

次世代赤外線天文衛星
SPICA
ミッション提案書

Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics

次期赤外線天文衛星ワーキンググループ

2005年3月

はじめに

銀河の誕生と進化、星・惑星系の誕生と進化、物質の進化の研究を通して、宇宙史を解明することを目指して、次世代赤外線天文衛星 SPICA (Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics) を提案する。SPICA は、ASTRO-F によるサーベイ観測の成果を基礎に、天文学における重要課題の解明を目指すミッションである。

SPICA には、口径 3.5m 大型望遠鏡を、絶対温度 4.5K に冷却して搭載する。これにより、今までにない高感度でかつ高空間分解能の観測を可能にしようとしている。このような大型冷却望遠鏡の搭載を可能にするために、望遠鏡を常温で打ち上げ、軌道上で冷却する Warm Launch 方式を SPICA では採用する。

SPICA を実現するための基礎技術 (冷凍機、大型軽量望遠鏡など) の開発にワーキンググループとして精力的にとりくみ、ミッションが技術的に充分に実現可能であることを示してきた。

SPICA は、従来の科学衛星よりも大きな規模のミッションである。このような規模のミッションを確実に実現していくためには、プロジェクト開始前に、系統的な技術検討と、高い技術成熟度が要求される。そこで、SPICA では、従来の科学衛星の提案書のように、いきなり PM フェーズの開始を提案するものではなく、まず

フェーズ A を開始し、その中で系統的な技術検討と、技術成熟度の向上を目指す

ことを提案する。そのために、本提案書では、最重要技術項目の洗い出しと、フェーズ A で行なうべき開発内容の明確化を行なっている。

フェーズ A 終了時に、獲得目標の達成度を確認し、その上でシステム設計・開発方針ならびにそのプロセスの妥当性について検証を行ない、次のステップにプロジェクトを進めるかどうかを判断する。

目次

はじめに	i
目次	iii
第1章 ミッション概要	1
1.1 宇宙の進化: ビッグバンから生命まで	1
1.2 ASTRO-F への期待とその発展	2
1.2.1 ASTRO-F への期待	2
1.2.2 ASTRO-F の成果	2
1.2.3 ASTRO-F からの発展: Warm Launch 型の赤外線衛星	2
1.3 SPICA ミッション	2
1.3.1 ミッション概要	2
1.3.2 軌道: S-E L2 ハロー	3
1.3.3 SPICA の能力と国際的位置づけ	4
1.4 SPICA 推進体制	5
1.5 技術開発	6
1.6 日本の宇宙科学、宇宙開発における位置づけ	6
1.6.1 新しいカテゴリーの提案	6
1.6.2 宇宙開発の将来を拓く SPICA	6
1.6.3 新しい開発体制の提案	7
1.7 本プロポーザルの概要	7
1.7.1 本プロポーザルの目的	7
第2章 SPICA の目指す科学	9
2.1 ビッグバンから生命まで: 宇宙史の解明にむけて	9
2.1.1 SPICA の特徴	9
2.1.2 代表的課題の概要	10
2.2 銀河の誕生と進化	14
2.2.1 銀河研究の現状と問題点	14
2.2.2 初代天体の形成と宇宙再電離	15
2.2.3 水素分子冷却期を捕える	16
2.2.4 塵に包まれた形成途上銀河	19
2.2.5 銀河基本構造の獲得	21
2.2.6 宇宙大規模構造の形成と進化	25
2.2.7 赤外線宇宙背景放射	28
2.3 活動銀河核 (AGN) の形成史	30
2.3.1 研究の現状と問題点	30

