

# 離散体モデルを用いたバラスト軌道の挙動シミュレーション

河野 昭子  
鉄道力学研究部  
(軌道力学 副主任研究員)

相川 明  
同  
(同 主任研究員)

名村 明  
同  
(同 研究室長)

浦川 文寛  
同  
(同 研究員)



この あきこ



なむら あきら



あいかわ あきら



うらかわ ふみひろ

## バラストって？

我が国に鉄道システムが誕生して、約130年経ちましたが、その間、車両は華やかにモデルチェンジを繰り返して来ました。それでは、「線路はどうか？」と言うと、こちらも、列車の高速化や大量輸送化に合わせて、多種多様なタイプの軌道（線路のこと。以下、軌道）が開発されて来ました。

さて、図1に示す構造のバラスト軌道（有道床軌道ともいう）は、鉄道システム誕生当初から採用されている最もオーソドックスな軌道で、現在でも日本の軌道の約9割がこのタイプの軌道となっています。

このバラスト軌道の特徴は、まくらぎと路盤の間にバラストと呼ばれる大粒の碎石を敷き込んでいる点です。そして、この道床バラスト層の役割は、専門書によると、次のように書かれています。

- まくらぎを緊密にむらなく保持する。
- まくらぎに伝わってくる列車荷重を路盤に広く、かつ均等に分散させる。
- 列車の横圧及びレール温度上昇に伴う張出しに抵抗する。
- つき固めその他の保線作業が容易に行える。
- 軌道構造にいくらかの弾性を持たせる。
- 軌道の排水を良くし、雑草の発生を防ぐ。

つまり、道床バラスト層は、ただ石コロが敷き詰められ

ているだけですが、様々な役割を果たしていると言えます。しかし一方で、まくらぎから伝達される繰返し列車荷重によって、変形し易いと言う宿命も背負っていて、これが鉄道現場の保線を担当する方々の悩みの種ともなっています。

## 道床バラスト層の変形の特徴

道床バラスト層の変形に関しては、これまで実験による研究が多くなされ、変形のメカニズムが解明されて来ました。特に特徴的なのは、図2に示す、道床バラスト層の鉛直方向の沈下特性です。この図は、横軸に载荷回数、縦軸に道床バラスト層の沈下量をとっていますが、図示したように、道床バラスト層は敷設直後または保守直後に急激に沈下(図中の“初期沈下過程”)した後、徐々に沈下が進む(図中の“漸進沈下過程”)ことが知られています。更に、この“初期沈下過程”では、個々のバラストは「初期の不均一な空隙を是正するように、間隙率の大きい方向に移動する」と言われ、これは道床バラスト層の初期の不均一な粒子構造が、初期の繰返し荷重で、均一になろうとすることを意味しています。また“漸進沈下過程”では、バラストは「側方に流動する」と言われています。つまり、道床バラスト層内のバラストの粒子構造は、列車の繰返し荷重下で変化しているものと考えられます。

