

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

レールの摩耗進展・き裂発生を予測する

レールは車両を支持するだけでなく、車両の駆動力や制動力の伝達、車両の案内、軌道回路を構成するなど、さまざまな役割を担っています。一方で、車輪と転がり接触することにより、レールには著大な接触荷重やすべりがもたらされます。その結果、レールには摩耗やき裂が生じることが知られています。そこで鉄道総研では、レールにおける摩耗進展やき裂発生を予測する解析モデルを開発しましたので、紹介します。

はじめに

鉄道のレールは列車の通過にともなう、車輪と転がり接触します。そして、著大な荷重やすべりが車輪と接触するレールの表面（レール頭頂面）にもたらされます。その結果、レール頭頂面において摩耗が生じ、その程度に応じてレールを交換することとなっています。また、車輪とのくりかえし接触によりレール頭頂面に疲労が蓄積し、図1(a)に示すシェリングや図1(b)に示すきしみ割れとよばれるき裂の発生が一部で確認されています。このようなき裂の発生は、摩耗と密接な関係があります。これらの観点から、摩耗進展やき裂の発生を精度よく予測することは、鉄道の安全を確保する上で、非常に重要となります。

これまでレールにおける摩耗進展やき裂発生を予測する解析モデルは、あ

る一つの地点における車輪／レール接触状態からのみ予測していました。しかし、車輪／レール接触状態は列車の走行条件や直線や曲線といったレール敷設状況によって大きく変化するため、摩耗進展状況やき裂発生状況も場所によって大きく異なります。この複雑に変化する摩耗進展／き裂発生を精度よく予測するために、筆者らはマルチボディダイナミクス（※参照）を活用した、レールの摩耗進展予測モデル¹⁾ならびにき裂発生予測モデル²⁾を開発しました。マルチボディダイナミクスを活用することにより、複雑に変化する車輪／レール接触状態を反映させることができるため、さまざまな場所や走行条件におけるレールの摩耗進展やき裂発生を予測することができます。ここでは、これらの解析モデルについて紹介します。



辻江 正裕
Masahiro Tsujie
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員



坂井 宏隆
Hiroataka Sakai
鉄道力学研究部
計算力学研究室
主任研究員



浦川 文寛
Fumihiko Urakawa
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
副主任研究員

※ マルチボディダイナミクス

鉄道車両や自動車のように、多数の物体や部品からなる機械の運動を、コンピューターを駆使して解析する学問分野です。鉄道分野では、車両運動解析や車輪／レール接触解析などで活用されます。

摩耗進展予測モデル

レールにおける摩耗進展は、車輪／レール接触の影響を大きく受けるため、直線や曲線といったレール敷設状況に大きく依存します。そこで、前述のとおりマルチボディダイナミクスによる

