

クリープ観測に向けた簡易な地上設置型合成開口レーダの開発および運用に向けた基礎検討

A Development of a Simple Ground-Based Synthetic Aperture Radar
for Monitoring Fault Creep and a Basic Study on the Operation

宮田 尚起¹⁾
Naoki MIYATA

秋山 祐也¹⁾
Yuya AKIYAMA

吉田 政弘¹⁾
Masahiro YOSHIDA

栗田 勝実¹⁾
Katsumi KURITA

Abstract : The purpose of this study is to monitor fault creep in Marikina, Republic of the Philippines using a Ground-Based Synthetic Aperture Radar(GB-SAR). We have made the prototype GB-SAR for monitoring the fault creep. The GB-SAR's performance have been confirmed by some examinations. In the examinations, SAR images and interferograms are generated by the GB-SAR. The targets are iron balls with a diameter of 15 mm. As a result, we succeed in generating several SAR images and interferograms. However, the several SAR images and interferograms have some problems, therefore, challenges remain.

Key words : Diastrophism, Fault Creep, GB-SAR, Long-term Monitoring

1. はじめに

地震や大雨により発生する斜面崩壊や地すべりなど、地殻変動が伴う地学現象を理解するには、対象となる地域に存在する地盤の形状や変動量の広範囲にわたる詳細な観測が必要となる。特に、クリープと呼ばれる地殻が長期的に徐々に変動する現象の観測は、一般的に断層を形成する突発的な地殻変動と違い、地殻運動の長期的な変化傾向を捉えられ、地震や地すべりなど災害の予知などへの応用が期待できる。さらに、地盤の変位を捉える技術は火山活動や雪崩、土砂崩れの監視への応用も期待されている。

クリープの測地測量には様々な方法が存在する。最も一般的な手法である三角測量は、トランジットやレベルメータを用いて、あらかじめ定めた三角点および水準点の測地測量を行い、三角形の性質を利用して距離や形状を計測する。この手法の利点は、比較的簡便で精度良く地殻の変動量を求められることである。しかし、三角測量はトランジットやレベルメータを用いるため2人以上の人手が必要であり、人為的誤差の発生や、リアルタイムな地形変動の測量が不可能である等の欠点を有する。さらに、人間が測量するため、滑落や落石、有毒ガスなど人命を脅かす可能性がある危険地帯での測量には不向きなことや、1次元的な距離を測量するために1つの測点に対して1度の測定を行う必要があるため、2次元的な面状の変動を測量する場合には、膨大な時間を要する。

一方、レーザやレーザなどの距離を推定する技術を用いて変位を観測する方法 [1],[2] も注目されている。特に、近年では人工衛星に搭載したレーザを用いて合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar; SAR)[3] を行い宇宙から地表面の形状を把握する技術が利用されている。また、地表面の形状の変化を測定する技術として干渉合成開口レーダ (Interferometry SAR; InSAR) が使われている。InSAR は受信信号の持つ位相情報と波長の関係を用いて地表面の変化を観測している。SAR および InSAR は数十 km² から数百 km² に渡る広範囲を測量できるが、人工衛星に搭載したレーザを使用するため、人工衛星が観測地域の上空を通過している限られた時間内でしか測定することができない。さらに、人工衛星が10から20年程度で寿命を迎えるために運用停止されるのに伴い、搭載されているレーザが使用できなくなり、同条件でのデータを取得することができなくなるため、観測データの時間的な連続

性が失われてしまうなどの欠点を抱えている。

そのため、数百 m² の範囲をリアルタイムに測定できる方法として現在注目されているのが地上設置型合成開口レーダ (Ground-Based SAR; GB-SAR) を使った測量 [4]-[7] である。従来の GB-SAR は、数 km 離れた場所にある目標をリアルタイムで2次元的に測定をすることができるため、橋梁や高層ビルなどの大規模建築物の保守点検への利用や、火山の噴火などの様々な自然災害の予兆の観測の分野での利用されることが期待されている。しかし、従来の GB-SAR は1台運用するために年間数千万円程度のコストがかかるために普及していない。さらに、本研究で観測対象とするマリキナ断層に発生するクリープの影響を顕著に観測できる場所は、主に市街地であり、GB-SAR を近距離に設置する必要であり、本研究で使用する GB-SAR は従来の GB-SAR のように、大きな電力を放射し数 km 遠くのセンシングを行うような性能は必要とせず、人体に影響のないような出力電力で数 m から数十 m での運用が望ましい。

さらに、従来の GB-SAR に関しては法律による規制が多くあり、無線局に関する免許を保有していなければ GB-SAR を設置・運用することができない場合が多い。このように GB-SAR を用いた測定は法律上の障害もある。その上、免許を取得したとしても電波の混信を防止するために測定場所が特定される場合があり、任意の場所で自由に測定することは極めて難しい。

本研究では、クリープが発生している場所を数十 m² の範囲に渡って時間的に連続して測定することを目的とする。そのために GB-SAR を用いた InSAR を行う。はじめに、測定対象となるフィリピンのマリキナ断層に発生するクリープの調査を行い、本研究で使用する GB-SAR の仕様を決定するとともに、使用するレーダモジュールの選定及び評価を行う。次に、選定したレーダを用いて GB-SAR のプロトタイプの製作およびシステムの構築を行い、製作した GB-SAR を用いて SAR 画像の生成を行った。さらに、GB-SAR を運用するにあたり、2次元的な SAR 画像の生成と InSAR を確認する。

2. マリキナ断層のクリープの測定

本研究では、フィリピンにあるマリキナ断層に発生するクリープの測定を行う。2016年9月までにクリープの測定を繰り返し水準測量を用いて計5ヶ所10計測線で計測を行っ

1) 東京都立産業技術高等専門学校

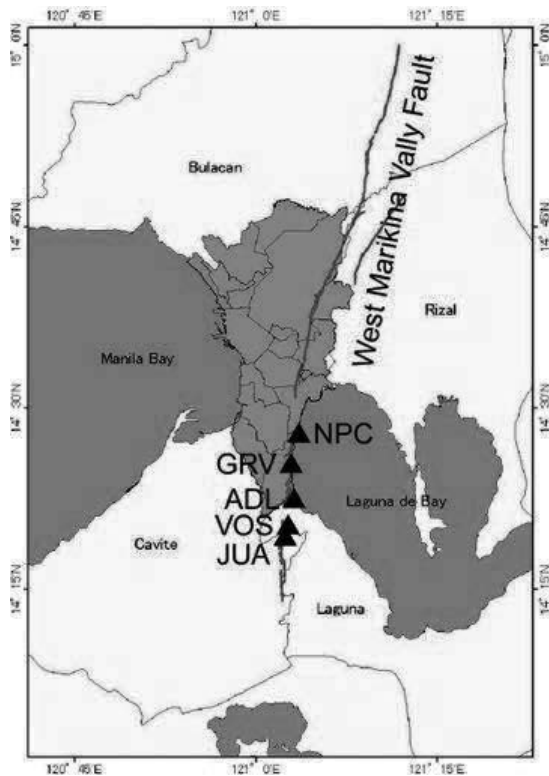


図 1: マリキナ断層および 2016 年 8 月現在までにクリープの変化を繰り返し水準測量を用いて測定している場所

ている [8]. 図 1 に断層の位置と測定を行っている 5ヶ所の位置を示す. 図 2 に実際に測量を行っている JUA-B の側線付近の様子を示す. 図 2 に示した側線付近の様子から, 測定場所はクリープによって道路が破壊されていることが確認できる. 図 3 にクリープを測量している各地点における繰り返し水準測量での測量結果を示す. 図 3 に示した結果から 2016 年 9 月までに最も大きく変化している VOS において 6ヶ月で最大 3 cm 程度の変動を確認している.

