

SOLAR-B可視光・X線望遠鏡の開発・試験における汚染評価と フライト部品のベーキング結果報告

田村友範, 原 弘久, 常田佐久, 一本 潔, 熊谷収可, 中桐正夫, 清水敏文, 坂尾太郎*, 鹿野良平

(2004年9月30日受理)

Contamination Evaluation and Thermal Vacuum Bakeout for SOLAR-B Visible-Light and X-Ray Telescope

Tomonori TAMURA, Hirohisa HARA, Saku TSUNETO, Kiyoshi ICHIMOTO, Kazuyoshi KUMAGAI,
Masao NAKAGIRI, Toshifumi SHIMIZU, Taro SAKAO*, and Ryouhei KANO

Abstract

In the development of space telescopes, we are concerned about molecular outgassing materials from telescope components. In particular, for solar telescopes in space, the deposition of the outgassing materials may lead to the increase of solar absorptance at a mirror surface and it causes the thermal distortion due to the resultant temperature increase. The mirror reflectivity at vacuum ultraviolet wavelengths is very sensitive to molecular contamination. We have extensively evaluated reflectance at 121.6nm (Lyman-alpha) of the contamination witness mirrors exposed to the telescope testing environments in the SOLAR-B visible-light telescope program. Thermal vacuum bakeout of flight components is very effective process to reduce the outgassing rate. We have severe contamination control program during the assembly and testing of the SOLAR-B telescope up to launch of the satellite.

1. はじめに

SOLAR-Bのように太陽光に直射される宇宙望遠鏡では、アウトガス吸着に起因する光学部品の分子汚染によって鏡面の太陽光吸収率が増加し、吸熱による鏡面変形を引き起こす懸念がある。SOLAR-B可視光望遠鏡(OTA: Optical Telescope Assembly)では、地上試験における分子汚染管理のために望遠鏡と同一環境に汚染評価用のミラー(以下Witness mirrorと記す)を暴露し、打ち上げまでの試験期間において望遠鏡がどれだけ汚染されるかを調べてきた。ミラーの真空紫外線での反射率は、有機物による汚染に敏感であることが知られており¹⁾, 反射率の変化からミラーへの汚染物質の蓄積量が求められる。汚染評価は、国立天文台の真空紫外線反射率測定装置を使用して、Witness mirrorのライマン α 光 (1216 Å) における反射率を測定することで行っている。

宇宙空間では、望遠鏡自身のアウトガス放出による汚染が最も懸念される。この汚染を極力減らすためには、地上で望遠鏡部品を高温真空環境下においたベーキングを実施して、アウトガスを積極的に放出させておく必要がある。望遠鏡の組立前には部品ごとに可能であるものは全てベーキングを実施した。ベーキングには国立天文台の天文機器開発実験センター、高度環境試験棟のクリーンルーム内に設置された5台の真空槽を使用した。ベーキングの終了を判定するために、真空槽の中にアウトガス分子の吸着を検出できる水晶振動子センサー (Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance: 以下TQCMと略す) を配置して、供試体から放出されたアウトガスのTQCMへの吸着レートを測定した。ベーキングは、部品ごとに軌道上で許容できる初期アウトガスレートを計算して基準を設定し、その基準を満たすまで続けられた²⁾。

可視光望遠鏡の主鏡の場合、鏡表面への汚染物質の許容蓄積量は約200 Åであり、これを超えな

* 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency)

いように製作，試験段階から望遠鏡の汚染管理，各部品のアウトガス量の管理を行う必要がある．地上試験，軌道上でのミッション期間終了までに許容汚染レベルに達することを防ぐため，後述する Witness mirror による望遠鏡の汚染評価やフライト品の徹底したベーキングを行っている，本論文では，Witness mirror 評価とベーキング結果について合わせて報告を行う．

2. Witness mirror を使用した汚染評価

2.1 Witness mirror 反射率測定による汚染評価

汚染物質の堆積した鏡の反射率 $R(\lambda)$ は，汚染物質の吸収係数 $k(\lambda)$ ，堆積厚さ d 、鏡の初期反射率 R_0 とすると式（1）のように表される．

$$R(\lambda) = R_0 \exp[-2k(\lambda)d] \quad (1)$$

典型的な汚染物質のライマン α 光 (1216 Å) での吸収係数を $k = 9 \times 10^{-3} \text{ Å}^{-1}$ として³⁾，Witness mirror の反射率測定で検出可能な汚染

