

CRDS-FY2016-CR-01

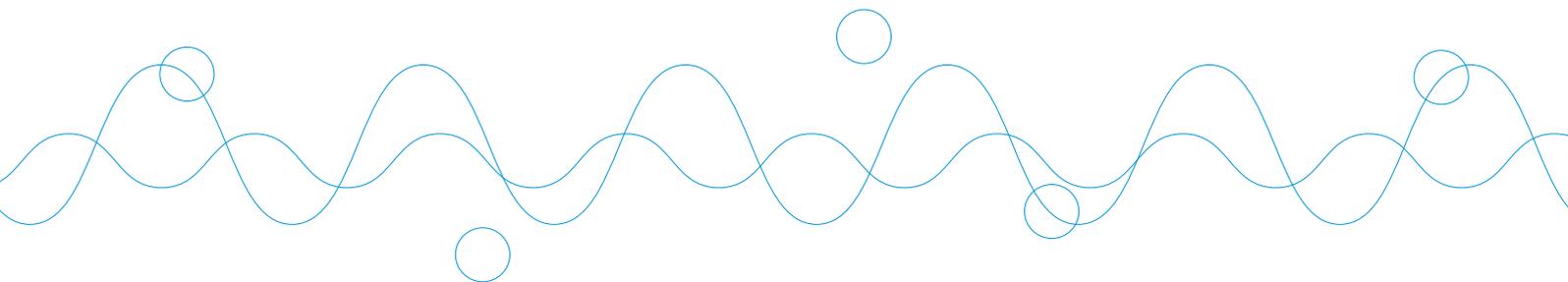
ATTAAT A AAGA C CTA ACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAACT
CTCGCC AATTAATA
TTAATC A AAGA C CTA ACT CTCAGACC
AAT A TCTATAAGA CTCTAAC
TGA C CTA ACT CTCAGACC

G-TeC 報告書

世界の宇宙技術力比較 (2015年度)

A Comparative Study on Space Technology in the World (2015)

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



国立研究開発法人 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

国立研究開発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、今後のわ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年と2013年にも実施しており、今回は3回目となる。

今回の調査分析は、2015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、とりわけ中国やインドの進展が著しい。このような変化を調査分析し最新の技術力比較を行うため、前回と同様にCRDS内に「世界の宇宙技術力比較調査研究会」を設置し、委員長を文部科学省の元宇宙開発委員会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いただいた。

今回の調査では、評価項目、評価基準及び配点の見直しを行い、これまでの評価方法を変更したところがある。このため、前回の評価と今回の評価を直接比較して上昇下降を論じることは適当ではない。評価基準の変更に当たっては事前に担当委員間で検討を行い、その結果を研究会の場に持ち寄って、委員長、委員長代理及び他の分野の委員も交えて討議を行ったうえで、2014年から2015年の2年間の実績を踏まえて各領域・各国別の評価を積み上げた。なお、軍事に係る技術は秘密になっているものもあり、原則として民生用技術を対象としたが、最高水準の技術を論じるために軍事関連の実績も判明している範囲で取り込んでいる。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。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。

2016年5月

国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）

研究開発戦略センター（CRDS）

特任フェロー 辻野 照久

目 次

はじめに	
1. 総論	1
2. 宇宙輸送分野	3
(1) ロケットの打上げ数と信頼性	6
(2) ロケットの最大性能	8
(3) ロケットの衛星搭載環境	10
(4) 推進装置の性能	11
(5) 打上げ運用性	14
(6) 有人打上げ技術	16
(7) 宇宙輸送分野のまとめ	17
3. 宇宙利用分野	18
(1) 衛星バス技術	20
(2) 衛星通信放送	26
(3) 地球観測	31
(4) 航行測位	43
(5) 宇宙利用分野のまとめ	55
4. 宇宙科学分野	56
(1) 太陽系探査	59
(2) 天文・宇宙物理観測	61
(3) 地球周辺空間観測・太陽風・太陽観測	65
(4) 宇宙科学分野のまとめ	67
5. 有人宇宙活動分野	68
(1) 有人宇宙船運用技術	71
(2) 宇宙飛行士運用技術	73
(3) 長期有人宇宙滞在技術	75
(4) 宇宙環境利用実験技術	79
(5) 有人宇宙探査技術	81
(6) 有人宇宙活動分野のまとめ	83
別添：世界の宇宙技術力比較調査研究会 委員名簿	84

1. 総論

（1）2014年-2015年の世界の宇宙開発動向

前回調査後2年が経過し、今回の評価に資するため、2014年と2015年のロケット・衛星の打上げ実績をまとめた。この2年間に全世界で合計179回のロケット打上げがあり、36カ国と5機関から通信放送衛星、地球観測衛星、航行測位衛星、宇宙科学衛星、有人宇宙船など計472機の衛星が軌道に投入された。

ロシアの打上げ回数は59回で、年平均では2013年を下回った。米国のロケット打上げ回数は43回で、中国の35回を上回った。欧州は南米ギアナ射場から主力の「アリアン5型」ロケットが12回、ロシア製の「ソユーズ」ロケットが7回、小型の「ヴェガ」ロケットが4回の打上げで、2年間で23機の打上げとなった。わが国は「H-II B」ロケット1回と「H-II A」ロケット7回で計8回の打上げが行われたが、インドの9回を下回った。その他、イスラエルとイランが各1回打上げを行った。この中で、ロシアの「プロトン」ロケットと米国の「アンタレス」ロケット及び「ファルコン」ロケットの打上げ失敗、ロシアの「ソユーズ」ロケットの3回の軌道投入失敗など計8件の不具合があった。

衛星打上げは全般的に順調に行われ、宇宙応用分野では通信放送衛星・地球観測衛星・航行測位衛星が294機、宇宙科学関連の分野では天文観測衛星などが8機、有人宇宙飛行の分野では有人宇宙船や物資輸送船が26機打ち上げられた。その他、技術試験衛星およびAIS衛星が144機あり、この期間の年間平均の衛星打上げ数としては2013年を28機上回った。

国際宇宙ステーション(ISS)の物資輸送では、米国のオービタル・サイエンシズ社（現オービタル ATK 社）の物資輸送船「シグナス」が2014年10月にアンタレスロケットの主エンジンの不具合で打上げに失敗し、次号機は2015年12月にアトラスロケットを用いて打ち上げられた。スペース X 社の物資輸送船「ドラゴン」は2015年6月の打上げに失敗した。またロシアの物資輸送船「プログレス」は2015年5月にロケットからの分離時に損傷し、物資輸送ミッションを達成できなかった。一方、日本が2015年に打ち上げた「こうのとり5号機」は緊急物資を含め国際宇宙ステーションへの重要な輸送を担ったことにより高い評価を得た。

この2年間の世界の宇宙開発・利用活動の中で、最も注目すべき動きは、米国のスペース X 社が2015年12月に再使用型の「ファルコン9」ロケットで衛星11機を搭載した第2段を切り離した後、第1段を発射場所であるケープカナベラル空軍基地に直立した状態で機体を損傷することなく着陸することに成功したことである。同社は2016年に20回以上の打上げを予定しており、再使用型ロケットが多用される見込みである。今後の世界の商業打上げ受注競争に多大な影響を及ぼす可能性が高い。この他、ロシアの「アンガラ」ロケットの試験飛行成功や中国が新型小型ロケット2種類（「長征6型」及び「長征11型」）の打上げを2015年に相次いで成功させたことも特筆される。中国は2016年以降に長征5

型と長征 7 型を海南島の射場から打ち上げる計画であり、有人宇宙飛行や月探査などで飛躍的な発展が見込まれる。

（2）総合評価結果

今回の調査では、2014 年-2015 年の各国の宇宙活動を踏まえて、前回調査結果の見直しを行い、評価項目や評価基準の再設定を行った。その結果得られた各分野の結果を総合した評価結果のまとめを表 1 に示す。

前回の結果（参考 1）と比較すると、第 1 位の米国から第 7 位のカナダまで、順位の変化はなかった。評価項目や評価基準が前回と異なることや、評価点を 0.5 点単位に改めたことなども影響しているため、数値だけで単純に比較することはできないことに留意されたい。

表 1 宇宙技術力比較調査 評価結果総括表（2015 年版）

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	23.5	25.5	18	22	12	0
宇宙利用分野	30	28	24.5	15	17	16	9.5	5.5
宇宙科学分野	20	20	9.5	4	7.5	2	2	0
有人宇宙活動分野	20	19	10	17	10.5	11.5	3	4
合計	100	94	67.5	61.5	53	51.5	26.5	9.5
順位		1	2	3	4	5	6	7

（100 点満点、0.5 点単位）

参考 1 前回の結果（2014 年 3 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	27	25	25	17	22	11	0
宇宙利用分野	30	29	25	11	19	12	8	5
宇宙科学分野	20	19	11	8	7	5	3	2
有人宇宙活動分野	20	20	9	15	9	10	1	3
合計	100	95	70	59	52	49	23	10
順位		1	2	3	4	5	6	7

（100 点満点、1 点単位）

出典：「世界の宇宙技術力比較（2013 年）」（平成 26 年 3 月）

以下に今回評価を行った各分野の国別の評価結果を詳述していく。

2. 宇宙輸送分野

宇宙輸送分野の技術は、打上げロケットや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を提供するものである。

宇宙輸送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。

宇宙輸送分野の評価結果を表2に示す。

前回の結果（参考2）と比較すると、評価結果に大きな変化はない。

表2 宇宙輸送システム 評価結果（2015年版）

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	9	10	8	8	9	4	0
ロケット最大性能	10	9.5	10	6.5	5.5	4	2	0
衛星搭載環境	10	10	9	9	6	6	3	0
推進装置の性能	10	9.5	9	7.5	8.5	7.5	8.5	0
打上げ運用性	10	8	9	10	8	7	6	0
有人打上げ技術	10	8	0	10	0	10	0	0
合計	60	54	47	51.5	36	43.5	23.5	0
総合評価		27	23.5	25.5	18	22	12	0

（合計60点満点 ⇒ 総合評価30点満点に換算、0.5点単位）

参考2 前回の結果（2013年版）

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）

出典：「G-TeC 世界の宇宙技術力比較」（平成26年3月）

◎宇宙輸送システムに関する各国の概況

最近のロケットの年間打上げ数は概ねロシア・米国・中国・欧州の順で多く、日本とインドはそれらに比べるとかなり少ない。カナダは独自の宇宙輸送能力を有していない。

ロケットの打上げ能力では、米国のデルタ 4H ロケットが世界最大であり、中国が開発中の長征 5 型ロケットはそれをやや下回るレベルである。

有人打上げを行える国は、現時点ではロシアと中国しかなく、スペースシャトルの退役以来独自の有人打上げ手段がなくなった米国では、NASA やスペース X 社などが新たな有人打上げシステムを開発中である。

◎2014-2015 年の主な実績

2015年にスペース X社はファルコン9ロケットの第1段機体・エンジンを再使用すべく、洋上プラットフォームへの着陸を4回試みたが、2回は激突炎上し、1回は荒天のためにプラットフォームを着地点に配置せず、1回は打上げ自体が失敗に終わった。第5回の試みが12月22日に行われ、ケープカナベラル射場への第1段機体着陸に成功した。

◎評価項目及び評価基準の見直し

前回の調査で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項目で技術力比較を行った。今回は、これらの項目を継承するものの、打上げ運用性の項目においては、前回比較で用いた年間打上げ機数に加えて、打上げの適時性と同一射点からの最短打上げ間隔を実績ベースで比較することとした。

なお、スペース X社の成功で注目されている再使用型ロケットについては、目的である低価格の継続的な打上げが実現できるか見通しが得られていないため、今回の評価項目に入れないこととした。

◎今後の展望（再使用型ロケット・超重量級ロケット・小型ロケット）

スペース X社は現在50回以上の打上げ予約（マニフェスト）を公表しており、2016年にはそのうち26回もの打上げをすべて再使用型ロケットで行うことを計画している。この中にはファルコンヘビーも含まれ、再使用型でなければ超重量級に相当する50トン程度のペイロードをLEOに投入可能である。NASAも超重量級のSLSを開発中であり、今後数年以内に有人のオリオン宇宙船を打ち上げることを目指している。中国は超重量級の長征9型を開発する計画である。

小型ロケットは欧州のヴェガ、日本のイプシロン、中国の長征6型及び長征11型、米国のスーパー・ストライピなど小型衛星打上げ用ロケットを開発しており、打上げシステムの効率性を競っている。

◎新興国の動向

2013年に韓国が11番目の独自ロケット打上げ国となったが、その後新たな独自打上げを達成した国は現れていない。

今後、ブラジル・インドネシア・南アフリカなどが独自打上げ国の仲間入りをする可能性がある。

（１）ロケットの打上げ数と信頼性

表 2-1a に、各国の 2015 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 9 回、イラン 6 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～2015 年 12 月末）

評価項目	米国	欧州	ロシア*1	日本	中国	インド	その他	世界計
打上げ数	1609	259	3218	97	230	48	16	5477
打上げ失敗数	144	13	208	8	13	10	4	340
打上げ成功率	91.1	95.0	93.5	91.8	94.3	79.2	75.0	93.8

*1：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を対象外とし、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を評価対象とするためであり、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（2006 年 1 月～2015 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	181	63	318	30	136	29	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は、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（2006 年 1 月～2015 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	5	0	19	0	3	3	0
打上げ成功率	97.2%	100%	94.0%	100%	97.8%	89.7%	0
信頼性評価	4	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	4	5	3	5	4	1	0
評価	9	10	8	8	9	4	0

(10 点満点)

なお、この 2 年間で 9 回の打上げ失敗があった。ロシアの「ソユーズ」が 3 回、「プロトン」が 3 回、米国オービタル社の「アンタレス」とスペース X 社の「ファルコン 9」及び「スーパー・ストライピ」が各 1 回である。

