

S1-1-5

車輪滑走時の粘着係数 μ の実態

— 第1報 μ の解析手法 —

○ 西浦 崇郎(金沢工業大学 院) 兵頭 信彦(金沢工業大学)
塩澤 尚大(金沢工業大学) 堀 俊行(金沢工業大学)
平元 忠雄(JR 西日本) [機・電]平間 淳司(金沢工業大学)
[機・電]永瀬 和彦(金沢工業大学)

Measuring Method to Accurately Measure the Adhesion

under Wheel Skidding Condition

— 1st Report Results of Basic Study —

Takao Nishiura, (Kanazawa Institute of Technology) Nobuhiko Hyodo, (Kanazawa Institute of Technology)
Naohiro Siozawa, (Kanazawa Institute of Technology) Toshiyuki Hori, (Kanazawa Institute of Technology)
Tadao Hiramoto, (West Japan Railway Co.) Junji Hirama, (Kanazawa Institute of Technology)
Kazuhiko Nagase, (Kanazawa Institute of Technology)

Under wheel skidding conditions, the adhesion coefficient between rails and wheels is said to be variously changed according to the differences between wheel tread velocities and train traveling velocity. However, to accurately measure the μ is seemed extremely difficult. The authors installed an event recorder on a narrow gauge JR Ltd. Express to investigate to the behavior of wheel skidding. In the course of the study, they found the skidding wheel sometime rotated constantly. Under such a condition, the adhesive force is equivalent to the braking force. The braking force was employed to measure the μ under the above mentioned conditions. In the paper, the results of the study were written.

キーワード: 鉄道、鉄道車両、滑走、空転、ブレーキ、粘着

Keyword: Railway, Railway Stock, Wheel Spin, Wheel Skidding, Breaking, Adhesion

1. はじめに

鉄道において滑走の原因となる車輪・レール間の粘着係数 μ (以下 μ とする) の実態を把握することは、車輪損傷を防ぎ適正な車両の制御を行ううえで大切である。滑走中の期待粘着係数は、滑走開始時と滑走終了時の速度の速度差から容易に求められるが、車輪滑走途中における μ は簡単に求めることができない。なぜなら、車輪滑走時において μ はすべり速度やすべり率に応じ、多様に変化しているからである。過去の研究において、すべり率と μ との関係についてすべり粘着台車を用い特殊な方法ですべり率を変化させて本線上のすべり率と μ との関係を測定した研究報告がある¹⁾。しかし、すべり粘着台車を用いても車輪滑走中

のすべり率に応じた μ の変動は測定できない。なぜならすべり粘着台車ではすべり率が一定だからである。

ところで、 μ はレール及び車輪踏面の状態に応じ多様に変化するとされる。そして、車輪が空転又は滑走した場合には、車輪踏面は高い面圧でレールに接した状態で滑るので、車輪踏面はレールとの研磨作用などにより刻々と変化すると想定される。従って、滑走が起きた場合に、車輪速度、レールと車輪とのすべり速度及びすべり率並びにレール、及び車輪踏面の状態などの諸因子との関わりまでも明らかにした μ を調べようとすれば、滑走中の μ の挙動を逐次調べる以外にない。このためには、レール・車輪間の接線力、ブレーキ力及び車輪の加減速状態から粘着力を求める以外の方法は見当たらない。

しかし、この方法で実際の接線力を調べようとすれば、車輪の正確な回転状態だけではなく、車輪及びこれに連なる回転系の慣性モーメントを正確に把握する必要がある。従って、この方法の実施は実際には容易でない。しかし、車輪が滑走中であっても車輪が等速回転している状態であるならば、慣性モーメントの影響は排除できる。従って、この状態の下では、 μ は単に車輪の回転に関わる力関係だけから比較的容易に求めることができる。

