

国際共同水星探査計画 BepiColombo の現状

早川基、 山川宏、 笠羽康正、 小川博之、 向井利典 (宇宙科学研究所) 水星探査 WG

1. BepiColombo 計画

太陽に最も近い惑星、水星は、地球からの観測が難しく、また、探査機による水星の観測データは過去に唯一、米国のマリナー10号によるフライバイ観測(1974-1975)があるだけである。マリナー10号は金星スウィングバイを利用して水星に3回近づいたが、この方策をNASAに提案したのが計画の名前にもなっているイタリアの応用数学者 Giuseppe (Bepi) Colombo (1920-1984)であった。

水星は大きさの割に平均密度が異様に大きく、そのため、半径の75%より内側は鉄の中心核で占められている(図1)。マリナー10号の観測は、この小さな惑星が内部に固有磁場、周辺に磁気圏を持っている事を発見した時には非常な驚きを引き起こしたが、その正体は明らかにされていない。また、水星の表面地形は月と似ているようであるが、マリナー10号が写真を撮った所は限られていて詳しい事はほとんどわかっていない。ごくわずかにある稀薄な大気の主成分はナトリウムで、その量も空間分布も時間的な変化をしているようである。BepiColombo計画はこれらの謎を解き明かすべく、水星の内部構造、表層、大気、磁気圏にわたる広範な観測目的を持つ。

図1 地球型惑星の密度と半径の関係

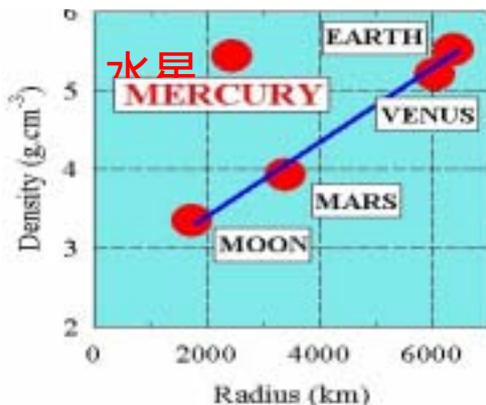
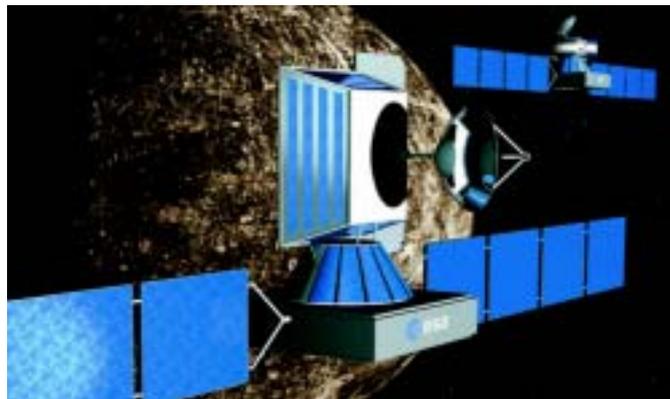


図2 BepiColombo 探査機 (MPO と MMO)



BepiColombo計画では Soyuz-Fregat ロケット2機による打ち上げ想定している(図2)。1機はESA担当の3軸オービタ MPO (Mercury Planetary Orbiter) を打ち上げ、もう1機は宇宙研が担当することを期待されているスピン衛星 MMO (Mercury Magnetospheric Orbiter、図3) およびロシアが担当する可能性がある水星ランダー MSE (Mercury Surface Element) を打ち上げる。これらの探査機を水星まで運ぶ推進系として、惑星間軌道で使用される電気推進モジュール (SEPM = Solar Electric Propulsion Module) および水星投入/水星着陸用の化学推進モジュール (CPM = Chemical Propulsion Module) があり、MPO および MMO+MSE のそれぞれにほぼ同じ推進モジュールが使用される。従って、1機は MPO+推進系モジュール (CPM+SEPM) もう1機は MMO+MSE+SM+推進系モジュール (CPM+SEPM、図4) という構成の探査機となる。SM (Service Module) は構造的には MMO と CPM を結ぶインターフェース部にあたり、機能的には惑星間巡行中の統合モジュール全体の運用を司る。

