

ENVI/SARscape ユーザカンファレンス 2025

# Sentinel-1 SARデータを用いた干渉時系列解析 によるコーナーリフレクタの非線形変位の計測

2025/11/06

東京ガス株式会社  
○山口 洸

NV5 Geospatial株式会社  
大串 文 誉

東京科学大学  
松岡 昌 志

未来をつむぐ エネルギー



- 東京ガスのご紹介
- 取り組み背景
- 手法： NN-PSI（Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry）の詳細
- NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測
- 残差高さ推定の精度に関する考察
- 結言

## ■ 東京ガスのご紹介

### ■ 取り組み背景

### ■ 手法： NN-PSI（Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry）の詳細

### ■ NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測

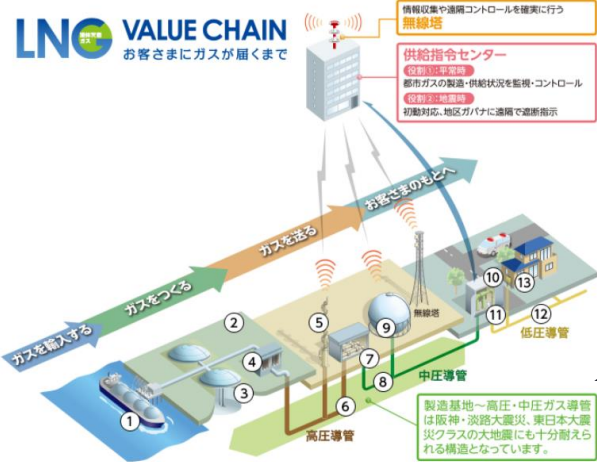
### ■ 残差高さ推定の精度に関する考察

### ■ 結言

# 東京ガスの設備

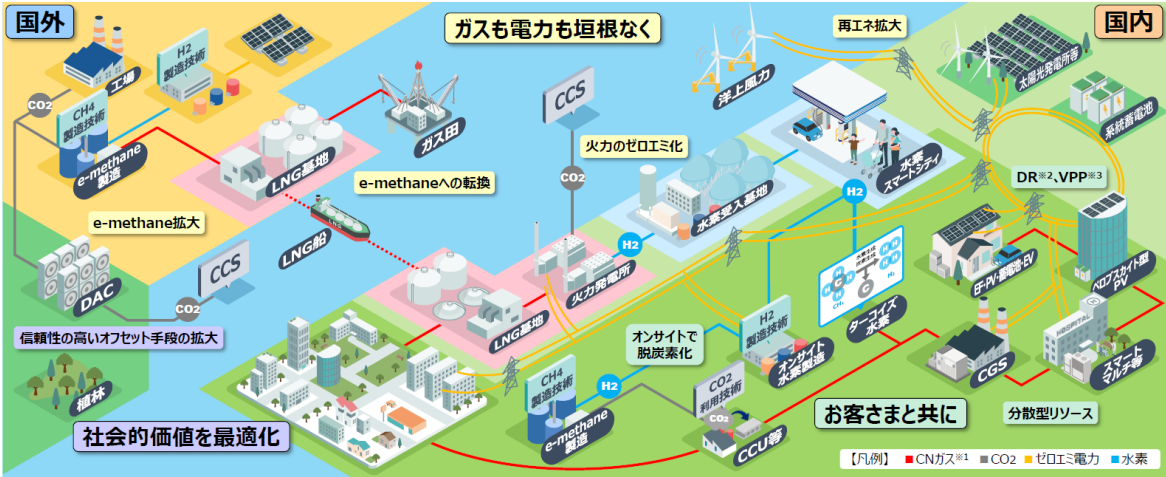
■ 東京ガスは総合エネルギー企業として、お客様へエネルギーを供給するための多数のインフラ設備を保有している

## 都市ガス供給設備



<https://www.tokyo-gas.co.jp/network/anzen/valuechain/index.html>

## 東京ガスの目指す2050年カーボンニュートラル社会像



カーボンニュートラルロードマップ2050より引用  
<https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20240322-03.pdf>

## 主要な都市ガス導管网

- ✓ 導管総延長は60,000 km以上におよぶ
- ✓ 関東全域に広範囲に存在





# 東京ガス研究所の取り組み

- 東京ガスの研究所では、多数のインフラ設備の安全性を担保すべく、設備の健全性評価・モニタリング手法の開発部隊が存在
  - 広範なエリアに存在する当社インフラ設備のモニタリング手法として、衛星によるリモートセンシング技術に着目
- ⇒ 本日は、この取り組み事例の一つをご紹介します

基盤技術部Fundamental Technology Department

Step forward from imagination to creation: aiming for a sustainable future through innovation

想像から創造へ、イノベーションが拓く持続可能な未来を目指して

脱炭素化や自然災害に対するレジリエンスの向上、デジタルトランスフォーメーション(DX)等、事業環境の急激な変化の中で、基盤技術部は技術の力でグリーン・トランスフォーメーション(GTX)を推進し、コーポレート研究組織としての役割を担いながら、東京ガスグループの持続的な成長と、お客さまと社会に対する新たな価値の提供を支えます。グループ経営理念のもと、お客さまや社会に寄り添いながらCO<sub>2</sub>ネット・ゼロの実現と持続可能な成長の両立を目指し、エコシステム・イノベーションにより次代のビジネスに繋がる戦略的な技術のインキュベーションに取り組むことで、グループ経営ビジョンであるCompass2030が拓く持続可能な社会へのトランジションを推進します。

The business environment in which we operate is undergoing profound and rapid transformation, driven by escalating demands for decarbonization, enhanced resilience against natural disasters, and advancements in Digital Transformation (DX). At the Tokyo Gas Group's Fundamental Technology Department—our corporate research institute—we are steadfast in our commitment to advancing Green Transformation (GTX) through the application of cutting-edge technology. Our mission is to underpin the sustainable growth of our business while delivering new value to our customers and society.

Anchored in the principles of our group's management philosophy, we strive to achieve the dual objectives of net-zero CO<sub>2</sub> emissions and long-term sustainable development. Guided by a customer-first ethos and a deep commitment to societal contribution, we are cultivating strategic technologies to support the next generation of businesses. Through innovation fostered within collaborative ecosystems, we are dedicated to expediting the transition toward a sustainable society, as articulated in our group's management vision, "Compass2030".

Hamamatsu-cho  
Yokohama

横浜テクノステーション  
Yokohama Techno Station  
—次世代技術研究所  
Next-generation Technology Research Institute—

Organization Chart  
組織図 (2025年4月)

グリーン・トランスフォーメーションカンパニーGreen Transformation Company

再生可能エネルギー事業部Renewable Energy Business Development Dept.

洋上風力開発部Offshore Wind Dept.

e-methane推進部e-methane Business Development Dept.

水素・カーボンマネジメント技術戦略部Hydrogen & Carbon Management Technology Strategy Dept.

基盤技術部Fundamental Technology Department

次世代技術研究所Next-generation Technology Research Institute

知的財産室Intellectual Property Office

AI活用・DXソリューション開発チームAI Applications and DX Solution Development

分散型エネルギー資源・モビリティ活用チームDistributed Energy Resources, Mobility utilization

インフラ評価高度化チームInfrastructure Assessment

風力・流体解析チームWind energy, Thermo and Fluid Dynamics

研究推進チームResearch Promotion

契約チームIP Practice

権利化チームIP Promotion

知財管理・企画チームIP Administration & Planning

知財活用推進チームIP Utilization Promotion

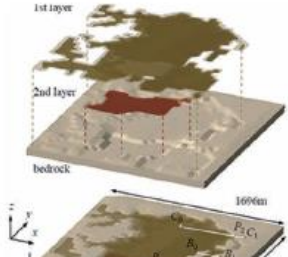
■インフラ評価高度化チームInfrastructure Assessment

地盤振動解析による耐震性評価、材料試験や有限要素解析による構造強度評価といった技術を駆使し、首都圏の天然ガスインフラのさらなる強靱化に貢献しています。さらに、衛星によるリモートセンシング技術の開発、発電設備のメンテナンス効率化、先端的な消費機器の開発支援、各種構造物へのヘルスマニタリング技術の適用等にも取り組み、各事業領域におけるLNGバリューチェーンの変革を支えています。

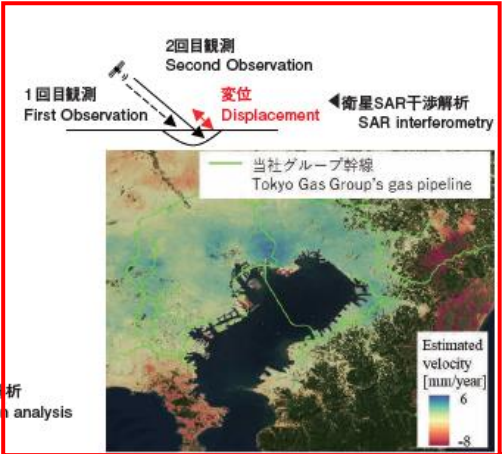
We are engaged in research involving earthquake resistance evaluation using ground motion analysis and structural assessment via experiments and finite element analysis. Using these technologies, we contribute to building resilience of the natural gas infrastructure in the Tokyo metropolitan area. Furthermore, we are supporting the transformation of the LNG value chain in each business domain in Tokyo Gas by developing satellite remote sensing technology, improving the efficiency of maintenance of power generation facilities, supporting the development of advanced consumer equipment, and applying structural health monitoring technology to various facilities.



