鍛造 Forging

湯川 伸樹*

Nobuki YUKAWA*

1. はじめに

鍛造とは、塊状の金属素材にさまざまな形状の金型を用いて圧縮力あるいは打撃を加え、そのとき材料に生じる塑性流動を用いて材料を成形および鍛錬する加工技術である。

鍛造の歴史は非常に古く、紀元前 4000 年ころにはすでに自然産の金・銀・銅などの加工に石を工具とした鍛造が使われていたと考えられている¹⁾。紀元前 25 世紀頃から鉄が利用されるようになると鍛造は単に金属の形を整えるだけでなく、不純物を絞り出し材料の固体組織を調整する鍛錬としての役割も相まって、急速に発達してきた。わが国においても鍛造は主に装飾品や武具、農機具などの製造に古くから使われており、日本刀などはその代表的なものである。

現代においては、手作業にかわりプレス機械による鍛造が広く行われるようになり、非常に多種多量の工業製品が生産されている。ボルトやナット、歯車や軸受けボールなどの小さい部品からエンジンのコンロッド、クランクシャフト、あるいは大型船舶のシャフトや圧延機のロール、発電所の蒸気タービンシャフトなど非常に大きなものまで、鍛造によって生産される。

軽金属の鍛造については、そもそも軽金属の工業的利用の歴史が浅いため、鍛造の歴史も鉄鋼の場合に比べると短い。図 1 は近年のアルミニウムの生産量の変化を示したものである²⁾が、アルミニウム生産量における鍛造品の割合は圧延品

やダイカスト品に比べまだかなり少ない。しかし図 2²⁾に示すように、その量自体は年々増加の傾向にある。特に軽量化による燃費向上、CO₂ 排出量の削減などの要請から、アルミニウム鍛造品の約 7 割が自動車用であり、サスペンション部品やホイール、ピストンなどの製造に利用されている。

自動車用以外のアルミニウム鍛造品としては、代表的なものでは VTR のビデオヘッド用シリンダやハードディスク用モータハブ、コンプレッサ用部品、航空機の窓枠などがあり、その利用は多岐にわたっている。

本稿においては、鍛造の基礎ならびに応用について簡単に解説する。

2. 鍛造の特徴

鍛造の長所としては、以下のようなものが挙げられる³⁾。

(1) 主に圧縮応力場で加工を行うため材料の延性破壊がおこりにくく、材料に大きな変形を与えることが可能である。

(2) 機械プレスなどによる鍛造では、加工に要する時間が非常に短いため、生産効率が高く、大量生産に適している。

(3) 鍛流線（圧延、押出などによって製造された素材が有する長手方向の繊維状の組織）が切れずに鍛造品表面に沿って通るため、引張応力に対して強靱である。

(4) 鍛造することによって材料特性を改善する、いわゆる鍛錬効果を期待できる。これは加工硬化による強度の向上、内部空孔の圧着、再結晶による結晶粒の微細化、などによるものである。

図 1 アルミニウム生産量の推移²⁾

図 2 アルミニウム鍛造品の生産量の推移²⁾

* 名古屋大学工学研究科マテリアル理工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)。Graduate School and School of Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603). E-mail: yukawa@numse.nagoya-u.ac.jp
 受付日：平成 19 年 11 月 22 日 受理日：平成 19 年 12 月 7 日

図3 主な自由鍛造の種類

逆に短所としては

(1) 一般に加工に要する力が大きいので、容量の大きいプレスが必要とするなど、設備費が増大しやすい。

(2) 材料-金型間の接触圧力が高くなりやすく、また相対すべり量が多い場合が多いので、工具面の摩耗や破損が生じやすい。そのため工具には強度・靱性・耐摩耗性に優れた金型材料が必要となる。

(3) 騒音や振動などが大きく、また作業に危険を伴うなど、作業環境が悪いことが多い。

(4) 一般に単一の工程で成形させる場合はまれであり、数工程から場合によっては十数工程によって成形される場合が多い。そのため最適な方案作成、金型設計にはある程度の熟練を要する。