2016 年 8 月までに行っている測量は, いずれも直線上での変化しか得ることができない. そのため, GB-SAR を用いてクリープを 2 次元平面での変化として確認することはクリープ動きを理解するのに重要である. また, 測定対象となるクリープの影響が顕著に現れる場所は, 人間が実際に生活している市街地に多くあるため, クリープによってコンクリートやアスファルトが破壊されると補修されてしまう. この他にも測定対象となる地面には小石などが多数存在するため, 純粋な地殻変動に対するノイズ成分がとて多く, 観測面の純粋な変化を捉える必要がある. さらに, 測定場所の条件は多種多様であるため, それぞれの測定場所での免許取得は難しい. そのため, 免許を必要としない GB-SAR を製作する必要がある.

以上より, フィリピンのマリキナ断層に発生するクリープの観測を行う GB-SAR を運用するためには, 以下の条件を満たさなければならない.

- 観測までの距離 R が 1 m から 20 m 前後
- 目標 (地盤) の 5 mm 程度の変位 ΔH の観測
- 小石や路面補修などの地殻変動に対する外乱の補正



図 2: JUA-B における測線付近の様子

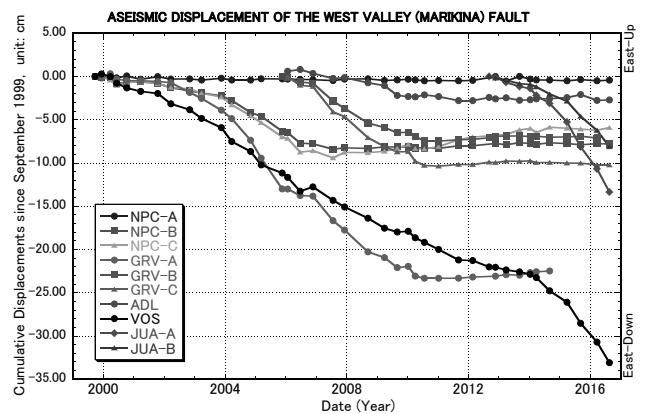


図 3: 各測線における繰り返し水準測量による地形変動の測量結果

また, 観測を行う場所は市街地のため, 施設を小規模にする必要がある.

3. GB-SAR の製作

3.1 レーダモジュール

マリキナ断層に発生するクリープの測定に用いる GB-SAR を製作するために, 現地の条件に則したレーダモジュールの選定を行った. 本研究では, 5ヶ所 10 側線での計測を目的としているため, GB-SAR に搭載するレーダモジュールは, 安価で測定場所を限定されない必要がある. そこで, 本研究では GB-SAR に搭載するレーダモジュールとして Quonset Microwave 社の The QM-RDKIT Radar Demonstration Kit(QM-RDK) を選定した. QM-RDK はマサチューセッツ工科大学で用いられている缶レーダ [9] を参考に作られたものである. QM-RDK の基本的な仕様はレーダ方式が FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) で中心周波数 2.45 GHz, 周波数帯域幅 100 MHz, パルス幅 16 ms, 出力電力 1.0 W, サンプリング周波数 20 kHz である.

選定したレーダモジュールを GB-SAR のレーダ部として運用するには, 受信信号と距離に相関関係を有する必要がある. そのため, レーダから目標までの距離 R の測定を行った. 測定の概略を図 4 に示す. 目標をレーダのアンテナ先端から 1 m から 20 m まで, 1 m 間隔で移動させ測定を行った.

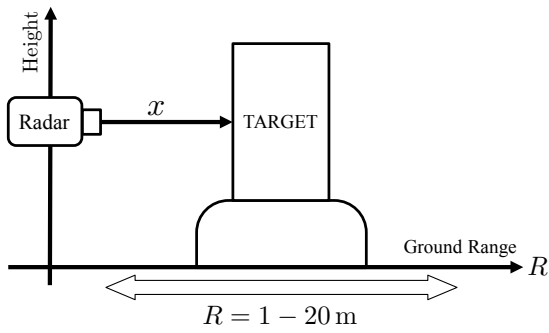


図 4: FMCW レーダを用いた距離 R の測定実験の概略



場所：体育館

図 5: FMCW レーダを用いた距離 R の測定実験の様子

このとき、目標は $500 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ の段ボールにアルミ箔を貼ったものを用いた。距離 R の測定実験の様子を図 5 に示す。また、実験は本校の体育館で行った。 $R=1-5 \text{ m}$ の測定結果を図 6 に示す。図 6 に示した $R=1-5 \text{ m}$ の波形における最大値の位置が最も反射が大きい場所である。波形の最大値に注目すると R が大きくなるにつれて最大値が現れる位置も右側に移動していることを確認した。また、目標が 1 m から 20 m までレーダで測定したときの波形の最大値が示す距離 x と目標の位置 R の関係を図 7 に示す。図 7 に示した関係から $R=1 \text{ m}$ から 18 m に関して目標の位置と波形の最大値が示す距離を最小二乗法にて一次曲線に近似した。その結果を式 (1) に示す。このとき、 x が波形の最大値が示す距離、 R が目標の位置である。

$$x = 1.0091R + 1.0419 \quad (1)$$

式 (1) より、目標の位置と波形の最大値が示す距離に相関があることを確認した。ただし、最大値の位置と実際の目標の位置は、実際の目標の位置に比べて、およそ 1 m 程度後方になる。また、 19 m 以上に関しては、測定環境から、床や壁からの反射の影響を強く受けているため、目標から反射した信号を正しく受信することができなかつたと考えられる。

また、最大値の位置と実際の目標の位置が 1 m 程度後方になる理由として考えられるのは、アンテナと信号生成を行う基板を接続する同軸ケーブルの存在がある。本実験で用い

