

5相ステッピングモータのステップ角分割数の違いによる 速度 - 振動特性に関する検討

Speed-Resonance Characteristics of a Five-Phase Stepping Motor Affected by Step Angle Divisions

○伊藤宏志*, 松尾健史*, 三浦武*, 佐藤靖雄**

○Hiroshi Ito*, 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 : 5相ステッピングモータ (five-phase stepping motor), 回転子振動 (rotor oscillation), 共振周波数 (resonance frequency), マイクロステップ駆動 (micro-step drive), ステップ角分割数 (the number of step angle divisions)

連絡先 : 〒 010-0852 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、フィードバック機構を用いない開ループで位置および速度制御が可能という特徴を有するモータである¹⁾。このような利点から、FA 機器や OA 機器で幅広く用いられている。このモータは、1 秒間あたりの入力パルス信号数であるパルス周波数によって回転速度を制御することができる。

一方で、欠点として速度制御時にある特定の周波数で回転子の振動が急に大きくなる共振現象が生じるという問題がある¹⁾。この振動は、騒音の原因となるだけでなく、回転がパルス信号に追従できなくなる脱調現象や出力トルクの低下を引き起こす。

ステッピングモータの振動に対する抑制法の 1 つとしてマイクロステップ駆動がある。この

方法では、励磁電流値を微細に制御することで、ステップ角を細分化され振動が抑制される²⁾。しかし、マイクロステップ駆動を適用してもなお回転子振動が発生する速度域が存在する。このため、回転速度に対する振動特性 (以下、「速度-振動特性」とする) を知ることが重要となる。

ステッピングモータで一般的に用いられているのは 2 相モータである一方で、構造的にステップ角の分割が大きく振動が抑制される 5 相モータも普及しており、関連研究として、低・中速域において十分に大きいマイクロステップ分割数 (以下「分割数」とする。) でマイクロステップ駆動した場合の速度-振動特性に関する研究が行われており、モータの相電圧の周波数解析により共振周波数およびその高調波成分を用いた共振周波数の推定方法が提案されている³⁾⁴⁾。

このように、パルス周波数が 2000 pps までの

低・中速域では研究が行われているが、さらに高速の速度域での検討や、先行研究では分割数を1つに固定していたため、分割数を変えた場合の評価に関する文献は少ない。そこで、本稿では5相ステップモータのマイクロステップ駆動において分割数を変えた場合の振動の発生傾向について検討する。

2. 実験システム

Fig.1に5相ステップモータの駆動システムを示す。本システムでは、マイクロコンピュータ (Raspberry Pi Pico W) を用いて、指令パルスを発生させ、それを駆動回路 (オリエンタルモーター社製 CVD528B-K) に入力する。指令パルス毎に駆動回路は設定された角度分回転できるように、5相ステップモータ (PKP566N28B2) の各巻線に励磁電流を流す。

ここで、設定角度とはフルステップ駆動時は、仕様で定められた基本ステップ角度であり、マイクロステップ角度は基本ステップ角度を設定された分割数で割り、細分化した角度である。ロータリエンコーダで計測した角度情報は、Up/Downカウンタを介してパーソナルコンピュータに出力される。このとき速度はPC上で、角度情報を微分して遮断周波数 500 Hz のローパスフィルタで処理することで求められる。

本研究で用いる5相ステップモータは、新ペンタゴン巻線のハイブリッドモータであり、その仕様は Table.1 に示される。ロータリエンコーダはオムロン社製 E6D-C を使用する。仕様は 3600 pulses/rev であり、4 通倍して用いるため 14400 pulses/rev の分解能でモータの回転角度を検出する。

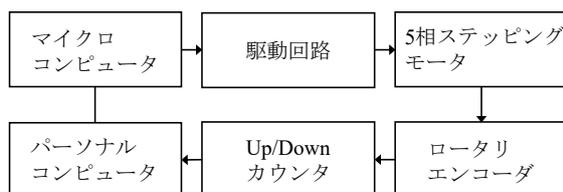


Fig. 1: 5相ステップモータの駆動システム。Drive system of the five-phase stepping motor.

Table 1: ステッピングモータ (PKP566N28B2) の仕様。Specifications of the Stepping Motor (PKP566N28B2).