よって、鉄道現場における保守周期を長くする(保守の

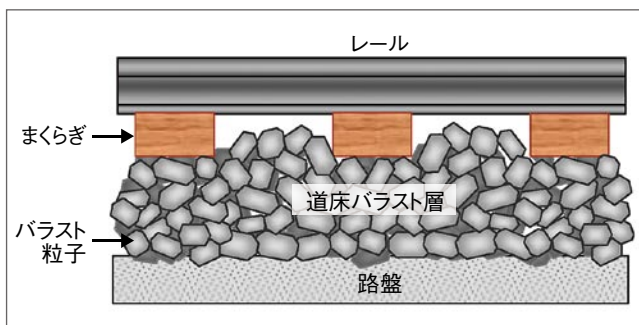


図1 バラスト軌道

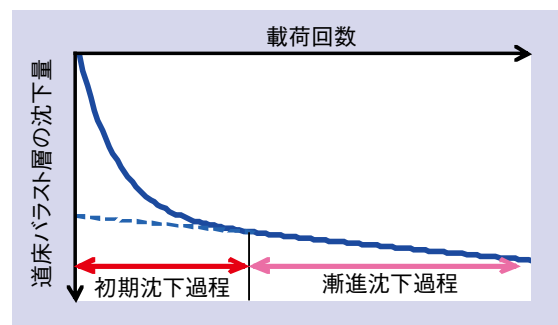


図2 道床バラスト層の沈下特性

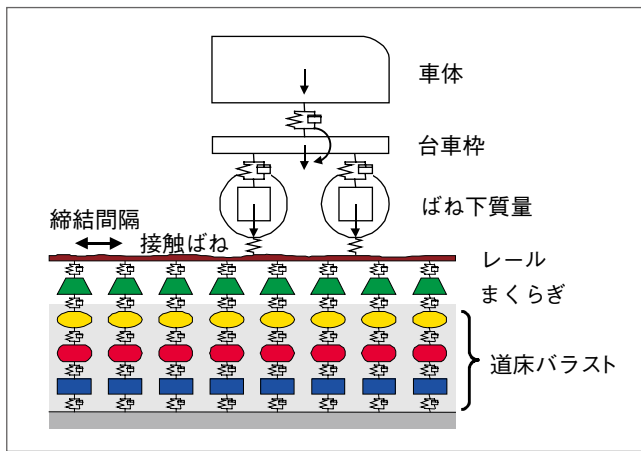


図3 軌道動的応答モデル

回数を少なくする)上では、初期沈下が小さくなること、また漸進沈下過程における沈下進み(図2の直線の傾き)がゆるやかになることが求められ、そのための改善・対策手法が検討されてきました。

### 道床バラスト層のシミュレーションモデル

さて、道床バラスト層の変形メカニズムを解明するための実験的研究の一方で、列車通過時の軌道の挙動を再現するシミュレーションモデルの研究も行われてきました。現在、実用レベルで主に用いられているのは、図3に示す、道床バラスト層をバネ-質点系でモデル化したものです。このモデルは、列車が近づき、去って行くまでの間の、軌道各部の変位や振動を、精度良く再現することが可能です。ただし、図2に示した、道床バラスト層の“沈下の増加”を再現することはできません。なぜなら、このモデルでは、道床バラスト層はバネとダンパでつながれた質点で表現されているので、バラスト層の塑性沈下の要因となる、粒子間の回転や滑りによる移動は再現されないからです。

これに対して、こうした軌道の“長期的な沈下の増加”を直接再現できる手法の一つとして「離散体モデル」に着

目しました。これは、道床バラスト層を構成するバラスト一つ一つを個々の要素とするモデルなので、実際に道床バラスト層内で起きていると考えられる、粒子構造の変化、粒子の回転や滑りなどを直接再現することが可能です。この「離散体モデル」は、近年のコンピュータ技術の発展に伴い、ポピュラーになりつつあり、解析ソフトが市販されたり<sup>1)</sup>、専門家の方々が開発した基本プログラムが公開される<sup>2)</sup>ようになっています。

### 離散体モデルの一例：個別要素法

さて、一言に「離散体モデル」と言っても、様々な手法が提案されていますが、それらの中でも、現在最もポピュラーで、かつ理論がシンプルな個別要素法と言う手法(Discrete Element Method, 以下「DEM」)を取り入れることとしました。

このDEMでは、図4に示すように、各粒子は基本的に“剛体”(粒子自体は変形しない)の要素として扱われ、要素間の接触は法線方向と接線方向のバネとダンパで表現されます。また要素間の滑りは、接線方向にスライダを設定することで再現しています。一つ一つの要素には、接触する要素からの接触力と重力(重力場の場合)だけが作用するものとし、各要素のXY(3次元の場合はZも)方向と回転方向の運動方程式を立て、時間ステップで解いていきます。

この計算過程で最も面倒な作業は、複数の要素同士が接触しているかどうか判定する“接触判定”で、これは要素が円や球の場合(図5)は簡単ですが、要素を複雑な形状にすると、たちまち面倒な作業となり、それゆえ、計算時間も膨大になってしまいます。よって、バラストのような複雑な形状の粒子を扱う上では、要素の形状の考え方も重要となります。

