ISSN 1349-1113
JAXA-RR-04-025

宇宙航空研究開発機構研究開発報告
JAXA Research and Development Report

# Astro-E2 衛星ベーキングにおけるアウトガス量の測定

穴吹　直久、Astro-E2チーム

2005年　2月

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

This document is provided by JAXA.

# Astro-E2 衛星ベーキングにおけるアウトガス量の測定

穴 吹 直 久, Astro-E2チーム

# Measurements of the outgasing rate during the satellite baking of Astro-E2

By

Naohisa Anabuki , Astro-E2 Team

**Abstract** : Performance of various instruments on-board a satellite could be degraded by the outgas from the satellite on orbit. In order to prevent such degradation, satellite baking in a vacuum chamber is often employed. It is essential to measure the outgasing rate accurately during the baking to evaluate the reduction of the outgas on orbit. We carried out the satellite baking of Astro-E2 for about 10 days in the spring of 2004. We used a TQCM to measure the outgasing rate, which is described in detail in this report. We also discuss on the nature of the outgas in comparison with the case of Astro-E. We succeeded to reduce the expected outgasing rate of Astro-E2 on orbit largely through the satellite baking.

## 概　　要

衛星搭載機器，特に光学系を持つ機器では，衛星からのアウトガスの影響により軌道上でその性能が劣化することがある．そこで，衛星からのアウトガス量を減少させるために，一般に衛星のベーキングが行なわれる．ベーキングによるアウトガスの減少量を評価するには，アウトガス量の正確な測定が不可欠である．Astro-E2衛星では，2004年春に約10日をかけて衛星ベーキングを行なった．その時，TQCMを用いてアウトガス量の計測を行なったので，その方法について詳述する．また，測定から得られたアウトガスの性質について，Astro-E衛星での結果と比較しながら議論する．Astro-E2では，この衛星ベーキングにより，軌道上でのアウトガスの影響を大幅に減少させることができた．

This document is provided by JAXA.

# 第1章．はじめに

衛星が軌道上に上がって周囲が真空になると，様々な搭載機器や衛星構体等からアウトガスが発生する．軌道上での衛星周囲の真空環境の計測例は，シャトルによる短期の測定以外はほとんどないものの，SFUでは，軌道上でのSFU周辺の真空度が３ヶ月以上に渡って測定されている（参考文献［１］）．それによると，打ち上げ直後からアウトガス量は減少していくものの，３ヶ月を過ぎてもかなりのアウトガス量があり，SFU周辺の真空度は$10^{-7}$torr台で，高度450 kmで期待される真空度にくらべて２桁ほど悪かった．また，衛星の姿勢変更等により，衛星の温度分布が変わると，新たなアウトガスの増加が発生している．SFUに搭載されていた質量分析器での解析によると，アウトガスの大部分は水や空気であるが，炭化水素も含まれているようである．

これらのアウトガスは，衛星内部で発生した場合，まず衛星内部を満たし，外部への開口部を通して徐々に排出されていくと考えられる．衛星内部を満たしたアウトガスは，温度が低い場所に吸着する傾向があり，吸着した場合，センサーの光学系などに性能劣化を引き起こすことがある．これを防ぐには，アウトガスの影響を受けやすい部分の温度を上げる，アウトガスが侵入しないようにシールする，などの方法が考えられるが実際上は困難なことが多い．そこで，抜本的な解決策として，軌道上でのアウトガスの発生量を十分低く押える対策が取られることになる．

アウトガスの発生を押えるには，様々な方法があり，また，問題となるアウトガスの種類によって使われる方法が異なってくる．たとえば，これから述べるAstro-E２のように，高分子化合物のアウトガスが問題になる場合には，アウトガスを出しにくい材料を使うのが第一であろう．一方，水が問題になる場合には，取り扱い方に十分な注意を払う必要がある．いずれの場合でも，使用が決まった材料や完成した機器に対してアウトガス量を減らすには，ベーキングが有効である．衛星ベーキングにあたっては，ベーキング中のアウトガス量を正確に測定し，軌道上でのアウトガス量が十分低くなると予想されるまでベーキングを行なう必要がある．本報告では，このアウトガス量の測定について詳述する．

アウトガスの測定方法を理解するには，関連する吸着や脱離について知っておく必要があるので，まず吸着・脱離について簡単に述べる．つぎに，Astro-E２衛星について述べ，アウトガスがどのように搭載機器の性能に影響するのか，どの程度のアウトガスまで許容できるのか，まとめておく．その後，アウトガスの計測結果について（Astro-E衛星の場合と比較して）述べ，軌道上で予想されるアウトガス量についてまとめる．

# 第2章．アウトガスの物理

この章では，アウトガスに関連する物理について簡単にまとめておく．詳細については，適当な教科書を参照されたい（参考文献［２］，［３］）．

## ２.１．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こり，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わかる．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むものの，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，吸着熱が段々小さくなってくるのが普通である．なお，物理吸着と化学吸着ははっきり区別出来るものではなく，連続的に移り変わっていくもの

This document is provided by JAXA.

と考えられる．

物理吸着にしろ化学吸着にしろ，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付着確率の積に比例する．

$$\text{吸着の早さ}=\frac{1}{4}n\bar{v}\omega \qquad (1)$$

ここで，$\omega$は付着確率，$n$は分子数密度，$\bar{v}$は分子の平均速度である．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，付着確率が１だとすると，$10^{-6}$torrの場合には１秒で壁面が単原子層で覆われてしまうことになる．従って，通常は壁面に付着して行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，両者の僅かな差を通じて正味の吸着や離脱が生じることになる．

### ２．２　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事が可能になる．したがって，脱離の速度は，脱離の活性化エネルギーと温度の比で決まり，

$$\text{脱離の早さ}\propto\frac{\sigma}{\tau}\propto\Lambda\exp\left(\frac{-E_d}{RT}\right) \qquad (2)$$

と表される．ここで，$\sigma$は固体表面に吸着している分子数の面密度，$\tau$は分子が固体表面に（吸着後）存在している平均滞在時間，$E_d$は脱離の活性化エネルギー，$R$は気体定数（8.31J/K/mol），$T$は吸着面の温度（吸着している分子の平均温度に等しい），$\Lambda$は吸着分子が固体表面を覆っている割合（被覆率）である．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もつ物質，例えば，水の物理吸着（５０－７０kJ/mol）や拡散ポンプ油の物理吸着（９０－１１０kJ/mol）などは，大きな問題になり得る．また，上式より脱離速度は温度の上昇により急激に増加することがわかる．これが，真空中でベーキング（baking：焼き出し）が行われる理由である．

### ２．３．吸着脱離平衡

２．１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．吸着と脱離の釣合を考えるとき，考慮しないといけないパラメーターに被覆率がある．

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ので，被覆率に応じて吸着エネルギーが実質的に変化することになる．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，脱離速度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割合であるが，脱離や吸着速度の被覆率依存性から求められる固体表面積は，micro-roughnessのためにその幾何学的表面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はない．

## 第３章．Astro-E２衛星とアウトガスの影響

### ３．１．Astro-E２

Astro-E２は，２００５年打ち上げ予定のX線天文衛星であり，約０.２－６００keVのエネルギー範囲でX線天体の観測を行なう．このうち，１０keV以下の軟X線領域では，X線反射鏡と焦点面検出器を組み合わせたX線望遠鏡を使用する．X線は，反射面に対してすれすれに入射した時（斜入射角約１度以下）のみ全反射するので，斜入射の反射鏡を２段組み合わせて結像系を構成している．一方，焦点面検出器としては，マイクロカロリーメータとX線

This document is provided by JAXA.

