

各国の宇宙輸送システム開発動向 —スペースシャトル退役がもたらす変化—

我が国の基幹的な宇宙輸送システムである宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の HIIA ロケットは、2005 年 2 月 26 日の 7 号機の打上げに成功し、6 号機の打上げ失敗以来 1 年余りの足踏み状態をようやく脱した。また、米国航空宇宙局 (NASA) の宇宙輸送システムであるスペースシャトルも空中分解事故から 2 年余りを経て、打上げ再開が迫ってきた。しかしその間に米国は宇宙政策を変更し、多額のコストを要するスペースシャトルを 10 年以内に退役させる方針を明らかにした。

本稿では、最初にスペースシャトル退役の動きを紹介し、ポストスペースシャトル時代の宇宙輸送システムを①有人宇宙輸送システム、②国際宇宙ステーションへの物資補給、③使い切り型打上げロケット、④月以遠の深宇宙探査、⑤再使用型宇宙輸送システム、の 5 つに大別して、現時点で進行中の世界各国の開発・運用プロジェクトをトピック的に紹介し、世界的な開発競争の中で、我が国は宇宙輸送システム関連の施策をどのように考えるべきかを検討する。

まず、有人宇宙輸送システムでは、NASA は現在建設中の国際宇宙ステーション (ISS) の完成後、月・火星などの有人探査を目指す計画であり、そのための新しい有人探査機「CEV」を開発しようとしている。ロシアも「クリーベル」という新型の 6 人乗り宇宙船の開発を計画している。欧州でも、フランスとドイツが有人宇宙船の開発を競い始めている。中国も独自の有人宇宙飛行計画を着々と拡大しようとしている。

次に、国際宇宙ステーションへの物資補給輸送では、我が国の国際宇宙ステーション物資補給機 (HTV) と欧州の自動輸送機 (ATV) の開発が行われており、スペースシャトル退役後の ISS への物資輸送を我が国が独自の技術で担う可能性が高まってきた。我が国は 2008 年に HTV の技術実証機を打ち上げる計画であるが、欧州はそれに先立って 2006 年に ATV 初号機打上げを予定している。

一方、使い切り型ロケットによる衛星打上げでは、商業通信衛星の長寿命化などで打上げ需要が毎年 20 ～ 30 機と予想より少なくなっており、その中で有力な商業打上げ会社が受注を競っている。米国は発展型使い切り型ロケットで 2 種類の重量級ロケットを開発してきた。アトラス V は性能を下げて成功したが、デルタ IV はまだ完成の域に達していない。また、打上げ競争の新たな参加者として、陸地に射場を持たないシー・ロンチ社が後発でありながら静止衛星打上げで着々と実績をあげている。中国も長征 5 号系列という新しい打上げロケットの開発に着手していることが注目される。我が国では、H-IIA ロケットの民間移管により定常的な運用を確実に行うとともに、より大型の衛星の打上げが可能な H-IIA 能力向上型ロケットを開発すべく検討が行われている。

深宇宙探査では各国が月や火星へ探査機を打ち上げており、我が国でも小惑星の物質を採集して持ち帰る「サンプルリターン」という計画が進行中である。

エネルギー危機に対応した、宇宙太陽光発電衛星 (SSPS) は超大型の宇宙構造物であり、その打上げを効率よく行うには、運用コストが安い再使用型宇宙輸送システムの実現が必須である。再使用型宇宙輸送システムはこれまで各国とも失敗の連続でありながら、引き続き研究開発が行われている。

こうした各国の開発動向を踏まえて、我が国の宇宙輸送システムの今後の進め方として、① HTV の実用化、② 使い切り型ロケット技術の保持と発展、③ 再使用型宇宙輸送システムの開発を通じた基盤技術の育成、の 3 点を提案する。我が国では H-II 打上げ型宇宙往還機 (HOPE) の開発を凍結しているが、今後は小規模な繰り返し実証を通じて地に足のついた基盤技術の育成を目指すべきである。

各国の宇宙輸送システム開発動向

—スペースシャトル退役がもたらす変化—

辻野 照久

総括ユニット

1 はじめに

2005年2月26日、国土交通省は運輸多目的衛星新1号(MTSAT-1R)をH-IIAロケット7号機により打ち上げた。宇宙航空研究開発機構(JAXA)が開発したH-IIAロケットは、2003年11月の6号機打上げ失敗以降、1年3ヶ月に亘り足踏みを余儀なくされていたが、MTSAT-1Rの静止トランスファ軌道(GTO)への投入成功を足掛かりにして再出発することになる。

一方、米国の宇宙輸送システム

もスペースシャトル・コロンビア号の空中分解事故により運用中断が続いていたが、2005年7月に打上げ再開を予定しており、ようやく復活の途についたところである。しかし、その間の米国の宇宙政策の変化により、今後10年以内にスペースシャトル退役という事態を迎える見通しである。

本稿では、最初にスペースシャトル退役への動きを紹介し、これを受けたポストスペースシャトル時代の宇宙輸送システムを、①有

人宇宙輸送システム、②国際宇宙ステーションへの物資補給、③使い切り型打上げロケット、④月以遠の深宇宙探査、⑤再使用型宇宙輸送システム、の5つに大別し、現時点で進行中の世界各国の開発・運用プロジェクトをトピック的に紹介する。

最後に、このような世界的な開発競争の中で、我が国は宇宙輸送システム関連の施策をどのように考えるべきかを検討したい。

2 スペースシャトル退役の動き

スペースシャトルは1980年にコロンビア号の打上げで華々しく運用が開始された。スペースシャトルは正式名称を「宇宙輸送システム」(STS)といい、帰還してくる機体を「オービタ」という。オービタは合計5機製造された。これまでの飛行回数は100回以上に及んでいる。

米国航空宇宙局(NASA)は、文字通りあらゆる宇宙輸送を行うためのシステムとしてスペースシャトルを開発した。そのコンセプトは、人と貨物を同時に宇宙へ輸送し、何回でも再使用ができ、着陸後1ヶ月程度でまた飛行できるというものであった。当初は4機のスペースシャトルで年間数十回の打上げを目指していた。

しかし、実際に運用が始まってみると、たちまちこの計画は挫折した。再突入の際に耐熱タイルが甚だしく損傷し、その修復に時間がかかるため、1ヶ月程度での再打上げは到底できなかった。また、繰り返し運用の考慮が十分でなかったことから、コストは当初予想したより2ケタ近く高くなってしまった。最近では年間40億ドルで8機の打上げがせいぜいであった。1機100億円から200億円程度で打上げができる使い切り型ロケットに全く及ばないコストであったため、衛星打上げ専用のミッションは1992年以降行われていない。

