

# 高性能・高機能ブラシレスモーターユニット BXIIシリーズの開発

植中佑太郎 新開克巳

## Development of the **BXII** Series Brushless Motor and Driver Package with High Performance and High Functionality

Yutaro UENAKA, Katsumi SHINGAI

Brushless motors offer great features such as energy-saving, space-saving, wide-range speed control and excellent speed stability, and are therefore used as the drive sources of various types of equipment and devices. However, for the past few years, the demand for equipment and devices has been increasing even further and along with this, the demand for higher performance in motors also has started to increase dramatically.

In order to meet such market demands, we developed the **BXII** Series which is the top-of-the line model among the brushless motors. By adding a current loop to its features, the characteristics and functions of the **BXII** Series have become closer to the servo motors. Therefore, this product has become a commodity that can be used in an even wider range of applications than our conventional products.

This article introduces the new features of the **BXII** Series as well as the new technologies which were required to achieve those new features.

### 1. はじめに

ブラシレスモーター<sup>(注1)</sup>は、ローターに永久磁石を採用しており、薄型でありながら高出力なモーターです。また、インバータ駆動のインダクションモーターよりも高効率で可変速範囲も広いという利点を持っています。そのブラシレスモーターの中でも、速度制御だけでなく位置制御やトルク制限機能を備えた **BX** シリーズは、ブラシレスモーターの最上位機種です。

近年では半導体や液晶、電子部品の製造装置などを中心として、より高精度で高応答、高機能のモーターが求められるようになりました。このような高い要求に応えるべく、**BX** シリーズをリニューアルし、高性能・高機能を実現した **BXII** シリーズを開発しました。**BXII** シリーズはブラシレスモーターの使いやすさを損なわずに、サーボモーターに迫る性能と機能を実現した製品です(図1参照)。



図1 ブラシレスモーターユニット **BXII** シリーズ

### 2. **BXII** シリーズの特徴

**BXII** シリーズはブラシレスモーターのメリットを継承しつつ、性能・機能を向上しています。**BXII** シリーズには次のような特徴があります。

#### ・幅広い速度制御範囲

速度制御範囲 2 ~ 4000r/min (速度比 1:2000) と幅広い速度で運転が可能です。

(注1) 当社ではブラシレス DC モーターのことをブラシレスモーターと呼んでいます。

・優れた速度安定性

速度変動率が±0.05%なので、負荷が変化するような用途でも安定した運転が可能です。

・操作パネル搭載

ドライバ本体の操作パネルで運転データやパラメータの設定、操作ができます。また、回転速度、負荷率、現在位置、運転番号などを表示できます。

・位置制御が可能

操作パネルでデータ設定ができるようになりましたので、ドライバ本体のみで位置決め運転が可能です。

・トルク制限、モニタ機能搭載

モーターのシャフトに加わっている負荷をモニタすることができます。また、モーターの最大出力トルクを制限することができます。

・省スペース化

ドライバ形状を従来品よりも薄型にしました。また、複数のドライバを密着して取り付けることが可能になり、省スペースでの設置ができます。

### 3. BXIIシリーズの新技术

**BXII**シリーズは、従来品よりもドライバの省スペース設置が可能になりました。また、トルク制限精度や応答性も向上しています。これらを可能とした技術を紹介します。

#### 3.1. 損失低減と省スペース化

**BXII**シリーズのドライバは、パワー素子の損失低減、放熱構造の改善、部品配置の見直しにより<sup>(1)</sup>、従来品よりも薄型にしました。また、複数のドライバを密着して取り付けることが可能になり、従来品よりも同じ設置スペースで軸数を増やすことが可能です。これにより、設備や制御盤の小型化に貢献できます（図2参照）。

