

トライボロジーからみた軌道技術の課題

石田 誠*

Subjects on Track Technology focussed on from Tribological Point of View

Makoto ISHIDA

Currently some subjects on track technology are focused on from the tribological point of view. Basically rail problems related to wheel/rail contact are typical tribological issues. Besides rail problems, there are some tribological subjects in the field of track technology. Regarding various interfaces between rail and spring clip of rail fastener, rail and track pad, rail and fish plate, sleeper and ballast, and others involved in track structures, there are many problems or important subjects in order to understand their friction mechanisms and to improve the efficiency of maintenance. However, those subjects have not been tribologically studied enough except wheel/rail interface. On the other hand, track structures and components have been so far designed ensuring some appropriate safety margin under the consideration of large variation of tribological phenomena. In the latest decade, the coefficient of friction of wheel/rail interface has been broadly investigated since a typical wheel flange climb derailment was caused some years ago. Since then the tribological approach has been recognized as a helpful measure to investigate rolling and/or sliding phenomena of wheel/rail systems. This paper describes the current status of research subjects of track technology related to tribological aspects.

キーワード：トライボロジー，軌道技術，軌道材料，材料損傷，軌道座屈

1. はじめに

初めに、トライボロジーとはあまり聞きなれない言葉であろうと思われるので、その意味を紹介する。トライボロジー (tribology) とは、摩擦・摩耗・潤滑のメカニズムなどを扱う学問領域であり、ギリシア語で「摩擦」を意味する *tribos* を語源とする。この言葉は、経済協力開発機構 (OECD) で「相対運動を行いながら相互作用を及ぼしあう表面およびそれに関連する実際問題の科学技術」と定義されている。少々平たく言うと、二つの物体が接触し、擦れ合いながら相互の表面あるいは表面下に影響を及ぼし合う実際問題に関係する科学技術であり、材料、力学、物理・化学などが主な学問領域であると言える。また、トライボロジーは実際問題に関係することから、メンテナンスの問題に深く関わっている。軌道技術に関しても、トライボロジーに関するいくつかの重要な課題があるが、これまでは車輪と接触するレールを除いて、必ずしもトライボロジーの視点から十分な検討が加えられてきたとは言えない。もちろん、それにはその必要性がなかった、あるいはそれほど厳密に検討しなくてもよいように設計されていたとも言えるかもしれない。また、車輪とレールを除いてと断ったが、確かに車輪とレールに関しては、現在の鉄道システムにおいて、

車輪がレール上を滑らずに転がり、そして安全に止まるためには「転がりすべり」という現象を理解することが重要であった。しかし、その車輪とレールにおいてさえ、すべり易さあるいはすべり難さの代表的パラメータである「摩擦係数」に関して、ある乗り上がり脱線事故を契機に、幅広く調査研究が行われ、どのような値を取り得るのかが明らかにされたのも、鉄道の長い歴史の中で比較的最近のことである。一方、「転がりすべり」の現象そのものではなく、車輪とレールにおいてはそれにより生じる摩耗と転がり接触疲労損傷も材料保全の面から極めて大きな課題であった。

ところで、車輪とレール以外の軌道技術に関するトライボロジーの課題は、そのほとんどが「転がり」ではなく「すべり」を対象にし、滑るか滑らないかが大きな問題であり、すべり易さあるいはすべり難さの程度が問題になることはそれほど多くなかった。前述したように、それほど厳密な摩擦管理は行わなくても済むような設計、あるいは、厳密な摩擦管理を必要としない機構が考案されるなど工夫されてきた面もある。

このような背景の下、本稿ではトライボロジーからみた軌道技術の課題と題して、車輪とレール、レールと継目板、レールと軌道パッドを含む締結装置、軌道パッドとまくらぎあるいは軌道スラブ、まくらぎとバラスト、分岐器の各部材間などの「転がりすべり」あるいは「すべり」現象について、トライボロジーの面から解説する。

* 軌道技術研究部 部長

特集：軌道技術

2. トライボロジーに関わる諸現象

2.1 車輪/レール¹⁾

まず、レールに関しては、車輪との「転がり-すべり」現象の解明が極めて大きな課題である。そこで、「転がり-すべり」とはどのようなものかを図1のすべり率と接線力係数の関係（「粘着力特性」あるいは「クリープ力特性」と呼ぶ）により説明する。図に示すように、車輪とレール間のすべり率が小さい領域（「粘着領域」あるいは「クリープ領域」、さらには「微小すべり領域」と呼ばれる場合もある）では、すべり率が大きくなるにつれ車輪とレール間に作用する接線力と呼ばれるせん断力（車両としてみれば駆動力あるいはブレーキ力）が大きくなり、通常はすべり率がある値のとき接線力係数は最大値を示す。その最大接線力係数を鉄道では粘着係数と呼ぶ。そして、この粘着係数を与えるすべり率よりさらにすべり率が大きくなると接線力係数は一定あるいは実際的には小さくなり、この領域を単にすべり領域あるいは巨視すべり領域と呼ぶ。このすべり率の小さい領域のすべりとすべり率が大きい領域のすべりであるが、英語では slip あるいは micro-slip 対 slide と単語が異なるが、日本語では同じ「すべり」である。このようなことから、slip あるいは micro-slip を「微小すべり」、slide を「巨視すべり」と称し、図1の2つの領域を区別することが考えられる。