名称	数値	単位
保持トルク	0.81	[N·m]
定格電流	2.8	[A/phase]
巻線抵抗	0.24	[Ω/phase]
回転子慣性モーメント	270×10^{-7}	[kg·m ²]
基本ステップ角度	0.72	[deg]

3. 予備実験

本章の考察で本システムにおける共振周波数を用いることから、1ステップの回転子角度の時間変化および周波数応答を調べた。Fig.2にその波形を示す。図に示されるように角度は減衰振動しながら基本ステップ角度の0.72に収束していく。次に、周波数応答を見ると Fig.3のように、直流成分を除くと約 180 Hz において振幅スペクトルがピークかつ最大となる。これはシステムの共振周波数の影響によるものである。

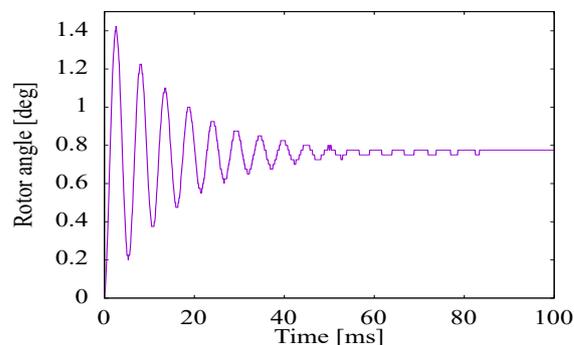


Fig. 2: 1ステップの角度位置の時間変化。Time variation of angular position in 1-step.

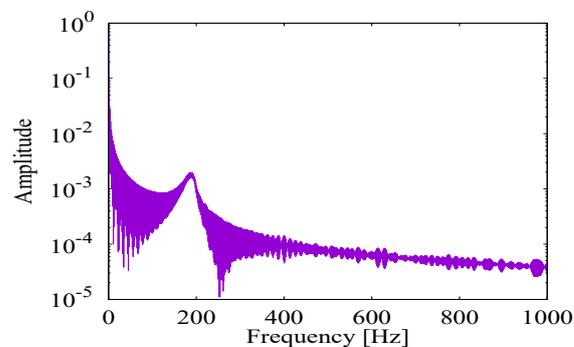


Fig. 3: Fig.2の波形の振幅スペクトル。Amplitude spectrum of the waveform in Fig.2

4. 速度-振動特性

4.1 実験方法

本実験では、マイクロステップ駆動の分割数をいくつかを設定して、それぞれの場合で速度-振動特性を計測する. 具体的な実験条件は Table.2 に示される. 表に示す各分割数で、パルス周波数の範囲を 100 - 4100 pps で定速駆動を行う. なお、測定間隔は 5 pps 間隔である. ここでパルス周波数はフルステップ換算後の周波数であり、実際に駆動回路に入力されるパルスの周波数は (フルステップ換算周波数) × (マイクロステップ分割数) であることに注意されたい.

Table 2: 実験条件. Experiment conditions.

名称	数値	単位
マイクロステップ分割数	1, 2, 4, 8, 10, 20	
パルス周波数	100 - 4100	[pps]
計測時サンプリング時間	0.1	[ms]

さて、各速度制御時に得られる角度情報を微分して、低域通過フィルタを通して得られる速度波形から求められる回転子振動から速度-振動特性を求める. この振動成分は、速度波形の振幅の Peak-to-peak 値で求められる. ここで、Peak-to-peak 値とは Fig. 4 に示されるように、速度波形の最大と最小の差である.

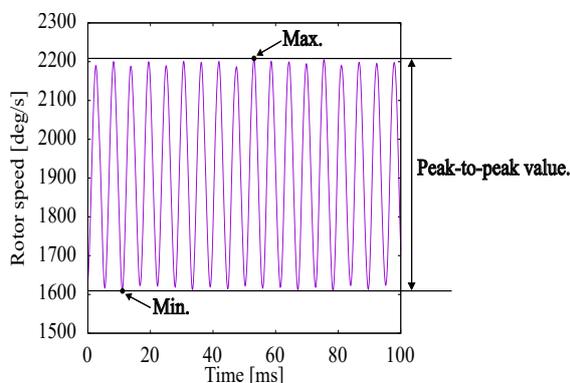


Fig. 4: 速度波形の例. Example of a speed waveform.

4.2 共振時と非共振時の速度波形の比較

共振時と非共振時の速度波形を確認する. 例として、Fig.5 に共振時の速度波形、Fig.6 に非共振時の速度波形を示す. いずれも振動的ではあるものの、共振時は振幅が大きくなっていることが分かる. これらの波形から、Fig.4 のようにして振動を求め、振動特性を得る.

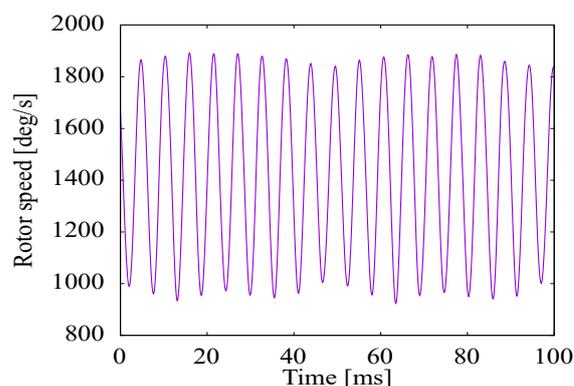


Fig. 5: 共振の場合 (分割数 8, 1980 pps). Case of resonance (1/8 micro-stepping, 1980 pps).