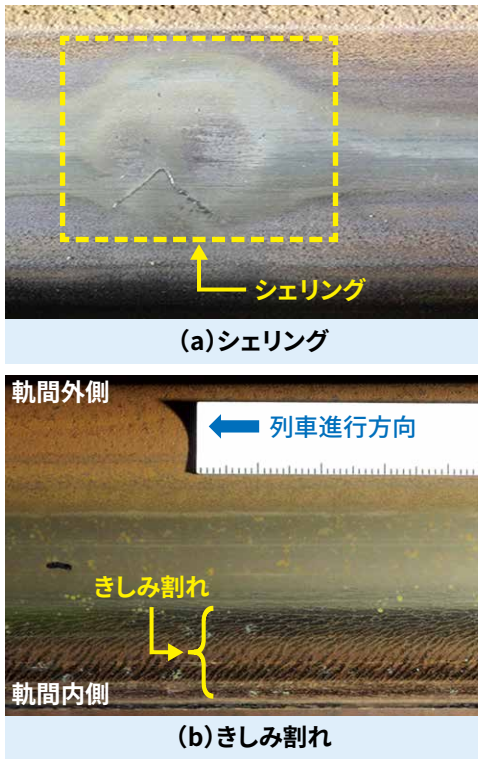


図1 レールのき裂発生事例

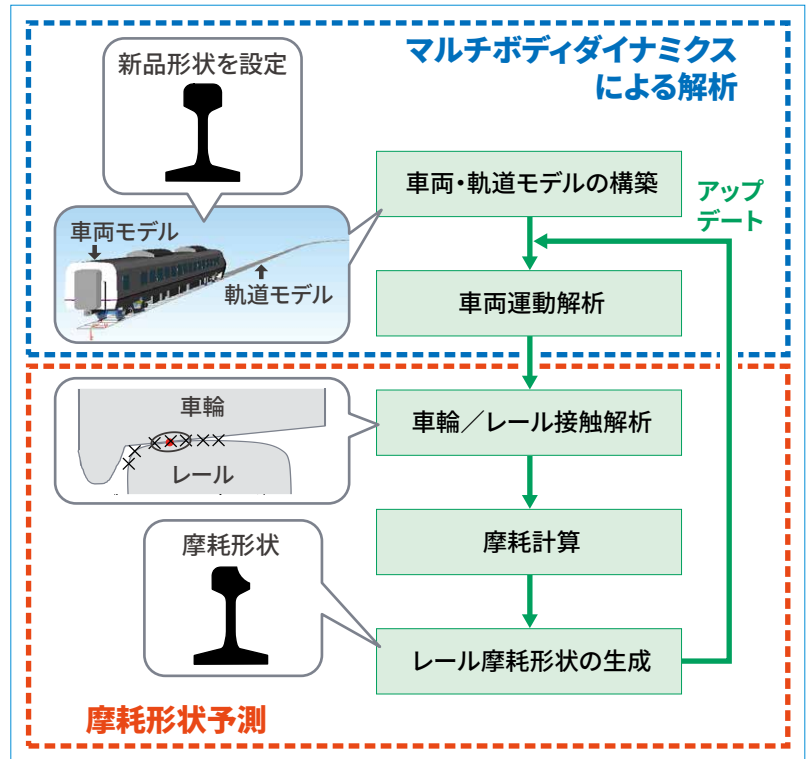


図2 摩耗進展予測のフローチャート

車輪／レール接触に基づいた、レールの摩耗予測モデルを構築しました。摩耗進展予測モデルのフローチャートを図2に示します。解析手順は以下のとおりです。

- (1) マルチボディダイナミクスのツール上に、対象となる車両モデルと軌道モデルを構築します(図2)。とくに軌道条件として、曲線半径やカントのほか、初期のレール断面形状を設定します。
- (2) 構築した車両モデルならびに軌道モデルの条件で、マルチボディダイナミクスツールにより車輪／レール接触状態(輪重や横圧(※参照)など)を算出します。
- (3) マルチボディダイナミクスより得られた結果に基づき車輪／レール接触解析を実施し、さらに詳細な車輪／レール接触状態(応力分布など)を算出します。軌道モデル上に任意の間隔で設けた、観測点における車輪／レール接触状態から摩耗計算を実施し、摩耗量を算出します。一般的

- に車輪／レールの転がり接触によって生じる摩耗の形態は、凝着摩耗(※参照)と考えられています。そこで、本モデルにおける摩耗量の算出においては、凝着摩耗の予測式の一つであるアーチャード(Archard)摩耗則(※参照)を用いて算出しています。
- (4) 軌道モデルに配置したレール断面形状と算出された摩耗量から、レールの摩耗断面形状を形成します。そして形成した摩耗断面形状のレールを軌道モデルにアップデートします。その後、摩耗形状にアップデートした軌道モデルにおいて、再度、(2)に示す車両運動解析を実施します。軌道モデルにおいては、一定の間隔で観測点(観測点の間隔は任意に指定できます)を配置し、これらの箇所について摩耗形状を予測することで、軌道モデル内におけるさまざまな箇所における摩耗形状変化を時系列で予測することができます。本モデルでは、軌道モデルに組み込むレールの断面形状は任意に設定できるため、新しい断面

形状のレールにおける摩耗進展を予測することができます。また、アーチャード摩耗則における材料パラメータを任意の値に設定することで、新しい材料のレールにおける摩耗進展を予測することができます。このように本モデ