ここでは、薄型化、密着取付を可能とした損失低減と、放熱構造の改善について説明します。

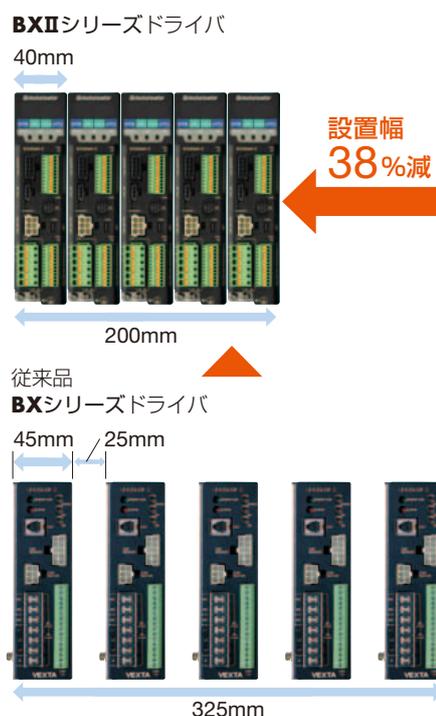


図2 設置スペースの比較

#### 3.1.1. 二相変調方式による損失低減

ドライバの発熱にはいくつかの要因がありますが、そのひとつとして、パワー素子の損失があります。**BXII**シリーズではパワー素子の損失を低減するため、インバータの変調方式を従来の三相変調方式から二相変調方式に変更しています。二相変調方式を採用した場合、次のメリットがあります。

- ・インバータ出力電圧利用率の改善
- ・パワー素子スイッチング損失の低減

ここでは、パワー素子スイッチング損失の低減について説明します。

スイッチング損失とはパワー素子がOFF状態からON状態、またはON状態からOFF状態に移行するときに発生する損失です。パワー素子はOFF状態からON状態に移行するとき、図3に示すような時間( $\Delta T_{on}$ )がかかります。図3の波形は図4の箇所で測定した波形です。 $\Delta T_{on}$ の間、パワー素子に印加される電圧がゼロにならないため電力損失が発生します。これがスイッチング損失です。

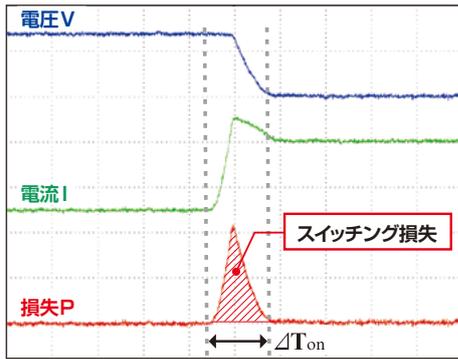


図3 スwitching損失の波形

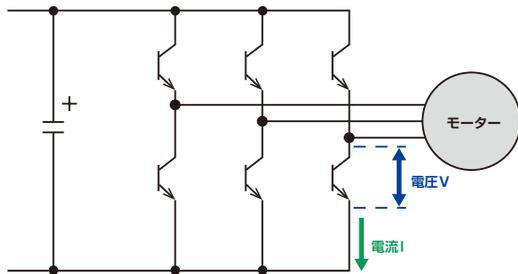


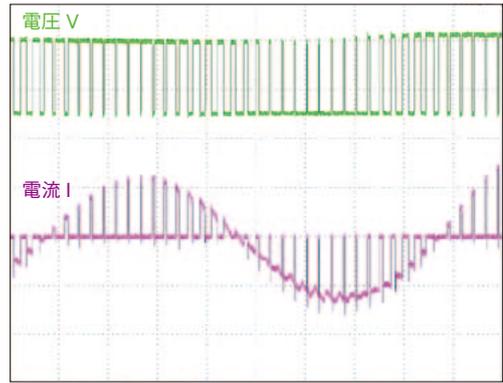
図4 パワー素子電圧・電流波形測定箇所

従来の三相変調方式では、三相インバータのすべての相を常にスイッチングしているため、スイッチング損失が大きくなっていました。一方、二相変調方式では、三相インバータのうち一相のスイッチングを1/3周期の間停止し、残りの二相で電流を制御します(図5)。スイッチングを1周期中の1/3期間停止することで、スイッチング損失を抑え発熱を抑制することができます。表1は出力400Wのモーター(**BXM6400-A**)を定格運転で駆動したときの、三相変調方式と二相変調方式での、パワー素子の1周期中の損失を示します。変調方式を二相変調方式にすることで、スイッチング損失(SW損失)を低減することができます。

