

技術論文



Technical Paper

Fe-Co 合金の打抜き加工条件が切口面と磁気特性におよぼす影響

大橋明弘^{*1}, 中川純一^{*1}, 藤田恵人^{*2}, 吉田佳典^{*3}

Effect of Punching Condition on Cut Surface and Magnetic Properties of Fe-Co Alloy

Akihiro OHASHI, Junichi NAKAGAWA, Keito FUJITA and Yoshinori YOSHIDA

Synopsis

Fe-18Co alloys have a higher saturation magnetic flux density than electrical steel sheets typically used as motor core materials, making them a promising material for high-power-density motors. Press punching is commonly used to form motor cores, but it induces plastic strain around the cut edges, resulting in increased iron loss. While many studies on the deterioration of iron loss after punching have focused on electrical steel sheets, none have focused on Fe-Co alloys. In this study, we measured the cut edges and magnetic properties (hysteresis loss) of Fe-18Co alloys after punching to investigate the effects of grain size and punching conditions on post-punching properties. Results showed that smaller grain sizes and larger clearances resulted in greater increases in hysteresis loss. FEM analysis revealed that larger clearances resulted in increased rollover height and larger areas of plastic strain. EBSD analysis of the cut edges confirmed a tendency for smaller grain sizes to increase the average KAM around the cut edges. The increase in hysteresis loss was found to correlate with the area of the cross-section of the measurement ring where the KAM value exceeded 0.5 °.

1. 緒 言

自動車をはじめとするモビリティ分野では電動化が進められており、モータを含む各部品の軽量化、小型化が求められている。モータは主に銅線、磁石およびモータコアで構成され、モータコアには一般的に電磁鋼板が使用されている。さらに、ドローン、空飛ぶクルマ等の飛行物体に搭載されるモータにはより一層の軽量化と高出力が求められるため、モータコア材料には、より高い飽和磁束密度が求められる。高い飽和磁束密度を有する材料としてパーメンジュール (Fe-49Co-2V (mass%)) が

挙げられる。パーメンジュールは優れた磁気特性を有する材料ではあるが、熱間域からの冷却速度が遅いと脆い規則相 (B2 相) が発生するため¹⁾、後工程の冷間加工工程が困難となる。そこで、Co 量を調整して良好な加工性と高い飽和磁束密度を有する Fe-18Co (mass%) 合金の研究が進められている²⁾。

一般的にモータコア形状に成形する際はプレス打抜き加工が用いられている。モータコア材は塑性変形や残留応力により鉄損が悪化するとされており³⁾、プレス打抜きでは切口面周辺に塑性ひずみが付与されるため、鉄損悪化が懸念される。千田ら⁴⁾は電磁鋼板を対象として塑性ひず

2025年 9月 11日 受付

* 1 大同特殊鋼(株)技術開発研究所 (Corporate Research & Development Center, Daido Steel Co., Ltd.)

* 2 東海国立大学機構岐阜大学大学院 自然科学研究科 (Graduate School of Nature Science and Technology, Gifu University, Tokai National Higher Education and Research System)

* 3 東海国立大学機構岐阜大学 地域連携スマート金型技術研究センター、工博 (Dr. Eng., Center for Advanced Die Engineering and Technology (G-CADET), Gifu University, Tokai National Higher Education and Research System)

みによる鉄損悪化の傾向を定量的に調査している。また、財前ら⁵⁾は同じく電磁鋼板を対象として結晶粒径が打抜き後の鉄損へおよぼす影響を調査し、結晶粒径の小さい材料の方がだれ高さが小さく、鉄損悪化も小さくなることを報告している。上記のようにモータコア材として広く使用されている電磁鋼板を対象とした先行研究は多くみられるが、Fe-Co合金を対象とした打抜きによる切口面および磁気特性悪化に関する調査事例はほとんどみられない。

そこで本研究では、モータコア用軟磁性材料のFe-18Co (mass%) 合金を対象として、リング打抜き試験とその後の切口面および磁気特性の測定を実施し、平均結晶粒径および打抜き条件が打抜き後の諸特性におよぼす影響を調査した。打抜き条件については、工具摩耗や切口面精度に関連するクリアランスと生産性に関連するプレス速度を対象とした。

2. 実験方法

2. 1 実験方法

供試材としてFe-18Co (mass%) 合金を使用した。溶解、鋳造、熱間鍛造、熱間圧延、焼鈍の工程を経て、冷間圧延により板厚0.2 mmの帶鋼とした。その後、熱処理条件を変化させることで平均結晶粒径11 μm, 27 μmの2種類のサンプルを用意した。Fig. 1にミクロ組織を示す。

