

ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラのコンタミネーション対策

井澤 正治 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 宇宙物理学研究系
東京工業大学 理工学研究科 基礎物理学専攻 修士課程 1 年)

ABSTRACT

我々の研究グループでは 2014 年打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される軟 X 線撮像検出器 (Soft X-ray Imager : SXI) の開発を行っている。ASTRO-H の観測対象とする X 線のエネルギー範囲は広く、約 3 桁の領域 (0.1-100 keV あるいは 100-0.1 Å) にも及ぶ。したがって、X 線の性質も大きく変わり、数 keV より高いエネルギーの X 線は比較的透過力が強いのに対し、それ以下のエネルギーの X 線は透過力が弱く、簡単に吸収されてしまう。特に 1 keV 以下のエネルギーの軟 X 線は著しく吸収されやすく、検出器の取り扱いには細心の注意が必要である。

『ぎんが』までの X 線衛星で主に使用されてきたガスカウンターでは、X 線入射窓にガス圧に耐える強度 (つまり厚さ) が必要なことから、観測エネルギー範囲は 1-2 keV より高くせざるを得ず、また、検出器自身も常温で使用するため、衛星から放出されたアウトガスが検出器に付着し、汚染 (コンタミネーション) を引き起こすことはなかった。しかし、SXI の場合、観測エネルギー範囲が低エネルギー側 (0.4 keV) まで伸びており、また、CCD を低温 (-120°C) に冷却して使用するため、CCD 表面に付着したアウトガスによる軟 X 線の吸収が検出器の感度を著しく低下させる可能性がある。そこで、SXI では検出器内部を二部屋構造にし、(アウトガス発生が懸念される) ビデオボード等の電子部品のある部屋と、(清浄に保つべき) CCD のある部屋を分離している。しかし、部屋を隔てるしきり板には配線等によるわずかな隙間があるため、アウトガスの一部が CCD に付着してしまう。

本研究では、SXI 内部のアウトガス源として最も注意すべきビデオボードに関して、アウトガス許容値を評価するとともに、試作品ビデオボードについて実際にアウトガス量の測定を行った。

1 ASTRO-H 衛星と X 線 CCD カメラ (SXI)

1.1 ASTRO-H 衛星

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H は、『すざく』衛星に次ぐ日本で 6 番目の国際 X 線天文衛星である。過去最高となる 0.3-600 keV の広帯域で、『すざく』に比べ 10-100 倍の高感度観測を実現し、ブラックホールの周辺や超新星爆発といった高エネルギーの現象に満ちた極限宇宙の探査や、高温プラズマに満たされた銀河団の観測を行い、宇宙の構造やその進化を明らかにする。

1.2 軟 X 線撮像検出器 (SXI)

SXI は 0.4-12 keV の軟 X 線領域において撮像分光を行う焦点面検出器であり、軟 X 線望遠鏡 (Soft X-ray Telescope : SXT) から 5.6 m 離れた焦点面に配置される。高い位置分解能とエネルギー分解能を兼ね備えた X 線 CCD が用いられ、これまでの X 線 CCD よりも広いエネルギー領域をカバーする。また、CCD 素子の暗電流抑制の観点から、機械式冷凍機により CCD を -120°C に冷却し動作させる。

2 コンタミネーション

コンタミネーションとは『汚染』のことであるが、人工衛星の場合について言えば、衛星搭載品から発生したアウトガスが衛星表面に付着する現象のことである。コンタミネーションは、衛星搭載機器の性能低下など様々な影響を及ぼすことが知られていて、観測目的が達成されないなど重大な影響が懸念されるため、衛星開

発においては適切なコンタミネーション対策を行う必要がある。

2.1 アウトガスの物理

ABSTRACTでも述べたように、本研究の目的は、アウトガスがX線検出器に与える影響を定量的に評価することなので、まず、アウトガスの性質と振る舞いについて簡単にまとめておく。詳細については参考文献[4]、[5]を参照されたい。

