



車載および電子部品の小型軽量化に寄与する ダイヤモンド製異形ダイス

Shaped Dies Made of Diamond for Smaller and Lighter Automotive and Electronic Components

大野 暁人*
Akihito Ono

関 裕一郎
Yuichiro Seki

木村 公一郎
Kouichiro Kimura

深谷 朋弘
Tomohiro Fukaya

河原 宏紀
Hiroki Kawahara

近年、車載用モータや電子部品においては、小型軽量化およびエネルギー効率向上への要求が一層高まっている。これに対応する有効な手段の一つが、巻き線の占積率向上であり、異形断面線材の活用が注目されている。異形断面線材の製造には異形ダイスが不可欠であるが、車載用途における高精度化および電子部品の微細化に対応した極小径の異形ダイスの実現は既存技術では困難な領域であった。そこで、当社ではダイヤモンド製異形ダイスの開発によって、車載用途では穴径公差 $\pm 1\mu\text{m}$ の高精度化と表面粗さ $Ra10\text{nm}$ のダイス内面の高品質化を達成した。電子部品用途では $30\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ クラスの小径異形ダイスの量産化を実現するとともに、さらにCAEと実機伸線を組み合わせた設計手法を確立した。本稿ではこれらについて報告する。

In recent years, demands for miniaturization and improved energy efficiency in automotive motors and electronic components have intensified. One effective approach to these demands is increasing the space factor of coil windings by utilizing wires with non-circular cross-sections, which require shaped dies. However, achieving high precision for automotive applications and realizing ultra-small shaped dies suitable for miniaturized electronic components has been challenging with existing technologies. Therefore, A.L.M.T. Corp. has developed shaped dies made of diamond, achieving a high-precision hole diameter tolerance of $\pm 1\mu\text{m}$ and high-quality inner surfaces with surface roughness of $Ra 10\text{ nm}$ for automotive use. For electronic components, A.L.M.T. Corp. has mass-produced ultra-small shaped dies with hole diameters ranging from $30\mu\text{m}$ to $100\mu\text{m}$, and established a design methodology combining computer-aided engineering (CAE) simulation with actual wire drawing experiments. This paper reports these developments.

キーワード：異形ダイス、ダイヤモンド、伸線、モータコイル、小型軽量化

1. 緒 言

伸線加工とは、ダイスと呼ばれる工具の穴に金属線材を通し、引き抜くことで所望の径・断面形状に成形する加工法である^{(1),(2)}。電線・ばね材・医療線・ボンディングワイヤなど、幅広い産業分野に用いられる加工法である。このプロセスに用いられるダイスのコア素材として高い性能を発揮するのがダイヤモンドである。ダイヤモンドはその極めて高い耐摩耗性や硬度、熱伝導性によって、長寿命かつ高精度な伸線加工を可能にする。当社は、このダイヤモンドダイスの製造において高い技術力を有する。世界トップシェアメーカー群の一つとして、高品質なダイヤモンドダイスを供給することで産業インフラの発展に貢献してきた。

近年、自動車の電動化や電子機器の高機能化が急速に進む中、車載モータや電子部品に対する小型軽量化・エネルギーの高効率化の要求はますます高まっている。異形断面線材を用いた巻き線の占積率^{*1}向上が着目されており⁽³⁾、その製造に用いる異形ダイスに対する要求水準も急速に高まっている。こうした背景のもと、車載モータ向けには異形ダイスの穴径精度および内面品質の更なる高精度化・高品位化が求められている。また、電子部品向けには既存技術では対応が困難な極小径（穴径 $100\mu\text{m}$ 未満）の異形ダ

イスへのニーズが生じている。さらに、異形断面線材の伸線加工で必要となる複数枚ダイスの最適な組合せ設計もまた高度な技術力を要する課題である。

以上を踏まえ当社ではダイヤモンド製異形ダイスの開発に取り組んできた。本稿では、車載用途向けの高精度・高品位異形ダイス、電子部品向けの小径異形ダイス、およびCAE^{*2}と実機伸線を組み合わせた設計手法の確立について紹介する。

