

令和 4 年度 防衛装備庁  
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書  
合成開口レーダによる  
埋設物探査における  
クラッタ分離技術の研究

令和 5 年 5 月

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構が実施した令和4年度「合成開口レーダによる埋設物探査におけるクラッタ分離技術の研究」の成果を  
取りまとめたものです。

## 1. 委託業務の目的

### 1. 1 研究課題の最終目標

合成開口レーダによる埋設物探査にあたり、できるだけ少ない走査時間・走査回数で、表層クラッタを回避し、地下埋設ターゲットを識別するための条件の把握と最適な走査方式・解析技術を明らかにする。走査条件が限定される屋外で運用される合成開口レーダの一般論として汎用的に応用可能な知見の獲得（適用例として、飛翔体に搭載されるもの（航空機・人工衛星等））を目指す。

### 1. 2 最終目標を実現するために克服又は解明すべき要素課題

(1) できるだけ少ない1次元走査本数で、ターゲット・クラッタの分離を実現することが可能な条件は具体的にどのようなものか？

屋外で運用される合成開口レーダとして、飛翔体においては、走査時間・走査回数は、軌道・航路等（以下軌道という）の1次元走査本数で決定される。ターゲット・クラッタの分離を実現できる最小の1次元走査本数を決めるためには、軌道の1次元走査本数の大小と、軌道の方位角パターンの多様性、飛翔体からターゲットを見降ろした際の入射方位・入射角の多種多様性ととのトレードオフを考慮する必要がある。理論的には、1個のターゲットと1個のクラッタの組み合わせであれば、異なる方向からの2本の軌道による観測で分離が可能である。一方、現実的な環境では、クラッタが複数個存在する、観測方向が十分離れているとは限らない等、さまざまな制約条件が存在する。ターゲットやクラッタの個数、両者の配置に相互関係についてモデル化した上で、飛翔体の軌道や、観測方向を念頭に置きつつ、何本の走査本数であれば、どの程度のクラッタを分離できるか、実験及びシミュレーションで明らかにする必要がある。

(2) 提案した走査方法で、屋外での観測への適用が可能か？

要素課題(1)で得られた知見をもって、屋外で運用される一般的な合成開口レーダのなかから具体的な適用例を選択した上で、ターゲットとクラッタの分離が可能であることを、実証する必要がある。

### 1. 3 要素課題に対する実施項目及び体制

(1) 室内実験による1次元走査での埋設物・表層クラッタ分離実験

埋設物と表層散乱体を設置した室内実験装置により、飛翔体を模擬した様々な1次元走査パターンでの観測を実施し、これまで提案者が実施してきた2次元走査との比較を行いつつ、飛翔体の軌道や観測角度や本数の違い、ターゲットやクラッタの個数・位置関係の違いに応じ、分離能力がどのように変化するか、検証を行う。その上で、屋外実験を想定し、飛翔体の軌道を模擬した走査による実験を通して屋外実験計画に反映する。また、ターゲット・クラッタを分離するために必要かつ最小となる軌道の本数として、飛翔体に搭載する合成開口レーダや、地上に設置する合成開口レーダ（GB-SAR）のいずれにも応用可能な汎用的な走査条件を提案し、実験で検証する。走査条件としては、具体的には、どの角度の軌道と軌道を何本組み合わせ、かつターゲットとアンテナの間の入射角に関してどの角度と角度で観測すれば最適であるか、前提条件を設定した上で実施する。

(2) 比較対照となる計算機シミュレーション

室内実験の比較対照として、埋設物・クラッタの様々な配置パターンの下、FDTDによるイメージングシミュレーションにより行い、室内実験の妥当性を検証するとともに、屋外実験計画にも反映する。

(3) 屋外埋設物探査への応用のための衛星観測実験

屋外で運用される合成開口レーダの適用例として、本研究では人工衛星を選択し、観測実験を実施する。2本の1次元走査での屋外埋設物探査を念頭に、埋設反射体と表層反射体を屋外に設置し、だいち2号（ALOS-2）もしくは、研究実施期間中に打ち上げが計画されている先進レーダ衛星（ALOS-4）の複数本の軌道を組み合わせることで観測を行い、ターゲットとクラッタの分離

コンセプトの実証を行う。実験は3年目に行い、期間限定の準常設サイトという形で、おおむね半年程度のデータを取得し、評価を行う。

#### **(4) プロジェクトの総合的推進**

各要素課題に関する研究の進捗を管理し、所属部署の業務として管理する。また、必要に応じて外部有識者の意見を聞くなどして研究の方向性を確認する。実施に当たっては、本委託業務の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究のさらなる進展に努める。

## **2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度**

前述の通り設定した下記2点の要素課題に対し、下記の成果を得た。

### **(1) できるだけ少ない1次元走査本数で、ターゲット・クラッタの分離を実現することが可能な条件は具体的にどのようなものか？**

走査位置を適切に定めることにより、1回の1次元走査で、近傍に地上物体（クラッタ）が存在する状況下で埋設物のモニタリングが可能であることを示した。加えて、トモグラフィーへの応用を念頭に、少ない1次元走査本数の組合せで埋設物の同定が可能な条件として、両端の軌道間距離を確保すれば（本研究では砂面からアンテナまでの高さと同等スケールの水平距離）、エリアジングの影響を抑制できる範囲で本数を絞り込んでも（本研究では10本弱のオーダー）、周囲に別のエコーが存在する条件下において埋設物のモニタリング能力が向上するという知見を得た。

### **(2) 提案した走査方法で、屋外での観測への適用が可能か？**

前項の知見をもって、実際に、埋設したパイプ状散乱体（ターゲット）と、クラッタを模した物体（コーナリフレクタ）に対し、2つの軌道による分離が可能であることを実証した。

したがって、上記の通り、表層クラッタを回避し、地下埋設ターゲットを識別するための条件の把握や最適な走査条件を明らかにするとともに、屋外における衛星観測において、2つの軌道による複数物体の識別ができた。また、屋外で運用される合成開口レーダの一般論として応用可能な走査条件に関する知見を獲得した。よって、達成度は100%である。

### 3. 委託業務における研究の方法及び成果

本項では、1. 3項「要素課題に対する実施項目及び体制」の項番(1)～(3)に沿って、各研究の方法及び成果を説明する。なお、(4)プロジェクトの総合的推進については、5項(研究発表等の状況については7項)で示す。

#### (1) 室内実験による1次元走査での埋設物・表層クラッタ分離実験

本研究では、室内実験装置(2次元走査型レーダ散乱計)を用いて、2次元走査時と1次元走査時の比較を通して、埋設物・表層クラッタの分離実験を実施した。併せて、埋設物の状況把握にあたり、1次元走査を複数組み合わせ合わせたトモグラフィーにおける走査本数や間隔を様々に変化させ、イメージング能力の検証を行うことで、できるだけ少ない軌道での埋設物把握条件を明らかにした。

##### a. 室内実験設備について

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA)では、2次元走査型レーダ散乱計(以下レーダ散乱計とする)(図3.1)を実験室内に構築して、P/Lバンドの地下探査の能力を、実験と電磁界シミュレーションにより明らかにする研究を継続的に実施している。レーダ散乱計の構成を表3.1に示す。レーダ散乱計は4つの偏波の送受信が可能であり、アンテナを2次元的に80 $\mu$ mの精度で最大6m $\times$ 6mの範囲で移動可能であり、合成開口を行って走査方向に分解能を向上させることが可能となっている。使用したアンテナはVivaldiアンテナ[1]である。また、データ処理に当たっては、レンジ方向の処理はチャープ-Zフーリエ変換、合成開口処理は逆フレネル変換[2]に基づき実施した。

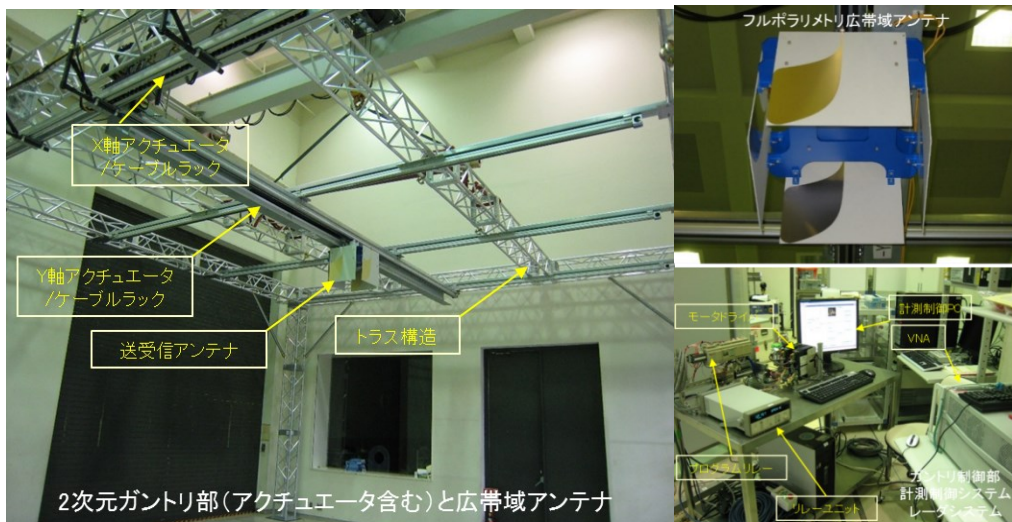


図3.1 2次元走査型レーダ散乱計の外観

表3.1 2次元走査型レーダ散乱計の装置構成と主要仕様

装置構成
<p><b>【2次元ガントリ部】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・移動量: 6m × 6m(位置決め精度: +/-0.08mm)</li> <li>・FESTO社製ベルト駆動アクチュエータEGC-TB × 5式組み合わせ</li> <li>・モータ: オリエンタルモータ社製ステッピングモータ</li> <li>・モータドライバ: オリエンタルモータ社製ドライバAZD-CD × 2軸</li> <li>・ローカル制御: プログラムリレー(OMRON社製 ZEN)</li> </ul>
<p><b>【広帯域アンテナ】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Balanced Antipodal Vivaldi アンテナ × 4式 (周波数範囲: 300MHz 以上), 2直交偏波送受信</li> <li>・アンテナ高さ: 3m(嵩上げ可能)</li> </ul>
<p><b>【レーダシステム】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・Keysight社 PNA-X N5245A(4ポート) チャープレーダ(チャープ-Zフーリエ変換)</li> </ul>
<p><b>【計測制御システム】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・パソコン(HP VEE Pro)による GPIB 制御</li> <li>・Agilent社 34970Aリレーユニットによるガントリ部制御</li> </ul>
<p>※ ガントリ部のトラス構造の製作と組立てのみ外注. その他は JAXAインハウス開発</p>

b. 室内環境の確認

まず、予備実験として、室内に水槽を設置しない状態で、コーナリフレクタを設置し、X軸（南北方向、北向きが正）及びY軸（東西方向、西向きが正）の2次元走査による計測を実施した。計測範囲はX軸が 394-3794 mm、走査時のデータ取得間隔として、X方向、Y方向、それぞれ20mm間隔でデータを2次元方向に取得した。データ点数は、X方向 171 点、Y方向 141 点である。使用した周波数は 1 GHz-1.5 GHz の 500 MHz 帯域幅で、レンジ分解能 30 cmに相当する。図3.2に配置図を、図3.3に写真を示す。1辺の長さ（以下同様）が 20 cm の正方形コーナリフレクタを2個、30 cm の正方形コーナリフレクタを1個設置した。また、30 cm のコーナリフレクタについては、レーダ散乱計の合成開口処理を行う上での位置・高さの校正に活用するために設置した。

レーダ散乱計で2次元合成開口処理を行った結果について、平面図を図3.4に、断面図を図3.5に示す。平面図によると、床面からの高さ 900 mm 相当では左上のコーナリフレクタが結像された。また、高さ400mm相当では、右上及び下のコーナリフレクタがそれぞれ結像された。また、左上のコーナリフレクタの背後に相当する残像が見えていたものの、右上のコーナリフレクタとは大きな信号強度差があり、両者を識別可能である。また、断面図によると、天井のアンテナ付近に、送受アンテナのカップリングによる影響が見られているが、左図では、高さに差をつけた2個のコーナリフレクタを別々のエコーとして受信できている。また、全体的に、不要な反射物の影響が無視でき、室内環境に問題がないことを確認した。

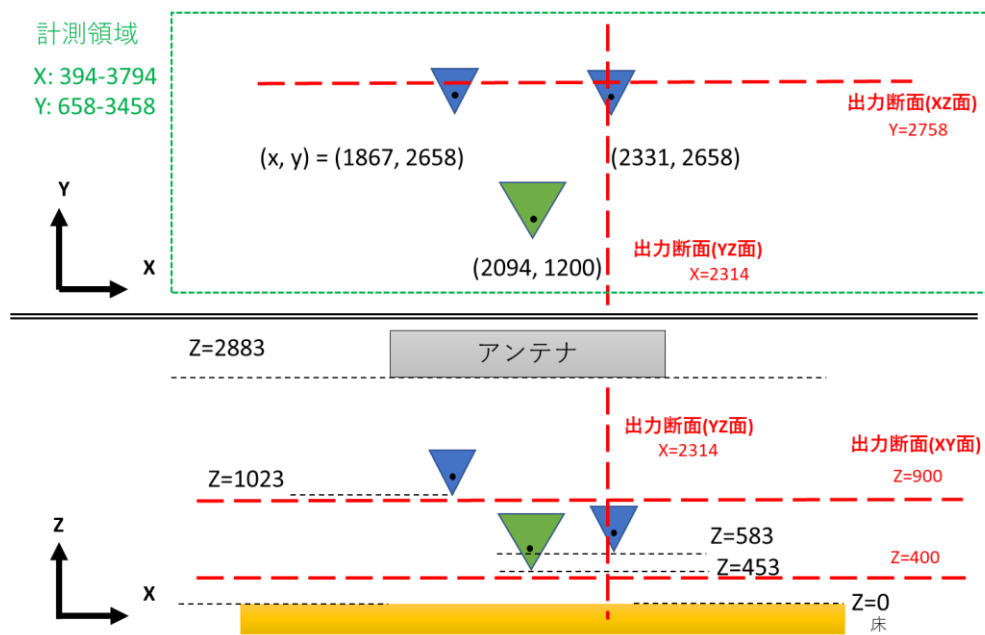


図3.2 予備実験時の配置図。(上)平面図、(下)断面図。▼は正方形コーナリフレクタを示す。表中の数値の単位はすべてmm。使用するコーナリフレクタの寸法は、青▼は20cm、緑▼は30cm。

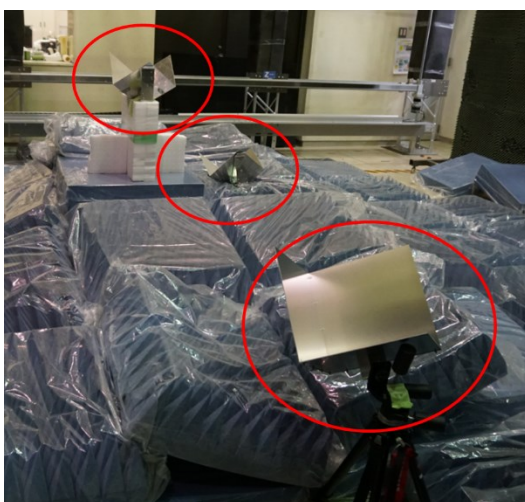


図3.3 予備実験時の写真。赤丸はコーナリフレクタを示す。

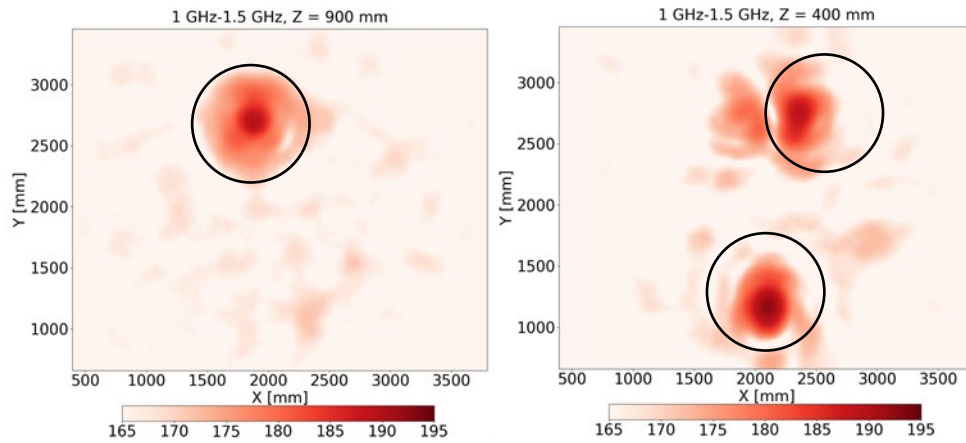


図3.4 レーダ散乱計で計測された2次元合成開口レーダ画像の平面図。周波数 1.0-1.5 GHz。座標軸の単位はすべてmm（以下同様）。コンターレベルは相対的な電力（デシベル、以下同様）。（左）床面からの高さ $Z=900\text{mm}$ 、（右） $Z=400\text{mm}$ 。

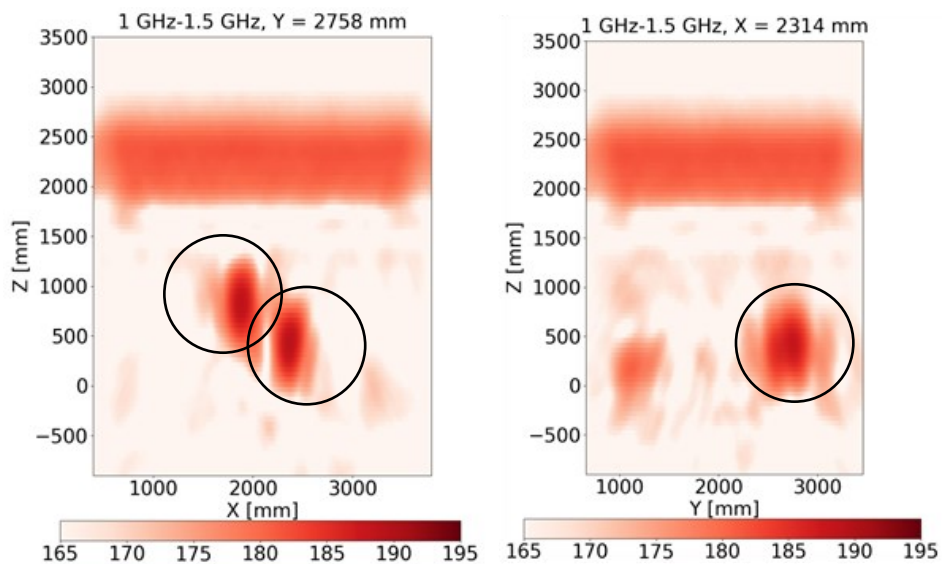


図3.5 レーダ散乱計で計測された2次元合成開口レーダ画像の断面図。周波数 1.0-1.5 GHz。（左）X-Z断面（ $Y = 2758\text{ mm}$ ）、（右）Y-Z断面（ $X = 2314\text{ mm}$ ）。



c. 砂埋設時の2次元合成開口レーダ画像の確認

次に、2次元合成開口での砂に埋設されたコーナリフレクタが正しく結像されるかどうかを確認するため、コーナリフレクタを埋設した状態でのレーダ計測を実施した。計測範囲やデータ間隔、周波数帯域幅は前項と同様である。図3.6に配置図を、図3.7に写真を示す。水色の水槽の中に砂を入れた上で、砂面上及び砂内部にコーナリフレクタを配置した。具体的には、1辺の長さ（以下同様）が20cmの正方形コーナリフレクタを2個配置し、そのうち1個を砂面上に置き、1個を埋設とした。併せて、水槽内の右端に、30cmの正方形コーナリフレクタを1個埋設した。また、水槽の外側に、30cmのコーナリフレクタを設置し、レーダ散乱計の合成開口処理を行う上での位置・高さの校正に活用した。

レーダ散乱計で2次元合成開口処理を行った結果について、平面図を図3.8に、断面図を図3.9に示す。平面図によると、床面からの高さ900mm相当では左上に、砂面上に置いたコーナリフレクタが結像された。併せて、水槽内の砂面上において、砂面とみられる弱い散乱エコーが確認された。一方、高さ400mm相当では、水槽の中心部及び右端に、埋設したコーナリフレクタがそれぞれ結像された。強度の差は、コーナリフレクタのサイズ違いに起因する。また、砂面上に置いたコーナリフレクタの背後に相当する残像が併せて観察された。図の下部においては、参照用の水槽外のコーナリフレクタの像も観察されている。一方、断面図によると、左図のX-Z断面においては、床上高900mm付近に1個、400mm付近に2個のコーナリフレクタが結像された。一方、X=1200mm付近において、床上高0mm付近にもエコーが見られているが、これは床の回転台のエコーの一部が受信されている可能性がある。電波吸収体で覆ってあるものの、水槽や砂の荷重の関係から水槽の底付近には薄い電波吸収体を使用している関係で、回転台まで電波が到達しているものとみられている。

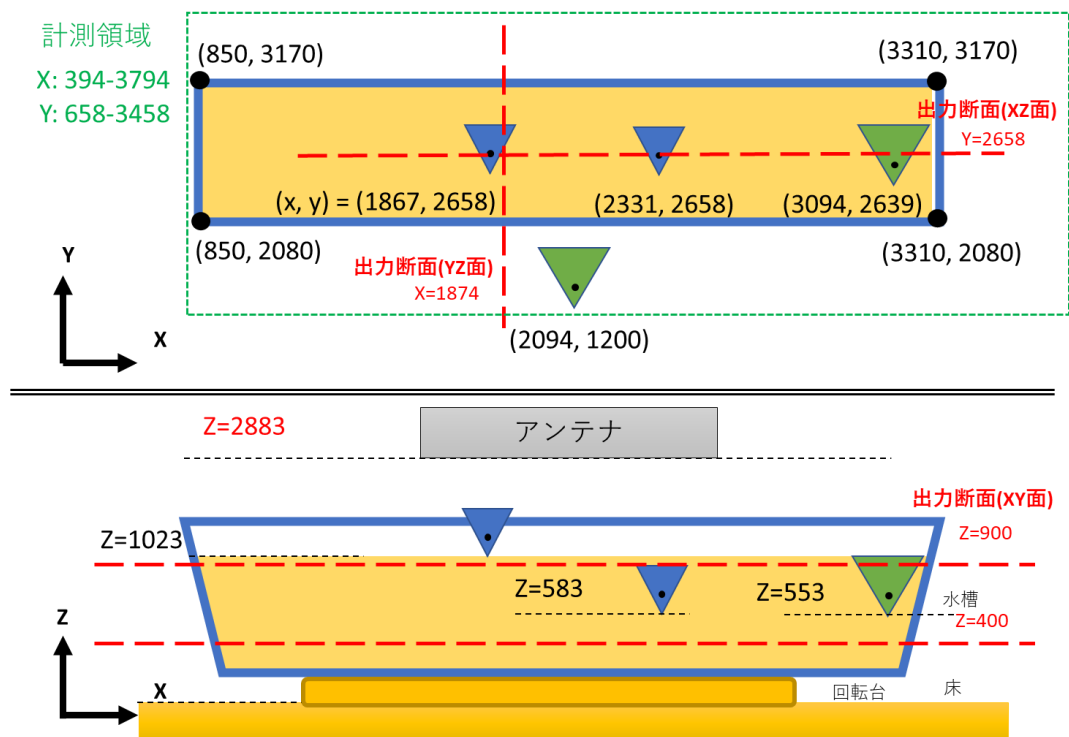


図3.6 コーナリフレクタ埋設実験時の配置図。(上)平面図、(下)断面図。▼は正方形コーナリフレクタを示す。表中の数値の単位はすべてmm。使用するコーナリフレクタの寸法は、青色は20cm、緑色は30cm。

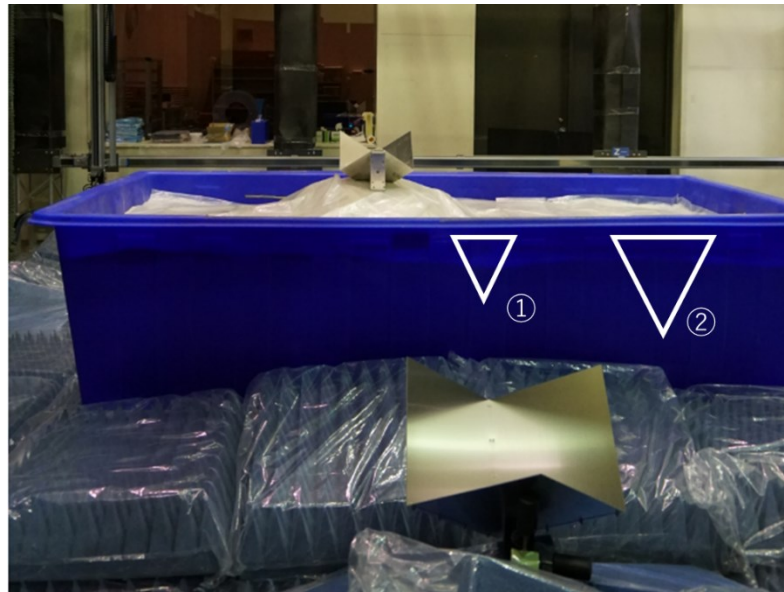


図3.7 コーナリフレクタ埋設実験時の写真。

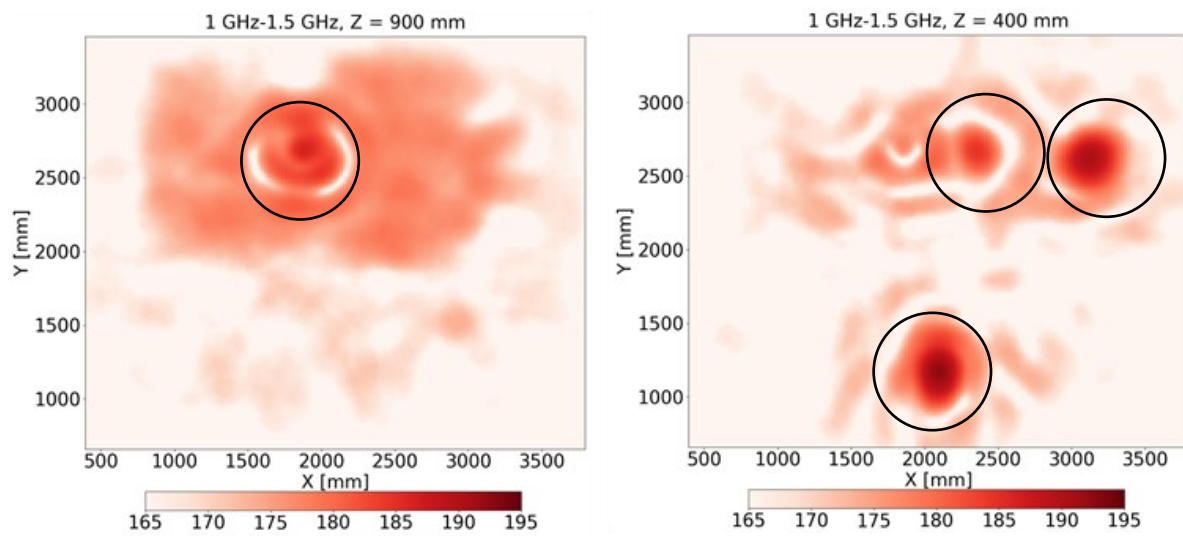


図3.8 レーダ散乱計で計測された2次元合成開口レーダ画像の平面図。周波数 1.0-1.5 GHz。  
 (左) 床面からの高さ $Z=900\text{mm}$ 、(右)  $Z=400\text{mm}$ 。

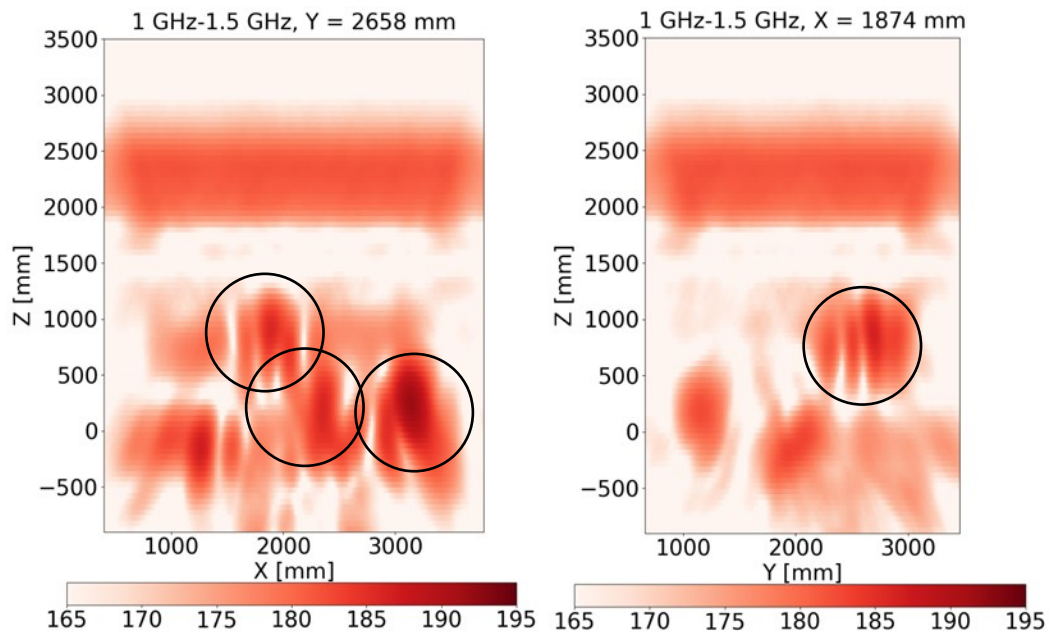


図3.9 レーダ散乱計で計測された2次元合成開口レーダ画像の断面図。周波数 1.0-1.5 GHz。  
 (左) X-Z断面 (Y = 2658 mm)、(右) Y-Z断面 (X = 1874 mm)。

#### d. 2次元処理と1次元処理の比較

前項までの確認を踏まえ、前項と同一のデータを用いて、2次元処理により得られたY-Z断面の画像と、同じY-Z断面で1次元処理を行った画像とを比較し、2個のコーナリフレクタが分離出来るかどうかを検証する。

図3.10に、2次元合成開口レーダ画像のY-Z断面について、断面の位置を  $X=1674$  mm から100 mm 間隔で  $X=2574$  mm まで変化させた場合の画像を示す。 $X=1674$  mm から  $X=2074$  mm にかけて、砂面上に置いたコーナリフレクタからの散乱エコーが明瞭に観察された。 $X=2074$  mm においては、散乱エコーがさらに下方に伸びているように見えることから、砂面上のコーナリフレクタと、埋設コーナリフレクタのエコーが重畳している可能性がある。 $X=2174$  mm から  $X=2474$  mm にかけては、埋設コーナリフレクタのエコーが明瞭に観察される一方、砂面上においては、砂面からの反射はみられるものの、コーナリフレクタに起因するエコーはみられなかった。このように、2次元で合成開口処理を行うことにより、表層のコーナリフレクタと、埋設したコーナリフレクタを区別することができることが分かった。

一方、図3.11に、同じY-Z断面において、特定のXにおける値のみを抽出し、1次元合成開口処理を行った場合の画像を示す。こちらにおいても、 $X=1674$  mm から  $X=2074$  mm にかけて、砂面上に置いたコーナリフレクタからの散乱エコーが明瞭に観察された。 $Z=0$ 以下にみられるエコーは、回転台に起因するものと思われる。一方、埋設したコーナリフレクタについては、 $X=2374$  mm においてのみ明瞭にコーナリフレクタと分かるエコーが観察された。一方、その前後の  $X=2274$  mm や  $X=2474$  mm では、エコーの形状の観点からは、コーナリフレクタなのか、別の物体なのかの判読がより難化していることが分かった。さらなる考察のためには、埋設物を取り除いた実験等が必要であることを示唆している。

したがって、位置が既知の物体について、その時間経過による変化を監視するような場合、直下視においては、設置座標の直上でスキャンすれば、2つの物体に対し、それぞれ1本ずつ、計2本のスキャンで、各々の物体の状況を把握できることが分かった。

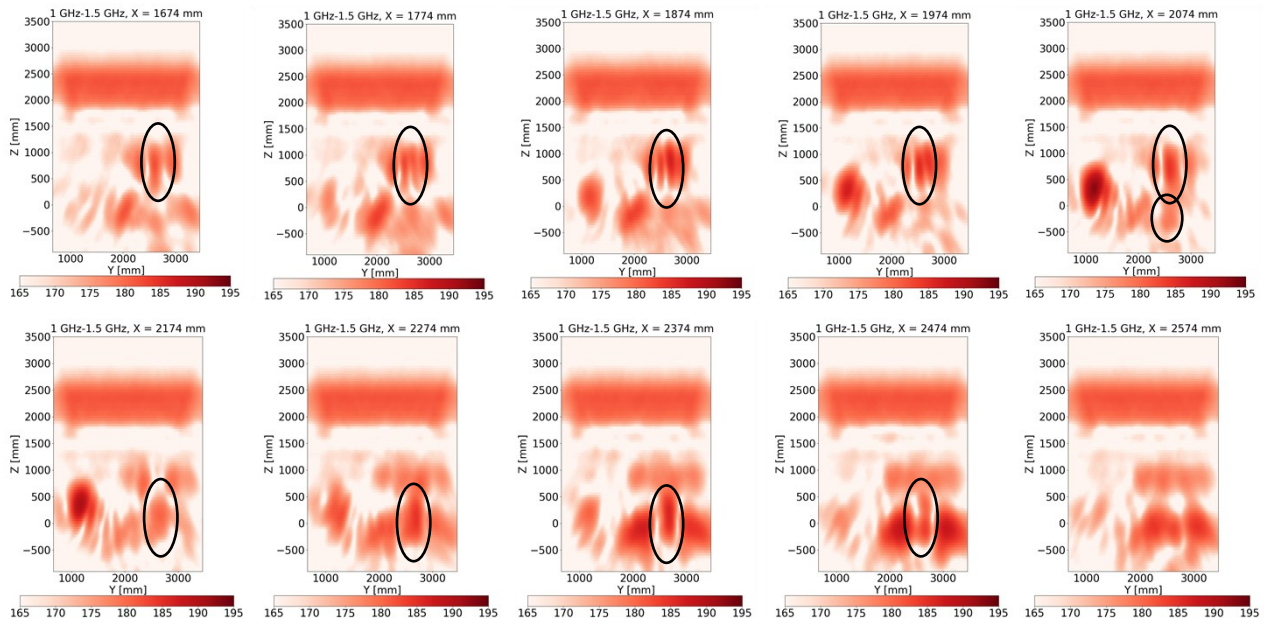


図3.10 レーダ散乱計で計測された2次元合成開口レーダ画像のY-Z断面について、断面の位置を変化させた場合。周波数 1.0-1.5 GHz。左上から順に、 $X=1674$  mm から100 mm 間隔で  $X=2574$  mm まで示す。

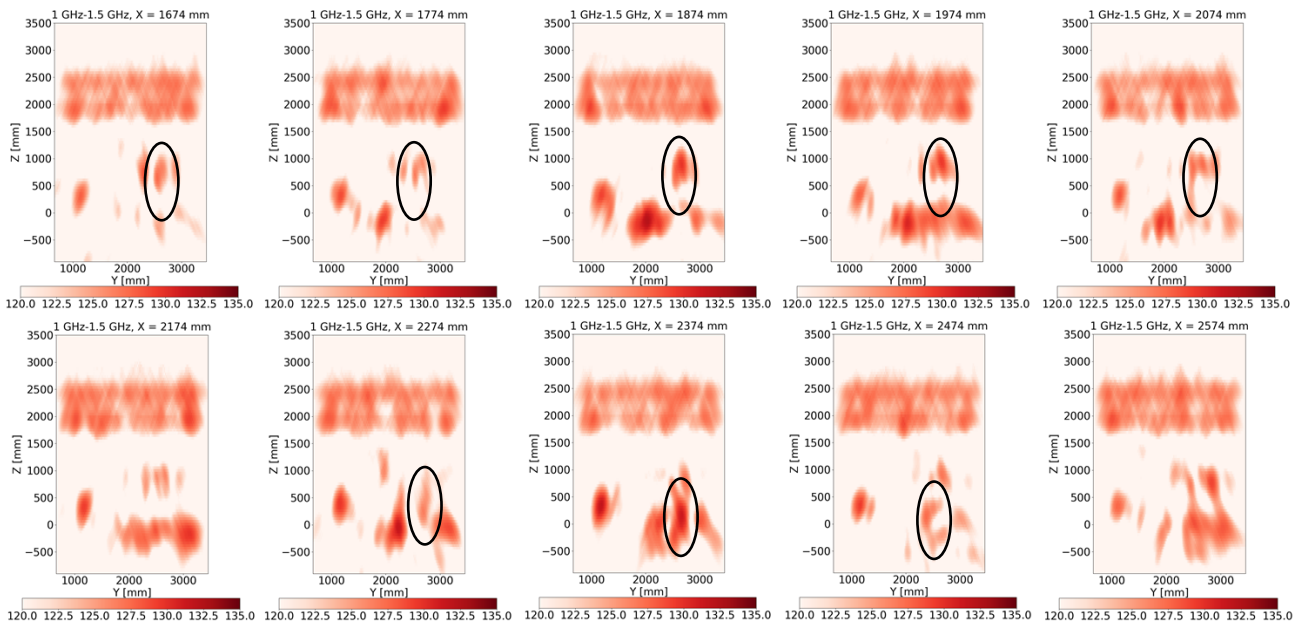


図3.11 レーダ散乱計で計測された、Y-Z断面における1次元合成開口処理を行ったレーダ画像。周波数 1.0-1.5 GHz。左上から順に、 $X=1674$  mm から100 mm 間隔で  $X=2574$  mm まで示す。

e. 鉄板及び鉄パイプの床置き状態での計測

コーナリフレクタ以外の金属物体を埋設供試体として検証することを視野に入れ、まずは鉄板及び鉄パイプを床上に置いた場合の散乱を確認するための計測実験を実施した。

図3.12に配置図を、図3.13に写真を示す。使用した鉄板は 300 mm × 300 mm × 7.5 mm のステンレス製 (SS400)、鉄パイプは外径 127 mm、板厚 10 mm、長さ 300 mm の炭素鋼 (S45C 相当品) (ミスミ S45C-PSH-127-10-300) を使用した。水槽及びコーナリフレクタについては残した状態で実験を実施した。なお本項以降では、衛星搭載LバンドSARの周波数帯域が最大 85 MHz である点と、室内実験における実験空間の制約の両方を鑑み、前項までの 500 MHz 帯域幅よりもやや帯域を狭めた 1.0-1.3 GHz の 300 MHz 帯域幅で実験を実施した。

図3.14、図3.15、及び図3.16にレーダ散乱計で計測された鉄板及び鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像を示す。鉄板については非常に強い散乱が観察されており、コーナリフレクタと同等レベルの強度の散乱となっている。一方、鉄パイプからの散乱は、鉄板や鉄パイプと比較して大幅に小さくなっており、20 dB 前後の違いが生じている。断面積は鉄板と比べて3倍程度しか変わらない点を考慮すると、曲面形状が散乱に影響を与えている様子が反映されていると考えられる。

