アルミニウムの鍛造

山下 幸一*・横川 和明*

Forging of aluminum alloys

Kouichi YAMASHITA* and Kazuaki YOKOKAWA*

1. はじめに

鍛造とは、素材を圧縮加工することによって鑄造組織を破壊し、有害な欠陥を圧着して、機械的性質を改善すると共に目的形状の製品を作り出すことである。アルミニウム合金の鍛造品は、当初よりその比強度（強度/比重）が大きい特徴を生かして、主に航空機部品として使用されてきた。今日では、延性、靱性、疲労強度および耐腐食性などにも優れる安全で信頼性の高い材料として、航空機をはじめ車両、船舶、一般機械などの重要部品に広く使用されている。さらに最近では、自動車の高性能化に伴い懸下装置、動力伝達部品に使用されるようになってきている。しかし、アルミニウム合金の鍛造品は、国内では圧延、押出しなどに比べて馴染みが薄いと思われるので、ここでは熱間鍛造を主として取上げ、関係の基本的事項について広く解説することにする。

2. 鍛造用アルミニウム合金

展伸用アルミニウム合金の多くが鍛造用合金として使用可能である。表1に主な鍛造用合金の特性と用途を示す。2014および7075は最もよく知られた高力合金である。7175および7050は、強度、靱性および耐応力腐食割れ性などに優れる新合金であるが、国内でも最近使用の実績が増えている。2219、2618および4032は耐熱特性が良好な合金である。図1に製品例を示す。

鍛造用合金の化学組成および機械的性質は、JIS H4140, AA (the Aluminum Association) 規格, Federal 規格 (QQ A367), AMS 規格等の公共規格および航空機メーカー固有の規格などに規定されている。

3. アルミニウム合金鍛造の基礎

本章では、まず鍛造に関する基本的事項について説明

(a)

(b)

(c)

図1 アルミニウム合金鍛造品

- (a) 航空機翼部支柱 (7075-T73)
- (b) 航空機用ホイール (2014-T6)
- (c) 船用ディーゼルエンジン用ピストン (4032-T6)

する。

3.1 鍛造方法の種類

アルミニウム合金の鍛造は、自由鍛造 (Hand Forging, Open Die Forging) と型鍛造 (Die Forging, Closed Die Forging) とに大別される。自由鍛造は液圧プレスまたはハンマーを用いて、金敷の上で角柱、円柱、円板、棒またはリングなどの形状を作り出すものである。プレス能力の関係で型鍛造が不可能な大物鍛造品とか、生産量が少なく金型費用が割り高になる場合に用いられ、機械加工の工数を多くとって最終製品を得ることになる。

型鍛造は金型を用いて複雑な形状の製品を得るもので、特殊な場合を除けば次のように分類される。

* 古河アルミニウム工業(株)鍛造事業部鍛造工場品質保証課 (日光市)。Quality Assurance Sector, Forging works, Casting & Forging Division, Furukawa Aluminum Co., Ltd, (Nikko-shi, Tochigi).
受理日：平成元年9月18日

表 1 代表的な鍛造用アルミニウム合金の特徴と用途

分 類	合 金	質 別	特 徴	主 な 用 途
高強度合金	2014	T4, T452 T6, T652 T61, T611	古くから使われる一般的な高力合金で、鍛造性もよい。ある程度の耐熱性も有する。耐食性および耐 SCC 性に劣る。	航空機部品、車両自動車部品、一般構造部品
	7075	T6, T652 T73, T7352	一般的に使われる高力合金である。T6 材はきわめて高い強度を有する反面耐 SCC 性に劣り、これを改善したのが T73 材である。	航空機部品、船舶部品、自動車部品、一般高力部品
	7175	T74, T7452	7075-T6 並の強度を有しかつ耐 SCC 性および靱性が改善された合金である。	航空機部品
	7050	T74, T7452	きわめて高い強度を有し、かつ耐 SCC 性および靱性に優れ、焼入性がよいので厚物でも優れた強度を有する。	航空機部品、高速回転体
	7005 (7N01)	T4, T6	溶接が可能で、溶接構造材料として使われる。	車両自動車部品 船舶部品
耐 熱 合 金	2618 (2N01)	T652, T61	アルミニウム合金の中では耐熱性に優れる。	過給器の扇車、ブレード、航空機エンジン部品、ゴム金型、一般耐熱部品
	2219	T6, T852	耐熱性に優れ、溶接性も良好な合金である。	ロケット部品、真空容器
	4032	T6, T7	熱膨張係数が小さく耐摩耗性に優れる。	ピストン、コンプレッサー部品、VTR シリンダ
耐 食 合 金	5052	H112, 0	非熱処理合金で耐食性、溶接性に優れる。強度は低く一般品に使われる。	ロープ留め金具
	5083	H112, 0	5052に比べ強度が高く、溶接性に優れる。	LNG フランジ
	6061	T6, T652	強度はあまり高くないが、鍛造性がよく耐食性、溶接性に優れる。	自動車部品 一般中力耐食部品

- (a) ブロッカータイプ
(b) 普通級鍛造品
(c) 精密級鍛造品

これらの比較を模式的に図 2 に示す。ブロッカータイプ鍛造は、仕上型のみで製造できるように、コーナー、フィレット半径を大きくとり、ウェブ、リブを厚くする

図 2 型鍛造品の形状の比較¹⁾

(各部名称は図 3)。普通級鍛造はブロッカータイプより厳しい公差が要求され、仕上型の他に荒型を用いることも多い。このタイプの製造が最も多く、一般に型鍛造といえばこのタイプを指すと考えてよい。精密級鍛造は、最終機械加工をほとんど必要としない目的形状の製品を鍛造のみによって製造するものである。フィレット、コーナー半径、抜き勾配が小さく、ウェブ厚さ、リブ厚さが薄く、高い仕上精度が必要なので、その製造には高度な技術が要求される。

