

# 高トルク型ステッピングモータの速度-振動特性に関する検討

## Speed-Resonance Characteristics of a High-Torque Stepping Motor

○鈴木豪佑\*, 松尾健史\*, 三浦武\*, 佐藤靖雄\*\*

○Gousuke Suzuki\*, Kenshi Matsuo\*, Takeshi Miura\*, Yasuo Sato\*\*

\*秋田大学, \*\*オリエンタルモーター株式会社

\*Akita University, \*\*Oriental Motor Co., Ltd.

**キーワード** : 高トルク型ステッピングモータ(high-torque stepping motor), 速度-振動特性(speed-resonance characteristics), 共振周波数(resonance frequency), フルステップ駆動(fullstepping drive), マイクロステップ駆動(microstepping drive)

**連絡先** : 〒:010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学 大学院理工学研究科 松尾 健史,  
Tel.: 018-889-2332, Fax.: 018-837-0406, E-mail: matsuo@gipc.akita-u.ac.jp

### 1. はじめに

ステッピングモータは指令パルスの周波数および総数によって回転速度および角度が制御可能なモータである<sup>1)</sup>。フィードバック不要, すなわち開ループ制御が可能であるため, 駆動回路を含めたシステムが簡素になる利点がある<sup>2)</sup>。

しかし, ステッピングモータは速度制御時, 特定の周波数で振動が増大する共振現象<sup>1)2)3)</sup>が発生することが問題となる。その対策として共振周波数帯域を避ける駆動あるいは振動抑制法を用いる場合が考えられるが, いずれの場合でもまずは共振の発生傾向を把握する必要がある。

現在最も普及している 2 相ハイブリッド型

ステッピングモータにおいて, 近年, トルク-体積比が大幅に向上した径方向誘導方式の高トルク型ステッピングモータが市販された<sup>4)</sup>。径方向誘導式は従来型とは着磁方式が異なり, 磁極の誘導方向も変化している。その結果, 鎖交磁束が増大し, 同体積でありながら従来型より高トルクを発生できる<sup>4)</sup>。

高トルク型の速度-トルク特性に関しては, 従来型と比較して低速領域のトルクが増大し, 位置決め時間も早くなることが報告されている<sup>4)</sup>。

また, 速度-振動特性に関しては従来型モータについては報告がある。文献(3)では慣性負荷を取り付けた場合, 慣性モーメントが大きくなることで共振が発生するパルス周波数が低下し, 振動も減少することが報告されている<sup>4)</sup>。

Table 1 高トルク型ステッピングモータの仕様. Specifications of high-torque stepping motor.

モータ	PKP244PD23A2
固定子慣性モーメント	$61 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
定格電流	2.3 A / 相
巻線抵抗	0.98 $\Omega$ / 相
励磁最大静止トルク	0.84 N $\cdot$ m
基本ステップ角	1.8 $^\circ$

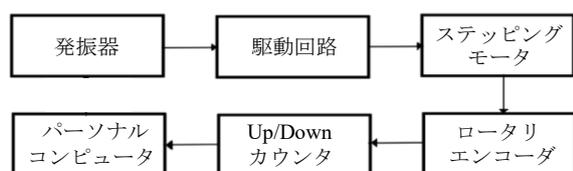


Fig. 1 実験システム構成図. Configuration of experimental setup.

しかし、高トルク型については報告がない。

そこで本研究では高トルク型ステッピングモータの性能調査の 1 つとして低速度域での速度-振動特性を調査し、従来型と比較し、振動の発生傾向を検討する。

## 2. 実験システム

今回の実験ではオリエンタルモーター社製の 2 相ハイブリッド型ステッピングモータと同社の駆動回路を使用する。高トルク型ステッピングモータは PKP244PD23A2 であり、使用する駆動回路は CVD223F2B-K である。比較としてトルク以外は同等の諸元である従来型モータ PKP244D23A2 を使用し、駆動回路は CVD223FB-K を使用する。それぞれのモータの仕様を Table 1 と Table 2 に示す。高トルク型は従来型とほぼ同体積であるが約 2 倍のトルクを発生できる。

次に、実験システムの構成図を Fig. 1 に示す。実験システムの流れとして、まず発振器からパルスが発生させ、駆動回路へ出力する。このと

Table 2 従来型ステッピングモータの仕様. Specifications of conventional stepping motor.

