

磁歪効果を用いた切削抵抗力および工具たわみ量検出センサの開発

80122316 鈴木 武志 指導教員 青山 英樹

1. 結論

自動加工・自律加工を実現するために、加工プロセスを監視する技術の開発が求められており、その実現のために、多くの監視技術が提案されてきたが、信頼性が十分ではなく、改善が求められていた。この問題を解決するため、複数のセンサ情報からの信号を処理・融合することにより、信頼性を高めるセンサーフュージョンの手法が提案されてきている。

加工プロセスを監視するうえで、切削抵抗力は加工現象によって直接的に発生される信号であるため、最も重要な情報として認識されている。従来、この信号を高精度で検出するためには、特別なデバイスを工作機械テーブルに設置する必要があり、実用上、適した方法ではなかった。また、主軸に特別なデバイス（センサ）を取り付け、切削抵抗力を検出することも可能であるが、機械剛性が低下する問題がある。

切削抵抗力を基に加工プロセスの監視を行うにあたり、その信頼性を高めるため、多くの切削抵抗力成分を検出しフュージョン処理することが要求される。すなわち、工作物あるいは工作機械テーブルに特別な処理をすることなく、また、機械剛性を低下させることなく、切削抵抗力多分力を獲得できるセンサが望まれている。

本研究では、強磁性体の磁歪効果を利用して、切削抵抗力を X, Y, Z 分力、トルク の四成分として検出するとともに、X, Y 方向の切削工具たわみ量を同時に検出する加工プロセス監視用センサの開発を目的としている。

2. 検出原理

2.1 磁歪効果

磁歪効果とは、磁性体に生じるひずみと磁性体周囲に発生する磁場との相互変換の現象である^{(1)~(6)}。切削工具シャンク表面に磁性体(磁歪膜)を形成し、工具が受ける切削抵抗力によって磁歪膜に発生する磁場を検出・処理することにより、工具に加わっている切削抵抗力と工具たわみ量を検出する。

2.2 磁歪効果による磁場の検出方法

磁歪効果によって発生した磁場を検出するため、本研究では図1に示す磁気ヘッド型コイルを提案する。同図において、軸芯 A, B を用いてコイル1が形成され、軸芯 B, C 用いてコイル2が形成されている。図1(b)に示されるように、検出コイル下部に設置されている磁歪膜の磁場は、コイル1、コイル2で発生される磁束を変化させ、それぞれのコイルのインダクタンスを変化させる。したがって、コイル1とコイル2のインダクタンスの差を検出することにより、磁歪膜に発

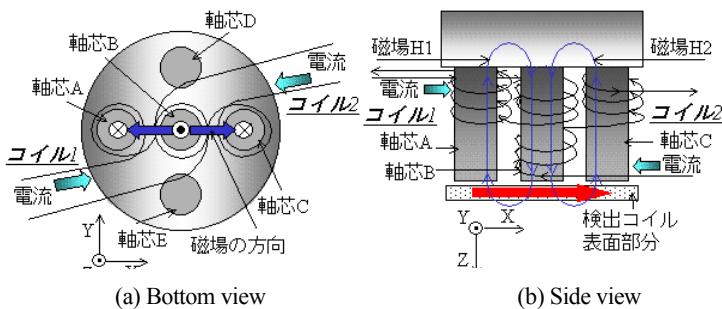


図1 磁気ヘッド型コイル

生している軸芯AからC方向の磁場の大きさを検出することができる。同様の原理に基づき、軸芯DからE方向の磁場の大きさを検出することができ、提案した磁気ヘッド型コイルは、直交する2方向の磁場の大きさを検出できる。