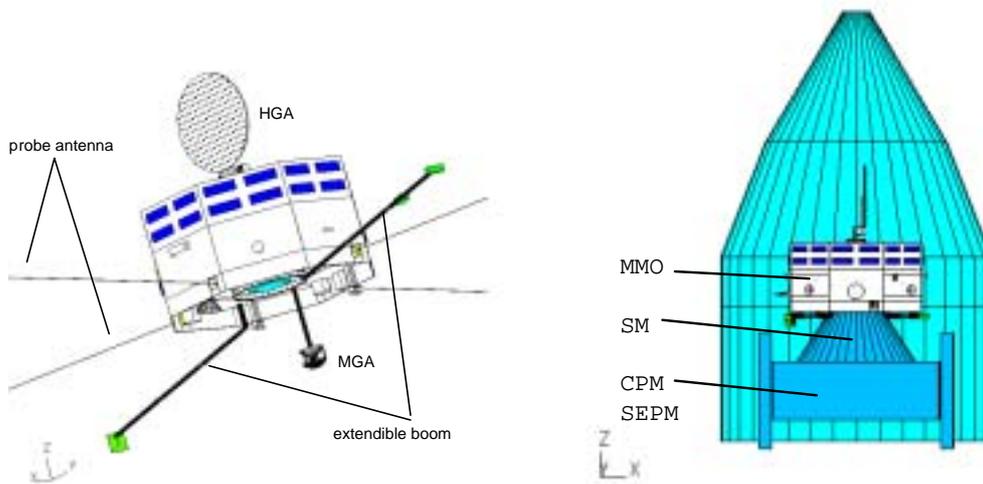


図3 水星軌道上でのMMO configuration 図4 Soyuz-Fregatのフェアリング内の形態

地球から水星投入までの惑星間巡行フェーズでは電気推進 (SEP) が月、金星および水星スイングバイと併用され、水星周回軌道への投入時およびMSEの水星着陸時に化学推進 (CPM) が使用される。SEPの燃料はXeであり、5.5kW (@1AU) の電力により0.17Nあるいは0.34Nの推力を発生する。

MPOは水星表面の連続的な観測が可能ないようにnadir pointingの3軸姿勢制御衛星である。また地球との通信はX帯およびK帯の直径1.5mの高利得アンテナを介して行われる。水星ランダーMSEは高温環境を回避するために85度程度の高緯度に着陸し、寿命としては1週間程度が想定されている。なお、MSEのデータはUHF帯のcross dipoleアンテナによりMPO (MMOはバックアップ) を介して地球に伝送される。

2. 検討の経緯

BepiColombo水星探査計画は、2000年の10月にESA (European Space Agency) の5つ目のCornerstoneミッションとして正式に認定され、宇宙科学研究所との国際協力ミッションとすることが承認されている[1-2]。宇宙科学研究所にはMMO (Mercury Magnetospheric Orbiter) 探査機的设计、製作、運用を行なうことが期待されている。宇宙研では2000年8月に行なわれた水星探査WGキックオフに始まり、MMO探査機のシステムのfeasibilityを得るために検討を重ねている[3-7] (表1)。

参考までに、サイエンス以外の2001年11月末現在の累計会議数は、システム検討21回、熱制御系20回、通信系18回、構造・機構・材料系21回、電源系9回、姿勢制御・推進系3回であり、その後、2003年1月末までに、システム検討17回、熱制御系2回、通信系10回、構造・機構・材料系21回、電源・電子機器系4回、姿勢制御・推進系2回の会議を重ねている。ESAとISAS間のtechnical meetingも下記のように5回開催され、MMOとESAモジュールとの間のインターフェースに重点を置いて検討している[8-9]。

