

令和 4 年 5 月 19 日現在

機関番号：32407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04129

研究課題名(和文)次世代モータ用電磁材料の超音波振動せん断技術に関する研究

研究課題名(英文) Study on ultrasonic-vibration shearing for electromagnetic metal sheet of next-generation motors

研究代表者

神 雅彦 (Jin, Masahiko)

日本工業大学・基幹工学部・教授

研究者番号：80265371

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：電気モータの性能はロータおよびステータの電磁特性に大きく依存する。コアとステータは無方向性電磁鋼板やアモルファス合金の積層構造であり、製造には主にせん断加工法が用いられるが、切口面の塑性ひずみ増大などの影響により、鉄損率や磁束密度などの電磁特性が劣化してしまうという課題がある。本研究では、超音波振動シェーピング法による前記材料の加工法に関して検討した。簡易の実験装置を開発し、基礎的なシェーピング実験を行って、切口面の評価を行った。その結果、切り口面の加工精度が大きく向上し、かつ生産性も向上できそうなことを明らかにした。この成果は高性能のコアおよびステータ製造のための一つの解になるものと考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超音波振動シェーピング法は、シェーピング刃に対して加工方向と同方向の超音波振動を作用させながら加工する方法である。この加工原理は、切削を微細に断続化することにより、せん断ひずみの蓄積による破断の発生を防止できるものと考えられる。無方向性電磁鋼板やアモルファス合金は脆性材料であるが、同加工法の適用により破断発生を防止できるものと考察した。実験結果は、その考察を裏付けるものであり、同材料の精密加工法になりうることを発見した学術的意義は大きい。この技術の実用のためには、生産用工具や機械、最適加工条件など、開発すべき要素が多々あるが、一つの方向性を原理的に提示することができた社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The performance of an electric motor largely depends on the electromagnetic characteristics of the rotor and stator. The core and stator are laminated structures of non-oriented electrical steel sheets and amorphous alloys. Shearing is mainly used for manufacturing, but there is a problem that electromagnetic characteristics such as iron loss rate and magnetic flux density deteriorate due to the influence of increased plastic strain on the cut surface. In this study, we investigated the processing method of the above materials by the ultrasonic vibration shaving method. We developed a simple experimental device, conducted a basic shaving experiment, and evaluated the cut surface. As a result, it was clarified that the processing accuracy of the cut surface can be greatly improved and the productivity can be improved. We believe that this result will be one solution for manufacturing high-performance cores and stators.

研究分野：機械工作

キーワード：超音波振動 電磁鋼板 アモルファス合金 シェーピング 切口面

1. 研究開始当初の背景

機械装置における動力発生装置には、現在、内燃機関、タービンシステムあるいは電気モータなどが稼動している。それに対して、次世代の主流は、電気モータであろうと考えられている。その根拠は、環境負荷が少ないこと、省エネルギーであること、精密な加減速、トルク、位置決めなど動力装置としての性能が高いこと、同時に電池技術が進んできたため、社会インフラの観点からも実用性が高まっていることなどの背景による。

今後、電気モータは、さまざまなサイズと機能により進化し、輸送機器、工作機械、産業機械、ロボットあるいは福祉機器などのあらゆる分野の主たる動力発生装置になるものと考えられている。

従って、この電気モータには、省エネルギーや回転精度などの性能のさらなる向上が要求されることは必定である。電気モータの基本性能は、電力 - 動力変換能力によって決まり、その能力は、回転軸となるロータのコアおよびケース側となるステータの電磁特性により決まる。しかしながら、電磁鋼板の製造には一般的にプレスせん断加工法が用いられ、その工程において、特に性能を大きく左右する板端部での電磁特性が劣化してしまうことが大きな問題となっている。

現在、この課題に対して有効な手段がない。また、無方向性電磁鋼板の次世代材料として「アモルファス軟磁性合金」が注目されているが、この材料は、さらに薄板となり、機械的特性が向上するため、より難加工性が増すことが次の課題となっている。