2.1.1 吸着

固体表面へのガスの吸着には、物理吸着と化学吸着がある。物理吸着は、吸着分子がファンデルワールス力によって固体表面に吸着する現象で、吸着エネルギーはほぼ気体の液化熱に等しい。したがって、吸着エネルギーは比較的小さく、また、吸着量によって吸着エネルギーが変化することも少ない。

一方、化学吸着は吸着分子に変形や解離が起り、固体表面の原子と共有結合やイオン結合することによって生ずる。したがって、化学吸着の場合、吸着エネルギーはむしろ分子の生成熱に近く、物理吸着に比べて非常に大きくなり得ることが分かる。また、清浄な表面に吸着が進んでいく場合、最初は表面の構成物質との間で化学吸着が進んでいくものの、表面が覆われてくるにつれて自己同士の吸着が主になり、吸着熱がだんだん小さくなっていくのが普通である。なお、物理吸着と化学吸着ははっきり区別できるものではなく、連続的に移り変わっていくものと考えられる。

物理吸着にしる化学吸着にしる、吸着が進む早さは、単位時間単位面積当たりに衝突する気体分子の数とその吸着確率の積に比例する。

$$\text{吸着の早さ} \propto \omega n \bar{v} / 4 \quad (2.1)$$

ω : 吸着確率

n : 分子数密度

\bar{v} : 分子の平均速度

この式によると、気体分子が壁に衝突する頻度はきわめて大きく、例えば、付着率が1だとすると、 10^{-6} Torrの場合には1秒で壁面が単原子分子層で覆われてしまうことになる。したがって、通常は壁面に付着していく早さと壁面から離脱する早さがほとんど釣り合っていて、両者のわずかな差を通じて正味の吸着や離脱が生じることになる。

2.1.2 脱離

固体表面に吸着している分子は、脱離の活性化エネルギーよりも大きなエネルギーを受け取ると、脱離して固体表面から離れることが可能になる。したがって、脱離の早さは、脱離の活性化エネルギーと温度の比で決まり、

$$\text{脱離の早さ} \propto \Lambda \exp(-E_d/RT) \quad (2.2)$$

Λ : 吸着分子が表面を覆っている割合 (被覆率)

E_d : 脱離の活性化エネルギー

R : 気体定数

T : 吸着面の温度

と表される。吸着面への滞在時間の極端に長い分子、つまり脱離の活性化エネルギーの大きい分子は実質的に脱離することがないため、アウトガス対策では問題になることが少ない。これに対し、中程度の活性化エネルギーを持つ物質、例えば、水の物理吸着 (約 60 kJ/mol) や拡散ポンプ油の物理吸着 (90-110 kJ/mol) などは、大きな問題になり得る。また、式 (2.2) より脱離の早さは温度の上昇により急激に増加することが分かる。これが真空中でベーキング (baking: 焼きだし) が行われる理由である。

2.1.3 吸着脱離平衡

2.1 と 2.2 で述べたように、現実的な状況では吸着と脱離はほとんど釣り合っており、準静的に物事が進行すると考えられる。吸着と脱離の釣り合いを考えると、考慮すべきパラメーターとして被覆率が挙げられる。

吸着では、被覆率に依存して吸着する相手が異なってくるため、被覆率に応じて吸着エネルギーが実質的に変化する。この変化は、物理吸着では少なく、化学吸着では大きい。一方、脱離の場合は、被覆率が 1 より小さい場合は、脱離の早さは被覆率に依存するものの、被覆率が 1 より大きくなればもはや被覆率には依存しないと考えられる。なお、ここでいう被覆率は、固体表面が分子で覆われている場合であるが、脱離や吸着の早さの被覆率依存性から求められる固体表面積は、微小粗さのためにその幾何学的面積よりも著しく大きくなるのが普通である。数十倍に大きくなることも珍しくない。

2.2 宇宙機におけるコンタミネーション

2.2.1 コンタミネーション発生のメカニズム

人工衛星に使用されているプラスチックやゴムなどの高分子材料は、可塑剤や酸化防止剤などの低分子有機物が添加され、合成時に残った未反応モノマーが含まれている場合がある。衛星打ち上げ後、高分子材料が真空中に曝されると、含有されていた低分子有機物がガス化し、材料から放出される現象が起こる。この揮発性のガスをアウトガスと呼ぶ。