表1 BepiColombo検討経緯

- 1997年06月 ISAS 水星探査ワーキンググループ結成 (I S A S)
 - 2000年09月 BepiColombo への参加の意志表明 (I S A S)
 - 10月 BepiColombo が ESA Cornerstone ミッションとして選定 (E S A)
 - 12月 1st ESA-ISAS Joint Meeting (E S T E C)
 - 2001年03月 European Science Advisory Group(ESAG) Meeting (E S T E C)
 - 04月 Joint ESA-ISAS Science Advisory Group (JSAG) Meeting (E S T E C)
 - 04月 2nd ESA-ISAS Joint Meeting (E S T E C)
 - 05月 Kick-off Meetings of ESA Definition Studies (E S T E C)
 - 09月 MMO Science Workshop (I S A S)
 - 09月 宇宙理学委員会に提案 (I S A S)
 - 10月 3rd ESA-ISAS meeting (I S A S)
 - 12月 Phase 1 Mid-Term Review Presentation of Definition Study (E S T E C)
 - 12月 4th ESA-ISAS meeting (E S T E C)
 - 12月 European Science Advisory Group (ESAG) (E S T E C)
 - 2002年01月 宇宙理学委員会・評価委員会にて承認 (I S A S)
 - 01月 Concurrent Design Facility Activity に参加 (E S T E C)
 - 02月 Concurrent Design Facility Activity に参加 (E S T E C)
 - 04月 Phase 1 Delta Mid-Term Presentation of Definition Study (E S T E C)
 - 04月 Science Advisory Group (SAG) (E S T E C)
 - 04月 概算要求 (I S A S)
 - 07月 5th ESA-ISAS Meeting (I S A S)
 - 10月 Phase 1 Final Presentation of Definition Study (E S T E C)
 - 10月 Delta 5th ESA-ISAS meeting (E S T E C)
-

当初打ち上げは2009年度であったため、探査機全体の総合試験をESA/ESTECにて行う必要性を考慮して、FM (Flight Model) フェーズとして2005~2007年、PM (Proto-type Model) フェーズとして2003~2004年を想定して、2001年9月の理学委員会へ提案を行なった。2002年1月の理学委員会下の評価委員会にて承認され2002年4月に概算要求を行った。その後、ヨーロッパ側の予算状況の変化により打ち上げ年度は2010年となり、現在は、2003年度は開発研究フェーズ、2004~2005年度がPMフェーズ、2006~2008年度がFMフェーズとなる公算が高い(表2)。

ESA側は、2003年6月の国際観測機器の公募に向けて、ヨーロッパのメーカー2社による競合的システム検討(Definition Study)を行っており、機器選定終了後の2004年6月より、Phase Bがスタートする予定である。

なお、図5にBepiColomboのマネジメント組織(ESA案)を示す。日本のProject Teamは、SWT+Project Teamに相当し、PI権限やデータ権限などを含めて、「日本型」との整合については検討中である。

表2 BepiColombo 今後のスケジュール

2003 年度	MMO	開発研究 phase	(ISAS)
2003 年 6 月	MPO	A/O 募集	(ESA)
2003 年 6 月 (選定 : 12 月)	MMO	A/O 募集	(ISAS)
2004 年 6 月	MPO	Phase B 開始	(ESA)
2004 ~ 2005 年度	MMO	PM phase	(ISAS)
2006 ~ 2008 年度	MMO	FM phase	(ISAS)
2005 年度	MMO	MTM/TTM (構造・熱モデル) 設計・製作	
2006 年度	MMO	MTM/TTM 試験	(ISAS)
	統合	MTM/TTM 試験	(ESA/ESTEC)
2008 年度		総合試験	(ISAS)
2009 年度		総合試験	(ESA/ESTEC)
2010 年度		打ち上げ (2011 年 1 月)	