ところで、図1に示す粘着係数を与えるすべり率のある値を説明するためには、車輪とレールの転がり接触において、その接線応力分布を理解する必要がある。この接線応力分布は、1882年にハインリッヒ・ヘルツが接触応力（いわゆるヘルツ圧力として有名）を求めたことが嚆矢となり、1926年と1927年のほぼ同時期にカーターとフロムにより、それぞれ2次元ではあるが求められた。図2にカーターが求めた接線応力分布を示す。この図において、接触領域の車輪の進入側において車輪とレールの転がり方向の歪が等しくかつ一定である領域（「固着領域あるいは粘着領域」と呼ばれる）と、同去り側において接触圧力が歪を一定に保つには不十分になり、限界接線応力（ $f = \mu p$ ； f ；接線応力， p ；接触圧力）ですべ

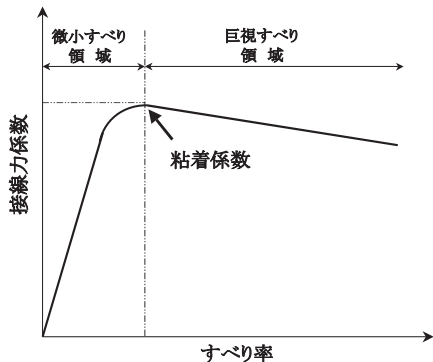


図1 一般的な車輪/レール間粘着力特性

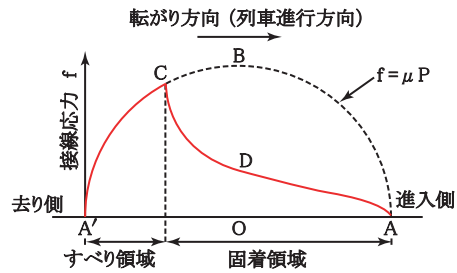


図2 カーターの接線応力分布

る領域（「すべり領域」と呼ばれる）を示す。ここで、図1の粘着係数を与えるすべり率とは、この固着領域がすべり率の増加に伴いすべり領域に徐々に変化し、接触領域すべてがすべり領域になる時のすべり率である。また、接触領域すべてがすべり領域になることは、粘着係数が動摩擦係数あるいはすべり摩擦係数とほぼ同じ現象を表していると考えられる。ただし、その場合は乾燥状態であり、車輪とレール間に水などの流体が介在し、特に湿潤状態で高速走行する場合は、走行速度に依存する流体の膜厚さと車輪とレールの表面粗さにより粘着係数が大きく影響される。この分野は、弾性流体潤滑理論（Elasto Hydro-dynamic Lubrication）を応用して研究が進められている。この粘着係数あるいは動摩擦係数は、安定した高速走行を可能にする駆動力とブレーキ力を得るためには大きいことが望ましく、逆に半径の小さい曲線における低速走行時の乗り上がり脱線を防ぐためには小さいことが望ましいなど、車両の走行条件に応じて制御できることが大いに期待される。

一方、接線応力分布においては、カルカーの3次元弾性転がり接触理論に基づき、弾性に限られた条件であるが、様々な荷重や摩擦係数等の接触条件の下に、接線応力分布を求めることができる。このような車輪とレールの「転がり-すべり」において、車輪とレールは摩耗しあるいは疲労して損傷が生じる場合がある。レールの摩耗については、曲線外側レール（外軌）の頭側部の側摩耗および図3に代表的な例を示す車輪との動的相互作用とすべりが複合した波状摩耗が重要な問題である。また、図4に示す摩耗と疲労の相対的な関係において生じるきしみ割れと呼ばれるレール頭側部の頭頂面に近い部分に比較的狭い間隔で連続するき裂は、そのき裂のうち



