

平成 30 年 5 月 6 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06600

研究課題名(和文)帯電現象を考慮したスペースデブリの軌道・観測・低減に関する総合的研究

研究課題名(英文)Comprehensive Research on Space Debris Trajectory, Observation, and Mitigation Considering Charging Phenomenon

研究代表者

山川 宏 (Yamakawa, Hiroshi)

京都大学・生存圏研究所・教授

研究者番号：50260013

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：人工衛星や、国際宇宙ステーションの維持と利用のために、これらに衝突して破壊する恐れのあるスペースデブリに関して、その観測手法、軌道進化、低減に関する総合的工学研究を推進した。京都大学の中高層大気レーダ(MUレーダ)を用いた観測を実施し、回転するデブリから得られるドップラー情報やエコー情報を解析することにより、スペースデブリの軌道、大きさ、スピン状態の推定手法を提案した。地球周辺電磁場の微小デブリの軌道に対する影響の評価を計算機シミュレーションにより実施した。さらに、積極的なスペースデブリの帯電量の制御を行うことで、大気圏再突入によるスペースデブリ除去が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Space debris are remnants of satellites and rocket bodies, which have hazardous effects on the maintenance and utilization of space infrastructures including the international space station. We investigated possible engineering approaches for tackling space debris issues from observation, modeling and removal points of view. Orbit determination and characterization of space debris are important tasks in evaluating its trajectory evolution and collision probability with resident objects in space. Several methods to estimate the orbit, size, and spin of space debris were studied by investigating the profiles of received signals by the Kyoto University MU radar system. The effect of electric and magnetic fields around the Earth on long-term small-scale space debris trajectory evolution have been investigated based on numerical simulation. Furthermore, it was shown space debris with charging control system can be removed by controlling its trajectory and reentering the Earth atmosphere.

研究分野：宇宙工学

キーワード：デブリ レーダ 軌道 デブリ除去 帯電

1. 研究開始当初の背景

(1) 1957年のソ連によるスプートニク1号衛星の打上げ以降、数多くの人工衛星が打ち上げられており、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る。スペースデブリの飛行速度は、人工衛星の地球周回速度と同様に秒速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す。現在既に、10 cm以上のデブリ2万個程度が確認されているが、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る。今後、持続的な宇宙開発利用を進めるに当たり、光学望遠鏡やレーダ観測装置による定常的なデブリ観測の実施、打ち上げ時や軌道運用時のスペースデブリ発生抑制、スペースデブリの人工衛星等への接近や衝突の予測、デブリ除去手法の研究の推進等による持続的な宇宙空間の利用のための研究が不可欠となっている。この背景のもと、本研究では、以下の「問い」に取り組んだ。

(2) スペースデブリ検出のための、地上に設置された、あるいは、軌道上に配置された観測装置を用いた最適なスペースデブリの観測運用とはどのようなものか、既存の大気観測用レーダ観測装置によりどの程度の精度でスペースデブリの軌道や形状推定が可能なのか、という「問い」に取り組む。

(3) スペースデブリ環境の状況把握と人工衛星に対するリスク予測に不可欠でありながら、観測不能な微小デブリが、どのような軌道分布を持ち、破碎や衝突を通じた発生時からどのように軌道進化していくのか、その結果、活動中の人工衛星にどのような影響があるのかという「問い」に取り組む。

(4) スペースデブリがもたらす、活動中の人工衛星等に対する危険の回避に向けて、デブリに装着した小型のビームエミッタによるデブリの帯電制御によって、軌道低下ひいては大気再突入によるデブリの除去を実現するための軌道制御理論とはどのようなものかという「問い」に取り組む。

2. 研究の目的

(1) 測位・観測・通信等の生活情報のための宇宙インフラや国際宇宙ステーションの維持と利用を図るために、これらに衝突して破壊する恐れのあるスペースデブリに関して、その観測、軌道進化、除去等の総合的対応に関する工学研究を推進する。

(2) デブリ専用レーダと異なり、観測波長

(6.45 m)が観測対象のスペースデブリより長い大気観測用レーダ(京都大学 MU レーダ)を用いた実際の観測による、デブリの検出、軌道推定、形状推定等の総合的な特性把握は初めての取り組みとなる(図1)。これにより、既存のデブリ専用ではない地上センサをグローバルなデブリ観測ネットワークに組み込める可能性が生じる。また、人工衛星搭載の光学センサとレーザレーダ(LIDAR)を組み合わせた未知デブリの検出やオンボードでのリアルタイム高速軌道推定も初めての取り組みとなる。

(3) 微小粒子デブリの軌道モデルについては、これまで取り組みが不十分であった地球磁場、共回転電場が、微小粒子において他の擾乱項と比較して顕著になる点に着目する。地球磁場を考慮した短期間の検討事例は存在したが、共回転電場までを考慮した、多数のデブリクラウドの長期的かつ集団的挙動に関する検討事例は初めてとなる。