筆者らは過去の J-RAIL で高精度で加減速度情報を取得できる装置を提案した²⁾。当該装置で得た滑走に関わるデータの中には、車輪が滑走状態にあった場合でも、車輪の加減速度が一時的に $0[(\text{km/h})/\text{s}]$ の状態を持続した状態のデータが散見されることがわかった。そこで、筆者らは、このような状態に限ってではあるが、前記の考え方を利用して、車輪滑走中の μ の実態把握を試みた。

2. 計測システムと取得情報について

筆者らは前述した計測システムを図 1 に示す 9 両編成の特急列車の端部 9 号車(T 車)の床下機器箱内に搭載しており、速度情報、ブレーキ・シリンダ圧(以下 BC 圧という)、MM 電流は 8 号車(M 車)の 1・4 軸から取得している。また、速度情報・加減速度は $0.1[\text{s}]$ で、他の情報については $0.2[\text{s}]$ で記録している。なお、計測システムの詳細については「車輪滑走の詳細な挙動を記録するシステムの開発とその使用結果」³⁾を参照していただきたい。

3. μ の算出方法

以下に先に述べた考え方で、具体的に μ を求める手法を述べる。

3.1 μ を求める際の車輪側の状態

3.1.1 車輪が等速回転状態にあると見做す条件

滑走中に μ を求めることが出来るのは、車輪が等速回転している場合である。幸いに、この研究で筆者らが取得したデータの中には高い精度と短いサンプル時間で車輪の加減速度を取得したデータがある。その例として、図 2 に 2004 年 6 月 19 日に N 駅通過後 $0.5[\text{km}]$ の下り $10[\%]$ の地点で 1 軸のみ滑走を起こしたものを示す。図 2 の横軸に時間 $[\text{s}]$ を、縦第一軸には速度 $[\text{km/h}]$ 、 $\beta [(\text{km/h})/\text{s}]$ を、縦第二軸に MM 電流 $[\text{A}]$ 、BC 圧 $[\text{kPa}]$ を示す。また、各チャートの意味する記号は図中の右上に、天候・日時・滑走地点は左下に示す。図示の、滑走地点の約 $600[\text{m}]$ 先の閉塞信号機が減速を現示していたため、ブレーキを 5 ノッチに入れ減速を開始した。このとき、MM 電流が立ち上がっていないことから回生失効または回生開放を起こしたため、空気ブレーキが作動した。なお、このとき車両の前軸は 1 軸である。

車輪滑走時の加速度を見ると、図示の如く、瞬時ではあるが等速状態にある。しかし、車輪が等速回転状態にある

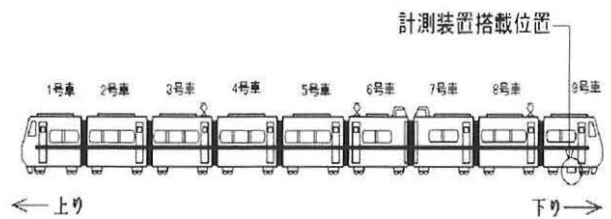


図 1 計測システム搭載位置

と見做す条件について図 2 のようなデータは避けなければならない。図 2 の①、②地点では、 β は $0[(\text{km/h})/\text{s}]$ を示して、一見今回の実態調査に適しているかに見える。しかし、①地点の β の前後プロットを見ると、 β が急激に再粘着方向に向かっている途中である。②地点も β が再粘着に向かっている途中の点である。従って、これらは等速回転を持続しているとは言えない。

そこで、 β が $0[(\text{km/h})/\text{s}]$ を連続して 3 プロット以上記録した場合に車輪が等速回転運動をしていると見做すことにした。