なお、本実験は真下を含む2次元走査である。そのため、鏡面散乱からの寄与分が反射強度に大きく影響していると考えている。衛星からの観測の場合、入射角 30 度程度の斜方からの入射・反射を対象としているため、鏡面散乱の影響は大きく減ることが予測される。

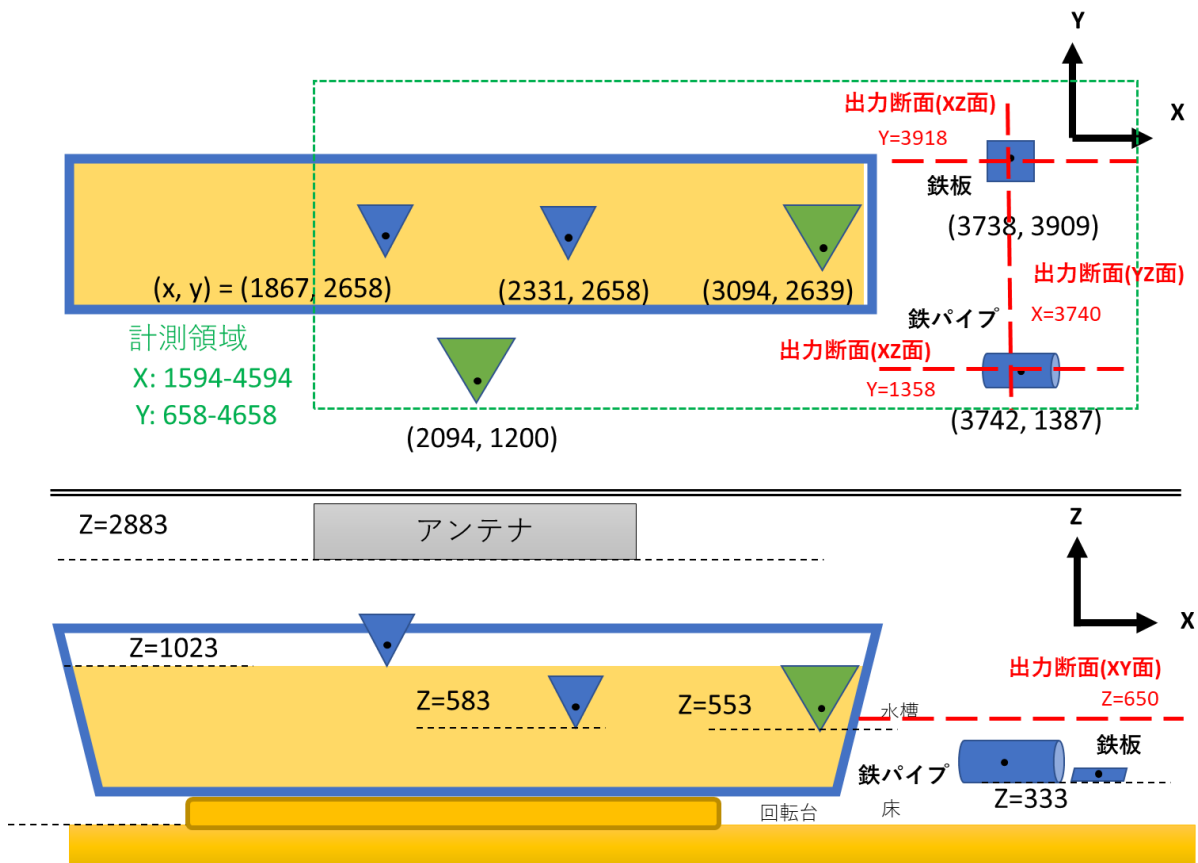


図3.12 鉄板及び鉄パイプを床上に置いた場合の実験の配置図。(上) 平面図、(下) 断面図。青▼は 20 cm のコーナリフレクタ、緑▼は 30 cm のコーナリフレクタを示す。

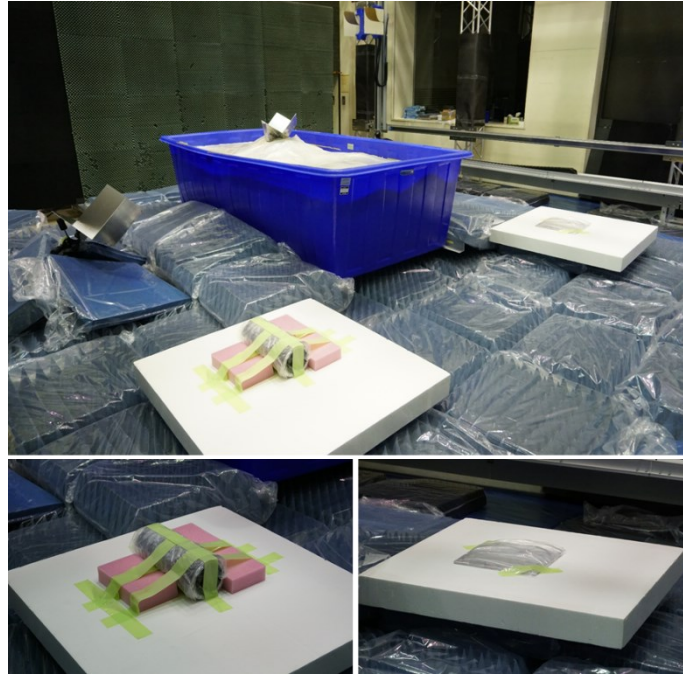


図3.13 鉄板及び鉄パイプを床上に置いた場合のイメージング実験の写真。(上) 全体写真、(左下) 鉄パイプ、(右下) 鉄板。

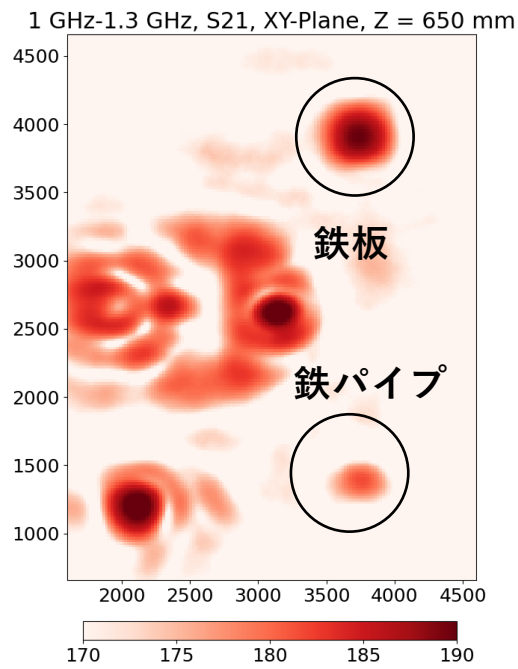


図3.14 レーダ散乱計で計測された鉄板及び鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像の平面図 (横軸X、縦軸Y)。周波数 1.0-1.3 GHz。床面からの高さ Z=650 mm。

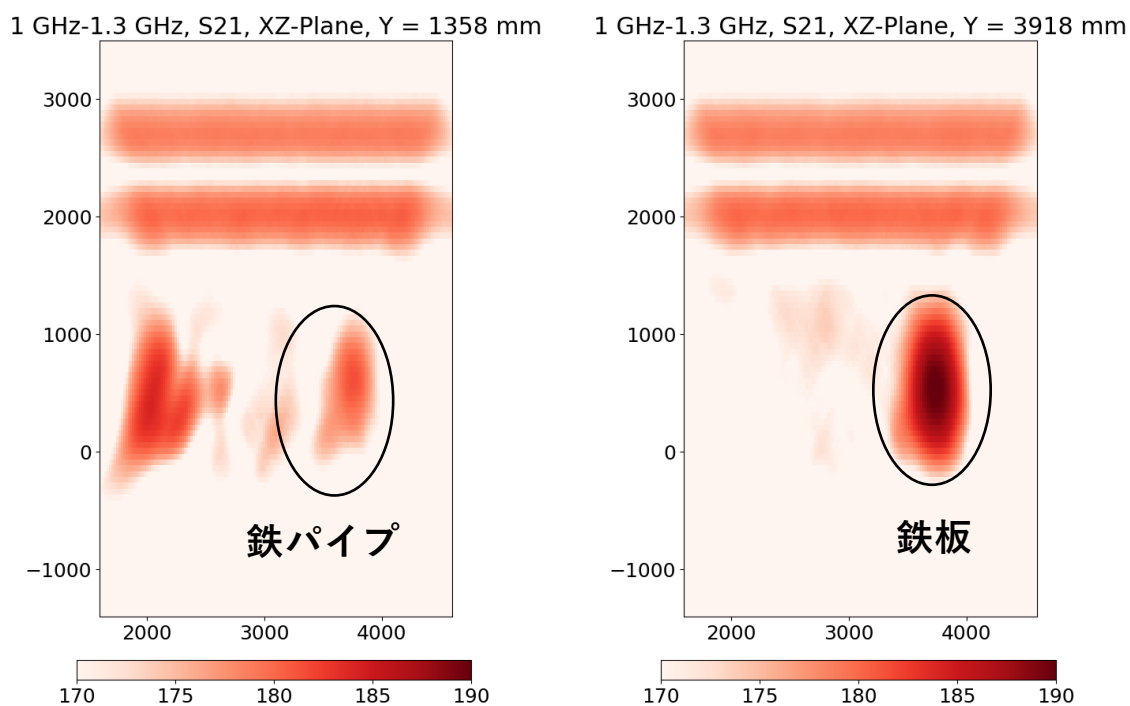


図3.15 レーダ散乱計で計測された鉄板及び鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像の断面図（X-Z断面、横軸X、縦軸Z）。周波数 1.0-1.3 GHz。Y方向の座標は（左）Y=1358 mm、（右）Y=3918 mm。左図において X=2000 mm 付近にあるのは参照用の床置きコーナリフレクタの像。

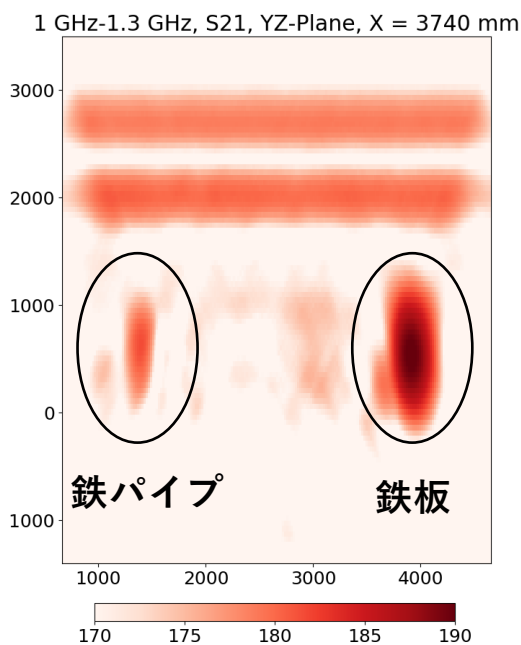


図3.16 レーダ散乱計で計測された鉄板及び鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像の断面図（Y-Z断面、横軸Y、縦軸Z）。周波数 1.0-1.3 GHz。X方向の座標は X=3740mm。



f. 鉄板及び鉄パイプの埋設状態での計測

次に、鉄板及び鉄パイプを砂に埋設した場合の散乱を確認するための計測実験を実施した

図3.17 に配置図を示す。水槽の左側に鉄板を、右側に鉄パイプを埋設した。前項の実験で床置きとした鉄板、鉄パイプはそのまま残してある。また、コーナリフレクタについては、鉄パイプを埋設した場所にあった 30 cm のものを1個撤去し、他のコーナリフレクタを残した状態で実験を実施した。

図3.18、図3.19、及び 図3.20にレーダ散乱計で計測された鉄板及び鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像を示す。鉄板については床置きの状態と同様、埋設時にも強い散乱エコーが観察されている。これは、床置き時と同様に、鏡面散乱の影響が強く出現していると考えられる。一方、鉄パイプについては、鉄板と比べて強度が弱まるのみならず、水平・鉛直的に広がりを持ったエコーとして受信されていた。水槽等、周囲の物体の影響もありうることから、1項で示すトモグラフィーへの応用を目指した実験では、パイプの直径を大きくする、埋設物の有無を比較できるようにする、といった改良を施した上で取り組んだ。

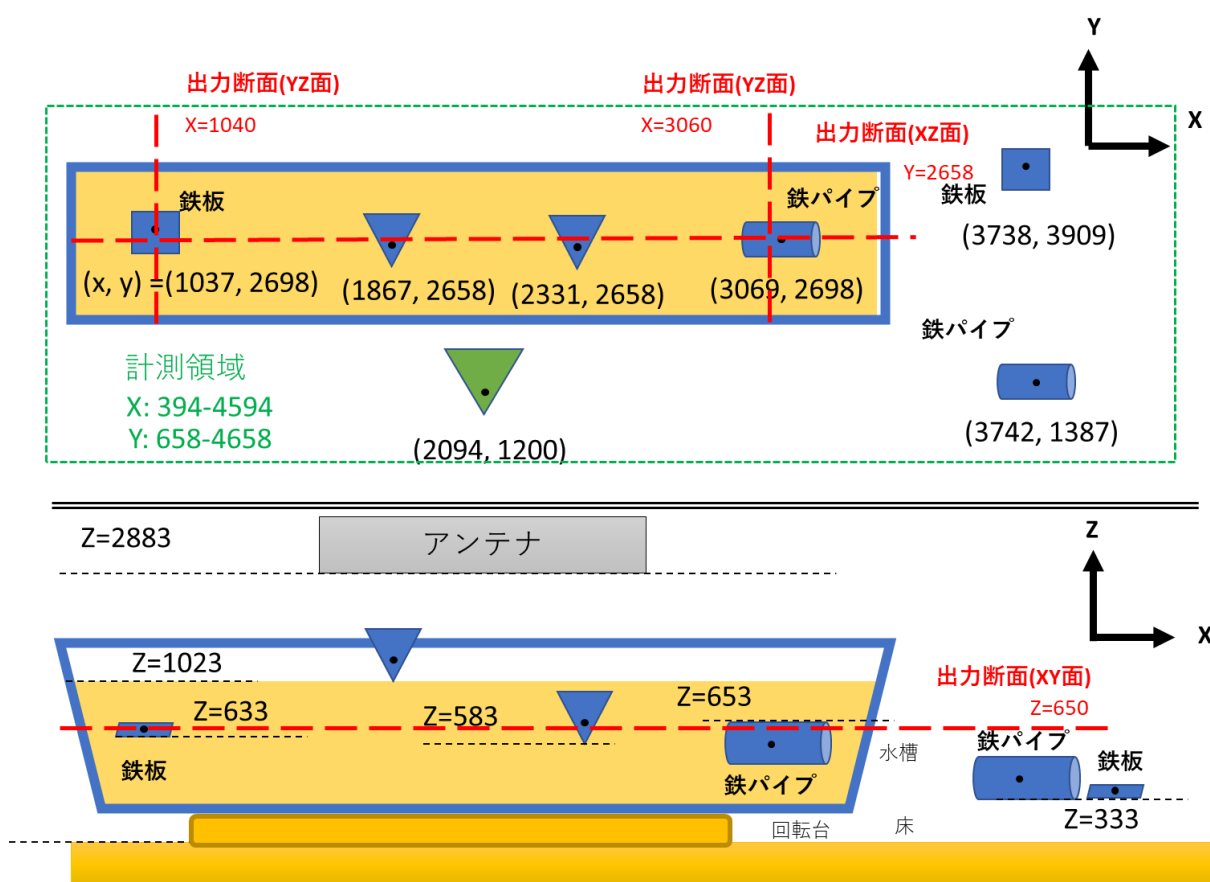


図3.17 鉄板及び鉄パイプを砂に埋設した場合の実験の配置図。(上)平面図、(下)断面図。青▼は 20 cm のコーナリフレクタ、緑▼は 30 cm のコーナリフレクタを示す。

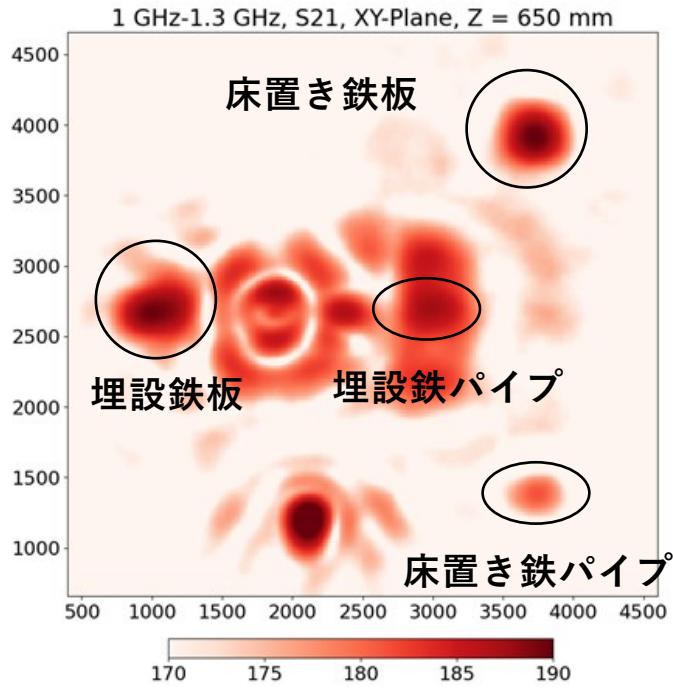


図3.18 レーダ散乱計で計測された埋設鉄板及び埋設鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像の平面図（横軸X、縦軸Y）。周波数 1.0-1.3 GHz。床面からの高さ Z=650 mm。

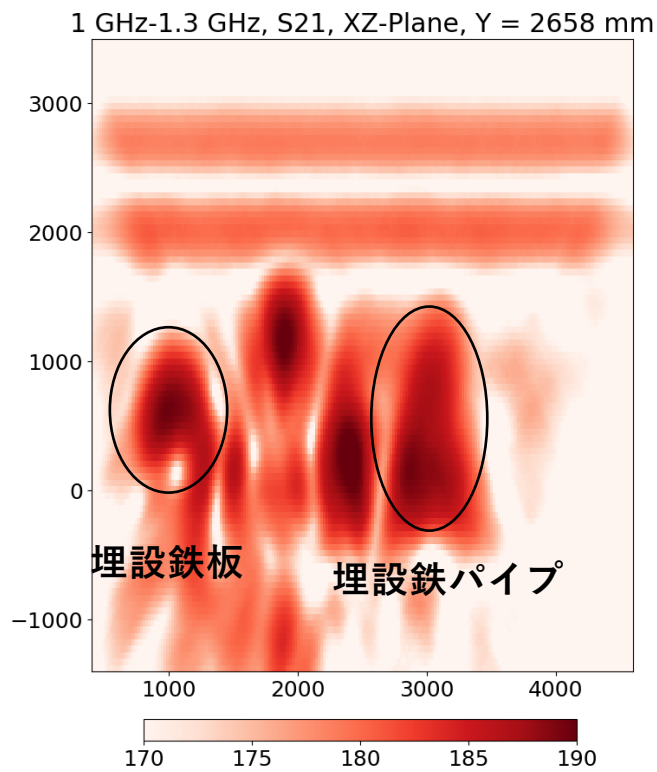


図3.19 レーダ散乱計で計測された埋設鉄板及び埋設鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像の断面図（X-Z断面、横軸X、縦軸Z）。周波数 1.0-1.3 GHz。Y方向の座標は Y=2658 mm。

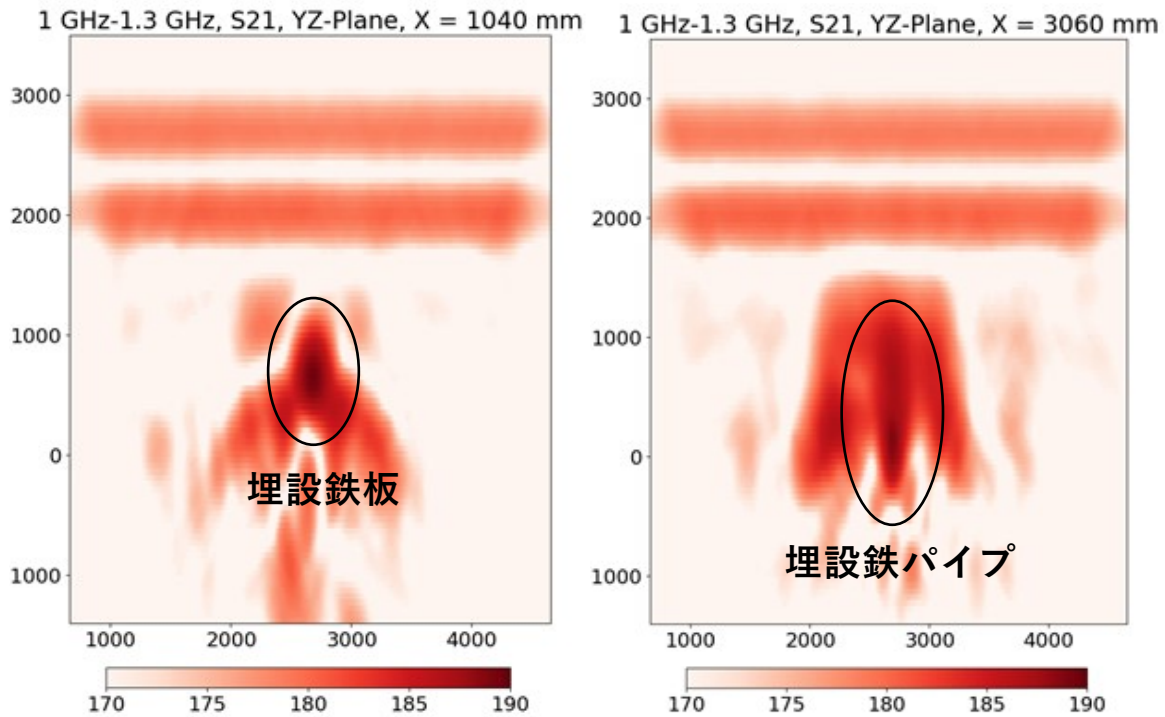


図3.20 レーダ散乱計で計測された埋設鉄板及び埋設鉄パイプを含む2次元合成開口レーダ画像の断面図 (Y-Z断面、横軸Y、縦軸Z)。周波数 1.0-1.3 GHz。X方向の座標は (左) X=1040 mm、(右) X=3060 mm。

g. 1次元走査時の走査位置の細かな違いによる埋設物イメージングの影響の分析

図3.17のシーンにおいて、1次元走査位置を細かく変化させた場合の埋設コーナリフレクタの様子を解析し、近傍に存在する砂面上のコーナリフレクタによる影響を分析した。

図3.21に、レーダ散乱計で計測された合成開口レーダのY-Z断面について断面の位置を40 mm ずつ変化させた場合の埋設コーナリフレクタ周辺の画像を2次元走査時と1次元走査時のそれぞれについて示す。黒で囲われた部分が埋設コーナリフレクタの場所である。2次元走査においては、X = 2340 mmから2500 mm にかけていずれの断面においても、埋設されたコーナリフレクタが可視化されていた。但し、埋設コーナリフレクタの両側において、水槽を支える2本の金属製のレールが映りこんでいる。一方、1次元走査においては、X = 2340 mmにおいては2本の金属製のレールの間にあるはずのコーナリフレクタの部分が空洞となっていた。Xを2500 mm に近づけていくにつれ、埋設したコーナリフレクタが現れ始め、X = 2460 mm から 2500 mm にかけて明瞭になっていることが分かった。

これにより、1次元走査においては、2次元走査と比べ、断面の位置の違いによるイメージングの違いが強く表れるとともに、別の物体による影響を強く受けることが示唆された。このため、1次元走査においては、ターゲットと走査位置との関係について、より慎重に見極める必要があることが分かった。

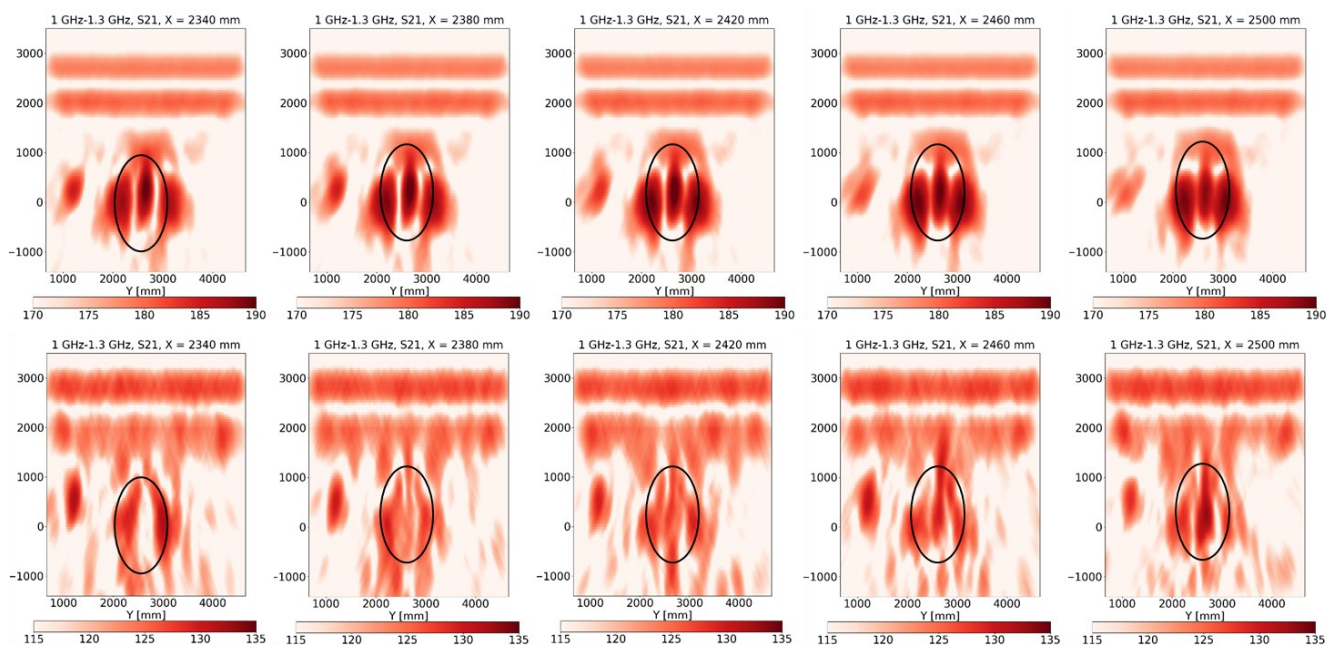


図3.21 レーダ散乱計で計測された合成開口レーダのY-Z断面について断面の位置を変化させた場合の埋設コーナリフレクタ周辺の画像。上段は2次元走査、下段は1次元走査（走査方向はY軸方向のみ）を示す。また、左から順に、 $X = 2340$  mm から  $40$  mm 間隔で  $X = 2500$  mm まで示す。

h. コーナリフレクタを傾けた状態での実験

衛星搭載合成開口レーダの入射角は30度程度であるため、新たにコーナリフレクタを傾けた状態での埋設実験を実施した。

図3.22に実験コンフィグレーションを示す。正方形コーナリフレクタを5個準備し、1辺の長さについては1個を20 cm、4個を30 cmとした。3個を水槽の内側に配置し、うち1個を砂面上に置き、2個を砂内部に埋設した。また、残り2個を水槽の外側に置いた。各コーナリフレクタの方位角と入射角を表3.2に、方位角の定義を図3.23に示す。但し、ここでのコーナリフレクタの入射角は、記載した入射角で到来する入射波に対して反射が最大となる角度とする。水槽の内側にあるコーナリフレクタに対しては 15 度の入射角に対応できるように設置し、かつ方位角については複数の軌道に対向できるよう2種類の方角とした。水槽の外側のコーナリフレクタに対しては、地面上観測を想定し、入射角を 0 度および 30 度とした。また、走査は2次元走査とし、走査範囲は、X 軸は 594 mm から 3994 mm までの 3400 mm 幅を 20 mm 間隔、Y軸は 658 mm から 3858 mm までの 3200 mm 幅を 20 mm 間隔とした。周波数は 1.0 - 1.3 GHz とした。

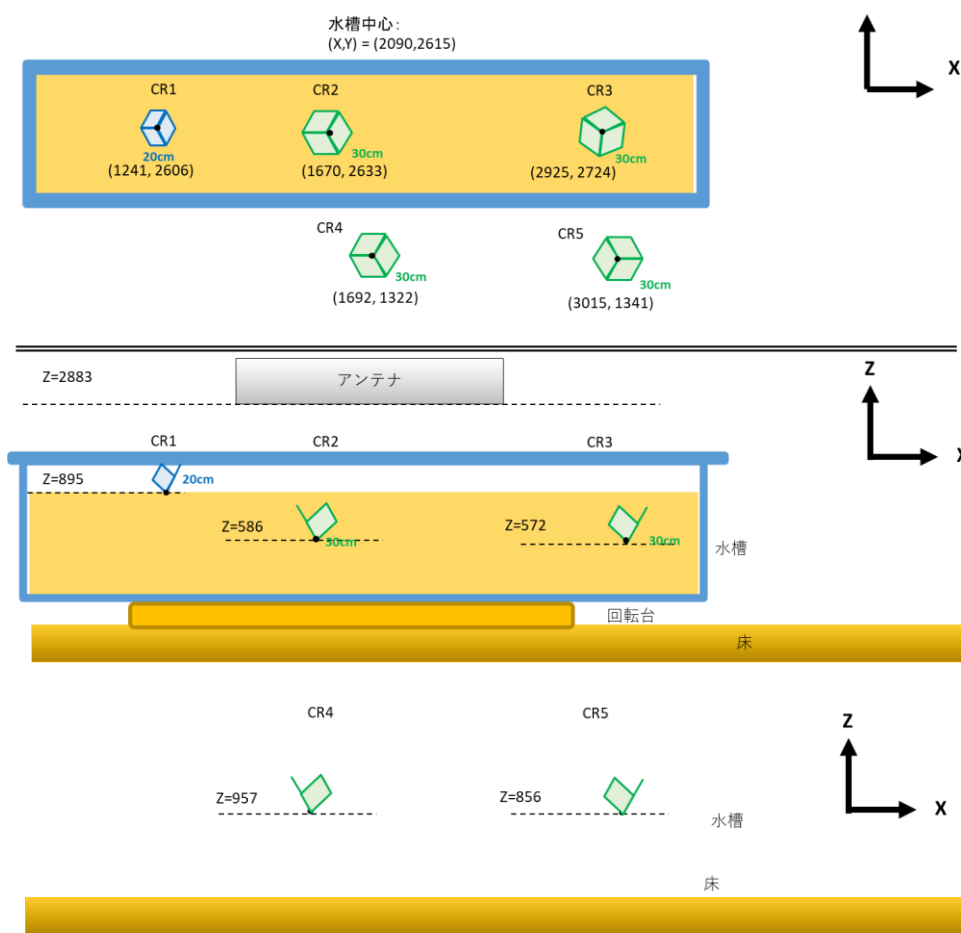
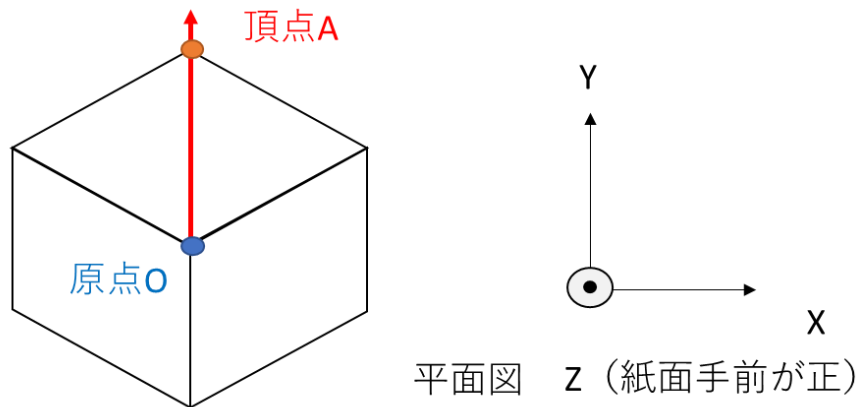


図3.22 コーナリフレクタを傾けた状態で実施した実験におけるコンフィグレーション。

表3.2 各コーナリフレクタの方位角と入射角。

CR名	1辺の長さ	設置場所	方位角	入射角
CR1	20 cm	水槽の砂の上	270°	15°
CR2	30 cm	水槽の砂に埋設	270°	15°
CR3	30 cm	水槽の砂に埋設	110.7°	15°
CR4	30 cm	水槽の外	270°	30°
CR5	30 cm	水槽の外	90°	0°



図は正方形3面コーナリフレクタの方位角が0度するとき  
OAベクトルの向きを方位角とする

図3.23 コーナリフレクタの方位角の定義。

図3.24に、コーナリフレクタを傾けて実験を行った際の2次元処理時の X-Y平面図を示す。高さは 1200 mm および 650 mm である。まず、左下の CR4 と右下の CR5 に着目する。右下の CR5 は入射角が 0 度であり、前述の内容と整合性のある楕円状の水平断面形状となっている。一方、左下の CR4 は入射角が30 度で方位角が 270 度であり、X軸正の方向に傾けて設置した。このため、縦長の楕円形状となっており、かつ1個のコーナリフレクタに対して大小二つの楕円エコーが見えることが分かった。一方、水槽内における CR1 ~ CR3 のうち、砂面上に置いたコーナリフレクタについては、入射角が 15 度と小さかったため、 $Z = 1200 \text{ mm}$  においてはやや縦長となる傾向があるものの、形状については入射角が 0 度である CR5 の場合との差異が小さかった。さらに、埋設したコーナリフレクタ CR2 及び CR3 においては、ほぼ同心円状となり、CR5 とほぼ同じ形状となった。また、図3.25にX-Z平面図を示す。Y座標は水槽外のコーナリフレクタ近傍の 1320 mm 及び水槽内のコーナリフレクタ近傍の 2700 mm である。CR4 近傍において平面図と同様の二重エコーが観察された。また、CR5及びCR1~CR3においては、二重エコーは観察されず、逆三角形のような形状がみられた。

このように、コーナリフレクタを傾けて設置して2次元走査を実施した場合、自由空間上においては、入射角 30 度においては形状が大きく影響を受け、15 度においては影響が小さかった。また、砂埋設時においては、入射角 15 度においても入射角 0 度とほぼ同じエコー形状となった。特に、埋設時は、砂（比誘電率が 5 程度）の影響により、自由空間で30 度で入射した入射波が砂内部を伝搬する際に入射角が小さくなることから、より入射角の影響が低減され

る方向に作用することが原因と考えられる。

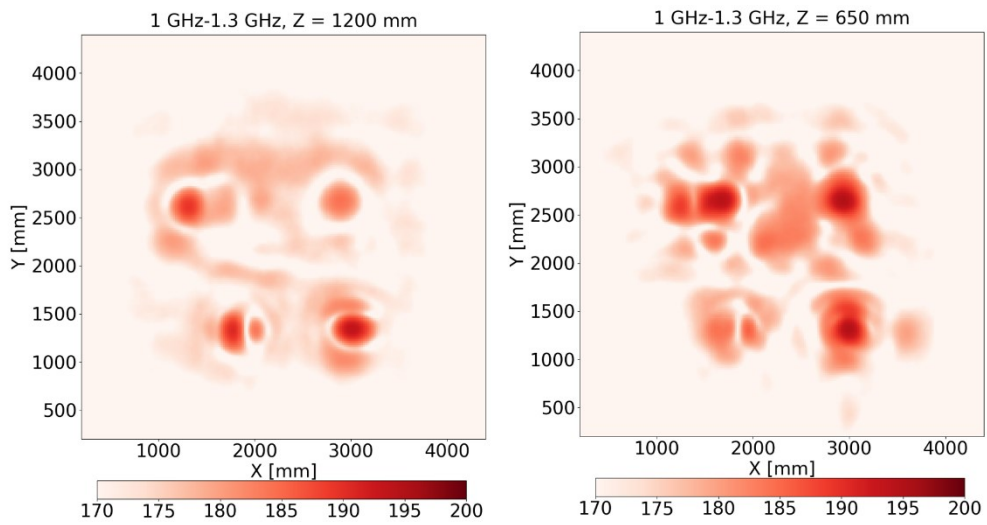


図3.24 コーナリフレクタを傾けて実験を行った際の2次元処理時の X-Y平面図。高さは（左） $Z = 1200$  mm、（右） $Z = 650$  mm。

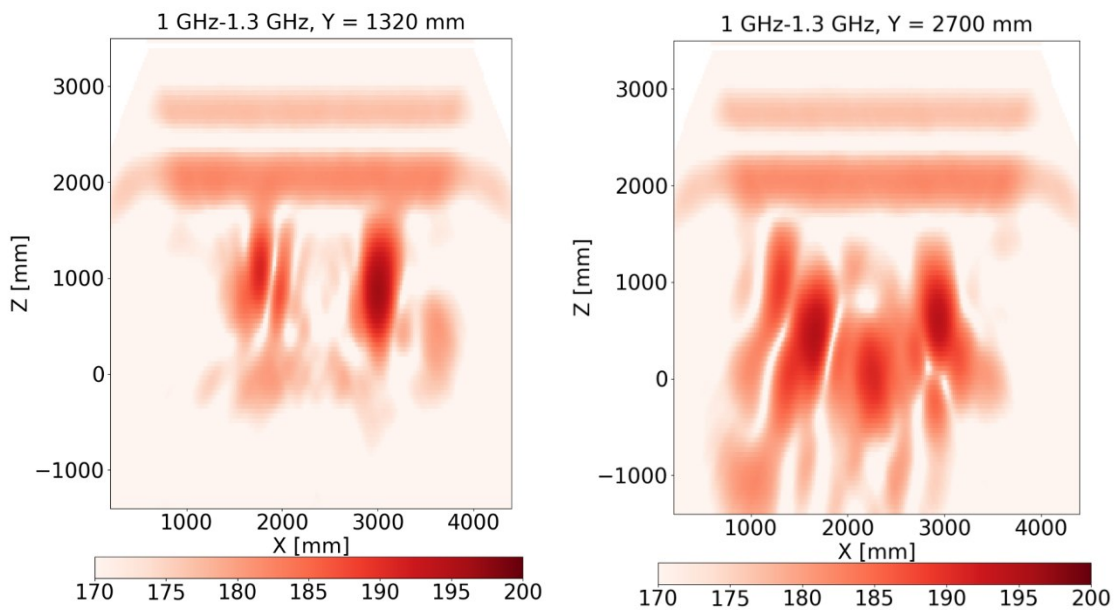


図3.25 コーナリフレクタを傾けて実験を行った際の2次元処理時の X-Z平面図。Y方向の断面（左） $Y = 1320$  mm、（右） $Y = 2700$  mm。

i. 斜め格子での走査

合成開口レーダ衛星の軌道は、降交軌道（ALOS-2では北北東から南南西に向かう軌道で昼間に観測）と昇交軌道（ALOS-2では南南東から北北西に向かう軌道、夜間に観測）があり、中緯度域において概ね20度程度の方角角の違いがある。そこで、室内実験においても、斜め軌道を想定した実験ができるように、2つのアプローチで、斜め軌道を想定した実装作業を進めた。

