

精密積層金型におけるカシメ用ダボパンチの 耐摩耗性向上化技術の開発

神戸大学 大学院工学研究科
名誉教授 白瀬 敬一
(2022 年度 一般研究開発助成 AF-2022010-B2)

キーワード：モーターコア、精密積層金型、表面処理

1. 研究の目的と背景

近年の世界的な EV 開発の急激な進行に伴い、EV 駆動用の大型モーターの需要が急激に拡大しつつある。これに伴うモーターコアの生産や精密積層金型製造における各企業の新規参入や業務シフトによりモーターコアの高品質／高効率生産および精密金型製造の技術開発競争が世界的に激化している。

モーターコアの生産では、高硬度の電磁鋼板を精密積層金型にて SPM200（毎分 200 ショット）以上の高速せん断加工およびカシメ用のダボ穴成形を行う。その際、高い成形応力によりダボ穴成形用のパンチ（以下「カシメパンチ」と略す）の先端が徐々に摩耗してダボ穴の成形品質が劣化し、モーターコアのカシメ積層品質を大きく毀損する。モーターコアの積層品質を保証するために、一般的には 100 万ショットを目安に、摩耗したカシメパンチ先端を研磨する定期メンテナンスが必要になる。この頻繁なメンテナンスのために、モーターコア生産用の精密積層金型の稼働率は 50% 程度であり、決して効率的な生産ができていないと言えない。そのため、カシメパンチ先端の摩耗メカニズムを解明し、耐摩耗性を大きく向上させる要素技術の開発が国内業界の技術レベル底上げに必須となっている。

ここで、図 1 に積層モーターコアの例¹⁾とダボ穴によるカシメ積層の模式図を示す。この図で分かるように、ダボ穴の成形品質が劣化すると、電磁鋼板の積層位置がずれてカシメ積層の品質が毀損される。



図 1 積層モーターコアのカシメ積層とダボ穴

本研究では検証金型の耐久試験を行うことで、マイクロショットピーニング、AlCrN といった様々な表面改質技術やコーティング技術^{2,3)}がカシメパンチの耐摩耗性に与える効果を検証した。また、表面処理と加工油の組み合わせを直交表に割り付けた品質工学実験⁴⁾を行うことで、カシメパンチの耐摩耗性に対する各因子の寄与度を評価し、摩耗メカニズムを分析した。

本研究は、型技術協会の表面処理加工技術に関する調査研究委員会に参画している素材／加工油／金型製作／表面処理に関わる金型製造関連企業と大学との共創活動として取り組み、幅広い知見を結集しての研究活動を行うことで、電磁鋼板材の精密積層における新技術開発を活性化させることを狙いとして実施された。

2. 100 万ショット耐久試験

2.1 耐久試験の概要

モーターコア生産の高品質／高効率生産技術については秘匿化されており、その検証方法や有効な因子についての知見が少ない。そこで、検証金型を製作し、カシメパンチの摩耗推移を評価しつつ、金型の耐久性向上に有効な因子を検証するための耐久試験を実施した。検証金型は図 2 に示すように、ダボ穴成形とスクラップカットを行うだけの簡易的な工程とし、因子の異なるカシメパンチを 4 本配置してそれぞれの比較評価を実施できるようにした。

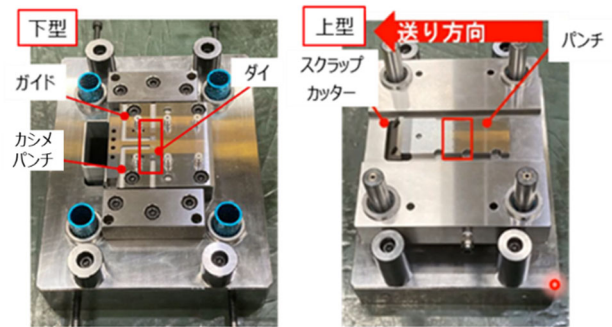


図 2 耐久試験に用いた検証金型

この金型に 4 種類のカシメパンチ（A: 未処理、B: マイクロピーニング、C: AlCrN コーティング、D: AlCrN コーティング後天面研磨）を配置し、100 万ショット加工した際のカシメパンチ先端の摩耗を評価した。カシメパンチの素材には超硬合金：VM30 相当を使用した。D のコーティング後天面研磨とは、実際の生産現場で実施されるカシメパンチ先端を研磨する定期メンテナンスを考慮し、コーティング施工後にパンチ先端を 0.1mm 研削加工したもので、パンチ側面にのみコーティングが施された状態である。

