

G1

## 京都大学におけるスペースデブリの取り組み Space Debris Studies at Kyoto University

○山川 宏 (京都大学)

○Hiroshi Yamakwa (Kyoto University)

本発表では、京都大学のレーダによるデブリ観測成果と、帯電によるデブリ低減手法の提案内容について報告する。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を、シングル・レンジ・ドップラー・インターフェロメトリ法を利用し、京都大学 MU レーダによって、実際に観測を実施した結果について報告する。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ある。また、帯電制御による除去手法を提案する。デブリに取り付けた荷電粒子エミッタによりデブリ自体を帯電させ、帯電デブリの運動と地球磁場の関係で働くローレンツ力で軌道を変更し、大気圏突入を目指す。この手法は姿勢制御が必要ないという点から、デブリ除去手法として優れていると考えられる。

Size, shape and spin estimation of space debris is an important task in evaluating its trajectory evolution and collision probability with resident objects in space. This paper shows the magnitude and rotation of space debris can be estimated by investigating the Doppler shift with a Single Range Doppler Interferometry (SRDI) method. The theory of SRDI method is discussed and its usefulness is confirmed by numerical simulations. Furthermore, fluctuation of Doppler shift of known space debris were successfully observed by the MU radar of Kyoto University and the size and spin rate of some space debris were successfully estimated. This paper also proposes a new method for the removal of space debris. The Lorentz force acts on electrostatically charged objects moving in the Earth's magnetic field. This implies charged space debris orbit can be controlled and debris may be removed by controlling its charge amount. In this paper, we propose various charge control sequences for debris removal and investigate their performance via numerical simulations.



# 京都大学における スペースデブリの取り組み

## Space Debris Studies at Kyoto University

山川 宏(京都大学)  
Prof. Hiroshi Yamakawa (Kyoto University)

2016年10月20日  
JAXAスペースデブリワークショップ

## Space Debris Environment

- ・ロケットの上段ステージの残骸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。
- ・微小デブリも国際宇宙ステーション、人工衛星などに大きな被害の可能性(Damage)。
- ・スペースデブリ発生の抑制や除去、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(Environment)。
- ・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を実施(Observation)。



山口皓平氏作成

# Study on Space Debris Observation Method Using Kyoto University MU Radar

学会誌:

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

論文タイトル:

「**京都大学MUR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、岩堀 太紀、山川 宏、佐藤 亨、山本 衛、橋口 浩之

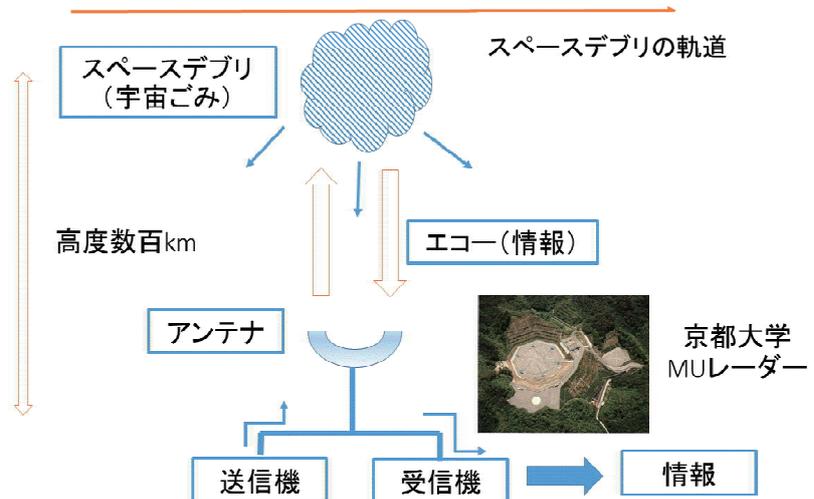
3

## Space Debris Identification

- ・スペースデブリの**サイズ、スピン、形状**(Size, Spin, Shape)等の**状態**を知るとは、デブリ軌道の長期的な推移を評価する場合、宇宙物体との衝突可能性を評価する場合、スペースデブリに接近して除去する場合等において必要。
- ・本研究では、**数百kmの低高度**(several hundred km LEO)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、長い観測波長のレーダー観測装置を用いて得ることが目標。
- ・デブリ観測用途ではない**大気観測用大型レーダー**(Middle and Upper Atmosphere Radar)などは、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。

## Space Debris Observation by Radar

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(Echo, 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(Estimation)。



