

3208 降雨が粘着に及ぼす影響 (第3報)

— レール踏頂面へのミクロな観察手法の導入 —

Influence of Precipitation upon Adhesion Coefficient

- 3rd Report, Application of Microscopy to Rail Surface Condition Observation -

学 [機] ○笠原 純 (金沢工業大学)、学 [機] 西島 豊 (金沢工業大学)

正 [機] 新谷 一博 (金沢工業大学)、正 [機・電] 永瀬 和彦 (金沢工業大学)

Jun KASAHARA, Kanazawa Institute of Technology
Yutaka NISHIJIMA, Kanazawa Institute of Technology
Kazuhiro SHINTANI, Kanazawa Institute of Technology
Kazuhiko NAGASE, Kanazawa Institute of Technology

In J-RAIL/02, an experiment was conducted with wet rail to clarify the mechanism of adhesion coefficient reduction by precipitation. During the wet rail experiment, an unexpected increase in adhesion coefficient was observed when a rail surface was cleaned during the test to eliminate the influence of rust on the rail surface. To determine the cause of adhesion coefficient reduction, a remaining section of the rail used for the experiment was put under the same experimental conditions and its cross-section was examined by electron microscope. Pores of 1 to 5 μm in diameter were observed, and water getting into the pores might have lowered adhesion coefficient.

Keyword: railway, rail, adhesion coefficient, rainfall, electron microscope

1. μ の極端な低下現象

在来線におけるレール・車輪間の粘着係数(以下「 μ 」という)は降雨初期には低速度域でも極端に低下して、連続的に0.05以下となる場合が少なくない¹⁾。この現象は外気温が低く車輪踏面が鏡面状態の時に起こり易いとされ、その原因の一つはレール踏面の汚れに起因するとされてきた。このメカニズムを解明するため、筆者らは速度、レール温度、レール上の夾雑物及び降雨量を変化させた状態で模型の粘着台車を走らせる現象再現実験²⁾³⁾を行い、さらに、JR西日本と共同で在来線特急電車について季節及び天候との車輪滑走発生率との関係を調べた⁴⁾。一方、石田等は転がり接触試験機を用い、多様な温度の下で踏面粗さを変化させて散水時の粘着の挙動を調べ、さらに、理論解析を行った⁵⁾。

これらの研究の過程を通じ、在来線特急の車輪滑走率は冬季に豪雪地帯を走るとき格段に高くなることから、そして、レール湿潤下の模型実験及び理論解析の結果では μ は速度、レール踏面の汚損状態、踏面粗さ及び散水温度などに応じ変化することが明らかになった。しかし、実験で得た μ は本線上で降雨初期に得た値のように極端に低下して値とはならなかった。この原因を探るために、筆者等はレール踏面の摩耗粉を電子顕微鏡で観察した。その結果、散水によりレール踏面に生じた「ある種の錆」⁶⁾が実験用レール踏面介在して μ の低下を阻止している可能性があるかと判断し、これらの影響を排除した実験を行った⁷⁾。しかし、それでも μ

は本線上での降雨初期に近い値を得ることは出来なかった。

走行距離の増大に応じて車輪踏面が鏡面化すると車輪滑走率が増大する傾向があることは広く知られる。このメカニズムについて最近行われた解析結果⁸⁾によれば、レール湿潤時の踏面粗さは μ に支配的な影響を及ぼすとされ、さらに、従前から概念的には認識されていたものの具体的には把握されていなかった μ と踏面粗さとの定量的な関係が明らかにされただけでなく、得た値も概ね整合性ある値であった。しかし、乗務員の間にも広く認識されている「降雨初期に μ は一時的には極端に低下する」とされる現象、そして、過去に粘着台車で得られたような50km/h以下の速度域で μ が0.03又はこれを下回る現象が起きるメカニズムについては、必ずしも解明されているとは言えない。

2. 電子顕微鏡による実験レール踏面の観察

前記の現象が起きるメカニズムを解明するには、レール踏面に付着した夾雑物を電子顕微鏡で観察するだけでなく、本来はレール踏面を直接的に観察することが望ましい。レール断面をこの手法で観察した事例は少なくないが、その目的はレール金属組織の解明を主目的としたもので、摩擦のメカニズムを解明するために踏面状態の詳細な観察を光学顕微鏡より倍率が格段に高い電子顕微鏡を導入した事例は見当たらない。筆者等は1/5スケールの模型ではあるが、車輪が接触したレール踏面を特殊な方法で軌道から分離して電子顕微鏡で観察できる仕組みを構築する事とした。