アウトガスが衛星内部で発生した場合、まず衛星内部を満たし、衛星外部へ通じる開口部を通して徐々に排出される。一方、衛星内部を満たすガスは衛星内を飛び回るうちに搭載機器に吸着・脱離を繰り返し、やがて温度が低い場所に付着してコンタミネーションを引き起こす。

2.2.2 『すざく』衛星におけるコンタミネーションの影響

『すざく』衛星には 4 台の X 線検出器が搭載され、それぞれ XIS 0, XIS 1, XIS 2, XIS 3 と呼ぶ。XIS において X 線は CCD にほぼ垂直に入射するため、CCD にアウトガスが付着している場合、光電吸収により入射 X 線の強度は減衰する。したがって、エネルギーが 1 keV 以下の軟 X 線ほど容易に吸収されてしまう。

XIS におけるコンタミネーションの影響を確認するために、あらかじめエネルギー強度が既知である軟 X 線源について観測を行い、計測される軟 X 線のスペクトル変化から余分な吸収物質が存在しないか確かめる。

図 2.1 は XIS 1 で観測した超新星残骸 E0102-72 のエネルギースペクトルである。一般に超新星残骸からの X 線の強度は、我々が観測する時間スケールでは一定であることが知られている。また、エネルギースペクトルがよく分かっており、『すざく』衛星から定常観測可能であることからこの天体が選ばれた。

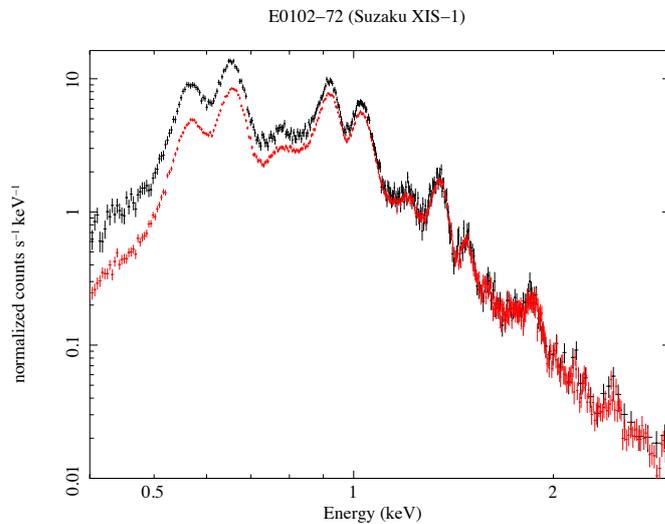


図 2. 1 XIS 1 による超新星残骸 E0102-72 のエネルギースペクトル (和田 師也氏提供)。図中の黒、赤で示されたデータ点は各 2005 年 8/31、同 12/16 に観測されたデータを表す。

図 2. 1 から、衛星打ち上げ後まもなくの 2005 年 8 月と、その 4 ヶ月後の 2005 年 12 月の観測データを比較すると、低エネルギー側 (<1 keV) で X 線の強度が減少しているのが確認できる。これより、天体によるエネルギー強度の変化分ではなく、検出器による強度の変化分、つまり、CCD に付着したアウトガスによる軟 X 線の吸収により、検出器の感度が低下していることが確認された。

2.3 SXI におけるコンタミネーション対策

SXI では以下のような対策により CCD へのアウトガス蓄積を防いでいる。

- SXI 外部で発生したアウトガスに対しては、コンタミネーション防止フィルターにより侵入を防ぐ。
- SXI 内部で発生するコンタミネーションについては、SXI 内部を二部屋構造にし、(アウトガス発生が懸念される) ビデオボード等の電子部品のある部屋と (清浄に保つべき) CCD のある部屋を分離する。二部屋構造の隙間をできるだけ小さくすることにより、CCD の置かれる部屋へのアウトガスの侵入を抑制する。
- SXI の各部屋で発生するアウトガスについては、それぞれベントパイプにより衛星外部に排出する。

