

制御モーター用フレキシブルカップリングの特性について

榎 浩永 糸岐 聡一郎

Characteristics of flexible couplings for control motors

Hironaga MAKI, Soichiro ITOKI

The couplings are widely used to couple a rotational axis with another, and to transfer the torque. It is also used to transmit not only the rotative power but also the minute angle when it is used being combined with a position control motor. Therefore, it is important to select the coupling that is suitable for the use from a wide variety of couplings. In this article, we introduce the types and the features, and explain the basic characteristics, the difference of the characteristics when it is combined with a position control motor. By utilizing these data, the selection of coupling can be done according to the usage.

1. はじめに

フレキシブルカップリング（以後 カップリング）は、軸と軸を締結して回転力を伝達する要素部品です。

制御モーター（ステッピングモーター、サーボモーター）と組み合わせて使用される場合、回転方向のバックラッシュ（ガタ）のあるカップリングやねじり剛性（トルクに対するねじれ角度）が低いカップリングを使用すると、モーター側と負荷側の回転角度にずれが生じ、位置決め精度を損なう場合があります。そのため高い精度が必要な用途ではバックラッシュがなく、ねじり剛性が高いカップリングを使用する必要があります。また装置の振動を重視する用途では、振動吸収性に優れた機械共振がないカップリングが適しています。

ここでは、カップリングの種類と特徴、制御モーターと組み合わせて使用した時の特性について説明します。

2. 制御モーター用カップリングの種類と特徴

制御モーターと組み合わせられ使用されることが多いディスクタイプ、スリットタイプ及びゴムタイプについて構造、特徴を説明します。

2.1. ディスクタイプカップリング

ディスクタイプは、中央部に組み付けられたディスク（金属板ばね）と両側のハブが、かしめによって一体化されています（図1(a)参照）。ねじり剛性が最も高く、高精度位置決め用途のステッピングモーター、サーボモーターとの組み合わせに適しています。

2.2. スリットタイプカップリング

スリットタイプは、アルミ合金の円筒材にスリットを入れた一体構造の金属ばねカップリングです（図1(b)参照）。スリットで形成された板ばねがミスアライメントを許容します。特に、ステッピングモーターとの組み合わせに適しています。当社MCカップリングはスリットタイプカップリングです。

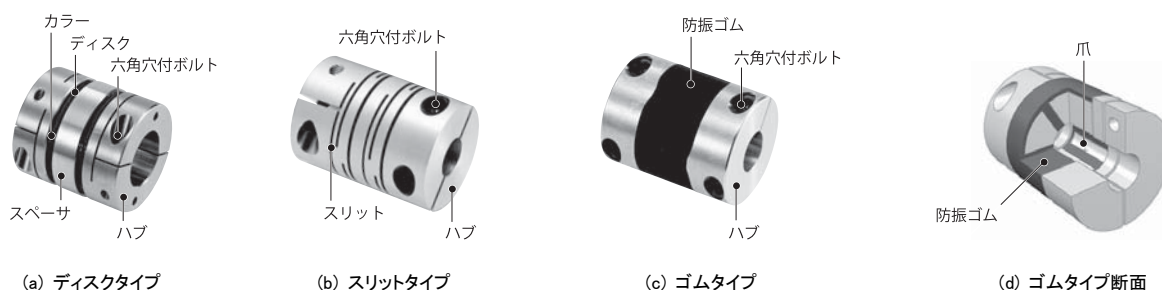


図1 制御モーター用カップリングの種類

2.3. ゴムタイプカップリング

ゴムタイプは、アルミ合金製の爪のついたハブ間を水素化ニトリルゴム製の防振ゴムで成型した一体構造です（図1(c)、(d)参照）。運転時の振動を小さく抑える振動吸収性や両ハブ間の電気絶縁性を持っています。また同じサイズで比較すると連続的に伝達できるトルク値（常用トルク）が最も高いためカップリングのサイズダウンが可能です。ステッピングモーター、サーボモーターとの組み合わせに適しています。当社 MCV カップリングはゴムタイプカップリングです。