図 3 型鍛造品の各部の名称

7

図4 2014-T6の鍛錬成形比による機械的性質の変化²⁾

図5 鍛造品のグレनフローと異方性

3.2 鍛錬成形比とグレンフロー

鍛錬成形比は、素材形状に対する3方向の変形比のうち、最大のもので表し、JIS G0701に表示法が規定されている。図4のごとく、鍛錬成形比が大なるほど機械的性質が向上する。一般に鍛錬成形比は4以上にすることが望ましい。

鍛造によって最も伸ばされた方向(L方向)にグレンフローが形成される(図5)。鍛造品の諸特性は、L方向において最も優れ、圧縮されたST方向において最も劣る。したがって製品においてST方向に大きな引張応力が作用すると、疲労強度の低下や応力腐食割れの危険が生じるので、最大引張応力が作用する方向とL方向とが一致するように考慮する。型鍛造は製品形状に沿ってグレンフローが形成されるので、この点で自由鍛造より好ましいが、図6に示すように、型割線の位置に注意して、グレンフローが切断されないようにしなければならない。

図6 型鍛造品における型割線の位置とグレンフローとの関係³⁾

図7 アルミニウム合金の鍛造温度⁴⁾

3.3 鍛造条件

熱間鍛造は通常320~470°Cの範囲で行われ、図7のごとく、合金ごとに適正な温度が定められている。鍛造中に材料温度が固相線温度以上になると、粒界の脆弱化による割れが生じるが、固相線温度以下であっても適正温度より高いと、材料のごく表面が優先的に変形して表面欠陥が発生する。逆に温度が低いと材料の変形能が小さくなるので、クラックが発生する、型内に材料が充填されないなどの事態を生じる。さらに後工程の高温加熱時にグレングロースを起こすこともある。

鍛造変形中の材料温度は、加工発熱と冷却との兼ね合いによって決められるので、素材の初期加熱温度は変形

図8 7075合金の変形抵抗とひずみ量(a), 変形温度(b)およびひずみ速度(c)との関係⁵⁾

量と変形速度に応じて適正温度範囲内で選択する。一般に、変形速度の大きいハンマーおよびメカニカルプレス使用の場合は、液圧プレス使用時よりも加熱温度を低めに設定する。

単純形状の小物鍛造品の製造にはハンマーまたはメカニカルプレスを使用するが、複雑な形状の鍛造品または大物鍛造品には液圧プレスを用いることが多い。ハンマーの鍛造速度は5~6 m/sにも及ぶのに対し、液圧プレスのそれは数 mm/s~数 cm/sであるので、後者使用時には材料の変形中に熱が均一に分散される時間的余裕があり、局所的な過熱を生じない。また、材料の変形速度が小さいので変形抵抗が小さくなり、所要荷重が小さくなってこの点でも有利である。

3.4 材料の変形

材料の変形抵抗 K_f は、ひずみ量 ε 、ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}$ および温度 T と合金材質によって決定される。図8に K_f と ε , $\dot{\varepsilon}$ または T (300~450°C) との関係を示す。7075合金を例として示す。一般に、室温では K_f に対して ε が支配的であり、 $\dot{\varepsilon}$ の影響は小さい。一方再結晶温度以上では ε の影響は小さく、 $\dot{\varepsilon}$ の影響が大きい。低温、高温を問わず K_f に対する T の影響は非常に大きく、特に250~300°Cにおける K_f の変化は、他の温度におけるよりも急激である。また、合金元素の種類と量によって K_f は著しく異なる。たとえば2000系合金の500°Cにおける K_f

図9 アルミニウム合金の高温における変形能 (ひずみ速度: 0.00017 s⁻¹)⁵⁾

は、99.7%アルミニウムのその3~4倍に達することが知られている⁵⁾。

鍛造においては材料の変形抵抗のみならず、変形能(欠陥が発生することなく変形される塑性変形量)も考慮すべき重要な要素である。変形能は一般に、300°C以上では温度と共に増加する。一方 $\dot{\varepsilon}$ が大なるほど変形能は小さくなり、温度が高いほどその程度は大きい。変

図10 アルミニウム合金の鍛造性の相対的比較¹⁾

形能は通常ねじり試験，引張試験における伸びまたは断面減少率によって評価する。図9は ϵ 一定における破断伸びと試験温度との関係であるが，いずれの合金も変形能は約300℃から増加し，ある温度で最大となった後に急激に減少する。これは，ほぼ再結晶開始温度以上から伸びが増加し，最大値付近ではグレングロスが生じ，それ以後の急激な低下は溶融が生じるためである。なお，変形能は材料の均質化の程度にも著しく影響される。

3.5 鍛造の難易性

ある鍛造条件における材料の変形抵抗と摩擦係数がわかれば，鍛造に要する加圧力が理論的に計算されるはずであるが，アルミニウム合金に関してはそのようなデータはあまり報告されていない（後述6.6参照）。そこで加圧方向からの投影単位面積あたりの所要応力 $K_w = F/A_p$ の値を推定し，鍛造の可否を判断することが多い。型鍛造において，

