「ひので」X線望遠鏡におけるコンタミネーション評価^{*1}Molecular Contamination Assessments on *Hinode* X-Ray Telescope浦山文隆^{*2}・坂東貴政^{*3}・鹿野良平^{*3}・原弘久^{*3}

Fumitaka URAYAMA, Takamasa BANDO, Ryouhei KANO, Hirohisa HARA,

成影典之^{*4}・坂尾太郎^{*4}

Noriyuki NARUKAGE and Taro SAKAO

Key Words: *Hinode*, XRT, Contamination, Outgassing, Optical Degradation

Abstract: The *Hinode* (Solar-B) was launched by M-V rocket on 22 September 2006 UT. The telemetry data of the *Hinode* X-ray Telescope (XRT) showed that the X-ray count rate detected with the XRT had decreased rapidly since the operational heaters on the XRT telescope tube were turned on. This is attributed to the fact that molecular contaminants accumulated onto the CCD with the temperature of -60°C resulting in the degradation of the XRT sensitivity. We baked the CCD at the temperature of 35°C in order to remove the contaminants from the CCD surface. However many contaminant spots appeared on the surface. We found that major contaminant source existed in the telescope tube, and identified the contaminants as diethylhexyl phthalate (DEHP) or DEHP-like organics. The mechanisms to yield the contaminant spots were discussed.

1. はじめに

宇宙環境下において、人工衛星自身の有機材料から放出されるアウトガス分子（低分子有機物）はより低温の表面へ付着する。付着物は、光学系の太陽光吸収率の増加や反射率・透過率の変化を引き起こし、ミッションへ悪影響を及ぼすことが知られている¹⁾。

2006年9月に打ち上げられた太陽観測衛星「ひので」(SOLAR-B)には可視光磁場望遠鏡(SOT)、X線望遠鏡(XRT)、極端紫外線撮像装置(EIS)が搭載され、2008年5月現在においてもミッションは順調に進められている。XRTは、NASAが開発した鏡筒部(XRT-T)、国立天文台および宇宙航空研究開発機構が開発したカメラ部(XRT-S)からなる斜入射望遠鏡である。XRT-T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。XRT-Sではシリコン系接着剤を極力排除し、接着剤にはエポキシ系をほとんどで使用しているが、プリアンプにシリコン系接着剤が一部使用されている。光学系に有機材料からのアウトガス分子が付着すると、付着物を構成する元素がX線を吸収し、X線望遠鏡の感度低下を引き起こす。一般に、観測波長が紫外線の場合に付着物の影響が最も大きく現れ、次いで可視光線、X線の順で影響するため、EISやSOTに比べてXRT

への影響は軽微と予想されていた。しかしながら、 -60°C 前後に冷却されたCCDに汚染分子がフィルム状に付着し、CCDのX線検出感度を低下させていることがわかった。また、CCD上の付着物を除去するためCCDを約 35°C まで加熱したが、CCD上にスポット状汚染物質が多数残ったことがわかった。

本稿では、XRTの概要および汚染状況を述べた上で、汚染分子付着厚の推定、汚染成分の同定、汚染源の推測を行い、スポット状汚染物質の発生メカニズムを考察した結果をまとめている。

2. X線望遠鏡の概要

「ひので」の概観を第1図に示す。「ひので」に搭載されているXRTは「ようこう」の軟X線望遠鏡をさらに発展させたものであり、X線ではこれまでにない高い空間分解能を達成している。全長は約3m、空間分解能は2秒角、観測波長は $6\sim 200\text{ \AA}$ （軟X線、極紫外線）である^{2,3)}。ここでは、便宜上、X線と呼ぶことにする。この性能により、太陽のコロナ中の磁気プラズマ現象の発生機構、コロナの加熱機構の解明に大きく貢献している。SOTに対するXRTアライメント測定のため、波長 $4300\text{ \AA}$ の可視光を観測することもできる。太陽からのX線が入射する順にXRTの光学系を次に述べる。第2図に示すように、太陽からのX線はスリット状のプレフィルタに入射する。太陽方向からプレフィルタを見るとリング状である。透過したX線はミラー1, 2(M1, M2)で反射・集光し、フィルタ・ホイール(FW)1, 2のX線観測用フィルタに入射する。第3図に示すように、回転式フィルタ・ホイールには計9種類のX線観測用

