

## 〔基調講演〕

# レール・車輪接触力学研究会 (JSCM)

The Japan Society for Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems

正〔土〕 石田 誠 (鉄道総研)

Makoto Ishida, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji-shi, Tokyo

### 1. 背景

鉄道における、レールと車輪の接触問題については、その重要性にもかかわらず、学問的には土木工学と機械工学、トライボロジーの境界領域に位置し、鉄道事業者においては施設と車両、メーカーにおいてもレールメーカーと車輪メーカーに別れるなど、統一的、総合的な見地からの議論が少ない状況にある。

従来、土木学会、日本機械学会、電気学会が共催する鉄道技術連合シンポジウム (J-Rail) や、各学会の研究会において議論する機会はあるが、わが国における本格的なこの分野の学術的な活動は、関係者が一同に会し、協力体制の基に運営、開催した国際会議 (第 5 回レール・車輪の接触力学と摩耗に関する国際会議; 通称 CM2000) が初めての機会であったと考えられる。

CM2000 国際会議は、東京大学生産技術研究所が主催、日本機械学会、土木学会の共催、運輸省 (当時) が後援という枠組みであったが、国内組織委員会、幹事会は、鉄道事業者、メーカー、大学・研究所における土木、機械双方からメンバーが集まり、交流の場としての機能もあったと考えられる。

CM2000 国際会議が成功裏に終了し、その後取りまとめた論文集を WEAR として出版する事業も完了した現在、その使命も終了することになるが、この分野の研究開発の重要性は一層高まっている。一例として、CM2000 国際会議の直前に発生した地下鉄脱線衝突事故は、車輪とレールの接触問題、踏面形状やレール形状、車輪研削やレール削正、摩擦特性の正確な把握、緩和曲線の線形や軌道管理手法、軌道条件を考慮した台車の設計手法、などの検討、脱線安全性の新たな指標の必要性が取り上げられ、一層の研究推進を迫る結果となった。

### 2. 組織

- (1) 名称: 「レール・車輪接触力学研究会」 (The Japan Society for Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems; JSCM)
- (2) 団体資格: 任意団体
- (3) メンバー:
  - ・ CM2000 組織委員、幹事 (交替旧メンバーも含む)、査読委員
  - ・ 官・大学・事業者・メーカー
- (4) 活動:
  - ・ 研究者、技術者の交流の場として、研究会を年に 2 回程度研究会の開催
  - ・ 研究会では、話題提供、情報交換を実施
  - ・ メインテーマを定めてそれについての研究協力・調査・情報交換を実施

- ・ 今後の「レール／車輪の接触力学と摩耗に関する国際会議」への協力
- ・ 見学会や学術講演会を企画
- ・ 既存の学術講演会 (例えば J-Rail など) へオーガナイズドセッション企画などで協力
- ・ 年度末には、研究会の活動報告書を作成
- ・ 将来の鉄道学会の設立も視野にいたした活動を展開

#### (5) 活動資金および予算:

- ・ 活動資金は、当面現有資産の活用を基本とするが、イベントごとに参加費 (資料代) として会費を集めることを検討
- ・ 今後の活動方針、予算、組織形態については発足後必要に応じて検討
- ・ 国土交通省、日本機械学会、土木学会、トライボロジー学会の協力を得る

#### (6) メイン活動テーマ案:

- ・ 軌道と車両の相互作用に伴う諸問題
- ・ レール断面形状と車輪頭頂面形状の最適化
- ・ レールの削正、車輪の転削手法
- ・ 波状摩耗
- ・ レール・車輪間の摩擦制御手法
- ・ レール・車輪材料
- ・ 転がり騒音問題
- ・ 転がり疲労問題

### 3. レール・車輪接触問題の最近の動向

ここで、レール・車輪接触問題を取り巻く最近の動向について、筆者の独断を少々お許しいただき、述べさせていただきます。接触問題を粘着・摩擦、材料強度および接触幾何学とダイナミクスといった面から整理すると、以下のようなことが考えられる。

#### 3.1 粘着・摩擦

(1) 高速走行時の湿潤状態における粘着係数の低下、特に低温において加速・減速が困難になり、車輪の空転・滑走が起こる問題は現在までの EHL (Elasto-Hydro dynamic Lubrication: 弾性流体潤滑) 理論を応用した混合潤滑状態 (水膜が存在するものの粗さ突起部が固体接触する状態) の解析により、低速時は水の粘度が大きく水膜の厚さが大きくなるのに応じて、粗さ突起部の固体接触領域が減少し、粘着係数が低下することが明らかになっている。最近実験的にも確認されている。

このようなメカニズムを考慮すると車輪／レール間に固体をからませるあるいは表面粗さを大きくして固体接触部

分を増加させることが粘着係数の改善に効果的であると期待できる。一方、車輪／レール間に侵入する水の温度を上げること考えられる。

(2) 低速域における車輪・レールの摩擦係数の制御に関する問題点として、急曲線内軌波状摩耗と乗り上がり脱線がある。急曲線内軌波状摩耗は、R400 以下の曲線を台車が通過する際に、その台車が持つ軸箱支持剛性に応じてアタック角を生じ、そのアタック角に起因する台車前軸の車輪踏面と内軌頭頂面の横クリープ力（横圧）によりレールが小返り、継目等において輪重が変動するとレール小返りを抑えていた輪重×摩擦係数の抗力が変動し、それに伴ってレール小返り振動が励起され、主にレール横方向の摩擦によりレール頭頂部が摩耗することが一つのメカニズムであると考えられている。

