

非接触渦電流インパクト機構の動作特性解析法

Dynamic Analysis of Non-Contact Eddy Current Impact Drive Mechanism

太田 智浩* · 光武 義雄** · 長谷川 祐也** · 平田 勝弘***
Tomohiro Ota Yoshio Mitsutake Yuya Hasegawa Katsuhiko Hirata

渦電流によるローレンツ力を利用して非接触で衝撃トルクを発生する静音インパクト機構において、複数の接合面を有する回転領域のメッシュを周方向に等間隔で分割してメッシュを自動修正する方法を採用するとともに、共振現象に関しては増幅率を用いて換算することによって、簡単かつ短時間で可能な動作特性解析法を開発した。

本法を用いることで、非接触衝撃トルク発生メカニズムを明らかにするとともに、インパクト機構の性能向上と高効率化を可能としている。

For silent-impact mechanisms of generating non-contact impact torque by using Lorentz force of the eddy current, a simple and efficient dynamic analysis method has been developed by adopting a rotary mesh of 3D finite elements with multiple joints equally divided in the circular direction and automatic regeneration of the mesh, and combined with a magnification factor for converting resonance into impact torque.

Use of this method clarifies the generation mechanism of non-contact impact torque and enables improvement of the performance and efficiency of impact mechanisms.

1. ま え が き

現在、衝撃力伝達機構を用いた工業製品は数多く存在している。その一例として、図1に示すねじ締用の電動工具などに利用されている衝撃トルクを発生させるインパクト機構がある。このインパクト機構はモータの運動エネルギーを衝撃トルクに変換することで、瞬間的に大きなトルクが得られるという特徴を有する。このため、モータのトルクを直接利用する方法と比べて最大締付トルクが大きいことや、手に掛かる反動が小さいなどの利点がある。しかし、衝撃トルクを得るためにハンマとアンビルを衝突させることから大きな騒音が発生する問題を抱えている。

そこで筆者らは、インパクト機構の静音化を図るため渦電流によるローレンツ力を利用して非接触で衝撃トルクを発生する静音インパクト機構を提案している¹⁾。この渦電流インパクト機構の設計に際し、大きな衝撃トルクを得るためには動作特性を明らかにする必要があり、シミュレーションによる解析は有効な方法となる。

本稿では非接触渦電流インパクト機構の動作特性解析法

を提案し、原理モデルにおける衝撃トルクの解析結果と測定結果を比較することでその妥当性を検証するとともに、これを用いて衝撃トルクを向上させるための方法についても検討する。



図1 インパクト機構を用いた電動工具

* パナソニック電工解析センター（株） Panasonic Electric Works Analysis Center Co., Ltd.

** 先行技術開発研究所 Advanced Technologies Development Laboratory

*** 大阪大学大学院 工学研究科 Graduated School of Engineering, Osaka University

2. 非接触渦電流インパクト機構

図2に非接触渦電流インパクト機構の原理モデルとなる磁気構造を示す。回転部はリング磁石、固定部は銅板と鉄心で構成されている。リング磁石は極数8のネオジウム系磁石である。銅板は厚み0.8 mm、長さ30 mmで、リング磁石の外側と内側にそれぞれ4枚ずつ90度間隔で鉄心に固定されている。

鉄心や銅板は回転しないように固定し、リング磁石をモータに連結して高速で回転させると、銅板を鎖交する磁束が変化して渦電流が流れ、ローレンツ力によるトルクが発生する（以下、渦電流トルクと記す）。1枚の銅板でリング磁石の周囲を完全に囲うと、渦電流トルクはモータの回転に対して一定負荷となり、単なる制動トルクとなる。しかし、銅板を複数に分割することで渦電流トルクはパルス状となり、インパクト機構として利用できる。このことから本機構では、リング磁石の回転速度で渦電流トルクの大きさを、銅板の形状などで渦電流トルクの波形を制御できる。また、鉄心は銅板を固定するために銅板間が凸構造となっており、リング磁石と鉄心の凸部間で吸引力（以下、電磁吸引トルクと記す）が発生する。この両トルクの合計を過渡トルクとする。