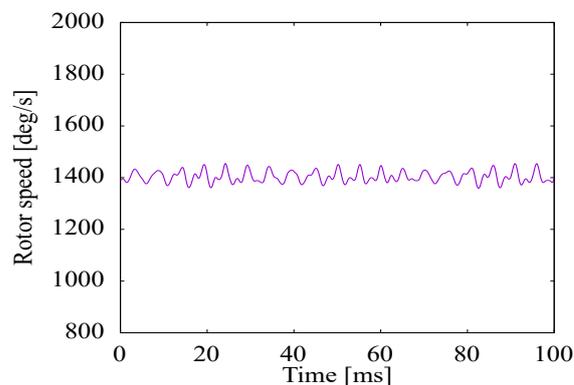
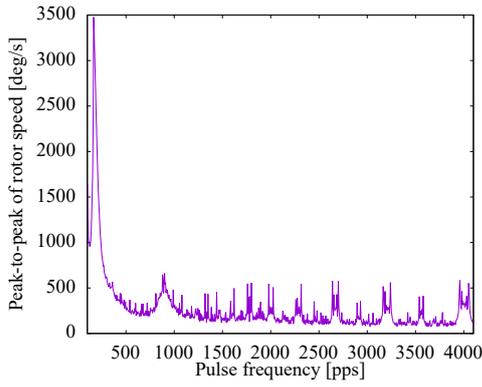


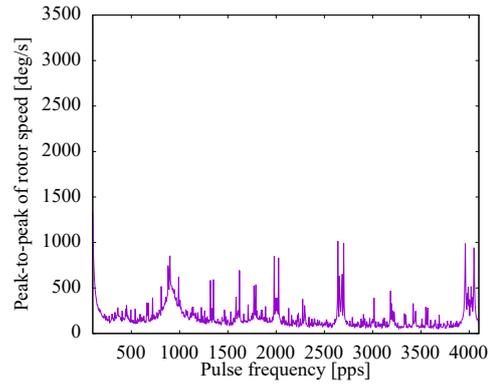
Fig. 6: 非共振の場合 (分割数 8, 1950 pps). Case of non-resonance (1/8 micro-stepping, 1950 pps).

4.3 各マイクロステップ分割数における速度-振動特性

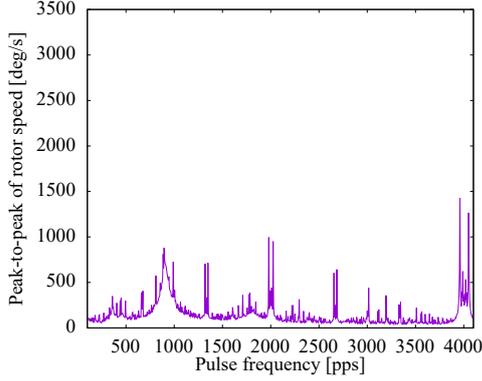
結果を Fig.7, 8 に示す. Fig. 7 は Table.2 の条件の下で分割数を変えた場合の結果であり、Fig.8 は全ての場合を 1 つの図にプロットした図である. Fig.7 (a) のフルステップ駆動時と (b) - (f) の比較から、マイクロステップ駆動により全体の振動は低減されるが、分割数に依存しない



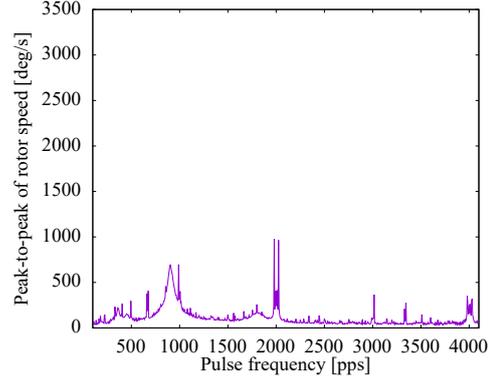
(a) 分割数 1 の場合. Case of full-stepping.



