

新しい宇宙ミッション、そして、 未来の人工衛星の可能性を考える*

山川 宏**

1. はじめに

前半では、当研究室で行っている新しい宇宙ミッションや未来に向けた人工衛星の研究を紹介し、後半では、視点を日本全体に広げて、将来の日本の宇宙開発利用の方向性について考えます。

2. 研究室での「新しい宇宙ミッション・未来の人工衛星」への取り組み

研究室の研究テーマの柱は2つあります。1つは、宇宙課題解決型のテーマ「宇宙圏由来危機の理解と対応」です。これは、宇宙に起因する人類の生存圏に対する危機を理解して、それらに対応する方法について研究を行っています。例えば、太陽フレア、プラズマ、宇宙線、地球接近小惑星、宇宙ごみ等の極端宇宙天気や宇宙環境の理解と対応の手法を研究し、社会に提言できればと考えています。将来的には、大気圏現象との連動性の評価（大気圏）、過去の極端宇宙現象の履歴の森林圏での調査による解明（森林圏）、エネルギー等の人間生活圏への影響の評価（人間生活圏）を行う研究者との連携につなげることができればと考えています。

もう1つの研究テーマは、宇宙観測利用型のテーマ「宇宙状況・環境の理解と利用」です。先に挙げた宇宙圏由来の危機の宇宙機による宇宙状況・環境の調査、並びに、それらの宇宙状況・環境を利用・改善する宇宙システムの研究を行っています。宇宙および室内での実験と計算機実験を駆使した研究を推進しています。これは、生存圏研究所の「宇宙環境・利用」というミッションテーマにおける人類の生存圏の持続と拡大のための技術基盤の構築につながるものです。

研究の手段としては一言で言うと「宇宙工学」となります。さまざまな目的の宇宙ミッションを実現するために、ロケット（宇宙輸送システム）、人工衛星（宇宙利用システム）、観測装置等の搭載機器、アンテナ等の地上系の全体システムの設計を行う宇宙システム工学、そして、宇宙プラズマ環境計測のための宇宙機機器開発、宇宙プラズマ環境の理解を目的とした宇宙電波工学を駆使します。また、地球や惑星の重力、大気抵抗、太陽光圧、太陽風圧、地球磁場等の影響下での、ロケットや人工衛星が宇宙空間を飛行する軌道の特徴をとらえ、効果的な飛行計画・航法・誘導手法について研究する分野である宇宙機の「軌道工学」の研究手法を使って、電磁気学と力学が融合された宇宙機システムの研究を目指しています。

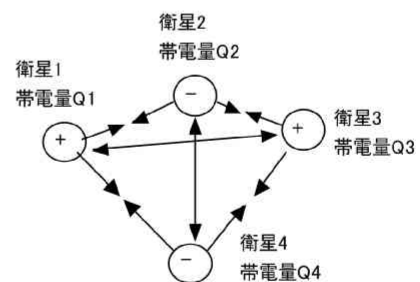


図1：帯電した衛星間のクーロン力による人工衛星編隊飛行の形状維持のコンセプト。正負の符号により引力あるいは斥力になりうる。

* 本稿は第9回生存圏研究所公開講演会（2012年10月21日開催）講演要旨に加筆・修正を行ったものである。

** 〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所宇宙圏航行システム工学分野。

E-mail: yamakawa@rish.kyoto-u.ac.jp

2.1 宇宙環境を計測・利用・改善する

具体的研究テーマとしては、「宇宙環境を計測・利用・改善する宇宙システム」の研究を行っています。研究テーマを地球周回軌道と惑星間軌道という2つの領域に分けて整理すると、「地球周回軌道上の宇宙システム構築」という観点では、人工衛星を積極的に帯電させて地球磁場との相互作用で発生するローレンツ力によって姿勢や軌道の制御が可能な帯電衛星の研究、薄膜を展開して太陽光の圧力を推進力に変換するソーラーセイルによる地球磁気圏の連続観測を実現するための研究、地球を周回するスペースデブリ（宇宙ごみ）低減のための大気再突入手法の研究、独自の超小型宇宙電磁環境モニタシステムの開発（小嶋准教授）、月探査機「かぐや」の観測データ解析による宇宙電磁環境解明（小嶋准教授）が挙げられます。