本解析に用いる3次元分割図を図3に示す。この図において、ギャップ部分は4層に分割し、周方向に等間隔としている。

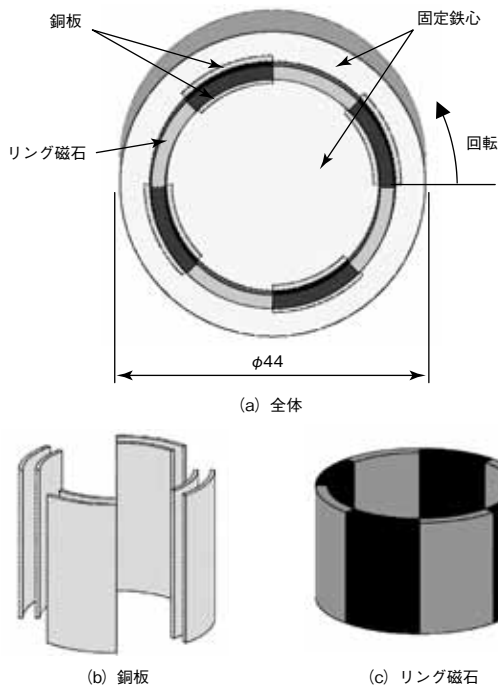


図2 非接触渦電流インパクト機構の原理

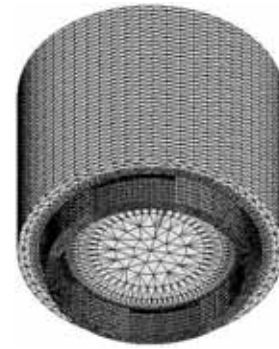


図3 3次元分割図

3. 解析方法

非接触渦電流インパクト機構の動作特性解析フローチャートを図4に示す。

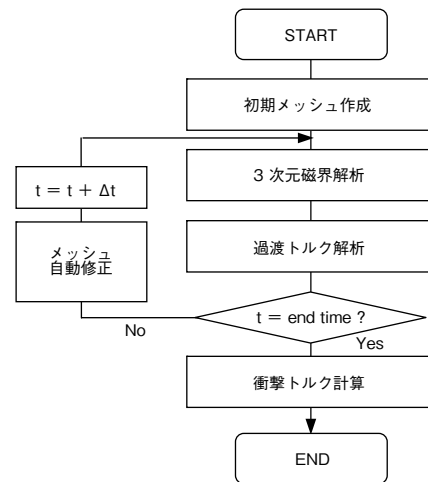


図4 動作特性解析フローチャート

3.1 磁界解析

3次元有限要素法を用いた磁界解析の基礎方程式は、磁気ベクトルポテンシャル A と電気スカラーポテンシャル ϕ によって次のように表すことができる²⁾。

$$\text{rot}(\nu \text{rot} A) = J_e + \nu_0 \text{rot} M \quad (1)$$

$$J_e = -\sigma \left(\frac{\partial A}{\partial t} + \text{grad} \phi \right) \quad (2)$$

$$\text{div} J_e = 0 \quad (3)$$

ここで、 ν は磁気抵抗率、 J_e は渦電流密度、 ν_0 は真空の磁気抵抗率、 M は磁化、 σ は導電率である。

鉄心磁気特性の非線形性はニュートン・ラプソン法を、過渡トルクはマクスウェルの応力法を用いてそれぞれ計算している。このため、リング磁石の周囲のギャップ中央に

は積分面を作成している。

3.2 3次元分割図自動修正法

有限要素法を用いた磁界解析では、3次元メッシュはリング磁石の回転に伴い自動的に修正する必要がある。通常、モータのような回転運動に対しては、回転部と固定部のもっとも近い節点同士を接続することでメッシュを修正する方法が用いられている³⁾。本モデルにおいても同様の方法を採用しているが、回転部と固定部間の接合面が側面および上下面に複数存在するため、回転領域を周方向に等間隔でメッシュを作成することによって自動修正時間を高速化している。図5に回転運動に伴う3次元分割図の修正法を示すとともに、以下で簡単に説明する。

