

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

宇宙望遠鏡に搭載する高頻度回転駆動機構：
アウトガスレートの高精度計測

渡邊 恭子, 清水 敏文, 飯田 佑輔,
Kyoung-Sun Lee, 大場 崇義

2015年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

宇宙望遠鏡に搭載する高頻度回転駆動機構： アウトガスレートの高精度計測

渡邊恭子^{*1*4}, 清水敏文^{*2}, 飯田佑輔^{*2}, Kyoung-Sun Lee^{*2}, 大場崇義^{*3}

High Accuracy Measurements of the Outgassing Properties of a Rotating Mechanism for the Space Telescope

Kyoko Watanabe^{*1*4}, Toshifumi Shimizu^{*2}, Yusuke Iida^{*2}, Kyoung-Sun Lee^{*2}, Takayoshi Oba^{*3}

Abstract

We have been developing a rotating mechanism to rotate a waveplate in the light beam from a space solar telescope to be flown onboard the next solar satellite mission, Solar-C. Because the performance of this telescope is very sensitive to contaminants on the optical surfaces, the rotating mechanism shall have a low outgassing performance. We are currently evaluating its life-duration performance by operating it in a small vacuum chamber to ensure the number of operations required in the mission life. During this test, we also measured the outgassing rate every month. The data from a run in more than 1 year shows that the outgassing rate from the mechanism is kept low. We confirmed this mechanism could be used under stringent conditions for contaminants.

Key Words: Space-borne telescopes, Low outgassing lubricant, Contamination control

要 旨

次期太陽観測衛星計画「SOLAR-C」用光学磁場診断望遠鏡（SUVIT）への搭載を目指して、望遠鏡光路中で常時回転する回転駆動機構の要素開発を行っている。コンタミ管理レベルの厳しい望遠鏡内部で使用できる機器を実現するために、回転駆動機構には各種アウトガス対策を施している。現在、回転駆動機構試作品を真空環境下で連続駆動させて、寿命性能を評価する試験を行っている。この真空試験において、回転駆動中の機構から放出されるアウトガス量およびその変化を高精度に計測するために、新しいTQCM治具を開発し、定期的にアウトガス測定を行ってきた。1年以上にわたるアウトガス計測から、回転する機構からの発生アウトガス量に目立った経年変化はなく、低アウトガスレートが維持されていることを確認した。この計測から、本研究で開発中の機構は、コンタミ管理が厳しい望遠鏡内部で使用できる目処が付いた。

1. 目的および背景

現在、次期太陽観測衛星計画「SOLAR-C」に搭載される大型光学望遠鏡の焦点面観測に必要な技術要素として、高頻度回転駆動機構（PMU）¹⁾や焦点調節駆動機構²⁾などの可動機構機器の開発研究を、国内において行っている。

太陽の撮像観測においては、機械式シャッター・透過波長切り替えのためのフィルタホイール・偏光磁場測定に必要な回転波長板など、望遠鏡の光路中に入れた可動機構を真空下で多数回動作させる必要がある。これまでの日本の太陽観測衛星「ようこう」（1991～2001年）および「ひので」（2006年～現在）に搭載された撮像望遠鏡³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾では、この技術を海

* 平成26年12月18日受付 (Received 18 December, 2014)

*1 宇宙科学研究所 SOLAR-B プロジェクトチーム
(SOLAR-B Project Team, Institute of Space and Astronautical Science)

*2 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系
(Department of Solar System Sciences, Institute of Space and Astronautical Science)

*3 総合研究大学院大学 物理科学研究科 宇宙科学専攻
(The Graduate University for Advanced Studies, School of Physical Sciences, Space and Astronautical Science)

*4 日本学術振興会 特別研究員
(Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science)

外機器の一部として搭載したが、SOLAR-C計画においては、この技術を国内開発することによって、科学的成果に結びつく大型光学望遠鏡の焦点面観測装置の一つを日本の研究機関・大学が主導して開発することを目指している。観測装置を一つのシステムとして開発するには、光学系・検出器・熱構造に加え、可動機構の技術は増々重要となってきた。

現在開発中の高頻度回転駆動機構には、以下の性能実現を要求されている。

- (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⁷⁾⁸⁾

このような高性能の信頼性が高い可動機構の国内開発は宇宙科学ミッションでは前例がない。

本論文では、このうち(2)の要素について検討するため、(1)の要素検討のために行っている高頻度回転駆動機構連続回転試験中におけるアウトガス特性について報告する。

2. 機構設計とアウトガス条件

2.1. アウトガス視点から見た機構設計

高頻度回転駆動機構はコンタミ管理レベルの厳しい望遠鏡内部で使用するため、低アウトガスを実現する必要がある。低アウトガス特性を持った高頻度回転駆動機構を実現するためには、転がり軸受で使用する潤滑方式や潤滑剤が、使用用途に対して適切なものでなければならない。宇宙搭載機器で使用される転がり軸受としては、宇宙用固体潤滑転がり軸受と、宇宙用グリースや油といった液体潤滑剤を使用する転がり軸受がある⁹⁾。日本の搭載機器では宇宙用固体潤滑が多くの場合使用されてきたが、駆動回数が極めて限定的で、本研究で目指す1000万回以上という多数回の動作の実績が無い。一方、液体潤滑剤は1000万回を超える回転運転を確実に実現できると考えられるが、液体潤滑はアウトガスの観点で望遠鏡内での使用が可能であるかが不明であるため、適切な液体潤滑剤を選定し、使用環境も考慮する必要がある。

近年、海外の搭載品では、シクロペンタン(MAC, Multiply-alkylated cyclopentane)系の潤滑油・グリース基油が、極めて蒸気圧が低く、アウトガス特性が優れているために広く用いられるようになってきた。そこで我々はMAC系2001Aの基油にウレアを増ちょう剤として用いた国産のグリース潤滑剤(協同油

脂製スペーススルブ MU)を最もアウトガス特性が良い液体潤滑剤として選定し使用することとした。また、潤滑剤が塗布してある軸受けにはラビリンス構造を施し、アウトガス放出量を低減する対策を施した¹⁰⁾¹¹⁾。

しかし、これらのアウトガス低減対策を施しても、液体潤滑剤を用いている限りアウトガス量自体をゼロにすることはできない。そこで、これらの機器を使用した場合のアウトガス量を把握し、どの程度観測に影響を及ぼす可能性があるのかについて見積もることは、望遠鏡の使用方法などにも直結する重要な事項である。

2.2. 機構に求められるアウトガス条件

光学面などに汚染物質が堆積した場合、透過率の低下を引き起こす。その体積厚みがおおよそ $0.3\mu\text{m}$ 程度になると、可視光や紫外線の透過率は10%程低下するため、観測量に影響を及ぼす¹²⁾。一度堆積したこれらの汚染物質を除去するためには光学面のベーキングを行う必要があるが、このベーキングを軌道上で頻繁に行うと観測時間が限られることになる。したがって、光学面のベーキングはせいぜい数ヶ月に1度、できれば半年に1度程度に押さえるのが理想である。

