

5.4. BepiColombo/水星磁気圏探査機の ESA/ESTEC における 10 ソーラ熱モデル熱平衡 試験

日本電気 株式会社

岡本 章 氏



BepiColombo/水星磁気圏探査機の ESA/ESTECにおける 10ソーラ熱モデル熱平衡試験

岡本 章

日本電気株式会社 宇宙システム事業部

小川博之

ISAS/JAXA

1



目次

1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

2

目次

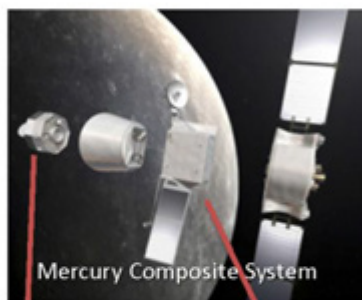


1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

3

1.水星磁気圏探査機(MMO)の概要

1.1 BepiColombo計画の概要



Mercury Magnetospheric
Orbiter (MMO) by JAXA



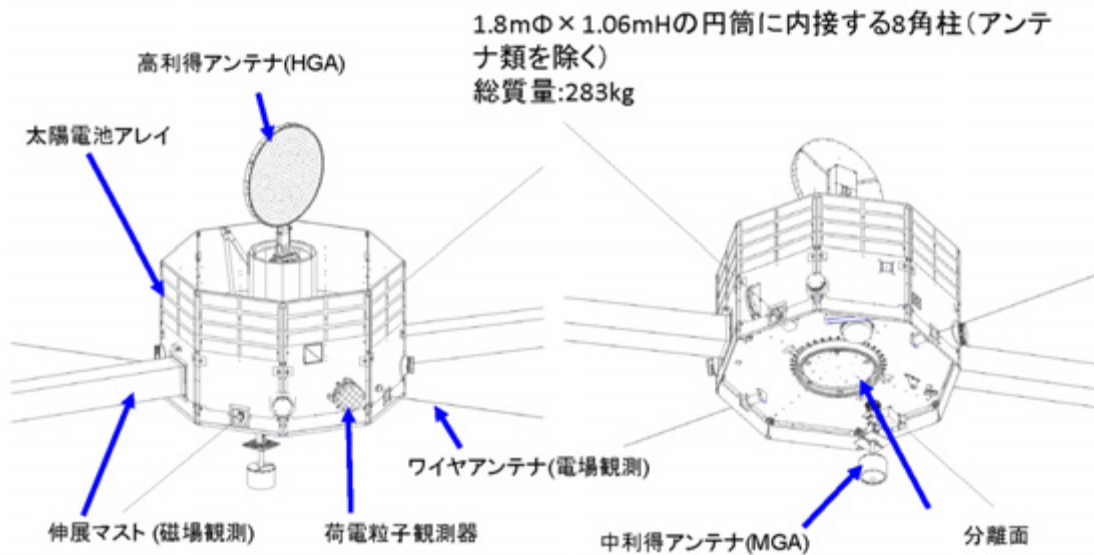
Mercury Planetary
Orbiter (MPO) by ESA

- 灼熱の水星を探索するチャレンジングなJAXA/ESA共同プロジェクト
- 2016年にAriane5で仏領ギアナから打ち上げ、水星には約6年後に到着
- 6年間のクルーズ期間中、半年毎のバッテリー定期メンテナンス以外はMMOは冬眠状態で過ごす
- 水星到着後、MMOはMPOから分離され、水星周回軌道に投入される
- 水星を2年間周回し、科学観測を行う
- MMOはCDRを2011年11月に終了し、現在ISASでフライトモデルの組立試験を実施中
- MMOフライトモデルは2014年末にESTECに輸送し、ESA側担当部分と組み合わせた組立・試験を実施

4

1. 水星磁気圏探査機(MMO)概要

1.2 探査機コンフィギュレーション



5

目次

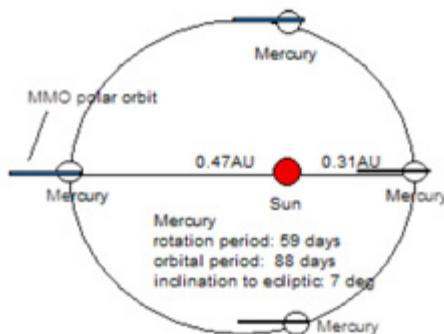


1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. **MMOの熱設計と検証計画**
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