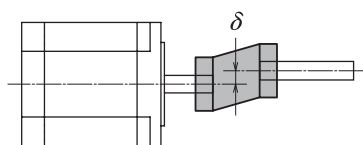
3. カップリングの特性

3.1. 許容ミスアライメント

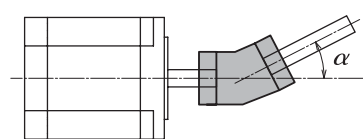
ミスアライメントとは、軸心のずれのことで図2のように偏心、偏角、エンドプレイの3種があります。

モーター軸と負荷軸にずれがないことが理想ですが実際にはミスアライメントが存在し、振動の発生や寿命が急速に低下することがあります。

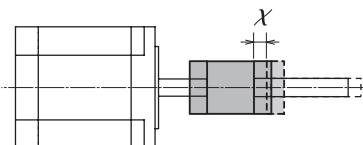
ここで紹介するディスクタイプ、スリットタイプはバネで、ゴムタイプは防振ゴムでミスアライメントを許容しています。



(a) 偏心：両軸心の平行誤差



(b) 偏角：両軸心の角度誤差



(c) エンドプレイ：シャフトの軸方向の移動

図2 ミスアライメント

表1にカップリング外径φ25のカップリングの仕様と許容ミスアライメント値をまとめます。

表1 カップリングの仕様と特徴

	ディスクタイプ	スリットタイプ	ゴムタイプ
バックラッシュ [min]	0	0	0
静的ねじりばね定数 [N·m/rad]	850	380	170
常用トルク [N·m]	2	2	4
振動吸収性	なし	なし	有
電気絶縁性	なし	なし	有
許容偏心 [mm]	0.2	0.15	0.15
許容偏角 [°]	2	2	1.5
許容エンドプレイ [mm]	±0.4	±0.5	±0.3

3.2. ねじり剛性

図3に示したねじり剛性特性は、ねじれ角度とトルクの関係を表しています。グラフの傾きを静的ねじりばね定数といい、これが大きいほどねじれの少ないカップリングとなります。

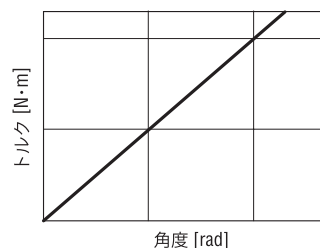


図3 ねじり剛性特性

3.3. 静的ねじりばね定数の温度特性

ディスクタイプ、スリットタイプでは温度による静的ねじりばね定数の変化はほとんどありませんが、ゴムタイプは温度によって変化します。使用温度の範囲内でのゴムタイプの静的ねじりばね定数の変化を20℃における値との比で示すと図4のようになります。

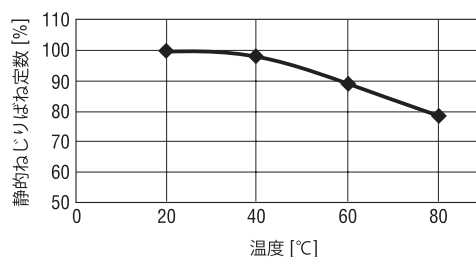


図4 温度による静的ねじりばね定数の変化

ゴムタイプでは常用トルク・最大トルクも温度により変化します。周囲温度が30℃を超える場合、表2の温度補正係数で補正する必要があります。

表 2 温度補正係数

周囲温度	-20 を超え 30°C以下	30 を超え 40°C以下	40 を超え 60°C以下	60 を超え 80°C以下
温度補正係数	1.00	0.80	0.70	0.55

3.4. 固有振動周波数

ディスクタイプ、スリットタイプなどの板バネ構造でミスアライメントを吸収するカップリングには、共振する周波数が存在します。軸方向の共振周波数を図 5 のようにカップリングを上下に振動させて調べます。周波数と振幅(カップリング固定端の加速度 G' と自由端の加速度 G との比)の関係を図 6 に示します。

