

架線・パンタグラフの 三次元シミュレーション

鉄道力学研究部 集電力学研究室

主任研究員 小山 達弥



本日の発表

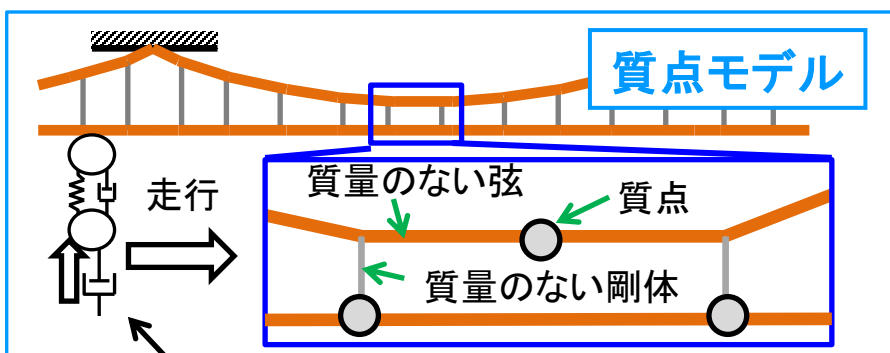
- ◆ 研究背景・目的
- ◆ 架線とパンタグラフの三次元モデルの概略
- ◆ 三次元運動シミュレーション手法の開発
 - ・ 接触解析方法
- ◆ 解析例
- ◆ シミュレーションの高度化
 - ・ 他シミュレーションとの連成計算
- ◆ まとめ・成果の活用

研究背景・目的

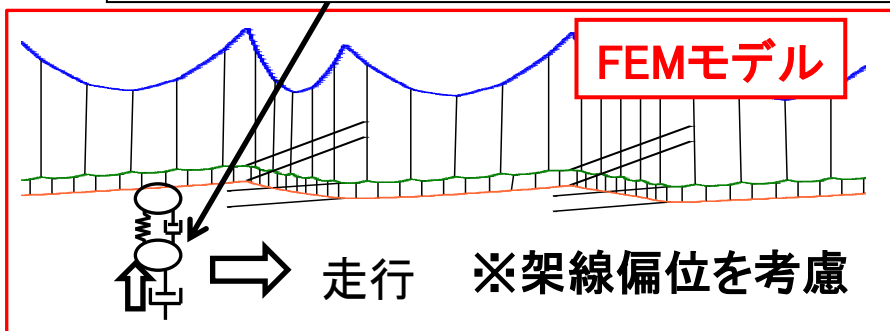
架線やパンタグラフの設計・開発

詳細な静構造計算
動的挙動の把握

- 架線は離散的に支持された複雑な構造
- パンタグラフが架線から離れる「離線」などの非線形現象
→架線・パンタグラフシミュレータの開発(1960年代～)



パンタグラフモデル(集中質量・ばね)



