

架線の3次元静構造計算 プログラム

鉄道力学研究部 集電力学研究室

主任研究員 小山 達弥

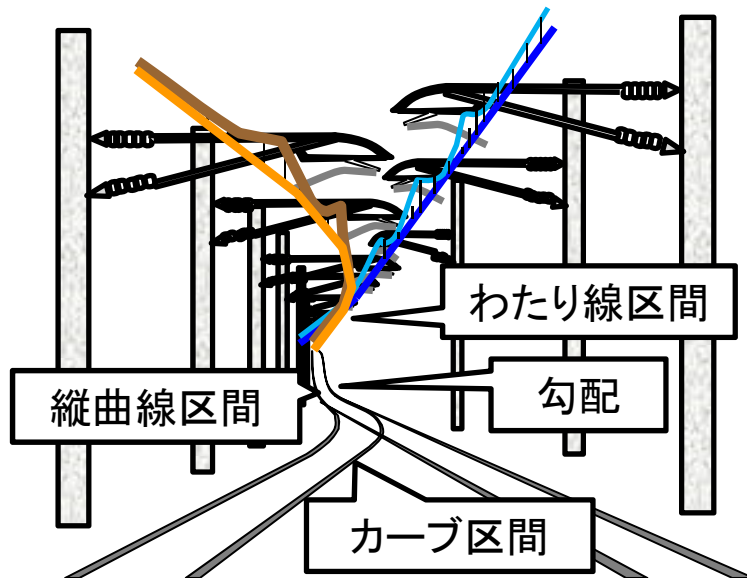
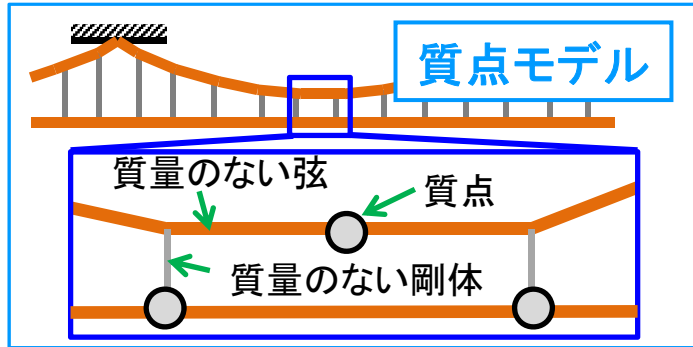


本日の発表

- ◆ 開発背景・目的
- ◆ 3次元架線モデル
 - ・ 架線モデルの概要
 - ・ モデル作成の手順
 - ・ 計算例(曲線、温度変化)
- ◆ まとめと成果の活用

研究背景・目的

従来の架線モデル(架線道)



実際の架線の架設例

- ・質点により架線を再現
- ・質点を二次元(上下-レール方向)に配置
- ・質点は上下にのみ移動(運動計算)

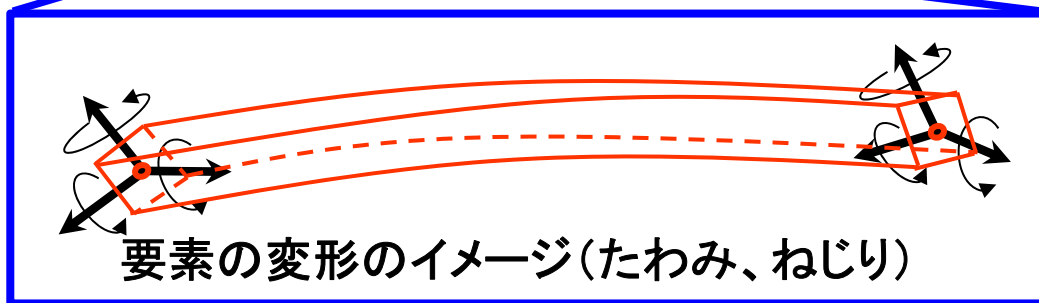
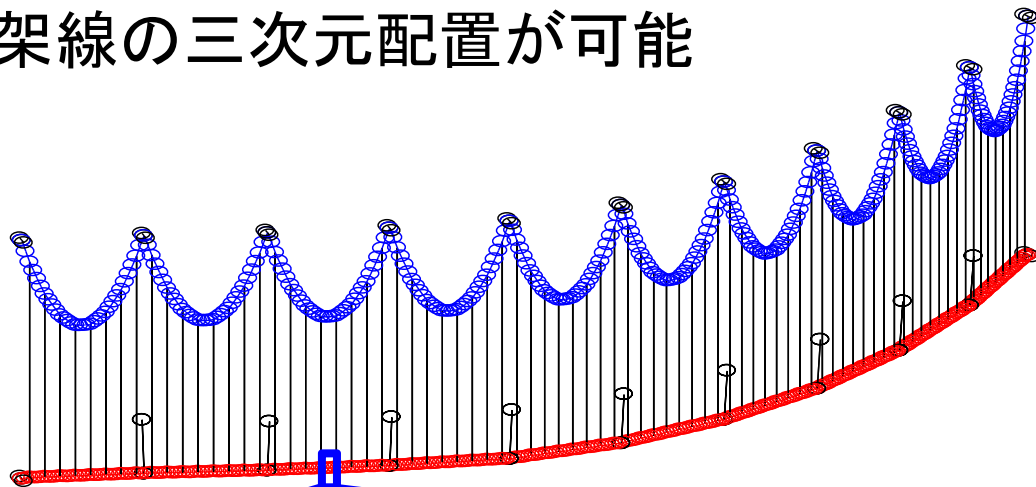
【考慮不可・別途計算が必要な条件】

- ・曲線区間の再現
- ・温度変化による架線の伸縮
→弛度変化と曲線引金具による引き上げ, レール方向への移動
- ・オーバーラップ, わたり線などにおける架線のまくらぎ方向位置

- ・架線の3次元配置
- ・温度変化に伴う静構造変化

3次元架線モデルの概要

架線の三次元配置が可能



架線要素：3次元Eulerはり
たわみ、ねじり、伸びを考慮

3次元要素により
モデル化

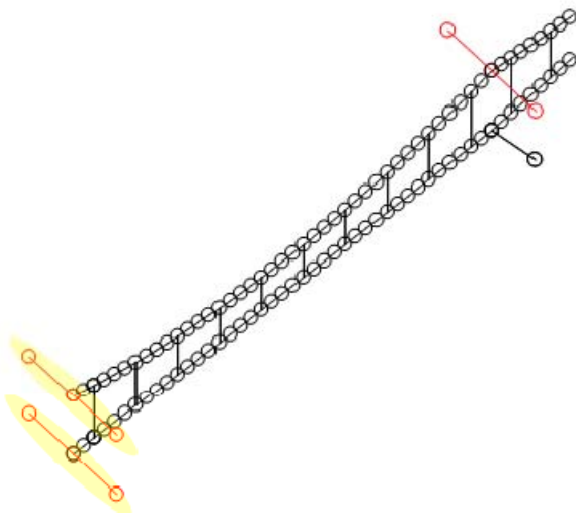


- ・曲線区間への対応
- ・温度変化に伴う架線構造の変化を再現

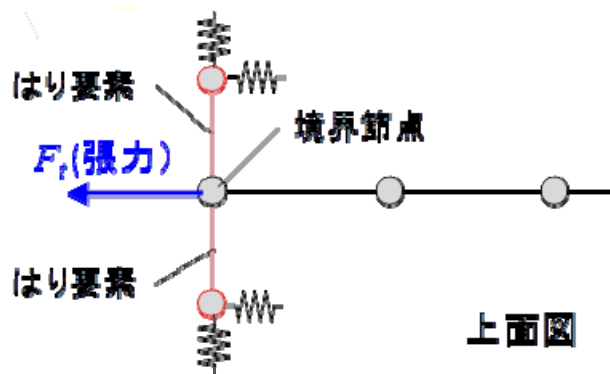
3次元架線モデルの概要

境界条件

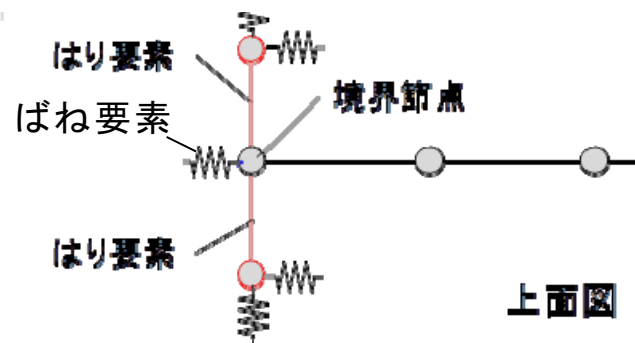
張力の付与
(各線条の両端点)



張力調整装置がある場合



直留の場合



硬いばねを挿入することで直留を再現

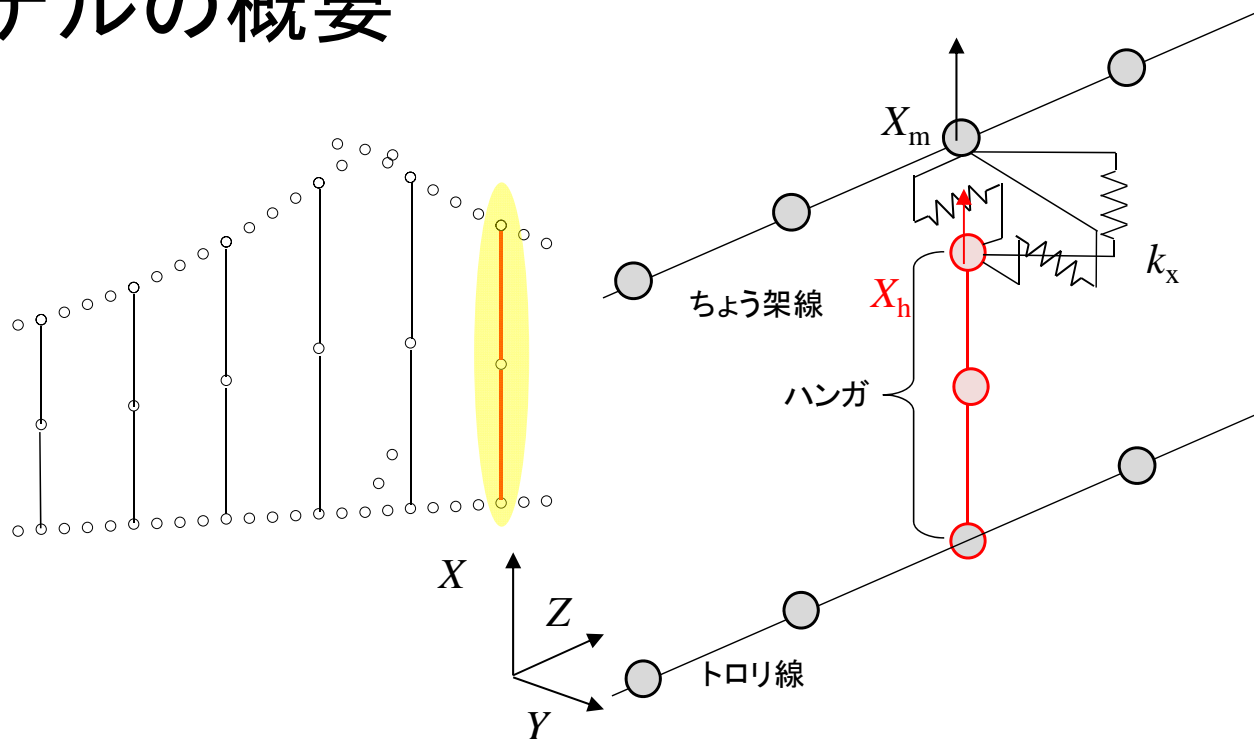
3次元架線モデルの概要

境界条件

ハンガ浮きの再現



ハンガとちょう架線との接続



ちょう架線とハンガ上部をばねで接続

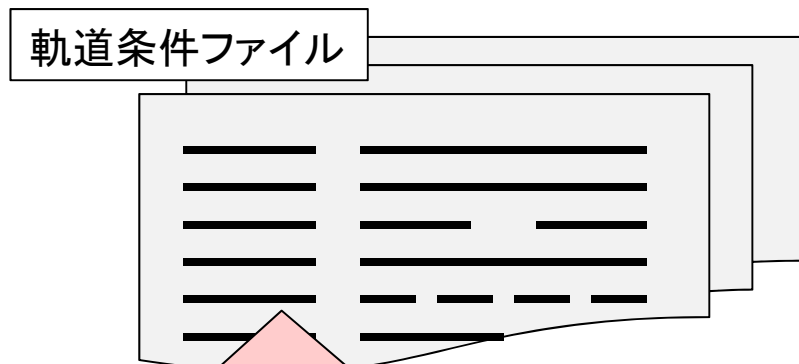
- ハンガ浮きを考慮しない場合
→ k_x に大きな値を入れる
- ハンガ浮きを考慮する場合
→ $X_h - X_m > 0$: $k_x = 0$