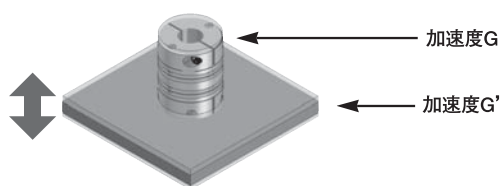


図 5 固有振動の測定

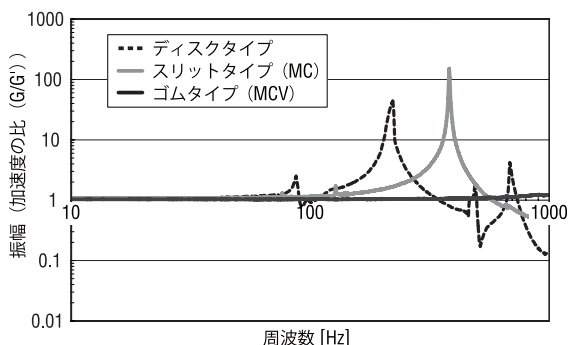


図 6 軸方向の共振特性

ゴムタイプは 1000Hz 以下では共振点がないのでモーターの振動や装置振動との共振が起きませんが、ディスクタイプ、スリットタイプは共振が問題となることがあります。

4. 制御モーターとの組み合わせ特性

ステッピングモーターと組み合わせたときの振動特性、ダンピング特性と、AC サーボモーターと組み合わせたときの位置決め特性のカップリングの種類による違いについて以下に示します。

4.1. 振動特性

2相ステッピングモーター (CMK シリーズ)、5相ステッピングモーター (RK シリーズ) とカップリングを組み合わせた時の振動特性の違いを比較します。

4.1.1. 測定方法

測定装置の概要を図 7 に示します。慣性体 (円板) を軸に取付け、タコジェネレータで回転速度を検出します。

モーターに直結したタコジェネレータとカップリングを介した慣性体に直結したタコジェネレータの 2 箇所での回転速度の変動を振動成分電圧として測定しカップリングによる振動特性の違いを比較します。

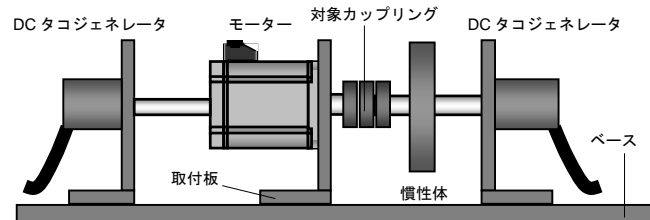


図 7 振動測定装置概要

4.1.2. 振動特性比較

図 8 に当社 2 相ステッピングモーターユニット CMK266AP と 3 タイプのカップリング (同サイズ $\phi 25$) を組み合わせた振動特性を示します。

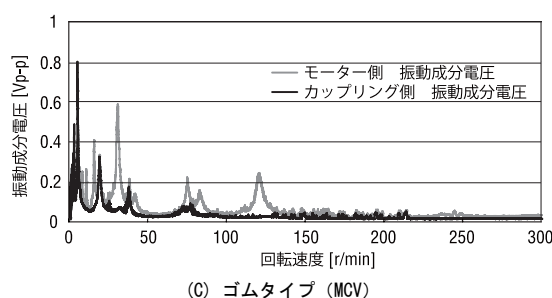
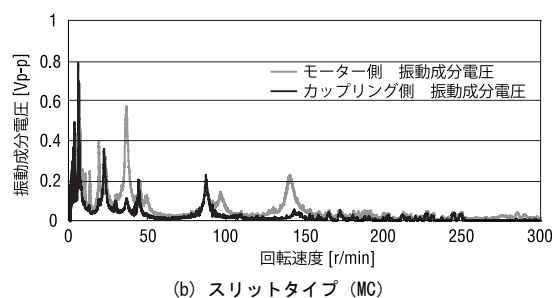
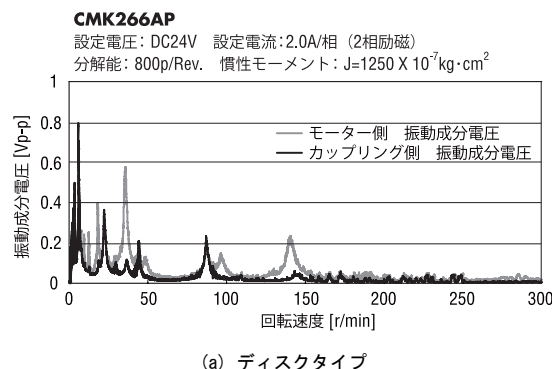


