

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)

田村友範, 原 弘久, 常田佐久, 一本 潔, 熊谷収可

(2002年3月29日受理)

Contamination Evaluation and Control for Solar-B Optical Telescope

Tomonori TAMURA, Hirohisa HARA, Saku TSUNETA, Kiyoshi ICHIMOTO, and Kazuyoshi KUMAGAI

Abstract

In space telescopes, the deposition of molecular outgassing from its component parts may degrade the mirror reflectivity. In the case of the SOLAR-B visible light telescope, the molecular contamination is even more threatening since the deposited contaminants, when illuminated by the ultraviolet light from the sun, not only blacken but also promote further deposition. We thus started an extensive program to measure outgassing from all the non-metal material candidates to be used for the SOLAR-B telescope and to evaluate various chemical-cleaning (de-oil) procedures for the metal parts. The evaluation is based on NASA-MSFC-SPEC-1238 specification, and Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance is the primary apparatus for the measurement. We are able to select the best possible adhesives and de-oil procedures for the flight model, whenever there are multiple choices. Conditions for the flight-model vacuum bakeout will also be established based on the measurements. The program significantly mitigates the risk due to molecular contamination in the Solar-B program.

1. はじめに

人工衛星に搭載された望遠鏡では、宇宙空間で光学機器が汚染されてしまうとそれを取り除くことはほぼ不可能であり、汚染を定量的に予測しその対策を施す（汚染源を取り除くなど）ことが極めて重要である。固体表面から出るアウトガスは、材料そのものの蒸気または物質表面に付着している不純物のガスである。放出されたガスが固体表面に入射すると、気体分子はすぐに反射されるかまたは表面に吸着する。入射面がエネルギーの低い低温面であれば吸着した分子は長時間面上に留まることになる。このような分子の吸着による汚染のことを分子コンタミネーションと呼ぶ。アウトガスが光学面に吸着した場合、物質によっては光学面の反射率が減少する。Solar-Bのような太陽望遠鏡の場合、吸着した汚染物質は、紫外線照射によって光化学反応を起こすことが知られており、太陽光に含まれる強力な紫外線によって黒色化する、汚染物質の吸着量が増加するという問題が発生する可能性がある^{1,2)}。したがって、Solar-Bにおいてアウトガス問題は、太陽光吸収が増加することによる温度上昇、さらにはそれによる光学素子の熱変形により結像性能の劣化を引き起こす極めて重要な問題である。

分子コンタミネーションを防ぐためには、機器の設計段階及び部品選定の段階で使用部品からのアウトガスによる

汚染が極力少なくなるようにする必要があり、以下のような設計指針が非常に有効な対策となる。(1) 配置：光学面に直接対向する部分にアウトガス源になる可能性のある物（接着部品、ケーブルなど）を配置しない。(2) 温度：光学面は周囲の構造物と比較して温度が高くなるように設計する。(3) 材料選定：複合材料、接着剤、金属のコーティング材料などはアウトガスの少ない材料を使用する。したがって、使用する材料のアウトガスを測定して問題とならないことを地上試験で確認しておく必要がある。

このようなコンタミネーションの評価と対策は、宇宙ミッションの成否を握る要素の1つとして極めて重要であるにもかかわらず、我が国では大手宇宙航空産業、宇宙関係の機関を含めてこれまであまり関心が払われていなかった。

Solar-Bでは、複合材料、接着剤はもちろんのこと、金属も汚染源になる可能性のあるものはすべて、国立天文台においてアウトガス評価を行っている。評価の目的は、(1) 使用材料のベーキングや金属部品の脱脂洗浄の効果を調べて、適切なベーキングや脱脂によりコンタミネーションを減らすこと、(2) 使用接着剤のアウトガス放出量を使用条件に即して測定し、複数の候補材料の中から最良の材料を選別する、ことである。

評価は、国立天文台 天文機器開発実験センターの中型真空槽を使用し、真空槽中に温度制御した測定試料と Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance (以下 TQCM と略

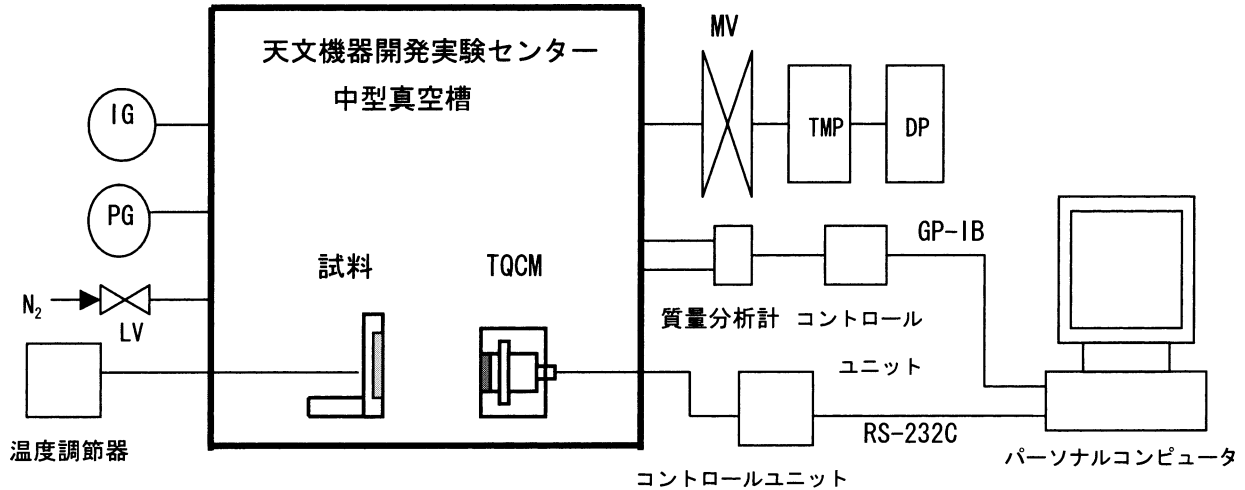


図1. 実験装置 (MV: メインバルブ, TMP: ターボ分子ポンプ, DP: ドライスクロールポンプ, IG: イオンゲージ, PG: ピラニゲージ, LV: リークバルブ).