打抜き後に磁気特性測定をそのまま実施するため、その試験片形状を打抜きで作成することを意図して、打抜き形状は外径28 mm、内径20 mmのリング形状とした。打抜き試験では板厚に対するクリアランスの割合（以下、クリアランス）とプレス速度を変化させて、リングサンプルを作製した。クリアランスはリングの内径側と外径側で同じ条件となるよう設定した。Table 1に打抜きの試験水準を示す。打抜き試験はパンチとダイスの材料としてSKD11を使用し、板押さえ力137 kgfにて無潤滑で実施した。Fig. 2にリング打抜き用プレス金型の構成図および打抜き後のリングサンプルの外観写真を示す。

打抜き後のサンプルは圧延方向に対して縦断し、光学顕微鏡によりリング外径側の切口面の観察を行った。また、鉄損増加と相関があるとされているだれ高さを測定した。Fig. 3に切口面観察箇所を示す。磁気特性評価用の試料は打抜きで作製したリング5枚と絶縁紙5枚を専用のリングホルダに交互に入れ、ホルダに銅線を巻き、トロイダルコアとした。その後、交流磁化特性試験装置（メトロン技研株式会社 SK200）を用いて励磁束密度を1.0 Tで一定とし鉄損 P_c の測定を行った。Fig. 4に鉄損の内訳を示す。鉄損はヒステリシス損失 P_h と渦電流損失 P_e

の和であり、ひずみによる影響を受けやすいのはヒステリシス損失 P_h である^{6), 7)}。そこで、本報告では打抜きサンプルの磁束密度 $B=1.0$ T、周波数 $f=400$ Hzにおけるヒステリシス損失 P_h を算出した。また、比較用の無ひずみ材として、各平均結晶粒径においてエッチングで作製したリングのヒステリシス損失を測定し、打抜きによるヒステリシス損失の増加量を算出した。その後、ヒステリシス損失増加量の最小値を0、最大値を1にスケーリングする方法で正規化を行った。

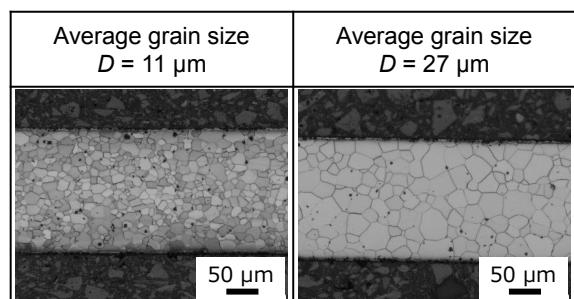


Fig. 1. Initial microstructure.

Table 1. Punching conditions

No.	Average grain size D (μm)	Clearance CL (%t)	Strokes per minute V (min^{-1})
1	11	5	300
2	11	10	300
3	27	5	30
4	27	5	100
5	27	5	300
6	27	10	30
7	27	10	100
8	27	10	300

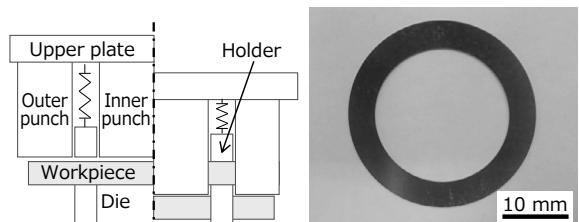


Fig. 2. Die set diagram and punched ring sample.

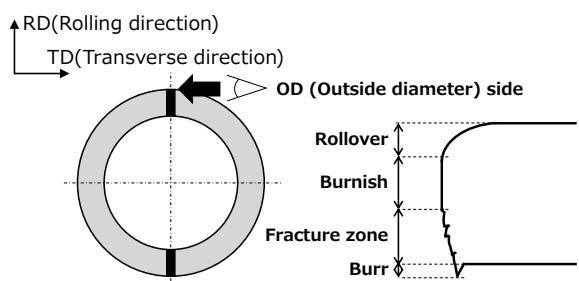


Fig. 3. Observation Point.

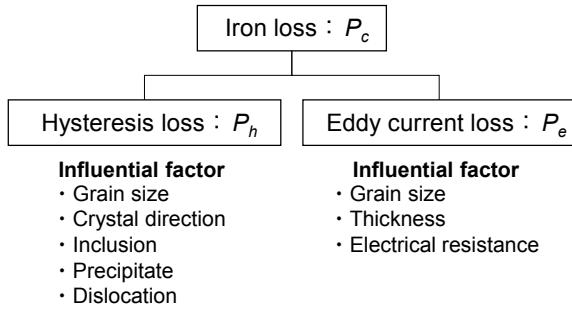


Fig. 4. Details of iron loss.

