博士論文

エネルギー施設の維持管理分野への
人工衛星 SAR データ活用に関する研究

(A study on the application of satellite SAR data to the field of maintenance and management of energy facilities)

2024 年 9 月

安保　秀範

山口大学大学院創成科学研究科

概要

衛星リモートセンシングの技術は，資源探査，農業，森林，環境，土地利用，防災など，様々な分野で利用が進んでおり，危機管理・防災分野などで期待されているとともに，社会インフラの維持管理分野への活用研究も進んでいる．地球観測人工衛星に搭載する観測機器としては，光学センサであるカメラ，マイクロ波センサである合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar ; SAR）がある．合成開口レーダーはマイクロ波を用いたアクティブセンサであり，昼夜，天候の影響を受けにくく，レーダーの反射波の強度と位相が得られる．

本論文は，人工衛星 SAR データをエネルギー施設の維持管理の分野へ活用することを目的として，一つ目として，レーダーの反射波の位相の変化から変位を求める変位計測の適用性について検討する．具体的には，①ロックフィルダムの外部変形モニタリング，②斜面変位モニタリング（適用対象は，ダム湛水池斜面，送電鉄塔周辺斜面，発電所水路経過地斜面など），③地盤沈下モニタリング（適用対象は，シールドトンネル構築などによる地表面への影響，水溶性天然ガス溶存地下水の揚水による地盤沈下，地熱発電での熱水くみ上げによる地表面への影響など）への適用性について検討した．

人工衛星 SAR データを用いた変位計測の計測手法はこれまで多くの研究がされてきているが，本論文では，同一条件で観測したデータを多く用いれば，恒久散乱点のみとなるが計測精度の高い PSInSAR（Persistent Scatterers InSAR）解析手法を適用した．SAR データは，同一条件で観測したデータが 12 日間隔（2 基体制を考慮すると 6 日間隔）と多くのデータが入手可能な Sentinel-1 を用いた．

人工衛星 SAR データを用いた変位計測が，現状の変位計測に代替できるかどうか，実適用できるかどうかは，その計測精度が問題となるため，それぞれの適用対象で変位の計測精度の検証を行った．また，PSInSAR 解析では人工構造物がある箇所など恒久散乱点のみの計測となり，山間部の草木が生い茂っている斜面では恒久散乱点が得られないことから，斜面へのコーナーリフレクタ設置による斜面変位計測についても検討して，その変位計測精度も検証した．なお，日本では，ロックフィルダムの外部変形，斜面変位，地盤沈下の変位計測への人工衛星 SAR データの活用は，これまで主に日本の ALOS（Advanced Land Observing Satellite）SAR データの活用についての検討がされてきている．同一条件で観測したデータは，現在利用可能な ALOS-2 では 3～4 カ月に 1 回の頻度であり，PSInSAR 解析には適しておらず，時系列干渉解析としては，スタッキング解析，SBAS（Small Baseline Subset）解析などによる多くの精度検証事例があるものの，Sentinel-1 を用いた PSInSAR 解析による精度の検証はされていない．

二つ目として，強度の変化から地表面の変化を把握できるが，強度の変化から積雪深を推定することを検討した．山間部に位置するダムの集水域全体の積雪の量を把握できれば，ダム運用上重要なデータとなり，水力発電の効用を向上させる効率的なダム運用に資する可能性がある．そこで，人工衛星 SAR データを用いて山岳地帯を対象とした積雪深の推定方法を検討し，その積雪深推定精度の検証を行うとともに，ダム運用への適用性について検討した．

第 1 章は序論であり，本研究の背景，目的について記述するとともに，衛星搭載合成開口レーダーの特徴とともに，変位を推定手法である PSInSAR 解析を主体とした干渉 SAR 解析について記述した．また，本論文の構成を記述した．

第 2 章は「PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリングの精度検証」について記述した．ロックフィルダムの外部変形計測は，保守管理のための計測の中でも堤体全体の挙動を評価でき，最も重要な計測項目の一つである．ロックフィルダムの表面はリップラップと呼ばれる岩石材料を敷き詰めており，恒久散乱点が得られやすく，海外では Sentinel-1 SAR データを活用したロックフィルダムの変位計測検討事例はあるものの，変位の計測精度の検証が十分になされているとは言い難い．そこで，ここ数年年間最大 1cm 程度（1mm/月程度）変位しているとともに，外部変形量を連続計測していたロックフィルダムを対象に，約 4 年間の C バンドの Sentinel-1 SAR データ（南行軌道，北行軌道の両方）を用いて，PSInSAR 解析を実施して，衛星視線方向の変位を把握した．この PSInSAR 解析結果と連続計測されている測量値を比較して，PSInSAR 解析による変位計測精度を検証した．PSInSAR 解析により mm オーダーの高い精度で計測できることが検証され，保守管理に人工衛星 SAR データが活用できる可能性があることを示した．

PSInSAR 解析によるロックフィルダムの保守管理への適用にあたっては，地震時などの不連続な変位の現象でない場合には，高い精度の移動平均値（3 データ）により健全性の確認をすることを提案した．さらに，Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析によるロックフィルダム外部変形計測の保守管理への適用性について考察した．

第３章は「PSInSAR 解析による大規模な 6 基のロックフィルダムの外部変形モニタリング」について記述した．安定期にあり年間最大 2mm 程度の変位で，変形量が小さい，大規模な 6 基のロックフィルダムを対象に，北行，南行軌道それぞれ 2017 年 4 月から 2022 年 12 月までの最大 5 年 9 カ月間の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施し，ロックフィルダムの外部変位量を計測した．PSInSAR 解析結果と 3 カ月間隔で実施されている測量による外部変形量を比較して精度の評価をするとともに，変位量が小さいロックフィルダムの保守管理においても，健全性評価に PSInSAR 解析による計測が活用できることを示した．

第４章は「コーナーリフレクタを活用した PSInSAR 解析による変位計測精度の検証」について記述した．PSInSAR 解析による変位計測は永久散乱点のみ高精度で変位を測定することができるが，山間部などの人工構造物の少ない斜面では恒久散乱点はほとんど得られない．そのため，変位を把握したい箇所にコーナーリフレクタを設置することで，その地点が永久散乱点となり，高精度な計測が可能となる．そこで，変位の計測精度が確認できるように，強制的に変位させることが可能なコーナーリフレクタを製作，設置し，Sentinel-1 の SAR データを用いて PSInSAR 解析による PS（Persistent Scatter）点の変位と実際の変位を比較することで，コーナーリフレクタ設置位置での PSInSAR 解析の計測精度を検証した．

第５章は「コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリングの適用性評価」について記述した．水力発電所の水路経過地斜面で，約 5 年間の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施し，斜面上部の人工構造物がある PS 点での衛星視線方向の変位計測結果と，斜面下部の水路がある地点の測量調査結果が整合していることを確認し，斜面変位モニタリングの適用性について評価した．また，小型で安価なコーナーリフレクタを製作，PS 点が得られない水路近傍に設置した．これにより，人工構造物の PS 点に加え，コーナーリフレクタの PS 点でも変位が精度高く計測できることを確認し，コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリングの適用性について評価した．

第６章は「PSInSAR 解析による地盤沈下モニタリングの精度検証」について記述した．千葉県内には，水溶性天然ガス溶存地下水の揚水が多い地域があり，近年，なお地盤沈下の生じている地域があり，毎年 1 回県内全体では約 1,070 箇所で水準測量を実施して，地盤沈下の状況等を把握している．本論文では，最大で約 2cm/年地盤沈下している千葉県東部地域を対象に，2017 年 1 月から 2024 年 1 月までの 7 年間の南行軌道の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して計測した地盤沈下量と千葉県で実施している水準測量結果を比較して，地盤沈下量の計測精度を検証した．本解析での年平均変位の計測精度は約 1mm/年であり，これまでの同地域での精度検証事例より高い精度であることを確認した．都市部では PSInSAR 解析により広域で一定程度の密度で PS 点が得られ，地盤沈下を広域で面的に精度よくモニタリングできることから，水準測量と併用するなど地盤沈下監視の合理化ができる余地があることを示した．

第７章は「Sentinel-1 SAR データを用いた積雪深の推定」について記述した．Sentinel-1 SAR データを用いて，積雪深の推定方法を検討するとともに，群馬県の利根川最上流域を対象に，積雪深観測所での観測値を用いてその推定精度を検証した．本地域の森林地帯において，積雪深と斜面の VV 偏波と VH 偏波の後方散乱係数の関係性について検討した結果，後方散乱係数から積雪深の推定が可能であることを確認した．木が生い茂っている 500m 四方の斜面の後方散乱係数から 4m 以下の積雪深の推定精度は，推定条件などによるが 20～50cm 程度となり，融雪量推定のための広域な流域面積での積雪の状況を把握することなどに活用できる可能性があることを示した．

第８章は本研究の結論とともに，災害時の衛星データ活用，今後の展望と課題について記述した．

目次

第4章 コーナーリフレクタ設置箇所の変位計測精度の検証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 53

4.1 研究概要 ・・ 53
4.2 変位計測精度検証用コーナーリフレクタの製作・設置と調整 ・・・・・・・・・・・・・・ 54
4.3 コーナーリフレクタの設置効果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56
4.4 解析手法と解析データ・範囲 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
4.4.1 解析手法 ・・・ 58
4.4.2 解析データと解析範囲 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
4.5 PSInSAR 解析結果と計測値の比較検討 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 59
4.6 まとめ ・・ 62

第5章 PSInSAR 解析による斜面変位モニタリング ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

7.4.2　利根川最上流域の後方散乱係数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・105
7.4.3　積雪深観測所近傍の後方散乱係数と積雪深の関係 ・・・・・・・・・・・・・・107
7.5　後方散乱係数からの積雪深の推定方法と精度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・115
7.6　後方散乱係数からの積雪深の推定精度の検証 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・118
7.7　後方散乱係数からの積雪深の推定精度の検証（新潟県） ・・・・・・・・・・・・・・121
7.7.1　後方散乱係数と積雪深の関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・125
7.7.2　積雪深の推定精度 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・126
7.8　まとめ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・127

第8章　結論及び展望 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・

第１章　序論

1.1　本研究の背景・目的

衛星リモートセンシングの技術は，資源探査，農業，森林，環境，土地利用，防災など，様々な分野で利用が進んでおり，危機管理・防災分野などで期待されているとともに，社会インフラの維持管理分野への活用研究も進んでいる．地球観測人工衛星に搭載する観測機器としては，光学センサであるカメラ，マイクロ波センサである合成開口レーダー（Synthetic Aperture Radar；SAR）がある．

本論文は，人工衛星 SAR データを活用した合理的なインフラ施設の維持管理方法について，特にエネルギー施設を対象に検討する．

合成開口レーダーはマイクロ波を用いたアクティブセンサであり，昼夜，天候の影響を受けにくく，安定して定期的に観測され，レーダーの反射波の強度と位相が得られる．

インフラ施設の維持管理への人工衛星 SAR データを利用した変位計測については，ロックフィルダムの外部変形モニタリング，斜面変位モニタリング（対象としては，ダム湛水池斜面，送電鉄塔周辺斜面，発電所水路経過地斜面など），地盤沈下モニタリング（対象としては，シールドトンネル構築などによる地表面への影響，水溶性天然ガス溶存地下水の揚水による地盤沈下，地熱発電での熱水くみ上げによる地表面への影響など）への適用性について検討することを目的とする．

人工衛星 SAR データを活用した変位計測については，これまで多くの研究が進められてきてはいるものの，実適用にあたっては一定の精度が求められる．これまで多くの時系列干渉 SAR 解析手法が提案されてきてはいるものの，変位計測精度が十分に検証されているとは言い難い．そこで，恒久的な散乱点（Persistent Scatter；PS）の箇所のみの限定となるが，高い精度で時系列での変位が得られる，時系列干渉 SAR 解析の一つ PSInSAR（Persistent Scatterer InSAR）解析による変位計測精度について検証する．一方，PSInSAR 解析では，恒久的な散乱点の箇所のみの変位計測となることから，山岳部の斜面など，PS 点が得られない箇所については，コーナーリフレクタ（Corner Reflector；CR）を設置して，その箇所を恒久散乱点とすることで精度の高い計測が可能となる．このため，コーナーリフレクタ設置箇所での PSInSAR 解析による変位計測精度についても検証する．

なお，PSInSAR 解析では同じ場所を同一条件で観測したデータが多く必要となるため，南行，北行軌道それぞれ 12 日間と，比較的高頻度のデータの入手が可能な C バンドの Sentinel-1 を用いる．Sentinel-1 は，欧州宇宙機関（European Space Agency；ESA）が 2014 年，2016 年に打上げた 2 基の衛星からなり，C バンド（波長：5.6cm），分解能は追求せず広域を観測するように設計されており，観測幅は 250km，空間分解能は 5m×20m である．

積雪は水資源であり，積雪期にダム上流域の積雪の分布，量を把握することは，水資源の活用，管理の面で重要である．人工衛星 SAR データの強度から，積雪深を推定する方法を提案するとともに，推定精度を検証することも本研究の目的である．

日本では ALOS-2（Advanced Land Observing Satellite -2）SAR データの活用も含め衛星データから積雪深などを推定する検討が行われており，ダム管理への衛星データの活用では人工衛星画像から抽出した雪面の情報を融雪期のダム管理に活用する検討や，積雪分布，積雪深の推定に関する検討事例などが挙げられる．海外においては衛星データを用いた積雪に関する検討事例が数多くあり，Sentinel-1 SAR データを用いてヨーロッパアルプスでの乾燥した雪を対象に，積雪深さに伴うレーダーの後方散乱係数の変化と積雪深の関係性について検討されている事例もある．

本論文では群馬県の利根川最上流域，新潟県を対象に Sentinel-1 SAR データを用い，積雪深さの推定を重回帰分析により検討するとともに，その推定精度を積雪深観測所の観測値を用いて検証する．

1.2　人工衛星 SAR データ

1.2.1 合成開口レーダーと SAR 画像

衛星に搭載された合成開口レーダーは，衛星進行方向（アジマス方向）に対して直角方向（レンジ方向）に斜め下方へマイクロ波を地表に放射し，その反射（後方散乱）から地表を観測する．レーダーで地表を観測する時，画像の分解能はアンテナが大きいほど向上するが，宇宙空間に巨大なアンテナを打ち上げることは困難である．そこで，衛星が軌道を移動しながらマイクロ波を地表に照射し，同じ地点を複数回観測することにより，見かけ上，大きなアンテナを持っていることと等しい画像を得ることがでる．この技術は合成開口処理と言われ，合成開口処理を行っているレーダーが合成開口レーダーである（**図-1.1**[1)]参照）．

マイクロ波は雲や雨を透過するため，曇っていても地表を観測することができ，センサからマイクロ波を発射し，その後方散乱を観測しているため，太陽の出ていない夜間でも観測ができる．

また，SAR は後方散乱とともに，衛星から地表までの距離を示す位相を取得できる．この位相の情報を用い，干渉 SAR 解析を行うことで，地表面の変位を計測することができる．

SAR 観測の特徴として，マイクロ波が地上に向けて照射されるため，**図-1.2** に示すように，高い山などが実際の平面位置より衛星に近い位置に記録され，斜面が倒れ込む画像となるフォアショートニング，さらに急傾斜面などの上部が下部より衛星に近くなり画像が反転して白くつぶれるレイオーバー，高い山などにさえぎられて影ができるレーダーシャドウに留意する必要がある．

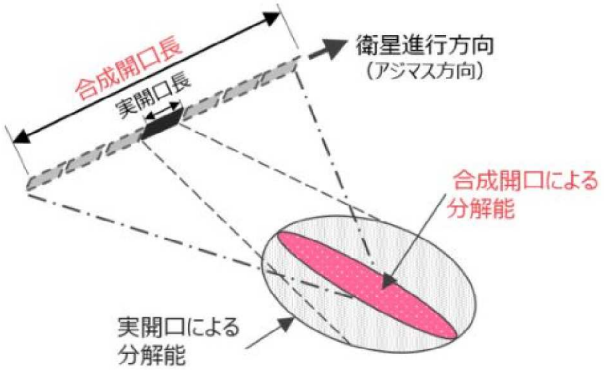


図-1.1　合成開口のイメージ[1)]

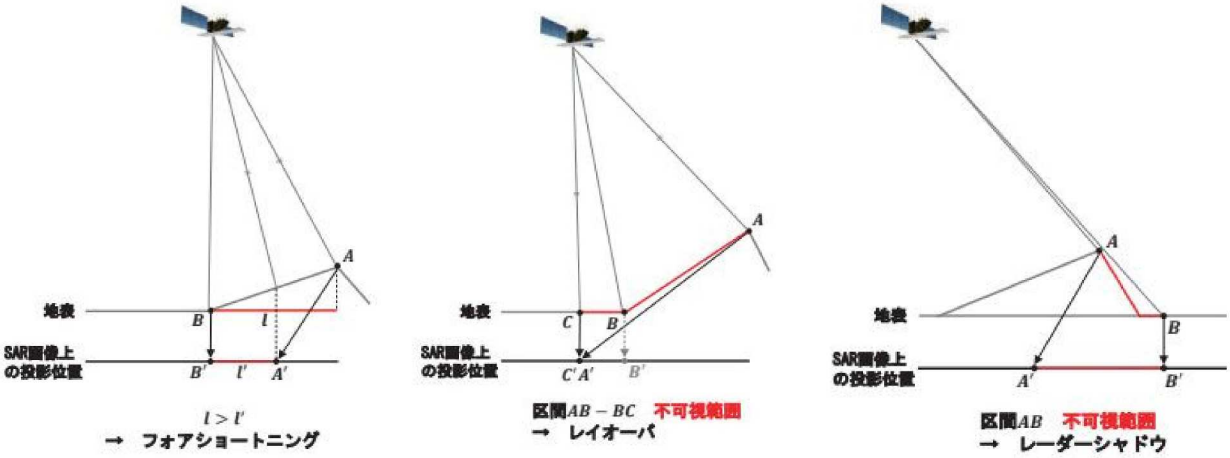


図-1.2　フォアショートニング・レイオーバー・レーダーシャドウ[2)]

1.2.2　散乱特性

表面散乱は，SAR から照射されたマイクロ波が地表などの境界面で散乱することであり，境界面の粗さの影響を受ける．なめらかな表面ではマイクロ波の照射方向と反対側への散乱（前方散乱）が大きくなり，粗い境界面では照射方向側への散乱（後方散乱）が大きくなる特性がある．

体積散乱は，SAR から照射されたマイクロ波が境界部を浸透して侵入し，内部の誘電率の不均一性によって生じる散乱である．

二重散乱は，表面散乱した後に再度散乱がする後方散乱が大きくなる現象である．

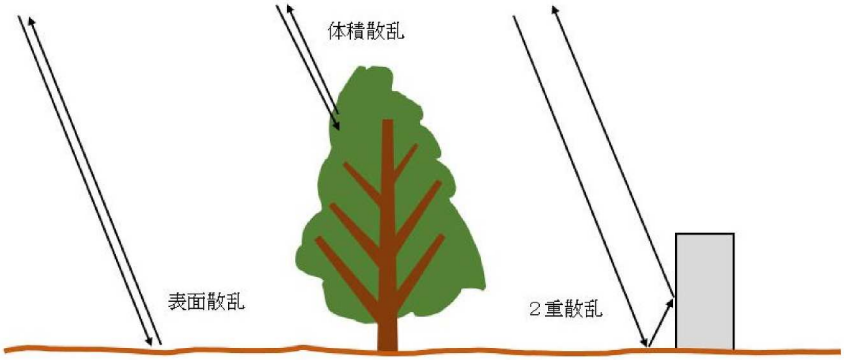


図-1.3　散乱特性

1.2.3　SAR データ

地球観測衛星による SAR で利用されるのは X バンド(波長:24～37.5mm)，C バンド(波長:37.5～75mm)，L バンド（波長:150～300mm）などがあり，大気中の水蒸気，雨滴などに吸収されにくく，悪天候時での地表の観測が可能である．SAR はバンドの違いにより，図-1.4 に示すように，反射特性が異なる．

バンド	波長 (mm)
Ka	7.5-11
K	11-16.7
Ku	16.7-24
X	24-37.5
C	37.5-75
S	75-150
L	150-300
P	300-1000

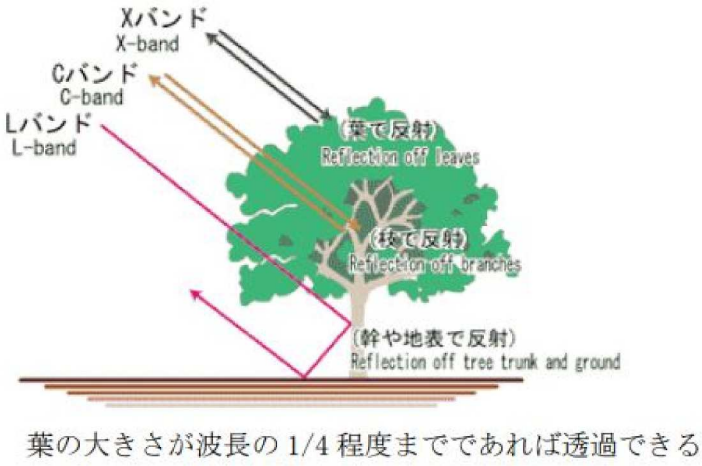


図-1.4　バンドの違いと反射特性 [2)]

波長に応じた変位の計測精度は，波長が短いほど理論的には高いが，一方，草木などの地表物の影響を受けて，干渉の度合いを示すコヒーレンスが小さくなる場合は，計測精度が悪くなる，あるいは計測不可能となる可能性がある．

干渉 SAR 解析においては，例えば，コヒーレンスが 0.3 以上ないと有効な解析結果を得られないとの指摘もある．合成開口レーダー（SAR）の道路土構造物の維持管理への活用マニュアル（案）[3] に，都市部と山地部における各バンドのコヒーレンスが 0.3 以上の割合が示されている．その解析事例では，都市部ではコヒーレンスが 0.3 以上の箇所は X，C，L バンドで 90%以上あるが，一方，草木などのある山間部では，コヒーレンスもが 0.3 以上の箇所は，X バンドで 0%，C バンドで約 30%，L バンドで約 80%と，波長が長い方が草木を透過しやすいことから，有効な解析結果を得られる範囲が広くなる．

代表的な衛星 SAR データは，**表-1.1** に示すとおりであり，Sentinel-1 は無償で提供されているとともに，同一条件での観測間隔が短いことから，時系列解析に有効に活用できる．

表-1.1　代表的な衛星 SAR データ

衛星 SAR	観測波長	基数	分解能・観測幅	回帰日数	期間	購入価格例
TerraSAR-X DLR(ドイツ)	X バンド 約 3cm	2	1×2m　10km	11 日	2007 年 ～	約 50 万円 ～/枚
Sentinel-1 ESA(EU)	C バンド 約 6cm	2	5×5m　80km 5×20m　250km	12 日	2014 年 ～	無料
ALOS-2 JAXA(日本)	L バンド 約 24cm	1	1×3m　25km 3×3m　50km	14 日 (3～4 カ月)	2014 年 ～	8 万円/枚

注）回帰日数の括弧内は同一条件で観測が行われる回帰日数

Sentinel-1 は European Space Agency （ESA） が運用している地球観測衛星で，欧州委員会（European Commission）と ESA の共同イニシアチブである Global Monitoring for Environment and Security（GMES：欧州地球観測計画，現在は名称を Copernicus に変更）の一環として行われている地球観測ミッションの一つである．2014 年 4 月 3 日に Sentinel-1A, 2016 年 4 月 25 日に Sentinel-1B の 2 基の衛星が打ち上げられている．軌道は他の地球観測衛星と同様に極軌道で，約 700 km 上空を約 100 分で周回している．日本付近で観測される時刻は，早朝 6 時ころ（南行軌道）と夕方 6 時ころ（北行軌道）である．Sentinel-1 の回帰日数は 12 日であり，2 基の衛星が同じ軌道を周回していることから，システムとしての回帰日数は 6 日になる．このように，同一条件での観測間隔期間が短いことから，時系列解析には極めて有利である．

Sentinel-1A/B の設計寿命は 7 年であるが，その段階で後継機（Sentinel-1C/D）に置き換えられる計画になっている．これにより，少なくとも 2030 年までは観測が継続される予定であり，貴重なデータが蓄積される．

1.3　干渉 SAR 解析

合成開口レーダで観測すると，地表の対象物からレーダの反射波の強度と位相が得られる．地表の同一場所に対して 2 回の観測を行い，2 回の SAR データを干渉させて差をとること（干渉解析）で地表面の変動をとらえられる（図-1.5 参照）．

一方，干渉 SAR 解析の結果には，大気中の水蒸気分布の変化等を起因とする誤差が含まれるため，一般的に微小な変動規模で進行する変動を検出することは難しい．干渉 SAR 解析による位相差の主な原因としては，1）地表の散乱状態の変化（主に植生）に伴う誤差，2）対流圏擾乱（主に水蒸気）に伴う誤差，3）電離圏擾乱に伴う誤差などが，計測精度に影響を及ぼすと考えられる．

そこで，複数枚の画像を統計的に処理することにより，計測精度を高める干渉 SAR 時系列解析が開発されてきており，代表的なものに，PSInSAR 解析や SBAS 解析などの干渉 SAR 時系列解析が挙げられる．この干渉 SAR 時系列解析は，通常の干渉 SAR 解析より高い計測精度で変位計測が可能であり，年間数 mm 程度の速度で進行する微小な変動などを検出することができる可能性がある．

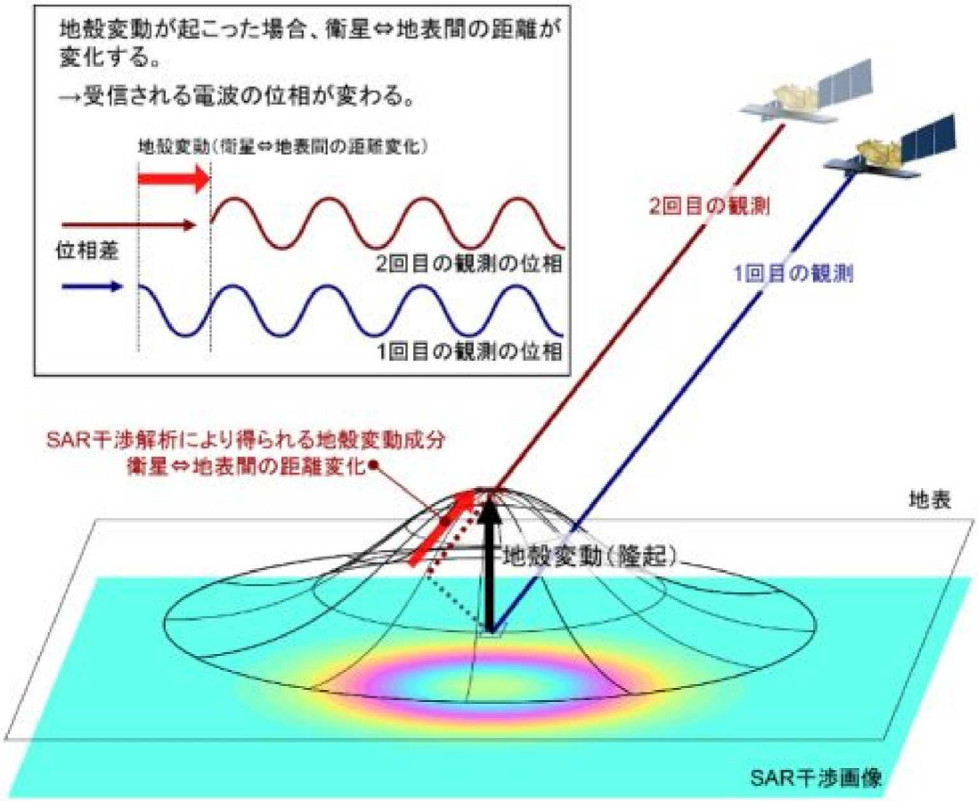


図-1.5　SAR 干渉解析 [1)]

PSInSAR 解析は，PS 点と呼ばれる時間的にマイクロ波の反射波が安定している箇所（人工構造物など）に着目して，PS 点の時系列変化を推定する解析手法である．

SBAS 解析（Small Baseline Subset）は，短い垂直基線長及び短い観測間隔のデータペアを多数作成して，各観測間の変動量を推定する解析手法である．

これまでに海外で開発されてきた主な差分干渉解析・時系列干渉解析プログラムを**表-1.2** に示す．

表-1.2　主な差分干渉解析・時系列干渉解析プログラム

名称	解析対応	開発年	開発者	Main code	提供形態
Gamma	InSAR,PSInSAR,SBAS	1995	C.Werner	C	製品
DORIS	InSAR	1999	R.Hanssen et al.	C＋＋	Open source
TRE	InSAR,SBAS,PSDS	1999	A.Ferretti	n/a	製品
ROI_PAC	InSAR	2002	JPL	Fortran	Open source
SARSCAPE	InSAR,PSInSAR,SBAS	200X	Sarmap	n/a	製品
StaMPS	PSInSAR,SBAS	2005	A.Hooper	matlab	Open source
ISCE	InSAR	2008	JPL	Python	Open source
SARPROZ	PSInSAR	2009	D.Perissin	matlab	製品
GMTSAR	InSAR	2012	D.Sandwell et al.	C	Open source
SNAP	InSAR	2014	ESA	java	Open source
TomoSAR	ComSAR,PSDS	2014	D.Ho Tong Minh and Y.-N. Ngo	matlab	Open source
MintPy	SBAS	2018	F.Amelung et al.	Python	Open source
Licsbas	SBAS	2019	Y.Morishita	Python	Open source

日本で開発された主な差分干渉解析・時系列干渉解析プログラムは以下のとおりである．

(a) Sigma-SAR

Sigma-SAR は東京電機大学島田政信教授が開発した商用のプログラムである．SIGMA-SAR 研究所は，島田政信教授（Sigma-SAR 研究所 CTO）の開発した Sigma-SAR を利用して，地球観測衛星データの解析サービスをしている．

(b) ANATIS

ANATIS（Automated Nationwide Application of Timeseries InSar） は JAXA が開発した商用のプログラムである．ANATIS は，ALOS-2 を使ってインフラの変位をモニタリングできるツール「衛星 SAR データによるインフラ変位監視ツール」として，商用利用事業者への公募を行っている．

(c) RINC

RINC（Radar INterferometry Calculation tool）は防災科学技術研究所の小澤拓博士が開発したプログラムである．

時系列干渉解析としては，**表-1.3** に示すとおり，多くの PSInSAR 解析，SBAS 解析，PSDS（Persistent Scatterers and Distributed Scatterers）解析が研究されてきており，それぞれの干渉解析のネットワークを**図-1.6** に示す．

本論文で用いた時系列干渉解析は，Hooper et al. が開発した StaMPS を用いており，干渉解析はシングルマスターネットワークであり，恒久散乱点は位相が安定しているピクセル（振幅幅が安定しているピクセル）を選定している．StaMPS による時系列干渉解析は「2.3.1 解析手法」に記述する．

表-1.3　主な時系列干渉解析手法の特徴 [6)]

Method Reference	Interferogram Network	Pixel Selection Criteria	Deformation Model and Others
Persistent Scattering Interferometry			
Ferretti et al. (2000, 2001) [4,5]	Single master	Amplitude dispersion	Linear deformation
Werner et al. (2003) [16]	Single master	Amplitude dispersion and spectral phase diversity	Linear deformation
Hooper et al. (2004) [6]	Single master	Phase stability	Spatial smoothness and 3D phase unwrapping
Kampes (2006) [17]	Single master	Amplitude dispersion	Different types of deformation models
Perissin and Wang (2012) [18]	Target-dependent subset	Quasi-PS approach	Linear deformation
Devanthéry et al. (2014) [19]	Small baseline	Amplitude dispersion and Cousin PS	Spatial smoothness
Siddique et al. (2016) [20]	Single master	Amplitude dispersion and spectral diversity	Different types of deformation models and tomography
Small baseline			
Berardino et al. (2002) [7]	Small baseline	Coherence	Spatial smoothness
Mora et al. (2003) [21]	Small baseline	Coherence	Linear deformation
Schmidt and Bürgmann (2003) [22]	Small baseline	Coherence	Spatial and temporal smoothness
Lanari et al. (2004) [8]	Small baseline	Coherence	Spatial smoothness and full-resolution
Crosetto et al. (2005) [23]	Small baseline	Coherence	Stepwise linear function
López-Quiroz et al. (2009) [24]	Small baseline	Coherence	Spatial smoothness
Hetland et al. (2012) [25]	Small baseline	Coherence	Different types of deformation models
Casu et al. (2014) [26] and Manuta et al. (2019) [27]	Small baseline	Coherence	Spatial smoothness and parallel
The combination of PS and DS			
Hooper et al. (2008) [9]	Single master and small baseline	Phase stability	Spatial smoothness and 3D phase unwrapping
Ferretti et al. (2011) [10]	Full stacking	Statistical homogeneity test	Linear deformation and phase linking
Goel and Adam (2014) [28]	Small baseline	Statistical homogeneity test	Linear deformation
Samiei-Esfahany et al. (2016) [29]	Full stacking	Statistical homogeneity test	Different types of deformation and phase linking
Cao et al. (2016) [30], Engelbrecht and Inggs (2016) [31]	Full stacking	Statistical homogeneity test	Linear deformation, phase linking, and multiple scattering
Ansari et al. (2017) [32]	Efficient stacking	Statistical homogeneity test	Linear deformation and phase linking
Mullissa et al. (2018) [33]	Full stacking	Statistical homogeneity test	Linear deformation, phase linking, and polarization

StAMPS

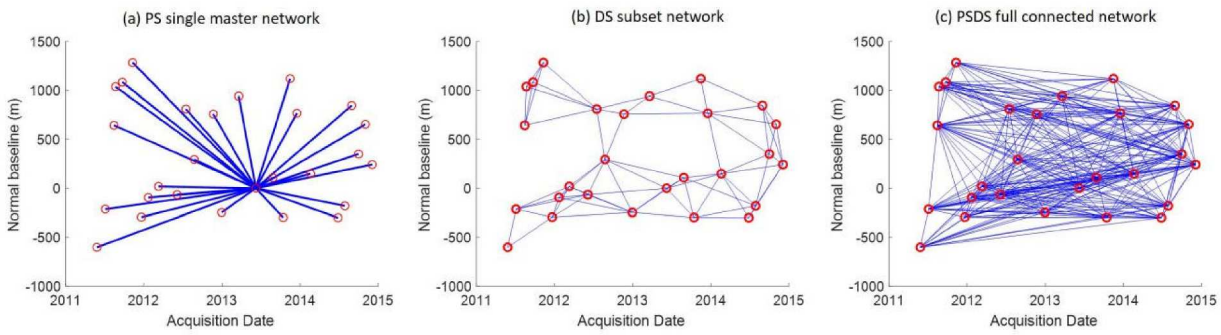


図-1.6　干渉解析のネットワーク [6)]

1.4　本論文の構成

本論文は，ロックフィルダムの外部変形モニタリング，ダム湛水地や送電鉄塔などの斜面を対象とした斜面変位モニタリング，地盤変状の監視が必要な地域を対象とした地盤沈下モニタリングへの人工衛星 SAR データの活用について検討し，変位計測精度を検証，その適用性について検討するとともに，人工衛星 SAR データからの積雪深の推定方法を提案し，その推定精度を検証することを目的に研究を行った．本論文の構成は以下のとおりである．

第１章　序論

本研究の目的，背景について記述するとともに，衛星搭載合成開口レーダーの特徴とともに，変位の推定手法である PSInSAR 解析を主体とした干渉 SAR 解析について記述した．

第２章　PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリングの精度検証

ここ数年年間最大 1cm 程度変位しているとともに，外部変形量を連続計測していたロックフィルダムを対象に，PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形の変位計測精度の検証結果を記述するとともに，PSInSAR 解析によるロックフィルダムの保守管理への適用性について記述した．

第３章　PSInSAR 解析による大規模な 6 基のロックフィルダムの外部変形モニタリング

安定期にあり年間最大 2mm 程度の変位で，変形量が小さい，大規模な 6 基のロックフィルダムを対象に，PSInSAR 解析結果と 3 カ月間隔で実施している測量による外部変形量を比較して精度の評価をするとともに，変位量が小さいロックフィルダムでの保守管理への適用性について記述した．

第４章　コーナーリフレクタを活用した PSInSAR 解析による変位計測精度の検証

変位の計測精度が確認できるように，強制的に変位させることが可能なコーナーリフレクタを製作，設置し， Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析による PS 点の変位と実際の変位を比較して，コーナーリフレクタ設置位置での PSInSAR 解析の計測精度を検証した結果を記述した．

第５章　コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリングの適用性評価

水力発電所の水路経過地斜面を対象に，小型で安価なコーナーリフレクタを PS 点が得られない水路近傍に設置し，斜面上の人工構造物の PS 点に加え，コーナーリフレクタ設置箇所の PS 点での変位も Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析により精度よく計測できることを確認し，コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリングの適用性について記述した．

第６章　PSInSAR 解析による地盤沈下モニタリングの精度検証

水溶性天然ガス溶存地下水の揚水が多い地域で，近年，地盤沈下が継続している千葉県の地域を対象に，Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して計測した地盤沈下量と千葉県で実施している水準測量結果を比較して，地盤沈下量の計測精度を検証した結果を記述した．

第７章　Sentinel-1 SAR データを用いた積雪深の推定

Sentinel-1 SAR データを用いて，積雪深の推定方法を検討するとともに，群馬県の利根川最上流域，新潟県を対象に，積雪深観測所での観測値を用いてその推定精度を検証した結果を記述するとともに，融雪量推定のための広域な流域面積での積雪の状況を把握することへの適用性について記述した．

第８章は本研究の結論とともに，災害時の衛星データ活用，今後の展望と課題について記述した．

各章の関連性と本論文の新規性などに関するとりまとめを，**表-1.4**，**表-1.5** に示す.

表-1.4　レーダーの反射波の位相の差を利用した変位計測

活用対象	これまでの研究成果など	本論文の新規性と成果
ロックフィルダムの外部変位計測	【特徴・考慮すべき事項】 ●ロックフィルダムの表面は適度の凹凸があり，反射特性がよく，SAR データによる変位計測に向いている. ●GNSS（Global Navigation Satellite System）による変位計測は既に実用化されているが，計器などの設置が必要であり，計器設置，現場作業などのない SAR データ活用による変位計測はメリットがある. 【研究成果など】 ●ALOS-2 を用いたスタッキング解析による計測精度を検証. ●ロックフィルダムの変位計測マニュアル（案）（主に ALOS-2 対象, 国土技術開発総合研究所, 2022）. ●海外では Sentinel-1 での適用事例はあるものの精度検証が十分にされていない.	●ALOS-2 を用いたスタッキング解析より精度が高い PSInSAR 解析（Sentinel-1 利用）による変位計測精度を検証. ●毎日変位を計測していたダムで計測精度の検証をするとともに，ダム軸と衛星視線方向の関係が異なる 6 基のダムでも検証. ■計測精度検証 PSInSAR 解析（本論文）　3～5mm ＜既往研究事例＞ スタッキング解析（ALOS-2）　5mm
斜面の変位計測	【特徴・考慮すべき事項】 ●山岳斜面は植生により干渉性が低下して変位計測精度が非常に低下，あるいは計測できない（波長が長い方が植生への透過性が高くなり有利）. ●北行，南行軌道の両方向から変位を計測してすべり方向の評価が必要. ●計測したい箇所にコーナーリフレクタを設置することで変位計測できる. 【研究成果など】 ●ALOS-2 を用いたスタッキング解析による変位計測事例などがある. ●湛水池斜面の変位計測マニュアル（案）（主に ALOS-2 対象，国土技術開発総合研究所，2022）. ●コーナーリフレクタ設置箇所の Sentinel-1 を用いた PSInSAR 解析による変位計測精度の検証事例はない.	●コーナーリフレクタ設置箇所における Sentinel-1 を用いた PSInSAR 解析による変位計測精度を検証. ●人工構造物がある斜面で PSInSAR 解析により月 1mm 程度の変位挙動を確認するとともに，コーナーリフレクタを設置してその箇所の変位も合わせて斜面の挙動を計測できることを実証. ■計測精度検証（CR 設置箇所） PSInSAR 解析（本論文）　1.4mm
地盤沈下量の計測	【特徴・考慮すべき事項】 ●地盤沈下が生じている都市部では人工構造物が多く干渉性が高い箇所が多くあり広域で変位計測が可能. ●地盤沈下量は北行，南行軌道のどちらか一方の変位計測から評価が可能. 【研究成果など】 ●ALOS-2 を用いたスタッキング解析，SBAS 解析などによる多くの計測精度検証事例がある. ●地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル（主に ALOS-2 対象，環境省，2017）. ●千葉県の事例では，ALOS-2 を用いたスタッキング解析，SBAS 解析などによる変位計測精度の検証事例がある.	●千葉県を対象に, Sentine-1 を用いた PSInSAR 解析による変位計測精度を検証. ●南行軌道のデータのみを用いても，適切に基準点補正を行うことで高い計測精度で計測できることを実証. ■計測精度検証 PSInSAR 解析（本論文）　1.0mm/年 ＜既往研究事例＞ スタッキング解析（Sentinel-1）　3.1mm/年 2.5 次元解析（ALOS-2）　2.8mm/年 PSInSAR 解析（ALOS-2）　2.6mm/年

表-1.5　レーダーの反射波の強度（後方散乱係数）の差を利用した計測

活用対象	これまでの研究成果など	本論文の新規性と成果
積雪深の計測	【特徴・考慮すべき事項】 ●Sentinel-1 の回帰日数は 12 日であり，2 基の衛星が同じ軌道を周回していることから，システムとしての回帰日数は 6 日であり，頻度高く計測できる． ●ダムの融雪量の推定には，山岳地帯で木が生い茂っている斜面で積雪深を推定する必要がある． 【研究成果など】 ● 日本における ALOS-2 を利用した積雪深推定に関する論文では，後方散乱強度の差分から推定できる可能性は示しているものの，積雪深推定式の検討まではされていない． ● 海外では Sentinel-1 を用いてヨーロッパアルプスでの乾燥した雪などを対象に，積雪深の変化に伴う後方散乱係数の変化と積雪深の関係性について検討，積雪深の推定式も提案されている（積雪深と後方散乱係数の関係は日本の雪とは異なる）．	●Sentinel-1 SAR データを用いて，積雪深の推定方法を検討（東・西傾斜斜面に分類，VV・VH 偏波に後方散乱係数に基づいた重回帰分析による推定）． ●群馬県の利根川最上流域，新潟県を対象に，積雪深観測所での観測値を用いてその推定精度を検証． ●山岳地帯で木が生い茂っている斜面においても，Sentinel-1 SAR データから積雪深を推定することが可能であることを示す． ■計測精度検証 20～50cm　（対象：4m 以下の積雪深）

【参考文献】

1) 国土地理院：干渉 SAR の基本，https://www.gsi.go.jp/uchusokuchi/sar_mechanism.html，（参照 2024.7.1）．
2) 国土技術政策総合研究所：合成開口レーダー（SAR）の基本事項，https://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn1110pdf/ks1110_05.pdf，（参照 2024.7.1）．
3) 国立大学法人東京大学，基礎地盤コンサルタンツ株式会社：合成開口レーダー（SAR）の道路土構造物の維持管理への活用マニュアル（案），2021.
4) 宇宙航空研究開発機構，国土交通省：災害時の人工衛星活用ガイドブック土砂災害版，2018.
5) 佐藤弘行、金銅将史、小堀俊秀、櫻井寿之：衛星 SAR データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の変位計測マニュアル(案)，国土技術政策総合研究所資料，2022.
6) Dinh HO TONG MINH, Ramon Hanssen and Fabio Rocca : Radar Interferometry: 20 Years of Development in Time Series Techniques and Future Perspectives, *Remote Sens.* 2020.

第２章　PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリングの精度検証

2.1　研究概要

近年，人工衛星 SAR データの活用については社会インフラ設備の維持管理などへの研究[1)~6)]が進んでいるものの，恒久散乱点が得られやすいロックフィルダムにおいても，PSInSAR 解析[7)~11)]による恒久散乱点の変位の計測精度が十分に検証されているとは言い難い．

これまでの研究成果などは以下のとおりである．

ロックフィルダムの外部変形計測に関する衛星 SAR データの活用について，日本では，L バンドの ALOS データを用いた検討がされてきている．

衛星リモートセンシングによるフィルダムの外部変形計測[12)]では，4 年間の ALOS データ，北行軌道，南行軌道の各 14 シーンを用いて検討されている．解析手法は，全 91 ペアの中から基線長が 1,000m 以下の干渉ペア，北行軌道では 39 ペア，南行軌道では 37 ペア用いて SBAS 解析を実施しており，SBAS 解析による変位を GPS による変位と比較した結果の二乗平均平方根誤差は，北行軌道で 13.2mm，南行軌道で 11.5 mm となっている．

ALOS/PALSAR データを用いた時系列干渉 SAR 解析による 5 基のロックフィルダムの外部変形計測[13)]では，1 シーンに含まれる 5 基のロックフィルダムを対象に，ALOS データの北行・南行軌道各 14 シーンを用いて，時系列干渉 SAR 解析により検討がなされており，GPS・測量により計測された外部変形量との比較を行い，二乗平均平方根誤差が約 5 mm であると評価されている．なお，北行軌道，南行軌道の各 14 シーンで SBAS 法による事前検討を実施されているが，基線長や観測時間間隔が外部変形の計測精度に及ぼす影響を明確に確認できなかったため，SBAS 法は適用されず，全観測データを用いた時系列干渉 SAR 解析が適用されている．

衛星 SAR による 19 基のロックフィルダムの外部変形計測[14)]，では，19 基のロックフィルダムを対象に，ALOS-2 のデータ，北行，南行軌道の 6 から 15 シーンを用いた時系列干渉 SAR 解析を実施している．対象 19 ダムの半数以上の 12 ダムにおいて RMSE は 5mm 以下となっており，ロックフィルダムの定期的な外部変形量の計測に必要な精度と考えている 5mm の精度は得られていると記述されている．

衛星 SAR データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の変位計測マニュアル(案)[15)]では，衛星 SAR データとして， ALOS-2 により取得されたデータの利用を主に想定して策定されている．ロックフィルダムの変位計測で用いられることが多い光波測量と GNSS 測量との主な比較が表-2.1 のとおり示されており，5mm 程度以下の精度については，複数の干渉 SAR 解析結果を足し合わせるスタッキング解析による精度が示されている．より変位計測精度が高くなると思われる PSInSAR 解析は，現状通常 3 カ月程度の間隔のデータしか得られないために，多くのデータが必要となる PSInSAR 解析の適用には適していないので，この精度を含めた適用性の評価はされていない．

表-2.1　衛星 SAR と既存の変位計測手法との比較[15)]

観測手法	観測対象	観測対象とする最小変動量	データ取得頻度	特徴
光波測量	観測点	数 mm	年数回（任意で実施）	現地作業必要
GNSS 測量	観測点	数 mm	24 時間連続観測	要インフラ（受信アンテナ等）整備
衛星 SAR（ALOS-2）	ロックフィルダム	5mm 程度以下	年 3～4 回程度×2（北行・南行軌道）	地上に計測設備不要
	貯水池周辺斜面	＊		

注）＊は試行事例での誤差は確認できていなく不明，ただし変動領域をほぼ正確に評価できることはわかっている．また，変動量や変動方向についても概略的な評価は可能であることがわかっている．

海外では，ESA（European Space Agency）の 2 基体制でそれぞれ 12 日間隔のデータが無償提供されている Sentinel-1 SAR データを活用した検討事例[16)~20)]などはあるものの，外部変形量を連続計測した測量値との比較検討など，変位の精度の検証が十分になされているとは言い難い.

このように，衛星データによる変位計測の活用，適用性を評価するにあたっては，その変位計測精度を確認する必要があるが，Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析による変位計測精度が十分に検証されていないのが現状である.

本章では，既に安定期にあるものの，ここ数年でも年間最大 1cm 程度変位しており，外部変形量を連続計測していたロックフィルダムを対象に，Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析を実施し，測量値と解析結果を比較することにより，人工衛星 SAR データから把握できる変位の精度を検証するとともに，ロックフィルダムの保守管理への適用性について考察した．ロックフィルダム外部変形の測量値と解析結果の比較により，PSInSAR 解析により mm オーダーの高い精度で計測できることが検証され，保守管理に人工衛星 SAR データが活用できる可能性があることを示した.

2.2　検討対象ダムと外部変形計測

2.2.1　検討対象ダム

ロックフィルダムの表面は，**図-2.1** に示すように，降雨等の気象や貯水の波浪による浸食や風化を防止するため，リップラップと呼ばれる岩石材料を敷き詰めており，人工衛星 SAR からのレーダーの反射が良好である．

検討対象ダムは，東京電力リニューアブルパワーが保有する，中央土質遮水壁型ロックフィルダムで，堤高 136m，堤頂長 444m，天端標高 1,532m である（**図-2.2** 参照）．本ダムは 1995 年より建設を開始し，2005 年に完成している．

図-2.1　ロックフィルダムの表面

図-2.2　検討対象ダム

2.2.2 外部変形計測

ロックフィルダムの外部変形計測[28)~30)]は，保守管理のための計測の中で堤体全体の挙動を評価でき，最も重要な計測項目の一つである．日本では，河川法の下に定められた構造基準である河川管理施設等構造令においては，堤高 50m 未満の重力式コンクリートダム以外のダムでは安全管理を目的として変形を計測することが義務付けられている．

検討対象ダムの外部変形計測は，湛水開始以降 2021 年 3 月まで，水平角と鉛直角を計測する経緯儀という器械に，測距儀の機能が内蔵された測量器械であるトータルステーションにより，変形量を連続計測している．なお，2021 年 4 月からは，基本的には外部変形計測は 1 回/3 月の頻度で計測しており，ダムの挙動を把握して健全性を確認している．

計測方法は，**図-2.3** に示すように右岸側の斜面にトータルステーション測量器械を設置して，ダム堤体に設置した**図-2.4** に示すターゲット（プリズム）を視準して計測している．斜面の測量器械を設置している位置からは全てのターゲットが見通せる．ダム堤体の挙動を把握するための計測箇所であるターゲット位置は**図-2.5** に示すとおりであり，ダム下流面に 15 箇所，天端付近に 7 箇所の合計 22 箇所設置している．また，測量の基準点として，ターゲットを左岸側に 2 箇所（洪水吐コンクリート壁面，左岸上流の湛水地斜面上）設置している．測量値は，毎日全てのターゲットを 8 回視準（全ターゲット視準する時間：約 3 時間）して計測しており，8 回の平均値をその日の変位量としている．ただし，機械的エラー等で測量できていない日もあり，測量値が欠損している時期がある．

図-2.3　測量器械設置場所

図-2.4　ターゲット

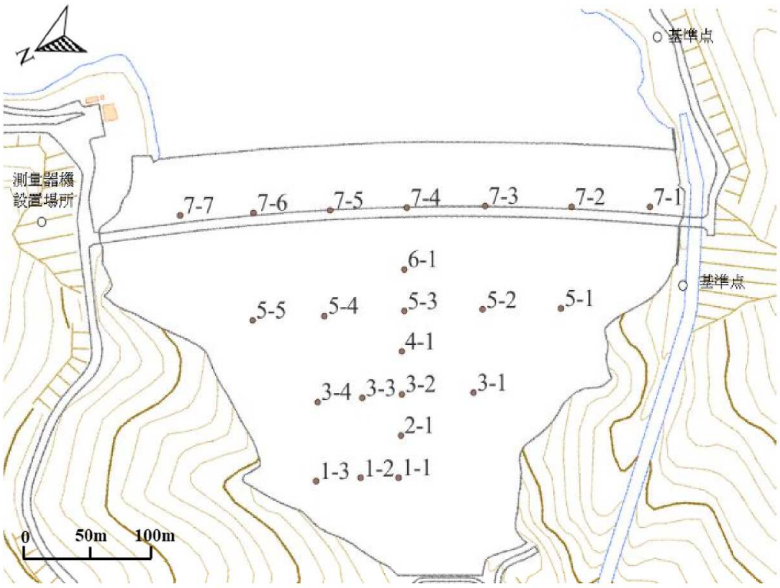


図-2.5　外部変形計測位置図

2.2.3 外部変形量

検討対象ダムは2004年9月から湛水を開始しており，既に第3期の挙動の安定した時期にある．これまでの湛水開始以降の測量箇所での鉛直方向の変位の最大値は，天端中央部付近（7-3）で沈下量が約 45cm（2.6cm/年），上下流変位の最大値については，天端より少し低い箇所（6-1）で下流方向に約38cm（2.2cm/年）である．ダム軸方向については，ダムの左岸側は右岸側に，右岸側は左岸側に変位（最大で10cm程度）している．

ダム堤体の外部変形については，時間が経過するにしたがって変位の速度が小さくなっているが，その変位の傾向については湛水開始から基本的には変わっていない．

本論文でのPSInSAR解析による変位計測精度の検証期間の2017年4月から2021年3月までの4年間の変形量は，**図-2.6**に示すとおりであり，天端中央部付近（7-3）の沈下が4.7cm（1.2cm/年），上下流変位については，天端より少し低い箇所（6-1）で4.0cm（1.0cm/年）である．ダムの左岸側は右岸側に，右岸側は左岸側に変位しており，最大でも1 cm程度である．ダムの外部変形量については，**図-2.6**に示すとおり，下流堤体斜面については，標高が高くなるほど，ダム中心になるほど，沈下量，下流側変位量は大きくなっており，その大きさは同程度である．一方，天端付近では沈下量に比べて，下流側変位量が小さい．また，ダム軸方向変位量は小さく，ほとんどの箇所で沈下量，下流側変位量に比べ小さい．

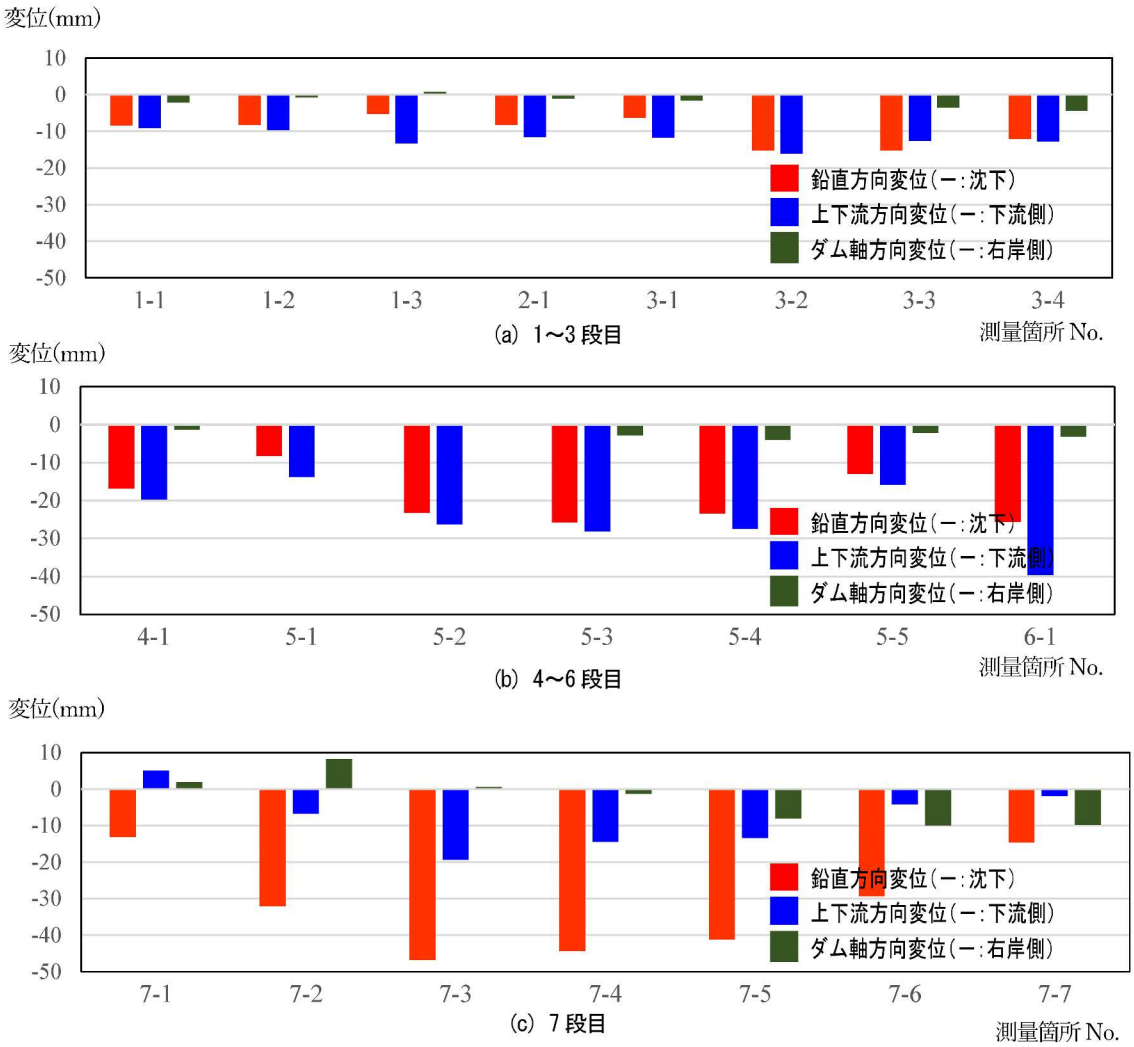


図-2.6 外部変形測量結果（2017/4～2021/3）

2.3　解析手法と解析データ・範囲

2.3.1 解析手法

ロックフィルダムの外部変形を精度よく把握するため，解析手法は多くのデータを使用することで，干渉性の低下，DEM 誤差及び対流圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減でき計測精度が高い PSInSAR 解析を用いた.

図-2.7 に示す 2 回の SAR 衛星と地表間の距離 R_1，R_2 はそれぞれ，下式で表される.

$$2R_1 = n_1 \lambda + r_1 \tag{2.1}$$

$$2R_2 = n_2 \lambda + r_2 \tag{2.2}$$

ここで，n はマイクロ波の波数，λ は波長，r は端数（$0 \leq r < \lambda$）である．2 回の観測期間中の SAR 衛星と地表間の距離の差は，衛星軌道が完全に一致しているとし，$n_1 = n_2$ の場合，式(2.3)となる.

$$2(R_2 - R_1) = r_2 - r_1 = \lambda(\varphi_2 - \varphi_1)/2\pi \tag{2.3}$$

ここで，φ は位相である.

この位相残差 $\varphi = (\varphi_2 - \varphi_1)$ から，衛星視線方向の変位量を求めることができる.

実際に観測される位相 φ は，下式の 5 項目で表すことができる.

$$\varphi = \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{orb} + \varphi_{DEM} + \varphi_n \tag{2.4}$$

ここで，φ_{def} は衛星視線方向変位による位相差，φ_{atm} は大気の遅延差などによる位相差，φ_{orb} は軌道データ誤差による位相差，φ_{DEM} は数値標高モデルの誤差により生じる位相差，φ_n は干渉度低下によるノイズである．PSInSAR 解析では，φ_n ができるだけ小さなピクセルを選定し，恒久散乱点である PS 点としている.

本論文では PSInSAR 解析として，スタンフォード大学において Andrew Hooper ら [22), 23)]が開発した StaMPS/MTI（Stanford Method for Persistent Scatterers / Multi-Temporal InSAR）を用いた [24)~26)].

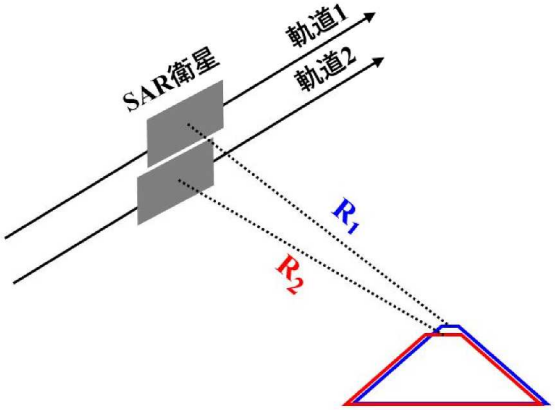


図-2.7　SAR 衛星と地表間の関係

PS 点の選定に際しては，まず複数の干渉画像において振幅幅が安定しているピクセルは位相も安定していることから，分散指標D_A が閾値より小さいピクセルを PS 点（位相の安定しているピクセル）とみなす．

$$D_A = \sigma_A \ / \mu_A \tag{2.5}$$

ここで，σ_A，μ_Aはピクセルにおける振幅幅の標準偏差と平均値である．

次に PS 候補点に対して，位相安定性評価を行い，φ_nのばらつきの小さいピクセルを PS 点として選出する．φ_{atm}，φ_{orb} については，PS 点ごとに位相時系列に対してローパスフィルターをかけることなどにより，誤差を低減させる．

PSInSAR 解析では，このように解析期間において散乱特性が変化しない点（PS 点）にのみ着目することで，時系列的な変動を精度よく推定することができる．PS 点となり得る地表の物体は，主に人工建造物や岩などであり，それらが密に分布する都市部や植生及び積雪のない山肌などでは PS 点が得られやすく，今回対象のロックフィルダムでは，外部表面のリップラップはレーダーの反射が良好であり，ダムの外部表面全体で PS 点が多く得られる．

PSInSAR 解析のフローは，**図-2.8** に示すように，SNAP（Sentinel Application Platform）[27]を用いて InSAR 解析を実施して StaMPS/MTI への入力データを作成し，そのデータを用いて StaMPS/MTI により PS 点を選定して，PS 点での時系列の変位を求めた．

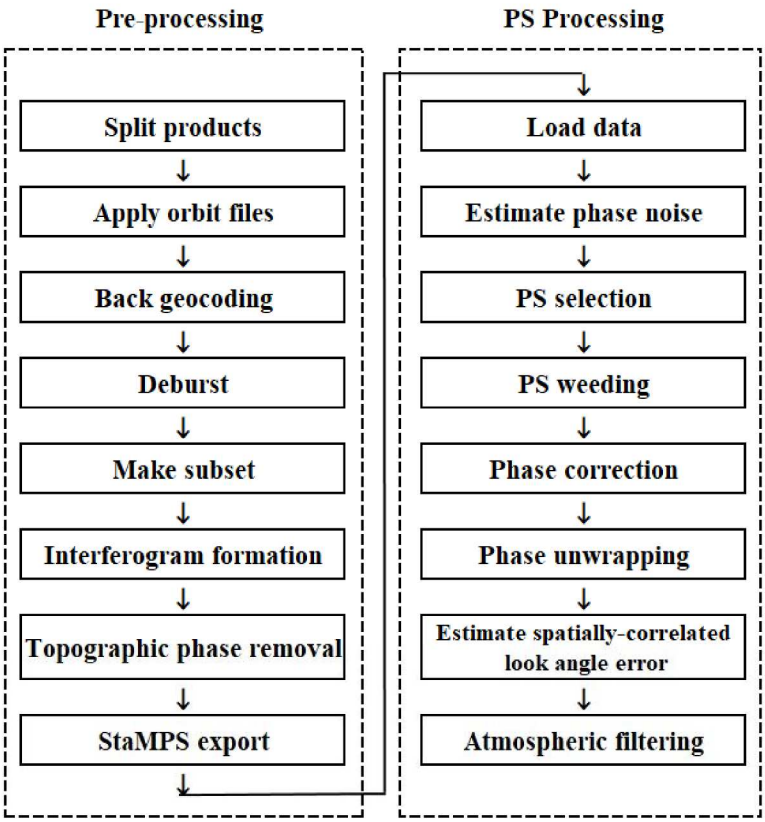


図-2.8　SNAP・StaMPS/MTI 解析フロー

2.3.2　解析データと解析範囲

衛星 SAR データは，同じ軌道で多くのデータが取得できる C バンド （波長：5.6cm）の Sentinel-1 を用いた．Sentinel-1 は，欧州宇宙機関 （ESA） が 2014 年，2016 年に打上げたものであり，2 機の衛星からなり，分解能は追求せず広域を観測するように設計されており，5m×20m の空間分解能で観測幅は 250km（Interferometric Wide Swath）である．

衛星は地球を南北に周回するため，衛星が南向きに飛行する南行軌道（Descending）右側観測と北向きに飛行する北行軌道（Ascending）右側観測の 2 通りの観測があるが，Sentinel-1 の 2 機運用されている南行，北行軌道両方のデータを用いた．

南行，北行軌道，それぞれの解析範囲は**図-2.9** に示すとおりであり，検討対象ダムを含めた，東西方向約 15km，南北方向約 12km の領域を解析した．Sentinel-1 は南行，北行軌道それぞれ 12 日間隔でデータが取得でき，**表-2.2** に PSInSAR 解析で用いた 2017 年 4 月から 2021 年 12 月の約 4 年間の SAR データを示す．

検討対象ダムは天端の標高が 1,532m と高いところにあり，冬季にはダムに雪が積もる日がある．積雪時の SAR データを用いた場合，積雪の影響により変位を精度よく把握できない可能性が高い．そのため，**表-2.2** に示す全データを用いて PSInSAR 解析を実施して，PS 点の変位のばらつきを確認して，積雪の影響などにより信頼性が得られない日のデータを抽出し，その日のデータを除いて解析した．

全データを用いて PSInSAR 解析を実施し，ダム堤体の PS 点での 12 日間の変位を求めた結果から得られたダム堤体の全ての PS 点の標準偏差を**図-2.10** に示す．標準偏差が 5 mm 以上の日のデータは，冬季の積雪時期と整合しており，非常に短い期間でありながらばらついており，積雪の影響などで解析結果の信頼性が得られないと判断した．この結果，PSInSAR 解析結果と測量値を比較検討するにあたっては，**表-2.1** に示すとおり，南行軌道で 110，北行軌道で 122 の SAR データを用いた．

DEM は国土地理院の 5m×5m メッシュの数値標高モデルに基づいて作成した．

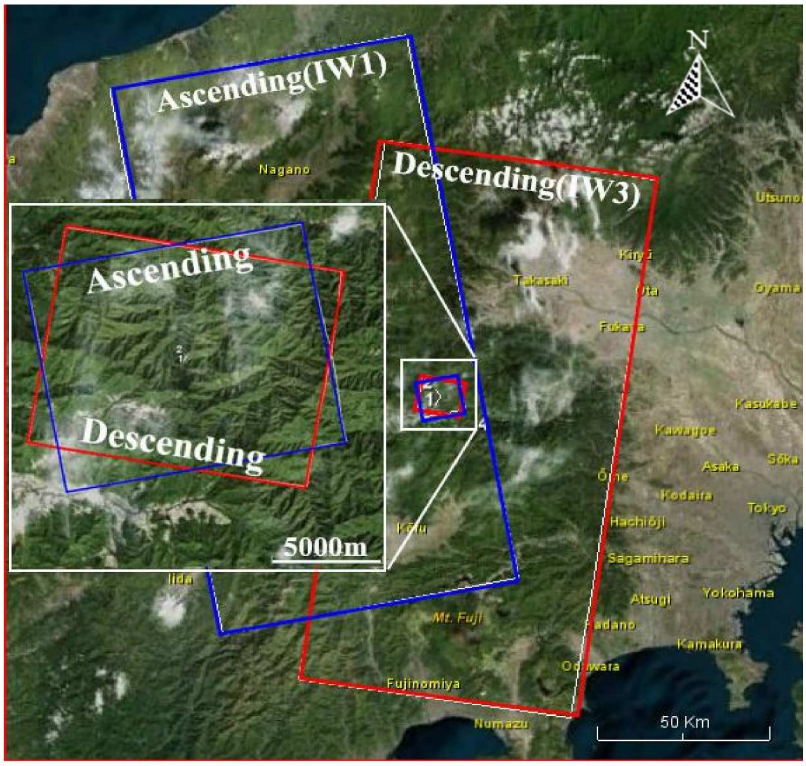


図-2.9　解析範囲

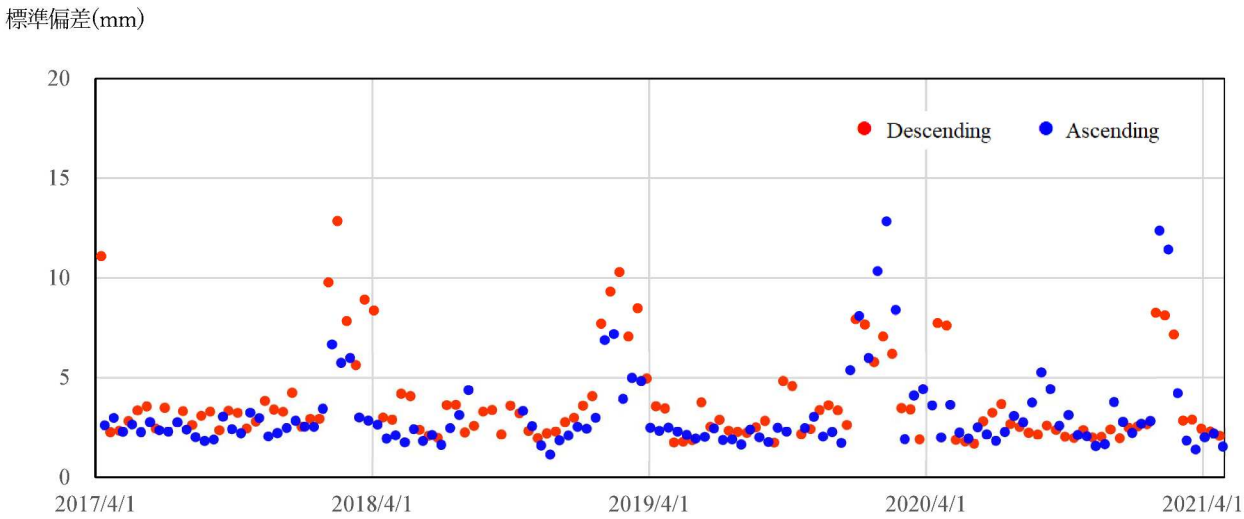


図-2.10　変位の標準偏差(12 日間)

