ひので可視光望遠鏡における軌道上コンタミネーションの影響評価^{*1} Molecular Contamination Assessment on Hinode Optical Telescope Assembly

浦山 文隆^{*2}・渡辺 吉男^{*2}・矢野 敬一^{*3}・馬場 尚子^{*3}

Fumitaka URAYAMA, Yoshio WATANABE, Kei-ichi YANO and Naoko BABA

Key Words: Hinode, Contamination, Outgassing, Optical degradation

Abstract: The *Hinode* (Solar-B) Optical Telescope Assembly (OTA) is sensitive to molecular contaminant deposition resulting from its organic materials outgassing on orbit. It was launched by M-V rocket on 22 September 2006 UT. The *Hinode* telemetry data showed that temperature of the Heat Dump Mirror (HDM) rose rapidly during first two months. This is attributed to the fact that molecular contamination deposition degrades a solar absorptance of the HDM. Each numerical analysis result for the Primary Mirror (M1) and the Secondary Mirror (M2) corresponded with a change in solar absorptance $\Delta \alpha_s$ converted temperature data into. The numerical analysis result for the HDM was less than $\Delta \alpha_s$. It is necessary to take into account desorption and temperature-dependent outgassing on the numerical analyses.

記号の説明

- R : 地球から太陽までの距離
 $\dot{M}$: 単位面積当たりのアウトガスレート
 $\dot{m}$: 単位面積当たりの付着レート
 m : 単位面積当たりの付着量
 F : 形態係数
 s : 付着係数
 t : 経過時間
 a, b, c : 定数
 $A_{\text{component}}$: ベーキング時のコンポーネント全表面積
 A_{model} : 形状モデルの表面積
 κ : 付着レートからアウトガスレートへの換算係数
 α_s : 太陽光吸収率
 λ : 波長
 ρ : 清浄な状態での主鏡・副鏡の反射率スペクトル
 α_c : 汚染付着成分の吸収係数¹⁾
 S : エアマス・ゼロでの太陽光スペクトル強度²⁾
 χ : 汚染分子付着厚

1. はじめに

宇宙環境下において宇宙機用材料等から放出される分子状コンタミネーションは、宇宙機表面へ付着し、熱制御材の太陽光吸収率 α_s の増加や光学系の反射率・透過率の低下を引き起こし、ミッションへ悪影響を及ぼすことが知られ

ている^{3,4)}。

軌道上での分子状コンタミネーション付着量を数値的に求めるため、我々は汚染環境解析ソフトウェア Japanese Spacecraft Induced Contamination Environment analysis software (J-SPICE)を開発するとともに、ソフトウェアを構成する各数学モデルを試験データで部分的に検証し、改良を進めてきた^{5,6)}。また、米国他社が保有する汚染解析ツールによる数値解析結果との比較を通して、数学モデルの検証も進めてきた。しかしながら、実際のフライトデータによる数値解析結果の評価を未だ実施できていなかった。

一方、太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)には、可視光、X線、極端紫外線の3つの望遠鏡が搭載され、そのうちの可視光磁場望遠鏡(SOT)の可視光望遠鏡(OTA)部は主鏡、副鏡等の光学系からなる反射望遠鏡である。望遠鏡構体には軽量化対策のためCFRPが用いられ、さらに接着剤をはじめとした様々な有機材料が使用されている。光学系に有機材料からのアウトガスが付着すると太陽紫外線により付着物が暗色化し、 α_s の増加が生じる。これに伴い、光学系の熱変形、あるいは反射率・透過率の低下が生じ、観測データの劣化、最悪の場合にはミッション喪失の事態を引き起こす恐れがあった。このため、真空チャンバ内で予め各種コンポーネントのベーキングが実施されるなど、光学系に対するコンタミネーション管理が徹底された。ベーキングの際にQuartz Crystal Microbalance (QCM)で計測されたコンタミネーション付着量データを用いて「ひので」打上げ前にOTAクリティカル・コンポーネント(主鏡、副鏡、コリメータレンズ)を対象としたコンタミネーション解析・評価を実施し、コンタミネーションの影響は設計値内であると結論づけた。

