

# レール損傷，バラスト軌道劣化を予測する

名村 明  
 鉄道力学研究部  
 (軌道力学 研究室長)

石田 弘明  
 鉄道力学研究部  
 (部長)



なむら あきら いしだ ひろあき

## 研究開発の背景

鉄道においては、車輪とレール間の転がり接触疲労によってレール頭部に損傷が発生する場合があります。また、バラスト軌道では、道床バラスト部に塑性変形が累積し、いわゆる「軌道破壊現象」という軌道変位進みを伴います。そのため、どのような対策がレール損傷やバラスト軌道劣化に有効となりうるかを定量的に評価できるモデルの開発が望まれています。

鉄道総研では、課題設定前に車輪／レール間接触の計算力学モデルや、レール材料の疲労・摩耗評価など、車両／軌道構造系動的評価システムの構成要素となるべき個々の課題の現状を調査し、鉄道総研部内における研究開発成果の蓄積が十分な項目や、今後さらに推進すべき項目を明らかにしました。これらの調査結果を踏まえて、必要な要素

研究を進めつつ、これまでの成果の統合化を推進できる状況が整ってきていると考えられたため、2005年から5年間に渡って将来指向課題「レール損傷・バラスト軌道劣化モデル構築と保守低減技術評価」を設定して、レールとバラスト軌道に関する諸問題に取り組んできました。本稿では、成果の概要を紹介します。

## レール損傷モデル

例えば、直線区間で発生するシェリング損傷の進展過程は、図1に示したような経過をたどります。すなわち、新品レールの敷設後、車輪／レール転がり接触を繰り返し受けることにより、レールにはある期間の後、き裂が発生します。そのき裂は、短いき裂として進展した後、水平裂としてさらに成長し、最終的には分岐して横裂となり、破断に至る場合もあります。

本モデルは、図2に示すシェリング、きしみ割れ、側摩耗という主要な損傷形態を対象に、レール頭部表面付近に発生する応力、ひずみを求め、「き裂発生モデル」、「短いき裂の進展と摩耗の競合モデル」、「水平裂の進展及び分岐モデル」、「横裂の進展モデル」および「レール摩耗形状予測モデル」という5つのサブモデルにより、き裂の発生・進展および摩耗の進展を予測します(図3)。

き裂の発生や短いき裂の進展を解析するためには、レール頭部表面近傍数ミリメートルにおける車輪／レール接触による応力とひずみの局所的な分布を求める必要があります。本モデルでは、車両運動解析ソフトと有限要素法を用いてこれを求めます。車両運動解析では、線形条件(曲線半径、カントなど)、レール形状、車両諸元、車輪形状、列車速度などを入力とし