スペースシャトルはこれまでに2回の重大事故を起こし、オ

ービタ2機が失われた。1986年1月28日、チャレンジャー号は打上げ直後に固体ロケットブースタ(SRB)のOリングの隙間から燃焼ガスが噴き出し、これが発端になって液体推進薬が隙間から爆発して、7名の搭乗員の生命を失ったことは米国の宇宙開発にとって大きな打撃であった。打上げ再開は1988年9月で、再開準備に2年8ヶ月を要した。チャレンジャー号の代替オービタとして製造されたエンデバー号は、1992年5月に初飛行を行った。2003年2月1日、今度は米国テキサス州の上空で着陸を目前にしたコロンビア号が空中分解し、搭乗員7名が死亡した。原因は左翼前縁の強化炭素複合材(RCC)パネルが打上げ

時に外部タンクから落下した断熱材で一部破損し、その部分から再突入時に機体内部に高温の空気が侵入したことによるとされる。事故の調査及び今後の対策がまとまり、2005年7月から打上げが再開されることになった。

米国・欧州・日本・ロシア・カナダが国際的に協力して建設を

進めている国際宇宙ステーション (ISS) 計画では、構成要素 (モジュールやトラスなど) はスペースシャトルとロシアのプロトンロケットで打ち上げられることになっている。このうち、日本や欧州の実験モジュールはスペースシャトルでなければ打上げができない。このため、米国は、ISS が完成す

るまでは国際約束を果たすためにどうしてもスペースシャトルを運航させておく必要がある。しかし、ISS 完成後はなるべく早期にスペースシャトルを退役させ、搭乗員輸送と物資輸送を分離して、より効率的な新しい宇宙輸送システムに移行しようとしている。

■用語説明■

繰り返し使用されるスペースシャトルの固体ロケットブースタ (SRB)

SRB は燃焼を終えて分離投下された後、海上から回収され、鉄製の構造であるため推進剤を再度充填して再使用することができる。一方、我が国の H・II A ロケットの SRB・A はフィラメント・ワインディング (FW) で形成された構造体の中に推進剤を充填しており、燃焼後は構造体の強度が大幅に低下するため、再度使用することはできない。

オゾン層に影響を与える SRB の酸化剤

SRB の推進剤は、燃料と酸化剤の原料をミキサで混合して成形・凝固させて製造する。この酸化剤は成分に過塩素酸塩 (perchlorate) を含むため、SRB の排出物がオゾン層を破壊するという報告もある。2005 年 2 月、米国環境保護庁 (EPA) は、過塩素酸塩の公式な参照用量を 0.0007mg/ 体重 kg/ 日に設定した。

3 有人宇宙輸送システムの開発動向

3 - 1

米国の有人探査機 (CEV)

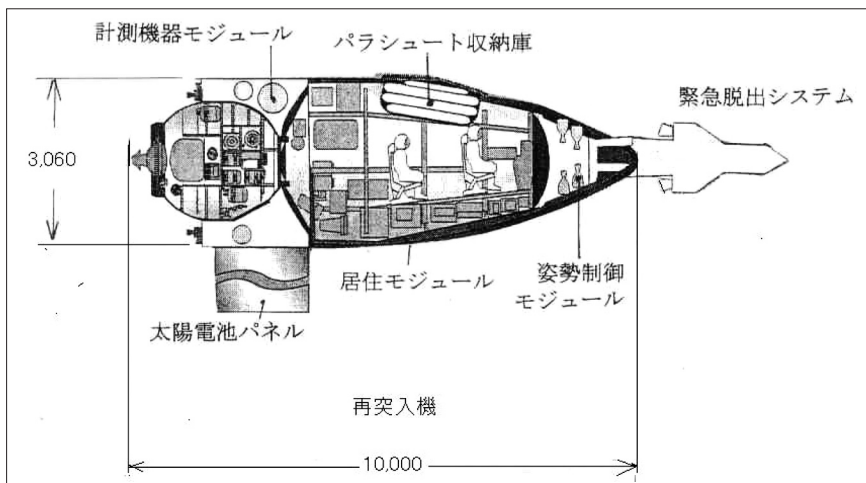
NASA は、スペースシャトル退役に先立ち、地球低軌道飛行から火星の有人探査まで可能にする有人宇宙輸送システムとして、有人探査機 (CEV) を新たに開発することを計画している。当初は、2014 年までに CEV による有

人実証飛行を達成し、2015 年から 2020 年までの間に有人月探査を実施するという目標を設定していたが、その後、NASA のグリフィン長官は飛行実証を 2010 年に前倒ししたい意向を示している。

2005 年 3 月、NASA は CEV の開発を 2005 年 9 月から 2008 年 12 月までの期間に実施すべく、提案要請書 (RFP) を発出した。これに対し、5 月 2 日の締切日ま

で 2 つのグループから応募があった。ロッキード・マーチン社が主導するコンソーシアムは 6 人乗り・有翼型の構想を提案した。一方、ボーイング社はノースロップ・グラマン社や欧州のアレニア・スパツィオ社などと連合して、3 つのモジュールが宇宙でドッキングする方式を提案した。NASA は今後これらの提案を審査し、2005 年 9 月には契約相手方が決まる予定である。

図表 1 リフティングボディ型クリーペルの断面図¹⁾



原図 © Anotly Zak

3 - 2

ロシアの新型有人宇宙船開発動向

2004 年 11 月、ソユーズ有人宇宙船などを製造・運用しているロシアの RKK エネルギア社は、KIS 試験基地において次世代の有人宇宙船「クリーペル」(КЛИПЕР) の原寸大模型を公開した。この模型は、2005 年 6 月にパリで開催される航空ショーでも展示される予定である。現用のソユーズ宇宙船 (3 人乗り) の基本

的な構造・仕様は40年前の1号機とほとんど変わりがなく、宇宙飛行士にとって船内は狭く乗り心地の悪いものであったが、これに代わるクリーペルはスペースシャトル退役後の搭乗員輸送の主役となる可能性がある。

クリーペルのコンフィギュレーションはこれまでに2通りが発表されており、図表1はそのうちリフティングボディ型の機体の断面図である。搭乗員は6名（3名×2列）で、ISSの搭乗員を6名輸送できるだけでなく、2名の搭乗員で4名の宇宙旅行客を乗せる場合もありうる。もう1つのコンフィギュレーションはスペースシャトルと同じ有翼型の形態であるが、搭乗員が乗り込むコンパートメント部分はリフティングボディ型と同じである。このことから、当初はリフティングボディ型で開発し、その後、有翼型を開発するというような段階的な開発を行う可能性があると思われる。