「ひので」は予定通り2006年9月23日(日本時間)に打上げられ、10月25日から太陽観測が開始された。2007年4月現在においてもミッションは順調に遂行されているが、

^{*1}©2007 日本航空宇宙学会

2006年11月9日、第50回宇宙科学技術連合講演会にて一部講演
平成19年5月12日原稿受理

^{*2}宇宙技術開発株式会社

^{*3}宇宙航空研究開発機構 総合技術研究本部

コンタミネーションの影響と見られる現象が起こっている。

本稿では、コンタミネーションの影響の観点から「ひので」初期フライトデータ(約5カ月分)の分析を行った上で、数値解析結果との比較、考察を行った結果をまとめている。

2. 「ひので」初期フライトデータ

第1図に示すように、OTAには主鏡、副鏡、排熱鏡(Heat Dump Mirror, HDM)等の光学系がある。排熱鏡はドーナツ型のものであり、構体側面の排熱鏡窓を介して太陽観測に不要な熱を捨て、排熱鏡中央の穴を介して主鏡からの反射光が副鏡に入射する。副鏡からの反射光は2次絞りを介してコリメータレンズへ入射する。設計上、鏡面の α_s のBeginning Of Life(BOL)からEnd Of Life (EOL)へ至る許容増分は0.05とされている。

第1図 OTA内の光学系配置⁷⁾

SOT 太陽観測開始(2006 年 10 月 25 日トップドア展開)からの主鏡及び副鏡，排熱鏡近傍の温度プロファイルをそれぞれ第 2～4 図に示す．短期的な温度変動としては，1) 内部ヒータで鏡面を保温していたため太陽観測開始前後で温度が高い，2) 太陽中心を観測しているとき温度が上昇し，太陽の端のとき低下する傾向がある，などの特徴がある．

長期的な温度変動として、各鏡面ともに 12 月末頃まで温度上昇レートが高い傾向が続いた。この時期には、第 5 図に示すように太陽光入射エネルギーが増加し続けていると推測され、太陽と地球との距離が最も短くなる時点は 12 月末頃となる。特に、排熱鏡近傍の温度上昇レートは主鏡及び副鏡近傍よりも高く、これは排熱鏡自体の温度上昇レートが高いことを意味する。また、熱解析結果より、排熱鏡の温度が 7℃ 上昇すると主鏡及び副鏡の温度が約 1℃ 上昇することが示されている。このため、主鏡及び副鏡の温度上昇は排熱鏡の温度上昇が要因の一つと推測される。

12 月末以降、各鏡面ともに温度が概ね安定化している。外部熱環境は緩和方向に向かっており、排熱鏡の α_s が一定値であるならば排熱鏡温度は 12 月末以前の温度変化レ

トで低下していくはずである。しかしながら、温度は概ね安定しているため、12月末までに α_s が急増していた可能性が高い。また、温度の極大値辺りでは太陽中心方向を観測しているため、排熱鏡中央付近の α_s が局所的に急増し、温度の極小値辺りでは太陽の端方向を観測しているため、排熱鏡外周近傍の α_s が増加していると推測される。主鏡に関しては、内部ヒータ制御により温度変化を抑制しているため、12月末以降では温度がほぼ一定値を示している。

第2図 主鏡近傍の温度プロファイル (2チャンネル分)

第3図 副鏡近傍の温度プロファイル (2チャンネル分)

第4図 排熱鏡近傍の温度プロファイル

第5図 太陽電池パドルの温度と太陽光入射エネルギーの関係
(注) 温度データについては移動平均処理を行っている。

3. OTA 軌道上コンタミネーション解析

軌道上での分子状コンタミネーション付着は、第6図に示すように汚染源からの汚染分子の放出、輸送、付着の3つのプロセスで生じる。第6図に示すメカニズムの一部を対象として、我々は2002年から国産初の軌道上コンタミネーション解析ソフトウェア J-SPICE の開発を進めてきた。基礎式は次の通りである。

