

# 脱調レスステッピングモーターユニット ARシリーズの低損失化技術

佐藤 靖雄

*Lower losses technology for the AR Series closed loop stepping motor and driver package*

Yasuo SATO

The **AR** Series was developed for satisfying the demand for high-speed operation and continuous operation. Lowering the losses of the motor and driver enabled continuous operation that had been previously impossible. The motor and driver package losses of the **AR** Series have been reduced by 67% at its peak compared with the existing product. The motor loss has been reduced by 73% and the driver loss by 26% respectively. In addition, when the running losses of the **AR** Series is compared with that of a servomotor of the same size, it was understood that the losses of the **AR** Series is lower in case of short positioning distance. Then, it can be expected an expansion of the stepping motor's usage in which only a servomotor has been used for a continuous operation and other uses due to the heat generation problem, but also a servomotor has caused a problem with heat generation, etc. This article explains the technology of lowering iron losses of the stepping motor as the technology for lowering the losses of the **AR** Series.

## 1. はじめに

ステッピングモーターはオープンループで速度と位置を正確に制御できるモーターで、簡単に使用できるという利点がある一方、高速回転時の発熱が大きいという欠点がありました。従来は停止時保持力や低速トルクを利用した使い方が多く、モーターへの要求は高トルク化が中心でしたが、近年は装置のタクトタイム短縮のため、高速運転や連続運転ができることが要求として高まってきました。その要求に応えるために開発された製品が、脱調レスステッピングモーターユニットARシリーズです<sup>(1)</sup>。

従来品に比べ、ドライバ損失、モーター損失ともに低減されていますが、ここでは、ARシリーズの低損失化技術としてステッピングモーターの低鉄損化技術を中心に説明します。

さらに、位置決め運転時の損失をサーボモーターと比較した結果についても紹介します。

## 2. ステッピングモーターユニットの損失

### 2.1. 損失の分類

モーターが回転しているときのユニット損失を分類すると、図1のようになります。ユニット損失はドライバ部で発生するドライバ損失とモーター部で発生するモ-

ーター損失に大別されます。

モーター損失の大部分は銅損と鉄損です。銅損はステータ（電機子）に電流が流れることにより発生する損失であり、鉄損は鉄心中の磁束が変化することにより発生する損失です。

鉄心中の磁束はロータ（界磁）の回転、またはステータ（電機子）の電流変化により変化しますので、鉄損は、界磁による鉄損と電機子による鉄損に分類することができます。以降、前者を界磁鉄損、後者を電機子鉄損と呼びます。

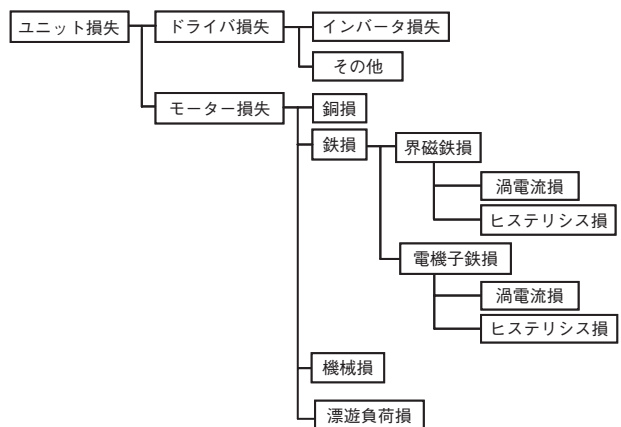


図1 損失の分類

また、鉄損はその損失の発生原理から渦電流損とヒステリシス損に分類できます。渦電流損は鉄心に流れる渦電流による損失であり、ヒステリシス損は鉄心のヒステリシス特性による損失です。

