

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

高信頼性回転駆動機構開発のための

グリース潤滑剤アウトガス評価

今田 晋亮, 清水 敏文, 渡邊 恭子,

坂東 貴政, 常田 佐久, 原 弘久

2011 年 3 月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

高信頼性回転駆動機構開発のための グリース潤滑剤アウトガス評価

今田 晋亮^{*1}, 清水 敏文^{*1}, 渡邊 恭子^{*1},
坂東 貴政^{*2}, 常田 佐久^{*2}, 原 弘久^{*2}

Contamination Evaluation of High Duty Cycle, Space-Qualified Wheel Mechanisms for Onboard Telescopes

Shinsuke IMADA^{*1}, Toshifumi SHIMIZU^{*1}, Kyoko WATANABE^{*1},
Takamasa BANDO^{*2}, Saku TSUNETAKA^{*2} and Hirohisa HARA^{*2}

Abstract

Developing a new high duty cycle, space-qualified wheel mechanism is essential for next generation space solar telescope, because we need various types of high duty cycle, high reliable wheel mechanisms installed in the optical path of the telescopes, including mechanical shutter for controlling exposure time, filter wheel for switching wavelength band, and continuously rotating waveplate for measuring polarization. There are three key elements which should be conquered: 1) reliability for more than 10 million rotating action, 2) low molecular contamination, 3) reduction of disturbance from rotating action. In this paper we evaluate molecular contamination from high duty cycle, flight wheel mechanisms.

Keywords: Space-borne Telescopes, Wheel Mechanisms, Frequent Operations, Low Out-gassing Lubricant

概 要

次期太陽観測衛星計画（SOLAR-C）用観測望遠鏡への搭載を目指して、国内開発中の高頻度回転駆動機構の要素検討を行っている。これまでミッションライフを通じて数100万–1000万回以上動作させ得る可動機構は、日本国内で開発されておらず、「ひので」や「ようこう」では海外機器の一部として導入して実現させてきた。コンタミネーション管理レベルの厳しい望遠鏡内部で使用する長寿命（数100万–1000万回以上）かつ低アウトガスの回転機構を実現する上で、軸受部潤滑剤の選定は重要な評価項目の一つである。本論文では、グリース潤滑方式軸受で使用するグリース（MAC系グリース：近年新しく開発された低蒸気圧のシンクロペンタン油に増ちょう剤を加えた真空潤滑用グリース）のアウトガス特性を把握する試験を行い、グリース潤滑剤を用いた場合に予測されるコンタミネーションレベルについて考察を行った。

* 1 JAXA 宇宙科学研究所（ISAS/JAXA）

* 2 国立天文台（NAOJ）

1. はじめに

次期太陽観測衛星 Solar-C に搭載する予定の望遠鏡の開発の一環として、回転駆動機構の要素検討を行っている。太陽の撮像観測において、機械式シャッタ、フィルタホイール（透過波長の切替え）、回転波長板（偏光磁場測定）など、望遠鏡の光路中に可動機構を設置し、頻繁に動作させることは必須であり、軽量化された大口径の回転駆動機構は次期太陽観測衛星に必須の要素である。動作不良がミッション喪失につながるこのようなクリティカル機器を真空下で数 100 万～1000 万回以上動作させ得る可動機構が国内で開発されておらず、これまでの日本の太陽観測衛星では海外機器の一部として駆動機構を搭載した「ひので」（2006 年～現在）、および「ようこう」（1991～2001 年）^{1), 2), 3), 4)}。

回転駆動機構の要素技術として、以下の性能を実現できることが必要である。

- 1) 1000 万回以上の確実な回転駆動動作
- 2) アウトガス条件が厳しい高精度スペース望遠鏡において使用可能
- 3) 駆動により発生する微小擾乱の低擾乱化^{5), 6)}

このうち、本論文では 2) の要素を検討するため、回転駆動機構に用いる潤滑剤からのアウトガス特性について報告する。その他の項目については別論文にて報告する予定である。

衛星観測で使用する望遠鏡では衛星に搭載する前に光学機器等の汚染を定量的に測定・予測しておくことが極めて重要である。これは、光学機器等がひとたび宇宙空間で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るからである。汚染の要因として、接着剤や潤滑剤から出るアウトガスが考えられ、放出されたガスが光学機器等の表面に入射すると、気体分子はすぐに反射されるかまたは表面に吸着する。入射面が高温であればすぐに反射されるが、低温面には分子が吸着する。このような分子の吸着による汚染は分子コンタミネーションと呼ばれている。アウトガスが鏡やレンズなどの光学面や低温に冷却された検出素子面（CCD 素子など）に付着し、時間をかけて付着量が増え、検出効率の低下といった観測性能の低下を引き起こすことがあり、この評価は宇宙望遠鏡には必須の要素である。

本研究では、開発中の回転駆動機構を想定した供試体からのアウトガスの特性について考察する。宇宙搭載機器で使用される転がり軸受として、宇宙用固体潤滑転がり軸受と、宇宙用グリース油といった液体潤滑剤を使用する転がり軸受がある⁷⁾。宇宙用固体潤滑転がり軸受はアウトガスという観点では適しているが、長期運転時には固体潤滑剤の摩耗によりロストルクの増加を引き起こす等、本研究で

目指す 1000 万回以上にわたり安定した回転の動作保証ができるかに問題が存在する。一方、液体潤滑剤は、姿勢制御用の機械式ジャイロやフライホイールの軸受で用いられ、多くの人工衛星に搭載され、数年以上安定して運転が行われており、液体潤滑転がり軸受は 1000 万回を超える回転運転を実現できる公算が高い。そこで、液体潤滑剤からのアウトガスを計測し、分子コンタミネーションの条件をクリアしうる液体潤滑剤を選定する。

具体的な実験内容は、2つのグリース潤滑剤を Knudsen セルに入れ加熱し、アウトガスを計測（第一計測）し、最もアウトガスが少なかったものを選定する。さらにガスの放出量を少なくするため、ラビリンス構造を施した潤滑剤（第一計測で最もアウトガスが少なかったもの）入りの軸受ホルダからのアウトガスを計測（第二計測）する。

2. 液体潤滑剤の選定

宇宙用の潤滑油・グリース基油として最近広く用いられているのは、シクロペンタン（MAC, Multiply-alkylated cyclopentane）系の潤滑油・グリース基油で、極めて低い蒸気圧またアウトガス特性が優れていると言われている。潤滑油のみを潤滑剤として使用するとアウトガス特性が最も良い可能性があるが、少量使用でも内外輪間の隙間から一部の油が流れ出し、望遠鏡内部に影響を与える可能性もある。そのため基油 MAC 系 2001A に増ちょう剤を加えたグリース潤滑剤を有力候補と考え、宇宙環境で必要な真空下での摩擦摩耗特性、耐放射線性能、低アウトガス性に優れたグリース潤滑剤であるスペースルブ MU および ML（協同油脂製：表 1）の 2つの潤滑剤からのアウトガスを測定

表 1 グリース潤滑剤の基本特性

グリース潤滑剤	スペースルブ MU	スペースルブ ML
増ちょう剤	ウレア	リチウム石けん
基油	シクロペンタン油	
基油動粘性	106 mm ² /s	
流動点	-50 °C	
蒸気圧 20 °C	1 × 10 ⁻¹⁰ Torr	
蒸気圧 125 °C	4 × 10 ⁻⁷ Torr	
概観	淡褐色粘ちよう状	
混和ちよう度	300	280
滴点	260 °C 以上	209 °C
TML	0.641 %	0.143 %
CVCN	0.111 %	0.007 %
WVR	0.011 %	0.019 %
用途	アクチュエーターの潤滑	軸受の潤滑
使用温度範囲	-40 ～ 180 °C	-40 ～ 150 °C