2. 異形ダイスとは

2-1 丸ダイスと異形ダイスの違い

伸線加工に用いられるダイスは、その穴の断面形状によって大きく2種類に分類される。穴断面が真円のものを丸ダイス、四角形・六角形などの円形以外の断面形状を持つものを異形ダイスと呼ぶ（図1）。

ダイスの中では丸ダイスが主流であり、幅広い用途に使用されている。穴が丸い形状であるため加工時の応力分布が均一になりやすく、安定した伸線加工が実現しやすい。一方で異形ダイスは穴の断面が多角形であるため、加工中の材料流動が複雑になり形状精度の確保や表面品質の維持

が技術的に難しい。特に角部（コーナ）の形状制御は困難であり、高精度な異形ダイスの製造には高い加工技術と品質管理が不可欠である。

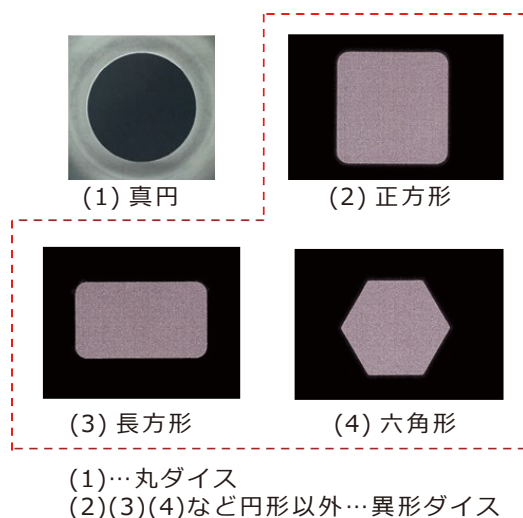


図1 様々なダイス穴形状

2-2 異形断面と占積率の関係

丸線を用いてコイルを形成した場合、丸線と丸線の間には空隙が生じ、占積率が低下する。これに対し、四角形や六角形などの異形線を用いた場合、隣接する線材どうしが面で接触するため、空隙を大幅に低減し占積率を向上させることができる（図2）。

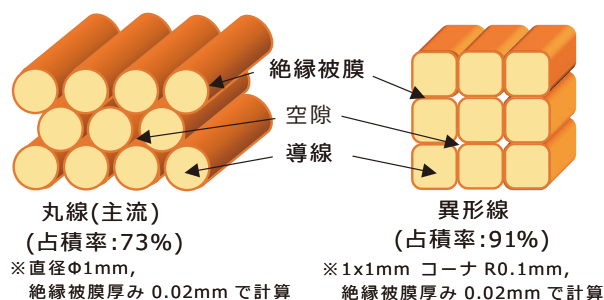


図2 コイル形成時の丸線と异形線の占積率の比較

2-3 車載モータ・電子部品への応用

占積率の向上は、車載モータおよび電子部品の性能向上に対して以下の効果をもたらす。

車載モータへの応用においては、占積率の向上によってモータコイルの電気抵抗が低下し、同一出力を得るのに必要な電流が減少する。また、同等の出力性能をより小さな

コイル体積で実現できるため、モータ自体の小型軽量化に寄与する⁽⁴⁾。HEVやEVにおいては、駆動モータの小型軽量化が航続距離や車両性能に影響するため、この効果は重要な意味を持つ。

電子部品への応用においては、インダクタやトランスなどの磁性部品において、同一インダクタンス値をより小型のコアで実現できるようになる。電子部品の高機能化・小型化が加速する中、部品の小型化への貢献は製品競争力に直結する。

3. 車載用モータ向け异形ダイスの開発

当社では車載用モータ向け异形ダイスの高品位化に向け、独自の研磨技術を開発した。本章では、ダイス内面性状および穴径精度の向上、ならびに実際の伸線加工における効果検証の結果を示す。

3-1 内面性状・穴径精度の向上

ダイス内面の表面粗さは、伸線時において線材の表面品質や摩擦抵抗に大きな影響を及ぼす。内面粗さが大きい場合、伸線時に線材表面への微細なキズが転写され、断線のリスク増大や線材品質の低下につながる。また、穴径精度はダイスを通じた後の線材断面寸法を直接決定するパラメータであり、従来の异形ダイスでは製造上の困難から穴径公差は数μmオーダーが一般的であった。

