

令和 6 年 6 月 27 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03789

研究課題名（和文）ナノ周期構造付きせん断工具によるアモルファス電磁鋼板のせん断変形メカニズム解明

研究課題名（英文）Elucidation of shear deformation mechanism of amorphous electrical steel sheet by punching tool with nano-metric structure

研究代表者

白鳥 智美 (Tomomi, Shiratori)

富山大学・学術研究部工学系・教授

研究者番号：80607755

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,700,000円

研究成果の概要（和文）：アモルファス電磁鋼板の多層積層せん断加工時の被加工材表面き裂と変形を抑止するメカニズムを明らかにした。アモルファス電磁鋼板の破壊進展ではクリアランスを5 μm以下とし、ナノメートル周期構造をパンチ側面に付与することでナノメートル単位の溝が爪のように被加工材に食い込む効果を生む。これにより、せん断加工時に被加工材がダイ側に引き込まれることを抑止することで穴の表面に生じるき裂発生を抑えられることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高強度脆性材料であるアモルファス電磁鋼板の破壊進展がナノメートルからマイクロメートルサイズの工具刃先やクリアランス設定が主影響因子であることを突き止めた。これにより、高品位で低鉄損なモータ鉄心のせん断加工を可能とする学術的裏付けを得た。

研究成果の概要（英文）：The mechanism that suppresses surface cracking and deformation of the workpiece during multilayer lamination shear processing of amorphous electrical steel sheets was clarified. For the fracture progression of amorphous electrical steel sheets, the clearance is set to 5 μm or less, and by adding a nanometer periodic structure to the side of the punch, the nanometer grooves bite into the workpiece like claws. It was revealed that the workpiece from being drawn into the die during shearing, thereby suppressing the occurrence of cracks on the surface of the hole.

研究分野：ナノマイクロ加工

キーワード：せん断 アモルファス電磁鋼板 クリアランス ナノメートル周期構造 イオン先鋭化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

アモルファス電磁鋼板は、板厚が 0.025 mm 程度と薄く、伸びが 1 % 程度で脆性的な破壊挙動を示す。また、引張強さは 2 GPa を超え、ビッカース硬さは 700 を超える高強度高硬度材である。したがって強く硬い材料をせん断するために工具摩耗量の増加が課題として顕在化する。

これまでにアモルファス電磁鋼板のせん断加工では、5 枚の多層積層せん断の実現が図られてきた。せん断加工用パンチを従来の超硬からダイヤモンドに切り替え、パンチの側面に 1 μm の範囲に 3 本程度のナノメートルサイズの溝を形成したナノ周期構造付与工具が開発された。ナノ周期構造付きダイヤモンドパンチせん断品では、10 μm 未満のき裂が生じるのみでせん断性能の向上が基礎的に示された。

しかしながらこれまでにナノ周期構造を有するダイヤモンドパンチにおいて、アモルファス電磁鋼板の多層積層せん断加工時に、穴表面にき裂を伴わせないメカニズムの解明はなされてきていない。

2. 研究の目的

アモルファス電磁鋼板の多層積層せん断加工時の被加工材表面き裂と変形を抑止するメカニズムを明らかにし、学術的な裏付けを産業界に提供することを目的とする。

3. 研究の方法

専用金型を準備し、板厚 0.025mm の市販アモルファス電磁鋼板を準備した。せん断試験は図 1 に示す小型スクリーサープレス (微細加工研究所: DT-J311) を用い、これに専用金型を取り付けた。せん断実験は 2 段階に分けた。第 1 段階の実験条件を図 2 に示す。パンチの仕上げ工法としては、CVD ダイヤモンドをコーティング、イオンビームによる先鋭化、これと通常 (Normal) の研削仕上げとした場合の 3 種類の仕上げとした。また、ナノメートル周期構造を極短パルスレーザ加工によって施し、パンチの底部から 90° (パンチストローク方向に平行) の場合を nano90 であらわし、パンチ底部から 30° となる場合を nano30 とした。ダイについては一般超硬材とした。第 2 段階の実験条件を図 3 に示した。パンチの仕上げ状態を PCD ダイヤモンドの研磨のままの実験条件 6 と、パンチ側面にパンチ底部から 60° のナノ周期構造を付与したダイ nano60 とした工具条件 7 を準備した。クリアランスは工具条件 1 の 0.010 mm を半減して 0.005 mm を基準とした。アモルファス電磁鋼板の積層枚数は 1 枚のみとした。

