

# 高トルク 2 相ステッピングモーター PKP シリーズの特長

金子 貴志

## Features of **PKP** Series High-Torque 2-Phase Stepping Motors

Takashi KANEKO

*With 2-phase stepping motors, position and velocity can be easily controlled with high precision, using only the pulse signals. In addition, there are advantages of low cost because of no sensor, and absence of gain adjustment, compared to the servo motor often used for motion control.*

*Here, we will explain the structure of the stepping motor, the principle of operation and the basic characteristics such as speed-torque characteristic. Then, we will introduce the **PKP** Series which is our new lineup of 2-phase stepping motors with high torque. The advantages of using the **PKP** Series are compact size, low temperature and energy savings.*

### 1. はじめに

ステッピングモーターは、センサのフィードバックを行わずにオープンループで制御が可能な特長から、監視カメラなどの小型装置や CT スキャンなどの医療用機器、券売機など、さまざまな用途で使用されています。特に、ハイブリッド型と呼ばれるタイプは高精度な位置決めが可能なため、数多く採用されています。

当社は、ハイブリッド型ステッピングモーターの開発を 1970 年代より開始し、多様なニーズにお応えできる豊富な種類のステッピングモーターを展開しています。制御用に使われることの多いサーボモーターと比較すると、センサが不要なため堅牢で低コストであり、ゲイン調整も不要で、容易に高精度な位置決めが可能です。

ここでは、初めにステッピングモーターの構造・動作原理・特徴を改めて紹介します。さらに、新商品の高トルク 2 相ステッピングモーター **PKP** シリーズ(図 1 参照)の特長と特性を述べ、使用することで得られるメリットを紹介します。

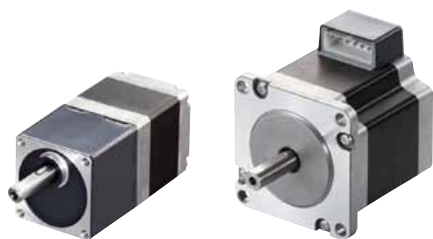


図 1 PKP シリーズ

### 2. ステッピングモーターの特長

#### 2.1. 構造

ステッピングモーターはその名のとおり、一定角度ずつステップ状の回転をするモーターです。図 2 に示したように、巻線が巻かれたステータ（固定子）と、軸方向に磁化された永久磁石の入ったロータ（回転子）で構成されています。この磁石によって、前後のロータセグメントは一方が N 極、他方が S 極に磁化されています。

ステータとロータにはそれぞれ小歯が設けられており、 $1.8^\circ$  ずつ回転する 2 相ステッピングモーターの場合、小歯は  $7.2^\circ$  ピッチで均等に配置されています。2 つのロータセグメントは半ピッチ ( $3.6^\circ$ ) ずらした状態で組み立てられています。

