

都市デジタルツインへの衛星観測の統合と インフラモニタリングへの展開

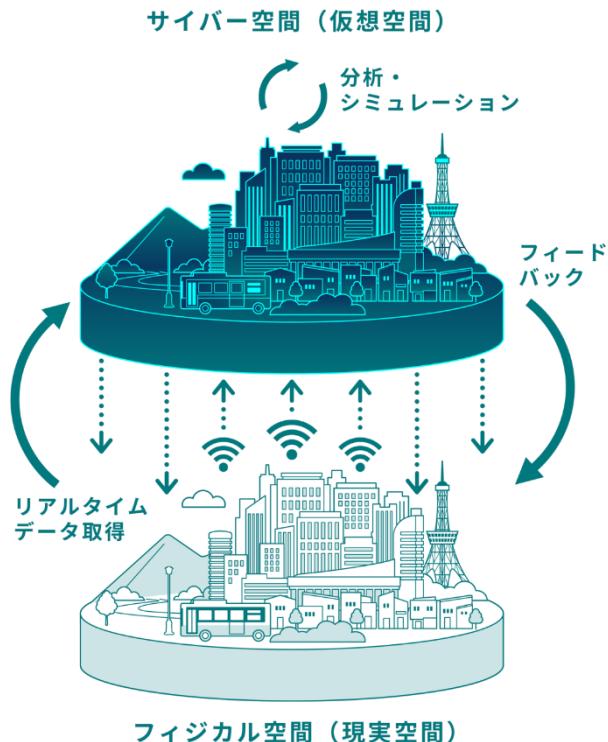
東京科学大学 宮本崇

デジタルツイン：高度な技術をあらゆる場所でローコストに適用するための基盤

- インフラ個々の詳細な管理と将来予測
- 高精度シミュレーションによる災害リスク評価

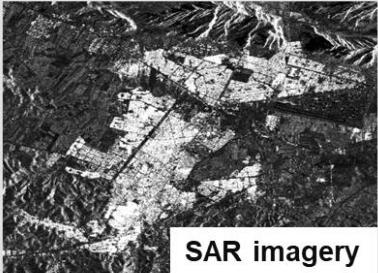
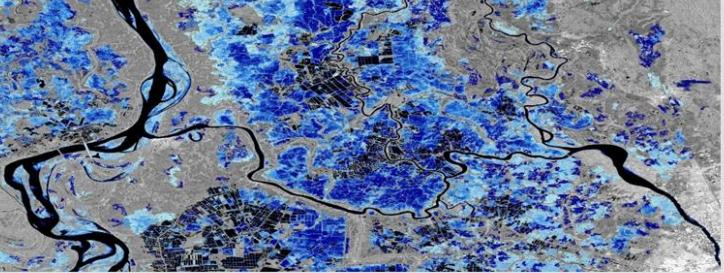
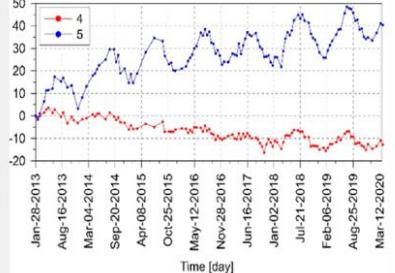
実現に向けた課題