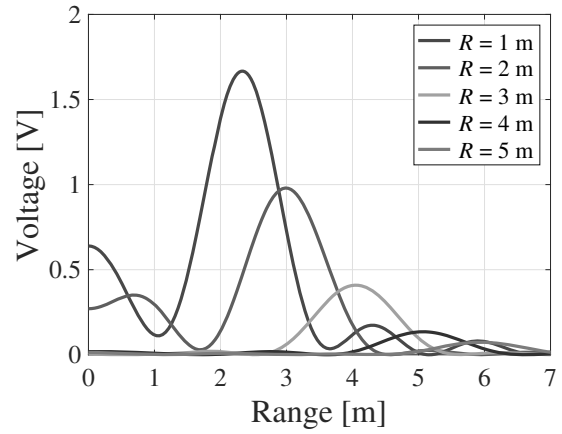


図 6: レーダと目標間の距離の測定結果

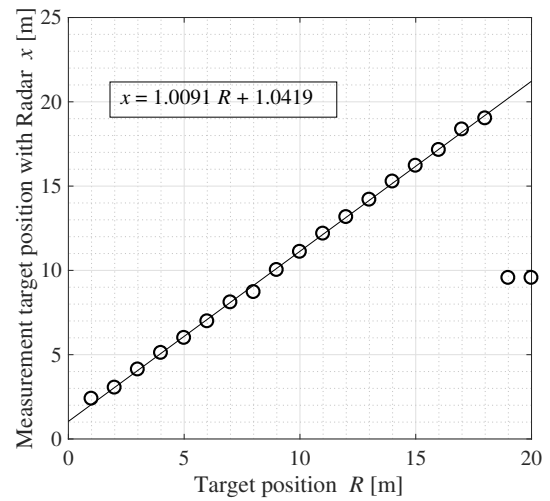


図 7: レーダで測定した波形の最大値が示す距離 x と目標の位置 R の関係

たレーダモジュールで使用している同軸ケーブルは、物理長 $l = 320 \text{ mm}$ 、比誘電率 $\epsilon_r = 2.3$ 、比透磁率 $\mu_r = 1.0$ で、 R_x と T_x にそれぞれ 1 本ずつ計 2 本である。このとき、使用している同軸ケーブルの電気長から算出する見かけの長さ l_θ は式 (2) で算出することができ、およそ 970.6 mm となる。

$$l_\theta = l\sqrt{\mu_r\epsilon_r} \quad (2)$$

3.2 GB-SAR を用いた合成開口レーダ処理

選定したレーダモジュールを使用して、GB-SAR を製作し、性能評価を行う。製作した GB-SAR を図 8 に示す。図 8 に示した GB-SAR が実際に運用できるかどうかを試すために 15 mm の導体球の画像化を合成開口レーダ処理を用いて行った。実験の概略を図 9 に示す。このとき、合成開口長を 0.5 m 、合成開口点数を 26 点とし、目標としてレールの中心から 3.22 m 離れた位置に直径 15 mm の導体球を設置した。また、画像生成を行うにあたり、後方投影法を用いた。SAR 画像生成実験の様子を図 10 に示す。また、実験は本校の電波暗室で行った。

実験から得られた SAR 画像を図 11 に示し、比較のために、同条件で目標を点散乱体とし、シミュレーションした

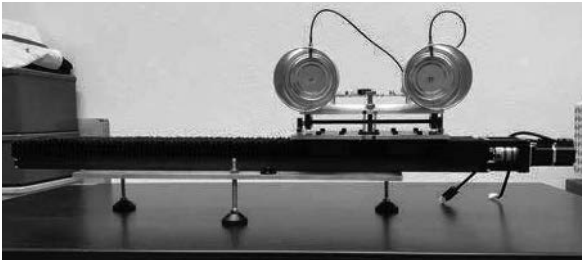


図 8: 製作した GB-SAR

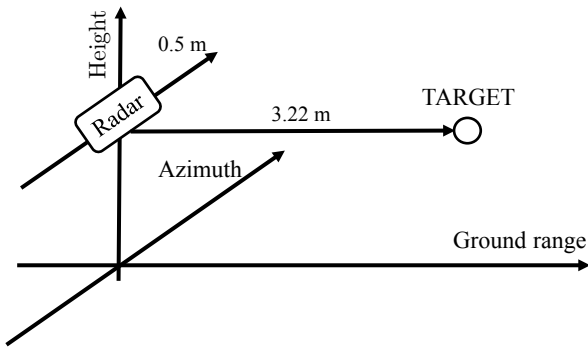


図 9: 直径 15 mm の導体球の SAR 画像生成実験の概略

SAR 画像を図 12 にそれぞれ示す [10]. 図 11 および図 12 に示した実験結果とシミュレーション結果から, SAR 画像には Azimuth 方向と Range 方向に虚像が発生しているを確認した. また, Azimuth 方向に発生している虚像は目標の像を軸として対称かつ放射状に発生している. 虚像は SAR 画像を生成するのにノイズとなるため, 虚像の低減を行うことが SAR 画像生成する上で非常に重要である. さらに, 実験とシミュレーションで生成した SAR 画像を比較する. 図 11 に示した SAR 画像における最大値の位置は, Azimuth が -0.01m , Range が 5.32m の位置であり, 図 12 に示した同条件で目標を点散乱体としてシミュレーションしたときの SAR 画像の最大値は, Azimuth が 0m , Range が 2.84m の位置であった. したがって, 実験により得られたターゲットの位置はシミュレーション結果と比較しておよそ 2.48m 後方に変化していることを確認した.

また, GB-SAR に搭載したレーダは, 3.1 節における実験にて 1m 程度後方にオフセットがあることを確認したため, SAR 画像生成の際にそれぞれの受信信号に 1m のオフセット補正を行った. その結果を図 13 に示す. 図 13 に示した画像から, 目標の像が結像していることを確認した. また, 得られた SAR 画像における最大値の位置は, Azimuth が -0.01m , Range が 4.38m となり, 図 11 に示したオフセット補正を行わない SAR 画像に比べ SAR 画像における最大値が Range 方向に 0.92m 前方にあることを確認した. さらに, 図 11 に示す SAR 画像内の Range 方向の $0\text{-}2\text{m}$ の間に存在する, 強い反射は, GB-SAR に搭載しているレーダに由来するノイズである可能性が高い.