表-2.2　PSInSAR 解析に用いた SAR データ

Descending

2017		2018		2019		2020		2021	
	7/1	1/9	7/8	1/4	7/3	1/11	7/9	1/5	7/4
	7/25	1/21	7/20	1/16	7/15	1/23	7/21	1/17	7/16
	8/6	2/2	8/1	1/28	7/27	2/4	8/2	1/29	7/28
	8/18	2/14	8/13	2/9	8/8	2/16	8/14	2/10	8/9
	8/30	2/26	8/25	2/21	8/20	2/28	8/26	2/22	8/21
	9/11	3/10	9/6	3/5	9/1	3/11	9/7	3/6	
	9/23	3/22	9/18	3/17	9/13	3/23	9/19	3/18	
4/8	10/5	4/3	9/30	3/29	9/25	4/16	10/1	3/30	
4/20	10/17	4/15	10/12	4/10	10/7	4/28	10/13	4/11	
5/2	10/29	4/27	10/24	4/22	10/19	5/10	10/25	4/23	
5/14	11/10	5/9	11/5	5/4	10/31	5/22	11/6	5/5	
5/26	11/22	5/21	11/17	5/16	11/12	6/3	11/18	5/17	
6/7	12/4	6/2	11/29	5/28	11/24	6/15	11/30	5/29	
6/19	12/16	6/14	12/11	6/9	12/6	6/27	12/12	6/10	
	12/28	6/26	12/23	6/21	12/18		12/24	6/22	
					12/30				

Ascending

2017		2018		2019		2020		2021	
	7/6	1/2	7/1	1/9	7/8	1/4	7/2	1/10	7/21
	7/18	1/14	7/13	1/21	7/20	1/16	7/14	1/22	8/2
	7/30	1/26	7/25	2/2	8/1	1/28	7/26	2/3	8/14
	8/11	2/7	8/6	2/14	8/13	2/9	8/7	2/15	8/26
	8/23	2/19	10/17	2/26	8/25	2/21	8/19	2/27	9/7
	9/4	3/3	10/29	3/10	9/6	3/4	8/31	3/11	9/19
	9/16	3/15	11/10	3/22	9/18	3/16	9/12	3/23	10/1
4/1	9/28	3/27	11/22	4/3	9/30	3/28	9/24	4/4	10/13
4/13	10/10	4/8	12/4	4/15	10/24	4/9	10/6	4/16	10/25
4/25	10/22	4/20	12/16	4/27	11/5	4/21	10/18	4/28	11/6
5/7	11/3	5/2	12/28	5/9	11/17	5/3	10/30	5/10	11/18
5/19	11/15	5/14		5/21	11/29	5/15	11/11	5/22	11/30
5/31	11/27	5/26		6/2	12/11	5/27	11/23	6/15	12/12
6/12	12/9	6/7		6/14	12/23	6/8	12/5	6/27	
6/24	12/21	6/19		6/26		6/20	12/17	7/9	
							12/29		

項目	2017	2018	2019	2020	2021	合計
全データ	22	30	31	29	20	132
積雪影響	1	6	6	6	3	22
最終使用	21	24	25	23	17	110

項目	2017	2018	2019	2020	2021	合計
全データ	23	26	29	31	28	137
積雪影響	0	3	4	5	3	15
最終使用	23	23	25	26	25	122

解析対象から除いたデータ

2.4　後方散乱係数と干渉性

検討対象ダムの勾配については，下流堤体斜面は 1：2.0，上流堤体斜面は 1：2.2 である．南行，北行軌道の入射角と堤体斜面の角度の関係は**表-2.3**，**図-2.11** に示すとおりであり，堤体斜面の勾配より入射角が大きいのでレイオーバーは発生しておらず，レーダーシャドウも発生していない．

図-2.11 の入射波と後方散乱の関係図が示すように，南行軌道では下流堤体斜面，北行軌道では上流堤体斜面で，衛星視線方向と斜面とのなす角度が小さくなり，後方散乱が小さくなるものの，**図-2.1** に示すように，堤体表面には岩石が敷き詰められているため反射が良好であることから，一定程度の後方散乱が得られる．2017 年 4 月の後方散乱係数は**図-2.12(a)**，**(b)** に示すとおりであり，南行軌道では天端，上流堤体斜面の箇所が，北行軌道では下流堤体斜面の箇所において後方散乱係数の高い箇所が存在する．

2 つの SAR データの干渉性の度合いを示すコヒーレンス（Coherence；干渉性）の例として，約 3 カ月の間隔（2017 年 4 月と 7 月）のコヒーレンスを**図-2.12(c)**，**(d)** に示す．**図-2.12(c)**，**(d)** はコヒーレンスが 0.5 以上の箇所を示しており，後方散乱係数が高い箇所がコヒーレンスが高い傾向にある．また，南行軌道の下流堤体斜面でも 0.5 以上の箇所が広く分布しており，ダム堤体表面での干渉性が高く，SAR データから変位を精度よく把握できることが示されていると言える．

表-2.3　入射角と堤体斜面との角度

軌道	入射角	下流堤体斜面との角度	上流堤体斜面との角度
南行	44.8°	18.6°	71.8°
北行	35.7°	78.7°	35.7°

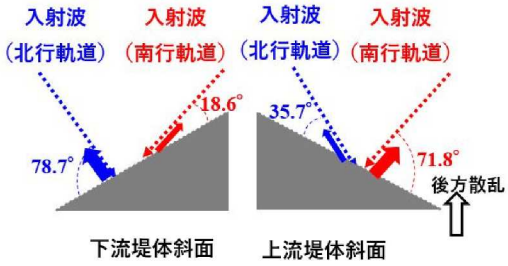
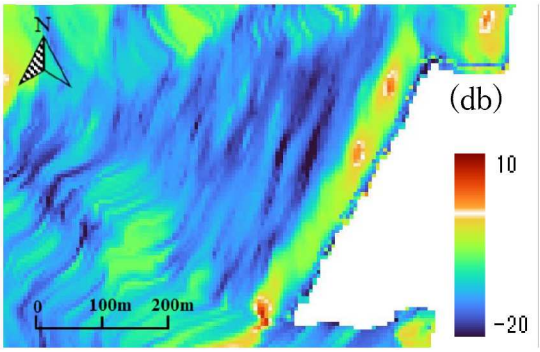
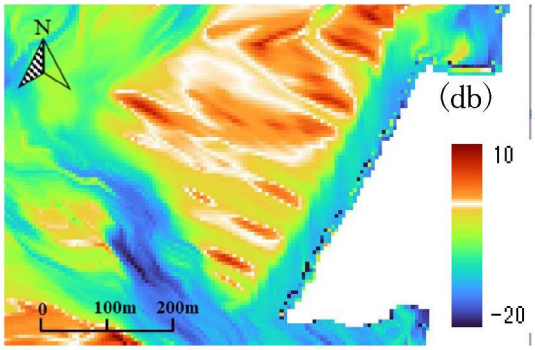


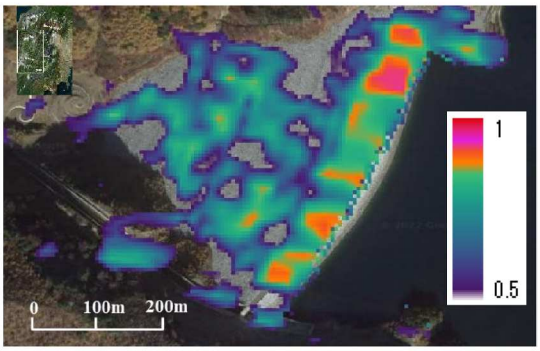
図-2.11　入射波と後方散乱の関係



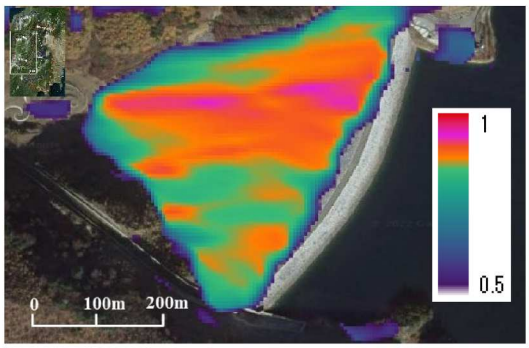
(a) 2017 年 4 月の後方散乱係数（南行軌道）



(b) 2017 年 4 月の後方散乱係数（北行軌道）



(c) 2017 年 4 月と 7 月のコヒーレンス（南行軌道）



(d) 2017 年 4 月と 7 月のコヒーレンス（北行軌道）

図-2.12　後方散乱係数と干渉性

2.5　PS 点（恒久散乱点）

検討対象ダムを含む解析範囲で，4 年間の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して得られた PS 点は**図-2.13** に示すとおりであり，解析対象地域は都市部のような建物などは少なく山岳地であることからほとんどの場所で PS 点は得られない．一方，ダムなどの人工構造物や植生のない岩主体の箇所などでは PS 点が得られた．特にロックフィルダムでは，岩主体であり堤体表面積が大きいため，多くの PS 点が得られている．

ロックフィルダムでの PS 点は，**図-2.14** に示すように，南行軌道で約 280 箇所，北行軌道で約 340 箇所あり，ロックフィルダムの外部変形が面的に把握できるだけの十分な個数が得られた．南行軌道の方が少ないのは，**図-2.11** に示すように，下流堤体斜面の角度と入射波のなす角度が小さいことが考えられる．また，南行軌道の下流堤体斜面で PS 点が得られていない場所と**図-2.12(c)** のコヒーレンスが小さい場所は整合している．この場所は，若干植生が多い箇所である可能性もあると考えられる．

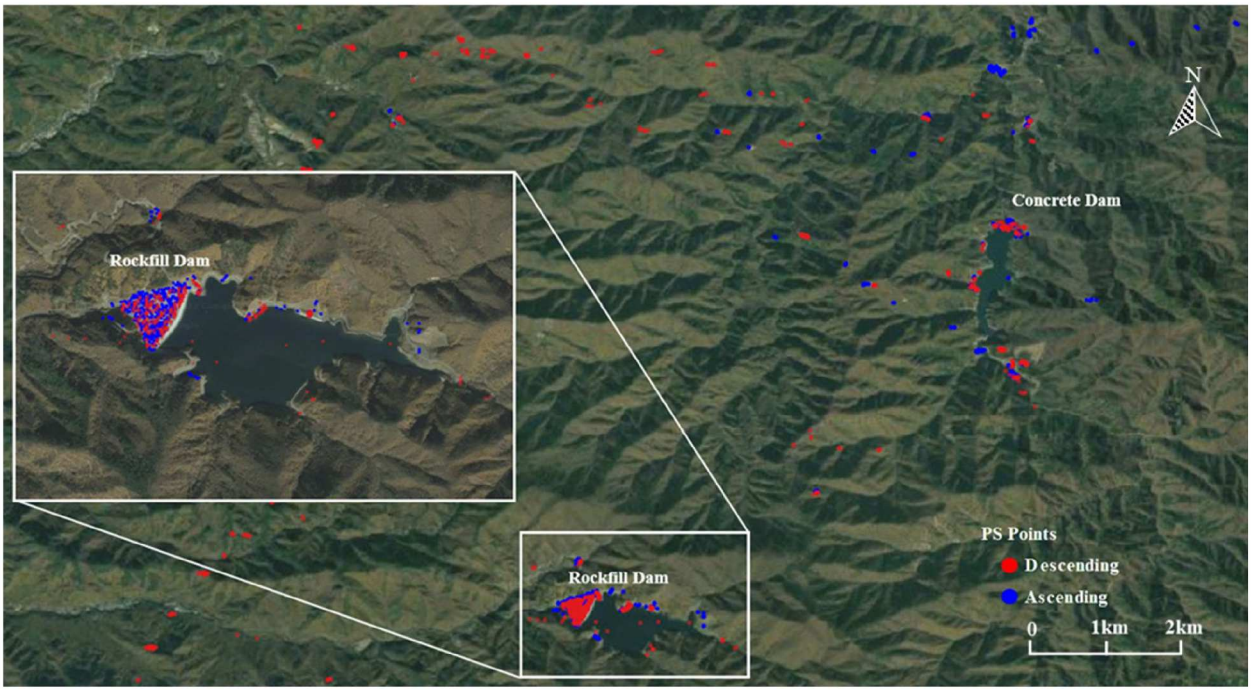


図-2.13　解析範囲の PS 点

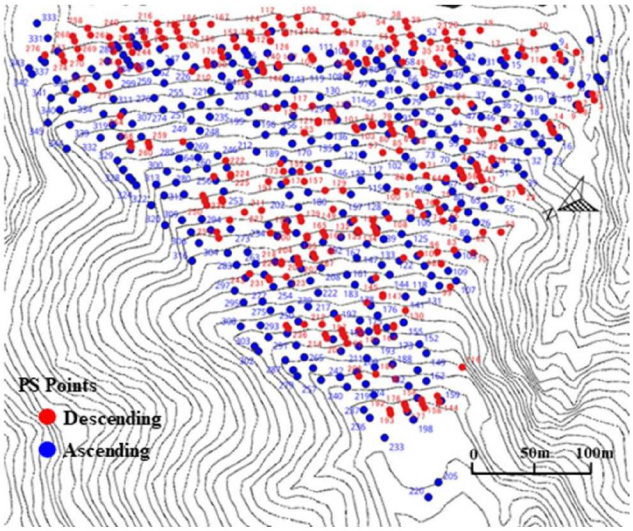


図-2.14　ロックフィルダムの PS 点

2.6　PSInSAR 解析結果と計測値の比較検討

PSInSAR 解析で求まる変位は，人工衛星と地表を結ぶ衛星視線方向の変位であり，衛星軌道方向の変位は把握できない．検討対象ダム地点において，衛星軌道方向，衛星視線方向とロックフィルダムの関係を**図-2.15** に示す．衛星軌道がほぼ南北方向であり，ダム軸も南北方向に近いため，ダム軸方向の変位はとらえづらいが，ダム軸方向の変位は，鉛直方向，上下流方向に比べて非常に小さい．

鉛直方向，上下流方向の変位は，南行，北行軌道の衛星視線方向の変位の変化によりとらえられるが，北行軌道の変位は，沈下による衛星から遠ざかる方向の変位に対して，近づく方向の下流側に変位をしていることから，変位が打ち消されることになり，南行軌道の衛星視線方向の変位に比べて小さくなる．

南行，北行軌道の PS 点の衛星視線方向の変位をそれぞれ，$d_{LOS(D)}$，$d_{LOS(A)}$ とすると下式で表される．なお，衛星方向に近づく方向を正とする．

$$d_{LOS(D)} = -\, d_{North}\ \sin\theta_d\ \sin\beta_d + d_{East}\ \sin\theta_d\ \cos\beta_d + d_{Vertical}\ \cos\theta_d \tag{2.6}$$

$$d_{LOS(A)} = -\, d_{North}\ \sin\theta_a\ \sin\beta_a - d_{East}\ \sin\theta_a\ \cos\beta_a + d_{Vertical}\ \cos\theta_a \tag{2.7}$$

ここで，d_{North} は南北方向の変位，d_{East} は東西方向の変位，$d_{Vertical}$ は鉛直方向の変位，θ は入射角，β は南・北と衛星進行方向とのなす角度である．

PSInSAR 解析による衛星視線方向の変位と比較する測量値は，トータルステーションで計測された鉛直変位，上下流変位，ダム軸方向の変位に基づき，式(2.6)，(2.7)から求めた．トータルステーションによる測量は，左岸の洪水吐コンクリート壁面とダム軸より上流約 160m の道路脇に設置したターゲットを基準点としているが，PSInSAR 解析では，この基準点に近い箇所として左岸側でダム堤体より東側に得られた PS 点を基準点とした．

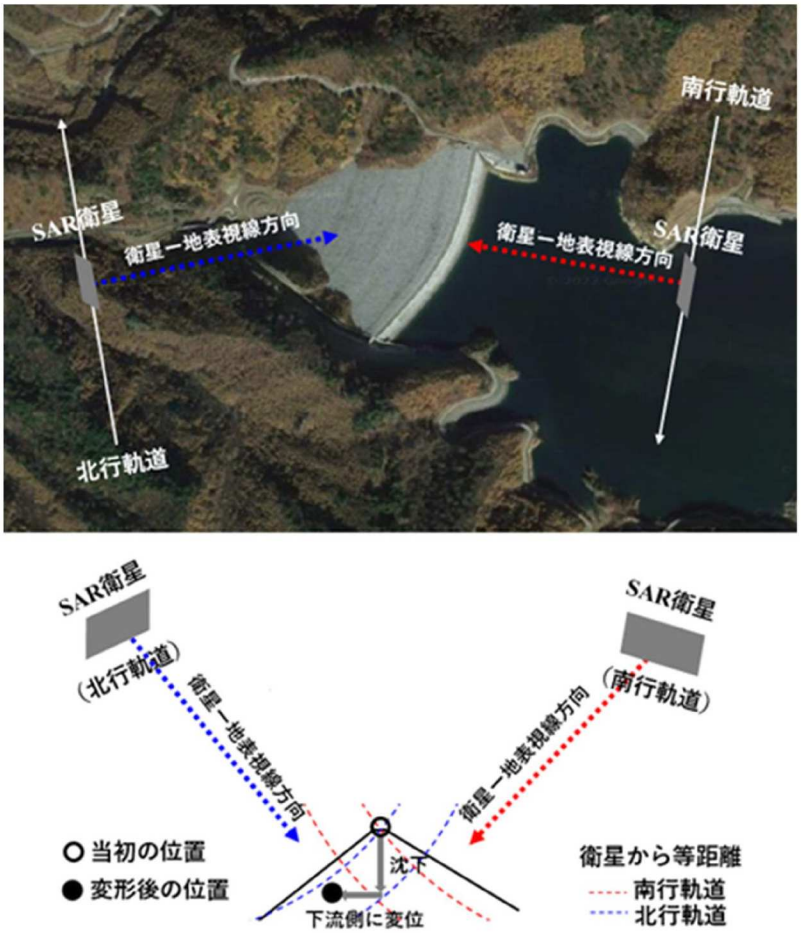
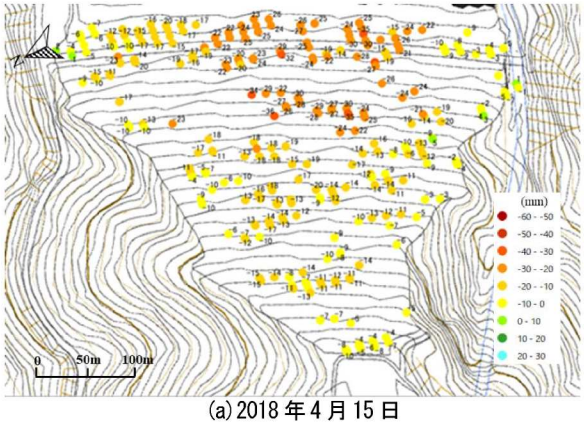


図-2.15　衛星視線方向とロックフィルダムの関係

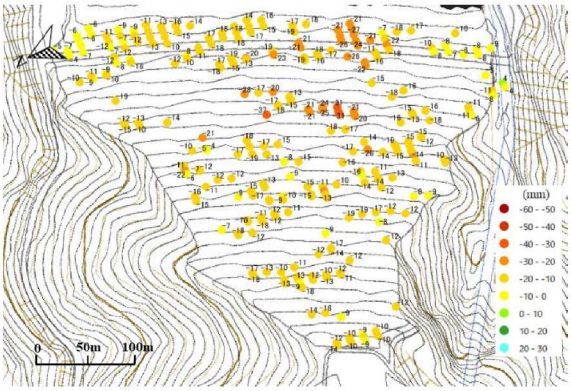
2.6.1　PS 点の変位（1 年間隔）

PSInSAR 解析を実施して得られた南行，北行軌道の 1 年間隔で PS 点の衛星視線方向の変位を**図-2.16**, **2.17** に示す．ここで，衛星視線方向の変位のマイナスは，衛星から遠ざかる方向である．

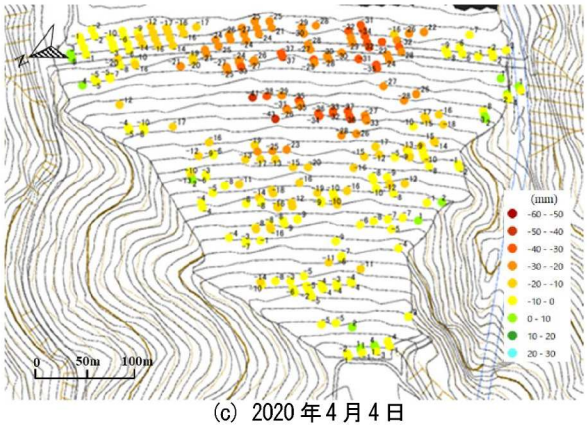
図-2.16 に示す南行軌道の PS 点の衛星視線方向の変位は，測量結果で示された高さが高くなるほど沈下と下流方向の変位が大きくなること，左右岸からダム中央になるほど変位が大きくなる傾向を反映して，それぞれの年の変位は，高さが高くなるほど，左右岸からダム中央になるほど大きくなっており，ダム堤体全体でダムの挙動が把握できている．また，時間が経過するにしたがって，PS 点の変位が大きくなっていることが確認できる．**図-2.17** に示す北行軌道の PS 点の衛星視線方向変位は，沈下により衛星から遠ざかる方向に変位するものの，衛星に近づく下流方向にも変位しているために，その変位を打ち消しており，南行軌道の PS 点の変位に比べて，変位が小さくなっていることが確認できる．



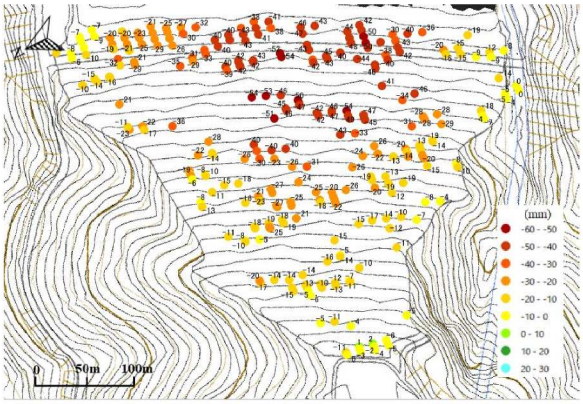
(a) 2018 年 4 月 15 日



(b) 2019 年 3 月 29 日

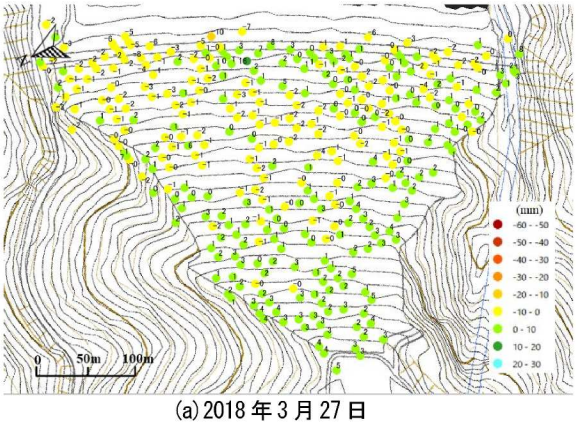


(c) 2020 年 4 月 4 日

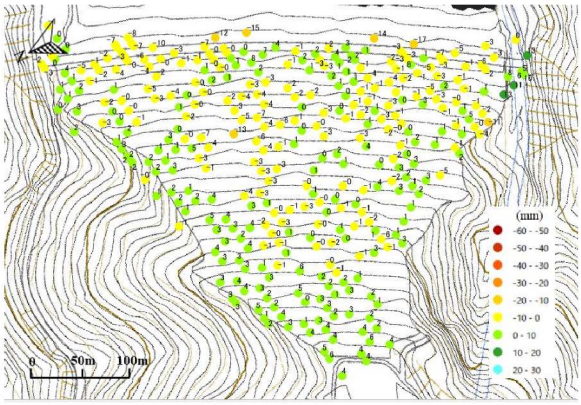


(d) 2021 年 3 月 30 日

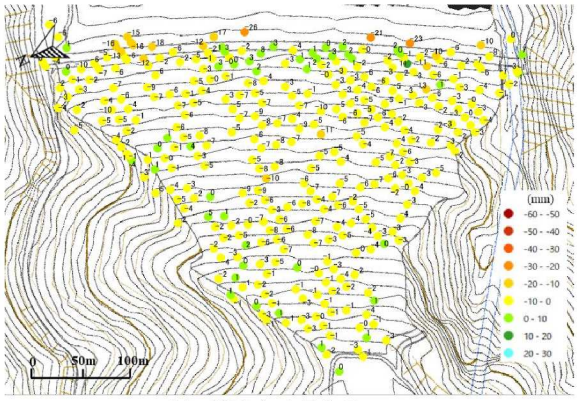
図-2.16　PS 点の変位（南行軌道）



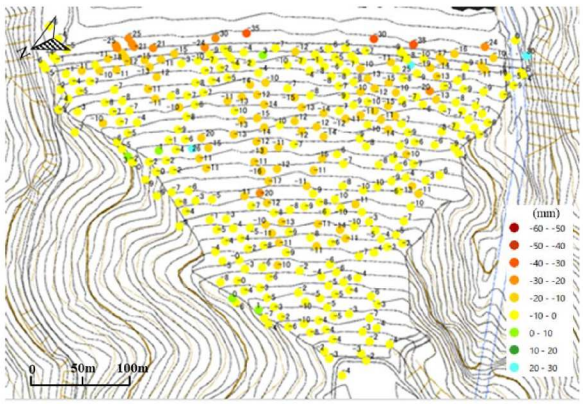
(a) 2018 年 3 月 27 日



(b) 2019 年 4 月 3 日



(c) 2020 年 4 月 9 日



(d) 2021 年 4 月 4 日

図-2.17　PS 点の変位（北行軌道）

2.6.2　精度検証期間（4 年間）の変位

精度検証期間の 2017 年 4 月から 2021 年 3 月までの 4 年間の PSInSAR 解析結果の変位と測量値の比較を**図-2.18** に示す．測量値については，測量による鉛直変位，上下流方向変位，ダム軸方向変位をもとに，衛星視線方向の変位に変換している．PSInSAR 解析結果の変位は，測量のターゲット設置箇所と必ずしも一致しないが，その位置に近い箇所の PS 点の変位とした．PSInSAR 解析による PS 点の変位については，標高差等により完全には取り除かれない誤差があることから，誤差を低減させるため，変位の移動平均値として，前後のデータを含めた計 3 データの平均値として評価することもできることから，この値も合わせて示した．

図-2.18 に示すように，測量箇所での測量による南行，北行軌道の衛星視線方向の変位と PSInSAR 解析による PS 点の変位は，場所の違いによる大小の傾向とともに，絶対値についてもほぼ一致している．南行軌道の測量値の最大変位は，測量箇所 7-3 で-51 mm，解析結果は-48 mm でこの差は 3 mm である．北行軌道の測量値の最大変位は，測量箇所 7-4 で-29 mm，解析結果は-32 mm でこの差も 3 mm である．なお，測量値と解析結果の差は，解析による誤差とともに，計測位置が完全一致していない要因などもあると思われる．

トータルステーションによる測量機器の測角精度が 0.5″, 光波距離計の測距精度は 1mm＋1ppm であり，堤体長より少し長い 500m での精度を試算すると，測角誤差 $5\times10^{5}\times2.42\times10^{-6}=1.2$ mm，測距精度 1 mm＋$5\times10^{5}\times10^{-6}=1.5$ mm となる. 比較する測量値自体についても mm 単位の誤差が含まれている可能性がある．

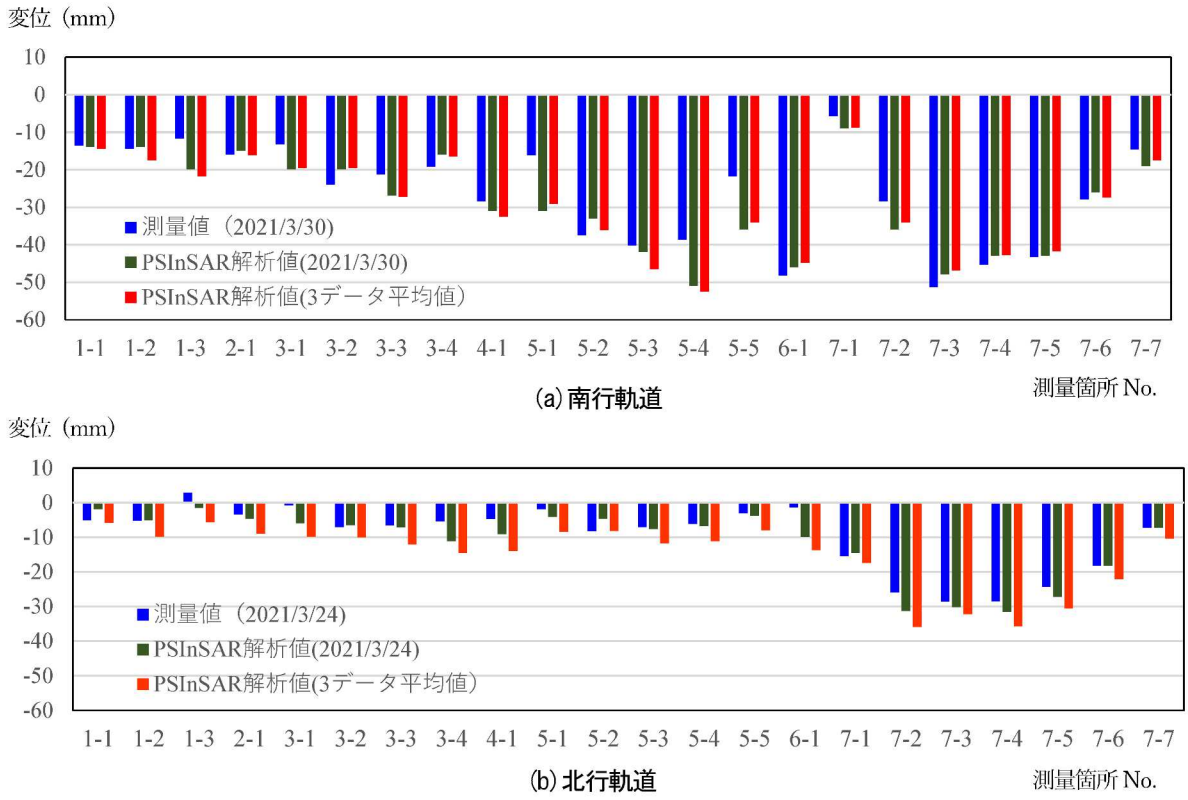


図-2.18　PSInSAR 解析結果と測量値の比較（2017 年 4 月～2021 年 3 月間の変位）

2.6.3　経時変化

ダム天端付近にあるターゲット設置箇所の 7-1～7-7 の測量値とターゲット設置場所の近くにある PSInSAR 解析による PS 点の変位の比較を，南行，北行軌道，それぞれ**図-2.19，2.20** に示す．

PSInSAR 解析結果の誤差を評価するため，二乗平方根誤差（Root Mean Squared Error；RMSE）により定量的評価を行った．RMSE は，測量値を dsur,i，PSInSAR 解析による変位を $d_{PSI,i}$ とすると，次式によって定義される．

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^{n} (d_{PSI,i} - d_{sur,i})^2} \tag{2.8}$$

なお，PSInSAR 解析による変位の日の測量値が欠損している場合は，その日に近い日の測量値と比較した．**図-2.19，2.20** には，その日の変位とともに，移動平均値である前後のデータを用いた 3 データの平均値を示すとともに，それぞれの RMSE も示す．**図-2.19，2.20** に示すように，時間が経過するとともに，測量による衛星視線方向から遠ざかる変位と PSInSAR 解析結果の変位は，一部差が生じているところはあるものの，全体的に精度よくその変化をとらえている．

南行軌道の RMSE は 4.4 mm～5.6 mm，北行軌道の RMSE は 3.4 mm～7.2 mm である．移動平均値では南行軌道の RMSE は 2.7 mm～4.3mm，北行軌道の RMSE は 2.5 mm～6.7 mm である．南行軌道の測量箇所 7-2，7-4 については，計測場所が完全に一致していないことなどから，比較的長い期間 PSInSAR 解析結果と測量値の差が生じている可能性があり，この 2 箇所を除くと移動平均値の RMSE は 3 mm～5 mm 程度となる．一方，毎日の測量値の変動については，実際の変位の進行や貯水池水位による変動などとともに測量誤差が含まれる．

ダム左岸，右岸に最も近く変位量が小さいとともに，測量の視準距離が最も長い箇所 7-1 と最も短い箇所 7-7 での測量値（2020 年 4 月から 2021 年 3 月の 1 年間）の平均値と標準偏差を**表-2.4** に示す．7-1 の標準偏差が 7-7 に比べて大きいのは視準距離が長いことにより測量誤差が大きくなっているものと考えられる．

測量誤差については，測角誤差，測距精度，日変動量などから，1 mm～3 mm 程度と推定される．Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析の誤差については，移動平均値の RMSE が 3 mm～5 mm 程度であることから移動平均値での変位の計測精度については測量には劣るものの mm オーダーの高い精度であると評価できる．

表-2.4　測量値の平均値と標準偏差

場所	南行軌道		北行軌道	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
7-1	-10.8mm	1.8mm	-6.3mm	1.8mm
7-7	-5.5mm	1.5mm	-13.2mm	1.5mm

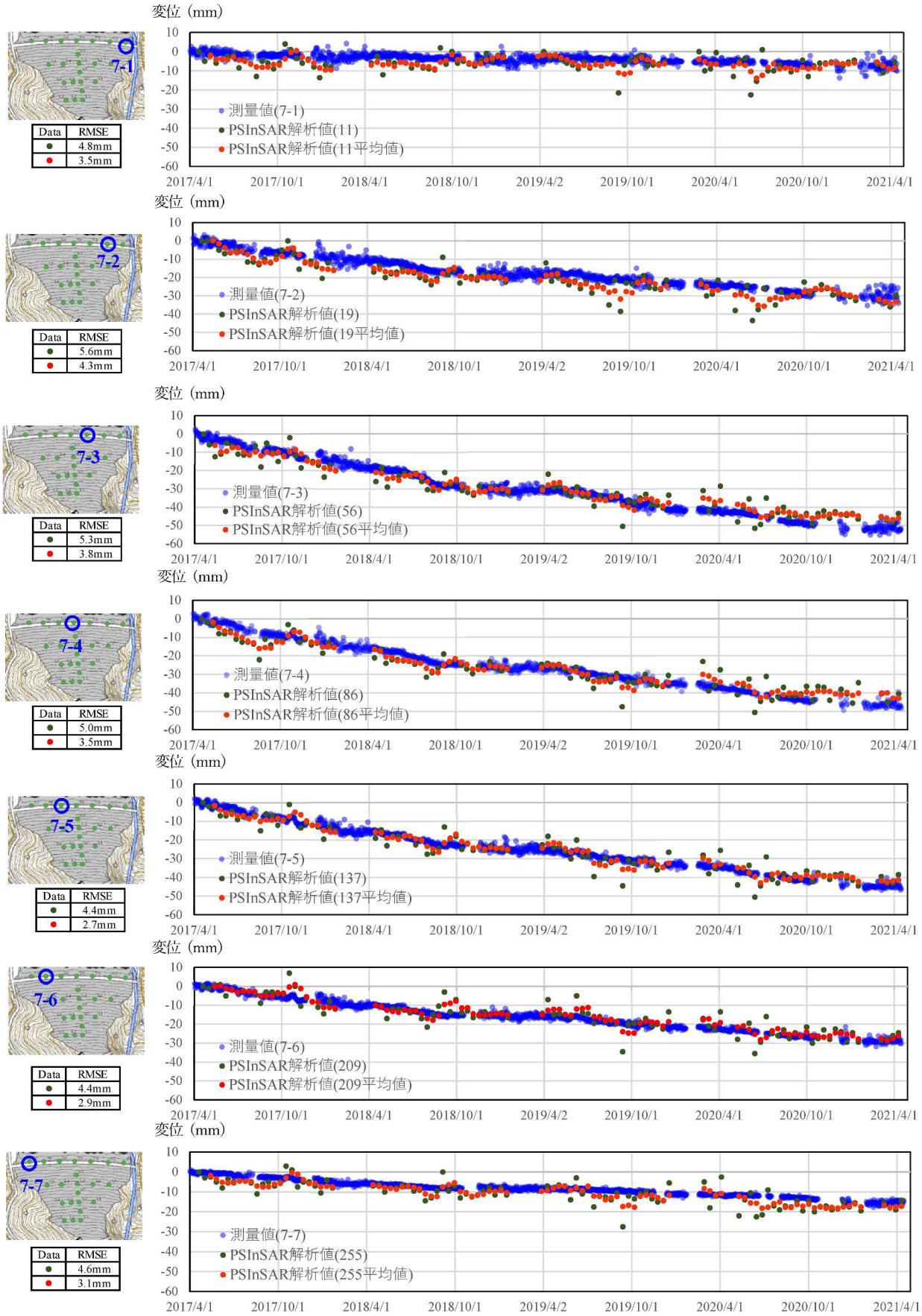


図-2.19　PSInSAR 解析結果と測量値の比較（南行軌道）

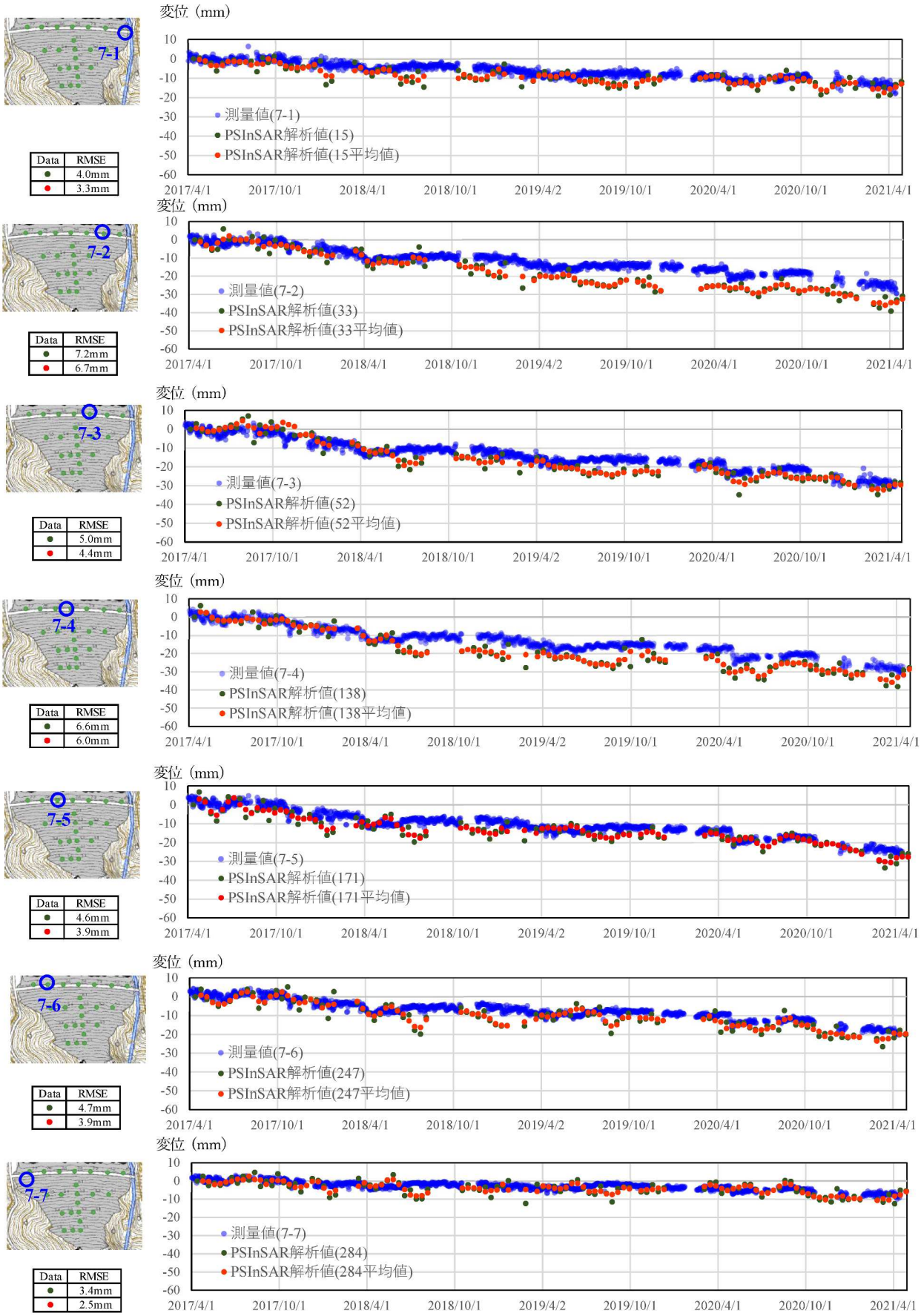


図-2.20　PSInSAR 解析結果と測量値の比較（北行軌道）

2.7　ロックフィルダムの維持管理への適用性

外部変形計測によるダム堤体の挙動把握について，測量と比べた場合の PSInSAR 解析による変位計測のメリット，デメリットは以下のとおりである．

a．PSInSAR 解析のメリット

- ロックフィルダムのリップラップはレーダーの反射が良好であり，ダムの外部表面全体で PS 点が得られ，外部表面の面的な変位の把握ができる．
- 衛星データは定期的に比較的高頻度のデータも入手が可能であり，Sentinel-1 を用いれば 6 日間隔（南行，北行軌道それぞれ 12 日間）の変位が把握できる．
- 無償提供されている Sentinel-1 のデータを用いても測量の精度には劣るものの一定の精度が得られ，経済的に変位計測ができる可能性があるとともに，近くにあるダムなど複数同時に解析できれば，さらに経済的に変位計測できる．
- ダムへの計測機器の設置は不要であるとともに，現場作業をすることなく，変位計測ができる．このことは，現地に行くことが困難な場合などには特に有効である．
- 過去の衛星データを用いて，確認したい時期の変位が把握できる．

b．PSInSAR 解析のデメリット

- 測量の精度より計測精度が劣るとともに，衛星視線方向の変化しか確認できないため，東西方向に比べて南北方向の変位の計測精度が劣る．
- 積雪時には信頼性のおける変位計測はできない．
- 地震時直後の計測など，定期のインターバル以外に計測したい日に計測することは難しい．
- 急激な変状が発生する場合には，移動平均による評価はできず，あまりにも大きな変状の場合には対応できない．
- 衛星に何かのトラブルが生じるなどして，予定していた時期にデータが入手できない場合がある．

安定期のロックフィルダムでは，ダム堤体の健全性を確認するため，外部変形計測を 1 回/3 月の頻度で実施している．PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形量の計測精度は，移動平均値（3 データ）で評価することにより，mm オーダーの高い精度で計測できることが確認できた．

これより，PSInSAR 解析での Sentinel-1 SAR データを用いて，6 日間隔（南行，北行軌道それぞれ 12 日間隔）の計測を行うことで，計測頻度や計測点数などを考慮すると，健全性の確認の信頼性を低下させることなく適用できる可能性があり，PSInSAR 解析を導入することで，現状の測量の頻度を低減させるなど，合理的な保守管理の可能性があると思われる．

今回の安定期の検討対象ダムのように，ダム軸方向の変位は小さく，鉛直方向と上下流方向の変位の比率の傾向が既にわかっている場合には，衛星視線方向の変位から，鉛直方向と上下流方向の変位が推定可能である．なお，PSInSAR 解析を導入した場合でも，衛星データでの結果でこれまでと異なる変位の増加傾向などが認められれば，測量による計測も実施して対応することなどが考えられる．

2.8 まとめ

Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形計測の精度について，外部変形量を連続計測している安定期にある大規模なロックフィルダムを対象に, 2017 年 4 月から 2021 年 3 月までの 4 年間の測量値と PSInSAR 解析結果を比較することにより計測精度の検証を行った.

PAInSAR 解析にあたっては，検討対象ダムが標高が高い場所にあるため冬季に雪が積もることから，積雪時には信頼できる変位計測ができないため，積雪影響の可能性のあるデータを変位のばらつきを確認して解析対象から除外した．変位の基準点については，トータルステーションによる変位計測での右岸の基準点に近い PS 点を基準点として，基準値となる箇所を極力合わせて比較した.

PSInSAR 解析を実施した結果，南行，北行軌道ともにダム堤体全面に PS 点が得られ，面的に変位が把握できるとともに，測量位置と PS 点の場所が完全に一致してはいないものの，移動平均値の RMSE が 3 mm～5 mm と mm オーダーの高い精度で計測できることが確認できた.

PSInSAR 解析では，散乱特性が変化しない PS 点にのみ着目，PS 点における時系列的な変動を精度よく推定することができるが，大気の影響などによる誤差など，誤差を完全には除去することは難しいため，南行軌道の RMSE は 4.3mm～5.6mm，北行軌道の RMSE は 3.4mm～7.1mm となり，変位の計測精度は 5 mm 程度の精度であると推定される．さらに計測精度を向上するためには，大気（水蒸気）の影響を考慮した大気補正をすることが考えられるが，ダムの高低差による水蒸気の差の影響については確認できなかった.

PS 点での 4 年間の最大変位が発生している箇所での PSInSAR 解析と測量値の差が 3mm 程度であるなど，数年間のトータルの変位の絶対量からの比較結果からも，ダム堤体全面の挙動を的確にとらえていることが確認できた.

ロックフィルダムでは PS 点が多く得られるため，ダム堤体全面の面的な変位の把握ができ，現場で計測することなく，定期的に比較的高頻度で変位計測ができるなどのメリットがある．一方，今回のダムでの検証結果より移動平均値を用いれば，mm オーダーの高い精度で計測が可能であるものの，測量に比べやや劣り，南行，北行軌道の 2 方向の衛星視線方向の変位しか把握できないなどのデメリットがある.

ロックフィルダムへの衛星 SAR データを利用した PSInSAR 解析結果の保守管理への適用性については，一定の計測精度であることが確認でき，導入によるメリット，デメリットも踏まえた上で，現状の測量と PSInSAR 解析結果を組み合わせるなど，合理的な保守管理の可能性があると思われる．さらに，PSInSAR 解析の適用については，挙動計測の信頼性のさらなる向上や，過去の挙動評価において，測量は実施していないが，衛星データがある場合などのケースでの活用も期待できると思われる.

【参考文献】

1) 竹内渉:衛星搭載合成開口レーダーSAR によるインフラヘルスモニタリング, 地質調査, Vol.151, No.1，2018．[Ayumu, T. : Infrastructure Health Monitoring by Satellite-Borne Synthetic Aperture Radar SAR, Geology and Surveys, Vol.151, No.1, 2018.]
2) 大内和夫：「第 23 回 合成開口レーダーはどのように利用されているのでしょうか？」，日本リモートセンシング学会誌，Vol.36，No.5，2016．[Kazuo, O. : Vol. 23 How is Synthetic Aperture Radar used?, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, Vol.36, No.5, 2016.]
3) 穴原琢摩, 夏秋嶺, 琴浦毅, 岩塚雄大, 佐々木義信, 冨井直弥, 前田勇司, 西剛：衛星観測による干渉 SAR 解析を用いた港湾施設の変状の計測，土木学会論文集 B2(海岸工学)， Vol.72，No.2，2016．[Takamura, A., Ryo, N., Tuyosho, K., Yuudai, I., Yoshinobu, S., Naoya, T., Yuuji, M. and Takeshi, N. : Deformation Mesurement of Harbor Facilities with Satellite-Borne Insar Analysis, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.72, No.2, 2016.]
4) 清水則一：地盤工学における情報収集・分析・伝達技術開発の最前線，地盤工学会誌，69(1)，2021．[Norikazu, S. : The Forefront of Information Gathering, Analysis, and Communication Technology Development in Geotechnical, Geotechnical Engineering Magazine, 69(1), 2021.]

5) 国立大学法人東京大学，基礎地盤コンサルタンツ株式会社：合成開口レーダー（SAR）の道路土構造物の維持管理への活用マニュアル（案），2021．[University of Tokyo, Kiso-Jiban Consultants Co.,Ltd. : Manual for the Application of Synthetic Aperture Radar (SAR) to the Maintenance and Management of Road Soil Structures (Draft), 2021.]
6) 環境省水・大気環境局土壌環境課：地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル，2017．[Soil Enviroment Division, Water and Air Environment Bureau, Ministry of the Environment, Japan : Manual for Satellite Applications in Land Subsidence Observation, etc., 2017.]
7) 石塚師也，松岡俊文：ALOS/PALSAR データを用いた PS 干渉 SAR 解析の精度評価－千葉県九十九里地域の地表変動を例として，日本リモートセンシング学会誌, Vol.36，No.4,2016．[Kazuya, I. and Toshifumi, M. : Accuracy Evaluation of Persistent Scatterer Interferometry Using ALOS/PALSAR Data : A Case Study of Surface Displacement in the Kujukuri Plain, Chiba Prefecture, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, Vol.36, No.4, 2016.]
8) 小林知勝，森下遊，山田晋也：干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発，国土地理院時報，No.130，2018．[Tomokazu, K., Yu, M. and Shinya, Y. : A Prototype System for InSAR Time Series Analysis, Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan, No.130, 2018.]
9) 下里航大，浮田宗泊：深層学習を用いた PSInSAR 解析の対流圏遅延誤差除去，情報処理学会研究報告，No.32，2020．[Koudai, S. and Sohaku U. : Tropospheric Delay Error Removal in PSInSAR Analysis Using Deep Learning, IPSJ SIG Technical Report, No.32, 2020.]
10) A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca : Permanent scatterers in SAR interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol.39, January 2001.
11) 今井靖晃：インフラ管理分野での衛星（合成開口レーダ）の利活用事例，測量，2019 年 11 月号，2019．[Yasuaki, I. : Case Studies of Satellite (Synthetic Aperture Radar) Applications in the Field of Infrastructure Management, Journal of Survey, November 2019, 2019.]
12) 本田謙一，浅田典親，虫明成生：衛星リモートセンシングによるフィルダムの外部変形計測，写真測量とリモートセンシング，Vol.54，No.6，2015．[Kenichi, H., Norichika A. and Naruo M. : External Deformation Monitoring of Filldams by Satellite Remote Sensing, Journal of the Japan Society of Photogrammetry, Vol.54, No.6, 2015.]
13) 佐藤弘行，佐々木隆，金銅将史，小堀俊秀，小野寺葵，山口嘉一，佐藤渉，虫明成生，本田譲一：ALOS/PALSAR データを用いた時系列干渉 SAR 解析による５基のロックフィルダムの外部変形計測，土木学会論文集（土木情報学），Vol.73，No.1，1-14，2017．[Hiroyuki, S., Takashi, S., Masafumi, K., Toshihide, K., Aoi, O., Yoshikazu, Y., Wataru, S., Naruo, M. and Kenichi, H. : Interferometric SAR Time Series Analysis for External Deformation Monitering of Five Rockfill Dams Using ALOS/PALSAR Data, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.73, No.1, 1-14, 2017.]
14) 佐藤弘行，金銅将史，小堀俊秀，小野寺葵：衛星 SAR による 19 基のロックフィルダムの外部変形計測，土木技術資料 59-9，2017．[Hiroyuki, S., Masafumi, K., Toshihide, K. and Aoi, O. : Satellite SAR Measurements of External Deformation of 19 Rockfill Dams, Civil Engineering Journal, 59-9, 2017.]
15) 佐藤弘行，金銅将史，小堀俊秀，櫻井寿之：衛星 SAR データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の変位計測マニュアル(案)，国総研資料，第 1233 号，2022.
16) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Pinglan Ge, Akira Takahashi and Katsutoshi Yamagishi : Deformation Monitoring of Large-Scale Rockfill Dam Applying Persistent Scatterer Interferometry(PSI) Using Sentinel-1 SAR Data, 2021 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2021.
17) Tao Li，Mahdi Motagh, Mingzhou Wang, Wei Zhang, Chunlong Gong，Xunan Xiong，Jinping He，Lulu Chen and Jingnan Liu : Earth and Rock-Filled Dam Monitoring by High-Resolution X-Band Interferometry：Gongming Dam Case Study，Remote Sens. 2019.
18) Yehia H. Miky : Multitemporal Sentinel-1SAR Interferometry for Surface Deformation Monitoring near High Dam in Aswan, Egypt，American Journal of Geographic Information System 2019.

19) Joaquim J.Sousaa，Antonio M.Ruiz，Matus Bakon，Milan Lazecky，Ivana Hlavacova，Gloria Patricio，J. Manuel Delgado and Daniele Perissin : Potential of C-Band SAR Interferometry for Dam Monitoring，Procedia Computer Science 100， 2016.
20) Shibo Cheng， Wenhui Zhao and Zhiping Yin : PS-InSAR Analysis of Collapsed Dam and Extraction of Flood Inun-dation Areas in Laos Using Sentinel-1 SAR Images，2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference, 2019.
21) 橋本学：Sentinel-1 による地表変動観測と測地・地球科学における意義，測地学会誌， Vol.64，2018．[Masanobu, H. : Observation of Ground Deformation with Sentinel-1 and its Significance in Geodesy and Geosciences, Journal of the Geodetic Soccitey of Japan, Vol.64, 2018.]
22) A. Hooper, P. Segall and H. Zebker : Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal defor-mation analysis, with application to Volcan Alcedo, Gala-pagos, Journal of Geophysical Research,Vo1 112, B07407, 2007.
23) Andy Hooper, David Bekaert, Ekbal Hussain and Karsten Spaans : StaMPS/MTI Manual Version 4.1b, School of Earth and Environment University of Leeds, Aug. 15, 2018.
24) 福島洋：StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析，測地学会誌， Vol.57，No.2，2011．[Yo, F. : Persistent Scatterer Interferometry by Using StaMPS Package, Journal of the Geodetic Soccitey of Japan, Vol.57, No.2, 2011.]
25) Andy Hooper :StaMPS Persistent Scatterer Exercise，ESA Land Training Course，Bucharest，2015.
26) Michael Foumelis, Jose Manuel Delgado Blasco, Yves-Louis Desnos, Marcus Engdahl, Diego Fernandez, Luis Veci，Jun Lu and Cecilia Wong : ESA SNAP－STAMPS INTEGRATED PROCESSING FOR SENTINEL-1 PERSISTENT SCATTERER INTERFEROMETRY， IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018.
27) Serco Italia S.p.A. : SNAP2StaMPS : Data preparation for StaMPS PSI processing with SNAP - Mexico City 2020，Research and User Support for Sentinel Core Products , December 2020.
28) 吉越洋，井上素行，津田正寿，内田善久，藤山哲雄，太田秀樹：ロックフィルダム遮水ゾーンの長期沈下挙動，土木学会論文集，No.582/III-41，pp.197-205，1997.12.
29) 井上泰行，内田善久，望月直也，石黒健，太田秀樹：ロックフィルダム遮水ゾーンの湛水後長期沈下メカニズム，土木学会論文集, No.582/II-41，pp. 275-284,1997.12.
30) 佐藤信光, 米崎文雄, 大藪勝美, 太田秀樹, 中川浩二：ロックフィルダムの実測変形挙動に関する検討，土木学会論文集，No.736/III-63，179-192，2003.6.

第３章　PSInSAR 解析による 6 基のロックフィルダムの外部変形モニタリング

3.1　研究概要

第２章では年間最大 10mm 程度変位し，外部変形量を連続計測していたダムで，Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析による恒久散乱点の変位の計測精度の検証を行った[1]．本章では，安定期にあり年間最大 2mm 程度の変位で，変形量が小さい，第２章の検証対象ダムより古い大規模な 6 基のロックフィルダムを対象に，北行，南行軌道それぞれ 2017 年 4 月から 2022 年 12 月までの最大 5 年 9 カ月間の C バンドの Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施し，ロックフィルダムの外部変位量を計測する．PSInSAR 解析結果と 3 カ月間隔で実施されている測量による外部変形量を比較して精度の評価をするとともに，変位量が小さいロックフィルダムの保守管理においても，健全性評価に PSInSAR 解析による計測が活用できることを示した．

3.2　検討対象ダムと外部変形計測

3.2.1　検討対象ダム

検討対象ダムは，**表-3.1** に示すとおりであり，東京電力リニューアブルパワーが保有する 6 基のロックフィルダムを対象とした．最も至近に建設された A ダムでも完成から約 25 年が経過，最も古い F ダムでは約 47 年が経過している．

ロックフィルダムの表面は，降雨等の気象や貯水の波浪による浸食や風化を防止するため，リップラップと呼ばれる岩石材料を敷き詰めており，人工衛星 SAR からのレーダーの反射が良好である．**図-3.1** に D ダムと E ダムの表面の状況を示す．

表-3.1　検討対象ダム

ダム名	形式	高さ(m)	堤頂長(m)	竣工年
A	中央遮水壁型	87	494	1999
B	表面遮水壁型	90.5	263	1994
C	中央遮水壁型	97.5	340	1988
D	中央遮水壁型	176	362	1978
E	中央遮水壁型	125	340	1978
F	中央遮水壁型	116	570.1	1977

(a) D ダム（ダム下流端から上流側を撮影）　　(b) E ダム（ダム天端から下流側を撮影）

図-3.1　ロックフィルダムの表面

3.2.2　外部変形量

検討対象ダムの変位は，ダム完成後 20 年以上が経過し既に収束してきており，ここ数年の変位量は小さい．検討対象ダムの測量箇所での 5 年 9 カ月間（2017 年 4 月から 2022 年 12 月間）の鉛直変位と上下流変位は**図-3.2** に示すとおりであり，多くの箇所で 5mm（1mm/年）以下であり，最大でも 10mm 程度（2mm/年程度）である．

検討対象ダムの最大鉛直変位と最大衛星視線方向変位（後述する鉛直・上下流変位を衛星視線方向に変換した値）は**表-3.3** に示すとおりであり，最大鉛直変位は-1.0～-2.4mm/年，北行軌道の最大衛星視線方向変位は-0.9～-1.3mm/年，南行軌道の最大衛星視線方向変位は 0.9～-2.1mm/年である．なお，鉛直変位だけの場合は鉛直変位と衛星視線方向変位の最大となる箇所は一致するが，上下流変位が大きい場合は一致していない箇所がある．

表-3.2　外部変形測量箇所数

ダム	計測数	計測段数（順番は上段から）				
		1	2	3	4	5
A	15	5	5	3	2	
B	15	7	3	3	2	
C	12	4	3	3	2	
D	26	6	6	6	4	4
E	15	5	5	5		
F	19	8	5	4	2	

注）測量箇所番号は下図のとおり，上段からの段数にハイフンして右側から順番に番号をふる

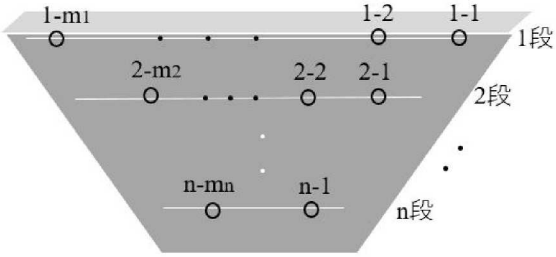


表-3.3　最大鉛直変位と最大衛星視線方向変位

ダム	鉛直変位			北行視線方向変位			南行視線方向変位		
	変位量(mm)		場所	変位量(mm)		場所	変位量(mm)		場所
	6年間	年平均		6年間	年平均		6年間	年平均	
A	-14	-2.4	2-2	-7.2	-1.3	2-2	-11.8	-2.1	2-2
B	-7	-1.2	1-4	-5.1	-0.9	1-4	-5.4	-0.9	1-4
C	-6	-1.0	1-3	-8.7	-1.5	3-3	-8.2	-1.4	3-3
D	-10	-1.7	3-2	-9.0	-1.6	3-4	-7.1	-1.2	3-2
E	-10	-1.7	2-1	-6.3	-1.1	2-1	-7.1	-1.2	3-2
F	-9	-1.6	1-4	-3.2	-0.6	1-4	-7.5	-1.3	1-4

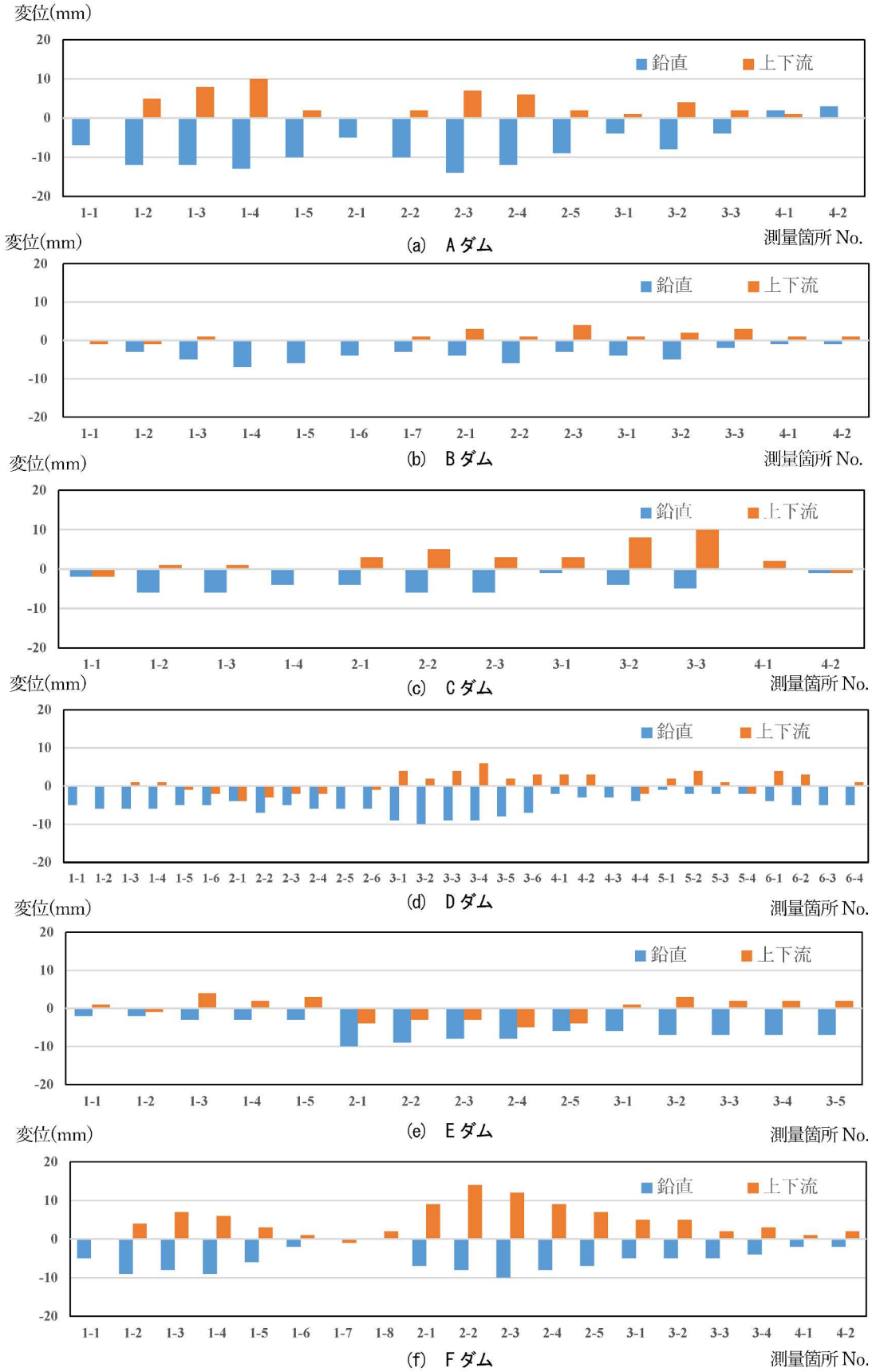


図-3.2 鉛直・上下流変位

3.3　解析手法と解析データ・範囲

3.3.1　解析手法

解析手法は多くのデータを使用することで，干渉性の低下，DEM 誤差及び対流圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減でき計測精度が高い PSInSAR 解析[12)]を用いた．PSInSAR 解析では，解析期間において散乱特性が変化しない点（PS 点）に着目することで，時系列的な変動を精度よく計測することができる．

PSInSAR 解析は，第２章同様，スタンフォード大学において，Andrew Hooper ら[2), 3)]が開発した StaMPS/MTI[4~6)]を用いた．PSInSAR 解析のフローは，SNAP[7)]を用いて InSAR 解析を実施して StaMPS/MTI への入力データを作成し，そのデータを用いて StaMPS/MTI により PS 点を選定して，PS 点での時系列の変位を求めた．

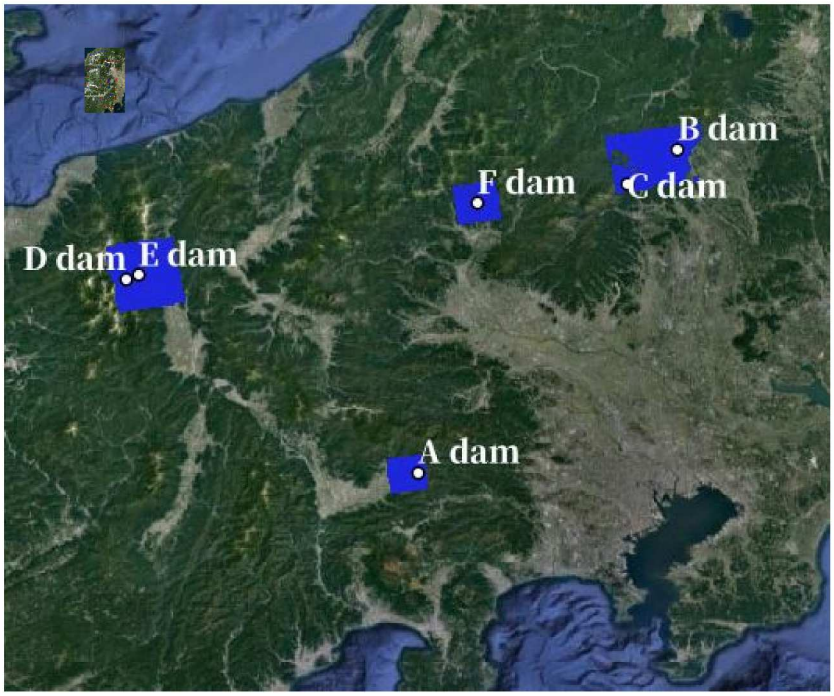
3.3.2　解析データと解析範囲

北行，南行軌道，それぞれの解析範囲とダムの位置を**図-3.3** に示す．北行，南行軌道それぞれ 12 日間隔でデータが取得でき， 2017 年 4 月から 2022 年 12 月間の 5 年 9 カ月間で，同一条件で取得できた Sentinel-1 SAR データを**表-3.4** に示す．検討対象ダムの天端標高は 1,000m 以上であることから，冬季にはダムに雪が積もる可能性がある．ロックフィルダムに雪が積もった時の SAR データを用いた場合，積雪の影響により変位を精度よく把握できないため，まず，取得した全ての検討データを用いて PSInSAR 解析を実施して，PS 点の変位のばらつきを確認した．この解析結果に基づき，PS 点の変位のばらつきが大きく，積雪の影響などにより信頼性が得られない日のデータを抽出した．具体的には，ダム堤体の PS 点での 12 日間の変位の標準偏差が 5 mm 以上の日のデータを除いて解析を実施した．この結果，PSInSAR 解析結果と測量値を比較検討するにあたっては，**表-3.4** の最終使用に示すとおり，北行軌道で 71～134 シーン，南行軌道で 98～156 シーンの SAR データを用いた．

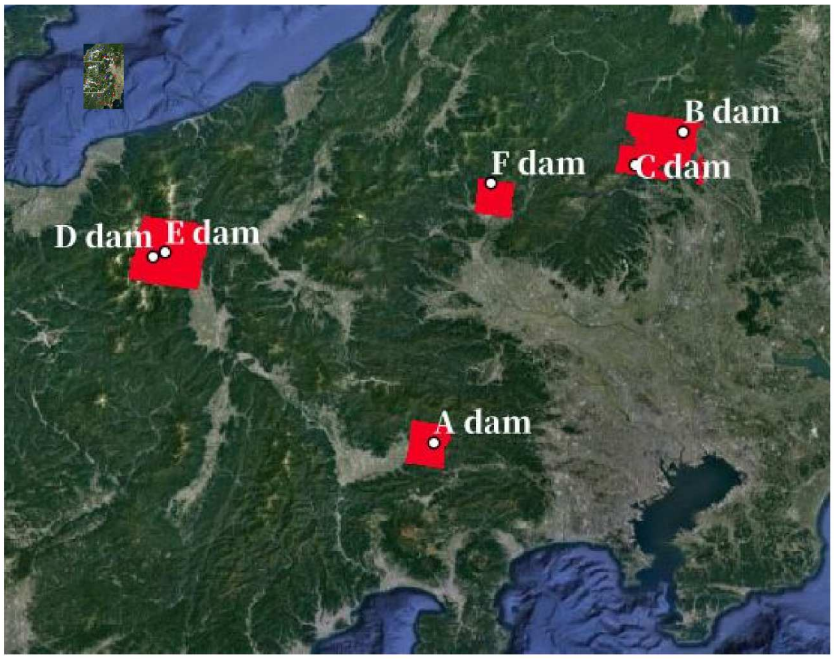
DEM は国土地理院の 5m×5m メッシュの数値標高モデルに基づいて作成した．

表-3.4　PSInSAR 解析に用いた Sentinel-1 SAR データ

ダム	衛星軌道	検討データ		最終使用
		期間	シーン数	シーン数
A	北行	2017/4/1～2021/12/12	136	134
	南行	2017/4/12～2022/12/30	159	156
B･C	北行	2017/4/1～2021/12/12	136	104
	南行	2017/4/19～2021/8/20	132	110
D･E	北行	2017/4/6～2021/12/17	117	71
	南行	2017/3/31～2022/12/30	160	102
F	北行	2017/4/1～2021/12/12	136	84
	南行	2017/4/12～2022/12/30	159	98