モータ	PKP244D23A2
固定子慣性モーメント	$55 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
定格電流	2.3 A / 相
巻線抵抗	0.93 $\Omega$ / 相
励磁最大静止トルク	0.48 N $\cdot$ m
基本ステップ角	1.8 $^\circ$

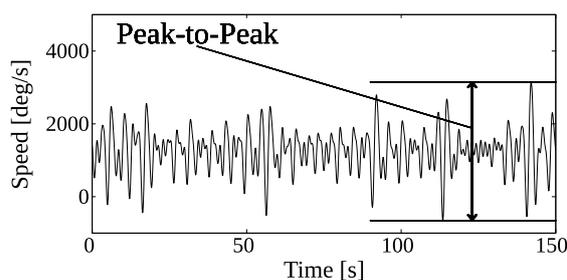


Fig. 2 速度波形の例. Example waveform of motor speed.

き、回転速度は 1 s あたりの指令パルス数で表現し、pps(pulses per second)と表す。今回使用するモータは基本ステップ角 1.8 deg であるため例えば 100 pps の場合、180 deg / s の速度で回転することになる。

駆動回路はこの入力されたパルスに従ってモータの各相 (2 相モータのため A 相あるいは B 相) へ励磁電流を流し、それに従ってモータが駆動される。モータの回転角度情報はロータリエンコーダにより検出され、Up/Down カウンタを介してパーソナルコンピュータに測定データが取り込まれる。この角度情報は 0.1 ms 毎に取得される。速度は、角度を FIR 低域通過フィルタで処理した後に微分することで得られる。使用した FIR フィルタの仕様は遮断周波数 500 Hz, フィルタ長 30, サンプリング周波数 10 kHz である。

速度情報の Peak-to-Peak を速度振動成分とする。Fig. 2 に例を示す。速度情報の最大値と最小値の差を Peak-to-Peak とする。これが振幅

の大きさとなる。

この測定を各入力パルス周波数で行い、それぞれの速度振動成分を縦軸に、パルス周波数を横軸として、速度-振動特性とする。

また、本研究ではフルステップ駆動とマイクロステップ駆動を扱う。フルステップ駆動は、モータの基本ステップ角で回転する駆動方式である。一方、マイクロステップ駆動は、微細な電流制御によって基本ステップ角をさらに細分化する駆動方式である。

駆動方式によって 1 指令パルスあたりの回転角度が異なるため、本研究では駆動方式にかかわらず比較を容易にするために、パルス周波数の表記にはフルステップ換算を用いる。例えば、フルステップ駆動 (1 分割) では 1 指令パルスで  $1.8^\circ$  回転するが、マイクロステップ駆動 (4 分割) では 1 指令パルスで  $0.45^\circ$  しか回転しない。つまり同じパルス周波数で駆動した場合でも、モータの実際の回転角度が異なる。このため、本稿では以後のマイクロステップ駆動時の駆動周波数をフルステップ換算で表記する。

### 3. 速度-振動特性

本章は高トルク型と従来型の速度-振動特性を取得し、比較を行う。

#### 3.1 実験方法

速度として入力パルスの周波数を 10 pps から 10 pps 毎に増加させ、1000 pps まで、無負荷で駆動した場合の各速度の振動成分を測定する。フルステップ換算 10-1000 pps の低速度域においてモータをフルステップ駆動させた場合と、マイクロステップ駆動させた場合で速度-振動特性を測定する。マイクロステップ駆動時は基本ステップ角の分割数を 2, 4, 8, 16 に設定して測定する。

#### 3.2 実験結果

実験によって得られた従来型と高トルク型の速度-振動特性の比較を Fig. 3 に示す。

Fig. 3(a) にフルステップ駆動時の速度-振動特性の比較を示す。Fig. 3(b) 以降はマイクロステップ駆動時の速度-振動特性の比較である。分割数は (b), (c), (d), (e) の順にそれぞれ 2, 4, 8, 16 である。また、Fig. 4(a) に高トルク型の各分割数における速度-振動特性を示し、Fig. 4(b) に従来型の各分割数における速度-振動特性を示す。

