

GNSS衛星測位システムに基づく 長大橋の変位計測モニタリングと AIを活用した変形予測に関する研究

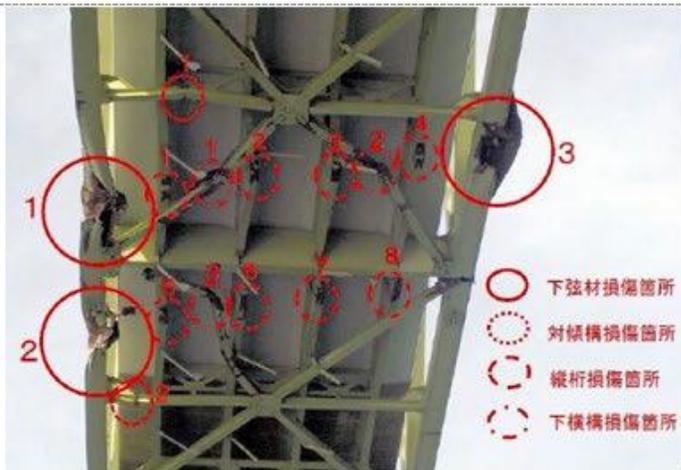
山口大学大学院 創成科学研究科
渡邊 学歩

研究の背景(想定外の事故)

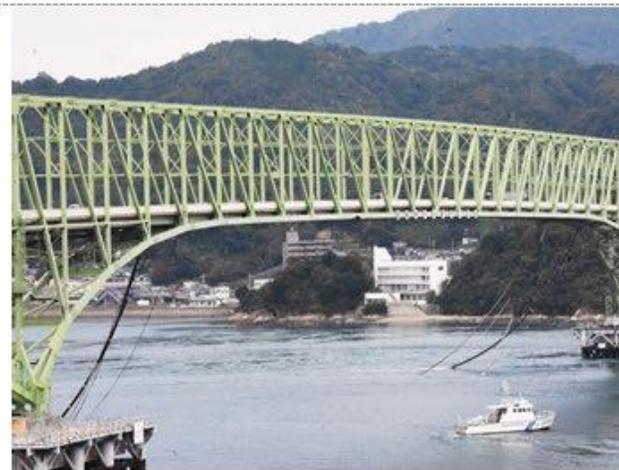
- 2018年10月, タンカーの衝突による長大トラス橋の損傷事故が発生



(a) 事故の概要



(b) 事故による損傷状況



(c) 分断された送水管



(d) 損傷部材 1

図-2.21 本事故による衝突位置と損傷状況の概況

翌朝に判明した深刻な損傷



(b) 下弦材損傷部（広島側） ←



(c) 下弦材破断部（広島側） ←



(d) 下弦材破断部（柳井側） ←



(e) 下弦材破断部（柳井側） ←



(f) 下横構破断部 ←



(g) 下横構破断部 ←

24時間365日の常時モニタリングシステムが必要では！

GNSS変位計測システム

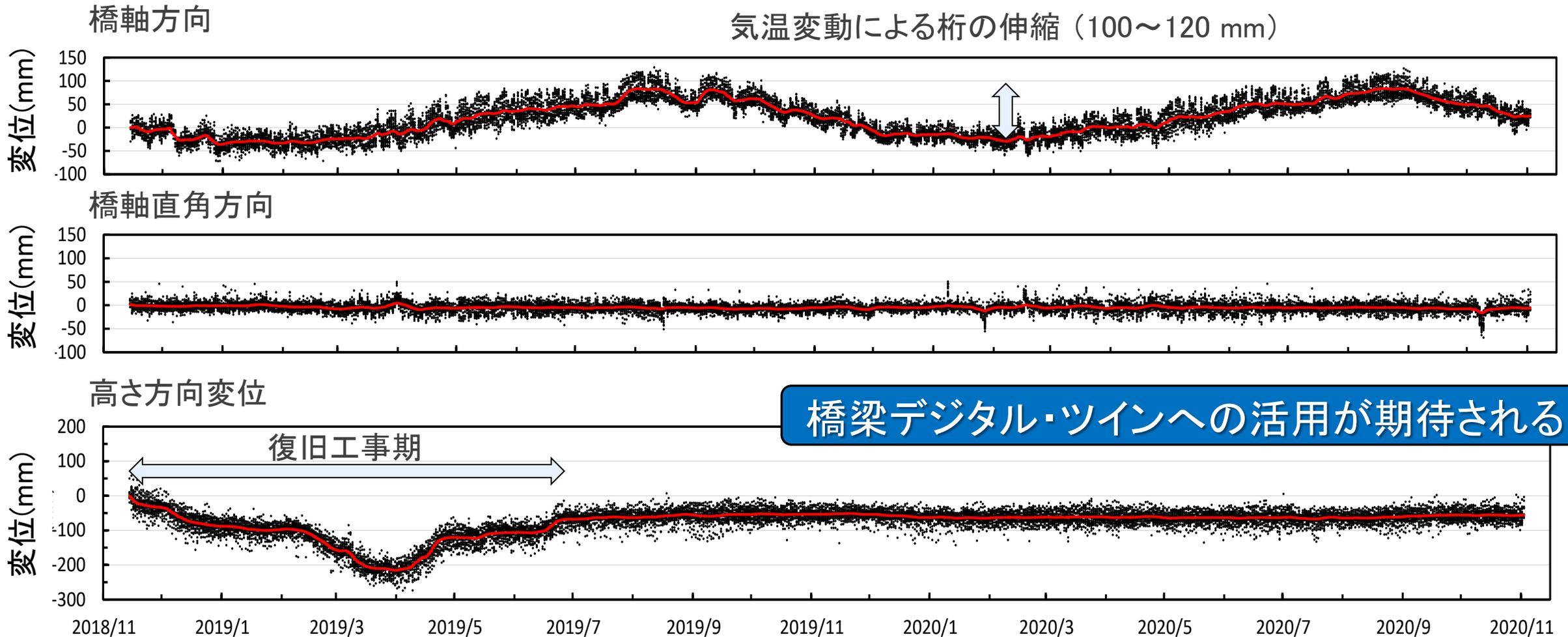
The figure illustrates the GNSS displacement measurement system for the Sagami Bay Bridge. It features a central satellite map of the Oshima side (大島側) with red dots marking measurement points. The map includes labels for various locations such as 大島瀬戸 (Ōshima Seto), 橋井-伊保田-三津浜 (Hashii-Ihoda-Mitsuhama), and 大島 (Ōshima). A red line traces the path of the bridge across the map.

Surrounding the map are several photographs and diagrams:

- Top-left: A photograph of a GNSS antenna mounted on a bridge railing overlooking the sea.
- Top-right: A photograph of a GNSS antenna on a bridge pier.
- Bottom-right: A photograph of a GNSS antenna on a truck, with solar panels for power.
- Bottom-left: A grid of circular images showing the antenna's view from different locations:
 - G-1 (P2~P3中央)
 - G-2 (P3橋脚上)
 - G-3 (P3~4中央)
 - G-4 (P4橋脚上)
 - G-5 (P4~P5中央)
 - 基準点 (Base Point)
 - 通信集約器 (Communication Concentrator)