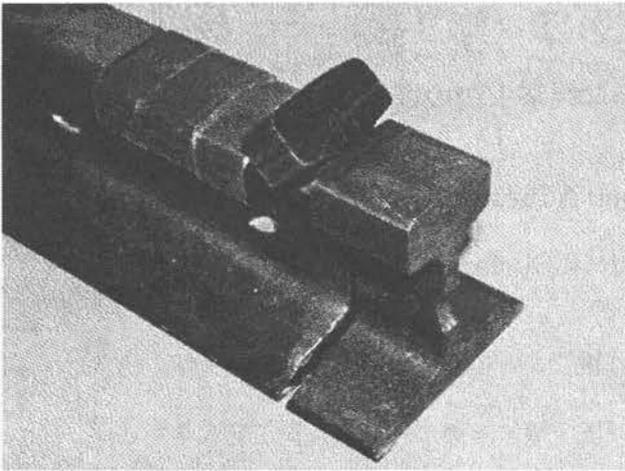


Fig.1 Rail head cut from the rail

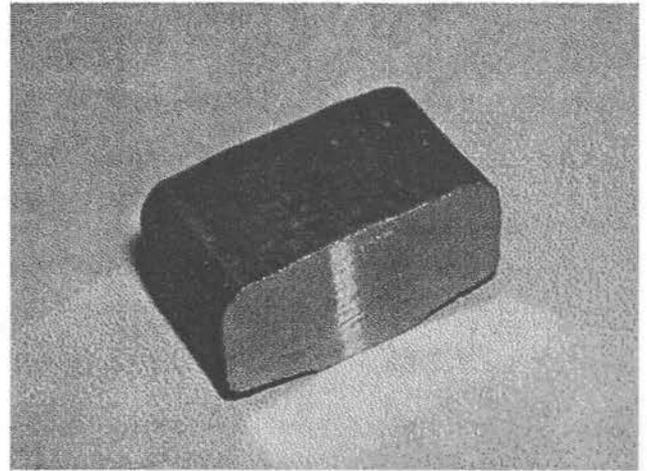


Fig.2 Test specimen taken from the rail head

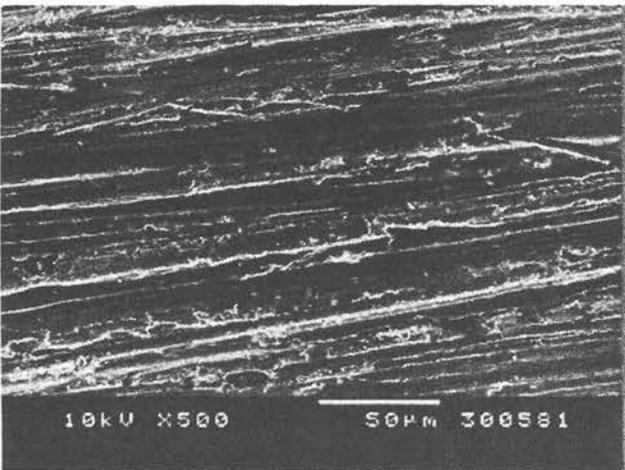


Fig.3 Results of electron microscope observations (x500)

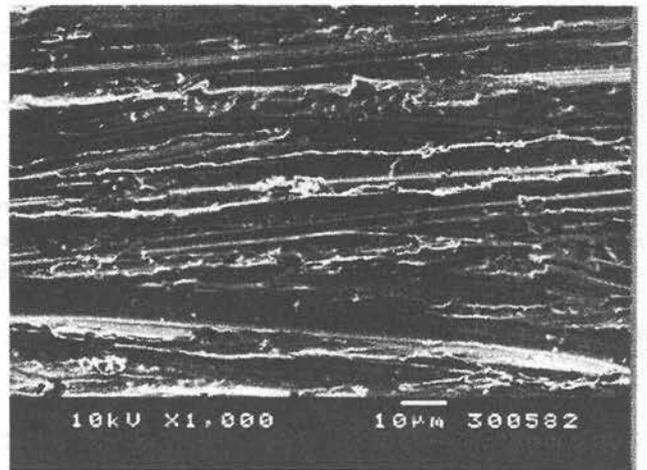


Fig.4 Results of electron microscope observations (x1000)