4. 運用に向けた性能評価

2 次的に InSAR を行うためには, 散乱体が 2 次的に存在するときに SAR 画像の生成が可能なこと, および InSAR

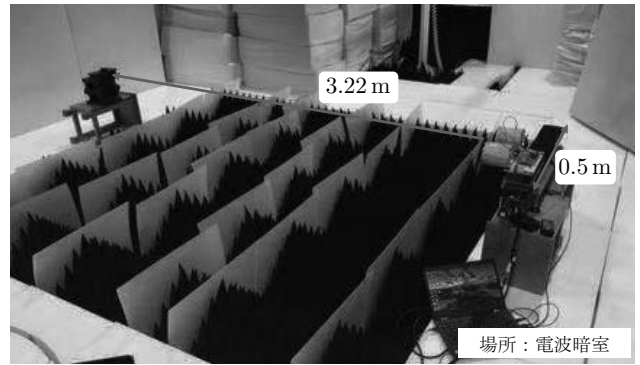


図 10: 直径 15 mm の導体球の SAR 画像生成実験の様子

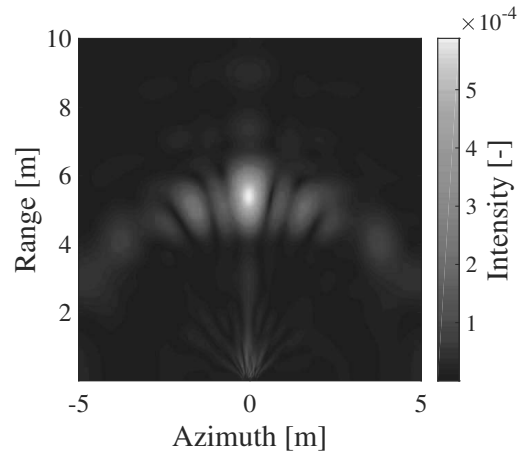


図 11: 目標を直径 15 mm の導体球としたときの SAR 画像生成実験の結果

による位相情報を用いた目標の測定が可能なることの 2 つの条件を満足する必要がある. 本章では, この 2 つの条件について検証を行う.

4.1 複数目標に関する合成開口レーダ

散乱体が 2 次的に存在するときに SAR 画像の生成が可能かを検証するため, 点散乱体 2 つを目標としたときの SAR 画像の生成を行う. SAR 画像生成では, 2 つの目標を Azimuth 方向に平行に並べたときと, 垂直に並べたときの 2 つのパターンについてシミュレーションおよび実験を行った.

はじめに, 2 つの目標を Azimuth 方向に平行に配置したときの SAR 画像生成のシミュレーションを行う. シミュレーション条件は 3 章に示した 1 つの目標の SAR 画像の生成と同様に合成開口長を 0.5m , 合成開口点数を 26 点とし, 目標をレールの中心から 3.22m 離れた位置に点散乱体を 2 つを幅 w 離して設置したときを考える. シミュレーションの概略を図 14 に, 図 15 に $w = 0.30\text{m}$ のときのシミュレーションの結果をそれぞれ示す. 図 15 に示したシミュレーションから得られた SAR 画像は, 図 12 に示した目標が 1 つのときシミュレーションから得られた SAR 画像と同様に結像した像が 1 つであることを確認した. また, SAR 画像内の最大値を有するピクセルは Azimuth が 0m , Range が 2.83m の位置に 1ヶ所のみであった. このことから, 意図したように間隔 $w = 0.30\text{m}$ とし, Azimuth 方向に平行に配置した 2 つの目標それぞれを独立に観測できなかった. 目標が分離しなかつ

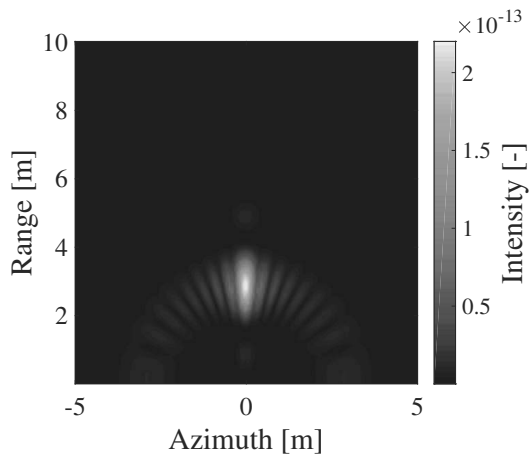


図 12: 目標を点散乱体としたときの SAR 画像生成シミュレーションの結果

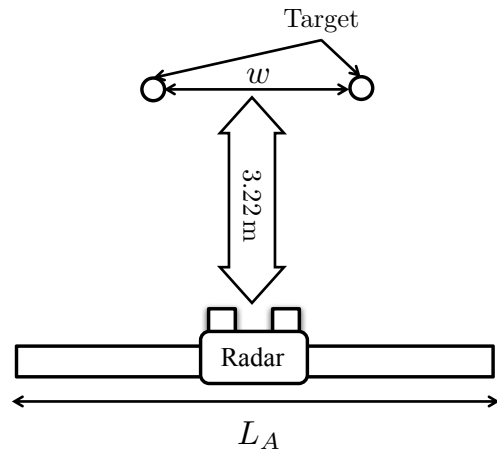


図 14: 2つの目標を Azimuth 方向に平行に並べたときの SAR 画像生成シミュレーションの概略

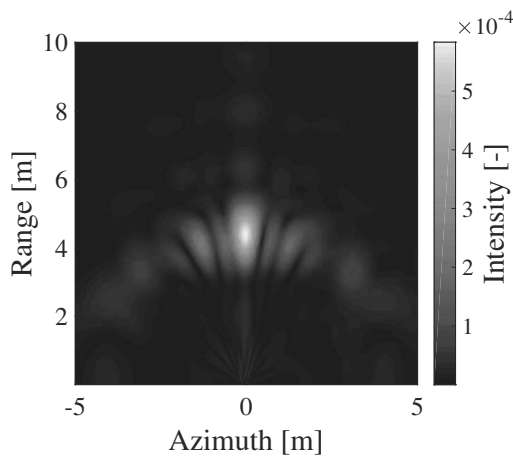


図 13: 目標を直径 15 mm の導体球とし、オフセット補正を行った SAR 画像

た理由として、2つの目標の位置がレールの中心に対して線対称であった影響と考えられる。また、図 12 に示した目標が点散乱体 1 つのときの SAR 画像と比較すると SAR 画像のある Azimuth 方向に発生している虚像の影響が小さくなっていることを確認できる。次に、シミュレーションの正当性を確認するためにシミュレーションと同じ測定条件で目標を直径 15 mm の導体球としたときの実験を行った。目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に平行に $w = 0.30$ m 離れたときの実験の様子を図 16 に示す。また、実験は本校の電波暗室で行った。2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に平行に $w = 0.30$ m 離れたときの実験の結果を図 17 に示す。図 17 に示した実験から得られた SAR 画像は、シミュレーションと同様に SAR 画像内の最大値を有するピクセルは Azimuth が 0.01 m、Range が 5.36 m の位置に 1ヶ所のみであった。また、図 15 に示したシミュレーションで得られた SAR 画像に対して、結像位置が Range 方向に 2.53 m 後方になることを確認した。このことから、シミュレーションと実験同様に 2つの目標が Azimuth 方向に対して平行に $w = 0.30$ m 離して目標を置いたときには、目標が 2つに分離して結像しないことを確認した。