物質の堆積量を評価する．NASA Marshall Space Flight Centerの文献⁴⁾によると，評価に使用するミラーはNASAの基準では真空紫外線で78%以上の反射率が必要であるが，使用した Acton Research Corporation製のミラーは，真空紫外線で80%以上の反射率を持つ．真空紫外線反射率測定装置による測定誤差は1%以下なので，Witness mirrorに1 Å以上の汚染物質の堆積があれば反射率測定によって汚染を検出することができる．可視光の場合には，汚染物質の吸収係数は $k = 3 \times 10^{-5} \text{ Å}^{-1}$ ($\lambda = 5000 \text{ Å}$) であり¹⁾，ミラー反射率の1%の劣化は汚染物質の200 Åの堆積に相当するため感度の良い汚染検出はできない．

2.2 真空紫外線反射率測定装置の概要

図1-a,b,cに真空紫外線反射率測定装置を示す．測定装置は国立天文台天文機器開発実験センターのクリーンルームの中に設置されており，光源，分光器，真空槽，真空槽内のゴニオメータに設置した検出器からなる．光源はガスフロー型の放電管であり，本測定では流入ガスに水素を使用した．

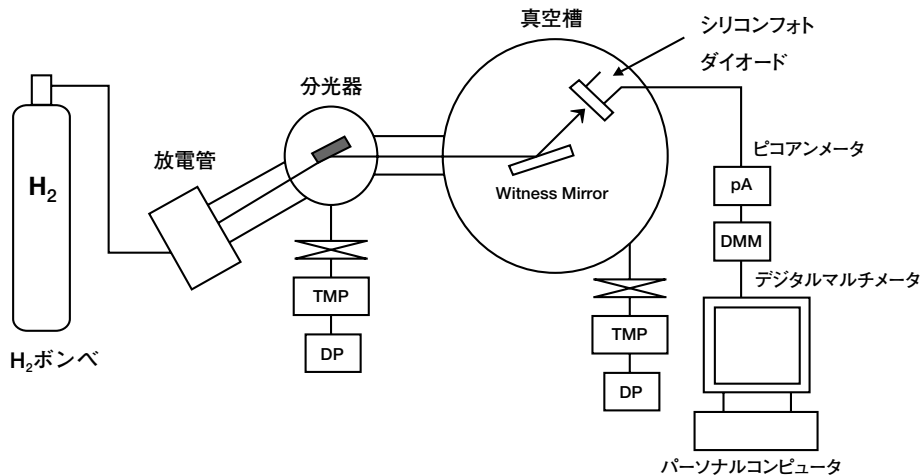


図1-a. 真空紫外線反射率測定装置

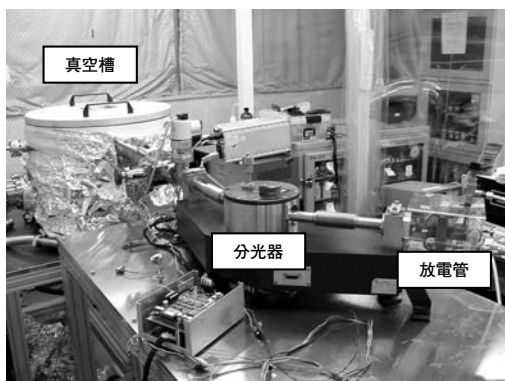


図1-b. 反射率測定装置の外観

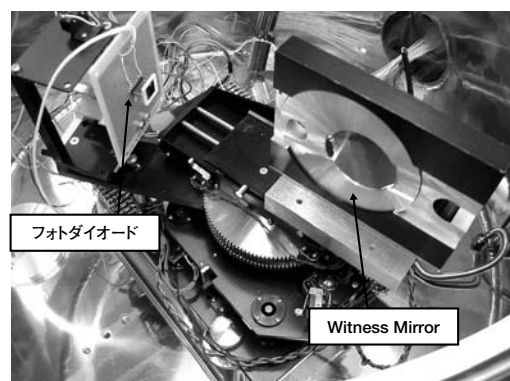


図1-c. 真空槽内部

分光器は斜入射型であり、測定では1216 Å（ライマン α 光）の波長を用いる。真空槽（ $\Phi 600$, h370）内のゴニオメータでミラーと検出器を回転、移動させることができる。

2.3 真空紫外線検出器

検出器は、真空紫外線に感度を持つ以下の3種類を使用した。

- 1) マイクロチャンネルプレート（浜松ホトニクス製F1094）

受光部寸法： $\Phi 20\text{mm}$ 。マイクロチャンネルプレート（以下、MCPと略す）は、細いガラスパイプを多数束ねたものを薄い板状に仕上げたものであり、それぞれのガラスパイプが独立した二次電子増倍管を形成している。ガラスパイプの内壁に入射粒子を衝突させるためにプレートの垂直軸に対してパイプは角度がついている。この検出器は光の入射角度に敏感でありまた面むらもあるため、測定には検出器の高い位置精度が要求されるが、天文台測定装置のゴニオメータでは検出器の回転角度に約 ± 1 度の誤差があり、それによって反射率は7%前後の誤差が生じるため、本測定の使用には適さなかった。