その他の損失として、機械損や漂遊負荷損があります。しかし、鉄損や銅損と比較して小さいため、ここでは無視し、鉄損に含めて考察を進めます。

2.2. 界磁鉄損

図2にステッピングモーターの構造を示します。ハイブリッド型ステッピングモーターはロータに永久磁石を使用しており、ロータ鉄心の外周とステータ鉄心の内周に小歯が設けられています。ロータが回転すると、小歯どうしが周期的に対向し、ステータ鉄心中の磁束が周期的に変化するため、鉄損が発生します。これは前述のように界磁鉄損と呼ばれています。

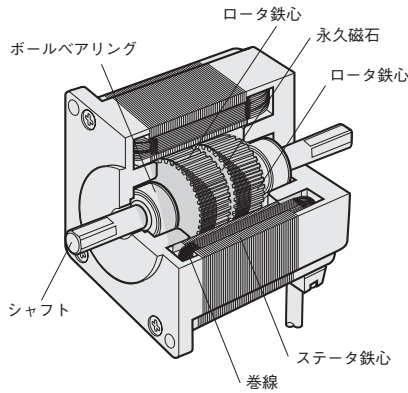


図2 ステッピングモーターの構造図

図3に界磁鉄損の測定システムを示します。外部駆動モーターと被測定モーターの間にトルク計を挿入し、外部からロータを回転させます。そのときの回転速度とトルクを測定し、式(1)で鉄損を計算します。

$$W = (2\pi / 60) \cdot N \cdot T \quad \dots\dots\dots (1)$$

- W：界磁鉄損[W]
- N：回転速度[r/min]
- T：トルク[N・m]

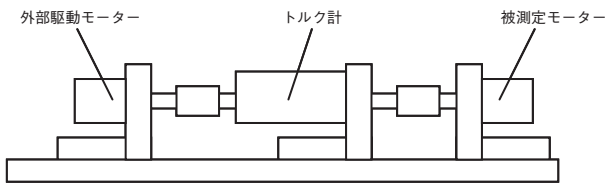


図3 界磁鉄損の測定システム

前述のように、鉄損は渦電流損とヒステリシス損からなっており、単位質量あたりの損失は、それぞれ以下のように表されます。

$$W_e = k_{fe} \cdot B_m^2 \cdot t^2 \cdot k^2 \cdot N^2 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$W_h = k_{fh} \cdot B_m^{1.6} \cdot k \cdot N \quad \dots\dots\dots (3)$$

- W<sub>e</sub>：渦電流損[W/kg]
- W<sub>h</sub>：ヒステリシス損[W/kg]
- k<sub>fe</sub>、k<sub>fh</sub>：材料によって決る鉄損定数
- t：電磁鋼板の厚さ[mm]
- k：ロータ小歯数による定数
- B<sub>m</sub>：磁束密度[T]
- N：回転速度[r/min]

これらの式から、渦電流損は回転速度の2乗に比例し、ヒステリシス損は回転速度に比例することがわかります。鉄損は、渦電流損とヒステリシス損の和ですから、回転速度の1～2乗に比例することになります。

従来品 (AS66AAE) の界磁鉄損の測定結果を図4に示します。近似的に式(4)で表され、回転速度の1.44乗に比例することがわかります。

$$W = 7.84 \times 10^{-4} \cdot N^{1.44} \quad \dots\dots\dots (4)$$

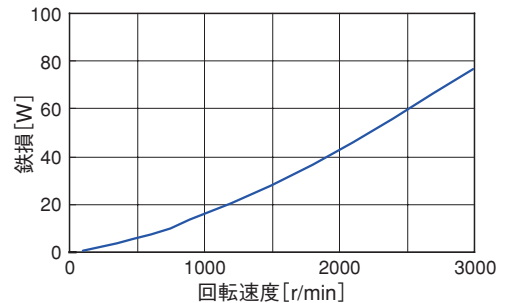


図4 従来品の界磁鉄損

2.3. モーター損失と損失の分離

図5に損失測定の構成図を示します。電源とドライバ間、ドライバとモーター間に電力計を挿入して、電力および電流を測定します。ドライバ入力、モーター入力、および出力をそれぞれ、P<sub>d</sub>、P<sub>m</sub>、P<sub>o</sub>とします。ドライバ入力と出力の差がユニット損失W<sub>u</sub>となり、モーター入力と出力の差がモーター損失W<sub>m</sub>となり、それぞれ次の式で表されます。

$$W_u = P_d - P_o \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$W_m = P_m - P_o \quad \dots\dots\dots (6)$$