さらに、GB-SAR に搭載したレーダは、3.1 節における

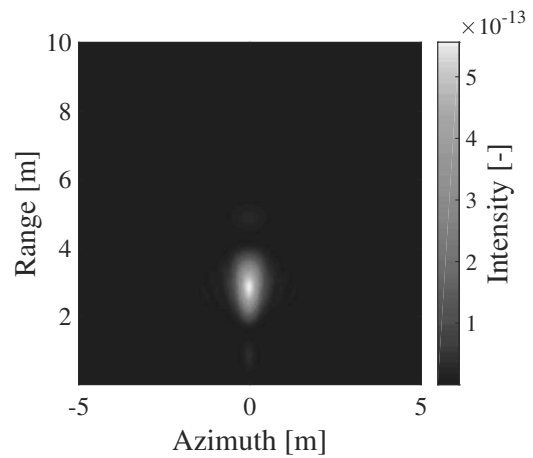


図 15: 2つの目標を点散乱体とし Azimuth 方向に平行に $w = 0.30$ m 離れたときのシミュレーションから得られた SAR 画像

実験にて 1 m 程度後方にオフセットがあることを確認したため、SAR 画像生成の際にそれぞれの受信信号に 1 m のオフセット補正を行った。その結果を図 18 に示す。図 18 から、得られた SAR 画像における最大値の位置は、Azimuth が 0.01 m、Range が 4.39 m となり、図 17 に示したオフセット補正を行わない SAR 画像に比べ SAR 画像における最大値が Range 方向に 0.97 m 前方になることを確認した。そして、図 17 に示す SAR 画像内の Range 方向の 0-2 m の間に存在する強い反射は、目標が 1 つの場合と同様に GB-SAR に搭載しているレーダに由来するノイズである可能性が高い。

次に、2つの目標を Azimuth 方向に対して垂直に配置した場合の SAR 画像生成のシミュレーションおよび実験を行う。シミュレーションおよび実験条件は合成開口長を 0.5 m、合成開口点数を 26 点、オフナディア角 θ_0 を 70 deg. でアンテナから床面高さを 1.1 m とし、目標をレールの中心から 3.22 m 離れた位置に点散乱体を 2つを距離 d 離して設置したときを考える。シミュレーションと実験の概略を図 19 に示す。このとき、 $d = 1.0$ m とした。また、Range 方向の分解能を上げるために 3 パルス分の信号を用いて画像生成を行った。シミュレーションの結果を図 20 に示す。図 20 に示

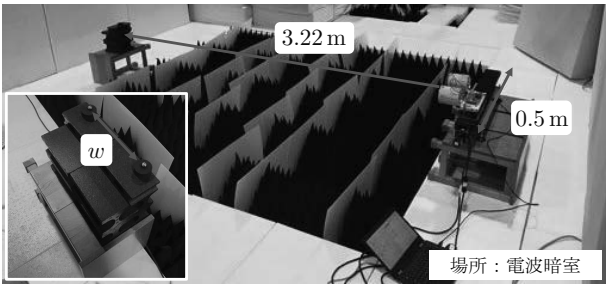


図 16: 2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に平行に $w = 0.30$ m 離れたときの実験の様子

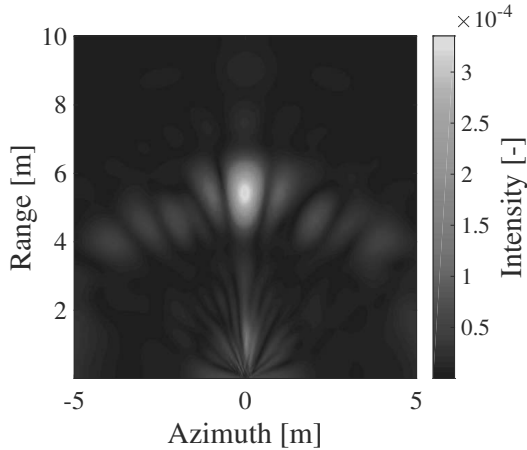


図 17: 2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に平行に $w = 0.30$ m 離れたときの実験から得られた SAR 画像

したシミュレーションから得られた SAR 画像では、Range が 2 m 付近と 3 m 付近に強い反射があることが確認できる。3 m 付近で結像した像は、2 m の付近で結像した点散乱体の Range 方向の虚像とも考えられる。そのため、2 m 付近の目標が 1 つのときのシミュレーションを行い、そのシミュレーション結果から、3 m 付近に発生する虚像の強度を計測した。その結果、3 m 付近に発生する虚像の強度の最大値は 1.00×10^{-12} であった。目標が 2 つのときに生成した SAR 画像で 3 m 付近で結像した像の強度の最大値は 4.22×10^{-13} となり、2 m 付近の目標によって発生している Range 方向の虚像より、目標が 2 つあるときに 3 m 付近に発生する像の強度の方がおよそ 2.4 倍大きいため、2 つの目標が結像していると考えられる。また、シミュレーションの正当性を確認するために、シミュレーションと同じ測定条件で目標を直径 15 mm の導体球としたときの実験を行った。目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に垂直に $d = 1.0$ m 離れたときの SAR 画像生成実験の様子を図 21 に示す。このとき、実験は本校の実験室で行った。目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に垂直に $d = 1.0$ m 離れたときの実験の結果を図 22 に示す。図 22 から、2 つの目標の像と考えられる 2 つの局所的な最大値が確認することができる。目標の像と考えられるそれぞれの像の局所的な最大値の位置は、前方の像は、Azimuth が 0.02 m, Range が 5.91 m で、後方の像は Azimuth が -0.03 m, Range が 7.42 m となり、それぞれ

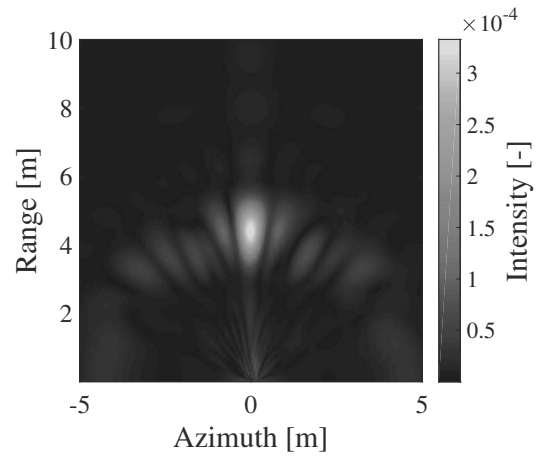


図 18: 2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に平行に $w = 0.30$ m 離れたときの実験でオフセット補正を行った SAR 画像

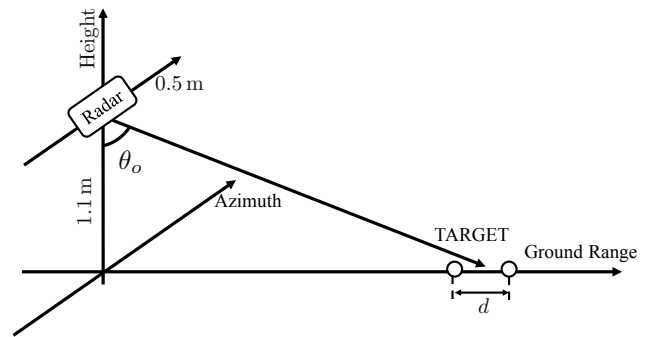


図 19: 2つの目標を Azimuth 方向に垂直に並べたときの SAR 画像生成シミュレーションの概略

れの像の間の距離は 1.51 m 離れており、実際の $d = 1.0$ m から 0.51 m 大きくなる。また、シミュレーション結果と違い、前方の像よりも後方の像の方が局所的な最大値が大きいことを確認した。前方の像よりも後方の像の反射が大きい理由として考えられるのは、実験を行った場所に、鉄製の製品が多数存在していたため、それらによって反射された信号によって後方にある目標の像の方が反射が大きくなったと考えられる。