6

2. MMOの熱設計と検証計画

2.1 水星周回軌道の熱環境



太陽の周りの水星とMMOの軌道
(北極から俯瞰)

- 水星周囲の極度の高温熱環境はMMOの設計の支配要因になっている
- 太陽光強度は、**14.5kW/m² (10.7 SC)**@近日点 ~ **6.3kW/m² (4.7 SC)**@遠日点 (地球近傍では 1.35kW/m²)
- 水星表面からの赤外放射は**12.8kW/m²** @ 遠日点 ~ **5.5kW/m²**@近日点 (地球周回低軌道では0.22W/m²)
- MMOの軌道周期: 9.3時間
- 日食時間: **最大118分**

7

2. MMOの熱設計と検証計画

2.2 熱設計への要求

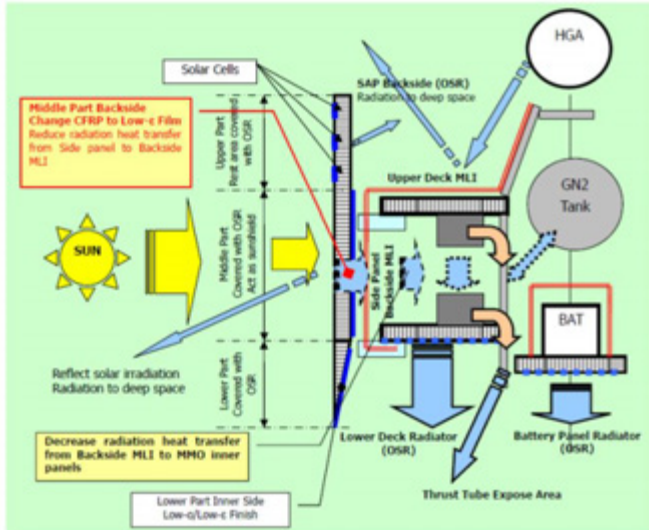


ミッションライフ	8.5年 (クルーズ6.5年, 観測 2年)
姿勢制御	スピン安定(スピンレート15rpm) 太陽光入射角: スピン軸に対し92+/-1度
探査機形状・寸法	直径: 1.8m, 高さ 1.06m (アンテナを除く) ボディマウントの太陽電池アレイを含む8角柱 アジマス、エレベーション駆動のデスパンアンテナ
質量	Total:283kg
内部発熱	Max: 322W, Min: 144W
内部機器の許容温度範囲	バッテリー: 0 ~ 10℃ その他の機器: -30 ~ 60℃
外表面の導電性	荷電粒子観測のため、すべての外表面を導電性とし衛星グラウンドに接地する

8

2. MMOの熱設計と検証計画

2.3 熱設計コンセプト

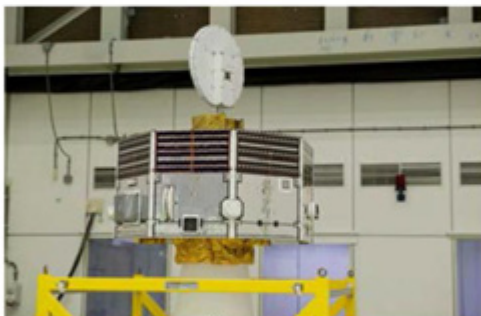


- 太陽光の当たらない下部デッキ外側を主放熱面とし、100%OSRで覆っている
- 上部デッキ外側は高温のHGAからの熱放射を防ぐためMLIで全面を覆っている
- 側面パネルはヒートシールドとして作用し、衛星本体からはMLIとチタン部材で断熱。太陽電池温度を下げるためOSRを貼っている
- バッテリーは本体とは独立したOSR放熱面とヒータで制御している