また、「惑星間軌道上の宇宙システム構築」という観点では、地球接近・衝突が予測される小惑星が発見された時の対処法としてのソーラーセイル宇宙機の小惑星衝突による地球接近小惑星の地球衝突回避手法の研究、宇宙機に搭載した超伝導コイルが発生する見えない磁場による帆によって高速のプラズマ流である太陽風を推進力に変換する磁気セイル宇宙機の研究、積極的に帯電させることによって見えない静電的な帆を張って太陽風を推進力に変換する帯電セイル宇宙機の軌道力学に関する研究、地球の生物起源解明の観点から微生物付着微粒子が地球・火星重力から脱出したと仮定した時の火星・地球を往還する可能性の検討、日欧国際共同水星探査計画

BepiColombo の日本の水星磁気圏探査機への観測機器搭載による水星電磁環境探査（小嶋准教授）が挙げられます。

2.2 人工衛星を電磁気力で動かす

ここで、帯電衛星の研究について少し詳しく説明します¹⁾⁻⁴⁾。少し意外に思う人もいるかもしれませんが、人工衛星は、プラスあるいはマイナスに帯電することがあります。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との衝突により起きます。日照時には、光が衛星表面に当たることによって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ります。

我々の研究室では、この衛星の帯電量を自然現象に任せるのではなく、積極的に制御することにより、地球磁場と帯電衛星との相互作用によって、磁場方向と人工衛星の速度方向の双方に対して垂直方向に働くローレンツ力、あるいは、複数の帯電衛星間に働く引力あるいは斥力であるクーロン力（図1～図4）を用いて、地球を周回する複数の人工衛星の相対位置や軌道・姿勢の制御を行う手法を研究しています。

一般に、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、欧州の CLUSTER（クラスタ）衛星などで、周辺のプラズマで満たされている空間の電位と等しくなるように衛星を中和していることからわかるように、通常は回避すべき現象と捉えられています。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

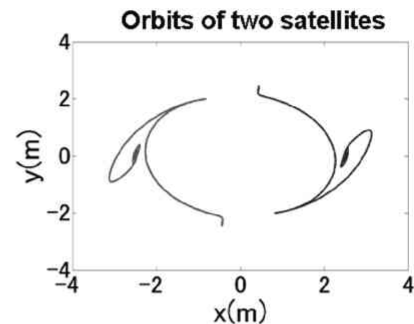


図2：2つ（赤および青）の人工衛星の帯電量、すなわち、クーロン力を、時間に応じて調整することで、2つの帯電した人工衛星の相対的な位置を制御している。x軸は地球中心から半径方向、y軸はx軸と垂直で、かつ、人工衛星の軌道面内にある。x軸上に2つの衛星を誘導することに成功している^{5,6)}。

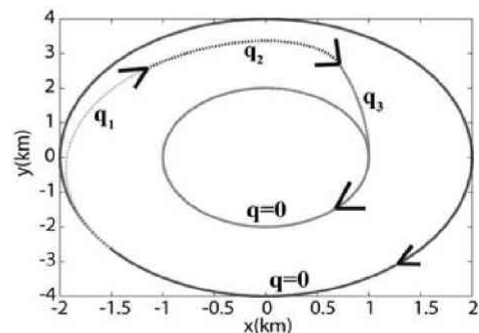


図3：衛星相対運動を記述する回転座標系におけるローレンツ力の調整による軌道移行例。帯電していない人工衛星を中心（原点）として、帯電している人工衛星の相対的な軌道図を表わしており、帯電量を変化させることで、大きな周回軌道から小さな周回軌道に移行している^{7,8)}。

を積極的に用いて、新たに人工衛星の軌道制御や姿勢制御に応用する点にあるのです。

人工衛星の帯電量の制御は、能動的な電子放出、あるいは、イオン放出により行うことを想定しており、既に欧州の CLUSTER (クラスタ) 衛星等で搭載されているイオンエミッタ (放出装置) や電子エミッタと同じ原理の軽量の装置を用いることにより実現できます。人工衛星の帯電量のコントロールのためのイオンあるいは電子の放出量は僅かであり、これにより、軌道を修正することができれば、ほぼ燃料 (プロペラント) が不要となる「プロペラントレス」な推進機関と捉えることができます。また、電子やイオン放出の量が、一般のエンジンでのガス放出量と比較すると非常に小さいために、衛星の質量変化は、ほぼなくて質量一定と考えることができ、放出による人工衛星の速度 (ひいては運動量)、および、人工衛星周辺のプラズマ環境に与える影響は無視可能となります。さらに、帯電量の制御に必要な電力は 1 W 程度と小さく、また、帯電量制御に要する時間は数ミリ秒であるために、ほぼ瞬間的に帯電量を制御可能と考えられます。現在、この積極的に帯電をさせた人工衛星が、地球磁場中を動くときに受ける力 (ローレンツ力) や、複数の帯電衛星が互いに電氣的な力で引きあう力 (クーロン力) の影響を受けたときに、従来の通常の人工衛星では実現できない固有の軌道運動や姿勢運動を解析している段階です。燃料が不要なことを利用して超小型の人工衛星群の実現、そして、それらによる宇宙環境の観測・利用・改善等、近い将来の新たな宇宙ミッションにつなげることを目標にしています。

