

CRDS-FY2011-CR-02

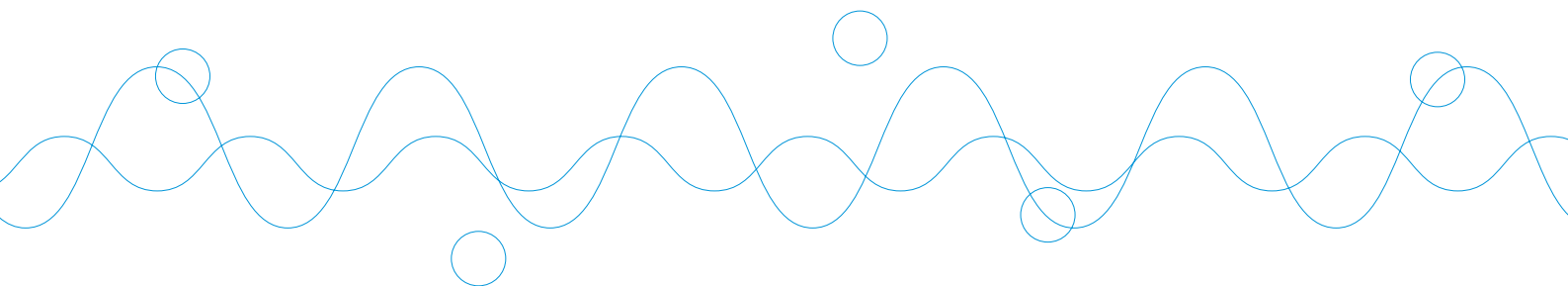
ATTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTAAC T CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTAAC T CTCAGACC

G-TeC報告書

世界の宇宙技術力比較

～A Comparative Study on
Space Technology in the World～

0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
0101 000111 0101 00001
001101 0001 0000110
0101 11
00110 11111100 00010101 011



独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

エグゼクティブサマリ

本書は、先端科学技術分野の一つとして脚光を浴びている宇宙技術について、先進各国・地域の技術力の比較を行ったものである。同種の試みとしては、科学技術振興機構（JST）の中国総合研究センター（CRC）が、2010年に中国の科学技術力の調査と並行して、米国、欧州、ロシア、日本、インド及びカナダを含めた合計7カ国・地域の宇宙技術力比較を実施している。その結果は、米国が1位、欧州とロシアが2位・3位グループ、日本と中国が4位・5位グループ、インドとカナダが6位・7位グループとなっている。

今回は、この中国総合研究センターでの調査結果を基にして、宇宙技術力を宇宙輸送分野、宇宙利用分野、宇宙科学分野及び有人宇宙活動分野の四分野に分けて評価した。具体的には、次のとおりである。

- ・宇宙輸送分野：スペースシャトルの退役、中国の打上げ数の目覚ましい増加などを踏まえ、ロケットやエンジンの性能面からも技術力を分析した。
- ・宇宙利用分野：衛星バス技術・衛星通信放送技術・地球観測技術・航行測位技術についてそれぞれいくつかの観点から分析を行った。
- ・宇宙科学分野：前は探査機の数など工学的な見地からの評価が中心であったが、今回は主要な会議での論文発表数や各国の代表的な雑誌のインパクトファクターの比較など理学的な観点からの評価を追加した。
- ・有人宇宙活動分野：有人宇宙船技術や有人活動支援技術を中心に技術力の評価を行った。

今回の結果は、前回と比べて全体としてそれほど大きく変化していない。ただ、前回若干の差のあった欧州とロシアは、ロシアの新機種衛星の打上げなどでロシアの技術力がより高く評価された結果、欧州とロシアは同点となっている。また、宇宙科学分野の評価が理学的な観点から詳細化されたため、日本と中国の科学技術力の距離が若干広がる結果となった。

なお今回の比較調査は、2011年8月末までの各国・地域の宇宙開発動向をベースにして取りまとめており、その後も各国・地域において活発に宇宙活動が進められると想定されるため、今後とも適当なタイミングで見直していくことが重要と考えられる。

Executive Summary

This report describes the comparison of space technology which is in the spotlight as one of the cutting-edge science and technology of advanced nations and regions. A similar attempt was made when JST China Research Center(CRC) has conducted the survey of Chinese space activities in 2010. Not only the survey of Chinese own space technologies was conducted, but also a technological comparison with U.S, Europe, Russia, Japan, India and Canada was carried out. As a result, the U.S. Space technology was first rank, Europe and Russia were in second and third rank group, Japan and China were fourth and fifth rank group, and India and Canada were sixth and seventh rank group.

Based on the survey results of the Chinese Research Center, we evaluated the space technology by dividing it into four sectors as follows; space transportation, space utilization, space science and manned space activities.

- Space Transportation Sector.

With retirement of the space shuttle, and remarkable growth of China in launch number, we analyzed performance in terms of launch vehicles and engines.

- Space Utilization Sector.

We have analyzed from the several perspectives each of the satellite bus technology, satellite communications and broadcasting technology, earth observation technology and navigation & positioning technology.

- Space Science Sector.

The previous evaluation was only focused on engineering view represented by the number of spacecrafts, but this time we added new evaluation from scientific view by comparison of the number of papers presented at major conferences and the impact factor of major journals.

- Manned Space Activities Sector.

We have evaluated on the manned spaceship technology and support technologies for manned space activities.

Our results have not changed significantly less overall than before. However, there was a slight difference between Europe and Russia last time, the result this time was evaluated higher in the Russian newly launched satellite technology, so Europe and Russia have been equalized. Also, between Japan and China, because we refined the perspective of space science and scientific evaluation, the survey has resulted in widening a slight gap of scientific and technological capabilities.

Noting the fact that in this comparative study has been compiled based on national and regional space development trends until the end of August 2011, and because it is assumed that space activities in each country will be conducted actively in the future, henceforth is important to review at proper timing.

目 次

エグゼクティブサマリ

はじめに	3
1. 評価結果のまとめ	6
2. 宇宙輸送システム分野	7
(1) ロケットの信頼性.....	7
(2) ロケットの最大性能.....	9
(3) 推進装置の性能.....	11
(4) 打上げ運用性.....	13
(5) 複数衛星打上げ能力.....	14
(6) 有人打上げ技術.....	15
(7) 宇宙輸送システム分野のまとめ.....	16
3. 宇宙利用分野	17
(1) 衛星バス技術.....	18
① 静止衛星用標準バス.....	18
② 衛星バスのラインアップ.....	19
③ 部品、要素技術、搭載コンポーネント等.....	20
④ その他（品質信頼性、情報公開等）.....	21
⑤ 衛星バス技術のまとめ.....	22
(2) 衛星通信放送.....	23
① 衛星通信放送技術開発.....	23
② 衛星通信放送ミッション.....	24
③ 衛星通信企業の売上げ（2010年）.....	25
④ 衛星通信放送のまとめ.....	26
(3) 地球観測	27
① 地球観測ミッション.....	28
② 地球観測センサの種類と性能.....	28
③ 公共利用（気象・防災・環境）.....	30
④ 商用利用（衛星製造販売・衛星画像販売）.....	31
⑤ 国際貢献.....	32
⑥ 地球観測のまとめ.....	34
(4) 航行測位	35
① 航行測位衛星打上げ数.....	35
② 測位性能・能力.....	36

③ 測位利用.....	37
④ 航行測位のまとめ.....	38
(5) 宇宙利用分野のまとめ.....	39
4. 宇宙科学分野	40
(1) 地球近傍宇宙環境観測.....	40
(2) 天文観測	42
(3) 月・惑星探査.....	44
(4) 宇宙科学分野のまとめ.....	46
5. 有人宇宙活動分野	47
(1) 有人宇宙船と運用管制技術.....	47
(2) 有人宇宙滞在技術.....	50
(3) 有人宇宙活動支援技術.....	52
(4) 宇宙環境利用技術.....	53
(5) 有人宇宙探査技術.....	54
(6) 有人宇宙活動分野のまとめ.....	55

はじめに

独立行政法人科学技術振興機構（JST）研究開発戦略センター（CRDS）においては、重要な科学技術に焦点を当て、各国・地域を調査・分析することで、日本のポジションを把握し、今後の我が国の取るべき研究開発戦略の企画立案に資することを目的として、「G-TeC（Global Technology Comparison）」という調査を実施している。本書は、この G-TeC の対象として宇宙技術を取り上げ、調査分析した結果を取りまとめたものである。

宇宙に係る科学技術については、1957年の旧ソ連の Sputnik 衛星打上げ成功を契機として、ソ連と米国が開発競争を熾烈に進めてきた。当初は軍事技術や国威発揚としての側面が強かったが、その後欧州や日本などが参入し、通信放送・気象観測・地球観測などの分野で人工衛星の民生利用が進むに従って、宇宙技術開発は科学技術先進国におけるハイテク技術分野として脚光を浴びるに至っている。今回、G-TeC 調査の一環でこの宇宙技術を取り上げたのは、このような理由による。

CRDS の兄弟組織である JST 中国総合研究センターは、2010年に中国の科学技術力の調査を実施した際、科学技術力の重要な柱である原子力・宇宙・海洋などのビッグ・プロジェクトについても調査・分析を行った。その際、宇宙に関しては中国の動向だけでなく、米国、欧州、ロシア、日本、インド、カナダの7カ国・地域の宇宙技術力比較も合わせて実施した。今回はこの技術力比較をベースとして、これに抜本的な改訂を行ったものである。具体的には、CRDS内に「世界の宇宙技術力比較調査委員会」を設置し、文部科学省宇宙開発委員会の前委員長代理の青江茂氏に委員長の任をお願いし、宇宙技術を構成するいくつかの分野における宇宙開発機関、宇宙産業、研究機関の専門家に委員として加わって頂いた。今回取りまとめられた内容は、前回の試みに比べて比較の正確さが格段に向上していると自負するものである。

今回の調査分析は、2011年8月末までの各国・地域の宇宙開発動向をベースにして取りまとめている。ただし、宇宙技術開発の性格上、軍事に係る部分も存在しており、当然のことながら軍事関連の技術は秘密になっている部分が多い。従ってここでは、民生用も兼ねて開発が進められ公開されているものを除き、軍事関連に関する記述はなされていないことを付言しておきたい。また、民生用の技術開発においても十分に公開されているとは言い難い状況のものも

あり、本書の記述において不正確であったり間違っていたりする可能性があると考えている。従って、読者の方々から具体的に御指摘いただければ幸いであり、今後の改訂の際に修正していきたいと考えている。

2011年11月

独立行政法人科学技術振興機構（JST）

研究開発戦略センター（CRDS）

上席フェロー（海外動向ユニット担当）

林 幸 秀

世界の宇宙技術力比較調査委員会 委員名簿

委員長	青江 茂	文部科学省宇宙開発委員会前委員長代理
委員	泉山 卓	株式会社 IHI 航空宇宙事業本部 宇宙開発事業推進部 プロジェクトグループ主幹
委員	臼杵 茂	宇宙航空研究開発機構 宇宙利用ミッション本部 利用推進プログラム・システムズエンジニアリング室技術領域リーダー
委員	佐藤直樹	宇宙航空研究開発機構 宇宙環境利用ミッション本部 有人宇宙環境利用・システムズエンジニアリング室技術領域リーダー
委員	鈴木茂裕	三菱重工業株式会社 航空宇宙事業本部 宇宙事業部 H-IIA/B 担当部長
委員	松永三郎	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙構造・材料工学研究系 教授
委員	迎 久幸	三菱電機株式会社 電子システム事業本部 宇宙システム事業部宇宙開発利用推進室 室長代理
委員	村井善幸	日本電気株式会社 航空宇宙・防衛事業本部 宇宙事業開発戦略室 室長
委員	村上 淳	IHI エアロスペース株式会社 営業部 次長
委員	森戸俊樹	宇宙航空研究開発機構 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送プログラム・システムズエンジニアリング室技術領域リーダー
委員	渡部潤一	国立天文台 天文情報センター 広報室長・教授
事務局	林 幸秀	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 上席フェロー
事務局	辻野照久	科学技術振興機構 研究開発戦略センター 特任フェロー