クリーペルは全長10m、直径約3m、重量13トンで、搭乗員6名の他に貨物500kg程度を積

載可能としている。緊急脱出口ロケットは公開された図面ではソユーズ宇宙船と同様に先端部に設けられているが、別の設計案としては、重量軽減のため、宇宙船の後方に取り付けて加速用の推進エンジンと兼用することも考えられている。また打上げロケットは開発コストを節減するため、ウクライナのゼニットロケットを使用することになると見込まれる。

3 - 3

欧州宇宙機関加盟国間の 有人宇宙船開発競争

欧州では、各国独自の国家宇宙開発プログラムとは別に、欧州宇宙機関（ESA）が加盟各国の出資と開発分担による大型宇宙プロジェクトを実施しているが、有人宇宙飛行については、これまでに例のない加盟国間の競争が生じている。これは、ESA自身の有人宇宙飛行計画が予算計上のみであり、内容がまだ定まっていないことに起因していると思われる。

ESAの最大の出資国であるフランスとドイツは、自国の宇宙開発プログラムとして、それぞれ有人宇宙飛行の技術開発を行っている。フランスはエンジェル／プレXという2種類の有人宇宙船を、ドイツもフェニックス／ホッパーという2種類の有人宇宙船を開発中である。両国とも、うまくいけば、自国の有人宇宙船をESAのプログラムに昇格させたいという思惑があるものと思われる。

3 - 4

中国の有人宇宙飛行

中国は2003年10月に、神舟5号の打上げ成功によって、世界で3番目の有人宇宙船打上げ国となった。2005年9月頃には、搭乗員2名で数日間にわたる宇宙飛行を行い、単独宇宙飛行から2年以内に複数人の宇宙飛行を実現して最短記録を樹立しようとしている。かつて、旧ソ連は3年半、米国は3年を要した。さらに2006年以降は、3名の宇宙飛行士を搭乗させ、しかも3名のうち1名は一般人を搭乗させることを視野に入れている（2004年7月号特集3参照）。

さらに、有人飛行船を中国独自の宇宙ステーションとドッキングする計画もある。2010年頃には、独自の宇宙ステーションのモジュールを打ち上げるためのロケットとして、現在開発中の長征5号系列が使われる可能性がある。

■用語説明■

有人打上げ

ロケット打上げにおいて、ペイロード（積載物）に人間が含まれる場合を特に「有人打上げ」という。この場合、貨物だけの積載とは異なる要素として、人間を安全に地上に帰還させる上での信頼性の確保、非常事態における緊急脱出システムの装備、ロケットの振動や音響などの環境条件を考慮する必要がある。中国では有人宇宙船「神舟」を打ち上げるため、打上げロケットとして「長征2E」を設計変更して「長征2F」という新しい型式のロケットを開発した。主な変更点は、制御系の冗長化、故障の自己診断機能、緊急脱出装置の追加などである。また、4回行われた無人試験機の段階で宇宙飛行士を模した人形を搭載し、医学的計測の試行や支援作業者の訓練などを行ったものと思われる。

4 国際宇宙ステーションへの物資補給船の開発動向

4 - 1

ロシアの物質補給船 プログレス

ロシア連邦宇宙局（FSA）は、

2005年2月28日、ソユーズUロケットにより、物資補給船プログレスM-52の打上げに成功した。ISSへの補給ミッションとしては17回目の飛行になる。1回の打上げで輸送できる物資の重量は

約2.8トンで、このうち約1トンは燃料や酸素ガスなどタンクに充填したもの、その他は搭乗員が取り扱う実験機材や食糧などの物資である。米国のスペースシャトルの打上げ再開時まで、ISSへの補

給ミッションはプロGRESSが一手に引き受けてきたという経緯がある。物資補給の遅れのため、ISS搭乗員が節食を余儀なくされた期間もあったほどである。プロGRESSは1978年の初飛行以来、若干の改良が施されたが、ソユーズ宇宙船と同様に原型と比べて大きな変化はなく、旧ソ連のサリュートやミールなどの宇宙ステーションへも補給を行ってきた。今後、プロGRESSに匹敵する物資補給船が他の国で開発されて運用に供されたとしても、実績のあるプロGRESSの役割が終わることは当分ないと思われる。

4 - 2

日本の補給機 HTV

2005年1月26日、カナダで開催された宇宙機関長会議において、スペースシャトル退役後の宇宙輸送システムについて話し合いが行われ、JAXAが開発中の宇宙ステーション補給機(HTV)を国際宇宙ステーションへの物資輸送に使用するという形でISS計画を支援することが、共同声明²⁾に盛り込まれた。これにより、ロシアのプロGRESS物資補給船や後述の欧州の自動輸送機(ATV)と並んで、我が国の宇宙輸送システムが実力を発揮する舞台が用意されたといえることができる。

図表2 HTVの外観³⁾

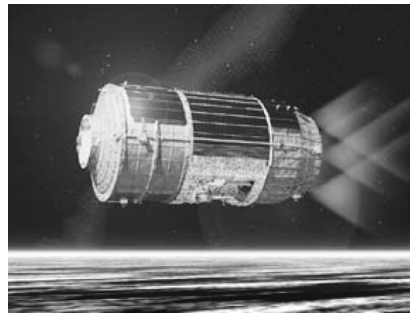


Photo by JAXA

HTVは、図表2に示すように円筒状で、後端(図の右端)が推進装置や誘導制御機器等、また中胴部から先がペイロード用の容器であり、与圧部と非与圧部に分かれている。積載できる物資は最大で約6トンである。ISSヘドッキングするうえでは、技術試験衛星Ⅶ型(ETS-Ⅶ、きく7号)で培われた無人での自動ランデブ技術が反映される。日本は負担すべきISSの運用経費の代替としてHTVによる物資補給を行うことになっており、ISSの運用期間にわたって、一定割合の物資補給需要があるものと期待できる。

4 - 3

欧州の自動輸送機 ATV

欧州のATVは1990年代から構想が練られてきた。1995年10月のESA閣僚級理事会においてATV開発が決定され、ドイツを

図表3 ATV(ジュール・ベルヌ)の外観⁴⁾



Photo by ESA

中心に開発が行われてきた。現時点では、図表3に示すような外観の「ジュール・ベルヌ」と呼ばれる技術実証機の打上げを2006年に予定している。これまでの開発経過は必ずしも順調とは言えず、コスト超過や技術的な課題などの問題もあったが、現在は欧州として他の宇宙関連プロジェクト予算を圧縮してでも遂行すべき重要な位置に置かれている。このATVは、アリアン5型ロケットで打ち上げられ、ISSに自動的にランデブ・ドッキングして、最大6ヶ月間滞留することを想定している。ISSの最前部右舷側にある欧州実験モジュール「コロナバス」の実験機器や食料などの生活物資を、年に1回程度の頻度で輸送する。打上げ時に積載可能な物資は約7.5トン、廃棄時に搭載するISSの排出物は約6.5トンとして設計されている。