9

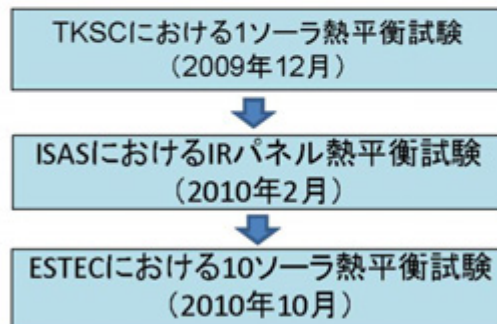
2. MMOの熱設計と検証計画

2.4 熱モデル開発試験



MMO 熱モデルTTM
ソーラ試験を中心とした評価を実施するため、特に実機の外表面特性、形状に対し高い忠実度を有している

MMO熱モデル(TTM)開発試験は 次の3段階で慎重に実施した



10

2. MMOの熱設計と検証計画

2.5 検証マトリクス



	検証事項	15Cソーラ試験 @TKSC	IR試験 @ISAS	10 ⁴ ソーラ試験 @ESTEC
熱数学モデルの検証	内部の熱数学モデル (伝導、輻射、熱容量)	○	○	○
	MLI実効放射率	○	○	○
	赤外熱環境	○	○	○
	ソーラ環境(1ソーラ平行光)	N/A	○	N/A
	ソーラ環境(10ソーラ収束光)	N/A	N/A	○
	日陰模擬での熱容量確認	N/A	N/A	○
熱設計の検証	放熱面積	○	○	○
	ヒータ電力、設定温度	○	○	○
	高温、高光強度に対する耐性	N/A	N/A	○
	熱衝撃耐性(10ソーラ日陰)	N/A	N/A	○
PFM試験への反映	PFM熱平衡/熱真空試験方法の確立	N/A	○	N/A

11

目次

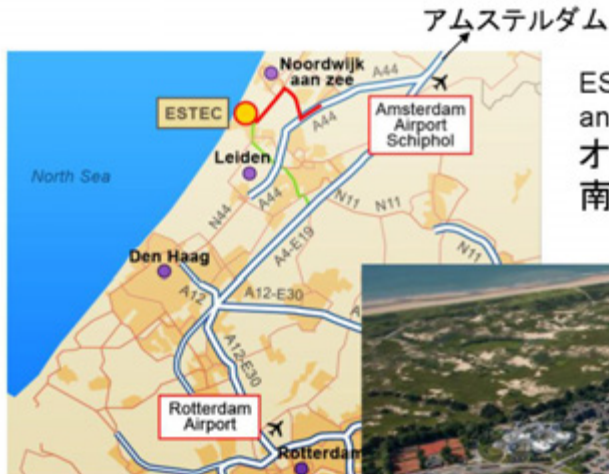


1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10⁴ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

12

3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要

3.1 ESTECの位置



ESTEC: European Space Research and Technology Centre
オランダ、アムステルダムの南西約50Kmに位置



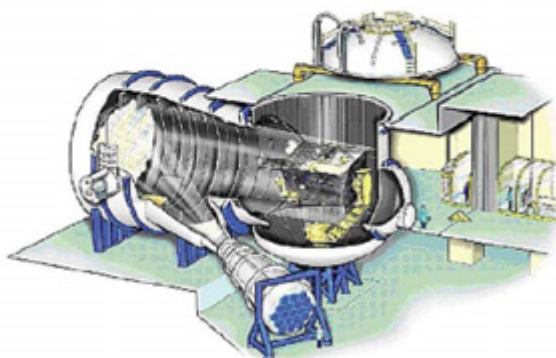
出典: ESAホームページ

3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要

3.2 LSS設備の概要



Large Space Simulator (artist's impression)



出典: Facility Description LSS

諸元	仕様
主チャンバ寸法	直径10m × 高さ15m
到達圧力 (Typ.)	5×10^{-7} Pa
ソーラ光束径	6m
ソーラ光強度	2000W/m ² (20kW × 19灯)
シュラウド温度	100K (LN2モード)、 150K ~ 350K (GN2モード)
供試体ジンバル最大質量	5000kg
供試体コンフィギュレーション	垂直または水平