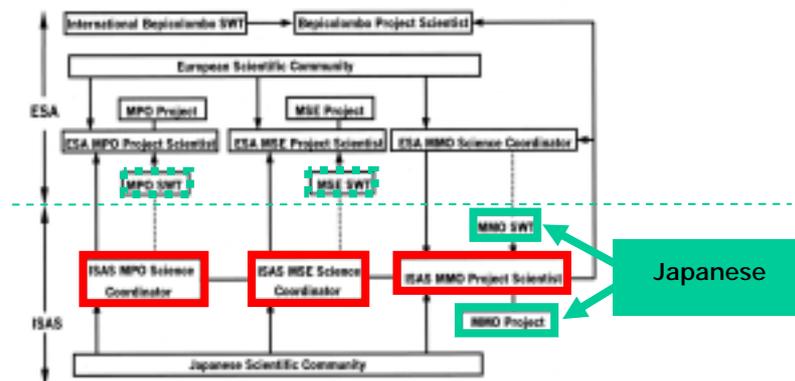


図5 BepiColombo Management 組織

3. 参考文献

- 1) ESA-SCI(2000)1, BepiColombo System and Technology Study Report, ESA, April 2000.
- 2) BR-165, BepiColombo, ESA, September 2000.
- 3) BepiColombo 国際水星探査計画提案書、水星探査ワーキンググループ、2001年11月。
- 4) 山川、"BepiColombo/MMO システム検討"、太陽系科学シンポジウム、2000.12.20-21.
- 5) 山川、他水星 WG、"MMO System Design Feasibility"、宇宙科学シンポジウム、2001.1.11-12.
- 6) H.Yamakawa, H.Ogawa, Y.Kasaba, H.Hayakawa, T.Mukai, and M.Adachi, "ISAS Feasibility Study on the BepiColombo/MMO Spacecraft Design," Acta Astronautica, Vol.51, No.1-9, pp.397-404, 2002.
- 7) H.Yamakawa, H.Ogawa, Y.Kasaba, H.Hayakawa, T.Mukai, and M.Adachi, "Current Status of the BepiColombo/MMO Spacecraft Design," COSPAR Paper B0.1-D3.7-0004-02, 34th COSPAR Scientific Assembly, The Second World Space Congress, Houston, Texas, USA, 10-19 October 2002, to appear in Advances in Space Research.
- 8) MMO-001, MMO CDD (Configuration Data Document), Version 2.0b, ISAS, 18 May 2001.
- 9) SCI-PF/BC/RS/04, MMO IRD (Interface Requirements Document), ESA, 15 May 2001.

水星探査機 MMO の現状

早川基、山川宏、笠羽康正、小川博之、向井利典 (宇宙科学研究所) 水星探査 WG

1. MMO 開発経過 (2000 年度 ~ 2001 年度)

大型水星探査ミッション「BepiColombo」(ベピコロombo)は、2000年10月にヨーロッパ宇宙機関(ESA: European Space Agency)において日欧協力のもとで実施する第5番目のコーナーストーン(3~4年に一度程度の割合で行う大型の科学ミッション)として、また、宇宙科学研究所(ISAS)の理学委員会においては2002年1月にそれぞれ正式に承認された。宇宙科学研究所はMMOの開発と運用を担当する予定になっている。MMOは、重量約200kgの水星の磁気圏の探査に焦点を置いた探査機で、観測機器としては、電子分析器、イオン分析器、太陽風分析器、磁力計、プラズマ波動観測装置、カメラ、ダストカウンタ等を予定している(図1、図2)。

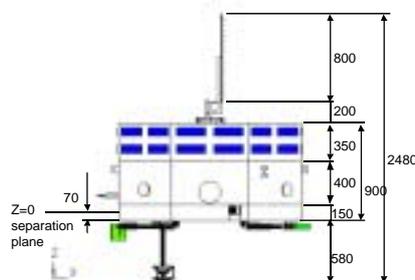
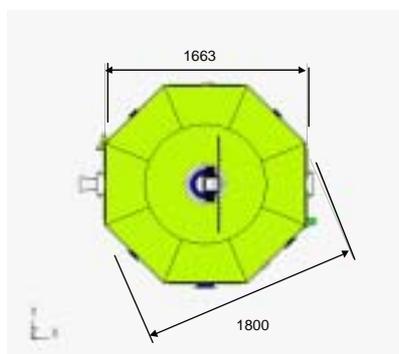


図1: MMO Configuration (Top View)

図2: MMO Configuration (Side View)

2003年1月現在は、2003年6月の国際観測機器の公募に向けて、ESA側はヨーロッパのメーカー2社による競合的システム検討を行っており、日本側もシステム検討とともに科学観測機器の開発、高利得アンテナの開発、表面材料の光学・熱・機械特性取得試験、放射線試験等を行っている。過去の2000年から2001年度にかけての技術開発の経過については下表にまとめられており(宇宙研戦略的開発研究費:日欧共同ミッション「BepiColombo」による水星観測)開発項目に対して重点的に検討を行なっている。