す)を配置して、試料から放出されたアウトガスがTQCMに吸着する量を測定する。本論文では、複合材料、接着剤のTQCMによるアウトガスレート測定の結果、及びベーキングや洗浄の効果について報告する。

2. 実験

2.1 実験の原理と装置

図1に実験装置の構成を示す。真空到達度 10^{-7} Torrの真空槽 ($\Phi 1200 \times H650$) 中に試料を固定し加熱するためのジグとTQCMを設置する。TQCMは水晶振動子センサーを持ち、水晶振動子への物質の吸着が振動数の減少を引き起こすことを利用して汚染物質の質量を知ることができる。TQCMは、2個の同一の水晶振動子のうち1つを測定環境に暴露し、2つの発振周波数の差を出力する。以後、この周波数差のことをTQCMの周波数と呼ぶ。周波数変化は振動子表面上の質量変化と比例関係にあり、質量変化を高感度に感知できる。TQCMの周波数変化は、水晶振動子の温度にも敏感に依存するため、ペルチェ素子により一定温度を保つ必要がある。使用したTQCMは、QCM research社製MK10、発振周波数15 MHz、感度 $S = 1.96 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ 、水晶振動子の面積 $A_1 = 0.316 \text{ cm}^2$ であり、TQCMの周波数変化 Δf は、以下のようにしてTQCM表面上の堆積物の質量変化 Δm に変換できる。

$$\begin{aligned} \Delta m &= S \times A_1 \times \Delta f \\ &= 6.19 \times 10^{-10} \text{ g Hz}^{-1} \times \Delta f \end{aligned} \quad (1)$$

実験試料の暴露面積は、 $A_2=50.3 \text{ cm}^2$ 、TQCMと実験ジグの間隔は、 $r=10 \text{ cm}$ である。TQCMへ吸着したアウトガス量 Δm と試料から放出されたアウトガス量 m_2 の関係は以下ようになる。

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_2 A_1 / 2\pi r^2 \\ &= 5.03 \times 10^{-4} \times m_2 \end{aligned} \quad (2)$$

試料温度は、実験ジグ内に取り付けられたヒーターと白金抵抗温度センサーを温度調節器に接続して温度制御する。TQCMの温度は、ペルチェ素子により外部から制御する。測定中の真空槽の温度は室温とする。TQCM測定では、まず試料を何も入れず実験ジグのみ真空槽の中に入れて測定し、次に試料を入れて測定して2つの値の差を取ることで真空槽及び実験ジグから出るアウトガスの成分を除去する。本測定ではTQCMを温度25で動作開始してから約10分後に測定温度である-15に下げている。ここで、TQCMの周波数の温度特性(温度が低くなるほど周波数が増加する)とTQCMへのアウトガスの吸着によって周波数は急激に上昇する。その後15分ほどでTQCMの温度は測定温度(-15)で一定となる。温度が一定になった状態でアウトガスの吸着がなければ、周波数の値は一定になる。一方、アウトガスが吸着していればそのまま周波数は増加し続ける。測定の目的は、このアウトガスの吸着を調べることである。

試料を交換するには真空槽を大気圧に戻さなければならない。その際に真空槽内壁や実験ジグにアウトガス源となる不純物が付着する可能性があり、バックグラウンドのアウトガス量が変化して、測定には $\pm 0.2 \text{ Hz hr}^{-1}$ 程度の誤差が生じる。

2.2 温度条件および評価基準

アウトガスの放出、吸着は、汚染源や汚染対象の温度条件によって全く異なった振る舞いを示すことから、アウトガス被測定材料、コンタミネーションの影響を調べたい光学素子等の軌道上の予測温度から測定時の試料、TQCMの温度条件を決定する。測定の温度条件、評価基準は、NASA MSFC-SPEC-1238³⁾ が示す規定に基づいて決定する。この文書は、コンタミネーションの影響を受けやすい宇宙機器のベーキングの必要条件と手順を示すものであり、ベーキングにおけるアウトガスの測定方法とその容認レベルに

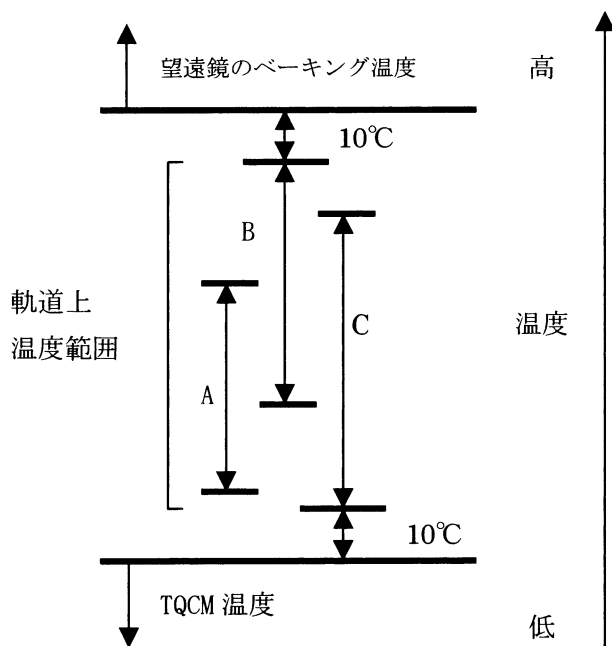


図 2. ベーキングおよびアウトガス測定温度条件 (MSFC-SPEC-1238).