5 使い切り型打上げロケット(ELV)の開発動向

5 - 1

米国の発展型使い切り型ロケット(EELV)

米国は1994年に国家宇宙輸送政策を発表し、使い切り型ロケットの発展型であるEELVの開発を国防総省(DoD)が担当することになった。開発のベースとなった

機種はアトラスⅡASロケットとデルタⅡロケットである。

ロッキード・マーチン社は2003年にアトラスⅤ(ファイブ)型ロケットの初打上げを行い、これまでに計5回の打上げに成功している。静止トランスファ軌道(GTO)投入可能重量は、3.8トンから8.7トンに向上した。重量級バージョンはGTO13トン級以上を目指し

ていたが、現在は開発を中断している。一方、ボーイング社もデルタⅢでGTO投入可能重量をデルタⅡの1.8トンから3.8トンへ向上させようとした。しかし、デルタⅢは3回打ち上げて1回しか成功せず、同社はGTO13トン級を目指して並行開発していたデルタⅣを市場に投入した。中量級のデルタⅣは、2004年までにGTO 3

トン前後の静止衛星で3回の打上げに成功し、デルタⅡからの性能向上という意味では成功した。しかし、2004年12月に初めて重量級デルタⅣ（図表4）でGTO 6トン級の実証衛星を打ち上げた際には、エンジンの早期燃焼停止で不十分な結果となった。これまでに発表された資料によれば、液体酸素供給配管で発生したキャビテーション（気泡）が早期燃焼停止の原因と見られている。ボーイング社は既に重量級デルタⅣでDoDの静止早期警戒衛星（DSP）を打ち上げる準備を始めている。

5 - 2

欧州のアリアン5増強型

欧州では、アリアンスペース社がアリアンロケットの運用を行い、世界各国の静止通信衛星の半数程度を受注している。一方で、ESAの開発プログラムにおいては、アリアン5E/ESC-AによりGTO投入可能重量10トン級を目指している。2002年12月の初打上げで、衛星を所定の軌道に投入することに失敗したが、2005年2月12日、通信衛星等を積載した同型式のロケットの打上げに

成功し、GTO7.5トン級の打上げ能力を実証した。アリアン5E/ESC-Aは、大型の静止衛星2機を同時に打ち上げて打上げコストを削減することを目指しており、コストが下がればますます競争力を高めることになる。

5 - 3

国際合弁企業の
洋上打上げシステム

最近の新しい打上げ方式として、海洋上に射点を設けて打ち上げる方式が注目される。この方式は、静止衛星打上げにおいて最も有利な赤道直下の公海上に射点を選ぶことができ、ロケットの能力を最大限利用できるというメリットがある。また、ロケットの整備は航海中の船内でも行うことができるため、作業時間の短縮効果もある。米国・ロシア・ウクライナ・ノルウェーの4カ国の企業の合弁で設立された「シー・ロンチ社」⁵⁾の船舶とロケットを図表5に示す。打上げを行う海上構造物は、海底石油掘削に使用されていた長さ130mのサブマーシブル型浮遊構造物で、「オディッセイ」と名づけられている。

図表4 重量級デルタⅣ
の外観

Photo by Boeing

シー・ロンチ社は1999年3月に性能実証衛星をGTOに打ち上げて以来、2005年3月までに計15回の打上げを行い、2000年3月に中高度円軌道のICO衛星の軌道投入に失敗した以外は、計13個の衛星の打上げに成功している。軌道投入精度は回を追うごとに向上しており、当初は20kmほどずれていたが、最近ではほとんど誤差がなくなっている。シー・

■用語説明■

多段式ロケット

打上げロケットは2段、3段と段数を多くすることで、燃焼を終えた段を切り離しながら目標とする速度や高度に到達させる。この方式を「多段式ロケット」といい、ロシアのツィオルコフスキーが1929年にその理論を発表した。

静止衛星を打ち上げるロケットは通常3段式で、静止トランスファ軌道（GTO）投入までの推進を担当する。1段目は大気圏を抜けて宇宙高度まで持ち上げ、第2段は衛星速度に達するまで加速する。第3段は軌道面を変えてGTOに投入するために用いられる。その後は衛星搭載のアポジエンジンにより静止ドリフト軌道に投入する。

なお、我が国のH-IIAロケットは2段式にもかかわらずGTOへの投入ができる。これは、第2段のエンジン（LE-5B）が再着火可能であり、第3段の役割も兼ねることができるからである。これは世界に誇りうる高度な技術である。一方、ロシアのプロトンロケットは4段式である。これは、第4段が衛星のアポジエンジンに相当し、静止ドリフト軌道投入もロケット側の役目に行っているためである。

「静止トランスファ軌道」と「静止ドリフト軌道」

静止軌道（GEO）は、地球表面からの距離が約35,786km、軌道傾斜角0°の円軌道である。衛星の周期が23時間56分で地球の自転と同期して赤道面上を周回することで衛星が静止して見える。実際には衛星は時速10,000km以上で飛行している。静止トランスファ軌道（GTO）は近地点約200km、遠地点約36,000kmの楕円軌道で、周期は12時間程度である。種子島（北緯30度）から東方向に打ち上げた場合、ロケットによりGTOに投入された後、衛星側のアポジエンジンで燃料を大量に消費して静止ドリフト軌道に移行するため、静止化後の衛星重量はGTO投入時の重量の約半分になる。なお、赤道近辺から東方向に打ち上げた場合は衛星の燃料消費は少なく済むため、この比率はもっと大きくなる。静止ドリフト軌道はほとんど静止軌道と同じであるが、わずかな周期の差や微小な軌道傾斜角などにより静止化していない軌道である。逆に、衛星の静止位置を変更する目的で、ドリフト（漂流）させるように制御することもできる。MTSAT-1R運用開始までGMS-5（ひまわり5号）の代役を務めた米国の気象衛星GOES 9号は静止位置が西経105度から東経155度へと変更された。