3.1.2 滑走した車軸のブレーキ力の算出方法

車輪が等速滑走中に回転力に関わる因子は、ブレーキ力及び車輪とレールとの接線力(粘着力)である。ところで、ブレーキ力のうち、電流値から求めた回生ブレーキ力(電空の協調制御を行っている場合も含む)は、必ずしも実態に即していない事例もあり得ると判断した。そこで、今回は高い信頼性がある空気ブレーキが作動している状態のみを選んだ。そして、滑走制御が行われる前に滑走軸に作動したブレーキ力は、列車全体に作動したブレーキ力と等価と仮定した。列車全体のブレーキ力は滑走地点の勾配補正を行った後の列車全体の減速度から逆算した。具体的な方法を述べると、先ず、列車全体の減速度を求め、これに対応した列車全体のブレーキと、本来必要とされる粘着係数(期待粘着係数)を求める。さらに、滑走軸のブレーキ低減割合、基礎ブレーキ装置の機械効率、ブレーキ・シリンダ加圧無効圧及び勾配などの補正を行い、滑走軸の粘着係数を求めた。なお、基礎ブレーキの機械効率は $95[\%]$ 、ブレーキ・シリンダの加圧無効圧は $20[\text{kPa}]$ とした。

3.2 μ を求めるに際しての条件

μ は地上側の諸因子に応じて多様に変化する。よって、 μ が急激に変化する可能性がある地点のデータを用いることは、今回のような手法で μ を求める場合は好ましくない。そこで、 μ が大きくは変化する可能性が少ない地点における滑走データを用いることにした。 μ に深く関わる因子は天候だけでなく、沿線環境因子も少なからず影響を与えることは周知の事実である。そこで、これらの因子をも排除した状態で μ を求めることが好ましいと判断し、トンネル内で発生した滑走のみを調査対象にした。幸い、本列車が走行する沿線のトンネル距離が走行距離に占める割合は $25[\%]$ に達するため、幾つかの事例を取得出来た。