▲ ガスパイプラインの変形挙動解析  
FEM simulation for deformation of gas pipeline



地震波  
Seismic wave



- 東京ガスのご紹介

- **取り組み背景**

- 手法： NN-PSI（Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry）の詳細

- NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測

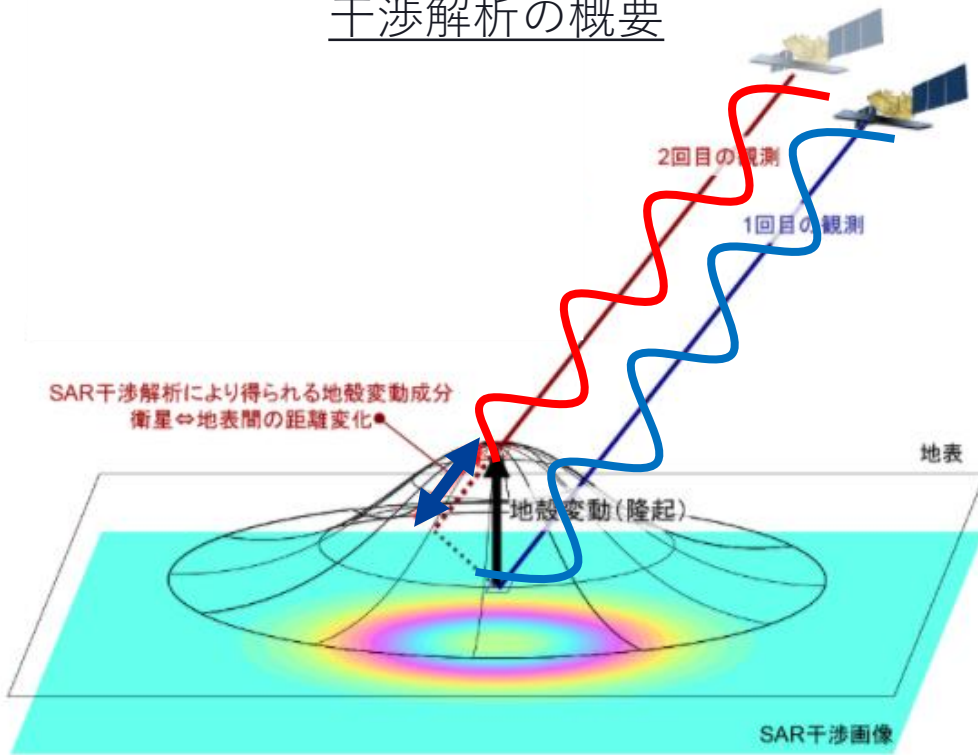
- 残差高さ推定の精度に関する考察

- 結言

# 背景

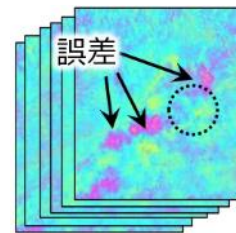
- 合成開口レーダ（SAR : Synthetic Aperture Radar）データを用いた干渉解析は、対象物の変位を推定でき、災害時の地表面変位やインフラ設備のモニタリングに活用されている。
- 中でも時系列干渉解析は、多時期の干渉解析により変位推定精度が向上し、広く活用されている。
- 特に時系列干渉解析の一種である**Persistent Scatterer Interferometry（PSI）**は、マイクロ波が安定して強く反射する点において解析する手法で、過密な都市域でも変位推定が可能である。

## 干渉解析の概要

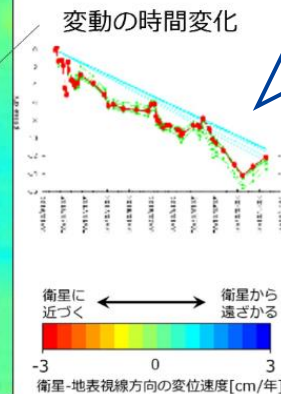
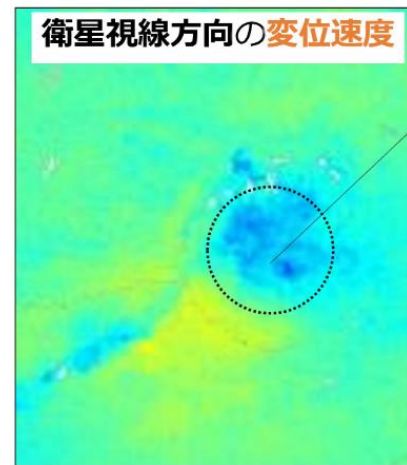


引用元：国土地理院HP

## 時系列干渉解析の概要



様々な誤差を含む  
多数のSAR干渉画像



- ✓ 時系列歴に精緻な変位を推定可能
- ✓ 手法として下記等が存在
  - SBAS法
  - PSI

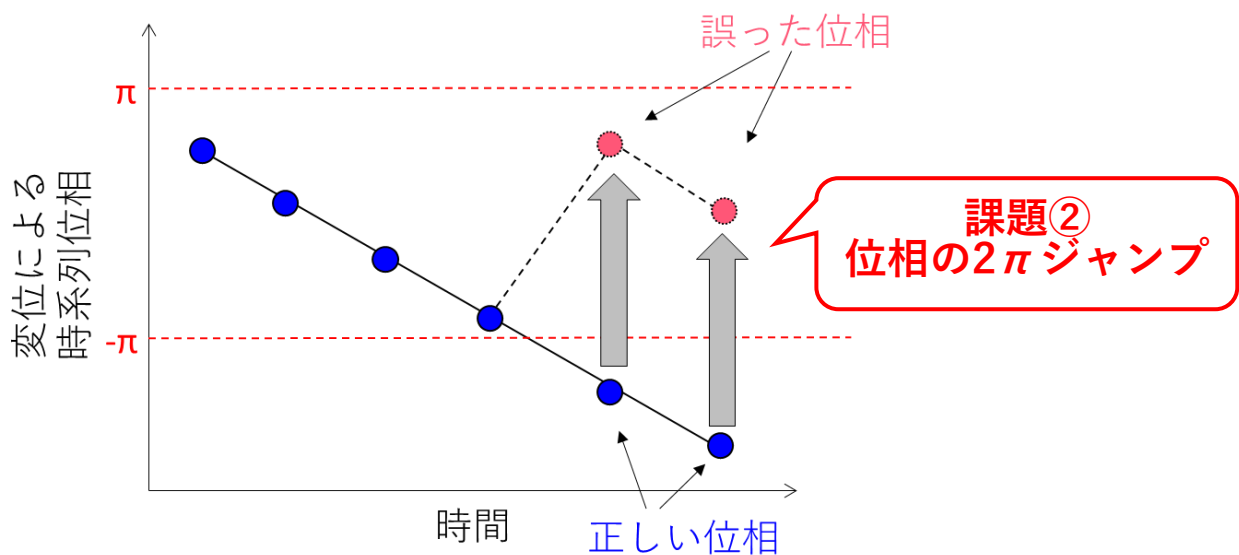
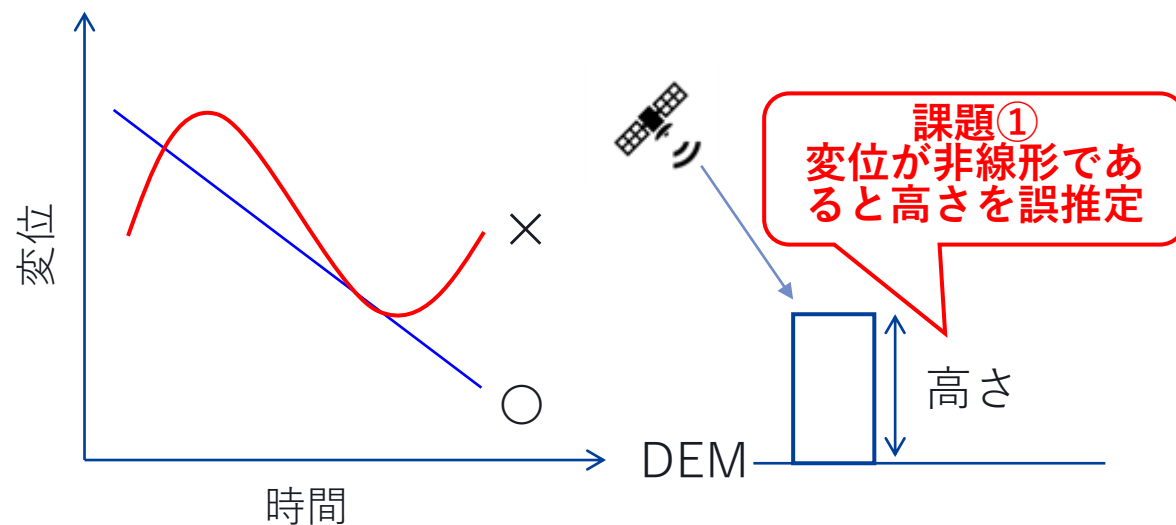
引用元：国土地理院HP