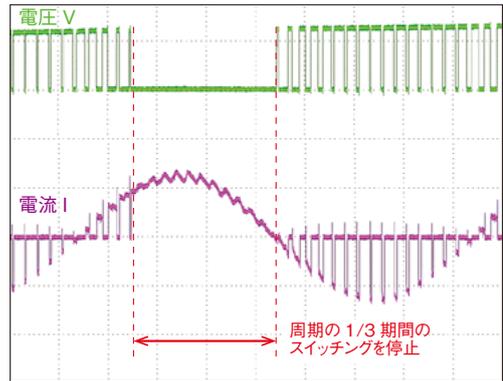
表1 二相変調方式と三相変調方式のパワー素子損失

変調方式	パワー素子損失		
	オン損失	SW損失	全損失
三相変調	1.63W	0.95W	2.58W
二相変調	1.75W	0.26W	2.01W

図6に三相変調方式と二相変調方式で、モーター(**BXM6400-A**)を駆動したときのパワー素子の温度分布結果を示します。青線で囲っている部分がパワー素子です。三相変調方式で駆動したときよりも二相変調方式で駆動したときの方が、スイッチング損失が低減したことで温度が低下しています。



三相変調方式



二相変調方式

図5 各変調方式のパワー素子電圧・電流波形



パワー素子  
温度分布(三相変調)



パワー素子  
温度分布(二相変調)

図6 二相変調と三相変調の温度分布比較

### 3.1.2. 放熱構造の改善

**BXII**シリーズは、ドライバの薄型化と密着取付を実現するために、放熱板構造を従来品のL字型の構造からフィン型の放熱板構造にしています。図7に従来品、図8に**BXII**シリーズの密着取付時の熱解析結果を示します。従来品の放熱板構造では、中央のドライバは両側が塞がれており、空気の流れ経路が確保できないので温度が高くなります。これに対し**BXII**シリーズの放熱板構造は、両側を塞がれていても空気の流れ経路を確保できるため、温度上昇を低く抑えることができます。

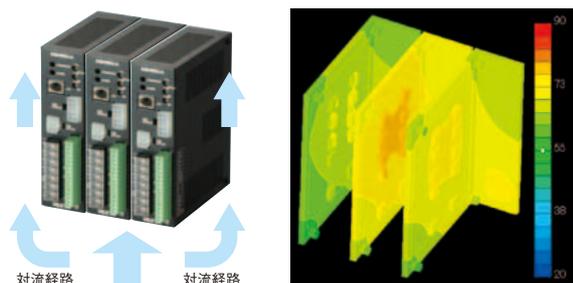


図7 熱解析結果(従来品:L字型放熱板)

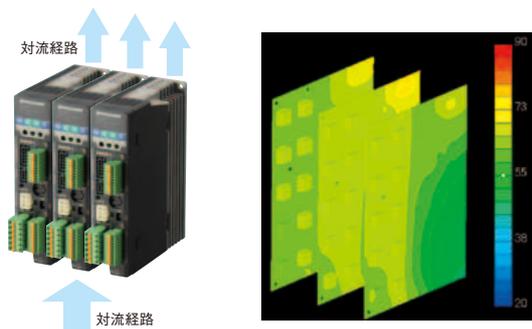


図8 熱解析結果(**BXII**シリーズ:フィン型放熱板)

### 3.1.3. 取付環境と温度上昇

ドライバの放熱は空気の流れ以外にも、設置する取付板への放熱がありますので、**BXII**シリーズではドライバを設置する取付板のサイズを規定しています(単体:200mm×200mm×2mm、密着:350mm×350mm×2mm)。

密着取付を行う場合、モーター出力が120W以下の場合には周囲温度50°Cで運転可能ですが、モーター出力が200W・400Wの場合には、モーターの電流値が高く、ドライバ内部の温度も高くなりますので、周囲温度40°Cに制約を設けています。また、図9のように冷却ファンを取り付け、空気を対流させる場合は、200W・400Wの場合でも周囲温度50°C環境での使用が可能です。

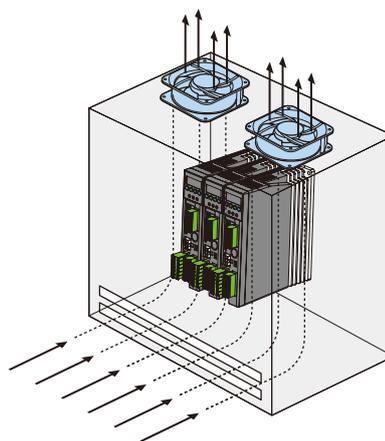


図9 ファンを取り付けた場合

### 3.2. 電流検出精度の向上による制御性改善

従来品では電流検出回路を搭載せずに、ドライバの運転状態から負荷率を推定し、トルク制限を行っていました。この方式は、モーターの電流を検出していないため、トルク設定値に対する誤差が大きくなります。

