

# 剛性向上によるステッピングモーターの低騒音化

桑田 克也 岩原 光男 長松 昭男  
法政大学工学部機械工学科

研究の目的はステッピングモーターの低騒音化である。ステッピングモーターは、ステップ毎に回転する構造によって簡単に位置制御が実現できるが、ローターは加減速を繰り返すことにより速度変動をもち、振動が発生する要因となる。この振動を低減する為に、ステーターの荷重点変位感度を求め剛性向上を目的とした構造最適化を行い、剛性向上により低振動化を試みる。

## 1. 緒論

ステッピングモーターは、高精度な多点位置決めが簡単にでき、小形で高トルクが得られる特徴をもっている。このため、機器の高性能化、小形ローコスト化の要求にマッチし、非常に幅広い用途に使われるようになった。現在でも、トルクアップ、高応答性が要求され続けているが、最近では、低振動、低騒音という新しいニーズが要求されるようになった。振動は、画像処理や精密なワークに対する影響などが懸念され、騒音は、機器の使用環境の多様化や装置周辺への環境問題などから重要視されるようになった。

本研究の目的はステッピングモーターの低騒音化である。まず、ステッピングモーターの主要部品であるステーターの実験モード解析を行う。ステーターは珪素鋼板を積層して出来ているので、異方性の材料となっている。そのため、実験から得られたモードと固有値を理論モード解析と比較し異方性の材料特性マトリクスを同定した。次に荷重点変位感度を用いて低振動化の為にステーター磁極部分の剛性向上を目指した形状最適化を行った。

## 2. 実験モード解析

ステーターを市販の輪ゴムで懸架し、自由支持状態にした。材質は珪素鋼板を積層したもので、大きさは60mmで重量は325gである。振動試験は、インパルス・ハンマによる打撃加振で行う。計測には、1軸加速度ピックアップを用いた。加速度ピックアップを固定し、加振点移動で打撃試験を行った。FFT分析器に入力されたインパルス・ハンマと加速度ピックアップによる2つの信号は、毎回フーリエ変換し、各加振点での(応答/力)の伝達関数として記録した。MATLAB言語を使用して構築された実験モード解析システムを使用してモード特性を同定した。

実験によって得られた固有振動数とモード減衰率を表1に示す。また、モード形状を図1～図7に示す。表1からモード減衰率が2,4,5次で他と比べて大きな値となっていることがわかる。これはステーターが珪素鋼板を積層して作られている為に捩りモードである2,4,5次モードで、積層するときに使う接着剤が原因で減衰が大きくなったと考えられる。そのため曲げモードと捩りモードで減衰率に大きな差が出たと思われる。

表1 実験と固有値解析の結果

	実験		計算		誤差
	振動数	減衰比	振動数		
1	2323 (Hz)	0.15%	1	2484 (Hz)	6.90%
2	2595 (Hz)	1.76%	4	6771 (Hz)	161.00%
3	2848 (Hz)	0.12%	2	2983 (Hz)	4.70%
4	3142 (Hz)	2.44%	3	4879 (Hz)	55.20%
5	5808 (Hz)	2.22%	9	12648 (Hz)	117.80%
6	6631 (Hz)	0.13%	5	7035 (Hz)	6.10%
7	7073 (Hz)	0.05%	6	7418 (Hz)	4.90%