図 8 振動特性 (CMK シリーズ)

カップリングを介した慣性体の振動はモーターの振動成分電圧に比べて小さくなっていることがわかります。またゴムタイプでの振動はディスクタイプ、スリットタイプに比べ 35r/min、80r/min 付近で小さいことがわかります。

図 9 に、5 相ステッピングモーターユニット RK566AAE での振動特性を示します。

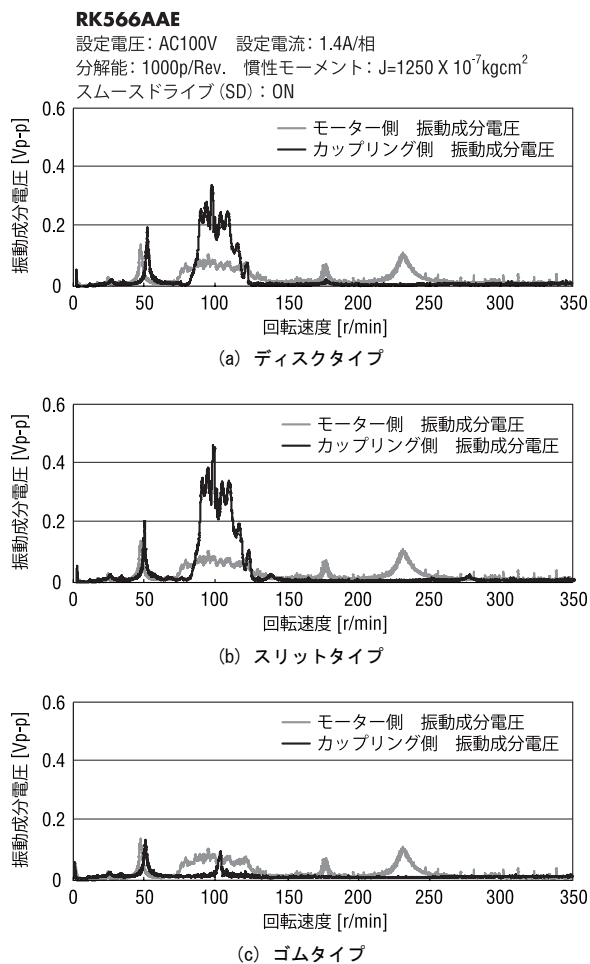


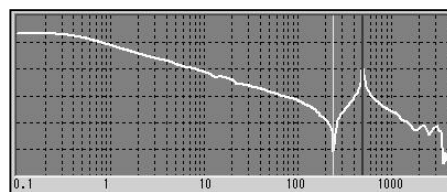
図 9 振動特性(RKシリーズ)

モーター側の振動は、2 相ステッピングモーターに比べて全体的に小さくなっています。ゴムタイプのカップリングでは振動が減少していますが、ディスクタイプ、スリットタイプのカップリングでは、80~120r/min の範囲で慣性体の振動成分電圧が大きくなっています。

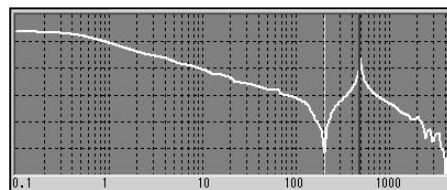
モーター軸にカップリングを介して慣性体を取付けた状態でトルクに対する応答の周波数を測定した結果を図 10 に示します。

図 10 (a) スリットタイプ、(b) ディスクタイプは 500Hz 前後で共振点を持っています。そのためステッピングモーターとカップリングの機械共振により振動が増幅されたと考えられます。

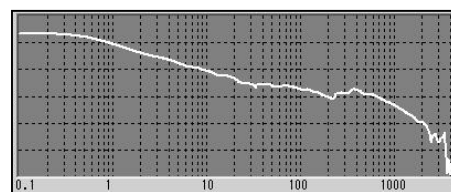
一方、図 10 (c) のゴムタイプは振動を吸収するため共振点がなく、振動が減少したと考えられます。