**BXII**シリーズでは電流検出回路を追加し、電流とトルクの制御性が高くなっています。

#### 3.2.1. 相電流検出回路

図10に**BXII**シリーズのモーターの電流検出回路を示します。モーター動力線に直接抵抗を挿入し、検出抵抗両端の電圧をCPUに取り込み、電流値とする方式です。この方式は、絶縁回路が必要になりますが、モーター電流を直接検出することが可能なため、高精度な電流検出が可能です。

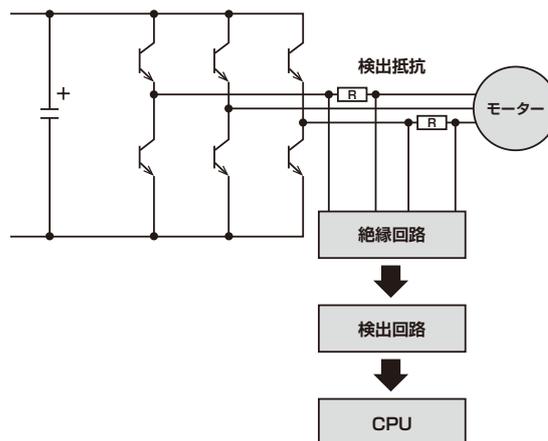


図10 相電流検出回路

図11に**BXII**シリーズの制御ブロック図を示します。**BXII**シリーズは速度ループの内側に、電流ループを構成しています(2)。電流ループは、相電流検出回路と電流演算器から得られた電流値が、速度制御器の出力である電流指令値に追従するように、PWMインバータの

出力電圧を調整します。このようにモーター電流を検出し、制御することでトルク精度の向上を行っています。

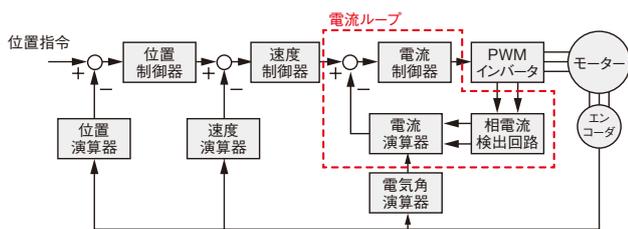


図 11 BXIIシリーズ 制御ブロック図

### 3.2.2. トルク制限精度の向上

**BXII**シリーズは、出力トルクの最大値を制限できるトルク制限機能を搭載しています。この機能を使うことで、巻き取り用途、押し当て用途など、お客様の装置に合わせてトルクを制限することができます。また、トルク制限機能のON/OFFを簡単に切り替えられる外部信号（TL 入力）を追加しました（図 12 参照）。

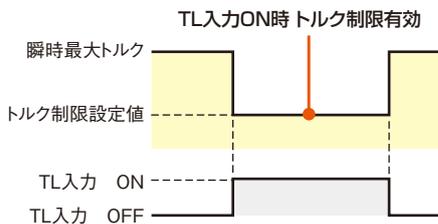
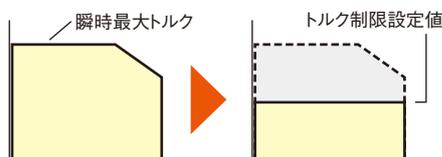


図 12 トルク制限機能

先に述べたように、**BXII**シリーズではモーター電流を検出し電流を制御することで、トルクの制御性が高くなり、トルク制限のずれが従来品の 1/4 になりました。図 13 に従来品と **BXII**シリーズのトルク制限設定値に対する誤差を示します（定格トルクを 100%とした場合）。

また、図 14 に温度変化による出力トルクの変動を示します（トルク制限設定値  $0.65\text{N}\cdot\text{m}$ ）。従来品は温度変化によりトルク制限精度が悪くなっています。これは、モーターの電流を検出せずに制御を行っているため、部品の温度特性の影響により、トルク制限設定値に対する誤差が大きくなるためです。**BXII**シリーズでは電流を検出し制御しているため、温度に対するトルク制限精度が改善されていることが分かります。