# 現状のPSIの課題

## ■ PSIには、以下に挙げる二点の課題が存在

- ✓ 【課題①】 対象物が時間に対し線形に変位することを想定しており、非線形変位に対しては正しく対象物の高さを推定できず、結果変位推定精度が下がる
- ✓ 【課題②】 推定できる変位の範囲が、 $-\pi$  から  $\pi$  に限定され、対象物がこの範囲以上に変位した場合、位相の $2\pi$ ジャンプが生じる

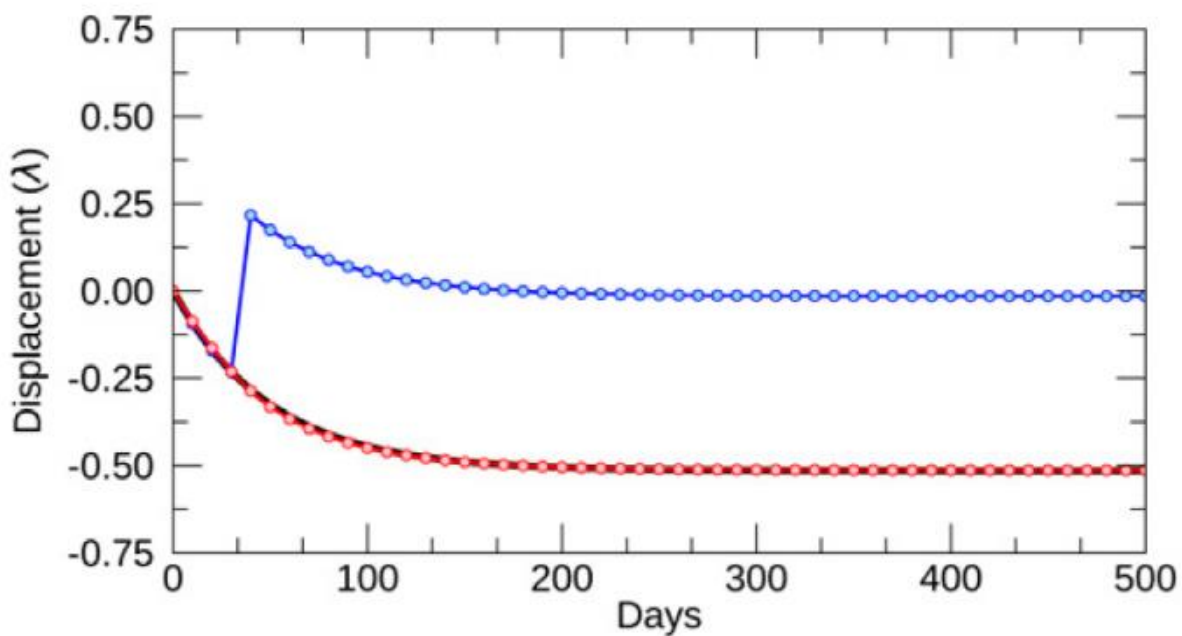




# 発展手法：NN-PSI

- PSIの課題を解決する手法として、大串らは、非線形かつ大変位においても精緻に対象物の変位を推定可能な **Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry (NN-PSI)** を開発
- ただし、NN-PSIの有効性検証は数値シミュレーションによるものが主であり、**実測変位を用いた実験による有効性検証は多くない**

NN-PSIの有効性を確認した数値シミュレーションの例



- 変位
- 既往のPSIによる推定変位
- NN-PSIによる推定変位

引用元：F. Ogushi et al., "Implementation of Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry and Its Robustness for Displacement Monitoring", Sensors 2021, 21(3), 1004

# 研究目的

## 実測変位を用いた実験により、NN-PSIの有効性の検証を行う

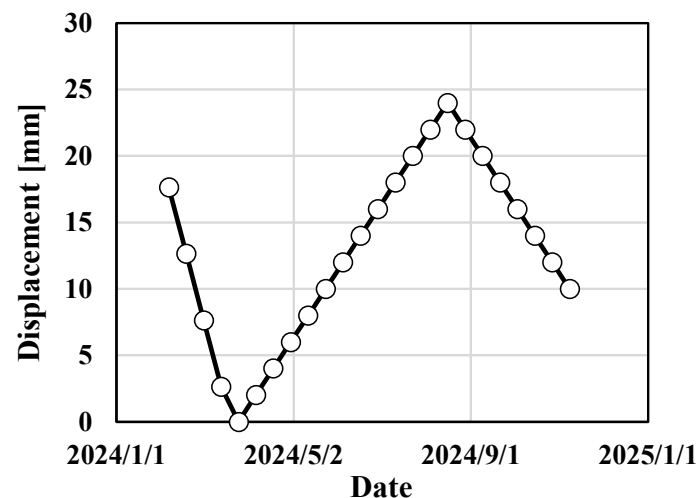
### 実施事項

- 観測対象物としてマイクロ波を高強度で反射可能なコーナリフレクタ（CR）を選定
- Sentinel-1回帰周期ごとにCRに、時間に対して非線形な変位を付与
- Sentinel-1データを用いたNN-PSIにより、CRの変位を推定、既往のPSI（Conv. PSI）との変位推定精度の差異を確認

観測対象としたCR



CRの変位



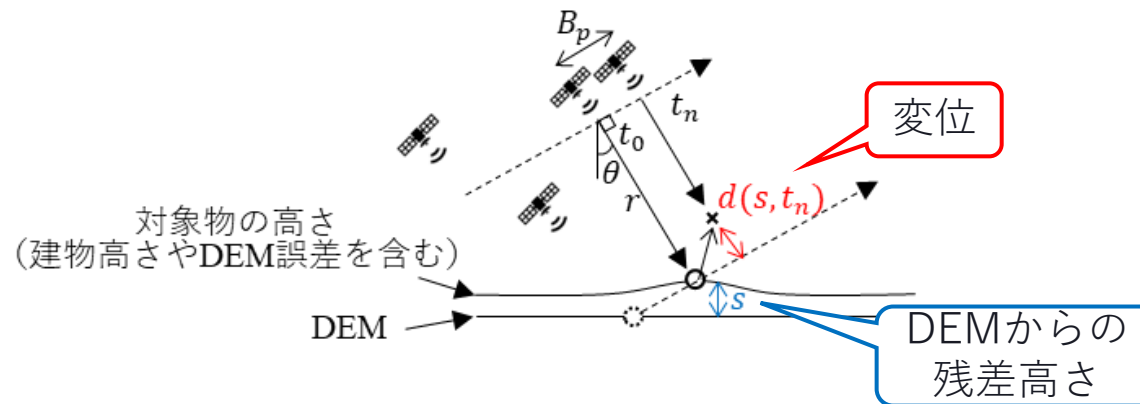
- 東京ガスのご紹介
- 取り組み背景
- **手法： NN-PSI (Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry) の詳細**
- NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測
- 残差高さ推定の精度に関する考察
- 結言