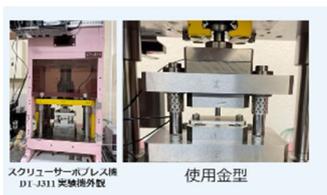


図 1 せん断条件

<工具条件1>

実験順序	パンチ			ダイ			CL[μm]
	材質	仕上げ	直径[mm]	材質	仕上げ	内径[mm]	
1	超硬	ダイヤモンド nano90	4.982	超硬	ion	5.003	10.5
2	超硬	ダイヤモンド nano30	4.985	超硬	ion	5.007	11
3	AF1	Normal	4.998	超硬	ion	5.019	10.5
4	超硬	先鋭化 nano90	4.999	超硬	ion	5.021	11
5	超硬	先鋭化 nano30	4.998	超硬	ion	5.021	10.75

図 2 工具条件 1

<工具条件2>

実験順序	パンチ			ダイ			CL[μm]
	材質	仕上げ	直径[mm]	材質	仕上げ	内径[mm]	
6	焼結ダイヤモンド	ダイヤモンド	4.997	超硬	ion	5.008	5.5
7	焼結ダイヤモンド	ダイヤモンド nano60	4.999	超硬	ion	5.009	5.0

図 3 工具条件 2

4. 研究成果

4 - 1 まとめ

アモルファス電磁鋼板の破壊進展で主となるパラメータとして、以下の 3 つが主要素となることを見出した。

クリアランス ナノメートル周期構造の付与 工具先端の均質性

具体的なアモルファス電磁鋼板の破壊進展におけるメカニズムは以下となった。

- ・アモルファス電磁鋼板の積層せん断では、せん断進行中に積層材がダイの中心側に引き込まれる。この引き込みが被加工材表面に曲げモーメントを生じ、引張強さを超える荷重が加わることでき裂が生じる。
- ・アモルファス電磁鋼板のせん断加工における穴表面のき裂幅は工具種に依存しない。
- ・ナノ周期構造はアモルファス電磁鋼板の表面にき裂を早い段階から生じさせる効果を生む。このき裂が生じやすいことは、1 μm に 3 本程度のナノメートルサイズの小さな凹凸の溝形状が被加工材であるアモルファス電磁鋼板に食いつき、破壊起点となることによる。

- ・工具先端の面粗さ向上および刃先部分の 1 μm サイズの均質性によってせん断荷重を被加工材に効率的に伝え、被加工材がダイ側に引き込まれることを抑制する効果を生む。
- ・無方向性電磁鋼板のせん断加工においてせん断した穴のき裂を抑制するには、クリアランスは少なくとも 0.005 mm 以下とすることが求められる。1 枚のアモルファス電磁鋼板を 0.005 mm のクリアランスでせん断した際に、クリアランスのわずかな偏りによってき裂幅は穴の円周方向で偏りが生じ、その値は 20 μm に達した。このことは板厚 25 μm の 80%であることを意味し、クリアランス 5 μm の 4 倍相当となる。

本研究の成果から、以下の課題が抽出された。継続した研究からアモルファス電磁鋼板を用いるモータの実用化を支える、高品位製品を高耐久な金型で実現するためのメカニズム解明を進めていく所存である。

【高品位加工に向けた課題】

- ・せん断した穴のき裂抑制には、クリアランスをゼロとする、またはマイナスに設定し、被加工材のダイへの引き込みを抑制する効果が見込まれる。この時の最適な加工条件を物理的な力のつり合いや摩擦状態を解明する必要がある。
- ・ダイへの材料引き込みを抑制するには、逆押え機構の採用と逆押え力の付与が考えられる。しかしながら、逆押え材の選択や逆押え部と被加工材の加工時の摩擦状態などは検討が進められてきておらず、さらなるメカニズム解明と工法開発が求められる。