【既開発のシミュレータ】

- 直線区間のみを対象
- パンタグラフ舟体を質点で表し、上下方向のみに運動

・線條の運動

質点モデル: 上下のみ

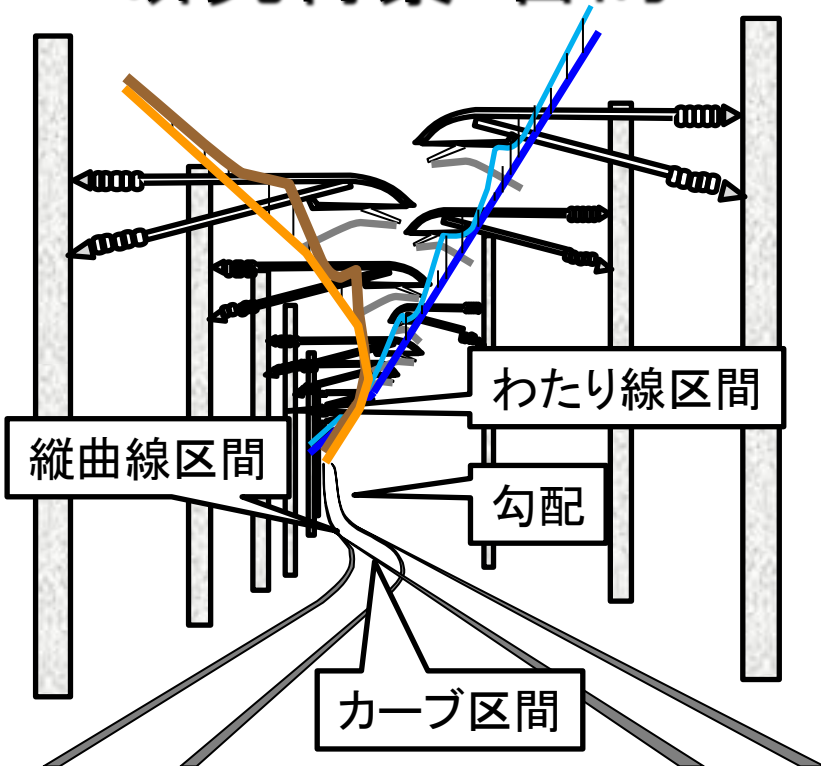
FEMモデル: 上下・まくらぎ方向

※いずれも伸びやレール方向の変位の変化は考慮しない

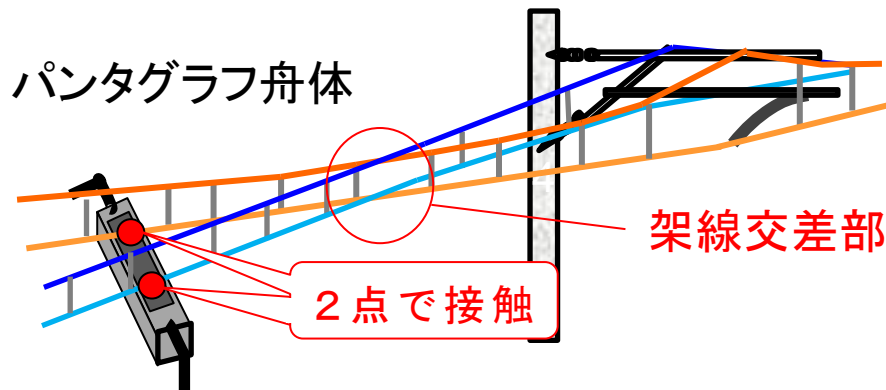
既開発の架線・パンタグラフシミュレータ



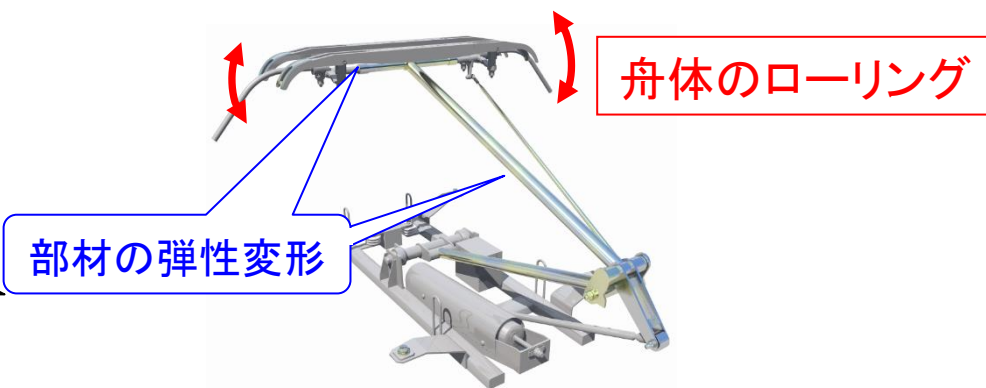
研究背景・目的



実際の架線の架設例



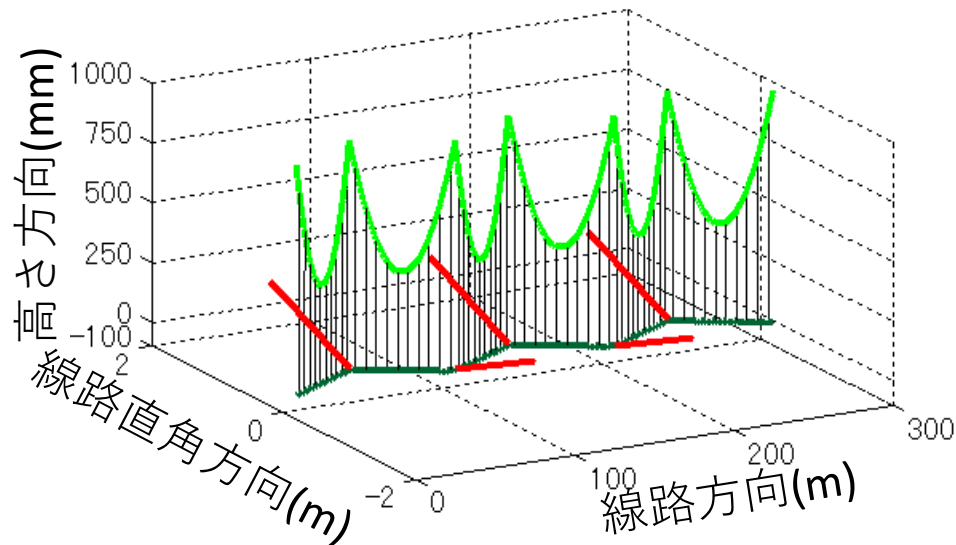
わたり線におけるしゅう動



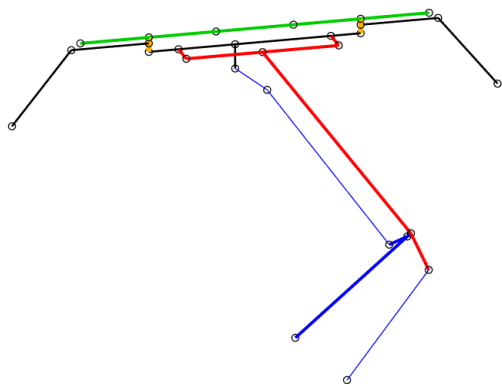
パンタグラフの運動

- ・高速化における詳細な検討
 - ・三次元配置・三次元運動に起因する事故原因の究明
- 架線とパンタグラフの三次元化

研究背景・目的



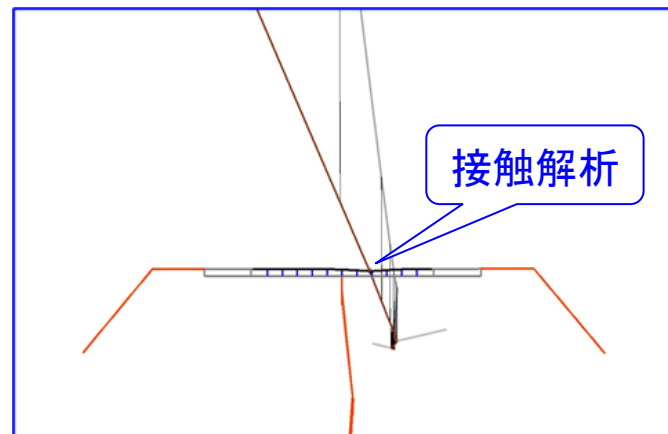
架線の三次元モデル(既開発)



パンタグラフの三次元モデル(既開発)

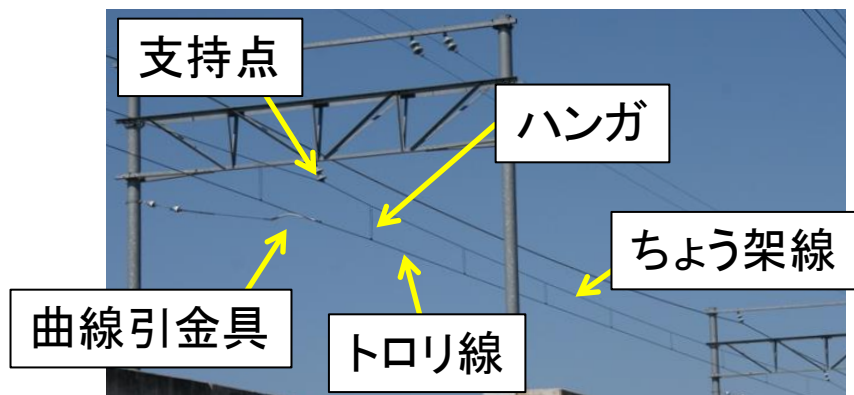
統合

三次元運動シミュレーション手法の開発

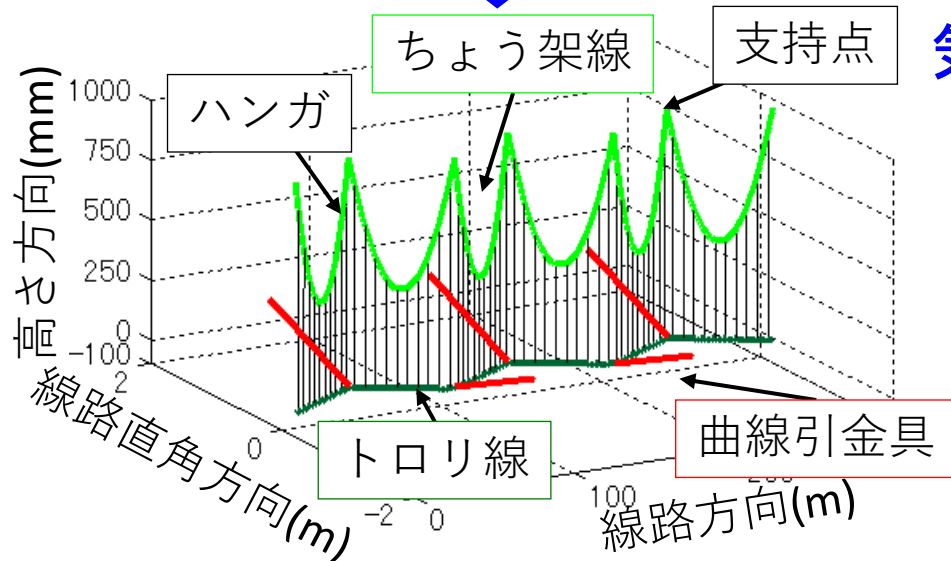


架線とパンタグラフの三次元モデルの概略

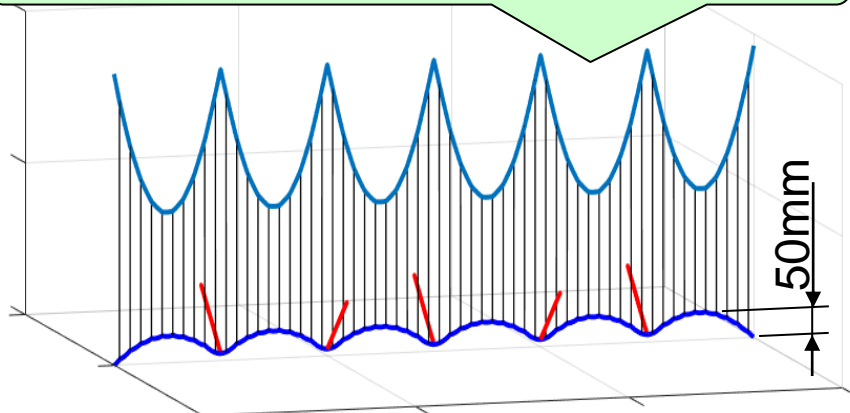
架線の三次元モデル



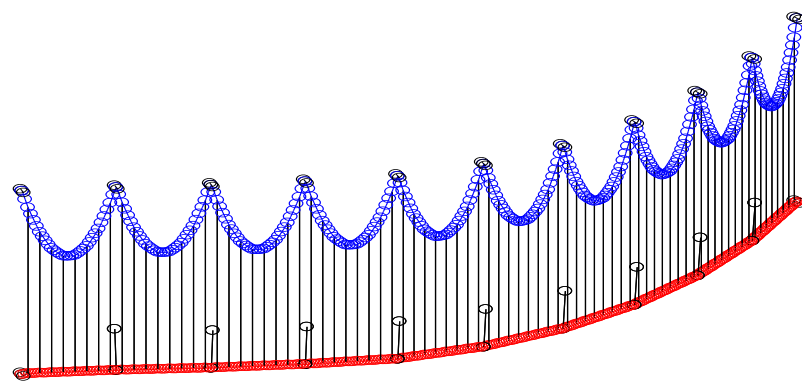
モデル化



温度変化量から架線静構造を直接計算



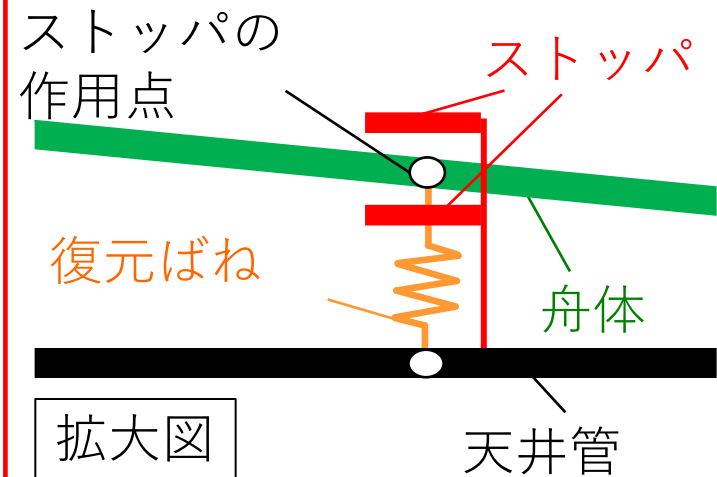
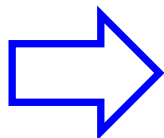
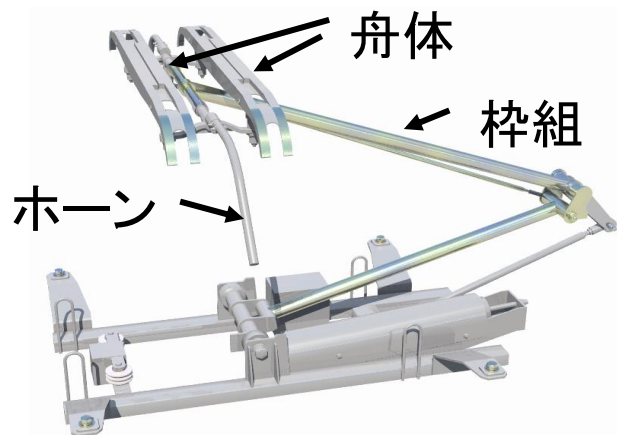
※ちょう架線は直留、トロリ線は張力調整装置あり
気温が25°C低下した場合の静構造