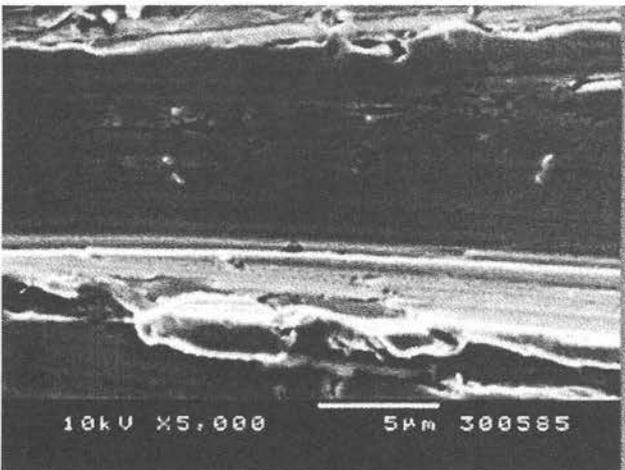


Fig.5 Results of electron microscope observations (x5000)

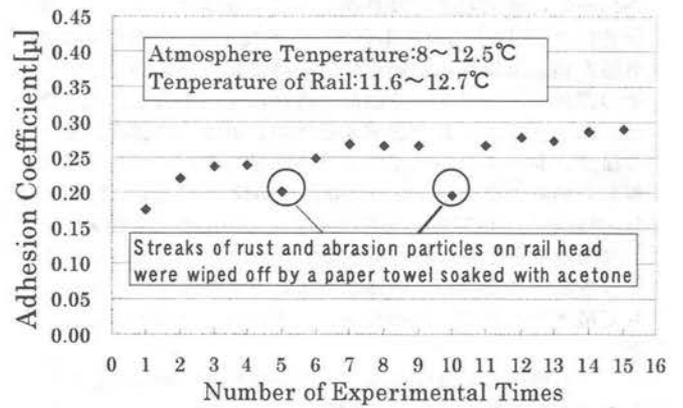


Fig.6 Relationship between wet rail run times and adhesion coefficient

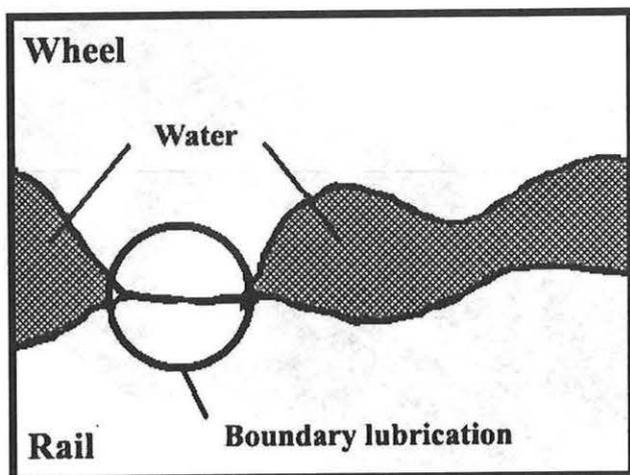


Fig. 7 Boundary lubrication region between wheel and rail

電子顕微鏡での観察を可能とするために模型レールからレール頭部を切り離し、枕木方向に切断した試験片を Fig. 1、Fig. 2 に示す。今回観察に用いた電子顕微鏡に投入できる大きさの制限に合わせ、試験片の寸法はレール長手方向に 13mm、高さは 8mm とした。

電子顕微鏡で観察する前に、過去に報告している μ 計測実験に合わせる事とし、模型レールの実験前初期条件と同様に #60、#180 の順にサンドペーパーで研磨し、アセトンで脱脂した。また、電子顕微鏡で観察しやすくするためにアサヒクリンによる超音波洗浄も行った。

3. 観察結果

3.1 実験用レール

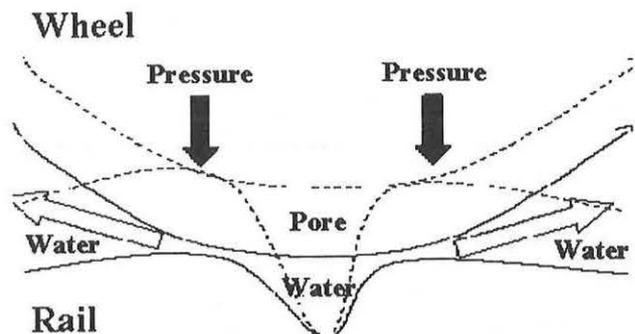
実験に供したレールは 6kg 軽レール (JIS E 1103) である。このレールは用途が工用軌道などに限定されていることから、普通レールに比べ化学成分の規制値がやや緩く、強度や寸法などについての規格も普通レールほど厳格ではないが、製造方法や成分は基本的には普通レールに準じている。

