

我が国輸送システムについて

平成 23 年 2 月 24 日
宇宙開発戦略本部事務局

1. 輸送システムの意義

輸送システムの意義について、「宇宙基本計画」（2009 年 6 月 2 日宇宙開発戦略本部決定）及び「宇宙分野における重点施策について」（2010 年 5 月 25 日宇宙開発戦略本部決定）において（別紙 1）のとおり位置づけられており、以下のような意義が確認されている。なお、各国の輸送システムについては（別紙 2）を参照。

「宇宙輸送システムは、我が国が必要なときに、独自に宇宙空間に必要な人工衛星等の打ち上げを行うために、維持することが不可欠な技術である。」

2. 我が国輸送システムの開発・運用・販売の現状と課題

(1) 基幹ロケット（H2A ロケット/H2B ロケット）

① H2A ロケット

i) 現状

早期に気象衛星などの実用衛星を打ち上げるため、米国からの技術導入により N1・N2 ロケットを開発した後、打上能力と国産率の向上を目指して燃費のいい液体酸素・液体水素エンジンをを用いた H1・H2 ロケットを開発。さらに低コスト化・信頼性向上を目指して H2A ロケットを開発し、現在の基幹ロケットとなる。

宇宙開発事業団（当時）（2003 年に JAXA に統合）が三菱重工等が開発を委託。ロケット製造には 1 次下請だけでも約 370 社に及ぶ。

元来、H2 ロケットは公共衛星（主に NTT や NHK による利用）の打上を大きな目的として開発された。

平成 19 年度からは、民間の効率的かつ迅速な経営手法によりコスト低減等を進めるため、三菱重工に H2A ロケットの打上サービスを移管した。

これにより我が国は自在性のある宇宙活動を確保するために不可欠となる輸送システムについて、これまでに基盤的技術を獲得したと言える。

ii) 課題

a) 産業技術基盤の維持・発展

イ) 打上機会の確保

JAXA 及びメーカーによれば、H2A ロケットについては、部品メーカー等を含めた生産基盤の維持には年間4機程度が必要。年間3機を割り込むと特に中小の下請製造メーカーは事業から撤退せざるを得なくなる。すでに2004年以降2013年までに約370社中54社が撤退の見込み。

一方、衛星は衛星利用のニーズに応じて開発されるべきものであり、実際には政府衛星だけでは毎年4機の打上機会を確保することは難しく、商業受注でそれを穴埋めする道を欧州同様探るものの、後述の理由により競争力がない。

※直近10年のH2A ロケットの年度別打上実績・予定 ()内はH2B

2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011 (予定)	2012 (予定)
2	3	1	1	2	3	2	1	1(1)	2(1)	3(1)	1(1)

米国は、大型ロケットだけで政府衛星により年間10機以上の打上機会を有しており産業基盤の維持に貢献している。欧州も補助金により主力ロケットの受注を支援して、打上機会の確保を図っている(詳細は後述)。

ロ) 開発技術の維持

メーカーによれば、ロケット開発技術の維持には、約20年に1回は大規模な開発プロジェクトが必要であり、このまま開発プロジェクトがないと技術の散逸の恐れがある。

b) 競争力

現在 EU のアリアン5 ロケットとロシアのプロトンが大型ロケットの商業市場を席卷しており、日本がこれまで海外から受注した打上サービスは1件のみ。これは政府衛星の打上機会に余剰となったキャパシティを融通することで獲得した受注である。競争力のない理由は主に以下の3点。

イ) 打上能力

H2A ロケットは打上能力が近年の市場需要に適合しなくなっている。近年商業市場での衛星は2.5t前後と4.5t前後に2つの大きな需要があるが、本ロケットは3t以上で寿命15年の衛星を静止軌道に打ち上げられない。つまり、他国のロケットと比べると、所定の静止軌道まで

