

京都大学MUレーダーで宇宙ごみの姿を捉える

～観測波長より小さいスペースデブリのサイズやスピンの推定に成功～

概要

高度数百 km の地球周回軌道上にあるスペースデブリ（宇宙ごみ）のうち、レーダー観測装置の波長と比較して、大きさが同程度以下のスペースデブリのサイズ、スピン、概形等の状態の推定をする観測手法を提案し、大型大気レーダーである京都大学生存圏研究所 MU レーダー（周波数 46.5 MHz、波長 6.45 m）を用いて、実際の観測に成功しました。

1. 背景

1957 年に人類最初の人工衛星が打ち上げられて以降、数多くの人工衛星が打ち上げられてきました。これらの打ち上げに使用されたロケットの上段ステージや役割を終えた人工衛星などの機能を持たない人工天体はスペースデブリと呼ばれています。スペースデブリの飛行速度は秒速 8 km 程度あり、わずか数 cm 程度の大きさでも運用中の国際宇宙ステーション、人工衛星などに大きな被害を引き起こします。現在は、10 cm 以上のデブリ 2 万個以上が確認されています。近年、デブリ同士の衝突によりデブリの総数が劇的に増加した事例があり、スペースデブリが連鎖的に自己増殖し続けるケスラーシンドロームと呼ばれる現象の発生が懸念されています。今後、持続的な宇宙開発利用を進めるに当たり、スペースデブリ発生抑制や除去、人工衛星等への接近や衝突の予測等、宇宙空間における環境への配慮が不可欠となっています。そのため、世界中の機関によって、地上に配置された光学望遠鏡やレーダー観測装置によって、定常的にデブリ観測が行われています。

スペースデブリのサイズ、スピン、形状等の状態を知ることは、デブリ軌道の長期的な推移や宇宙物体との衝突可能性の評価、スペースデブリに接近して除去する場合等で必要となります。本研究では、数百 km の低高度の地球周回軌道上のスペースデブリの状態に関する情報を、観測対象デブリよりも観測波長が長いレーダー観測装置を用いて得ることを目標としています。デブリ観測用途ではない大気観測用大型レーダーは、デブリ観測専用施設と比較すると波長が長いために分解能は劣るものの、その観測高度範囲においては低軌道上のデブリなどは十分に観測可能です。また、光学望遠鏡との比較では、天候に左右されない長所があります。

2. 研究手法・成果

これまで、観測対象と比較して観測波長が短く、レンジ（距離）の分解能が高いレーダー観測では、レンジ・ドップラー・インターフェロメトリ（RDI）法と呼ばれる、自転する物体の回転中心からの距離によってドップラーシフト（相対速度により変化する周波数）が異なることを利用し、ドップラーシフトの情報とレンジ方向の距離情報を元に形状を推定する手法が提案されています。実際にドイツの FGAN レーダー（波長：数 cm）を用いて、全長 30 m 程の宇宙ステーション「ミール」などの形状推定を行った例があります。

本研究では、レーダーの観測波長と同程度、あるいは、小さいデブリのサイズ、スピン、形状等の状態を推定することを目標としています。そのために、京都大学の佐藤亨博士によって提案されたシングル・レンジ・ドップラー・インターフェロメトリ（SRDI）法と呼ばれる手法を適用しました。具体的には、自

転するスペースデブリから後方散乱される信号を、回転周期以上の観測時間を通して、レーダー観測施設にて取得し、観測された時系列データに信号処理を行うことで時間-周波数情報を取得し、これらの情報を元にサイズ、スピン、形状等を推定する手法です。この SRDI 法はレンジ分解能が長い（波長が長い）レーダー施設を想定しており、従来の RDI 法で必要な高精度のレンジ方向の情報は使えない場合でも、スペースデブリの回転 1 周期分以上の観測から得られるドップラーシフトの情報をを用いて補完します。取得データから時間情報とデブリの回転に起因するドップラーシフトの変化を抽出することが可能であり、このドップラーシフトの情報は回転物体の大きさの情報を含みます。これらの時間周波数解析結果から回転物体の概形を推定することが出来ます。

