

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

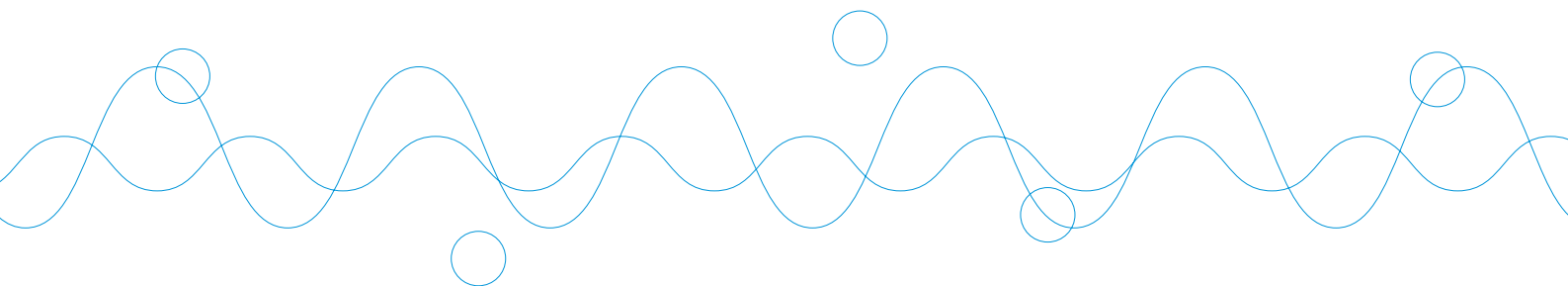
CRDS-FY2013-CR-02

G-TeC報告書

# 世界の宇宙技術力比較 (2013年)

~A Comparative Study on  
Space Technology in the World 2013~

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

## 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。G-TeC としての宇宙技術力の調査は 2011 年 11 月にも実施しており、今回は 2 回目となる。

今回の調査分析は、2013 年 12 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。前回の調査から 2 年以上が経過し、各国の宇宙開発も相当に変化しており、とりわけ GPS の分野ではロシア、中国、インドでの進展が著しい。また、有人宇宙飛行や月探査においても、中国の活動が世界的に注目を集めている。これらの変化を調査分析し最新の技術力比較を行うため、前回と同様 CRDS 内に「世界の宇宙技術力比較調査研究会」を設置し、委員長を再び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。

なお、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。

2014 年 3 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

## 目 次

はじめに .....	1
<b>1. 総合評価結果 .....</b>	<b>3</b>
<b>2. 宇宙輸送システム分野 .....</b>	<b>4</b>
(1) ロケットの打上げ数と信頼性 .....	4
(2) ロケットの最大性能 .....	6
(3) ロケットの衛星搭載環境 .....	8
(4) 推進装置の性能 .....	10
(5) 打上げ運用性 .....	13
(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
<b>3. 宇宙利用分野 .....</b>	<b>17</b>
(1) 衛星バス技術 .....	18
(2) 衛星通信放送 .....	24
(3) 地球観測 .....	28
(4) 航行測位 .....	39
(5) 宇宙利用分野のまとめ .....	48
<b>4. 宇宙科学分野 .....</b>	<b>49</b>
(1) 月・惑星探査 .....	49
(2) 天文観測 .....	53
(3) 地球近傍宇宙環境観測 .....	55
(4) 宇宙科学分野のまとめ .....	57
<b>5. 有人宇宙活動分野 .....</b>	<b>58</b>
(1) 有人宇宙船と運用管制技術 .....	59
(2) 有人宇宙滞在技術 .....	62
(3) 有人宇宙活動支援技術 .....	64
(4) 宇宙環境利用実験技術 .....	65
(5) 有人宇宙探査技術 .....	67
(6) 有人宇宙活動分野のまとめ .....	69
<b>別添：世界の宇宙技術力比較調査研究会委員名簿 .....</b>	<b>70</b>

## 1. 総合評価結果

最初に各分野の結果を総合した評価結果のまとめを表 1-1a に示す。

前回の結果（表 1-1b）と比較すると、第 1 位は米国で変わらない。前回も欧州とロシアが同点であったが、今回は欧州が第 2 位、ロシアが第 3 位となっている。これは、欧州が輸送分野や科学分野で評価点を上げたのに対し、ロシアは近年のロケット打上げ失敗の影響などで輸送分野の評価点を下げたことなどによる。また、前回有意の差があった第 3 位の日本と第 4 位の中国は、順位は変化がないが差が減少している。これは、GPS や月探査などの進展により輸送、利用、科学の各分野で中国が評価点を上げたことによる。第 6 位のインドと第 7 位のカナダについては、それほど大きな変化はない。

表 1-1a 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	27	25	25	18	22	11	0
宇宙利用分野	30	29	25	12	19	12	8	5
宇宙科学分野	20	19	11	8	7	4	3	2
有人活動分野	20	20	9	15	9	10	1	3
合計	100	<b>95</b>	<b>70</b>	<b>60</b>	<b>53</b>	<b>48</b>	<b>23</b>	<b>10</b>
順位		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

(100 点満点)

表 1-1b 前回の結果（2011 年 11 月作成）

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	<b>95</b>	<b>65</b>	<b>65</b>	<b>53</b>	<b>44</b>	<b>22</b>	<b>12</b>
順位		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>

(100 点満点)

出典：「世界の宇宙技術力比較」（平成 23 年 11 月）

以下に今回評価を行った各分野の評価項目・評価基準・評価結果を詳述する。

## 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。宇宙輸送システム分野の主要な指標は、ロケットの打上げ数と信頼性、ロケットの最大能力、衛星搭載環境、推進装置の性能、打上げ運用性及び有人打上げ技術の6項目とした。

### (1) ロケットの打上げ数と信頼性

表 2-1a に、各国の 2013 年 12 月末までのロケット打上げ数、失敗数、成功率を示した。今回の調査対象国の打上げ数別での順位を見ると、ロシア>米国>欧州>中国>日本>インドの順である。この他にロケットを打ち上げた国としては、イスラエル 8 回、イラン 5 回、韓国 1 回となっている。

中国は欧州に急速に追いつく傾向にあり、数年後には欧州を追い抜いて米ロに次いで第 3 位となる可能性がある。なお、この表は参考までに示したもので、今回の評価には用いていない。

表 2-1a 各国の打上げ数及び打上げ成功率 (1957 年～2013 年 12 月末)

評価項目	米国	欧州	ロシア*	日本	中国	インド	その他	世界計
打上げ数	1566	236	3159	89	195	39	14	5298
打上げ失敗数	141	13	206	8	13	10	4	395
打上げ成功率	91.0	94.5	93.5	91.0	93.3	74.4	71.4	92.5

\* ロシアにはシーロンチ社の打上げを含む

注：打上げ失敗数にはロケットの不具合による予定軌道への投入失敗を含む。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：各種資料を基に事務局作成

今回の評価対象は、最近 10 年間の打上げ数とその成功率のデータとした。これは、旧式ロケットの時代の打上げ状況を考慮せず、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のため、各国の現時点でのロケット信頼性に関する実力を良く表していると考えられる。

打上げ数については、60 回以上を 5 点、40 回以上を 4 点、20 回以上を 3 点、10 回以上を 2 点、1 回以上を 1 点と評価した。その結果を表 2-1b に示す。

表 2-1b 打上げ数（2004年1月～2013年12月末）と評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
打上げ数	166	62	300	23	114	22	0
評価	5	5	5	3	5	3	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

打上げ成功率について、成功率98～100%を5点、96～98%を4点、94～96%を3点、90～94%を2点、80～90%を1点、80%以下または打上げなしを0点として、ロケットの信頼性を評価した。その結果を表 2-1c に示す。

表 2-1c 打上げ成功率（2004年1月～2013年12月末）に基づく信頼性評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
打上げ失敗数	3	0	18	0	3	3	0
打上げ成功率	98.2%	100%	94.0%	100%	97.4%	86.4%	0
信頼性評価	5	5	3	5	4	1	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

ロケットの打上げ数と信頼性の評価を合計すると次の表 2-1d の通りとなる。

表 2-1d ロケットの打上げ数と信頼性の評価

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
打上げ数	5	5	5	3	5	3	0
信頼性	5	5	3	5	4	1	0
評価	10	10	8	8	9	4	0

(10点満点)

なお、2013年に3回の打上げ失敗があった。1月にシーロンチ社が「ゼニット 3SL」ロケットによる Intelsat 衛星の打上げに失敗、7月にロシアが「プロトン M/ブリーズ M」ロケットによる「GLONASS」衛星3機の打上げに失敗、12月に中国が「長征 4B 型」ロケットによる「CBERS-3」衛星の打上げに失敗した。

プロトンロケットの打上げは9月に再開され、2013年12月までに5回連続で打上げに成功して、結局打上げ成功率は2012年末よりも若干高まった。シーロンチ社のロケット及び中国の「長征 4B 型」の次回の打上げは、2014年に予定されている。

## (2) ロケットの最大性能

ロケットの最大性能は、静止トランスファー軌道 (GTO) への投入可能な衛星重量で比較することが適当と考えられる。さらに、衛星が GTO から静止軌道 (GSO) 上に静止化する増速量についても、射点の緯度に依存する点ではあるが、ロケット側で再着火などにより対処していることから評価に加えた。

各国における大型実用ロケットでの最大性能ロケットは、米国では United Launch Alliance (ULA:Boeing/Lockheed Martin の合弁企業) 社の「デルタ (Delta) IV Heavy」、欧州は、アリアンスペース (Arianespace) 社の「アリアン (Ariane) 5 ECA」(製造プライム企業: エアバス (Airbus) 社、サフラン (Safran) 社)、ロシアは、「プロトン (Proton) M/ブリーズ (Briz) M」、日本は「H-II B」、中国は、「長征 3B/G2」、インドは「GSLV Mk2」、多国籍企業のシーロンチ社は「ゼニット (Zenit) 3SL」である。

「アリアン 5 ECA」は、前回調査よりも GTO 能力が約 1 トン向上しており、これは、打上げ実績による誤差源の見直しにより、打上げ保証値が向上したものである。また、「プロトン M」については、材料 (複合材) や構造 (ラティス構造) の見直しにより構造効率を向上させ、打上げ能力の向上を図ったものである。各国のロケットの性能データを表 2-2a に示す。

表 2-2a 大型実用ロケットの性能データ

国名	ロケット名	製造企業等	GTO 投入能力	LEO 投入能力	静止化増速量 $\Delta V$
米国	DeltaIV Heavy	ULA	9.7t	23.0t	1500m/s
欧州	ArianeV ECA	アリアンスペース	10.5t	20.0t	1500m/s
ロシア	Proton M	フルニチェフ	6.6t	22.3t	1500m/s
日本	H-II B	三菱重工業	6.0t	16.5t	1500m/s※1
中国	長征 3B-G2	長城工業総公司	5.5t	11.5t	1800m/s
インド	GSLV Mk2	ISRO	2.2t	5.0t	1800m/s
多国籍	ゼニット 3SL	シーロンチ	6.2t	13.9t※2	1500m/s

※1:H-II A 高度化を適用した場合の能力

※2: 理論的性能値 (実績なし)

(出典) 各種資料を基に事務局作成

このデータを踏まえて、GTO 投入能力、静止化増速量 (1500m/s:1、1800m/s : 0.75) を加味した最大性能の評価を実施した。

表 2-2b 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	カナダ
GTO× 静止化増速量	9.7	10.5	6.6	6.0	4.125	1.65	—
評価	9	10	6	6	4	2	0

（10点満点）

将来計画であるが、静止衛星の大型化（打上げ時質量6トン以上）の傾向に伴い、ロシア・欧州・中国はロケットの打上げ能力の見直しを行っている。

ロシアでは、次期主力ロケットとなる「アンガラ（Angara）」ロケットの開発において、「アンガラ A5 型」で GTO 7.5 トン、同 A7 型では GTO 12.5 トンの能力とすることを計画している。