- 2) CCD（Site社製 裏面照射型 SI-502A）

画素サイズ： $24\mu\text{m} \times 24\mu\text{m}$ 、画素数：512×512。CCDは入射光の画像が取得できるため、測定時に光のケラレの有無を確認できることもあり本測定の検出器としては適している。

- 3) シリコンフォトダイオード（International Radiation Detectors社製 AXUV-100）

受光部寸法： $10\text{mm} \times 10\text{mm}$ 。本測定で主に使用している検出器。他の検出器と比べると扱いが容易であり、ダイオードの電流を測定すればよいので検出装置も簡単である。

2.4 光源の安定性

測定には光源の安定性が極めて重要な要素となる。光源は放電管電流と分光器に取り付けた真空計の値が常に一定となるように放電ガスの流量を調整することで安定させている。フォトダイオードに光を入射させて、光源のゆらぎを測定すると、出力値のバラツキは $\sigma = \pm 0.25\%$ である。この光源の安定性は点灯後数時間が経っても変化が見られないことから、ミラー反射率の1%以上の変化を測定するには十分である。

2.5 反射率測定方法

評価に使用するWitness mirrorは、Acton Research社製の直径1インチ、2インチのミラーであり、ライマン α 波長で約80%の反射率を持つ。真空槽の入口には $4\text{mm} \times 4\text{mm}$ の穴があり、分光器から出た光はこの穴を通して真空槽内に入り、Witness mirrorと検出器に入射する。光のミラーへの入射角度は、鏡面から測って10度（2インチミラー）、30度（1インチミラー）の角度で入射させている。以下にシリコンフォトダイオード使用時の測定手順を示す。

●測定手順

- 1) 大気中でHe-Neレーザーを放電管から装置に入射して、Witness mirrorとフォトダイオードのおおまかな位置を合わせる。
- 2) 真空引き
- 3) 直接光測定。ライマン α 光をフォトダイオードに直接入射して、フォトダイオードをゴニオメータで上下左右に動かして電流値を読み、光量のピークを探す。測定は、最初に分光器のシャッターを閉じてdarkを測定し、次にシャッターを開けて直接光を測定、最後に再びシャッターを閉じてdarkを測定する。
- 4) 反射光測定。ライマン α 光をWitness mirrorに入射させて、Witness mirrorを上下左右に動かしてフォトダイオードの電流出力を読み、ケラレていないか調べる。その後、フォトダイオードを上下左右に動かして電流値を読み、光量のピークを探す。測定は、最初に分光器のシャッターを閉じてdarkを測定し、次にシャッターを開けて反射光を測定、最後に再びシャッターを閉じてdarkを測定する。
- 5) 3)、4) を5回繰り返して測定する。

2.6 Witness mirror による汚染評価結果

- (1) 衛星システム熱平衡試験における汚染評価

熱平衡試験は衛星を軌道上の環境にさらし、熱試験モデルによる熱設計の検証を行う試験である。試験は、2002年10月に宇宙航空研究開発機構の大型スペースチャンバーを使用して行われた。Witness mirrorは真空チャンバーのフランジに取り付けて、ペルチェ素子によって温度を下げて、 -20°C に維持した。試験前の反射率測定では検出器にMCPを使用した。紫外線感度を上げるためにMCPに蒸着されているヨウ化セシウムがその後の繰り返し測定によって何度も大気にさらされて蒸発し感度が落ちてしまい測定が出来なくな

ったため、試験後はCCDで測定を行った。試験の前後におけるWitness mirrorの反射率測定結果を表1に示す。この結果を見ると、反射率が約6%落ちている。しかし、2.3 1) に記述したように、後にMCPは測定誤差が大きいということが分かったため、この試験のWitness mirrorによる汚染評価は正確ではない。しかし、試験後のCCDで測定した反射率は、別の未使用のミラーの反射率とほぼ同程度であり、試験による汚染はほとんどなかったと推測される。この後CCDが故障したために、これ以後の測定は全て検出器にシリコンフォトダイオードを使用したものである。

(2) OTA熱光学試験における汚染評価

OTAフライトモデルの真空環境における熱光学試験（2004年5月と7月の2回実施）、及びOTAの像安定化装置（CTM：Correlation Tracker & Tip-Tilt Mirror System）単体の熱光学試験（2003年12月）でもWitness mirrorによる汚染評価を実施した。OTA試験では望遠鏡自身にWitness mirrorを取り付け、CTM試験では真空槽の温度可変シュラウドの底に配置した。結果を表1に示す。いずれも試験の前後で反射率の変化は測定誤差の範囲内であり、汚染は検出されなかった。

