アルミニウム鍛造材

高田 与男*

Aluminum forgings

Kumio TAKADA*

1. はじめに

鍛造技術の歴史は非常に古く、工業的にも産業革命以来金属の成形法として用いられている。アルミニウムの鍛造も延展性が良いことから、アルミニウムが金属として工業的に用いられはじめた時代からすでに採用されている。

鍛造材料あるいは鍛造法が飛躍的に発展したのは近代航空機産業の発展と深いつながりを有している。アルミニウム合金の鍛造品は軽量で比強度が高く、また材料の信頼性が鋳造品に比べて高いことから、非定常な形状を有する機体部品やエンジン部品、脚部品などに強度部材として、その特長を発揮している。また鍛造品と航空機の結びつきには、ジュラルミンや超ジュラルミンなど高力合金の開発が深くかかわっており、現在でも合金開発や製造技術の進歩の源動力となっている。

これら鍛造品はいわゆる熱間鍛造法であつて、材料を再結晶温度以上に昇温して塑性変形する技術であり、これとは別に常温に近い温度域で成形する鍛造法があり、冷間鍛造法と称している。

冷間鍛造法は押出しに類似した成形様式に代表され、インパクティング (Impacting 又は Impact Extrusion) とも呼ばれている。

アルミニウム合金の鍛造品は航空機部品は言うに及ばず、船舶、車両・産業機械・電子機器・原子力など非常に広い分野で用いられており、特に熱間鍛造の分野では鍛造品の大型化、形状・寸法の精密化に関する設備・技術の改良が進んでいる。また一方では高力合金や高じん性合金など新しい合金が実用段階に入っている。

2. 鍛造方法

2.1 熱間鍛造法

鍛造方法を大別すると自由鍛造法と型鍛造法がある。

2.1.1 自由鍛造法 (Hand Forging)

液圧プレスまたはハンマーにより、平金敷や種々の治工具を用いて素材に塑性変形を加え、角柱・厚板・円形・円盤・リングなど比較的単純な形状に成形する方法である。

図1に各種鍛造法による形状を比較して示す。自由鍛造品がそのまま部品として用いられることは全くなく、機械加工用の素材であり、圧延や押出などでは製造できない厚物・異形の素材に適用される。また型鍛造化の前段階のプロトタイプや本来製造個数の少ない部品に適用される。図2に製品例を示す。

2.1.2 型鍛造法 (Die Forging)

金型を用いて特定形状に鍛造する方法で、最終製品形状に対する余肉の程度、あるいは形状の忠実さにより、

ブロッカタイプ鍛造法 (Blocker Type Forging)、コンベンショナルタイプ鍛造法 (Conventional Type Forging) および精密鍛造法 (Precision Forging) に分類されている¹⁾。

図3に一般的な金型構造を示す。金型は上下2分割が基本であり、製品部の外周には成形した時に発生する余剰のメタルを逃がすガッター (Gutter) を設け、製品部とガッターの間にフラッシュランド (Flash Land) を付ける。フラッシュランドは製品部金型空間にメタルを充填するに必要な静水圧を保つのに重要な役割を果たすとともに、成形後に製品部から余剰メタル部分すなわちバリ (Flash) を切り放しやすくしている。

金型の作動方向に対して垂直な方向の平面部分をウェブ (Web)、平行な方向をリブ (Rib) と称し、リブの側面には抜き勾配を付ける。またウェブとリブの角・隅にはメタルを流れやすくするためRを付ける。特に製品形状に内接するコーナーRはメタルを完全充填するに要する鍛造圧力すなわち鍛造力量に大きく影響し、コーナーRが小さいほど高い圧力が必要となる。

* ㈱神戸製鋼所 名古屋工場。Kobe Steel, Ltd. (Nagoya)

図1 各種鍛造品の形状比較

図2 自由鍛造品の形状

図3 熱間鍛造用金型と各部の名称

前述した3種類の鍛造法で金型構造や成形方法は共通しているが、次のような差異がある。

(1) ブロッカタイプ鍛造法

製品のフィレットRやコーナーRが大きく、ウェブやリブも厚い。抜け勾配は $5 \sim 10^\circ$ と大きく付け、図1に示すように、部品の最終形状に対して全面に余肉を有している。鍛造圧力は $1.5 \sim 3 \text{ ton/cm}^2$ で、型鍛造では、比較的低い圧力で成形できる。また形状がなめらかなので、金型は1型で製造するのが普通である。