ドライバ入力とモーター入力の差がドライバの損失W<sub>d</sub>となり、次の式で表されます。

$$W_d = P_d - P_m \quad \dots\dots\dots (7)$$

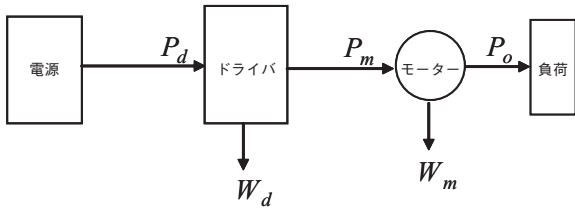


図5 損失測定構成図

ステッピングモーターは負荷に関係なく一定の電流が流れるようにドライバで制御されています。そのためサーボモーターなどとは異なり、負荷が小さいほど損失は大きくなります。したがって、ステッピングモーターの損失の評価は、無負荷が最も厳しくなります。式(5)、式(6)において $P_o=0$ とすると、ドライバ入力はすべてユニット損失になり、モーター入力はすべてモーター損失となります。

図6に従来品の無負荷損失を示します。ドライバの損失に比較して、モーターの損失の割合が大きいことがわかります。

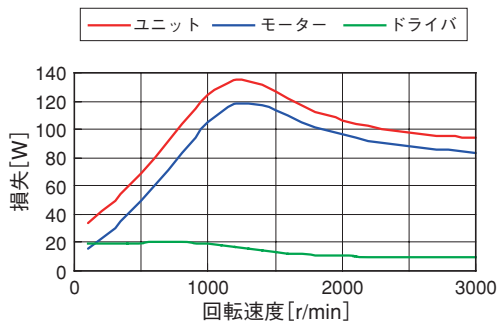


図6 従来品の無負荷損失

次に、モーター損失の分離について説明します。モーターの銅損は式(8)で計算できますので、鉄損は式(9)のようになります。

$$W_c = n \cdot I^2 \cdot R \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$W_{fe} = W_m - W_c \quad \dots\dots\dots (9)$$

$W_c$ : 銅損[W]

$W_{fe}$ : 鉄損[W]

$n$ : 相数

$I$ : 電流実効値[Arms]

$R$ : 巻線抵抗 [Ω]

図7に、従来品のモーター損失を銅損と鉄損に分離した結果を示します。参考として、モーター電流、トルク、界磁鉄損を載せています。

1000r/min以下の定電流領域では、ステッピングモーターの電流は一定になるように制御されていますが、そ

れ以上の高速になると電流は減少します。これは、高速ではインピーダンスの増加により、定電流制御するための電圧が不足するためです。電流が減少する領域を定電圧領域と呼びます。

モーター鉄損は、図7のように、約1200r/minで最大となっています。通常、回転中の鉄損は、界磁鉄損に電機子鉄損が加わるため、界磁鉄損よりも大きくなります。したがって、鉄損と界磁鉄損の差が電機子鉄損と考えることができます。定電圧領域になると電流の減少により電機子鉄損が減少していることがわかります。従来品のモーターでは約3000r/minで界磁鉄損と鉄損が一致する特性となっています。