(1) 室内レーダ散乱計の2次元走査を行う際に、斜め格子で走査を行う手法

レーダ散乱計のアンテナ位置の制御及びデータの自動取得を行うプログラムに関し、機能向上のための制御プログラム改良（改良版プログラムの製作）を実施した。走査時のイメージを図3.26に示す。

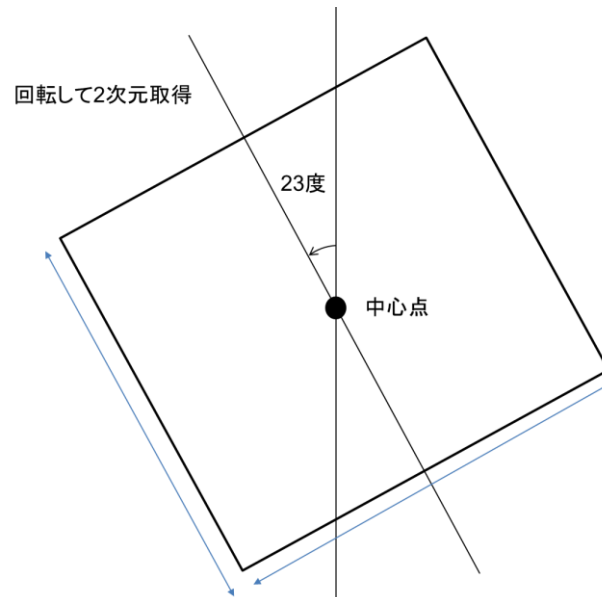


図3.26 斜め格子で走査を行う場合のイメージ（図は軌道角度が23度となる場合の例）。

(2) 従来通り、2次元走査においてX軸とY軸の格子にそって走査を行い、処理を行う上で斜め方向の線に沿ったデータを抽出の上処理を行う手法

従来通りのX軸とY軸の格子（以後水平垂直格子とする）にそって走査したデータについて、合成開口処理を行うプログラムにおいて、あらかじめ定めておいたターゲット軌道周囲のみのデータを抽出して読み込み、合成開口処理を行うプログラムを作成した。処理のイメージを図3.27に示す。



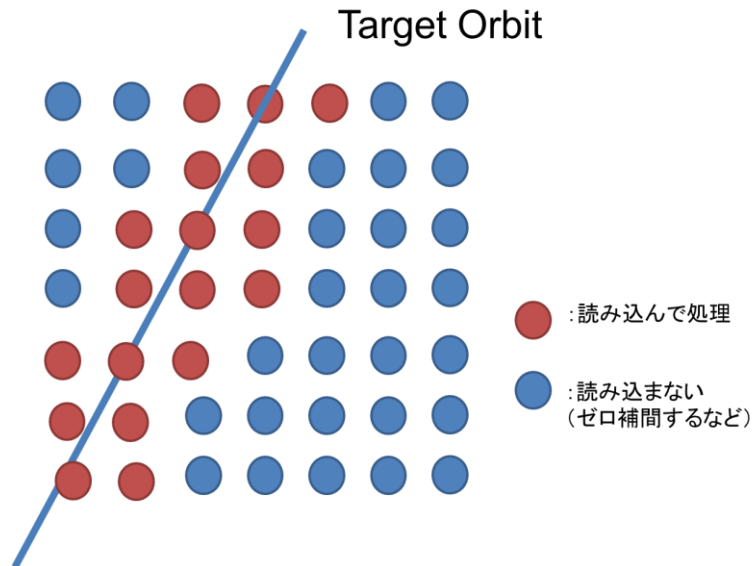


図3.27 水平垂直格子による2次元走査データからターゲット軌道周辺のデータのみを取り出し処理する場合

その上で、斜め軌道を模擬するにあたり、室内レーダ散乱計のデータ処理プログラムについても改良を実施した。

プログラムの改良にあたり、検討を加えた結果、室内実験における観測時（走査時）の格子がどのような格子点であっても、アジマス圧縮後の計算結果として可視化したい断面点群で処理結果が得られることが分かった。具体的には、 $x_i$  を  $x$  座標上の観測時の座標、 $x_t$  を計算結果として可視化点の座標、 $z_t$  を鉛直方向の座標、 $S(x_i, z_t)$  をアジマス圧縮前の信号強度、 $h(x_i - x_t, R_0)$  をアジマス圧縮時に用いる逆フレネル変換の式とし、 $R_0$  をアンテナからターゲットまでの距離とすると、アジマス圧縮後の可視化点の座標は下記の式で示される。

$$g(x_t, z_t) = \sum_{i=0}^n h(x_i - x_t, R_0) S(x_i, z_t) \Delta x$$

本式は、観測時の格子点と、計算結果の点群を独立に設定可能であることを示していることが分かった。模式図を図3.28に示す。

そこで、プログラム実装においては、

- ・入力ファイルは水平・垂直な格子点とは限らず、不規則な点群データで良いとする。
- ・出力点群は従来通り、水平・垂直な格子点とする(2次元格子出力が可能)。
- ・入力ファイルのフィルタ機能として、任意の線分とその近傍距離を指定できる。

とし、室内レーダ散乱計の2次元走査を行う際の点群に関わらず、共通のプログラムで処理可能とするよう実施した。

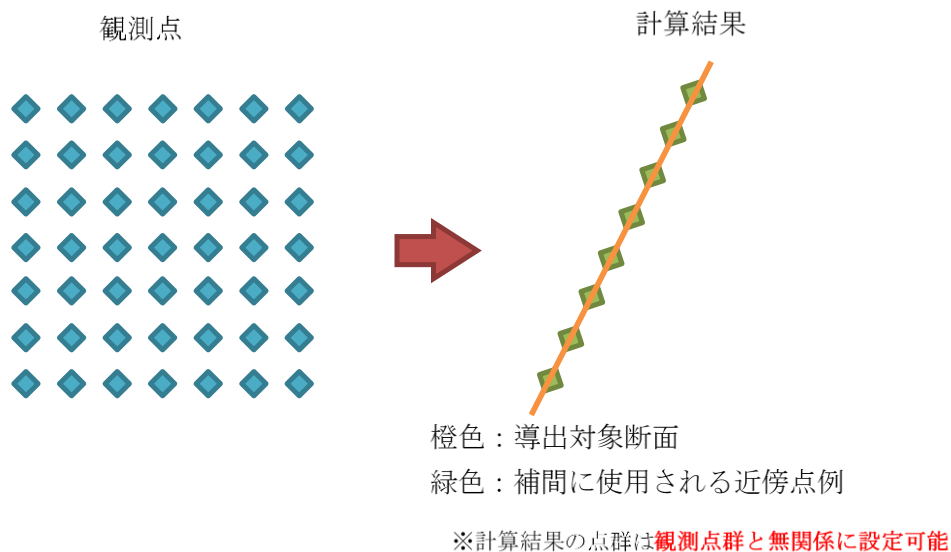


図3.28 鉛直上方向から見る形で3次元を2次元化した場合の模式図。

その上で、水平垂直格子で実験を行った場合と、斜め格子で実験を行った場合を比較した。前述のコーナリフレクタを傾けて行った実験について、水平垂直格子に加えて斜め格子でも実験を実施した。図3.29に両者の走査範囲の比較を示す。斜め格子においては、回転角としてJAXAのSAR衛星（ALOS-2）の昇交軌道と降交軌道の中緯度域での角度差の一例として20.7度を想定し、格子にそって前述実験と同じデータ点数で実験を行った。図3.30に、水平垂直格子及び斜め格子で走査した場合のX-Y平面図を示す。両者を比較した結果、走査領域が異なるためわずかな差異があるものの、ほとんど同じ結果が得られることが分かった。

このことから、観測格子点という観点からは、必要なサンプリングが得られていれば、水平垂直格子であっても斜め格子でも同等のイメージング結果が得られることが分かった。このことは、軌道の方向よりは、サンプリング点群の空間分布が重要であることを示唆している。

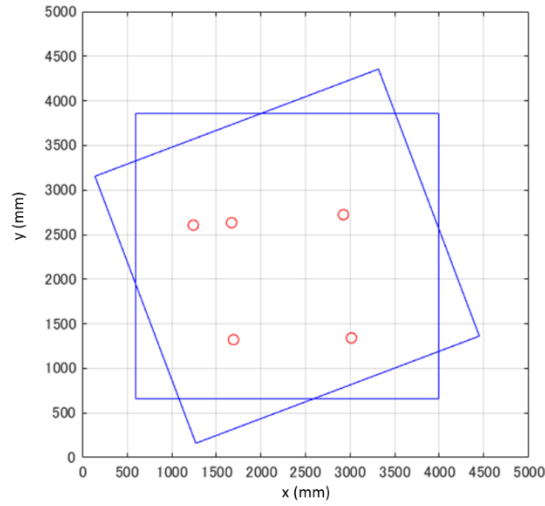


図3.29 水平垂直格子で走査した場合と斜め格子で走査した場合の走査範囲の比較。青四角はそれぞれの走査範囲を示す。赤丸はCR1～CR5の位置を示す。

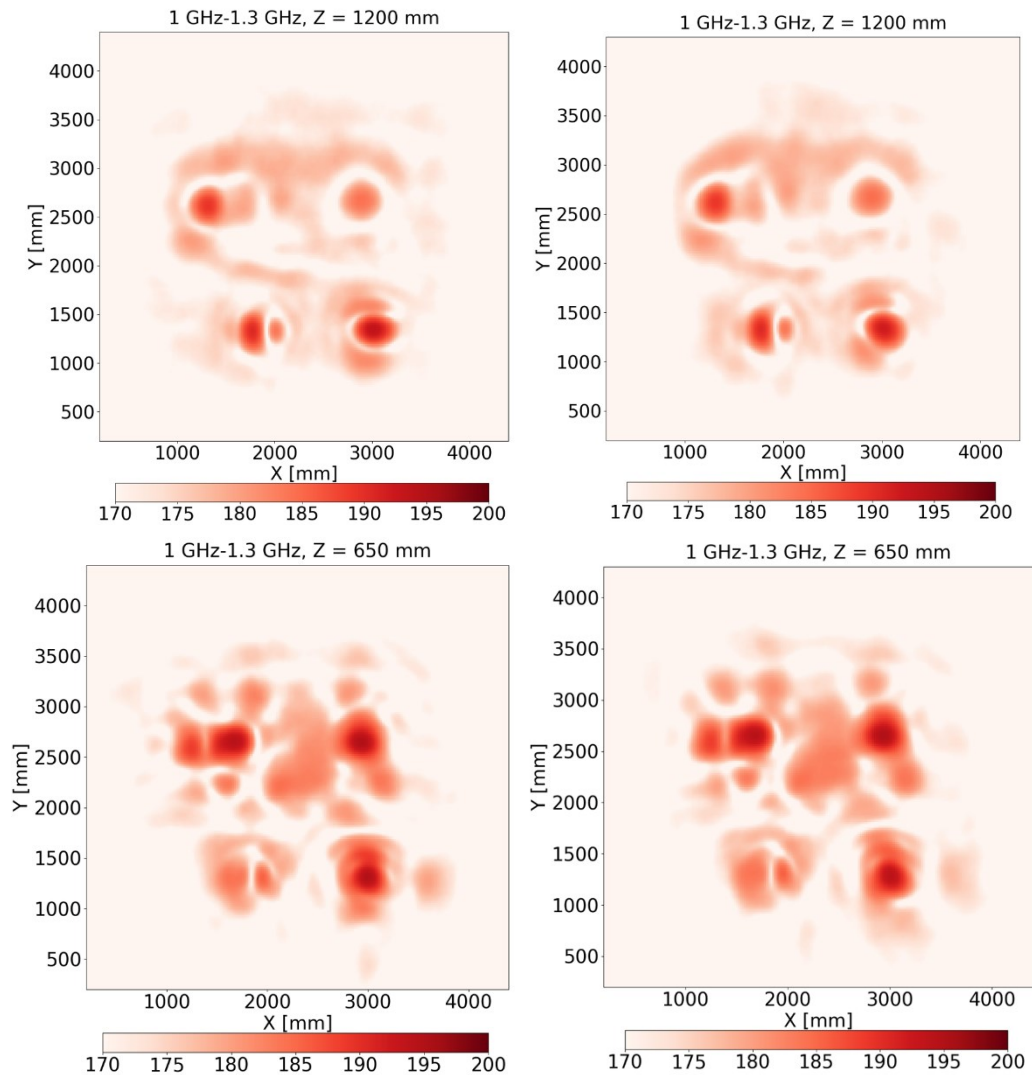


図3.30 (左) 水平垂直格子及び (右) 斜め格子で走査した場合のX-Y平面図。(上)  $Z = 120$  mm、(下)  $Z = 650$  mm。

j. 衛星観測に有効な屋外埋設実験での供試体配置条件

図3.31 に、衛星観測に有効な屋外埋設実験での供試体配置条件を示す。埋設したコーナリフレクタ（またはパイプ状散乱体）の近傍に、妨げとなる物体（例えばコーナリフレクタ）を置く。衛星搭載SAR（ALOS-2）の入射角（30度程度）を念頭において、コーナリフレクタを傾けて観測を行うことを念頭に置き、昼間に観測を行う降交軌道では埋設したコーナリフレクタを衛星からの入射に合わせた角度に設置しつつ、妨げとなる物体の角度を、別の角度（例えば、夜間に観測を行う昇交軌道）に向け、昼間と夜間で分離する、といった条件が有効である可能性が高いとして、後述する通り、屋外実験計画に実際に反映した。

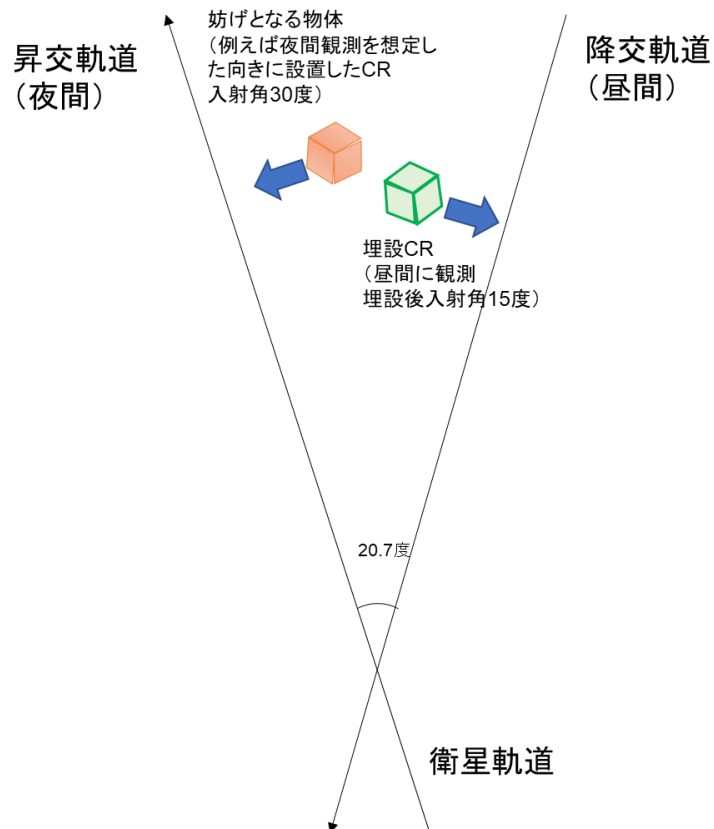


図3.31 衛星観測に有効な屋外埋設実験での供試体配置条件

#### k. 複数の1次元走査画像を扱う上での2つのアプローチの整理

前述の成果を踏まえ、複数の1次元走査画像を組み合わせた埋設物探査への応用について、2つのアプローチの整理を実施した。

具体的には、走査位置・角度を変更した複数の1次元走査画像の解析については、下記のアプローチがある。

(ア) 各1次元画像を1枚ずつ目視で分析する手法

(イ) 複数の1次元走査データを組み合わせた2次元合成開口処理によるトモグラフィー処理画像の生成

屋外実験においては、これまでの成果を踏まえつつ、現状での衛星観測機会が極めて限定され、走査位置・角度のバリエーションを限られた実験期間で得られないため、(ア)の手法で取り組むこととした。一方、室内実験における(ア)の手法では、1枚ずつ走査位置をずらし、目視で画像を見ながら埋設物を推定する手法であるため、汎用的な走査条件を示すための一般化が困難であるとともに、前述の斜め格子での走査機能を活用し、斜め方向での室内実験を試みたところ、周囲の物体の影響など、実験室や実験シーンがもたらす固有の影響が大きく、一般化を想定した条件自体の設定が困難であることが分かった。

そこで、より一般化を容易とし、かつ将来の飛行体(衛星・航空機等に搭載したSAR)への画質改善のポテンシャルが見込める(イ)のアプローチをもとに、令和4年度はトモグラフィーへの応用を目指した走査方法と合成開口効果の関係の検証を行った。

#### 1. トモグラフィーへの応用を目指した走査方法と合成開口効果の関係の検証

本項では、前項(イ)のアプローチにより、実際に走査本数とレーダ画像の関係を検証する実験を行った。具体的には、完全な2次元走査と比べて走査本数を減らし、その本数と画像の関係がどのようになるか、という観点から検証を進めた。なお、(イ)のアプローチは、室内実験における2次元走査そのものであり、本項では2次元走査とトモグラフィー処理を同じものとして扱う。

図3.32に、1次元走査本数を増やし、複数本のトモグラフィー処理を行った場合に期待される一般的な効果を示す。具体的には、X方向に1次元走査を行ったデータをY方向に複数本組み合わせる場合、①合成後のY方向のビーム広がり抑制でき、周辺物体からの影響が低減できる効果、②合成によるS/N改善効果、が期待できる。

実験シーンとして、後で述べる屋外衛星観測実験の結果をフィードバックした。具体的には、衛星SAR画像で埋設時に感度の得られたパイプ状物体を対象に、衛星における昇交軌道と降交軌道での見え方の差を検証できるように、2個のパイプを準備し、方位角を変えて埋設するコンフィグレーションとした。配置図を図3.33に示す。パイプは、感度を確保すべく外径を前述の実験よりも拡大(127 mm から200 mm へ)し、板厚 15 mm、長さ 300 mmのアルミニウムの市販品とした。比較対照として、水槽内にコーナリフレクタを1個埋設し、水槽外にコーナリフレクタ1個とアルミニウムパイプ2個(PP1及びPP2)を設置した。PP1及びPP3はX軸に平行に設置・埋設を行い、PP2及びPP4はX軸より方位角方向として時計方向に $20.7^\circ$ (一般的なXY座標系において $-20.7^\circ$ と表記)回転させて設置・埋設を行った。また、水槽や水槽外の室内環境の影響を考慮した解析のため、比較対照として、図3.34に示す通り、埋設物を撤去し水槽内部を砂のみとした場合のデータ取得を併せて実施した。実験実施時の写真を図3.35に示す。なお、実験に使用した周波数は 1 GHz ~ 1.3 GHzの 300 MHz 帯域幅である。

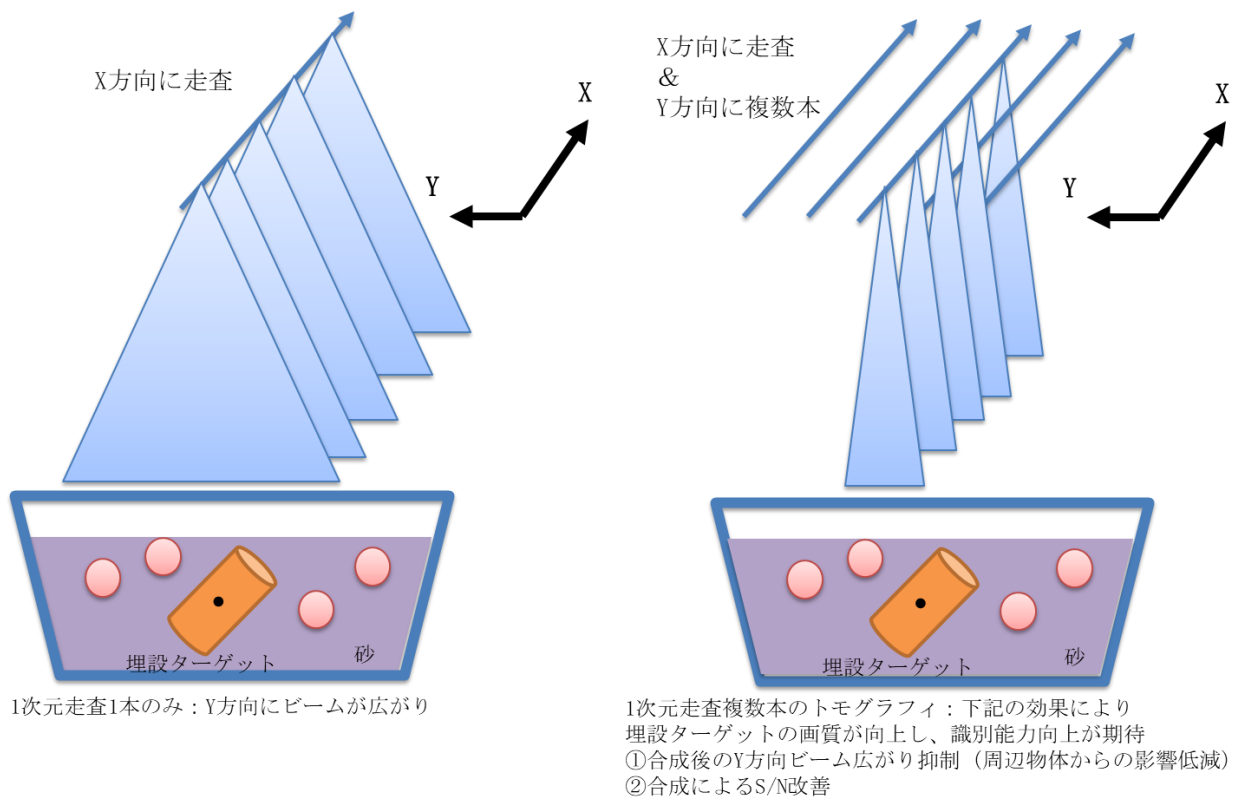


図3.32 1次元走査本数を増やし、複数本のトモグラフィ処理を行った場合に期待される一般的な効果。

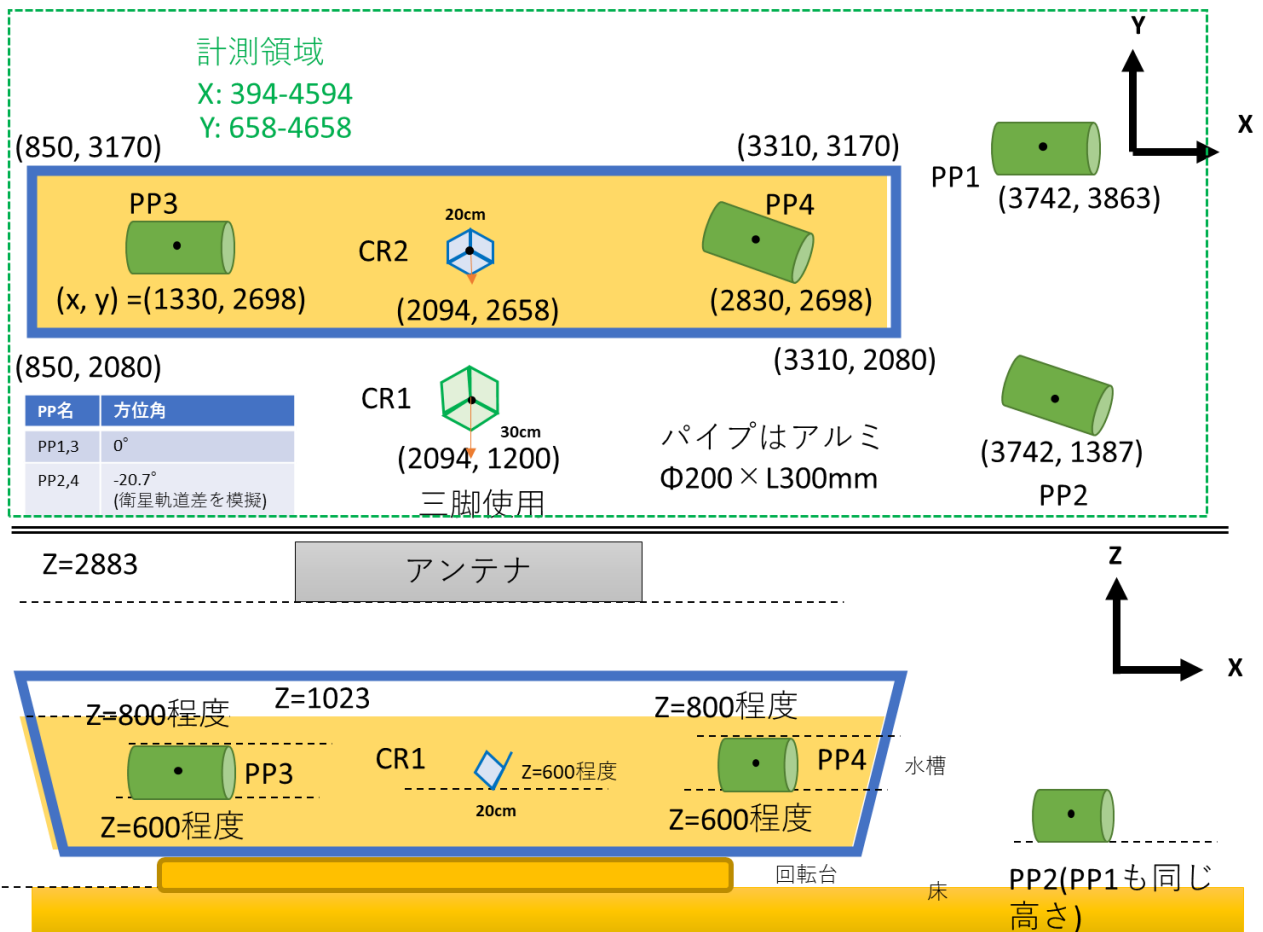


図3.3 アルミニウムパイプ（外径 200 mm、長さ 300 mm）を2個（PP3及びPP4）砂に埋設した場合の実験の配置図。（上）平面図、（下）断面図。CR（青）は 20 cm のコーナリフレクタ、CR（緑）は 30 cm のコーナリフレクタを示す。比較対照として、水槽内にコーナリフレクタを1個埋設し、水槽外にコーナリフレクタ1個とアルミニウムパイプ2個（PP1及びPP2）を設置した。PP1及びPP3はX軸に平行に設置・埋設を行い、PP2及びPP4はX軸より方位角方向として時計方向に20.7°（一般的なXY座標系において-20.7°と表記）回転させて設置・埋設を行った。

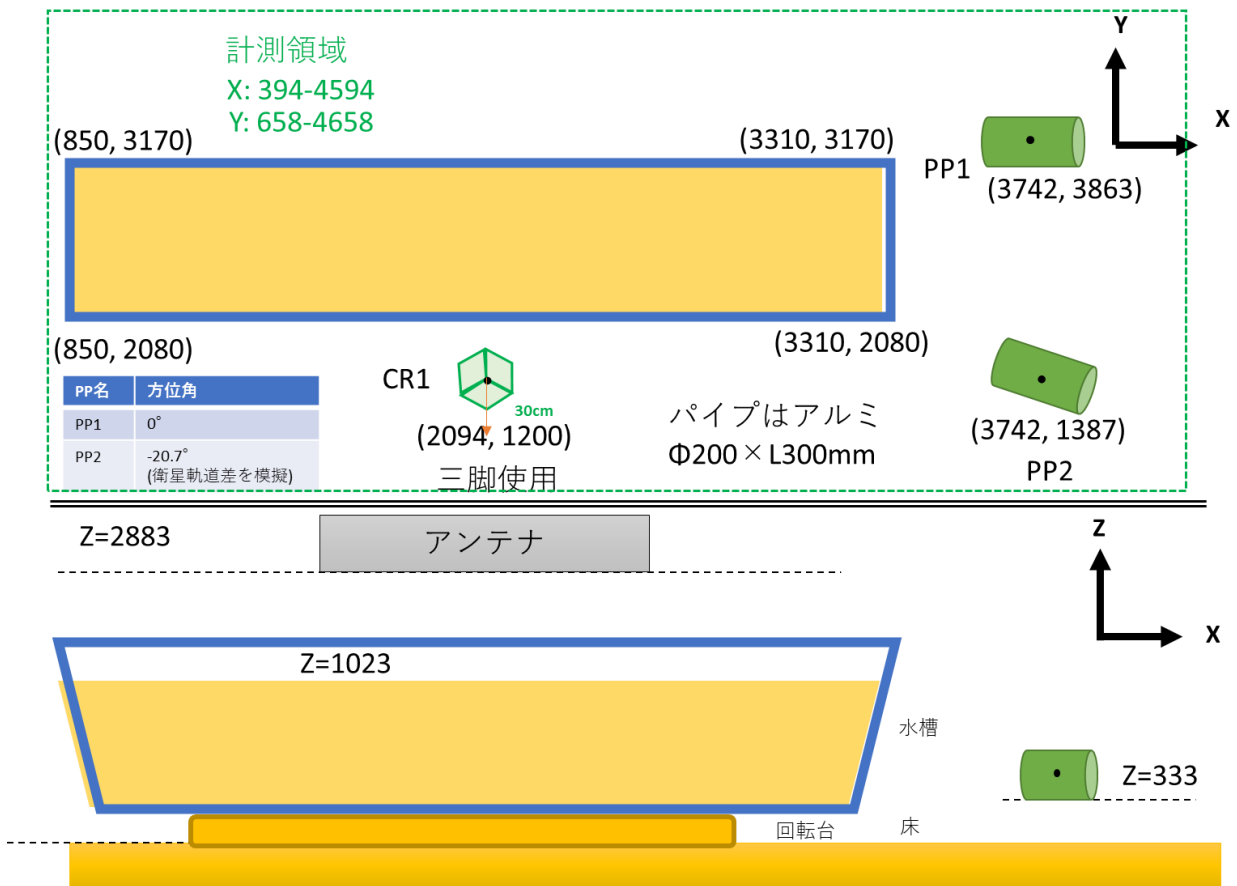
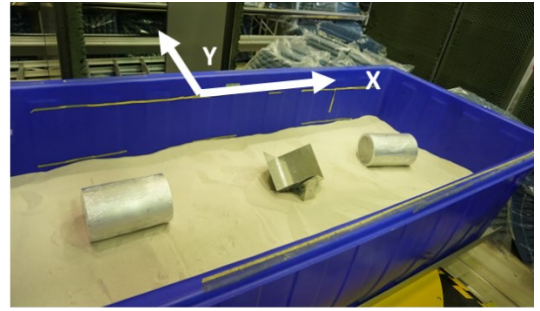


図3.34 比較対照用に、埋設物を撤去し水槽内部を砂のみとした場合の配置図。(上) 平面図、(下) 断面図。CR (緑) は 30 cm のコーナリフレクタを示す。水槽外に設置した物体は図3.33と同じである。

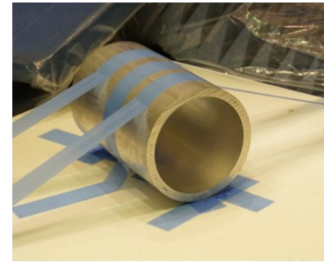




埋設時の実験風景



埋設直前の状態



埋設アルミニウムパイプ  
(外径200mm、L=300mm)

図3.35 アルミニウムパイプを埋設した場合のイメージング実験の写真。(左)全体写真、(右上)埋設直前の状態、(右下)アルミニウムパイプ(拡大;外径200mm、長さ300mm)。

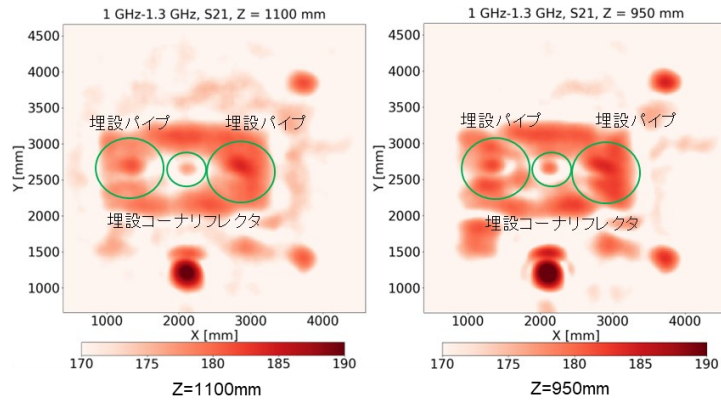
解析は、下記の3つの段階で実施した。

- (ア) 計測領域全域をカバーして2次元走査をさせたケース  
1次元走査データを20mm間隔で201本使用して2次元合成開口処理を実施した。
- (イ) 走査間隔を固定し、1次元走査の本数を段階的に増加させたケース  
隣接走査間の間隔を20mm間隔として固定し、走査本数を1本から段階的に81本まで増加させた。
- (ウ) 走査範囲の両端を固定し、中間の本数を段階的に減少させたケース  
(イ)における走査本数81本のケースを起点とし、両端の間隔を800mmに固定し、中間の本数を81本から段階的に3本まで減少させた。

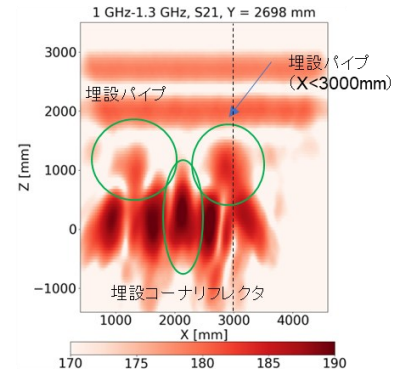
以下、それぞれのケースについて結果を述べる。

- (ア) 計測領域全域をカバーして2次元走査をさせたケース

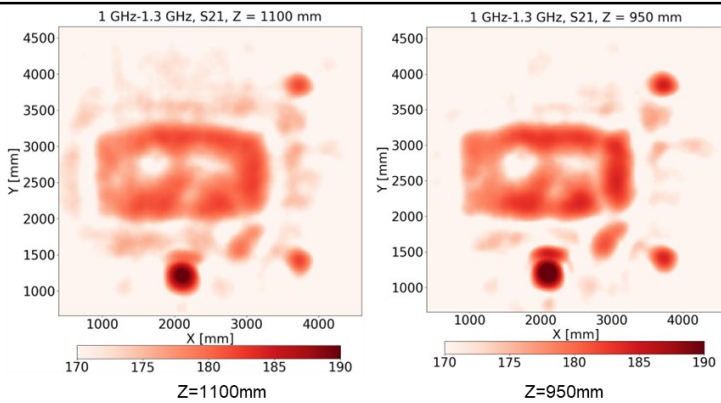
まずは、実験で取得した全データを合成開口処理に活用したケースとして、X軸方向に 394 mm ~ 4594 mm までの 20 mm 間隔で211点走査したデータを1次元走査とし、その1次元走査を、Y軸方向に658 mm ~ 4658 mm までの 20 mm 間隔で201本走査したケースを示す。図3.36に、埋設物がある場合と、砂のみの場合のレーダ画像の比較を示す。平面図において、埋設したパイプ及びコーナリフレクタのエコーを確認することができる。また、鉛直断面図(X-Z平面)において、Z = 1000 mm 付近に埋設したパイプのエコーを2個確認することができる。水槽内部を砂のみとした場合にも同じ高さにエコーがあり、水槽壁面と対応しているが、X軸の位置の違いにより、例えば X = 3000 mm 付近より左側はパイプ、右側は水槽壁面として識別可能である。



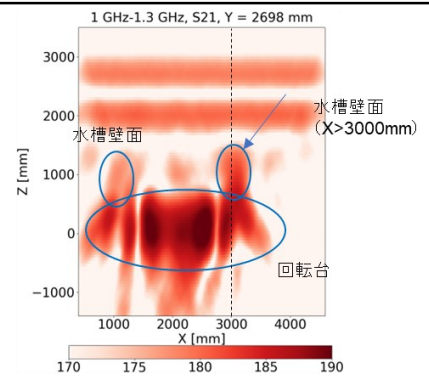
水槽内部に埋設物あり／水平断面



埋設物あり／鉛直(XZ)断面



水槽内部は砂のみ／水平断面



砂のみ／鉛直(XZ)断面

図3.36 1次元走査をY軸方向に201本合成して2次元走査としたケースのレーダ画像。(上) 水槽内部の埋設物としてアルミニウムパイプ2個及びコーナリフレクタ1台を埋設したケース (図3.33)。(下) 水槽内部を砂のみとしたケース (図3.34)。左図及び中央図は平面図(X-Y平面、左図はZ=1100mm、中央図はZ=950mm)を、右図は鉛直断面図(X-Z平面、Y=2698mm)を示す。

(イ) 走査間隔を固定し、1次元走査の本数を段階的に増加させたケース

次に、X軸方向に 394 mm ～ 4594 mm までの 20 mm 間隔で211点走査したデータを1次元走査として、Y軸方向を、Y = 2698 mm を中心として、20 mm 間隔で、下記の通り段階的に走査本数を増加させたケースを示す。

○1次元走査1本のケース

- ・1次元走査 1本：Y:2698 mm (埋設パイプ中心である Y = 2698 mmを中心とする)

○1次元走査3～81本を合成処理したケース

- ・1次元走査 3本：Y:2678mm～2718mm (Y = 2698 mmを中心とする 20 mm 間隔)
- ・1次元走査 5本：Y:2658mm～2738mm (Y = 2698 mmを中心とする 20 mm 間隔)
- ・1次元走査 21本：Y:2498mm～2898mm (Y = 2698 mmを中心とする 20 mm 間隔)
- ・1次元走査 41本：Y:2298mm～3098mm (Y = 2698 mmを中心とする 20 mm 間隔)
- ・1次元走査 81本：Y:1898mm～3498mm (Y = 2698 mmを中心とする 20 mm 間隔)

○比較対照 (2次元走査)

- ・1次元走査 201本：Y:658 mm ～ 4658 mm (Y = 2658 mmを中心とする 20 mm 間隔)

図3.37に、走査本数を1～5本としたレーダ画像、図3.38に走査本数を21～81本としたレーダ画像を示す。それぞれの図の一番右において、比較対照(走査本数201本)を示している。走査本数を1～5本とした場合、埋設パイプの有無によるレーダ画像の違いを見出すことは困難で、かつ走査本数が増えた場合の改善効果を見出すことは困難であった。また、走査本数を21本とした場合も依然、埋設パイプを目視で見出すことは困難であった。走査本数を41～81本と増やしていくことで、埋設パイプの同定ができるようになり、走査エリア拡大に対する改善効果が出現していくことが明らかとなった。このことは、走査範囲の両端間距離がイメージング能力に影響することを示唆している。

なお、図ではコンターレベルを走査本数に応じて変えているが、エコー強度のレベル自体については走査本数を3本とすることで1本と比べて増加していることから、ランダムノイズとの比較という意味ではS/Nの改善効果は有していると考えられる。実際の画像の解析においては、砂や水槽、水槽下に電波吸収体越しで存在する回転台や、アンテナを吊り下げているガントリー構造の影響があることから、単純にS/Nを改善した結果がイメージング能力の向上に寄与しているとは限らない点には留意が必要である。