ベーキング温度は機器の許容する最も高い温度で、且つ軌道上最高温度より 10℃ 以上高く設定する。TQCM の温度は、コンタミネーションに敏感な光学素子等の軌道上での最低温度より 10℃ 以上低く設定する。例えば搭載望遠鏡の各部分 (A, B, C) で軌道上温度範囲が異なる場合、温度条件は上図のようになる。

関して NASA の光学機器ミッションの基準とされているものである。

温度条件は、放出されたアウトガスの汚染物質は、より低温の面に吸着し易いという性質を巧みに利用して規定されている。図 2 にベーキング温度とアウトガス測定条件を示す。ベーキング温度は、機器の許容する最も高い温度で、且つ軌道上最高温度より 10℃ 以上高く設定する。TQCM の温度は、コンタミネーションの影響を調べたい光学素子等の軌道上での最低温度より 10℃ 以上低く設定する。例えば搭載望遠鏡の各部分 (A, B, C) で軌道上温度範囲が異なる場合と同じ真空槽内でベーキングする時、温度条件は図 2 のようになる。本測定では、測定試料の温度はその材料の軌道上予測温度 +10℃、TQCM 温度は Solar-B 可視光望遠鏡 主鏡の軌道上予測最低温度が 0℃ であることから -15℃ とした。主鏡は太陽からの紫外線に直接さらされるため、特に注意が必要である。主鏡より下流 (副鏡等) は、主鏡が紫外線を反射しないため、危険度は低いと考えられる。

アウトガスの評価基準は NASA MSFC-SPEC-1238 に従う。この規定によると TQCM (発振周波数 15 MHz, 感度 $1.96 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$) の周波数変化率が 36 時間平均で 0.8 Hz hr^{-1} (質量変化率 $1.56 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-1} \text{ hr}^{-1}$) 以下で合格となる。

2.3 真空槽のベーキング

実験前にまず空の真空槽をベーキングする必要がある。通常は、温度 80℃、24 時間のベーキングを行っている。ベーキング終了の判定は TQCM 測定で行うが、測定条件は真空槽温度が室温、TQCM 温度が -15℃ で、周波数変化率が 0.2 Hz hr^{-1} 以下であれば終了とする。基準を満たさなければさらに追加ベーキングを行う。アウトガスの多い試料を測定した後は、真空槽も汚染される場合があり、念入りなベーキングが必要となる。

3. 複合材料のアルミコートによるアウトガスの抑制

Solar-B 可視光望遠鏡では主構造材として複合材料: Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) を使用するが、そのマトリックス樹脂としてシアネート材を使用するため、そのアウトガス評価を行う必要がある。シアネート材は従来のエポキシ材に比べて吸水が少ないなどの優れた特徴があり、最近になって寸法安定性の重要な望遠鏡などに使用され始めている。比較として従来衛星で使用されてきたエポキシ材も評価した。複合材料から大量にアウトガスが出る場合、対策として材料の表面にアルミコートを施しアウトガスを抑制することを考えた。そこで複合材料試料とその試料にアルミコートした試料を用意し、試料をベーキング (真空槽温度 80℃、24 時間) して、その前後の質量比較を行った。測定試料を表 1 に示す。試料の大きさは、100 mm × 100 mm × 1.5 mm である。表 2 にベーキング前後の試料の質量を示す。ベーキング後は、試料を真空槽から取り出してすぐに質量を測定した。アルミコートなしの試料では、シアネート材に比べてエポキシ材の減少量が 3 倍程度多く、アウトガスが多いと言える。エポキシ材は吸湿率が高いために、ベーキングによる質量の減少も大きいと考えられる。一方、アルミコートした試料ではシアネート材とエポキシ材ともにベーキングによる質量の減少がほとんど見られなかった。この結果から複合材料にアルミコートすることによってアウトガスが抑制できることが分かった。なお、ここで言うアウトガスには水も含まれているが、光学素子を汚染する可能性は小さい。

4. 複合材料と接着剤のベーキングによるアウトガスの減少

ベーキング前後の質量比較からベーキングすることによって大量のアウトガス (水分を含む) が放出されることが分かった。そこで加熱することによってアウトガスを放出させて、ガスを出し尽くした材料を使用するベーキングという方法が考えられる。ベーキングによってアウトガスが減少するならば材料にアルミコートをする必要はない。そこで、複合材料、接着剤をベーキングした後、TQCM を使用してアウトガスレートの測定を行った。ベーキングは真空槽温度を 80℃ にして 24 時間行った。測定試料は、可視光望遠鏡で使用する複合材料 (試料寸法: 100 mm × 100 mm × 1.5 mm) と接着剤 (100 mm × 100 mm × 1 mm のアルミ板表面に塗布した物) である。測定した試料とその結果を

田村友範・他
表 1. アルミコート実験試料

繊維	マトリックス樹脂	試料の状態	望遠鏡使用部位
K13C	シアネート材 (EX1515)	アルミコートなし	トラスパイプ
K13C	シアネート材 (EX1515)	アルミコートあり	トラスパイプ
T800H	シアネート材 (EX1515)	アルミコートなし	トラスパイプ
T800H	シアネート材 (EX1515)	アルミコートあり	トラスパイプ
M60J	エポキシ材	アルミコートなし	比較用試料
M60J	エポキシ材	アルミコートあり	比較用試料

