

日本深空探测发展研究

摘要：本文总结了日本深空探测航天器的发展概况及取得成就；分析其独特的管理体制；重点介绍政策、战略和正在制定的路线图；根据已列入宇宙基本计划和正在研究的计划预测未来发展；最后得出几点启示。

日本在深空探测领域有较长发展历史，40 余年发射了近 30 颗此类卫星，取得了众多重要成果，尤其在空间物理学和小行星探测方面具有国际领先地位。日本根据自身特点与能力，正在制定具有日本特色的深空探测的长期战略与路线图，将未来探索目标定位于了解太阳系前生命环境的进化。目前日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)已确定的计划包括月球探测和水星探测，正在讨论的计划包括火星卫星采样返回计划、火星大气探测和火星着陆探测计划以及月背探测计划等。

一、管理体制

日本的深空探测项目研制由 JAXA 下属的宇宙科学研究所 (ISAS) 具体实施。隶属内阁府的航天开发战略本部领导制定宇宙基本计划，宇宙基本计划中包括深空探测等航天各领域未来的 10 年计划。

(一) 航天开发战略本部

2008 年颁布《宇宙基本法》后，日本成立了航天开发战略本部，内阁总理大臣兼任部长，其办事机构，或称航天开发司令部

参谋本部为隶属于内阁府的宇宙战略室。航天政策、开发应用计划均由最高决策者——兼任航天开发战略本部部长的内阁总理大臣及以他和航天主务大臣为首的航天开发战略本部决定，宇宙战略室负责航天计划、任务的协调、监督和落实，文部科学省负责研发管理，日本宇宙航空研究开发机构具体负责研发计划落实和技术实施。航天开发战略本部在宇宙政策委员会的协作下制定国家航天计划——《宇宙基本计划》，其中就包括深空探测相关的十年发展计划。

（二）宇宙科学研究所

日本自航天开发初期起就有专门负责空间科学相关项目的机构。目前，日本专门负责空间科学项目的组织是宇宙航空研究开发机构的下属部门——宇宙科学研究所。

宇宙科学研究所的最高负责人是所长。所长、副所长以下是研究主管、空间科学项目主任和技术主管。研究主管负责领导和空间科学相关的5个研究系。空间科学项目主任负责领导具体各空间科学项目组和项目相关处室。技术主管负责系统技术相关团队。宇宙科学研究所下设宇宙科学运营协议会，负责对所长的监督、建议以及研究人员的人事安排，此外还负责运营大学共同利用系统。

二、政策、战略及路线图

（一）近两次《宇宙基本计划》中对空间科学的阐述

《宇宙基本计划》是内阁府航天战略本部制定的国家级航天计划，是全面指导包括深空探测在内各航天领域未来发展的权威政策和计划。

2015年的《宇宙基本计划》将安全保障列为航天开发与应用的最重要目标。尽管如此，计划并没有削减深空探测计划，仍然继

承了以往对此领域的重视。该计划首次提出分类进行的计划，其中战略性中型计划未来 10 年将发射 3 颗卫星、两年 1 次的公开招标形式的小型计划发射 5 颗卫星，还将执行多种样式的小规模项目。《宇宙基本计划》还提出太阳系探测科学领域不仅要根据自下而上的讨论结果实施，为了更加有效和高效地进行无人探测还需要从学术大局的观点推动这些项目。

(二) 长期战略和路线图

根据实际情况，行星科学会为太阳系科学及行星探测制定了独特的长期战略目标：前生命环境的进化——解开生命圈的诞生延续条件之谜。日本认为，在未来 20 年内通过与地球生命圈进行对比，了解太阳系前生命环境的进化(CHASE - PBEE)——解开生命圈诞生和延续的条件之谜是合适的科学目标。虽然，“天体生物学”是世界的潮流，但日本倾向于研究整个太阳系从诞生到现在的前生命环境进化过程。实现 CHASE - PBEE 有以下 5 个途径：

途径 1——生命前驱物质的形成和进化：彗星，原始小行星，行星尘埃；

途径 2——生命前驱物质的分布和移动：月球，小行星，水星；

途径 3——地下热水环境：矿物—水—有机物反应：火星，冰卫星，原始小行星；

途径 4——大气逃逸·光化学反应：火星，金星，太阳系外行星(大气)；

途径 5——行星及卫星的形成和初期分化：月，水星，火星，分化小行星。

日本正在制定深空探测路线图，目前尚未完成。作为中、短期战略，宇宙开发政策委员会指出，最初 10 年内应以机动性较高的小型任务和中型任务为主，攻克工程难题，并寻找以日本为主

导的战略课题，为 10 年后大型计划做准备。根据最新的《宇宙基本计划》，这些任务的实施频度和资金投入如下：战略性中型计划(300 亿日元左右)10 年 3 次；小型计划(100 ~ 150 亿日元左右)2 年 1 次；小规模项目区(10 亿日元)1 年 1 次。

