

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

坂井 宏隆* 高垣 昌和* 林 雅江*
相川 明** 奥田 洋司*** 殷 峻#

**Analysis of Rolling Contact Behavior between Wheel and Rail by Large-Scale
Parallel Computing**

Hiroataka SAKAI Masakazu TAKAGAKI Masae HAYASHI
Akira AIKAWA Hiroshi OKUDA Jun YIN

In this paper, we attempt to make dynamic rolling contact analysis between wheel/rail by using the three-dimensional finite element method in large-scale parallel computing. We clarify the mechanical behavior of the contact patch, when a wheel runs at a high speed with loading torque. In order to accelerate the wheel in the minimum rail model in size, the technique of an efficient rail model is developed. In addition, the present method has a technique of dynamic partitioning to limit the contact region between wheel and rail to one partition region on the parallel calculation with the wheel rolling. As a result, it became possible to evaluate the dynamic rolling contact behavior between wheel/rail.

キーワード：車輪，レール，コンタクトパッチ，3次元大規模並列有限要素法，動的接触解析

1. はじめに

鉄道車輪の転動時に車輪／レール間で発生する衝撃荷重は、接触面からまくらぎやバラスト、さらにはその下の構造物にまで伝わり、軌道の劣化を引き起こす要因となる。一方で、車輪のフラットやレールの波状摩耗、バラストの摩耗や軌道の沈下など、車輪／レールおよびバラストに生じる種々の損傷に関する理論的な発生メカニズムは未解明な点も多く、車輪／レール間の衝撃荷重を詳細に評価することは、メカニズムの解明や有効な対策法を検討する上で有益な情報となる。車輪／レール間の接触部（コンタクトパッチ）の大きさは10～数十ミリ程度と小さく、パッチ部の状態を詳細に把握するためには、非常に細かいメッシュ分割が必要となる。そこで、著者らは大規模並列計算が可能な3次元有限要素法を用いた、車輪／レール間の動的接触解析手法を構築した。

車輪／レール間の接触問題に着目した研究は、これまでにも数多く行われている。我が国においては、車輪／レール間の接触問題に対して影響を及ぼす複数の因子（例えば、すべりや回転、レールの表面粗さ、摩耗進展

など）を考慮した数値解析^{1) 2) 3)}や、車輪と軌条輪を用いた実験^{4) ~ 7)}が数多く行われており、これを基にした具体的な対策法も検討されている。海外においては、弾性体の多次元転がり接触問題について理論的・数値解析的なアプローチを行ったKalker⁸⁾をはじめとし、車輪／レール間に非Hertz接触モデルを用いて接触応力や形状、固着／すべり等に着目したPiotrowskiら⁹⁾、レールの表面粗さを考慮し、生成される波状摩耗の深さやピッチを予測したBaezaら¹⁰⁾、摩耗や接触疲労を調べるための有限要素モデルを提案したPletzら¹¹⁾など、コンタクトパッチの力学的挙動そのものに着目した事例も多い。

一方で、従来のアプローチは車輪やレールの一部のみを詳細にモデル化した事例や、接触計算と走行の模擬解析を別々に実施し、走行は強制変位でモデル化するなどの準静的解析によるものが多い。これらの手法は車輪／レール間の動的な挙動を表現できないため、実際の走行状態を模擬するためには改良や工夫が必要となる。また、一般的に、着目する周波数成分に応じた規模（メッシュサイズ）のモデルを作成する必要がある。車輪／レール間に生じる衝撃荷重においては、レールの継ぎ目や波状摩耗など、不整を有するレール上を車輪が転動する際に高い衝撃力が発生するため、数kHzオーダーの高周波成分に着目することもある。そこで、本研究では高周波

* 鉄道力学研究部 計算力学研究室

** 鉄道力学研究部 軌道力学研究室

*** 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

株式会社先端力学シミュレーション研究所

特集：鉄道力学

数帯域での評価が可能な、車輪／レール間の動的転がり状態を計算するための解析手法の構築を目標としている。

2. 大規模並列計算による車輪／レール間の転がり接触解析

車輪／レール間に生じる劣化現象を解明するためには転がり接触状態の再現が重要であり、動的転がり接触を取り扱える手法が必要である。加えて、車輪／レール間の接触を取り扱う場合は接触力、とりわけ接線方向の状態（クリープ力）を詳細に再現し、加減速が接触面に与える影響も考慮する必要がある。さらに、劣化現象の解明にあたり、複数車輪あるいは台車単位でのモデル化もその必要性が求められている。そこで、本稿では3次元大規模並列有限要素解析が可能なプログラム FrontISTR¹²⁾ をカスタマイズした。