- (様々な場所・形式で管理されるデータの処理)
- 観測の空間スケールと解像度の両立
- 実空間とデジタル空間の相互作用の適切なデザイン

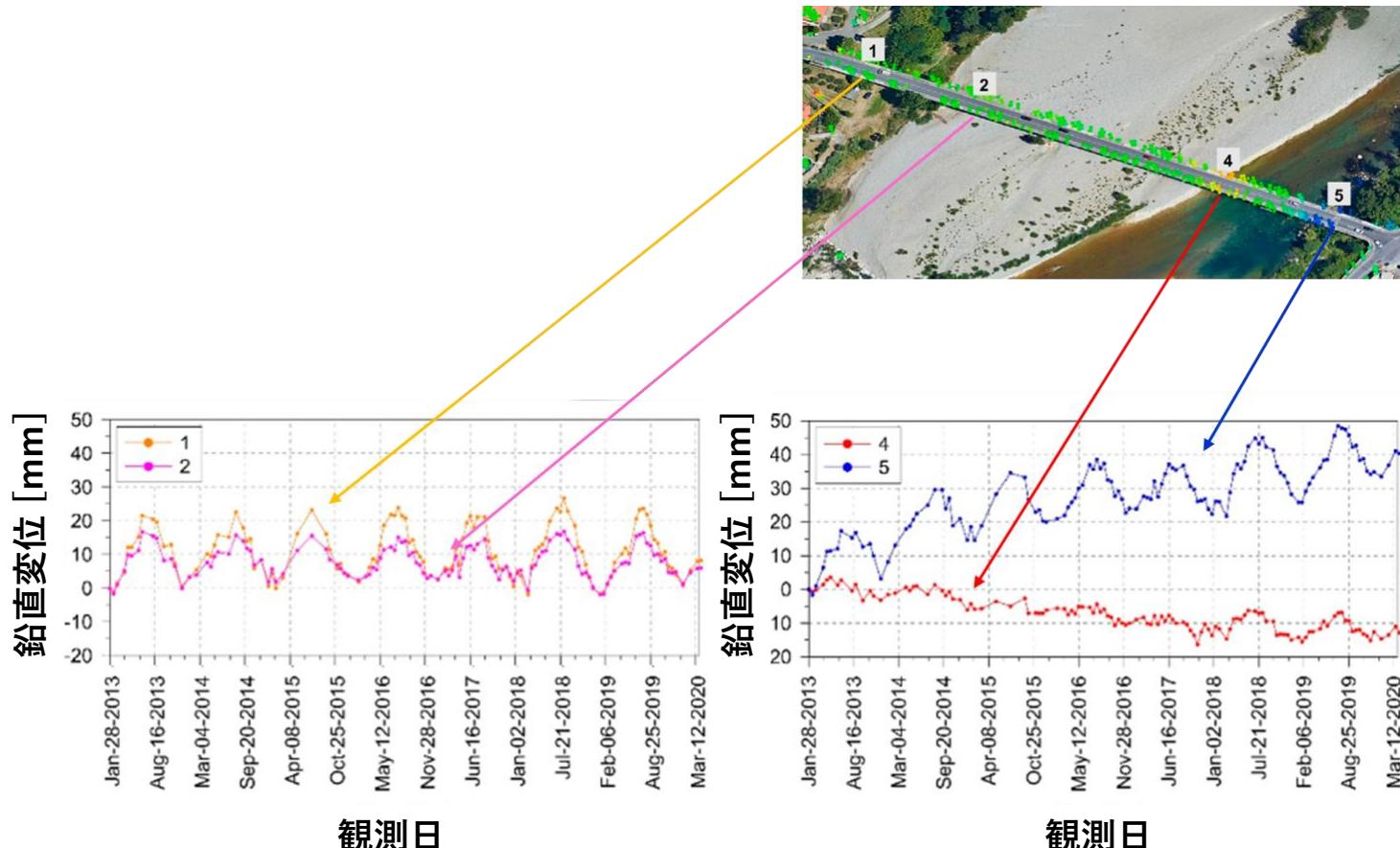


引用：東京都デジタルツイン実現プロジェクトHPより

- 経済的かつ包括的な計測手段として様々な時空間スケールの解析に活用
- 観測と解析の発展に伴い、近年はmm~cmスケールの現象も捉えられるように

	小規模現象	大規模現象
緊急観測	地震時の住宅被害分析 (Miyamoto+ IEEE J-STARS, 2021)  SAR imagery	洪水被害域の分析 (Miyamoto+ IEEE IGARSS, 2024) 
長期計測	橋梁のモニタリング (Miyamoto+ SEMC, 2025)  	土地利用の変遷 