当社では、独自の研磨技術の開発によって、これら2つの課題を同時に解決した。研磨工程における加工制御の精度向上が、結果として内面性状と穴径精度の双方に寄与した。内面性状については、ダイス内面を鏡面レベルに仕上げることに成功した。図3に従来品と改良品のダイス内面の比較写真を示す。従来品では内面に微細な凹凸が確認されるのに対して、改良品では平滑な鏡面状態が確認できる。表面粗さは従来品Ra61nmに対し、改良品ではRa10nmとなっており、大幅な平滑化を実現した。また、穴径精度

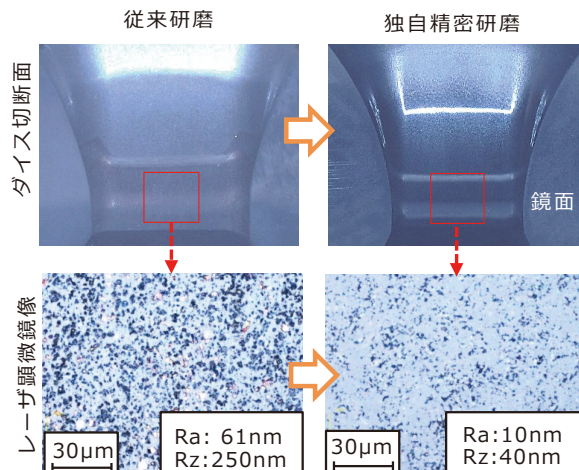


図3 异形ダイス内面比較

については、同研磨技術の高度化によって穴径公差 $\pm 1\mu\text{m}$ への対応を実現した。これにより、伸線後の線材寸法のばらつきが抑制され、コイル占積率の安定化およびモータ特性の均質化に貢献する。

3-2 伸線結果

ダイス性能向上の効果を実際の伸線加工で検証するため、改良品異形ダイスを用いた伸線試験を実施した。表1に伸線条件を示す。

図4に従来品と本製品を用いて伸線した線材の表面写真を示す。従来品ダイスを使用した線材表面には微細なキズが観察されるのに対し、本製品を使用した場合は平滑な表面が得られている。図5に線材の粗さ比較データを示す。従来品使用時はRa114nmに対し、本製品使用時にはRa39nmを示しており、線材表面品質の大幅な改善が確認された。表面の平滑化によって、線材表面に形成する絶縁被膜が均一化され、絶縁信頼性の向上が期待できる。以上より、当

表1 伸線条件

伸線機	伸線機	ドローイングベンチ
	伸線速度	20m/min
	ダイス個数	1個
ダイス	ダイス穴径	2.000×3.000mm コーナR0.3mm
	リダクション角度	16±2°
	ベアリング長さ	0.6mm
	ダイヤ素材	PCD ^{*3}
母線	材料	純銅
	母線径	2.200×3.200mm