さらに、GB-SAR に搭載したレーダは、3.1 節における実験にて 1 m 程度後方にオフセットがあることを確認したため、SAR 画像生成の際にそれぞれの受信信号に 1 m のオフセット補正を行った。その結果を図 23 に示す。図 23 から、目標の像は 2 つに分離しており、目標の像と考えられるそれぞれの像の局所的な最大値の位置は、前方の像が Azimuth が 0.04 m, Range が 4.89 m で、後方の像が Azimuth が -0.03 m, Range が 6.41 m となり、それぞれの像の間の距離は 1.52 m 程度離れており、実際の $d = 1.0$ m から 0.52 m 離れている。

4.2 GB-SAR を用いた干渉合成開口レーダ

InSAR による変位量の測定が可能かを検証を行う。GB-SAR が同じ軌道を通ることを前提とし、観測時期が違う 1 組の SAR 画像の位相情報があるとする。このとき、1 組の SAR 画像間に発生する位相差 $\delta\phi$ は式 (3) から算出できる。

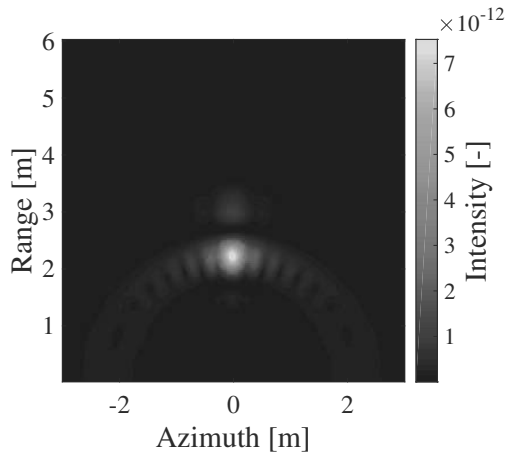


図 20: 2つの目標を点散乱体とし Azimuth 方向に垂直に $d = 1.0\text{ m}$ 離れたときのシミュレーションから得られた SAR 画像

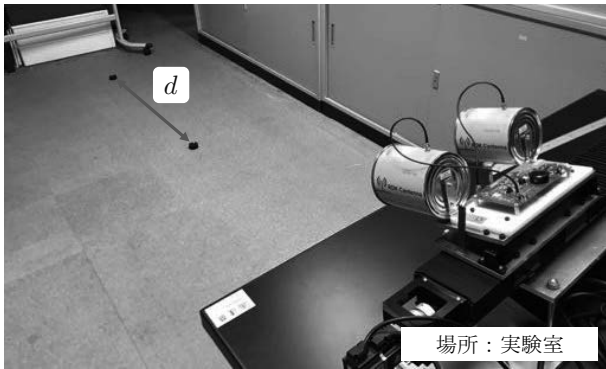


図 21: 2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に垂直に $d = 1.0\text{ m}$ 離れたときの実験の様子

ただし、 ΔH は目標の変位量、 λ は送信信号の波長である。

$$\delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(R - \Delta H) \quad (3)$$

また、発生する干渉縞のサイクルは λ によって決定し、目標の変位量と λ の関係は式(4)のようになる。

$$\Delta H = \frac{\lambda}{2} \quad (4)$$

観測時期が違う 1 組の SAR 画像間に発生するインターフェログラムから、式(3)に示したように目標の変位量 ΔH と相関があるかを確認するために点散乱体を使用して InSAR のシミュレーションを行う。図 24 にシミュレーションの概略を示す。InSAR を行うために必要となる 1 組の SAR 画像として、1 枚目は目標の位置を $\Delta H = 0$ として固定して SAR 画像を生成し、2 枚目は目標を ΔH 動かして SAR 画像を生成する。この 2 枚 1 組の SAR 画像の位相情報を用いてインターフェログラムを生成した。また、インターフェログラムを生成するにあたり、それぞれの SAR 画像を点散乱体の位置を中心として合わせた。ただし、 $\Delta H = 0.01\text{--}0.1\text{ m}$ とした、 $\Delta H = 0.01\text{ m}$ の場合のシミュレーション結果を図 25 に示す。図 25 のインターフェログラムは、Azimuth が 0 m から放射状に同値の ΔH が並んでいることを確認した。しかし、目標の変位量は確認できなかった。より詳しく調査する

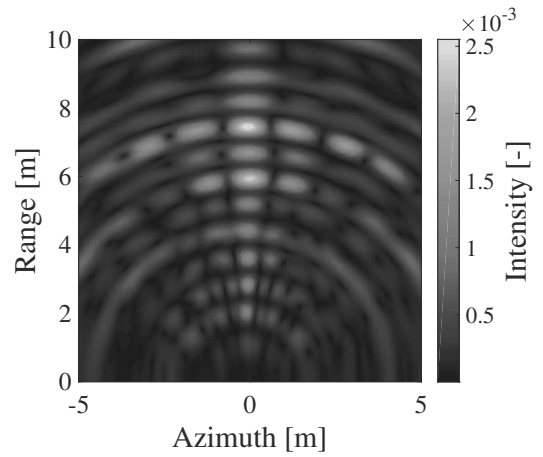


図 22: 2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に垂直に $d = 1.0\text{ m}$ 離れたときの実験から得られた SAR 画像

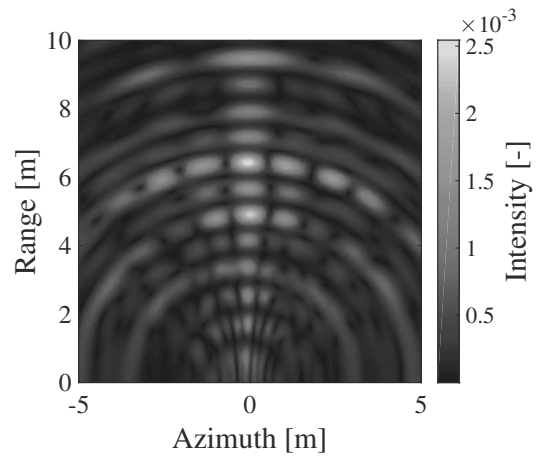


図 23: 2つの目標を直径 15 mm の導体球とし Azimuth 方向に垂直に $d = 1.0\text{ m}$ 離れたときの実験でオフセット補正を行った SAR 画像

