

「第2回宇宙科学奨励賞受賞者決定」

平成21年度の第2回宇宙科学奨励賞には宇宙科学の各分野より多数のご推薦をいただきました。当財団では宇宙理学、宇宙工学の分野の学識者で構成する選考委員会を設置し、同委員会からは審査選考の結果下記2名の推挙を頂きました。

平成21年度 第2回宇宙科学奨励賞受賞者

(1) 宇宙工学関係

京都大学生存圏研究所 ミッション専攻研究員

坂東 麻衣 氏

(2) 宇宙理学関係

名古屋大学太陽地球環境研究所 研究員

宮下 幸長 氏

この推挙に基づき、当財団理事長は上記の2名に今年度の第2回宇宙科学奨励賞を授与することと決定いたしました。なお当財団では、両受賞者に対する表彰式及び祝賀会を来る3月9日に東海大学校友会館において挙行いたします。

今回受賞されるお二人の受賞理由となった研究業績は以下のとおりです。

(1) 坂東 麻衣 氏

研究題目：惑星間航行・地球周回編隊飛行のための最適軌道制御理論の構築

軌道工学、就中「軌道の最適化問題」は衛星や探査機の計画策定におけるミッション解析のみならず、実際の運用においてもその根幹を成す重要な研究課題である。しかしながら、昨今注目を集めているフォーメーションフライト乃至コンステレーションと呼ばれる複数の衛星による編隊飛行や、スペース・デブリ回収或いは小惑星・彗星等への探査等において複数の目標と多数回ランデヴーを行う軌道の最適制御は、単一軌道の最適化問題より一層複雑となるため、現実的な演算時間では解くことが困難で、従来の軌道理論で扱うことが出来ないことが多い。

坂東麻衣氏は、京都大学生存圏研究所ミッション専攻研究員として、

1. スペース・デブリ・地球接近小惑星探査に関する多数回ランデヴーのための軌道計画
2. 燃料消費の少ないフォーメーションフライトや軌道間遷移に関する基礎理論の研究において独創的な研究成果を挙げている。夫々の業績を以下に記す：

1. Colorado大学のD. Sheeresらにより提案された軌道の最適制御理論は、従来の境界条件毎に最適軌道を求める方法とは異なり、ハミルトン系の正準変換の理論を用いて最適軌道を生成する母関数を求める方法であり、必要な制御量が初期位置、目標位置及び時刻をパラメータとする関数として得られる。即ち対象とするハミル

トン系の母関数が得られれば、その後は各問題で異なる初期条件等のパラメータを代入することで解を得ることが出来るため、軌道最適化問題の解を解析的な形で表すことが可能となる。しかしながら現実の問題として、母関数を求めるための非線形偏微分方程式の一般的な解法は存在していないため、基準軌道周りの線形なダイナミクスに対する局所解を得る解法は提案されているものの、単純な二体問題に対しても、母関数を求めるための理論は確立していない。これに対し、坂東氏は軌道の母関数と非線形最適制御理論の評価関数との対応に注目し、非線形なダイナミクスを直接解き、大域解として母関数を構築する方法を世界で初めて提案・構築した。

地球近傍に多く存在するスペース・デブリや地球接近小惑星へのミッションのように多数の目標へのミッションを宇宙機が限られた燃料で効率よく達成するためには、膨大な数の対象の中から、どの対象に、いつ、どのような順番でランデヴーするかを決める必要がある。しかしこの問題は膨大な計算量を要し、現実的な演算時間では解くことが出来ない問題であり、従来の軌道理論で扱うことが出来ない。坂東氏はこの問題に対し、前述の母関数を用いて宇宙機の最適軌道解を解析的に表すことで効率的に解を求めることを可能にして、今まで計算不可能であった複数ランデヴー軌道最適化の計算時間を大幅に減らすことに成功した。