Fig. 3(a) で示したフルステップ駆動では、高トルク型において 600-1000 pps で従来型では発生しない振動が確認できる。また、300-320 pps の範囲で脱調が発生する。従来型においては、230-250 pps の範囲で脱調が発生している。

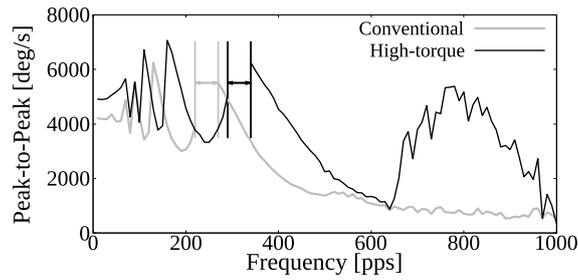
一方、Fig. 3(b)-(e) に示したマイクロステップ駆動においては、分割数の増加に伴い、振動の抑制傾向が確認されている。

Fig. 4 に示した高トルク型と従来型の各分割数の速度-振動特性より、分割数を増加させることで最大振動になる共振の周波数は低下し、振動の抑制が確認できる。一方で Fig. 4 の各分割数における低速域以降の大きな振動では、つまり 200 pps 以降においては、Fig. 4(a) の高トルクの場合 380 pps および 700 pps 付近において振動が増大する傾向があり、Fig. 4(b) の従来型の場合 250 pps および 590 pps 付近で振動が増大する傾向がある。この振動は分割数の増加によっても抑制されない傾向が確認された。

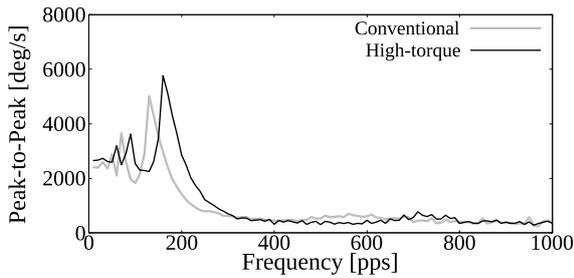
本章で確認された特性については次章で考察する。

### 4. 考察

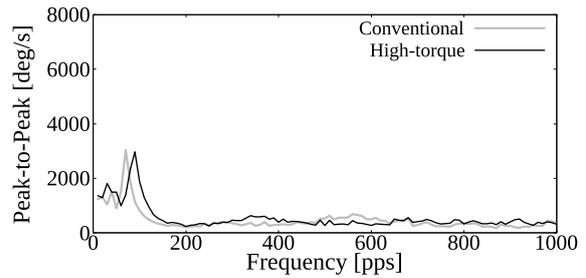
高トルク型および従来型モータの速度-振動特性を比較した結果、共振点の位置に差異が



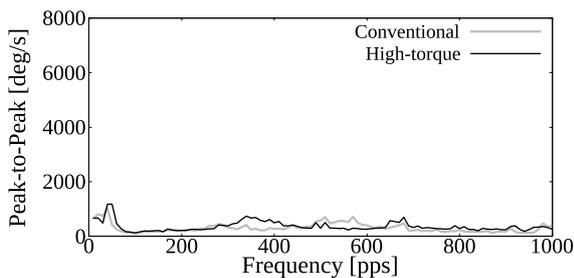
(a) フルステップ駆動. Fullstepping drive.



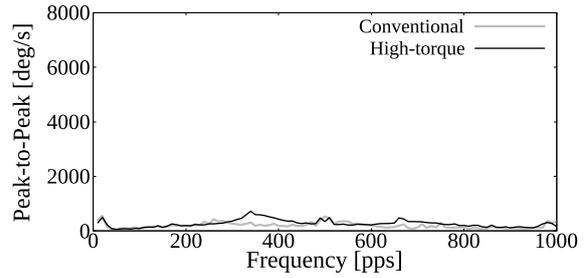
(b) マイクロステップ駆動(2分割).  
Microstepping drive(1/2).