(3) 電子ビーム溶接における汚染評価

OTAの光学部品の中で排熱鏡と2次絞りは鏡部と鏡筒部を溶接で接合する必要があるため、電子ビーム溶接が行われた。電子ビーム溶接とは、真空（約0.01 torr）中で加速した電子を標的に照射して溶接する方法である。この溶接によって光学部品が汚染される懸念があり、Witness mirrorを使用して装置の事前評価、溶接時の汚染の有無の検証を行った。表1に排熱鏡と2次絞りのダミー品にWitness mirrorを取り付けて本番と同様に溶接した時の評価結果を示す。結果は溶接の前後での反射率の変化はいずれも測定誤差の範囲内であり、電子ビーム溶接による汚染は検出されなかった。

表1. Witness mirrorの反射率測定結果

試験／評価	試験前測定	試験後測定
熱平衡試験	79.9±1.6% (2002年10月4日)	73.7±0.9% (2003年2月)
OTA熱光学試験1	77.2±0.8% (2004年1月21日)	77.9±0.9% (2004年6月1日)
OTA熱光学試験2	77.6±0.7% (2004年7月3日)	78.1±0.8% (2004年7月26日)
CTM熱光学試験	71.9±0.5% (2003年12月9日)	72.0±0.8% (2004年1月20日)
ダミー2次絞りの	78.0±0.6%	77.8±1.0%
電子ビーム溶接評価	(2004年6月1日)	(2004年6月11日)
ダミー排熱鏡の	77.8±1.0%	77.6±0.7%
電子ビーム溶接評価	(2004年6月11日)	(2004年7月3日)

3. 望遠鏡フライト品のベーキング

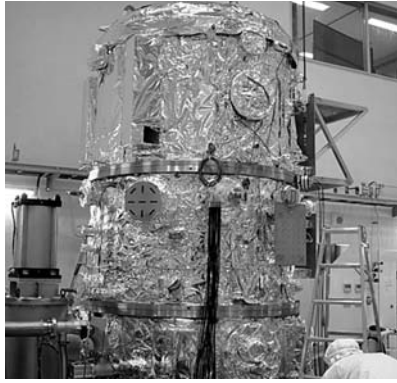
3.1 OTAのベーキング

OTAでは米国のSwales社に依頼して軌道上での分子コンタミネーションの評価を行った。Swales社の分子コンタミネーションモデルによると衛星打ち上げ後、主鏡には5年で汚染物質が211Å堆積すると予測されている。主鏡表面への汚染物質の許容蓄積量は約200Åであるため、モデル通りであれば約5年は初期光学性能を維持することが可能である。モデルから望遠鏡の各部品で許容されるアウトガス量が求められるので、ベーキングは、アウトガスレートがこの許容値以下になるまで行う必要がある。このベーキング終了基準は非常に厳しいものであり、OTAのCFRP構体で約2ヶ月、その他の部品でも長いもので1ヶ月ものベーキングを行った。

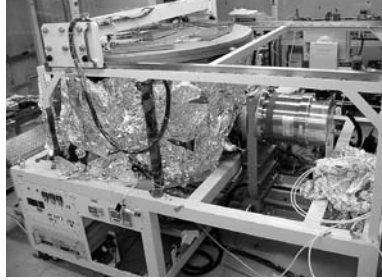
OTAのフライト部品のベーキングは、2003年7月から2004年8月までの間、国立天文台の2つのクリーンルーム内に設置された真空槽（図2）を使用して、ベーキング不可である光学部品などを除く全ての部品を対象に実施した。ベーキングは各部品の許容最高温度-10℃で行われ、ベーキング後に軌道上における最高温度+10℃に設定し、温度-80℃まで下げたTQCMに吸着するアウトガスレートを測定して終了基準を満たすかどうか判定する。TQCMは、QCM research社製水晶振動子センサー MK10、発振周波数 15MHz、感度 $1.96 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-1} \text{ Hz}^{-1}$ である。TQCMの測定値は水晶振動子の発振周波数の時間変化で表されるが、吸着した汚染物質の密度を 1 g cm^{-3} と仮定し、周波数を堆積厚さに換算すると $1 \text{ Hz} = 0.2 \text{ Å}$ に相当する。軌道上で光学部品の温度が-80℃まで下がることはないが、太陽光に含まれる紫外線の照射によって汚染物質の吸着係数が増大する可能性があるため¹⁾、TQCMの温度をできるだけ下げてアウトガスを測定しておく必要がある。

3.2 各部品のベーキング終了条件の設定

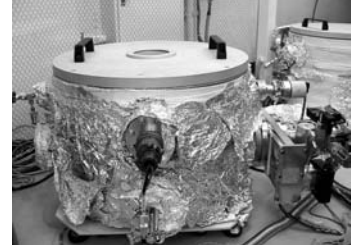
望遠鏡の軌道上における初期のアウトガスレートは、ベーキング終了後のアウトガスを実測することで分かる。逆に言えばコンタミネーションモデルから決まるアウトガス許容量以下になるまでベーキングを続ければよいということになる。ベーキングの前に、まず1つ1つの部品の軌道上初期におけるアウトガス放出レートの許容値を決定する。コンタミネーションモデルで軌道上のアウトガスレートが評価されている部品はそれを基に