2.4 SXI のアウトガス許容値

SXI に対する検出効率の要求としては、『有効エネルギー範囲下限である 0.4 keV での検出効率低下が 10% 以内』となっている。この要求から SXI でのアウトガス許容量を算出する。アウトガス量と検出効率低下は、付着する物質の組成に依存するため、ここでは『すぎく』衛星で主なアウトガス物質とされた DEHP ($C_{24}H_{38}O_4$: 分子量 390.6) を仮定して算出する。DEHP 以外のアウトガス物質も炭素が主体であるため、この仮定で特に問題はない。

ここで、DEHP が CCD に付着した際の、検出効率低下のエネルギー依存性を検討する。図 2. 2 は、CCD に DEHP が $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ と $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 付着した場合について示している。いずれの場合も 0.3 keV 付近の炭素の edge 構造を中心とする低エネルギー側で検出効率の低下が見られる。0.4 keV のエネルギー帯を見ると、 $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の場合は検出効率の低下が 10% 以下に抑えられている。したがって、上記の要求を満たす条件として、『SXI 光路中に存在するアウトガス量は $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 以下』が必要となる。

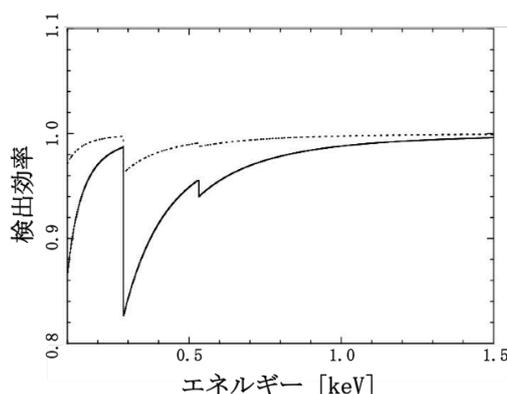


図 2. 2 DEHP による検出効率低下のエネルギー依存性。実線が $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 、点線が $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の場合。

2.5 ビデオボードのアウトガス許容値

2.5.1 CCD へのコンタミネーションの要求

前節より 0.4 keV での検出効率低下を 10% 以下にするために、SXI に対するアウトガス許容値は $5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ である。一方、CCD へのコンタミネーションとしては地上試験時のコンタミネーションが主要になるため、ここでは地上試験時のアウトガス許容値の配分を $3 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ として考えることにする。CCD を含めた低温部のうち、どこにアウトガスが付着するかはアウトガスの侵入パスにも依存するが、ここでは簡単のため CCD 全面に均等にアウトガスが付着すると仮定する。そうすると、地上試験時のアウトガス総量に対する要求として、低温部の面積を 206.6 cm^2 とすると

$$3 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \times 206.6 \text{ cm}^2 = 620 \mu\text{g} \quad (2. 3)$$

となる。

2.5.2 アウトガスの総量

『すざく』衛星のベキング結果によると、単位時間あたりのアウトガス量は時間とともに減少し、時間の -0.8 乗に比例した。ここでは、ビデオボード等からのアウトガスも同様の時間依存性をもつと仮定する。ただし、アウトガス量が単純に $t^{-0.8}$ に比例すると仮定すると、時間の原点付近でアウトガスが急激に増大することになり、非現実的である。この問題を避けるため、ベキ関数モデルは $t=1 \text{ day}$ 以降で適用可能として、単位時間あたりのアウトガス量が

$$A \left(\frac{t}{86400 \text{ s}} \right)^{-0.8} \mu\text{g}/\text{sec} \quad (\text{適用範囲は、} t > 86400 \text{ sec}) \quad (2. 4)$$

