

# ダイナミクスからみた軌道技術の課題

石田 誠\*

## Subjects on Track Technology Focussed on from Dynamical Point of View

Makoto ISHIDA

It is essential to understand the characteristics of vehicle/track dynamic response for efficient and economical track maintenance. Many efforts have been made experimentally and analytically to obtain more precise and efficient solutions. In particular, very high frequency phenomenon of fishplate rail joints, which probably leads to hanging sleeper has been recently analysed by a newly established model, and the dynamic behaviour of ballast stone which surely leads to ballast settlement has been attempted to analyse by granular model. On the other hand, multi-body dynamics has been developed very much so that many vehicle dynamic behaviours has been analysed precisely enough. This paper describes the status of track dynamic model focusing on the above-mentioned track maintenance subjects and the future development of track maintenance subjects and dynamic models.

キーワード：ダイナミクス，軌道技術，動的応答モデル，軌道構造，軌道路盤，軌道管理

### 1. はじめに

車両が軌道上を走行する際に生じる車輪とレール間の作用力（以下、「車輪／レール作用力」と略称する）により、軌道は上下・左右に振動し、その振動が路盤や高架橋あるいは盛土などの構造物を通して地盤へと伝わる。また、車輪とレールからの転動音や構造物音などが上記の地盤振動とともに沿線環境に関する重要な課題となっている。一方、軌道保守の面からは、車輪／レール作用力によるバラスト軌道の沈下や軌道部材の疲労破壊等の軌道破壊が重要な課題である。このような課題に関しては、その加振源としての車輪／レール作用力とそれによる対象構造物の動的応答の周波数特性等を十分に理解することが重要であり、そのために、多くの研究機関で車両と軌道の動的相互作用の解析法の研究が進められ、近年、コンピュータの発展とあいまって予測精度の高い洗練されたモデルが提案されている<sup>1)</sup>。一方、マルチボディダイナミクスと呼ばれる運動解析ソフトの開発が進み、既に優れた成果も得られている<sup>2)</sup>が、今後は関連する研究分野の発展が大いに期待される。

ここでは、ダイナミクスからみた軌道破壊と材料劣化や軌道状態評価に関係する軌道技術の課題について、これまでの発展の経緯を紹介し、今後について展望する。

### 2. 軌道破壊と材料劣化

#### 2.1 車両／軌道動的応答モデル<sup>1)</sup>

初めに、バラスト軌道の塑性沈下とこれに基づく軌道

変位（狂い）の増大、軌道材料の摩耗・劣化および騒音や振動に大きな影響を及ぼす車輪／レール作用力の予測に有効な手段である車両と軌道の動的応答モデルのこれまでの経緯と現状について紹介する。車両／軌道動的応答モデルに関しては、KnotheとGrassieが1992年当時までに提案された様々な解析モデルについて、主に軌道側に着目した解析対象の課題と、大きく分けて周波数領域と時間領域の2つに分けられる解析法によって分類した。それによると、1960～70年代までは、ほとんどの研究は理論解析的であったが、その後はコンピュータの発展とともに、より実際の非線形要素を考慮した予測精度の高いモデルが構築されてきた。そして、1990年代以降は、例えば分岐器等の複雑な構造を対象とするなど課題に応じて様々に改良されてきたが、モデルの基本的な部分は大きく変わっていない。本節で紹介しているモデルに関しては、文献1)を参照されたい。

#### (1) 周波数領域の解析モデル

このモデルは、動的挙動を周波数応答として全体的な傾向を理解しやすい一方、線形を基本としているため、軌道パッドあるいはバラストに本来存在する非線形な要素あるいは輪重抜けのような車輪とレールが離れる状況や浮きまくらぎ等の挙動も解析が困難である。ただし、非線形であるレールと車輪のHertz接触ばねなどは、例えば静止輪重付近の傾きで線形化するなどの工夫がなされている。このモデルは、Timoshenkoの解析において最初に用いられ、連続梁とするレールを連続支持か離散支持か、あるいは車輪／レール作用力を定位置か移動かなどの条件において、転動音、車両／軌道の動的相互作用、軌道の動的安定性、波状摩耗等の課題を対象に多くのモ