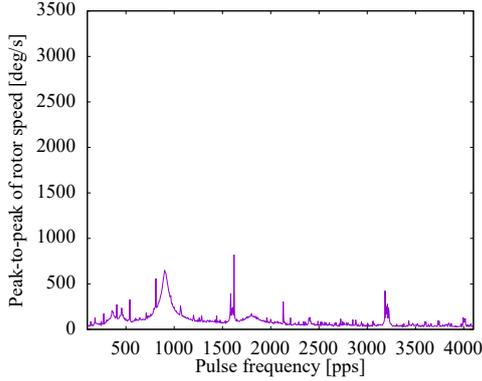
(b) 分割数 2 の場合. Case of 1/2 micro-stepping.



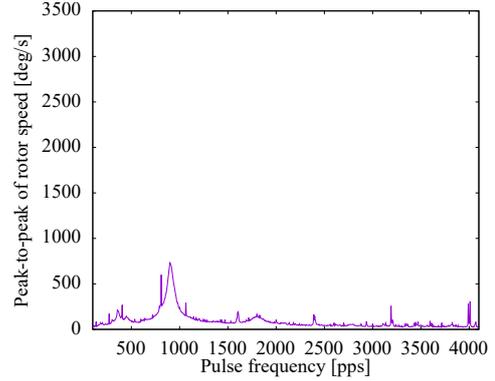
(c) 分割数 4 の場合. Case of 1/4 micro-stepping.



(d) 分割数 8 の場合. Case of 1/8 micro-stepping.



(e) 分割数 10 の場合. Case of 1/10 micro-stepping.



(f) 分割数 20 の場合. Case of 1/20 micro-stepping.

Fig. 7: 各分割数における速度-振動特性. Speed-resonance characteristics at each division number.

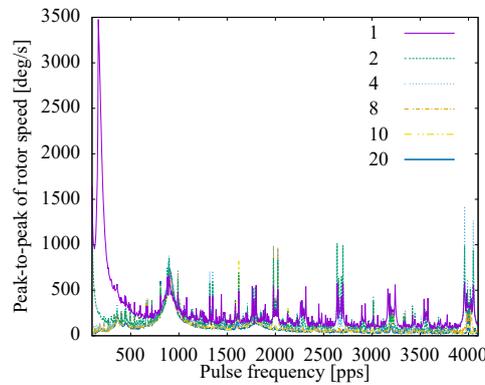


Fig. 8: 分割数による特性の比較. Comparison of speed-resonance characteristics by step angle divisions.

振動として、400, 900, 1800 pps 付近の振動が確認できる。また、(a) - (d) 間の比較から、分割数 1 - 8 は分割数の増加に伴い突発的振動の生じる速度範囲が小さくなる傾向がみられ、分割数を大きくすることで振動が抑制されることが分かる。一方、それ以上の分割数ではその効果は限定的である。

特定の速度域に注目すると、低速域の 100 - 500 pps の速度域では、(a) と (b) の比較から低速域では特に効果的であると分かる一方、分割数 8 以上の (d) - (f) では振動がさほど変化しないことが分かる。中・高速域では、(a) - (d) の 2,000 pps 付近の速度域と (a) - (c) の 2600 - 2800 pps の速度域の振動が高くなる。また、分割数によって若干差が認められるものの (a) - (f) から 3200 - 3400 pps と 3900 - 4100 pps の速度域で突発的振動がみられる。

そのほか、特定の分割数で生じる振動として、(c) の 1400 pps 付近の振動、(e) の 1600 pps 付近の振動が確認できる。

4.4 周波数解析

前節で述べたように、ある速度範囲において分割数によって振動特性に違いがみられることが分かった。そこで、分割数による違いが顕著かつ振動がピークとなっている周波数において、その速度波形の周波数解析を行い、どのような特徴がみられるか調べた。本稿では中・高速域において、(i) 1900 - 2,100 pps の速度域、(ii) 2600 - 2,800 pps の速度域、(iii) 3900 pps - 4100 pps の 3 つの速度域から、それぞれ 1 点を選択し周波数成分について調べた。

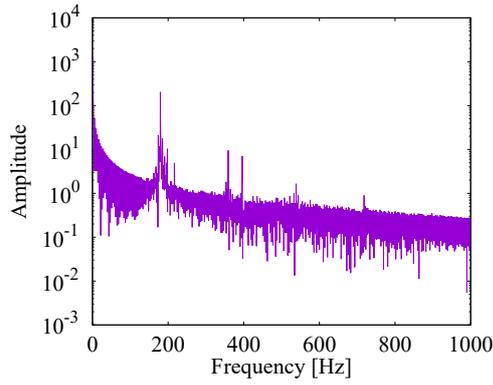
Fig.9-10, 11-12, 13-14 に選択した 1980 pps, 2640 pps, 3960 pps の速度波形の振幅スペクトルおよび当該速度域における振動特性を示す。なお、Fig.10, 12, 14 は分割数による振動の比較のために示している。全体として、振動の比較的高い場合は実験システムの共振周波数に起因する成分である 180 Hz 付近の振幅が最大となって