図 3 に、ロータを正面（軸方向）から見た図を示します。ロータを正面から見ると、50 枚あるロータの小歯が、交互に並んで 100 極のロータ構造となっています。

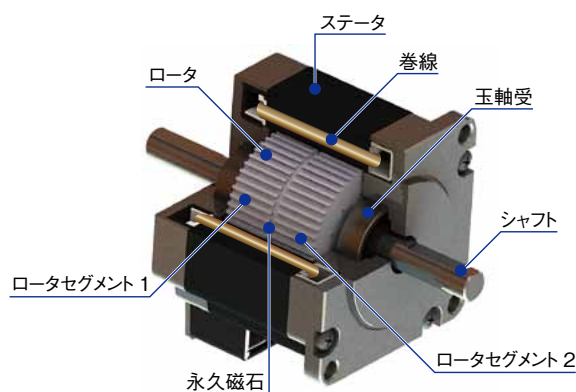


図 2 ステッピングモーターの構造

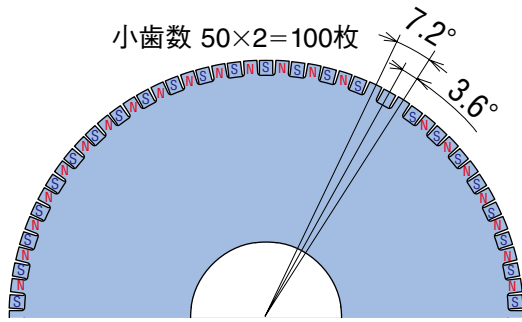


図3 ロータ正面図

関係によって決まります。図5を用いてこの関係を説明します。

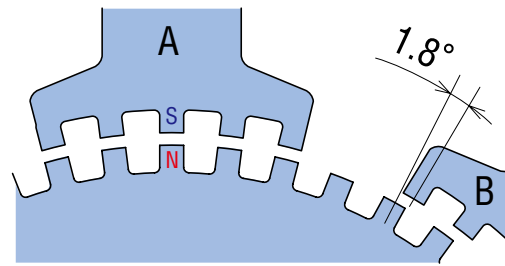


図5 ステータとロータの小歯位置

図4に、ステータコアの正面図を示します。

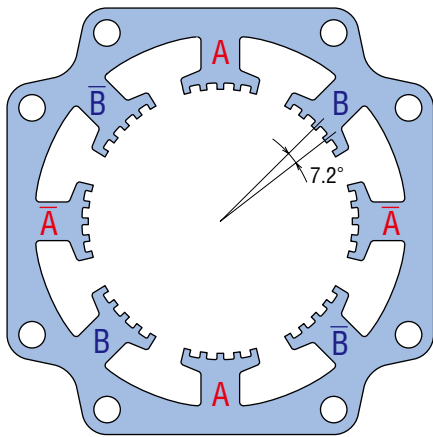


図4 ステータコア正面図

ステータには8つの磁極があり、内周にロータ同様に小歯が設けられています。この磁極に巻かれた巻線に電流を流すと、それぞれの磁極はN極またはS極に磁化されます。巻線に電流を流し、磁力を発生させることを励磁と呼びます。励磁すると、90°位置の2極が異極となります。同時に磁化させる磁極を相と呼び、A相、B相の2種類の相に分けられることから、2相ステップングモーターと呼ばれています。

## 2.2. 回転原理

励磁すると、ロータの小歯とステータの小歯との間で磁気的な吸引力が発生します。励磁を続けていれば、ステータとロータの小歯は引き合ったままになり、停止位置を保持することができます。停止状態で保持トルクを発生できることは、ステップングモーターの特長の一つです。保持トルクの最大値は、励磁最大静止トルク（ホールディングトルク）と呼ばれています。

回転させるためには励磁相の切り替えが必要ですが、駆動回路にパルス信号を与えることで励磁の切り替えを行っています。このため、ステップングモーターは、別名「パルスモーター」とも呼ばれます。

ロータの回転角度は、ステータとロータの小歯の位置

A相をS極に励磁しているとき、N極側のロータの小歯と、A相の小歯が引き合います。この状態のとき、A相では小歯と小歯が向かい合っており、隣のB相では小歯が1.8°ずれた状態となっています。パルス信号によってA相の励磁を切り、B相をS極に励磁すると、B相で小歯が向かい合うようにロータが1.8°回転します。この繰り返しによって、2相ステップングモーターは1.8°ずつ回転します。

## 2.3. 位置、速度制御

ステップングモーターは、パルス信号に同期して、ステップ角度ずつ回転するので、パルス信号の数と入力する速度によって、モーターの回転量と回転速度を変えることができます。

パルス速度はHzで表します。例えば、200Hzでは1秒間で200パルスが送られます。1.8°のステップ角の場合、200パルスで1回転(360°)するので、200Hzは1秒間で1回転する速度です。

モーターの回転速度を表す単位は、Hzの他にr/minが使われます。例えば、200Hzの速度は60秒(1分)で60回転となりますので、60r/minの速度となります。パルス速度とモーター回転速度の関係は次式で表されます。

$$N = \frac{\theta_s}{360} \times f \times 60 \dots\dots\dots (1)$$

N: 回転速度 [r/min]