2. 地上観測、GPS、通信等の目的で複数機の衛星が相互の位置関係等決められた条件を保ったまま、地球周回軌道を航行するフォーメーションフライトにおいて、円軌道上の主衛星に対する従衛星の相対運動の方程式は非線形系として表されるが、特に主衛星の近傍での線形化された運動は Clohessy-Whitshire (CW) 方程式として知られる時不変系で記述することができる。この方程式は軌跡が楕円となる周期解を持ち、フォーメーションフライトに都合の良い相対軌道となるため、これまでのフォーメーションフライト問題では、この周期解を用いた研究が行われてきた。しかしながら、現実に行われている長期的なミッションを考えると、線形近似による誤差の蓄積が顕著に表われるため、燃料消費最小化の観点からは問題を生じることになる。これに対し、坂東氏は元の非線形方程式の周期解の間の移行を考えることにより、より燃料消費の少ない軌道移行が可能であることを示した。まず、フォーメーションフライトの相対軌道における主衛星の軌道面内の初期条件は、主衛星と従衛星の初期位置と慣性座標系での軌道の離心ベクトルと軌道面の相対角度をパラメータとして生成できることを示し、次に面外運動は従衛星の慣性座標系での軌道を2つの軸まわりの回転で表すことにより、非線形周期軌道の初期値を近似を行うことなく完全に特長付ける方法を提案した。この結果を線形システムに対する最適レギュレータ理論に適用して、非線形方程式の周期解を利用した相対軌道移行において、より燃料消費の少ない軌道移行が可能であることを明らかにした。この周期軌道の応用例は多岐に亙り、今後より複雑化する宇宙ミッション策定に対し重要な指針を与えるものである。

我が国が本格的な複数小惑星探査、スペースデブリ対策、小型衛星による編隊飛行

等に着手しようとしている現在、上記の研究意義は大きく、坂東氏の研究成果は高く評価できる。また坂東氏は研究の過程で得られた知見と経験の蓄積を通じて、将来の複雑且つ先進的ミッションの実施に対して重要な役割を果たすとともに、さらに業績を積むことにより、我が国の軌道工学の分野において欠かすことのできない研究者となると期待される。

関連する論文リスト

1. “A New Optimal Orbit Control for Two-Point Boundary-Value Problem Using Generating Functions”, Mai Bando and Hiroshi Yamakawa, *Advances in the Astronautical Sciences*, Vol.134, pp.245-260 (2009).
2. “Orbital Design for Multiple Flyby Mission”, Mai Bando and Hiroshi Yamakawa, *27th International Symposium on Space Tecnology and Swcience*, 2009-d-01, pp.1-5 (2009).
3. “Periodic Orbits of Nonlinear Relative Dynamics and Satellite Formation”, Mai Bando and Akira Ichikawa, *AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol.32, No.4, pp.1200-1208 (2009).

(2) 宮下 幸長 氏

研究題目：衛星データに基づいた地球磁気圏におけるサブストームに関する実証的研究

磁気圏物理学における最も重要な課題の一つに「サブストームが如何に駆動されるのか」という未解決な問題がある。宮下幸長氏が行った一連の研究は、この問題に重要な手掛りを与えると同時に、その過程の中で、磁気リコネクションが大きな役割を果たすことを明確にした点で、学術的に極めて高い価値を持つものである。

宮下氏は、先ず、サブストームの発生機構の解明に向けて、地上 Pi2 脈動を用いて 300 例以上のサブストームの開始時刻を同定し、Geotail 衛星で観測されたプラズマ流・磁場・電場・全圧力を Superposed-Epoch Analysis (時間重畳) 法により解析し、サブストーム開始前後の磁気圏尾部の変化を統計的に調べた。その結果、サブストーム開始直前に、地球から反太陽方向に地球半径の約 20 倍の距離だけ離れた真夜中前の領域 ($X \sim -20 R_E$) で磁気リコネクションが起こり、サブストーム開始直後に、 $X \sim -30 R_E$ 付近でのプラズモイド発達と $X \sim -10 R_E$ 付近でのダイポール化が同時に起こることを示し、磁気リコネクションがサブストームの発生に重要な役割を果たしていることを明らかにした。この論文がきっかけとなり、アメリカ地球物理学連合でサブストームトリガーに関する特別セッションが組織されるなど、国際的に高い評価を得た。

次に、宮下氏は、サブストームの規模による磁気圏尾部変化の違いを Geotail 衛星のデータを用いて統計的に調べる研究を行った。その仕事では、プラズマ流・磁場・全圧力に加えて、エネルギー束を解析することにより、サブストーム開始時の磁気リ