欧州は「アリアン 5-ME」で GTO 11.5 トンへの能力向上を図る計画であり、同時打上げ（デュアルロンチ）における運用性の向上を目指している。また、欧州の次期ロケットとして開発中の「アリアン 6」では、より運用性を向上させるため、デュアルロンチからシングルロンチへの転換を図り、GTO 7 トンを目標にしている。

中国では、「長征 5E 型」で GTO 14 トンの打上げ能力を目指しており、完成すれば世界最大級となる。

なお、現在通信など衛星実用ミッションがほとんどない小型ロケットは、低軌道（LEO）または太陽同期軌道（SSO）さらには極軌道への投入可能な衛星重量が指標となる。今回の評価では、下記表 2-2c にデータを示すのみで、評価の対象外とした。

小型ロケットにより打ち上げるペイロードは、我が国の「アスナロ（ASNARO）」衛星のような 500kg 級が主流となりつつあるが、今後の世界の地球観測衛星が技術の進展とともに質量のボリュームゾーンがどこになるか注目される。

表 2-2c 小型ロケットの性能データ

国名	ロケット名	製造企業等	SSO 投入能力	LEO 投入能力	備考
米国	Tarus XL	Orbital Sciences	1050kg	1600kg	SSO400km
欧州	Vega	アリアンスペース	1500kg	2300kg	Polar700km
ロシア	Dnepr	Yuzhnoye	2000kg	3700kg	SSO400km
日本	Epsilon	IHI エアロスペース	550kg	1400kg	SSO500km
中国	長征 2C	長城工業総公司	1200kg	3900kg	SSO400km

（出典）各種資料を基に事務局作成



### (3) ロケットの衛星搭載環境

ロケットの衛星搭載環境としてはロケット先端のフェアリング内（衛星搭載部）における衝撃、振動、音響などが重要である。

今回は、下記の理由により振動と音響は評価の対象外とした。

まず振動環境であるが、考慮すべき振動には正弦波振動とランダム振動がある。正弦波振動環境に関しては、基本的な環境条件が定めてあるものと、スペース X 社の「Falcon 9」ロケットのように規定していないものがある。これは、大型衛星ということから、ユーザに振動解析を行うモデルを提供し、機体構造とのカップリング振動解析により個々の衛星の振動環境条件を定めることから、規定していないものと思われる。正弦波振動環境条件については、0.4G（重力加速度：9.8m/s<sup>2</sup>）から 0.9G に各周波数帯においても分散しており、各国のロケットの比較としては大差ないものと評価した。一方、ランダム振動に関しては、「Proton」ロケットや「Zenit」ロケットでは要求されているが、正弦波振動環境を踏まえると、同様に大差ないものである。

フェアリング内部の音響については、搭載部容積に対して衛星が占める容積の割合を示す Fill Factor、射点設備の構造などにより実際の音響レベルが変動するため、技術力評価には適さないと考え、評価の対象外とした。なお参考までに、音響スペクトラムの 10kHz までのオーバーオール値(O.A.)を表 2-3a に記載した。

表 2-3a 音響環境のデータ (参考)

国	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
ロケット名	AtlasV	Ariane 5	Proton M	H-IIA	長征 3B	GSLV
音響 O.A.値 (db)	134	139.5	141.4	137.5	141.5	不明

(出典) 各種資料を基に事務局作成

次に衛星搭載部の衝撃環境であるが、主にフェアリング分離時または衛星分離時に発生する最大衝撃 (G) で規定され、この数字が小さい程技術レベルが高い。今回の評価では、この衝撃環境の数字を衛星搭載環境の評価対象として比較を行った。最高 10 点から 500 G 増加するごとに 1 点減点した。インドについては、公表されたデータがないため推定により評価した。

結果は表 2-3b の通りである。

表 2-3b ロケットの衛星搭載環境の評価

国	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
ロケット名	DeltaIV	Ariane 5	Proton M	H-IIA	長征 3B	GSLV
最大衝撃 (G)	2000	2000	2000	4000	4000	不明
評価	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>3</b>

(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

#### (4) 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「固体モータ」）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。固体モータは、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。

各国の主力ロケットの推進装置の性能を表 2-4a に示す。

表 2-4a 主力ロケットの推進装置の性能

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
ロケット	Delta IV	Ariane 5	Proton	H-II A/B	長征 3	GSLV
1 段主エンジン	RS-68	Vulcain2	RD-259	LE-7A	YF-21B	S138
推進薬	LOX/LH <sub>2</sub>	LOX/LH <sub>2</sub>	LOX/RP-1	LOX/LH <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /UDMH	固体
推力 (kN)	3341	1390	10550	1098	2962	4801
比推力 (秒)	409	434	316	440	260	266
上段エンジン	RL10B-2	HM7B	Breeze-M	LE-5B	YF-75	KVD-1
推進薬	LOX/ LH <sub>2</sub>	LOX/LH <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /UDMH	LOX/LH <sub>2</sub>	LOX/LH <sub>2</sub>	LOX/LH <sub>2</sub>
推力 (kN)	110	64.8	19.62	137	78	75
比推力 (秒)	462.4	445.5	325.5	448	437	460
補助ブースタ	GEM60	MPS		SRB-A	YF-20B	Vikas
推進薬	固体	固体	なし	固体	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /UDMH	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /UH <sub>25</sub>
推力 (kN)	1615	5060		2260	732	760
比推力 (秒)		275.4		283.6	259	261

註：推力の単位は N（ニュートン）である。

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。

次の 4 つの観点で評価した。

○使用する燃料：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/LH<sub>2</sub>) を用いたエンジンに満点の 5 点、低公害型の LOX/RP-1 を用いたエンジンに 4 点、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 点を与えた。インドの 1 段は固体であり 3 点とした。

○1 段主エンジン推力：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。そこで、5000kN 以上に 5 点、2500～4999kN に 4 点、2499kN 以下に 3 点を与えた。

○上段エンジン比推力：上段エンジンは、1 段主エンジン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の大きさを重視し、450 秒以上を 5 点、

400～449秒を4点、399秒以下を3点とした。

○補助ブースタ：推力のみで評価し、4000kN以上に3点、2000～4000kNに2点、1999kN以下に1点を与えた。

表 2-4b に評価結果を示す。

表 2-4b 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	カナダ
1段主エンジン燃料	5	5	5	4	5	3	3	-
上段エンジン燃料	5	5	5	3	5	5	5	-
1段主エンジン推力	5	4	3	5	3	4	4	-
上段エンジン比推力	5	5	4	3	4	4	5	-
補助ブースタ	3	1	3	0	2	1	1	-
合計	23	20	20	15	19	17	18	-
評価		9	9	7	8	7	8	0

（合計 23 点満点⇒評価 10 点満点に換算）

以下は各国で開発中の推進装置に関する参考情報である。

米国では、重量級打上げロケットとなる「宇宙打上げシステム（Space Launch System : SLS）」用の2段として当初考えられていた J2X エンジンがあげられる（現在は EELV との共通的なエンジンを用いる Dual Use Upper-Stage(DUUS)がベースラインとして検討されている）。J2X エンジンは、推進薬に LOX/LH<sub>2</sub> を用い、推力 1307kN、比推力 448 秒のガスジェネレータサイクルのエンジンである。ほぼ同推力の高圧である2段燃焼サイクルを用いた「LE-7」エンジンの比推力 440 秒よりも高い高性能なエンジンであるといえる。

欧州においては、「VINCI」エンジンをアリアン 5 ME 及びアリアン 6 の上段エンジンに適用すべく開発中である。「VINCI」エンジンは、推進薬に LOX/LH<sub>2</sub> を用い、推力 180kN、比推力は 465 秒のエクスパンダーサイクル（性能の高いクローズドサイクル）のエンジンである。ほぼ同推力の LE-5B エンジンは推力 137.2kN、比推力は 448 秒のエクスパンダーブリードサイクル（性能が低いオープンサイクル）で、これと比べると格段に性能が高い。これは、エンジンサイクル及びノズルの膨張比によるところが大きく、膨張比を大きくすると機体の構造重量が増すというデメリットがあり、最終的には、システム性能で評価する必要がある。

また、中国では「長征 5 型」に向けて、LOX/ケロシンの推力 100 トン級のエンジンを開発中である。

ロシアにおいては、アンガラロケット（ステージクラスタ構想）のブースターエンジンとして、韓国の「Naro-1」（KSLV-1）にも派生型が使用された RD-191 エンジン

ンの開発が完了している。RD-191 エンジン、推進薬に LOX/ケロシンを用い、推力 1920kN、比推力 337 秒の 2 段燃焼サイクル (性能の高いクローズドサイクル) のエンジンである。燃焼圧力は、263kgf/cm<sup>2</sup> であり、「LE-7A」エンジンの 123kgf/cm<sup>2</sup> の 2 倍以上と非常に高圧のエンジンである。

日本においては、新型基幹ロケットにおいて、高い信頼性と低コストを目指し、LE-9 エンジンの開発計画がある。LE-9 エンジン、現在技術実証中の LE-X エンジン (推進薬 LOX/LH<sub>2</sub>、推力 1618kN、比推力 421 秒) の大型エキスパンダーブリードサイクル技術を活用し、新型基幹ロケットのシステムに向け最適化するエンジンである。性能、コスト及び信頼性のバランスに主眼を置いたエンジンであり、必ずしも高性能を目指したものではない。

## （５） 打上げ運用性

各国の射点の運用性を比較するため、ミッションインテグレーションに要する期間、同一射点からの打上げ機数を調査した。その結果を表 2-5a に示す。

表 2-5a 射点運用性のデータ

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
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
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

出典：各種資料を基に事務局作成

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。一方、同一射点からの打上げ数は当然多いほど優れており、ロシア、欧州が高く、米国と中国、次いで日本、インドの順となっている。このデータを基にした、射点運用性の評価結果を表 2-5b に示す。

表 2-5b 射点運用性の評価

国名	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評価	8	10	10	6	7	4	0

(10 点満点)

次に、各国のロケットによる衛星の複数打上げについて調査した。そのデータを表 2-5c に示す。

表 2-5c 衛星複数打上げのデータ

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
複数静止衛星同時打上げ実績及び技術的能力	実績○ (小型)	実績○ (大型)	実績○ (中型)	実績× 技術能力○	実績× 技術能力○	実績× 技術能力○
静止衛星と LEO 衛星同時打上げ実績	×	×	×	○	×	×
LEO 衛星の複数打上げ実績	○	○	○	○	○	○

出典：各種資料を基に事務局作成

5トン級の大型静止衛星を2機同時に打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ー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、各種の組合せの打上げを行ってきた。長征3B/Gロケットにより、中高度軌道（MEO）の「北斗」衛星の2機同時打上げを行った実績もある。

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。

LEO衛星の複数打上げは、今回の調査対象の全ての国で実績がある。

このデータを基に、評価した結果を表2-5dに示す。

表 2-5d 衛星複数打上げの評価

国名	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評価	3	5	4	4	3	2	0

(5点満点)

射点の運用性と衛星複数打上げの両方を勘案した打上げ運用性の評価結果を表2-5eに示す。

表 2-5e 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	カナダ
射点運用性	8	10	10	6	7	4	0
衛星複数打上げ	3	5	4	4	3	2	0
合計	11	15	14	10	10	6	0
評価	7	10	9	7	7	4	0

(合計15点満点⇒評価10点満点に換算)

## （6）有人打上げ技術

現在、定常的に有人輸送を実施できる国はロシアと中国の2か国に限られている。打上げ頻度としてはロシアの「Soyuz-TMA」が年間4機、中国の「神舟（Shenzhou）」が年間1機程度でそれぞれISS（International Space Station:国際宇宙ステーション）及び「天宮」に有人輸送を行っている。

ロシアは2009年から年4回、1回当たり3名の搭乗員を輸送している。中国は最大3名の搭乗員を搭載し、「天宮1号」へのドッキングを行っている。

有人打上げ技術を既に保持している米国については、過去の実績を踏まえ点数をつけた。米国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、ISS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。

