ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

概要

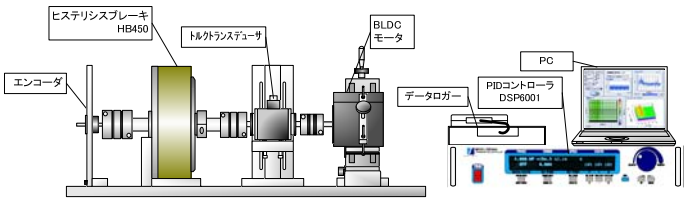
Magtrol社のTMシリーズトルクトランスデューサとヒステリシスブレーキを用いたトルクリップル測定システムです。

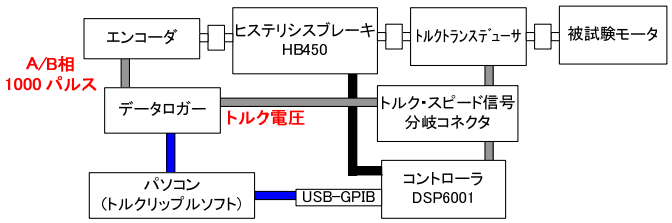
TMシリーズの高速応答という特長を活かして高速回転でのリップル測定が可能です。

データロガーと組み合わせて、ブレーキ負荷とリップル成分の関係を解析することができます。

システム構成

- ヒステリシスブレーキ HB-450
- トルクトランスデューサ　TMB204
- ロータリエンコーダ
- データロガー
- コントローラ DSP6001
- BLDCモーター
- パソコン





1. 被試験モータを**回転制御**で回転させながら、DSP6001コントローラで徐々にブレーキ電流を加えていきます。
2. データロガーは**エンコーダのパルス**とトルクトランスデューサの**トルク電圧**を連続して収録します。
3. パソコンはデータロガーのデータを**リアルタイムでFFT処理**し、**周波数**・**回転数**・**ブレーキ負荷**・**リップル振幅**を強度分布グラフに表示します。

システムの特徴

トルクリップルのように変動の早いトルクを計測するためには、応答の速いトルク検出器を用いるか、または計測時の回転数を低くしてトルクの変動を遅くすることが必要です。

Magtrol社のトルクトランスデューサは、トルク出力の応答速度が5kHzと非常に高速です。このため、回転数を低くせずに、変動の早いトルクを計測することが可能です。

また、ブレーキ負荷を変化させながらトルク信号をFFT処理することにより、モーターの構造に依存するリップル成分と、ドライバが供給する電流に依存するリップル成分をそれぞれ解析することができます。

システム仕様

HB-450 :

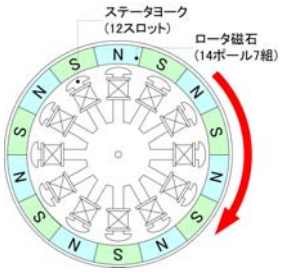
定格トルク 3.2 Nm
イナーシャ 7.50 x 10^{-4} kgm^2
最大回転数 8,000rpm

TMB204 :

定格トルク 1.0Nm (5Vフルスケール)
トルク分解能 ±0.15mNm
イナーシャ 2.8 x 10^{-5} kgm^2
最大回転数 6,000rpm
ねじれ度　145 Nm/rad

被測定モーター :

定格トルク 300mNm
定格回転数 2000rpm
イナーシャ 2 × 10^{-5} kgm^2
モーター構造　12 スロット / 14 ポール
制御方法　回転制御



㈱東陽テクニカ　汎用計測営業部
〒103-8284　東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp

http://www.toyo.co.jp/magtrol

ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

- **測定の手順 (回転制御モーターの場合)**
  1. **リップル周波数の推定**: モーターの構造から、ある回転数でリップル周波数がいくつになるかを推定します。
  2. **回転数の検討**: **測定系の応答特性**と、トルクトランスデューサの**応答周波数**を考慮し、測定する回転数を検討します。
  3. **全体の傾向を把握**: 3次元の**ウォーターフォールグラフ**で周波数・ブレーキ負荷・リップル振幅を表示します。
  4. **特定の周波数で解析**: モーターの構造から、機械的リップル(コギング)や電流リップルの周波数を計算し、**ブレーキ負荷とリップル振幅の関係**を解析します。

