

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560973

研究課題名(和文) 積極的な帯電によるプロペラントレス超小型衛星編隊飛行

研究課題名(英文) Propellantless Satellite Formation Flight by Positive Use of Satellite Charging

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：人工衛星における帯電現象は、放電等による機器の破損の可能性があるために、通常は回避すべき現象である。本研究では、逆に、電子ビーム等の利用により積極的に人工衛星を帯電させることで、推進力として利用する可能性を検討をした。地球周回軌道においては、帯電衛星と地球磁場との相互作用により生じるローレンツ力による微小推力は、複数の衛星の編隊飛行維持に利用する可能性があることを示した。太陽周回軌道においては、衛星と小型の小惑星の帯電によって発生するクーロン力と重力を組み合わせると小惑星の軌道を微修正することが可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Satellite charging is usually avoided for discharging phenomenon. However, this research investigated the positive use of satellite charging by ion/electron emitting for possible propulsive force on the satellite dynamics. A charged satellite on an Earth orbit is propelled by Lorentz force as a charged particle moves in a geomagnetic field. The Lorentz force itself is quite small, while it can be used for maintaining a formation flight. A charged spacecraft in a heliocentric orbit with a charged tiny asteroid in its proximity produces Coulomb force. This Coulomb force with a combination of gravity force is shown to change the asteroid orbit quite moderately.

研究分野：宇宙工学

キーワード：衛星帯電 軌道制御

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 一般に、人工衛星の帯電は、地球周辺のプラズマ中のイオンや電子の衝突により起きる。日照時には、光が衛星表面に当たることで表面の電子が光電子として真空中に放出されやすいために、衛星電位は一般に正の値(+数V~数十V)になり、逆に日陰の場合は負の値になる。本研究においては、この衛星帯電量を積極的に制御することにより、地球磁場との相互作用によるローレンツ力、あるいは、帯電衛星間のクーロン力による相対位置制御を行う手法を構築する。本研究での衛星の帯電量は、能動的な電子放出あるいは、イオン放出により制御することを想定しており、既に CLUSTER 衛星等で搭載されているイオン電子エミッタと同じ原理の軽量の装置を用いる[1]。イオンあるいは電子放出量を比推力換算すると10の10乗以上に相当するために、ほぼプロペラントレスな推進機関と捉えることができ、衛星運動量、および、周辺プラズマ環境に与える影響は無視可能である。帯電量制御に必要な電力は1W程度であり、また、帯電量制御に要する時間は数ミリ秒であるために、衛星の軌道ダイナミクスという観点からは追従に要する時間遅れは無視してよいオーダーである。

(2) King 等[2]はクーロン力による衛星相対位置制御の概念を検討し、Natarajan と Schaub[3]は2つの帯電衛星を想定した場合に、相対的な位置関係が保たれる平衡状態が存在することを示し、平衡状態に保つための軌道制御則を提案し、また、3機以上の帯電衛星の場合にも平衡状態がある可能性を示唆した。Streetman と Peck[4]は、1機の帯電衛星と地球磁場間のローレンツ力により軌道要素の制御が可能であり、例えば重力のみを想定した場合と比較して、低高度での太陽同期軌道が実現可能であることを示した。

(3) 研究代表者は、これまで、クーロン力による2機の衛星の相対位置制御において従来考慮されていなかったデバイ長を軌道制御手法に取り入れた[5,6]。また、H21~H23年度の科学研究費補助金(挑戦的萌芽研究、研究代表者)により、円軌道上の帯電していないターゲット衛星に対する帯電衛星の相対的な運動方程式を導き、地球磁場と帯電衛星の間のローレンツ力によって軌道面内における任意の2地点間を実現するための解析的な条件を導き、また、数値解法によって最小の帯電量による最適な移行軌道を求めた[7,8]。また、自然力を用いた人工衛星の姿勢制御方法として、重力傾斜トルクを利用した手法は今までに用いられてきたが、これのみでは制御できる範囲が制限されている。しかし新たに、宇宙機重心から離れた位置における帯電部分が地球磁場中を移動する際に発生するローレンツ力によるトルクという概念を提