ソユーズ、プロトン及びファルコン 9 は原因究明・対策を完了し打上げを再開している。

（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）4 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：Airbus Safran Launchers（ASL：Airbus/Safran の合弁企業））、ロシアは、International Launch Services（ILS）社の「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」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	運用機関	GTO 投入能力	LEO 投入能力	静止化増速量 ΔV
米国	Delta 4 Heavy	ULA	10.1t	28.8t	1500m/s
欧州	Ariane 5 ECA	アリアンスペース	10.5t	20.0t	1500m/s
ロシア	Proton M/Briz M	ILS	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	2.5t	5.0t	1800m/s

※1:H-II A 高度化を適用した場合の能力

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 投入能力に静止化増速量（1500m/s:1、1800m/s : 0.75）を加味した最大性能の評価を行った。

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 能力× 静止化増速量	10.1	10.5	6.6	6.0	4.125	1.875	—
評価	9.5	10	6.5	5.5	4	2	0

（10 点満点、0.5 点単位）

◎将来計画

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、さらにアンガラ A5 型の改良により更なる能力向上を計画している。なお、2014 年にはアンガラ A5 型の試験飛行に成功している。

欧州では 2014 年の閣僚級会合にて「アリアン 5 ME」の計画を中止し、「アリアン 6」の開発に着手することを決定した。「アリアン 6」では、A62 型で GTO に 5 トン、A64 型で GTO に 10.5 トンの能力とすることを計画している。

中国では、「長征 5 型」ロケット（CZ-5）の系列で 3 種類のタイプを計画しており、大型ブースタと「遠征 2 型」静止軌道投入用上段ロケット（YZ-2）で構成される「CZ-5/YZ-2 型」で GTO 13 トン・LEO23 トンの打上げ能力を目指している。

また、わが国では 2014 年から H3 ロケットの開発に着手した。H3 ロケットの最大性能は 6.5 トン以上とすることを計画している。

◎小型ロケット

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。今回は、表 2-2c にデータを示すにとどめ、技術力評価の対象外とした。

表 2-2c 小型ロケットの性能データ

国名	ロケット名	運用機関	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	ICS コスモトラス	2000kg	3700kg	SSO400km
日本	Epsilon	JAXA	550kg	1400kg	SSO500km
中国	長征 2C	長城工業総公司	1200kg	3900kg	SSO400km
	長征 6	長城工業総公司	1080kg	—	SSO700km
	長征 11	長城工業総公司	350kg	—	SSO700km

出典：各種資料を基に事務局作成

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

（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、正弦波振動環境条件については、0.4G（重力加速度：9.8m/s²）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。

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は変動するため、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.)を参考値として表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	Falcon 9	Ariane 5	Proton M	H-II A	長征 3B	GSLV
音響 O.A.値 (db)	131.4	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、この数字が小さいほど技術レベルが高いといえる。

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。1000G以下を10点とし、2000G以下を9点、4000G以下を6点とした。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	Falcon 9	Ariane 5	Proton M	H-II A	長征 3B	GSLV
最大衝撃 (G)	1000	2000	2000	4000	4000	不明
評価	10	9	9	6	6	3

(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 4	Ariane 5	Proton M	H-II A/B	長征 3B	GSLV MK-II
1 段	1 段主エンジン 推進薬 推力 (kN) 比推力 (秒)	RS-68A	Vulcain2	RD-259	LE-7A	YF-21B	S139
		LOX/LH ₂	LOX/LH ₂	LOX/RP-1	LOX/LH ₂	N ₂ O ₄ /UDMH	固体
		3560	1390	10550	1098	2962	4700
		414	434	316	440	260	266
	補助ブースタ 推進薬 推力 (kN) 比推力 (秒)	GEM60	MPS		SRB-A	YF-20B	Vikas
		固体	固体	なし	固体	N ₂ O ₄ /UDMH	N ₂ O ₄ /UDM
		1615	5060		2260	732	H
		274	275.4		283.6	259	680
上 段	上段エンジン 推進薬 推力 (kN) 比推力 (秒)	RL10B-2	HM7B	Briz-M	LE-5B	YF-75	CE-7.5
		LOX/LH ₂	LOX/LH ₂	N ₂ O ₄ /UDM	LOX/LH ₂	LOX/LH ₂	LOX/LH ₂
		110	64.8	H 19.62	137	78	75
		462.4	445.5	325.5	448	437	454

注：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 つの観点で評価を行った。

○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/LH₂）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。主エンジンと補助ブースタの合計推力で評価を行い、7000kN 以上に 5 点、4000～6999kN に 4 点、3999kN 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。

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	3	5	3	3	0
上段エンジン燃料	5	5	5	4	5	5	5	0
1 段推力	5	4	4	5	3	3	4	0
上段エンジン比推力	5	5	4	3	4	4	5	0
合計	20	19	18	15	17	15	17	0
評 価		9.5	9	7.5	8.5	7.5	8.5	0

(10 点満点、0.5 点単位)

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 1 段エンジンとして RS-25 の開発を進めている。

RS-25 エンジンは、推進薬に LOX/LH₂ を用い、推力 2279kN、比推力 452 秒の 2 段燃焼サイクルのエンジンである。

欧州においては、「VINCI」エンジンをアリアン 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/LH₂ を用い、推力 180kN、比推力は 465 秒のエキ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 秒のエキスパンダーブリードサイクルで、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(YF-100)の開発を完了し、長征 6 型の第 1 段エンジンに搭載し、その技術実証に成功している。

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 エンジンの開発が完了している。RD-191 エンジンは、推進薬に LOX/ケロシンを用い、推力 2085kN、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/cm²であり、「LE-7A」エンジンの 123kgf/cm²の 2 倍以上と非常に高圧のエンジンである。2014 年にはアンガラ A5 型の試験飛行に成功しており、プロトンの後継機となる予定である。

日本においては、H3 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（推進薬 LOX/LH₂、推力 1471kN）は大型エキスパンダーブリードサイクル技術を活用し、H3 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

各国の打上げ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及び同一射点からの年間打上げ機数に加え、打上げの適時性と同一射点からの最短の打上げ間隔を新たに調査した。その結果を表 2-5a に示す。

表 2-5a 打上げ運用性のデータ

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	8 機	7 機	8 機	4 機	7 機	4 機
打上げの適時性	約 70%	約 50%	約 80%	約 80%	不明	不明
同一射点からの最短 打上げ間隔	13 日	25 日	9 日	25 日	17 日	79 日

注：年間打上げ機数は 1～12 月で評価した。

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。

また、同一射点からの打上げ数は当然多いほど優れており、これまでロシア、欧州の打上げ頻度が高かったが、昨今、米国や中国の打上げ頻度が多くなってきており、同一射点から年間 7～8 機の実績がある。次いで日本とインドが年間 4 機となっている。

打上げの適時性及び打上げ間隔については、過去 10 年間の打上げ実績に基づき評価した。評価にあたっては各国のロケット運用機関等による打上げ結果及び延期に関する公表や打上げ実績に関する公開情報に基づき評価した。

打上げの適時性の評価の考え方は、ロケット及び地上設備の運用技術を評価することを目的に、決められた日時に打ち上げることができる可能性を評価した。この際、天候による打上げ延期、衛星のトラブルによる打上げ延期及び打上げ失敗を母数から除いた。なお、中国とインドについては打上げ結果の情報は得られるものの、打上げ延期に関する情報が公表されていないことから不明とした。

上記に基づいて、ミッションインテグレーション期間に 3 点、同一射点からの年間打上げ機数に 3 点、打上げ適時性に 2 点、同一射点からの最短打上げ間隔に 2 点を配分して打上げ運用性を評価した。

ミッションインテグレーション期間について、最短で 12 ヶ月以下とできるものを 3 点、

18ヶ月以下とできるものを2点、24か月以上要するものを1点として評価した。

同一射点からの年間打上げ機数について、年間6機以上を3点、年間4機以上を2点、年間2機以上を1点として評価した。

打上げ適時性について、80%以上を2点、50~80%を1点、50%以下を0点として評価した。なお、中国とインドの打上げ適時性の評価は不明なものの1点として評価した。

また、同一射点からの最短打上げ間隔について、30日以下を2点、30日以上を1点として評価した。

上記に基づく打上げ運用性の評価結果を表2-5bに示す。

表 2-5b 打上げ運用性の評価

国名	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
ミッションインテグレーション期間	3	2	3	3	2	1	2	0
同一射点からの年間打上げ機数	3	3	3	3	2	3	2	0
打上げ適時性	2	1	1	2	2	1	1	0
打上げ間隔	2	2	2	2	2	2	1	0
合計	10	8	9	10	8	7	6	0

(10点満点)

（6）有人打上げ技術

現在、定常的に有人宇宙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」が年間4機、中国の「神舟（Shenzhou）」が2年に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1号」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て評価した。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高い。

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ので、0点とした。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	9	10	8	8	9	4	0
ロケット最大性能	10	9.5	10	6.5	5.5	4	2	0
衛星搭載環境	10	10	9	9	6	6	3	0
推進装置の性能	10	9.5	9	7.5	8.5	7.5	8.5	0
打上げ運用性	10	8	9	10	8	7	6	0
有人打上げ技術	10	8	0	10	0	10	0	0
合計	60	54	47	51	36	43.5	23.5	0
総合評価		27	23.5	25.5	18	22	12	0

（合計 60 点満点 ⇒ 総合評価 30 点満点に換算、0.5 点単位）

3. 宇宙利用分野

宇宙利用分野の技術については、衛星バス・衛星通信放送・地球観測・航行測位の4領域に分けて評価を行った。これらの4領域は、いずれも各国の宇宙開発活動の中で重要な役割を果たしているが、ミッションについて考えると、単独の技術が利用されているだけでなく、2つか3つの領域の技術を組み合わせて、新たなミッションの創出が行われている。例えば、通信衛星の1種と考えられるAIS（自動船舶識別）情報を収集する衛星は、地球観測衛星と組み合わせることで、AIS情報を発信していない船舶を識別でき、不審船の検出に役立つ。さらに、AIS情報には航行測位衛星により取得した位置情報が含まれている。また、地球観測衛星と航行測位衛星の組み合わせにより地理情報システム（GIS）を利用した観光地などの案内情報の提供が行われるなど、日常生活における利便性の向上に貢献している。さらに、通信衛星と航行測位衛星の組み合わせにより、航空機事故や船舶事故などの対処に当って、従来よりも精度の高い位置情報が得られるようになることが期待される。

衛星バスは、これらの衛星で共通的に必要とされる機器が組み合わされたもので、中国では通信放送衛星だけでなく、航行測位衛星や月周回衛星にも同じ形式の衛星バスが用いられたこともある。わが国においても、通信放送衛星と航行測位衛星に民間企業が開発した同じ衛星バスが利用されている。

このように宇宙利用分野における各領域は相互に連携するケースがみられるが、本調査では4つの領域をそれぞれ別の尺度により評価を行った。

今回の宇宙利用分野の総合的な評価結果を表3に示す。

表3 宇宙利用分野の総合評価（2015年版）

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
衛星バス技術	10	10	9.5	5.5	7	5	3.5	1
衛星通信放送	10	9	8.5	3	5	3.5	2	3
地球観測	10	8	8.5	4	6	5.5	4	3
航行測位	10	10	6	7.5	4.5	7	3	0.5
合計	40	37	32	19	22.5	20	12.5	7.5
総合評価		28	24.5	15	17	16	9.5	5.5

（合計40点満点 ⇒ 総合評価30点満点に換算、0.5点単位）

前回の評価結果を参考3に示す。

参考3 宇宙利用分野の総合評価（2013年版）

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	2	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	15	25	16	11	7
総合評価	29	25	11	19	12	8	5

（合計40点満点 ⇒ 評価30点満点に換算、1点単位）

以下に各領域の技術評価結果を示す。

（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・TTC（Telemetry, Tracking and Command）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及び固有バスがある。単品生産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

通信放送分野では大型大容量化のトレンドが継続する一方で、従来の化学推進系を部分的または全面的に電気推進系に置き換えた中型の衛星が現れている。

米国では、ボーイング社が製造した全電化衛星である「ABS-3A」と「Eutelsat 115WB」が、約6か月かけて電気推進系を用いて所定の軌道位置に到達し、通信サービスを開始し、全電化衛星の軌道上実績が示された。ボーイング社は、「SES-15」に加えて、現時点で数機の全電化衛星の製造を行っていると思われる。欧州では、エアバス社が3機の全電化衛星（「SES-12」、「Eutelsat 172B」、「SES-14」）を受注している。

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。評価基準は前回の項目をほぼ継承するものの、年間打上げ機数のみではなく、累積の軌道上の運用実績なども評価することとした。また、一般的に各項目の評価方法と配点の見直しを行った。

従来通り、米国の衛星メーカーが優位であることには揺るぎがない。また打上げ機数ではロシアが欧州を凌ぐ状況であったが、一方で受注機数では欧州が復活する兆しを見せている。

欧州では、欧州宇宙機関（ESA）の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）」として成功裡に打ち上げられた。しかし、エアバス（Airbus）社・ターレス・アレニア・スペース（TAS）社は、それぞれが有する「Eurostar型」バス、「Spacebus型」バスを継続して使用しており、「アルファバス」は現時点では広く使用されていない。