Mode Shape : Order = 2, f = 2323 (Hz), ζ = 0.151 00

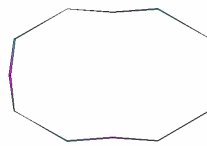


図1 1次モード

Mode Shape : Order = 2, f = 2595 (Hz), ζ = 1.76 00

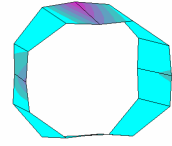


図2 2次モード

Mode Shape : Order = 2, f = 2848 (Hz), ζ = 0.12 00

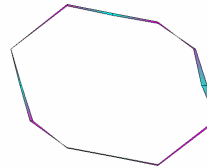


図3 3次モード

Mode Shape : Order = 2, f = 3142 (Hz), ζ = 2.44 00

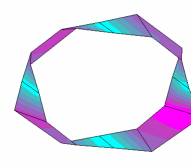


図4 4次モード

Mode Shape : Order = 2, f = 5808 (Hz), ζ = 2.22 00

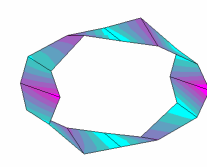


図5 5次モード

Mode Shape : Order = 2, f = 6631 (Hz), ζ = 0.13 00

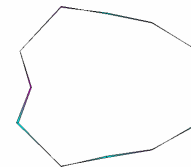


図6 6次モード

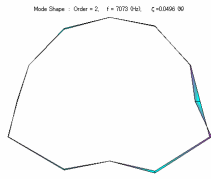


図7 7次モード

### 3. 固有値解析と材料特性

図8に示すモデルを用いて実験モード解析と有限要素法による固有値解析の結果を比較する。モデルは四面体二次要素でモデル化し、要素数136,884で節点数220,332である。比較したものを表1に示す。実験結果を基準に同じモード形状のものを同じ行に書き、実験結果との誤差を示した。実験結果で述べた減衰率が高い振りモードで実験と計算との誤差が非常に大きくなった。これは、計算において使用した材料特性が等方性であった為に、珪素鋼板を接着剤で積層したステーターは接着剤の影響でせん断方向が垂直に比べて弱くなっている為だと思われる。また、図9に実験と計算の固有振動数を比較したものを示す。2つの点線は実験との誤差がそれぞれ10%と20%を表している。振りモードの誤差が大きいことがわかる。

等方性の材料特性を用いて固有値解析を行うと振りモードで固有振動数が非常に高い結果となった。そこで、異方性材料特性を用いて実験とモード形状と固有振動数を同定する事を試みる。実験値に近づくようにせん断剛性の数値を変えて何度か計算を行った。最も実験値に近づいたものの材料特性を用いて以後の解析を進める。また、実験との固有振動数の比較を図10に示す。等方性材料特性を用いた結果図9と比べて実験に近くなり、以前より正確なモデル化ができた。

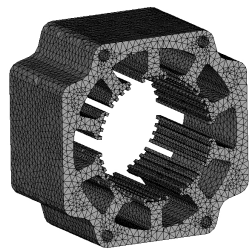


図8 ステーターのFEMモデル

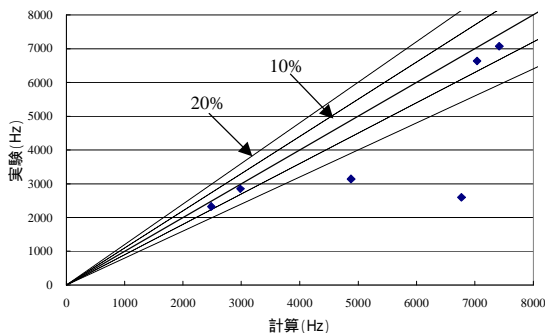


図9 実験と等方性材料特性を用いた計算の

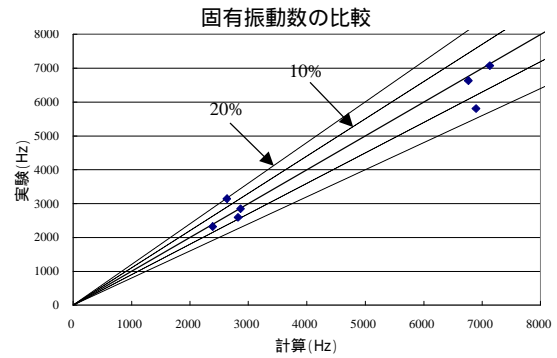


図10 実験と異方性材料特性を用いた計算の固有振動数の比較

### 4. 騒音計測

次にステッピングモーターの騒音測定を行った。測定は本研究室にある簡易無響音室で行った。ステッピングモーターの表面から300mmの場所で騒音を測定し、その信号をFFTアナライザに取り込み1.28秒を10回測定し平均した。ステッピングモーターは天井から吊りし無負荷状態で回転させた。測定結果を図11に示す。

今回対象としたステッピングモーターは常に1組を短絡しながら4相ずつ励磁する5相ステッピングモーター独特の結線方式で、ステップ角が $0.72^\circ$ となるものである。1組の相を見ると5パルスで+と-が逆になり、10パルスが1周期になっている。図11を見ると、入力パルス波の周波数の1/5、1/10の周波数で音圧が大きくなっている。これは、他の入力パルス周波数でも同じ傾向となった。このことにより、騒音が発生している主な原因はステーターの共振によるものではなく、入力パルス波によって磁極が励磁されローターが回転することにより磁極が加振されて起こるものであり、固有振動数による共振現象は小さいと考えられる。

以上のことにより、次の章では騒音低減の手法としてステーター磁極部の剛性向上によりステーター表面の振動を抑えることを試みる

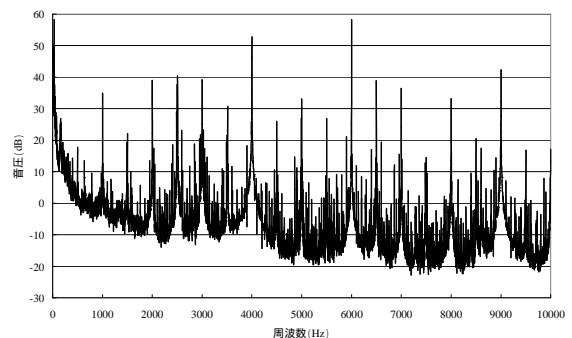


図11 騒音測定

## 5. 構造最適化

### 5.1 荷重点変位感度の導出

まず、構造変更を行う前に荷重点における変位に対する感度を導く。

静的荷重条件化での変位は式(7.1)のフックの法則が成り立つ、

$$[K]\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} [K] &: \text{剛性行列} \\ \{x\} &: \text{変位ベクトル} \\ \{f\} &: \text{荷重ベクトル} \end{aligned}$$