2. 2 解析方法

打抜きによる塑性ひずみ分布を推定するため、汎用 FEM 解析ソフト Simufact Forming を用いて、二次元平面ひずみの打抜き解析を実施した。Fig. 5 に解析モデルと解析条件を示す。解析の流動応力は、各平均結晶粒径の帶鋼に対して圧延方向に引張試験片 (JIS13B 号) を採取し、ひずみ速度 0.03s^{-1} の室温引張試験を実施し、高ひずみ領域を式 (1) の Swift 則で近似したものを使用した。ここで、 ε_p は真ひずみ、 a 、 b および n は材料定数である。

$$\sigma = a(\varepsilon_p + b)^n \quad (1)$$

Fig. 6 に打抜き解析に使用した平均結晶粒径 $11\text{ }\mu\text{m}$ と $27\text{ }\mu\text{m}$ の流動応力を示す。

打抜き時の破壊開始の閾値については積分型延性破壊条件式の一つである Cockcroft & Latham モデルを使用した。Cockcroft & Latham 延性破壊条件式を式 (2) に示す。ここで、 σ_{max} は最大主応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $d\bar{\varepsilon}$ は相当ひずみ増分、 ε_f は破断ひずみである。

$$C = \int_0^{\varepsilon_f} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\varepsilon} \quad (2)$$

破壊開始の閾値は実験の切口面形状に合わせこむ形で設定した。

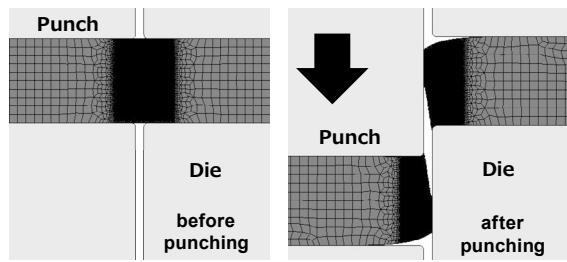


Fig. 5. Analysis model and conditions.

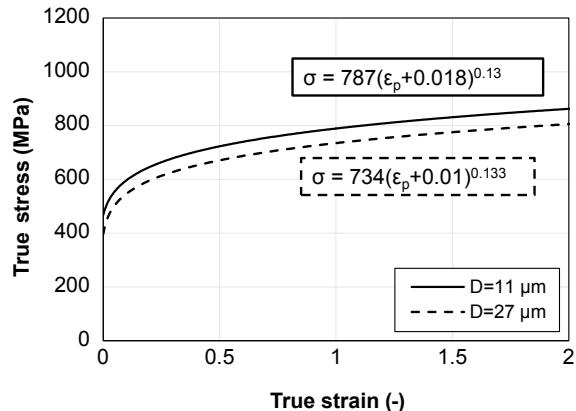


Fig. 6. Predicted flow stress by swift hardening law.

3. 実験結果

3. 1 打抜き後の切口面の変化

Fig. 7 に打抜き後のリング外径側の切口面の観察結果を示す。クリアランスが小さい方がせん断面の割合が高く、破断面も打抜き方向に対してより水平に近づく傾向となった。Fig. 8 に打抜き後のだれ高さの測定結果を示す。クリアランス 10% は 5% と比較して、だれ高さが増加する傾向を確認した。一方で、平均結晶粒径とプレス速度についても、クリアランスの影響と比較してだれ高さに明確な変化はみられなかった。

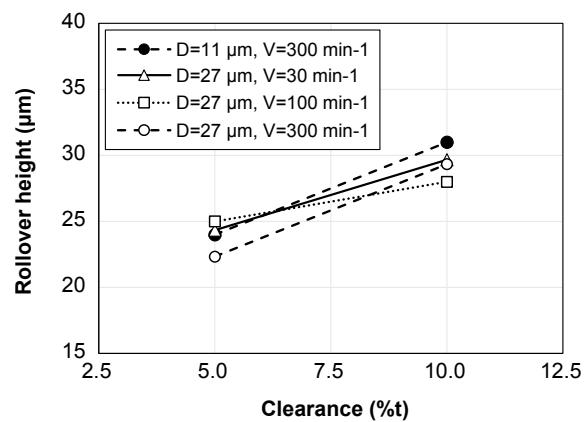


Fig. 8. Rollover height of punching samples.