案し、重力傾斜トルクにローレンツ力によるトルクが加わることでどのような姿勢運動が可能になるかを考察した[9,10,11]。さらに、通常は重力だけで構成される3体問題に、帯電衛星間のクーロン力を導入できるよう理論的に拡張を行った[12]。

## 2. 研究の目的

(1) 衛星における帯電現象は、放電の危険性、観測への支障が予見され、CLUSTER 衛星などで周辺のプラズマ空間電位と等しくなるように衛星を中和していることからもわかるように、通常は回避すべき現象と捉えられている。しかし、本研究の特色は、衛星帯電量の制御という既存の技術を積極的に用いて軌道制御に応用する点にある。

(2) 相対距離の2乗に反比例するクーロン力制御のコンセプトは、相対距離が小さい複数の超小型衛星(および、デブリ・小惑星等)の近距離編隊飛行における精密位置制御に適している。クーロン力制御の特徴は、クーロン力による、物理的にはつながっていない(構造が不要な)複数の衛星(および、デブリ・小惑星等)間の相対距離の制御である。細かいケーブルによって物理的に宇宙機をつなぐテザー衛星が張力(引力)を与えるのと比較して、クーロン力制御は空間電位に対する電荷のプラス、マイナスを制御することにより引力と反力の双方を与えることが可能である。また、一般にテザーの場合、ケーブルは柔軟構造物でありその剛性は変えられないが、クーロン力制御の場合、帯電量の制御により衛星間剛性(引力・反力の大きさ)を制御可能である。

(3) これら、電磁気力制御下の衛星軌道運動においては、重力等以外に、電磁気力のカップリングを考慮する必要がある。複数衛星を考えたときには、1つの衛星の帯電量を変化させることが他のすべての衛星との間のクーロン力に影響を及ぼす。また、帯電衛星と地球磁場間のローレンツ力は、衛星の地球相対速度、そして、地球ダイポール磁場における位置の双方の関数となる。このように非常に高い非線形性を有する軌道ダイナミクスで記述する必要がある点にチャレンジすべき点がある。

(4) 宇宙機の軌道ダイナミクスは、従来、重力、太陽光圧、大気抵抗等を考慮していたが、従来では考慮されていなかった高い非線形性を有する帯電衛星間のクーロン力・帯電衛星と地球磁場間のローレンツ力を導入するために、新しいダイナミクスに基づく軌道ダイナミクス・制御理論を展開でき、軌道工学と非線形力学・非線形制御を融合した新しい分野を開拓できる可能性がある。また、本研究は、従来と異なり推進系を搭載しない多数の超小型衛星(および、デブリや小惑星等)

によるフォーメーションフライトを提案するものであり、既存の宇宙推進システムの概念にはなかった全く新しい発想に基づくミッションの提案が可能となる。

### 3. 研究の方法

(1) ローレンツ力(軌道): 帯電衛星の相対軌道ダイナミクス: 地球磁場をダイポール磁場モデルで近似し、位置と速度の関数であるローレンツ力を地球周回円軌道の軌道要素で表現し、回転座標系における運動方程式を解析的に解く。平成23年度までの研究により、地球磁場として、簡易なダイポール磁場を想定して、円軌道上の帯電していないターゲット衛星に対する帯電衛星の相対的な運動方程式を導き、地球磁場と帯電衛星の間のローレンツ力によって軌道面内における任意の2地点間を実現するための解析的な条件を導き、また、数値解法によって最小の帯電量による最適な移行軌道を求めた[7,8]。