2.1 FrontISTR による大規模並列有限要素解析

車輪／レール間の転がり接触問題を取り扱えるよう、機能を付加した FrontISTR を用いて、弾塑性接触や大変形を考慮した解析を行い、接触部の評価を行う。ここでは車輪とレールの3次元有限要素モデルを作成し、速度ゼロの状態から加速して必要な所定の速度を得るための助走区間と、レールの表面不整等をモデル化してコンタクトパッチの詳細な評価を行うための評価区間に分けて計算を行う。なお、現在はプログラムの検証段階のため、車輪・レールはともに弾性体として計算を行っている。

2.2 FrontISTR のカスタマイズ

車輪を速度ゼロの状態から加速させ、高速域での車輪・レールの転がり接触状態を模擬するため、次のような機能を追加した。

2.2.1 キャタピラメッシュによる全体メッシュサイズの削減および計算の効率化

コンタクトパッチのサイズは車輪やレールの全体サイズと比較して非常に小さいため、転がり接触解析を行う際、接触部に力学的な影響を及ぼすレールの長さに限られる。そのため、助走区間では車輪が通過し、車輪から十分に離れたレールモデルは不要となる。そこで、図1に示すように助走区間のレールを複数ブロックに分割し、車輪が1ブロック長の距離を進行する毎に、接触領域への影響が少ない後端部のブロックを進行方向前端へ移動させる。レールがキャタピラのように進行することから、このようなメッシュをキャタピラメッシュと呼んでいる。これにより全体のモデル規模を抑えつつ、車輪の転動を連続的に評価できるようにした。なお、評価区間ではキャタピラメッシュを用いず、評価区間用の長い

レールモデルを使用する予定だが、本稿（3章）では全てキャタピラメッシュを用いた場合の計算結果を示している。

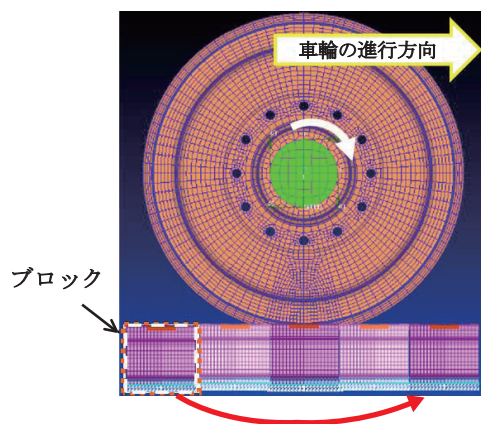


図1 キャタピラメッシュの概念図

2.2.2 無反射境界の導入による弾性波の影響除去

解析では2kHzまでの高周波振動を評価するため、車輪の転動時に有限長のレール内を伝播・反射する弾性波がコンタクトパッチの評価に影響し、高周波領域において妥当な結果が得られなくなる可能性がある。そこで、弾性波の影響がないように、レール両端部の1ブロック、または複数ブロックの要素にレーリー減衰を与え、弾性波を減衰させるようにした（図2）。

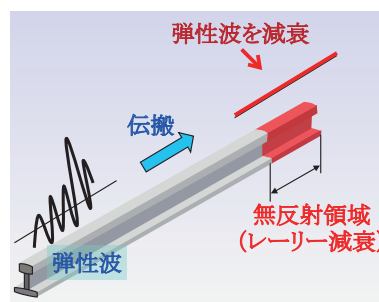


図2 無反射境界の概念図

2.2.3 トルクの制御

トルク相当の集中荷重（ここでは単にトルクと呼ぶ）を与えた車軸の初期節点は車輪の転動とともに回転移動するため、常にトルクが一定となるよう車軸の接線方向に沿った荷重を全体座標系の成分に分解するように、トルクの制御機能を付加した。

2.2.4 計算速度の高速化

前述したように、車輪／レール間の接触面積は車輪やレールのサイズと比較して小さい。本研究の目的は車輪／レール間の接触挙動の評価であるため、接触領域のメッシュサイズを小さくしなければならず、モデルの細密化により計算規模は膨大となる。そのため、複数の