(a) スリットタイプの共振周波数 (500Hz)



(b) ディスクタイプの共振周波数 (500Hz)



(c) ゴムタイプの共振周波数 (共振点なし)

図 10 回転方向の共振特性

4.2. ダンピング特性

ステッピングモーターによる位置決め運転では、運転指令終了後に減衰振動が発生しワークが完全に停止するまでに時間がかかることがあります。これをダンピング特性といいます。カップリングの違いによるダンピング特性の違いを以下に示します。

4.2.1. 測定方法

測定装置の概要を図 11 に示します。円板状の慣性体を軸に取付け、エンコーダを用いて慣性体の回転角度と回転速度を測定します。

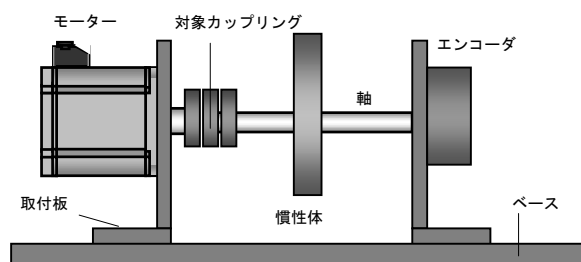
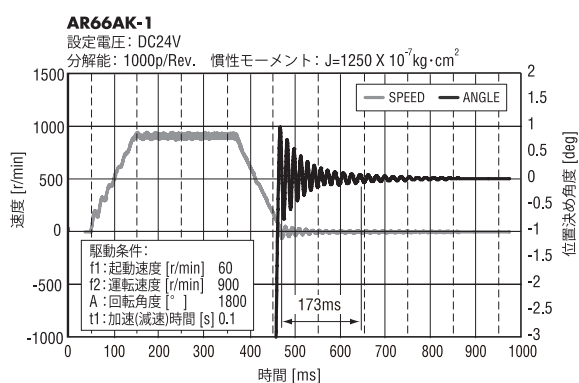


図 11 ダンピング特性測定装置概要

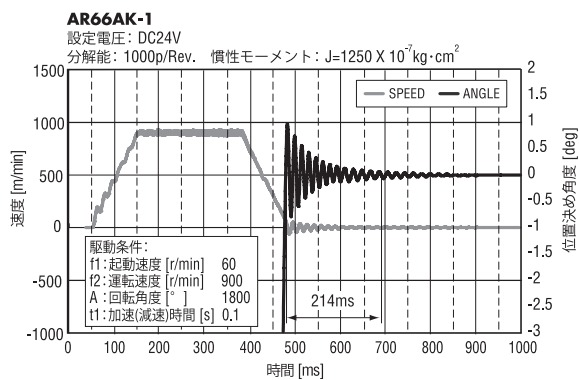
高効率ステッピングモーターユニットα Step AR66AK-1と3タイプのカップリング（同サイズφ25）を組み合わせたダンピング特性を図12に示します。モーターの運転指令終了時点から慣性体の角度と目標位置との差が0.072°以下になるまでの時間を整定時間とします。

4.2.2. ダンピング特性比較

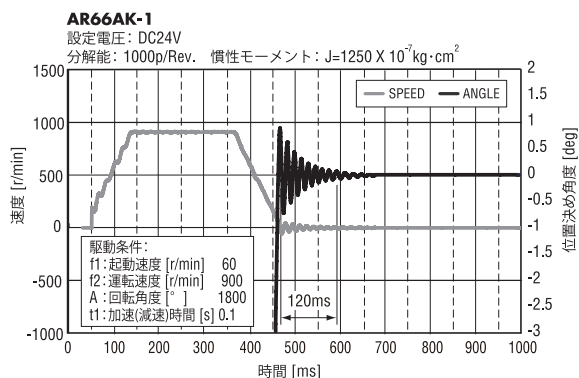
図12(a)～(c)より、ゴムタイプの整定時間は120msで、ディスクタイプの173msに比べ30%の短縮、スリットタイプの214msに比べ44%の短縮となりました。また、一定速度で運転している時の振動（回転ムラ）も低減されていることがわかります。



