

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

大規模並列計算による車輪・レール・バラスト挙動シミュレーション

車輪の転動時にレールとの接触面で発生する衝撃荷重は、車輪やレールのみならず、まくらぎやバラストまで伝播し、各部材に劣化（例えば波状摩耗や車輪フラット、バラスト劣化）が生じる要因になります。こうした劣化の発生メカニズムには未解明な点が多く、現象解明に向けて、車輪・レール間の接触挙動を再現する解析プログラムと列車走行荷重下の道床バラスト層の動的挙動を再現する解析プログラムの開発に取り組んでいます。いずれも実現現象模擬のためには詳細モデルでの数値シミュレーションが不可欠であり、大規模並列計算を必要とします。ここでは、各解析プログラムの特徴と計算事例、今後の展望などについて紹介します。



林 雅江
Masae Hayashi
鉄道力学研究部
計算力学研究室
副主任研究員
[専門分野]大規模並列計算, 線形方程式解法, 有限要素法



相川 明
Akira Aikawa
鉄道力学研究部
軌道力学研究室
主任研究員(上級)
[専門分野]バラスト, 衝撃問題, 不連続体解析, 大規模有限要素法

現象解明に向けた大規模数値シミュレーション

車輪・レール間の動的転がり接触現象のシミュレーション

車輪・レール間の接触面でどのような力学現象が起きているかを明らかにする研究では、多くの実験的および数値解析的なアプローチがなされています。しかし、車両が高速走行する際の接触面圧の測定は困難なため、数値解析的なアプローチが多くとられてきました。ただし、計算時間やメモリー容量の制約から、たとえば車輪・レール形状の単純化、弾性範囲での解析、定常的な転がり状態での接触挙動の再現など、計算コストを抑えた数値シミュレーションを実施する例がほとんどです。より現実的な走行状態下での接触挙動を見ようとすると、実形状に沿った車輪・レールの詳細なモデル化、車輪・レール接触面での塑性変形(☞参

☞ 塑性変形

金属などの材料では外力が弾性変形の限界を超えると外力を取り除いても永久変形が残ります。そのような変形状態を塑性変形といいます。

照)や応力履歴、および加減速などの動的な転動状態での接触面の詳細な力学挙動の評価が必要です。これらの要求を満たすため、東京大学奥田教授が開発した大規模な並列計算が可能な三次元有限要素法構造解析ソフトウェアFrontISTRをもとに、車輪・レール間の動的転がり接触解析プログラムの開発を進めています。

道床バラストの動的挙動のシミュレーション

また、列車による走行荷重を受ける道床バラスト層についての動的挙動を再現する解析プログラムの開発にも取り組んでいます。道床バラスト層は、バラストと呼ばれる硬い碎石の集合体であり、車輪・レール間において発生する著大な衝撃荷重を吸収・緩和して、路盤が許容できる荷重レベルまで低減するという重要な役目を担っています。しかしながら、バラスト自身の劣化現象が避けられず、維持管理が必要になることが問題となっています。しかし、どうしてバラストに劣化が発生するのかという物理的な仕組みはまだ十分には解明されていません。列車通過時のバラスト層内部で生