現時点で有人輸送能力を有するロシアと中国を満点とし、現在有人打上げを実施していない米国については過去の実績を勘案して8点とした。欧州・日本・インドは有人打上げ手段を持たない。表2-6に評価結果を示す。

表 2-6 有人打上げ技術の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評価	8	0	10	0	10	0	0

（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



### (7) 宇宙輸送システム分野のまとめ

以上のような宇宙輸送に関する各国の状況分析を踏まえて、主要7カ国・地域の宇宙輸送システム分野のレベルを相対的に評価した。宇宙輸送分野は全体で100点満点中の30点を割り当てることとし、6項目の評価項目の満点が60点であることから、合計点に30/60倍して評価点を算出した。

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。

宇宙輸送システム分野の総合評価結果を、表2-7に示す。

表2-7 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	カナダ
打上げ数及び信頼性	10	10	10	8	8	9	4	0
ロケット最大性能	10	9	10	6	6	4	2	0
衛星搭載環境	10	10	10	10	6	6	3	0
推進装置の性能	10	9	9	7	8	7	8	0
打上げ運用性	10	7	10	9	7	7	4	0
有人打上げ技術	10	8	0	10	0	10	0	0
合計	60	53	49	50	35	43	21	0
評価		27	25	25	18	22	11	0

(合計60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。

各国の年代別の衛星数の統計値を表 3-0 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 年ごと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定できる。なお、表 3-1 の衛星数の合計は 6,441 機となるが、表にない国 (36 カ国) や国際機関・企業 (5 機関) などの衛星数を合わせると 2013 年 12 月末までの全世界の累積衛星数は 6,754 機である。

表 3-0 各国の年代別衛星打上げ数 (参考)  
(2013 年 12 月末現在)

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
2011-2013	158	71	76	18	61	14	6
総計	2135	422	3401	169	210	64	40

注：欧州には欧州宇宙機関 (ESA) 及びその加盟国 (仏独など 17 カ国) の他、ユーロサット及びユーテルサットなどの国際機関・企業が保有する衛星を含む

出典：各種資料を基に事務局作成

以下に宇宙利用分野の主要な領域である衛星バス技術、衛星通信放送、地球観測及び航行測位の 4 つについて、製造技術、機器開発、システム構築、運用などの比較を行う。

## (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技術

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行った。性能に加えて、受注状況も併せて比較した。

過去においては米国の衛星メーカが優位であったが、最近では国際武器取引規則（ITAR）の制約などのため、欧州のメーカが優位に立っている。

欧州では、通信システム研究開発プログラム（ARTES : Advanced Research in Telecommunications Systems)の中で「ARTES-8」として実施された「アルファバス（Alphabus）/アルファサット（Alphasat、次世代通信衛星）」の開発成果による初号機が2013年に「インマルサット IV-A F4（アルファサット I-XL）」として成功裏に打ち上げられた。アルファサットは高電力通信衛星ペイロード搭載など多目的プラットフォームとして、官民パートナーシップ（PPP）の形態でインマルサット社・アストリウム（Astrium）社・ターレス・アレニア・スペース（TAS）社により共同開発されたもので、商用通信放送衛星市場の中で、大型大容量化のトレンドの中で欧州製の衛星バスのメニューが追加されたことになる。

米国では、スペースシステムズ/ロラール（SSL）社の「LS-1300型」衛星バスが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」衛星バスの輸出実績が上がり始めており、ボリビア、ラオスなど、その国の最初の衛星となる通信衛星の受注を獲得している。

日本は、三菱電機の「DS-2000型」衛星バス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、主要指標、受注実績を表 3-1a に示す。

表 3-1a 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	70
	ボーイング	BSS702 系	5~6t	17kW	15年	52
	スペースシステムズ/ロラール(SSL)	LS1300 系	6~7t	25kW	15年	115
	オービタルサイエンシズ (OSC)	Geostar-1/-2	2~4t	5kW	15年	40
欧州	エアバス(旧 EADS アストリウム)	Eurostar-3000 系	5~6t	18kW	15年	46
	ターレス・アレニア・スペース(TAS)	Spacebus-4000 系	5~6t	15kW	15年	28
ロシア	ISS レシェトネフ	Ekspress-2000 型	3~4t	N/A	15年	4
日本	三菱電機(株)	DS-2000 型	3~5t	14kW	15年	15
中国	中国空間技術研究院 (CAST)	東方紅 4 型	5t	18kW	15年	19
インド	インド宇宙研究機関(ISRO)	I-3000 型、4000 型	2~3t	N/A	10年	9

注：ロシアは評価対象の衛星バスの種類を最新機に変更。

出典：各種資料を基に事務局作成

表 3.2a に示す各国の代表的な衛星バスの打上げ時重量、最大電力、設計寿命、受注実績を、総合的に勘案して評価した結果を表 3-1b に示す。

表 3-1b 静止衛星用標準バス技術の評価

	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、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評価を行った。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。日本でも宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の衛星を中心に各種技術試験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」や ISAS 科学衛星に使われ、同社の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、それぞれの衛星規模ごと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「ハッブル (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開発している。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)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、技術力を評価した結果を表 3-1c に示す。

表 3-1c 衛星バスのラインアップの評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
静止衛星バス	4	4	4	3	3	2	2	0
周回衛星バス	3	3	3	3	3	2	2	1
特殊バス	3	3	3	2	2	2	2	0
評価合計		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

衛星バスの技術的競争力を評価する上で、衛星搭載用部品、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こと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ネル、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。

これら衛星搭載用部品、要素技術、搭載コンポーネントの技術的な評価と、国際市場でのシェアを併せて評価した結果を表 3-1d に示す。

表 3-1d 部品、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
部品	2	2	2	1	1	1	0	0
要素技術	3	3	3	1	2	1	1	2
搭載コンポーネント	3	3	3	1	2	1	1	0
国際市場でのシェア	2	2	2	0	1	0	0	0
評価合計		10	10	3	6	3	2	2

(10点満点)

#### ④衛星バスの信頼度

衛星バスの信頼度を評価するための指標として、損害保険会社による保険料率算定水準を用いることとした。宇宙保険には大別して「打上げ前保険」、「打上げ保険」、「軌道上寿命保険」、「第三者賠償責任保険」の4種類がある。

このうち軌道上寿命保険（以下、「寿命保険」と呼ぶ）とは、軌道上での衛星の物的損害（搭載機器の故障、衛星機能の喪失、衛星寿命の短縮等）を補償の対象とする保険であるが、今回はこの寿命保険に注目して、引受保険会社の視点を参考として各主要バスの信頼度を評価する。

損害保険会社では、衛星の設計仕様、健康状態を分析して保険料率を算出している。そこで今回は、宇宙保険マーケットでの主要保険会社である三井住友海上火災保険株式会社の協力を得て、保険料率の観点から各主要バスの信頼度を評価した。その結果を表 3-1e に示す。

ただし、宇宙保険マーケットの状況により各主要バスの保険料率は大きく変動することを留意されたい。

表 3-1e 寿命保険における各主要バスの信頼度評価

	欧州		米国				中国	日本
衛星メーカー	Thales	Airbus	Boeing	LMCSS	Orbital	SS/L	CAST	三菱電機
代表的なバス	Spacebus -3000型, -4000型	Eurostar -2000型, -3000型	BSS -602型, -702型	A2100型	Star-2型	LS-1300型	東方紅 -4型	DS-2000型
評価	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>5</b>

(5点満点)

このデータを基に、欧州、米国、日本は差が無いと考え5点、中国は3点とした。さらに、このデータにないロシアとインドについては中国より一段低い2点を、衛星バスの技術を持たないカナダは0点とした。その結果を表 3-5 f に示す。

表 3-1f 衛星バスの信頼度の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評価	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>0</b>

(5点満点)

## ⑤情報公開

商用通信衛星のような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。一方、新興国における教育目的や入門的な衛星は廉価であることを重視する傾向にあり、中国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。しかし一方で、故障発生比率が通常の商用衛星よりも高い傾向にある。中国の場合、公開情報が限定的なため、事前の客観評価が難しいことが影響していると思われる。

このため、単に受注実績が多いからということだけで衛星バス技術の評価をするのではなく、製造元の国がどの程度情報公開を進めているかを勘案することが必要である。そこで、衛星バス技術関連の情報公開について評価した結果を表 3-1g に示す。

表 3-1g 情報公開の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評価	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>

(2点満点)

## ⑥衛星バス技術のまとめ

以上の個々の評価を踏まえ、衛星バス技術のレベルを総合的に評価した結果を表 3-1h に示す。

表 3-1h 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
部品等	10	10	10	3	6	3	2	2
信頼度	5	5	5	2	5	3	2	0
情報公開	2	2	2	1	2	1	1	2
合計	37	37	36	20	28	20	15	5
評価		10	10	5	8	5	4	1

（合計 37 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-VIII)、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た。ただし近年、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。

近年の動向として英国のO3b (Other Three Billion) Networks社が、新しいコンステレーション衛星データシステムとして、赤道上空約8,000kmの低軌道に16機の「O3b」衛星を編隊飛行させ、途上国地域に低コストのブロードバンドサービスを提供することを目指すとして2008年9月に発表し、2013年に最初の4機の同時打上げに成功した。O3b Networks社には、米Google社も出資している。O3b衛星のミッションはアジア、アフリカ、ラテンアメリカ、中東地域の途上国の人々、いわゆる『その

他 30 億人』に対して、高速で低コストのインターネット接続を提供するサービスである。

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。2012 年には 3 機目の天鏈 1C を打ち上げ、有人宇宙船のランデブー・ドッキングに備えている。

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 3-2a に示す。

表 3-2a 衛星通信放送技術開発の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
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
評価合計		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重要である。

また、移動通信対応やブロードバンド対応の技術保有の有無も技術評価として意味がある。

以上を踏まえて各国別に、通信全体での占有率、テレビ放送、遠隔教育、遠隔医療、安全保障、移動通信等を指標として、衛星通信放送ミッションを評価した結果を結果を表 3-2b に示す。

表 3-2b 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		4	2	2	3	2	3	3

(合計 12 点満点⇒評価 5 点満点に換算)

### ③衛星通信放送企業

それぞれの国で衛星通信がどの程度利用されているかを示す指標として、衛星通信放送企業の数と売上げが重要である。ここでは 2012 年の固定衛星通信放送企業の売上げのデータを基に、比較する。

日本ではスカパーJSAT 社が 10 機以上の静止通信衛星を運用して、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米国系のインテルサット社、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。中国の中国衛星通信集団公司 (China Satcom 社) は第 6 位、ロシアのロシア衛星通信 (RSCC) 社は 13 位、インドの Antrix 社は 16 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 China Satcom 社の他、香港に「Asiasat」を運用するアジアサット社及びアジア放送衛星 (ABS) が含まれ、3 社合計では日本のスカパーJSAT 社をわずかに上回っている。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 年以降は出典資料の統計が固定局間通信に限定されたため除外された。

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。

具体的なデータは表 3-2c の通りである。

表 3-2c 2012 年の衛星通信放送企業数と売上げ（上位 25 位まで）

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
企業数	2	5	3	1	3	1	1
売上げ（百万米ドル）	2699	4,540	370	659	672	160	846

注1：第1位のインテルサット（2,360 百万米ドル）社はルクセンブルクに本社をおくが、歴史的に米国の企業とみなされるという実態を考慮して米国に計上した。

注2：その他の9社は東アジア4、中近東2、中南米2、アフリカ1。

出典：各種資料を基に事務局作成

このデータを基に、各国の衛星通信放送企業の評価を行った結果を表 3-2d に示す。

表 3-2d 衛星通信放送企業の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評 価	4	5	2	3	3	1	3

（5 点満点）

#### ④ 衛星通信放送のまとめ

以上の個々の評価を踏まえて、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 3-2e に示す。

表 3-2e 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
技術開発	10	9	9	1	5	1	0	0
ミッション	5	4	2	2	2	2	3	3
企業	5	4	5	2	3	3	1	3
合計	20	17	16	5	11	6	4	6
評 価		9	8	3	6	3	2	3