表 2. ベーキング前後の質量比較
アルミコートなし [g]

	K13C シアネート	T800H シアネート	M60J エポキシ
ベーキング前	23.474	23.867	18.501
ベーキング後	23.465	23.858	18.478
差	-0.009 (-0.038%)	-0.009 (-0.038%)	-0.023 (-0.124%)

アルミコートあり [g]

	K13C シアネート	T800H シアネート	M60J エポキシ
ベーキング前	24.247	24.385	19.002
ベーキング後	24.246	24.384	19.000
差	-0.001 (-0.004%)	-0.001 (-0.004%)	-0.002 (-0.011%)

表 3. TQCM 周波数変化率 [Hz hr⁻¹]

	試料		望遠鏡使用部位	ベーキング	25	40	50	60
	繊維	マトリックス樹脂						
複合材料	K13C	シアネート材 (EX1515)	トラスパイプ	後	< 0.2	< 0.2	0.7	0.9
	T800H	シアネート材 (EX1515)	トラスパイプ	後	< 0.2	< 0.2	0.3	0.5
	M60J	エポキシ材	比較用試料	後	< 0.2	0.4	0.3	0.9
	—	シアネート材 (RS-3)	ハニカムコア	前	0.6	1.6	4.0	—
接着剤	EA9396 (エポキシ)	複合材料/複合材料接着	前	0.5	8.5	81.8	—	
			後	< 0.2	0.4	1.1	—	
	REDUX (エポキシ)	パネル表皮/コア接着	前	0.5	1.3	3.0	—	
			後	< 0.2	0.3	0.8	—	

表中の温度 (25 ~ 60) は、試料の温度を示す。測定値は試料が設定温度に達してから 5 時間後の値を示す。TQCM 温度は全て -15 。

表 3 に示す．表中の温度は，測定試料の温度を示す．測定値は，1 時間当たりの TQCM 周波数変化率で示してあり，真空槽，実験ジグなどから出るアウトガス成分を除いた，試料から出たアウトガス成分を示す．また，図 3(RS-3)，図 4(EA9396)，図 5(REDUX) に，試料温度 50 の場合の各試料のベーキング前後の TQCM 測定結果を示す．試料のベーキング前後の TQCM 周波数変化率を比較すると，ベーキングの効果は明らかである．ベーキング前の結果を見ると特に EA9396 で吸着量が多いが，ベーキングするこ

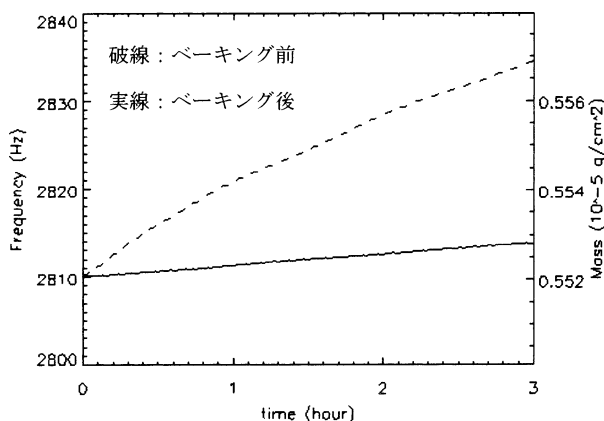


図 3. RS-3 (試料温度 50) .

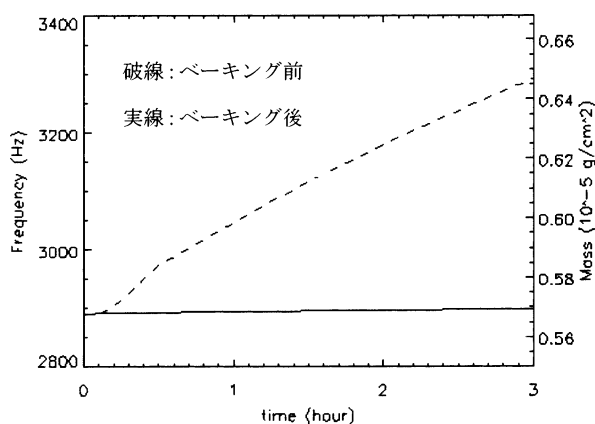


図 4. EA9396 (試料温度 50) .

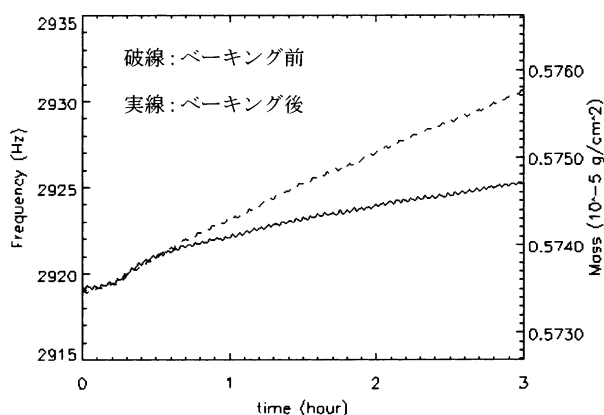


図 5. REDUX (試料温度 50) .