1. 評価結果のまとめ

最初に各分野の結果を総合した評価結果のまとめを表 1-1 に示す。

前回の結果と比較すると、欧州とロシアが同点となり、最近のロシアの新機種衛星の打上げなどでロシアの技術力が欧州に近づく傾向を反映していると見られる。日本は宇宙科学で理学的な観点から再評価を行った結果、米欧ロとの差が縮まり、逆に中国に対しては前回より優位性が高くなった。

表 1-1 宇宙技術力比較調査 評価結果総括表

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙輸送分野	30	28	23	26	18	21	11	0
宇宙利用分野	30	28	23	14	18	11	8	7
宇宙科学分野	20	19	10	8	7	2	2	2
有人活動分野	20	20	9	17	10	10	1	3
合計	100	95	65	65	53	44	22	12
順位		1	2	2	4	5	6	7

(100 点満点)

表 1-2 前回の結果 (2009 年 9 月作成)

分野	米 国	欧 州	ロシ ア	日 本	中 国	イン ド	カナダ
累積衛星数	8	6	10	4	3	2	1
宇宙輸送システム	9	8	10	5	6	2	0
衛星バス技術	10	8	5	6	7	3	1
衛星通信	9	8	3	6	5	4	5
地球観測	9	9	3	6	5	3	3
航行測位	10	6	8	5	5	3	4
宇宙科学	10	6	7	4	2	2	1
有人宇宙活動	9	5	8	4	4	1	3
合計	74	56	54	40	37	20	18
順位	1 位	2 位～3 位		4 位～5 位		6 位～7 位	

(合計 80 点満点)

出典：「中国の科学技術力（ビッグプロジェクト編）」

以下に今回評価を行った各分野の評価項目・評価基準・評価結果を詳述していく。

2. 宇宙輸送システム分野

宇宙輸送システムは、打上げロケットと射場施設などで構成され、宇宙軌道上でミッションを遂行する人工衛星や有人宇宙船を所定の宇宙軌道へ投入するための輸送手段となるものである。また回収技術なども含まれる。宇宙輸送システム分野の主要な指標は、ロケットの信頼性、ロケットの最大能力、推進装置、運用性、複数衛星打上げ能力及び有人打上げ技術の6項目とした。

(1) ロケットの信頼性

各国の2011年8月末までのロケット打上げ数は、ロシア>米国>欧州>中国>日本>インドの順で、各国相互間には比較的大きな差がある。前回の比較では単に打上げ数だけで評価を行ったが、今回は信頼性の観点から最近10年間の打上げ数とその成功率を評価することとした。このため、今回の評価には用いないが、参考までに最新状況を含め過去のすべての打上げとその成功率を表2-1に示す。

なお、前回はシーロンチを除外していたが、インドより打上げ数が多いことから、比較のため追加した。シーロンチは、米国ボーイング社（衛星製造）とロシア（打上げ作業）・ウクライナ（ゼニットロケット）・ノルウェー（海上発射台オディッセイ）の企業が合弁で設立した洋上打上げ会社で、主に赤道直下の太平洋で打上げを行なっている。海上発射台の母港は、米国カリフォルニア州にある。

表2-1 各国の打上げ数及び打上げ成功率 1957年～2011年8月末まで

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
打上げ成功数	1394	203	2851	74	140	24	32
打上げ失敗数	136	13	196	8	11	9	3
打上げ成功率	91.1%	94.0%	93.9%	84.1%	92.7%	72.7%	91.4%

出典：各種資料を基に事務局作成

最近10年間の打上げ数とその成功率のデータ、及びこれに基づく評価結果を表2-2に示す。この結果は、旧式ロケットの時代の打上げ状況まで考慮せず、主に現在運用中のロケットが運用開始された頃からの打上げ状況で比較したため、各国の現時点でのロケット信頼性に関する実力をよく表していると考えら

れる。

なお米国は、2011年1月のGlory衛星打上げにおいて、Taurusロケットのフェアリングが分離できず軌道投入に失敗した。また、同年8月にはロシアがEkspress衛星打上げにおいてプロトンMの上段のBreeze Mエンジンの制御システムの不具合により軌道投入失敗、中国が実践衛星打上げにおいて長征2Cロケットの上段の不具合により軌道投入失敗、ロシアのソユーズロケットが上段の不具合により墜落しProgress物資補給船打上げ失敗と、1週間以内に3回の打上げ失敗が続く異常事態が生じた。ロシアは8月の1週間の間に2回連続で打上げに失敗したため、プロトン・ソユーズなど主要ロケットの今後の打上げ計画が一時ホールド状態になったが、不具合原因が特定できたため、9月にプロトンロケットの打上げが再開され、ソユーズロケットによる国際宇宙ステーションへの物資補給船は10月30日に打上げられた。一方、9月の搭乗員の帰還も当初の予定より1週間程度遅れるとともに、交代の搭乗員を輸送するソユーズ宇宙船の打上げは当初の9月22日から11月14日予定へと大幅に延期された。これらの失敗はまだ分析が十分でないため、今回の評価対象としておらず、今後の取扱いとなる。

表 2-2 各国の最近 10 年間の打上げ成功率（2001 年 1 月から 2010 年 12 月末まで）

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
打上げ成功数	175	61	243	22	71	16	26
打上げ失敗数	3	1	10	1	1	3	2
打上げ成功率	98.3%	98.4%	96.0%	95.7%	98.6%	84.2%	93.3%
評 価	10	9	8	7	9	4	6

（10 点満点）

注：打上げ失敗数にはロケットの不具合による予定軌道投入失敗を含む。初期失敗（初号機成功以前の打上げ失敗）は含めていない。

（出典）評価を除くデータは、各種資料を基に事務局作成

(2) ロケットの最大性能

ロケットの最大性能は静止トランスファ軌道 (GTO) または低軌道(LEO)へ投入可能な衛星重量で比較することが適当である。

米国のスペースシャトルは、過去には静止衛星 3 機を同時に搭載して、高度約 200km の軌道上から順次打ち上げるなど、世界最強の輸送手段であったが、予算の制約や安全上の懸念などから 2011 年 7 月をもって運用終了した。現時点では米国の主力ロケットは国防総省が開発した EELV (発展型使い切り型打上げロケット) であり、ボーイング社のデルタIVロケットとロッキードマーチン社のアトラスVロケットが運用されている。このうちデルタIV4050H 型が、最大性能となる GTO13.1t・LEO23.0t と公称しているため、これを米国の代表とした。最近の動向として、米国民間企業のスペース X 社は数年以内に LEO50t 以上の重量級ロケット Falcon Heavy の運用を開始する可能性がある。また NASA は将来の惑星探査ミッションに用いる重量級打上げロケットとして、Space Launch System (SLS) の検討を行っている。

欧州のアリアン 5 ECA は現時点で世界最強の打上げロケットである。

ロシアのプロトンロケットは直径が 4 m 以下と小さいが、Breeze M 上段により GTO 6.4t という強力な仕様になっている。

日本では H-II B ロケットが最大性能の打上げロケットである。

中国の宇宙輸送システムの技術水準を諸外国と比較すると、現在運用中のロケットでは米・ロ・欧・日より一歩遅れている。ただし、有人打上げでは宇宙船と組み合わせた打上げ実績があり、実績のない欧・日より一歩先んじている。大きさで見ると、中国の長征 3 型ロケットの直径は 3.35m であるが、米・欧・日では機体の直径が 5m 級のロケットが開発され、大型化が進んでいる。直径が大きくなると燃料をより多く搭載でき、打上げ可能な衛星重量が大きくなる。今後、中国も直径 5m 級の長征 5 号 (GTO14t・LEO25t) が実運用に入れば、中国は世界最大級の打上げ能力を持つようになる可能性がある。

インドの最大性能のロケットは静止衛星打上げ用の GSLV であるが、LEO 打上げの実績はまだない。理論値 5.0t の打上げ能力を有しているとされる。

これらの性能をまとめたものが、表 2-3 である。

表 2-3 打上げロケットの性能データ

国名	ロケット名	製造企業・機関	GTO 投入	LEO 投入
米 国	デルタ IV 4450	ボーイング	13.1t* ¹	23.0t
	アトラス V 551	ロッキードマーチン	8.7t	18.5t
欧 州	アリアン 5 ECA	アリアンスペース	9.6t	20.0t
ロシア	プロトン M/Breeze M	フルニチェフ	6.4t	21.0t
日 本	H-II B	三菱重工業	8.0t* ¹	16.5t
中 国	長征 3	長城工業総公司	5.2t	11.0t* ¹
インド	GSLV Mk-2	インド宇宙研究機関 (ISRO)	1.5t	5.0t* ¹
多国籍企業	ゼニット 3SL	シーロンチ	6.2t	13.9t* ¹

*1：理論的性能値(実績なし)

出典：各種資料を基に事務局作成

以上を踏まえて、各国の最大能力を比較する上で、低軌道への最大投入能力の理論値を用いた。結果は表 2-4 に示す。

表 2-4 打上げロケットの最大性能の評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
ロケットの最大性能 (LEO)	23.0	20.0	21.0	16.5	11.0	5.0	13.9
評 価	10	9	9	7	5	2	6

(10 点満点)

(出典) 評価を除くデータは、各種資料を基に事務局作成

(3) 推進装置の性能

打上げロケットの推進装置は、大別して液体燃料式ロケットエンジン（以下「液体エンジン」と、固体燃料式ロケットモータ（以下「固体ロケット」）がある。液体エンジンに用いられる推進薬は、二液式の場合燃料と酸化剤を組み合わせたものである。固体ロケットは、燃料と酸化剤の各粉末が調合されて固形化された推進薬を燃焼する。

日本の基幹ロケットである H-IIA 及び H-IIB においては、第 1 段ロケットの主エンジンに液体式 LE-7A、第 1 段の固体燃料式補助ブースタ SRB-A、第 2 段の液体エンジンに LE-5B を用いている。

各国の各種エンジンの性能を表 2-5 に示す。

表 2-5 各国の主要な液体エンジン及び固体モータの推力

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
代表的系列	Delta IV	Ariane 5	Proton	H-II A/B	長征 3	GSLV	Zenit
1 段主エンジン	RS-68	Vulcain2	RD-259	LE-7A	YF-21B	S138	RD-171
推進薬	LOX/LH2	LOX/LH2	LOX/RP1	LOX/LH2	N2O4/UDMH	固体	LOX/RP1
推力	3341kN	1390kN	10550kN	1098kN	2962kN	4801kN	7915kN
比推力	409 秒	434 秒	316 秒	440 秒	260 秒	266 秒	337 秒
上段エンジン	RL10B-2	HM7B	Breeze-M	LE-5B	YF-75	KVD-1	BlockDM-SL
推進薬	LOX/LH2	LOX/LH2	N2O4/UDMH	LOX/LH2	LOX/LH2	LOX/LH2	LOX/RP1
推力	110kN	64.8kN	19.62kN	137kN	78kN	75kN	84kN
比推力	462.4 秒	445.5 秒	325.5 秒	448 秒	437 秒	460 秒	356 秒
補助ブースタ	GEM60	MPS		SRB-A	YF-20B	Vikas	
推進薬	固体	固体	なし	固体	N2O4/UDMH	N2O4/UH25	なし
推力	1615kN	5060kN		2260kN	732kN	760kN	
比推力		275.4 秒		283.6 秒	259 秒	261 秒	

出典：各種資料を基に事務局作成

これらの推進装置を評価するポイントとしては、燃料の種類、推力の大きさや比推力の大きさなどがある。第 1 段エンジンは、打上げ時の重力損失や大気による抗力損失を少なくするため、推力が大きい方が有利である。一方、上段エンジンは、第 1 段で考慮したような損失が少なくなるため、増速量に密接に関係する比推力が大きい方が有利である。なお、推力の単位は N（ニュートン）、比推力の単位は秒である。