*1 © 2008 日本航空宇宙学会

平成20年5月29日原稿受理

*2 宇宙技術開発(株)

*3 自然科学研究機構国立天文台

*4 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部

第1図 「ひので」の概観

第2図 XRT 光学系配置

第3図 X線観測用フィルタの概観⁶⁾

フィルタがあり、波長感度特性（透過スペクトル）がそれぞれ異なる。このうち、波長 $200 \text{ \AA}$ での透過率の高い順番でいうと、Ni 製メッシュに Al 薄膜を貼った Thin-Al-Mesh、ポリイミドに Al をコーティングした Thin-Al-Poly、ポリイミドに Ti をコーティングした Ti-Poly がある。他のフィルタは波長 $200 \text{ \AA}$ をほとんど透過しない。FW-1, 2 にはフィルタを設置していない部分もある。フィルタ部を透過した X 線は、第4図に示す CCD に入射・結像する。太陽 X 線観測時には CCD が約 -50°C 以下に冷却される。CCD の隣の区画にはプリアンプが設置されている。可視光観測時には可視光用シャッタを開き、FW-1 が None、FW-2 が G-band の状態にされる。

温度 T (K) の太陽コロナプラズマを観測するとき、XRT

第4図 XRT-S の概観³⁾

が X 線観測用フィルタ i を用いて感受する X 線強度 I_i ($\text{DN sec}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$) は式 (1) で表される。DN とは CCD の Data Number の略である。

$$I_i = EM \cdot f_i(T) \quad (1)$$

ここで、 EM はエミッションメジャー（コロナプラズマの量）(cm^{-5})⁴⁾、 f_i は X 線観測用フィルタ i の温度感度 ($\text{DN cm}^5 \text{ sec}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$)²⁾ である。 f_i は式 (2), (3) で表される。

$$f_i(T) = a \cdot \int S(T, \lambda) \cdot A_{\text{eff},i}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$A_{\text{eff},i}(\lambda) = A \cdot \tau_P(\lambda) \cdot R_{M1}(\lambda) \cdot R_{M2}(\lambda) \cdot \tau_i(\lambda) \cdot Q_{\text{CCD}}(\lambda) \quad (3)$$

ここで、 a は単位変換の定数 ($3.0 \times 10^9 \text{ DN erg}^{-1}$)、 S は XRT に入射する太陽コロナのスペクトル ($\text{erg cm}^3 \text{ \AA}^{-1} \text{ sec}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$)⁵⁾、 A_{eff} は有効面積 (cm^2)、 λ は観測波長 ($\text{\AA}$)、 A はプレフィルタの開口面積 (cm^2)、 τ_P はプレフィルタの透過率、 R はミラー 1, 2 の反射率、 τ_i は X 線観測用フィルタ i の透過率、 Q_{CCD} は CCD の量子効率である。各 X 線観測用フィルタを用いた X 線強度 I_i の比 (DN 比) からコロナプラズマの温度診断が可能となる。

3. 軌道上での X 線望遠鏡の状況

2006 年 9 月に打ち上げられた「ひので」は全日照軌道に投入され、2007 年 5 月初旬から日照・日陰を繰り返す軌道となったため XRT-T の温度が低下傾向を示した。これにともなう XRT-T 構体の熱変形、観測データの劣化を防ぐため、2007 年 6 月に XRT-T 内のオペレーショナル・ヒータがオンにされた。XRT-T, XRT-S 内の温度をそれぞれ第 5, 6 図に示す。第 7 図には、X 線観測用フィルタを用いた太陽静穏領域の DN 値を示している。同図中の矢印は -60°C 前後の CCD を約 35°C に加熱・保持 (CCD バークニング) し、元の温度に戻したタイミングを指す。CCD バークニング終了