目次



1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

15

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験



4.1 試験目的

- 10ソーラ熱環境下でのMMOの耐性を実証する
- 高温環境での熱数学モデルパラメータを検証する



16

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験

4.2 現地作業スケジュール

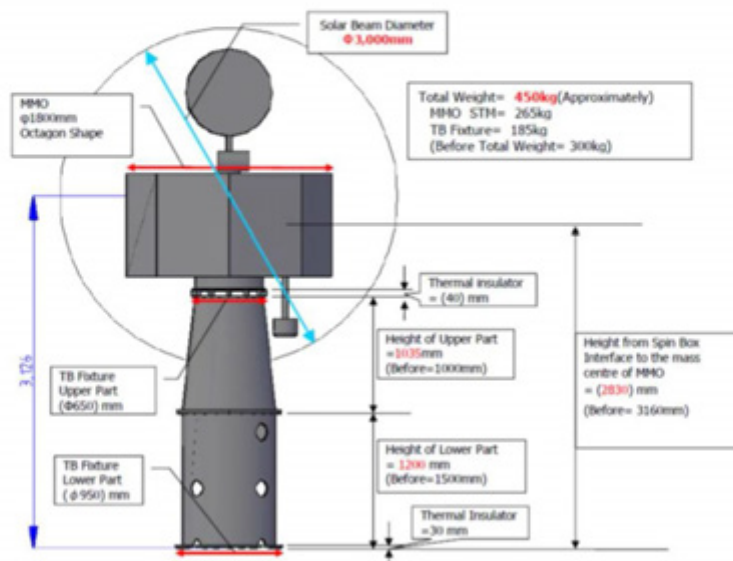


作業アイテム	期間	備考
開梱	2010/9/15～17	
試験準備	2010/9/18～10/4	
Test Readiness Review	2010/10/1	
熱真空試験	2010/10/5～15	
撤収	2010/10/18～21	
Post Test Review	2010/10/21	
コンフィギュレーション変更	2010/10/22～25	軌道上→打上げ
母船側との結合支援	2010/10/26～29	
ESAへ引渡し	2010/11/3	打上げコンフィギュレーション試験のため

17

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験

4.3 試験コンフィギュレーション



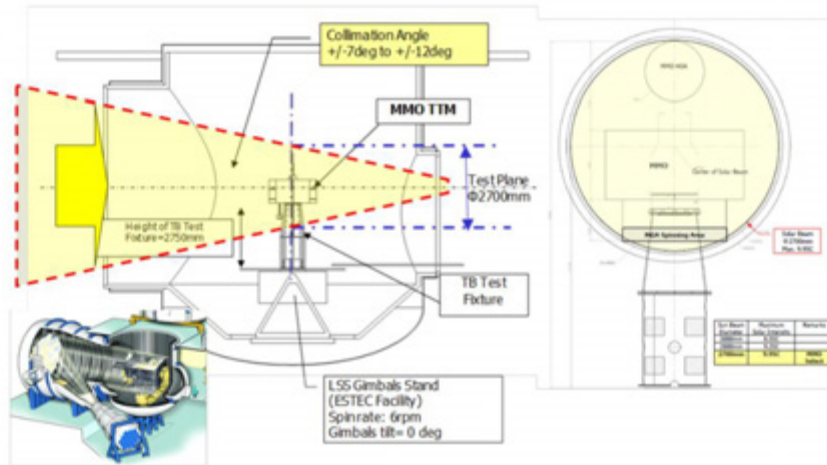
18

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験

4.4 ソーラービーム



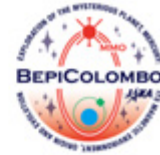
- ESTEC LSSのソーラービームはBepiColomboプロジェクトのため特別に改修し、円錐状に集光して供試体の位置で10ソーラの強度を得ている。このため位置による強度変動が大きい。
- TKSCチャンパで技術を培ったウシオ製Xeランプを使用している