まず、使用する燃料については、第 1 段・上段とも無公害の推進薬である液体酸素／液体水素（LOX/LH2）を用いたエンジンに満点の 5 点を与え、低公害型の LOX/RP-1 を用いたエンジンには 4 点を与えた。人体に対し有害な物質である非対称ジメチルヒドラジン（UDMH）などの燃料を用いたその他のエンジンは 3 点とした。

次に推力及び比推力の評価基準については、次の通りとした。

推力：5000kN 以上：5 点、2500～4999kN：4 点、2499kN 以下：3 点

比推力：450 秒以上：5 点、400～449 秒：4 点、399 秒以下：3 点

補助ブースタについては、推力のみで評価した。

表 2-6 に評価結果を示す。

表 2-6 推進装置の性能の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
1 段主エンジン燃料	5	5	5	4	5	3	3	4
1 段主エンジン推力	5	4	3	5	3	4	4	5
上段エンジン燃料	5	5	4	4	5	4	4	4
上段エンジン比推力	5	5	4	3	4	4	5	3
補助ブースタ	3	1	3	0	2	1	1	0
合計	23	20	19	16	19	16	17	16
評 価		10	9	7	9	7	8	7

(10 点満点)

(4) 打上げ運用性

各国のロケットの運用に関する技術力を比較するため、ミッションインテグレーションに要する期間と同一射点からの打上げ機数を調査した。その結果を表 2-6 に示す。

このうち、ミッションインテグレーション期間については、概ね 18 カ月から 24 カ月程度で、顕著な差異は見られなかったため、評価は同一射点からの打上げ機数を重視した。

表 2-7 に評価結果を示す。

表 2-7 打上げ運用性の評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
ミッションインテグレーション期間	18～24 か月	10～40 か月	12～24 か月	18 か月	24 か月	18 か月	18 か月
同一射点からの年間打上げ機数	3～5 機	6 機	5～8 機	3 機	4 機	2 機	5 機
評 価	8	10	10	6	7	4	8

(10 点満点)

出典：評価を除くデータは、各種資料を基に事務局作成

(5) 複数衛星打上げ能力

5 トン級の大型静止衛星を 2 機同時に打ち上げた実績を有するロケットは、欧州のアリアン 5 型ロケットだけである。

中型静止衛星まで拡大すると、ロシアのプロトンロケットは 2011 年に初めて 2 機同時打上げの実績ができた。

日本は、H-II ロケットで 1995 年に静止気象衛星「GMS-5」（約 750kg）と大型 LEO 衛星「SFU」（約 4 トン）の同時打上げ及び H-IIA ロケットで 2002 年にデータ中継衛星「DRTS」（約 3 トン）と中型 LEO 衛星「USERS」（約 1 トン）の同時打上げを行った実績があるが、これらは世界的にみて非常に珍しい組み合わせ例である。これは静止衛星の静止トランスファ軌道とほぼ同じ軌道傾斜角でミッションを行うような大型 LEO 衛星自体が稀有であることによる。H-IIB ロケットや米国の EELV は理論値で 2 機同時打上げが可能であるが、実績はまだない。

中国は、複数衛星打上げ用のアダプタを独自開発し、各種の組合せ実績がある。今後長征 3B ロケットにより中高度軌道（MEO）の「北斗」衛星の 2 機同時打上げを行う可能性がある。

米国の EELV は、衛星の質量に合わせて補助ブースタの数を細かく調節して 1 機の大型衛星を打ち上げることが多く、複数打上げの機会はほとんどないが、同一ミッション衛星 2 機を同時に打ち上げた例はある。

これらをベースとして、基礎データとそれに基づく評価結果を表 2-8 に示す。

表 2-8 複数衛星打上げ能力の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
複数静止衛星同時打上げ実績及び技術的能力	実績あり (小型)	実績あり (大型)	実績あり (中型)	実績なし 技術能力 あり	実績なし 技術能力 あり	実績なし 技術能力 なし	実績なし 技術能力なし
静止衛星と LEO 衛星同時打上げ実績	なし	なし	なし	あり	なし	なし	なし
LEO 衛星の複数打上げ実績	あり	あり	あり	あり	あり	あり	なし
評 価	3	5	4	4	3	2	0

(5 点満点)

出典：評価を除くデータは、各種資料を基に事務局作成

(6) 有人打上げ技術

米国はスペースシャトルで年数回、1回当たり6-7名の搭乗員を輸送していたが、2011年をもって運用終了した。現在は火星探査などに向けてカプセル型の宇宙船(MPCV)の開発と民間企業による商業軌道輸送システム(COTS)の開発を進めている。スペースX社が開発に成功したFalcon 9ロケットは、国際宇宙ステーションへの物資輸送にとどまらず、有人打上げまで実現する可能性がある。

ロシアは2009年から年4回(2008年までは年2回)、1回当たり3名の搭乗員を輸送している。

中国は輸送ではなく周回するだけで、2-3年に1回、最大3名の搭乗員を搭載している。欧州・日本・インドは有人打上げ手段を持たない。

以上のデータを基にした評価結果を表2-9に示す。

表 2-9 有人宇宙船打上げ能力の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
評 価	10	0	10	0	8	0	0

(10点満点)

(7) 宇宙輸送システム分野のまとめ

これらの状況を踏まえて、主要 6 カ国・地域とシーロンチ社の宇宙輸送システム分野のレベルを相対的に評価した。他の分野と適切な点数配分を検討した結果、宇宙輸送分野は 100 点満点中 30 点を割り当てることとし、6 項目の評価項目の満点が 55 点であることから、合計点に 30/55 倍して評価点を算出した。

なお、カナダは宇宙輸送システムの開発を行っていないため、評点は 0 となる。

表 2-10 宇宙輸送システム分野の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	シーロンチ
打上げ信頼性	10	10	9	8	7	9	4	6
ロケット最大性能	10	10	9	9	7	5	2	6
推進装置	10	10	9	7	9	7	8	7
打上げ運用性	10	8	10	10	6	7	4	8
複数衛星打上げ	5	3	5	4	4	3	2	0
有人打上げ技術	10	10	0	10	0	8	0	0
合計	55	51	42	48	33	39	20	27
評 価		28	23	26	18	21	11	15

(合計 55 点満点 ⇒ 評価 30 点満点に換算)

3. 宇宙利用分野

宇宙利用分野では、人工衛星を利用した通信放送、地球観測及び航行測位などの実用システムを構築する技術力や、それを運用する能力、外国の需要に対する競争力などの観点から世界の宇宙開発先進国の比較を行う。

表 3-1 は、各国の年代別の衛星数の統計値を示す。この数自体は評価の対象とはしないが、衛星を打ち上げ始めた時期や 10 年毎に区切った各国の衛星数の推移などを見ると、各国の経済力の変化や技術向上など宇宙開発利用への取り組みぶりがある程度想像できる。なお、表 3-1 の衛星数の合計は 6,090 機となるが、表にない国 (28 カ国) や国際機関・企業 (5 機関) などの衛星数を合わせると 2011 年 8 月末までの全世界の累積衛星数は 6,353 機である。

表 3-1 各国の年代別衛星打上げ数

年 代	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
1957-1960	35	-	9	-	-	-	-
1961-1970	629	21	483	1	1	-	3
1971-1980	247	41	1053	19	7	3	6
1981-1990	234	47	1123	31	23	9	5
1991-2000	535	112	442	32	30	14	7
2001-2010	297	130	215	68	88	24	13
2011 年(8 月末まで)	23	4	13	2	7	4	0
総計	2000	355	3338	153	156	54	34

(2011 年 8 月末現在)

注：欧州には ESA 及びその加盟国の他、ユーテルサット及びユーメトサットなどを含む

出典：各種資料を基に事務局作成

以下に衛星バスの製造技術力と通信放送、地球観測及び航行測位の 3 つの利用分野の機器開発、システム構築、運用技術などの比較を行う。

(1) 衛星バス技術

人工衛星には種々のミッション機器が搭載されるが、どの衛星にも共通的に必要とされる構体系・電源系・姿勢制御系・誘導制御系・推進系・通信系などの機器を組み合わせたものを「衛星バス」という。

衛星バスの中でも、ミッション目的によらず共通的に利用される衛星バスは「標準バス」と呼ばれる。一方、ミッション目的に応じて衛星ごとに特有の形状や特徴を有する特殊バス、固有バスがある。一品製造であることが多い特殊バスや固有バスに対し、標準バスは量産型の衛星バスであるともいえる。

① 静止衛星用標準バス

通信放送分野では貴重な資源である静止軌道のスロット（静止位置）を最大限活用できるよう、衛星バスの大型化が進み、近年では 5 トンから 6 トン級の静止通信衛星が多くなっている。代表的な標準バスとして、静止衛星用標準バスの比較を実施した。性能的な評価に加え、受注状況も加味した。

過去においては米国が優位であったが、欧州は最近次々に顧客を獲得しており、ITAR 規制に制約される米国の衛星メーカーは米政府の需要以外はなかなか受注競争に勝てない状況である。米国の中でも、スペースシステムズ/ロラール社の衛星バスは移動体通信用などで大型のアンテナを搭載しており、技術的には高いレベルにある。

中国は独自の東方紅 4 型バスの輸出実績が上がり始めており、ボリビア、ラオス、ベラルーシなどその国の最初の衛星となる可能性のある通信衛星の受注を獲得している。

日本は三菱電機 DS-2000 がトルコの通信衛星 2 機を受注するなど実績を伸ばしてきている。なお日本では静止標準バスを気象衛星や測位衛星にも適用しており、受注実績にはこれらを含む。

ロシアは欧州の技術を取り入れてイスラエルやインドネシアなどの衛星を受注している。

インドはユーテルサット向けの衛星バスを受注した。

カナダは要素技術を有するものの、まだ衛星バスといえるシステムを確立していない。

各国の主要な大型衛星バスの名称や主要指標を表 3-2a に示す。

表 3-2a 各国の代表的な静止衛星用標準バス

国名	企業名	バス型式名	打上げ時重量	最大電力	設計寿命	受注実績
米 国	ロッキードマーチン (LM)	A2100A 系	3-6t	18kW	15 年	115
	ボーイング	BSS702 系	5-6t	17kW	15 年	37
	スペースシステムズ/ロラール(SS/L)	LS1300 系	6-7t	25kW	15 年	104
	オービタルサイエンシズ (OSC)	Star-1/-2	2-4t	5kW	15 年	35
欧 州	EADS アストリウム	Eurostar-3000 系	5-6t	18kW	15 年	35
	ターレス・アレニア・スペース(TAS)	Spacebus-4000 系	5-6t	15kW	15 年	27
ロシア	ISS レシェトネフ	MSS-2500-GSO	2-3t	N/A	12 年	15
日 本	三菱電機(株)	DS-2000 型	3-5t	14kW	15 年	10
中 国	中国空間技術研究院 (CAST)	東方紅 4 型	5t	18kW	15 年	11
インド	インド宇宙研究機関 (ISRO)	I-3000 型	2-3t	N/A	10 年	21

注：打上げ実績は当該バス型式の分だけを計上。製造中の衛星も含む。

出典：各種資料を基に事務局作成

表 3.2a に示す各国の主要静止衛星バスの受注実績、最大重量、最大電力などを総合的に勘案して、表 3-2b のように技術力を評価した。

表 3-2b 静止衛星用標準バスの評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評 価	10	9	6	7	7	4	0

(10 点満点)

② 衛星バスのラインアップ

衛星バスのラインアップについては、標準バス、特殊バス、固有バス等を含めて、衛星バスの多様性の観点での評価を実施した。周回型の地球観測衛星や航行測位衛星などは中型または小型の衛星バスが用いられる。日本でも JAXA