- (1) 図5(a)に示すように、回転磁石の領域を周方向に等間隔で分割する。ここでは周方向に24分割している。メッシュを分割する間隔は、回転速度や時間きざみ幅とは関係がない。なお、回転部磁石は反時計回りの方向に回転するものとする。
- (2) 図5(b)のように回転磁石と固定領域を分離し、図5(c)に示すように回転磁石を任意の角度に移動させると同時に、磁石の磁化ベクトルも回転角度と同じだけ回転させる。
- (3) 図5(d)に示すように、回転磁石と固定領域のもっとも近い節点同士を複数面で接続する。このため回転磁石付近のメッシュは少し歪んでいる。

以上のメッシュ自動修正を図4の各ステップで実施する。

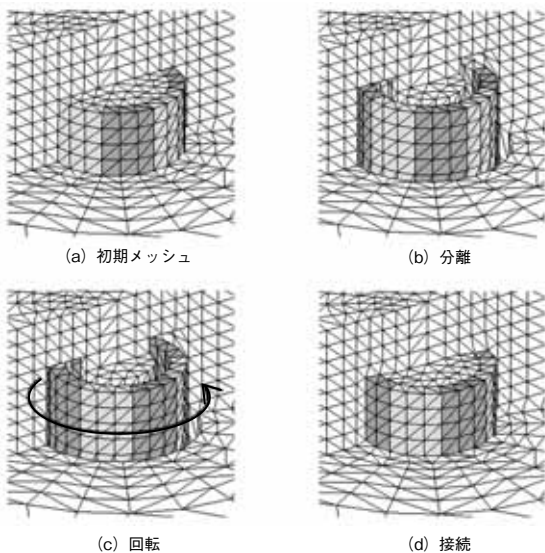


図5 3次元分割図自動修正法

4. 過渡トルク特性の解析結果

図6に回転数が 2000 min^{-1} 時の過渡トルク特性の解析結果を示す。なお、磁石の極の境界面と銅板の端面が一致している位置を回転角度 0° とする。図7に過渡トルクが

最小時と最大時の渦電流密度ベクトル分布、図8にローレンツ力密度ベクトル分布を示す。

図6から、本モデルの過渡トルクはリング磁石と同様に 45° 周期で、回転角度が 25° 付近で最大となり、その値は約 $0.85 \text{ N}\cdot\text{m}$ であることがわかる。この回転角度はリング磁石の極の境界面が銅板中心を通過するときであり、銅板を鎖交する磁束の変化が最大となるために過渡トルクも最大となる。

図7の(a)と(b)では渦電流の大きさはまったく異なるが、これはリング磁石を固定部に突然挿入したことを模擬するために磁気ベクトルポテンシャルの初期条件をゼロとして解析しており、1ステップ目ではリング磁石の磁束を打ち消す大きな渦電流が流れるからである。そのため、図8のローレンツ力密度ベクトルも同様に大きさがまったく異なる。ただし、1ステップ目の大きな渦電流はリング磁石の回転で生じたわけではないことから、ローレンツ力はトルクと関係がないラジアル成分のベクトルが非常に大きいことがわかる。

本来、渦電流トルクは制動力となるため、トルクの向きはプラス方向である。しかし、過渡トルクはプラス方向だけでなく、マイナス方向にも発生している。これは電磁吸引トルクの影響であるが、詳細は後述する。

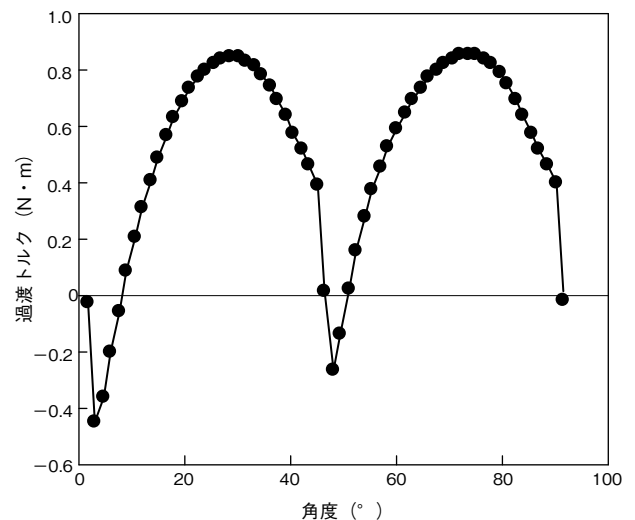


図6 過渡トルク特性 (回転数 2000 min^{-1})