計算機を用いた並列計算は不可欠である。また、接触計算を行う場合、連立方程式解法（ソルバ）に反復解法を用いると、解の収束性が著しく低下したり、全く収束しない場合が多い。このような理由から、分散メモリ型並列計算に対応した直接解法ソルバ MUMPS¹³⁾ を導入し、大規模モデルでの計算を可能とした。また、本プログラムでは車輪とレールの接触計算を行う際、複数の領域間での通信を避けるため、図3に示すように車輪とレールの接触近傍部を一つの領域内に収めている。さらに、車輪が回転すると、接触部が複数の領域にまたがるため、領域を再分割して車輪とレールの接触近傍部が常に同じ計算領域内に含まれるような工夫を施している。なお、領域分割を高速で処理するため、オンメモリで計算が実行できるようにした。

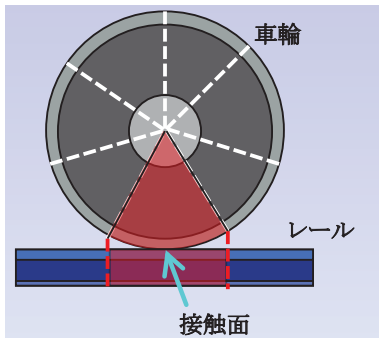
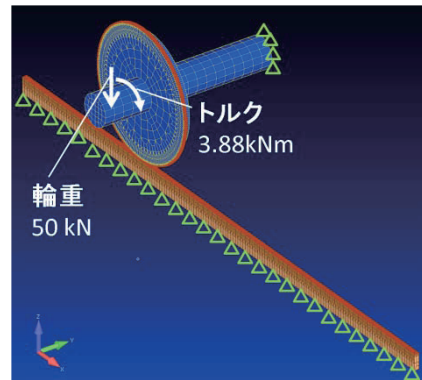


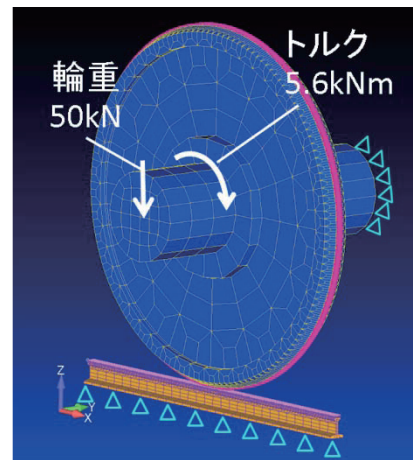
図3 領域分割の概念図

2.3 計算モデル

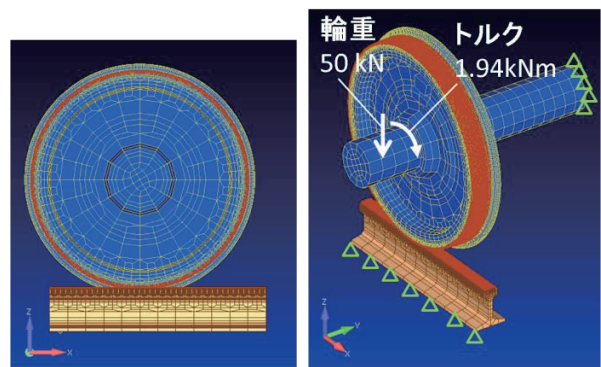
車輪およびレールの材料定数は新幹線車両の車軸と車輪鋼材、および 60kg レール用鋼材の値とした。メッシュは全て 8 節点 6 面体要素から成る。用意したモデルは、高速域まで安定して計算が可能であることを検証するための、車輪のフランジ部やレールの断面形状を有しない試算用簡易モデル (A1)、接触部でのコンタクトパッチの挙動を調べるため、A1 の接触部付近のメッシュサイズのみ細かくした簡易モデル (A2)、実形状を再現した接触部のメッシュサイズが粗めのモデル (B1)、B1 に対して接触部付近のメッシュサイズのみを細かくしたモデル (B2) の 4 種である。モデル A1, A2 および B1 を図 4 (a) ~ 4 (c) に、各モデルの節点数および要素数、接触部メッシュサイズを表 1 に示す。モデル B2 は B1 とメッシュサイズの違いのみで同一形状であるため省略する。全てのモデルは 1 本のレール上に 1 輪および車軸の 1/2 を有する 1 軸 1 輪モデルとした。負荷として車軸中心に 50kN の輪重を集中荷重として与え、また、車軸の表面にトルクを付加した。境界条件として、車軸の対称面の節点は長手方向を拘束し、レール底部の節点は完全拘束とした。解析時は車輪をレールから浮かせた状態から、輪重相当の集中荷重で車輪をレールに接触させて安定後、車軸に負荷するトルクを漸増させた。