衛星を中心に各種技術開発衛星や科学衛星を開発している経緯もあり、欧米に準ずるラインアップを保有している。日本電気(株)のNEXTARバスがASNARO、ISAS科学衛星に使われ、標準バスになっている他、今後打ち上げられるGCOMシリーズでは、それより大型のGCOMバスが使われる。三菱電機(株)のUSERSバス、GOSATバス、ADEOSバスなどは衛星規模毎に標準バスとなっている。

ミッション要求の特殊性に応じて、特殊バス、固有バスで対応できる技術も評価する必要がある。米国では大型望遠鏡を搭載した「Hubble」宇宙望遠鏡衛星や、ラグランジュポイントで超大型望遠鏡を極低温冷却して運用する「JWST」(開発中)などが典型的である。日本においても太陽を常時観測する「ひので」(SOLAR-B)などの科学衛星や、「かぐや」(SELENE)、「はやぶさ」(Muses-C)等の探査衛星では、ミッション目的の特殊性に応じた専用バスを実現している。また大学を中心に教育目的等で超小型衛星(キューブサット等)を製作し打ち上げた実績が増加している。

各国の衛星バスのラインアップの種類ごとの性能や実績を勘案して、表 3-3 のように技術力を評価した。

表 3-3 衛星バスのラインアップ(静止、周回、大型、小型)の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
静止(大型・中型・小型)	4	4	4	3	3	2	2	0
周回(大型・中型・小型)	3	3	3	3	3	2	2	1
特殊バス	3	3	3	2	2	2	2	0
合計		10	10	8	8	6	6	1

(10点満点)

③ 部品、要素技術、搭載コンポーネント等

技術競争力を評価する上で、部品、要素技術、搭載コンポーネント等の技術力も重要である。衛星搭載用部品では依然として米国依存度が高く、米国の優位は揺るがないものの、欧州ではITARフリー衛星(米国の輸出規制の影響を受けない衛星)を実現するなど、自在性確保や単一ソースに依存するリスクを回避する目的で競争力を強化している。また中国は独自の生産スキームを確立している。一方日本では国産宇宙用部品製造業者が撤退傾向にあり、競争力は低下傾向である。

要素技術、搭載コンポーネントのレベルでは各国とも戦略的に優位性確保に努めており、日本においては太陽電池パドル、リチウムイオン電池など国際競争力の高いアイテムを多数保有している。

カナダは要素技術の一つであるロボットアームで卓越した技術力を有している。

なお、どの衛星バスにおいても、集積回路・太陽電池パネル・バッテリーなど、個々のコンポーネントや部品については、各国の製品が混在して使用されている。

これら进行评估した結果を表 3-4 に示す。

表 3-4 要素技術・搭載コンポーネント等の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
国際市場でのシェア	2	2	2	0	1	0	0	0
搭載コンポーネント	3	3	3	1	2	1	1	0
要素技術	3	3	3	1	2	1	1	2
衛星搭載部品	2	2	2	1	1	1	0	0
合計		10	10	3	6	3	2	2

(10 点満点)

④ その他（品質信頼性、情報公開等）

商用通信衛星のように、衛星によるサービス事業等を目的とする衛星においては軌道上寿命や信頼度などの品質信頼性に係る客観指標が重視されるのに対して、新興国に対する教育目的や入門的衛星ではむしろ廉価であることを重視する場合もある。例えば中国では新興国に対する衛星売込みに積極的であり、受注実績が増加している一方で、故障発生の方が通常商用衛星よりも高い傾向にあり、衛星技術の国際評価において留意する必要がある。また公開情報が限定的なために客観評価が難しいという実状も勘案する必要がある。

表 3-5 高信頼性・情報公開等の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
高信頼性	3	3	3	3	3	2	3	N/A
情報公開	2	2	2	1	2	1	1	N/A
合 計		5	5	4	5	3	4	0

(5点満点)

⑤ 衛星バス技術のまとめ

これらの状況を踏まえて、表 3-6 に示すように主要 7 カ国の衛星バス技術のレベルを総合的に評価した。

表 3-6 衛星バス技術の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
標準バス技術	10	10	9	6	7	7	4	0
ラインアップ	10	10	10	8	8	6	6	1
要素技術等	10	10	10	3	6	3	2	2
その他	5	5	5	4	5	3	4	0
合計	35	35	34	21	26	19	16	3
評 価		10	9	6	7	5	4	1

(合計 35 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

(2) 衛星通信放送

① 衛星通信放送技術開発

衛星通信放送は商用化が最も進んだ衛星利用ジャンルであるとともに、防衛通信技術の利用拡大を含めて技術開発が進んでいる。技術開発の主な方向としては、静止衛星のラインアップ拡大（大型化、小型化）、トランスポンダ数の増大、新たな周波数帯域の利用、移動通信向けの大型アンテナ技術、デジタルディバイドの解消のためのブロードバンド中継技術、アクティブ・フェイズドアレイ・アンテナ（APAA）によるマルチビーム化と伝送容量拡大、光通信を含む衛星間通信技術などがある。また衛星寿命が 15 年程度にまで長寿命化してきた結果として、需要変動に応じて柔軟にミッションサービスを変更するためのリコンフィギュラブル技術の開発が進んでいる。

米国は 1980 年代まで衛星通信に関する最先端技術を常に世界に先駆けて開発しており、技術的に成熟した感がある。そのため、米国航空宇宙局（NASA）は、1993 年以降は新規の通信放送衛星の技術開発を行わなくなり、有人宇宙活動や地球観測で必要性となるデータ中継衛星「TDRS」の運用を行うにとどまっている。TDRS は確立された設計に基づく衛星調達を行なうものである。一方、民間の通信事業者向けの大型静止衛星や米国防総省(DoD)向けの新たな帯域での衛星通信システムを開発するボーイング社などの衛星製造企業は、引き続き衛星システムの大型化や高信頼化・長寿命化などの先端課題に取り組むとともに、防衛通信技術で培った先進技術を民間通信放送衛星にも技術転用する仕組みにより、技術的にはトップレベルにある。

日本の衛星通信技術開発衛星としては、JAXA が通信技術試験衛星「かけはし」(COMETS)、データ中継衛星「こだま」(DRTS)、衛星間光通信実験衛星「きらり」(OICETS)、技術試験衛星「きく 8 号」(ETS-8)、超高速インターネット中継衛星「きずな」(WINDS) など新しい衛星通信技術の研究開発を通じて多くの技術成果を生み、通信技術の幅広さでは欧州を上回っている。ただしそれ以降、通信技術開発を目的とした衛星計画が途絶えたため、Ka 帯通信技術の高度化やリコンフィギュラブル技術などでは後塵を拝した感が否めない。

欧州では欧州宇宙機関（ESA）が先端的な通信技術を開発する ARTES プログラムの中でアルファバスや小型静止通信放送衛星用バスなど衛星通信分野での技術開発を行っている。欧州の衛星製造企業は多国籍化し、各国連携で大量生産体制を構築して、米国に対抗している。

中国は東方紅 4 型バスで世界水準の通信放送衛星を開発しており、データ中

継衛星「天鏈 1 号」も開発した。2011 年には 2 機目の「天鏈」を打ち上げ、ランデブー・ドッキング実験に備えている。

ロシア・インド・カナダでは目立った新技術の開発は行われていないが、世界的に確立された要素技術を組み合わせて、独自の通信放送衛星の開発・製造を行っている。

以上のような衛星通信放送の技術開発を、相対的に評価した結果を表 3-7 に示す。

表 3-7 衛星通信放送技術開発の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
大容量衛星通信	2	2	2	0	1	0	0	0
移動体通信	2	2	2	0	0	0	0	0
リコンフィギュアラブル化	2	2	1	0	0	0	0	0
大容量高速放送	1	1	1	0	1	0	0	0
秘匿性・抗堪性	1	1	1	0	1	0	0	0
データ中継	1	1	1	1	1	1	0	0
衛星間光通信	1	0	1	0	1	0	0	0
合計		9	9	1	5	1	0	0

(10 点満点)

② 衛星通信放送ミッション

衛星通信放送ミッションとしては、テレビ放送が最大のユーザであり、国際間通信など固定通信の割合は地上や海底の光ケーブル敷設に伴って減少している。一般に、地上インフラの整備が一通り完成している先進国では衛星通信の貢献が少なく、国土が広大で地上インフラが整っていない新興国や開発途上国では衛星通信が通信インフラとなり、応用範囲を広げている。特に、遠隔教育と遠隔医療が注目されている。

インドは遠隔教育の分野で最も進んでおり、小学校の授業を衛星通信で行って、全国一律の質の高い教育を実現している。さらに、遠隔教育のノウハウをアフリカ諸国に伝授している。

遠隔医療の面では、米国において遠隔医療用の聴診器や心電図計など医療計測機器の開発が進んでいるが、地上の通信インフラを利用するので、必ずしも衛星通信の応用が進んでいるとはいえない。一方、遠隔医療の必要性が高く、かつ地上インフラが不足しているインドでは、衛星通信の利用価値が高くなっている。

安全保障の面では、国防専用の通信衛星を保有しているかどうかで評価した。また、移動通信対応やブロードバンド対応の技術保有を評価した。

以上の検討を踏まえて、衛星通信放送ミッションの評価結果を表 3-8 に示す。

表 3-8 衛星通信放送ミッションの評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
通信全体での占有率	2	1	1	1	1	1	2	2
テレビ放送	2	2	2	1	1	1	1	2
遠隔教育	2	1	0	0	2	0	2	1
遠隔医療	2	1	0	0	1	0	1	0
安全保障	2	2	1	2	1	2	0	0
移動通信など	2	2	1	0	1	1	1	2
合計	12	9	5	4	7	5	7	7
評 価		5	3	2	4	3	4	4

(最大 12 点⇒評価 5 点満点)

③ 衛星通信企業の売上げ (2010 年)

ここでは 2010 年の固定衛星通信企業の売上げを比較する。我が国では「スカパーJSAT」社が 10 機以上の静止通信衛星を保有して、世界第 5 位の売上げ実績をあげている。売上げトップの衛星通信放送企業はルクセンブルクに本社を置く「インテルサット」社、2 位はルクセンブルクに本社を置く「SES」社、3 位はフランスに本社を置く「ユーテルサット」社、4 位はカナダの「テレサット」社である。ロシアの「ロシア衛星通信 (RSCC)」社は 9 位、インドの「Antrix」社は 14 位である。

中国は軍事通信衛星も商業通信衛星も運用する中国衛星通信集团公司 (China Satcom 社) と Asiasat を運用する「アジアサット」社及び APStar を運用する「APT 衛星ホールディング」社が含まれ、3 社合計では日本のスカパーJSAT 社を上回っている。なお、2009 年までは衛星放送企業も対象としていたため、日

本では BSat 社も 25 位以内に入っていたが、2010 年は除外されている。

通信放送分野の衛星に関しては、一つの国だけでなく幾つかの国あるいは国際的な機関で打上げ運用を行うという例が多くあり、特定の国の比重が大きい場合にはその国に計上したが、インマルサットのように各国が比較的均等に利用しているものは、数字の計上から除外してある。

以上の検討を踏まえて、衛星通信企業の売上げ面から見た各国の評価結果を表 3-9 に示す。

表 3-9 2010 年の衛星通信放送企業の売上げと評価
(上位 25 位に含まれる企業数と国別売上げ)

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
企業数	2	4	3	1	3	1	1
売上 (単位百万\$)	2600	4,190	370	391	424	150	821
評 価	3	4	1	2	2	0	2

(5 点満点)

注 1：第 1 位のインテルサット (2,360M\$) はルクセンブルクに本社をおくが、歴史的に米国との関係が強く、米国の顧客が多いので、実態を考慮して米国に計上した。

注 2：その他の 10 社は東アジア 5、中近東 2、中南米 2、アフリカ 1。

出典：企業数と売上げは各種資料を基に事務局作成

④ 衛星通信放送のまとめ

以上の状況を踏まえて、主要 7 カ国の衛星による通信放送のレベルを総合的に評価した結果を表 3-10 に示す。

表 3-10 衛星通信放送の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
衛星通信放送技術開発	10	9	9	0	5	1	0	0
衛星通信放送ミッション	5	5	3	2	4	3	4	4
衛星通信放送企業の売上げ	5	3	4	1	2	2	0	2
合計	20	17	16	3	11	6	4	6
評 価		9	8	2	6	3	2	3