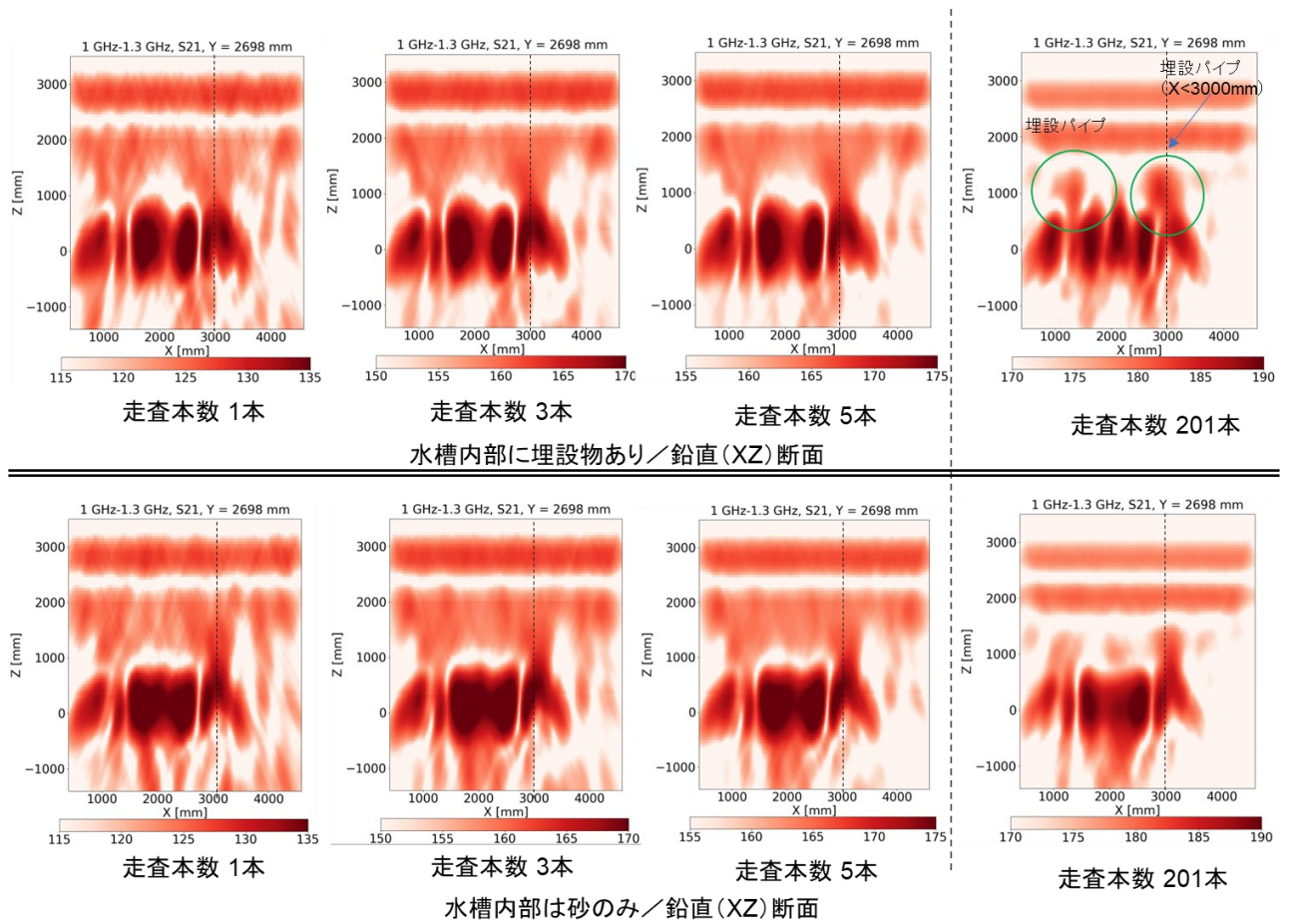


図3.7 走査間隔を20 mm に固定し、1次元走査の本数を段階的に増加させたケースのレーダ画像 (X-Z平面、その1)。(上) 水槽内部の埋設物としてアルミニウムパイプ2個及びコーナリフレクタ1台を埋設したケース。(下) 水槽内部を砂のみとしたケース。左から順に、走査本数を1本、3本、5本、201本とする。

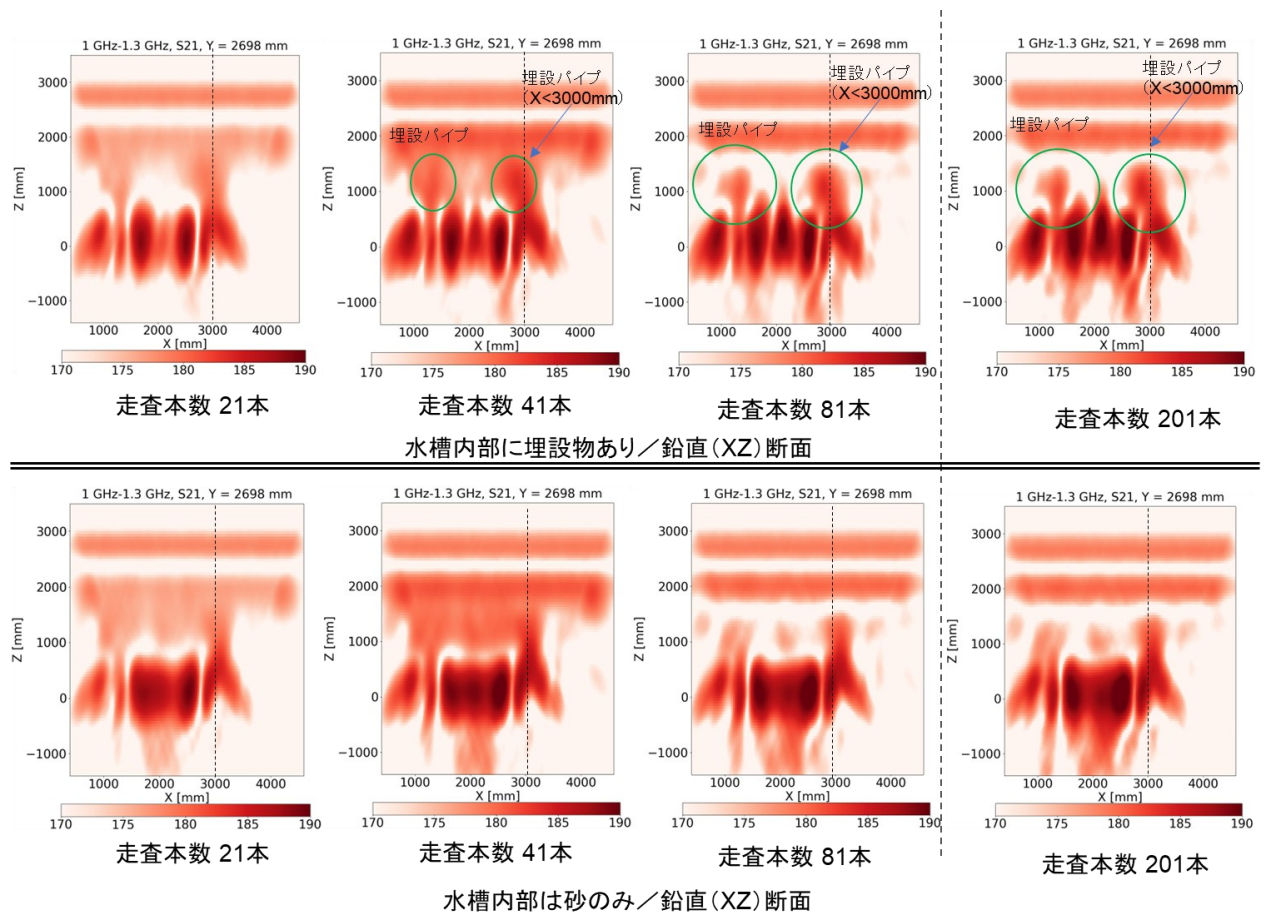


図3.8 走査間隔を20 mm に固定し、1次元走査の本数を段階的に増加させたケースのレーダ画像 (X-Z平面、その2)。(上) 水槽内部の埋設物としてアルミニウムパイプ2個及びコーナリフレクタ1台を埋設したケース。(下) 水槽内部を砂のみとしたケース。左から順に、走査本数を21本、41本、81本、201本とする。

(ウ) 走査範囲の両端を固定し、中間の本数を段階的に減少させたケース

前述の結果から、走査範囲の両端間距離がイメージング能力に影響を与えている可能性が視された。そこで、走査範囲の両端を固定した上で、走査本数を間引く形で中間の本数を段階的に減少させ、どの程度減らしてもイメージング能力を維持可能かについて検証する解析を実施した。具体的には、X軸方向に 394 mm ~ 4594 mm までの 20 mm 間隔で211点走査したデータを1次元走査として、Y軸方向については、両端を  $Y = 1898$  mm 及び  $Y = 3498$  mm の 1600 mm 間隔（中心から±800 mm）として固定し、走査本数を減らして走査間の間隔を広げたケースを示す。

具体的には、下記のケースについて解析を実施した。

○1次元走査3~81本を合成処理したケース

1次元走査 81本： $Y = 2658$  mmを中心とする 20 mm 間隔 ( $Y = 1898$  mm ~ 3498 mm の範囲)

1次元走査 9本： $Y = 2658$  mmを中心とする 200 mm 間隔 ( $Y = 1898$  mm ~ 3498 mm の範囲)

1次元走査 5本： $Y = 2658$  mmを中心とする 400 mm 間隔 ( $Y = 1898$  mm ~ 3498 mm の範囲)

1次元走査 3本： $Y = 2658$  mmを中心とする 800 mm 間隔 ( $Y = 1898$  mm ~ 3498 mm の範囲)

○比較対照 (2次元走査)

・1次元走査 201本： $Y:658$  mm ~ 4658 mm ( $Y = 2658$  mmを中心とする 20 mm 間隔)

図3.39に、走査本数を81~9本としたレーダ画像、図3.40に走査本数を9~3本としたレーダ画像を示す。それぞれの図の一番右において、比較対照（走査本数201本）を示している。走査本数を81本から9本に減少させても、画像は大きな変化はなく、埋設したパイプのイメージングに本質的な影響はなかった。一方、走査本数を9本から5本、3本と減少させていくにつれて、全体的にバックグラウンドとなるエコーが増大する傾向となり、イメージング能力が悪化することが観察された。このことは、アンビギュイティによって、埋設物以外の物体が全般的にエコーに重なり合ってイメージング能力に影響している可能性が示唆される。

以上の結果をまとめると、下記の結論となる。

- ・軌道間距離を近接させた状態で1次元本数を増やしても、埋設物識別能力の向上は見込めない。
- ・両端の軌道間距離を確保し（本実験では、砂面からアンテナまでの高さ（1800 mm）と同じ程度のスケール（1600 mm）として）、その範囲内であれば、本数を絞り込んでも（本実験では9本）の走査を組み合わせることで、埋設物のモニタリング能力の向上が期待できる。
- ・一方、本数を大幅に減少させた場合、アンビギュイティ等によりモニタリング能力が悪化する傾向がみられる。このことから、中途半端な条件でトモグラフィ処理を実施するとかえって画質の悪化を招きうる可能性が示唆された。

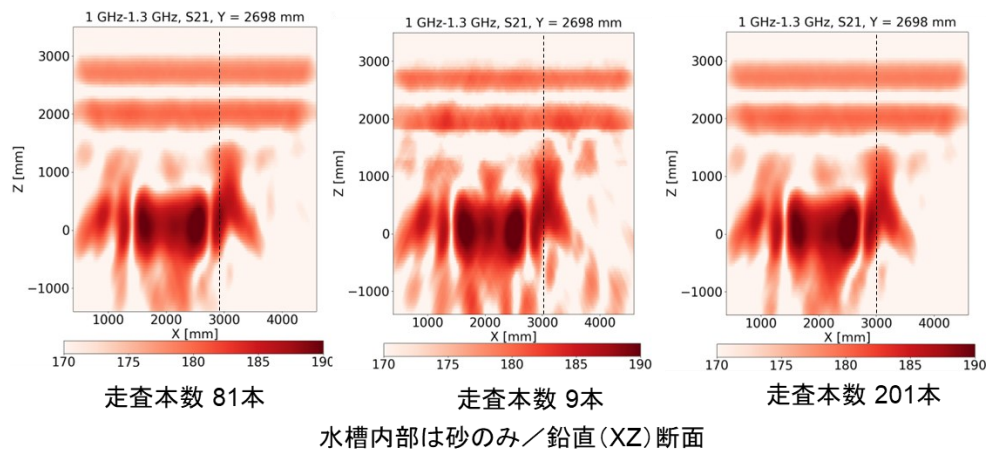
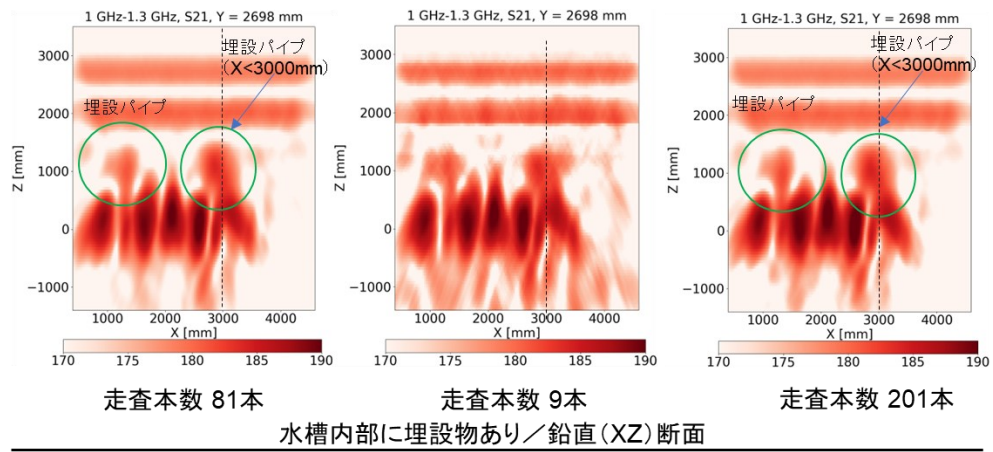


図3.39 走査範囲の両端距離を 1600 mm (中心から±800 mm) に固定し、中間の本数を段階的に減少させたケースのレーダ画像 (X-Z平面、その1)。(上) 水槽内部の埋設物としてアルミニウムパイプ2個及びコーナリフレクタ1台を埋設したケース。(下) 水槽内部を砂のみとしたケース。左から順に、走査本数を81本、9本、201本とする。



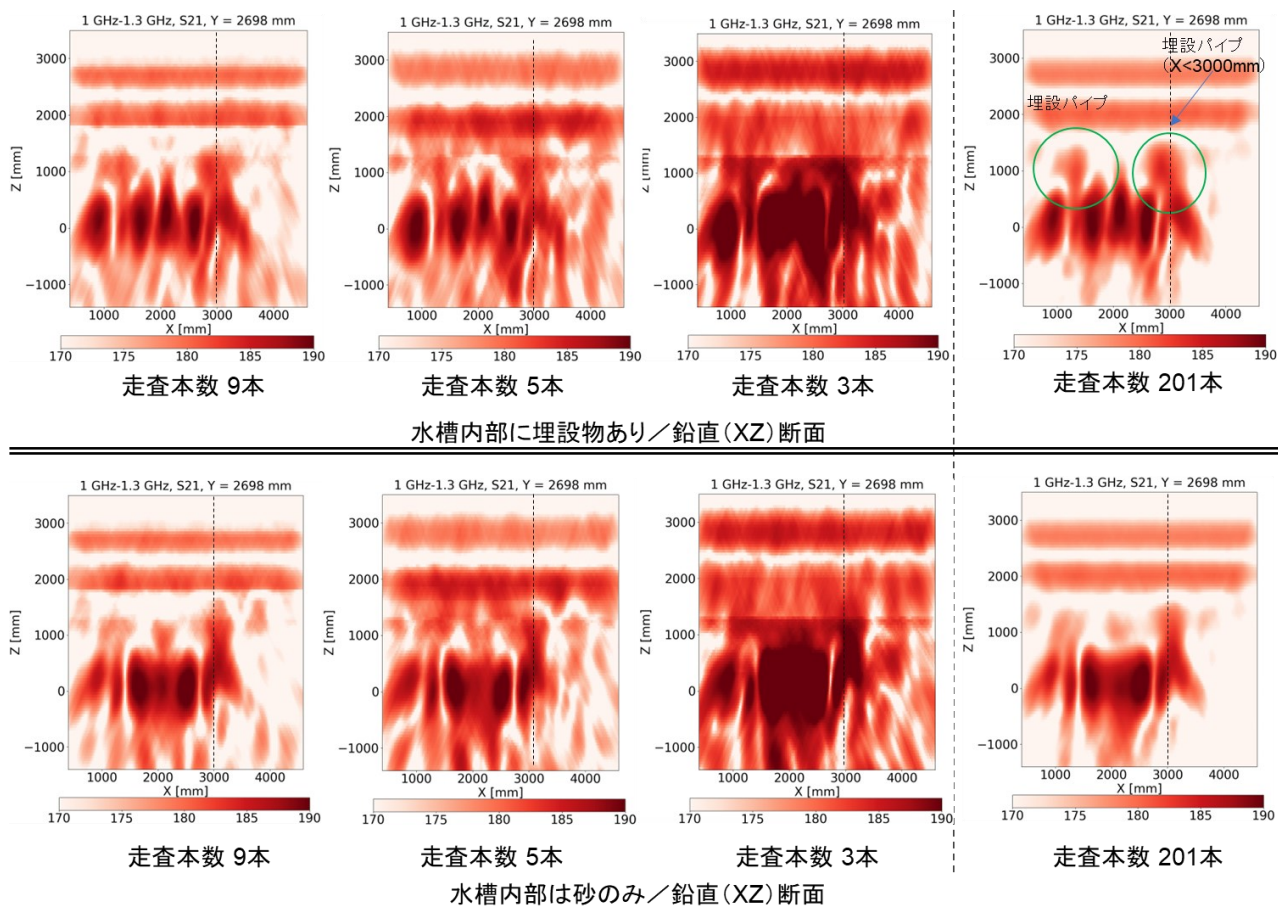


図3.40 走査範囲の両端距離を 1600 mm (中心から±800 mm) に固定し、中間の本数を段階的に減少させたケースのレーダ画像 (X-Z平面、その2)。(上) 水槽内部の埋設物としてアルミニウムパイプ2個及びコーナリフレクタ1台を埋設したケース。(下) 水槽内部を砂のみとしたケース。左から順に、走査本数を9本、5本、3本、201本とする。

m. まとめと今後の展望

本研究では、JAXAが保有する大型の室内実験装置（2次元走査型レーダ散乱計）を用いて、できるだけ少ない走査本数での埋設物探査や埋設物・表層クラッタの分離に関わる実験を実施し、以下の結果を得た。

（ア）1次元走査であっても、適切な走査位置の選定により埋設物が予め同定できれば、砂面上に物体がある場合においても、埋設物の画像が2次元走査と同様に得られることを明らかにした。このことは、既知の物体に対する埋設物の状況変化のモニタリング時において、1次元走査が有効であることを示している。一方、1次元走査においては、わずかな走査位置の変化により、砂面上の物体によるブロッキングの影響が出現しやすいことも明らかになった。

（イ）2次元走査時において、水平垂直格子での計測と、斜め格子での計測を比較した結果、同等のレーダ画像を得ることができた。このことは、イメージングにおいて、軌道の方向よりは、サンプリング点群の空間分布が重要であることを示唆している。

（ウ）将来の飛翔体における埋設物観測のためのトモグラフィーを念頭に、できるだけ少ない走査本数での探査を念頭に置いて、走査本数や間隔を様々に変化させてイメージング能力の検証を行った。その結果、軌道間距離を近接させた状態で1次元本数を増やしても、S/Nの改善効果はあっても、埋設物自体の識別能力の向上はあまり期待できない点、両端の軌道間距離を確保すれば（本実験では、砂面からアンテナまでの高さと同等スケールの水平距離）、エリアジングの影響を抑制できる範囲で本数を絞り込んでも（本実験では10本弱のオーダー）、埋設物のモニタリング能力の向上が期待できることが分かった。

今後の展望として、本知見を衛星や航空機等の飛翔体からの観測に適用することが考えられるが、トモグラフィーにおいては、中途半端な走査本数のデータを組み合わせても、かえってイメージング能力が劣化することが明らかになったため、実験を行う際には十分な走査本数と、アンビギュイティの条件を明らかにした上で実施する必要があると考える。実際に十分な走査本数が確保できれば、飛翔体からの観測における質的向上を期待することができる。

## (2) 比較対照となる計算機シミュレーション

本研究では、室内実験の比較対照として、FDTDによるイメージングシミュレーションを実施し、室内実験の妥当性を検証するとともに、屋外実験計画にも反映した。研究に当たり、シミュレーションデータに対して、室内実験と同等の合成開口処理ルーチンを開発した。また、散乱メカニズムの可視化や、散乱過程とレーダ画像の関係性を明らかにする観点で研究を進めた。

### a. 単純なモデルによる散乱過程の可視化

まず、シミュレーションの第一段階として、埋設したターゲット1個と表層のクラッタ1個を置いたモデルを作成した上で、散乱過程の可視化を行った。

具体的には、米国 Remcom 社が開発し、市販されているFDTDソフトウェア XFDTD を使用して、埋設物及び表層物を表現できるシーンを作成した。図3.41 に、作成したシーンにおけるアンテナやターゲット等の配置図を示す。天井に、Vivaldiアンテナを配置する。Vivaldiアンテナは、送信と受信で各1枚、計2枚を並べて配置する。また、アンテナの下部に、ポリエチレン製（比誘電率2.2）の水槽を置き、その内部に深さ 530 mm の砂（比誘電率5.0）を入れる。ターゲットとして、1辺 30 cm の正方形コーナリフレクタを2個用意し、そのうち1個（CR-001）を砂面に置いた状態に、1個（CR-002）を砂内部に埋設した状態とした。なお、電波吸収体、回転台及び床については、計算時間やメモリの制約の観点から、配置の準備ができる状態としておき、実際のモデル化や計算は行わないものとした。作成したシーンのイメージ図を図3.42 に示す。天井部にVivaldiアンテナが、その下に水槽・砂及びコーナリフレクタが配置されているのが分かる。

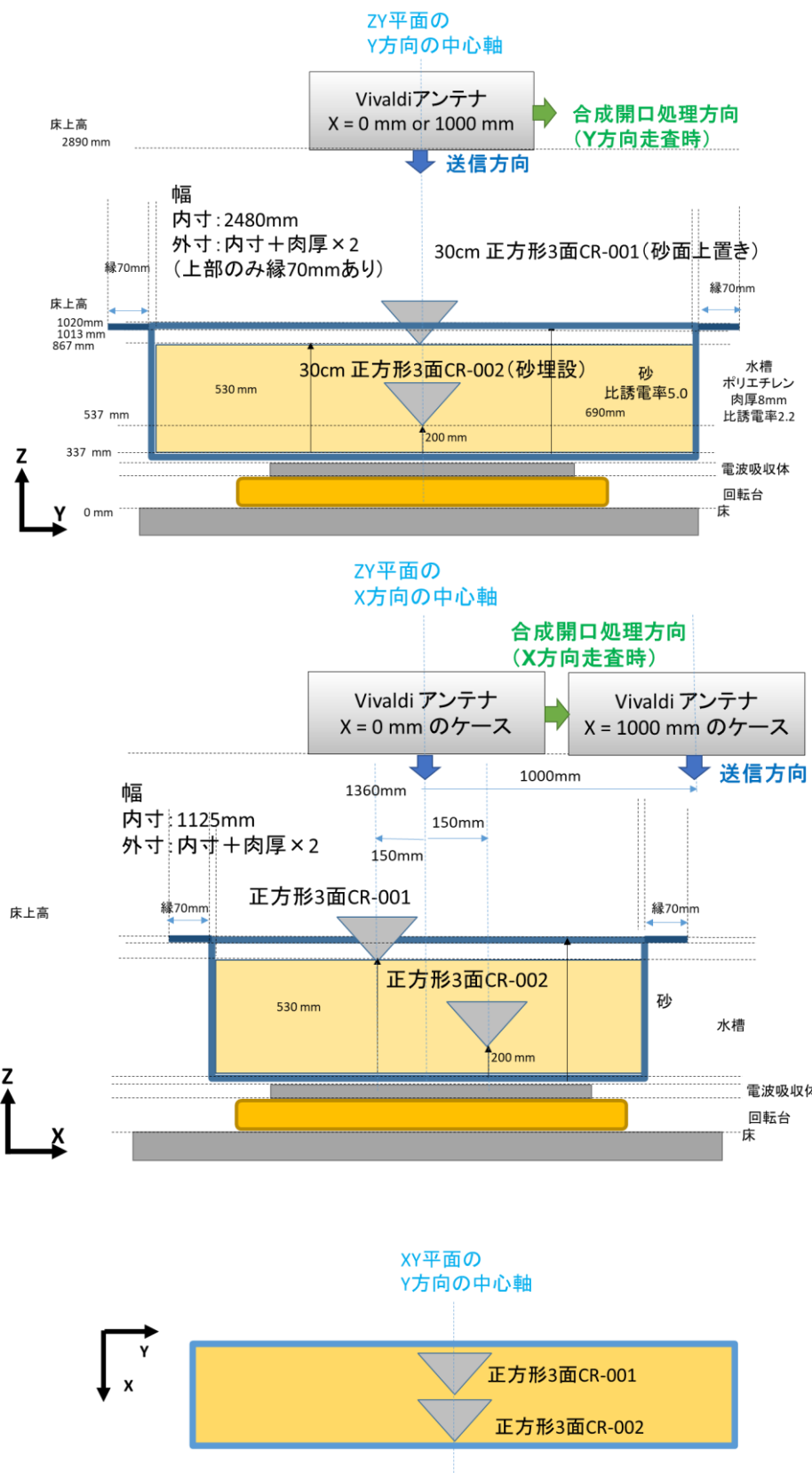


図3.41 評価対象となるシーンにおけるアンテナやターゲット等の配置図。(上) YZ面の断面図、(中) XZ面の断面図、(下) XY面の平面図。

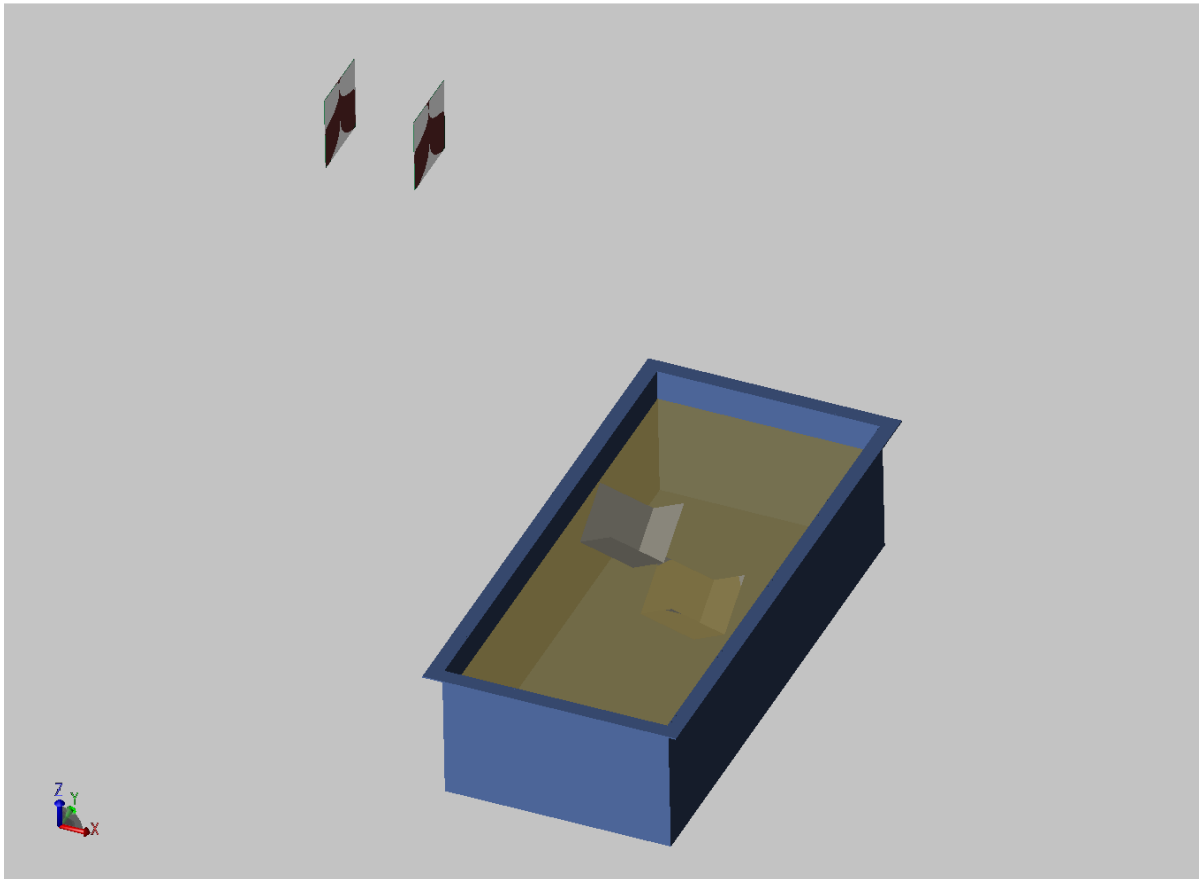


図 3.42 評価対象となるシーンのイメージ図。但し、アンテナの位置は図とは異なる。

作成したモデルを用いて、単純な条件で、一方のVivaldiアンテナから送信し、他方のVivaldiアンテナで受信される様子のシミュレーションを実施した。送信信号はModulated Gaussianを使用し、パルス幅を0.98 nsec とした。図3.43 に、送信信号の波形の波形を示す。

シミュレーションにおいて、アンテナ及びターゲットを含む断面における電界強度の分布を計算した。送信開始の瞬間を  $t = 0$  nsec とし、図3.44 に、それぞれ、送信波がターゲットとなるコーナリフレクタに到達する前の  $t = 7.801$  nsec (上)、砂面上に置いた CR-001 からの散乱波が観察できる  $t = 13.2828$  nsec (中)、および埋設した CR-002 からの散乱波が観察できる  $t = 19.0808$  nsec (下)における電界強度を示す。 $t = 13.2828$  nsec において、CR-001 での散乱波がアンテナに向かって伝搬していく様子が捉えられている。一方、 $t = 19.0808$  nsec においては、CR-001 での散乱波がアンテナ側に到来しつつあるとともに、CR-002 からの散乱波が水槽から上方に向かって伝搬していく様子が捉えられている。但し、アンテナ側に向かっては、CR-001 の背面(砂面側の面)によって、アンテナ側へ向かうのを妨害しているように見えている。

また、受信アンテナ端子における出力電圧波形を 図3.45 に示す。 $t = 7-10$  nsec に現れる波形は送信アンテナから受信アンテナへ直接伝搬された信号を示している。 $t = 21-25$  nsec に現れる波形が、砂面上に置いた CR-001 での散乱波が受信される瞬間を示している。一方、埋設した CR-002 からの散乱波については、明確な波形のピークとして目視レベルで確認することは難しかった。

このように、作成したモデルにより単純な条件でのシミュレーションを実施した結果、電界分布や受信アンテナ端子での出力電圧が正常に出力されることを確認することができた。

なお、アンテナの位置をX方向に少しずつ移動させつつ、連続して計算を行い、その結果を出力する準備として、アンテナ座標を変化させた複数個のデータを一括して csv 形式で出力させるためのマクロを作成した。

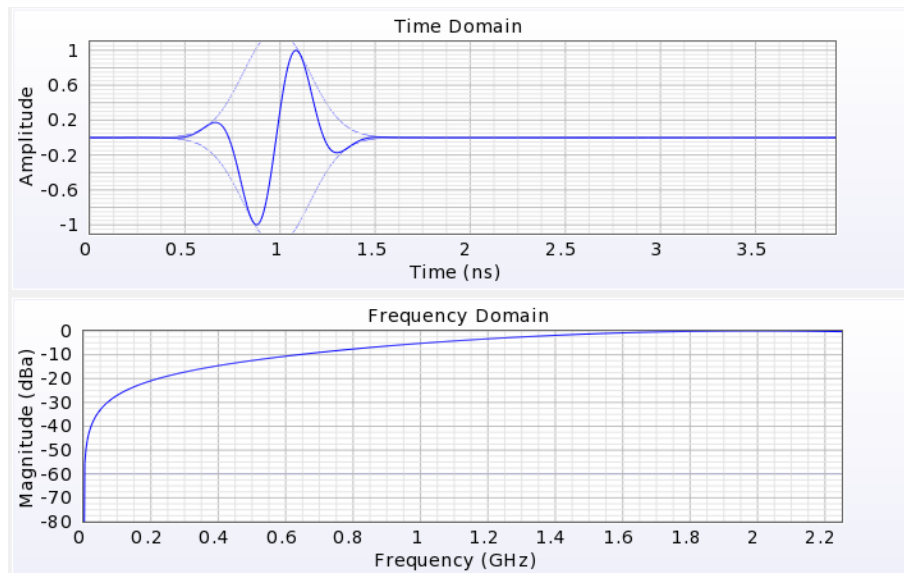


図3.43 シミュレーションにおける送信信号の波形。(上)時間領域、(下)周波数領域。  
Modulated Gaussianを使用し、パルス幅を0.98 nsec とした。

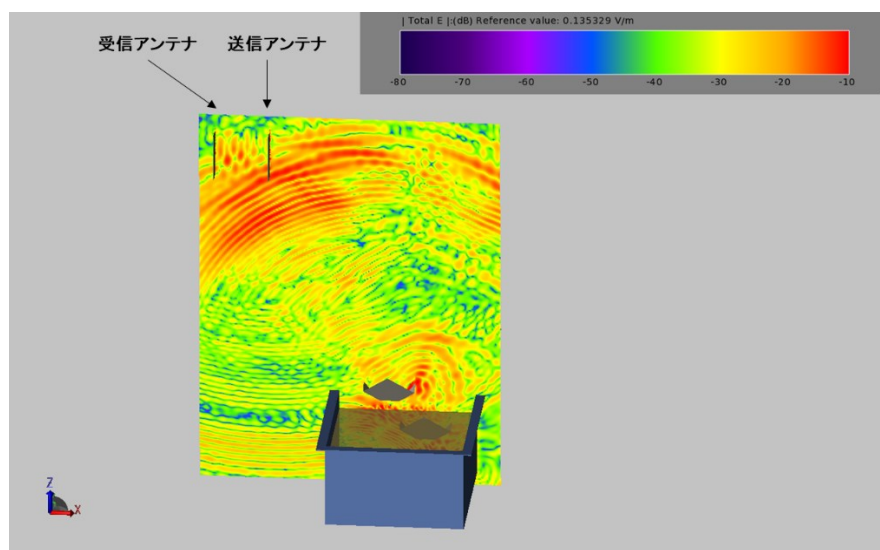
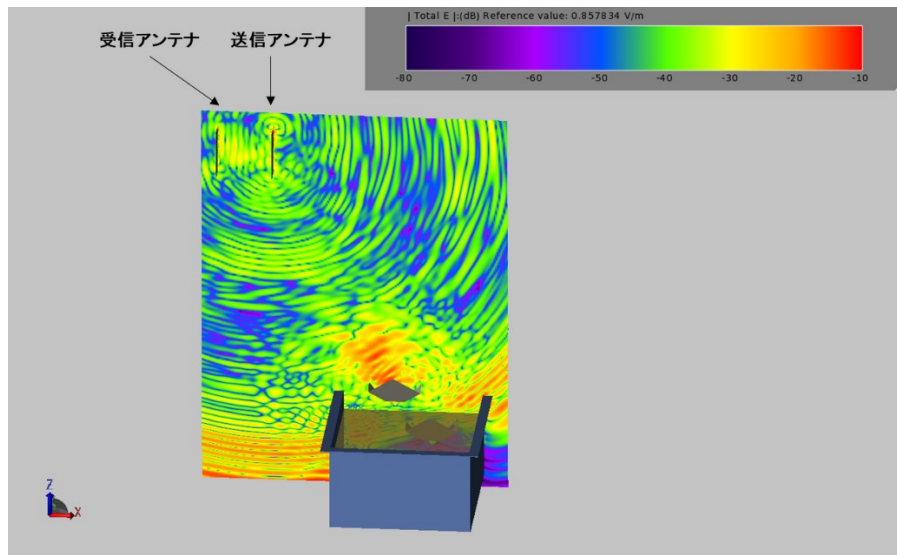
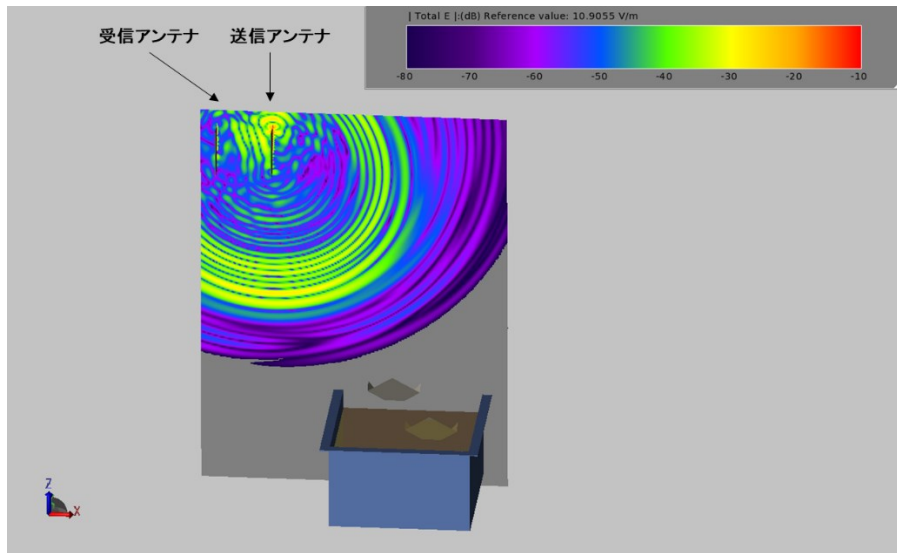


図3.44 アンテナ及びターゲットを含む断面における電界強度の分布図。(上)  $t = 7.801$  nsec、(中)  $t = 13.2828$  nsec、(下)  $t = 19.0808$  nsec。