光学面への汚染物質体積厚みが半年で $0.3\mu\text{m}$ である場合、コンタミ付着レートは $6.8\times 10^{-5}\mu\text{m hr}^{-1}$ 以下でないといけない。これは汚染物質の密度を 1g cm^{-3} と仮定し、放出されたアウトガスが全て、検出器面(10cm^2 と仮定)に吸着したと仮定したとき、回転駆動機構からのアウトガス発生レートは $6.8\times 10^{-8}\text{g hr}^{-1}$ 以下でなくてはならないことを意味している。このアウトガスを我々が今回測定に用いたTQCMで計測した場合、その周波数変化率は 0.7Hz hr^{-1} となる。

コンタミに感受性が高い望遠鏡では、 1Hz hr^{-1} 以下のアウトガスレートを許容判定の指標として使われることが多い。そして、これまでに 1Hz hr^{-1} 以下の周波数変化を意味のある値として安定的に測定した報告例はない。これは、 1Hz hr^{-1} 以下のガスレートを高精度で計測することは容易でないためである。しかし、アウトガス条件が厳しい望遠鏡内で使用可能な機構を実現するためには、 1Hz hr^{-1} 以下の周波数変化を安定的に測定しなければならない。

そこで本研究では、 1Hz hr^{-1} 以下の周波数変化を高精度で測定するために必要な、真空チャンバ内で使用する新しい治具を製作した¹³⁾。また、それを用い

て連続回転試験中の高頻度回転駆動機構からのアウトガスを定期的に計測した。定期的に繰り返し計測を行うことにより、アウトガス計測がどれだけ精度良く実施されているかについて、また、回転駆動物からの経年的なアウトガス変化について理解することができる。また得られた結果より、望遠鏡のシステム設計や軌道上ベーキングといった観測運用への指針も得ることができる。

実際には本機構以外にもアウトガス発生源となる機器があるが、本実験では高頻度回転駆動機構が主なアウトガス発生源と仮定し、 1 Hz hr^{-1} 以下の周波数変化の測定を目指す。またアウトガス発生源・光学面それぞれの温度環境によってアウトガス発生レート・吸着量は変化するため、それぞれの温度環境を変化させ、実際の使用において許容できる条件を探っていく。

3. アウトガス測定用実験装置と測定条件

3.1. 実験装置

アウトガス測定を行う実験装置は、「ひので」搭載望遠鏡のアウトガス計測で用いられた真空チャンバ測定系^{14) 15)}と同様の系を用いている(図1)。φ610 mm、高さ560 mmの真空チャンバ内に、アウトガス測定用のThermoelectric Quartz Crystal Microbalance (TQCM, QCM research社製、発信周波数15 MHz、感度 $1.96 \times 10^{-9} \text{ g cm}^{-2}$)を配置している。図1では、TQCMは3.3章で詳しく述べる低アウトガス測定用TQCM冷却治具内に設置されている。また、チャンバ内にある加熱器(図1)は、シートヒータが貼付けられたアルミ箱であり、この中に高頻度回転駆動機構を設置して、高温側の温度環境で駆動試験を行っている。

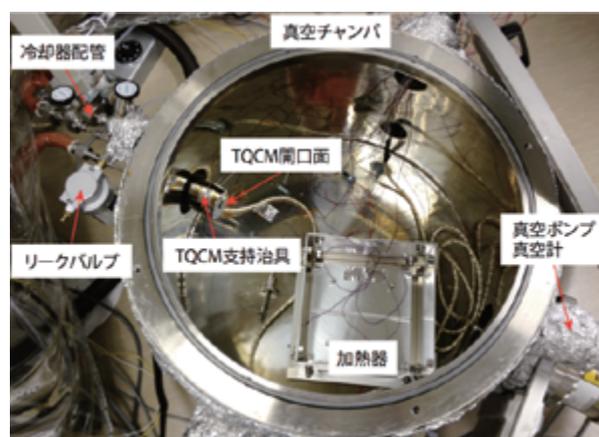


図1. 真空チャンバ内部配置

3.2. 測定の温度条件

アウトガスの放出量、また吸着量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、アウトガスの特性を理解した上で、設定した仕様の可否を決める必要がある。本研究で評価を行っている各種機構は次期太陽観測衛星Solar-Cに搭載する事を想定しているが、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確定である。しかし、各種機構は $0 \sim 30^\circ\text{C}$ 程度の常温環境での運転を想定しており、また本機構が置かれる同一閉空間内において最も低温の部分としては、冷却した検出器の表面を想定している。その温度をここでは -60°C と仮定して、その他に3つの温度ケースのデータを取得することとした。測定の温度条件・評価基準は、NASA MSFC-SPEC-1238¹⁶⁾の規定を参考にした。これによると、コンタミネーションの影響を調べたい光学素子については、軌道上予測最低温度からさらに 10°C 低い値を想定し、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°C 高い値を設定する。今回の計測では、評価する吸着面として $-70, -45, -15, 0^\circ\text{C}$ を選んだ。

また、アウトガス計測を行う高頻度回転駆動機構の温度は常温(約 25°C)または約 40°C とした。これらの温度における機構回転数は、常温(約 25°C)時に40 rpm、約 40°C 時に100 rpmとした。100 rpm回転時に約 40°C としているのは、回転駆動機構の長時間駆動試験における加速条件として、潤滑剤の膜厚が常温60 rpmと同様になるようにするためである。機構温度 40°C は機構の回転のみによっては賄えないため、加熱器を用いることによって実現している。

3.3. 低アウトガス測定用TQCM冷却治具

バックグラウンド測定を行うTQCM温度は、上記の通り $-70, -45, -15, 0^\circ\text{C}$ の4点であるが、TQCM自体のペルチェ素子だけでは $-70, -45^\circ\text{C}$ といった低温にはできないため、 -60°C の冷媒を用いてこれらの温度を実現している。以前は図2上図のようにTQCM冷却用の支持治具をチャンバ内に設置し、その治具に冷媒導入配管を接続して、TQCMを -60°C まで冷却していた。また、これらの冷却された冷媒配管・支持治具がアウトガス吸着面になるのを防ぐために、図2下図のように冷媒配管周りにアルミカバーを設置していた。しかし、これらの対策を施しても冷媒配管が吸着面になっていることが確認された¹⁷⁾。また冷媒配管と支持治具の接合部は取付・取外しのために真空用継手を用いているが、継手からの冷媒の微

小さな漏れが発生する事例も見られたため、高精度のアウトガス測定を確実に実施するために、チャンバ内への冷媒導入方法を再考した。

そこで我々が今回開発したのが、図3に示した「新 TQCM 冷却フランジ」である。冷媒導入配管と TQCM 冷却用支持治具がフランジと一体型になっており、チャンバ内には接合部が一切無い構造になっている。これにより冷媒のチャンバ内への漏れの可能性を排除することができた。またこれらの冷媒配管がアウトガス吸着面になることを防ぐために、円筒形のアルミカバーを TQCM センサ・冷媒配管を覆うように2重に設置した。これらのカバーもフランジと一体型になっている。アルミカバーには TQCM の電源・信号ケーブルのためにφ2 cm 程度の穴が下部に空いているが、ここからのアウトガスの流入は、電源ケーブルがあることから、少量に押さえられている。

製作した新 TQCM 冷却フランジは図4のようにチャンバ内に設置した。これにより、機器起源ではないアウトガスの影響を受けることなく、高精度のアウトガス測定が行えるようになった。また、フランジに一体化させたコンパクトな治具であるので、チャンバへの取り付けも容易である利点がある。