本研究では、その「無方向性電磁鋼板」および「アモルファス軟磁性合金」のせん断加工性向上に関する研究課題に取り組む。

2. 研究の目的

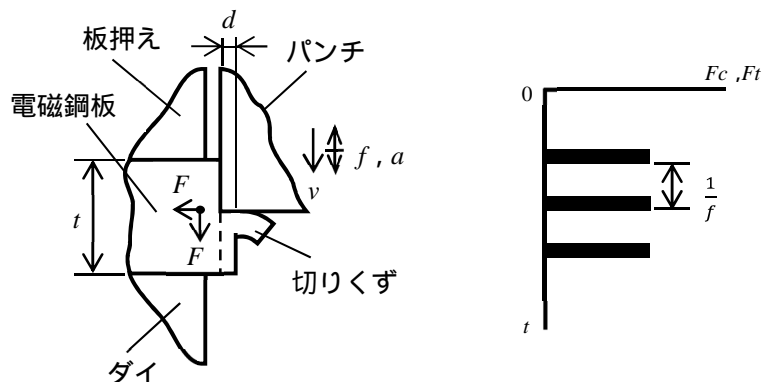
本研究では、申請者がこれまで研究してきた超音波振動切削の加工原理による有効な効果が電磁鋼板やアモルファス合金の打抜き加工やシェーピングにおいて、どのように発現し、どの程度の効果が得られるのかに関して検討する。

3. 研究の方法

超音波振動シェーピング法の加工原理および加工力波形を図1に示す。この方法は、パンチにシェーピング方向と同方向の超音波振動(f, a)を与え、パンチ速度 v との間に $v < 2af$ の関係(最大振動速度をパンチ速度より高くする)を与えて加工する方法である。この条件により加工が断続的になる。加工力は図(b)に示すようにパルス状となり、シェーピング切り口面の平滑度が向上するものと考えられる。

この妥当性を実験により証明する。超音波振動金型には、図2に示すような金型を設計・製作した。すなわち、上型に超音波振動パンチを設置する。振動数は20kHzとし、振幅は0~20 μ mの範囲を想定した。同パンチは、市販のボルト締めランジュパン構造の超音波振動子を用い、1/2波長で共振する超音波振動パンチを設計・製作した。パンチ材質は、ダイス鋼および超硬とした。設計に際しては、固有値解析FEMソフトウェアを利用した。電磁鋼板のシェーピング実験条件を表1に示す。

アモルファス合金($t=20$ および 50 μ m)に対するシェーピング実験装置は、板厚が薄いため、取り代を精度よく設定する必要がある。そこで、図3で示すように専用の基礎実験装置を設計・製作した。その基礎実験装置においては、まず、理想的な金型精度条件において効果を確認するために、アモルファス合金板を上下の鉄鋼製当て板ではさみ、共削り条件において実験を行うこととした。これにより、理想状態での効果を確認することができるようになった。アモルファス合金のシェーピング実験条件を表2に示す。



(a)シェーピングの原理

(b)加工力波形

図1 超音波振動シェーピング法

< d : 取り代, t : 板厚, v : パンチ速度, f : 振動数, a : 振幅 >

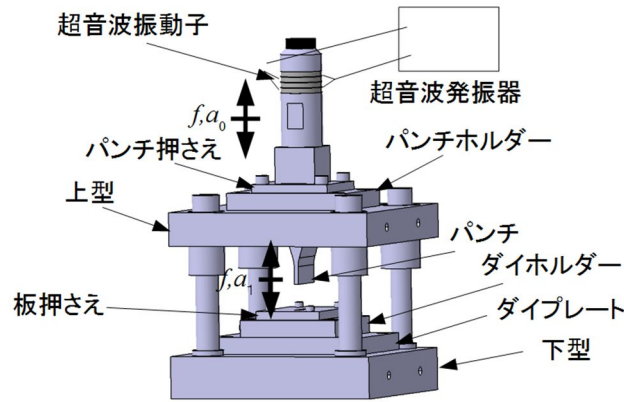


図2 電磁鋼板のシェーピング実験用金型

表1 電磁鋼板に対する実験条件

パンチ打抜き部形状[W×D]	5×55 mm
パンチ材質	SKD11(HRC62)
ダイ材質	プレハードン鋼(HPM1)
被削材材質・硬さ	無方向性電磁鋼板(フルプロセス材)・約 220 HV
シェーピング速度 v	182 mm/min
シェーピング取り代 d	0.02, 0.05, 0.1, 0.2mm
振動数 f	20.24 kHz
振幅 a	0, 3, 6, 10 μ m(0-p)
切削油剤	ユニカットジネン MQL(セミドライ系)

