

カルマンフィルタによる 架線・パンタグラフ間の接触力推定手法

鉄道力学研究部 集電力学研究室

主任研究員 小林 樹幸

本日の発表

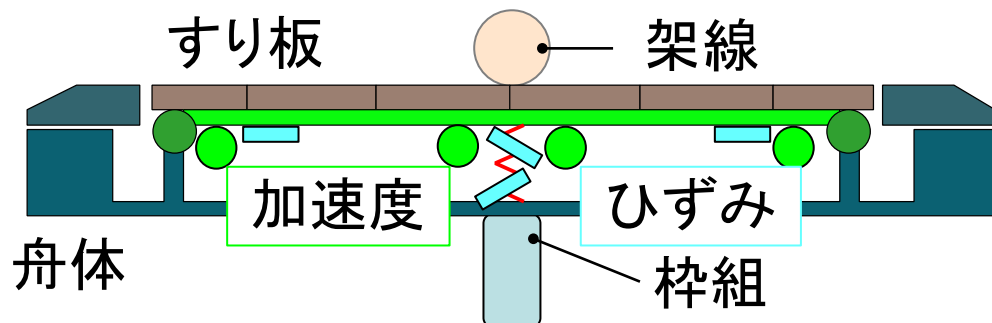
- ◆ 背景・目的
- ◆ カルマンフィルタによる接触力推定手法
- ◆ シミュレーションに基づく検証
- ◆ 加振試験に基づく検証
- ◆ まとめと成果の活用

背景・目的

架線・パンタグラフ系の省メンテナンス化に接触力を活用

- ・接触力に基づくトロリ線静高さ推定
- ・シミュレーションと試験を融合したHILSによるデジタルツイン

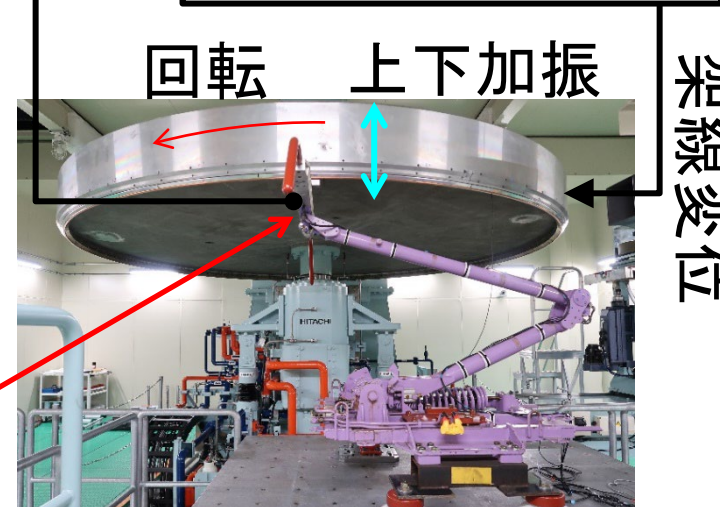
従来の接触力測定手法



接触力測定用センサ設置例(新幹線用パンタグラフ)

センサ設置のための十分な空間確保が困難

接触力 → 架線運動の実時間シミュレーション

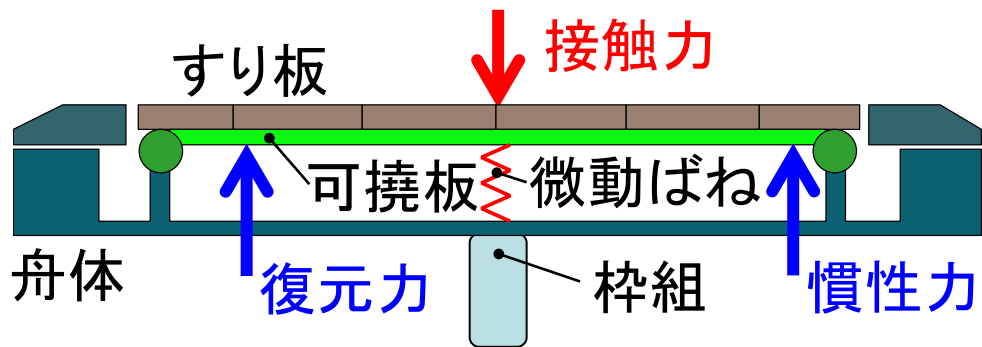


架線・パンタグラフ系のHILSシステム

目的:カルマンフィルタ手法を架線・パンタグラフ系へ適用し接触力推定の妥当性を検討

- ・シミュレーションと加振試験から推定精度を検証

従来の接触力推定手法(つり合い法)