行くのに衛星の燃料をより多く負担させることになり、衛星寿命は衛星の推進薬量と比例するため、結果として衛星寿命が短くなってしまふ。

その理由として、静止軌道への打上は低緯度からが望ましいが、種子島宇宙センターは北緯 30 度に位置するため赤道近くから打ち上げる他国のロケットと比べると不利となっていることやロシアのロケットが持つような多数回の着火能力などの機能が具備されていないことが挙げられる。

ロ) 価格

現在、大型ロケットの打上市場では、H2A ロケットは主に欧州のアリアン 5 ロケット及びロシアのプロトンロケットと競争している。この中で H2A ロケットは他のロケットに比べて価格が高い。プロトンロケットはプライスリーダーであり、アリアン 5 ロケットは後述の補助金により商業受注を支援されている。

また、H2A ロケットの打上の成功率の数字上は 94% であり世界最高水準である。しかし、事実上、政府研究衛星の需要にしか対応していない H2A ロケットの打上数は 18 にとどまっており、同じ大型ロケットであるアリアン 5 (EU) の 55、プロトン K (ロシア) 239 に比べて圧倒的に少ないため、打上失敗のリスクをカバーする打上保険の料率はアリアン 5 に比べて割高に設定される。

ハ) 衝撃

H2A ロケットは衛星分離に際して 4000G 以下の衝撃があるが、近年主流の衛星は 2000G 以下で標準設計されることが多いため、衛星側に追加的な試験や解析を強いることになっている。

一方、各国の取組として、欧州では、技術基盤の維持に向けて毎年一定数の打上機会を確保するため、政府衛星で使用するほか商業受注によりその機会を得ることを図っている。アリアン 5 ロケットを運用するアリアンスペース社は商業受注を有利にするために ESA から年間約 200 億円の補助金を受けている。しかし、近年この補助金が減額された結果、赤字受注を余儀なくされている状況。

また、JAXA によれば、射場等の維持・整備のために欧米は手厚い支援を行っており、日本も年間射場等の維持のために約 130 億円を支援しているが、米国は 1000 億円に上る支援を行っている。

これに加え新しい動きとして、米国では、NASA が産業振興を目的として、ISS への貨物輸送については、SpaceX 社と Orbital Science 社を選定し、デ

モフライトについては COTS (Commercial Orbital Transportation Service ; 定額補助) により実施し、輸送サービス調達については CRS (Commercial Resupply Service ; 需要保証(アンカーテナンシー)) を実施している。

近年低価格打上サービスで話題となっている SpaceX 社は、Falcon9 ロケットを市場投入当初は市況価格のほぼ半額で提示していた。しかし、現在は市況価格に近い価格で提示している。これは製造コストが上昇したという見方の他に、企業が利益を上げるための合理的な行動として市況価格に近づけて提示しているという見方がある。Falcon9 ロケットのコストが低い理由として、同型のロケットエンジンを複数束ねて推力を得る方式を採用することにより量産効果があるといわれている。

中国やインドも低価格ロケットで商業打上サービス市場に参入を始めており、一層打上サービス市場は競争が激化している。

c) 射場

射場やテスト施設等が 30 年を経過して老朽化し、維持経費が年々増加。現在、年間 130 億円に上る。近々大規模な更新が必要。

② H2B ロケット

i) 現状

H2A ロケットの 1 段目のエンジンを 2 機束ねることにより推力を増したロケット。

国際宇宙ステーション (ISS) に貨物を運搬するための輸送機である HTV (こうのとり) を ISS に輸送するために開発・運用中。現在、2 回連続成功。

ii) 課題

H2A ロケット以上に価格が高く、こうのとりを 2009 年から 2015 年に年間 1 回計 7 回輸送する以外に当面の使用予定がない。

(2) 小型固体ロケット (イプシロンロケット、SRB-A、空中発射システム)

i) 現状

固体ロケット技術は糸川博士のペンシルロケット以来、独自に技術開発を進めてきており、すでに東京大学宇宙航空研究所 (2003 年 JAXA に統合) が M-V (ミューファイブ) ロケットによる自立的な固体ロケット技術を獲得。