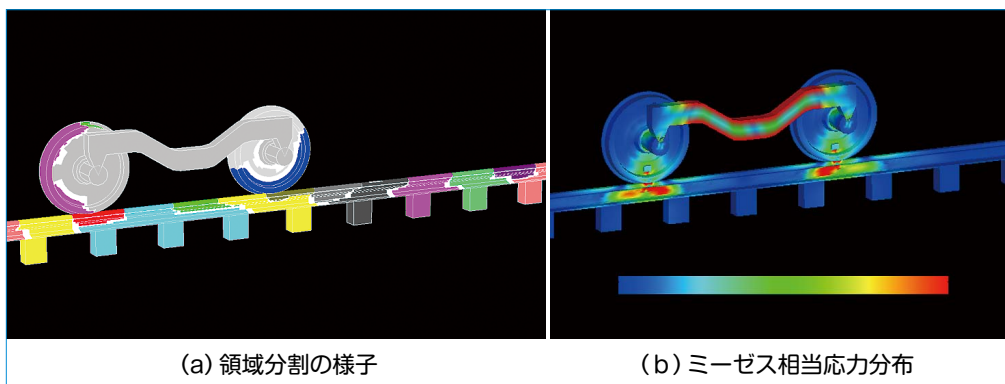


図1 二軸二輪モデルを用いた分散並列計算による転がり接触解析

じる動的挙動も観察や測定は容易でないため数値シミュレーションが有用です。数値シミュレーションによってバラスト層の動的挙動や劣化現象を解明するには、硬い石でできた弾性体としての性質と、粒子集合体からなる不連続体としての性質の相反する2つを同時に考慮する必要があります。海洋研究開発機構との共同研究により、その両方の性質を同時に扱える弾性体個別要素法 (QDEM) を開発しました。弾性体個別要素法による解析モデルの規模は非常に大きくなるため、画像処理を専門とする演算装置GPU (Graphics Processing Unit) を利用した大規模並列処理にも対応しています。

車輪・レール間の動的転がり接触解析手法

動的転がり接触解析モデルの開発

まず、車輪・レール間の動的転がり接触解析プログラムについて紹介します。このプログラムは、鉄道の車輪・レール間の転がり接触挙動を計算機上で詳細に再現するために必要な機能を上述のFrontISTRへ追加・拡張することにより開発してきました¹⁾。たとえば、塑性変形の考慮、駆動力による転がり状態の再現、計算の効率化の機能、高精度に接触部を評価するための大規模並列計算などです。特徴的な機能について幾つか説明します。

計算の効率化のための機能

動的転がり接触解析の計算は、まず

静止状態の車輪に輪重相当の荷重を徐々に負荷し、車輪・レール間の接触状態を求めます。次に、駆動トルクを車軸に負荷し、車輪を回転させながら徐々に加速する計算を行います。評価対象の速度まで車輪を加速させる計算を「助走区間計算」と呼び、レールの不整などの具体的な軌道条件の下で接触状態を詳細に再現する計算を「評価区間計算」と呼び、区別して扱っています。車輪が静止状態から目標の速度に達するまでに、本来ならば長いレールが必要ですが、必要な長さのレールをすべてモデル化すると解析モデルの規模が膨大になります。そこで助走区間では、あらかじめレールを複数の短いブロックに分割しておき、車輪が通過して十分に接触点から離れたレールブロックを進行方向前端へ移動させ再利用できるように工夫しました。これにより解析モデル全体の規模を抑えつつ、車輪の転動を連続的に計算できるようになりました。

領域分割による大規模並列解析

動的転がり接触解析プログラムの開発にあたり、まずは最も単純な一軸一輪モデルによるプログラム開発を進めてきましたが、より現実的な列車走行状態下での接触挙動を模擬するには、車輪間の相互作用も考慮する必要があります。つまり、解析モデルは、一軸一輪モデルから二軸二輪、一台車というように拡張してゆく必要があります。一方、接触領域近傍での力学挙動を詳

細に再現するには細密なメッシュ分割が必要なため解析規模は膨大なものとなります。単一の計算機では解析に必要なメモリー容量が不足してしまいます。このような解析モデルの大規模化に関して、FrontISTRでは領域

分割法による分散並列化^(註)によって、大規模計算モデルに対応しています。図1 (a) では実際に、二軸二輪モデルを用いた動的転がり接触解析を並列化するために行った領域分割を示しています。色が異なる領域が異なるCPUコアに割り当てられて計算されます。有限要素法による数値解析では、離散化の過程を経て得られた行列方程式を解きます。領域分割による分散並列化を行うと、各CPUコアは割り当てられた部分的な領域に関してのみ要素剛性行列や外力ベクトルを計算します。行列方程式の求解過程では、各CPUコアが部分的にもつ情報を通信によって補い合うことで系全体に対する演算の一貫性を保ちつつ、局所的に実行できる演算は各CPUコアで実施することで並列計算が進められます。図1 (b) に分散並列計算によって得られた二軸二輪モデルによるミーゼス相当応力分布 (車輪並進速度は約10km/h) を示します。接触面では塑性変形が生じるレベルの応力が発生していました。