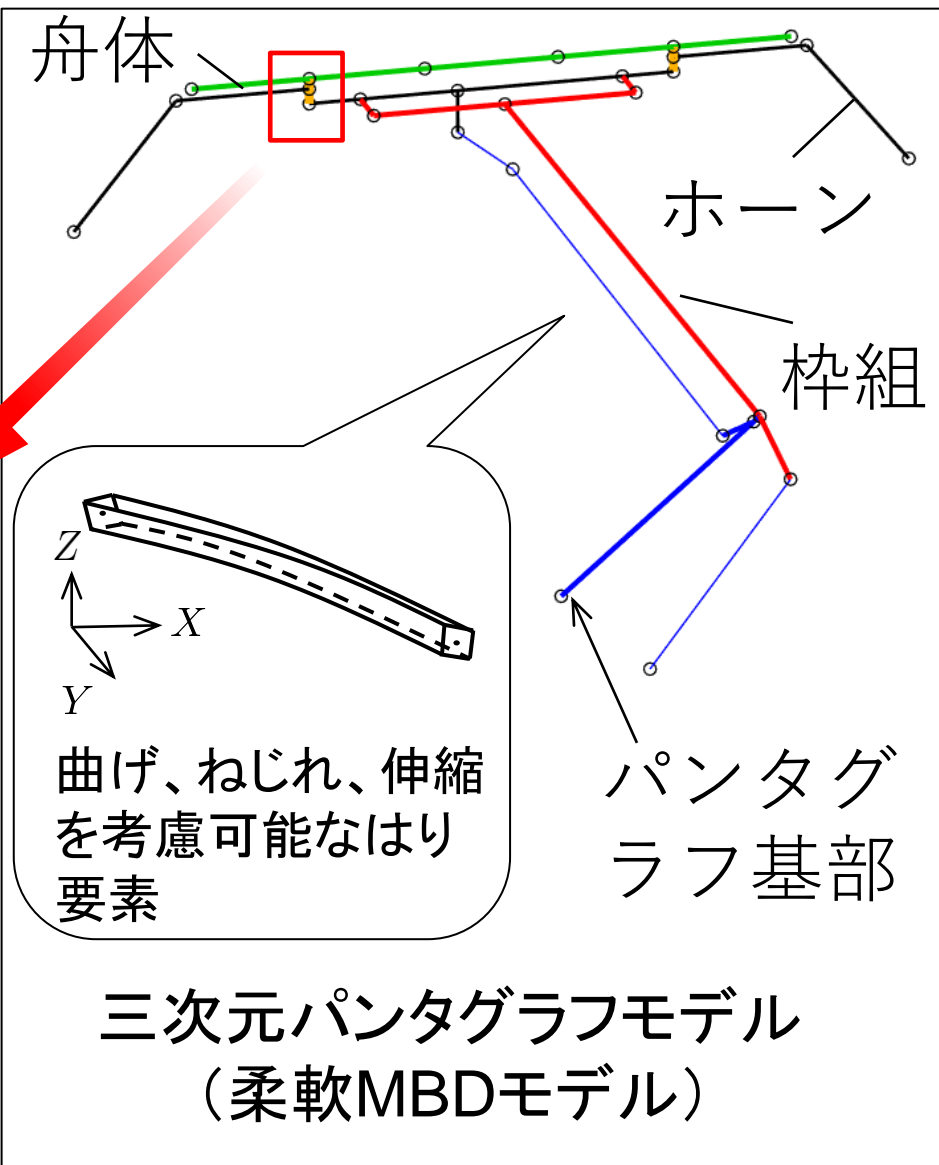
曲線区間のモデル化

架線とパンタグラフの三次元モデルの概略

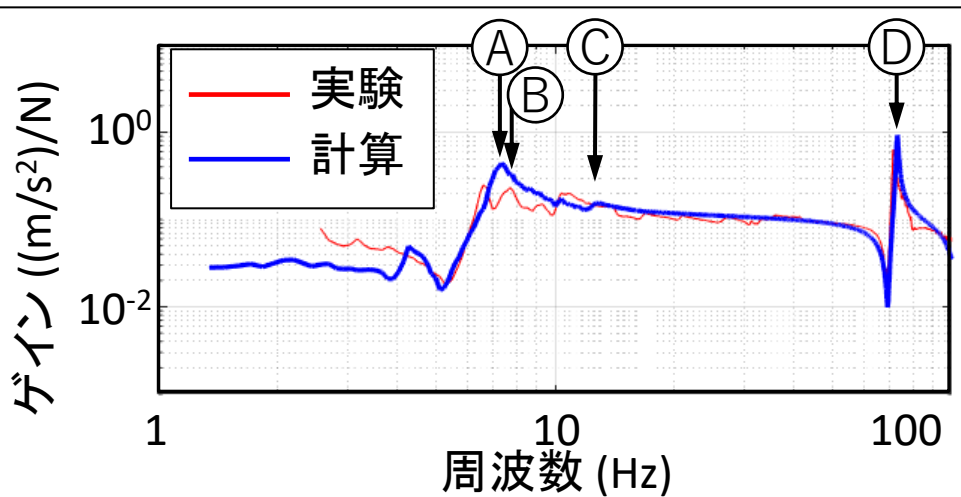
パンタグラフの三次元モデル



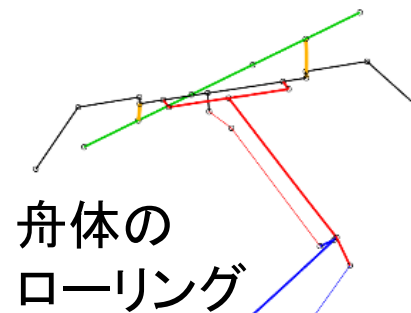
すり板の変位制限の再現



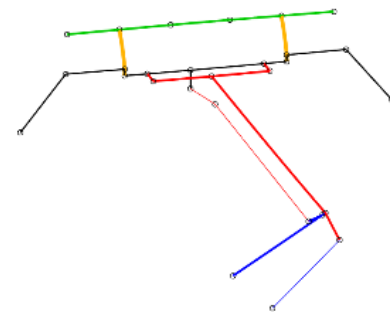
架線とパンタグラフの三次元モデルの概略



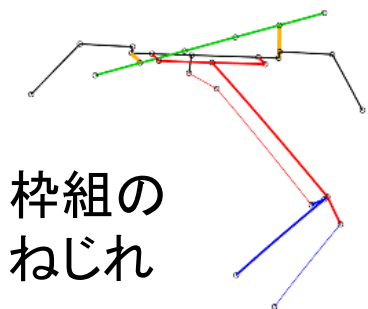
実験との比較(アクセランス)