しかし、平成 18 年に総合科学技術会議並びに総務省、文部科学省及び国土交通省は、M-V ロケットの技術開発の終了を決定。コスト高などを理由に事実上 M-V ロケット 7 号機の打上を最後に運用が停止された。

M-V ロケット以外の固体ロケットとして、H2A/H2B ロケットの補助ブースタ (SRB-A) に現在使用中。

固体ロケットシステムの技術基盤の維持や小型科学衛星の打上を目的として小型固体ロケット (イプシロンロケット) の開発に着手。平成 25 年度初号機打上を目指している。

経済産業省は、超小型衛星などを航空機により高高度からロケットを発射する空中発射システムの研究開発を実施中。当システムは射場を必要とせず、柔軟な打上を可能にするもの。ロケットは固体ロケットを使用予定。

ii) 課題

ロシアは、核軍縮の過程で不要となった大陸間弾道ミサイルを転用して低価格打上サービス (30 億円程度) を提供しており小型ロケットの商業市場を席卷している。ミサイル転用のロケットは新たな製造費がほとんどないため、市況に合わせて価格が決定できる。こうした市場においてイプシロンロケットの現在の課題は以下のとおり。

a) 価格

イプシロンロケットは、開発の第一段階として 1 段に SRB-A、2, 3 段に M-V ロケットの 3, 4 段を使用することで開発費を抑えつつ、機体価格も M-V ロケットの約半分の 38 億円で低減している。上記のような事情で価格が決まっているロシアのロケットに対する価格優位性を持つことは困難な状況にあるが、今後更なる低コスト化の研究開発等を通じて競争力を向上させることが必要。

b) 打上能力

小型科学衛星の要求を考慮して打上能力を設定している。しかし、小型科学衛星のみでは打上頻度が十分とは言えない。今後想定される多様な小型科学衛星や経済産業省が推進する小型衛星等の幅広い打上需要にも対応できるようにすることが必要。

(3) LNG エンジン技術

i) 現状

LNG(主にメタン)を燃料としたロケットエンジンは(別紙3)のような特性があり、以下のような用途に利用可能性がある。

a) 軌道間輸送

軌道間輸送のように宇宙で長期間燃料を保存する必要がある場合、水素燃料はタンクからの蒸発量が多い等の問題がある。またヒドラジンやケロシンは固化を防止するための温度制御(管理)が必要となる。他方、LNGは宇宙空間において液体状態で維持でき、こうしたミッションに適する。

b) LNGエンジン

LNGは使用温度が水素燃料ほど極低温ではなく液体酸素と近いこと等から、部品の共通化等を通じてコスト低減の可能性がある。また、性能(比推力)は水素燃料より低い、ヒドラジンやケロシンより高いため、上段エンジンとしての換装による低コスト化などを期待して関心を寄せている国もある。なお、輸送システムを構築する際には、エンジン製造費以外にも運用コスト、地上設備コスト、あるいはエンジンの輸出可能性などを総合的に評価する必要がある。

我が国では先般中止となったGXロケット計画の中で、上段用LNGエンジンの技術開発を行っており、長時間の燃焼試験に成功して世界に先駆けて実用化に近づいている。今後は、これまでの研究開発の成果を活用しつつ、LNG推進系に係る技術の完成に向けた必要な研究開発(高性能化・高信頼性化など)を推進することとなっている。

ii) 課題

燃焼試験は所定の成果を上げているが、この技術の発展のためには、飛行実証の機会がなく、利活用方法を含めた検討が必要である。

(4) その他民間でのロケット開発等

i) 現状

我が国では政府以外にも民間事業者が超小型衛星の打上サービス、宇宙旅行、無重力実験などを目的とした打上機開発を独自に行っており、一部の事業者は無重力実験の最も早い事業開始を2014年頃想定している。