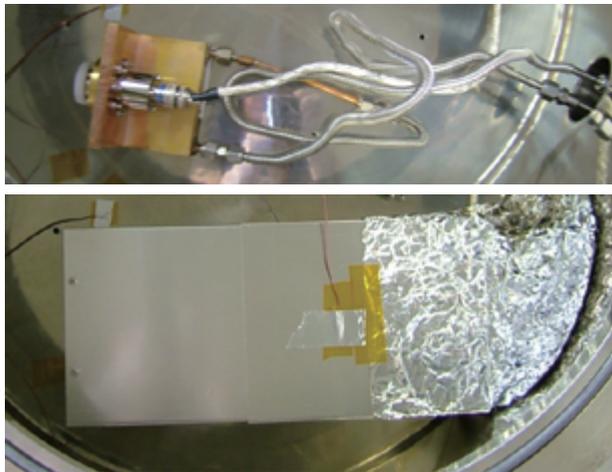


図2. これまで使用していた TQCM 冷却用冷媒導入配管・治具（上）と、アルミカバー（下）

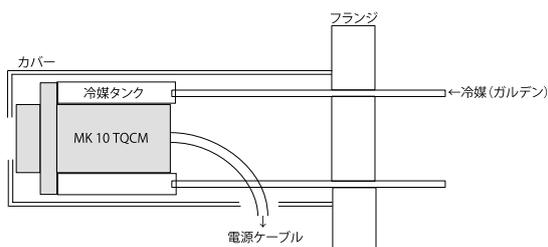


図3. 新 TQCM 冷却フランジ（概略図）

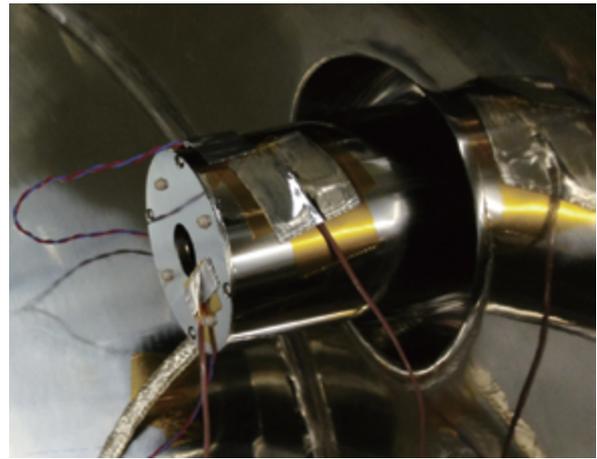


図4. 新 TQCM 冷却フランジ

4. アウトガス測定

4.1. チャンババックグラウンド測定

まず高頻度回転駆動機構設置前に、チャンバ等の試験環境からのアウトガスレートを、バックグラウンドとして測定した。まず、実験治具・装置を、1週間程度チャンバ温度 90°C、真空度 10^{-7} torr 以下でベーキングを行った。その後測定したバックグラウンドの測定データを図5、6に、バックグラウンド測定値を表1に示す。バックグラウンド測定を行った TQCM 温度は、-45、-15、0°Cの3点であるが、これらの温度は -60°Cの冷媒を用いて実現している。また、冷媒使用時における環境変化も評価するために、TQCM 温度 -15、0°Cにおいては、冷媒使用時と不使用時、両方の環境において測定を行った。TQCM 温度-70°Cにおける測定については、バックグラウンド測定実施時に想定していた検出器表面温度が -70°Cであり、TQCM 温度-80°Cでの測定を目指していたことから、冷媒を用いても TQCM 温度-80°Cを実現できなかったことから、精度の良い測定値がない。

バックグラウンドの測定は各 TQCM 測定温度について約12時間行い、バックグラウンド測定値は計測開始後、6時間以降のデータをフィッティングすることによって導出している。これは、TQCM の温度が安定し、精度良い計測ができるようになるまでに、少なくとも6時間は待つ必要があることを示している。図5上図においては、その様子がよく見て取れる。図5の計測データ点は、全ての図において図6の計測データ点よりも振れ幅が大きい。これらの振れ幅は冷媒の温度変化によるものである。これらの計測データから、TQCM 計測時のデータの振れ幅は0.2 Hz程度であることが分かる。

表 1. チャンババックグラウンド測定値

TQCM 温度	-45 度	-15 度	0 度
冷媒使用	0.11	0.03	0.13
冷媒不使用	-	0.14	(0.16)

(数値単位：Hz hr⁻¹)

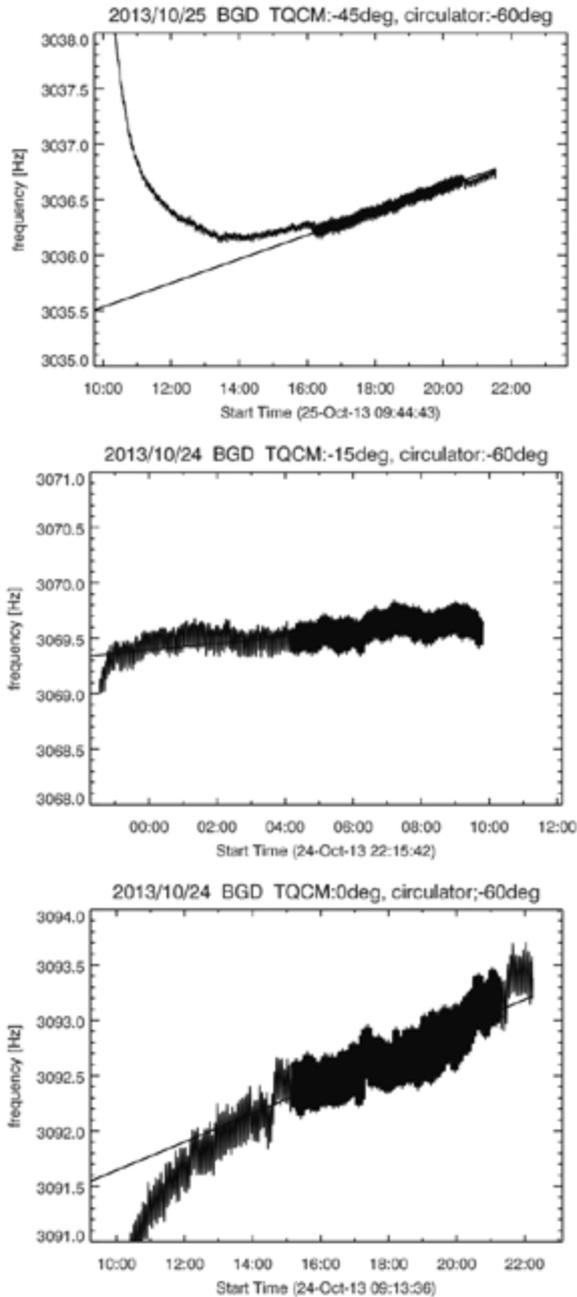


図 5. 冷媒 -60°C使用時におけるチャンババックグラウンド TQCM 計測値. 各 TQCM 温度は上図：-45°C, 中図：-15°C, 下図：0°C. 黒線は TQCM 測定値, 太線はバックグラウンド測定値として用いたデータ点, 黒直線はデータ点をフィッティングした結果.