(4) スペースデブリは運用中の宇宙機と衝突して故障を招くだけでなく、衝突破碎により新たに多数のデブリを生み出す可能性がある。宇宙空間の継続利用のためには、積極的にデブリを除去する必要に迫られつつある。そのため、任意の初期軌道を持つスペースデブリを、大気圏に再突入させることが可能となる帯電制御による手法を提案する。

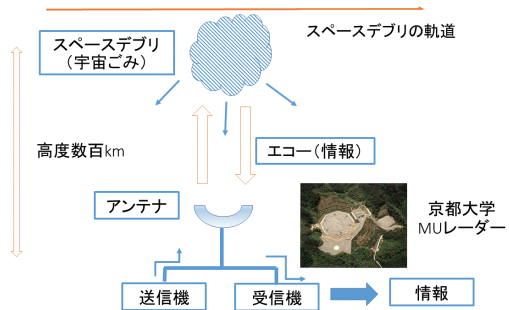


図1 京都大学 MU レーダによるデブリ観測

3. 研究の方法

(1) 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軌道や回転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観測装置を用いて得ることを目標としている。デブリ観測用途ではない大気観測用大型レーダなどは、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である。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る。実際の観測においては、滋賀県に設置された京都大学の中高層大気レーダ(MU レーダ)による観測を実施した。

(2) スペースデブリの軌道推定のために、軌

道の3次元の位置と速度を定義する、ある軌道6要素の値を想定したうえで、その結果、導かれる理論上の観測値と実際の観測値の誤差が最小となるような最小二乗法を用いて、軌道6要素を推定する。また、スペースデブリの大きさやスピン等の特性推定においては、回転するデブリから得られるドップラー情報を用いた時間周波数解析手法、および、レーダーエコー情報を用いた散乱断面積変動解析手法を用いる。

(3) スペースデブリの軌道の進化に関する解析や、軌道除去に至る軌道寿命の検討においては、従来から考慮されている重力項、大気抵抗、太陽高圧に加えて、地球周辺の電流や地場を考慮した高精度の数値積分シミュレーションを用いた。

(4) デブリ除去手法としては、取付けを前提とする小型スラスタや導電性テザー、非接触型のレーザーを用いた手法などが提案されている。スラスタを用いた手法では、デブリに取り付けたスラスタの噴射によりデブリの軌道を変更して大気圏突入を目指す。推進剤が必要となり装置の重量が増大する。また、デブリの姿勢により推力方向が変化するため、姿勢制御が必要である。導電性テザーを用いた手法では、デブリに取り付けたテザーを展開して電流を流し、電流と地球磁場の関係で働くローレンツ力によって軌道を変更して大気圏突入を目指す。この手法は必要な推進剤量を無視できるが、テザー保持のためにデブリの姿勢制御が必要である。レーザーを用いた手法では、除去衛星からレーザーをデブリに照射し、デブリの表面においてプラズマアブレーションを発生させる。その反力によってデブリを減速し、大気圏突入を目指す。この手法では必要となる電力が非常に大きく、巨大なシステムが必要となることが予想される。

研究代表者は、帯電した物体に働く電磁気力を宇宙機やスペースデブリの軌道制御に利用しようという新しい推進手法を提案した[引用文献 1-2]。具体的には、地球周辺磁場を帯電したスペースデブリが横切ることによって働くローレンツ力を利用したものであり、本研究においてもこの手法を想定した。

4. 研究成果

(1) スペースデブリを地上のレーダーによって観測し、その軌道のみならず、大きさ、スピン状態、形状の推定手法について提案し、実際の観測を通して、その妥当性や適用の限界について検証した。

(2) スペースデブリの軌道推定については、レーダーの観測データに合致するように、スペースデブリの軌道6要素の値を収束させる最小二乗手法を用いた。滋賀県に設置され

た京都大学の中高層大気レーダ(MUレーダ)による観測を実施し、軌道推定精度向上のために最適なレーダーのビーム方向や距離設定等の観測パラメタの検討を行ったうえで、軌道推定手法の精度を検証した。特に、MUレーダーのフェーズアレイアンテナとしての特性を活かした、観測範囲(天頂から30度以内)をスキャンするレーダー運用方法を検討した。

(3) 一方、地上ではなく、地球周回軌道上に配置された人工衛星に搭載された光学望遠鏡およびレーザー光による測距センサ(LIDAR)をスペースデブリの観測装置として想定する場合について、軌道推定を実施する手法を提案し、その精度について検討を実施した。人工衛星に搭載された観測装置が想定した諸元を有し、近距離からスペースデブリを追尾観測することが可能ならば、複数回の観測が可能な程度に、軌道6要素を推定可能であることが示された。