ロンチ社の打上げ作業スケジュールによれば、衛星を組立・指令船に積み込んでから打上げまでの期間は約3～4週間であり、このうち母港から射場までの航海に1週間を要する。これまでの打上げ間隔実績は最短で53日である。最近の打上げは2005年4月26日に西経154度の赤道直下で行われ、その際のペイロードは米国のディレクTV社の放送衛星スペースウェイ(GTO重量6.1トン)であった。その直前の打ち上げは3月1日に行われており、この間の56日という打上げ間隔は前記の最短記録に近い。

■用語説明■

「射場」と「射点」

打上げロケットを用いて衛星を打ち上げるには、ロケットを発射する場所が必要である。これを「射場」という。射場では、打上げロケットを発射地点である「射点」に据えるために、ロケット各段の組立て・点検や衛星及びフェアリングの組立てなどを行い、またそれらを結合する作業を行う。発射時の打上げ管制を行う施設や監視台などの設備もある。

5 - 4

中国の次世代ロケット

近年、米欧に次いで世界最大級の重量級ロケットの開発を目指している中国の動向が注目される。

2003年10月、ドイツのブレーメンで開催された第54回国際宇宙会議(IAC)において、中国の研究者から新しい長征ロケットに関する発表⁶⁾が行われた。中国の長征ロケットは、1号から4号までは軍事用ミサイルを人工衛星打上げ用に発展させた設計であり、燃料に非対称ジメチルヒドラジン(UDMH)を用いていたため、燃料の毒性が問題になってきた。併せて打上げ作業を簡便にすることや、信頼性を高めることなど、これまでに長征ロケット全体として

図表5 作業中のシー・ロンチ社のロケット
(ゼニット3SL)



手前：洋上発射台「オディッセイ」、奥：組立・指令船
Photo by Sea Launch

80機以上を打ち上げた経験を踏まえて、現在は長征5号系列の研究開発を行っている。

長征5号は、直径が5m(1段、2段)、3.35m(1段、2段、3段)及び2.25m(1段、2段)の計7種類の機体モジュールを組み合わせてシリーズを構成している。直径5mの1段・2段モジュール、3.35mの第3段モジュール及び2.25mの第2段モジュールのエンジンは、液体酸素・液体水素を推進剤とする推力50トンのエンジンを2個装備している。その他の3種類のモジュール(3.35m 1段・2段及び2.25m 1段)の推進剤は液体酸素・ケロシンで、推力120トンのエンジンを2個装備する。燃料充填時の第1段モジュールの重量は173.5トン(5m)、144トン(3.35m)及び64トン(2.25m)である。2段式の5mモジュールだけでは低軌道にしか投入できないが、既存の液酸・液水エンジンを用いた「HOモジュール」を追加することでGTO投入が可能になる。長征5号系列のうち、最も強力な「504/HO」モデルは、5mモジュールの周囲に4個の3.35mモジュールを取り付けて静止トランスファ軌道投入能力

の目標を15トンとしており、打上げ能力としては世界最強となる可能性がある。

長征5号はその設計思想からみて、小型衛星から重量級衛星までペイロードに応じて自在に輸送能力を調節できる柔軟性を持ち、かつ、すべてのエンジンが無公害または低公害の液体である点が、従来の長征4号までと異なる特徴である。液体エンジンは燃焼試験を行ってから使用でき、また、打上げ時には点火を確認してからリフトオフできるので、信頼性の観点からも望ましい。

なお、中国は北緯20度の海南島に4番目の射場を建設することを計画しており、長征5号は海南島射場から打ち上げられることになる可能性がある。

大韓民国が全羅南道・外羅老島に初の射場を建設する動きと併せて、中国の新射場建設の動向も注目される。

5 - 5

インドの使い切り型ロケット PSLVとGSLV

インドの宇宙開発を主導するインド宇宙機関(ISRO)は、1980

年に独自の使い切り型ロケット SLV によりインド初の人工衛星の打上げに成功し、続いて能力増強型 (ASLV)、極軌道用 (PSLV)、静止軌道用 (GSLV) などの打上げロケットの開発を進めてきた。1997 年までの打上げにおいては、SLV で 4 機中 2 機、ASLV で 4 機中 3 機、PSLV で 4 機中 2 機が失敗し、成功率は 41.7% と非常に低い状況であったが、1999 年以降、8 回連続で静止衛星 3 機を含む中量級衛星の打上げに成功しており、現在は日本の H-IIA ロケットの約半分の打上げ能力を有している。

インドは 2001 年に初めて GSLV により静止衛星 GSAT の打上げに成功した。インドの実用静止衛星であるインサットは通信と気象観測のミッション機器を搭載している。これまでに 13 機のインサットが欧米のロケットにより打ち上げられてきたが、今後は自

国の GSLV による打上げが行われるようになる可能性がある。

5 - 6

我が国の H-IIA 能力向上型ロケット

我が国の基幹ロケットと位置づけられている H-IIA ロケットはこれまでに 7 回打ち上げられ、SRB-A 分離に失敗した 6 号機を除いて 6 回成功している。今後さらに数回の打上げ成功が続けば、H-IIA の設計技術は確立できたものと見なされて、運用主体が JAXA から三菱重工業株式会社 (MHI) に移管されることになっている。現在は JAXA 又は顧客から委託を受けたロケットシステム社 (RSC) が打上げ関連作業を各宇宙関連企業に委託する形態になっているが、民間移管後は MHI が主体となって関連企業の製品や作業者をとりまとめて打上

げの準備を行い、最終段階の打上げ管制だけを JAXA に委託するという形になる。時期的には平成 18 年度契約分からと見込まれるが、このことによって、我が国では打上げロケットの定常運用と新規開発が明確に区分されることになる。

新規ロケットの開発を担当する JAXA は、H-IIA 能力向上型のコンフィギュレーションを種々検討してきたが、今後は、直径を 4 m から 5 m に拡大し、1 段の主エンジンを 2 個束ねた形にして、GTO 投入可能重量 6 トン級を目指そうとしている。この性能目標が実現すれば、HTV を低軌道に打ち上げることができ、また、インテルサット 10 型衛星 (GTO5.6 トン) のような世界最大級の通信衛星を商業的に受注して打ち上げることも可能になる。