※ 輪重

車輪／レール間に作用する力のうち、上下方向の成分の力。輪重は、車両の重量を支える静止輪重と、車両の運動による動的重さの和で与えられます。

※ 横圧

車輪／レール間に作用する力のうち、左右方向の成分の力。

※ 凝着摩耗

転がり接触のように二つの物体が相対的に移動している場合、その摩擦面において、摩耗粒子が形成、脱落・排出されることで生じる摩耗形態。

※ アーチャード摩耗則

凝着摩耗を予測する式であり、摩耗係数や接触状態、物体の硬さから摩耗量を算出します。ここで、摩耗係数は材料固有の値であり、室内試験結果から算出される値を採用します。

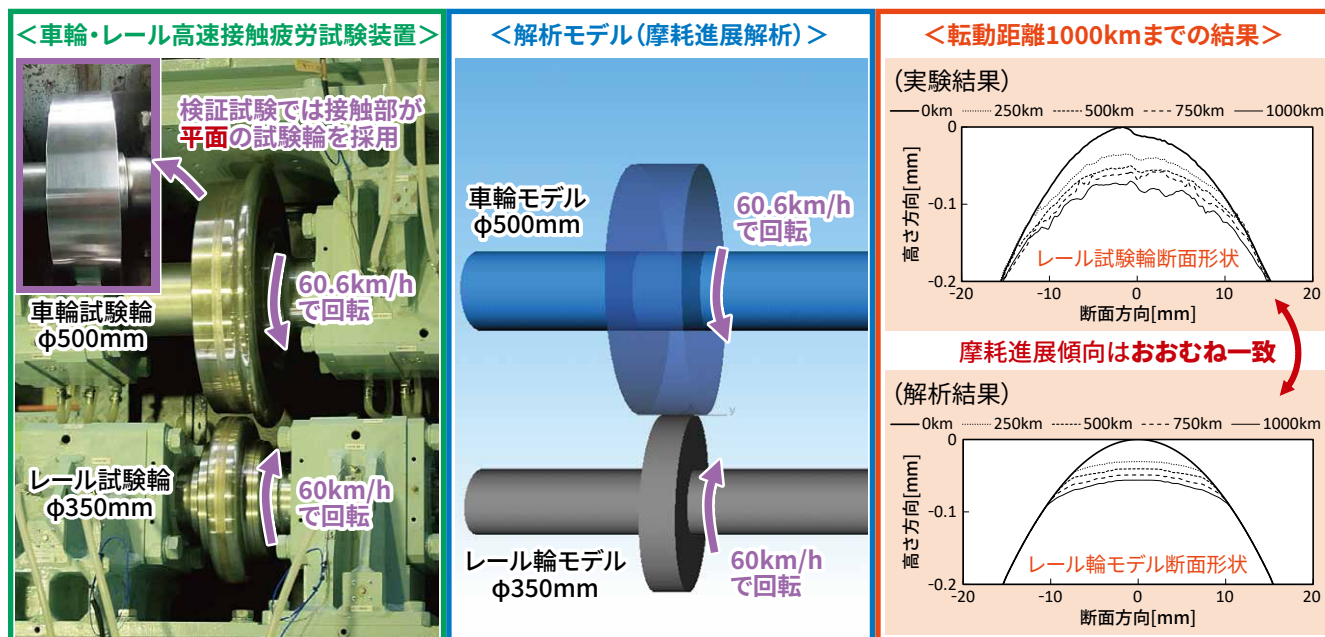


図3 実験結果と解析結果の比較

ルでは、現在用いられているレールだけでなく、新断面形状や新材質レールにおける摩耗進展に対しても、室内摩耗試験や営業線における敷設試験に先立ち、理論的に予測・評価することが可能となります。