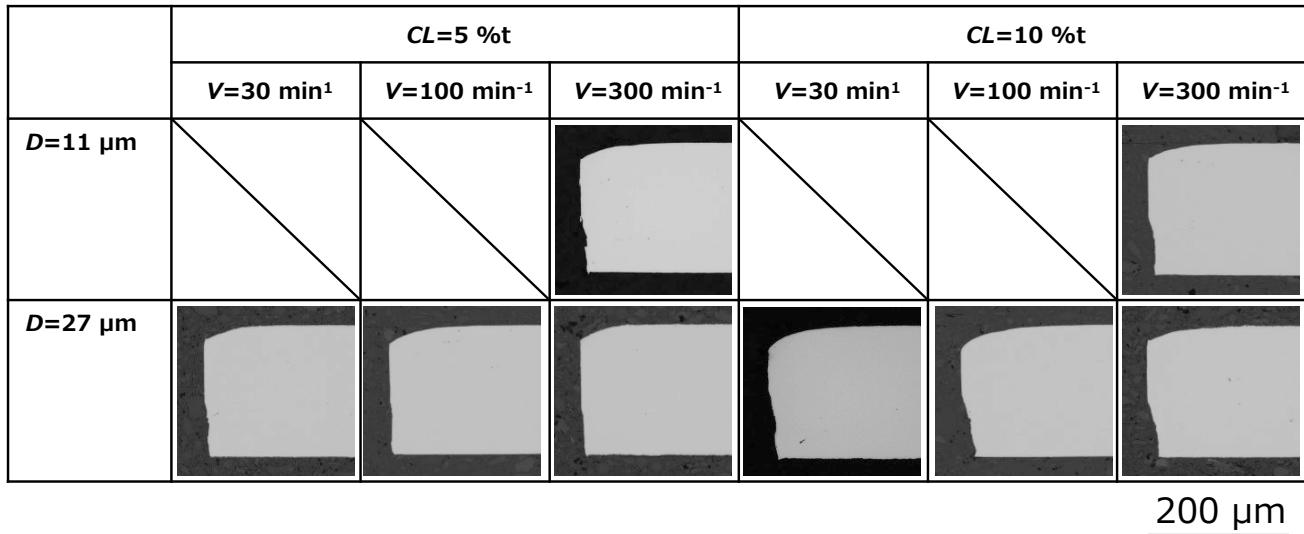
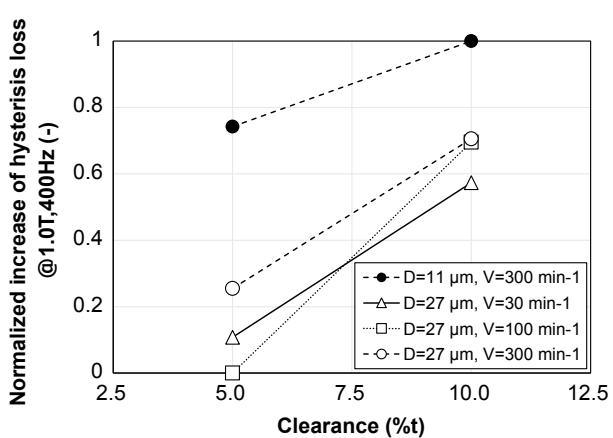


Fig. 7. Cut surface of punching sample.

3. 2 打抜き後のヒステリシス損失の変化

Fig. 9 に打抜き後のヒステリシス損失 ($B=1.0\text{ T}$, $f=400\text{ Hz}$) の増加量を正規化した結果を示す。クリアランス $5\%t$ と $10\%t$ を比較すると、平均結晶粒径とプレス速度によらず、クリアランス $10\%t$ の方がヒステリシス損失の増加が大きいことを確認した。これは、だれ高さと同様の傾向であった。また、平均結晶粒径 $11\text{ }\mu\text{m}$ と $27\text{ }\mu\text{m}$ を比較すると、平均結晶粒径 $11\text{ }\mu\text{m}$ の方がヒステリシス損失の増加が大きいことを確認した。プレス速度についてはクリアランス、平均結晶粒径と比較して大きな変化は確認できなかった。本結果より、平均結晶粒径が小さく、クリアランスが大きい方が、ヒステリシス損失の増加が大きくなることがわかった。増加量に差異が発生したメカニズムを考察するため、打抜き解析と EBSD 測定を実施した。

Fig. 9. Normalized increase of hysteresis loss. ($B=1.0\text{ T}$, $f=400\text{ Hz}$).

4. 考察

4. 1 解析による塑性ひずみ分布予測

クリアランスと平均結晶粒径が塑性ひずみ分布へおよぼす影響を調査するため、打抜き解析は Table 1 における No.2, 5, 8 の水準を対象として実施した。Fig. 10 に作成した解析モデル（赤色部）を切口面写真（白色部）に重ねた結果および相当塑性ひずみのセンター図を示す。解析モデルは切口面形状をおおむね再現できており、この時の Cockcroft & Latham 延性破壊条件式の閾値は、平均結晶粒径 $11\text{ }\mu\text{m}$, $27\text{ }\mu\text{m}$ とともに $C=2.8$ となった。粒径により破壊開始の閾値が変化しなかった要因として、流動応力と切口面形状に大きな差がなかったためと考えられる。解析モデルを作成したことで打抜き条件による塑性ひずみ分布を比較できるようになった。