$\theta_s$ : ステップ角 [°]

f: パルス速度 [Hz]

## 2.4. 速度—トルク特性

ステップングモーターのトルクは、速度によって変化します。図6に示す速度—トルク特性は、速度とトルクの関係を表した特性で、ステップングモーターの基本的な特性の一つです。

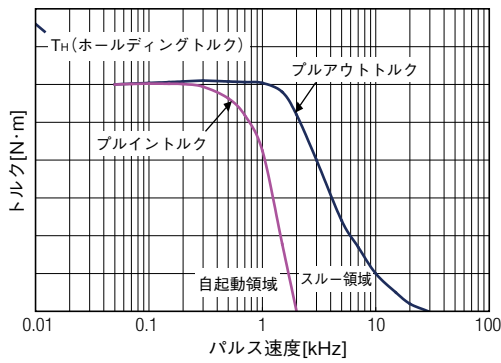


図6 速度—トルク特性

横軸が速度 kHz、縦軸がトルク N・m です。ステッピングモーターは使用できる速度範囲が広いので、片対数グラフで表記するのが慣例となっています。各回転速度でモーターが出力できる最大のトルクをプルアウトトルクと呼びます。ステッピングモーターを選定する場合には、装置を駆動させるために必要な速度とトルクを明確にし、このプルアウトトルク以下で装置の駆動を考えます。実際には、必要トルクに対し、プルアウトトルクに2倍程度の余裕を持たせることで、モーターが正常に回らなくなる脱調と呼ばれる現象を避けることができます。

ステッピングモーターは、プルイントルクと呼ばれる曲線以下であれば、瞬時に起動と停止を行う自起動運転が可能な応答性の高いモーターです。速度—トルク特性上では、その領域を自起動領域と呼びます。ただし、慣性負荷が付くと、自起動可能な領域が狭くなります。

それに対し、プルイントルクとプルアウトトルクの間領域をスルー領域と呼び、自起動領域で起動し、加速することで回転可能な領域です。

ステッピングモーターは、低速時は高いトルクを出すことができますが、高速になるにつれてトルクが減少します。この原因は、巻線電流の立ち上がりの遅れにあります。

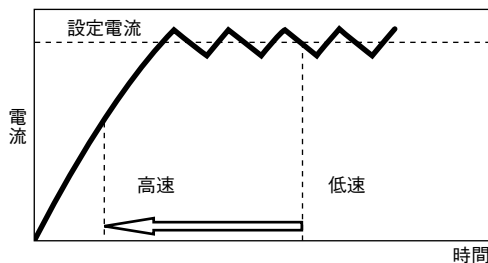


図7 巻線電流の立ち上がり

図7は、巻線電流の立ち上がりを表しています。モーターに一定の電流を流す場合、電流が設定値に達すると、スイッチング回路で電圧のON/OFF(チョッピング)を行うことで、一定の電流となるように制御します(定電流制御)。モーターの回転速度が高速になると、電流

が設定値に達する前に励磁が切り替わるので電流が減少し、トルクが低下します。

## 2.5. 振動特性

もう一つの基本的な特性として、図8に示した振動特性があります。速度に比例した電圧が出力される直流発電機であるDCタコジェネレータを用いて、各回転速度でのステッピングモーターの振動(回転ムラ)を、振動成分電圧として測定した結果です。振動成分電圧が高いほどモーターの振動が大きいことを示しています。振動が最も大きくなる周波数は共振周波数と呼ばれます。振動の大きな速度では、騒音や脱調の原因になることがあるので、この領域を避けて運転することが一般的です。モーターの振動を下げるには、モーターにダンパを付ける、運転電流を下げる、マイクロステップ駆動をするなどの方法があります。