米国では、COTSや賞金形式の支援によって、民間活力を活用した斬新な宇宙へのアクセスのアプローチの研究開発を進めている。こうした取組が現在米国でベンチャー企業など民間主体による打上機開発が活発化している1つの要因と言える。欧州も民間活力を活用するための同様のプログラムに着手した。

ii) 課題

民間事業者が打上サービス等を行うための事業環境整備として、宇宙活動法や射場の整備などが求められている。

「宇宙基本計画」
(2009年6月2日宇宙開発戦略本部決定) (抜粋)

第3章2項(5) 戦略的産業としての宇宙産業育成の推進

② 自立的な宇宙活動を支える宇宙輸送システム構築の推進

宇宙輸送システムは、我が国が必要なときに、独自に宇宙空間に必要な人工衛星等の打ち上げを行うために、維持することが不可欠な技術である。そのような観点から、これまでH-II A/H-II Bロケットを我が国の基幹ロケットとして開発・運用しており、情報収集衛星、陸域観測衛星、気象衛星や宇宙ステーション補給機などの重要な打ち上げニーズに対応すると共に、我が国の知的資産の蓄積に資する科学衛星の打ち上げにM-Vロケットで対応し、その運用終了後、固体ロケットシステム技術の維持を行っている。

基幹ロケットであるH-II Aロケットの運用は既に民間移管を完了し、民間による商業打ち上げサービスとしての活動を行っているところであるが、経済的な宇宙開発利用を行っていくためには、継続的な商業市場でのシェア獲得が不可欠であり、国は引き続き国際競争力を維持・向上するための信頼性の向上などの改良施策を推進するとともに、今後拡大が予想される多様な衛星需要に合わせ、最適なロケットで効率的に対応するための施策を推進する。

(a) 人工衛星等の開発利用計画・先端的研究開発と世界の衛星需要に対応したロケット開発利用の推進

(i) 基本的な対応

独自に宇宙空間に必要な人工衛星などを打ち上げる能力を維持するため、他国と同様、政府関係の人工衛星等を打ち上げる場合には、国産ロケットを優先的に使用することを基本とする。また、我が国の民間企業が人工衛星を打ち上げる場合にも、国産ロケットの使用を奨励する。

民間移管後の商業打ち上げサービスの安定的かつ効率的な遂行に資するため、別紙2の中長期の人工衛星等の開発利用計画により、民間による計画的調達や投資の促進等への配慮を行うとともに、商業打ち上げサービスに対応する安全確保に必要な措置を講ずる。

(ii) 人工衛星等の開発利用計画に対応した輸送システムの構築

・ H-II A系ロケット

H-ⅡA/H-ⅡBロケットについては、引き続き我が国の基幹ロケットとして位置付け、定常的に打ち上げに使用する。我が国宇宙開発利用の経済的な対応、及び商業打ち上げサービスにおける国際競争力を維持・向上させるため、継続的に信頼性、運用性、打ち上げ能力及び安全性等を改良すると同時に、コストを削減する取り組みを進める。

・ **GXロケット**

GXロケットについては、中型ロケットとして効率的な輸送の提供、基幹ロケットのバックアップロケット、戦略的な日米協力関係の構築、民間の宇宙開発利用への参入に向けた産業振興、及び液化天然ガス(LNG)推進系技術の獲得といった5つの観点から推進する意義がある。但し、現在までの研究開発状況等を踏まえた上で、LNG推進系に関する技術的見通し、安全保障ミッションを含めた需要の見通し、及び全体開発計画が明確になっていないなど全体計画・所要経費の見通しの点において考慮すべき課題が残っている。このため、国が主体となり、平成22年度概算要求までに技術的見通し、需要の見通し、全体計画・所要経費の見通しを踏まえ、開発着手に関して判断を行う。

・ **固体ロケット**

固体ロケットシステム技術は、我が国独自の技術の多くの蓄積があり、即応性を要求される打ち上げ技術として重要であり、M-Vロケット運用終了後も、その維持を行ってきた。固体ロケットについては、これまでの技術的蓄積をいかして、別紙2のような宇宙科学分野や地球観測分野などの小型衛星需要に機動的かつ効率的に対応するための手段の確保の一環として推進する。