【金型の高耐久化に向けた課題】

- ・本研究ではせん断した穴のき裂進展過程をあきらかにした。しかしながらアモルファス電磁鋼板を採用したモータの実用化では、金型には高耐久化が求められる。既に本研究者は特許 7129048 でパンチ先端に 10 μm 程度の C 面加工を施して高耐久化を図る工法を開発した。しかしながら加工メカニズム解明は不十分で、メカニズムの更なる解明からせん断条件の最適化を図り、アモルファス電磁鋼板採用モータの実用化を進める必要がある。

4 - 2 5 枚積層せん断におけるせん断挙動の把握

図 4 にせん断加工後パンチの SEM 観察結果を示した。Normal 工具ではパンチエッジが 2 μm 程度の範囲で不均質なエッジ状態となっている。ダイヤモンド nano90 と先鋭化 nano30 ではナノ周期構造を視認できる。ダイヤモンド nano30 と先鋭化 nano90 は凝着のためにナノ周期構造は視認できない。

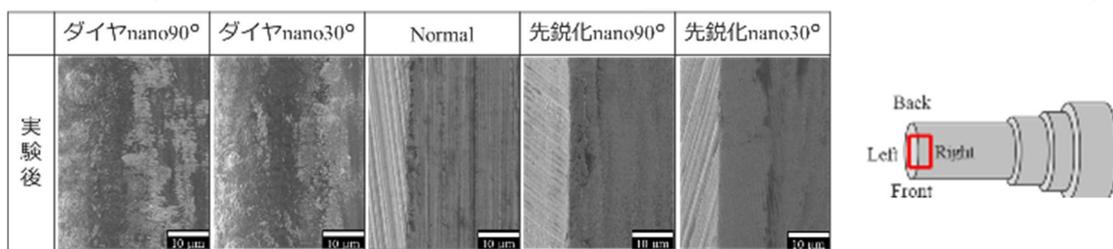


図 4 パンチ実験後 SEM 観察結果

図 5 に加工条件 1 から 5 におけるせん断加工した穴のだれ側表面で穴の右側の SEM 観察結果を示した。各図では穴の端部から右側に生じている表面のき裂幅を赤線で表記した。パンチ側から 1 枚目を、5 枚目を としてあらわした。図 6 は図 5 のき裂幅測定結果をグラフ化した