$$\dot{m} = \dot{M} \cdot F \cdot s \quad (1)$$

OTA の汚染源は材料からのアウトガスのみである。他の汚染源であるスラスタに関しては、OTA のドアを開けた以降にはスラスタ噴射は一切行われていない。

第6図 軌道上での分子状コンタミネーションの主要メカニズムとその制御方法、ミッションへの影響

3.1 使用した数学モデル 使用した解析用形状モデルを第7, 8図に示す。汚染源から鏡面へのアウトガス分子の輸送パスを大別すると、1) OTA 内のコンポーネントからのアウトガス分子が直接、あるいは OTA 内面で付着・再昇華を繰り返して到達するケース、2) 太陽電池パドルのアウトガス分子が排熱鏡窓を介して OTA 内に入射し、OTA 内面で付着・再昇華を繰り返して到達するケース、がある。

第7図 「ひので」全体の形状モデル

第8図 OTA 内の形状モデル

各コンポーネントのベーキング時に取得された QCM 振動数データを用いて、次式よりアウトガスモデルを作成した。

$$\dot{M}(t) = \dot{m}(t) \cdot \frac{A_{\text{component}}}{A_{\text{model}}} \cdot \kappa \quad (2)$$

換算係数の算出に当たっては、真空チャンバ内部の形状モデルを作成し、真空ポンプの排気効率を 0.2 として J-SPICE で計算を行った。また、 $\dot{m}(t)$ については、QCM 振動数データから QCM 感度係数を除して付着量を算出し、(3)、(4)式⁵⁾にそれぞれカーブフィッティングを行った上で、基本的に残差二乗和が小さい方を選択した。

$$m(t) = a \cdot t^b + c \quad (3)$$

$$m(t) = a \cdot \ln(t) + c \quad (4)$$

3.2 解析条件 単位面積当たりの主鏡への太陽光入射エネルギーを 1 とすると、排熱鏡への入射エネルギーは 2500、副鏡への入射エネルギーは 1/2 程度である。また、清浄な主鏡及び副鏡の反射率スペクトルには、光化学反応が生じやすい波長 200~300 nm に反射率約 38% のピーク値がある。一方、アウトガス成分の光化学反応付着係数は鏡面への入射フラックスと付着レートの比で表されるが、光

子数の増加に伴い付着係数が大きくなることが実験的に示されている⁸⁾。このため、鏡面ごとに光化学反応付着係数を設定した。J-SPICEによるアウトガス分子付着量の数値計算後、次式¹⁾を用いて、汚染された鏡面の α_s を算出した。

$$\alpha_s(t) = \frac{\int [1 - \rho(\lambda) \cdot \exp(-2\alpha_c(\lambda) \cdot \chi(t))] \cdot S(\lambda) d\lambda}{\int S(\lambda) d\lambda} \quad (5)$$

軌道上でのコンタミネーション現象の特徴としては、1) 汚染分子付着厚が数 nm～数十 nm 程度の極めて少ない物理量であること、2) 温度変動に伴う付着・再昇華、紫外線照射による光重合・光分解、原子状酸素による浸食等の宇宙環境との相互作用が付着成分ごとに異なり現象が複雑であること、が挙げられる。解析ではこれら全ての現象を対象に含めていないため、解析条件の設定に当たっては、コンサバティブ（汚染分子付着量が大きく）となるアプローチで解析条件を設定していた。主要な解析条件を第1表に示す。

第1表 OTA コンタミネーション解析における主な解析条件

解析対象期間	L+32day～(SOT 太陽観測開始時).
アウトガス源温	ベーク時温度 (>軌道上温度).
度	
付着・再昇華面	鏡面以外には一切付着せずに全て再昇華.
光化学反応付着係数※	テトラメチル・テトラフェニル・トリシロキサ ン(DC704): 主鏡 0.2, 副鏡 0.043, 排熱鏡 0.996 フタル酸ジエチルヘキシル(DEHP): 主鏡 0.029, 副鏡 0.012, 排熱鏡 0.933
汚染された鏡面	DC704, DEHP の吸収係数から算出 ¹⁾ 。 の α_s

