

# ステッピングモーター冷却実験

沖田博文 (東北大)

2009/7/11

## 1 実験目的

南極 40cm 赤外線望遠鏡に使用するステッピングモーター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、 $-60$  以下では常温と同じように駆動しない。具体的には天体の追尾程度の低速回転は可能だが、導入時に必要な高速回転が低温環境では不可能になる。この時、モーターは入力されたパルス数 (= 同期速度) に回転が追従出来ず、「脱調」と呼ばれる現象が起きている。ひとたび脱調が起こると自力で同期速度に復帰する事はほぼ不可能であるため、脱調しない速度でモーターを回転させる事が絶対条件となる。しかしモーターの回転を落とせば天体の導入に必要な時間が増え、観測効率が低下する。

そこで今回の実験は温度、入力パルス数を変えてモーターがどのような条件であれば駆動するのかを調べた。

## 2 モーターユニットの構造

南極 40cm 赤外線望遠鏡に使用している RA・Dec 駆動用モーターはオリエンタルモーター (株) 社製「CSK564AP-T20」である。これは 5 相ステッピングモーターで  $1/20$  に減速するギヤード (ギヤ Box) がモーターに直に取り付けられており、フルステップ駆動の場合 10,000 パルスで 1 回転する。(なお 1 つの相に来るパルスの周期は 10 ステップに相当する。)

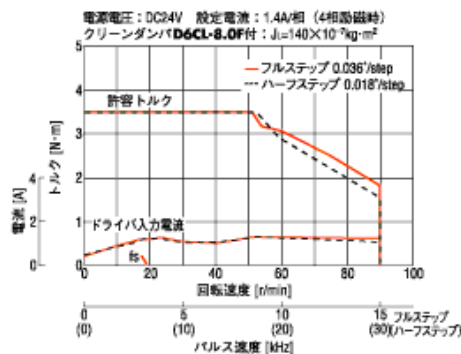


図 1 CSK564AP-T20 の回転速度-トルク特性。オリエンタルモーター (株) カタログより転載。

そしてモーター + ギヤ Box は IK 技研 (株) 製のウォームネジホルダーに、RA 軸は直接、Dec 軸は 2/3 に減速する平ギヤを介して回転を伝達する構造となっている。

なお「モーター + ギヤ Box + ウォームネジホルダー」の事を特にこのレポートでは「モーターユニット」と呼ぶ事にする。

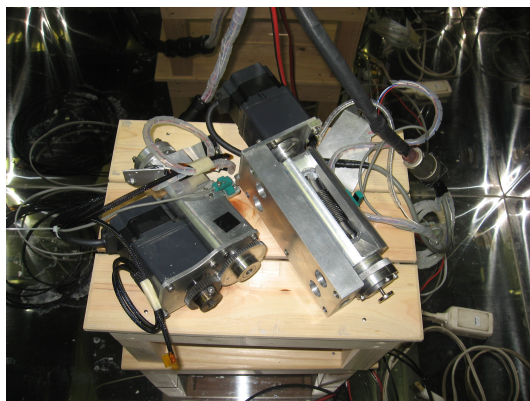


図 2 冷凍庫内のモーターユニット。左側が Dec 用 (2/3 に減速)、右側が RA 用 (直接接続)。

### 3 原理

常温で正常に動作するモーターユニットが低温では脱調してしまう原因として以下のものが考えられる。

1. モータートルクの減少
2. モーターの内部抵抗の増加
3. ギヤ Box の内部抵抗の増加
4. ウォームネジホルダーの内部抵抗の増加

まず 1 のモータートルクの減少であるが、カタログには温度変化によってトルク特性が変化する旨の記載が無く詳細は不明である。

次に 2~4 の内部抵抗の増加とは、

- 熱収縮率の違いから来るギヤ・ベアリング等の隙間の減少
- グリスの粘性の増加

によるものと考えられ、内部抵抗の増加によって回転に必要なトルクも増加しそれがモータートルクより大きくなり脱調すると考えられる。

ここでこのレポートでは簡単の為、2~3 の内部抵抗をすべて 1 つの「内部抵抗」として扱い、モータートルクとこの「内部抵抗」の温度依存性と回転数 (パルス数) 依存性を調べることにする。

ところで温度と回転数に依存する内部抵抗の原因として「粘度」を考えることにする。これは軸受けには回転する以上必ず隙間があり、またその隙間はグリスによって潤滑されていることから、「グリスの粘度」と「軸受けの隙間」が温度に依存すると考えられるからである。また、以降の議論にもあるように粘度は速度、つまり「回転数=パルス数」にも依存するので、今回のモデル化では都合がよい。