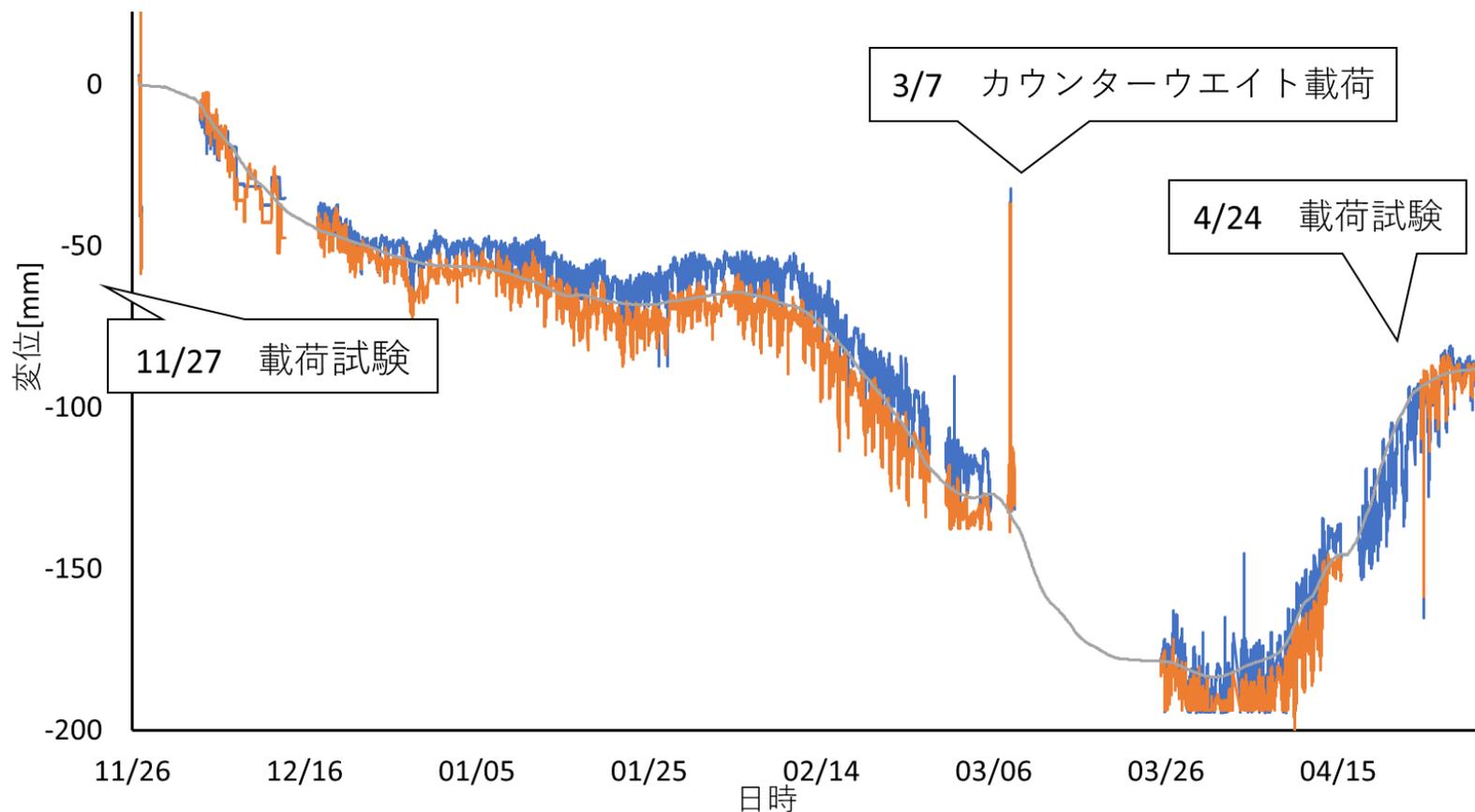
スタティック計測によるモニタリングシステム

- 計測データの平滑化により、長期トレンドの把握や定量的な評価が可能



GNSSによる橋梁変位監視システム

- GNSSによる高さ方向たわみ計測値は、連通管式変位計の計測値と一致し、**高い精度での長期モニタリングが可能**



連通管式
変位計

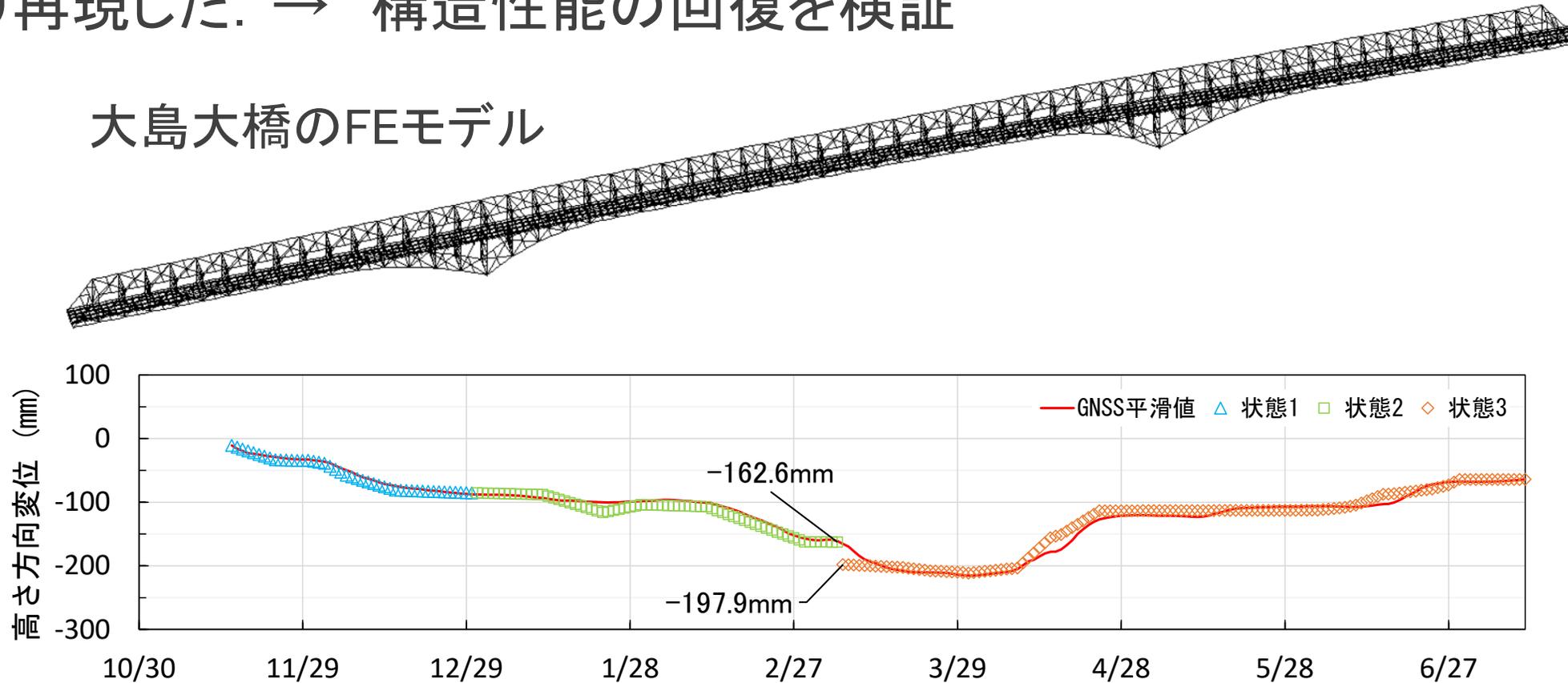


GNSS
変位計

構造性能の復旧過程を再現

- 復旧過程における橋梁変位(高さ方向)を, GNSSにより追跡し, 構造解析により再現した. → 構造性能の回復を検証

大島大橋のFEモデル



GNSSインフラモニタリングに基づくデジタル・ツインの活用が有効

GNSS測位法と測位精度

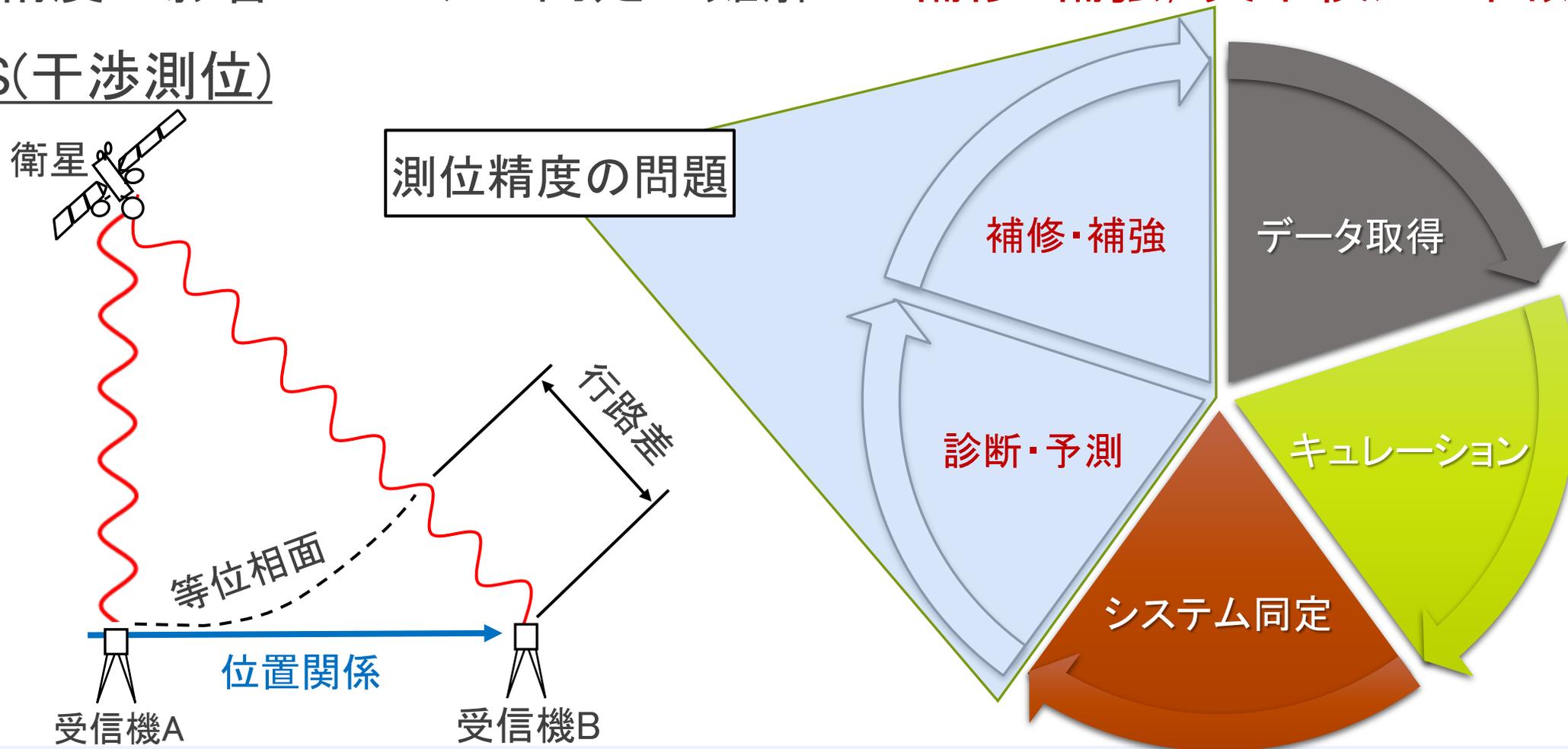
GNSS測位法の種類		観測時間	精度	適用
単独測位	絶対単独測位法	1秒～数秒	～10m	船・航空機カーナビ
相対測位	ディファレンシャル方式	数秒～1分	0.2～1m	船位測量, 工事用車両の運行管理
干渉測位方式	スタティック法	60分以上 ※30分以上	5mm + 1ppm・D (水平精度)	1～4級基準点測量 地滑り・地殻変動 構造物の変形
	短縮スタティック法	20分以上	5mm +1ppm・D	3～4級基準点測量 路線・河川・用地測量 出来形・施工管理測量 各公共測量
	キネマティック法	10秒以上	10～20mm +2ppm・D	
	RTK法	10秒以上	10～20mm +2ppm・D	

※改訂2版 基礎 測量学 編著者 長谷川昌弘・川端良和 電気書院に記載の表を今回の計測仕様に合わせて一部加筆修正

GNSS(衛星測位技術)の期待と橋梁モニタリングへの課題

- 干渉測位法や準天頂衛星みちびきによる測位精度の向上が期待される
- 測位精度の影響でシステム同定が難解 ⇒ **補修・補強, 異常検知が困難**

GNSS(干渉測位)



本研究の目的

研究背景

- 橋梁の維持管理にはモニタリングが重要.
- 橋梁のGNSS変位観測に基づく構造ヘルスマニタリングの実施では, 誤差の影響により構造性能の同定が難しく, 補修・補強戦略, 異常検知システムの開発に未到達.

研究目的

- GNSS変位観測データの誤差処理方法の開発
- デジタル・ツインによる構造変形挙動の再現可能なモデルの開発

学術 & 工学

- 線形・ガウス型状態空間モデルと測位特性に基づく観測データの誤差処理
- デジタル・ツイン時代の構造解析の精度向上に向けた取り組み

GNSSを活用したモニタリングの実施状況

① 長大特殊橋



大島大橋
実施済

② 鋼箱桁橋



新八幡川大橋
実施済

③ PC箱桁橋



沖家室大橋

④ アーチ橋



笠戸大橋

計測中

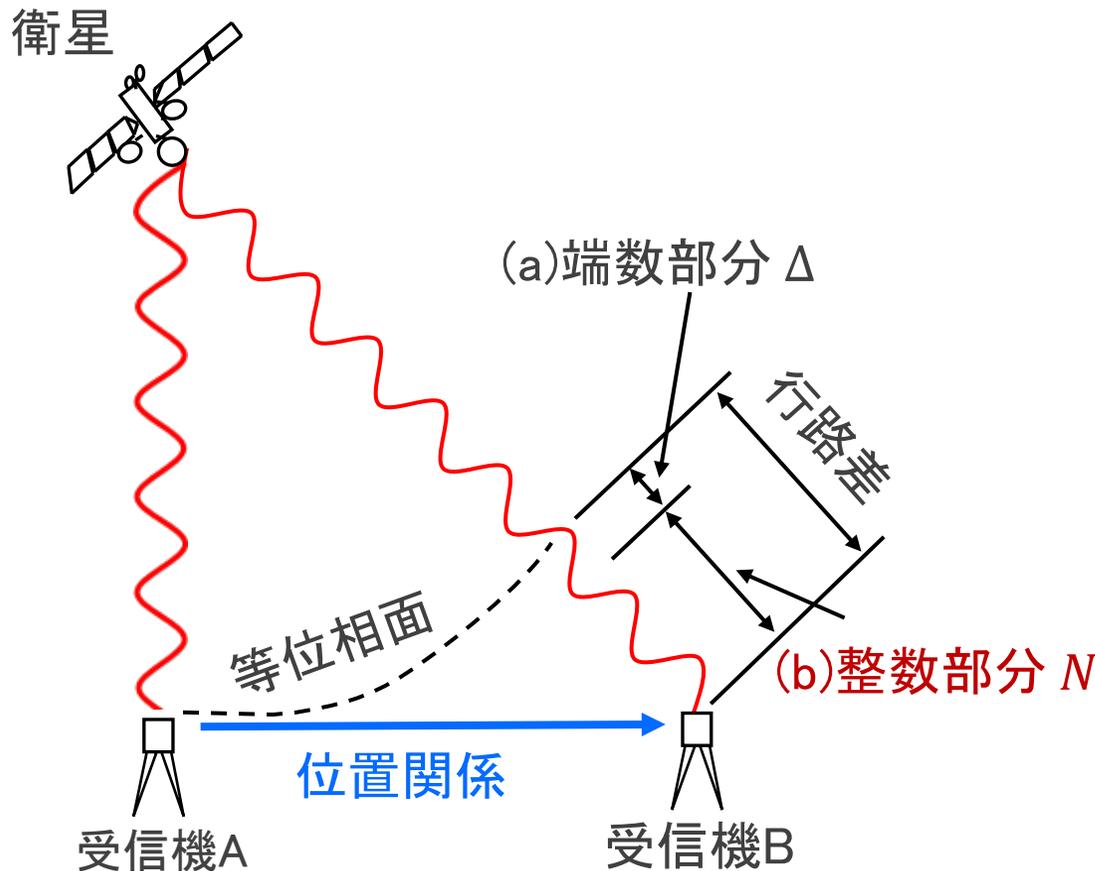
長大特殊橋のデジタル・ツインの構築や異常検知に向けて

- 橋梁構造物のGNSS変位モニタリングデータの誤差処理手法の提案
- 温度応力解析や構造解析による変形挙動の再現

GNSS変位観測データの 誤差処理方法の開発

GNSS(Global Navigation Satellite System)の概要

干渉測位の仕組み



行路差の算出(波長: λ)

$$\text{行路差} = \lambda(\Delta + N)$$

$\Delta \Rightarrow$ 取得可能
 $N \Rightarrow$ 未知

N : 整数値バイアス



干渉測位の種類(N の決定法)