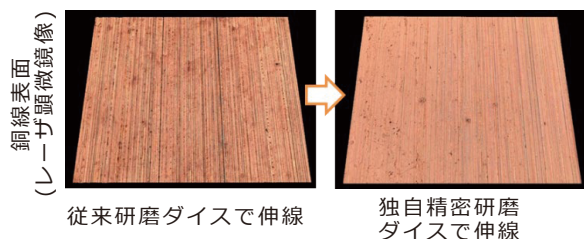


図4 ダイス伸線後の銅線表面の比較

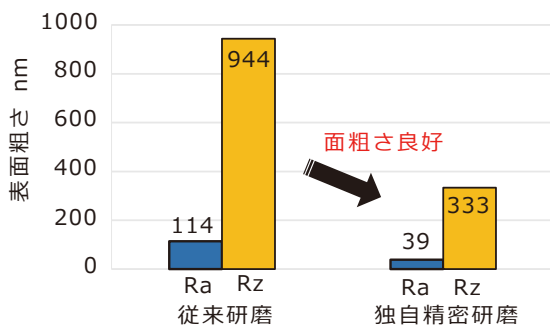


図5 伸線後銅線表面粗さの比較

社独自の研磨技術によってダイス性能の向上が実際の伸線加工における線材品質の改善に貢献することが実証された。

4. 電子部品向け小径異形ダイスの開発

4-1 小径異形ダイスの技術課題

2-3節に述べた電子部品の小型化要求のため、穴径100 μm 未満の小径異形ダイスへのニーズが高まっている。しかし、異形ダイスの穴径を微細化するにあたっては、大きく2つの技術課題が存在する。

第1に、穴径の縮小に伴い、所望の異形断面形状を精度良く形成することが格段に困難になる。第2に、コーナ形状の制御において、穴径が小さくなるほどコーナの微細化および均一化が難しくなる。コーナ形状が不均一な場合、伸線時の応力集中により線材の断線や形状不良が生じるリスクが高まる。従来技術ではこれらの課題への対応が困難であり、穴径100 μm 未満の領域における異形ダイスの製品化には技術的なハードルが存在した。

4-2 小径異形ダイスの実現

当社では独自の微細加工技術を開発し、穴径30 μm ～100 μm の小径異形ダイスの製品化に成功した。これは従来製品化が困難であった穴径領域への対応である。

図6に製品化した小径異形ダイスの内面SEM像を示す。

所望の断面形状が高精度に形成されていることを確認できる。また、コーナ部も最小コーナR5 μm と微細に形成できた。これらの結果から、当社の微細加工技術によって、小径領域においても形状精度およびコーナ品質を確保できることが実証された。

本製品によって、従来は丸線での対応に限られていた極細径領域においても異形断面線材の伸線加工が可能となった。これにより、電子部品の更なる小型化・高機能化に向けた新たな選択肢を提供できると考える。

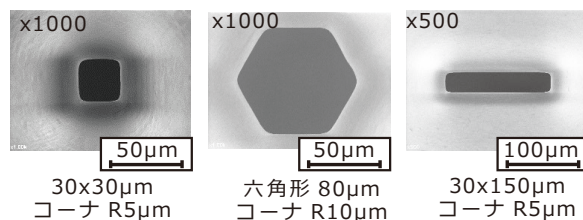


図6 小径異形ダイスの試作例

5. CAEを活用した異形ダイスの組合せ設計

3章および4章では、個々のダイスの加工品質向上について述べた。一方、異形断面線材の伸線加工では、丸線から所望の異形断面へ一度に成形することは困難であり、複数枚のダイスを用いて段階的に成形するのが一般的である。

この際、各ダイスの減面率^{※4}や形状をどのように設定するかという組合せの設計が、線材の形状精度や伸線の安定性を左右する重要な要素となる。従来、この組合せ設計は技術者の経験や試作の繰返しに依存する部分が大きく、最適条件の探索に多大な工数を要していた。当社ではCAEを活用し、最適な組合せ条件を導出する設計手法を確立した。本章ではその取り組みについて述べる。

5-1 解析手法の概要

本検討では、弾塑性有限要素解析を用いて伸線加工のシミュレーションを行った。解析モデルでは、ダイスを剛体、線材を弾塑性体としてモデルを構成した。ダイスと線材の間の摩擦にはクーロン摩擦モデル^{※5}を適用し、摩擦係数は実加工条件に基づいて設定した。評価指標として、伸線後の線材のコーナR測定値および引拔力を用いた。

5-2 CAEによる組合せ条件の最適化

本検討では、線径45μm・コーナR10μmの異形断面線材をターゲットとし、2枚のダイスを用いた伸線加工を想定した。組合せ設計において減面率に着目した理由は、減面率が伸線加工に大きく影響を及ぼすパラメータであり、成形性と引拔力の双方に影響するためである。本検討では、他のパラメータ（ダイス角度・ベアリング長さなど）を固定したうえで、1枚目および2枚目のダイス減面率を等しい値に設定した。これを5～30%の範囲で変化させ、その影響を系統的に評価した。