行列方程式の解法については、直接

註 領域分割による分散並列計算

分散メモリーに対応した並列化手法の一つに領域分割法があります。解析領域のメッシュを複数の部分領域に分割し、その部分領域を各CPUコアに割り当てます。この領域分割処理をパーティショニングと呼ぶこともあります。

法と反復法がありますが(☞参照)、車輪・レール間の接触状態は両者が互いに貫入しないという幾何学的な拘束条件の下で釣り合い状態を求めることになります。この拘束条件を考慮する過程で係数行列が不定行列となるため、より安定的な求解が可能な直接法を採用しています。直接法は演算量が多く、高速化が課題です。

プログラムの検証と妥当性評価

開発した動的転がり接触解析プログラムについては、現在、一軸一輪モデルによる解析結果について、解析プログラムの検証と妥当性評価(V&V: Verification & Validation)に取り

り組んでいます。特に接触領域の評価については測定などの実験的アプローチが容易ではないため、理論解および先行研究の結果との比較によりV&Vを進めています²⁾。その一例を紹介します。

先行研究³⁾と形状・材料パラメータなどを合わせた解析モデルを作成し、本解析プログラムで得られた解析結果と比較しました。図2(a)は、本解析プログラムから得られた接触面内の鉛直方向垂直応力分布を示しています。図中の破線で示す長手方向の中心線上の応力分布を理論解や先行研究の解析結果と重ね合わせてみまし

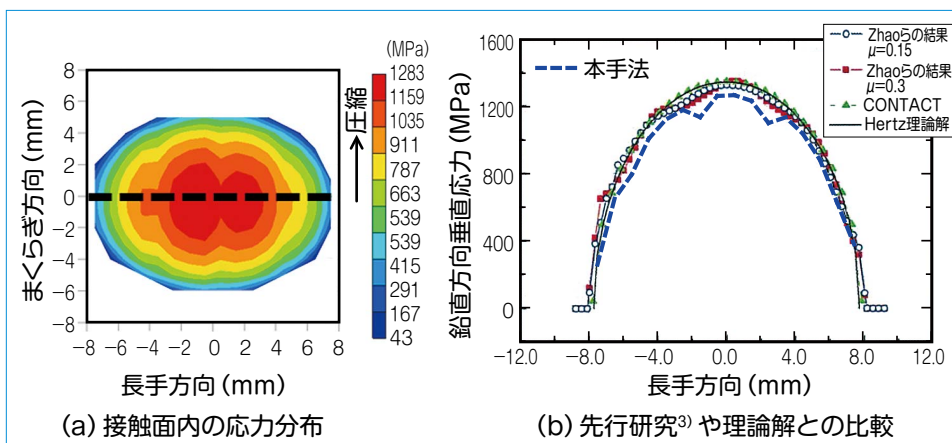


図2 一軸一輪モデルによる動的転がり接触解析結果の検証例

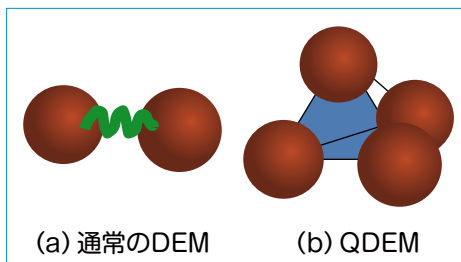


図3 弾性体個別要素法の原理

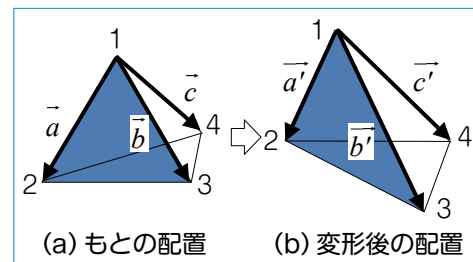


図4 3組の1次独立なベクトル

た(図2(b))。これにより、最大値や分布の形状が概ね一致することを確認できました。また、本解析プログラムでは接触状態を時刻歴に対し連続的に捉えることも可能です。連続的な接触状態を模擬する研究事例は少ないため、その検証や妥当性評価については今後の課題となります。さらに、二軸二輪モデルを用いて不整通過時の輪重変動や接触挙動評価も実施する予定です。