図3 曲線内側レール（内軌）の波状摩耗の例

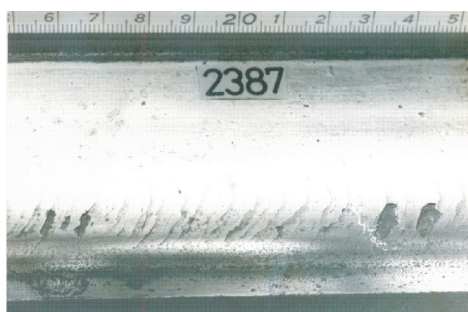


図4 曲線外側レール（外軌）のきしみ割れの例

頭部深くまで成長しレール折損に至るものもある。

一方、主に直線のレール頭頂面に生じるレールシェリングと呼ばれる転がり接触疲労損傷は、その探傷作業や予防研削作業などこれに関わるレール保守作業に多大な費用を要している。さらに、レールに関するトライボロジーの課題として、分岐器を構成する部材は、車輪との厳しい接触により摩耗や損傷が生じ、保守上の大きな問題である。特に図5に示すトングレール先端の摩耗は、軌道変位(狂い)整備や材料工学など多方面からの検討が重要である。また、分岐器は信号の軌道回路を構成する上でも重要であり、特にトングレールと基本レールは物理的にも電気的にも十分な接触を確保することが重要である。



図5 トングレール先端部付近の摩耗状況

2.2 レール／継目板・締結装置

レールと継目板の接触に関しては、いわゆる普通継目(溶接継目と区別するために、よく普通という言葉が付加される)軌道における遊間管理において、レールとボルトで締結された継目板との継目拘束力が問題となる。この継目拘束力は、レールと継目板の接触面の摩擦係数と継目板をレール腹部に押し付けるボルト軸力に依存する摩擦力であり、ボルトの締結トルクで管理されている。これは、摩擦力を直接測定できないことと、またボルト軸力も測定が容易でないため、比較的容易に測定できるボルトの締結トルク(ボルトとナットのねじ部の山と谷の摩擦面の押し付け力と摩擦係数に依存する)が用いられている。つまり、継目拘束力はいくつかの間接的な摩擦力を介して最終的に管理できる摩擦力に着目して評価されている。その場合、設計では安全側に見積もっ

ている関係する摩擦係数が想定内であることが重要である。例えば、締結ボルトとナットのねじ部の摩擦係数が想定と異なると、ボルト軸力が想定外となり、またレールと継目板との摩擦係数が想定と異なると、想定する継目拘束力と実際との誤差が大きくなる。したがって、実務上は走行安全性を確保しつつ、精度の良い継目拘束力の推定を可能にするために、関係する構造の摩擦面の摩擦係数のばらつきをできるだけ小さくする工夫が極めて重要である。

一方、レールと継目板の接触において、車輪からの作用力により普通継目が上下にたわみ、レールと継目板の接触境界部で微小な相対すべりが生じるが、そのすべりが繰り返されるとその部分からき裂が発生することがある。これをフレッチングと呼び、レールと継目板のどちらかに生じ、そのき裂が成長して折損に至る場合もある。

次に、レールと締結装置の接触に関しては、バラスト軌道において、レール軸力やレール長手方向の作用力によりレールが移動する場合、レールとまくらぎ間の抵抗であるレールと締結装置間の移動抵抗がまくらぎとバラスト間の抵抗である道床縦抵抗を上回り、レールとまくらぎが一体となって移動する設計になっている。つまり、道床縦抵抗よりレールとまくらぎ間の移動抵抗が上回るように締結装置の締結力が設計されている。その締結装置の締結力に関して、締結ボルトを用いる場合は、継目拘束力と同様に締結トルクで管理されている。この場合、レールと締結装置間の移動抵抗は、締結ばねとレール間の摩擦係数と締結ばねがレール底部上面を押える力およびレール底面と軌道パッド間の摩擦係数とレール底面が軌道パッドを押える力に依存する。つまり、レール底部上面と底面の双方の摩擦力の合力がレールと締結装置あるいはまくらぎ間の移動抵抗となるが、その押え力は締結ボルトの軸力から得られるものであり、その軸力は、継目拘束力と同様に、比較的容易に測定できる締結トルクで管理されている。ここでも、レールと締結装置あるいはまくらぎ間の移動抵抗はいくつかの間接的な摩擦力を介して、最終的に管理できる摩擦力で評価されている。したがって、継目拘束力と同様に、設計では安全側に見積もっている摩擦面の摩擦係数のばらつきをできるだけ小さくする工夫が重要である。

さらに、スラブ軌道におけるレールと締結装置の接触に関しては、バラスト軌道と異なり、レールと締結装置あるいは軌道スラブとの移動抵抗は、軌道スラブの移動を防止するために設けられている突起部を破損しないように設計されている。つまり、突起部が破損しないように軌道スラブに作用する力を抑制するためには、軌道スラブに作用する温度荷重や軌道スラブを支持する下部構造であるCAモルタルとの摩擦抵抗の他に締結装置を介してレールから作用するロングレール縦荷重があるが、