(a) 北行軌道



(b) 南行軌道

図-3.3　解析範囲とダムの位置

3.4　堤体斜面と衛星視線方向との関係と干渉性

検討対象ダムの堤体斜面の傾斜角と衛星の入射角，堤体斜面と衛星視線方向の関係を**表-3.5**，**図-3.4** に示す．堤体の下流側斜面の傾斜角は約 25°～27°，上流側斜面は約 20°～27°，衛星の入射角度は南行軌道で約 36°～43°，北行軌道で約 32°～41°であり，レイオーバー，レーダーシャドウは発生していない．

ダム軸と衛星視線方向の関係では，ダム軸と衛星視線方向が比較的平行であるのは，A，F ダム，ダム軸と衛星視線方向の関係が比較的直行しているのは E ダム，中間的な関係であるのは B，C，D ダムとなる．

コヒーレンス(Coherence：干渉性)[8]は，電磁波の 2 つの波動の間で干渉現象が見られる場合，2 つの波動間の干渉性の度合いを示す値であり，0～1 に規格化された値で，1 に近づくほど干渉性が良いことを示す．この 2 つの SAR データの干渉性の度合いを示すコヒーレンスの例として，約 1 カ月の間隔（2017 年 4 月と 5 月）の検討対象ダムでのコヒーレンス値を**図-3.5**，**3.6** に示す．ダム軸の方向にかかわらず，北行，南行軌道でのダム堤体斜面では，コヒーレンス値は 0.6 以上の高い箇所が広く分布している．ダム軸と衛星視線方向が比較的平行な A，F ダムは，北行，南行軌道で，ダム堤体下流斜面のコヒーレンス値の傾向に大きな差はない．ダム軸と衛星視線方向の関係が比較的直行，あるいは中間的な関係の B，C，D，E ダムでは，衛星視線方向と斜面とのなす角が大きくなる，B，D，E ダムの南行軌道，C ダムの北行軌道では，コヒーレンス値が非常に高い箇所が広い．一方，衛星視線方向と斜面とのなす角が小さくなる，B，D，E ダムの北行軌道，C ダムの南行軌道では，コヒーレンス値が高い箇所は，もう一方の軌道に比べて相対的に少なくなっており，コヒーレンス値も相対的に低くなっている．

表-3.5　堤体斜面角度と衛星入射角度

ダム	堤体斜面の傾斜角(°)		衛星の入射角(°)	
	下流斜面	上流斜面	北行軌道	南行軌道
A	26.6	20.3	36.3	32.4
B	26.6	26.6	43.0	39.8
C	26.6	20.3	42.0	40.7
D	25.5	21.0	42.1	39.9
E	26.6	20.3	42.4	39.7
F	24.5	20.3	38.9	32.6

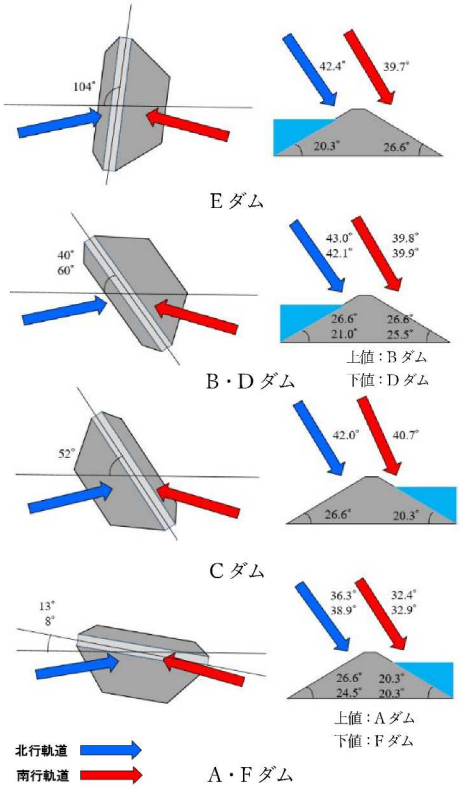
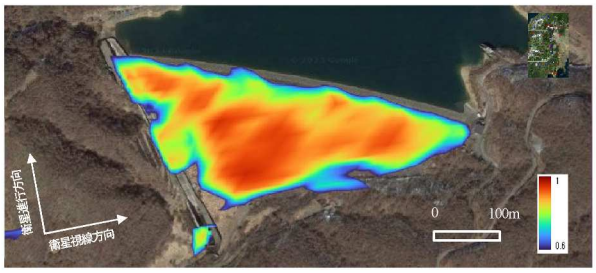
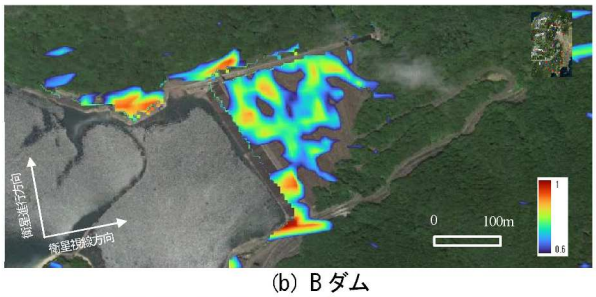


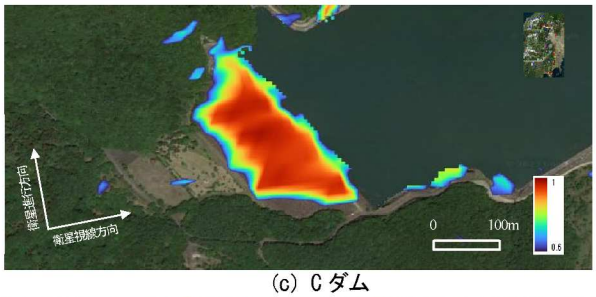
図-3.4　堤体斜面と衛星視線方向の関係



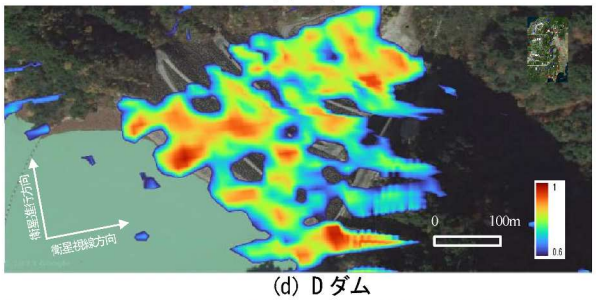
(a) Aダム



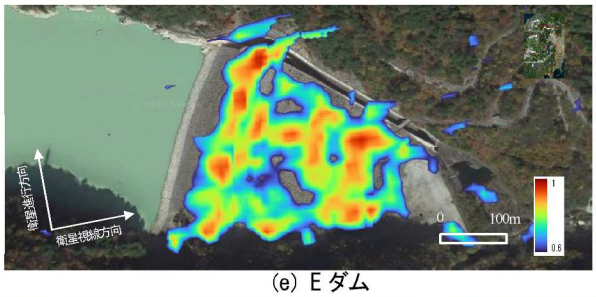
(b) Bダム



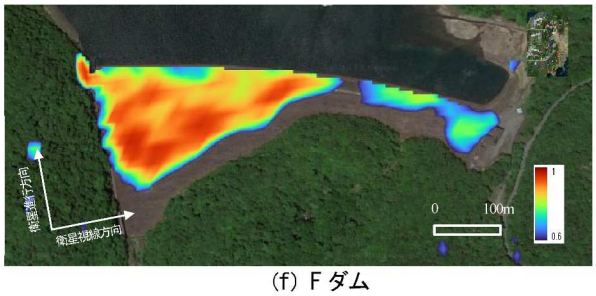
(c) Cダム



(d) Dダム

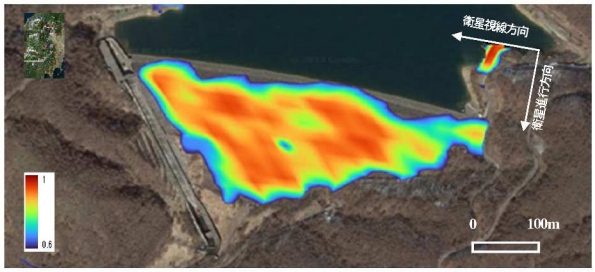


(e) Eダム

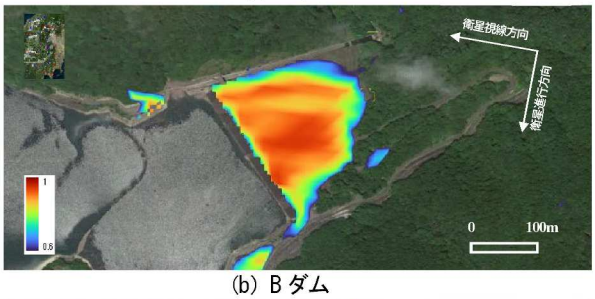


(f) Fダム

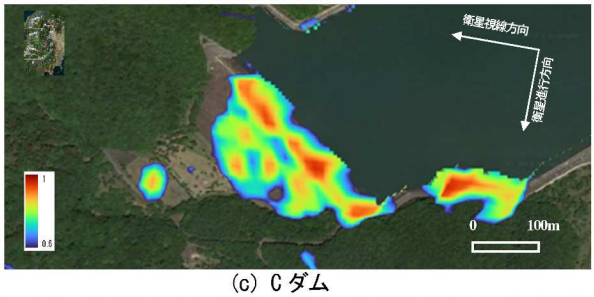
図-3.5　コヒーレンス（北行軌道）



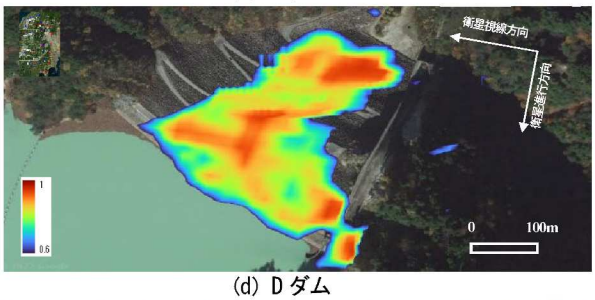
(a) Aダム



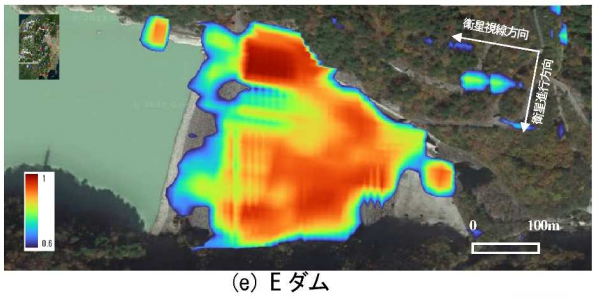
(b) Bダム



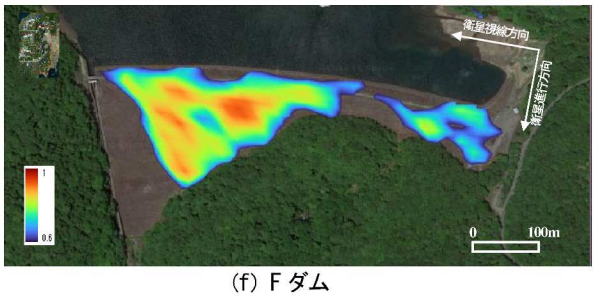
(c) Cダム



(d) Dダム



(e) Eダム



(f) Fダム

図-3.6　コヒーレンス（南行軌道）

3.5　PS 点（恒久散乱点）

検討対象ダム(D，E ダム)を含む広範囲で，5 年 9 カ月間の積雪時期を除いた 102 シーンの南行軌道の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して得られた PS 点を，後方散乱係数，コヒーレンスと合わせて**図-3.7** に示す．第２章と同様，ダム周辺では都市部のような建物などは少なく山岳地であることからほとんどの場所で PS 点は得られない．一方，ダムなどの人工構造物や植生のない岩主体の箇所などでは PS 点が得られている．特に，ロックフィルダムでは，岩主体であり堤体表面積が大きいため，多くの PS 点が得られている．

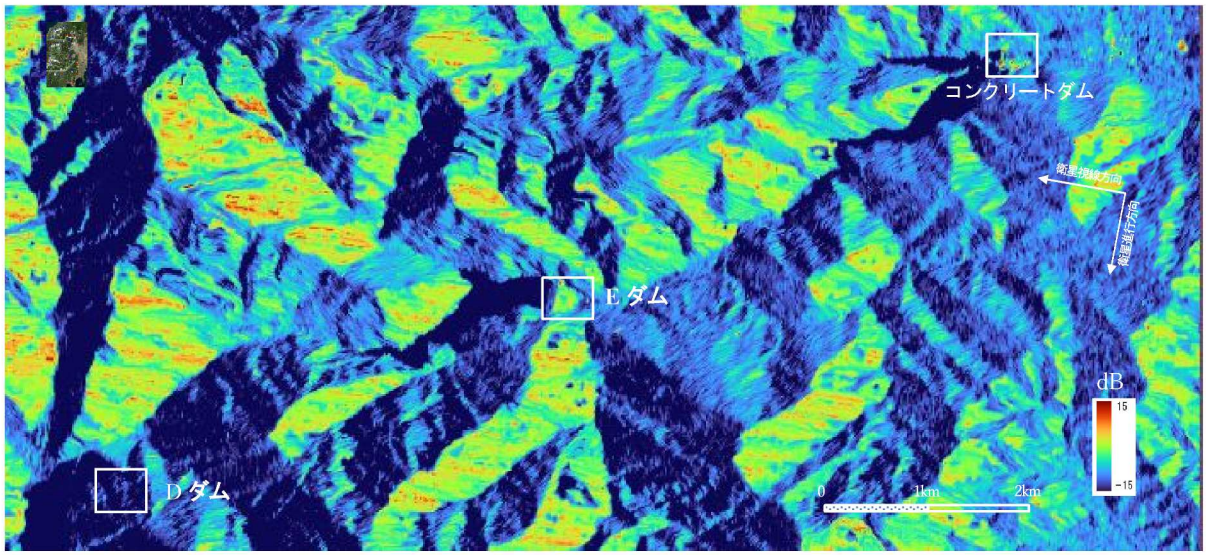
後方散乱係数はロックフィルダムでの表面は適度な凹凸があることから反射特性が良いため高く，水面となるダム湖は非常に小さくなっている．植生がある箇所については，南行軌道で衛星視線方向が西方向の事例であるため，東傾斜斜面で後方散乱係数が高くなっているとともに，人工構造物がある箇所でも高くなっている．一方，コヒーレンスについては，電波が植生の葉や枝によって異なる方向に散乱され，位相が不規則に変化することなどにより，植生のある箇所では低くなり，ロックフィルダム，岩・砂が主体の箇所，コンクリートダム，家屋，送電鉄塔など人工構造物がある箇所で，後方散乱係数と同様に高くなっていることが確認できる．PS 点が得られる箇所は，コヒーレンスが高い箇所と一致している．このような傾向については，北行軌道でも，他の解析範囲でも同様である．**図-3.5** に示す B，D，E ダムの北行軌道では，ダム堤体斜面と衛星視線方向のなす角が小さく，南行軌道に比べ後方散乱強度が小さくなり，干渉性も低下することから，コヒーレンスが 0.6 以下となる箇所が散在している．

検討対象ダムでの北行，南行軌道の PS 点は，**図-3.8**，**表-3.6** に示すとおりであり，ロックフィルダムの外部変形を面的に把握できるだけの十分な個数が得られた．検討対象ダムでの PS 点は，**図-3.5**，**3.6** に示すコヒーレンスが高い箇所と整合している．

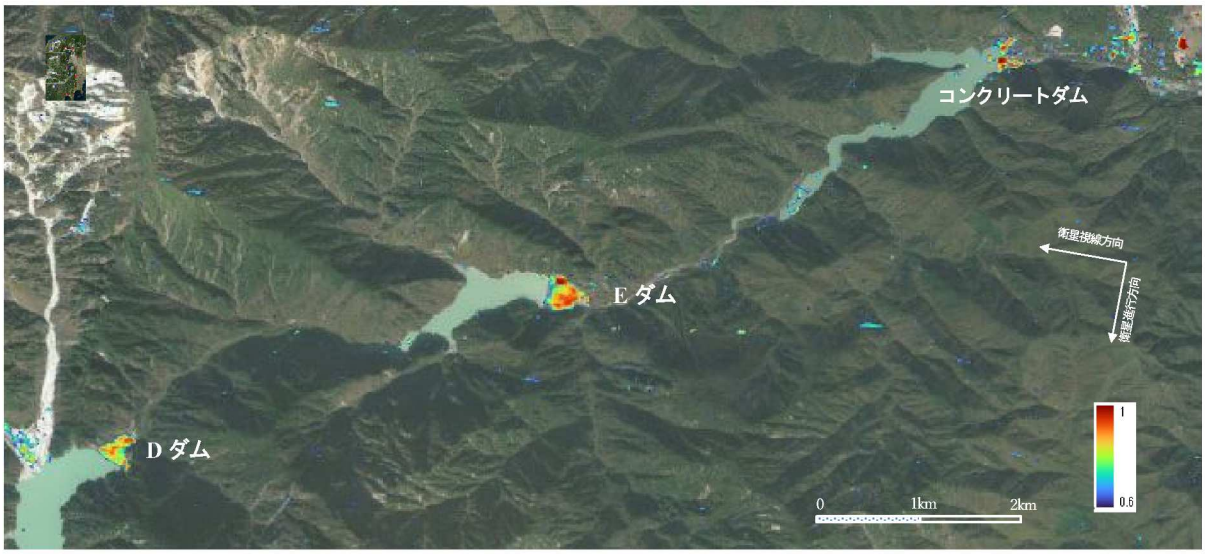
表-3.6　ロックフィルダムでの PS 点総数と密度

ダム	北行軌道	南行軌道
A	407 (0.6)	386 (0.6)
B	136 (0.4)	246 (0.7)
C	289 (0.9)	373 (1.1)
D	880 (1.0)	530 (0.6)
E	577 (0.9)	355 (0.5)
F	571 (1.0)	378 (0.7)

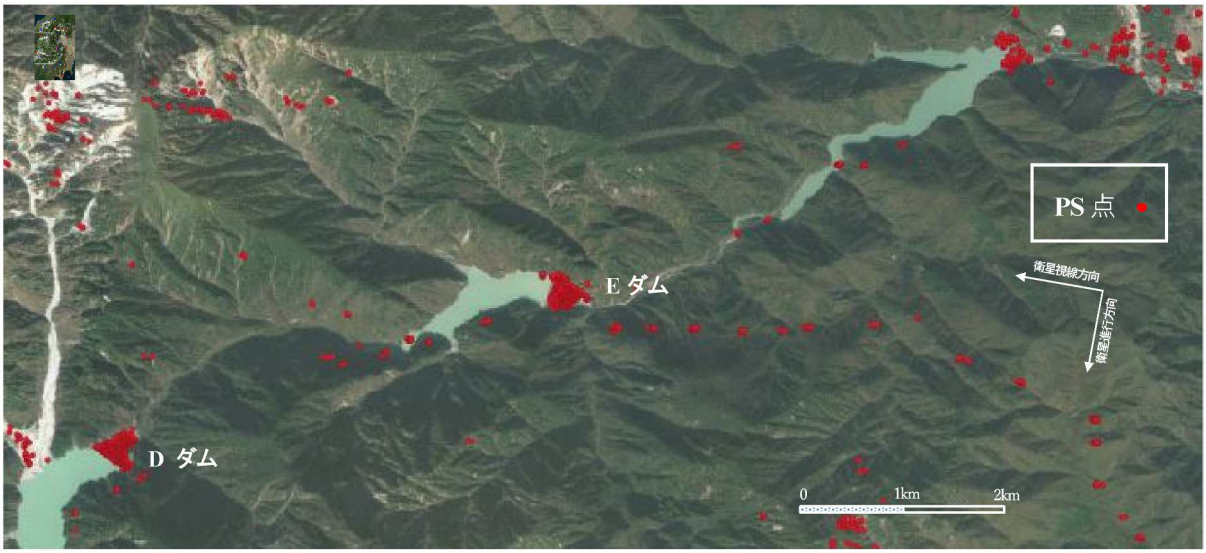
注）括弧内は空間分解能である 5m×20m＝100m^2
あたりの PS 点密度



(a)　後方散乱係数（2020 年 4 月 8 日，南行軌道）

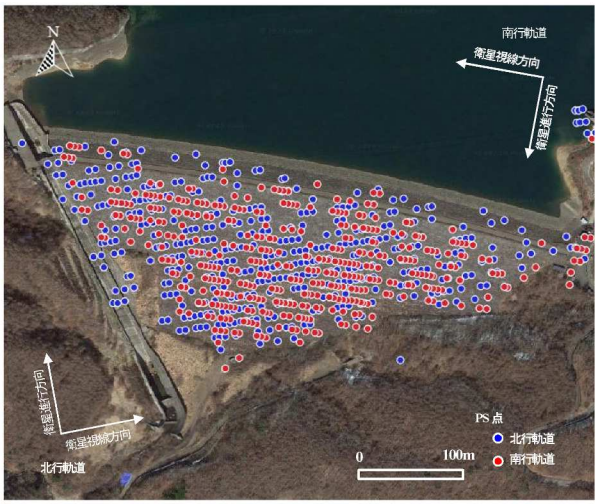


(b) コヒーレンス（2020 年 4 月 8 日ー2020 年 5 月 2 日，南行軌道）

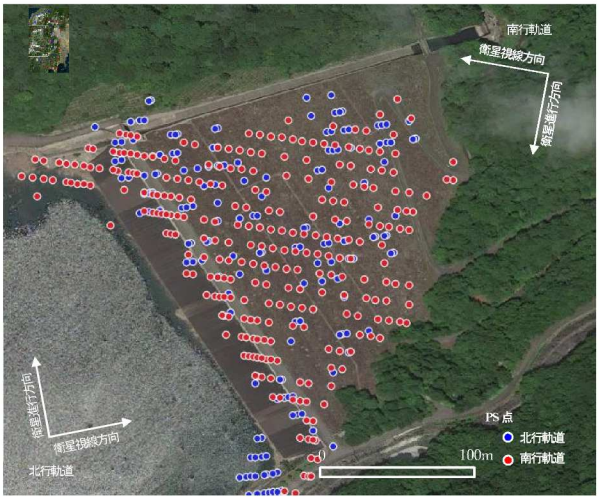


(c) PS 点（2022 年 4 月 8 日～2022 年 12 月 12 日，102 シーン，南行軌道）

図-3.7　D・E ダムを含む広域の後方散乱係数，コヒーレンス，PS 点（南行軌道）



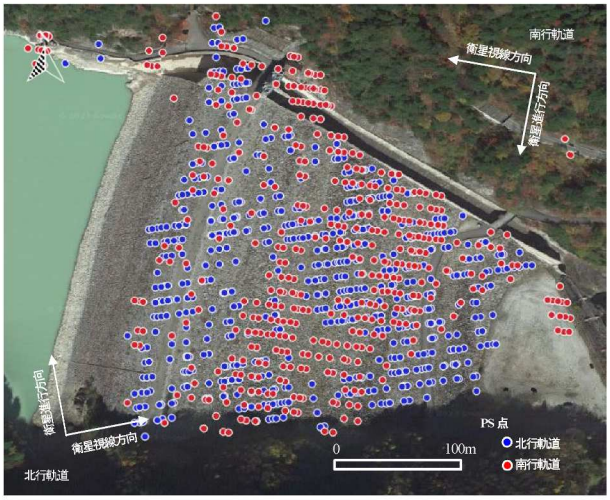
(a) A ダム



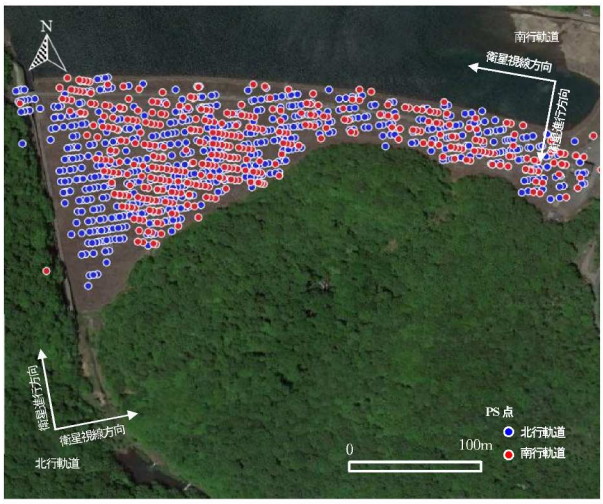
(b) B ダム

(c) C ダム

(d) D ダム



(e) E ダム



(f) F ダム

図-3.8　PS 点（北行軌道，南行軌道）

3.6 PSInSAR 解析結果と計測値の比較検討

3.6.1 PSInSAR 解析結果

(a) A ダム

A ダムの約 6 年間の測量箇所での最大鉛直変位は-14mm，北行，南行軌道の衛星視線方向の最大変位は-7.2mm，-11.8mm で，検討対象ダムの中で南行軌道の変位が最も大きい．北行，南行軌道の PS 点の衛星視線方向の年平均変位，累積変位を図-3.9 に，北行，南行軌道の PS 点の変位の経時変化を図-3.10，3.11 に示す．北行，南行軌道の変位は，高さが高くなるほど，左右岸からダム中央になるほど大きくなる傾向にあり，ダム堤体全体でダムの挙動が把握できている．北行軌道の変位が南行軌道の変位より小さくなっているが，沈下量に比べて小さいものの下流側に変位していることから，南行軌道では衛星に近づく下流側の変位が衛星から遠ざかる沈下による変位を打ち消しているためである．

(b) B ダム

B ダムの約 6 年間の測量箇所での最大鉛直変位は-7mm，北行，南行軌道の衛星視線方向の最大変位は-5.1mm，-5.4mm であり，検討対象ダムの中で衛星視線方向の最大変位が小さい．北行，南行軌道の PS 点の衛星視線方向の年平均変位，累積変位を図-3.12 に，北行，南行軌道の PS 点の変位の経時変化を図-3.13，3.14 に示す．PS 点が多い南行軌道では，高さが高くなるほど，左右岸からダム中央になるほど変位が大きくなる傾向が確認できる．

(c) C ダム

C ダムの約 6 年間の測量箇所での最大鉛直変位は-6mm，北行，南行軌道の衛星視線方向の最大変位は-8.7mm，-8.2mm である．北行，南行軌道の PS 点の衛星視線方向の年平均変位，累積変位を図-3.15 に，北行，南行軌道の PS 点の変位の経時変化を図-3.16，3.17 に示す．南行軌道の変位は，高さが高くなるほど，左右岸からダム中央になるほど大きくなる傾向にあることが確認できる．北行軌道の変位では，上下流変位は衛星に近づく下流側に変位しており，衛星から遠ざかる鉛直変位を打ち消していることから，南行軌道の変位より小さくなっている．

(d) D ダム

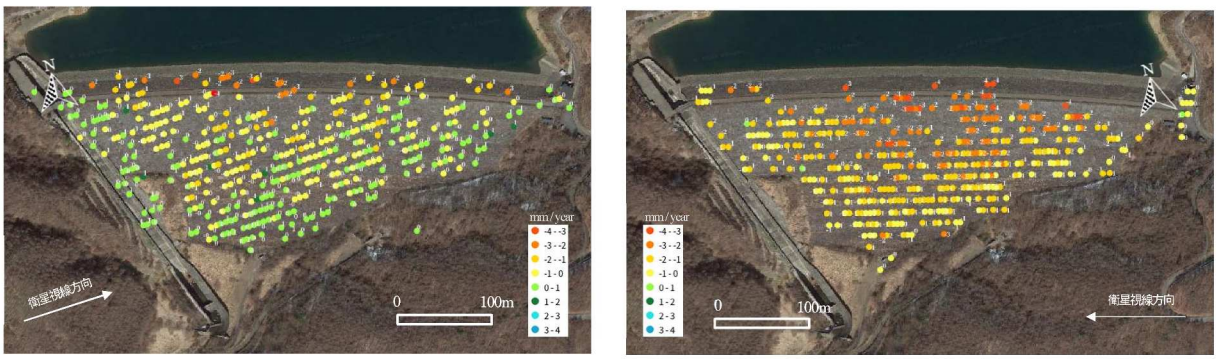
D ダムの約 6 年間の測量箇所での最大鉛直変位は-10mm，北行，南行軌道の衛星視線方向の最大変位は-9.0mm，-7.1mm である．北行，南行軌道の PS 点の衛星視線方向の年平均変位，累積変位を図-3.18 に，北行，南行軌道の PS 点の変位の経時変化を図-3.19，3.20 に示す．ダムの中段が変位が大きくなっており，その傾向が特に南行軌道で確認できる．

(e) E ダム

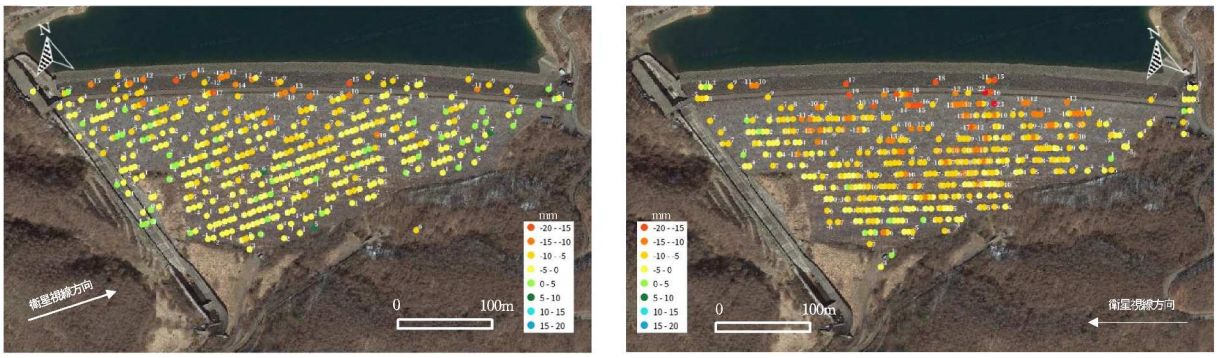
E ダムの約 6 年間の測量箇所での最大鉛直変位は-10mm，北行，南行軌道の衛星視線方向の最大変位は-6.3mm，-7.1mm である．北行，南行軌道の PS 点の衛星視線方向の年平均変位，累積変位を図-3.21 に，北行，南行軌道の PS 点の変位の経時変化を図-3.22，3.23 に示す．ダムの中段が変位が大きくなっており，その傾向が特に北行軌道で確認できる．

(f) F ダム

F ダムの約 6 年間の測量箇所での最大鉛直変位は-9mm，北行，南行軌道の衛星視線方向の最大変位は-3.2mm，-7.5mm，北行軌道の変位は対象ダム衛星視線方向の中で最も小さい．北行，南行軌道の PS 点の衛星視線方向の年平均変位，累積変位を図-3.24 に，北行，南行軌道の PS 点の変位の経時変化を図-3.25，3.26 に示す．変位が小さいものの，北行，南行軌道の変位は，高さが高くなるほど，左右岸からダム中央になるほど大きくなる傾向にある．

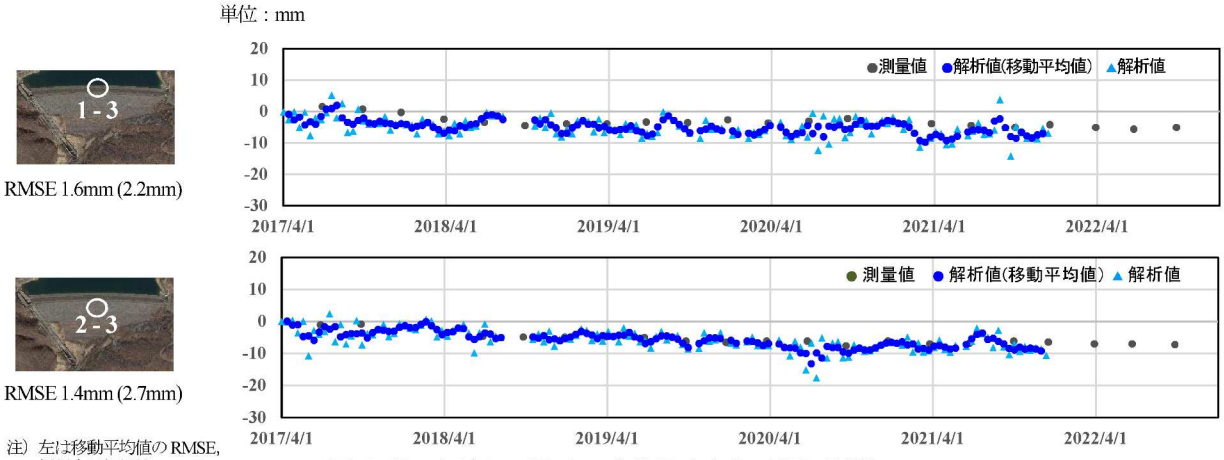


(a) 年平均変位（北行軌道）　(b) 年平均変位（南行軌道）



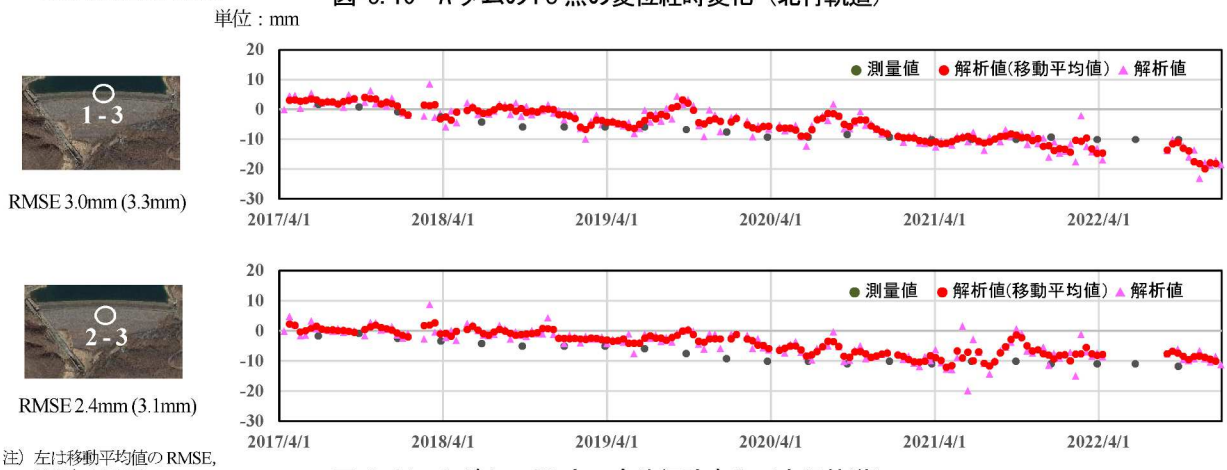
(c) 累積変位（北行軌道）　(d) 累積変位（南行軌道）

図-3.9　A ダムの PS 点の変位



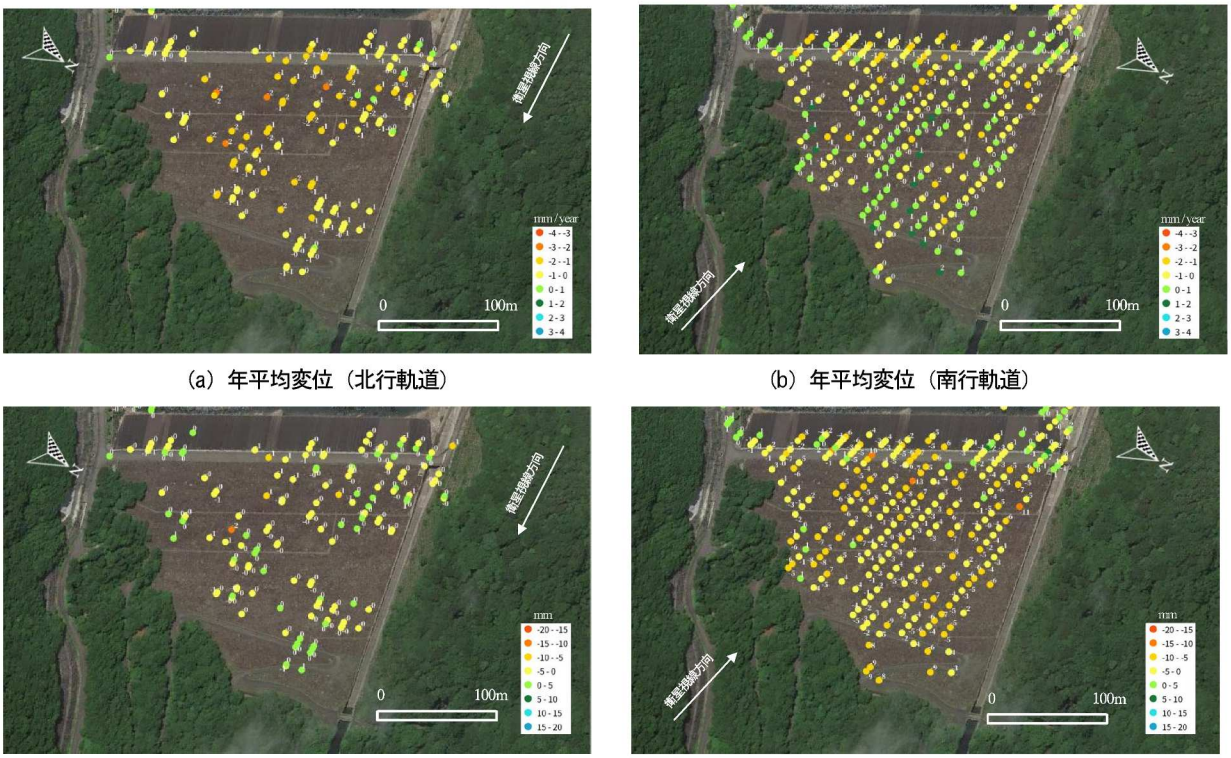
注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

図-3.10　A ダムの PS 点の変位経時変化（北行軌道）



注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

図-3.11　A ダムの PS 点の変位経時変化（南行軌道）



(a) 年平均変位（北行軌道）　(b) 年平均変位（南行軌道）

(c) 累積変位（北行軌道）　(d) 累積変位（南行軌道）

図-3.12　B ダムの PS 点の変位

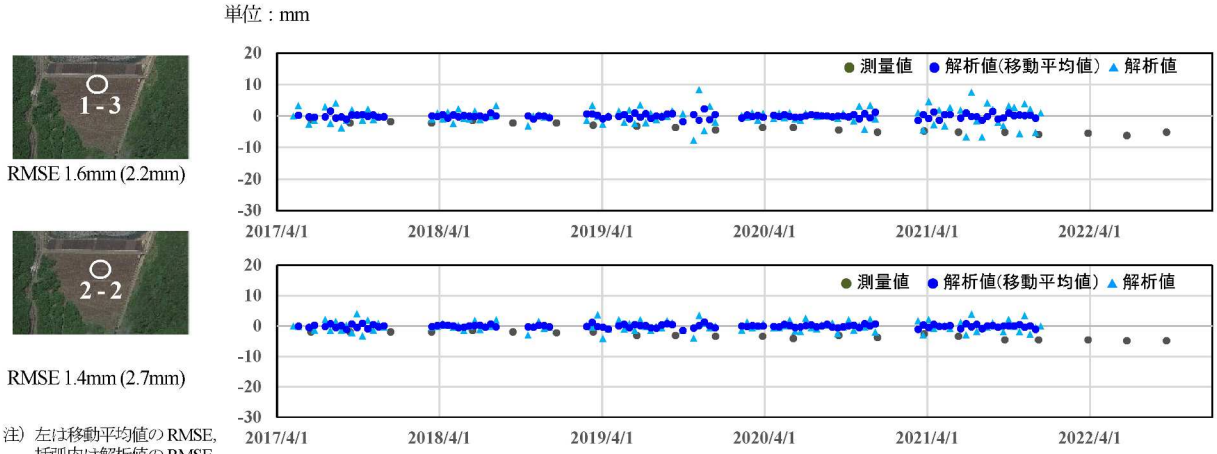


図-3.13　B ダムの PS 点の変位経時変化（北行軌道）

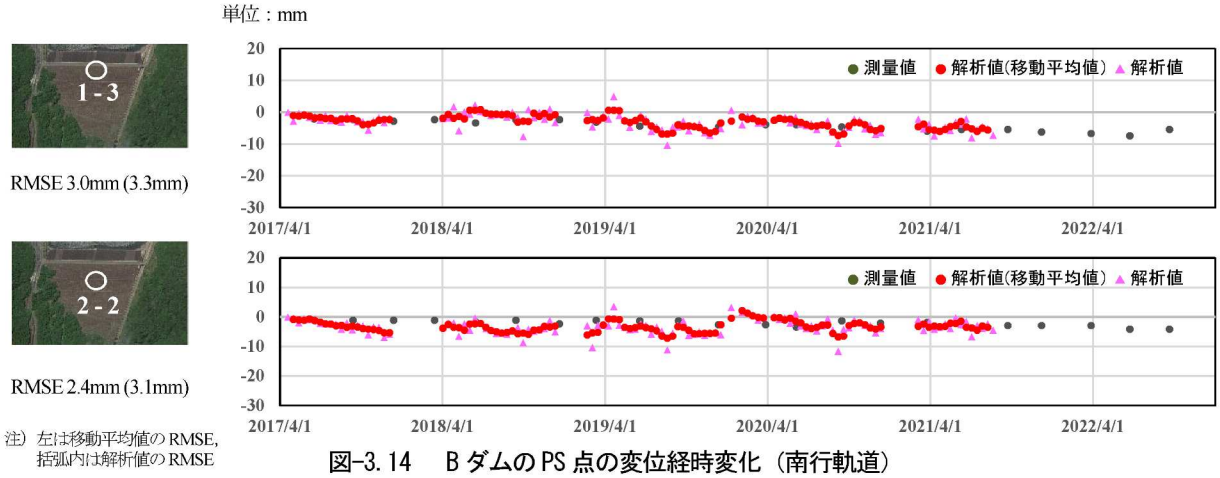
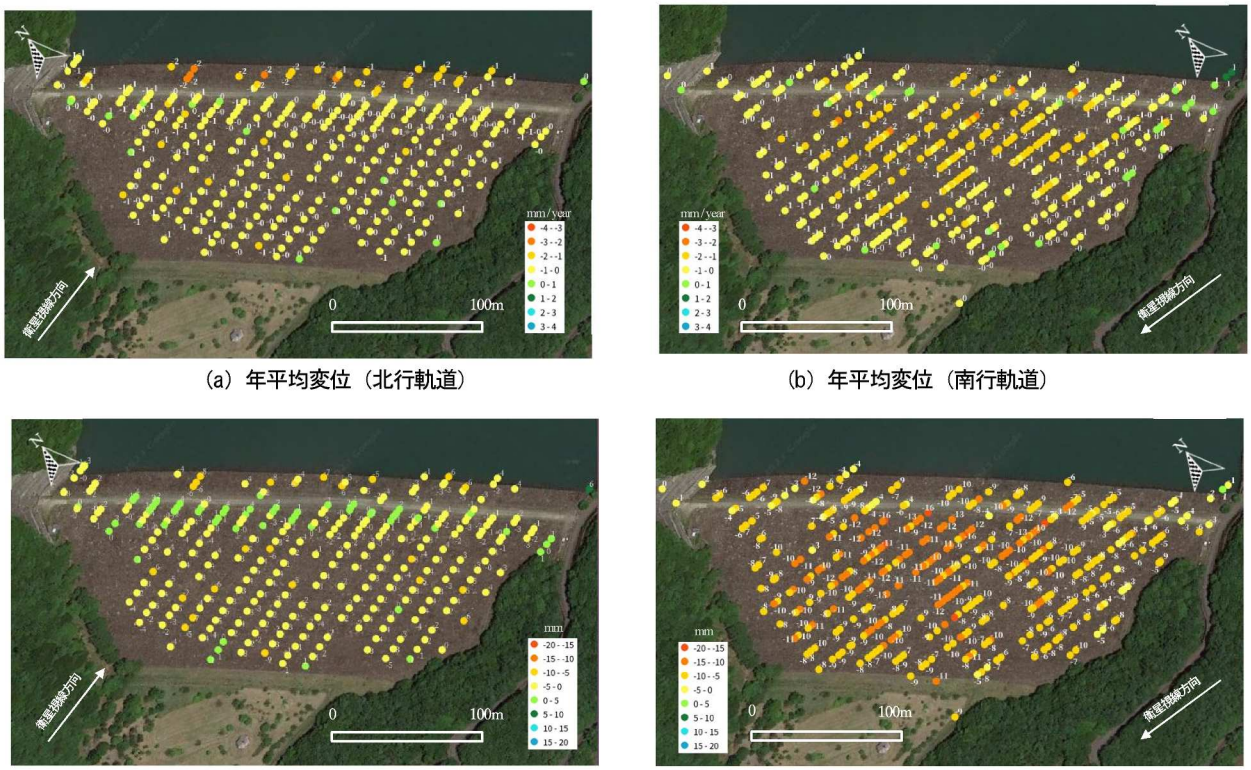


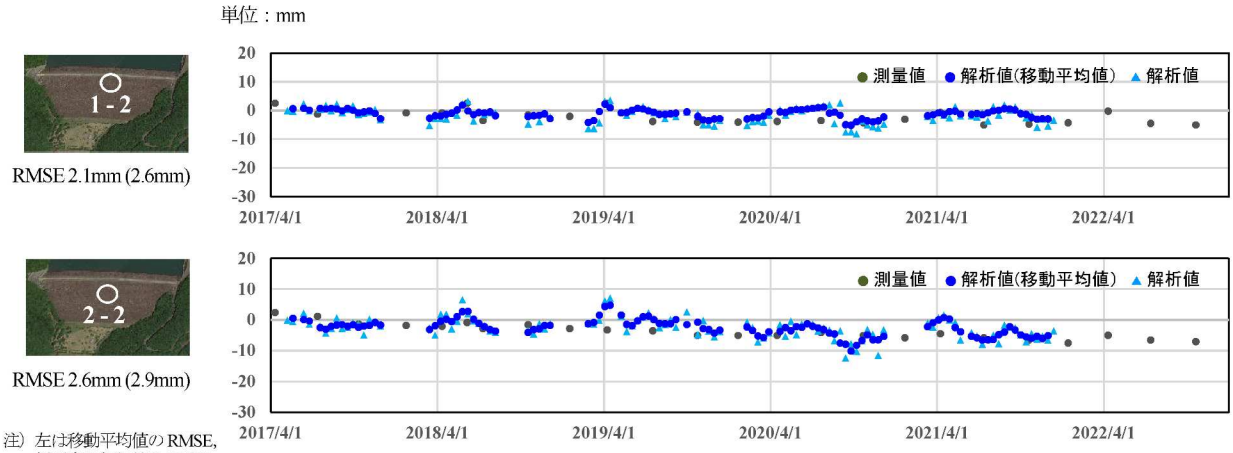
図-3.14　B ダムの PS 点の変位経時変化（南行軌道）



(a) 年平均変位（北行軌道）　(b) 年平均変位（南行軌道）

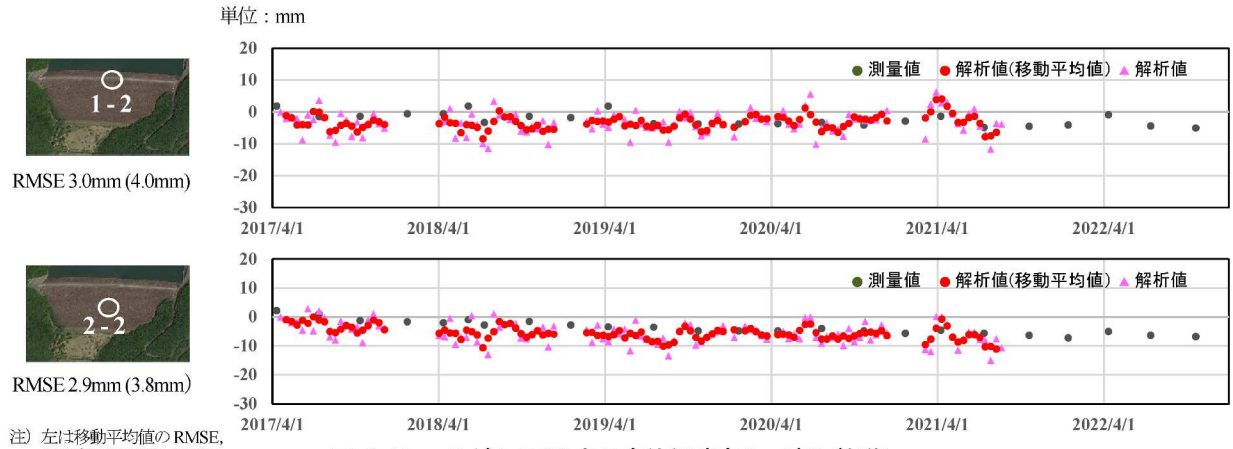
(c) 累積変位（北行軌道）　(d) 累積変位（南行軌道）

図-3.15　C ダムの PS 点の変位



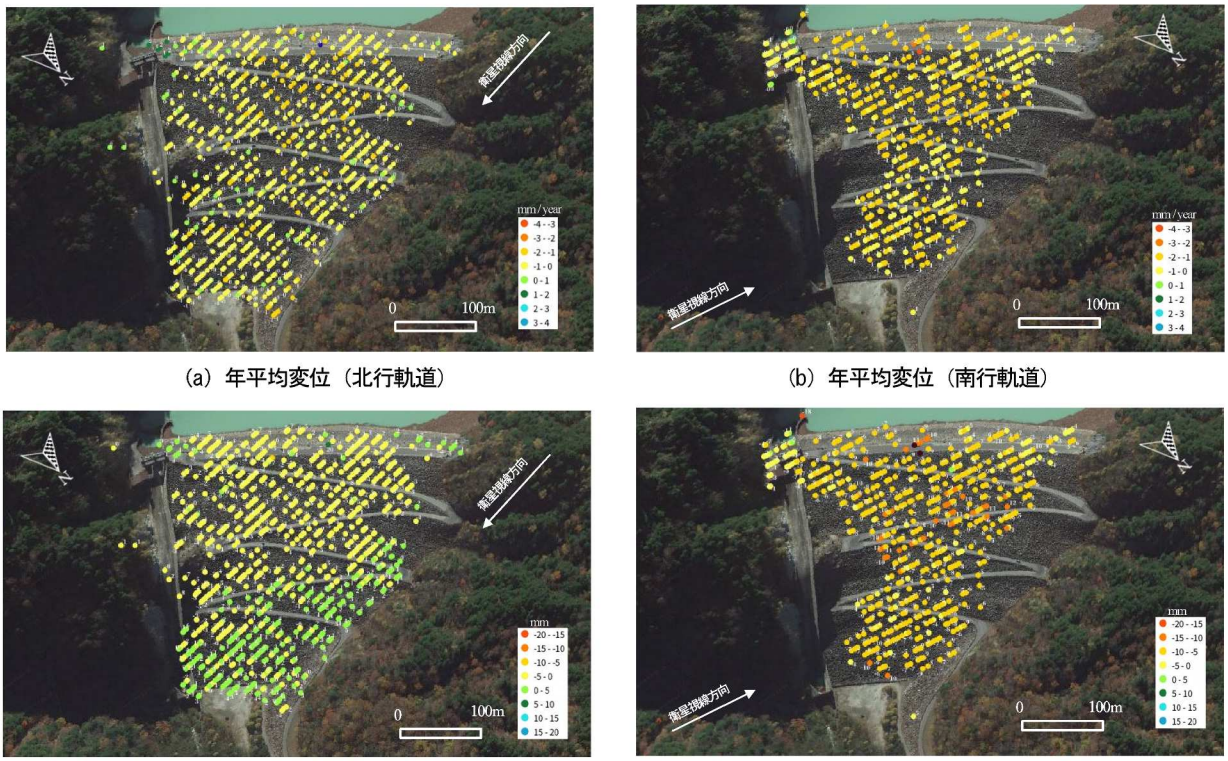
注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

図-3.16　C ダムの PS 点の変位経時変化（北行軌道）



注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

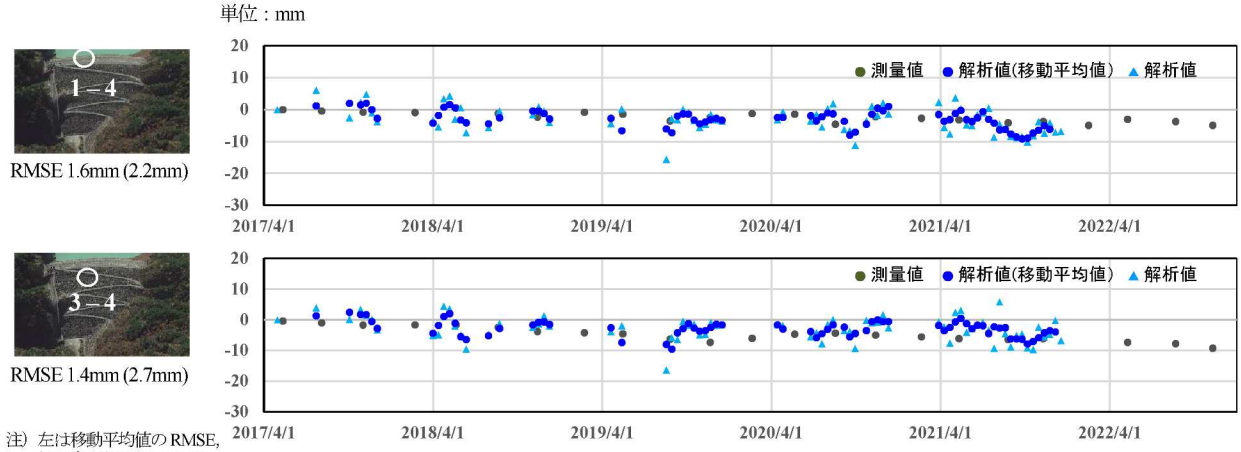
図-3.17　C ダムの PS 点の変位経時変化（南行軌道）



(a) 年平均変位（北行軌道）　(b) 年平均変位（南行軌道）

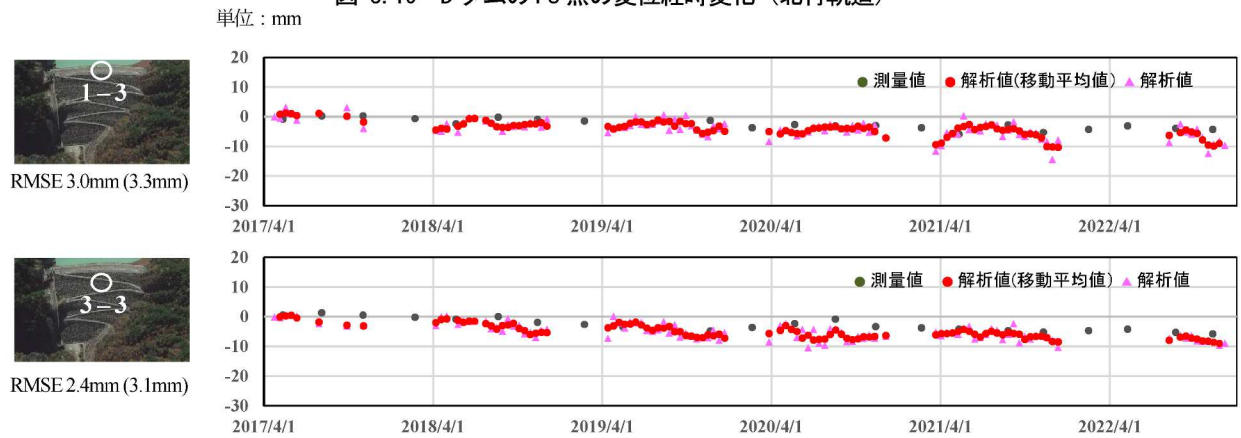
(c) 累積変位（北行軌道）　(d) 累積変位（南行軌道）

図-3.18　D ダムの PS 点の変位



注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

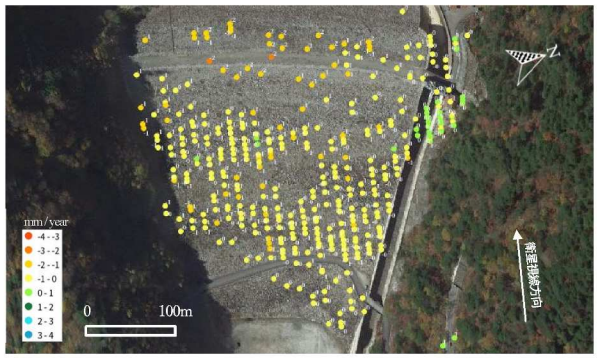
図-3.19　D ダムの PS 点の変位経時変化（北行軌道）



注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

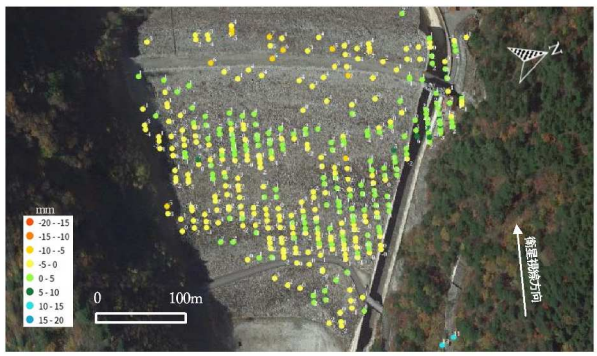
図-3.20　D ダムの PS 点の変位経時変化（南行軌道）

(a) 年平均変位（北行軌道）



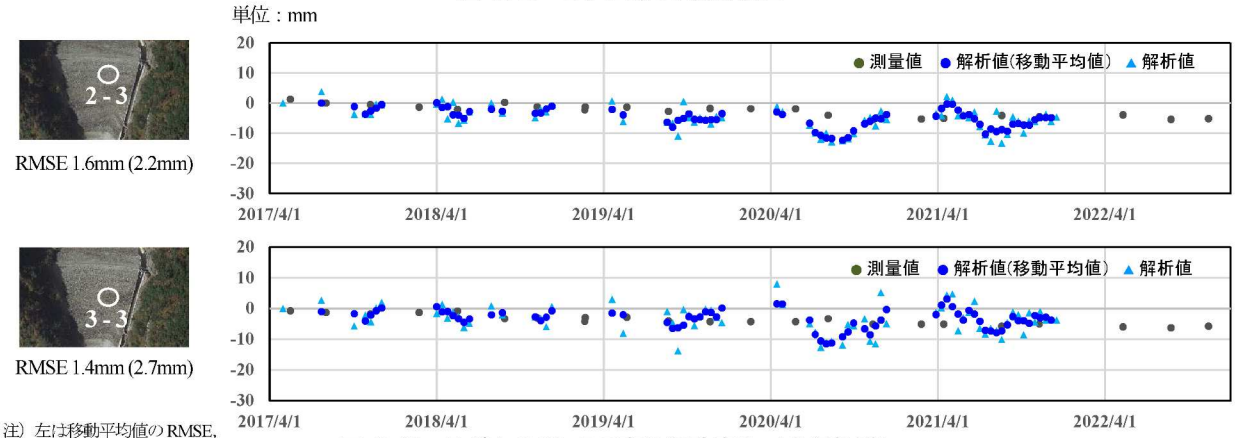
(b) 年平均変位（南行軌道）

(c) 累積変位（北行軌道）



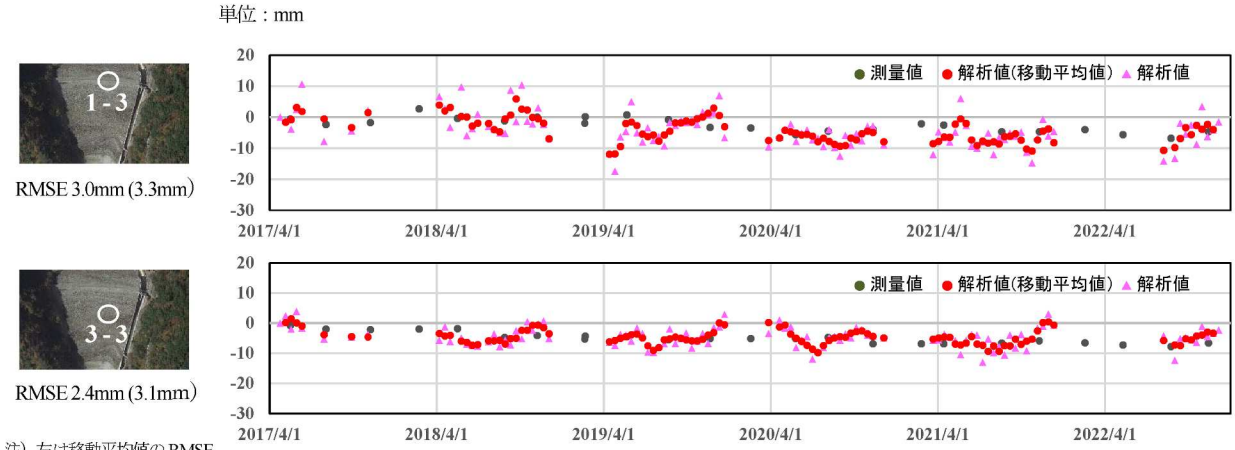
(d) 累積変位（南行軌道）

図-3.21　E ダムの PS 点の変位



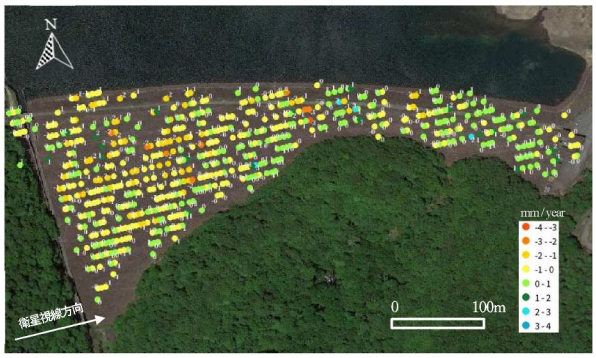
注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

図-3.22　E ダムの PS 点の変位経時変化（北行軌道）

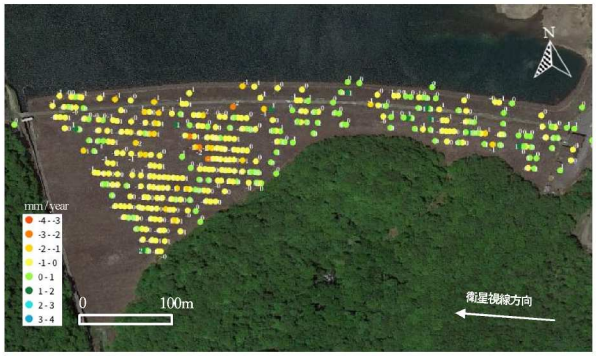


注）左は移動平均値の RMSE，括弧内は解析値の RMSE

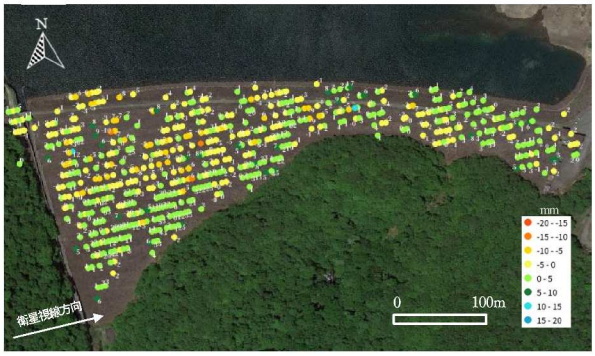
図-3.23　E ダムの PS 点の変位経時変化（南行軌道）



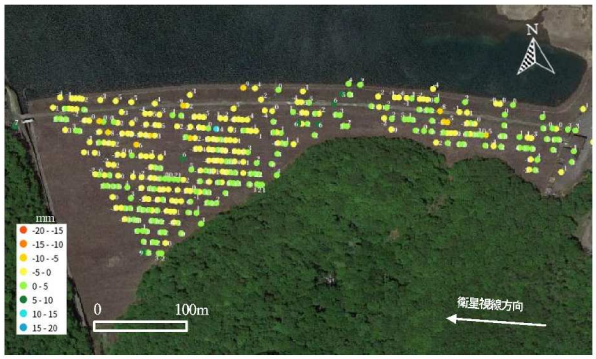
(a) 年平均変位（北行軌道）



(b) 年平均変位（南行軌道）



(c) 累積変位（北行軌道）



(d) 累積変位（南行軌道）

図-3.24　F ダムの PS 点の変位

RMSE 2.0mm (3.3mm)

RMSE 2.5mm (3.0mm)

注）左は移動平均値の RMSE,
括弧内は解析値の RMSE

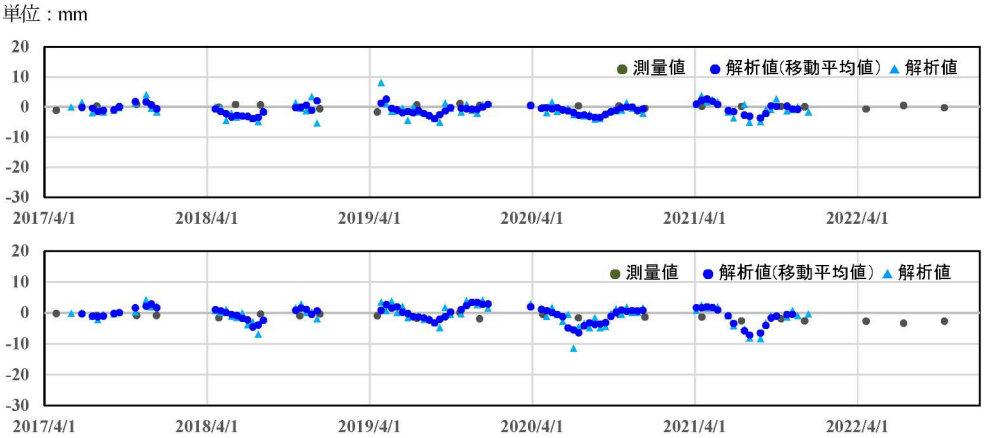


図-3.25　F ダムの PS 点の変位経時変化（北行軌道）

RMSE 3.8mm (4.3mm)

RMSE 4.5mm (5.0mm)

注）左は移動平均値の RMSE,
括弧内は解析値の RMSE

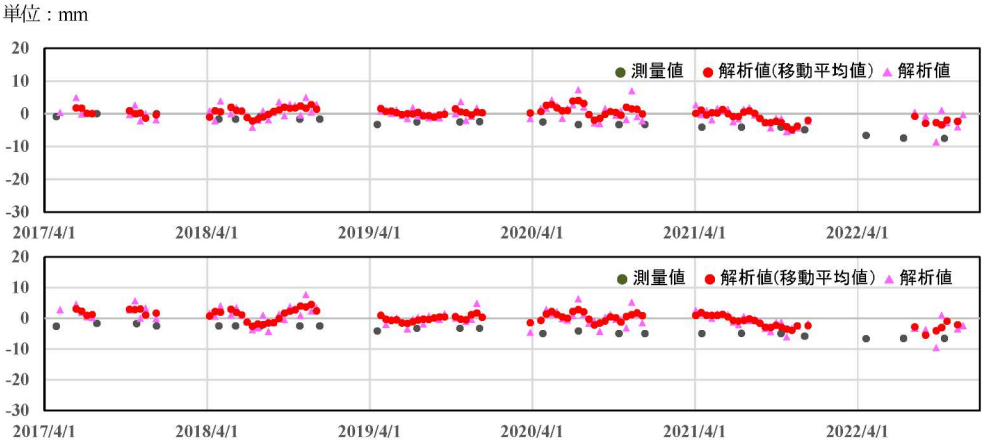


図-3.26　F ダムの PS 点の変位経時変化（南行軌道）

3.6.2　PS 点の年平均変位

検討対象ダムの測量箇所での最大年平均鉛直変位は，-1.0～-2.4mm/年であり，上下流方向の変位も考慮して衛星視線方向に変換した最大衛星視線方向年平均変位は，-0.6～-2.1mm/年である．検討対象ダムではここ数年では最大でも 2mm/年程度と変位量が小さいが，PSInSAR 解析結果の年平均変位で示したように，堤体斜面で面的に得られた PS 点の年平均変位は，最大変位は 2mm/年程度であり測量値と整合している．

北行，南行軌道の衛星視線方向の変位が大きいダム中央上部の測量箇所での測量値と PSInSAR 解析による解析値の比較例は**図-3.27** に示すとおりであり，B ダムの北行軌道を除いて，その差は 0.5mm/年程度以下となっている．B ダムの北行軌道については，ダム堤体斜面と衛星視線方向のなす角が小さいことなどから，コヒーレンスが低い傾向にあることから，他の箇所，軌道に比べて，測量値と解析値の差が大きくなったと考えられるが，それでも解析期間での累積変位の誤差は約 5mm である．変位が最も大きい A ダムでは，北行軌道の測量値は-1.4mm/年，解析値-2.0mm/年でこの差 0.6 mm/年である．南行軌道の測量値は-1.9mm/年，解析値-2.0 mm/年でこの差は 0.1 mm/年である．年平均変位の誤差は 0.5mm/年程度と高い精度で計測できている．

3.6.3　解析期間（4.2～5.6 年間）の変位

検討対象ダムの測量箇所での最大鉛直変位は，-6～-14mm であり，上下流方向の変位も考慮して衛星視線方向に変換した最大衛星視線方向変位は，-3.2～-11.8mm である．検討対象ダムでは約 6 年間の最大変位でも 10mm 程度と変位量が小さいが，PSInSAR 解析結果の累積変位で示したように，堤体斜面で面的に得られた PS 点の解析期間での累積変位は，最大変位は 10mm 程度であり測量値と整合している．なお，解析期間は同一条件でのデータの取得可能期間が異なるとともに，積雪の影響によるデータを除いていることから，検討対象ダム，衛星軌道により異なる．

検討対象ダムの北行，南行軌道の衛星視線方向の変位が大きいダム中央上部の測量値と PSInSAR 解析による解析値の比較例は**図-3.28** に示すとおりであり，測量値と解析値の差は，B ダムの北行軌道での 5mm 程度を除き，その差は 3mm 程度以下となっている．

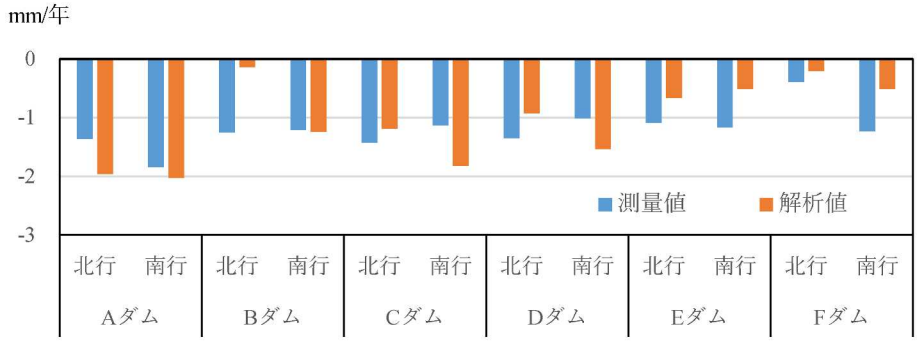


図-3.27　PS 点の年平均変位の比較

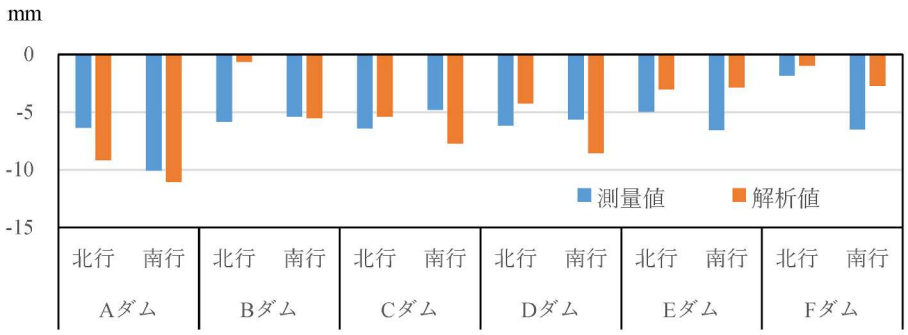


図-3.28　PS 点の解析期間での変位の比較

3.7 まとめ

第２章ではSentinel-1 SARデータを用いたPSInSAR解析によるロックフィルダムの外部変形計測の精度については，年間最大10mm程度変位し，毎日計測されていたロックフィルダムで精度検証し，移動平均値のRMSEが3 mm ～5 mmとmmオーダーの高い精度で計測できることを確認している[24]．本章では，精度検証したダムよりさらに完成からの経過年数が長く，年間最大変位が2mm程度以下の6基のロックフィルダムを対象に，2017年4月から2022年12月までの最大5年9カ月間のSentinel-1 SARデータを用いてPSInSAR解析を実施して外部変位を計測した．その結果，個々の変位計測の誤差は3 mm ～5 mm程度であるが，年間 1～2mm 程度変位するロックフィルダムの挙動は把握できており，年平均変位の誤差は0.5mm/年程度と精度が高い計測となっている．

PSInSAR解析による変位計測結果の評価，ロックフィルダムの保守管理への適用性の考察については，「2.7ロックフィルダムの維持管理への適用性」でも記述したが，本章でも以下のとおり同様の考察ができる．

- ロックフィルダムのリップラップはレーダーの反射が良好であり，今回検討対象の 6 基のダムでもダム堤体全体で多くのPS点が得られ，外部表面の面的な変位の把握ができる．
- Sentinel-1 SARデータを用いたPSInSAR解析による変位計測精度については，解析値を3カ月に1回の測量による変位と比較した結果，年間最大 10mm 程度変位し，毎日計測されていたロックフィルダムで精度検証された結果と同様，移動平均値のRMSEが3 mm ～5 mmとmmオーダーの高い精度の計測であることを確認した．
- 検討対象ダムは，最大でも年間 1～2mm 程度と非常に変位速度が小さいにもかかわらず，例えばAダムでの計測結果が示しているように，ダムの中央の高い箇所では変位が数 mm/年の変位となり，高さが低くなるほど，ダム中央から左右岸に近くなるほど変位が小さくなると計測されており，ダム全体の挙動が高い精度で計測できている．
- PSInSAR 解析によるロックフィルダムの保守管理への適用にあたっては，地震時などの不連続な変位の現象でない場合には，高い精度の移動平均値（3データ）により健全性の確認ができる．

PSInSAR解析による変位計測をロックフィルダムの保守管理に適用するメリットは以下のとおりである．

- 衛星SARデータは定期的に比較的高頻度でのデータの入手が可能であり，Sentinel-1 SARデータを用いれば6日間隔（北行，南行軌道それぞれ12日間）での変位が把握できる．
- ダムへの計測機器の設置は不要であるとともに，現場作業をすることなく，変位計測ができる．このことは，現地に行くことが困難な場合などには特に有効である．
- 過去の衛星データがある場合には，確認したい時期の変位が把握できる．

PSInSAR解析による変位計測をロックフィルダムの保守管理に適用するにあたっての注意事項，デメリットは以下のとおりである．

- 測量の精度より計測精度が劣るとともに，衛星視線方向の変化を計測するため，東西方向に比べて，衛星進行方向とほぼ近い南北方向の変位については計測精度が劣る．
- 積雪時には信頼性のおける変位計測はできないため，ダムに積雪があるデータは適切に評価して取り除く必要がある．
- 基準点については，測量の基準点あるいは変位していない箇所の PS 点を適切に設定する必要がある．
- 急激な変状が発生する場合には，移動平均による評価はできず，あまりにも大きな変状の場合には対応できない．

● 衛星に何かのトラブルが生じるなどして，予定していた時期にデータが入手できない場合がある．

安定期のロックフィルダムでは，ダム堤体の健全性を確認するため，外部変形計測を 1 回/3 月の頻度で実施している．PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形量の計測精度は，移動平均値（3 データ）で評価することにより，3 mm ～5 mm と mm オーダーの高い精度で計測できる．また，変位計測できる PS 点はダム堤体全面で多く得られ，面的な変位計測が可能である．Sentinel-1 SAR データを用いた場合，6 日間隔（北行，南行軌道それぞれ 12 日間隔）の計測が可能であり，計測精度，計測点数，計測頻度などを考慮すると，健全性の確認の信頼性を確保した上で，PSInSAR 解析による変位計測をロックフィルダムの保守管理に適用することは可能であると思われる．

【参考文献】

1) 安保秀範，大澤高浩，葛平蘭，高橋章，山岸勝俊，櫻澤裕紀：人工衛星 C バンドの Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリングの精度検証，土木学会論文集，Vol.79，No.7，2023．[Abo, H., Osawa T., Ge P., Takahashi A., Yamagishi K. and Sakurazawa H. : Verification of External Displacement Monitering of Rockfill Dam by PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.79, No.7, 2023.]
2) A. Hooper, P. Segall and H. Zebker : Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal defor-mation analysis, with application to Volcan Alcedo, Gala-pagos, Journal of Geophysical Research,Vo1.112, B07407, 2007.
3) Andy Hooper, David Bekaert, Ekbal Hussain and Karsten Spaans : StaMPS/MTI Manual Version 4.1b, School of Earth and Environment University of Leeds, Aug. 15, 2018.
4) 福島洋：StaMPS パッケージを用いた PS 干渉 SAR 解析，測地学会誌， Vol.57，No.2，2011．[Fukushima, Y. : Persistent Scatterer Interferometry by Using StaMPS Package, Journal of the Geodetic Soccitey of Japan, Vol.57, No.2, 2011.]
5) Andy Hooper :StaMPS Persistent Scatterer Exercise，ESA Land Training Course，Bucharest, 2015.
6) Michael Foumelis，Jose Manuel Delgado Blasco，Yves-Louis Desnos，Marcus Engdahl，Diego Fernandez，Luis Veci，Jun Lu and Cecilia Wong : ESA SNAP－STAMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry，2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2018.
7) Serco Italia S.p.A. : SNAP2StaMPS : Data preparation for StaMPS PSI processing with SNAP - Mexico City 2020，Research and User Support for Sentinel Core Products , December 2020.
8) 島田政信：地球からの地球観測 地球物理量の計測原理，東京電機大学出版局，2021． [Shimada M. : Fundamental thoory of measuring the Earth forom space, Tokyo Denki University Press, 2021.]