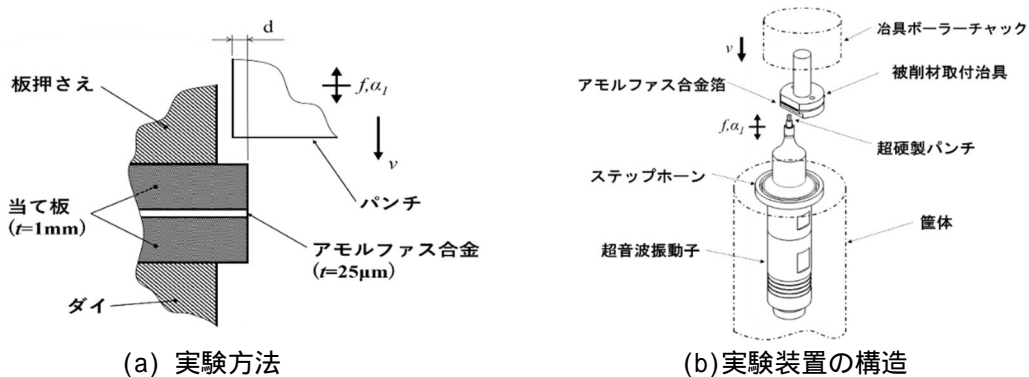


図3 アモルファス合金板の超音波振動シェーピング方法および実験装置

表2 アモルファス合金板に対する実験条件

パンチ形状[W×D]	4×4mm
パンチ材質	超硬合金
ダイ材質	SKD11
板押さえ材質	SKD11
当て板材質・板厚 t_0	S30C・1mm
被削材材質・板厚 t	アモルファス軟磁性合金・25 μ m
シェーピング速度 v	150mm/min
シェーピング取り代 d	2.5, 5, 10, 25 μ m
振動数 f	19.70(kHz)
振幅 a	0, 5, 6, 8 μ m(0-p)
潤滑油剤	不水溶性切削油剤

4. 研究成果

(1) 電磁鋼板の超音波振動シェーピング

切り口面を観察した結果を図4に示す．板厚 $t=0.2$ mm の無方向性電磁鋼板をダイス鋼製のパンチで加工する場合において，慣用シェーピングの場合，取り代が $d=0.05$ mm の条件で，平滑

面が7, 8割で残りは破断面となった．取り代が大きくなると平滑面割合が減少し，破断面が増えてくる．

それに対して，超音波振動シェーピングの場合では，実験したどの条件でも，ほぼ全面が平滑面となっている．切り口面断面形状を計測した結果を図5に示す．慣用シェーピングの場合では，だれ，平滑面および破断面を含めた真直度が15 μm ほどになっているが，超音波振動シェーピング($a=10\mu\text{m}$)になると，それが3 μm 程度へと格段に向上している．以上の実験結果などにより，電磁鋼板のシェーピングに対する超音波振動の効果を明らかにすることができた．