Static測位

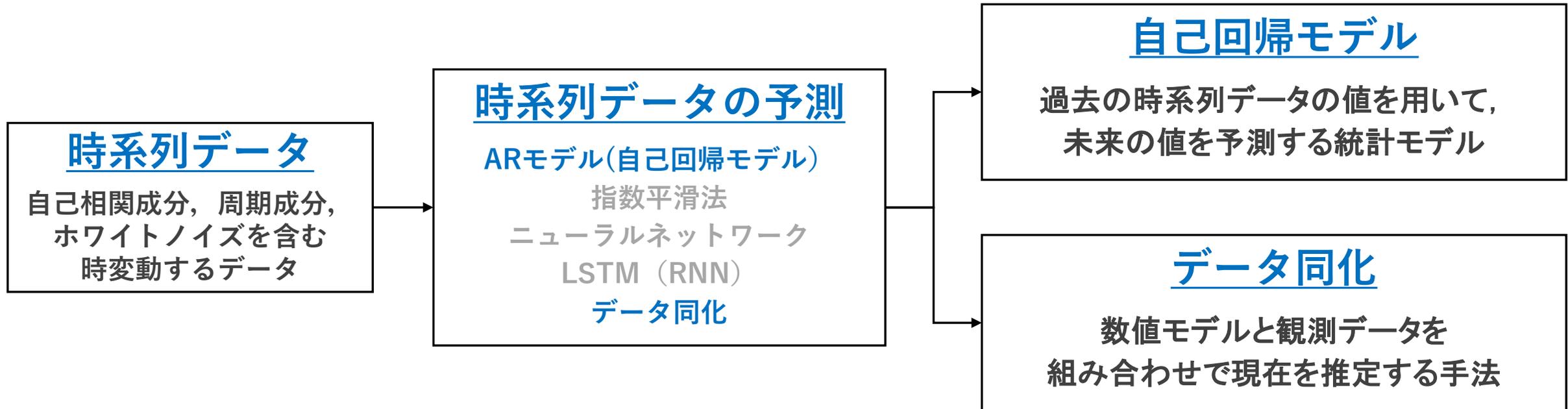
- 30~60分に1個のデータ取得可能
- 静的なデータに有利

RTK測位

- 30秒に1個のデータ取得可能
- 動的なデータに有利

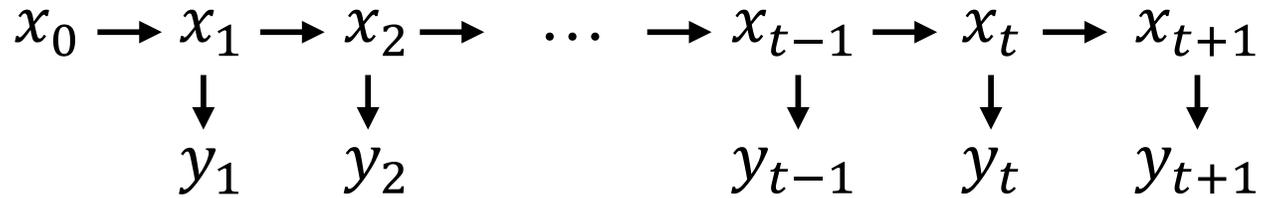
時系列計測データの分析手法

- 機械学習・データサイエンスの分野では、時系列データの分析は異常検知や将来予測などの、話題のテーマを多く含んでいる。



状態空間モデルの概要

状態空間モデル: 観測値 y_t に対して状態 x_t を設定



モデルの仮定(マルコフ性)

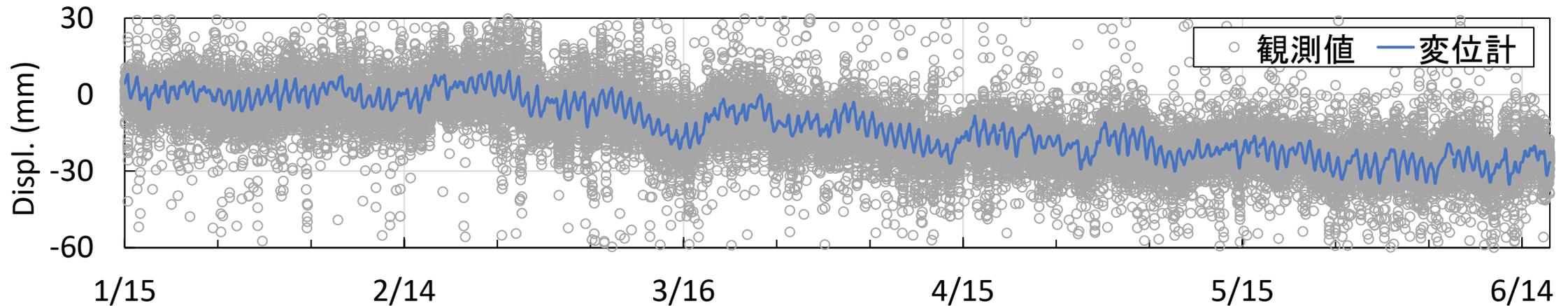
- x_t は確率分布
- x_t は直前の x_{t-1} とのみ関連する
- y_t は同時刻の状態 x_t でのみ決まる

本研究に用いる状態空間モデルの種類

状態空間モデル	ガウス型	非ガウス型
線形	カルマンフィルタ(誤差処理)	
非線形		粒子フィルタ(異常検知)

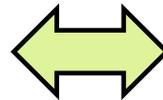
RTK測位を用いた橋軸方向変位の観測結果

RTK観測結果(橋軸方向変位)



変位計計測値(標準偏差: 11mm)

- 日周期的な変動
 - 季節変動
- ⇒ 夏場にかけて伸び(マイナス方向)



