

渦電流ブレーキの原理を利用した非接触動的軸試験の提案

○山本 寛, 金沢大学 ○高杉 敬吾, 浅川 直紀

要旨

主軸回転中の工作機械の動特性をインパルス加振試験で正確に把握することは難しく、主軸回転中に適用可能な非接触動的軸試験への期待は大きい。そこで本研究は、新たな非接触動的軸試験として渦電流ブレーキの原理を利用する手法を提案する。また、疑似工具に渦電流を発生させ制動トルクで工具を加振する装置を開発し、さらにその装置を用いて種々のパラメータの変化が制動トルクへ与える影響を明らかにする実験を行った。

1. はじめに

マシニングセンタなどの工作機械には高い加工面精度が要求されており、その実現のために工作機械の各ユニットにおける動特性の把握は欠かせない。現在主流の動特性評価方法としてはインパルスハンマと加速度ピックアップセンサを用いたインパルス加振試験があるが、この方法では特に主軸回転中に加振できないために動作中の工作機械の動特性を正しく把握することはできない。そのためこの問題を解決する非接触動的軸試験 (contact-less dynamic spindle testing : CDST) として、電磁石を用いて回転中の主軸を吸引加振する手法が提案されている¹⁾。しかしこの手法は装置が大型で疑似工具が限定的であるほか、実際の切削現象とは異なり工具の半径方向への加振しか行えないという問題が挙げられる。

そこで本研究では、電車のブレーキなどに用いられる渦電流ブレーキに着目し、回転する疑似工具を制動トルクで加振する非接触動的軸試験を提案する。提案する手法には工具接線方向への加振を可能とし、また電磁石の制御を必要としないという利点がある。本研究は、制動トルクの発生に関わる各種パラメータの発生トルクに対する影響を明らかにし、本手法の有用性を検証した。

2. システム概要

2.1 渦電流ブレーキの原理 渦電流ブレーキは、磁石の近傍で運動する電気伝導体に運動と逆向きの電磁気的な制動力が作用する、電磁制動²⁾の現象を利用した非接触式のブレーキである。渦電流ブレーキの原理を図1に示す。固定した磁石の近傍で金属円筒を回転運動したときに円筒に生じる渦電流と磁束の発生を模式的に表したものである。回転運動によって円筒のある領域を貫く磁束が時間変化すると、電磁誘導効果により磁石直下の円筒面には誘導起電力が発生する。誘導起電力の方向は右手の法則で決定し、流れる電流は図のように磁石を挟んで左右で逆向きの2つの渦を描き、これを渦電流と呼ぶ。渦電流は右ねじの法則により円筒面上に磁束を発生し、磁石による磁束と円

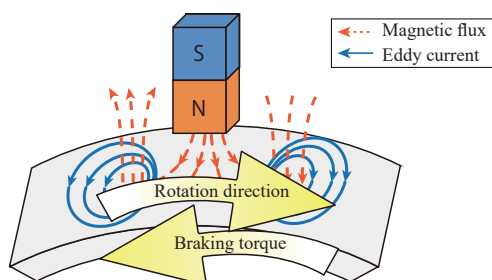


Fig.1 Mechanism of braking torque with eddy current

筒面の磁石右側では引き合い、左側では反発するため、結果として円筒には回転を妨げる方向の制動トルクが生じる。本手法では、図1における円筒を疑似工具として、制動トルクを加振力として考える。

2.2 制動トルクによる疑似工具加振の原理 疑似工具を加振するためには、工具に作用する制動トルクは断続的なものでなければならない。図2は回転する疑似工具とその近傍に配置した磁石を回転軸方向から見た図と、得られる制動トルクの波形を示したものである。図2(a)のように疑似工具が単に円柱形状である場合、右図のように一定の制動トルクが工具回転中に途切れることなく連続的に作用するため、疑似工具を加振することはできない。そこで、図2(b)のように疑似工具の側面を一部平取りすることで回転中の疑似工具と磁石のギャップが大きい工具回転角度では制動トルクは作用せず、得られる制動トルク波形は右図のように周期的なステップ形状となる。その結果疑似工具を断続的に、また周期的に加振することができる。また、工具の平取り箇所を増やすことで一回転中に制動トルクが作用する回数を増やすことも可能である。このように円柱側面を平取りした工具形状を、本研究では平取り形状と呼ぶ。