(a) モデル A1



(b) モデル A2



(c) モデル B1

図4 各モデルの全体図

表1 各モデルの規模

モデル	節点数	要素数	接触部メッシュサイズ	
			車輪 (mm)	レール (mm)
A1	16904	10576	4.0 × 3.8	5.0 × 7.5
A2	85112	64932	1.0 × 1.0	1.0 × 1.0
B1	95084	95071	5.0 × 5.0	3.0 × 3.0
B2	3973853	3678708	1.0 × 1.0	1.0 × 1.0

※接触部メッシュサイズについては、車輪が（車軸方向）×（進行方向）、レールが（縦方向）×（横方向）である。

特集：鉄道力学

2.4 計算フロー

解析の計算フローを図5に示す。はじめに計算モデルを読み込み、領域分割を行う。本解析ではUpdate Lagrange法を用いている。時間積分はNewmark β法である。接触計算は接線方向をペナルティ法、法線方向をラグランジュ乗数法で求解し、計算結果の収束判定を行った後、領域再分割およびキャタピラメッシュ更新の必要性を判定する。

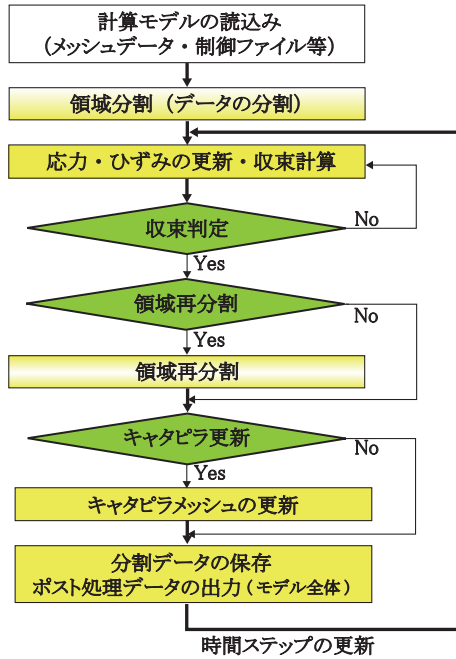


図5 計算フロー

2.5 計算に用いたパラメータ

各モデルの各種パラメータに関する諸元を表2に示す。助走区間においては車輪を効率よく加速させるため、基本的に摩擦係数は1.0に設定している。なお、表中の接線ペナルティは、接線方向の接触計算におけるペナルティ係数を意味している。

表2 各モデルの諸元

モデル	A1	A2	B1	B2
密度 (t/mm ³)	7.81 × 10 ⁻⁹			
時間増分 (× 10 ⁻⁴ sec)	5.0	2.0	2.0	2.0
摩擦係数	1.0	0.3	1.0	1.0
接線ペナルティ	1.0 × 10 ⁴			
車軸のトルク相当集中荷重 (kN × 接点数)	10.0 × 4	5.0 × 8	2.5 × 8	2.5 × 8

3. 計算結果および考察

3.1 簡易モデル1 (A1) による試算結果

図6に、車軸中心のレール縦方向並進速度および変位の経時変化を示す。また、図7に車軸中心の鉛直方向変位を示す。図6より、助走区間では短時間で所定の速度にするため、実車両の出力トルクよりも大きなトルクをかけて計算することにより、解析上で加速に要する時間は4.8秒ほどで、車輪の並進速度が時速約270kmまで達している。また、図7から、開発したプログラムでは高速域でも比較的安定して計算が実行されていることがわかる。なお、解析初期に0.2mmほど変位が生じているのは、前述の通り、解析モデルの初期状態で車輪をレールから浮かせているためである。

また、図7を拡大して詳細に挙動を調べると、時間に依存せず高周波数で振動する成分と、低周波数で時間に依存して波長が短くなる成分の2種類が観察される。前者の要因については数値解析的な振動であり、後者は車輪の回転速度に応じた振動であると考えられる。