ブロッカータイプ鍛造： $K_w = 15 \sim 25 \text{ kgf/mm}^2$

普通級鍛造： $K_w = 25 \sim 40 \text{ kgf/mm}^2$

精密級鍛造： $K_w = 40 \sim 80 \text{ kgf/mm}^2$

であることが知られている。図10は各温度においてハンマーによって一定のエネルギーを与えた場合の，各種合金の変形量の相対値であり，鍛造の難易度を表す。目的とする鍛造品を製造しようとする場合には，このようなデータと鍛造品の形状，鍛造速度および摩擦（潤滑）条

表2 製造工程

件を考慮して K_w を推定し，必要なプレス（またはハンマー）の大きさを考慮する。

4. 鍛造品の製造

客先から鍛造品の要求があると，その大きさ，形状，寸法精度，数量，材質，鍛造品が具備すべき性能および機械加工の程度などをまず明らかにし，それに応じて鍛造方法（自由，型鍛造），鍛錬成形比，グレングロースの方向，使用する設備機械，鍛造速度および温度などを定めて製造を行う。

4.1 製造工程

工程の概略は，表2のごとくである。

4.1.1 素材

鍛造用の素材としては，連続鋳塊（一般に丸形の鋳塊をビレット，角形の鋳塊をスラブと呼ぶ），押出棒，鋳造棒（通常 $\phi 100 \text{ mm}$ 以下の小径のビレットをいう）または圧延材を用いる。

鋳塊は，重量のある大きな自由鍛造品の素材として，または所定の寸法形状に鍛錬成形してから型鍛造にそれぞれ使用する。鋳塊はそのままでは，粒界に合金元素が晶出物などの形で偏析しており，脆いため鍛造時に割れが発生したり，合金本来の性能を発揮しなくなるので，十分な均質化処理を施してから使用する。

押出棒は主に比較的小さな型鍛造品の素材として，また圧延材は平らな形状の型鍛造品の素材として用いる。

鋳造棒は鋳造時の冷却速度を早くすることができるので，結晶粒および晶出物が微細になるため押出棒を使用した場合と比べて性能が改善される。たとえば4032の初晶シリコンを微細にすることができ，押出棒を使用した場合に比べ耐摩耗性を改善できるのでVTR シリンダ等に多く用いられる。しかも鋳造棒はビレットと比べて安

表 3 熱間鍛造用潤滑剤

No	種 類	黒鉛粒度	希 釈 剤	潤滑方法	用 途
1	油性コロイダル黒鉛	0.5～30 μm	鈹 物 油	スプレーまたは 塗布	主として液圧プレス用
2	油性黒鉛粉末		灯 油		
3	エマルジョン型コロイダル黒鉛		水		
4	水溶性コロイダル黒鉛				
5	水溶性黒鉛粉末				
6	黒鉛粉末		アルコール溶剤	塗布・乾燥	

価であるので、今後使用量が増加すると考えられる。ただしグレンフローを出しにくいので形状設計時には注意が必要である。

4.1.2 切断・外削

素材をバンドソーなどによって、所定の長さに切断する。シアー切断は、素材に変形を生じる場合があるので、一般的には好ましくない。連続鋳塊を素材とする場合には、表面を外削して逆偏析層を除去する。

4.1.3 加熱

切断された素材を、プレスまたはハンマーの側の加熱炉に装入して、所定の鍛造温度に加熱する。加熱温度は、場合によっては $\pm 10^{\circ}\text{C}$ にコントロールする必要がある。加熱時には、温度、時間および雰囲気⁶⁾に留意して、素材表面からのガス吸収とブリストア発生⁶⁾を防止する。

4.1.4 鍛造

加熱炉内から素材を1個ずつ取出し、プレスまたはハンマーを用いて鍛造する。鍛造条件についてはすでに述べた。鍛造時に荒型を使用する場合でも、大型鍛造品では表2において加熱-鍛造-フラッシュ除去を何回か繰り返すことになる。荒型によるブリフォームは、最終形状に比較してコーナー半径、フィレット半径および抜き勾配を大きくする。そして加圧方向の材料寸法を大きくして、仕上型内で材料が十分に変形するように留意する。

型設計の詳細および鍛造設備については、章を改めて説明するので、ここでは潤滑について述べる。潤滑は材料の型内への充填性および表面品質の多くを左右する重要な因子である。潤滑剤は、大別して表3に示すものがあり、一般にグラファイト（黒鉛）を鈹物油、灯油または水で希釈して使用する。液圧プレス鍛造には、概して潤滑性が良く、型温度の降下が防止できる油性潤滑剤を用いることが多い。スプレータイプの油性潤滑剤は、型内に潤滑剤が十分に行きわたるので有効であるが、発煙が多いので環境対策を考慮する必要がある。塗布潤滑は粘性の高いものを使用し、環境面からは有利であるが、

潤滑が均一に行われない恐れがある。メカニカルプレスまたはハンマー鍛造には、型と素材の接触時間が短いため型温度を低くする。したがって冷却効果のある水溶性潤滑剤を用いるのが一般であり、水溶性のため型の冷却効果もある。また表3中のように、加熱前に塗布、乾燥して素材表面を黒鉛膜で覆う方法もある。

熱間鍛造の潤滑剤として重要なことは、黒鉛の分散安定性が良い（凝集・沈澱が少ない）こと、潤滑皮膜が滑らかで切れないことおよび黒鉛の純度、粒径が鍛造方法に適したものであることなどである。黒鉛系以外の潤滑剤としては、二硫化モリブデンが冷間～温間鍛造用として、またアルミニウム表面に結晶質の磷酸塩皮膜を生成させる化成皮膜処理が、冷間鍛造に用いられている。