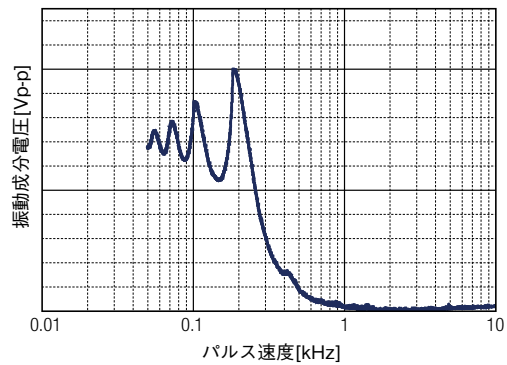


図8 振動特性

## 2.6. 角度精度

ステッピングモーターの精密さを表す指標として、当社では「静止角度誤差」を示しています。これは、任意の点を原点として360°回転させ、それぞれのステップについて、実際の停止位置と理論上の停止位置との差を測定したものです。

図9は、仕様値が±3分(±0.05°)のPKPシリーズPKP244U12B-Lにて静止角度誤差を測定した結果で、仕様値の約半分の±0.028°となりました。この精度を実現するために、部品にミクロン単位での精密加工を施しています。

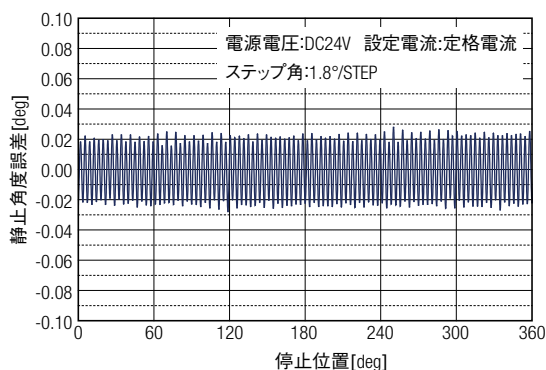


図9 静止角度誤差

### 2.7. 内部結線と駆動方式

2相ステップモーターには、2種類の駆動方式があります。励磁電流の方向が一方向で、回路構成が簡単なユニポーラ駆動と、励磁電流の方向が双方向で、ユニポーラ駆動と比較して低速トルクが高いバイポーラ駆動です。図10に、ユニポーラ駆動と、バイポーラ駆動の結線図を示します。

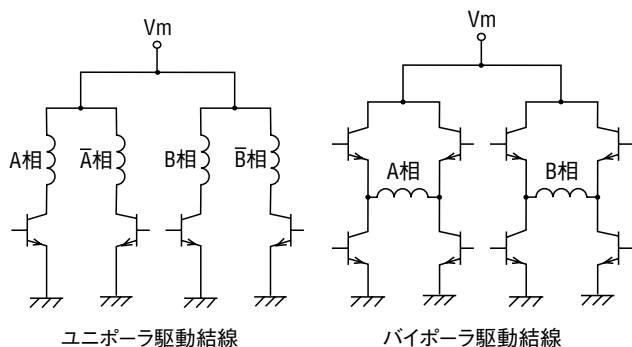


図10 2相ステップモーターの結線図

ユニポーラ駆動結線からバイポーラ駆動結線にすると、結線本数が6本から4本になります。ユニポーラ駆動に対し、バイポーラ駆動では、2倍の巻線を使用して駆動しており、入力が等しいときには、トルクは使用している巻線量の平方根に比例するので、トルクは $\sqrt{2}$ 倍になります。

ユニポーラ駆動の回路はスイッチングトランジスタが1相あたり2個でよく、バイポーラ駆動回路と比較してコストが低いため昔から多用されてきました。現在は、安価なバイポーラドライバICが各社より販売されています。

どちらの駆動方式でも採用していただけるよう、当社のステップモーターはPKPシリーズをはじめ、各モーターサイズでユニポーラ結線、バイポーラ結線の両方のタイプを用意しています。

### 3. PKPシリーズ

PKPシリーズは従来のPKシリーズと比較し、高トルクを実現したモーターです。鉄心の磁束密度を最適化し、巻線が入る部分の面積を大きく取ることで、高トルクを実現しました。