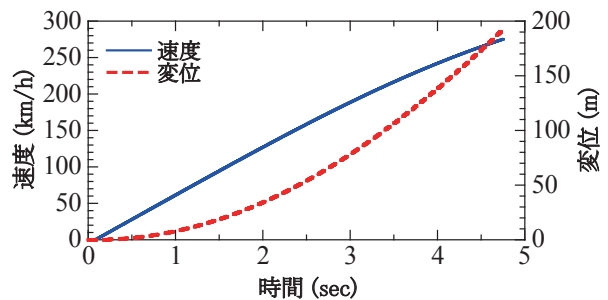


図6 車軸中心のレール縦方向並進速度

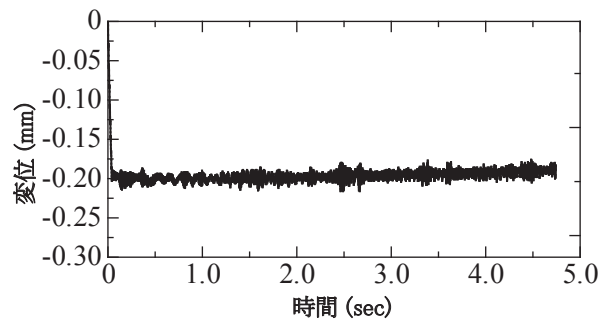


図7 車軸中心の鉛直方向変位

3.2 簡易モデル2 (A2) によるコンタクトパッチの評価

図8a～8cは、接触面のメッシュサイズを1mmとした簡易モデル2 (A2) における、コンタクトパッチの応力分布である。各図は全て、走行中の車輪をレールとともにレール横方向 (車軸方向) から見た接触面領域の断面を示す。最大応力値は既往の理論計算や数値解析結果および実測値と同レベルであるが、その分布はやや乱れ

ており、特に車輪内部には応力分布が不連続となっている箇所が存在する。節点の応力は形状関数を用いて外挿しているが、車輪内部では明らかにメッシュ形状そのものと思われる応力分布も見られることから、メッシュの切り方に配慮が必要である。

また、図9は、Hainesら¹⁴⁾による固着/すべりの理論評価と、本シミュレーションにより求めたレール頭頂面のせん断応力分布である。シミュレーション結果から、せん断応力は車輪/レール間の接触部に生じる固着/すべりの領域とよく対応しているといえる。