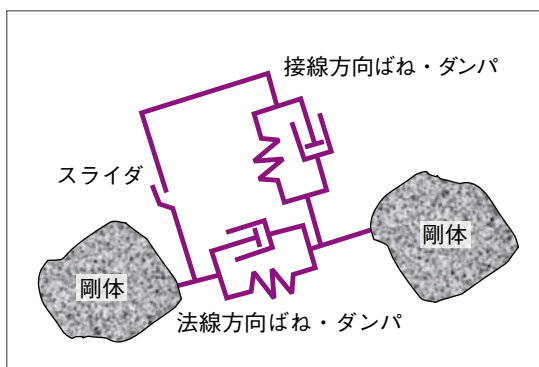


図4 DEMモデル

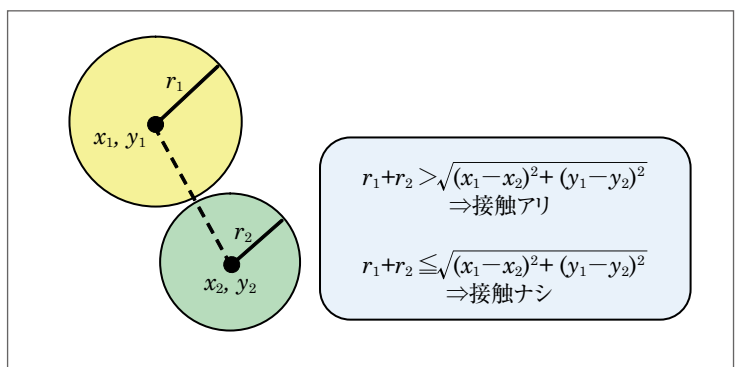


図5 粒子間接触判定(円の場合はラク♪)

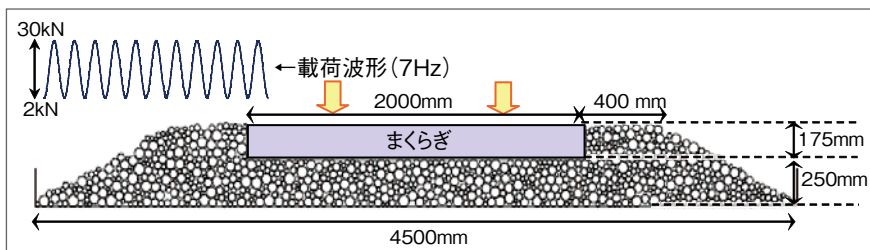


図6 DEMシミュレーションモデル(円要素)