(2) コンベンショナルタイプ鍛造法

型鍛造の中で最も一般的なタイプで、ブロッカタイプに比べて、より最終部品形状に近い形に鍛造する。仕上型の他に、素材を予備成形するための荒型が必要で、鍛造回数も多くなる。ウェブや取付ボスなどを一部黒皮で使用する事が多い。このためブロッカタイプに比べて寸法公差は厳しくなる。型割面に垂直な方向には抜け勾配が必要で、 $3 \sim 10^\circ$ が普通である。鍛造圧力はコーナーRが小さくなり、リブ・ウェブが薄くなるのでブロッカタイプより高く、 $2.5 \sim 4 \text{ ton/cm}^2$ となる。

(3) 精密鍛造法

金型構造や基本的な鍛造方法はコンベンショナルタイプと同様であって、ユーザー・フィレットRがより小さく、抜け勾配も $1 \sim 3^\circ$ で、リブ・ウェブを薄く鍛造する。したがって、金型も1～2種類の荒型が必要で、鍛造回数も多くなる。しかしリブ・ウェブ・ボスなど黒皮のまま使用する部分が大部分となるので、最終部品にするための機械加工費は大幅に低減できる。鍛造圧力は $4 \sim 8 \text{ ton/cm}^2$ 必要である。

表1にこれら3種類の鍛造品について、それぞれの寸法公差を示す。また図4にそれぞれの鍛造品に適用される標準的なフィレットR・コーナーRを示す。Rの大きさは鍛造品の種類と型割り面からの位置によって異なる。

写真1(a)～(d)にそれぞれの鍛造品について製品例を示す。

(4) ノードラフト鍛造法 (No Draft Forging)

名前のとおり、製品に抜け勾配をほとんど付けずに成形する特殊な鍛造法である。この鍛造法は、ほとんど部品の最終形状に成形できるのが特長で、機械加工費を極端に省くことができる。通常は組付用の孔加工とか特に精度を要求される嵌合部のみを加工するだけである。

この特長は前述した精密鍛造法と良く似ているが、図5に示すように金型構造から異なっており、精密鍛造法はブロッカ・コンベンショナルタイプと同様に、金型を上・下に割って鍛造するために、抜け勾配が必要で、それだけ余肉を付けねばならない。また図1の左側のリブのようにアンダカットのある場合も余肉となる。

ノードラフト鍛造法では製品形状に合わせて型割り面を設定するため、いくつかの分割型をホルダーに納めて鍛造する。したがって抜け勾配 $0 \sim 30^\circ$ としても不都合ない。また部分的にアンダーカットがあっても成形可能となる。

図6に基本的な金型構造を示す。変形方式の基本は押出に類似しており、上下ポンチでウェブを圧縮してリブ

表1 型鍛造品の寸法公差

製品重量/kg	鍛造面積/cm ²	鍛造方向の厚さ公差/mm		
		精密鍛造	コンベンショナルタイプ鍛造	ブロッカタイプ鍛造
0.2 以下	65	+0.50~-0.25	+0.50~-0.25	+0.80~-0.41
0.2~0.5	194	+0.50~-0.25	+0.80~-0.41	+1.20~-0.80
0.5~2.3	645	+0.80~-0.25	+1.20~-0.41	+1.57~-0.80
2.3~9.1	2580	+1.20~-0.41	+1.57~-0.80	+2.36~-1.57
9.1~22.6	4840	+1.57~-0.80	+2.36~-0.31	+3.18~-1.57

製品重量/kg	全長/mm	型ずれ公差/mm		
		精密鍛造	コンベンショナルタイプ鍛造	ブロッカタイプ鍛造
0.5 以下	254	0.25	0.38	0.38
0.5~2.3	431	0.38	0.50	0.50
2.3~9.1	635	0.50	0.80	0.80
9.1~22.6	1270	0.80	1.14	1.14
22.6~45.3	1905	1.14	1.52	1.52

図4 各種鍛造法におけるフィレットRとコーナR¹⁾

を成形する。押出と異なるのは、リップ上端が薄いバリで紋られた密閉型となつてゐることである。したがつて成形圧力は端面を開放する押出よりかなり高く、加えてウェーブも薄くなるので4~8 ton/cm²は必要である。