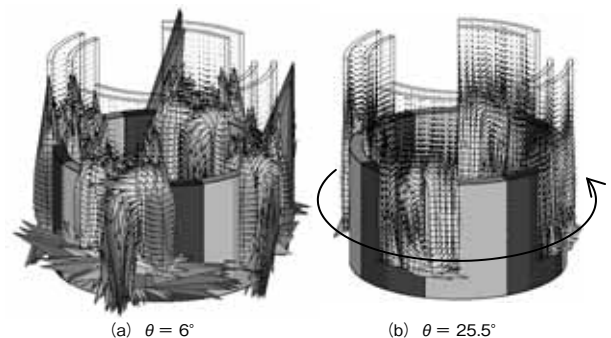


図7 渦電流密度ベクトル分布

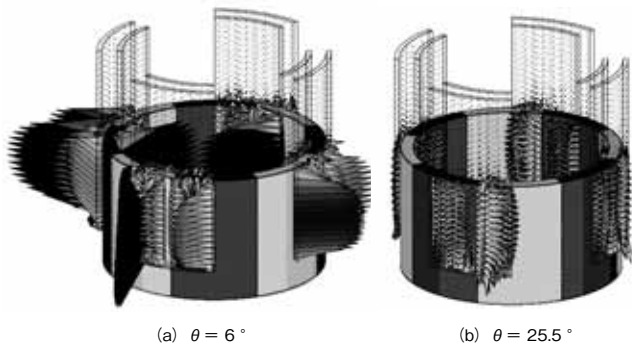


図8 ローレンツ力密度ベクトル分布

5. 衝撃トルク測定法

ここでは図2に示した非接触渦電流インパクト機構を試作して衝撃トルクを測定する。図9(a)に衝撃トルクを測定するための実験装置の全体を示す。シミュレーションではリング磁石を回転部、リング磁石の内側と外側の銅板および鉄心を固定部としているが、実験では逆に、リング磁石を固定部、銅板と鉄心を回転部としている。回転部はサーボモータと接続されており、サーボモータの速度を制御することで回転数を調整する。固定部は磁歪式のトルク計に接続されており、回転ないようにロックされている。また、回転部と固定部は0.2 mmのギャップを維持するように保持されている。ここで回転部を高速で回転すると回転部と固定部の間で過渡トルクが生じ、トルク計は衝撃トルクを測定する。図9の(b)は回転部、(c)は固定部を拡大したものである。

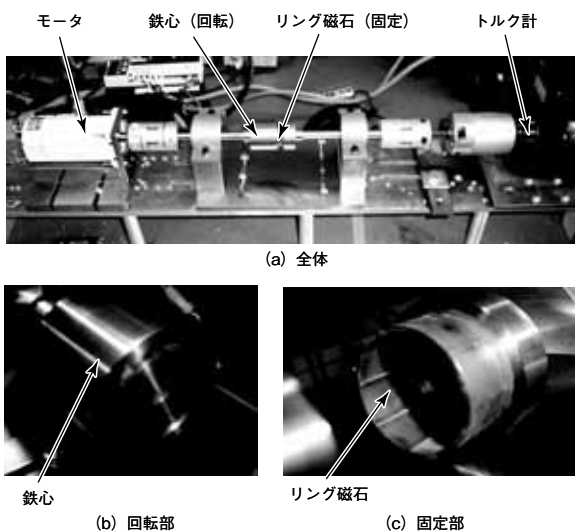


図9 実験装置

6. 測定結果との比較検証

図10に衝撃トルクの測定結果を示す。モータの回転数はシミュレーション時と同じ 2000 min^{-1} (360° は 30 ms) である。この図から、測定した衝撃トルク波形は1周期が