のように変化すると仮定する。ここで、 $A \mu\text{g}/\text{sec}$ は最初に真空中に曝される時のアウトガス量である。したがって、軌道上におけるアウトガスの総量は、『すぎく』でアウトガスがほぼ1年で放出されなくなったことを考慮すると

$$\int_{1 \text{ day}}^{1 \text{ year}} A \left(\frac{t}{86400 \text{ s}} \right)^{-0.8} dt = \frac{A}{1-0.8} \left(\frac{1}{86400} \right)^{-0.8} [t^{0.2}]_{1 \text{ day}}^{1 \text{ year}} \quad (2.5)$$

$$= 1.0 \times 10^6 A \mu\text{g}$$

となる。

2.5.3 SXI 内部からのアウトガス

2.3節のSXIのコンタミネーション対策でも述べた通り、SXIは上部と下部に分かれ、上部に面積 $S_{\text{CCD}} \text{ cm}^2$ のCCDが置かれる。上部からは冷却開始時で $A_U \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}$ 、下部からは $A_L \mu\text{g}/\text{cm}^2/\text{s}$ のアウトガスが放出されているとする。上部と下部の間には面積 $S_g \text{ cm}^2$ 、長さ $L_g \text{ cm}$ のgapがある。下部には半径 $r_V \text{ cm}^2$ 、長さ $L \text{ cm}$ のベントパイプがつながっている。

・SXI 上部からのアウトガス量

上の部屋からのアウトガスについては、ベントパイプから排出される前に低温部に付着してしまう。そこで、ベントパイプは考慮せずに、アウトガスはCCDとgapに分配されると考える。CCDに配分された分のアウトガスは全てコンタミネーションを引き起こす。したがって、SXI上部からの1年分のアウトガス量は

$$1.0 \times 10^6 A_U \frac{S_{\text{CCD}}}{S_{\text{CCD}} + S_g} \approx 1.0 \times 10^6 A_U \mu\text{g} \quad (2.6)$$

となる。ただし、gapはCCD面積に比べて十分小さいと仮定した。上の部屋には、アウトガス源となるプラスチック類は少ないので、主なアウトガス源は部屋の内面であると考えられる。

・SXI 下部からのアウトガス量

アウトガスはベントパイプとgapに分配される。gapに分配されて上の部屋に移動した分のアウトガスは全てコンタミネーションを引き起こす。ここで分配比は、ベントパイプとgapのコンダクタンスの比になるはずである。ベントパイプのコンダクタンス C_V は分子流の場合

$$C_V = 121 \frac{(2r_V)^3}{L} \text{ m}^3/\text{s} = 968 \left(\frac{r_V}{1 \text{ cm}} \right)^3 \left(\frac{L}{100 \text{ cm}} \right)^{-1} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.7)$$

となる。gapのコンダクタンス C_g については、配線が二部屋のしきり板を貫通する箇所、 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ で長さが 1 cm 程度の間隙が4つあると仮定する。実際はこの間隙はもっと小さいはずであるが、他の場所にも間隙があるため、この値で代表させる。したがって、ギャップのコンダクタンス C_g は分子流の場合

$$C_g = 4 \times 172 \left(\frac{S_g}{4} \right)^{3/2} / L_g = 68.8 \left(\frac{S_g/4}{1 \text{ mm}^2} \right)^{3/2} \left(\frac{L_g}{1 \text{ cm}} \right)^{-1} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (2.8)$$

となる。したがって、SXI下部からのアウトガスのうちCCDに付着する量は $C_V + C_g \sim C_V$ とすると

$$1.0 \times 10^6 A_L \frac{68.8 \left(\frac{S_g/4}{1 \text{ mm}^2} \right)^{3/2} \left(\frac{L}{100 \text{ cm}} \right)^{-1}}{968 \left(\frac{r_V}{1 \text{ cm}} \right)^3 \left(\frac{L_g}{1 \text{ cm}} \right)^{-1}} = 7.1 \times 10^4 A_L \frac{\left(\frac{S_g/4}{1 \text{ mm}^2} \right)^{3/2} \left(\frac{L}{100 \text{ cm}} \right)^{-1}}{\left(\frac{r_V}{1 \text{ cm}} \right)^3 \left(\frac{L_g}{1 \text{ cm}} \right)^{-1}} \mu\text{g} \quad (2.9)$$