CCDカメラの2種類の検出器を搭載する．マイクロカロリーメータは，絶対温度60 mKまで冷却した熱量計をX線検出器とするもので，検出器本体は大型のデュワーの中に納められている．一方X線CCDカメラは，文字通りCCDを用いたX線撮像検出器で，表面照射型が3台，背面照射型が1台搭載される．表面照射型CCDが約0.4 keVまでしか感度がないのに対し，背面照射型の方は約0.2 keVの低エネルギーまで検出感度がある．

X線反射鏡は，伸展式の光学ベンチの先端に搭載されるため，冷えやすい環境にあるが，熱歪みを少なくするため，ヒーターにより約15 ℃に制御される．また，反射鏡の（宇宙空間への）開口部には，サーマルシールドが装着され，放熱量を小さくし，ヒーターに必要な電力を押えている．マイクロカロリーメータとX線4 CCD検出器は，いずれも真空容器に封じられた状態で打ち上げられ，軌道上で検出器の蓋をあけて観測を開始することになる．マイクロカロリーメータは，極低温の検出器のため，蓋をあけても検出器が直接反射鏡に対してむき出しになるわけではなく，間に5種類の（紫外線，可視光，赤外線等の）遮断フィルターが存在する．したがって，衛星内部のアウトガスの影響を受けるのは一番外側のメインシェルフィルターとなる．X線CCDカメラの場合も，－90 ℃に冷却されるCCDへの熱入力を減らす（とともに可視光を遮断する）ため，可視光遮断膜がCCDの前面に置かれる．可視光遮断膜の温度は約－40 ℃程度であり，衛星内部のアウトガスが吸着するとすれば，この可視光遮断膜に吸着することになる．

### 3.2. コンタミによるX線望遠鏡の性能低下

ここでは，吸着したアウトガスのことをコンタミ（contamination）と呼ぶ．まず，Astro-E 2衛星の場合，どういう物質によるコンタミが問題になるか，簡単に述べておく．X線反射鏡の温度は室温であり，マイクロカロリーメータのメインシェルフィルターは－30 ℃，X線CCDの可視光遮断膜でも－40 ℃程度である．一方，衛星内部は少なくとも$10^{-6}$torr以下の圧力と考えられるので，マイナス数十度での蒸気圧が$10^{-6}$torrより大きい物質はコンタミにはならない．これから，空気や水はコンタミにならないことがわかる．したがって，実質上問題になるのは，高分子化合物であり，常温で油状になる物質がコンタミの主成分と考えられる．

X線反射鏡にコンタミがあった場合の性能低下のメカニズムについては，『あすか』衛星の開発時に詳しく調べられた．サンプルミラーにコンタミを受けさせた実験によると，コンタミによりX線反射率が単純に低下するだけでなく，散乱成分が増加することがわかった．この影響は低エネルギー側で大きく，高エネルギー側では小さい．これから，コンタミ物質が反射面上で油滴を形成し，その油滴により入射X線が散乱かつ吸収されているのではないかと推測される．X線は，極端な斜入射で反射面に入射するため，表面に背の低い油滴があるとX線が油滴中を走る距離が長くなり，容易に吸収されてしまう．また，斜入射のため，背の低い油滴でもかなり広い面積が影になってしまう．これらの効果により，X線の散乱や吸収の影響が顕著に現れるものと考えられる．一方，吸着量が小さい場合，最初島を作りながら吸着していたアウトガスは，吸着量が多くなると島同士がお互いにくっつき，表面全体を覆うようになる．ただし，X線反射鏡の場合，衛星内部への開口部の断面積に対し，反射鏡表面積が桁違いに大きいので，反射鏡表面全体がコンタミで覆われることはないと考えられる．『あすか』開発時の実験によると，X線反射率の低下を数%以下に押えるには，反射鏡表面へのコンタミを～$0.1\mu g/cm^2$に押える必要がある．

一方，検出器の場合は，衛星内部にむき出しになっている遮蔽膜にコンタミが吸着する．X線は，遮蔽膜にほぼ垂直に入射するため，純粋に光電吸収によりX線が減衰することになる．したがって，エネルギーの低いX線ほど吸収されやすい．コンタミ物質は，いずれH，C，Oを含む高分子化合物なので，組成の違いによるX線吸収率の違いはあまり大きくなく，0.2 keVでの減衰量を数%以下に押えるには，コンタミ量を～$1-2\mu g/cm^2$以下に押える必要がある．

This document is provided by JAXA.

# 第4章．衛星ベーキング

## 4.1．ベーキングの経緯

Astro-E 2衛星では，2004年5月28日から約10日間に渡って，宇宙科学研究本部飛翔体環境試験棟にあるスペースチェンバを用いて衛星ベーキングを行なった．スペースチェンバは，直径4m高さ6.8mの円筒系をしており，ターボ分子ポンプとクライオポンプからなる排気系を備えている．宇宙科学研究本部のほとんどすべての衛星の試験に，本スペースチェンバが使用されている．アウトガスの測定には，チェンバに備えつけのTQCM（Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance）を使用した．

衛星はできるだけフライトに近い状態としたが，いくつかの機器はベーキング中は取り外す等の処置により参加しなかった．これらの機器としては，(1)X線望遠鏡やSTT，太陽電池パドルのようにコンタミを受けやすい機器，(2)バッテリーのように高温にできない機器，(3)スケジュール上ベーキングに参加できない機器，などがある．また，ベーキングに参加した機器でも，必ずしも衛星に組み込まれず，衛星の脇に置かれたものもある（MLI等）．衛星に取り付けられた機器では，なるべくサーマルフィラーを塗布したが，今後の取り外し予定等により塗布できない機器も多かった．衛星は，フライト形状ではなく，衛星内部のアウトガスが効率良く排出されるよう，側面パネルを開いた形態でチェンバー内に設置された．チェンバー内の衛星設置状態を図1に示す．