6 月以遠の深宇宙への輸送

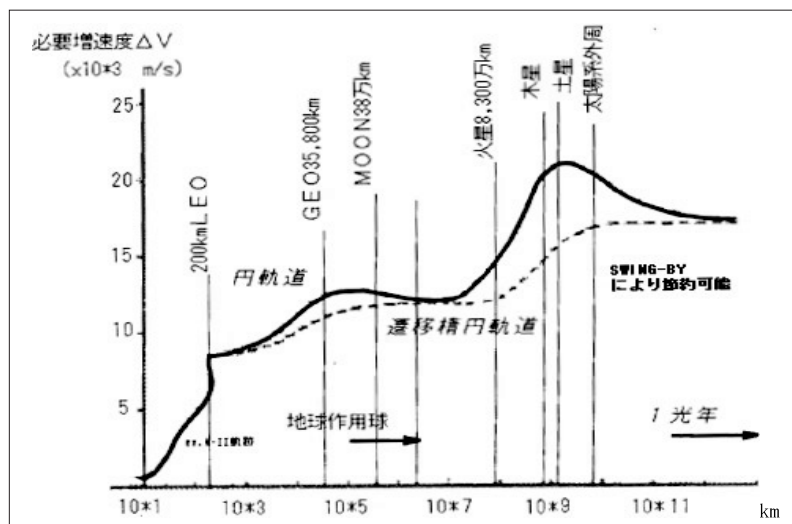
宇宙のある高度へ到達するために必要となるエネルギーは ΔV (デルタブイ)、すなわち「増速度」という数値で表される。図表 6 は、高度 10km から 1 光年に近い距離まで飛行するのに要する ΔV をグラフで示したものである⁷⁾。

図表 6 から、200km の高度に到達するのに必要な増速度は約 8 km/s であり、静止軌道 (GEO) と月に到達するための増速度はほとんど変わりがなく約 12 km/s であることがわかる。また、火星までの距離は月までの距離と比べて約 200 倍、木星・土星までの距離は数千倍あるが、それらの惑星に到達するための増速度は意外に小さいことが分かる。このような深宇宙への飛行においては、打上げロケットだけでなく探査機に搭載した推進系も ΔV の一部を担うこ

とになり重要な役割を果たしている。また、惑星探査機の飛行計画では、 ΔV を節約するために地球または他の天体の重力を利用して加速するスイングバイという手法が用いられる。

NASA はこれまでに太陽系探査機として「ユリシーズ」(太陽)、「メッセンジャー」(水星)、「マゼラン」(金星)、「ルナ・プロスペクタ」(月)、「マーズオブザーバ」(火星)、「ガリレオ」(木星)、「カッシーニ」

図表 6 地球から到達するために必要なエネルギー ΔV ⁷⁾



(土星)、「ボイジャー」(太陽系外飛行中)、「スターダスト」(彗星)などを打ち上げている。このうち、カッシーニは2004年12月に土星の衛星タイタンに最接近し、2005年1月にはESAが開発した「ホイヘンス」をタイタンへ向けて降下させた。

旧ソ連では、「ベネラ」(金星)、「ルナ」(月)、「マルス」(火星)、「ベガ」(彗星)などの深宇宙探査機が過去に打ち上げられている。

我が国では、JAXA 宇宙科学研究本部 (ISAS) が固体ロケット (L-3SII や M-V) により、「はごろも」(月)、「のぞみ」(火星)、「すいせい」(彗星)、「はやぶさ」(小惑星)などを過去に打ち上げている。「のぞみ」は酸化剤加圧バルブ系不調等のため火星到達に失敗

したが、「はやぶさ」は小惑星「イトカワ」に順調に接近しており、2005年中に「イトカワ」から物質サンプルを取得して帰還する計画である。このような飛行を行うため「はやぶさ」には探査機自身の推進装置としてイオンエンジンを

用いている。微量とはいえ深宇宙空間から物質を採集して地球に持ち帰る、いわゆる「サンプルリターン」というミッションは、まさに宇宙輸送システムのひとつと言える。

■用語説明■

「固体ロケット」と「液体ロケット」

「固体ロケット」とは、多段式ロケットの各段の推進装置がすべて固体ロケットモータで構成された打上げロケット、「液体ロケット」は、液体エンジンで推進する打上げロケットをいう。

米ソ冷戦時代の宇宙開発競争において、米ソの打上げロケットはほとんどが液体エンジンのみを推進力とする液体ロケットであった。代表的な例として、ロシアのソユーズロケットは1機当たり5組の液体エンジン(燃焼器は20個)が使用されており、ソ連時代を含め40年間で1,000機以上打ち上げられている。既に運用を終了した欧州のアリアンIV型ロケットの系列では、最大性能の44L型は第1段に8個の液体エンジンを使用していた。

我が国では、1955年4月に東京大学が固体推進剤のペンシルロケットの水平発射に成功して以来、ISASで全段固体の「K(カップ)」「L(ラムダ)」「M(ミュー)」のシリーズが開発されてきた。

7 再使用型宇宙輸送システム

再使用型宇宙輸送システムとは、打上げロケットの機体を回収することにより、燃料を再充填して次の飛行ができるように設計されたシステムである。再使用型宇宙輸送システムの基本的な形式として、単段式(SSTO)と二段式(TSTO)に大別される。二段式再使用型宇宙輸送システムの場合、1段目を通常の航空機とし、2段目を空中で発射する形態も考えられる。

単段式か二段式のいずれかが実用化されれば、繰り返し運用コスト(リカーリング・コスト)は主に消費する燃料や作業費などだけになり、毎回巨額の製造費を必要とする使い切り型に比べて打上げコストを大幅に削減できると期待される。特に軌道上に建設する超大型衛星の資材打上げミッションに対して有効である。今後化石資源が枯渇していくという人類全体のエネルギー危機の中

で、太陽光発電衛星(SSPS)を開発することはエネルギー戦略のひとつである。ただし、その衛星を打ち上げるための輸送コストが莫大であったり、獲得できる電力以上のエネルギーを開発・運用のために投入するようでは開発計画の妥当性がない。スペースシャトルが登場した当時は、太陽光発電衛星の実現が近いと考えられたが、スペースシャトルの場合は外部タンク(ET)が使い切り型であって完全再使用型ではないことや、帰還後の補修に予想外の時間とコストがかかったため、太陽光発電衛星の建設計画も急速にしぼんでしまった。

スペースシャトルだけでなく、これまで各国で試みられた再使用型宇宙輸送システムの開発は、挑戦と失敗の連続であった。過去に各国が行ってきた再使用型宇宙輸送システム開発プロジェクトの概況を以下に記す。

(1)米国

①NASAは1994年の国家宇宙輸送政策に基づき、スペースシャトルの後継機として再使用型宇宙輸送機(RLV)の開発を担当することになり、リフティングボディ型の「X-33」型試験機を開発しようとしたが、複合材タンクの軽量化で思わしい結果が得られず、開発を中止した。

②マクドネル・ダグラス社(当時)は米国防総省(DoD)の委託により垂直上昇・垂直着陸型の「デルタクリッパー」を開発し、1993年の初飛行成功以後、計10回以上試験飛行を行ったが、1996年の試験飛行で着陸時に脚の不具合のため転倒し、焼失した。