となる。

2.5.4 地上ベーキングに対する要求

以上より、SXI 上部、下部両方からのアウトガスが地上試験時のアウトガスの要求値を超えないための条件は

$$1.0 \times 10^6 A_U + 7.1 \times 10^4 A_L \frac{\left(\frac{S_g/4}{1 \text{ mm}^2}\right)^{3/2} \left(\frac{L}{100 \text{ cm}}\right)^{-1}}{\left(\frac{r_v}{1 \text{ cm}}\right)^3 \left(\frac{L_g}{1 \text{ cm}}\right)^{-1}} < 620 \left(\frac{S_{CCD}}{206.6 \text{ cm}^2}\right) \quad (2. 10)$$

となる。通常、ビデオボード等からのアウトガスが金属表面からのそれより桁違いに大きいため、 A_U を無視し A_L のみを考慮すると

$$A_L < 9 \times 10^{-3} \frac{\left(\frac{r_v}{1 \text{ cm}}\right)^3 \left(\frac{L_g}{1 \text{ cm}}\right)^{-1}}{\left(\frac{S_g/4}{1 \text{ mm}^2}\right)^{3/2} \left(\frac{L}{100 \text{ cm}}\right)^{-1}} \left(\frac{S_{CCD}}{206.6 \text{ cm}^2}\right) \mu\text{g/s} \quad (2. 11)$$

となる。アウトガス量の推定には不定性が多いため、ここでは 1 桁近くのマージンを取り

$$A_L < 1 \text{ ng/s} \quad (\text{ベーキング終了時のアウトガス上限値}) \quad (2. 12)$$

となる。

3 ビデオボードからのアウトガス測定

SXI の場合、アウトガス源として最も注意すべきはセンサー内にあるビデオボードであることが分かっている。ビデオボードからのアウトガス量は十分少ない必要があり、今回は試作品のビデオボードからのアウトガスを測定し、アウトガス量許容値を達成可能かどうかを確かめた。

3.1 測定装置

アウトガス量の測定には TQCM(Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance) を用いた。TQCM は、温度コントロールされた水晶振動子を利用してアウトガス量を測定する装置である。TQCM は真空槽中に露出され、かつ冷却されてアウトガスが吸着しやすい状態に保たれる。TQCM にアウトガスが吸着すると、水晶振動子の固有振動数が減少するため、周波数変化分を精度よく測定し、吸着量に換算することができる。今回使用した TQCM は、水晶振動子の面積が 0.316 cm^2 、振動数が 15 MHz 、感度は $1.96 \times 10^{-9} \text{ g/cm}^2/\text{Hz}$ である。測定系の概念図を図 3. 1 に示す。

3.2 測定結果

測定結果を図 3. 2 に示す。測定は、TQCM の温度を $20 \text{ }^\circ\text{C}$ から $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ まで $10 \text{ }^\circ\text{C}$ おきに変化させ、各温度で TQCM の周波数を 1 分毎に計 10 分間測定し、アウトガス吸着率を求めた。また、チャンバーからのバックグラウンドガスを考慮して、ビデオボードをチャンバーに入れた場合と入れない場合で測定を行った。図中のビデオボードのみの場合のデータは、ビデオボードを入れた場合のデータからビデオボードを入れな

