

RA 本体ユニット冷却実験

沖田博文 (東北大)

2009/8/24

1 実験目的

南極 40cm 赤外線望遠鏡はドームふじ基地の最低気温、 -80 でも確実に動作する事が求められているが実際にその環境での動作テストは行われていない。これは組み上げた状態で -80 まで冷却することのできる大型冷凍庫 (冷凍室) がないからである。しかし RA 本体部分のみであれば実験室の冷凍庫にぎりぎり入る。そこで RA 本体部分にウォームギヤ、ウォームホルダー、ギヤ Box、RA モーターを取り付け、できる限り南極での使用時と同じように部品を組み付け冷却し、 -80 で正しく動作するか調べる事にした。



図1 RA 本体ユニット全体を冷凍庫で -80 に冷却する

2 RA 本体ユニットの構造と実験の概要

南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 本体ユニットは 2009 年 05 月に IK 技研で行った軸受け改良により、図 2 のような構造となっている。材質は RA シャフトが鉄 S45C?、軸受けホルダーがジュラルミン A2017、本体 (箱) がアルミ A5052、ベアリングが鉄 SUJ2、ウォームホイールが砲金、ウォームネジが鉄 S45C?である。(表 1 を参照。) 常温 (20) から -80 へ冷却した場合、図 2 の垂直方向と水平方向でそれぞれ収縮が起こる。

まず垂直方向では RA シャフトは約 0.28mm 、軸受けホルダーは約 0.68mm 収縮する。その差およそ $0.4\text{mm}(250[\text{mm}] \times (27.3 - 11.2) \times 10^{-6}[\text{/K}] \times 100[\text{K}] \sim 0.4[\text{mm}])$ は下部の円柱ころ軸受けが軸受けホルダー内を下方方向へ動くことで影響をキャンセルできる筈である。

