

Investigation of Design Method of Synchronous Motor for Machine Tools Based on Quality Engineering

Takakazu IKEGAMI*, Toshiki HIROGAKI ** and Eiichi AOYAMA ***

(Received September 27, 2016)

One requirement has been emerged that a compact synchronous motor with a high speed and a high torque is needed to drive a rotary axis and a spindle in machine tool manufacturing fields. However, there has been no report dealing with design method of its synchronous motor for a rotary axis or a spindle in machine tools. In the present report, we propose a novel method to design a synchronous motor for a rotary axis in machine tools based on quality engineering. The CAE (computer aided engineering) is combined with quality engineering to develop a direct drive motor for a rotary axis of machine tools. As a result, it is demonstrated that a proposed method is effective to optimize the design parameters of a compact synchronous motor with a high speed and a high torque for machine tools.

Key words : quality engineering, machine tools, design, synchronous motor, optimization

キーワード : 品質工学, 工作機械, 設計, 同期モータ, 最適化

品質工学の手法を導入した工作機械用の同期モータの設計法の考察

池上貴一, 廣垣俊樹, 青山栄一

1. 緒言

近年の工作機械業界において、国際競争力を維持するために要素技術の研究開発の重要性は益々増大している。特に製品開発において、限られたスペースにおいて各要素を適切に配置して、その機能性を最大限に発揮することが製品の競争力の増大のために不可欠な技術となる。直進3軸制御のマシニングセンタについては数多くの研究の例がある¹⁾。しかしながら、旋回軸を有する5軸制御のマシニングセンタや4軸以上の制御軸を有するターニングセンタなど関する体系的な研究は始まったばかりである。

工作機械の要素技術の中でも、旋回軸にダイレクトド

ライブ (Direct Drive: DD) モータを採用する技術は、運動性能の向上だけでなく設計におけるスペースの自由度の向上などにも効果的である。そのためには、高トルクな工作機械向け同期モータの開発が不可欠となる。また主軸が旋回軸となる場合に必要な小型で高トルクな主軸モータも同期モータで達成できる可能性がある。しかしながら、これら用途に適した工作機械用の同期モータの研究に関する報告はなされていない。

一方、ネオジウム磁石が開発された当初に家電製品などに内蔵されるモータなどを対象にして、品質工学の手法を導入することで、効果的に同期モータが開発された例がある²⁾。また近年は、かご形誘導電動機の高周波損

* Graduate Student, Doshisha University, Kyoto/DMG Mori Co. Ltd, Nara
Telephone/Fax: +81-743-53-1123, E-mail: ta-ikegami@dmgmori.co.jp

** Department of Mechanical Systems Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6503, E-mail: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

*** Department of Energy and Mechanical Engineering, Doshisha University, Kyoto
Telephone: +81-774-65-6506, E-mail: eaoyama@mail.doshisha.ac.jp

失低減の設計法に応用された例があるが、同期モータにおいてはなかった³⁾。そこで本報では、品質工学を工作機械用の新たな同期モータに応用する手法に取り組む。特にIPM(埋込磁石形: Interior Permanent Magnet)モータを例にして、設計プロセスにおける最適化手法の提案とその有効性について検討する。

2. 品質工学の手法とモータ設計の方法

2.1 品質工学に基づく2段階設計法

品質工学の内容^{4,5)}は、大きく分けてオフラインとオンラインとなり、前者は開発の技術に関連し、後者は制御、管理などの日常の生産活動に用いられる。さらにオフライン品質工学は、

- (1) システムの選択: 目的機能を持つ技術的手段の選択。
 - (2) パラメータ設計: システムの中のパラメータの水準を機能性を良くするために決める。
 - (3) 許容差設計: 品質とコストのトレードオフ。
- の3段階に分けられる。

パラメータ設計では、機能性をS/N比で表現し、システムの中の設計定数の水準(値)を変えて機能性の改善を行う。また許容差設計では、ばらつきの原因である誤差因子を直交表に割り付けて品質特性に対する影響の大きさを調べる。