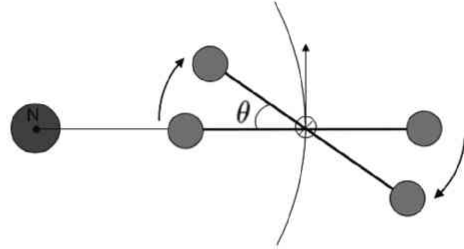


図4：地球（青）を中心とする軌道上にある振り子型の人工衛星のコンセプト。帯電部分（オレンジ）に働くローレンツ力によって、人工衛星の姿勢を回転させるトルクが励起され、振り子型宇宙機の姿勢が変動する⁹⁻¹²⁾。

3. 日本の「新しい宇宙ミッション・未来の人工衛星」はどのようなべきか

さて、ここでは、一つの研究室における研究という視点を拡大して、日本全体の宇宙活動という視座を持って議論したいと思います¹³⁾。

気象衛星による日々の天気情報、通信放送衛星による大量の情報交換、測位衛星による位置情報、リモートセンシングによる地球の災害情報・環境情報、ブラックホール存在の痕跡や遠方の銀河の軌道上望遠鏡による観測 (図5)、惑星探査機による惑星観測・探査、そして、人類の宇宙空間活動の場を提供する宇宙ステーション。1957年に人類が初めての人工衛星スプートニク1号を宇宙空間に飛ばしてから50年の間に、さまざまな目的のために地球の近くから遠くは惑星にまで、人類はロケットを打ち上げて、人工衛星を送ってきました。



図5：X線宇宙望遠鏡を搭載した科学衛星 (宇宙科学研究所 内之浦宇宙空間観測所, 2000年)

日本は 1970 年に、最初の人工衛星「おおすみ」を打上げ、その後も、固体燃料のロケットとしては世界最大級の M-V シリーズロケット (図6、図7)、世界レベルの高い 95%以上の信頼性を誇る液体燃料の H-IIA シリーズロケット等を用いて、着実に人工衛星を打ち上げてきました。その一方で、ソ連のスプートニク1号からたった12年で米国がアポロ11号で月面に降り立ったことと比較して、その後の世界そして日本の宇宙開発の進歩は目覚ましく早いという人もいます。

しかし、日常的に通信衛星を介した会話、データのやりとりを行い、放送衛星を介した番組を視聴し、米国のGPSの測位衛星（近い将来には日本の準天頂衛星）を介した携帯電話、時計、カーナビで自分の位置を知る生活を送り、X線望遠鏡、赤外望遠鏡、太陽望遠鏡が搭載された科学衛星を介して、宇宙、太陽の物理現象を少しずつ解明し、月、火星、金星のような地球に近い惑星から、水星、小惑星、彗星の遠い天体に向けて、当たり前のように惑星探査機が飛翔し、宇宙ステーションに日常的に宇宙飛行士が滞在し、日本国内の多くの大学が自前の超小型衛星を目差す時代になったことは、やはり大きな進歩があったと言わざるを得ないのだと思います。ちなみに、日本がこれまで打ち上げた月・惑星探査機は以下の通りです。月（ひてん探査機, 1990年打ち上げ, かぐや探査機, 2007年打ち上げ）、火星（のぞみ探査機, 1998年打ち上げ）、金星（あかつき探査機, 2010年打ち上げ）、水星（日欧共同 BepiColombo 計画, 2014年打ち上げ予定, 図8）、小惑星（はやぶさ探査機, 2003年打ち上げ, 図9、図10）、彗星（さきがけ・すいせい探査機, 1985年打ち上げ）。

1つ宇宙技術が普及していることを示す小話があります。宇宙開発に反対していた人が、「国民の税金を宇宙開発に投ずるよりは、GPS（Global Positioning System）のような技術を開発すべきだ」と言ったそうです。説明はやבוではありませんが、GPSシステムは、地球周回軌道上に24機以上の衛星を配置して初めてグローバルに測位機能を発揮するものです。