第４章　コーナーリフレクタ設置箇所の変位計測精度の検証

4.1　研究概要

第２・３章では，ロックフィルダムのリップラップがレーダーの反射特性がよく，ダムの外部表面全体で PS 点が得られ，外部表面の面的な変位の把握ができたが，山岳地の人工構造物が少ない斜面などでは，人工衛星 SAR データによる PSInSAR 解析を実施しても変位を精度よく計測できる恒久散乱点は得られない．

山岳部の斜面の変位計測については，葉の大きさが波長の 1/4 程度あれば透過できるとも言われており，Sentinel-1 の C バンド（波長約 6cm）より波長の長い ALOS-2 の L バンド（約 24cm）の方が有利であるが，草木のある箇所の斜面計測では，PSInSAR 解析による PS 点での変位計測精度のように精度高く計測できない．衛星 SAR データを用いたロックフィルダムおよび貯水池周辺斜面の変位計測マニュアル(案)に記述されている貯水池周辺斜面を対象とした場合，変動領域をほぼ正確に評価でき，変動量や変動方向についても概略的な評価は可能であるとのことであるが，変位計測精度は不明となっている．

干渉 SAR 解析では，衛星 SAR の波長の 1/2 が変位の検出限界となる．解析ペア間の変位量が衛星 SAR の半波長を超える場合には，基本的に変位を一意的に決定することができないため，半波長を超えた変位が生じていることを認識した上で干渉縞から変位量に変換する対応が必要となる．一方，波長が短いほど，微少な変位を検出することが可能である．

このため，コーナーリフレクタ（CR）[1)~7)]を設置して，その箇所を恒久散乱点とすることで精度の高い計測が可能となることから，草木のある斜面などの斜面で変位が発生している，あるいは今後発生する可能性のある箇所に，コーナーリフレクタを設置して斜面の変位監視を行うことが考えられる．

コーナーリフレクタ設置箇所の変位は，Sentinel-1SAR データを用いた PSInSAR 解析により変位を精度よく計測できると考えられるが，大気遅延や電離層の影響などによる誤差を完全にゼロとすることはできないと考えられるため，その計測精度の検証が必要である．

そこで本章では，高さが調整できるコーナーリフレクタを製作，設置した後，コーナーリフレクタに強制変位を与え，この変位を Sentinel-1SAR データを用いた PSInSAR 解析による変位計測結果と比較することで変位計測精度を検証した．

4.2　変位計測精度検証用コーナーリフレクタの製作・設置と調整

コーナーリフレクタは**図-4.1**に示すとおりであり，反射効率の高い四角形型コーナーリフレクタを製作した．底板は 100cm×100cm，2 枚の側板は 100cm×140cm であり，1.5mm のアルミニュームプレートを用いている．1 本の支柱によりコーナーリフレクタを支えており，コンクリート基礎とすることで変形を抑えるようにした．鉛直方向に最大で 45mm 変位制御できる構造にした．

コーナーリフレクタは，**図-4.2**に示すインドネシアのバリ島の北部に 2022 年 5 月 19 日に設置した．設置の状況は**図-4.3**に示すとおりであり，北行軌道の衛星からのレーダーに反射するように設置した．コーナーリフレクタ設置箇所の周辺状況は**図-4.4**に示すとおりであり，周辺は畑，植生などがある箇所であり，周囲には PS 点となり得る人工構造物がほとんどない箇所に設置した．なお，この精度検証をインドネシアで実施したのは，インドネシア Udayana 大学駐在の大澤教授のもとで研究員 Nyoman 氏による場所提供，コーナーリフレクタ製作の協力が得られたためである．

コーナーリクレクタの変位の計測精度を確認するため，2023 年 4 月 1 日に鉛直方向に 15mm アップ，2023 年 9 月 17 日にはさらに 15mm アップ（合計 30mm）させた(**図-4.5**参照).

図-4.1　変位計測精度検証用コーナーリフレクタ

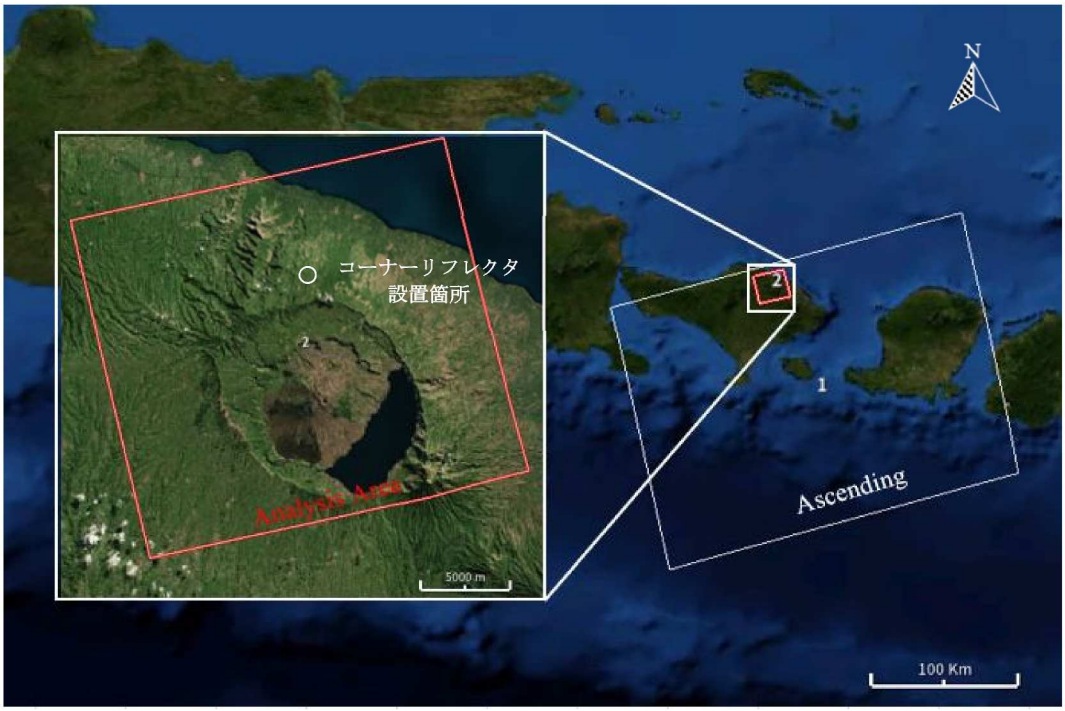


図-4.2　コーナーリフレクタ設置箇所と解析範囲

図-4.3　コーナーリフレクタ設置状況
(2022 年 5 月撮影)

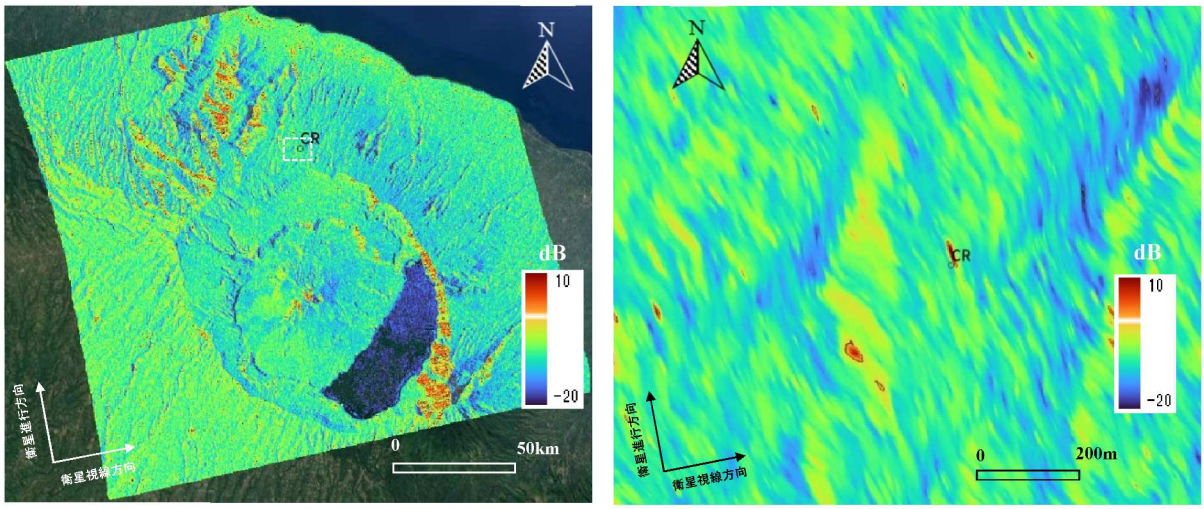
図-4.4　コーナーリフレクタ設置箇所の周辺状況
(2023 年 10 月撮影)

図-4.5　コーナーリフレクタの変位調整

4.3　コーナーリフレクタの設置効果

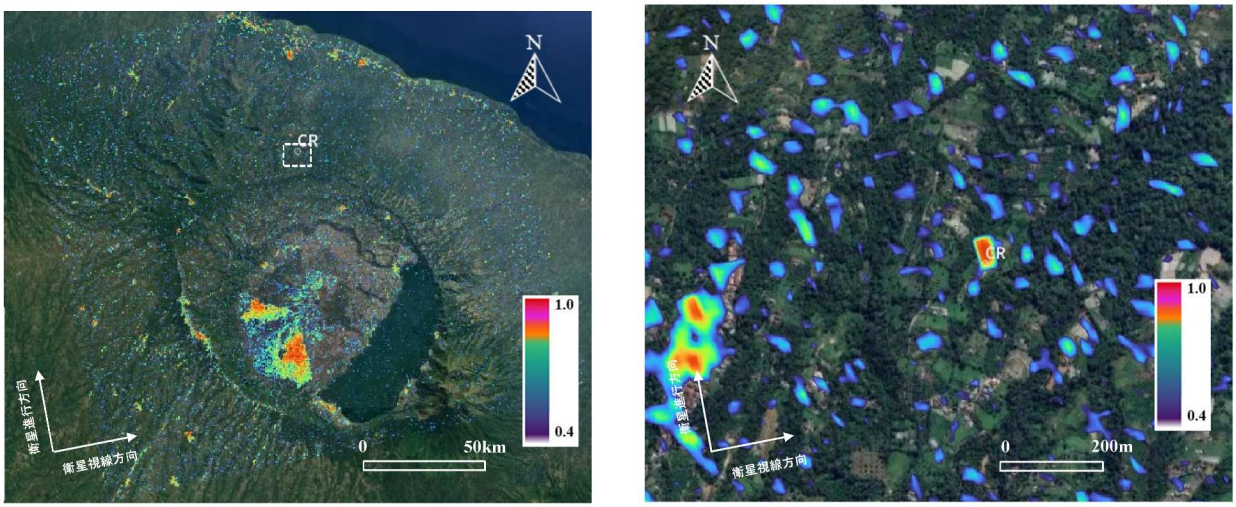
2023 年 4 月 8 日の後方散乱係数は**図-4.6** に示すとおりであり，都市部や西側傾斜斜面で後方散乱係数が高くなっている．コーナーリフレクタ設置箇所でもその強度は 10dB 程度以上と周辺に比べ高くなっている．

2023 年 3 月 27 日と 2023 年 4 月 8 日の間のコヒーレンスは**図-4.7** に示すとおりであり，都市部や Batur 山の南側斜面（**図-4.8** 参照，火山岩で植生がない）では 0.8 以上の箇所が存在する．コーナーリフレクタ設置箇所周辺では，**図-4.9** に示す人工構造物のある箇所とコーナーリフレクタ設置箇所で高い．コーナーリフレクタ設置箇所は 0.8 以上となり，変位を調整した前後のデータでのコヒーレンスが高いことから，調整した変位が精度高く計測できていると思われる．



(a) 解析範囲全体　　(b) コーナーリフレクタ設置箇所周辺

図-4.6　後方散乱係数（2023 年 4 月 8 日）



(a) 解析範囲全体　　(b) コーナーリフレクタ設置箇所周辺

図-4.7　コヒーレンス（2023 年 3 月 27 日－2023 年 4 月 8 日）

図-4.8　解析全体で PS 点が非常に多い Batur 山

図-4.9　CR 設置箇所周辺で PS 点が多い箇所

4.4　解析手法と解析データ・範囲

4.4.1　解析手法

解析手法は多くのデータを使用することで，干渉性の低下，DEM 誤差及び対流圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減でき計測精度が高い PSInSAR 解析を用いた．

PSInSAR 解析は，スタンフォード大学において，Andrew Hooper らが開発した StaMPS/MTI を用いた．

PSInSAR 解析のフローは，**図-2.8** に示すように，SNAP を用いて InSAR 解析を実施して StaMPS/MTI への入力データを作成し，そのデータを用いて StaMPS/MTI により PS 点を選定して，PS 点での時系列の変位を求めた．

4.4.2　解析データと解析範囲

解析に用いた衛星 SAR データは，**表-4.1** に示すとおり，欧州宇宙機関（ESA）の打ち上げた 5m×20m の空間分解能で C バンド（波長：5.6cm）の Sentinel-1 で，リフレクター設置後の北行軌道の 48 シーンを用いた．

表-4.1　解析に用いた Sentinel-1 SAR データ

衛星軌道	CR変位	期間	シーン数
北行	0㎜	2022/5/29 ～ 2023/3/27	19
	15㎜	2022/4/8 ～ 2023/9/11	11
	30㎜	2023/9/23 ～ 2024/4/26	18
	合計	2022/5/29 ～ 2024/4/26	48

Digital Surface Model（DSM）として，ALOS Global Digital Surface Model "ALOS World 3D - 30m (AW3D30) "[8]を用いた．コーナーリフレクタ設置箇所の DSM の値は 1,245m であり，コーナーリフレクタ周辺の 5m 間隔の等高線図を**図-4.10** に示す．

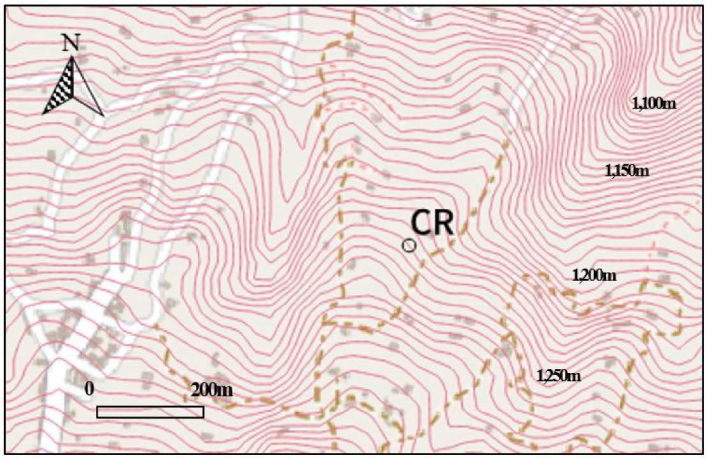


図-4.10　コーナーリフレクタ周辺の 5m 間隔の等高線図

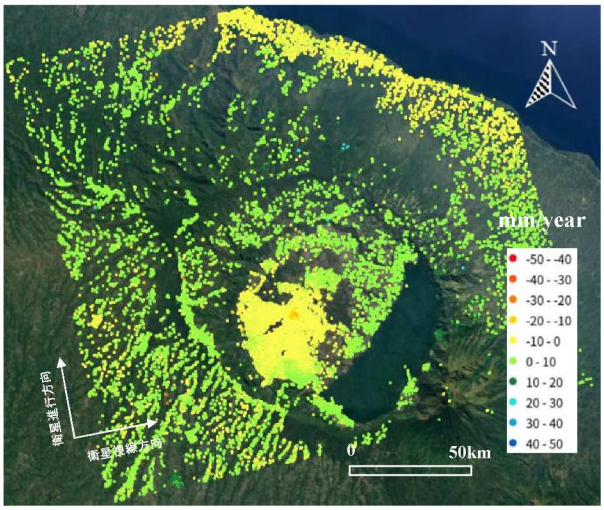
4.5　PSInSAR 解析結果と計測値の比較検討

PSInSAR 解析の結果として，PS 点の衛星視線方向年平均変位を**図-4.11** に示す．**図-4.7** に示したコヒーレンスが高い箇所に PS 点が得られている．**図-4.11(b)** に示すとおり，コーナーリフレクタ設置箇所では 6 点の PS 点が，また，家屋などの人工構造物がある箇所に多くの PS 点が得られている．コーナーリフレクタ設置箇所を除いた PS 点の年平均変位速度は±10mm 以内となっており，コーナーリフレクタ設置箇所周辺では大きな変位は生じていないと思われる．

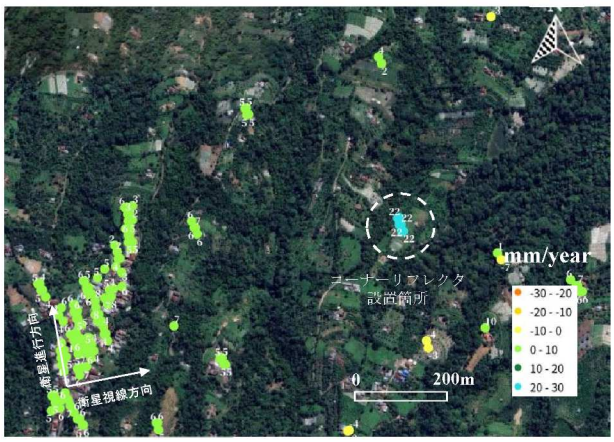
コーナーリフレクタ設置箇所の PS 点の年平均変位と後方散乱係数を図-4.12 に示す．コーナーリフレクタは底板 1m×1m，側板は 1m×1.4m であるにもかかわらず，コーナーリフレクタ設置箇所の約 5m×約 30m の範囲での後方散乱係数が 10dB 程度以上となっている．6 箇所の PS 点は，この後方散乱係数が高くなった箇所で得られており，この 6 箇所の PS 点の変位は同じ変位（年平均変位：21mm/年）となっている．

このようにコーナーリフレクタは小さいにもかかわらず PS 点が多く得られたのは，空間解像度が低いとともに，コーナーリフレクタが強い反射源となるため，サイドロープと言われる現象によりコーナーリフレクタ設置箇所位置周辺のピクセルにも影響を与えるためであると思われる．このように，コーナーリフレクタ設置箇所と PS 点が得られた箇所は，一対一となっておらず，設置箇所周辺に影響を及ぼすことに注意が必要である．

一方，コーナーリフレクタ設置箇所位置周辺のピクセルの位相はコーナーリフレクタ設置箇所での位相が反映されており，6 点の PS 点で計測される変位は，コーナーリフレクタの設置箇所の変位が反映されることが計測結果から確認できる．



(a) 解析範囲全体



(b) コーナーリフレクタ設置箇所周辺

図-4.11　PS 点の衛星視線方向年平均変位

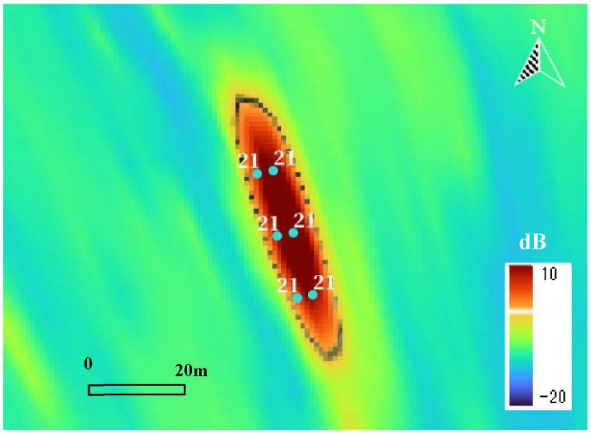


図-4.12　コーナーリフレクタ設置箇所の後方散乱係数と PS 点の年平均変位

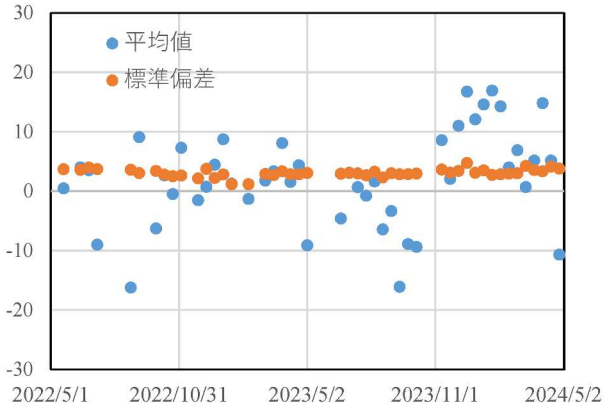


図-4.13　コーナーリフレクタ周辺 PS 点の平均値と標準偏差

コーナーリフレクタ設置箇所の変位の評価にあたっては，変位が生じていない箇所の PS 点の変位を基準点ゼロとして求めることが考えられるが，ここでは，この周辺の多くの箇所の PS 点はほとんど変位していない可能性が高いことから，**図-4.11(b)**に示すコーナーリフレクタ周辺の 133 箇所の PS 点のうち，解析期間での年平均変位が 5 mm 以下の 31 箇所の PS 点の平均値を基準値とした．

基準点として用いた 31 箇所の PS 点の観測日ごとの平均値と標準偏差は**図-4.13** に示すとおりであり，標準偏差の平均値は 3.1mm である．このように観測日での PS 点の変位の標準偏差は小さいものの，平均値は PSInSAR 解析により誤差の低減を図っているがばらついており，基準点による補正をすることで変位計測精度を高めることが重要である．

鉛直変位 dver は，東西・南北方向の変位がない場合は下式となる(**図-4.14** 参照).

$$\mathrm{dver} = d_{LOS} / \cos\theta \tag{4.1}$$

ここで，d_{LOS} は衛星視線方向変位，θ は入射角である．

コーナーリフレクタ設置箇所の入射角は約 37.9°，1/ cos（37.9°）は 1.27 であり，PSInSAR 解析より求めた変位の 1.27 倍が鉛直変位となる．調整した鉛直変位の上昇 15mm は衛星視線方向変位では 11.8 mm，上昇 30mm では 23.7mm となる．

コーナーリフレクタ設置箇所周辺の PS 点の衛星視線方向変位の計測結果を**図-4.15**，コーナーリフレクタ設置箇所の衛星視線方向の変位計測結果を**図-4.16** に示す．4 月 1 日，9 月 17 日にコーナーリフレクタの高さを 15mm 高くしたことによる変位の変化を精度よく計測できている．**図-4.16** では移動平均（3 点の平均値）も示している．なお，移動平均は強制変位前後のデータは 2 点の平均値としている．

変位の移動平均値による評価については，地震時前後などの不連続な挙動には適用できないが，地盤沈下など比較的変位速度が一定な場合には適用可能であり，ロックフィルダムの外部変形計測への変位精度検証事例などがある．今回のように基本的には 12 日間と比較的短い計測間隔であれば，より高い精度で変位を評価できる可能性があるため，移動平均値による評価をここでは適用している．

コーナーリフレクタ設置箇所の PSInSAR 解析による変位の二乗平均平方根誤差は，**表-4.2** に示すとおりであり， 15 mm，30mm 変位させた場合，移動平均での変位計測精度はそれぞれ，1.2 mm，1.4mm と非常に高い精度で計測できている．全てのデータでの衛星視線方向の変位の計測精度は 1.4mm，鉛直変位では 1.8 mm となる．移動平均を適用しない場合は，衛星視線方向の変位の計測精度は 2.4mm，鉛直変位では 3.0 mm となる．このように，コーナーリフレクタを利用した変位計測精度は Sentinel-1SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施すれば，高い精度で変位計測できることが検証できた．

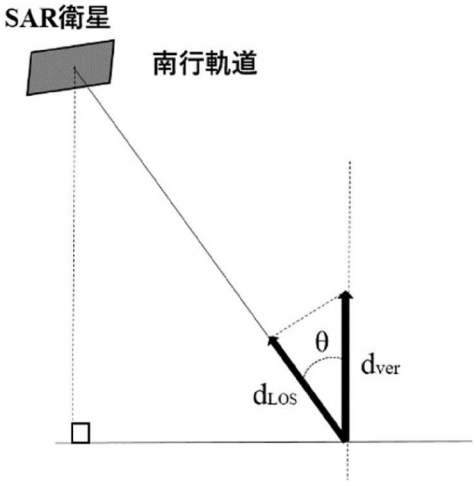
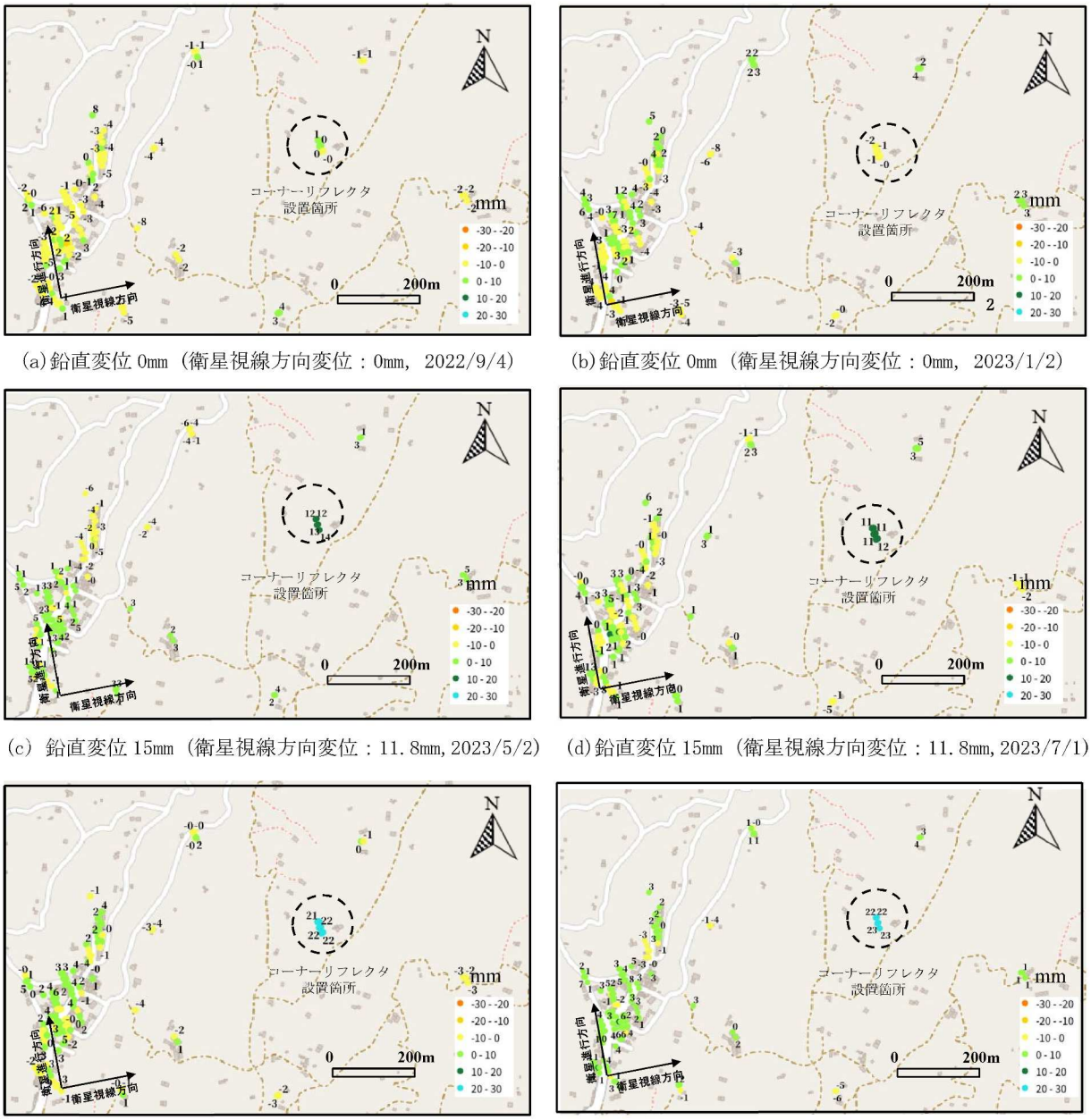


図-4.14　衛星視線方向変位と鉛直変位の関係

表-4.2　PSInSAR 解析による変位の二乗平均平方根誤差

項目	データ数	二乗平均平方根誤差(㎜)	
		PSInSAR解析	PSInSAR解析（移動平均）
15㎜の変位	11	2.3(2.9)	1.2(1.5)
30㎜の変位	18	2.4(3.0)	1.4(1.8)
全体の変位	48	2.4(3.0)	1.4(1.8)

注）衛星視線方向変位，（　）は鉛直変位



(a)鉛直変位 0mm（衛星視線方向変位：0mm，2022/9/4）

(b)鉛直変位 0mm（衛星視線方向変位：0mm，2023/1/2）

(c) 鉛直変位 15mm（衛星視線方向変位：11.8mm, 2023/5/2）

(d)鉛直変位 15mm（衛星視線方向変位：11.8mm, 2023/7/1）

(e)鉛直変位 30mm（衛星視線方向変位：23.7mm，2024/1/9）

(f)鉛直変位 30mm（衛星視線方向変位：23.7mm，2024/4/14）

図-4.15　CR 設置箇所周辺の PS 点の衛星視線方向変位計測結果

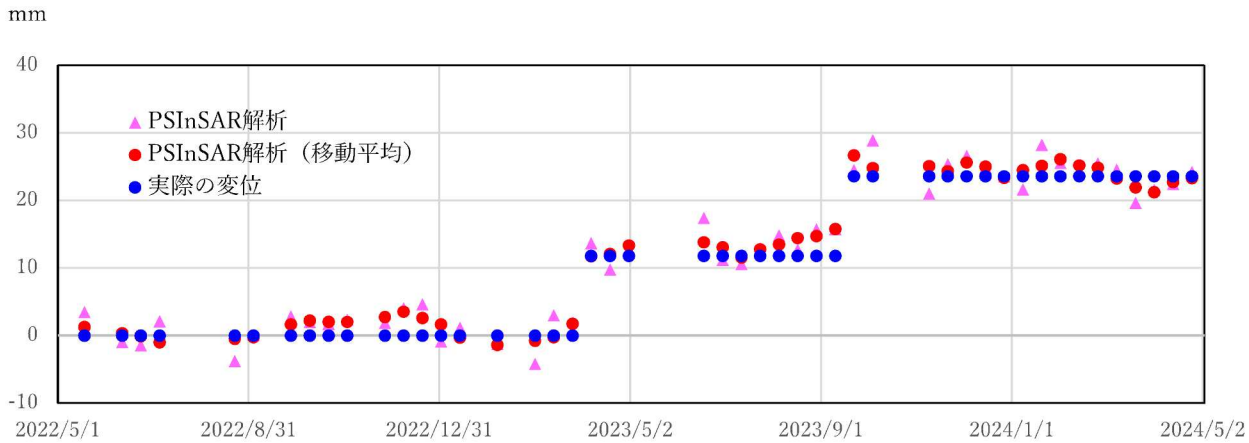


図-4.16　コーナーリフレクタ設置箇所（PS 点）の鉛直変位計測結果

4.6 まとめ

Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析によるコーナーリフレクタ設置箇所での変位の計測精度を検証した．コーナーリフレクタを鉛直方向に 15mm，30 mm アップした衛星視線方向変位の変位計測精度は 1.2mm，1.4 mm，計測期間の変位計測誤差は 1.4 mm であり，高い精度で変位が計測できることを確認した．鉛直方向の変位は，衛星視線方向の入射角度にも左右されるが，2 mm 程度以下で計測が可能であると思われる．なお，変位計測精度を確保するためには，基準点変位を適切に設定する必要がある．

山岳部の斜面など PS 点が得られない箇所で斜面の変位監視が必要な箇所へコーナーリフレクタを設置して変位監視するなど，社会インフラ設備の保守管理などへの人工衛星 SAR データのさらなる活用が期待される．

【参考文献】

1) 安保秀範，葛平蘭，大澤高浩，町田勝巳，櫻澤裕紀，池本龍平：コーナーリフレクター設置効果と衛星 SAR データを活用した PSInSAR 解析による水路経過地斜面の変位計測，令和 5 年土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，VI-127, 2023. [Abo, H., Ge P., Osawa T., Machida K., Sakurazawa H. and Ikemoto R. : Displacement Measurement of Waterway Slope by PSInSAR Analysis Using Satellite SAR Data and the Effect of Corner Reflector Iinstallation, Japan Society of Civil Engineers 2023 Anuual Meeting, VI-127, 2023.]
2) 高橋徹，白井敏夫，藤島豊久，大木真人，佐野博昭，小定弘和：簡易リフレクターによる ALOS-2 の教育活用，リモートセンシング学会誌，Vol. 36, 2016.　[Tohru Takahashi, Toshio Usui, Toyohisa Fujishima, Masato Ohki, Hiroaki Sano and Hirokazu Koshida : Education Using ALOS-2 with Easy-to-Make Reflectors, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol. 36, 2016.]
3) 伊藤陽介，山本学：合成開口レーダー用反射板の設計・製作と性能評価，鳴門教育大学研究紀要，第 23 巻，2008．[Yosuke Ito, Manabu Yamamoto : Design, Fabrication and Performance Evaluation of a Reflector for Synthetic Aperture Radar, Naruto University of Education Research Bulletin, Vol. 23, 2008.]
4) Nopphawan Tamkuan, Dorj Ichikawa, Vaibhav Katiyae, Masahiko Nagai, Yumiko Nagai, Tsuyoshi Eguchi: The Experiments on Corner Reflector for SAR Data Calibration at Yamaguchi University, Japan, Joint Conference : 33rd ISTS, 10th NSAT & 14th IAA LCPM, 2022.
5) Yuxiao Qin, Daniele Perissin and Ling Lei : The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation, 2013.
6) Matthew C. Garthwaite : On the Design of Radar Corner Reflectors for Deformation Monitoring in Multi-Frequency InSAR, remote sensing, 2017.
7) Matthias Jauvin, Yajing Yan, Emmanuel Trouvé, Bénédicte Fruneau, Michel Gay : Integration of Corner Reflectors for the Monitoring of Mountain Glacier Areas with Sentinel-1 Time Series, remote sensing, 2019.
8) Takaku J., Tadono T., Doutsu M., Ohgushi F. and Kai H. : UPDATES OF ‘AW3D30’ ALOS GLOBAL DIGITAL SURFACE MODEL WITH OTHER OPEN ACCESS DATASETS, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLIII-B4-2020 , 2020

第５章　PSInSAR 解析による斜面変位モニタリング

5.1　研究概要

月 1mm 程度とわずかに変位している斜面を対象に斜面の変位計測を実施するとともに，小規模で安価なコーナーリフレクタを設置して，人工構造物の恒久散乱点に加えて，コーナーリフレクタ[1)~3)]設置箇所でも変位計測が可能であることを検証した．

水力発電所の水路において中心線測量結果など，水路沿いの測量結果から，水路の一部で最大 10～15mm/年程度（約 1mm/月）の山側から川側への変位が推定され，斜面のすべりが想定された．そこで，変位計測ができていない水路経過地の斜面全体を対象に，対象斜面を含む広域な領域で PSInSAR 解析を実施し，斜面のすべり範囲とすべり速度を確認した．また，水路周辺では PS 点が得られないことから，小規模で安価なコーナーリフレクタを製作，設置して，PSInSAR 解析により水路近傍での変位も把握できるようにした．

5.2　コーナーリフレクタの製作・設置

コーナーリフレクタは**図-5.1** に示すとおり，四角形型と三角形型をそれぞれ 2 基製作した．コーナーリフレクタの 3 面のパネルは，重量を軽くすることと，空気抵抗が低減できること，雨水などが溜まらないように，ステンレスパンチング板を用いた．ステンレス製の単管パイプとクランプを用いて骨組みを製作して，3 面のパネルと単管パイプはプラスチックのバンドで固定した．地盤には鉛直方向に 3 本の単管パイプを埋め込むことで固定した．

コーナーリフレクタは，**図-5.2，5.3** に示すとおり，水路の脇に約 10m間隔で東から西に向けて四角形，三角形，四角形，三角形の順に，南行軌道の衛星視線方向に向けて，2022 年 11 月 8 日に設置した（検討対象斜面の場所は**図-5.4 参照**）．

(a)　四角形型

(b)　三角形型

図-5.1　コーナーリフレクタ

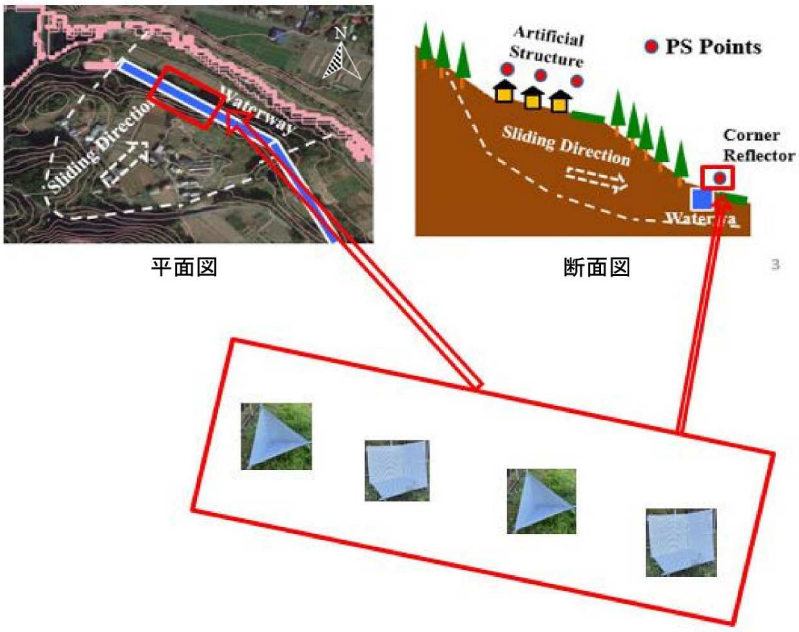


図-5.2　コーナーリフレクタの設置

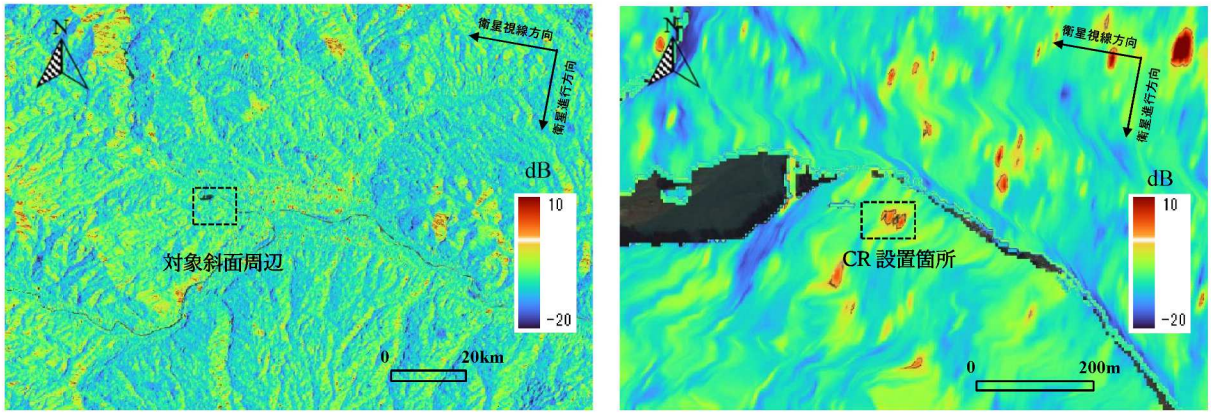
図-5.3　コーナーリフレクタの設置状況

5.3　コーナーリフレクタの設置効果

コーナーリフレクタ設置後の 2022 年 11 月 22 日の後方散乱係数は**図-5.5** に示すとおりであり，4 基のコーナーリフレクタ設置箇所での強度は 10dB 程度と周辺に比べ高くなっている．

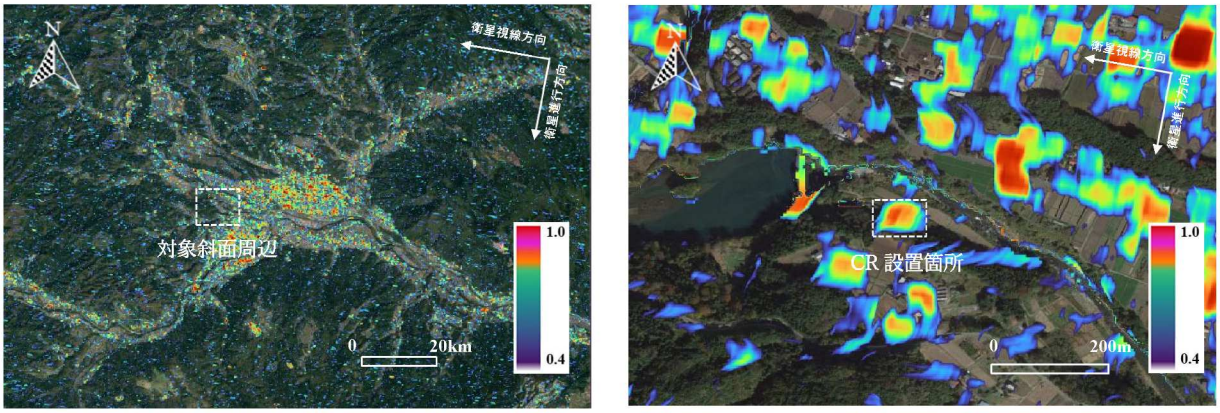
2022 年 11 月 22 日と 2022 年 12 月 18 日の間のコヒーレンスは**図-5.6** に示すとおりであり，コーナーリフレクタ設置箇所では 0.8 以上の箇所が存在し，変位が精度よく計測できる可能性がある．

コーナーリフレクタ設置による後方散乱係数，コヒーレンスの増加については，インドネシアでの精度検証用に設置したコーナーリフレクタの設置効果と同様の傾向である．



(a) 解析範囲広域　　(b) 対象斜面周辺

図-5.5　後方散乱係数（CR 設置後，2022 年 11 月 22 日）



(a) 解析範囲広域　　(b) 対象斜面周辺

図-5.6　コヒーレンス（2022 年 11 月 22 日－12 月 18 日）

5.4　解析手法と解析データ・範囲

解析手法は第３章に示したとおりであり，SNAP を用いて InSAR 解析を実施して StaMPS/MTI への入力データを作成し，そのデータを用いて StaMPS/MTI により PS 点を選定して，PS 点での時系列の変位を求めた．

解析範囲は**図-5.4** に示すとおりであり，解析に用いた Sentinel-1 SAR データを**表-5.1** に示す．コーナーリフレクタ設置前の約 4 年 9 カ月間の北行，南行軌道，それぞれ 134，140 シーンを用いて，PSInSAR 解析を実施して，対象斜面の挙動を確認した．さらに，南行軌道でコーナーリフレクタ設置後約 1 年間での解析を実施するとともに，設置前後の 6 年 6 カ月間の解析も合わせて実施した．

DEM は国土地理院の 5m×5m メッシュの数値標高モデルに基づいて作成した．

表-5.1　解析に用いた Sentinel-1 SAR データ

項目	軌道	期　　間	シーン数	PS 点数
CR 設置前	北行	2017/4/1～2021/12/12 約 4 年 9 カ月	134	39,068
	南行	2017/3/31～2021/12/23 約 4 年 9 カ月	140	33,330
CR 設置前後	南行	2017/5/7～2023/11/7 約 6 年 6 カ月	175	29,522
CR 設置後	南行	2022/11/12～2023/11/7 約 1 年	28	55,935

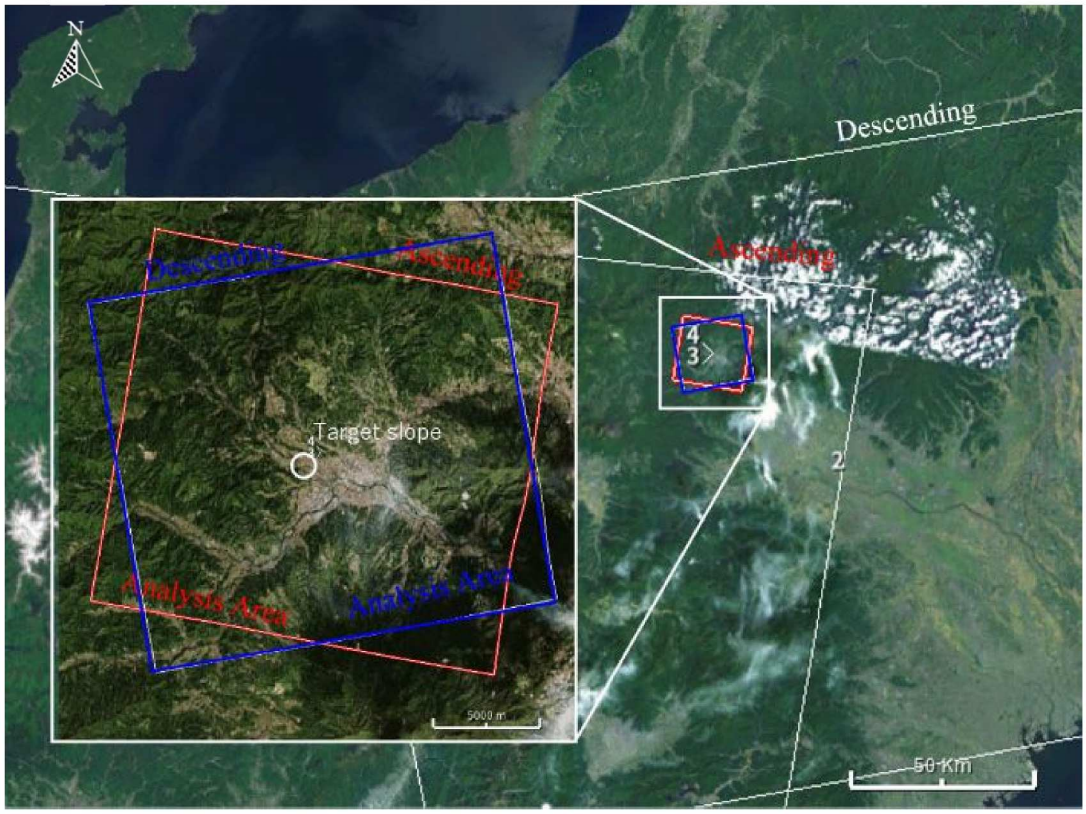


図-5.4　検討対象斜面と解析範囲

5.5　PSInSAR 解析による変位計測(CR 設置前)

北行，南行軌道の約 4 年 9 カ月間の Sentinel-1SAR データを用いた PSInSAR 解析による衛星視線方向の変位は**図-5.7** に示すとおりであり，都市部の人工構造物が多くある箇所では PS 点は多く得られるが，山岳地帯で植生がある箇所などでは PS 点は得られない．

水力発電所水路経過地斜面の周辺の北行，南行軌道の衛星視線方向の変位は**図-5.8** に示すとおりであり，水路近傍は植生があり PS 点は得られず，家屋，ダムなどの人工構造物がある箇所では PS 点が得られている．

図-5.9 から対象斜面で得られた PS 点以外の PS 点の衛星視線方向年平均変位は，±1mm/年以下と変位が生じていないが，対象斜面で得られた PS 点では北行，南行軌道ともに変位が生じていることが確認できる．

図-5.10 に示すように，対象斜面で得られた PS 点は，北行軌道では衛星から遠ざかる方向に変位（約 4～8 ㎜/年），南行軌道では衛星に近づく方向に変位（約 1～4 ㎜/年）しており，斜面のすべりの方向と整合している．

図-5.11 に示す 4 箇所の PS 点の北行，南行軌道の衛星視線方向の変位の経時変化図を**図-5.12** に示す．衛星視線方向の変位は誤差の低減を考慮して移動平均値（3 回の平均値）も示す．北行軌道の衛星視線方向の年平均変位は No.1 で-7.6mm，No.2 で-7.6mm，No.3 で-7.2mm，No.4 で-6.4 mm，南行軌道の年平均変位は No.1 で 2.0mm，No.2 で 1.3mm，No.3 で 1.2mm，No.4 で 3.6 mm であり，ばらつきはあるものの時間が経過するに従い変位が大きくなっている．

図-5.10 に示す衛星視線方向変位とすべり方向変位の関係より，斜面上部で沈下はしていないと仮定し，No.1～No.4 の場所でのすべり方向と変位量を算出した結果を**図-5.13** に示す．すべり方向は想定される斜面の川側へのすべり方向と整合しており，PSInSAR 解析で計測されたすべり量は 13～18 mm/年であり，水路付近で確認された 10～15mm/年程度の変位と整合している．このように，PSInSAR 解析により斜面の挙動を精度よく把握できているものと思われる．

計測された約 1mm/月は地すべり防止技術基準指針及び同解析 [4)]の地盤伸縮計観測結果による地滑り判断基準を適用すると，変動種別 C（累積変位量 0.5～2mm/月）継続観測が必要に相当する．

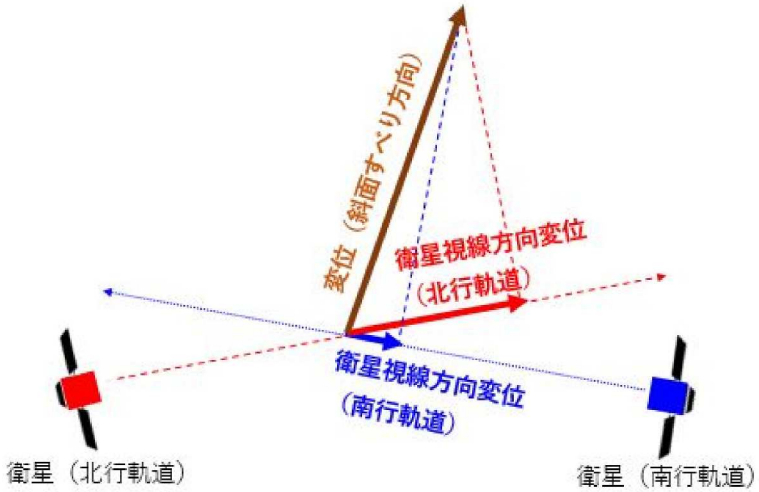
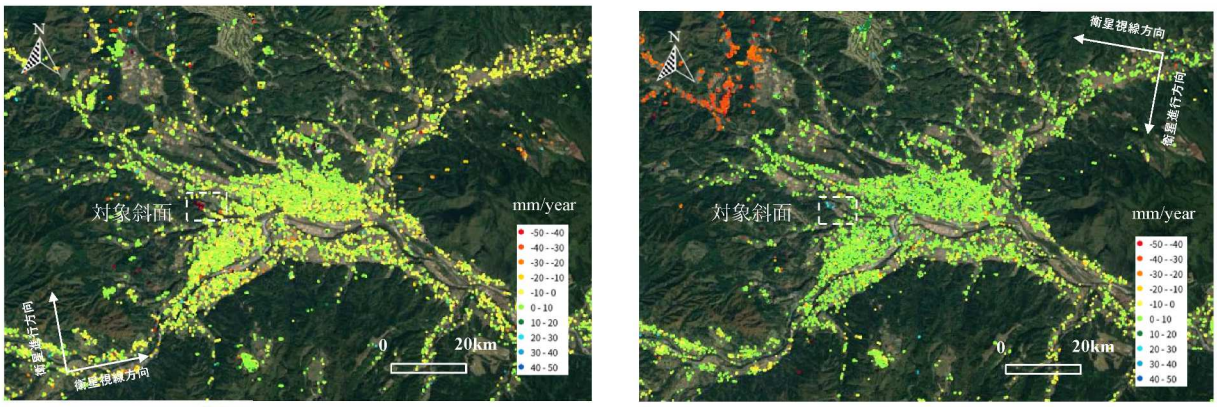
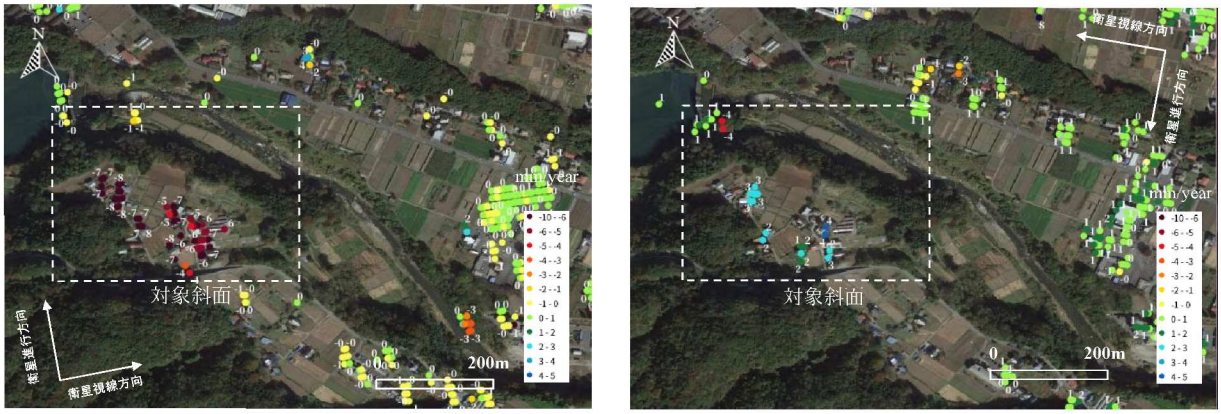


図-5.10　衛星視線方向変位とすべり方向変位の関係



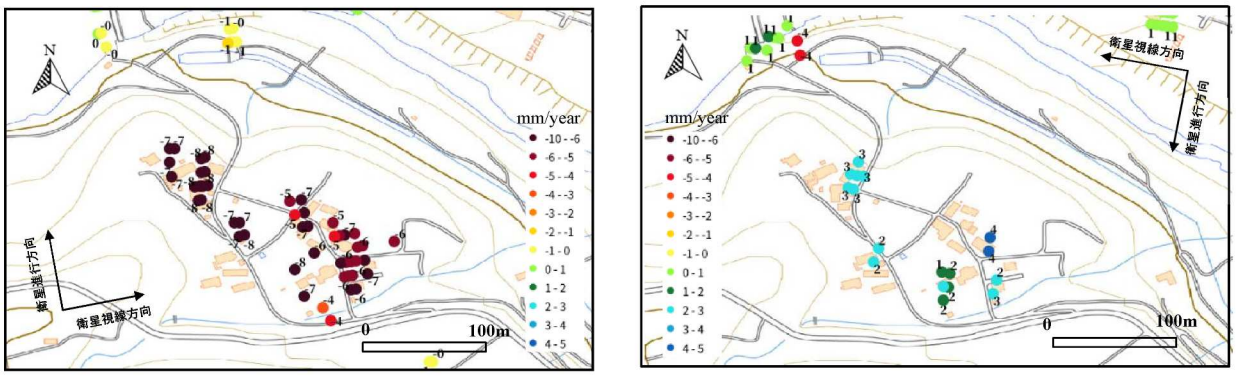
(a) 北行軌道　　(b) 南行軌道

図-5.7　PS 点の衛星視線方向年平均変位（解析範囲広域）



(a) 北行軌道　　(b) 南行軌道

図-5.8　PS 点の衛星視線方向年平均変位（対象斜面周辺）



(a) 北行軌道　　(b) 南行軌道

図-5.9　PS 点の衛星視線方向年平均変位（対象斜面）

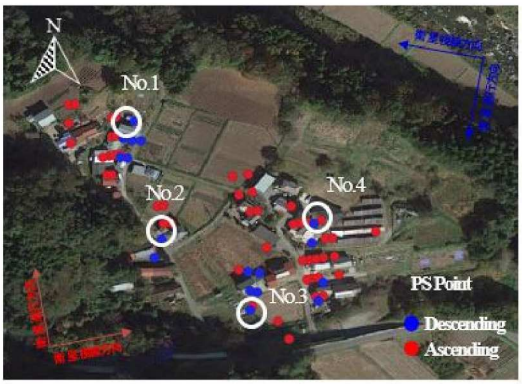


図-5.11　経時変化図を示した PS 点の位置

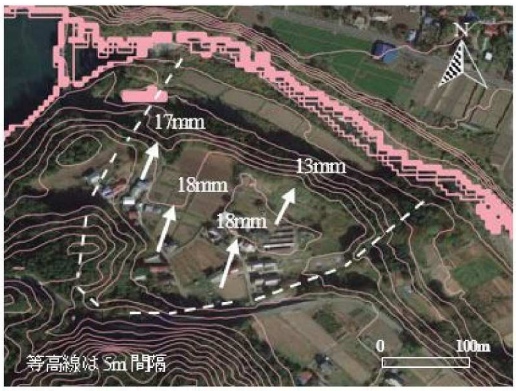
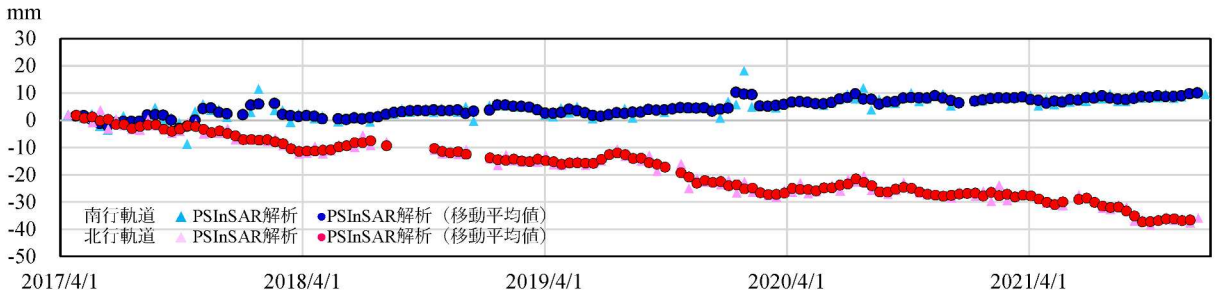
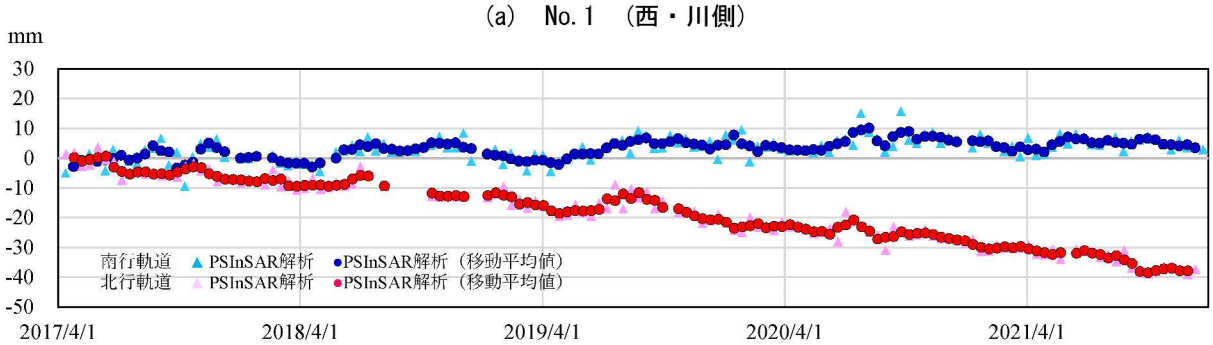


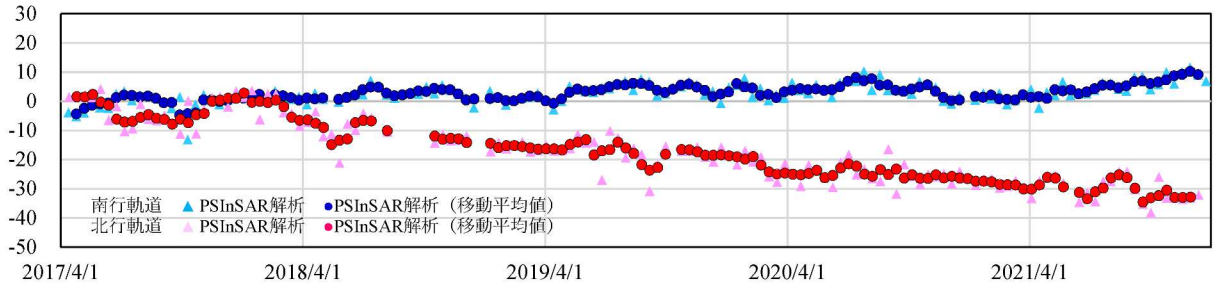
図-5.13　PS 点の年平均変位



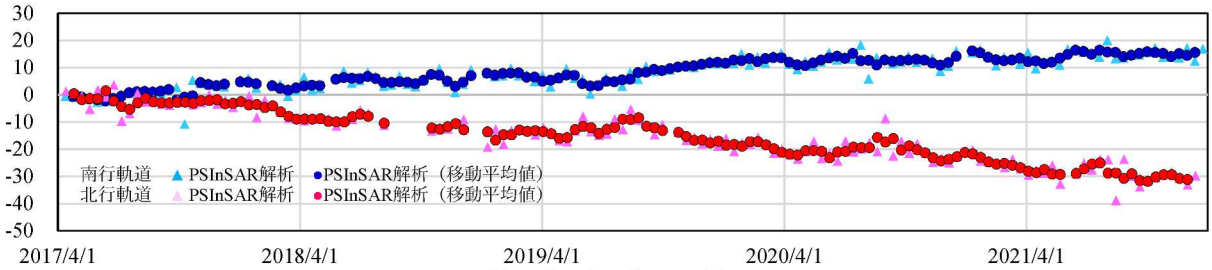
(a)　No. 1　（西・川側）



(b)　No. 2　（西・山側）



(c)　No. 3（東・山側）



(d)　No. 4（東・川側）

図-5.12　PS 点の衛星視線方向の変位の経時変化図

5.6　PSInSAR 解析による変位計測(CR 設置後含む)

表-5.1 に示すコーナーリフレクタ設置以降の約 1 年間の南行軌道の Sentinel-1SAR データとともに，設置以降も含む 2017 年 5 月から約 6 年 6 カ月間のデータも用いて PSInSAR 解析を実施した．それぞれの期間の解析を実施して得られた PS 点は**図-5.14** に示すとおりであり，コーナーリフレクタ設置前の期間が 1 年と設置前後に比べて短いことから，青色の PS 点が増えている．4 基のコーナーリフレクタ設置箇所には 18 ポイントの PS 点が得られている．インドネシアの精度検証用のコーナーリフレクタ 1 基の場合は 6 ポイントであり，ほぼ同等の数である．解析範囲全体の PS 点の数は，設置後が 55,935，設置前後が 29,522 であり，解析期間が長期となることにより，約 1 年間に比べて安定した PS 点が約 53%に減少する．