ために、それぞれの SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差 $\delta\phi$ から変位量を計算した。その結果、SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差 $\delta\phi = 2.008 \times 10^{-3}\text{ rad.}$ 、すなわち、 $\Delta H = 1.956 \times 10^{-5}\text{ m}$ となり、設定値である $\Delta H = 0.01\text{ m}$ と大きく異なっている。設定した ΔH とシミュレーションから得られた ΔH と $\delta\phi$ の関係を示したグラフを図 26 に示す。図 26 から分かるように設定した ΔH とシミュレーションから得られた ΔH と $\delta\phi$ に相関があることを確認した。算出した $\delta\phi$ からは実際に変位させた ΔH を示せていないが、 ΔH が増加するほど、 $\delta\phi$ が増加することを確認した [11]。次に、シミュレーションの正当性を確認するためにシミュレーションと同じ測定条件で目標を直径 15 mm の導体球としたときの実験を行った。目標を直径 15 mm の導体球とし $\Delta H = 0.01\text{ m}$ のときのインターフェログラム生成実験の様子を図 27 に示す。実験は本校の電波暗室で行った。目標を直径 15 mm の導体球とし $\Delta H = 0.01\text{ m}$ のときのインターフェログラム生成実験の結果を図 28 に示す。図 28 に示した実験結果から、図 25 に示したシミュレーション結果と同様に目標の変位量を確認することができない。より詳

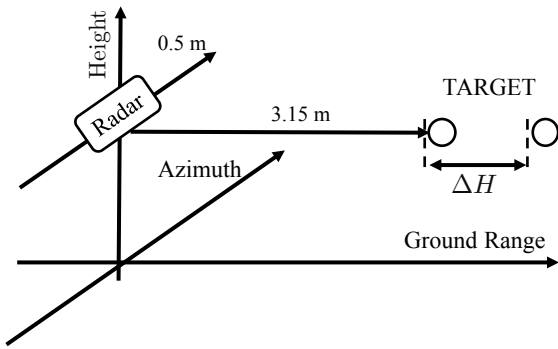


図 24: 目標を点散乱体としたときのインターフェログラム生成シミュレーションの概略

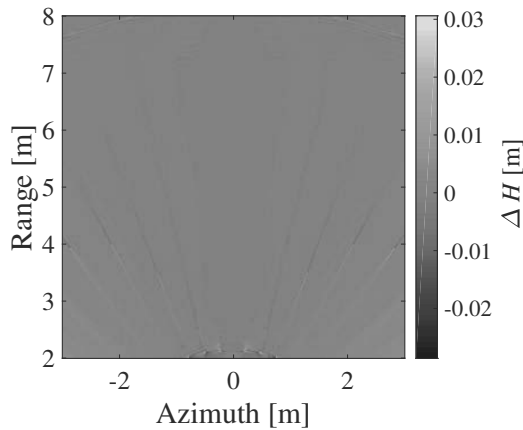


図 25: 目標を点散乱体とし $\Delta H=0.01$ m のときのインターフェログラム生成シミュレーションの結果

しく調査するために、インターフェログラムを生成する際に用いるそれぞれの SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差 $\delta\phi$ から変位量を計算した。その結果、SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差 $\delta\phi = 7.567 \times 10^{-3}$ rad., すなわち $\Delta H = 7.368 \times 10^{-5}$ m となり、シミュレーションと同様に設定値である $\Delta H = 0.01$ m とは大きく異なることを確認した。さらに、図 25 に示したシミュレーション結果と図 28 に示した実験結果を比較すると、実験から生成したインターフェログラムは位相が激しく変化している。しかし、どちらのインターフェログラムも巨視的に見ると同値の ΔH が放射状に存在していることを確認した。

また、GB-SAR に搭載したレーダは、3.1 節における実験にて 1 m 程度後方にオフセットがあることを確認したため、インターフェログラム生成の際にそれぞれの受信信号に 1 m のオフセット補正を行った。その結果を図 29 に示す。図 29 から、シミュレーションと同様に目標の変位量を目視で確認することができない。より詳しく調査するために、それぞれの SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差 $\delta\phi$ から変位量を計算した。その結果、SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差 $\delta\phi = 1.786 \times 10^{-2}$ rad., すなわち $\Delta H = 1.739 \times 10^{-4}$ m となり、シミュレーションと同様に設定値である $\Delta H = 0.01$ m とは大きく異なることを確認した。また、オフセット補正かける前後で巨視的には変

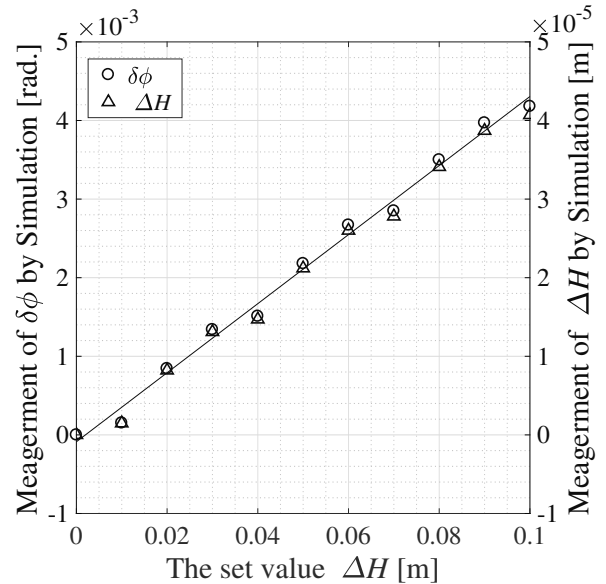


図 26: 設定した ΔH とシミュレーションから生成した SAR 画像内で最大値を示したピクセルの位相差 $\delta\phi$ と得られた位相差から算出された ΔH の関係

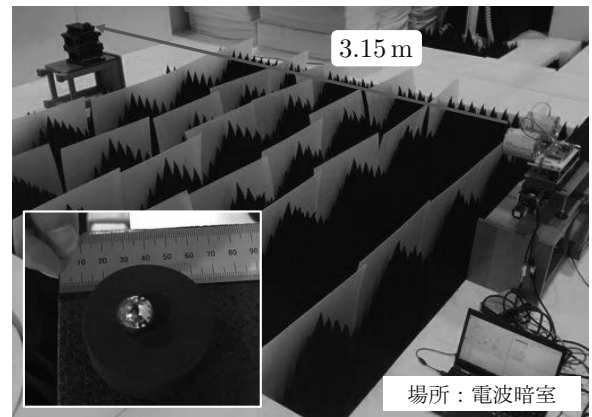


図 27: 目標を直径 15 mm の導体球とし $\Delta H=0.01$ m のときのインターフェログラム生成実験の様子

化は確認できなかった。すなわち、実験において、目標の変位に開きがある理由として、オフセットの有無は直接的な原因ではないと考えられる。

5. おわりに

本研究では、フィリピンのマリキナ断層において発生するクリープによる地盤の変位の測定を行う。また、任意の場所で数十 m^2 の範囲にわたって時間的に連続で行うために、GB-SAR の運用および InSAR を行う。その前段階として、GB-SAR のプロトタイプ製作と 2 次元的な SAR 画像の生成および InSAR に必要な条件の検討を行った。