第 5 図 XRT-T の温度

第 6 図 XRT-S の温度

第 7 図 X 線観測用フィルタを用いた太陽静穏領域の DN 値

直後には DN 値が Thin-Al-Mesh で約 $15 \sim 16 \text{ DN sec}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$ 、Ti-Poly で約 $2.5 \text{ DN sec}^{-1} \text{ pixel}^{-1}$ の初期状態に戻る傾向を示したが、時間の経過とともに DN 値が減少した。特に、波長 $200 \text{ \AA}$ での透過率が高い Thin-Al-Mesh を用いた DN 値が著しく減少する傾向を示した。

冷却された CCD を約 35°C に昇温する途中 (約 -2°C)

第 8 図 第 1 回 CCD 昇温途中の画像 (可視光)

で取得した CCD 画像 (第 1 回 CCD ベーキング) を第 8 図に示す。同図より、CCD 上から何かが蒸発している模様が観察され、一部にセル状の模様も見られた。第 9 図には第 1 回 CCD ベーキング終了直後の CCD 画像を示している。観測波長が X 線の場合、黒い斑点が多数出現した。X 線観測用フィルタを変えても、黒い斑点の位置は変わらなかった。観測波長が可視光線の場合、これらの斑点は明るい模様となった。第 2 回 CCD ベーキング終了直後には斑点の数やかたちに変化が観察されなかったが、第 3 回 CCD ベーキング終了直後には斑点の被覆面積が 2 倍以上に達した。

可視光線観測用フィルタ G-band を用いた CCD 中央の DN 値を第 10 図に示す。同図より、DN 値が周期的に変動していることがわかる。また、後述するとおり、CCD 中央から離れるにしたがって DN 値の変動周期が長くなる傾向を示した。

4. コンタミネーションの評価・考察

低分子有機物であるアウトガス分子には、表面温度が低いほど付着しやすい性質がある⁷⁾。付着した汚染分子を構成する元素は X 線を吸収するが、その元素比によって付着物の X 線吸収特性が異なる⁸⁾。また、付着物の屈折率が光学材料のそれよりも小さいとき、付着物の反射防止効果により系全体の透過率が光学材料のみのときよりも高くなる現象がある⁹⁾。3 章で述べた XRT フライトデータより、CCD が主に汚染されていると推測される。その理由として、1) CCD 温度が -60°C 前後のとき汚染分子付着厚が増え続けるため X 線観測用フィルタを用いた DN 値が減少し続け、CCD ベーキング終了直後には付着物が蒸発してしまうため DN 値がほぼ元の状態に戻った (第 7 図)、2) スポット状汚染物質による X 線の吸収により当該箇所が黒い斑点のように見えた (第 9 図左)、3) CCD (Si 製) の屈折率は代表的なアウトガス成分の屈折率の 2 倍程度であるため、付着物の反射防止効果により可視光ではより明るく見えた (第

第9図 第1回 CCD ベーキング終了直後の CCD 画像（X 線，可視光）

第10図 可視光フィルタを用いた CCD 中央の DN 値

9 図右，第 10 図)，が挙げられる。

本章では，CCD 上の汚染分子付着厚の推定を行った上で，付着成分の同定，汚染源の推測，スポット状汚染物質の生成メカニズムについて述べる。

4.1 汚染分子付着厚 ここでは，X 線観測用フィルタによるフィルム状汚染分子付着厚の推定，第 2 回 CCD ベーキング終了以降での可視光フィルタによるフィルム状汚染分子の付着レート空間分布の推定，可視光フィルタによるスポット状汚染物質の厚さの推定を行った。

まず，X 線観測用フィルタによるフィルム状汚染分子の付着厚推定について述べる。付着厚 χ (cm) の汚染分子が CCD に付着したとき，式 (3) で定義される有効面積は式 (4) のとおり変形できる⁸⁾。

$$A'_{\text{eff},i}(\lambda, \chi) = A_{\text{eff},i} \cdot \exp(-\alpha_C(\lambda) \cdot \rho \cdot \chi) \quad (4)$$