図7に減面率とコーナRの関係を示す。減面率の増大に伴いコーナRは減少する傾向が確認された。これは減面率が

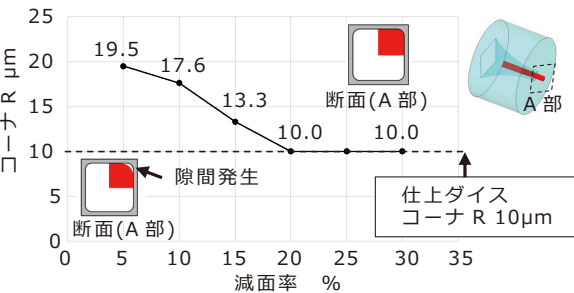


図7 減面率によるコーナRの変化

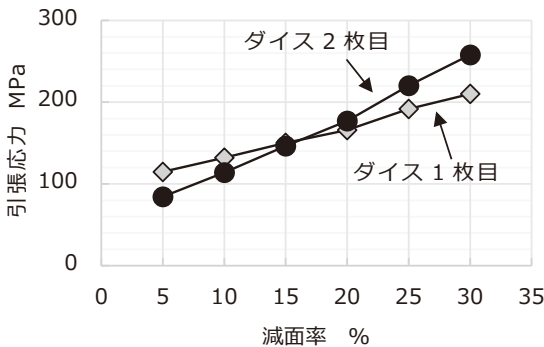


図8 減面率による引張応力の変化

大きいほど材料の塑性流動が促進され、ダイス穴形状への材料の充填性が向上するためと考えられる。一方、図8に減面率と引拔力の関係を示す。減面率の増大に伴い引拔力も増加する傾向が確認された。引拔力の過度な増大は線材の断線リスクを高めるため、減面率を大きくすることには上限がある。

以上の結果から、コーナRがターゲットに近い値を示しつつ、引拔力が安定した伸線の可能な範囲に収まる条件として、減面率20%を最適条件と判断した。

5-3 伸線加工による検証

5-2節でCAEにより導出した組合せ条件の妥当性を検証するため、実機による伸線試験を実施した。表2に伸線条件を示す。

図9に伸線後の線材のSEM像を示す。表面性状が良好な小径異形線の伸線に成功した。また、図10にコーナRの測定結果を示す。コーナR実測値は9.6μmであり、ターゲット値10μmおよびCAE解析での予測値10μmのいずれに対

表2 伸線条件 (45×45μm 線の伸線)

伸線機	伸線機	ノンスリップ
	伸線速度	100m/min
	バックテンション	1cN
	潤滑剤	鉱油系潤滑剤
ダイス	仕上ダイス	45×45μm コーナR10μm
	中間ダイス	50×50μm コーナR10μm
	リダクション角度	16±2°
	設定減面率	20%
	ダイヤ素材	BLPCD
母線	材質	純銅
	母線直径	Φ62μm

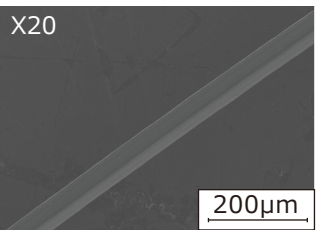


図9 伸線後線材 (45×45μm)

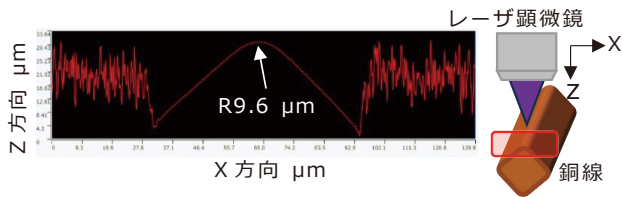


図10 伸線後銅線 コーナ部測定結果

しても良好な一致を示した。伸線中の断線等の不具合も発生せず、安定した伸線加工が実現できた。

以上より、CAE を活用した組合せ設計手法の有効性が実機伸線によって実証された。本手法を用いることで、従来は試作の繰り返しに依存していた組合せ設計を効率化でき、多様な異形断面形状への対応が可能になると考える。