品質工学におけるパラメータ設計の内容は、制御因子間の交互作用をなくすために、制御因子と信号や誤差との交互作用である機能性の測度であるS/N比を導入することと、制御因子どうしに交互作用がなくなったかどうかをチェックに直交表を使うものである。

科学と技術・工学の違いとして、科学は現象の理解と発見であるが工学は創造であるとし、品質工学の中心は改善であり、機能性の評価はばらつきに対する因果関係の追求でなく、機能を理想関係に近づけることとされる。改善の中心はシステムを変えるか、システムやシステムパラメータの水準を変えることで行うものである。新しいシステムは独創的な設計をすることであり真理とは異なるので、他にも無数の同じ機能のシステムが存在するとするものである。

品質工学の場合、できるだけ上流で、できれば源流で技術開発を能率よく実施することを目指している。したがって、数学的なモデルの正しさより、機能性の利得を

再現できる可能性があるとして、最適設計のあとで出力データを求め目標値に修正する方法が採用される。よって、品質工学は2段階設計法と呼ばれている。

2.2 基本機能と因子の定義

目的を達成するための技術の働きに対し、原因系を M (信号因子)、結果を特性 y (出力)として、両者の関係を単純に

$$y = \beta M \quad (1)$$

と定義して、基本機能と称する。品質工学では複雑な式で現象を解明するのではなく、原因と結果を単純な構図で考え、 M に対する y の値のバラツキの小ささを評価するという考え方を導入している。特に M をなされた仕事量とみなし、その結果 y が生成されるとすると、仕事量(エネルギー)がばらつきなく結果を反映すれば良いと考えるものである。一次式だけで済ませ、再現性よく安定的な結果を得ることを目指す手法である。

ここで、技術者が意図的に設定可能な要因(実験条件等)を制御因子として、入力である信号因子 M に対してさまざま制御不能な誤差因子が介在した結果として出力である特性 y が得られるものとする。

2.3 基本機能と特性値に基づくS/N比と感度

実際には出力 y は、例えば製造の各工程などで生じる誤差因子($x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$)の影響を受け、次のような関係式になるものと考えられる。

$$y = f(M, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (2)$$

そこで

$$f(M, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = \beta M + [f(M, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) - \beta M] \quad (3)$$

とすると、右辺の第1項が有効部で第2項が誤差部と考えられる。それぞれの大きさを求めるために、品質工学では信号因子の範囲は十分に広く、水準数もできるだけ多くする。式(2)の因果関係を求めるのが目的でないので、多くの場合、出力値 y がそれぞれ最大、最小となるように誤差因子を調合する。

出力値 y を最大化や最小化するのでなく、 y と M の関

数関係のばらつきを S/N の改善で最小化し、希望する y の値を得るように感度で調整するのが品質工学である。

そこで S/N 比は有効部の β^2 (または $\beta \Sigma M^2$) を、誤差部は特性値の 2 乗和から比例項を引いて誤差変動を求め、誤差の大きさを平均 2 乗誤差である σ^2 として求める。その比のデシベル(db) 単位 η

$$\eta = 10 \log (\beta^2 / \sigma^2) \quad (4)$$

を S/N 比とする。

また感度 S は、

$$S = 10 \lg (\beta^2) \quad (5)$$

とする。

2.4 2 段階設計法とモータ設計に向けたモデル化

品質工学では、第 1 段階として S/N 比を用いてばらつきを最小化し、第 2 段階で感度 S を調整する。最初に最小化するの、後でばらつきを最小化することが困難だからである。ばらつきを最小化した後、出力 y の大きさを調整するための尺度が感度 S である。信号 M あたりの出力 y を大きくしたければ感度 S を上げ、出力 y を小さくしたければ感度 S を下げる調整を行う。Fig. 1 は、第 1 段階における入出力関係と誤差因子 x_1, x_2 の関係である。図中の左から右にすることで、S/N 比を改善 (ばらつきを減少) し、その後に感度を改善する手順となる。