（合計 20 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算）

### (3) 地球観測

地球観測では、国家安全保障、国土保全、環境監視、農林水産業支援などの多様な目的のために画像を含む地球環境データ取得を実施しており、先進国では地球温暖化/環境汚染モニタ、災害被害緩和、第一次産業利用などで宇宙からの地球観測システムの社会実装への活動が進められている。

各国の地球観測衛星で現在運用中のものと、近年中に打上げ予定のもの（斜体字で表記）を、参考までに以下に示す。

#### (a) 米国

地球観測 EOS-Terra/Aqua/Aura, OSTM/JASON, TRMM, GPM, QuickSCAT, ACRIMS, SORCE, EO-1, Landsat, OCO, CloudSat, CALIPSO, Aquarius, *SMAP*, ICE-Sat, GRACE, KH, GeoEye, IKONOS, Worldview, NOSS  
気象観測 GOES, NOAA, DMSP, Suomi-NPP, JPSS

#### (b) 欧州

地球観測 TerraSAR-X, TanDEM-X, RapidEye, SPOT, *Sentinel*, GOCE, SMOS, Cryosat, SWARM, Aelous, *EarthCARE*, SAR-Lupe, Helios, COSMO-SkyMed, Pleiades  
気象観測 MeteoSat/MSG, MetOp

#### (c) ロシア

地球観測 Resurs, Kanopus, Kosmos  
気象観測 Elektro, Meteor

#### (d) 日本

地球観測 TRMM, AMSR-E, GOSAT, GCOM-W, *GCOM-C*, GPM, ALOS, *EarthCARE*  
気象観測 MTSAT

#### (e) 中国

地球観測 CBERS, 資源(ZY)、環境(HJ)、天絵(TH)、高分(GF)、海洋(HY)、遙感(YG)  
気象観測 風雲 (FY) (静止および極軌道)

#### (f) インド

地球観測 SARAL, RISAT, Megha-Tropiques, RECONCOURSAT, CARTOSAT, OCEANSAT,  
気象観測 INSAT, KALPANA

#### (f) カナダ事例

地球観測 Radarsat, *RCM*, *PCW*

なお、地球観測は宇宙開発の新興国でも活発であり、今回の評価には直接関係ないが、ここで簡単にその状況を紹介します。

韓国は、英国 SSTL の衛星バスを元にした KITSAT より始まり、近年周回衛星のアリラン（KOMPSAT）シリーズを米欧からの海外技術導入により開発。近年は主に欧州のエアバス（旧アストリウム）や TAS に衛星を発注している。また静止衛星については同じく欧州バスによる多目的衛星「COMS」を取得した。小型衛星については、Satrec Initiative が KITSAT からの自主開発努力を続けており、近年他国への輸出も見られる。小型のシステム開発能力を持つものの、中型～大型実用衛星については、海外からの購入に頼らざるをえない。また、センサ機器開発に必要な基幹部品（光学系、センサ等）についても研究を行っているが基盤となるパーツ生産能力は保持していないと思われる。小型衛星による独自技術習得と外国技術導入による実用衛星取得を並行して進めていくと見られる。

ブラジル、アルゼンチンなどは、観測センサについてこれまで主に NASA との共同開発を行ってきた。それら観測センサはニッチ的に高度なものも含まれており、部分的な技術習得がなされているものと判断する。なお、近年ではブラジル・アルゼンチン共に小型の自国地球観測衛星を米中などとの国際協力により取得している。

ベトナム、タイなどはこれまで、他国の衛星観測データ利用という位置で地球観測を行ってきたが、これらの国も海外協力により打ち上げた自国の地球観測衛星で観測データを取得するようになった。

## 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。種類の広がり、地球観測能力（技術力）の広さを示している。

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、電波方向探知（ELINT）及び電波傍受（COMINT）の9項目を評価対象としたが、今回の調査ではこれらを観測対象領域とミッションの特異性という視点で再整理し、気象観測、大気観測、海洋観測、陸域観測、立体地図作成、資源探査、電波探査（ELINT/COMINT）の7項目で評価した。

評価結果を表3-3aに示す。

表3-3a 地球観測ミッションの評価

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
大気観測	2	2	2	1	2	1	1	0
海洋観測	2	2	2	0	2	1	1	1
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
資源探査	2	2	1	1	2	1	1	1
電波探査 (ELINT/COMINT)	1	1	0	1	0	0	0	0
合計	14	14	13	6	12	9	8	3
評価		10	9	4	9	6	6	2

(合計14点満点 ⇒ 評価10点満点に換算)

## ②地球観測センサ技術

地球観測センサの種類と性能は、その設計力のみならず、キーとなる部品の技術力を含めた指標となる。取得したデータの解釈（解析力）は各国の関連科学レベルとも強く相関しており、評価に当たってはそれらを考慮する必要がある。

### ○センサの概観

地球観測センサは主に光学・電波に大別され、さらにそれぞれ受動/能動別に4分類される(例外として加速度計を用いた重力場センサがある)。地球観測は、観測対象により、水平/垂直分解能、波長分解能、時間分解能（観測頻度）の3つの次元で評価される。例えば気象衛星などは時間分解能を重視したミッションであり、偵察衛星などは水平分解能を重視したミッション、環境観測衛星などは一般的に波長分解能を重視したミッションになっている。それぞれの能力はトレードオフ関係にあり、全てを単一の衛星で満足することはできないが、近年は複数衛星の利用による観測頻度向上な

ど不足部分の補強を図るアプローチが用いられている。前世代においては、米国「EOS」シリーズ、欧州「Envisat」、日本の「ADEOS」シリーズなど、大型プラットフォームに多種類の観測機器を搭載したミッションが実施されてきたが、システムとしてのロバスト性、開発計画における柔軟性の観点から、近年、1〜2個程度のセンサを搭載した小型〜中型単一ミッションが主流になりつつある。ただし、気象用極軌道周回衛星（米「JPSS」、欧「MetOp」、中「FY」）などはやや小型化しつつも、複数搭載センサの同時観測性の利点から、プラットフォーム方式を継続している。一方、単一ミッション衛星においても、米「A-Train」に代表されるフォーメーションフライトが評価を得ており、欧州でも検討を開始されていることから、大型プラットフォームを用いたミッションはこうした形態に置換されていく可能性がある。

#### ○可視光分解能

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(KH)」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-2」で、分解能 34cm である。一方、地表面分解能と広域撮像性はトレードオフの関係にあるため、一般的に地表面分解能が高ければ、一度に撮れる範囲は狭い。これは同時に撮影頻度が低くなることを意味するため、撮像目的（地上建築物/道路/河川/車両/人間など）に応じた分解能と広域性のバランスの最適化を行う必要がある。

#### ○合成開口レーダ

合成開口レーダは、光学センサと観測上の特徴が原理的に補完的である。つまり可視光学観測は撮像できれば精細な情報が取れるが夜間や曇天域では不可能であるのに対し、レーダは分解能が劣るものの夜間を含めた全天状態で観測が可能である。合成開口レーダは、カナダの C 帯、米国の C/X 帯、欧州の X 帯、日本の L 帯、中国の S 帯が衛星搭載用として実現している。それぞれの周波数により降雨減衰等の透過特性が異なり、地表面分解能が物理的に決定されるといった違いがある。日本独自となる L 帯では、水蒸気に感度を持つため、大気水蒸気の状態や地表面の土壌水分量などの質的情報も得ることができ、森林識別や水害関連の観測に適し、形状以上の情報が得られることから広範に利用されている。また「JERS-1」から蓄積した観測データベースと「ALOS」合成開口レーダの干渉を取ることで、センチメートルオーダーの地殻変動評価なども可能である。東日本大震災や阪神淡路大震災の前後における広域の地殻変動量を「ALOS」により評価したことは記憶に新しい。

#### ○マルチバンドセンサ

光学のマルチバンドイメージャは近紫外から赤外域までの広波長域にわたり 30 程度の狭帯域バンドを持ったイメージャであり、狭帯域化により光量が減ることで、地表面分解能を上げることは難しいものの、広域で対象物の識別など質的観測を行うことができる。最も利用されているのは米「EOS」搭載の「MODIS」であり、近年「Suomi-NPP」の「VIIRS」が後継センサとして引き継ぎつつある。これらの放射計は非常に高い精度が要求される。日本では「ADEOS-2」搭載の「GLI」がほぼ同様



の性能があったが、衛星障害により運用を停止し、2016年に初号機打上げ予定の「GCOM-C」に搭載される「SGLI」が引き継ぐ予定である。「VIIRS」の地表面分解能375mに対して、「SGLI」は250mを実現しており、日本に仕様上の優位性がある。放射計としての精度が高く要求されるため、先進国以外での開発は困難であり、欧州では「Sentinel-2」、中国では「FY-3」に同目的のものを開発している状況である。

#### ○ハイパーセンサ

ハイパーセンサは、赤外領域において大気中の気体を検知するためのもの(オゾン、二酸化炭素など)や、可視領域で対象物の質的評価を行うものがある。どちらも非常に狭い帯域の分光特性を測ることで物質の特性を評価することに重点をおいている。欧州の「Envisat」搭載の「Sciamachy」、米国の「AIRS」、「OCO」等が該当する。日本では、二酸化炭素を観測する「GOSAT」がある。分光方式として、欧米が主に回折格子を用いているのに対して、日本およびカナダではフーリエ分光計を採用している。

#### ○レーザーレーダ

レーザーレーダについては、米国がリードしている。地球観測に用いる大出力のレーザー送信機は寿命が設計通りに持たないという世界的に共通の技術的問題があったが、「CALIPSO」の開発において、米国(NASA)が解決し、地球観測用長寿命レーザー送信機として唯一の技術を持っている。欧州では「Aelous」、「EarthCARE」に搭載する紫外レーザー送信機を開発中であり、米国に追従している。日本では、月探査用に小型のレーザー高度計を実現しているが、大出力長寿命レーザー送信機技術は現在研究中である。

#### ○気象センサ

各国が静止軌道の気象衛星に自国開発の気象センサを載せている中で、日本は米国センサの輸入に頼ってきたため、気象センサ開発の経験は非常に乏しい。日本とカナダを除く各国では、数チャンネルの比較的単純なセンサという古い仕様から、周回軌道で開発された「多バンドイメージャ」や「サウンダー」を静止気象衛星に移植する開発を終えつつある。

#### ○早期警戒衛星用センサ

早期警戒衛星用センサについては、技術的詳細は明らかではないが、既に実用化しているのは米国(DSP)とロシアのみである。フランスは試験衛星(Spirale)打上げを完了し、中国も開発を急ぎつつある。日本は潜在的な技術力を持つが、特に赤外エリアセンサの研究開発の加速が必要である。

#### ○国別のセンサ開発状況

米国と欧州は各種のセンサをほぼ網羅して開発しているが、性能や技術力という点では米国が欧州を圧倒している。

ロシアは、早期警戒衛星や地震予知を目指した電磁波観測衛星で一部進んでいるものの、観測センサのバリエーションや近代化という意味では停滞している。

中国では欧州との協力（ドラゴンプログラムや試験設備導入）や、欧米での在外研究員活動等で、近年激しい追い上げを見せている。しかし、自ら独自に研究開発する能力がどの程度あるかについては、今後の成果を見て見極める必要がある。今のところ、インドと同じく、観測システムとしての研究開発段階にあると思われる。

カナダは国策として開発範囲を絞り、世界トップを目指すという戦略を取っており、C帯のSAR衛星、フーリエ赤外分光計（Fourier transform infrared spectrometer : FTS）、W帯高出力送信機など、いくつかのキー技術を掌握している。