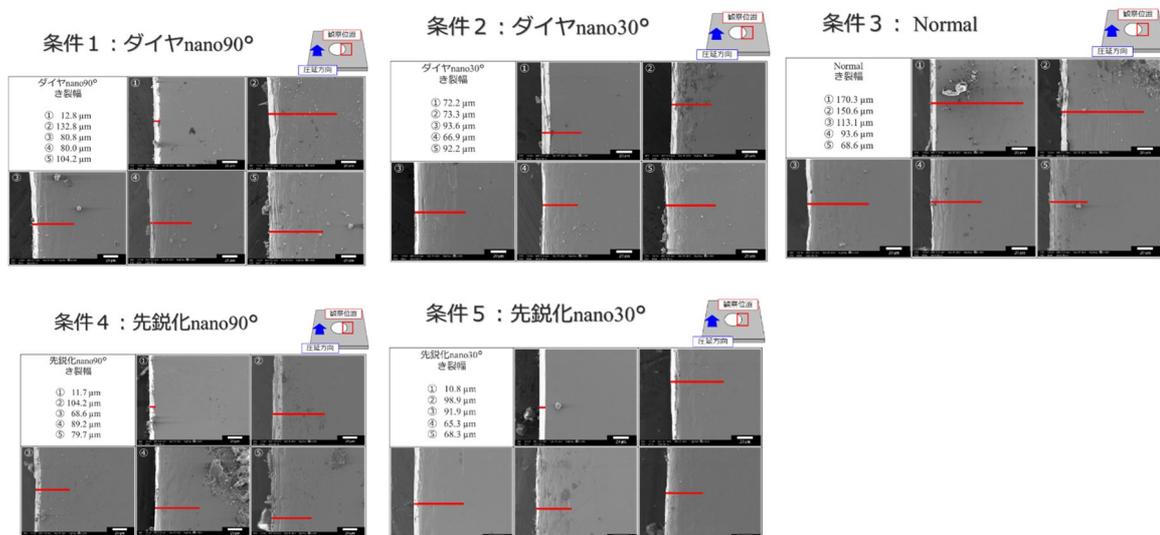


図 5 せん断穴の右側表面 SEM 観察結果

図である。この図から、条件3のNormalが最もき裂幅が大きくなる。また、パンチ側から1枚目となるからまでが直線的にき裂幅が減少しているのに対して、他の4条件

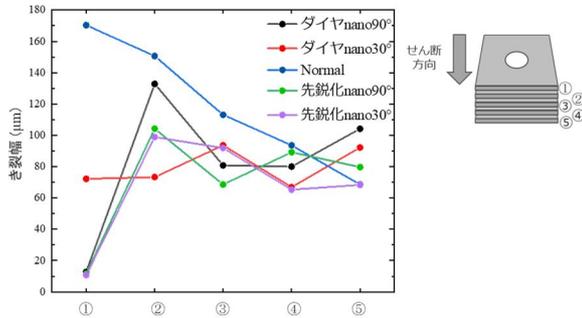


図6 き裂幅比較結果

では、き裂幅が減少し、先鋭化工具を用いる2条件とダイヤモンド nano90° の3条件では板厚 25 μm の半分となる 12.5 μm 程度まで減少している。条件4のダイヤモンド nano30° は 72.2 μm となり、同じダイヤモンドを使用したダイヤモンド nano90° の 12.8 μm と大きく異なる結果となった。

図7は全抜き(100%)と、全抜きとなるパンチストロークの手前-50 μm となる中間止め時の荷重-ストローク線図を示した。ストローク 0 mm は、パンチが材料

に接触してから 100 N となるポイントとした。100%全抜きの荷重-ストローク線図からは、青色で示したダイヤモンド nano30° の荷重立ち上がりが遅いことがわかる。中間止め-50 μm でも青色で示したダイヤモンド nano30° の荷重立ち上がりが遅い。つまり、せん断加工初期の荷重の上がり方は工具条件に依存している。また、-50 μm の段階における最大荷重に至るストロークは最小でオレンジ色の先鋭化 nano30° の 0.19 mm であり、5枚積層の板厚である 0.125 mm よりも 0.065 mm 多い。このことは 0.065 mm 分の被加工材がダイ側に引き込まれたことを示している。

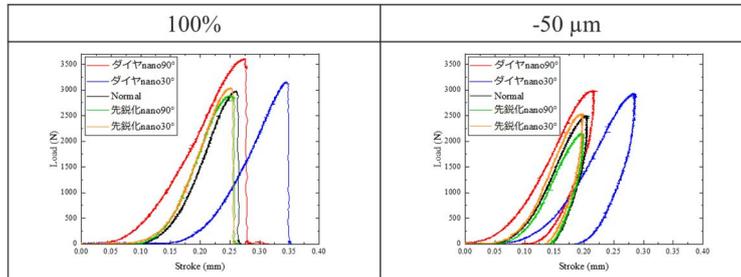
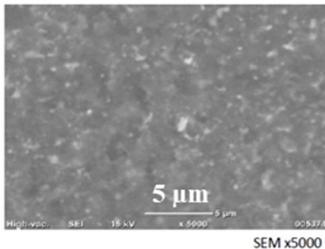