(合計 20 点満点 ⇒ 評価 10 点満点)

(3) 地球観測

地球観測は、国家安全保障、国土保全、環境監視、海外貢献などの多様な目的のために多岐に亘る画像及び各種データ取得を実施しており、昨今は地球温暖化対策、環境汚染防止、災害対策、経済的活動（農業・漁業など）の支援などで宇宙からの地球観測の需要が高まっている。

各国の地球観測衛星としては開発中も含め以下のような衛星がある。

(a) 米国事例

地球観測 Landsat1～7、Topex/Poseidon、Jason1-2、QuickScat、GPM、EOS (Terra、Aqua、Aura)、TRMM、EO-1、ICESAT1-2、Acrimsat、Cloudsat、SMAP

気象観測 GOES (静止)、NOAA (周回)、NPP (周回)、JPSS (周回)

(b) 欧州事例

地球観測 GOCE、SMOS、Cryosat、Aeolus、Swarm、Sentinel-1～5

気象観測 Meteosat (静止)、MetOp (周回)

(c) ロシア事例

地球観測 Resurs (資源)、Okean (海洋)

気象観測 Meteor (周回)、Elektro (静止)

(d) 日本事例

地球観測 だいち(ALOS) (陸域)、いぶき(GOSAT) (大気)、

気象観測 ひまわり (MTSAT) (静止)

(e) 中国事例

地球観測 CBERS (資源)、ZY (資源)、HY (海洋)、HJ (陸域)、YG (偵察)

気象観測 FY (静止・周回)

(f) インド事例

地球観測 IRS、Cartosat (陸域・立体地図作成)、Oceansat (海洋)、Resourcesat (資源)、RISAT (レーダ)

気象観測 Kalpana (静止)

(g) カナダ事例

地球観測 RADARSAT (陸域・レーダ)

① 地球観測ミッション

各国の地球観測衛星の技術力を評価する指標の1つとして、ミッションの種類を取り上げる。各国の衛星シリーズの運用実績や成果を見れば、どのようなミッションが実施されているかがわかる。

前回の調査では気象観測・陸域観測・立体地図作成・海洋観測・レーダ観測・資源探査・大気観測・地震電磁波観測を評価対象としたが、今回の調査では電波方向探知（ELINT）及び電波傍受（COMINT）を追加した。

評価結果を表 3-11 に示す。

表 3-11 各国の地球観測ミッション実施状況の評価

ミッション	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
気象観測	3	3	3	2	2	3	2	0
陸域観測	2	2	2	1	2	2	1	1
立体地図作成	2	2	2	0	2	1	2	0
海洋観測	2	2	2	1	2	1	2	0
レーダ観測	2	1	2	1	2	1	1	2
資源探査	2	1	1	1	2	1	1	1
大気観測	2	1	1	1	2	0	0	0
電波方向探知 (ELINT)	1	1	0	1	0	0	0	0
電波傍受 (COMINT)	1	1	0	1	0	0	0	0
合計	17	14	13	9	14	9	9	4
評 価		8	8	5	8	5	5	2

(合計 18 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

② 地球観測センサの種類と性能

地球観測センサは光学・レーダに大別され、性能は主に分解能（解像度）で評価される。世界で最も空間分解能の高い衛星は、米国の偵察衛星キーホールで、分解能 10~15cm 程度と言われているが詳細は不明である。情報公開されている衛星としては米国の商用画像衛星「GeoEye-1」で、分解能 41cm である。一方、分解能は m 級であっても、同じ場所を短い頻度で観測できる時間分解能や、同時に広い面積を観測できる広域観測能力が重視されるミッションもあり、

同じ陸域観測衛星でも災害監視、地図作成、植生観測、土地利用モニタなど利用目的に応じて必要とされるセンサが異なる場合もある。例えば L バンド合成開口レーダは「JERS-1」以来日本の得意とするセンサであり、災害監視や植生、森林伐採監視などの目的で世界的なニーズも高い。また東日本大震災のような巨大災害発生時には、広域的な地殻変動を合成開口レーダで把握することができ、被害状況の目視評価には光学センサ画像が利用できる。東日本大震災では、高分解能商用衛星が原子力発電所の状況把握で活躍した一方で、広域観測能力を誇る「ALOS」は被災地全容把握に威力を発揮した。今後の「ALOS」シリーズでは高分解能化も図られる計画である。

米国や欧州は各種のセンサをほぼ網羅して開発している。ロシアは最近まで写真式の回収衛星を打上げており、情報入手のタイムリー性と画像の質は比較的高いとされるが、米欧の地球観測衛星の洗練された技術から見ると陳腐化した技術である。

日本は各種の地球観測衛星を開発しており、個別衛星の機能・性能は欧米に伍する技術水準を具備し、保有技術の種類も多岐に及んでいる。これまでは研究開発目的に特化してきた経緯もあり、継続性が担保されず個々の衛星が単発で終わる傾向があったが、最近では「ALOS」シリーズや「GCOM」シリーズなど継続的な実利用を目指して衛星をシリーズ化する方向に変化してきている。また、2009年に温室効果ガス観測技術衛星「いぶき」(GOSAT)を打ち上げたことで、二酸化炭素の発生状況を観測できる世界唯一のミッションを実施している。「TRMM」に搭載した PR (降雨レーダ) とその後継となる「GPM」に搭載される DPR (二周波降水レーダ) や日欧共同ミッションである「EarthCARE」に搭載される CPR (雲プロファイリングレーダ) などのレーダ技術も日本の得意な分野である。また、米国の「Aqua」に搭載された AMSR-E (マイクロ波放射計) やその後継である GCOM-W1/AMSR2 は、低周波を含めた広範囲・高精度での全天候型海面水温、土壌水分などを提供する観測装置である。

中国・インドは地球観測衛星を多数打ち上げており、1衛星1センサを原則とする小型衛星で単機能に絞って成功している。カナダも「レーダサット」で高水準のレーダ技術を保有している。

なお、1990年代の米国 EOS シリーズ、日本 ADEOS シリーズの頃は巨大プラットフォーム衛星に諸外国から募集した AO センサが相乗りする例が多かったが、一連の不具合の教訓を鑑みてその後の観測衛星は中・小型で単一ミッション化の傾向が強くなってきた。

最近の地球観測衛星に関しては、再び相互乗り入れが進んでおり、ある国が打ち上げる衛星に他の国の製作したセンサを搭載する例が増えてきている。その場合にはセンサ製作国に着目して評価を行っている。

地球観測センサ技術の評価結果を表 3-12 に示す。

表 3-12 地球観測センサ技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
可視高分解能	5	5	4	3	4	2	1	0
合成開口レーダ	2	2	2	0	2	0	0	2
赤外センサ	2	2	2	1	2	0	0	0
ハイパーセンサ	2	2	1	0	1	0	0	0
レーザレーダ	2	2	2	0	1	0	0	0
気象センサ	2	2	2	0	1	1	1	0
早期警戒センサ	2	2	1	1	0	0	0	0
合 計	17	17	14	5	11	3	2	2
評 価		10	8	3	6	2	1	1

(最大 17 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

③ 公共利用 (気象・防災・環境)

気象観測に関しては、世界気象機関 (WMO) における世界的な気象/環境の観測網として、「ひまわり」シリーズ (日)、「GOES」シリーズ (米)、「Metosat」シリーズ (欧)、「Electro」 (露)、「INSAT/Kalpana」 (印)、「FY-2」 (中)、「COMS-1」 (韓) などの静止衛星群と、「NOAA」 (米)、「MetOp」 (欧)、「Meteor」 (ロ)、「FY-3」 (中) からなる周回衛星群により構成されている。各国の静止衛星で全球をカバーし、相互にデータを交換し合うという世界的な観測体制が構築されている。日本では静止気象衛星として国際貢献している一方で、搭載する気象センサは輸入に依存しているのが実情であり、また気象観測を目的とした周回衛星は保有していない。

地球観測に関する全世界の取組みとしては、「複数システムによる全球地球観測システム」(GEOSS) という 10 年計画 (2006~15 年) がある。米国では商務省に属する海洋大気庁 (NOAA) が推進役になっている。GEOSS の特徴は、宇宙からの観測だけでなく、陸域・海洋・大気など現場観測のシステムと統合化した観測を行うことで、災害、健康、気象、農業など社会利益につながる 9 分野での監視・観測データの社会応用を目指している。米国では統合地球観測システム (IOES) が政府の省庁横断で実施されている。

欧州では「GMES」(環境と安全保障のための地球観測) という名称で環境監視・安全保障のためのシステム構築に欧州連合 (EU) が乗り出し、各国と共同して欧州及びアフリカを対象としたシステムを構築中であり、衛星の整備・運用を継続するだけでなく、衛星データを公共目的で実利用する仕組みができて

いる。これは欧州の GEOSS に対する貢献でもある。

日本は GEOSS 構築に当初から参加しており、10 年実施計画書の策定、事務局への人的貢献、構造・データ委員会の共同議長を受け持つなど積極的に参加している。反面で欧州 GMES のような公共利用の仕組みが定着しておらず、国による利用は研究開発目的に特化した限定的な場合が多い。文部科学省は 2011 年に「気候変動適応戦略イニシアチブ」地球環境統融合プログラムの実施機関の公募を行い、平成 18 年度から 22 年度までデータ統合・解析システム (DIAS) を整備してきた東京大学を引き続き採択することを決定した。

ロシアは気象機関が参加しているが、GEOSS への参加実績はほとんどない。

中国とインドは自国の地球観測衛星の主たる目的を減災や気候変動観測など公共的課題に置いている。カナダはレーダ衛星の性能を活用して国内の水資源の観測にも力を入れている。

以上のような状況を踏まえて、地球観測衛星の公共利用に関する評価結果を表 3-13 に示す。

表 3-13 公共利用の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
統合システム	3	3	3	0	1	0	0	0
災害	3	3	3	0	3	2	2	2
健康	3	2	2	0	1	0	0	0
エネルギー	3	2	2	0	1	0	0	0
気象	3	3	3	2	2	3	2	0
水	3	2	2	0	3	0	0	1
気候変動	3	2	3	0	2	1	1	1
生態系	3	2	3	0	1	2	0	0
農業	3	2	3	0	1	2	0	0
生物多様性	3	2	3	0	1	1	0	0
合計	30	23	27	2	16	11	5	4
評 価		8	9	1	5	4	2	2

(合計 30 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

④ 商用利用 (衛星製造販売・衛星画像販売)

地球観測衛星の製造販売の観点では欧州が先行しており、SSTL の小型衛星や、EADS アストリウム、TAS などがアフリカやアジアの新興国などに衛星販売実績を複数有する。またカナダも「レーダサット」の技術を活用してドイツの「RapidEye」の開発を行っている。韓国は Satrec Initiative がマレーシアやア

ラブ首長国連邦（UAE）の地球観測衛星を製作している。

中国はブラジルと衛星の共同開発を行っているが、販売とはいえない。米国・ロシア・インドは、他国向けに地球観測衛星を製造した実績はない。

日本では、「ASNARO」など海外販売を視野に入れた低価格衛星の開発が進められているが、まだ実績はない。アジア中堅国からは「ALOS」シリーズ衛星レベルのニーズもあるものの、このジャンルでの販売実績はまだない。

衛星画像をビジネスとする観点では、米国や欧州の企業は、受信局を運用できるユーザに対し、受信権を販売する形で売上げを計上している。受信局を持たないユーザは、画像販売を利用する。米国・欧州（仏・独）・インド・カナダなどは自国衛星の画像を販売している。米国は情報機関での利用がアンカーテナントとなり、長期にわたり民間企業が高解像度画像を販売する基盤が確立されている。欧州ではフランスの「SPOT」やドイツの「TerraSAR」などの商業画像が販売されている。インドはアントリックス社が ISRO の地球観測衛星の画像を世界中に販売している。カナダでも MDA 社が「レーダサット」の画像を販売している。