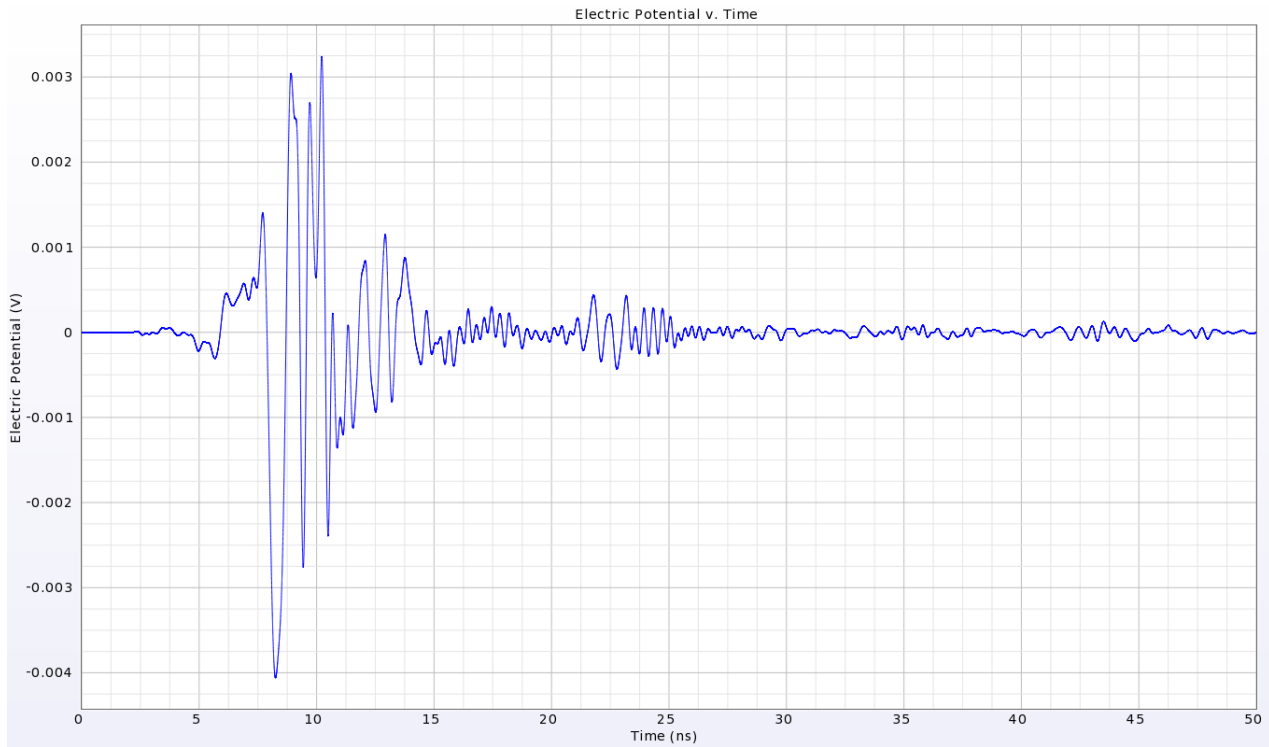


図 3.45 受信アンテナ側端子における電圧出力波形。横軸は時刻 (nsec)、縦軸は出力電圧を示す。



## b. 合成開口処理化

次に、前述のシーンに対して、受信に使用するアンテナ2における受信電圧をもとに、アンテナをY方向もしくはX方向に走査した上で、一定の距離間隔で連続的に出力された受信電圧データについて、逆フレネル変換[2]を使用してアジマス合成開口処理を行うルーチンを作成した。なお、使用する手法は、室内実験のデータ処理で使用方法と同じ手法である。

アンテナの走査については、Y方向の走査、及びX方向の走査の2パターンを実施した。

- Y方向走査：アンテナ位置が  $X = 0 \text{ mm}$  及び  $X = 1000 \text{ mm}$

走査範囲： $Y = -1000 \text{ mm}$  から  $1000 \text{ mm}$  までの  $20 \text{ mm}$  間隔

- X方向走査：アンテナ位置が  $Y = 0 \text{ mm}$

走査範囲： $X = -1360 \text{ mm}$  から  $1360 \text{ mm}$  までの  $40 \text{ mm}$  間隔

まずY方向にアンテナを走査した場合の評価結果を述べる。図3.46にアンテナ走査をY方向に行った場合のB-scopeイメージ（アンテナ位置に対する高さ方向の相対受信強度）、図3.47に合成開口後のY-Z平面における2次元相対受信強度を示す。 $X = 0 \text{ mm}$  及び  $X = 1000 \text{ mm}$  のいずれの場合においても、B-scopeイメージ設置及び埋設を行ったコーナリフレクタがある  $Y = 0 \text{ mm}$  を中心に、下向きに放物線上のエコーが出現しており、コーナリフレクタとアンテナとの伝搬時間遅延に応じたエコーになっていることが分かった。 $X = 0 \text{ mm}$  においては、 $Y = 0 \text{ mm}$  付近では砂面からの反射エコーと、砂面上のコーナリフレクタからのエコーを見分けるのが難しいことが分かる。一方、合成開口後の2次元受信強度においては、 $X = 0 \text{ mm}$  及び  $X = 1000 \text{ mm}$  のいずれの場合においても、逆三角形形状のエコーが2か所に現れており、室内実験と同じような形状として可視化されていることが確認できた。なお、埋設されたコーナリフレクタの位置が水槽の底よりも低い場所に出現しているが、これは、砂の比誘電率が真空より大きく、砂内部における電波の伝搬速度が光速よりも低下している一方、処理においては光速で伝搬することを前提として進めているためである。

次に、X方向にアンテナを走査した場合の評価結果を述べる。図3.48にアンテナ走査をX方向に行った場合のB-scopeイメージ、図3.49に合成開口後のY-Z平面における2次元相対受信強度を示す。Y方向走査時と同様、B-scopeイメージにおいてはターゲットに応じた放物線エコーが、合成開口後のイメージにおいては逆三角形形状のエコーが現れ可視化されていることを確認できた。

このことから、室内実験を再現するにあたり同様の合成開口シミュレーションが可能であることを確認することができた。

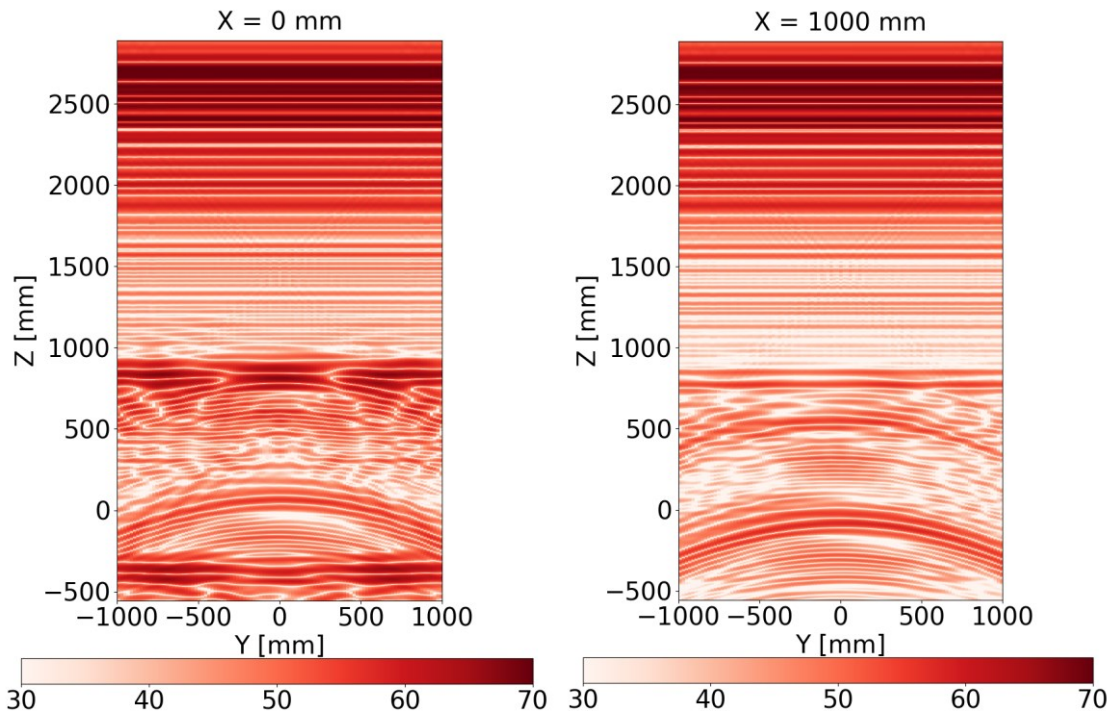


図3.46 アンテナ走査をY方向に行った場合のB-scopeイメージ。アンテナ位置に対する高さ方向の相対受信強度 [dB]を示す。アンテナ位置は (左)  $X = 0$  mm、(右)  $X = 1000$  mm とする。

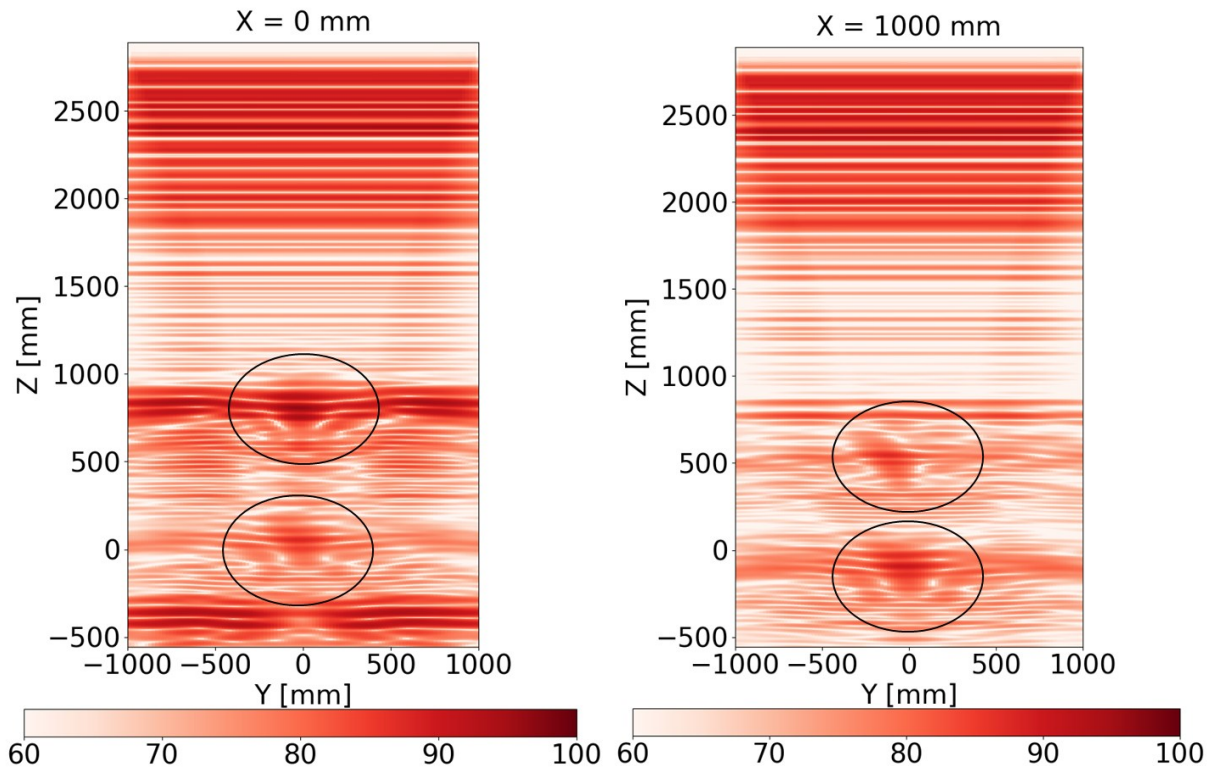


図3.47 アンテナ走査をY方向に行った場合の合成開口後のY-Z平面における2次元相対受信強度 [dB]。アンテナ位置は (左)  $X = 0$  mm、(右)  $X = 1000$  mm とする。

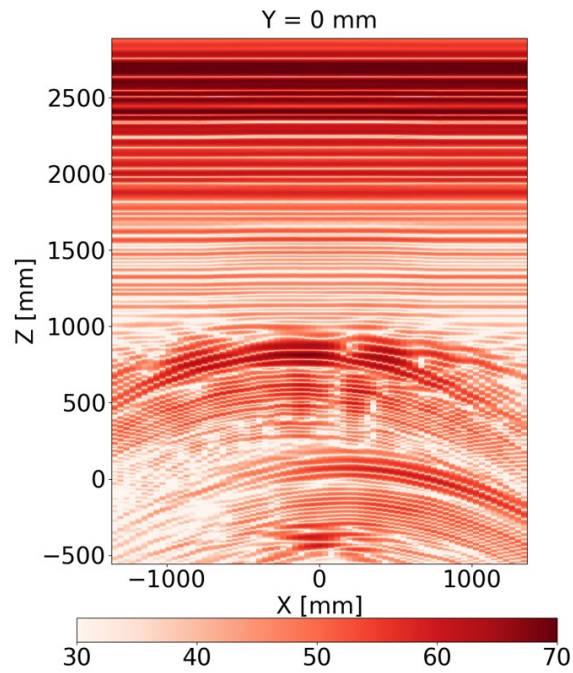


図3.48 アンテナ走査をX方向に行った場合のB-scopeイメージ。アンテナ位置に対する高さ方向の相対受信強度 [dB]を示す。アンテナ位置は  $Y = 0 \text{ mm}$  とする。

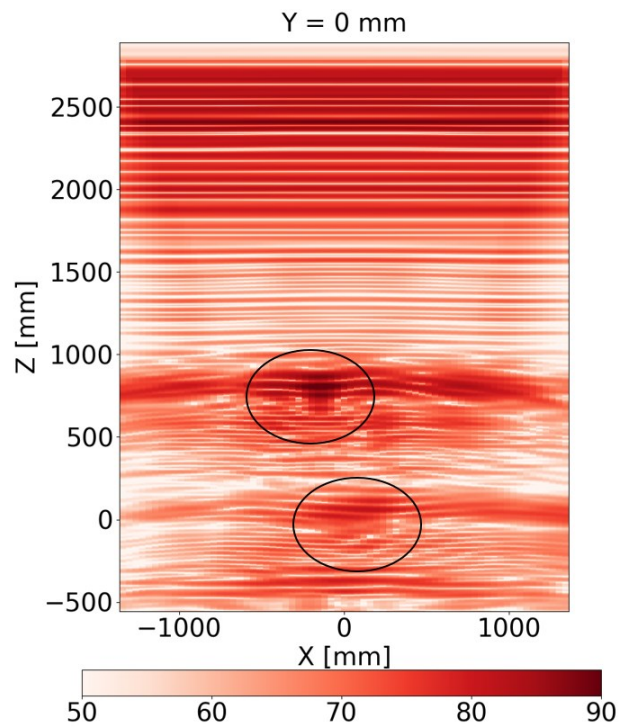


図3.49 アンテナ走査をX方向に行った場合の合成開口後のX-Z平面における2次元相対受信強度 [dB]。アンテナ位置は  $Y = 0 \text{ mm}$  とする。

埋設したコーナリフレクタに対して、不要散乱体（クラッタ）を想定した砂面上の別の物体（コーナリフレクタ）が、電波散乱時、及び合成開口時においてどのような影響を及ぼしているかを、評価結果を用いて考察する。

図3.50に埋設コーナリフレクタ反射後のタイミングにおいて、アンテナ位置が  $X = 0 \text{ mm}$  及び  $X = 1000 \text{ mm}$  で観測された場合を想定した電界強度の分布図を示す。 $X = 0 \text{ mm}$  においては、砂面上に設置したコーナリフレクタの真上に近い場所より送受信を行っている関係で、埋設されたコーナリフレクタから反射した波が、砂面上のコーナリフレクタの背面部分（下向きの部分）に当たることにより、上方への伝搬が抑圧されていることが分かった。一方、 $X = 1000 \text{ mm}$  では、送受信アンテナは埋設されたコーナリフレクタの右方（ $X$ 軸における正の方向）に存在することから、埋設コーナリフレクタからの反射波は、砂面上のコーナリフレクタの影響を受けることなく、上方のアンテナへ伝搬することも分かった。

$Y$  方向へ合成開口処理された画像である図3.47を見ると、 $X = 0 \text{ mm}$  においては上方にある砂面上のコーナリフレクタからの反射強度の方が埋設コーナリフレクタよりも大きい一方、 $X = 1000 \text{ mm}$  においては埋設コーナリフレクタの方が砂面上のコーナリフレクタよりも反射強度が大きいことが見て取れる。このことは、埋設コーナリフレクタが砂面上のコーナリフレクタよりも右方にあり、かつアンテナがさらに右方にあることで、砂面上のコーナリフレクタの影響を回避しつつ埋設コーナリフレクタのイメージングが可能であることを示している。このことは、室内実験の結論とも定性的に整合している。

一方、 $X$  方向へ合成開口処理された画像である図3.49を見ると、砂面上のコーナリフレクタに比べ、埋設コーナリフレクタの強度が大きく低下し、かつ形状が逆三角形を保持していないくらい不明瞭になっていることが分かった。 $X$  方向へ走査した際のB-scopeイメージである図3.48を見ると、埋設コーナリフレクタについては、放物線上エコーの右半分と比べて左半分の受信レベルが、砂面上のコーナリフレクタの影響を受けて大きく低下している。このため、強度の劣化のみならず、形状にも影響していることが分かった。

以上の通り、市販のFDTDソフトウェアで出力されたアンテナ受信電圧値をもとに、位置を変えて連続実行を行い、かつ逆フレネル変換による合成開口処理を行うことで、室内実験の検証が可能となるとともに、 $Y$ 方向における1次元走査の再現実験を行うことで、 $X$ 方向に並べられた地面上、埋設各コーナリフレクタの右方で1次元走査を行うことで、埋設コーナリフレクタの観測が期待でき、かつ室内実験と定性的に整合する結果を得た。

また、可視化においては、図には示さないが、砂内部の伝搬における屈折の効果も確認した。衛星からの入射角に対して、砂内部を伝搬する際には入射角が小さくなることを定性的に確認できた。この結果を実際に衛星観測計画に反映した。具体的には、衛星SARの入射角30度程度に対して、埋設コーナリフレクタの入射角を15度程度で実施したが、FDTDシミュレーションにおいてもこれを支持する結果を得た。

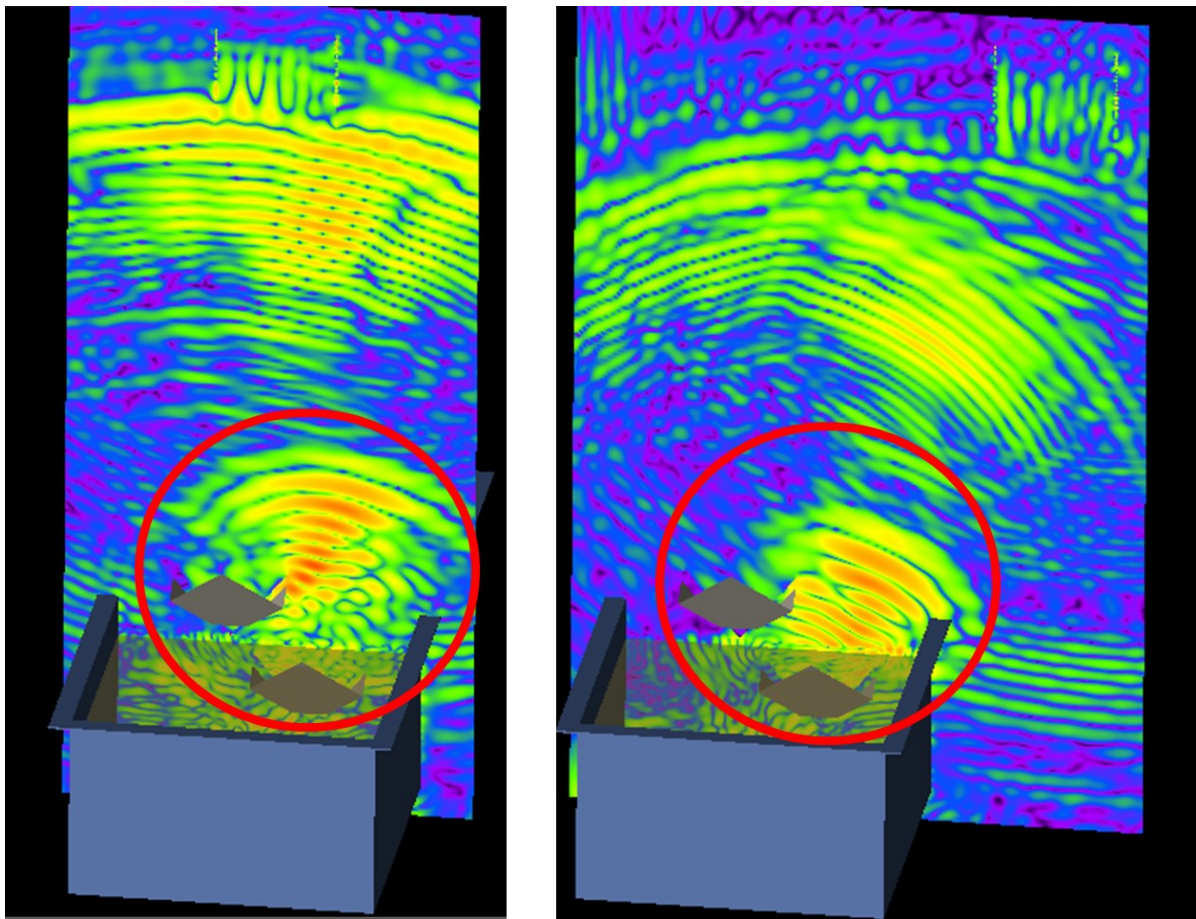


図3.50 埋設コーナリフレクタ反射後のタイミングにおけるアンテナ及びターゲットを含む断面における電界強度の分布図。アンテナ位置のX座標は、(左)  $X = 0$  mm、(右)  $X = 1000$  mm とする。Y座標は  $Y = 0$  mm とする。

c. 室内実験と同等の埋設パイプを含むモデルにおけるシミュレーション

次に、屋外の衛星観測において、衛星画像で埋設物のエコーが確認できたパイプ状物体を想定し、散乱メカニズムの可視化を主な目的として、室内実験における埋設パイプを含むモデルと同等のシミュレーションモデルを構築し、入射角の違いを考慮したイメージング評価を実施した。

図3.51にFDTDシミュレーションで評価したシーンを、図3.52にイメージ図を示す。シーンは室内実験における図3.33と同等であるが、シミュレーションにおいては、回転台・床はモデルに含まず、室内にある衝立、電波吸収体についてもモデル化を行っていない。シーン構築の都合により、原点を水槽中心としたほか、座標軸の変換を実施した。具体的には、室内実験におけるX軸をFDTDシミュレーションにおけるY軸に、室内実験におけるY軸をFDTDシミュレーションにおける-X軸とした。なお、室内実験、FDTDシミュレーション、いずれも座標系は右手系としている。以後、本項においては座標軸をFDTDシミュレーションにおける軸で表現する。

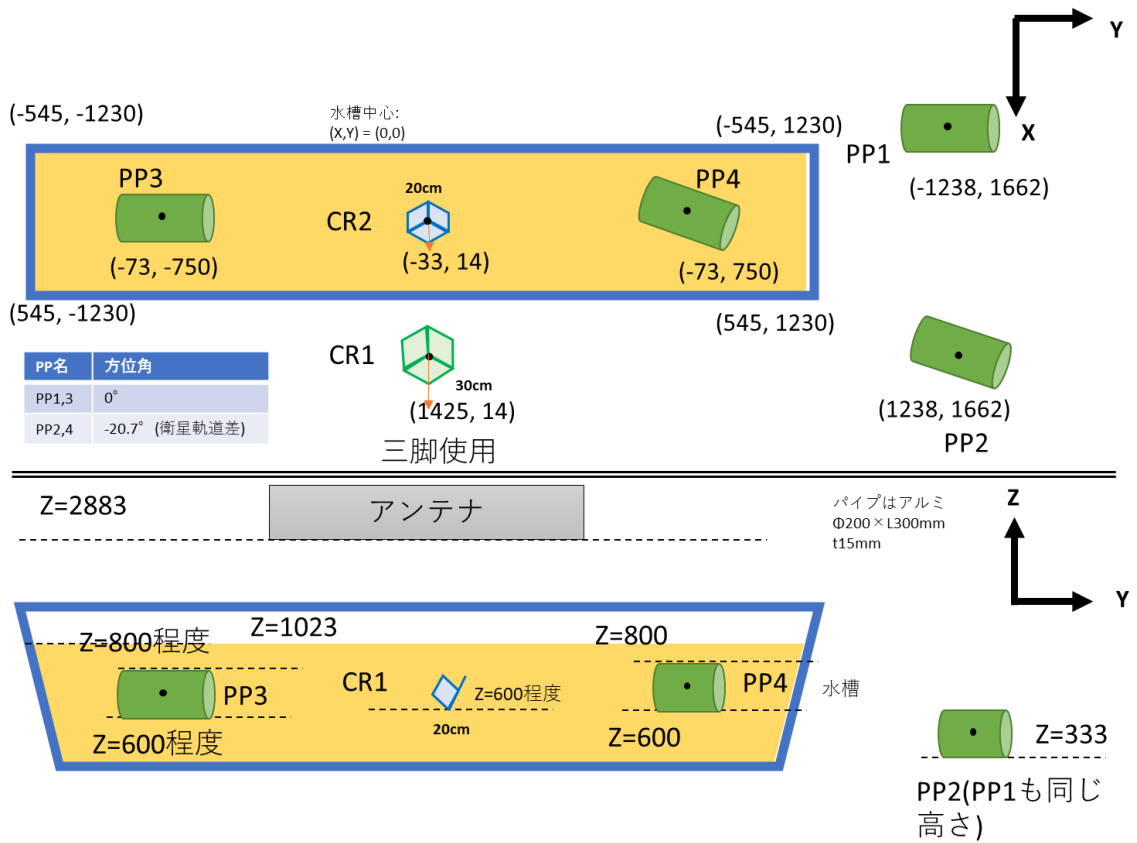


図3.51 FDTDシミュレーションで評価したシーン。室内実験における図3.33と同等であるが、シミュレーションにおいては、回転台・床はモデルに含まず、室内にある衝立、電波吸収体についてもモデル化を行っていない。シーン構築の都合により、原点を水槽中心としたほか、室内実験からの座標軸の変換を実施した。

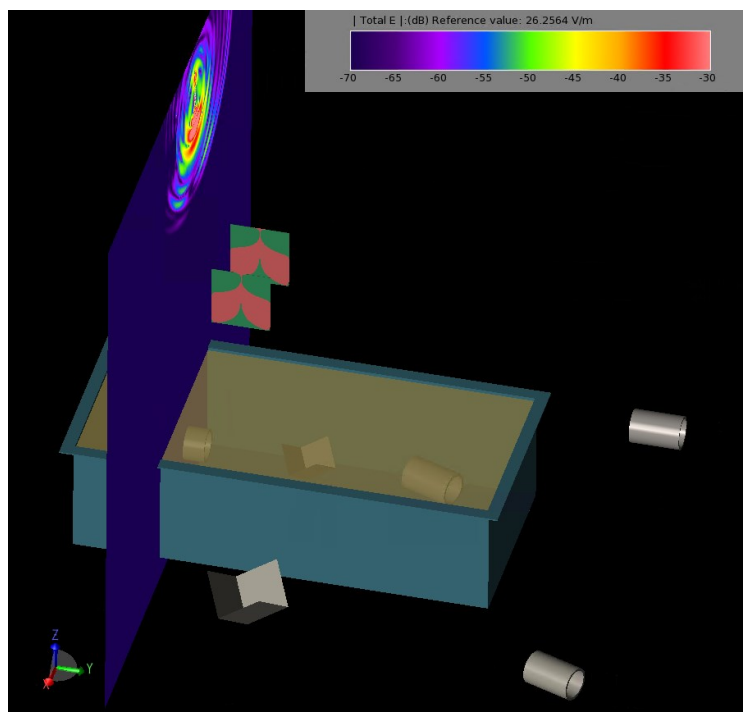


図3.52 FDTDシミュレーションで評価したシーンのイメージ図。

評価はパイプの散乱過程を観察することを主眼として1次元走査のみとし、下記2パターンの解析を実施した。

(ア) パイプ中心の真上 ( $X = -33 \text{ mm}$ ) において、Y軸方向に合成開口を実施したケース

(イ) パイプ中心からX方向に  $-800 \text{ mm}$  離れた場所 ( $X = -833 \text{ mm}$ ) において、Y軸方向に合成開口を実施したケース

以下、それぞれの事例での解析結果を説明する。

(ア) パイプ中心の真上 ( $X = -33 \text{ mm}$ ) において、Y軸方向に合成開口を実施したケース

図3.53に、パイプ中心の真上 ( $X = -33 \text{ mm}$ ) において合成開口シミュレーションを実施した際の、アンテナ及び埋設パイプ中心付近 ( $Y = -740 \text{ mm}$ ) を含む断面における電界強度の分布図を示す。アンテナから送信した電波が土壌内に侵入し、パイプから散乱して再び砂面から大気中に向かい、アンテナまで伝搬する様子が可視化された。

図3.54に、レーダB-scope画像及びアジマス圧縮後の画像を示す。B-scope画像においては、コーナリフレクタに対してはレンジマイグレーションに伴う放物線エコーが見いだされる一方、パイプに対しては、層状のエコーとなっており、レンジマイグレーションがはっきりしない一方、パイプが存在するY座標の位置において散乱が顕著にみられることが分かった。一方、アジマス圧縮後の画像をみると、パイプに対しては、B-scopeと同様の層状エコーが観察された。これは、パイプ状の物体に対して合成開口レーダを行う際には、レンジマイグレーションを前提としない処理ではなく、B-scopeでの層状エコーのアジマス方向での積分処理を確立することができれば、アジマス圧縮後の画像におけるパイプ状物体のイメージング能力を高められる可能性があることを示唆している。

なお、2つのパイプに対しては、衛星軌道の昇交・降交軌道の違いを模擬し、シミュレーションにおいて埋設する際の方角をずらしているが、本シミュレーションにおけるイメージングにおいては、両者の顕著な差はみられなかった。



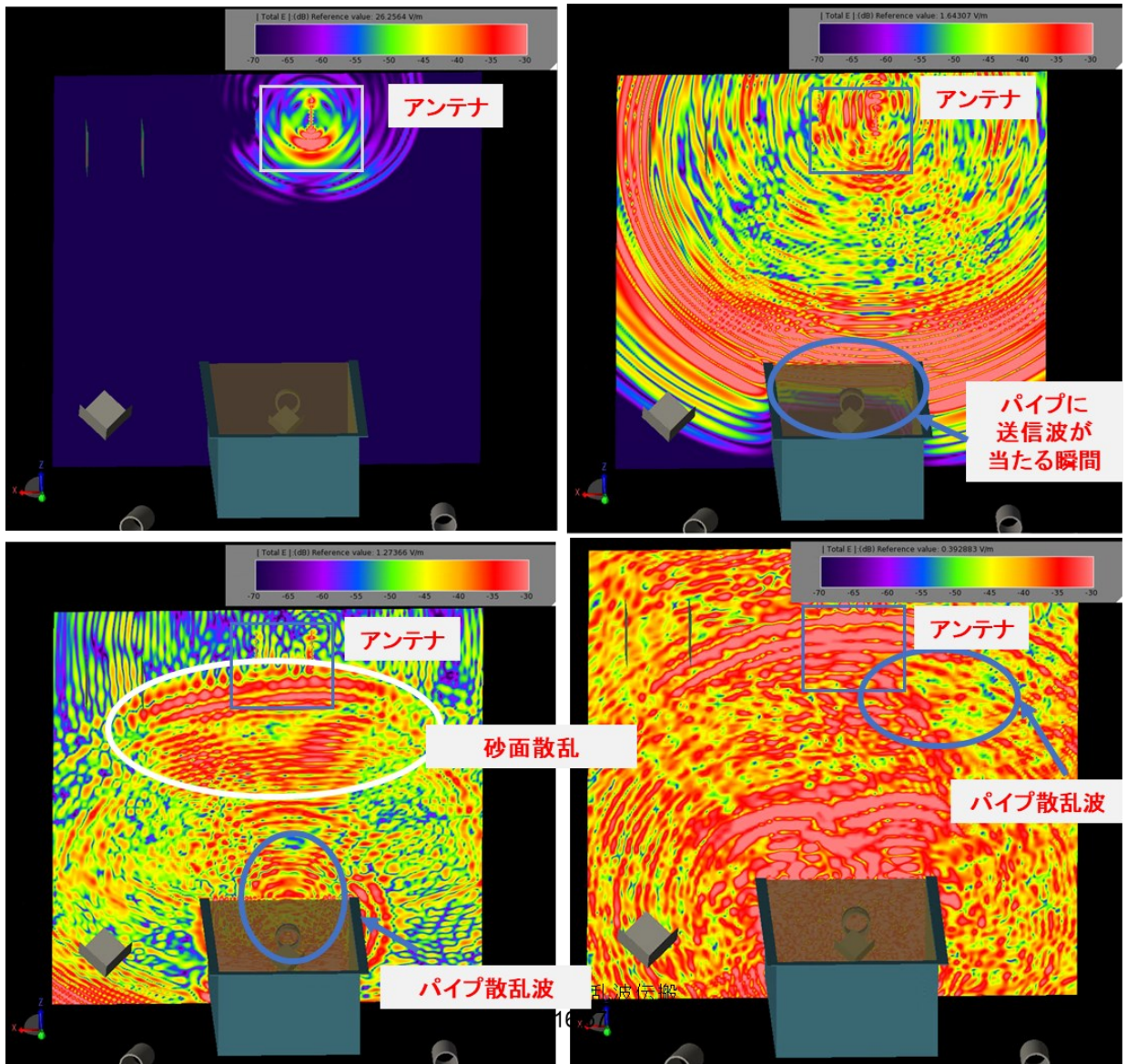


図3.53 パイプ中心の真上 ( $X = -33 \text{ mm}$ ) において合成開口シミュレーションを実施した際の、アンテナ及び埋設パイプ中心付近 ( $Y = -740 \text{ mm}$ ) を含む断面における電界強度の分布図。(左上) 送信直後 ( $t=4.04075\text{ns}$ )、(右上) 送信波パイプ到達直後 ( $t=11.6042\text{ns}$ )、(左下) パイプ散乱波伝搬 ( $t=16.5774\text{ns}$ )、(右下) パイプ散乱波受信アンテナ到達 ( $t=22.6903\text{ns}$ )。

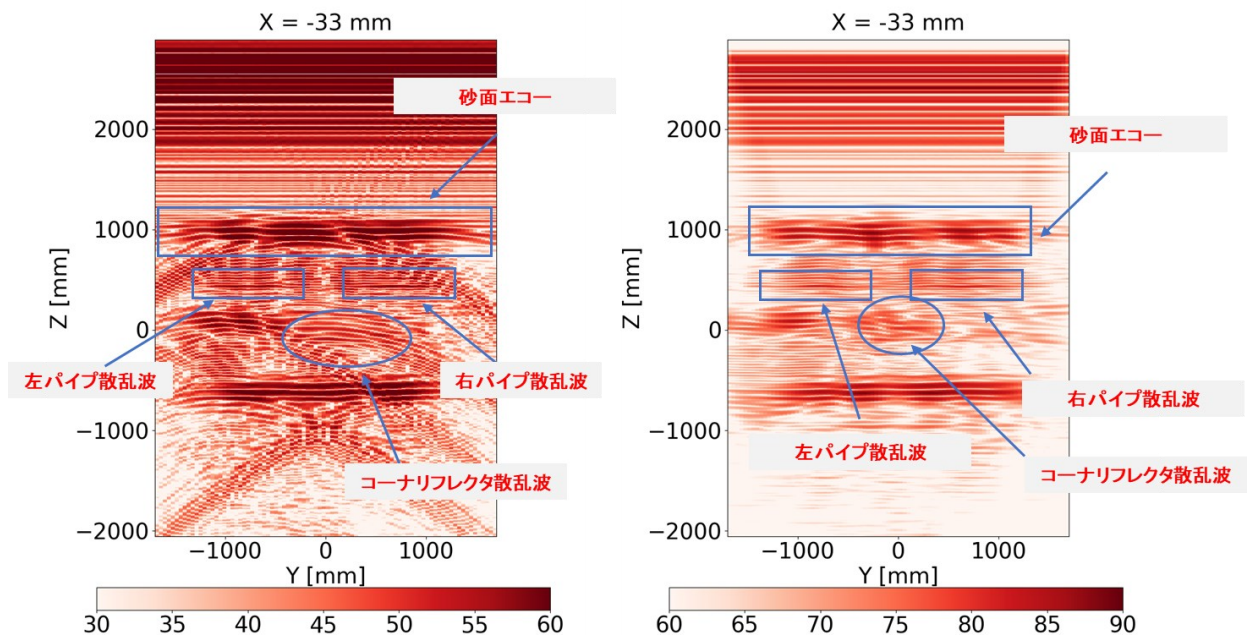


図3.54 パイプ中心の真上 ( $X = -33 \text{ mm}$ ) において合成開口シミュレーションを実施した際の、(左) レーダB-scope画像、(右) アジマス圧縮後の画像。

(イ) パイプ中心からX方向に  $-800\text{ mm}$  離れた場所 ( $X = -833\text{ mm}$ ) において、Y軸方向に合成開口を実施したケース

図3.55に、パイプ中心から離れた場所 ( $X = -33\text{ mm}$ ) において合成開口シミュレーションを実施した際の、アンテナ及び埋設パイプ中心付近 ( $Y = -740\text{ mm}$ ) を含む断面における電界強度の分布図を示す。 $X = -33\text{ mm}$  と同様、アンテナから送信した電波が土壌内に侵入し、パイプから散乱して再び砂面から大気中に向かい、アンテナまで伝搬する様子が可視化された。但し、パイプからの散乱波の強度は全体的に弱まる傾向にある。

図3.56に、レーダB-scope画像及びアジマス圧縮後の画像を示す。B-scope画像においては、 $X = -33\text{ mm}$  と同様、パイプに対しては、層状のエコーとなっており、レンジマイグレーションがはっきりしない一方、パイプが存在するY座標の位置において散乱が顕著にみられることが分かった。アジマス圧縮後の画像の傾向も、 $X = -33\text{ mm}$  と同様の傾向があったものの、やや上下方向に拡散する傾向があった。

このように、パイプ中心からX方向に離れた場所からの送受信においてもパイプのイメージングが可能であることは、様々な角度のデータのトモグラフィーを組み合わせることによるイメージング能力の改善が期待できることを示唆している。