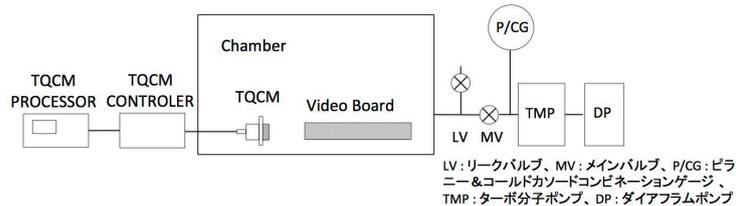


図 3. 1 測定概念図。

かった場合のデータを差し引いたものである。また、測定時のチャンバー内の真空度は概ね 10^{-6} Torr 程度であった。

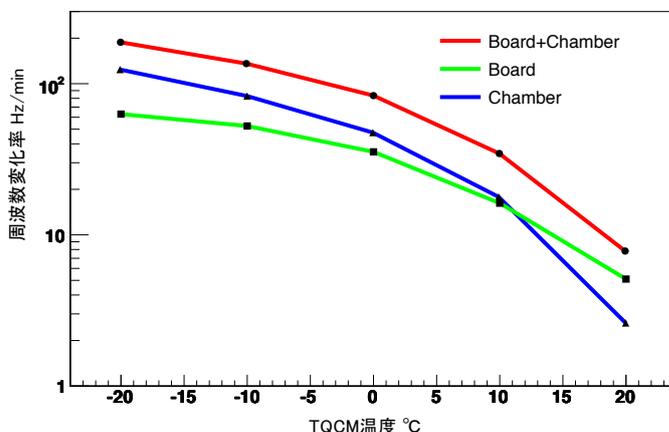


図 3. 2 ビデオボードからのアウトガス測定結果。赤線はチャンバーにビデオボードを入れた場合。青線はチャンバーに何も入れなかった場合。緑線はチャンバーにビデオボードを入れた場合のデータから何も入れなかった場合のデータを差し引いたもの。

3.3 吸着率の温度依存性

TQCM への吸着量は、TQCM センサーに入射する分子の数とセンサーから脱離する分子の数の差で決まる。入射分子はガスの分圧で決まり、1 回のアウトガス測定に要した時間は 1 時間程度であったため、この間のガスの分圧は一定とみなせる。したがって、(2.1) 式で表される吸着の早さは一定とみなせる。一方、(2.2) 式で表される脱離の早さは、TQCM 表面に付着している分子数と分子の種類、また、TQCM の温度に依存する。ただし、各温度においてアウトガス測定を行う前に、TQCM のベーキングを行うようにしていたため、測定時には吸着ガスの被覆率は 1 に比べて十分小さかったと考えられる。そこで、以下簡単のため、測定中に被覆率の変化はなかったものと仮定する。実際、アウトガスは様々な分子の集まりであり、脱離の早さは活性化エネルギーが異なる各成分を足し合わせて考える必要がある。しかし、ここでは近似として、活性化エネルギーは 1 種類のアウトガスで代表されるものとする。したがって、(2.2) 式は T 以外すべて定数となり、TQCM に対する吸着率は

$$\text{TQCM 吸着率} = P_0 - \exp(P_1 - P_2/T) \quad : \quad T = \text{TQCM 温度} \quad (3. 1)$$

という温度のみの関数になる。ここで、 T は TQCM の絶対温度、 P_0 は TQCM に入射してくる吸着性ガスのフラックス (Hz/min)、 P_1 はセンサー表面に吸着している分子数とアウトガスの脱離速度の積に関連する量である。また、 P_2 は E_d/R であり、気体定数 $R(8.31 \text{ J/K/mol})$ をかけることで活性化エネルギーに換算できる物理量である。