SRDI 法の有効性は数値シミュレーションによって理論上は確認されていましたが、まだ実際の観測に基づく実証実験がなされていなかったために、今回、実際の観測を実施して、その手法の有効性を示しました。本研究では、周波数 46.5 MHz（波長：6.45 m）を用いる VHF 帯大型大気レーダー（京都大学生存圏研究所 MU レーダー）を用いて SRDI 法の実証実験を行いました。MU レーダーの波長と比較して、大きさが同程度あるいは小さい観測対象のレーダーデータを実際に取得して SRDI 法を適用しました。観測を実施する際に問題となるのが、デブリからのエコー（信号）が微弱であり、かつ、観測時間が短い（本研究の例では 10-15 秒程度）点です。これらのデータから有意な特徴を導くためのデータ解析手法として、時間分解能、周波数分解能が高い信号処理手法の適用を提案することで、姿勢変化に起因するドップラーシフト情報を抽出して、サイズ、スピン、概形を推定することができました。

3. 波及効果

本研究で実証したデブリの観測手法は、様々な観測波長に適用可能です。1 cm 以下のデブリは比較的衝突効果が小さく、10 cm 以上のデブリは定常的に世界中の光学望遠鏡やレーザー観測装置によって定常的に観測されています。そのため、1 cm から 10 cm の間のサイズのデブリの軌道分布や特性を把握することが重要な課題となっています。スペースデブリ観測専用のレーダー観測装置は、S 帯や X 帯（波長：10 cm-3 cm）が用いられることが多いですが、本研究で実証した SRDI 法を適用することにより、1 cm から 10 cm 程度のスペースデブリのサイズやスピン等の状態を観測することが期待されます。また、京都大学 MU レーダーのように、本来はスペースデブリの観測用途ではない既存のレーダー観測装置に、本研究の手法を適用することで、デブリの総合的な観測能力を向上されることが期待できます。

4. 今後の予定

持続的な宇宙開発利用を進めるために、スペースデブリ問題への工学的対応に関して総合的に取り組む予定です。本研究の発展として、地上のレーダー観測装置によるスペースデブリの状態推定の精度向上、および、軌道推定の精度向上を目指します。また、人工衛星に搭載した光学望遠鏡による軌道上からのスペースデブリの観測の可能性について検討します。さらに、10 cm 以下の微小スペースデブリの軌道分布モデルの構築、スペースデブリの除去戦略や除去手法の研究を推進します。

＜論文タイトルと著者＞

掲載誌：日本航空宇宙学会論文集 Vol. 64, No. 3, 2016 年 6 月号, 189-199 ページ

論文タイトル：「京都大学 MU レーダーを用いたスペースデブリの観測手法に関する研究」

(Study on Space Debris Observation Method Using Kyoto University MU Radar)

著者：河原 淳人¹⁾（かわはら あつひと）、岩堀 太紀¹⁾（いわほり たいき）、山川 宏¹⁾（やまかわ ひろし）、佐藤 亨²⁾（さとう とおる）、山本 衛¹⁾（やまもと まもる）、橋口 浩之¹⁾（はしぐち ひろゆき）

