

鍛造による部品締結用突起を有するフィン成形技術の開発

松田豪彦*, 桑原田聡*, 堀之内悠介**

Development of Forging Technology of Fin with Protrusion for Fastening Products

Takehiko MATSUDA, Satoru KUWAHARADA and Yusuke HORINOUCI

放熱用のフィンとかしめ加工を行う突起の成形を目的に、アルミニウム合金円柱材料を用いてフィンと突起を同時に成形する鍛造の計算機シミュレーションと実試作を行った。試作でフィン先端部に欠肉が発生したため、その対応策として、フィンの端面を追押しする工法を考案し、解析と試作により欠肉が減少することを確認した。また、鍛造で成形された突起については、かしめ加工を試み、部品結合が可能であることを確認した。結合強度は、従来のねじ締結よりも向上していた。

Keyword : 鍛造, 欠肉, フィン, かしめ, 結合

1. 緒言

県内の金属部品や機械・器具等を製造している企業では、複数ある金属部品同士の結合の多くに、ねじ締結を用いている。例えば、照明部品の放熱に用いるフィンの製造はアルミニウム合金の鋳造で行っており¹⁾、消費電力10W未満の照明ではフィンの数は1～5枚程である。図1に照明部品の組付け模式図を示す。鋳造でできたフィンは、基板を組み付ける板状部品と結合され、基板から出る熱を放熱するために使用される。結合は手作業によるねじ締結が行われており、生産性を向上させるためには手作業時間の短縮とねじの削減が求められている。また、鋳造による成形は材料を熔融させるためエネルギー消費が多く、品質的にも鑄巣の発生による不良の削減が難しい。

そこで、本研究では、フィンの成形に鍛造を適用し、部品の結合にねじ締結ではなくかしめの結合を用いることを試みた。図2に本研究の鍛造前後の材料と成形品の形状概略を示す。図に示すとおり、鍛造で円柱状の材料からフィンとかしめに用いる突起まで含めて成形を行った。従来の鋳造によるフィンの成形は、フィン先端角部まで成形されているが、鍛造の場合、フィン端部まで材料を流動させることは摩擦の増大や型内の空気の残留が起こり、フィン先端の欠肉発生が懸念される²⁾。そこで、本研究では欠肉の対策として鍛造後にフィン先端を追押し、端面形状を改善し欠肉を減少させることを試みた。

また、突起はかしめとして他部品と結合する際に圧縮加工する必要があるが、従来工法の鋳造で突起を成形した場合、鋳造用の材料は延性や韌性に劣り、圧縮加工に適さないため、かしめ加工は難しい^{3) 4)}。そこで、鍛造へ工法転

換することで、用いる材料が展伸材となり、圧縮加工が可能な材料となる。ただし、鍛造で材料にひずみが蓄積されると変形中に割れが発生し圧縮加工が難しくなることが懸念される⁵⁾。

本研究では、計算機シミュレーションによって相当ひずみ分布を調べ、鍛造やかしめ加工まで含めてひずみの蓄積を調べた。一度の鍛造でフィンと突起を同時に成形する一体成形を試み、実試作により詳細に工程を検証し欠肉対策の効果を確認した。次に、鍛造で得られた突起をかしめ加工し、部品の結合を行った。さらに、結合強度を調べ、従来のねじ締結と比較を行い、かしめの有効性を検証した。

2. 鍛造による成形性の評価

2.1 鍛造モデル

フィンと突起を成形する鍛造型のモデルを図3に示す。図中のダイスおよびパンチは1/4カット断面で表示している。加工対象となる材料は、直径20mm×高さ12mmの円柱形状のアルミニウム合金 (A6061) とした。材料は、ダイス内に装填し、上方からパンチが下降して、材料を加圧する構造とした。パンチ内には、後方押し出によって、1枚の

