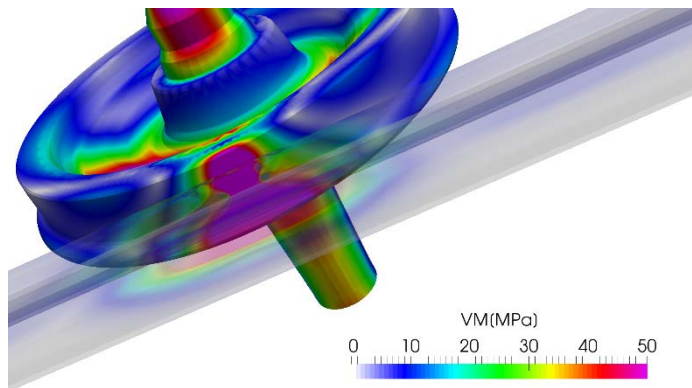
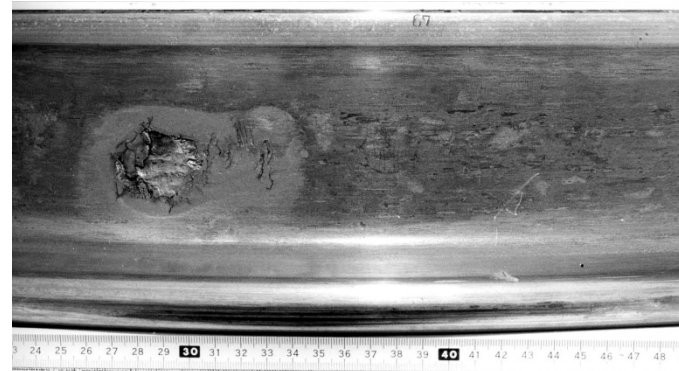
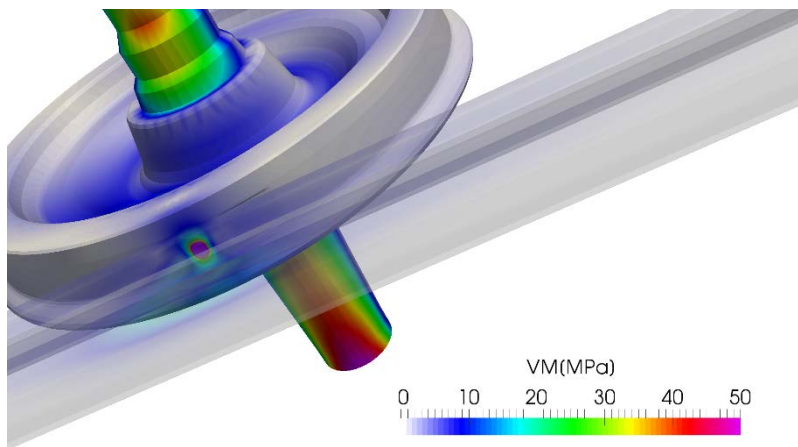


鉄道における車輪・レール間の動的転がり接触解析

第42回FrontISTR研究会

(公財)鉄道総合技術研究所

鉄道力学研究部計算力学研究室 林 雅江



① 研究背景および開発目的

② 解析結果のご紹介

●大規模一台車モデルによる曲線走行の実現

- 一台車モデルの構築(高い計算精度と自由度の抑制を両立したメッシュ)
- 複雑な曲線モデルの自動生成機能
- 解析ツールのソルバー部分の高速化

●衝撃挙動の計算例

- 車輪フラットを有する車輪モデルによる数値解析

●MBDとの連成システムの構築と計算例

③ 今後の展望

① 研究背景および開発目的

② 解析結果のご紹介

●大規模一台車モデルによる曲線走行の実現

- 一台車モデルの構築(高い計算精度と自由度の抑制を両立したメッシュ)
- 複雑な曲線モデルの自動生成機能
- 解析ツールのソルバー部分の高速化

●衝撃挙動の計算例

- 車輪フラットを有する車輪モデルによる数値解析

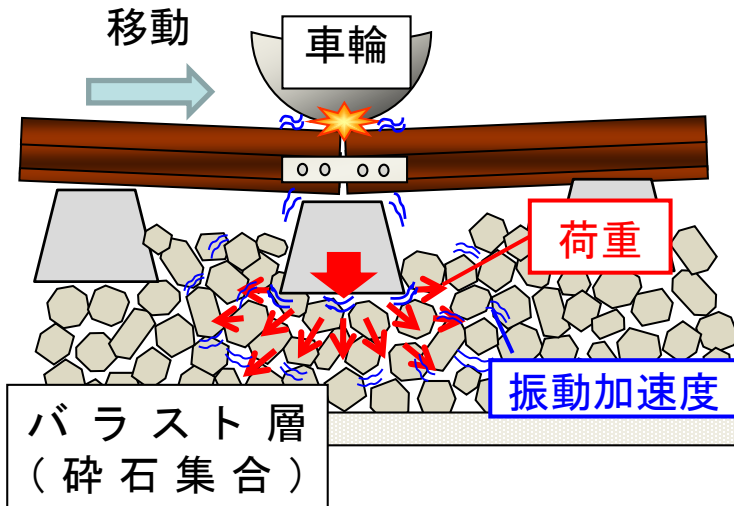
●MBDとの連成システムの構築と計算例

③ 今後の展望

研究背景

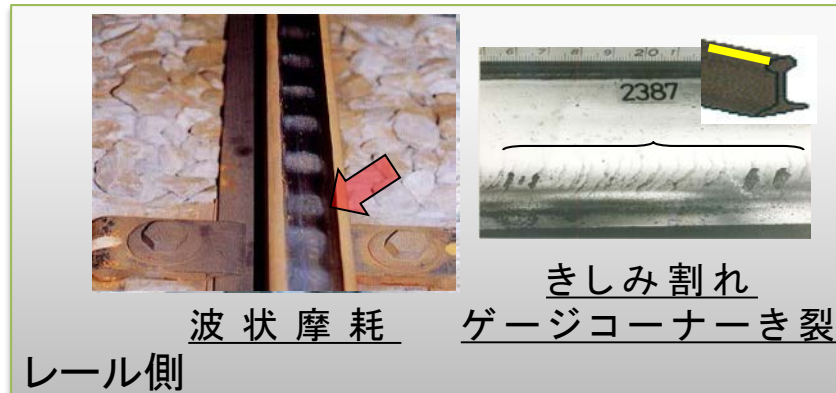
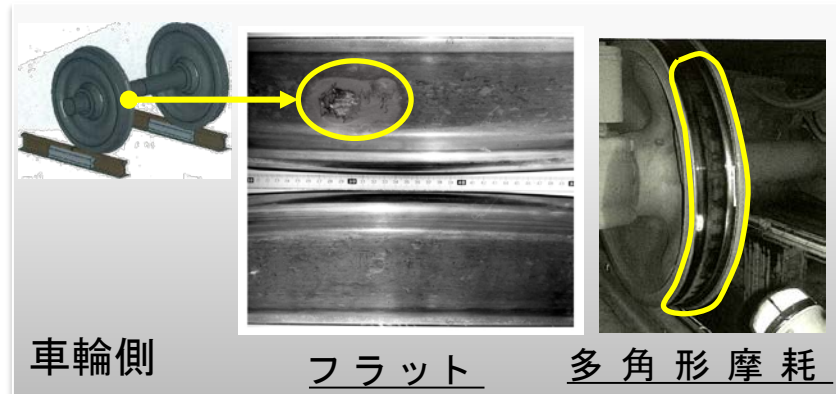
鉄道車両の走行