2.3.2	ダストに埋もれた AGN の探査	35
2.4	星・惑星系の誕生と進化	39
2.4.1	低質量星の形成	39
2.4.2	若い星からのアウトフロー	41
2.4.3	大・中質量星形成	42
2.4.4	銀河中心における星形成	44
2.4.5	星形成と星間物質	46
2.4.6	スーパースタークラスター	47
2.4.7	初期質量関数	48
2.4.8	星形成と星間化学	49
2.5	原始惑星系円盤から惑星へ	52
2.5.1	原始惑星系円盤とその進化	52
2.5.2	デブリディスク（残骸円盤）	54
2.5.3	系外惑星	58
2.6	星になりそこなった天体: 褐色矮星と準褐色矮星	61
2.6.1	褐色矮星	61
2.6.2	準褐色矮星	61
2.7	星の進化と終焉	62
2.7.1	はじめに	62
2.7.2	中小質量星	63
2.7.3	質量放出現象	64
2.7.4	大質量星	67
2.7.5	超新星爆発、GRB	69
2.7.6	物質循環（星間ダスト）	71
2.8	太陽系の起源とその進化	72
2.8.1	小惑星: 岩石小天体	73
2.8.2	氷微小天体	76
2.8.3	彗星	80
2.8.4	惑星間塵: 太陽系ダストの分布と組成の解明	84
第 3 章	ミッションへの要求	87
3.1	波長領域	87
3.2	温度	88
3.3	望遠鏡の口径	89
3.3.1	銀河の誕生と進化	89
3.3.2	系外惑星の直接検出	91
3.4	ミッションへの要求	92
第 4 章	衛星システム概要	93
4.1	衛星全体の構成	93
4.1.1	構成	93
4.1.2	設計方針	93
4.2	ミッション部	96
4.2.1	ミッション部の構成	96
4.2.2	ミッション要求	96

4.3	バス部	98
4.3.1	衛星コンフィギュレーション	98
4.3.2	システムブロック図	99
4.4	質量/電力配分	99
第5章	焦点面観測装置	105
5.1	観測装置の全体像	106
5.1.1	観測装置	106
5.1.2	共有リソース	106
5.1.3	入射波面の能動補償	108
5.2	中間赤外線撮像分光装置	109
5.2.1	期待されるサイエンス	109
5.2.2	撮像装置	111
5.2.3	分光方式の検討	115
5.2.4	関連する開発要素	130
5.2.5	技術成熟度およびフェーズ A での開発課題	141
5.3	ステラコロナグラフ観測装置	142
5.3.1	背景・目的	142
5.3.2	世界の天文学における位置づけ・意義	143
5.3.3	サイエンス面から要求される性能	144
5.3.4	コロナグラフ光学系の方式	146
5.3.5	観測システムの全体構成	150
5.3.6	技術成熟度およびフェーズ A での開発課題	153
5.4	遠赤外線観測装置	157
5.4.1	設計方針	157
5.4.2	基本設計	158
5.4.3	遠赤外線検出器の開発状況	160
5.4.4	遠赤外線分光器	168
5.4.5	技術成熟度およびフェーズ A での開発課題	171
5.5	サブミリ波観測機器	172
5.5.1	冷却望遠鏡の威力	172
5.5.2	BLISS の概要	173
5.5.3	BLISS 検出器系	174
5.5.4	BLISS 光学系	176
5.5.5	技術成熟度およびフェーズ A での課題	177
5.6	近赤外線撮像装置	178
第6章	望遠鏡システム	179
6.1	基本仕様	179
6.2	光学設計	180
6.3	鏡材料・望遠鏡システムの検討	181
6.3.1	SiC 鏡	183
6.3.2	C/SiC 鏡	183
6.3.3	Be 鏡	184
6.3.4	CFRP 鏡	184

6.3.5	ガラス材を用いた薄メニスカス鏡 + 多点能動支持	184
6.4	SPICA 望遠鏡の開発	184
6.4.1	C/SiC 複合材鏡	185
6.4.2	SiC 鏡	185
6.5	SiC 望遠鏡	186
6.5.1	SiC100	187
6.5.2	SiC 望遠鏡設計	189
6.5.3	望遠鏡性能	191
6.5.4	材料製造設備	193
6.5.5	研磨プロセス	195
6.5.6	望遠鏡の組み立て	199
6.5.7	SiC 製望遠鏡の実現可能性とリスク軽減	200
6.6	C/SiC 望遠鏡	200
6.6.1	C/SiC 複合材料製超軽量・高剛性鏡	200
6.6.2	低支持反力固定点	203
6.6.3	能動支持アクチュエータ (オプション)	203
6.6.4	重量配分	203
6.6.5	誤差配分	203
6.6.6	BBM 開発	204
6.7	高強度反応焼結 SiC(NT-SiC) 望遠鏡	205
6.7.1	NT-SiC の概要	205
6.7.2	材料特性	205
6.8	試験計画	209
6.8.1	重要な技術開発要素	210
6.8.2	主鏡単体の冷却面検	212
6.8.3	望遠鏡の低温透過波面測定	213
6.9	技術成熟度およびフェーズ A での開発課題	214
6.9.1	望遠鏡システム	214
6.9.2	主鏡部	216
6.9.3	副鏡部・その他	216
6.9.4	試験方法	217
第 7 章	ミッション部冷却システム	219
7.1	冷却方式の革命	219
7.2	ミッション要求	220
7.3	冷却システムの構成	220
7.4	断熱 / 放射冷却構造	224
7.4.1	前提条件	224
7.4.2	熱解析	227
7.4.3	構造解析	241
7.4.4	鏡筒 / バッフルの一体構造化	253
7.4.5	検討結果	261
7.5	機械式冷凍機	261
7.5.1	高効率 / 高信頼性冷凍機の開発	261
7.5.2	冷凍機ドライバ (バス部搭載)	270