19

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験

4.5 試験モード・条件

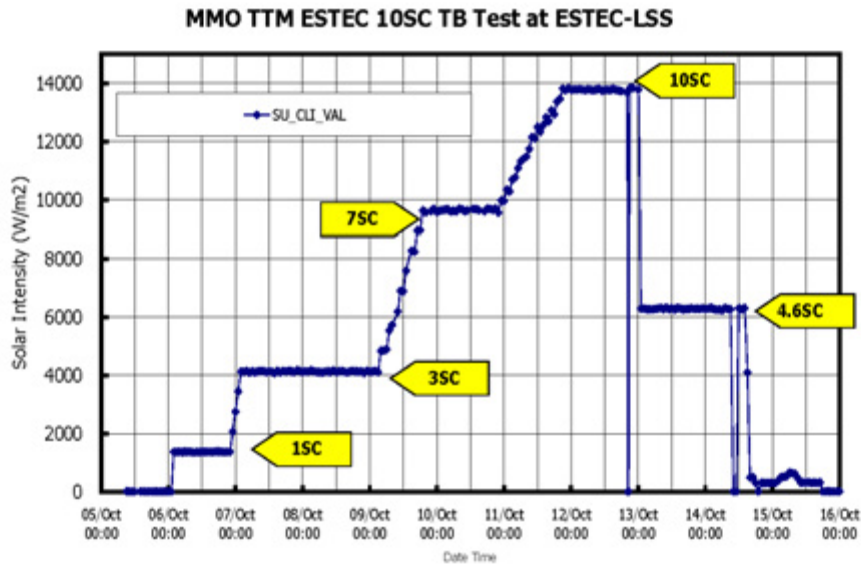


	105C-TBT Day-1	105C-TBT Day-2	105C-TBT Day-3	105C-TBT Day-4	105C-TBT Day-5	105C-TBT Day-6	105C-TBT Day-7	105C-TBT Day-8	105C-TBT Day-9	105C-TBT Day-10	105C-TBT Day-11	
Test Phase	TP1 / TP2	TP3	TP4	TP5	TP6	TP6	TP7	TP7	TP8, TP7, TP9	TP9, TP10, TP11	TP12	
Test EVENT	Pump-Down Cool-down	TB-ISC _SPIN _OBSCOM	TB-3SC _SPIN _OBSCOM	TB-3SC _HIGAREF _OBSCOM	From 3SC to 7SC	TB-7SC _SPIN (Or STBY)	From 7SC to 10SC	TB-10SC _SPIN (Or All OFF)	TB-Edge _SPIN (Or All OFF)	TB-4.6SC _SPIN, STBY And Edge (7hours)	Re- Pressurization Warm-up	
Temperature Profile	Room Temp	05-Oct-2010 9:20	06-Oct-2010 1:55	08-Oct-2010 03:10	09-Oct-2010 22:23	09-Oct-2010 02:00	10-Oct-2010 22:10	12-Oct-2010 20:00	13-Oct-2010 20:30	14-Oct-2010 09:00	14-Oct-2010 14:50	14-Oct-2010 00:00
MMO Mode	OFF	OBSCOM	OBSCOM	OBSCOM	STBY	STBY	All OFF	All OFF	All OFF	STBY	Adjustment	
Solar Intensity	N/A	1 SC	3 SC	3 SC	3 to 7 SC	7 SC	7 SC to 10 SC	10 SC	OFF(0 min) to 10SC	4.6SC to OFF(2hr) to 4.6SC	1SC to N/A	
Inclination from Spin axis (deg)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Angle between Solar to Spin (deg)	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	90	
Spin Rate (rpm)	N/A	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN)	0 Fix at HGA-REF	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN)	Max.6 (SPIN) To Stop	
Thermal Control Heater	N/A	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	Enable proportional	
Test Criteria	N/A	Thermal Balance 0.3°C/hr	Thermal Balance 0.3°C/hr	Thermal Balance 0.3°C/hr	N/A	Thermal Balance 0.3°C/hr	N/A	Thermal Balance 0.3°C/hr	Transient 30minutes (Edge)	Transient 2hours (Edge)	N/A	

20

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験

4.6 ソーラ強度



21

4. ESTEC/LSSでの10ソーラ熱平衡試験

4.7 測定項目



測定	使用ch数	備考
熱電対(C-C)温度測定	450ch	
白金温度センサー	9ch	高温部位のみ
ヒータ電力供給(1A)	23ch	内部機器ダミー
ヒータ電力供給(5A)	43ch	内部機器ダミー 及び支持治具
IRカメラ	広角、望遠各1	