→車輪・レール間の振動、衝撃力、接触面の相対すべり



現状対策: 定期的なメンテナンス

発生メカニズムは未解明な点が多い。



バラストの粉粒化によるの軌道の沈下

安全性
乗り心地
騒音

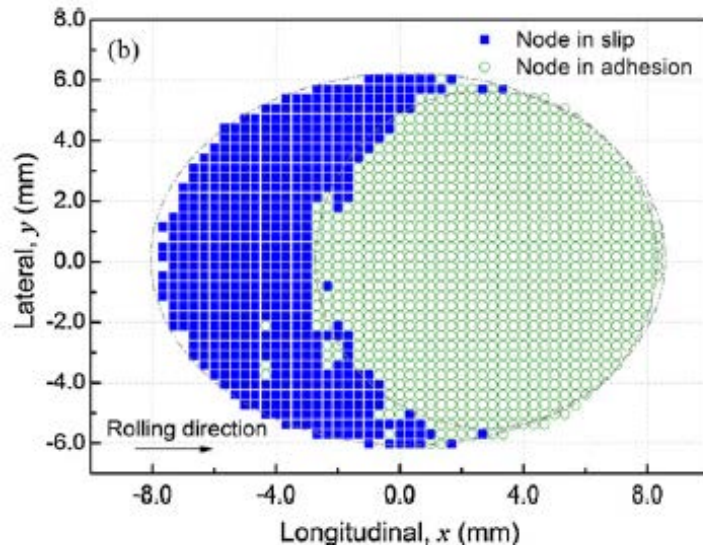
現象解明によって、より適切なメンテナンス頻度、よりよい形状設計につなげられる

車輪・レール間の接触問題に関するアプローチ

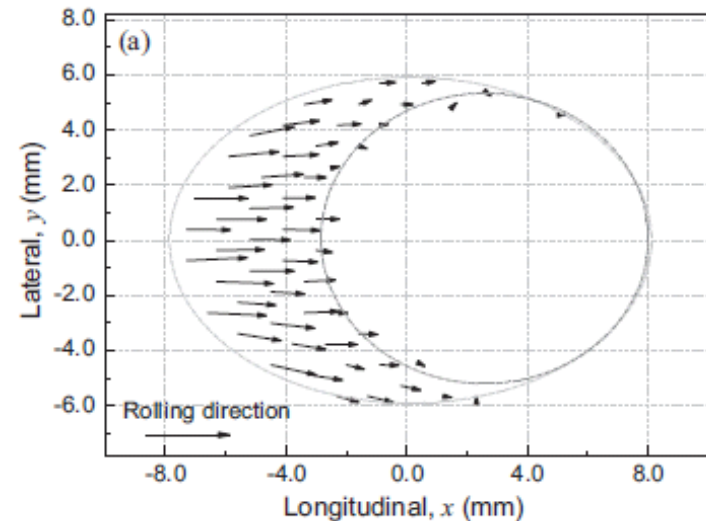
- 実験的なアプローチは困難
 - 接触面積が小さく、接触部の応力は数百MPaレベル(センサが壊れる)
⇒ マクロな量(輪重・横圧など)を測るなど間接的な評価が一般的
- 理論的アプローチ
 - Hertzの接触理論
 - 車輪・レールを単純な形状(円柱面と円柱面)とみなす
 - まっすぐに押しつけ合う場合の弾性範囲の解析解(転がっていない)
- 数値解析的アプローチ
 - KalkerのCONTACT
 - 実際の車輪・レールの複雑形状／複雑な接触状況(スピンや側面での接触)に拡張
 - BEMベースの数値解析プログラム
 - 非線形材料の取り扱いが弱い
 - FEMモデルによる数値シミュレーション
 - 材料非線形
 - より現実的な接触の取り扱い
 - 動解析

解析対象のサイズや接触面で起こる現象

- 接触領域はわずか**数センチ四方**のサイズ
- 進行方向前側と後側にそれぞれ「**固着**」「**すべり**」が発生
- 接触領域の精緻な評価には、**1ミリオオーダー**や**それ以下の離散化が必要**
- **大規模計算**となるため、転動状態の再現による動解析事例は少ない



接触領域における固着／滑り分布



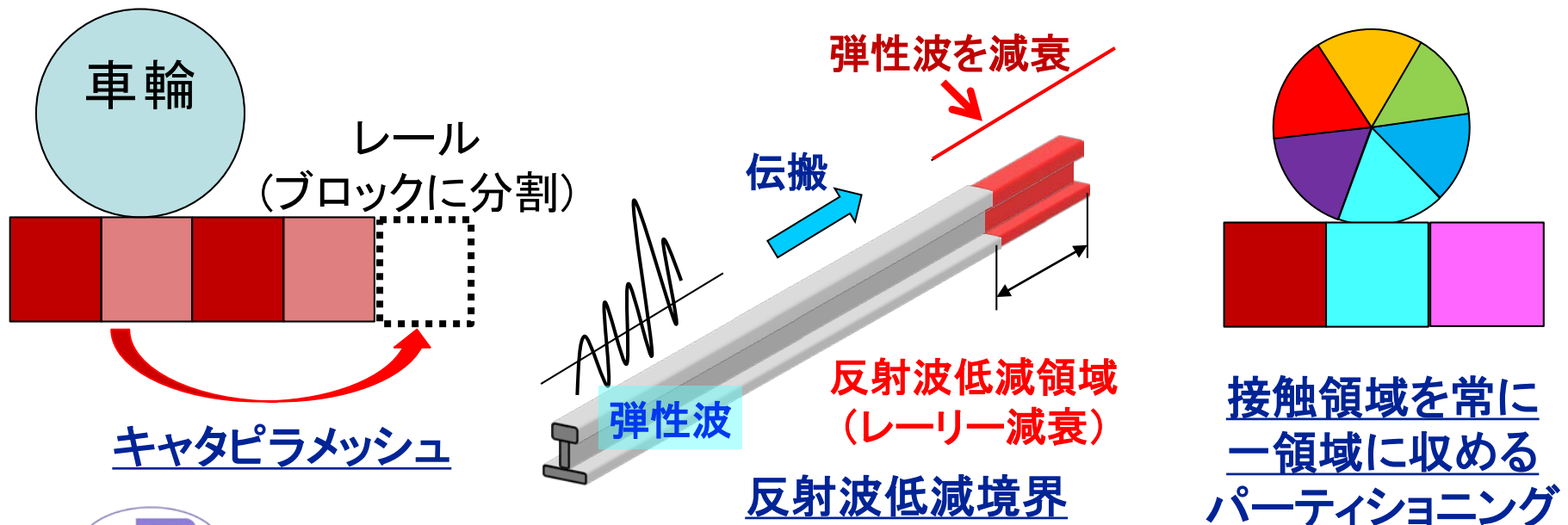
接触領域における微視すべり

X. Zhao, Z. Li, 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.

車輪・レール間の転がり接触解析ツール

大規模並列有限要素法構造解析ソフトウェア「FrontISTR」に
機能拡張をすることで「車輪・レール間の転がり接触解析」ツールを開発

- トルクによる駆動力制御 (→[公開版へ](#))
- 走り終わったレールを再利用するキャタピラメッシュ機能
- レールモデル端部における反射波低減境界の導入
- 独自のパーティショニング (→[paraconへ](#))



FrontISTRにおける動的接触解析手法

- 弾性／弾塑性解析(本発表では弾性解析)
- 時間積分: Newmark β 法
- 接触解析: 法線方向「ラグランジュ乗数法」
接線方向「ペナルティ法」
- 摩擦力を考慮(クーロン摩擦)
- 領域分割法による並列計算
- 行列方程式解法: 分散並列用直接解法「MUMPS」(ベース)

① 研究背景および開発目的

② 解析結果のご紹介

●大規模一台車モデルによる曲線走行の実現

- 一台車モデルの構築(高い計算精度と自由度の抑制を両立したメッシュ)
- 複雑な曲線モデルの自動生成機能
- 解析ツールのソルバー部分の高速化

●衝撃挙動の計算例

- 車輪フラットを有する車輪モデルによる数値解析

●MBDとの連成システムの構築と計算例

③ 今後の展望

① 研究背景および開発目的

② 解析結果のご紹介

●大規模一台車モデルによる曲線走行の実現

- 一台車モデルの構築(高い計算精度と自由度の抑制を両立したメッシュ)
- 複雑な曲線モデルの自動生成機能
- 解析ツールのソルバー部分の高速化

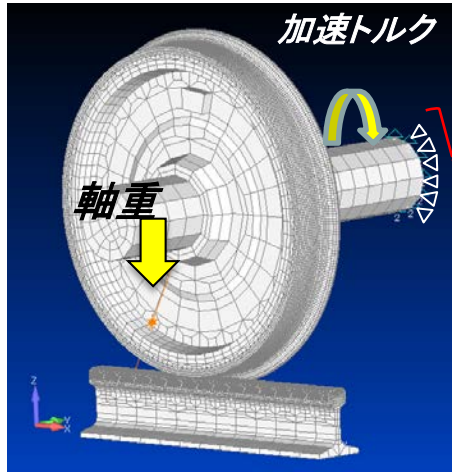
●衝撃挙動の計算例

- 車輪フラットを有する車輪モデルによる数値解析

●MBDとの連成システムの構築と計算例

③ 今後の展望

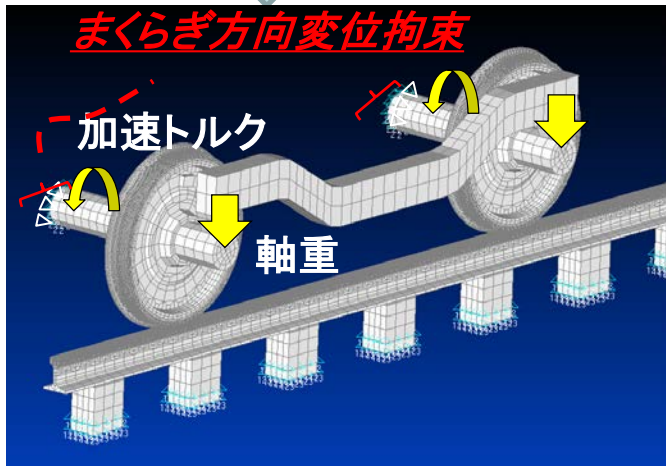
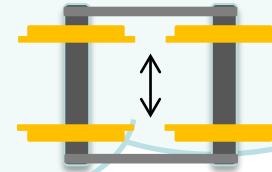
解析モデルの変遷



