により車輪踏面粗さを増加させることが可能であるとわかった。これより車輪－レール間の粘着増加への有効性が確認できたため、従来品に比較し 1.5 倍のブロック面積を持つ増粘着制輪子の採用を決定した。

設計時には、2 倍のブロック面積を持つ制輪子等の検討も行ったが、鋳鉄ブロック量の過剰な増大は、制輪子摩耗量の不必要な増加に繋がるため、粘着の確保と適度な摩耗量のバランスを両立させるため 1.5 倍の面積を持つものを採用した。なお、本制輪子の変更においては、減速度の調整は前記調整により図られたことから、摩擦係数の変化に寄与する母材(レジン部)の変更は行わないこととした。変更前後の増粘着制輪子について以下図 7、表 4 に示す。

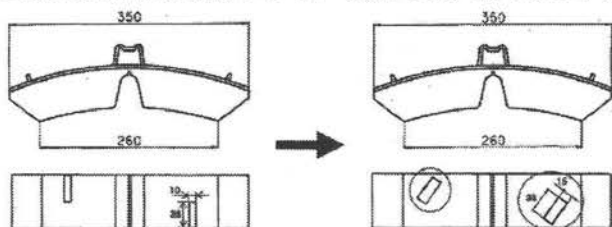


図 7. 変更前後の増粘着制輪子(左:変更前, 右:変更後)

表 4. ベンチ試験における車輪踏面荒さの変化

制輪子種別	新制輪子	従来制輪子
静摩擦係数 (トリボメータ)	0.319	0.236
算術平均粗さ (Ra)	1.47	0.67

制輪子変更前には想定していなかったことだが、新制輪子装着後、粘着の向上により滑走が起こりにくくなっただけでなく、力行時の空転も抑制され、加速性能が向上することが確認された。この結果、ダイヤ余裕を生み、高ステップのブレーキの使用頻度が減少したことにより、非常ブレーキの抑制につながるという相乗効果へもつながった。

7. まとめ

本稿ではブレーキ性能やフラット発生の原因が、背景となる実使用する速度域・ブレーキステップ、他社車両との仕様差、或いは架線電圧等の実営業環境に大きく起因することがわかり、その調整内容について述べた。

実際に今回の取組で当初の試運転では仕様を満たしていたが、営業線添乗や運転情報記録装置を活用した実営業中の挙動の把握、他社車両の仕様や使用環境の調査を行うことで、この問題の本質が見えてきた。

また、制御・回生ブレーキ調整の結果、回生安定性は向上したが制輪子の増粘着効果の低下につながったため、滑走制御の再調整や従来品よりブロック形状を大きくした増粘着制輪子を導入し、車輪踏面の適正化を再構築し、加減速性能を確保した例についても述べた。最終的に 08 系車両は制御・ブレーキ・制輪子の 3 者が相互に協調し合うことで、当該路線の使用環境・使用状況に最適な車両性能に調整することができ、当初の問題の解決に至っている。

本稿での概略を図 8 に示すが、各機器・環境は密接に関連・影響しておりその影響範囲は非常に広い。新車導入時や問題発生・調整時は、機器単体だけでなく機器間協調、環境との調和、実使用環境での評価も重視すべきである。

最後になるが、鉄道車両は多くの機器がその機能を果たすことはもちろん、これらが集まり「鉄道車両システム」として機能するものである。この点で、鉄道事業者が主体となって、各機器のメーカーと連携を図り、鉄道車両システムとしての磨き上げに、鉄道事業者とメーカー、及び関係者が一体となって努めることが重要と考える。

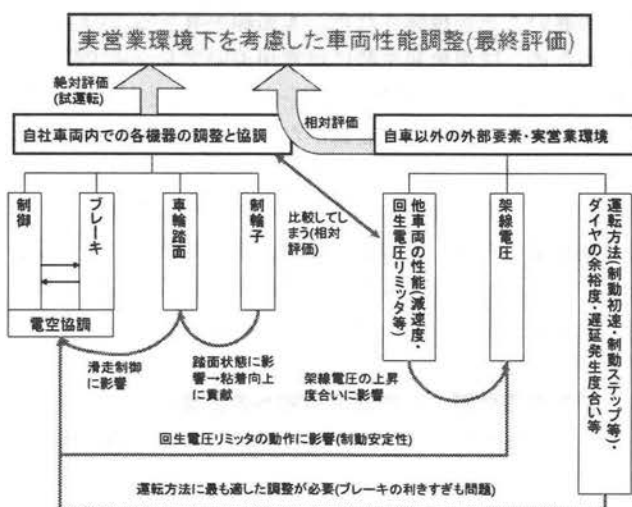


図 8. 各種機器と実使用環境の相関関係概略図