とによって他の試料とほとんど変わらなくなる．ベーキング後に測定した複合材料，接着剤の TQCM 周波数変化率は TQCM 測定における MSFC の基準 0.8 Hz hr^{-1} 以下をほぼ満たしている．ベーキング温度や時間を増やすことでさらにアウトガスは減少すると考えられる．この測定から複合材料にアルミコートをしなくても，ベーキングすることでアウトガスは大幅に減少することが確認できた．

ベーキング後に長期間保管する場合には，できる限り再び不純物が付着しない清浄な環境（少なくともクリーンルームの中で汚染防止シートに包む）に保管するべきである．我々は，汚染防止シートとして，CPFilms 社の Llumalloy，Honeywell 社の Capran 980 を使用している．ベーキングによって複合材料，接着剤の内部からもアウトガスを出し尽くすことになるので，長期間保管することによって水分以外のアウトガス放出量がベーキング前のレベルに戻る可能性は低い．

5. Solar-B で使用する接着剤のアウトガス測定

Solar-B では今までに示した接着剤以外に，接着した後ベーキングを行うことができない部位（レンズや鏡のマウント等）で使用する接着剤もある．それらの接着剤のアウトガス測定結果を表 4 に示す．測定結果から，シリコン接着剤は全てエポキシ接着剤よりアウトガスが多く，接着剤によってアウトガス量の差も大きいことがわかる．例えば，表 4 を見ると，東レ・ダウコーニング・シリコン社の SE9188RTV はアウトガスが多い接着剤と言える．そこで，使用予定であった SE9188RTV の使用を中止して，熱的特性なども考慮してアウトガスの比較的少ない DOW CORNING 社の 6-1104 に変更した．

表 5 には Total Mass Loss (以後 TML と略す): (試験前試料質量 - 試験後試料質量)/試験前試料質量，Collected Volatile Condensable Material (以後 CVCM と略す): (試験後コレクタプレート質量 - 試験前コレクタプレート質量)/試験前試料質量，Water Vapor Regained (以後 WVR と略す): (吸湿後試料質量 - 試験後試料質量)/試験前試料質量を記載している．CVCM，TML，WVR は，ASTM E595⁴⁾ に準拠したアウトガス試験で測定した値であり，測定条件は，真空度: 5×10^{-5} torr 以下，試料温度: 125 ，アウトガスを吸着させるコレクタプレートの温度: 25 ，測定時間: 24 時間である．WVR は，試料を真空槽から取り出した後，23 ，50%RH の環境で 24 時間放置した後のコレクタの質量を測定している．宇宙機で使用する材料，接着剤などは，TML，CVCM の値の小さいものを選定するのが通常であり，選定において推奨される基準は，TML: 1.0% 以下，CVCM: 0.1% 以下である．

SE9188RTV と 6-1104 の TML，CVCM，WVR の値は，それぞれ SE9188RTV: TML 0.468%，CVCM 0.012%，WVR 0.072%，6-1104: TML 0.180%，CVCM 0.018%，WVR 0.019% である．SE9188RTV は TML から WVR を差し引いた値が 6-1104 よりも多く，水分以外のアウトガス放出量が多いということがわかる．しかし，CVCM は 2

表 4. 接着剤 TQCM 周波数変化率 [Hz hr⁻¹]

試料	メーカー	望遠鏡使用部位	ベーキング	25	40	50	80
エポキシ接着剤 (注)		主鏡パッド	前	< 0.2	2.3	7.7	
RTV566 (シリコン)	GE Silicones	衛星バス	前	12.5	87.0	112.0	200.0
S691 (シリコン)	Wacker	ドア機構緩衝材	前	13.0	92.0	213.0	860.0
S692 (シリコン)	Wacker	Optical Solar Reflector	前	18.0	53.0	67.0	220.0
SE9188RTV (シリコン)	東レ・ダウコーニング・ シリコーン	使用しない	前	30.0	290.0	600.0	1150.0
6-1104 (シリコン)	DOW CORNING	コリメータレンズユニット	前	< 0.2	19.5	65.8	375.0

表中の温度 (25 ~ 80) は、試料の温度を示す。測定値は試料が設定温度に達してから 5 時間後の値を示す。
TQCM 温度は全て -15 (注) 契約守秘義務により製品名は記載しない。

表 5. 接着剤の TML, CVCM, WVR [%]

	TML	CVCM	WVR
RTV566 (シリコン)	0.110	0.010	0.030
S691 (シリコン)	0.600	0.120	0.030
S692 (シリコン)	0.107	0.004	0.005
SE9188RTV (シリコン)	0.468	0.012	0.072
6-1104 (シリコン)	0.180	0.018	0.019

表中の値は、NASA(<http://epims.gsfc.nasa.gov/og/>) および NASDA (http://matdb1.tksc.nasda.go.jp:8000/Outgas/OG_main_i.html) の公表データ。

つともほとんど同じ値であり、同じようにコレクタに吸着するアウトガス量を測定した値である CVCM と TQCM による結果が一致していない。試料から放出されたアウトガス分子がコレクタに入射した場合、吸着するかどうかはコレクタ面の温度に大きく依存する。SE9188RTV は、6-1104 よりもアウトガス放出量が多いが、CVCM の結果から温度 25 の面に対するアウトガスの吸着量には差がないということがわかる。しかし、TQCM 測定ではコレクタの温度が -15 という低温であることにより SE9188RTV から放出されたアウトガスの吸着率が増加して 6-1104 とのアウトガス測定値に大きな差が出たと考えられる。本実験