ここで， α_C は付着物の質量吸収係数 ($\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$)， ρ は付着物の密度 (g cm^{-3}) である。 α_C は式 (5) で表される⁸⁾。

$$\alpha_C = \sum_j q_j \cdot \alpha_j \quad (5)$$

第11図 X線観測用フィルタによるフィルム状汚染分子の付着厚推定値（DEHP 換算）

ここで， q_j は元素 j の重量分率， α_j は元素 j の質量吸収係数¹⁰⁾である。次節で述べる汚染付着成分の同定結果より，代表的なアウトガス成分であるフタル酸ジエチルヘキシル (DEHP, $\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}_4$) を付着成分として，式 (1)～(5) より任意の付着厚に対する X 線観測用フィルタ Thin-Al-Mesh, Ti-Poly での太陽静穏領域の X 線強度 I を算出し， $I_{\text{Al-mesh}}/I_{\text{Ti-Poly}}$ を求めた。この値が各フィルタを用いた DN 値（観測値）の比に対応する。X 線観測用フィルタによるフィルム状汚染分子の付着厚推定値を第 11 図に示す。同図より，オペレーショナル・ヒータがオンとなった時点から付着レートが急激に高くなったことがわかる。

つぎに，第 2 回 CCD ベーキング終了以降での可視光フィルタによるフィルム状汚染分子の付着レート空間分布の推定について述べる。第 10 図に示した周期的な DN 値の変化は汚染付着厚の時間変化に起因し，その周期は付着レートの空間分布に起因すると推測される。汚染分子付着物の屈折率を n_1 ，入射光の波長を λ ($= 4,300 \text{ Å}$) とすると，DN 値の極小から次の極小までの期間 Δt に付着した付着物の厚さ $\chi(\text{Å})$ は式 (6) で表される⁹⁾。

$$\chi = \frac{\lambda}{2n_1} \quad (6)$$

付着成分を DEHP とすると，第 2 回 CCD ベーキング終了以降での汚染分子付着レートの空間分布は第 12 図のとおりとなる。ここで，DEHP の屈折率を 1.5 とした¹¹⁾。第 12 図より，CCD 中央付近への汚染分子付着レートが最も高く，CCD の端であるほど低くなった。

スポット状汚染物質の厚さに関しては，式 (7) を用いてニュートンリングの縞の数とスポット中央の明暗から推定した⁹⁾。

$$\text{明：} \chi = \left(l - \frac{1}{2}\right) \cdot \frac{\lambda}{2n_1} \quad (7)$$

$$\text{暗：} \chi = l \cdot \frac{\lambda}{2n_1}$$

ここで， l は自然数である。

4.2 汚染付着成分 有機材料からの代表的なアウトガス成分には DEHP，ポリジメチルシロキサン (PDMS，

第 12 図 第 2 回 CCD ベーキング終了以降での可視光フィルタによる汚染分子付着レートの空間分布推定値 (DEHP 換算)

第 13 図 フィルム状汚染付着成分の同定

C_2H_6OSi), メチルフェニルシロキサン (MPS, $C_{28}H_{32}O_2Si_3$) がある. DEHP は可視光磁場望遠鏡の CFRP やエポキシ系接着剤からも放出される可塑剤の一種であり^{12, 13)}, X 線天文衛星「すざく」やスペースチャンバでも検出され

第 14 図 スポット状汚染付着成分の同定
図中の点線の色は、付着成分ごとの推定厚さ (緑: PDMS, 黄: MPS, 赤: DEHP) に対応する。

第 15 図 XRT-S 形状モデルの内部

第 16 図 XRT-T 側を汚染源とした汚染分子付着レート数値解析値

第 17 図 プリアンプを汚染源とした汚染分子付着レート数値解析値

たことのある成分である¹⁴⁾。次節で述べるとおり、XRT-Tあるいはプリアンプが汚染源となり得る可能性があった。XRT-TにはCFRPやエポキシ系接着剤が使用されているため、CCDへの付着成分がDEHPもしくはこれに類似した成分であれば、汚染源はXRT-T内の有機材料である可能性が高い。一方、PDMS、MPSはシリコン系材料から放出される成分である¹⁵⁾。付着成分がPDMS、MPSに類似した成分であれば、汚染源はXRT-Sのプリアンプ内部に使用されているシリコン系接着剤KE101A/Bである可能性が高い。