2.3 実験装置 本手法を実際のミル主軸へ適用する際に発生する制動トルク波形と、その発生に関するパラメータの関係を明らかにするための実験装置を製作した (図3)。実験装置は、サーボモータ (Kollmorgen, AKM12E) と回転トルクメータ (ユニパルス (株), UTM II -10Nm), および制動トルク発生部から構成されており (図3(a)), サーボモータによって疑似工具を回転させ、発生した制動トルクを回転トルクメータで測定する。制

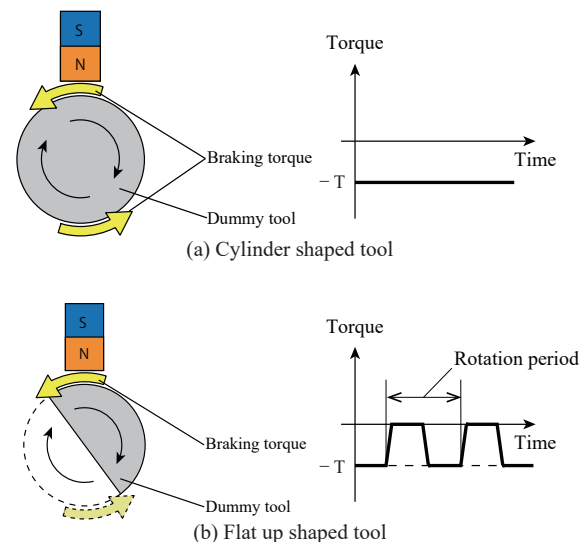


Fig.2 Generation of braking torque on dummy tool

動トルク発生部の構成を図3(b)に示す。制動トルク発生部は平取り形状疑似工具と2つの扇形磁石、磁石を対角に固定するため溝をあけたハウジングとそのカバーから構成されている。今回疑似工具は円柱側面を平行に2か所平取りした形状とし、疑似工具の一回転中に2回の制動トルクを発生させる。さらに疑似工具は段付き形状をしており、図3(c)のように磁石を収めたハウジングをスライドさせることで磁石とのギャップと三段階に変更できる。また疑似工具の材質には純銅を採用する。これは電気抵抗が小さいため渦電流を流しやすく、大きな制動トルクが期待できるためである。扇形磁石には永久磁石のうち最も強力とされるネオジウム磁石を用いた。

3. 実験

磁石と疑似工具間のギャップが 1.0 mm, 0.8 mm, 0.5 mm の3条件に対して疑似工具の回転数を 1000 ~ 8000 min^{-1} まで変化させる実験を行い、疑似工具に作用する制動トルクを計測した。