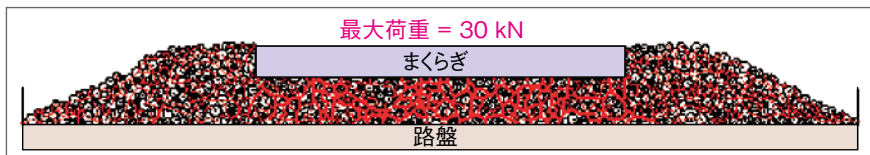


図8 粒子間接触荷重の分布

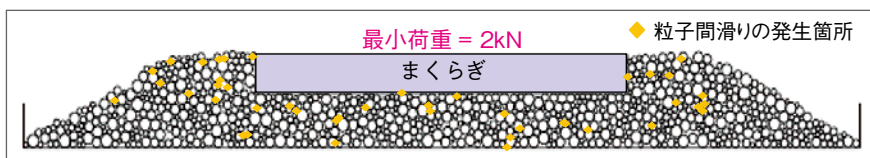


図9 粒子間の滑り

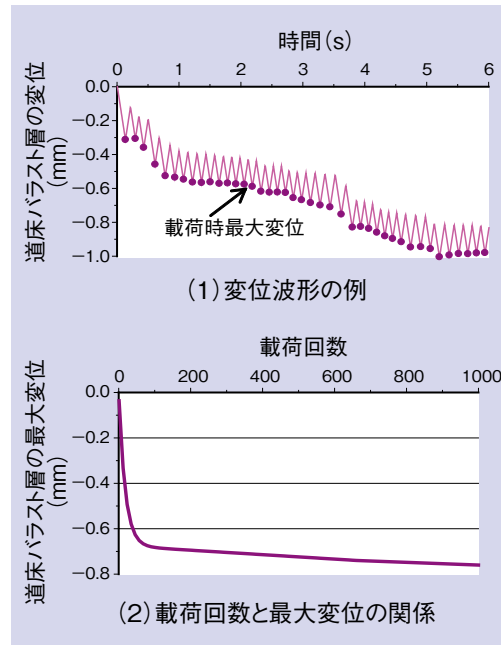


図7 シミュレーション結果

## 離散体モデルでできること

それではここで、実際のDEMシミュレーションの事例を紹介しましょう。ここでは、最もシンプルな円要素を用いて、図6に示すバラスト軌道の横断面のモデルを作り、繰り返し荷重シミュレーションを行ないました。荷重荷重は、図6中の波形に示す、最小2kN、最大30kNの左右同位相の連続繰り返し荷重で、周波数は7Hzとしました。

### (1) 道床バラスト層の沈下特性

シミュレーションにより得られた道床バラスト層の変位波形を図7(1)に、また、図7(1)の丸印で示す各荷重時の最大変位量と荷重回数の関係を図7(2)に示します。

まず図7(1)より、変位波形は、繰り返し荷重によるギザギザを示しながら、全体が少しずつ緩やかに下降しています。これは、道床バラスト層の粒子構造が、荷重によって変化した後、その荷重が除かれても、完全に元に戻らない性質を示しています。次に、図7(2)に示す通り、道床バラスト層の最大変位は、初期に大きく増加した後、徐々に収束し、これは図2に示した道床の沈下特性と同様となっています。これは、離散体モデルによって、粒子の集合体である道床バラスト層の沈下特性を再現可能であることを示しています。

### (2) 荷重の分散・伝達状況

離散体モデルのもう一つのメリットは、実験では観察が困難な情報を得ることが可能と言う点にあります。

その一例として、最大荷重が加わっている瞬間の力の分

散・伝達状況を見てみましょう。図8の赤線は、要素同士が接触して力を伝達している状況を示す線で、これより、まくらぎから道床バラスト層に加わった荷重が、道床バラスト層内で分散して伝達し、路盤部に到達しているのがわかります。

### (3) 粒子間の滑り

今度は逆に、粒子間の滑りの状況を観察してみましょう。図9に、最小荷重の瞬間に、粒子間の滑りが発生している点をプロットします。これより、粒子間の滑りは、道床肩付近のみでなく、まくらぎ下部分でも起きていることが把握できます。

## さらに精緻なモデルへ：バラスト形状のモデル化

ところで、図6を見て「え？バラストを丸い要素でモデル化して良いの？」と思う方も多いでしょう。ご指摘通り、円要素を用いたモデルでは、道床バラスト層の挙動を正確に再現することはできません。

実際、上述のシミュレーションと同じ条件の実験結果(図10)を比較すると、図7(2)のシミュレーション結果は、図10の実験結果と比較して、荷重100回目では約7倍、荷重1000回で約3倍の変位となっています。これは、実際はゴツゴツした形状のバラストから構成された道床バラスト層を、シミュレーションでは“円”でモデル化してしまったことが主な原因と考えられます。よって、バラスト軌道の沈下を正確に把握する上では、シミュレーションの