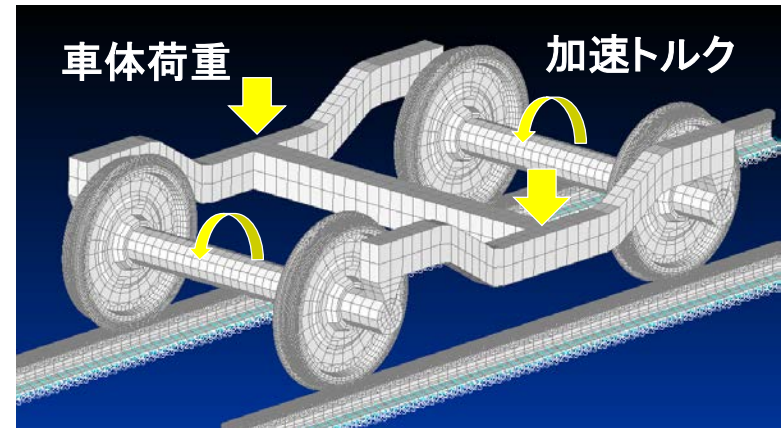
一軸一輪モデル

まくらぎ方向変位拘束

軸半断面にまくらぎ方向変位拘束があるため、直線走行のみ。左右動・ローリングが再現できない。



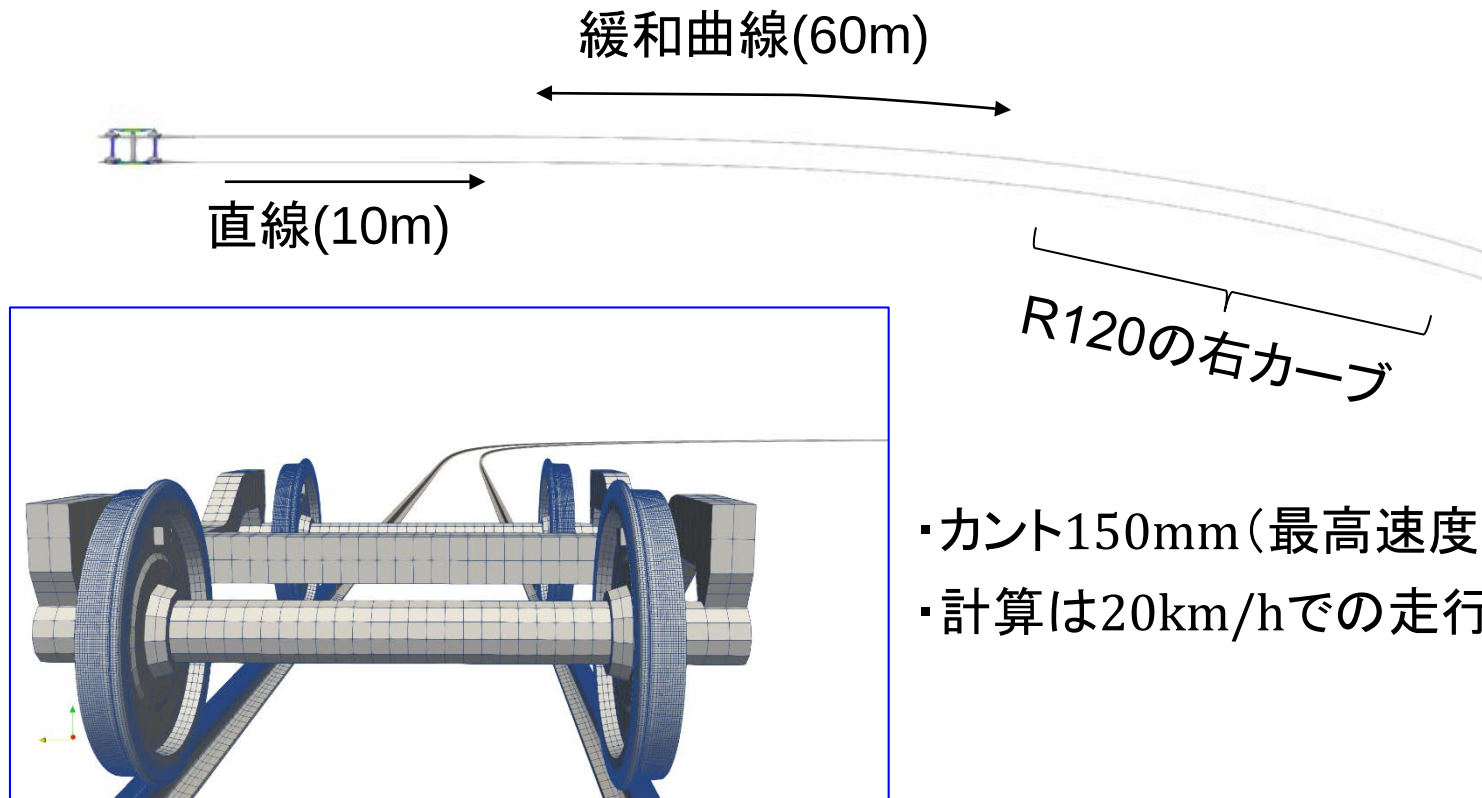
二軸二輪モデル



一台車モデルを用いた曲線走行の再現

実形状 一台車モデルによる曲線走行の実現

- ・新幹線の車輪／レールの幾何形状を精緻にモデル化(最小メッシュサイズは2mm)
- ・簡易な側はり／軸はり構造を組み込んだ「一台車モデル」を用いる。



- ・カント150mm(最高速度40km/h)
- ・計算は20km/hでの走行

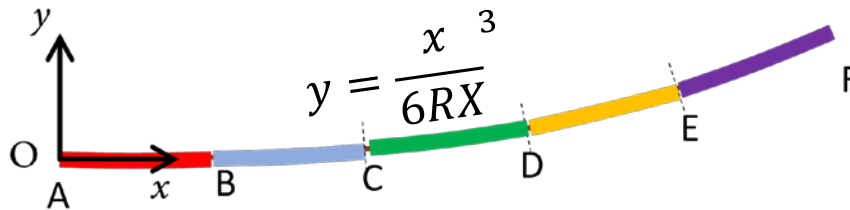
大規模モデルを用いた曲線走行実現のために

曲線走行を実現するための要素技術

➤ 曲線形状は複雑なため手作業のモデル作成は困難

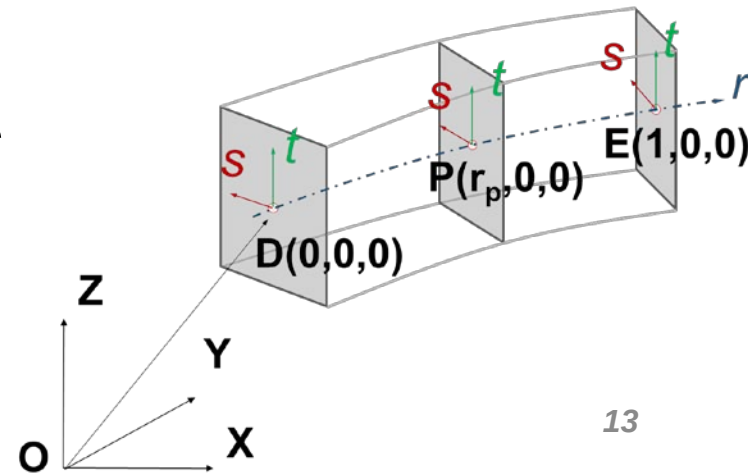
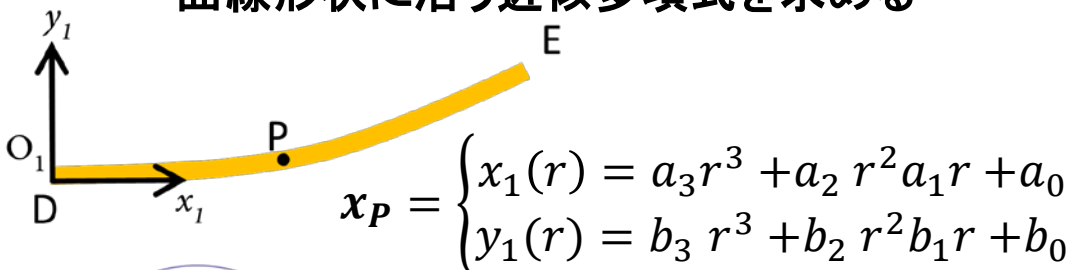
- ・緩和曲線(3次放物線／サイン半波長逓減曲線)
- ・カント(プロペラ[軌道中心線が回転中心]／片上げ[内軌が回転中心])