\* 軌道技術研究部 部長

特集：軌道技術

デルが提案されている。

(2) 時間領域の解析モデル

このモデルは、直接時間積分により運動方程式を解くものが代表的であり、計算には多くの時間を要するが、複雑なモデルも扱うことができる。そこで、計算時間を節約するアルゴリズムの導入や、梁の変形する波の境界からの反射による影響を防ぎ、モデルの大きさを節約できる境界条件の工夫が行われてきた。また、非線形もある程度扱えるモード重ね合わせ法なども提案されている。また、運動方程式を直接時間積分法ではなく、グリーン関数等を用いた時間域積分方程式法により解くモデルや有限長モデルにおける境界条件の影響を避ける解法が提案されている。

2.2 バラスト沈下

バラスト軌道は、列車荷重を繰り返し受けて永久変形が徐々に進む。従来の軌道の設計は、軌道構造別に求められた軌道変位(狂い)進みとその保守量に関する経験式に、それらの建設・保守コストを考慮して最適な軌道構造を定めることであった。そのような背景の下、軌道変位進みとして新たな実験結果と動的応答モデルによるシミュレーション結果を用い、軌道変位進みに工学的な解釈を与えて、1997年に新たに有道床軌道設計標準が定められた。その後、2001年に施行された「鉄道に関する技術上の基準に関する省令」を受けて、バラスト軌道に限らずスラブ軌道等のバラストレス軌道も含めた軌道構造の設計標準が検討されている。

バラスト軌道の効率的な維持管理を行うためには、軌道破壊の程度とその原因を的確に診断し、道床内部の不均一な沈下現象を適切に予測し、さらにどのような対策工が沈下抑制に有効かを定量的に評価することが可能なモデルの開発が望まれる。ここでは、軌道保守の効率化を目指して、バラスト軌道の実態把握のために構築されてきた質点系あるいは分布質量系の解析モデルと新たに取り組んでいる保守低減対策の評価を目指した粒状体モデルによるバラスト動的挙動の解析法について紹介する。

(1) 質点系モデル

バラスト道床の挙動を検討する上で、まくらぎと道床バラスト間の作用力あるいはまくらぎ下面の圧力とともに道床振動加速度の特性を全体として評価するために、バラスト道床を多層質点とするモデルが開発された<sup>3)</sup>。そのモデルを用いて、レール面の凹凸形状と走行速度に依存する動的輪重と道床バラストのまくらぎからの距離(深さ)による振動加速度の違い等が評価された。それによると、道床振動加速度について、比較的波長の長い継目落ちを想定した凹凸形状においては、バラスト道床の上層と下層で違いはほとんどないが、溶接部のような波長の比較的短い凹凸形状に対しては、道床の上層と下層で大きく異なる可能性が指摘された。このような上層と

下層の振動加速度の違いは道床沈下メカニズムを明らかにする上で重要な知見であり、さらに理解を深めることが期待される。

(2) 分布質量系(連続体)モデル

道床部分を多層質点とするモデルと異なり、有限要素と境界要素を結合し、道床と路盤を2次元連続体とするモデルが提案されている<sup>4)</sup>。このような道床・路盤を連続体で表現するモデルは、現時点でバラスト道床をより詳細に記述できる粒状体モデルを通常の車両走行シミュレーションに用いる延長の軌道解析モデルに取り入れようとする場合には、そのモデル全体の規模が極めて大きく(容量が大きく、計算時間が長い)なり容易ではないそのため、その粒状体モデルによる成果を取り入れられる適切なパラメータを設定できれば、将来的にも重要な役割を果たすことが期待できる。

(3) 粒状体モデル

道床バラストは、所定の粒度を有する硬い火山岩からできた砕石で、それを用いたバラスト道床は、適度な強度と剛性により列車から受ける荷重を分散して路盤に伝えるとともに、まくらぎやレールへの衝撃を軽減する役割を担っている。また、列車の振動や騒音も軽減し、排水性にも優れている。これらの優れた性能は、バラスト道床の砕石粒子の集合体としての力学特性、いわゆる粒状性によりもたらされる。

しかし、道床バラスト集合体の骨格構造は、粒子同士に互いに引き合う力が無く、砕石表面の凹凸による摩擦力と、砕石稜角のひっかかりという、いわゆる「安息角」のみでその安定性を保っている。一方、繰り返し列車荷重を受けることによって、道床バラスト自体にも摩耗や破砕が生じ、道床バラストが側方に移動し、軌道面の長手方向に不同沈下等の軌道変位が発生する。