1. リップル周波数の推定

モーターのポール数とスロット数を確認します。今回のモーターは14ポール(SN 7組)・12スロットです。よって、**機械的なリップル周波数**は **[7 × 1秒あたりの回転数]**、**電流によるリップル周波数**は、**[12 × 1秒あたりの回転数]** に現れます。また、これらを**合成したリップル周波数**は、**[84 × 1秒あたりの回転数]** に現れます。(7 と 6 の最小公倍数は42)

例えば1000rpmの場合、

- 機械的なリップル: 7×1000÷60 = 116.67 Hz
- 電流によるリップル: 12×1000÷60 = 200 Hz
- 合成したリップル: 84 × 1000÷60 = 1400 Hz

となります。また、これらの2倍、3倍、、、の高調波成分も現れます。

2. 回転数の検討

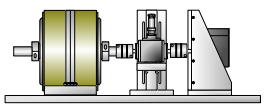
トルクリップルの試験では、解析の対象となるリップル成分と不要なリップル成分が混在するため、それらを区別することが重要です。不要な成分としては、測定系の**固有周波数**があります。

固有振動数と共振

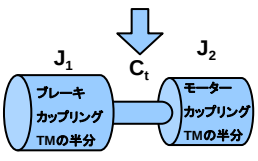
この測定系をモデル化すると、下図のようにネジレ部C_tにイナーシャJ_1とJ_2が繋がった形になります。(Drive Train Modelと呼ばれます) そして、このモデルでの固有振動数は、以下の式で表されます。

今回の測定系で固有振動数を計算すると、カップリングが 約 1×10^{-5} kg・m^2 として、

f_0 は **294 Hz** となります。



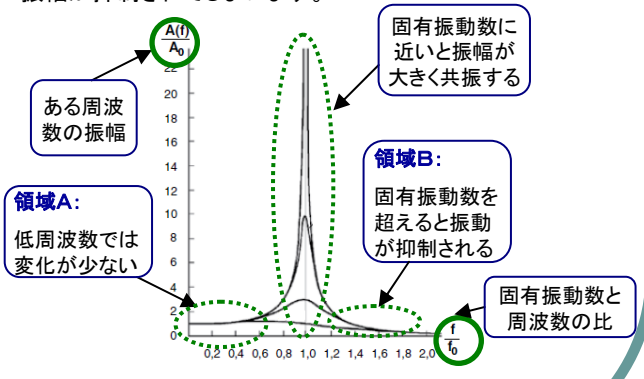
$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{C_t \frac{J_1 + J_2}{J_1 \times J_2}}$$



f_0 : 固有振動数 $[Hz]$
C_t : ねじれ度 $[Nm/rad]$
J_1 : イナーシャ $[kg \cdot m^2]$
J_2 : イナーシャ $[kg \cdot m^2]$

よって、294Hz 付近に解析の対象となるリップル成分が重ならないような回転数で測定する必要があります。

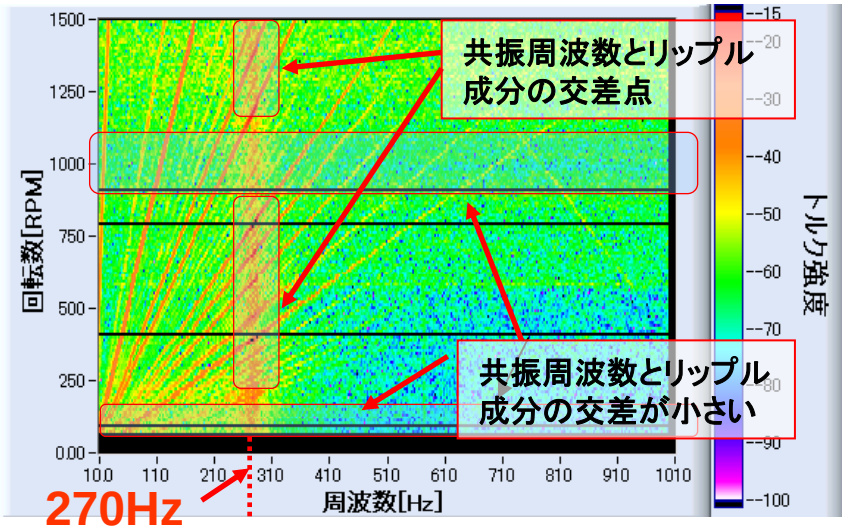
下図のように、固有振動数より低い周波数領域(**領域A**)では、測定系による振幅の変化は少なくなります。一方、固有振動数より高い周波数領域(**領域B**)では、振幅が抑制されてしまいます。