3.2 電子顕微鏡による観察

まずはレール踏面部分の全体的な状況をつかむため、光学式顕微鏡で観察が可能な 500 倍に拡大した状況を Fig. 3 に示す。表面には多くの横方向についた傷が見えるが、この傷は一方方向に合わせて研磨しているサンドペーパーによるものだと考えられる。その傷も全てが一方方向の直線ではなく、所々は鱗のようになっている部分も見える。この鱗のような部分がレールと車輪が接触したとき、微小な隙間の存在に繋がる可能性があるため更に拡大して詳しく観察した。

電子顕微鏡による拡大を先程の倍である 1000 倍とし、同じレール試験片を観察した状況を Fig. 4 に示す。この結果から表面には鱗のような部分だけではなく、更に小さい窪みに類する存在が認められ、これが湿潤時にレール・車輪間状態を少なからぬ影響を及ぼす可能性があるためと判断し、更に拡大倍率を上げて観察した。

5000 倍に拡大して観察した結果を Fig. 5 に示す。この結果から研磨跡である 1 本の筋の中に、顕著な窪みの存在が確認された。観察の結果によると、窪みの大きさは $1\mu\text{m}$ 程度から $5\mu\text{m}$ ほどの物までであった。この窪みが生じた原因は、



Water in the pore gets out to form water film as mixed lubrication

Fig. 8 Possible new lubricant film formation

窪みが研磨傷よりかなり小さい事から実験レールの製造時に生じたものであると判断した。

4. レール湿潤時に窪みが粘着に及ぼす影響

粘着台車を用いてレール湿潤時の μ の挙動を調べた過去の研究⁷⁾で散水を行ったレールでの走行実験を繰り返したとき、本来は挟雑物の堆積や車輪踏面の平滑化によって次第に低下すべき μ が、逆に増加する現象が起きた。この現象が起きた原因は、散水によってレール踏面に極微量な錆が発生し、それが増粘剤として作用したと当時は推定した。そこで、錆の影響を除去するために、レール踏面をアセトンで清拭した直後の状態で μ を測定する実験を行った。しかし、その結果は当初の予想に反し、アセトンを使用した直後の走行実験で μ の値は大幅に低下する現象は見られず、僅かに減少するに止まった。そして、実験を続けると μ は再び元の高い μ に戻った。その時の実験結果を Fig. 6 に示す。この現象が起きた理由はアセトンの使用によって、レール及び車輪踏面の踏面スキマに潜んでいた極微量な介在物がレール踏面に浮き上がり、 μ を僅かに低下させたためと推定した。

レール踏面は車輪との接触の場が境界潤滑の領域を超えて金属接触状態 (Fig. 7) となった時、当然にレール表層部の接触面は塑性変形又は弾性変形する。すると変形が行われる領域内にある窪みは多くも変形し、内部の空隙は完全に喪失する可能性が高い。この場合、空隙内に流体が存在した場合には流体は空隙から排除される。その際、窪み開口部周辺が境界潤滑条件を超えた高い接触面圧で金属接触状態となり、空隙内の流体が密室に閉じ込められても、その流体は空隙消滅により生じた高い内圧により金属接触面を通過して外部に強制的に排出されることになる。その過程では排出される流体により金属接触面は過渡的に潤滑膜が形成され、境界潤滑の場となる可能性がある。

Fig. 6 に示す μ の一時的に低下も、このようなメカニズムが存在するならば一応の説明が付く。その状況を Fig. 8 に示す。さらに、降雨初期に μ が一時的に極端に低下して理論的にはあり得ない値になる現象が起きるメカニズムも、挟雑物を含む雨水が空隙から排出される際に起きる現象とすれば、一応の納得が行く説明が付く。

5. 結論

レール湿潤時の μ の挙動、とりわけ、降雨初期に μ が極端に低下する現象を解明するために、車輪が転動した後のレール踏面部分の状態を電子顕微鏡で観察できる新たな実験用軌道を構築するとともに、当該設備を用いてレール踏面の状態を微細に観察する実験を行った結果、以下のようなことがわかった。