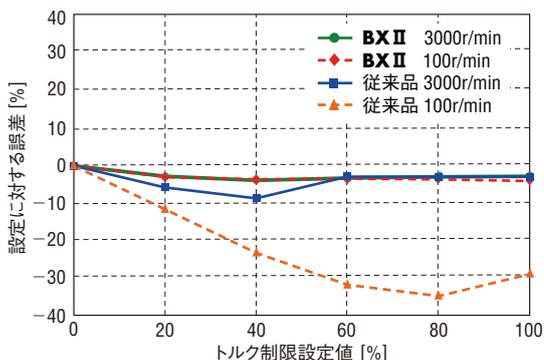


図 13 トルク制限設定値に対する誤差 (BX6200A-AとBX56200A-Aの比較)

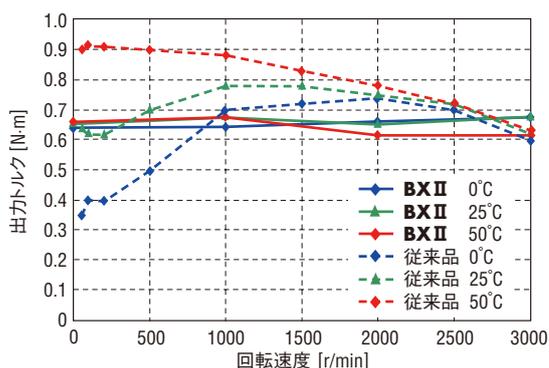


図 14 温度によるモーター出力トルクの変動 (BX6200A-AとBX56200A-Aの比較)

### 3.2.3. 応答性の向上

**BXII**シリーズは、電流ループの追加やパラメータの変更により、従来品に比べ応答性が向上しています。図 15 にロータ慣性の 2 倍の負荷を取り付けたときの位置決め応答特性を示します（移動量 40 回転、回転速度 3000r/min）。(a) は **BXII**シリーズ、(b) は従来品の特性を示します。**BXII**シリーズは従来品よりも、指令速度までの応答が向上しており、位置決めに必要な時間が 48ms 短縮できます。

また、用途に応じてゲインチューニングすることで、応答性を向上させることもできます。図 16(a) にゲインチューニングしたときの **BXII**シリーズの特性を示します。ゲインチューニングすることにより応答性が向上し、図 15 と同じ負荷条件で位置決め時間を 126ms 短縮することができます。ゲインチューニングを行うことでさらに高速な位置決め運転が可能となりますので、高速・高応答を必要とする用途でも使用することができます。また、**BXII**シリーズにはオーバーシュートを抑えたり、お客様の機構に与える負荷を緩和することができる速度フィルタがあります。(b) に速度フィルタを調整した特性を示します。速度フィルタを入れることで起動・停止時のモーター動作が滑らかになっています。

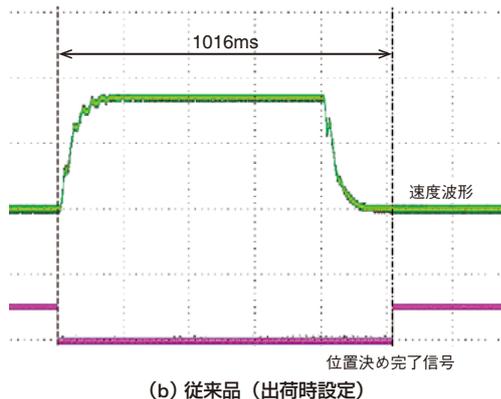
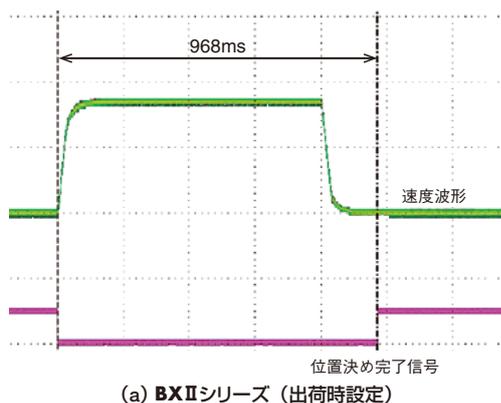