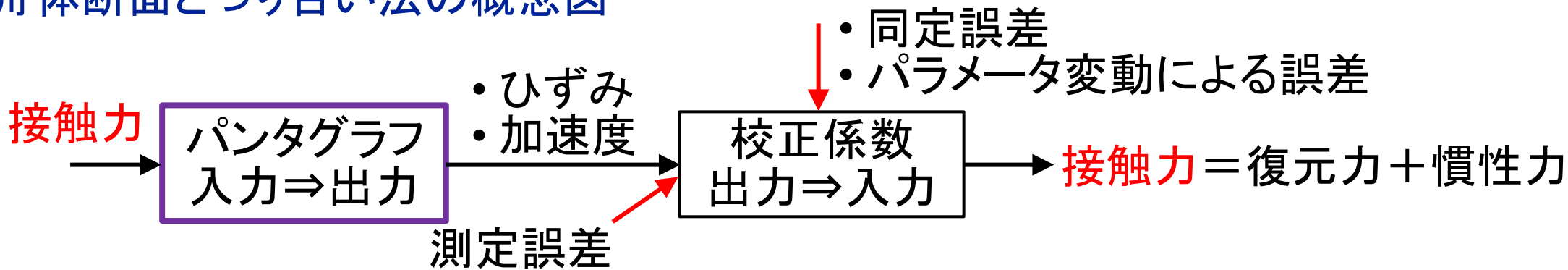


舟体断面とつり合い法の概念図

復元力 = ひずみ × 校正係数
 慣性力 = 加速度 × 校正係数

測定誤差

同定誤差やパラメータ変動による誤差

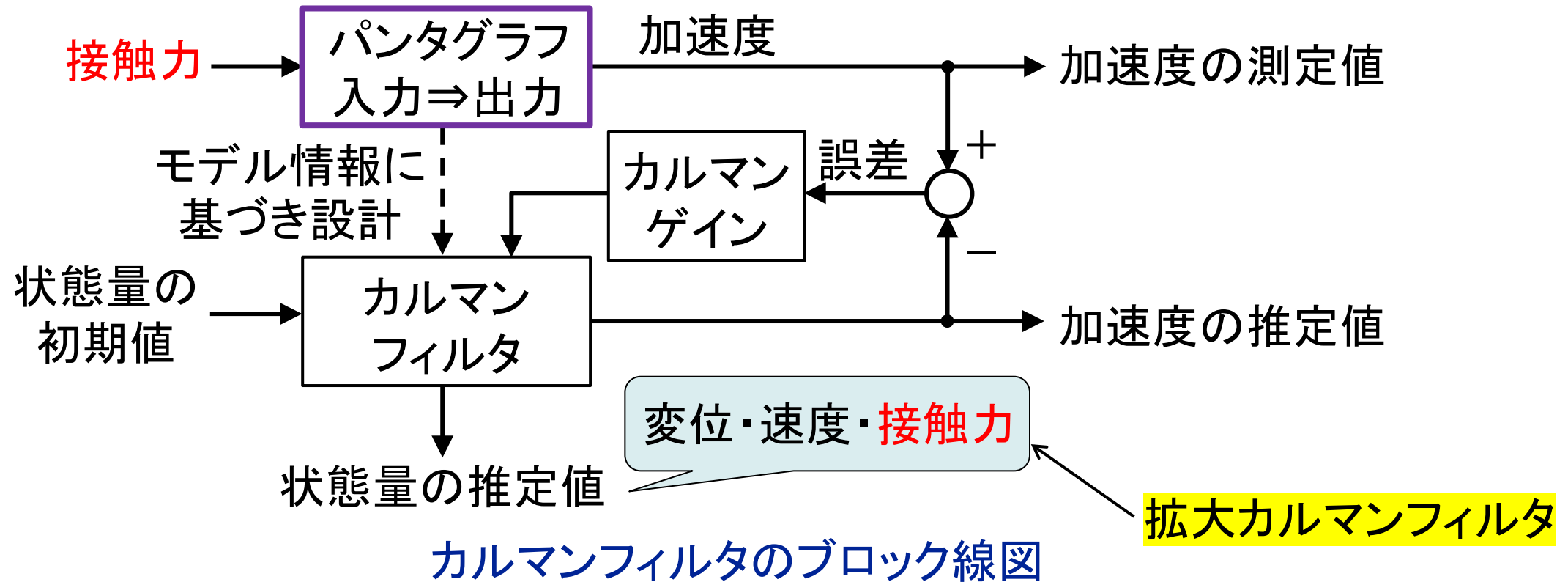


つり合い法のブロック線図

- メリット : 接触力推定の計算が容易 = オンライン推定可能
- デメリット : ・接触力推定における加速度・歪の計測誤差の影響
 ・舟体の取り外し前後で校正係数が変化

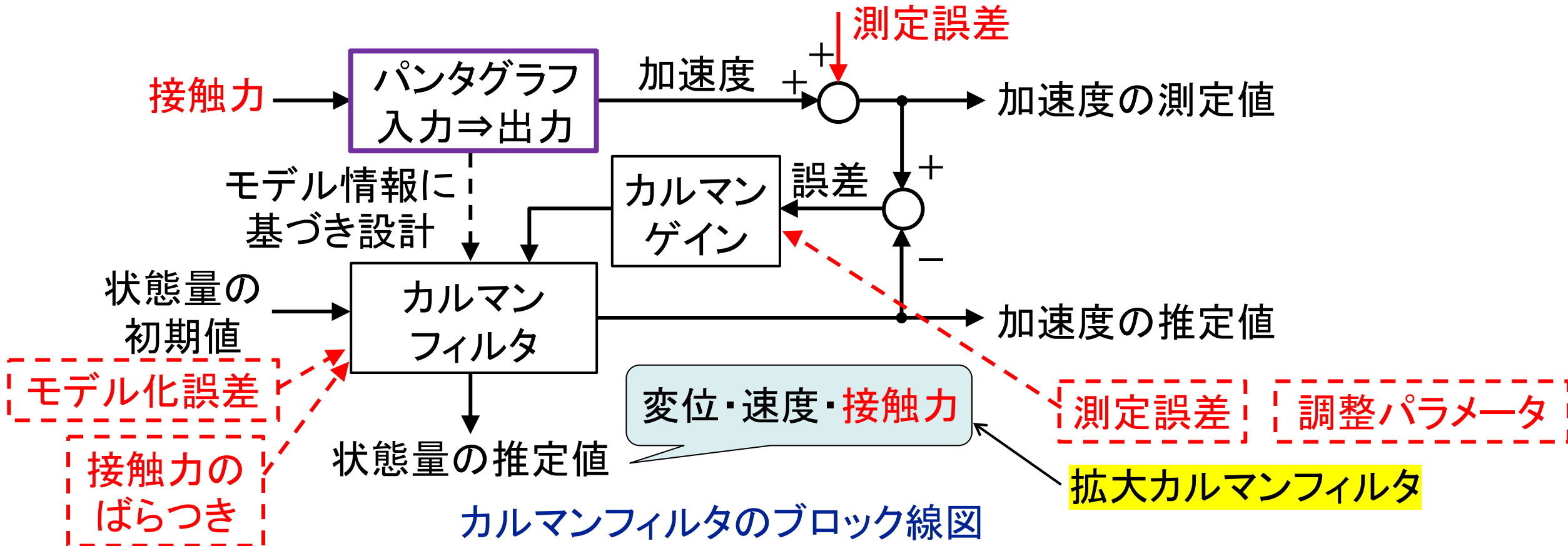
カルマンフィルタによる接触力推定手法

カルマンフィルタ: モデル情報と測定値(加速度など)に基づいて状態量(変位など)を推定



カルマンフィルタによる接触力推定手法

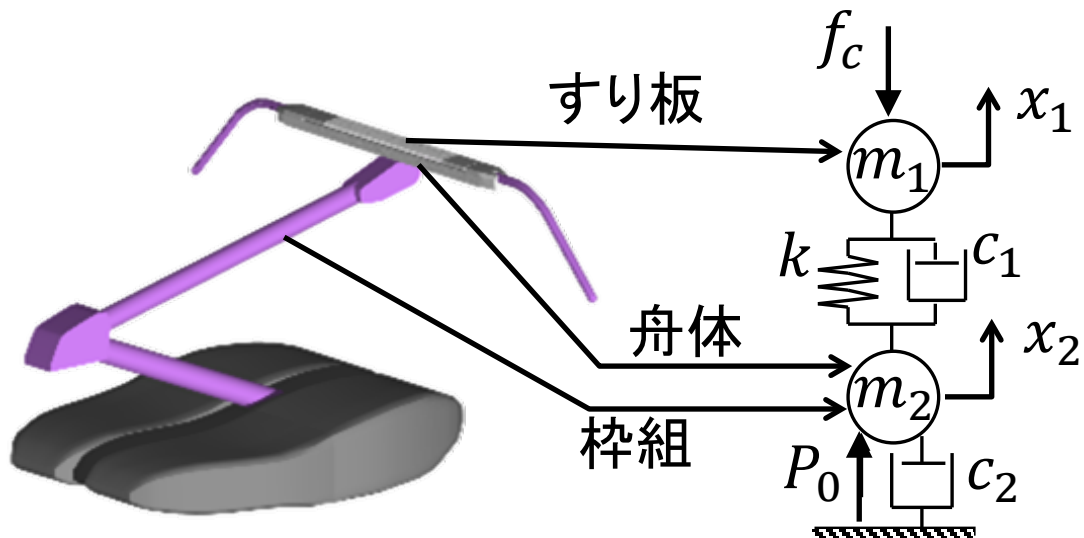
カルマンフィルタ: モデル情報と測定値(加速度など)に基づいて状態量(変位など)を推定