(iii) 基盤技術の維持・発展

将来に亘って自立性を持った我が国の競争力のある宇宙輸送システム及びその技術を維持するために、第3章2(5)①項の施策を通じた基盤技術の維持・発展を図る。

(iv) 将来の輸送システムに関する研究開発

将来必要とされる多様な輸送需要に応えうるよう、研究開発を行っておくことが重要である。

このため、再使用型の輸送システム、軌道間輸送機、空中発射システム等を含めた将来の輸送システムに関する検討を進めるとともに、基盤技術の構築に向けた研究開発を進める。その際、H-ⅡAロケット等の改良活動や有人を視野に入れたロボットによる月探査等の検討にも留意する。

(b) 打ち上げ射場の維持・整備等の推進

打ち上げ射場は、国の自立的な宇宙へのアクセスを保証するための重要なインフラである。加えて、民間の商業打ち上げサービスの国際競争力を向上する観点でも確実に利用できる状況にしておく必要がある。

我が国においては、射場はJAXAで整備・運用しているが、射場の施設設備は、古い設備も多く老朽化への適切な対応が必要な状況である。

このため、射場施設設備の確実な維持及び更新による機能維持・向上を進めるとともに、打ち上げ時期の制約や射場環境の改善等に関する検討を進め、順次対応に努める。

また、今後の衛星需要やロケット開発利用に対応した長期的視点に立ったふさわしい射場の整備等の在り方についての調査・検討を進める。

「宇宙分野における重点施策について」
(2010年5月25日宇宙開発戦略本部決定)

3. (1) 我が国の自律性確保に必要な基盤技術(輸送系・衛星系など)の獲得・確保

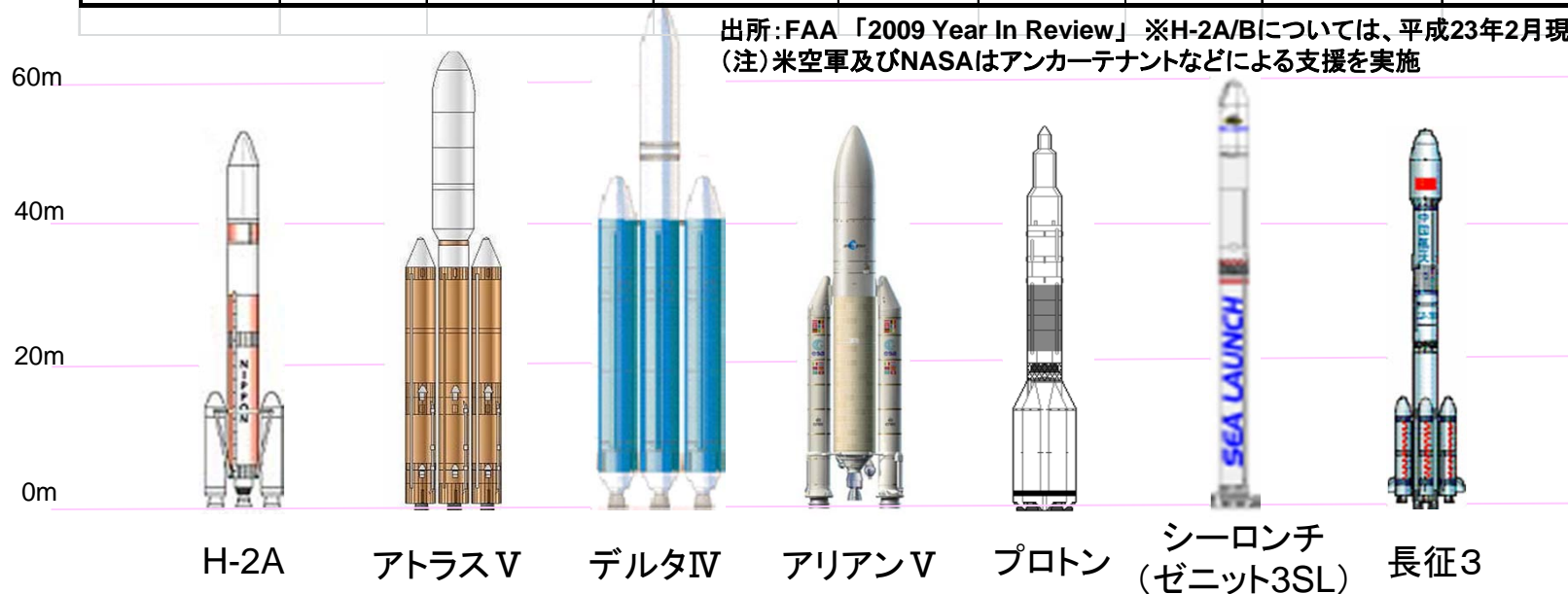
今後の宇宙の重要性に鑑みれば、我が国として、宇宙活動に係る自律性を保持し続けることが必要不可欠である。具体的には、宇宙空間へのアクセスを可能とする輸送系(H-IIAロケット、小型固体ロケットなど)や、人工衛星に共通的な部分であるバス、様々な観測を行うセンサーに係る技術などが該当するが、今後とも、我が国が、これらの技術確立し、自律性を確保していくためには、長期的な視点に立った弛まない新たな技術開発を継続的に行い、人材の育成や経験・知見の蓄積を図ることによってロケットや衛星に係る総合的な技術力を継続的に発展・向上させていくことは必要不可欠である。