7.5.3	冷凍機の運用	278
7.6	冷凍機用排熱システム	278
7.6.1	前提条件	278
7.6.2	排熱方式の検討	281
7.6.3	今後の検討課題	283
7.7	技術成熟度およびフェーズ A での開発課題	284
第 8 章	サブシステム設計・検討	287
8.1	信頼性の確保	287
8.1.1	基本方針の設定	287
8.1.2	システムの視点からの信頼性確保方針	288
8.1.3	機器単位での信頼性確保方針 (一般的事項)	290
8.2	電源系	292
8.2.1	電力制御系	292
8.2.2	太陽電池パドル系	301
8.3	通信系	306
8.3.1	要求条件	306
8.3.2	構成	307
8.3.3	主要諸元	310
8.3.4	信頼性確保方針	319
8.3.5	技術成熟度	319
8.3.6	フェーズ A における検討・開発項目	319
8.4	信号処理系	322
8.4.1	要求条件	322
8.4.2	信号処理系運用検討	322
8.4.3	構成	326
8.4.4	主要諸元	326
8.4.5	信頼性確保方針	326
8.4.6	技術成熟度	326
8.4.7	フェーズ A における検討・開発項目	326
8.5	姿勢軌道制御系	329
8.5.1	要求条件	329
8.5.2	構成概要	331
8.5.3	方式検討	331
8.5.4	主要諸元	335
8.5.5	外乱解析	337
8.5.6	内部擾乱解析	337
8.5.7	指向解析	340
8.5.8	主要コンポーネントとその諸元	347
8.5.9	角運動量管理 / 余剰並進力管理	351
8.5.10	擾乱管理方針	351
8.5.11	試験方針	354
8.5.12	初期姿勢運用	354
8.5.13	信頼性確保方針	357
8.5.14	技術成熟度	358

8.5.15	フェーズ A における要検討・開発項目	358
8.6	二次推進系	358
8.6.1	要求条件	358
8.6.2	構成	358
8.6.3	主要諸元	361
8.6.4	スラストサイジング検討	363
8.6.5	スラスト配置検討	363
8.6.6	信頼性確保方針	364
8.6.7	技術成熟度	365
8.6.8	フェーズ A における要検討・開発項目	365
8.7	構造系	366
8.7.1	設計条件	366
8.7.2	構造様式	368
8.7.3	構造解析結果	369
8.7.4	ロケットインタフェース	371
8.7.5	技術成熟度	374
8.7.6	フェーズ A における検討・開発項目	374
8.8	熱制御系	374
8.8.1	ミッションの熱的特徴及びバス部への要求仕様	374
8.8.2	構成	375
8.8.3	試験方針	378
8.8.4	技術成熟度	379
8.8.5	フェーズ A における検討・開発項目	379
8.9	システム全体としてフェーズ A で実施すべき項目	381
8.9.1	SAP 実装法検討	381
8.9.2	HGA 展開/駆動方法検討、冗長化検討	381
8.9.3	ミッション部軽量化	382
8.9.4	信頼性確保方針	382
8.9.5	擾乱管理/抑制手法の確立	382
8.9.6	ハイブリッド制御系による高精度指向制御実現方法の検討	382
第 9 章	ミッション運用概要	383
9.1	運用期間	383
9.2	軌道	383
9.2.1	S-E L2 概要	383
9.2.2	観測軌道への投入	384
9.2.3	軌道保持	385
9.3	観測運用	386
9.4	contingency	386
第 10 章	試験計画	387
10.1	基本方針	387
10.1.1	試験計画の重要性	387
10.1.2	衛星システム	388
10.1.3	特別な試験項目	388