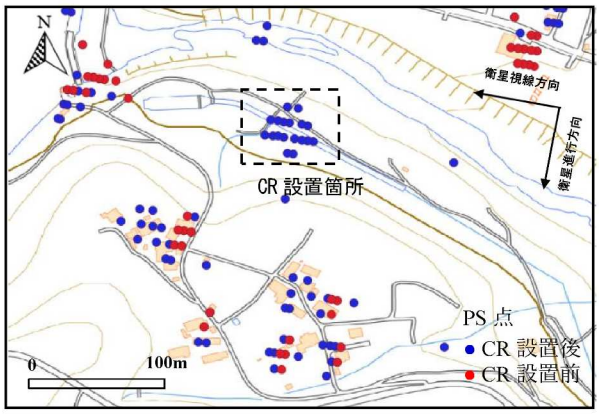
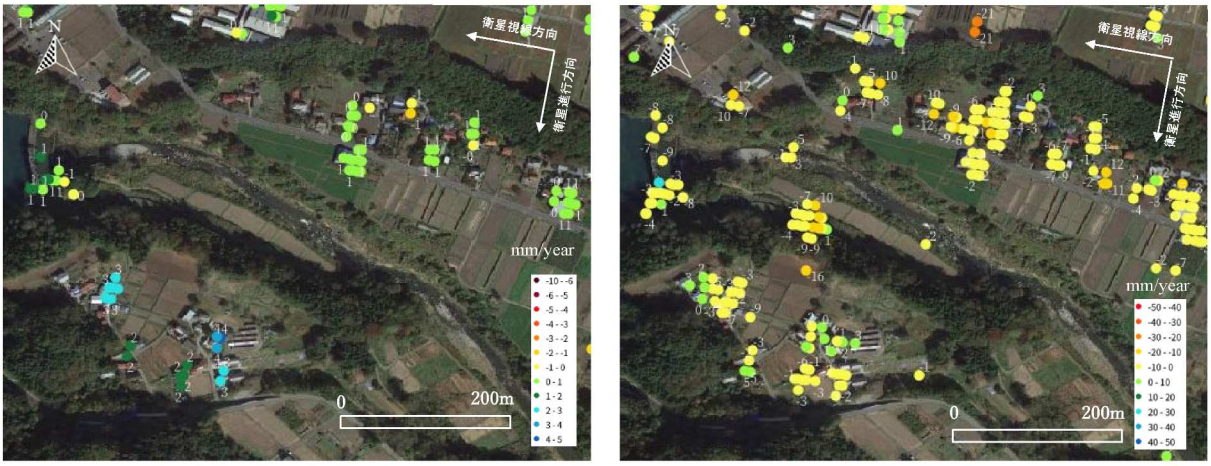


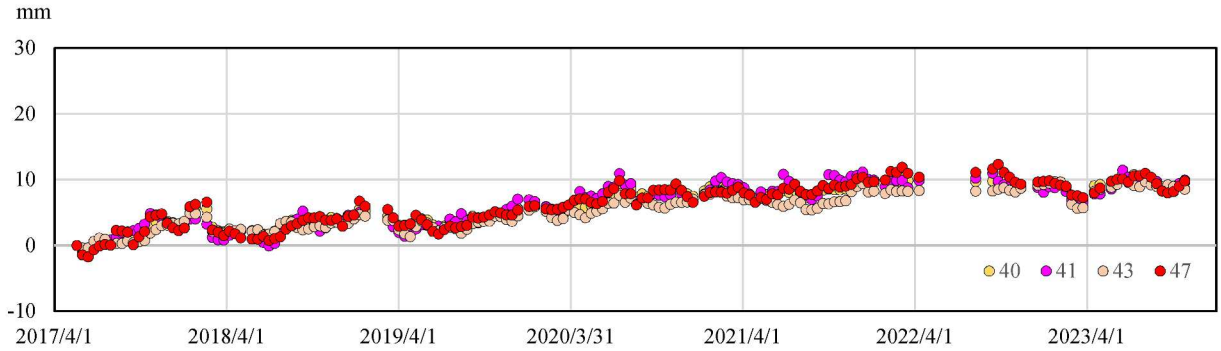
図-5.14　対象斜面の PS 点（CR 設置後，CR 設置前後）



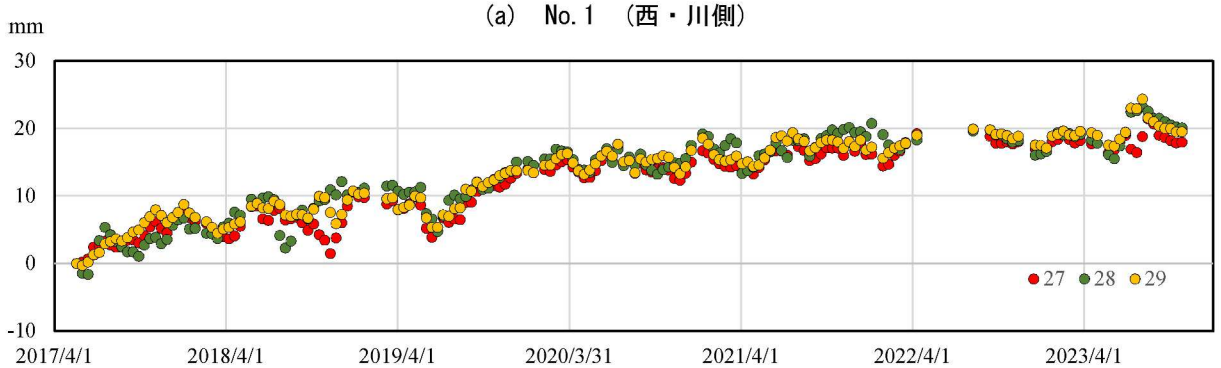
(a) CR 設置前後（約 6 年 6 カ月間）　　(b) CR 設置後（約 1 年間）

図-5.15　PS 点の衛星視線方向年平均変位（対象斜面）

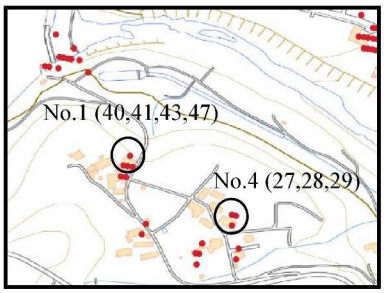
対象斜面の PS 点の衛星視線方向年平均変位を**図-5.15** に，PS 点が得られた川側の No.1 の 4 箇所と No.4 の 3 箇所とコーナーリフレクタ設置箇所の 3 箇所の経時変化を**図-5.16** に示す．コーナーリフレクタ設置以降の PS 点の衛星視線方向年平均変位は，計測期間が約 1 年間と短いため，4 基コーナーリフレクタを設置した箇所も含め，長期の解析期間に比べばらついているが，ほとんどの箇所の変位が±10 mm 内にはいっており，この期間で大きな変位は生じていないことが確認できる．**図-5.16** より，No.1 と No.4 の箇所の変位は 2022 年 4 月までは，2～4 mm/年程度の一定の速度で増加傾向にあるものの，それ以降は明確な増加傾向は認められない．これまでの計測期間ではコーナーリフレクタ設置箇所の衛星視線方向の変位も一定の増減傾向は認められない．



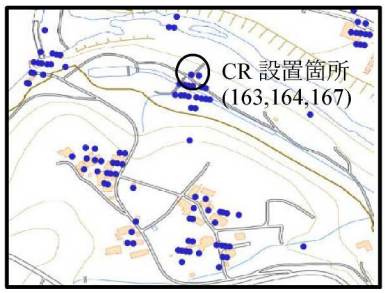
(a)　No. 1　（西・川側）



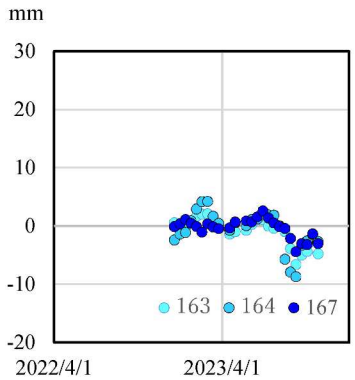
(b)　No. 4（東・川側）



CR 設置前後（約 6 年 6 カ月間）



CR 設置後（約 1 年間）



(c)　CR 設置箇所

図-5.16　PS 点の衛星視線方向の変位（移動平均値）の経時変化図

5.7 まとめ

水力発電所の水路において水路沿いの測量結果から，水路経過地斜面のすべりが懸念された斜面で，Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析による斜面の変位計測を実施した．対象斜面の上部では家屋などの人工構造物があり，PS 点が得られ変位計測を行うことができた．北行，南行軌道の 2017 年 4 月から 2021 年 12 月までの約 4 年 9 カ月間の Sentinel-1SAR データを解析することにより，北行軌道では衛星から遠ざかる変位，南行軌道では衛星に近づく方向の変位を確認した．斜面上部の PS 点が得られた箇所の変位の方向は山側から川側への変位であり，想定される斜面のすべり方向と一致するとともに，変位量についても 1mm/月程度と水路周辺での計測結果と整合がとれている．

水路周辺では PS 点が得られないことから，小規模で安価なコーナーリフレクタを製作，設置して，水路近傍での変位も PSInSAR 解析により把握できるようにした．コーナーリフレクタ設置後約 1 年間のデータを用いて PSInSAR 解析を実施した結果，コーナーリフレクタ設置箇所でも PS 点が得られ，変位計測ができることを確認した．南行軌道については，コーナーリフレクタ設置後約 1 年間と合わせて，2017 年 5 月から 2022 年 11 月までの約 6 年 7 カ月間の Sentinel-1SAR データでの解析も実施し，長期間の斜面の挙動を確認した．

Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析による斜面変位モニタリングは，対象斜面に人工構造物がなく十分な PS 点が得られない場合でも，着目する箇所にコーナーリフレクタを設置することで計測が可能となり，コーナーリフレクタの設置以外は現場に計測機器などを設置することなく，精度の高い変位計測ができることから，条件によっては有効な斜面変位モニタリングの方法となり得るものと考えられる．

水力発電所，送電設備などのインフラ施設は，山岳部などにも位置しており，ダム湛水地斜面，送電鉄塔周辺斜面，発電所水路経過地斜面，変電所斜面などで，斜面の変状の監視が必要な箇所があり，測量などによる斜面変位モニタリングを実施している．このような斜面において人工構造物や岩主体などの箇所がなく，PSInSAR 解析を実施しても PS 点が得られず斜面の挙動が評価できない場合には，変位を確認したい箇所にコーナーリフレクタを設置して，その箇所を PS 点とすることで，斜面変位モニタリングが可能となる．

【参考文献】

1) 安保秀範，葛平蘭，大澤高浩，町田勝巳，櫻澤裕紀，池本龍平：コーナーリフレクター設置効果と衛星 SAR データを活用した PSInSAR 解析による水路経過地斜面の変位計測，令和 5 年土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，VI-127, 2023. [Abo, H., Ge P., Osawa T., Machida K., Sakurazawa H. and Ikemoto R. : Displacement Measurement of Waterway Slope by PSInSAR Analysis Using Satellite SAR Data and the Effect of Corner Reflector Iinstallation, Japan Society of Civil Engineers 2023 Anuual Meeting, VI-127, 2023.]

2) 高橋徹，白井敏夫，藤島豊久，大木真人，佐野博昭，小定弘和：簡易リフレクターによる ALOS-2 の教育活用，リモートセンシング学会誌，Vol. 36, 2016. [Tohru Takahashi, Toshio Usui, Toyohisa Fujishima, Masato Ohki, Hiroaki Sano and Hirokazu Koshida : Education Using ALOS-2 with Easy-to-Make Reflectors, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol. 36, 2016.]

3) 伊藤陽介，山本学：合成開口レーダー用反射板の設計・製作と性能評価，鳴門教育大学研究紀要，第 23 巻，2008．[Yosuke Ito, Manabu Yamamoto : Design, Fabrication and Performance Evaluation of a Reflector for Synthetic Aperture Radar, Naruto University of Education Research Bulletin, Vol. 23, 2008.]

4) 国土交通省砂防部独立法人土木研究所：地すべり防止技術指針及び同解説，2008，[Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Erosion Control Department, Civil Engineering Research Institute : Landslide prevention technical guidelines and commentary, 2008]

第６章　PSInSAR 解析による地盤沈下モニタリング

6.1　研究概要

合成開口レーダーは，地表面や構造物の変位が計測でき，多くの利活用の研究が進められてきており，衛星 SAR データを用いた地盤沈下量の計測についても，日本では主に ALOS-2（L-band）を利用した多くの研究[8)~17)]がされてきている．

Sentinel-1 SAR データは，空間解像度は高くないが，同一条件で観測したデータが 12 日間隔で入手可能なため，PSInSAR 解析を実施するのに，十分な数のデータが得られ，PS 点のみの変位計測となるが，精度の高い計測が可能である．水平地盤での地盤沈下の現象のように，地殻変動を除くと鉛直方向のみ変位している場合は，南行，北行軌道の東と西の両方向からの計測データを用いて，2.5 次元解析のような検討をしなくても，水平方向の変位を補正するように適切に基準点を設ければ，一方向からの SAR データで精度の高い計測できる可能性がある．

本章では，最大で約 2cm/年地盤沈下している千葉県東部地域において，2017 年 1 月から 2024 年 1 月までの 7 年間の南行軌道の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して地盤沈下量を計測し，年 1 回実施されている水準測量結果と比較して，Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析による計測精度を評価した．その結果，比較的広い領域ごとに基準値を設定しても，PSInSAR 解析による変位計測精度は 5mm 程度，変位速度の計測精度は 1mm/年程度であり，水準測量と併用することで，広範囲での沈下量を精度よく把握できることを示した．

6.2　千葉県の地盤沈下と水準測量結果

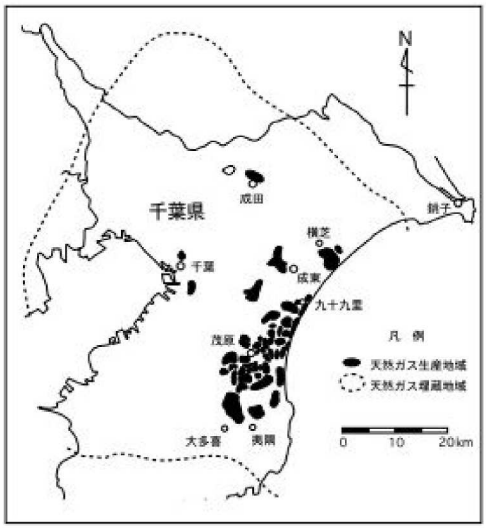
6.2.1　千葉県の地盤沈下

高度成長期においては，わが国では工業用水を地下から利用するなど，過剰な地下水の採取を主な要因として，首都圏をはじめとする全国で広域的な地盤沈下が発生したが，その後，地下水採取制限が行われ，長期的には地盤沈下は沈静化の傾向をたどってきている．このような中にあって，千葉県の九十九里平野は水溶性天然ガス溶存地下水の揚水が多い地域であり，近年，なお地盤沈下の生じている地域である[1)~4)].

千葉県では人為的要因による地盤沈下を防止するため，１）地盤沈下の状況等を把握するため，観測井による地下水位等の測定及び地盤変動調査の実施，２）工業用水法，千葉県環境保全条例などによる，地下水採取規制の実施 ，３）かん水を採取する企業と県が締結している「地盤沈下の防止に関する細目協定」に基づき，かん水地上排水量の削減等を実施している．

6.2.2　天然ガス田と生産地域

南関東の天然ガス田は，千葉県を中心に南関東一帯に広がり，可採埋蔵量が 3,685 億 m³と言われており，国内最大の水溶性天然ガス田である．水溶性天然ガスは第四紀更新世（約 250～50 万年前）の海底に堆積した砂岩と泥岩の互層中にある地層水に，微生物起源のメタンガスが溶けた状態で存在しており，概ね深度 100m から 2,000m の広い範囲に堆積していると言われている．天然ガス田の生産地域は，**図-6.1** に示すとおりであり，九十九里地域を中心とした多数のガス井戸から年間約 4.4 億 m³（2018 年）の水溶性天然ガスが生産されている[5),6)].



出典：千葉県の天然ガス・ヨウ素資源[5)]

図-6.1　天然ガス田と生産地域

6.2.3　水準測量結果

千葉県では，昭和 35 年から地盤変動量調査を実施しており，2017 年から 2022 年の 5 年間の調査結果 [2)]では，調査面積（約 3,208km^2 ）のうち約 44%（約 1,411km^2）で地盤沈下が確認されている．東葛，葛南及び君津地域では，4cm 以上の地盤沈下は見られず，千葉・市原，北総及び九十九里地域では，4cm 以上の沈下が見られる．千葉・市原地域では地盤沈下している面積は 約 3%，北総地域では 約 28%，九十九里地域でも約 28%を占める．

2017 年 1 月から 2023 年 1 月の 6 年間の水準測量結果 [4)]は**図-6.2** に示すとおりであり，沈下量が大きい地域とガス田生産地域は整合している．千葉市周辺を含む西側については，一部地域を除いて，2cm 以下であるが地盤が隆起している．また，東京湾に接する市原市の西部，袖ケ浦市，木更津市も若干であるが地盤が隆起している．地盤沈下量の大きい地域は富里市，八街市などの県北部，九十九里低地を中心とした東側に存在しており，水準測量により確認されている，それぞれの地域での沈下量の最大値は 126mm（21mm/年），97mm（16mm/年）である．

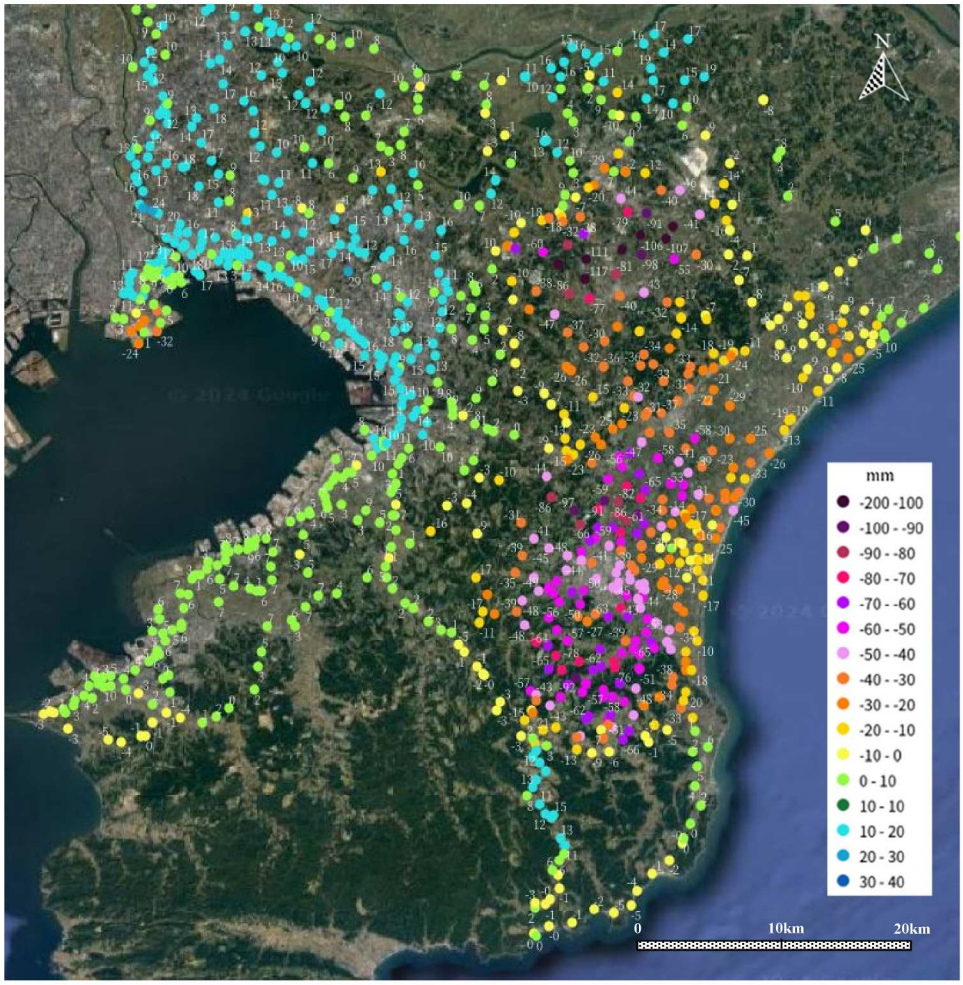


図-6.2　千葉県の水準測量結果 [4)]（2017 年 1 月から 2023 年 1 月）

6.3　解析手法と解析データ・範囲

6.3.1　解析手法

解析手法は多くの SAR データを使用することで，干渉性の低下，Digital Surface Model（DSM）誤差及び対流圏・電離圏遅延などに起因するノイズの影響を低減でき計測精度が高い PSInSAR 解析を用いた．PSInSAR 解析では，解析期間において散乱特性が変化しない点（PS 点）に着目することで，時系列的な変動を精度よく計測することができる．

第２章同様，PSInSAR 解析は，スタンフォード大学において，Andrew Hooper らが開発した StaMPS/MTI を用いた．

6.3.2　解析データと解析範囲

解析データは，2016 年 12 月 18 日から 2024 年 1 月 1 日までの 7 年間の南行軌道の Sentinel-1 SAR データを用いた．なお，南行軌道，北行軌道の両方のデータを用いて 2.5 次元解析することも考えられるが，北行軌道のデータは 2021 年 12 月 12 日以降は衛星のトラブルによりデータが入手できないこと，地盤沈下のように基本的には鉛直方向のみの変位が生じている場合は，一方向のデータからでも精度よく計測可能であることから，南行軌道のデータを用いて地盤沈下量の計測を実施した．解析に用いた Sentinel-1 SAR データの位置図は，**図-6.3** に示すとおりであり，検討対象地域の入射角は主に 35°から 36°程度の範囲内にある．

解析に用いた Sentinel-1 SAR データは，2016 年 12 月 18 日から 2024 年 1 月 1 日までの 7 年間の 209 シーンで，マスターを 2020 年 4 月 3 日のデータとした．208 シーンのデータとマスターデータとの基線長は**図-6.4** に示すとおりであり，ほとんどが±100m 以内となっている．

DSM として，ALOS 全球数値地表モデル（DSM）"ALOS World 3D - 30m (AW3D30) "を用いた．

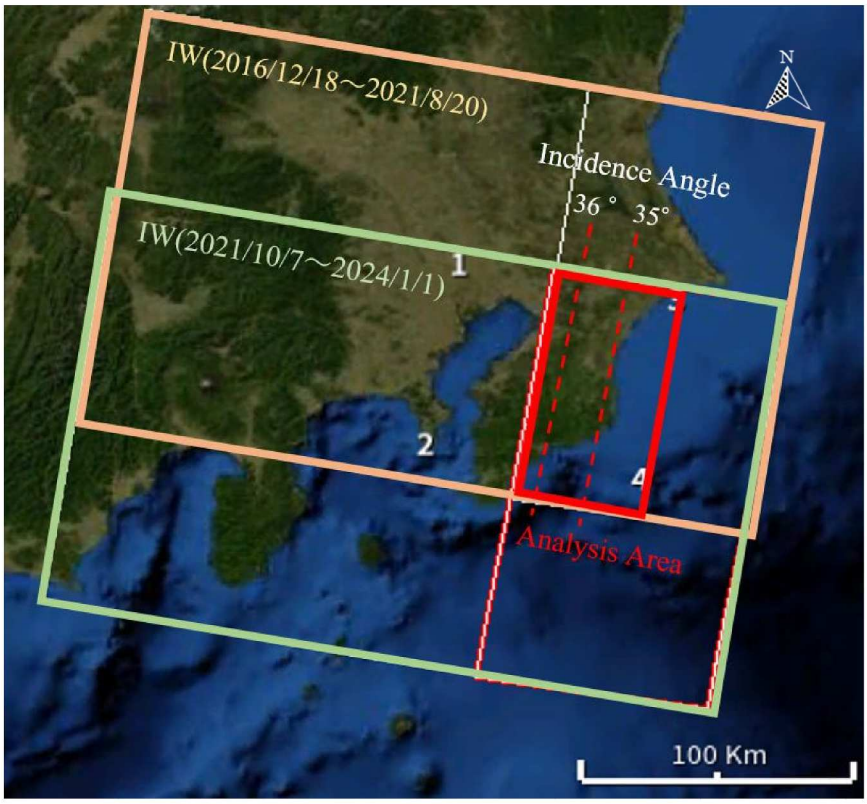


図-6.3　Sentinel-1 SAR データの解析範囲

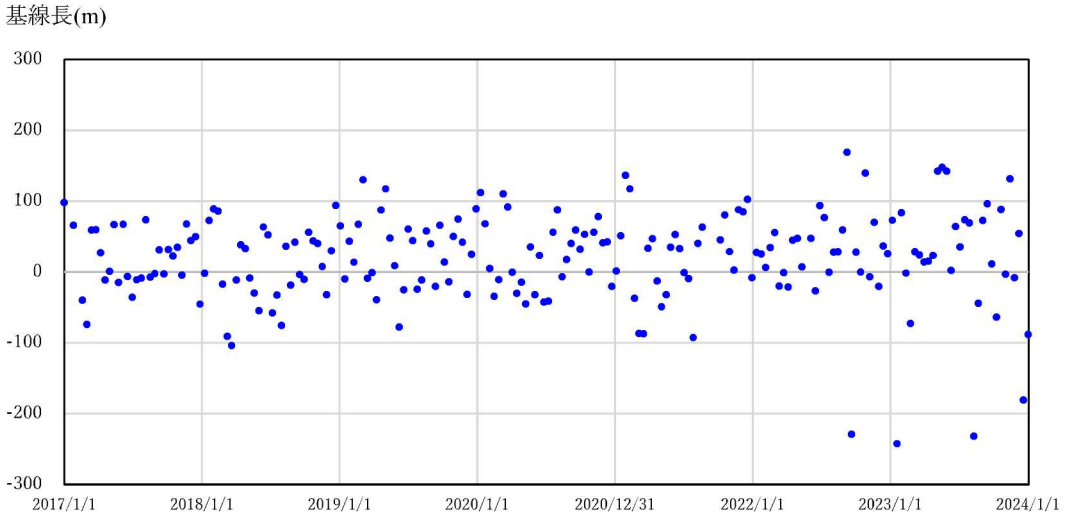


図-6.4　解析に用いた Sentinel-1 SAR データの基線長

6.4　PSInSAR 解析結果(解析範囲全体)

6.4.1　コヒーレンスと PS 点

2020 年 4 月 4 日と 4 月 27 日のコヒーレンス，衛星視線方向の年平均変位も示している PS 点の位置を**図-6.5**，**図-6.6** に示す．千葉県で地盤沈下が最も大きい箇所を含む富里市，八街市などの北西部，東金市，大網白里市，茂原市などの中東部では，広範囲で PS 点が得られない箇所は少ない．一方，いすみ市，大多喜町，御宿町などの南部では，植生箇所が多く広範囲で PS 点が得られない箇所が多くあるものの，地盤沈下が問題とならない箇所である．地盤沈下が 0.8cm/年程度以上の箇所では，一定程度の密度で人工構造物などによる PS 点が得られ，広範囲での面的な変位の把握が可能である．**図-6.5** のコヒーレンスが高い箇所は，家屋などの人工構造物の箇所と一致しており，例えば，茂原市の家屋が密集している箇所は，コヒーレンスの高い箇所で密度の高い PS 点が得られている．

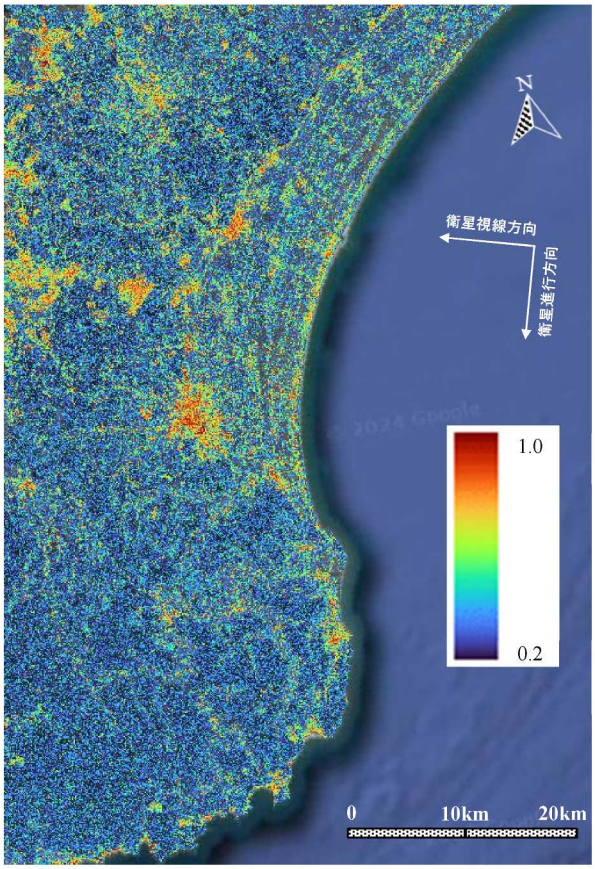


図-6.5　コヒーレンス（2020 年 4 月 4 日－2020 年 4 月 27 日）

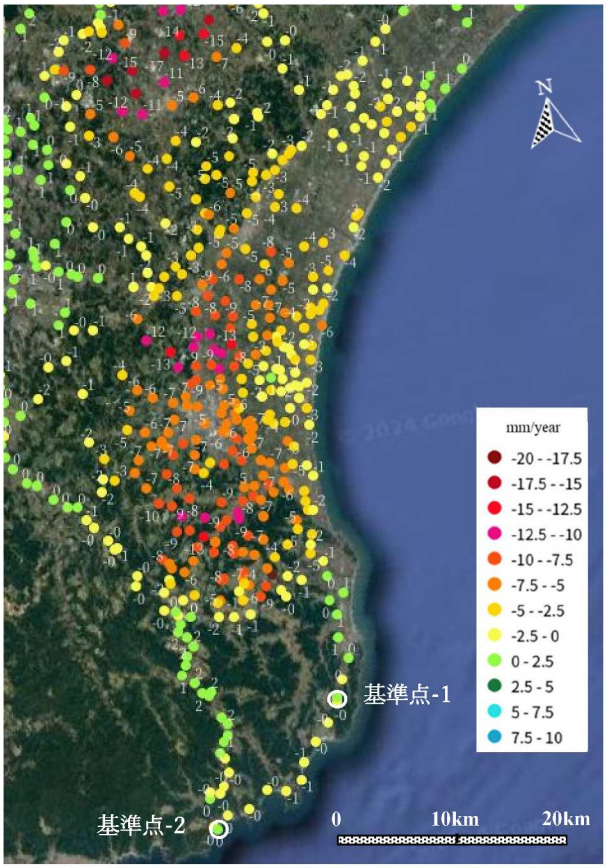


図-6.9　水準測量結果（2017 年 1 月～2023 年 1 月）[4)]

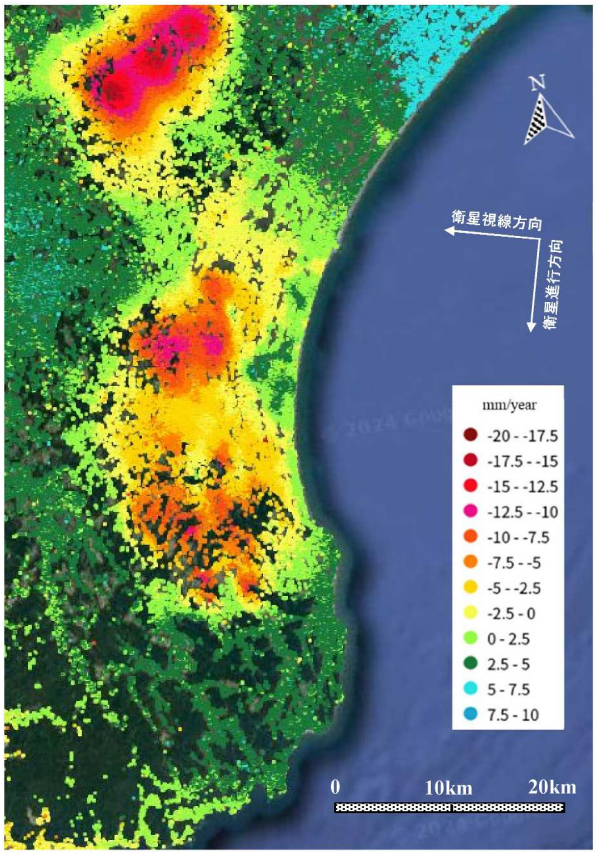


図-6.6 衛星視線方向の年平均変位（2017 年 1 月～2023 年 1 月）

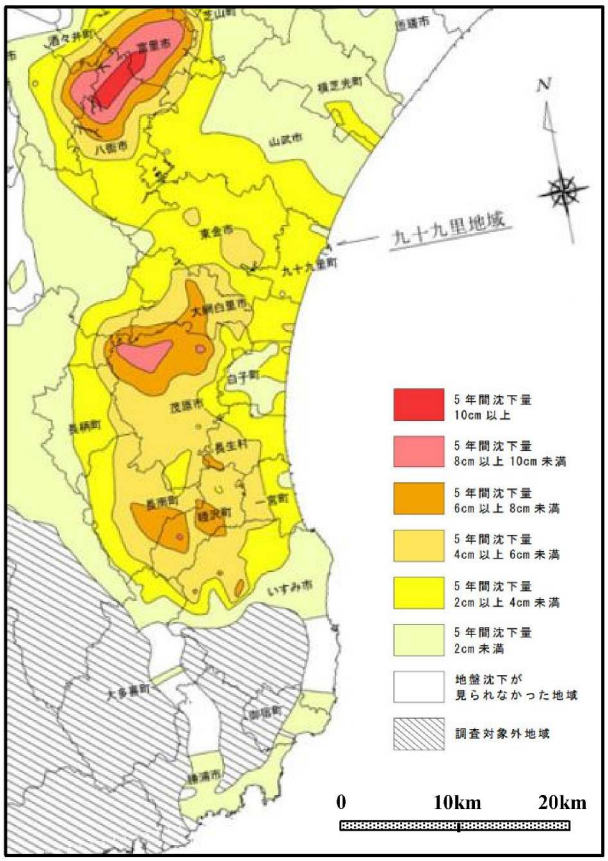


図-6.10 水準測量結果に基づいた変位（2018 年～2023 年）[3)]

6.4.2　衛星視線方向変位と鉛直変位の関係

鉛直変位 dver は，東西・南北方向の変位がない場合は下式となる(**図-6.7** 参照).

$$dver = d_{LOS} / \cos\theta \tag{6.1}$$

ここで，d_{LOS} は衛星視線方向変位，θ は入射角である.

検討対象地域での入射角は，約 35°から約 36°であり，水平方向の変位がない場合，PSInSAR 解析より求めた変位の約 1.22 から 1.24 倍が鉛直変位となる.

水準測量は，東京都千代田区永田町 1 丁目 1 番地に設置されている日本水準原点（標高：東京湾平均海面（T.P.）上 24.3900m）を基準として，標高の計算は日本水準原点と関東地区内の計 13 箇所の固定水準点を不動として扱われている. 千葉県内の固定水準点は 4 箇所あり, 検討対象範囲では，いすみ市小池 324 の基準-1，勝浦市興津字湊 461 の基準-2 である（**図-6.9** 参照）.

図-6.8 において，一定の地殻変動がある A・B 地域で，基準点とする A 地点は地盤沈下しておらず，B 地点の地盤変位を計測する場合は，A 地点での計測結果の補正量を用いることで正確に沈下量を計測できる. 変位計測誤差には水蒸気などによる対流圏, 電離圏の擾乱による誤差が生じるが, 比較的 2 地点間の距離が近い地点ではこの誤差が小さくなる可能性がある. 一方，基準点 A 地点を用いて，地殻変動が A 地点と異なる C 地点の沈下量を評価する場合は，地殻変動による差分を考慮するとともに，地点間での対流圏，電離圏の擾乱による誤差が大きくなる可能性がある. したがって，地殻変動の差，対流圏，電離圏による位相の差が小さい範囲が選定できれば，南行・北行軌道での解析結果から 2.5 次元解析をしなくても，精度高く計測された水準測量を基準として，一つの軌道での PSInSAR 解析による衛星視線方向の変位から沈下量を精度よく計測できると考えられる.

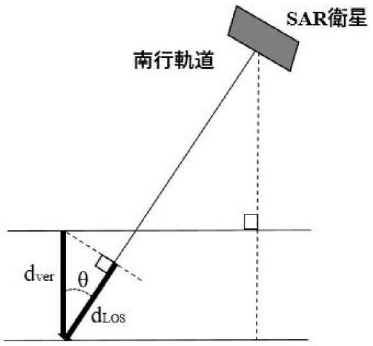


図-6.7 衛星視線方向変位と鉛直変位の関係

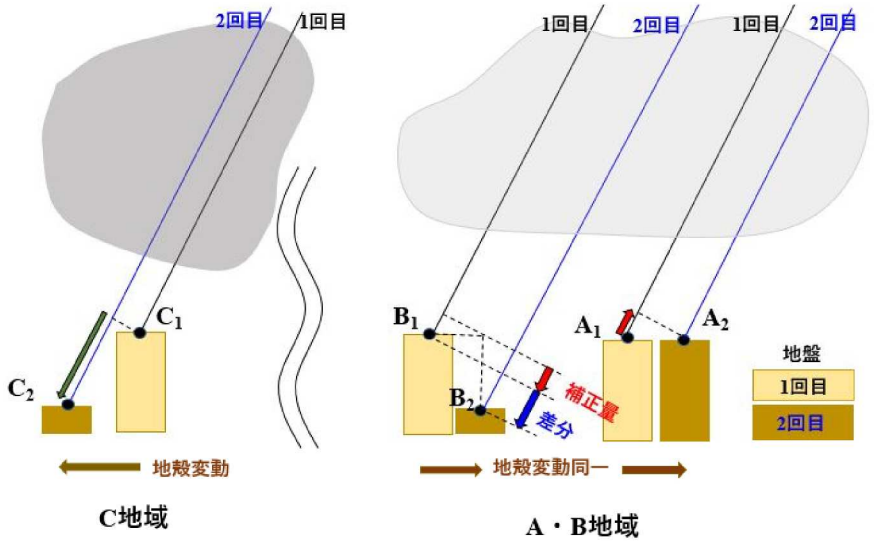


図-6.8 基準点に基づいた衛星視線方向変位と鉛直変位の関係

6.4.3　衛星視線方向の年平均変位速度

2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位を**図-6.6** に示す．衛星視線方向の年平均変位は，3 データの移動平均を用いて，2022 年 12 月 25 日，2023 年 1 月 6 日，2023 年 1 月 18 日の平均値から 2016 年 12 月 8 日，2017 年 1 月 1 日，2017 年 12 月 25 日の平均値の差を 6 年間で割って算出した．水準測量値[4)]は 2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の年平均変位を 0.81 倍して衛星視線方向の変位に変換した値を**図-6.9** に示す．水準測量結果から 2018 年 1 月から 2023 年 1 月の 5 年間の変位の推定コンター図（2cm（4mm/年）[3)] の間隔）を**図-6.10** に示す．

図-6.6 に示す衛星視線方向の変位の大きい箇所は，北西部の富里市，八街市の箇所，北東部の茂原市，大網白里市の箇所，長南町，睦沢町などの箇所であり，**図-6.9**，**6.10** に示す水準測量結果に基づく沈下量が大きい箇所と一致しており，大小の傾向は整合している．一方，変位量については，水準測量に基づく 5 年間の沈下量が 2cm 以下（4mm/年以下）と衛星視線方向の変位が 2.5～5mm/年と整合しているが，これは地殻変動，方向としては東側への変位を計測している可能性がある．また，水準測量の基準点である 2 箇所の衛星視線方向の変位が 3mm/年程度と 2.5～5mm/年の領域内にあり，基準点での変位の差も衛星視線方向との差が生じている原因である．

6.5　PSInSAR 解析結果と水準測量値との比較

一方向からのみの PS 点の変位から地盤沈下量の推定精度を高めるためには，地殻変動の影響，対流圏，電離圏の差の影響を小さくする範囲の設定と，基準点を適切に設定する必要がある．PSInSAR 解析結果と水準測量値の比較にあたり，地盤沈下の大きい箇所を含む北部，中部，南部の 3 領域に分けて検討した．各領域の基準点については，地盤沈下の大きい箇所から比較的近く地盤沈下量が小さい水準測量箇所を選定したが，地殻変動の影響などをさらに低減させるため，北部と南部については 2 箇所の水準測量箇所の基準点を設定し，合計 5 箇所の基準点を設定した．

具体的には，**図-6.11** に示すように，北部の基準点は北西部に位置する水準測量箇所（佐倉市，SK-1），北南部の水準測量箇所（千葉市若葉区，c-68）で，6 年間の年平均変位はそれぞれ，-2.7mm/年，-0.3mm/年である．中部の基準点は，東の中央に位置する水準測量箇所（長生郡白子町，SR-2）で 6 年間の年平均変位は-1.9mm/年である．南部の基準点は，北東部に位置する水準測量箇所（いすみ市，MI-11），南部の水準測量箇所（勝浦市，3906）で，6 年間の年平均変位はそれぞれ，-0.8mm/年，-0.2mm/年である．

PSInSAR 解析による計測誤差を評価するため，RMSE により定量的評価を行った．RMSE は，水準測量値を $d_{sur,i}$，PSInSAR 解析による変位を $d_{PSI,i}$ とすると，次式によって定義される．

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^{n} (d_{PSI,i} - d_{sur,i})^2} \tag{6.2}$$

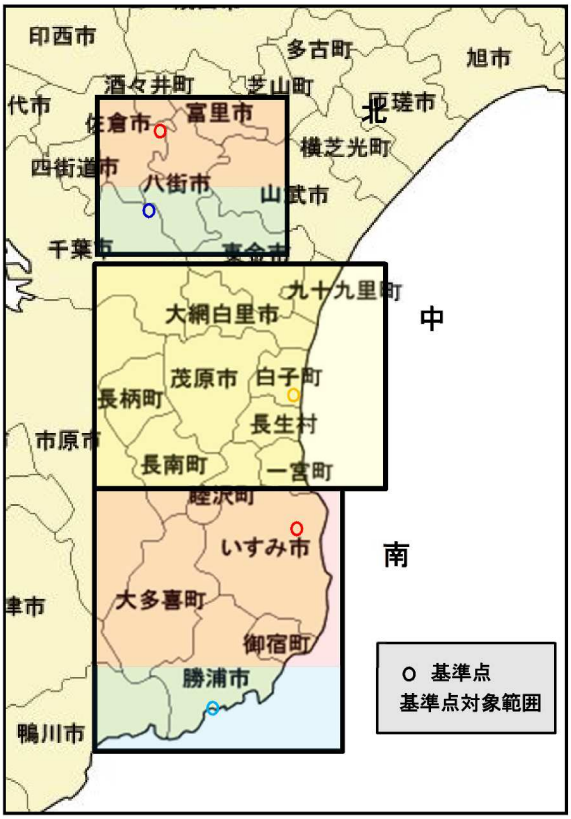


図-6.11　領域の基準点と基準点対象範囲

6.5.1　衛星視線方向の年平均変位

2017 年 1 月から 2023 年 1 月の 6 年間の衛星視線方向の年平均変位を，水準測量値を衛星視線方向に換算した値と合わせて**図-6.12～6.14** に示す.

北部の PSInSAR 解析による変位は，**図-6.12** に示すとおりであり，千葉県内で最も地盤沈下量が大きい富里市，八街市などの変位を示している．地盤沈下量が大きい箇所ともに，その変位量も水準測量結果と整合している．富里市での沈下量の最も大きい箇所の水準測量値は-17.0mm/年，-15.6 mm/年で，その箇所での解析結果は-16.5 mm/年，-16.4 mm/年であり，誤差は 0.5mm/年， 0.8 mm/年である．同様に，八街市では水準測量値は-15.9mm/年，-15.0mm/年，解析結果は-15.9 mm/年，-14.9 mm/年であり，誤差は 0.0mm/年， 0.1 mm/年である．水準測量箇所が正確に特定でき，周辺に PS 点が存在する 68 箇所の水準測量値と PSInSAR 解析結果の関係は，**図-6.15**，**表-6.1** に示すとおりであり，RMSE は 1.0mm/年と精度よく計測できている．なお，西側に位置する佐倉市，四街道市，千葉市のデータ（21 箇所）は，解析結果と水準測量値を比較すると西側に相対的に地盤が移動していると計測されているので，基準点から更に-1mm/年補正した.

中部の PSInSAR 解析による変位は，**図-6.13** に示すとおりであり，中央部の大網白里市，茂原市，長南町，睦沢町の地盤沈下量が大きい箇所ともに，その変位量も水準測量結果と整合している．大網白里市，茂原市，長南町，睦沢町の地盤沈下量が最も大きい水準測量値はそれぞれ -9.7mm/年，-12.7mm/年，-10.2mm/年，-12.5mm/年であり，解析結果は -9.5mm/年，-13.7mm/年，-10.3mm/年，-12.6mm/年，誤差は 0.5mm/年，1.0mm/年，0.1mm/年，0.1mm/年である．正確に特定できて周辺に PS 点が存在する 177 箇所の水準測量値と PSInSAR 解析結果の関係は，**図-6.16**，**表-6.1** に示すとおりであり，RMSE は 0.9mm/年と精度よく計測できている．なお，沿岸部に位置する九十九里，白子町，大網白里市の東側のデータ（34 箇所）は，解析結果と水準測量値を比較すると西側に相対的に地盤が移動していると計測されているので，基準点から更に -1mm/年補正した.

南部の PSInSAR 解析による変位は，**図-6.14** に示すとおりであり，いすみ市の地盤沈下量が大きい箇所とともに，その変位量も水準測量結果と整合している．いすみ市の地盤沈下量が大きい水準測量値は -8.8mm/年，-8.7mm/年，それぞれの解析結果は-8.0mm/年，-10.1mm/年，誤差は 0.5mm/年，0.8mm/年，1.4mm/年である．正確に特定できて周辺に PS 点が存在する 67 箇所の水準測量値と PSInSAR 解析結果の関係は，**図-6.17**，**表-6.1** に示すとおりであり，北部，南部に比べて地盤沈下量が大きい箇所で誤差が若干大きいものの，RSME は 1.0mm/年と精度よく計測できている.

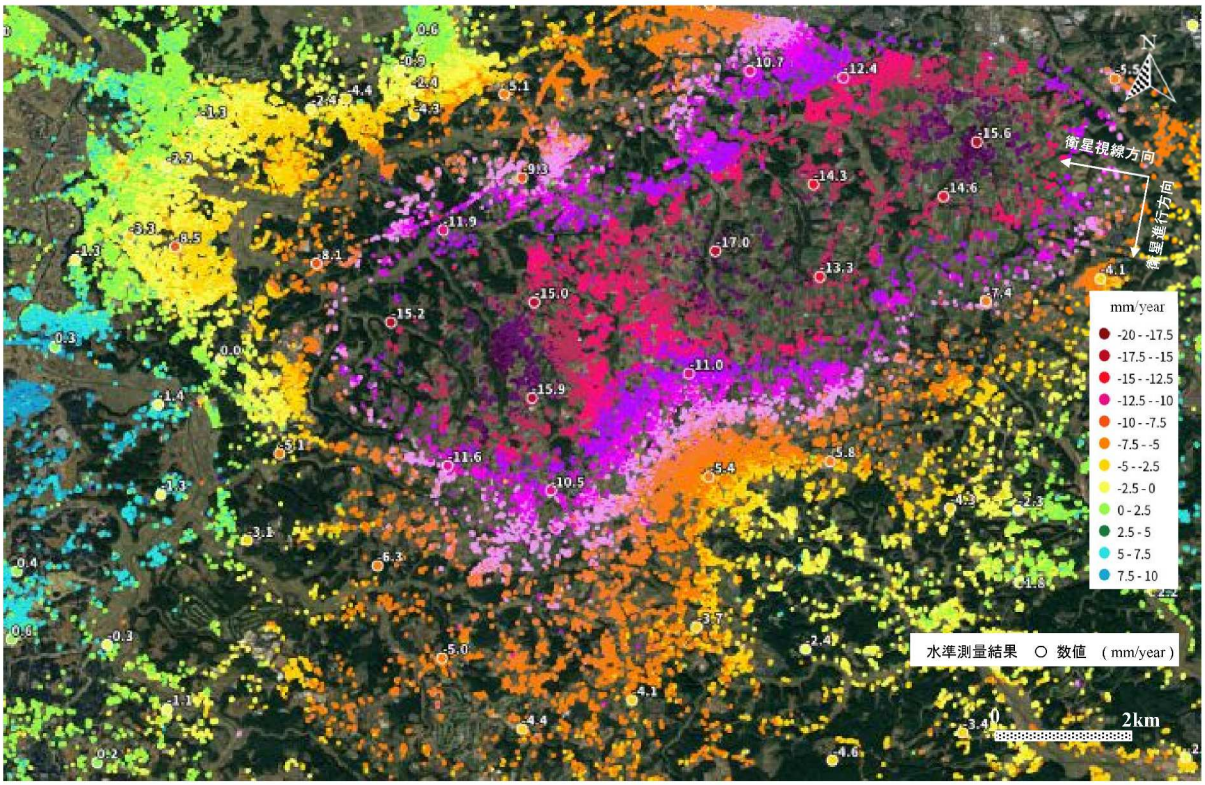


図-6.12 2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位と水準測量結果（北部）

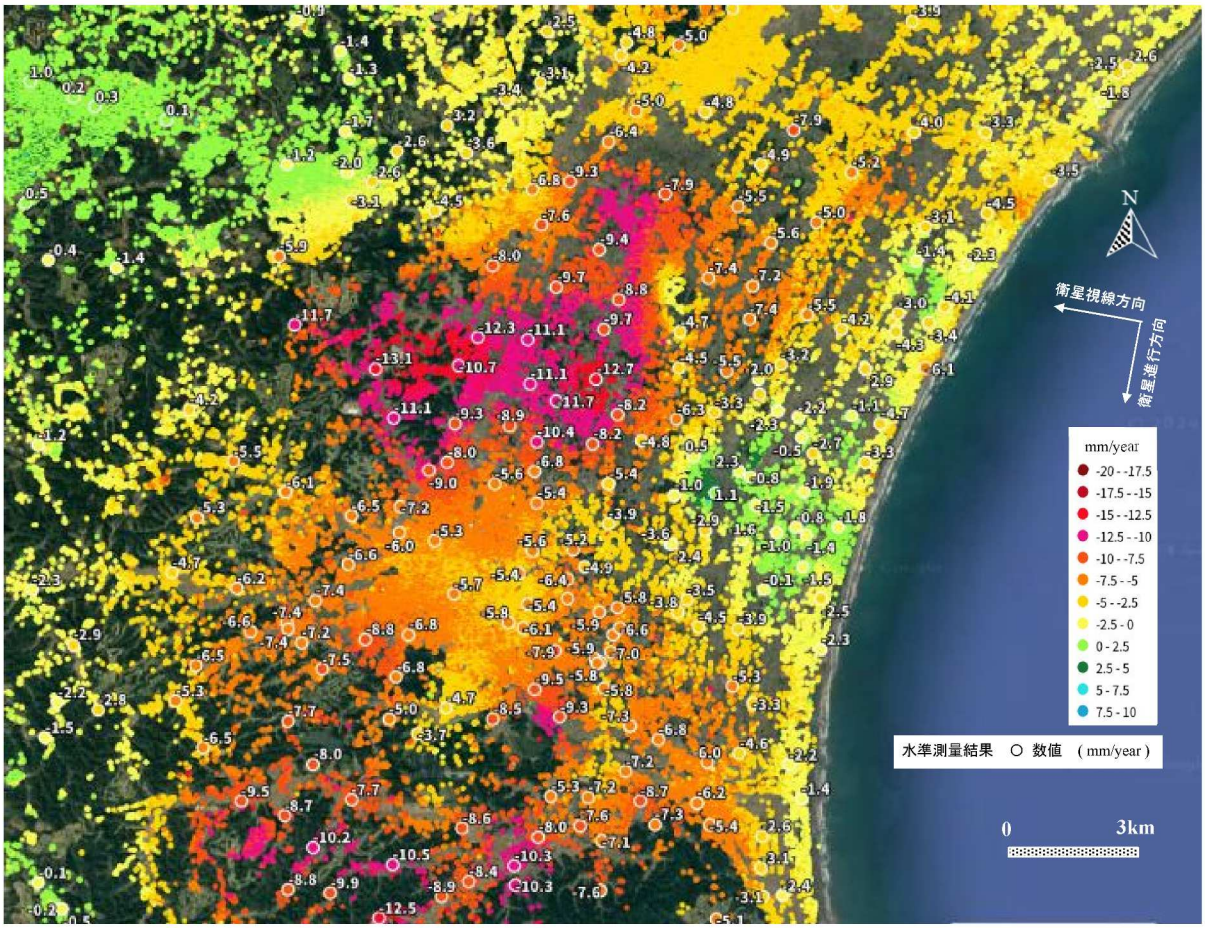


図-6.13　2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位と水準測量結果（中部）

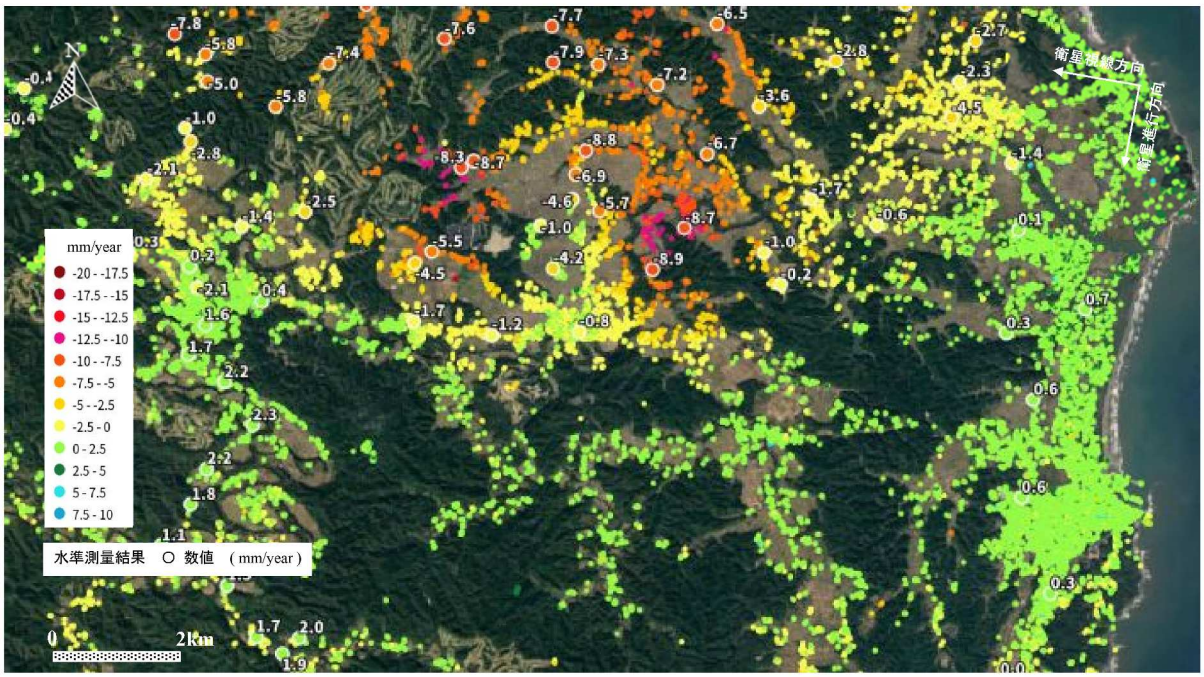


図-6.14　2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位と水準測量結果（地盤沈下している南部の北部）

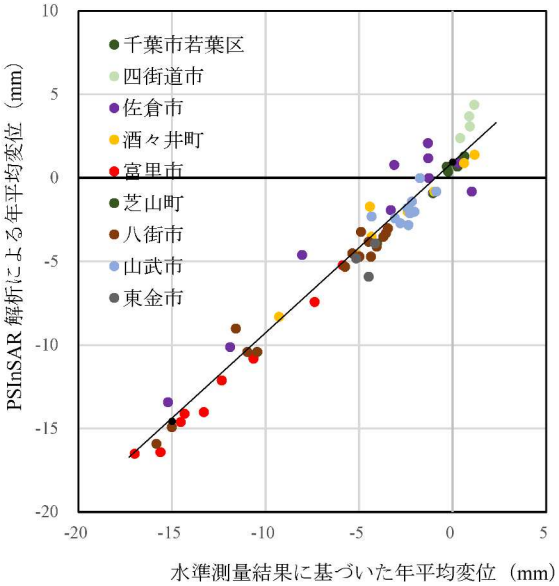


図-6.15 2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位と水準測量値の関係（北部）

表-6.1　PSInSAR 解析による年平均変位と水準測量による年平均変位の相関係数と二乗平均平方根誤差

領域	相関係数	二乗平方根誤差
北部	0.98	1.0 mm/年
中部	0.96	0.9 mm/年
南部	0.95	1.0 mm/年

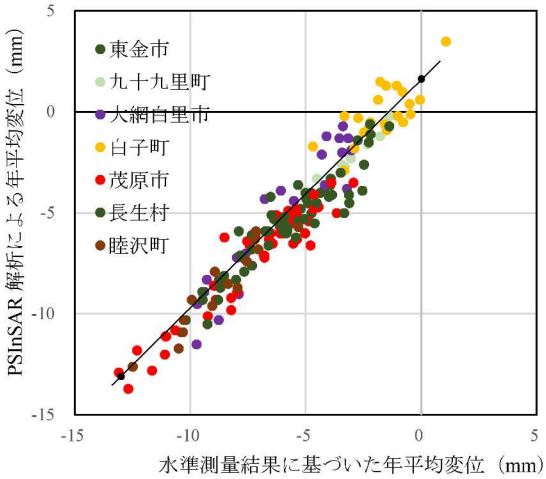


図-6.16 2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位と水準測量値の関係（中部）

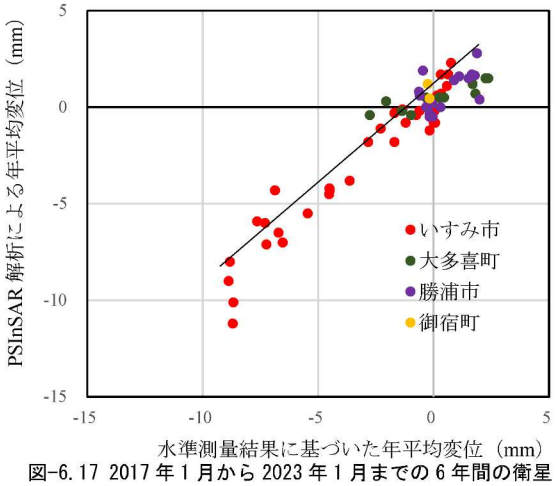


図-6.17 2017 年 1 月から 2023 年 1 月までの 6 年間の衛星視線方向の年平均変位と水準測量値の関係（南部）

6.5.2　鉛直変位の経時変化

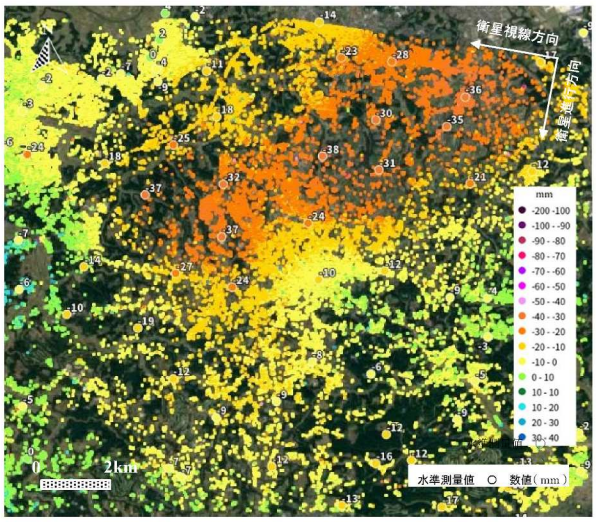
2017 年 1 月を基準にして，2019 年 1 月から 2024 年 1 月までの 1 年ごとの PSInSAR 解析による鉛直方向変位を水準測量値と合わせて**図-6.18～6.20** に示す．PSInSAR 解析による鉛直方向変位は衛星視線方向の変位に入射角を考慮して 1.23 倍としている．解析による各年 1 月の変位は 1 月の最初のデータと前後 2 データの平均値を用いた．例えば，2019 年 1 月の鉛直変位は 2018 年 12 月 22 日，2019 年 1 月 3 日，15 日の平均値である．なお，基準値の 2017 年 1 月の鉛直変位は 2016 年 12 月 8 日，2017 年 1 月 1 日，25 日の平均値，2024 年 1 月の鉛直変位は 2023 年 12 月 8 日，20 日，2024 年 1 月 1 日の平均値を用いた．**図-6.21～23** に示す PSInSAR 解析による経時変化は移動平均値（3 データの平均値）を用い，PSInSAR 解析ではマスターを 2020 年 4 月 3 日としているので，2020 年 1 月と 2021 年 1 月の水準測量結果から 2020 年 4 月の水準測量値を線形補間して推定して補正した．水準測量値については，毎年 1 月 1 日を基準日としており，この前後 2 カ月間程度の間に測量を実施しており，基準日の値に補正されている．

北部の PSInSAR 解析による 1 年間隔の鉛直変位は，**図-6.18** に示すとおり，富里市，八街市などの変位を示しており，各年で地盤沈下量が大きくなっている箇所ともに，その変位量も水準測量結果と整合している．**図-6.18(f)**2024 年 1 月に示す水準測量箇所（9 箇所）での PSInSAR 解析による 7 年間の経時変化を，毎年 1 回の水準測量値と合わせて**図-6.21** に示す．最も沈下量が大きい N2-3 の 6 年間の水準測量値は-126mm，PSInSAR 解析による解析値は-119mm で，誤差は 7mm である．各箇所の変位を精度よく計測できており，二乗平均平方根誤差は鉛直方向は 7.1 mm，直接計測している衛星視線方向では 5.8 mm である．

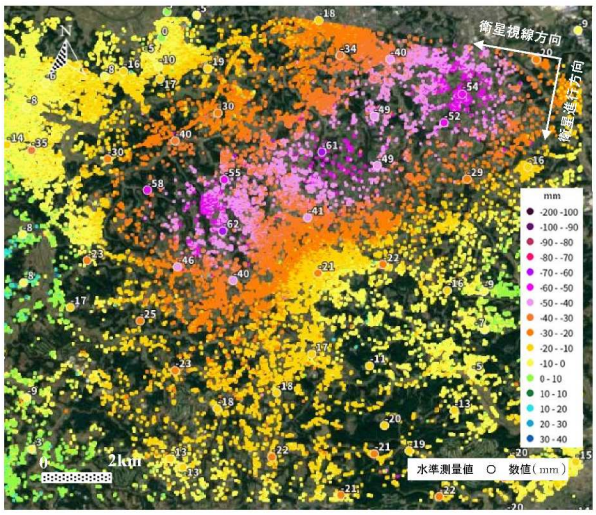
中部の PSInSAR 解析による 1 年間隔の鉛直変位は，**図-6.19** に示すとおり，中央部の大網白里市，茂原市，長南町，睦沢町などの地盤沈下量が大きい箇所では，各年で地盤沈下量が大きくなっており，その箇所とともにその変位量も水準測量結果と整合している．**図-6.19(f)** 2024 年 1 月に示す水準測量箇所（16 箇所）での PSInSAR 解析による 7 年間の経時変化を毎年 1 回の水準測量値と合わせて**図-6.22** に示す．最も沈下量が大きい C1-4 の 6 年間の水準測量値は-91mm，PSInSAR 解析による解析値は-87 mm で，誤差は 4mm である．各箇所の変位を精度よく計測できており，二乗平均平方根誤差は鉛直方向は 6.1 mm，衛星視線方向では 5.1 mm である．

南部の PSInSAR 解析による 1 年間隔の鉛直変位は，**図-6.20** に示すとおり，いすみ市の地盤沈下量が大きい箇所では，各年で地盤沈下量が大きくなっており，その箇所とともにその変位量も水準測量結果と整合している．**図-6.20(f)** 2024 年 1 月に示すいすみ市の水準測量箇所（8 箇所）での PSInSAR 解析による 7 年間の経時変化を毎年 1 回の水準測量値と合わせて**図-6.23** に示す．最も沈下量が大きい S1-3 の 6 年間の水準測量値は-66mm，PSInSAR 解析による解析値は-63 mm で，誤差は 3mm である．各箇所の変位を精度よく計測できており，RMSE は鉛直方向は 5.2 mm，衛星視線方向では 4.3 mm である．

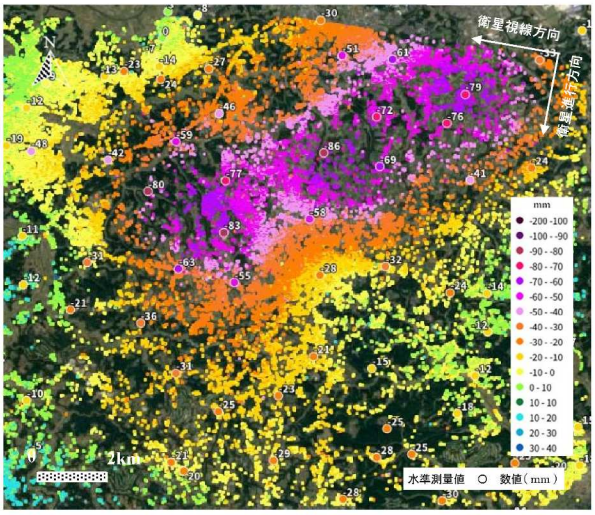
図-6.24 は PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値の関係を示しており，変位が大きくなっても，その変位の計測精度はあまり変わらない．変位が生じていない 2017 年 1 月のデータのばらつきが大きいが，2016 年 12 月 8 日，2017 年 1 月 1 日のデータが VV のみの異なるデータになっていることに関係する可能性があるかもしれない．PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値の相関係数と RSME は**表-6.2** に示すとおりであり，衛星視線方向の誤差は 5 mm 程度であり，鉛直変位の推定精度は入射角によるが，本ケースでは鉛直変位は衛星視線方向の約 1.2 倍となることから誤差は 6 mm 程度となる．



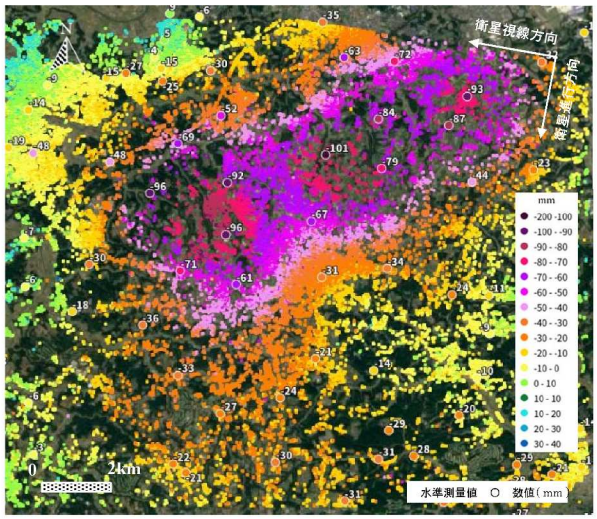
(a) 2019 年 1 月



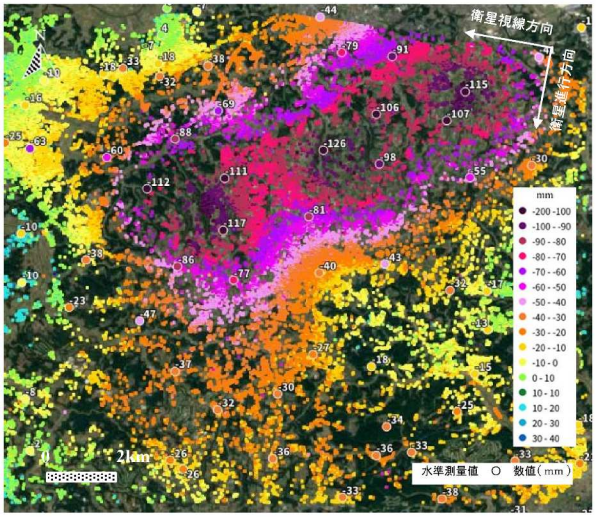
(b) 2020 年 1 月



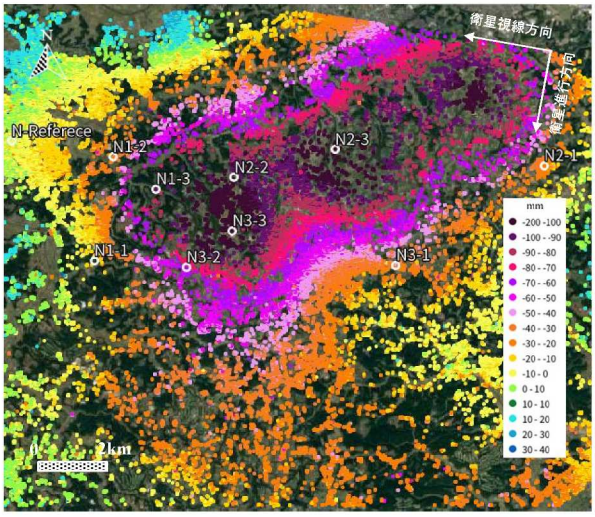
(c) 2021 年 1 月



(d) 2022 年 1 月

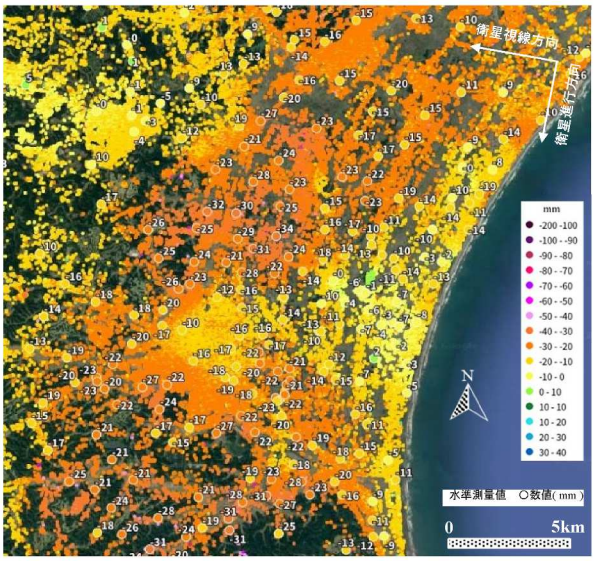


(e) 2023 年 1 月

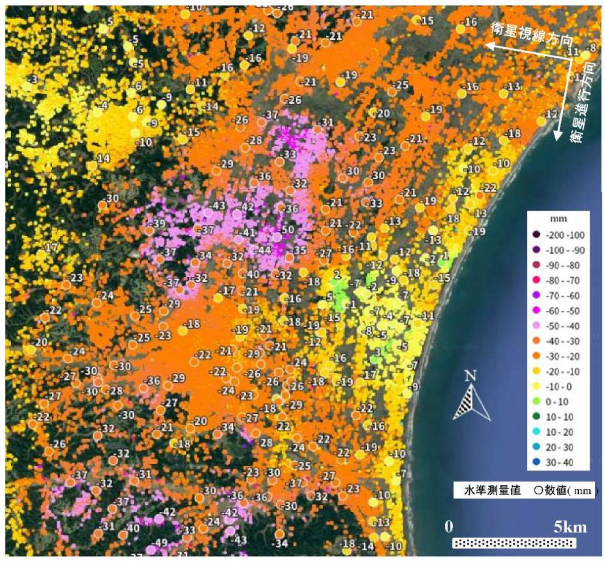


(f) 2024 年 1 月

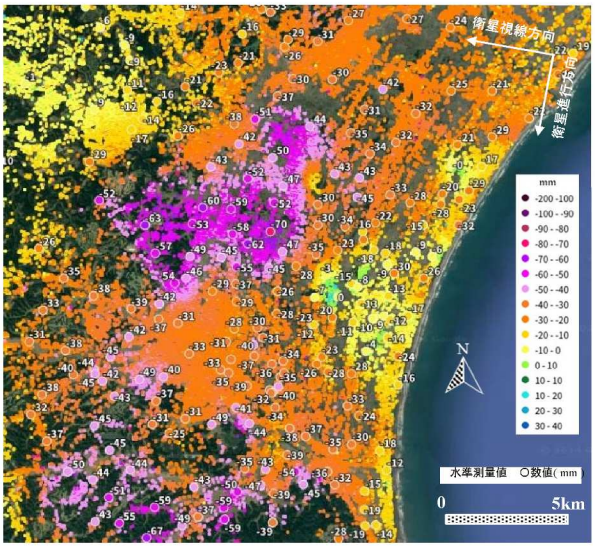
図-6.18 PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値（北部）