した（以後 MU, ML と呼ぶ）。

3. 液体潤滑剤軸受：アウトガス評価

3.1 測定の温度条件

アウトガスの放出、吸着は汚染源および汚染対象物の温度条件により全く異なるため、単にどのくらいの質量が放出されるか（Total Mass Loss）を見積もるだけでなく、実際の宇宙空間での仕様を考慮し、アウトガスの特性を理解した上で可否を決める必要がある。本研究で評価をおこなう回転駆動機構は次期太陽観測衛星 Solar-C に搭載する事を想定しており、ミッション検討の初期段階のため、実際の仕様の細部は未定である。そのため、回転駆動機構は 30℃ 程度で運転、最も温度が低いと考えられる CCD 面温度は -70℃ 程度であると想定し、試験をおこなった。測定の温度条件、評価基準は、NASAMSFC-SPEC-1238⁸ で規定がある。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。また、「ひので」搭載の可視光望遠鏡におけるベーキングなどコンタミ管理においても基準として参照していたものである^{9),10)}。それによるとコンタミネーションの影響を調べたい光学素子の軌道上予測最低温度からさらに 10℃ 低い値を想定して測定しなくてはならない。そのため今回の計測では最低温箇所の CCD 面を想定し -80℃ の面に吸着する量を計測した。また、汚染源の温度に関しては、軌道上温度範囲の上限から 10℃ 高い値を設定しなくてはならない。そのため、本計測では試料の温度を 40℃ に加熱して計測をおこなった。

3.2 実験装置

「ひので」搭載望遠鏡のアウトガス計測で十分な実績のある真空チャンバ測定系（φ 610, 高さ 560 mm）^{9),10)} と同様な系を宇宙科学研究所に新たに立ち上げ（図 1）測定をおこなった。アウトガスの検出器は Thermoelectric Quartz Crystal Microbalance（TQCM, QCM research 社製、発信周波数 15 MHz、感度 $1.96 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-2}$ ）を用いた。真空到達度 10^{-7} Torr の真空槽中に、試料の温度を調節できる Knudsen セル（第一計測時にのみ使用）と TQCM を配置し、計測をおこなった。第二計測では Knudsen セルの代わりに加熱器と軸受ホルダを用いた（図 1）。

Knudsen セルは試料を入れるセルとセルを加熱するヒーターから構成され、これを用いる事により、試料の温度を均一にし、かつ温度制御が容易になる。TQCM 測定データおよびオリフィスの寸法（直径、長さ）により、セル内にある試料から放出されるアウトガス量を測定すること

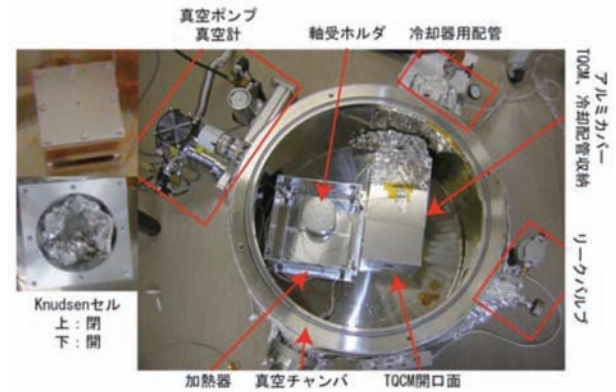


図 1 第二計測時の真空チャンバ内部。軸受ホルダ及び加熱器（左）と TQCM（右、冷媒配管を隠すアルミカバー）、第一計測時は軸受ホルダ＋加熱器の代わりに Knudsen セル（左、上：上蓋を閉じている状態、下：上蓋を開いて試料が見える状態）を使用。

ができる¹¹⁾。衛星に用いられる物質からのアウトガスを測定する標準方法が記載されている ASTM E-1559 に Knudsen セルの標準形状が記載されており、開口部の径および厚みはどちらも 0.3 cm で、セルの大きさは幅 6.5 cm, 高さ 5 cm とした（図 1 左）。

TQCM には 2 つの同一の水晶振動子が入っており、1 つは測定環境に暴露されていて、暴露されていないものの発信周波数の違いから振動子面上の質量変化を測定する。周波数差と質量変化には線形の関係があり、高精度でアウトガスの吸着量を測定することができる。TQCM は質量の差だけでなく温度差にも感度があり、温度を一定に保つためにペルチェ素子により制御される。実際には TQCM 温度を -80℃ までペルチェ素子だけでは下げられないので、-60℃ の冷媒を用いて TQCM 支持ジグを冷却する事で、TQCM 温度 -80℃ を実現させる。冷媒配管や TQCM 支持ジグが主要なガスの吸着面にならないよう、それらをアルミのカバーで覆い、冷媒配管や TQCM 支持ジグへのアウトガスの吸着をおさえている（図 1）。

3.3 グリース潤滑剤のアウトガスレート計測評価：第一計測

まず試料を何も入れず実験ジグ及び装置のみを入れ、数週間チャンバ温度 90℃ でベーキングを行い、バックグラウンドを極力少なくした。ベーキングの終了判定は TQCM 温度 -15℃, チャンバ温度は室温で 0.2 Hz hr^{-1} とした。その後、試料を入れずに計測を行い、バックグラウンドを求め、次に試料を入れて測定した。計測する際のチャンバ温度はどの計測でも室温とした。この 2 つの周波数変化率の差を取る事で試料からのアウトガスレートを求める事ができる。試料を交換したりする際、真空槽を大気圧に戻さなければならないため、真空槽内壁等にアウトガス

表2 バックグラウンド実測値 (数値単位: Hz hr^{-1})

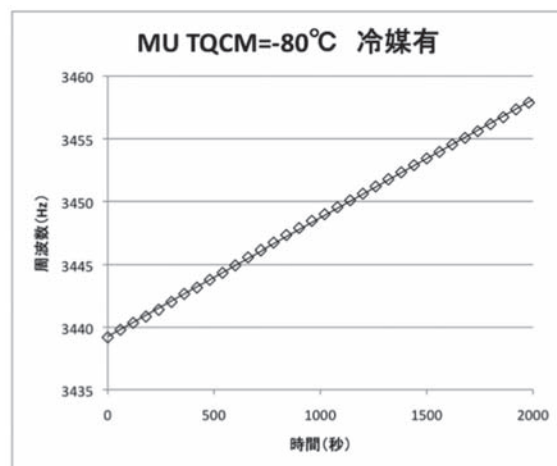
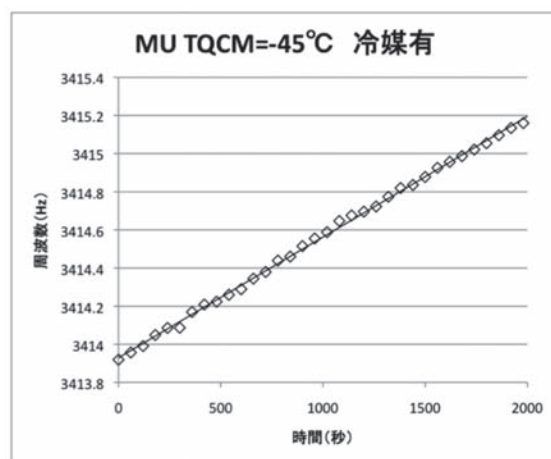
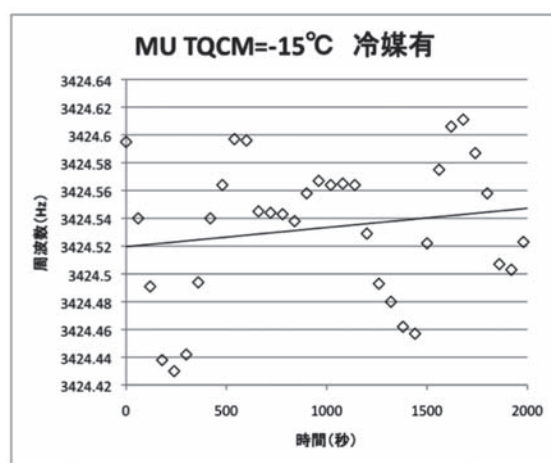
TQCM 温度	-80 度	-45 度	-15 度	0 度
冷媒使用	1.08	0.72	<0.2	<0.2
冷媒不使用	—	—	<0.2	<0.2

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に変化して、測定には 0.2 Hz hr^{-1} 程度の誤差が生じていると考えられる。

表2にバックグラウンドのTQCM周波数変化率の測定値を示す。冷媒を使用しない場合、バックグラウンドのアウトガスレートは本計測の誤差範囲 (0.2 Hz hr^{-1}) を下回るので無視できる。また冷媒を使用する場合でもTQCM温度 -15°C 以上では 0.2 Hz hr^{-1} を下回る結果が得られた。TQCM温度 -15°C 以上での計測の場合、誤差範囲 (0.2 Hz hr^{-1}) 以下なので無視してよいが、TQCM温度 -80 、 -45°C での計測の場合バックグラウンドを無視できない。バックグラウンドによるTQCM周波数変化率を、試料を入れて計測したTQCM周波数変化率から差し引く必要がある。

