

冷却下での ANIR 用モーターの特性実験

児島和彦

平成 19 年 2 月 2 日

1 目的

前回までは ANIR 用モーターの常温環境での特性を調べた。しかし、実際にはこのモーターは液体窒素温度程度に冷却した環境で使用される。そこで、ANIR 用モーターの冷却下での特性 (pullin トルク) を調べ、実際にフィルターホイールが回転できるか考察する。

2 方法

前回までの実験では、モーターをデュワーの外に出した上、常温環境での特性を調べた。低温下での特性を調べるにはモーターをデュワーの中に入れ、軸だけをデュワーの外に導き、これまでと同じ方法で pullin トルクを測定した。最後に常温でのモーターのトルクと低温でデュワー内にあるモーターのトルクを測定して比較することにより、実際に使用する際のモーターのトルクを推定することにする。

この実験で使用したモーターは前回まで使用していたモーターを、低温で使用できるように改造したものである。また、この実験ではモーターは直列にしてある。また、この実験ではマイクロステップは一切使っていない。

3 実験と結果

まず、常温でモーターをデュワー内に入れモーターを動かすと、0.2A から安定的に回転した。0.1A でも回転することはあるが、軸受けの摩擦により回転が止まることがあり、安定しなかった。次に、真空を引いて液体窒素を注入し、モーターを冷却した。100K 程まで温度が下がった頃に再びモーターを動かしてみると、0.4A から安定して回転した。このようにモーターの回転力が小さくなり、より大きな電流でなければ安定して回転しなくなった原因としては、極低温下でモーター内部の磁力が弱まる可能性、モーター内部の部品の熱膨張率が異なるために、冷却した際に部品間で摩擦が起きる可能性などが考えられる。

そこで、最初に常温でデュワー内のモーターの pullin トルクを測定した。

表 1: 常温、デュワー内、0.4A での測定結果

デュワー内、常温					
軸半径		8.0mm			
電流		0.4A			
ゴム		直列 4 個		直列 6 個	
rps	Hz	kg	mNm	kg	mN
0.5	50	0.142	11.1	0.144	11.3
1.0	100	0.142	11.1	0.144	11.3
1.5	150	0.164	12.9	0.163	12.8
2.0	200	0.160	12.5	0.159	12.5
2.5	250	0.150	11.8	0.151	11.8
3.0	300	0.153	12.0	0.146	11.4
3.5	350	0.145	11.4	0.143	11.2
4.0	400	0.141	11.1	0.140	11.0
4.5	450	0.132	10.3	0.136	10.7
5.0	500	0.134	10.5	0.133	10.4

デュワー内からデュワー外に軸を出すときの摩擦はほぼ 0 である。

表 2: 低温、デュワー内、0.4A での測定結果

デュワー内、低温～100K													
軸半径		8.0mm											
電流		0.4A											
ゴム		直列 4 個				直列 6 個				直列 8 個			
rps	Hz	左：限界荷重 (kg)、右：限界トルク (mNm)											
0.5	50	0.110	8.6	0.108	8.5	0.113	8.9	0.111	8.7	0.111	8.7	0.106	8.3
1.0	100	0.109	8.5	0.122	9.6	0.123	9.6	0.109	8.5	0.108	8.5	0.111	8.7
1.5	150	0.123	9.6	0.124	9.7	0.107	8.4	0.111	8.7	0.116	9.1	0.120	9.4
2.0	200	0.112	8.8	0.123	9.6	0.130	10.2	0.119	9.3	0.113	8.9	0.118	9.3
2.5	250	0.127	10.0	0.124	9.7	0.125	9.8	0.129	10.1	0.121	9.5	0.118	9.3
3.0	300	0.125	9.8	0.125	9.8	0.102	8.0	0.117	9.2	0.114	8.9	0.118	9.3
3.5	350	0.124	9.7	0.123	9.6	0.114	8.9	0.118	9.3	0.113	8.9	0.118	9.3
4.0	400	0.121	9.5	0.112	8.8	0.113	8.9	0.108	8.5	0.113	8.9	0.119	9.3
4.5	450	0.110	8.6	0.113	8.9	0.082	6.4	0.107	8.4	0.106	8.3	0.105	8.2
5.0	500	0.094	7.4	0.097	7.6	0.080	6.3	0.094	7.4	0.088	6.9	0.100	7.8