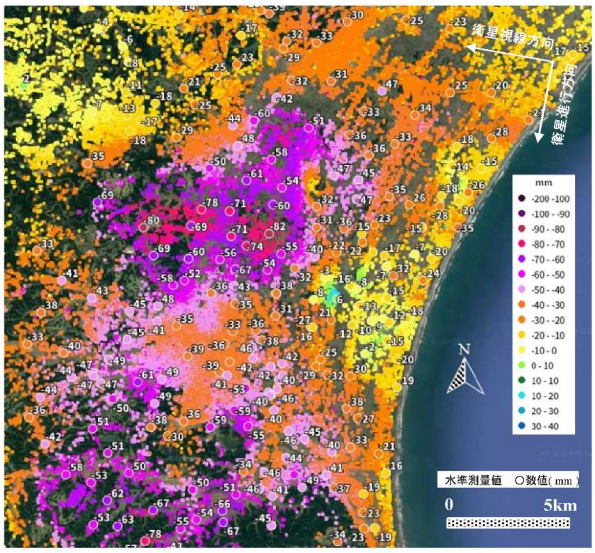
(a) 2019 年 1 月



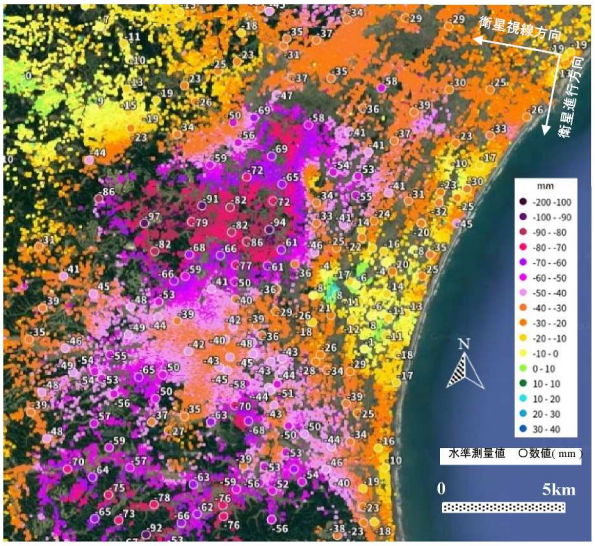
(b) 2020 年 1 月



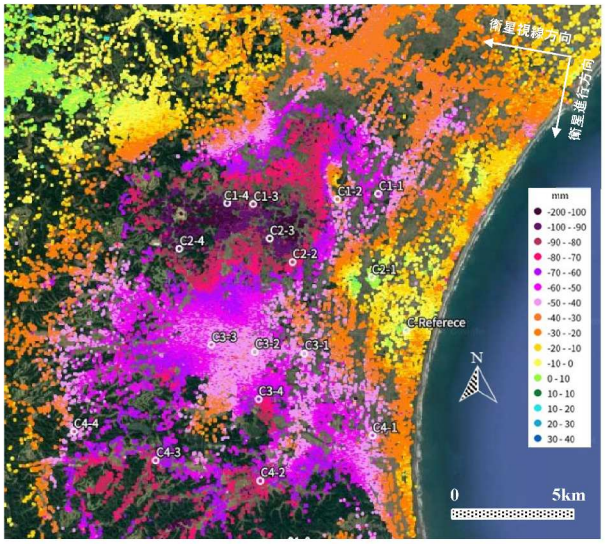
(c) 2021 年 1 月



(d) 2022 年 1 月

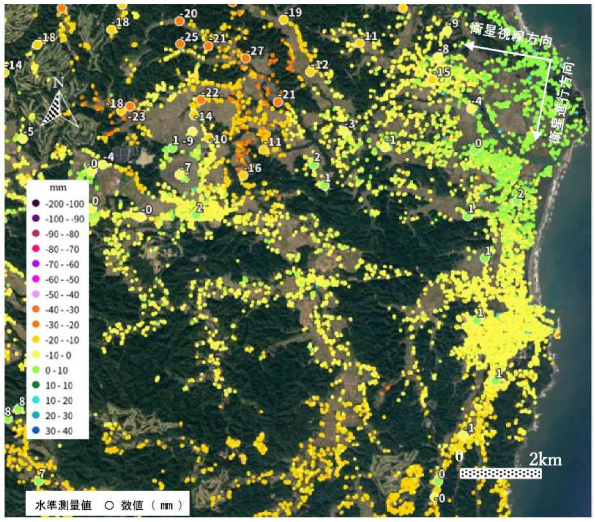


(e) 2023 年 1 月

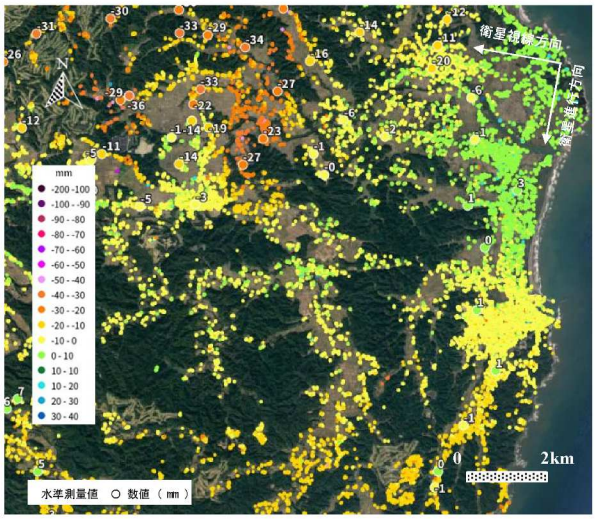


(f) 2024 年 1 月

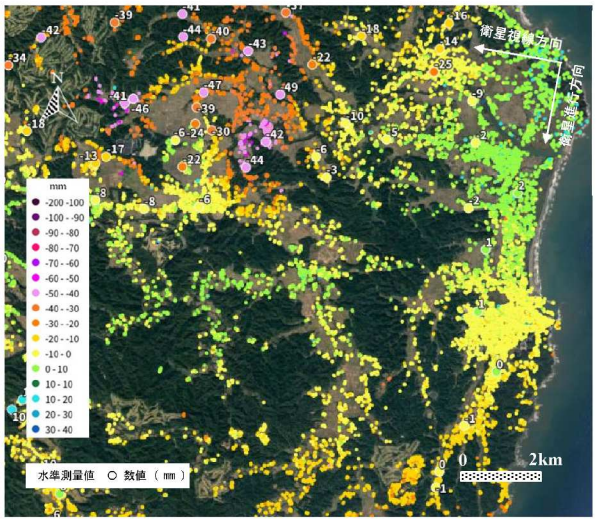
図-6.19 PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値（中部）



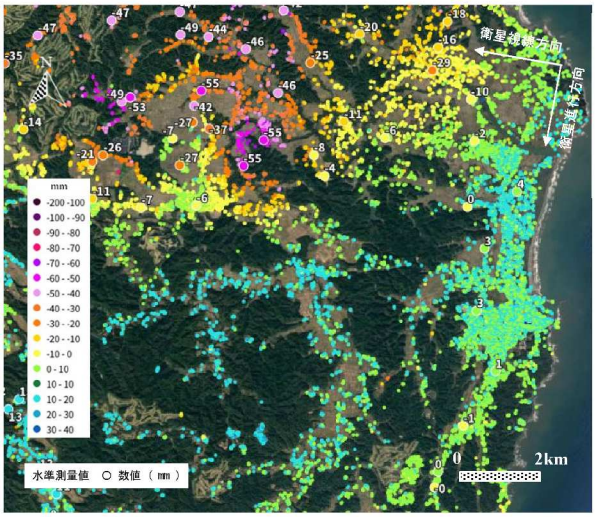
(a) 2019 年 1 月



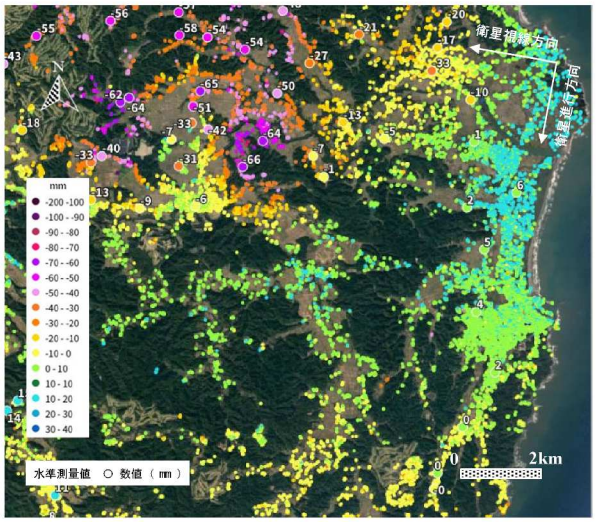
(b) 2020 年 1 月



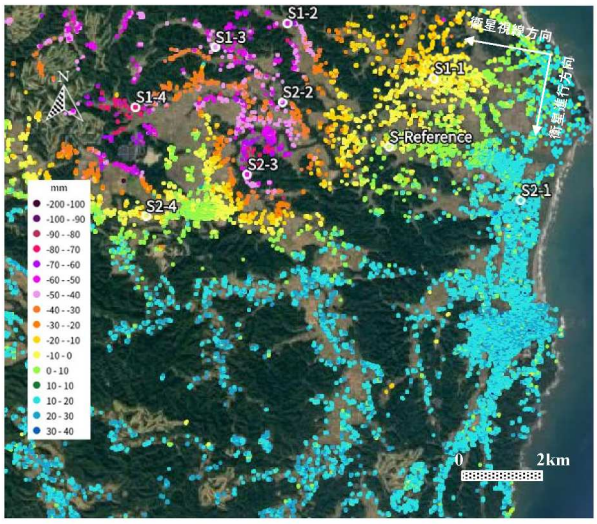
(c) 2021 年 1 月



(d) 2022 年 1 月



(e) 2023 年 1 月



(f) 2024 年 1 月

図-6.20　PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値（南部）

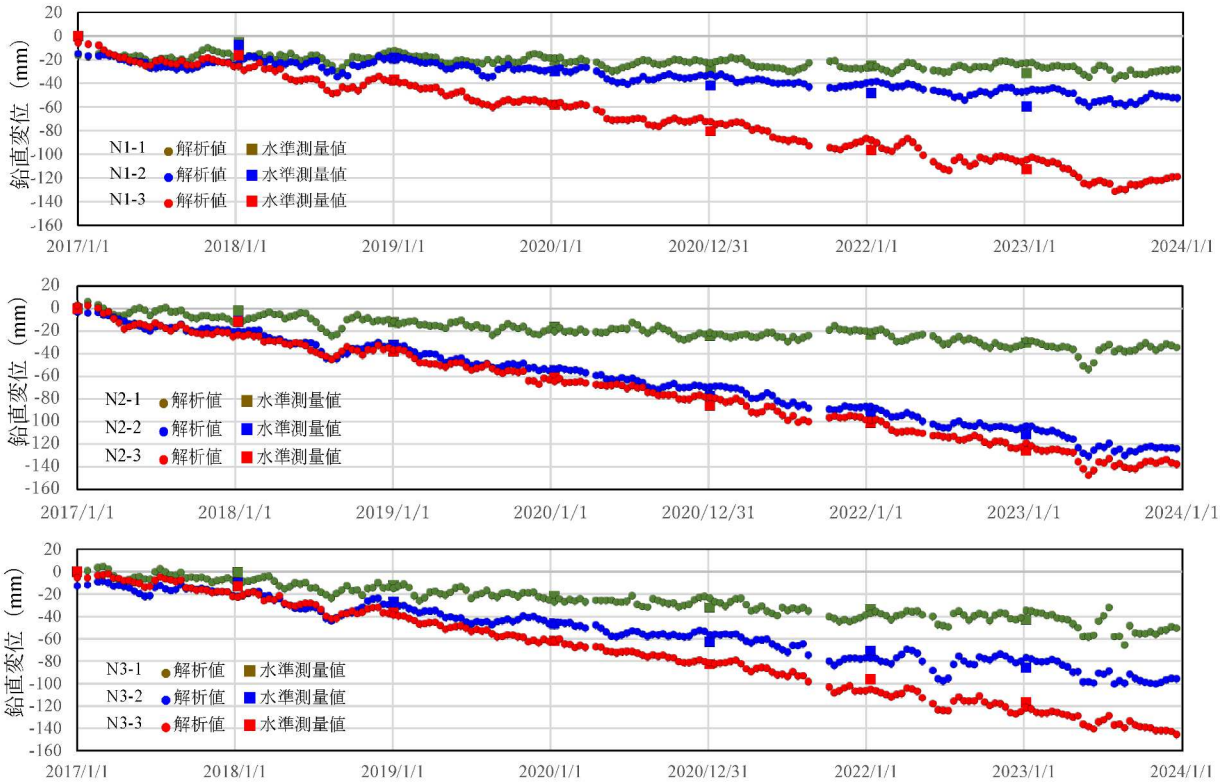


図-6.21　PSInSAR 解析による鉛直変位の経時変化と水準測量値（北部）

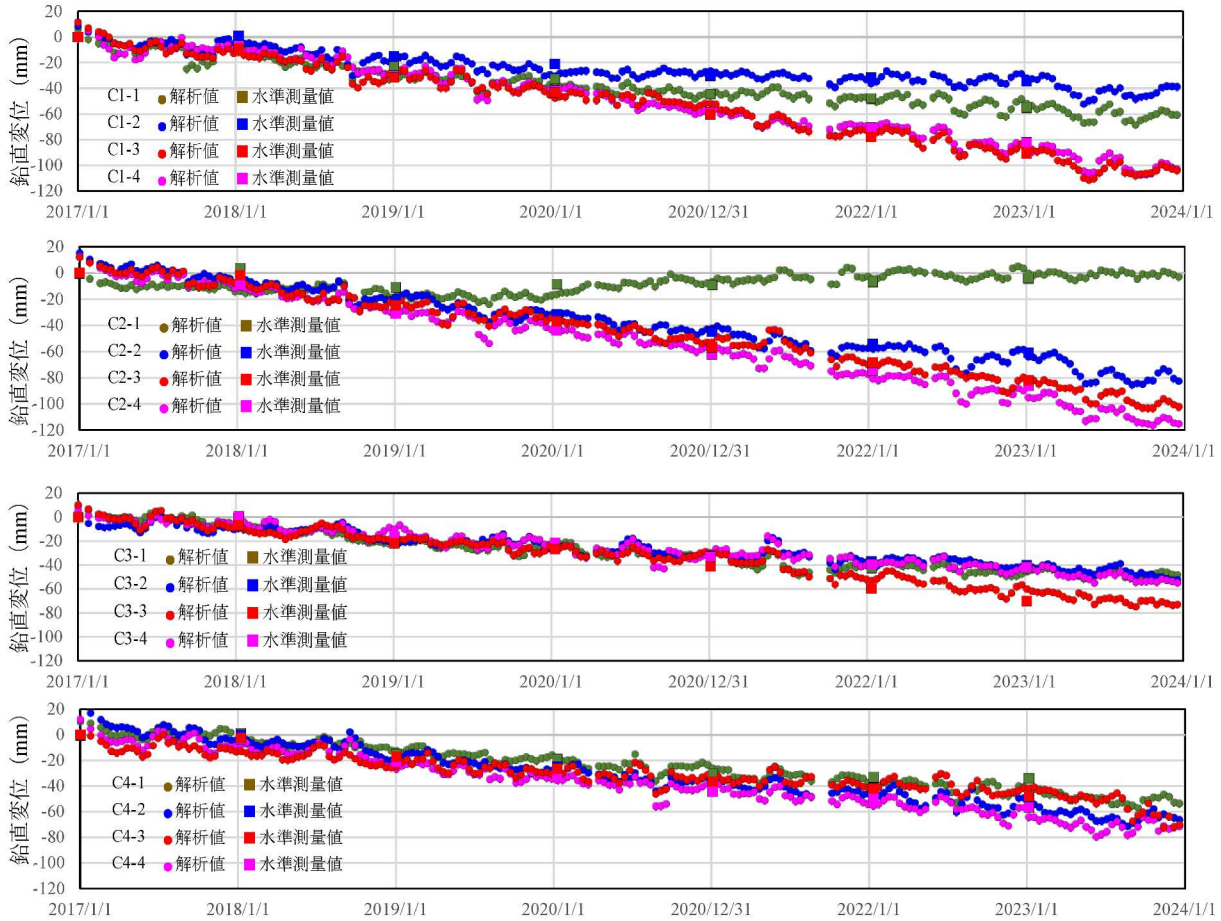


図-6.22　PSInSAR 解析による鉛直変位の経時変化と水準測量値（中部）

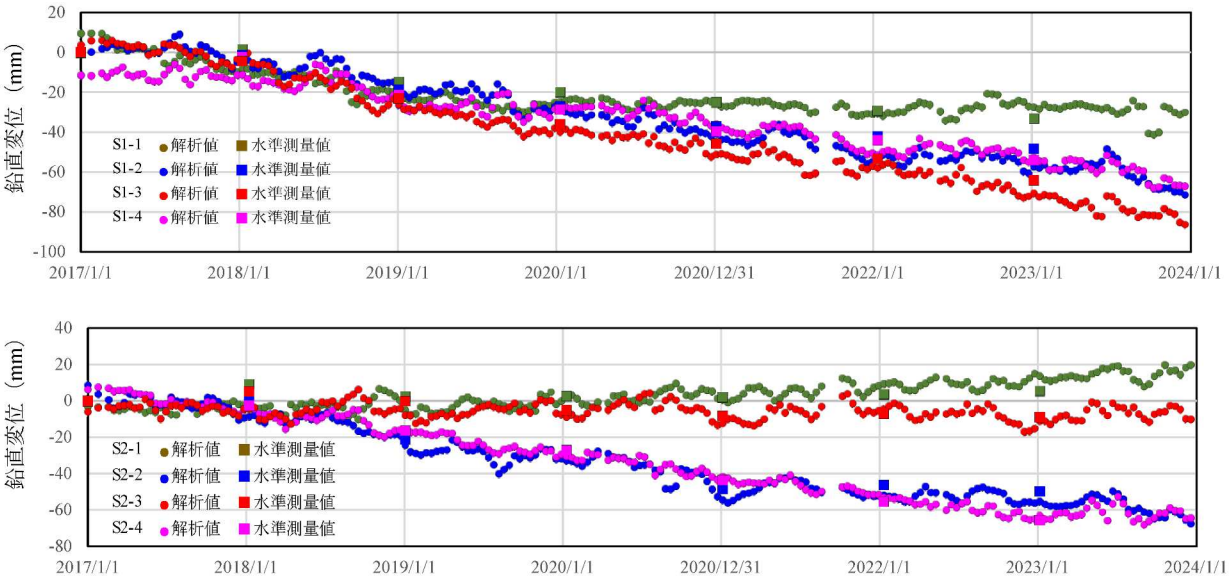


図-6.23　PSInSAR 解析による鉛直変位の経時変化と水準測量値（南部）

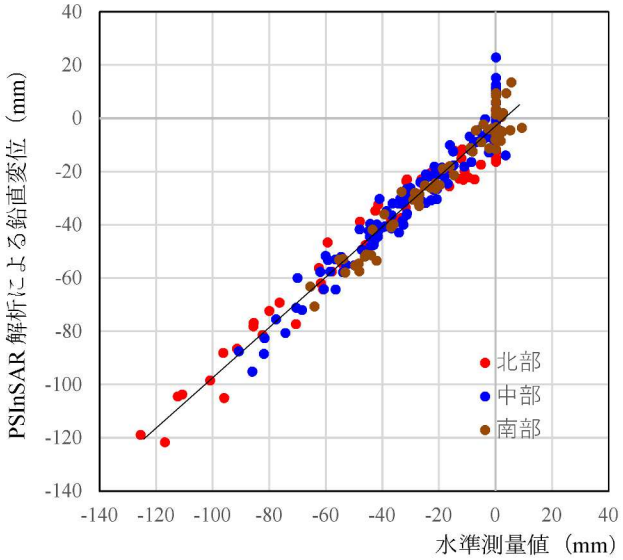


図-6.24　PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値の関係

表-6.2　PSInSAR 解析による鉛直変位と水準測量値の相関係数と二乗平均平方根誤差

領域	相関係数	二乗平均平方根誤差 (mm)	
		鉛直方向	衛星視線方向
北部	0.97	7.1	5.8
中部	0.98	6.2	5.1
南部	0.97	5.2	4.3
全体	0.97	6.4	5.2

6.6　既往研究との比較

衛星 SAR データを用いて，**表-6.3** に示す解析手法により千葉県の地盤沈下量を計測し，水準測量結果と比較して，年平均沈下量の計測精度を検証している既往の研究と本論文の計測精度を比較する．

文献 7 の地盤沈下観測等における衛星活用マニュアでは，ALOS，ALOS-2 SAR データを用いて，1 ペアの干渉解析，スタッキング解析，2.5 次元解析で，また，Sentinel-1 SAR データを用いて，1 ペアの干渉解析，スタッキング解析で精度検証を実施しており，その結果を**図-6.25～6.27**，**表-6.4** に示す．文献 9 の南行，北行軌道の両軌道の ALOS SAR データを用いたスタッキング解析，PSInSAR 解析から 2.5 次元解析により精度検証した結果を**図-6.29**，**表-6.4** に示す．文献 10 の ALOS-2 SAR データを用いた SBAS 解析での精度検証結果を**図-6.28**，**表-6.4** に示す．本論文での年平均地盤沈下量の計測精度の結果を**図-6.30**，**表-6.4** に示す．

文献 13 では千葉県においても SBAS 解析を実施して長期の変位の計測をしているが，水準測量結果との比較がないこと，また，文献 16，17 では本論文と同様 PSInSAR 解析による解析を実施しているが，測量値と比較した数値が示されていないので，ここでの比較対象としていない．なお，文献 24 では本論文と異なり，基準点を 1 箇所設定している．

表-6.4 に示すように，2 時期のデータでだけでは，大気遅延などの誤差が多いが，多くのデータを用いること，さらに，2.5 次元解析を実施することで，精度が向上することが確認できる．

ALOS SAR データを用いた南行軌道 6 ペアのスタッキング解析結果では，標準偏差が 2.07mm/year であるが，北行軌道の 6 ペアのスタッキング解析結果も用いた 2.5 次元解析では，1.65mm/year と，ここで比較する既往の研究の中では最も精度が高い．決定係数は 0.868 から 0.908 に上がっている．

本論文では年平均沈下量の RMSE は 1.1mm/year，決定係数は 0.949 と高い精度で計測できており，1 方向のみの Sentinel-1 SAR データではあるが，多くのデータを用いて PSInSAR 解析を実施し，一定の領域を定めてその領域内の変位が小さい測量箇所を基準点とすることで高い精度の計測ができていると考えられる．

ALOS-2 SAR データについては，同一条件で観測される期間の間隔が 3～4 カ月であるので，PSInSAR 解析を行うために必要な十分なデータが得られにくいものの，植生の影響を受けにくいというメリットがある．2024 年 7 月に打ち上げられた ALOS-4 では，観測幅が約 200km に拡大することで，Sentinel-1 と同程度の年 20 回程度の高頻度で観測データが得られる．この ALOS-4 SAR データを用いた PSInSAR 解析を実施することで，ALOS，ALOS-2 SAR データに用いる場合に比べ，地盤沈下量の計測精度の更なる向上が期待される．

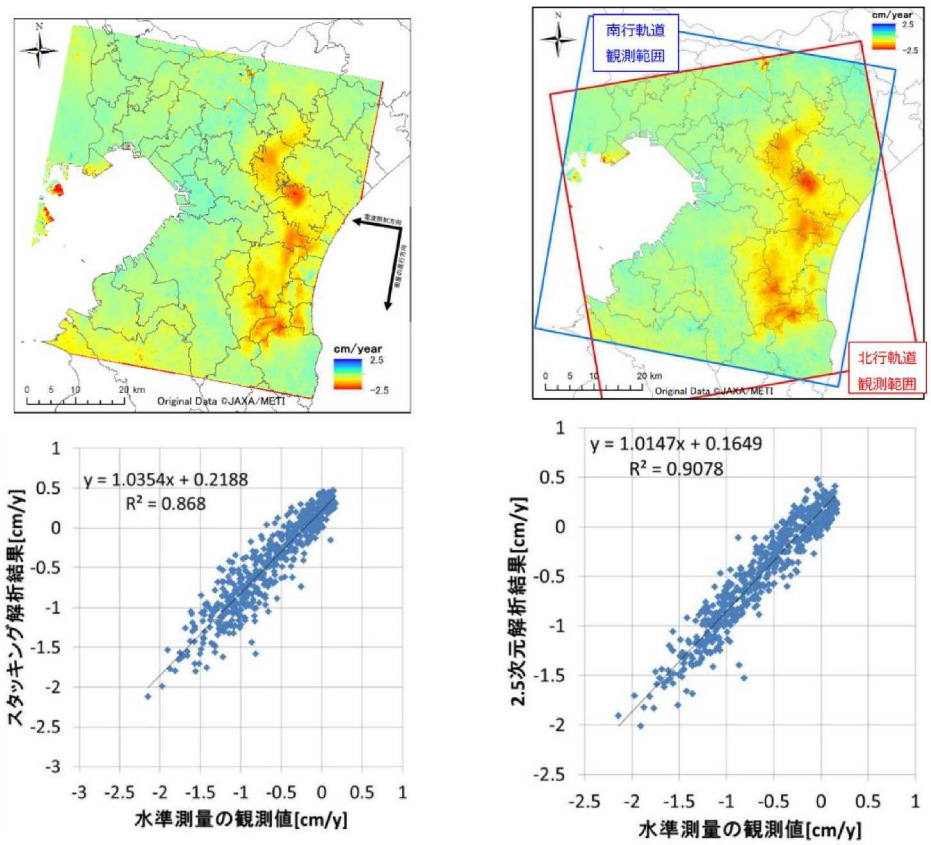
表-6.3　SAR 干渉解析手法の概要と特徴

解析手法	概要	特徴
1 ペアの干渉解析	2 時期の衛星データ（1 ペア）による干渉 SAR 解析.	利点：2 時期データだけで解析できる. 欠点：大気遅延などの誤差が多く含まれる.
スタッキング解析	複数枚の干渉ペアをスタックすることで，大気遅延の誤差などを低減し精度の向上を図る.	利点：大気遅延などの誤差が低減できる. 欠点：同一衛星軌道で複数回の観測が必要となり，より多くのデータが必要となる.
2.5 次元解析	北行，南行軌道の異なる軌道の観測データを用いることで，東西方向の水平変位と鉛直変位に分離し精度を向上させる.	利点：大気遅延などの誤差がさらに低減できる．水平成分を除き，鉛直方向の変動成分を抽出できる. 欠点：異なる軌道での衛星データが必要となり，解析可能な範囲が狭くなる.
SBAS 解析	短い垂直基線長及び短い観測間隔のデータペアを多数作成して，各観測間の変動量を精度よく推定する解析手法である.	利点：多くのデータを用いることで，大気遅延などの誤差を低減できる. 欠点：PSInSAR 解析に比べると精度が劣る可能性がある.
PSInSAR 解析	恒久的な散乱点（PS 点）に着目して，PS 点の時系列変化を精度よく推定する解析手法である.	利点：多くのデータ（20 シーン以上）を用いることで，大気遅延などの誤差を低減できる. 欠点：恒久散乱点でしか変位の把握ができない.

注）文献 9 を加筆

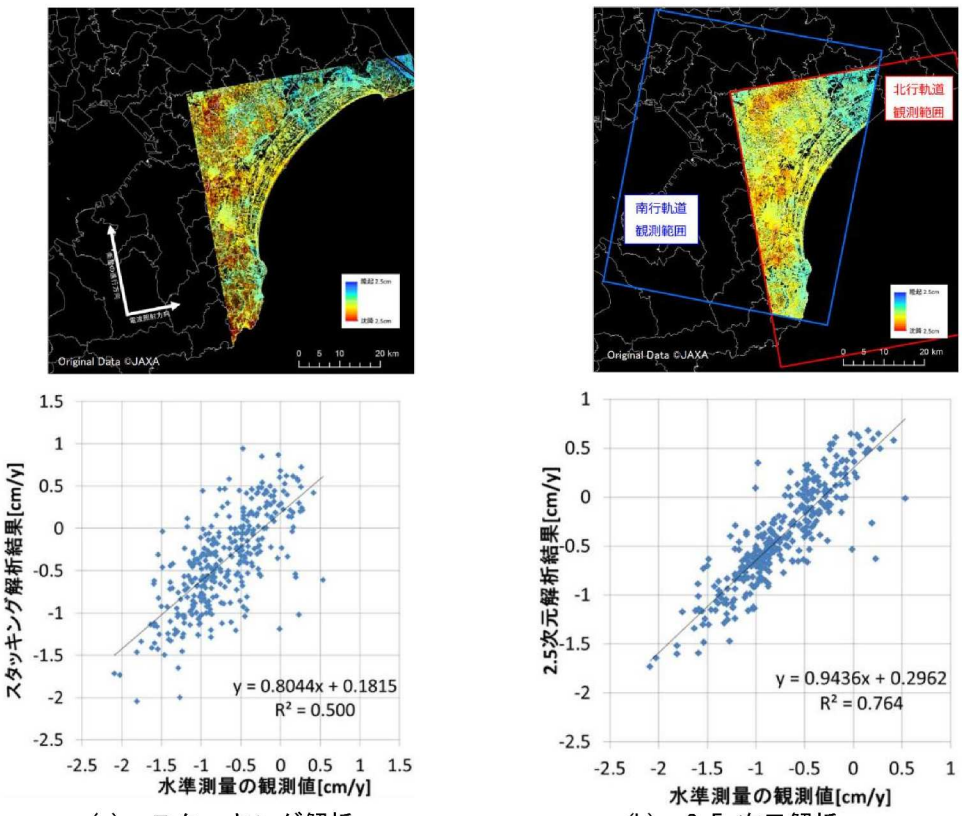
表-6.4　SAR 干渉解析の地盤沈下計測精度の検証結果 [7),9),10)]

出典	解析手法	データ	概要	計測精度
文献 7	1 ペアの干渉解析	ALOS	南行軌道：6 ペア(2006～2010) 北行軌道：6 ペア(2006～2011)	決定係数：　0.426～0.665 標準偏差：　2.75～7.44mm/year
		ALOS-2	南行軌道：4 ペア(2015～2016) 北行軌道：6 ペア(2014～2016)	決定係数　：0.016～0.636 標準偏差：　4.22～14.27mm/year
	スタッキング解析	ALOS	南行軌道の全 6 ペア平均値（11 シーン）	決定係数：　0.868 標準偏差：2.07mm/year
		ALOS-2	北行軌道の全 3 ペア平均値（5 シーン）	決定係数　：R^2=0.500 標準偏差：3.99mm/year
	スタッキング解析 2.5 次元解析	ALOS	北行軌道の 6 ペアスタッキング結果と南行軌道の 6 ペアスタッキング結果（計 23 シーン）	決定係数　：0.908 標準偏差：1.65mm/year
		ALOS-2	南行軌道の 1 ペアスタッキング結果と北行軌道の 3 ペアスタッキング結果（計 7 シーン）	決定係数：　R^2=0.764 標準偏差：2.87mm/year
	1 ペアの干渉解析	Sentinel-1	南行軌道：7 ペア（2014～2016）	決定係数　：0.080～0.487 標準偏差：4.59～10.04mm/year
	スタッキング解析	Sentinel-1	南行軌道：31 シーン（2014～2016）	決定係数：　0.654 標準偏差：　3.07mm/year
文献 9	スタッキング解析 2.5 次元解析	ALOS	南行軌道：12 ペア（2006～2011） 北行軌道：12 ペア（2006～2011）	残差の RMS：1.9 mm/year
	PSInSAR 解析 2.5 次元解析	ALOS	北行軌道：26 シーン（2006～2011） 南行軌道：25 シーン（2006～2010）	残差の RMS：2.6 mm/year
文献 10	SBAS 解析	ALOS-2	北行軌道：15 シーン（2015～2019）	RMSE：2.0 mm/year （修正前 6.8 mm/year）
本論文	PSInSAR 解析	Sentinel-1	南行軌道：208 シーン（2017～2021）	相関係数：0.974，決定係数：0.949 RMSE：1.1mm/year



(a)　スタッキング解析　　(b)　2.5 次元解析

図-6.25　ALOS による精度検証結果 [7)]



(a)　スタッキング解析　　(b)　2.5 次元解析

図-6.26　ALOS-2 による精度検証結果 [7)]

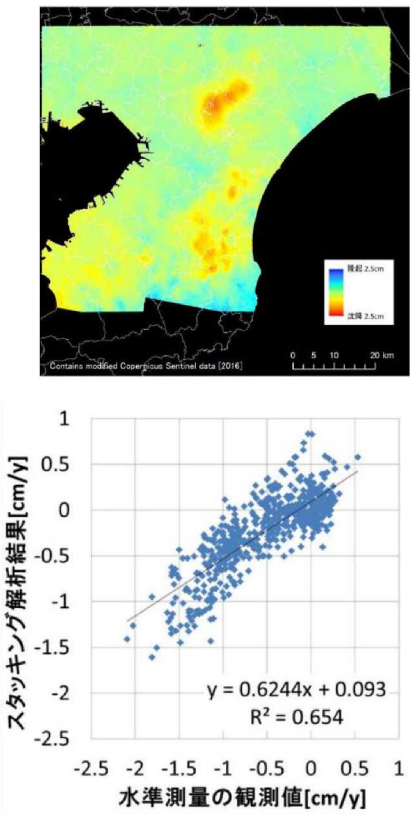


図-6.27　Sentinel-1 による精度検証結果 [7)]

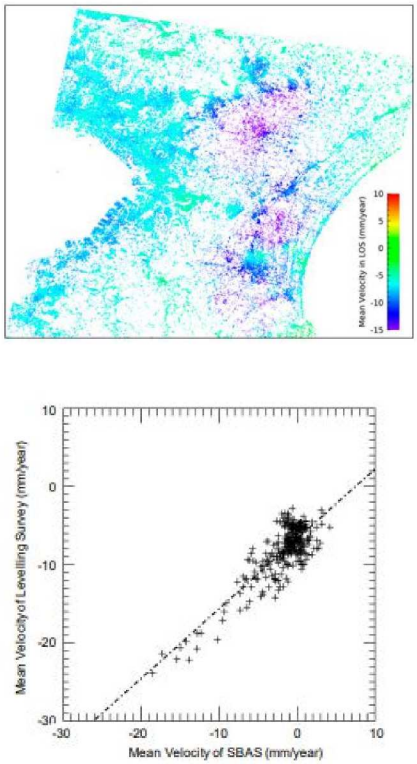
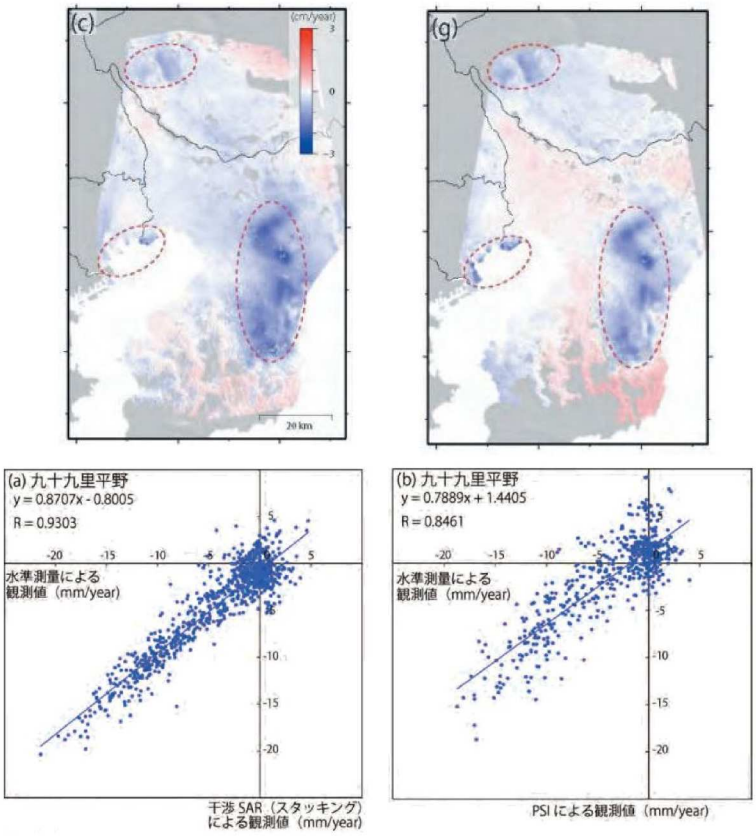


図-6.28　SBAS 解析による精度検証結果 [10)]



(a)　スタッキング解析　　(b)　PSInSAR 解析

図-6.29　ALOS による精度検証結果 [9)]

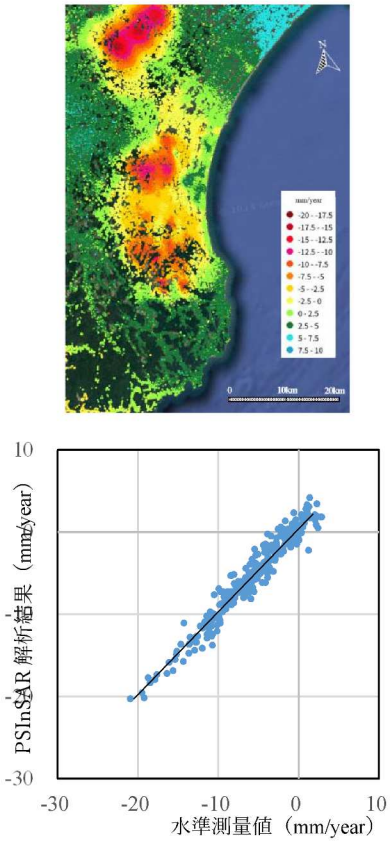


図-6.30　本論文の精度検証結果

6.7 まとめ

千葉県内では水溶性天然ガス溶存地下水の揚水が多い地域があり，近年，なお地盤沈下が生じている千葉県東部を検討対象地域として，PSInSAR 解析を用いて広域な地盤変動モニタリングを実施した．衛星 SAR データは，同一条件で観測したデータが 12 日間隔で得られる Sentinel-1 SAR の南行軌道のデータを用いた．PSInSAR 解析による鉛直変位と毎年 1 回実施されている水準測量値を比較して，PSInSAR 解析による地盤沈下量の計測精度を検証した．

PSInSAR 解析での人工構造物や植生のない岩石主体の箇所で得られる PS 点は，南部の植生が多い箇所で広域で得られない箇所はあるものの，地盤沈下が生じている箇所では，一定程度の密度で人工構造物などによる PS 点が得られ，広範囲での面的な変位計測ができた．

水平地盤での地盤沈下の現象のように，地殻変動を除くと鉛直方向のみ変位している場合は，地殻変動が同程度で，計測誤差をなるべく低減できるように，一定の領域を定め，その領域内において変位が測量などで把握できている箇所の基準点を適切に設定することで，一方向からの SAR データでも精度の高い計測が可能である．本論文では千葉県の東部で 5 箇所を基準点として設定して，PSInSAR 解析の変位を基準点で補正して，地殻変動などの差の影響を低減させ，計測精度を確保した．

PSInSAR 解析結果と水準測量結果を比較した結果，PSInSAR 解析による衛星視線方向の変位，年平均変位の RMSE は，比較的広範囲の領域ごとに基準値を設定しても，5mm 程度，1mm/年程度であり，PSInSAR 解析により地盤沈下量を mm オーダーの高い精度で計測できることが確認できた．また，鉛直方向の変位，年平均変位の計測誤差については，衛星の入射角によるが，本論文での南行軌道の Sentinel-1 SAR データの千葉県東部での入射角から，鉛直変位は衛星視線方向の約 1.2 倍となることから，6mm 程度，1.2mm/年程度となる．

日本では広域な地盤沈下は沈静化する傾向にあるものの，国や地方公共団体では水準測量により地盤沈下監視を継続しており，測量には多くの費用や人員の確保が必要になる．人工構造物がある程度の密度である地域では，PSInSAR 解析により広域で一定程度の密度で PS 点が得られ，地盤沈下を広域で面的に精度よくモニタリングできることから，水準測量と併用するなど地盤沈下監視の合理化ができる余地があると思われる．

エネルギー施設関連での地盤沈下モニタリングは，電力流通設備用のシールドトンネル構築などによる地表面への影響，水溶性天然ガス溶存地下水の揚水による地盤沈下，地熱発電での熱水くみ上げによる地表面への影響などの変状の監視が必要な場合へ適用できる可能性がある．

衛星 SAR データを用いた PSInSAR 解析による地盤沈下モニタリングは，エネルギー施設関連での地盤沈下モニタリングにおいても，広域で面的に一定の間隔で変位の把握ができる，現場の作業がないことなどのメリットがあり，測量などと組み合わせて合理的な地盤沈下モニタリングが実施できる可能性がある．

【参考文献】

1) 環境省 水・大気環境局：令和 3 年 全国の地盤沈下の概況，2023 ．[Water and Atmospheric Environment Bureau, Ministry of the Environment : Overview of land subsidence in Japan in 2021, 2023.]
2) 千葉県環境生活部水質保全課：令和 3 年 千葉県における地盤沈下の概況について，報道資料，2022．[Water Quality Conservation Section, Environment and Living Department, Chiba Prefecture: 2021 : Overview of land subsidence in Chiba Prefecture, Press Release, 2022.]
3) 千葉県環境生活部水質保全課：令和 4 年 千葉県における地盤沈下の概況について，報道資料，2023 ．[Water Quality Conservation Section, Environment and Living Department, Chiba Prefecture: 2021 : Overview of land subsidence in Chiba Prefecture, Press Release, 2023.]
4) 千葉県：千葉県水準測量成果表（基準日:令和 5 年 1 月 1 日），https://www.pref.chiba.lg.jp/suiho/jibanchinka/torikumi/seikaomote.html . [Chiba Prefecture : Chiba Prefecture Level Survey Table of Results (Reference date: 1 January 2023).]
5) 金子信行：千葉県の天然ガス・ヨウ素資源，地質ニュース 605 号，2005 年 1 月，[Kaneko, N. : Natural gas and iodine resources in Chiba Prefecture, Japan, Geological News No. 605, 2005]
6) 国土交通省関東地方整備局東京第二営繕事務所：施設整備・管理のための天然ガス対策ガイドブック，2007. [Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism : Guidebook on natural gas measures for facility development and management, 2007.]

7) 環境省水・大気環境局土壌環境課：地盤沈下観測等における衛星活用マニュアル，2017．[Soil Enviroment Division, Water and Air Environment Bureau, Ministry of the Environment, Japan : Manual for Satellite Applications in Land Subsidence Observation, etc., 2017.]
8) 小林知勝，森下遊，山田晋也：干渉 SAR 時系列解析プロトタイプシステムの開発，国土地理院時報，No.130, 2018．[Kobayashi, T., Morishita, Y. and Yamada, S. : A Prototype System for InSAR Time Series Analysis, Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan, No.130, 2018.]
9) 山中雅之，森下 遊，大坂優子：干渉 SAR 時系列解析による地盤沈下の検出，国土地理院時報，No.124，2013． [Masayuki Y., Yu M. and Yuko O. : Detection of ground subsidence by InSAR time series analysis，Bulletin of the Geospatial Information Authority of Japan，No.124，2013.]
10) Nonaka, T., Asaka, T., Iwashita, K. and Ogushi, F. : Evaluation of the Trend of Deformation around the Kanto Region Estimated Using the Time Series of PALSAR-2 Data, Sensors 2020, 20, 339, 2020.
11) 出口知敬，六川修一，松島 潤: 干渉 SAR の時系列解析による長期地盤変動計測．日本リモートセンシング学会誌, 29, 412-428，2019．[Deguchi, T., Rokugawa, S. and Matushima, J. : Long-term Ground Deformation Measurement by Time Series Analysis for SAR Interferometry, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, 29, 412-428, 2019.]
12) 石塚師也，松岡俊文: ALOS/PALSAR データを用いた PS 干渉 SAR 解析の精度評価—千葉県九十九里地域の地表変動を例として．日本リモートセンシング学会誌, 36, 328-337，2016．[Ishituka, K. and Matuoka, T. : Accuracy Evaluation of Persistant Scatterer Interferometory Using ALOS/PALSAR Data : A Case Study of Surface Displacement in the Kujyukuri Plain, Chiba Prefecture, Journal of the Remote Sensing Society of Japan, 36, 328-337, 2016.]
13) Morishita Y. : Nationwide urban ground deformation monitoring in Japan using Sentinel-1 LiCSAR products and LiCSBAS, Morishita Progress in Earth and Planetary Science, 2021.
14) 下里航大，浮田宗泊：深層学習を用いた PSInSAR 解析の対流圏遅延誤差除去，情報処理学会研究報告，No.32，2020．[Shimosato, K. and Ukita, S. : Tropospheric Delay Error Removal in PSInSAR Analysis Using Deep Learning, IPSJ SIG Technical Report, No.32, 2020.]
15) 楠瀬智也，須崎 純一：X バンド画像を活用した都市部における面的な地盤変動モニタリングの検証，土木学会論文集，Vol.78，No.1，2022．[Kusunose, T. and Susaki, J. : Verification of Areal Ground Deformation Monitering in Urban Areas Using X-Band Images, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.78, No.1, 2022.]
16) 荻津 達：県内の 2020 年の地盤変動について：InSAR 解析結果から，千葉県環境研究センター年報第 20 号（令和 2 年度），2022．[Tatsu, O. : Ground deformation in 2020 in Chiba Prefecture based on SAR analysis results, Annual Report of Chiba Prefectural Environmental Research Centre No. 20, 2022.]
17) 八武崎寿史，荻津 達：県内の 2021 年の地盤変動について：InSAR 解析結果から，千葉県環境研究センター年報第 21 号（令和 3 年度），2023．[Hisashi, Y. and Tatsu, O. : Ground deformation in 2020 in Chiba Prefecture based on SAR analysis results, Annual Report of Chiba Prefectural Environmental Research Centre No. 20, 2022.]

第７章　Sentinel-1SAR データを用いた積雪深モニタリング

7.1　研究概要

積雪は水資源であり，積雪期にダム上流域の積雪の分布，量を把握することは，水資源の活用，管理の面で重要である．合成開口レーダーは積雪に関する活用の検討もなされている．例えば，日本では ALOS SAR データの活用も含め衛星データから積雪深などを推定する検討 [1)~3)]が行われており，ダム管理への衛星データへの活用では人工衛星画像から抽出した雪面の情報を融雪期のダム管理に活用する検討 [4)]や，積雪分布，積雪深の推定に関する検討事例 [5), 6)]などが挙げられる．

海外においては衛星データを用いた積雪に関する検討事例[例えば 7), 8)]は数多くあるが，Sentinel-1 SAR データを用いてヨーロッパアルプスでの乾燥した雪を対象に，積雪深さに伴うレーダーの後方散乱係数の変化と積雪深の関係性について検討 [9), 10)]されている事例もある．**図-7.1** はオーストリアとスイスの積雪深と後方散乱係数（VV，VH 偏波）の関係を示しており，両地点で冬季の乾燥した雪で強い相関関係にあることが示されている．一方，後方散乱係数がピーク以降大幅に減少しているのは積雪層内の水分量の増加によるものと考えられる．しかしながら，Sentinel-1 を用いた日本の雪を対象にした積雪深推定についての検討は行われていない．

本報告では群馬県の利根川最上流域を対象に 2017 年 1 月から 2022 年 3 月までの約 5 年間の Sentinel-1 SAR データを用い，積雪深さの推定を重回帰分析により検討するとともに，その推定精度を積雪深観測所の観測値を用いて検証した．

検討対象地域は平地が少なく斜面に木が生い茂っている森林地帯が多く，落葉広葉樹林域の斜面ではあるが，この後方散乱係数と積雪深には相関関係があり，後方散乱係数から積雪深を推定することが可能であることを確認した．なお，後方散乱係数は垂直偏波で電波を出して，垂直，水平で受ける VV，VH 偏波の両方を用いた．検討対象地域において，500m 四方の落葉広葉樹林域の斜面の後方散乱係数からの積雪深推定における二乗平均平方根誤差は，推定する条件にもよるが 20～50cm 程度であり，広域なダム上流の流域面積での積雪の状況を把握することに活用できる可能性があると考えられる．

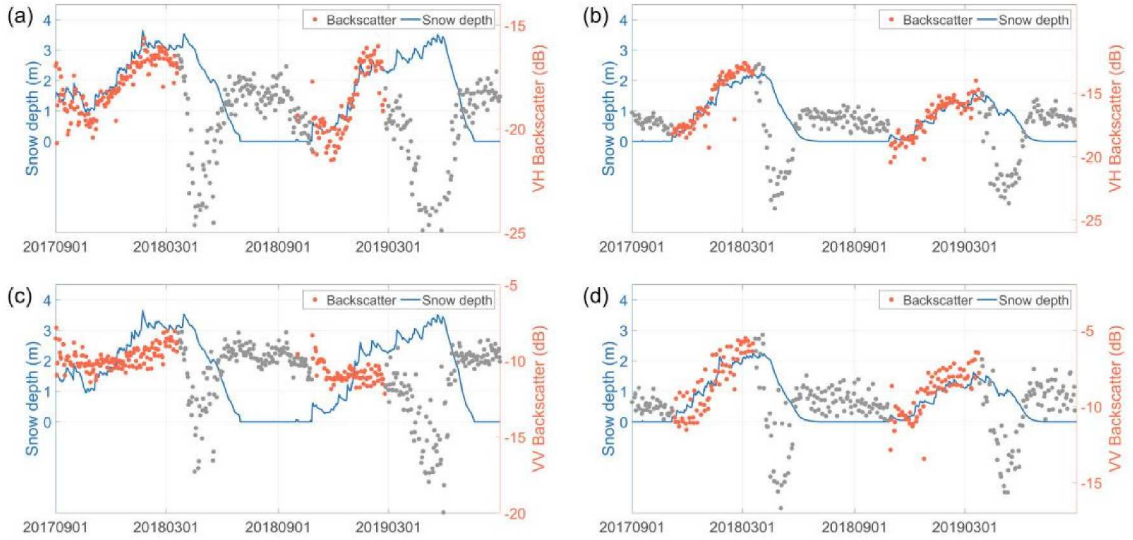


図-7.1 積雪深と後方散乱係数の関係（オーストリア：(a)，(c)，スイス：(b)，(d)） [12)]

7.2　検討対象地域と積雪深

首都圏の水瓶とも言われる利根川上流ダム群の水運用において，上流域山間部の融雪水は春先の水資源として重要な役割を果たしている．利根川最上流域の北部山間部は，冬期の最深積雪が 10m 以上になる豪雪地帯であり，この地域の積雪域の状況の経年変化を把握することができれば効率的なダム運用に資する可能性がある．そこで，利根川上流ダム群の上流域を含む，**図-7.2** に示す群馬県，新潟県，福島県，栃木県の一部領域を後方散乱係数を算出した解析範囲とした．

本論文では群馬県の利根川最上流域を対象にしており，この地域で積雪深を観測している気象庁の藤原観測所，水資源機構の矢木沢，奈良沢，小穂口観測所の位置を**図-7.3** に示す．積雪深は支柱に固定された積雪計から発射したレーザ光が，雪面で反射して感部に戻るまでの位相差を計測して求める光電式積雪計が用いられている．積雪深の計測精度は±1cm 以内であり，計測間隔は気象庁の藤原観測所では 10 秒，水資源機構の矢木沢観測所では 1 時間，奈良沢，小穂口観測所では 6 時間である．

各観測所で観測された 2017 年 1 月から 6 冬季間の積雪深を**図-7.4** に示す．小穂口では 3 冬季間で約 6m の積雪となる日があるなど，藤原，矢木沢，奈良沢に比べて積雪深が大きい．藤原，矢木沢，奈良沢の積雪は一時期を除き積雪深は 3m 以下となっている．

群馬県はおよそ 3 分の 2 は山地や丘陵地で占められており，利根川最上流域は，それぞれ 2,000m 級を含む山々が形成されており，県北部から北西部の三国山地と北東部に足尾山地に囲まれている．藤原観測所の標高は 700m，矢木沢ダムの堤頂標高は 856m である．

群馬県の利根川最上流域の植生帯，自然・代償植生は**図-7.5** に示すとおりであり，大部分がブナクラス域（落葉広葉樹林域）に分類され，一部，コケモモ-トウヒクラス域（亜高山針葉樹林域）なども存在する．植生図は**図-7.6** に示すとおりであり，チシマザサ-ブナ（ブナ科ブナ属の落葉高木）群団の面積が最も広く，アカミノイヌツゲ-クロベ（ヒノキ科常緑高木）群集，ヒメヤシャブシ-タニウツギ（スイカズラ科タニウツギ属の落葉低木）群落，ウラジロヨウラク（ツツジ科ヨウラクツツジ属の落葉低木）-ミヤマナラ群団などが分布している．

藤原観測所周辺は**写真-7.1**（須田貝ダム写真左側）に示すとおりであり，落葉広葉樹林が生い茂っている．**写真-7.2** は矢木沢ダムから上流に向けて撮影した写真で，落葉樹林と広葉針葉樹林がまだらで存在していることが確認できる．

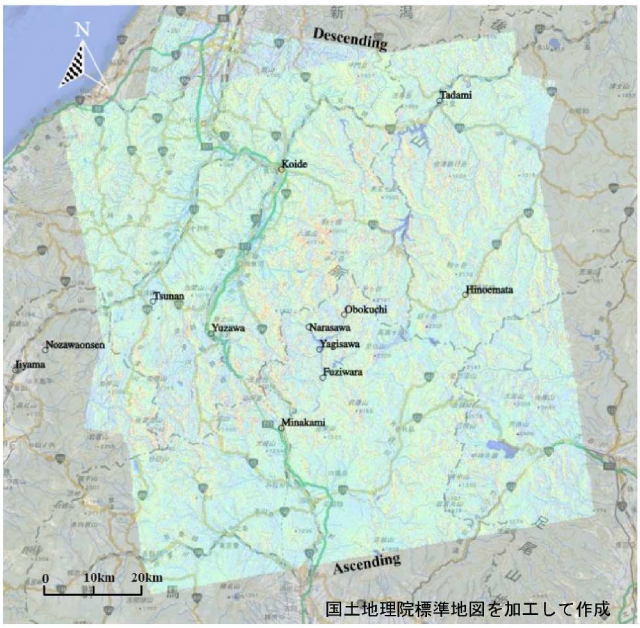


図-7.2　解析範囲

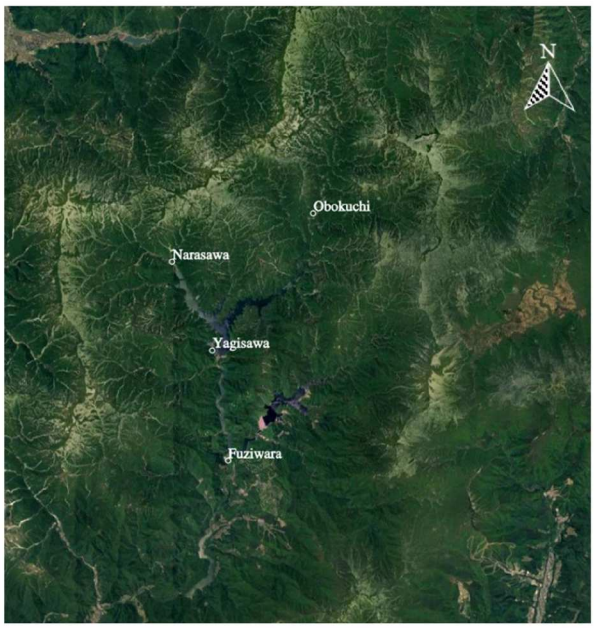


図-7.3　利根川最上流域の積雪観測所位置図

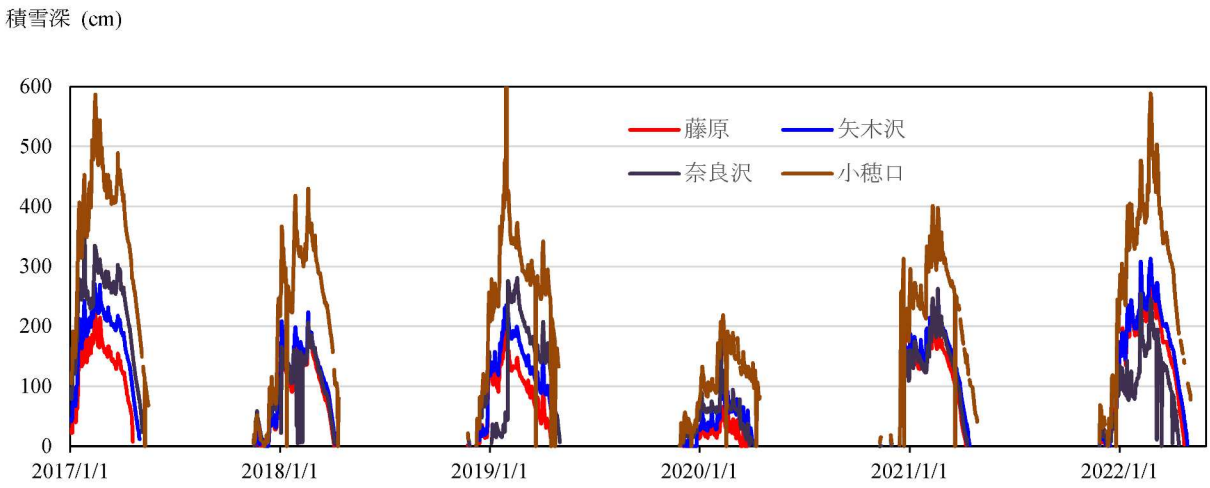
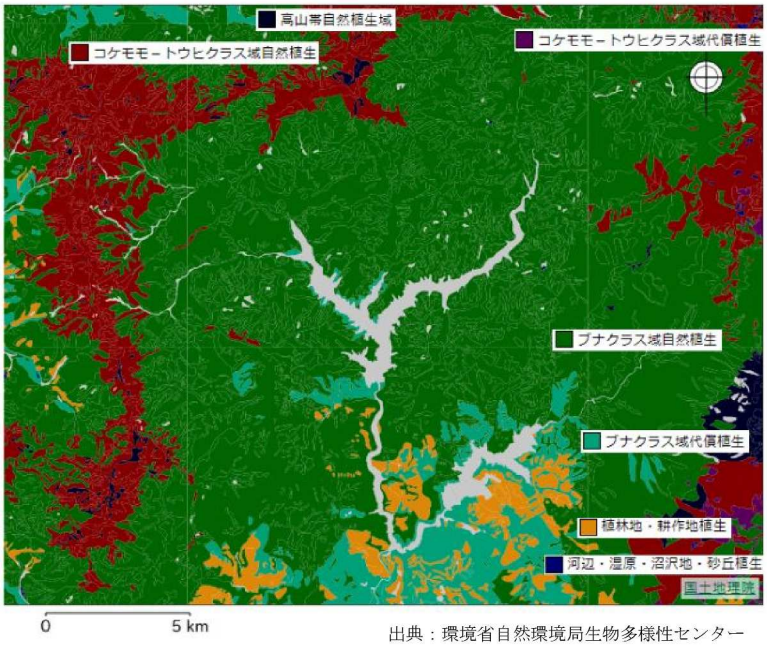


図-7.4　観測所で観測された積雪深



出典：環境省自然環境局生物多様性センター

図-7.5　植生帯，自然・代償植生

出典：環境省自然環境局生物多様性センター

図-7.6　植生

写真-7.1　植生の状況（藤原観測所近傍 2022 年 11 月 9 日撮影）

写真-7.2　植生の状況（矢木沢ダムから上流に向け 2022 年 11 月 9 日撮影）

7.3　解析手法と解析データ

7.3.1 解析手法

後方散乱係数と積雪深の関係性を検討するとともに，式(7.1)に示すとおり，目的関数を観測された積雪深（H_{snow}），説明変数として，後方散乱係数の平均値，標準偏差として重回帰分析を実施する．後方散乱係数は VV 偏波（垂直偏波（V）で送信，後方散乱波を垂直偏波（V）を受信），VH 偏波（垂直偏波（V）で送信，後方散乱波を水平偏波（H）で受信）両方を用いる．VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数は積雪深の違いにより変化するが，積雪深の違いによる影響の程度などが VV 偏波，VH 偏波では異なるため両方の後方散乱係数を説明変数とした．

$$H_{snow} = F(\sigma^0_{VV-AV}, \sigma^0_{VH-AV}, \sigma^0_{VV-ST}, \sigma^0_{VH-ST}) \tag{7.1}$$

ここで，$\sigma^0_{VV-AV}, \sigma^0_{VV-ST}$は VV 偏波の後方散乱係数の平均値，標準偏差，$\sigma^0_{VH-AV}, \sigma^0_{VH-ST}$は VH 偏波の後方散乱係数の平均値，標準偏差である．

後方散乱係数は，式(7.2)に示すとおりであり，Sentinel-1 SAR データの後方散乱係数を SNAP（Sentinel Application Platform）を用いて求めた（図-7.7 参照）．

$$\sigma^0(dB) = 10\ \log_{10}\ (DN^2 \cdot CF) \tag{7.2}$$

ここで，DNは輝度値，CFは校正係数である．

DEM は国土地理院の 10m×10m メッシュの数値標高モデルに基づいて作成した．また，後方散乱係数については，標準偏差が適切に評価できるように，5m×5m メッシュで算出した．

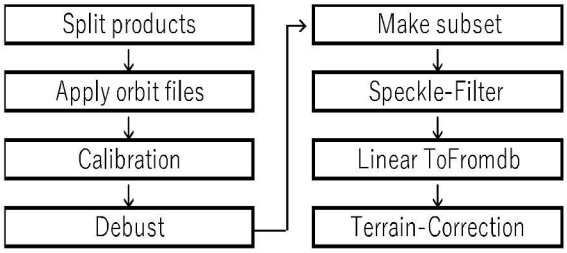


図-7.7　SNAP 解析フロー

7.3.2 解析データと解析範囲

本論文では，無償で提供され，比較的高い頻度でデータが取得できる C バンド（波長：5.6cm）の Sentinel-1 を用いた．Sentinel-1 は南行軌道（Descending），北行軌道（Ascending）それぞれ 12 日間隔でデータが取得でき，**表-7.1** に後方散乱係数を求めた 2017 年 1 月から 2022 年 4 月までの約 5 年間の SAR データを示す．Sentinel-1 SAR データの位置関係は**図-7.8** に示すとおりであり，矢木沢地点では入射角が北行軌道が約 39°，南行軌道が約 44°と北行軌道の方が 5°程度小さい．

南行，北行軌道，それぞれの解析範囲は**図-7.2** に示すとおりであり，利根川上流ダム群の上流域を含めて広域を解析した．また，後述する利根川最上流の後方散乱係数の対象範囲を**図-7.9** に示す．

表-7.1　解析データ（Sentinel-1 SAR）

Descending

2017		2018		2019		2020		2021		2022
2/19	6/19	1/9	7/8	1/4	7/3	1/11	7/9	1/5	7/4	1/12
3/3	7/1	1/21	7/20	1/16	7/15	2/4	7/21	1/17	7/16	1/24
3/15	7/13	2/2	8/1	1/28	7/27	2/16	8/2	1/29	7/28	2/5
3/27	7/25	2/14	8/13	2/9	8/8	2/28	8/14	2/10	8/9	2/17
4/8	8/6	2/26	8/25	2/21	8/20	3/11	8/26	2/22	8/21	3/13
4/20	8/18	3/10	9/6	3/5	9/1	3/23	9/7	3/6	9/2	3/25
5/2	8/30	3/22	9/18	3/17	9/13	4/4	9/19	3/18	9/14	4/6
5/14	9/11	4/3	9/30	3/29	9/25	4/16	10/1	3/30	9/26	4/18
5/26	9/23	4/15	10/12	4/10	10/7	4/28	10/13	4/11	10/8	
6/7	10/5	4/27	10/24	4/22	10/19	5/10	10/25	4/23	10/20	
	10/17	5/9	11/5	5/4	10/31	5/22	11/6	5/5	11/1	
	10/29	5/21	11/17	5/16	11/12	6/3	11/18	5/17	11/13	
	11/10	6/2	11/29	5/28	11/24	6/15	11/30	5/29	11/25	
	12/4	6/14	12/11	6/9	12/6	6/27	12/12	6/10	12/7	
	12/16	6/26	12/23		12/18		12/24	6/22	12/19	
	12/28				12/30				12/31	

Ascending

2017		2018		2019		2020		2021	
1/7	7/6	1/2	7/1	1/9	7/20	1/4	7/2	1/10	7/9
1/19	7/18	1/14	7/13	1/21	8/1	1/16	7/14	1/22	7/21
1/31	7/30	1/26	7/25	2/2	8/13	1/28	7/26	2/3	8/2
2/12	8/11	2/7	8/6	2/14	8/25	2/9	8/7	2/15	8/14
2/24	8/23	2/19	10/17	2/26	9/6	2/21	8/19	2/27	8/26
3/8	9/4	3/3	10/29	3/10	9/18	3/4	8/31	3/11	9/7
3/20	9/16	3/15	11/10	3/22	9/30	3/16	9/12	3/23	9/19
4/1	9/28	3/27	11/22	4/3	10/24	3/28	9/24	4/4	10/1
4/13	10/10	4/8	12/4	4/15	11/5	4/9	10/6	4/16	10/13
4/25	10/22	4/20	12/16	4/27	11/17	4/21	10/30	4/28	10/25
5/7	11/3	5/2	12/28	5/9	11/29	5/3	11/11	5/10	11/6
5/19	11/15	5/14		5/21	12/11	5/15	11/23	5/22	11/18
5/31	11/27	5/26		6/2	12/23	5/27	12/5	6/15	11/30
6/12	12/9	6/7		6/14		6/8	12/17	6/27	12/12
6/24	12/21	6/19		6/26		6/20	12/29		

