

低温真空中で使える機械要素の紹介

○池之上文吾、大淵喜之、齊藤栄、中本崇志、清水莉沙、
浦口史寛、小俣孝司、鈴木竜二、早野裕（国立天文台）

概要 (Abstract)

TMT の第一期観測装置である近赤外線撮像分光装置 IRIS の撮像部には低温真空中で動作するメカニズムが複数ある。これらのプロトタイプ試験の結果と共に、低温真空中で利用できるベアリングやリニアガイド、またそれらに施した固体潤滑などの機械要素について紹介する。

1. IRIS の簡単な紹介と真空低温中で動作するメカニズム

IRIS は TMT 望遠鏡の第一期観測装置で現在最終設計段階にある。クライオスタット（液体窒素温度）内部の上段に撮像系、下段に面分光器という構成になっており、我々日本の IRIS チームは上段の撮像系を担当している。IRIS 撮像系にはいくつか低温真空中で動作するメカニズムがある。フィルター交換機構のフィルターホイールを支えるベアリングやその駆動に用いるギアードモーター、コールドストップの直動ステージに用いているリニアガイドやウォームギア、同じく回転部分のベアリング、位置検出用のホール素子などである。図 1 に IRIS 撮像系の 3D CAD モデル（機構が見やすいよう一部ハウジングを省略している）と駆動部分の機械要素を示す。

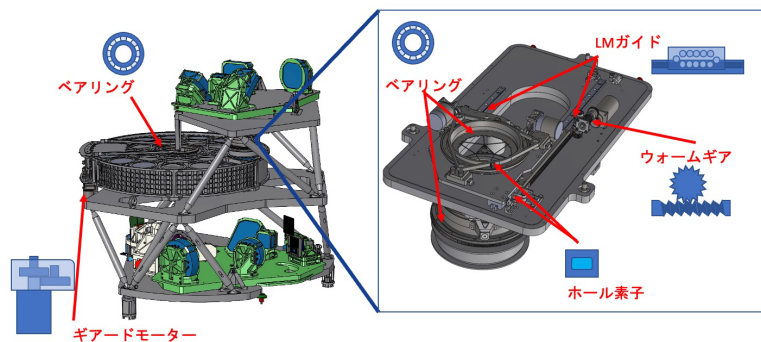


図 1 IRIS 撮像系 3D CAD モデルと駆動部分の機械要素。

右図上はコールドストップと呼ばれる機構。

2. 低温真空中で駆動する機械要素の耐久試験

IRIS 撮像系は低温真空中で運用され、組立調整の 3 年間及びその後初回メンテナンスまでの 10 年間、計 13 年間トラブルなく運用できることが要求されている。通常ベアリングなどメーカーが公表している寿命計算式はオイル等使用し良好な潤滑状態にある時のもので、オイル等使用できない低温真空中の寿命計算はできない。また、位置検出用のホール素子はメーカーが低温での動作を保証しているものではない。そこで実際に低温真空中で 13 年の運用に耐えるかプロトタイプ試験を行った。

1) ホール素子

Asahi Ksei Microdevices (AKM) 製の 4 種のホール素子について低温真空中で動作するか確認したところ HG-106A が動作した。HG-106A についての試験や位置検出の検討は[1]を参照。

2) ボール案内機構耐久試験

ベアリング、リニアモーションガイド、ボールネジなどボールが転動面を転がるボール案内機構についてプロトタイプ試験を行った。真空中にて、金属面を無潤滑で接触させるとコールドウェルドと呼ばれる現象が起こり、機構が動かなくなる。対策としてはボールと転動面を異素材にする、固体潤滑を施す、という2点が考えられる。そこで、ボールと転動面を同種金属(SS440C)無潤滑のもの、ボールを Si_3N_4 に変えたもの、ボールにMoSTTMコーティング^{*1}を施したものの3つの組み合わせでプロトタイプ試験を行った。試験は負荷相当のウェイトを取り付けた試験装置をクライオスタットの内部に設置し、クライオスタット外部よりトルクメーターを介して軸導入した軸を回転させ試験装置を駆動し、その際の負荷トルクをモニターする。ボール案内機構に異常が発生すればトルクの変化として検出できる。ボールネジ耐久試験の結果、同種金属(SS440C)無潤滑のものと Si_3N_4 ボールのものはトルク値が急激に変化しステッピングモーターが脱調し動かなくなった。ボールにMoSTTMコーティングを施したものはトラブルなく目標値である4,500,000mm、6mmを750,000往復、を超えて駆動できた。ボールネジ耐久試験の試験装置概略図と試験結果を図2と図3にそれぞれ示す。

ボールに MoST™ コーティングを施したリニアモーションガイドとベアリングもそれぞれ目標値（リニアモーションガイドは 18,000,000mm、100mm を 180,000 往復。ベアリングは直径 4inch ベアリングで ±360° を 5755 回。）を超えて駆動でき、耐久試験をクリアした。