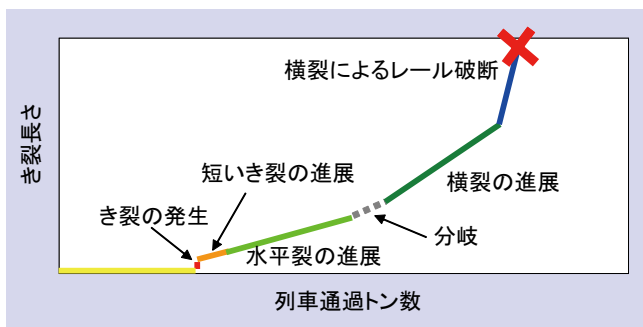


図1 レールにおけるき裂の全寿命

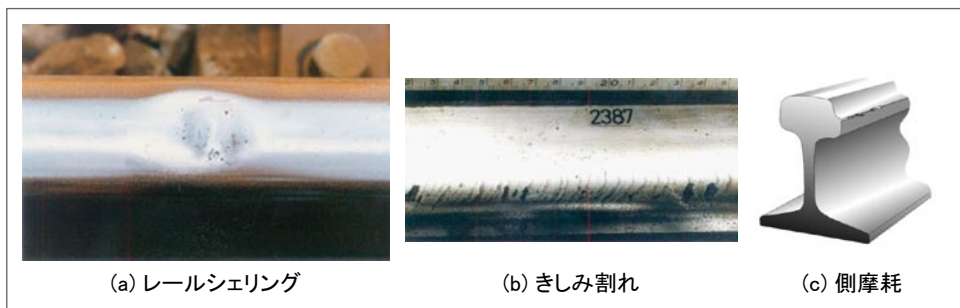


図2 レールの損傷形態

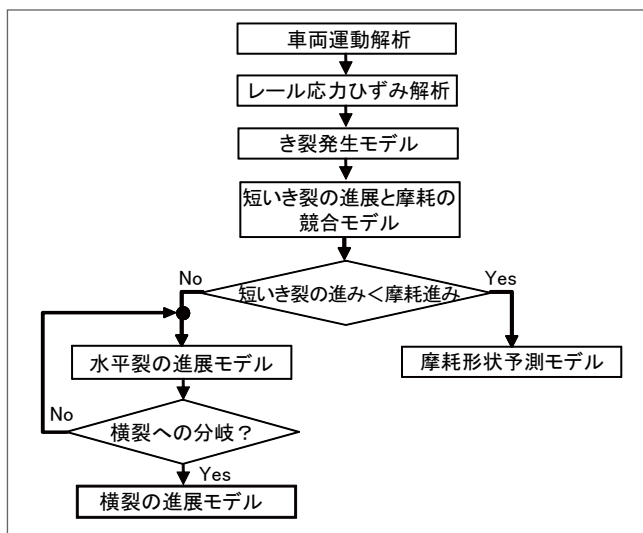


図3 レール損傷モデルの全体構成

て、車両が任意の曲線区間を通過する際の、車軸の軸受位置における垂直方向、進行方向および横方向の力、車輪とレールの接触位置、アタック角などを求めます。得られた値を入力として有限要素解析用の車輪-車軸-レールモデル(図4)で解析を行います。車輪とレールの接触部周辺のみ細かくメッシュ分割を行い、計算の効率化を図っています。

ここでは、先に述べた5つのサブモデルのうち「短いき裂の進展と摩耗の競合モデル」と「横裂の進展モデル」について紹介します。

き裂の発生後に起こる短いき裂の進展の段階は、材料の微細組織などの影響を受けることが指摘されています。そこで、このような短いき裂の特性を考慮し、進展を正確にシミュレーションできるプログラムを作成しました。同時に摩耗の進行を予測するモデルも組み込み、その競合を検討できるようにしました。この「短いき裂の進展と摩耗の競合モデル」を用いることにより、線区別、曲線別によどのような鋼種のレールを使用すれば、き裂および摩耗を最小化できるかを検討できます。

シェリングと呼ばれるき裂がある程度進展すると、き裂はレール底部へと進展する横裂に分岐します。この横裂は、より底部へと進展すると、レール破断を引き起こす危険性があるので、横裂の深さを管理するために、定期的にレールの探傷を実施し、破断に至る前にレールを交換します。各線区に対応した横裂の進展を精度よく予測することができれば、安全性を確保しつつ、より経済的なレール管理が可能になると期待されます。有限要素法など、既存の代表的な数値解析法を用いる場合、き裂が進展する度にメッシュを再分割して解析を行う必要があるため、多大な

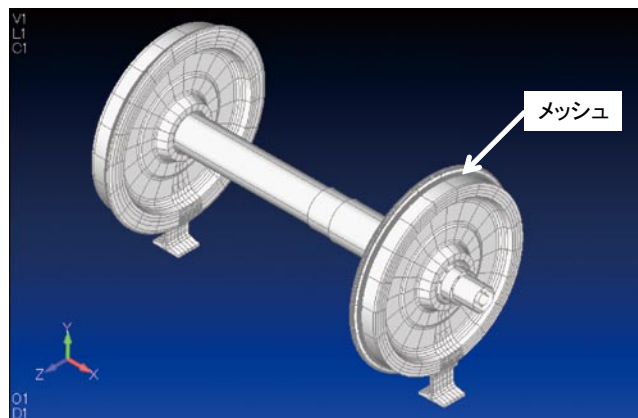


図4 車輪-車軸-レールの有限要素モデル

労力を必要とし、場合によっては解析自体が行えないこともありました。「横裂の進展モデル」で用いているメッシュフリー法は、メッシュを使わずに解析を行う手法ですので、解析の途中でメッシュの更新を必要とせず、比較的短時間に横裂の進展を計算することができるようになりました。レールの材料特性値は試験片を用いた疲労試験により決めました。レール製造時の残留応力などの不明確な条件がありますので、実際の探傷結果と照合させることで、横裂の進展速度を合理的に評価する解析条件を決定します。その解析結果をもとに、その線区における適切なレール探傷周期を決定することができます。