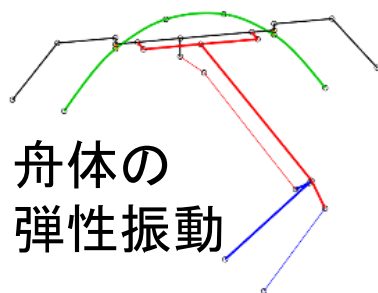
Ⓐ 7.3 Hz



Ⓑ 7.9 Hz



Ⓒ 12.5 Hz



Ⓓ 74.3 Hz

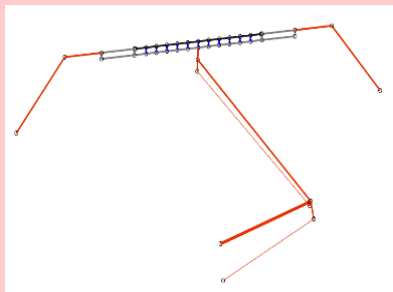
※モデル図は変位を拡大して表示

- ・三次元パンタグラフモデルの妥当性を確認
- ・従来は考慮できなかった三次元運動を再現

三次元運動シミュレーション手法の開発

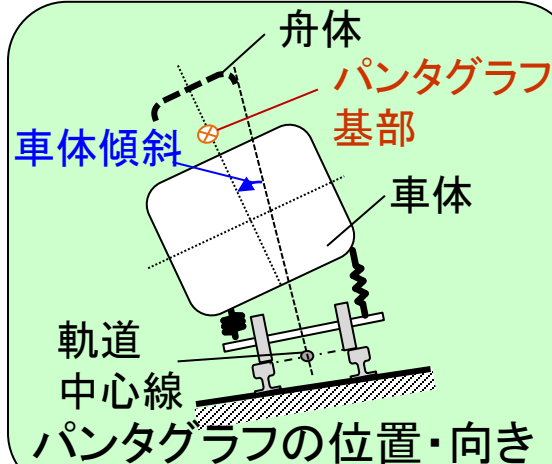
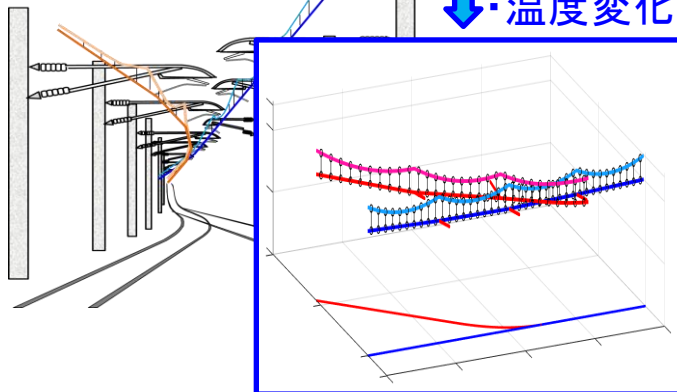
計算手順

パンタグラフモデル



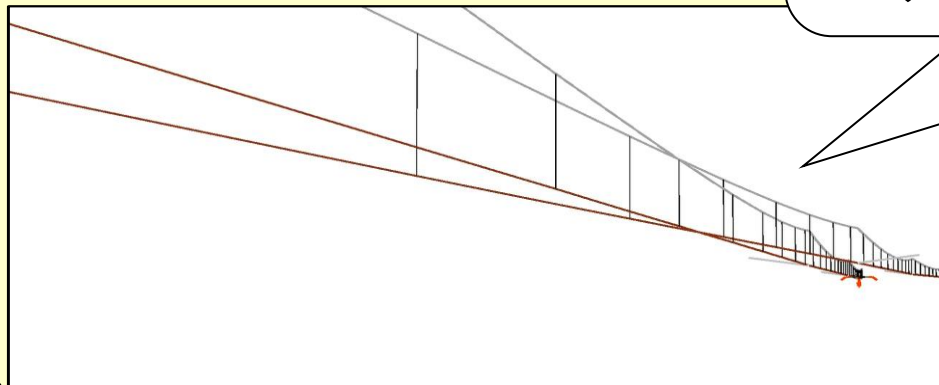
電車線モデルの作成

- ・複数架線
- ・温度変化



連成計算

架線・パンタグラフシミュレーション

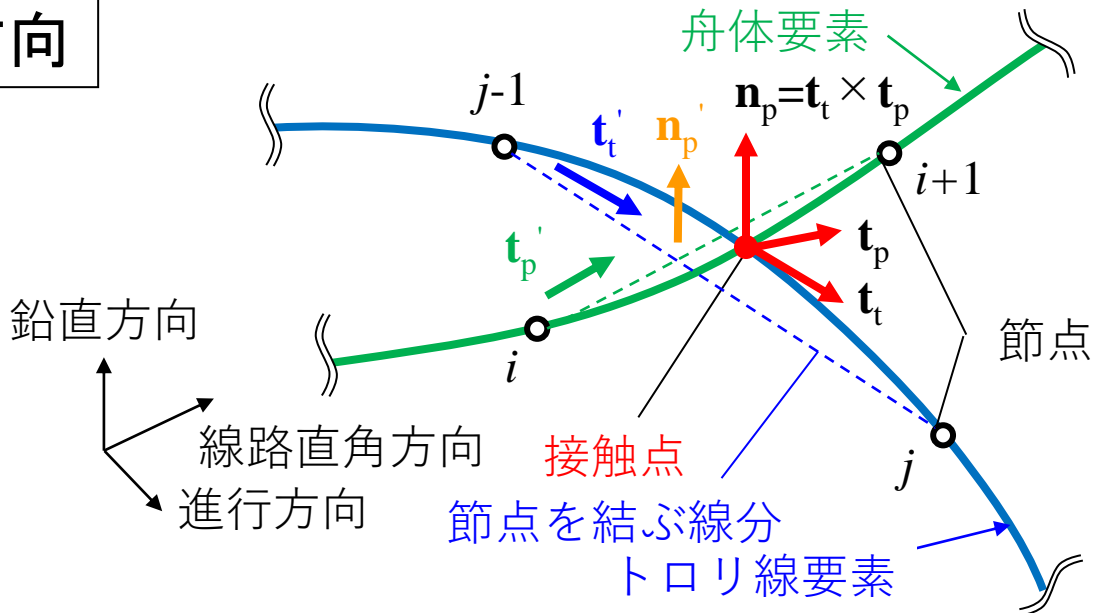
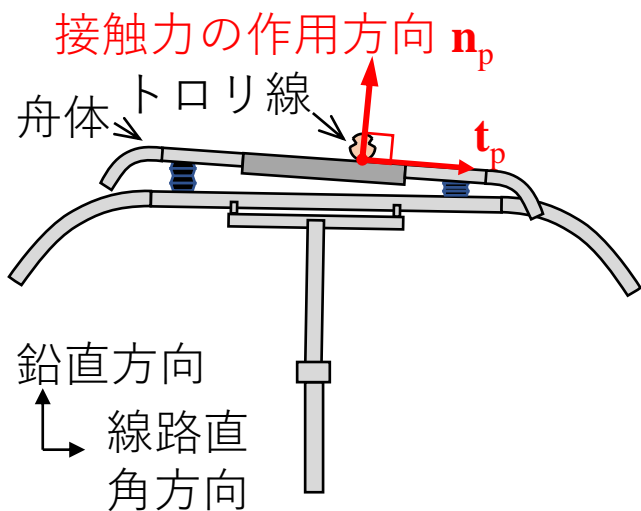


- ・ 接触点探査
- ・ トロリ線・すり板間の接触解析 (ペナルティ法)

従来は考慮できなかった
様々な軌道条件を考慮可能

三次元運動シミュレーション手法の開発

接触点探査と接触力の方向



【仮定】接触力はトロリ線要素と舟体要素にそれぞれ直交する向きに作用

【接触点探査と接触力の方向】

- ① 節点を結ぶ線分のベクトル t_t' , t_p' から仮の接触力方向 n_p' を算出
- ② これらの線分を n_p' に垂直な平面に投影し交点の有無を判定
- ③ 交点がある場合は、両要素が接触しているものとして、接線ベクトル t_t, t_p から接触力の方向 n_p を算出

三次元運動シミュレーション手法の開発

接触力の算出

【接触解析法】弾性接触法：接触点にペナルティばねを挿入

トロリ線要素と舟体要素
の相対変位

トロリ線要素と舟体要素
の相対速度

接触力

$$F_{\text{cont}} = \alpha x_r + \beta \dot{x}_r$$

ばね定数

減衰定数

要素が貫入→着線

$$\alpha = 5.0 \times 10^4 [\text{N/m}]$$

要素が離れる→離線

$$\alpha = 0 [\text{N/m}]$$

着線かつ相対速度が貫入する方向

$$\beta = 1.0 \times 10^4 [\text{Ns/m}]$$

上記以外

$$\beta = 0 [\text{Ns/m}]$$

三次元運動シミュレーション手法の開発

運動方程式と数値解法

架線・パンタグラフを含む系全体で運動方程式を記述

慣性力

減衰力

復元力

外力

架線: 支持点反力、張力など
パンタグラフ: 押上力など

$$\mathbf{G}_m + \mathbf{G}_c + \mathbf{G}_k = \mathbf{F} + \mathbf{F}_{cont}$$

接触力

前述の接触力を接触力の方向を加味してベクトル形式で記述

数値積分 (Newmark- β 法) と収束計算 (Newton-Raphson 法) により繰り返し計算を実行

【離線等の取扱い】

nステップ目の計算開始

n-1ステップ目の接触状態のままで運動方程式を解く

接触状態の判定

接触状態が変化

接触状態を変えて再計算 (α 、 β を変更)