いることが分かる。そのほか、ほぼすべての場合に見られる特徴として、パルス周波数の $1/10$ (相数分の固定子巻線および正負の励磁方向) の周波数においてピークを確認できる。以下、各速度域について見ていく。

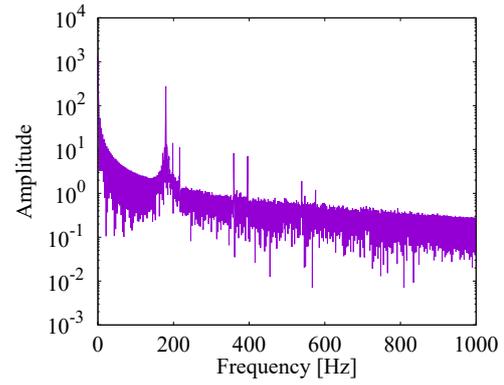
(i) 1900 - 2100 pps の速度域においては、1980 pps における速度波形の周波数成分を調べた。まず、振動について見ると Fig.10 のように分割数 4, 8 で振動がもっとも大きく、分割数 2 でやや下がり、分割数 1 で分割数 4, 8 の場合の $1/2$ の振幅となっている。次に振幅スペクトルを見ると、Fig.9 に示されるように、振動の高い (a) - (d) の場合については共振周波数の成分である 180 Hz とその 2, 3 倍高調波で振幅のピークが確認できる。共振周波数における振幅の大きさをみると、回転子振動が大きくなると振幅も大きくなる傾向がある。また、全ての場合でパルス周波数の $1/10$ である 198 Hz とその 2, 3 倍高調波で振幅のピークがみられるが、共進周波数の成分に比べて小さく、振動の比較的低い (e), (f) の場合でもみられるため振動への影響は小さいと思われる。

(ii) 2600 - 2800 pps の速度域においては、2640 pps における速度波形の周波数成分を調べた。Fig.11 のように分割数 2 で振動がもっとも大きく、分割数 1 でその $1/2$ 、分割数 4 以上では分割数 2 の場合の $1/10$ 以下となっている。次に振幅スペクトルを見ると、Fig.10 に示されるようにまず、2640 pps で振動の高い (a) - (b) で共振周波数のピークが確認できる一方で、振動の低い (d) - (f) ではピークがみられない。また、(a) と (b) で振動に 2 倍ほどの差がみられる。これは (b) の共振周波数における振幅が (a) の約 2 倍となっているためであると考えられ、速度域 (i) と同様に共振周波数の基本波および整数次高調波の成分が振動に関係すると思われる。また、

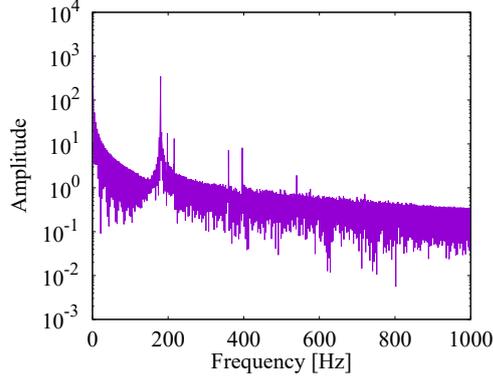
(iii) 3900 pps - 4100 pps の速度域においては、3960 pps における速度波形の周波数成分を



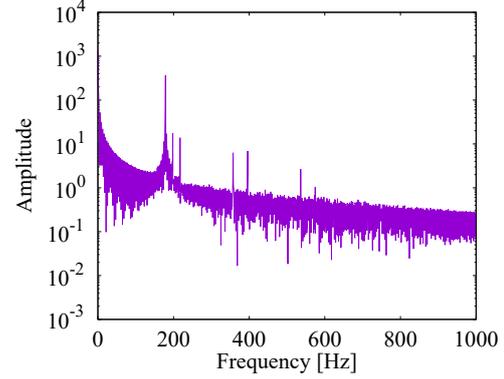
(a) 分割数 1 の場合. Case of full-stepping.



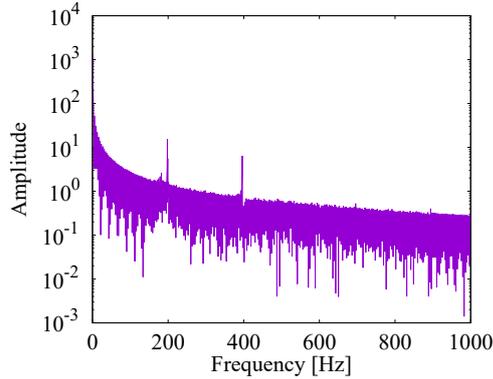
(b) 分割数 2 の場合. Case of 1/2 micro-stepping.