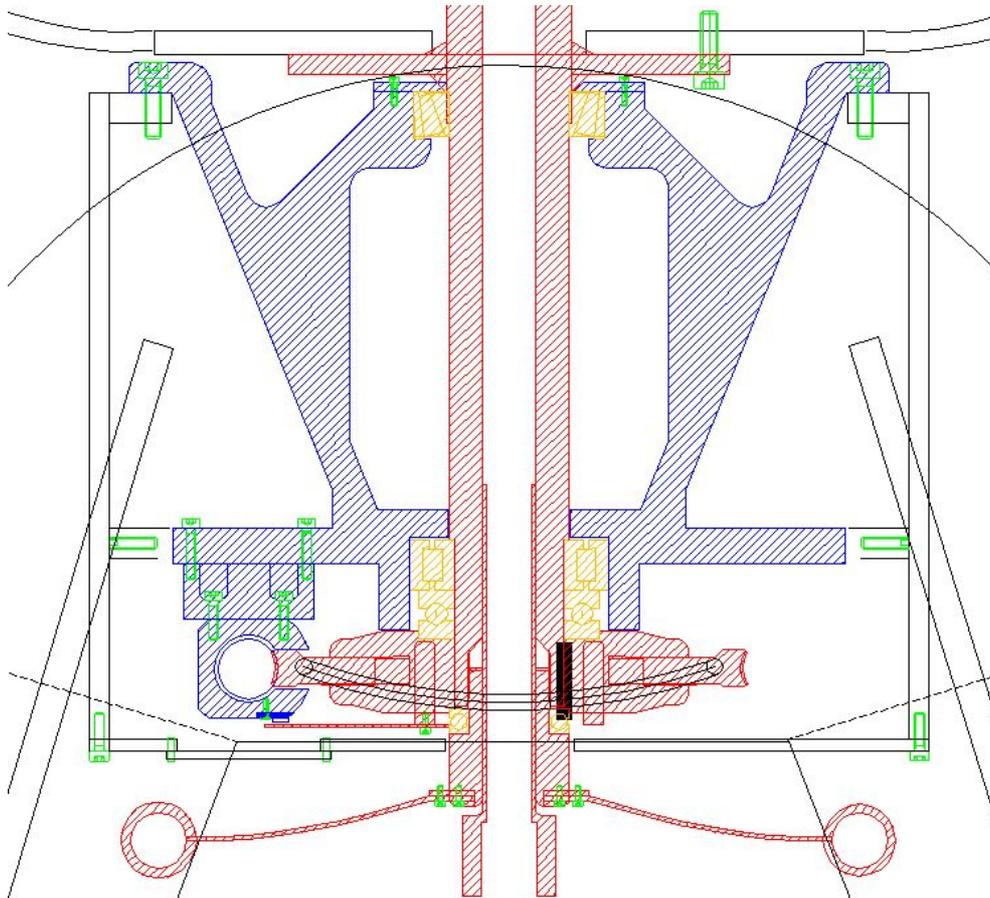


図2 RA 本体ユニット。赤色がRA シャフト、青色が軸受けホルダー、黄色がベアリングである。

水平方向は同様に RA シャフトとベアリングの間で最大 $0.01\text{mm}(60[\text{mm}] \times (12.8 - 11.2) \times 10^{-6}[\text{/K}] \times 100[\text{K}] \sim 0.01[\text{mm}])$ 隙間が減少し、回転が渋くなる。またウォームホイールとウォームネジのかみ合わせは約 0.11mm 減少 ($115[\text{mm}] \times (27.3 - 18) \times 10^{-6}[\text{/K}] \times 100[\text{K}] \sim 0.11[\text{mm}])$ する。

そこで今回の実験ではまずモーターユニットをつけない状態で RA 本体部分を -80 に冷却し、垂直方向・水平方向の収縮に対して設計通り正しく回転するかどうかを調べる。次にモーターユニットを取り付け、冷却環境下でウォームホイールとウォームネジのかみ合わせの変化に対してモーターが正しく回転するかどうかを調べる。

3 実験方法

南極 40cm 赤外線望遠鏡の RA 軸本体ユニット (モーターユニットは実験によって付けたり外したりした) を丸ごと日本フリーザー (株) 社製 CLN-70C 冷凍庫に入れ -80 まで冷却し実験を行った。後述する実験 A では CLN-70C 冷凍庫に表示される温度を読み取り、実験 B・C では RA モーターにカプトンテープで取り付けられた白金温度計で測定し、KEYENCE 社製データ収集システム NR-1000 に繋いでリアルタイムにその値を読み取った。

	材質	種類	熱膨張率
RA シャフト	鉄	S45C	11.2
ウォームネジ	鉄	S45C	11.2
ベアリング	鉄	SUJ2	12.8
軸受けホルダー	ジュラルミン	A2017	27.3
本体 (箱)	アルミニウム	A5053	23.9
ウォームホイール	砲金		18
(参考)	ステンレス	SUS304	17.3
	ステンレス	SUS430	10.4

表 1 各材質の種類と熱膨張率 ($10^{-6}/$)

実験は以下の 3 回行い、RA 軸の軸受けは-80 度でも正しく機能する (=回転する) かどうか、モーターの回転はきちんと伝達可能であるかどうかを調べた。

なお実験はそれぞれ 6 月 2 日~4 日、7 月 13 日~15 日、8 月 18 日~20 日に行った。また実験 C のみ、ウォームネジとウォームホルダーの間が最適になるよう、プラスチックハンマーを用いてモーターユニットを叩いて回転がスムーズになるよう-80 度で調整を行った。

実験 A RA 軸本体ユニット (モーターユニット無し) を-80 度に冷却し、手で軸が回るかどうか調べる

実験 B 常温でウォームネジとウォームホイールのかみ合わせがほとんど無い状態で全体を冷却し、-80 度でモーターが回転するかどうか調べる

実験 C 常温でウォームネジとウォームホイールを、最大限離れた状態で固定し全体を冷却、-80 度でモーターが回転するかどうか調べる

4 実験結果

4.1 実験 A

モーターユニットを外した状態で RA 軸本体ユニットを-80 度まで冷却した。

温度 ()	回転
+17	軽い力で回転 (スラスト方向に 1mm 程度ガタ有り)
-79	少し重いが手で十分回転可能 (ガタは無くなった)

表 2 実験 A 結果

4.2 実験 B

常温でウォームネジとウォームホイールのかみ合わせが最も「きつく」なるようモーターユニットを調整し固定した状態で RA 軸本体ユニットを-80 度まで冷却し、モーターを回転させ最大パルス数を記録した。

温度 ()	最大パルス数	コメント
-75.3	< 50	カチ、カチ、カチ、カチという音
-66.6	< 50	カッ、カッ、カッ、カッ、突っ掛かる音
-39.4	6000	

表 3 実験 B 結果

4.3 実験 C

常温でウォームネジとウォームホイールのかみ合わせが最も「ゆるく」なるようモーターユニットを調整し固定した状態で RA 軸本体ユニットを-80 ℃まで冷却し、モーターを回転させ最大パルス数を記録した。

なおウォームネジとウォームホルダーの隙間が最適になるよう、プラスチックハンマーを用いてモーターユニットを叩いて回転がスムーズになるよう-80 ℃で調整を行っている。