はじめに、現地での運用に則した GB-SAR を製作するために、利用可能な GB-SAR に搭載するレーダモジュールの選定を行い、選定したレーダモジュールを用いて GB-SAR として運用できるかを確認するため、距離推定実験を行った。その結果、GB-SAR として運用できることを確認した。選定したレーダを用いて GB-SAR のプロトタイプを製作し、

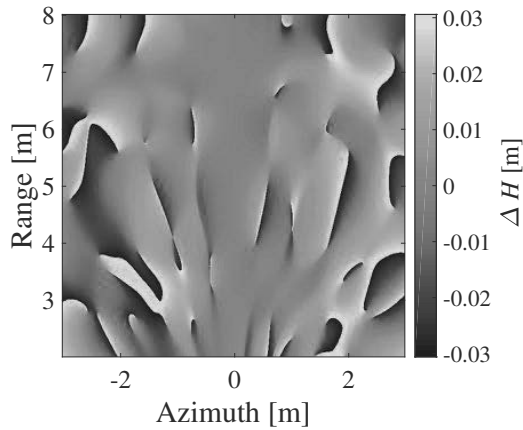


図 28: 目標を直径 15 mm の導体球とし $\Delta H=0.01$ m のときのインターフェログラム生成実験の結果

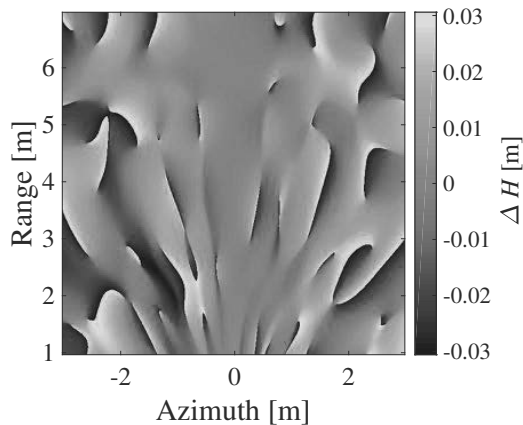


図 29: 目標を直径 15 mm の導体球とし $\Delta H=0.01$ m のときでオフセット補正を行ったときのインターフェログラム生成実験の結果

目標が 1 つのときの SAR 画像の生成実験およびシミュレーションを行った。実験から生成した SAR 画像では、目標の像を確認することができた。しかし、シミュレーションから生成した SAR 画像の目標の位置と実験から生成した SAR 画像の目標の位置を比較した結果、Range 方向に 2.48 m 後方になることを確認した。また、オフセットを考慮した SAR 画像もシミュレーションから生成した SAR 画像の目標の位置より Range 方向に 1.56 m 後方になることを確認した。

次に、2 次元的な SAR 画像の生成ができるかを確認するために目標が 2 つのときの SAR 画像の生成実験およびシミュレーションを行った。このとき、2 つの目標を Azimuth 方向に平行に並べたときと垂直に並べたときの 2 つのパターンについて行った。2 つの目標を Azimuth 方向に平行に 0.30 m 離して並べたときに生成した SAR 画像では、目標の像が 2 つ分離しないことを確認した。しかし、2 つの目標を Azimuth 方向に垂直に 1.0 m 離して並べたときに生成した SAR 画像では、シミュレーションおよび実験のどちらも像が 2 つ結像した。だが、実験ではそれぞれの像の局所的な最大値の間隔は 1.51 m 離れており、設定値よりも 0.51 m 大きくなった。

最後に、InSAR が行えるかを調べるために、1 つの目標

の位置を変化させたときのインターフェログラムを生成実験およびシミュレーションを行った。シミュレーションおよび実験で生成した SAR 画像の中で最大値を持つピクセルの位相差から距離の推定を行った結果、位相情報から算出した変位量は実際の目標の変位と大きく異なることを確認した。また、位相差と目標の変位量には相関が認められるが目標の変位量を算出については課題が存在する。

今後は、目標が 2 つの場合に、目標を Azimuth 方向に平行に並べたときのシミュレーションを様々な条件で行い、目標が 2 つに分離しない理由を多角的に検討する。また、InSAR においても、インターフェログラム生成のプロセスを見直すとともに、本実験で用いるレーダにあったインターフェログラム生成法について検討を行う。

参考文献

- [1] 早川 裕弐 他, “地形学における地上レーザ測定の活用,” 地学雑誌, vol.125, no.3, pp.299-324, Apr. 2016.
- [2] Y. S.Hayakawa et al., “Application of terrestrial laser scanning for detection of ground surface deformation in small mud volcano (Murono, Japan),” Earth, Planets and Space, Jul. 2016.
- [3] 大内 和夫, リモートセンシングのための合成開口レーダの基礎 第 2 版, 東京電機大出版局, 東京, 2009.
- [4] K. Takahashi et al. “Continuous Observation of Natural-Disaster-Affected Areas Using Ground-Based SAR Interferometry,” IEEE GRSS, vol.6, no.6, pp.1286-1294, Jun. 2013.
- [5] 17GHz 帯地上設置型合成開口レーダの周波数有効利用技術に関する調査検討会. “17GHz 帯地上設置型合成開口レーダの周波数有効利用技術に関する調査検討報告書,” 総務省, http://www.soumu.go.jp/main_content/000217150.pdf, 参照 Oct. 12, 2017.
- [6] K.V. Chet et al., “Ku-band Ground-based SAR Experiments for Surface Deformation Monitoring,” IEEE 5th APSAR, pp.641-644, Singapore, Singapore, Sep. 2015.
- [7] M. Pieraccini et al., “A GBSAR Operating in Monostatic and Bistatic Modalities for Retrieving the Displacement Vector,” IEEE GRSS Letters, vol.14, no.9, pp.1494-1494, Sep. 2017.
- [8] K. Kurita et al., “Monitoring Aseismic Surface Creep along the Western Valley (Marikina) Fault,” 11th IWSMRR, USB, University of Granada, Oct. 2016.
- [9] MIT OPEN COURSEWARE. “Build a Small Radar System Capable of Sensing Range, Doppler, and Synthetic Aperture Radar Imaging,” Massachusetts Institute of Technology,

<https://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/>, 参照 Oct. 12, 2017.

- [10] 秋山 祐也 他, “クリーブの観測に向けた簡易な地上設置型合成開口レーダの” 電子情報通信学会東京支部学生会研究発表会, no.118, p.118, Mar. 2017.
- [11] 秋山 祐也 他, “クリーブの観測に向けた簡易的地上設置型合成開口レーダの性能評価,” 電子情報通信学会電磁界理論研究会, vol.117, no.289, pp.25-30, Nov. 2017.