本研究では、帯電量を変化させることにより、与えられた初期相対位置からターゲットの相対位置まで移行させる手法について考察を行う。既に一部の結果[7,8]は得られているが、衛星帯電量をステップ状、あるいは、連続的に変化することにより、任意の2つの位置・速度の境界条件を満たす制御手法を確立することを目標とする。また、スペースデブリの低減を応用例として、スペースデブリへの電子・イオンエミッタ等の装置搭載による軌道高度の低減のための帯電量制御の手法について検討する。

(2) クーロン力(軌道): クーロン力による複数宇宙機の軌道ダイナミクスの解明: 宇宙空間に2つの帯電する衛星を置いたときには、それぞれに同符号の電荷がある場合は、反力が働くために両者は離れていき、一方がプラスで他方がマイナスの電荷を持つ場合には引力が働き両者は近づいていく。つまり、どちらの場合も平衡状態は存在しない。しかし、地球周回軌道上の衛星とともに動く回転座標系において、近接する2つの帯電した衛星を考えた場合には、衛星から見た場合にはクーロン力以外に重力、遠心力が働くために、相対的な位置が変化しない平衡点が存在することが King 等[2], Natarajan 等[3]によって明らかにされている。具体的には地球中心と衛星と共に動く座標中心を結ぶ軸(半径方向)上に2つの衛星を配置すると、適当な衛星帯電量を与えることで(帯電量の積が負値)、回転座標系において静止する。

本研究では、地球に衝突する可能性のある超小型小惑星の軌道変更による地球衝突回避のための方策として考えられている、人工衛星を小惑星の近傍に配置することによる相互の重力による軌道修正効果(重力アトラクター)を、より効率的にするために、小惑星と人工衛星に帯電装置を付加することで、クーロン力を付与する効果について検討す

る。また、惑星間軌道上で衛星を積極的に帯電させることで、太陽風のプラズマ流の運動量を推進力に変換する帯電セイル宇宙機を、地球衝突可能性のある小惑星に衝突させることにより地球衝突回避の可能性について検討する。

#### <引用文献>

Torkar, K., et al., "Active Spacecraft Potential Control for Cluster - Implementation and First Results," *Annales Geophysicae*, Vol. 19, pp. 1289-1302 (2001).

King, L. B., Parker, G. G., Deshmukh, S., and Chong, J. H., "Study of Interspacecraft Coulomb Forces and Implications for Formation Flying," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 3, pp. 497-505 (2003).

A. Natarajan, A., Schaub, H., "Linear Dynamics and Stability Analysis of a Two-Craft Coulomb Tether Formation," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol.29 no.4, pp. 831-839 (2006).

Streetman, B. and Peck, M. A., "New Synchronous Orbits Using the Geomagnetic Lorentz Force," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 30, No. 6, pp. 1677-1690 (2007).

Yamamoto, U., Yamakawa, H., "Two-craft Coulomb-force Formation Dynamics and Stability Analysis with Debye Length Characteristics," Paper AIAA-2008-7361, AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference (2008).

山川宏, 向井祐利, 矢野克之, 山本詩子, "電磁気力を用いた衛星編隊飛行", 第52回宇宙科学技術連合講演会(2008).

辻井秀, 山川宏, 矢野克之, 坂東麻衣, "ローレンツ力による衛星編隊飛行に関する一考察", JSASS-2009-4480, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 京都(2009).

辻井秀, 矢野克之, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力を用いた衛星編隊飛行のダイナミクスと制御に関する研究", JSASS Paper 1105, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡(2010).

山川宏, 八山慎史, 第59回理論応用力学講演会, "帯電した宇宙機の振動運動と回転運動", 日本学会会議(2010).

八山慎史, 坂東麻衣, 山川宏, "ローレンツ力と重力による振り子型衛星の姿勢運動に関する研究", JSASS Paper 2106, 第54回宇宙科学技術連合講演会, 静岡(2010).

Yamakawa, H., Hachiyama, S., and Bando, M., "Attitude Dynamics of a Pendulum-shaped Charged Satellite," *Acta Astronautica*, (in press, available online 17 August 2011).