約 3.75 ms であり、シミュレーション結果と同様に 45° の周期性を確認することができる。また、実験で得られた衝撃トルクの最大値はおよそ $2.0 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。ここでシミュレーションから求めた過渡トルクと実験から求めた衝撃トルクの最大値を比較すると、回転数 2000 min^{-1} において衝撃トルクは過渡トルクの最大値 $0.85 \text{ N}\cdot\text{m}$ の約 2.4 倍となることがわかる。

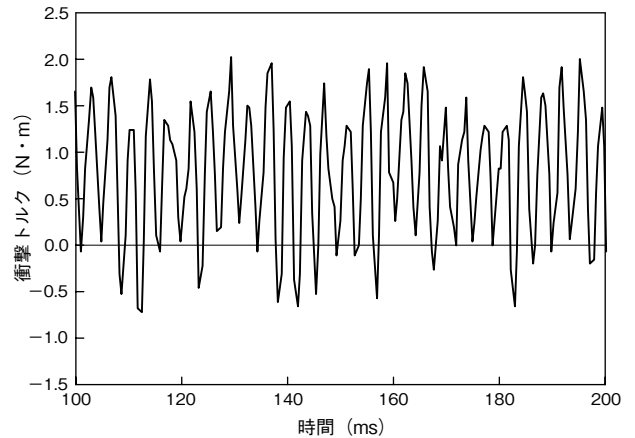


図10 衝撃トルク波形 (回転数 2000 min^{-1})

衝撃トルクの測定結果と過渡トルクの解析結果が異なる原因を検討するため、モータの回転数を $500 \sim 3000 \text{ min}^{-1}$ まで変化させて両者を比較する。図11に、回転数に対する衝撃トルクの実測値と過渡トルクの計算値をそれぞれ示す。過渡トルクの計算値は回転数に比例して大きくなっていくが、これは回転数に比例して渦電流が大きくなるためである。一方、衝撃トルクの実測値は回転数に比例しておらず、回転数 2500 min^{-1} で最大となることがわかる。この原因は、測定では機械的な共振が生じて過渡トルクが増幅されているものと考えられる。したがって実測値と計算値が一致しないのは、解析では共振現象を考慮していないためといえる。

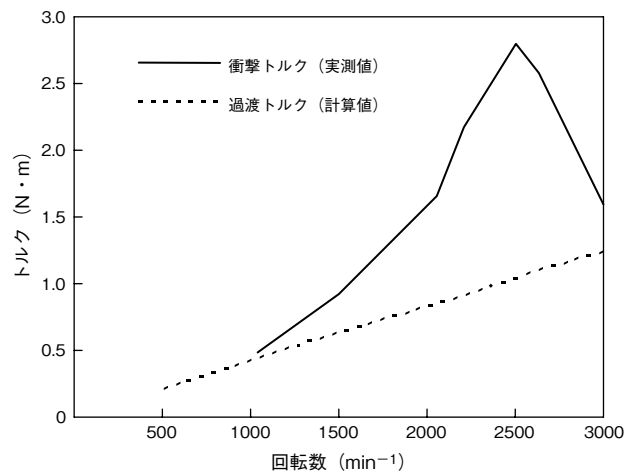


図11 衝撃トルクと過渡トルクの比較

そこで、衝撃トルクの実測値を基に、過渡トルクは共振現象でトルクが増幅されるものと仮定して、これについて考える。1自由度減衰系の定常振動では、次の式(4)と式(5)から振幅倍率Xを求めることができる。

$$X = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right\}^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (5)$$

ここで、 ω_n は固有角振動数、 ζ は減衰比であり、 m は質量、 k はばね定数、 c は粘性係数である。したがって、 X は $\omega = \omega_n$ のとき最大となる。

以上の計算式をもとに求めた X を、シミュレーションで求めた過渡トルクに乗ずる。その結果を用いて衝撃トルクの実測値と比較する。

なお、 ω_n は実測値から 2500 min^{-1} とする。図12に、減衰比 $\zeta = 0.19$ として求めた衝撃トルクを示す。衝撃トルクの実測値と計算値を比較すると、よく一致していることがわかる。これから本法の妥当性を確認できる。