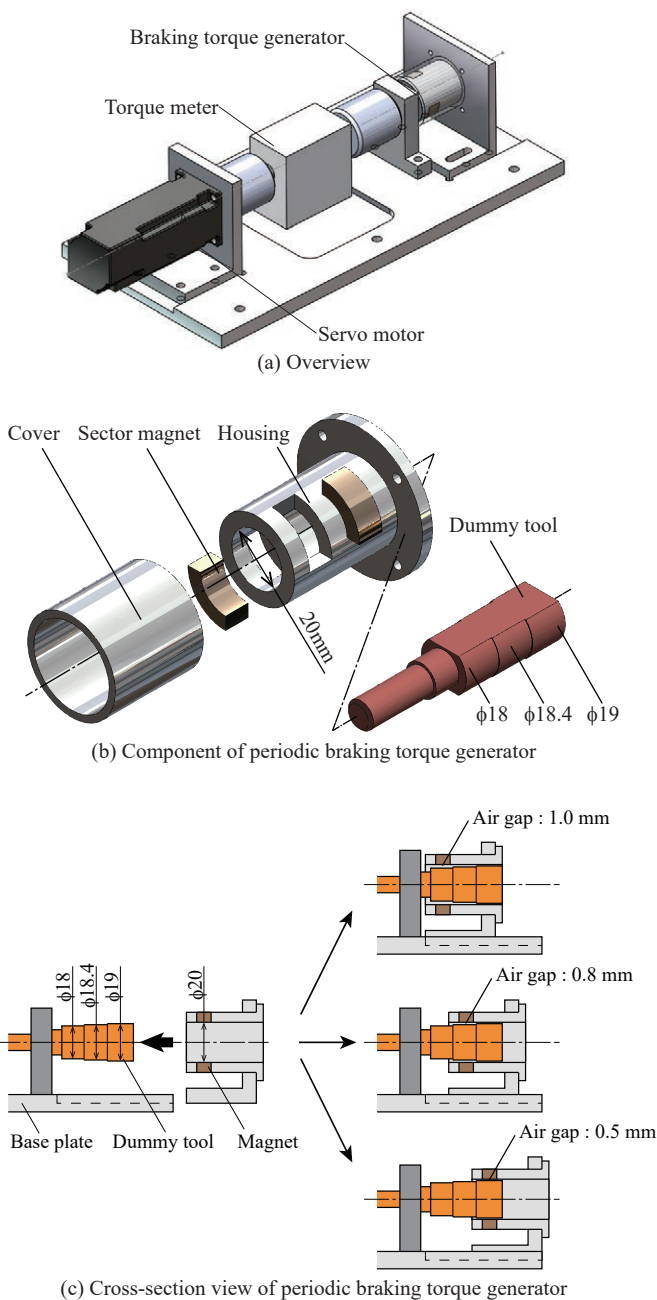


Fig.3 Test bench for CDST

4. 実験結果と考察

回転トルクメータにより制動トルクを計測し、疑似工具回転数およびギャップと制動トルクの関係を示したものを図4に示す。疑似工具回転数の増大に伴って制動トルクが増大することが確認できる。これは誘導起電力は電気伝導体を貫く磁束の時間変化率に比例するため、回転数が高くなるにつれ渦電流と疑似工具に発生する磁束が増加したためだと考えられる。しかし、回転数上がるに従い回転数とトルクの比例関係が崩れ制動トルクがサチレートする傾向も見られた。これは渦電流の発生周期が小さくなった結果疑似工具上で表皮効果³⁾を引き起こし、渦電流が工具表面に集中し、疑似工具の電気抵抗が増大したためだと考えられる。またギャップが減少するほど制動トルクが大きくなるのは、磁石に近づくほど磁束密度が高くなるためだと考えられる。

今回の実験で計測された制動トルクは最大で約 23 mNm と微小なものであった。アルミの切削抵抗から本手法で目標とする制動トルクを 1 Nm とし、この目標値まで制動トルクを増大させる方法としては、工具回転数の増加やギャップの減少のほか、疑似工具に面する磁石の面積を増やすことで疑似工具を貫く磁束を増やすことなどが考えられる。

5. おわりに

新たな非接触動的軸試験として、渦電流ブレーキの原理を利用する手法を提案した。また、電磁力により非接触で疑似工具に制動トルクを発生する実験装置を構築し、制動トルクの発生に関わるパラメータとその影響を明らかにする実験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 疑似工具に渦電流を発生する実験装置を構築し、発生する制動トルクを測定することができた。
- (2) 疑似工具回転数の増大および工具と磁石のギャップの減少に伴い制動トルクは増大する。
- (3) 疑似工具回転数が増大すると、表皮効果の影響により制動トルクの発生が妨げられる。

参考文献

- 1) T. Yamazaki, et al: Measurement of Spindle Stiffness by using a Magnet Loader, LEM21, 5, (2009) 67.
- 2) 大槻義彦: 物理学総論 2 電磁気・電磁波, 学術図書出版社, (1985), 157.
- 3) 沢新之輔, 小川英一, 小野和雄: エース 電磁気学, 朝倉書店, (1998), 141.

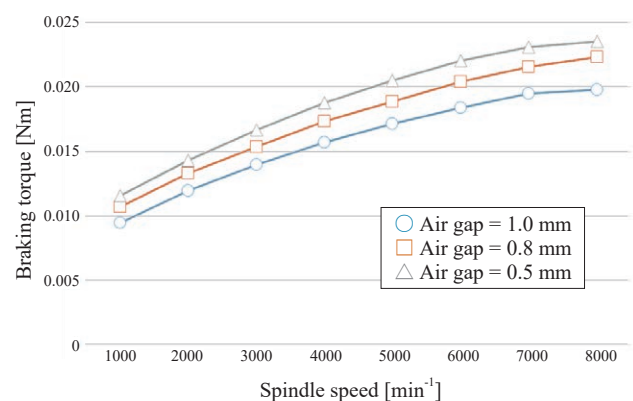


Fig.4 Relationship between spindle speed and braking torque