なお、最近白色系の潤滑剤（水ガラス、ちっ化ほう素等）も開発されている。これらは潤滑性能およびコストが黒鉛より劣るが、作業環境を良くするため使用している例もある。

4.1.5 フラッシュ除去

比較的大きな鍛造品のフラッシュは、バンドソーまたは回転鋸で除去する。小物大量生産品は、トリミング用金型を別途準備し、これをプレスに設置して能率的に行うことが多い。

4.1.6 熱処理

熱処理型合金には、溶体化処理およびこれに続いて時効処理を施す。溶体化処理では、固相線温度直下にて十分な時間（通常30分～4時間程度）保持して、主溶質元素を完全に固溶させる。焼入れ時には、特に焼入れ遅れが生じないように注意を要する。薄物、小物ほど焼入れ遅れに敏感である。焼入れ水温は室温であるか、または焼入れひずみと残留応力の緩和のために 60°C 以上にすることもある（4.2.2参照）。焼入れ後T6、T73などの人工時効処理を施して、所定の機械的性能を得る。

4.1.7 洗浄

鍛造品表面に付着した潤滑剤や酸化皮膜除去のために、表面の洗浄を行う。それには通常 $60\sim 70^{\circ}\text{C}$ の3～8

7

%水酸化ナトリウム水溶液中に1~5分浸漬し、水洗後硝酸で中和し、さらに温水で洗浄、乾燥を行う。

4.1.8 検査・試験

完成した鍛造品に対して、要求に応じて品質検査と性能試験を実施する。材料内部の微小割れや介在物などの欠陥は、超音波探傷試験によって検出する。検出可能な大きさはその表面からの深さや位置によっても異なるが、一般には径約0.4 mm以上である。表面の鍛造欠陥、微小割れおよびピンホール状欠陥の検査には蛍光浸透探傷検査を行うが、これにより径約0.03 mm以上の大きさの欠陥が検出可能である。内部および表面欠陥の許容範囲については、MIL規格（米国軍規格）などに基準が定められている。

機械的性能の試験は、製品余肉部から試験片を採取するか、またはロットごとに実製品を1~数個切断し、所定の位置から試験片を採取して行う。また個々の製品につき、硬さ（主としてブリネル硬さ）を測定して性能をチェックすることが多い。7000系合金の応力腐食割れ防止を目的とするT73、T74等の熱処理品については、過時効の程度を、渦電流による導電率測定によって調べる。さらにマクロ組織およびミクロ組織の観察も必要に応じて実施する。鍛造品は人命に関わる重要部品として使用されることが多いので、品質管理は特に厳重に実施される。

4.2 健全な鍛造品の製造

構造用部材として使用される鍛造品は、内部および表面欠陥が存在してならないことは当然であるが、性能的には、静的強度のみならず靱性、疲労特性、耐応力腐食割れ性などのバランスを保ちながら、高性能を発揮することが要求される。そのためにはとくに下記の点に留意して、製造を行うことが肝要である。

- (a) 鍛錬成形比とグレنفローのコントロール
- (b) 結晶粒径のコントロール
- (c) 残留応力の緩和ないし除去

(a)については3.2で述べたので、(b)および(c)について説明する。

4.2.1 結晶粒径のコントロール

延性、靱性、疲労強度および耐応力腐食割れ性に対しては、結晶粒は細かいほど好ましい。細粒を得るには、再結晶温度以下で加工するか再結晶温度以上で強加工を行う方法があるが、熱間鍛造では必然的に後者になる。図11は、一定温度における再結晶粒の大きさと変形量との関係を模式的に示す。粗大結晶粒が生じる変形量は、合金材質および変形温度（鍛造温度）によって異なり、変形速度の影響も受けるので、これらの点にも注意を要

図11 一定温度における再結晶粒径と変形量との関係

図12 7075-T6自由鍛造品の焼入れ条件による残留応力の変化⁸⁾

する。結晶粒をコントロールする方法として、加工と熱処理とを組み合わせる加工熱処理⁷⁾も知られているが、工程が複雑になるため、実用的にはほとんど用いられていない。

4.2.2 残留応力の緩和または除去

熱処理型合金においては、溶体化処理後焼入れ時に、表面と内部との冷却速度の差によって、表面に圧縮、内部に引張残留応力が発生する。その値は、時に20 kgf/mm²に達することもある。残留応力は、後の時効温度が少々高めであっても、完全に緩和されることはない。したがってこのような残留応力が存在する鍛造品を機械加工すると、応力のバランスが崩れて寸法変化を起こしたり、表面に引張応力が現れて疲労強度が低下し、応力腐食割れに対する抵抗が小さくなる。残留応力の緩和ないし除去のために、次のような方法が採られている。

- (1) 荒機械加工後熱処理：焼入れ厚さが大なるほど残留応力が大きくなるので、最終製品に近い形状になるま

図13 軽加工による残留応力除去の原理⁹⁾

で機械加工を行ってから熱処理する。

(2) 焼入れ水温の調整：60～80℃の温水または沸騰水に焼入れを行う。図12から分かるように、焼入れ水温が高いほど残留応力は小さくなる。しかし機械的性質は低下するので、両者の兼ね合いから、60～80℃の温水焼入れを行うことが比較的多い。

(3) ポリアルキルグリコール焼入れ：原理は、水と混合したポリアルキルグリコールが、約75℃以上で熱分離を起こして焼入れ物体の表面を覆い、このグリコール膜を通して熱が奪われることにある。グリコール膜が厚くなるほど焼入れ速度が小となるのでグリコールの濃度(15～40%)、かく拌速度および温度を制御して、残留応力を緩和できる。本法は特に物体表面での蒸気発生が無く、熱が均一に奪われるので、リブ、ウェブの薄い精密鍛造品などのひずみ防止にも効果がある。