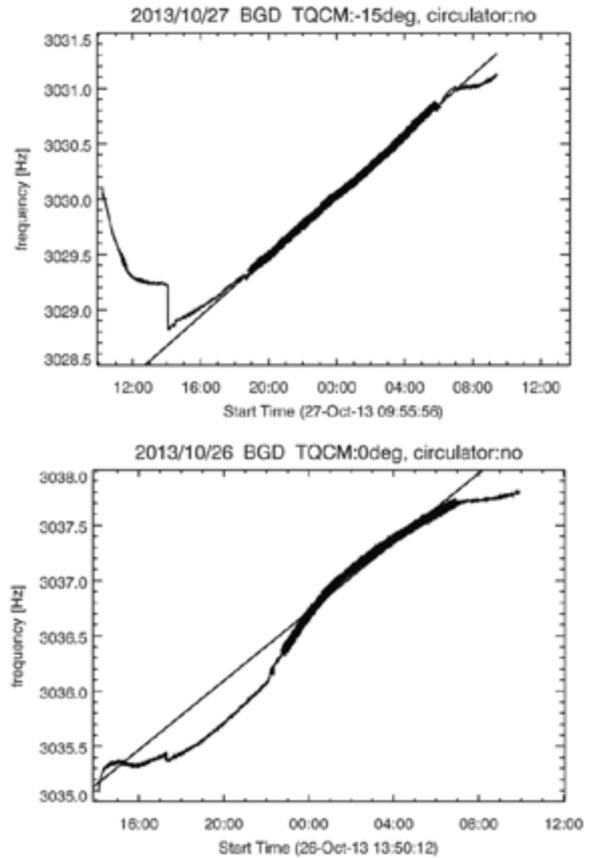


図 6. 冷媒不使用時におけるチャンババックグラウンド TQCM 計測値. 各 TQCM 温度は上図：-15°C, 下図：0°C. 線種は図 5 と同様.

一方, 図 5, 6 全ての図において, 測定開始 6 時間後においてもデータ点のがたつきが見られた. 表 1 のチャンババックグラウンドの測定値は, これらのがたつきが見られる部分を取り除いたデータのみ使用したが, 図 6 下図では, どの時間においても安定した測定が行えていなかった. 最終的に得られたバックグラウンド測定値は, どの測定温度の時においても 0.2 Hz hr⁻¹ 以下の測定誤差以下程度であるため, データのがたつきは検出限界とも考えられるが, データを見る限りでは, 計測時間を長くすることによって安定した計測値が得られると期待される.

チャンバのベーキング状態については, 表 1 の全ての値が測定誤差の 0.2 Hz hr⁻¹ 以下であることから十分にベーキングできていると言える. また, 測定中におけるチャンバ内真空度も $\sim 10^{-8}$ torr 台であり, 高真空が維持できていた. それでも冷媒使用時における測定値は不使用時と比べて小さくなっていることから, TQCM 冷却フランジが吸着面となっていることが伺える.

また、通常アウトガス測定値はTQCM温度が低くなるにつれて大きくなるはずであるが、表1ではTQCM温度0°Cという高い温度の時の方がTQCM温度-45°Cや-15°Cの時よりも大きくなるという逆転現象が起きており、通常の現象としては説明できない値が得られていた。これらの結果をそのまま使用してはバックグラウンド補正ができないが、全ての値が0.2 Hz/hr以下と小さい値であることから、平均値の0.1 Hz/hrを全てのTQCM温度におけるチャンババックグラウンドの値として使用する。

4.2. 回転駆動機構回転前アウトガス測定

4.1章でバックグラウンドを測定したチャンバ内に高周波回転駆動機構を設置し、まずは回転前に機構本体からのアウトガスを測定した。まずは、本体に付着しているが高真空ベーキングで除去可能なアウトガスを除去するために、1週間程度チャンバ温度60°C（機構の許容温度上限70°Cに10°Cのマーヅを設定）、真空度 10^{-7} torr以下でベーキングを行った。その後、高周波回転駆動機構を回転させずにアウトガス量を測定した。測定値を表2に示す。

高周波回転駆動機構設置後のアウトガス量は、ベーキングを行ったあとではあるが、あきらかにバックグラウンドよりも大きな値になっており、誤差範囲である0.2 Hz hr⁻¹よりも大きな値も計測された。したがって、非回転時であっても高周波回転駆動機構本体から何らかのアウトガスが放出されていると考えられる。

特に、表2においてTQCM温度-70°Cにおける測定値はかなり大きな値になっている。この時の実際の計測データを図7に示す。図7の周波数変化は、時間が経つにつれて減少傾向にあり、計測時間を延ばすことによってアウトガス量が減少すると見て取れる。したがって、今回のTQCM温度-70°Cにおける計測では、周波数変化が一定値になる前にデータ計測を終えてしまったために計測値が大きくなったと考えられる。

表2. PMU#1 回転前アウトガス実測値

TQCM 温度	-70 度	-45 度	-15 度	0 度
冷媒使用	2.49	0.22	0.16	0.09
冷媒不使用	-	-	0.79	0.58

(数値単位: Hz hr⁻¹)

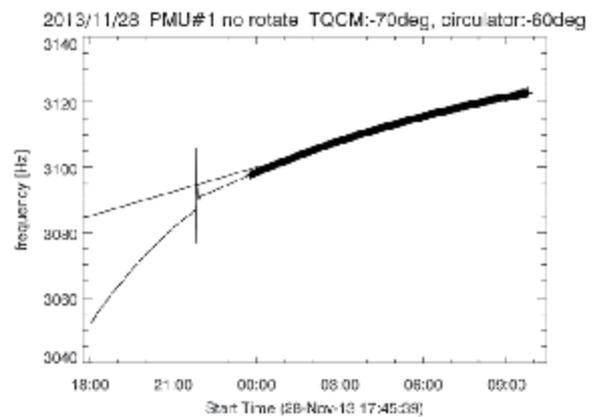


図7. PMU#1 設置後、非回転時、TQCM 温度-70°Cにおけるアウトガス計測値。線種は図5,6と同様。

4.3. 回転駆動機構回転開始時アウトガス測定

次に、TQCM 温度 -15°C（冷媒不使用時）においてアウトガス量の測定を行いながら、高周波回転駆動機構の回転を始め、回転前後のアウトガス量の変化を調べた。実際のTQCM測定値を図8に示す。機構回転前のアウトガス量は実測値で0.79 Hz hr⁻¹で、回転後は0.67 Hz hr⁻¹となった。回転後のアウトガス量が回転前の値よりも少ないという結果となっており、その差も測定誤差の0.2 Hz hr⁻¹以下となっていることから、この回転前後のアウトガス量変化は誤差範囲内であり、特に回転することによってアウトガスが発生するという現象は見られなかった。

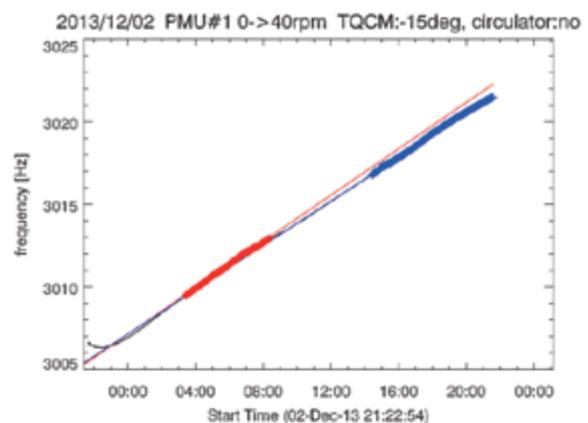


図8. PMU#1 回転前後におけるTQCM計測値
黒線がTQCM測定値、赤点が回転前のアウトガス測定値として用いたデータ点、青点が回転後のアウトガス測定値として用いたデータ点。赤・青線はそれぞれのデータ点をフィッティングした結果。