フィルム状汚染付着成分の同定を次のように行った。まず、式(1)～(5)より付着成分をそれぞれDEHP、MPS、PDMSとして任意の付着厚に対する $I_{\text{Al-mesh}}/I_{\text{Ti-Poly}}$ を求めた(計算値)。つぎに、式(6)を基に任意時刻での付着厚を一次補間で推定し、そのときのDN比(X線観測用フィルタThin-Al-mesh, Ti-Poly)をプロットした(観測値)。ここで、MPSの屈折率を1.6、PDMSの屈折率を1.4とした^{16, 17)}。フィルム状汚染付着成分の同定を第13図に示す。同図より、付着物はDEHPもしくはこれに類似した成分と推測される。一方、第1回CCDベーキングの際、CCD温度が約 -18°C のときCCD上の付着物が蒸発している状態は観察されなかったが、約 -2°C のときには蒸発している状態(第8図)が観察された。そこで、DEHPの蒸気圧曲線¹⁸⁾を基にDEHPが蒸発し得る温度を計算した。XRT-S上部の圧力 P (Pa)の計算式は式(8)のとおりである。

$$P = \dot{m} \cdot \frac{\Phi_{\text{Window}}}{\Phi_{\text{CCD}}} \cdot \sqrt{2\pi mkT} \quad (8)$$

ここで、 $\dot{m}$ はCCDへの汚染分子付着レート(molecules $\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$)、 Φ_{Window} はXRT-Sウィンドウを通過する汚染分子フラックス(molecules $\text{m}^{-2} \text{sec}^{-1}$)、 Φ_{CCD} はCCDに入射する汚染分子フラックス(molecules $\text{m}^2 \text{sec}^{-1}$)、 m は分子質量(kg)、 k はボルツマン定数(J K^{-1})、 T は温度(K)である。第1回CCDベーキング時のフィルタ・ホイール近辺の温度(約 20°C)を T 、第1回CCDベーキング直前の付着レート $\dot{m}$ を $1,000 \text{ \AA}/\text{month}$ 、汚染分子をDEHP(MW 391)とすると、圧力は $3.3 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ となり、蒸気圧曲線からDEHPは約 -16°C 以上で蒸発することになる。試算では汚染分子成分をDEHPのみと仮定しているが、実際には -60°C 以上で付着しない水などの成分もあろう。したがって、DEHPは $-18 \sim -2^{\circ}\text{C}$ で蒸発し得る条件にあり、成分同定結果が支持される。

フィルム状汚染付着成分の同定と同様の方法でスポット状汚染付着成分の同定を試みた。結果を第14図に示す。可視光で見たスポット状汚染物質が全体的に明るいときその中央の厚さは $700 \text{ \AA}$ 前後、明暗のパターンでは $1,400 \text{ \AA}$ 前後、明暗明のパターンでは $2,150 \text{ \AA}$ 前後、明暗明暗のパターンでは $2,900 \text{ \AA}$ 前後と推定される。同図より、スポット状汚染付着物もDEHPに類似した成分と推測される。

4.3 汚染源 有機材料の温度が高いほどその材料からのアウトガスレートは高くなる傾向がある⁷⁾。第11図に示したように、ヒータ・オン直後から汚染分子付着レートが

高くなった。このことは、ヒータ・オン直後に温度が上昇したXRT-T内部(第5図)、プリアンプ(第6図)のうち、どれかが直接的あるいは二次的な汚染源となったことを示唆している。一方、XRT-Sに使用されているエポキシ系接着剤はラジエータシールドの-Z側(第4図)にあり、これらは低温状態である。また、その-Z側には宇宙空間への専用排気パスも設けられている。したがって、これらが汚染源になる可能性は極めて低い。

第12図に示したように、CCD上への汚染分子付着レートに空間的な分布があるため、汚染分子の飛来方向を推測することができる。第15図に示すXRT-S形状モデルを構築し、コンタミネーション解析ソフトウェアJapanese SPacecraft Induced Contamination Environment analysis software (J-SPICE)¹⁹⁾を用いて付着レート分布解析を行った。有機材料からのアウトガス分子の放出、空間中の運動、付着を表現する基礎式は式(9)のとおりである。