(4) 焼入れ後軽加工：水焼入れ後時効処理前に、図13の原理により、自由鍛造品に1～5%の冷間圧縮加工を行って残留応力を除去する(TX52またはW52処理)。型鍛造品では、冷間で型寸法と製品寸法とに差が生じることを利用し、室温または0℃以下に冷やした鍛造品を仕上型内にて若干塑性変形させて残留応力を除去する方法もある(TX54またはW54処理)。後者は、大物鍛造品やリブの高い鍛造品には応用できず。大容量のプレスが必要であるなどの難点がある。

(5) Uphill Quench：水焼入れ後ただちに液体ちっ素に保存し、次に高温の蒸気を吹き付けて急熱し、そのまま人工時効処理を行う。水焼入れ時と逆向きの応力を付加することになるので、残留応力が軽減される。

(6) ショットピーニング：製品表面に圧縮残留応力を付加するものである。

4.3 種々の鍛造方法

本項では、熱間普通級鍛造以外のいくつかの鍛造について、簡単に説明する。

図14 普通級鍛造品および精密鍛造品におけるグレインフロー⁹⁾

- (a) 普通級鍛造品、鍛造後
- (b) 同、機械加工後
- (c) 精密鍛造品

図15 精密鍛造品⁹⁾

4.3.1 精密鍛造

既述のごとく、ほぼ最終形状の製品を鍛造によって作るものである。普通級鍛造品に比べて、寸法公差およびドラフトは小さく、リブ厚さは薄く、コーナー半径、フィレット半径は小さい。ドラフトは、0～3°(普通級は3～7°)、リブ厚さは最小1.3 mm(同約7 mm)である。とくにドラフトが0～0.5°の場合をノードラフト鍛造と称する。精密鍛造には大きな鍛圧力を要し(3.5)、鍛造欠陥が発生しやすいので、特に注意して鍛造を行う。またコーナー半径、フィレット半径が小さいため型に高応力集中部が発生し、型の損耗がはげしくなりやすいので、型用鋼材は吟味したものを使用する。

精密鍛造品は図14から分かるように、機械加工によってグレインフローを切断することが無いので、性能的に信頼性が高いものになる。この点で、複雑な引張力、ねじり力が作用する航空機の窓枠などには必須なのである。図15に窓枠などの製品例を示す。表4は各種鍛造品の重量、コストなどの比較を示す。精密鍛造品はそれ自体かなり割高なものであるが、機械加工費を大幅に節減できるので、数量がまとまれば、トータルコストを安くすることが可能である。

4.3.2 シームレス鍛造(フラッシュレス鍛造)

通常、上下型をプレスで保持しておき、サイドプレスを使って材料を型内に充填させる。フラッシュの発生が

7

表4 各種鍛造品の重量、コスト等の比較¹⁾

	自由鍛造	ブロッカータイプ	普通級	精密級
重量	10x	(5~10)x	(2~5)x	x
単位重量当りのコスト	x	(2~3)x	(3~5)x	(5~25)x
型コスト	—	x	(2~4)x	(4~10)x
型組立てコスト	—	x	(2~3)x	(3~10)x
製造期間	x	(3~5)x	(5~8)x	≥8x
単位面積当りの所要荷重	x	(2~3)x	(3~5)x	(5~10)x

x: 基本単位

図16 シームレス鍛造品⁹⁾

ほとんど無いので、内部から全方向に圧力のかかる油圧機器部品(図16)などにおいて、信頼性の高い製品が得られる。

4.3.3 粉末鍛造 (P/M 法)

急冷凝固されたアルミニウム合金粉末を固化成形した素材を用いて鍛造した製品は、従来のインゴット (I/M) 法では限界に達してきている大幅な特性改良が達成できるプロセスとして期待が持たれている。

P/M 合金は大きく分けて3種類に大別される。高強度耐応力腐食割れ性 P/M 合金は、I/M 合金の耐応力腐食割れ性を維持して、約20%の強度向上が図られている。耐熱合金は、300°Cにおける引張強さ30 kgf/mm²が達成されている。耐摩耗性合金は、耐摩耗性と共に塑性加工性および切削加工性に優れる。これらの P/M 合金は、熱間鍛造時に割れやすいので鍛造温度を高め狭い範囲でコントロールする、なるべく解放端の無い密閉型を用いる等の配慮が必要である。

4.3.4 冷間鍛造

寸法精度および表面性状が良好で、比較的単純な形状の小物品に適用される。機械加工が少なく、熱作業が無

図17 鍛造機械における変形力とストロークとの関係⁹⁾

- (a) 液圧プレス
- (b) クランクプレス
- (c) ハンマー

いので自動化を行いやすい。大量生産品としてカメラ部品、VTR 部品、自動車部品、機械器具部品、レジャー用品等に多く使用されている。

高力系合金の2017, 2014, 7N01, 耐食合金の5056, 6061および快削合金である2011, 6262, 耐熱・耐摩耗合金である2218, 4032などが用いられている。

5. 設備および工具

5.1 鍛造機械

主な鍛造用機械は、液圧プレス、メカニカルプレス(主にクランクプレス)およびドロップハンマーである。機械特性としてそれぞれ、最大変形力一定、ストローク一定および最大エネルギー一定の特徴を有する。各機械の変形力とストロークとの関係を図17に示す。

液圧プレスは荷重負荷速度が小さいので、複雑形状または大物鍛造品の製造に適する。プレスには通常、型内から鍛造品を取出すための工夫として、押上ピンなどが備えられている。