Fig. 11 に板厚中央部における切口面から板面内方向への相当塑性ひずみ分布を示す。相当塑性ひずみはすべての条件で切口面で最大値をとっており、半板厚の距離である $100\text{ }\mu\text{m}$ まで離れるほとんどの導入されていないことが確認できる。同じ平均結晶粒径 $27\text{ }\mu\text{m}$ においてクリアランスの影響を比較すると、切口面近傍ではクリアランス $5\%t$ の方が相当塑性ひずみは大きいが、切口面から離れていくにしたがってクリアランス $10\%t$ の方が相当塑性ひずみが大きくなることを確認した。一方、同じクリアランス $10\%t$ において平均結晶粒径の影響を比較したが、相当塑性ひずみは切口面からの距離によらず同程度であった。これは先行研究^{6), 7)}における導入される塑性ひずみが大きい方がヒステリシス損失が増加

するという結果に対して異なる傾向となつた。解析モデルは流動応力の差異のみで平均結晶粒径による変形挙動を表現しており、粒界密度の差による転位生成までは再現できなかつたためヒステリシス損失の増加傾向とは一致しなかつたと考えられる。

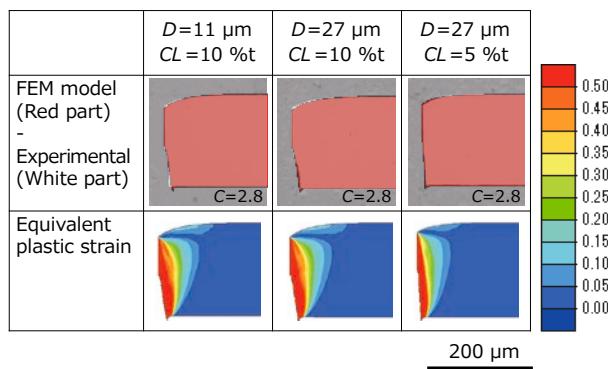
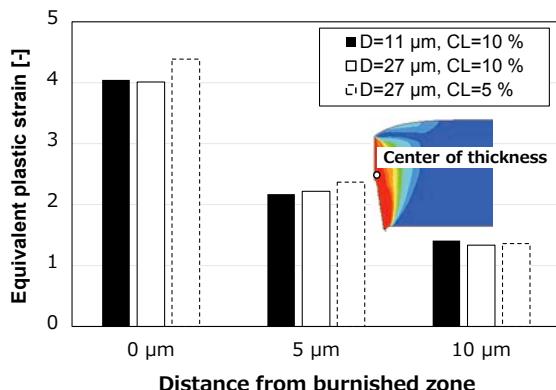
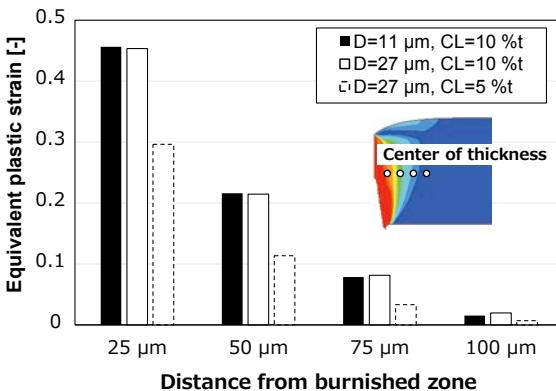


Fig. 10. Cut surface analyzed by FEM.



(a) Distance from burnished zone(0~10 μm).



(b) Distance from burnished zone(25~100 μm).

Fig. 11. Equivalent plastic strain analyzed by FEM.

4. 2 EBSDによる切口面近傍のKAM値

FEM 解析を行つた打抜き水準の実体の塑性ひずみ値を調査するため、打抜きサンプルの切口面に対して EBSD (Electron BackScatter Diffraction) を用いて KAM (Kernel Average Misorientation) を算出した。KAM は塑性ひずみと正の相関があるとされているパラメータである。Fig. 12 に EBSD による切口面の Band Contrast および KAM を示す。KAM が増加している領域は、FEM 解析の相当塑性ひずみ分布と類似しており、FEM 解析による塑性ひずみ領域については実体を再現できていたと考えられる。また、板面内方向内部では粒界に沿つて KAM 値が増加している箇所が確認され、粒界に転位が蓄積されやすいことが示唆された。