4.4. 回転駆動機構連続回転時アウトガス測定

上記の高頻度回転駆動機構の回転開始より、連続回転試験を続けて行った。本連続回転試験は1000万回以上の確実な回転駆動動作を確認するために行うものである。しかし、実際の運用では60 rpmでの使用を予定しており、これを3年間運用したとすると、全回転数は約9500万回転となる。3年間の使用に耐えられるかどうかを検証するため、我々は回転駆動機構を1億回以上回転させることとした。これを達成するためには60 rpmでは3年かかるが、100 rpmで高速回転させることによって1.8年程で1億回転以上を達成することとした。

また、アウトガス測定時の機構温度は、前述の通り25℃と40℃の2点を設定し、それぞれにおける機構回転数を40 rpmと100 rpmとした。40 rpm回転時は常温に保つことで機構温度約25℃程度となる。100 rpm回転時は機構自体が発熱するため常温で25℃以上となるが、40℃には達しないため加熱器を用いて機構温度を40℃とした。

本連続回転試験中において、機構使用中のアウトガス量と機構潤滑油の変質などによるアウトガス発生量の増加などが無いかを監視するため、1か月毎に定期的にそれぞれ40、100 rpm時におけるアウトガス量の測定を行った。この定期アウトガス測定の結果を表3, 4に示す。表3は40 rpm回転時（機構温度約25℃）の、表4は100 rpm回転時（機構温度約40℃）におけるアウトガスの実測値である。-60℃の冷媒使用時において、TQCM温度を-15℃や0℃にするにはTQCMにかなりの負荷がかかるため、TQCMが温度を保てず、アウトガス量が測定できなかったことが数回あった。冷媒不使用時においても、TQCM温度を-15℃に保つにはかなりの負荷がかかるため、これもTQCMが温度を保てず、アウトガス量が測定できなかったことがあった。このような場合については表中に値を記載していない。また、指定のTQCM温度を保ててはいたが、安定した計測時間が十分ではなかったもの（3時間以上の測定時間が確保できていなかったもの）については、表中において括弧書きで示した。

表3, 4より、どの月の測定値においても値なし、括弧書きの場合をのぞき、ほぼ同程度のアウトガス量が計測されており、急激なアウトガス量の変化は起こらなかったことが分かる。そこで、各TQCM温度における典型的なアウトガス測定値を得るために、これらの実測値の平均値を取った。その値を表5に示す。また表5の値のばらつきを見るために、図9, 10, 11, 12に、それぞれ表3, 4作成時に使用したアウトガス測定値の生データを示した。

図9, 11においては、データの振れ幅が大きいものと小さいものが混在しているが、これらはTQCM自体の温度揺らぎによるものである。この揺らぎが大きくても小さくても、長時間に渡り（3時間以上）測定を行うことで、正確なアウトガス量が得られている。図10下図と図12では所々でスパイク構造が見られるが、スパイク後の挙動がスパイク前と変わらず一定であるため、スパイク部は無視してデータのフィッティングは行っている。表5には1つの値として平均値を示したが、実際の値は図9-12の通りの揺らぎがある。

表5から分かる通り、アウトガス量は40 rpm回転時に比べ、100 rpm回転時の方が多くなっていった。これは100 rpm回転時においては機構設定温度が40℃と40 rpm回転時よりも高くなっていることによって、アウトガスが発生していたと考えられる。また冷媒使用時よりも冷媒不使用時の方がアウトガス量が多くなっているが、これはTQCM冷却フランジが吸着面になっているためである。

表3. PMU#1 40 rpm 回転時アウトガス実測値

TQCM 温度	冷媒温度: -60 度				冷媒なし	
	-70 度	-45 度	-15 度	0 度	-15 度	0 度
2013 年 12 月	0.88	0.49	0.32	0.16	0.67	0.30
2014 年 1 月	0.79	0.47	0.25	0.23	0.54	0.40
2014 年 2 月	0.95	0.85	0.29	0.15	0.88	0.49
2014 年 3 月	0.75	0.64	0.21	0.15	0.68	0.63
2014 年 4 月	0.56	0.47	0.29	-	0.82	0.47
2014 年 5 月	0.40	0.42	-	(0.12)	0.40	0.22
2014 年 6 月	0.77	0.69	0.21	(0.04)	0.75	0.53
2014 年 7 月	0.73	0.69	0.19	(-0.61)	0.78	0.47
2014 年 8 月	0.69	0.63	0.28	(0.01)	0.64	0.43
2014 年 9 月	0.65	0.62	(0.57)	(0.12)	0.64	0.46
2014 年 10 月	0.63	0.63	0.28	0.16	0.68	0.48

(数値単位: Hz hr⁻¹)

表4. PMU#1 100 rpm 回転時アウトガス実測値

TQCM 温度	冷媒温度: -60 度				冷媒なし	
	-70 度	-45 度	-15 度	0 度	-15 度	0 度
2014 年 1 月	1.41	0.98	0.33	0.20	0.72	0.44
2014 年 2 月	1.10	0.84	-	(0.71)	-	(3.69)
2014 年 3 月	1.25	0.94	0.35	0.20	(4.06)	0.33
2014 年 4 月	1.19	0.83	0.45	0.24	(1.56)	0.89
2014 年 5 月	0.66	0.59	0.29	(0.59)	(0.55)	0.36
2014 年 6 月	0.72	0.59	(0.17)	(0.16)	(0.54)	0.36
2014 年 7 月	1.06	0.90	0.35	0.26	0.96	0.32
2014 年 8 月	1.05	0.84	0.34	0.26	0.99	0.60
2014 年 9 月	0.98	0.81	0.33	0.14	0.82	0.59
2014 年 10 月	0.96	0.83	0.30	0.20	0.85	0.60

(数値単位: Hz hr⁻¹)

表 5. PMU#1 アウトガスレート実測平均値

TQCM 温度	冷媒温度: -60 度				冷媒なし	
	-70 度	-45 度	-15 度	0 度	-15 度	0 度
40 rpm	0.71	0.60	0.26	0.17	0.68	0.44
100 rpm	1.04	0.81	0.34	0.21	0.87	0.50

(数値単位 : Hz hr⁻¹)

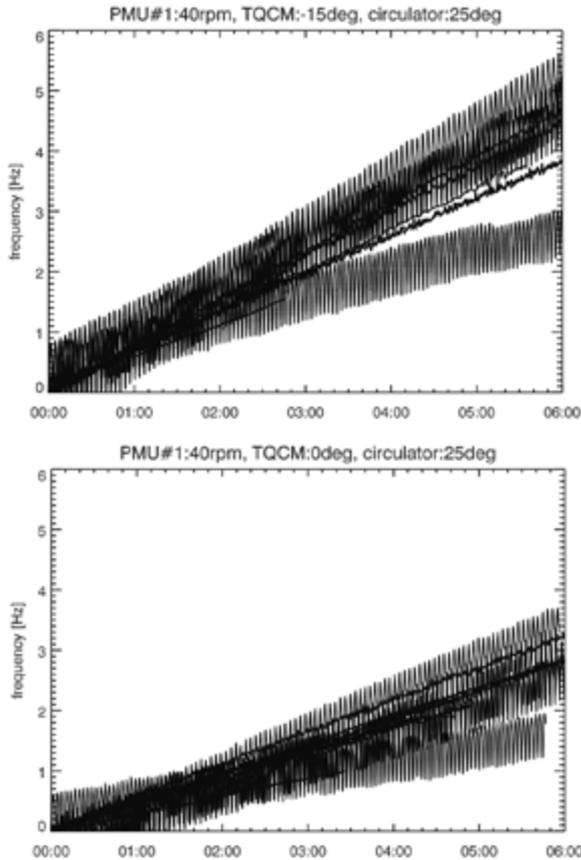


図 9. アウトガス実測値の計算(表 3)に用いた 40 rpm 回転時における TQCM 計測値(冷媒不使用時)