真空槽A
(内径：1.8m, 高さ：4 m)



真空槽B
(内径：1.2m, 高さ：0.65m)



真空槽C
(内径：0.6m, 高さ：0.37m)

図2. ベーキングで使用した真空槽

許容値を決めて、未評価の部品（約20個）は実現性と許容レベルを考慮した上でCFRP製主鏡セルのアウトガスレート解析値の5%以下を各部品の統一した許容値と決めた。

次にそのアウトガス放出レートを各真空槽で行うアウトガス測定時のTQCMへの吸着レートに変換する。この変換でそれぞれの真空槽ごとにベーキング終了条件が設定できる。変換は以下のように行う。

- (1) 供試体から放出された分子がTQCMに衝突した後、そのまま吸着するか反射するかは分子の飽和蒸気圧とTQCMの温度の相関で決まる。前述したように紫外線照射の影響を考慮してTQCMは -80°C に設定しており、ここでは供試体から放出された汚染物質のうちTQCMに衝突した分子は全てTQCMに吸着すると考える。
- (2) アウトガス測定時の真空槽内壁の温度は室温以上であるため壁に衝突した分子は壁には吸着せずに反射すると考える。供試体から出たアウトガスは、真空ポンプで外に排気されるかTQCMに吸着するかのどちらかであるので、TQCMへのアウトガスの吸着レートは真空槽のポンプ開口寸法によって変わることになる。TQCM吸着レートが一定である時、供試体放出レート = TQCM吸着レート + ポンプ排気レート となるので、TQCM周波数レート $F \text{ Hz hr}^{-1}$ は、供試体放出レートを $M \text{ g hr}^{-1}$ 、TQCM検出器面積を $S_{\text{TQCM}} = 0.316\text{cm}^2$ 、ポンプ排気口面積を S_p 、ポンプ排気効率を C とすると、式(2)のように表される。表2にベーキングで使用した真空槽の寸

法、図3に真空槽Cを示す。

$$F = M \times 1 / (6.2 \times 10^{-10}) \text{ Hz g}^{-1} \times \{ S_{\text{TQCM}} / (S_p C + S_{\text{TQCM}}) \} \quad (2)$$

このように求めたベーキングの終了判定基準は、各部品と真空槽の組み合わせによって異なり、それぞれの値は表3に示すようになる。

表2. ベーキング真空槽

	内径[cm]	高さ[cm]	ポンプ開口[cm ²]	ポンプ排気効率
真空槽A	180	400	1256.6	0.5
真空槽B	120	65	452.3	0.5
真空槽C	60	37	71.8	0.5

*各真空槽の排気効率は明らかではないため一律0.5とした。

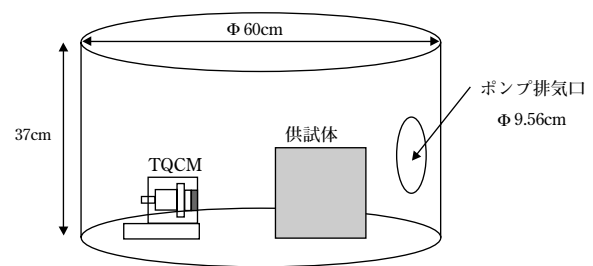


図3. 真空槽C

3.3 CFRP構体のベーキング

図4は望遠鏡のCFRP製の構体をベーキングするために、クレーンで吊って真空槽の中に入れようとしているところである。CFRP構体は真空槽内の銅シュラウドの中に設置され、真空槽外壁のヒーターによって真空槽全体の温度を 70°C まで上げてベーキングを行う。CFRP構体に関してはSwales社によってコンタミネーションモデルを基にしたベーキング終了条件が示されており、



図4. CFRP構体のベーキング準備

CFRP構体の温度が 70°C ，TQCM温度が -47°C の時にTQCMの周波数変化率が 45Hz hr^{-1} 以下という値であった．ベーキングは2回に分けて実施された〔第1次：2004年7月5日～8月13日（39日間），第2次：2004年10月5日～11月1日（27日間）〕．図5に第2次ベーキングのアウトガス測定値の経過をTQCMの周波数変化率で示す．最初は 1000Hz hr^{-1} を超えていたアウトガスレートは6日で十分の一になり，その後も少しずつ減り続け，最後は 36Hz hr^{-1} まで下がった．アウトガスの測定方法は，まず供試体が真空槽に入った状態で測定し，供試体を真空槽から取り出した後に再度真空槽のみで測定して，その差を取って供試体のアウトガスレートとする．真空槽のみのTQCM測定値は 32Hz hr^{-1} だったので，ベーキング後のCFRP構体のアウトガスレートは 4Hz hr^{-1} である．結果として，のべ66日間のベーキングによって，設定した終了条件を大幅に下回るアウトガスレートまで下げることが成功した．