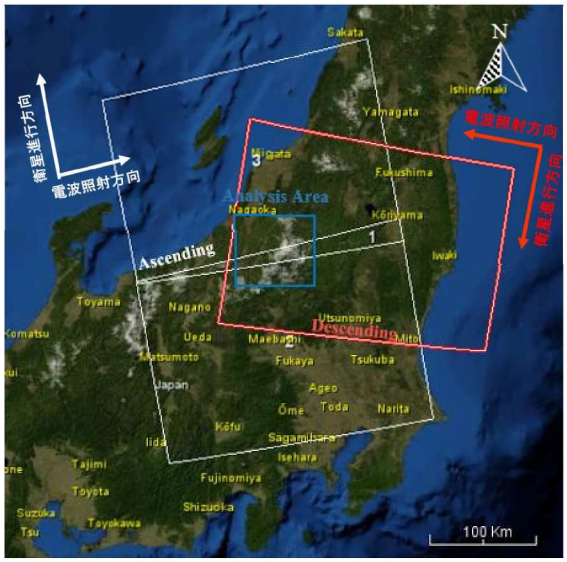


図-7.8　解析に用いた Sentinel-1 SAR の位置図

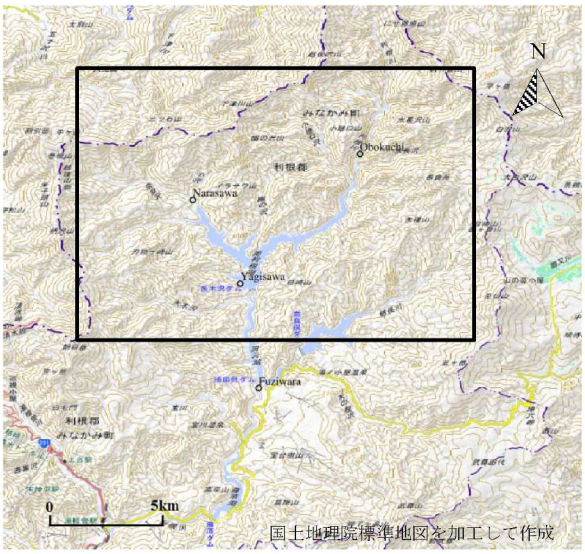


図-7.9　利根川最上流域の後方散乱係数対象範囲

7.4　後方散乱係数への積雪の影響

7.4.1　後方散乱係数への積雪の影響

利根川最上流域において，2020 年 12 月の 4 箇所の観測所で積雪がない日の後方散乱係数と 2021 年 2 月の積雪がある日の後方散乱係数を**図-7.10** に示す．後方散乱係数は VV 偏波，VH 偏波ともに，南行軌道では東傾斜斜面，北行軌道では西傾斜斜面が大きくなっているとともに，積雪の影響により低減している．

積雪がない日の後方散乱係数と積雪がある日の広域での後方散乱係数の差分は，**図-7.11** に示すとおりであり，積雪深が大きい山岳地帯では後方散乱係数が小さくなっているが，一方，積雪のない可能性が高い関東平野の箇所は小さくなっていないことが確認できる．

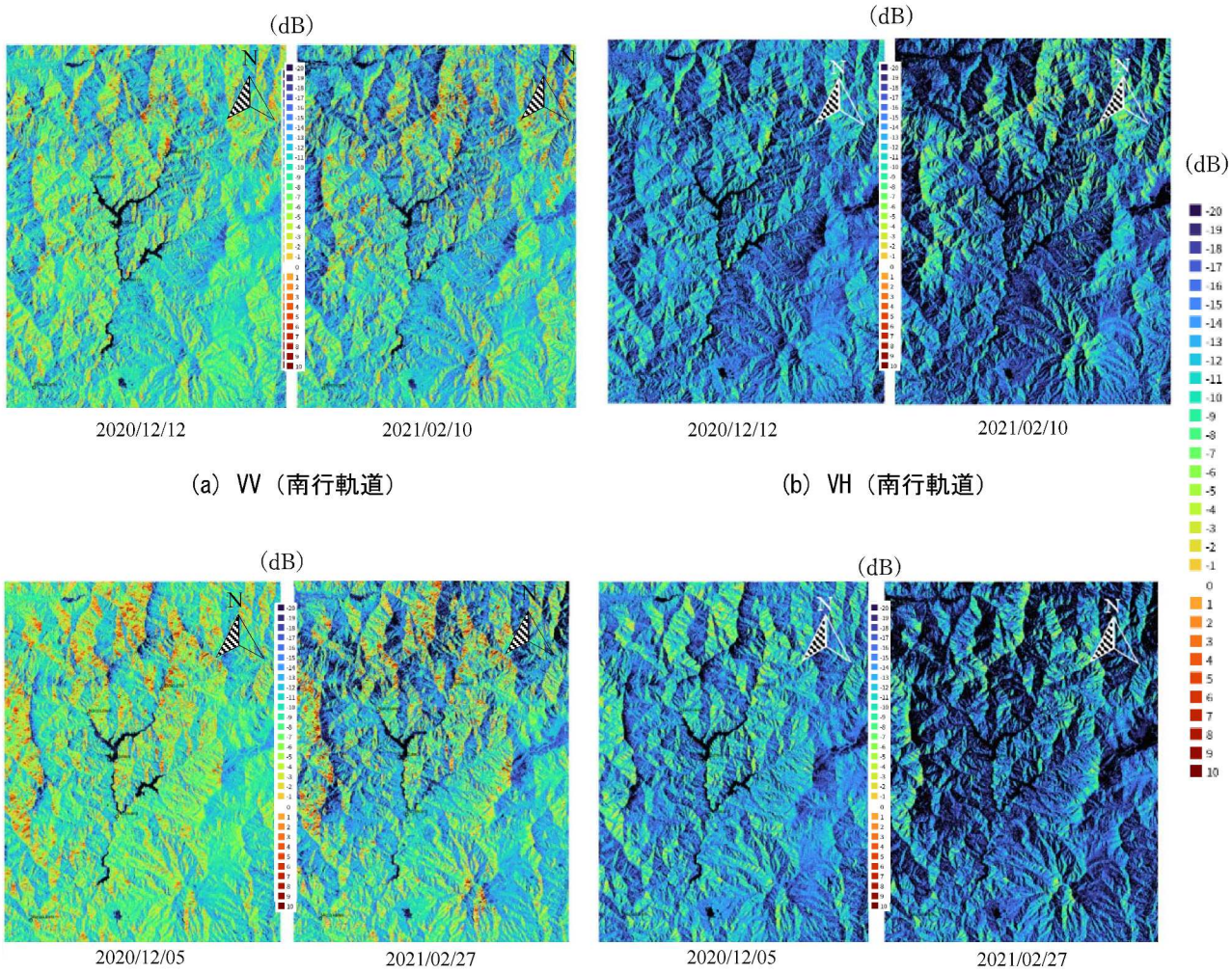
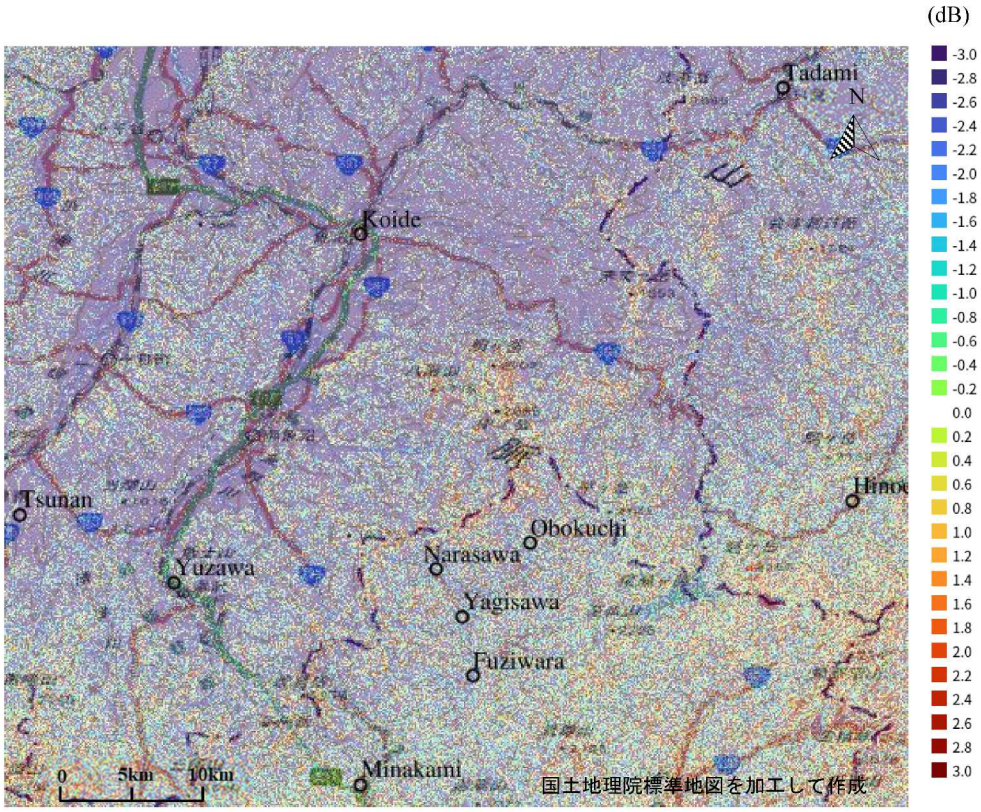
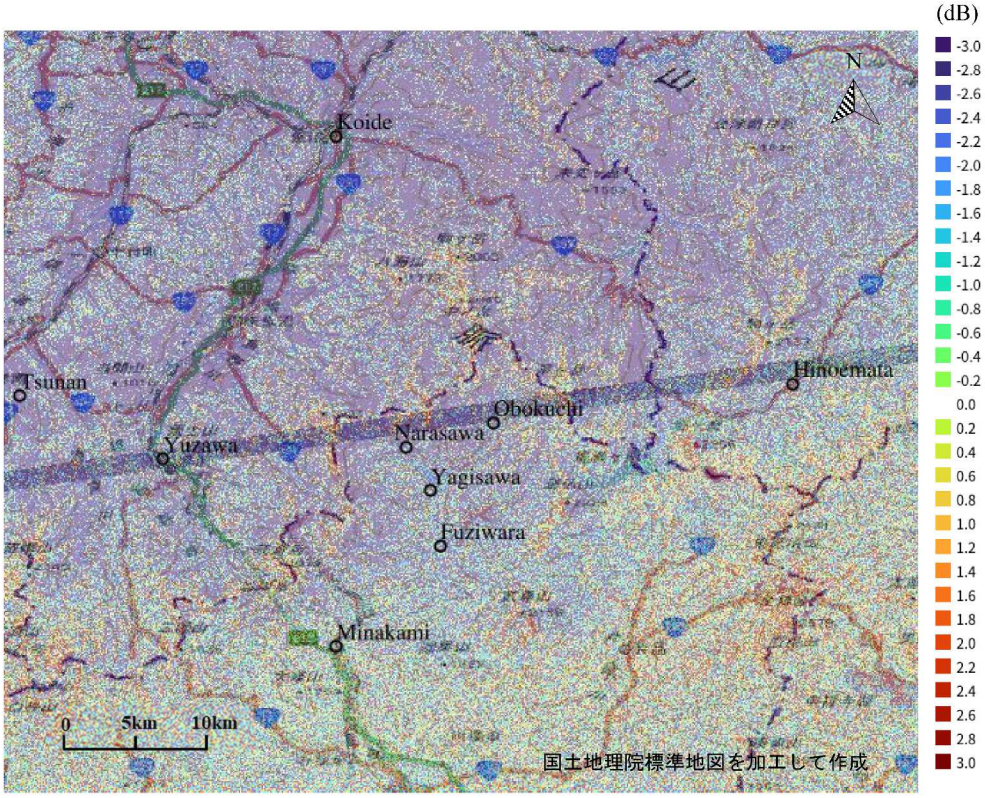


図-7.10　後方散乱係数



(a) VV (2021/02/10) - VV (2020/12/12) 南行軌道



(b) VV (2021/02/27) - VV (2020/12/05) 北行軌道

図-7.11 後方散乱係数の差分

7.4.2　利根川最上流域の後方散乱係数

図-7.9 に示す利根川最上流域における南行，北行軌道の VV，VH 偏波の後方散乱係数の平均値（VV, VH），差分（VV-VH），基準化差分 DR((VH-VV)/(VV+VH)), 比率 RA(VH/VV), 標準偏差（VVS, VHS）を**表-7.2** に，後方散乱係数の平均値，標準偏差の経時変化を**図-7.12** に示す．

表-7.2　VV 偏波，VH 偏波の平均値，標準偏差など

項目	Descending（D）			Ascending（A）			差（D-A）		
	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値	平均値	最大値	最小値
VV(dB)	-10.1	-8.7	-12.6	-8.7	-7.2	-11.0	-1.4	-1.4	-1.6
VH(dB)	-16.0	-14.1	-19.3	-14.7	-13.1	-17.6	-1.3	-1.0	-1.6
VV-VH(dB)	5.9	6.8	4.6	6.0	6.8	5.2	-0.11	-0.02	-0.65
DR	0.23	0.18	0.26	0.26	0.22	0.30	-0.03	-0.04	-0.04
RA	1.59	1.70	1.45	1.70	1.86	1.56	-0.11	-0.16	-0.11
VVS(dB)	5.4	6.2	4.9	5.6	6.5	4.9	-0.2	-0.3	0.0
VHS(dB)	4.8	5.9	4.0	4.8	5.5	4.3	0.0	0.5	-0.3

VV 偏波の後方散乱係数の平均値は，南行，北行軌道それぞれ -10.1dB，-8.7dB で，北行軌道が南行軌道に比べて，1.4dB 大きいが，これは主に入射角が北行軌道が約 39°，南行軌道が約 44°と北行軌道の方が小さいことによるものと考えられる．VH 偏波の後方散乱係数の平均値は，VV 偏波に比べて小さくその差分は，南行，北行軌道とも 6dB 程度である．VV，VH 偏波の基準化差分は，南行，北行軌道それぞれ 0.23，0.26 であり，北行軌道の方が 0.03 大きい．VV，VH 偏波の後方散乱係数の標準偏差は 5dB 程度であり，VV 偏波の方が VH 偏波に比べて大きい．また，VV 偏波の標準偏差は北行軌道の方が 0.2 大きくなっている．

図-7.12 に示すとおり，12 月中旬ごろから 4 月頃までの積雪期では，VV，VH 偏波の後方散乱係数の平均値が減少傾向にあることが確認できる．後方散乱係数の比率の経時変化は**図-7.13** に示すとおりであり，平均値と同様に積雪期に減少傾向にあることが確認できる．この傾向は積雪深が大きくなることにより，積雪層内部での散乱，減衰が大きくなり後方散乱係数が小さくなるとともに，VV，VH 偏波でこの低減率も異なることによるものと考えられる．

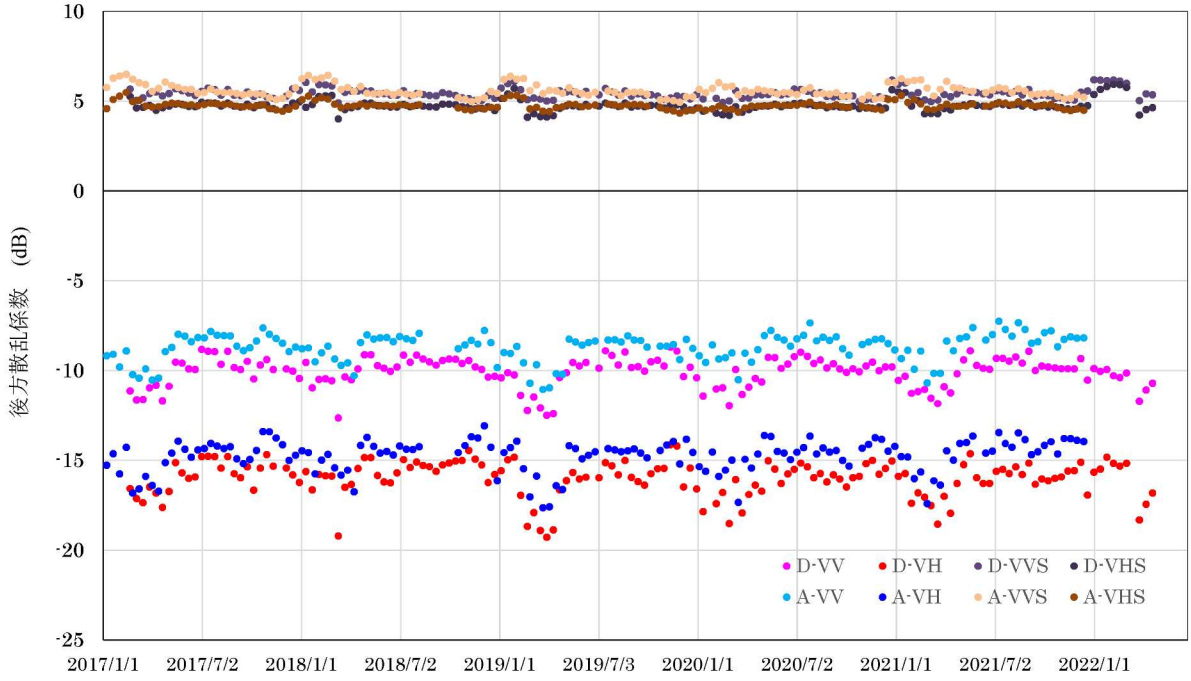


図-7.12　VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数の平均値，標準偏差

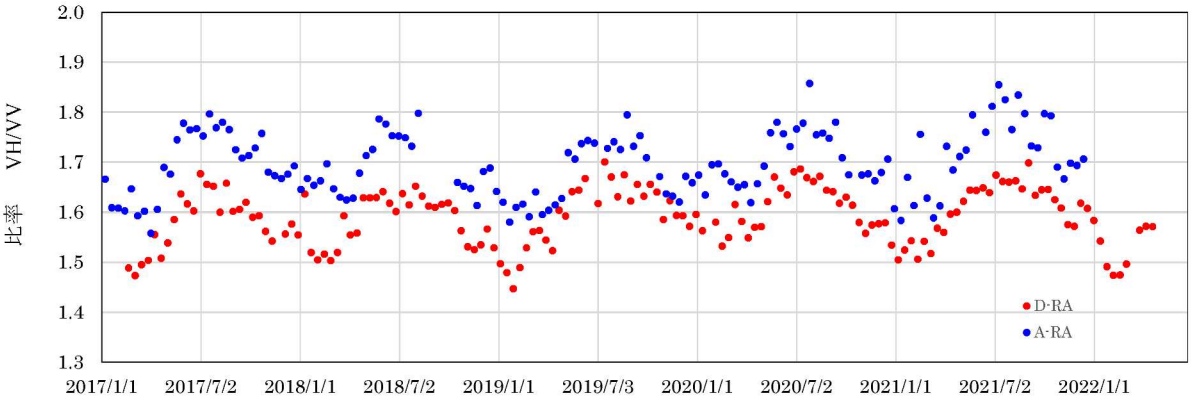


図-7.13　VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数の比率（VH/VV）

7.4.3　積雪深観測所近傍の後方散乱係数と積雪深の関係

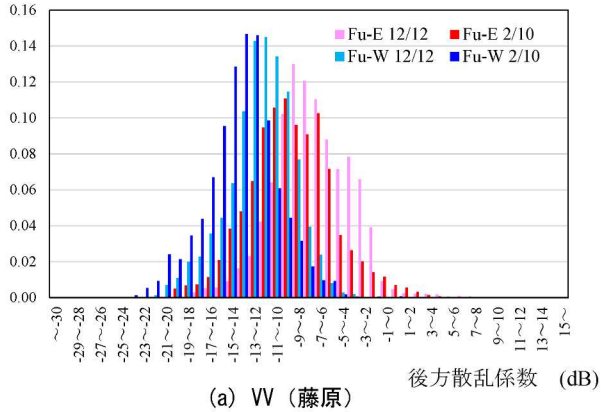
積雪深観測所 4 箇所の近傍で，それぞれ東傾斜，西傾斜の斜面で東西南北 500m の領域（**図-7.14** 参照）での VV，VH 偏波の後方散乱係数と観測された積雪深の関係を検討する．藤原（Fu），小穂口（Ob）について，2020 年 12 月に観測所で積雪がない日の後方散乱係数と 2021 年 2 月の積雪がある日の後方散乱係数の頻度分布を**図-7.15, 7.16** に，後方散乱係数の平均値を**表-7.3** に示す．なお，積雪深については，2021 年 2 月 10 日は藤原 214cm，小穂口 369cm，2 月 27 日は藤原 163cm，小穂口 323cm と観測されている．

図-7.15，7.16 に示すとおり，南行軌道では東傾斜の斜面が，北行軌道では西傾斜の斜面の方が後方散乱係数が大きく，南行，北行軌道とも頻度分布は 12 月から 2 月になることで，小さくなる左側にシフトしていることが確認できる．**表-7.3** に示すとおり，2020 年 12 月の積雪がない日から 2021 年 2 月の積雪がある日の後方散乱係は低減しており，南行軌道の後方散乱係数 VV，VH の平均値は藤原 -2.2dB，小穂口 -3.0dB，北行軌道では藤原 -3.8dB，小穂口 -4.0dB であり，小穂口の方が低減効果が大きい．

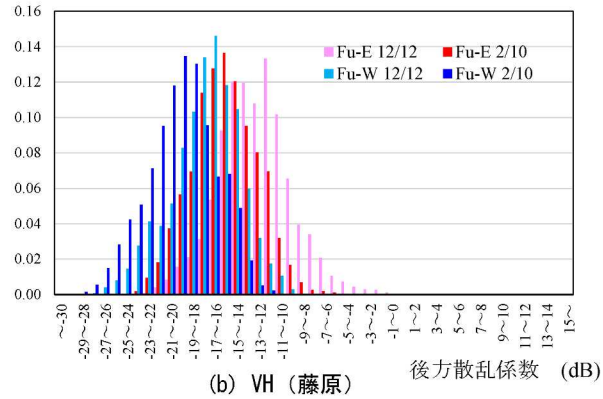
図-7.14　積雪深観測所近傍の後方散乱係数算出領域

表-7.3　後方散乱係数の変化（2020 年 12 月，2021 年 2 月）

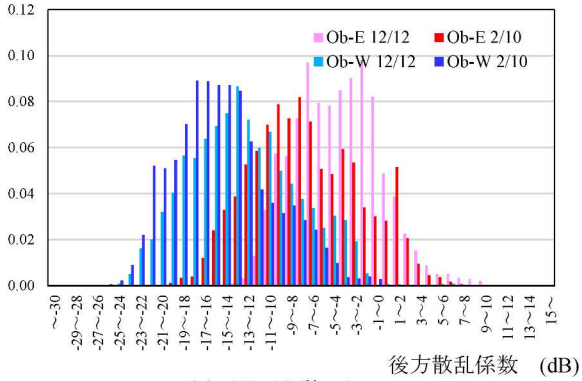
項目		南行軌道			北行軌道		
		12/12	2/10	差	12/5	2/27	差
VV	Fu-E	-7.0	-9.0	-2.0	-9.9	-12.3	-2.4
	Fu-W	-11.9	-13.7	-1.8	-5.6	-8.7	-3.1
	Ob-E	-3.9	-6.9	-3.0	-11.1	-14.9	-3.8
	Ob-W	-12.8	-14.9	-2.0	-3.4	-5.8	-2.4
VH	Fu-E	-12.6	-15.5	-2.8	-15.1	-18.6	-3.5
	Fu-W	-17.4	-19.6	-2.2	-9.9	-15.9	-6.1
	Ob-E	-9.6	-14.3	-4.7	-16.2	-20.9	-4.7
	Ob-W	-18.1	-20.3	-2.1	-9.5	-14.5	-5.0



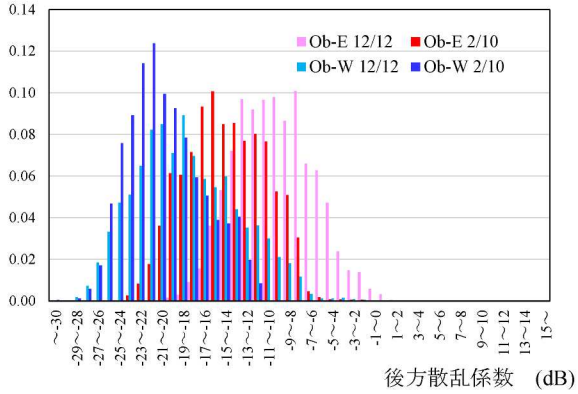
(a) VV（藤原）



(b) VH（藤原）

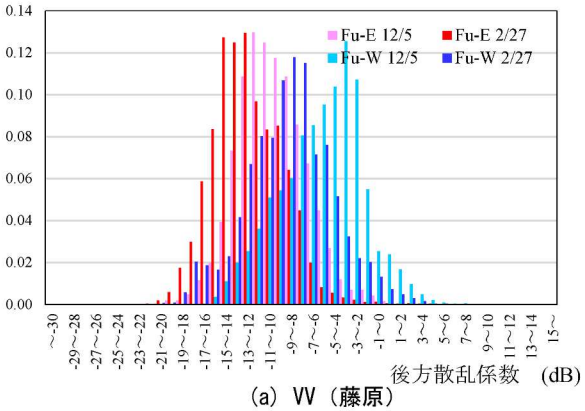


(c) VV（小穂口）

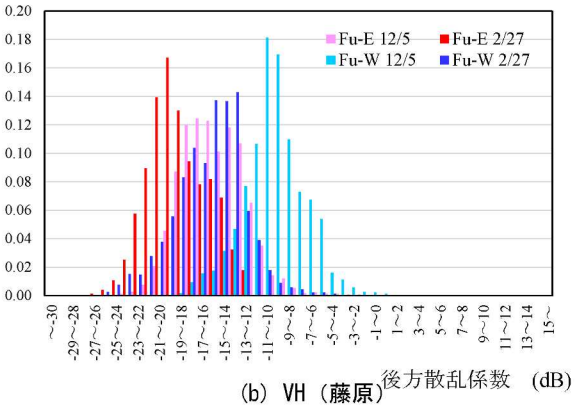


(d) VH（小穂口）

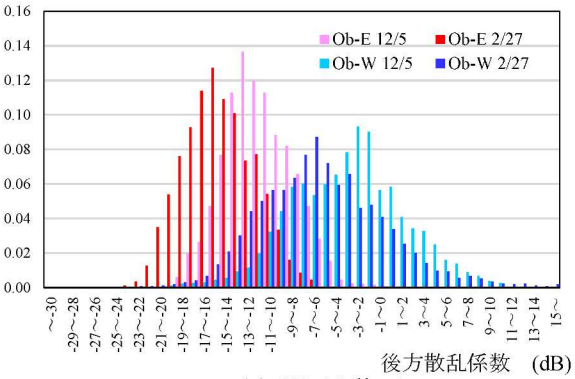
図-7.15　後方散乱係数の頻度分布（南行軌道）



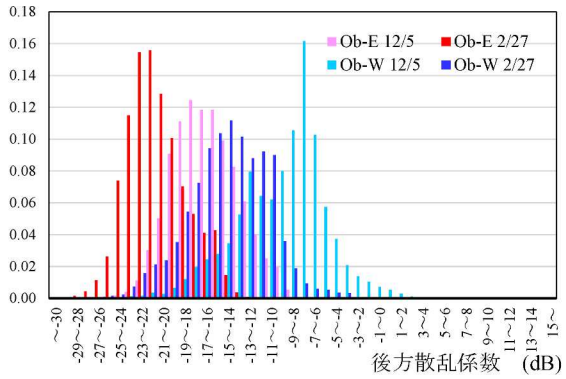
(a) VV（藤原）



(b) VH（藤原）



(c) VV（小穂口）



(d) VH（小穂口）

図-7.16　後方散乱係数の頻度分布（北行軌道）

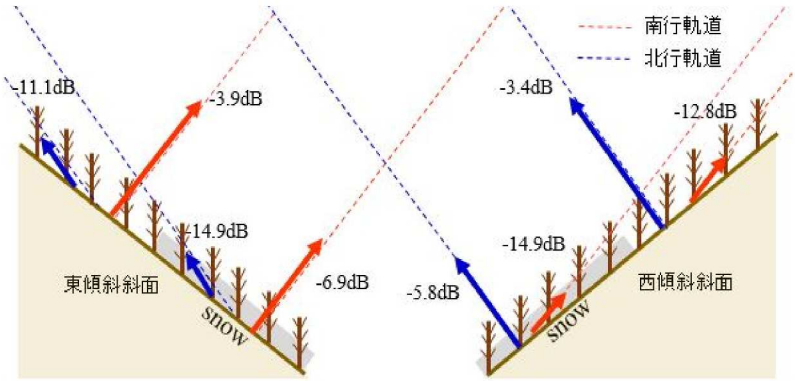
小穂口での後方散乱係数について，衛星軌道，斜面傾斜，積雪の影響を示す模式図を数値（2020年12月，2021年2月）も合わせて**図-7.17**に示す.

図-7.17 に示すとおり，斜面の傾斜と衛星視線方向との角度との関係が後方散乱係数に大きく影響し，それに比べれば積雪による低減効果は小さい.

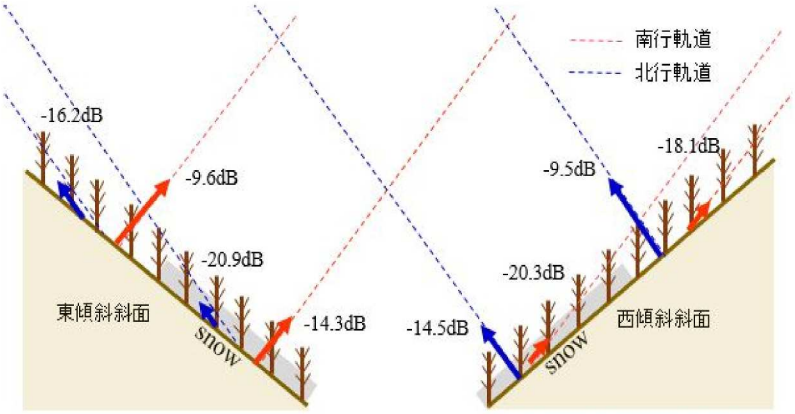
藤原，矢木沢，奈良沢，小穂口の東傾斜，西傾斜の斜面での VV，VH 偏波の後方散乱係数の平均値，標準偏差の経時変化を**図-7.18**，**7.19** に，基準化差分，比率を**図-7.20** に示す.

後方散乱係数 VV，VH の平均値は経時変化図より，年間周期で変動しており，積雪期に減少する傾向が確認できる．後方散乱係数 VV，VH の平均値は，南行軌道においては，東傾斜斜面では小穂口が一番大きく，西傾斜斜面では奈良沢，藤原，小穂口，矢木沢の順となっている．北行軌道においては，東傾斜斜面では藤原，奈良沢，矢木沢，小穂口の順で大きく，西傾斜斜面では矢木沢，小穂口，奈良沢，藤原の順となっており，各斜面での地表面の状況とともに，斜面と衛星視線方向との角度の違いなどから後方散乱係数の値が異なっていると思われる.

後方散乱係数 VV，VH の標準偏差の経時変化図より，平均値と同様，標準偏差も年間周期で変動しており，特に，小穂口，奈良沢の北行軌道の西傾斜斜面では，積雪期における増加傾向が確認できる.



(a) VV



(b) VH

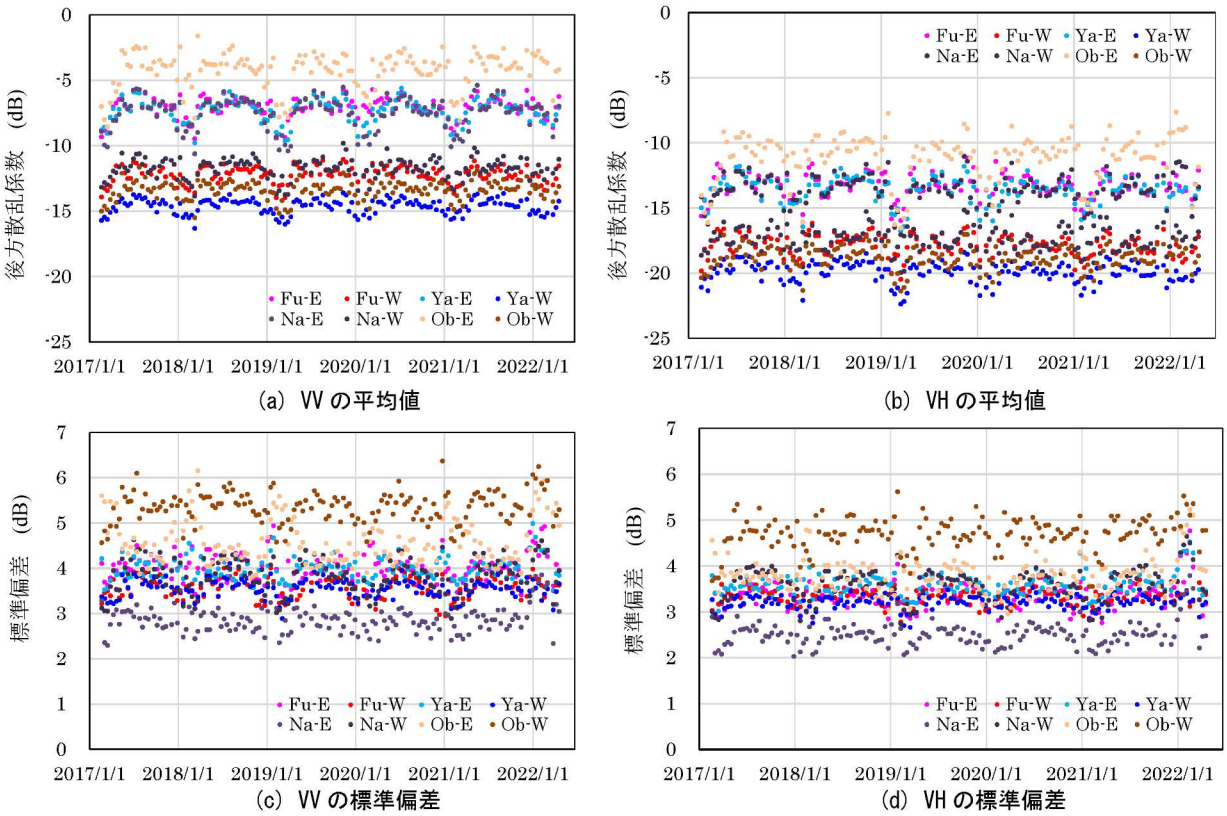
図-7.17　後方散乱係数模式図（数値は小穂口の値）

後方散乱係数 VV，VH の基準化差分，比率の経時変化図より，積雪期に基準化差分，比率が減少する傾向が確認できる．これらの値は南行軌道では東傾斜斜面の方が西傾斜斜面に比べて大きく，北行軌道では西傾斜斜面の方が東傾斜斜面に比べて大きい．

積雪深観測所 4 箇所の近傍で，それぞれ東傾斜，西傾斜の斜面で東西南北 500m の領域（**図-7.14** 参照）での後方散乱係数と積雪深との関係を，北行軌道を例に**図-7.21**，**7.22** に示す．**図-7.21** に示す東傾斜斜面での後方散乱係数 VV，VH の平均値は，それぞれ，-9～-16dB，-14～-21dB の範囲，上下幅は 7dB 程度であり，VV，VH ともに積雪深が大きくなるにしたがって小さくなっている．ただし，積雪深が 3～4m 以上ではその傾向は確認できない．一方，標準偏差は 2～4dB の範囲内にあり，VV は増加傾向にあるものの，平均値のような積雪深との明瞭な相関は認められない．後方散乱係数 VV，VH の基準化差分，比率は，小穂口については積雪深が大きくなるにしたがって小さくなっている傾向が確認できるが，藤原，矢木沢，奈良沢では小穂口のような積雪深との相関は認められない．

図-7.22 に示す西傾斜斜面での後方散乱係数 VV，VH の平均値は，それぞれ，-2～-10dB，-8～-16dB の範囲，上下幅は 8dB 程度であり，積雪深が大きくなるにしたがって小さくなっている傾向は藤原では確認できるものの，その他の地点では，東傾斜斜面のような低減傾向はない．一方，標準偏差は VV，VH それぞれ 3～8dB，3～6dB の範囲内にあり，特に VV では藤原を除いて，積雪深が大きくなるにしたがって大きくなる傾向が確認できる．ただし，積雪深が 3～4m 以上ではその傾向は確認できない．後方散乱係数 VV，VH の基準化差分，比率は，藤原については積雪深が大きくなるにしたがって小さくなる傾向が確認できるものの，その他の地点では同様の傾向は確認できない．

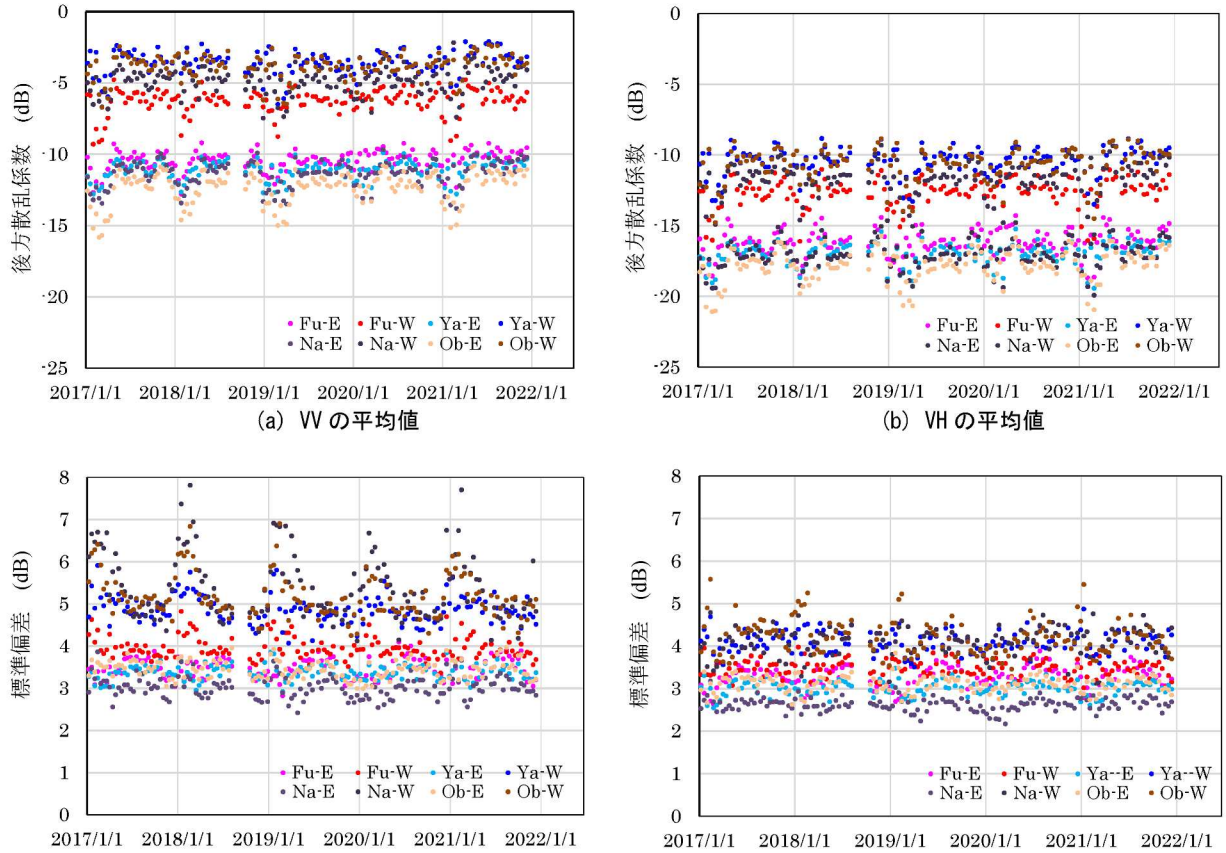
なお，奈良沢観測所の積雪深については，最下流の藤原観測所の積雪深よりも小さい期間が一時期あり，この時期のデータについては，奈良沢観測所周辺の東傾斜，西傾斜の東西南北 500m の領域から積雪深を推定する重回帰分析するデータとすることが適切であるか確認ができないため，奈良沢については重回帰分析の検討を省略する．



(a) VV の平均値　(b) VH の平均値

(c) VV の標準偏差　(d) VH の標準偏差

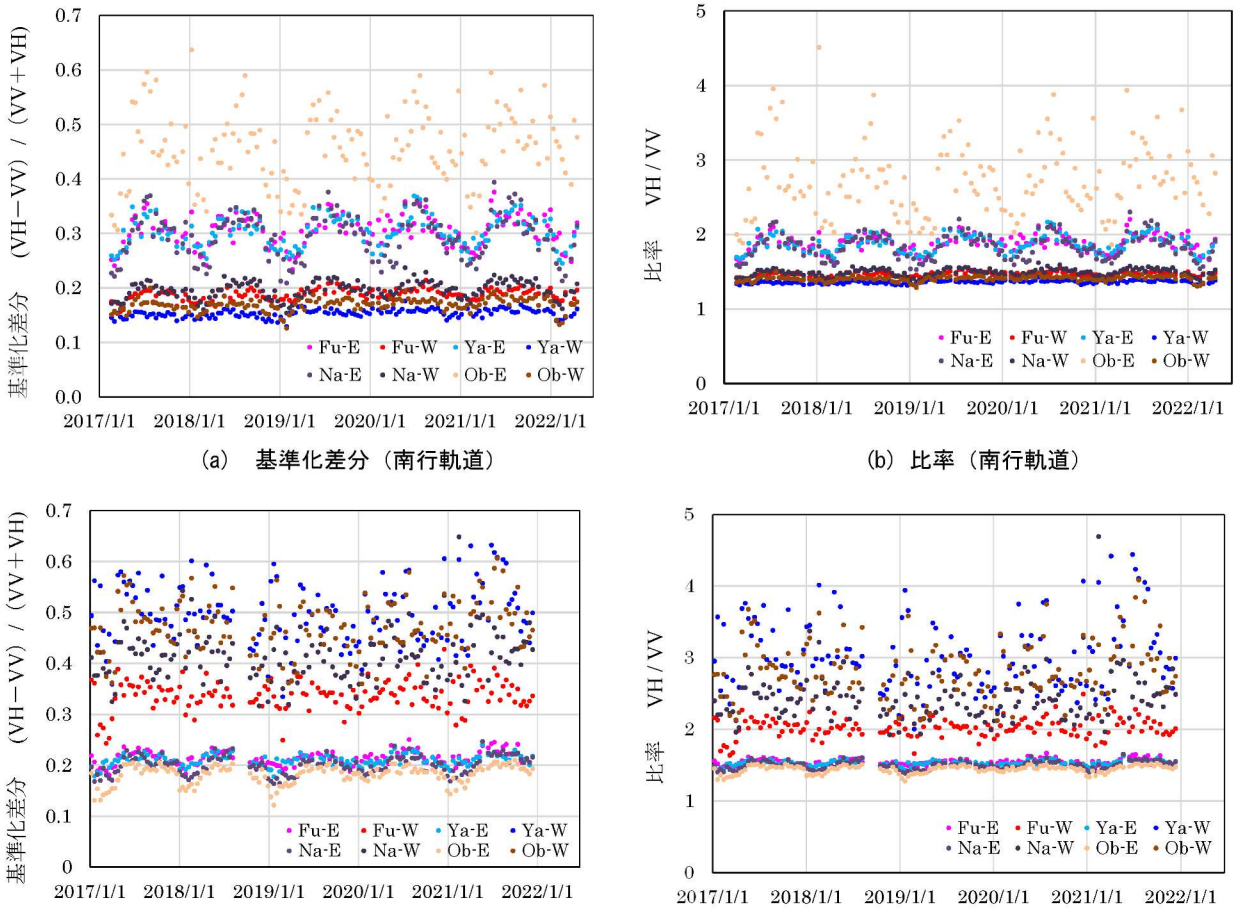
図-7.18　VV，VH の平均値，標準偏差の経時変化（南行軌道）



(a) VV の平均値　(b) VH の平均値

(c) VV の標準偏差　(d) VH の標準偏差

図-7.19　VV，VH の平均値，標準偏差の経時変化（北行軌道）



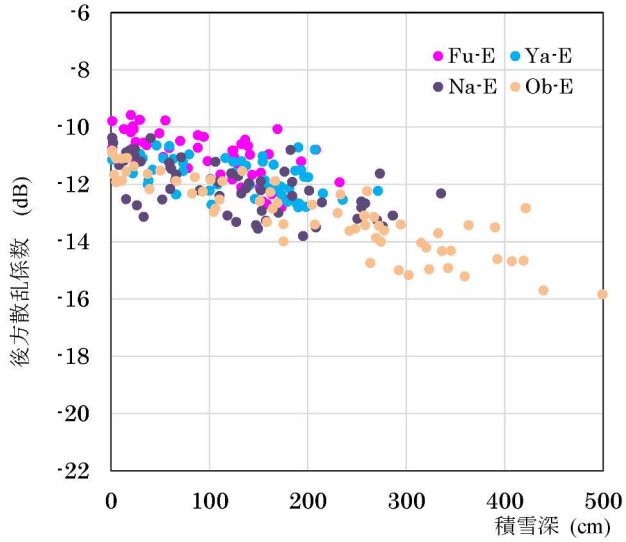
(a)　基準化差分（南行軌道）

(b) 比率（南行軌道）

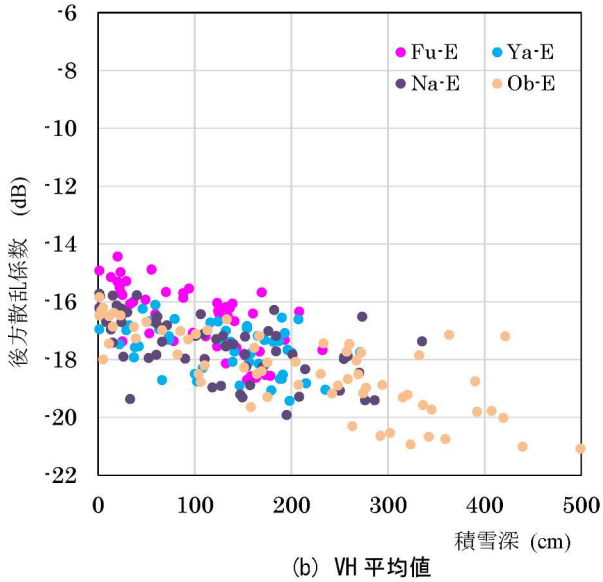
(c) 基準化差分（北行軌道）

(d) 比率（北行軌道）

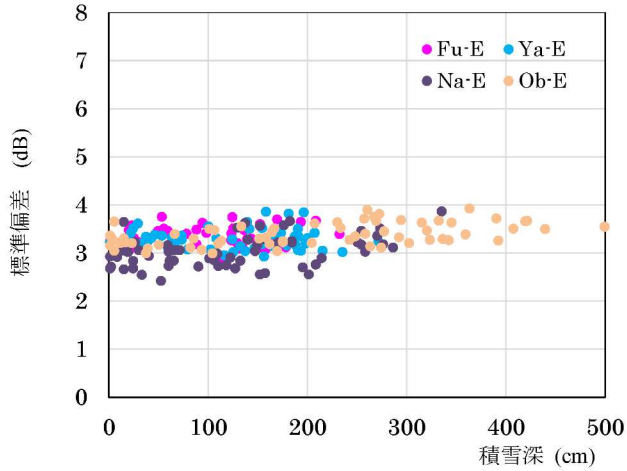
図-7.20　VV，VH の基準化差分，比率



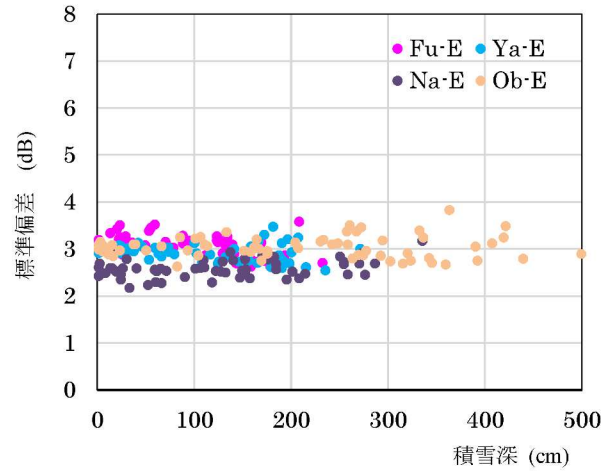
(a) VV 平均値



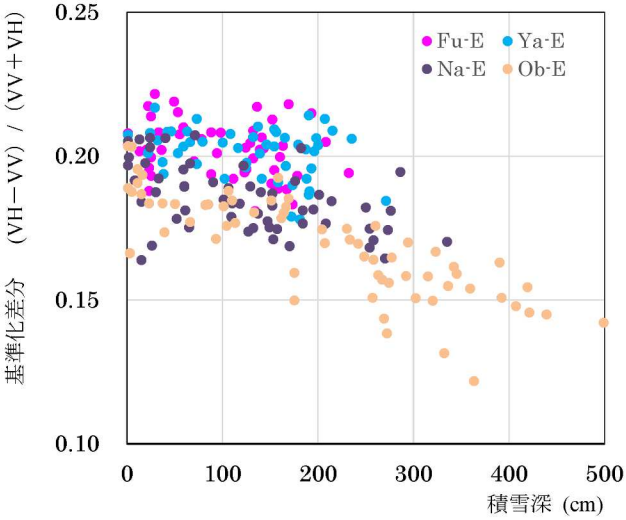
(b) VH 平均値



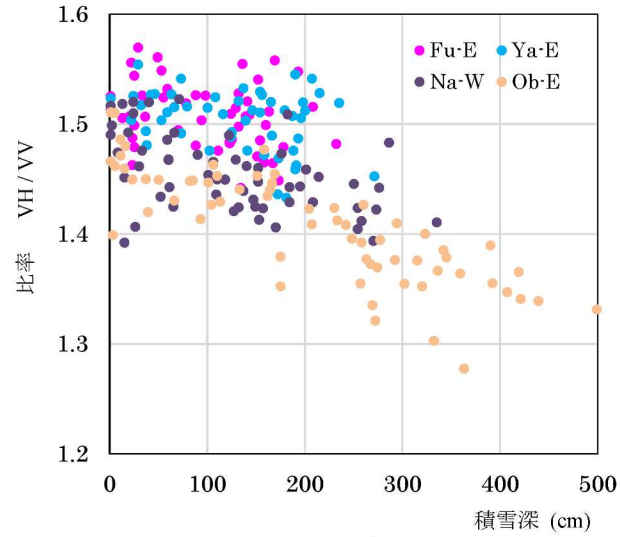
(c) VV 標準偏差



(d) VH 標準偏差



(e) (VH-VV) / (VV+VH)



(f) VH/VV

図-7.21　積雪深と後方散乱係数の平均値，標準偏差，基準化差分，比率の関係（東傾斜斜面）

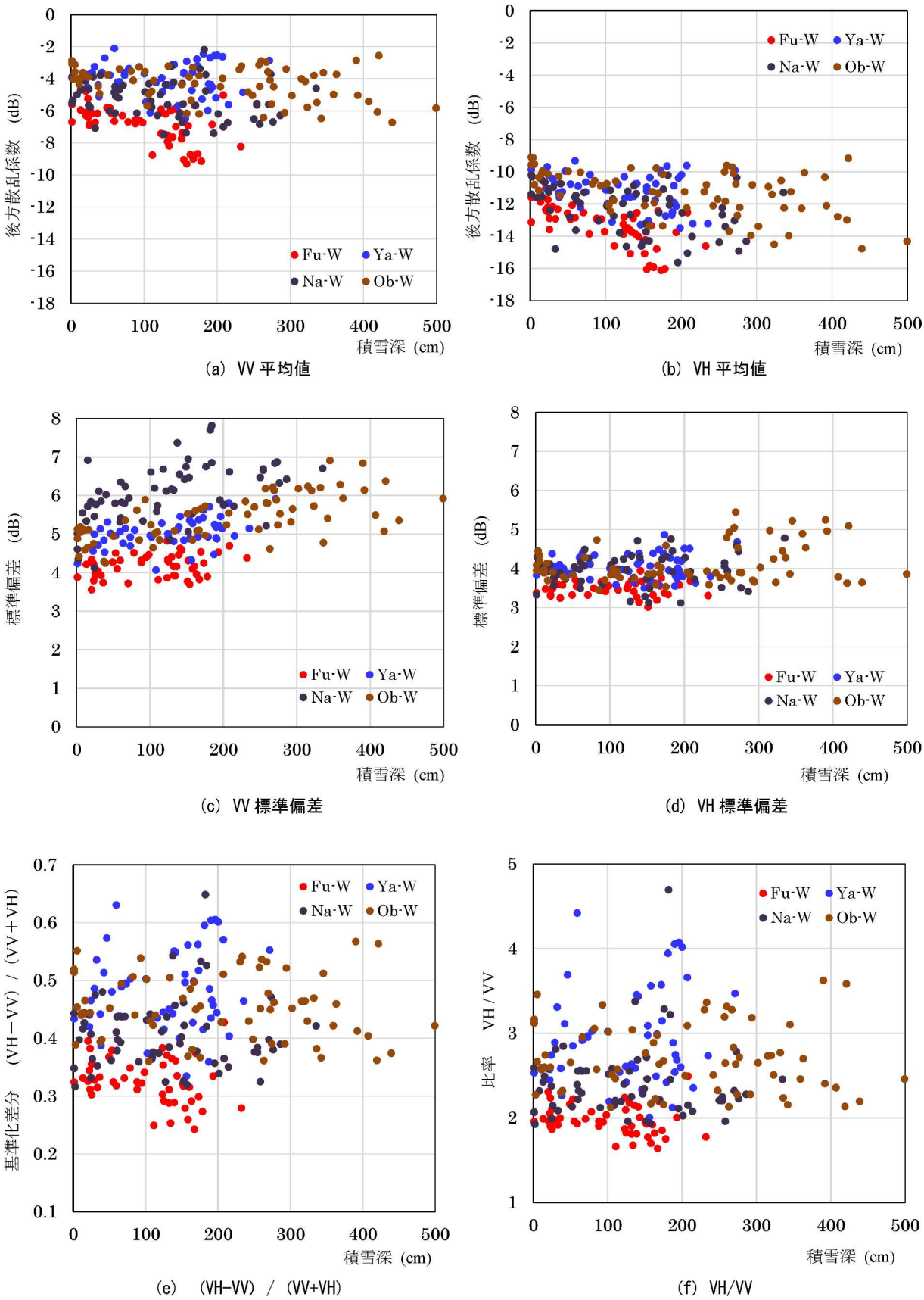


図-7.22　積雪深と後方散乱係数の平均値，標準偏差，基準化差分，比率の関係（西傾斜斜面）

7.5　後方散乱係数からの積雪深の推定方法と精度

後方散乱係数は，地表の状況（植生の状況，地面の状況，雪の状況），入射角，斜面の角度，大気の状況などに影響すると考えられる．

本論文では，積雪深を目的関数として，説明変数として，後方散乱係数の VV，VH の平均値，標準偏差，VV，VH の標準化差分，比率を説明変数として，重回帰分析を行った．

式(7.3)を用いて，各観測所の観測された積雪深を目的関数に，各観測所周辺の東傾斜，西傾斜の東西南北 500m の領域の後方散乱係数と利根川最上流域の後方散乱係数に関する値を説明変数にして重回帰分析を行った結果を**表-7.4**，**図-7.23** に示す．

$$H_{snow} = \sum_{j=1}^{3}(a_{i,j}\cdot VV_{i,j} + b_{i,j}\cdot VH_{i,j} + c_{i,j}\cdot DA_{i,j} + d_{i,j}\cdot RA_{i,j} + e_{i,j}\cdot VVS_{i,j} + f_{i,j}\cdot VHS_{i,j}) + h_i \quad (7.3)$$

ここで，H_{snow} は観測所の積雪深(cm)，VV, VHは VV，VH の平均値(dB)，DA, RAは VV と VH の標準化差分，比率，VVS, VHSは VV，VH の標準偏差(dB)，$i = 1$は藤原，$i = 2$は矢木沢，$i = 3$は小穂口，$j = 1$は東傾斜，$j = 2$は西斜面，$j = 3$は利根川最上流域，a, b, c, d, e, fは偏回帰係数，hは偏回帰定数である．

表-7.4 に示すとおり，重回帰分析による重相関係数は 0.78～0.96，自由度調整済相関係数は 0.68～0.95 であり，特に，北行軌道では高い相関が得られた．北行軌道での二乗平均平方根誤差は 20cm 程度，南行軌道においては，藤原は 20cm 程度，矢木沢，小穂口は 30cm 程度である．

入射角が 5°程度小さい北行軌道の方が重相関係数が大きく，二乗平均平方根誤差は小さい．矢木沢での精度が他の地点に比べて劣るが，観測所と近傍の領域との積雪状況の差が他の 2 地点と比べて大きいことが考えられる．

なお，奈良沢については前述のとおり，今回の解析対象から除いた．

次に式(7.4)を用いて，積雪深を目的関数に各観測所周辺の東傾斜，西傾斜の東西南北 500m の領域の後方散乱係数と利根川最上流域の後方散乱係数に関する値を説明変数にして重回帰分析を行った結果を**表-7.5**，**図-7.24** に示す．

$$H_{snow} = \sum_{i=1}^{3}(a_i\cdot VV_i + b_i\cdot VH_i + c_i\cdot DA_i + d_i\cdot RA_i + e_i\cdot VVS_i + f_i\cdot VHS_i) + h_i \quad (7.4)$$

ここで，$i = 1$ は東傾斜，$i = 2$は西斜面，$i = 3$は利根川最上流域を示す．

表-7.4　重相関係数と二乗平均平方根誤差（各地点ごと）

項目	南行軌道			北行軌道		
	藤原	矢木沢	小穂口	藤原	矢木沢	小穂口
重相関係数	0.858	0.781	0.902	0.904	0.867	0.962
自由度調整済相関係数	0.781	0.677	0.854	0.848	0.793	0.945
二乗平均平方根誤差(cm)	24	34	32	19	24	23

最後に式(7.5)を用いて，積雪深を目的関数に，東西南北 500m の領域の後方散乱係数と利根川最上流域の後方散乱係数に関する値を説明変数にして重回帰分析を行った結果を**表-7.5**，北行軌道の場合を**図-7.25** に示す.

$$H_{snow} = \sum_{i=1}^{2}(a_i \cdot VV_i + b_i \cdot VH_i + c_i \cdot DA_i + d_i \cdot RA_i + e_i \cdot VVS_i + f_i \cdot VHS_i) + h_i \qquad (7.5)$$

ここで，$i = 1$ は東傾斜あるいは西斜面，$i = 2$ は利根川最上流域を示す.

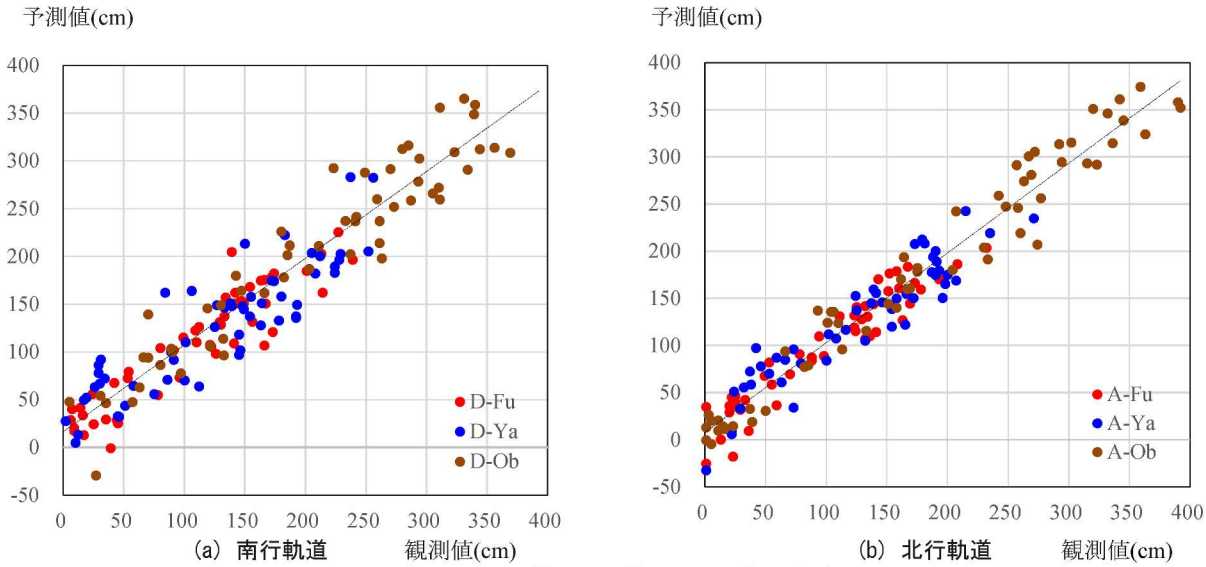
東・西傾斜ペアの後方散乱係数に関するデータに基づきその周辺の積雪深を推定した場合，二乗平均平方根誤差は北方軌道の場合 30cm 程度，南行軌道の場合は 50cm 程度となり，単独の領域で推定した場合は北方軌道で 40cm 程度，南行軌道で 50cm 程度となる.

このように，観測所の計器に不具合が生じた場合など，そこでの積雪深さを推定する場合の誤差は北行軌道で 20cm 程度，南行軌道では 20～30cm 程度であり，斜面の 500m 四方の後方散乱係数から積雪深を推定する場合の精度は，東・西傾斜斜面のペアであるかどうか，軌道にもよるが 30～50cm 程度となる.

北行軌道の方が南行軌道に比べて，後方散乱係数と積雪深の相関が高いのは，木が生い茂っている地域であり，入射角が小さいほど，木に邪魔されず，地表に積もった雪までレーダーが到達する確率が高くなること，入射角が小さい方がノイズが小さいことなどによるものと考えられる.