ノードラフト鍛造品の一般的な寸法公差を表2に示す。肉厚公差は精密鍛造品と同程度である。

写真2(a)~(c)にこの鍛造品の例を示す。

(4) 押出鍛造法 (Extruded Forging)

管・筒状の製品を成形するのに、押出を利用する方法で、自由鍛造法で製造するより成形コストが安く、寸法精度も高くなる。しかし金型費が高いので少量生産には不向きである。図7に金型構造を示す。従型の後方押能方式が一般的であり、鍛造圧力は2~3 ton/cm²である。

写真3(a)~(c)にその製品例を示す。

10

(a) ブロックタイプ鍛造品

(b) コンベンショナルタイプ鍛造品

(c) コンベンショナルタイプ鍛造品

(d) 精密鍛造

写真1 各種の型鍛造品

図5 コンベンショナル鍛造法とノードラフト鍛造法の製品形状比較¹⁾ 図6 ノードラフト鍛造金型²⁾

図7 押出鍛造法

(5) シームレス鍛造法 (Seamless Forging)

別名フラッシュレス鍛造法 (Flashless Forging) ともいわれ、密閉キャビティ内で、まったくバリを出さない

(a) 電機部品

(b) 航空機用フィッティング

(c) 旅客機用窓枠

写真2 ノードラフト鍛造品

表2 ノードラフト鍛造品の寸法公差³⁾

寸 法		公差 (mm)	
長さ, 幅, 高さ, 肉厚		並 級	±0.8
		精 級	+0.6 -0.3
鍛 造 方 向 の 厚 さ		並 級	±0.8
		精 級	+0.6 -0.3
段	差	0.25	
壁	肉 厚	0.60 0.30	
ミ ス マ ッ チ		最 大	0.40
抜けこう配ノードラフト		0°+0°30" -0.0	
ロ ー ド ラ フ ト		1°±30"	
フ イ レ ッ ト R		1.6	
コ ー ナ ー R		0.8	
ば り 残 長		最 大	0.8
ガ ス 抜, ノックアウト			
浮	出	最 大	0.8
沈	み	最 大	0.3

写真3 押出鍛造法で成形した船用エンジンピストン

か、あるいは限定した方向にのみバリを流して成形する鍛造法である。内圧が加わるシリンダーやバルブボディなどのメタルフローを改善し、型割り面からバリが流出したために生ずる材料の方向性を少なくすることによって、内面が加わった場合の強度を高めることができる。

油圧シリンダー素材をコンベンショナル法で鍛造した場合の変形について実験した結果を図8に示す。バリが流出する型割り面付近では大変形領域ができ、この素材から中空のシリンダーを製作し、内圧を加えると円周方向の引張応力に対して、型割り面付近は最も強度が低い

10

図 8 コンベンショナル鍛造における変形様式

図 9 マルチラム鍛造⁴⁾

写真 4 シームレス鍛造品

ST 方向となる。シームレス鍛造は、バリ流出を防止して組織の方向性による強度低下を生じさせない鍛造法である。

シームレス鍛造法の一例として図 9 に示すようなマルチラム鍛造がある。これは図に示すように金型の割り面を閉じて横方向から加圧するような方法により、円周方

図10 熱間鍛造の製造工程

表 3 アルミニウム合金のソーキング温度⁶⁾

合金 (A A呼称)	加熱温度℃	加熱時間 hr
1100, 3003	550～570	12～24
2014	480～510	6～12
2017	480～510	4～12
2024	480～510	4～12
5052	480～510	4～12
5056	480～510	4～12
6061	480～510	8～10
6063	480～510	8～10
7075	420～480	8～20

向のバリ流出を制限する。これには特殊な鍛造設備が必要である。

写真 4 にシームレス鍛造品の 1 例を示す。

2.1.3 鍛造工程

鍛造工程は鍛造法、寸法精度、材質、品質保証の程度によつて製造工程が異なるが、最も一般的なコンベンショナルタイプ鍛造品の標準的な工程を図10に示す。

(1) 鍛造用素材と予備鍛錬

鍛造用素材は製品が小物の場合には押出丸棒を、また大物や製品のグレنفローを特別に制御する必要がある場合には半連続鋳塊を予備鍛錬して用いる。予備鍛錬は

図11 φ500 mm 鋳塊の鍛伸比と機械的性質⁵⁾

鋳塊を均熱処理した後、自由鍛造法で丸棒または角柱に鍛造して、鋳造組織を分塊して鍛錬組織にする。また鋳造欠陥もこの工程で消滅させる。

鍛造われが生じやすいのはこの工程であり、均熱処理、鍛錬初期の変形方法すなわち圧下量・温度条件が重要である。表3に鍛造用アルミニウム合金鋳塊の均熱処理条件を示す。加熱時間は鋳塊の直径によつて異なる。