測定誤差・モデル化誤差を最小化するように接触力を推定

パラメータ感度の影響分析(シミュレーション方法)

2元系モデルを使用して、各種パラメータに対する感度を調査



パラメータ	値
m_1	3 kg
m_2	15 kg
k	105 kN/m
c_1	10 Ns/m
c_2	50 Ns/m
P_0	54 N

シミュレーション条件

すり板を2Hzの正弦波で強制変位加振

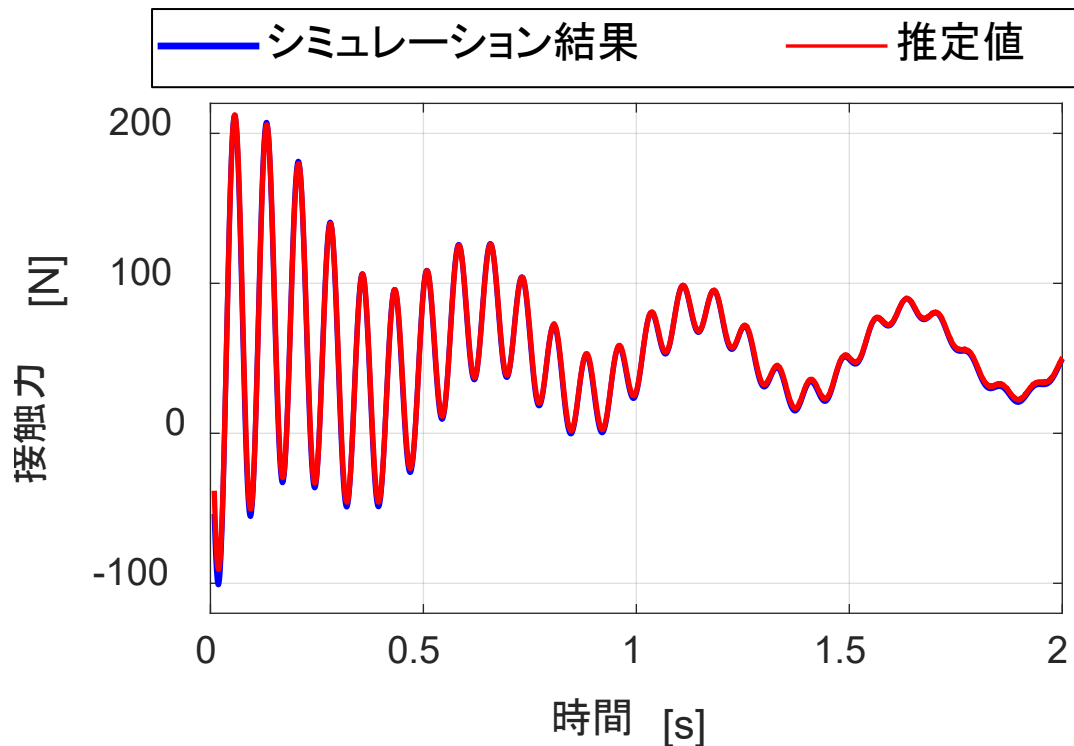
各質点の加速度から接触力を推定

(検討1) モデル化誤差による推定精度の影響

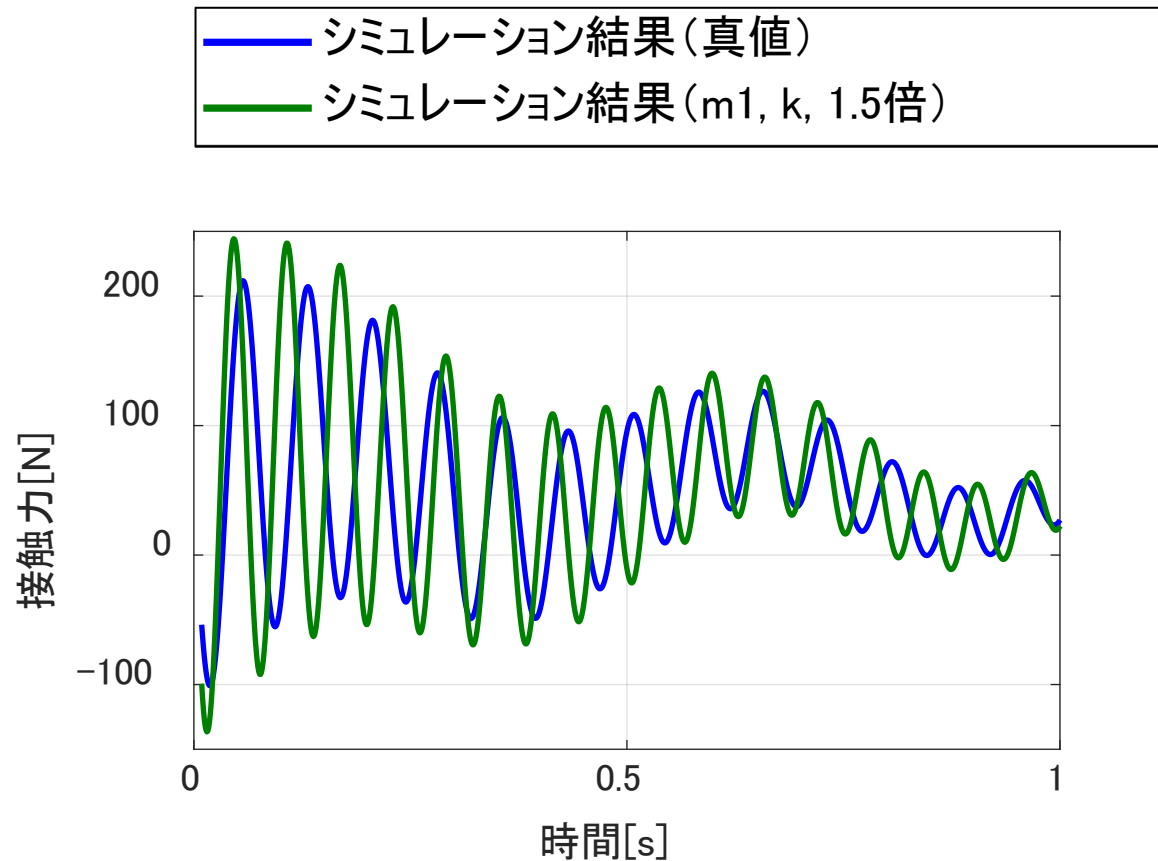
(検討2) 調整パラメータ(接触力のばらつき)による推定精度の影響

パラメータ感度の影響分析(検討1の結果)