(a) ディスクタイプ



(b) スリットタイプ



(c) ゴムタイプ

図12 ダンピング特性

ゴムタイプのねじれ角-トルク特性は図13のように、ヒステリシス特性を持っています。これは、外力によって変形したゴムがもとに戻る時に内部に歪が残るためです。この曲線で囲まれた面積は、変形時に吸収されるエネルギーを表しています。正逆方向のトルクが繰返し加えられた場合、カップリング内部で振動のエネルギーを損失として消費させることにより振動やダンピングを抑えています。

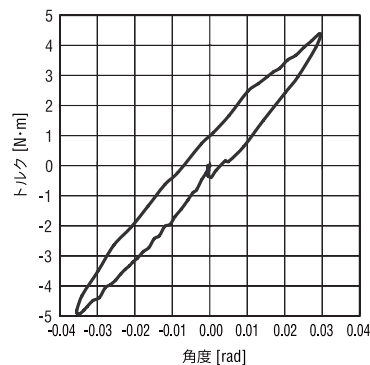


図13 ゴムタイプのねじれ角-トルク特性

4.3. 位置決め特性

チューニングレス AC サーボモーターユニット NX シリーズは、ゲイン調整をすることなく大慣性駆動やベルト駆動を安定して行えます。またゲイン調整を行えば、より短時間での位置決め運転が可能です。しかし、カップリングによっては発振（鳴き：カップリングが振動し音を発生する現象）がおこり位置決めゲインを高く出来ないことがあります。

ディスクタイプ、ゴムタイプについて位置決め時間の違いを比較します。

4.3.1. 測定方法

スライダ[荷重(20kg)、ねじ径(15mm)、リード(20mm)、全長(800mm)]と AC サーボモーターユニット NX シリーズの軸間にディスクタイプ、ゴムタイプのカップリングを組み込み、NX シリーズドライバ前面のパネルスイッチ SW2（図14参照、機械剛性設定 16段階）を表3のように0から順に上げ、カップリングの発振（鳴き）状態の確認と各目盛での位置決め時間を測定します。



図14 NXシリーズドライバ前面

表3 機械剛性設定目盛と整定時間の関係

SW2の目盛り	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
位置ループゲイン [Hz]	3	4	6	9	11	14	16	20	20	20	20	20	20	20	20	20
速度ループゲイン [Hz]	14	22	32	46	56	68	82	100	120	150	180	220	270	330	390	470
速度ループ積分定数 [ms]	51.0	51.0	48.2	33.8	28.4	23.4	19.4	15.8	13.2	10.6	8.8	7.2	5.8	4.8	4.0	3.4
ディスクタイプ	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
ゴムタイプ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×

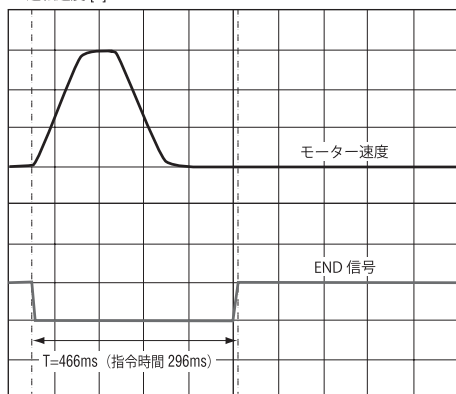
○：駆動可能 装置の発振（鳴き）なし
 ×：駆動不可 装置の発振（鳴き）あり

4.3.2. 位置決め特性比較

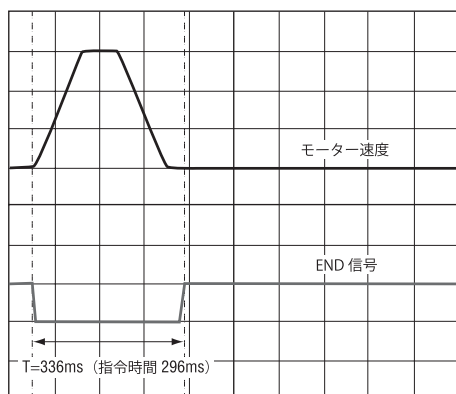
表3のようにディスクタイプでは機械剛性設定SW2の目盛 [4] で発振（鳴き）が始まり、目盛 [5] では停止時を含めて常時発振が発生し駆動できなくなりました。一方ゴムタイプでは機械剛性設定SW2の目盛 [C] で発振が発生し駆動できなくなりました。