温度 ()	最大パルス数	コメント
-78.5	5500	W 方向のみ周期的なこすれる音
-72.8	7500	
-68.2	7500	はじめ 8000 で OK だったが 8500 をやった後 8000 も ×
-63.5	< 5500	はじめ 7500 で OK だったが金槌で隙間調整をすると ×
-30.4	< 500	トッ、トッ、トッ、トッ、という音
-15.7	< 500	少し動いてカッ、カッ、カッ、カッ
-5.8	< 500	
1.1	1000	たまに引っかかって脱調
8.1	2000	
30.1	-	W 方向のみ 5000 可、E 方向は 2000 で不可

表 4 実験 C 結果

5 考察

5.1 実験 A

RA 本体ユニットの軸受けが-80 ℃でも正しく機能する(=回転する)事がわかった。17 ℃でのガタは円筒ころ軸受けと軸受けホルダーの垂直方向の遊びを表しており、設計ではそれが-80 ℃で無くなるように作ったので設計通りうまく機能していることがわかった。

またベアリングも軸に対し計算上約 0.01mm 収縮するはずであるが、問題なく回転することが確認できた。実験 A で「少し重くなった」原因はおそらくこのベアリングの収縮だと思われる。が、実験の通り問題ないレベルであることが確認できた。

5.2 実験 B

常温でウォームネジとウォームホイールを十分にかみ合わせた状態ではモーターは回らないことがわかった。これは軸受けホルダーが RA 軸に対して 0.4mm、ウォームホイールに対して 0.1mm 収縮したことによってかみ合わせがきつくなり、全く回転しなくなったと考えられる。

垂直方向はモーターユニットの取り付けの際、スペーサーを入れることで対応可能であり、水平方向はウォームホイールとウォームネジの間隙を十分に確保して取り付けなければならないことがわかった。

5.3 実験 C

-60 前後から異音が生じてモーターが回らなくなった事に関して、後日分解し点検してみたところウォームネジの軸受け (砲金製) と軸が固着していた。その結果、ウォームホルダーは手で回すことができないくらい非常に固くなっており、これが脱腸の原因であると断定した。この固着を分解してみると軸・軸受け双方に傷が見られた。よってこれは異物混入が原因であると考えられる。異物は組立の時に混入したか、もしくはプラスチックハンマーでモーターユニットを叩いて隙間調整をした際に混入したと考えられる。よって-60 以降のデータは正しいデータとは言えない。



図 3 ウォームホルダー内、砲金軸受けについた傷

しかしながら、ウォームネジとウォームホルダーの間隙を十分に開けた今回の実験で、-78.5 で 5500 パルスで回転させることができたという事実は注目に値する。これから隙間調整さえ適切に行えば-80 の環境下でも RA モーターは回転することがわかったと言える。

6 まとめ

RA 軸本体ユニットを丸ごと-80 に冷却して軸が回転するか、モーターは駆動するかどうか調べた。実験から軸は-80 でも問題なく回転し、モーターも隙間調整さえ適切に行えば-80 でも回転することがわかった。

しかしウォームネジとウォームホルダーの間隙を大きくとればバックラッシュ量が大きくなる。また隙間調整だけでは垂直方向の熱収縮 0.4mm に対応できていない。小原歯車工業のカタログによると、バックラッ

シュ量は中心距離 (ウォームネジとウォームホイールの隙間) が大きくなると増大し、取り付け位置 (垂直方向の誤差) が大きくなるほど減少する。(ちなみにバックラッシュ量 0 だと歯車は回転しない。) 実験 C はただ単にウォームネジとウォームホイールの隙間を調整しただけなので、実際に熱収縮による隙間の減少について垂直方向、水平方向のどちらがより影響が大きかったかはわからない。

よって、-80 で RA 本体ユニットは駆動したが、モーターユニット取り付けの隙間に関しては、今後継続して対処法を検討する必要があるといえる。

7 参考文献

1. 鉄鋼材料選択のポイント、大和久重雄著、日本規格協会 (ISBN4-542-30342-X)
2. 各種物質の性質 金属 (固体)、株式会社八光ホームページ、<http://www.hakko.co.jp/qa/qakit/html/h01020.htm>
3. 各種材料の熱伝導率・線膨張係数、ビルトマテリアル株式会社ホームページ、<http://www.built-material.co.jp/catalog/pdf/YDR-109.pdf>
4. KHK 総合カタログ (KHK3008 VOL.4)、小原歯車工業株式会社
5. ステッピングモーター冷却実験、沖田博文 (2009/07/11 レポート)