三、发展概括

日本至今进行过彗星探测、金星探测、火星探测、月球探测和小行星探测，在深空探测领域处于世界前列，也是目前唯一成功进行过小行星采样返回的国家。深空探测计划中金星、水星、彗星探测与小行星、月球探测都由一些独立的计划演变而来。

(一)“PLANET”计划(彗星、金星和火星探测)

东北大学在 1975 年的科学卫星研讨会上提出了《行星探测的意义及计划》：PLANET - A、B 计划，向金星发射小型轨道探测器，探测进行大气和太阳风。PLANET - C 计划是在 A、B 的基础上向火星发射小型火星轨道探测器，探测电离层和磁层。

20 世纪 70 年代末，由于哈雷彗星自 1910 年以来再次接近地球，全球掀起了哈雷彗星探测热潮。日本将 PLANET - A 计划改为向哈雷彗星发射两颗质量为 120 千克的探测卫星。两颗哈雷彗星探测卫星是“先驱”和“彗星”，分别于 1985 年 1 月和 1985 年 8 月发射。“先驱”作为“彗星”的试验卫星，先于后者 7 个月发射。“彗星”于 1986 年抵达距离彗星彗核最近的 14.5 万千米处，对其进行了拍摄。此后两次试图接近彗星，但由于都受到彗核飞来的固体物质撞击没有成功。

20 世纪 80 年代末，日本提出了金星和火星探测计划，将 PLANET - B 计划定为火星探测计划，就是后来的“希望”号火星探测器。“希望”号于 1998 年 7 月发射，采用一次月球借力飞行和一次地球借力飞行后再飞向火星。由于阻止燃料逆流的阀门问题，借力飞行没有达到预期速度，无法进入火星轨道，不得不再进行

两次地球借力飞行。计划外的两次地球借力飞行时间长达 5 年，这期间经历了十数年一遇的强烈太阳风暴，导致“希望”号通信功能几乎丧失。虽然通过特定通信方式确定“希望”号到达距火星表面 894 千米处，由于通信根本达不到传输观测数据的要求，本次任务没有取得任何火星相关数据。

2001 年，日本提出了世界首个“金星气象探测器”计划 (PLANET - C)。该星在 2010 年 5 月发射，命名为“拂晓”。“拂晓”在变轨过程中推力器发生故障，轨道投入暂告失败。2011 年 11 月通过 3 次变轨，使“拂晓”于 2015 年与金星再次接近。2016 年 4 月再次变轨，进入金星轨道。目前，“拂晓”正在对金星进行科学观测。

(二) 小行星探测计划

目前日本是世界上唯一成功进行过小行星采样返回的国家。首个小行星探测计划于 1996 年被当时的宇宙开发委员会正式立项为 MUSES - C 计划，决定对距地球 370 万千米以外的“糸川”小行星进行采样返回。MUSES - C 的设计、研制工作历时 7 年，2003 年 5 月 9 日用 M - V 火箭成功地将其发射入轨，并命名为“隼鸟”。2005 年 9 月“隼鸟”飞抵小行星“糸川”对其进行一系列的观测，获取了大量的观测数据。2005 年 11 月“隼鸟”完成着陆、取样，然后升轨，飞离“糸川”，返回地球。2010 年 6 月 13 日，经历了一系列故障后仍携带样品成功地返回地面，比原计划推迟了两年。期间经历了 3 个反作用飞轮中 2 个故障、化学推进系统燃料泄漏、锂离子蓄电池故障等一系列困难。

2006 年 11 月，日本敲定了“隼鸟”2 号的飞行计划。日本宇宙航空研究开发机构确定“隼鸟”2 号要对长度仅为 900 米，宽度尚不足 500 米的 C 型小行星 1999ju 小行星进行探测和取样。“隼鸟”2 号于 2014 年 12 月 3 日发射，2015 年 12 月 3 日进行了地球借力飞行，预计于 2018 年夏天达到 1999ju 小行星，将于 2020 年末回

到地球。

(三) 月球探测计划

日本至今进行过两次探月任务。第一次是以验证月球借力飞行技术为目的的“飞天”，于1990年1月24日发射。“飞天”所验证的月球借力飞行是在往返远地点和近地点间通过月球借力飞行不断变换轨道，叫作“双重月球借力飞行”，至今，这种复杂的借力飞行仅有日本做过。

第二次是“月女神”计划，由于与中国发射嫦娥一号月球探测器时期接近，备受关注。“月女神”由母卫星和两颗子卫星组成。“月女神”于2007年9月14日发射，10月4日进入绕月球运行轨道，11月19日，卫星进入距月球100千米的绕月稳态运行的对月观测轨道。“月女神”在轨道上主要进行了5项任务，包括地形地貌勘测、内部结构勘测、月球磁场及宇宙射线等月球环境勘测、测量重力场分布和从月球勘测地球。