$X_h - X_m \leq 0$: k_x に大きな値を入れる

3次元架線モデルの作成

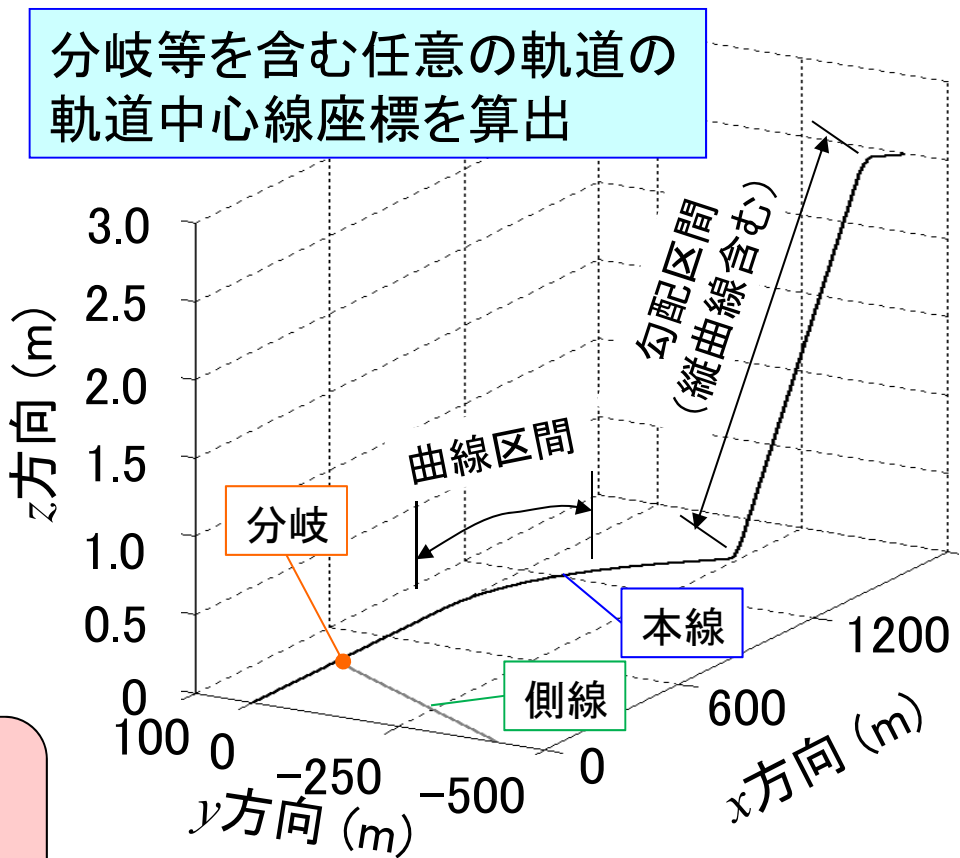
3次元架線モデル作成の手順

- ① 軌道の生成
- ② 架線固定点の決定
- ③ 静構造計算



線形情報の設定

- ・線路種別 (曲線、緩和曲線 etc)
- ・勾配、縦曲線 etc

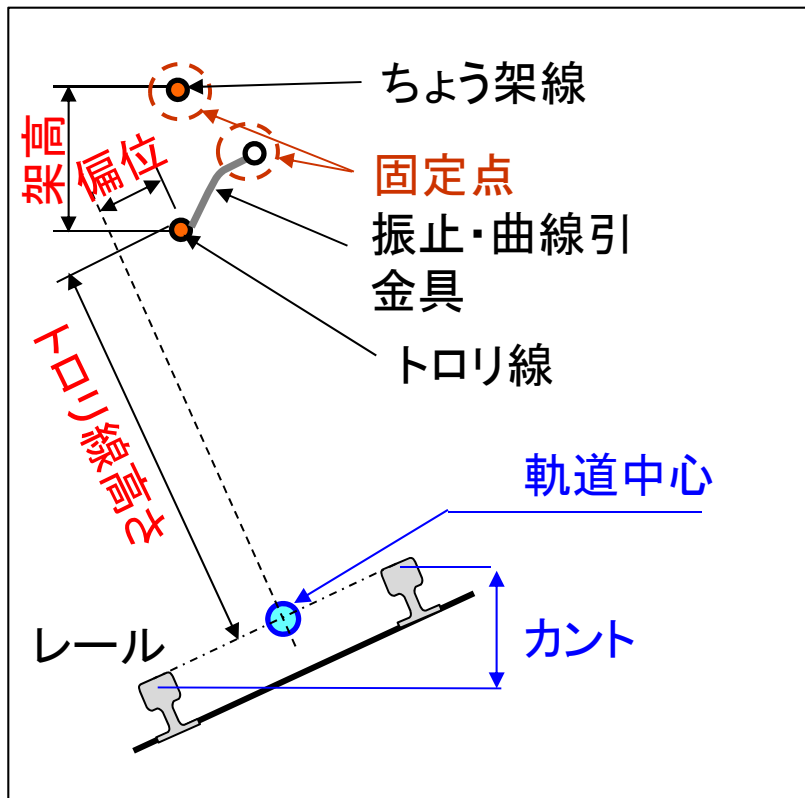


軌道の計算例

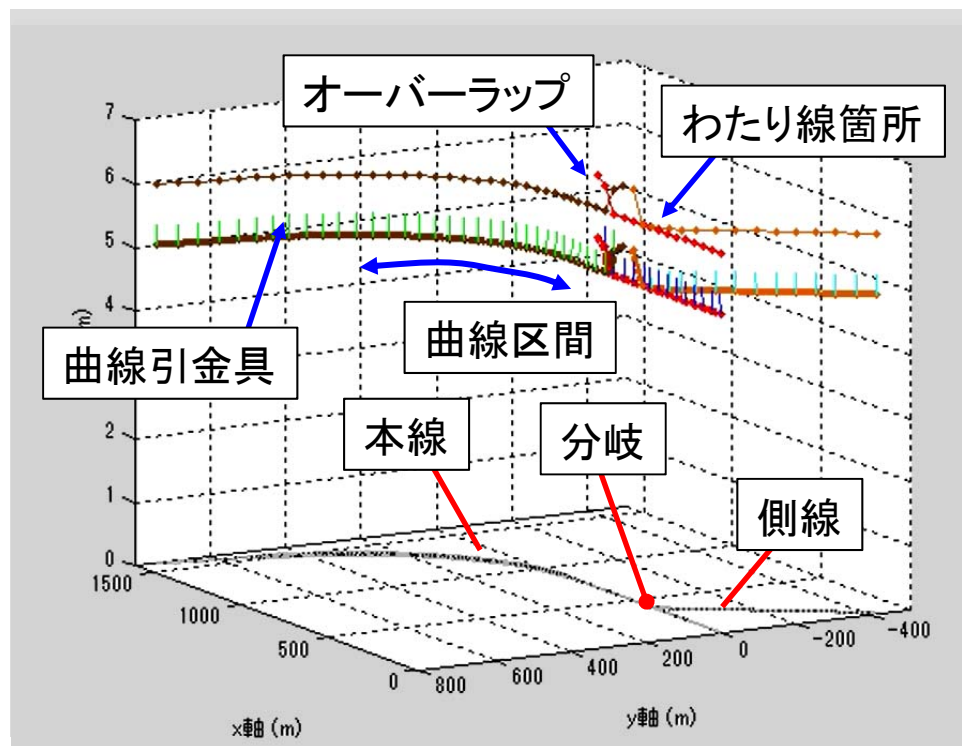
3次元架線モデルの作成

②架線固定点の決定

カーブ区間:カントを考慮して架線固定点を決定



軌道に対する架線の配置

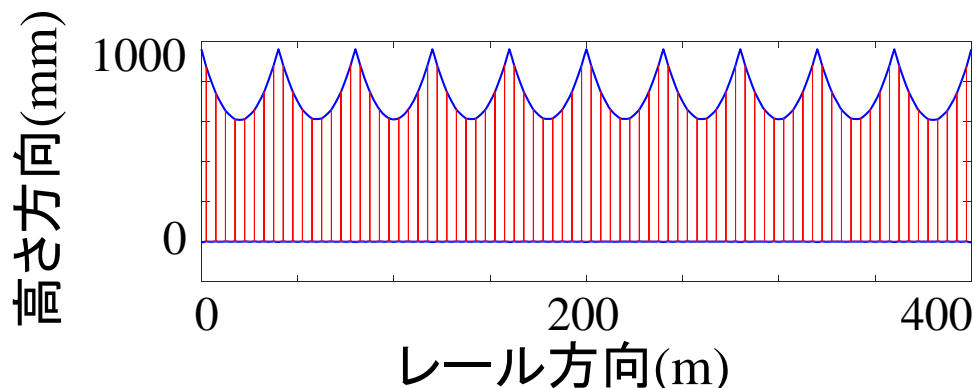


架線固定点の配置例

3次元架線モデルの作成

③架線の静構造計算

③-1 2次元モデルによりハンガ長を決定



- 1)ハンガ下点高さを与える
- 2)ハンガ力を算出
- 3) ちょう架線高さを算出
- 4) ハンガ長を算出

③-2 架線固定点・ハンガ長さの情報を基に3次元位置を決定

力のつり合い式：線形復元力 + 非線形復元力 - 外力 = 0

端部のばね要素など

張力、重力など

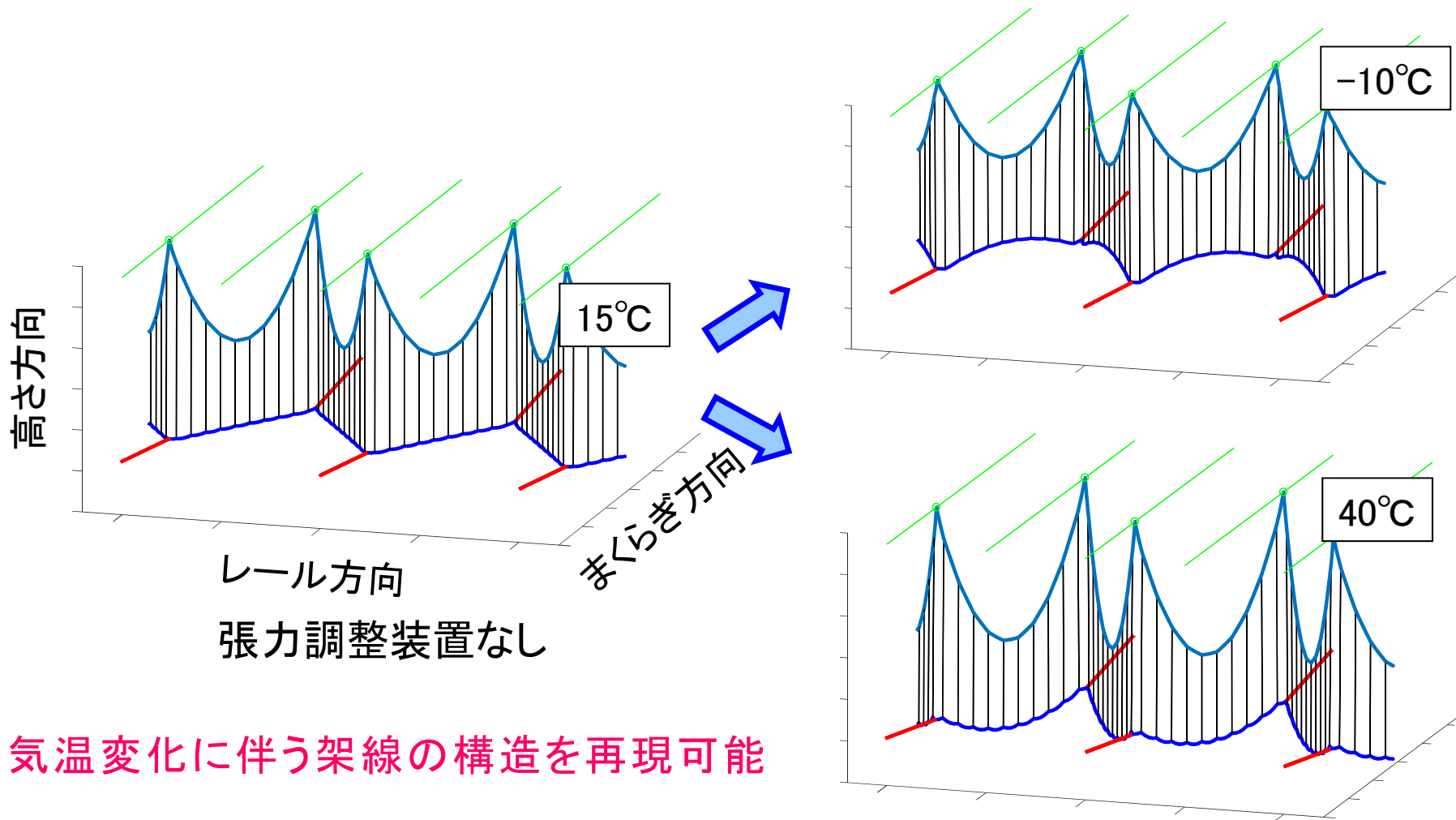
大変形に伴う幾何学的非線形性



収束計算

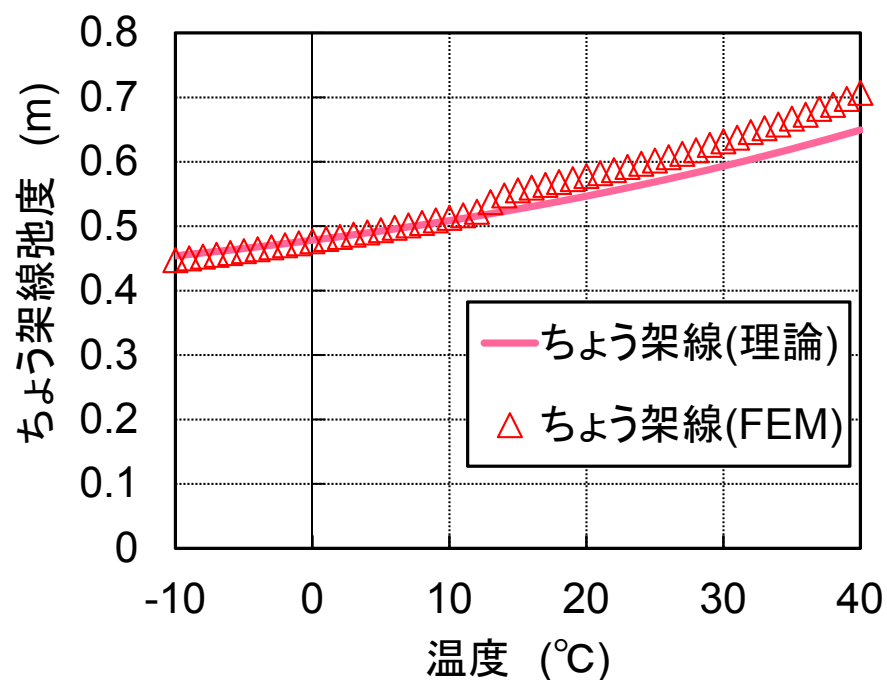
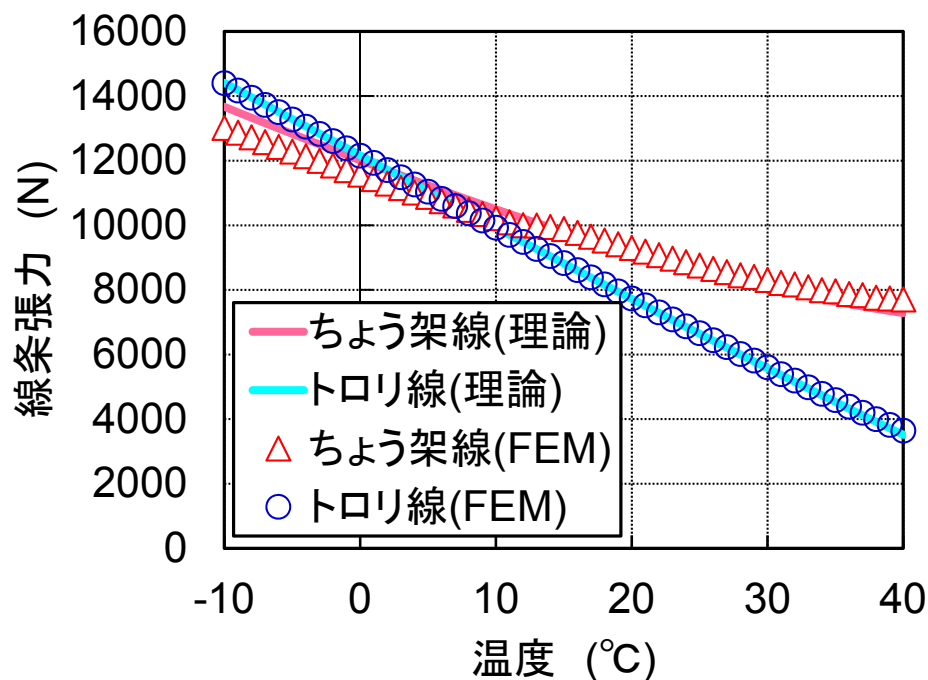
3次元架線モデルの計算例