(4) スペースデブリの大きさ、スピン、形状等の特性を知ることは、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となる。スペースデブリの大きさ等の特性の把握のために、回転するデブリから得られるドップラー情報を用いた時間周波数解析手法(シングルレンジ・ドップラー・インターフェロメトリ(Single Range Doppler Interferometry法))を適用した。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い、時間-周波数情報を取得することで、形状やスピンを推定した。また、レーダーエコー情報を用いた散乱断面積変動解析手法により、対象デブリの形状を簡易モデル化したうえで、散乱断面積変動からスピンや形状を推定した。また、両手法を組み合わせることで、スペースデブリの大きさ、スピン状態、形状の推定精度の改善に取り組んだ。このスペースデブリの特性推定についても、MUレーダーによる観測を実施し、その手法の有効性を確認した。

具体的には、SRDI法の有効性を計算機シミュレーションによって理論上確認したうえで、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し、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、概形を推定する手法を構築した[雑誌論文1]。高度数百kmの地球周回軌道上にある実際のスペースデブリをVHF帯大型大気レーダ(京都大学MUレーダ)による観測を数回実施した。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(10-15秒程度)が、軌道推定に

については十分な精度を得られた。一方、形状推定については場合により十分な精度が得られない場合があり、レーダー運用時、および、データ解析手法における改善が必要である。

(5) 本研究で実証したデブリの観測手法は、より短い観測波長に適用可能であり、スペースデブリ観測専用のレーダー観測装置で用いられる S 帯や X 帯 (数 cm 波長) 波長の場合に適用できる可能性がある。

(6) さらに、レーダー方程式等により、MU レーダによる静止軌道付近にあるデブリの観測可能性について検討を実施し、スペースデブリの高度と観測可能な大きさの関係を理論的に導いた。

(7) 通常、地球磁場等に起因する電磁気的な摂動力は無視可能であるが、デブリのサイズが小さいほど電磁気的な摂動力が相対的に大きくなり、ミクロンサイズのデブリでは、電磁気的な摂動力が高次の地球重力ポテンシャル項による摂動力に次いで 2 番目に大きい力となる。従って、これらの大きさのデブリを対象とした軌道計算では、電磁気的な摂動力を考慮すること、そして、デブリの帯電量を計算することが重要となる。デブリの帯電量を、周囲のプラズマ密度および温度に依存して、その位置と時刻によって変動していることを考慮して導出した。その上で、計算機シミュレーションにより実施し、軌道要素の時間発展の傾向、および、軌道から除去されるに至るまでの軌道寿命等の観点から傾向を評価した。さらに、破砕現象に起因するデブリの軌道進化についての検討を実施した。

(8) 軌道高度の低減を目的として、スペースデブリに加速度を与えるために、地球周辺磁場を帯電したスペースデブリが横切ることによって働くローレンツ力を利用する手法の妥当性を検証した。帯電モデルを想定することによって、任意の初期軌道傾斜角からでも、スペースデブリを大気圏に再突入させることが可能であることを示した。

具体的には、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。エミッタを ON/OFF 制御することでデブリの帯電を制御し、軌道要素の変更、ひいては、高度の低下、そして、大気圏への再突入による除去を行う。帯電制御シーケンスの検討を行った結果、任意の初期軌道傾斜角のスペースデブリの大気圏再突入を実現可能であることを示した。また、大気圏落下までに要する時間は、帯電量 / 質量比に反比例することを示した [雑誌論文 2]。

<引用文献>

H. Yamakawa, S. Hachiyama, M. Bando, Attitude Dynamics of a Pendulum-shaped Charged Satellite, Acta Astronautica, 査読有, Vol. 70, 2012. pp. 77-84.

S. Tsujii, M. Bando, H. Yamakawa, Spacecraft Formation Flying Dynamics and Control Using the Geomagnetic Lorentz Force, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 査読有, Vol.36, No. 1, 2013, pp. 136-148.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

河原淳人, 岩堀太紀, 山川宏, 佐藤亨, 山本衛, 橋口浩之, " 京都大学 MU レーダを用いたスペースデブリの観測手法に関する研究 ", 日本航空宇宙学会論文集, 査読有, Vol. 64, No. 3, 2016, pp. 189-199. DOI: <http://doi.org/10.2322/jjsass.64.189>

福島健, 池田成臣, 赤司陽介, 中宮賢樹, 山川宏 " 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 ", 航空宇宙技術, 査読有, Vol. 15, 2016, pp. 101-110. DOI: <http://doi.org/10.2322/astj.15.101>

[学会発表](計17件)

鳥居拓哉他, MUレーダを用いた未知スペースデブリの軌道推定手法に関する研究, 第61回宇宙科学連合講演会, 2017年.