Fig. 13 に切口面から板面内方向への KAM 平均値の分布を示す。KAM 平均値は板厚全域での平均を算出したもので、EBSD 測定点のブランク部は計算から除外している。クリアランス 5 %t と 10 %t を比較すると、クリアランス 5 %t の方が切口面より約 20 μm 位置から KAM 平均値の減少量が大きくなつた。FEM 解析と同様にクリアランスが小さくなると塑性ひずみ領域が縮小するものと考えられる。平均結晶粒径 11 μm と 27 μm を比較すると、切口面より 100 μm 程度まで離れる KAM 平均値が一定となつてゐるため、平均結晶粒径によらず板厚の 1/2 倍程度の領域まで打抜き変形の影響が及んでゐると考えられる。しかし、切口面からの距離 100 μm 以下の範囲では平均結晶粒径 11 μm の方が KAM 平均値が大きくなる傾向が確認された。これは FEM 解析の相当塑性ひずみ値と異なる傾向であった。

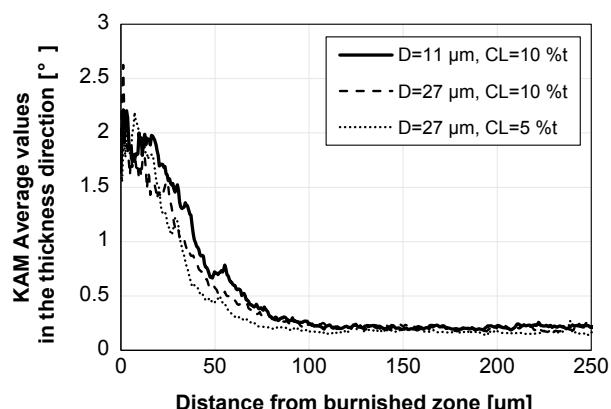


Fig. 13. Distribution of KAM average value

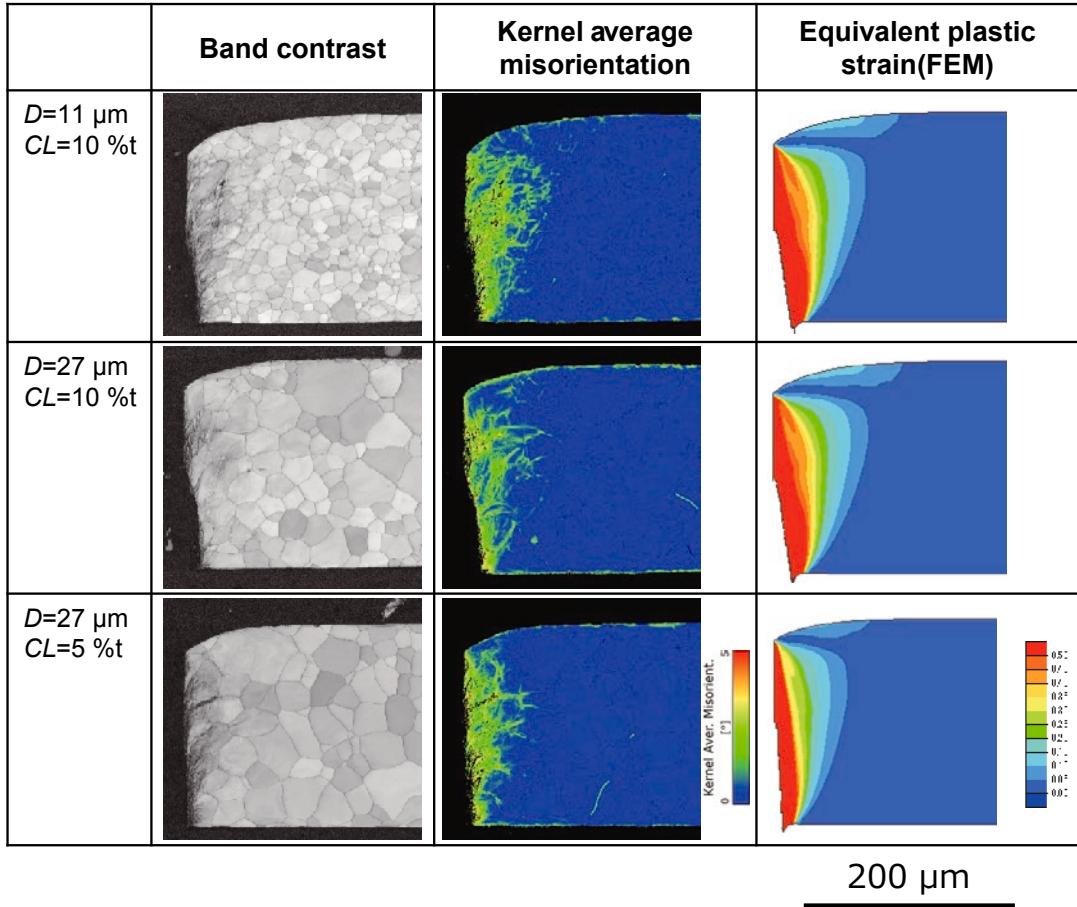


Fig. 12. Results of EBSD.