(5) 素材として鍛造性、熱処理性などに優れ、表面きずのない高価な材料が必要とされることが多い。

などが挙げられる。

3. 鍛造の加工形態による分類

鍛造は加工形態で大別すると、一般に自由鍛造と型鍛造、その他の鍛造に分けられる⁴⁾。

3.1 自由鍛造

自由鍛造は平面あるいは簡単な曲面の汎用工具を用いて材料を圧縮する加工法である。代表的なものとして、図3(a)のように材料の軸方向に圧縮する据込み、(b)材料長手方向に垂直に圧縮する鍛伸、(c)幅広げ、(d)材料を回転させながら材料半径方向に圧縮を繰り返すラジアルフォーミング、(e)リング状の素材の肉厚をリングの内外から圧縮してリングの直径を大きくする穴広げなどがある。

局所的な加工を繰り返して逐次的に成形することが多く、多様な形状の製品の製造に柔軟に適用できるため、多品種少量生産に適している。また変形が材料の局部に限定されるため、加工荷重は低い。しかし自由表面に近い部分では静水圧応力が低く、場所によっては引張となることも多いので、加工中に割れが発生しやすいので注意を要する。

3.2 型鍛造

型鍛造は材料を型内に閉じ込め、材料流動によって材料を型となじませることにより成形する加工である。かなり複雑な形状にも加工することが可能であり、寸法精度もよく、生産性も高いので、同一形状の部品を大量に生産するのに適している。

図4(a)のように材料を完全に型内に閉じ込める方法を密

図4 型鍛造の種類

図5 型鍛造部品の例

閉鍛造と呼ぶが、これは加工の最終段階で荷重が急激に増大するため、型の破損を引起こしたりプレスの負荷能力不足による欠肉が生じたりしやすい。これを避けるため、図(b)に示すように型の外周部に隙間を設け、材料を外周方向にいくらか逃がしながら鍛造を行うばり出し鍛造がしばしば用いられる。また図(c)のように材料を型内に閉じ込めた後、パ

10

図6 押出

ンチを押込むことにより材料を側方向に流動させて型内の空間に充満させる閉塞鍛造なども用いられる。

図5は型鍛造により製造した部品の例である。

3.3 その他の鍛造

押出は、加工部の長さが短く非定常変形で加工が終了するような場合は、鍛造に分類される。押出には材料を工具の動きと同一方向に流動させる前方押出と、工具と逆方向に材料を流動させる後方押出、直角方向に流動させる側方押出などがある。図6(a)は前方押出により軸直径を小さくする軸押出の例である。(b)は後方押出の例であり、カップ状に成形している。(c)は側方押出の例である。

回転する工具もしくは揺動する工具を用いた鍛造を回転鍛造と呼ぶ。回転鍛造には図7(a)に示すような、彫り型を取付けたロールを回転させて材料を成形するロール鍛造、(b)のようにくさび状の型を用いるウェッジローリング、(c)リング状の素材の直径を広げるリングローリング、(d)揺動運動する型により材料を下型に充満させる揺動鍛造などがある。これらはいずれも材料を逐次的に変形させるため、加工荷重が低く抑えられるという特徴がある。

図7 その他の鍛造

4. 熱間鍛造と冷間鍛造

鍛造を加工時の温度で分類すると、加熱して高温で加工を行う熱間鍛造、常温付近で行う冷間鍛造、その中間域の温間鍛造がある。これらの鍛造温度は、加工の目的、材料の種類や大きさ、材料の機械的特性と設備能力、製造数量など多くの要因を考慮して決定される。

4.1 熱間鍛造

金属材料の再結晶温度以上に加熱して行う鍛造を、熱間鍛造という。金属を加熱すると一般に軟らかくかつ延性が増大するため、これを利用して低荷重で大変形を与えることができる。