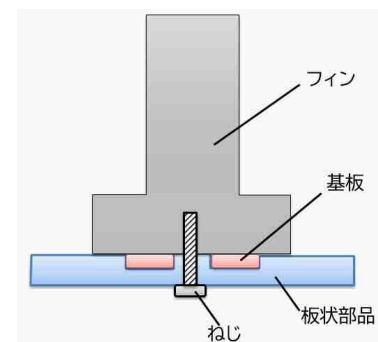


図1 照明部品の組付け模式図

* 生産技術部

** 生産技術部 (現 企画支援部)

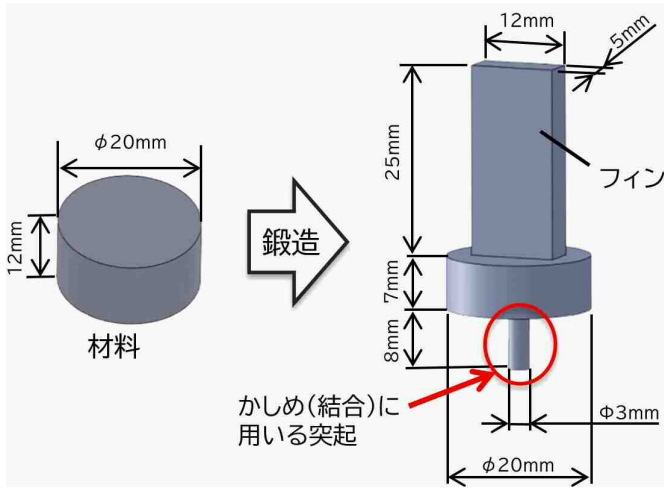


図2 鍛造前後形状の概略

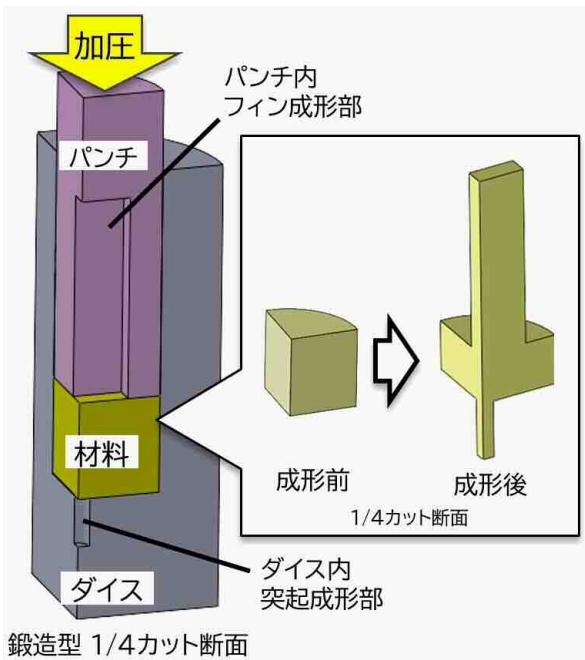


図3 鍛造型のモデル図

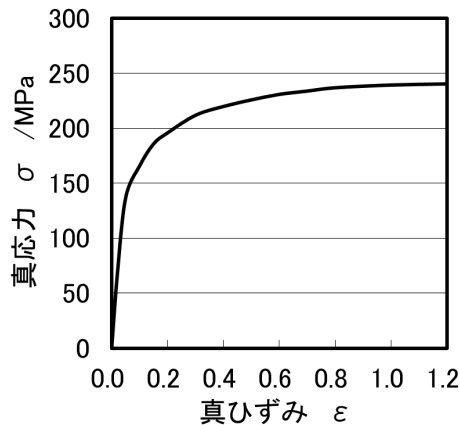


図4 A6061の変形抵抗曲線

フィンを成形する空間を設けており、フィン成形部の寸法は、幅12mm×厚み5mm×高さ25mmとした。ダイスには、前

方押しによって突起を成形する円柱状の突起成形部を設けており、突起成形部の寸法は直径3mm×長さ8mmとした。

2.2 解析条件

計算機シミュレーションを用いた鍛造解析を行うための解析条件として、材料(A6061)は剛塑性体とし、ダイスおよびパンチは剛体と仮定した。解析に用いる材料の変形抵抗は、図4に示す変形抵抗曲線を用いた。摩擦係数は1.2、パンチ速度は1.0mm/s、材料温度は20℃とし、パンチストロークは5mmとした。解析には、商用の有限要素法鍛造解析ソフト(SFTC社製,DFORM-3D)を使用した。

2.3 鍛造解析結果および考察

解析結果におけるパンチ荷重とパンチストロークの関係を図5に示す。加工初期に荷重が増加し、パンチストローク1mm以降は200kN程を保ちながら成形が進み加工終期に荷重が急激に増加した。図中に付した番号における成形品形状の1/4カット断面を図6に示す。パンチが下降するにしたがって、フィンが上方に向かって押出された。それと同時に、下方に突起が押出された。図6中④において、フィン先端がパンチ内部のフィン成形部の上端面に到達し、突起の先端も突起成形空間の下端面に到達した。このときのフィン先端は、円弧状になって欠肉があるが、ここから図6中⑤に至るまでに荷重が急激に上昇し、図6中⑤に示すとおりフィン先端部に材料が流入し欠肉は無くなった。パンチ荷重は図6中⑤で最大となり412kNであった。