接触状態が変わらない

n+1ステップ目の計算へ



三次元運動シミュレーション手法の開発

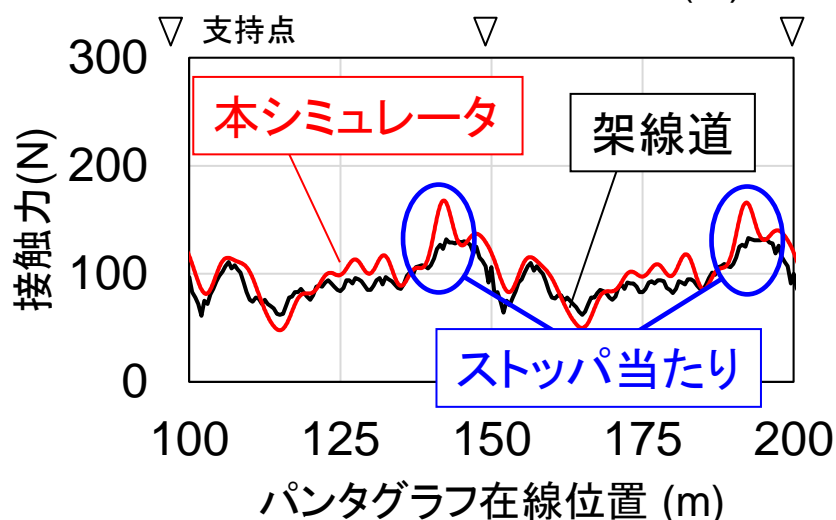
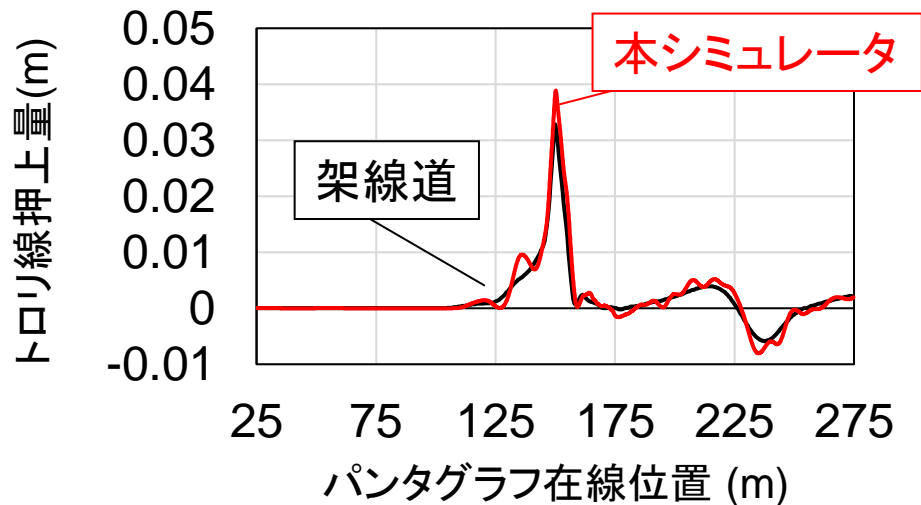
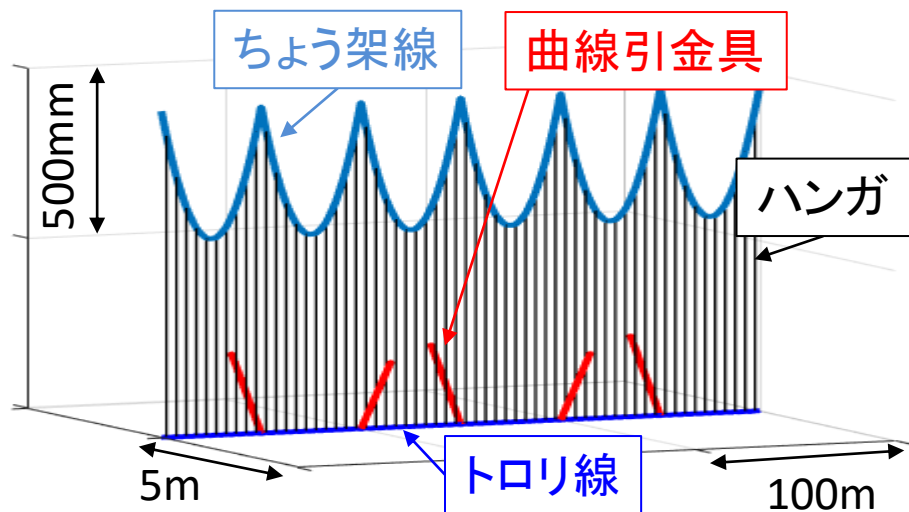
接触解析の検証

【検証方法】

従来シミュレータ(架線道)との比較

【計算条件】

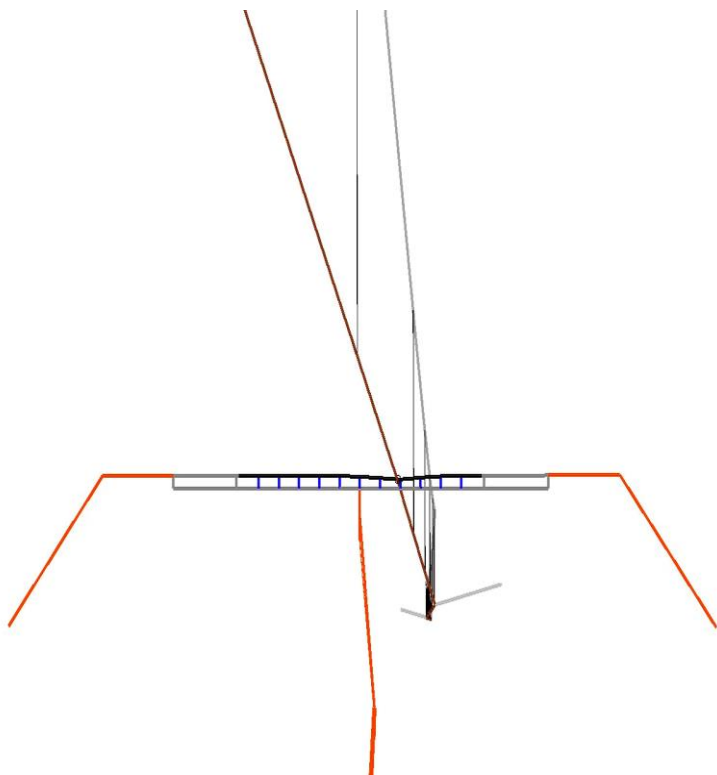
- 架線: 高速シンプル架線
- パンタグラフ: 新幹線用パンタグラフ
- 速度: 320km/h