列車走行荷重下の道床バラスト層の動的挙動解析手法

弾性体個別要素法(QDEM)の特徴

バラスト軌道の劣化現象解明のためには、バラスト層の粒状体構造の特徴を考慮した上で、バラスト内部の弾性変形挙動や波動伝播特性を十分な精度で評価する必要があります。そこで、バラスト砕石間の不連続体としての接触挙動と、バラスト砕石の弾性変形挙動とを同時に扱える弾性体個別要素法を海洋研究開発機構と共同で開発しました。弾性体個別要素法は、一般の個別要素法(DEM)のように、バラスト

の回転・並進による剛体変位、および、粒子間の接触・摩擦挙動に関する動解析が実施でき、その上で、バラスト粒子内部を細かな四面体要素に分割することで、有限要素法(FEM)のように弾性変形や応力分布も同時に解析できるという特徴があります。

弾性体個別要素法の原理

通常の個別要素法と弾性体個別要素法の違いについて説明します。図3は、両モデルの基本構造を示したものです。通常の個別要素法では、図3(a)に示すように、接触する2つの剛体要素間にばねを配置し、2要素間の1次元的な距離の変化から1次元的な接触力を求めます。構成則や破壊基準は基本的に1次元の剛体モデルであり、変形状態から連続体内部の応力を求めることはできません。一方、弾性体個別要素法では、図3(b)に示すように、要素4粒子で四面体を構成し、四面体の変形をもとに内部の応力を求めます。

図4はQDEMにおける応力の定義について示したものです。図4(a)のように、元の配置の四面体に関して、3組

☞ 行列方程式解法の反復法と直接法

反復法は行列ベクトル積や内積など単純な演算で成り立つ反復計算を繰り返しながら近似解を探索する解法であるため、並列化が容易です。しかし、行列の性質によって近似解への収束性は異なり、場合によっては反復回数の増加や発散もあります。一方で直接法はガウスの消去法に代表されるように厳密解を求めます。演算手順に逐次性が高いため並列化は単純でなく、演算量も多いですが、行列の性質に依存せず、求解ができます。

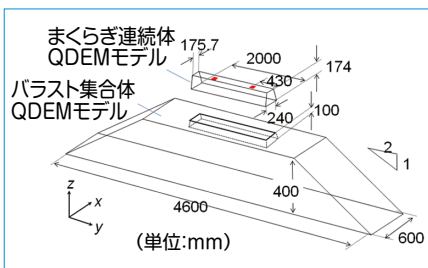


図5 まくらぎ1本分のQDEMモデル

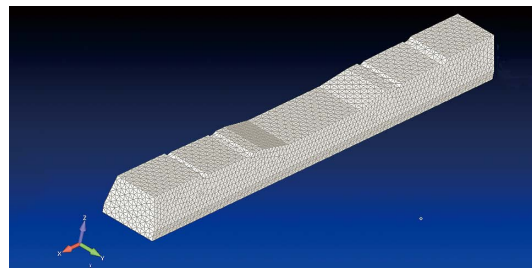


図6 QDEMによるまくらぎモデル

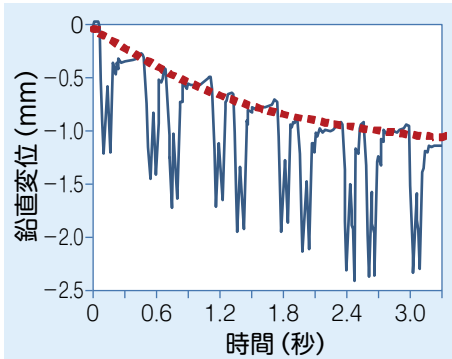


図7 バラストの初期沈下挙動 (剛性を1/100にした場合の計算)