図6中⑤における成形品1/4カット断面の相当ひずみ分布状態を図7に示す。フィンの先端付近では相当ひずみは小さく0.5程となり、フィンの下半分外面側では相当ひずみが大きくなり最大で3.5程となった。これは、先端部は加工初期に押出され、材料の流動が少ないことと、下半分は、加工が進み材料流動が多くなったことが要因と思われる。一方、突起については、先端部で相当ひずみは小さく0.6程であったが、先端部以外においてはフィンほど相当ひずみは大きくならず、突起付け根部で最大で2.5程であった。先端部は材料流動が少なく、先端部以外でもフィンほど材料流動が多くなっていないと考えられ、相当ひずみが大きくならなかったと思われる。図8に図6中③における速度ベクトル分布を示す。材料の流動はフィン側が早くなっており、突起側はフィン側に比べ遅いことがわかる。このように、速度の違いから材料流動の差が生じ、フィン下半分外面側のひずみは大きくなったと考えられる。

本解析の結果では、成形された突起の先端部は、相当ひずみが0.6程であり、図4の変形抵抗曲線ではさらにひずみが大きくなるまで変形させることが可能と思われる。

2.4 鍛造の試作と試作結果および考察

試作用金型を製作し、鍛造試作を行った。鍛造試作の概要を図9に示す。金型は、ダイスおよびパンチともに合金

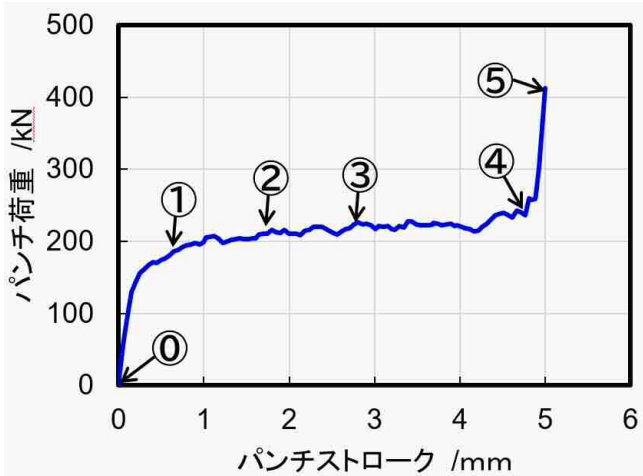


図5 パンチ荷重－パンチストロークの関係

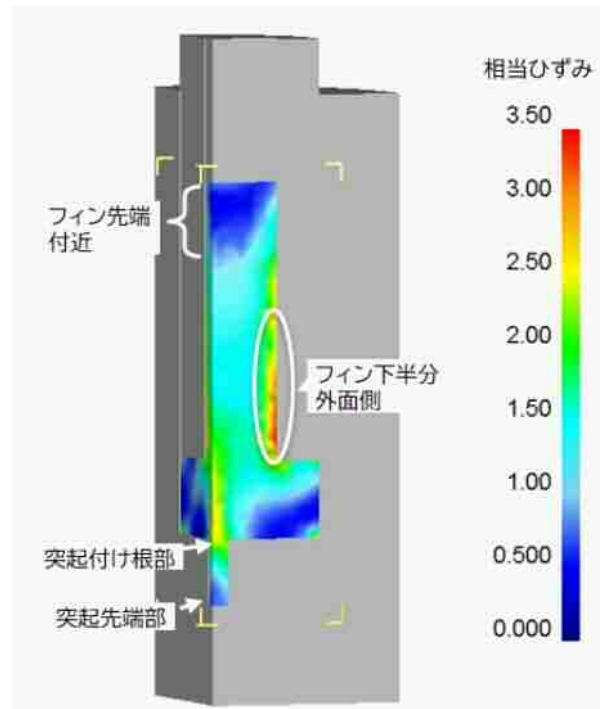


図7 成形品内部の相当ひずみ分布

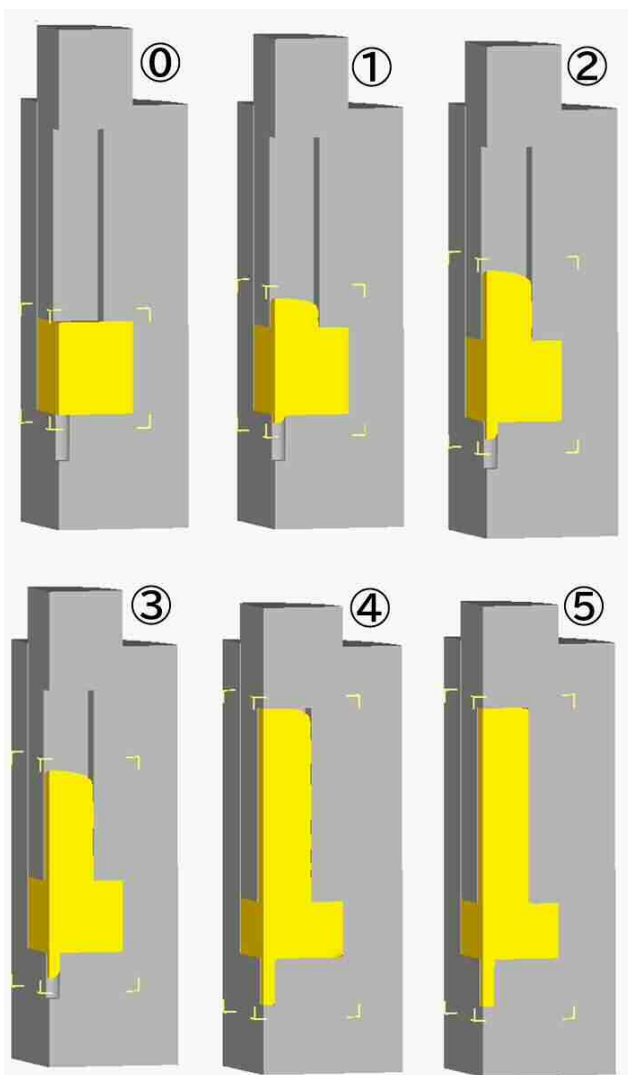


図6 逐次加工過程の成形品形状

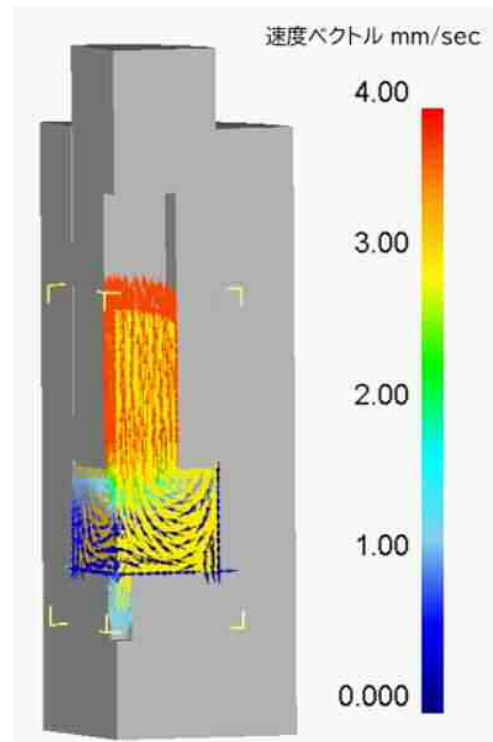


図8 成形品内部の速度ベクトル分布

工具鋼SKD11で製作した。フィン成形空間と突起成形空間の寸法は、先述の鍛造モデルと同様である。金型内部に装填する材料には、直径20mm×高さ12mmの円柱状アルミニウム合金A6061を350℃で2時間加熱後に炉冷した焼鈍材を用いた。なお、焼鈍前後においてマイクロビッカース硬さ計