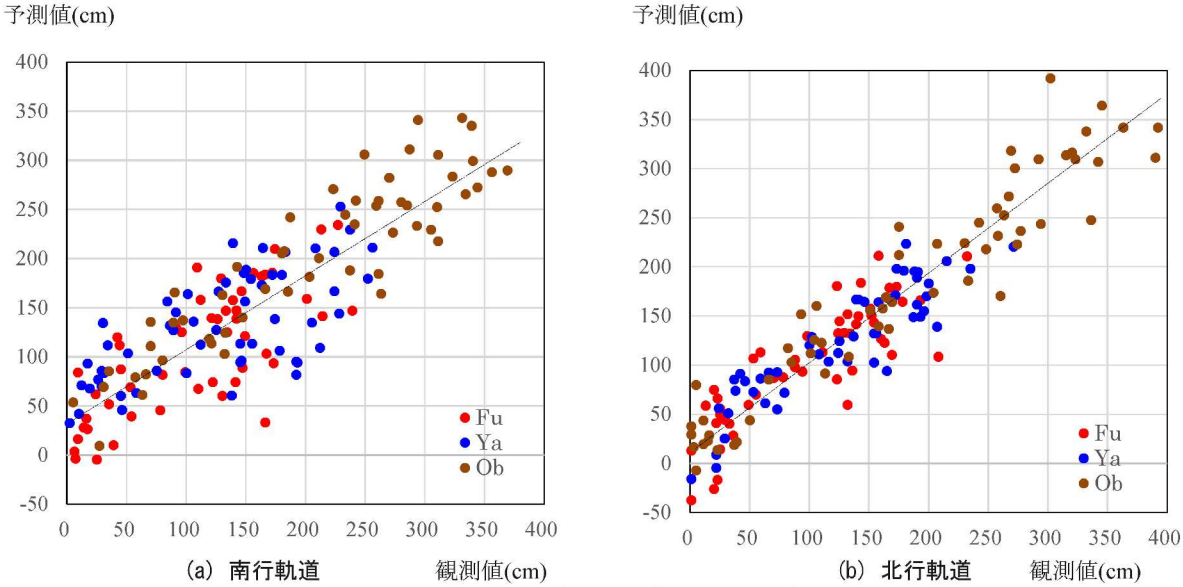
表-7.5　重相関係数と二乗平均平方根誤差（全体）

項目	南行軌道			北行軌道		
	E・W	E	W	E・W	E	W
重相関係数	0.726	0.664	0.640	0.877	0.850	0.814
自由度調整済相関係数	0.692	0.638	0.612	0.861	0.838	0.799
二乗平均平方根誤差(cm)	48	53	55	34	38	41



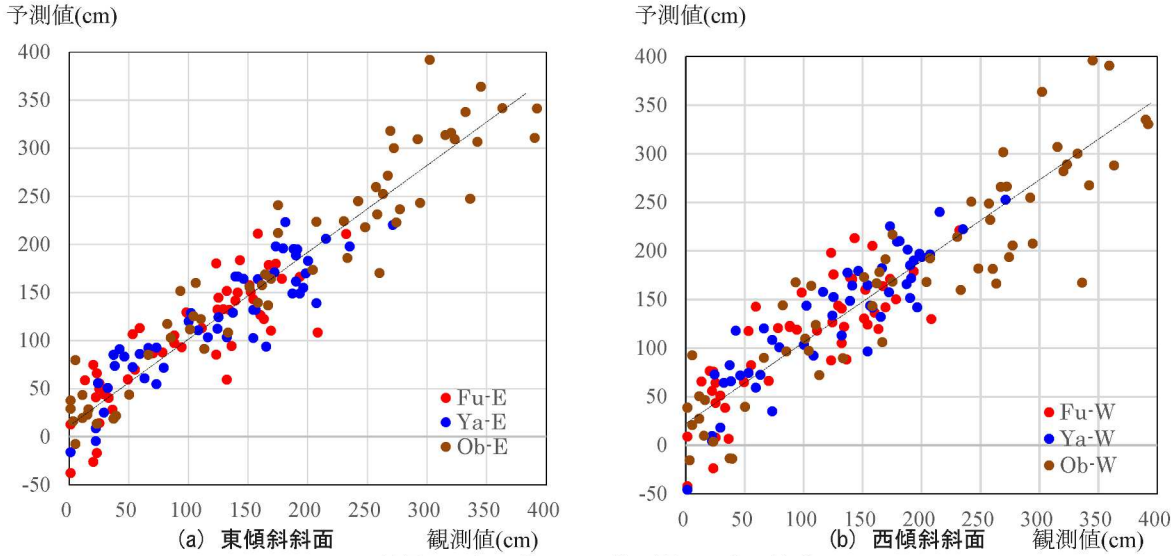
(a) 南行軌道　　(b) 北行軌道

図-7.23　積雪深の観測値と予測値の関係（各地点ごと）



(a) 南行軌道　　(b) 北行軌道

図-7.24　積雪深の観測値と予測値の関係（全体）



(a) 東傾斜斜面　　(b) 西傾斜斜面

図-7.25　積雪深の観測値と予測値の関係（北行軌道）

7.6　後方散乱係数からの積雪深の推定精度の検証

7.5 では 2017 年 1 月から 2022 年 3 月までの約 5 年間の Sentinel-1 SAR データを用い，積雪深さの推定を重回帰分析により検討するとともに，その推定精度を積雪深観測所の観測値を用いて検証した．ここでは，7.5 の積雪深の推定式に基づき，2022 年 12 月から 2023 年 3 月の積雪期の積雪深を推定して，その精度を検証する．

観測所で観測された積雪深は**図-7.26** に示すとおりであり，2022 年 12 月から 2023 年 3 月の積雪期の積雪は 2017 年からの 7 期の中では，2 番目に雪が少ない．

2017 年 1 月から 2022 年 3 月までの VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数の小穂口，利根川最上流域の事例を**図-7.27**，積雪深と後方散乱係数の関係（小穂口）を**図-7.28**，積雪深と後方散乱係数の比率の関係（小穂口）を**図-7.29** に示す．

式(7.3)に示す，2017 年 1 月から 2022 年 3 月までのデータに基づく重回帰分析による積雪深予測式により，2022 年 12 月から 2023 年 3 月の積雪深を推定した結果は**図-7.30**，**表-7.6** に示すとおりであり，二乗平均平方根誤差は 30cm 程度である．

2022 年 12 月から 2023 年 3 月の二乗平均平方根誤差は，積雪深のデータは少ないものの，**表-7.4** に示した 2017 年 1 月から 2022 年 3 月まで二乗平均平方根誤差と同程度である．

表-7.6　二乗平均平方根誤差

項目	Descending		
	藤原	矢木沢	小穂口
Root mean square Error (cm)	28	25	26

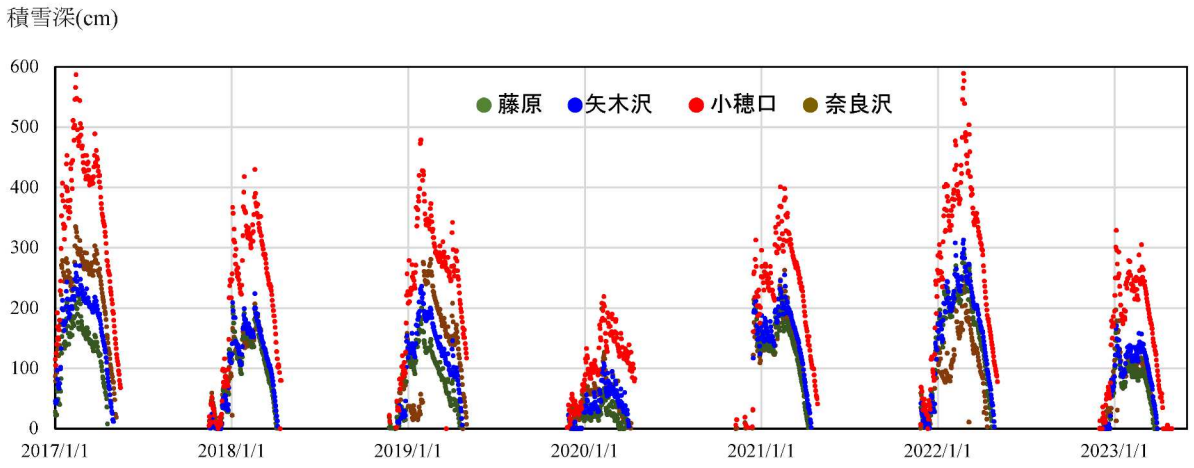
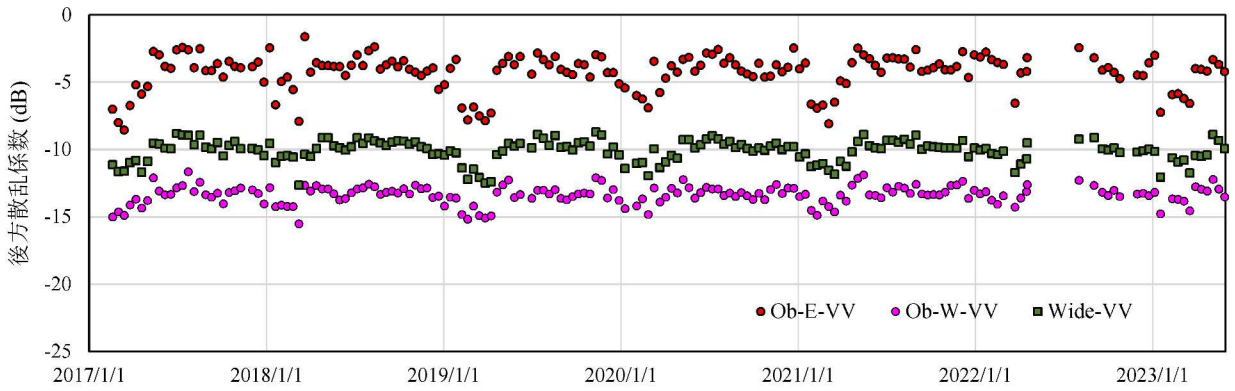
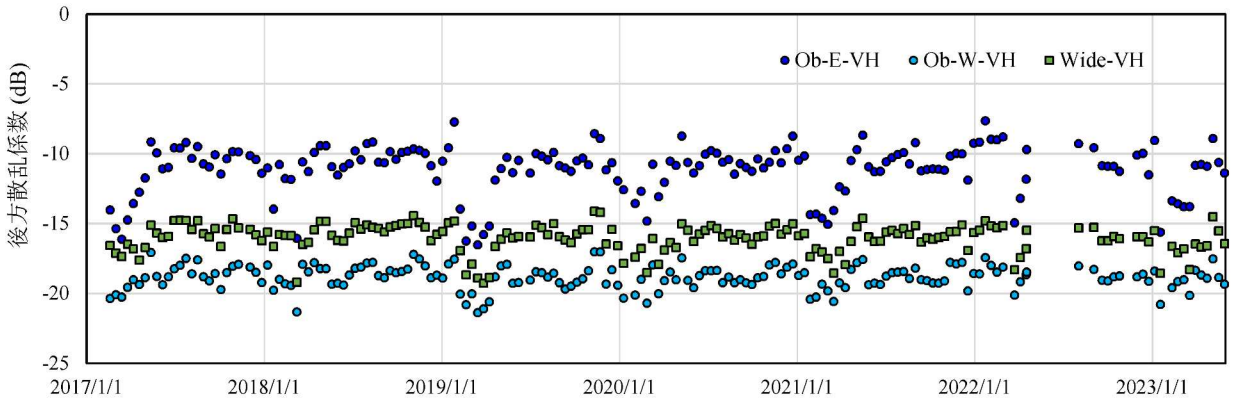


図-7.26　観測所で観測された積雪深

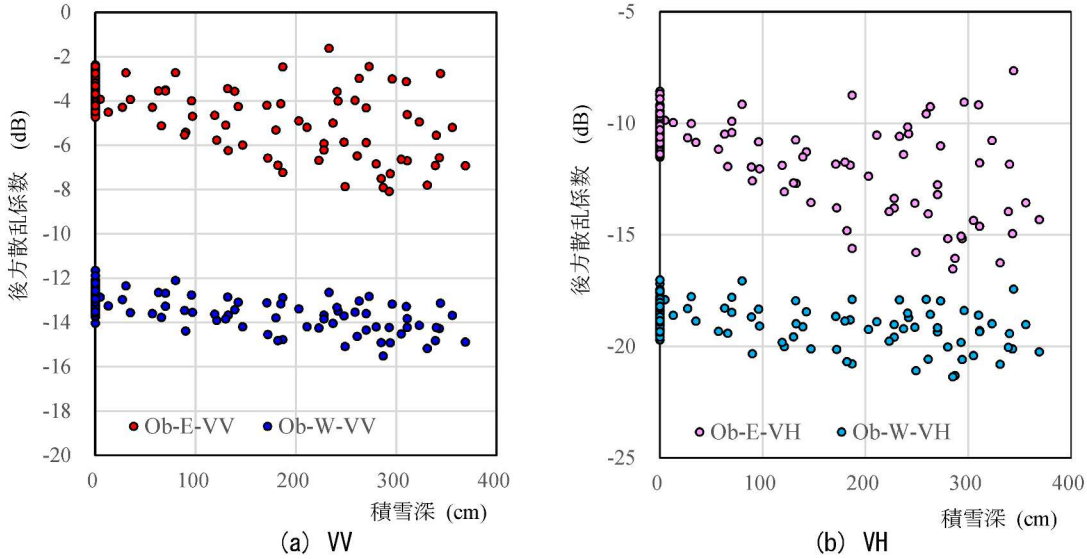


(a) VV 偏波の後方散乱係数の平均値



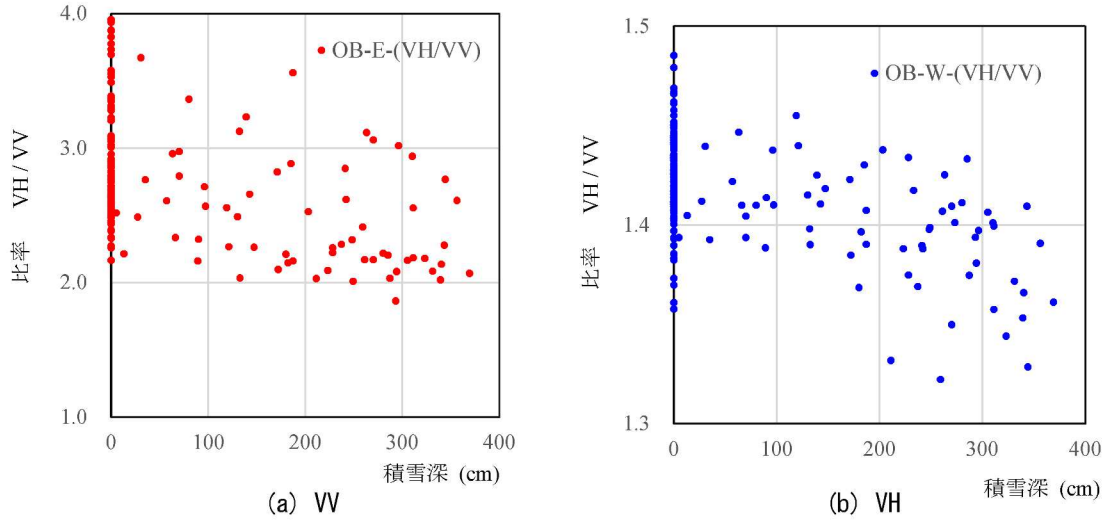
(b) VH 偏波の後方散乱係数の平均値

図-7.27　VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数（小穂口，利根川最上流域）



(a) VV　　(b) VH

図-7.28　積雪深と後方散乱係数の関係（小穂口）



(a) VV　　(b) VH

図-7.29　積雪深と後方散乱係数の比率の関係（小穂口）

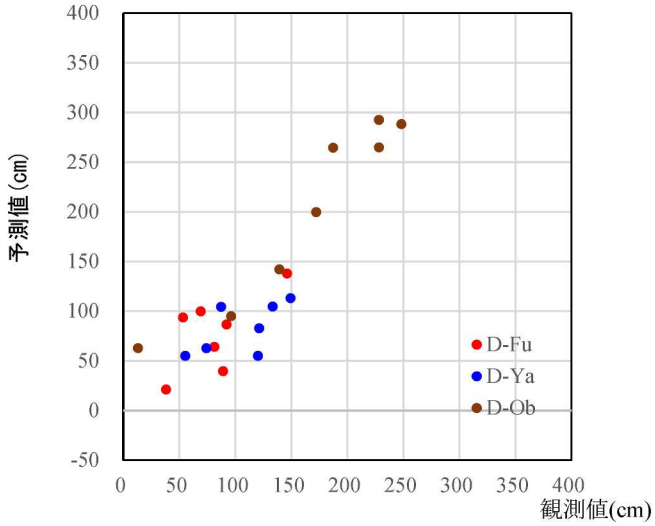


図-7.30　積雪深と後方散乱係数の比率の関係

7.7　後方散乱係数からの積雪深の推定精度の検証（新潟県）

これまでは，利根川最上流域の木が生い茂った箇所で積雪深推定について検討したが，ここでは平地も含む新潟県の豪雪地帯を対象に検討する．Sentinel-1 SAR データは 2017 年 1 月から 2022 年 3 月までの約 5 年間を用いて，利根川最上流域での検討と同様，重回帰分析による積雪深の推定を検討し，積雪深観測所の観測値を用いて推定精度を検証する．

新潟県は世界有数の豪雪地域であり，主に日本列島中央を走る脊梁山脈の西側で集中的に湿った雪が降ることが多い．新潟県の内陸部・山間部では積雪が 3m 以上となる場合もあるなど雪の多い地域地である．年間 800cm 以上の豪雪地が，観測地点では津南，小出，湯沢など 6 箇所あり，津南町は一冬に降る雪の量が平均約 1100cm と新潟県内でも最大である．

解析範囲と積雪観測所位置は**図-7.31** に示すとおりであり，本章での検討対象の積雪深を観測している気象庁の観測所は，津南観測所，小出観測所，湯沢観測所，只見観測所である．

2021 年 12 月の観測所で積雪がない日と積雪期の 2022 年 2 月の解析範囲全体の後方散乱係数を**図-7.32**，**7.33** に示す．後方散乱係数は VV 偏波，VH 偏波ともに，南行軌道では東傾斜斜面，北行軌道では西傾斜斜面が大きくなっているとともに，積雪の影響により低減している．

積雪観測所で観測された積雪深は**図-7.34**，積雪観測所周辺が平地の津南と，周辺は木が生い茂っている斜面の只見の VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数の経時変化（12 日間隔）は**図-7.35** に示すとおりであり，積雪の影響により後方散乱係数が小さくなっていることが確認できる．

後方散乱係数が，衛星軌道，斜面の傾斜方向，積雪の有無の違いがどのように異なるかを**図-7.36** に示す．斜面の傾斜と衛星視線方向との角度との関係が後方散乱係数に大きく影響し，積雪による低減効果も確認できる．

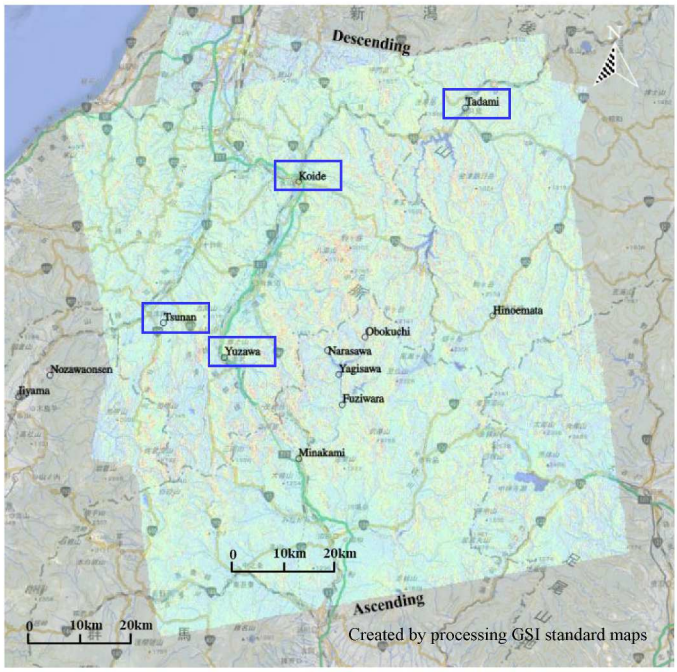
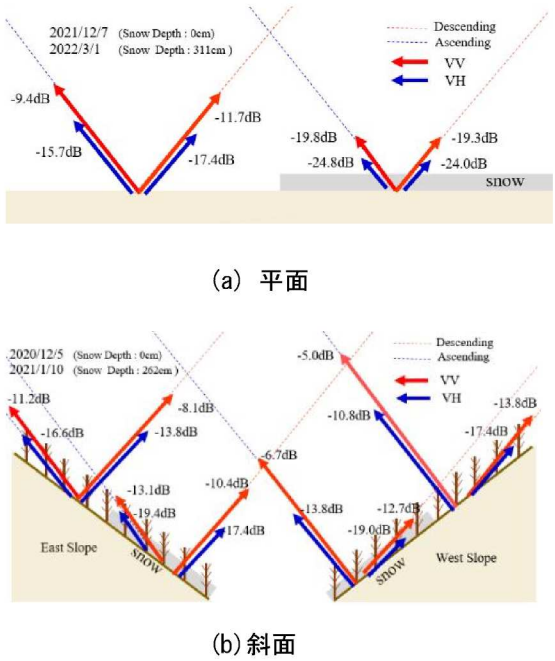


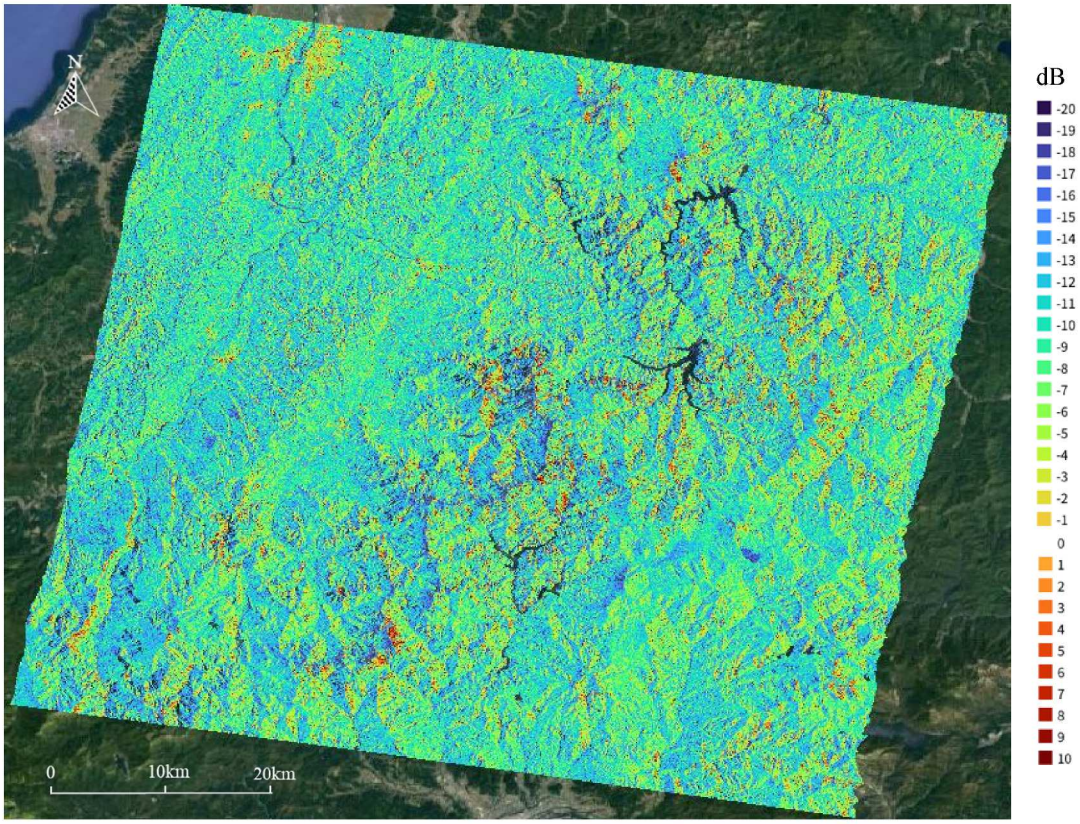
図-7.31　解析範囲と積雪観測所位置図



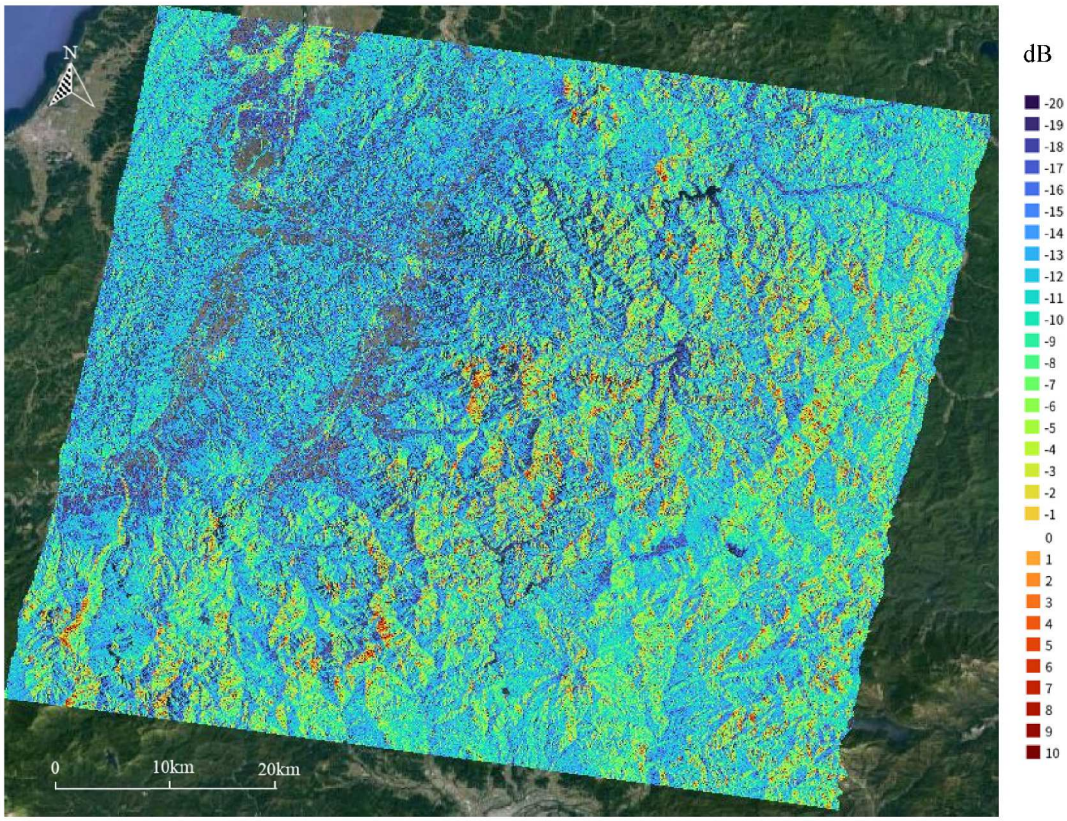
(a) 平面

(b) 斜面

図-7.36　後方散乱係数模式図

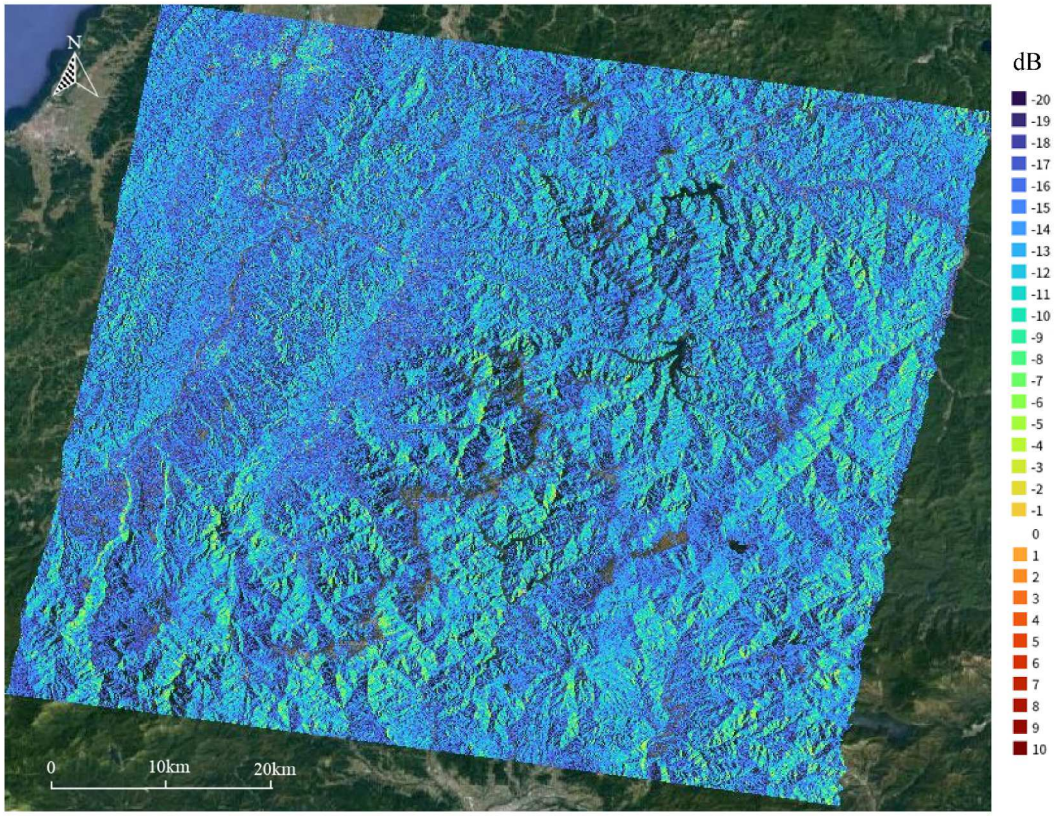


(a) 2021 年 12 月 6 日

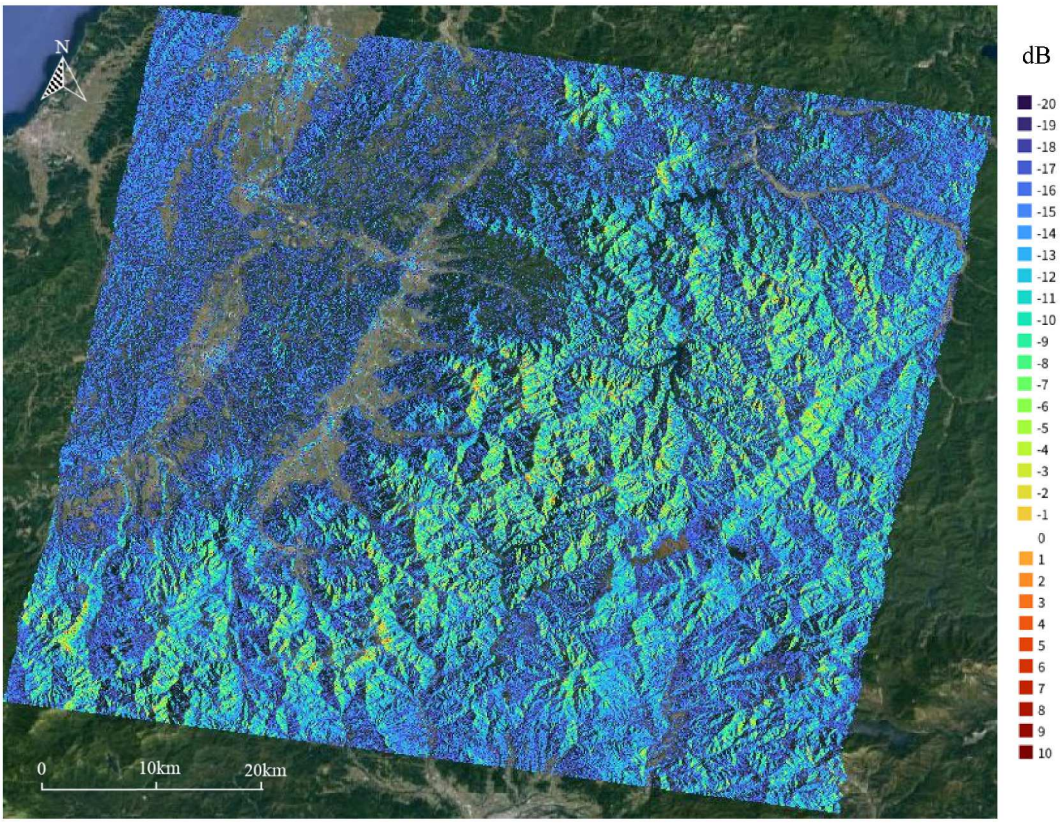


(b) 2022 年 2 月 28 日

図-7.32　後方散乱係数(VV)



(a) 2021 年 12 月 6 日



(b) 2022 年 2 月 28 日

図-7.33　後方散乱係数(VH)

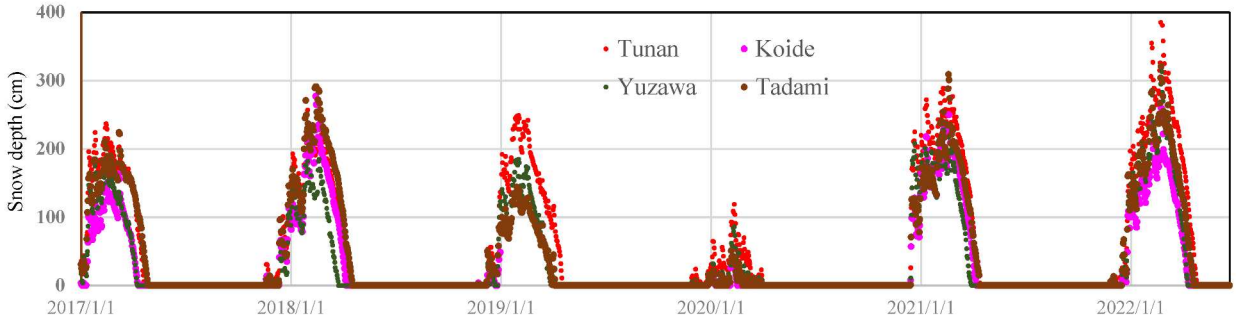
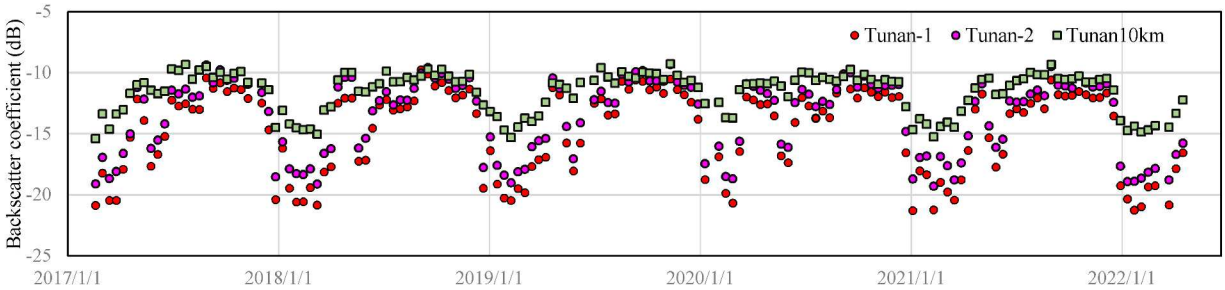
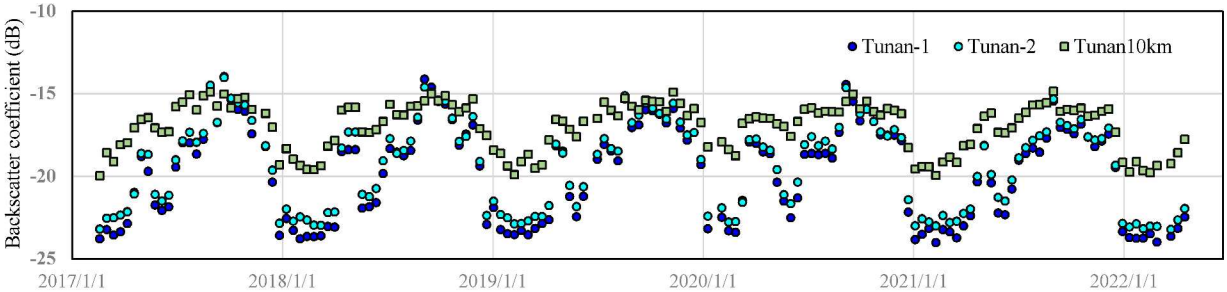


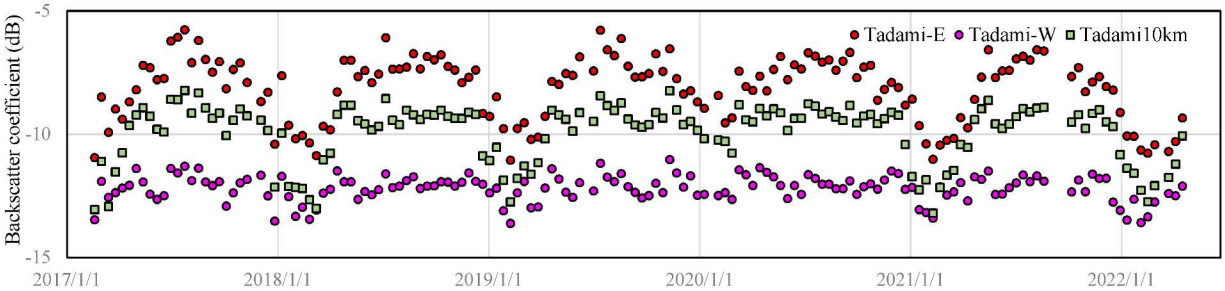
図-7.34　観測箇所での積雪深



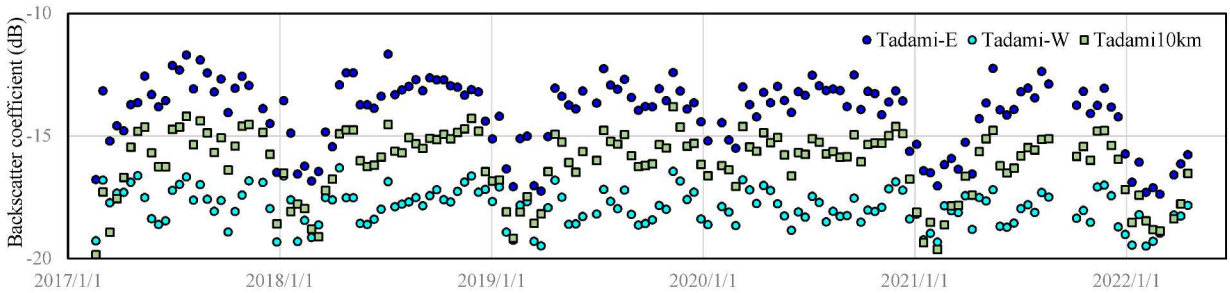
(a) 平地（津南）VV



(b) 平地（津南）VH



(c) 斜面（只見）VV

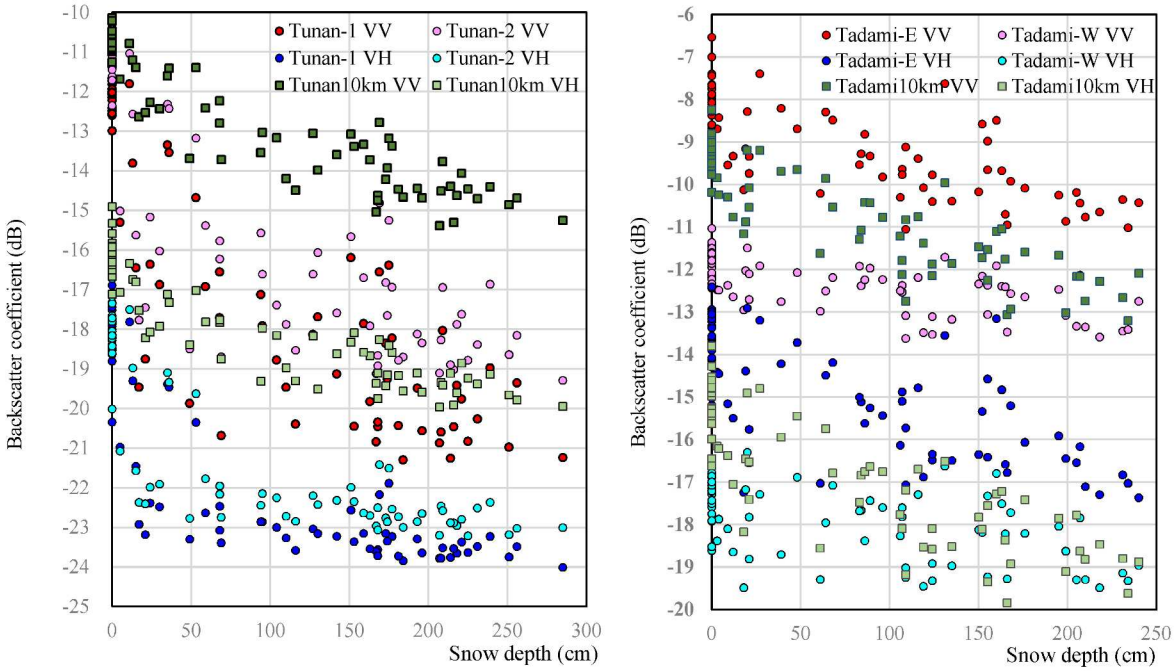


(d) 斜面（只見）VH

図-7.35　VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数

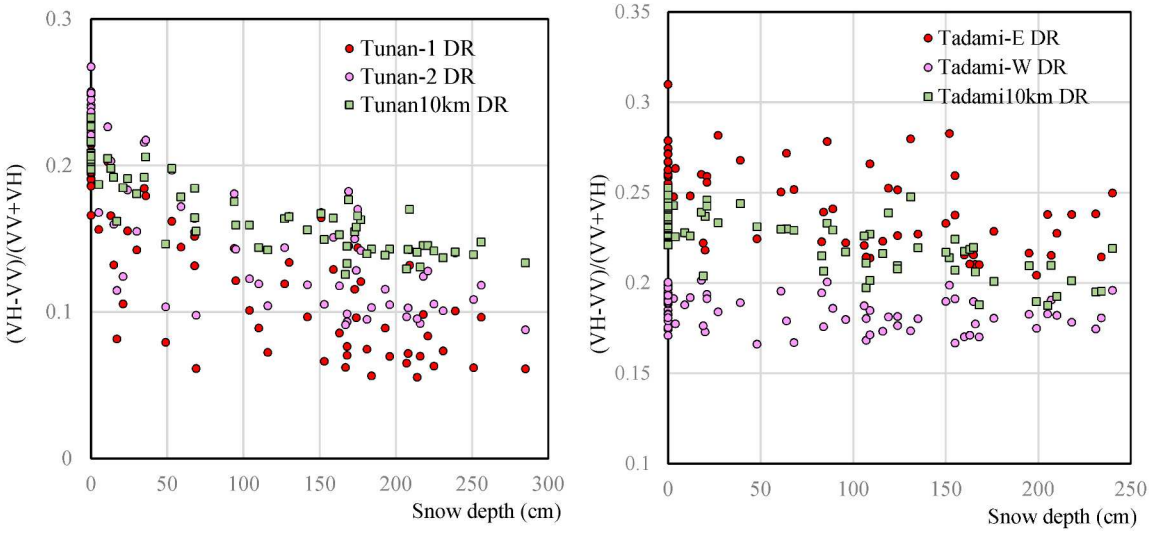
7.7.1　後方散乱係数と積雪深の関係

津南と小出の積雪深と後方散乱係数の関係は**図-7.37** に示すとおりであり，VV 偏波と VH 偏波の後方散乱係数は積雪深が大きくなるにつれて小さくなる傾向がある．平地の津南で，積雪深が小さいと後方散乱係数は大きく減少し，積雪深が大きくなると後方散乱係数は減少する傾向がある．一方，樹木に覆われた斜面では，樹木の有無によるばらつきは大きいものの，どの深さでも同程度に積雪深の増加とともに後方散乱係数が減少する傾向がある．津南と只見における積雪深と VV 偏波と VH 偏波の標準化差分（VH-VV）/（VV+VH）の関係は**図-7.38** に示すとおりであり，積雪深が深くなるにつれて VH 偏波の後方散乱係数は減少するが，VV 偏波は VH 偏波よりも減少する．



(a) 津南（平地）　　(b) 只見（斜面）

図-7.37　VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数



(a) 津南（平地）　　(b) 只見（斜面）

図-7.38　VV 偏波，VH 偏波の後方散乱係数の基準化差分

7.7.2　積雪深の推定精度

積雪深を目的関数とし，後方散乱係数の VV と VH の平均値と標準偏差，VV と VH の標準化差，VV と VH の比を説明変数として，利根川最上流域と同様に，式 (7.6) に示す重回帰分析を行った．

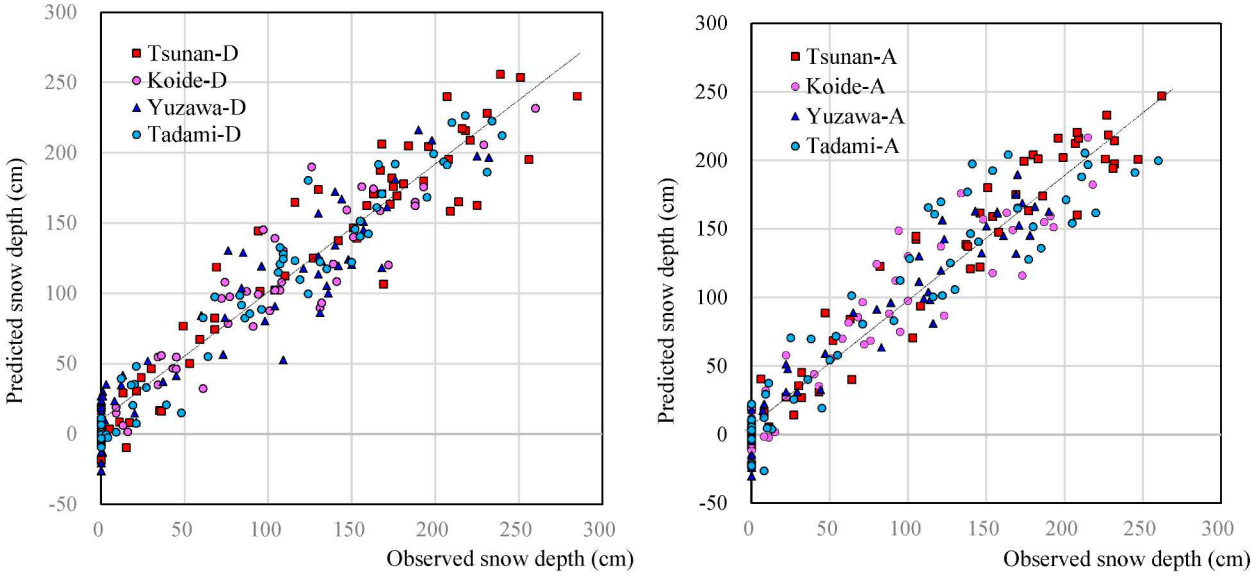
$$H_{snow,i} = \sum_{j=1}^{3}(a_{i,j} \cdot VV_{i,j} + b_{i,j} \cdot VH_{i,j} + c_{i,j} \cdot DA_{i,j} + d_{i,j} \cdot RA_{i,j} + e_{i,j} \cdot VVS_{i,j} + f_{i,j} \cdot VHS_{i,j}) + h_i \quad (7.6)$$

ここで，H_{snow} は観測所の積雪深(cm)，VV, VHは VV，VH の平均値(dB)，DA, RAは VV と VH の標準化差分，比率，VVS, VHSは VV，VH の標準偏差(dB)，$i = 1$は津南，$i = 2$は小出，$i = 3$は湯沢，$i = 4$は只見，$j = 1$は平地あるいは東傾斜，$j = 2$は平地あるいは西斜面，$j = 3$は観測所周辺領域，a, b, c, d, e, fは偏回帰係数，hは偏回帰定数である．

重回帰分析の結果は**表-7.7**，**図-7.39** に示すとおりであり，重相関係数は 0.86 から 0.95 の範囲であり，自由度調整相関係数は 0.78 から 0.92 の範囲であった．二乗平均平方根誤差は 18cm から 30cm の範囲で，多くは 20cm 程度であり，利根川最上流域での結果と同様の結果となった．

表-7.7　重回帰分析結果

項目	南行軌道				北行軌道			
	津南	小出	湯沢	只見	津南	小出	湯沢	只見
重相関係数	0.91	0.90	0.88	0.95	0.94	0.88	0.93	0.86
自由度調整済相関係数	0.87	0.84	0.82	0.89	0.90	0.79	0.89	0.79
二乗平均平方根誤差(cm)	25	22	24	18	22	24	18	30



(a) Descending　　(b) Ascending

図-7.39　積雪深の観測値と予測値の関係（南行軌道）

7.8 まとめ

Sentinel-1 SAR データを用いて，後方散乱係数と積雪深の関係性を検討するとともに，後方散乱係数を説明変数とした重回帰分析による積雪深の推定精度を群馬県の利根川最上流域を対象に，積雪深観測所での観測値に基づき検討した．主な検討結果は以下のとおりである．

- 木が生い茂った領域において，積雪深が大きくなるにしたがって，VV，VH 偏波の後方散乱係数はそれぞれ減少する傾向にある．また，VV，VH 偏波の後方散乱係数の基準化差分，比率も減少する傾向にある．VV 偏波の後方散乱係数が積雪深さが大きくなるにしたがって低下するのに比べて，VH 偏波の方がより低下する．
- VV，VH 偏波の標準偏差については，上記の低減傾向が顕著に認められない場合は，積雪深さが大きくなるにしたがって大きくなる傾向にある．
- 目的関数を積雪深観測所の積雪深，説明変数を積雪深観測所周辺，利根川最上流域の VV，VH 偏波の後方散乱係数に関する値として重回帰分析をした結果，VV，VH 偏波の後方散乱係数の平均値，標準偏差，基準化差分，比率から，重相関係数で 0.64～0.95，推定精度 20～50cm 程度で積雪深の推定が可能である．ただし，今回の観測値は 4m 以上のデータが少なく，4m 以上になると積雪深と後方散乱係数に関する値の相関関係が明確に認められないので，推定対象は 4m 以下である．
- 山岳地帯で木が生い茂っている箇所では，入射角が小さい方が地表に積もった積雪に到達する確率が高くなることなどにより，精度よく積雪深を推定できる可能性がある．今回は北行軌道の方が入射角が小さく，観測所での推定誤差は 20cm 程度，重相関係数は 0.87～0.96，任意の箇所での推定誤差は 30～40cm 程度，重相関係数は 0.81～0.88 である．
- Sentinel-1 SAR データを用いれば，南行，北行軌道それぞれ 12 日間隔で，広域での積雪分布を VV，VH 偏波の後方散乱係数から推定が可能である．融雪量推定のための広域な流域面積での積雪深については，500m メッシュの斜面の後方散乱係数，川沿いなど東・西傾斜斜面が隣接する箇所では，推定精度の高い東・西傾斜斜面のペアの後方散乱係数を用いることなどにより推定することが考えられる．今後，データを蓄積することで，VV，VH 偏波の後方散乱係数からの積雪深推定精度を更に高められると考えられる．
- 2017 年 1 月から 2022 年 3 月までの約 5 年間の Sentinel-1 SAR データを用いた重回帰分析による積雪深の推定式に基づき，2022 年 12 月から 2023 年 3 月の積雪期の積雪深を推定した結果，二乗平均平方根誤差は 30cm 程度であり，2017 年 1 月から 2022 年 3 月まで二乗平均平方根誤差と同程度である．

平地も含む新潟県の豪雪地帯を対象に，Sentinel-1 SAR データは 2017 年 1 月から 2022 年 3 月までの約 5 年間を用いて，利根川最上流域での検討と同様，重回帰分析による積雪深の推定精度を検証した．平地では積雪深が小さい場合，利根川最上流域の木が生い茂った箇所に比べて，後方散乱係数の大きく減少する傾向があるものの，二乗平均平方根誤差は 18cm から 30cm の範囲で，多くは 20cm 程度であり，利根川最上流域での検討結果と同様の結果となった．

【参考文献】

1) 小池雅洋，虫明功臣，沖大幹，渕上吾郎：マイクロ波散乱計による積雪観測のための実験，土木学会学術講演会，1993. [Koike, M., Mushiake, K., Oki, T. and Fuchigami, G.: Experiments for snow accumulation observation by microwave scatterometer, JSCE Annual Conference, 1993.]
2) 外狩麻子，本間信一，佐藤匠，本田謙一，鈴木修：衛星 SAR を用いた積雪深分布推定に関する研究，JSSI & JSSE Joint Conference, 2015. [Togari, A., Homma, S., Sato, T., Honda, K. and Suzuki, O.: Satellite SAR processing methods evaluation for snow depth estimation, JSSI & JSSE Joint Conference, 2015.]
3) 永井裕人，山口悟，山下克也，河島克久：衛星を活用した積雪域の広域積雪深分布を目指した積雪中マイクロ波反射特性の解明, 新潟大学災害・復興科学研究所共同研究報告書, 2019. [Nagai, Y., Yamaguchi, G., Yamashita, K. and Kawashima, K.: Microwave reflection characteristics in snow cover

for wide-area snow depth distribution in snow covered areas using satellites, Niigata University Research Institute for Disaster and Recovery Science Joint Research Report, 2019.]

4) 小川幹治：衛星画像と雪モデルを利用した積雪量の経年変化について，国土交通省関東地方整備局スキルアップセミナー関東，2012. [Ogawa, K.: Secular change of snow cover using satellite images and snow models, Skill-up Seminar Kanto, Kanto Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan, 2012.]

5) 高橋和政，窪田政浩，宮原雅幸：融雪期の積雪分布推定と流入量予測の精度向上に向けた検討について，寒地土木研究所北海道開発技術研究発表会，2017. [Takahashi, K., Kubota, M. and Miyahara, M.: Study on improvement of accuracy of snow distribution estimation and inflow prediction during snow-melting season, Hokkaido Development Technology Research Presentation Meeting, Civil Engineering Research Institute for Cold Region, 2017.]

6) 西原照雅，谷瀬敦：人工衛星画像から抽出した雪面の情報を融雪期のダム管理に活用する手法の検討，日本リモートセンシング学会誌，Vol. 39, No. 4, 2019. [Nishihara, T. and Tanise, A.: A study on a method for how to utilize snow cover information extracted from satellite images for dam operation during the snowmelt period, Journal of The Remote Sensing Society of Japan, Vol. 39, No. 4, 2019.]

7) Li, H., Wang, Z., He, G. and Man, W.: Estimating snow depth and snow water equivalence using repeat-pass interferometric SAR in the northern piedmont region of the Tianshan Mountains, Hindawi Journal of Sensors, 2017.

8) Mazeh, F., Hammoud, B., Ayad, H., Ndagijimana, F., Faour, G., Fadlallah, M. and Jomaah, J.: Numerical analysis of radar response to snow using multiple backscattering measurements for snow depth retrieval, Progress in Electromagnetics Research B, Vol. 81, 63–80, 2018.

9) Feng, T., Hao, X., Wang, J., Li, H. and Zhang, J.: Quantitative evaluation of the soil signal effect on the correlation between Sentinel-1 cross ratio and snow depth, Remote Sensing, 2021.

10) Lievens, H., Brangers, I., Marshall, H.-P., Jonas, T., Olefs, M. and De Lannoy, G.: Sentinel-1 snow depth retrieval at sub-kilometer resolution over the European Alps, The Cryosphere, 2022.

第８章　結論及び展望

8.1　本研究の結論

本論文は，地球観測人工衛星 SAR データを活用した合理的なインフラ施設の維持管理方法について，特にエネルギー施設を対象に検討したものである．具体的には，Sentinel-1 SAR データを活用したロックフィルダムの外部変形モニタリング，コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリング，地盤沈下モニタリング，積雪深の推定である．それぞれの検討事項の結論は以下のとおりである．

8.1.1　ロックフィルダムの外部変形モニタリング

Sentinel-1 SAR データを用いた PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形計測の精度について，年間最大 10mm 程度変位し，外部変形量を連続計測している安定期にある大規模なロックフィルダムを対象に，2017 年 4 月から 2021 年 3 月までの 4 年間の測量値と PSInSAR 解析結果を比較することにより計測精度が検証できた．PSInSAR 解析を実施した結果，南行，北行軌道ともにダム堤体全面に PS 点が多く得られ，面的に変位が把握できるとともに，測量位置と PS 点の場所が完全に一致してはいないものの，移動平均値の RMSE が 3 mm～5 mm と mm オーダーの高い精度で計測できることを確認した．

さらに，年間最大変位が 2mm 程度以下の 6 基のロックフィルダムを対象に，2017 年 4 月から 2022 年 12 月までの最大 5 年 9 カ月間の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して外部変位を計測し，変位計測の誤差は 3 mm ～5 mm 程度であるとともに，年平均変位の誤差は 0.5mm/年程度と高い精度の計測が可能であることを確認した．計測精度を確保するためには，基準点を適切に設定するとともに，積雪による影響などにより，変位計測の信頼性が得られない SAR データとして，ダム全面での PS 点の 12 日間の変位の標準偏差が 5 mm 程度以上となるデータとすることを提案した．

ロックフィルダムへの PSInSAR 解析による変位計測の適用性について，そのメリットとデメリットを評価するとともに，現状の測量の頻度を低減させ PSInSAR 解析による変位計測を適用するなど，合理的な保守管理について提案した．

8.1.2　コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリング

Sentinel-1 データを用いた PSInSAR 解析によるコーナーリフレクタ設置箇所での変位の計測精度の検証ができた．コーナーリフレクタを鉛直方向に 15mm アップした衛星視線方向変位 11.8mm の変位計測精度は 0.9mm，30mm アップした衛星視線方向変位 23.7mm の変位計測精度は 1.2mm，計測期間の変位計測誤差は 1.3 mm であり，高い精度で変位が計測できることを確認した．変位計測精度を確保するためには，基準点変位を適切に設定する重要性を指摘した．

山岳部の斜面など PS 点が得られない箇所で斜面の変位監視が必要な箇所へコーナーリフレクタを設置して変位監視するなど，社会インフラ設備の保守管理などへの人工衛星 SAR データのさらなる活用を指摘した．

水力発電所の水路経過地斜面で，Sentinel-1 SAR データを用いて，約 5 年間の PSInSAR 解析を適用し，人工構造物がある PS 地点で衛星視線方向の変位計測の結果と，水路がある地点の測量調査結果が整合していることを確認し，斜面変位モニタリングの適用性について評価した．また，小型で安価なコーナーリフレクタを PS 点が得られない水路近傍に製作，設置し，人工構造物の PS 点に加え，コーナーリフレクタの PS 点でも変位が精度高く計測できることを確認し，コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリングの適用性について評価した．

8.1.3　地盤沈下モニタリング

最大で約 2cm/年地盤沈下している千葉県東部地域を対象に，2017 年 1 月から 2024 年 1 月までの 7 年間の南行軌道の Sentinel-1 SAR データを用いて PSInSAR 解析を実施して計測した地盤沈下量と千葉県で実施している水準測量結果を比較して，地盤沈下量の計測精度の検証ができた．

水平地盤での地盤沈下の現象のように，地殻変動を除くと鉛直方向のみ変位している場合は，地殻変動が同程度で，計測誤差をなるべく低減できるように，一定の領域を定め，その領域内において変位が測量などで把握できている箇所の基準点を適切に設定することで（本論文では千葉県の東部で 5 箇所の基準点），一方向からの SAR データでも精度の高い計測が可能であることを示せた．

PSInSAR 解析結果と水準測量結果を比較した結果，PSInSAR 解析による衛星視線方向の変位，年平均変位の RMSE は，比較的広範囲の領域ごとに基準値を設定しても，5mm 程度，1mm/年程度であり，PSInSAR 解析により地盤沈下量を mm オーダーの高い精度で計測できることを検証した．

日本では広域な地盤沈下は沈静化する傾向にあるものの，国や地方公共団体では水準測量により地盤沈下監視を継続している．人工構造物がある程度の密度である地域では，PSInSAR 解析により広域で一定程度の密度で PS 点が得られ，地盤沈下を広域で面的に精度よくモニタリングできることから，水準測量と併用するなど地盤沈下監視の合理化ができる余地があることを指摘した．

8.1.4　積雪深の推定

Sentinel-1 SAR データを用いて，積雪深の推定方法を検討するとともに，群馬県の利根川最上流域を対象に，積雪深観測所での観測値を用いてその推定精度の検証ができた．本地域の森林地帯において，積雪深と斜面の VV 偏波と VH 偏波の後方散乱係数の関係性について検討した結果，後方散乱係数から積雪深の推定が可能であることを確認した．木が生い茂っている 500m 四方の斜面の後方散乱係数から 4m 以下の積雪深の推定精度は，推定条件などによるが 20～50cm 程度となり，融雪量推定のための広域な流域面積での積雪の状況を把握することなどに活用できる可能性があることが示せた．

8.2　災害時の衛星データの活用

8.2.1　活用できる衛星データ

大規模，広域での災害が発生した際には，衛星データを活用して，どこで何が起きたのかを速やかに災害対応者などに提供して，今後の対応などへの意思決定などに役立てることができる．その際，災害の発生前後の衛星データがいつの時点で得られるかが，災害発生時から情報提供までの期間を左右することになる．

主な衛星SARデータは下表に示すとおりであり，通常は同一条件での衛星SARデータの取得は，ALOS-2 では 3 カ月程度の間隔，Semtinel-1 では 12 日間隔（2 基体制を考慮すると 6 日間隔）である．

現在，世界の宇宙機関の多くが大規模災害時に緊急観測データを無償で提供しており，国際的には国際災害チャーターが，また，アジア太平洋地域での取り組みとしてセンチネルアジアがある．

国際災害チャーターは2000 年にカナダとヨーロッパの宇宙機関から発足し，2019 年の時点で 15 の国と地域から 17 の宇宙関連機関が参加している．センチネルアジアは，アジア太平洋地域宇宙機関会議　（APRSAF）の取り組みとして 2006 年に始まり，国際災害チャーターが発動される規模ではないが，国内的に大きな被害が出ている災害にも対応する．

表-8.1　主な衛星 SAR データ

衛星	観測波長	分解能	観測幅	同条件での画像観測間隔	観測範囲（画像購入価格）
ALOS-2（日本：JAXA）	L バンド（約 24cm）	1×3m	25km	年 3～4 回	日本全域（8 万円/枚）
		3×3m	50km		
Sentinel-1（EU：ESA）	C バンド（約 6cm）	5×5m	80km	月 1～2 回	日本全域（無料）
		5×20m	250km		
TerraSAR-X（独＊DLR）	X バンド（約 3cm）	1×2m	10km		都市域中心（約 50 万円～/枚）

表-8.2 インドネシア・スラウェシ島地震で国際災害チャーターに提供されたデータの種類とシーン数 [1)]

データ名称	特徴	所有国	提供シーン数
WorldView	VHR	米国	92
Pleiades	VHR	フランス	12
KOMPSAT	VHR	韓国	5
GeoEye	VHR	米国	4
PLANET	HR	米国	66
GF1	HR	中国	4
Kanopus-V	HR	ロシア	2
Resurs-P	HR	ロシア	1
Sentinel-2	MR	欧州	7
DMC	MR	UK他	2
Landsat-8	MR	米国	1
RADARSAT	SAR	カナダ	3
ALOS-2	SAR	日本	3
TerraSAR-X	SAR	ドイツ	2
合計			204

VHR: 超高分解光学センサ，分解能 1m 以下
HR: 高分解光学センサ，分解能 1～10m 未満
MR: 光学センサ，分解能 10m 以上
SAR:SAR センサ，分解能 1m ～30m

表-8.3　2016 年から 2018 年（3 年間）に発動された センチネルアジアの国別・災害タイプ別の件数 [1)]

国(地域)	計	内訳					
		F	T	E	L	V	他
ベトナム	20	17	3				
インドネシア	14	6		4	2	2	
フィリピン	10	2	3	2		2	F
台湾	10	3	4	2			O
インド	6	3	3				
ミャンマー	5	4		1			
ネパール	4	4					
スリランカ	4		4				
バングラデシュ	4	2	1		1		
日本	3	1		2			
タイ	3	2					O
ラオス	2	2					
韓国	2			2			
中国	2			1	1		
パキスタン	2				2		
ブータン	1	1					
PNG	1					1	
UAE	1		1				
トンガ	1		1				
フィジー	1		1				
計	96	47	21	14	6	5	3

F: 洪水（Flash Flood を含む），T: 台風，サイクロン
E: 地震，L: 地すべり，V: 火山噴火
その他：O：原油流出事故，F：森林火災

なお，緊急災害対応マッピングでは，データ提供による迅速なデータ解析が求められるため，災害タイプ別標準プロダクトが作成される．標準プロダクトの例は以下のとおりである．

（1）洪水

被災前後の SAR データの強度の差から冠水被害地を検出する．

（2）地滑り・斜面崩壊

被災前後の SAR データ，光学データともに，その変化を抽出して災害箇所を検出するが，SAR データからは誤検出が多いため，光学データを用いた目視判読による認定が不可欠である．

（3）地震・火山噴火・津波

被災前後の SAR データから，差分干渉 SAR 解析（DInSAR 解析）により地殻変動量を把握する．

光学データを用いて建物被害マップを作成する．

（4）その他

氷河湖決壊による洪水災害で光学データから被災地マップを作成する．

原油流出の際，SAR データの強度から海面の粗度を解析し，流出原油の分布を推定する．

8.2.2 衛星コンストレーションの進展

人工衛星に使用される機器の小型軽量化や衛星打上げ費用の低廉化により，小型の人工衛星の実用化が比較的容易になってきている．このため，中・低軌道に打ち上げた多数の小型非静止衛星を連携させて一体的に運用する「衛星コンストレーション」の構築が可能となってきている．

衛星コンステレーションを用いた主なビジネスとしては，衛星ブロードバンド通信と地球観測が具体化している．衛星コンストレーション事業を実施・計画する主な事業者（2022 年時点）は**表-8.4** に示すとおりである．

現段階の衛星保有数で見れば，通信分野では米国の SpaceX，地球観測分野では，光学衛星の米国の Planet Labs，SAR 衛星ではフィンランドの ICEYE が挙げられる．近年，日本でも商用の小型 SAR 衛星によるコンストレーションを目指して衛星を大量に打ち上げる計画がある．例えば，QPS 研究所や Synspective 社では，将来的には 36，30 基の運用を計画している．

衛星コンストレーションが構築されるとデータの取得間隔が短くなり，衛星データの入手が非常に早くなり，速やかに情報提供できるようになる可能性がある．

QPS 研究所の X バンドの小型 SAR 衛星における分解能は 0.7m であり，特に都市部の建物などでも精度よく把握できる可能性があるとともに，近い将来には 10 分ごとに撮ることを目指すとも言われており，従来の時間の概念を崩す頻度でのデータが取得できる可能性がある．

光学衛星については，米国 Planet 社の小型光学衛星 Dove は空間解像度 3m 程度のセンサーであるとともに，衛星を既に 150 機程度打ち上げており，日本列島においては陸地を 1 日 1 回程度の頻度で観測可能と言われており，こちらも従来の時間の概念を崩す頻度でのデータが取得できる可能性がある．

表-8.4　衛星コンストレーション事業を実施・計画する主な事業者（2022 年時点）[3)]

分野	事業者（プロジェクト名）	国	軌道上保有数	計画総数
通信	SpaceX（Starlink）	米国	約 3,400	11,943
	Amazon（Project Kuiper）	米国	0	3,236
	Astra Space（Astra Constellation）	米国	0	13,620
	Telesat（Lightspeed）	カナダ	0	198
	OneWeb（OneWeb）	英国	428	648
	China Satellite Network Group（Guo Wang）	中国	0	12,992
	Hanwha Systems（Hanwha）	韓国	0	2,000
地球観測（光学センサー）	Planet Labs（Planet Explorer）	米国	150 超	—
	BlackSky（Spectra AI）	米国	15	60
	Satellogic（Aleph-1）	アルゼンチン	26	300
	アクセルスペース（AxelGlobe）	日本	5	10
地球観測（SAR）	Capella Space（Capella Console）	米国	7	36
	ICEYE（ICEYE）	フィンランド	21	18
	シンスペクティブ	日本	3	30
	QPS 研究所	日本	2	36

（出典）OECD, *Earth's Orbits at Risk: The Economics of Space Sustainability*, Paris: OECD Publishing, 2022, p.25; 中田晃司・福原始「小型衛星コンステレーションビジネスの現状と将来」『日本リモートセンシング学会誌』41 巻 2 号, 2021.5, p.291; 各社ウェブサイト等を基に筆者作成。

8.2.3　災害時の衛星データの活用

災害時の衛星データの活用については下記の事項などが挙げられる．雲や夜間の影響を受けずに地表を観測できる SAR，直接的な画像が確認できる光学衛星データの特徴とともに，災害時に利用できるデータを活用して災害リスクの予測も含め災害対応への活用が期待できる．今後は，衛星コンストレーションが進展していくと，その対応も大きく変わる可能性があると考えられる．

（1）被災地の評価と被害の把握

衛星画像は災害が発生した地域の状況をリアルタイムで提供し，被災地の状況把握に役立てる．被害の範囲や程度，被災地のアクセス状況などを把握するのに重要である．

（2）救援活動の支援

衛星データは，救援隊が効果的かつ効率的に行動できるようにするのに役立てる．道路の状況，洪水の範囲，被災者の集中地などを特定し，救助や支援の優先順位を設定するのに活用される．

（3）復旧計画の策定

被災地の復旧や再建計画を策定するための情報提供にも活用される．衛星データは，建物やインフラの状態を把握し，復旧計画を立案するための基礎データを提供できる．

（4）被災地のモニタリング

災害後も，衛星データは被災地の状況を定期的にモニタリングするために使用できる．これにより，復旧の進捗状況や新たなリスクに対処するための情報を提供することができる．

（5）国際的な支援と連携

衛星データは，国際的な支援や協力のための情報提供にも利用される．国際組織や他の国に対して，被災地の状況を共有することができる．

8.3　今後の展望と課題

Sentinel-1SAR データを活用した PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリング，コーナーリフレクタを活用した斜面変位モニタリング，地盤沈下モニタリングの計測精度の検証ができ，下記の対象設備，対象斜面，対象領域など，インフラ施設の維持管理への更なる人工衛星 SAR データの活用が期待される．

対象設備　ロックフィルダム
対象斜面　ダム湛水地斜面，送電鉄塔周辺斜面，発電所水路経過地斜面など
対象領域　水溶性天然ガス溶存地下水の揚水による地盤沈下，シールドトンネル構築など
　　による地表面への影響，地熱発電での熱水くみ上げによる地表面への影響など

人工衛星 SAR データによる変位計測の実適用にあたっては，それぞれの計測対象，求められる計測頻度，計測精度などを考慮して，個別に測量などと組み合わせた合理的なモニタリング方法について検討する必要がある．

ALOS-2 SAR データについては，同一条件で観測される期間の間隔が 3～4 カ月であるので，PSInSAR 解析を行うために必要な十分なデータが得られにくいものの，植生の影響を受けにくいというメリットがある．2024 年 7 月に打ち上げられ ALOS-4 では，観測幅が 50km から 200km に拡大されるため，観測頻度が 2 週間に 1 回程度に向上されるため，インフラ施設の維持管理などの変位計測への更なる活用が期待される．

日本においても QPS 研究所や Synspective 社では，将来的には 36，30 基の X バンド SAR 衛星の小型衛星の運用を計画しており，頻度の高い計測が可能となり，今後，計測頻度が高く要求されるケースでは特に，これらの活用も期待される．

Sentinel-1SAR データを活用した PSInSAR 解析による積雪深の推定については，積雪観測所周辺では精度高く積雪深を推定できることが検証でき，今後，データを蓄積することで，VV，VH 偏波の後方散乱係数からの積雪深推定精度を更に高められると考えられる．一方，広域な流域面積での積雪の状況を把握する精度の検証，精度を向上させる更なる検討も期待される．

【参考文献】

1) 越智士郎，トラン タン ダン，マンズール クマル ハザリカ，竹内　渉：アジア太平洋地域における衛星データによる災害緊急対応と国際連携，生産研究 71 巻 4 号，2019.
2) 酒井直樹，田口仁，六川修一：災害時にも使えるフェーズフリーな衛星データの利活用，AI・データサイエンス論文集，4 巻 L1 号，2023.
3) 清水直樹：衛星コンステレーションの可能性と課題，宇宙空間の利用をめぐる動向と課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書，2022.

謝辞

本論文を取りまとめるにあたりご指導いただいた，大澤高浩教授には心から感謝申し上げます．IGRASS2023，2024，APSAR2022，2023 への英語での論文投稿の際など，お忙しい中，論文のチェックをして適切な指導をしていただき，ありがとうございました．

本研究での PSInSAR 解析結果の評価に関して，関西大学清水則一教授，東京電機大学島田政信教授，山口大学三浦房紀教授よりご指導いただきました．心から感謝申し上げます．

積雪深さの推定では，東京電機大学島田政信教授，山口大学今岡啓治准教授にご指導いただきました．心から感謝申し上げます．

山口大学河村圭教授，瀧本浩一准教授には，応用情報特論において博士論文の概要を説明し，ご指導をしていただき，感謝申し上げます．

コーナーリフレクタの製作・設置については，試行錯誤しながら自前で製作して，その効果を確認しましたが，当初は東京都江東区の都市部のわずかに緑がある箇所に設置して検討しました．しかしながら，周囲には高いビルがあるなど，適切な箇所でなく代替えの箇所での精度検証も検討していました．その際，大澤高浩教授はインドネシアのウダヤナ大学に駐在されていることから，山口大学で博士を取得されウダヤナ大学の研究員の I Nyoman Sudi Parwata 氏に製作・設置していただきました．I Nyoman Sudi Parwata 氏にはインドネシアバリ島の出身地に，コーナーリフレクタの製作・設置して管理をしていただき，感謝申し上げます．

本研究を進めるにあたり，東電設計株式会社の関係者の皆様には多大なるご支援とご理解を賜り，心より感謝申し上げます．社会人留学という貴重な経験を与えてくれた，窪泰浩社長，野本高憲常務，溜幸生新領域研究開発推進室長に感謝するとともに，本研究を取り組むきっかけをつくっていただくとともに，その後もご支援をしてくださった佐藤正行前新領域研究開発推進室長に感謝申し上げます．

研究実績

１．査読のある論文

1) 安保秀範，大澤高浩，葛平蘭，高橋章，山岸勝俊，櫻澤裕紀：人工衛星 C バンドの Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析によるロックフィルダムの外部変形モニタリングの精度検証，土木学会論文集，Vol.79，No.7，2023．[Abo, H., Osawa T., Ge P., Takahashi A., Yamagishi K. and Sakurazawa H. : Verification of External Displacement Monitoring of Rockfill Dam by PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.79, No.7, 2023.]

2) 安保秀範，大澤高浩，葛平蘭，高橋章，櫻澤裕紀：人工衛星 C バンドの Sentinel-1 SAR データを用いた利根川最上流域の積雪深の推定，土木学会論文集，Vol.79，No.8，2023．[Abo, H., Osawa T., Ge P., Takahashi A. and Sakurazawa H. : Method and Accuracy of Estimating Snow Depth Using Sentinel-1 SAR Data in Gunma in Japan, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol.79, No.8, 2023.]

3) 安保秀範，大澤高浩，高橋章，櫻澤裕紀：人工衛星 C バンドの Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析による６基のロックフィルダムの外部変形モニタリング，土木学会論文集，査読中．[Abo, H., Osawa T., Takahashi A. and Sakurazawa H. : Monitoring External Displacement of Six Rockfill Dams by PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR DATA, Journal of Japan Society of Civil Engineers]

4) 安保秀範，大澤高浩，I Nyoman Sudi Parwata，櫻澤裕紀，池本龍平：Sentinel-1 SAR データを活用した PSInSAR 解析によるコーナーリフレクタ設置箇所の変位計測精度の検証と斜面変位モニタリング事例，土木学会論文集，査読中．[Abo, H., Osawa T., I Nyoman Sudi Parwata, Sakurazawa H. and Ikemoto R. : Verification the Accuracy of Displacement at CornerReflector and Slope Displacement Monitoring by PSInSAR Analysis, Journal of Japan Society of Civil Engineers]

２．査読のある国際会議の会議録等

1) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Pinglan Ge, Akira Takahashi and Katsutoshi Yamagishi : Deformation Monitoring of Large-Scale Rockfill Dam Applying Persistent Scatterer Interferometry(PSI) Using Sentinel-1 SAR Data, 2021 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2021.11

2) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Pinglan Ge, Akira Takahashi and Hiroki Sakurazawa : PPLICATION OF PSINSAR ANALYSIS USING SENTINEL-1 SAR DATA TO MEASURE EXTERNAL DEFORMATION OF ROCKFILL DAM FOR MAINTENANCE MANAGEMENT, The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)　2023, 2023.7

3) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Pinglan Ge : METHOD AND ACCURACY OF ESTIMATING SNOW DEPTH USING SENTINEL-1 SAR DATA IN NIIGATA PREFECTURE IN JAPAN, The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)　2023, 2023.7

4) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, I Nyoman Sudi Parwata, Pinglan Ge, Sakurazawa Hiroki and Ryuhei Ikemoto : Slope Displacement Monitoring with Corner Reflectors by PSInSAR Analysis Using Sentinel-1 SAR Data , The 8th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2023.10

5) Hidenori Abo, Takahiro Osawa : LAND SUBSIDENCE MONITORING OF PSINSAR ANALYSIS USING SENTINEL-1 SAR DATA FROM 2017 TO 2022 IN CHIBA PREFECTURE, JAPAN, The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)　2024, 2024.7

6) Hidenori Abo, Takahiro Osawa, Akira Takahashi, Hiroki Sakurazawa : METHOD AND ACCURACY OF ESTIMATING SNOW DEPTH USING SENTINEL-1 SAR DATA IN THE UPPERMOST CATCHIMENT　AREA　OF THE TONE RIVER , JAPAN, The International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)　2024, 2024.7

３．その他

1) 安保秀範，葛平蘭，大澤高浩，町田勝巳，櫻澤裕紀，池本龍平：コーナーリフレクター設置効果と衛星 SAR データを活用した PSInSAR 解析による水路経過地斜面の変位計測，令和 5 年土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会，VI-127, 2023. [Abo, H., Ge P., Osawa T., Machida K., Sakurazawa H. and Ikemoto R. : Displacement Measurement of Waterway Slope by PSInSAR Analysis Using Satellite SAR Data and the Effect of Corner Reflector Iinstallation, Japan Society of Civil Engineers 2023 Anuual Meeting, VI-127, 2023.]

2) 安保秀範，大澤高浩，櫻澤裕紀，池本龍平：コーナーリフレクタ設置箇所での Sentinel-1 SAR データを利用した PSInSAR 解析による変位計測精度の検証，令和 6 年土木学会全国大会第 79 回学術講演会，2024 年 9 月.