表1 MMO 検討項目 (2000 年度から 2001 年度にかけて)

平成12年度(実績)	平成13年度(今年度提案)	平成14年度(予定)
水星探査機システム検討	システム検討 ○探査機のシステム検討 (探査機本体構成案、ESAと共同開発)	システム検討 詳細化
MMOの分離解析	○姿勢ダイナミクス検討 (慣性モーメント、推進系、ブローブと姿勢、 実用化ORASのシステム構築、検討にMRD)	構造設計の評価化
推進系の概念検討	○高利得アンテナの試作及び 電気的特性評価試験	構造・部品試作
ブローブアンテナのダイナミクス解析	○熱制御システムの概念検討 (解析評価、機構実証を考慮)	材料評価試験 の構築
MMOの熱設計ソフトウェア (探査機本体)	○表面材料の熱特性評価試験 ○可変熱伝導率フィルムの開発	
磁力計ブームの耐熱CFRP構造検討	○アルミと炭素繊維の熱膨張特性試験 ○高熱CFRPの開発 及び3次元CC製品の試作 ○火工品老化試験(長期保存試験)	
耐熱CFRPの各種特性試験	新技術開発 ○電子部品のSOI化 ○耐放射線試験	
野放電線CPI開発の検討	新技術開発 ○観測機器開発 (ソラール設計・開発、設計書、製造計画書)	
BGA実装技術の検討		
プラズマ波動観測装置の予備検討 プラズマ観測装置の予備検討 (フロントパネルの熱、推進、電力)		

2. 2002 年度の検討内容

[システム検討]

1) 探査機システムの検討 (山川・小川)

現実的な機器配置を考慮した熱・構造・電力検討を行い、重量・電力マージンを確保すべく探査機システムの最適化を行っている。また、ESA内および欧州メーカー 2 社による競合的システム検討と連動して、巡行フェーズにおける複合モジュール (MMO と ESA 側の電気・化学推進モジュール及び MSE とが結合) との熱・構造・通信・データ・電源のインターフェースの具体的な検討を行った。

2) 推進系の検討 (志田・沢井)

探査機との結合を前提とした仕様の最適化を行っている。具体的には、システム熱設計への影響評価、スラスト艙装位置の検討、および技術課題の早期抽出のため、1) スラストモジュールの基本構造設計、2) 熱数学モデルの作成・熱解析、3) 衛星システムとの熱インターフェース、4) スラスト艙装方法検討など。

3) ワイヤアンテナ伸展時の姿勢ダイナミクス検討 (森田・岡田[富山県大]・小嶋[京大 RASC])

MMO は、熱制御の観点から水星軌道周回時のスピン軸方向を太陽にほぼ垂直としているが、電界測定用ワイヤアンテナの伸展による姿勢擾乱によって探査機放熱面への太陽光入射が起きると、衛星への熱入力が増大する可能性がある。日欧それぞれの研究グループが提案を予定するワイヤアンテナの仕様を踏まえた姿勢ダイナミクス解析を行う。具体的には、Geotail・Nozomi で用いられた伸展解析ソフトウェアを改修して解析を行い、結果をワイヤアンテナの仕様にフィードバックするとともに、伸展シーケンスや故障モードの検討を行う。

[熱対策検討]

1) 熱制御システムの検討 (小川・大西・太刀川・小林)

MMO 探査機における最大の課題は熱対策 (最大 11 solar の強い太陽輻射および水星表面からの太陽光反射・赤外熱輻射の影響抑制) である。ESA 側の BepiColombo 複合モジュールの検討と連動して、巡航フェーズおよび水星周回軌道 (分離前) における熱インターフェースを詳細に詰める。また、MMO 探査機についても、現実的な機器配置を考慮した熱設計の検討を引き続き行うとともに、アンテナ・ブーム・スラストモジュール・姿勢センサー・観測機器など、それ自身の熱設計が探査機全体に大きな影響を与える外部露出機器の詳細な検討を行う。探査機熱試験法の詳細な検討も実施する。