中国は独自の「東方紅4型」衛星バスの打上げ実績が上がり始めているものの、一方で2014年から2015年にかけては1機のみを受注に留まる。

わが国は、三菱電機の「DS-2000型」衛星バスが、カタールの通信衛星を受注するなど実績を伸ばしてきている。

ロシアは、初めて民間で設立された衛星製造会社であるDauria社が、インドの2機の衛

星を受注している。

インドは、自国内の衛星の生産に留まる。

カナダは、MDA 社が 2012 年にスペースシステムズ/ロラール社（SSL）を買収して親会社となったものの、依然として自国の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、2014 年及び 2015 年の受注実績、軌道上運用実績を表 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	軌道上 運用実績※
米 国	ロッキードマーチン (LM)	A2100A 系	3~6t	18kW	15 年	2	450 年以上
	ボーイング	BSS702 系	5~6t	17kW	15 年	4	公表値なし
	スペースシステムズ/ロラール (SSL)	LS1300 系	6~7t	25kW	15 年	14	1900 年以上
	オービタル・サイエンシズ (OSC)	Geostar-1/-2	2~4t	5kW	15 年	5	公表値なし
欧 州	エアバス	Eurostar-3000 系	5~6t	18kW	15 年	8	500 年以上
	ターレス・アレニア・スペース (TAS)	Spacebus-4000 系	5~6t	15kW	15 年	8	500 年以上
ロシア	ISS レシエトネフ	Ekspress-2000 型	3~4t	N/A	15 年	1	公表値なし
日 本	三菱電機(株)	DS-2000 型	3~5t	14kW	15 年	1	50 年以上
中 国	中国空間技術研究院 (CAST)	東方紅 4 型	5t	18kW	15 年	1	公表値なし
インド	インド宇宙研究機関 (ISRO)	I-3000 型、 I-4000 型	2~3t	N/A	10 年	2	公表値なし

注：ロシアは評価対象の衛星バスの種類を最新機に変更。

※当該衛星バスで打ち上げられた全衛星の経過年数の合計

出典：各種資料を基に事務局作成

表 3-1a 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

評価	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
重量	2	2	2	1	1	1	1	0
電力	2	2	1	1	1	1	1	0
寿命	2	2	2	2	2	2	1	0
受注	2	2	2	1	1	1	1	0
実績	2	2	2	1	1	0	0	0
評価	10	10	9	6	6	5	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には、各国の中型または小型の衛星バスが用いられる。また、日本を含む各国においては、小型衛星及び超小型衛星の衛星バスが充実化してきているなど、それぞれの衛星規模に適した標準バスが必要とされている。

米国は、オービタル ATK 社の「Star 型」バス、Orbcomm 衛星に採用された SNC 社の「SN100S」型バス、欧州では O3b 衛星に採用された TAS 社の「ELiTeBus」型バスなどが目立っている。

わが国においては、日本電気（株）の「NEXTAR」バスを活用した「ASNARO-1」が 2014 年に打ち上げられ、2016 年に打ち上げられる GCOM-C1 ではそれより大型の「GCOM」バスが使われる。また、2015 年に打ち上げられた「はやぶさ 2 号」は、「はやぶさ」のバスを踏襲している。三菱電機（株）は、「DS-2000」バスよりも小型の「DS-1000」バスを採用した ALOS-2 を 2014 年に打ち上げ、2017 年打上げ予定の「GOSAT-2」にも「DS-1000」バスが用いられている。

中国の周回衛星バスの新しいバリエーションとしては、アポジエンジンを搭載しない「北斗 3 型」（中高度及び軌道傾斜角付き地球同期軌道）衛星用のバスが出現している。

インドでは、測位衛星である IRNSS のバス向けに、従来の I-1000 (I-1K) バスが改良されて用いられている。

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	3	2	0
周回衛星バス	3	3	3	3	3	1	1	1
特殊バス	3	3	3	2	2	2	1	0
評価	10	10	10	8	8	6	4	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。一方わが国では、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においては、各国から輸出されているアイテムが高い国際競争力を有しているものと考えられる。わが国においては衛星通信機器、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、MDA 社が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	10	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出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、損害保険会社の視点を参考とし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

衛星 メーカー	欧 州		米 国				中 国	日 本
	Thales	Airbus (旧 Astrium)	Boeing	LMCSS	Orbital	SSL	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	4	5	5	5	4	5	3	5

(5 点満点)

このデータを基に、欧州、米国、日本は差がないと評価して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 3-1f 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	5	5	5	2	5	3	2	0

(5 点満点)

⑤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 3-1g に示す。

表 3-1g 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	6	5	4	0
ラインアップ	10	10	10	8	8	6	4	1
部品等	10	10	10	3	6	3	2	2
信頼度	5	5	5	2	5	3	2	0
合計	35	35	34	19	25	17	12	3
総合評価	10	10	9.5	5.5	7	5	3.5	1

(合計 35 点満点 ⇒ 総合評価 10 点満点に換算、0.5 点単位)

（２）衛星通信放送

①衛星通信放送技術開発

衛星通信放送においては、ハイスループット衛星（HTS：High Through-put Satellite）が注目されており、既に海外ではおよそ 50 機が打ち上げられている。HTS 衛星とは、Ka 帯の使用による狭ビーム化と周波数の再利用により、同じ帯域幅で少なくとも 2 倍以上（数十倍に及ぶ場合もある）にスループットを向上させた高速大容量の衛星を指す。

海外では 100Gbps を超えるスループットを有する HTS 衛星によるサービスも開始され、通信サービスの単価の大幅な削減を実現している。テレビ放送の需要が残る地域などを中心として DTH（Direct To Home）衛星は存続すると考えられるが、今後の通信衛星市場は HTS 衛星に移行していくことは明らかである。

2011 年に打ち上げられた Viasat-1 がこれまで世界最高速（約 150Mbps）の HTS 衛星であったが、2016 年に米国 SSL 社が打上げ予定の Echostar-19（Jupiter-2）は Viasat-1 を超える通信容量を有するものと予想される。

また、従来の化学推進系を電気推進系に置き換えたいわゆる全電化衛星は大幅に衛星バスの重量の削減を図ることが可能であり、通信ペイロードのリソースとしてより重量を必要とする HTS 衛星との組合せに特徴を発揮する。2015 年 3 月に打ち上げられた米国 Boeing 社の「ABS-3A」と「Eutelsat 115WB」が、同年 9 月から 10 月にかけて所定の軌道位置に到達して通信サービスを開始し、全電化衛星の軌道上実績が示された。

HTS 衛星の性能を十分に発揮するためには、軌道上においてビームパターンやビーム間接続などの通信コンフィギュレーションを柔軟に変更できるフレキシブル・ペイロード機能が必須である。

米国では、ボーイング社などの衛星製造企業は、防衛通信技術で培った先進技術を民間の通信放送衛星にも積極的に技術転用して、継続的な技術革新を行っている。

わが国の衛星通信技術開発衛星としては、技術試験衛星「きく 8 号」（ETS-VIII）が 2006 年に、超高速インターネット衛星「きずな」（WINDS）が 2008 年にそれぞれ打ち上げられている。2021 年には技術試験衛星「きく 9 号」（ETS-IX）が打ち上げられる予定である。

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（Advanced Relay and TEchnology MISsion）プログラムの中で、アルファバス（ARTES-8）、小型静止通信放送衛星用バス（ARTES-11）、NEOSAT バス（ARTES-14）など衛星通信分野での技術開発を行っている。

中国は、東方紅 4 型バスで「Laosat-1」を 2015 年に打ち上げ、ラオスが初めて衛星を保有した。

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 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	1	1	0	1	0	0	0
評価	10	10	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、これまではテレビ放送が最大のユーザであった。

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、HTS 衛星によるサービスが開始され、通信サービスの単価の大幅な削減が実現されつつあるため、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	1	1	2	1	2	1
遠隔医療	2	1	1	1	1	1	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	7	6	7	7	7	7
評価	5	4	3	2.5	3	3	3	3

(最大 12 点⇒評価 5 点満点、0.5 点単位)

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。

固定衛星通信放送（FSS）企業のランキングは、上位においては大きな変動はない。わが国ではスカパー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とワシントンの本拠地とするインテルサット社、2位も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。サウジアラビアのアラブサット社が6位、アラブ首長国連邦のヤーサット社が7位、タイのタイコム社が8位、中国の中国衛星通信集团公司（China Satcom社）が9位、スペインのヒスパサット社が10位である。ロシアでは、ロシア衛星通信（RSCC）社が11位、インドのAntrix社は15位である。中国では、China Satcom社に加えて、香港のアジアサット社が16位及びAPTサテライト社が17位、バミューダのアジア放送衛星（ABS）が19位であり、これらの4社合計ではわが国のスカパーJSAT社を上回っている（いずれも2014年時点）。

なお、2009年までは衛星放送（BSS）企業も対象としていたため、わが国では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。

移動体衛星通信（MSS）の衛星についても適切な資料は見当たらないが、イギリスに本社を置くインマルサット社、イリジウム社（米国）、スラヤ社（アラブ首長国連邦）、グローバルスター社（米国）、オーブコム社（米国）などがランキング上位の会社である。ただし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、評価から除外した。O3b社の躍進にもめざま

しいものがある。

なお最近のトレンドとして、「小型衛星によるメガ・コンステレーション」に基づく衛星インターネットサービスが挙げられるが、現時点では採点の対象とはしない。

具体的なデータは表 3-2c の通りである。

表 3-2c 2014 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	4	1	1
売上げ (百万米ドル)	2,547	4,428	448	446	727	185	794

注1：第1位のインテルサット（2,470 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：第19位の ABS（130 百万米ドル）社はバミューダに本社をおくが、歴史的に中国の企業とみなされるという実態を考慮して中国に計上した。

注3：その他の8社はアジア2、中近東3、豪州1、中南米1、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

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
売上／企業数	2,547	4,428	448	446	727	185	794
評価	4	5	2	2	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	10	9	1	5	1	0	0
ミッション	5	4	3	2.5	3	3	3	3
企業	5	4	5	2	2	3	1	3
合計	20	18	17	5.5	10	7	4	6
総合評価	10	9	8.5	3	5	3.5	2	3

(合計 20 点満点 ⇒ 総合評価 10 点満点に換算、0.5 点単位)

（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/環境汚染対策、災害被害緩和、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用が進められようとしている。ここでは地球観測について、「ミッション」「センサ技術」「公共利用」「商用利用」「国際貢献」の各視点から評価し、まとめた。

前回の調査と視点の分類は同一であるが、評価方法の見直しを行った。「ミッション」については、簡潔に観測対象領域で再分類した。「センサ技術」については最近提案が増えた小型コンステレーションの項目を追加し、また、静止軌道などからの観測を常時高分解観測として再定義した。「公共利用」については 2015 年度に GEO(Group on Earth Observation)により見直された社会貢献分野の定義に倣い、分類を改め、特に気候変動については基盤分野として再定義されたことにより評価点比率を見なおした。

各国の地球観測衛星で現在運用中のものを以下に示す。

(a)米国事例

地球観測	EOS-Terra/Aqua/Aura, GPM, QuikSCAT, SORCE, EO-1, Landsat, CloudSat, CALIPSO, OCO-2, Aquarius, CATS/ISS, RapidScat/ISS, GRACE, SMAP, KH, GeoEye, IKONOS, Worldview, Skybox, Flock
気象観測	GOES, NOAA, DMSP, Suomi-NPP, OSTM/JASON-2

(b)欧州事例

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

(c)ロシア事例

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

(d)日本事例

地球観測	GOSAT, GCOM-W, GPM/DPR, ALOS-2, GPM, IGS, ASNARO
気象観測	Himawari

(e)中国事例

地球観測	CBERS、資源、環境、天絵、高分、海洋、遙感、吉林
気象観測	風雲(静止および極軌道)

(f)インド事例

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

(f)カナダ事例

地球観測 RADARSAT, SCISAT、他欧米との協力ミッション

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。ミッションの多様性は、地球観測能力（技術力）の広さを示している。

評価基準は、気象観測については気象観測衛星ネットワークに参加している現業静止衛星を持つこと、現業周回衛星を持つこととし、それぞれ、2/1点とした。その他各領域対象については、その領域観測を目的とする、あるいは主要な観測パラメータが含まれている衛星を持つことを1点とし、複数持つ場合に1点を加えた。

評価結果を表3-3aに示す。

表3-3a 各国の地球観測ミッションの多様性の評価

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	3	2	3	2	0
大気観測	2	2	2	1	2	2	2	1
海洋観測	2	2	2	1	2	2	2	1
陸域観測	2	2	2	1	2	2	2	2
合計	9	9	9	6	8	9	8	4
評価	10	10	10	6.5	9	10	9	4.5

(合計9点満点 ⇒ 評価10点満点に換算、0.5点単位)

② 地球観測センサシステムの種類と性能

地球観測センサシステムの種類と性能は、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、それらを考慮した評価とした。

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、陸域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。それぞれの能力はミッション検討においてトレードオフ対象となり、全てを単一の衛星で満足することはできないが、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がされるのが近年のアプローチである。前世代においては、米国「EOS」シリーズ、欧州「EnviSat」、わが国の「ADEOS」シリーズなど、大型プラットフォームを使用したミッションが実施さ

れてきた。近年、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、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、気象用周回衛星（米「JPSS」、欧「MetOp」）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高い評価を得ており、欧州でも検討が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。

今回、評価に当って近年システム構築の発表が相次いでいる小型衛星を使った観測システムについて項目を追加した。「Skybox」などのシステムでは、時間及び空間分解能を同時に上げる手段として小型化、超多数化による観測を基本としている。従来小型化による搭載観測機器の制約、多数機調達によるコストの高額化が問題とされていたが、「Skybox」の例では、通常観測衛星に求められる姿勢制御系を極端に簡略化し、観測方向制御を犠牲にする代わりに観測機器は大型機並みに維持することでこの問題を回避している。観測方向制御ができない代わりに多数観測を行うことで、観測対象領域をカバーする可能性を高めることで、Google Map 等、全球対象で地表面状況観測、時間変化が少ないと見込める対象に対して有効なシステムとなっている。