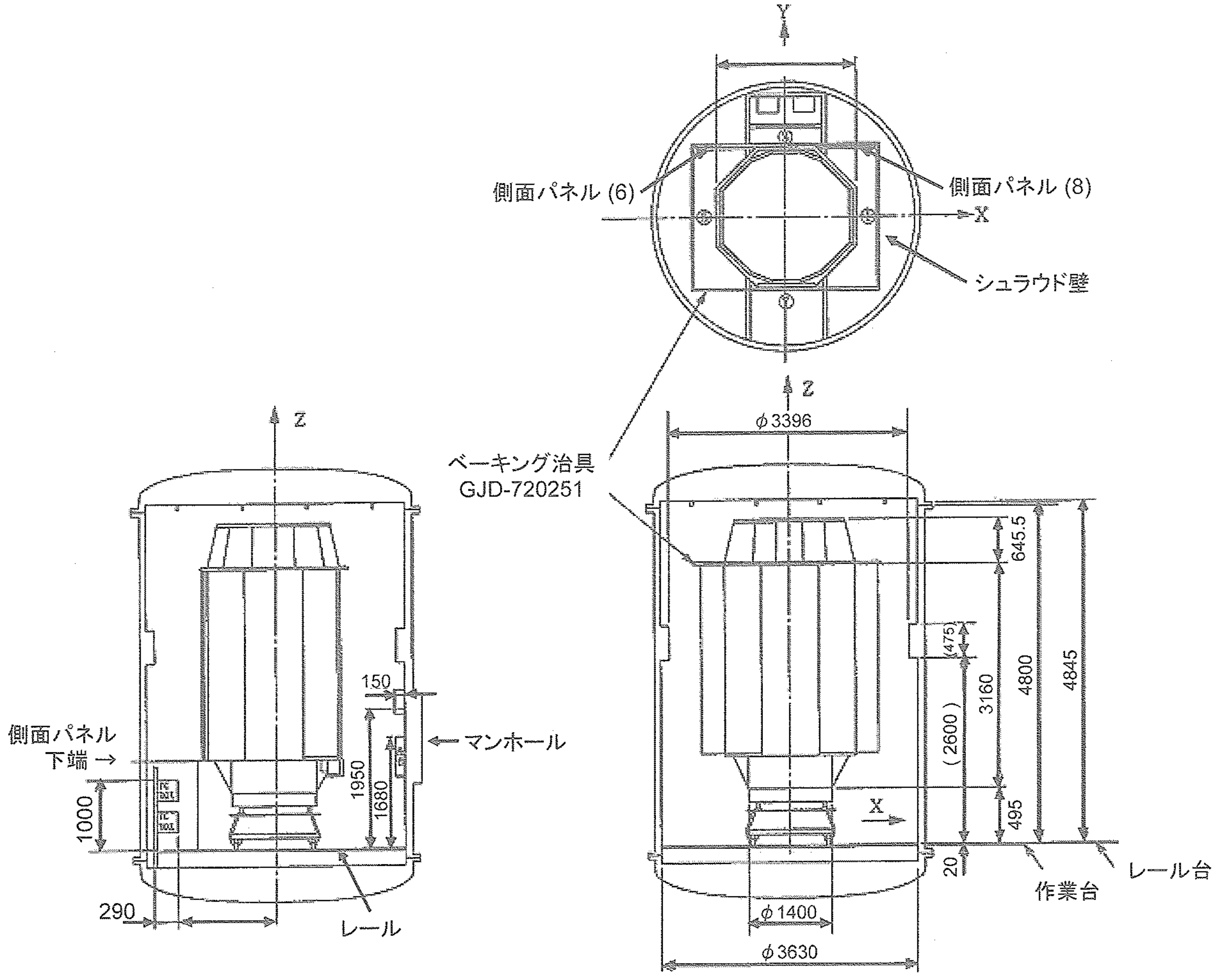


図1：Astro-E 2衛星のチェンバ内設置状態（図提供：NEC東芝スペースシステム株式会社［4］）

This document is provided by JAXA.

ベーキングを行なうには衛星を温度を上げる必要があるが，それにはチェンバ内のシュラウドを用いた．衛星および搭載機器の多くは保存上限温度が60℃なので，シュラウドの温度を約55℃に保つことでベーキングを実施した．ただし，実際のシュラウドの温度は，衛星の温度が60℃には十分余裕を持ちながら，かつなるべく高くなるように，衛星各点の温度をモニターしながら微調整を行なった．

衛星のベーキングが始まると，通常大量のアウトガスにより真空度が著しく悪くなる．そこで，スペースチェンバには，アウトガスを吸着するためのコンタミパネルが備え付けられている．これは直径1.5mの円盤状の板で，液体窒素により冷却が可能な構造になっている．アウトガスの多くは水や高分子化合物なので，液体窒素温度のものに触れると，吸着されて再放出されることがない．そこで，このような液体窒素温度の板は，アウトガスを効率良く除去できるパネル（コンタミパネル）として働くことになる．ただし，コンタミパネルが衛星に面していると，衛星のその部分が冷えてしまうことになるので，コンタミパネルはシュラウドの内側（シュラウドとチェンバ外壁との間），チェンバ壁面近くに設置されている．

衛星ベーキングで一番高温になるのはシュラウドである．そこで，シュラウド等のチェンバ自身がアウトガスを出さないよう，衛星ベーキングに先立ち，何も入れない状態でチェンバの空ベーキングを行なった．

### 4.2． ベーキング中の温度変化

アウトガス量の測定結果を示す前に，衛星ベーキングにおける衛星温度の変遷を図2に示す．図の左がAstro-E衛星（以下，1号機）の時のデータで，右が今回Astro-E 2のデータである．衛星温度は衛星各所に貼り付けられた熱電対（1号機は21点，今回は23点）でモニターしている．測定チャンネルとデータ線の色分けの対応づけは表2に示したとおりである（ただし，プロットツールの都合上15色だけでの色分けとなっている）．なお，1号機とAstro-E 2では熱電対の張り付け場所が異なるため，図2のプロットでは左と右のグラフは，同じ色同士で必ずしも対応していない．

図の横軸はベーキングの経過日数を表しているが，今回と1号機を直接比較できるよう，便宜的に，全熱電対の値が40℃を越えた日をベーキング0日目と定めている．1号機では1999年6月13日，今回は2004年5月28日が0日目に相当する．

**表1：温度遷移図の測定チャンネルと線色の対応（Astro-E 2の場合）**

| CH | 線色 | 熱電対貼り付け位置名称 | CH | 線色 | 熱電対貼り付け位置名称 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Black | XPS (側面パネル 1) | 13 | Red+Mag | IRU-SA (側面パネル 7) |
| 2 | Red | DR (側面パネル 1) | 14 | Dark Grey | 側面パネル 7 中部 |
| 3 | Green | IGBOX-SA (側面パネル 2) | 15 | Light Grey | 側面パネル 8 上部 |
| 4 | Blue | XIS-PPU01 (側面パネル 2) | 16 | Black | 側面パネル 8 上部 |
| 5 | Light blue | 側面パネル 3 上部 | 17 | Red | ベースパネル 1 |
| 6 | Magenta | 側面パネル 3 下部 | 18 | Green | ベースパネル 2 |
| 7 | Yellow | PCU (側面パネル 4) | 19 | Blue | ベースパネル 3 |
| 8 | Orange | HXD-DE (側面パネル 4) | 20 | Light blue | BCCU-A |
| 9 | Yel.+Green | MTQ-Z (側面パネル 5) | 21 | Magenta | BCCU-B |
| 10 | Green+Cyan | AOCU (側面パネル 5) | 22 | Yellow | チェンバー・マンホール |
| 11 | Blue+Cyan | 側面パネル 6 上部 | 23 | Orange | チェンバー・マンホール |
| 12 | Blue+Mag | 側面パネル 6 下部 | | | |

This document is provided by JAXA.