熱間鍛造では加工中や加工後に再結晶が進行するため、加工された材料に加工硬化がほとんど残らない。また再結晶に伴う組織の微細化や内部空孔の圧着などの材質改善効果が大い。適切な加工温度は、材料や加工目的、加工条件などによって異なるが、アルミニウム合金では400~470°C程度⁵⁾、マグネシウム合金では250~400°C程度⁶⁾である。

熱間鍛造は、高温状態にあることにより材料表面が酸化しやすいこと、加熱・冷却に伴う熱膨張・収縮が起こるため寸

法精度が劣ること、熱の影響に晒されることにより型寿命が比較的短いこと、などが欠点として挙げられる。

4.2 冷間鍛造

材料を加熱せず室温あるいはそれに近い温度において鍛造することを冷間鍛造という。材料表面に酸化膜が生成しないため、加工された製品の表面状態は良好である。また熱間鍛造に比べ加熱・冷却による寸法変化が少ないため、寸法精度がよい。場合によっては後工程での切削仕上げが不要か軽度の研削のみですますことが可能なことも多い。

一方、熱間鍛造に比べ変形抵抗が高い領域での加工となる上、加工硬化を伴うため加工に必要な荷重が高い。そのため大容量の設備が必要となったり、金型の破損などが生じやすい。このため、適用できる材料は比較の変形抵抗の低い材料に限られる。また常温において材料に十分な延性があることが必要であり、不純物、表面きずなどが少ない素材が要求される。

4.3 温間鍛造

再結晶温度以下の温度域に加熱して行う鍛造を温間鍛造と

図8 ガイドポストを用いたダイセット

いう。熱間鍛造と冷間鍛造の両方のよいところを利用し、表面性状、寸法精度がよい製品を低い荷重で成形することを目指すものである。

5. 鍛造金型

5.1 金型の構成

通常、金型は上型－下型の位置精度の確保や型交換作業のしやすさ、また型に対する作業や保管などの取扱いの標準化をしやすいなどの理由から、図8のようにダイセットに組込んで使用することが多い。ダイセットは下プレート、上プレートおよびそれに組込まれたガイドポスト、ガイドシューなどで構成され、ガイドポストに沿って上プレートが摺動する構造となっている。

鍛造の種類に応じて金型も様々な形態があるが、一般に素材の外側形状を成形するものをダイ、内側形状を成形するものをパンチという。成形時にパンチには軸方向の圧力が、ダイには外側へ向かう方向の内圧が主に作用する。ダイに大きな内圧が作用すると円周方向に大きな引張応力が発生し、型破損の原因となる。これを防ぐためにダイ外径よりわずかに小さい内径を持つ補強リングの中にダイインサートを圧入することであらかじめ圧縮の円周方向応力を与える方法などが用いられる(図9)。圧入の方法には、補強リングを加熱することによって生じる熱膨張を利用する焼きばめや、ダイ外径、補強リング内径をテーパ状にして押込むテーパ圧入などがある。

5.2 金型材料

鍛造において、金型には非常に大きな圧力が繰返し作用し、その値は場合によっては2,000~3,500 MPaにまで達する。また熱間鍛造においてはもちろん、冷間鍛造においても変形による自己発熱や摩擦熱により、型はかなりの高温にさらされる。したがって金型に使用する材料は、圧力に耐える強度と、衝撃に耐える靱性、耐摩耗性などに優れていることが要求される。

一般的には工具鋼を熱処理して用いることが多いが、非常に大きな面圧がかかる場合には炭化タングステンなどを主体とした超硬合金が用いられる。型の表面を炭化チタンや窒化チタン、炭化バナジウムなどの硬質皮膜でコーティングすることにより、型の焼き付きや摩耗を防止することも行われる。

図9 焼きばめ時の円周方向応力分布

図10 欠肉

6. 鍛造における欠陥

鍛造において発生する欠陥は大別すると、望ましくない材料流動に起因する欠陥と、素材の延性不足に起因する割れがある。

6.1 材料流動によって生じる欠陥

(a) 欠肉

型鍛造においては、材料が型に充満する直前に加工荷重が急激に増大するため、プレスの負荷能力が不足すると図10に示すように材料が型に完全に充満せず、欠肉となる。これを防止するには、材料が型に完全に密閉されないように図4(b)のようなばり出し鍛造を行ったり、分流鍛造(後述)を行ったりする。