※ 実験値から導出された数学モデルに基づき、入射する光子数から算出⁸⁾。

3.3 太陽光吸収率の比較 コンタミネーション解析結果の比較対象を得るため、熱解析結果に基づき各鏡面温度と α_s の関係を一次関数で表現し、各鏡面近傍の温度データから $\Delta\alpha_s$ を概算した。 $\Delta\alpha_s$ 概算値と数値解析結果の比較を第9～11図に示す。概算に当たっては、SOT 太陽観測方向や季節変化による外部熱環境の変動を一切考慮していない。第12図は、 $1/R^2$ が等しく(第5図参照)、かつ、温度が極大となっている日時の温度データを基に概算した排熱鏡の $\Delta\alpha_s$ を示している。2006年10月26日時点での α_s と2007年3月14日時点での α_s の差は約0.072であり、第11図の $\Delta\alpha_s$ 概算値と比較しても顕著な差異は見られない。したがって、ミッション初期における排熱鏡の $\Delta\alpha_s$ に対する季節変化の影響は比較的小さいと考えられる。

第9, 10図より、主鏡及び副鏡の $\Delta\alpha_s$ 数値解析結果は概算値に傾向が概ね一致、あるいは上回っているものの、第11, 12図より排熱鏡では下回っている。解析条件の設定に当たっては、前述のようにコンサバティブとなるアプローチとしたが、特に、排熱鏡に限っては解析条件の設定方法に問題があることが判った。

なお、排熱鏡の温度は保証値を大きく下回っており、SOT ミッションへの影響はないことが確認されている。

第9図 主鏡の $\Delta\alpha_s$ 概算値と数値解析結果の比較

第10図 副鏡の $\Delta\alpha_s$ 概算値と数値解析結果の比較

第11図 排熱鏡の $\Delta\alpha_s$ 概算値と数値解析結果の比較

第12図 外部熱環境の変動を考慮した排熱鏡の $\Delta\alpha_s$ 概算値と数値解析結果の比較

4. 考 察

4.1 排熱鏡の $\Delta\alpha_s$ 数値解析結果が概算値を下回る要因

数値解析結果が概算値を下回る要因の候補として、1) 放射線、原子状酸素による劣化、2) 主鏡からの反射光入射位置の局在化、3) OTA コンポーネント表面からの脱着、4) 汚染源の急激な温度上昇、が挙げられる。

まず、放射線、原子状酸素による劣化の可能性について考察する。排熱鏡表面は保護膜付銀蒸着コーティング処理が行われており、宇宙環境で既に使用された実績があるが、今回のような急激な α_s の劣化は一切報告されていない。また、「ひので」の軌道・姿勢の関係上、排熱鏡窓を介して原子状酸素が周期的に排熱鏡へ直接入射する。排熱鏡への原子状酸素入射時間の累積を第13図に示す。現在は太陽活動極小期であり、第11図と第13図に相関が見られないため、原子状酸素が劣化に寄与しているとは考え難い。したがって、放射線、原子状酸素による劣化が要因であるとは言いがたく、コンタミネーションの影響が主要因である可能性が高い。

第13図 排熱鏡への原子状酸素入射時間の累積(計算値)

第二に、主鏡からの反射光入射位置の局在化について考察する。数値解析上では紫外線を含んだ反射光が排熱鏡の面全体に均一に入射し、汚染分子が面全体に均一に付着する前提としていたが、実際には排熱鏡の一部に反射光が入射する⁷⁾。一方、実験結果より、紫外線が入射している環境下では低分子有機物が付着し、入射しない条件では付着しなかったことが報告されている⁸⁾。このため、反射光入射位置に汚染分子が付着し、それ以外の影の位置では付着しなかった可能性がある。付着しなかった汚染分子はさらにOTA内で付着・再昇華を繰り返し、反射光入射位置に汚染分子が入射すると付着が生じると考えられる。そこで、反射光が排熱鏡へ入射する面積を半分とし、常に同じ位置へ入射すると仮定して数値解析を行った。その結果、鏡面全体に均一に付着する場合と比べ、汚染分子付着厚及び $\Delta\alpha_s$ の増分は1%にも満たない。これは、数値解析上、汚染分子の90%以上がサンシェード及び排熱鏡窓(第1図参照)を介