Step1 一つの曲線区間をセグメントに分割する



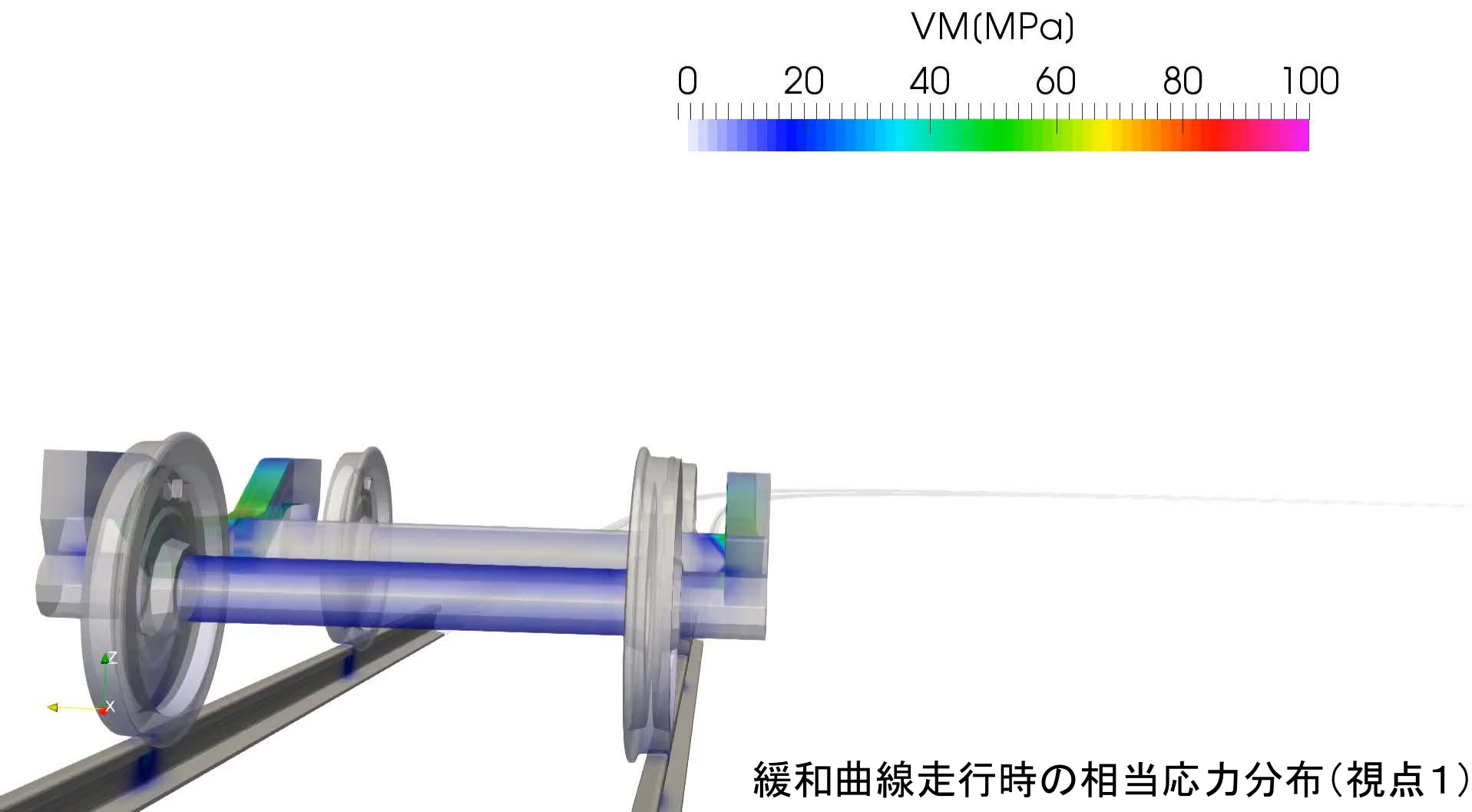
Step3 $r(0 \leq r \leq 1)$ の断面について
局所座標 r, s, t を求め断面毎に
節点を配置する