(c) マイクロステップ駆動(4分割).  
Microstepping drive(1/4).

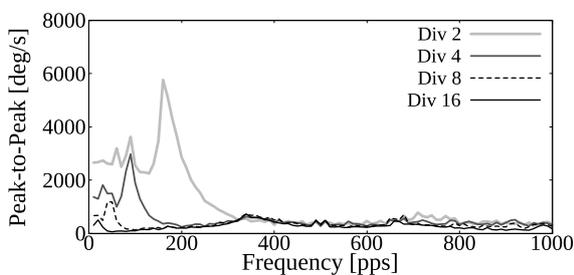


(d) マイクロステップ駆動(8分割).  
Microstepping drive(1/8).

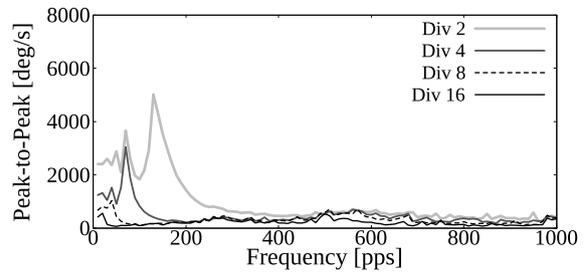


(e) マイクロステップ駆動(16分割).  
Microstepping drive(1/16).

Fig.3 高トルク型と従来型の速度-振動特性の比較. Comparison of speed-resonance characteristics of the high-torque and conventional.

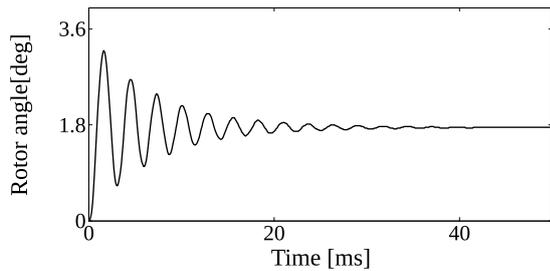


(a) 高トルク型, マイクロステップ駆動.  
High-torque microstepping drive.

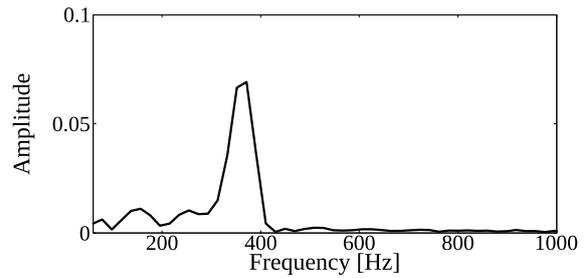


(b) 従来型, マイクロステップ駆動.  
Conventional microstepping drive.

Fig.4 高トルク型と従来型の各分割数の速度-振動特性の比較. Comparison of speed-resonance characteristics for each step division of the high-torque and conventional types

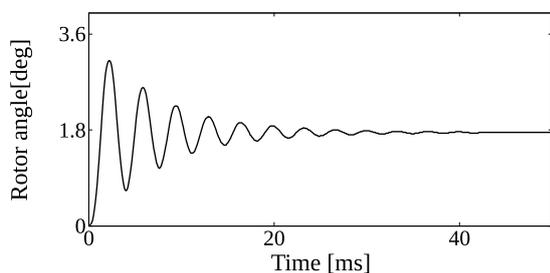


(a) 応答波形. Response waveform.

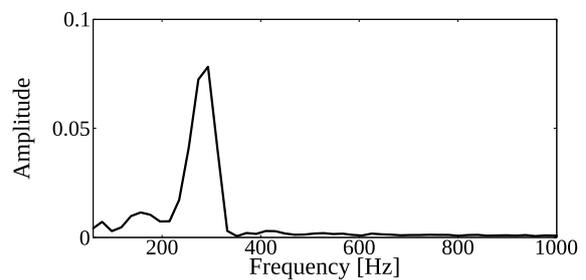


(b) 振幅スペクトル. Amplitude spectrum.

Fig. 5 高トルク型ステッピングモータにおける応答波形および振幅スペクトル. Response waveform and amplitude spectrum of the high-torque stepping motor.