RTK観測データ

変位最大値 : 3156 mm
変位最小値 : -12087 mm
標準偏差 : 110 mm

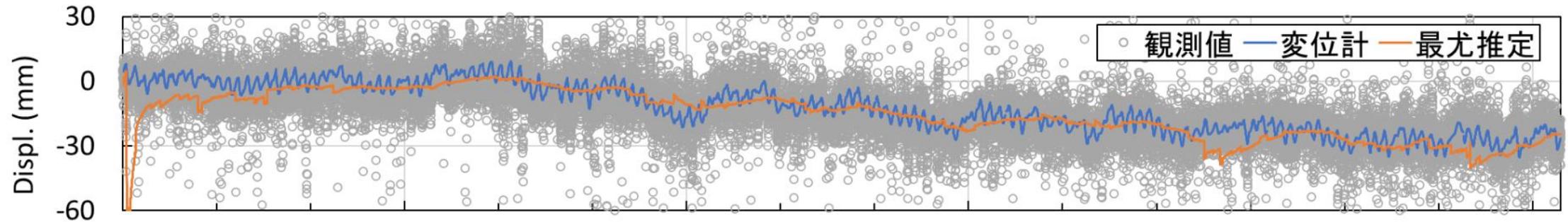
RTK観測値は変位計を中心に大きく変動していることから誤差処理が必要

通常のカルマンフィルターによる観測データの平滑化

- 通常のカルマンフィルター処理(最尤推定)により観測データを平滑化しても、必ずしも良好な結果が得られる(ノイズが除去出来る)とは限らない。

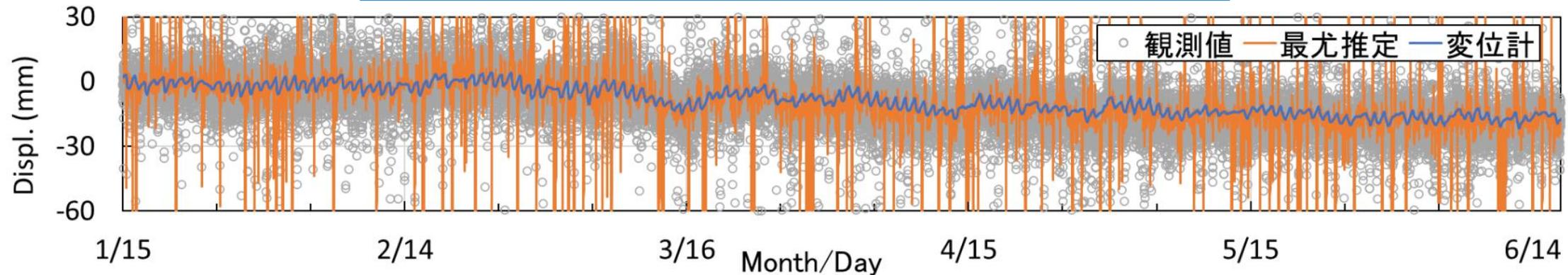
G1観測点

過度に平滑化されてしまっている



G3観測点

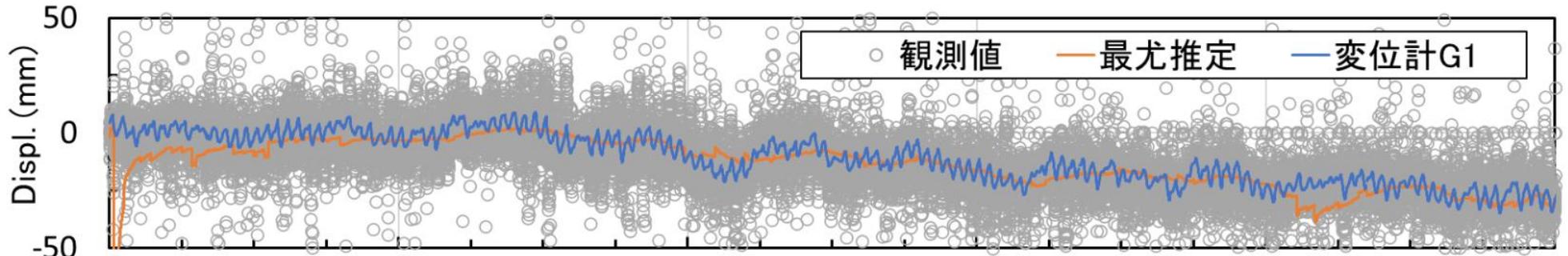
ノイズに引きずられて、平滑化が出来ていない



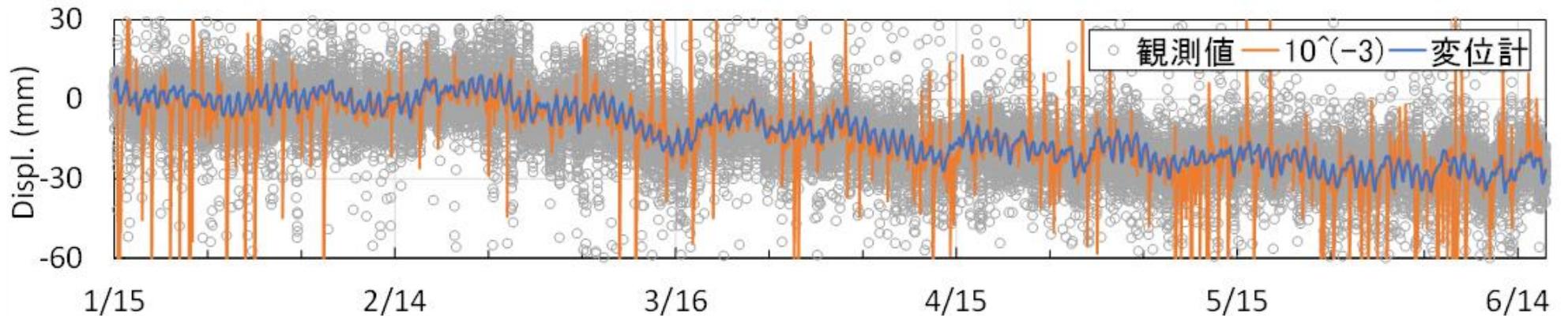
通常のカルマンフィルタ

- ノイズ比の制御により、変化の様子を適切に捉えることが出来たが、ノイズの影響でうまく平滑化が出来ていない。

最尤推定
による処理



ノイズ比制御
による処理



GNSSデータから外れ値を除去することでトレンドの補足を目指す

ノイズ比を変えた際のカルマンフィルタ適用結果

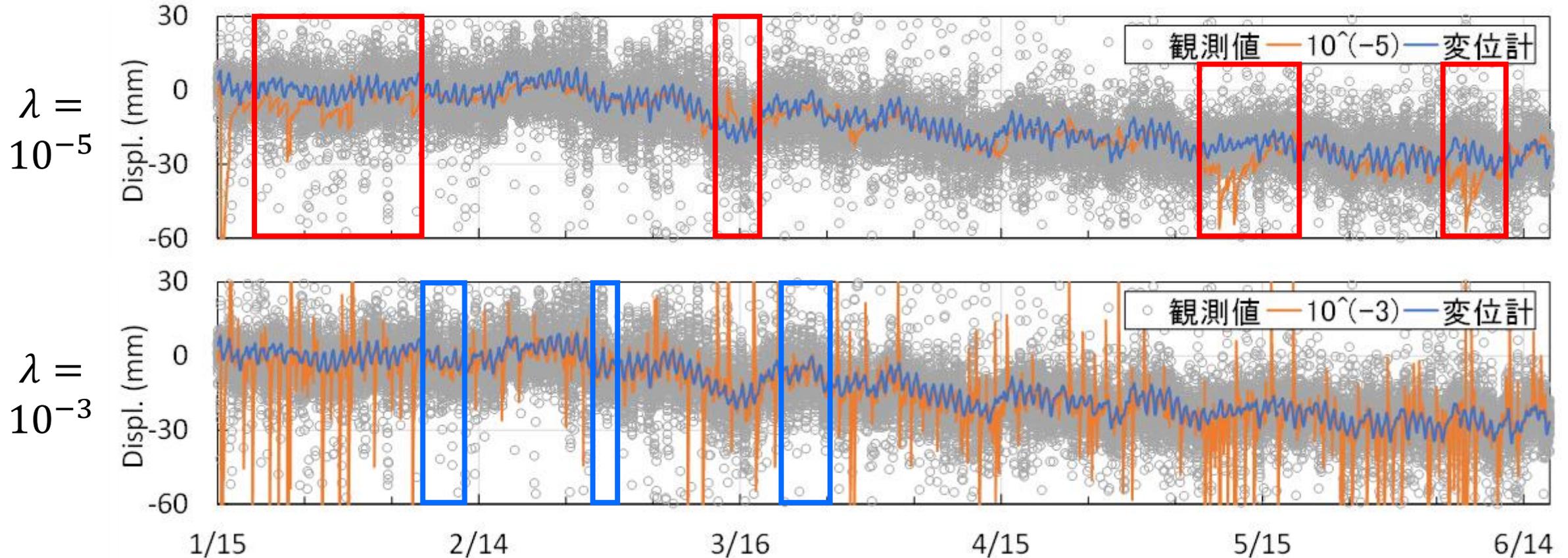
ノイズ比毎の処理結果



失敗



高精度



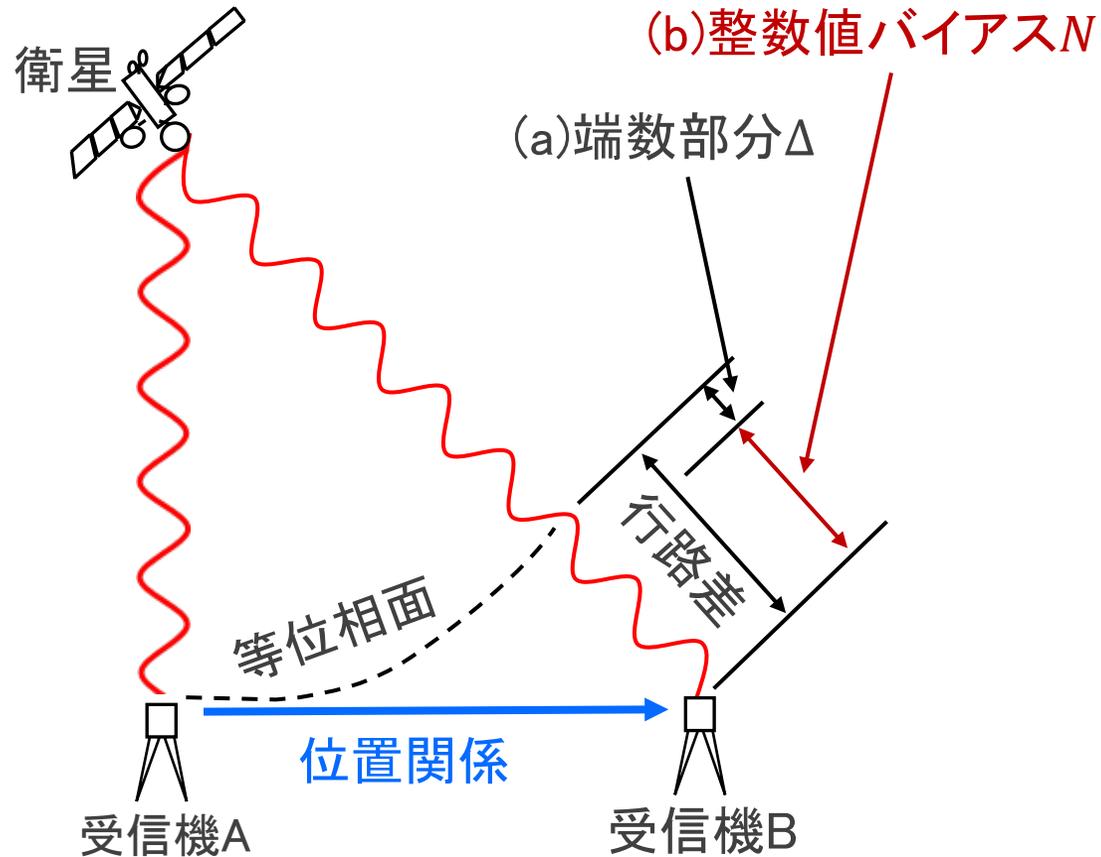
ばらつくものの、ノイズ比によって良い推定結果を得る時点が存在する

推定精度が低下する原因と対策

推定精度が低下する原因

測位精度が悪く、実際の位置から大きく外れた観測値を推定対象にしたこと

対策



行路差の算出(波長: λ)