日本においては、宇宙開発予算規模から、欧米と同じ範囲のミッションを全て保有することはできないが、技術的な欠落がないように、網羅した範囲の研究を実施している。またミッションとして衛星開発に着手したものについては、いずれも世界唯一あるいは世界最高性能により、その国際的位置を確保している状況である。例えば「ALOS」のL帯フェイズドアレイSARシステム（PALSAR）、「GPM」のKu/Ka帯降水レーダ、「EarthCARE」のW帯ドップラーレーダ、「GOSAT」の二酸化炭素計測用フーリエ分光計は世界唯一であり、「GCOM-W」の「AMSR」はマイクロ波スキャナセンサとして世界標準になりつつある。「SGLI」も午前軌道における「VIIRS」相当の高性能多波長放射計として、代えがたいセンサとなる見込みである。レーザーレーダを除き、基本的な技術の研究開発段階は欧米と同じく抜け出つつある状況にあり、今後、これらの衛星複合利用により社会実装に向かう段階に入る状況にある。そのため、こうした基幹となる地球観測衛星シリーズの継続性については産業/公共利用インフラとして保証されていく必要がある。

以上の各種センサの技術評価結果を表3-3bに示す。

表 3-3b 地球観測センサ技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
可視光分解能	2	2	2	1	2	1	1	0
合成開口レーダ	2	2	2	0	2	1	0	2
マルチバンドセンサ	2	2	1	1	2	1	0	0
ハイパーセンサ	2	2	1	0	2	0	0	1
レーザーレーダ	2	2	1	0	0	0	0	0
気象センサ	2	2	2	2	0	2	2	0
早期警戒衛星用センサ	2	2	1	2	0	1	0	0
合計	14	14	10	6	8	6	3	3
評価		10	7	4	6	4	2	2

（最大14点満点 ⇒ 評価10点満点に換算）

### ③公共利用

打ち上げられた多数の衛星から得られたデータを、どのように災害、健康、気候変動等の公共利用に資するかについて、ひと通りの技術開発を終えようとしている欧州、米国を中心に多くの議論がなされている状況である。

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) があるが、GEOSS 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。

米国では衛星はすでに防衛を中心に不可欠な社会インフラとして確立しており、部分的に社会実装を終えている状況にある。

欧州では、コペルニクス計画 (旧 GMES; 環境と安全保障のための地球観測) という名称で、欧州及びアフリカを対象とした環境監視・安全保障のためのシステムを、EU が構築中である。衛星を整備・運用するだけでなく、衛星データを公共目的で実利用することとする。これは欧州の GEOSS に対する貢献でもある。

日本では、GEOSS 貢献として 9 つの社会利用分野のうち、後述の気象衛星観測協力の他「地球温暖化・炭素循環変動」、「気候変動・水循環変動」、「災害」の 3 分野を中心とし、その他の分野にも応用可能な衛星システムの整備を実施してきた。また、得られた衛星観測データと地上観測データの融合と利用を目的としたデータ統合・解析システム(DIAS)について、並行して検討が実施されてきた。しかしながら、現時点では社会インフラとして、あるいは社会実装としての仕組みが定着できておらず、今後欧米に準じ、喫緊の課題として衛星システムのインフラ化、社会実装を行う必要がある。

ロシアは気象機関が後述の気象衛星観測協力に参加しているが、GEOSS への参加実績はほとんどない。しかしながら近年 ScanEx 社などにおいて、森林、河川管理など、海外衛星も含めたデータ高次利用が行われている様子である。

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。

なお、GEOSS10 年計画の完了を間近に控え、次期 GEOSS の議論、あるいは 3 つの地球科学コミュニティの統合化を図ろうとする「Future Earth」などの議論が始まっているところである。

気象観測に関しては、各国の衛星を総合的に利用して全球をカバーし、相互にデータを交換し合うという世界的な観測システムが、世界気象機関 (WMO) により構築されている。具体的には、衛星観測網(World Weather Watch; WWW)が、「ひまわり」(日)、「GOES」(米)、「Meteosat」(欧)、「Electro」(露)、「INSAT」/「Kalpana」(印)、「FY-2」(中)、「COMS-1」(韓)などの静止気象衛星群と、「DMSP」、

「NOAA」、「JASON」（以上米）、「MetOp」（欧）、「Meteor」（露）、「FY-3」（中）からなる周回気象衛星群により構成されている。日本では静止気象衛星による国際貢献を行っている一方で、搭載する雲観測用赤外線センサは外国製品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おらず、各国の周回気象衛星のデータに頼っている。

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 3-3c に示す。

表 3-3c 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	1	3	2	2	2
健康	3	2	2	0	0	0	0	0
エネルギー	3	2	2	0	0	0	0	1
気象	3	3	3	3	2	3	2	0
水	3	3	2	1	3	0	1	2
気候変動	3	3	3	0	3	2	2	2
生態系	3	2	3	0	0	1	0	2
農業	3	2	3	1	1	1	10	2
生物多様性	3	2	3	0	0	1	0	1
合計	30	25	27	6	13	10	8	124
評価		8	9	2	4	3	3	4

（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）

地球観測衛星の製造販売では欧州が先行しており、SSTL の小型衛星や、エアバス（旧 EADS Astrium）、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「RadarSat」の技術を活用してドイツの「RapidEye」の開発を行った。韓国の Satrec Initiative は、マレーシア、アラブ首長国連邦（UAE）、スペインの小型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他、ベネズエラの小型地球観測衛星を製造した。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。米国は実質的に韓国の「KOMPSAT-1」を製作し、日本向けには気象衛星センサやコンポーネントの輸出が行われている。

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おり、アジア中堅国からは「ALOS」レベルのニーズもあるものの、1999年に「Formosat-1」(台湾)向けに海色イメージャ「OCI」を輸出した他は、まだ地球観測衛星としての輸出実績はない。

衛星画像のビジネスには、受信権販売と画像販売がある。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には、画像そのものを販売する。米国、欧州(仏・独)、ロシア、インド、カナダなどは、自国衛星の画像を販売している。米国では情報機関がアンカーテナントとなり、長期にわたりデジタルグローブ(Digital Globe)社が高解像度画像を販売する基盤を確立している。欧州ではAstrium GEO information services社が「SPOT」、「Pleiades」、TerraSARなどの商業画像を販売している。ロシアは国営企業の地球観測センター(NTs OMZ)やRDC Scan Ex社が外国衛星の画像を利用したサービスを行っているほか、IKI Data Distribution Service社がロシア衛星の画像販売を行っている。インドはアントリクス(Antrix)社がISROの地球観測衛星の画像を世界中に販売している。カナダでもマクドナルド・デトワイラー・アソシエイツ(MDA)社が「RadarSat」の画像を販売している。

日本では民間企業である株式会社パスコ(PASCO)や一般財団法人リモート・センシング技術センター(RESTEC)が「ALOS」の他、諸外国の商用衛星画像を含め販売してきた。

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3-3dに示す。

表 3-3d 商用利用(衛星製造販売・衛星画像)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
衛星製造販売	2	1	2	0	0	1	0	1
受信権販売	1	1	1	0	0	0	0	0
画像販売	2	2	2	2	1	0	2	1
評 価		4	5	2	1	1	2	2

(5点満点)

## ⑤ 国際協力

地球観測衛星の国際協力について、国際災害チャーターへの参加と、地域協力の二項目で評価した。

## ○国際災害チャーターへの参加

国際災害チャーターは地震・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、レーダ衛星「ALOS-2」の打上げにより再び復帰する見込みである。

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（他に Digital Globe, GeoEye）

欧州 5機関＝ESA、CNES（仏、他に Astrium, NSPO(台湾)、DLR（独）、DMC（英、他にアルジェリア、ナイジェリア、トルコ、SSTL）、EUMETSAT

以下は各々1機関。ロシア Roscosmos、日本 JAXA、中国 CNSA、インド ISRO、カナダ CSA、アルゼンチン CONAE、韓国 KARI、ブラジル INPE。

## ○地域協力

欧州においては、ESA が欧州地域における国際協力機関の中核であり、更に TIGER Initiative の活動により、アフリカ地域に対する利用推進を続けている。また、中国に対する協力として龍計画（DRAGON Program）を実施し、中国と共同で地球観測研究を継続中である。

アジア・太平洋地域では、日本はアジア太平洋宇宙機関フォーラム（Asia Pacific Regional Space Agency Forum(APRSAF):欧米中露を含む参加国 40, ESA を含む国際機関 26)を主導している。地球観測においては、日本主導で APRSAF のフレームの下、地域的防災枠組みであるセンチネルアジア、環境観測枠組みである SAFE, 気候変動枠組みである Climate R3が活動をしており、地域的な枠組みが形成されている。

中国は、アジア太平洋宇宙協力機構（Asia Pacific Space Cooperation Organization (APSCO:参加国 8)を主導している。なお、APSCO 自身は APRSAF にも参加している。

以上の状況から国際貢献の評価結果を表 3-3e に示す。

表 3-3e 国際貢献の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
国際災害チャーター	4	3	4	1	2	1	1	1
地域協力	4	0	4	0	4	2	0	0
合計	8	3	8	1	6	3	1	1
評価		2	5	1	4	2	1	1

（合計 8 点満点 ⇒ 評価 5 点満点に換算）

### ⑥地球観測のまとめ

以上の個々の評価結果を踏まえて、地球観測のレベルを評価した結果を表 3-17 に示す。

表 3-3f 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	10	9	4	9	6	6	2
センサ種類及び性能	10	10	7	4	6	4	2	2
公共利用	10	8	9	2	4	3	3	4
衛星販売・画像販売	5	4	5	2	1	1	2	2
国際貢献	5	2	5	1	4	2	1	1
合 計	40	34	35	13	24	16	14	11
評 価		9	9	3	6	4	4	3

(合計 40 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算)

## （４）航行測位

航行測位衛星とは、ユーザ受信端末の位置及び時刻決定（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。ユーザ受信端末の位置及び時刻を精密に決定するためには、4個以上の衛星からの信号を受信し、当該受信端末と各航行測位衛星との距離を計測することが必要であり、サービスエリア内で常時、ユーザの位置・時刻決定を可能にするためには、複数の航行測位衛星から構成される衛星測位システムを整備運用する必要がある。

地球全球をカバーする衛星測位システムは、GNSS:Global Navigation Satellite System と呼ばれており、24機から30機の中高度周回衛星が必要である。現在、米国のGPS、ロシアのGLONASSの2システムが既に運用中であり、中国のBeiDou（北斗）、欧州のGalileoが現在整備中である。

一方、地域限定でサービスを提供するシステムは、上記のGNSSに対してRNSS:Regional Navigation Satellite System と呼ばれており、日本が準天頂衛星システムをインドがIRNSSを整備中である。また、GNSSを補強するためのシステムであるSBAS:Satellite Based Augmentation Systemが、民生航法向けに米欧日でサービスが開始されている他、インドやロシアでも開発が進められている。

今回、システム構築技術、コンステレーション性能、GNSS補強技術の三点に着目し、評価を行った。

### ①システム構築技術

衛星測位システム構築に必要な技術としては、「SIS-URE:Signal-In-Space User Range Error」が最も重要な指標と考えられる。そこで、このSIS-UREで評価を行い、その上でこれに搭載原子時計と、精密軌道・クロックオフセット推定技術を加味することとした。

#### ○SIS-URE

衛星測位システムとしての性能を比較するにあたり、もっとも重要な指標となるのが、測位衛星の軌道とシステム時系からのズレを精密に推定し、これを所定の期間にわたって伝搬予報し、航法メッセージとしてユーザの測位演算に利用可能な形で提供する能力である。

第8回国連GNSSに関する国際委員会（ICG）での各システム発表資料に記載されたSIS-UREを表3-4aに示す。

GPSとGLONASSについては、世代の古い衛星も含めた全衛星のRMS値であるため他のシステムの1衛星ごとの数値、かつ新しい衛星のみの評価であることを比較の際には留意する必要があるが、長期間にわたり安定的に運用を継続し、衛星及び地上システムの更新を行っているGPSが一番高い性能を有している。QZSSは1衛星のみながら、SIS-UREとしては最新型GPS衛星と同等の性能を達成している。



表 3-4a 各システムの SIS-URE

国名	衛星測位システム名	SIS-URE (RMS)
米国	GPS	0.8m(全運用中衛星の RMS)*1
ロシア	GLONASS	1.8m(全運用中衛星の RMS)*2
中国	BeiDou	1.0~2.0m (14 衛星 1 衛星ごと)
欧州	Galileo	1.26m (IOV 初号機)
日本	QZSS	0.4m(みちびき)
インド	IRNSS	—