(検討1)モデル化誤差の影響



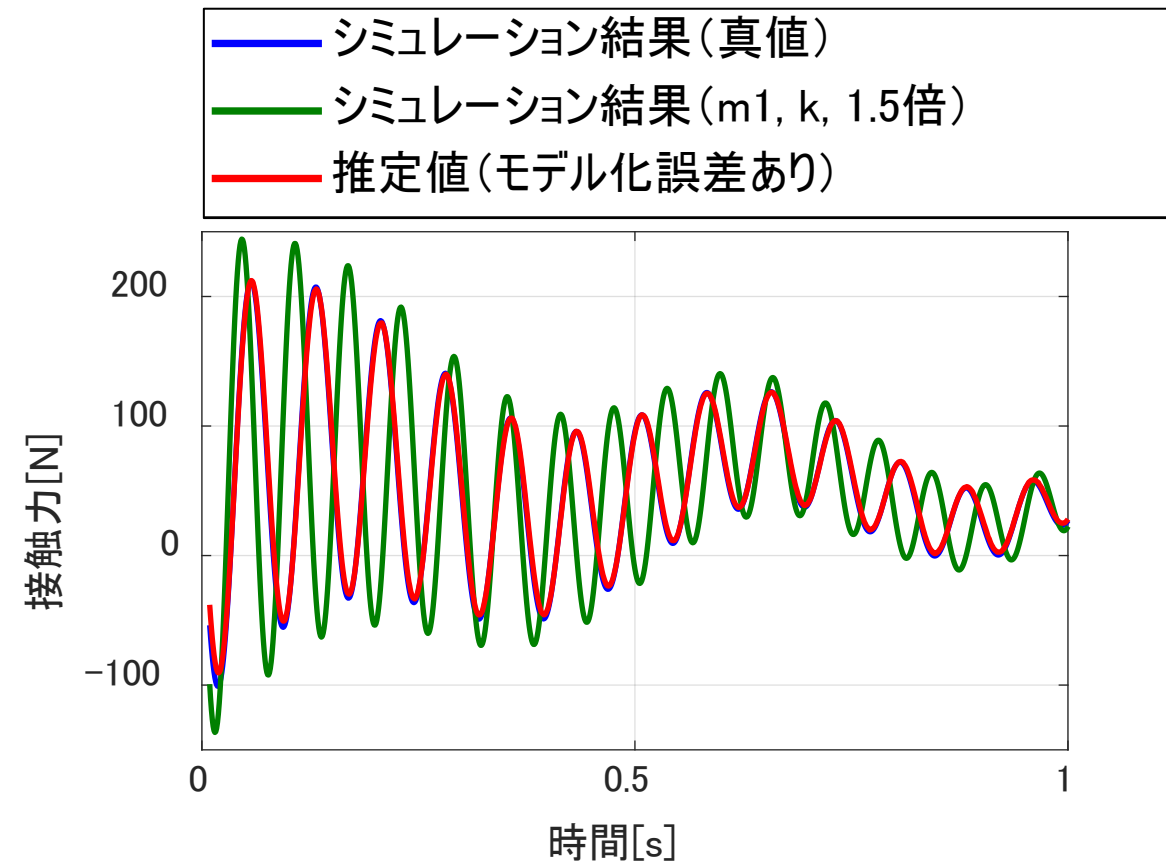
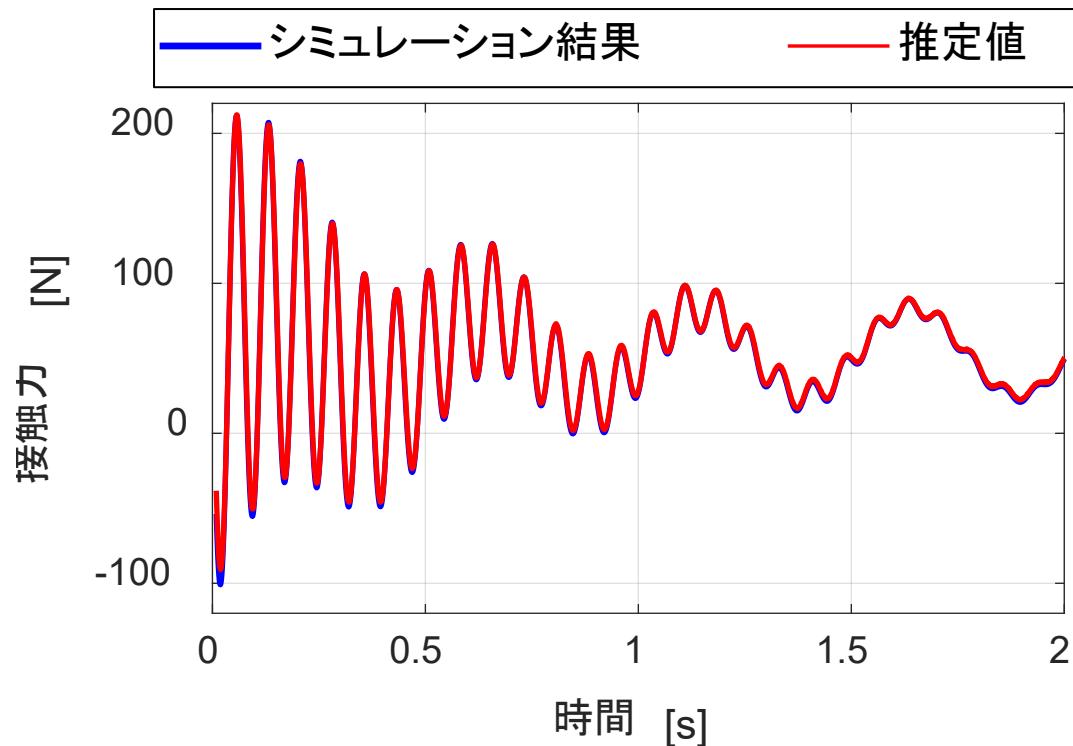
加速度測定・接触力推定で同一モデルを使用



推定時にモデル化誤差を有する場合

パラメータ感度の影響分析(検討1の結果)