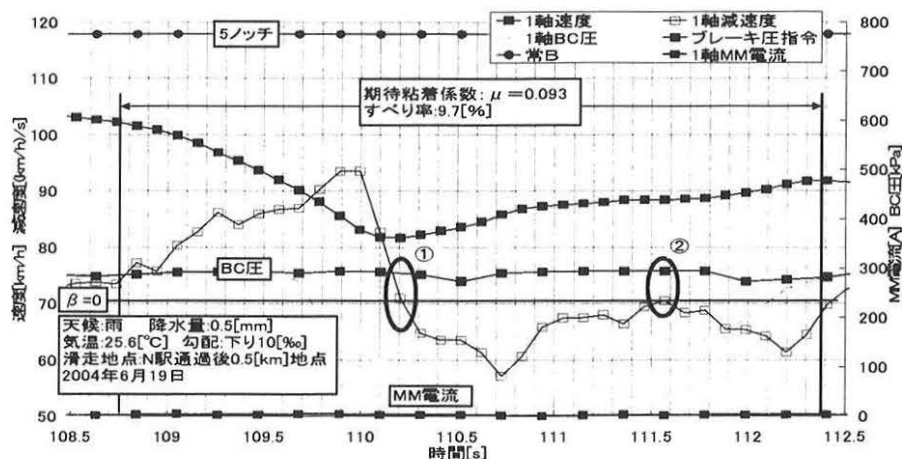


図2 解析に不適切なデータ

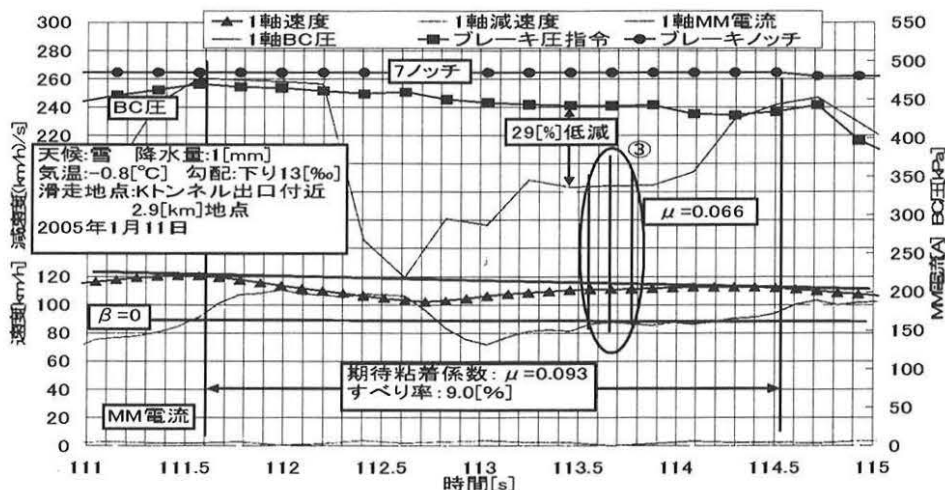


図3 事例1の解析データ

4. 解析の方法と結果

以上に述べた方法で、 μ を算出した事例を二つ示す。

4.1 事例1の解析結果

図3に2005年1月11日、全長3.7[km]のKトンネル出口手前2.9[km]付近で下り勾配13[%]地点で起きた1軸のみの滑走データを示す。図の横軸・縦軸ともに図2と同様である。また、各チャートの対応記号は図の上側、天候・日時・滑走地点は図左側に示す。車両の前側の軸は4軸である。

今回の滑走地点付近には閉塞信号機が設けられており、減速を現示していたと考えられる。信号現示に対応して減速するため、滑走開始20[s]前からブレーキを7ノッチに入れているが、MM電流が立ち上がっていないので解析対象になるのではないかと考えられる。

4.1.1 解析対象に該当する箇所と滑走の状況

前記の手法で μ 算出点を定めることにする。初めに図3の、図中④地点に着目すると $\beta = 0[(\text{km/h})/\text{s}]$ を連続3プロ

ット記録しており、BC圧を同一状態に保っている。また、前述したがMM電流が立ち上がっていないので④地点を解析対象とした。

今回の滑走のすべり率は最大で4.6[%]、列車全体の減速度は3.27[(km/h)/s]である。

4.1.2 滑走軸のブレーキ力と粘着係数の算出

次に当該地点の粘着係数を求める。当該地点の勾配及び、列車全体の減速度から、列車全体の期待粘着係数を求めると0.093となる。一方、 μ 算出点(滑走軸が等速走行している地点)のブレーキ圧の低減割合は図示のように36[%]である。よって、先に述べた機械効率95[%]及びブレーキ・シリンダ加圧無効圧20[kPa]を勘案して、該当地点の μ を求めると、0.060となる。

4.2 事例2の解析結果

図4に2005年2月12日、全長10.4[km]のAトンネル出口手前1.0[km]で下り勾配13[%]地点で起きた1軸のみの滑走データを示す。図の横軸・縦軸・諸記号などは図2と同様である。