解析結果の妥当性精度を検証するためには、営業線に敷設したレールの摩耗進展状況と比較することが考えられます。しかし、営業線ではさまざまな走行条件や車輪踏面形状の車輪が通過するため、摩耗進展状況も一様ではありません。そこで同じ接触状態がつねに再現できる車輪・レール高速接触疲労試験装置による室内摩耗試験、ならびに同じ条件を模擬した摩耗進展解析を実施しました。その結果、両者における摩耗進展の傾向はおおむね一致していることから、本モデルの妥当性は検証できていると考えられます(図3)。

今後は本モデルを活用して、摩耗進展によるレール断面形状の変化が車輪／レール接触状態に及ぼす影響に着目し、き裂発生対策の研究開発を進めていく予定です。そのほか、営業線に敷設したレールにおける摩耗進展状況と

比較検証するなど、モデルの精度向上を進める予定です。

き裂発生予測モデル

図1に示すき裂の発生を予測するために、車輪／レール接触解析に基づいた、き裂発生予測モデルを構築しました。き裂発生予測モデルのフローチャートを図4に示します。図4に示すように、き裂発生予測モデルは、き裂の発生予測と、発生したき裂の大きさに基づいた2つのステージのき裂進展予測の3つから構成されます。解析手順を以下に示します。

- (1) マルチボディダイナミクスのツール上に、対象となる軌道モデルと車両モデルを構築します。そして車両運動解析を実施し、車輪／レール接触状態(輪重や横圧、接触位置など)を算出します。
- (2) 車輪との接触によりレール頭頂面に作用する応力やひずみを算出するために、有限要素解析(☞参照)を実施します。
- (3) 算出した応力やひずみの値が、材料のき裂発生に対する限界値を超過

した場合、き裂が発生すると判断します。

- (4) き裂発生に至る場合、結晶粒(☞参照)内において進展する微小なき裂(ステージⅠ)について、その進展を予測します。

- (5) 初期の微小なき裂が進展し、その大きさが3粒子径以上(約100 μ m)に達すると、近接するほかのき裂と結合して大きなき裂(ステージⅡ)へと成長します。一方、表層における摩耗進展については、前述のアーチャード摩耗則を適用し、深さ方向の摩耗進み量を算出します。そして、算出したき裂進展速度と摩耗進展速度から、き裂と摩耗の発生を予測します。

☞ 有限要素解析

複雑な形状の部品における応力や変形を求めるため、単純な形状の集合体になるよう分割し、解析する手法です。

☞ 結晶粒

レールや車輪のような金属材料は、多くの結晶粒が集まって形成されています。レールについてはおもに、フェライトとパーライトとよばれる結晶粒で構成されています。

このようにき裂の発生予測は、き裂の発生ならびに微小なき裂の進展速度を予測して実施します。またき裂の発生予測は、レール表層における任意の位置ならびに寸法で行うことができます。レール表面直下の1mm×1mmの矩形を領域とした、解析結果例を図5に示します。

レールはおもに、フェライトとパーライトとよばれる結晶粒で構成されています。そこで図5に示すように、結晶粒が集まったモデルを構築しています。またオレンジで示す線が結晶粒内に発生した微小なき裂(ステージI)で、赤で示す線がより成長したき裂(ステージII)になります。図5では上部がレール表層を示しますが、摩耗進展速度に応じてレール表層の結晶粒を除去することで、摩耗進展を表現しています。

したがって、摩耗進展によりレール表層の結晶粒が除去される速度とき裂が発生し成長する速度を比較し、結晶粒が除去される速度が速い場合は、摩耗進展によりき裂が発生しないことを意味します。逆に、結晶粒が除去する速度が遅くき裂が残存した場合は、き裂が成長することを意味します。

本モデルでは、レール鋼の材料パラメーターを変更することにより、さまざまなレール鋼のモデルを構築することができます。そして、これらのモデルにより、摩耗進展とき裂発生ならびに進展の競合について解析を実施することで、さまざまな材質のレールに対する投入箇所(緩曲線や急曲線)の検討や新材質レールの開発に活用することが期待できます。

本モデルの課題として、モデルの検証が不十分であることがあげられます。そこで今後、車輪・レール高速接触疲労試験装置により車輪/レール接触を模擬した転がり接触試験を実施し、本