(株アカシ製, MVK-H1)を用いてビッカース硬さを測定した。焼鈍前硬さはHV102であり、焼鈍後硬さはHV64であった。金型を油圧プレス機(株神藤金属工業所製, ASFA-70)に設置し、室温においてパンチ速度1.0mm/sの条件でパンチを下降させて鍛造試作を行った。材料の成形前と成形後の形状は図9中に示すとおりとなった。突起は良好な成形状態であった一方、フィンは先端が円弧状になって成形され欠肉が生じていた。

実験で測定したパンチ荷重とパンチストロークの関係を図10に示す。解析で得られた荷重とパンチストロークの関係も比較として図10中に示す。鍛造試作では、最大パンチストロークが解析結果よりも長くなり5.8mmに達しているが、これは金型や材料との隙間および工具等の弾性変形の影響によるものと考えられる。図10中に記した番号①～④のパンチストロークにおける成形品形状を図11に示す。①～④間において、フィンが上方に押出されはじめているが、突起の押しはわずかであった。加工初期にパンチ荷重が増加し、①ではパンチストローク1.7mmで荷重は180kNに達した。①～③間は、フィンと突起の押しが同時に進む過程であった。パンチストロークが2.2mm増加したのに対しパンチ荷重は95kN増加した。この間でのパンチストロークに対するパンチ荷重増加比は43.2kN/mmであった。荷重増加率が大きいと金型や成形品の応力増加が進んで成形しにくくなり、逆に小さいと金型や成形品への応力は低く成形しやすい。③～④の間は、突起の長さが2倍以上に急増した。突起部の長さは8mmに達し成形が完了した。パンチ荷重は430kNに達した。この間、パンチストロークが2.1mmの増加に対しパンチ荷重は155kN増加し、荷重増加比は73.8kN/mmであった。加工終期にフィンや突起の先端が金型の内壁に接触することによって荷重が増加し、荷重増加率も大きくなったと考えられる。