プレスの大きさについて述べると、欧州では国家的なバックアップによって数万トン級の大型プレスが導入されているが、日本ではアルミニウム鍛造専用として最大9000トンプレスが稼働しているのみである。表5に各国に設置されている最大のプレス容量を示す。たとえばフランスの65,000トンプレスのテーブルの大きさは、6,000 mm×3,500 mmといわれる⁵⁾。表5には、 $K_w=25$ kgf/mm²とした場合の普通級鍛造品の製造可能な投影面積を併示した。しかし国内のプレスを使用しても生産技術の改善により、欧米の数万トン級のプレスを使用したものに匹敵する製品も製造されている。

メカニカルプレスは、比較的単純な形状の中～小物の

表5 各国に設置されている最大のアルミニウム鍛造用液圧プレス

国	最大のプレス (トン)	製造可能な型鍛造品の投影面積 (一片を正方形とした場合のサイズ) ^{注1)}
ソ連	75,000	30,000 cm ² (173 cm × 173 cm)
フランス	65,000	26,000 cm ² (161 cm × 161 cm)
米国	50,000	20,000 cm ² (141 cm × 141 cm)
西ドイツ	30,000	12,000 cm ² (110 cm × 110 cm)
日本	9,000	3,600 cm ² (60 cm × 60 cm)

注1) 普通級 ($K_w=25 \text{ kgf/mm}^2$ の場合)

型鍛造品を大量生産するのに適している。たとえば、500トンのクランクプレスで、1時間あたり1,400個の製造が可能である⁵⁾。ドロップハンマーは、自由鍛造および型鍛造の双方に使用可能であるが、メカニカルプレスと同様材料の変形速度が大きく、加工発熱があるのでこの点に注意して使用する。ハンマーは振動と騒音が大きいので、使用が徐々に限定されてきている。鍛造用機械として他に、リング状の鍛造品製造に用いるリングロール鍛造機械などがある。

5.2 加熱炉

鍛造素材用加熱炉には、直接加熱炉、マッフル炉、強制循環型加熱炉および誘導加熱炉などがあり、電気、重油または天然ガスを熱源とする。直接加熱炉使用時には、素材が燃焼ガスに直接触れるので、表面からのガス吸収に特に注意を払う。重油使用の場合、硫黄が触媒としてガス吸収を促進する¹¹⁾ので、硫黄分の少ないものを使用する必要がある。マッフル炉は、素材が燃焼ガスに直接触れないので、ガス吸収を防化しやすいが、熱効率はやや劣る。強制循環型加熱炉は、素材が短時間で加熱され、しかも材料温度コントロールを行いやすい。誘導加熱炉は、比較的小さな鍛造品を大量生産する場合には好都合である。

5.3 鍛造用型

熱間鍛造用の型には、耐熱性、耐摩耗性、靱性および切削性などに優れる合金工具鋼を用いる。国内で使用される主な鋼材の化学成分を表6に示す。No. 1は靱性に

優れるが、耐熱性、耐摩耗性は他より劣る。一応ハンマー用および大物型用であるが、安価であるので、一般に多く用いられている。No. 4およびNo. 5は耐熱性、耐摩耗性に優れるので、大量生産、精密鍛造品向きである。しかし逆に靱性にはやや劣る。No. 2およびNo. 3はこれらの中間的な性質を示す。

型彫りはミーリング、フライスまたは放電加工によって行う。型彫り寸法は次のごとくに、熱膨張を考慮したものとなる。

$$L_d = L_f(1 + \alpha_f \Delta T_f - \alpha_d \Delta T_d)$$

L_d : 型彫り寸法

L_f : 鍛造品の寸法

α_d : 型鋼材の熱膨張係数

α_f : 鍛造品の熱膨張係数

ΔT_d : 型の加熱温度と室温との差

ΔT_f : 鍛造品の加熱温度と室温との差

たとえば、 $L_f=100 \text{ mm}$, $\Delta T_d=\Delta T_f=400^\circ\text{C}$ とすると、

$$L_d = 100(1 + 24 \cdot 10^{-6} \cdot 400 - 12.5 \cdot 10^{-6} \cdot 400) \\ = 100.46 \text{ mm}$$

である。

鍛造用型は型加熱炉で所定の温度に加熱した後、プレスまたはハンマーに取付ける。液圧プレスでは、型温度を素材温度と同等または数十度低めにして、型をパーナール等で保温する。メカニカルプレスおよびハンマーの場合は、素材と型の接触時間が短いので、型温度を200°C程度に設定する。

6. 型鍛造品の形状設計

型鍛造品の形状は基本的には、グレンフローが製品に負荷される応力の方向に形成されるように型の設計を行い、しかも型の製作が容易で、型寿命が損なわれることなく経済的な鍛造品が得られるように計画する。鍛造品の形状は単純なものから非常に複雑なものまで無限に変化し、特に後者の設計には経験的判断を要することが多い。しかしここでは、鍛造品の形状設計を行う際に考慮しなければならない基本的な事項について述べる。

表6 主な熱間鍛造用型鋼材の化学組成 (wt%)

No.	JIS 相当記号	C	Si	Mn	P,S	Ni	Co	Cr	W	Mo	V
1	SKT4	0.55	0.2	0.4~1.0	≤0.03	1.2~2.0	—	0.8~1.4	—	0.2~0.5	0.0~0.2
2	SKD61	0.4	1.0	0.4	≤0.03	—	—	5.2	—	1.4	0.8
3	SKD62	0.4	1.0	0.4	≤0.03	—	—	5.2	1.3	1.4	0.4
4	—	0.35	0.4	0.4	≤0.03	—	—	3.0	—	3.0	0.5
5	—	0.4	0.3	0.4	≤0.03	—	4.2	4.4	4.4	0.4	2.0