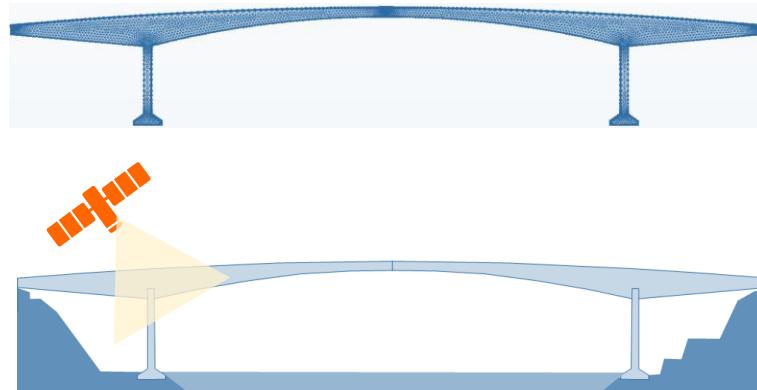
- 変位の長期的なモニタリングを通して、異常挙動の補足に成功した事例も報告
- 一方で、異常とノイズとの区別や異常挙動の原因の推測は困難



衛星観測とシミュレーションモデルの連携スキームを設計し、以下へと応用する

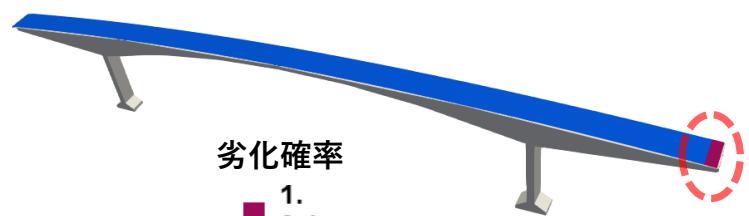
1. 衛星観測データの解釈性（異常/正常挙動/ノイズ）の向上
2. インフラ構造物の完全遠隔診断の実現