解析結果では、加工初期に荷重が増加し、パンチストローク1mm以降は200kN程を保ちながら成形が進み、加工終期に荷重が急激に増加していたが、鍛造試作では加工初期の荷重の増加は解析結果に比較して少なく、パンチストロークの増加とともに荷重も増加した。また、解析結果では、加工終期の荷重の急上昇でフィンの端面角部まで完全に成形される結果となっていたが、鍛造試作では480kNまで加圧しても、荷重だけが急増しストロークは変わらず成形は

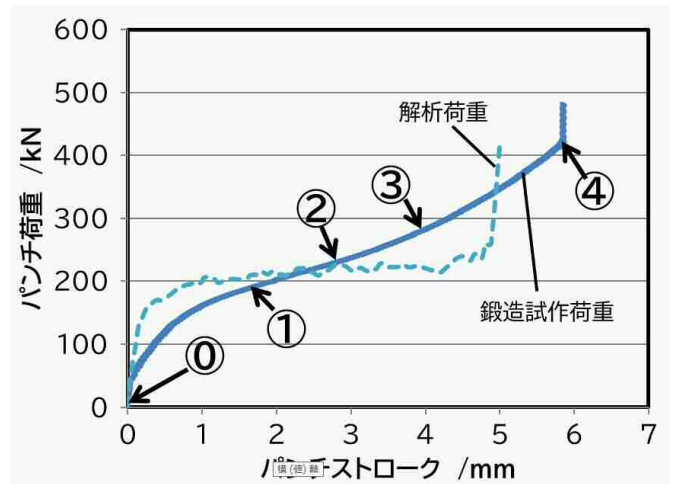


図10 パンチ荷重ーパンチストロークの関係



図9 鍛造試作の概要

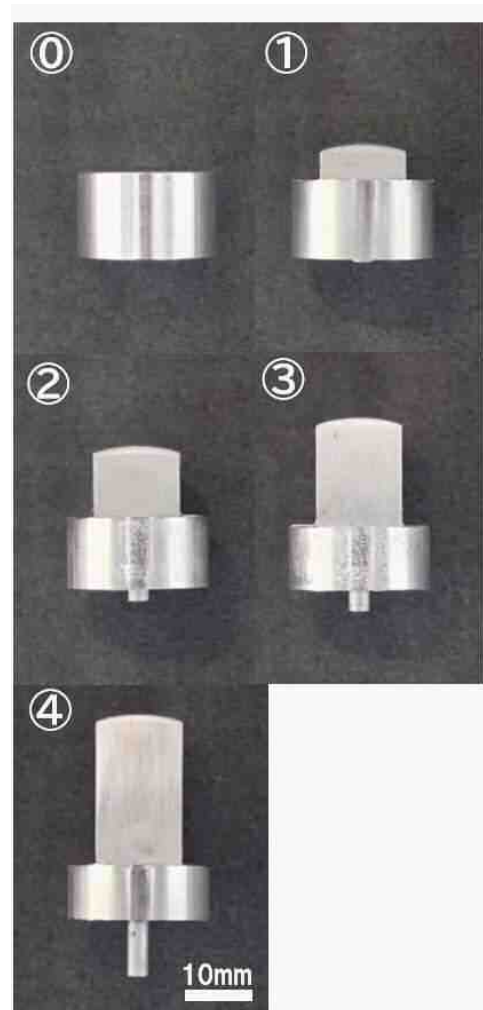


図11 逐次加工過程の成形品形状

進まなかった。フィン部は先端角部に欠肉が生じたままであった。摩擦の増加やパンチ内部における空気の残留の影響で端部まで完全に材料が充填できなかったと考えられる。

2.5 フィン先端欠肉の対策案と解析条件

フィンの先端部に欠肉が生じることに対する対策案として、鍛造後に上方からフィン先端の端面だけを追押しすることで、円弧状になっているフィン先端形状を平面に仕上げる工法を考案した。対策案の型構造1/4カット断面を図12に示す。パンチ内部に可動する端面押しパンチを設けており、鍛造によってフィンを成形する後方押しを行った後に、同パンチを下降させる構造となっている。パンチ内部のフィン成形空間の高さは、あらかじめ端面押しのパンチストローク分だけ長くしている。2.2項と同様の解析条件で解析を行い、端面押しパンチで追押しする解析を行った。このときの端面押しパンチストロークは0~0.3mmとした。

2.6 フィン先端欠肉対策の解析結果

成形解析の結果を図13に示す。鍛造後は、フィン先端角部には欠肉が生じている。2.2項の解析結果よりも欠肉が生じたことは、フィン成形空間の高さを0.3mm長くしたことが影響していると考えられる。鍛造後に端面押しを行ったところ、欠肉が減少する結果となった。端面押し時のパンチストロークと荷重の関係を図14に示す。図中には、フィン端面部の1/4カット断面も示す。パンチストロークの増大に伴って欠肉が小さくなり、ストローク0.3mmで欠肉は無くなっている。このときのパンチ荷重は205kNであった。