Yamakawa, H. and Bando, M., "Gravity-Coulomb Force Combined Three-Body Problem," The 18<sup>th</sup> Symposium of International Federation of Automatic Control in Automatic Control in Aerospace, Nara, Japan (2010).

#### 4. 研究成果

##### (1)平成 24 年度

地球周回軌道上にある人工衛星を積極的に帯電させ、人工衛星が地球磁場中を飛翔することで生じるローレンツ力を用いて、人工衛星の軌道制御を行う研究を行った。

まず、地球磁場をダイポール磁場モデルで近似し、位置と速度の関数であるローレンツ力を地球周回円軌道の軌道要素で表現し、回転座標系における運動方程式を解析的に解いた。また、円軌道上の帯電していないターゲット衛星に対する帯電衛星の相対的な運動方程式を導き、地球磁場と帯電衛星の間のローレンツ力によって軌道面内における任意の2地点間を実現するための解析的な条件を導いた。さらに、帯電衛星の帯電量を漸次変化させることによって、2衛星の相対軌道変動を解析的に、あるいは、数値的に導出した。また、周期的な軌道の条件を導出した。解析の妥当性については、座標原点を基準に線形化した方程式ではなく、非線形運動方程式を用いて数値積分により検証した。

さらに、帯電量を変化させることにより、与えられた初期相対位置からターゲットの相対位置まで移行させる手法について考察を行った。衛星帯電量をステップ状、あるいは、連続的に変化することにより、任意の2つの位置・速度の境界条件を満たす制御手法を確立した。地球を周回する軌道における相対的な2地点間の移行については、まずは、解析解が適用可能な2次元でその妥当性を示した後、3次元的な相対軌道移行に適用し、広範囲な相対位置制御に応用可能であることを示した。

##### (2)平成 25 年度

人工衛星を積極的に帯電させることで、人工衛星が地球磁場中を飛翔することで生じるローレンツ力を利用し、その帯電量を変化させることで、与えられた初期相対位置から、ターゲットの相対位置まで移行させる手法について、終端条件を、固定された相対位置から、位置や速度の複合的な条件で規定される終端軌道に拡張して研究に取り組んだ。2つの事項に取り組んだ。1つは、制御終了時の終端軌道の高度を最小化あるいは最大化することを目標としている。応用例としては、地球周回軌道上宇宙ごみ(スペースデブリ)にイオンエミッタ等を取り付けて帯電させることで、ローレンツ力によって軌道高度を低減させることを想定している。もう1つは、制御終了時の軌道速度を、最小化あるいは最大化することを目標としている。この具体例としては、地球に衝突する可能性のある小惑星の帯電現象を利用して、同様に帯電させた編隊飛行を行う複数の宇宙機の間が生じるクーロン力および重力によって、わずかに軌道速度を変化させ、地球衝突の確率を低減させることを目標とした。また、制御手法のみならず、人工衛星のイオン・電子エミッタに

よる帯電現象の数値シミュレーションを実施する方法についての検討に着手した。

##### (3)平成 26 年度

積極的に衛星を帯電することで軌道制御に応用する場合として、1)編隊飛行への応用を目指した地球周回軌道上における帯電現象のシミュレーション、2)スペースデブリの帯電による高度低下への応用、そして、3)惑星間軌道上を航行する帯電セイル宇宙機の地球接近小惑星の軌道修正への応用について検討した。

地球静止軌道上において、荷電粒子エミッタを能動的に用いた場合の衛星帯電特性、および、地球磁場との相互作用によって生じるローレンツ力を3次元粒子シミュレーションにより明らかにした。高精度な微小推力による編隊飛行の相対位置制御などへの応用が期待されることがわかった。

地球低軌道上にあるスペースデブリを積極的に帯電させる場合に、高度低下をさせるための帯電量の制御手法について検討を行い、軌道の離心率拡大やエネルギー減衰のために帯電量のオンオフ制御が有効であることを示した。