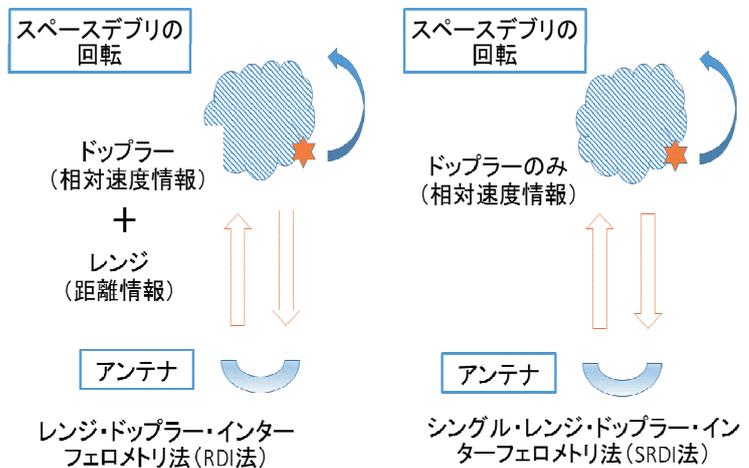
## Space Debris Observation by SRDI Method

- 従来は、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を用いて、レンジ・ドップラー・インターフェロメトリ (RDI: Range Doppler Interferometry) 法と呼ばれる、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を適用。
- 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。
- 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 (equivalent or smaller than wavelength) 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指。
- 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: Single Range Doppler Interferometry) 法と呼ばれる手法を適用。さらに、特徴を抽出するデータ解析手法に工夫。

## Space Debris Observation by SRDI Method

**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(Doppler Shift)が異なることを利用し、相対速度の情報と距離情報(Range)を使用。

**SRDI法**：距離情報を用いることなく(without range info)、相対速度の情報のみを使用(本研究で用いた手法)。



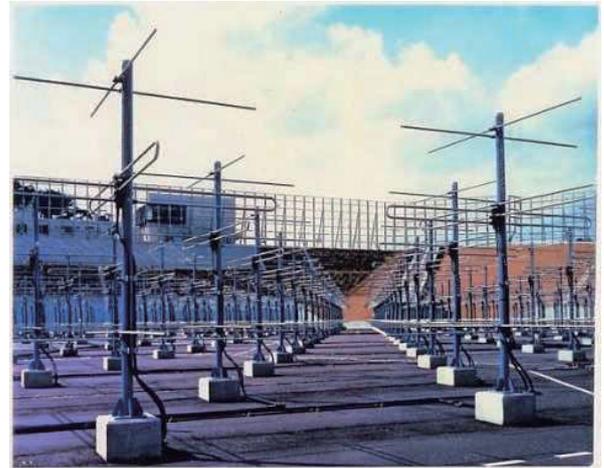
## Outline of SRDI Method

- 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(Variation in Doppler Shift)**。このドップラーシフトの情報は回転物体の大きさとスピンの情報を含む。
- SRDI法を用いて、これらの**時間周波数解析(Frequency Analysis)**を行い、回転物体の大きさ、スピン、概形を推定。
- 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(Theory)**。実際の観測に基づく**実証実験(Observation)**がなされていなかった。