- ・従来シミュレータと概ね一致していることを確認
- ・ストッパ当たりなどの挙動を再現

解析例

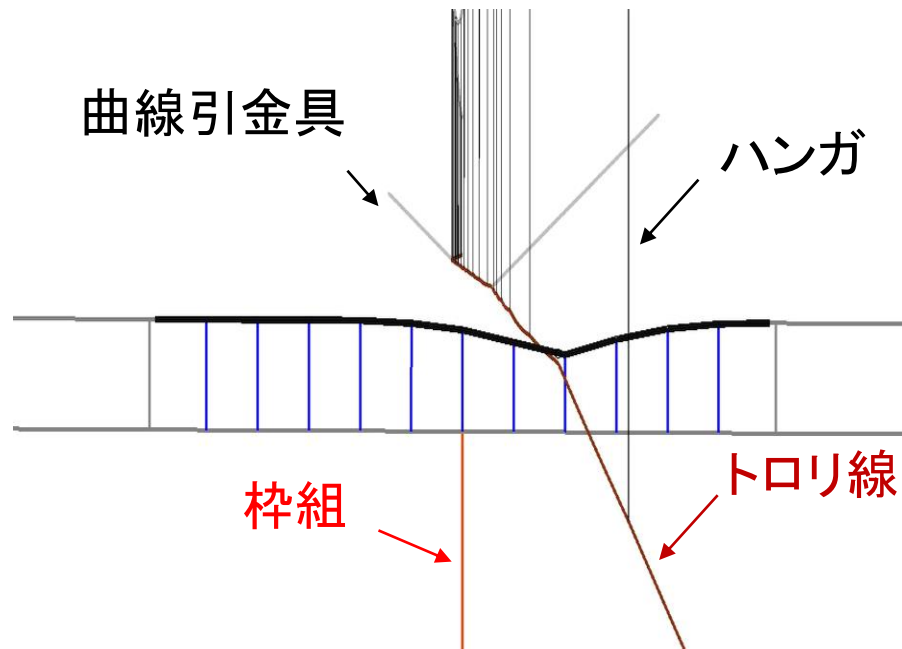
新幹線用パンタグラフの高速走行時の 架線・パンタグラフシミュレーション



シミュレーション結果のアニメーション

【計算条件】

- 架線: 高速シンプル架線(偏位あり)
- パンタグラフ: 新幹線用パンタグラフ
- 速度: 320km/h



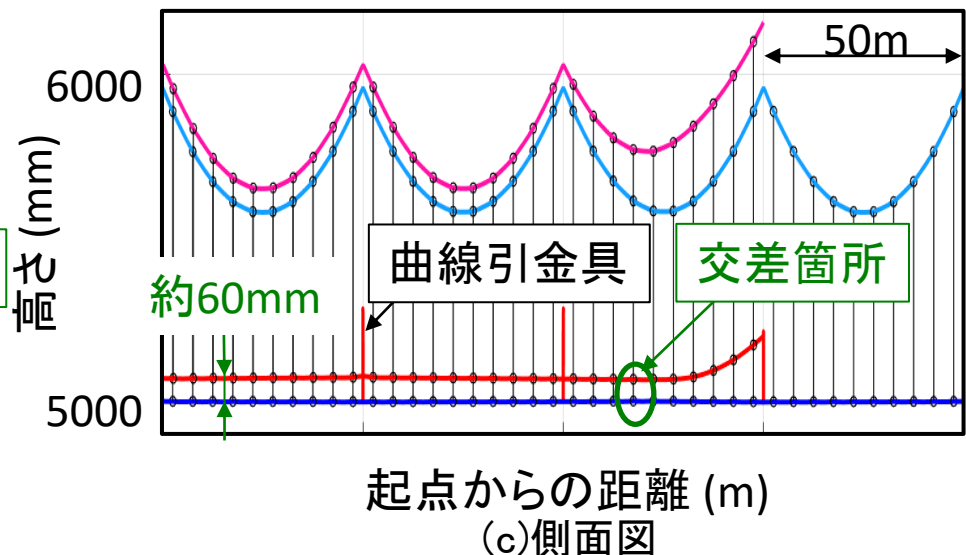
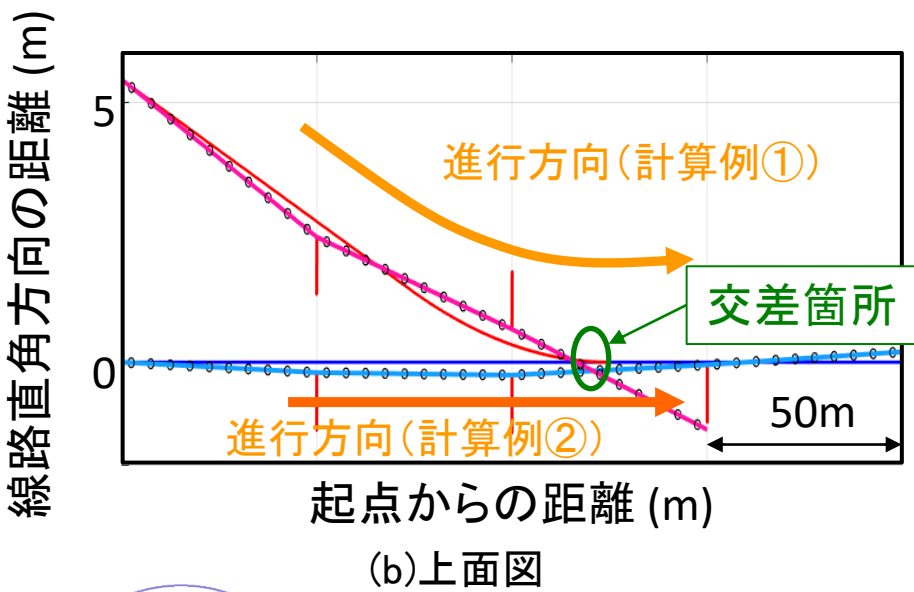
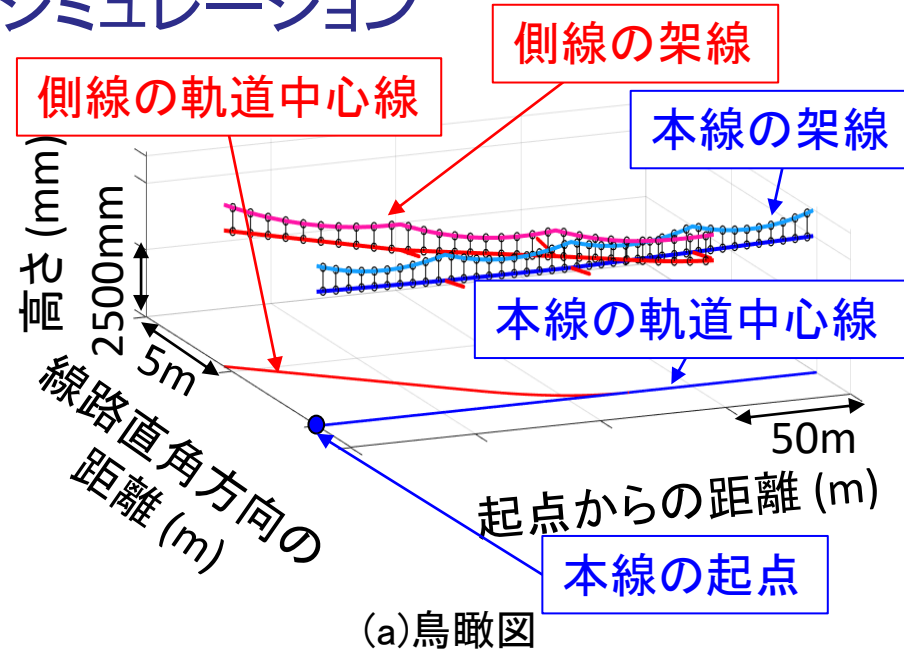
シミュレーション結果のアニメーション
(上下拡大)

従来は考慮できなかった可動すり板などのパンタグラフ部材の挙動も再現

解析例 わたり区間走行時のシミュレーション

【計算条件】

- 架線: 高速シンプル架線
- パンタグラフ: 新幹線用パンタグラフ
- 走行条件
- 計算例①: 速度: 30km/hで側線から本線に進入
- 計算例②: 本線を260km/hで走行
- わたり線: 交差わたり