# 第5章．アウトガスの測定結果

衛星ベーキング中に発生したアウトガスをTQCMでモニターした結果をこの章でまとめる．まず，測定に用いたTQCMについて簡単に説明し，測定方法と結果を示す．最後に，測定結果から推測されるアウトガスの性質と，今回のベーキングで軌道上でのアウトガスをどの程度に押えることができたかを述べる．

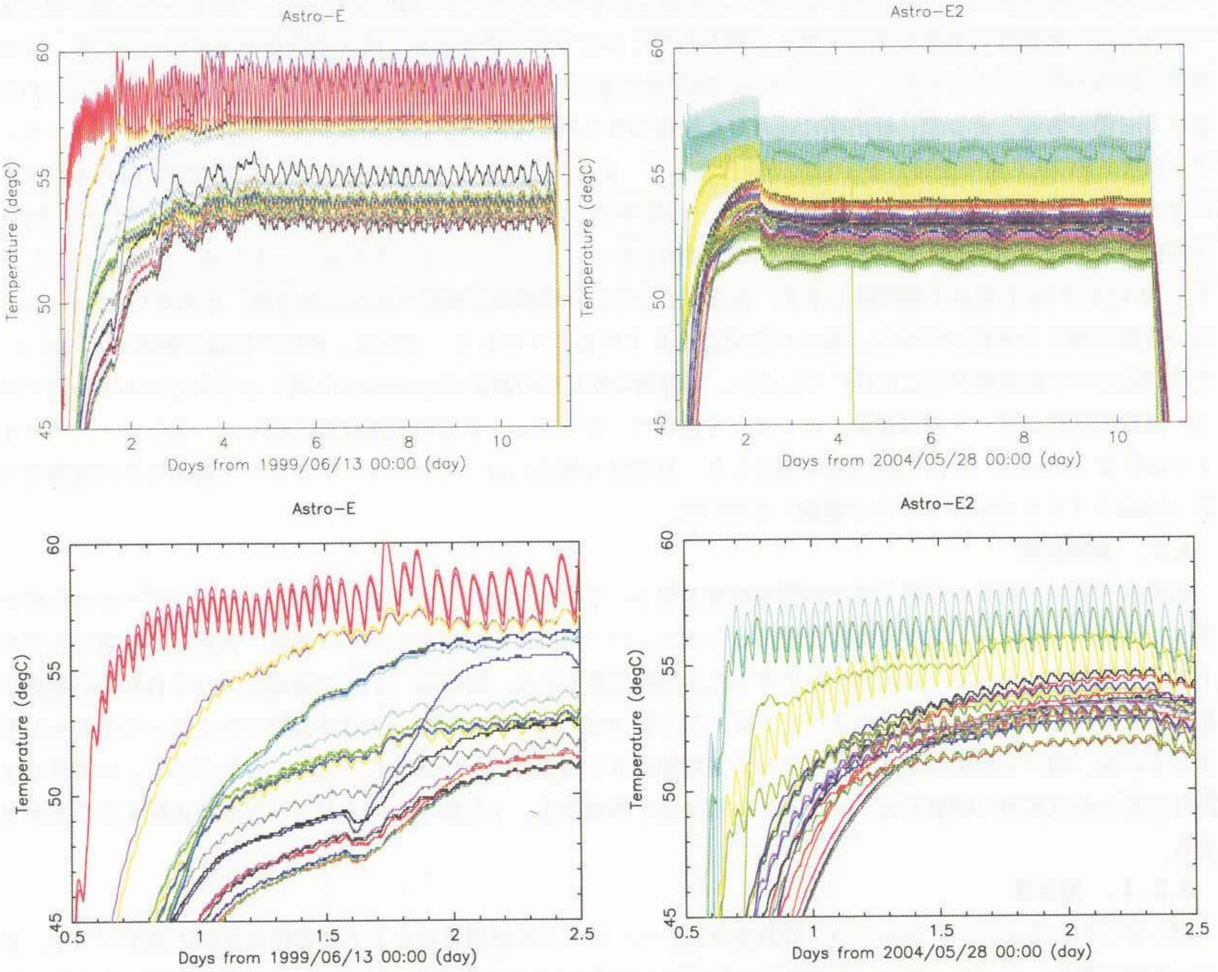


**図2：ベーキングにおける衛星の温度遷移の比較，左側が1号機，右側が今回（Astro-E 2）のデータ．上段の図は，衛星ベーキング全日程の温度変化で，下段は各データ線を見やすくするために，0.5日目から2日分のデータのみを拡大表示した図である．Astro-E 2（右側のパネル）の熱電対の張り付け位置については，表1を参照のこと．**

## 5.1．TQCMの測定原理

アウトガス測定に用いた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．内部に同じ固有振動数を持つ2つの水晶振動子を備えており，一方を外部にさらしてアウトガスを検出し，もう一方を内部に密封しリファレンスとする構成である．水晶振動子は，ペルチェ素子による温度制御が可能になっており，検出部とリファレンスを（同じ温度に保ったまま）冷却もしくは加熱できるようになっている．通常は，水晶振動子を冷却し検出部にアウトガスを吸着しやすい状態にして測定を行なう．検出部の水晶振動子に物質が吸着すると，その吸着量に応じて振動子の固有振動数が減少するため，リファレンスとの間にうなり周波数が生じる．この周波数を精度良く測定することで，吸着量を求めることができる．吸着ガスの量が計測範囲を逸脱した場合に，検出部の水晶振動子自身をベーキングできるよう，ヒーターが内蔵されている．

This document is provided by JAXA.

TQCMは，アウトガス量が実時間で測定できることと，水晶振動子の温度に対する吸着率の依存性を調べることにより，ガスの吸着エネルギーが推定できるという特長がある．本測定で使用したTQCMは，水晶振動子の面積が0.316 $cm^2$，振動数が15 MHzのもので，感度は$1.96\times10^{-9}$ $g/cm^2/Hz$である（参考文献［5］）．