2.2 耐久試験結果

図 3 に 100 万ショットに至るまでの各カシメパンチ先端の摩耗の推移を示す。100 万ショット時の A: 未処理の摩

耗量に対し、C:コーティング、D:コーティング後天面研磨において摩耗量を低減できる結果となった。DにおいてもC同様に摩耗量が低減したことからパンチ側面にコーティングが施されていれば効果があると考えられる。また、B:マイクロピーニングにおいては、表面処理施工時にパンチ先端に $16\mu\text{m}$ ほど R の丸みが付いてしまったため初期の摩耗量が大きくなっているが、摩耗の進行は最も小さい結果となった。

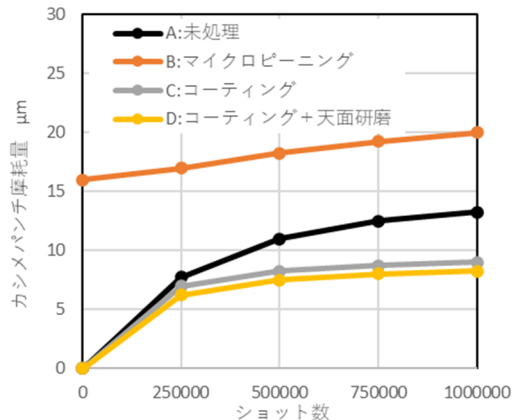


図3 カシメパンチ摩耗推移

図4に100万ショット時点でのカシメパンチ先端の摩耗状況を示す。図より、パンチ底部の摩耗進行はほとんど見られず、側面のエッジを起点とする摩耗進行が大きいことが確認できた。このことからカシメパンチの摩耗進行においては、パンチ側面の摩耗が支配的なため、Dにおいても摩耗を低減できたと考えられる。

今回の実験で採用したマイクロピーニングやコーティング処理では硬度が上昇するため、高い成形圧力が作用するカシメパンチ先端部の耐摩耗性向上に効果があったと考えられる。さらに、Bにおいては摩耗の進行がほとんど見られなかったことから、カシメパンチ表面の微細な凹凸が摺動性の向上に寄与していることが示唆された。

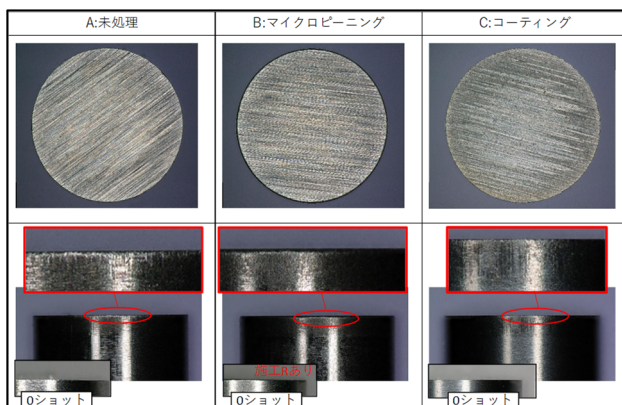


図4 カシメパンチ先端の摩耗状況

3. 品質工学による条件の最適化

3.1 品質工学実験による最適条件の検討

耐久試験の結果より表面処理による耐摩耗性の向上が確認できたが、ダボ穴成形における上下金型のクリアラン

スは一般に $10\mu\text{m}$ 以下と言われており、コーティング処理については膜厚管理が非常にシビアとなる。また、コーティングの剥離強度等の耐久性にも配慮が必要で技術的な課題が多い。そこで、ショットブラストによる表面改質に着目し、他の因子との組み合わせによる条件を検討することで耐摩耗性の向上を更に検証することとした。

様々な因子での組み合わせを検証する上で実験の効率化が課題となった。前章で述べた耐久試験は実験に1か月を要したが、因子の組み合わせ検証では更なる工数増加が予想される。そこで、実験効率化のため①材料置換による摩耗促進、②品質工学による組み合わせ検証、について検討した。