図11に、PKシリーズPK244-01Bと、PKPシリーズPKP244U12B-Lのトルク特性を示します。両モーター共に、同じ取付角42mmですが、PKPシリーズは主に低速領域で高トルクとなっています。PKシリーズを使用していた場合、PKPシリーズにそのまま置き換えることで必要トルクに対する余裕が生まれます。

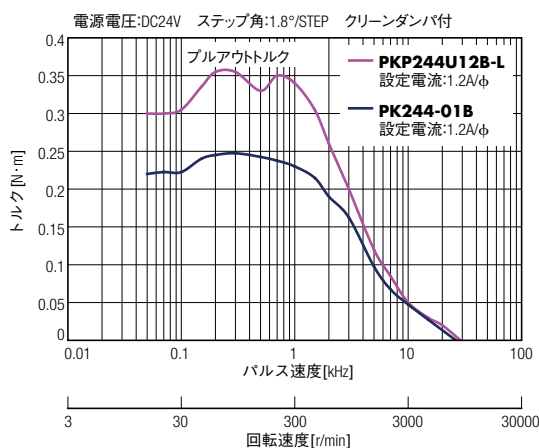


図11 PK、PKPシリーズ比較 速度—トルク特性

### 3.1. 小型・省スペース化

PKPシリーズは前述のとおり、従来のPKシリーズと比較して、同サイズで高トルクを実現しているモーターです。その一例として図12に、従来製品のPK264-01B(取付角56.4mm)と、PKPシリーズのPKP244U12B-L(取付角42mm)の速度—トルク特性を示します。

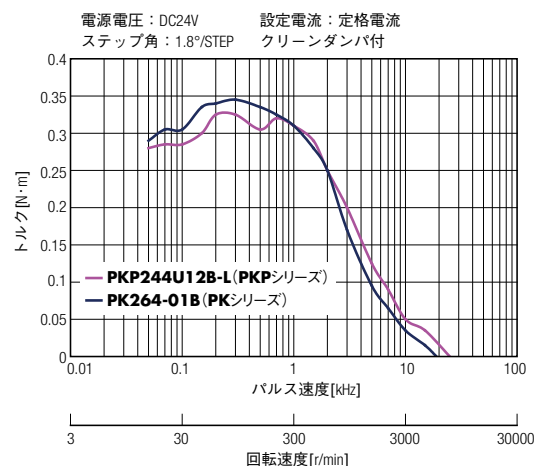


図12 速度—トルク特性比較

モーターサイズは違いますが、比較するとほぼ同等のトルクが出力されていることがわかります。したがって、**PK264-01B** から **PKP244U12B-L** への置き換えが可能です (図 13 参照)。これによって、モーター用に必要なスペースを小さくすることができ、複数軸でモーターを使用していれば、装置全体の小型化が可能になります。