四、未来计划

日本从2013年末开始研究制定科学卫星发展路线图，目前路线图尚未完成。作为中、短期战略，宇宙开发政策委员会指出，最初10年内应以机动性较高的小型任务和中型任务为主，攻克工程难题，并寻找以日本为主导的战略课题，为10年后大型计划做准备。根据最新的《宇宙基本计划》，这些任务的实施频度和资金投入如下：战略性中型计划(300亿日元左右)10年3次；小型计划(100~150亿日元左右)2年1次；小规模项目区(10亿日元)1年1次。

(一) 已确定的计划

2013年宇宙科学研究所首次向社会公开招标小型任务，共有以下几个课题参与申报。其中，“小型月球着陆器”(SLIM)计划已

经通过宇宙科学研究所的审查，并列入了最新的《宇宙基本计划》。水星探测计划是很早以前确定的任务。

1. 月球着陆探测

日本宇宙航空研究开发机构从 2016 年开始执行“小型月球着陆器”(SLIM)月球登陆卫星计划，将于 2018 年度发射“小型月球着陆器”。该计划的预算大约 0.84 ~ 1.26 亿美元，按分类属于小型计划。如该计划顺利实施，日本将成为继俄、美、中后第四个进行月面软着陆的国家。

“精确着陆技术”不同于以往的惯性导航技术，惯性导航的精度仅为公里级别，而“精确着陆技术”可把着陆精度控制在 100 米以内，简单说是验证“在想着陆的地点着陆”的技术。将降落于月表风暴海马利厄斯丘陵地带的垂直孔(Marius Hills Hole)附近。

2. 水星探测

日本与欧洲合作的 Bepi Colombo 水星探测计划于 2008 年启动，现已完成研制，正在系统联试，计划 2017 年初发射，是继 NASA“水手”10 号和“信使号”探测器后的又一项水星探测计划。

日、欧水星探测计划包括 2 颗探测器：一颗是 JAXA 负责开发，以观测水星磁场、磁层和大气等为主要目的的水星磁层探测器(MMO)；一颗是欧洲航天局(ESA)设计、研制，欧洲航天研究和技术中心(ESTEC)负责开发、以观测水星表面地形、精密计测水星上矿物质，搞清其化学成分、执行重力场测量等为主要目的的水星表面探测器(MPO)。

(二) 讨论中的计划

宇宙科学研究所于 2014 年 12 月首次向社会公开招标中型计划，共有以下几个计划参与申报。目前火星卫星采样返回计划已经通过初次审查，有望成为首个战略中型计划。

1. 火星卫星采样返回计划(2026 年前实现)

项目正在概念讨论阶段。2015 年后半年开始，宇宙科学研究

所的工学系和太阳系科学系的研究人员进行讨论。一些搭载科学仪器以火星着陆技术实证探查和小型 3 号机候补的名义进行研制和设计。

火星卫星探测是火星探测与小行星探测之间起到连接作用的任务，既是“隼鸟”系列任务的继承和发展，同时也是和火星着陆任务有紧密联系的火星周围探测。火卫一在国际上关注度比较高，已经有过数个探测计划。对火卫二的关注度较少，甚至没有进行过飞近探测，存在诸多未知。火星卫星未来有望作为载人探索的前哨基地和通信中继站，因此这个计划会收获宝贵的科学信息。目前火星卫星采样返回计划已经通过宇宙科学研究所的初次审查，有望成为首个中型计划。

2. 火星着陆地下水探测计划(2030 年前实现)

“好奇”号和 ExoMars 等大型探测器对火星 35 ~ 38 亿年前表层流水形成的层状堆积物进行了探测。目前没有对 38 亿年前活跃的地壳热水活动伴随的地下水探测计划，对于理解环境进化全貌的重要部分缺失。本计划将探测与地下水活动紧密相关的“露头”(地层、岩体、矿体、地下水等露出地面的部分)进行着陆探测，以了解初期火星对温室效应的抑制机理、地下水中的主要元素浓度、pH、溶存碳酸离子浓度等初期生命进化的三要素(能量、环境和物质进化)。

目前该计划属于概念讨论阶段，探测所需的激光励起分光分析装置由东京大学、立交大学和千叶大学联合研制，火星车的研制由火星着陆探测技术实证工作组研制。

3. 火星大气散逸探测计划(2024 年前实现)

该计划是“希望”号火星探测器的延续和发展，目的是探测火星二氧化碳和水的去向。通过对火星电磁层的近景拍摄和现场观测，完成从“统计拍摄”到“瞬时拍摄”的本质转变，对于过去大气散逸量的推定和表层环境变化的理解有重要意义。