近年、中型の 5 軸制御マシニングセンタを中心にして旋回 C 軸 (Z 軸まわり) の高速化のニーズが高い。そこで 1200min^{-1} 以上の回転を具現化するための、旋回軸用の

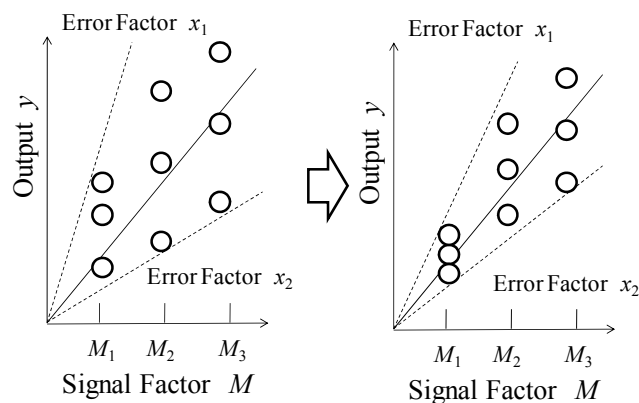
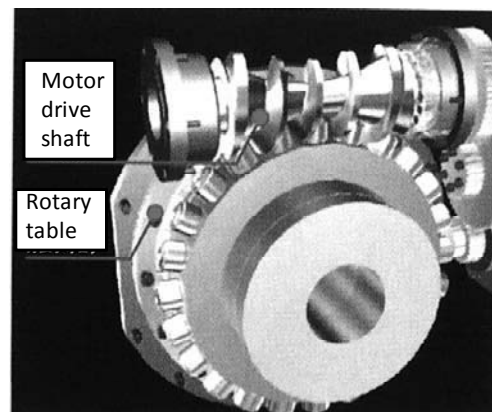


Fig. 1. Input, output and error factors.

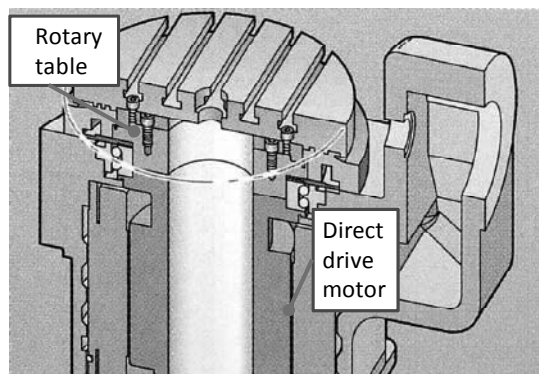
DD モータを想定して本報では検討する。また高速化に適した、IPM モータを想定する。IPM モータは SPM モータに比べてロータ中の永久磁石の磁束の利用率が下がる欠点があるため、品質工学によりその問題を払拭するための磁石の最適配置を検討する。

従来の工作機械の旋回運動軸は、Fig. 2(a)に示すようにテーブル旋回軸にウォームなどの減速機とサーボモータを取り付け駆動する 경우가一般的であった。しかしながらモータロータ側にネオジウム磁石を採用して十分なトルクを確保して、Fig. 2(b)に示すようなダイレクトドライブ駆動を採用すると、省スペース化や構成する部品点数の減少による高剛性化やメカの信頼性の向上、バックラッシュレスによる運動の高精度化、ユニット化などが期待できる⁶⁾。ただし工作機械用としては、加工面の品質を確保するためにトルク脈動を十分に抑制しておく必要がある。

そこで最適化を目指す対象としては、(1)トルクを最大化するため、磁石のつくる磁束のロスを減らし有効な磁束量を大きくする、(2)トルクの脈動を最小化するた



(a) Roller worm reducer for rotary axis



(b) Direct drive for rotary axis

Fig. 2. Rotary axis of machine tools.