「粘度」は流体の教科書によると厚さ  $h$  の液体をはさんだ面積  $S$  の 2 枚の板が相対速度  $v$  で運動する時、板と液体にかかる力  $F$  と定義され、

$$F = \mu \frac{S}{h} v \quad (1)$$

である。ここで  $\mu$  は粘度である。

これを今回のモーターユニットに適用する。板と液体の相対速度  $v$  は単位時間に  $n$  回転する半径  $r'$  の軸の接線の速度だと言え、1 回転に必要なパルス数を  $P_c$ 、単位時間あたりの入力パルス数を  $P$  とすると、

$$v = 2\pi r' \frac{P}{P_c} \quad (2)$$

と書き直すことができる。

ところで粘度  $\mu$  は絶対温度  $0K$  で  $\infty$  になる事が予想されるので

$$\mu = \mu(T) = C_\mu T^{-\alpha} \quad (3)$$

軸受けと軸の間隙  $h$  はある温度  $T_C$  で  $h = 0$  となるとすると

$$h = h(T) = C_h(T - T_C) \quad (4)$$

と書く事が出来る。 $C_\mu$  と  $C_h$ 、 $\alpha$  は比例定数である。

よって (1) 式で与えられた力  $F$  は温度とパルス数の関数として以下のように書ける。

$$\begin{aligned} F = F(T, P) &= 2\pi r' \mu(T) \frac{S}{h(T)} \frac{P}{P_c} \\ &= 2\pi r' \frac{S}{P_c} \frac{C_\mu}{C_h} T^{-\alpha} (T - T_C)^{-1} P \end{aligned} \quad (5)$$

また (単位時間あたりの) トルクは  $N = F \times r'$  であるので、

$$\begin{aligned} N(T, P) &= |F(T, P) \times r'| \\ &= 2\pi r'^2 \frac{S}{P_c} \frac{C_\mu}{C_h} T^{-\alpha} (T - T_C)^{-1} P \\ &= CT^{-\alpha} (T - T_C)^{-1} P \end{aligned} \quad (6)$$

ただし  $C = 2\pi r'^2 SC_\mu / P_c C_h$  である。

よってある温度  $T$  でパルス数が  $P$  の時にモーターが脱調したのであれば、内部トルク  $N(T, P)$  がモーターの許容トルク  $N_a(T, P)$  を超えたと考える事ができ、

$$N(T, P) > N_a(P) \quad (7)$$

と言える。このことから脱調するパルス数  $P$  を温度  $T$  の関数で書くと、

$$P(T) = \frac{N_a(T, P)}{C} T^\alpha (T - T_C) \quad (8)$$

と書ける。よって様々な温度で脱調パルス数を測定する事で許容トルク  $N_a(T, P)$ 、粘性  $\mu$  の温度依存性、熱収縮によって軸受け間の隙間が無くなる温度  $T_C$  を求める事が出来る。

## 4 実験方法

RA、Dec それぞれのモーターユニット (モーター + ギヤ Box + ウォームネジホルダー) を日本フリーザー (株) 社製 CLN-70C 冷凍庫に入れ-80 まで冷却し、その後冷凍庫のスイッチを切り、冷凍庫内の温度上昇にあわせて適時脱調パルス数を測定した。モーターの駆動パルス数は (株)Xtron 製 R2-2007-SV 望遠鏡コントロールで変更した。([R2SV Controller] [System Data] [ speed])

なおパルス数は 500[パルス/sec] 単位で変更した。脱調パルス数は、例えば 4000 パルスで回転し 4500 パルスで脱調したとすると脱調しない最大パルス数は 4000 以上 4500 以下であると言える。つまり測定精度の分解能は 500 パルスであると言える。しかし今回は安全を見て脱調しない最大パルス数を下限値、つまりこの例えでは 4000 パルスとする事にする。

また温度は RA ウォームネジホルダ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た。白金温度計は 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。

## 5 実験結果

測定温度での脱調しない最大パルス数。測定は 500[パルス/sec] 毎に行い、以下の表では脱調しなかった最大の測定パルス数を脱調しない最大パルス数とした。また Dec パルス数に見られる\*印は、モーターの定格最大回転パルス数が 15000[パルス/sec] である為、これ以上大きなパルス数を入力できなためによる。この為、\*印の付いた値は脱調しないパルス数の下限値である。

温度 ( )	温度 (K)	RA パルス数	Dec パルス数
-79.7	194.75	4000	5000
-74.6	198.55	5000	7500
-70.2	202.95	5500	8500
-65.3	207.85	8000	10500
-58.4	214.75	8500	11000
-55.0	218.15	9500	12500
-49.8	223.35	11000	15000*
-45.2	227.95	11000	15000*

## 6 考察

図3は脱調しない最大パルス数を温度の関数として示したものである。ここで(8)式を今回の実験結果にフィッティングさせると、

$$\begin{aligned}
 \frac{N_a(T, P)}{C} &_{RA} = 229.471 \\
 \alpha_{RA} &\ll 10^{-30} \\
 T_{CRA} &= 177.151 \\
 \frac{N_a(T, P)}{C} &_{Dec} = 330.836 \\
 \alpha_{Dec} &\ll 10^{-30} \\
 T_{CDec} &= 178.295
 \end{aligned} \tag{9}$$

となり、脱調しない最大パルス数は温度の一次関数になっていることが分かった。これはモーターユニットに使用しているグリスの粘度が実験をした温度域(-80 ~ -45)では殆ど変わらず、またこの温度域、パルス数の範囲でモーターの許容トルクも温度やパルスの関数ではなくほぼ一定値になると考えられるからである。