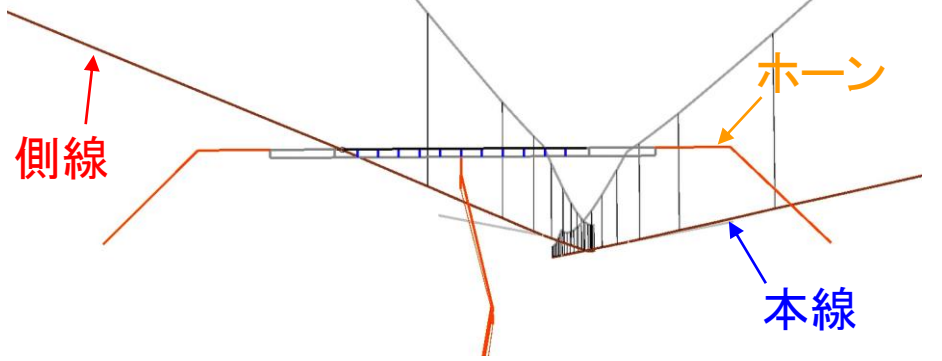


解析例

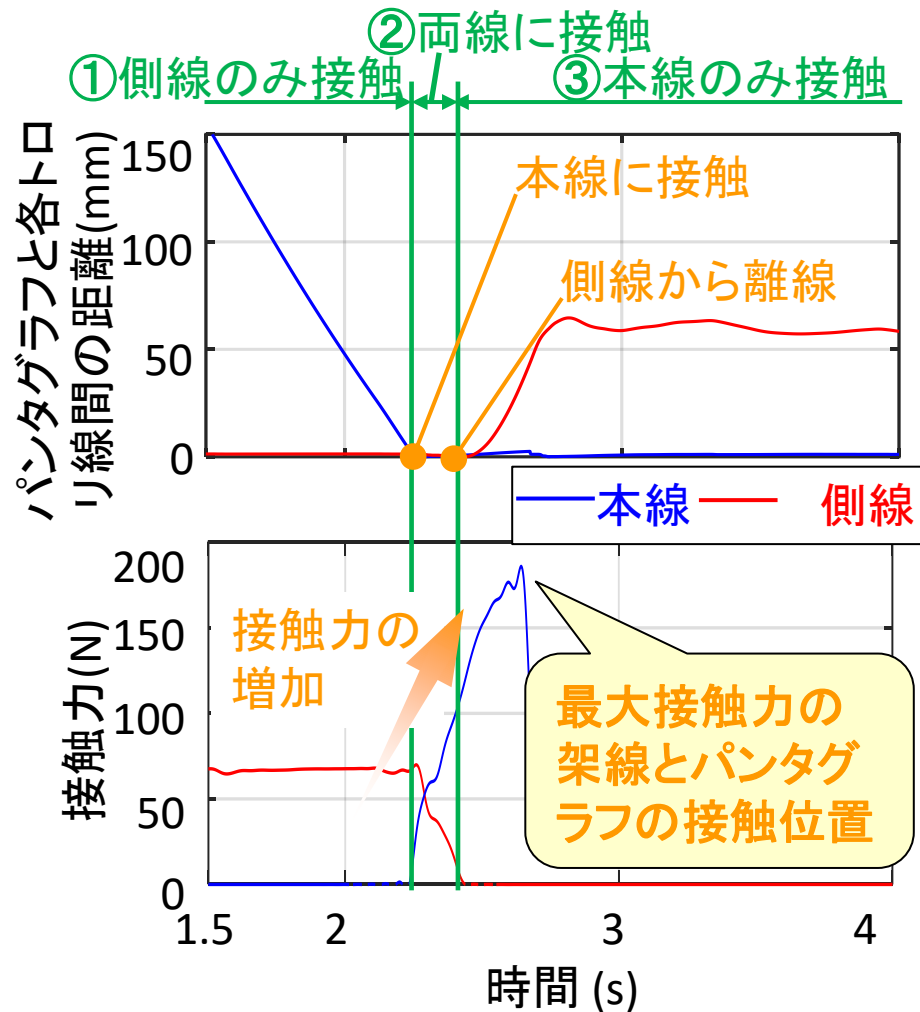
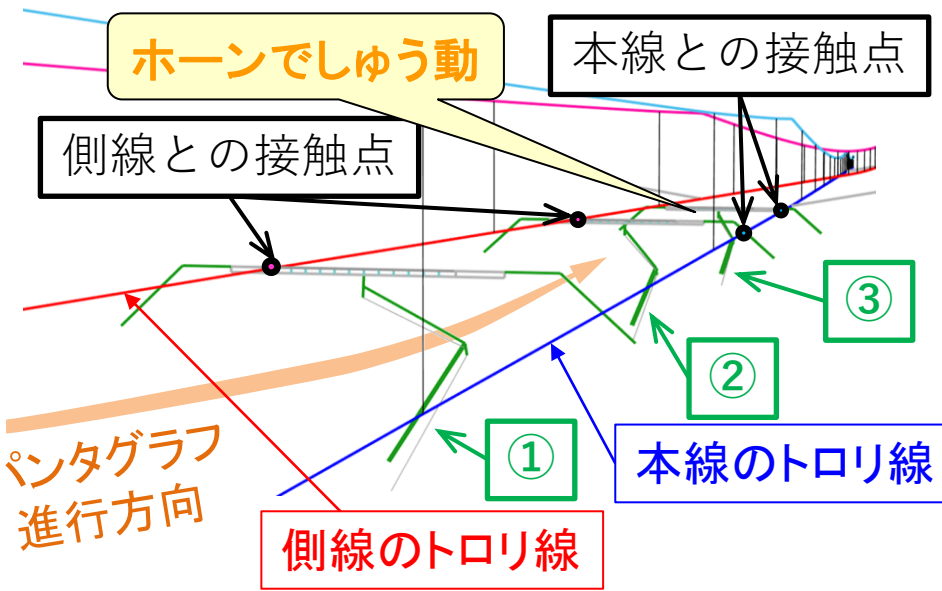
わたり線走行時のシミュレーション結果

(計算例①)

走行速度: 30km/h



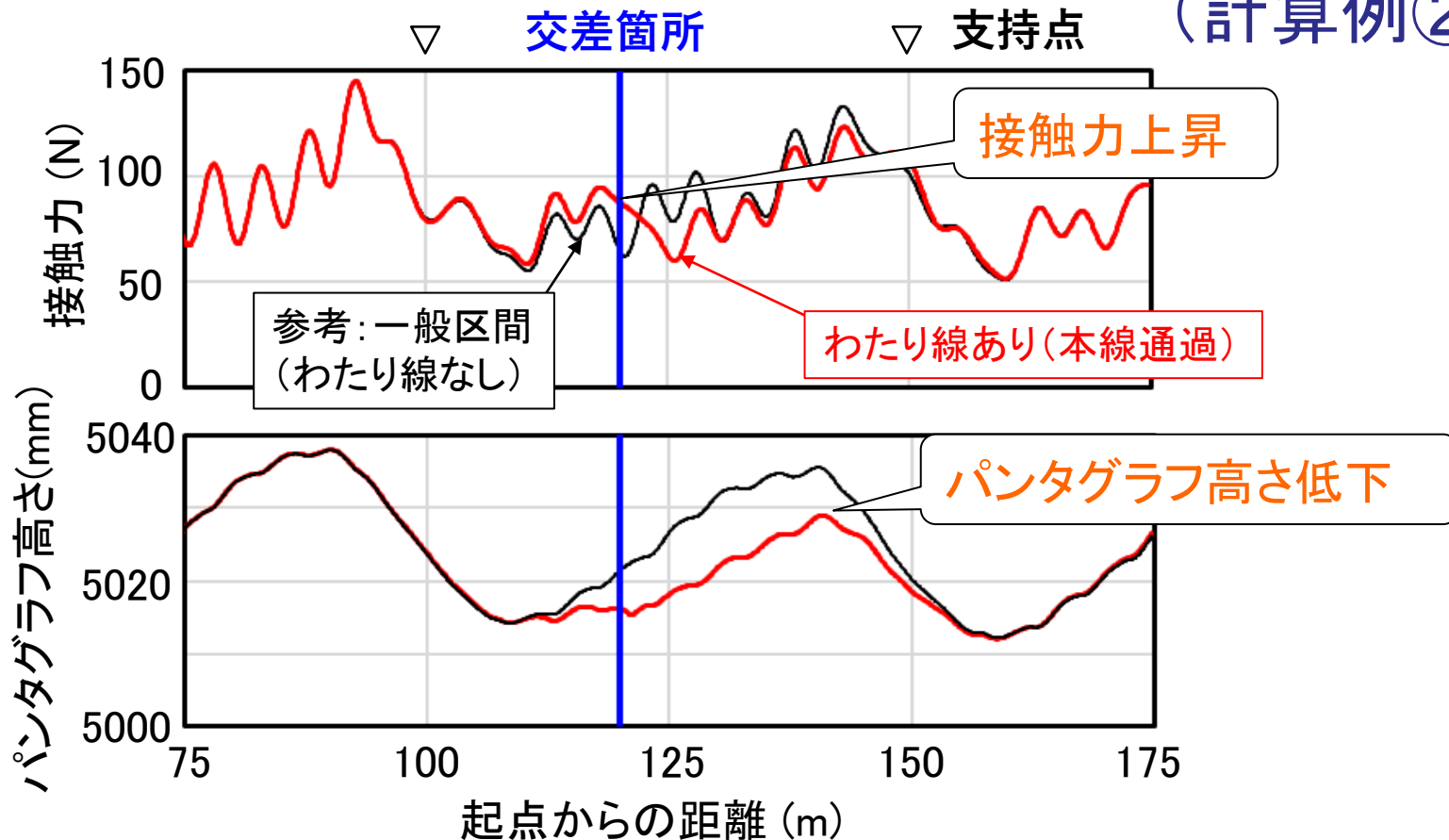
わたり線通過時の動画



解析例

わたり線走行時のシミュレーション結果

(計算例②)