# 既往のPSI (Conv. PSI) の概要

- 干渉処理により得られる位相差 $\Delta\phi_n$ は、軌道誤差や大気誤差を除くと以下で表される

$$\Delta\phi_n = \frac{4\pi}{\lambda} \left( \underbrace{d(s, t_n)}_{\text{観測位相差}} + \underbrace{\frac{B_p}{r \sin \theta} \times 10^3 s}_{\text{変位による位相差}} \right)$$

残差高さによる位相差



残差高さを推定した上で、観測位相差から残差高さによる位相差を差し引き、変位を推定する

# 既往のPSI (Conv. PSI) の残差高さ推定法

- 残差高さを推定するために、時系列コヒーレンス $\gamma(s, v)$ を用いたEVスペクトラムを使用する

- ✓ **【時系列コヒーレンス】** 2つのシグナル（複素数）の類似度を示す指標値で、ここでは全干渉ペアの「観測位相差 $\Delta\phi_n$ 」と「推定位相差 $\Delta\phi'_n$ 」のコヒーレンスとする
- ✓ **【EVスペクトラム】** 縦軸に残差高さ $s$ 、横軸に変位速度 $v$ をとり、各セルに時系列コヒーレンスを入れた表である

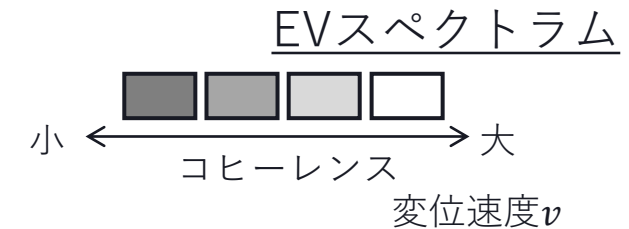
- EVスペクトラムを用いた残差高さの推定法は下記フローに則る

- ① 考えられる全ての残差高さ $s$ および線形変位速度 $v$ に対して時系列コヒーレンス $\gamma(s, v)$ を計算、EVスペクトラムを作成
- ② 変位が線形であるという仮定のもと、**EVスペクトラム上のコヒーレンス最大点**が実際の残差高さ $s$ であると決定
- ③ 観測位相差から**残差高さによる位相差を差し引き、変位による位相差を抽出**
- ④ 抽出された変位による位相差を、マイクロ波の波長情報をもとに変位に変換する。

$$\gamma(s, v) = \left| \frac{\sum_{n=1}^N \exp(j\Delta\phi_n - j\Delta\phi'_n)}{N} \right|$$

N: 全干渉ペア数

j: 虚数単位



	Velocity <sub>1</sub>	Velocity <sub>2</sub>	Velocity <sub>3</sub>	...	Velocity <sub>i</sub>
Elevation <sub>1</sub>	$\gamma(1,1)$	$\gamma(2,1)$	$\gamma(3,1)$	...	$\gamma(i,1)$
Elevation <sub>2</sub>	$\gamma(1,2)$	$\gamma(2,2)$	$\gamma(3,2)$	...	$\gamma(i,2)$
Elevation <sub>3</sub>	$\gamma(1,3)$	$\gamma(2,3)$	$\gamma(3,3)$	...	$\gamma(i,3)$
...	...	...	...	...	...
Elevation <sub>j</sub>	$\gamma(1,j)$	$\gamma(2,j)$	$\gamma(3,j)$	...	$\gamma(i,j)$

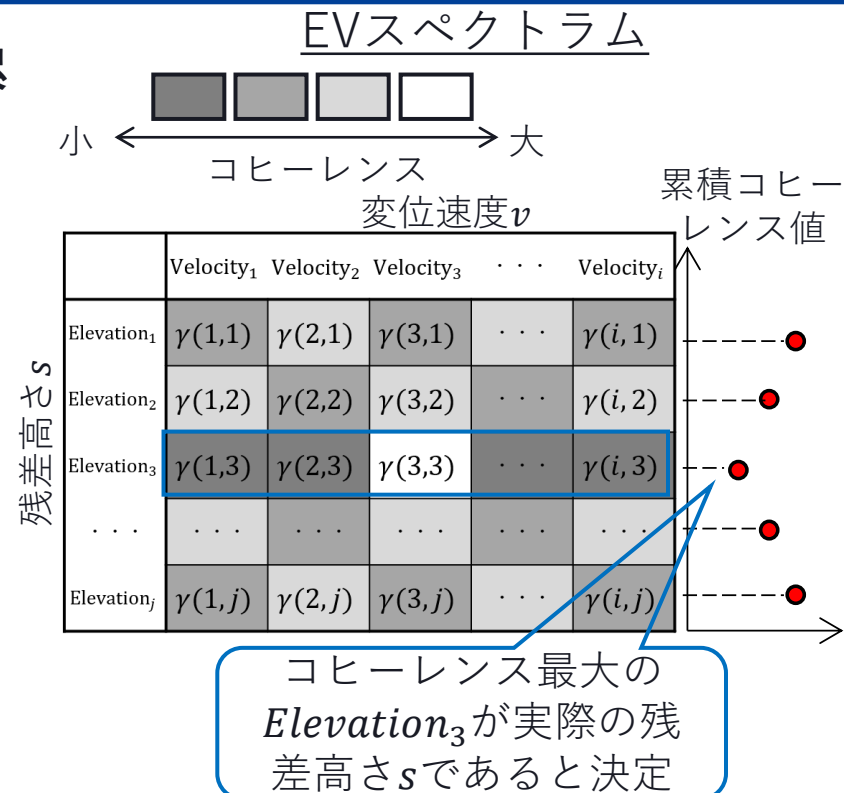
コヒーレンス最大のElevation<sub>3</sub>が  
実際の残差高さ $s$ であると決定



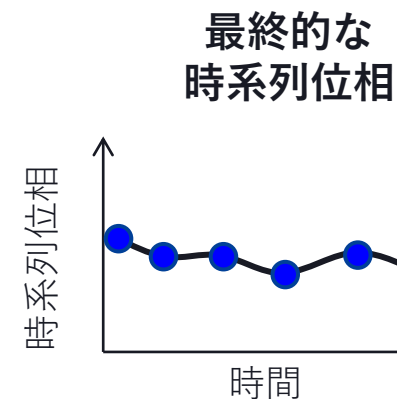
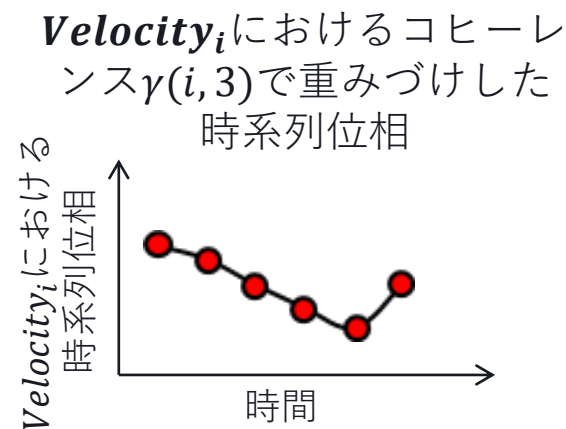
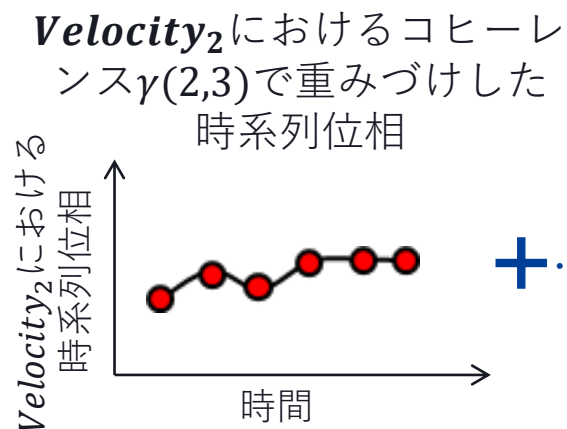
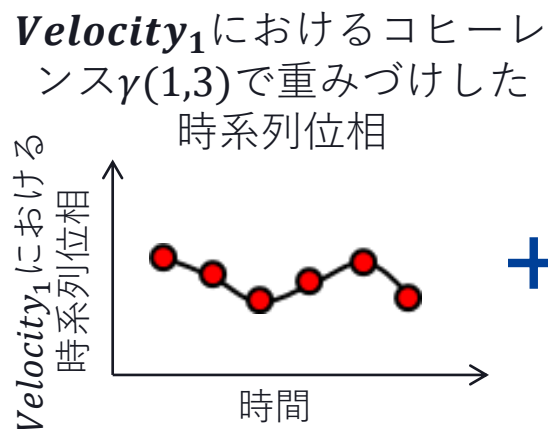
# NN-PSIの残差高さ推定法