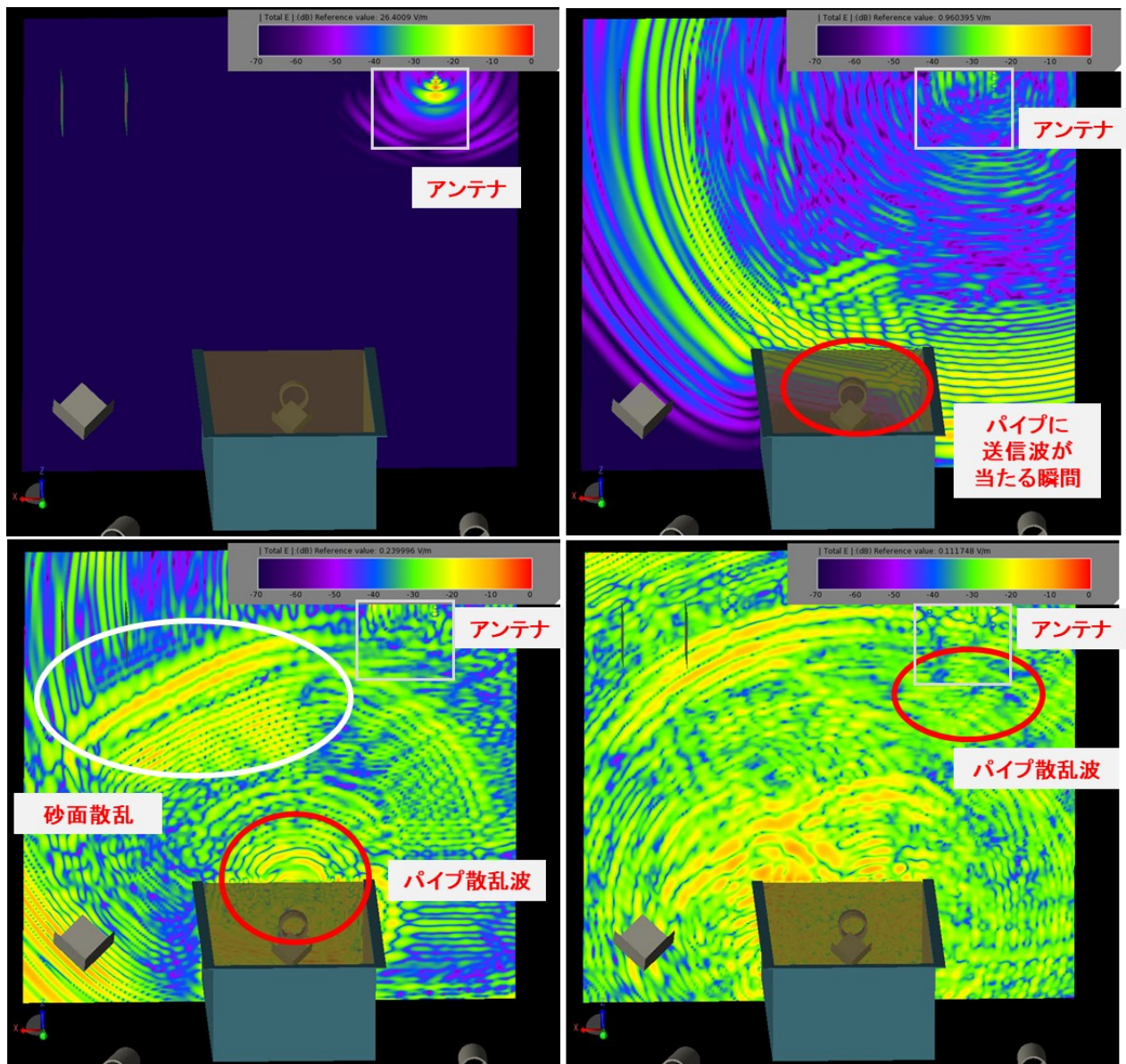


図3.55 パイプ中心から離れた位置 ( $X = -833 \text{ mm}$ ) において合成開口シミュレーションを実施した際の、アンテナ及び埋設パイプ中心付近 ( $Y = -740 \text{ mm}$ ) を含む断面における電界強度の分布図。(左上) 送信直後 ( $t = 4.04075 \text{ ns}$ )、(右上) 送信波パイプ到達直後 ( $t = 12.7439 \text{ ns}$ )、(左下) パイプ散乱波伝搬 ( $t = 15.3341 \text{ ns}$ )、(右下) パイプ散乱波受信アンテナ到達 ( $t = 23.5192 \text{ ns}$ )。

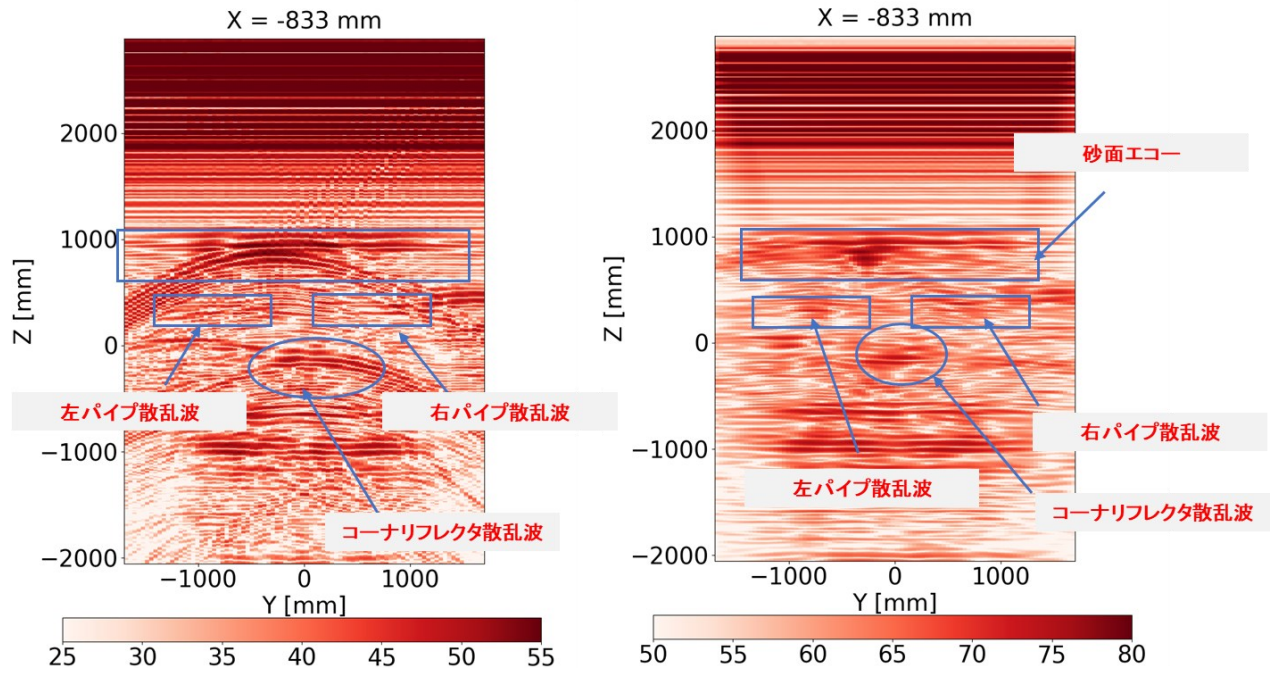


図3.56 パイプ中心から離れた位置 ( $X = -833 \text{ mm}$ ) において合成開口シミュレーションを実施した際の、(左) レーダB-scope画像、(右) アジマス圧縮後の画像。

#### d. まとめと今後の展望

本研究では、室内実験の比較対照として、FDTDによるイメージングシミュレーションを実施し、室内実験の妥当性の検証や散乱メカニズムの明確化、屋外実験計画へのフィードバックに取り組んだ結果、下記の結論を得た。

- (ア) FDTDシミュレーションの出力結果に対して、室内実験と同等の合成開口処理を行うルーチンを開発した結果、室内実験を再現するにあたり同様の合成開口シミュレーションが可能であることを確認することができた。
- (イ) 室内実験を模して、コーナリフレクタを砂面上に1個設置し、1個埋設した状態でのシミュレーションを実施した結果、砂面上物体によるブロッキング効果を可視化することに成功した。また、砂面上物体からやや離れた位置での走査により埋設物体のイメージング画像を得ることができた。併せて、砂内部の屈折の影響の可視化から、埋設時のコーナリフレクタの角度を地面設置時よりもより天頂方向に近い角度（天頂から15度）と定め、屋外実験に反映した。
- (ウ) 衛星観測によって埋設物の可視化が確認できたパイプ状物体を対象に、シミュレーションを実施した。B-scope画像において、パイプ状物体に対しては、コーナリフレクタと異なりレンジマイグレーションによる典型的な放物線パターンが確認できず、層状となることが確認できた。一方合成開口後の画像においても層状となることが確認できた。このことは、埋設パイプ状物体に特化した合成開口手法によるイメージング能力の改善への期待を示唆する結果となった。また、入射角を変えた観測でも同等のイメージが得られたことから、多彩な入射角を組み合わせたトモグラフィー等への応用が期待できる結果となった。

今後の展望として、室内実験とシミュレーションを組み合わせ、より現実のインフラに近い物体（より長いパイプ）に対するイメージングの研究や、屋外での飛翔体からの観測への応用が期待される。

### (3) 屋外埋設物探査への応用のための衛星観測実験

ターゲットとクラッタの分離コンセプトの実証を目的に、屋外で運用される合成開口レーダの適用例として、本研究では人工衛星を選択し、観測実験を実施した。具体的には、2本の1次元走査での屋外埋設物探査を念頭に、期間限定の準常設サイトという形で埋設反射体と表層反射体を屋外に設置し、陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)の複数本の軌道を組み合わせることで観測を行い、評価を行った。

#### e. 全体スケジュール

全体スケジュールの概要を表3.3に示す。令和2年度は、屋外実験場所を選定するとともに、実験計画の立案を行った。選定後、令和3年度は埋設前予備実験、令和4年度は埋設実験を主に実施した。

表3.3 全体スケジュール

年度	主な実施内容
令和2年度	候補地の選定、実験計画の立案
令和3年度	埋設前予備実験 (Phase 1: 地面上での供試体の映り方の確認)
令和4年度	埋設実験 (Phase 2)

#### f. 候補地の選定

候補地として、JAXAの事業所の中から下記の3か所を選び、文献や衛星画像等による調査を実施するとともに、関係する管理担当者等との打ち合わせを実施した。それぞれの所在地を図3.57に示す。

- (ア) 筑波宇宙センター (茨城県つくば市)
- (イ) 地球観測センター (埼玉県比企郡鳩山町)
- (ウ) 角田宇宙センター (宮城県角田市)

なお、開始当初は、上記3か所に加え、国立大学法人が所有する施設1か所(茨城県内)も想定し、文献等による調査に着手していたが、調査の詳細化や施設の利用にあたり当該施設の管理担当者からの同意が得られなかったため、報告からは除外する。



図3.57 屋外実験候補地の所在地。国土地理院 地理院地図（電子国土Web）を改変。

候補場所の調査にあたっては、下記の点を考慮し実施した。

- 1) 実験エリアそのものが持つ電波散乱上の性質について
  - ・平地である、もしくは傾斜が大きくないこと
  - ・20 m～30 m 四方程度の実験エリアが確保できること
  - ・既設埋設物がないこと
  - ・何も設置しない状態において、ALOS-2 の画像に顕著なエコーが映りこまないこと。  
具体的には、周囲に、ALOS-2での撮像時に供試体と重なるような高い木・建物が存在せず、電波干渉による影響が実験エリア内に影響しないこと。
- 2) 実験時の供試体の設営・管理体制について
  - ・アクセスがしやすく、災害発生時に駆け付けできること
  - ・周囲の人がみだりに入らないこと
  - ・動物の侵入リスクを回避できること
  - ・設置後、ある程度のメンテナンスフリー性が確保できること
  - ・土壌の入れ替え、供試体の搬入に必要な車両が出入りできること
- 3) 実験エリアの利用可能性について
  - ・近接におけるほかの実験・試験との干渉を回避できること
  - ・敷地を管理する部署からの了承が得られること



各候補地の調査結果を簡単に述べる。

#### (ア) 筑波宇宙センター

図3.58に筑波宇宙センターにおける Google Earth の画像、及び陸域観測技術衛星 2 号 (だいち 2 号、以下 ALOS-2 とする) の画像を示す。確保できる可能性のある場所として、図中の赤枠で示す①②③の3か所を想定した。いずれも平地であり、現地調査の結果、①③は20 m 程度の実験エリアが、②は 10×20 m 以上のエリアが確保できることが分かった。また、既設埋設物の可能性が低く、ALOS-2での撮像時に供試体と重なるようなエコーの映り込みも回避できる。また、研究代表者や研究分担者の執務場所と同じ敷地にあるためアクセス性もよい。また、一般人の入構が制限されているエリアであり、動物の侵入リスクも小さい。また、土壌の入れ替え、供試体の搬入に必要な車両の出入りも可能である。

一方、筑波宇宙センターにおいては、本課題以外にもさまざまな実験・試験を実施しており、その中には、電波の送受信を行う試験や、磁気に関連した試験が含まれている。①については電波の受信を、③については電波の送受信を実施する試験エリアに入っているもしくは近接している。本課題では金属物体を地表面に設置もしくは埋設するものであり、電波の送信を行うものではないが、設置した金属物体が引き起こすマルチパスが、他の実験・試験へ及ぼす影響が懸念された。また、②③については、磁気に関連した試験中は、人や車両の立ち入り制限が発生することから、その期間中は供試体の配置換えの作業が制限されることが分かった。

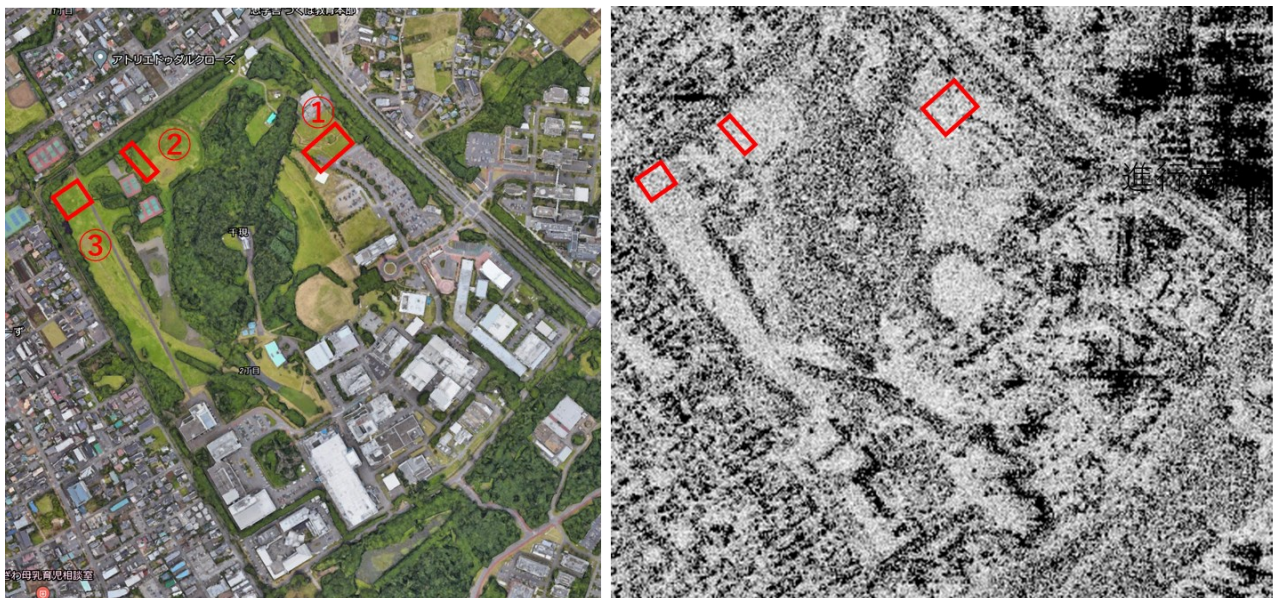


図3.58 筑波宇宙センターにおける (左) Google Earthの画像、及び (右) だいち 2 号の画像。

#### (イ) 地球観測センター

図3.59 に地球観測センターにおける Google Earth 及び ALOS-2 の画像を示す。赤枠内に示すエリアが確保可能性のある場所として識別された。池の北側にあるグラウンドであり、現地調査の結果、25m 四方程度の実験エリアを確保でき、若干の傾斜を伴うものの、設置作業やALOS-2 での観測に影響はないものであった。また、既設埋設物の可能性はほぼなく、ALOS-2での撮像時に供試体と重なるような建物を回避することも可能であることが分かった。研究代表者や研究分担者が勤務する筑波宇宙センターから片道2時間程度での日帰りアクセスが可能であり、車両の立ち入りが可能で、かつ他の実験・試験との干渉もほぼないことが分かった。また、動物の侵入リスクも小さいことが分かった。

懸念点として、周囲に地球局アンテナが存在しているため、過去のALOS-2データを解析した結果、干渉が生じていることが分かった。そこで、干渉波が画像に映りこんでいる領域を具体的に調べた。図3.60に地球観測センターにおける地球局アンテナからの電波干渉及び建物の影

響回避のための位置検討結果を示す。赤枠は電波干渉もしくは建物干渉エリア、青枠は実験候補エリアを示し、Google Earthの画像に、ALOS-2の画像をオーバーレイする形で作成した。事例は2例、2014年11月8日の正午ごろの、北から南へ向かうパス、及び2019年2月24日深夜の、南から北へ向かうパスについて示す。なお、青枠内にある反射体は、当日の広報イベントで設置された金属反射体であり、別の日の同一観測条件での画像では映りこんでいなかったことを確認済みである。検討の結果、干渉波の発生エリアを回避して観測エリアを確保できることが分かった。

併せて、一般公開における公開エリアに該当するため、人の侵入可能性があることから、柵で囲うことにより防止することとした。

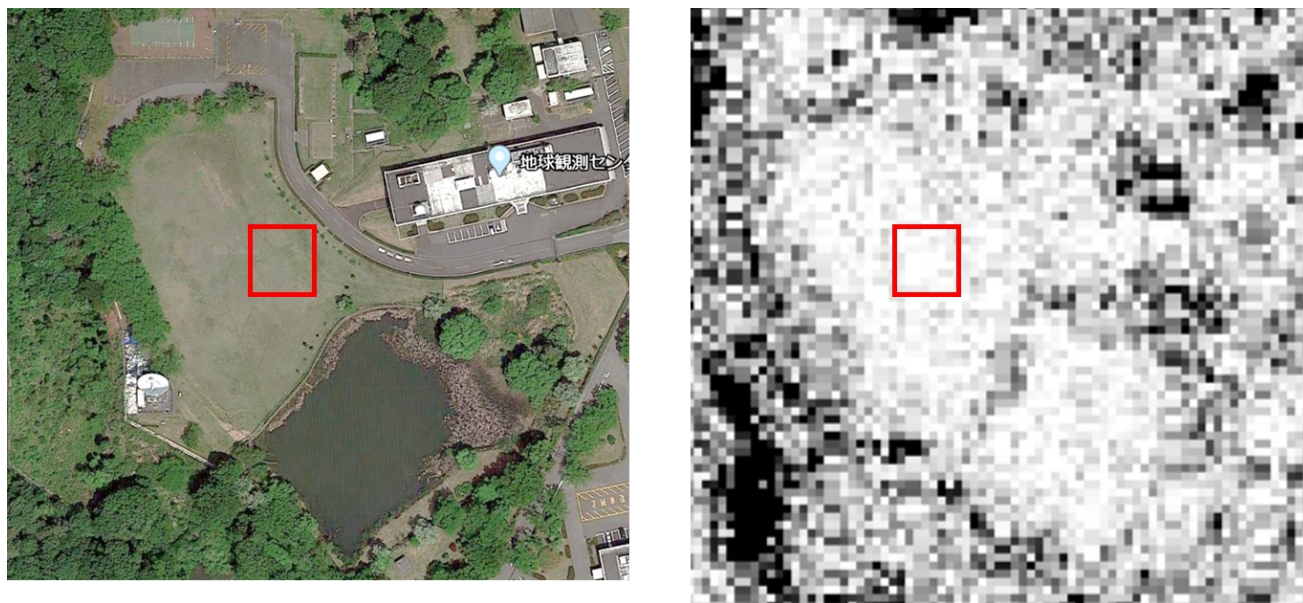


図3.59 地球観測センターにおける（左）Google Earthの画像、及び（右）だいち2号の画像。

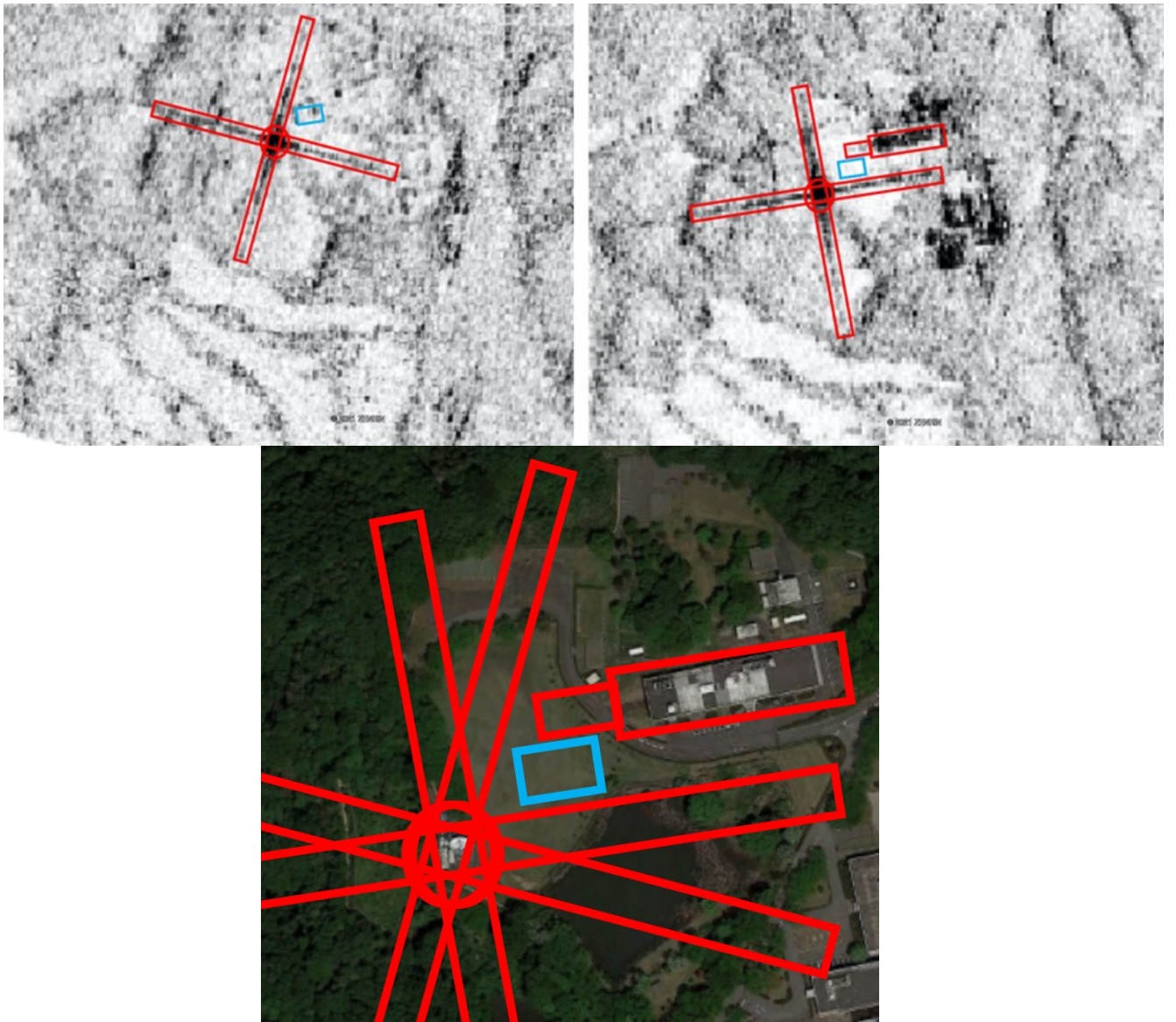


図3.60 地球観測センターにおける地球局アンテナからの電波干渉及び建物の影響回避のための位置検討結果。いずれも赤枠は電波干渉もしくは建物干渉エリア、青枠は実験候補エリア。Google Earthの画像に、ALOS-2の画像をオーバーレイする形で作成した。（左上）2014年11月8日の正午ごろの、北から南へ向かうパス、及び（右上）2019年2月24日深夜の、南から北へ向かうパス。（下）両者の観測をマージさせた、電波干渉もしくは建物干渉エリアと実験候補エリアとの関係。Google Earth画像をもとに編集。なお、左側の図において、青枠内にある反射体は、当日の広報イベントで設置された金属反射体であり、別の日の同一観測条件での画像では映りこんでいなかったことを確認済みである。

(ウ) 角田宇宙センター

図3.61に角田宇宙センターにおける Google Earth 及び ALOS-2 の画像を示す。赤枠内ですエリアが確保可能性のある場所として識別された。管理担当者とのリモート会議によるヒアリングを通して、具体的な情報を聞き出した結果、20 m 程度のエリアが存在することが分かった。

一方、懸念点として、イノシシの侵入による意図しない掘り起こしや地中内の空洞発生リスクが存在する点と、筑波宇宙センターから遠く、大雨や地震等の災害時の即応体制に課題があることが分かった。

以上の調査の結果、最も良い候補地として、(イ)の地球観測センターを令和2年度に選定した。

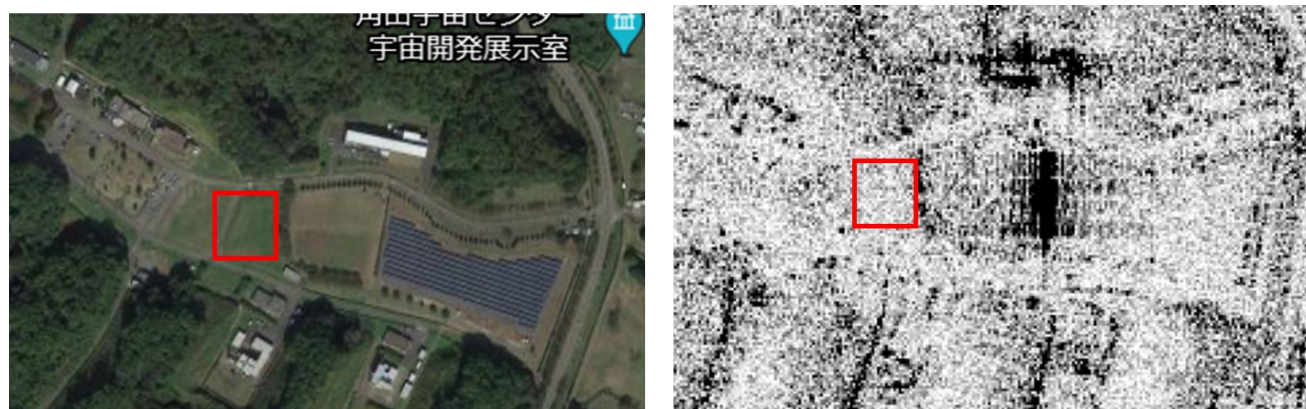


図3.61 角田宇宙センターにおける (左) Google Earthの画像、及び (右) だいち 2 号の画像。

g. 実験スケジュール

観測場所は、前述の通り選定したJAXA地球観測センター（埼玉県比企郡鳩山町）のグラウンドとした。実験スケジュールを表3.4に示す。

(ア) 令和3年度：Phase 1（感度の確認）

令和3年度は、Phase 1 として、埋設前予備実験を実施した。具体的には必要な供試体の準備・製作を行うとともに、地面に3種類の供試体を設置し、地面上での物体の映り方や感度を確認するための衛星観測を実施した。

(イ) 令和4年度：Phase 2（埋設物の衛星観測データ取得と解析）

令和4年度は、令和3年度の実験結果を踏まえ、埋設計画を一部変更し、供試体の追加製作を実施するとともに、Phase 2 として、実際に埋設ターゲット及びクラッタに位置付けられる地面上の別物体を衛星で観測する実験を実施した。終了後、撤収と原状復帰を行った。

表3.4 実験スケジュール

(a) 令和3年度

月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
作業		製作する物体の 物体の配置検討	物体の検討		入札	契約	製作	・土壌入替 ・物体設置				・鉄板のみ 撤収
現場 状態							Phase 1：地面上での映り方の確認 ・地面上物体 ・土壌入替エリア、安全囲い					

(b) 令和4年度

月	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
作業		埋設計画の一部修正 物体の埋設配置検討		入札	追加 製作	物体埋設					・配置 変更	・撤収 現状復帰
現場 状態	Phase 1：地面上での映り方の確認 ・地面上物体 ・土壌入替エリア、安全囲い					Phase 2：埋設実験 ・埋設物体及び地面上物体 ・土壌入替エリア、安全囲い						

#### h. 衛星観測データ

解析において使用した衛星データはJAXAが運用中の陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2) に搭載されたLバンド合成開口レーダPALSAR-2である。衛星の主要諸元を表3.5に、PALSAR-2の主要諸元を表3.6に示す。衛星は14日回帰の軌道となっており、降交点通過地方時が12:00±15分となっている。PALSAR-2のうち、本研究では高分解能(3 m 分解能)モードのデータを使用した。偏波は単偏波(SP:HH偏波)である。表にはないが、中心周波数は1257.5 MHzである。

また、PALSAR-2のプロダクトの各レベル定義を表3.7に示す。今回は、レベル1.1のデータをもとに、JAXAの全球高精度デジタル3D地図[3](陸域観測技術衛星(だいち;ALOS)搭載のPRISMによって観測された約300万枚の衛星データを用いて、全球陸域を対象とした高精度デジタル3D地図)を使用した高精度なオルソ補正を実施した。処理後の水平分解能は2.5 mである。画像表示については、後方散乱係数に変換した上で、白黒のコントラスト(白色が強い散乱)で示すこととした。また、一般的に、SARのデータについては、スペックルの影響を低減するために、ピクセル平均化処理(マルチルック処理)を行う。今回は、Phase 1において、3×3ピクセルの平均化を行う場合に加え、ピクセル平均化を行わない場合の解析も併用した。但し、オルソ補正において適用したバイキュービック補間手法において、元データのピクセルを補正後のピクセルに割り当てる過程で特定の点において割り当てできず欠損が生じるピクセルがあり、その点についてはコントラスト作成の際に最も小さい値に対応する色を割り当てた他、3×3の平均化の対象外とした。なお、レベル1.5以降の標準プロダクトのデータについて、コーナリフレクタの後方散乱係数において、プロダクトで定義された上限値を越えて飽和することが分かり、定量的な評価が困難と判断した。

解析対象データを表3.8に示す。また、使用したビームの番号、観測時間帯及び対応する軌道、オフナディア角及び入射角を表3.9に示す。なお、PALSAR-2は衛星進行方向に対して右側と左側を切り替えて観測する機能を有しているが、本解析においては右側に向けて観測を行ったデータのみを使用した。

表3.5 陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)の主要諸元

運用軌道	種類	太陽同期準回帰軌道
	高度	約628km (赤道上)
	軌道傾斜角	97.9°
	降交点通過地方時	12:00±15分
	回帰日数	14日
寸法		3.5m×3.2m×4.5m (打上時) 16.5m×3.7m×9.9m (軌道上)
質量		約2100kg (打上時)
設計寿命		5年 (目標7年)
電力	発生電力	約5300W (EOL)
	バッテリー	リチウムイオンバッテリー: 200Ah
観測デューティ		50% (約49分)
ミッションデータ伝送		直接伝送 (最大800Mbps) および データ中継衛星経由 (278Mbps)
データ蓄積容量		約128GByte (EOL)
ミッション機器		Lバンド合成開口レーダPALSAR-2
打上げ	日時	平成26年 (2014年) 5月24日
	ロケット	H-II Aロケット24号機

表3.6 Lバンド合成開口レーダPALSAR-2の主要諸元

観測モード	ス ポ ッ ト ラ イ ト	高分解能					広域観測			
		3m	6m		10m		Normal		Wide	
帯域幅 (MHz)	84	84	42		28		14	28	14	
分解能 (m)	3×1 (Rg × Az)	3	6		10		100 (3 looks)		60	
入射角 (deg.)	8 - 70	8 - 70	8 - 70	20 - 40	8 - 70	23.7	8 - 70		8 - 70	
観測幅 (km)	25 × 25 (Rg × Az)	50	50	40	70	30	350 (5 scans)		490 (7 scans)	
偏波	SP	SP/D P	SP/DP/ CP	FP	SP/DP/CP	FP	SP/DP		SP/DP	
NESZ (dB)	-24	-24	-28	-25	-26	-23	- 26	- 23	-26	
S/A (dB)	Rg	25	25	23	23	25	20	25	25	20
	Az	20	25	20	20	23	20	20	20	

\* SP: HH or HV or VV, DP: HH+HV or VV+VH, FP: HH+HV+VH+VV, CP: compact pol. (experimental)

表3.7 PALSAR-2のプロダクトの各レベル定義について

レベル	定義
レベル1.1	レンジ圧縮及びアジマス圧縮を行った後の、スラントレンジ上の複素数データである。1ルックのデータであり、位相情報を含んでいるため、この後の処理のベースとなる。広域観測モードでは、スキャン単位でイメージファイルが作成される。
レベル1.5	レンジ圧縮及びアジマス圧縮を行い、さらに地図投影した振幅データでマルチルックされたグラントレンジ上のデータである。
レベル2.1	レベル1.1データに数値標高データを用いて幾何補正(オルソ補正)を行ったデータである。
レベル3.1	レベル1.5データに画質補正(雑音除去処理、ダイナミックレンジ圧縮処理)を行ったデータである。



表3.8 解析対象データの観測スケジュール

観測時間帯 ビーム番号 ／フェーズ	昼間観測 ビームU2-6	昼間観測 ビームU2-9	夜間観測 ビームU2-7
設置前	・ 2021/2/9	・ 2021/9/16	・ 2021/2/21
Phase 1	・ 2022/2/8	・ 2022/3/31	・ 2021/11/14 ・ 2022/2/20
Phase 2	・ 2023/2/7	・ 2022/9/15	・ 2022/11/27 ・ 2023/2/19

表3.9 PALSAR-2のビーム番号、観測時間帯、  
オフナディア角及び入射角（本解析で使用したもの）

ビーム番号		U2-6	U2-9	U2-7
観測時間帯及び軌道		昼間観測 降交軌道	昼間観測 降交軌道	夜間観測 昇交軌道
オフナディア角範囲 [deg]		29.1	38.2	32.4
入射角範囲 [deg]	Near	30.2	41.1	34.1
	Far	34.3	44.4	38.0

i. Phase 1における供試体の準備と設置

供試体として、下記3種類の物体を準備した。それぞれの写真を図3.62に示す。

(ア) 1.2 m 正方形コーナリフレクタ

各辺の長さが 1.2 m である正方形コーナリフレクタを令和3年度及び4年度に各2台、計4台製作した。設置時の風による影響を低減するため、Lバンドの波長（約 23 cm）に対して十分小さい径の穴（直径 10 mm）を有するパンチングメタルとした。地上設置時の設置角は衛星観測の入射角にあわせて天頂より30度とした。

(イ) パイプ状散乱体

埋設インフラ管を想定し、直径 2 m、長さ 2 m となる半円形状のパイプ状散乱体を製作した。コーナリフレクタと同様、設置時の風による影響を低減するため、Lバンドの波長（約 23 cm）に対して十分小さい径の穴（直径 5 mm）を有するパンチングメタルとした。ただし組み立ての都合上、断面形状については半円から若干のずれが生じた。

(ウ) 敷鉄板

3 m × 1.5 m 程度の大きさの工事用鉄板をレンタルにより 1 枚準備し、令和3年度のみ設置した。



図3.62 製作・準備した供試体。（左上）1.2 m 正方形コーナリフレクタ、（右上）パイプ状散乱体、（下）敷鉄板。

グラウンド上に、30 m × 30 m 四方のフェンスを設置し、その内部を実験エリアとした。フェンスは木製の柱とプラスチック製の網状の囲いとした。実験エリア内において、準備し

た供試体（1.2 mコーナリフレクタ2台、パイプ状散乱体1台、敷鉄板1枚）を設置した。また、埋設実験を想定し、3か所において、水はけのよい土（鹿沼土）への入れ替え作業を行った。配置作業は2021年10月から11月上旬にかけて実施した。Phase 1の実験エリアにおける供試体の配置図を図3.63に、実験エリアの全景を図3.64に示す。

使用する衛星（ALOS-2）は、昼間（正午前の11時台、日本時間、以下同様）及び夜間（23時台）それぞれにおいて、降交軌道（北北東から南南西へ）、及び昇交軌道（南南東から北北西へ）として飛行する。

衛星搭載レーダが放射するビーム方位角は、衛星軌道の直交方向に近い方位角であり、昼間の観測では西北西向き（方位角-79.4度）、夜間の観測では東北東向き（方位角79.8度）である。そこで、2台のコーナリフレクタについて、それぞれのビーム方位角に対向するように設置した。具体的には、1.2 m コーナリフレクタ#1を昼間の観測軌道に合わせて東南東向きに、1.2 m コーナリフレクタ#2を夜間の観測軌道に合わせて西南西向きとした。また、パイプ状散乱体については、半円柱状物体の長軸を、昼間の観測軌道のビーム方位角に直交するように設置した。

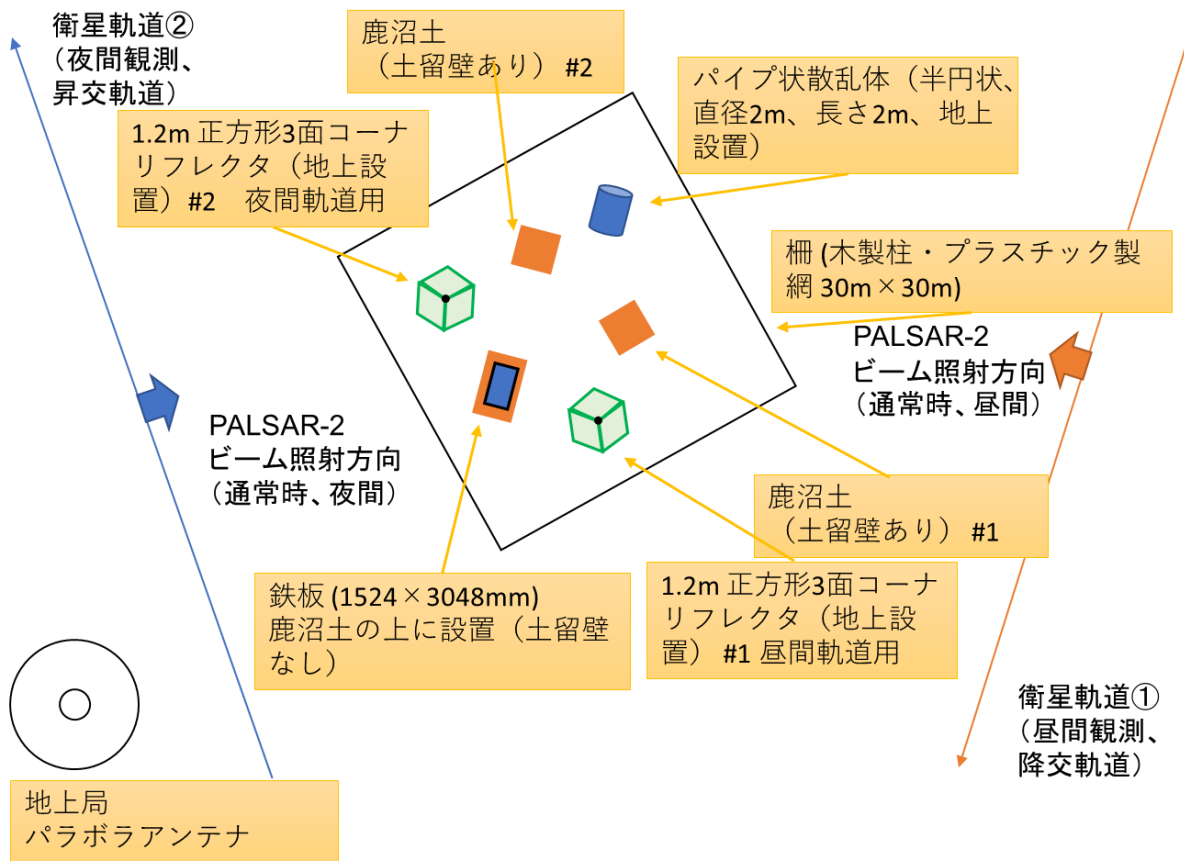


図3.63 実験エリアにおける供試体の配置図 (Phase 1)。(上)配置イメージ、(下) Google Earthの画像 (2021年11月15日時点)をJAXA側で加工。