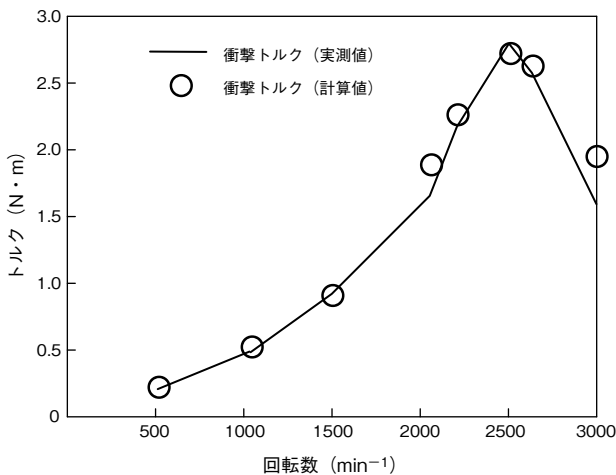


図12 衝撃トルクの計算値と実測値の比較

7. 非接触渦電流インパクト機構の性能向上検討

実測値と計算値を比較することで、渦電流による過渡トルクが共振で増幅されて衝撃トルクが得られることを確認できた。ここでは、非接触渦電流インパクト機構の性能向上を図るため、過渡トルク波形を詳細に検討する。

7.1 過渡トルク波形の詳細検討

前述の図6の過渡トルク波形は渦電流トルクと電磁吸引トルクの和であり、両方のピークが一致するときにもっとも大きな値が得られるはずである。そこで原理モデルにお

いて、固定鉄心の磁極をなくしたもので渦電流トルク成分を、磁極を残して銅板をなくしたもので電磁吸引トルク成分をそれぞれ解析し、トルクを分離して検討する。図13に渦電流トルクと電磁吸引トルクを分離した結果を示す。

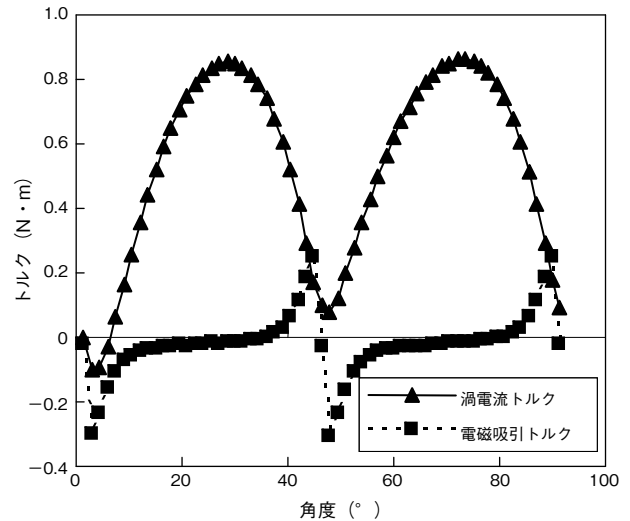


図13 過渡トルクの分離

渦電流トルクが最大となる角度が約 25° であるのに対して電磁吸引トルクが最大となる角度は約 45° であり、二つのトルクのピークに 20° の位相差がある。このことから原理モデルでは、渦電流トルクに対して電磁吸引トルクを有効に利用できていないことがわかる。したがって、渦電流トルクと電磁吸引トルクのピークの位相差をなくすことで、さらに大きな過渡トルクを得られることが期待できる。

7.2 改善モデルの過渡トルク特性

そこで、電磁吸引トルクの位相をずらして渦電流トルクとピークを一致させるモデルを検討する。図14に改善モデルの磁気回路を示す。電磁吸引トルクの位相を約 20° ずらすため、鉄心の磁極幅を 9° と小さくするとともに磁極を 9° ずらした位置に配置する。これにより、電磁吸引トルクの位相は約 18° ずれると考えられる。図15に回転数 2000 min^{-1} 時の改善モデルの過渡トルク特性を示す。最大トルクは改善モデルで約 $1.28 \text{ N}\cdot\text{m}$ となり、渦電流トルクと電磁吸引トルクそれぞれの最大値を合計した値とほぼ同じであることがわかる。これは原理モデルの約 $0.85 \text{ N}\cdot\text{m}$ と比べ、およそ1.5倍となっている。さらに改善モデルでは回転数 2500 min^{-1} 時の衝撃トルクが約 $3.5 \text{ N}\cdot\text{m}$ まで向上すると考えられ、過渡トルクのマイナス成分がなくなり、バックラッシュ防止としても有効である。なお、表1に解析諸元を示す。