その際、それらの技術を支えている戦略的な部品を開発・確保することについても留意することが必要である。特に、これまで海外からの輸入に依存している部品の中には、今後、その輸入が困難になることが見込まれるものもあり、早急な対応が必要である。また、シングルソースになっている部品などのセカンドソースの確保、中小企業や大学などの優れた技術の活用も含めた民生部品の適用拡大を図ることも重要である。

世界の主要な大型ロケット

ロケット名称	運用国	開発主体	製造主体	打上開始年	最大低軌道打上能力(t)	2009年の打上成功回数	直近10年間の打上成功回数(※)	射場
H-2A	日本	JAXA	三菱重工	2001	11.7	2/2	17/18	種子島
H-2B	日本	JAXA/MHI	三菱重工	2009	19	1/1	2/2	種子島
アトラスV	米国	ロッキードマーチン社 / 米空軍(注)	ULA	2002	20.5	5/5	19/19	バンデンバーグ、ケープカナベラル
デルタIV	米国	ボーイング社 / 米空軍(注)	ULA	2002	22.6	3/3	11/11	バンデンバーグ、ケープカナベラル
アリアンV	欧州	ESA	EADS	1996	17.3	7/7	44/46	クールー
プロトン	ロシア	ソ連/ロシア	クルニチェフ	1967	21	10/10	78/82	バイコヌール
シーロンチ (ゼニット3)	米、露、ウクライナ	シーロンチ社	ユズマッシュ	1999	15.2	1/1	26/28	太平洋上
ファルコン9	米国	スペースX社 / NASA(注)	スペースX社	2010	10.4	0	2/2	フロリダ ケーズリン環礁
長征3B	中国	国家航天局	中国ロケット技術研究院	1996	13.6	1/1	7/7	西昌

出所: FAA 「2009 Year In Review」 ※H-2A/Bについては、平成23年2月現在までの数字
 (注)米空軍及びNASAはアンカーテナントなどによる支援を実施