3.4 OTAフライト部品のベーキング

CFRP構体以外の部品では，ベーキング終了を判定する温度条件は全部品で統一し，供試体の温度を各々の軌道上における最高温度 $+10^{\circ}\text{C}$ に設定し，TQCMの温度を一律 -80°C とした．TQCMはセンサー自身をペルチェで冷却することが可能だが， -80°C までは下がらないため，センサーの

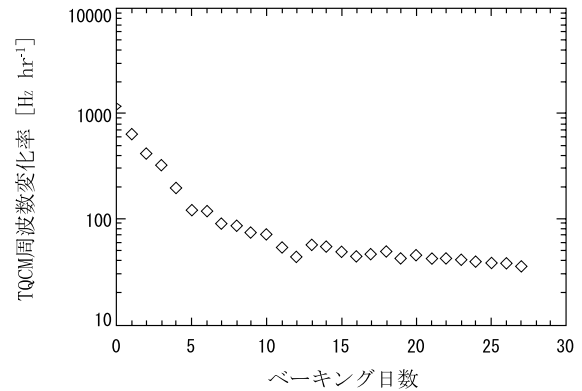


図5. 第2次CFRP構体ベーキング経過

放熱ジグに配管をつけてバスサーキュレータで冷媒（ガルデン：フッ素系不活性液）を循環させて -60°C まで冷却させた．放熱ジグにはアウトガスが吸着しないようにまわりをカバーで囲んで，センサー部だけ露出するようにして測定した．ベーキングの結果を表3，ベーキング部品の一部を図6に示す．最初はベーキングがいつ終わるのかよく分からず，望遠鏡組立工程に及ぼす影響が心配されたが，経験を積むことにより使用材料などから必要なベーキング期間をある程度予測できるようになった．それぞれ，ベーキング温度や期間が異なるが，シリコン接着剤を使用した物（サンシェードなど），グラステープを巻いたハーネスなどは，目立ってベーキングに時間がかかり苦労することになった．またベーキング温度の高低よりも，ベーキング温度とアウトガス測定温度との差がベーキング日数に大きく影響した．現在までにベーキングが終了した部品は，全てがベーキング終了条件を満たした上で望遠鏡に組み込まれた．

3.5 X線望遠鏡のベーキング結果

SOLAR-BのX線望遠鏡（以下XRTと略す）は，日本がX線CCDカメラや観測制御コンピューター，米国（スミソンアン天文台，NASA）がX線ミラーや全体構造の開発を行っている．XRTではCCDの軌道上予測最低温度が -78°C と低く，またCCDの感度（波長 $200\text{\AA}$ ）は，汚染物質の堆積が $10\sim 20\text{\AA}$ で影響が出てしまうため厳しいベーキング条件を課す必要がある．日本が担当しているCCDカメラ部の部品は国立天文台でベーキングを行った．OTAのベーキングと基本的には同じであるが，以下のような条件で実施した．

- (1) TQCM温度を $-84\sim -88^{\circ}\text{C}$ とした．
- (2) CCDカメラ部は軌道上最高温度が室温以下なので，アウトガス測定時の供試体温度は全