試料を1g取り、Knudsenセル内に入れ、セルの温度を 40°C に設定し、グリース潤滑剤からのアウトガス計測をおこなった。まずTQCMを -80°C に設定し、その後 -45 、 -15 、 0°C を計測し、最後に -80°C を再度計測した。チャンバ内のTQCMやアルミカバー等の温度が安定するまで2時間程度を要する。本測定では微量な吸着量を測定する必要があり、十分に安定するのを待ってから計測を開始した。

図2a-dはグリース潤滑剤MUをKnudsenセルに入れ 40°C に加熱し、冷媒を使用し、TQCM温度を -80 、 -45 、 -15 、 0°C に設定し計測した結果である。縦軸はTQCMの周波数 (Hz)、横軸は時間 (秒) を表す。TQCMへの吸着レートはこの傾き (周波数変化率) によって求められる。ダイヤは実測値を表し、実線は線形で近似した結果を表す。測定されたTQCM周波数変化率は、それぞれ 33.84 (-80°C)、 2.16 (-45°C)、 0.036 (-15°C)、 0.144 (0°C) Hz hr^{-1} となった。TQCM温度が -15°C 以上ではバックグラウンドと同程度と極めて少ない値であるが、TQCM温度が -80 、 -45°C に設定した際にはバックグラウンドに対し十分量の吸着がある事がわかる。 -15°C 以上では線形近似直線があまりフィットしていない (周波数変化率の誤差77%) のはバックグラウンドおよびチャンバ内部の熱環境の長期の時間変化の効果の方がMUからのアウトガスによるTQCM面への吸着による周波数増加より大きいためと考えられる。TQCM温度 0°C まで計測を終えた後 (最初の計測から約8時間後)、もう一度TQCM温度 -80°C の計測をおこなった。結果は 22.6 Hz hr^{-1} と最初の時と比

図2a TQCM温度 -80°C , MUからの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.11%)図2b TQCM温度 -45°C , MUからの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 1.6%)図2c TQCM温度 -15°C , MUからの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 77%)

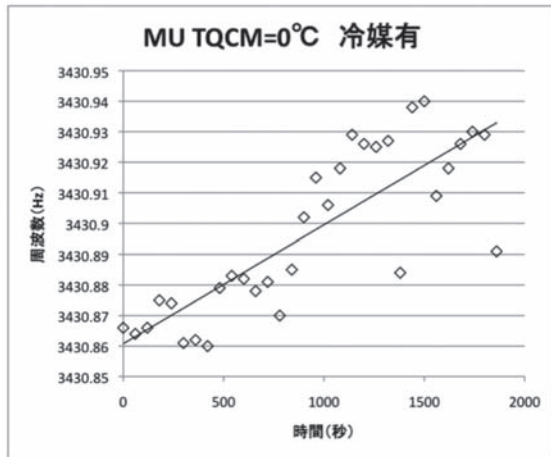


図 2d TQCM 温度 0 °C, MU からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 18%)

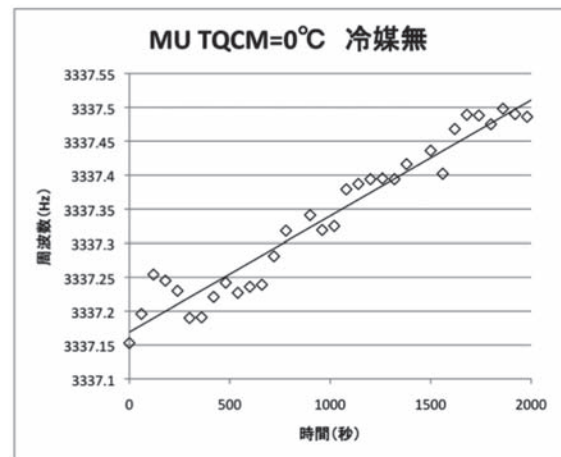


図 3b TQCM 温度 0 °C, MU からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 5.0%)

べて低いものとなった。これは、試料を 40 °C に加熱し、長時間アウトガスを出していたため、アウトガス速度がゆっくりとであるが減少しているためである。

冷媒を使用しているために生じる誤差を見積もるため、冷媒を使用せずに TQCM 温度 -15, 0 °C 設定で計測を行った。これは冷媒を使用して TQCM の支持ジグを冷やすと、そのそばにあるアルミカバーが冷えカバーにガスが吸着する、またはアルミカバーの隙間からカバー内部に入ってきたガスが TQCM ではなく支持ジグに吸着する、等の量を見積もるためである。実際には冷媒を使用している時のアルミカバーの温度を計測すると 18 °C 程度とチャンバ壁面の温度と比べそれほど低くないので、アルミカバーにつく量は非常に少ないと考えられる。図 3a-b は冷媒を使用せずに試料 MU からのアウトガス吸着による TQCM 周波数変化を表している。測定値は 1.44 (-15 °C), 0.72

(0 °C) Hz hr^{-1} で、冷媒を使用したときに比べ高い吸着率を示した。

MU の計測と同様に、ML についても計測を行った。まずバックグラウンドを計測し、MU の計測前に計ったバックグラウンドと同じであることを確認した後、試料をチャンバ内に入れ計測をおこなった。図 4a-d, 図 5a-b は、それぞれ ML を Knudsen セルに入れ 40 °C に加熱し、冷媒を使用した計測結果と、冷媒を使用せずに計測をおこなった結果である。表 3 に試料からのアウトガスが TQCM 面へ吸着するレートの実測値をまとめた。誤差はフィッティングによる誤差とバックグラウンド誤差 (0.2 Hz hr^{-1}) の和である。

チャンバに接続している真空ポンプの排気量を見積もる目的でフタル酸ジエチルヘキシル (DEHP, $\text{C}_{24}\text{H}_{38}\text{O}_4$) という無色透明の液体 (加熱温度 70 度) の測定もおこなっ

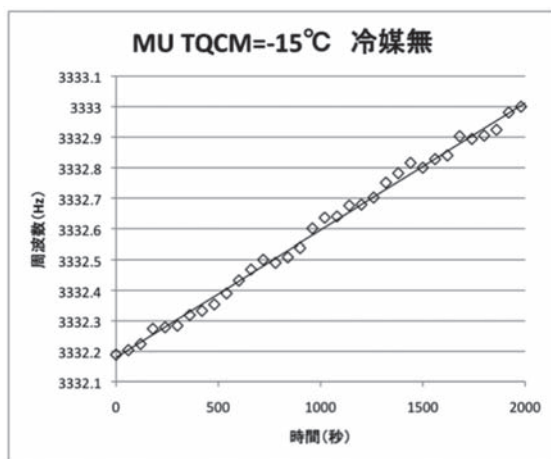


図 3a TQCM 温度 -15 °C, MU からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.74%)

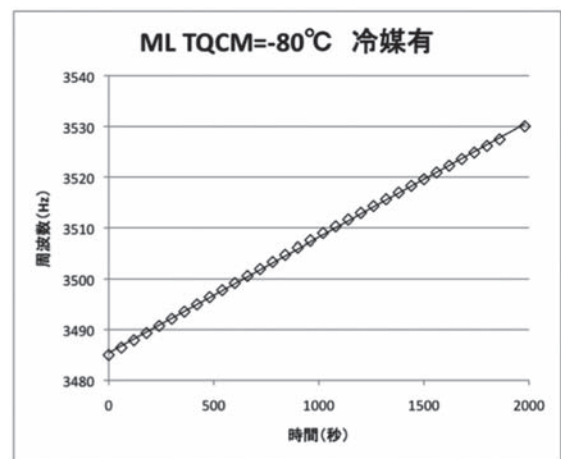


図 4a TQCM 温度 -85 °C, ML からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.18%)

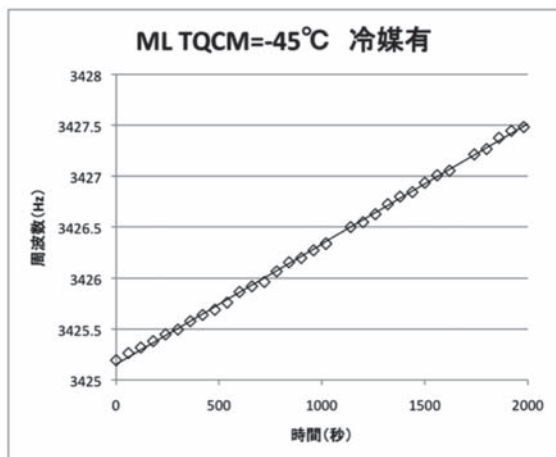


図 4b TQCM 温度 -45°C , ML からの吸着量(フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.86%)