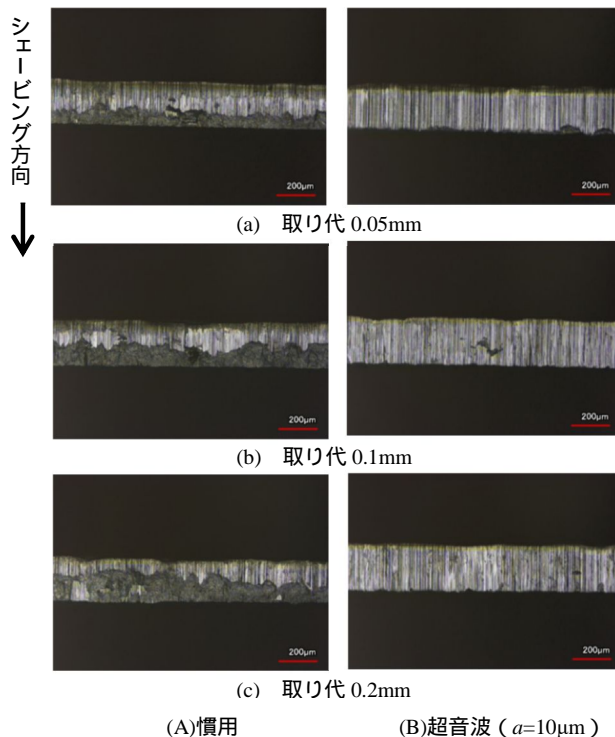


図4 シェーピング面の観察結果

$\langle t=0.2\text{mm}, f=20.24\text{kHz}, a=10\mu\text{m}[0\text{-p}], v=182\text{mm}/\text{min}, C=0.01\text{mm}\rangle$

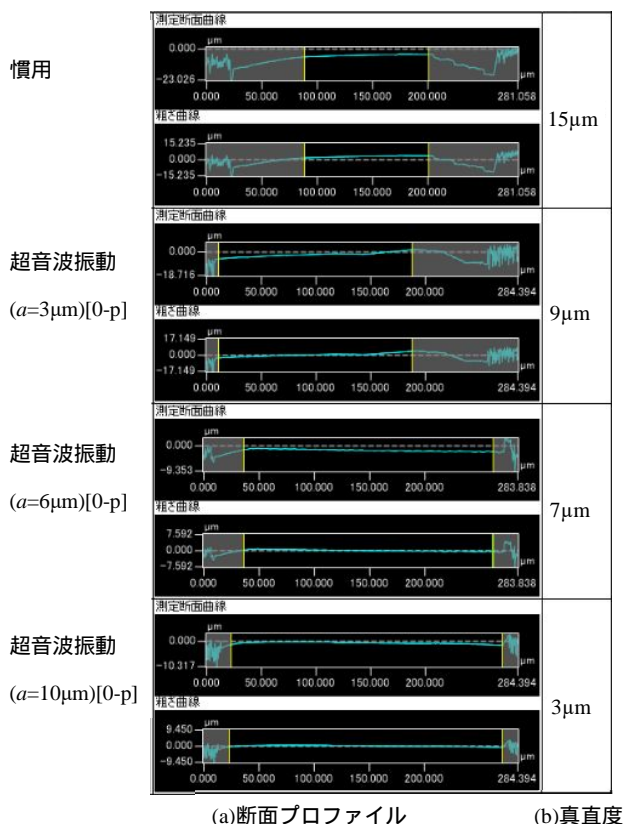


図5 切り口面の状況

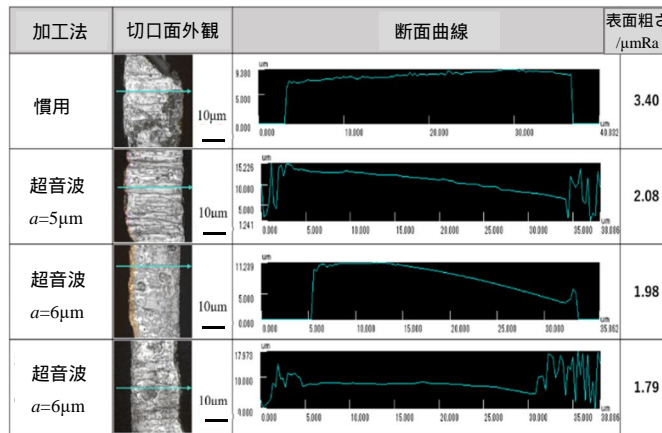
$\langle f=20.24\text{kHz}, a=0, 3, 6, 10\mu\text{m}[0\text{-p}], v=182\text{mm}/\text{min}, C=0.01\text{mm}, \text{取り代 } 0.05\text{mm}\rangle$