6. 結 言

本稿では、ダイヤモンド製異形ダイスの開発として、車載用モータ向けの高精度・高品位異形ダイス、電子部品向けの小径異形ダイス、および CAE を活用した組合せ設計手法の確立について述べた。得られた成果を以下に要約する。

車載用モータ向け異形ダイスでは、独自の研磨技術の開発により、ダイス内面の鏡面化および穴径公差 $\pm 1\mu\text{m}$ を実現した。伸線試験においても線材表面品質の大幅な改善が確認され、コイル占積率の安定化およびモータ特性の均質化への貢献が期待できる。

電子部品向け小径異形ダイスでは、独自の微細加工技術により、従来実現されていなかった穴径 $30\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ の異形ダイスの製品化に成功した。SEM 観察により、小径領域においても形状精度およびコーナ品質が確保されていることを確認した。

CAE を活用した組合せ設計では、弾塑性有限要素解析を用いて減面率がコーナ R および引抜力に及ぼす影響を系統的に評価し、最適な組合せ条件を導出した。実機伸線による検証でも CAE 予測値と良好な一致を示し、本設計手法の有効性が実証された。

今後は、異形ダイスのさらなる高精度化・微細化に取り組むとともに、CAE 設計手法の適用範囲を拡大し、多様な断面形状や加工条件への対応力を強化していく所存である。これらの技術を通じて、自動車の電動化や電子機器の高機能化を支える産業基盤の発展に貢献していきたい。

用 語 集

※1 占積率

コイルやモータのスロットの断面積のうち、電流が流れる導体が占める面積の割合を示す指標。

以下の式で定義される。

$$\text{占積率 (\%)} = (\text{導体断面積総和} \div \text{スロット断面積}) \times 100$$

※2 CAE

Computer Aided Engineering (コンピュータ支援工学) の略語。製品設計・開発においてシミュレーションを用いて性能や挙動を事前に評価・検証する技術の総称。

※3 PCD

Polycrystalline Diamond (多結晶ダイヤモンド) の略語。ダイヤモンド粉末を金属バインダと一緒に高圧・高温下で焼結一体化した材料。

※4 減面率

伸線加工においてダイス通過前後の線材断面積の減少割合を示す指標。減面率が大きいほど 1 パスあたりの成形量が大きくなるため、材料の塑性流動が促進され成形性が向上する一方、引抜力が増加し断線リスクが向上。

以下の式で定義される。

$$\text{減面率 (\%)} = ((A_0 - A_1) \div A_0) \times 100$$

A_0 : ダイス通過前の断面積

A_1 : ダイス通過後の断面積

※5 クーロン摩擦モデル

接触する 2 物体間の摩擦力が、接触面に垂直な抗力に比例するとする摩擦のモデル。

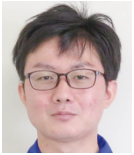
・BLPCD は(株)アライドマテリアルの登録商標です。

参 考 文 献

- (1) 一般社団法人日本塑性加工学会, 「引抜き - 棒線から管までのすべて -」, pp.1-18 (2017)
- (2) 荒井達雄 ら, 「ダイヤモンド工具マニュアル」, ダイヤモンド工業協会, pp.130-140
- (3) Yu Zhao, Dawei Li, Tonghao Pei, Ronghai Qu, "Overview of the Rectangular Wire Windings AC Electrical Machine," CES Transactions on Electrical Machines and Systems, Vol.3, No.2, pp.160-169 (June, 2019)
- (4) P.S.Ghahfarokhi, "Hairpin Windings for Electric Vehicle Motors: Modeling and Investigation of AC Loss-Mitigating Approaches," Machines, Vol.10, No.11, 1029 (2022)

執 筆 者

大野 暁人*：(株)アライドマテリアル 主務



関 裕一郎：(株)アライドマテリアル マネージャー



木村公一朗：ESTEVE'S GROUP CTO



深谷 朋弘：(株)アライドマテリアル 部長



河原 宏紀：(株)アライドマテリアル



*主執筆者