の結果は、光学系などクリティカルな用途に使用する材料の選定を TML, CVCM だけで行うことは非常に危険であるということを示している。

接着剤は接着後に外部に露出する量が少ないと言えどもアウトガス放出量がかかなり多いため、長期的影響に関して定量的な評価を行う必要がある。

6. 脱脂洗浄

機械加工した金属の脱脂洗浄は、金属からのアウトガスを減少させるために必要な作業である。ベーキングによってアウトガスを減少させることもできるが、まず金属部品

では十分な洗浄が重要である。金属の試料を用いて、脱脂洗浄をした後のアウトガスを測定した。

複合材料や接着剤と金属から放出されるアウトガスの違いは、前者が材料そのものの蒸気または物質表面に付着している不純物のガスであるのに対し、後者は飽和蒸気圧が極めて低いことから表面上の不純物のみがアウトガス源になることである。この測定の目的は、アウトガスが検出されない洗浄方法を選別することであり、調べることはアウトガスが出るか出ないか（表面に不純物が付着しているかないか）ということのみである。したがって、複合材料のように長時間測定してアウトガスレートを調べてもあまり意味はない。ここで示す TQCM 測定の結果はアウトガスレートの値ではなく、TQCM 周波数の時間変化を示すのみとする。

測定試料は 2 種類で、Al-Mg 合金 5052 (100 mm × 100 mm × 10 mm) とそれに M3 非貫通タップ穴を 5 個切ったものである。次にアウトガスを測定した脱脂洗浄方法（洗浄 No. 1～7）の手順を示す。洗浄法は、各社で使用している標準法に対応する。

洗浄 No. 1

- (1) 準水系洗浄剤（パイン ST-100N）, 60 , 5 分, 超音波洗浄
- (2) 水, 40 , 5 分, 超音波洗浄
- (3) 水, 40 , 5 分, 超音波洗浄
- (4) 純水, 40 , 5 分, 超音波洗浄
- (5) 窒素ガスブローで液切り
- (6) 温風オープンで乾燥, 5～10 分

洗浄 No. 2

- (1) 炭化水素系溶剤, 120 （真空中）, 10 分, 揺動洗浄
- (2) 乾燥炉, 200 （真空中）

洗浄 No. 3

No. 2 の洗浄の前に下記を挿入した。
炭化水素系溶剤, 10 分, 超音波洗浄

洗浄 No. 4

- (1) 純水 + 中性洗浄剤, 40 , 超音波洗浄
 - (2) 減圧, 純水 + 中性洗浄剤, 40 , 超音波洗浄
 - (3) 純水 + 中性洗浄剤, 室温, 浸漬
 - (4) 減圧, 温超純水, 超音波洗浄
 - (5) 減圧, 温超純水, 超音波洗浄
 - (6) 超純水, 室温, 浸漬
 - (7) 超純水, 室温, 浸漬
 - (8) 温超純水, 50 , 超音波洗浄
 - (9) 圧縮空気で液切り
 - (10) 真空乾燥 加温
- 全工程で計 15～25 分

洗浄 No. 5

No. 4 の洗浄の後に下記を加えた。
プラズマ洗浄 (Ar, O₂), 常温, 7 分

洗浄 No. 6

- (1) 非イオン界面活性剤, 50 , 10 分, 超音波洗浄
- (2) 非イオン界面活性剤, 50 , 5 分, 浸け置き
- (3) 純水, 室温, 2 分, 超音波洗浄
- (4) 純水, 60 , 1 分, 超音波洗浄
- (5) 工業エアで液切り
- (6) 乾燥炉, 60 , 10～20 分

洗浄 No. 7

- (1) アセトン, 10 分, 超音波洗浄
- (2) クリーンプースの中で自然乾燥

図 6～図 12 に TQCM 測定結果を示す。前述したように本測定では TQCM の動作を開始してから約 10 分後に TQCM 温度を 25 から測定温度 -15 に下げている。温度が -15 で一定になった状態でアウトガスの吸着がなければ、試料なしの測定結果のように周波数の値は一定になる。一方、アウトガスが吸着していればそのまま周波数は増加し続ける。試料温度 50 の場合、測定開始時から TQCM 温度は -15 なので、試料温度 25 の図のような測定開始時の周波数の急激な上昇はない。測定結果から判断すると、洗浄 No. 1 と洗浄 No. 5 の 2 つの洗浄法は、試料を何も入れていない時とほぼ同じ結果を示している。同じ結果とは、TQCM の温度を下げている時、および -15 で一定の状態であつたアウトガスの吸着レートが同じ値を示しているということである。これは、洗浄 No. 1, 5 では試料から出たアウトガスの吸着がほとんどないということであり、脱脂洗浄として非常に優れていることを示す。それ以外の洗浄では、特にタップ穴付き試料でアウトガスが多く、穴の洗浄が不十分であることを示している。洗浄 No. 1, 5 以外の洗浄法は汚れが完全に除去できていないため、Solar-B では使用しないこととした。

7. まとめ

Solar-B 可視光望遠鏡の構造材として使用する複合材料、接着剤のアウトガスを TQCM で測定した結果、ベーキングによってアウトガスが大幅に減少し、NASA MSFC 基準を満たすことがわかった。この結果からフライト望遠鏡でも徹底的なベーキングの必要性が確認された。また、ベーキングを行わない部位で使用する接着剤の測定では多量のアウトガスが放出されることがわかった。接着剤は使用量が少なく、露出する面積も小さいが十分な注意が必要であり、例えば熱設計により当該部をできるだけ低い温度に保つなどの工夫が必要である。脱脂洗浄測定では、洗浄法によっては機械加工油または洗浄液などが落とされずに表面に残留して、真空中でアウトガスとして放出されて低温面に吸着することがわかった。金属コンポーネントについ

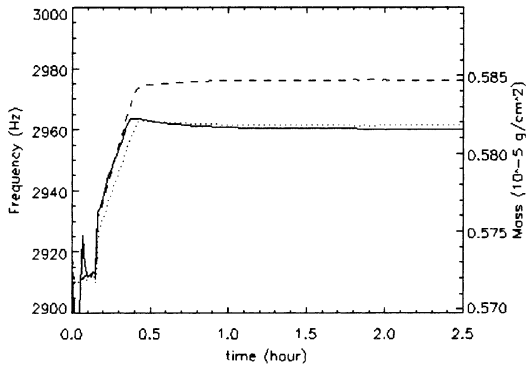


図 6-1. 洗浄 No. 1 25 .