\*1 : GPS の最新型衛星 (IIRm 及び IIF) の SIS-URE は 0.4m (RMS)

\*2 : 第 4 回 ICG におけるロシア発表資料より。

これ以降の ICG 資料では SIS-User Positioning Error が公表されている。

### ○搭載原子時計

測位衛星に搭載する原子時計を自国で製造できるかどうか、またその時計が安定であるかどうかシステム構築に重要と考えられる。ICG での発表や関連する学会発表論文から各システムに搭載されている原子時計が当該国の製品かどうか、およびその安定度 (期間 1 日におけるアラン偏差) を表 3-4b に示す。

米国 GPS の Block-IIR 衛星用のルビジウム原子時計は  $1 \sim 8 \times 10^{-14}$  の安定度であるが、最も多くの軌道上運用実績があり、数台を除いて、 $2 \times 10^{-14}$  以下の安定度である。Galileo はルビジウム原子時計に加えて、受動型水素メーザ原子時計を搭載している。現時点で公開されている実験衛星である GIOVE-A 及び B に搭載された性能評価結果を示した。ルビジウム時計では米国が最も性能が高く、欧州の受動型水素メーザ原子時計が、同等以上の性能を有している。

表 3-4b 原子時計の製造能力、安定度

国名	システム名	搭載原子時計製造能力	原子時計性能 (安定度)
米国	GPS	○ (Cs, Rb)	$1 \sim 8 \times 10^{-14} @ 1 \text{day}$ (Block-IIR、IIR 搭載 Rb)
欧州	Galileo	○ (受動型水素メーザ、Rb)	$8 \times 10^{-15} @ 1 \text{day}$ (GIOVE-B 搭載受動型水素メーザ) $5 \times 10^{-14} @ 1 \text{day}$ (GIOVE-A 搭載 Rb)
ロシア	GLONASS	○ (Cs)	$2 \sim 8 \times 10^{-14} @ 100000 \text{s}^*1$
日本	QZSS	×*2(Rb)	—
中国	BeiDou	○ (Rb)	$2.5 \sim 9.4 \times 10^{-14} @ 1 \text{day}$
インド	IRNSS	—*3 (Rb)	—

\*1: 第4回 ICG 発表資料 (2008年) による。

\*2: みちびきの搭載原子時計 (Rb) は米国からの輸入。国産の搭載原子時計としては NICT が能動型水素メーザの開発をエンジニアリングモデルの開発試験まで実施したが、質量と寿命がネックとなってみちびきへの搭載は見送られている。

\*3: IRNSS の搭載原子時計についてはインド国内で製造されたものかどうか、公開情報がなく不明である。

### ○精密軌道推定

国際 GNSS 事業 (IGS: International GNSS Service) の解析センターとなっている NASA/JPL の軌道クロック推定ソフトウェアが、次世代 GPS の地上管制局に採用されるなど各機関の成果が各国の衛星測位システムに適用されている。そこで、現時点の精密軌道クロック推定技術の比較として、IGS の解析センターを自国に有しているかどうかを調査した。IGS 解析センターの一覧表を表 3-4c に示す。日本には、解析センターに選ばれた機関はないが、現在 JAXA が MADOCA (MultiGNSS Advanced Demonstration tool for Orbit and Clock Analysis) を開発中であり、これにより IGS の解析センターを自国に有するのと同等の技術力を持つと評価した。

したがって、IGS の解析センターとなっている米国、欧州、中国、カナダと MADOCA を開発中の日本は、同等の精密軌道クロック推定技術を有している。一方ロシアは、IGS 解析センターレベルの精密軌道クロック推定技術はないと推定される。またインドは、1 機目を打上げたばかりで SIS-URE も未評価であり、IGS レベルの精密起動クロック推定技術はないと推定される。

表 3-4c IGS 解析センターの所在機関と国

機関名		国
Center for Orbit Determination in Europe, AIUB	CODE	スイス
European Space Operations Center (ESA)	ESA	ドイツ
Geodetic Observatory Pecny,	GOPE	チェコ
GeoForschungsZentrum	GFZ	ドイツ
GRGS-CNES/CLS, Toulouse	GRG	フランス
Jet Propulsion Laboratory, (JPL/NASA)	JPL	米国
Massachusetts Institute of Technology(MIT)	MIT	米国
National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)/ NGS	NGS	米国
Scripps Institution of Oceanography	SIO	米国
U.S. Naval Observatory(USNO)	USNO	米国
Natural Resources Canada(NRCan)	NRCan	カナダ
武漢大学 (Wuhan University)	WU	中国

以上から、まず基礎点として、SIS-URE の性能を最大 10 点として、1m 以下を 10 点、1～1.5m を 8 点、1.5m 以上を 6 点、データが無いインドは 0 点とした上で、これに原子時計製造技術を有していない日本は-2 点、また、IGS の解析センターとなっている機関がないロシアを-1 点とした。この評価結果を表 3-4d に示す。

表 3-4d システム構築技術の比較

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
SIS-URE	10	10	8	6	10	6	—	—
原子時計	—	—	—	—	-2	—	—	—
精密軌道推定	—	—	—	-1	—	—	—	—
評価	10	10	8	5	8	6	0	0

(10 点満点)

## ②コンステレーション

コンステレーションとは、多数の衛星を協調作動させるための技術である。衛星の他の用途と違い、測位は 24 機から 30 機の衛星からの情報により達成されるサービスであるため、このコンステレーションが重要となる。今回の調査では、現時点でのシステム運用整備状況、運用実績（安定的なサービス提供実績）、提供可能な DOP（Dilution Of Precision）を考慮して比較した。

### ○各国のシステム整備状況

米国は、GPS を軍事システムとして 1950 年代から開始し、その後継続的に開発整備を行ってきた。2013 年末の時点で、31 機が運用中である。民生用信号は L1C/A（1575.42MHz）、軍用信号は L1（1575.42MHz）、L2（1227.60MHz）の 2 周波が送信されている。

新しい民生用信号である L2C（1227.60MHz）は Block-IIRm から、さらに L5 信号（1176.45MHz）は Block-IIF 衛星から送信が開始されており、2013 年末までに IIRm が 7 機、IIF が 4 機打ち上げられて運用中である。2015 年より打上げ予定の Block-III 衛星からは L1 帯にも L1C 信号が追加される計画である。近代化信号のサービス開始は、L2C が 2018 年ごろ、L5 が 2021 年ごろ、L1C が 2026 年ごろと想定されている。

これら近代化信号は、より受信環境の悪い条件においても測位が行えるように、測距専用チャンネルを持たせ、測距コードのコード長やチップレートを増やすなどの改良が行われている。

ロシアは、GLONASS の初号機を 1982 年に打ち上げ 1995 年 12 月に 24 機のシステムが完成したが、ソ連崩壊以降の経済的な混乱により、2001 年には運用可能な衛星

数が6機にまで低下していた。その後2011年11月に24機体制に復帰し、2013年末時点では試験機1機、予備機3機含む28機の衛星が軌道上で運用されている。現在Mシリーズの衛星が運用されているが、次世代のKシリーズからは他GNSSとの相互運用性を考慮し、CDMA方式の信号が追加される予定である。

中国は、段階的に衛星測位システムBeiDou(北斗)の構築を計画しており、3段階でグローバルな測位システムを構築する計画である。

第1段階は、静止衛星2機を用い、Sバンドの基地局とユーザ端末間で衛星を経由した2-Way測距を実施し、基地局でユーザの位置を計算、ユーザに通知するシステムであった。

第2段階は、他のGNSSと同様の1-Way測距方式のシステムで、中国とその周辺のアジア・オセアニア地域(北緯55度から南緯55度、東経55度から180度)をサービスエリアとする地域システムであり、2007年から打上げを開始し、2012年12月にシステム整備完了、定常サービス移行を宣言した。2014年1月時点で、静止衛星5機、準天頂衛星と同じく8の字の地上軌跡を描く地球同期傾斜軌道衛星5機、中高度軌道衛星4機の計14機がサービスを提供している。民生用の公開信号と、軍用と想定される安全保障信号、広域補強サービス、静止衛星を用いたショートメッセージサービスを提供している。

第3段階は、地域システムを拡張し2020年ごろ完成を目指しているグローバルシステムであり、静止衛星5機、地球同期傾斜軌道衛星3機、中高度軌道衛星27機の計35機で構成される。測位方式は第2段階と同じ方式であるが、第3段階では、他GNSSとの相互運用性を確保するために、使用する周波数が変更される。

欧州が構築を進めるGalileoシステムは、3つの軌道面にそれぞれ衛星9機と予備機の10機、計30機を配置するものであり、公開サービス、公共専用サービス(Public Regurated Service)、商用サービス、Safety of Life(SoL)サービスの4つの測位サービスと、遭難捜索救助サービスを提供する。2011年に2機、2012年に2機の軌道上実証機(In Orbit Validation:IOV)4機を打ち上げて、システム検証を進めている。2015年までに、初期サービスを開始する予定であり、2014年中に6機を打ち上げる予定である。

日本は、地球自転に同期した傾斜軌道を用いたGPS補完補強を目的とする地域システムQZSSの構築を進めており、2010年9月に初号機「みちびき」が打ち上げられ運用中である。QZSSは、静止衛星1機を含む4機構成で、2018年に実用サービスが開始される予定であり、内閣府宇宙戦略室にてシステム検討を実施中である。

インドは、独自の測位サービスとして公開サービス及び公共専用サービスを提供する地域衛星測位システム IRNSS を構築中である。静止衛星 3 機と地球同期傾斜軌道衛星 4 機の計 7 機で構成され、初号機が 2013 年 7 月 1 日に打ち上げられた。

コンステレーション性能の評価を行うため、各国の測位システムの情報を整理し、システム (GNSS または RNSS) 構築における必要衛星数、現時点での実働衛星数、各衛星測位システムの整備運用状況、サービス開始以降、安定してサービス提供を行った実績と、2013 年末時点における運用中のコンステレーションから計算した PDOP (Position DOP) のサービスエリア内の平均値を表 3-4e に示す。

表 3-4e コンステレーションのデータ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
必要衛星数 (GNSS)	27	30	24	-	35	-
同 (RNSS)	-	-	-	4~7	14*	7
実働衛星数	31	4	28	1	14	1
整備運用状況	運用中	整備中	運用中	整備中	運用中	整備中
安定運用実績**	20 年	—	2 年	—	1 年	—
PDOP***	1.96	—	4.39	—	3.48	—

\* 中国の BeiDou (北斗) システムは地域システムから段階的にグローバルシステムへの拡張を図る計画となっており、2013 年末時点では、14 機による地域サービスを提供中である。

\*\* GPS は 1993 年の IOC 宣言から、GLONASS は 2011 年のシステム復旧から、BeiDou は 2012 年の地域サービス開始宣言からの年数

\*\*\*GPS、GLONASS は全球緯度経度 2 度間隔 1 分間隔で 24 時間の PDOP を算出、全時間空間の平均値、BeiDou は南北緯 55 度、東経 55 度~180 度までを同様に算出

上記表 3-4e のデータを基に、コンステレーションの性能を総合的に評価した結果を表 3-4f に示す。

表 3-4f コンステレーション性能の評価

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
評価	10	2	6	1	4	1	0

(10 点満点)

### ③GNSS 補強技術

GNSS 補強技術として重要なものは、SBAS（Satellite Based Augmentation System）と搬送波位相測位向け補強サービスである。今回はこの二つの点から、GNSS 補強技術を評価した。

#### ○SBAS

SBAS とは、補強信号を配信することにより GPS による測位精度及び信頼性を向上する技術であり、ICAO（International Civil Aviation Organization: 国際航空機関）が定める要求を満たす補強サービスを提供することを目的に各国が整備・運用を行っている。米国の WAAS（Wide Area Augmentation System）、欧州の EGNOS（European GNSS Navigation Overlay Service）、日本の MSAS（MTSAT Satellite Augmentation System）が運用中、インドの GAGAN ロシアの SDCM がシステム整備中である。