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（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「WorldView-3」で、分解能 31cm である。また 2014 年に商用地表面分解能の限度が 25cm まで緩和されたため、今後限度に迫るシステムの登場が見込まれる。一方、地表面分解能と広域撮像性はどちらを優先するかトレードオフ対象となるため、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最適化がなされる必要がある。光学と合成開口レーダは原理的に観測上の特徴が補完的である。つまり夜間や曇天域では可視光学観測は不可能だが、撮像できれば精細な情報が取れるのに対し、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。レーダの分解能が低いのは周波数利用政策による帯域制限が主な原因であったが、昨今 X 帯レーダが使用できる帯域が国際的に見直されたことを受け、光学に迫る地表面分解能を達成するものも出現してくると思われる。

また、合成開口レーダは、C 帯、X 帯、L 帯が衛星搭載用として実現している。更に Ku 帯、P 帯、S 帯についても計画が発表されており、周波数の多様化、それに伴い複数周波数による同時観測等のシステム、また「TanDEM-X」に見られるタンデムフライトによる即時干渉観測システムなどへの技術発展が予測される。わが国においては、「JERS-1」から「ALOS-2」に至って搭載する L 帯 SAR について、長期観測実績の点から優位性が高い。多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亘り 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。最も利用されてきたのは米「EOS」搭載のMODISであるが、近年「Suomi-NPP」のVIIRSが後継センサとして引き継がれている。わが国では「GCOM-C」に搭載されるSGLIがこれに当たる。VIIRSの地表面分解能375mに対して、SGLIは250mを実現しており、わが国に仕様上の優位性がある。わが国で「GCOM-C」の上げが順延されている間に、欧州で「Sentinel」が予定通りの開発を進めており、日欧の優位性に変化が出ている。中国では「FY-3」を打ち上げ、多波長観測による質的観測の結果を公表し始めているが、未だ先進国の例に倣ったものに留まり、新規性および精度の保証については、未達の状況である。

分光計は、赤外領域において大気中の気体（オゾン、二酸化炭素など）を検知するためのものや、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。欧米などでは、欧Sciamachy、IASIや米AIRS、OCO、CrIS等が該当する。わが国では、二酸化炭素を観測する「GOSAT-FTS」、また「ISS」に搭載予定のHISUIの他、小型衛星による利用実証が計画されている。

レーザーレーダについては、米国がリードし、欧州が追随している。地球観測に用いる大出力のレーザー送信機は寿命性能実現が困難という世界的に共通の技術的問題があったが、「CALIPSO」において、米国(NASA)が地球観測用長寿命レーザー送信機の技術を確認した。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、ドップラー計測機能を新たに加え、米国に追従している。わが国では、月探査用に小型のレーザー高度計を実現しているが、地球観測用としては「ISS」搭載植生ライダー実証を研究中というレベルに留まっている。

気象センサは、各国が静止軌道の気象衛星に自国開発のセンサを載せている中で、わが国の気象衛星は、結果的に米国センサの輸入に頼ってきた。それゆえに日本国内における静止衛星軌道からの独自の地球観測センサ開発経験は乏しくなりつつある状況である。先進国では、数チャンネルの比較的単純なセンサという旧仕様から、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。

常時高分解観測にあたる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。欧州は試験衛星「Spirale」打ち上げを完了し、Airbus社では、「GO-3S」と呼ばれる民生利用の高分解能常時観測衛星構想を発表した。中国では2015年に打ち上げられた「高分4号」において、地表面分解能50mでの常時観測を実現したとの報告がある。インドは「GISAT」という分解能60mの常時観測衛星を開発中とされている。わが国は潜在的な技術力を持つが、研究段階に留まる。

国別に観測センサを見てみると、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。

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が非常に多くのセンサ開発の成果が出つつある。ハードの最低限の開発能力を得たが、観測したデータの校正検証、応用利用については、途上と言える。インドは観測システムハードウェアとしての研究開発において中国にやや遅れて追随しつつあると思われる。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、フーリエ分光部、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。

わが国においては、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、研究のレベルで網羅的に実施する努力はなされている。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、その国際的地位を確保している状況である。例えば「ALOS」のL帯SARシステム、「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」のAMSRはマイクロ波スキャナセンサとして事実上世界標準となっている。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し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った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。

評価としては各分野のセンサが自国開発・運用されていることを1点とし、更にそのセンサ観測結果が十分国際学会などで認知されており、安定していると判定できる場合1点加えた。

地球観測センサ技術の評価結果を表3-3bに示す。

表 3-3b 地球観測センサ技術の評価

センサ技術	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	2	2	2	1	2	1	1	0
合成開口レーダ	2	2	2	0	2	1	0	2
多バンドセンサ	2	2	2	1	2	1	0	0
分光計	2	2	2	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
常時高分解観測	2	2	1	2	0	1	1	0
小型フォーメーション	2	2	0	0	0	0	0	0
合計	16	16	12	6	8	6	4	3
評価	10	10	7.5	4	5	4	2.5	2

(最大16点満点 ⇒ 評価10点満点に換算、0.5点単位)

③ 公共利用（気象・防災・環境）

多数の衛星ミッション成果をどのように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、米国を筆頭とし、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、政府間地球観測作業部会（GEO）による「全球地球観測システム」（GEOSS）が挙げられる。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Copernicus（旧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を欧州連合（EU）が各国と共同して欧州及びアフリカを対象として構築中である。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議論の整理が終わっている。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構築について、平成17年に宇宙開発委員会地球観測特別部会報告書としてまとめ、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、並行して研究が実施されてきた。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いないことから、欧米に準じ、衛星システムのインフラ化、社会実装について長期的見直しが図られるべきである。

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自国及び周辺領域の土地利用、気象観測などの現業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。

尚、GEOSS10年計画は更新され、社会実装を前提に、科学と人文科学を融合し、更に拡張を図ろうとする「Future Earth」などの議論が進められているところである。

気象観測に関しては、世界気象機関(WMO)における衛星観測網(World Weather Watch; WWW)が、「Himawari」(日)、「GOES」(米)、「Meteosat」(欧)、「Electro」(露)、「INSAT」(印)、「FY-2」(中)、「COMS-1」(韓)などの静止衛星群と、「DMSP」、「NOAA」、「JASON」(米)、「MetOp」(欧)、「Meteor」(露)、「FY-3」(中)からなる現業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。わが国では静止気象衛星として国際貢献できている一方で、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

た現業周回衛星は保有していない。周回衛星観測データについては各国の現業周回衛星と JAXA の R&D 周回衛星のデータに頼っている。

評価としては、統合システムについては、各衛星からの観測データを統合運用する仕組みを持っている場合に 2 点とした。また気候については気候変動重要変数(ECVs)の観測をどの程度カバーし、気候評価に利用されているかにより、ほぼすべてを網羅している場合を満点とした。評価に当っては観測の有無だけではなく、観測データが解釈され、利用されているかに着目した。その他の項目については具体的な利用の動きがある場合を 1 点とし、一部具体的な利用を開始しているものに 1 点加点し、すでに定常的な利用に入っているのが明らかなものについて更に加点した。

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	2	1	2	0	1	0	0	0
気候	4	4	4	3	3	2	2	1
生物多様性	3	1	1	0	1	0	0	0
災害	3	3	3	3	3	3	3	3
エネルギー・資源	3	2	2	2	1	1	0	0
食料・農業	3	2	2	1	1	1	0	1
インフラ交通	3	1	1	1	1	1	0	0
公衆衛生	3	1	1	0	1	1	0	0
都市開発	3	1	1	0	0	0	0	0
水資源	3	3	2	1	3	1	2	0
合計	30	19	19	11	15	10	7	5
評価	10	6.5	6.5	3.5	5	3.5	2.5	1.5

(合計 30 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算、0.5 点単位)

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、英国 SSTL の小型衛星や、Airbus、TAS などがアフリカや韓国など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 衛星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)、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おり、2014 年までに 4 機打ち上げた。またベ

ネズエラの小型地球観測衛星を受注し打ち上げた実績がある。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の輸出が行われている。

わが国では、「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ーに対し、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ーは、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 Digital Globe 社（GeoEye 社と合併）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 Astrium GEO information services 社が「SPOT」、「Pleiades」、「TerraSAR」などの商業画像を販売している。インドは 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 MDA 社が「RADARSAT」の画像を販売している。

わが国では民間企業である PASCO や一般財団法人 RESTEC 等が ALOS の他、諸外国の商用衛星画像を含め販売してきた。

ロシアは IKI Data Distribution Service 社が NOAA およびロシア衛星の画像販売を行っている。他に ScanEx, SOVZOND といった複数社が存在する。中国は 21 世紀空間技術応用公司（21AT）と長光衛星技術有限公司という画像販売企業がある。21AT は英国の SSTL 社が 2015 年 7 月に打ち上げた 3 機の DMC3 衛星を独占的に運用して画像を取得している。長光は 2015 年 10 月に 1 号機が打ち上げられた吉林省独自の地球観測衛星「吉林」を運用し、商業的な画像販売を目指している。

ここでの評価は、センサ本体あるいはサブシステムレベル、小型衛星レベルで輸出が行われている実績のあるものを 1 点とし、中型以上の衛星本体の輸出があるものについて 1 点加点した。受信権については行っている場合に 1 点、画像販売については、有無および、その規模で評価した。

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	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	1	1	1
合計	5	4	5	2	1	2	1	2
評価	5	4	5	2	1	2	1	2

(5点満点)

⑤国際協力

衛星による地球観測システムは例え米国や欧州という巨大国家や地域においても独立では賄えず、また得られた観測結果を完全に利用しきことはかなわない。この現実を踏まえば、如何に国際協力を組織し、自国の観測要求に対する不足分を賄い、他国に余剰の観測結果を与える仕組みを作るかは、地球観測システムを実用化していくために必須の活動といえる。システムの成長は、まず自国の観測を充実させ、次に自らの経済圏による近傍地域全体の観測網の構築、最後には地域同士の連携による完全な全球観測システムが構築されていく過程を経るものと考えられる。GEOSS はまず主要宇宙機関を対象として、既に全球観測システムを目指した枠組みではあるが、各地域において国際協力フレームを充実させる必要がある段階にある。そうした意味において、国際協力の深度を評価の対象とする。気象観測についての評価はミッションとして別途実施していることから評価対象とせず、ここではもう一つの実用化された衛星観測枠組みである国際災害チャータを対象とする。また一方各地域において地域協力フレームワークが育成されているかの視点で評価を行った。評価についてはそれぞれ4点ずつとし、災害チャータについては参加を1点、実際に利用された衛星の頻度により1-2点、運営管理している欧州に1点を追加した。地域協力については、自らをリーダーとした地域協力体制の有無で2点、かつそれらの成果（継続年数・参加国数・キャパシティビルディング、公共利用技術の深化等）を勘案し、1-2点を配分した。

(a) 国際災害チャータへの参加

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・カナダの他、アルゼンチンや韓国も参加している。わが国は「ALOS」の運用終了に伴い貢献が中断されていたが、後継機として「ALOS-2」が打ち上げられ、合成開口レーダによる貢献を再開している。

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 (Digital Globe, GeoEye)

欧州 5 機関＝ESA, CNES (仏, Airbus, NSPO(台)), DLR (独), DMCii (英, Algeria, Nigeria, Turkey), 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

(b) 地域協力

(1) アジア・太平洋地域

アジア・太平洋地域では、わが国はアジア・太平洋地域宇宙機関フォーラム (APRSAF: Asia Pacific Regional Space Agency Forum、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。中国は別途アジア太平洋宇宙協力機構 (APSCO: Asia Pacific Space Cooperation Organization、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。

(2) 欧州

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、中国大陸においても DRAGON Program の活動により、中国における利用推進を継続中である。

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

	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	2
地域協力	4	0	4	0	4	3	0	0
合 計	8	3	8	1	6	4	1	2
評 価	5	2	5	0.5	4	2.5	0.5	1.5

(合計 8 点満点⇒ 評価 5 点満点に換算、0.5 点単位)

⑥新興国の状況

韓国の衛星開発は、SSTLのバスを基にした「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してきている。センサについては主に欧州のAirBus社やThales社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「COMS」を取得した。小型衛星については、Satrec Initiativeが主導し、近年他国への輸出も見られる。小型衛星の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）についても国内生産能力はまだ高くはないと思われる。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予測される。

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によって地球観測を行ってきたが、「VNREDSAT」（ベトナム）、「THEOS-1」（タイ）など、自らの衛星を持ち、継続していく方向性である。また、新たにフィリピンなど、自国小型衛星取得に意欲を見せている国も出てきており、新興国全体に宇宙産業に対する芽生えが見られる。

⑦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 3-3f に示す。前回に比して、中国・インドの技術的な急成長が見られる。また欧州は米国に対し、技術的にはやや劣るものの地球観測の公共利用システムにおいて先んじており、利用・国際協力体制まで含めた地球観測プログラムとしてのバランスが最も優れているという結果となった。

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	10	6.5	9	10	9	4.5
センサ種類及び性能	10	10	7.5	4	5	4	2.5	2
公共利用	10	6.5	6.5	3.5	5	3.5	2.5	1.5
衛星販売・画像販売	5	4	5	2	1	2	1	2
国際貢献	5	2	5	0.5	4	2.5	0.5	1.5
合計	40	32.5	34	16.5	24	22	15.5	11.5
総合評価	10	8	8.5	4	6	5.5	4	3

(合計 40 点満点 ⇒ 総合評価 10 点満点に換算、0.5 点単位)

（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、わが国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、さらに搭載原子時計と、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。

2015年11月開催の第10回及びそれ以前の国連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最新の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値であり、他のシステムは1衛星ごとの数値で、かつ新しい衛星のみを対象に評価しているため、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
米国	GPS	0.7m(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	0.6~1.3m (RMS) ^{*3}
欧州	Galileo	1.26m (IOV 初号機 (RMS))
日本	QZSS	0.4m(みちびき (RMS))
インド	IRNSS	4~5m 程度 ^{*4}