所属：1) 京都大学生存圏研究所、2) 京都大学大学院情報学研究科

＜研究費＞

日本学術振興会 科学研究費補助金：基盤研究（C）15K06600、および、

京都大学生存圏研究所：MU レーダー・赤道大気レーダー全国国際共同利用

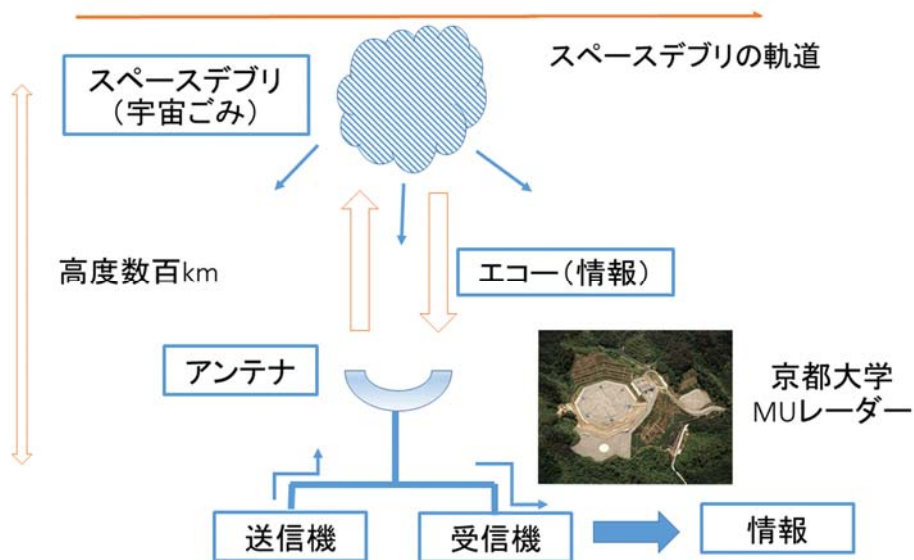


図 1 : レーダーから送信された後、スペースデブリから後方散乱されるエコー (信号) を、レーダー観測施設にて取得し、信号処理を行うことによって、スペースデブリの状態を推定します。

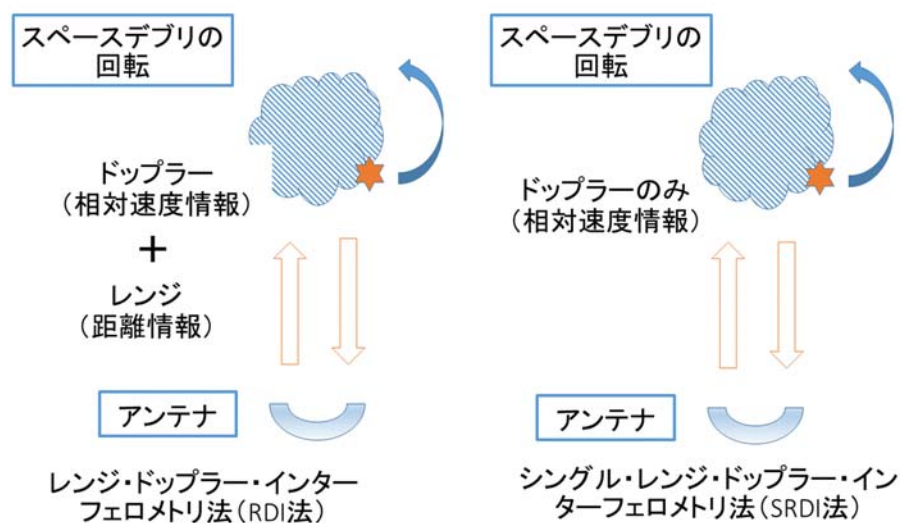


図 2 : RDI 法 : 自転する物体の回転中心からの距離によってドップラーシフトが異なることを利用し、相対速度の情報と距離情報を使用します。SRDI 法 : 距離情報を用いず、相対速度の情報を用います。