シミュレーションモデル（デジタル空間）



衛星観測（実空間）

インフラの遠隔モニタリング・遠隔診断



劣化確率

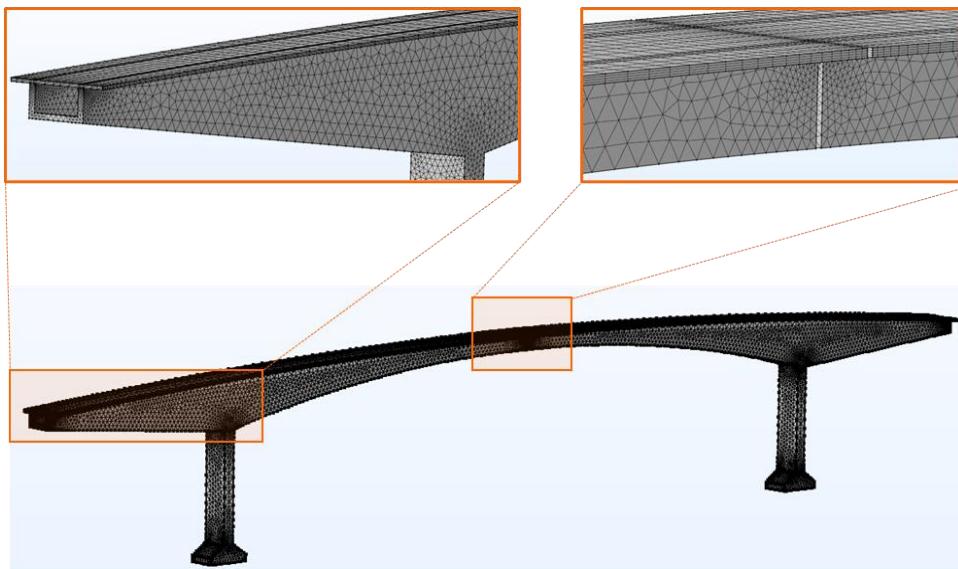
1.
0.1
0.01
0.01
0.001

- 橋台と桁を繋ぐ鋼棒の破断により、桁の跳ね上がりや路面段差が生じる事故が発生
- 過去の衛星観測データから事故の予兆補足やその原因推定を実施

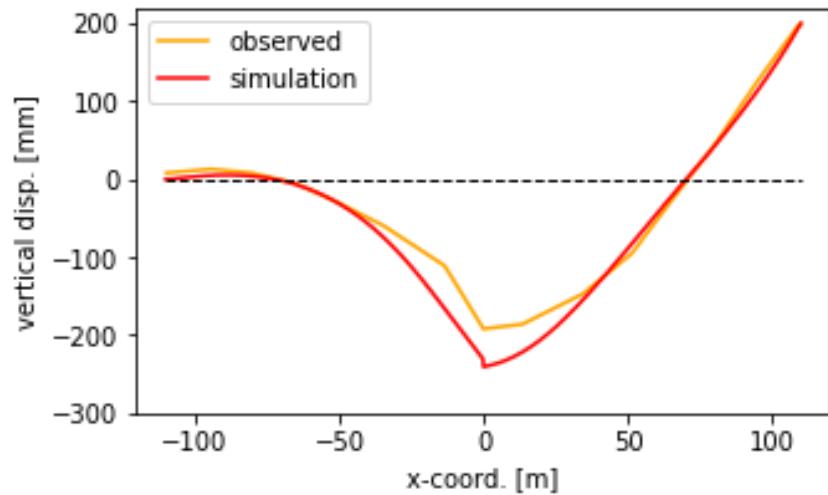


対象橋梁の形状や諸条件を精確に反映する3D FEMモデルを設計

- 要素数 約100,000, 自由度 約650,000
- 通常時・事故時の変位の再現解析による妥当性検証



上関大橋 3D FEMモデル



事故時変位の再現解析

デジタル空間



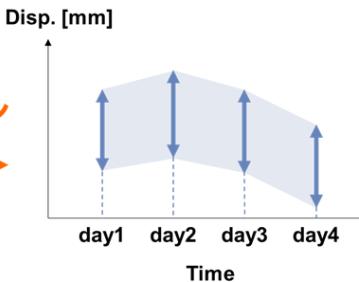
外気温・日照量

交通量

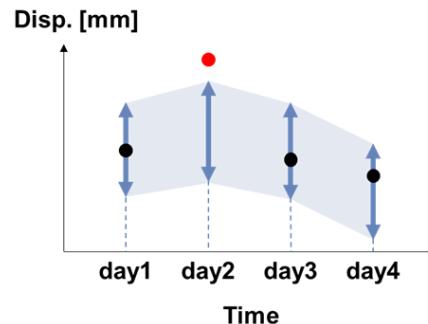
モンテカルロシミュレーション