*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。

*3 : ICG での公表資料に記載された 1.25~2.6m (14 衛星 1 衛星ごと 95%誤差) を RMS 換算

*4 : Inside GNSS 誌 2015 年 7-8 月掲載記事より概算

○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。

米国の「GPS 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、 2×10^{-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	衛星測位システム名	搭載原子時計製造能力	原子時計性能 (安定度)
米国	GPS	○ (Cs, Rb)	1~8×10 ⁻¹⁴ @1day (Block-IIR、IIR 搭載 Rb)
ロシア	GLONASS	○ (Cs)	2~8×10 ⁻¹⁴ @100000s ^{*1}
中国	BeiDou	○ (Rb)	2.5~9.4×10 ⁻¹⁴ @1day
欧州	Galileo	○ (受動型水素メーザ、Rb)	8×10 ⁻¹⁵ @1day (GIOVE-B 搭載受動型水素メーザ) 5×10 ⁻¹⁴ @1day (GIOVE-A 搭載 Rb)
日本	QZSS	× ^{*2} (Rb)	—
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 : 現在整備中の IRNSS の搭載原子時計は海外からの輸入コンポーネントである模様¹。

○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を表 3-4c に示す。なお、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 を開発中のわが国は同等の精密軌道クロック推定技術を有している。ロシアは IGS 解析センターになっている機関はないものの、Information Analysis Center が公開している GLONASS の精密軌道・クロック推定結果は IGS の解析センターの推定結果と同等の精度を有している。インドは、IGS への参加、精密軌道クロック推定結果の公表をまだ行っていないため、精密軌道クロック推定の技術レベルは他の国に比較すると現時点では低いも

¹ Hindou 誌 2013 年 6 月 27 日掲載記事

<http://www.thehindu.com/sci-tech/technology/india-prepares-to-establish-navigation-satellite-system/article4853847.ece>

のと推定される。

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 SIS-URE の性能を最大 6 点として、1m 以下を 6 点、1~1.5m を 4 点、1.5m 以上を 2 点とした上で、これに原子時計製造技術の有無として 2 点/0 点、また、将来の SIS-URE 向上の基礎技術の有無の目安として高いレベルの精密軌道クロック推定技術を有しているかどうかという観点で IGS の解析センターとなっている機関がある国（または同等性能の軌道クロック推定結果を公表している機関がある国）に 2 点、現時点で精密軌道推定結果を定期的に公表する機関がない国を 0 点として満点 10 点となるように比較評価を行った。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	6	6	4	2	6	4	2	—
原子時計	2	2	2	2	0	2	0	—
精密軌道推定	2	2	2	2	2	2	0	2
評 価	10	10	8	6	8	8	2	2

(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。他の用途の衛星と異なり、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。2015 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、2015 年末までに IIRm が 7 機、IIF が 11 機打ち上げられて運用中である。2016 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、2015 年末時点では試験機 2 機、チェックアウト中の衛星 2 機含む 27 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。2015 年末時点で、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 3 機の計 13 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。2015年より打上げを開始し、2015年末時点で第3段階のグローバルシステムの構成要素である地球同期傾斜軌道衛星を2機、中高度軌道衛星2機の計4機を打ち上げて試験中である。

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1機の10機、3軌道面合計で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 Regulated 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、機能性能検証を進めてきたが、2014年から実用（Full Operational Capability:FOC）衛星の打上げを開始し、2015年までに合計8機の衛星を打ち上げている。8機中2機は所定の軌道への投入に失敗したが、その後リカバリの計画が検討されており、システムの一部として利用可能かどうかを検討中である。2016年中に初期サービスを開始する予定であり、2016年中に6機を打ち上げる予定である。

わが国は、地球の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3機の衛星と地上システムの整備を実施中である。2015年1月に宇宙基本計画の工程表が改訂され、2023年ごろに7機システムへの拡張を行うことが明示された。

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、2015年末時点で4機の衛星を軌道に配置済みである。

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）

の解析実施日 1 日での平均値、さらにサービスエリア内で平均した値を表 3-4e に示す。

表 3-4e コンステレーションのデータ

評価項目	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	12	27	1	14+4**	4
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***	22 年	-	4 年	-	3 年	-
PDOP****	1.96	-	3.13	-	2.88	13.6

* 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、2015 年末時点では、14 機による地域サービスを提供中である。

** 第 2 段階の地域システムに加えて第 3 段階の試験機の打上げが開始され、2015 年末時点で 4 機の衛星が運用されている。

*** 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、IRNSS は南緯 5 度～北緯 40 度、東経 65 度～100 度をサービスエリアとして同様に算出

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。検討会における議論の結果、実際に衛星測位システムとして利用可能かどうかという観点で、コンステレーションの性能の比重は他の評価ポイントより高いと考えられるため、今回の評価ではコンステレーションの評価に 15 点を配分し、その配点にあたっては以下の考え方を適用した。

- ・ グローバルな衛星測位システムを完成、運用を 2 年以上継続的に行っている：10 点
- ・ 地域測位システムを完成、運用を 2 年以上継続的に行っている：7 点
- ・ グローバルまたは地域システムを整備中で、4 機以上の衛星で自立測位の検証が済んでいる：5 点
- ・ グローバルまたは地域システムを整備中：3 点
- ・ サービスエリア全域における平均 PDOP が 6 以下である（5 点を加点）

表 3-4f コンステレーション性能の評価

	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
GNSS・RNSS 運用	10	10	5	10	3	7	5	0
PDOP	5	5	0	5	0	5	0	0
評価	15	15	5	15	3	12	5	0

(15点満点)

③GNSS 利用技術（受信機、補強技術）

（a）GNSS 受信機

測位利用の観点では、複数 GNSS 利用が拡がりつつあり、元々、複数システム対応が進んでいた測量用のハイエンド受信機だけでなく、一般利用者向けのチップセットにおいても、GPS+GLONASS+BeiDou 対応が一般的になりつつある。

欧州の Galileo、わが国の準天頂衛星対応のチップも市場に投入されており、都市部などの測位環境の悪い場所においても、高いアベイラビリティで測位利用が可能になりつつある。これらの一般利用者向けのチップは、スマートフォン（スマホ）の普及により、通信モジュールと一体化して売られるようになり、カルコム(米)やブロードコム(米)のチップが大きな割合を占めるようになっている。

スマホ、携帯電話等の通信モジュールと一体になっていないカーナビやデジカメ向けのチップセットでも、u-blox（スイス）、Mediatek（台湾）が国際市場ではシェアを獲得しており、わが国のチップメーカーである古野電気、日本無線、Sony、セイコーエプソン等は、高感度化や、IoT 普及を睨んだ省電力化対応でシェア拡大を目指している。カーナビ端末としては、わが国の企業の製品が大きなシェアを持っていた時期もあったが、世界的には個人用ナビゲーション装置（Personal Navigation Device：PND）が普及し、ガーミン（米）やトムトム（蘭）がシェアを伸ばしているが、スマートフォンの普及により、スマートフォンのアプリに市場での地位を脅かされている状況である。

測量用のハイエンドな受信機については、2周波を利用するための特許が米国企業に押さえられていたため、米国やカナダの企業が市場で大きなシェアを得ているが、各国での GNSS 整備の進捗や、一般公開された民生用信号の増加に伴い、比較対象としている各国において測量用ハイエンドの二周波以上の周波数を利用可能な受信機が開発され、商用としても市場に投入されるようになっている。

本研究において比較対象としている宇宙開発先進国では、衛星測位の利用は、幅広い分野で日常的に行われており、既に製品、サービスとしては、一般化され、市場原理によってその普及度が決まっているケースがほとんどである。GNSS 利用技術に対する技術的な差異は少ないと考え、技術力比較においては比較対象からは除外することとした。

（b）GNSS 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、国際民間航空機関（International Civil Aviation Organization:ICAO）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）、わが国の MSAS（MTSAT Satellite Augmentation System）、インドの GAGAN が運用中、ロシアの SDCM、中国の BeiDou Satellite-Based Augmentation System（BDSBAS）が、システム整備中である。また韓国も独自の SBAS システムの開発に着手した。

現在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、インド GAGAN は APV 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り、わが国の MSAS は米欧より低いレベルとなるエンルート及び NPA サービスを提供している。インドも同様に電離層の環境としては厳しい条件であるが、多層モデルを用いた電離層補正を適用、2015 年 4 月に ICAO の認証を受けた。ロシアの SDCM、中国 BDSBAS 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の補強サービス

搬送波位相測位向けの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。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。

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, GLONASS, 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	RTK-PPP	3cm	6cm	日本	GPS	QZSS
	JAXA	MADOCA	PPP	10cm	10cm	東アジア オセアニア (QZSS) 全世界	GPS GLONASS QZSS	QZSS Internet

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。

上記のサービスのうち、CNES、JAXA、SPAC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。

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点を配分する。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	4	—
搬送波位相測位 補強	4	4	4	—	1	—	—	—
合 計	8	8	8	1	3	0	4	0
評 価	4	4	4	0.5	1.5	0.5	2	0

（合計 8 点満点⇒評価 4 点満点に換算、0.5 点単位）

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	配点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
SIS-URE	10	10	8	6	8	8	2	2
コンステレーション	15	15	5	15	3	12	5	0
GNSS 補強技術	4	4	4	0.5	1.5	0.5	2	0
合計	29	29	17	21.5	12.5	20.5	9	20
総合評価	10	10	6	7.5	4.5	7	3	0.5

(合計 29 点満点 ⇒ 評価 10 点満点に換算、0.5 点単位)

（５）宇宙利用分野のまとめ

以上の４領域の評価を踏まえて、宇宙利用分野の総合評価結果を表 3-5（p22 の表 3 と同じ）に示す。

表 3-5 宇宙利用分野の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
衛星バス技術	10	10	9.5	5.5	7	5	3.5	1
衛星通信放送	10	9	8.5	3	5	3.5	2	3
地球観測	10	8	8.5	4	6	5.5	4	3
航行測位	10	10	6	7.5	4.5	7	3	0.5
合計	40	37	32.5	20	22.5	21	12.5	7.5
総合評価	30	28	24.5	15	17	16	9.5	5.5

（合計 40 点満点 ⇒ 総合評価 30 点満点に換算、0.5 点単位）

4. 宇宙科学分野

◎宇宙科学分野の概況

宇宙科学は、宇宙の構造やその起源を追究すべく大気の外に出て行う天文・宇宙物理学観測、地球を含む太陽系の生い立ち及び太陽によって支配される太陽圏環境を探る太陽系科学、微小重力環境等を利用してさまざまな実験を行う宇宙環境利用科学、そしてこれらの研究を支え新たな宇宙への可能性を切り開く宇宙工学から成り立っている。人類の知のフロンティアを切り開く宇宙科学研究は、宇宙技術力を進めるためにキーとなる分野でもある。

なお、宇宙科学研究にとっては小型飛翔体(観測ロケットや大気球)の存在意義はきわめて高く、萌芽的な研究や野心的な研究が進められており、X線天体の発見(ノーベル物理学賞)などの大きな科学的成果を生んでいるが、今回の評価では対象に含めないこととした。

◎2014-2015年の主な実績

宇宙科学分野においては2014年には1機の小惑星探査機(日本)が打ち上げられ、2015年には4機1組の磁気圏観測衛星(米国)、2機の天文観測衛星(中国・インド)および重力波検出衛星(ESA)の計7機が打ち上げられた。2年間で計8機となる。

わが国は2014年12月3日に小惑星探査機「はやぶさ2」の打上げに成功し、翌2015年12月3日に地球スイングバイに成功したほか、2015年12月7日には金星探査機「あかつき」の金星周回軌道投入に成功した。「あかつき」はわが国にとって初めての惑星探査機である。

米国は小惑星探査機「Dawn」で2015年3月に小惑星Ceresの周回軌道投入に成功するとともに、2015年7月には冥王星探査機「New Horizons」で冥王星とその衛星カロンにフライバイして詳細な画像を取得し、これまで予想もできなかった冥王星とカロンの多様な地形を発見するとともに、大気の詳細な観測を実施した。

欧州は2014年に彗星探査機「Rosetta」の着陸機「Philae」をChuryumov-Gerasimenko彗星へ着陸させることに成功した。

◎評価項目及び評価基準の見直し

今回は前回の評価方法を見直し、以下のような項目ごとに評価を行った。

- (1) 太陽系探査：対象天体の難しさも考慮しつつ、対象天体ごとに、フライバイ観測、周回探査、着陸探査、試料回収などの到達段階に応じて配点することとした。
- (2) 天文・宇宙物理観測：観測波長や用途のそれぞれに応じた観測装置性能に重点をおき、加えて、観測方法とそれに関連する投入軌道にも配慮して配点することとした。
- (3) 地球周辺空間観測、太陽風、太陽観測：天文・宇宙物理観測と同様の考え方で配点した。

なお、前回からの主要な変更点としては以下のことがある。

- 技術の質(到達点)を第一に考慮する。(1)において量(機数)は考慮しない。
- (2)(3)の分野においては、時間とともに観測装置の性能は向上しており、機数も多い。そこで、2000年以降に観測を行った衛星・探査機のみを対象とする。(このため準備中の衛星も対象外とした。)
- 科学的成果の多寡は技術(装置仕様)を反映するが、今回は、観測衛星の技術力に特化するため、論文成果の数は評価対象外とした。

このようにして行った宇宙科学分野の評価結果を表4に示す。

表4 宇宙科学分野の評価(2015年版)

評価項目	最高点	米国	欧州	日本	ロシア	中国	インド	カナダ
太陽系探査	20	19.5	9	9	7.5	4	4	0
天文・宇宙物理	20	20	15.5	0.5	10	0	1.5	0
地球周辺・太陽	20	20	3.5	4	4.5	2	0	0
合計	60	59.5	28	13.5	22	6	5.5	0
総合評価	20	20	9.5	4.5	7.5	2	2	0

(合計60点満点 ⇒ 総合評価20点満点に換算、0.5点単位)