2.7 フィン先端欠肉対策による検証試作

解析結果に基づき、端面押しパンチを設けた鍛造金型を作製し、検証試作を実施した。欠肉対策無しと欠肉対策有りで得られた成形品のフィン先端部を図15に示す。欠肉対策無しは、フィンの幅12mmに対し成形された平坦な端面幅

は6mmであったが、考案した欠肉対策を実施した結果、平坦な端面幅は10mmまで拡大された。

欠肉対策無しでのフィン成形では、フィン端部に欠肉が

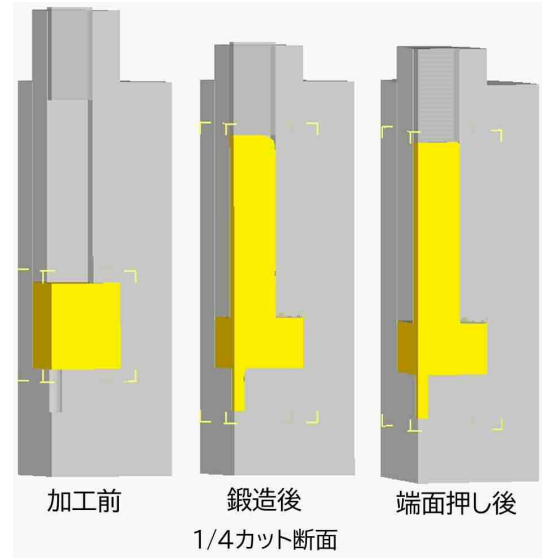


図13 成形解析結果

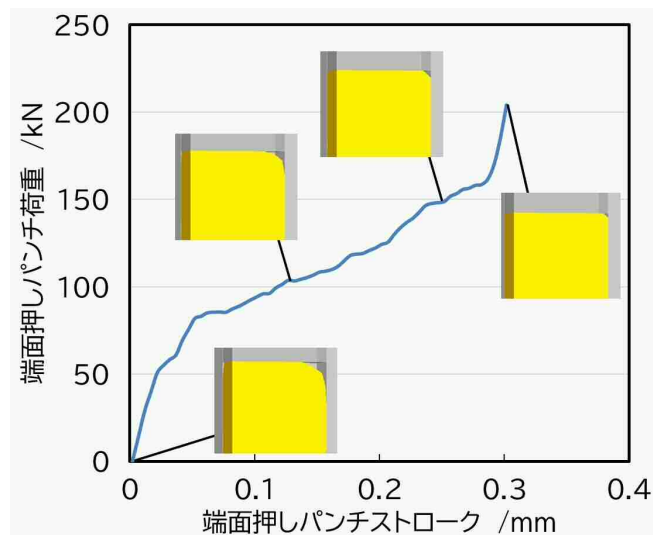


図14 端面押しパンチストロークと荷重の関係

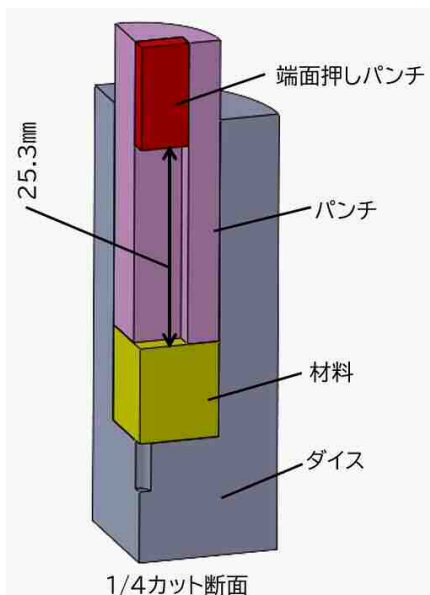


図12 フィン先端欠肉対策案の金型構造

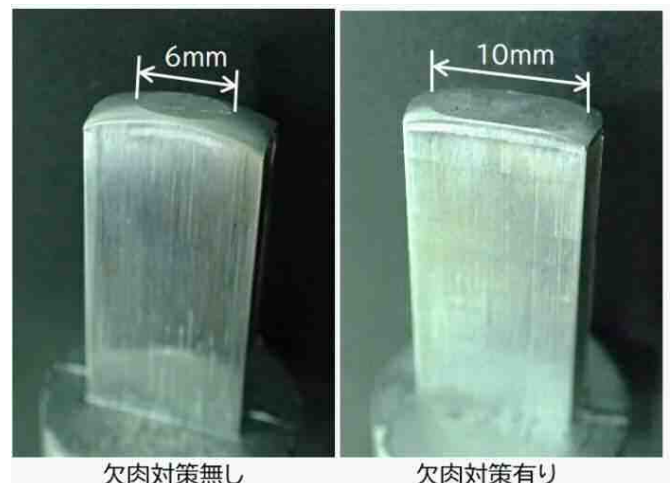


図15 欠肉対策有り無しフィンの端部比較

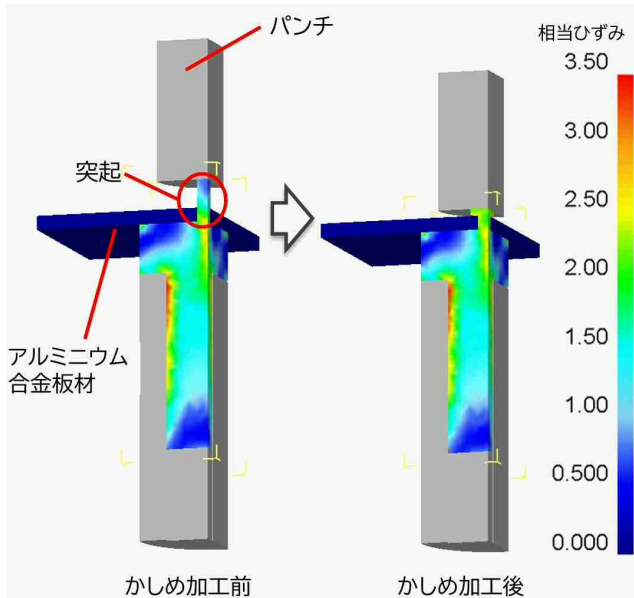


図16 かしめ加工前後の相当ひずみ分布



図19 かしめ部

生じ円弧状になっていたが、今回考案したフィン先端の端面だけを追押しすることで、フィン先端形状は大幅に改善され、角部にわずかに欠肉を残してほぼ平面に仕上げることができた。