一方、乗り上がり脱線も波状摩耗と同様、台車前軸の内軌側車輪と内軌間の横クリープ力により、前軸は曲線外方に押し出され、前軸と外軌間に生じる横圧が脱線の発生要因となる。急曲線では、内軌の横クリープ力は粘着限度ぎりぎりである場合が多く、その結果外軌の横圧が増大し、外軌側輪重が小さいとき、外軌ゲージコーナと車輪フランジの接触によって得られるいわゆるフランジ反力と呼ばれる横圧がつりあうために必要となる。その外軌ゲージコーナと車輪フランジの接触において、アタック角を持つ車輪はフランジ接触面の横クリープ力でレールを乗り上げろうとする。その際に、摩擦係数が大きいと乗り上げろうとする力が輪重を超えると車輪がレールに乗り上がり、さらに横圧が継続して作用したり、輪重が減少する場合に脱線が生じる。

このように記述される脱線メカニズムにおいて、車輪とレールの接触点に作用する粘着力である前後接線力（車輪を曲線に沿って案内するので案内力と呼ばれる）と車輪を上方に押し上げる左右接線力の 2 方向のいわゆる摩擦力がどのように作用しているのかが重要である。最近の鉄道総研における研究成果において、すべりの大きいフランジ接触部では、アタック角によらずクリープ力は飽和状態にあり、アタック角の増加とともに前後接線力が減少して左右接線力が増加し乗り上がりやすくなるほか、車輪上昇量が大きくなるほど前後接線力が増加して相対的に左右接線力が減少し、車輪が乗り上がりにくくなることが明らかになった。乗り上がり脱線に対する安全性評価という点では、大きな摩擦係数の値が発生する原因を明らかにし、どの程度の値まで見込むべきかという問題を解決する必要がある。

### 3. 2 材料強度と車輪とレール材の相互関係

(1) レールの転がり接触疲労のうち、特に日本において問題点となっているレールシェリングは列車荷重の大きさに依存して極表層の塑性変形の大きい部分き裂が発生し、それが転がり荷重により進展していくと考えられている。その極表層の塑性変形は、車輪とレールの表面粗さの突起部の接触により生じるため、塑性変形により突起部の形状を変えながら塑性変形が進展していくという非常に定量化が困難な現象であると考えられる。

また、このような捉えどころのない局所的な塑性変形の進展によりある限界値に達した部分にき裂が発生すると考えられるが、まだ十分に解明されていない。ただし、このようなメカニズムを仮定するとそのような激しい塑性変形を研削により削り取ってしまうか、あるいは摩耗により徐々に取り除かれる状況にするのか、さらにはある程度期

待する使用期間中に塑性変形の限界に達しない材料を用いるのかなどが対策として考えられる。

(2) 車輪とレールの摩耗に関して、現在問題となっているのは、曲線において発生するレールゲージコーナの側摩耗と車輪フランジの直立摩耗である。この摩耗は曲線走行時の車輪とレール間に生じる荷重に起因する接触応力とアタック角等に依存する接触点におけるすべり率が大きな要因と考えられる。さらにその接触点の摩擦係数と材料特性が摩耗進みを決定する重要な要因である。

このようなメカニズムを前提に車輪とレールの接触面積と接触点を決めるそれぞれの形状を検討し、摩耗しにくい材料特性を有する材料等の採用などが考えられるが、一般的に摩耗が少ない材料は疲労損傷の発生する可能性が高まるなど摩耗と疲労のバランスが問題となることが多い。そのバランスを考慮し、材料開発等を検討する必要がある。

(3) レールの腐食・侵食に関しては、車輪とレール間に作用する荷重に耐えられ、使用環境においても問題のない耐腐食性の強い材料開発、あるいは表面処理が期待される。力学的には、形成される腐食ピットの形状等も応力集中の小さいものが望ましい。

### 3. 3 接触幾何学とダイナミクス

(1) 車輪とレールの形状と振動・騒音の関係については、車輪とレールの接触による車輪／レール間の表面粗さの塑性変形と摩耗を伴うきしり音の発生メカニズム、あるいは、車輪とレール間の作用力に励起された振動により放射される音の現象解明が重要な課題である。そのメカニズムに基づき新たな形状と材質の開発が期待される。

(2) 車輪／レールの接触幾何と車両走行特性については、3次元弾性転がり接触理論としてカルカーの理論があるが、曲線通過時のレールゲージコーナと車輪フランジの接触部の接触応力と接線応力、さらにはレール頭頂面と車輪踏面も接触するいわゆる 2 点接触の場合の前後、左右接線力を求める理論あるいはモデルの構築がより詳細な車両と等の開発が期待される。

### 4. おわりに

以上、レール・車輪接触力学研究会の概要とレール・車輪接触問題の最近の動向について、紹介させていただいた。この分野は、鉄道技術に関する代表的な固有の分野の一つであり、現在の鉄道システムのより一層の発展を実現するためには、この分野の学術的・実務的発展が極めて重要かつ大いに貢献することが期待されている。この分野に関係する皆様の本研究会へのご参加とご支援をよろしくお願い申し上げます。