前回(2013年)の評価(参考4)では、(1)月・惑星探査を①月探査(月探査機数)、②惑星探査(惑星探査機数および対象惑星数)、③地球への帰還実績、④理学的観点(LPSC 発表論文数)から評価し、また(2)天文観測を①天文観測衛星数、②理学的観点(学術誌のインパクトファクター)から評価、さらに(3)地球近傍宇宙環境観測を①宇宙環境観測衛星数、②理学的観点(COSPAR 開催回数およびCOSPAR 発表論文数)から評価した。

参考 4: 宇宙科学分野の評価 (2013 年版)

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
月・惑星探査	20	20	9	9	8	5	4	2
天文観測	20	16	10	5	8	1	0	1
地球近傍 宇宙環境観測	20	20	15	9	6	5	4	4
合 計	60	56	34	23	22	11	8	7
総合評価	20	19	11	8	7	4	3	2

(合計 60 点満点 ⇒ 評価 20 点満点に換算、1 点単位)

評価方法を変えているので 2013 年の評価結果との直接の比較はできないが、宇宙科学分野においても米国の優位は揺るがない。また、欧州も天文観測分野などでの加点があり存在感を高めている。わが国も欧州に次いで高い水準にある。特記すべきこととして、中国とインドが宇宙科学分野への進出を始めていることがある。

(1) 太陽系探査

歴史的には世界の太陽系探査は、地球を周回している月の探査から始まり、地球に接近する小惑星や彗星、金星や火星といった隣接する地球型惑星などの比較的地球からアクセスしやすい天体、そして、水星や木星以遠の外惑星・小天体とその衛星へと対象を拡大してきた。このように、対象天体によって探査に難易度がある。また、同じ天体を探査するにしても、フライバイ探査、周回探査、着陸探査、試料回収などの到達段階があり、各国の到達度は異なる。

評価項目には陽には含めなかったが、超遠距離通信、スイングバイ、精密軌道制御、自律航行、エアロブレーキ、着陸・再離陸、無人移動探査(表面、表層、地下、飛行)、ペネトレータ、インパクト、極限熱制御(内惑星、外惑星、越夜)、電気推進、太陽光・太陽風推進(ソーラーセイル、プラズマセイル)、試料採取、惑星間空間からの大気圏(再)突入などの特徴的な技術がこの分野には多数存在する。

太陽系探査分野の評価結果を表 4-1a に示す。

表 4-1a: 太陽系探査分野の評価

天 体	最高点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
月	5	5	3	5	3	4	3	0
小惑星・彗星	5	5	4	2	5	2	0	0
火星と衛星系	4	4	3	3	0	0	3	0
金 星	4	3	3	4	3	0	0	0
水 星	3	3	1	0	1	0	0	0
木星と衛星系	3	3	0	0	0	0	0	0
土星と衛星系	4	4	0	0	0	0	0	0
天王星・海王星	2	2	0	0	0	0	0	0
太陽系外縁天体	2	2	0	0	0	0	0	0
合 計	32	31	14	14	12	6	6	0
評 価	20	19.5	9	9	7.5	4	4	0

(合計 32 点満点 ⇒ 評価 20 点満点に換算、0.5 点単位)

評価にあたっては、開発中を1点、フライバイ探査成功を2点、周回探査成功を3点、着陸探査成功を4点、試料回収成功を5点とした。宇宙科学分野では国際共同ミッションが通常だが、この技術到達点に関しては基本的には主担当国のみ割り付けた。

この評価の対象となった探査機を表4-1bに示す。

表4-1b: 各国の主要な太陽系探査機

天体	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
月	Lunar Prospector	Smart1	Luna	かぐや	嫦娥1	Chandrayaan	—
小惑星 ・彗星	ISEE-3、 Dawn	Giotto Rosetta	Vega	すいせい、 はやぶさ	嫦娥2	—	—
火星と 衛星系	Viking、 MSL	Mars Express	Mars	のぞみ (失敗)	—	Mangalyaan	—
金星	Mariner、 Magellan	Venus Express	Venera	あかつき	—	—	—
水星	Mariner、 Messenger	—	—	—	—	—	—
木星と 衛星系	Galileo、 Juno	—	—	—	—	—	—
土星と 衛星系	Cassini	—	—	—	—	—	—
天王星 ・海王星	Voyager	—	—	—	—	—	—
太陽系 外縁天体	New Horizons	—	—	—	—	—	—

(2) 天文・宇宙物理観測

天文・宇宙物理観測衛星は、 γ 線・X線・紫外線・可視光・赤外線・電波・宇宙線など、観測する波長・粒子によって大別されるが、加えて、スペース VLBI 観測や太陽観測、系外惑星探査精密測光観測、位置天文観測、重力波検出などの研究目的に特化した分類も必要である。

これらの天文観測衛星の技術的到達度を正確に定量化することは難しいが、それぞれの観測目的に応じた基本的な性能は存在する。そこで、それらの基本的な性能に沿って、観測装置の性能を評価することにした。ただし、観測の手法によっては、基本的な性能の一部を犠牲にして、その観測手法を達成することが必要となり、かつ、その観測手法そのものが技術力を反映することもある。この点も配点に考慮することとした。このため、各衛星の技術点は以下のように求めた。まず、観測目的毎にカテゴリーに分ける。同じカテゴリーの中では、共通の基本性能項目を設け、各基本性能項目の満点を3点とする。基本性能項目の数は、カテゴリーにより異なるので、基本性能項目の点数の和を項目数で割った平均点を求め、それを基本性能評価点とする。加えて、カテゴリーに共通の観測手法による点数を定義し、それを基本性能評価点に掛け算して、最終的な得点とする。表 4-2a に主な配点を示す。

この評価の対象とした衛星・探査機を表 4-2b に示す。ここで ISS の曝露部搭載の天文・宇宙物理ミッションも、同等に評価すべき性能を有するため、表 4-2b の中に含めた。また、国際共同ミッションに関しては、その主担当国に割り付けることにした。これらのミッションに対して、表 4-2a の評価を行い、その合計点に基づいて、各国の天文・宇宙物理観測分野の評価結果を行った。その結果を表 4-2c に示す。

表 4-2a 天文・宇宙物理観測分野の主な観測能力の配点

観測手法項目(乗算因子、全カテゴリー共通)						
軌道	1.2:L2 ハロー, 1.1:太陽周回, 1.0:地球周回					
観測モード	1.1:サーベイ, 1.0:指向・モニター					
基本性能評価項目(平均化)						
能力	γ 線	X線	紫外線	可視光	赤外線	電波(CMB)
空間分解能	3:<360" 2:<3600 1:≥3600	3:<5" 2:<30 1:<180 0:≥180	3:<1" 2:<10 1:>10	3:<0.05" 2:<0.2" 1:>0.2"	(#)	3:<360" 2:<3600 1:≥3600
望遠鏡口径					3:>100 cm 2:>50 cm 1:<50 cm	
有効集光面積	3:≥1000cm ² 2:≥100 1:<100	(結像系) 3:≥1000cm ² 2:≥100 1:<100 (非結像) 3:≥10000 2:≥1000 1:<1000	3.0:>100cm ² 2.0:>10 1.0:<10			
観測帯域		3:≥50keV 2:≥3keV 1:<3keV			3:>200um 2:>22um 1:<22um	3:≥10 バンド 2:>5 1:<5
分光性能 ($\lambda/\Delta\lambda$)	3:≥100 2:≥10 1:<10	3:≥100 2:≥10 1:<10	3:≥10000 2:≥1000 1:<1000	3:≥10000 2:≥1000 1:<1000	3:10000 2:1000 1:100	
その他					(主鏡温度) 3:<6K 2:<10K 1:>20K	(同時観測方向数) 3:>100 2:>10 1:<10

(#) 赤外線観測の空間分解能は波長と望遠鏡口径に依存するため、空間分解能の代わりに望遠鏡口径を評価項目とした。

表 4-2b: 各国の天文・宇宙物理学観測衛星（2000年以降に観測を実施したもの）

評価項目	米国	欧州	日本	ロシア	インド
電波 CMB	COBE, WMAP	Planck			
電波 VLBI			はるか	Specktr-R	
赤外線観測	Spitzer, WISE	ISO, Herschel	あかり		
可視	HST				
位置天文		GAIA			
系外惑星	Kepler	COROT			
紫外線観測	EUVE、FUSE、 GALEX		ひさき		
X線観測 (<1MeV)	RXTE、 Chandra、 SWIFT、 Nu-Star	BeppoSax、 XMM-Newton、 INTEGRAL	あすか、 すざく MAXI/ISS、		AstroSat
ガンマ線観測 (>1MeV)	Fermi	AGILE			
宇宙線 電子成分	AMS/ISS	PAMELA	CALET/ISS		

表 4-2c: 天文・宇宙物理学観測分野の評価

カテゴリー	米国	欧州	ロシア	日本	インド
電波 CMB	3.08	2.48	0	0	0
電波 VLBI	0	0	0.50	1.00	0
赤外線観測	3.58	5.45	0	2.20	0
可視	3	0	0	0	0
位置天文	0	3.30	0	0	0
系外惑星	1.21	1.10	0	0	0
紫外線観測	5.13	0	0	1.00	0
X線観測 (<1MeV)	7.75	6.00	0	7.75	2.00
ガンマ線観測 (>1MeV)	2.57	1.83	0	0	0
宇宙線電子成分	2.00	1.50	0	2.00	0
合計	28.32	21.66	0.50	13.95	2.00
評価	20	15.5	0.5	10	1.5

(合計 20 点満点。米国を 20 点とし、0.5 点単位で換算)

中国とカナダは対象衛星がないため 0 点。

(3) 地球周辺空間観測・太陽風・太陽観測

地球周辺空間観測・太陽風・太陽観測についても、乗算因子と加算項を観測方法、性能項目毎に表 4-3a のように定義し、式(1)に従って評価することにした。この評価の対象とした衛星・探査機を表 4-3b に示し、表 4-3c に評価結果をまとめた。

表 4-3a 地球周辺空間観測・太陽風・太陽観測分野の観測能力の配点

観測手法項目(乗算因子、全カテゴリー共通)					
軌道	1.2: 特殊軌道, 1.0: 地球周回/L1				
基本性能評価項目(平均化)					
プラズマ計測	エネルギー範囲	エネルギー分解能	時間分解能	イオン種分解能	多地点同時
	3: eV-GeV 2: eV-100MeV 1: より狭い	3: <10% 2: < 20% 1: ≥20%	3: < 0,1 s 2: <1 1: <10 0: ≥10	3: m/dm≥10 2: ≥1 1: <1 0: 0	4: ≥4" 3: 3 2: 2 1: 1
磁場計測	磁場分解能	時間分解能			
	3: ≥20bit 2: <20bit, & <10 pT 1: <20bit & ≥10 pT	3: ≥128 S/s 2: ≥16 S/s, 1: <16 S/s			
太陽観測	波長範囲	空間分解能	波長分解能		
	3: 赤外, 可視, 紫外, X, ガンマ 全て 2: 上記中 3 1: 上記中 2 以下	3: <1" 2: < 2 1: ≥2	3: ≥1000 2: ≥100 1: <100		

表 4-3b 各国の地球周辺空間観測・太陽風・太陽観測衛星・探査機
(2000年以降観測実施)

評価項目	米国	欧州	ロシア	日本	中国
宇宙空間 プラズマ	THEMIS、 Van Allen Probe、 MMS	Cluster		Geotail、 あけぼの、 れいめい、 かぐや	Double Star (双星)
太陽風	Ulysses、 WIND、 ACE、 Genesis、 DSCOVR	SOHO			
太陽	STEREO、 SDO		Koronas-F、 Koronas-Foton	ひので	

表 4-3c 各国の地球周辺空間観測・太陽風・太陽観測観測分野の評価

カテゴリー	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙空間プラズマ	7.43	2.29	0	1.86	2.00	0	0
太陽風	9.03	1.29	0	0	0	0	0
太陽	3.53	0	4.00	2.67	0	0	0
合計	19.99	3.57	4.00	4.52	2.00	0	0
評価	20	3.5	4	4.5	2	0	0

(合計 20 点満点、0.5 点単位)

地球周辺空間観測分野の評価結果を表 4-3c に示す。評価にあたっては、開発中を 1 点、小型衛星を 2 点、中型衛星を 3 点、大型衛星を 5 点とした。大型衛星、中型衛星、小型衛星の区別についてはそれぞれおおむね 3000kg 超級、500-3000kg 級、500kg 以下級とした。また、国際共同ミッションの技術到達点に関しては基本的には主担当国のみ割り付けた。

(4) 宇宙科学分野のまとめ

3つの分野のまとめとその合計、それに基づく宇宙科学全体の評価を表4-4（p62の表4と同じ）に示す。3つの分野毎の最高点が、それぞれの重みを表しているが、それは評価の対象となる衛星・探査機数の比に近いものになっている。

表4-4 宇宙科学分野の評価(2015年版)

評価項目	最高点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
太陽系探査	20	19.5	9	9	7.5	4	4	0
天文・宇宙物理	20	20	15.5	0.5	10	0	1.5	0
地球周辺・太陽	20	20	3.5	4	4.5	2	0	0
合計	60	59.5	28	13.5	22	6	5.5	0
総合評価	20	20	9.5	4.5	7.5	2	2	0

(合計60点満点 ⇒ 総合評価20点満点に換算、0.5点単位)

5. 有人宇宙活動分野

近年の有人宇宙活動は、国際宇宙ステーション（「ISS」）での長期宇宙滞在を中心として行われている。2015年版の評価では、今後の月・小惑星探査を見据えた長期有人宇宙滞在に関する技術力の比重を大きくした。有人宇宙活動分野の評価結果を表5に示す。