わたり線の有無による集電性能の変化

わたり線などの複数の架線や、架線の三次元配置を考慮した計算が可能

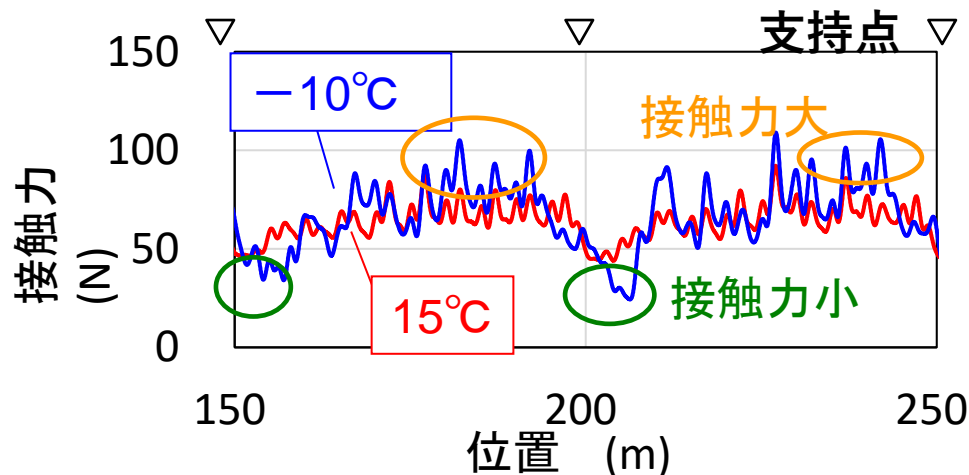
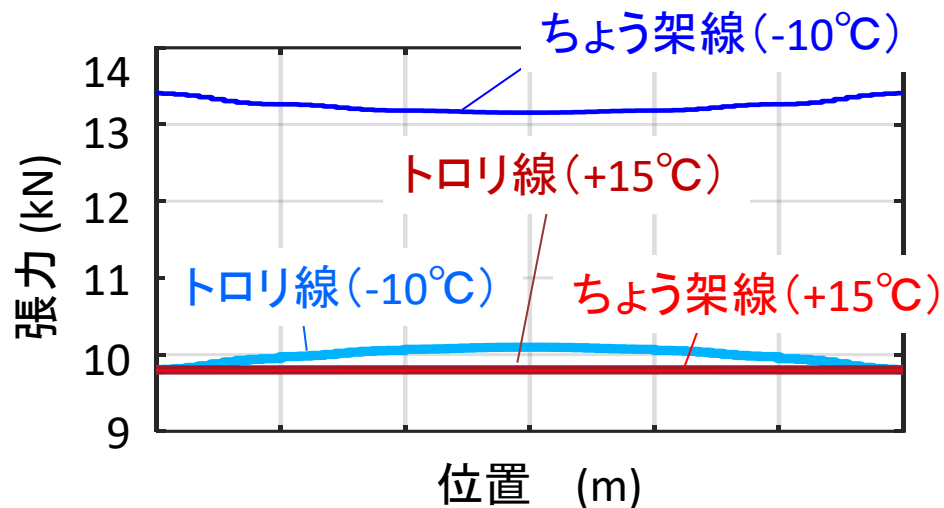
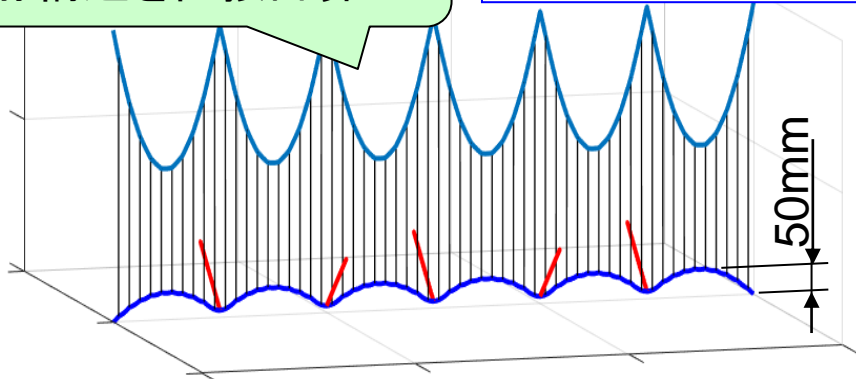
解析例 温度変化時のシミュレーション結果

【計算条件】

- シンプル架線
- ちょう架線: 張力調整装置なし
- トロリ線: 張力調整装置あり
- 在来線用パンタグラフ
- 速度: 110km/h
- 温度変化: 標準(15°C)から25°C低下(-10°C)

温度変化量から架線静構造を直接計算

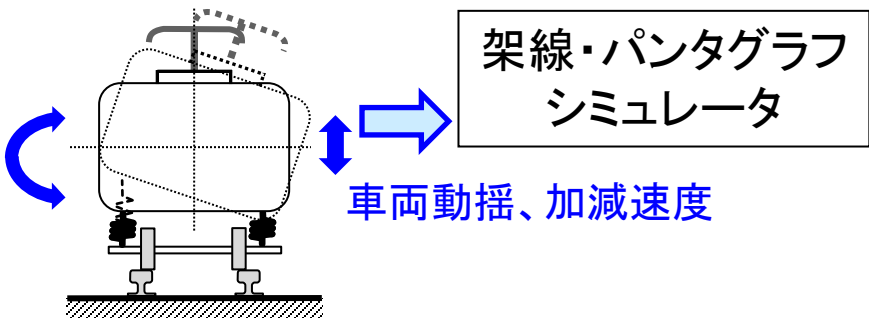
-10°Cの静構造



温度変化による静構造変化の影響を把握

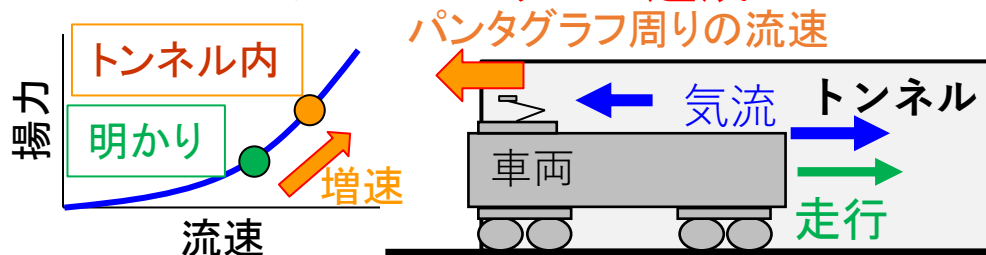
シミュレーションの高度化

車両運動シミュレータとの連成



トンネル内の一次元空気流動

シミュレータとの連成

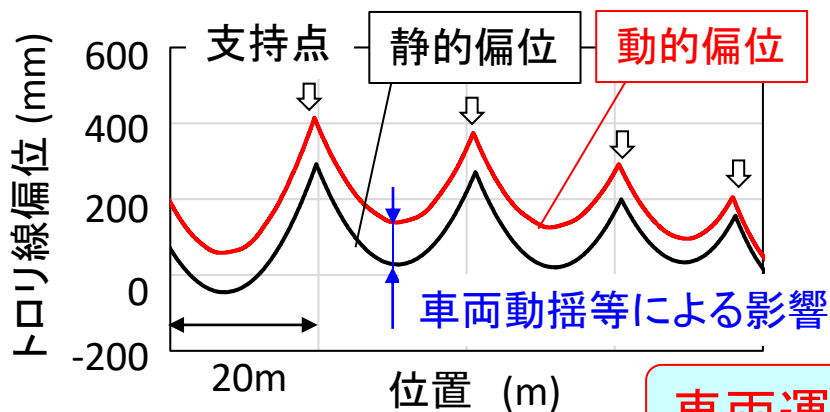
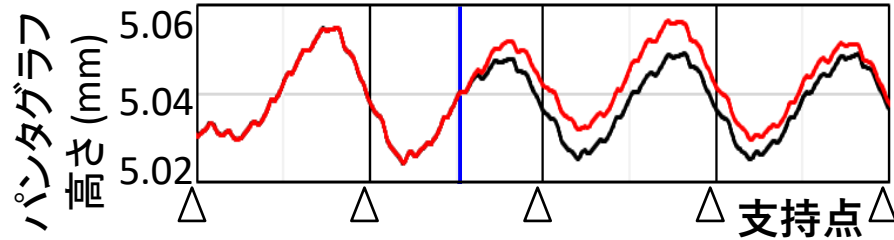
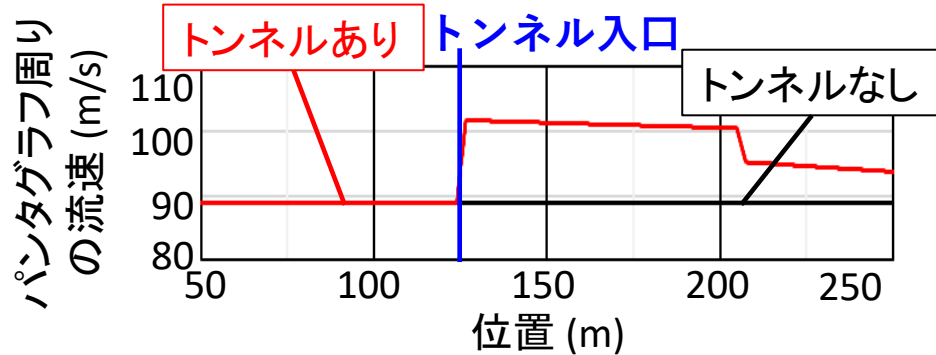


空気流動シミュレータ

パンタグラフ
周りの流速

架線・パンタグラフシミュレータ

トンネル内のパンタグラフ揚力を算出



車両運動やトンネル突入時の流速変化を考慮可能



■ まとめ

わたり線やオーバーラップにおける複数架線の三次元配置を考慮可能な架線とパンタグラフの三次元モデルを用いた運動シミュレーション手法を開発

■ 成果の活用

- 架線・パンタグラフの開発支援
 - ・新しい架線構造の検討、高速用パンタグラフの開発
 - ・保守基準値の策定(例:わたり線の高低差管理)
- 現象解明のツールとしての活用
 - ・事故メカニズムの解明(例:強風時の架線の割り込み事故)

参考文献

- 1) [小山達弥、長尾恭平、池田充：架線・パンタグラフの三次元シミュレーション、鉄道総研報告、Vol.34、No.9、pp.5-10、2020](#)
- 2) 小山達弥、長尾恭平、池田充、臼田隆之：MBDモデルを用いた架線・パンタグラフの三次元運動シミュレーション、Dynamics and Design Conference2020講演論文集、日本機械学会、2020