図 15 位置決め応答特性の比較

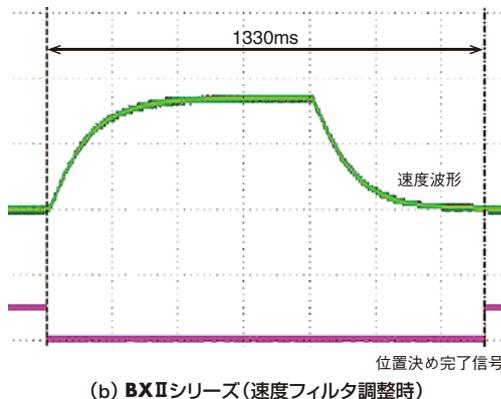
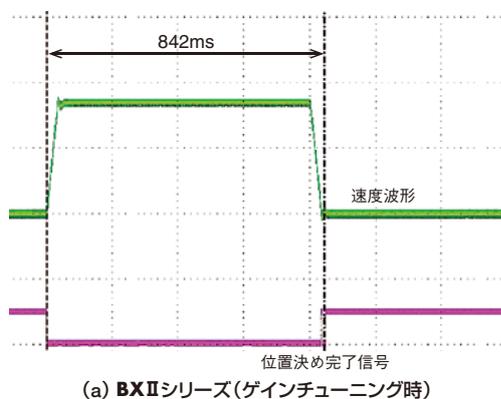


図 16 ゲインおよびフィルタ調整時の応答特性

## 4. BXIIシリーズの向上した性能と新機能

ここでは、**BXII**シリーズが従来品と比較して、向上した性能と**BXII**シリーズで新たに追加された機能について説明します。

### 4.1. 速度制御

#### 4.1.1. 速度制御範囲の拡大

**BXII**シリーズは従来品と比較して、速度制御範囲を拡大しています。図 17 に **BXII**シリーズ 400W の回転速度-トルク特性を示します。従来品の速度制御範囲は 3 ~ 3000r/min、速度比は 1:1000 でしたが、**BXII**シリーズでは 2 ~ 4000r/min まで設定可能になり、速度比も 1:2000 と従来品と比較して 2 倍になりました。

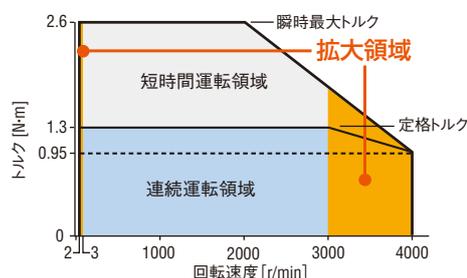


図 17 BXIIシリーズの回転速度-トルク特性 (BX56400C-A)

#### 4.1.2. 速度設定のゲイン・オフセット機能

**BXII**シリーズには次のような速度設定方法があります。

##### デジタル設定

- ・ 操作パネル (図 18)
- ・ データ設定器 (**OPX-2A**)
- ・ データ設定ソフト (**MEXE02**)

##### アナログ設定

- ・ 内部速度設定器
- ・ 外部速度設定器
- ・ 外部直流電圧

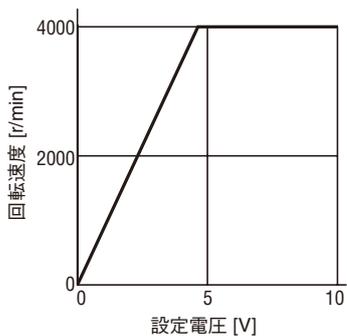


- ・ MODE キー  
モードの切り替えなどに使用
- ・ 上下キー (△▽)  
選択の変更などに使用
- ・ SET キー  
確定などに使用

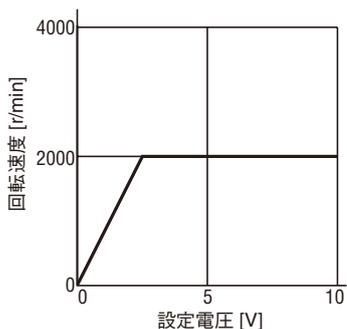
図 18 操作パネル (トルクモニター時)

**BXII**シリーズで速度設定方法を外部速度設定器、外部直流電圧に選択した場合は、パラメータにより最大値やオフセット、1V あたりの速度指令を設定することが可能です。

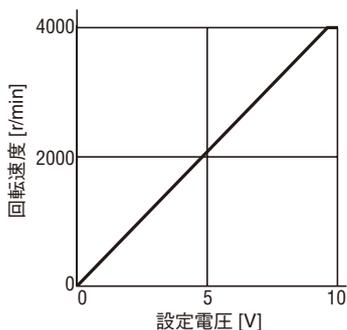
図 19 に外部電圧での速度指令の調整例を示します。



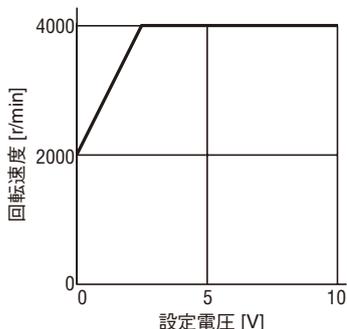
(a) 出荷時設定の外部電圧と速度指令  
外部電圧が5Vのときに4000r/minで回転