(a) 応答波形. Response waveform



(b) 振幅スペクトル. Amplitude spectrum.

Fig. 6 従来型ステッピングモータにおける応答波形および振幅スペクトル. Response waveform and amplitude spectrum of the conventional stepping motor.

見られ、共振周波数外 の速度域でも振動が増大した。さらに、高トルク型ではフルステップ駆動時に従来型にない特有の振動特性が確認された。これらについて考察する。

#### 4.1 共振周波数

前章において高トルク型と従来型の共振点異なるため、共振周波数を測定する。従来型と高トルク型それぞれに 1 パルスだけ入力した際の応答波形を取得し、FFT を適用することでその振幅スペクトルを求める。高トルク型の応答波形および振幅スペクトルを Fig. 5(a), (b) に示す。従来型の応答波形および振幅スペクトルを Fig. 6(a), (b) に示す。振幅スペクトルにおいて、直流成分を除くために周波数は 60 Hz か

ら表示している。共振周波数は高トルク型が約 370 pps、従来型が約 290 pps であることが確認できた。前章の速度-振動特性の比較において高トルク型と従来型の共振点異なるのはこのためである。

フルステップ駆動の場合において、Fig. 3(a) より、それぞれ脱調範囲と共振周波数がおおよそ一致している。

一方、マイクロステップ駆動において、共振周波数の分数倍で共振が発生している。Fig. 3 で示した速度-振動特性の最大振動のパルス周波数情報を Table. 3, 4 に示す。Fig. 3(b) に示した 2 分割においては共振周波数の約 1/2 倍の周波数で共振が発生し、Fig. 3(c) に示した 4 分割においては共振周波数の約 1/4 倍の周波数で共振が発生している。Fig. 3(d), (e) も同様であり、

Table 3 高トルク型マイクロステップ駆動における最大振動のパルス周波数. Pulse frequency at maximum resonance in high-torque microstepping drive.

分割数	パルス周波数[pps]
2	160
4	90
8	40
16	20

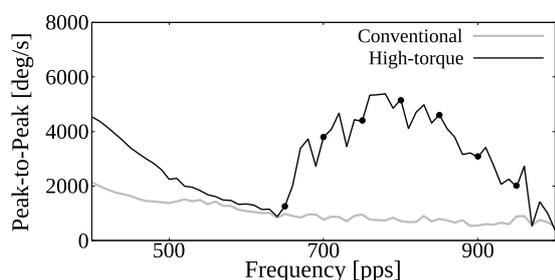


Fig. 7 速度-振動特性(高トルク型, フルステップ駆動). Speed-resonance characteristics (high-torque, fullstepping drive).

マイクロステップ駆動においておおよそ(共振周波数)/(分割数)の周波数で振動が最大になるといえる。

また, 高トルク型のマイクロステップ駆動を示した Fig. 4(a)では 380 pps および 700 pps 付近において振動が増大する傾向があり, 従来型のマイクロステップ駆動を示した Fig. 4(b)では 250 pps および 590 pps 付近で振動が増大する傾向が確認できる. マイクロステップ駆動時に 200 pps 以降で振動が増大する速度域はモータの共振周波数の整数倍の速度域で発生する。

## 4.2 高トルク型の振動

高トルク型フルステップ駆動において, 600-1000 pps の範囲で従来型に無い振動が確認できたため考察する。

Table 4 従来型マイクロステップ駆動における最大振動のパルス周波数. Pulse frequency at maximum resonance in conventional microstepping drive.