これは多少の誇張がある話かもしれませんが、宇宙にある人工衛星システムの部分が見えないほどに、宇宙関連技術が日常生活に浸透していることを示しています。自動車や飛行機までの日常性には及ばないものの、かなり宇宙も、それに近い状態になりつつあるということを示すものでしょう。そして、現在の携帯電話を使った生活がたった15年前には全く予想できなかったように、2030年頃までには、現在では想像もできないほど人類の宇宙活動は拡大していると思います。



図6：打上げ直前のM-Vロケット
(宇宙科学研究所 内之浦宇宙空間観測所, 2000年)



図7：M-Vロケット打ち上げ時の緊迫した場面
(ISAS 内之浦宇宙空間観測所, 1997年)

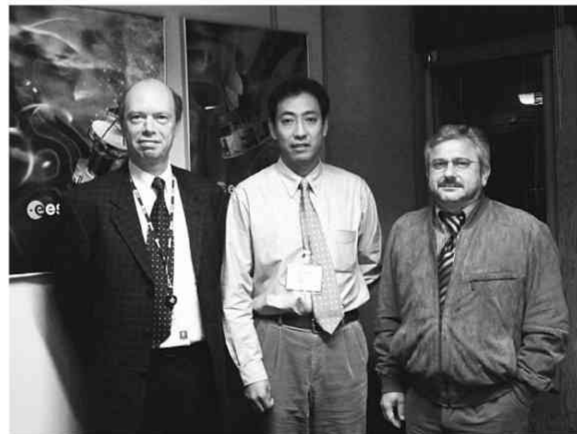


図8：日欧共同水星探査 BepiColombo プロジェクトが進行中（欧州宇宙機関のプロジェクトマネージャーと, 2005年）

3.1 これまで：宇宙開発は「夢」か「現実」か？

私は、これまで 20 年程度、宇宙開発に携わってきましたが、当初より「宇宙開発」という言葉が古めかしく聞こえて、しっくりきません。何となく、違和感を覚えてしまうのです。舞台を、宇宙と地球の中間にある空（そら）で考えてみましょう。昔は、空を飛ぶことは人類の夢だったと思いますが、現代の世界で、身近な交通手段として、しかも、航空ビジネスの世界で運用されている旅客機に乗るということを「夢」と表現する人はいないと思います。その一方で、太陽光エネルギーだけで、無着陸で、世界一周をするんだと聞くと「夢」と思えてくるのです。舞台を「海（うみ）」として考えても同様の比較が可能だと思います。

この宇宙の舞台も、空の舞台に遅れること数十年という状況ですが、気象・通信・放送を中心として、既に、ビジネスが展開され、身近になっています。その反省から、最近ようやく「宇宙開発・利用」と「利用」という言葉が付加されることも多くなりました。でも、未だに、しっくりせず、切れ味が無い表現と言わざるを得ないのです。私は、後で述べる「夢」の部分と、「現実」の部分、として、それらの狭間の部分の全ての活動を包含したいので、意図的に「宇宙活動」という言葉を使うようにしています。それにも、関わらず、本講演のタイトルで使っていないのは、その言葉が一般的とは言えない故の苦渋の判断なのです。

私のように、「宇宙の仕事に従事しています」と自己紹介をすると、一般に2種類の反応があります。宇宙を現実の空間としてとらえるか、あるいは夢の舞台と捉えるかの2つの反応です¹³⁾。現実空間派は、人工衛星等の宇宙システムを、社会生活のためのインフラ、あるいは、問題解決のためのツールと捉え、夢舞台派は、生命と空間の根源を解き明かす科学の場、そして、人類の活動のフロンティアと捉えます。別な視点から言うと、通信・放送・測位・観測・気象・災害対応・安全保障のための人工衛星が配置されている地球の周辺の領域を思い浮かべるか、あるいは、宇宙飛行士の活躍、太陽系、そして、より遠い深宇宙の領域を思い浮かべるかの違いということになります。

五百年前の大航海時代の世界の海は、まさに国家のフロンティアでありましたが、今は、完全に社会経済活動の領域です。そして、五十年前の冷戦までは、宇宙は、超大国の競争の場であり、大気圏の外は人類のフロンティアでした。しかし、21世紀の今、社会インフラとフロンティアの境目は、少なくとも、地球周辺の宇宙空間にまで広がっていることは確かです。ここで言いたいことは、宇宙開発は、社会インフラの側面とフロンティアの側面を両輪として捉えるべきだということなのです。ただ、日本では、宇宙システムが社会インフラとして機能している意識が他国と比較したとき希薄であると思われます。それは、国家の主権をかけた宇宙政策が進められてきた諸外国と比較して、いわゆる平和利用として進められてきた日本の歴史的な経緯の影響もあると思われるのです。