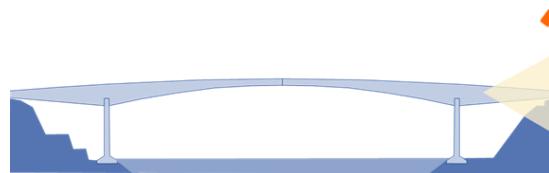
正常挙動の範囲



異常挙動の抽出

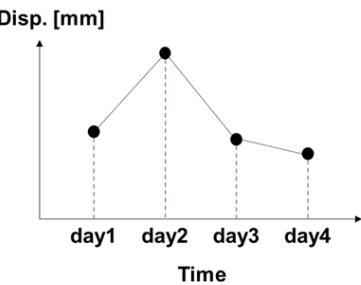


計測変位



衛星による変位計測

実空間

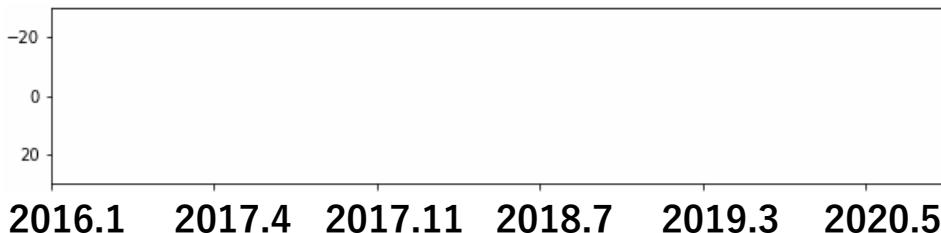
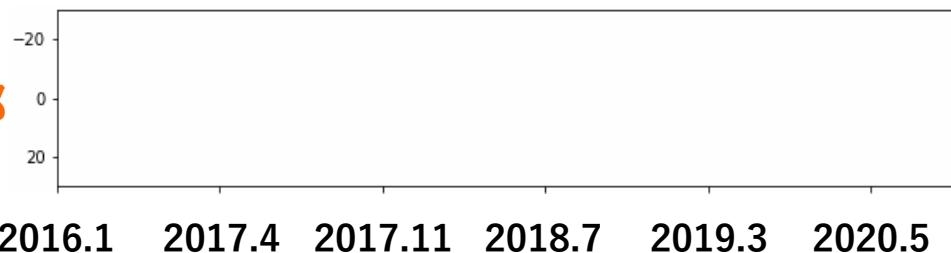
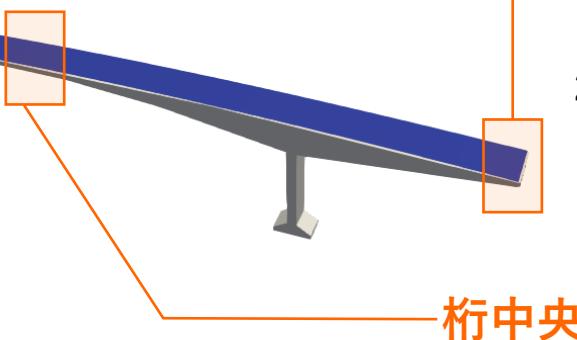


シミュレーションと観測変位の比較から異常挙動を定量的に評価

- 異常挙動の発生位置やタイミングを特定
- 一方で、まだ誤判定が多い → ノイズ低減の手法が必要

2016-01-16

- 正常
- 異常

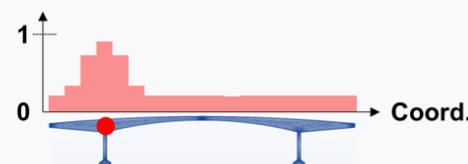


状態毎の異常発生尤度：FEMより解析的に導出

$p(\text{anomaly}|\text{normal})$



$p(\text{anomaly}|\text{bearing})$...