22



目次

1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

23

5. 試験結果とLessons Learned

5.1 試験結果概要



- MMOが10ソーラ熱環境に耐えることを実証できた
- 本試験結果により最終的にコリレートした熱数学モデルを用い、フライト熱解析を実施し、いくつかの設計変更を要することが判明した
 - 探査機内部機器の温度を下げるために、下部デッキ放熱面を拡大する
 - 側面パネル内側のMLIを2重にし、断熱性能を向上させる。
 - 外部に露出するアンテナデスパン機構がクルーズ中に冷えすぎる為にサバイバルヒータを追加する
- 最新のフライト温度予測において、全ての機器について許容温度に対し10°C以上の不確定性マージンを確保できた

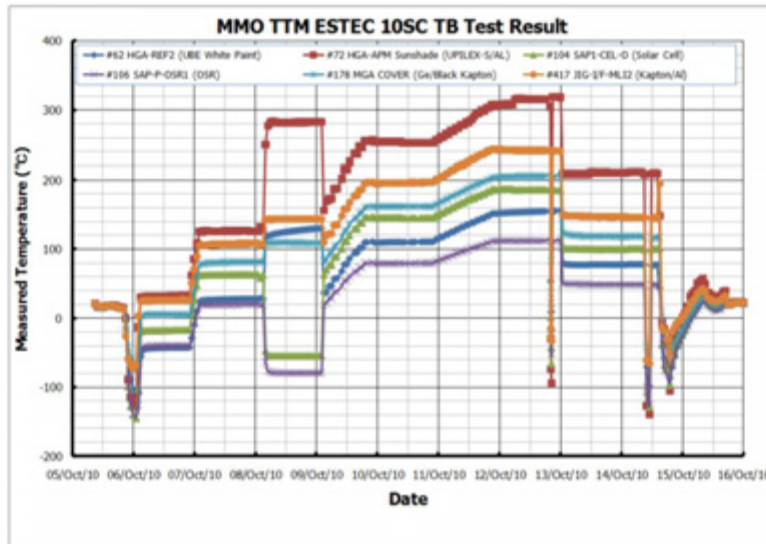
24

5.試験結果とLessons Learned

5.2 外部機器温度プロファイル



- HGAは300°Cに、ソーラアレイは200°Cに達した
- 食模擬の ΔT は400°C~300°Cに達した



25

5.試験結果とLessons Learned

5.3 Lessons Learned



本試験を通して、いくつかの問題点が明らかになった

- ITOコートUplex-S熱制御フィルムの熱光学特性がソーラ照射により大きく変わった。FMではGe蒸着ブラックカプトンに変更した
- 熱制御材として一般的に用いられるアクリル系両面テープY966が、高温になった部位で、溶けて変色した。FMでは耐熱温度が高いシリコーン系のテープを採用する。
- 試験後外観検査において探査機下部デッキ放熱面のOSR1に多量の分子コンタミが発見された。高温環境では分子コンタミが重要な課題であることをあらためて認識した。注意深い材料の選択とベーキングが必要になる。
- 試験直後のコンタミ物質採取/分析、TESA2000による熱光学特性実測がESTECの技術開発部門と連携して迅速に行われ、調査に役立った。

26



目次

1. 水星磁気圏探査機(MMO)の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

27

6.チャンバ設備及び利用に関するトピックス

6.1 全般



- 試験センター運営の民間委託
ESTEC試験センターの運営、設備運転・維持はESAからETS(European Test Service)に委託されている。
ETSはフランスInteSpaceと、ドイツIABGが共同出資した合弁会社で、従業員も両社からの出向者で構成されている。公用語は英語。
- 利用契約とワークパッケージ
試験センター利用者はETSと契約する。試験設備運転の他に、ページガス等の消耗品調達、オフィスやLANの賃借、スモック利用等に至るまでパッケージ化されている。契約後の増減は精算する。VATは非課税。
- テストマネジャー
利用者との調整窓口となるテストマネジャーがアサインされ、各種会議に参加する。
- 構内荷役
供試体コンテナやGSEはトラックからの積み下ろし時点から、ESTEC内の物流業者が構内荷役を実施する。