# Middle and Upper Atmosphere Radar of Kyoto University

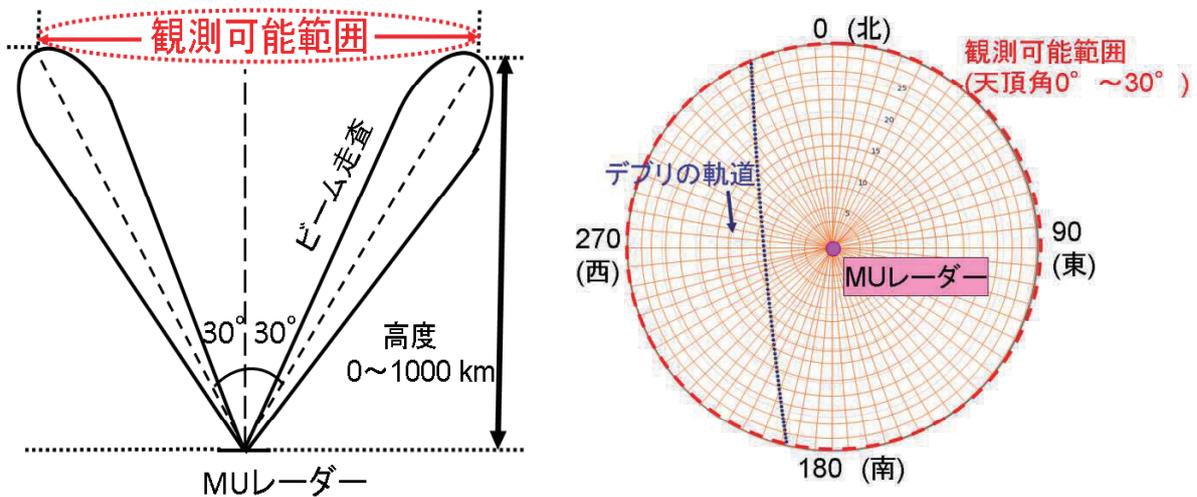


<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/DCRP/MU.html>



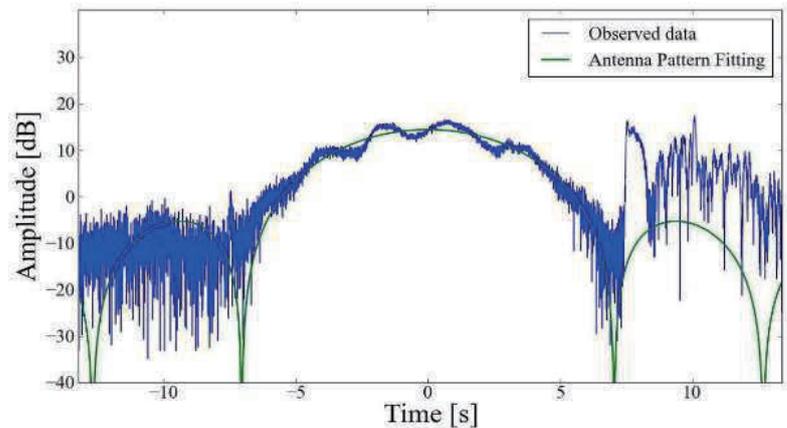
<http://www.rish.kyoto-u.ac.jp/~mu/detail.html>

## MU Radar Space Debris Observation (46.5 MHz)



## MU Radar Space Debris Observation

- ・横軸: 観測開始時刻からの経過時間(time)。
- ・縦軸: 高度826 kmにおけるエコー(信号)の時間変化。
- ・直上を通過。
- ・スペースデブリの回転に起因して、エコーも変動。
- ・デブリの姿勢回転の影響を抽出し、スピン周期 (spin period、約5.6秒) を導出。



11

## MU Radar Space Debris Observation

- ・周波数解析による、デブリの自転軸と電波が散乱される点(外周)との相対距離(Distance between scattering point and rotating center)の時間履歴。
- ・観測例では、ドップラー信号は20-70 cmの領域にあったので、40-140 cm程度の円筒形の**ロケットの衛星アダプタ(Adapter)**と推定された。
- ・さらに、物理探査の分野で広く使われている**Migration法**という信号処理を行った結果も、円形を示唆。

12

## Future Studies of Radar Observation

- ・本研究で実証したデブリの観測手法(レーダー波長6.45m、デブリサイズ1m級)は、**様々な観測波長に適用可能(Applicable to Various Wavelengths)**。
- ・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。
- ・本研究で実証したSRDI法を適用することにより、**微小スペースデブリ(Small size debris)**のサイズやスピン等の状態を観測することが期待。ただし、複数デブリからのエコーの信号処理方法等の課題。

13

## Study on Charge Control Sequence for Debris Removal Using Lorentz Force

学会誌:

日本航空宇宙学会 航空宇宙技術 (採択済、オンライン公開準備中)

論文タイトル:

「ローレンツ力を用いたスペースデブリ除去のための  
帯電制御シーケンスに関する研究」

(Study on Charge Control Sequence for Debris Removal  
Using Lorentz Force)

著者: 福島健、池田成臣、赤司陽介、中宮賢樹、山川 宏

14

## Debris Removal Using Lorentz Force

デブリにエミッタ(Electron Emitter)などを取付け



エミッタの動作で電荷 $q$ を制御



電荷 $q$ のデブリが速度 $v$ で地球磁場 $B$ 中を運動



デブリに働くローレンツ力 $qv \times B$ で軌道変更

電荷 $q$ の制御によりデブリに働くローレンツ力を制御  
 ⇒電荷 $q$ の制御によりデブリの軌道を制御

## Charge Control for Debris Removal

質量電荷比と除去時間 (初期軌道傾斜角 90 度)

帯電制御方式	質量電荷比	除去時間
離心率増大方式	0.03C/kg	約60日
長半径減少方式	0.03C/kg	約40日
近地点距離減少方式	0.03C/kg	約30日