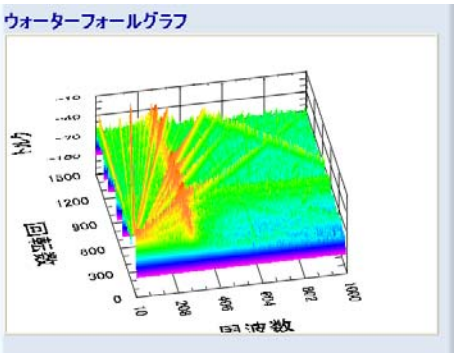


㈱東陽テクニカ 汎用計測営業部
〒103-8284 東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp

ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

下の図は、ブレーキ負荷を加えずに回転数を **0 ～ 1500 rpm** までスイープしたときの強度グラフとウォーターフォールグラフです。回転数と周波数が比例しているところは、モーターが発生するリップル成分です。また、回転数に関係なく一定の周波数のところは、およそ **270Hz**で**共振による成分**です。そして、それらが交差する位置では、共振の振動数とリップルの振動が重なってトルク強度が大きくなることがわかります。さらに重要なことは、ある回転数の範囲(100rpm以下、または900から1100rpm)では共振周波数とリップル成分の交差が小さくなることです。





それでは、回転数をいくつにすればよいのかを検討します。上で述べたように、ある回転数では共振周波数とリップル成分が重なってしまい、リップル成分の解析ができなくなります。そのため、これらの重なりが少ない回転数で解析しなければなりません。

今回の測定では、重なりの少ない回転数は、**900から1100rpm と 100rpm以下** にあることがわかります。そこで、代表値として **1000rpm** と **100rpm** の2通りを選択します。

「1. リップル周波数の推定」で示した **1000rpm** の場合、機械的なリップルと電流によるリップルの成分は低周波領域に現れ、合成したリップルは高周波領域に現れます。よって、合成したリップル成分は減衰するために相対値としての測定が可能です。

100rpm の場合、合成したリップル成分も140Hzとなり、低周波領域で測定することができます。このように、測定系の応答特性に応じて回転数を調整すれば、解析したいリップル成分を測定することができます。

また、トルクトランスデューサの応答周波数にも注意してください。トルクトランスデューサには、トルク信号のローパスフィルタ周波数を調整するディップスイッチがあります。カットオフ周波数は最大で**5kHz** なので、それより高い周波数では測定できません。解析したい成分がカットオフ周波数より小さくなるように、回転数を調整してください。

㈱東陽テクニカ　汎用計測営業部
〒103-8284　東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp

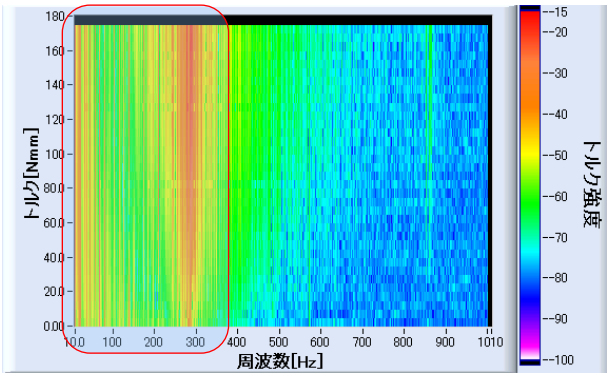
ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

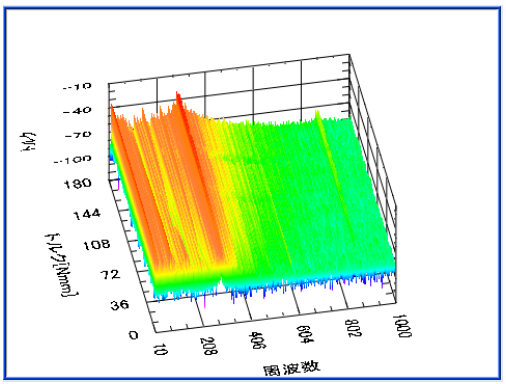
3. 全体の傾向を把握

回転数が決まったら、3次元のウォーターフォールグラフで測定系全体の傾向を確認します。
ここでは、**100 rpm** と **1000 rpm** の2通りで確認します。