特集：軌道技術

このロングレール縦荷重をある一定値以下に制御するために、レールからのレール長手方向の作用力がある一定値を超えるとレールと締結装置間ですべりが生じることを前提としている。平たく言うと、レールは締結装置との間でバラスト軌道ではすべらないが、スラブ軌道ではある一定値を超えるとすべるように設計されている。このために、スラブ軌道で用いる軌道パッドにはレールと接触する側に鋼板が貼られており、すべらせるために摩擦係数を安定して低下する工夫がなされている。

2.3 まくらぎ／道床²⁾

前節では、レール長手方向のレールと締結装置あるいはまくらぎ間の移動抵抗に関して、まくらぎとバラスト間の道床縦抵抗力に触れたが、ここではロングレール軌道の軌道座屈に関して、道床横抵抗力について紹介する。普通継目は欠線部やその後の落ち込みにより常に保守を必要とするため、溶接継目によりその衝撃を抑制するロングレールが普及されてきた。そのロングレールで最も注意を払う現象の一つが、図6に示す軌道座屈である。



図6 軌道座屈（実物大試験）

この軌道座屈を抑制する抵抗力は、まくらぎ底面と側面のバラストとの摩擦抵抗およびまくらぎ端面がバラストを押し退ける抵抗力である。この抵抗力を道床横抵抗力と呼び、各種まくらぎの横引き試験から、軌道諸元に応じた以下に示す実験式が提案されている。

$$F = aW + brG_e + crG_s \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

F：まくらぎ1本当たりの道床横抵抗力 (kgf)

W：まくらぎ1本当たりの軌輻重量 (kgf)

(軌輻：レール，まくらぎ，レール締結装置および付属品の合計)

r：道床単位重量 (kgf/cm³)

G_e：まくらぎ端面の上辺周りの断面1次モーメント (cm³)

G_s：まくらぎ側面の上辺周りの断面1次モーメント (cm³)

a,b,c：まくらぎおよび道床種別に応じた係数

式(1)の道床横抵抗力のうち係数aがまくらぎと道床

間の摩擦係数に相当する。道床バラストとして碎石を用いた場合の係数aは0.75を標準としているが、最近の試験結果によると、PCまくらぎ／バラスト(碎石)間で0.75より大きな値が提案されている。

一方、ロングレールが何らかの理由で破断した場合、その部分の破断時開口量が問題となる。この場合、レールと締結装置あるいはまくらぎ間の移動抵抗が大きいほど開口量は小さくなる。したがって、バラスト軌道においては、レールと締結装置あるいはまくらぎ間の移動抵抗は大きい方が有利であるが、スラブ軌道においては突起部の強度等の制約から締結装置の締結力はある限度以下に適正に管理することが重要である。

なお、道床横抵抗力に関しては、ロングレール軌道における軌道座屈とともに、曲線通過時の車両の輪軸横圧(左右車輪からレールに作用する横圧の合力)に対して軌道が滑動して左右方向の安定性を喪失する現象である急激な通り変位(狂い)の検討において、重要な役割を果たしている。この検討においては、軌道座屈において対象とした輪重載荷のない場合の道床横抵抗力に左右レールのレール圧力と呼ぶ輪重のまくらぎ1本当たりの負担分にまくらぎ／バラスト間の摩擦係数を乗じた抵抗力を加えたまくらぎの横移動に対する抵抗力を、左右レールのレール横圧力と呼ぶ横圧のまくらぎ1本当たりの負担分であるまくらぎを横移動させる作用力と比較して評価するが、その評価において特にまくらぎ／バラスト間の摩擦係数の影響が大きいとされている。

3. おわりに

トライボロジーに関わる軌道技術に関する課題について紹介したが、代表的である車輪／レール間に関して最も基本的である摩擦係数が幅広く調査されたのは最近になってからであり、トライボロジー的には未解明な点が多い。また、まくらぎ／バラスト間の摩擦抵抗が軌道座屈の防止に重要な役割を果たしていること、あるいはスラブ軌道においてはある一定の荷重以上でレールと締結装置間ですべる設計になっていることなどを理解していただき、軌道に関するトライボロジー現象をより身近に感じていただければ幸いである。なお、それらの課題に対する対策については、例えば車輪／レール間の潤滑と研削、まくらぎ／道床間の座屈防止板等があるが、別の機会に紹介したい。

文献

- 1) 石田誠：レール・車輪系の接触に関わる理論と実務のこれまでの発展，トライボロジスト，45-7, 2000, pp.9-14
- 2) 須田征男ほか編：新しい線路，日本鉄道施設協会，1997