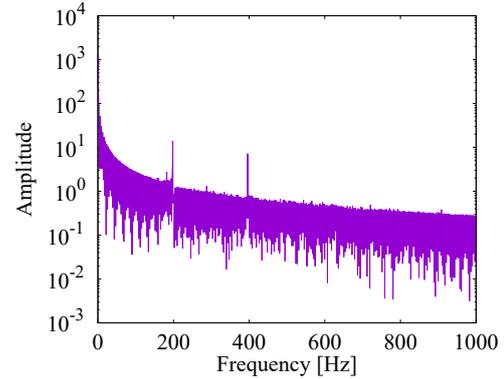
(c) 分割数 4 の場合. Case of 1/4 micro-stepping.



(d) 分割数 8 の場合. Case of 1/8 micro-stepping.



(e) 分割数 10 の場合. Case of 1/10 micro-stepping.



(f) 分割数 20 の場合. Case of 1/20 micro-stepping.

Fig. 9: 速度波形の振幅スペクトル図 (1980 pps). Amplitude spectrum of the speed waveform (1980 pps).

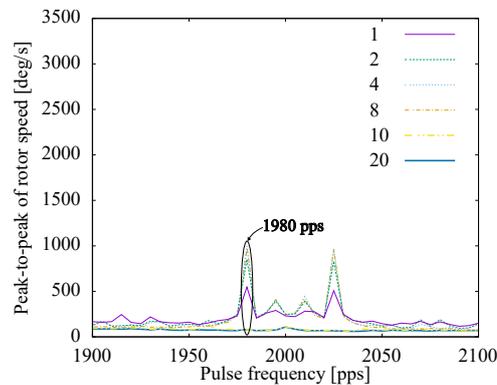


Fig. 10: 速度-振動特性 (i). Speed-resonance characteristics (i).