(b) 上限リミット設定時  
速度最大値を2000r/minに設定した場合  
外部電圧の値を上げてても2000r/minで制限される



(c) ゲイン調整時  
外部電圧と速度設定の傾きを変えて10Vのときに  
4000r/minで回転するように設定した場合



(d) オフセット設定時  
速度指令のオフセットを2000r/minに設定した場合  
外部電圧が0Vでも2000r/minから回転

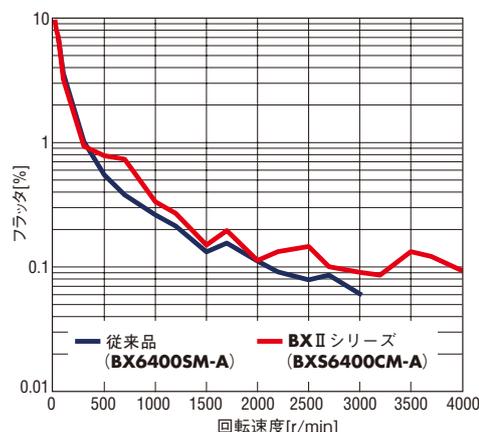
図19 外部電圧での速度指令の調整例

これらの機能を使用することで、従来品での並列運転の場合に各ドライバに必要な調整用の外部抵抗が不要になります。

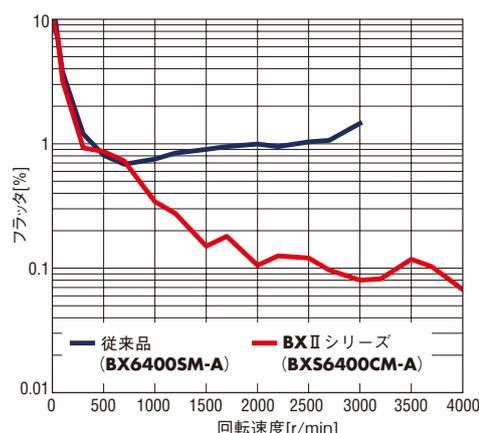
### 4.1.3. 速度安定性

ブラシレスモーターは、速度むらが少ないモーターなので、速度安定性が求められる用途に適しています。また **BXII** シリーズは、負荷・温度・電圧の変化に対する速度安定性も優れており、速度変動率は0.05%以下（デジタル設定時）となっています。

**BXII** シリーズと従来品のフラッタ特性を図20に示します。フラッタ特性とはモーターの速度むらを表しており、数値が小さいほど速度むらが無く、安定して回転していることを表しています。図20(a)は電源電圧200Vでのフラッタ特性、図20(b)は電源電圧240V（従来品では230V）でのフラッタ特性です。従来品は速度制御系の内部に電流制御系が無いため、電源電圧の設定を変えるとフラッタ特性が悪くなっていますが、**BXII** シリーズでは電流を検出して制御しているため、電源電圧の設定を変えてもフラッタ特性は安定しています。



(a) **BXII**シリーズと従来品のフラッタ特性の比較  
(電源電圧：三相200V)



(b) **BXII**シリーズと従来品のフラッタ特性の比較  
(電源電圧：三相230V or 240V)

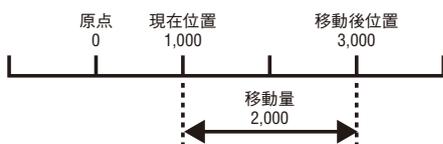
図20 フラッタ特性

## 4.2. 位置制御

### 4.2.1. 位置決め方式

一般的に位置決め方式には、原点位置から移動量を設定する「絶対方式」と、現在位置からの移動量を設定する「インクリメンタル方式」の2種類があります。**BXII**シリーズの位置決め方式は絶対方式、インクリメンタル方式どちらでも可能です（ただし、絶対方式にはバッテリーバックアップ機能はありません）。図21に設定3000とした場合の、各位置決め方式の違いを示します。