本測定では，TQCMを専用の温度コントローラを用いて温度制御し，うなり周波数（つまり，ガスの吸着量）とセンサー温度を1分毎に自動測定した．周波数の測定には周波数カウンタ（HP 53131 A）を用いた．また，センサー温度は電圧値として出力されるため，この電圧値をマルチメータ（HP 34401 A）で測定した．第2章で述べたように，検出部の表面がアウトガスに覆われてくるにつれ，アウトガス同士の吸着が主になってくる（この状態を飽和と呼ぶことにする）．アウトガスの吸着量を適切に測定するためには，センサーが飽和状態になるのを避ける必要がある．そこで，検出部に固着した吸着物質を飛ばすため，TQCMセンサー自体のベーキング（センサー温度を約70 ℃まで上昇）を1日に2回行なった．また，センサー・ベーキング前に飽和状態に達しないようにするため，半日以上の間が空く夜間はセンサー温度を約10 ℃に，日中は約0 ℃に制御するよう設定した．また，夜間帯（10 ℃）から日中（0 ℃）に移る時に実施するセンサー・ベーキングの後に，センサー温度を＋30 ℃から－30 ℃まで10 ℃刻みで段階的に下げ，各温度でのうなり周波数の変化（ガスの吸着率）を測定した．この時，高い温度の測定を最初に行ない，徐々に設定温度を下げるようにした．これは，最初に低温の測定を行なうと，その測定のみで被覆率が1に近付いてしまい，高温側の吸着率の測定がsystematicに低くなることがあるからである．温度依存性のデータの取得後，センサーを再びベーキングし，0 ℃の定常状態に戻した．センサー・ベーキング前には，チェンバー内の真空度も測定した．真空度の測定には，スペース・チェンバー備え付けの電離真空計（NudeタイプとTubeタイプの2種類）を用いた．

### 5.2．測定結果

衛星ベーキング開始から終了までの測定結果を図3に示す．今回のデータを実線で，1号機のデータは点線で表している．上段から，電離真空計で測定したチェンバー内圧，TQCMセンサーの温度，TQCMへ吸着したアウトガスの積分量，そして，TQCMへのアウトガスの吸着率である．横軸は，4.1で定義した0日目からの経過日数を示している．上から2番目のプロットは，5.1節で述べたTQCM測定における温度コントロールそのものを示している．図からわかるように，TQCMの温度制御は1号機の時とほぼ同じである．したがって，3段目と4段目に示したTQCMへ吸着したアウトガスの積分量と吸着率を，1号機と今回のデータを直接比較することができる．

#### 5.2.1．真空度

図3からわかるように，チェンバーの真空度は，ベーキングの経過日数とともに指数関数的に減少しつつ，ある一定値に漸近している．また，その減少の仕方は1号機とAstro-E 2で良く似ているが，若干の違いもある．そこで，第3日目から10日目までの間，NudeゲージとTubeゲージで測定したチェンバー内圧を

$$(\text{チェンバー内圧}) = P_\infty + P\exp(-\kappa t) \quad [10^{-8}\,\text{bar}] \qquad (3)$$

という関数でフィットした．その結果得られたパラメータの値を表2にまとめておく．誤差は1パラメータの90 %信頼限界である．また，Astro-E 2のデータではパラメータ間のカップリングが大きかったため，*印で示したパラメータの誤差を求める際は，decayのタイム・スケールを表す$\kappa$をベスト・フィット値に固定した．

This document is provided by JAXA.

表2：(5)式のモデル関数によるフィット結果

| | 1号機 | | | Astro-E2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ゲージの種類 | $P_\infty$ ($10^{-8}$ bar) | $P$ ($10^{-8}$ bar) | $\kappa$ (1/day) | $P_\infty$ ($10^{-8}$ bar) | $P$ ($10^{-8}$ bar) | $\kappa$ (1/day) |
| Nude | $0.18^{+0.05}_{-0.08}$ | $2.0^{+0.5}_{-0.4}$ | $0.33^{+0.08}_{-0.07}$ | $0.45 \pm 0.03^*$ | $2.1 \pm 0.3^*$ | $0.5^{+0.3}_{-0.3}$ |
| Tube | $0.26^{+0.06}_{-0.08}$ | $3.6^{-0.8}_{+1.5}$ | $0.43^{+0.10}_{-0.10}$ | $0.48^{+0.04}_{-0.06}$ | $6 \pm 1^*$ | $0.8^{+0.4}_{-0.3}$ |

誤差は1パラメータの90％信頼限界.
*パラメータ間のカップリングが大きかったため，$\kappa$をベスト・フィット値に固定して求めた誤差.

NudeゲージとTubeゲージで真空度の測定結果にいくらか違いがあり，その結果が表2のパラメータの違いとして現れている．一般に，nudeゲージの方が（tubeに継るガラス管のコンダクタンスの影響がないので）正確な測定結果を与えると言われているが，今回はチェンバーが大型のうえ測定箇所も同じではないので，計測値の違いが何によるものか必ずしも明確ではない．

今回のベーキングを無限に続けた場合の到達真空度は，$4-5\times10^{-9}$bar（1 bar $\simeq$ 750 torr）となり，1号機の時に比べて2倍程度悪い．ただし，後に述べるように，真空排気の過程で出てくるアウトガスの大部分は空気や水であり，吸着性の高分子化合物が分圧に占める割合は無視できる．したがって，これがただちに吸着性アウトガスが多いことを意味しない．Astro-E 2では，ベーキングにより水や空気が比較的出易い状況にあり，それが真空度に反映したと考えられる．

### 5.2.2. 積分吸着量と吸着率

5.1節で述べたTQCMの感度と面積から，周波数の増加分$\Delta f$と吸着量の増加分$\Delta m$との間に

$$\Delta m\ [\mathrm{g}] = 6.21\times10^{-10}\,\Delta f\ [\mathrm{Hz}] \qquad (4)$$

という換算式が成り立つ．この換算式から，測定で求めた1分おきのうなり周波数の増減を積分吸着量と吸着率に換算した．図3の3段目に示した積分吸着量で，急激に減少している部分がセンサー・ベーキングを実施した（TQCMセンサー温度が70℃付近まで針のように立った箇所に相当する）時間帯である．このセンサー・ベーキングによって，あらかじめ，センサー表面に付着しているアウトガスを飛ばすようにした．なお，積分吸着量の最小値は～0.3$\mu$gになっているが，これはゼロ点の選び方の任意性によるもので，特に意味はない．

図3の4段目に示したTQCMへのアウトガス吸着率は，その上段の積分吸着量の傾きに相当する．吸着率はセンサーを0℃と10℃に温度制御した時間帯のデータのみを示している．ベーキング実施の経過日数と共に，TQCMへの吸着率は漸近的に減少している様子がわかる．吸着率の時間変化を定量的に評価するため，チャンバー内圧のときと同様に，

$$(\text{TQCMへの吸着率}) = q_{A,\infty} + q_A \exp(-\alpha t)\ [\mu\mathrm{g}/0.316\,\mathrm{cm}^2/\mathrm{hr}] \qquad (5)$$

という形の関数を用いて，データをモデル・フィットする．1号機と今回の結果について，第3日目から10日目までのデータをフィットした結果を表3にまとめた．誤差は1パラメータの90％信頼限界である．

This document is provided by JAXA.