前回の結果（参考5）と比較すると、大きな順位変動はないものの、40年以上前のアポロ計画の実績を有する米国と「ISS」への有人輸送を担っているロシアの差が縮まっている。中国・日本・欧州ともに評価点数が増加したが、有人宇宙船の運用実績を持つ中国が3位を維持しており、今後、中国の宇宙ステーションの建設が開始されると日欧との差が広がるものと予想される。「きぼう」日本実験棟には独自のロボットアームとエアロックを設置しており、ロボットアームを活用した船外利用ミッションが増加していることから、わが国の技術力を欧州より高く評価した。インドは小型の回収型衛星の実績を有する点を評価したため、評価点数が増加した。カナダについては前回評価からの見直しはほとんどない。

表5 有人宇宙活動分野 評価結果

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 運用技術	8	7	0	7	0	4	0	0
宇宙飛行士 運用技術	10	10	7	10	7	7	2	4
長期有人 宇宙滞在技術	14	14	7	12	9	9	1	2
宇宙環境利用 実験技術	4	4	4	4	4	2	2	2
有人宇宙探査技術	4	3	2	1	1	1	1	0
合 計	40	38	20	34	21	23	6	8
総合評価	20	19	10	17	10.5	11.5	3	4

（合計40点満点 ⇒ 総合評価20点満点に換算、0.5点単位）

参考5 前回の結果（2013年版）

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船と運用 管制技術	15	15	4	13	4	11	0	0
有人宇宙滞在技術	14	14	11	14	10	11	1	3
有人宇宙活動支援 技術	6	5	2	3	3	3	0	3
宇宙環境利用技術	6	6	5	6	5	0	0	2
有人宇宙探査技術	12	12	1	3	1	1	1	1
合計	53	52	23	39	23	26	2	9
総合評価		20	9	15	9	10	1	3

（合計 53 点満点 ⇒ 評価 20 点満点に換算、1 点単位）

出典：「G-TeC 世界の宇宙技術力比較」（平成 26 年 3 月）

◎有人宇宙活動に関する各国の概況

2015 年 11 月 2 日、「ISS」における宇宙飛行士の長期滞在は 15 年を経過した。これまでに「ISS」を訪問した宇宙飛行士は 18 カ国から 221 人を超え、1760 件を超える実験が行われた。「ISS」は国際協力と平和の象徴であり、異なる経歴や文化を持つ各国の宇宙飛行士や地上のスタッフが互いに尊重しあい、協力しながら運用されている。

この 2 年間の有人関係の活動実績を参考 5-1 にまとめた。

参考 5-1 2014-2015 年の有人関係の活動実績

	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船飛行実績	0 回	0 回	8 回	0 回	0 回	0 回	0 回
宇宙飛行士飛行人数	9 人	4 人	14 人	2 人	0 人	0 人	0 人
宇宙滞在日数	1,341 日	391 日	2,035 日	274 日	0 日	0 日	0 日
物資補給実績	7 回成功 2 回失敗	1 回 成功	8 回成功 1 回失敗	1 回 成功	0 回	0 回	0 回

「ISS」への搭乗員輸送は、ロシアの有人宇宙船「ソユーズ」が一手に引き受けており、年間 4 機の頻度で宇宙飛行士を輸送している。米国は、民間企業による商業乗員輸送開発を進めており、段階的に候補を絞り込み、現在はボーイング社の「CST-100」とスペース X 社の「ドラゴン V2」の 2 つが 2017 年の打上げを目指している。

「ISS」への物資輸送船は欧州宇宙機関の「ATV」の運用が 5 号機で終了し、ロシアの「プログレス」、米国の「ドラゴン」「シグナス」、そしてわが国の「こうのとり」が運用中であ

る。「このとり」は、他の輸送船では運べない大型の装置の輸送を行い、これまでの補給ミッションを全て成功させていることから、国際的に高い評価を得ている。2014年から2015年にかけては、他の輸送機が立て続けに物資輸送に失敗する中、「このとり5号機」は2015年8月に打ち上げられ、「ISS」に長期滞在中の油井宇宙飛行士がキャプチャーし、「ISS」運用に重要な物資の輸送に成功した。

中国は、宇宙ステーション「天宮」の構築に向けて、有人宇宙船「神舟」と物資輸送船「天舟」及び実験モジュール「天和」「問天」「巡天」の打上げを行っていく計画である。

◎評価項目及び評価基準の見直し

現在の有人宇宙活動が地球周回低軌道での長期滞在を中心として行われ、将来的には月・小惑星探査を経て火星探査に向かうことに鑑み、評価方法と評価基準の見直しを行った。具体的には、「有人宇宙船運用技術」と「宇宙飛行士運用技術」を区別し、「有人宇宙滞在技術」を「長期有人宇宙滞在技術」に変更した。また、「宇宙環境利用実験技術」は「実験装置開発技術」と「宇宙環境利用実験実績」の2つで構成し、「有人宇宙探査技術」は「月・小惑星探査技術」と「火星探査技術」の2つで構成することとした。評価基準については、今後10年間使い続けることを想定して見直しを行った。

◎今後の展望

ESAを除く「ISS」加盟国は、「ISS」の運用を2024年まで延長することを決定し、残るESAも2016年の閣僚級理事会にて決定される見通し。中国は、2018年以降に新たな宇宙ステーション「天宮」の建設を開始し、2022年の完成を目指している。

国際宇宙探査については、2014年1月に米国で35ヶ国・地域・機関から関係閣僚や宇宙機関長等が国際宇宙探査フォーラム（ISEF）に集い、国際宇宙探査の意義、重要性等に関する議論が行われた。宇宙探査における途上国の初参加を受けて、持続可能な開発を推進する宇宙活動の価値が認識され、「ISS」のようなプロジェクトの経験を踏まえつつ、将来の宇宙探査協力に関する国際的な枠組みや共通の原則について議論することの必要性が確認された。2017年には第2回ISEFがわが国で開催される予定である。

◎新興国の動向

アラブ首長国連邦（UAE）は2015年に宇宙機関UAESAを発足させ、国際協力を通じて火星探査まで視野に入れた有人宇宙活動に参加する意欲を見せている。

（1） 有人宇宙船運用技術

有人宇宙活動を行う上で欠かせない有人宇宙船の技術力の比較は、有人宇宙船の飛行実績と飛行回数の2項目で評価する。2015年時点で、有人宇宙船の飛行実績のある国は、ロシア・米国・中国の3カ国のみであり、宇宙船の種類も少なく、それぞれの技術を細かく比較する段階ではないため、実績のみで定量的な比較を行うこととした。

①有人宇宙船技術

1961年に旧ソ連が世界初の有人宇宙船を飛行させてから54年が経過したが、有人宇宙船の飛行実績のある国は、ごくわずかである。また、アポロ計画で米国は人類を月面に送り込むことに成功したが、1972年を最後に月面に有人宇宙船が向かうことはなかった。一方、今後10年以内に人類が火星に到達する可能性は限りなく低いと予測する。そのため、有人宇宙船の飛行実績がある場合を3点、有人宇宙船の試験飛行実績がある場合を1点、実績なしの場合を0点とした。また、有人月飛行実績ありの場合、1点加点とした。

米国は有人月飛行の実績を有する唯一の国で、4点となった。ロシア、中国は、有人宇宙船の地球周回軌道飛行実績を有するため3点となる。その他の国は、有人宇宙船の試験飛行実績もないため、0点とした。

②有人宇宙船飛行回数

有人宇宙船は、高度なシステム技術を必要とする。また、他の宇宙機と異なり、人が搭乗するために安全に対する要求も大きく異なっている。有人宇宙船を定期的に飛行させ続けるためには、それ相応の技術力がなければ出来ないことであり、人命にかかわる事故が起きた後に飛行を再開させることは容易ではない。そのため、飛行実績の有無に加え、飛行回数に対して配点を行い、直近10年間(2006年～2015年)の飛行回数が30回以上を3点、15～29回を2点、1～14回を1点、0回を0点とした。また、累積100回以上の実績については1点加点とした。

ロシアは直近10年間で有人宇宙船「ソユーズ」を34回飛行させており、累積で100回以上の実績を有するため4点とした。米国は直近10年間で「スペースシャトル」を21回飛行させており、累積で100回を超える実績を有するため3点とした。中国は直近10年間で「神舟」を3回飛行させており、累積で5回の実績を有するため1点とした。その他の国は0回のため、0点とした。

③有人宇宙船運用技術のまとめ

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

表 5-1 有人宇宙船運用技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船技術	4	4	0	3	0	3	0	0
有人宇宙船飛行回数	4	3	0	4	0	1	0	0
評 価		7	0	7	0	4	0	0

(8点満点)

（２） 宇宙飛行士運用技術

「ミール」や「ISS」などの宇宙ステーションの運用が行われてから、自国で有人宇宙船を所有していない国でも宇宙飛行士の養成や訓練が行われ、有人宇宙活動が行われるようになった。そのため、宇宙飛行士の訓練施設または訓練技術の有無を、その国の有人宇宙技術力を評価する指標の一つとした。また、宇宙飛行士の飛行実績は、有人宇宙船の飛行実績と同様に有人宇宙活動の技術力を比較する指標となるため、宇宙飛行を経験した宇宙飛行士の人数と累積滞在日数を指標とした。さらに、船外活動は有人宇宙活動の幅を広げるものであり、将来の有人宇宙探査に繋がる技術として指標の一つとした。

①宇宙飛行士訓練技術

宇宙飛行士の訓練施設または訓練技術がある場合は1点、ない場合0点とした。米国、ロシアは、50年以上前から宇宙飛行士の養成を行っており、現在でも他国の宇宙飛行士を訓練するだけの施設と技術を有しているため1点とした。中国は、ロシアの技術を導入しているものの、中国単独での有人宇宙飛行を行っている実績から1点とした。日本と欧州は、「ISS」に実験モジュールを提供しており、それぞれの実験モジュールの訓練施設等を有し、他国の宇宙飛行士の訓練も行っているため1点とした。なお、欧州では洞窟を使ったチームビルディングの訓練も行っている。カナダは「ISS」にロボットアームを提供しており、実験運用のためのロボットアームの訓練装置を有するが、（３）長期有人宇宙滞在技術の一項目であるロボティクス技術として評価することとした。宇宙飛行士の訓練は、NASAに依存しているため、0点とした。インドは訓練施設も訓練技術もないため、0点とした。

②宇宙飛行士飛行人数

1961年にソ連のユーリ・ガガーリンが人類初の宇宙飛行を行ってから50年を超えたが、その間に宇宙飛行を経験した人数は500人を超えたに過ぎない。近い将来、サブオービタルでの宇宙旅行により、短時間宇宙飛行を経験する人は飛躍的に増えると予測される。一方、地球周回飛行の実績は、緩やかな増加が予測されるため、地球周回飛行を経験した宇宙飛行士の人数が100人以上の場合4点、50～99人の場合3点、10～49人の場合2点、1～9人の場合1点、0人の場合0点とした。

米国は334人、ロシアは旧ソ連時代も含めて119人のため4点とした。欧州は46人、日本と中国はともに10人のため、2点とした。カナダは9人、インドは1人のため1点とした。

③累積宇宙滞在日数

2015年に行われた有人宇宙活動は全てISSミッションであり、2000年に「ISS」での長期滞在が開始されてから、15年の年月が経過した。宇宙飛行士の滞在日数が10,000日を超

えるロシアと米国は別格として、宇宙飛行士の累積滞在日数が 1,000 日以上の場合を十分な実績と有人宇宙活動技術を有すると判断して 3 点満点、100～999 日の場合 2 点、1～99 日の場合 1 点、1 日未満の場合 0 点とした。

米国は、17,000 日超のため 3 点とした。ロシアも 17,000 日超で 3 点とし、ソ連時代の 8000 日超も加えると 25,000 日超となる。欧州は、ドイツの 659 日を筆頭にイタリアの 627 日、フランスの 432 日等を合算し、2,300 日超となるため、3 点とした。わが国は、2015 年に油井宇宙飛行士の ISS 長期滞在中に 1,000 日を超え、1071 日のため、3 点とした。カナダは、506 日のため 2 点とし、中国も 100 日と 19 時間のため、2 点とした。インドは 7 日のため、1 点とした。

④宇宙飛行士船外活動

2015 年末までに 213 人の宇宙飛行士が合計 717 回の船外活動を行っている。宇宙飛行士の船外活動実績がある場合 1 点、ない場合 0 点とした。また、宇宙服の開発実績がある場合、1 点加点とした。

米国は 421 回の船外活動実績を有し、宇宙服の実績もあるため 2 点、ロシアはソ連時代も含めて 262 回の船外活動実績を有し、宇宙服の実績もあるため 2 点とした。中国は 1 回の船外活動で 2 名の宇宙飛行士が船外活動を行い、そのうち 1 名はロシア製の宇宙服を着用していたが、もう一人は中国製の宇宙服を着用していたため 2 点とした。欧州は、フランス・ドイツ・スウェーデンがそれぞれ 5 回、イタリアが 2 回、スイスが 1 回で計 18 回の実績を有するため 1 点とした。わが国は 8 回の実績を有するため 1 点、カナダは 6 回のため 1 点とした。インドは 0 回のため 0 点とした。

⑤宇宙飛行士運用技術のまとめ

以上の個々の評価結果に基づき、宇宙飛行士運用技術の評価した結果を表 5-2 に示す。

表 5-2 宇宙飛行士運用技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙飛行士訓練技術	1	1	1	1	1	1	0	0
宇宙飛行士飛行人数	4	4	2	4	2	2	1	1
累積宇宙滞在日数	3	3	3	3	3	2	1	2
宇宙飛行士船外活動	2	2	1	2	1	2	0	1
評 価		10	7	10	7	7	2	4

(10 点満点)

（3） 長期有人宇宙滞在技術

長期運用可能な有人宇宙施設を実現する技術の獲得状況を、システム統合技術、有人モジュール技術、生命・環境維持技術、衛生・健康管理、物資補給技術、物資回収技術、ロボティクス技術の観点で、これまでの宇宙機飛行実績と使用されている技術で評価を行った。