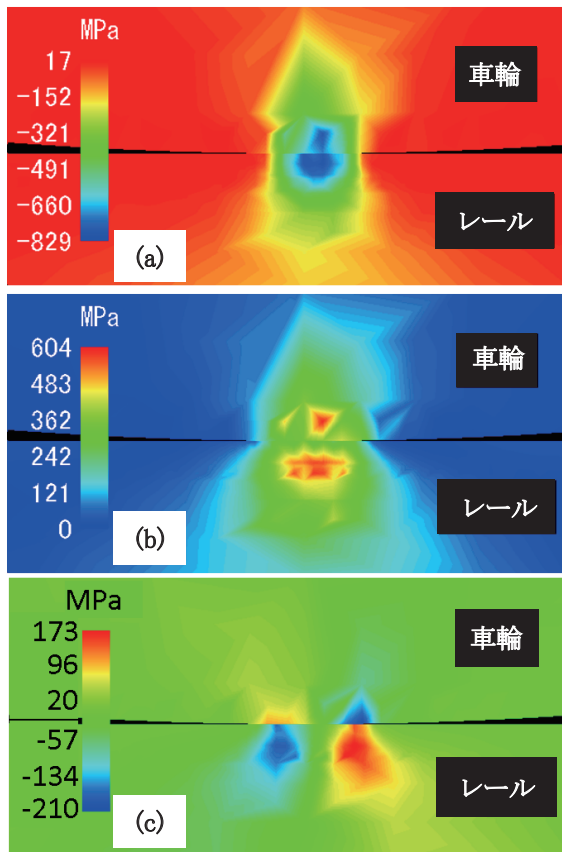


図8 簡易形状2 (A2) のモデルによるコンタクトパッチの様子：(a) 鉛直方向応力 (b) Mises 相当応力 (c) せん断応力

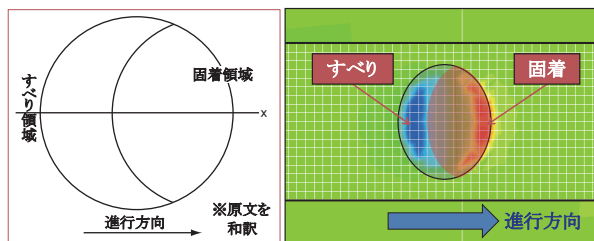


図9 接触面の理論評価と数値シミュレーションによるレール頭頂面のせん断応力分布

3.3 並列化の評価

計算機の使用ノード数ごとの1ステップあたりに要する計算時間を比較した。なお、計算は実形状1のモデル(B1)を用い、すべてのケースは1ノードあたり4コアで計算を行っている。図10は、コア数ごとの1ステップあたりの経過時間を示したものである。縦軸は、キャタピラメッシュの更新や領域の再分割が生じない100ステップを実行し、1ステップあたりの平均計算時間を経過時間とした。横軸のグラフ上部には1ノード4コア並列の計算時間を基準とした各ノードにおける計算時間の短縮率を示している。

図10から、本モデルは計算規模が小さいために64コア(16ノード)あたりから計算時間が頭打ちになっていることがわかる。これは、ノード数の増加に伴ってノード間の通信時間が増大するためである。

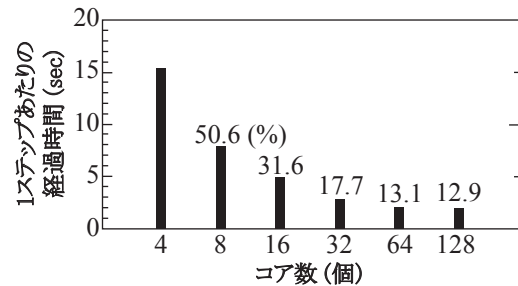


図10 計算に使用したコア数と1ステップあたりに要する計算時間および計算時間の短縮率

3.4 実形状モデル2 (B2) による試計算結果

図11a～11bは、実形状2のモデル(B2)を用いた場合の車輪とレールの接触部における断面(横方向から見たもの)と、レール頭頂面におけるコンタクトパッチの応力状態の一例である。図11aでは、図8aと比較すると分布が滑らかであり、定性的には接触状態をよく表しているといえる。また、図11bより応力分布は中心から離れるほど滑らかに応力が減少しており、妥当に接触部の状態が計算されているものといえる。また、発生応力の大きさについても概ね妥当な結果である。なお、車軸方向(進行方向と垂直方向)の応力分布がパッチ中心に対して非対称であるのは、実物と同様、レールに1/40の角度で傾斜を与えているためである。

現在は当該モデルを用いて助走区間の計算を実施しているが、今後は評価区間における、走行中の接触状態の評価や、波状摩耗、溶接継ぎ目等の不整を導入したレールモデルによる衝撃力の評価などを行い、既往の実験や現地測定結果と比較・検証を行う予定である。

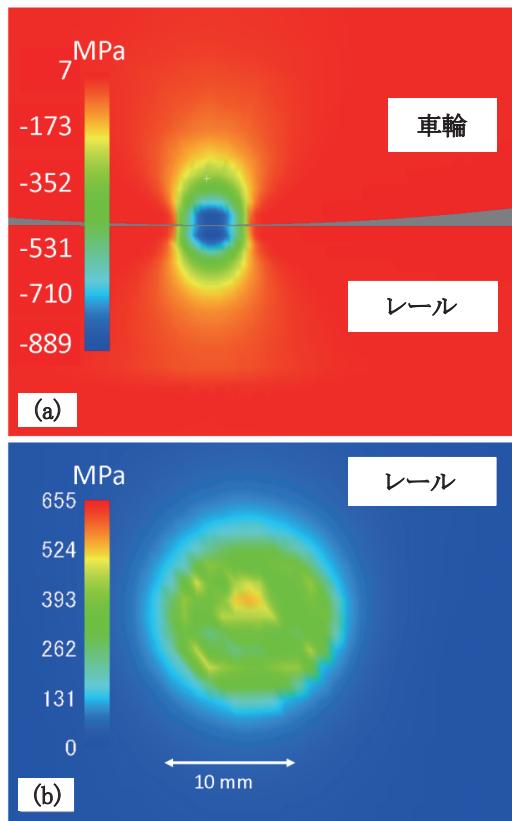


図 11 実形状 2(B2)のモデルによる接触部付近の様子：
(a) 車輪とレールの鉛直方向応力 (b) レール側の
コンタクトパッチにおける Mises 相当応力