(b) ひけ

前方軸押出や容器の後方押出において、押し残り部の厚さ、底厚が小さくなると、図11(a)、(b)のように素材中心や底角付近の部分の面圧が周辺の材料流動の影響で小さくなり、材料が型から離れる方向に流動し始めることがある。このような欠陥をひけという。中空材のフランジ据込みでも、(c)のように内径側でひけが生じる場合がある。これらを防止するには、ひけが生じる方向に材料が流動するのを阻止するように対抗圧力の付加などを行う。中空材のフランジ据込みの場合は、内径上面を面取りするなどして材料流れを制御することによっても改善される。

(c) 座屈

高さが直径に比べてかなり高い素材を軸方向に据込んだよ

10

図 11 引き

図 12 ヘッディング加工における塑性座屈

うな場合、図 12 のように座屈が起こりやすい。座屈が生じる限界の高さ/直径比 (H/D) は型の面の平行度や素材の傾き、加工硬化特性などによって変化するが、一般的に $H/D=2.5$ 程度以上になると座屈が生じる危険が大きい。座屈を防ぐためには工程を分割して予備据込みを行った後に仕上げ据込みを行うなどの方策がよくとられる。

(d) 折込み

座屈やひけが生じた状態でさらに加工を進めていくと、材料表面が材料の内部に入り込んで折りたたまった状態となる。この場合、加工後の製品には筋状のきずとなって残る。通常、材料表面は薄い酸化膜や潤滑剤が存在することが多いため、このように折れ込んだ部位は圧着せず、強度的に弱いため割れや疲労破壊の起点となることが多い。

6.2 割れ

(a) 表面割れ

摩擦の大きい条件で据込みを行うと、表面が樽型に張出すバルジ変形が生じる。これが大きくなると赤道面近傍において静水圧応力 (平均垂直応力) が引張となる領域が発生し、材料の延性が不足すると図 13 に示すような割れが生じる。割れの形態は、高さ/直径比 (H/D) が小さい場合は主に縦割れ (図 14 (a)) が、大きい場合には主に斜め割れ (図 14 (b)) が発生する⁷⁾。奥行き方向には、縦割れの場合、破面表面に対して 45° の傾きを持ち、斜め割れの場合は表面に直角となっており、それぞれ最大せん断応力が生じる面と一致する。

図 13 据込み割れの例 (斜め割れ)

図 14 据込み時の割れ

(b) 内部割れ

加工の種類によっては材料内部で割れが発生する場合もある。図 15 は多段押出加工を行った場合に発生することのある内部割れの例であり、シェブロンクラックと呼ばれる。これは型の段となっている部分の出口付近において、その周囲の材料流動との相互作用により静水圧応力が引張となるからである。

このような 2 次的引張応力によって発生する内部割れはほかにも、例えば図 16 のように円柱材を側面圧縮した場合に中心部分が割れるマンネスマン割れなどがある。図 17 はその例である。

7. 鍛造の力学⁸⁾

鍛造において使用するプレス等の設備を選択する際には、加工に必要な荷重を見積もることが必要である。また材料流れや面圧、ひずみや応力、温度分布などを推定することは、最適な工程設計、加工条件あるいは金型材料の選択をするた

図 15 シェブロンクラック

図 16 マネスマン割れ

図 17 マネスマン割れの例

めに重要である。そこで、鍛造においても他の塑性加工と同様、様々な理論解析が行われている。ここでは、簡単なスラブ法と、近年広範囲に多用されている有限要素法について解説する。