5. アウトガス放出量の評価

5.1. アウトガス量の冷却治具吸着量補正

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, 温度が低い 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と考えられる. 冷媒を使用して計測している場合, 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 冷却治具にも吸着する. そのため, 冷媒使用時は, チャンバ内の冷却治具に吸着するアウトガスの量を考慮しなくてはならない. どれだけの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.

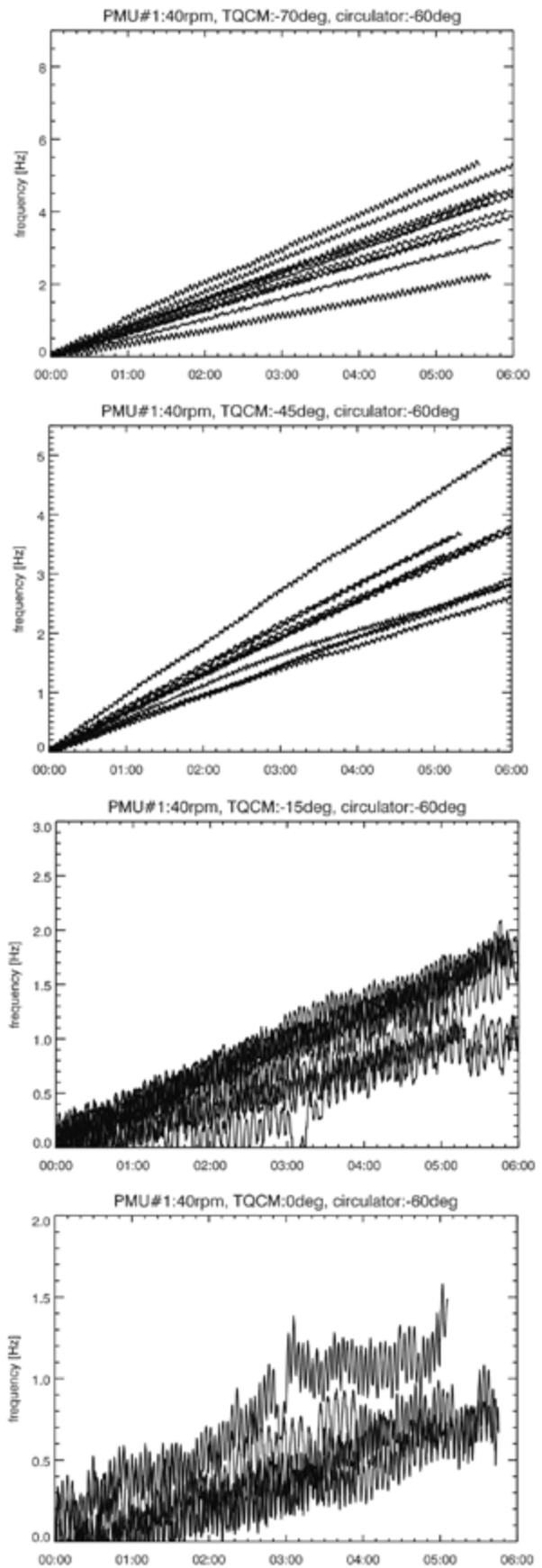


図 10. アウトガス実測値の計算(表 3)に用いた 40rpm 回転時における TQCM 計測値 (冷媒使用時)

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

$\Phi, F, S, A_{\text{pump}}, A_{\text{TQCM}}, A_{\text{jig}}$ 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 (0.316 cm^2)、冷却治具の実効断面積である。 A_{pump} は潤滑剤選定時における測定値より 48.3 cm^2 と求められている¹¹⁾。 A_{jig} は、冷媒不使用時は無視できる($A_{\text{jig}}=0$)が、冷媒使用時には無視できない値になっていることが表 1, 2, 3, 4 から分かる。冷媒使用時の値は冷媒不使用時に比べて小さくなっており、これはガスが冷媒配管などに付着しているためと考えられる。 A_{jig} は冷媒使用時と不使用時における計測を式 (1) に用いることにより、次式 (2) から得られる。

$$A_{\text{jig}} = (A_{\text{pump}} + A_{\text{TQCM}})(F_2 - F_1) / F_1 \quad (2)$$

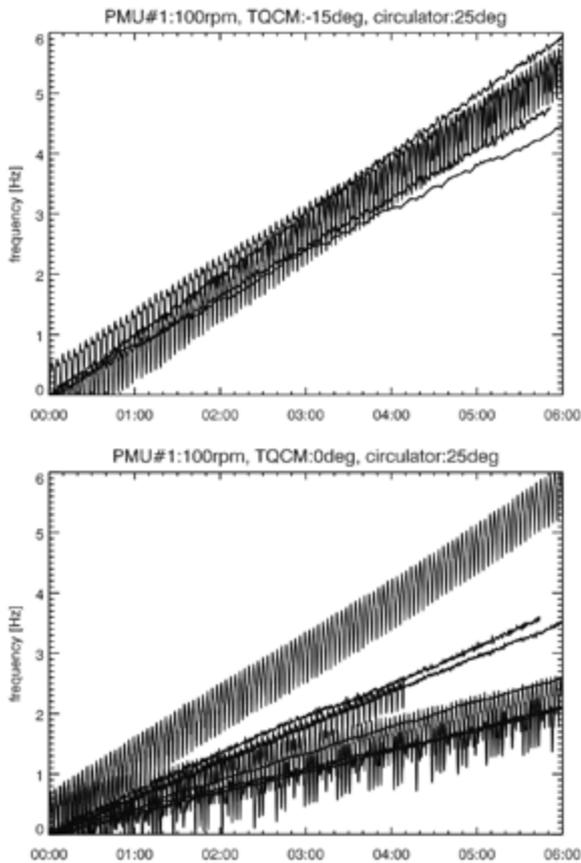


図 11. アウトガス実測値の計算 (表 4) に用いた 100 rpm 回転時における TQCM 計測値 (冷媒不使用時)