■ NN-PSIでは、各残差高さのコヒーレンスを変位速度方向に累積した値（**累積コヒーレンス値**）を比較し残差高さの推定

- ① Conv. PSIと同様にEVスペクトラムを作成
- ② EVスペクトラムにおいてコヒーレンスが高くなる点以外の同一残差高さのコヒーレンスは低くなることを利用し、**累積コヒーレンス値が最小**となる残差高さを実際の残差高さ $s$ と決定
- ③ 決定された残差高さにおいて考えられる**全ての**変位速度について**時系列変位位相**を算出し、各変位速度の時系列コヒーレンスを重みとして**足し合わせ**、**変位による位相**を算出

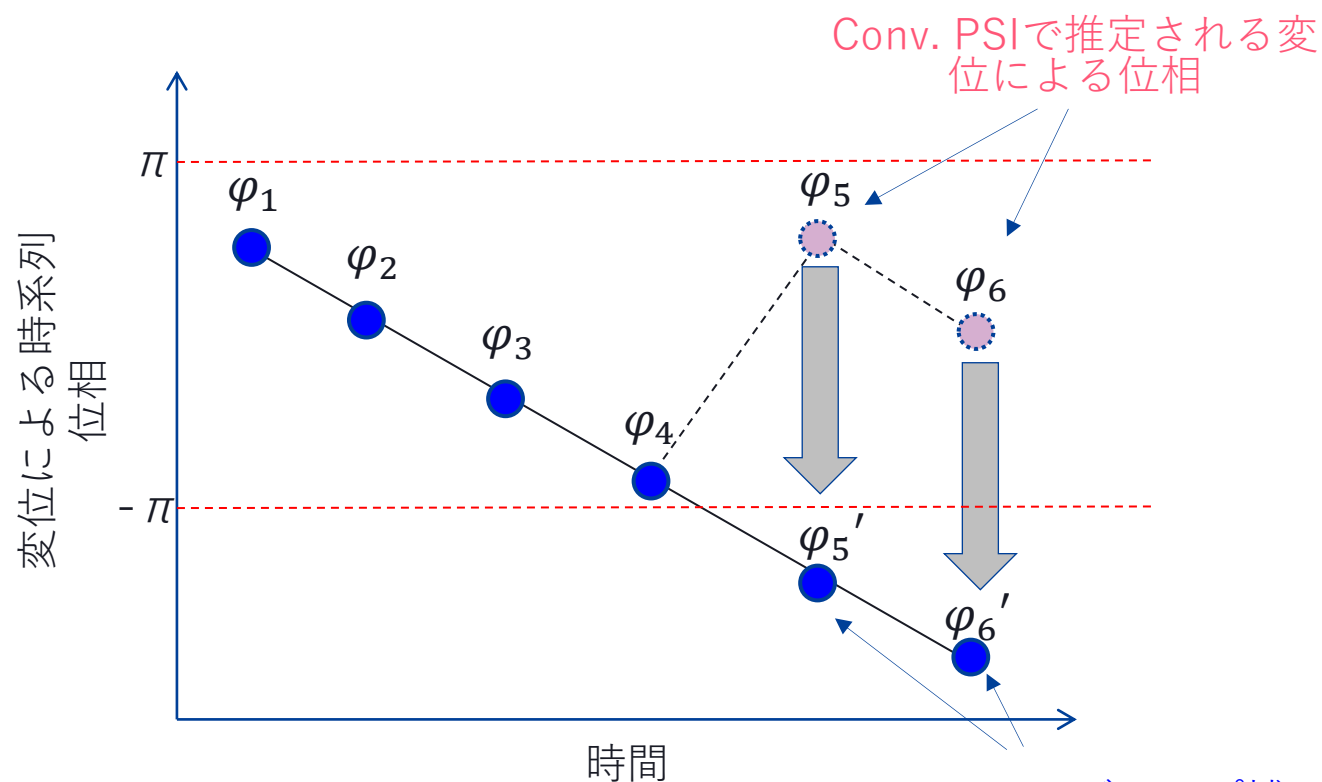


## 変位による位相差算出法



# NN-PSIの $2\pi$ ジャンプ補正法

- 前頁の通り、NN-PSIは考えられる全ての変位速度による位相を計算しており、求まった位相は観測時間において連続的である
- 上記連続性を活かし、 $2\pi$ ジャンプが生じる箇所を特定・補正が可能



$2\pi$ ジャンプの生じた回数 $k_n$ を算出

$$k_n = \sum_{n=1}^N \text{Round} \left[ \frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{2\pi} \right]$$

$$\varphi_n' = \varphi_n + 2\pi k_n$$

$2\pi$ ジャンプの生じた回数 $k_n$ に応じて位相を補正

$2\pi$ ジャンプ補正によりNN-PSIで推定される変位による位相

- 東京ガスのご紹介
- 取り組み背景
- 手法： NN-PSI（Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry）の詳細
- **NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測**
- 残差高さ推定の精度に関する考察
- 結言

# 実験概要

- 観測対象物としてマイクロ波を高強度で反射可能なコーナリフレクタ（CR）を東京ガス敷地内に設置
- SAR衛星であるSentinel-1の回帰周期ごとに、CRの高さを時間に対して非線形に変更（非線形変位を付与）
- Sentinel-1データを用いたNN-PSIにより、CRの変位を推定、既往のPSI（Conv. PSI）との変位推定精度の差異を確認