7.1 スラブ法

スラブ法は材料のある一断面の応力の平均値の釣合い式をもとに、圧力分布を求める方法である。ここでは平行金型による円柱の据込みに対してスラブ法を適用する場合を考える。これは円周方向に応力、ひずみが一定となるいわゆる軸対称問題の一つである。円柱の中心軸を z 、半径方向を r 、円周方向を θ とする円筒座標系をおき、そこにリング状の微小領域を考えて、そのリングにかかる力の釣合い方程式を解く。このとき、次の仮定をおく。

(1) 半径方向応力 σ_r ならびに円周方向応力 σ_θ は、それぞれ高さ方向の平均値 σ_{rm} 、 $\sigma_{\theta m}$ によって代表されるものとし、高さ方向の応力分布は無視する。

(2) 端面に摩擦力が作用する場合でも主応力は軸方向応力 σ_z 、半径方向応力 σ_{rm} ならびに円周方向応力 $\sigma_{\theta m}$ であるとみなし、また σ_{rm} と $\sigma_{\theta m}$ は近似的に等しいとする。

図 18 に示すような半径位置 r 、幅 dr 、高さ h の半割りのリングを考え、上下面に工具からの圧力 p ($= -\sigma_z$)、および摩擦応力 τ (中心に向かう方向が正) が作用しているとする。軸対称問題なので σ_{rm} は円周方向には一定値であり、半径位置 r のみの関数となる。したがって内外面に作用する半径方

向応力は σ_{rm} 、 $\sigma_{rm} + \frac{d\sigma_{rm}}{dr} dr$ となる。また半割りした断面に

図 18 円筒スラブに作用する応力

は円周方向応力 $\sigma_{\theta m}$ が作用しているので、そのとき半割面に垂直な方向の力の釣合いは次式で表される。

$$-\int_0^\pi (\sigma_{rm} r h \sin \theta) d\theta + \int_0^\pi \left(\left(\sigma_{rm} + \frac{d\sigma_{rm}}{dr} dr \right) (r + dr) h \sin \theta \right) d\theta - \int_0^\pi (2\tau dr \sin \theta) d\theta = -2\sigma_{\theta m} h dr \quad (1)$$

これを整理し、 $dr \rightarrow 0$ とすると、

$$\frac{d\sigma_{rm}}{dr} + \frac{\sigma_{rm} - \sigma_{\theta m}}{r} = \frac{2\tau}{h} \quad (2)$$

となり、この式が釣合い方程式となる。

仮定 (2) より Mises の降伏条件、Tresca の降伏条件いずれにおいても、

$$\sigma_{rm} + p = \sigma_Y \quad (3)$$

である。さらに摩擦応力 τ が Coulomb-Amonton の法則 ($\tau = \mu \cdot p$) で与えられるとすると、式 (2) は

$$\frac{dp}{dr} = -\frac{2\mu p}{h} \quad (4)$$

と表される。

円柱の外側面 ($r=R_0$) は自由表面なので $\sigma_{rm}=0$ であり、したがって式 (3) より $p=\sigma_Y$ である。これを境界条件とし、また降伏応力 σ_Y は材料内で一定として式 (4) を解くと、

$$p = \sigma_Y \cdot \exp\left(-\frac{2\mu(R_0 - r)}{h}\right) \quad (5)$$

という圧力分布を得る。プロットすると図 19 に示すように、摩擦の影響により材料の中心付近が高い分布となることから、この分布を“フリクションヒル”と呼ぶ。

10

図 19 据込み時の圧力分布（フリクションヒル）

荷重は式 (5) を接触面にわたって積分することにより、

$$P = \frac{\pi h^2 \sigma_y}{2\mu^2} \cdot \left\{ \exp\left(\frac{2\mu R_0}{h}\right) - \frac{2\mu R_0}{h} - 1 \right\} \quad (6)$$

となる。

スラブ法は非常に簡単な解析であるが、このように圧力分布や荷重の概略を把握すること、また加工条件の圧力分布に対する影響を大雑把にでも把握することは、適切な設計や最適化のためには重要である。