観測データ

2016-01-16

Normal

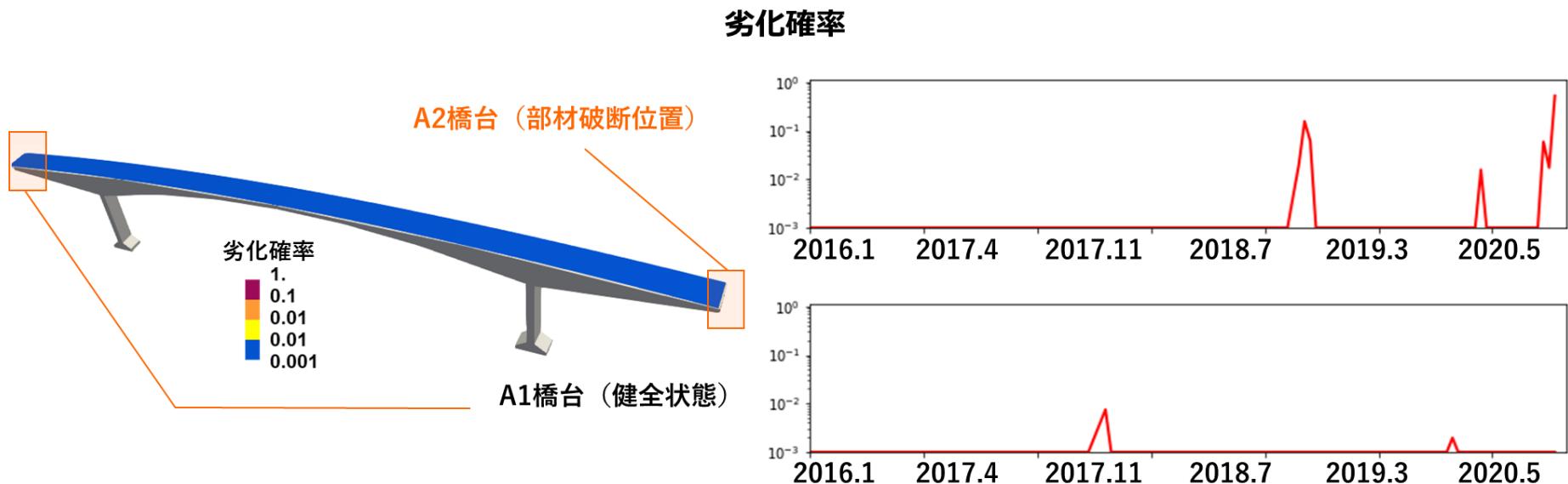
Anomaly



状態確率のアップデート

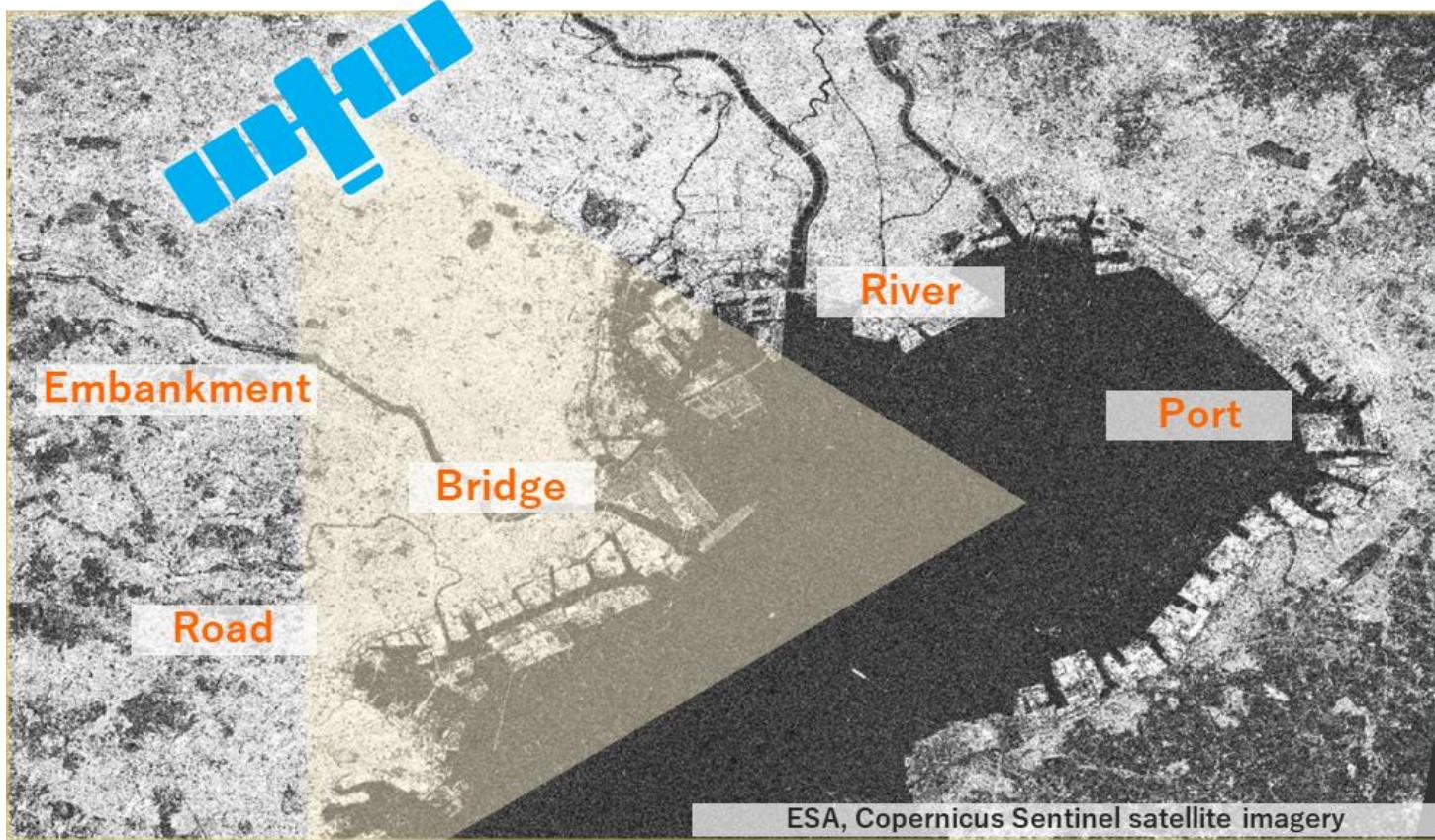
$$p(i)^{t+1} = \frac{p(\text{anomaly}| i)p(i)^t}{\sum_j p(\text{anomaly}| j)p(j)^t}$$