温度変化に伴う架線静構造の変化



3次元架線モデルの計算例

温度変化に伴う架線静構造の変化



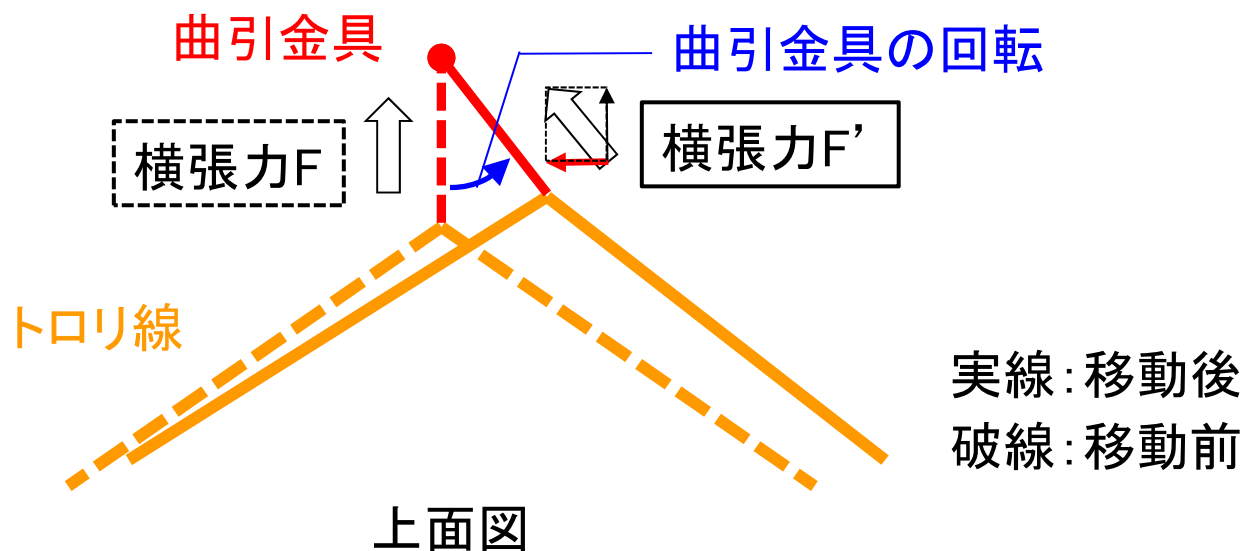
自動張力調整装置がない場合の張力と弛度の変化

3次元架線モデルの計算例

温度変化に伴う架線静構造の変化

【温度変化に対する本プログラムの特徴】

- 線膨脹を考慮することで張力を自動計算
(従来プログラムでは温度変化後の張力を別途計算)
- 線条のレール方向移動による、ハンガのレール方向位置の変化、曲引金具・ブラケットの回転に伴う抑制抵抗を再現

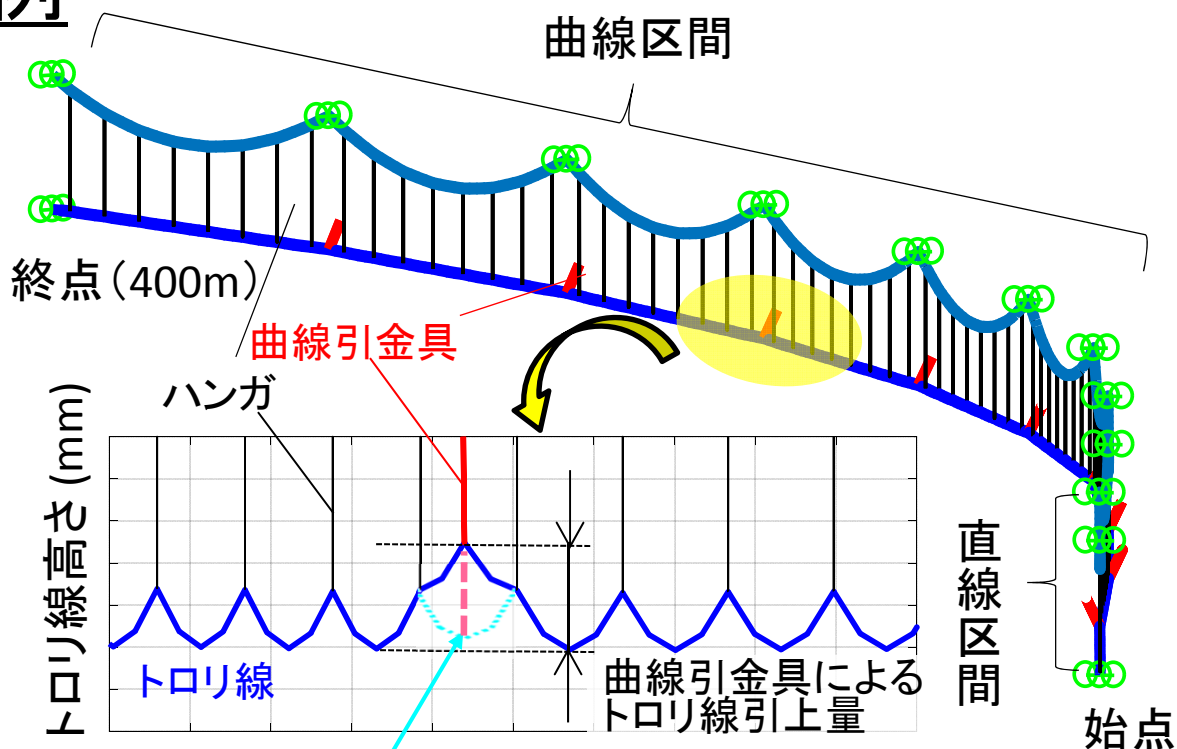


3次元架線モデルの計算例

曲線区間の計算例

計算の諸条件

架線条件		パラメータ
架線種別	シンプル架線	
径間長	40m	
ハンガ間隔	5m	
トロリ線	種別	Cu110
	線密度	0.99kg/m
	張力	9.8kN
ちょう架線	種別	St90
	線密度	0.70kg/m
	張力	9.8kN



【参考】直線区間の支持点付近のトロリ線

- ・直線区間＋R400曲線区間
- ・曲線引金具の標準引角10°

曲線区間に支持点において発生する横張力によるトロリ線の引上を再現可能

3次元架線モデル

新旧モデルの比較

架線モデル	既存モデル (質点モデル)	新しいモデル (3次元FEM)
直線区間	○	○
架線偏位	×	○
曲線区間	×	○
温度変化	△	○

まとめと成果の活用

- 曲線区間や温度変化に対応可能な3次元FEMによる架線モデルを開発
→架線新設・開発時の静構造把握に活用可能
- 今後は、パンタグラフモデルとの連成計算による運動解析シミュレータを構築する

以下、印刷不要

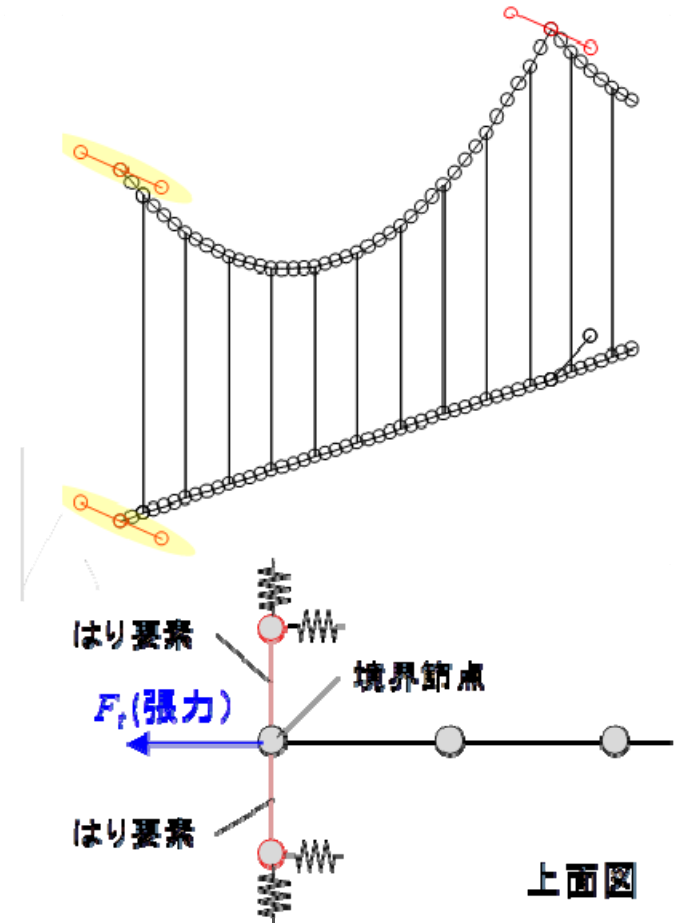
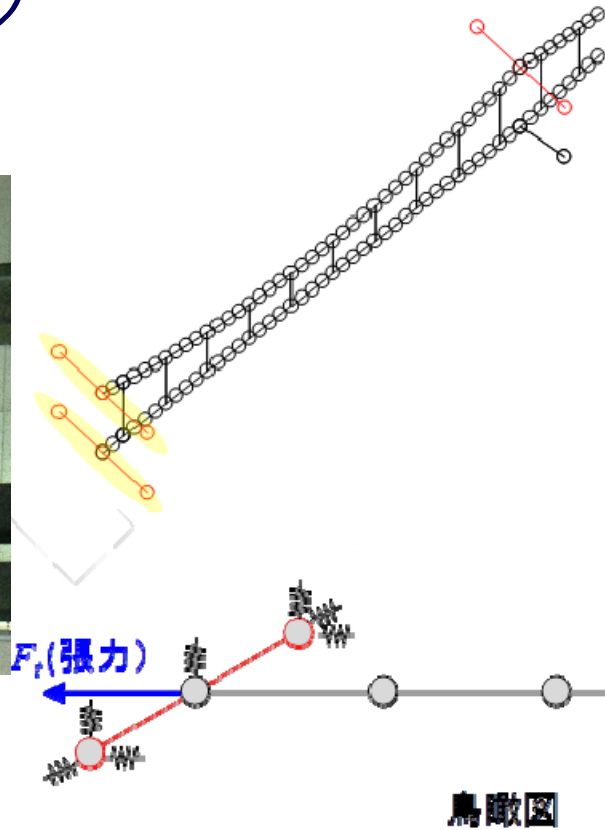


解析手法(境界条件)

張力の付与 (各線条の両端点)



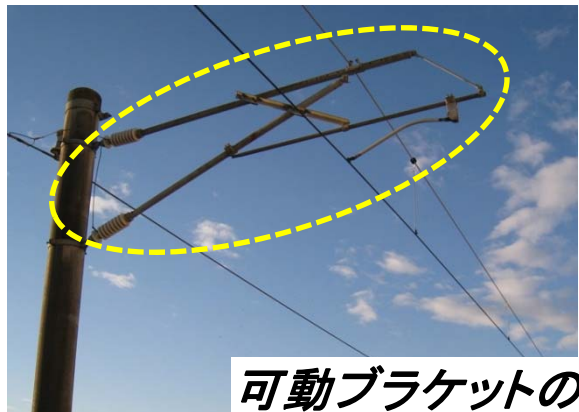
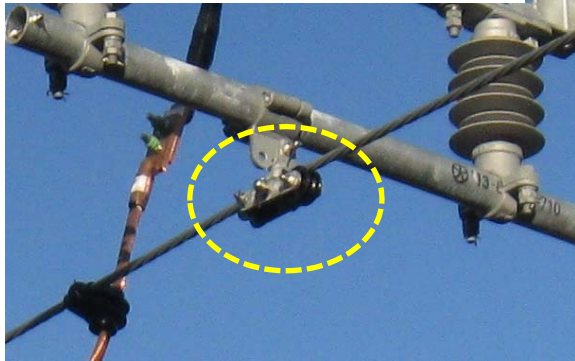
張力調整装置の例
(ばね式バランサ)