①システム統合技術

システム統合技術とは、有人宇宙施設に必要な技術を統合し、一つのシステムとして機能させるための技術で、他国の協力なしに有人宇宙滞在施設の運用実績を有する国は、自ずとその技術を有すると判断し 2 点とした。単独での運用実績はないものの他国の技術・リソースを使つての運用実績がある場合は 1 点とした。

米国、ロシア、中国は、独自の有人宇宙滞在施設の運用実績を有するため 2 点とした。欧州と日本は、「ISS」計画で米国モジュールから電力等のリソース提供を受けて「コロンバス」と「きぼう」のモジュールを運用しているため 1 点とした。

②有人モジュール技術

長期飛行実績があり十分な技術を有すると判断できる場合 2 点とし、飛行実績はあるが期間が短い場合や技術レベルに不足がある場合は 1 点とした。

米国、欧州、ロシア、日本は「ISS」に有人モジュールを提供し長期の運用を行っている。米国、ロシアは「ISS」のバス部の主要機能を担当し、かつ、有人モジュールの運用実績が 10 年を超えており（「ユニティ」、「ザーリャ」が 1998 年打上げ）2 点とした。一方、欧州、日本はモジュールの運用実績が 8 年前後（「コロンバス」、「きぼう」日本実験棟が 2008 年打上げ）と長期であるが、主要機能を「ISS」本体に依存しておりドッキング／バーシングポートやハッチといった主要機能品も他国開発品を使用している状況もあるため 1 点とした。中国は 2011 年に「天宮 1 号」を打ち上げた。「天宮 1 号」の有人モジュールとして使用された最新時点は 2013 年の「神舟 10 号」とのドッキング時で、打上げ後 2 年程度と運用実績としてはまだ長期ではないが、有人モジュールに関する技術を独自で有していると推測されるため 1 点とした。

③生命・環境維持技術

生命・環境維持装置の飛行実績がありかつ再生型の生命・環境維持技術の有人プログラムへの適用実績がある場合 2 点、使い捨て型技術の実績がある場合を 1 点とした。

米国とロシアは「ISS」の環境制御系で水の再生利用技術を実現しており、呼気中の二酸化炭素から吸気用酸素を再生する技術についても完全循環ではないものの再生型を導入しており 2 点とした。欧州、日本は「ISS」に有人モジュールを有しており、その環境制御系は長期の飛行実績を継続しているが、空気循環および部分的な熱制御等の限定された範囲

の使い捨て型技術であるため1点とした。中国の「天宮1号」や「神舟」の生命・環境維持技術は使い捨て型技術を使用していると考えられる。情報が乏しく正確な評価が難しいが、独自技術を開発しているものと推測されるため1点とした。

④衛生・健康管理技術

衛生・環境維持管理には食事、トイレ、細菌・毒物の管理や飛行中前後の宇宙飛行士に対する健康管理や軌道上医療技術を含む。米国とロシアは、十分な実績があるとして2点。欧州と日本は、食事や宇宙飛行士に対する健康管理に対する十分な実績はあるもののトイレ、ギャレー等のフライトハードウェア実績を保有していないため1点とした。中国は短期ミッションでの実績はあるものの長期間の有人宇宙滞在の実績はないため1点とした。

⑤物資補給技術

継続的に長期の有人宇宙活動を行うために必要となる物資補給に関し、地上から有人滞在施設までの貨物輸送機を開発し飛行させた実績を評価した。

「ISS」及び各国の有人滞在施設への補給実績がある米国（「スペースシャトル」、「ドラゴン」、「シグナス」）、欧州（「ATV」）、ロシア（「ソユーズ」、「プログレス」）、日本（「こうのとり」）、中国（「神舟」）が2点となる。

⑥資源回収技術

実験試料や交換機器を回収する技術に関し、宇宙からの物資回収実績がある場合2点、実績ないし技術レベルが不十分な場合1点と評価した。

米国、ロシア、中国は物資回収の実績があり技術力を有していると考えられるため2点とした。その他の帰還飛行の実績がある国として、欧州、日本、インドがあり、実績・技術レベルには以下の通り差異はあるものの、いずれも1点とした。欧州はロゼッタで予定されているサンプルリターンが完了していないが、「Atmospheric Reentry Demonstrator(ARD)」や「Intermediate eXperimental Vehicle(IXV)」による揚力誘導制御の実績等がある。日本は、「はやぶさ」によるサンプルリターンや各種試験機の帰還実績はあるものの弾道飛行によるものであり生物試料回収等の用途に対して技術的に十分とは言えない。インドは弾道飛行による実証飛行の実績があるのみ。

⑦ロボティクス技術

長期の飛行実績がある場合2点、飛行実績が短いし技術レベルに不足がある場合は1点とした。

ロボティクス技術についても長期飛行実績の点では、「ISS」の運用実績が評価対象となる。カナダは「ISS」の支援ロボットアームとして「Canadarm2」と「Dexter」を提供しており。「Canadarm2」は15年近く良好に運用されており2点とした。わが国も、「ISS」

の「きぼう」日本実験棟に設置されたロボットアームが 8 年弱の長期に亘り運用されているので 2 点とした。米国は「ISS」にロボットアームを持っていないが、「Mobile Base System」やその他機構系の長期実績がある、火星探査機「Curiosity」のロボットアーム飛行実績、人型ロボット「Robonaut」の研究開発等もあり技術力を有していると推測し 2 点とした。その他、研究開発を進めていると考えられる国として、「European Robot Arm(ERA)」の欧州、人型ロボット「SAR-401」のロシア、人型ロボットや宇宙用アームを公開している中国があるが、飛行実績が確認されないため 0 点とした。

⑧長期有人宇宙滞在技術のまとめ

以上の個々の評価結果に基づき、長期有人宇宙滞在技術を評価した結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 長期有人宇宙滞在技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
システム統合技術	2	2	1	2	1	2	0	0
有人モジュール技術	2	2	1	2	1	1	0	0
生命・環境維持技術	2	2	1	2	1	1	0	0
衛生・健康管理技術	2	2	1	2	1	1	0	0
物資補給技術	2	2	2	2	2	2	0	0
物資回収技術	2	2	1	2	1	2	1	0
ロボティクス技術	2	2	0	0	2	0	0	2
評 価		14	7	12	9	9	1	2

(14 点満点)

（４） 宇宙環境利用実験技術

宇宙環境利用は有人宇宙活動の1つの大きな目的である。このため、有人宇宙活動分野の中でその技術レベルを比較評価する。前回までは、宇宙医学実験、ライフサイエンス実験、微小重力科学実験と実験の目的による分類で技術レベルの評価を行っていたが、実験目的は今後、変わっていく可能性もあるため、今回は実験目的によらず、実験実績と、実験装置の開発技術というハードウェア技術的側面で評価することとした。

なお、「宇宙環境利用実験実績」「実験装置開発技術」とも、実績ありを2点、実績なしを0点とした。

なお、部分的な技術実績のみで、他国と比較して明らかに実績の差が大きい場合は1点減点とした。

①宇宙環境利用実験実績

旧ソ連と米国は、古くは1970年代の「サリュート1号」、「スカイラブ」の有人宇宙船から現在の国際宇宙ステーションに至るまで宇宙環境利用実験を実施しているため、2点とした。また、欧州、日本も1990年代前半の「ユーレカ」や「FMPT」以降、継続的に宇宙環境利用実験を実施しており、2点とした。カナダも米国の「スペースシャトル」の利用や「ISS」の参加国として宇宙ステーションでの実験を実施しているが、米欧露日に比較して実績は少ないとして、1点とした。中国は、2000年前後から「神舟」を用いた宇宙環境実験を開始しているが、実績は多くなく1点とした。インドも2007年、2014年にそれぞれ小型の回収型衛星を打上げ、宇宙環境利用実験を実施しているが、実績は少ないため1点とした。

②実験装置開発技術

宇宙環境利用実験の実績がある国は、基本的に自国で実験装置も開発している。また、実績が多い国では、ライフサイエンスや材料等、広い分野の実験装置を開発している。このため、実験装置開発技術は、米欧露日を2点、中国、インド、カナダを1点とした。なお、インドの回収型衛星2号機には、日本のライフサイエンス実験装置が、また、中国の神舟8号には中国とドイツのライフサイエンス実験装置が搭載されている。

③宇宙環境利用実験技術のまとめ

以上の個々の評価結果に基づき、宇宙環境利用実験技術を評価した結果を表 5-4 に示す。

表 5-4 宇宙環境利用実験技術の評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
宇宙環境利用 実験実績	2	2	2	2	2	1	1	1
実験装置開発技術	2	2	2	2	2	1	1	1
評 価		4	4	4	4	2	2	2

(4点満点)

（５） 有人宇宙探査技術

①月・小惑星探査技術

月または小惑星の有人宇宙探査の実績ありを 2 点、有人宇宙探査計画に繋がる無人機の実績ありを 1 点、実績なしを 0 点とした。

カルマン境界（高度 100 km）を超える有人宇宙飛行の実績は、米国、ロシア、中国しか有していない（宇宙飛行士の国籍ではなく、実施した国家）。このうちロシア、中国は宇宙ステーションにおける活動に留まり、月の有人探査の実績は米国のみが有している。

月または小惑星の有人宇宙探査計画に繋がる無人機の実績としては、わが国は月への衝突を行った「ひてん」および「おきな」、月の観測を行った「かぐや」と小惑星イトカワからのサンプルリターンを行った「はやぶさ」を有しており、「はやぶさ」後継の「はやぶさ 2 号」を 2014 年に打ち上げ、2010 年に打ち上げられた金星探査衛星「あかつき」の金星周回軌道への再投入に 2015 年に成功した。豊富な無人機及び月面軟着陸の実績を有する米国、ロシアに加えて、欧州は月への衝突を行った「SMART-1」の実績を有する。中国は「嫦娥 3 号」により、世界で 3 番目に月面軟着陸に成功した。

②火星探査技術

火星の有人宇宙探査の実績ありを 2 点、有人宇宙探査計画に繋がる無人機の実績ありを 1 点、実績なしを 0 点とした。

わが国は、火星探査機「のぞみ」を 1998 年に打ち上げ、火星へ約 1,000 km まで接近したものの、最終的には火星周回軌道への投入を断念した。米国は、オバマ政権が 2030 年代半ばまでに火星有人探査を実現することを表明し、急速な技術開発を進めている。ロシアは、旧ソ連の時代から火星探査を行っているが、完全に成功した事例はない。欧州は、2003 年に「マーズ・エクスプレス」を打ち上げ、2004 年に打ち上げられた「ロゼッタ」が 2007 年に火星近傍を通過した。中国は、2011 年にロシアの火星探査機に萤火 1 号を搭載したが、ロシア探査機の火星遷移軌道投入失敗によってともに地上落下に終わった。インドが 2014 年に打ち上げた「マーズ・オービタ・ミッション」は、火星周回軌道への投入にアジアで初めて成功した。

③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 5-5 に示す。

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
月・小惑星探査技術	2	2	1	1	1	1	0	0
火星探査技術	2	1	1	0	0	0	1	0
評 価		3	2	1	1	1	1	0

(4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（p73 の表 5 と同じ）に示す。

表 5-6 有人宇宙活動分野の総合評価

評価項目	満点	米国	欧州	ロシア	日本	中国	インド	カナダ
有人宇宙船 運用技術	8	7	0	7	0	4	0	0
宇宙飛行士 運用技術	10	10	7	10	7	7	2	4
長期有人 宇宙滞在技術	14	14	7	12	9	9	1	2
宇宙環境利用 実験技術	4	4	4	4	4	2	2	2
有人宇宙探査技術	4	3	2	1	1	1	1	0
合計	40	38	20	34	21	23	6	8
総合評価		19	10	17	10.5	11.5	3	4

（合計 40 点満点 ⇒ 総合評価 20 点満点に換算、0.5 点単位）

別添：世界の宇宙技術力比較調査研究会 委員名簿

委員長	青江 茂	元文部科学省宇宙開発委員会委員長代理
委員長代理	小澤 秀司	元宇宙航空研究開発機構理事 オフィスK代表
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 システム技術グループ 主幹
委員	小川 俊明	日本電気株式会社 宇宙システム事業部 主席主幹
委員	木村 俊義	宇宙航空研究開発機構 研究開発部門 センサ研究グループ グループ長
委員	小暮 聡	宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門 衛星測位システム技術ユニット ミッションマネージャ
委員	阪本 成一	国立天文台 チリ観測所（三鷹） 教授
委員	高橋 伸宏	宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門 事業推進部
委員	西平慎太郎	宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門 H3プロジェクトチーム ファンクションマネージャ
委員	長谷川広樹	三菱電機株式会社 鎌倉製作所 技師長
委員	満田 和久	宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 研究総主幹 教授
委員	宮本 剛	三菱重工業株式会社 防衛・宇宙ドメイン 宇宙事業部 宇宙機器部 次長
委員	村上 淳	IHI エアロスペース株式会社 営業部 次長
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

協力

◎三井住友海上火災保険株式会社

航空運輸産業部 部長（航空宇宙業務担当） 御正 和伸

◎宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 齋藤義文，松岡彩子，横田勝一郎

CRDS-FY2016-CR-01

G-TeC報告書

世界の宇宙技術力比較(2015 年度)

各国の科学技術力についてのマクロ的な考察

平成 28 年 5 月

ISBN978-4-88890-514-5

国立研究開発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

〒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>

©2016 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 C CTAAC TCTAGACC

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 C CTAAC TCTAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

CTCGCC AATTAATA

TTAATC A AAGA C CTAAC TCTAGACC

AAT A TCTATAAGA CTCTAACT

ATTAATC A AAGA CCT

GA C CTAAC TCTAGACC

0011 1110 000

00 11 001010 1

0011 1110 000

0100 11100 11100 101010000111

001100 110010

0001 0011 11110 000101

ISBN978-4-88890-514-5