図3.64 実験エリアの全景（Phase 1）。

## j. Phase 1における解析結果

### (ア) 昼間軌道における観測結果

図3.65に昼間軌道（ビーム番号U2-6）におけるPALSAR-2画像、及び同じ領域におけるGoogle Earth 画像を示す。PALSAR-2画像のコンターは後方散乱係数（単位dB）を示す（以下同様）。2021年2月9日（供試体設置前）には見られなかった2点のエコーとして、2022年2月8日（Phase 1）においてパイプ状散乱体及びコーナリフレクタ#1に対応したエコーをとらえることができた。一方、夜間軌道の方向に設置したコーナリフレクタ#2や敷鉄板、及び土留め壁に囲われた鹿沼土領域のエコーについては、付近に類似のエコーがあるケースもあるの、設置位置とエコーの位置が一致しておらず、当該エコーのものと同定することは困難であった。

なお、供試体設置後において、左下から右上に伸びるエコーがみられるが、これは地球観測センターにおけるパラボラアンテナからのエコーが混入したものであり、実験エリアの一部に差し掛かっていることが新たに分かった。このため、コーナリフレクタ#2及び敷鉄板については、昼間軌道においては識別が困難となった。Phase 2の実験において、混入領域を回避すべく配置の見直しを行った。

次に、ピクセル平均化の影響について考察を行う。3×3ピクセルの平均化を行った場合、ターゲットとなる供試体の判別は容易となる一方、ピークとなる後方散乱係数が平均化の影響のため小さくなってしまう。供試体が存在するピクセルの後方散乱係数を表3.10に示す。抽出方法は、ピクセル平均化を行わない画像において供試体設置場所付近で後方散乱係数が最大となる点を抽出し、その点における後方散乱係数を、供試体設置前及びPhase 1において、ピクセル平均化の有無それぞれの画像において実施した。コーナリフレクタ#1については、平均化により 5 dB 以上の差異があることが分かった。平均化を行わない場合、パイプ状散乱体で 8 dB 程度、コーナリフレクタで 16 dB 程度の後方散乱係数で観測できることが分かった。また、観測前後の後方散乱係数を比較した結果、パイプ状散乱体で 26 dB、コーナリフレクタで 36 dB 程度の差分があることが分かった。

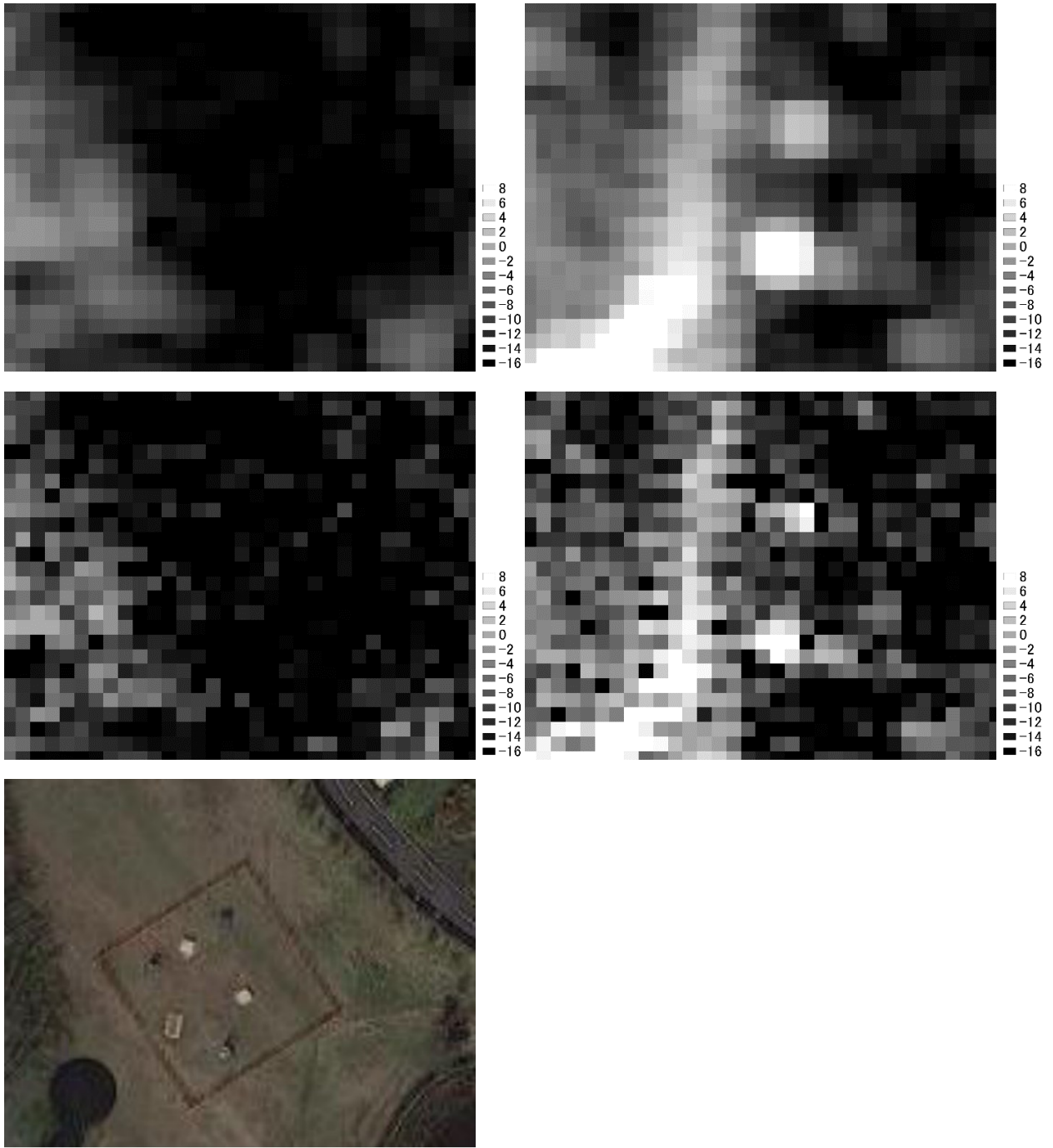


図3.65 昼間軌道（ビーム番号U2-6）におけるPALSAR-2観測画像（上段及び中段）、同じ領域におけるGoogle Earth画像（2021年11月15日）（下段）。コンターは後方散乱係数（単位dB）を示す。上段はピクセル平均化（ $3 \times 3$ ピクセル）を行った場合、中段はピクセル平均化を行わない場合を示す。上段及び中段の左図は2021年2月9日（供試体設置前）、右図は2022年2月8日（Phase 1）を示す。

表3.10 昼間軌道（ビーム番号U2-6）におけるPALSAR-2で観測された供試体が存在するピクセルの後方散乱係数。単位はdB。

供試体	ピクセル 平均化	設置前 2021/2/9	Phase 1 2022/2/8	差分
パイプ状散乱体	3x3 pixel	-18.82	2.41	21.23
	平均化なし	-18.33	8.01	26.34
1.2 m コーナリフレクタ#1	3x3 pixel	-19.51	10.86	30.37
	平均化なし	-19.90	16.26	36.16



#### (イ) 夜間軌道における観測結果

図3.66に夜間軌道（ビーム番号U2-7）におけるPALSAR-2画像、及び同じ領域におけるGoogle Earth 画像を示す。2021年2月21日（供試体設置前）には見られなかった2点のエコーとして、2021年11月14日（Phase 1）においてコーナリフレクタ#2に対応したエコーを同定することができた。

一方、パイプ状散乱体については、存在が推定される領域における後方散乱係数は、ピクセル平均化を行わない場合において 0 dB程度、平均化後には-5 dB程度となり、昼間軌道（平均化を行わない場合において8 dB程度、平均化後において2 dB程度）と比べて大幅に低下しているように見えた。これは、パイプの向きが昼間軌道に沿って設置したことから、昼間観測時には、合成開口時の重ね合わせの効果が出現してエコー強度が増大しているのに対し、夜間観測時には、パイプの長軸ベクトルと軌道ベクトルの向きが異なるため、重ね合わせの効果が期待できない可能性がある。したがって、衛星からのパイプ状物体の観測においては、パイプの長軸ベクトルと、衛星軌道が揃うか否かによって、検知能力に差が生じる可能性がある。但し、入射角が昼間軌道と夜間軌道で異なることから単純な比較は困難である。一方、敷鉄板については画像からエコーを見出すことができなかった。

図3.67に供試体設置後の2回の観測の比較を示す。コーナリフレクタにおいては、2回の観測において、大幅な差異はなく、観測において再現性が得られていることが分かったが、パイプ状散乱体の存在が推定される領域については、2回目の観測でややぼやける傾向があり、強度についても若干弱まる傾向がある。全体的に、昼間軌道と比べてレベルが弱いこともあいまって、数dBの強度差で揺らぎが生じていることがわかった。

表3.11に供試体が存在するピクセルの後方散乱係数を示す。コーナリフレクタ(1)については、平均化を行わない場合、18 dB 程度の後方散乱係数で観測できることが分かった。また、観測前後の後方散乱係数を比較した結果、35 dB 程度の差分があることが分かった。

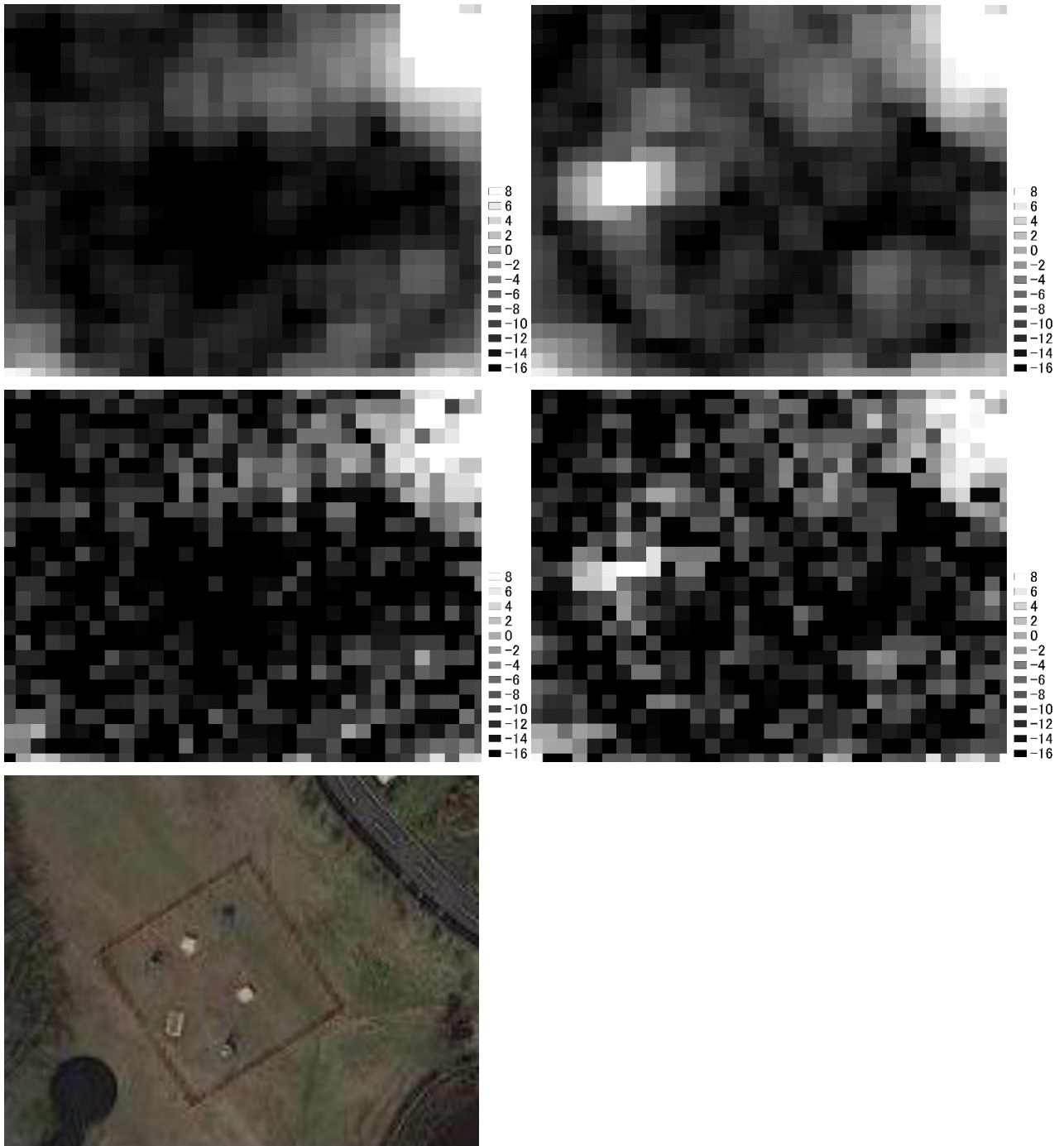


図3.66 夜間軌道（ビーム番号U2-7）におけるPALSAR-2観測画像（上段及び中段）、同じ領域におけるGoogle Earth画像（2021年11月15日）（下段）。上段はピクセル平均化（3×3ピクセル）を行った場合、中段はピクセル平均化を行わない場合を示す。上段及び中段の左図は2021年2月21日（供試体設置前）、右図は2021年11月14日（Phase 1）を示す。

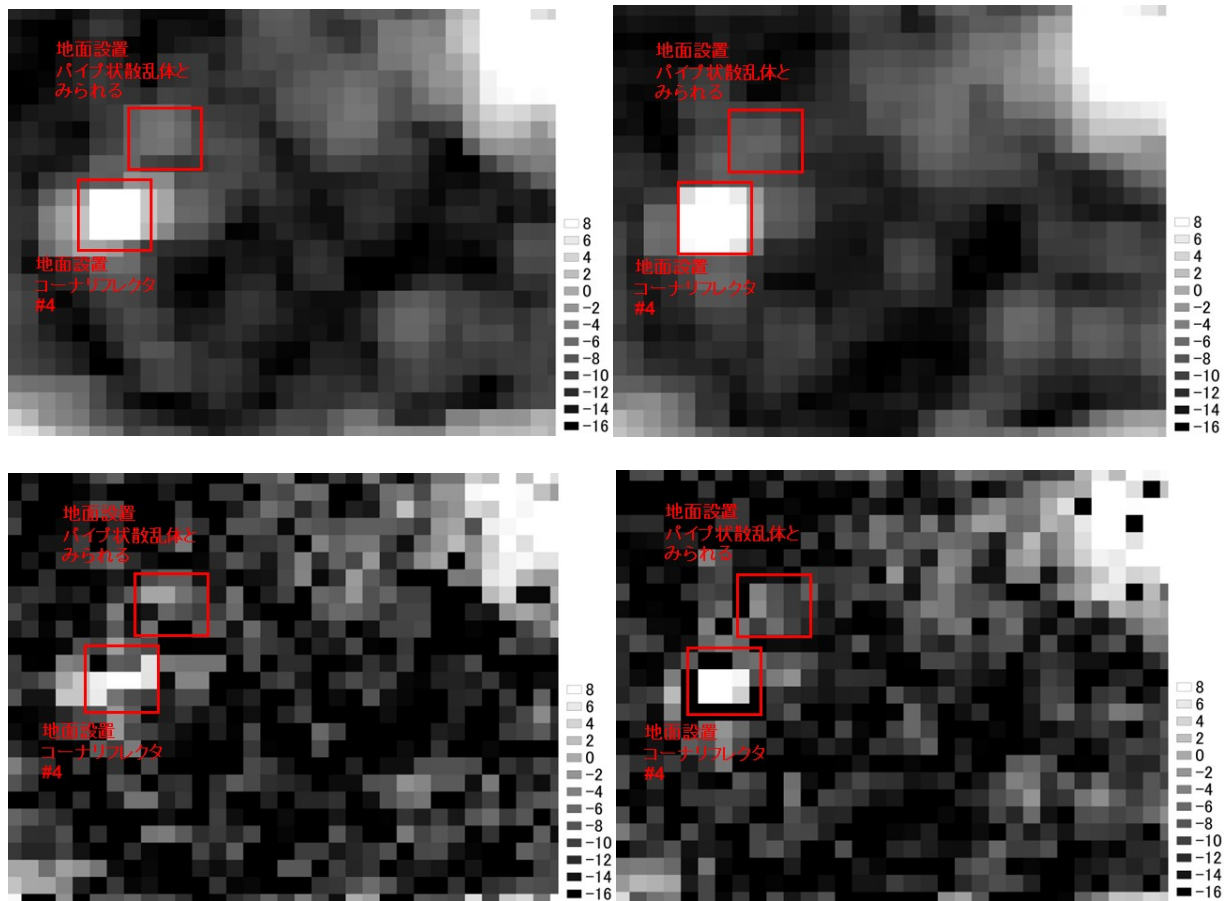


図3.67 夜間軌道（ビーム番号U2-7）におけるPhase 1の2回の観測の比較。上段はピクセル平均化（3×3ピクセル）を行った場合、中段はピクセル平均化を行わない場合を示す。左図は2021年11月14日、右図は2022年2月20日を示す。

表3.11 夜間軌道（ビーム番号U2-7）におけるPALSAR-2で観測された供試体が存在するピクセルの後方散乱係数。単位はdB。

供試体	ピクセル平均化	設置前 2021/2/21	Phase 1 2021/11/14	差分
パイプ状散乱体	3x3 pixel	-11.53 <sup>*1</sup>	-4.72 <sup>*1</sup>	6.81
	平均化なし	-10.67 <sup>*1</sup>	-0.40 <sup>*1</sup>	10.27
1.2 m コーナリフレクタ #2	3x3 pixel	-14.90	9.38	24.28
	平均化なし	-17.29	17.70	34.99

\*1 平均化なしにおいて同強度の点が2点存在したため、3x3pixel時に高い強度の値を抽出

k. Phase 2における供試体の準備と設置

前述の結果を踏まえ、Phase 2においては、下記の見直しを行った。

- ・鉄板については、夜間軌道の結果を踏まえ、設置を取りやめた。
- ・昼間軌道におけるアンテナエコーを回避するため、全体的に設置位置を東側にシフトさせることに伴い、グラウンド上の囲いの拡張（30 m × 30 m 四方を36 m × 30 m 四方に）を実施した。併せて、レイアウト自体についても見直しを実施した。
- ・供試体数について、観測機会を全体的に増加させるため、埋設2台、地上設置2台の計4台とした。そのため、2台の追加製作を実施した。
- ・土壌水分量計を設置した。

これに伴い、下記のコンフィグレーションとした。配置図を図3.68に、実験エリアの全景を図3.69に示す。

・埋設コーナリフレクタについては、昼間軌道、夜間軌道それぞれに向けて、各2台（埋設1台、地面設置1台）設置及び埋設を行った。具体的には、コーナリフレクタ#1を昼間の観測軌道に合わせて東南東向きになるよう埋設し、コーナリフレクタ#2を夜間の観測軌道に合わせて西南西向きとなるように埋設した。角度については、地上設置時が天頂方向から30度となるのに対し、埋設時は、屈折の影響を考慮し、天頂方向から15度とした。これについては、FDTDシミュレーションにおいて埋設時の屈折の影響を可視化の上確認し、屋外実験に反映した。

・パイプ状散乱体については、長軸を昼間の観測軌道のビーム方位角に直交するように1台埋設を実施した。

・実験エリアにおける画像上の位置を同定する標識としての目的、及び後述する複数物体の識別を目的として、埋設物とは別に、地面上にコーナリフレクタを2台設置した。具体的には、コーナリフレクタ#3を昼間の観測軌道に合わせて東南東向きになるよう、コーナリフレクタ#4を夜間の観測軌道に合わせて西南西向きとなるよう設置した。ただし、設置位置についてはPhase 1とは異なる場所である。

なお、埋設に当たり、地下水の影響から、供試体をすべて埋めることが出来なかったため土留壁に埋設物を入れた上で、コーナリフレクタについては地下80cm程度まで掘削の上、地面上に50～60cmの高さまで局所的に土を積み上げる方式とした。また、パイプ状散乱体については、60cm程度掘削し、50～60cmの高さまで局所的に土を積み上げパイプの最上面の上については砂を3～5cm程度積み上げた。埋設状態のイメージを図3.70に示す。

埋設作業は2022年8月下旬から9月上旬にかけて実施した。また、2022年12月に、供試体設置場所において、高精度GNSS観測による位置測定を実施し、得られたデータに基づいて、衛星画像との照合を行った。

また、実験の進捗に応じ、2023年2月3日に一部のコンフィグレーション変更として、下記の作業を実施した。

- ・埋設コーナリフレクタのうち、夜間軌道に向けたもの（#2）について、表面の土壌を除去した。
- ・地面に設置したコーナリフレクタのうち、夜間軌道に向けたもの（#4）について、パイプ状散乱体の北東にあったものを、南西側の近傍（中心間距離6m）へ移動した。
- ・パイプ状散乱体、及びコーナリフレクタ#1の土を補充した。

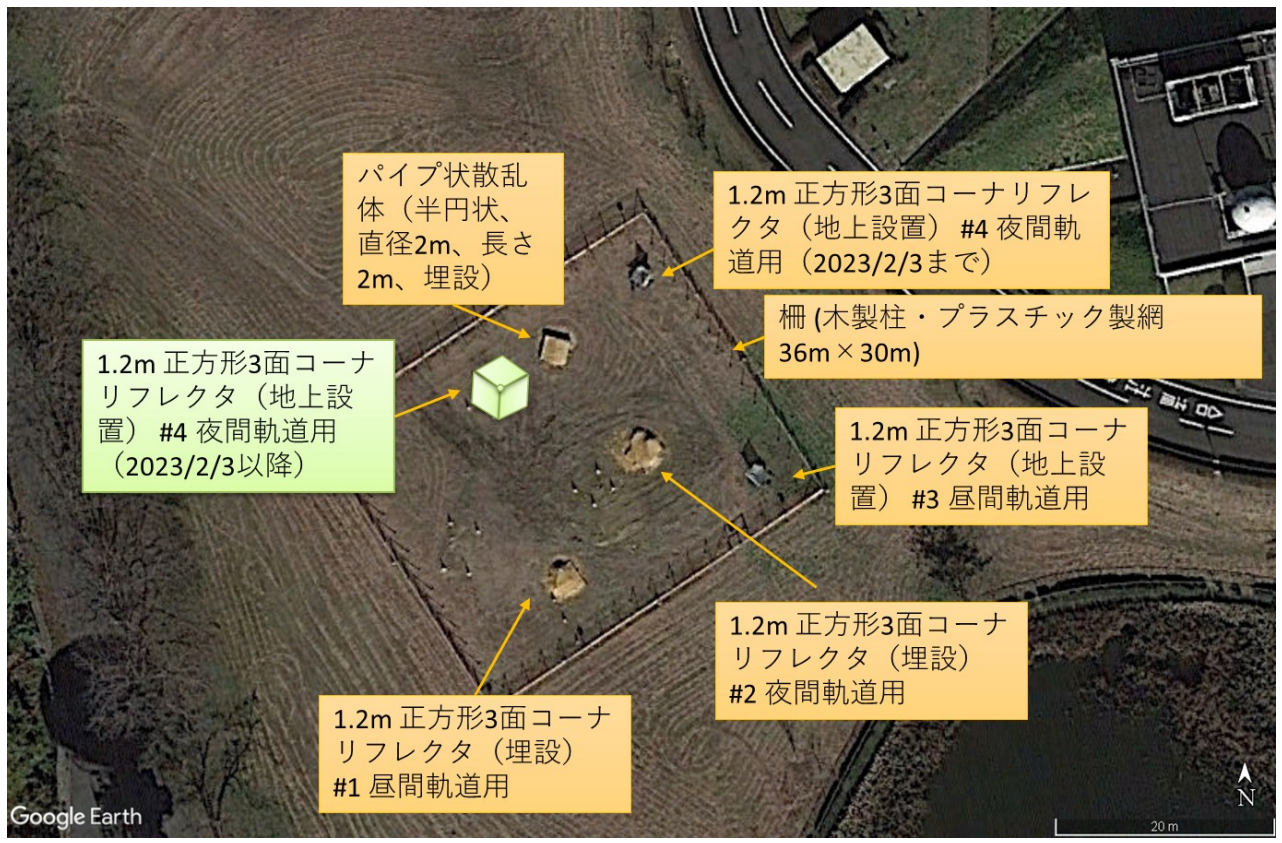
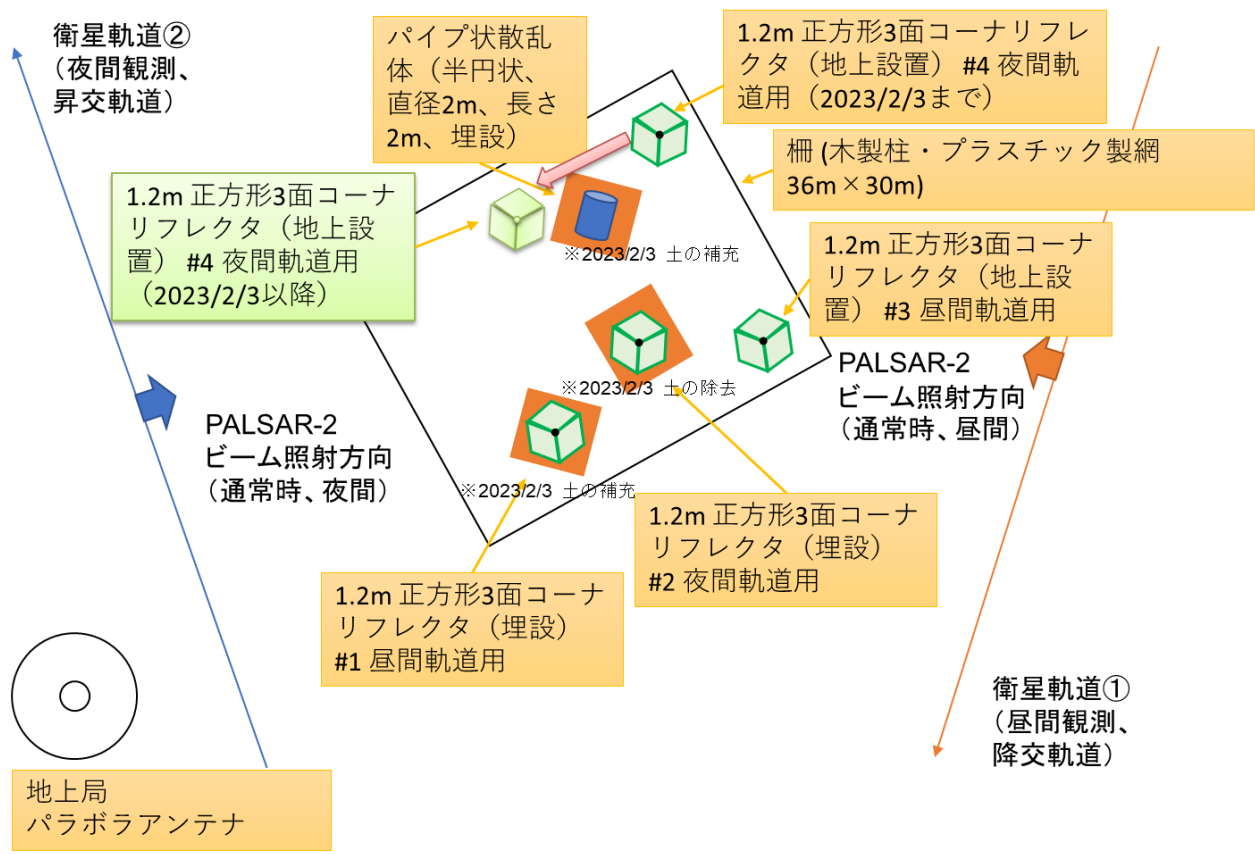


図3.68 実験エリアにおける供試体の配置図 (Phase 2)。(上)配置イメージ、(下) Google Earthの画像 (2022年11月16日時点) をJAXA側で加工。

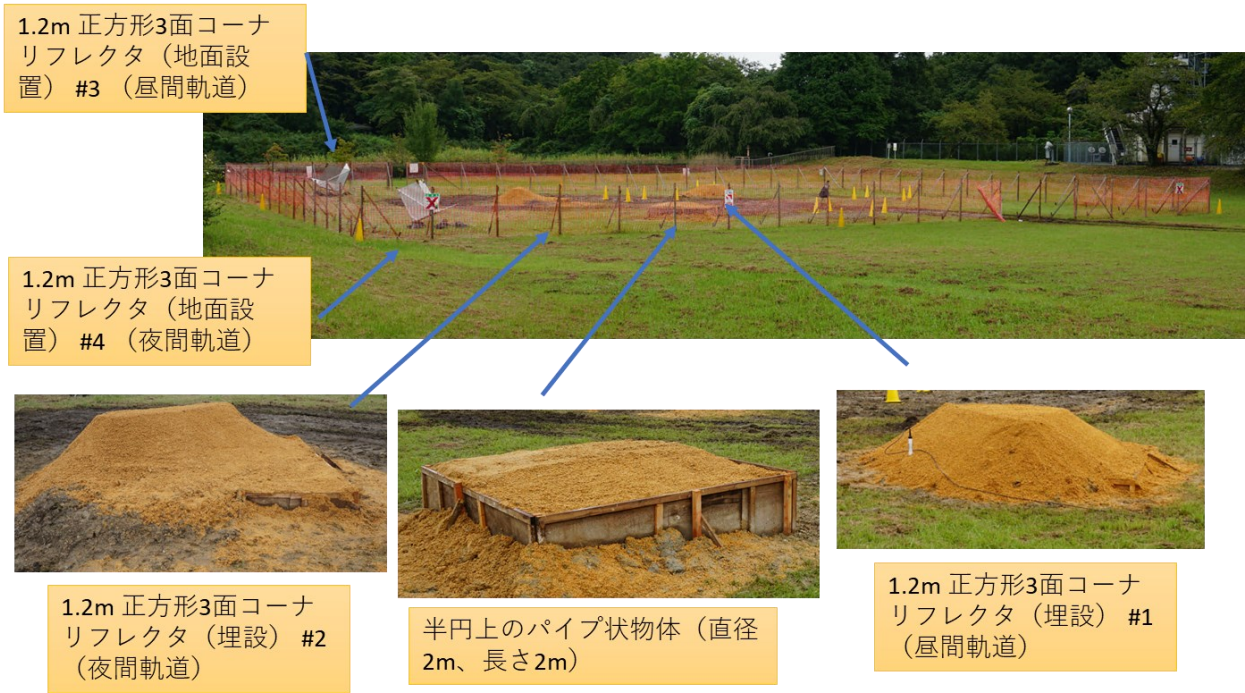


図3.69 実験エリアの全景 (Phase 2)。

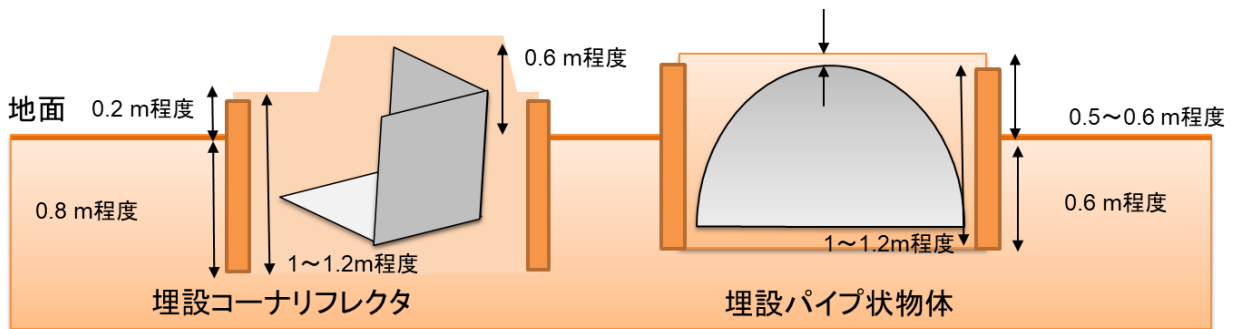


図3.70 埋設状態のイメージ (Phase 2)。

## 1. Phase 2における解析結果

Phase 2において、下記3つの解析課題に取り組んだ。

- (ア) 埋設物エコーを衛星で受信することは可能か
- (イ) 2つの物体の識別（埋設ターゲットと地上設置物体）は可能か
- (ウ) 土の有無による干渉SAR観測の試み

以下、それぞれについて、解析結果を示しつつ説明する。

- (ア) 埋設物エコーを衛星で受信することは可能か

図3.71に昼間軌道（ビーム番号U2-9）における供試体設置前、Phase 1及びPhase 2のPALSAR-2観測画像を示す。Phase 2の画像において、埋設した3つの物体（コーナリフレクタ2台及びパイプ状散乱体）のうち、パイプ状散乱体のエコーを見出すことができた。一方、埋設したコーナリフレクタについては、昼間軌道向け、夜間軌道向け共に、エコーを見出すことは困難であった。また、標識として地面上に設置したコーナリフレクタのうち、昼間軌道向け(#3)のみエコーを見出すことができた。散乱体が存在するピクセルの設置・埋設前後の後方散乱係数の比較について、地上設置物体（Phase 1）を表3.12に、埋設物体（Phase 2）を表3.13に示す。地面設置時の後方散乱係数は、パイプ状散乱体については-2.49 dB（ピクセル平均化時）及び2.64 dB（平均化なし）であり、コーナリフレクタ#1については8.34 dB（ピクセル平均化時）及び14.25 dB（平均化なし）であった。一方、埋設時の後方散乱係数は、パイプ状散乱体について-5.52 dB（ピクセル平均化時）及び0.82 dB（平均化なし）であった。当該ピクセルの設置前のバックグラウンドとなる地面の後方散乱係数が概ね-13~-21 dB程度であった。パイプ状散乱体について、埋設後の埋設前に対する後方散乱係数の低下はおおむね2~3 dBであった。一方、コーナリフレクタについては、埋設後の後方散乱係数はバックグラウンドレベル以下であったことから、3x3 pixelのピクセル平均化を行った場合において、埋設前と比べて20 dBを上回るレベル低下があったものと推定される。このように、パイプ状散乱体とコーナリフレクタで、埋設時の散乱強度の低下量に大きな差が生じる理由は、埋設深さについて、パイプ状散乱体においては散乱面の深さが一番浅い天井面で3~5cmと非常に浅く埋設していたのと比べ、コーナリフレクタにおいては、先端部は数cmの深さであったものの、地面に入射後散乱するまでの間に1m以上の土内部の伝搬があることから、伝搬長の違いが主な原因と考えられる。

このように、埋設物の探査においては、土壌の伝搬距離が感度に大きく影響していること、浅い物体であればSARで観測可能であることが、実験的に示された。

なお、地上で大きな散乱強度を有するコーナリフレクタを地下における反射標識として利用できるようにするためには、コーナリフレクタの前面において、乾燥し水分を保持せず、伝搬特性が大気中と大きく変わらない発泡スチロール等で満たすことが考えられる。但しこの方法が現実の地下探査に有効であるかどうかは、別途実験等での確認が必要である。

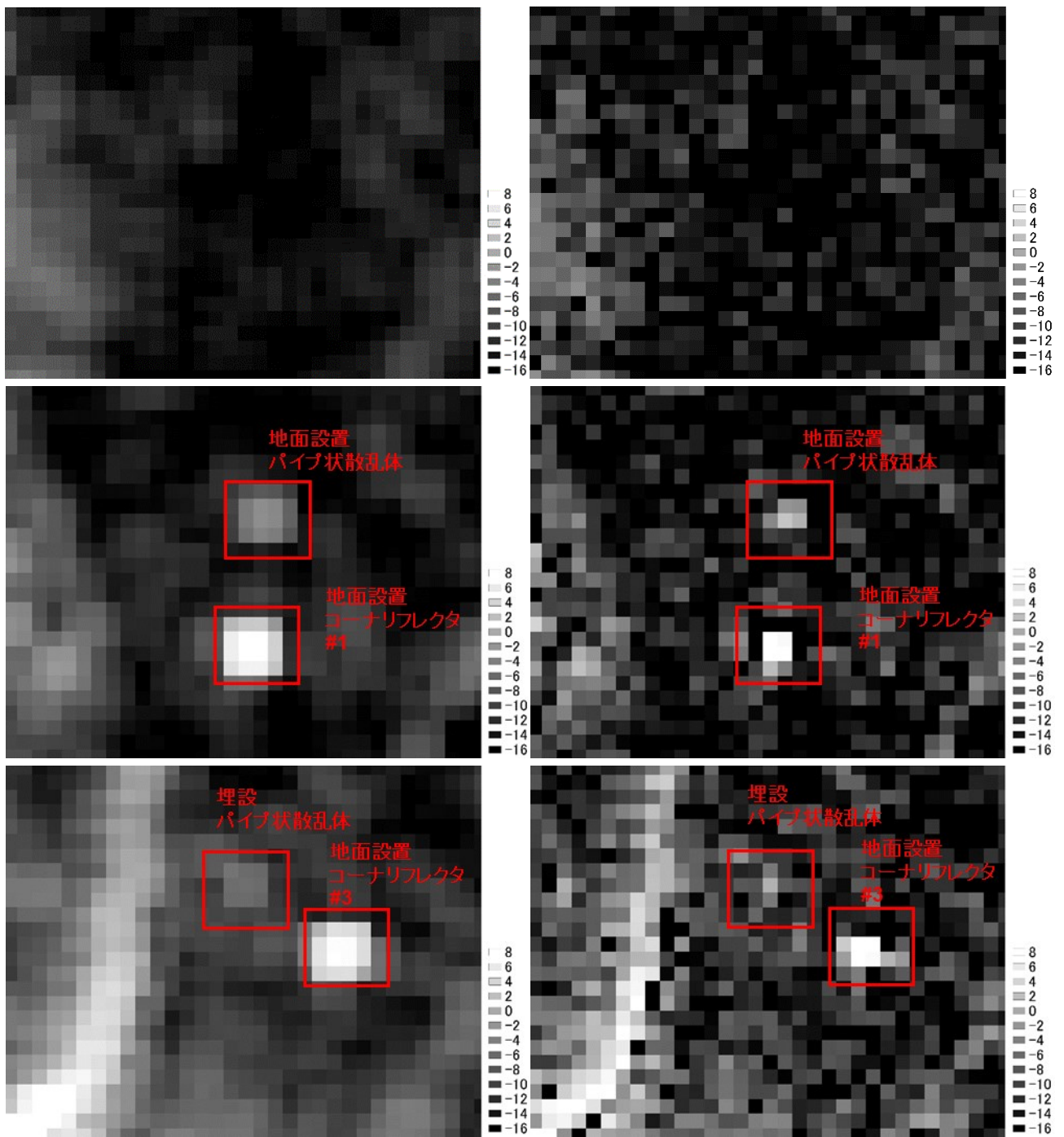


図3.71 昼間軌道（ビーム番号U2-9）における、供試体設置前、Phase 1及びPhase 2のPALSAR-2観測画像。左図はピクセル平均化（3×3ピクセル）を行った場合、右図は行わない場合を示す。上から順に、2021年9月16日（供試体設置前）、2022年3月31日（Phase 1）、及び2022年9月15日（Phase 2）を示す。