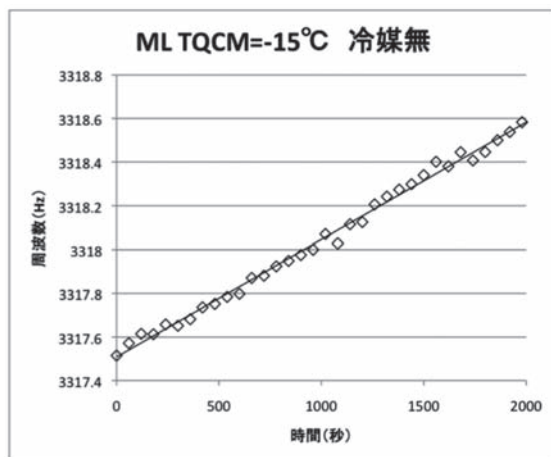


図 5a TQCM 温度 -15°C , ML からの吸着量(フィッティングによる周波数変化率の誤差: 1.6%)

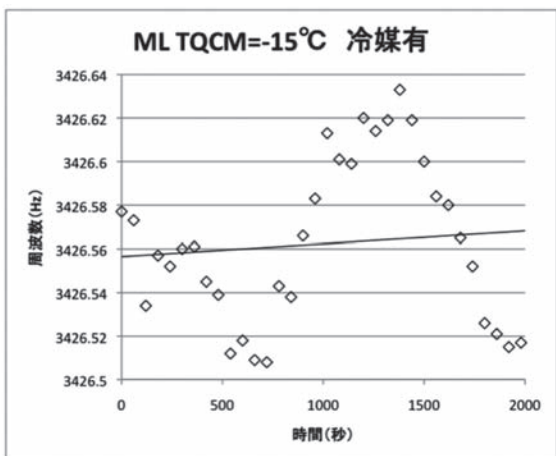


図 4c TQCM 温度 -15°C , ML からの吸着量(フィッティングによる周波数変化率の誤差: 140%)

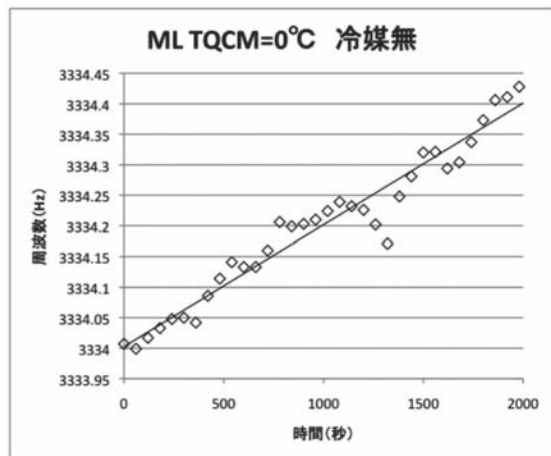


図 5b TQCM 温度 0°C , ML からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 1.9%)

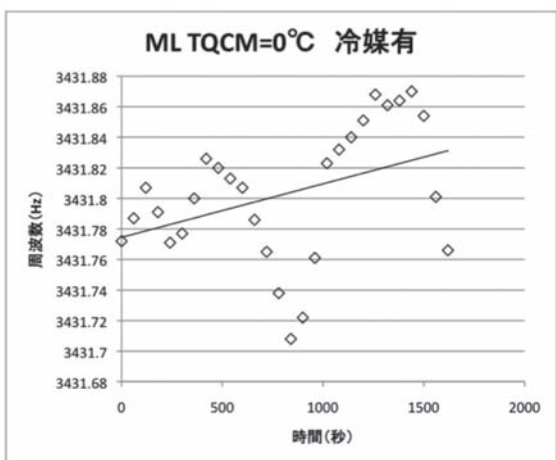


図 4d TQCM 温度 0°C , ML からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 25%)

た(図 6a-b 冷媒有, 図 7a-b 冷媒無). この標準物質は過去に蒸気圧等の性質がよく知られており, またガス放出量も比較的多い事から, 設定した温度でのアウトガス量の見積もりが容易である. この物質のアウトガス推定値と実際にチャンバ内で計測した値を比較する事で, 真空ポンプの排気量を測定することができる. これはアウトガスの絶対値を校正する際に必要な値である.

表 3 から MU, ML の 2 種類のグリース潤滑剤において, MU からのアウトガス量が最も少ない事がわかる. MU と ML は TQCM 温度 $-15, 0^{\circ}\text{C}$ ではともに誤差範囲以下の吸着量を示すが, $-80, -45^{\circ}\text{C}$ では MU からのアウトガスが半分程度におさえられており, 非常に低温な面への吸着まで考えると, 本研究が目指している回転駆動機構の潤滑剤には MU が最も適している事がわかる. また, 計測の前後に計測した試料の重量変化から総質量損失 (TML) は

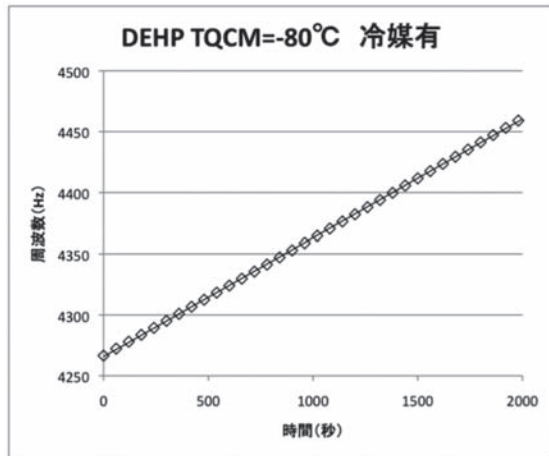


図 6a TQCM 温度 -80°C , DEHP からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.073%)

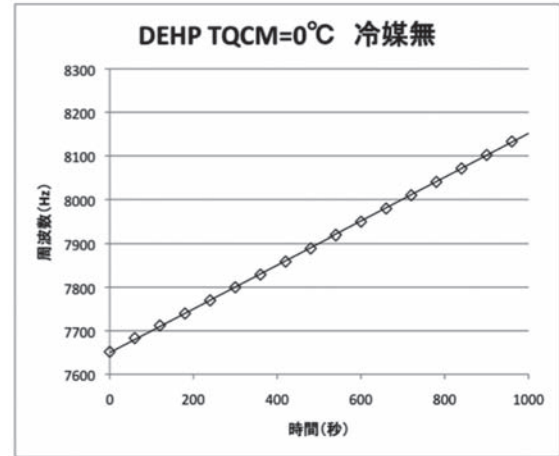


図 7b TQCM 温度 0°C , DEHP からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.13%)

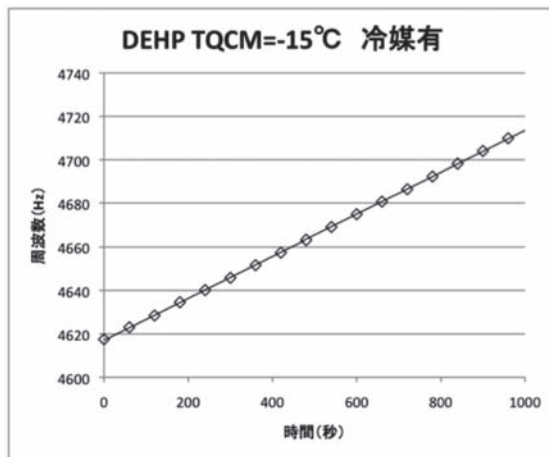


図 6b TQCM 温度 -15°C , DEHP からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.077%)

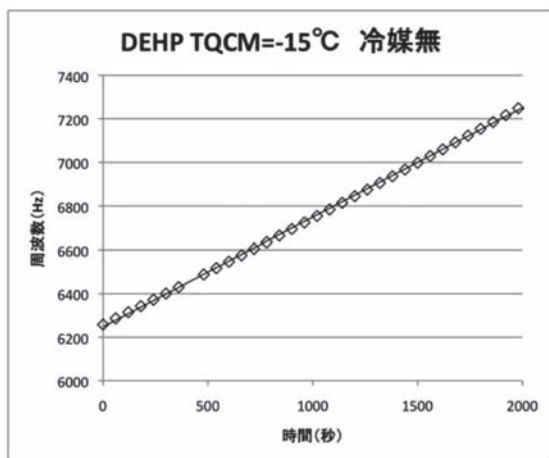


図 7a TQCM 温度 -15°C , DEHP からの吸着量 (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.14%)