$$\text{行路差} = \lambda(\Delta + N)$$

$\Delta \Rightarrow$ 取得可能
 $N \Rightarrow$ 未知

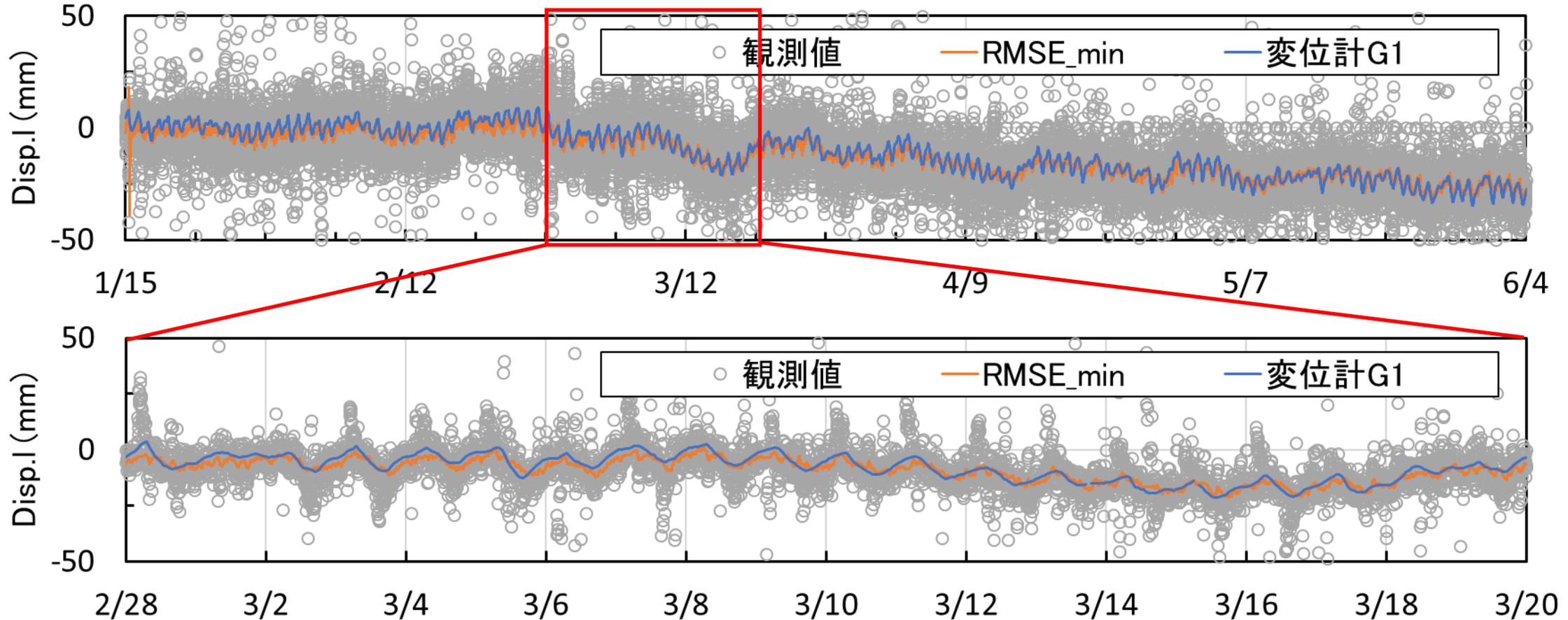
RTK測位

N が正しく求まった \Rightarrow Fix解
 N が正しく求まらなかった \Rightarrow Float解

Float解を推定対象外とする

k近傍法適用結果

- k近傍法を用いて不適切データを除去することが出来た。



時々刻々と変化する様子を捕捉することに成功

デジタル・ツインによる 構造変形挙動の再現

GNSSを活用したモニタリング

① 長大特殊橋



大島大橋
実施済

② 鋼箱桁橋



新八幡川大橋
実施中

③ PC箱桁橋



沖家室大橋

④ アーチ橋



笠戸大橋

実施予定

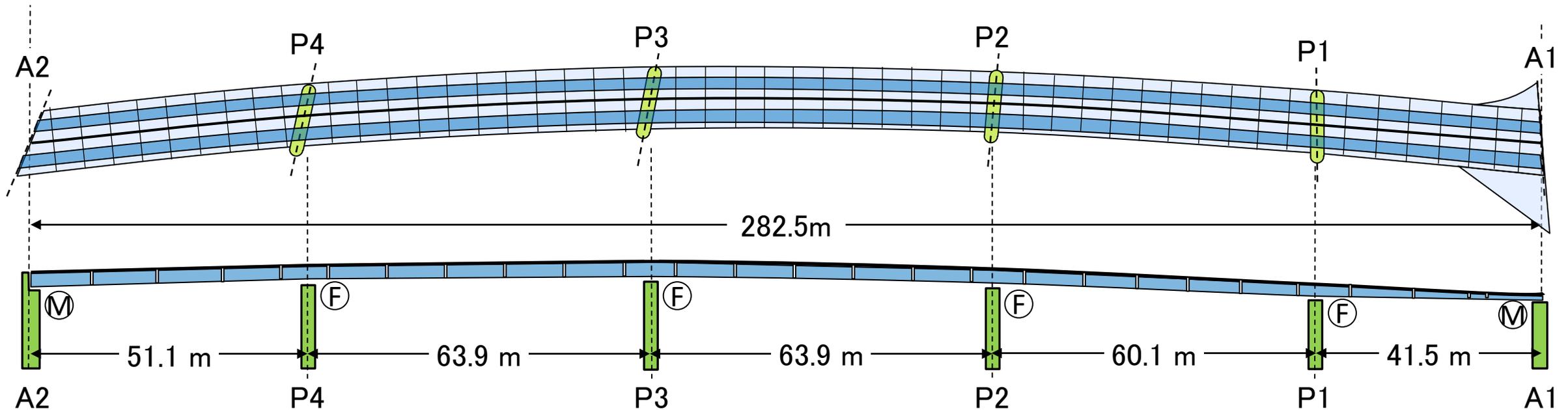
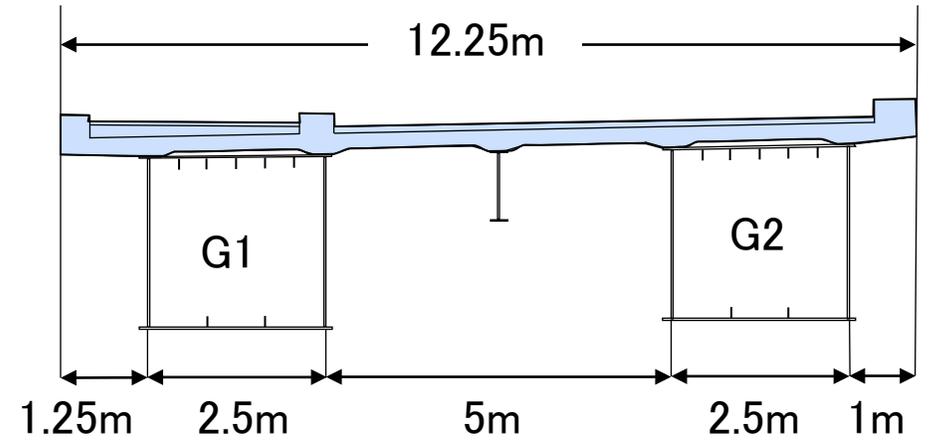
FEM解析による鋼箱桁斜橋の構造性能を明らかにする



GNSSモニタリングによる高精度変位計測結果を精度よく再現できるのか？

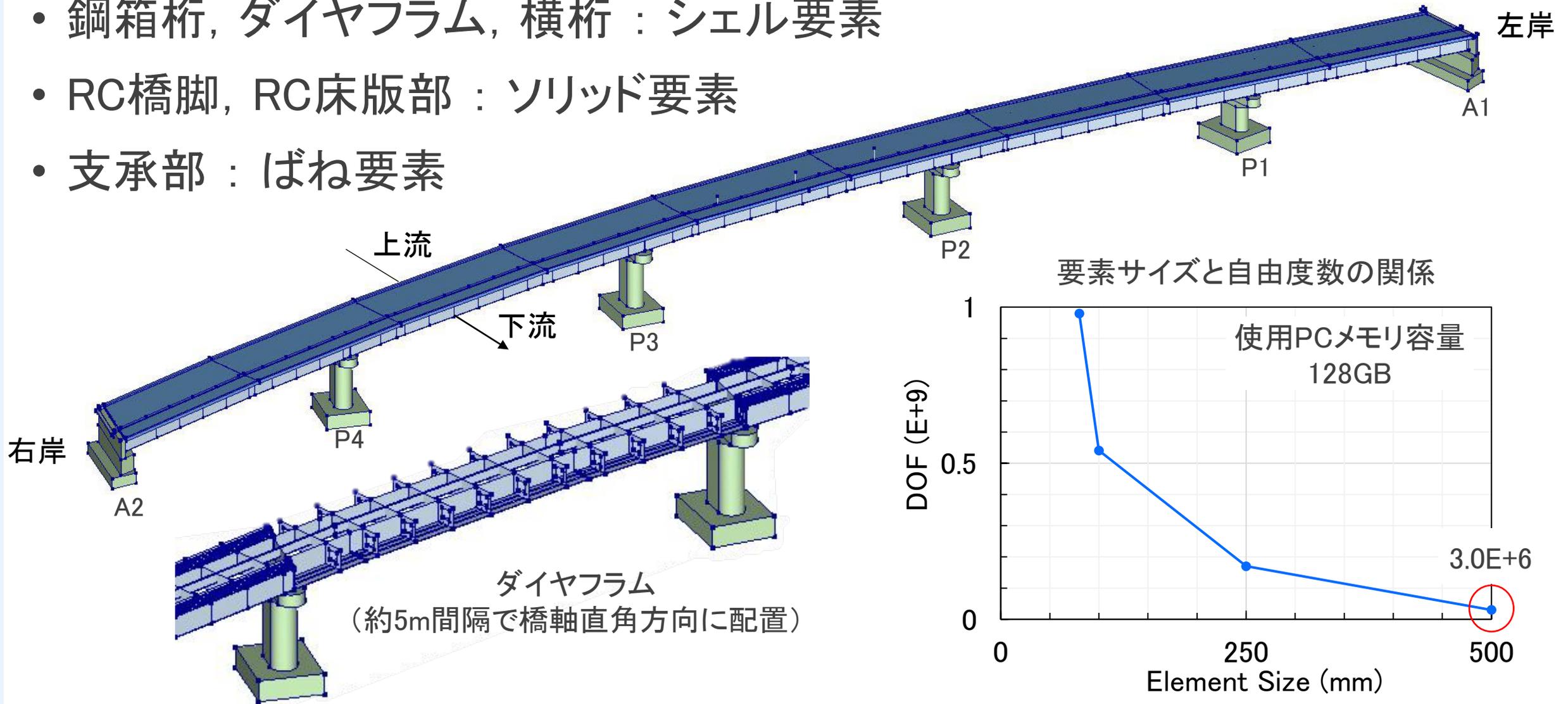
対象橋梁

- 新八幡川橋【広島県広島市】
- 臨港道路_廿日市草津線
- 5径間連続非合成曲線鋼箱桁橋(RC床版)
- 中間多点固定方式

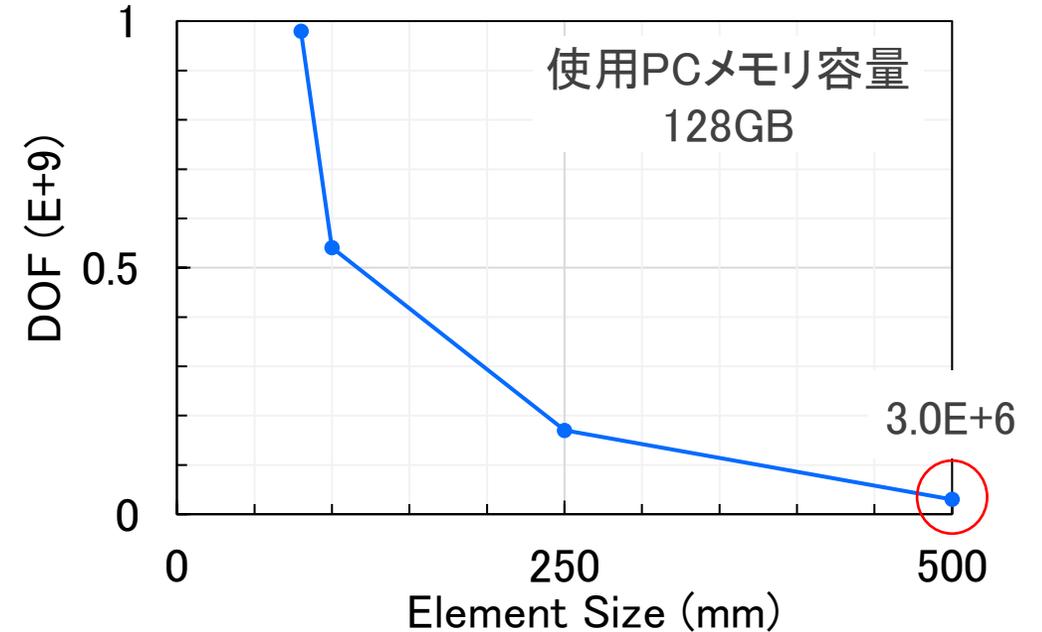


対象構造の有限要素によるモデル化

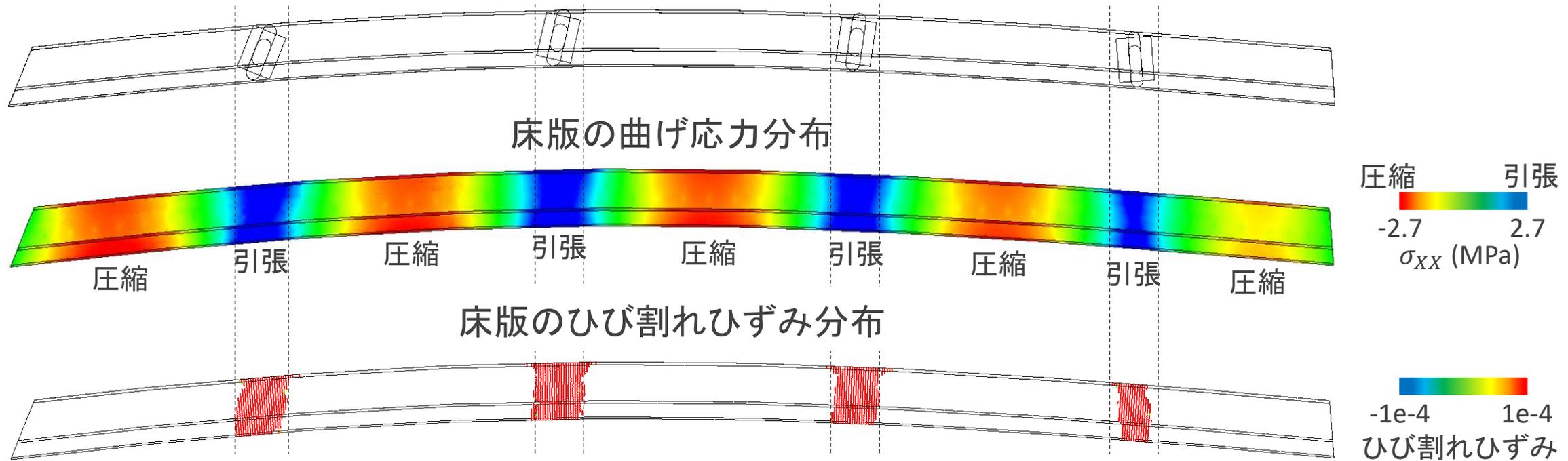
- 鋼箱桁, ダイヤフラム, 横桁 : シェル要素
- RC橋脚, RC床版部 : ソリッド要素
- 支承部 : ばね要素