2) 表面素材の熱特性評価試験 (小川・大西・早川)

水星環境 (高温および放射線) 下における導電性白色塗料、OSR、MLI 等の表面素材に対し、熱光学特性の劣化試験を引き続き実施する。特に、導電性白色塗料については、高温環境下の長期保存試験によって導電性劣化を評価する。

3) 火工品の長期保存試験 (堀)

熱制御系に対し火工品の温度制御要求をフィードバックするため、火工品試験を 2001 年度から開始した。2002 年度は、引き続き低温側および高温側の限界作動温度と限界温度付近の現象を把握することを目標とする。具体的には、3 温度水準 (低温側: -100 以下、恒温側: +60、+80 等) に調温した恒温槽に点火玉、パワーカートリッジを保存し、30 日毎に発火電流を計測する。また、点火玉中の点火薬の熱分析試験および発生圧力計測を行う。

[構造素材]

1) 耐熱 CFRP の試作及び熱特性試験 (横田・後藤・向後[東京理大]・八田)

MMO探査機の磁力計搭載用ブームは250 程度となることが予想されており、高温で使用可能な樹脂をマトリックスとした CFRP の開発が不可欠である。2001 年度に試作した耐熱 CFRP (BANI-CFRP) の各種機械特性データを引き続き取得する。また、展開解析から得られた要求物性に対応したチューブの積層構成・製造手法を検討するとともに、既に確立されている板材の製造条件を参考に、チューブ材に対応する作製ジグおよび成形条件を検討する。これらを元に実機サイズのチューブを試作し、長期高温試験(250 の減圧雰囲気中で2000 時間程度)を行って引っ張り・圧縮・層間せん断強度の劣化を測定する。

2) 耐熱性ヒンジブロックの開発 (横田・後藤・向後[東京理大]・八田)

MMO探査機の磁力計搭載用ブームの一部であるヒンジブロックも300 程度になると予想されている。ヒンジブロックは複雑な応力状態が予想されるが、重量増を避けるため、金属材料ではなく連続繊維強化複合材料での作製を検討している。2002 年度はこの織物材料の最適設計の検討を行う。具体的には、荷重付加条件や作製上の問題点の検討を行ったうえで、CFRP 化ヒンジブロックを一对作製する。また、CFRP 及び C/C それぞれの場合についてヒンジの強度及び剛性を予測し、成立性を検討する。CFRP の場合、ある程度技術が確立しているポリイミド樹脂 BANI を複雑な織物に含浸する手法の検討を行う。

3) 高利得アンテナ用繊維強化アルミの開発 (向後[東京理大]・横田・後藤)

昨年度は、3 種類の繊維強化アルミニウム板を試作し、この熱機械特性を計測した。作製上の問題点として 1) 含浸中の部分凝固による組織破壊、2) アルミ溶湯の流れによる繊維のしわ、3) 冷却時の熱収縮による圧縮破壊があげられた。2002 年度は、これらの問題点を明らかにするため、含浸時の繊維の余熱温度増、繊維織物の周囲のジグ固定、離型手法など作製条件の検討を行い、試作サイクルを多数回実施して作製条件を確立する。また、作製された複合材料について機械・熱物性の取得を行う。これらにより2002 年度で材料選択を終了し、2003 年度から実機サイズの試作を行う予定である。

[システム機器]

1) 高利得アンテナの電気特性試験 (鎌田・水野・中野[法政大])

MMO探査機の高利得アンテナとして、太陽光の集光による温度上昇を避けられる平面鏡で、かつ高効率・広帯域を実現できる「ラジアルライン給電ヘリカルアレイアンテナ」の検討を行っている。2001 年度は、電磁シミュレーションと一列6 素子のモデル実験にて性能の実証を行うとともに、1/2 モデルの作成を行った。2002 年度は、このモデルでアレイの振幅特性と位相特性の調整を行いつつ電気特性を確認し、2003 年度に行う 1/1 スケールモデルの作成準備を完了する。

2) 中利得アンテナの開発 (鎌田・水野)