该项目已经在宇宙力学委员会成立了以东北大学学者为主的“工作组”，于2013—2014年讨论了可以满足任务要求的探测器系统，目前正在讨论项目经费。主要观测仪器包括磁场计、电波计、等离子中子计、郎缪尔探针等。目前正在攻克近景相机对杂散光处理等关键技术。

4. 月球背面原始地壳采样返回计划(2030年前实现)

月球背面高地存在比正面更早的由岩浆海凝固形成的原始地壳，测定其详细的年代及主要微量元素组成就可以了解岩浆海固化的时间，有助于理解初期地壳形成的动态过程。通过比较月球高地原始地壳和“阿波罗”任务中带回的富含液层浓集元素的岩石，就可以了解地球的前生命环境中对生命诞生不可缺少的营养盐供给母体和前驱化学进化的相关信息。

目前该计划属于“JSPEC的后期月球探测计划”工作组负责。正在研究着陆器、月球脱离系统、返回舱等关键技术的实现可能性。未来将扩大研究队伍，形成学术研究组，研究更详细的计划。

五、启示

日本在预算和人员数量远少于欧美国家的情况下仍然在深空探测领域取得了不逊的成绩(日本对该领域的投入仅是欧洲航天局的1/4、美国国家航空航天局的1/10)，这与日本的组织管理体系、任务选取形式、大胆作风和积极的国际合作密切相关。这些经验对于在此领域快速发展的我国也有很高参考价值。

(一)“自下而上”的任务选取形式保证了学术独立性和公平性竞争

日本对深空探测任务有独特的“自下而上”的任务选取形式。大学和研究机构、甚至是独立学者在任何时候都可以根据自己的想法向空间理工学委员会提出设置“工作组”申请，这确保了任务

的独创性和研究者的独立性。这些想法经过空间理学委员会和工学委员会的严格审查和评定后会推荐给宇宙科学研究所进行最终决定。“工作组”的研究活动经费根据其提出的项目等级，由宇宙科学研究所提供相应资金和设施、设备支持，保证了工作组可以更大胆地实施自己的想法。整个过程灵活利用了研究人员的专长和跨领域知识，与任务取得最高的科学价值和独创的技术价值密不可分。

对“工作组”课题的评定由理学评价委员会或工学评价委员会各自进行评定后再综合判断，避免选取仅为突破技术难关而科学价值低的任务或科学价值很高但由于技术难度大风险过高的任务。同时，评价委员会的构成一半是宇宙科学研究所的专家，一半是外部聘请的专家，这也保证了评价和竞争的公平性。

(二) 路线图有助于空间科学及探测计划长期稳定发展

目前日本推进深空探测项目的体制是自下而上，虽然取得了一定的成绩，但是无论在科学目标和工程技术目标方面都缺乏系统性和连贯性。此领域想要达到高水平的科学目标，就必须跨越相应程度的技术难关，但是随着项目逐渐大型化和高成本化，在受限的财政预算下就无法保证实施频率。尤其是一些需要巨额资金的大型项目，如果没有长远规划和国家意志的支持，在财政支出日趋紧张的日本很难获得批准。因此日本认识到了路线图的重要性，正在抓紧制定。

路线图制定过程中，宇宙科学研究所邀请了众多科学群体（各研究领域的学会组织）参与进来，力争站在更高位置俯视整个空间科学，使路线图更加符合未来发展。当然，“自下而上”的任务选取形式依然有其优势，即使制定了路线图宇宙科学研究所仍然不会放弃以往的方式。未来将会在“自下而上”的基础上优先考虑符合路线图的项目，既有国家意志确保实现最终目标，又在任

务的选取上不失去独立性和竞争性。

(三) 深空探测方面参与国际合作一举三得

日本历来重视国际合作，尤其在深空探测的所有项目上都能看到国际合作的身影。在航天项目逐渐趋向高成本、高复杂度的今天，受到财政预算限制影响的日本航天更将国际合作视为航天政策的基本要素，2015年的《宇宙基本计划》指出“要在所有航天项目上考虑国际合作”。

在空间物理学等几个日本领先领域的国际合作中，日本力争起到主导作用，以提高国际影响力，在欧美主导的项目中，日本也尽量提供人力和技术支援，争取在科研中占据一席之地。日本为合作伙伴提供科研机会，扩大科学成果。比如与天文卫星项目上，日本按研制卫星的贡献比例为合作伙伴提供观测时间；日本还通过公开国际竞争申请的方式提供“隼鸟”带回的小行星样本。此外，日本还把国际合作视为重要的外交的手段，专门在外务省下设立了推动航天部门，以推动日本的航天外交。可以说，日本广泛的国际合作抵消了其拥有较少航天人才和航天预算无法大幅增加导致的负面影响。积极的国际合作在扩大科学成果、提高国际影响力和降低任务成本方面一举三得。

(北京空间科技信息研究所)