従来の連続体解析法と異なり個々のバラストを粒状体としてモデル化する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、粒子間の接触力、粒子の内部応力等も把握できる。バラストの3次元形状を測定し、測定データをもとに砕石形状を3次元多面体モデルで表現したバラスト軌道を詳細に再現した3次元個別要素法モデル<sup>5)</sup>を図1に示す。今後は解析モデルの高精度化と振動加速度センサーをバラストに埋め込んだセンシングストーンを用い、減衰モデルや物性値を改善し、さらなる実現象の解明が期待される。

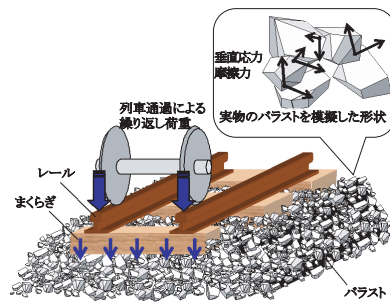


図1 バラストを粒状体とする個別要素法モデル

### 2.3 レール継目

軌道保守上の弱点箇所であるレール継目（ここでは、継目板を用いる普通継目と溶接による溶接継目を主な対象とする）について、その動的応答解析を可能とするモデルが構築され、レール継目における車輪通過時の輪重変動等の動的特性が明らかにされた。そのモデルを用いて、溶接継目付近からのレール折損に対する寿命予測手法<sup>6)</sup>や普通継目の代表的な破壊現象の一つである継目ボルト穴からのき裂によるレール折損に対する寿命予測手法<sup>7)</sup>が構築された。これにより、ある程度想定される条件における溶接継目と普通継目双方の寿命予測が可能になるとともに、研削による平滑化や継目落対策の効果が評価可能になった<sup>8)</sup>。

#### (1) 溶接継目

溶接継目は熱影響や溶接金属の硬度が母材レールと異なり凹凸が形成され、この凹凸や欠線部により極めて高周波で大きな動的輪重が生じ、軌道沈下や軌道材料の劣化が促進される。溶接継目を解析するモデルとしては、半車体モデルと連成した軌道の動的応答モデルが開発された<sup>9)</sup>。このモデルは、レールを連続梁、まくらぎおよび道床を質点とし、それぞれをばねとダンパーで結合している。このモデルのレール頭頂面に溶接継目の凹凸を設定することにより、溶接継目における軌道の動的応答が解析可能となる。なお、車輪とレール間の接触ばねは車輪とレールの接近量の1.5乗に比例するヘルツの非線形接触ばねを用いている。

#### (2) 普通継目

上記の溶接継目では凹凸が形成されるものの、車輪とレールの接触は連続であるが、普通継目部には欠線部いわゆる遊間があり、車輪とレールの接触が不連続になるため、そのモデル化にはいくつかの点で工夫が必要になる。普通継目の解析モデルに関しては、片岡らの先駆的なモデル<sup>10)</sup>を参考に図2に示す解析モデル<sup>11)</sup>が提案され、実測データによりモデルの妥当性は検証されている。