太陽風を推進力として用いる帯電セイル宇宙機の応用例として、地球と衝突の可能性のある小惑星に、事前に大きな相対速度で衝突させることで、地球衝突を回避することを目標として検討した。宇宙機に必要なとされるテザー長さおよび質量、小惑星との衝突を実現させるために必要となる最終誘導のための化学燃料の質量等を求め、宇宙機のリソースと達成される小惑星の軌道変更距離の関係を解析した。また、帯電セイル宇宙機の太陽風動圧の変動に注目した軌道修正法について検討した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

K. Yamaguchi and H. Yamakawa, Orbital Deflection of Potentially Hazardous Asteroids Using a Coulomb Force Attractor, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 査読有, Vol. 12, ists29, 2014, pp. Tr\_27-Tr\_33, DOI:[http://dx.doi.org/10.2322/tastj.12.Tr\\_27](http://dx.doi.org/10.2322/tastj.12.Tr_27)

山口 皓平, 山川 宏, 推力スイッチングによる帯電セイル宇宙機の軌道制御に関する研究, 航空宇宙技術, 査読有, Vol. 12, 2013, pp. 79-88 DOI: [10.2322/astj.12.79](http://dx.doi.org/10.2322/astj.12.79)

Tsujii, S., Bando, M., Yamakawa, H., Spacecraft Formation Flying Dynamics and

Control Using the Geomagnetic Lorentz Force, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 査読有, Vol. 36, 2013, pp. 136-148  
DOI: 10.2514/1.57060

〔学会発表〕(計 23 件)

Yamaguchi, K., Yamakawa, H., Study on the Required Electric Sail Properties for Kinetic Impactor to Deflect Near-Earth Asteroids, 25th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2015年01月11日~01月15日, Williamsburg, Virginia (USA)  
村中崇信, 星賢人, 小嶋浩嗣, 山川宏, 細田聡史, 西山和孝, 小惑星探査機「はやぶさ」におけるイオンエンジン中和不良時の宇宙機帯電解析, 第11回宇宙環境シンポジウム, 2014年12月10日~12月11日, 大阪府立大学(大阪市・大阪府)  
村中崇信, 星賢人, 小嶋浩嗣, 山川宏, 細田聡史, 西山和孝, イオンエンジンの中和不良時における荷電粒子による宇宙機汚染量評価, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月12日~11月14日, 長崎ブリックホール(長崎市・長崎県)  
増成一樹, 植田有紀子, 河原淳人, 山川宏, 地球磁場および地球電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, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月12日~11月14日, 長崎ブリックホール(長崎市・長崎県)  
赤司陽平, 山川宏, 中宮賢樹, ローレンツ力を用いたスペースデブリ除去および衛星衝突回避手法に関する検討, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月12日~11月14日, 長崎ブリックホール(長崎市・長崎県)  
山口皓平, 山川宏, 帯電セイル衝突を用いた地球衝突小惑星の軌道変更に関する研究, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月12日~11月14日, 長崎ブリックホール(長崎市・長崎県)  
星賢人, 村中崇信, 小嶋浩嗣, 臼井英之, 篠原育, 山川宏, 宇宙機の能動帯電を用いた軌道制御手法の推力特性の評価, 第58回宇宙科学技術連合講演会, 2014年11月12日~11月14日, 長崎ブリックホール(長崎市・長崎県)  
K. Hoshi, T. Muranaka, H. Kojima, H. Usui, I. Shinohara, H. Yamakawa, Numerical Simulation of Spacecraft Charging for Electromagnetic Orbital Control, 65th International Astronautical Congress, 2014年09月29日~10月03日, Toronto (Canada)  
Hoshi, K., Muranaka, T., Kojima, H. Yamakawa, H., Usui, H., and Shinohara, I., Numerical Simulation of Satellite Charging Control for Propellantless Orbital Control, 13th Spacecraft Charging Technology