鍛錬量の増大とともに機械的性質が向上する。図11に示すように、鍛伸比Sが増大するにしたがつて、引張強さ、伸びともに向上し、4S程度ではほぼ鍛錬材の機械的性質が得られる。またSの増大とともにグレنفローに平行な方向(L方向)とその垂直方向(ST方向)とに機械的性質に差を生じる。

予備鍛錬した素材は所定寸法に切断して、荒型鍛造または荒地取りをする。

(3) 型鍛造

鍛造用素材を電気炉あるいはガス炉にて予熱し、プレスまたはハンマーにて鍛造する。金型には荒型と仕上型があり、製品形状の複雑さに応じて1～3回に分けて鍛造する。各鍛造毎に発生する鍛造欠陥を除去した後再加熱して鍛造をくりかえす。荒型は仕上型で鍛造するための予備成形であり、仕上型鍛造で適正なグレنفローとなり、鍛造欠陥を生じないように体積配分するのが目的である。また予備成形で金型を用いずに自由鍛造法で行うこともあり、これを荒地取りと称する。

型鍛造には水圧・油圧プレス、メカニカルプレス、ハンマー、フリクションプレスなどが用いられる。写真5に8,000 ton 油圧鍛造プレスを示す。

型鍛造では型設計、グレنفローの制御、鍛造温度、

写真5 8000 ton 型鍛造プレス

鍛造力量・成形限界の持定、潤滑などが重要な技術である。

(a) 型設計とグレنفロー制御

型設計する際に重要なのは、荒型設計と型割り面の決定である。またグレنفローは製品が使用される時の負荷応力方向にそのL方向を一致させねばならない。

荒型の設計は製品形状が非対称であり、型鍛造中の変形が押出や圧延のように定常的でないので、理論計算は一部にしか適用できない。したがって経験則にもとづき型の断面形状や体積配分を行なうことが多い。しかし図12に示すように、仕上型のリブ高さ(h)とリブ厚さ(b)の関係から荒型形状を推定する方法や図13のように仕上型に対して係数を使つて計算する方法がある。また製品形状を軸対称・平面ひずみモデルなど理論計算が可能なモデルに分解して設計に応用する方法も試みられている。

型割り面は鍛造のしやすさ、製品の抜き出しやすさ、金型製作の難易などを考慮して決定する。型割り面の位置は製品のグレنفローと密接に関連するので、製品形状に対してグレنفローをどのように流すかを中心に決定するのが普通である。図14に型割り面の位置とグレنفローの関係を示す。また図15は同一製品で型割り面を2種類に変えた場合を比較して示す。

型鍛造品は製品形状に沿つてグレنفローが形成されるのが好ましく、フースルー (Flow through)、エンド

10

グレン (End grain), デッドメタル (Dead metal) は避けなければならない。図16に不適当とされるグレンフローを示す。もちろんこのようなグレンフローの乱れが著しくなると鍛造欠陥を生ずる。

(b) 鍛造温度

熱間鍛造は通常380~480℃で行なわれ、表4に示すように合金ごとに適正温度範囲が定められている。鍛造温度の上限は共晶熔融や高温粒界われを防止するため、固相線より30~50℃低くなっている。また下限は鍛造われが生じない温度であるが、これは予備鍛錬量や変形方法・変形速度によつて異なるので必ずしも一定ではない。近年造塊技術が進歩し、铸塊の結晶粒・晶出物の微細化、酸化物の除去、脱ガスなどが改善されており、変形能は向上しているのので、表4より低い温度で鍛造しても鍛造われを生じない場合もある。

掘込み
荒型
仕上型
	$h = b$	$h = 2b$	$h = 3b$

図12 H断面鍛造品の金型数⁷⁾

変形による発熱は変形量と変形抵抗によるが、熱間加工では変形抵抗が加工温度とひずみ速度すなわち変形速度に依存するので、変形速度が大きいハンマーやフリクションプレスでは鍛造温度を低目に押える必要がある。