分割数	パルス周波数 [pps]
2	130
4	70
8	40
16	20

### 4.2.1 速度波形

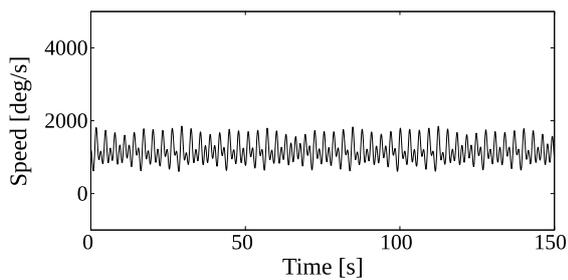
高トルク型の速度-振動特性図で振動が増大した速度域の速度波形を観察する。

Fig. 7 に前章で示した高トルク型フルステップ駆動時の速度-振動特性の 400-1000 pps 範囲を拡大したものを示す. 点の位置は, 次に示す速度波形を取得した速度である. Fig. 8 にそれぞれの速度波形を示す. 600-1000 pps において, 複数の周波数成分が含まれている速度波形が得られた. 振動と周波数にどのような関係があるか, 次項で周波数解析を用いて考察する。

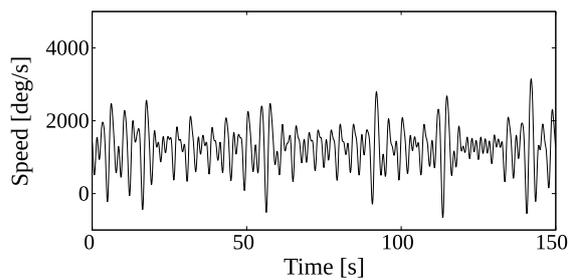
### 4.2.2 振幅スペクトル

周波数成分を分析するために Fig. 8 の速度波形にハミング窓を適用した後に, FFT を使用した結果の振幅スペクトルを Fig. 9 に示す。

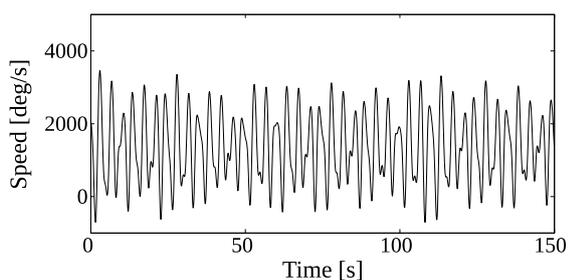
Fig. 9 の振幅スペクトルにおいて大小の差はあるが, 駆動周波数成分が含まれていることが確認できる. 次に駆動周波数を除外して周波数成分を観察する. Table. 5 に駆動周波数およびその 3/8 の値, 駆動周波数の 3/8 近傍で発生する共振の周波数成分を示す. ほとんどの場合, すなわち 700-800 pps において振幅スペクトルの成分が最大となる周波数成分は駆動周波数の 3/8 と一致する傾向が確認できる. 850 pps-950 pps では 3/8 からずれが生じるものの,



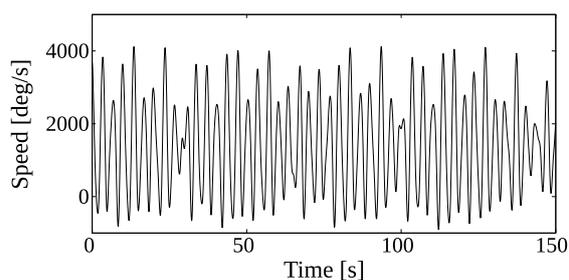
(a) 速度波形(650 pps). Speed waveform(650 pps)



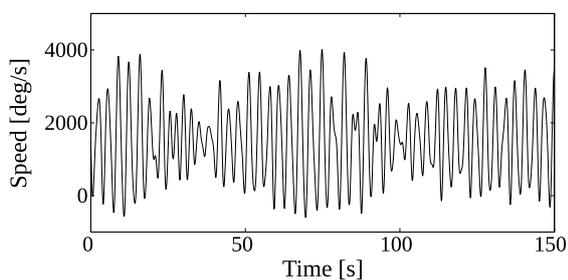
(b) 速度波形(700 pps). Speed waveform(700 pps)



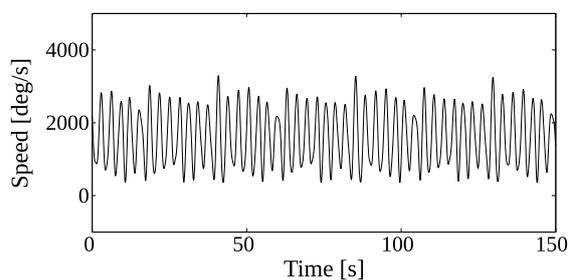
(c) 速度波形(750 pps). Speed waveform(750 pps)