日本では民間企業である PASCO や一般財団法人 RESTEC が ALOS 画像を販売してきた。また民間企業が諸外国の商用衛星画像を販売している。

ロシアは IKI Data Distribution Service 社 (<http://smiswww.iki.rssi.ru>) が画像販売を行っている。ただし画像データはロシア衛星ではなく米国の NOAA 衛星のものである。以前は回収式偵察衛星の写真を販売していたことがある。

中国は公的研究機関や国有企業同士で画像配布等が行われていると考えられるが、販売会社はまだ存在しないと思われる。

以上の状況を踏まえて、地球観測衛星の商用利用の評価結果を表 3-14 に示す。

表 3-14 商用利用（衛星製造販売・衛星画像販売）の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
衛星製造販売	1	0	1	0	0	0	0	1
受信権販売	1	1	1	0	0	0	0	0
画像販売	3	3	3	1	1	1	2	1
評 価		4	5	1	1	1	2	2

(5点満点)

⑤ 国際貢献

(a) 国際災害チャーターへの参加

国際災害チャータは地震・津波・洪水などの広域大規模災害発生国に対し、地球観測衛星を保有する国が災害対策に有効な画像データを提供するもので、米国・欧州・ロシア・日本・中国・インド・カナダの各国の他、アルゼンチンや韓国も参加している。日本は2011年5月に「ALOS」の運用が終了し、最新の画像を取得できなくなったが、これまで多くの画像提供により貢献してきた。現在、アーカイブデータの提供や海外衛星の画像処理で貢献しており、後継衛星の開発も進めている。

各国の参加機関でみると、次のようになる。

米国 2機関=NOAA、USGS この他民間企業が協力している。

欧州 4機関=ESA、CNES (仏)、DLR (独)、DMC (英)

ロシア FSA

日本 JAXA

中国 CNSA

インド ISRO

カナダ CSA

(その他の参加国はアルゼンチン、韓国)

(b) センチネルアジアへの貢献

センチネルアジアは日本・中国・インド・韓国・マレーシア・タイ・インドネシアなど地球観測衛星を保有するアジアの国が災害発生時に相互に観測データを提供する枠組みである。センチネルアジアには、日本・中国・インドのアジア諸国以外に欧州が含まれている。これは、フランスが太平洋にニューカレドニアなどの領土を有していて、アジア地域の宇宙活動にも参加しているためである。

以上の状況から国際貢献の評価結果を表 2-15 に示す。

表 2-15 国際貢献の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
国際災害チャータ	4	3	4	1	2	1	1	1
センチネルアジア	1	0	1	0	1	1	1	0
評 価		3	5	1	3	2	2	1

(5点満点)

⑥ 地球観測のまとめ

以上の調査結果を踏まえて、主要7カ国の地球観測分野のレベルを総合的に評価した結果を表3-16に示す。

表3-16 地球観測の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
ミッションの多様性	10	8	8	5	8	5	5	2
センサ種類及び性能	10	10	8	3	5	2	1	1
公共利用	10	8	9	1	5	4	2	2
衛星販売・画像販売	5	4	5	1	1	1	2	2
国際貢献	5	3	5	1	3	2	2	1
合計	40	33	35	11	22	14	12	8
評 価		8	9	3	6	4	3	2

(合計40点満点 ⇒ 評価10点満点に換算)

(4) 航行測位

① 航行測位衛星打上げ数

航行測位衛星とは、地上の位置決定（測位）を行なうために、精密な時刻データと衛星自身の位置データを発信する衛星である。4個以上の衛星の時刻・位置データを同時に受信することにより、位置を決定することができる。これに地理情報システム（GIS）や地図データを組み合わせることによりカーナビなどの各種のGPS（Global Positioning System）応用機能が実現されている。

24機から30機の中高度周回衛星で全球をカバーする航行測位衛星システムをGNSS（Global Navigation Satellite System）という。既にGPS衛星によりGNSSを実用化している米国、2011年にはGlonass衛星の整備を完了する予定のロシアに続いて、欧州のガリレオ衛星と中国のCompass衛星によるGNSSが今後本格的な衛星群打上げ時期を迎え、世界に4つのGNSSが並立するようになると予想される。なお、ロシアのグロナスは軍民両用の航行測位衛星であるが、2010年までに必要な衛星数に到達しておらず、現在完成を急いでいるところである。（新規打上げ数と故障等による運用終了数が毎年同数程度で、長期にわたって衛星不足状態が継続していた。）GPS衛星群維持の懸念は米国にさえあり、これから初期運用体制を整備する欧州や中国も、第2段階以降で寿命の尽きた衛星や故障衛星の代替機打上げが継続できるかどうか不透明である。

全球をカバーするGNSSに対して、特定地域の航行測位衛星システムをRNSS（Regional Navigation Satellite System）という。日本では2010年に準天頂衛星の初号機「みちびき」が打ち上げられた。2011年9月30日、宇宙開発戦略本部は実用準天頂衛星システム事業の推進方針として、2010年代後半を目途に、4機体制を整備し、将来的には持続測位が可能となる7機体制を目指すことを決定した。

中国では2009年～2011年に4機の静止衛星と4機の準天頂衛星が打ち上げられ、中国のRNSSが既に完成の域に達した。インドは3機の静止衛星と4機の準天頂衛星（2組）よりなるインド版のRNSSを計画している。

また航空管制サービスを目的として国際民間航空機関（ICAO: International Civil Aviation Organization）の基準による静止衛星型衛星航法補強システム（SBAS: Satellite Based Augmentation System）を各国が運用しており、米国WAAS、欧州EGNOSと並び、日本では運輸多目的衛星MTSATシリーズに搭載されたMSASがGPS補強を行ない、主に航空管制の能力向上のために利用されている。なお、欧州のEGNOSが利用している衛星はインマルサット社所

有のものである。

各国の航行測位衛星の数や GPS 補強システムなどを評価した結果を表 3-17 に示す。

表 3-17 航行測位衛星打上げ・運用実績データと評価 (2011 年 8 月末まで)

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
測位衛星打上げ数	108	2	272	1	13	0	0
システムの必要衛星数 (GNSS)	24	30	24	なし	24	なし	なし
同 RNSS	なし	なし	なし	4~7	8	7	なし
実働衛星数	31	2	24	1	7-8	0	0
GPS 補強衛星 (SBAS)	WAAS	EGNOS	—	MSAS	北斗	GAGAN	—
評価	10	3	8	2	5	1	0

(10 点満点)

出典：評価を除き、各種資料を基に事務局作成

② 測位性能・能力

航行測位分野の技術力を比較する上で、航行測位衛星数と並び、衛星自体の機能・性能面での優劣も重要な要素である。航行測位衛星として配信する測位信号による測位精度は基本性能のひとつであり、米国 GPS で 10m 程度の測位精度と言われている。日本の準天頂衛星は GPS 衛星との互換測位信号を天頂から配信する補完機能を有している。

一方補強信号を配信することにより GPS による測位精度を向上する技術があり、航空管制サービス目的の SBAS などで適用されている。日本では準天頂衛星からの測位信号に補強情報を載せることにより測位精度を cm 級まで向上する技術実証に成功しており、世界に例のない高い技術を保有している。

また測位できる確率を示すアベイラビリティも主要なパラメータで、衛星の搭載装置だけでなく地上の補強システムの有無やサービス形態も性能に影響を与える。アベイラビリティについては、衛星の数が決定的な影響を及ぼすが、都市部では天頂付近に補完衛星が 1 機あることの効果は大きく、日本とインドで計画している地域限定の準天頂衛星はアベイラビリティ向上に大きく貢献する。

現時点では航行測位衛星を完全に展開しているのは米国だけで、欧州や日本

は米国の GPS に依存している。中国は第 1 段階の計画として準天頂衛星と静止衛星の組み合わせによる地域測位システムを優先し、第 2 段階で米国の GPS と同様の周回衛星による全球測位システムの構築を計画している。

個別衛星の性能としては、米国 GPS は軍事専用 M コードを具備し、ユーザに応じて精度を劣化（SA：現在は未使用）させたり、地域限定で信号を停波（Regional Denial）するなど機能も充実している。

ロシア、欧州、日本は少なくとも実証レベルでは十分な精度が得られることが確認されている。なお中国についてはチューニング段階であり、精度が公表されていない。

また測位補強精度の観点では、航空管制を実施している米国 WAAS、欧州 EGNOS、日本の MTSAT が ICAO 準拠の補強精度を達成しており、更に日本の準天頂衛星は独自の LEX 信号により cm 級の補強精度を実証確認している。

航行測位衛星の測位性能・能力に関する評価結果を表 3-18 に示す。

表 3-18 測位性能・能力の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
システム性能・自律測位性	10	0	8	0	5	0	0
個別衛星性能	10	5	5	5	3	0	0
測位補強の精度	8	8	5	10	5	5	0
合計	28	13	18	15	13	5	0
評価	9	4	6	5	4	2	0

（合計 30 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算）

③ 測位利用

測位利用としては、軍事防衛利用・航空管制・民生利用（カーナビゲーションなど）があり、地理情報システム（GIS）との連携、土地測量などで社会的に必須のインフラとなってきている。

測位利用のための受信機製造の観点では、GPS 利用のために必須となる GPS 受信機の製造は米国と日本が世界をリードしている。日本はカーナビ装置の機能や売上高で世界の地位にあったが、近年中国の GPS 受信機が米国の GPS 衛星だけでなくロシアの衛星や中国の北斗衛星の信号まで処理してアベイラビリティを高めるような製品を製造するようになってきた。

測位利用に関する評価結果を表 3-19 に示す。

表 3-19 測位利用の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
軍事防衛利用	10	8	8	5	5	5	5
航空管制	10	10	5	10	10	10	5
民生利用	8	8	6	10	2	2	8
受信機製造	10	8	8	10	7	4	4
合計	38	34	27	35	24	21	22
評 価	10	9	7	9	6	5	6

(合計 40 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

④ 航行測位のまとめ

以上の調査結果を踏まえて、主要 7 カ国の航行測位のレベルを総合的に評価した結果を表 3-20 に示す。

表 3-20 航行測位の総合評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
測位衛星数	10	3	8	2	5	1	0
測位性能・能力	9	4	6	5	4	2	0
測位利用	10	8	7	9	6	5	5
合計	29	15	21	16	15	8	5
評 価	10	5	7	5	5	2	2

(合計 30 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

(5) 宇宙利用分野のまとめ

以上の4項目の調査結果を総合して、宇宙利用分野全体の評価結果を表3-21に示す。

表3-21 宇宙利用分野の総合評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
衛星バス技術	10	9	6	7	4	4	1
衛星通信放送	9	8	2	6	3	2	3
地球観測	9	9	3	6	4	3	2
航行測位	10	5	7	5	5	2	3
合計	38	31	18	24	16	11	9
評 価	29	23	14	18	11	8	7

(合計40点満点 ⇒ 評価30点満点に換算)

4. 宇宙科学分野

宇宙科学は宇宙開発の初期から、地球近傍宇宙環境観測、天文観測、月・惑星探査などのミッションを実施してきた。今後は、様々な波長の大型望遠鏡をラグランジュポイントに設置するような計画が予定されている。科学の成果が大きくなるに従って科学衛星の規模も大きくなり、積極的な国際協力が図られるようになる。月・火星の探査で米国・ロシア・欧州・日本・中国・インドなどが技術や資金を持ち寄って、国際宇宙ステーションと同じような国際協力の枠組みで大型プロジェクトが実施される可能性がある。主導権を握る米国は、将来の火星探査を目指して、搭乗員や大重量打上げ用のロケットを開発しようとしている。