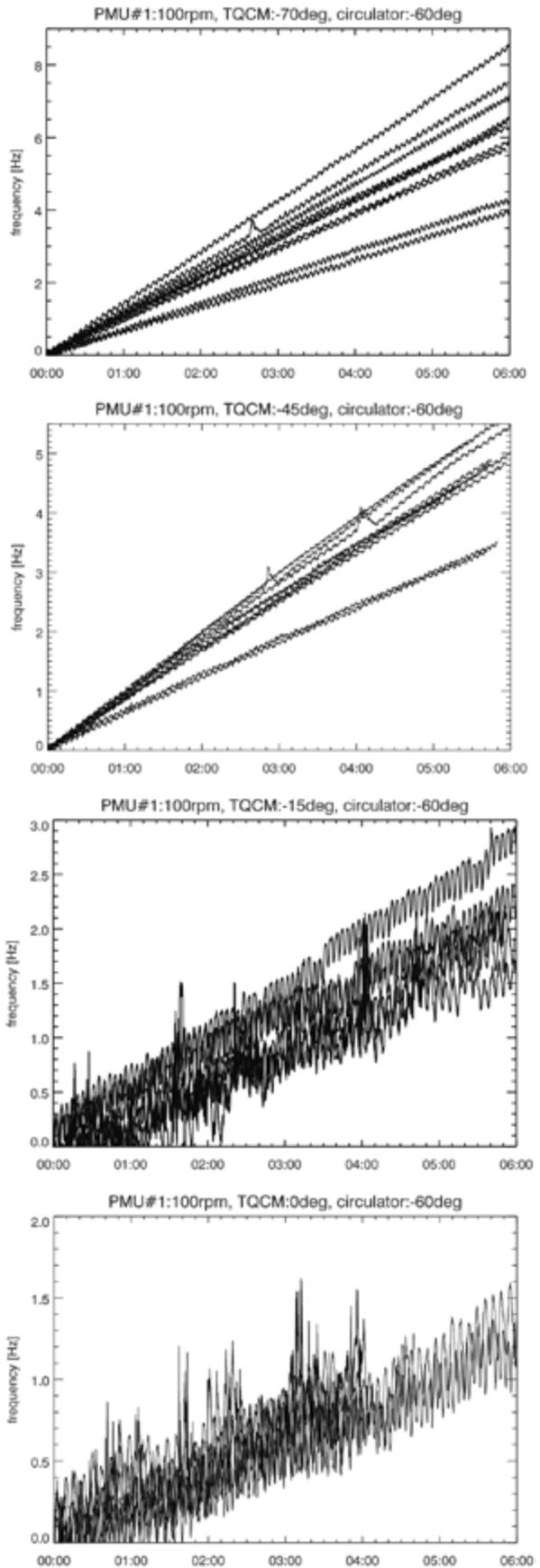


図 12. アウトガス実測値の計算 (表 4) に用いた 100 rpm 回転時における TQCM 計測値 (冷媒使用時)

F₁ および F₂ は冷媒使用時および冷媒不使用時の TQCM 周波数変化である。表 5 から、40 rpm 回転時における測定値を式 (2) の F₁ および F₂ に代入すると、A_{jig} は 77.7~80.0 cm² と得られた。また 100 rpm 回転時における値を用いた場合、A_{jig} は 64.7~74.6 cm² と得られた。これより、今回の高頻度回転駆動機構からのアウトガス測定時における A_{jig} の値は、これらの平均である 74.2 cm² を今後用いることとする。これらの A_{jig} の値は、図 2 上図の状態においては 194.5 cm² と求められ¹¹⁾、図 2 下図のアルミカバーを設置した状態においては 100.5 cm² と求められていた¹⁶⁾。これらの値と比較すると、今回新しく製作した TQCM 冷却治具における A_{jig} の値は比較的小さくできていることが分かる。したがって、アウトガスの冷却治具への吸着量を減少させることができたと言えるが、同様の TQCM 冷却フランジを用いて焦点調節機構に用いるボールネジからのアウトガス量を見積もったときに得られた A_{jig} の値は 25.6 cm² であり¹³⁾、今回の値は、これの 3 倍近く大きい値となった。同じ治具を用いて、これだけ A_{jig} の値が変わってしまう理由については不明であるが、25.6 cm² という値は、1 点のデータ点からのみ導出していたため、使用時の温度環境などの条件変化によって吸着面積が変化した可能性がある。A_{jig} の値の増加の原因としては、電源ケーブルをチャンバ内に出すための穴からアウトガスが新 TQCM 冷却フランジのカバー内に流入し、冷媒配管や冷媒タンク等に吸着していることが考えられる。新 TQCM 冷却フランジのカバー内には吸着面積として約 40 cm² の冷媒配管があり、TQCM 本体の表面積も約 60 cm² ある。冷媒タンクの表面積はこれよりも大きいことから、これらが吸着面になっていると考え、A_{jig} の値が 72.6 cm² であるのも妥当な値であると言える。

今回のアウトガス測定実験で、冷却治具に吸着するアウトガスの量を較正して求めたアウトガス測定量の補正值を表 6 に示す。また全ての値において、4.1 章で求めたようにチャンババックグラウンド補正值として 0.1 Hz hr⁻¹ を用いている。

表 6 より、高頻度回転駆動機構からのアウトガス量は TQCM 温度 -15℃ と 0℃ においては 1 Hz/hr 以下に押さえられていたが、TQCM 温度 -70℃ と -45℃ では 1 Hz hr⁻¹ 以上となった。特に 100 rpm 回転時においては 2 Hz hr⁻¹ 以上と大きな値になっているが、これは回転数によるものではなく、機構温度によってアウトガス量が増えるためであると考えられる。そこで、それぞれの回転数時における実際の機構温度も表中

に記述した。100 rpm 回転時においては 40 rpm 回転時と比べて供試体温度が 10℃ 程度高い。これがアウトガス量の違いの原因であると考えられる。

表 6 の値を求めるにあたって、どの TQCM 温度に対しても (2) 式を用いて冷媒管等吸着面の補正を行ったが、実際は (2) 式は温度に依存する。たとえば TQCM が -70℃ の時、アウトガスには色々な吸着エネルギーのものが混ざっているため、この時のアウトガス量には -70℃ になって初めて吸着したようなアウトガスも存在すると考えられる。このようなガスは -60℃ の冷却治具には吸着しないことになるので、TQCM -70℃ 時の治具吸着量補正は必要ない。表 6 は (2) 式に含むべき温度依存性を無視しているため、TQCM -70℃ 時の値は過大評価しており、上限値（安全側）になっている。

表 6. 高頻度回転駆動機構アウトガス測定値
(冷却治具吸着量補正済み)

TQCM 温度	-70 度	-45 度	-15 度	0 度
40rpm 回転時 (PMU 温度: 26℃)	1.69	1.42	0.55	0.32
100rpm 回転時 (PMU 温度: 36℃)	2.53	1.96	0.76	0.43

(数値単位: Hz hr⁻¹)

※バックグラウンド補正済み

5.2. アウトガス放出量と観測への影響

真空ポンプの排気および冷却治具の吸着を考慮して求めたアウトガス放出率を表 7 に示す。また、今回測定したアウトガスが冷却した検出器表面に堆積した場合に、観測にどの程度の影響があるかについて見積もるために、吸着した汚染物質の密度を 1 g cm⁻³ と仮定し、放出されたアウトガスが全て、検出器面 (10 cm² と仮定) に吸着すると仮定したときに、検出器面に堆積する汚染物質の堆積率を表 8 に示した。

汚染物質の堆積厚みがおよそ 0.3 μm 程度で、可視光や紫外線の透過率は 10% 程度低下すると考えられている¹²⁾。表 8 の値から、100 rpm 回転時 (機構温度 36℃ 時) において光学面 -70℃ においては、1.7 か月半程度で透過率 10% の低下を引き起こす計算となり、光学面 -45℃ では 2 か月、光学面 -15℃ では 6 か月、光学面 0℃ においては 10 か月程度で到達するという結果となった。もちろん実際の使用回転数は 60 rpm であり、機構の加熱も行わないことから、100 rpm での値は高頻度回転駆動機構からのアウト