図9：はやぶさ探査機のための飛行機による無重力実験(1998年)

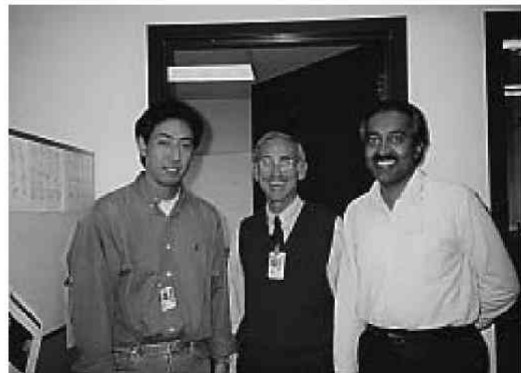


図10：はやぶさ探査機のNASA 追跡支援会議(1998年)

私は、かつて、太陽系の未踏の領域を目指す惑星探査機の開発、そして一方では、将来の大量宇宙輸送時代を見据えた垂直離着陸型の再使用型ロケットの開発（図 11）に携わっていましたが、前者がフロンティア、そして後者が社会インフラを見据えた研究開発に相当すると言えるかと思います。また、生存圏研究所は、「人類の生存に必要な領域と空間を生存圏としてグローバルにとらえ、その状態を正確に診断するとともに、それに基づいて現状と将来を学術的に正しく評価・理解し、さらにその生存圏の治療・修復を積極的に行なう」ことを目指した研究を遂行すると宣言しています。宇宙空間も対象に含まれており、人類の生存圏（Humanosphere）を構成する 1 つの領域として捉えています。また、同様に所属している京都大学の多様な研究科・研究所等の教員から構成されている宇宙総合学研究ユニットは、その扱う領域を、さらに、人文社会系にも広げようとしています（図 12）。

3.2 これから：それで、どうする？

これまで、世界の国々で、宇宙開発が展開されてきた原動力は何でしょうか¹³⁾。一般には、安全保障や経済発展を主たる動機として進められてきており、そこで培われた技術に基づく宇宙システムが、日常生活、つまり、民生分野にも展開されているというのが実情でしょう。日本の宇宙開発の経緯は、世界の中では特異で複雑であると思いますが、いずれにせよ、その結果として、日本は宇宙へのアクセスが自律的にできる、つまり、ロケットという輸送手段と、宇宙システムを構築する人工衛星手段の双方を保有する希少な国になったのです。これは、極めて重要であり、ここで改めて強調しておきたいと思います。

十分な資源を持たない日本にとっては、人工衛星等が持つ、宇宙空間という場を利用する能力、つまり、情報を取得する能力、情報を伝達する能力、そして、その広域性、継続性、耐災害性を有効に利用することが肝要です。人々の暮らしに、ライフライン、つまり、広義の安全保障に、あらゆる形で役立てることが望ましいと思います。日本は、



図 11：垂直離着陸型再使用型ロケットの開発（宇宙科学研究所 能代ロケット実験場, 2003 年）

自国の宇宙システムを、国民の日常生活に利用するシステムを展開する能力がある極めて恵まれた立場にあります。しかし、その潜在的な力を生かし切っているとは残念ながら言えない状況にあります。日常生活、経済活動において、宇宙の利便性が定着するように、そして、身近で敷居の低い宇宙活動に向けて、あとは判断をし、実行するだけという状況だと思います。ここで一番重要なことはスピード感をもって進めていき、同時に、世界的な動向に応じて柔軟な対応をするということかと思います。

現実には、衛星、地上局等の宇宙機器の輸出がここ約十年で落ち込み、宇宙機器産業での従事者数が同様にここ 15 年で激減しています。この状況のもと、これらの民生分野と安全保障分野における実利用宇宙システム、そして、それを支える科学・技術の研究開発と産業基盤が健全に成長する必要があります。

そのためには今後の方向は二つになると考えられます。まずは、生活のさまざまな問題の解決や利便性の向上のために、宇宙分野が貢献できる部分については最大限効率的な利用を進めることでしょう。宇宙活動が貢献できる分野は、気象、通信、放送だけではなく、災害監視、避難誘導、位置認証、物流、交通、観光、農業、漁業、森林管理、食料、土木、測量、資源、生物保護、気象、海洋、科学、