28

6.チャンバ設備及び利用に関するトピックス

6.2 安全関連



- 安全に関する調査書提出
試験開始2ヶ月前までに所定の調査書(Safety Questionnaire)の提出が義務付けられている。設問はハザード作業抽出や対策、危険物持込など約50項目の多岐に渡っている。
- 安全講習
ESTEC試験センターで作業に従事する要員には、1時間程度の安全講習受講が義務付けられている。数人でも随時開催される。
- クレーン・高所作業台運転講習
自国の免許所有者は、10分程度の実地講習により、クレーン及び高所作業台の運転が許可される。
- 吊り具、台車のプルーフ試験
オランダの法律に基づき、衛星吊り具と衛星台車にはプルーフ試験と4年毎の更新が要求される。現地の認定機関に試験を依頼した。フランス領のギアナ宇宙センターでも有効。

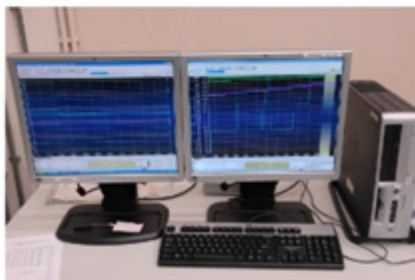
29

6.チャンバ設備及び利用に関するトピックス

6.3 データ処理系



- 温度データの取得・蓄積、ヒータ電源制御はTDH/STAMPと呼ばれるシステムで実施
- 基本的機能はTKSCと類似。一台のクライアント端末で複数画面を表示するマルチタスクが可能
- ユーザがクライアント端末に組んだデータ処理プログラムに取得データをリアルタイムで取り込むオンライン計算機能が便利
- ネットワーク経由でチャンバ室外からも最新データがモニタできる
- 電源設定やソーラ強度の変更は全てRequest Sheetで要求する



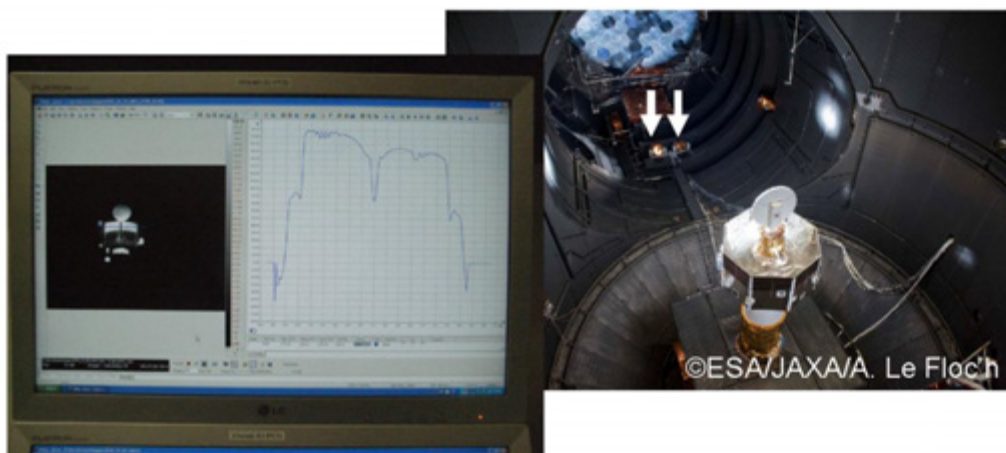
30

6.チャンバ設備及び利用に関するトピックス

6.4 IRカメラ（サーモグラフィー）



- チャンバ内に広角と望遠のIRカメラを常設
- リアルタイムで温度マッピング表示(1フレーム/秒)が得られる
- 供試体外表面の温度分布が大きいソーラ試験では便利



31

6.チャンバ設備及び利用に関するトピックス

6.5 供試体搬入



- チャンバ上部の蓋を開けて、高所へ供試体を吊り上げて直接ジンバル上に設置する方式
- チャンバ設置後の供試体へのアクセスは容易ではなく、台車搬入方式のほうが使い勝手が良い