(検討1)モデル化誤差の影響



加速度測定・接触力推定で同一モデルを使用

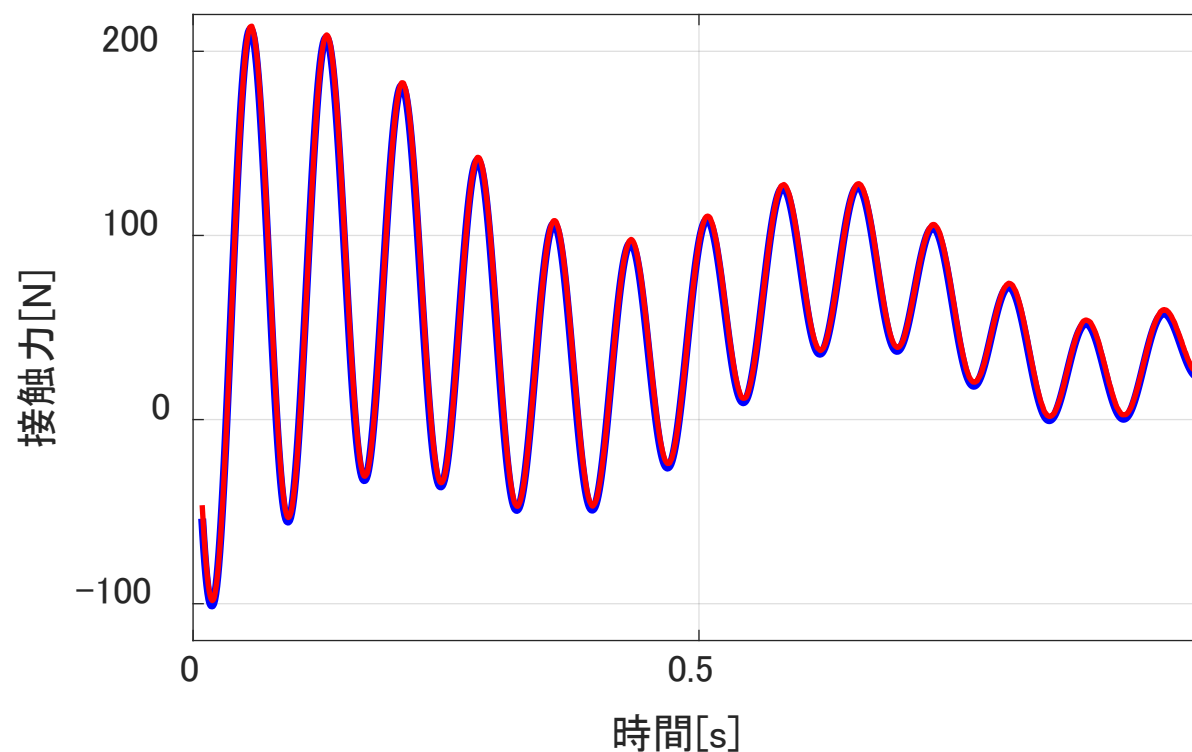
推定時にモデル化誤差を有する場合

モデル化誤差(パラメータ変動)がある場合でも高精度に推定

パラメータ感度の影響分析(検討2の結果)

(検討2) 調整パラメータ(接触力のばらつき)による推定精度の影響

— シミュレーション結果 — 推定値 ($\sigma^2 = 10^{-7}$)

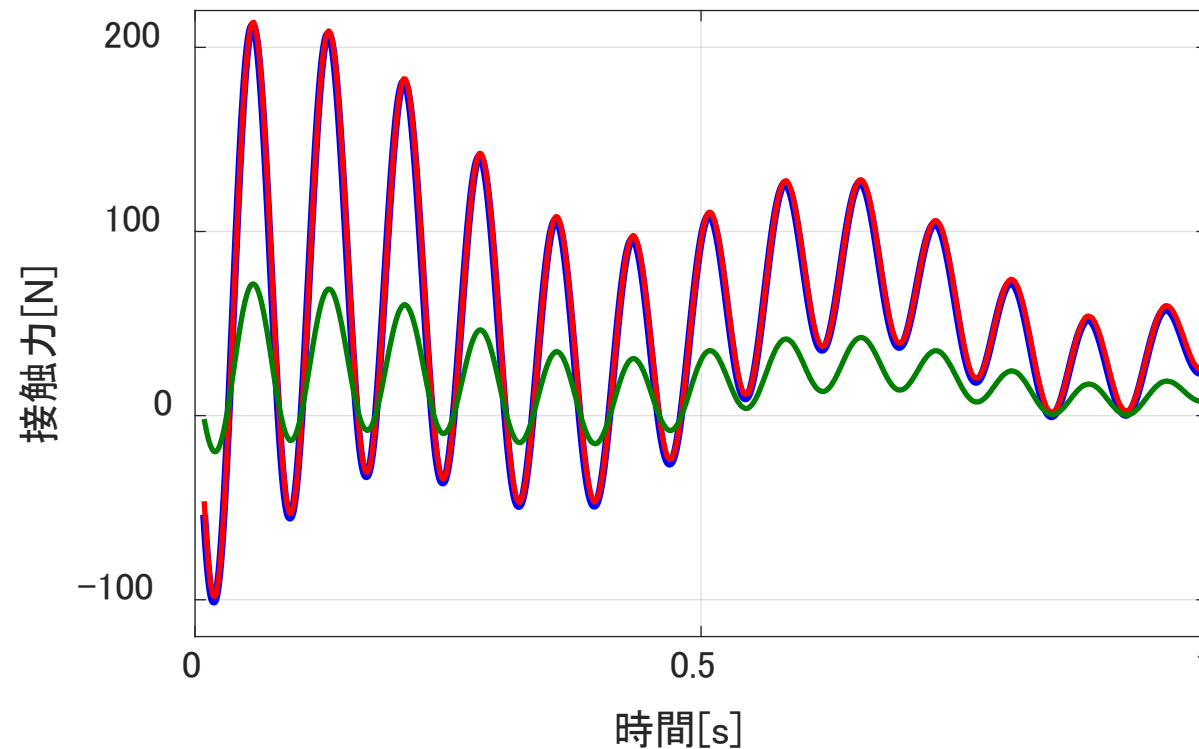


接触力のばらつき σ^2 による推定結果の変化

パラメータ感度の影響分析(検討2の結果)

(検討2) 調整パラメータ(接触力のばらつき)による推定精度の影響

— シミュレーション結果 — 推定値($\sigma^2=10^7$) — 推定値($\sigma^2=10^4$)