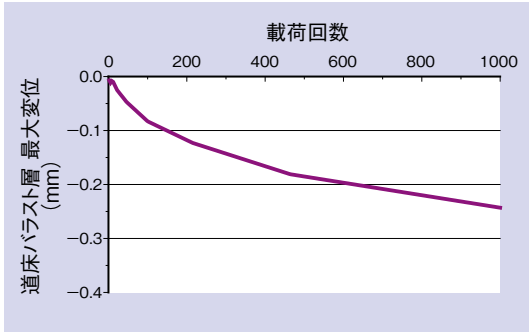


図 10 実物大軌道実験結果

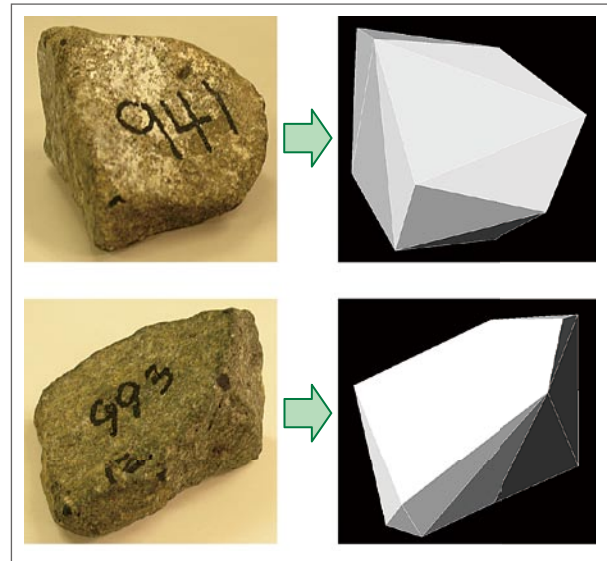


図 11 多面体モデルの例

モデルを作成する際に、バラストの要素形状に注意することが必要と言えます。

では、どうするか？と言うと、現在、砂や石の精緻なモデル化においては、“多面体（2次元なら多角形）”あるいは“球（2次元なら円）の集合体”として表現する手法が提案されています。鉄道総研では、バラストが角張っていることに注目して、まずは“多面体”でモデル化してみることにしました。図11に、多面体モデルの作成例を示します。これは、約1500個の実際のバラストについて、その頂点の3次元座標を測定した結果から作成したモデルですが、実バラストの写真と比較すると、大まかな形は示していると言えます。図12は、これらの多面体要素3万個を用いて、バラスト軌道のまくらぎ1本分を再現した3次元軌道モデルです。

このように、実バラストの形状に近いモデルを用いることで、列車通過時のバラストの挙動を、より現象に近い形で再現されることが期待されます。

### これからの目標

バラスト軌道の保守低減を目標とする場合、道床バラスト層は、できるだけ沈下しないようにすべきと考えられます。しかし一方で、道床バラスト層は、前述したような様々な役割も担っています。

よって、道床バラスト層の役割維持と沈下抑制の2つの

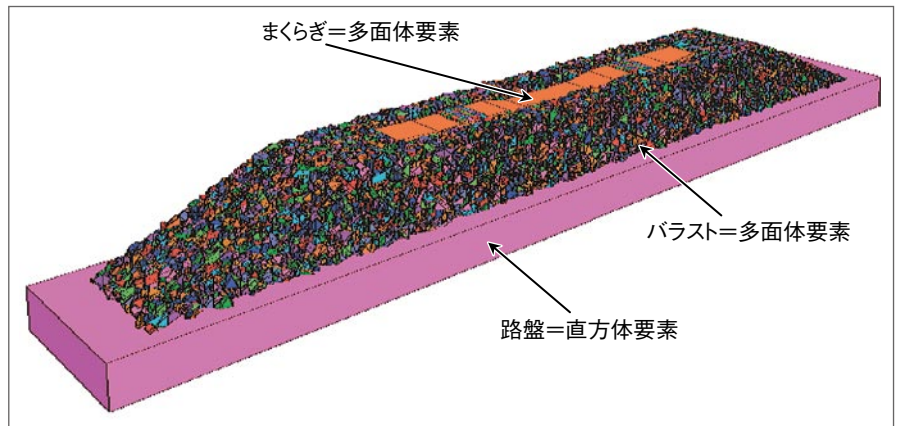


図 12 多面体要素による3次元軌道モデル

目的を果たす上では、これまでにない『ミクロな観点』での、道床バラスト層の変形・挙動のメカニズムの解明が不可欠です。

離散体モデルに関しては、やっと土台ができたという段階ですが、

- 道床バラスト層の沈下・劣化のメカニズムの解明
- 多種多様な現場のトラブルに対する効果的対策の提案

を目指して頑張ります。RRR

本稿で紹介したDEMシミュレーションでは、下記のプログラムを用いています。

- 1) Itasca社製“3DEC”（多面体DEM解析ソフト）
- 2) 筑波大学システム情報工学研究科 松島准教授 開発“CR01e”（円要素DEM解析プログラム）