【例題】直径 20mm、高さ 10mm のアルミニウム円柱の据込み荷重を、スラブ法を用いて求めよ。

ただし、素材の平均変形抵抗を $\sigma_y=120\text{MPa}$ 、ダイスとの間の摩擦係数を $\mu=0.2$ とする。

【解答】 $R_0=10\text{mm}$ 、 $h=10\text{mm}$ および σ_y 、 μ を式 (6) に代入して、

$$P = \frac{\pi \times 10^2 \times 120}{2 \times 0.2^2} \cdot \left\{ \exp\left(\frac{2 \times 0.2 \times 10}{10}\right) - \frac{2 \times 0.2 \times 10}{10} - 1 \right\}$$

$$= 43271$$

$$P=43.3\text{kN}$$

図 20 のように中心に半径 R_i の穴をあけたリングの圧縮を考えた場合、摩擦がある程度大きいとリング中心付近の材料は中心方向に流動するようになり、材料の外側と内側で材料にかかる摩擦の方向が逆向きとなる。材料が内側に流動している領域では釣合い方程式は

$$\frac{dp}{dr} = \frac{2\mu p}{h} \quad (7)$$

となり、 $r=R_i$ で $\sigma_{rm}=0$ を境界条件として解くと、

$$p = \sigma_y \cdot \exp\left(\frac{2\mu(r-R_i)}{h}\right) \quad (8)$$

図 20 分流鍛造

となる。プロットすると図 20 のようになり、式 (5) との交点が材料の流動方向が分かれる位置となる。このグラフからわかるように、荷重、最大面圧ともに穴がない場合に比べて大幅に減少している。このように材料の流動方向を意図的に分けることにより荷重・面圧を下げる方法を分流鍛造法という⁹⁾。中心に逃し穴をあけるほか、前方押出と後方押出と組合せた、いわゆる捨て軸を利用する方法などがあり、歯車などの実際の精密鍛造に応用されている。

【例題】外径 20mm、内径 8mm、高さ 10mm のアルミニウムのリングの据込み荷重を、スラブ法を用いて求めよ。

ただし、素材の平均変形抵抗を $\sigma_y=120\text{MPa}$ 、ダイスとの間の摩擦係数を $\mu=0.2$ とする。

【解答】 $R_0=10\text{mm}$ 、 $h=10\text{mm}$ および σ_y 、 μ を式 (5) に代入して、

$$p_{\text{outer}} = 120 \times \exp\left(\frac{2 \times 0.2 \times (10-r)}{10}\right)$$

$$= 120 \exp(0.4 - 0.04r)$$

$R_i=4\text{mm}$ 、 $h=10\text{mm}$ および σ_y 、 μ を式 (8) に代入して、

$$p_{\text{inner}} = 120 \times \exp\left(\frac{2 \times 0.2 \times (r-4)}{10}\right)$$

$$= 120 \exp(0.04r - 0.16)$$

p_{outer} と p_{inner} が等しくなるのは $r=7\text{mm}$ の位置であり、ここが材料が外側に流動するか内側に流動するかの分かれ目となる。

したがって、荷重 P は

$$P = \int_4^7 2\pi r \{120 \exp(0.04r - 0.16)\} dr$$

$$+ \int_7^{10} 2\pi r \{120 \exp(0.4 - 0.04r)\} dr$$

$$= 33646$$

$$P=33.6\text{kN}$$

図 21 有限要素法による解析例

7.2 有限要素法による非定常変形解析

近年、有限要素法による数値解析手法が非常に発展しており、鍛造の変形解析においても活用されている。有限要素法では、応力分布のみならず、ひずみ分布、形状変化も求めることができる。また適用できる素材形状や型形状の自由度が非常に大きく、完全な3次元変形にも対応できる。変形履歴を考慮しながら多段工程の解析をすることも可能であるため、実際の工程設計などでは不可欠なツールとなってきた。