(c) 鍛造性

鍛造性は材料の変形抵抗と変形態で評価される。変形

仕上型の寸法	荒型の寸法
ウェブ厚さ, t_f	$t_b = (1 \sim 1.5) t_f$
フイレットR, R_{ff}	$R_{bf} = (1.2 \sim 2) R_{ff}$
コーナR, R_{fc}	$R_{bc} = (1.2 \sim 2) R_{fc}$
抜けこう配 αf	$\alpha b = \alpha f, 3 \sim 7^\circ$
リブ幅 W_f	$W_b = W_f - 0.8$

図13 コンベンショナルタイプ鍛造における仕上型と荒型寸法形状の関係⁷⁾ 図14 型割線の位置がグレンフローにおよぼす影響¹⁾ 図15 型割線と抜けこう配¹⁾

図16 不適当なメタルフロー

表4 アルミニウム合金の鍛造温度¹⁰⁾

合 金	鍛造温度 (°C)
2014	420~460
2219	430~470
2618	410~450
4032	415~460
5083	405~460
6061	435~480
7075	385~435
7079	405~450

抵抗は鍛造荷重の推定や鍛造機械の選定など力量計算の基本となる数値である。変形抵抗はひずみ量・ひずみ速度、温度、材質で異なる。図17に2014、7075合金の変形抵抗とひずみ量・ひずみ速度・温度の関係を示す。図18には鍛造性を単位成形エネルギーあたりの変形量で相対比較した結果を示す。これによれば6000系合金が鍛造しやすく、7000系、5000系が鍛造しにくい結果となっている。2000系は両者の中間である。

変形能は連続変形で割れずに変形できる最大ひずみ量で表わすことができ、ねじり試験、引張試験、切欠円柱圧縮試験、くさび圧縮試験などが提案されている。図19に引張試験の破断のびで比較した結果を示す。6063の変形能が最も大きく、2014は小さく、7075はその中間である。いずれの合金も約300°C以上で変形能が大きくなり、370~480°Cで増大する。

(d) 鍛造力量と成形限界

製品ごとの鍛造圧力あるいは所要力量を詳細に計算するのは困難である。大まかには各鍛造法における平均鍛造圧力に製品の投影面積を乗じて力量を推定できる。平均鍛造圧力は、コンベンショナルタイプ鍛造法では3

図17 鍛造用合金の変形抵抗—ひずみ曲線(a)
変形抵抗—温度・曲線(b)
変形抵抗—ひずみ速度・曲線(c)⁹⁾

ton/cm²であり、ノードラフト鍛造法では6 ton/cm²である。さらにこの結果にウェブの肉厚など形状要因や温度を考慮して補正すると、ほぼ実際に合った力量が得られる。ウェブの肉厚が薄くなるほど所要鍛造圧力は高くなる。図20に8000 ton プレスでの鍛造可能寸法を示す。

型鍛造での成形限界については色々な考え方がある。まず、鍛造可能な肉厚については表5に示すように、製品の平面積に応じた推奨値があり、その限界は2.5 mmである。またフィレットRとコーナーRについては図4に推奨値を示してある。

コンベンショナルタイプの鍛造品などのように、型を上下に割る鍛造方法では、リップやボスの肉を盛り上げる

10

図18 代表的な鍛造用アルミニウム合金の鍛造温度と鍛造性⁸⁾

図19 アルミニウム合金の変形能⁹⁾

には限界があり、リブ高さ(h)とリブ幅(W)の比は8:1が最大である。一方ノードラフト鍛造の場合は、密閉に近い状態で成形することから、鍛造圧力を高く保てるので、成形限界を15:1あるいは23:1まで上げることができる⁴⁾。

(e) 潤滑

熱間鍛造では潤滑の良否が、鍛造力量、鍛造欠陥、成形の良否、グレンフローに影響するので、潤滑剤の選定および潤滑条件の決定は鍛造工程の重要なポイントである。一般的には、高純度で微粒の黒鉛で油性タイプのもが使用されている。黒鉛系潤滑剤は350°Cより高い温度で塗布条件により潤滑切れを生じ、金型と素材の焼付が起りやすくなる¹²⁾。