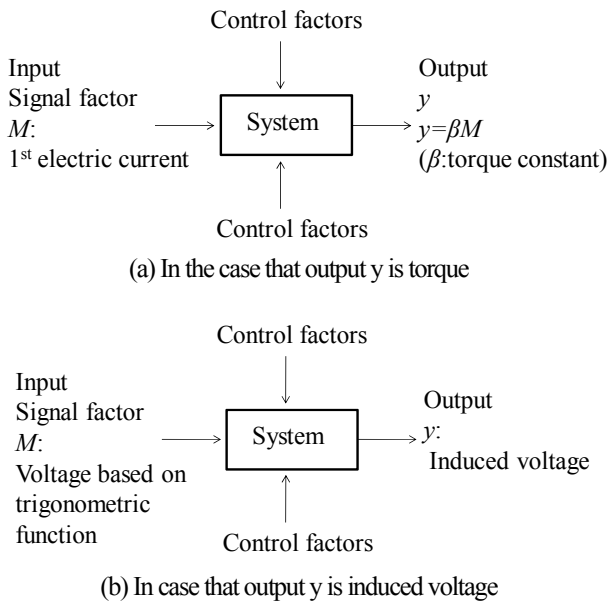


Fig. 3. Model for motor design system.

め、ロータとステータ間のギャップの磁束密度を電気角の1次で三角関数（正弦波）に近づける場合を対象システムの理想機能とする。

Fig. 3 は、それぞれのシステムモデルである。モータのトルクは、有効な磁束の磁束密度に対してフレミングの左手の法則より、（ロータコイル巻線に流れる電流）×（磁束密度）に比例するため、トルクを出力とする場合には入力を巻線の一次電流とする。モータを外部から強制的に回転させると発電機となり、その際に発生する交流の誘導電圧と磁石のつくる磁束分布が出力波形となるため、磁束の分布を直接評価するのではなく、誘導電圧を出力とし、入力を理想的な正弦波電圧とする。

2.5 解析方法と因子の決定

CAD データより、非線形電磁境界解析によりシミュレーションを遂行する。解析モデルの例を Fig. 4 に示す。

信号因子は、トルクを出力とする場合はモータ定格電流以下の電流の範囲を4水準とする。誘導電圧を出力とする場合は電気角の1周期を50分割して入力する。

誤差因子は、ギャップ幅、磁石の位置、磁石の厚み、磁石の幅、エアポケットとギャップの距離、ティース幅、スロット開口部の幅、スロット開口部の高さ、の8因子でそれぞれのばらつきとして±3%とした。

制御因子は同じく Fig. 5 に示すように、ギャップ幅、磁石位置（ギャップからの距離）、磁石の厚み、磁石の

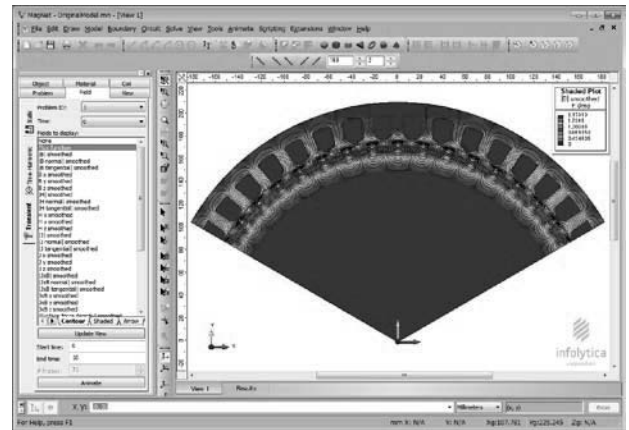


Fig. 4. FEM model for analysis.

ティース幅、スロット開口部の幅、スロット開口部の高さ、の8因子とした。これらの初期条件は、線形解析に基づく結果より決定した。また制御因子および信号因子と誤差因子の割り付けにはL18直交表を用いた。