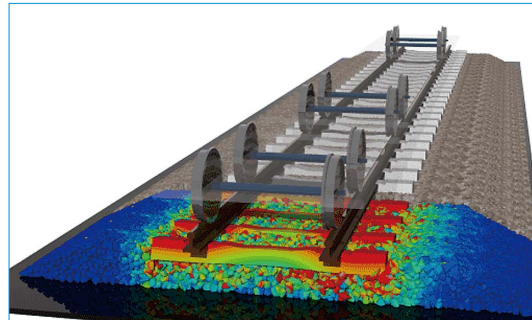


図8 1編成分の列車の実測荷重に対する変位応答の計算例

の1次独立なベクトルを考えます。これに外力が作用して図4 (b) のように変形したとします。もとの配置のベクトルも、変形後のベクトルも四面体の頂点の座標値から計算できます。ここに、変形前後のベクトルの差を考えると、これは四面体内部の純粋な変形挙動と剛体回転の2つからなります。つまり、変形前後のベクトルについて、剛体回転の影響を取り除くことで、四面体内の純粋な変形挙動を計算することが可能になります。本手法は、要素が接触状態にある場合は弾性体を模擬し、一方、粒子が分離した場合は通常の個別要素法演算を行うことにより、相反する2つの性質を考慮することができます。

バラスト軌道QDEMモデルの構築

図5はQDEMモデルの諸元を示したものです。本モデルでは、個々のバラスト形状を数百個のQDEM四面体を用いてモデル化しています。また、まくらぎに関しても、図6に示すように、およそ1cmメッシュのQDEMの四面体によりモデル化しました。構築したモデルはバラスト数5700個、四面体要素数約25万個、総節点数約92

万点からなります。これをQDEM解析により重力場で締め固めて、バラスト軌道の初期モデルとしました。

実測荷重入力による応答解析

構築したまくらぎ1本分のバラスト軌道モデルの左右のレール位置に、特急列車通過時の実測荷重を入力する動的応答解析を実施しました。なお、本計算では計算ステップが早く進むように、バラストの剛性を実際の値の1/100の大きさに設定しています。

図7は、1編成5両分の荷重を入力したときの、バラスト軌道の鉛直方向の初期沈下挙動を示したものです。本解析では剛性を実際の1/100に設定しているため沈下量が大きくなっていますが、沈下挙動に関しては、軸通過により沈下量が増加するものの、1軸あたりの沈下量は徐々に減少して一定値に漸近する傾向が得られました。これらの傾向は、実物大載荷実験や実軌道でのバラスト軌道の初期沈下の特徴によく符合しています。

また図8は、同様の手法によりまくらぎ4本分のバラスト軌道モデルを構築し、それに同じ荷重波形を入力した

ときの変位応答を示しています。図では変位量の大きいところを赤で、変形量が小さいところを青で示します。本計算は複数のGPUによるマルチGPU並列解析上で計算したものです。現在、前述の車輪・レール間の接触解析で得られた衝撃荷重を入力値とすることで、車輪・レール～道床バラスト層までの一連の力学挙動を数値シミュレーションで再現することにも取り組んでいます。

おわりに

車輪の転動時にレールとの接触面で発生する衝撃荷重に起因する軌道の劣化現象の解明に向けて開発中の車輪・レール間の接触挙動を再現する解析プログラム、列車走行荷重下の道床バラスト層の動的挙動を再現する解析プログラムの2つに関して、解析手法の原理およびその有効性について紹介しました。ここで紹介した解析モデルは、今後、レールシェリング、波状摩耗、あるいはバラスト軌道劣化などの発生メカニズムの解明や、各種対策工の評価などの実際的な応用に活用する予定です。[RRR]

文献

- 1) 坂井宏隆, 高垣昌和, 林雅江, 相川明, 奥田洋司, 殷峻: 大規模並列計算による車輪/レール間の転がり接触挙動の解析, 鉄道総研報告, Vol.27, No.10, pp.29-34, 2013
- 2) 林雅江, 坂井宏隆, 高垣昌和, 相川明, 奥田洋司, 殷峻: 車輪・レール間の動的接触挙動評価, 鉄道総研報告, Vol.28, No.12, pp.29-34, 2014
- 3) Zhao, X., Li, Z.: The solution of frictional wheel-rail rolling contact with a 3D transient finite element model: Validation and error analysis, Wear 271, pp.444-452, 2011