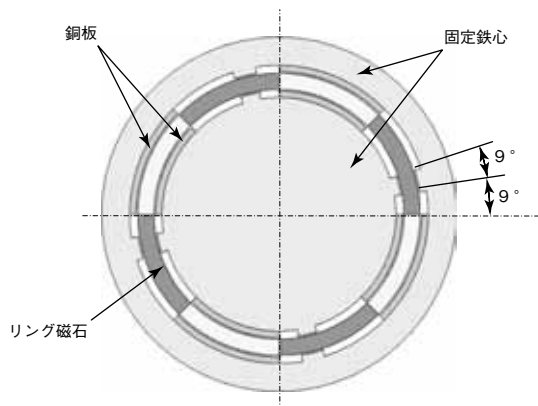


図14 改善モデルの磁気回路

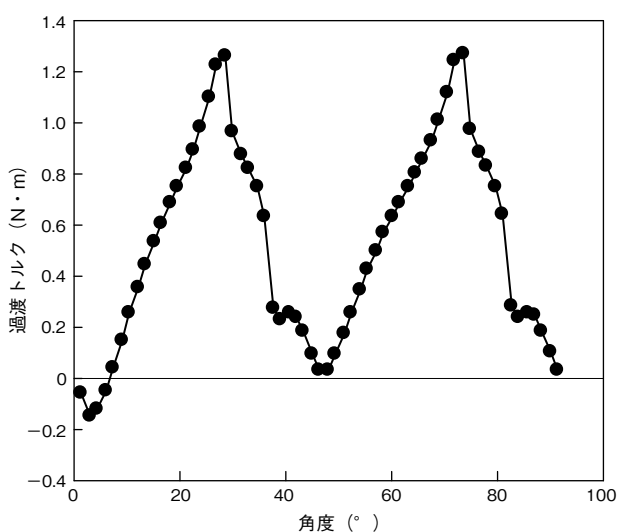


図15 改善モデルの過渡トルク波形 (回転数2000 min⁻¹)

表1 解析諸元

要素数	1512864
辺数	1781739
未知数	1748403
時間ステップ	61
計算時間 (h)	73.1

使用計算機：Pentium 4 3.2 GHz PC

8. あとがき

渦電流によるローレンツ力を利用して非接触で衝撃トルクを発生する静音インパクト機構において、複数の接合面を有する回転領域のメッシュを周方向に等間隔で分割してメッシュを自動修正する方法を採用するとともに、共振現象に関しては増幅率を用いて換算することによって、簡単かつ短時間で可能な動作特性解析法を開発した。また、改善モデルでは過渡トルクを約1.5倍まで向上できた。

本法を用いることで、非接触衝撃トルク発生メカニズムを明らかにするとともに、インパクト機構の性能向上と高効率化を可能とした。

*参考文献

- 1) T. Ota, Y. Mitsutake, Y. Hasegawa, K. Hirata and T. Tanaka : Dynamic Analysis of Electromagnetic Impact Drive Mechanism Using Eddy Current, IEEE Trans. on Magn., vol. 43, no. 4, p. 1421-1424 (2007)
- 2) T. Ota, K. Hirata, T. Yamaguchi, Y. Kawase and K. Shamoto : Transient Analysis of Thermostatic Switch Using 3-D Finite Element Method, IEEE Trans on Magn., vol. 41, no. 5, p. 1648-1651 (2005)
- 3) T. Yamaguchi, Y. Kawase, A. Nakase, K. Hirata and T. Ota : Multimotion Analysis of Opening and Closing Sensor for Windows Using 3-D Finite-Element Method, IEEE Trans on Magn., vol. 42, no. 4, p. 1015-1018 (2006)

◆執筆者紹介



太田 智浩

パナソニック電工解析センター(株)
博士(工学)



光武 義雄

先行技術開発研究所



長谷川 祐也

先行技術開発研究所
博士(工学)



平田 勝弘

大阪大学大学院
博士(工学)