- 定期的な観測とアップデートを通じて誤報の影響を低減・修正
- 部材破断位置での劣化確率が事故直前に急上昇する結果
 - 部材破断に通じる劣化が事故直前に生じていた可能性を示唆



衛星デジタルツインによる低コストかつ包括的な都市モニタリングの実現

■同様のフレームワークの様々な構造物への展開

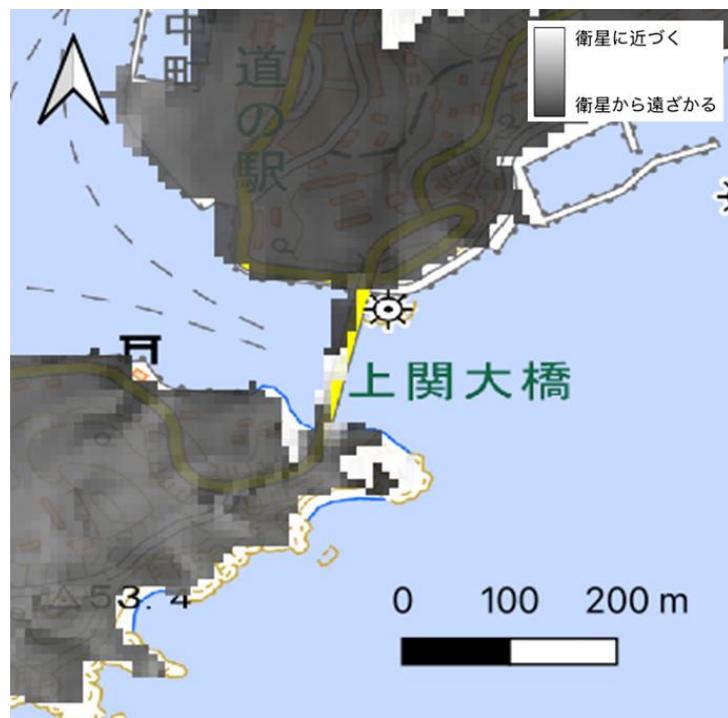


デジタルツインを利用した災害・事故時の観測データの模擬生成

→ 衛星データから異常・事故を直接検知するAIの学習データへの利用を想定



シミュレーションによる位相差



Sentinel-1による観測による位相差
2020/11/13 – 2020/11/25
(事故発生 : 2020/11/14)

- 衛星観測は都市を包括的・継続的にモニタリングする有力な手段である一方で、
強いノイズの影響やデータに含まれる情報の不足が応用上の課題となっている
- 本研究ではそのような衛星観測データとデジタル空間を連携させるスキームを
提案し、インフラ構造物の遠隔診断への応用を試行した
- 過去に部材劣化に伴う事故の生じた橋梁への適用からは、提案手法による
完全遠隔での異常挙動の検知や劣化部材の可能性が示唆されており、
都市全体を包括的かつローコストにモニタリングする都市デジタルツインを
実現する要素技術としての発展が期待される