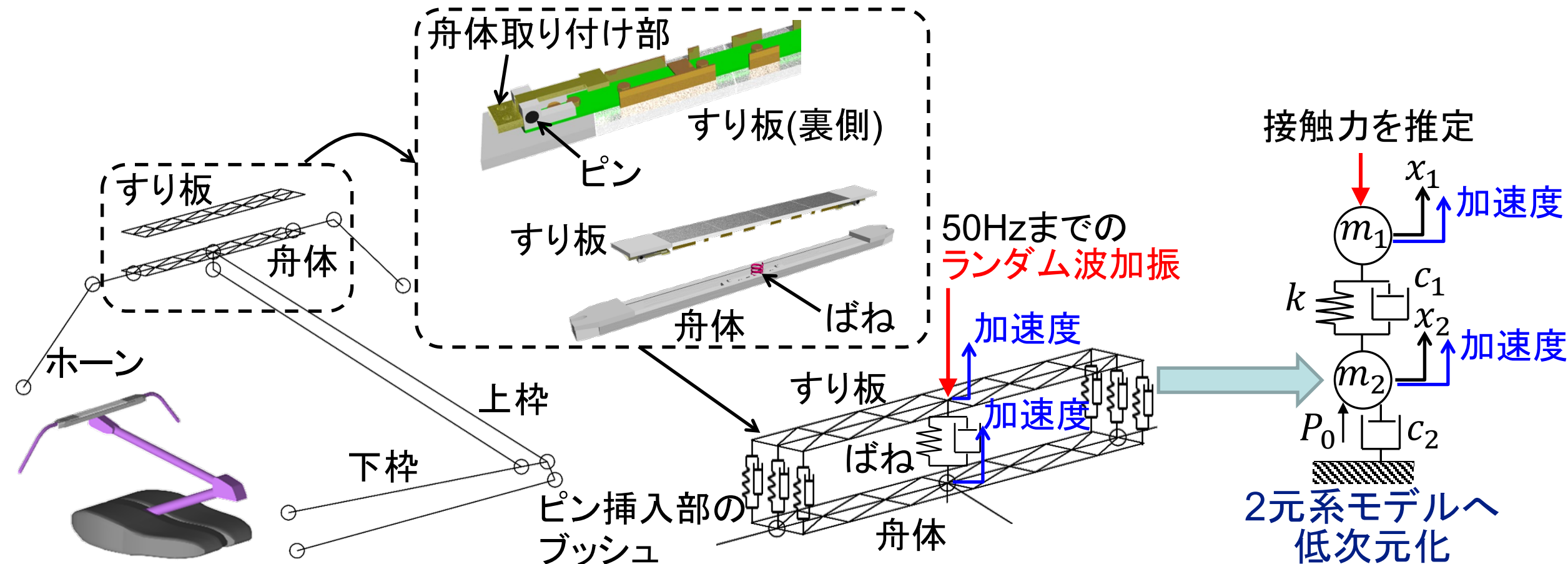


接触力のばらつき σ^2
などの調整パラメータ
の適切な設定が重要
⇒最適化手法の検討

接触力のばらつき σ^2 による推定結果の変化

モデル化誤差の影響分析(シミュレーション方法)

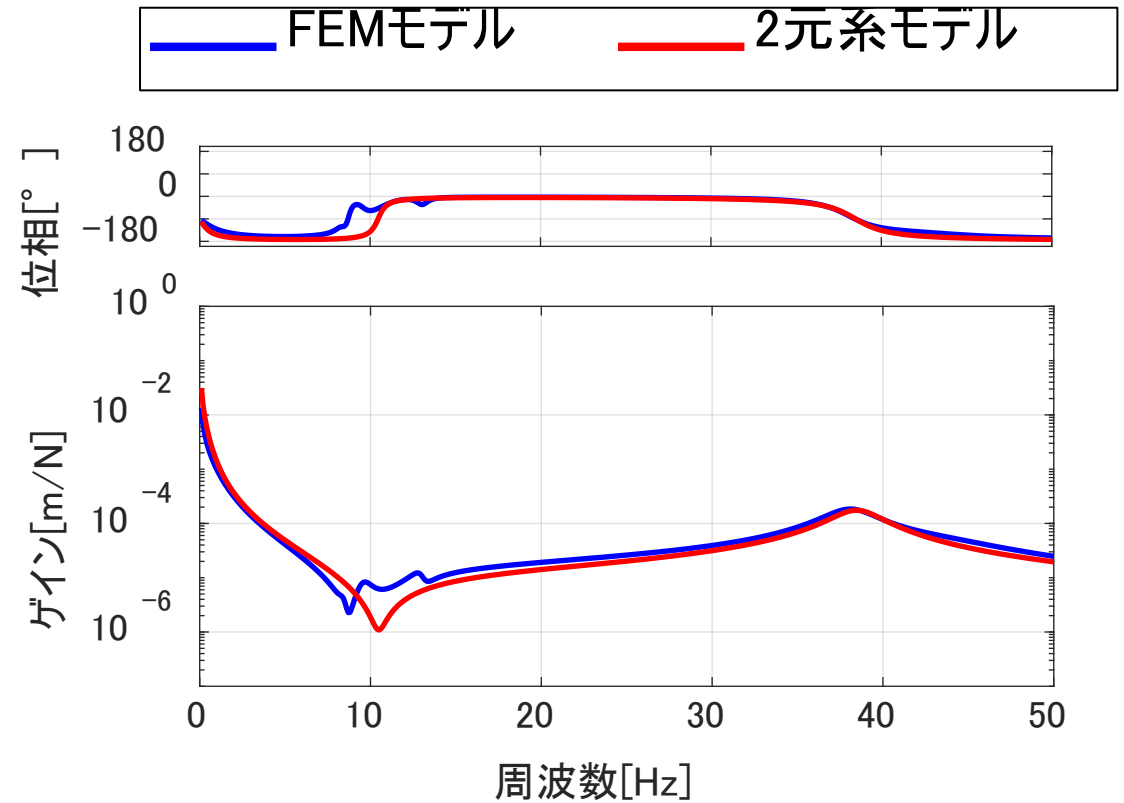
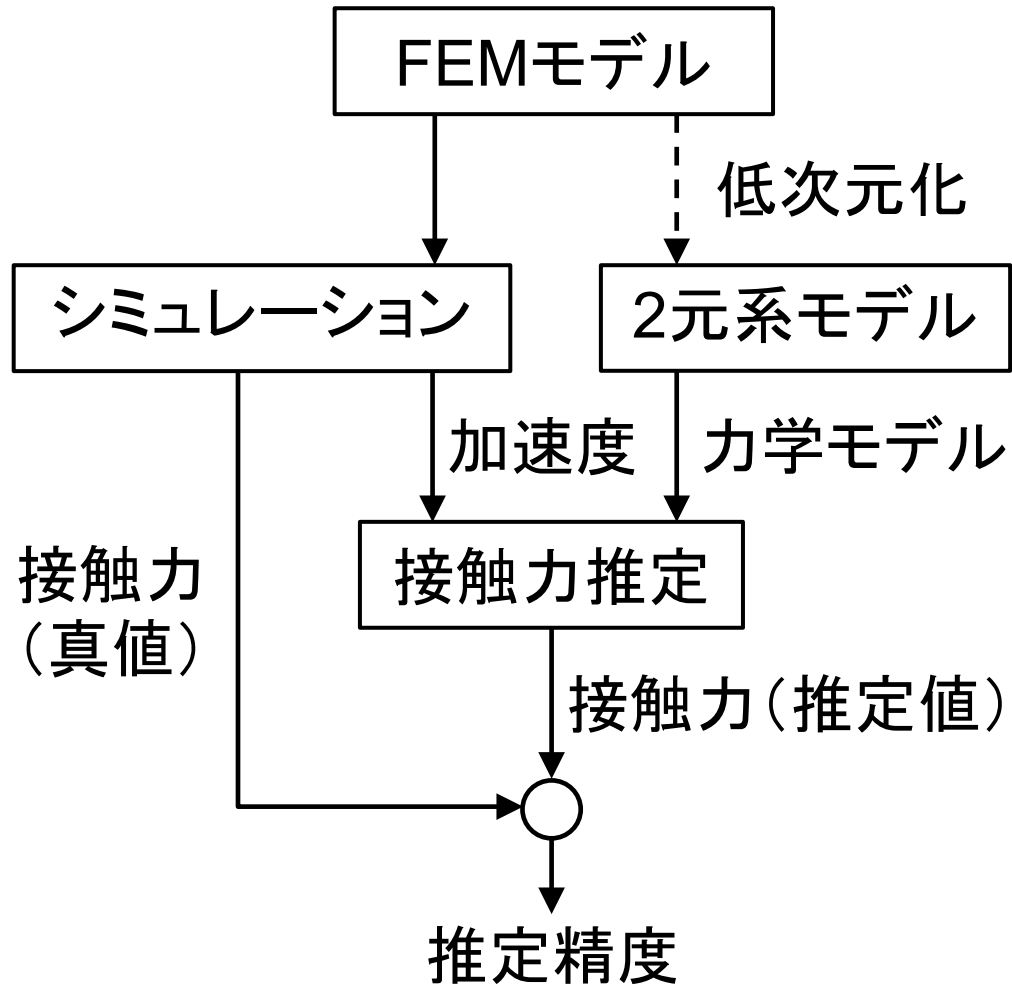
FEMモデルと2元系モデルを使用して、モデル化誤差が推定精度に与える影響を調査