Step2 セグメント毎に媒介変数 $r(0 \leq r \leq 1)$ を用い
曲線形状に沿う近似多項式を求める

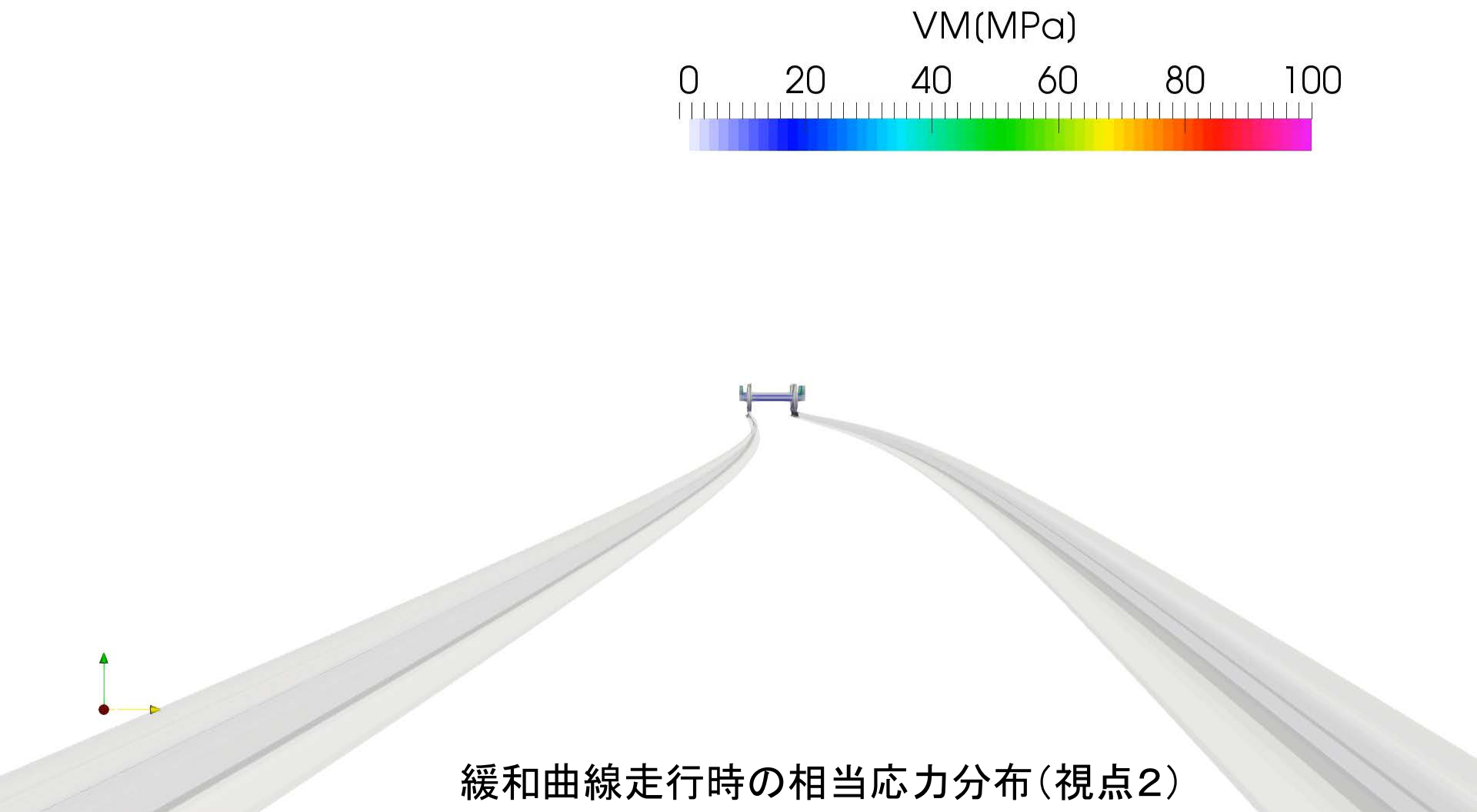


13

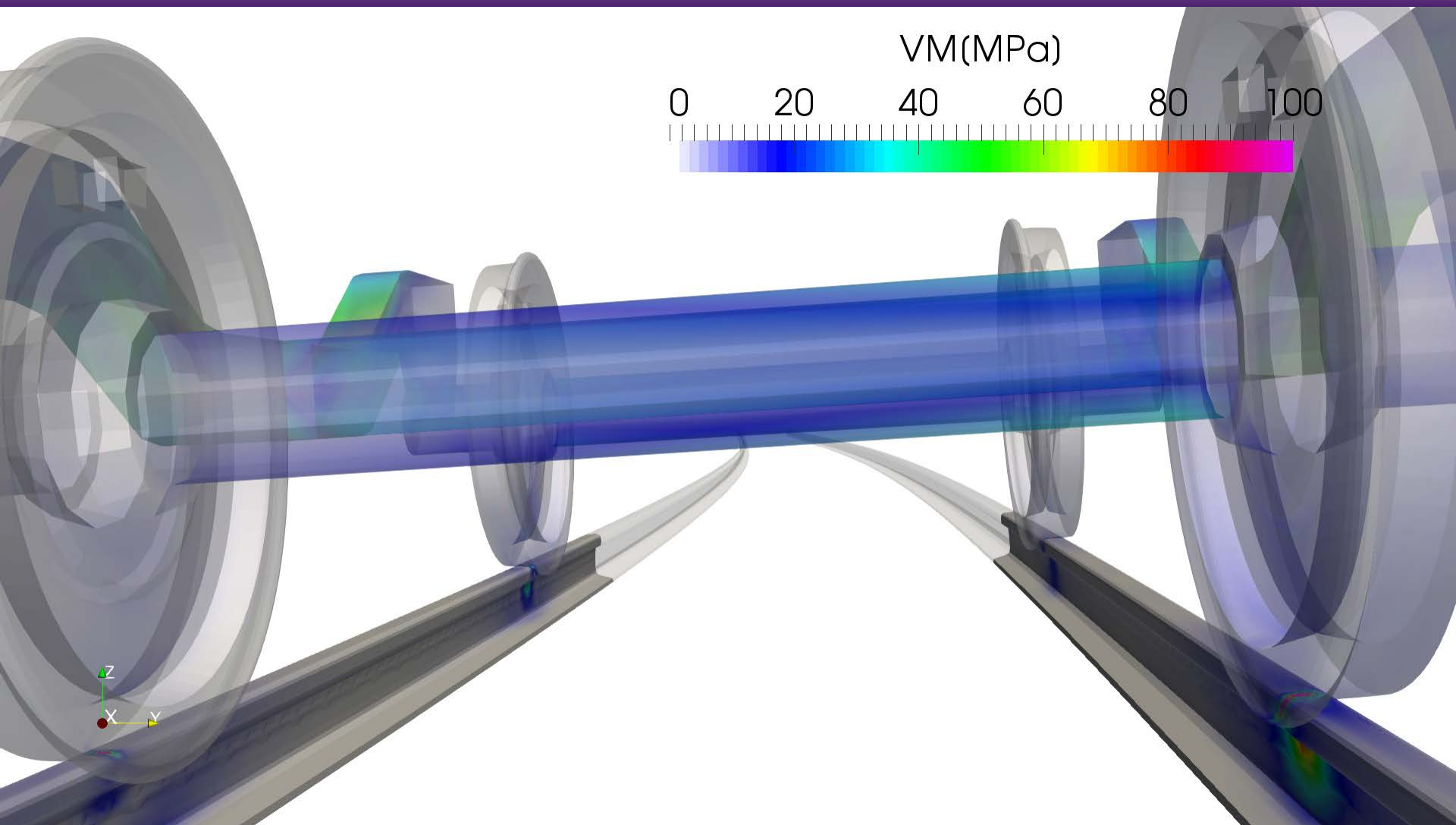
解析結果



解析結果

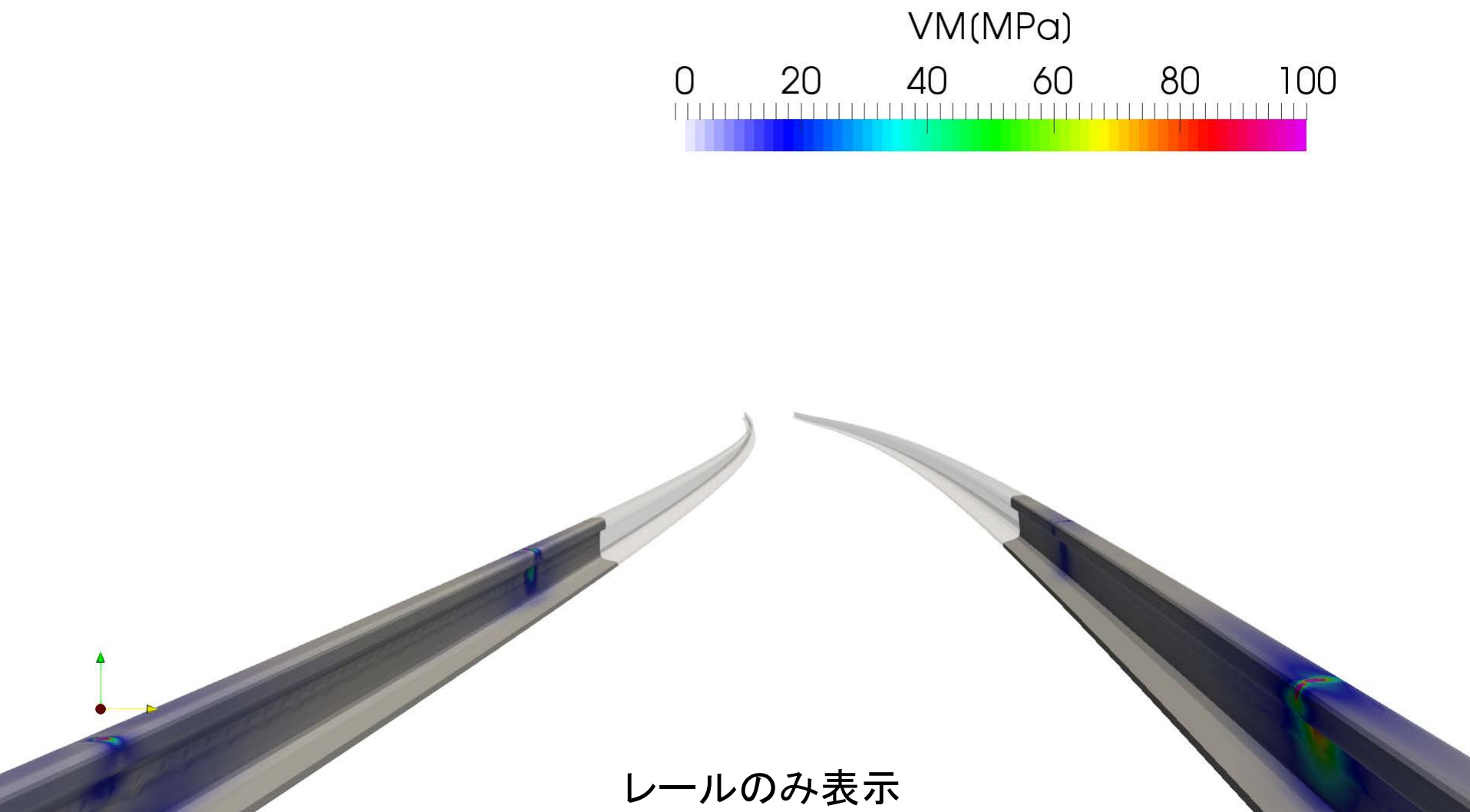


解析結果(曲線内でのフランジ接触)



フランジ接触発生時の相当応力分布

解析結果(曲線内でのフランジ接触)



計算速度のボトルネック

どこに／なぜ時間がかかっているのか？

- ボトルネックは領域再分割とソルバー部分の二つだったが、Paracon機能を利用することとなり再分割のコストは解消。内訳のほとんどは、**ソルバーによる求解**。

⇒なぜ、ソルバー部分にそんなに時間がかかるのか？

◆ 接触を「厳密」に解いている

- ペナルティ法(仮想バネ)ではなくラグランジュ未定乗数法(つり合い)
- ラグランジュ未定乗数法による接触解析の求解

解くべき方程式:
$$\begin{bmatrix} K & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ g \end{Bmatrix}$$