世界の主要な中小型ロケット

ロケット 名称	運用国	開発主体	製造主体	打上開 始年	最大低軌道 打上能力(t)	2009年の 打上成功回数	直近10年間の 打上成功回数	射場
Delta II	米国	ボーイング/ 米空軍(注)	ULA	1989	6.1	8/8	60/60	バンデンバーグ、 ケープカナベラル
Falcon1/1e	米国	スペースX社	スペースX社	2006	1	1/1	2/5	クェゼリン
長征2C/2D	中国	国家航天局	中国ロケット 技術研究院	1975	3.5	3/3	19/19	酒泉、太原、西昌
PSLV	インド	ISRO	ISRO	1993	3.7	2/2	11/11	スリハリコタ
Dnepr	露・ウクライナ	ユスマッシュ(国 営企業)	ISCコスモラス社	1999	3.7	1/1	11/12	バイコヌール ヤースヌイ
Soyuz	仏・露	ソ連/ロシア宇 宙局	プログレス中央 設計局	1963	7.8	13/13	99/100	バイコヌール プレセツク クールー
Rocket	独・露	ソ連/フルニチエ フ	フルニチェフ	1994	1.9	3/3	10/11	バイコヌール プレセツク
イプシロン	日本	JAXA	IHIエアロス ペース	—	1.2	2013年打上予定	—	内之浦
Vega	欧(伊中心)	ESA	ELV	—	2.3	2011年打上予定	—	クールー
Taurus2	米国	オービタルサイ エンス/NASA (注)	オービタルサ イエンス	—	5.4	2011年打上予定	—	ワロップス
Angara	露	ロシア宇宙局	フルニチェフ	—	3.7	2013年打上予定	—	プレセツク バイコヌール

■ は現在開発中のロケット

(注)米空軍やNASAはアンカーテナントなどにより支援

出所:FAA「2009 Year In Review」
 ※開発中のロケットについては推測値。
 ※GXロケットについては開発中止により記
 載してません。

主なロケット推進薬の比較

推進薬 (酸化剤/燃料)		LOX/LNG	貯蔵式推進薬		LOX/LH ₂				LOX/ケロシン	
			N ₂ O ₄ /Aerozine50	N ₂ O ₄ /MMH						
コスト	燃料 (製造費)	安い (100円/kg)	極めて高い (20,000円/kg)		中間 (1,400-1,900円/kg)				中間 (1,000円/kg)	
	システム/機器	・LOX温度(-183°C)で対応可 ・推薬密度大きくタンク等小型化可能	・耐腐食性は必要だが、常温のため一般工業製品と同じ設計で対応可能 ・推薬密度大きくタンク等小型化可能 ・自己着火性により点火器不要でシンプル		・LH ₂ 温度(-253°C)への対応が必要 ・推薬密度小さいためタンク等大型化 ・小推力エンジンで高い打上能力が得られる。				・LOX温度(-183°C)で対応可 ・推薬密度大きくタンク等小型化可能	
性能	比推力 [s]	~365	321	324	451	465.5	446	448	359	353
	(膨張比) (*1)		65	83	85	285	83	110	280?	280
			Delta-II 2段	Arian-V 2段	Atlas-V 2段	Delta-IV 2段	Arian-V 2段	H-IIA 2段	Soyuz-2 3段	Zenit 3段
	推薬密度 [kg/m ³]	812	1,200		285				1,030	
特性	運用性	温度は低いが工業使用の範囲で取扱いやすい	毒性/腐食性があり取扱は極めて困難 (欧米では手順確立)		温度が極めて低く取扱は困難 (欧米、日本では手順確立)				常温で取扱いやすい ケロシンの凝固点が-48°CのためLOX(-183°C)との温度差が大きく運用に制約あり	
	安全性	漏れ難く、爆発しにくい	毒性あり		漏れやすく、拡散しやすい				爆発しにくい	
	貯蔵性	蒸発少 (0.3%/月)	ヒータ必要		蒸発大 (1.8%/月)				ヒータ必要	
	再使用性	すすがほとんど発生せず良好	混合するだけで着火し良好		クリーンであり良好				すすの発生が多いため不向き	

(*1) 同じ推薬の場合、膨張比が大きいほど、比推力は大きくなる。なお、比推力を大きくするためには高圧化(高い燃焼圧)が必要となり、2段燃焼サイクルのターボポンプ式等複雑なエンジン構成となる。