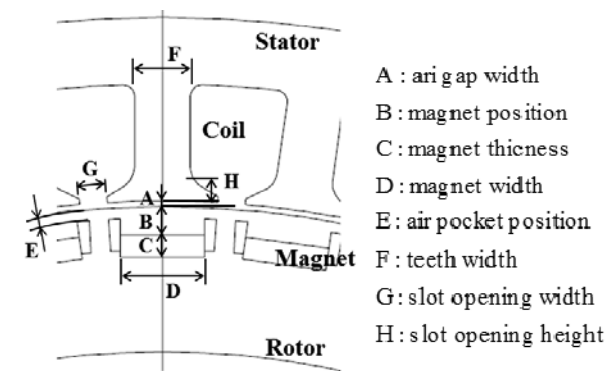


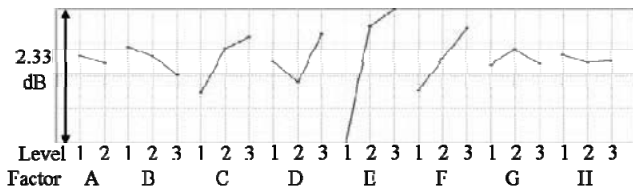
Fig. 5. Control factors.

3. 解析結果および考察

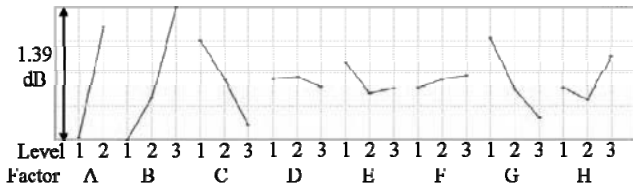
3.1 解析結果とS/N比の比較

Fig. 6 は、トルクを出力とする場合および誘導電圧を出力とする場合のS/N比である。感度の差は、2.33dbおよび1.39dbである。トルクを出力とする場合の方が感度差が大きいことがわかる。したがって、トルクを出力とした場合に着目して考察を進める。

Fig. 7 は、トルクを出力とした場合の要因効果図である。トルク脈動を小さくするためにS/N比が目標である。またトルクを大きくするために感度大が目標である。図より、2段階設計の例としてそれらを両立するためには、エアポケット位置 (E) およびティース幅 (F) が重要な制御因子であることがわかる。



(a) In the case that y is torque



(b) In the case that output y is induced voltage

Fig. 6. S/N ratio for signal factor.

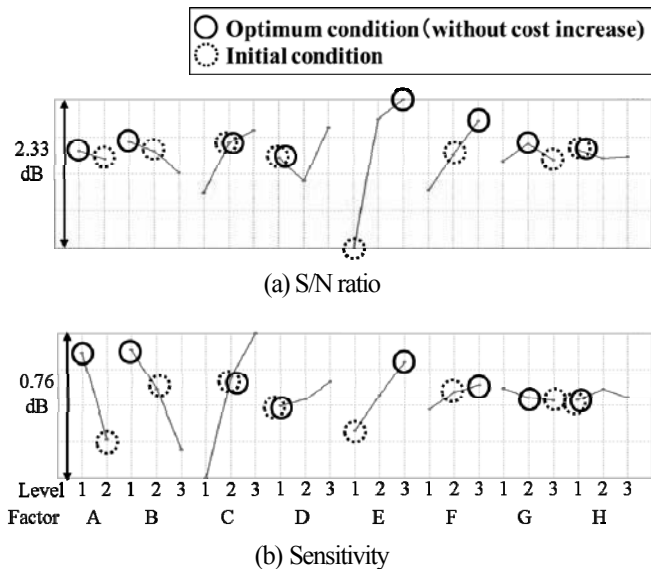


Fig. 7. Factor effect chart.

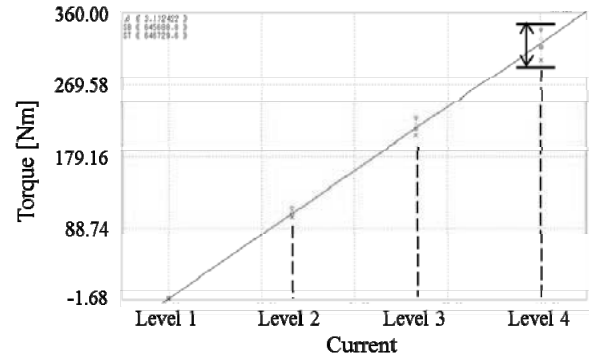
3.2 最適設計パラメータの選定と利得の推定と再現性

Table 1 は、最適パラメータを選定した場合の初期と最適化後の S/N 比の差および感度の差、すなわち利得である。また推定値と解析結果の利得も一致している。初期条件に対して、最適条件の改善効果および再現性が確認できた。