非正定値行列 → 反復法では解き難い

◆ 求解に「直接法」を用いている

◆ 大規模なモデル(数百万自由度レベル)を扱っている

大規模並列計算で高速化するための要件

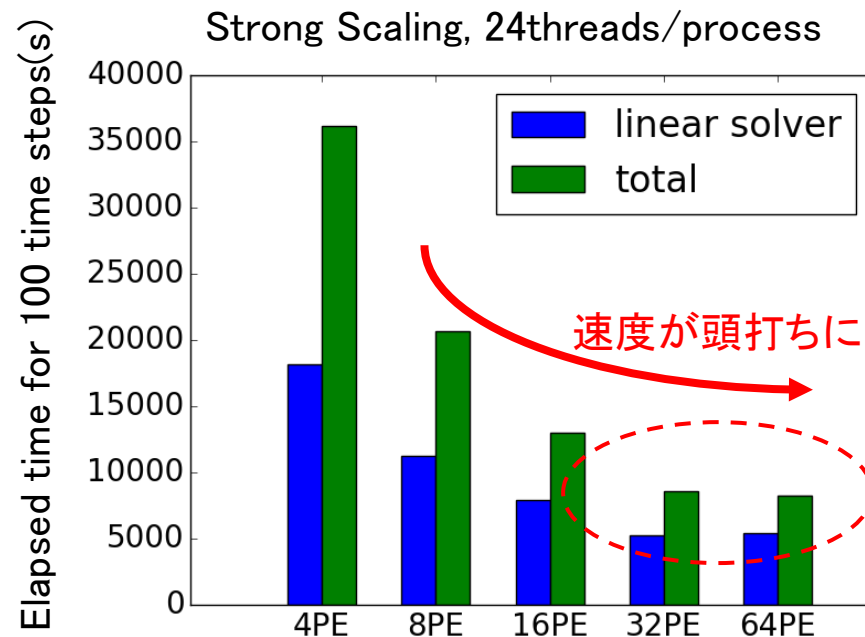
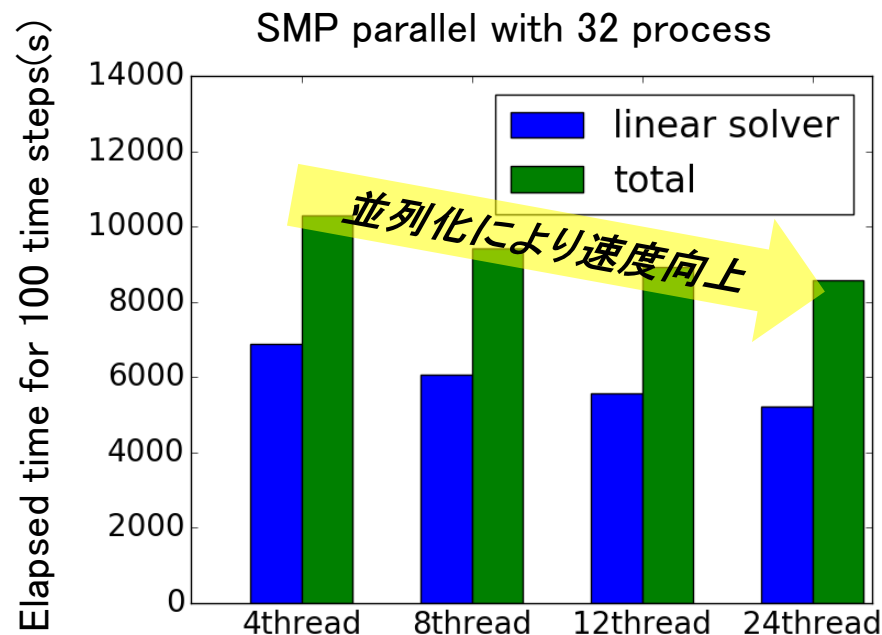
- ◆ 大規模並列計算において、直接法では限界がある

現行の解法(直接法)による並列化効率

Cray XC30(Intel Xeon E5-2695 2.4GHz)による計算結果

➤ 使用した解析モデル

- ✓ 927,000節点、808,000要素
- ✓ 1軸1輪モデル、接触部の最小メッシュサイズは1mm
- ✓ 32並列あたりが直接法での高速化の限界



ソルバー部分の高速化(反復法の適用)

接触部の求解アルゴリズムの違いと高速化の関係

- 一般的な有限要素法による求解(ペナルティ法を用いた接触計算も含む)

解くべき方程式: $Ku = f$ 正定値行列 → 反復法で解きやすい

- ラグランジュ未定乗数法による接触解析の求解

解くべき方程式: $\begin{bmatrix} K & B^T \\ B & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ \lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f \\ g \end{Bmatrix}$ 非正定値行列 → 反復法では解き難い

自由度消去

$$K'u_p = f'$$

正定値行列

$$K' = T^T K T$$

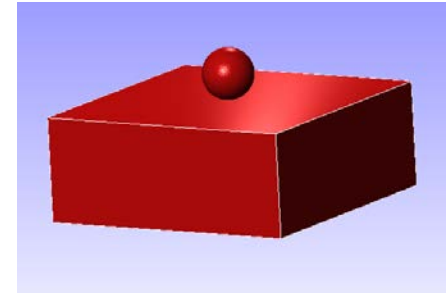
ただし、 $f' = T^T \left(f + K \begin{Bmatrix} 0 \\ h \end{Bmatrix} \right)$

自由度消去よによる正定値化により反復法が適用可能に。

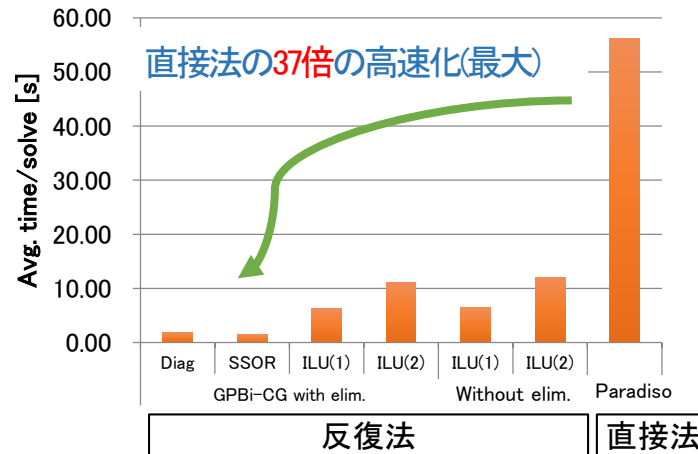
ただし、その過程であらわれる**疎行列の三重積**や**新係数行列** K' のために、**通信テーブルの構築・再構築**の処理が不可欠

高速化の効果検証(逐次ベンチマークテスト)

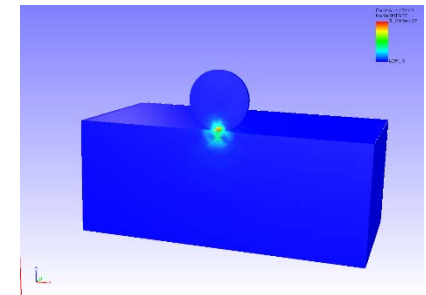
- まずは、通信テーブルの再構築などの必要のない逐次ケース
- 大変形、摩擦(接触)を考慮した動解析
- 解析規模は約18万自由度
- 反復法の計算手順は以下の通り
 - ① 解くべき式を $K'u_p=f'$ に変換
 - ② 収束性向上のための前処理(ILUやSSORなど)
 - ③ GPBiCG法で反復計算



解析モデル



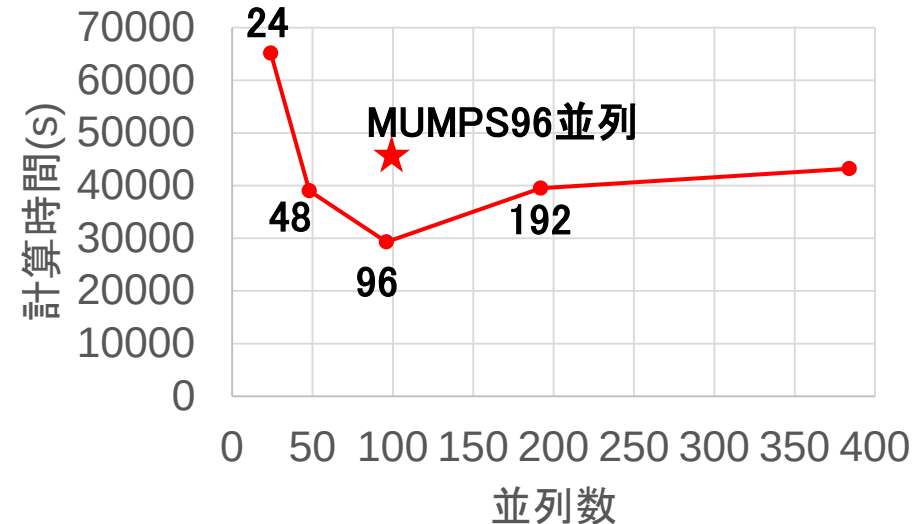
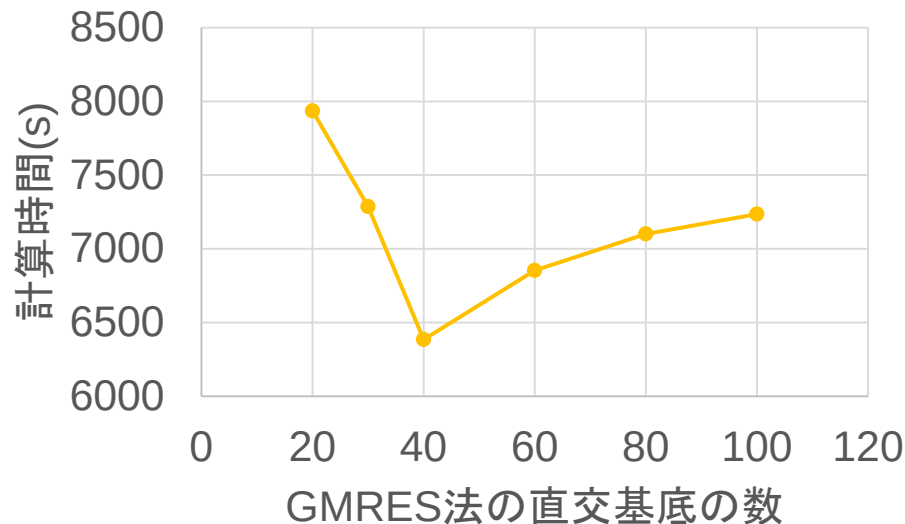
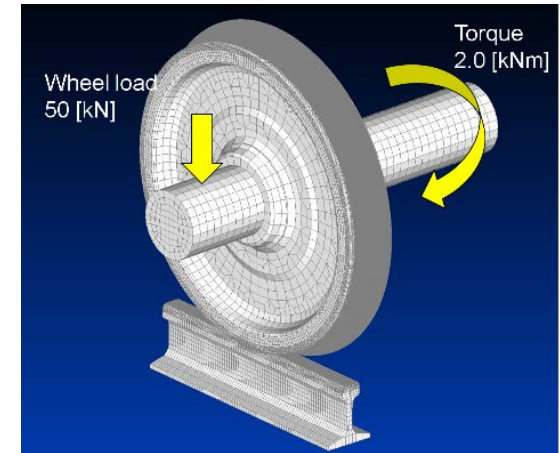
計算時間の比較(直接法／反復法)