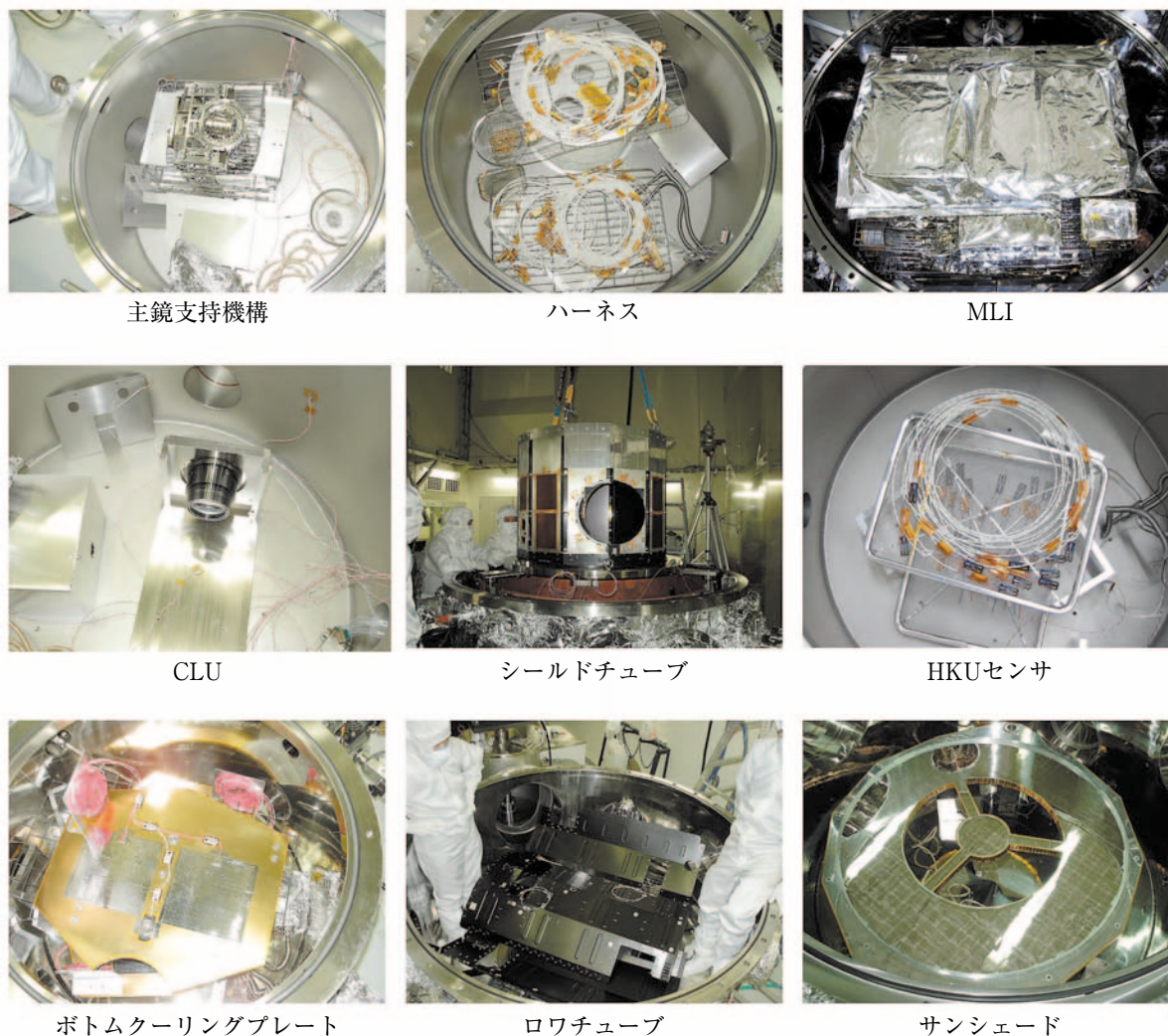


図6. OTAベーキング部品

表3. OTA部品のベーキング結果

品名	主なアウトガス源 材料	ベーキング 温度	ベーキング 期間	真空槽	アウトガス 測定温度	TQCM 測定値 [Hz hr ⁻¹]			備考 (部品の説明等)
						ベーキング後 TQCM測定値	TQCM値 終了基準	合・否	
CTM-TM	シリコン接着剤	60℃	9日	C	43℃	2.0	6.5	合	ビュン素子を使用した観測 画像安定化装置の可動鏡部
主鏡/副鏡HKUセンサ(4個)	ケーブル	70℃	17日	C	50℃	<1.4	6.5	合	白金温度センサ
主鏡支持機構	エポキシ接着剤	60℃	3日	C	31℃	<1.8	6.5	合	主鏡を支持する3本足
CLU(コリメーターレンズユニット)	シリコン接着剤	38℃	16日	C	38℃	<0.2	6.5	合	光を平行光に変換する
副鏡ヒータープレート	グラステープ	85℃	13日	C	70℃	2.0	6.5	合	副鏡加熱ヒーター
断熱ワッシャ	-	97℃	2日	C	60℃	<0.2	6.5	合	-
排熱鏡スパイダー	シルバートフロン	75℃	3日	C	28℃	<1.0	6.5	合	不必要な太陽光を宇宙に排 出する鏡の支持部(3本)
ボトムクーリングプレート	グラステープ	70℃	11日	C	51℃	2.6	6.5	合	主鏡の放熱板
ハーネス(CFRP/ST/LT/CTM)	グラステープ	110℃	25日	A	50℃	<1.0	1.0	合	-
ハーネス(ドア)	グラステープ	110℃	18日	C	20℃	<1.0	6.5	合	-
トップドア/サイドドア/ シールドチューブ	グラステープ/ シルバートフロン	75℃	11日	A	20℃	<1.0	1.0	合	望遠鏡のドア及び カバー
小型HKUセンサ	ケーブル	70℃	8日	C	45℃	2.6	6.5	合	白金温度センサ
ロウチューブ/ボトムカバー	グラステープ	85℃	18日	A	60℃	<1.0	1.0	合	望遠鏡のカバー
コネクタパネル	中継端子	80℃	4日	C	28℃	1.8	6.5	合	-
ボトムカバーセンターブ レート	中継端子	80℃	7日	C	60℃	<1.0	6.5	合	底面カバーのヒーター 付プレート
熱収縮チューブ	-	100℃	1日	C	50℃	<1.0	6.5	合	-
テープレーシング	-	110℃	10日	C	50℃	<1.0	6.5	合	ケーブルの結束ひも
MLI	ポリイミド	110℃	15日	A	60℃	<1.0	1.0	合	熱制御フィルム
CTM-TM基板	コンフォーマル コーティング剤	100℃	5日	C	45℃	<1.0	6.5	合	可動鏡駆動回路基板
HKUセンサ②(23個)	ケーブル	75℃	6日	C	45℃	<1.0	6.5	合	白金温度センサ
排熱鏡シリンダ	ケーブル	80℃	4日	C	42℃	<2.0	6.5	合	排熱鏡を溶接する筒
タイラップ	-	100℃	6日	C	45℃	<1.0	6.5	合	ケーブル固定用
サンシェード(1回目)	シリコン接着剤	75℃	27日	B	29℃	6.0	3.6	否	不要な太陽光を反射する 放熱板
サンシェード(2回目)/ シールドチューブ	シリコン接着剤	75℃	5日	A	29℃	<1.0	2.0	合	-