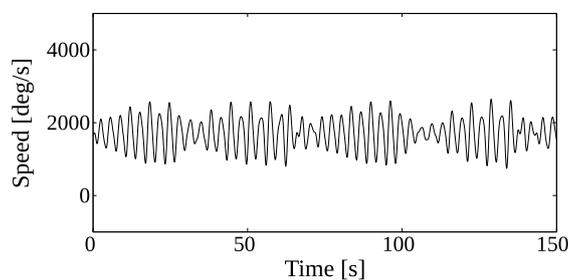
(d) 速度波形(800 pps). Speed waveform(800 pps)



(e) 速度波形(850 pps). Speed waveform(850 pps)

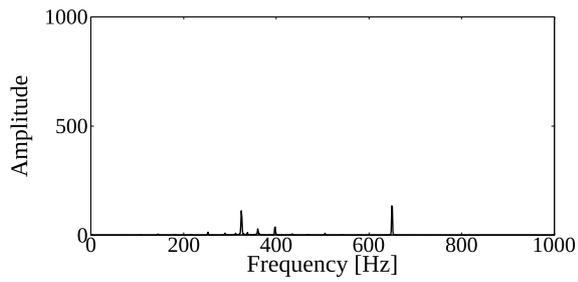


(f) 速度波形(900 pps). Speed waveform(900 pps)

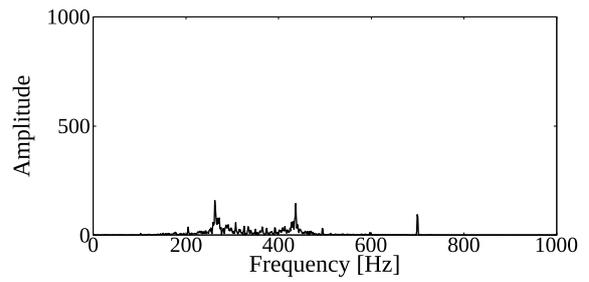


(g) 速度波形(950pps). Speed waveform(950 pps)

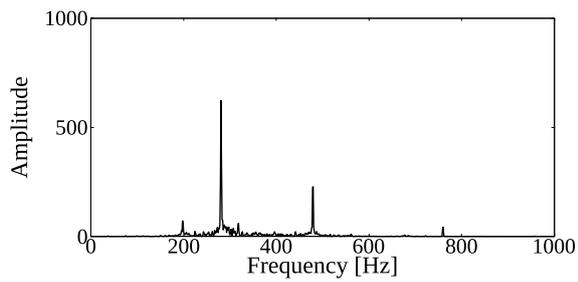
Fig. 8 フルステップ駆動における速度波形(高トルク型). Speed waveform during fullstepping drive(high-torque)



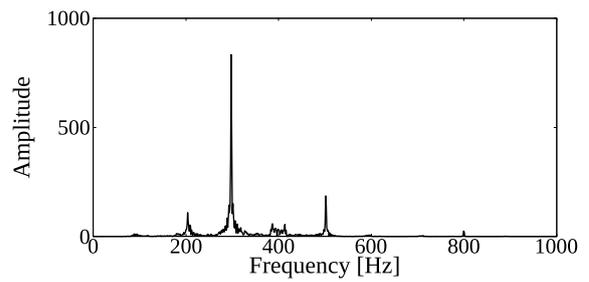
(a) 振幅スペクトル(650 pps). Amplitude spectrum(650 pps).



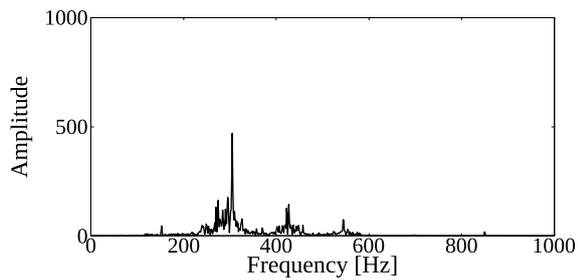
(b) 振幅スペクトル(700 pps). Amplitude spectrum(700 pps).