モーター損失は、鉄損と銅損の和ですが、銅損の割合は小さく、高速では全損失と鉄損はほとんど一致します。

従来モーターの最大損失は119Wですが、その時の鉄損は112Wで、全損失の94%を占めています。

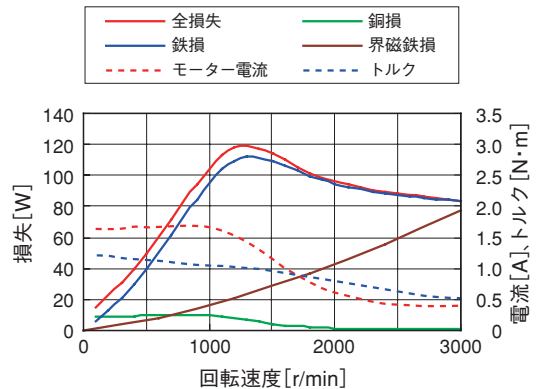


図7 従来品のモーター損失

### 3. ARシリーズの低損失化技術

#### 3.1. モーターの低鉄損化技術

式(2)と式(3)より鉄損の低減方法としては、以下の方法が考えられます。

- (1) 鉄損定数 ( $k_{fe}$ ,  $k_{jh}$ ) が小さい材料を使用する
- (2) 板厚の薄い電磁鋼板を使用する

これらは、電磁鋼板の等級や板厚を変更することで可能です。単位質量あたりの鉄損値が

電磁鋼板1 > 電磁鋼板2 > 電磁鋼板3 > 電磁鋼板4

となる4種類の電磁鋼板でステータコアを試作し最大損失を比較した結果を図8に示します。縦軸は電磁鋼板1のモーター損失を基準としたときの比率を表しています。材質による損失を比較するにあたり、励磁最大静止トルクが同一の条件で比較しました。

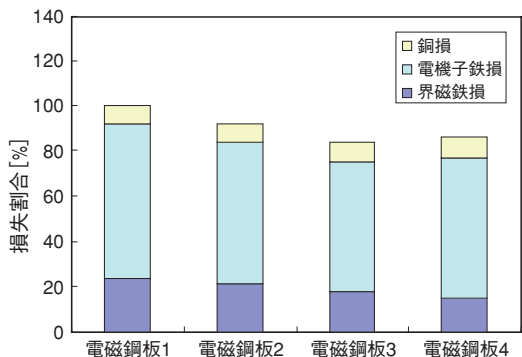


図8 電磁鋼板材質と損失の関係

一般的に、電磁鋼板は鉄損仕様値が小さいほど高級材となりますが、鉄損仕様値が小さくなると、飽和磁束密度も減少する傾向があり、モーターに使用した場合、トルクが小さくなります。ここでは電流を調整しトルクを揃えたため、鉄損仕様値が小さい電磁鋼板ほど銅損が大きくなっています。

界磁鉄損は、電磁鋼板の鉄損仕様値が小さいほど、小さくなっていますが、電機子鉄損は電流に依存するため、トルク一定の条件では、電磁鋼板の鉄損仕様値の大小どおりになるとは限りません。電磁鋼板3と4で鉄損値が逆転しているのはそのためです。

ARシリーズでは、電磁鋼板の鉄損仕様値だけでなく、トルク特性を考慮して、最適な電磁鋼板を選定しました。

次に、ステータ鉄心（積層コア）の締結方法と損失の関係を示します。ステータ鉄心は、絶縁コーティングが施された薄い電磁鋼板を積層して造られていますが、締結のため、部分的に積層間の電氣的絶縁が破壊されています。この絶縁破壊により、渦電流が流れやすくなり、渦電流損は式(2)で計算される値よりも大きくなります。図9に締結方法と最大損失の関係を示します。先の電磁鋼板の比較と同様に、励磁最大トルクが同一になるように電流を調整して比較しました。締結方法により損失に違いがあることがわかります。ARシリーズでは損失が小さい締結方法を採用しています。