この関数を用いて、図 3. 2 に示したビデオボードのみの場合のデータを fitting した結果を図 3. 3 と表 3.1 に示す。

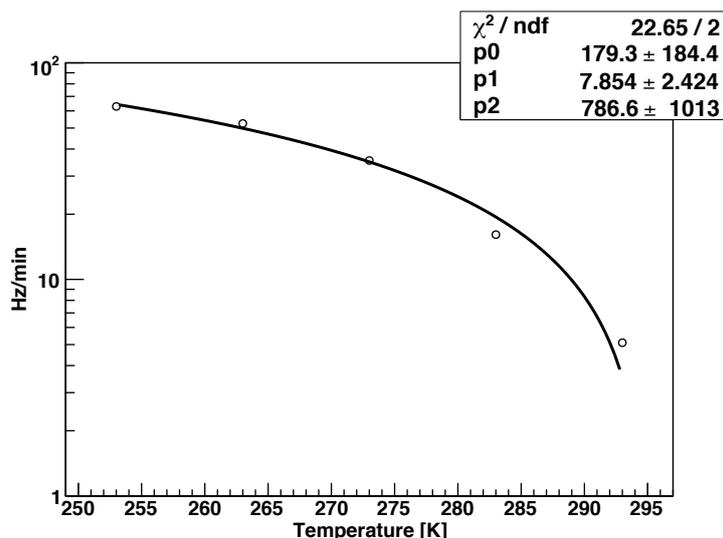


図 3. 3 ビデオボードのみの場合のデータ fitting 結果。

表 3.1 モデル関数による fit 結果。

P_0	P_1	P_2
179.3 ± 184.4	7.854 ± 2.424	786.6 ± 1013

fit 結果の P_2 から、アウトガスの活性化エネルギーを求めると、約 6 kJ/mol となった。これは希ガスの活性化エネルギー相当の値になっている。しかし、TQCM センサーにはビデオボードからのアウトガスの他にチャンバーから放出されるアウトガス等の吸着が進んでいたことを考えると、この活性化エネルギーが実際のビデオボードからのアウトガスの活性化エネルギーをそのまま表しているとは考えにくい。今回の解析では、すべてのアウトガスが単一の活性化エネルギーを持つと仮定したが、この仮定が正しくない可能性が考えられる。実際は、様々な活性化エネルギーを持ったガスが測定結果に影響していると考えられ、異なる温度では異なるガスが吸着に寄与し、それらの重ね合わせで見かけ上、油類等の活性化エネルギーに比べ小さな値が得られたのではないかと考えられる。

3.4 考察

アウトガスの活性化エネルギーを求めることが出来れば、軌道上での衛星内部の温度分布を仮定して、衛星内部での吸着脱離のバランスを解くことで、コンタミネーションが問題となる機器へのアウトガス吸着の速度

を評価することが出来る。しかし、今回の測定ではビデオボードからのアウトガスの活性化エネルギーを決めることが出来なかったため、異なる考え方でコンタミネーションの影響を評価する。

3.3 節で得られた fit 結果より、ビデオボードのみの場合のデータを $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$ まで外挿すると、おおよそ 200 Hz/min となった。

(2.12) 式より、ビデオボードからのアウトガス量許容値は、 1 ng/sec である。これを本実験 Chamber 排気系の Geometry を考慮し、TQCM 測定値 M_{TQCM} に変換すると

$$\begin{aligned} M_{\text{TQCM}} : M_{\text{board}} &= S_{\text{TQCM}} : S_{\text{TQCM}} + S \times C \\ M_{\text{board}} &= M_{\text{TQCM}}(S_{\text{TQCM}} + S \times C) / S_{\text{TQCM}} \end{aligned} \quad (3. 2)$$

となる。ここで、 M_{board} はビデオボードからのアウトガス放出量、 S_{TQCM} は TQCM の面積 (0.316 cm^2)、 S は排気口面積 (5.7 cm^2)、 C は補正係数 (0.2) である。

$M_{\text{board}} < 1\text{ ng/sec}$ より、アウトガス許容値はおおよそ

$$M_{\text{TQCM}} < 50\text{ Hz/min} \quad (3. 3)$$

となる。したがって、現状ではビデオボードからのアウトガス放出量は許容値に比べて 4 倍大きい。

4 まとめ

測定結果より、現状ではビデオボードからのアウトガス量 (200 Hz/min) は許容値 (50 Hz/min) に比べ、4 倍大きい。今回は試作品のビデオボードからのアウトガス量を測定したが、フライト品ではアウトガス放出の少ないセラミックパッケージ部品を使い、また表面のコーティングを行う。また、アウトガス量測定前にビデオボードのベーキングを 3 日間行ったが、フライト品では 2 週間のベーキングを行う。

以上より、フライト品のビデオボードではアウトガス許容値を満たすことは十分可能であると考えられる。

参考文献

- [1] 清水 一真、 修士論文「衛星搭載 X 線 CCD カメラのコンタミネーション対策」、 東京工業大学 (2011)
- [2] 堂谷 忠靖、 井上 一、 小賀坂 康志、 竹島 敏郎、「衛星搭載 X 線検出器のアウトガス対策」、搭載機器基礎開発成果報告書 (1994)
- [3] 穴吹 直久、「Astro-E2 衛星ベーキングにおけるアウトガス量の測定」、宇宙航空研究開発機構研究開発報告 (2005)
- [4] 堀越 源一、「真空技術」(東京大学出版)
- [5] 山科 俊朗、 広畑 優子、「真空工学」(共立出版)