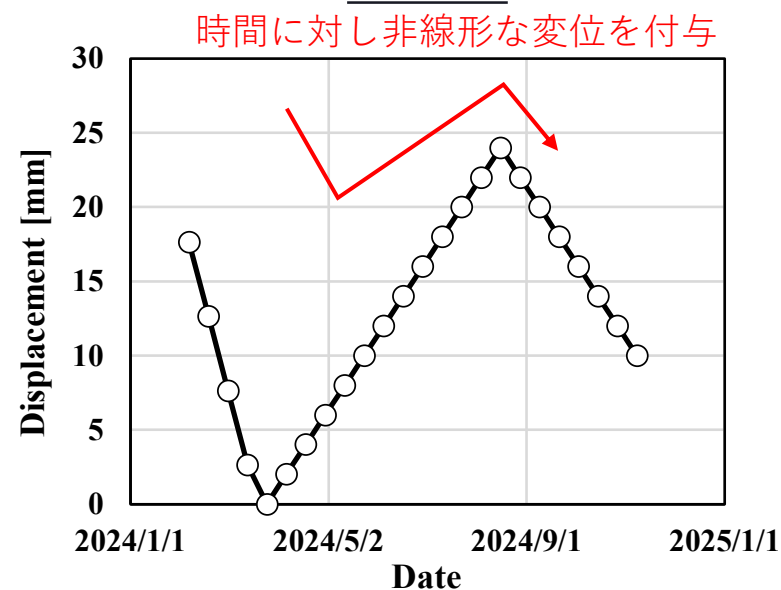
CR設置箇所



CR変位管理法



CR変位



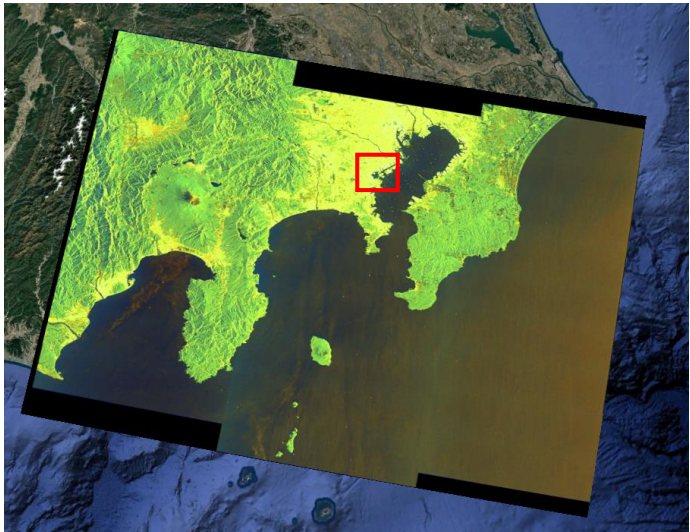


# 使用データ

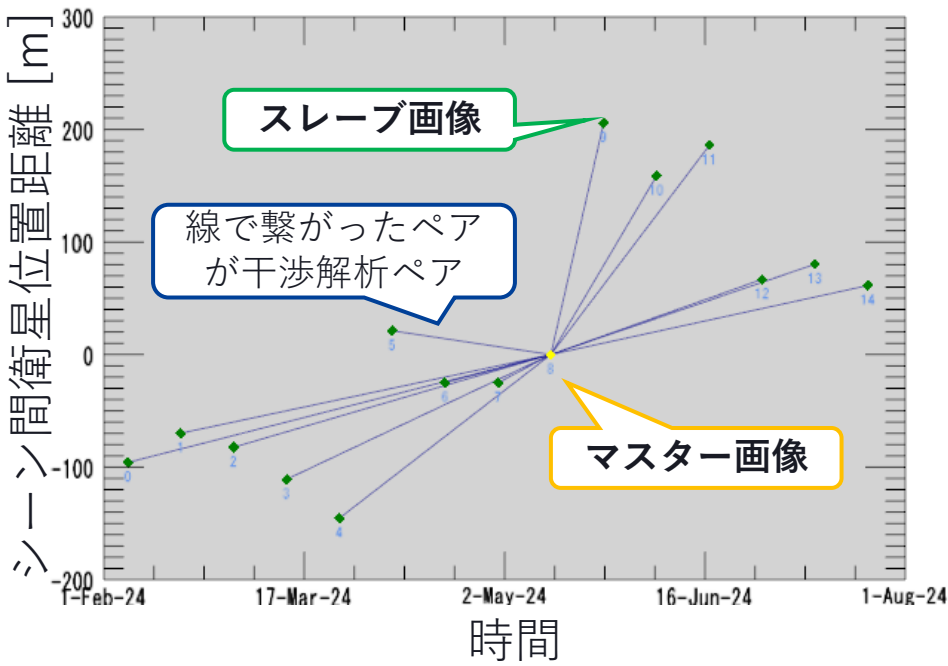
■ 関東を撮影したSentinel-1 SARデータ計24枚を使用

使用データ

シーンNo.	観測日	シーンNo.	観測日
1	2024/2/6	13	2024/6/29
2	2024/2/18	14	2024/7/11
3	2024/3/1	15	2024/7/23
4	2024/3/13	16	2024/8/4
5	2024/3/25	17	2024/8/16
6	2024/4/6	18	2024/8/28
7	2024/4/18	19	2024/9/9
8	2024/4/30	20	2024/9/21
9	2024/5/12	21	2024/10/3
10	2024/5/24	22	2024/10/15
11	2024/6/5	23	2024/10/27
12	2024/6/17	24	2024/11/8



干渉ペアに関するコネクショングラフ※

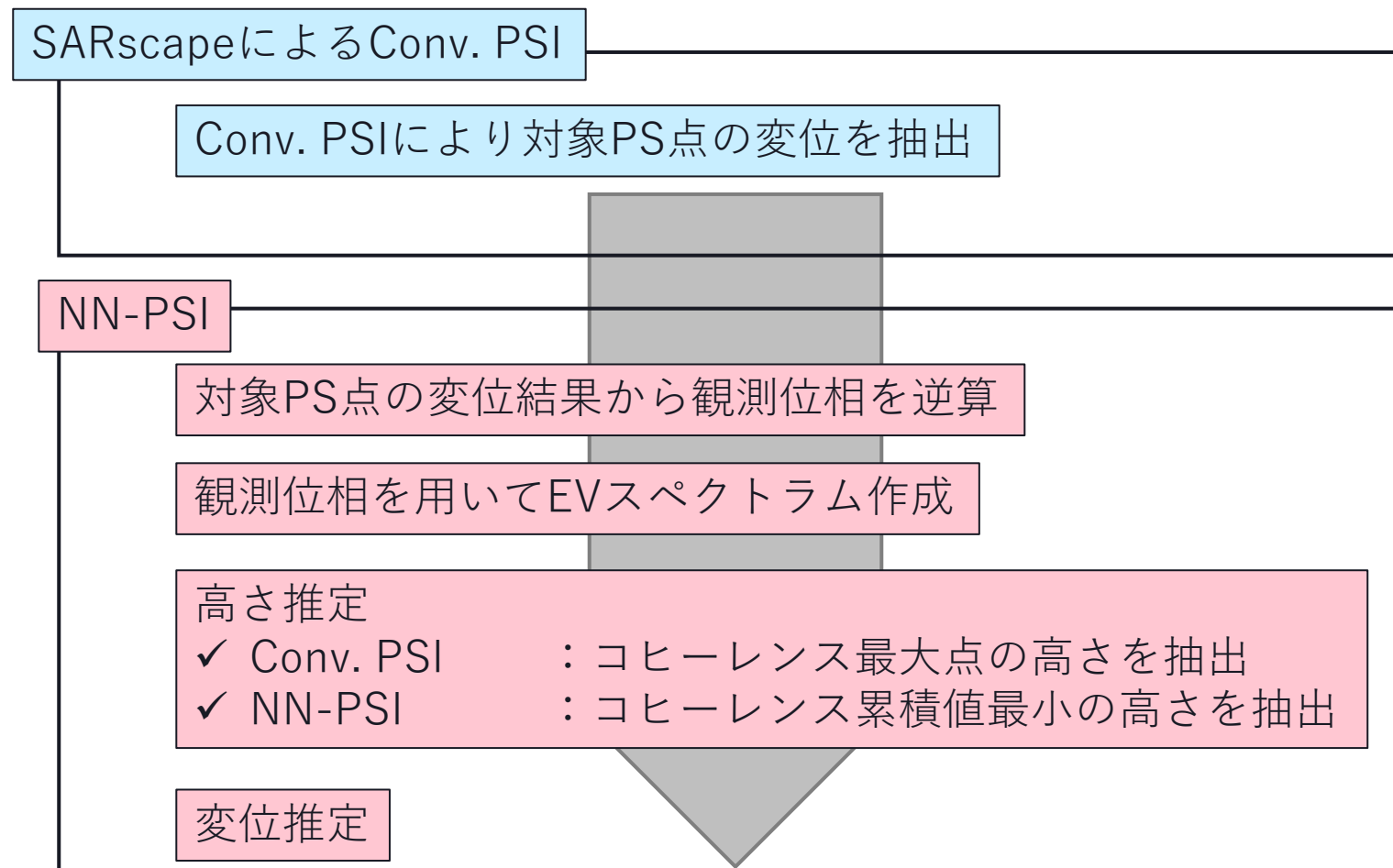




# NN-PSIの計算フロー

- Conv. PSIとNN-PSIの差異は「残差高さ推定手法」および「変位推定結果の $2\pi$ ジャンプ補正」であり、その他の解析フローに差異はない

⇒SARscapeを使用したConv. PSIを実施した後に、得られた変位情報をもとにNN-PSIを実施した



# SARscapeで得られたPS点の分布

- SARscapeで実施した従来のPSIにより得られたPS点は下図の通り
  - **CRからの反射点**では、**CRにより後方散乱強度が高く安定している**と推定されるため、後方散乱強度の平均値 $\mu$ および標準偏差 $\sigma$ の比である $\mu/\sigma$ が高いPS点をCRからの反射点とみなした。
- ⇒抽出されたCRからの反射点に対し、NN-PSIを実施