4. 3 ヒステリシス損失増加の考察

Fig. 14 に FEM 解析および EBSD 測定結果から考察したクリアランスと平均結晶粒径による打抜き変形の差異を示した模式図を示す。

クリアランス增加によるヒステリシス損失増加については、解析による相当塑性ひずみ分布と EBSD による KAM 値分布より、塑性ひずみ領域が拡大したことが要因と考えられる。打抜き初期で単純せん断変形が生じると仮定すると、せん断ひずみ γ は式 (3) のように示される⁸⁾。ここで、 S はパンチストローク、 C はクリアランスである。

$$\gamma = S/C \quad (3)$$

式 (3) よりクリアランスが大きくなる方が局所的なせん断ひずみは小さくなると推定される。しかし、クリアランスが大きくなるとだれ高さも大きくなるため、せ

ん断面が生成するまでのパンチストロークが大きくなり、塑性ひずみ領域も拡大するものと推定される。先行研究³⁾にて、非常に小さい塑性ひずみが付与された場合でも鉄損が線形に悪化すると報告された例を考えると、磁気特性測定用のリング内において磁壁移動が困難な塑性ひずみ領域が増加し、ヒステリシス損失も増加したと推定される。

平均結晶粒径の影響については、先行研究⁵⁾にて結晶粒径が小さい方が打抜き後のだれ高さが小さくなり、鉄損悪化も小さくなることが報告されている。しかし、今回は Fig. 6 のように平均結晶粒径によるだれ高さの差はほとんど確認できなかった。だれ高さは加工硬化指数が大きい材料ほど増加するとされているため⁸⁾、今回打抜きを実施したサンプルは平均結晶粒径 11 μm, 27 μm と限定的な範囲であったため、だれ高さに変化が生じるほど加工硬化指数に差がなかったと推察される。つまり、だれ高さを含めた切口面形状から、打抜きで付与さ

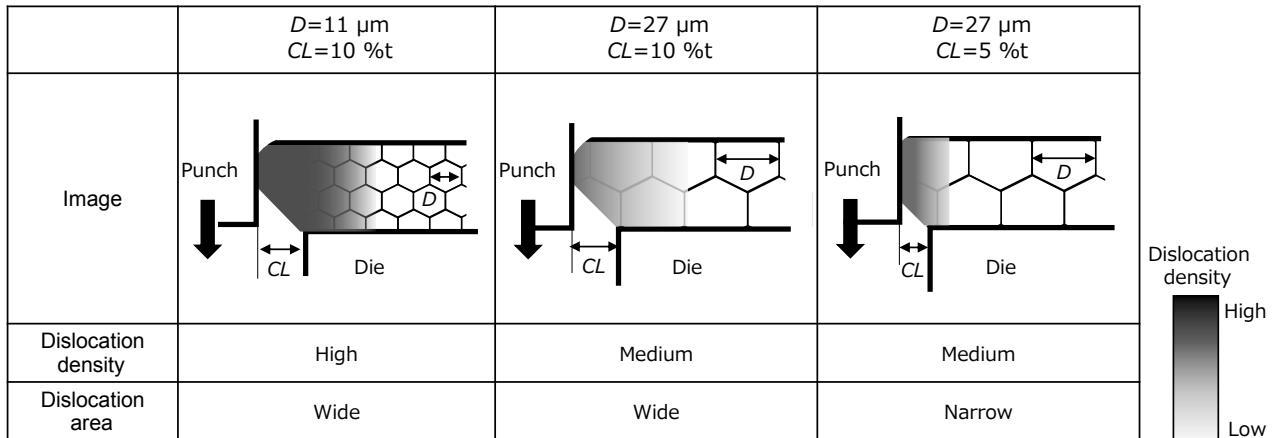


Fig. 14. Image of relationship between plastic deformation and punching conditions.

れる塑性ひずみは、Fig. 11 の FEM 解析のようにほとんど差が生じなかつたと考えられる。次に打抜きによる材料内の転位密度について考えると、高木⁹⁾は多結晶鉄を対象として加工に導入される転位 ρ を式 (4) のように提案している。ここで、 ε_t は真ひずみ、 d は平均結晶粒径、 K は定数である。

$$\rho = K(\varepsilon_t/d)^{1/2} \quad (4)$$

式 (4) より、打抜きにより付与される塑性ひずみが同じ場合でも平均結晶粒径が小さいほど転位密度が高くなると想定される。また、そのため、平均結晶粒径の小さいサンプルは、切口面周辺が磁壁移動をより阻害するような高転位密度の領域となったと考えられる。