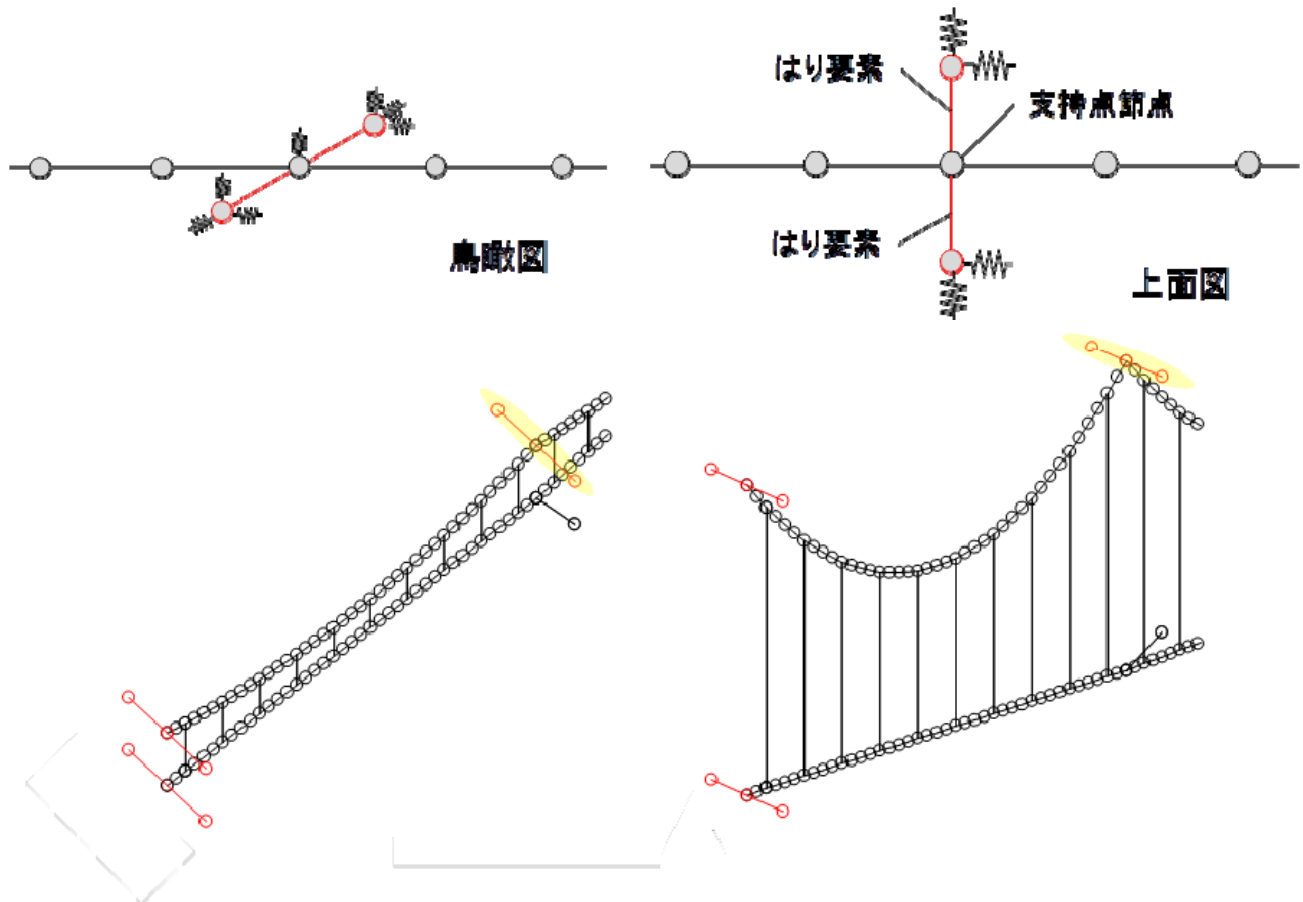
解析手法(境界条件)

ちょう架線の各支持点 (滑車・可動ブラケットの模擬)

ちょう架線支持滑車の例



可動ブラケットの例

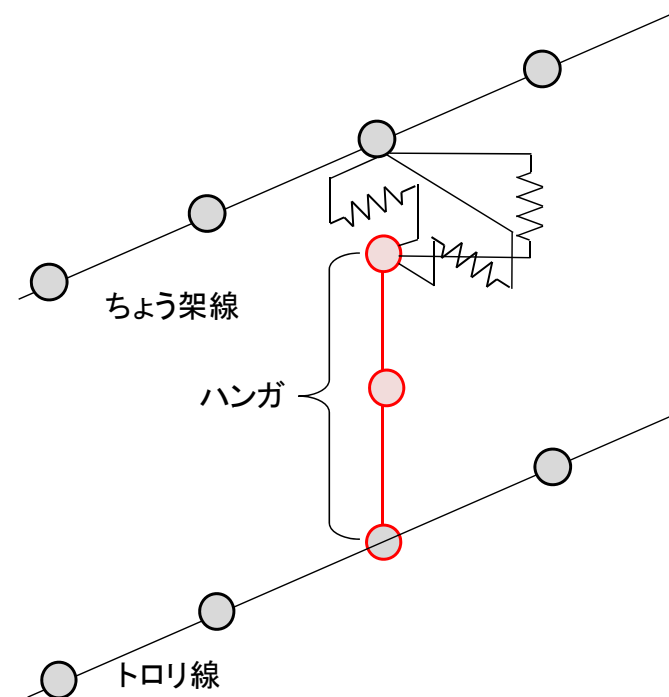
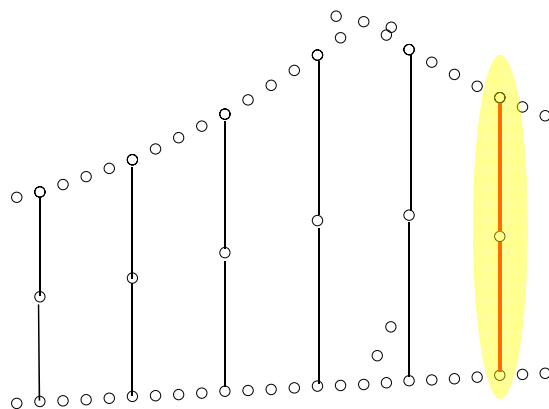


解析手法(ハンガ浮きの扱い)

ハンガとちょう架線との接続 (ハンガ浮きの表現)



ハンガとちょう架線との接続



解析手法(数値解析手法)

$$g(\mathbf{q}) \equiv \mathbf{G}_L(\mathbf{q}) + \mathbf{F}_{int}(\mathbf{q}) - \mathbf{F}_{ext} = \mathbf{0}$$

\mathbf{q} : 架空電車線を構成する各有限要素の節点座標

\mathbf{G}_L : 節点に作用する仮想的な線形復元力(ばね拘束等の境界条件など)

\mathbf{F}_{int} : 各要素に作用する非線形復元力

\mathbf{F}_{ext} : 各節点に作用する外力ベクトル

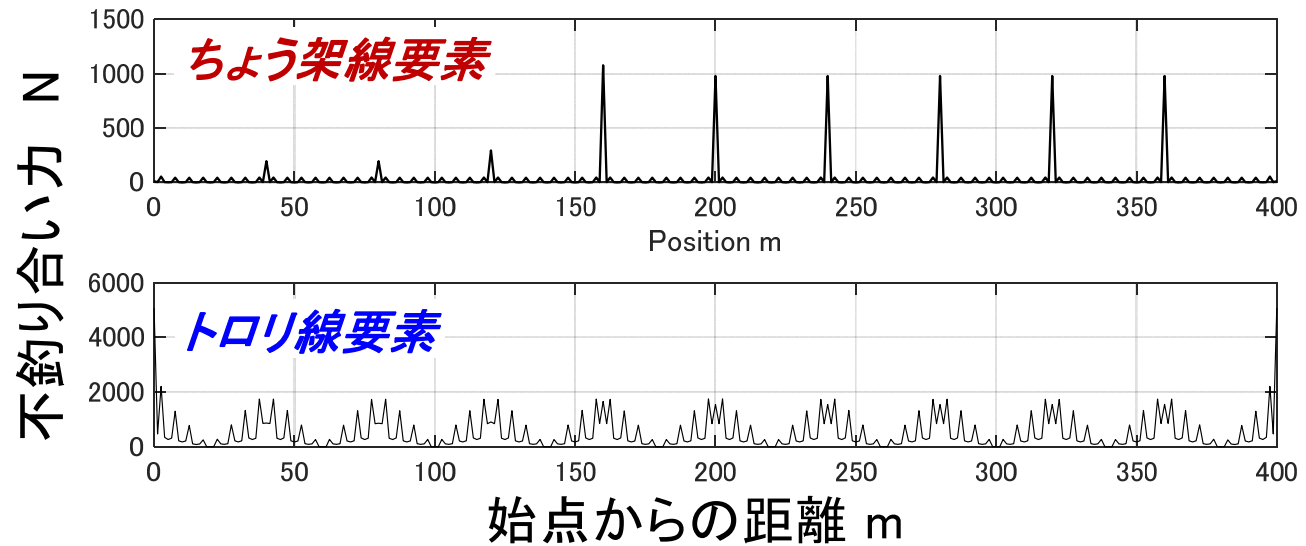
$g(\mathbf{q})$: 不釣り合い力ベクトル

Newton-Raphson法を適用して, $g(\mathbf{q}) \doteq \mathbf{0}$ を満足する \mathbf{q} を求める

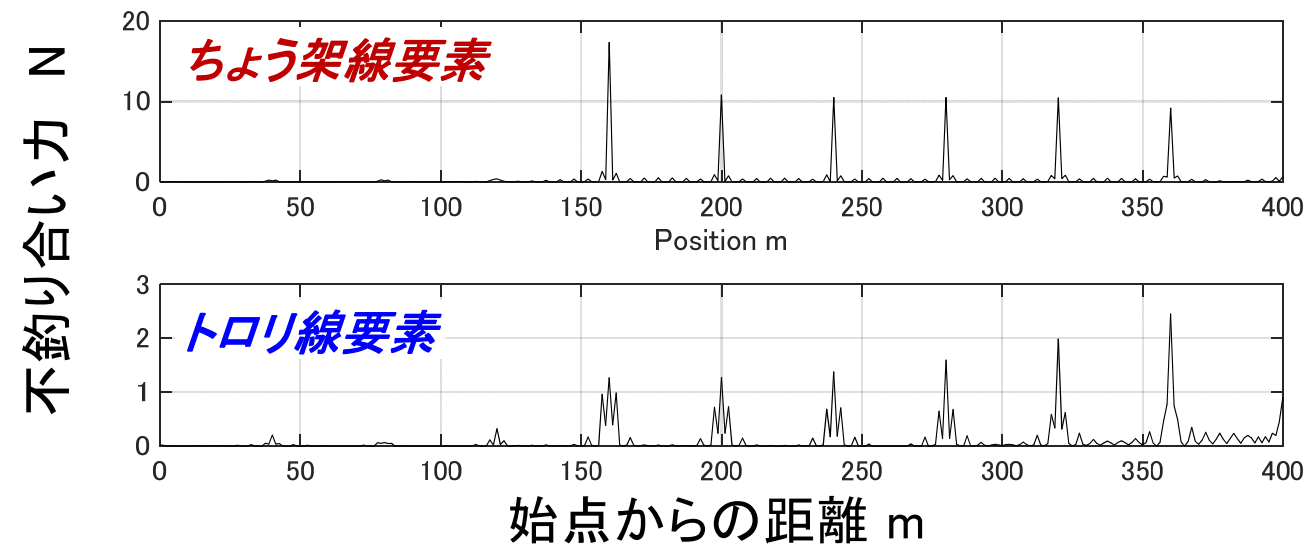
その際の反復計算には更新枠法を適用

解析例（収束の様子）

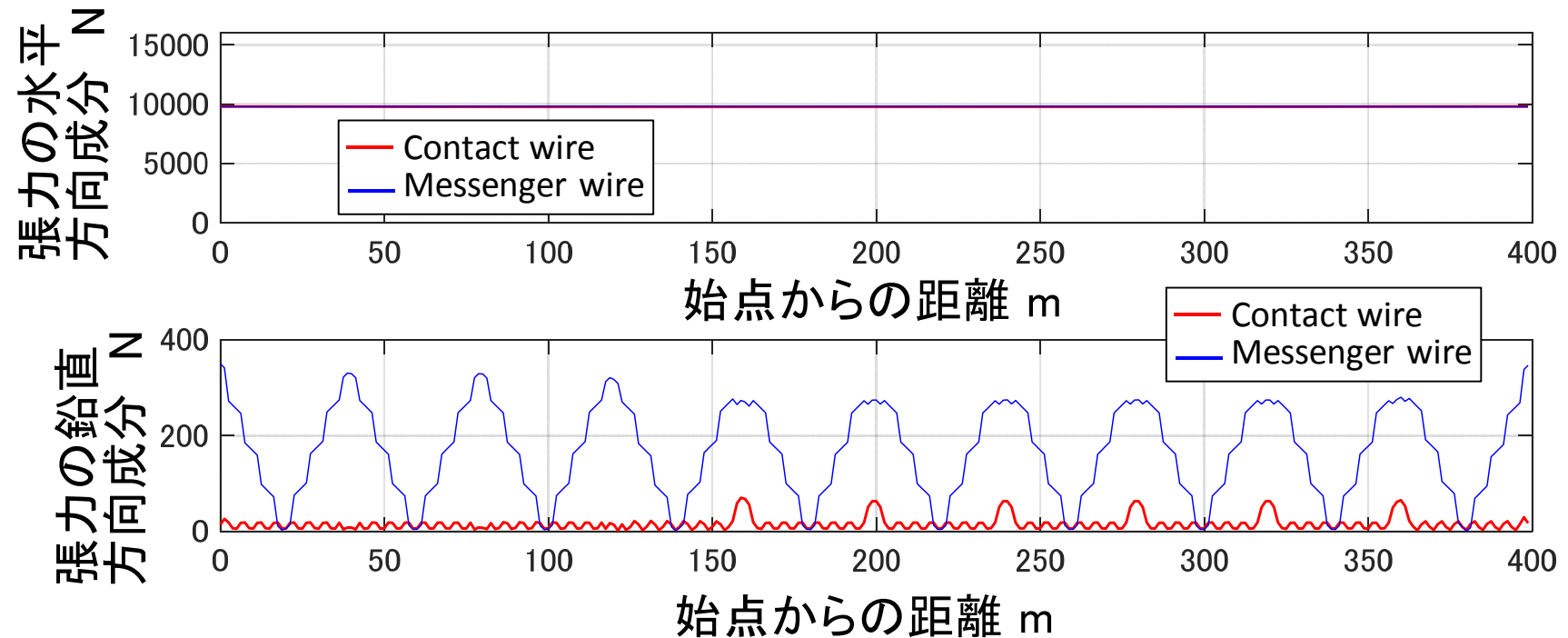
第1近似解
(線形解析)