### バラスト軌道劣化モデル

バラスト軌道は、排水性、施工性、保守のしやすさなど多くの長所を持つ一方で、列車走行による動的な荷重が繰返し長期的に作用することにより、バラストの摩耗や破碎、沈下などの劣化現象が起こるため、定期的に保守を行う必要があります。

本モデルは、車両走行による動的荷重に起因したバラスト軌道劣化のメカニズム解明を目的としており、①車両/軌道構造系モデルに、車両、軌道、走行条件を入力し、列車通過時に軌道に発生する動的荷重を求め、②軌道構造を詳細に再現した有限要素モデルにより、まくらぎに発生する動的応答とバラストに伝達される荷重特性を再現し、③碎石集合体からなる道床構造を模擬した個別要素法モデルにより、軌道劣化に関連するバラスト粒子の離散的な動的挙動を把握するという3つのサブモデルから構成されています。

軌道構造を詳細に再現した有限要素モデルでは、在来線用PCまくらぎについて自由支持条件およびバラスト層上でのインパルスハンマ加振試験結果をもとに、まくらぎをソリッドで、バラスト層を3軸方向のばね要素と減衰要

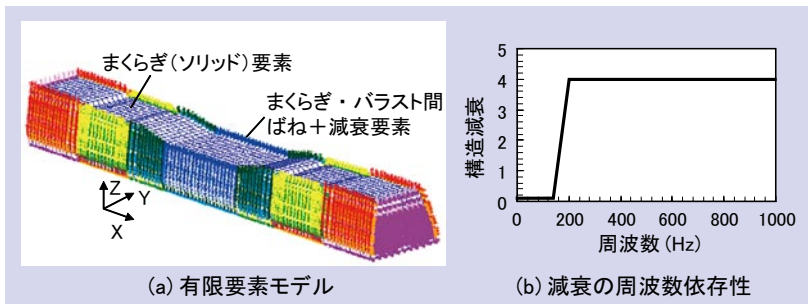


図5 振動特性に着目した軌道動的応答モデル

素で表現したモデルを構築しました。バラストの減衰特性に周波数依存特性を導入したことにより、1kHzまでの周波数域の振動特性を良好に再現できるようになりました(図5)。このモデルを用いることにより、まくらぎの形状や構造に関する因子が軌道の動的挙動に与える影響を解析することができます。

道床は任意形状を有する碎石粒子の集合体です。従来の連続体解析法では粒の動きを扱えませんでした。不連続体解析手法を用いると、粒子回転や摩擦すべりなどの粒状体特有の複雑挙動とともに、実験や観測では測定不可能な、粒子間の接触力、粒子の内部応力、運動履歴も把握でき、バラストの動的挙動特性の評価に関して多くの情報を得ることができます。バラストの三次元形状測定データをもとに碎石形状を三次元多面体モデルで表現し、2万個以上の碎石単体モデルを締め固め、まくらぎなどの軌道構造部材もモデル化して、実際のバラスト軌道構造を詳細に再現した三次元個別要素法モデルを構築しました(図6)。