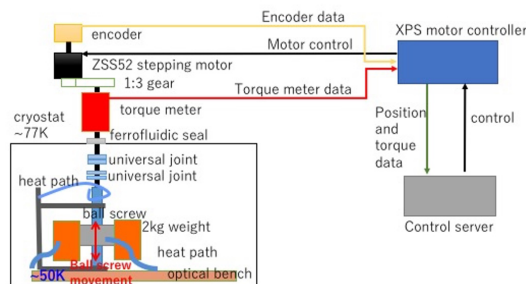


図2 ボールネジ耐久試験装置概略図。

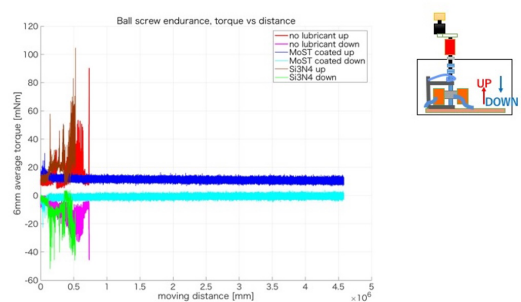


図3 ボールネジ耐久試験結果。

3) 超高分子量ポリエチレン (UHMW-PE) ギア

コールドストップの直動ステージはモーターがウォームギアを介してラックアンドピニオンを駆動するメカニズムを採用している。ウォームギアは減速比が大きくとれることとセルフロックできるというメリットがあるが、歯の接触面が大きいため摩擦熱や摩耗が発生しや

*1 MoST™ コーティングとは英国TEER社が独自開発したMoS₂と金属のコンポジットコーティング。

すいというデメリットがある。今回、ステンレスウォームとリン青銅ウォームホイール無潤滑、それらに MoS_2 パウダーコーティング、同じく両者にダイクロナイトコーティング、UHMW-PE ウォームとリン青銅ウォームホイール、の4つの組み合わせで試験を行った。試験に用いたクライオスタットは上記2) で述べたボール案内機構の試験に用いたものと同じものである。無潤滑のものは、目標値の1/10未満でステッピングモーターが脱調し停止。ウォームを観察するとウォームホイールが磨耗していた。 MoS_2 パウダーコーティングのものは、目標値の1/5未満でステッピングモーターが脱調し停止、同じくウォームホイールが磨耗していた。ダイクロナイトコーティングのものは目標値をクリアしたが、試験終了時の負荷が試験開始直後の1.5倍程度に増加し、ウォームホイールのダイクロナイトコーティングが一部剥がれ、そこに磨耗が見られた。UHMW-PE ウォームとリン青銅ウォームホイールの組み合わせは負荷の変化は無く、ウォームに顕著な摩耗も見られず、目標値を超えて駆動できた。また、フィルターホイールの駆動に用いるギアードモーターのギアボックスはUHMW-PEを一部使用した平歯車の組み合わせを用いたものを製作し、このギアードモーターも目標値を超えて駆動できた。

4) 繰り返し屈曲ケーブル及びサーマルリンク

コールドストップを光路へ出し入れするための直動ステージのストロークは200mmである。このステージ上には回転ステージ及び微動直動ステージ用のモーターが搭載されており、これらの配線と発熱を構造へ逃すサーマルリンクを何らかの形で直動ステージに搭載する必要がある。搭載時の形状をいくつか検討した結果、ステージを上部から見てU字に搭載することとした。U字形状はコンパクトに設置でき曲げ半径が変化しないという利点がある。ケーブルはGORE社のGSC-06-27305-00を使用、サーマルリンクは $16\mu\text{m}$ の銅箔を180枚重ねたものを自作した。耐久試験前に試験装置のバックグラウンド負荷測定の結果、U字形状にケーブルとサーマルストラップを搭載した直動ステージを低温にした際の負荷の増加は主にケーブルによるもので、サーマルストラップによる負荷増加はとても小さいということがわかった。耐久試験はケーブル及びサーマルリンクとも破損することなく目標値である200mmを11500往復を超えて駆動できた。図4にケーブル及びサーマルリンク試験装置の写真を示す。

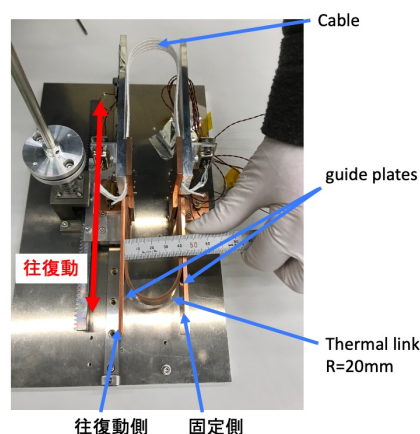


図4 ケーブル及びサーマルリンク試験装置。

5) ミニチュアハイブリッドベアリング

試験装置やプロトタイプに至る所に藤電子の各種ハイブリッドベアリングを使用している。これはボールはセラミック、転動面はステンレス、リテーナーはPTFEである。リテーナーが低温になった際に熱収縮で内輪に密着し、ベアリングが回転できなくなることを避けるため、一部切り込みを入れC字にカットして使用している。これまでの試験でこのベアリングが問題になったことはない。

3. 低温真空中使える機械要素とメーカー情報等まとめ。

上記2でいくつかのプロトタイプ試験と低温真空中で使える機械要素について述べた。表1に低温真空中で使える機械要素とメーカー情報等を示す。

表1 低温真空中で使える機械要素とメーカー情報等

機械要素	品番等	メーカー	メモ
ホール素子	HG-106A	Asahi Kasei Microdevices	数個であればサンプル提供してくれる。
ボール案内機構	ボールに MoST コーティン グ	国内では 安達新産業株式会社	2022/12 末でコーティング 事業終了。LO は 2022/9 末予 定。LM ガイドであれば、THK の個体潤滑 S 膜が同等品
ギア	UHMW-PE 製の の		
駆動部サーマルリンク	Stack of Cu foil	In-house	
駆動部ケーブル	GSC-06-27305-00	GORE 国内代理店は伯東	用途に合うサンプルあれば 提供してくれる。
ミニチュアハイブリッド ベアリング	各種	藤電子	

参考文献

- [1] 中本崇志他「IRIS撮像系の駆動機構のホール素子による原点出し・位置検出の検討」
第41回 天文学に関する技術シンポジウム