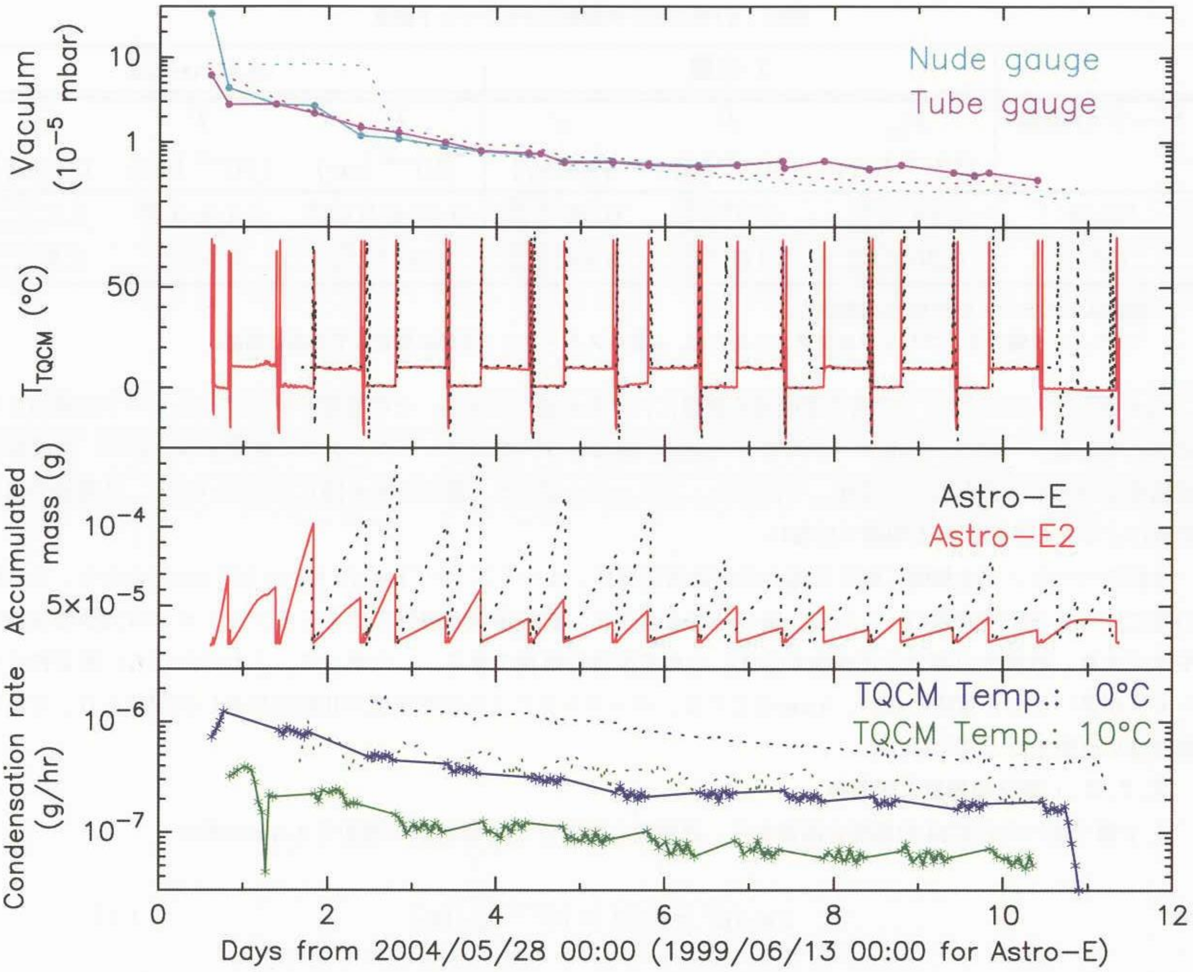


**図3：上から，衛星ベーキング中のチェンバーの真空度，TQCMセンサー温度，TQCMへのアウトガスの積分吸着量，吸着率を示す．実線が今回（Astro-E 2）の結果．比較のため，1号機の時のデータを点線で示している．**

**表3：(5)式のモデル関数によるフィット結果**

| | 1号機 | | | Astro-E2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| TQCM 温度 | $q_{A,\infty}$ ($\mu$g/0.316cm$^2$/hr) | $q_A$ | $\alpha$ 1/day | $q_{A,\infty}$ ($\mu$g/0.316cm$^2$/hr) | $q_A$ | $\alpha$ 1/day |
| 0 ℃ | $0.11^{+0.15}_{-0.05}$ | $2.2^{+0.1}_{-0.2}$ | $0.19^{+0.05}_{-0.06}$ | $0.18^{+0.01}_{-0.02}$ | $1.3^{+0.5}_{-0.3}$ | $0.52^{+0.10}_{-0.09}$ |
| 10 ℃ | $0.20^{+0.04}_{-0.11}$ | $0.8^{+0.4}_{-0.2}$ | $0.30^{+0.15}_{-0.13}$ | $0.04^{+0.01}_{-0.03}$ | $0.16^{+0.03}_{-0.02}$ | $0.23^{+0.10}_{-0.09}$ |

**誤差は1パラメータの 90 %信頼限界.**

図3からも明らかなように，1号機に比べ今回はTQCMへのアウトガス吸着率が低かった．また，吸着率の減少のtime scaleも1号機よりは早かった．これらの違いは，吸着性のアウトガスの性質の違いを反映しているものと考えられる．そこで，吸着ガスの性質について考えるため，次のサブセクションで吸着率の温度依存性について調べる．

### 5.2.3. 吸着率の温度依存性

次にTQCMセンサーの温度を変えたときの吸着率の変化から，吸着物質（アウトガス）の性質を調べると共に，軌道上での衛星からのアウトガスの影響について考える．図4に吸着率の温度依存性測定の結果を示した．左図が1号機，右図が今回（Astro-E 2）の結果である．横軸にTQCMセンサー温度，縦軸に吸着率を取り，縦横共にスケールを揃えている．また，両図中の線の色付けは，ベーキングの経過日数で対応づけている．今回は，第一

This document is provided by JAXA.

日目からデータがあるため，黒線として追加している．衛星ベーキングにおけるTQCMへの吸着率の温度依存性は『あすか』衛星の時にも調べられており，比較のため，両図ともに『あすか』の結果を載せている．

『あすか』衛星の時は，TQCMセンサーの温度を下げると急激に吸着率が増加し，0－10℃以下では吸着率が頭打ちになっているのに対し，Astro-E（1号機）やAstro-E 2では，グラフが直線に近くなっており，特にAstro-E 2でその傾向が著しい．また，0℃以下の低温側では，ベーキングの進行にともない吸着率が大きく低下しているのに対し，20－30℃付近では吸着率の低下はわずかになっている．