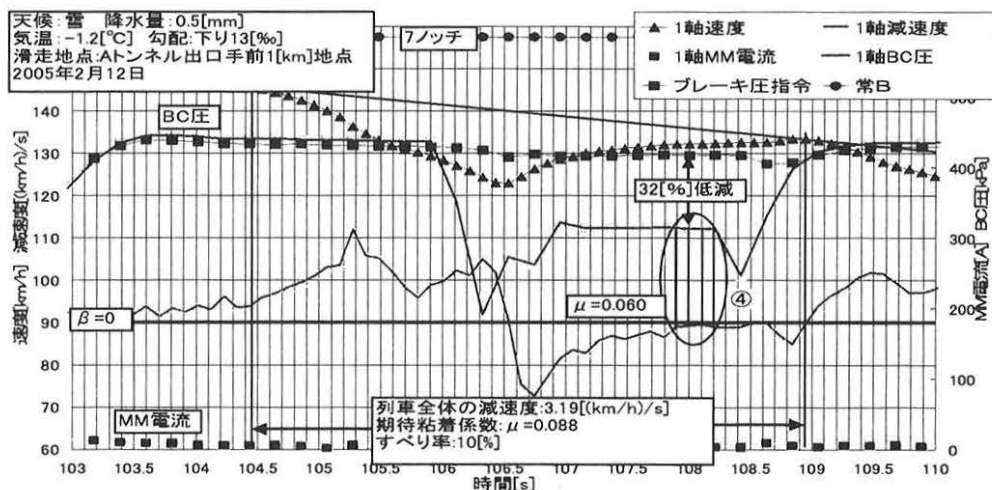


図4 事例2の解析結果

4.2.1 解析対象に該当する箇所と滑走の状況

図4の滑走原因として、滑走地点の約1[km]先に制限速度90[km/h]のR=500が存在しており、この曲線に向けて減速を開始しようと、ブレーキを7ノッチに入れたところ、回生失効を起こした。現場は下り13[‰]の勾配で、当日は沿線が豪雪に見舞われ、列車床下に抱え込んでいた雪を落下させ粘着力が低下したことで滑走に至ったと推定した。図4の④地点に着目してみると、図中④の地点で $\beta=0[(\text{km/h})/\text{s}]$ を連続4プロット記録しており、このときBC圧も同一状態を保っている。そこで、この地点を解析対象にした。

今回の滑走のすべり率は10.0[%]で、列車全体の減速度は3.19[(km/h)/s]、期待粘着係数は0.088であった。

4.2.2 滑走軸のブレーキ力と粘着係数の算出

次に当該地点の粘着係数を求める。 μ 算出点(滑走軸が等速走行している地点)のブレーキ圧の低減割合は図示のように32[%]である。従って、先に述べた機械効率95[%]及びブレーキ・シリンダ加圧無効圧20[kPa]を勘案して、該当地点の μ を求めると、0.060となる。

5. 結論

本線上での滑走時の μ がすべり速度、すべり率などに応じ多様に変化していると想定されているにも関わらず、これらの因子と μ との関係がほとんど解明されていないことに鑑み、車輪が滑走状態にある場合の μ を求める手法を模索した結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 車輪が滑走状態にある場合でも、車輪が等速回転状態にあれば回転系に関わる質量効果を見捨て、車輪の回転に関わる力の関係だけで β を求め得る可能性があることを明らかにした。
- 2) 在来線の特急電車に搭載中の高い分解能で車輪の速度及び加減速度を記録できる装置が取得したデータを解析した結果、滑走時に車輪が一時的に等速状態の下に

あるデータが多数存在することを確認した。

- 3) 天候及び沿線環境などの諸因子が μ に及ぼす影響の変化が比較的少ない地点を選んで、前記の車輪が等速回転状態にあるデータを筆者提案の方法により解析した結果、一部ではあるがすべり率などの関わりを明らかにした μ を求めることが出来た。

6. 今後の課題及び謝辞

筆者らは現在、この手法により得た多くのデータについて、速度及びすべり率との関係を定量的に把握する作業を実施中である。これらについては、次の機会にお話させて頂きたい。

また、本研究を行うにあたり、本学電気工学科平間淳司教授、西日本旅客鉄道株式会社本社、本学修士1年佐藤祐氏、学部4年堀俊行氏、塩澤尚大氏、谷本一穂氏、兵頭信彦氏の協力を得た。ここに関係者各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 永瀬和彦:「本線上におけるレール車輪間の粘着の実態(すべり粘着台車による調査結果)」,日本機械学会論文集第504号C編 昭和63年8月。
- 2) 中川大輔,若林雄介,平元忠雄,平間淳司,永瀬和彦:「空転滑走制御用加減速度情報取得方法についての一研究—高精度検知システムの試作—」,J-RAIL2001, pp617-620,2001年12月。
- 3) 吉田伸司,西浦崇郎,兵頭信彦,塩澤尚大,堀俊行,平間淳司,永瀬和彦:「車輪滑走の詳細な挙動を記録するシステムの開発とその使用結果」,J-RAIL2005 2006年1月発表予定。