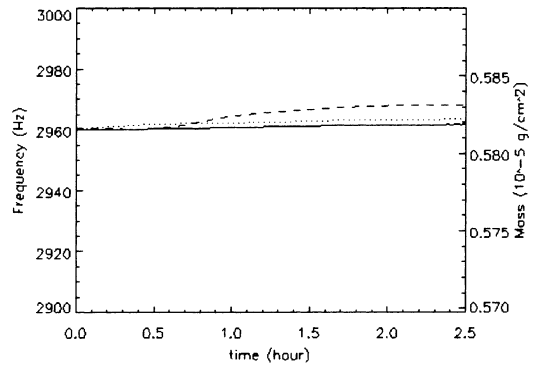


図 6-2. 洗浄 No. 1 50 .

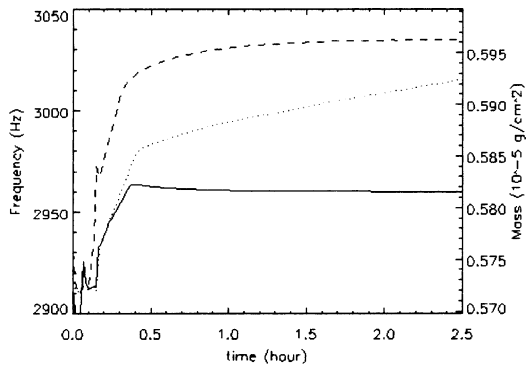


図 7-1. 洗浄 No. 2 25 .

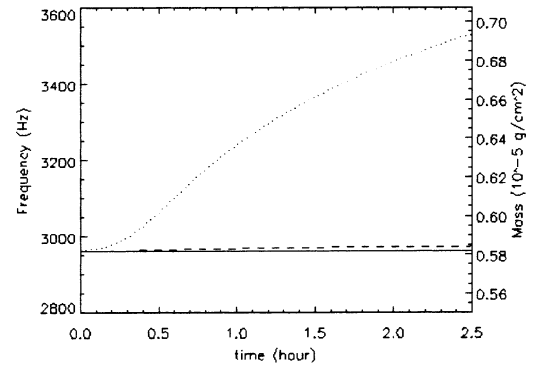


図 7-2. 洗浄 No. 2 50 .

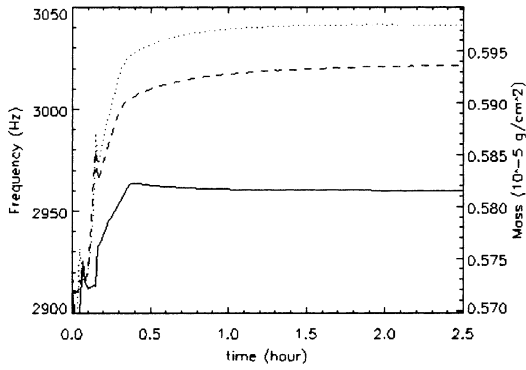


図 8-1. 洗浄 No. 3 25 .

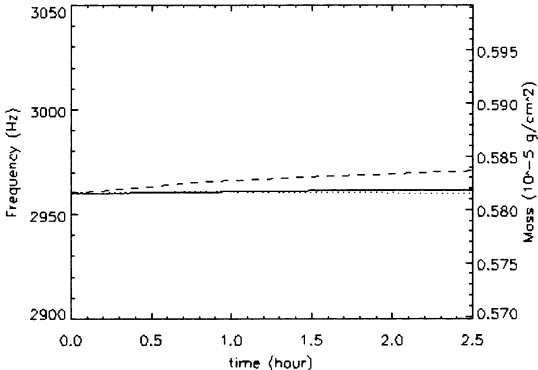


図 8-2. 洗浄 No. 3 50 .

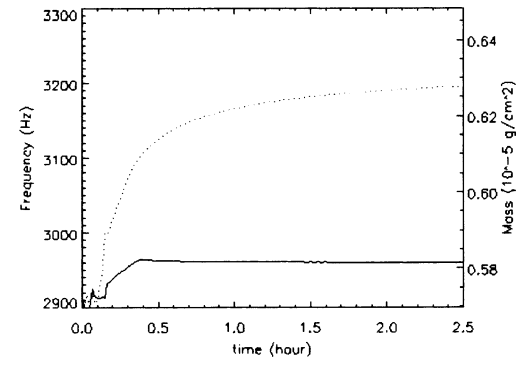


図 9-1. 洗浄 No. 4 25 .

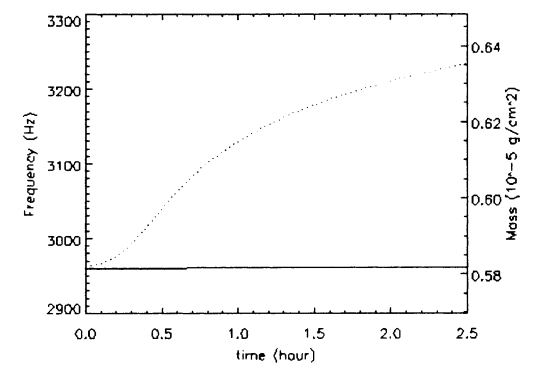


図 9-2. 洗浄 No. 4 50 .