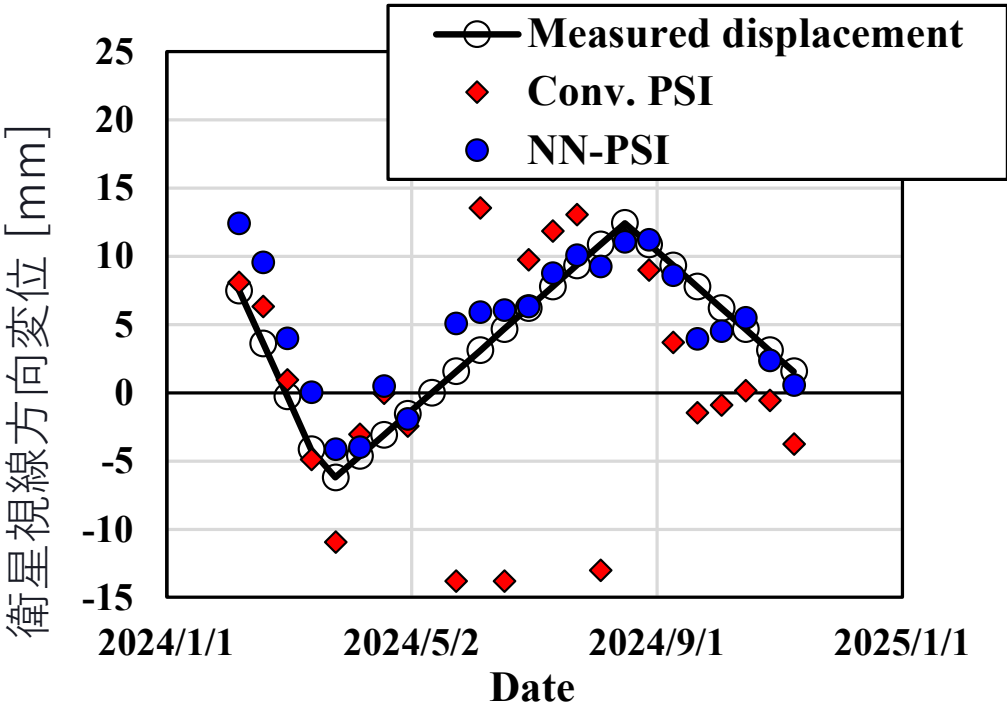


# 変位推定結果

■ **Conv. PSI（従来手法）** および **NN-PSI（新手法）** を用い変位推定結果の比較を行った

- ✓ **Conv. PSI**：変位推定誤差 8.3 mm
- ✓ **NN-PSI**：変位推定誤差 2.6 mm

⇒ 結果、**NN-PSIの方が精度高くCRの非線形変位を推定できる**ことが示唆された  
(ただし、Conv. PSIもCRの「沈下→隆起→沈下」という大まかな傾向は推定できている)



	Conv. PSI	NN-PSI
推定残差高さ [m]	-30	-5
実測変位との誤差 (RMSE) [mm]	8.3	2.6

# 目次

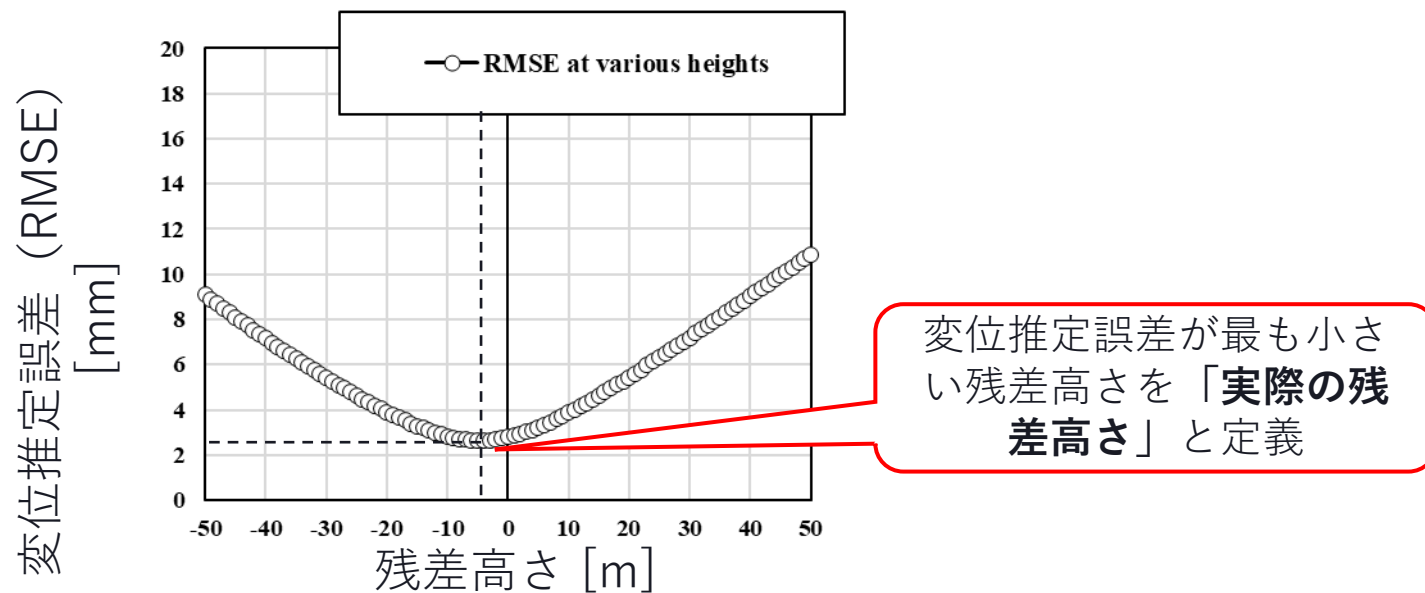
- 東京ガスのご紹介
- 取り組み背景
- 手法： NN-PSI（Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry）の詳細
- NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測
- 残差高さ推定の精度に関する考察
- 結言

# 残差高さ推定の精度に関する考察の概要

- Conv. PSIとNN-PSIでは、変位に加えて、残差高さ推定の結果も異なった。
  - 上記要因はEVスペクトラムからの残差高さ推定手法がConv. PSIとNN-PSI で異なるためと推察される。
- ⇒NN-PSIの特徴の一つである残差高さ推定手法の精度について検証した。

## 検証方法

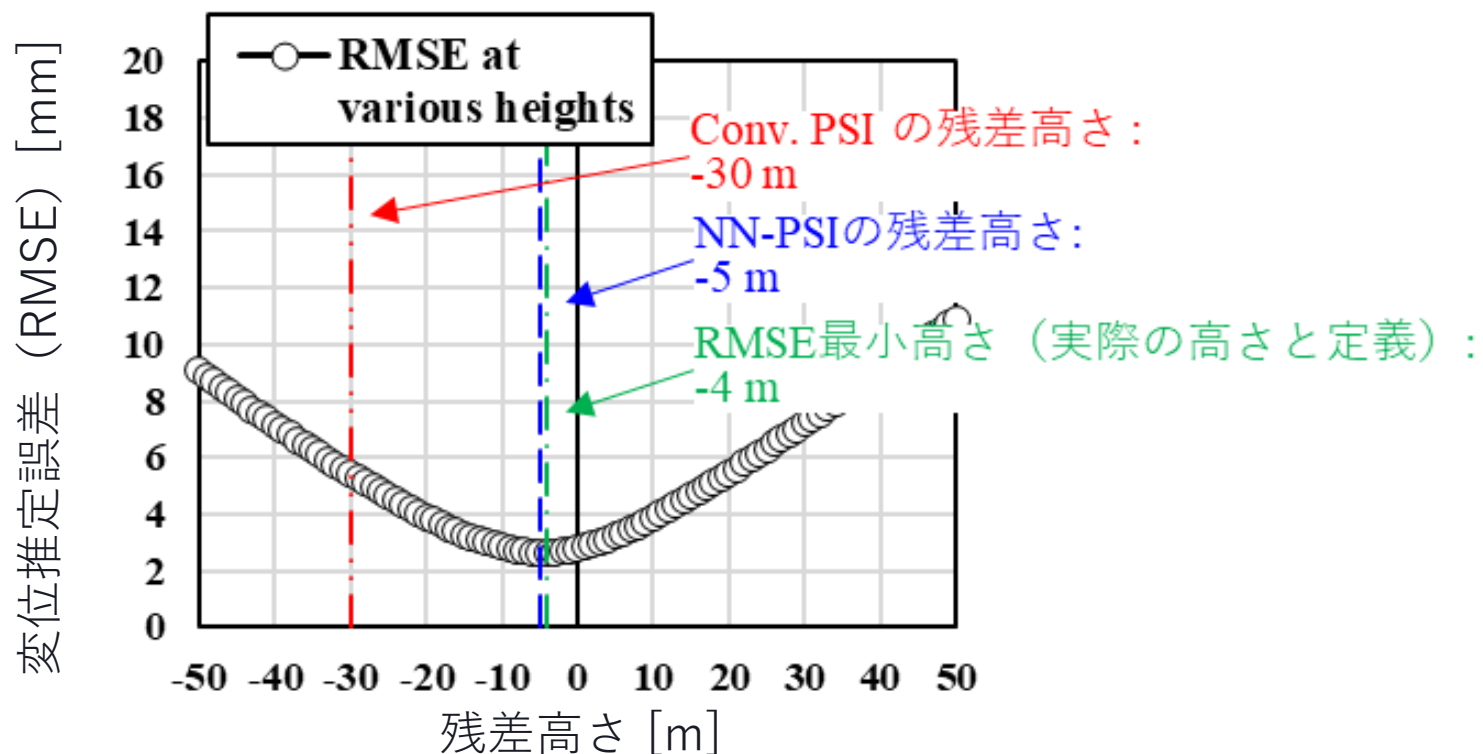
- ✓ 残差高さをパラメタとし、想定し得るすべての残差高さに対する変位を推定
- ✓ 変位誤差（RMSE）が最小となる高さを「最も確からしい、実際の残差高さ」と定義
- ✓ 「Conv. PSIで推定された残差高さ」と「NN-PSIで推定された残差高さ」いずれが「実際の残差高さ」に近い確認