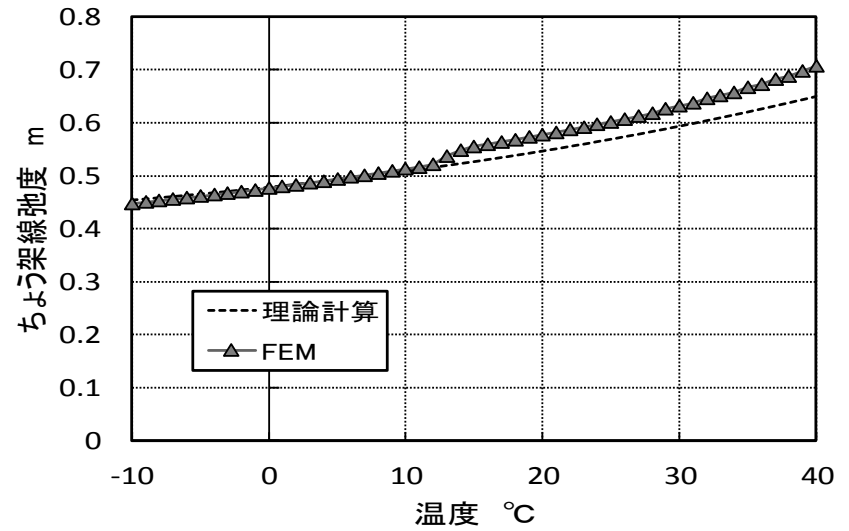
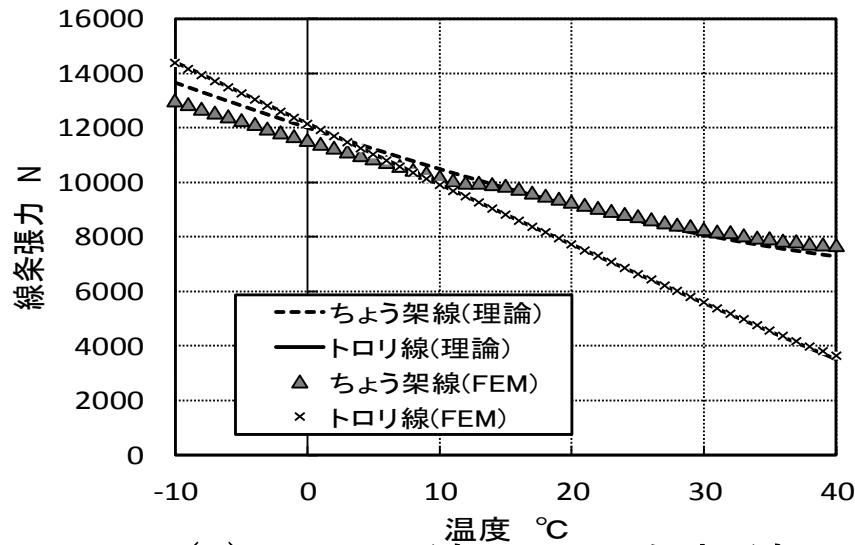
収束解
(反復回数8回)



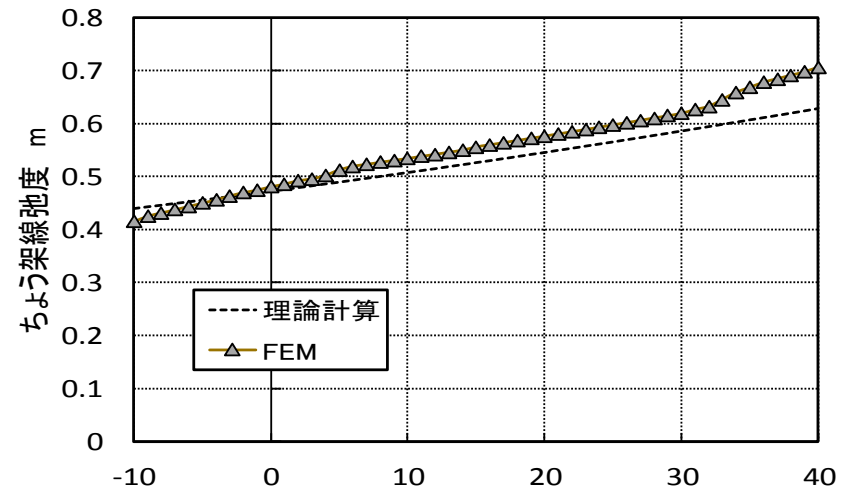
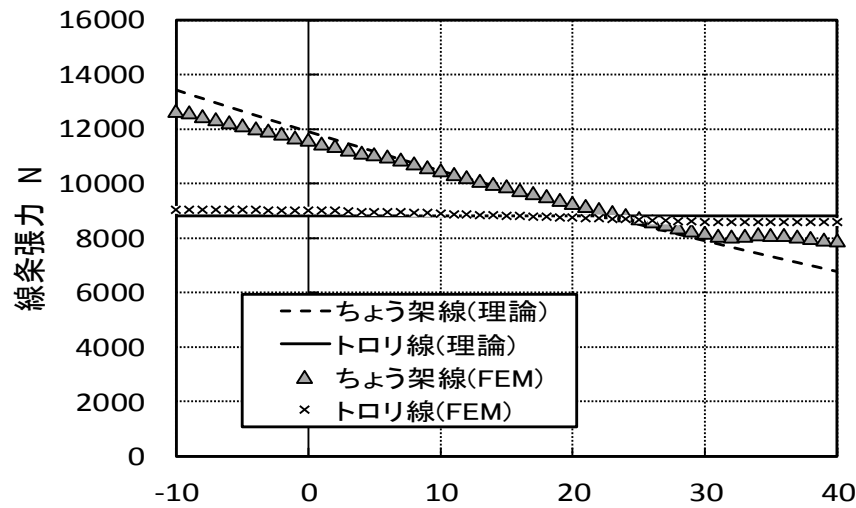
解析例（収束の様子）



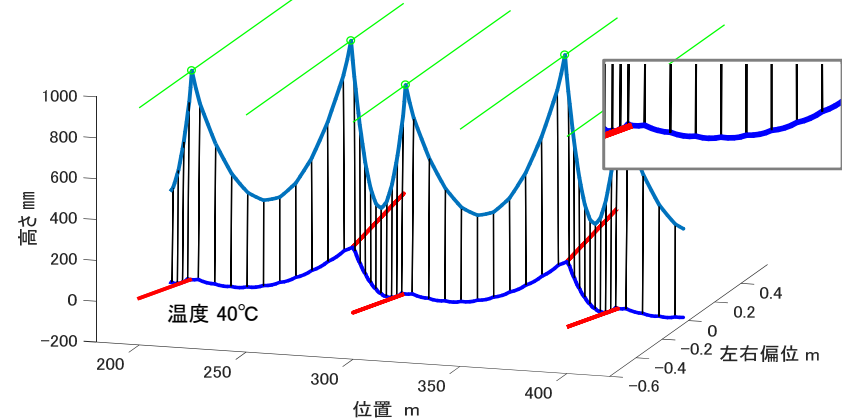
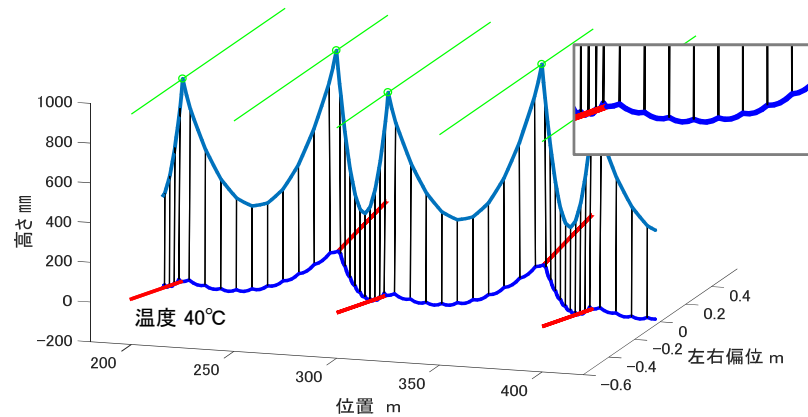
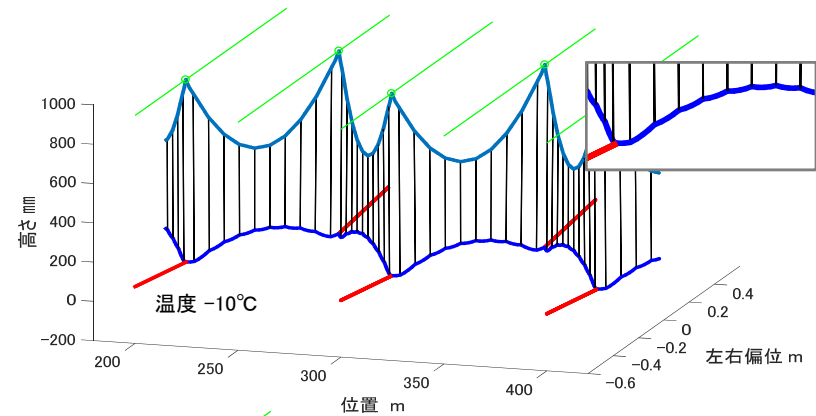
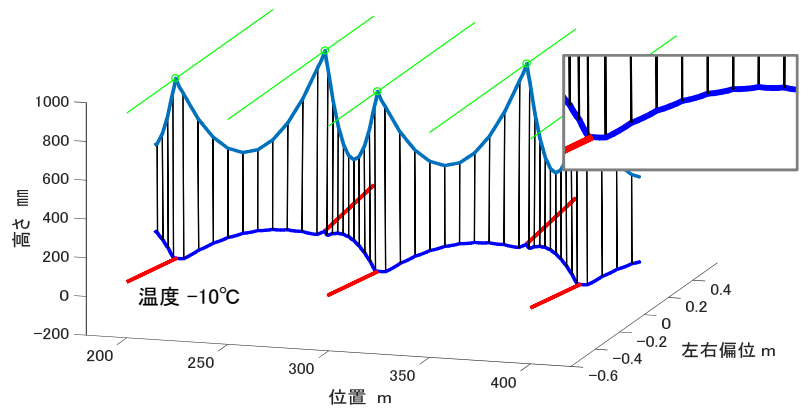
- ・張力水平方向成分は境界条件(標準張力)とほぼ等しい
- ・ちょう架線の張力鉛直方向成分は、スパン長の1/2のトロリ線とちょう架線の自重(330N)とほぼ等しい



(a) トロリ線, ちょう架線とも張力調整装置がない場合



(b) トロリ線にのみ張力調整装置がある場合



(a) トロリ線, ちょう架線とも張力調整装置がある場合

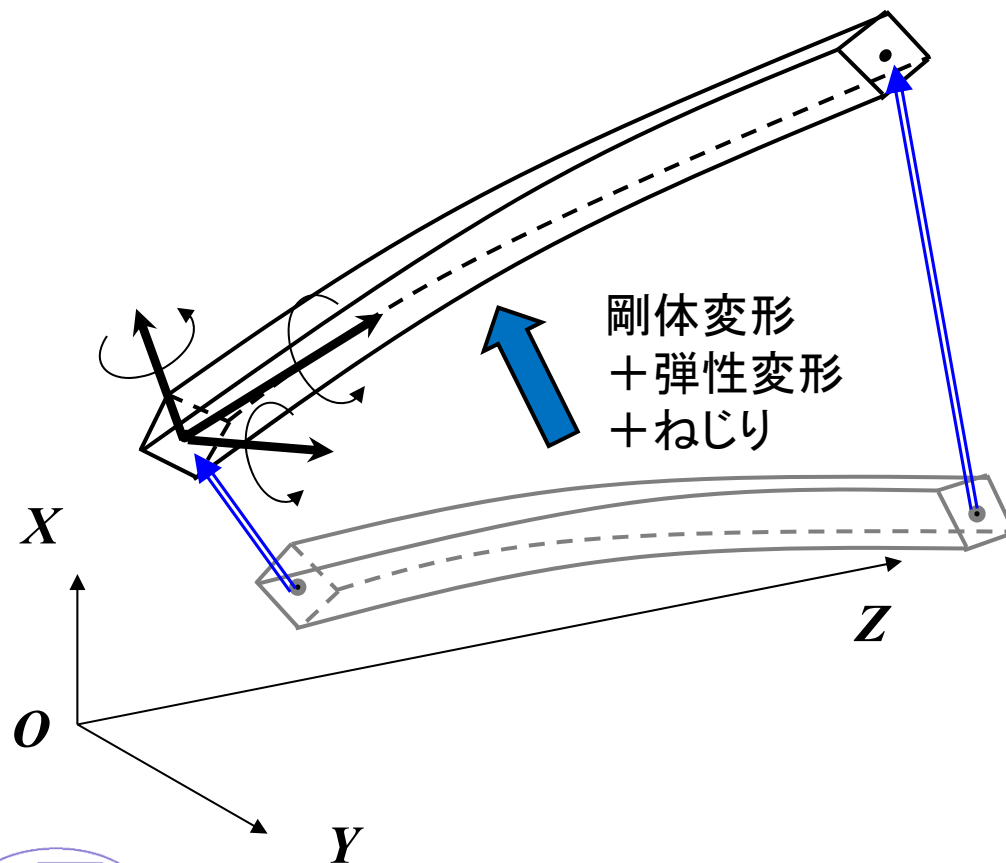
(b) トロリ線にのみ張力調整装置がある場合

3次元架線モデル

③架線モデルの静構造計算

架線要素：3次元はり

自由度：6自由度(変位×3、たわみ角×2、ねじり角)