100 rpm の測定結果

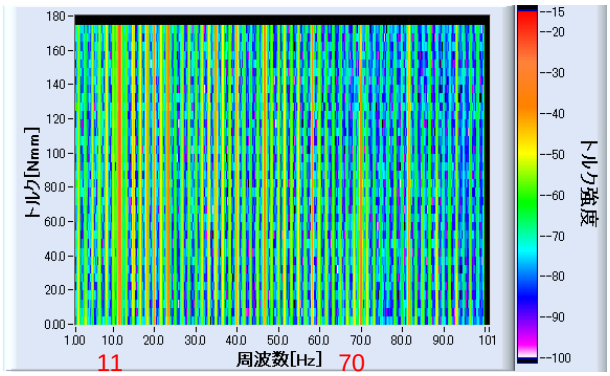
10から1kHzの解析

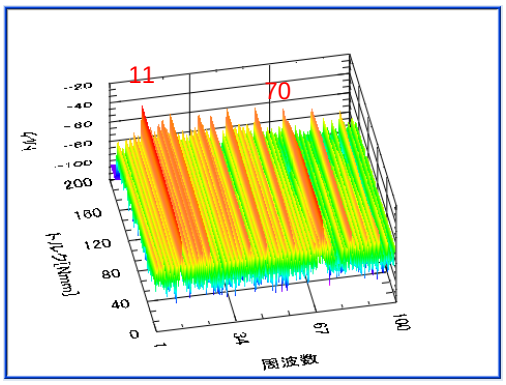




まず、10から1kHzの解析結果を見ると、およそ400Hz以上の周波数ではリップル成分が無いことがわかります。共振周波数付近は解析に適していないため、解析の対象は共振周波数の270Hzよりも小さな領域に絞ることができます。

1から100Hzの解析





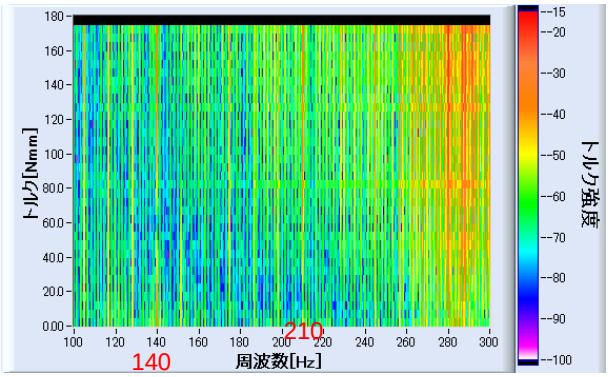
次に、1から100Hzの解析結果を確認します。特に強いところは、**11Hz,70Hz** が確認できます。11Hzは機械的なリップル(コギング)の成分、70Hzは合成したリップル 140Hzの半分です。

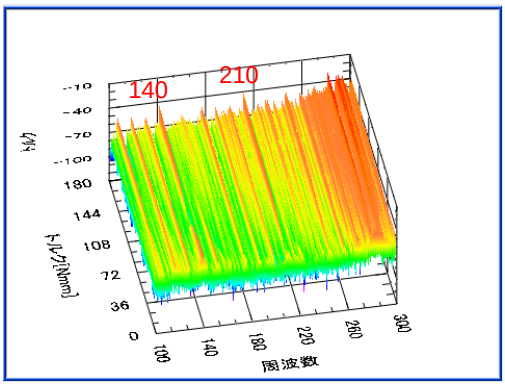
これらのピークは、次のステップでブレーキ負荷とリップル振幅の関係を解析をします。

㈱東陽テクニカ　汎用計測営業部
〒103-8284　東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp

ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

100から300Hzの解析



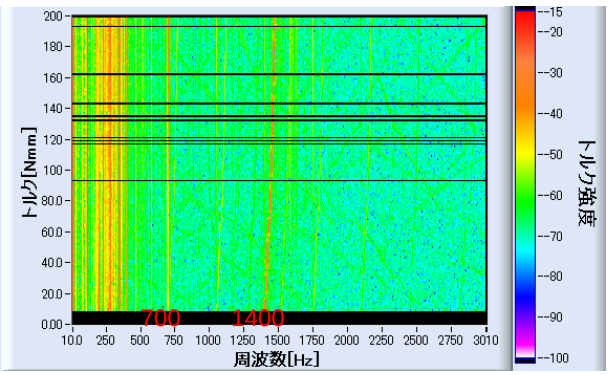


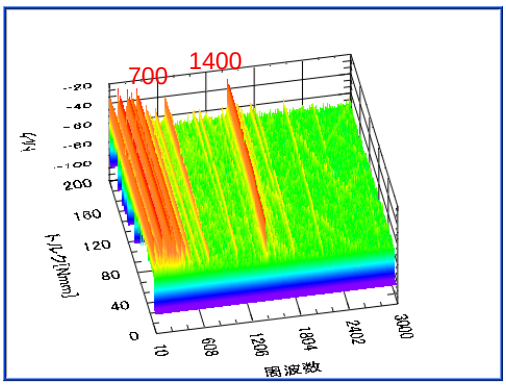
さらに、100から300Hzの解析結果を確認します。特に強いところは、**140Hz,210Hz** が確認できます。これらは、ともに合成したリップルに関係した成分です。

これらのピークも、次のステップでブレーキ負荷とリップル振幅の関係を解析をします。

1000 rpm の測定結果

10から3kHzの解析



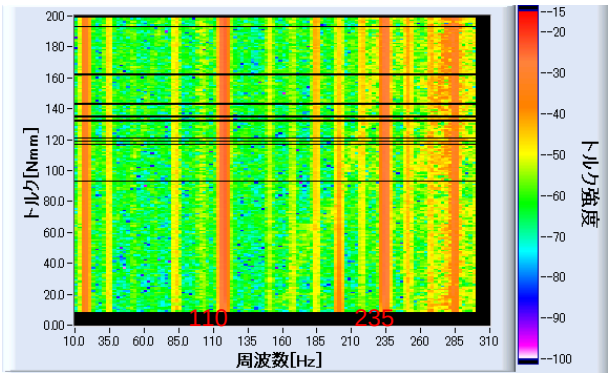


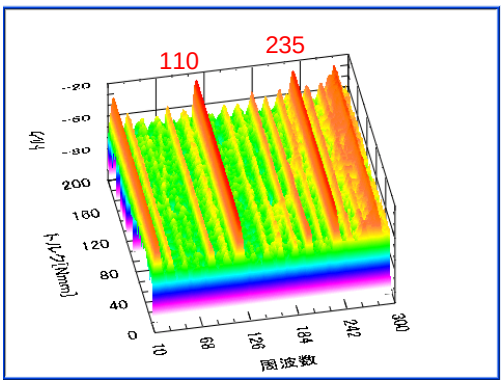
まず、10から3kHzの解析結果を見ると、300Hz以下に多数のピークがあります。また、**700Hzと1400Hz** のピークは合成したリップル成分です。ブレーキの負荷トルクが小さくなると周波数が小さくシフトしていますが、これはブレーキ負荷により回転数が変化したためです。

㈱東陽テクニカ　汎用計測営業部
〒103-8284　東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp

ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

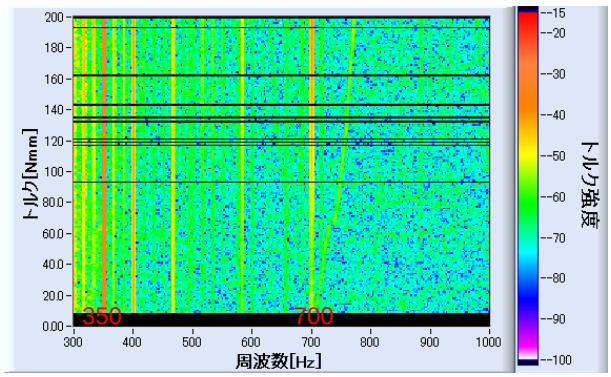
10から300Hzの解析

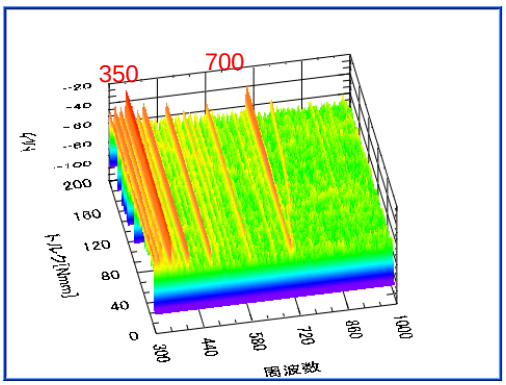




次に、10から300Hzの解析結果を確認します。特に強いところは、**115Hz,235Hz** が確認できます。115Hzは機械的なリップル(コギング)の成分です。また、235Hz はコギングの2倍の周波数成分です。