で室温とした。

(3) ベーキング終了基準を全ての部品で統一して
1 Hz hr⁻¹以下とした。

(4) ベーキングは全て真空槽Cで行った。

ベーキング結果を表4に示すが、全ての部品でアウトガスレートは、1 Hz hr⁻¹以下、もしくはそれをわずかに超えた程度であり、目標とするアウトガスレベルに達することができたと言える。

表4. XRT部品のベーキング結果

品名	主なアウトガス源 材料	TQCM 測定値 [Hz hr ⁻¹]		
		ベーキング 温度	ベーキング 期間	ベーキング後 TQCM測定値
XRT-Sシャーシ部品1	-	100℃	1日	<0.2
XRT-Sシャーシ部品2	-	100℃	1日	<0.2
バックプレート	ケーブル	50/60℃	8日	0.3
ブリアンプ	コンフォーマル コーティング剤	50/55℃	20.5日	0.8
アルミナワッシャ	-	100℃	3日	2.7
ラジエータ	シルバートフロン	80℃	14日	1.0
SUSワッシャ	-	100℃	1日	0.5
ピンボルト/ナット	-	80℃	1.5日	1.5

4. まとめ

本報告では、SOLAR-Bにおける地上試験時のWitness mirrorによる汚染管理、評価、及びベーキングによる軌道上での汚染管理、評価の方法と結果を示した。結果として現在までの汚染管理は問題なく進んでいると言える。

Witness Mirrorによる評価では、現在までの地上試験においてOTAフライト品が汚染されたという結果は出ていない。今後の真空試験としては、2005年にOTA熱光学試験、2006年に衛星の熱真空試験が予定されており、続けて汚染評価を行っていく。

OTAでは現在までのベーキングの結果、全ての部品のアウトガス量は設定したベーキング終了基準を下回っており、コンタミネーションモデルで見積もられた5年という望遠鏡の寿命はさらに延びると予想される。またXRTでも全体として目標のアウトガスレベルを達成することができた。

これからも2006年の衛星打ち上げまで地上試験は続き、望遠鏡のベーキングもまだ残されている。今後も今までと同様に厳しく汚染管理を行っていく必要がある。

謝 辞

ここに報告したSOLAR-Bのコンタミネーション評価は5年にわたる準備、試験の結果であり、その間SOLAR-B推進室の方々には実験に関する様々な助言、協力をいただき、また関係各社にはアウトガス測定試料を提供していただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) A. C. Tribble, B. Boyadjian, J. Davis, J. Haffner, and E. McCullough: Contamination Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA Contractor Report 4740 (1996).
- 2) 田村友範, 原 弘久, 常田佐久, 一本 潔, 熊谷収可: Solar-B 可視光望遠鏡で使用する複合材料及び接着剤のアウトガス放出に起因するコンタミネーションの定量的評価(I), 国立天文台報, **6**, 49-58 (2002).
- 3) J. D. Austin : Contamination control plan for prelaunch operations, SPIE Vol.338, 42-48 (1982).
- 4) Thermal Vacuum Bakeout Specification For Contamination Sensitive Hardware, MSFC-SPEC-1238 (1986).
- 5) 常田佐久, 山口朝三: 衛星搭載光学機器のコンタミネーションの定量的評価, 搭載機器基礎開発成果報告書, Vol.6, 宇宙科学研究所, (1993).