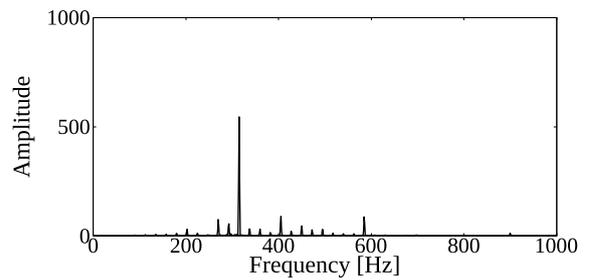
(c) 振幅スペクトル(750 pps). Amplitude spectrum(750 pps).



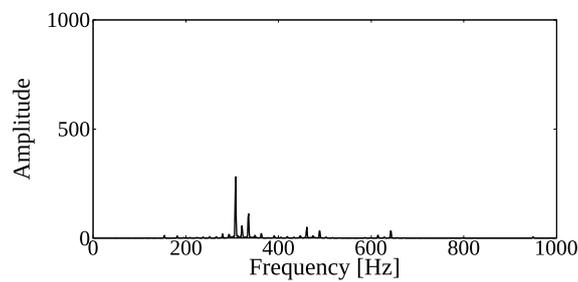
(d) 振幅スペクトル(800 pps). Amplitude spectrum(800 pps).



(e) 振幅スペクトル(850 pps). Amplitude spectrum (850 pps).



(f) 振幅スペクトル(900 pps). Amplitude spectrum(900 pps).



(g) 振幅スペクトル(950 pps). Amplitude spectrum (950 pps).

Fig. 9 フルステップ駆動における速度波形の振幅スペクトル(高トルク型). Amplitude spectrum during fullstepping drive(high-torque)

Table 5 振幅スペクトルにおける周波数成分.  
The frequency component in the amplitude spectrum.

駆動周波数 [pps]	駆動周波数の 3/8 の値 [Hz]	駆動周波数の 3/8 近 傍で発生する共振の 周波数 [Hz]
650	243	250
700	262	263
750	281	281
800	300	300
850	318	304
900	337	311
950	356	336

おおむね駆動周波数の 3/8 と一致する。例外として Fig. 9(a)に示した 650 pps の振幅スペクトルにおいては 324 Hz の成分の方が大きく、この値は駆動周波数の 4/8 と一致する。

また、他の振動が発生する周波数成分についても見ていく。650–900 pps において駆動周波数の 5/8 と一致する周波数成分が確認できる。750–800 pps においては駆動周波数の 2/8 成分が確認でき、650, 800–950 pps においては 4/8 成分が確認できる。

このことから高トルク型フルステップ駆動時の速度–振動特性において、従来型にはない振動が発生する速度域では、振動が増大するとその駆動周波数の 3/8 および 5/8 に関連する周波数成分が多く含まれる傾向がある。その他にも駆動周波数に分母が 8 の分数をかけた周波数成分が含まれていることが振幅スペクトルから確認された。

## 5. おわりに

本研究では、2相ハイブリッド型ステッピングモータの高トルク型の評価の1つとして、低速域における速度–振動特性を測定し、従来型

モータとの比較を行った。

その結果、マイクロステップ駆動においては、共振周波数に差異が見られた。一方、フルステップ駆動時には、高トルク型の 600–1000 pps にかけて従来型とは異なる共振点および振動傾向が発生し、その振動には駆動周波数の定数倍に関連した周波数成分が確認された。

今後の課題としては、これら特有の振動の抑制手法の検討および、その発生メカニズムの解明が挙げられる。

## 参考文献

- 1) 百目鬼 英雄：ステッピングモータの使い方，工業調査会（1993）
- 2) 坂本 正文：ステッピングモータの使い方，オーム社（2003）
- 3) 中野 祥也：2相ステッピングモータの慣性負荷に対する速度–振動特性に関する研究，秋田大学修士論文，（2021）
- 4) 須原 亨：径方向誘導式ハイブリッド型を用いたステッピングモータの高トルク化技術，RENGA，2306，オリエンタルモーター株式会社（2023）