### センシングまくらぎとセンシングストーン

バラスト軌道劣化のメカニズム解明のためには、まくらぎ下面に作用する動的荷重やバラスト粒子集合体がいかな

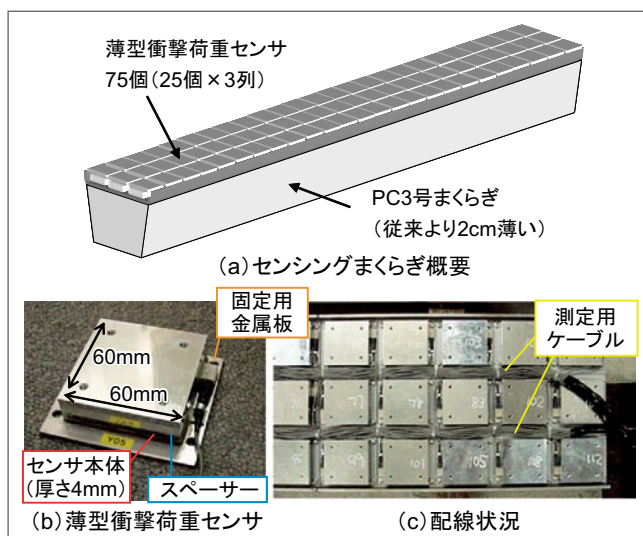


図7 センシングまくらぎ

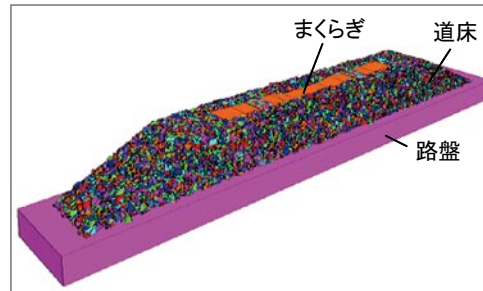


図6 粒状性に着目したバラスト軌道の個別要素法モデル

る動きをしているのかを知ることが重要です。そこで、まくらぎ下面に作用する衝撃荷重を測定するセンシングまくらぎとバラストの振動加速度を測定するセンシングストーンを開発しました。

#### (1) センシングまくらぎ

まくらぎと碎石層との境界は道床内部の見えない位置にあり、その荷重の実態は、これまでは全く測定できませんでした。そこで、構造面でも機能面でも、通常のもくらぎと互換で、実はそのなかにセンサがぎっしり組み込まれているという「センシングまくらぎ」を開発しました。

基本的なしくみを図7に示します。本まくらぎは薄型PC3号まくらぎの下面に、圧電シートを用いた新開発の超薄型衝撃荷重センサ75個を隙間なく貼り付け、その表面に保護用のアルミ合金製受圧板を貼り付けた構造です。これにより、まくらぎ下面に作用する数kHzまでの接触荷重とその分布を測定できます。

#### (2) センシングストーン

道床バラストの動的挙動に関しては、従来、一軸加速度センサを道床に直接埋設したり、あるいは、一軸センサをとりつけた碎石を道床内部に埋設して、いわゆる「道床振動加速度」を測定することが行われています。しかし、一軸センサでは、測定軸の方向やバラストの回転運動を含めた三次元的な挙動を測定することができませんでした。

そこで、三軸方向の加速度が測定可能で、重力による静的な加速度から高周波の動的な加速度まで精度よく測定できる「ピエゾ抵抗型三軸加速度センサ」を2個用いた「センシングストーン」を開発しました。本センシングストーン

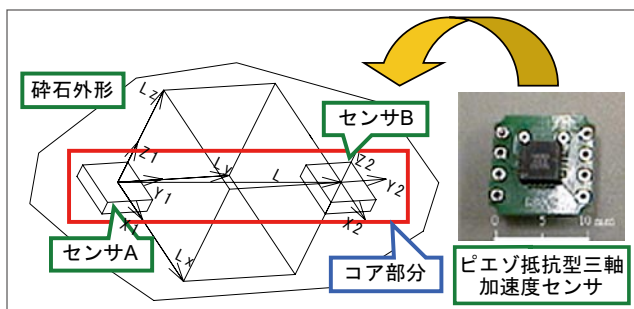


図8 センシングストーン

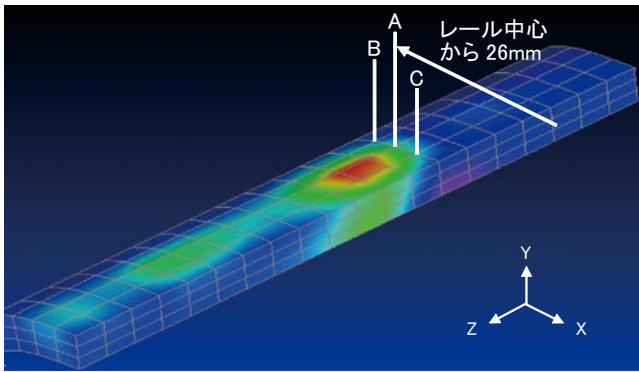


図9 接触領域付近のせん断応力

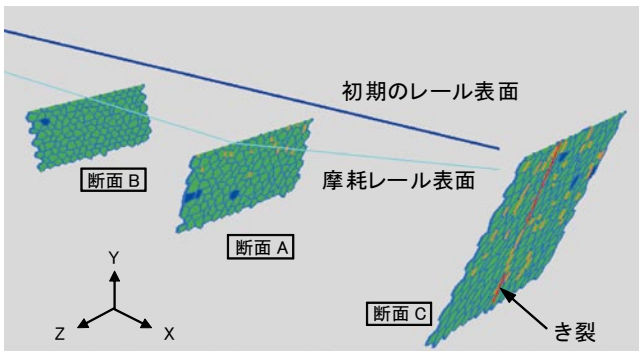


図10 短いき裂と摩耗の競合シミュレーション結果 (車輪通過120万回後)