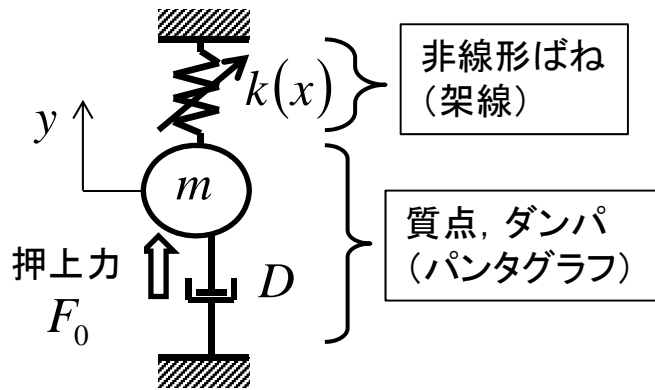


完全な3次元要素
としてモデル化

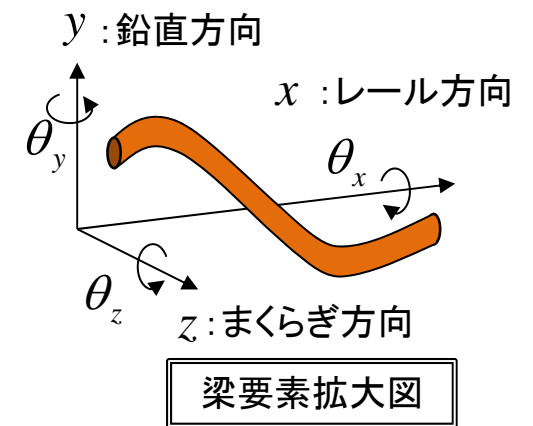
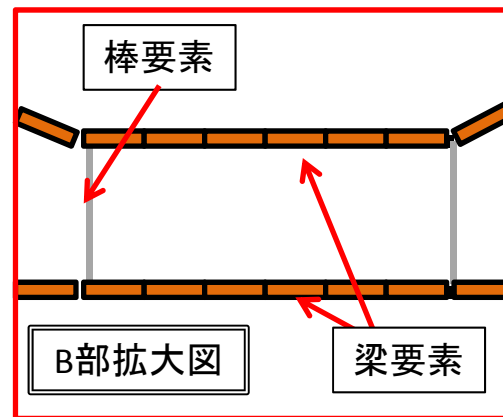
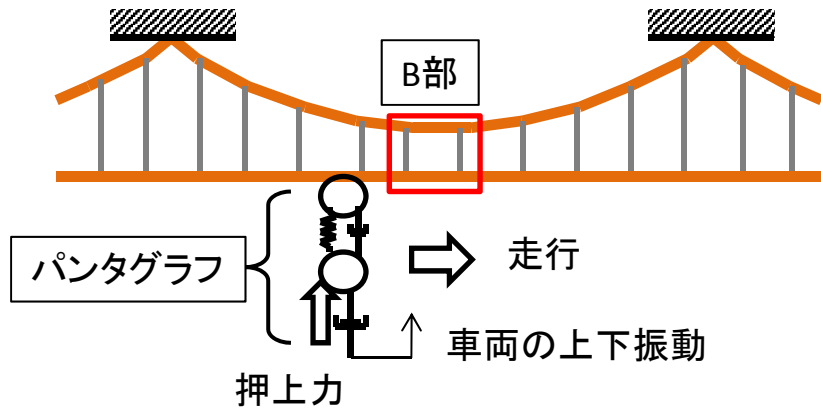
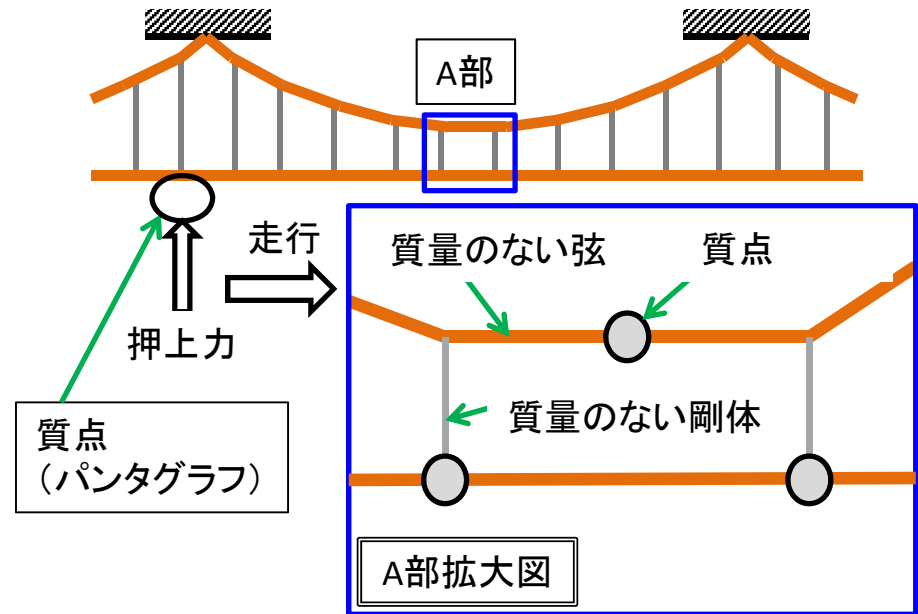


・曲線区間への対応
・温度変化に伴う架線
構造の変化を再現

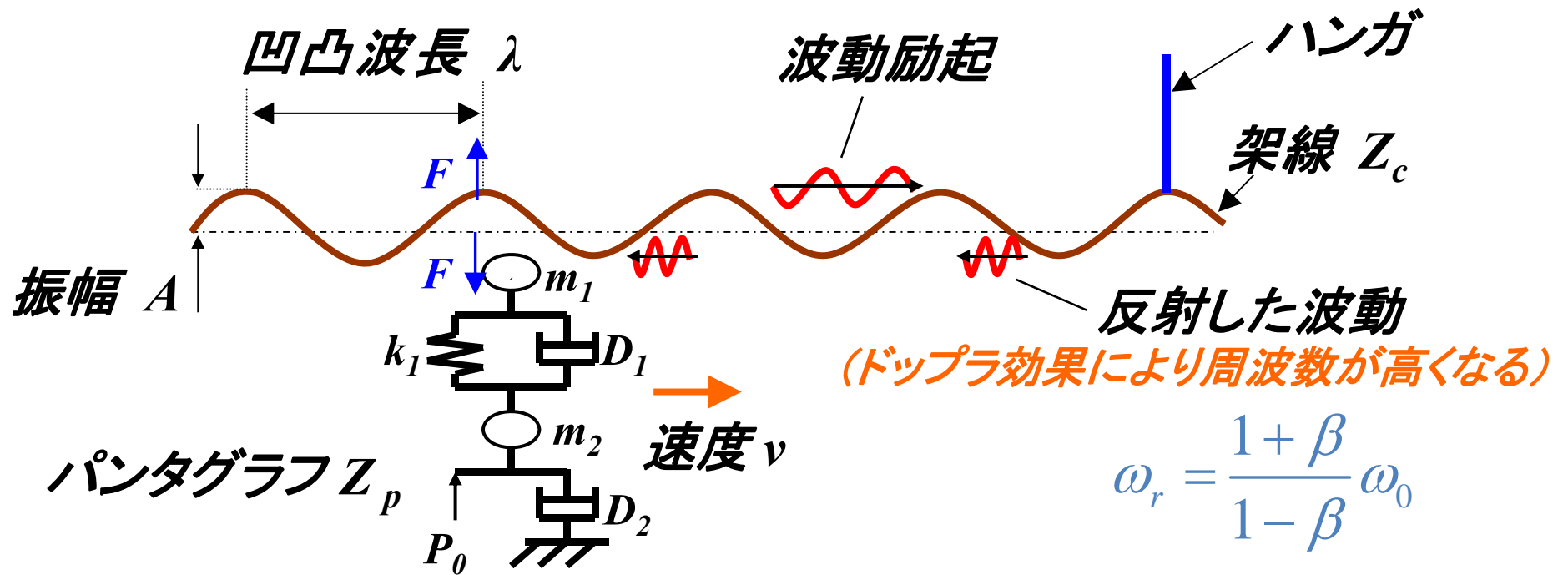
架線・パンタグラフシミュレータのモデル



$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + D \frac{dy}{dt} + k(x)y = F_0$$



架線波動による接触力変動（波動の反射の影響）



$$\omega_r = \frac{1 + \beta}{1 - \beta} \omega_0$$

反射係数

$$|F(\omega_r)| = \left[(1 + \beta) |Z(\omega_r)| \right] \gamma_R \left[\frac{1}{1 - \beta} \frac{1}{Z_c} |Z(\omega_0)| \omega_0 A \right]$$

反射波動による接触力変動

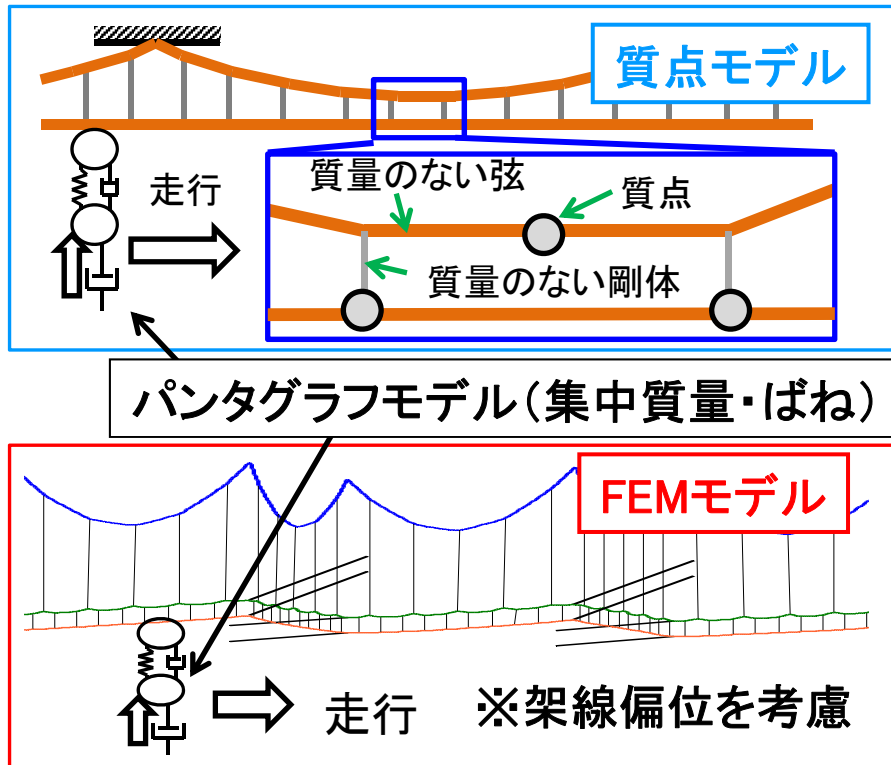
パンタグラフが励起する波動

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～)



【既開発のシミュレータ】

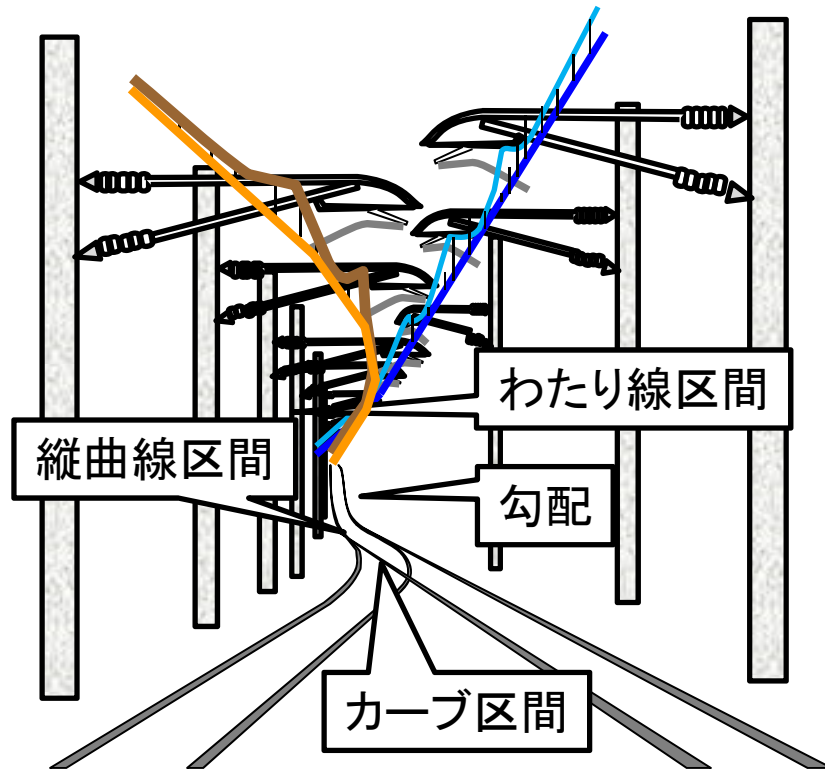
- ・直線区間のみを対象
 - ・パンタグラフ舟体を質点で表し、上下方向のみに運動
 - ・線條の運動
- 質点モデル: 上下のみ
FEMモデル: 上下・まくらぎ方向
※いずれも伸びやレール方向の変位の変化は考慮しない