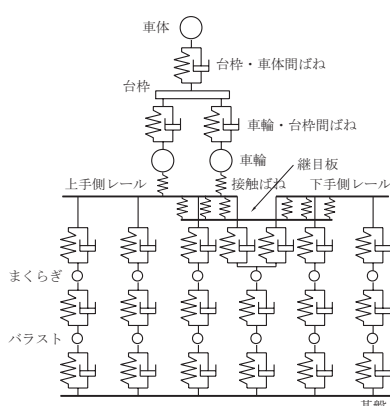


図2 普通継目を考慮した車両/軌道動的相互作用モデル

### 2.4 車輪フラット

溶接継目や普通継目と同様に軌道に衝撃荷重を与えるものに車輪フラットがある<sup>12)</sup>。車輪フラットは、主にブ

レーキ時に車輪がレール上をある一定の滑り率を超えて滑る（「巨視滑り」と称する）際に車輪踏面の一部が平坦になる場合があり、その平坦な部分を指す名称である。この車輪フラットはレールを衝撃し、騒音源になるとともにレールへの損傷被害等が懸念される。フラットの形状モデルとしては、これまでフラットが形成された直後の弦モデルと形成後の走行においてフラットの角が丸くなった余弦モデルと称されるものが提案されているが、走行試験等によるモデルの検証は、フラットのどの部分がレールとどの点で接触するかを特定するのが容易でないことから極めて困難な課題の一つとなっている。また、現象が高周波であるため、例えば時間領域の計算における時間ステップを数万分の1秒に設定するなど、十分に分解能が高い解析が必要である。また、フラット形状が円滑な曲面ではないため、レールとの接触ばねに工夫が必要である。

### 2.5 分岐器

分岐器はレール継目とともに軌道弱点箇所の一つであり、保守のために多くのリソースが投入されている。分岐器検査は、その構造が複雑であり車両脱線の危険性も他の構造と比較して高いことから、摩耗形状の測定を含む信頼性の高い寸法管理およびトングレールやクロッシング等の材料の損傷管理も極めて重要である。したがって、マンガクロッシングの鑄鉄製造上の欠陥、レールシェリング、トングレール先端部の摩耗等の軽減のために、有限要素法を用いた車輪と分岐器の接触応力解析等による、分岐器部における損傷発生メカニズムの解明が進められている。一方、そのような摩耗・損傷管理をより効果的かつ効率的に行うことを目的に、車輪がトングレールやクロッシング部を通過する際の車輪/レール作用力やそれに励起される動的応答を求める車両の分岐器通過時の動的応答解析モデルの構築や、分岐器の弾性支持構造の開発などが重要な課題である。

### 2.6 構造物境界あるいは軌道構変化箇所

スラブ軌道とバラスト軌道の接続箇所、踏切の前後、無道床橋梁橋台付近等の軌道構造変化箇所あるいは構造物境界部は、軌道保守量が多く弱点箇所となっている。したがって、盛土を新設する場合、設計標準では粒度調整砕石等を用いたアプローチブロックを設けることになっている。最近の2次元動的有限要素法や多層弾性解析と移動載荷試験等の解析と実験の双方からの検討により、踏掛板（ふみかけばん：厚さ30cmのコンクリート版）やセメント安定処理（厚さ60cm）でアプローチブロックとほぼ同等のバラスト軌道の沈下抑制が期待できる結果が得られている<sup>13)</sup>。一方、まくらぎ交換による道床沈下の抑制効果を質点系の車両/軌道動的応答モデル

特集：軌道技術

による解析結果と移動載荷試験による実験結果より評価すると、新幹線スラブ/バラスト軌道の境界部では弾性まくらぎ、在来線連接軌道境界部付近では特殊区間用まくらぎがいくつか他のまくらぎより、効果的であるとの知見が得られている<sup>14)</sup>。さらに、バラスト軌道を質点系や有限要素等の連続体から粒状体に変更し、浮きまくらぎ等の軌道破壊への影響を明らかにすることが期待される。

3. 軌道状態評価

3.1 軌道検測

軌道は列車荷重を支え、路盤等の下部構造への負荷を軽減するとともに、列車が安全に走行する滑らかな走行路として大きな役割を担っている。したがって、走行路面の滑らかさとしては、安全性を確保した上で、乗心地等のサービスレベルに応じた保守レベルを維持することが要求される。一方、軌道の幾何学的な線形状態等を評価するためには、営業列車と同様な速度による動的な軌道変位の測定が重要となる。そこで、従来の3台車を有する軌道検測車から、2台車の4軸のうち3軸のそれぞれの弦長（間隔）が異なる矢（偏心矢）による検測波形を10m弦正矢に変換する技術を開発し、中央台車を有しない2台車による検測で従来の3台車により得られた10m弦正矢と同等な検測が可能とする2台車軌道検測車を実現し、270km/h域による検測が行われている。また、このような10m弦正矢法の他に、従来から開発を進めてきた加速度を2回積分して変位を求める慣性測定法について、低速度域での精度向上を可能にする技術が開発され、さらに測定波形を処理する際に10m弦正矢法の特性を取り入れた「慣性正矢法」が開発された<sup>15)</sup>。