これらの結果をまとめると、次のようになる。

表 3: デュワー内での測定結果のまとめ

デュワー内						
軸半径	8.0mm					-
電流	0.4A					-
温度	常温		低温		-	
回転速度	パルス	平均	標準偏差	平均	標準偏差	比 (常温/低温)
rps	Hz	mNm	mNm	mNm	mNm	-
0.5	50	11.2	0.078	8.6	0.178	1.30
1.0	100	11.2	0.078	8.9	0.495	1.26
1.5	150	12.8	0.039	9.2	0.486	1.39
2.0	200	12.5	0.039	9.3	0.478	1.24
2.5	250	11.8	0.039	9.7	0.286	1.22
3.0	300	11.7	0.274	9.2	0.610	1.27
3.5	350	11.3	0.078	9.3	0.322	1.22
4.0	400	11.0	0.039	9.0	0.344	1.22
4.5	450	10.5	0.157	8.1	0.794	1.30
5.0	500	10.5	0.039	7.2	0.513	1.46

これをグラフにすると、次の様になる。

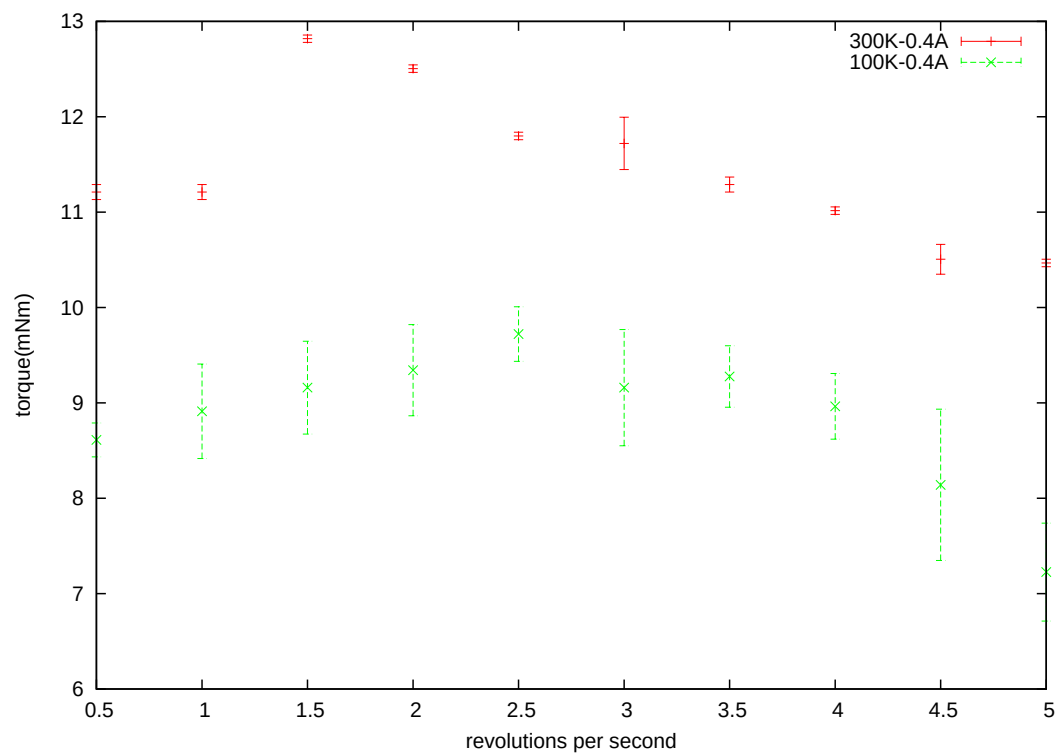


図 1: 0.4A での測定結果

また、常温と低温での保持トルクを測定すると、次の様になった。

表 4: 保持トルクの測定

電流	0.4A	0.3A	0.2A	0.1A	0A	平均
低温 (100K)	45.5mNm	38.2mNm	31.8mNm	25.1mNm	16.4mNm	-
常温 (300K)	49.8mNm	42.7mNm	34.0mNm	28.8mNm	19.3mNm	-
比 (常温/低温)	1.09	1.12	1.07	1.15	1.18	1.12

4 考察

常温での試験を行ったモーターをモーター 1、この実験で使用したモーターをモーター 2 とする。二つのモーターは両方改造してあるが、製品の規格が若干異なる。モーター 1 の常温での保持トルクは

表 5: モーター 1 の常温保持トルク

電流	0.2A	0.1A	0A
保持トルク	19.3mNm	11.1mNm	4.3mNm

であった。0A の保持トルクとは、モーター内部の永久磁石とコイルの鉄芯が引き合う力によって生じている。各電流値の保持トルク N_i から、0A での保持トルク N_0 を引くと、その値は理想的には電流に比例すると考えられ、次のようになる。

表 6: モーター 1 の常温保持トルク ($N_i - N_0$)