7

図18 型割線の選び方の例³⁾

- (a) 経済的な方法
- (b) 好ましくない方法
- (c) 好ましい方法
- (d) 経済的で推奨される方法

6.1 型割線 (Parting Line)

鍛造型の設計では、まず型割線の位置と形状を決める。型割線の位置は、図5に示したように、グレンフローが製品に負荷される応力方向と直角にならないように定める。また型割線の位置は、リップやコーナー半径などの最適形状に影響するほか、型からの鍛造品の取出しやすさおよび仕上機械加工の工数にも影響する。型割線の選び方として主な考えをあげると、

- (1) 上型と下型の深さができるだけ均等になるようにする。
- (2) 肉厚の大きい部分の周囲に設ける。
- (3) リップまたは壁で囲まれた高さの異なるウェブのあるときは、ウェブに沿って設ける。
- (4) 鍛造面に対し型割線を傾斜させるときは、傾きを75°以内にする。

などである。実際にはこれらの基本を踏まえた上で、個々の製品ごとにグレンフローの形成、鍛造作業性および材料歩留なども考慮して、最も適した型割線の決定を行う。

図18は型割線の選び方の例を示す。(a)は下面を型割線とし、上型にのみ型彫りを行う例で、型彫り経費を節

図19 型鍛造における型ずれとその防止³⁾

- (a) 型ずれにより鍛造不可能
- (b) 推奨されない方法 (カウンターロックが必要)
- (c) 推奨される方法 (カウンターロックが不要)

減できる。このような場合、フラットな型は汎用性があり、経済的でもあるが、高いリップまたは壁をもつ場合には、大きな鍛圧力を必要とし、型内に材料を充填させることが難しくなる。(b)は好ましくない例で、型ずれを起こしやすい。(c)は製品を鍛造面に対して傾斜させて型割線を設けたものである。製品形状そのものが後述ドラフトの効果を有し、(a)、(b)に比べて優れた型割線を選択といえる。(d)は製品2個分の上型にのみ型彫りし、鍛造後に切断分割するもので、生産性の良い方法である。図19はさらに、型ずれを起こす場合とその防止方法を示す。(b)のようにカウンターロックを用いるか、(c)のように製品を傾斜させるように型割線を選ぶことによって、型ずれを防止できる。(b)は型費が割高になるので、(c)の方法が好ましい。

6.2 ドラフト (抜き勾配)

ドラフトは製品を型から取出しやすくするために設けられた勾配で、鍛造面に垂直な方向からの角度で表す。ドラフトの大きさは、鍛造方法、鍛造機械の種類および鍛造温度などを考慮して決定する。普通級鍛造品のドラフトは3~7°であるが、鍛造機械に製品の取出し装置がある場合および鍛造品と型との温度差が小さい場合に

図20 ドラフト，コーナー半径およびフィレット半径を一定としたリブの例³⁾

図21 逆ドラフトがある場合の鍛造
(a) 鍛造不可能
(b) 鍛造可能

は，ドラフトを小さめにすることができる。精密鍛造のドラフトは $0\sim 3^\circ$ で，この場合型製作に工夫を要する。特にノードラフト鍛造では，割型（組合わせ型）を用いて製品の取出しを容易にすることが多い。

型製作を経済的に行うためには，各部のドラフトを一定にすることが重要である。図20はドラフトおよび後述のコーナー半径，フィレット半径を一定にしたリブの例である。リブ頭部の厚さは一定で，底部の厚さが変化している。もし底部の厚さも一定にすると，種々のドラフトが混在することになり，型彫り費が高額になる。

図21は逆ドラフトがある場合の例である。(a)のように，型割線の両側に逆ドラフトがあるものは鍛造不可能であるが，(b)のごとく一方の型のみ逆ドラフトがある場合は，反対側のドラフトをさらに大きくとることによ

図22 推奨されるコーナー半径³⁾

図23 推奨されるフィレット半径³⁾

R_c : ガターにメタルが流れ込まない部分
 R_u : ガターにメタルが流れ込む部分

って鍛造可能となる。

6.3 コーナー半径およびフィレット半径

コーナー半径，フィレット半径は，型への応力集中と型に材料を充填させるのに必要な鍛圧力を考慮して決定する。リブ高さが大なるほど，これらの半径を大きくする必要がある。各種鍛造について推奨されるコーナー半径およびフィレット半径を，それぞれ図22および図23に示す。一般にこれらの半径が大きいほど鍛造が容易で，

図24 型鍛造工程における欠陥発生例³⁾

左側：欠陥発生なし(大きなフィレット半径)
右側：欠陥発生あり(小さなフィレット半径)

小さいと型に高応力集中域が発生して型損耗が著しくなる。また、フィレット半径が小さすぎる場合には、図24に示すように型への材料の円滑な流入が妨げられて、鍛造欠陥が生じやすくなる。

6.4 リブ高さ

リブの高さは、リブ幅によって制限されるが、普通級鍛造品の場合では高さ/幅比を8/1にまで、精密鍛造では20/1にまですることができる。また、図22および図23に示したように、リブ高さはコーナー半径およびフィレット半径によっても制約される。

6.5 ウェブ高さ

鍛造可能なウェブの最小厚さは、鍛造品の寸法（特に型割線上の平均幅）と全投影面積（打ち抜き穴部は除く）とに依存する。標準的な最小ウェブ厚さを表7に示す。図25のように、ウェブに打ち抜き穴が存在する場合またはウェブにテーパをつけることが可能な場合には、材料の移動が容易になるので、薄いウェブが得られやすく