解析モデルの変形図

車輪・レール転がり接触モデルでの効果

- 約300万節点(900万自由度)のモデル
- CrayXC30 (Intel Xeon E5v2, 24core/node) 上で評価
- 反復法はAMG前処理(Trillinos ML)とGMRES(40)を採用
※最適な直交基底数を事前に調査(下図右)
- ストロングスケーリングで96並列まで高速化
- MUMPS@96並列では46000sに対して約二倍の高速化



- 実用問題でも二倍の高速化。さらに、並列数を増やしても安定して計算可能
- さらなる規模のケースを想定したとき直接法では、計算量およびメモリ使用量が急激に増大することを踏まえると、反復法にしたことの効果は大きい。
- 通信部分の最適化・スレッド並列化などによって今後もさらなる高速化が見込める。

① 研究背景および開発目的

② 解析結果のご紹介

●大規模一台車モデルによる曲線走行の実現

- 一台車モデルの構築(高い計算精度と自由度の抑制を両立したメッシュ)
- 複雑な曲線モデルの自動生成機能
- 解析ツールのソルバー部分の高速化

●衝撃挙動の計算例

- 車輪フラットを有する車輪モデルによる数値解析

●MBDとの連成システムの構築と計算例

③ 今後の展望

フラットを有する車輪の転がり接触解析

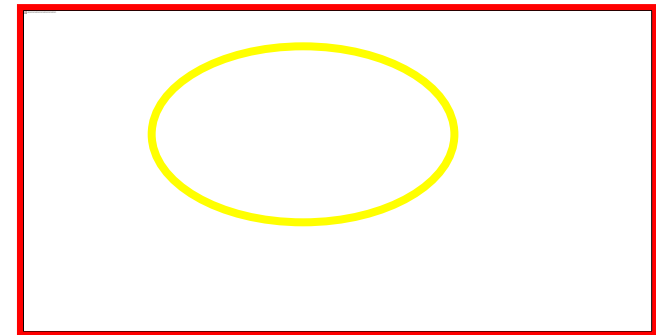
車輪フラットとは

- ・列車の急激な加減速等によって、レールと接する面(踏面)にできる傷
- ・フラット部分がレールと当たるたびに**衝撃力**が発生
 - ・車両や軌道に悪影響を与える(**損傷**要因)
 - ・**騒音**の発生(カンカンという音)
- ・実験的にその影響を調べる取り組みもある
⇒その際は機械加工を行う(右下図)