10.2	冷却系	388
10.2.1	研究開発フェーズ段階での試験項目	389
10.2.2	PM 段階の試験項目	389
10.2.3	試験設備の整備	390
10.3	焦点面観測装置	391
10.3.1	段階的試験	391
10.3.2	試験設備の整備	391
10.4	姿勢制御系	392
10.4.1	研究開発フェーズにおける試験項目	392
10.4.2	PM 段階以降の試験項目	392
10.4.3	試験設備の整備	394
10.5	試験設備の戦略的整備	394
10.6	技術成熟度	394
第 11 章	フェーズ A における開発課題	395
11.1	最重要技術項目の洗い出し	396
11.2	獲得目標の設定	396
11.3	フェーズ A における開発項目およびスケジュール	397
11.3.1	ミッション部冷却システムの成立性実証	399
11.3.2	SPICA 望遠鏡の成立性実証	400
11.3.3	宇宙望遠鏡用コロナグラフ光学系の実証	402
11.3.4	撮像分光器用要素の大幅な性能改善	403
11.3.5	姿勢/指向系制御システムの開発・実証	405
第 12 章	開発スケジュール	407
12.1	開発スケジュール	407
12.1.1	マスタースケジュール	407
12.1.2	ASTRO-F との関係	407
12.2	各フェーズでの基本方針	408
12.2.1	フェーズ A (2005 年～2006 年)	408
12.2.2	フェーズ B (2007 年～2008 年上半期)	409
12.2.3	フェーズ C (2008 年下半期～2009 年)	409
12.2.4	フェーズ D (2010 年～2012 年)	410
12.3	要素ごとの開発スケジュール	410
第 13 章	成果の普及、理解の増進、教育への活用	415
13.1	意義と目的	415
13.2	活動の内容	416
13.2.1	期待される成果の周知と国民への説明責任	416
13.2.2	得られた成果の普及と国民の理解の増進	416
13.2.3	教育への活用	417
13.2.4	開発過程で得られた技術的成果の活用	417
13.3	活動の方法	417
13.3.1	ホームページ	417
13.3.2	各種媒体	417

13.3.3	リーフレット、映像等	418
13.3.4	講演、教育プログラム等各種イベント	418
13.3.5	継続的な広報・開発段階からの広報	418
13.4	専任スタッフ	419
第 14 章	波及効果	421
14.1	宇宙科学、宇宙開発への波及効果	421
14.1.1	戦略的技術開発	421
14.1.2	S-E L2 への尖兵	423
14.1.3	新しい宇宙開発体制の提案	424
14.2	一般社会への波及効果	424
14.2.1	宇宙への関心を喚起する	424
14.2.2	技術的波及効果	424
第 15 章	推進体制	425
15.1	次世代赤外線天文衛星ワーキンググループ	425
15.1.1	グループの広がり	425
15.1.2	国立天文台のプロジェクト室開設	425
15.1.3	大学、研究機関	427
15.2	コミュニティでの議論	427
15.3	JAXA 統合効果としての SPICA	428
15.4	新規開発拠点の創設	428
15.5	国際協力	429
15.6	ワーキンググループ・メンバー	429
第 16 章	国際ミッションとしての SPICA	435
16.1	SPICA の国際的位置づけ	435
16.1.1	国際的役割分担	435
16.1.2	国際的ロードマップ	436
16.2	国際協力	436
16.2.1	サブミリ波観測機: アメリカとの協力	437
16.2.2	遠赤外線分光観測機: ヨーロッパとの協力	437
16.2.3	近・中間赤外線観測機: 韓国との協力	437
第 17 章	費用	439
付録 A	技術成熟度 (TRL)	441
付録 B	衛星コンフィギュレーション	443
B.1	衛星コンフィギュレーション検討概要	443
B.1.1	衛星コンフィギュレーションに対する要求条件	443
B.1.2	検討結果	443
B.2	衛星コンフィギュレーショントレードオフ	445
B.3	今後の技術的検討事項	447

付録 C 観測限界の見積り	449
C.1 観測パラメータの設定	449
C.2 検出限界を決める要因	449
付録 D 執筆者リスト	451
付録 E コミュニティからのサポート	453
図目次	465
表目次	477
参考文献	483