表7 推奨される最小ウェブ厚さ（普通級および精密級鍛造品）

平均幅 (mm)	全投影面積 (mm ²)	最小ウェブ厚さ (mm)
76以下	0.65×10 ⁴ 以下	2.29
102	1.94	3.05
152	3.87	4.06
203	6.45	4.83
279	12.9	6.35
356	22.6	7.87
457	35.5	9.40
559	54.8	11.18
660	77.4	12.70
864	129	15.75
1041	194	19.05
1194	258	31.75
1321	323	50.80

図25 薄いウェブを得る方法³⁾

- (a) 打ち抜き穴がある
(b) ウェブにテーパがついている

なる。ウェブ厚さが薄くなるほど、鍛造中に他の部分より冷却されやすくなる、あるいはそりを生じやすくなるなどの理由により、寸法精度を確保することが困難になる。また後の熱処理工程でひずみが発生しやすくなるので、薄いウェブを要求することはコスト上昇の原因になる。

6.6 CAD/CAM

鍛造はなんといっても金型の設計が最大のポイントであり、それによって金型の製作費、製品の生産性・品質が大きく変わる。金型の設計は技術者の経験の蓄積に負うところが大きく、技術者の定着率の低いアメリカではその危機感もあり、コンピュータによる金型の設計・製作 (CAD/CAM) の研究が盛んである。実用化は今のところ簡単な形状に限られているようであるが、今後の技術として注目されている。

図26¹⁵⁾はコンピュータによる鍛造品の一断面における鍛造応力を計算した例である。鍛造品を類似形状のいくつかのブロックに分け、それぞれの代表断面について断面形状、材料の物性、温度、鍛造速度、圧下量等の条件

図26 コンピュータによる鍛造品断面の鍛造応力計算例

図27 CAD/CAMによる荒型の設計例

図28 有限要素法による金型のたわみの解析例

を入力することにより、断面の鍛造応力が求まり、これが積分されて部品の成形に必要な鍛造力を求めることができる。これは、クランクプレスを使う場合等に非常に有用である。

図27はコンピュータによる荒型の設計の例である。仕上型の断面形状をインプットすることにより基本的な設計基準に従って荒型形状が描かれ、実際に鍛造するイメージで仕上型を画面上で動かしながら、荒型形状を修正して仕上げていくということができる。

(a)

(b)

(c)

図29 コンピュータによる鍛造中の材料の変形予測

鍛造時の金型の変形についても図28に示すように有限要素法により予測ができる。また、図29のように材料の変形する様子をコンピュータでシミュレーションする研究も進んでおり、こういった技術が完成すると、まったく試作等の手を経ることなく、荒型・仕上型のデザインが可能になってくる。しかし、精密鍛造のような形状への応用は先のことと思われる。

7. おわりに

アルミニウム合金の主として熱間鍛造について解説した。欧州における熱間鍛造は、国家的規模で航空機産業の発展がはかられたので、大型プレスの設置による大物一体鍛造品の製造や、精密鍛造などの技術向上が進み、生産量も多く、アルミニウム産業の中でも、一つの大きな分野を築いている。

これに対し国内では、プレス容量は欧州と比べてかなり小さいが、技術力により数万トンプレスを使用したのに匹敵する大型鍛造品を製造している。しかし、生産量はまだまだ少ないので、H-II ロケット、宇宙ステーションをはじめとする宇宙産業用大型鍛造品の開発・製造、および自動車の軽量化などの機運が高まりつつある

7

のでこれを機に鍛造品の需要拡大，設備および技術力の更なる向上がはかられ，欧州にひけをとらない分野に発展することを念じている次第である。

本稿によって鍛造に関する理解が少しでも深まって頂ければ幸いである。なお，より深い知見を得たい方のために，文献 5) および 13) を，特に形状設計に関しては文献 3) および 14) をお奨めする。

参 考 文 献

- 1) A. F. Favre: *Metals Eng. Quart.*, **8** (1968), 1.
- 2) 阪上，柴田，池永，加藤：神戸製鋼技報 R & D, **21** (1971), 81.
- 3) “Aluminum Forging Design Manual”, the Aluminum Association Inc., (1967), 10.
- 4) K. H. Miska: *Mater. Eng.*, **74** (1971), 14.
- 5) H. Meyer-Nolkemper: *Aluminum*, **55** (1979), 226, 286.
- 6) 浅見：軽金属学会シンポジウム “アルミニウムの熱間加工に関する諸問題”，(1977), 61.
- 7) J. H. Wanhill and G. F. J. A. van Gestel: *Aluminum*, **54** (1978), 573.
- 8) “Aluminum for Aerospace Applications”, ALCOA, 1961.
- 9) Design Manual “Alcoa Aluminum, Precision Forgings”, ALCOA, 1974
- 10) 浅見，松本，浅田：古河電工時報 No. 83 “急冷凝固アルミニウム粉末冶金材料の特性および研究開発動向”，(1989), 92.
- 11) 山下，松本：軽金属協会第 2 回講習会テキスト，“アルミニウム粉末鍛造の現状と将来”，(1988), 10.
- 12) D. E. J. Talbot: *Int. Met. Rev.*, **20** (1975), 166.
- 13) T. Altan et al: “Forging Equipment., Materials and Practices” Battelle Columbus Lab., 1973.
- 14) “Forging Design Handbook”, ASM, 1972.
- 15) Battelle: “Close Tolerance Forging Process Technology, A Reseach and Development Proposal”, (1980).