既開発の架線・パンタグラフシミュレータ

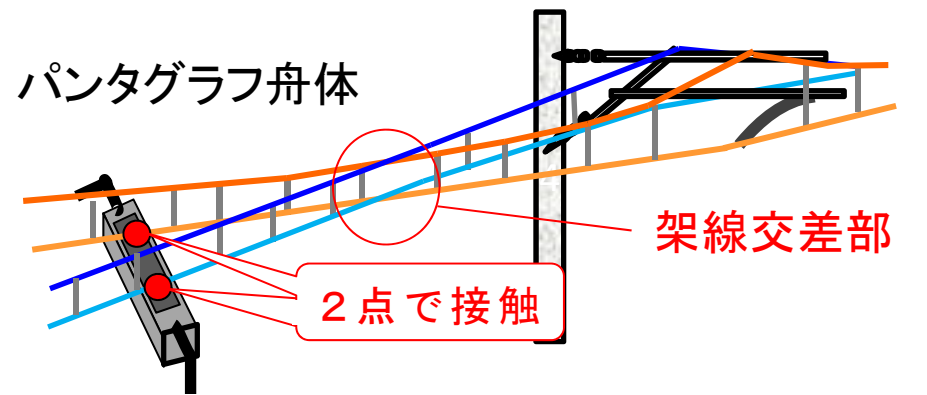
■ 研究背景・目的

- ・高速化における詳細な検討
- ・3次元配置に起因する事故原因の究明

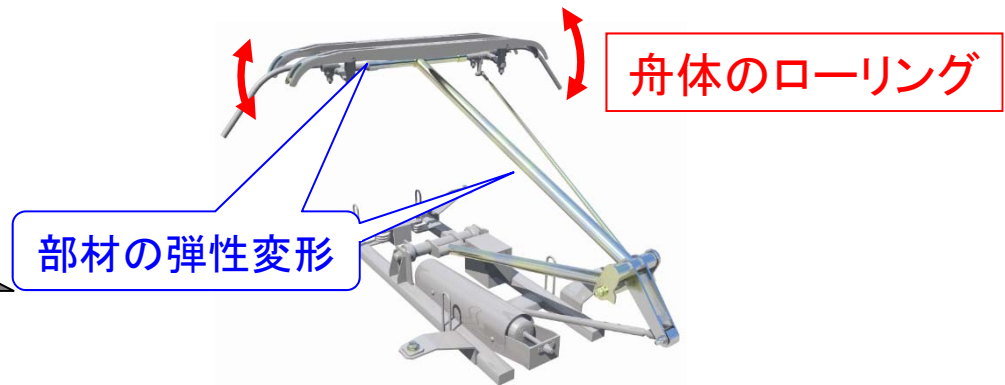
→架線とパンタグラフの3次元化



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

3次元架線モデル

③架線モデルの静構造計算

③-2 架線固定点・ハンガ長さの情報に基づき3次元位置を決定

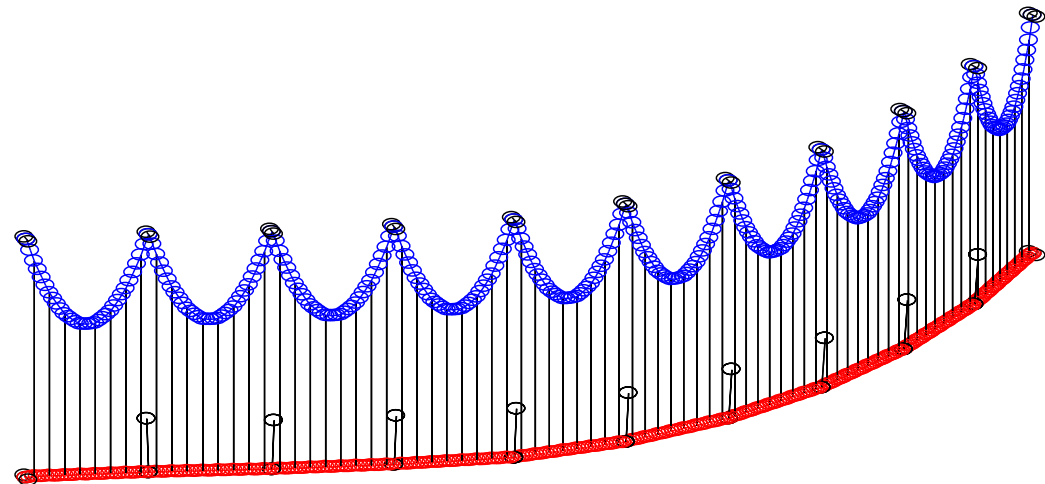
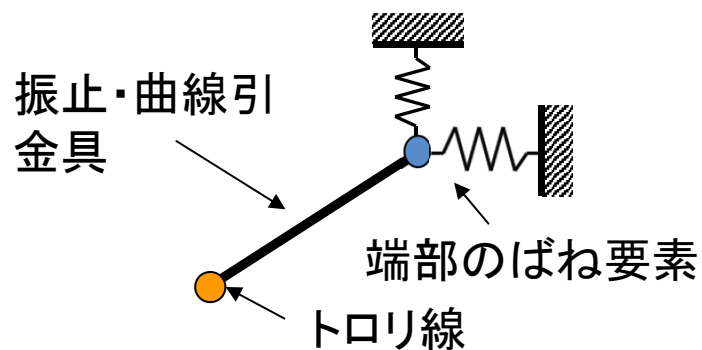
力のつり合い式： $\text{線形復元力} + \text{非線形復元力} - \text{外力} = 0$

端部のばね要素など

張力、重力など

大変形に伴う幾何学的非線形性

収束計算

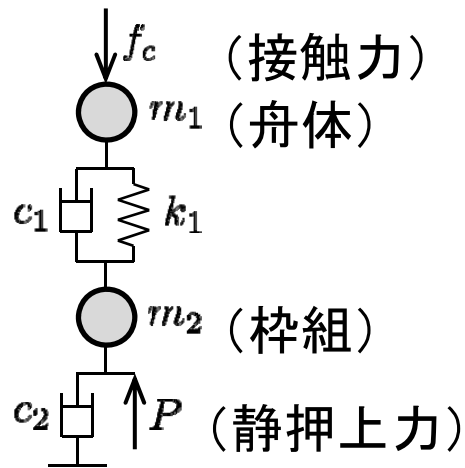


3次元パンタグラフモデル

3次元パンタグラフモデルの概要

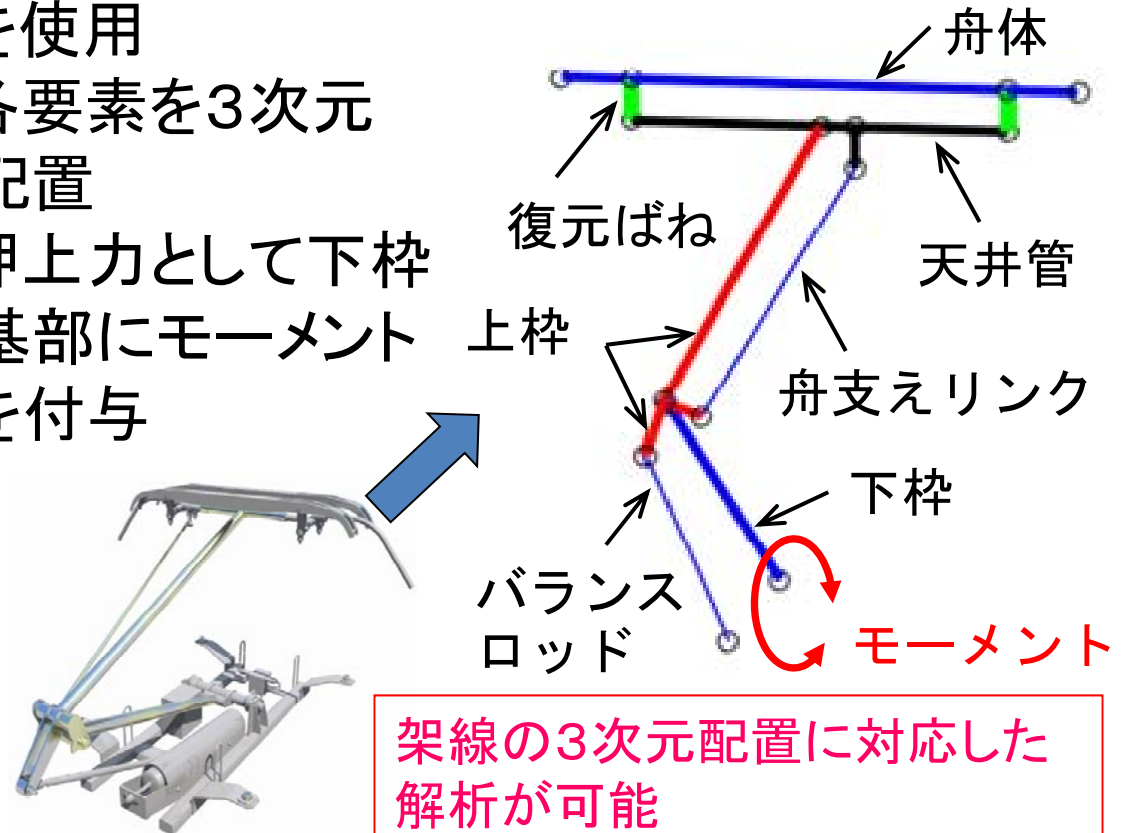
【従来モデル】

- ・主要な部材を質点としてモデル化
- ・弾性要素はばねのみ



【新しいモデル】

- ・3次元柔軟マルチボディダイナミクス (MBD)によるモデル
- ・伸縮・曲げ・ねじりを計算可能なはり要素を使用
- ・各要素を3次元配置
- ・押上力として下枠基部にモーメントを付与

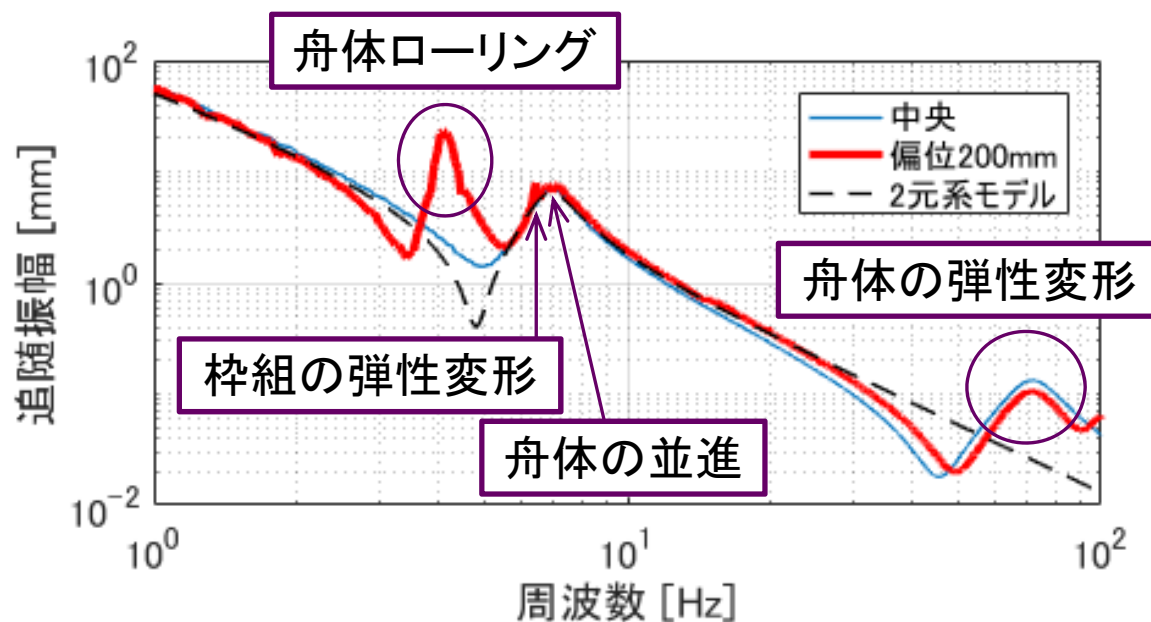


計算例(追従振幅特性)

追従振幅

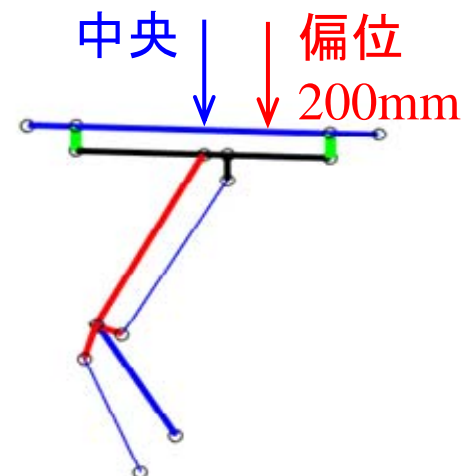
周波数ごとのパンタグラフの追従限界振幅

追従振幅が高い
= 離線が起こりにくい

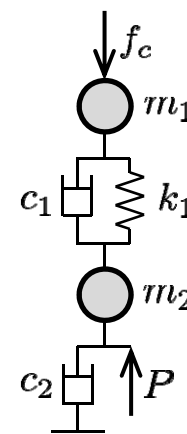


100Hz程度までの特性を再現可能
→ 高速走行時の離線の把握

3次元モデル



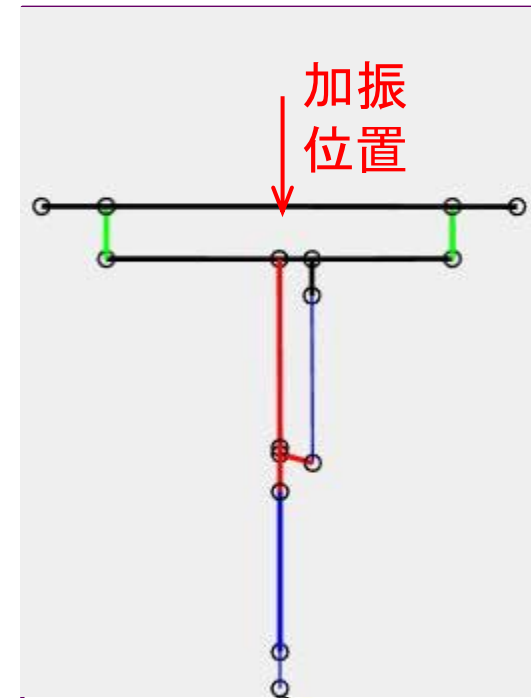
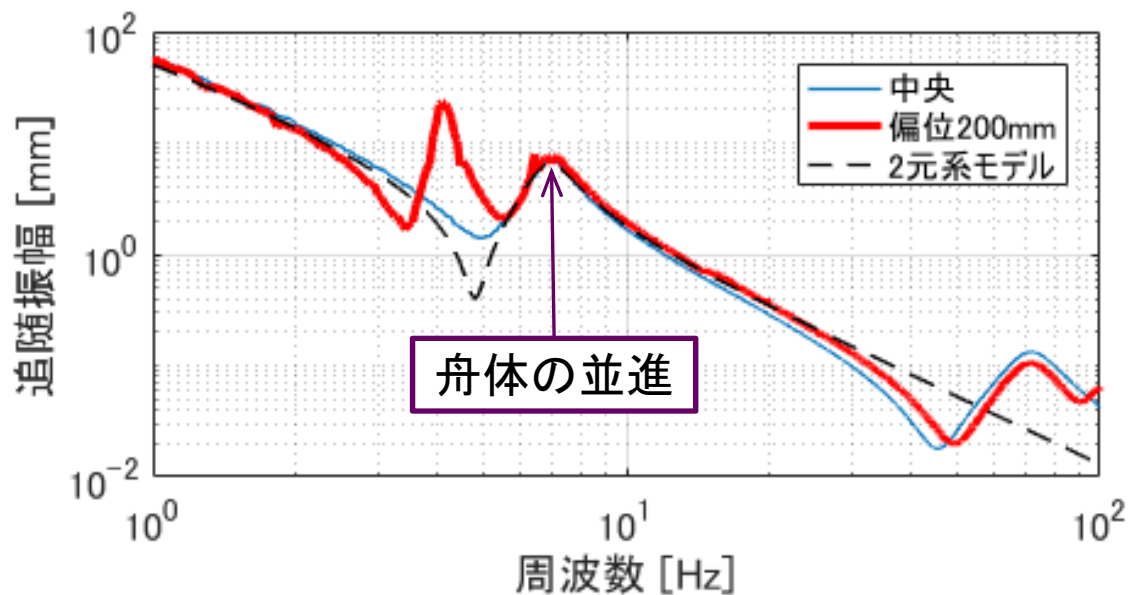
ばね・質点モデル