により、センサ設置後に砕石がどんなに移動や回転をしても、センサの設置角度とともに、バラストの水平方向、鉛直方向、奥行き方向の並進挙動、および、砕石の回転挙動も同時に測定できるようになりました(図8)。

### 保守低減技術の評価

ここでは、レール損傷モデルで、レール鋼種の影響を、また、バラスト軌道劣化モデルでまくらぎ形状などの影響を評価した例を紹介します。

#### (1) 短いき裂進展に及ぼすレール鋼種の影響

半径610mの曲線外軌側レールについて解析を行いました。図9に、熱処理レールの解析結果の例として、車輪-レール接触領域付近のせん断応力分布を示します。この図に示す横方向(x方向)でレール中心から26mmの断面Aと、Aからゲージコーナ側に1.77mmの断面B及びAからレール中心側に1.96mmの断面Cを短いき裂解析領域のx方向断面位置とし、その断面内でレール表面から1mm×1mmの正方形領域内でシミュレーションを行いました(図10)。断面Cでは、表面のすべりが小さいため、摩耗しにくいこと、せん断応力が大きいこと、き裂が発生して進展していることが分かります。普通レールでも同様の解析を行った結果、摩耗しにくい熱処理レールの方がむしろき裂が進展する可能性があることがわかりました。

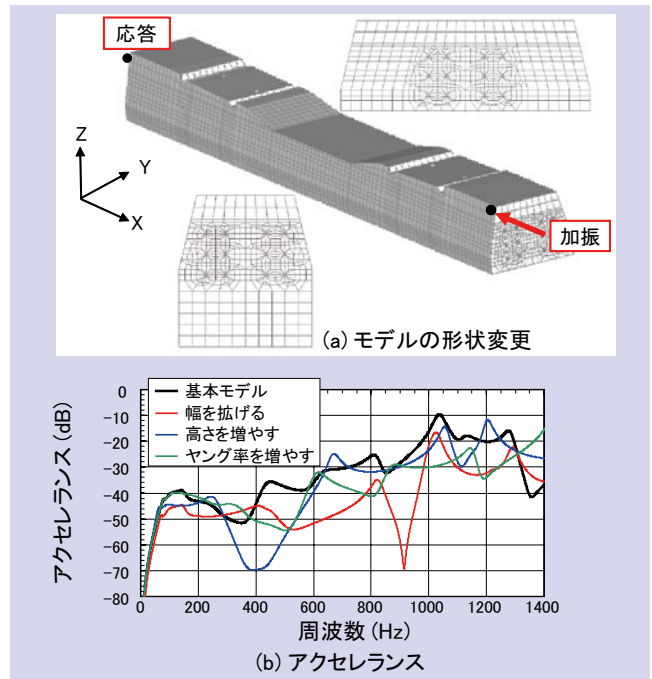


図11 振動低減効果の比較

#### (2) PCまくらぎの改善の方向性

PCまくらぎの固有モードに着目して、まくらぎ形状と構造の変更による振動加速度の低減効果を有限要素法解析により検討しました。振動を減少させる一般的な方法として、構造の変更により、問題となる周波数帯から固有振動数をずらす方法があります。軌道劣化に関して、問題となる周波数帯がどの辺りにあるかは十分には解明されていませんが、いずれも数百Hzから千数百Hzの周波数に存在すると想定されます。

振動低減の効果が期待できる解析例を図11に示します。図には、基本モデル、①まくらぎ幅を48cmに拡幅、②まくらぎ厚を10cm増加、③ヤング率を2倍に増加のそれぞれの構造変更による結果を示します。図より、いずれも、基本モデルと比較して、アクセラランス(加速度/加振力)が全体的に減少する傾向が得られ、PCまくらぎの改善の方向性として、①幅の拡幅、②厚さの増加および③剛性増加について、道床の振動加速度低減の効果が期待され、保守低減に貢献するとの方向性が得られました。

### おわりに

開発したレール損傷・バラスト軌道劣化モデルを活用することで、軌道の保守コスト縮減に対する車両/軌道構造系の改良または選択を合理的に行えるようになります。

今後は、軌道で起きている様々な力学現象をより詳細に把握するため、大規模並列計算モデルへの改良を進めていきたいと考えています。引き続き、鉄道固有現象の解明と保守の省力化に向けた研究開発に取り組んで参ります。RRR