コネクション領域は、サブストームの規模が大きいほど地球の近くに形成されることを見出した。また、磁気リコネクション領域より地球側におけるサブストーム開始前の磁力線の引き伸ばしや、 $X \sim -10 R_E$ 付近のダイポール化、特に $X \sim -10 R_E$ 付近に蓄積・解放されるエネルギー量は、大きいサブストームの方が顕著であることを示した。これらの結果は、磁気リコネクション領域の平均像からの変動幅を決定しただけでなく、サブストームの強度を支配する要因を明らかにした重要な結果である。

さらに、Polar と IMAGE 衛星搭載の紫外線カメラによるオーロラ爆発の観測をもとに同定された約 4000 例ものサブストーム事例について、Geotail 衛星データに加えて Polar、GOES 衛星のデータを統計的に調べ、一連の研究をさらに発展させた。これまでに得られた磁気圏尾部のサブストーム開始に伴う発展の全体像をより確固たるものにしたとともに、新たに、サブストームに伴うエネルギー解放は、磁気リコネクションとダイポール化の 2 領域の間で顕著であるという、サブストーム研究の今後の展開にも影響を与える結果も得た。これまでの一連の研究の集大成とも言えるこの論文は、米国 Journal of Geophysical Research 誌の宇宙科学部門で 3 週連続、ダウンロード件数 1 位を記録し、新聞にも報道されるなど、大きな反響を呼んでいる。

以上の研究の中で、諸変数の変動結果を示す宮下氏の表示方法は、国際学界で Miyashita - gram と呼ばれている。また、一連の研究が評価され、3件の国内会議招待講演および5件の国際会議招待講演（予定も含む）を、さらに、MSSL（英国）や APL（米国）から短期滞在の招聘も受けている。

このように、宮下氏の研究によって、宇宙プラズマの中で発生し、大局的な構造の決定や粒子の加速に極めて重要な役割を果たす磁気リコネクションの発達過程が実証的に明かにされた。宮下氏は、さらに磁気嵐時と非磁気嵐時のサブストームが基本的に同一の性質を持つこと、サブストーム開始に対する磁気圏・電離圏対流の応答、および、太陽風の変化に対する磁気圏の応答とサブストームとの関連についても研究をすすめて、成果を上げている。これら宮下氏の研究成果は、磁気圏尾部におけるリコネクション過程に関する統計的衛星データ解析の一つの到達点であり、今後の研究の基盤をなすものである。

宮下氏は JAXA 宇宙科学研究本部に研究員として在籍していた時、DARTS と呼ばれる、宇宙科学関係のデータアーカイブを公開しているシステムを運営するサイトにおいて、太陽地球系物理学分野の Geotail、Cluster、Double Star、THEMIS 衛星計画などで得られたデータの整備を担当し、さらに、それらの同時観測イベントを検索するツールを開発したが、その機能の高さと利便性が好評を博している。また、研究面においては、現在、磁気リコネクションと、地球に近い領域で形成される楔型電流系や電離圏 - 磁気圏の結合に関する問題について解明を進めており、それらの研究によって、太陽地球系物理および宇宙プラズマ物理に関する理解を大きく前進させることが期待される。

関連する論文リスト

1. "A statistical study of variations in the near and middistant magnetotail associated with substorm onsets: GEOTAIL observations", Miyashita, Y., S. Machida, T. Mukai, Y. Saito, K. Tsuruda, H. Hayakawa, and P. R. Sutcliffe, *Journal of Geophysical Research*, 105(A7), pp. 15,913-15,930 (2000).
2. "Difference in magnetotail variations between intense and weak substorms", Miyashita, Y., Y. Kamide, S. Machida, K. Liou, T. Mukai, Y. Saito, A. Ieda, C.-I. Meng, and G. K. Parks, *Journal of Geophysical Research*, 109, A11205, doi:10.1029/2004JA010588 (2004).
3. "A state-of-the-art picture of substorm-associated evolution of the near-Earth magnetotail obtained from superposed epoch analysis", Miyashita, Y., S. Machida, Y. Kamide, D. Nagata, K. Liou, M. Fujimoto, A. Ieda, M. H. Saito, C. T. Russell, S. P. Christon, M. Nosé, H. U. Frey, I. Shinohara, T. Mukai, Y. Saito, and H. Hayakawa, *Journal of Geophysical Research*, 114, A01211, doi:10.1029/2008JA013225 (2009).