表 3 第一計測における TQCM 吸着率測定値 (数値単位: Hz/hr) バックグラウンド較正済

TQCM 温度	-80°C	-45°C	-15°C	0°C
MU (1 g) 冷媒使用	32.76 ± 0.24 (21.52)	1.44 ± 0.23	0.036 [#] ± 0.23	0.144 [#] ± 0.23
ML (1 g) 冷媒使用	81.72 ± 0.35 (81.72)	3.6 ± 0.24	0.022 [#] ± 0.23	0.144 [#] ± 0.24
DEHP (1 g) 冷媒使用	348.12 ± 0.45	—	347.4 ± 0.45	—
MU (1 g) 冷媒不使用	—	—	1.44 ± 0.21	0.72 ± 0.24
ML (1 g) 冷媒不使用	—	—	1.80 ± 0.23	0.72 ± 0.21
DEHP (1 g) 冷媒不使用	—	—	1805.04 ± 2.73	1807.20 ± 2.55

括弧内は、7-8hr 経過後の数値

[#] TQCM 計測値が誤差範囲 0.2 Hz hr^{-1} 以下

* 冷媒を用いた計測

総質量損失量 (MU: 1.1%, ML: 0.4%)

MU で 1.1%, ML で 0.4% と表 1 の値に比べて若干大きい値を示したが、潤滑剤の保存状態が影響し水蒸気等がグリースにあらかじめ吸着していたのだと考えられる。水蒸気等は、本測定には影響を及ぼさない。

また、真空ポンプの排気量を求める目的で計測した DEHP については、同じ試験環境なら TQCM の温度を何度に設定してもほぼ変わらない結果が得られた。これは、DEHP の蒸気圧は 0°C で 5×10^{-9} (Torr) 程度であり、本試験環境ではほぼ全て TQCM 面に吸着するからである。また、冷媒を使用した時と、しない時で 5 倍程度の差が生じた。これは、DEHP の蒸気圧がアルミカバーの温度 18°C 程度で 10^{-7} Torr 程度であり、アルミカバーへのガスの吸着が MU や ML の計測に比べ非常に多いためと考え

られる。

3.4 ラビリンス構造によるアウトガス低減対策：第二計測

グリース潤滑方式の場合アウトガスの影響をできるだけ抑えるために、宇宙機では軸受ホルダの開口部にラビリンス構造を施し、潤滑剤からのアウトガスが外部に出にくい対策を施す場合が多い。隙間幅 0.1 mm のラビリンス構造が施された軸受ホルダ（図 8）を用いて計測した。供試体には先の第一計測で最もアウトガス特性が良かった MU をグリース潤滑剤として 0.7186 g、軸受に組み込んである。今回の計測ではラビリンスのコンダクタンスが大きい大口径軸受け（軸受口径～75 mm）を用いる。隙間 0.1 mm、軸受から外面までの長さ約 10 mm のラビリンス構造を施した軸受ホルダを制作し、ラビリンス構造の効果について評価するため、第一計測と同様の手順で真空槽にてアウトガスレート測定をおこなった。

軸受ホルダ以外全ての実験ジグ及び装置を入れ、一週間程度チャンバ温度 90℃ でベーキングをおこない、その後、チャンバを室温に戻し、加熱器を 40℃ に設定しバックグラウンドを計測した。バックグラウンドは第一計測時のものと誤差範囲以下でしか変わらなかったため、第一計測と同じ値を用いることにした。

バックグラウンド計測後、作成した軸受けホルダを加熱器に入れ、数日ベーキングをおこなった。その後、40℃ に加熱器を設定し、計測をおこなった。第一計測同様、冷媒を使用し、TQCM 温度を -80, -45, -15, 0℃ に設定し計測した。図 9a-d はその結果である。図の形式はこれまでのものと同様である。測定された TQCM 周波数変化率は、それぞれ 1.08 (-80℃), 1.44 (-45℃), 0.72 (-15℃), 0.72 (0℃) Hz hr⁻¹ となり、第一計測時と比べて -80℃ で周波数変化率は十分の一程度にさがり、ラビリンス構造の効果を確認できた。

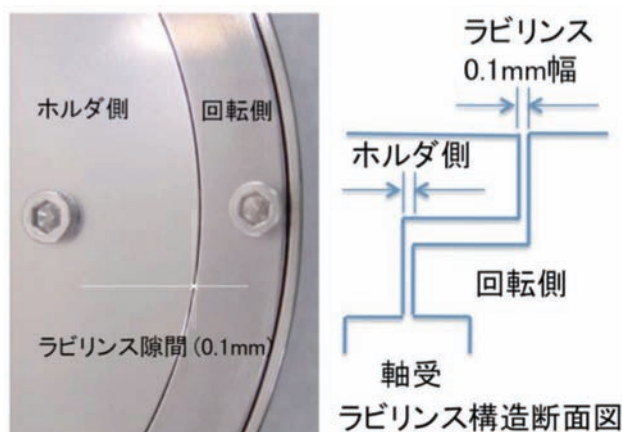


図 8 ラビリンス構造を施した軸受ホルダ（拡大）

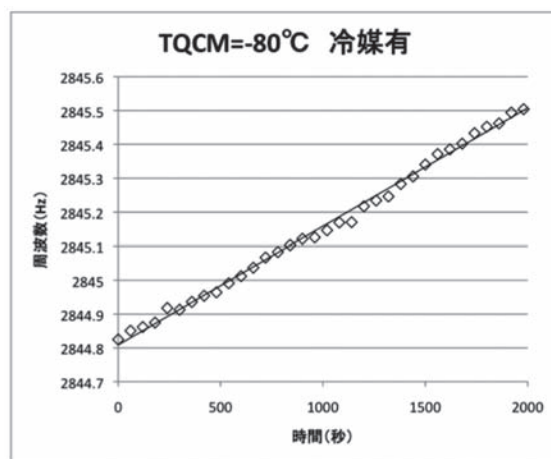


図 9a TQCM 温度 -80℃, ベーキング後のアウトガス（フィッティングによる周波数変化率の誤差：3.3%）

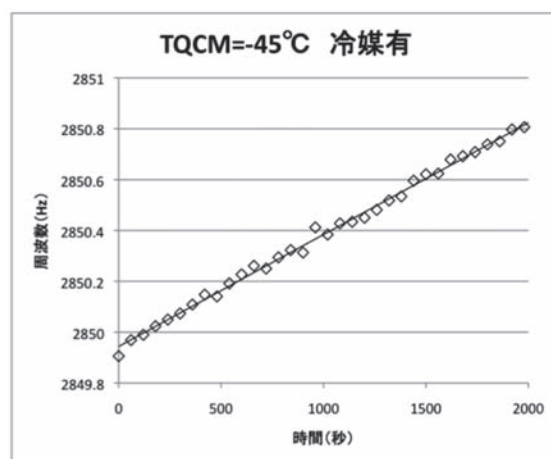


図 9b TQCM 温度 -45℃, ベーキング後のアウトガス（フィッティングによる周波数変化率の誤差：4.1%）

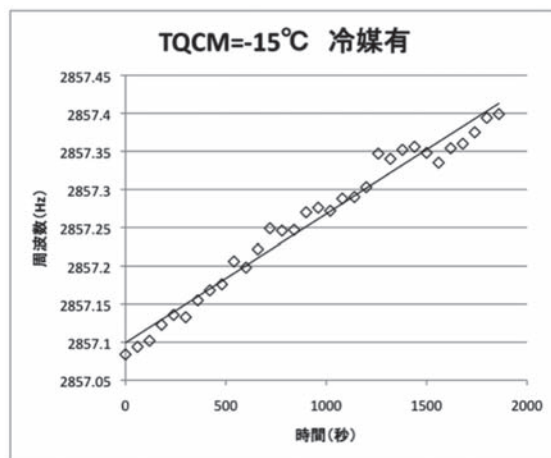


図 9c TQCM 温度 -15℃, ベーキング後のアウトガス（フィッティングによる周波数変化率の誤差：3.1%）

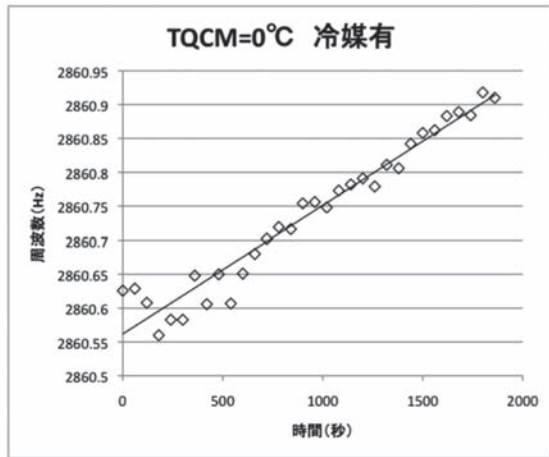


図 9d TQCM 温度 0°C, ベーキング後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 4.4%)