MMO探査機では、通信要求から円偏波損失 0 d B (円偏波で探査機スピン面内無指向性) でテレメータ送信・コマンド受信共用の中利得アンテナが必要である。これまで搭載実績のあるのは直線偏波のコリニアアレーアンテナで、円偏波損失が 3 d B あるため要求を満足できない。このため、上記条件と耐熱性を満足できる「パラボラと円錐鏡の組み合わせによるデュアルリフレクタアンテナ」を検討したが、2001 年度実施した解析では、パラボラと円錐鏡を支える柱の影響が大きく、支柱を誘電体製にしても 3 d B 程度のリップルが生じる事が分った。2002 年度は、パラボラ 円錐鏡間の開口面に付けるカバーでアンテナを一体化し、軸対象としてリップルを消

すことを検討する。このアンテナの1/1モデルを試作し、アンテナカバーの材質と肉厚等の放射パターンへの影響を調べる。二周波共用化のための給電回路の検討も行う。

3) スタースカナーの1段バッフルの検討 (広川・齋藤宏文)

従来のスタースカナー (NOZOMI、Lunar-A) の太陽光遮蔽用バッフルは、2段の角度をもった円錐形状 (高さ 30~40cm) 形状である。振動・熱対策の両面で小型化が望まれるが、これには1段バッフルに必要な減光量を達成する必要がある。2002年度は、キーとなる「ベーンの反射防止表面黒色処理」と「エッジ先端での反射光低減技術」の検討のため、バッフルを試作して光学特性を測定し、試作によってこの設計の妥当性を確認する予定であったが予算状況は厳しい。

[分離機構]

1) MMO分離機構の検討 (峯杉)

MMO分離機構は、SELENEの孫衛星分離時に想定されている「Bow Spring型スピン分離機構」、あるいはMUSES-Cのカプセル分離に使用される「Helical Spring型スピン分離機構」を候補として考えている。今年度は、分離時の外乱条件を標定として分離機構のサイジング検討を行う。必要ならば簡易分離試験を行い、分離機構の仕様を決定する。

2) MMOの分離解析 (峯杉)

上記スピン分離機構の設計へのフィードバックを目的として、BepiColombo複合モジュールからのMMOスピン分離時のダイナミクス解析を行う。この結果は、システムの重心管理、分離後の姿勢マヌーバ、MMOサンシールドの形状設計等にも反映されるものである。

[観測機器開発]

1) 放射線試験 (高島・早川・笠羽・吉川)

水星は、太陽に近い地球軌道の5~11倍の太陽放射線が予想される。このため、衛星製作においては素材・部品の耐放射線性 (衛星構体内で70krad程度、衛星外で300krad程度と想定) が必要である。被爆の殆どはフレアに伴う太陽プロトンであると考えられる。放射線耐性のデータの無い素材 (特に白色塗料など表面素材、高圧電源部品、光学部品など) に対しガンマ線・陽子線を用いた放射線試験を行う。また、耐放射線データの無いCPU・オペアンプなどの電子部品に関して、主にガンマ線 (一部陽子線) による放射線試験を行い、部品選定を通して特に観測機器設計へのフィードバックを行う。

2) 観測機器の検討 (早川・笠羽・齋藤・平原[立教大]・浅村・松岡・松本[京大RASC]・

野上[獨協医大]・三澤[東北大]・吉川・長谷部[早大]・加藤、他各機器担当)

MMO・MPOの搭載機器は、今年度中に公募(A/O)が開始される予定である。2002年度は、応募の前提となる設計事項の確定のため、欧州側研究者が担当する部分とのインターフェースを含めた各機器の機械系・電気系設計を固め、必要な検討・試作・試験を行う。特に、新規開発要素を含む機器 (高速中性粒子検出器、大気・地形カメラ、ダスト検出器、紫外線分光器[MPO]) においては、A/Oに応募する前にセンサーや光学系など性能を左右する部分の設計要素の検討・試作を必要とする。また、観測器で共通に使う電源・CPUボードについて、耐熱・放射線性に優れた小型高性能なコンポーネントの検討・開発を行う。さらに、強い太陽輻射への対策として、衛星外表面に露出するセンサー (磁力計用センサー、粒子系計測器用センサー、ワイヤアンテナ伸展機構) の熱対策を引き続き検討する。