(1) 地球近傍宇宙環境観測

地球の周囲の宇宙空間には磁気圏、電離層、放射線帯（バン・アレン帯）などがあり、これらの地球を取り巻く宇宙環境を調査するための宇宙科学ミッションが宇宙開発の初期から各国で行なわれてきた。バン・アレン帯は衛星打上げによって人類が初めて認識することができた。宇宙開発以前から知られていた磁気圏や電離層なども、ロケット・衛星の打上げによって詳細な状況が判明してきている。日本は、磁気圏探査を得意とし、対応する科学衛星を連続して打ち上げた。特に米国と共同で開発した **GEOTAIL** は、多くの成果をあげ、現在でも運用中である。近い将来には複数衛星を用いた様々な距離スケールでの磁気圏探査を行う計画が進められている。

地球近傍宇宙環境観測の各国比較の評価指標として、工学的観点では宇宙環境観測衛星数を採用する。

また、理学的観点からの評価として本分野の多くの科学者が参加する宇宙空間研究委員会（COSPAR）における発表論文状況で比較する。2010年に開催された第38回COSPAR科学大会において、発表された論文数は約4000件である。参加者数で日本人が1割を占めることから日本の論文数は全体の1割程度と考えられる。特に地球近傍宇宙環境観測に関連する発表が多いセッションからサンプリング調査を行い、日本が1割程度を占めることが確認できた。残りの9割のうち、米国は約6割、欧州は2割、その他の国は1割程度と推定された。その他の国にはオーストラリア、韓国、南アフリカなどが含まれる。

表 4-1a 地球近傍宇宙環境観測の基礎データ

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙環境観測衛星数	101	53	78	9	4	3	4
COSPAR 発表論文数の割合	6	2	0.2	1	0.2	0.2	0.2

出典：各種資料を基に事務局作成

以上の基礎データを踏まえて、主要7カ国の地球近傍宇宙環境観測に関する科学技術力を評価した結果を表 4-1b に示す。

表 4-1b 地球近傍宇宙環境観測の評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙環境観測衛星数の評価 10 点	10	5	8	2	1	1	1
COSPAR 発表論文数の割合の祖体評価 10 点	10	6	1	3	1	1	1
評 価	20	11	9	5	2	2	2

(20 点満点)

(2) 天文観測

宇宙科学の中で、天文観測は地上の天文台に設置する望遠鏡の代わりに宇宙軌道に投入した科学衛星に各種の望遠鏡を搭載するミッションである。観測センサの種類により、可視光望遠鏡、赤外光望遠鏡、紫外光望遠鏡、X線望遠鏡、ガンマ線望遠鏡、電波望遠鏡、マイクロ波望遠鏡、太陽望遠鏡、距離計測などに区分される。

米国はスペース VLBI を除き、すべての種類を開発・運用した経験を有する。

欧州は、大型 X 線望遠鏡、ガンマ線衛星などを独自に進める他、「ハッブル」(天文観測)、「コンプトン GRO」(ガンマ線天文観測) など米国主導の大型ミッションに積極的に参加している。

日本は小型ではあるが特徴のあるミッションを X 線、赤外線、電波の領域で実現してきた。特に日本では X 線天文観測がお家芸といわれており、国際的な X 線観測協力体制の中で独自の地位を有している。特に現在開発中の ASTRO-H は、日本の最先端観測技術を生かしたもので、広い波長域において過去最高の感度を有し、米国からの大規模な参加の他、各国の科学者が広く協力して開発される。最近では、太陽観測で史上最高の画像分解能による観測、赤外線領域での最も高感度な全天サーベイを日本の衛星が行うなど、日本の得意分野が広がりつつある。また、大型国際ガンマ線衛星「フェルミ」に大規模に参加するなど海外ミッションへの参加も行われている。

ロシアは 2011 年に「Spektr-R」を打ち上げ、独自の衛星で電波天文観測を実施する体制が整った。

カナダは NASA や欧州のプロジェクトに部分的に参加することで、宇宙からの天文観測を実施しているといえる。

中国とインドはまだ天文観測衛星を打ち上げた経験がないが、中国では硬 X 線望遠鏡衛星「HXST」を、インドでは天文観測衛星「Astrosat」を開発中である。

天文観測における理学的観点からの評価項目として、各国の学術誌の 5 年平均の Impact Factor を用いることとした。地上観測に関する論文も含めた評価になるが、「技術力」という視点からは地上観測が含まれることも意味があると考えた。

Impact Factor の情報源として、トムソン・ロイター社 (旧 ISI) のデータベースより、ASTRONOMY & ASTROPHYSICS のカテゴリで下記雑誌を評価対象として採用することとした。

欧州 Astronomy and Astrophysics (AA)

ロシア Astronomy Reports

米国 The Astrophysical Journal (ApJ)

中国 Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics

日本 Publications of the Astronomical Society of Japan (PASJ)

インド Journal of Astrophysics & Astronomy

なお、カナダは比較できるデータがない。

表 4-2a 天文観測の基礎データ

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
天文観測衛星数	67	16	11	12	0	0	1
Astronomy の IF	6.175	3.989	0.669	3.268	0.619	0.612	N/A

出典：各種資料を基に事務局作成

以上の基礎データを踏まえて、主要7カ国の天文観測に関する科学技術力を評価した結果を表 4-2b に示す。

表 4-2b 天文観測の評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
天文観測衛星数	10	5	4	4	0	0	1
Astronomy の IF	6	4	1	3	1	1	0
評 価	16	9	5	7	1	1	1

(20 点満点)

(3) 月・惑星探査

地球に最も近い天体である月は、宇宙開発の初期から到達の目標になっていた。

米国と旧ソ連は、1960年代に月周回だけでなく月面着陸やサンプル回収など高度な探査活動を行なってきた。さらに、1969年から1972年にかけて、米国はアポロ計画において、月面に6回にわたり宇宙飛行士を着陸させ、月面の科学探査を行なった後に地球への帰還に成功している。

最近では日本の月周回衛星「かぐや」(SELENE)に続いて、中国・インドも月周回衛星を打ち上げ、第2段階以降の月探査には米国・欧州も加わって、協力と競争が繰り広げられそうな状況である。

惑星探査は、内惑星の水星・金星・火星、外惑星の木星・土星・天王星・海王星、惑星以外では小惑星・彗星探査及び太陽系外の探査やなど、対象が幅広い。米国はこれらの対象天体に向けて一通り探査機を打ち上げている。「ボイジャー」(太陽系外探査)・「ハッブル」(天文観測)・「ガリレオ」(木星探査)・「カッシーニ」(土星探査)、「ユリシーズ」(太陽探査)、「マーズ・パスファインダー」(火星探査)など多数の大型科学衛星及び探査機を打ち上げてきており、特に特殊な電源を必要とする外惑星探査は米国の独壇場となっている。

欧州は内惑星探査機の外、米国との協力により外惑星探査機として「カッシーニ」に搭載する土星探査機「ホイゲンズ」を開発するなど、NASAに探査機の一部の観測機器を提供することにより多くの科学的知見を得た。独自のハレー彗星探査機「ジオット(Giotto)」も打ち上げている。

ロシアは金星と火星及びハレー彗星に向けた探査機を打ち上げた経験を有する。今後も月・火星を目指す探査計画を進めている。

日本では宇宙科学部門が独自のコンセプトで小型探査機を開発し、彗星探査機「すいせい」(PLANET-A)、火星探査機「のぞみ」(PLANET-B)、金星探査機「あかつき」(PLANET-C)を打ち上げており、米ロの実績には及ばないものの、欧州に比肩する業績をあげている。日本の小惑星探査機「はやぶさ」(MUSES-C)は衛星自体は小規模ながら雄大な計画であり、小惑星表面の岩石サンプルを採取して地球帰還に成功し、世界の注目を集めた。2010年打上げの金星探査機「あかつき」は、2011年に金星周回軌道投入に失敗し、現在は数年後に再挑戦する準備を進めている。今後の打上げ計画としては、欧州と共同で進める水星探査ミッション「BepiColombo」のうち水星磁気圏探査衛星「MMO」を開発中である。

中国・インド・カナダはまだ惑星探査機を打ち上げた経験がない。

航続距離または観測対象惑星の観点では米国が太陽系外へ 2 機のボイジャーを送り出し、木星以遠の外惑星の近傍観測や周回飛行などを実現している。欧州とロシアは金星までの飛行を行っている。日本は小惑星探査機「はやぶさ」が太陽から最も遠い地点まで飛行しただけでなく、打ち上げから 7 年後に地球帰還に成功した。月・惑星に着陸して試料を採取し、地球へ持ち帰った実績を有するのは米国とロシアだけである。このため、地球帰還の実績も評価した。

理学的観点からの評価として本分野の多くの科学者が参加する月惑星科学会議 (LPSC) における発表論文数の比較を行った。

表 4-3a 月・惑星探査の基礎データ

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
月探査機数	27	1	30	2	2	1	0
惑星探査機数 (彗星・小惑星を含む)	41	4	32	4	なし	なし	なし
対象惑星(彗星・小惑星を含まない)	5以上	2	2	2	0	0	0
地球帰還実績	2以上	なし	2以上	1	なし	なし	なし
LPSC発表論文数	402	91	3	34	2	1	9

出典：各種資料を基に事務局作成

以上の基礎データを踏まえて、主要 7 カ国の月・惑星探査に関する科学技術力を評価した結果を表 4-3b に示す。

表 4-3b 月・惑星探査の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
月探査機数	3	3	1	3	1	1	1	0
惑星探査機数	4	4	1	3	1	0	0	0
対象惑星	2	2	1	1	1	0	0	0
地球帰還実績	1	1	0	1	1	0	0	0
LPSC発表論文数	10	10	6	1	4	1	1	2
評 価		20	9	9	8	2	2	2

(20 点満点)

(4) 宇宙科学分野のまとめ

以上の比較を踏まえて、下表に総合評価結果を示す。

表 4-4 宇宙科学分野の総合評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
地球近傍宇宙 環境観測	20	11	9	5	2	2	2
天文観測	16	9	5	7	1	1	1
月・惑星探査	20	9	9	8	2	2	2
合計	56	29	23	20	5	5	5
評 価	19	10	8	7	2	2	2

(合計 60 点満点 ⇒ 評価 20 点満点に換算)

5. 有人宇宙活動分野

2011年7月、米国のスペースシャトル「アトランティス」が最終飛行を行い、30年間にわたって継続されてきたスペースシャトル計画が終了した。同年8月にはロシアの物資輸送船「プログレス」を搭載したソユーズロケットが上段エンジンの不具合のためシベリア上空で墜落するという事故が発生し、同系ロケットを用いて9月22日に打ち上げる予定であった有人宇宙船「ソユーズ」の打ち上げが延期された。もし11月中にソユーズ運航が再開されないと、地球から国際宇宙ステーション (ISS) へ搭乗員を輸送する手段が全くなり、一時はISS無人化の事態も懸念されたが、不具合原因が特定できたため、有人宇宙船を搭載したソユーズロケットの打ち上げは11月14日に予定され、短時間で搭乗員の引き継ぎを行う準備も進んでいる。米国は現時点で自力で有人宇宙飛行を行う手段を持たない状況であるが、スペース X 社のドラゴン宇宙船による有人輸送や、NASA の多目的搭乗員輸送船 (MPCV) などの開発が具体化してきており、数年以内には自力有人宇宙飛行能力が復活する可能性が高い。

1996年以来ロケットの打ち上げ失敗がなかった中国も、2011年8月に長征2C型ロケットの打ち上げに失敗し、同系列の長征2F型で9月頃打ち上げる予定であった宇宙ステーション実験機「天宮1号」の打ち上げが9月29日まで延期された。

欧州と日本はまだ独自の有人宇宙飛行手段を持たないが、独自の物資補給船をそれぞれ開発してISS運用に貢献している。

カナダはISS計画に参加し、ロボットアームで寄与している。インドは有人宇宙飛行の計画を進めようとしている段階にある。

このような現況を踏まえ有人宇宙活動分野の技術力比較は、①有人宇宙船と運用管制技術、②有人宇宙滞在技術、③有人宇宙活動支援技術、④宇宙環境利用技術、及び⑤有人宇宙探査技術の5項目について評価基準を設けて評価を行った。