3.2 材料置換による摩耗促進の検討

本来100万ショット規模の成形加工を要する摩耗評価を効率化するため、カシメパンチの材料を置換して摩耗を促進することを検討した。そこで、素材硬度に着目し現状のHV1500相当に対し、1200、700、600の3種類の超硬合金と焼き入れ鋼を選定した。しかし、材料を置換した結果、摩耗曲線や摩耗形態が変化すると実験として成立しない。そこで、選定材料を金型に組み込んで1万ショットの加工における、カシメパンチの摩耗曲線と摩耗状況、ダボ深さを評価した。

図5に置換材の1万ショットまでの摩耗推移と従来材の100万ショットまでの摩耗推移を示す。図より材料の置換により1万ショット時点で、従来材の100万ショット相当の摩耗量となった。また摩耗の推移を比較すると、成形の初期に急激に摩耗が進行する初期摩耗と、その後傾きが緩やかになる定常摩耗がみられ、傾向も一致した。

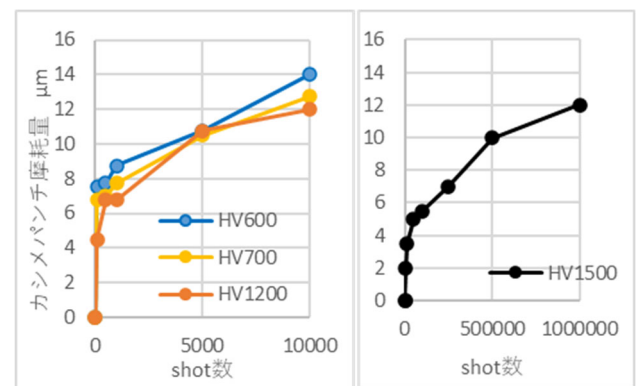


図5 カシメパンチの摩耗推移（素材比較）

図6にHV1200と1500の摩耗状況を示す。それぞれの初期摩耗、定常摩耗の状況を比較したが、摩耗形態に大きな違いは見られなかった。

	500shot	10000shot
HV1200		
	50000shot	500000shot
HV1500		

図6 カシメパンチ摩耗状況（素材比較）

図 7 に成形されたシートのダボ深さを計測した結果を示す。結果より焼き入れ鋼である HV600, 700 は超硬合金を使用した条件に比べダボ深さが 10%程度浅い結果となった。これは、焼き入れ鋼は超硬合金に比べヤング率が低いいため、成形時に弾性変形してしまったことが原因として考えられる。この結果から焼き入れ鋼については成形時の挙動が異なることが考えられたため、材料を置換する候補から除外した。

以上の結果から、摩耗促進のため超硬合金の素材硬度を HV1500 から HV1200 へ変更することとし、検証のショット数は 1 万ショットに決定した。

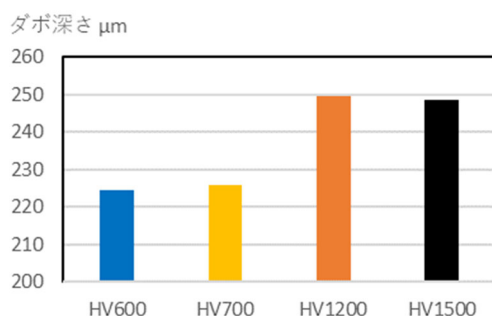
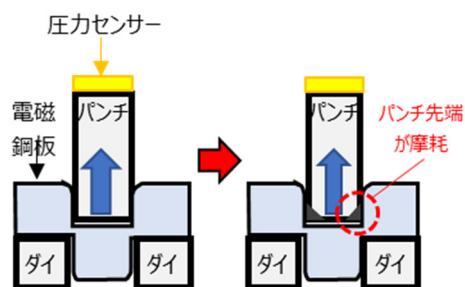


図 7 ダボ深さ (素材比較)

3-3 品質工学実験の概要

複数の因子の組み合わせ評価を効率的に行うために、品質工学を活用した検証を実施した。品質工学では、ある事象を発生させるシステムを原理原則である基本機能に置き換え、因子の組み合わせを実験計画法に基づいて実験することで基本機能に対する各因子の効果が検証できる。今回の事例では、カシメパンチの耐摩耗性を評価するうえで摩耗を直接評価するのではなく、成形中にカシメパンチに作用する圧力 (図 8) を評価指標とした基本機能を検討した (図 9)。この基本機能において、ショット数に対する圧力変化 (回数圧力-初期圧力) が小さい状態は、ショット数を重ねてもカシメパンチに作用する圧力が変化していない状態であるため、耐摩耗性に優れている理想状態と考える。