Conference, 2014年06月23日~06月27日, Pasadena, California (USA)  
星賢人, 村中崇信, 小嶋浩嗣, 臼井英之, 篠原育, 山川宏, 荷電粒子ビーム放出を用いた衛星帯電制御の数値シミュレーション, 日本地球惑星科学連合2014年大会, 2014年04月28日~05月02日, パシフィコ横浜(横浜市・神奈川県)  
山口皓平, 山川宏, 宇宙環境を利用した地球衝突小惑星の軌道変更に関する研究, 日本航空宇宙学会第45期年会講演会, 2014年04月10日~04月11日, 山上会館, 東京大学(文京区・東京都)  
星賢人, 村中崇信, 小嶋浩嗣, 臼井英之, 篠原育, 山川宏, 帯電衛星を用いたプロペラントレスな軌道制御を実現するための衛星帯電性能の解析, 第251回生存圏シンポジウム, 兼, 平成25年度 RISH 電波科学計算機実験(KDK)シンポジウム, 2014年03月12日~03月13日, 京都大学宇治キャンパス(宇治市・京都府)  
星賢人, 村中崇信, 小嶋浩嗣, 臼井英之, 篠原育, 山川宏, 荷電粒子ビーム放出による衛星帯電現象の解析, 第10回宇宙環境シンポジウム, 2013年12月02日~12月03日, 科学技術館(千代田区, 東京都)  
星賢人, 小嶋浩嗣, 臼井英之, 篠原育, 山川宏, 村中崇信, 荷電粒子ビーム放出による衛星帯電現象の解析, 地球電磁気・地球惑星圏学会 第134回総会・講演会, 2013年11月02日~11月05日, 高知大学朝倉キャンパス(高知市・高知県)  
山口皓平, 山川宏, 宇宙環境を利用した地球衝突小惑星の軌道変更に関する研究, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 2013年10月09日~10月11日, 米子コンベンションセンター「ビッグシップ」(米子市・鳥取県)  
星賢人, 小嶋浩嗣, 篠原育, 臼井英之, 山川宏, 村中崇信, 帯電衛星を用いたプロペラントレスな軌道制御を実現するための衛星帯電性能の解析, 第57回宇宙科学技術連合講演会, 2013年10月09日~10月11日, 米子コンベンションセンター「ビッグシップ」(米子市・鳥取県)  
M. Nakamiya, Y. Akashi, and H. Yamakawa, Active Debris Removal Using the Charged Satellite, 64th International Astronautical Congress, 2013年09月23日~09月27日 Beijing (China)  
中宮賢樹, 赤司陽介, 山川宏, スペースデブリの除去, 日本機械学会2013年度年次大会, 2013年09月08日~09月11日, 岡山大学津島キャンパス(岡山市・岡山県)  
M. Nakamiya, Y. Akashi, and H. Yamakawa, Study on Active Removal of Space Debris Using the Space Environment, The 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013年06月02日~06月09日, 名古屋会議センター(名古屋)

屋市・愛知県)

K. Yamaguchi, H. Yamakawa, Orbital Deflection of Potentially a Hazardous Asteroid Using Space Environment, The 29th International Symposium on Space Technology and Science, 2013年06月02日~06月09日, 名古屋会議センター(名古屋市・愛知県)

- 21 山口皓平、山川宏、宇宙環境を利用した地球衝突小惑星の軌道変更に関する研究、日本航空宇宙学会 第44期年会講演会、2013年04月18日~04月19日、東京大学本郷キャンパス(文京区・東京都)
- 22 山口皓平、山川宏、宇宙環境を利用した地球衝突小惑星の軌道変更に関する研究、第56回宇宙科学技術連合講演会、2012年11月20日~11月22日、別府国際コンベンションセンター(別府市・大分県)
- 23 赤司陽介、山川宏、ローレンツ力を用いたスペースデブリ除去手法に関する研究、第56回宇宙科学技術連合講演会、2012年11月20日~11月22日、別府国際コンベンションセンター(別府市・大分県)

## 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： 50260013