小型化によって、装置の重量が軽くなりますので、モーターと一緒に動く装置では高速化につながります。

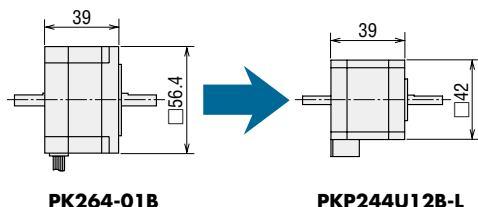


図 13 小型・省スペース化

### 3.2. 低発熱・省電力化

図 14 は、電流値を変化させたときの速度—トルク特性です。電流値を 1.2A、1A、0.8A と変化させたとき、その割合に比例してトルクも変化しています。

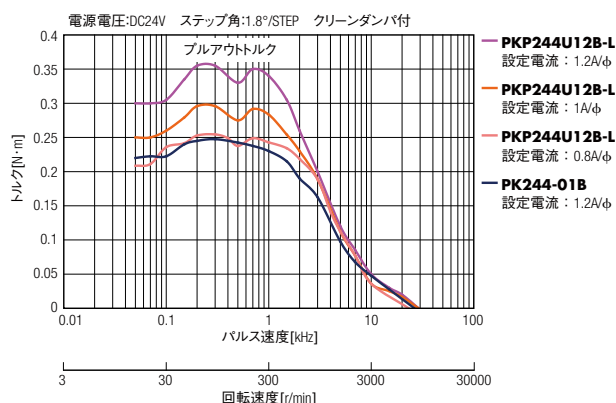


図 14 電流値に比例するトルク

定格電流 1.2A/相の **PKP** シリーズである **PKP244U12B-L** を、定格電流の 2/3 の 0.8A/相の電流値で駆動させたとき、同じ大きさで定格 1.2A/相の **PK** シリーズである **PK244-01B** を定格電流で駆動したときと同等のトルクとなっています。したがって、**PK** シリーズから **PKP** シリーズに置き換えると、電流を 1.2A から 0.8A に下げられます。

電流を下げると、モーターの入力と損失も下がるので、発熱の低下につながります。図 15 に、**PKP** シリーズと **PK** シリーズのトルクを同等にした場合の外被の温度上昇特性を示します。

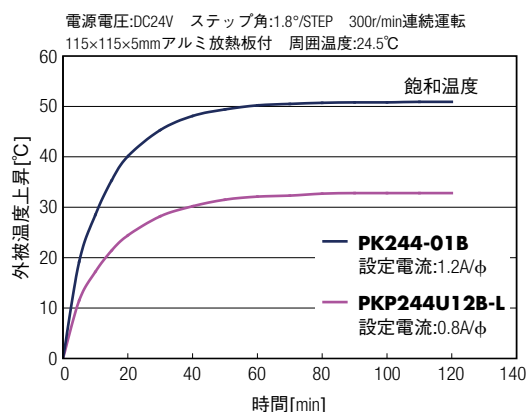


図 15 温度上昇特性

**PKP** シリーズの方が、**PK** シリーズより飽和温度上昇は 18.2°C 低く、発熱低減の効果がわかります。

ステッピングモーターは位置決め用途に使用されることが多い制御用モーターです。AC モーターのように連続的な運転を行うと、モーター内部の温度が上昇します。当社では、モーター内部の巻線温度上昇 80°C 以下を仕様としています。しかし、お客様がモーター内部の巻線温度を測定することはできませんので、目安としてモーター外被温度 100°C 以下としています。

また、当社では **αSTEP AR** シリーズの技術を応用した発熱を低減した高トルク・高効率タイプの 2 相ステッピングモーター **PKE244B-L** を販売しています。

## 4. まとめ

ハイブリッド型ステッピングモーターは、オープンループで簡単に高精度な位置決めシステムを構築できるモーターです。

ここで紹介した **PKP** シリーズは従来品よりもトルクの高いモーターとなっており、置き換えることで高いトルクを得ることができます。トルクアップの必要がない場合でも、小型のモーターに置き換えて、省スペースや軽量化に役立てることができます。また、入力を抑えて使うことで低発熱・省電力な使い方もできます。**PKP** シリーズの高い性能が、お客様の装置の性能向上に役立つことと考えます。

### 参考文献

- (1) 丸山 淳, 「ステッピングモーター **PK** シリーズ各タイプの特性」, RENGA, No.164, (2003), pp19-23
- (2) 中村 徳政, 「解説 6 ステッピングモーターの特性」, 機械設計, Vol.55, No.8, (2011), pp58-63

表1 2相 PKP シリーズ ラインアップ一覧

タイプ名	特長	取付角 [mm]				
		20	28	35	42	56.4 (ギヤ部 60)
標準タイプ	従来品に比べて 1.2~1.7 倍のトルク	○	○	○	○	○
SH ギャードタイプ	減速、トルクアップ、分解能アップ、振動抑制に効果的です。従来品に比べバックラッシュが小さく、許容速度範囲も広がっています。	-	○	-	○	○

筆者



金子 貴志

MS 事業部