Fig. 15 にヒステリシス損失増加量とリング断面積に対する塑性ひずみ付与部 (KAM 平均値 $\geq 0.5^\circ$) の面積率の関係を示す。今回の試験結果では KAM 平均値 0.5° 付近で EBSD で評価した 3 水準の差異が明確に確認されたため、KAM 平均値 0.5° を閾値とした。ヒステリシス損失増加量は最小値 0、最大値 1 に正規化したものである。磁壁移動を阻害する塑性ひずみの領域が拡大するほどヒステリシス損失増加量が大きくなる傾向となった。

今回プレス速度については、ヒステリシス損失の増加量に大きな変化がみられなかった。前田¹⁰⁾は軟鋼、亜鉛、アルミニウム、銅などを対象として、せん断速度がだれ高さにおよぼす影響はみられないと報告しており、今回の Fe-18Co (mass%) 合金においてもだれ高さを含めた切口面形状に大きな変化がみられなかつた。そのため、実施した打抜き速度範囲では塑性ひずみ領域も変化しなかつたと推定され、ヒステリシス損失増加量にほとんど差がみられなかつたと考えられる。そのため、今回

のプレス速度範囲において、生産性向上のため高速で打抜きした場合でもヒステリシス損の顕著な変化はみられないと想定される。

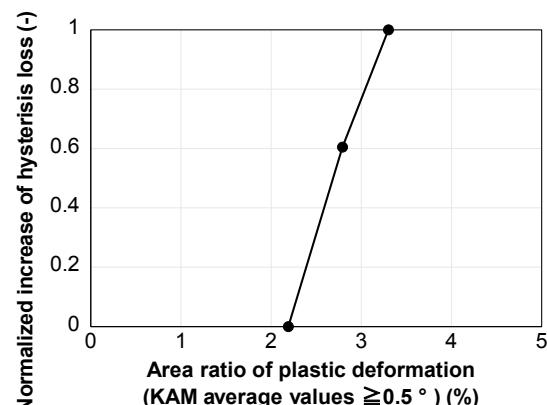


Fig. 15. Normalized increase of hysteresis loss by area ratio of plastic deformation.

5. 結 言

モータコア用軟磁性材料の Fe-18Co (mass%) 合金を対象としてリング打抜き試験を実施し、平均結晶粒径および打抜き条件 (クリアランス、プレス速度) が打抜き後の切口面、磁気特性におよぼす影響を調査した結果、以下の結論を得た。

- 1) 打抜き後の切口面観察により、クリアランスが $5 \%t$ から $10 \%t$ に増加するとだれ高さが増加したが、平均結晶粒径 ($11 \sim 27 \mu\text{m}$) およびプレス速度 ($30 \sim 300 \text{ min}^{-1}$) の範囲では大きな差はみられなかつた。

- 2) 打抜き後のヒステリシス損失を測定した結果、平均結晶粒径が小さく、クリアランスが大きい方がヒステリシス損失の増加量は大きくなった。プレス速度については大きな差はみられなかった。
- 3) FEM 解析よりクリアランスが大きい方が塑性ひずみ領域が拡大した。だれ高さが大きく板面内方向へ塑性変形部が大きくなつたと考えられる。
- 4) EBSD 測定より平均結晶粒径の小さいサンプルは打抜き後の KAM 値が大きいことを確認した。同じ塑性ひずみでも平均結晶粒径が小さいほど転位密度が増加するため、磁壁移動を阻害しやすくヒステリシス損失がより増加したと考えられる。

(文 献)

- 1) 電気製鋼, 82(2011), 99.
- 2) 佐藤誉将, 高林宏之: 電気製鋼, 94(2023), 15.
- 3) 柏原義之, 藤村浩志, 岡村一男, 今西憲治, 屋鋪裕義: 電気学会論文誌 A, 131(2011), 567
- 4) 千田邦浩, 石田昌義, 中須洋一, 八木正昭: 電気学会論文誌 A, 125(2005), 241.
- 5) 財前善彰, 大村健, 千田邦浩, 福村勝, 尾田善彦, 戸田広明: 電気学会論文誌 A, 138(2018), 576.
- 6) 土井智史, 青木哲也, 岡崎恵一, 高橋康人, 藤原耕二: 電気学会論文誌 B, 137(2017), 254.
- 7) 尾田善彦, 久保田猛: ふえらむ, 14(2009), 339.
- 8) 日本塑性加工学会: せん断加工 - プレス切断加工の基礎と活用技術-, コロナ社, 2016, 13.
- 9) 高木節雄: 鉄と鋼, 105(2019), 941.
- 10) 前田禎三: 精密機械, 25(1959), 439.



大橋明弘



中川純一



藤田恵人



吉田佳典