要素サイズと自由度数の関係



建設時初期段階を再現

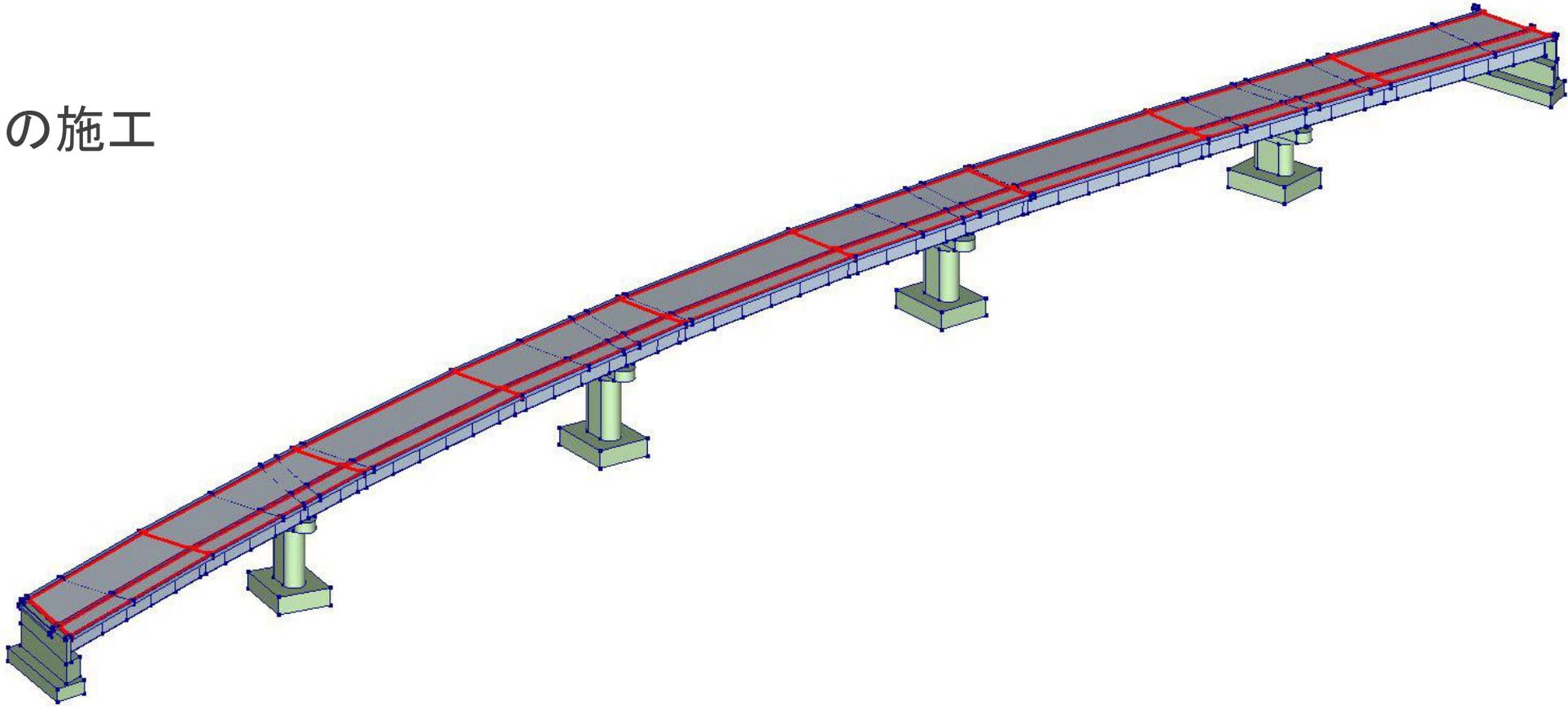


支点部で引っ張られ、床版がひび割れる
温度変化による応力状態など精緻な評価ができない

材料非線形性の導入や床版支点部を細かく分割して施工するなど
施工過程を考慮した設計、検討が必要

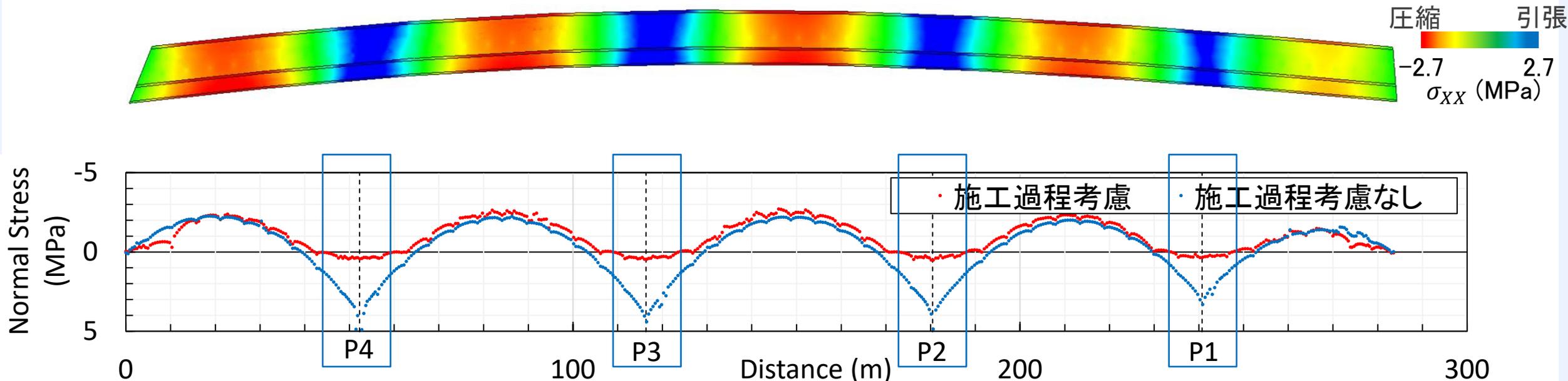
建設時初期段階を再現

6. 舗装の施工

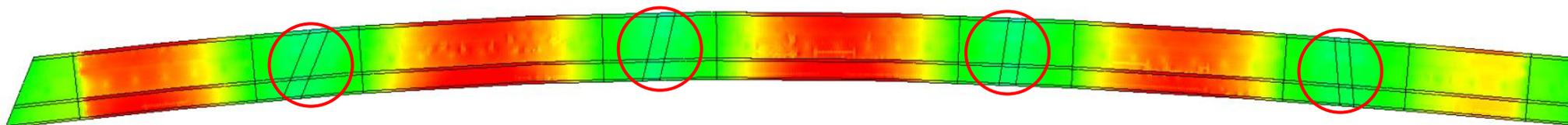


コンクリート床版の曲げ応力の変化

施工過程を考慮しない場合の床版の曲げ応力(σ_x 成分)分布

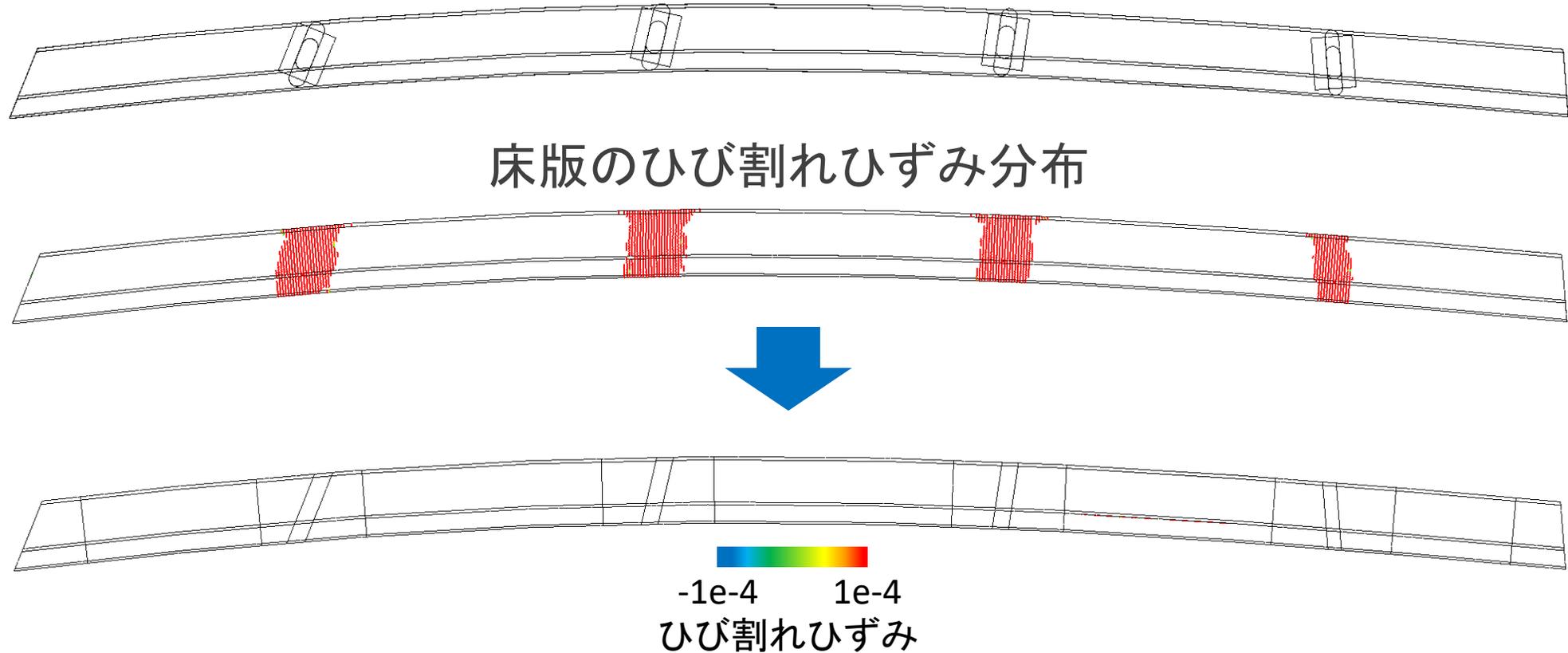


施工過程を考慮した場合の床版の曲げ応力(σ_x 成分)分布



支点部で発生していた負曲げは解消

床版のひび割れ分布の変化



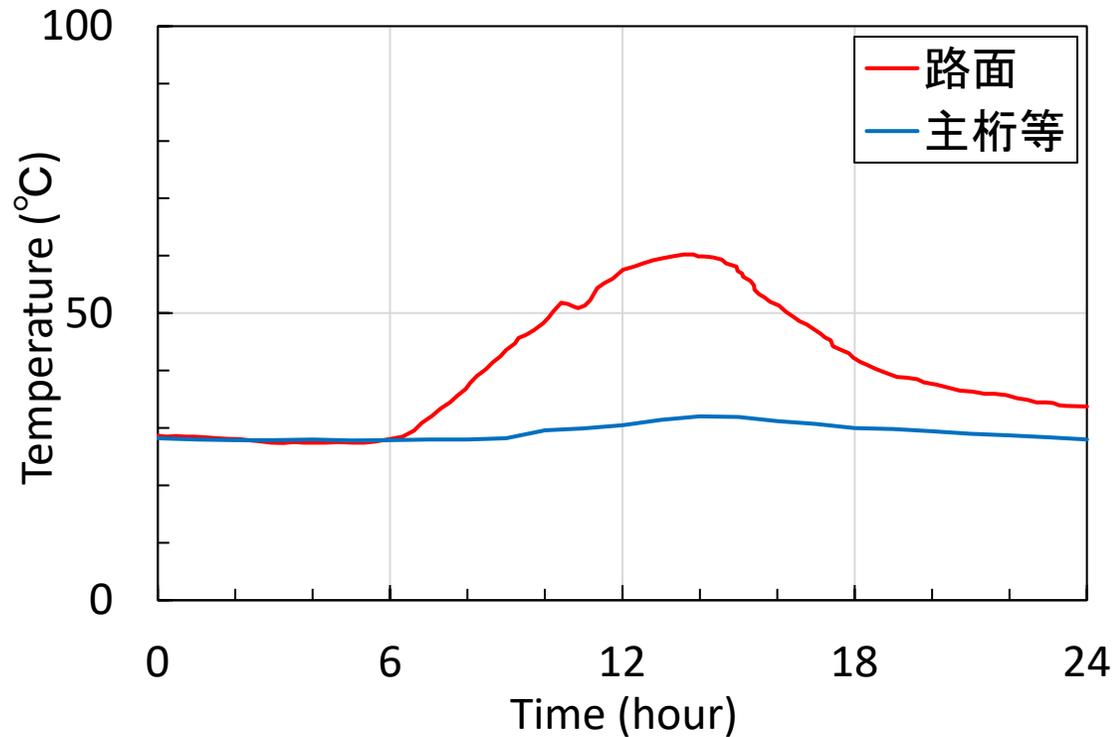
支点部で発生していたひび割れは解消し、建設時初期段階を再現できた

設計段階で施工過程を考慮することが必要

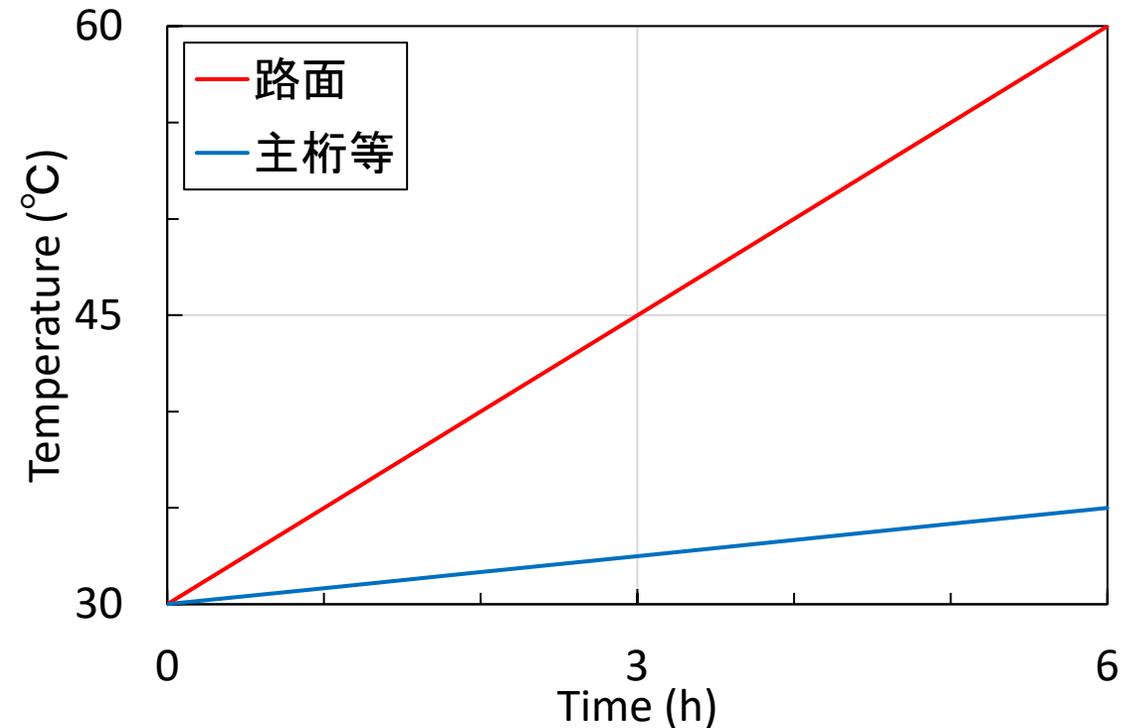
猛暑日の橋梁の温度変化