現在、SBAS を用いて運用されている航空機の運用フェーズで、各国の SBAS の技術比較ができると考えられ、米国 WAAS と欧州 EGNOS は APV（Approach and landing with vertical guidance：垂直方向の精度インテグリティ保証付きの着陸誘導）サービスを提供している。日本付近は磁気赤道に近く米国や欧州に比較すると電離層補正が難しい地理的な環境にあるため、日本の MSAS は、垂直方向の精度やインテグリティを保証しない米欧より低いレベルとなる、エンルート及び NPA（Non-Precision Approach: 非精度進入）サービスを提供している。インドの GAGAN、ロシアの SDCM はいずれも認証が未完で、システム検証中のステータスである。

#### ○搬送波位相測位向け補強サービス

搬送波位相測位向け補強サービスとしては、地上系では電子基準点網の観測データ配信サービスを活用したネットワーク型 RTK サービス、衛星系では衛星の軌道とクロックを精密推定し、単独搬送波測位（Precise Point Positioning: PPP）に用いるサービスが展開されている。PPP 方式では、収束に時間がかかる点が欠点となるが、Trimble 社の Centerpoint RTX サービスや SPAC の CMAS では、ローカルな基準点網を使って電離層や対流圏遅延補正を送ることで、収束時間の短縮を実現している。一方で、密な基準点網と伝送帯域が必要なことから、Centerpoint RTX の初期化時間短縮サービスのエリアは北米の一部のエリア、CMAS は日本に限定されている。

各国のリアルタイム搬送波位相測位向け補強サービスのうち主要なものを表 3-4g に示す。これらのサービスのうち、CNES、SPAC、JAXA のものは実証段階で、まだ定常的なサービスとして実用化はされていない。

表 3-4g 搬送波位相測位補強サービスの代表例

国名	事業者	サービス名	測位方式	精度 (RMS)		サービスエリア	補強対象システム	配信方式
				水平	垂直			
米国	NASA	GDGPS	PPP	~10cm		全世界	GPS GLONASS	TDRS Internet
	Trimble	Centerpoint RTX	PPP-AR	~2cm		全世界	GPS, GLONA SS, QZSS	静止衛星 Internet
欧州	CNES	PPP-Wizard	PPP-AR	~2cm	5cm	全世界	GPS GLONASS	Internet
	Terrastar	TerrastarD	PPP	5cm	10cm	全世界	GPS GLONASS	静止衛星 Internet
日本	SPAC	CMAS	PPP-RTK	3cm	6cm	日本	GPS	QZSS
	JAXA	MADOCA	PPP	10cm	10cm	東アジア オセアニア	GPS GLONASS QZSS	QZSS

補強技術の比較結果を表 3-4h に示す。SBAS については、APV サービスを提供しているシステムを 4 点、エンルート及び NPA サービスを提供しているシステムを 2 点、認証のための検証中のシステムに 1 点を配分した。また搬送波位相測位補強については、サービス開始済で、水平精度 5cm 未満のサービスを有する国に 4 点、5cm~10cm に対して 2 点、実用サービス開始前ではあるが性能検証済みの技術を保有する国に 1 点を配分した。

表 3-4h GNSS 補強技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
SBAS	4	4	4	1	2	—	1	—
搬送波位相測位補強	4	4	4	—	1	—	—	—
合計	8	8	8	1	3	0	1	0
評価	4	4	4	1	2	0	1	0

(合計 8 点満点⇒評価 4 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、航行測位の評価結果を表 3-4i に示す。

表 3-4i 航行測位の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
SIS-URE	10	10	8	5	8	6	0	0
コンステレーション	10	10	2	6	1	4	1	0
GNSS 補強技術	4	4	4	1	2	0	1	0
合 計	24	24	14	12	11	10	2	0
評 価	10	10	6	5	5	4	1	0

(合計 24 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3-5に示す。

表3-5 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	10	5	8	5	4	1
衛星通信放送	9	8	3	6	3	2	3
地球観測	9	9	3	6	4	4	3
航行測位	10	6	5	5	4	1	0
合計	38	33	16	25	16	11	7
評価	29	25	12	19	12	8	5

(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、月・惑星探査、天文観測、地球近傍宇宙環境観測などのミッションを実施してきた。2013年にはインドが火星探査機、中国が月着陸機を打ち上げた。インドの火星探査機は2014年に火星周回軌道投入に成功すれば、アジア初の火星周回機となる。中国は2013年12月14日にアジアで初の月面着陸に成功した。米国も月探査機と火星探査機を打ち上げ、火星探査においては米国とインドの国際協力も見られる。米国NASAは2014年度大統領予算で小型の小惑星を捕捉し、月の近くまで曳航してくるというユニークな探査計画を提案した。今後、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、ISSと同じような国際協力の枠組みで大型宇宙探査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、4人乗りの有人宇宙船や大重量打上げ用のロケットの開発を推進している。カナダは独自の探査機を打ち上げた経験はないが、NASAの火星探査機のロボットアームを供給することなどで貢献している。

### (1) 月・惑星探査

#### ①月探査

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。

2007年には日本の月周回衛星「かぐや」(SELENE)に続いて、中国の「嫦娥1号」、2008年にインドの月周回衛星「チャンドラヤーン」が打ち上げられた。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も見られたが、米国ではブッシュ大統領時代に計画されたコンステレーション計画がオバマ政権になって破棄され、現在は火星や小惑星の有人探査を目指している。欧州もロシアと協力して火星探査に力を入れている。そのような中で、中国は2013年12月に月着陸機「嫦娥3号」の月面軟着陸に成功し、月面走行ローバ「玉兔」を分離して相互に撮影し合うなど科学ミッションを開始したが、その後2014年1月の第二夜の休眠開始時に機器のトラブルが発生し、2月の再起動時には交信や観測は可能であったものの走行はできなかった。

各国の月探査機数のデータを表の4-1aに示す。

表 4-1a 月探査の基礎データ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
月探査機数	28	1	30	2	3	1

出典：各種資料を基に事務局作成

## ②惑星探査

惑星探査は、内惑星の水星・金星、外惑星の火星・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）、「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・サーベイヤー」（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その他、米国との協力により外惑星探査機として NASA の「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、金星を目指し、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、米国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。

2011年時点で惑星探査機を打ち上げた経験がなかった中国・インドは、火星探査機を開発し2011年と2013年に打ち上げた。中国の探査機はロシアの「フォボス・グランド」に搭載した「萤火1号」であったが、本体の衛星が火星遷移軌道投入に失敗し、一緒に海中に落下した。

インドの火星探査機「マンガルヤーン」は2013年11月に打ち上げられ、月末には火星遷移軌道への投入に成功した。その後約10か月の飛行で火星に接近し、2014年9月頃に火星の長楕円軌道に投入される予定である。

以上を整理したデータを表 4-1b に示す。

表 4-1b 惑星探査のデータ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
惑星探査機数(彗星・小惑星を含む)	42	4	32	4	1	1
対象惑星数(彗星・小惑星を含まない)	5以上	2	2	2	1	1

出典：各種資料を基に事務局作成

### ③地球への帰還実績

月や惑星を探査するには、対象に接近し衛星等が取得できたデータを電波により地上に送信してくる方法が主であるが、直接月や惑星に着陸して資料を採取し、地球に帰還することがより困難であり、当然科学的な価値も増大する。そこで、各国の宇宙科学活動で、衛星等が地球に帰還した実績も評価の対象とした。

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、打上げから7年後に地球帰還に成功した。はやぶさ以外で、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。具体的なデータを次の表 4-1c に示す。

表 4-1c 地球帰還実績のデータ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
地球帰還実績	2以上	なし	2以上	1	なし	なし

出典：各種資料を基に事務局作成

### ④理学的観点

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。データを次の表 4-1d に示す。

表 4-1d LPSC 発表論文数のデータ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
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

### ⑤月・惑星探査の評価結果

以上のデータを踏まえて、月・惑星探査を評価した結果を表 4-1e に示す。

表 4-1e 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	2	1	0
惑星探査機数	4	4	1	3	1	1	1	0
対象惑星	2	2	1	1	1	1	1	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		<b>20</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>2</b>

(20 点満点)

## （2）天文観測

### ①天文観測衛星数

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、太陽観測衛星「ひので」が太陽観測で史上最高の空間分解能を達成し、赤外線領域では世界最高の感度と分解能で全天サーベイを赤外線天文観測衛星「あかり」が実現するなど、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。

天文観測における工学的な評価項目として、2013 年末までの天文観測衛星累積数を用いることとした。2011 年 11 月以降、米国、欧州、日本及びカナダで各 1 機ずつ打ち上げられた。具体的なデータを表 4-2a に示す。

表 4-2a 天文観測衛星数のデータ

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	68	17	11	13	0	0	2

出典：各種資料を基に事務局作成

## ②理学的観点

天文観測における理学的観点からの評価項目として、2012年における各国の学術誌の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のカテゴリーで下記雑誌を評価対象として採用することとした。なお、カナダは比較できるデータがない。

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

具体的なIFの数値を表4-2bに示す。

表 4-2b 学術誌のIFデータ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド
学術誌のIF	5.945	4.422	0.707	3.062	0.849	0.336

出典：各種資料を基に事務局作成

## ③天文観測の評価結果

まず、天文観測衛星数による評価であるが、表4-2aのデータに基づき、評価点は10点満点とし、累積衛星数を3で割った値を切り上げて評価点とした。米国は68機なので10点満点となる。

次に、アカデミックな評価であるが、表4-2bを基に、評価点を10点満点とし、学術誌のIFを四捨五入した数値(上限10)を評価点として計算した。

この二つを合計したものが、天文観測全体の評価となる。結果を表4-2cに示す。

表 4-2c 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	6	4	5	0	0	1
学術誌のIF	6	4	1	3	1	0	0
評価	16	10	5	8	1	0	1

(20点満点)

### （3）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。

#### ①宇宙環境観測衛星数

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。

日本は、磁気圏探査を得意とし、米国と共同で開発した「GEOTAIL」は、多くの成果をあげ、現在も運用中である。欧州は2013年に3機編隊の「SWARM」を打ち上げ、地球磁気圏の研究を行う計画である。

2012年以降、欧州、中国、カナダで合計5機増加している。また、中国については過去に技術試験衛星と判断していた衛星の中に明らかに宇宙環境観測を主要ミッションとする衛星（実践シリーズ）が20機あったため、前回の5機から25機に増加させた。衛星数のデータを表4-3aに示す。

表 4-3a 宇宙環境観測衛星数のデータ

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	56	78	9	25	3	5

出典：各種資料を基に事務局作成

#### ②理学的観点

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）の科学大会開催実績及び発表論文状況で比較する。

COSPARの開催は欧米を中心に行われており、他の5か国は1回か2回しかない。ロシアは2014年に2回目の開催を予定している。

この大会における発表論文の国別の比率について、2012年に開催された第39回COSPAR科学大会のサンプリング調査を行い、米国は約6割、欧州は2割、日本は1割程度を占めることを確認した。その他の国は合わせて全体の1割程度で、今回の評価対象であるロシア、中国、インド、カナダがそれぞれ2%程度と推定された。

以上についての具体的な数値を表4-3bに示す。



表 4-3b 地球近傍宇宙環境観測の基礎データ

項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
COSPAR 開催回数 (2013 年まで)	5	23	1	2	1	2	2
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

### ③地球近傍宇宙環境観測の評価のまとめ

宇宙環境観測衛星数に関しては、10 機未満を 1 点とし、10 機ごとに 1 点を加点し、60 機以上を満点の 7 点とした。

COSPAR 開催回数に関しては、評価点は 3 点満点とし、開催回数 1 回は 1 点、2 回は 2 点、3 回以上は 3 点とした。また、COSPAR における発表論文数に関しては、割合×3 を四捨五入するとともに、10 点を超える米国については満点の 10 点とした。