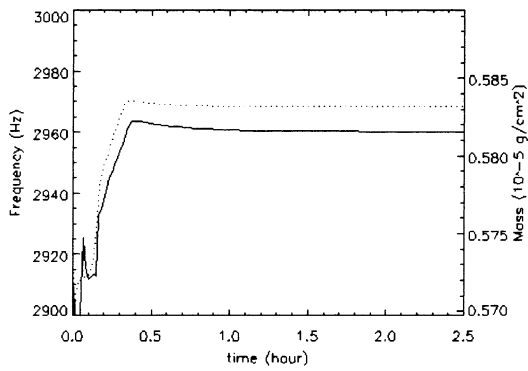


図 10-1. 洗浄 No. 5 25 .

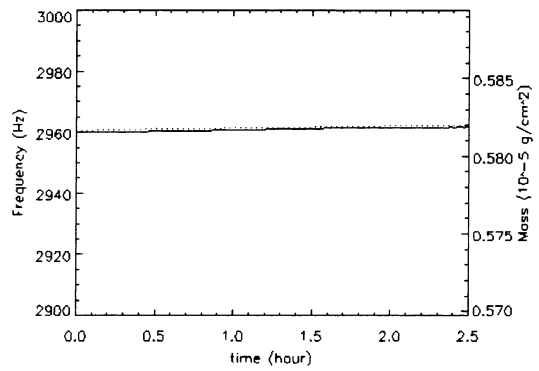


図 10-2. 洗浄 No. 5 50 .

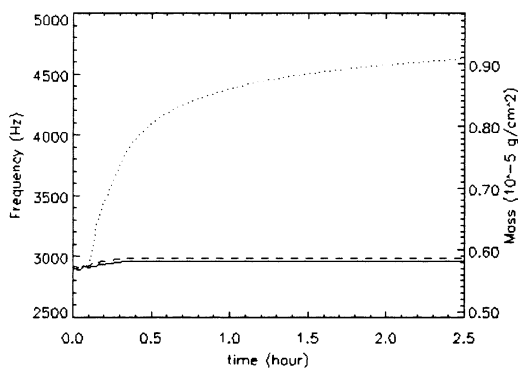


図 11-1. 洗浄 No. 6 25 .

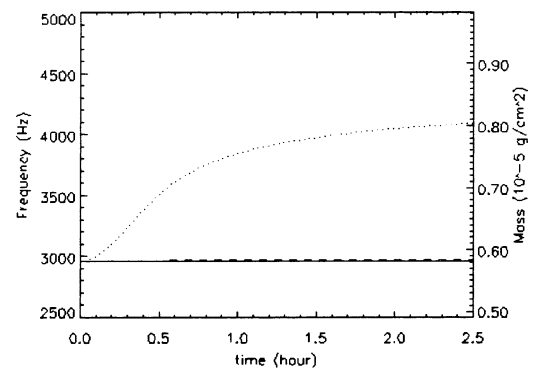


図 11-2. 洗浄 No. 6 50 .

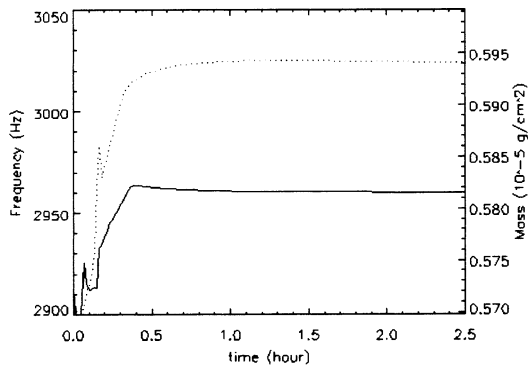


図 12-1. 洗浄 No. 7 25 .

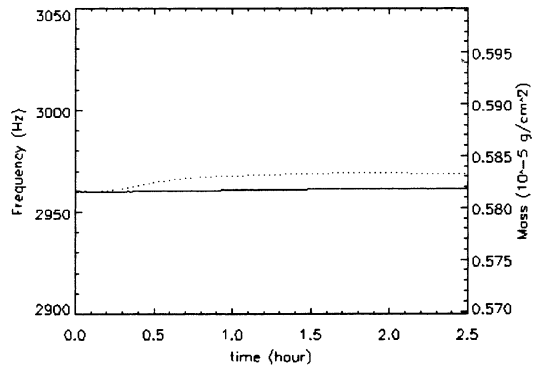


図 12-2. 洗浄 No. 7 25 .

図 6~12 において、
 実線：試料なし
 点線：タップ穴付き試料
 破線：タップ穴なし試料
 の結果を示している。

ても十分な注意が必要である。Solar-B では、TQCM 測定においてアウトガスが検出された洗浄法は使用しない。

TQCM による評価だけではまだ十分ではなく、吸着したアウトガスが光学面に与える影響を評価する必要がある。これには、Witness mirror を TQCM と同一環境に暴露し、ミラーのライマン線反射率の劣化を調べるという方法がある。これに関しては、第 2 論文にて報告する予定である。

謝 辞

本実験を行うにあたり、各社に材料、試料の提供、脱脂洗浄作業を行っていただきました。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) Stewart, T. B., Arnold, G. S., Hall, D. F., Marvin, D. C., Hwang, W. C., Young Owl, R. C., and Marten, H. D.: Photochemical Spacecraft Self-Contamination: Laboratory Results and Systems Impacts, *J. Spacecraft*, Vol. 26, No. 5, pp. 358–367 (1989).
- 3) Thermal Vacuum Bakeout Specification for Contamination Sensitive Hardware, MSFC-SPEC-1238 (1986).
- 4) ASTM E595 Standard Test Method for Total Mass Loss and Collected Volatile Condensable Materials from Outgassing in a Vacuum Environment, American Society for Testing and Materials (1993).
- 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).