表3.12 昼間軌道（ビーム番号U2-9）における地面設置物体が存在するピクセルの設置前とPhase 1との後方散乱係数の比較。単位はdB。

供試体	ピクセル平均化	設置前 2021/9/16	Phase 1 2022/3/31	差分
地面設置 パイプ状散乱体 (Phase 1における平均化なし時の散乱強度最大点)	3x3 pixel	-16.90	-2.49	14.41
	平均化なし	-19.47	2.64	22.11
地面設置 1.2 m コーナリフレクタ #1	3x3 pixel	-13.15	8.34	21.49
	平均化なし	-14.82	14.25	29.07

表3.13 昼間軌道（ビーム番号U2-9）における埋設パイプ状散乱体が存在するピクセルの設置前とPhase 2との後方散乱係数の比較。単位はdB。

供試体	ピクセル平均化	設置前 2021/9/16	Phase 2 2022/9/15	差分
埋設パイプ状散乱体 (Phase 2における平均化なし時の散乱強度最大点)	3x3 pixel	-16.97	-5.52	11.45
	平均化なし	-20.67	0.82	21.49

次に、夜間軌道における結果を示す。図3.72に夜間軌道（ビーム番号U2-7）における供試体設置前、Phase 1及びPhase 2のPALSAR-2観測画像を示す。Phase 2の画像において、埋設した3つの物体（コーナリフレクタ2台及びパイプ状散乱体）のうち、パイプ状散乱体とみられるエコーを見出すことができた。もう1つのエコーは標識として地面上に設置したコーナリフレクタ#4である。一方、埋設したコーナリフレクタ#1、#2が存在する領域において、3x3pixel平均化後の画像を見ると、バックグラウンドよりわずかに強度が上昇しており、概ね-7dB~-10dB程度の散乱を有しており、平均化なしの状態でも点状のエコーが観察される。しかしながら、コーナリフレクタ自体の散乱か、周囲の土壌や土留め壁が散乱に作用しているかを結論付けるのは難しい。

表3.14~表3.15に、パイプ状散乱体が存在すると推定しているピクセルの設置前と設置・埋設後の後方散乱係数の比較を示す。パイプ状散乱体からの後方散乱係数において、埋設前と比べて1 dB 増加するという事象があった。ただし、前述の通り、地上設置時においても観測毎に強度の揺らぎが数dB程度あることから、観測毎の誤差の範囲内と推定される。パイプ状散乱体の埋設時に、パイプの東側と比べて西側における土壌の分量が少なく、やや浅く埋設されていたため、2023年2月3日にパイプの西側の土壌を増やし、東側と同程度の分量とした。

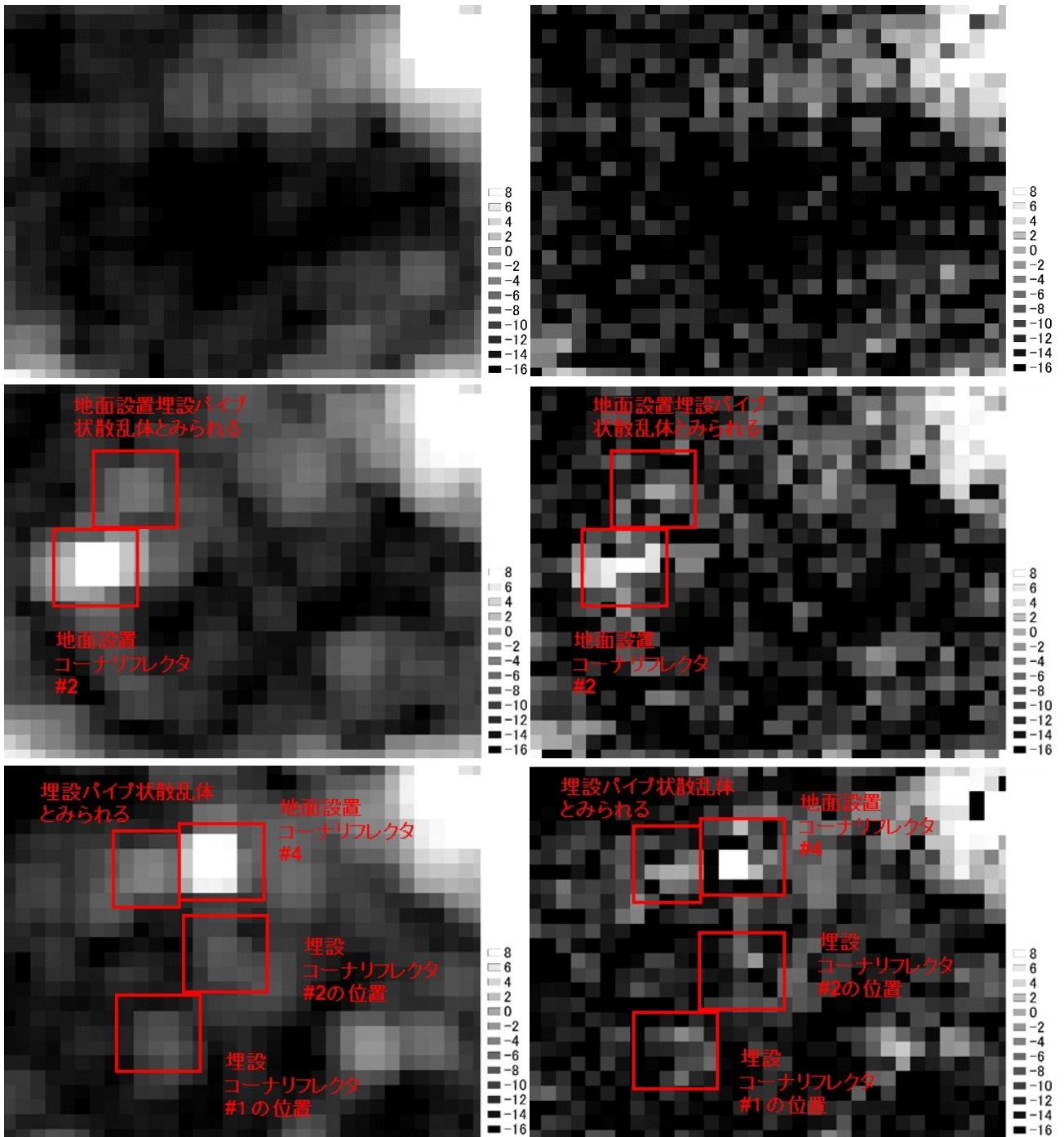


図3.72 夜間軌道（ビーム番号U2-7）における、供試体設置前、Phase 1及びPhase 2のPALSAR-2観測画像。左図はピクセル平均化（3×3ピクセル）を行った場合、右図は行わない場合を示す。上から順に、2021年2月21日（供試体設置前）、2021年11月14日（Phase 1）、及び2022年11月27日（Phase 2）を示す。

表3.14 夜間軌道（ビーム番号U2-7）における地面設置パイプ状散乱体が存在するピクセルの設置前とPhase 2との後方散乱係数の比較。単位はdB。（表3.11の一部を抜粋し再掲）

供試体	ピクセル平均化	設置前 2021/2/21	Phase 1 2021/11/14	差分
パイプ状散乱体	3x3 pixel	-11.53 * <sup>1</sup>	-4.72 * <sup>1</sup>	6.81
	平均化なし	-10.67 * <sup>1</sup>	-0.40 * <sup>1</sup>	10.27

\*<sup>1</sup> 平均化なしにおいて同強度の点が2点存在したため、3x3pixel時に高い強度の値を抽出

表3.15 夜間軌道（ビーム番号U2-7）における埋設パイプ状散乱体が存在するピクセルの設置前とPhase 2との後方散乱係数の比較。単位はdB。

供試体	ピクセル平均化	設置前 2021/2/21	Phase 2 2022/11/27	差分
パイプ状散乱体	3x3 pixel	-13.35	-3.35	10.00
	平均化なし	-10.67	0.46	10.21

(イ) 2つの物体の識別（埋設ターゲットと地上設置物体）は可能か

次に、昼間軌道（降交軌道）と夜間軌道（昇交軌道）の使い分けによる2つの物体（埋設ターゲット及び地上設置物体）の識別実験を実施した。実験のイメージを図3.73に示す。

これまでの観測から、コーナリフレクタについては一方の軌道に向けたものについては他方の軌道からのエコーがほとんど得られないことが分かっている。一方、パイプ状散乱体については、埋設時に昼間軌道時においては明瞭なエコーが得られることが前述の結果から明らかになっている。そこで、昼間軌道で埋設したパイプ状散乱体を本研究ではターゲットとして、夜間軌道に向けて設置した地上設置物体（コーナリフレクタ#4）を本研究でクラッタとして位置付け、両者を識別する実験を実施した。

図3.74に2023年2月19日（夜間軌道・ビーム番号U2-7）と2023年2月7日（昼間軌道・ビーム番号U2-6）の観測画像の比較を示す。夜間軌道で観測された画像において、夜間軌道に向けて設置したコーナリフレクタ#4のエコーが観察される。パイプ状散乱体についてはエコーがはっきりしない。一方、昼間軌道においては、パイプ状散乱体からのエコーがはっきりみられる一方、コーナリフレクタ#4はエコーがみられないことが明らかになった。

上記より、2つの軌道を使い分けることで、埋設/地面設置の各物体について、それぞれのモニタリングが可能であることが示された。

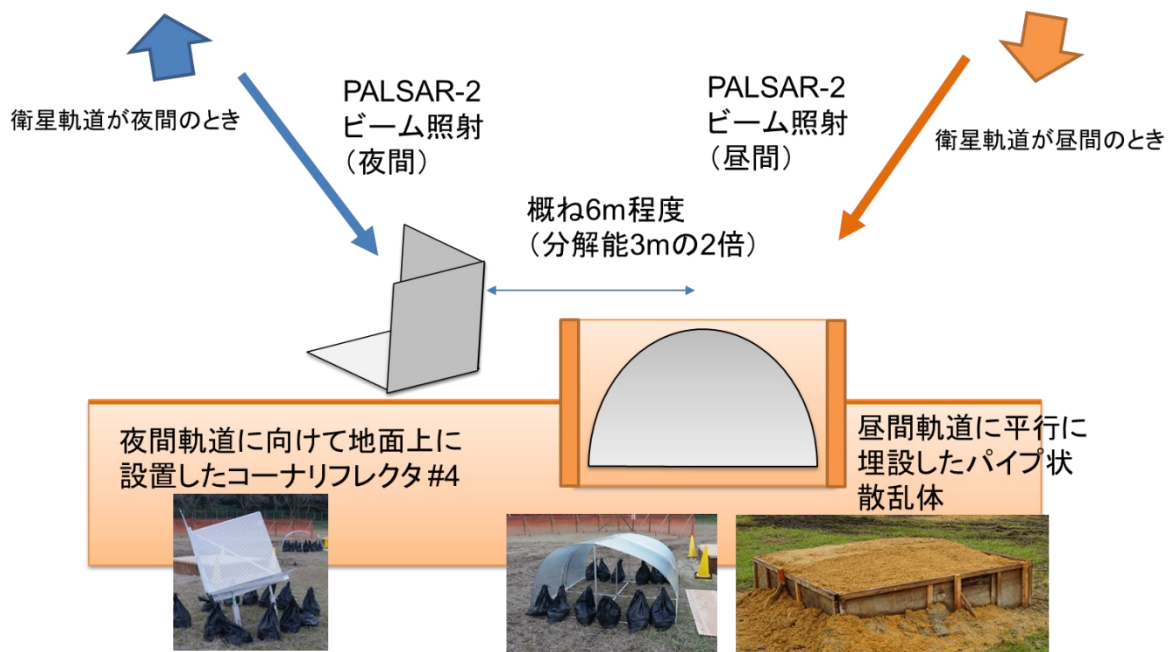


図3.73 昼間と夜間の軌道を使い分けた2つの物体の識別実験のイメージ（Phase 2）。昼間軌道は2023年2月7日に、夜間軌道は2023年2月19日に観測を実施した。

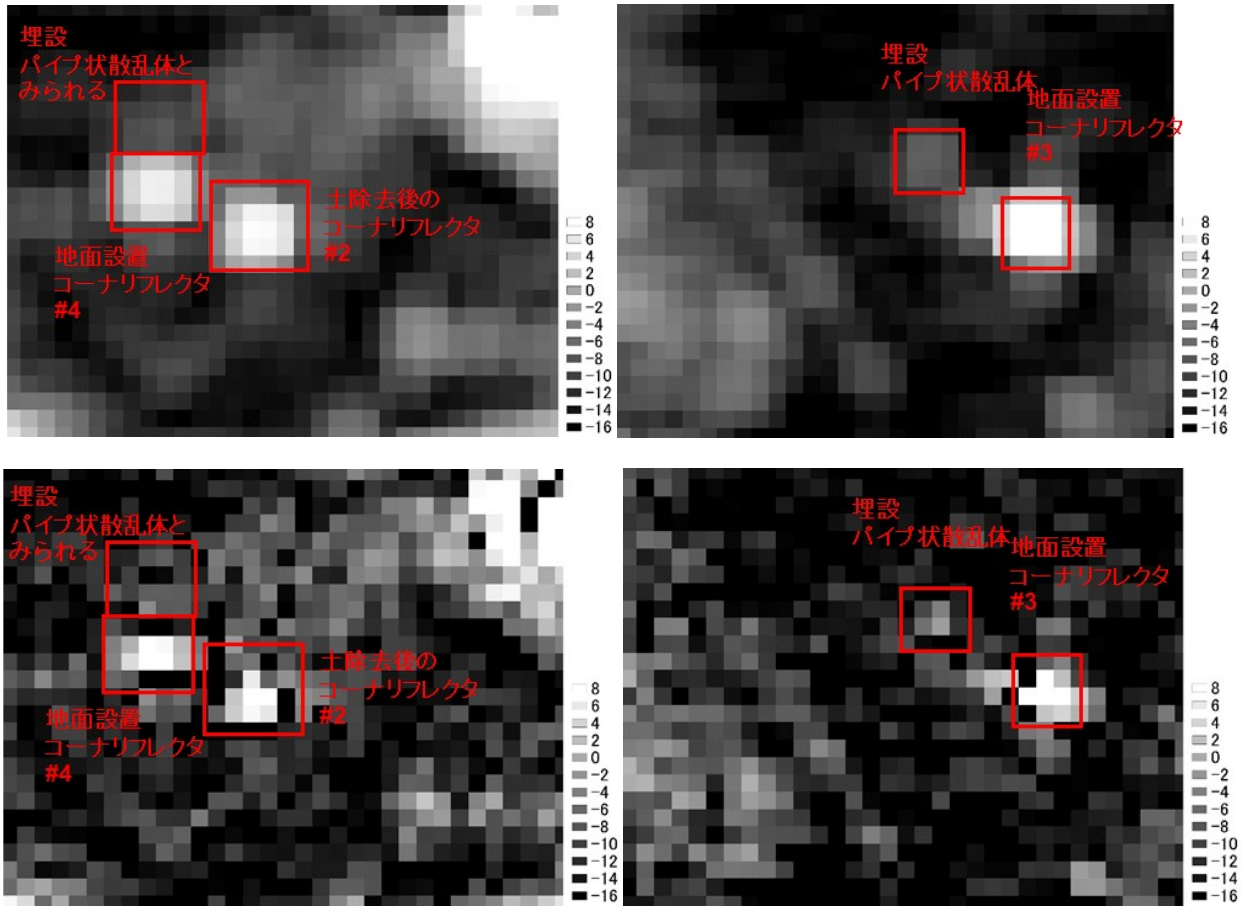


図3.74 PALSAR-2における夜間軌道（ビーム番号U2-7）と昼間軌道（ビーム番号U2-6）の観測画像の比較。左から順に、2023年2月19日（夜間軌道）、及び2023年2月7日（昼間軌道）を示す。上図はピクセル平均化（3×3ピクセル）を行った場合、下図は行わない場合を示す。

(ウ) 土の有無による干渉SAR観測の試み

さらに、エクストラの成果を狙い、世界で初めての試みとしてコーナリフレクタ#2において、土壌の有無の違いにより、干渉SARでどのような観測が得られるかを試みた。具体的には、夜間軌道（ビーム番号U2-7）において、コーナリフレクタ#2の前面の土を除去し、除去前後の画像の比較を実施した。実験のイメージを図3.75に示す。

図3.76に、2022年11月27日（土除去前）及び2023年2月19日（土除去後）の観測画像を示す。また、表2.16に土除去前後のコーナリフレクタ#2が存在するピクセルの後方散乱係数の比較を示す。土の除去後に後方散乱係数が16dB程度増大していることが分かる。

図3.77に干渉SARによる土除去前後のコヒーレンスを示す。全体的に非常に高い相関（相関係数 0.95 以上）となっており、コーナリフレクタ#2の付近における局所的な変化はみられなかった。また、図3.78に差分干渉処理による視線方向の変位量（単位 m）を示す。ピクセル平均化を行わない状態ではランダム状の変化となっており、個別のピクセルにおける土除去前後の変化を評価することは困難であった。またピクセル平均化を行った場合においては、コヒーレンスと同様にコーナリフレクタ#2の付近における局所的な変化はみられなかった。この原因として、視線方向の変位量を評価するにはランダム変動の影響を取り除くために平均化が必要となる一方、平均化領域（3x3ピクセルにおいて7.5 m 四方の平均化）に対して供試体の設置エリア（概ね 2x2 m）が小さいため、周囲の土壌の影響を強く受ける可能性が高いことが示唆された。さらなる研究のためには、より広範囲にわたって大型の物体を用いて実験を行う必要があることが示唆された。

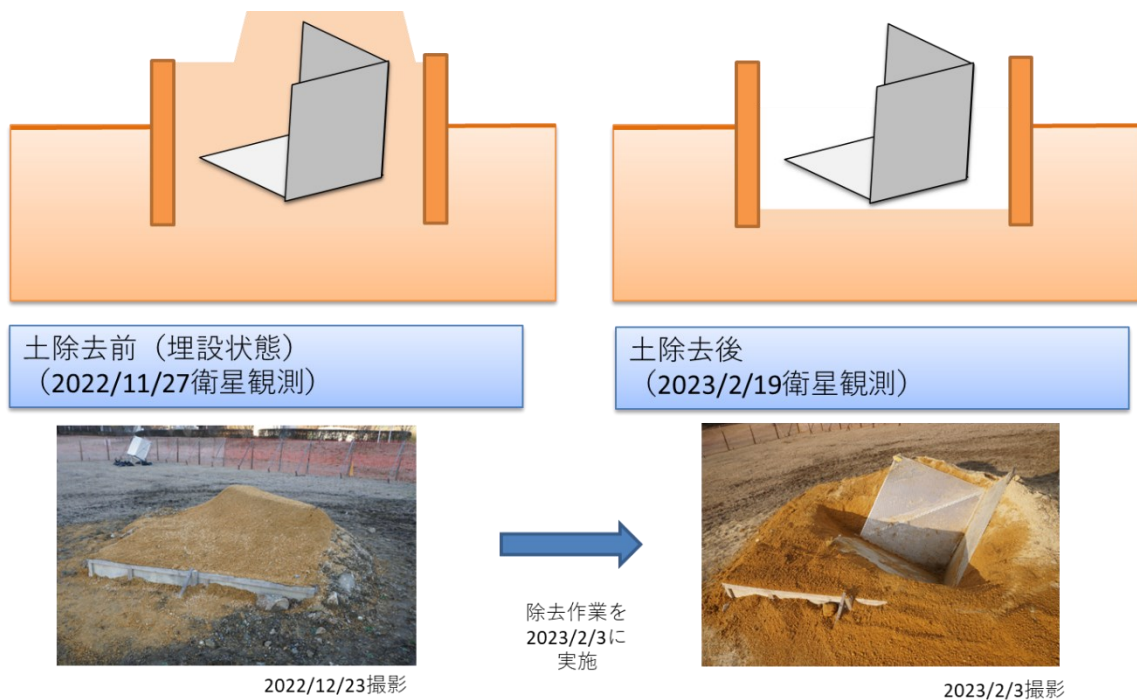


図3.75 土除去前後の干渉SAR実験のイメージ（Phase 2）。コーナリフレクタ#2の写真を併せて示す。土除去前は2022年11月27日に、土除去後は2023年2月19日に観測を実施した。

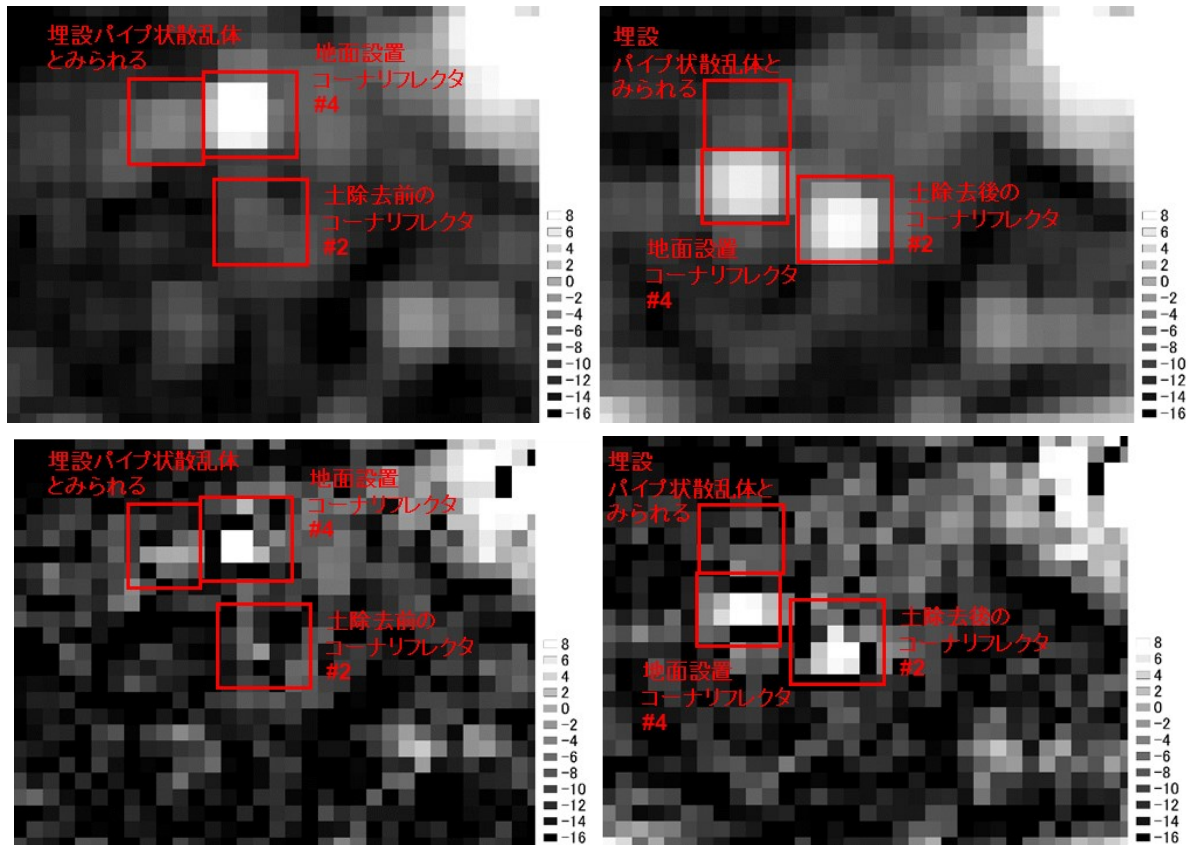


図3.76 夜間軌道(ビーム番号U2-7)におけるPALSAR-2での2回の観測画像の比較。左から順に、2022年11月27日(土除去前)、及び2023年2月19日(土除去後)を示す。上図はピクセル平均化(3×3ピクセル)を行った場合、下図は行わない場合を示す。

表2.16 夜間軌道(ビーム番号U2-7)における土除去前後のコーナリフレクタ#2が存在するピクセルの後方散乱係数の比較。単位はdB。

供試体	ピクセル平均化	土除去前 2022/11/27	土除去後 2023/2/19	差分
コーナリフレクタ #2	3x3 pixel	-8.02	7.65	15.62
	平均化なし	-1.70	14.19	15.89

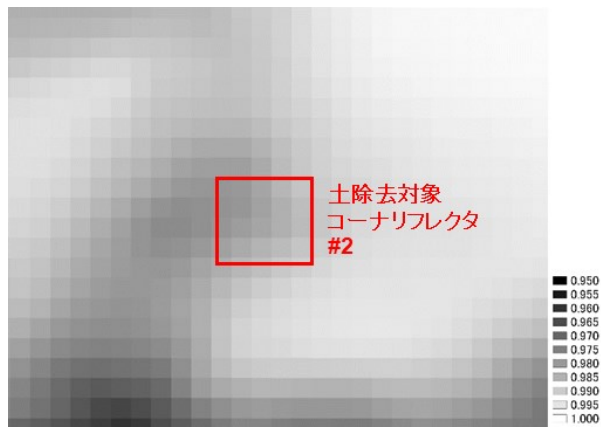


図3.77 夜間軌道（ビーム番号U2-7）におけるPALSAR-2での2回の観測（2022年11月27日（土除去前）及び2023年2月19日（土除去後））のコヒーレンス。コンター値は相関係数を示す。3×3ピクセルのデータを基に計算を実施。

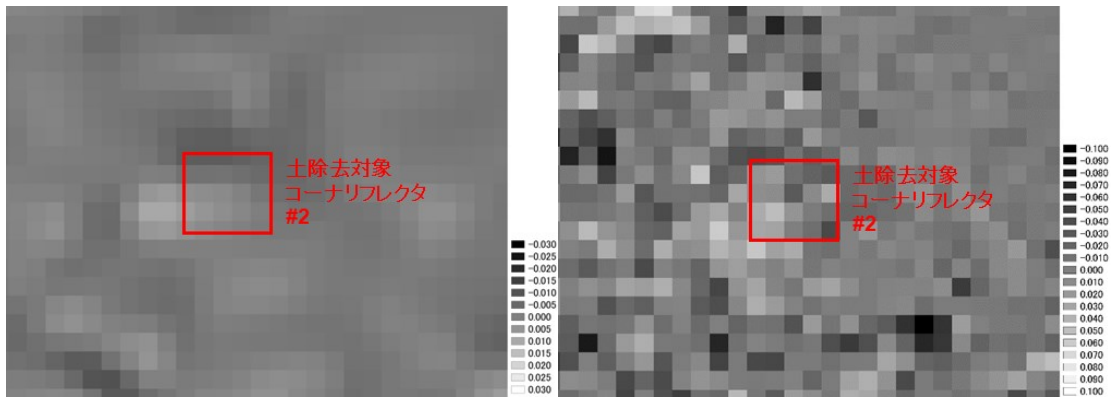


図3.78 夜間軌道（ビーム番号U2-7）におけるPALSAR-2での2回の観測（2022年11月27日（土除去前）及び2023年2月19日（土除去後））の差分干渉処理による視線方向の変位量（単位 m）。左図はピクセル平均化（3×3ピクセル）を行った場合、右図は行わない場合を示す。



(エ) まとめ

Phase 2において、下記3つの解析課題に取り組んだ。

- (ア) 埋設物エコーを衛星で受信することは可能か
- (イ) 2つの物体の識別（埋設ターゲットと地上設置物体）は可能か
- (ウ) 土の有無による干渉SAR観測の試み

その結果、埋設深の浅いパイプ状散乱体の埋設エコーを衛星で受信することが可能であること、昼間と夜間の軌道の違いを活用して埋設ターゲットと地上設置物体の識別が可能であることが示された。一方、エクストラの成果を狙い、世界で初めての試みとして土の有無による干渉SAR観測を試みたが、周囲の土壌の影響を強く受けたため、土除去前後の影響を見出すことは困難であった。

m. まとめと今後の展望

ターゲットとクラッタの分離コンセプトの実証を目的に、屋外で運用される合成開口レーダの適用例として、本研究では陸域観測技術衛星2号「だいち2号」(ALOS-2)に搭載されたPALSAR-2による屋外観測実験を実施した。実験サイトとしてJAXAの地球観測センターを選定し、1年半にわたって実験を実施した。まず地面設置状態で後方散乱係数を評価した後、供試体の埋設実験を実施した結果、下記の結論を得た。

(ア) 埋設深の浅いパイプ状散乱体の埋設エコーを衛星で受信することが可能であることを明らかにした。

(イ) 昼間と夜間の軌道の違いを活用して埋設したパイプ状散乱体と地上に設置したコーナリフレクタの識別が可能であることを示した。

(ウ) エクストラの成果を狙い、世界で初めての試みとして土の有無による干渉SAR観測を試みたが、周囲の土壌の影響を強く受けたため、土除去前後の影響を見出すことは困難であることが分かった。

今後の展望として、更なる大規模な物体（よりパイプ長の長い物体）の観測実証が必要と考える。また、今回は観測機会が年数回で、かつ同一軌道条件での観測がごくわずかと限られ、同一条件での結果の比較に限界があった。一方、JAXAでは先進レーダ衛星（ALOS-4）を開発中であり、観測幅をALOS-2の50 km からALOS-4では 200 km に広げる計画である。実現すれば、観測頻度が 4 倍に増大することが期待でき、同一条件での比較や異なる供試体配置条件での検証がさらに進むものと期待される。

#### 参考文献

- [1] T. Ito, R. Katayama, T. Manabe, T. Nishibori, J. Haruyama, T. Matsumoto, and H. Miyamoto, "Preliminary study of a ground penetrating radar for subsurface sounding of solid bodies in the solar system," 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation, Nanjing, Oct. 2013.
- [2] Y. Yamaguchi, and M. Sengoku, "Detection of objects buried in sandy ground by a synthetic aperture FM-CW radar," IEICE Trans. Commun., E76-B, pp. 1297-1303.
- [3] J. Takaku, T. Tadono, K. Tsutsui and M. Ichikawa, "Quality improvements of 'AW3D' global DSM derived from ALOS PRISM," 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 1612-1615, 2018. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518360.

#### 4. 委託業務全体の成果

##### 4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

当初想定していなかった成果として、コーナリフレクタ上の土壌の有無の違いを現場において反映し、2回の衛星観測による干渉SAR観測に世界で初めて取り組んだ。結果はあいにく周囲の土壌の影響を強く受けたため、土壌の影響を評価するに至らなかったが、より大型の物体を用いた実験の必要性など、将来の研究の方向性を明らかにすることができた。

##### 4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

本研究は、室内実験・シミュレーション・衛星観測という3つの異なる手法を統合的に活用し、散乱メカニズムから屋外のフィールド観測までを網羅した研究として非常にユニークなアプローチである。現状は室内実験と衛星観測のジオメトリの違いや、シミュレーション時間・衛星観測回数等の制約を受けているが、今後制約条件が緩和されると、更なる研究の発展が期待される。

本成果は、定常的に運用されているLバンド合成開口レーダにおいて、埋設深が浅い場合に限定されるものの、パイプ状物体のモニタリングに対する有効性を示すものとなった。このことは、地面に接した状態で使用する地下探査レーダと比べてこれまで十分に活用されてこなかった衛星や航空機による埋設物のリモートセンシングの可能性を示すものとなった。先行研究では非常に乾燥した土壌という特別な状況下でのイベント観測が主体であったが、より現実的な状況で、衛星での定常観測の可能性を示したという観点で、本研究はブレイクスルーがあったと考える。

LバンドSARは、現在運用されているだいち2号（ALOS-2）に加え、JAXAでは観測幅をALOS-2の4倍とし、観測頻度を4倍に向上させた先進レーダ衛星（ALOS-4）を開発中である。実現すれば、2週間に1回の頻度で同一軌道条件でのモニタリングが可能となる。また、海外でもLバンドSAR衛星の開発が進んでいる他、新たな計画も発表されている。これらを組み合わせることで、埋設物のリモートセンシングによる探査に必要な研究や実証がさらに進み、実用化に向けた取り組みが加速されることが期待される。

##### 4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

本研究について、国際学会（ISAP2021; 2021 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)）において発表したことにより、Best Paper Award を受賞した。また、受賞結果について、JAXA研究開発部門のホームページにおいて、受賞内容を一般に公開した。また、同学会に限らず、レーダリモートセンシングや埋設物探査に関わる学会において積極的に成果を発表した。

## 5. プロジェクトの総合的推進

### 5. 1 研究実施体制とマネジメント

本研究の遂行にあたり、研究代表者と研究分担者が同じ組織に所属する点を活かし、日常的なコミュニケーションを通して密接に連携して取り組んだ。特に、研究分担者が有する実験に関わる豊富な実績と経験に基づく知見を積極的に取り入れることで、効率的・効果的な研究に取り組んだ。一方、研究の進捗状況について、外部の専門家にピアレビューいただく機会を設け、得られた意見を研究に反映した。屋外実験の実施に当たっては、先行研究においては1回限りの観測データをもとに評価する事例がほとんどである中、1年半という比較的長期間の衛星観測を、JAXA施設（地球観測センター）を活用して実現することができた。

### 5. 2 経費の効率的執行

本研究の遂行にあたっては、JAXAが保有する施設や、既存の設備備品を最大限活用することで、経費の効率的遂行に努めた。具体的には、室内実験に使用する装置についてはJAXAがこれまで整備してきた大型レーダ散乱計設備を、FDTDシミュレーションの実施に当たってはJAXAが保有する既存のシミュレーションソフトウェアライセンスを活用した。また、屋外実験においては、JAXA施設の活用により、土地の賃貸借に関わる経費を不要とした。

## 6. まとめ、今後の予定

本研究では、衛星・航空機等の飛翔体に搭載される合成開口レーダにおいて、地下埋設ターゲットを識別するための条件の把握と最適な走査方式・解析技術を明らかにすることを目的に、室内実験、シミュレーションと、衛星観測を統合的に組み合わせたアプローチで取り組み、具体的に下記の成果を得た。

### (1) 室内実験による1次元走査での埋設物・表層クラッタ分離実験

JAXAが保有する大型の室内実験装置（2次元走査型レーダ散乱計）を用いて、できるだけ少ない走査本数での埋設物探査や埋設物・表層クラッタの分離に関わる実験を実施し、以下の結果を得た。

(ア) 1次元走査であっても、適切な走査位置の選定により埋設物が予め同定できれば、砂面上に物体がある場合においても、埋設物の画像が2次元走査と同様に得られることを明らかにした。このことは、既知の物体に対する埋設物の状況変化のモニタリング時において、1次元走査が有効であることを示している。一方、1次元走査においては、わずかな走査位置の変化により、砂面上の物体によるブロッキングの影響が出現しやすいことも明らかになった。

(イ) 2次元走査時において、水平垂直格子での計測と、斜め格子での計測を比較した結果、同等のレーダ画像を得ることができた。このことは、イメージングにおいて、軌道の方向よりは、サンプリング点群の空間分布が重要であることを示唆している。

(ウ) 将来の飛翔体における埋設物観測のためのトモグラフィーを念頭に、できるだけ少ない走査本数での探査を念頭に置いて、走査本数や間隔を様々に変化させてイメージング能力の検証を行った。その結果、軌道間距離を近接させた状態で1次元本数を増やしても、S/Nの改善効果はあっても、埋設物自体の識別能力の向上はあまり期待できない点、両端の軌道間距離を確保すれば（本実験では、砂面からアンテナまでの高さと同スケールの水平距離）、エリアジングの影響を抑制できる範囲で本数を絞り込んでも（本実験では10本弱のオーダー）、埋設物のモニタリング能力の向上が期待できることが分かった。

### (2) 比較対照となる計算機シミュレーション

室内実験の比較対照として、FDTDによるイメージングシミュレーションを実施し、室内実験の妥当性の検証や散乱メカニズムの明確化、屋外実験計画へのフィードバックに取り組んだ結果、下記の結論を得た。

(ア) FDTDシミュレーションの出力結果に対して、室内実験と同等の合成開口処理を行うルーチンを開発した結果、室内実験を再現するにあたり同様の合成開口シミュレーションが可能であることを確認することができた。

(イ) 室内実験を模して、コーナリフレクタを砂面上に1個設置し、1個埋設した状態でのシミュレーションを実施した結果、砂面上物体によるブロッキング効果を可視化することに成功した。また、砂面上物体からやや離れた位置での走査により埋設物体のイメージング画像を得ることができた。併せて、砂内部の屈折の影響の可視化から、埋設時のコーナリフレクタの角度を地面設置時よりもより天頂方向に近い角度（天頂から15度）と定め、屋外実験に反映した。

(ウ) 衛星観測によって埋設物の可視化が確認できたパイプ状物体を対象に、シミュレーションを実施した。B-scope画像において、パイプ状物体に対しては、コーナリフレクタと異なりレンジマイグレーションによる典型的な放物線パターンが確認できず、層状となることが確認できた。一方合成開口後の画像においても層状となることが確認できた。このことは、埋設パイプ状物体に特化した合成開口手法によるイメージング能力の改善への期待を示唆する結果となった。また、入射角を変えた観測でも同等のイメージが得られたことから、多彩な入射角を組み合わせたトモグラフィー等への応用が期待できる結果となった。

### (3) 屋外埋設物探査への応用のための衛星観測実験

ターゲットとクラッタの分離コンセプトの実証を目的に、屋外で運用される合成開口レーダの適用例として、本研究では陸域観測技術衛星2号「だいち2号」（ALOS-2）に搭載されたPALSAR-2による屋外観測実験を実施した。実験サイトとしてJAXAの地球観測センターを選定し、1年半にわたって実験を実施した。まず地面設置状態で後方散乱係数を評価した後、供試体の埋設実験を実施した結果、下記の結論を得た。

(ア) 埋設深の浅いパイプ状散乱体の埋設エコーを衛星で受信することが可能であることを明らかにした。

(イ) 昼間と夜間の軌道の違いを活用して埋設したパイプ状散乱体と地上に設置したコーナリフレクタの識別が可能であることを示した。

(ウ) エクストラの成果を狙い、世界で初めての試みとして土の有無による干渉SAR観測を試みたが、周囲の土壌の影響を強く受けたため、土除去前後の影響を見出すことは困難であることが分かった。

今後、先進レーダ衛星（ALOS-4）の打ち上げが控えており、観測頻度の向上が期待されるところから、トモグラフィー等の新たな観測技術の進化の方向性も踏まえつつ、埋設物探査を含むリモートセンシングの発展的な研究に取り組む予定である。

## 7. 研究発表、知的財産権等の状況

### (1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	該当なし
学会発表	5件
展示・講演	該当なし
雑誌・図書	該当なし
プレス	1件
その他	該当なし

### (2) 知的財産権等の状況

該当なし

### (3) その他特記事項

該当なし