そして、以上の 3 つの評価を足し合わせて、各国の地球近傍宇宙環境観測における技術評価を行った。その結果を表 4-3c に示す。

表 4-3c 地球近傍宇宙環境観測の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙環境観測衛星数	7	7	6	7	1	3	1	1
COSPAR 開催回数	3	3	3	1	2	1	2	2
COSPAR 発表論文数の割合	10	10	6	1	3	1	1	1
評 価		20	15	9	6	5	4	4

(20 点満点)

#### （４）宇宙科学分野のまとめ

以上の個別の評価結果を踏まえて、宇宙科学分野の総合評価結果を表 4-4 に示す。

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
月・惑星探査	20	9	9	8	5	4	2
天文観測	16	10	5	8	1	0	1
地球近傍宇宙環境観測	20	15	9	6	5	4	4
合計	56	34	23	22	11	8	7
評価	19	11	8	7	4	3	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ISS（国際宇宙ステーション）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日と設定され、短時間で搭乗員の引き継ぎを行うことができた。

米国は現時点では自力での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、数年以内には自力での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、独自の物資輸送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を、有人宇宙船と運用管制技術、有人宇宙滞在技術、有人宇宙活動支援技術、宇宙環境利用技術、及び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満点とするが、難易度が低ければ達成度は最大でも減点する。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。

### ①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した。具体的には、50回以上を5点、10回以上を4点、2回以上を3点、1回を2点、有人宇宙船の飛行はないがISSへの無人宇宙船の実績ありを1点、全くなしを0点とした。米国とロシアは既に50回以上の飛行実績を有しているため5点となり、中国は5回の実績であるため3点となる。有人宇宙船飛行回数の評価結果を表5-1aに示す。

表 5-1a 有人宇宙船飛行回数の評価

	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	3	0	0

### ②有人宇宙船技術

飛行させた有人宇宙船の技術レベルを、難易度に応じて評価した。具体的には、深宇宙探査用有人宇宙船の飛行実績ありを5点、LEO有人宇宙船（再使用型）の飛行実績ありを4点、LEO有人宇宙船（非再使用型）の飛行実績ありを3点、有人宇宙船の飛行実績なしを0点とした。米国は月への有人飛行と再使用型の有人宇宙船技術を有しているため5点となり、ロシアと中国は非再使用型で地球近傍のLEO軌道への有人宇宙船技術であるため3点となる。有人宇宙船技術の評価結果を表5-1bに示す。

表 5-1b 有人宇宙船技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船技術	5	5	0	3	0	3	0	0

### ③貨物輸送機飛行実績

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に関し、これ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、実績がある場合を2点とした。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を保有すると判断した。したがって、米国、欧州、ロシア、日本、中国が、それぞれ2点となる。貨物輸送機飛行実績の評価結果を表5-1cに示す。

表 5-1c 貨物輸送機飛行実績の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
貨物輸送機飛行実績	2	2	2	2	2	2	0	0

### ④貨物回収機飛行実績

同様に、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し、実績がある場合を2点とした。欧州や日本も弾道での回収で飛行実績を有している。したがって、米国、欧州、ロシア、日本、中国が、それぞれ2点となる。貨物回収機飛行実績の評価結果を表5-1dに示す。

表 5-1d 貨物回収機飛行実績の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
貨物回収機飛行実績	2	2	2	2	2	2	0	0

### ⑤新規開発計画

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、相当の技術レベルが確保されていると判断し、米国、ロシア、中国を1点とした。新規開発計画の評価結果を表5-1eに示す。

表 5-1e 新規開発計画の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
新規開発計画	1	1	0	1	0	1	0	0

## ⑥有人宇宙船と運用管制技術のまとめ

以上の個々の評価結果に基づき、有人宇宙船と運用管制技術を評価した結果を表5-1fに示す。

表 5-1f 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	3	0	0
有人宇宙船技術	5	5	0	3	0	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
新規開発計画	1	1	0	1	0	1	0	0
評 価		15	4	13	4	11	0	0

(15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。

### ①生命・環境維持技術

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を評価した。米国、ロシア、中国のように、空気再生、水再生、温湿度制御、空気循環で飛行実績がある国は3点とし、欧州と日本のように、温湿度制御、空気循環のみ飛行実績のある国は2点とした。評価結果を表5-2aに示す。なお、温湿度制御には大容量の排熱技術を含み、空気循環には火災検知・消火も含む。

表 5-2a 生命・環境維持技術での評価

	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

### ②衛生・健康管理技術

米国、ロシア、中国のように、衛生技術、健康管理技術ともに実績豊富な国は3点とし、欧州と日本のように、衛生技術、もしくは健康管理技術の一方のみ実績がある場合は2点とした。評価結果を表5-2bに示す。なお、衛生技術にはトイレ、シャワーを含み、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。

表 5-2b 衛生・健康管理技術での評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
衛生・健康管理技術	3	3	2	3	2	3	0	0

### ③有人モジュール技術

有人モジュール技術として、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を評価した。

米国、欧州、ロシア、日本は、これらの技術を開発し実機を飛行させた実績があるため3点とした。中国は、現在有人の軌道上施設はないが、有人宇宙船の飛行実績があるため、当然有人モジュール技術はあると判断し、やはり3点とした。有人モジュール技術の評価結果を表5-2cに示す。

表 5-2c 有人モジュール技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人モジュール技術	3	3	3	3	3	3	0	0

### ④宇宙飛行士累積滞在日数

宇宙飛行士の累積滞在日数を評価項目の一つとした。現在までのところ、米国16,188日、ロシア22,714日、欧州1,734日、日本742日、中国59日、カナダ506日、インド8日となっている。このデータを基に、10,000日以上を5点、1,000日以上を4点、100日以上を3点、10日以上を2点、1日以上を1点と評価した。評価結果を表5-2dに示す。

表 5-2d 宇宙飛行士累積滞在日数の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙飛行士累積滞在日数	5	5	4	5	3	2	1	3

### ⑤有人宇宙滞在技術のまとめ

以上の個々の評価を基にした、有人宇宙滞在技術の評価結果を、表5-2eに示す。

表 5-2e 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
宇宙飛行士累積滞在日数	5	5	4	5	3	2	1	3
評 価		14	11	14	10	11	1	3

(14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と支援ロボットの技術レベルを評価した。

#### ①宇宙服技術

宇宙服開発の技術を開発し、すでに実機を飛行させた実績がある米国、ロシア、中国を3点とした。宇宙服技術の評価結果を表5-3aに示す。

表 5-3a 宇宙服技術の評価

	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

#### ②支援ロボット技術

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である。欧州の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い。支援ロボットの開発・飛行実績のある日本とカナダを3点とし、支援ロボットの開発実績のみである米国と欧州を2点とした。支援ロボット技術の評価結果を表5-3bに示す。

表 5-3b 支援ロボット技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
支援ロボット技術	3	2	2	0	3	0	0	3

#### ③有人宇宙活動支援技術のまとめ

以上の個々の評価を基にした、有人宇宙活動支援技術の評価結果を表5-3cに示す。

表 5-3c 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）宇宙環境利用実験技術

有人での宇宙環境利用実験技術（宇宙医学実験、ライフサイエンス実験、微小重力科学実験）の実績数を評価した。

##### ①宇宙医学実験技術

自国の搭乗員を使った実験、放射線計測などの実験で、30回以上の実績のある米国、欧州、ロシアを2点とし、5回以上の日本を1点として評価した。宇宙医学実験技術の評価結果を表5-4aに示す。

表 5-4a 宇宙医学実験技術の評価

	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

##### ②ライフサイエンス実験技術

ライフサイエンスに関する軌道上実験の実績が30回以上の米国、欧州、ロシア、日本を2点、5回以上のカナダを1点、5回未満となる中国、インドを0点とした。ライフサイエンス実験技術の評価結果を表5-4bに示す。

表 5-4b ライフサイエンス実験技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
ライフサイエンス実験技術	2	2	2	2	2	0	0	1

##### ③微小重力科学実験技術

材料工学、流体物理、燃焼物質など実験の実績が30回以上ある米国、ロシア、日本を2点、5回以上の欧州、カナダを1点、5回未満の中国と、インドを0点とした。微小重力科学実験技術の評価結果を表5-4cに示す。

表 5-4c 微小重力科学実験技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
微小重力科学実験技術	2	2	1	2	2	0	0	1

#### ④宇宙環境利用実験技術のまとめ

以上の個々の評価を基にした、宇宙環境利用実験技術の評価結果を表 5-4d に示す。

表 5-4d 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・火星などの他天体表面での有人探査に必要な表面移動技術、耐レゴリス宇宙服技術、および有人探査活動実績を評価した。なお「レゴリス」とは、月、惑星・小惑星などの天体の表面に分布し、流星物質の衝突破片や、宇宙風化作用によって砕けた岩盤などの細粒物からなる堆積層をいう。

### ①表面移動技術

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。米国は有人対応のローバの運用実績があるため４点、ロシアは無人のローバの運用実績があるので２点、欧州、日本、中国、インド、カナダは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進められていることから１点とした。なお中国の「玉兔」については状況がはっきりしないため、今回の評価対象としなかった。表面移動技術の評価結果を表 5-5a に示す。

表 5-5a 表面移動技術の評価

	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

### ②耐レゴリス宇宙服技術

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米国を３点、他天体での運用に向けた研究開発を進めている。ロシアを１点とした。耐レゴリス宇宙服技術の評価結果を表 5-5b に示す。

表 5-5b 耐レゴリス宇宙服技術の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
耐レゴリス宇宙服技術	3	3	0	1	0	0	0	0

### ③有人宇宙探査活動実績

地球以外の天体での有人探査活動の実績そのものは、様々なシステムを総合的に運用できたという意味で重要な指標と考えられる。米国は月での有人探査の実績があるので５点とし、それ以外は実績がないため０点とした。有人探査活動実績の評価結果を表 5-5c に示す。

表 5-5c 有人探査活動実績の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙探査活動実績	5	5	0	0	0	0	0	0

## ④有人宇宙探査活動のまとめ

以上の個々の評価を基にした、有人宇宙探査活動の評価結果を表 5-5d に示す。

表 5-5d 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
有人宇宙探査活動実績	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

以上の評価を踏まえて、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	15	4	13	4	11	0	0
有人宇宙滞在技術	14	11	14	10	11	1	3
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	23	39	23	26	2	9
評 価	20	9	15	9	10	1	3

（合計 53 点満点 ⇒ 評価 20 点満点に換算）

## 別添：世界の宇宙技術力比較調査研究会委員名簿

(五十音順)

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技術グループ主幹
委員	内川英明	宇宙航空研究開発機構 宇宙環境利用ミッション本部 宇宙船技術センター次世代宇宙船研究開発室主任開発員
委員	沖田耕一	宇宙航空研究開発機構 宇宙輸送ミッション本部 宇宙輸送系システム技術研究開発センター長
委員	木村俊義	宇宙航空研究開発機構 第一衛星利用ミッション本部 地球観測研究センター技術領域総括
委員	小暮 聡	宇宙航空研究開発機構 第一衛星利用ミッション本部 衛星測位システム技術室ミッションリーダー
委員	後藤智彦	三菱重工業株式会社 航空宇宙事業本部 宇宙事業部 営業部宇宙輸送系担当部長
委員	遠間孝之	日本電気株式会社 宇宙システム事業部 事業部長代理
委員	松永三郎	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 宇宙飛翔工学研究系 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準天頂衛星推進部事業推進課長
委員	村上 淳	IHI エアロスペース株式会社 営業部 次長
委員	渡部潤一	国立天文台副台長 天文情報公開センター長
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

**CRDS-FY2013-CR-02**

**G-TeC報告書**

## 世界の宇宙技術力比較(2013年)

A Comparative Study on Space Technology in the World 2013

平成 26 年 3 月 March 2014

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  
電 話 03-5214-7481  
ファックス 03-5214-7385  
<http://www.jst.go.jp/crds>  
©2014 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](mailto: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