$$\dot{m} = \dot{M} \cdot F \cdot s \quad (9)$$

ここで、 $\dot{m}$ はアウトガス分子の付着レート($\text{g cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)、 $\dot{M}$ はアウトガスレート($\text{g cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$)、 F は形態係数、 s は付着係数である。本数値解析ではアウトガス分子はCCDおよびCCDハウジング以外には一切付着しないと仮定した。XRT-T側、プリアンプを汚染源とした汚染分子付着レート数値解析値をそれぞれ第16, 17図に示す。XRT-T側を汚染源とした解析値のほうが第12図の分布に近いことがわかる。前節で述べた付着成分同定結果も踏まえると、CCDの主要な汚染源はXRT-T内の有機材料であると考えられる。XRT-Tを開発したNASAは、米国の輸出規制の下、使用材料の仔細を日本側に開示できない状況であるため、残念ながら汚染源となった有機材料の特定には至っていない。

4.4 スポット状汚染物質の発生 スポット状汚染物質の発生メカニズムについて考察する。同メカニズムの可能性として、1) -60°C 前後のCCDには汚染分子が固体の状態が付着し、CCD昇温の過程で液体になり、CCD表面との濡れ性の影響により水玉のように分散した(相変化説)、2) 化学反応性のあるアウトガス分子が付着し、CCD上で分子同士が会合・反応し、より蒸発しがたい物質に変化した(化学反応説)、3) 軟X線が汚染付着分子の結合鎖を切断してラジカルを生成し、CCD上でラジカル同士が会合・反応して蒸発しがたい物質に変化した(光化学反応説)、が挙げられる。

まず、相変化説について考察する。前節より、XRT-T内の材料が主要な汚染源であることを述べた。XRT-TからCCDへの汚染分子の直接パスはなく、汚染分子がX線観測用フィルタ付近で反射を繰り返しながらCCDへ到達すると考えられる。第5, 6図より、CCDベーキング時の到達温度は約 35°C であるが、フィルタ付近の温度は高々 20°C である。単なる相変化であれば、ベーキング時に 35°C で蒸発しない汚染分子はフィルタ付近にトラップされ、CCDには到達しないはずである。したがって、相変化説は否定

される。

次に、化学反応説について考察する。「ひので」開発時に実施した接着剤のアウトガス測定実験では、真空チャンバに -20°C の石英マイクロ天秤 (QCM) を設置し、接着剤の温度を 90°C とした。測定終了後、QCM 温度を 95°C まで昇温して QCM 上の付着物の除去を試みたが、QCM 振動数は測定開始前よりも約 500 Hz (均一な付着厚で 100 Å 相当) 増加した。これは、接着剤中の未反応モノマーが放出され、QCM 上で会合・反応したことを示唆している。XRT においても同様の現象が起きた可能性はある。

最後に、光化学反応説について考察する。近年、軟 X 線を用いた分子メスの研究が盛んに行われている。これは、単分子層吸着物の化学結合を選択的に切断するものである。多分子層になると、軟 X 線で生じたラジカルが 2 次反応を起こし、化学反応メカニズムが複雑になるといわれている²⁰⁾。XRT においては、太陽の軟 X 線が CCD 上の多分子層付着物に達する。この軟 X 線により付着物からラジカルが生じ、結果としてスポット状汚染物質に化学変化した可能性も否定できない。いずれの説にせよ、スポット状汚染物質が生じた理由として化学反応が関与した可能性が高い。これら現象の原因究明のためには、関連する基礎研究が必要不可欠である。

5. む す び

「ひので」X 線望遠鏡 (XRT) の CCD においても、可視光磁場望遠鏡 SOT の排熱鏡と同様¹⁹⁾、コンタミネーション現象が観察された。汚染源は鏡筒部 XRT-T、汚染物質はフタル酸ジエチルヘキシル DEHP あるいはこれに類似した成分であることがわかった。また、CCD をベークンしても蒸発しないスポット状汚染物質が観察された。XRT においてもフライト品のベークンが実施されたが、XRT-T の場合にはベークン温度およびその時間が不十分であったと言わざるを得ない。一方、「すざく」でも光学フィルタのコンタミネーション現象が報告されており、ベークンが十分でなかった慣性基準装置の防振ゴムが主な汚染源となっていた可能性を指摘している。また、開発スケジュール上、フライト品の一部をベークンできなかったことも一因として挙げられている¹⁴⁾。X 線に対するコンタミネーションの影響は可視光などに比べ小さいものの、これらの結果は今後の X 線天文学ミッションにおいてもフライト品のベークンは極めて重要であることを指摘している。将来、X 線観測用光学系の高感度化、高分解能化が進むにつれ、ベークンのみに頼らず、新たな軌道上コンタミネーション対策 (例えば、低温にした汚染物質コレクターレー