設計変数として、ある要素の体積を採用すれば、歪エネルギーの要素体積による微分係数はその要素の歪エネルギー密度になる。

全要素体積を設計変数にすれば、

$$\{x'_p\} = -\{e\} \quad (2)$$

ここで、 $\{e\}$  は各要素の歪エネルギー密度を並べた列ベクトルである。

### 5.2 構造変更方法

求めた荷重点変位感度を用いて設計変数変更後の荷重点変位は次のように線形予測される。

$$[z]\{\Delta V\} = \{\Delta x\} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} [z] &: \text{感度マトリックス} \\ \{\Delta V\} &: \text{設計変数(要素体積)の変更ベクトル} \\ \{\Delta x\} &: \text{荷重点変位の変更ベクトル} \end{aligned}$$

感度マトリックス $[z]$ は列数が設計変数の数で行数が対象としている加重点変位の数である。

ところで、有限要素法の場合、特に自動モデル化プログラムを使用した場合、一般に要素の数は大きくなる。それに対し問題とする変位の数はいくつかから数十個である。したがって、設計変数として各要素の体積を、また挙動制約条件として荷重点の変位を選べば $[z]$ の行数は問題にしている変位の数で、列数は要素数となり、一般に $[z]$ は横に長いマトリックスとなる。以下 $[z]$ は横長で行数>列数とする。

感度マトリックス $[z]$ と荷重点変位変更量 $\{\Delta x\}$ が与えられるとき、式(3)から設計変数変更ベクトル $\{\Delta V\}$ を求める。式(3)は、式の数より変数が多い連立方程式となり無数の解 $\{\Delta V\}$ が存在するが、 $\{\Delta V\}$ のノルム最小という条件を付加すると $\{\Delta V\}$ は一意にきまり、

$$\{\Delta V^*\} = [z]^T ([z][z]^T)^{-1} \{\Delta x\} \quad (4)$$

となる。式(4)は擬似最小二乗法として知られている。

式(4)により体積変更量が決めれば、体積熱膨張係数で除することにより温度変更量が決まる。この温度変更

量を各接点に設定して有限要素法による熱膨張変形解析を行いことにより形状を変更できる。これらを繰り返して計算を行って構造変更を行っていった。また、1回の構造変更での体積増加量が最大100%になるように温度を設定した。

### 5.3 ステーターの構造変更

前節で示した理論を用いて、ステーター全体の断面形状の最適化を行った。使用したモデルは三角形二次要素を用いてモデル化し、節点数は66,899で要素数32,203である。

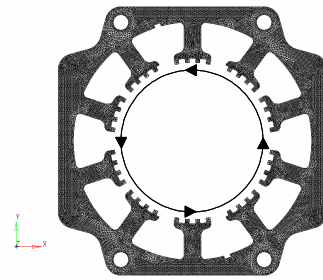


図12 ステーター断面形状と荷重

荷重条件は小歯先端に円周方向に作用させた。小歯は40個あるので荷重条件は40通りあることになる。拘束条件はステーターにはフランジとブラケットを固定する為の穴が4つ開いているので、その4点を拘束した。

このモデルでは荷重点が40個なので、式(3)に示す感度マトリックス $[z]$ は40行32,203列のマトリックスとなり、 $\{\Delta x\}$ は40行のベクトルとなる。

最適化を行った結果の荷重点変位一つの推移を図13に示す。変更前の変位 $1.98E-3\text{mm}$ から23回の変更で、ほぼ目標の $1.01E-3\text{mm}$ まで変位を下げる事が出来た。構造変更前後の形状の比較を図14に示す。