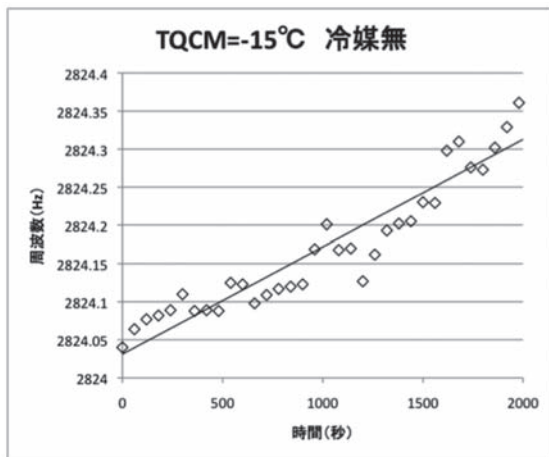


図 10a TQCM 温度 -15°C, ベーキング後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 12%)

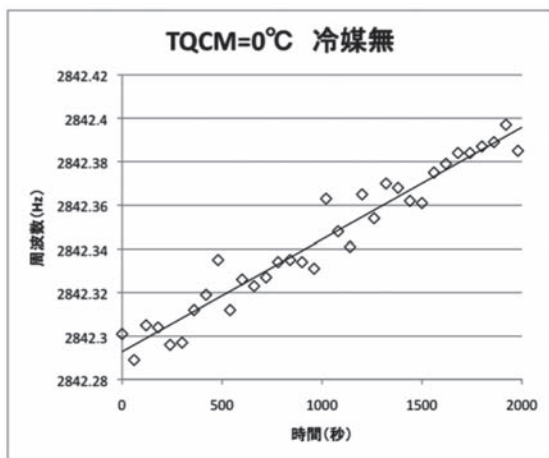


図 10b TQCM 温度 0°C, ベーキング後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 2.6%)

第一計測と同様に冷媒を使用せずに, TQCM 温度を -15, 0°C に設定し計測した. 図 10a-b はその結果を示した図であり, 冷媒を使用した時と誤差範囲程度にしか変わらない結果が得られた. 第一計測時には冷媒を使用して計測をおこなった周波数変化率の値の方が冷媒を使用せずに計測をおこなったものより低かった. これは, アルミカバーの隙間からガスがカバー内に流入し, 配管や TQCM の支持ジグに吸着する量が多かったためであると考えられる. 第二計測では, この隙間を極力少なくするようアルミホイルを使って工夫を施した. その結果, 冷媒を使用するかどうか依存しなくなったと考えられる. 一度真空槽を大気圧に戻し, チャンバを開けて 30 回転受ホルダを回転 (時計回り 15 回, 半時計回り 15 回) させ, その後ベーキングせず, 再び先の計測と同様の計測をおこなった. 本研究の目的は回転駆動機構からのアウトガス特性を理解する事にあり, 軸受の回転によってアウトガス特性がどのように変化するかも理解する対象だからである.

図 11a-d は軸受ホルダを回転させた後, 冷媒を使用し TQCM 温度 -80, -45, -15, 0°C に設定して計測した結果である. 測定された TQCM 周波数変化率は, それぞれ 1.8(-80°C), 1.8(-45°C), 0.72(-15°C), 0.72(0°C) Hz hr⁻¹ で, 回転させる前に計測した値と同程度の結果が得られた. 冷媒を使用しない計測 (図 12a-b) も回転させる前の値と同程度となった. 作成したラビリンス構造を施した軸受ホルダからのアウトガス計測で得られた TQCM 周波数変化率の結果は表 4 にまとめた.

4. スペース望遠鏡としての使用可能性評価

4.1 分子コンタミネーションの評価

アウトガス評価基準は NASA MSFC-SPEC-1238 に記述

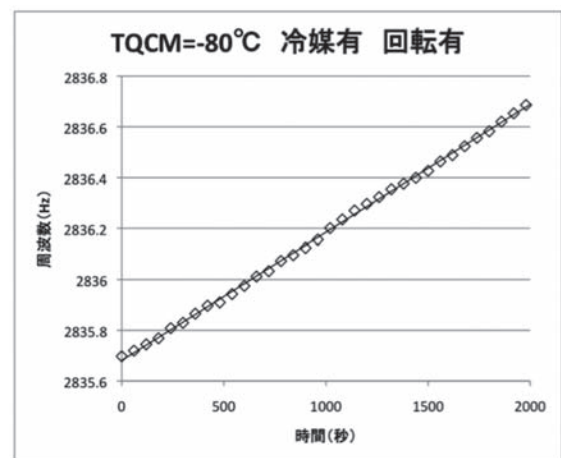


図 11a TQCM 温度 -80°C, 回転させた後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 0.46%)

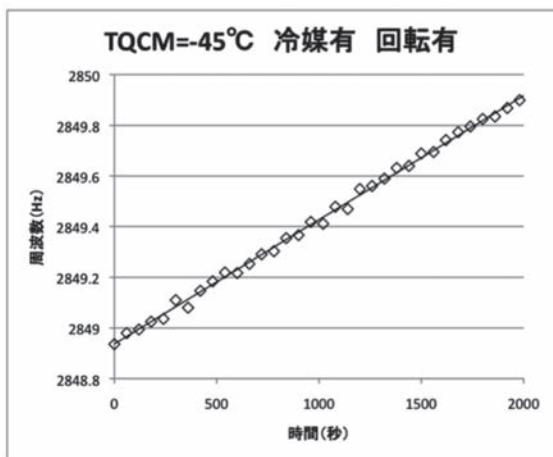


図 11b TQCM 温度 -45°C , 回転させた後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 5.0%)

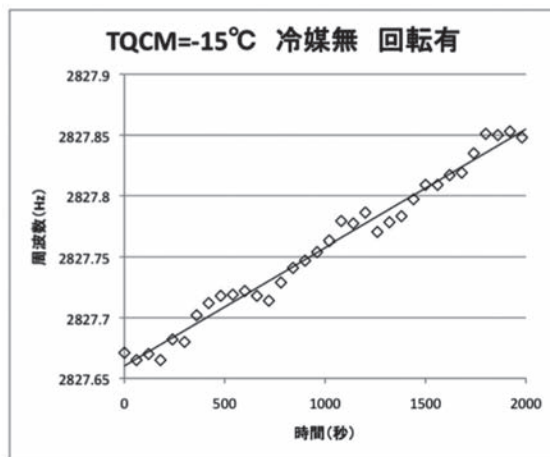


図 12a TQCM 温度 -15°C , 回転させた後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 6.2%)

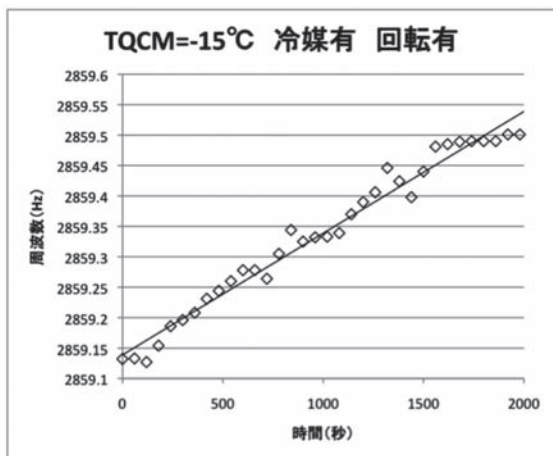


図 11c TQCM 温度 -15°C , 回転させた後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 2.8%)