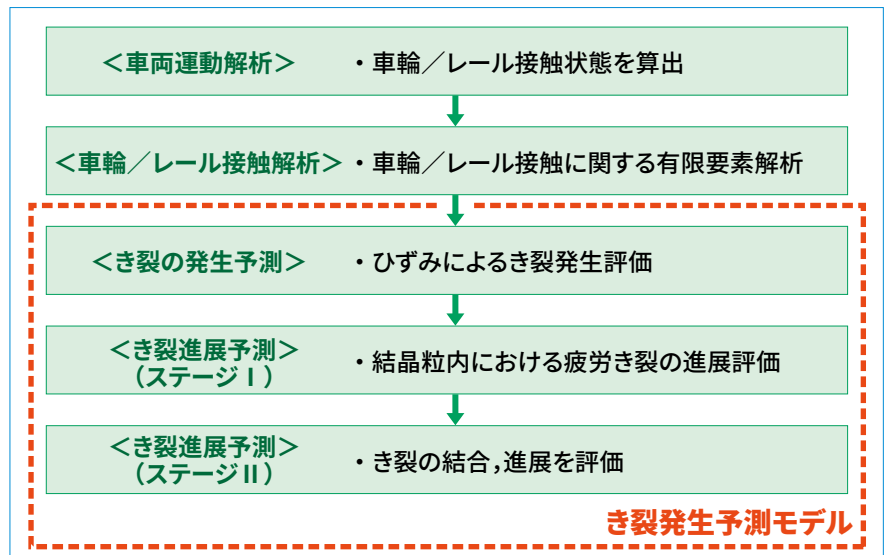


図4 き裂発生予測のフローチャート

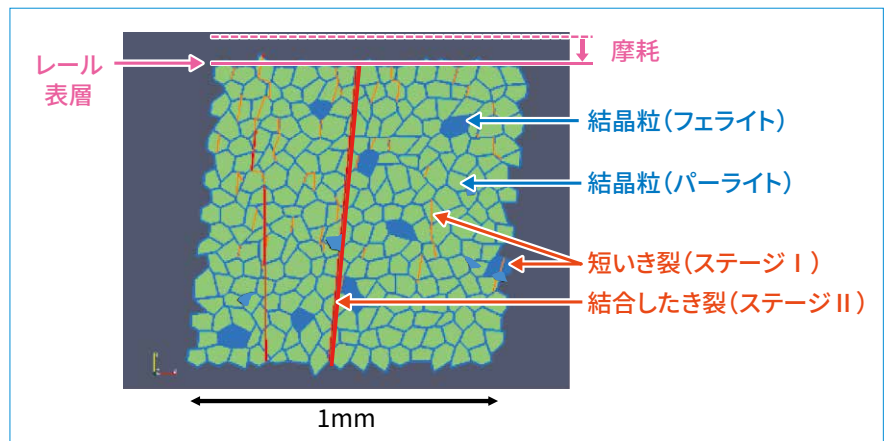


図5 き裂発生予測モデルの解析例

モデルの妥当性を検証する予定です。

さらに、曲線区間のき裂が群発している箇所を対象に、本モデルを活用してき裂進展と摩耗進展を予測し、それらの結果からき裂の発生を予防する対策法の提案を進めていく予定です。

おわりに

ここでは、車輪との接触に起因するレールの摩耗進展予測ならびにき裂発生予測について紹介しました。今後は、これらの予測モデルを活用した進展予測、ならびに大型試験装置による転動疲労試験を実施し、レール損傷対策法の検討や新たなレールの開発を進めていきたいと考えています。

なお、ここで紹介した摩耗進展予測モデルについては、上智大学との共同研究により実施したものです。[RRR]

文献

- 1) 辻江正裕, 水谷祐貴, 暁道佳明: マルチボディダイナミクスに基づくレール摩耗形状予測モデルと妥当性検証, 鉄道総研報告, Vol.31, No.12, pp.17-22, 2017
- 2) M.Akama, F.Ohya, M.Tsujie, H.Do: Numerical simulation of competition between short crack propagation and wear in rail head, 9th World Congress on Railway Research (WCRR), 2011