- 1) 新たに構築した実験用軌道を用いることによって、車輪が転動した後のレール踏面部分の状態を極めて容易に電子顕微鏡で観察できることを確認した。
- 2) 高い倍率に設定してレール踏面を観察すると、レール踏面の表層部分には製造上に起因すると推定される開口部が数 μm 程度で内部に空隙がある窪みの存在を確認した。
- 3) 車輪との接触によりレール表層部が塑性変形又は弾性変形して窪み開口部周辺が金属接触状態となって空隙を密室状態とした場合、空隙内部にある流体は空隙の縮小又は消滅により生じた高い内圧により金属接触面を通過して外部に強制的に排出され、その過程で金属接触面が過渡的に潤滑膜が形成されて、境界潤滑の場となる可能性があり得ることがわかった。
- 4) 降雨初期の μ の極端な低下現象は、前記のような従前の接触の概念と異なるメカニズムが機能して起きた可能性もあり得る。

6. 今後の課題

今回の電子顕微鏡による観察結果では、この微小隙間の存在は確認されたが実際に模型台車で走行した後のレール踏面ではない。特に走行実験ではすべり粘着台車を使用しているため、レール踏面は特殊な変化を起こしている可能性もある。

この繰り返し走行によるレール踏面の窪みの変化を調べるため、実験軌道のレール踏面の一部を今回電子顕微鏡で観察した試験片と同じサイズに切り離し、取り外し可能とする事で走行実験による踏面の変化を確認できる装置を開発した。その外観を Fig. 9 に示す。走行実験での車輪・レール間の接触面圧は在来線 T 車の標準的な値である $1.27\text{N}/\text{mm}^2$ に極力近づけている²⁾ため、現在は繰り返し走行での装置全体の耐久性を確認している所である。

また、今回用いた電子顕微鏡では、その構造上から散水時に実際に水が窪みに浸入しているかという確認はできない。走行に応じたレール踏面の変化と、レール踏面の微小な窪みに水が浸入しているかどうかのため、今後は非金属が存在する環境の下で観察が可能な環境制御型電子顕微鏡を導入して観察する必要がある。これらは今後の研究課題である。

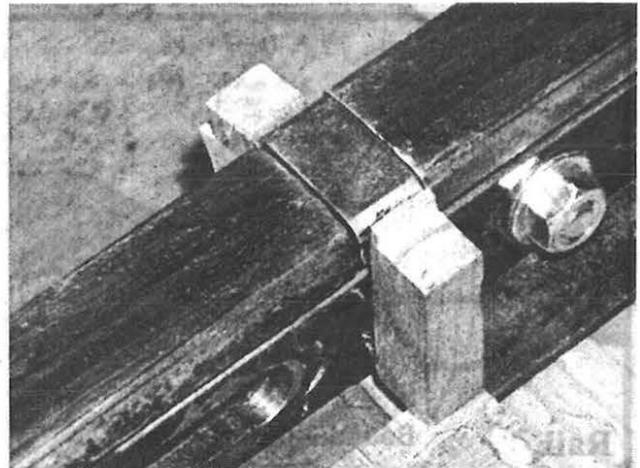


Fig. 9 New experimental apparatus

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、機論 54-504C, pp1852-1860, 昭和 63 年 (1988)
- 2) 今西学、永瀬和彦：レール湿潤時における鉄道車両のレール・車輪間の粘着に関する研究、J-Rail'97, pp107-110
- 3) 東真一、若林雄介、平間淳司、永瀬和彦：降雨量が粘着に及ぼす影響—模型のすべり粘着台車による常温・低速時の実験結果—、J-Rail'01, pp545-548
- 4) 大平晃彦、日下部詳、平間淳司、永瀬和彦：在来線特急電車における滑走の実態 (第 4 報 冬季降雪区間における滑走の実態)、J-Rail'02, pp317-320
- 5) 陳樺、伴巧、瀧川光伸、石田誠、中原綱光：湿潤時のレール・車輪の粘着に及ぼす水温の影響 (第 2 報 混合潤滑理論による実験結果の解析)、J-Rail'01, pp543-544
- 6) 大野、小川：車輪・レール間の粘着への錆の影響、鉄研速報 No.A, pp83-70, 1983
- 7) 東真一、若林雄介、平間淳司、永瀬和彦：降雨量が粘着に及ぼす影響 (第 2 報)、J-Rail'02, pp491-494