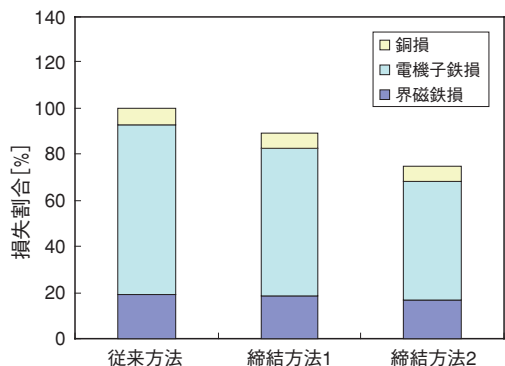


図9 締結方法と損失の関係

### 3.2. ドライバの低損失化技術

ドライバ損失の大部分はPWMインバータ出力段での損失です。ON抵抗の小さい素子を用いてスイッチング速度を速くしてスイッチング損失を小さくすれば、損失は小さくなりますが、スイッチング速度を速くすると電磁ノイズが大きくなるという問題があります。ARシリーズでは、電磁ノイズを低減すると同時に、スイッチング速度を最適化し、ドライバ損失を低減しました。

### 3.3. ARシリーズの損失

図10にARシリーズ（AR66AA-1）のユニットおよびモーターとドライバの無負荷損失を示します。また、図11にユニット損失がそれぞれ最大となる回転速度での従来品との損失比較を示します。

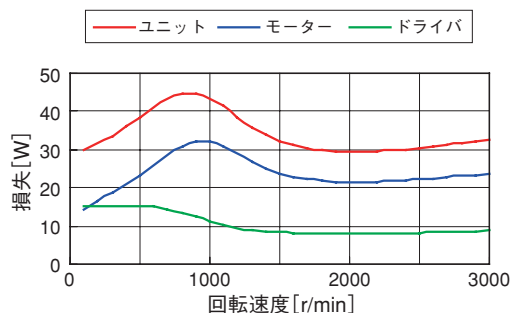


図10 ARシリーズの無負荷損失

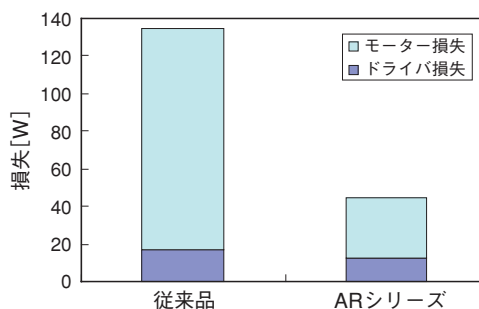


図11 ARシリーズと従来品の損失比較

ARシリーズのユニット損失は従来品に比べ、67%減少しており、モーター損失では73%、ドライバ損失では26%減少しています。

図12に、ARシリーズのモーター損失を銅損と鉄損に分離した結果を示します。

図13に、モーター損失が最大となる回転速度での損失を従来品と比較した結果を示します。トルクが同一となるように電流を調整しているため従来品に比べARシリーズでは銅損が増加していますが、電機子鉄損では81%、界磁鉄損では73%減少しており、全体では従来品に比べ72%の減少となっています。

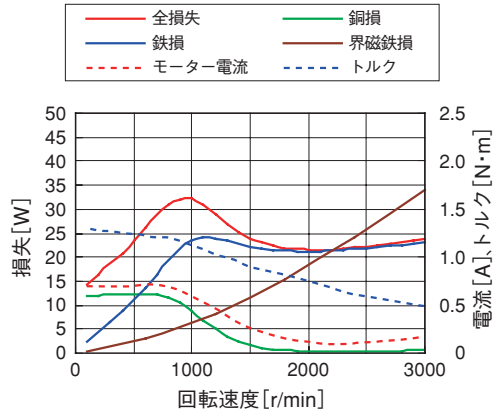


図12 ARシリーズのモーター損失

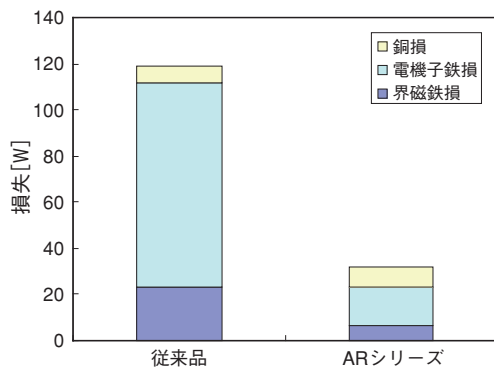


図13 従来モーターとの比較

#### 4. 位置決め運転時の損失

250×250mm、厚さ6mmのアルミ板相当の放熱板が付いた場合、ARシリーズのモーターの許容損失は、周囲温度40℃では約40Wです。ARシリーズの最大損失は32Wですので、上記条件では、連続運転が可能です。