加速度の計算に用いるFEMモデル

モデルの自由度が大きく異なるようなモデル化誤差を仮定

モデル化誤差の影響分析(モデルの比較)



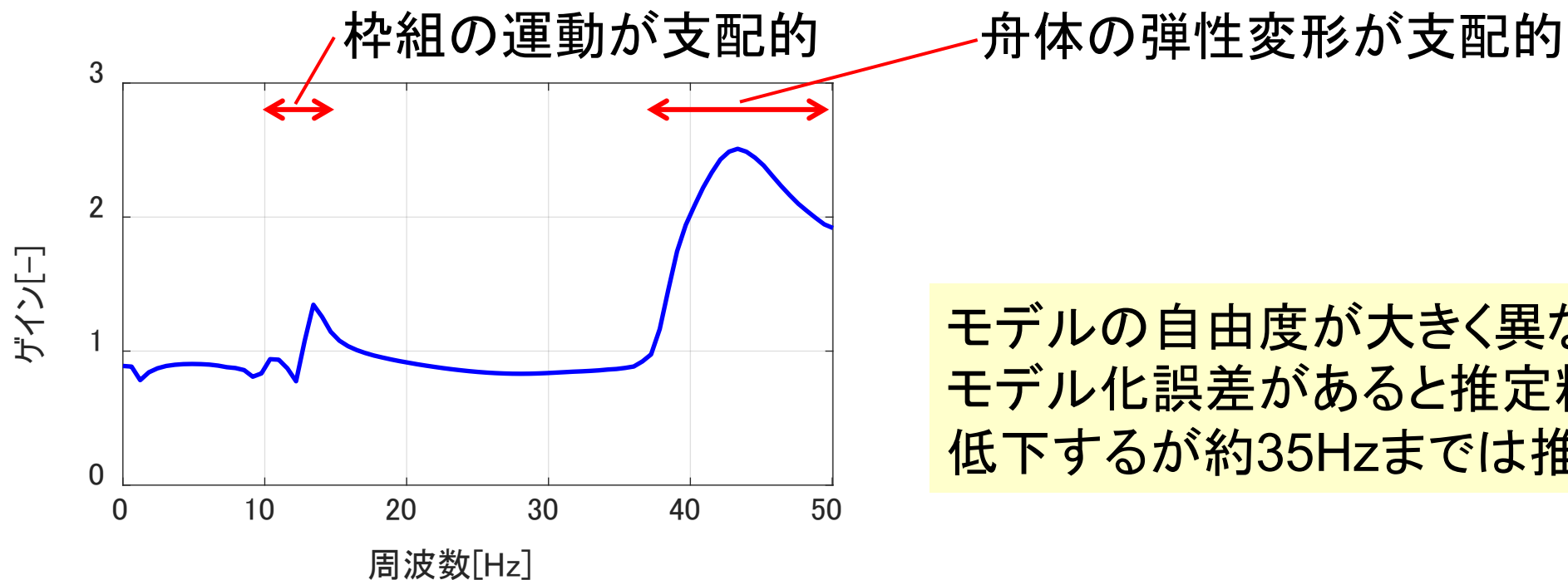
すり板中心の伝達関数の比較

シミュレーション・接触力推定の流れ

モデル化誤差の影響分析（推定精度）

推定接触力の真値に対する比を周波数ごとに計算（伝達関数）

$$G(\omega) = \frac{\text{推定値}}{\text{真値}}$$



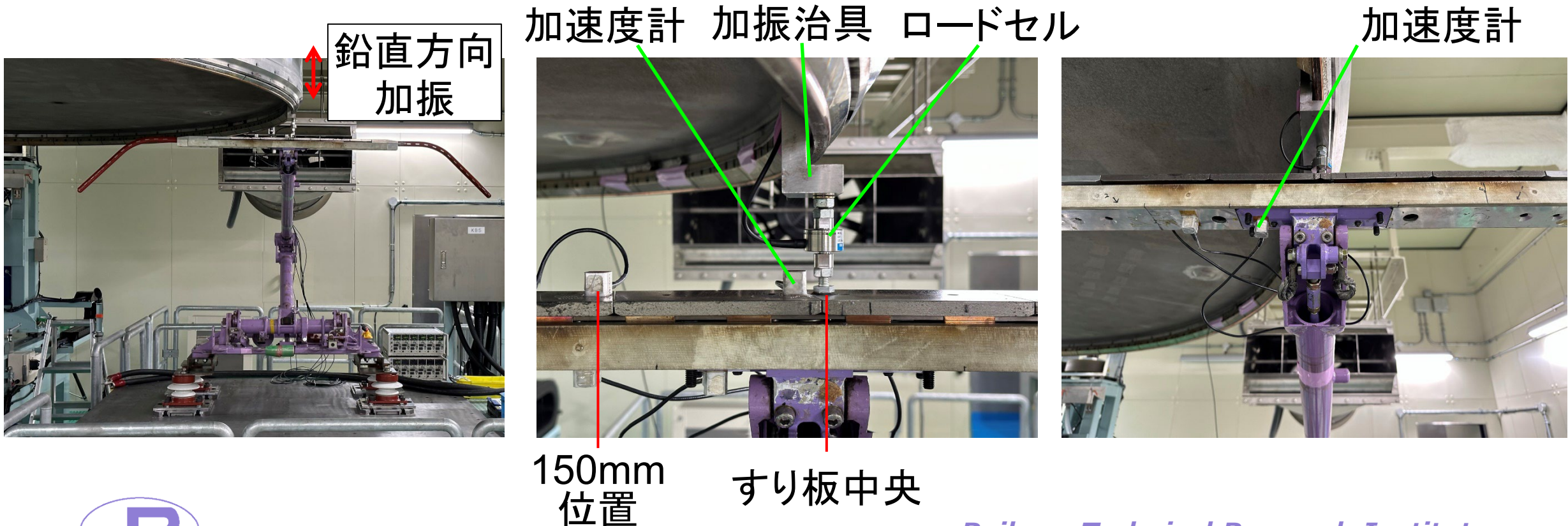
モデルの自由度が大きく異なるようなモデル化誤差があると推定精度が低下するが約35Hzまでは推定可能