して宇宙空間に放出され、残りの数%が主鏡、副鏡、排熱鏡に配分されて付着するためである。したがって、 $\Delta\alpha_s$ 数値解析結果が概算値を下回る主要因は反射光入射位置の局在化である可能性は低い。なお、実際には太陽中心方向を観測しているときには排熱鏡の中央付近へ局所的に反射光が入射し、太陽の端方向を観測しているときには排熱鏡の中央からずれた位置に入射する。これにより汚染分子付着厚及び $\Delta\alpha_s$ が排熱鏡面上の位置によって異なっていると推測される。第4図に示す排熱鏡温度の短期的な変動は、 $\Delta\alpha_s$ の分布が一因であると考えられる。

第三に、OTA コンポーネント表面からの脱着について考察する。第14図に示すように、EUV撮像分光装置内に取り付けられたQCMデータによると、10月末から1月中旬までの間に無機物である石英結晶の表面から $5 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2$ (一分子層相当)の脱着が見られた。これは、「ひので」打上げ前から石英結晶表面に既に吸着していた汚染分子が打上げ後に徐々に脱着したためと推測される。OTAにおいても、表面積が大きく、かつ、温度が比較的高いAl合金製の側面クーリングプレート(第7図参照)表面から $5 \times 10^{-8} \text{ g/cm}^2$ 程度の脱着が生じたと仮定すると、第11図に示す $\Delta\alpha_s$ 数値解析結果は3月末時点でさらに約0.017(DEHP換算)大きくなる。したがって、 $\Delta\alpha_s$ 数値解析結果が下回る要因の一つとして、ベーキング後の汚染分子吸着、軌道上での脱着が考えられる。なお、主鏡及び副鏡の $\Delta\alpha_s$ 数値解析結果は排熱鏡よりもそれぞれ1オーダ、2オーダ小さいため、脱着の影響は比較的小さいと考える。

第14図 EIS/QCM 汚染付着量測定データ

最後に、汚染源の急激な温度上昇の影響について考察する。数値解析上、打上げ直後からアウトガスは(3)、(4)式にしたがって放出される前提とした。一方、主鏡パッド部と支持機構のインタフェース部には接着剤が使用されており、温度データ及び熱解析結果より、太陽観測開始前後で主鏡パッド部の温度は 15°C 程度高くなっていると推測される。このため、観測開始前での軌道上ベーキング効果が少なく、観測開始直後に接着剤からのアウトガスレートが急激に高

くなった可能性がある。観測開始直後からアウトガスが放出され始めると仮定すると、第 11 図に示す $\Delta \alpha_s$ 数値解析結果は 3 月末時点でさらに約 0.014 (DEHP 換算) 大きくなる。これについても、 $\Delta \alpha_s$ 数値解析結果が下回る要因の一つとなっている可能性がある。なお、主鏡及び副鏡の $\Delta \alpha_s$ 数値解析結果は、表面からの脱着と同様、排熱鏡よりもそれぞれ 1 オーダ、2 オーダ小さいため、汚染源の急激な温度上昇の影響は比較的小さいと考える。

4.2 汚染付着成分の影響 第 9, 11 図より、DEHP を汚染物質とした $\Delta \alpha_s$ 数値解析結果の方が DC704 よりも $\Delta \alpha_s$ 概算値に近い。DC704 の光化学反応付着係数は DEHP よりも高いとされている⁸⁾が、数値解析上、光化学反応付着係数が小さいほど主鏡及び副鏡での汚染分子付着厚が減り、それらに付着しなかった汚染分子が排熱鏡に集まり易くなる傾向があるため、3 月末時点での排熱鏡の汚染分子付着厚 (DEHP 換算) は DC704 換算値の 1.16 倍となる。また、同じ付着厚での $\Delta \alpha_s$ (DEHP 換算) の寄与は DC704 換算値の 1.25 倍程度である。したがって、第 11 図に示すように、3 月末時点での排熱鏡の $\Delta \alpha_s$ 計算値 (DEHP 換算) は DC704 換算値の約 1.5 倍となる。ただし、OTA 内に使用されている材料からのアウトガス成分は炭化水素、シロキサン (DC704 等)、アミン、フタレート (DEHP 等) など多種多様であり、正味の付着係数及び吸収係数は得られていないが、第 9, 11 図より実際の付着成分の光化学反応特性は DEHP の特性により近い可能性がある。