しかし、ステッピングモーターは主に位置決め制御に使用されますので、ここでは位置決め制御時の損失について考察します。従来品との比較に加え、同サイズのサーボモーター（定格出力100W）との比較も行いました。

##### 4.1. 損失特性

各モーターの回転速度—トルク特性を図14に示します。100Wサーボモーターは定格トルクが0.32N・mであり、定格トルクの3倍の瞬時最大トルクが出力可能です。ステッピングモーターのプリアウトトルクとサーボモーターの瞬時最大トルクを比較すると、1500r/min以下ではステッピングモーターが高トルクであり、それ以上ではサーボモーターが高トルクとなっています。回転速度—トルク特性から、高速で運転する場合はサーボモーターが、低速で運転する場合はステッピングモーターがトルクの的に有利といえます。

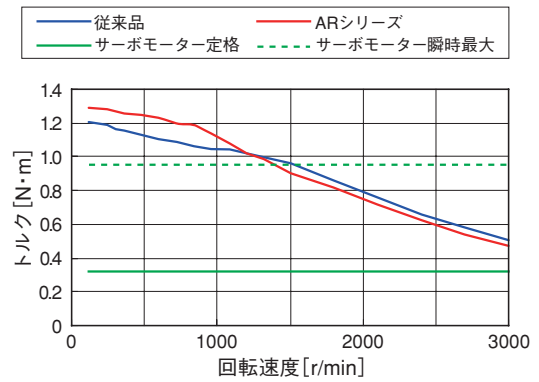


図14 回転速度—トルク特性

図15にARシリーズ、図16にサーボモーターの負荷と損失の関係を示します。図15から、ステッピングモーターでは負荷が増加するとモーター損失のピーク値が減少しますが、負荷による変化は小さく、それよりも回転速度による変化の方が大きいことがわかります。ドライバ損失は、負荷が増えると高速での損失が増加しますが、損失のピーク値はほとんど変化せず、負荷や回転速度の変化に対してはモーターほど影響を受けません。

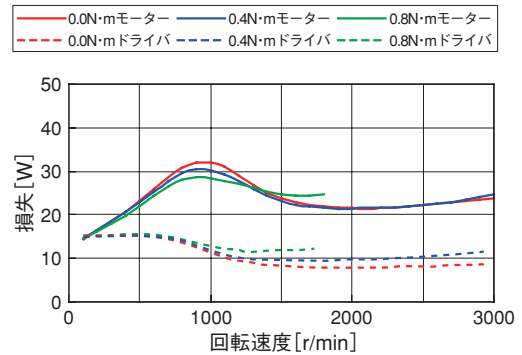


図15 ARシリーズの損失特性

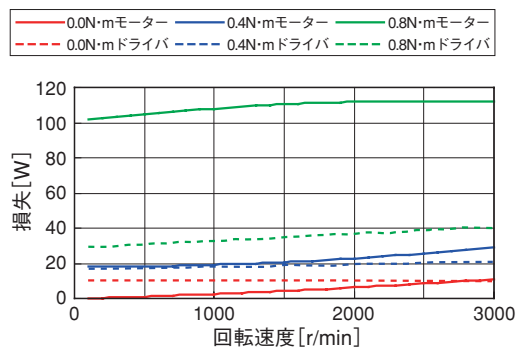


図16 サーボモーターの損失特性

一方、図16から、サーボモーターはモーター損失、ドライバ損失共に、負荷や回転速度が増加すると損失は増加しますが、負荷による変化の方が大きいことがわかります。

ステッピングモーターとサーボモーターでは、傾向は異なりますが、損失は、回転速度と負荷トルクの関数となります。したがって、トルクと回転速度から、損失を計算することができます。