上記の基本機能での評価を行うため、カシメパンチの背面に圧力センサーを配置した実験型を製作した。この金型に摩耗量の異なるカシメパンチをセットして成形圧力を評価した結果を図 10, 図 11 に示す。図 10 より、数 μm の摩耗量の違いに対しても成形圧力の変化が評価できることを確認した。摩耗の増加に伴いカシメパンチに作用する圧力が高い状態で遷移していることから、新品状態から切れ味が劣化することでせん断面の形成に至るまでの成形が徐々に引きちぎるような形態に変化し、カシメパンチに負荷がかかり続けている状態になったと考える。図 11 に成形圧力波形から算出した圧力面積を示す。ばらつきを考慮し、10 ショットの平均値で算出した。図より摩耗の増加に伴い圧力波形面積も増加しているため圧力波形面積を基本機能として採用することにした。



パンチにかかる圧力の変化=パンチ刃先の変化

図 8 基本機能の考え方

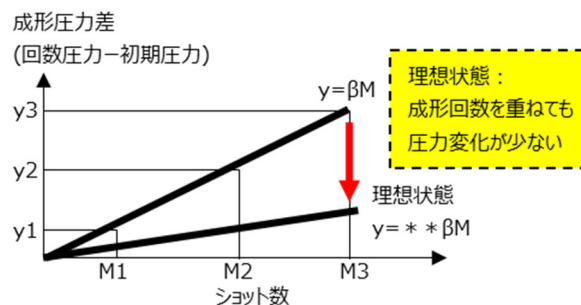


図 9 基本機能

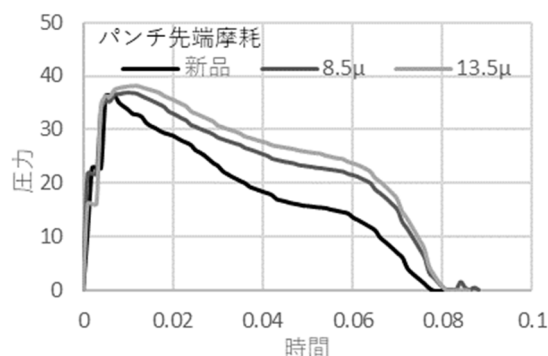


図 10 各摩耗量における 1 ショット中の圧力波形

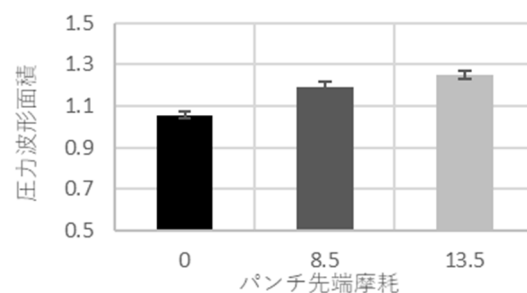


図 11 各摩耗量における圧力波形面積

3-4 実験計画

今回の検証ではカシメパンチ材料を固定とし、パンチと電磁鋼板との接触状態に着目して耐摩耗性を向上させる因子の組み合わせを検討するために、ショットブラストによる表面性状の変化と加工油について制御因子を選定した。また誤差因子はパンチの刃先形状とした。表 1 に制御因子と、誤差因子を示す。ショットブラストによる表面改質においては、表面粗さに着目し、最も表面粗さの小さい

未処理のパンチと、ディンプルの付与により表面粗さを大きくしたパンチ、ブラスト後にブラシ研磨を行いその中間の粗さとしたパンチの3種類を製作した。また、加工油については接触状態への影響の大きい加工油の粘度と、油量の他に、温度によってパンチ表面に犠牲膜を形成する添加剤を選定した。これらの制御因子を表2に示すようにL9直交表に割り付け、計18回の実験を実施した。実験では0, 1000, 10000ショットのタイミングで10ショット分の成形圧力を計測し波形面積の平均値を算出した。