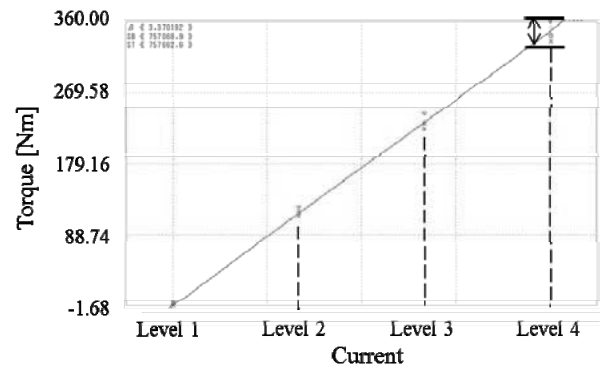
Fig. 8 は、初期条件と最適設計パラメータの選定後の信号因子とトルクの関係である。図より、最適化によりトルクが約 7% 向上 (β が 7% 増大) し、また各水準のデータが小さくなったことでトルク脈動も約 2% から 1% 以下となり -6db の改善効果が確認できる。特に実加工時に

Table 1. Estimation of gain.

	S/N ratio		Sensitivity	
	Estimate [dB]	FEM analysis [dB]	Estimate [dB]	FEM analysis [dB]
Initial condition	39.75	39.75	9.74	9.8
Optimum condition	42.5	42.88	10.72	10.56
Gain	2.75	3.13	0.98	0.76
	-	12.1%	-	-28.9%



(a) Initial parameters



(b) Optimal parameters

Fig. 8. Relationship between signal factor and output.

加工面の品質に影響を与えると考えられるトルク脈動に対する改善の効果が顕著であり、本手法は極めて有効であることが確認できた。

以上の結果より、工作機械用の DD モータの開発において、線形解析により初期形状を決定し、その後に品質工学と非線形電磁界解析を用いてロータ内部の永久磁石の配置の設計パラメータを最適化する手法が有効であることが示された。

4. 結言

工作機械の回転軸の DD モータの開発において、ロータ内部の永久磁石の配置設計を対象にして、品質工学の手法を導入する手法を提案した。その結果、以下の結論

を得た。

- (1) モータ設計を対象として、品質工学における基本機能を明確化し、そのシステムモデルを明らかにした。
- (2) 線形解析により初期形状を決定し、その後に品質工学と非線形電磁界解析を用いてロータ内部の永久磁石の配置の設計パラメータを最適化する手法を構築した。
- (3) 提案する手法は、モータの出力トルクの増大および加工面の品質を確保するために重要となるトルク脈動の抑制に有効であることが示された。

参考文献

- 1) 垣野義昭, 井原之敏, 亀井明敏, 伊勢徹, “NC 工作機械の運動精度に関する研究 (第 1 報: DBB 法による運動誤差の測定と評価)”, 精密工学会誌, **52**[7], 1193-1198(1986).
- 2) 岡田幸弘, 河瀬順洋, “品質工学と多変量解析法による磁石埋め込み形モータの最適設計”, 電気学会論文誌 D, **123**[12], 1516-1522(2003).
- 3) 杉本慎治, 小村昭義, 木村守, 西濱和雄, 小池正敏, 増田誠吉, “ロバスト感度解析を用いた誘導電動機の時間・空間高調波損失低減に関する検討”, 電気学会論文誌 D, **135**[10], 993-998(2015).
- 4) 田口玄一, “実験計画法と品質工学”, 品質工学, **2**[1], 2-8(1994).
- 5) 矢野耕也, “品質工学の基礎とパラメータ設計”, 精密工学会誌, **81**[11], 1008-1012(2015).
- 6) 小林誠一, “ダイレクトドライブモータ”, 精密工学会誌, **69**[11], 1534-1537(2003).