ガスの上限値であると言える。以上より、光学面の温度を -70°C や -45°C という極めて低温で使用した場合は、2か月程度に一度のベーキングが必要となるが、 0°C 程度であれば1年弱に一度程度ベーキングを行えば良い計算になる。ベーキング頻度を半年に一度とした場合、光学面温度は -15°C や 0°C という温度であることが許容範囲となる。これより、本機構と -60°C などの低温に冷却した検出器の光学面は、同一の閉空間内に設置するのはコンタミ管理上得策ではない可能性がある。最新の SOLAR-C 望遠鏡の設計では、本機構は冷却した検出器と分離した空間で、周辺温度が常温の構造内に設置されている。

一方、観測装置内にあるアウトガス源は今回測定した高頻度回転駆動機構だけではなく、焦点調節機構や他にも多数の要素が存在することから、アウトガス量の総合的な評価も今後必要である。

表 7. 高頻度回転駆動機構のアウトガス放出量

TQCM 温度	-70 度	-45 度	-15 度	0 度
40 rpm 回転時 (PMU 温度: 26°C)	16.1	13.5	5.2	3.0
100 rpm 回転時 (PMU 温度: 36°C)	24.1	18.7	7.2	4.1

(数値単位: $10^{-8} \text{ g hr}^{-1}$)

表 8. 光学素子への汚染物質の堆積レート

TQCM 温度	-70 度	-45 度	-15 度	0 度
40 rpm 回転時 (PMU 温度: 26°C)	1.6	1.4	0.5	0.3
100 rpm 回転時 (PMU 温度: 36°C)	2.4	1.9	0.7	0.4

(数値単位: $10^{-4} \mu\text{m hr}^{-1}$)

6. まとめ

まず、これまでの高頻度回転駆動機構連続回転試験において、1000万回以上の確実な回転駆動動作が確認された。機構からのアウトガス量は、一年近くに渡ってほぼ一定値であったことが確認され、突発的なアウトガス量の変化などは確認されなかった。実際に測定されたアウトガス量は最大でも実測値で 1 Hz hr^{-1} 程度と少量に押さえられており、長期間にわたって低アウトガス状態で高頻度回転駆動機構を多数回安定して使用できることが確認された。これより、液体潤滑剤の多数回にわたる使用は、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も可能であることが示された。

今回導入した「新 TQCM 冷却治具」は、以前用いていた治具と比べると、冷媒配管へのアウトガス吸着量などが押さえられており、高精度のアウトガス測定に必要な性能を持っていることが確認できた。しかし、今回行った高頻度回転駆動機構からのアウトガス測定により、冷媒使用時にはある程度の吸着面になっていることが確認されているため、実際のアウトガス量を見積もるためには、冷媒配管への吸着量も考慮しなくてはならないが、これは4章にあるように容易にできる。

表 6 に冷媒配管への吸着量を考慮した高頻度回転駆動機構からの長期駆動試験中におけるアウトガスレートの平均値を示した。これより 1 Hz hr^{-1} 以下の測定値でも正確に測定できていることが分かる。一方、高真空下におけるベーキングを行ったにもかかわらず、 -70°C や -45°C と言った低温の光学面には 1 Hz hr^{-1} を越えるアウトガスが付着することが分かった。これは回転駆動機構動作時にはある程度の量のアウトガスが発生することを示している。100 rpm 時におけるアウトガスレートの方が 40 rpm 時比べて多いことから、機構本体の温度によってはアウトガスレートが増加することも意味している。これらのアウトガスの起源は機構潤滑油である可能性もあるが、機構設置時 (60°C ベーキング済み) において、すでにアウトガス量の増加が見られていることから、機構本体の各部材に付着している物質であるとも考えられる。高頻度回転機構全体は 60°C という低温でしかベーキングを行うことができないが、機構組み立て前に、各部材それぞれにおいて上限温度での高真空下ベーキングを行うことによって、これらのアウトガスを低減できる可能性がある。これは、フライト品開発において製造工程の検討にて考慮すべきである。また、質量分析計を用いてアウトガス物質の同定を行い、発生アウトガスが付着した際に発生する影響を評価することも重要である。

実際に光学素子面に堆積すると見積もられるアウトガス量は表 8 に示した通りである。観測装置内部にあるアウトガス源は今回測定した高頻度回転駆動機構だけではなく焦点調節機構や多数の要素が存在することから、全使用機器からのアウトガス量を考慮するとアウトガス量も膨大な量になってゆく可能性がある。これまでもアウトガス低減対策を施してきたが、今後とも高真空下におけるベーキング方法なども含めて、各機器に対してアウトガス低減対策を十分に行う必要がある。

謝辞

本評価実験は宇宙科学研究所理学委員会から SOLAR-C WG に交付された JAXA 戦略的開発研究経費の支援を受けて実施している。高頻度回転駆動機構開発においては JAXA 研究開発本部の小原新吾氏と三菱プレジジョン(株)にお世話になった。また、名古屋大学の今田晋亮氏、国立天文台の原弘久氏、坂東貴政氏には多数の助言を頂いた。

参考文献

- 1) 中山聡他：観測望遠鏡用の回転駆動機構の開発，第 55 回宇宙科学技術連合講演会，2A16，2011.
- 2) Shimizu, T. et al.: New developments in rotating and linear motion mechanisms used in contamination sensitive space telescopes, Proc. SPIE 9151, 915138, 2014.
- 3) Tsuneta, S. et al.: The Soft X-ray Telescope for the Solar-A mission, Solar Physics, 136, 37-67, 1991.
- 4) Golub, L. et al.: The X-Ray Telescope (XRT) for the Hinode Mission, Solar Physics, 243 (1), 63-86, 2007.
- 5) Culhane, J.L. et al.: The EUV Imaging Spectrometer for Hinode, Solar Physics, 243 (1), 19-61, 2007.
- 6) Tsuneta, S. et al.: The Solar Optical Telescope for the Hinode Mission: An Overview, Solar Physics, 249 (2), 167-196, 2008.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 鈴木峰男他：宇宙トライポロジーの最近の話題，トライポロジスト，第 44 巻，第 1 号，6-12，1999.
- 10) 清水敏文他：観測望遠鏡用の高頻度回転駆動機構の開発，第 54 回宇宙科学技術連合講演会，2010.
- 11) 今田晋亮他：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，宇宙航空研究開発機構研究開発報告，JAXA-RR-10-012，2011.
- 12) Tribble, A.C. et al.: Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community, NASA Contractor Report 4740
- 13) 渡邊恭子他：次期太陽観測衛星 Solar-C 搭載用機器のアウトガス性能とその測定，第 55 回宇宙科学技術連合講演会，1F03，2013.
- 14) 田村友範他：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.

- 15) 田村友範他：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クング結果報告，国立天文台報，8，21-28，2005.
- 16) Thermal Vacuum Bakeout Specification for Contamination Sensitive Hardware, MSFC-SPEC-1238, 1986.
- 17) 渡邊恭子他：次期太陽観測衛星 Solar-C 搭載用高頻度回転駆動機構のアウトガス性能，第 55 回宇宙科学技術連合講演会，2B02，2011.