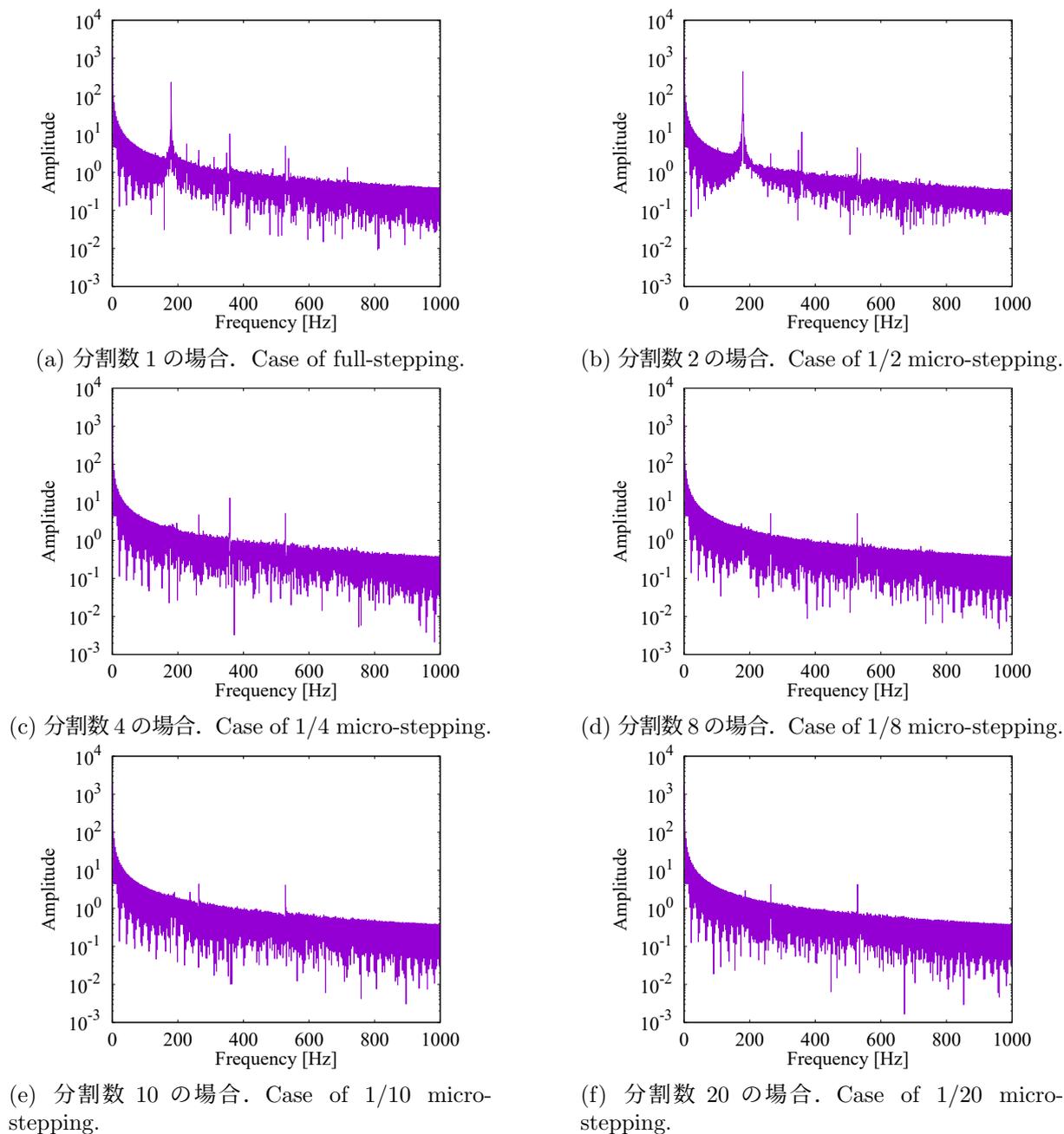


Fig. 11: 速度波形の振幅スペクトル図 (2640 pps). Amplitude spectrum of the speed waveform (2640 pps).

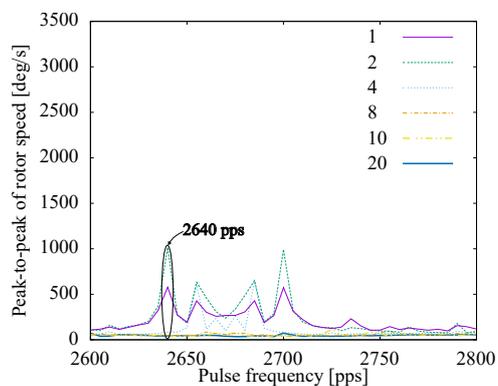


Fig. 12: 速度-振動特性 (ii). Speed-resonance characteristics (ii).