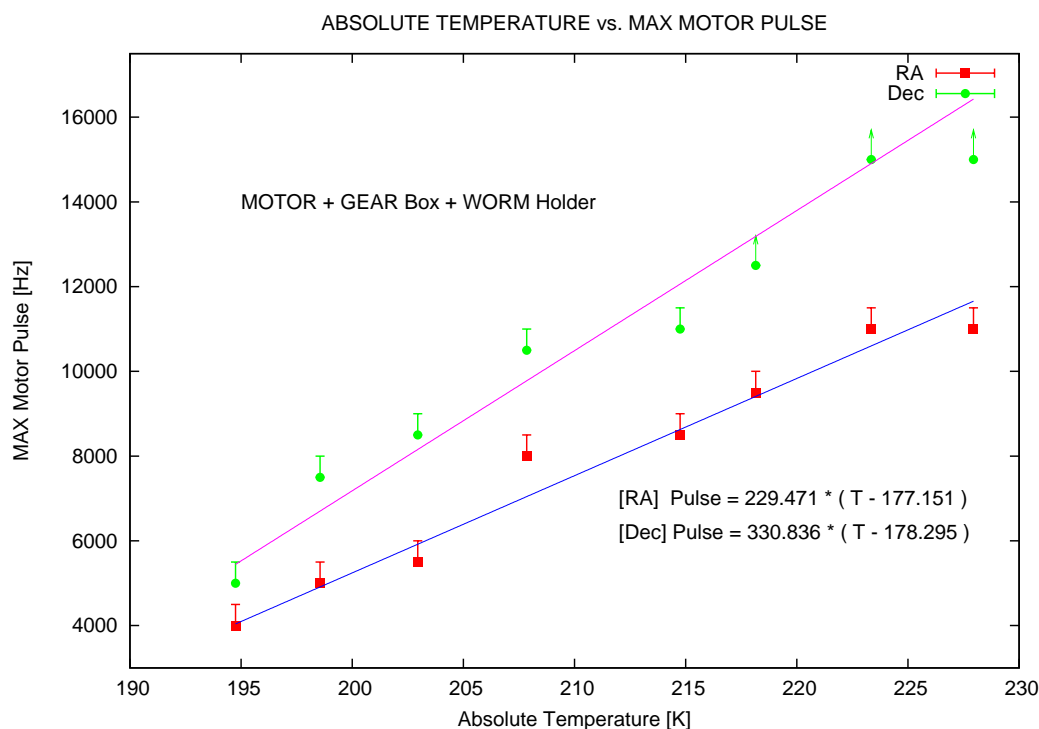


図3 脱調しない最大パルス数と温度の関係。フィッティングはgnuplotによる。

よって内部トルクが大きくなる原因は熱収縮による隙間の減少であると結論づけられる。今回のモデル化が正しいとするとおおよそ-100で軸受けの隙間が無くなり、全く回転できなくなる事が予想される。これはギヤBoxを液体窒素に入れて-196まで冷却した時に、全く回転させる事が出来なかったという実験と矛盾しない。(「ギヤBoxとベアリングの液体窒素冷却実験」参照。)

また、RA モーターユニットと Dec モーターユニットで値が大きく違う点については、構造の違いによるものと考えられる。Dec モーターユニットは回転速度を  $2/3$  に減速する平ギヤを介してウォームネジホルダーに回転を伝達する。よって同じパルス数であれば Dec ウォームネジホルダーで生じる内部トルクは RA ウォームネジホルダーの  $2/3$  となり、Dec モーターユニットの方がより大きなパルス数でも脱調しないと考えられる。

## 7 まとめ

今回の実験結果から、南極ドームふじ基地の最低気温である $-80$  では  $3670[\text{パルス}/\text{sec}]$  以上で調する事が分かった。よってモーターは  $3500[\text{パルス}/\text{sec}]$  程度以下に設定する必要がある。これは恒星時のおよそ 90 倍であり、望遠鏡の向きを  $180^\circ$  変えるのには 8 分必要となる。小型望遠鏡としては極めて遅いと言わざるを得ない。しかし現在の構造のまま、温度コントロールをしなくとも $-80$  で確実に動作する方法を今回の実験で確立出来た事は重要である。

## 8 参考文献

1. 南極用望遠鏡コントローラ R2-2007-SV 取扱説明書 (Ver.1.08)、株式会社エックス電子設計
2. オリエンタルモーター総合カタログ 2007/2008、オリエンタルモーター株式会社
3. 南極 40cm 望遠鏡のビデオディックモーションの測定と考察、沖田博文 (2008/10/22 レポート)
4. 南極 40cm 望遠鏡の駆動パルスカウント、沖田博文 (2009/01/22 レポート)
5. ギヤ Box とベアリングの液体窒素冷却実験、沖田博文 (2009/07/09 レポート)
6. モーターユニット等の脱脂・グリスアップについて、沖田博文 (2009/07/09 レポート)