(2)ロシア

旧ソ連は1988年に「エネルギー

ア」ロケットにより無人宇宙往還機「ブラン」の打上げ及び回収に成功したが、その後財政難のため計画は中止された。

(3)欧州

ESA はアリアン 5 型ロケットで小型の宇宙往還機エルメスを打ち上げようとしたが、財政面での制約のため、開発を断念した。

(4)日本

1990 年代に宇宙開発事業団 (NASDA = 当時) と航空宇宙技術研究所 (NAL = 当時) が共同して、H-II ロケットで打ち上げて水平着陸で回収する宇宙往還機 (HOPE) の研究開発を行い、関連して極超音速飛行実験 (HYFLEX) や小型自動着陸実験 (ALFLEX)

の飛行試験も行った。HYFLEX は飛行には成功したが、機体が海中に没してしまい、回収ができなかった。このため、再突入後の機体材料の変化に対する詳細な分析を行うことができなかった。2003 年には、キリバス共和国・クリスマス島やスウェーデン・エスレンジにおける高速飛行実証 (HSFD) 試験で機体を投下して自律飛行で着陸させる実験を行った。しかし、HOPE の実機製作も行えないまま、このプロジェクトは凍結されている。2005 年 3 月に JAXA が長期ビジョンを発表し、その中で、宇宙輸送システムについては基幹ロケットである H-IIA の運用維持・発展にとどまらず、再使用型宇宙輸送システムを開発していく必要性と方向性について言及して

いる。その基本的な考え方は、小規模な繰返し運用を行うことにより、有人打上げが可能な程度まで信頼度向上を図るために新たな取り組みを行うことである⁸⁾。

米国では、アンサリ X プライズ財団の懸賞を契機に、民間ベースでの有人宇宙飛行競争が活発化してきた (2005 年 2 月号トピックス参照)。米国のスペース X 社は衛星打上げのみならず、民間の宇宙ステーション打上げやそこにランデブ・ドッキングする有人宇宙船の開発も行おうとしている。このグループには、過去に他の宇宙関連企業でロケット開発に従事した技術者が含まれている模様である。停滞気味の政府計画に先んじて、民間の自由な発想から本格的な再使用型宇宙輸送システムが実現する可能性もあり、斬新なアイデアに基づく宇宙機の創出が期待される。

また、以上に述べてきたような推進薬を燃焼するロケットとは全くコンセプトの異なる宇宙輸送システムとして、「宇宙エレベータ」の研究が急速に進んでいる (2005 年 4 月号トピックス参照)。

■用語説明■

再使用型宇宙輸送システムのコスト

再使用型宇宙輸送システムの開発には膨大な資金を必要とする。このような費用をノン・リカーリング・コスト (1 回限りの経費) という。これに対し、完成したシステムを用いて打上げを定常的に行うために必要な経費をリカーリング・コスト (繰返し経費) という。使い切り型宇宙輸送システムではノン・リカーリング・コストは再使用型より少なく済むが、リカーリング・コストは 10 倍以上もかかると考えられる。例えば 100 回の打上げで両者の総コストが等しくなるとすれば、巨大な宇宙構造物を建造することになる宇宙太陽光発電衛星 (SSPS) の部品を 200 回、300 回と繰返し打ち上げる再使用型宇宙輸送システムは非常に割安な輸送手段となりうる。

8 おわりに —我が国の宇宙輸送システム開発の進め方についての考察— ●●●●●●●●

我が国は、宇宙輸送システムという技術領域で、どのような戦略に基づいて研究開発を行うべきかを明確にすべき時期にきている。本レポートで紹介した各国の動向を勘案したうえで、次のような提案を行ないたい。

(1)国際宇宙ステーション補給機

(HTV) の実用化

HTV は、スペースシャトル退役後の国際宇宙ステーションへの物資輸送を、一定割合で担える可能性がある。HTV は打上げ時には積載物であるが、最終目的地

付近では自らの機能で目的地に到達し、宇宙輸送の重要な一部分を担っている。我が国が得意とするロボット技術等に基づく独自の自動ランデブ技術を活用して、まずは第一に HTV の実用化に注力し、国際宇宙ステーション計画におけるポジションを確保すべきである。

(2)中量級使い切り型ロケット技術の保持と発展

商業的な静止衛星の打上げ需要は年間 20 ～ 30 個しかなく、しかも米・欧・ロ・中が激しくシェアを競う中で、H-IIA ロケットが

受注を勝ち取ることはかなり難しい。しかしながら、部品点数が 28 万点にも及ぶロケットの製造技術や打上げ運用を維持することは、材料開発や製造技術など個々の産業技術における技術発展や継承を図るうえで、一定の役割を果たす。また、宇宙実験などを通じて、ライフサイエンスや環境観測など他の科学技術分野に対して、「知の創造」という面で直接的あるいは間接的に寄与しうる。H-IIA 能力向上型の開発を通じた世界最高水準の打上げ能力追求だけでなく、数多く存在する中量級のペイ

ロードを高い信頼性かつ自在性をもって打ち上げられるだけの基幹ロケット技術を保持することが必要である。

考える発展の方向性のひとつとしては、H-IIA能力向上型の開発において、米国の発展型ロケットや中国の長征5号系列と同様に、液体エンジンだけで推進系を構成することが挙げられ、この技術によって信頼度を向上させることができると考えられる。もう一つの方向性は、第2段エンジンの再々着火により衛星のアポジエンジンをを用いずに静止ドリフト軌道に投入する技術の実現を目指すことである。これにより静止衛星の製造コストが下がるとともに衛星搭載機器の重量を増やすこともでき、あるいは複数衛星の同時打上げにより衛星1機当たりの打上げコストが低減できるなど、世界的に見ても競争力の高い宇宙輸送システムとなる可能性がある。

(3)再使用型宇宙輸送システムの開発を通じた基盤技術の育成

宇宙太陽光発電衛星の開発において、獲得できる電力以上のエネルギーを開発・運用のために投入するようでは開発計画の妥当性がない。輸送コストを下げると同時に、衛星の軌道上組立てを省資源・省エネルギーかつ円滑に行う

ためには、再使用型宇宙輸送システムの開発は避けて通れない。しかし、過去の各国の失敗の背景には、再使用型特有の課題である再突入時の高温に耐える軽量構造材料の開発や革新的な推進システムの開発などの技術面での未成熟さがある。これまで「基盤技術の蓄積」と「繰り返し運用による実証」とは全く別の課題のように考えられていた。しかし、再使用型宇宙輸送システムの開発においては従来の使い切り型打上げロケットの開発とは様相が異なり、繰り返し実証を行う中で信頼性向上や長寿命化などシステムのタフネスを高める基盤技術をはぐくんでいくことが可能である。繰り返し実証を通じて、地に足のついた基盤技術を育成する体制を整えることにも大きな意味があると考えられる。