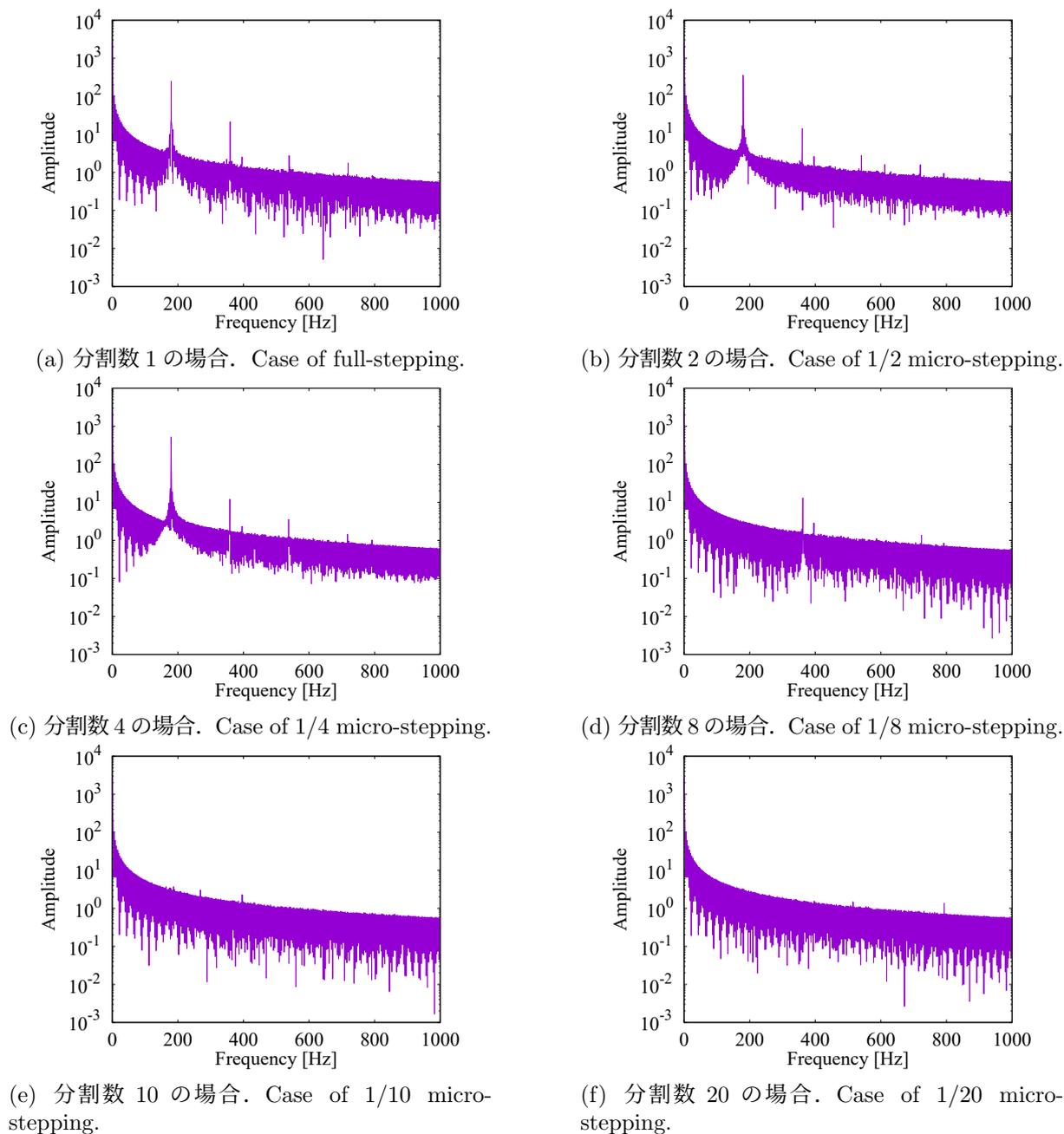


Fig. 13: 速度波形の振幅スペクトル図 (3960 pps). Amplitude spectrum of the speed waveform (3960 pps).

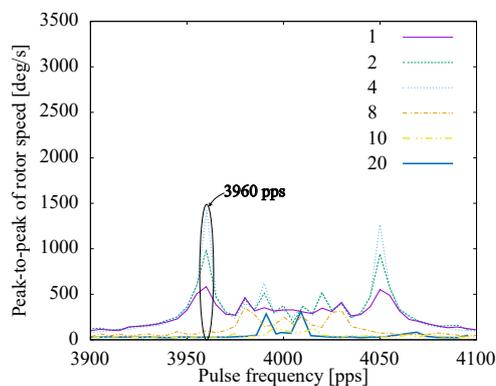


Fig. 14: 速度-振動特性 (iii). Speed-resonance characteristics (iii).

調べた。Fig. 9 のように分割数 4 で振動がもっとも大きく、分割数 2 でその 2/3 の振幅、分割数 1 で 1/3 となり、分割数 8 以降は 1/10 以下となる。次に振幅スペクトルを見ると、Fig.12 に示されるように (a) - (c) では共振周波数におけるピークが確認できる。また、ピークの振幅も振動とおおよそ比例して大きくなっていることが分かる。また、(d) は共振周波数の 2 倍高調波でピークとなっているが振動は比較的小さい。このことから、共振周波数の整数倍高調波の振動に及ぼす影響は小さいといえる。

振動の大きさと周波数応答における振幅スペクトルの比較の結果から、低分割においては駆動周波数の高い高速域でもシステムの共振周波数に起因すると思われる何らかの理由から振動が大きくなることが分かった。また、パルス周波数および共振周波数の整数倍高調波成分も共振周波数の成分ほどではないものの振動に関係していることが分かった。

5. おわりに

本研究では、5 相ステッピングモータのマイクロステップ駆動において分割数を変えた場合の速度-振動特性を測定した。実験の結果、ステップ角分割数の増加によって、全体的な振動の低減されることを確認したものの、分割数 8 以上ではその効果は限定的であることがわかった。また、分割数の違いによって突発的振動の生じる速度範囲および振動が変化する速度域が存在することが確かめられた。最後に共振時の速度波形の周波数応答を調べたところ、振動はシステムの共振周波数の成分および整数次高調波成分、パルス周波数に起因する成分が関わっており、特に共振周波数の成分が振動が大きく関係していることが分かった。詳しい振動の機序の解明および抑制方法についての検討は今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 百目鬼英雄: ステッピングモータの使い方, 95/98, 工業調査会 (1993)
- 2) 見城尚志, 菅原晟: ステッピングモータとマイコン制御, 69/71, 総合電子出版社 (1994)
- 3) 鄭翔, 松尾健史, 三浦武, 田島克文, 佐藤靖雄: 5 相ステッピングモータの共振周波数センサレス自動推定システムの開発, 令和 2 年電気学会全国大会, 5-061, 94 (2020)
- 4) 楊宇航, 松尾健史, 三浦武, 田島克文, 佐藤靖雄: 5 相ステッピングモータの相電圧を用いた共振周波数の推定その 2, 電気学会 回転機/リニアドライブ/家電・民生合同研究会, RM-21-059/LD-21-043/HCA-21-024, 7/11 (2021)