3.2 車両応答予測に基づく軌道管理

軌道管理は、車両と軌道の動的相互作用を制御する（ある限度値内におさめる）ために、軌道変位を含めた軌道状態を管理することであり、その意味では車両と軌道の動特性を十分に理解することが重要である。近年は、車両性能と走行速度に軌道変位波長を考慮して、従来からの10m弦正矢から在来線では20m弦正矢および新幹線では40m弦正矢による整備目標値を定め、軌道変位の整正を行っている<sup>16)・17)</sup>。したがって、車両応答を軌道変位に応じて車両運動シミュレーションで求めることができるが、解析時間や必要とする予測精度等から、軌道変位と車両走行特性値との関係を統計的にモデル化して、比較的精度良く車両応答を予測する手法が開発されている<sup>18)</sup>。

4. おわりに

以上、ダイナミクスからみた軌道破壊と材料劣化や軌

道状態評価に係る軌道技術の課題について紹介した。特に軌道破壊と材料劣化に関しては、近年の解析技術と実験技術の進歩により、現象解明が進められ解決策の提案がなされてきたが、さらなる発展のためには車両等の関係分野との協調が重要である。多くの関係者の方々に、より一層のご協力とご支援を賜れば幸いである。

文 献

- 1) 石田誠：軌道動的応答モデルのこれまでの発展と今後の展望、鉄道総研報告、Vol.14, No.4, pp.1-6, 2000
- 2) 谷藤克也：シミュレーションは現車試験に代わるか（鉄道車両の運動解析に関連して）、日本機械学会第16回交通・物流部門大会講演論文集、pp.11-14, 2007
- 3) 三浦重：軌道構造の動特性モデルの構築、鉄道総研報告、Vol.9, No.12, pp.7-12, 1995
- 4) 阿部和久、他：車輪・軌道・地盤系の連成振動解析手法、構造工学論文集、Vol.45A, pp.271-290, 1999
- 5) 相川明：不連続変形法による地震時のバラスト挙動解析、第204回鉄道総研月例発表講演要旨、2007
- 6) 石田誠、阿部則次：レール頭頂面凹凸と溶接部曲げ疲労の関係、鉄道総研報告、Vol.4, No.7, pp.8-15, 1990
- 7) 片岡宏夫、阿部則次、若月修、及川祐也：レール継目部の動的応力解析と寿命推定、鉄道総研報告、Vol.19, No.2, pp.5-10, 2005
- 8) 鈴木貴洋、石田誠、阿部和久、紅露一寛：レール継目部で生じる道床沈下進みの解析的検討、鉄道技術連合シンポジウム(J-rail'04)講演論文集、電気学会、pp.183-186, 2004
- 9) 石田誠、三浦重、河野昭子：軌道動的応答モデルとその解析結果、鉄道総研報告、Vol.11, No.2, pp.19-26, 1997
- 10) 片岡宏夫、阿部則次、若月修、及川祐也：レール継目部の梁モデルによる動的応力解析、土木学会第57回年次学術講演会概要集、pp.283-284, 2002.
- 11) 紅露一寛、阿部和久、石田誠、鈴木貴洋：レール継目を考慮した振動解析モデルによる軌道系の衝撃応答の評価、第21回
- 12) 石田誠、伴巧：車輪フラットによる軌道の衝撃応答に関する研究、構造工学論文集、Vol.46A, pp.1905-1914, 2000
- 13) 桃谷尚嗣：構造物境界部における軌道沈下対策、第204回鉄道総研月例発表会講演要旨、2007
- 14) 名村明、鈴木貴洋：軌道構造変化箇所における不同沈下抑制対策の評価、鉄道総研報告、20-11, 2006 pp.35-40
- 15) 矢澤英治、岡井忠生：慣性正矢軌道検測装置実用化に向けた性能向上、鉄道総研報告、Vol.18, No.3, pp.35-40, 2004
- 16) 高井秀之：新幹線の長波長軌道狂い管理、鉄道総研報告、Vol.3, No.4, pp.13-20, 1989
- 17) 高井秀之、菊地勝浩：在来線の長波長軌道狂い管理、鉄道総研報告、Vol.4, No.4, pp.27-34, 1990
- 18) 古川敦、吉村彰芳：統計モデルによる車両左右動特性の同定、鉄道総研報告、Vol.18, No.3, pp.29-34, 2004