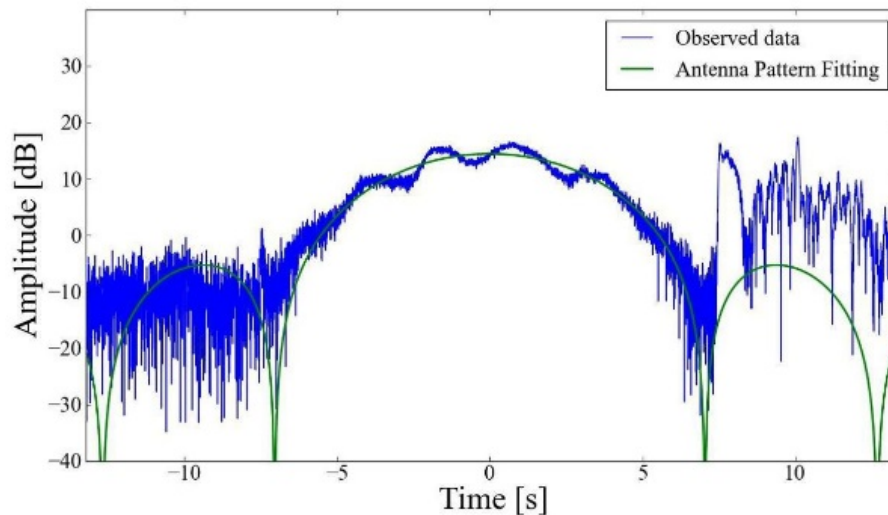


図 3：ロケット起源のスペースデブリのレーダー観測データ例。観測開始時刻からの経過時間を横軸に取り、高度 826 km におけるエコー（信号）の時間変化を縦軸に示しています。スペースデブリは直上を通過したため、受信電力の強度変化はレーダーの受信感度の形状を反映しています。−5 秒から +5 秒にかけて、スペースデブリの回転に起因して、エコーも変動しています。

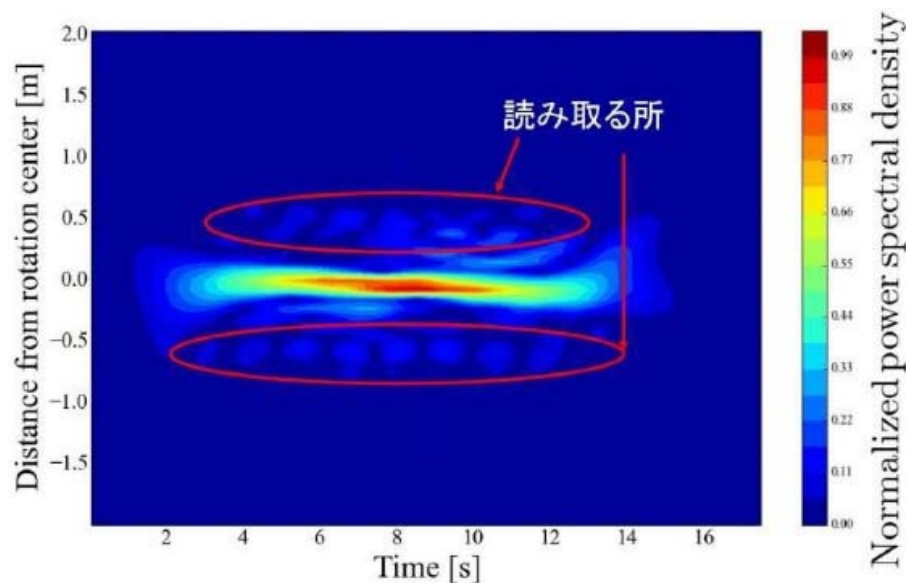


図 4：時間周波数解析結果の一例：ロケット起源のスペースデブリの観測データからデブリの重心の軌道運動成分をキャンセルしたうえで、デブリの姿勢回転の影響を抽出し、スピン周期（約 5.6 秒）を求めます。さらに、周波数解析により、デブリの自転軸と電波が散乱される点との相対距離の時間履歴を示したのが本図です。重心速度ドップラーの周辺に現れるスピンドップラーは 20 ~70 cm の領域に現れているため、サイズが 40 ~140 cm 程度の円筒形のロケットの衛星アダプタと推定されます。別途、マイグレーション法という信号処理を行った結果からも、ほぼ円形と推定されました。