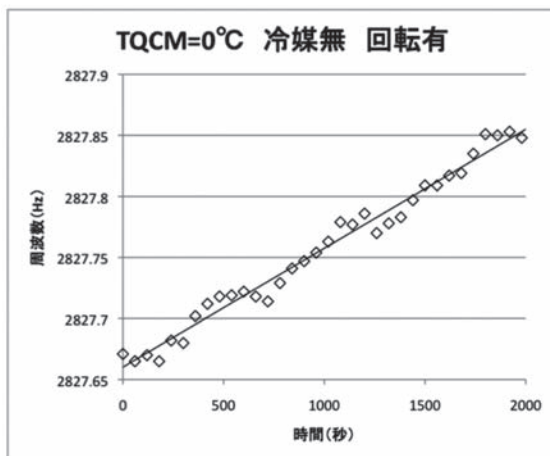


図 12b TQCM 温度 0°C , 回転させた後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 5.6%)

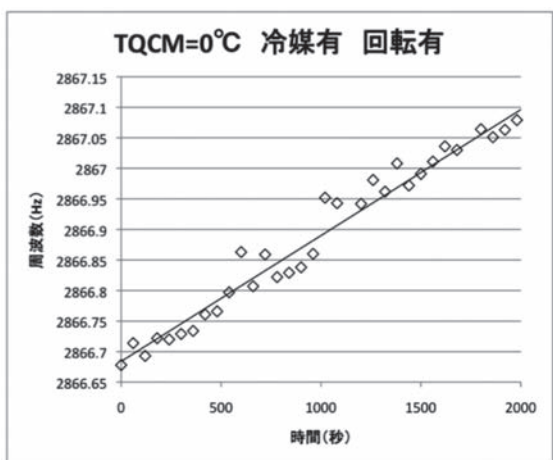


図 11d TQCM 温度 0°C , 回転させた後のアウトガス (フィッティングによる周波数変化率の誤差: 1.9%)

表 4 第二計測時の TQCM 吸着率実測値
(数値単位: Hz/hr) バックグラウンド較正済

TQCM 温度	-80°	-45°	-15°	0°
ベーキング	0 [#]	0.72	0.72	0.72
冷媒使用	± 0.24	± 0.26	± 0.22	± 0.23
ベーキング	—	—	0.36	0.18 [#]
冷媒不使用	—	—	± 0.20	± 0.20
回転	0.72	1.08	0.72	0.72
冷媒使用	± 0.21	± 0.21	± 0.22	± 0.20
回転	—	—	0.36	0.29
冷媒不使用	—	—	± 0.22	± 0.22

[#] TQCM 計測値が誤差範囲 0.2 Hz hr^{-1} 以下
使用 MU 総量: 0.72 g

があり、この規定によると 15 MHz の TQCM に対して周波数変化率が 36 時間平均で 0.8 Hz hr^{-1} 以下で合格となる。本研究では、36 時間平均の代わりに十分に安定した後の値を用いる事とした。この基準は、あくまで必要条件としてベーキングのレベルを規定するものであり、本研究が目的としている回転駆動機構は光路中に置く事を想定しているため、この基準に加え別途、用途別に分子コンタミネーションを評価する必要がある。実際、TQCM の周波数変化率はチャンバの環境によって左右（真空ポンプの排気効率等）される。そのためには今回の計測結果に関して絶対値の較正が必要で、次節で議論する。

グリース潤滑剤を Knudsen セルに入れて計測した場合、表 3 から NASA MSFC-SPEC-1238 の基準である 0.8 Hz hr^{-1} 以下を満たすものは冷媒を使用し、TQCM 温度 $-15, 0^{\circ}\text{C}$ 時の MU および ML のみである。冷媒を使用しない時の、TQCM 温度 $-15, 0^{\circ}\text{C}$ 時の MU および ML の値が条件をクリアできていない事を考慮すると、実際には冷媒を使用したために値を過小評価しているためクリアできたと考えられる。つまりグリース潤滑剤を Knudsen セルの用な構造で用いる場合、 0°C 以下の光学素子が存在する環境では NASA MSFC-SPEC-1238 基準 0.8 Hz hr^{-1} 以下の条件をクリアできない。

軸受ホルダの開口部にラビリンス構造を施し、潤滑剤からのアウトガスが外部に出にくい対策を施した場合、表 4 からほぼ全ての場で条件をクリアしている事がわかる。第二計測では冷媒を使用したための過小評価する効果を極力小さくする工夫を施したので、誤差範囲程度で無視できる。つまり軸受ホルダの開口部にラビリンス構造を施し、潤滑剤からのアウトガスが外部に出にくい対策を施した場合、NASA MSFC-SPEC-1238 基準 0.8 Hz hr^{-1} 以下の条件をほぼクリアできると結論できる。

Knudsen セル開口部面積と軸受のラビリンス隙間面積は、それぞれ 0.07 cm^2 および 0.47 cm^2 であり、軸受のものの方が 6 倍程度大きい。Knudsen セルおよび軸受を用いた計測時に使ったグリースの量はそれぞれ 1 g と 0.72 g でほぼ同じ程度である。ラビリンス構造を施した軸受からのアウトガスが Knudsen セル使用時より 10 倍程度良かった事から、ラビリンス構造を施す事が非常に効果的である事がわかった。

第一計測の結果（表 3）と第二計測の結果（表 4）を比較すると、第一計測では TQCM 温度が低いものほど吸着率が大きくなっている事が分かるが、一方第二計測の冷媒使用の場合ではその傾向は見られない。両計測前におこなったバックグラウンド計測ではほぼ同じ値であった。第二計測時では、グリース潤滑剤単体ではなく、グリース潤滑剤を塗布した軸受を組み込んだ軸受ホルダ（図 8）を計測している。ベーキングしたにもかかわらず、まだあるレベ

ルのアウトガスの発生がホルダからあった可能性は排除できない。また、第二計測の冷媒使用中に、実験設備系で何らかの特性の変化があったのかもしれない。従って、第二計測で得られたアウトガス量は、上限値を与えていると考えるのが妥当であろう。

4.2 アウトガス放出レートの絶対値較正

真空チャンバ内壁は室温 (25°C) 程度であり、壁に衝突した分子は壁には吸着せず全て反射すると仮定できる。つまり、チャンバ内を飛んでいる分子は TQCM に吸着するか真空ポンプによって排気されるかのどちらかである。先にも述べたが、冷媒を使用し計測している場合、アルミカバーの隙間からガスが流入し、ガスの一部は TQCM 面ではなく TQCM 支持ジグや冷媒配管に吸着する。そのため、冷媒を使用している場合は、支持ジグ等に吸着するアウトガスの量を考慮しなくてはならない。どれにどれだけ分子が吸着または排気されるかはそれぞれの実効的な断面積で表され、以下の式で決まる。

$$\Phi = FS (A_{\text{pump}} + A_{\text{TQCM}} + A_{\text{jig}}) \quad (1)$$

Φ , F , S , A_{pump} , A_{TQCM} , A_{jig} は、それぞれアウトガス放出レート (g hr^{-1})、TQCM 周波数レート (Hz hr^{-1})、TQCM 感度 ($1.96 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$)、真空ポンプ排気口の実効断面積、TQCM 検出器の実効断面積、その他支持ジグ等の実効断面積である。

まず、DEHP の計測結果から実効的な真空ポンプ排気口の実効断面積 (A_{pump}) を求める。DEHP は蒸気圧、分子質量などの値は調べられており、蒸気圧は実験的に次式¹²⁾で与えられる（注：文献により多少違いがある¹³⁾）。

$$\log(P_s) = 10.044 - 5008 T^{-1} \quad (2)$$

P_s , T はそれぞれ蒸気圧 (mbar)、温度 (K) を表す。また、Knudsen セル中の試料からのアウトガスは Langmuir の蒸発速度の式¹⁴⁾に従い、次式で与えられる。

$$dW/dt = P_s (M / 2 \pi R_0 T)^{0.5} \quad (3)$$

dW/dt , M , R_0 は単位面積あたりのアウトガスレート ($\text{g cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、分子量 ($390.57 \text{ J g mol}^{-1}$)、気体定数 ($8.3146 \text{ K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$) である。式 (2) より 70°C での DEHP の蒸気圧は $2.82 \times 10^{-3} \text{ (Pa)}$ 、Knudsen Cell の開口部の径が 0.3 (cm) なので、DEHP の放出レートは $1.72 \times 10^{-4} \text{ (g hr}^{-1}\text{)}$ である。ただし、オリフィスの寸法から Clausing 係数 0.5136 を用いた¹¹⁾。この値を Φ 、表 4 から TQCM 温度 -15°C で冷媒を使用しない計測時の値 $1805.04 \text{ (Hz hr}^{-1}\text{)}$ を F , A_{TQCM} は

0.316(cm²), A_{jig} を 0(cm²) として式 (1) に入れると, 実効的な真空ポンプの断面積 (A_{pump}) は 48.3(cm²) となる. 真空ポンプの実断面積は 71.8(cm²) なので排気効率 は 0.673 である.