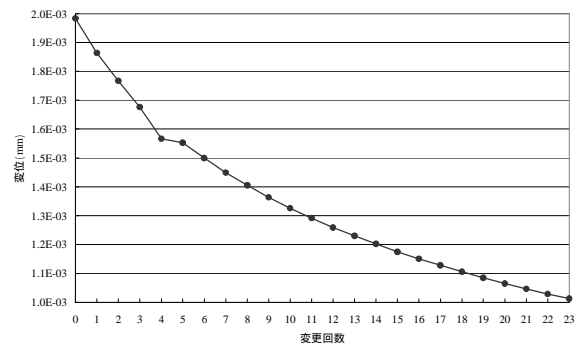


図13 荷重点変位の推移

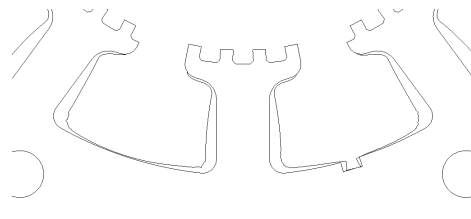


図14 変更前後の形状比較

### 5.4 周波数応答による比較

構造変更を行ったものの寸法を用いてステーターの3Dモデルを作成し、変更前と変更後のモデルの周波数応答を比較した。加振点は小歯1列を加振し、応答点はステーター4表面の中心点の表面に垂直な方向とした。解析はモーダル周波数応答解析で行い、40,000Hzまでの104個のモードを使用した。

周波数応答解析の結果を図15に示す。図には4点の速度の平均を示してある。剛性が向上したために変更後の方の周波数が高くなっている。大きさは全体的に下がっているといえる。速度の平均は約半分になっている。

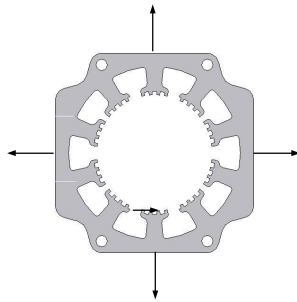


図15 周波数応答解析の加振点と応答点

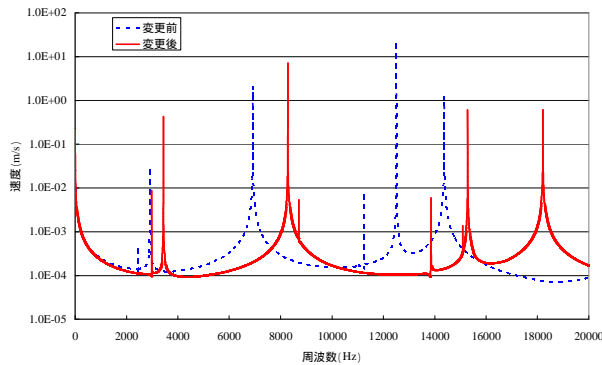


図16 周波数応答の4点の速度の平均

表2 応答の平均の比較

	変位			速度		
	変更前	変更後	減少率	変更前	変更後	減少率
方向	1.21E-07	1.02E-07	-16%	1.75E-03	2.94E-04	-83%
方向	6.20E-06	5.64E-06	-9%	2.35E-03	1.93E-03	-18%
方向	1.21E-07	1.01E-07	-17%	1.75E-03	2.99E-04	-83%
方向	6.00E-06	3.92E-06	-35%	2.36E-03	1.93E-03	-18%
平均	3.11E-06	2.44E-06	-22%	2.05E-03	1.11E-03	-46%

### 5. 結論

実験モード解析と固有値解析の固有振動数とモード形状の比較し、珪素鋼板を積層して作られているステーターの材料特性行列を変更して異方性材料特性を用いて実験との誤差20%の範囲内まで近づけた。

次に、単位荷重が作用したときの荷重点変位感度を導出し、熱膨張変形解析を用いた形状変更を行った。また、ステッピングモーターのステーターの磁極部の剛性向上に適用し有用性を検討し構造最適化を行った。小歯先端の単位荷重当たり変位を小さくすることにより、剛性向上を行うことができた。また、形状変更により得られた断面形状を用いて周波数応答解析を行った結果、応答変位、速度も低減することができ、ステーター表面4方向の速度の平均も約半分になった。形状変更より得られたステーター形状を用いて現在ステッピングモーターを製作しているので、今後、実回転時の騒音測定等で確かめていきたい。

### 参考文献

- [1]岩原・長松, 機論, 56-523, C(1990-3), 86-92.
- [2]長松昭男, モード解析入門, (1993), コロナ社.
- [3]O.C. ツィエンキーヴィッツ, マトリックス有限要素法, (1975), 倍風館.

キーワード.

騒音、モード解析、有限要素法、逆問題、最適設計

-----

Summary.

## **Noise Reduction of Stepping Motor by the Stiffness Improvement**

Katsuya Kumeda    Iwahara Mitsuo    Nagamatsu Akio  
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hosei University

The purpose of the research is a noise reduction of stepping motor. The stepping motor the structure which rotates every step can simply realize position control, and it has velocity fluctuation by repeating acceleration and deceleration, and it becomes a factor in which the vibration is generated rotor. The structural optimization for the purpose of the rigidity improvement is carried out in search of the load point displacement sensitivity of the stator in order to reduce this vibration, and the vibration reduction is tried by the rigidity improvement.

Keywords.

Noise, Modal Analysis, Finite Element Method, Inverse Problem, Optimum Design