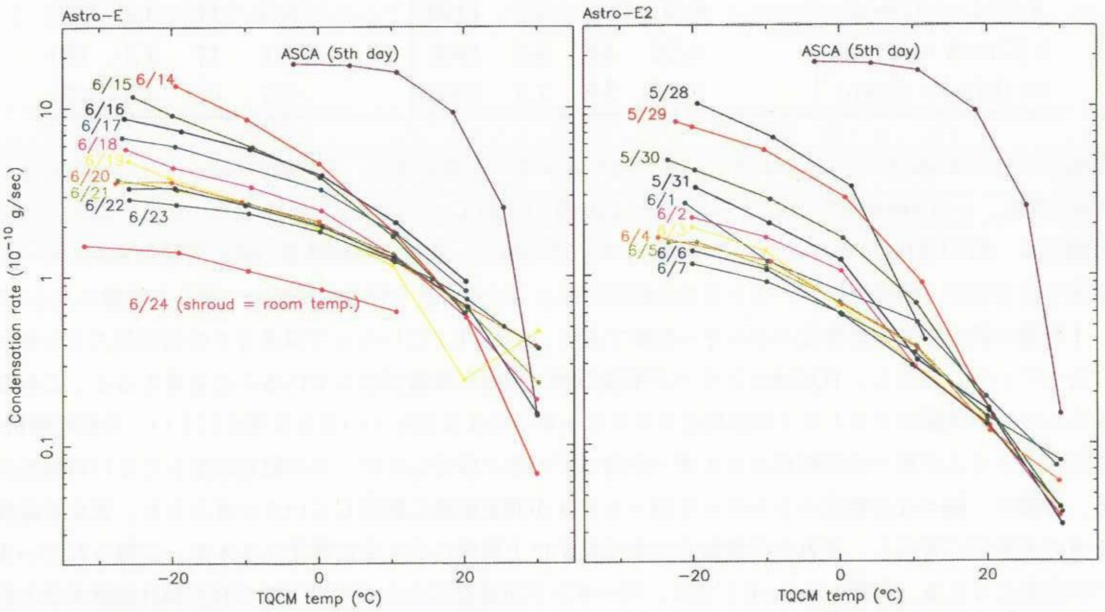


**図4：TQCMへの吸着量の温度依存性．左図が1号機の結果で，右図が今回（Astro-E 2）の結果．比較のため『あすか』衛星の結果を両図に載せている．**

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．入射分子数はガスの分圧できまり，1回の温度依存性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，(1)式で表される吸着の早さ項は定数とみなせる．一方，(2)式で表される脱離の早さは，TQCM表面に吸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，温度依存性測定の前には，TQCMのベーキングを行なうようにしたので，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．実際の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せて考える必要がある．しかし，ここでは第0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．すると，(2)式は$T$以外すべて定数となり，TQCMに対する吸着率は

$$\text{TQCMに対する吸着率} = A - \exp\left(B - \frac{C}{T}\right) \qquad (6)$$

という温度のみの関数に単純化できる．ここで，$T$はTQCMの絶対温度，$A$はTQCMに入射してくる吸着性ガスのフラックス（$10^{-10}$g/sec/0.316 cm$^2$），$B$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，$C$は$E_d/R$であり，気体定数$R$（8.31 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4に示した吸着率の温度依存曲線をfittingし，各パラメータを1号機の時と比較した．衛

This document is provided by JAXA.

星ベーキング９日目，１０日目（１号機では６/２２，２３，Astro-E２では６/６，７）の温度依存曲線を－３０℃から２５℃の範囲で求めたベストフィット値を表４にまとめた．

**表4：（６）式のモデル関数によるフィット結果**

| | 1号機 | | | | Astro-E2 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 経過日数(線色) | date | $A$ | $B$ | $C$ | date | $A$ | $B$ | $C$ |
| 7 (Orange) | 1999年6/20 | 4.8 | 9.1 | 2200 | 2004年6/4 | 7.0 | 3.5 | 450 |
| 8 (Yel. + Green) | 6/21 | 6.8 | 5.5 | 1100 | 6/5 | 11 | 3.3 | 280 |
| 9 (Green + Cyan) | 6/22 | 4.8 | 8.0 | 1900 | 6/6 | 17 | 3.3 | 130 |
| 10 (Blue + Cyan) | 6/23 | 3.8 | 7.9 | 2000 | 6/7 | 12 | 3.0 | 170 |

温度依存性を示す項$C$から，アウトガスの活性化エネルギーを求めると，１号機の場合は，$C\sim 2000$なので約２０kJ/mol程度，一方Astro-E２では，$C\sim 200-400$なので約１－３kJ/molということになる．なお，『あすか』衛星の場合は，約８０kJ/molであった．この『あすか』での値は，油類の物理吸着の時の活性化エネルギーに相当し，高分子化合物が（吸着性の）アウトガスの原因になっていると言う従来の解釈に一致した結果になっている．一方，１号機の値は空気の活性化エネルギー程度であり，Astro-E２にいたっては希ガスの活性化エネルギー相当の値になっている．ただし，TQCMセンサーが室温の時に実際に吸着が進んでいることを考えると，これらの活性化エネルギーが実際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っていると仮定したが，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異常に小さな活性化エネルギーが得られているのではないかと考えられる．実際，Astro-E２では，ベーキングが進むにつれ０℃以下でのTQCM計測値がひと桁近く減少しているのに対し，２０℃前後では計測値の減少はほとんど見られていない．これは，異なる温度では異なるガスが計測に寄与していることを示唆している．

## 第６章．考察

アウトガスの活性化エネルギーを求めることができれば，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，コンタミが問題となる機器へのアウトガスの吸着の速度を評価することができる．ただし，今回の計測では活性化エネルギーを決めることができなかったので，異なる考え方でコンタミの影響を評価する．

表４の結果から，TQCMセンサーに入射する（吸着性の）アウトガスの量は$A$項で表されるので，

$$\textit{TQCM}\text{センサに入射する分子数} \sim 1.5\times 10^{-9}\,\text{g/sec}/0.316\,\text{cm}^2 \qquad (7)$$

となる．

スペースチェンバ内では，ほとんどのガスは衛星表面やチェンバー内壁に吸着されたり脱離したりを繰り返しながら，少しずつコンタミパネルや真空ポンプから排出されていく．したがって，

$$(\text{衛星表面から脱離する分子数}) - (\text{衛星表面に入射する分子数}) = (\text{真空チェンバーから排出される分子数}) \qquad (8)$$

という関係が成り立つ．

This document is provided by JAXA.

ここで，ガスの吸着と排出に関係する箇所の面積をまとめておくと，

◉コンタミパネル（直径1.5 m）：17700 $cm^2$，排気のみ

◉真空ポンプ：2000 $cm^2$ × 0.2（排気効率），排気のみ

◉衛星：～ $2 \times 10^5 cm^2$（表面積），吸着と脱離の両方

となる．衛星表面に入射する分子数も，コンタミパネルから排出される分子数も，(7)式に面積をかけてやることで求まるので，

$$衛星表面から脱離する分子数 = (2.0 \times 10^5 + 1.8 \times 10^4) \times 4.7 \times 10^{-9} \quad (9)$$
$$= 1.0\ \mathrm{mg/sec}$$

これにより，ベーキング中はAstro-E 2衛星は，ほぼ1 mg/secの割合でアウトガスを放出していたことがわかる．ただし，この放出ガスはほとんどがまた衛星に戻っていき，実質減少分はコンタミパネル（と真空ポンプ）で排出される85 $\mu$g/secになる．これは，7.4 g/dayに相当する．