- 猛暑日には路面は他の橋梁部材に比べて温度が大きく上昇することがある。

ある猛暑日の部材温度の時間推移

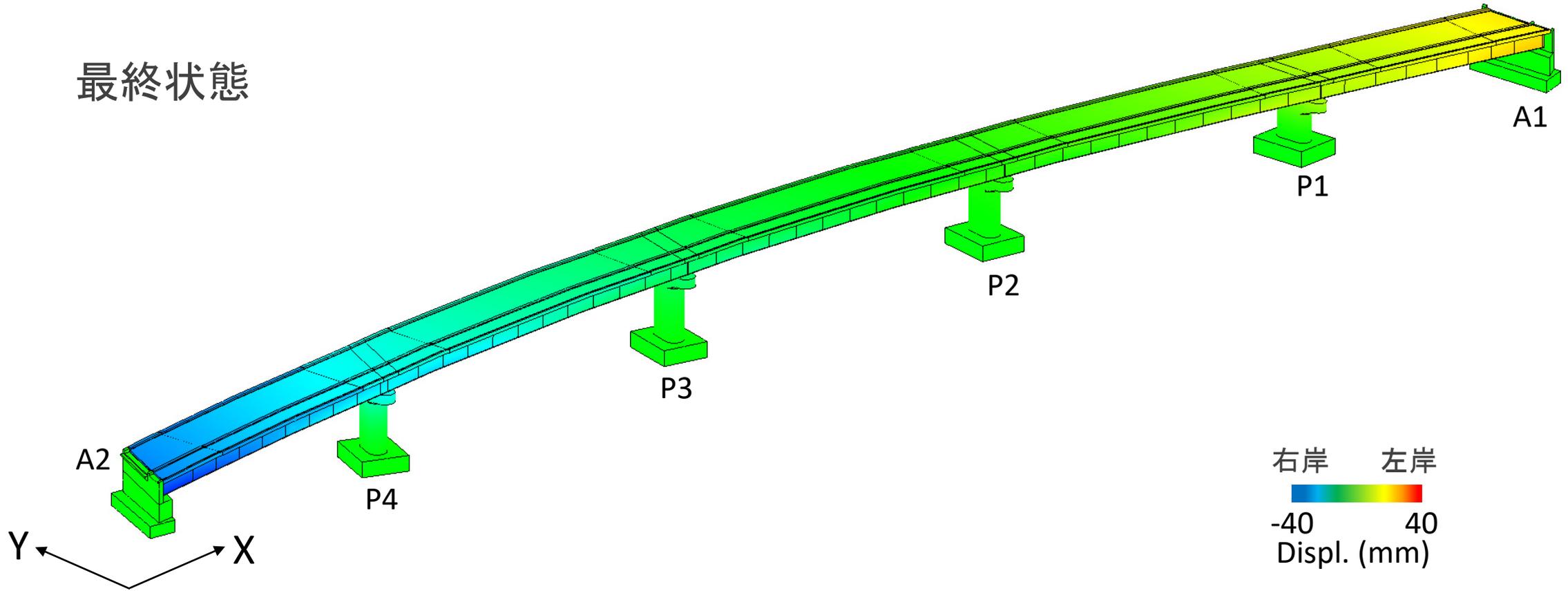


モデルに入力した温度



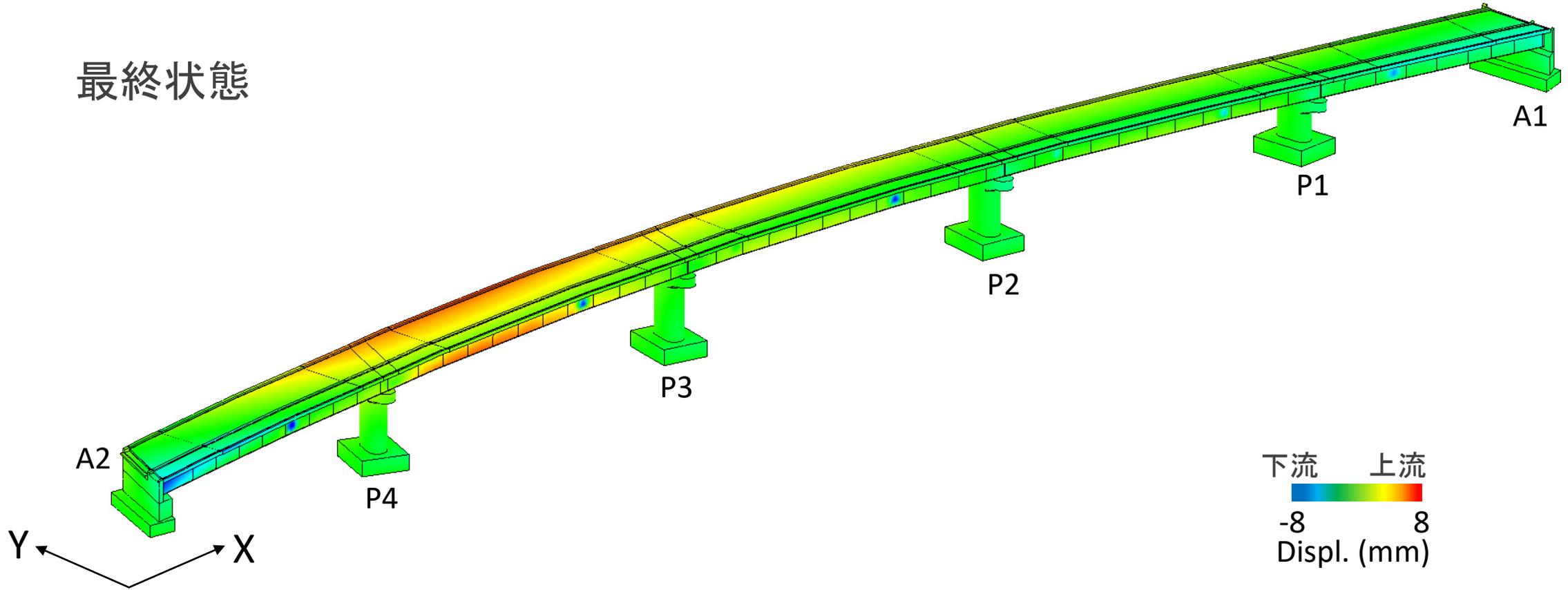
6時間で路面を30°C, その他の部材を5°C上昇させる

X軸方向の変形挙動



床版の温度が上昇するに伴い、床版及び主桁が一体となって両側に伸びた

Y軸方向の変形挙動

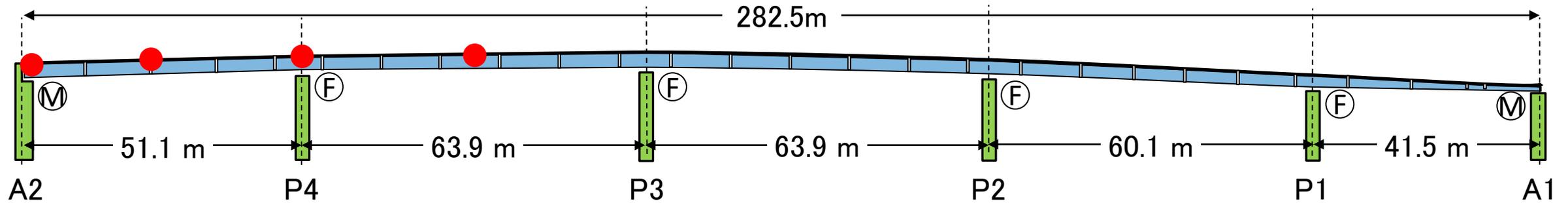


床版の温度が上昇するに伴い、P3-P4径間が4mm～8mm程度上流側に伸びた

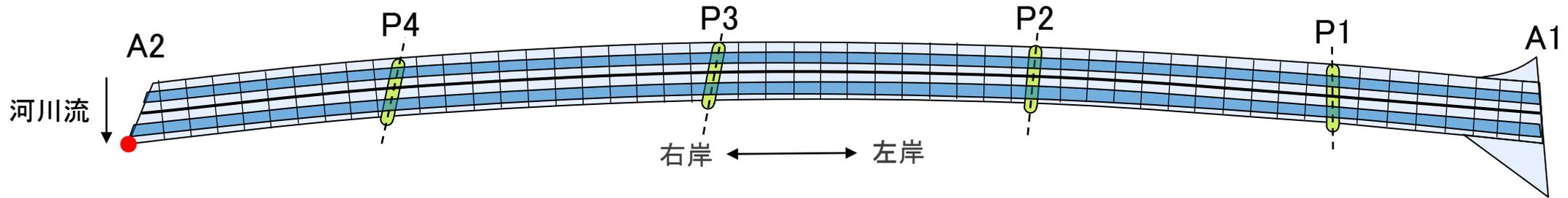
GNSSモニタリングの概要

- 新八幡川橋では2022年1月12日から、相対測位法により、4点で変形挙動のモニタリング及び、温度との追従性を調べている。

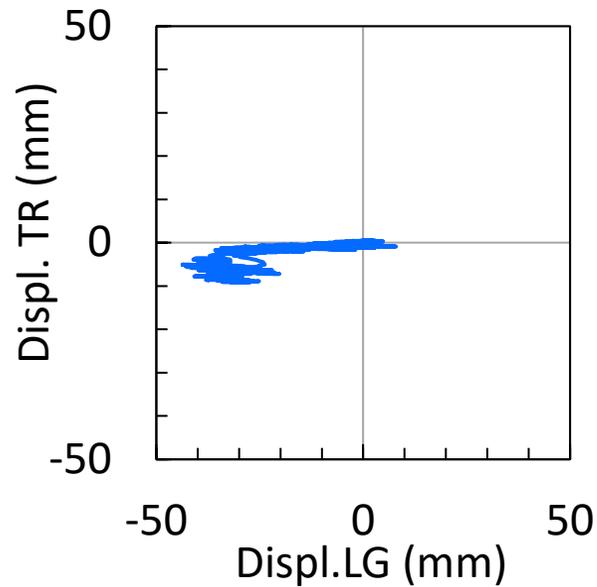
計測点位置



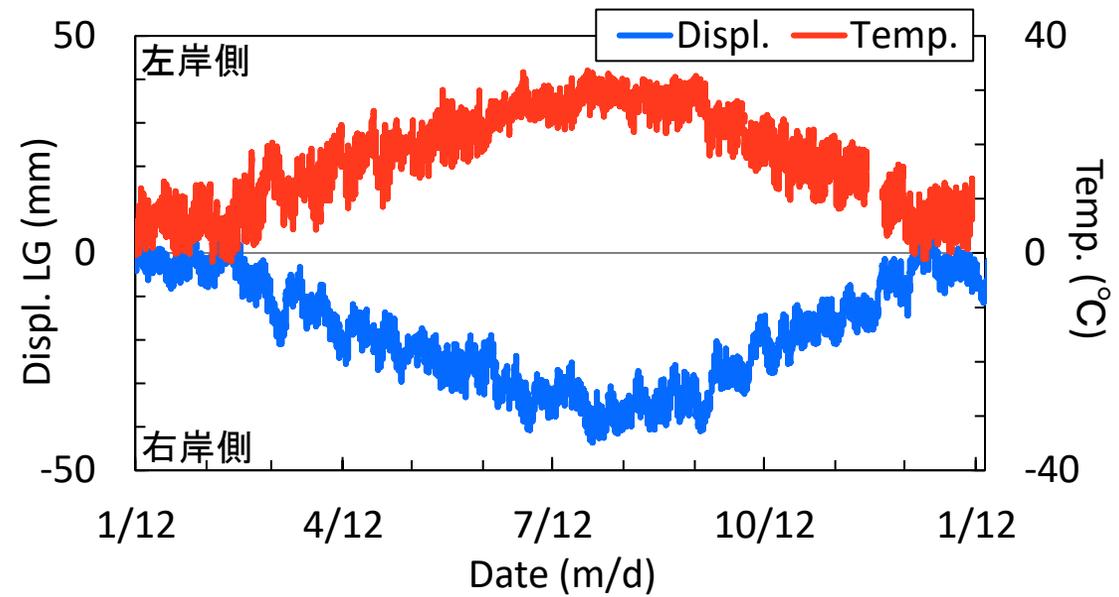
計測された1年間のA2位置における変形挙動



変形の軌跡

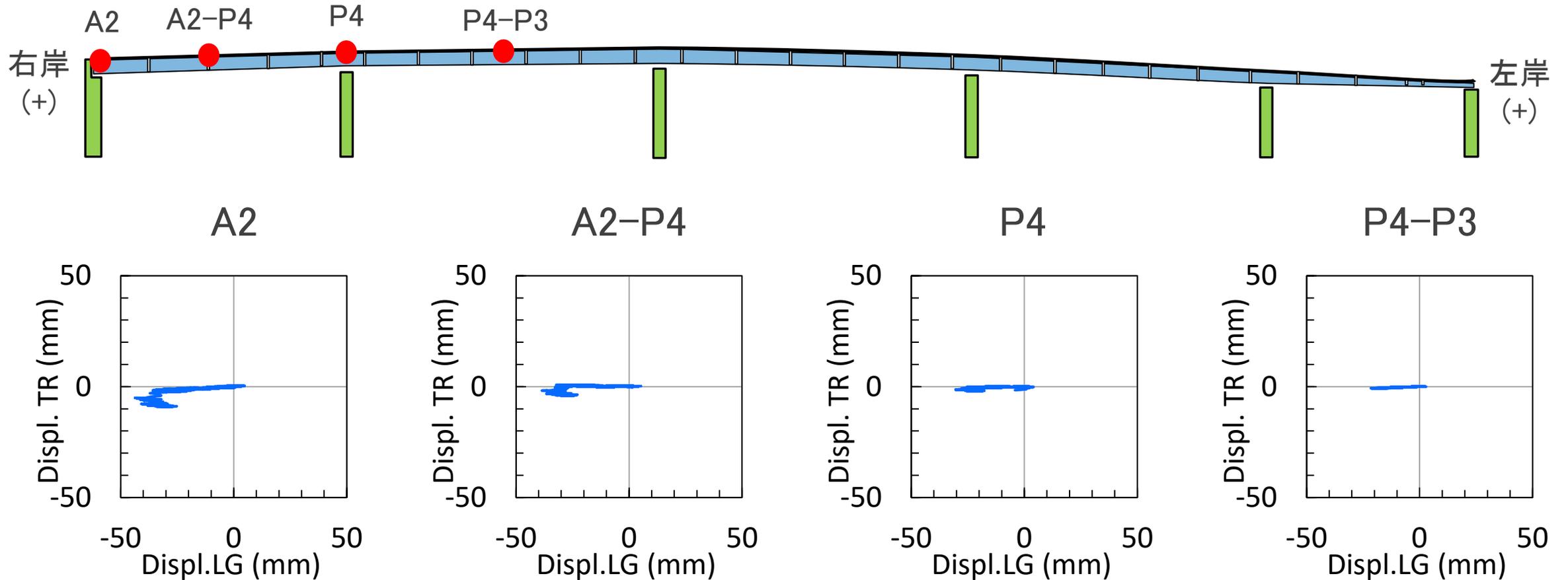