4.2. 位置決め運転時の損失

図17に一般的な位置決め運転時の速度パターンを示します。加速時間 $t_1$ で回転速度 $N_m$ まで加速し、一定速度で時間 $t_2$ 回転して、減速時間 $t_3$ で減速して停止する運転パターンです。台形駆動と呼ばれる運転パターンであり、台形の面積が回転量となります。通常、位置決め終了後の停止時間 $t_4$ に検査や組立てなどの作業を行い、次の運転が開始されます。起動から次の起動までの時間 $t_c$ をサイクル時間と呼びます。

発熱が大きい場合には、冷却のための停止時間を設定する必要がありますが、このような運転を間欠運転（デューティー運転）と呼びます。

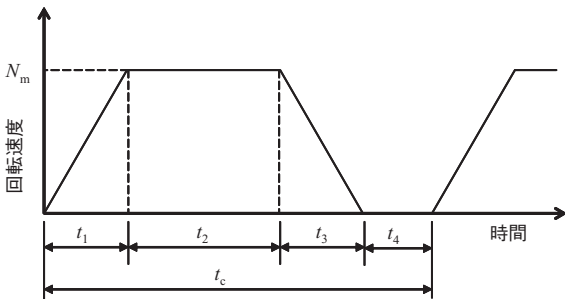


図17 位置決め運転時の速度パターン

図18に図17の速度パターンで駆動するときの、トルクパターンを示します。一定速度時は負荷トルク分のトルク $T_L$ が必要ですが、加減速時は、それに加え、加速トルク $T_a$ 、減速トルク $T_d$ が必要となります。

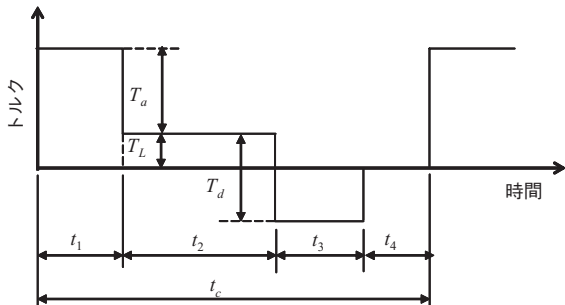


図18 位置決め運転時のトルクパターン

前述のように、ステッピングモーターの損失は速度に依存し、サーボモーターの損失は負荷に依存するため、損失パターンは図19に示すようになります。

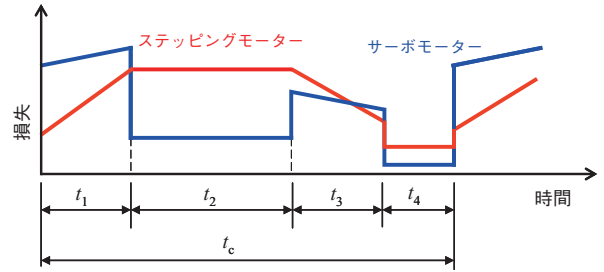


図19 位置決め運転時の損失パターン

損失の瞬時値を $w(t)$ とすると、1サイクルあたりの損失の平均値は次の式で計算されます。

$$W_a = \frac{1}{t_c} \cdot \int_0^{t_c} w(t) dt \dots\dots\dots (10)$$

4.3. 計算結果

慣性負荷 $J=2.5 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$ （外径90mm、厚さ5mm、材質 鉄）が付いた状態で最短位置決め運転を行うときのモーター損失を計算します。安全率を考慮し、ARシリーズで位置決め時間が最短となる運転パターンを計算すると、表1のようになります。

表1 運転パターン

回転量 [回転]	加減速時間 [ms]	回転速度 [r/min]	位置決め時間 [ms]
0.1	14	400	29
0.5	30	800	68
1	40	1000	100
2	59	1300	152
5	100	1800	267
10	146	2200	419