この数字をそのまま使うと，衛星ベーキングは10日間継続したことから，衛星から放出されたアウトガスの総量は約70 gになる．ただし，表4に見るように，TQCMに入射するアウトガスの量（*A*項）は計測日により2－3倍の違いがある．したがって，上記アウトガスの総量の見積りも，factor 2－3の誤差が含まれていると考えるべきであろう．Astro-E 2に使われている様々な材料の重さと，各材料のCVCM（Collected Volatile Condensible Materials：再凝縮物質比）から推定されるアウトガスの総量は，約31 gである．したがって，誤差は大きいものの，衛星ベーキングによりAstro-E 2のアウトガスの大半は飛ばすことができたと考えて良いであろう．

衛星の温度が下がれば，当然衛星が放出するガスの量は減少する．衛星が放出するガスの温度依存性がTQCMから脱離するガスの温度依存性と同じだとすれば，たとえば，衛星が10 ℃のときの放出ガス量は0.9 mg/secとなる．Astro-E 2では，アウトガスの見かけの活性化エネルギーが非常に小さいので，温度依存性が小さくなっている．軌道上では，衛星内部は近似的に密閉した空間と考えることができる．したがって，定常状態では，上記の量の放出ガスはやがて衛星内部に再吸着することになり，ガスの放出と吸着がつり合うことになる．なお，実際は衛星内部に温度分布があるので，低温の場所は相対的にガスの放出率が小さくなり，正味のガスの吸着が起こることになる．以下，X線反射鏡に対する影響とX線CCDカメラに対する影響について考察する．

X線反射鏡は，ごく薄い反射フォイルを多数枚同心円上に配置した形状になっており，同心円の断面が衛星内部に開いた開口部になっている．反射鏡の開口部の面積は1台あたり1250 $cm^2$なので，衛星内部を満たしたアウトガスのうち，反射鏡に入射するガスの総量は，1台あたり5.6 $\mu$g/secになる．一方，反射鏡の表面積（フォイルの面積の合計）は，約$10^6 cm^2$なので，アウトガスが反射鏡に一様に入射するとすれば，入射分子数は$5.6 \times 10^{-12}$ g/sec/$cm^2$になる．これは，反射鏡に入射する分子数であるが，定常状態では脱離する分子数とつり合うことになる．一方，(2)式によると，脱離する分子数は吸着している分子数密度と平均滞在時間の比で与えられる．Astro-E 2の場合，活性化エネルギーが極端に小さいため，平均滞在時間を活性化エネルギーからそのまま求めると$10^{-12}$ secのオーダーになってしまう．これは，Astro-E 2では活性化エネルギーが正しく求まっていないためなので，ここでは暫定的に『あすか』衛星の値（80 kJ/mol）を使うことにする．そうすると，平均滞在時間は100秒のオーダーとなり，$5.6 \times 10^{-12}$ g/sec/$cm^2$とつり合う吸着分子密度は，$5.6 \times 10^{-10}$ g/$cm^2$となる．これは，反射鏡へのコンタミの上限値$10^{-7}$ g/$cm^2$に比べ桁違いに小さいので，コンタミが問題になることはない．

X線CCDカメラの場合，CCDのすぐ上でバッフルの底にある可視光遮断膜が衛星内部に面することになるので，この遮断膜へのコンタミが問題になり得る．衛星からのアウトガスの発生量，言いかえれば，衛星内部への単位面積あたりのガスの入射量は，先に求めたように$4.5 \times 10^{-9}$ g/sec/$cm^2$である．ただし，この量のガスがそのまま遮断膜に入射するわけではない．可視光遮断膜はバッフルの底にあるので，衛星内部に面する立体角がバッフ

This document is provided by JAXA.

ルがない時に比べてひと桁ほど小さくなっている．したがって，可視光遮断膜に入射するガスの量は，$5\times10^{-10}$g/sec/cm$^2$ほどになると推定される．一方，可視光遮断膜は軌道上では－40℃ほどになるので，吸着分子の平均滞在時間も長くなる．そこで，吸着分子の平均滞在時間を$10^3$秒と仮定する．そうすると，入射ガス量と脱離ガス量がつり合うためには，可視光遮断膜上には$5\times10^{-7}$g/cm$^2$の吸着ガスが存在しないといけないことになる．これは，コンタミの許容量～1－2$\mu$g/cm$^2$以下である．

一方，マイクロカロリーメータのメインシェルフィルターの場合は，X線CCDカメラとは異なりバッフルは存在しない．メインシェルフィルターの温度は通常－30℃程度と予想され，CCDカメラの可視光遮断膜にくらべてやや温度が高いものの吸着ガスの滞在時間に極端な違いはないと考えられる．したがってメインシェルフィルターの場合，入射ガス量と脱離ガス量が釣り合う状態では，フィルター上におおよそ～1$\mu$g/cm$^2$のコンタミが存在することになる．これは，コンタミが問題になり始める量である．フィルターへのコンタミの吸着は，軌道上ではキャリブレーション天体の定期的な観測から知ることができる．そこで，問題になり得るようなコンタミが吸着した場合は，メインシェルフィルターに備えつけのヒーターでフィルターの温度を上げ，コンタミ物質を飛ばす必要がある．ヒーターを使っても，メインシェルフィルターの温度は室温程度にしか上げられないものの，Astro-E２では吸着ガスの活性化エネルギーが（見かけ上）小さいので，コンタミを減らすには十分と考えられる．

上記，コンタミ量の見積りでは，吸着ガスの平均滞在時間，いいかえると活性化エネルギーが重要なパラメータになっている．Astro-E２では，活性化エネルギーの値を決定することができなかったものの，上記見積りで仮定した『あすか』での値より，実質上ずいぶん低くなっていると考えられる．したがって，上記コンタミの見積りはかなり余裕のある上限値となっていると考えられ，実質上Astro-E２ではコンタミが問題になることはないだろうと予想される．

## 参考文献


[1] 佐々木進，加谷信幸，佐川永一，「Space Flyer Unit（SFU）で計測されたガス環境」（宇宙科学研究所報告第97号）

[2] 堀越源一，「真空技術」（東京大学出版会）

[3] 山科俊郎，広畑優子，「真空工学」（共立出版，1991年）

[4] NEC東芝スペース株式会社「ASTRO-E II（FM）総合試験ベーキング仕様書」

[5] TQCM MODEL MK10 OPERATING MANUAL, QCM Research


This document is provided by JAXA.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA−RR−04−025

発 行 日　2005年2月28日
編集・発行　独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
〒182−8522
東京都調布市深大寺東町七丁目44番地1
TEL 0422−40−3000(代表)
印 刷 所　株式会社 フジプランズ
東京都大田区東海3−8−2 TSKビル

©2005 JAXA

※本書（誌）の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複写、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。
※本書（誌）からの複写、転載等を希望される場合は、下記にご連絡ください。
※本書（誌）中、本文については再生紙を使用しております。

<本資料に関するお問い合わせ先>
独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 情報化推進部 宇宙航空文献資料センター

This document is provided by JAXA.

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

This document is provided by JAXA.