ト) の導入によるフォールト・トレランス設計も必要になっていくであろう。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) Golub, L., DeLuca, E., Austin, G., Bookbinder, J., Caldwell, D., Cheimets, P., Cirtain, J., Cosmo, M., Reid, P., Sette, A., Weber, M., Sakao, T., Kano, R., Shibasaki, K., Hara, H., Tsuneta, S., Kumagai, K., Tamura, T., Shimojo, M., McCracken, J., Carpenter, J., Haight, H., Siler, R., Wright, E., Tucker, J., Rutledge, H., Barbera, M., Peres, G. and Varisco, S.: The X-ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission, *Solar Physics*, **243** (2007), pp. 63–86.
- 3) Kano, R., Sakao, T., Hara, H., Tsuneta, S., Matsuzaki, K., Kumagai, K., Shimojo, M., Minesugi, K., Shibasaki, K., DeLuca, E., Golub, L., Bookbinder, J., Caldwell, D., Cheimets, P., Cirtain, J., Dennis, E., Kent, T. and Weber, M.: The Hinode X-Ray Telescope (XRT)—Camera Design, Performance and Operations, *Solar Physics*, **249** (2008), pp. 263–279.
- 4) Brooks, D. H. and Warren, H. P.: The Intercalibration of *SOHO* EIT, CDS-NIS, AND *TRACE*, *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, **164** (2006), pp. 202–214.
- 5) 太陽 X 線スペクトルデータベース, <http://www.chianti.rl.ac.uk/applications/index.html>
- 6) JAXA 宇宙科学研究本部 SES データセンター: 科学衛星 SOLAR-B 実験計画書, SES-TD-05-010, 2006.
- 7) Hayashi, T., Urayama, F., Takeda, N. and Baba, N.: Modeling of Material Outgassing and Deposition Phenomena, *Proc. SPIE*, **5526** (2004), pp. 137–146.
- 8) Brown, J., Forsyth, J.: 結晶構造, 丸善, 東京, 1975, pp. 29–31.
- 9) 金原寿郎編: 基礎物理学, 裳華房, 東京, 1963, pp. 237–248.
- 10) 元素の質量吸収係数データ, http://henke.lbl.gov/optical_constants/
- 11) 和光純薬工業: フタル酸ジエチルヘキシル カタログ値, 2007.
- 12) McCroskey, D.: Outgassing Measurements on M60JB/EX1515 Coated Carbon Fiber, NRL080502-5, 2002.
- 13) McCroskey, D.: Outgassing Measurements on Redux 312UL Epoxy, NRL080502-2, 2002.
- 14) 物質・材料研究機構: 第 1 回コンタミネーション管理技術ワークショップ概要集別刷, 2007, pp. 1–11.
- 15) McCroskey, D.: Outgassing Measurements on UFSS Panel, NRL120602, 2002.
- 16) Osantowski, J.: Contamination Sensitivity of Typical Mirror Coatings—a Parametric Study, *Proc. SPIE*, **338** (1982), pp. 80–86.
- 17) 東レ・ダウコーニング: SH200 オイル カタログ値, 2006.
- 18) Lesvenan, A., Guyt, J., Schmeitzky, O. and Van Eesbeek, M.: Re-Evaporation of Polymeric Materials during Outgassing Experiments, *Proc. of 9th International Symposium on Materials in a Space Environment*, 2003, pp. 211–216.
- 19) 浦山文隆, 渡辺吉男, 矢野敬一, 馬場尚子: 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, *宇宙技術*, **6** (2007), pp. 25–30.
- 20) 関口哲弘, 馬場祐治: 固体表面の軟 X 線光化学, *放射光*, **13** (2000), pp. 147–155.