なお、解析結果では、端面の追押しによって完全に欠肉が無くなり、試作と異なる結果となったが、このことは摩擦の増加やパンチ内部における空気の残留の影響により解析結果と試作結果とは完全に一致しなかったと考えられる。

3. 突起のかしめ加工および結合評価

3. 1 かしめ加工の解析条件と結果

鍛造解析で得られた突起付きのフィン成形品と铸造でできた板状部品との結合を想定して、板厚3.5mmのアルミニウム合金板材 (ADC12) を用いてかしめ加工の解析を行った。解析モデルは、1/4断面モデルとし、実際のかしめ加工では上方から圧縮することを想定して、突起を上側にし、その上方からパンチが下降するものとした。板材には、直径3.2mmの貫通穴があり、鍛造で得られた直径3mm×長さ8mmの突起を差し込み、突起先端をパンチで加圧し、突起を圧縮することで径を上げ板材と締結される。解析条件として、摩擦係数1.2、パンチ速度1mm/s、材料温度25℃とした。また、解析におけるパンチストロークは2.5mmとして解析を行った。

解析で得られたかしめ加工前後の相当ひずみ分布を図16に示す。解析の結果、突起は圧縮されて径が広がり、同部の相当ひずみは、最大で2.5程であった。かしめ部において相当ひずみ3以上の極端に大きいひずみは見られなかった。また、図17にかしめ加工後の最大主応力分布を示す。かしめ部において、材料 (A6061) の引張強度である破断引張応力100MPa以上は見られなかった。そのため、鍛造で得られた突起を圧縮しても、割れの発生は無いものと判断した。