表1 制御因子と誤差因子

制御因子		水準		
		1	2	3
A	表面粗さ	小：未処理	中：ディンプル+ブラシ	大：ディンプル
C	加工油粘度	小	中	大
D	加工油量	小	中	大
B	加工油添加剤	ベース	+リン	+硫黄

誤差因子		水準	
		1	2
パンチ刃先形状		丸平	角平

表2 L9直交表

実験No	制御因子				誤差因子
	表面粗さ(ディンプル)	加工油粘度	加工油量	加工油添加剤	
1,10	小：未処理	小	小	ベース	×
2,11	小：未処理	中	中	+リン	
3,12	小：未処理	大	大	+硫黄	
4,13	中：ディンプル+ブラシ	小	中	+硫黄	
5,14	中：ディンプル+ブラシ	中	大	ベース	
6,15	中：ディンプル+ブラシ	大	小	+リン	
7,16	大：ディンプル	小	大	+リン	
8,17	大：ディンプル	中	小	+硫黄	
9,18	大：ディンプル	大	中	ベース	

3.5 実験結果

圧力波形面積の変化が特徴的な実験の結果を、図12～図14に示す。図12の一般的な生産条件に近い実験No1では、ショット数の増加に伴い波形面積が増加する結果となった。1ショット中の波形をみるとショット数の増加に伴い、圧力ピークに達した以降の推移で差が生じており、ショット数が多くなるほど高い圧力がカシメパンチにかかり続けていることが分かる。

次に、図13の加工油の粘度、油量が増加した条件（実験No3）では、0ショットから1000ショットにかけては波形面積がNo1同様に増加しているものの、それ以降は面積の変化が小さい結果となった。加工油の粘度の増加で接触状態が改善したものと考えられる。

最後に、図14の加工油の粘度は上げずにディンプルを付与した条件（実験No7）では、ショット数が増加しても

波形面積が変化しない結果となった。この結果より、パンチ表面に微細な凹凸を付与することが接触状態の改善に有効であることが示された。

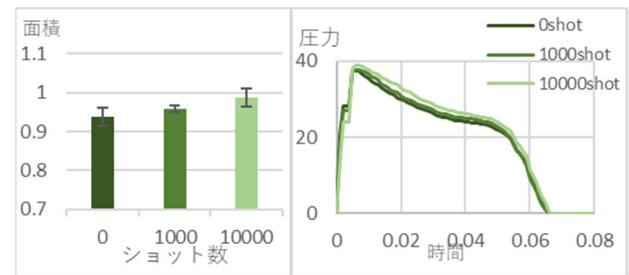


図12 実験No1の波形面積と圧力波形

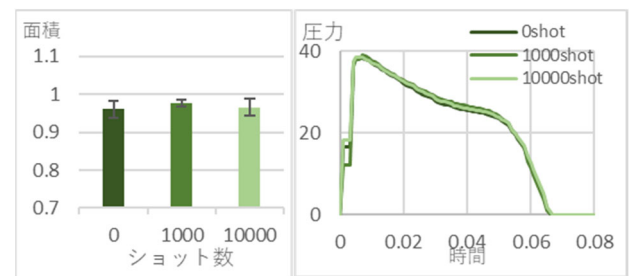


図13 実験No3の波形面積と圧力波形

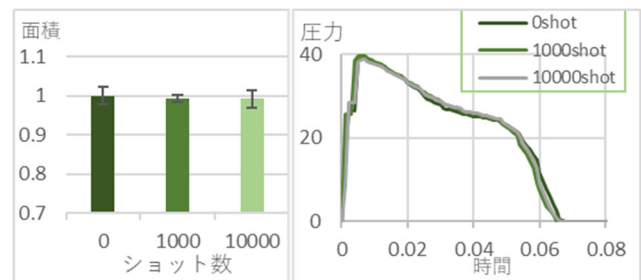


図14 実験No7の波形面積と圧力波形

全ての実験結果をもとに算出したSN比と感度の要因効果図を図15、図16に示す。今回の検証においては、SN比が大きい水準で、誤差因子として選択した丸平、角平パンチのばらつきを小さくできることから、パンチ形状に影響されないロバストな条件となる。一方、基本機能の傾きを小さくすることで圧力変化の少ない良好な条件となることから、感度は小さい水準を選択することが有効となる。一般にモーターコア金型においてはカシメパンチの先端形状が混在することはないため、丸平、角平におけるばらつきを抑えることよりも圧力変化を小さくすることが有効であると考え、感度優先で水準を選択した。それぞれの図中に、現行条件と感度を優先して検討した最適条件の水準を示す。表面粗さについては、表面粗さの低い滑らかな表面よりも、ディンプルを付与した表面の方が微細な凹部が油溜まりとして機能して摺動性が向上するものと推察される。また、加工油の粘度と、油量は高い水準が摺動性の向上に有効であった。