(4) 酸洗

コンベンショナルタイプ	ノードラフト
鍛造面積 $S_{MAX} = 2,600 \text{ cm}^2$ $S'_{MAX} = 1.5 S_{MAX}$	$S_{MAX} = 1,700 \text{ cm}^2$ $S'_{MAX} = 1.3 S_{MAX}$
$S_{MAX} = L \times W$ 	$S_{MAX} = L \times W$
$S_{MAX} = \pi D^2 / 4$ ϕD 	$S_{MAX} = \pi D^2 / 4$
$S'_{MAX} = \pi D^2 / 4$ ϕD 	$S'_{MAX} = \pi D^2 / 4$

図20 8000 ton プレスによる型鍛造可能寸法

表5 最小ウエブ厚さ⁵⁾

鍛造品の平均幅 mm	鍛造品の平均面積 cm^2	ウエブの最小厚さ mm	
		アルミニウム合金	マグネシウム合金
75以下	60	2.5	3.0
100 "	200	3.0	4.0
150 "	400	4.0	5.0
200 "	650	5.0	6.5
275 "	1,300	6.5	8.0
350 "	2,250	8.0	9.5
450 "	3,500	9.5	11.0

注 1) 打ち抜き穴は平面積に含まない。

2) 幅と平面積が同一でない場合は大きい方をとる。

鍛造品の表面に付着した潤滑剤や酸化皮膜を除去するために、また蛍光浸透探傷検査の前洗浄処理として酸洗工程がある。60~80°Cの3~15%苛性ソーダ水溶液中に1~5分浸漬後硝酸で中和し、水洗乾燥する。

(5) 検査

鍛造品の検査としては寸法検査、蛍光浸透探傷検査、超音波検査などがあり、蛍光浸透探傷は表面欠陥を、超音波検査は内部欠陥を検出するために行なう。

鍛造品は高い信頼性を要求されるので、これらは全数検査である。

(a) 後方押出

(b) 前方押出

図21 冷間鍛造法¹⁰⁾

製品の強度や耐応力腐食われ性を保証するのに、ブリネル硬さや電気伝導度検査が行なわれる。また強度については、製品に添付して製造工程を流した別取試験片や実体延長部から切出した試験片で引張り試験を行なう。

これらの他にミクロ組織、マクロ組織検査を行なうこともある。

2.2 冷間鍛造法

冷間鍛造の変形様式は押出である。図21に成形方法を示す。素材を型の凹部に入れ、ポンチを押込むことにより成形する。押出と同様にポンチの進行方向に対して、逆方向に成形するのを後方押出、同方向に流すのを前方押出と称する。また図22に示すような、両法の組合せもある。もちろん熱間鍛造のコンベンショナルタイプのような鍛造を低い温度で行なうこともある。図23に冷間鍛造の金型構造例を示す。

鍛造素材には押出丸棒や圧延板を用い、所定寸法に切断あるいは打抜きして使用する。素材寸法は製品の歩留り、寸法精度に影響するので、高精度でなければならない。

図22 冷間鍛造における前後方押出¹⁰⁾ 図23 冷間鍛造の金型構造（後方押出）²⁾

冷間鍛造は薄肉で高精度な製品を多量に生産できるのが特長であり、1回の変形量が高いので、安定した品質を得るには、潤滑の良否が大きく影響する。熱間鍛造では黒鉛系の潤滑剤を使用するが、冷間鍛造ではいわゆるボンデライト処理により、素材の表面に金属石けん被膜を作り、これを潤滑膜としている。この被膜は常温では大きな変形に対して良好な潤滑状態を特続する。冷間鍛造が多量生産技術として発展したのは、ボンデライト処理によるところが大きい。

冷間鍛造にはいわゆるナックルジョイントプレスが良く用いられる。成形速度が40～400 shot/min と大きく、芯精度も良い。数100 ton 級が良く用いられている。

鍛造回数は通常1回であるが、形状が複雑な場合や、加工硬化が大きくなり過ぎる場合は、中間焼鈍して2～

10

3回で鍛造する。鍛造圧力は8～12 ton/cm²であり、熱間鍛造よりかなり高い。図24に冷間鍛造の標準工程を示す。

純アルミニウム、Al-Mg系などの非熱処理合金は鍛造後ひずみ取り焼鈍する。また Al-Cu系、Al-Si-Mg系、Al-Zn-Mg系などの熱処理合金は溶体化処理後焼入れし、人工時効処理する。