電流	0.2A	0.1A	0A
$N_i - N_0$	15.0mNm	6.8mNm	0mNm

確かに $N_{0.2} - N_0$ は $N_{0.1} - N_0$ のほぼ二倍になっている。つぎに、モーター 2 についても同様な操作を行うと、次のようになる。

表 7: モーター 2 の保持トルク ($N_i - N_0$)

電流	0.4A	0.3A	0.2A	0.1A	0A
低温 (100K)	29.1mNm	21.8mNm	15.4mNm	8.7mNm	0mNm
常温 (300K)	30.5mNm	23.4mNm	14.7mNm	9.5mNm	0mNm

モーター 1 の場合のような理想的な線形性はないが、線形に近くなっている。この表では、 $N_i - N_0$ の値は低温の場合と常温の場合でほぼ等しくなっている。つまり、モーターの磁力は常温と低温ではほぼ同じことが予想される。もしモーターの磁場が弱くなっている場合、図 1 の 100K の曲線は 300K の曲線よりも傾きが緩やかであることが予想されるが、実際は並行移動に近い。この結果もモーターの磁場の強さは常温と低温ではほぼ変わらないことを示している。

今までの実験で常温・冷却下でのモーターのトルクを調べてきたが、実験から予想されるトルクが実際にフィルターホイールを回転させることができるか計算する。デュワー内ではフィルターホイールを次のようにして回転させる。

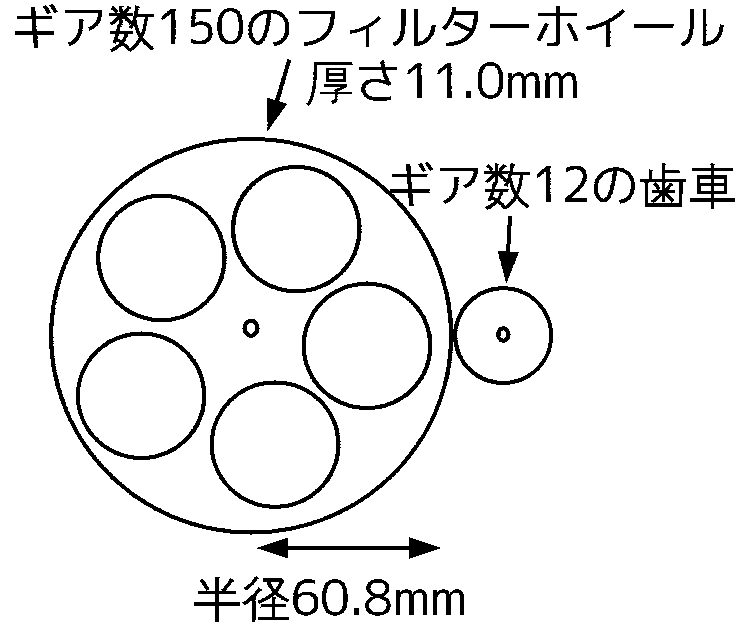


図 2: フィルターホイールの回転方法

このフィルターホイールを全体がアルミニウムでできていると仮定して、慣性モーメント I を求める。フィルターホイールの半径 r_0 、厚さ h 、密度 ρ とすれば

$$I = \int \rho r^2 dx^3 \quad (1)$$

$$= \int \rho r^2 r dr d\theta dz \quad (2)$$

$$= 2\pi\rho h \int r^3 dr \quad (3)$$

$$= \frac{\pi}{2} \rho h r_0^4 \quad (4)$$

アルミニウムの密度は $2.7g/cm^3 = 2.7 \times 10^3 kg/m^3$ なので、その他の変数も代入すれば

$$I = 6.375 \times 10^{-4} (kg \cdot m^2) \quad (5)$$

となる。モーターの回転開始時のパルスの発生加速度はコントローラで指定できる。例えば 500ms/kHz に指定すると、モーターの角加速度 $\ddot{\theta}$ は、このモーターが 100 パルスで一回転することに注意して、

$$\ddot{\theta} = \frac{2\pi \times 10^3}{0.500} \times \frac{1}{100} \quad (6)$$

$$= 125.66 (rad/s^2) \quad (7)$$

となる。したがって、フィルターホイールを回転させるのに必要なトルクは

$$I\ddot{\theta} = 8.011 \times 10^{-2} (Nm) \quad (8)$$

フィルターホイールと歯車のギア比は 150:12 なので、モーターに必要なトルクは $6.409 \times 10^{-3} (Nm)$ である。0.4A でのモーターのトルクは 10mNm 程度であるので、フィルターホイールを回転させることは十分可能であることが分かる。