(2) アモルファス合金板の超音波振動シェーピング

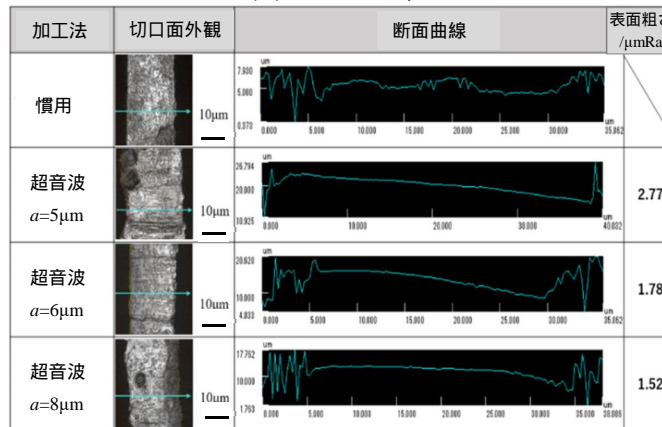
アモルファス合金板 ($t=0.025\text{mm}$) に対して、シェーピング実験を実施し、切口面の外観、断面曲線および表面粗さを測定した結果を図6に示す。超音波振動を与えない慣用シェーピングでは、 $d=2.5\mu\text{m}$ の条件で50%ほどのせん断面が見られたが、図(a)に示すように、 $d=5\mu\text{m}$ を超えるとせん断面割合は10%以下となった。それに対して、超音波振動シェーピングにおいては、図(b)に示すように、 $d=25\mu\text{m}$ までの条件で、高いせん断面割合を維持できていることがわかった。一方、表面粗さに関しては、慣用シェーピングでは、 $8\mu\text{mRa}$ を超えていたものが、超音波振動シェーピングでは、 $2\mu\text{mRa}$ となっており、これも飛躍的に向上している。

せん断面割合の変化を図7に示す。超音波振動シェーピングの場合では、振幅 $a=6\mu\text{m}$ 以上において、せん断面割合が60%を維持していることがわかった。

以上をまとめると、超音波振動シェーピングにより仕上面が飛躍的に向上することを明らかにすることができた。これは、超音波振動による断続切削の効果が有効に発揮されたためであると考えられる。



(a) 取り代 $5.0\mu\text{m}$



(b) 取り代 $25\mu\text{m}$

図6 アモルファス合金における切口面形状

$\langle f=19.70\text{kHz}, a=0, 5, 6, 8\mu\text{m}[0\text{-p}], v \approx 150\text{mm/min} \rangle$

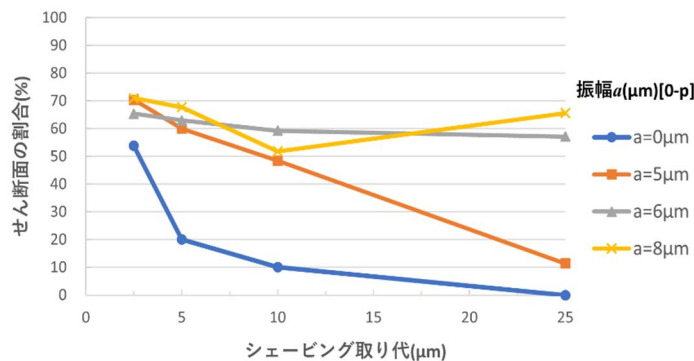


図7 せん断面割合の変化

引用文献

神雅彦：塑性加工関連技術に対する超音波振動の応用 - 摩擦制御，研磨およびプレスシェーピング - ，ぷらすとす，4巻，2021，23-27.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 神 雅彦	4. 巻 4
2. 論文標題 塑性加工関連技術に対する超音波振動の応用 - 摩擦制御, 研磨およびプレスシェーピング -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ふらすとす	6. 最初と最後の頁 23-27
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 神雅彦, 坂本慈瑛, 金井秀生
2. 発表標題 高硬度脆性材料の超音波振動研磨に関する基礎的研究 (第5報) - 研磨機構の解析 -
3. 学会等名 32nd ABTEC 2019 in さいたま
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神 雅彦, 坂本 慈瑛, 金井 秀生
2. 発表標題 高硬度脆性材料の超音波研磨に関する基礎的研究 (第6報) - 切りくず生成機構の解析 -
3. 学会等名 2019年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------