絶対方式  
設定値：3,000



インクリメンタル方式  
設定値：3,000



図21 位置決め方式の違い

### 4.2.2. 連結運転

**BXII**シリーズは、位置決めデータ設定点数が従来の6点から10点増え、16点まで設定可能となりました。また、単独運転の運転方法に加え、データを連結できる連結運転や、データを連結させて待ち時間（ドウェル時間）の設定ができる連結運転2の機能を搭載しました。単独運転では図22(a)のように、運転データごとにスタート信号が必要でしたが、連結運転では図22(b)(c)のように、1回のスタート信号で複数の運転データを運転することができます。

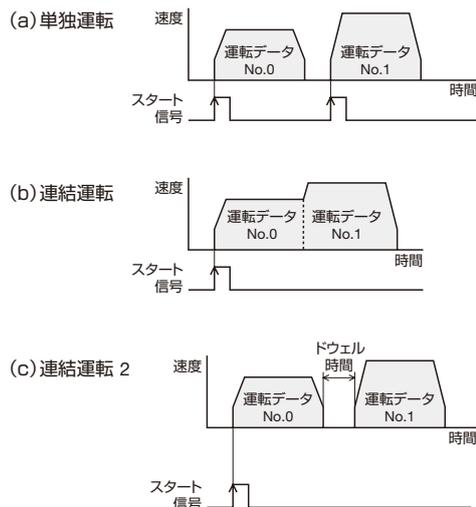


図22 単独運転と連結運転

### 4.2.3. ラウンド機能

ラウンド機能は、現在位置が設定した値を超えると位置情報と多回転データをゼロに戻す機能です。図23のインデックス機構のように同一方向に回転する場合、位置情報のリミットを超えてしまい、正しく位置決めできなくなります。しかし、ラウンド機能を使うと、設定した値で位置情報がゼロになるため、同一方向の回転で使用し続けることができます。

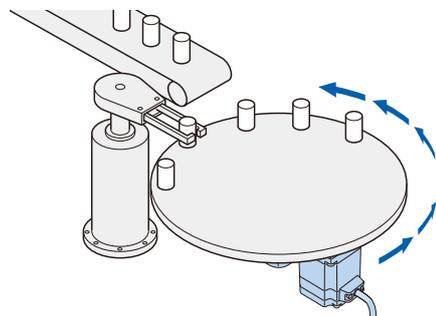


図23 同一方向に連続回転する場合の用途例

## 5. BXIIシリーズのラインアップ

表2に**BXII**シリーズのラインアップを紹介します。

**BXII**シリーズでは、従来品で要望の多かった単相200V-400W出力のラインアップを追加しています。

表2 **BXII**シリーズのラインアップ

モーター取付角寸法		[mm]	60	80	90	104	104
出力		[W]	30	60	120	200	400
コンビタイプ 平行軸ギヤヘッド	単相 100-120V		○	○	○	○	—
	単相 200-240V		○	○	○	○	○
	三相 200-240V		○	○	○	○	○
コンビタイプ 中空軸フラット ギヤヘッド	単相 100-120V		○	○	○	○	—
	単相 200-240V		○	○	○	○	○
	三相 200-240V		○	○	○	○	○
丸シャフトタイプ	単相 100-120V		○	○	○	○	—
	単相 200-240V 三相 200-240V		○	○	○	○	○

※ 各タイプに電磁ブレーキ付をご用意しています。  
※ オプションのケーブルと組み合わせて、最大30mまで延長可能です。

## 6. まとめ

**BXII**シリーズは市場の高いニーズに応えるべく開発したブラシレスモーターの最上位機種です。従来品である**BX**シリーズの良さを継承しつつ、サーボモーターに迫る性能、機能で幅広い用途に使える商品です。

**BXII**シリーズをお使いいただくことで、装置の性能向上や小型化に貢献できると考えております。

今後も、お客様の「使いやすさ」にこだわった商品を開発し、ラインアップの拡充を進めていきます。

### 参考文献

- (1) 新免 浩・榊原 昭宏, 「5相ステップモーターユニット **RKII**シリーズの特徴」, RENGA, No.177, (2013), pp.4-10
- (2) 瀧本 正浩, 「ブラシレスモーターユニット **BLE**シリーズの制御技術」, RENGA, No.174, (2011), pp.4-9

### 筆者



植中 佑太郎

PD 事業部



新開 克巳

回路事業部