図7 荷重-パンチストローク線図

4 - 3 1枚のせん断におけるせん断挙動の把握

(a)PCD



(b) PCD+nano60

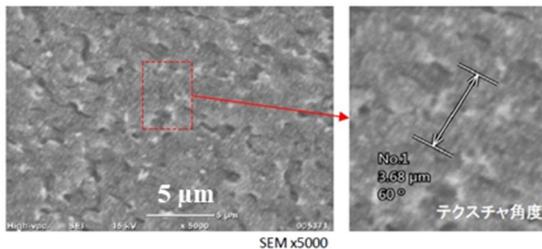


図8 PCDパンチ側面のSEM観察結果

図8は製作したPCDパンチとPCD+nano60パンチ側面のSEM観察結果を示した。図中下側がパンチ底部側となる。図8(b)のPCD+nano60では、凹凸がある表面の上に図60°方向にナノメートルサイズの微細な溝が形成され、ナノ周期構造が付与されている。

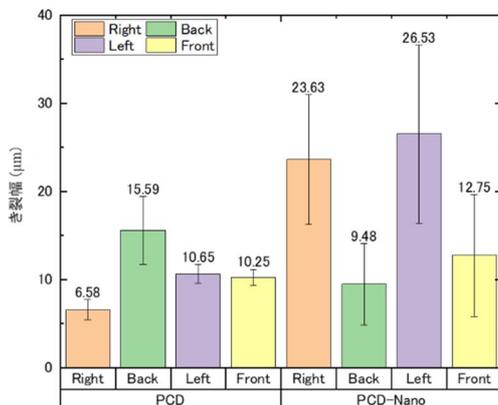


図9 1枚抜き時のき裂幅比較結果

図9は3回のせん断結果から得られたき裂幅をグラフ化した図である。PCDパンチではき裂幅は4方向がいずれも板厚25 μmを下回り、Rightでは平均で6.58 μmと板厚の1/4相当までき裂幅が小さくなっている。一方でPCD+nano60は最大でLeftの26.5 μmとなり、PCDパンチからナノ周期構造を付与しただけでき裂幅が増大している。クリアランスを5 μmで設定したがわずかな位置合わせのズレは生じるため、これが影響してき裂幅の偏りになったと考えられる。PCD+nano60はき裂幅の偏りが大きく、クリアランスに対するき裂幅増大の感度が高いと言える。

図9は3回のせん断結果から得られたき裂幅をグラフ化した図である。PCDパンチではき裂幅は4方向がいずれも板厚25 μmを下回り、Rightでは平均で6.58 μmと板厚の1/4相当までき裂幅が小さくなっている。一方でPCD+nano60は最大でLeftの26.5 μmとなり、PCDパンチからナノ周期構造を付与しただけでき裂幅が増大している。クリアランスを5 μmで設定したがわずかな位置合わせのズレは生じるため、これが影響してき裂幅の偏りになったと考えられる。PCD+nano60はき裂幅の偏りが大きく、クリアランスに対するき裂幅増大の感度が高いと言える。

4 - 4 考察

5枚積層せん断したアモルファス電磁鋼板のせん断加工時の被加工材表面き裂と変形を抑止するメカニズムを主要なパラメータについて加工結果を比較し、メカニズムを考察する。

4 - 4 - 1 クリアランス

本研究では5枚積層せん断時にはクリアランスを0.010 mm(10 μm)で設定した。この結果、図6き裂幅の比較からはパンチ側から1枚目となる において11 μm のき裂が生じ、且つ2枚目から5枚目においては60 μm 以上のき裂幅となり、全体としてき裂の抑制はできていない。

1枚のせん断加工時はクリアランスを0.005 mm(5 μm)まで半減させてき裂幅の減少効果の有無を確認した。図9ではPCDのRightにおいてき裂幅が6.58 μm となり、5枚積層時の最小値11 μm を下回った。しかしながら穴表面には1枚抜きであってもき裂が生じ、これは被加工材がダイに引き込まれて曲げられたことが原因と考えられた。

これらのことからクリアランスの選択では、1枚抜きの0.005 mmであっても曲げ変形起因のき裂を抑止するには充分でないと考えられる。したがってクリアランスをゼロとしたゼロクリアランスや、より積極的にクリアランスを小さくしてマイナスに設定するなど、さらなる対応が求められると言える。