推定接触力の真値に対する伝達関数 $G(\omega)$

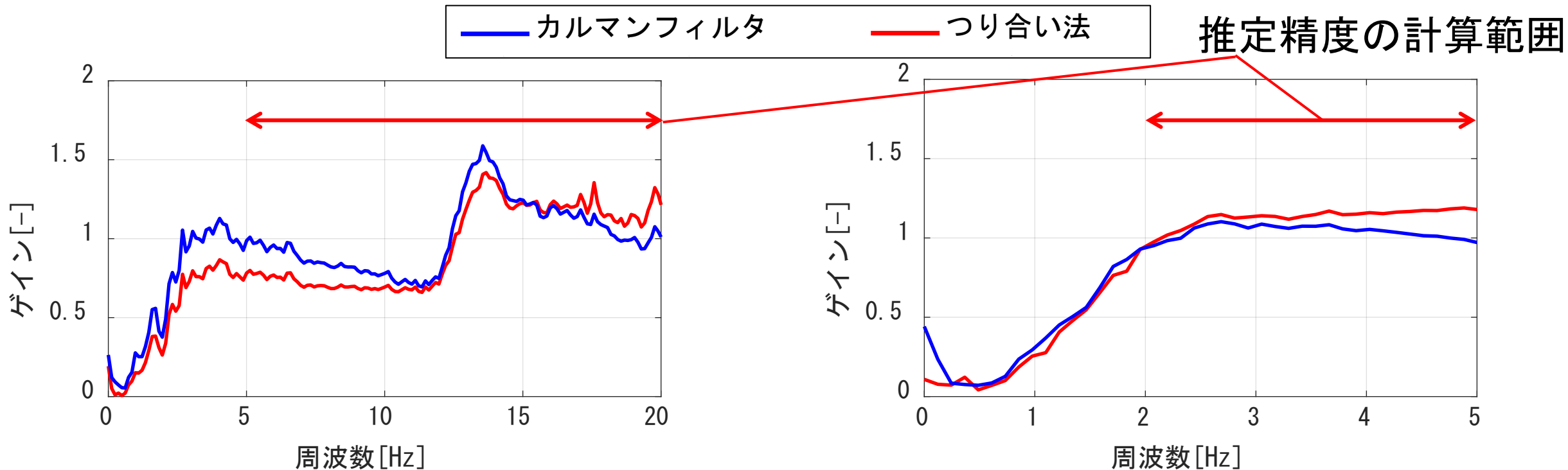
加振試験に基づく検証

高速パンタグラフ試験装置を用いた加振試験で提案手法を検証

試験方法: ランダム波ですり板上面を加振(加振位置: すり板中央, 150mm位置)
すり板・舟体底面の加速度(合計2点)を測定 → 接触力を推定



接触力推定結果(すり板中央加振)



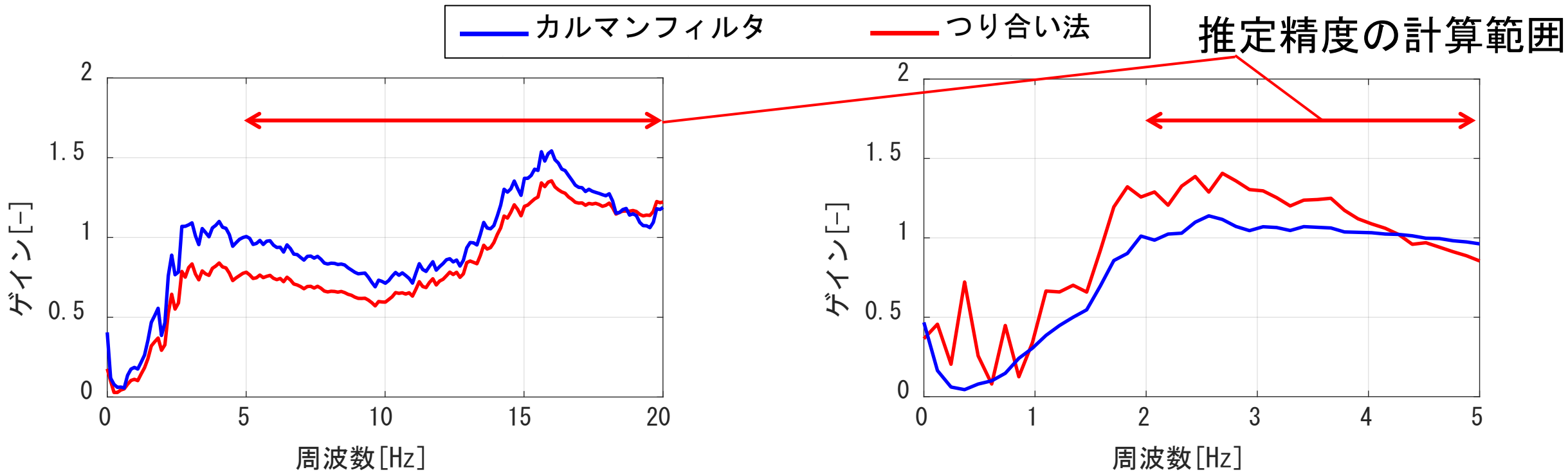
接触力推定精度(加振周波数: ~20Hz)

接触力推定精度(加振周波数: ~5Hz)

推定精度(真値との一致度)

加振位置	カルマンフィルタ	つり合い法	加振位置	カルマンフィルタ	つり合い法
中央	77 %	68 %	中央	64 %	46 %

接触力推定結果(150mm位置加振)



接触力推定精度(加振周波数: ~20Hz)

接触力推定精度(加振周波数: ~5Hz)

推定精度(真値との一致度)

加振位置	カルマンフィルタ	つり合い法	加振位置	カルマンフィルタ	つり合い法
150 mm	71 %	64 %	150 mm	66 %	23 %

まとめと成果の活用

まとめ

- 力学モデルに基づく接触力推定手法としてカルマンフィルタを適用
- シミュレーションでは、モデル化誤差(パラメータ, 自由度の変化)が存在する場合でも35Hz程度まで推定可能
- 加振試験では、従来法に対して精度向上する周波数帯が存在
- 今後は、共分散行列の適切な決定方法について検討を行う

成果の活用

- パンタグラフの接触力測定に基づく集電系の省メンテナンス化に活用