式(10)より、各運転パターンでの損失を計算しますが、例として、回転量が2回転の場合の、速度パターンと損失の計算結果を図20に示します。加減速時にはサーボモーターの損失が大きく、一定速時にはARシリーズの損失が大きくなっています。

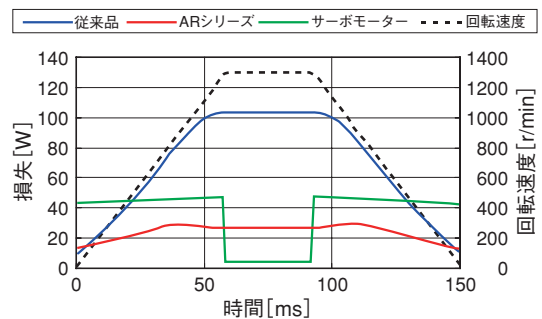


図20 計算例

回転量とモーター損失の関係を図21に示します。従来品の場合は、回転量が多くなると損失は約80Wになりますので、間欠運転を行うか、ファンでの冷却が必要となります。ARシリーズの場合は、回転量が多くなっても約24Wなので、冷却のための停止時間は不要で、従来品では不可能であった連続位置決め運転が可能となります。

サーボモーターでは回転量が少ないほど損失が大きく、回転量が多くなるほど損失は小さくなります。5回転以下の回転量ではARシリーズの方がサーボモーターより小さくなります。

サーボモーターを使用する場合、発熱対策として間欠運転を行うことも可能ですが、許容損失を超えるような使用法はせず、実効トルクに対する安全率を考慮して位置決め時間を長くして使用するのが一般的です。どちらの場合でも、装置のタクトタイムが長くなります。

以上のことから、回転量が少ない場合の位置決め運転には、ARシリーズが適しているといえます。

発熱の問題で、位置決め時間を長くしてサーボモーターを使用していた場合などは、ARシリーズに変更することで、タクトタイムの短縮が可能となります。

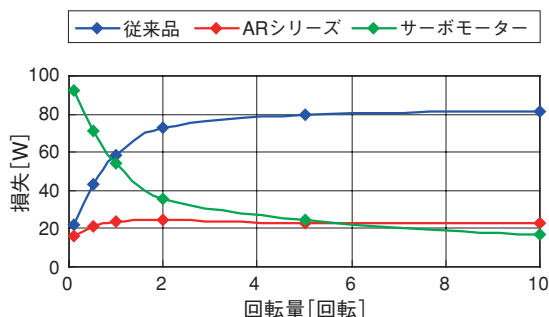


図21 回転量とモーター損失の関係

同一条件で、ドライバ損失を計算した結果を図22に示します。ドライバ損失も従来品やサーボモーターよりARシリーズは低損失という結果となりました。

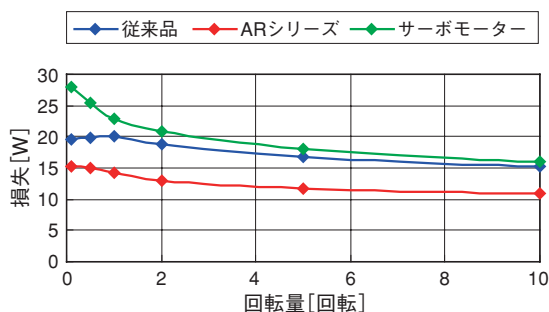


図22 回転量とドライバ損失の関係

## 5. まとめ

従来のステッピングモーターは、発熱が大きいという問題がありましたが、ARシリーズの低損失化技術により、ステッピングモーターの損失を大幅に低減することができました。

一定速度の連続運転など、従来では使用できなかった用途でも使用可能となり、ステッピングモーターの用途拡大が期待されます。また、運転条件によっては、サーボモーターより発熱が小さくなる場合もあります。

### 参考文献

- (1) 小松澤 誠一, 「脱調レスステッピングモーターユニットARシリーズの開発」, RENGA, No.169, (2007), p4-12

筆者



佐藤 靖雄

VEXTA事業部 土浦オフィス  
モーター技術部 モーター開発課