300から1kHzの解析





さらに、300から1kHzの解析結果を確認します。特に強いところは、**350Hz,700Hz** が確認できます。350Hzは機械的なリップルの成分です。また、700Hz のピークは合成したリップル成分です。

㈱東陽テクニカ　汎用計測営業部
〒103-8284　東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp

http://www.toyo.co.jp/magtrol

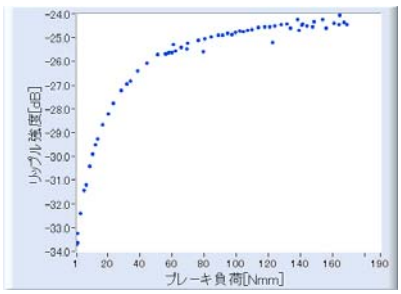
ブラシレスDCモーターのトルクリップル測定

4. 特定の周波数で解析

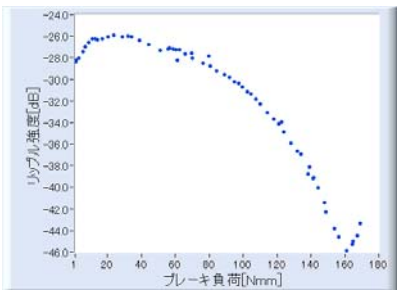
100rpm と 1000rpm それぞれの場合で、ある周波数におけるブレーキ負荷とリップル振幅の関係を解析します。ここでは、例として **機械的なリップル成分**と**合成したリップル成分**をそれぞれ解析してみます。

100 rpm ブレーキ負荷 vs リップル強度

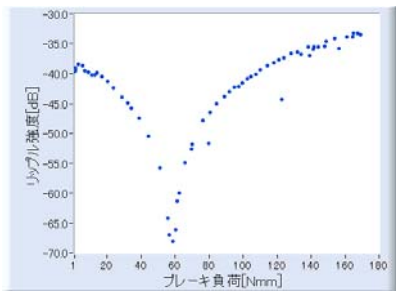
11Hzの解析



70Hzの解析



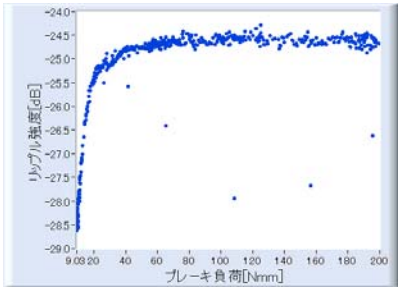
140Hzの解析



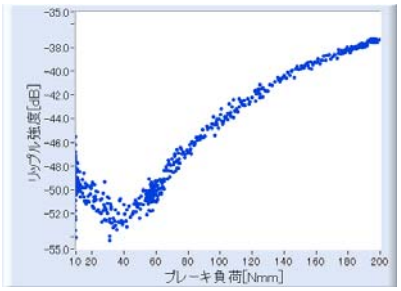
11Hzは機械的なリップル成分です。負荷の増加とともにリップル強度が増加する傾向が見られます。**70Hz** と **140Hz** は合成したリップル成分です。単調な増加になっていないことがわかります。これはモータのドライバが電流の周波数を制御するためであると考えられます。

1000 rpm ブレーキ負荷 vs リップル強度

110Hzの解析

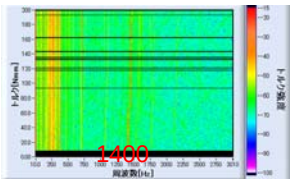


700Hzの解析



1400Hzの解析

解析不可



110Hzは機械的なリップル成分、**700Hz** は合成したリップル成分です。また、1400Hzの解析については、ピーク周波数が図のように変化してしまったために、特定の周波数で解析することができませんでした。このような場合には、**次数比分析(オーダートラッキング)** を行えば解析ができることがあります。

㈱東陽テクニカ　汎用計測営業部
〒103-8284　東京都中央区八重洲1-1-6
Tel: 03-3279-0771
Email: magtrol@toyo.co.jp