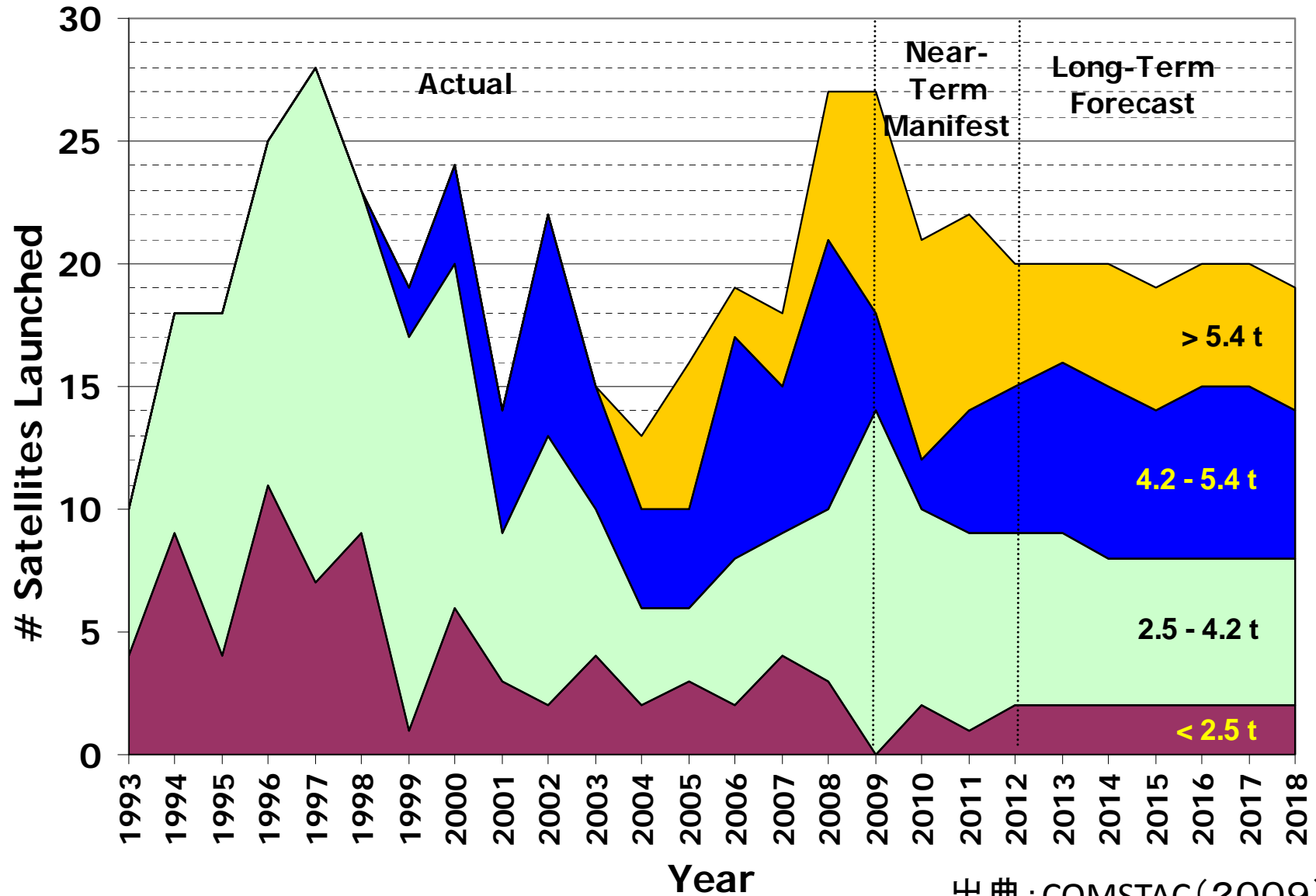
出典: (1)航空宇宙工学便覧、第3版、日本航空宇宙学会編、(2) International Reference Guide to Space Launch Systems, 4th Editions, AIAA

(3)LNG推進系飛行実証プロジェクトの開発状況について、平成18年9月26日、資料1-2-3、宇宙開発委員会推進部会LNG推進系飛行実証プロジェクト評価小委員会、等

:有利
 :不利
 :中間

商業静止衛星打上需要予測

別紙4



出典: COMSTAC (2009)