図25にいくつかの製品例を示す。

3. 鍛造用合金と熱処理

3.1 鍛造用合金

展伸用アルミニウム合金の多くは鍛造用合金としても使用可能である。表6に代表的な化学成分と機械的性質

図24 冷間鍛造工程

(a) 管形状

(b) 缶形状

図25 冷間鍛造製品例¹⁰⁾

を示す。また表7に特に良く用いられる合金の特長と用途をまとめて示す。

3.1.1 1100, 3003合金

変形抵抗が他の合金の $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ であり、冷間鍛造で良く用いられている。耐食性が良く、1100は食品関係の缶・容器に用いられている。3003は Al-Mn 系合金で、1100より約20%強度が高く、消化器やエアゾールなどの低圧力容器に用いられている。

3.1.2 2000系合金 (Al-Cu系)

最も良く用いられるのが2014で、熱間鍛造用の代表的な合金である。耐食性は良くないが、強度が高く、成形性も比較的良好である。航空機の2次的強度部材、車両、自動車、自転車部品および一般構造材に用いられている。また冷間鍛造用としても用いられている。

2017は2014よりやや強度が低い、溶体化処理後常温時効して使用できるのが特長である。冷間鍛造用として加工性を改善するため Fe を低くおさえた合金もある。

2219, 2618は含 V₁ Ni 合金で、耐クリープ性に優れ、高温での強度低下が少ない耐熱合金であり、ジェットエンジン、シリンダヘッド、油圧機器などに用いられている。鍛造性は良いが、溶体化処理温度が高いので、結晶粒粗大化を起すことがある。2218も鍛造性が良く、高強度であつて、プロペラや電子機器に用いられている。

3.1.3 4032合金 (Al-Si系)

高 Si 合金でアルミニウム合金の中では熱膨張係数が小さく、耐磨耗性が良いのでピストン材としてもつばら用いられている。熱処理により中程度の強度が得られ、Ni が添加されているので耐熱性も良い。Si 粒が粗大になると鍛造われを生じやすく、特に冷間加工では Si の微細化が重要である。

表6 アルミニウム合金型鍛造品の化学成分と機械的性質 (FEDERAL 規格, QQ-A-367 g)

合 金 名	調 質	化 学 成 分 %										機 械 的 性 質					
		Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Ni	Al	メタルフロー に平行な方向			メタルフロー に直角な方向		
												耐力 kg/ mm ²	引張 強さ kg/ mm ²	伸び %	耐力 kg/ mm ²	引張 強さ kg/ mm ²	伸び %
2014	T4	3.9— 5.0	0.50 —1.2	1.0 以下	0.40 —1.2	0.20 —0.8	0.25 以下	0.10 以下	0.15 以下	—	残部	21.1	38.7	11(16)			
	T6											38.7	45.7	6(8)	38.0	45.0	3
2218	T61	3.5— 4.5	0.9 以下	1.0 以下	0.20 以下	1.2— 1.8	0.25 以下	0.10 以下	—	1.7— 2.3	残部	33.8	40.8	7(10)	—	—	—
2219	T6	5.8— 6.8	0.20 以下	0.30 以下	0.20— 0.40	0.02 以下	0.10 以下	—V	0.20— 0.10	—	残部	26.7	40.8	8(10)	25.4	39.4	4
2618	T61	1.9— 2.7	0.25 以下	0.9— 1.3	—	1.3— 1.8	—	—	0.04— 0.10	0.9— 1.2	残部	33.8	40.8	4(6)	25.3	38.7	4
4032	T6	0.50— 1.3	11.0— 13.5	1.0 以下	—	0.8— 1.3	0.25 以下	0.10 以下	—	0.50— 1.3	残部	29.5	36.6	3(5)	—	—	—
5083	H-111	0.10 以下	0.40 以下	0.40 以下	0.30— 1.0	4.0— 4.9	0.25 以下	0.05— 0.25	0.15 以下	—	残部	15.5	29.5	14(16)	14.0	27.4	12
6061	T6	0.15— 0.40	0.40 —0.8	0.7 以下	0.15 以下	0.8— 1.2	0.25 以下	0.04— 0.35	0.15 以下	—	残部	24.6	26.7	7(10)	24.6	25.3	5
7049	T-73	1.2— 1.9	0.25	0.35	0.20	2.0— 2.9	7.2— 8.2	0.10— 0.22	0.10	—	残部	44.8	50.4	7(10)	42.7	49.7	3
7075	T6	1.2— 2.0	0.50 以下	0.7 以下	0.30 以下	2.1— 2.9	5.1— 6.1	0.18— 0.40	0.20 以下	—	残部	45.7	52.7	7(10)	43.6	49.9	3
	T73											39.2	46.2	7	37.1	43.4	3
7175	T736	1.2— 2.0	0.15 以下	0.20 以下	0.10 以下	2.1— 2.9	5.1— 6.1	0.18— 0.28	0.20 以下	—	残部	46.2	53.2	7	43.1	49.7	3
7050	T736	2.0— 2.6	0.12 以下	0.15 以下	0.10 以下	1.9— 2.6	5.7 以下	0.04 以下	0.06 以下	Zr0.03 —0.15		43.4	50.4	7	39.2	47.6	5
7079	T6	0.40— 0.8	0.30 以下	0.40 以下	0.10— 0.30	2.9— 3.7	3.8— 4.8	0.10— 0.25	0.10— 以下	—	残部	43.6	50.6	7(10)	42.3	49.2	3