■ パンタグラフモデルの計算例(追従振幅特性)

舟体の並進

周波数 : 約6.90 Hz

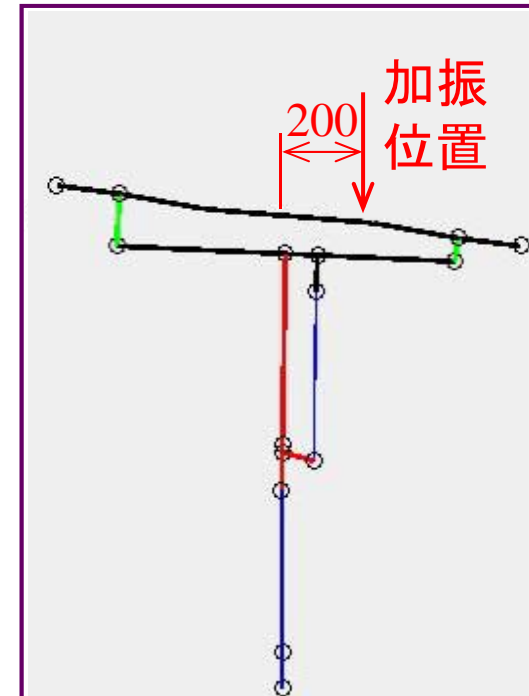
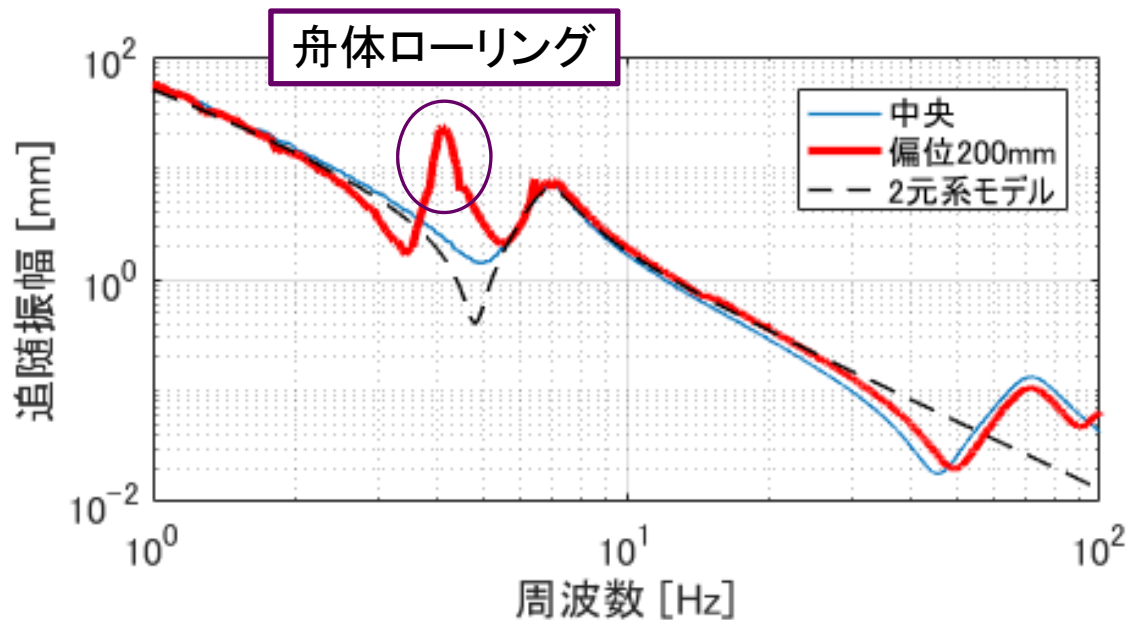


- ※変位拡大表示
- ※1/10スロー再生
- ※パンタグラフを正面から見た図

■ パンタグラフモデルの計算例(追従振幅特性)

舟体のローリング

周波数：約4.15 Hz

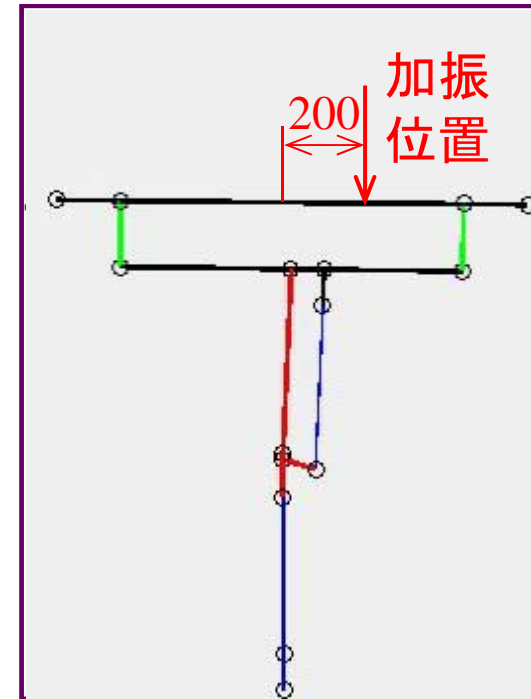
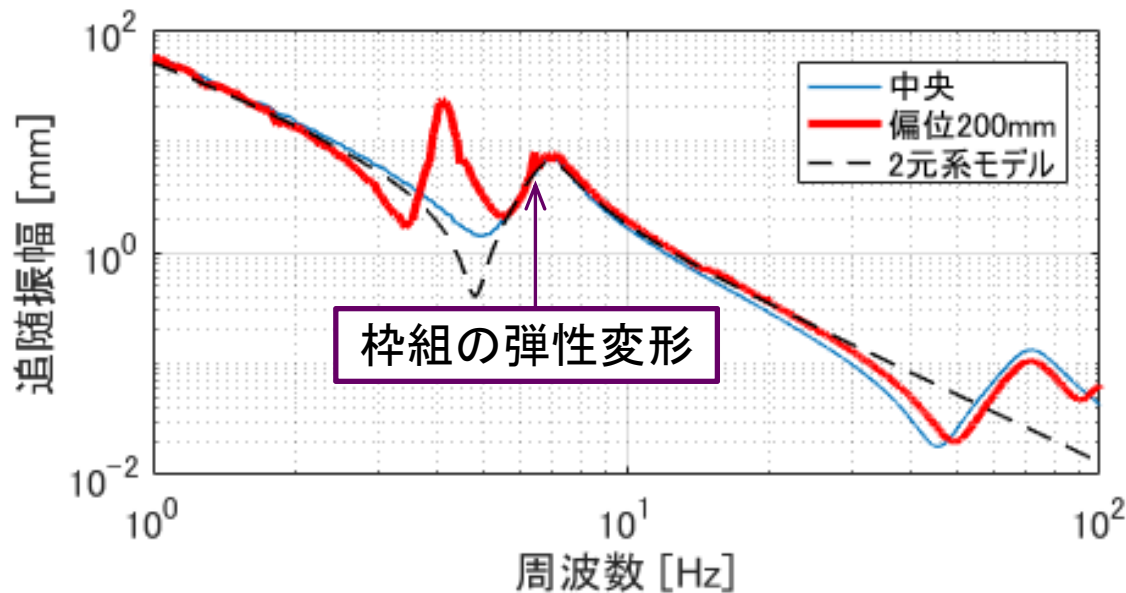


- ※変位拡大表示
- ※1/10スロー再生
- ※パンタグラフを正面から見た図

■ パンタグラフモデルの計算例(追従振幅特性)

枠組の弾性変形

周波数 : 約6.45 Hz

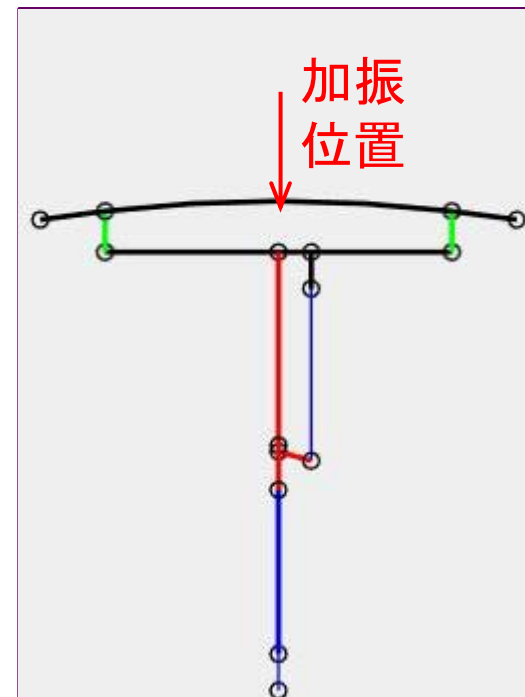
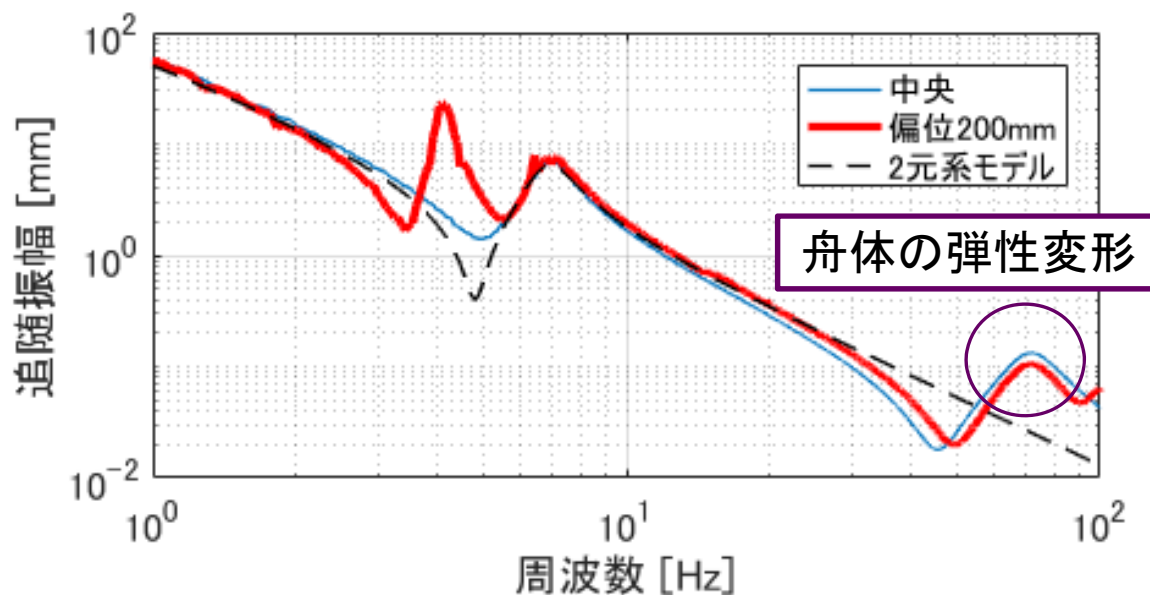


- ※変位拡大表示
- ※1/10スロー再生
- ※パンタグラフを正面から見た図

■ パンタグラフモデルの計算例(追従振幅特性)

舟体の弾性変形

周波数 : 約73.0 Hz



- ※変位拡大表示
- ※1/100スロー再生
- ※パンタグラフを正面から見た図

従来のモデルよりもパンタグラフの特性を正確に再現可能

3次元架線モデル

新旧シミュレータの比較

架線モデル	質点モデル	FEMモデル (既開発モデル)	FEMモデル (改良したモデル)
直線区間	○	○	○
架線偏位	×	○	○
曲線区間	△ 曲線引金具によるトロリ線の 引上げの影響を考慮すること は可能		○
温度変化	×	×	○

参考文献

- 1) [小山達弥、長尾恭平、池田充:任意の線形に対応した架線およびパンタグラフモデルの開発、鉄道総研報告、Vol.32, No.6, 2018.6](#)
- 2) 小山達弥、池田充:任意軌道に対する電車線モデルの作成手法(その1)、日本機械学会2017年度年次大会講演論文集、2017.9
- 3) 池田充、小山達弥:任意軌道に対する電車線モデルの作成手法(その2)、日本機械学会2017年度年次大会講演論文集、2017.9
- 4) 池田充、常本瑞樹:FEMによる温度変化に伴う架空電車線の静構造変化解析、J-RAIL2017講演論文集、2017.12
- 5) 長尾恭平、小山達弥、池田充、臼田隆之:マルチボディダイナミクスを用いた3次元パンタグラフモデル、J-RAIL2017講演論文集、2017.12