4. おわりに

本稿では、大規模並列計算が可能な 3 次元有限要素法を用いた車輪／レール間の動的接触解析手法を構築し、計算の安全性や結果の妥協性、並列化効率等々を評価した。車輪／レール間で生じる衝撃荷重を評価するための精緻で大規模なモデルを扱うため、3 次元大規模並列計算が可能な FrontISTR に、キャタピラメッシュや無反射境界の導入、車輪の転動中も接触領域を常に 1 領域に収めるための動的な領域分割機能等を拡充した。その結果、本手法は計算コストを抑えつつ、車輪／レール間に生じる衝撃荷重を再現することが十分に可能であり、高速域においても安定した計算が行えることが確かめられた。

現在、レールに波状摩耗等の不整を取り入れたモデルや、レール底面に軌道パッド相当の剛性を持つ要素をまくらぎ間隔毎に設置し、その最下部を変位拘束したモデルを作成しており、まもなく助走区間における所定速度までの加速後、評価区間での挙動評価を行う予定である。これらの解析モデルを用いた精緻な転がり接触解析によって、コンタクトパッチ内での力学的挙動を調べることで、車輪／レール間に生じる種々の損傷メカニズムの解明や原因究明に努めたい。

文 献

- 1) 須田義大, 佐野成寿: 多自由度振動系における転がり接触表面上のコレージェンション生成実験, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 57, No. 533, pp. 65-68, 1991
- 2) 松浦章夫, 内田忠之, 福田拓也: 急曲線における内軌レールの波状摩耗発生メカニズムに関する研究, 土木学会論文集, Vol. 773, No. I-69, pp. 125-135, 2004
- 3) 紅露一寛, 阿部和久, 石田誠, 鈴木貴洋: レール継目部列車走行試験の有限要素シミュレーションとその再現性, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 1037-1047, 2005
- 4) 須田義大, 佐野成寿: コレージェンションの成長・減衰機構に与える振動系の影響, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 56, No. 521, pp. 39-42, 1990
- 5) 須田義大, 岩佐崇史, 小峰久直, 曄道佳明, 銭蓓麗: 縦滑りを伴うコレージェンションの発生機構に関する研究, 生産研究, Vol. 50, No. 5, pp. 195-198, 1998
- 6) 松本陽, 佐藤安弘, 藤井雅子, 谷本益久, 陸康思: 曲線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに関する研究 第 1 報 接触ばね系振動を考慮した縦方向スティック・スリップ・モデル, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 62, No. 597, pp. 1697-1705, 1996
- 7) 松本陽, 佐藤安弘, 谷本益久, 陸康思, 宮内栄二: 曲線部に発生するレール波状摩耗の発生メカニズムに関する研究 第 2 報 基本的発生メカニズム, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 64, No. 623, pp. 2625-2632, 1998
- 8) Kalker, J., *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*, Kluwer Academic Publishers, 1990.
- 9) Piotrowski, J. and Kik, W., "A simplified model of wheel/rail contact mechanics for non-Hertzian problems and its application in rail vehicle dynamic simulations," *Vehicle System Dynamics*, Vol. 46, No. 1, pp. 27-48, 2008.
- 10) Baeza, L., Vila, P., Xie, G., and Iwnicki, D., "Prediction of rail corrugation using a rotating flexible wheelset coupled with a flexible track model and a non-Hertzian / non-steady contact model," *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, pp. 4493-4507, 2011.
- 11) Pletz, M., Daves, W., Yao, W., Kubin, W., and Scheriau, S., "Multi-Scale Finite Element Model to Describe Wear and Rolling Contact Fatigue in the Wheel-Rail Test Rig," presented at the *9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems*, Aug. 27-30, 2012.
- 12) 奥田洋司: 大規模アセンブリ構造対応非線形構造解析ソフトウェア, <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/dl/>
- 13) MUMPS: A Parallel Sparse Direct Solver., <http://graal.ens-lyon.fr/MUMPS/>
- 14) Haines, J. and Ollerton, E., "Contact Stress Distributions on Elliptical Contact Surfaces subjected to Radial and Tangential Forces," presented at the *The Institution of Mechanical Engineers*, Vol. 177, pp. 95-11, 1963.