# 残差高さ推定の精度に関する考察の結果

- 「NN-PSIで推定された残差高さ」は「Conv. PSIで推定された残差高さ」と比較して、実際の残差高さに近い  
⇒ NN-PSIが高精度に残差高さを推定できることが示された



# 残差高さ推定に差異が生じるケースの考察

■ どのような場合に残差高さ推定結果に差異が生じるか、変位の線形・非線形性に着目し考察を行った

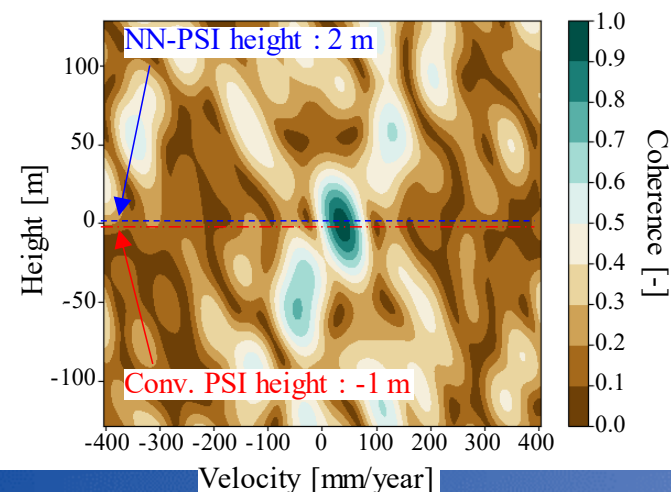
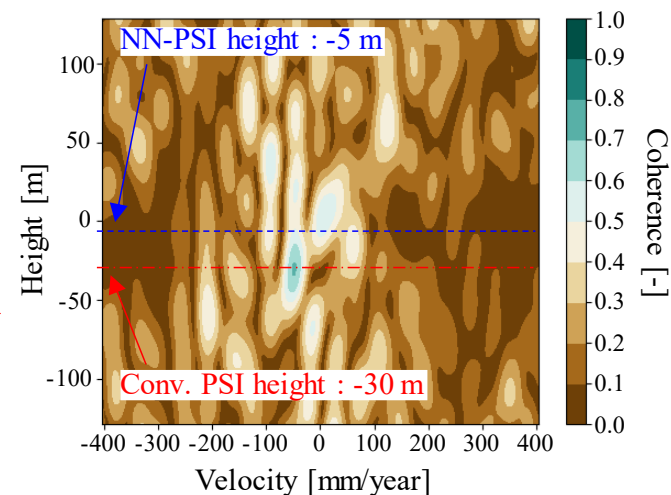
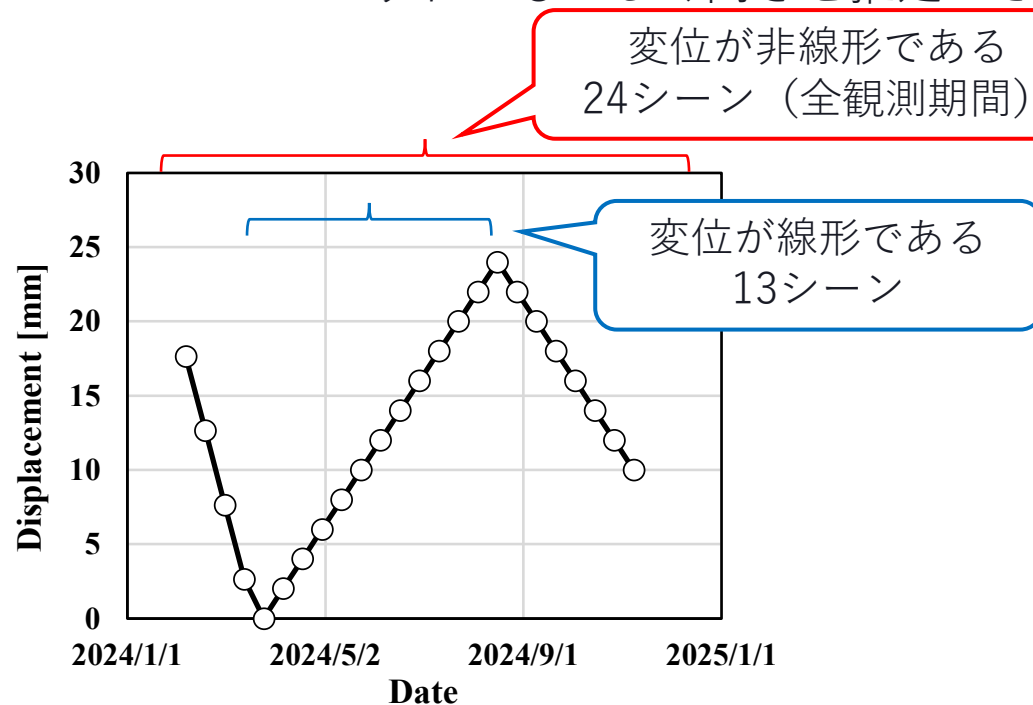
⇒ **変位が非線形の場合に、Conv. PSIでは正しく残差高さを推定できないことが示唆された**

✓ 【変位が非線形である場合】

EVスペクトラムにコヒーレンス最大点が明確に現れず、Conv. PSIでは正しく高さを推定できない

✓ 【変位が線形である場合】

EVスペクトラムにコヒーレンス最大点が明確に現れ、Conv. PSI・NN-PSIいずれでも正しく高さを推定できる



# 目次

- 東京ガスのご紹介
- 取り組み背景
- 手法： NN-PSI（Non-Linear Non-Parametric Persistent Scatterer Interferometry）の詳細
- NN-PSIによるコーナーリフレクタ変位計測
- 残差高さ推定の精度に関する考察
- 結言

# 結言

## まとめ

- Conv. PSIとNN-PSIの比較により、**NN-PSIの方が精度良く非線形変位を計測できる**（RMSE約2.6 mm）ことが確認された。ただし、Conv. PSIもCR実測変位の大まかな傾向は把握可能であることが示唆された。
- 推定残差高さをパラメタとし、様々な残差高さにおいて算出された変位と、実測変位との誤差（RMSE）の比較を行うことで、**NN-PSIが、実測の変位を求めることに適した残差高さを推定可能**であると示された。
- Conv. PSIとNN-PSIの高さ推定結果の差異理由は、**変位が時間に対して非線形であることが要因**と示唆された。

## 今後の課題

- 本研究ではマイクロ波反射強度が高いCRを対象としており、どの程度の強度が得られれば精緻に変位を計測できるかの検討がなされていない。
  - 一つのCRに着目した検討のみに留まっており、複数点の傾向確認や相対変位での整理がなされていない。
- ⇒ これら課題に対して今後、強度閾値の検討および複数CRでの検討を行う予定である。