次に, 第一計測時のその他支持ジグ等の実効断面積 (A_{jig}) を求める. 第二計測時はアルミカバーの隙間からガスがカバー内に流入し, 配管や TQCM の支持ジグに吸着する量を減らす工夫をしたため無視できるとする ($A_{\text{jig}} \sim 0$). 実効的な真空ポンプの断面積 (A_{pump}) はどの計測においても常に同じ値とする. また, その他支持ジグ等の実効断面積 (A_{jig}) は冷媒使用 (-60 °C) 時には常に同じ値となり, 冷媒を使用しない時は $A_{\text{jig}} \sim 0$ になると仮定する. 冷媒を使用する計測としない計測を式 (1) に用いると, 次式 (4) を得る.

$$A_{\text{jig}} = (A_{\text{pump}} + A_{\text{TQCM}}) (F_2 - F_1) / F_1 \quad (4)$$

F_1 および F_2 は冷媒使用時および冷媒をしない時の TQCM 周波数変化である. 表 3 から TQCM 温度 0 °C の時の MU の値を式 (4) の F_1 および F_2 に代入すると, その他支持ジグ等の実効断面積 194.5(cm²) を得る.

真空ポンプ排気および支持ジグ等に吸着するアウトガスの量を較正し求めた MU のアウトガス放出量を表 5 に示す. さらに, 装置内は閉空間であるとし放出されたアウトガスが全てある光学素子 (CCD, 10 cm² と仮定) に吸着するとする. また, グリースによく用いられている鉱油, 水酸化リチウム等ほとんどの物質は常温で 1(g cm⁻³) 程度の密度の物質なので, 吸着した汚染物質の密度を 1(g cm⁻³) と仮定する. 汚染物質が堆積した厚みのレートは表 6 で与えられる.

汚染物質の堆積厚みがおおよそ 0.1 μm 程度を超えたあたりから可視光や紫外光の透過率の低下等, 計測に影響が与ると考えられている¹⁵⁾. ラビリンス構造を施した軸受を用いた場合の -80 °C の面に対する堆積レートがおおよそ $7 \times 10^{-5} \mu\text{m hr}^{-1}$ なので汚染物質が 0.1 μm 堆積するのに

表 5 グリース潤滑剤 MU からのアウトガス放出量
(数値単位: $10^{-8} \text{ g hr}^{-1}$)

TQCM 温度	-80 度	-45 度	-15 度	0 度
MU (セル)	1560.0 ± 11.43	68.62 ± 10.96	3.71 ± 2.00	6.86 ± 2.29
MU (軸受 #1)	0 [#] ± 2.29	6.86 2.48	3.43 ± 1.91	1.72 [#] ± 1.91
MU (軸受 #2)	6.86 ± 2.00	10.31 ± 2.00	3.43 ± 2.10	2.76 ± 2.10

[#] TQCM 計測値が誤差範囲 0.2 Hz hr⁻¹ 以下

^{#1} ベーキング直後に計測

^{#2} ベーキング後, 30 回転して計測

表 6 光学素子に堆積する厚みの見積もり
(数値単位: $10^{-4} \mu\text{m hr}^{-1}$)

TQCM 温度	-80 度	-45 度	-15 度	0 度
MU (セル)	156.00 ± 1.14	6.86 ± 1.10	1.37 ± 0.20	0.686 ± 0.23
MU (軸受 #1)	0 [#] ± 0.23	0.686 ± 0.25	0.343 ± 0.19	0.172 [#] ± 0.19
MU (軸受 #2)	0.686 ± 0.20	1.03 ± 0.20	0.343 ± 0.21	0.276 ± 0.21

[#] TQCM 計測値が誤差範囲 0.2 Hz hr⁻¹ 以下

^{#1} ベーキング直後に計測

^{#2} ベーキング後, 30 回転して計測

よそ 3 ヶ月程度かかる事がわかる. 大口径軸受を想定したため大量の潤滑剤を用いた事, 半径も大きくラビリンス隙間面積が大きい事など, 今回の計測は分子コンタミネーションが最も多い場合の計測であるといえる. 今回の計測結果は決して楽観視はできないが, スペースルブ MU が高精度スペース望遠鏡で用いる回転駆動機構の潤滑剤として使用可能なレベルである事がわかった.

5. おわりに

本計測により, 軸受ホルダの開口部にラビリンス構造を施し, 潤滑剤からのアウトガスが外部に出にくい対策を施すことで, グリース潤滑剤スペースルブ MU は NASA MSFC-SPEC-1238 の基準である 0.8 Hz hr⁻¹ 以下を達成できる事, また汚染物質の堆積 (CCD を想定) が楽観視はできないものの十分検討の余地があるレベルである事がわかった. 今後, 1000 万回以上の確実な回転駆動動作を確認する試験をおこない, 他の要素の検討もおこなっていく. また, 回転動作中のアウトガス計測や, 長時間ベーキングの効果等も検討する必要がある. これらは回転駆動動作耐久試験の最中におこなう予定である.

6. 謝 辞

本評価に当たり, 三菱プレジジョンの梶田直希氏, 田島崇男氏, 小川智也氏にはグリースサンプルおよび軸受ホルダを提供いただき心より感謝申し上げます. また, 国立天文台の田村友範氏, JAXA 研究開発本部の小原新吾氏, 鈴木峰男氏, 川島教嗣氏, 宇宙技術開発株式会社の浦山文隆氏には多数の助言を頂いた.

参考文献

- 1) Tsuneta, S. *et al.*: The Soft X-ray Telescope for the Solar-A mission, Solar Physics 136, 37–67, 1991.

- 2) Golub, L. *et al.*: The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission, *Solar Physics* 243 (1), 63–86, 2007.
- 3) Culhane, J.L. *et al.*: The EUV Imaging Spectrometer for Hinode, *Solar Physics* 243 (1), 19–61, 2007.
- 4) Tsuneta, S. *et al.*: The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview, *Solar Physics* 249 (2), 167–196, 2008.
- 5) 吉田憲正, 他:「ひので」の指向精度要求とそれを実現したキー技術, 第51回宇宙科学技術連合講演会, 2007.
- 6) 一本 潔, 他:「ひので」微小擾乱測定試験, 第51回宇宙科学技術連合講演会, 2007.
- 7) 鈴木峰男, 西村 允, 小原新吾: 宇宙トライボロジーの最近の話題, *トライボロジスト*, 第44巻, 第1号, 6–12, 1999.
- 8) Thermal Vacuum Bakeout Specification for Contamination Sensitive Hardware, MSFC-SPEC-1238 (1986).
- 9) 田村友範, 原 弘久, 常田佐久, 一本 潔, 熊谷收可: 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), *国立天文台報*, 6, 49–58, 2002.
- 10) 田村友範, 原 弘久, 常田佐久, 一本 潔, 熊谷收可, 中桐正夫, 清水敏文, 坂尾太郎, 鹿野良平: SOLAR-B 可視光・X線望遠鏡の開発・試験における汚染評価とフライト部品のベーキング結果報告, *国立天文台報*, 8, 21–28, 2005.
- 11) Standard Test Method for Contamination Outgassing Characteristics of Spacecraft Materials, ASTM E1559 (2000).
- 12) S. Dushman: Scientific foundations of vacuum technique, Second edition, Ed. Wiley and Sons, 1962.
- 13) A.L. Lesvenan *et al.*: Re-evaporation of polymeric materials during outgassing experiments, *Proceeding of the 9th International Symposium on Materials in a Space Environment* Noordwijk, The Netherlands, 16–20 June 2003, ESA SP-540, September 2003.
- 14) Diels and Jaeckel: *Leybold Vacuum handbook*, Ed. Pergamon Press, 1962.
- 15) Tribble, A.C. *et al.*: Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA Contractor Report 4740.