4.3 今後のトレンド変化 今後 1 年間程度の排熱鏡温度のトレンド変化を左右する主要因として、1) 夏至以降の外部熱入力の増加に伴う温度の上昇、冬至以降の外部熱入力の減少に伴う温度の低下、2) 原子状酸素による汚染分子付着物の浸食、太陽光吸収率の低下に伴う温度の低下、が考えられる。現在は太陽活動極大期に向かっている時期であり、原子状酸素フラックスはオーダレベルで増加していくと予想される。排熱鏡近傍の温度データを年単位でモニタすることにより、原子状酸素による影響が顕在化していく可能性がある。

5. む す び

「ひので」は、コンタミネーション管理が最も徹底された人工衛星の一つであるが、このような人工衛星ですらコンタミネーションの影響が現れている可能性が高いことが判った。

主鏡及び副鏡での $\Delta \alpha_s$ 数値解析結果 (DEHP 換算) はフライトデータからの概算値に傾向が概ね一致した。現時点では、最初の約 2 ヶ月間における排熱鏡の急激な温度上昇の

原因、排熱鏡の $\Delta \alpha_s$ 数値解析結果がフライトデータからの概算値を下回る要因を特定するまでには至っていないが、数値解析上、表面からの汚染分子の脱着や汚染源の急激な温度上昇も考慮する必要があることが判った。

OTA 内でのコンタミネーションの影響の観点から、現時点までのトレンド変化より主鏡及び副鏡の寿命は 10 年以上あると見込まれる。排熱鏡に関しては、夏至以降から温度の再上昇が始まる可能性があるため、引き続き、温度のトレンド変化に注意を払う必要があると考える。また、主鏡を始めとしたコンタミネーションの影響は年単位で変化することが予想されるため、長期間のフライトデータによる数値解析結果の評価を行う必要がある。

本評価に当たり、多大なご協力、ご支援を頂いた国立天文台の常田佐久教授、一本潔准教授、原弘久助教、勝川行雄助教、中桐正夫プロジェクトエンジニア、田村友範技術員に著者一同深く感謝しております。

参 考 文 献

- 1) Arnold, G. and Luey, K.: Photochemically Deposited Contaminant Film Effects, Proc. of SPIE, Vol. 2864, 1996, pp.269-285.
- 2) Standard Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, ASTM E490-00, 2000.
- 3) Tribble, A. C., Boyadjian, B., Davis, J., Haffner, J. and McCullough, E.: Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA CR-4740, 1996.
- 4) Mauldin, L. E., III and Chu, W. P.: Optical Degradation Due to Contamination on the SAGE/SAGE II Spacecraft Instruments, Proc. of SPIE, Vol. 338, 1982, pp.58-64.
- 5) Hayashi, T., Urayama, F., Takeda, N., Yoshikawa, J. and Baba, N.: Experimental Approach for Modeling on External Molecular Contaminants Behaviors, 54th IAC, 2003.
- 6) Hayashi, T., Urayama, F., Takeda, N. and Baba, N.: Modeling of Material Outgassing and Deposition Phenomena, Proc. of SPIE, Vol. 5526, 2004, pp.137-146.
- 7) 科学衛星 SOLAR-B 実験計画書, JAXA 宇宙科学研究本部 SES データセンター, SES-TD-05-010, 2006.
- 8) Stewart, T. B., Arnold, G. S., Hall, D. F. and Marten, H. D.: Absolute Rates of Vacuum-Ultraviolet Photochemical Deposition of Organic Films, J. Phys. Chem., **93** (1989), pp.2393-2400.