それぞれのカップリングについて発振が起きず駆動可能な機械剛性設定での位置決め運動を行ったところ位置決め時間は、図15のようにディスクタイプ466ms、ゴムタイプ336msで130msの差がありました。

モーター品名: NX620AA-1
 条件: 電圧 AC100V、分解能 1000 分割、位置制御モード、指令時間 296ms
 制振制御周波数 (VR1) 無効
 ローター慣性モーメント $J_0=0.162 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$
 駆動条件
 f1: 起動速度 [r/min] 120
 f2: 運転速度 [r/min] 3000
 A: 回転角度 [°] 3600
 t1: 加速(減速)時間 [s] 0.1
 t: 運転速度 [s] 0.096



(a) SW2 目盛 : [3] ディスクタイプ



(b) SW2 目盛 : [B] ゴムタイプ

図15 位置決め特性

NX シリーズとスライダなどの高剛性な機器と組み合わせる場合、機械剛性設定SW2の目盛はA~Fを目安とします。しかし組み合わせるカップリングやボールねじの剛性、荷重によっては機械剛性設定の目盛を上げられないことがあります。

サーボモーター用のカップリングは、高精度位置決めを重視してねじり剛性の高さに注目が集まりがちですが、実際は発振を起こしてしまい高応答性というサーボモーターの特長を生かせない場合があることがわかります。

ゴムタイプのカップリングは、ディスクタイプに比べてねじり剛性は低くなりますが、振動吸収性に優れているため、発振を抑え高ゲイン設定での高応答短時間位置決め運動が可能です。

しかしゴムタイプはヒステリシスによって回転方向による停止位置に差があります。それをロストモーションといいます。今回比較した条件で、カップリングのねじり剛性の違いによる影響を計算すると、静的ねじりばね定数、位置決め方向の違いによるねじれ角度の誤差および位置精度誤差は表4のようになります。

スライダの摩擦トルクは実測より $0.04\text{N} \cdot \text{m}$ となりました。位置決め方向が同一の場合、位置精度はねじれの影響は受けません。

位置決め方向が逆になった場合でも、位置精度の差は $0.9 \mu\text{m}$ と微小なためねじり剛性の違いによる影響が小さいことがわかります。

表4 ディスク、ゴムタイプ位置精度差

	静的ねじりばね定数 [N·m/rad]	ロストモーション	
		角度 [°]	位置 [μm]
ディスクタイプ	1000	0.0046	0.26
ゴムタイプ	220	0.0208	1.16

5. まとめ

カップリングの種類と特徴、制御モーターと組み合わせで使用した時の特性について説明しました。

制御モーター用カップリングを選定する場合、バックラッシの有無やカップリング単体の剛性の高さをポイントに選定します。しかし、組み合わせるモーターの特性によっては、剛性の高いカップリングのほうが運転中の振動が大きくなることや、停止時の振動や発振により停止時間が長くなる現象もあることがわかりました。

制御モーター用カップリングを選定する場合、用途に合わせた使い分けが必要です。

●精密位置決めを行う場合

高ねじり剛性なディスクタイプ、スリットタイプ (MC カップリング)

●ステッピングモーターで振動やダンピングを重視する場合

振動吸収性に優れたゴムタイプ (MCV カップリング)

●AC サーボモーターで、短時間位置決めを行う場合

発振を起こしにくく高ゲイン設定が可能なゴムタイプ (MCV カップリング)

モーターに合わせてカップリングを選定することでより精密な位置決めを行うことができます。

参考文献

- (1) 山本 武, 「制御モーター用カップリング(MCS カップリング)の特性について」, RENGA, No.160, (2001), p20-25
- (2) 鍋屋バイテック会社, 「THE HANDBOOK 2008 カップリング・伝動サポート部品」, p42-51

筆者



榎 浩永

MC 事業部 制御モーター技術統括部
技術部



糸岐 聡一郎

MC 事業部
販促技術課