謝 辞

本稿を執筆するに当たり、三菱重工業株式会社の山崎勲特別顧問、技術士（航空・宇宙部門）の白子悟朗氏（SSC技術士事務所）、宇宙航空研究開発機構の長友正徳射場運用室長、青木宏再使用型推進系グループリーダー、岡田匡史宇宙輸送システム技術部技術領域リーダ並びに国際部の関係者から、資料提供や討議をいただいたことに対し、深く感謝します。

参考文献

- 1) Russian Space Web より；
Anatoly Zak：http://www.russian-spaceweb.com/kliper.html
- 2) JAXA プレスリリース「ISS計画に関する宇宙機関長会議（HOA）の結果について」添付3「共同声明」2005年2月2日：
http://www.jaxa.jp/press/2005/02/20050202_sac_hoa_j.html#at3
- 3) JAXAのHTVプロジェクトホームページ：
http://www.jaxa.jp/missions/projects/rockets/htv/index_j.html
- 4) ESAのATVプロジェクトホームページ：
http://www.esa.int/SPECIALS/ATV/index.html
- 5) シー・ロンチ社のホームページ：
http://www.sea-launch.com
- 6) The New Generation Launch Vehicle of Long-March Family；
Tangming Cheng 他；2003年10月（プレーメン大会）IAC-03-V.1.04
- 7) 青木宏、NASDA-TMR-95007「再使用ブースタ近未来試案」1996年10月
- 8) 岡田匡史他、「基幹ロケットの信頼度向上と繰り返し運用実証機」2005年1月

■略語のフルスペルと解説■

ALFLEX	Automatic Landing Flight Experimental 「自動着陸試験機（日本）」
ASLV	Augmented Satellite Launch Vehicle 「能力増強型衛星打上げロケット（インド）」
ATV	Automated Transfer Vehicle 「自動補給機（欧州）」
CEV	Crew Exploration Vehicle 「有人探査機（米国）」
DoD	Department of Defense 「米国防総省」
DSP	Defense Support Program 「国防支援計画（米国のミサイル早期警戒衛星）」
EELV	Evolved Expendable Launch Vehicle 「発展型使い切り型ロケット（米国）」
ELV	Expendable Launch Vehicle 「使い切り型打上げロケット」
EPA	Environmental Protection Agency 「米国環境保護省」
ESA	European Space Agency 「欧州宇宙機関」
ET	External Tank 「外部タンク（スペースシャトル）」
ETS	Engineering Test Satellite 「技術試験衛星（日本）」
FSA	Federal Space Agency of Russia 「ロシア宇宙局」
FW	Filament Winding「フィラメント・ワインディング（複合材料の製作法の1つで、樹脂に含浸させた炭素繊維の束を型の周囲に巻き付け、硬化処理してさまざまな形状の構造体を形成する方法）」

GEO	Geostationary Earth Orbit 「静止軌道（地球表面からの距離が約 35,786km の円軌道）」
GSLV	Geostationary Satellite Launch Vehicle 「静止衛星打上げ用ロケット（インド）」
GTO	Geostationary Transfer Orbit 「静止トランスファ軌道（近地点約 200km、遠地点約 36,000km の楕円軌道）」
HOPE	H-2 Orbiting Plane 「宇宙往還機（日本）」
HSFD	High Speed Flight Demonstration 「高速飛行実証（日本）」
HTV	H-2 Transfer Vehicle 「宇宙ステーション補給機（日本）」
HYFLEX	Hypersonic Flight Experimental 「極超音速飛行実験（日本）」
IAC	International Astronautical Convention 「国際宇宙会議（国際宇宙連盟（IAF）が毎年開催する全世界の宇宙関係者の会議。2005 年は福岡で開催される）」
ICO	Intermediate Circular Orbit 「中高度円軌道」
ISAS	Institute of Space and Astronautical Science 「2003 年 9 月までは文部省宇宙科学研究所、それ以後は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部」
ISRO	Indian Space Research Organization 「インド宇宙研究機関」
ISS	International Space Station 「国際宇宙ステーション」
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency 「宇宙航空研究開発機構」
KIS	Контрольно-Испытательная Станция 「RKK エネルギア社の総合試験設備」 英字表記：Kontrolno-Isptatel'naya Stantsiya （Complex Integrated Stand）
MHI	Mitsubishi Heavy Industry 「三菱重工業株式会社」
MTSAT	Multi functional Transport SATellite 「運輸多目的衛星」
NASA	National Aeronautic and Space Administration 「米国航空宇宙局」
PSLV	Polar Satellite Launch Vehicle 「極軌道衛星打上げ用ロケット（インド）」
RCC	Reinforced Carbon-Carbon 「強化炭素複合材」
RFP	Request For Proposal 「提案要請（契約相手方を公正に選定する手法の 1 つ）」
RKK	Ракетно-Космическая Корпорация 「宇宙ロケット会社（ロシア）」 英字表記：Raketno-Kosmicheskaya Korporatsiya （Rocket Space Corporation）
RLV	Reusable Launch Vehicle 「再使用型宇宙往還機（米国）」
RSC	Rocket System Corporation 「株式会社ロケットシステム」 (http://www.rocketssystem.co.jp)
SRB	Solid Rocket Booster 「固体ロケットブースタ」
SSC	Shirako Space Consulting (http://www2s.biglobe.ne.jp/~gshirako/)
SSPS	Space Solar Power System 「宇宙太陽光発電衛星」
SSTO	Single Stage To Orbit 「単段式再使用型宇宙輸送システム」
STS	Space Transportation System 「宇宙輸送システム（スペースシャトルの正式名称）」
TSTO	Two Stage To Orbit 「二段式再使用型宇宙輸送システム」
UDMH	Unsymmetrical DiMethyl Hydrazine 「非対称ジメチルヒドラジン」

執筆者



総括ユニット 特別研究員

辻野 照久

科学技術動向研究センター

<http://www.nistep.go.jp/>

nistep/prof/tsujino.html



専門は電気工学。旧国鉄で新幹線の運転管理等に従事した後、旧宇宙開発事業団において情報システム、世界の宇宙開発動向調査、知的財産権管理など宇宙技術全般と社会との接点に関わる業務に従事。現在はフロンティア分野を担当。