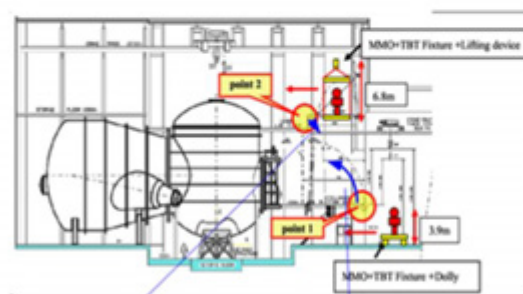
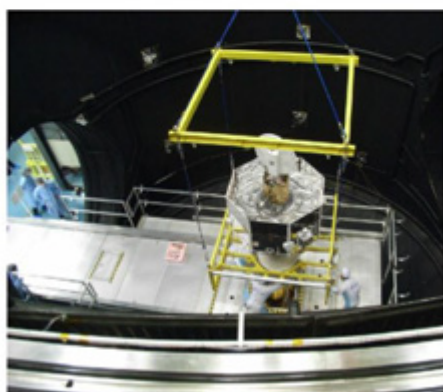
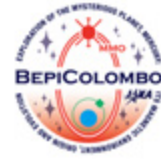


Figure 1-2 Collision Confirmation Point at ESTEC-LSS

Clearance not a problem, the 1.3m fence will be removed

Clearance not a problem, platform will be in vertical position.

32



目次

1. 水星磁気圏探査機 (MMO) の概要
2. MMOの熱設計と検証計画
3. ESTEC/LSSチャンバ設備の概要
4. ESTEC/LSSチャンバでの10ソーラ熱平衡試験
5. 試験結果とLessons Learned
6. チャンバ設備及び利用に関するトピックス
7. 結論・謝辞

33



7. 結論

- MMOの熱設計は、熱試験モデルを用いた3段階の熱平衡試験により検証する計画であり、その最終段階として10ソーラ環境での熱平衡試験をESA/ESTECのLSSチャンバで実施した。
- ESTECでの10ソーラ熱平衡試験によりMMOが厳しい水星の熱環境に耐えることを実証できた。
- 試験後のコリレーションにより、高温領域を中心とした熱数学モデルのチューニングを実施し、10ソーラ試験で判明した諸問題点はフライトモデルの設計に反映した。
- 10ソーラの未知の環境での試験を通じて、コンタミネーション対策をはじめとする貴重な知見・教訓を得た。
- ESAの附属施設とはいえ、欧州流に民営化された試験センターの運用実態を知ることができた。

34

謝辞



10ソーラの未知の熱環境、及び2ヶ月間に及ぶ海外での大規模な熱真空試験を、計画通り安全に実施できた。

試験に直接・間接に参加したメンバはもとより、数年前から準備・調整に尽力いただいたJAXA、NEC関係者、現地で親身に支援いただいたESA、ETSの関係者に、心から謝意を表したい。



質疑応答

質問者① JAXA OB 吉田様

JAXA 試験規格と ESA の規格との齟齬について何かあったか。

発表者

試験条件などは我々が通常行っている範囲で行える。ただ、安全面はより厳しい印象を受けた。

質問者② JAXA EarthCARE プロジェクト 岡田様

ESTEC で試験を行うとき、供試体に関わる作業は NEC で行うのか。

発表者

供試体に関しては全て NEC、JAXA が行う。また供試体の吊り上げ作業なども NEC、JAXA で行っている。設備に関わる場所は ETS が行う。

質問者③ JAXA 衛星機構構造グループ 佐々木様

軌道上温度での事前ベーキングは難しいと考えるが、何か工夫したことがあれば教えていただきたい。

発表者

軌道上温度の 200℃以上のベーキングを行うと、機械的に弱くなってしまい打上げ環境に耐えられなくなってしまう。従って軌道上温度でのベーキングは不可能である。太陽電池パドルについては JAXA 材料グループの協力の基、低い温度で長時間ベーキングすることで、軌道上でのアウトガスを許容レベルまで低減するという検討を行っている。

質問者④ 筑波大学 亀田様

試験設備のユーザインターフェースに関する印象を聞かせていただきたい。

発表者

リアルタイムで温度データの統計処理ができるといった点が優れていると感じた。

質問者⑤ JAXA 山本理事

熱衝撃の繰り返しにより疲労などはないのか。また ETS の人数など、印象を教えてください。

発表者

この試験では 1 サイクルしか行っていないが、下位のハードウェアレベルで高サイクルの熱衝撃試験を行っている。ETS の規模としては 30 名程度であった。海外のユーザに対して慣れている印象を受けた。