2.3 切削抵抗力・工具たわみ量の検出

図2は、センサの概略構造を示している。提案した磁気ヘッド型コイル S, W, N, E を切削工具シャンク表面に形成された磁歪膜の周囲に 90° 感覚で配置する。4 個の磁気ヘッド型コイルから $V_{S1}, V_{S2}, V_{W1}, V_{W2}, V_{N1}, V_{N2}, V_{E1}, V_{E2}$ の信号が検出され、それらを式(1)に代入することにより、x, y, z 方向の切削抵抗力分力 V_x, V_y, V_z 、切削トルク V_T 、および切削工具の x 方向、y 方向たわみ量 V_{DX}, V_{DY} を求めることができる。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= \frac{\sqrt{2}V_{E1} + \sqrt{2}V_{E2} - 2V_{W1} + 2(\sqrt{2} + 1)V_{W2}}{4} \\ V_y &= \frac{2V_{S1} - 2(\sqrt{2} + 1)V_{S2} - \sqrt{2}V_{N1} - \sqrt{2}V_{N2}}{4} \\ V_z &= \frac{2(\sqrt{2} - 1)V_{S2} + 2V_{S1} + \sqrt{2}V_{N2} + \sqrt{2}V_{N1}}{4} \\ V_T &= \frac{V_{N1} - V_{N2}}{2} = \frac{V_{E1} - V_{E2}}{2} \\ V_{DX} &= V_{W2} \\ V_{DY} &= -V_{S2} \end{aligned} \right\} (1)$$

2.4 測定系

図3は、測定系の構成図を示している。コイルには、電圧 1.0 V、周波数 40 kHz の励磁電圧が加えられている。検出コ

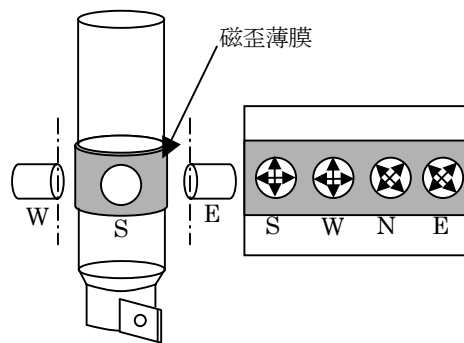


図2 検出コイルの配置

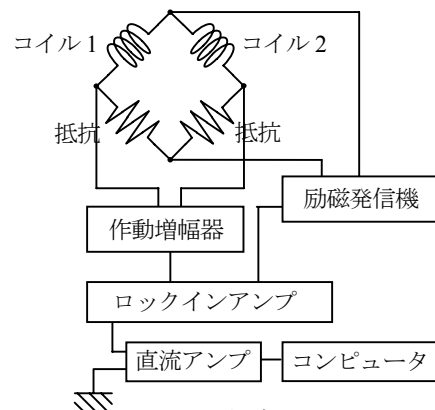


図3 測定系

イル間（コイル1, コイル2）のインダクタンス変化は、ブリッジ回路により検出されるが、この出力は極めて小さく、環境磁場の影響でノイズが発生する。ノイズを除去するためにロックインアンプ、ローパスフィルタを、信号を増幅するために作動増幅器、直流アンプを利用している。

3. 検出コイルの詳細設計

磁気ヘッド型コイルは、検出感度の低さが問題となる⁽⁶⁾。検出コイルの検出感度が最も高くなる条件を明らかにするため、有限要素法に基づく電磁場解析により、励磁周波数、励磁電圧、磁歪膜-検出コイル間のGAPの影響を調べた。

3. 1 励磁電圧の検討

解析結果より、励磁周波数を一定とした場合、励磁電圧は、コイルのインダクタンスの変化に対する影響は、極めて小さいことが明らかになった。

3. 2 励磁周波数の検討

解析結果から得られた、励磁周波数と検出感度の関係を図4に示す。同図より、検出コイルのインダクタンスに対する磁歪効果による発生するインダクタンス変化量の比は、励磁周波数による影響される。図4の結果より、励磁周波数を40kHzに設定することとした。

3. 3 磁歪膜-検出コイル間のGAPの検討

解析結果より、磁歪膜と検出コイルのGAP（隙間）は、コイルのインダクタンスの変化に対する影響は小さいが、磁歪膜内を通過する磁束を低減することが明らかになった。磁歪膜と検出コイルのGAPを大きく設定した場合、コイルのインダクタンス変化が得られなくなることが分かった。本研究では、そのGAPを0.2mmに設定することとした。