橋軸方向の変形挙動



橋軸方向への変形が卓越しており、温度が上昇すれば右岸側に伸びる。

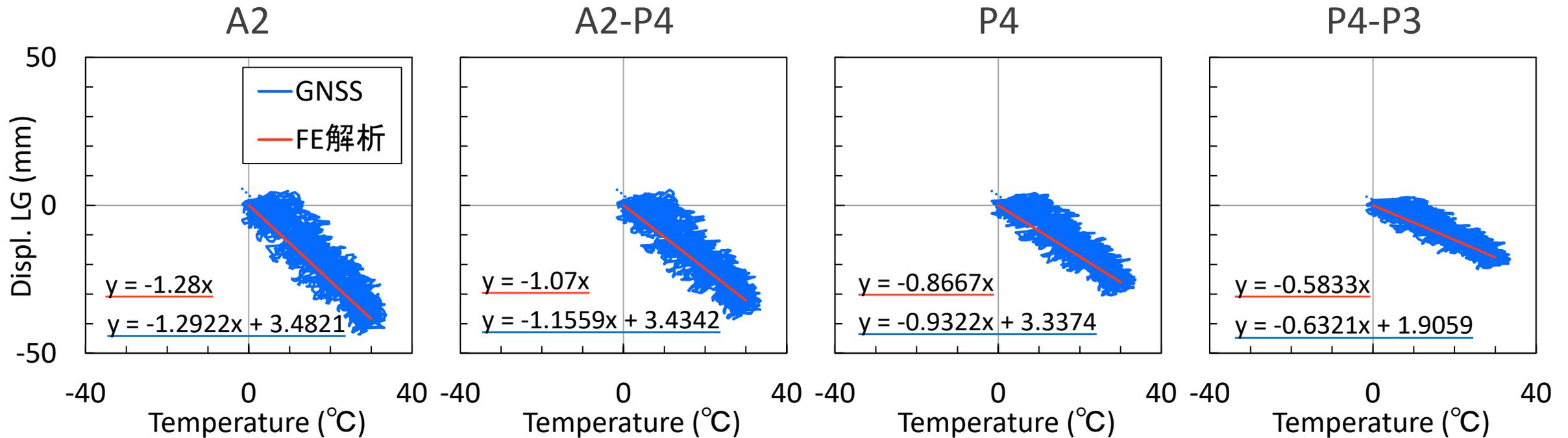
各計測点の半年間(冬~夏)の変形挙動



冬から夏にかけての温度上昇により、右岸側に伸びる

FE解析結果とGNSSモニタリングの比較

- FE解析で変形挙動を追跡し, GNSSモニタリング結果と比較



FE解析とGNSSモニタリングの結果はよく一致している

温度変化による実橋梁の変形挙動を再現することができた

結論

- 本研究では、長大特殊橋のデジタル・ツインの構築や異常検知に向けて下記の研究開発を行った。
- 橋梁構造物のGNSS変位モニタリングデータの誤差処理手法の提案
- 温度応力解析や構造解析による変形挙動の再現
- GNSS変位モニタリングデータの誤差処理手法の提案では、カルマンゲインとノイズ比に基づく誤差処理により、適切なノイズ除去を行うことが出来た。
- デジタル・ツインには、高精度な橋梁構造モデルが必要であるため、詳細なFEモデルを構築することで、温度変化時の橋梁構造の変形挙動が部分的に再現出来るようになった。

スタティック計測によるモニタリングシステム

- 計測データの平滑化により、長期トレンドの把握や定量的な評価が可能