(1) 有人宇宙船と運用管制技術

有人宇宙船、およびそれに繋がると思われるシステム（有人滞在システム、貨物輸送機など）の飛行実績などを評価基準とし、それぞれの基準の難易度と達成度に応じて5点を最大として点数を付与する。つまり、評価基準の難易度が高く達成度も高ければ5点を付与するが、難易度が低ければ達成度は最大でも3点、2点などとする。（他の評価項目も同様）なお、運用管制技術に関して

は個別の定量的なレベル付けが困難であるため、個々の評価基準に含めて考え、独立した評価基準とはしない。

具体的には次のとおりである。

(a) 有人宇宙船飛行回数

有人宇宙船の飛行回数に応じて評価する。

5=100 回以上

4=50 回以上

3=10 回以上

2=3 回以上

1=1 回以上

0=なし

(b) 有人宇宙船技術レベル

飛行させた有人宇宙船の難易度を下記の通り分類、評価する。

5=深宇宙探査用有人宇宙船飛行実績あり

4=LEO 有人宇宙船（再使用型）飛行実績あり

3=LEO 有人宇宙船（非再使用型）飛行実績あり

0=飛行実績なし

(c) 有人宇宙システムの飛行実績

有人宇宙船開発までは至らないものの、有人宇宙船開発に向けての大きな技術ステップである有人宇宙滞在施設を開発し、飛行させた実績があるかどうかの評価。実績がある場合のみ 3 点とする。米、露、中、欧、日がこれに該当する。

(d) 貨物輸送機飛行実績

同様に有人宇宙船開発までは至らないものの、有人宇宙船開発に向けての大きな技術ステップである地上から有人滞在施設までの貨物輸送技術を開発し、実機を飛行させた実績があるかどうかの評価。実績がある場合のみ 2 点。なお、中国のように狭義の貨物輸送実績はなくとも有人宇宙船技術がある場合は当然貨物輸送も可能であるのでこの技術は保有すると判断する。したがって、米、露、中、欧、日がこれに該当する。

(e) 貨物回収機飛行実績

同様に有人宇宙船開発までは至らないものの、有人宇宙船開発に向けての大きな技術ステップである宇宙からの貨物回収技術を開発し、実機を飛行させた実績があるかどうかを評価する。実績がある場合のみ 2 点とし、米、露、中、欧、日がこれに該当する。(欧、日も弾道での回収は飛行実績あり)

(f) 有人宇宙船の新規開発計画の有無

新規の有人宇宙船開発に向けての具体的な開発計画がある場合には、相当の技術レベルは確保されていると判断する。計画がある場合のみ 1 点。インドがこれに該当する。すでに有人宇宙船を保有している国・機関においてもさらなる新規開発計画があれば技術ポテンシャルを上げつつある証左ともなるので、同様に 1 点とする。米、露がこれに該当する。

この基準に従って、主要 7 カ国を評価した結果が表 5-1 である。

表 5-1 有人宇宙船と運用管制技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船飛行回数	5	5	0	5	0	2	0	0
有人宇宙船技術	5	5	0	3	0	3	0	0
有人宇宙システム飛行実績	3	3	3	3	3	3	0	0
貨物輸送機飛行実績	2	2	2	2	2	2	0	0
貨物回収機飛行実績	2	2	2	2	2	2	0	0
有人宇宙船の新規開発計画	1	1	0	1	0	0	1	0
評 価		18	7	16	7	12	1	0

(18 点満点)

(2) 有人宇宙滞在技術

宇宙飛行士が宇宙に「滞在」するための技術の達成度やその技術レベルに強く関連性のあると思われる実飛行した宇宙飛行士数などを評価基準とし、それぞれの基準の難易度と達成度に応じた点数を付与する。具体的には次のとおりである。

(a) 生命・環境維持技術レベル

空気再生、水再生、温湿度制御、空気循環などの技術を開発しており、すでに実機を飛行させた実績があるかどうかの評価。温湿度制御には大容量の排熱技術を含む。また、空気循環には火災検知・消火も含むものとする。

3=空気再生、水再生、温湿度制御、空気循環いずれも飛行実績あり。

2=温湿度制御、空気循環のみ飛行実績あり。

0=飛行実績なし

(b) 衛生・健康管理技術レベル

衛生技術にはトイレ、シャワーを含む。健康管理には食事、飛行中前後の健康モニタや管理、軌道上医療技術を含む。

3=衛生技術、健康管理技術ともに実績豊富。

2=衛生技術、もしくは健康管理技術の一方のみ実績あり。

0=飛行実績なし

(c) 有人モジュール技術レベル

与圧構造、ハッチ、ドッキング／バーシングポート、隕石・デブリ防御、大容量電力、通信、マンマシンインタフェース、システム監視・制御などの技術を開発し、実機を飛行させた実績があるかどうかの評価。

3=上記すべての技術の開発・実機飛行実績あり。

0=飛行実績なし

中国は軌道上施設はないが、有人宇宙船の飛行実績があるため、有人モジュール技術はあると判断。

(d) 宇宙飛行士数

技術はなくとも宇宙飛行士をフライトさせることは可能なため、評価そのものとしてはあまり重要視すべきではないと思われる。最大 2 点の範囲で評価する。

2=延べの宇宙飛行士数が 10 人以上。

1=延べの宇宙飛行士数が 1-10 人。

0=飛行実績なし

この基準に従って、主要 7 カ国を評価した結果が表 5-2 である。

表 5-2 有人宇宙船と運用管制技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
生命・環境維持技術	3	3	2	3	2	3	0	0
衛生・健康管理技術	3	3	2	3	2	3	0	0
有人モジュール技術	3	3	3	3	3	3	0	0
宇宙飛行士数	2	2	2	2	2	1	1	2
評 価		11	9	11	9	10	1	2

(11 点満点)

(3) 有人宇宙活動支援技術

宇宙飛行士の宇宙での活動を支援する技術である宇宙服や支援ロボットなどの技術レベルを評価基準とし、それぞれの基準の難易度と達成度に応じた点数を付与する。具体的には次のとおりである。

(a) 宇宙服技術レベル

宇宙服開発の技術を開発しており、すでに実機を飛行させた実績があるかどうかを評価した。

3=宇宙服の開発・飛行実績あり。

0=飛行実績なし

(b) 支援ロボット技術レベル

支援ロボット開発の技術を開発しており、すでに実機を飛行させた実績があるかどうかを評価した。

3=支援ロボットの開発・飛行実績あり。

2=支援ロボットの開発実績のみ。

0=飛行実績なし

支援ロボット飛行実績があるのはISSでの日本とカナダのみ。欧の European Robot Arm(ERA)は開発済みであるが飛行実績はまだない。米国は Robonaut が打ち上げられたが現時点で実績はほとんどなし。

この基準に従って、主要7カ国を評価した結果が表5-3である。

表 5-3 有人宇宙活動支援技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙服技術	3	3	0	3	0	3	0	0
支援ロボット技術	3	2	2	0	3	0	0	3
評 価		5	2	3	3	3	0	3

(6点満点)

(4) 宇宙環境利用技術

宇宙環境を利用した有人技術に関連する実験技術（宇宙医学実験、ライフサイエンス実験、微小重力科学実験）の実績数を評価基準とし、それぞれの基準の難易度と達成度に応じた点数を付与する。具体的には次のとおりである。

(a) 宇宙医学実験技術レベル

自国の搭乗員を使った実験、放射線計測などの実験をどの程度実行した実績があるかどうかを評価した。

2= 実験実績数 30 以上

1= 実験実績数 5 以上 30 未満

0= 実験実績数 5 未満

(b) ライフサイエンス実験技術レベル

ライフサイエンスに関する軌道上実験の実績数で評価した。

2= 実験実績数 30 以上

1= 実験実績数 5 以上 30 未満

0= 実験実績数 5 未満

(c) 微小重力科学実験技術レベル

材料工学、流体物理、燃焼物質など実験実績数で評価した。

2= 実験実績数 30 以上

1= 実験実績数 5 以上 30 未満

0= 実験実績数 5 未満

この基準に従って、主要 7 カ国を評価した結果が表 5-4 である。

表 5-4 宇宙環境利用技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙医学実験技術	2	2	2	2	1	0	0	0
ライフサイエンス実験技術	2	2	2	2	2	0	0	1
微小重力科学実験技術	2	2	1	2	2	0	0	1
評 価		6	5	6	5	0	0	2

(6 点満点)

(5) 有人宇宙探査技術

月・火星など他天体表面での有人探査に必要なと思われる、表面移動技術レベル、耐レゴリス耐性のある宇宙服技術レベル、および運用などを含めた全般的有人探査技術という観点から他天体での有人探査活動実績を評価基準とし、それぞれの基準の難易度と達成度に応じた点数を付与する。具体的には次のとおりである。

(a) 表面移動技術レベル

月面、火星表面などでの移動技術を開発し、実機を飛行させた実績があるかどうかを評価した。

4=有人対応のローバの運用実績あり。2=無人だが他天体でのローバの運用実績あり。

1=他天体でのローバの運用実績はないものの、地上デモンストレーションや研究開発が盛んに進められている。0=飛行実績なし

(b) 耐レゴリス宇宙服技術レベル

月面、火星表面などでのレゴリスに対する耐性のある宇宙服技術を開発し、実機を運用させた実績があるかどうかを評価した。

3=他天体で運用実績あり。

1=他天体での運用に向けた研究開発を進めている。0=飛行実績なし

(c) 他天体での有人探査活動実績

5=他天体での有人探査活動実績あり。0=実績なし

これらの基準に従って、主要7カ国を評価した結果が表5-5である。

表 5-5 有人宇宙探査技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
表面移動技術	4	4	1	2	1	1	1	1
耐レゴリス宇宙服技術	3	3	0	1	0	0	0	0
他天体での有人探査活動実績	5	5	0	0	0	0	0	0
評 価		12	1	3	1	1	1	1

(12点満点)

(6) 有人宇宙活動分野のまとめ

以上の調査を踏まえて、有人宇宙活動分野の総合評価を行った結果を表 5-6 に示す。

表 5-6 有人宇宙活動分野の総合評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船と運用 管制技術	18	7	16	7	12	1	0
有人宇宙滞在技術	11	9	11	9	10	1	2
有人宇宙活動支援 技術	5	2	3	3	3	0	3
宇宙環境利用技術	6	5	6	5	0	0	2
有人宇宙探査技術	12	1	3	1	1	1	1
合計	52	24	39	25	26	3	8
評 価	20	9	17	10	10	1	3

(合計 53 点満点 ⇒ 評価 20 点満点に換算)

CRDS-FY2011-CR-02

G-TeC 報告書

世界の宇宙技術力比較

A Comparative Study on Space Technology in the World

平成 23 年 11 月

独立行政法人科学技術振興機構 研究開発戦略センター 海外動向ユニット
Overseas Unit, Center for Research and Development Strategy
Japan Science and Technology Agency

〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 番地 K's 五番町 JST 東京本部別館

電 話 : 03-5214-7487

ファックス : 03-5214-7558

h t t p : //crds.jst.go.jp/

@2011 JST/CRDS

許可無く複写／複製することを禁じます。

引用を行う際は、必ず出典を記述願います。

No part of this publication may be reproduced, copied, transmitted or translated without written permission. Application should be sent to crds@jst.go.jp. Any quotations must be appropriately acknowledged.

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC

CT CTCGCC AATTAATA

TAA TAATC

TTGCAATTGGA CCCC

AATTCC AAAA GGCCTTAA CCTAC

ATAAGA CTCTAACT CTCGCC

AA TAATC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT CTAAT A TCTAT

CTCGCC AATTAATA

ATTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA CCTAACT CTCAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA CCT

GA CCTAACT CTCAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