特にアルミニウム合金の鍛造においては、鋼の鍛造に比べ複雑な形状を有し鍛造時の材料流動も極めて大きいような部品を精密に製造する必要がある場合が多く、こうした数値解析手法が鍛造工程や金型設計に幅広く活用されている¹⁰⁾。

鍛造では、素材は一般に非定常変形をする。非定常変形を有限要素法で取扱う場合、変形をいくつかの時間ステップに分割し、ステップごとに節点座標を更新していく方法を用いることが多い。同時にステップごとに各要素の変形抵抗を更新することにより、加工硬化の影響を容易に解析に取込むことができる。

金属材料の塑性変形では、厳密には弾性変形と塑性変形が同時に生じるが、鍛造のように材料の塑性変形量が弾性変形量に比べて極めて大きい場合、弾性変形を無視した剛塑性解析を行っても十分な解析精度が得られることが多い。そのため、鍛造用の有限要素解析ソフトでは剛塑性解析を基本とするものが多い。

有限要素法を用いた解析の例として、円柱材の軸対称熱間鍛造の解析結果を図21に示す。材料は不均一に変形し、材料内部に大きなひずみ分布が生じていることがわかる。また、工具への熱伝達および加工仕事による発熱の影響で、温度の分布も生じている。このように、有限要素法では複雑な形状の加工においても、非定常に変化するひずみや応力、温度などを逐一求めることができるため、材料の塑性流動のみならず、材料組織の予測や、金型の摩耗予測、割れ発生予測、工具の弾性変形や冷却による熱収縮も考慮に入れた寸法精度予測など、様々な問題への解析の適用が試みられている。

8. ま と め

鍛造は非常に古くからある加工法であり、現在の工業生産になくはならない技術である。そしてわが国の鍛造技術は世界でもトップレベルにあり、わが国のものづくりの原動力の一つともなっている。しかしそれは決して完結した技術ではなく、常に新しい領域に挑戦し、進歩・発展し続けている。

近年の鍛造に期待されている課題技術としては、

- (1) より複雑な形状の製品を切削等の後加工を必要としないくらい高精度に成形するネットシェイプ鍛造技術、あるいは極小部品の加工のような超高精度鍛造技術
 - (2) 加工と温度制御を組合せて、必要な場所に必要とする材質を加工と同時に造り込む、制御鍛造技術
 - (3) 工具寿命の大幅な向上、および工具寿命予測技術の高精度化
 - (4) マグネシウムやチタンなどの軽合金を含む難加工材への適用範囲の拡大
- 等が挙げられる。これらの課題を克服していくためには、単に形状や工程設計の最適化だけでなく、よりよい被加工材や金型材料、より高性能な潤滑剤やコーティング技術、より高精度な解析技術など、さまざまな研究開発が不可欠である。

参 考 文 献

- 1) 日本塑性加工学会 鍛造分科会編：わかりやすい鍛造加工，日刊工業新聞社，(2005)，2.
- 2) (社)日本アルミニウム協会 統計資料： http://www.aluminum.or.jp/statistics/statistics_i.html
- 3) 日本塑性加工学会編：塑性加工技術シリーズ4，鍛造，コロナ社，(1995)．
- 4) 日本塑性加工学会編：塑性加工便覧，コロナ社，(2006)，230.
- 5) 高田与男：軽金属，**32** (1982)，553.
- 6) 松本 良，小坂田宏造：マグネシウム合金の温間鍛造法の開発，塑性と加工，**44** (2003)，760-764.
- 7) 工藤英明，青井一喜：S45C 据え込み割れ試験—冷間鍛造性試験の研究，その2—，塑性と加工，**8** (1967)，17-27.
- 8) 日本塑性加工学会編：静的解法FEM—バルク加工，コロナ社，(2003)，134-147.
- 9) 近藤一義，大賀喬一：分流方式による精密冷間鍛造法の開発，塑性と加工，**27** (1986)，121-131.
- 10) 金丸信夫ほか：アルミニウム合金鍛造工程設計における数値シミュレーションの活用，神戸製鋼技報，**48** (1998)，64-67.