教育、警備、外交、安全保障等のあらゆる分野に広がります。このとき、社会インフラとしての宇宙システムから得られる様々なサービスが継続的に運用されること、地上のシステムとうまく組み合わせることが重要となります。

同時に、産業の観点からは、海外市場への参入をさらに拡大していく必要があります。現状では、日本のロケットは信頼性が高いものの価格面での競争が厳しい状況です。衛星の商業市場では実績が重視される世界であり、日本は政府衛星の実績はあるが商業市場においては新規参入の状況です。海外市場への参入には、政府の後押しも必要でしょうし、いわゆるパッケージ型のインフラ輸出が不可欠となっています。買う側は、人工衛星だけを渡されても困るのであり、データを受け取る受信局、データを使ったサービス、人材育成、他の産業への展開も視野に入るようにすることが望ましいと思います。



図 12：京都大学宇宙総合学研究ユニット発足直前の様子
(2007 年)

もちろん、これらを実現することは簡単ではありません。しかし、こういう時代だからこそ、これから日本が世界で牽引していくことができる分野である宇宙活動を通じて、日本を気持ちの上でも実質的にも元気にすることができると考えています。先端技術、そして、それに基づく生活に直結する実利用のフロンティアも切り拓くことで、プリンスプルがある「宇宙活動」をやっていると胸をはれると思います。明治維新の変革の時代に生きた勝海舟や坂本龍馬、国の経済基盤を構築した渋沢栄一、経済活動の重要性を認識していた白州次郎が、今生きていればどう考えただろうかと想像してしまいます。

最後に、日本のロケットの父と呼ばれる糸川英夫博士と松下幸之助氏が、歴史のある点で交差する場面を紹介します¹⁴⁾。「1953 年 10 月 3 日、糸川博士の経団連主催の講演会「日本でジェットエンジンの研究は遅れたけれど、ロケットはこれから日本でやってもアメリカに遅れをとらないでやれる」、「将来の輸送機として航空機に代わる超音速で超高層を飛べる飛翔体を作ろう、という糸川英夫のこの魅力的な「ロケット機構想」に心を強くとらえられた若い研究者たちが、専門分野を超えて幅広く結集した。そして 1953 年 12 月の準備会議を経て、翌年 2 月 5 日、AVSA という研究グループが誕生した。」「経団連での講演の後で、糸川は数社を回りロケット開発に協力する会社を探しているが、積極的に協力を申し出るところはなかった。故松下幸之助に至っては「糸川先生、そないなもん、もうかりまへんで。50 年先の話や」と、にべもなかった。」

松下幸之助氏の真意は、おそらく、「儲かる段階になるまでは 50 年かかるだろう。そういう現実を作って出なおしてこい。」ということだったのではないかと筆者は想像します。実は、今 2012 年は、それから 60 年が経とうとしているのです。今、まさに、日本が、宇宙活動の将来について決断するときなのだと思います。

参考文献

- 1) 山川宏, “人工衛星の軌道や姿勢を電磁気力で動かす”, 「高校生のページ」, 京都大学電気関係教室技術情報誌 cue 27 号, 平成 24 年 3 月発行, pp. 57-62
- 2) Torkar, K., et al., “Active Spacecraft Potential Control for Cluster – Implementation and First Results,”

Annales Geophysicae, Vol. 19, pp. 1289-1302 (2001).

3) 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).

4) 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).

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

6) 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).

7) 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).

8) 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 1I05, 第54回宇宙科学技術連合講演会,静岡(2010).

9) 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",日本学術会議(2010).

10) 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 2I06, 第54回宇宙科学技術連合講演会,静岡(2010).

11) 八山慎史,坂東麻衣,山川宏,"ローレンツ力と重力による帯電衛星の姿勢運動に関する研究", Paper 1D11, 第55回宇宙科学技術連合講演会,愛媛(2011).

12) Yamakawa, H., Hachiyama, S., and Bando, M., "Attitude Dynamics of a Pendulum-shaped Charged Satellite," *Acta Astronautica*, Vol. 70, pp. 77-84, 2012.

13) 山川宏,"地球圏・生存圏における宇宙開発",日本の宇宙開発は一流か?②,フォーラム新・地球学の世紀34,ウェッジ(WEDGE), pp. 68-69, 2011年8月号.

14) ISASニュース : <http://www.isas.ac.jp/ISASnews/No.289/00.html>.