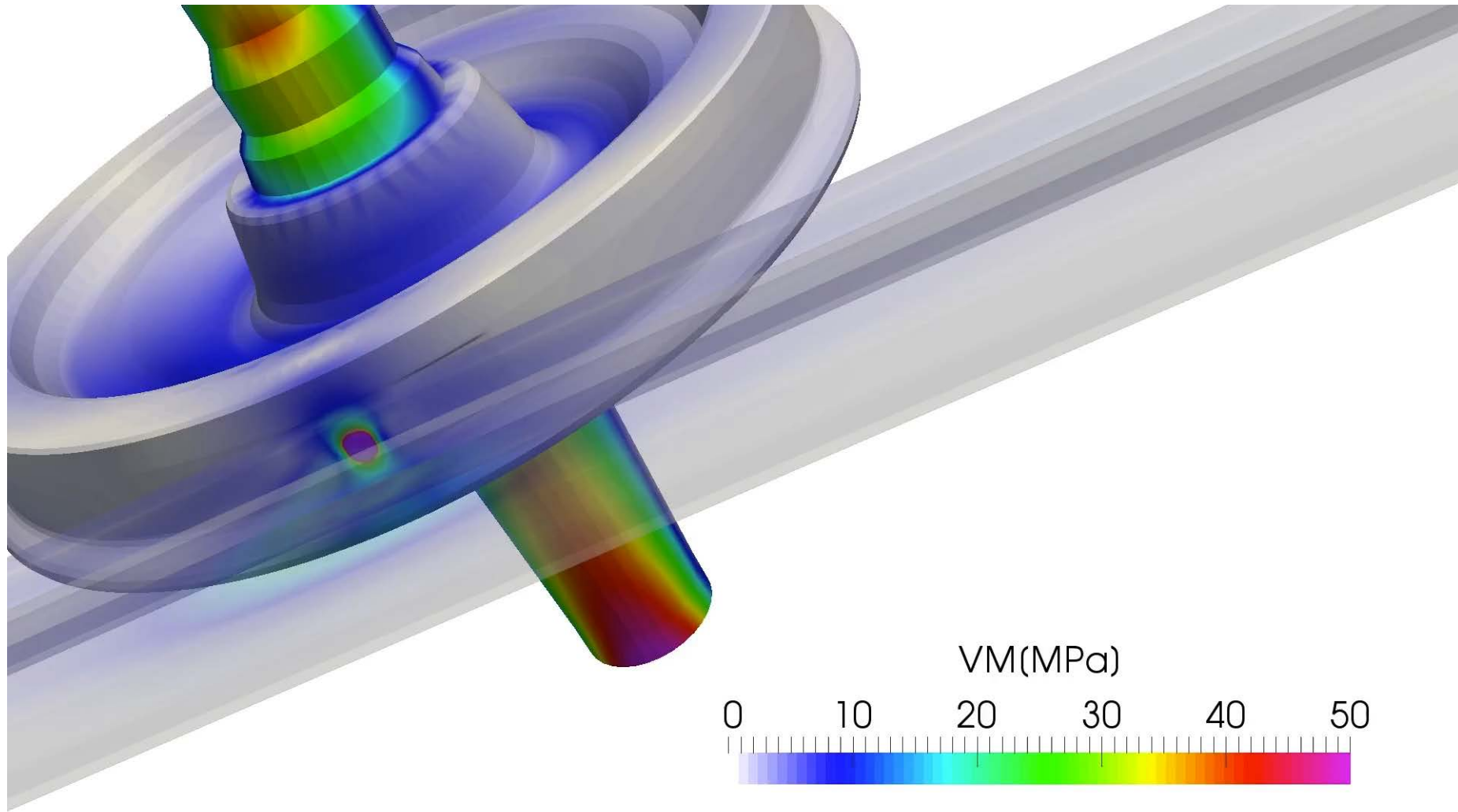


車輪フラットの数値解析

- ・開発した数値計算手法を用いて、車輪のモデルにフラットをつけた状態で車輪を転動させ、車軸の振動を調べた。

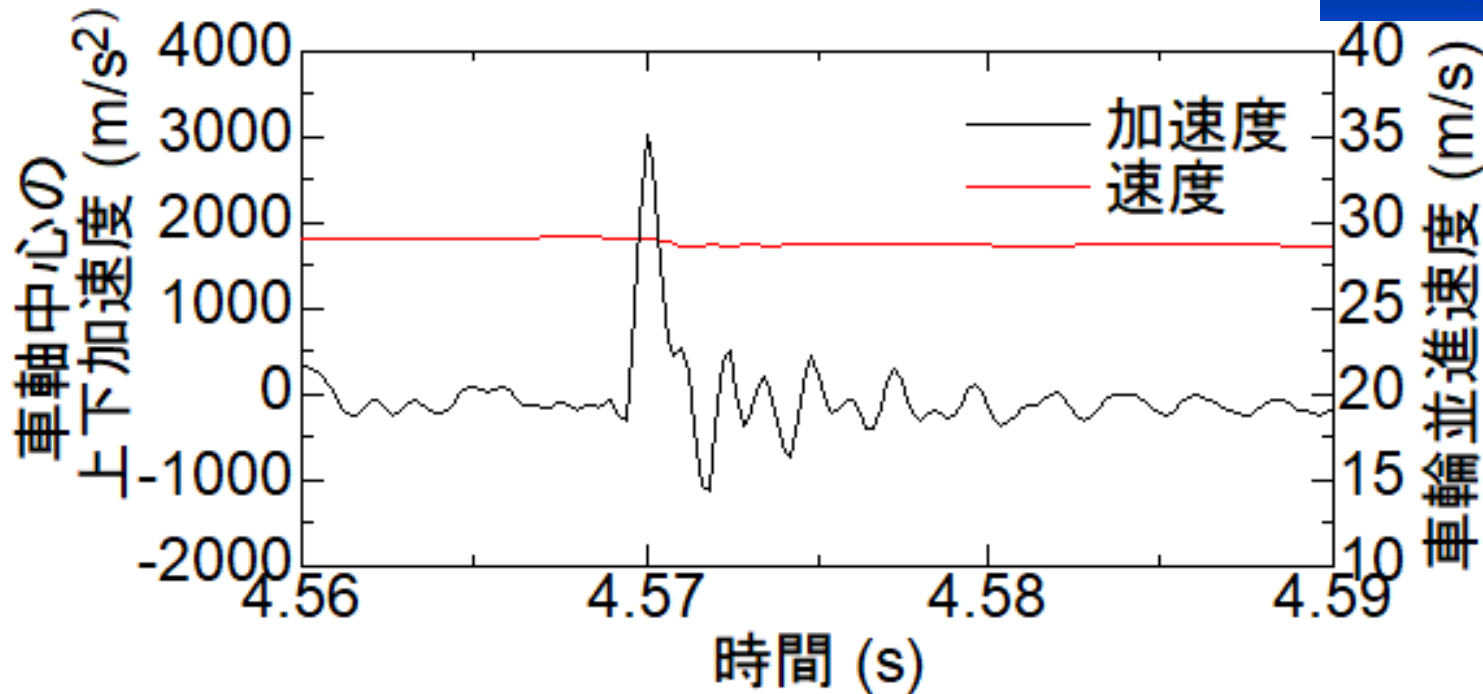
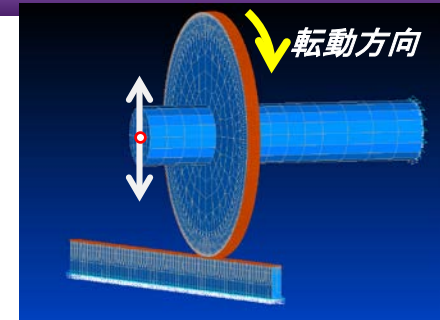


フラットを有する車輪の転がり接触解析(結果1)



フラットを有する車輪の転がり接触解析(結果2)

- ・走行速度は約30km/h
- ・車軸中心の節点における、上下方向加速度の時刻歴



- ・最大加速度は(走行速度にも依存するが)数千 m/s^2 にも及ぶ
- ・開発したツールで衝撃力の再現が可能であることが確認できた

① 研究背景および開発目的

② 解析結果のご紹介

●大規模一台車モデルによる曲線走行の実現

- 一台車モデルの構築(高い計算精度と自由度の抑制を両立したメッシュ)
- 複雑な曲線モデルの自動生成機能
- 解析ツールのソルバー部分の高速化

●衝撃挙動の計算例

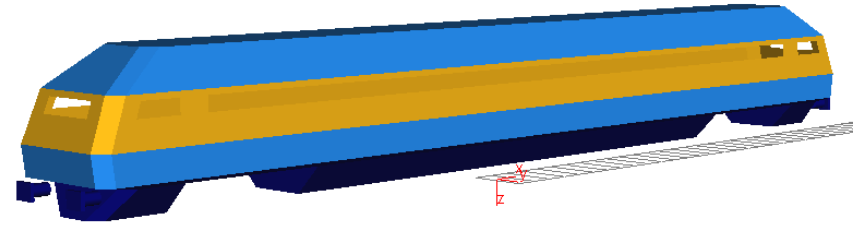
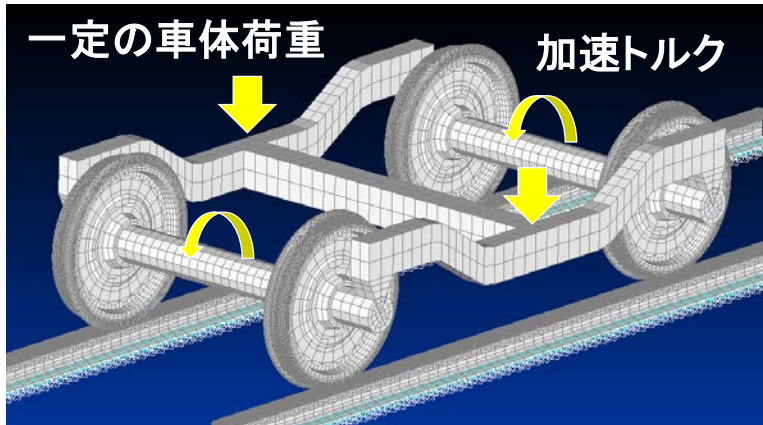
- 車輪フラットを有する車輪モデルによる数値解析

●MBDとの連成システムの構築と計算例

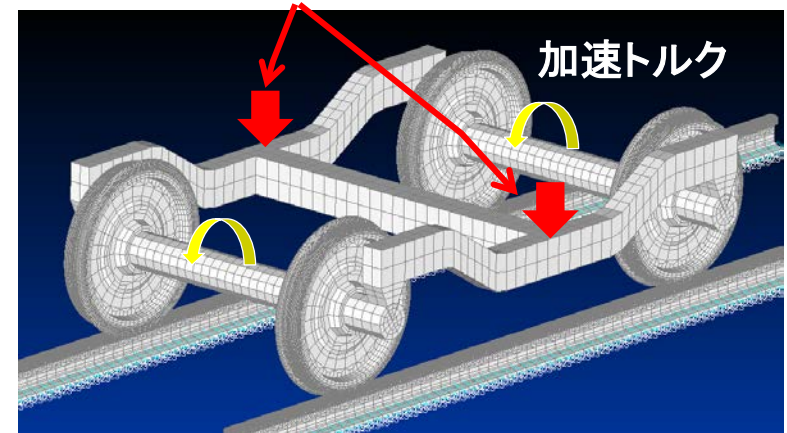
③ 今後の展望

MultiBodyDynamicsシステムとの連成

既存のFEM計算



実際には、車体の運動とともに時々刻々と変化する車体荷重



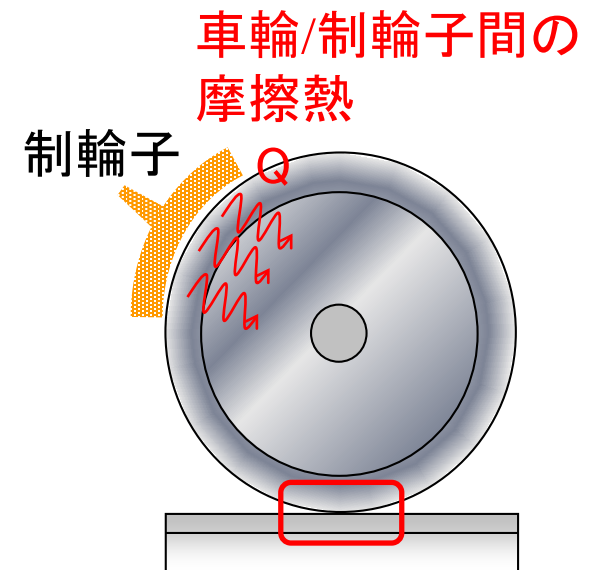
とはいえ、車両の複雑な機構(バネ・ダンパー)を全てFEMでモデル化するのには現実的ではない

今後の展望

熱構造連成解析の検討

熱一構造連成解析手法の構築

- ✓ 制動時の車輪～制輪子間の摩擦熱の伝導
- ✓ 外気への熱拡散
- ✓ 温度依存性材料の構成式の導入
 - ・ 熱影響を考慮した弾塑性構成式への拡張



ご清聴ありがとうございました