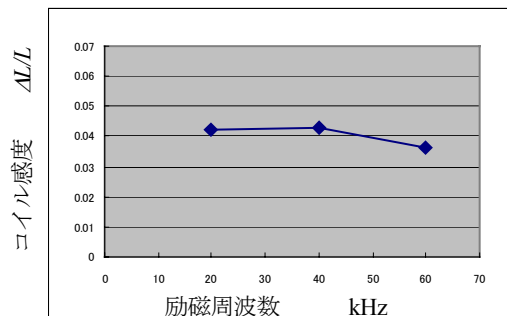
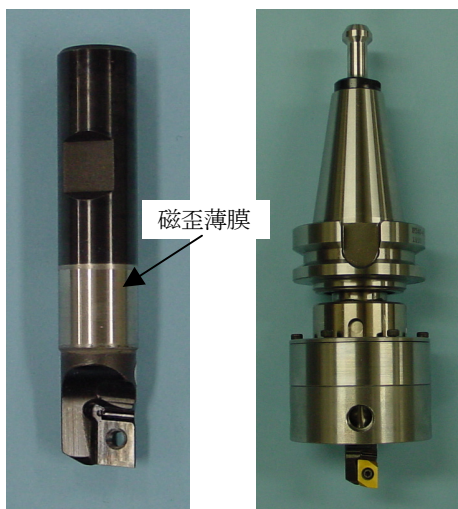


図4 励磁周波数とコイル感度の関係



(a) 磁歪薄膜を形成した工具 (b) 試作した工具ホルダ

図5 試作したセンサ

4. センサの設計・試作および実験

4. 1 切削工具の試作、センサの設計・試作

切削工具シャンク表面に強磁性体薄膜(Fe-Ni-Mo-B)をプラズマ溶射により形成した。また、磁気ヘッド型コイル4個を切削工具シャンク周囲に配置する工具ホルダを設計し、試作した。図5は、試作した切削工具と工具ホルダを示している。これらと磁気ヘッド型コイル、および測定系を組み合わせ、目的とするセンサシステムを構成した。

4. 2 実験およびその結果考察

試作したセンサシステムを用いて、切削工具先端に静的な荷重を加え、その出力を測定した。図6は、出力結果の一例を示している。同図は、切削工具先端に水平方向に対して700Nまで徐々に荷重を与えた後、ゆっくりと荷重を小さくし0Nまで戻した時の磁気ヘッド型コイル V_{SI} , V_{Σ} の出力結果である。

本実験結果より、試作したセンサは、工具切刃に加わる静的な荷重変化に対して、定性的には期待する信号特性を示したが、ノイズが大きかった (S/N が小さい) ため、直線性やヒステリシスを定量化することが困難であった。

5. 結論

本研究は、以下のとおりにまとめられる。

- 磁歪効果を利用し、切削抵抗力・工具たわみ量を測定するための方法を提案した。
- 磁歪効果により発生した磁場を検出するため、磁気ヘッド型検出コイルを提案した。
- 検出コイルの検出感度が最も高くなる条件を明らかにするため、有限要素法に基づく電磁場解析により、励磁周波数、励磁電圧、磁歪膜-検出コイル間のGAPの影響を調べた。
- センサの設計・試作を行い、試作したセンサを用いて静的な荷重の基で評価実験を行った。定性的には期待される出力が得られたが、実用化のためには、ノイズの低減が必要である。

参考文献

- (1) F.Ismail, M.A.Elbestawi : Generation of Milled Surfaces Including Tool Dynamics and Wear, Journal of Engineering for Industry, Vol.115 (AUGUST 1993), 245.
- (2) 第2章ニューアークチュエータ用材料・プロセス, 超磁歪材料, 426.
- (3) 内山, 増田 : 磁性体材料, (1980)
- (4) 小沼 : 磁性材料, (1996)
- (5) 高木, 沢田 : 磁性体・誘電体の物性工学, (1967)
- (6) 古賀文隆, 笹田一郎, 原田耕介 : 磁気ヘッド方式トルクセンサの感度最適化法, 計測自動制御学会論文集, Vol.30, No.4(1994), 401-406.

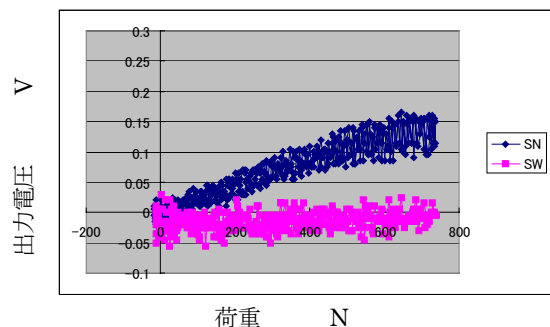


図6 荷重と出力電圧