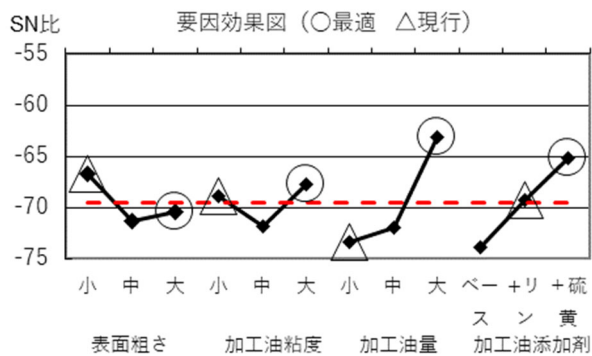


図 15 要因効果図：SN 比

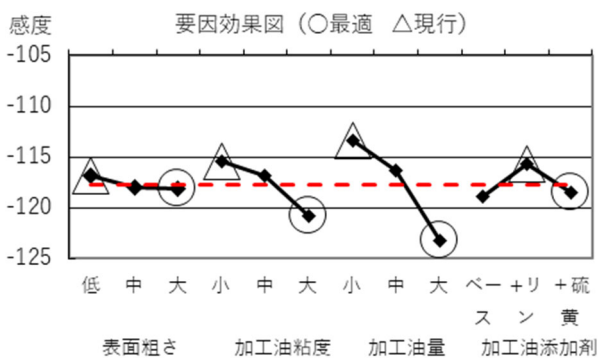


図 16 要因効果図：感度

3-6 確認実験

本検証の確からしさ、再現性を確認するため、要因効果図より選定した現行条件、最適条件による確認実験を実施した。また、感度を優先して選定した最適条件において、加工油動粘度、加工油量が一般的な生産条件から乖離した条件であったため、生産性を考慮した比較条件を追加して3条件で確認実験を実施した。実験条件を表3に示す。

表 3 確認実験の条件

	表面粗さ	加工油動粘度	加工油量	加工油添加剤
現行条件	小：未処理	小	小	+リン
最適条件	大：ディンプル	大	大	+硫黄
比較条件	中：ディンプル+ブラシ	中	中	+硫黄

確認実験の結果から計算した現行条件に対する利得を表4に示す。推定値に対し、確認値がやや減少したものの、

表 4 現行条件に対する利得

ゼロ点比例式		感度	
		推定値	確認値
	現行条件	-108.31	-97.52
	最適条件	-127.70	-109.77
	比較条件	-116.74	-101.57
利得	最適対現行	-19.38	-12.25
	比較対現行	-8.42	-4.04

実験の再現性が高く最適条件、比較条件において効果を確認することができた。

図 17 に確認実験後のカシメパンチの摩耗状況を示す。図より現行条件で見られるエッジ近傍の摩耗が比較条件、最適条件で減少していることが分かる。図 18 にカシメパンチの摩耗量を示す。結果より最適条件と比較条件で摩耗量が減少し、最適条件で最も摩耗量が小さくなった。