また、本研究ではダイへの被加工材の引き込みを防止するためにパンチの下側に逆押え機構を有した金型構造は採用していない。今回の結果からはクリアランスのみでき裂の発生を抑えるにはゼロクリアランスレベルの金型構造が求められ、逆押え機構の無い慣用せん断金型方式ではき裂抑止は難しいことが示唆された。

4 - 4 - 2 ナノメートル周期構造の付与

本研究では先鋭化工具、CVDダイヤモンド工具、PCDダイヤモンド工具の3種類の工具に対し1 μm に3本となる溝構造を有するナノ周期構造をパンチの側面に付与した。

5枚積層せん断時のき裂抑止効果は図5からパンチ側から1枚目において特に効果を発揮し、き裂幅を11 μm まで抑止した。しかしながら2枚目以降のき裂幅は60 μm 程度以上となり、き裂の抑止につながっていない。このことは多層積層せん断においてはナノ周期構造によって被加工材が接触するパンチ側から1枚目に顕著なき裂抑止効果が表れるが、これ以外の2枚目以降については特段の効果を発揮しないと考えられる。

また、図7の荷重ストローク線図からダイヤ nano90 の条件で荷重の立ち上がりが早く、被加工材への食い込み度合いが強くなると考えられた。一方でダイヤ nano30 では被加工材への食い込みは遅れる。今回の結果からはCVDダイヤモンドパンチへのナノ周期構造付与では、ナノ周期構造を付与する角度によって被加工材への食い込み性能が異なると考えられる。一方で先鋭化パンチへのナノ周期構造付与では、ナノ周期構造の付与角度90°と30°による有意差は認められない。CVDダイヤモンドパンチのエッジ部は図4で5 μm 程度のR形状があり、この上にナノ周期構造が付与されている。ダイヤ nano90 の食い込みが早い効果はエッジがR5 μm 程度と丸い表面にナノ周期構造が付与されたことで、被加工材をR上のナノ周期構造が爪のように押し込むことで被加工材表面に食い込みやすくなる効果が生まれたと考えられる。nano90はパンチストロークに平行な方向であるためナノ周期構造の爪が被加工材に引っかかりやすい。nano30だとナノ周期構造の爪は被加工材に入るが、加工方向と平行でないために被加工材への食い込み度合いはnano90よりも弱くなると考えられる。これらの考察からパンチのエッジをRを含んだ形状としてナノメートル周期構造と被加工材の接触状態とナノ周期構造付与角度をコントロールすることで、ナノメートル周期構造が爪のように被加工材に食い込む効果を利用してき裂の会合を早め、パンチエッジ周囲の被加工材がダイに引き込まれることを抑止する効果が生まれると考えられる。これは新たなせん断工法の開発につながると言える。

4 - 4 - 3 工具先端の均質性

図4からNormal工具パンチエッジは2 μm 程度の範囲でエッジが不均質であった。これが影響して図6からは、パンチ側から1枚目のき裂幅が170 μm まで増大した。図7からNormalの破断ストロークは0.26 mmであり、先鋭化した2つのパンチと同等程度であった。このことはつまり、破断するストローク以前のクラック会合までの間でダイに被加工材が引き込まれる過程でき裂幅が拡大すると考えられる。したがってパンチエッジの不均質さがダイへの被加工材材料引き込みも不均質化したと考えられる。

また、本研究からはアモルファス電磁鋼板のせん断加工における穴表面のき裂幅は工具種に依存しないと考えられた。工具先端の先鋭化では、図4から先鋭化工具は均質性確保と面粗さ向上によってパンチエッジ部分の1 μm サイズの均質性を確保できる。このことによってせん断荷重を被加工材に効率的に伝え、少なくとも図6に示した2枚目 から4枚目 までは被加工材がダイ側に引き込まれることを抑制してNormalよりもき裂幅を抑止する効果を生む。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kentaro Ito
2. 発表標題 Influence of Tool Edge Geometry on Stress Distribution State in Laminated Shearing of Amorphous Electromagnetic Steel Sheets
3. 学会等名 WCMNM2024（国際学会）
4. 発表年 2024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
---------	---------