池田成臣他, 信楽MUレーダを用いたスペースデブリ三次元形状推定手法に関する研究", 第61回宇宙科学連合講演会, 2017年.

平田拓仁他, MUレーダによる3次元SRDIシミュレーション形状推定, 第61回宇宙科学連合講演会, 2017年.

明里慶祐他, 電磁場による微小サイズスペースデブリの軌道変化, 第61回宇宙科学連合講演会, 2017年.

明里慶祐他, 地球周辺電磁場の影響を考慮した微小デブリの軌道モデルの構築, 第60回宇宙科学連合講演会, 2016年.

西村泰河他, MUレーダを用いたスペースデブリの軌道決定手法の確立, 第60回宇宙科学連合講演会, 2016年.

岩堀太紀他, MUレーダを用いたスペースデブリの形状推定の精度向上, 第60回宇宙科学連合講演会, 2016年.

山川宏, スペースデブリの現状と対策～観測・軌道・低減～, 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会(SI2015 Nagoya). 2015年.

山川宏, 京都大学におけるスペースデブリの取り組み, 第8回スペースデブリワークショップ, 2016年.

池田成臣他, 帯電物体の軌道制御手法とスペースデブリ除去への応用, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 2015年.

岩堀太紀他, MUレーダーを用いたスペースデブリ形状推定における可能性, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 2015年.

岩永直也他, スペースデブリ観測衛星システムの研究, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 2015年.

増成一樹他, 地球磁場および電場の影響を考慮した微小スペースデブリの軌道推移に関する研究, 第59回宇宙科学技術連合講演会, 2015年.

Naruomi Ikeda, et al, Shape and Orbit Estimation Technique for Space Debris Observation Using MU Radar, AMOS (Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference), 2017.

Keisuke Akari. et al. Changes in an Orbital Motion for Small Space Debris Due to Electromagnetic Perturbations, 68th International Astronautical Congress, 2017.

Kento Hoshi, et al, Study of the Effects of the Lorentz Force in Low Earth Orbit on Objects with High Area-to-mass Ratio, 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

Keisuke Akari, et al, Development of an Orbital Model for Small-Sized Space Debris Considering Electromagnetic Fields around the Earth, 31st International Symposium on Space Technology and Science, 2017.

[その他]

京都大学ホームページ、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, 2016年6月6日, www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2016/160605_1.html

産経新聞夕刊12面, 「宇宙ゴミ」大気レーダーで観測成功...地球周辺の2万個ゴミ...衝突回避・除去に役立つ可能性 京大, 2016年6月6日.

SankeiBiz ホームページ, 「宇宙ゴミ」大気レーダーで観測成功...京大 衝突回避・除去に活用も, 2016年6月6日. <http://www.sankeibiz.jp/compliance/news/160606/cpc1606061422001-n1.htm>

京都新聞夕刊8面, 「宇宙ごみ 形や大きさ解析 京大グループ 除去につながる成果, 2016年6月16日.

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 岩永直也「スペースデブリの軌道上光学観測に関する研究」, 2016年3月

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 増成一樹「地球周辺電磁場を考慮した微小スペースデブリの軌道推移に関する研究」, 2016年3月

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 岩堀太紀氏「MUレーダーを用いたスペースデブリの形状推定の精度向上に関する研究」, 2017年3月

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 西村泰河氏「MUレーダーの観測によるスペースデブリの軌道決定手法に関する研究」, 2017年3月

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 池田成臣「MUレーダーを用いたスペースデブリの三次元形状推定に関する研究」, 2018年3月

京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士論文, 明里慶祐「ローレンツ力を考慮した微小スペースデブリの軌道進化に関する研究」, 2018年3月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 福島健「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」, 2016年3月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 小林優太「衛星観測によるスペースデブリの軌道決定手法に関する研究」, 2016年3月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 荒木亮輔「エコー強度を用いたスペースデブリの形状とスピンの推定」, 2017年3月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 手嶋智樹「MUレーダーにおけるスペースデブリの観測性能に関する研究」, 2017年3月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文, 新城藍里「衛星搭載光学観測装置によるスペースデブリ軌道決定手法に関する研

究」, 2018 年 3 月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文,
田井宏「破碎現象によるスペースデブリ
の軌道進化に関する研究」, 2018 年 3 月

京都大学工学部電気電子工学科卒業論文,
三木淳平「MU レーダーによる静止軌道
デブリの検出可能性に関する研究」, 2018
年 3 月

6 . 研究組織

(1)研究代表者

山川 宏 (YAMAKAWA, Hiroshi)
京都大学・生存圏研究所・教授
研究者番号 : 5 0 2 6 0 0 1 3