3. 2 かしめ加工実験

鍛造試作で得られた突起付きのフィン成形品と板材部品として使われている板厚3.5mmのアルミニウム合金製板材

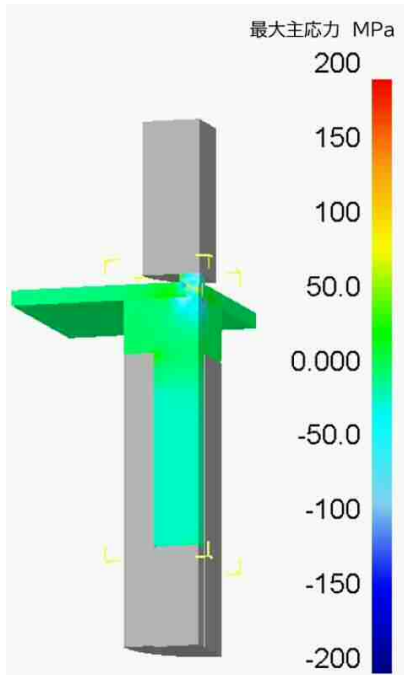


図17 かしめ加工後の最大主応力分布



図18 かしめ加工実験の概要

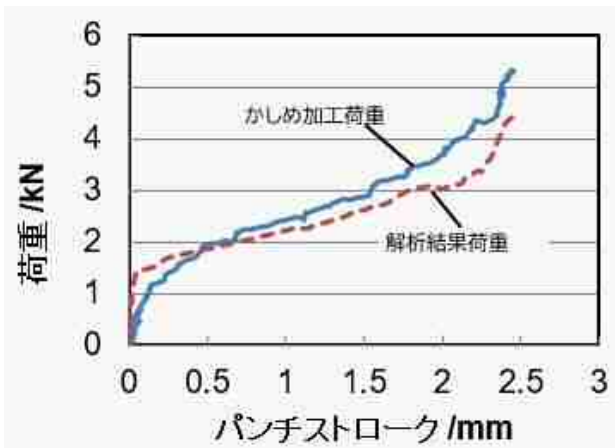


図20 かしめ加工のパンチストロークと荷重の関係

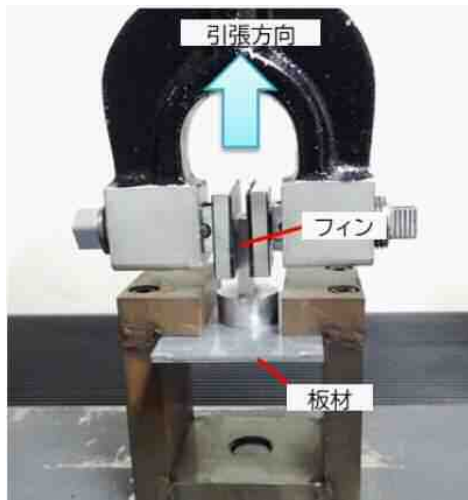


図21 引張試験の概要

(ADC12)を用いて、かしめ加工実験を行った。同加工実験の概要を図18に示す。板材中央部には、あらかじめ直径3.2mmの貫通穴をあけており、下面側から鍛造で成形された突起を差し込み、プレス機上に突起が上向きになるように設置した。プレス機のパンチを下降させて、突起を加圧することで圧縮し、かしめ加工を行った。

図19に加工後のかしめ部を示す。突起は同心円状に拡がってつぶれていた。亀裂等の発生は見られなかった。フィン成形品と板材にズレや緩み等は見られず、固定されていた。

図20にかしめ加工時に測定したパンチストロークと荷重の関係と解析で得られた同関係を示す。両結果とも荷重とパンチストロークの関係はほぼ同じ曲線となった。かしめ

加工に要した荷重は最大で5.3kNであった。

5kN程の荷重であれば、ハンドプレス等の簡易的な加圧機を用いてかしめ加工を行える。現状の手作業のねじ締結は成形品へのタップ加工も含め1つの締結に20秒程を要しているが、ハンドプレスを用いたかしめ加工を行えば、タップ加工も不要となり、結合は10秒以内に完了する。このことから、作業性が大幅に向上すると考えられる。

3.3 締結強度の評価

かしめ加工により結合したものと、従来のM3ねじで締結したものの双方で引張試験を行い破断時の結合強度を測定した。引張試験の概要を図21に示す。引張試験機(榊島津製作所製、AGS-5kNB)を用いて板材を治具で固定し、フィンを上方に引張ることで、かしめ部またはねじのタップ部を破断させた。引張速度は1mm/sとした。

引張試験の結果、かしめ加工の結合強度は約1.6kN、ねじ締結は約1.3kNとなり、かしめ加工による結合では従来のねじ止めに比べ1.2倍以上の結合強度があった。このことから、鍛造で得た突起をかしめ加工に用いることで、結合力は従来方法の同等以上になることがわかった。

4. 結 言

本研究では、フィンとかしめ加工を行う突起まで含めて鍛造で成形を行い、フィン先端部に生じる欠肉を減らす対応策を考案した。試作により欠肉が減少することを確認し、フィンと突起を同時に成形する技術を開発した。

また、鍛造で成形された突起でかしめ加工ができることを確認した。結合強度は、従来のねじ締結に比べ同等以上であり、本成形技術の有効性を確認できた。

参 考 文 献

- 1) 松田豪彦, 桑原田 聡, 田中耕治: 鹿児島県工業技術センター研究報告, 26, 45-49 (2012)
- 2) 牟禮雄二, 中西健二, 松田豪彦, 桑原田聡, 中村俊一: 塑性と加工, 51(589), 136-140 (2010-2)
- 3) 北岡山治: 素形材, 57(3), 2-24 (2016)
- 4) 蟹俊之, 鈴木秀人, 中村雅史, 福永久雄, 斎藤猛: 日本機械学会茨城講演会論文集, 602, 141-142 (2002.9)
- 5) 小豆島 明: 塑性加工便覧, コロナ社 (2006.5) p.1111-1122