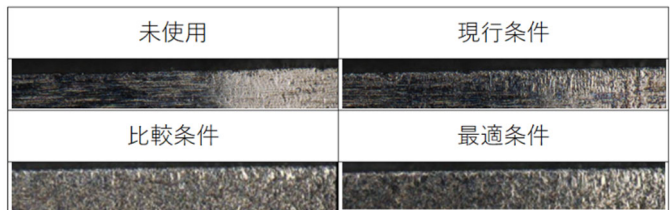


図 17 確認実験におけるカシメパンチ摩耗状況

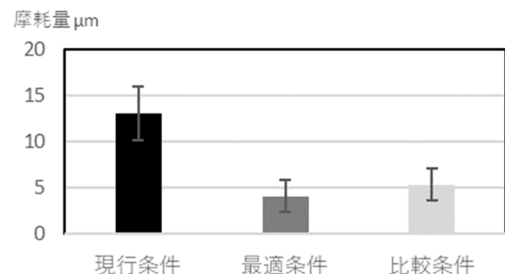


図 18 確認実験におけるカシメパンチ摩耗量

以上より、加工圧力の変化を抑制する対策を施すことでパンチの摩耗量を低減できるという結果が得られた。成形中の圧力波形面積が変化する理由としては、パンチのエッジ近傍で摩耗が進行することで切れ味が劣化し、せん断面の形成に至るまでの成形が徐々に引きちぎるような形態に遷移したためと考えられる。これを確認するためにダボ穴におけるダボ深さに対するせん断面（壁ストレート長）の割合を計測した。計測結果を図 19 に示す。この結果より、パンチの摩耗量に対応して壁ストレート長が増減し、摩耗量が少なければ壁ストレート長が長い（ダボ穴の品質が良い）ことが確認できた。このことから、パンチの摩耗に伴って電磁鋼板のせん断の形態が変化し、パンチに作用する圧力が変化したと考えられる。

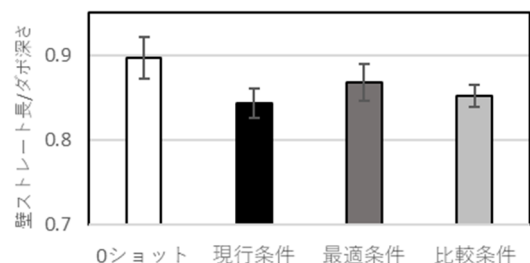


図 19 確認実験における成形シート品質

通常のモーターコア生産では低粘度の加工油が使用される。これは揮発性の高い加工油を使用することで、後工程での洗浄を不要にし、トラブル（溶接時の発火、施工不

良等)を抑えるためである。しかし、ダボカシメのような局所的な成形を行う部分では、油切れによってパンチの摩耗が促進されやすい状況になっていると考えられる。これに対し、今回の検証で効果が認められた大きい加工油粘度、大きい加工油量、ディンプルはいずれも加工油の保持性を高める要因であり、これによりパンチと電磁鋼板の接触状態が良好に保たれ、パンチの耐摩耗性の向上に有効であったと考えられる。実際の生産現場では、前述したような耐摩耗性以外の影響も考慮して生産条件を検討する必要がある。低粘度の加工油とディンプルの最適な組み合わせや新しい加工油供給方式の検討といったソリューションの組み合わせが、実際の生産現場では有効な手段となる。

4. 結言

本研究では、検証金型による実験を実施することでカシメパンチの耐摩耗性に対する効果を検証した。実験の結果、表面改質によるパンチ表面の硬度の上昇や、表面性状の変更(ディンプル)、加工油の粘度など、加工油の保持性を高めることでパンチの耐摩耗性が飛躍的に向上することが明らかとなった。実際の生産現場では後工程の工数やトラブルにも配慮した生産条件とする必要がある。ここで得られた知見をもとに、素材／加工油／金型製作／表面処理に関わる金型製造関連企業と大学との共創活動が継続さ

れることに期待したい。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2022 年度の研究開発助成(AF-2022010-B2)を受けて、一般社団法人型技術協会の表面処理加工技術に関する調査研究委員会の活動として実施されたものである。調査研究委員会に参画された企業および大学の皆様の多大なご助言・ご協力のもと実施することができました。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) <https://www.kuroda-precision.co.jp/products/lp/glue-fastec.html>, 2025. 4. 11 閲覧
- 2) 天野智子, 佐藤慎一郎, 田中裕介: 前処理による ZERO- I コーティングの冷間工具鋼表面への最適化被覆事例, 型技術, Vol35, No7P80-81, (2020)
- 3) 南裕太, 福井茂雄, 石田公哉: プレス金型向け PVD 処理に適した下地処理(窒化, ピーニング, 磨き)の研究, 第 30 回型技術ワークショップ, p. 66-67, (2024)
- 4) 鈴木健太, 安楽健次, 中山光一, 澤本健, 松本昂大, 肝付成哉, 長迫広大, 福園優太, 宮川英理也: バリ撲滅に向けたバンパー金型 P L 面高耐久化技術構築, 第 29 回品質工学研究発表大会, p. 42-45, (2021)