注) メタルフローに平行な方向の () の伸びの値は別取試験片の値を示す。

3.1.4 5000系合金 (Al-Mg 系)

熱間鍛造では5083, 5052が, 冷間鍛造では5056, 5052が良く用いられる。

5083は加工硬化が大きく, 大きな変形を1工程で加えることができない。耐食性に優れており, 溶接性が良いので船舶・低温容器の配管部品に使われている。

5056, 5052は中強度材で, 耐食性が良く, 冷間加工性も優れている。我国ではカメラの鏡筒に良く用いられている。5056は機械加工後の表面光沢が良く, 陽極酸化処理性と染色性に優れている。

3.1.5 6000系合金 (Al-Mg-Si 系)

5000系合金は非熱処理型の耐食合金であるが, 6000系は熱処理型の中強度耐食合金であり, 6061が最も良く用いられる。熱間鍛造用としては変形抵抗が小さく, 鍛造性が非常に良い合金である。切削性・溶接性も良く, 建築・車両・船舶および一般機械部品に広く用いられている。また冷間鍛造ではこれらの用途以外に, 中圧容器にも用いられている。高圧用にはより高強度の6351が用い

られる。

3.1.6 7000系合金 (Al-Zn-Mg-Cu 系)

現在実用に供されている合金の中で最も強度が高く, 航空機をはじめとして, 高応力部品に適用されている。従来2014, 2017が用いられていたものも7000系に替えて軽量化する例も多くなっている。他の合金より融点が低く, 鍛造温度の上限が低いので, 鍛造性は必ずしも良くない。また耐食性も良くなく, 特に強度を極端に高くした熱処理を施すと, 応力腐食割れを起す。これを改善した熱処理がT73処理であり, 強度をやや低くおさえた過時効処理である。7000系の中で最も良く用いられるのが7075で, 航空機用の主要合金となっている。

7075の改良あるいは同系統の合金が, 近年欧米で実用化されており, 我国でも一部使用されている。いずれも高力, 高じん性合金であり, 耐応力腐食割れ性, 破壊じん性が改善されている。高じん性合金として7175, 7050, 7049があり, これらはいずれも不純物のFe, Siを低くおさえている。

表 8 鍛造用合金の熱処理記号¹⁴⁾

記 号	定 義	説 明
F	鍛造のまま	特に調質の指定なく製造された状態を示す。押出のまま、鑄放しのままで調質をうけない材料がこれにあたる。
O	焼なましにより最も軟かい状態となったもの	焼なましにより完全に再結晶した状態を示す。熱処理合金の場合は、焼なまし温度より緩かな冷却をおこない、焼入れの効果を完全に防止することが必要である。
T	T 4	焼入れのみで十分に常温で時効硬化が完了したもの 通常 4 日間程度の常温放置で時効を完了するが、7 N 0 1 の場合は長期にわたって進行するので、1 ケ月経過後の引張性質を参考値としている。特に需要家において規定の条件で T 4 処理したものを T 42 という。
	T 5	高温加工から急冷し、焼もどし処理したもの 機械的性質の向上、寸法の安定化をはかるため、焼もどし処理を行なう。6063 など高温加工（押出）後の冷却で焼入効果が得られやすい合金に適用される。
	T 6	焼入れ後、焼もどし処理したもの 熱処理合金の代表的熱処理で冷間加工を行なうことなくすぐれた強度が得られる。特に需要家において規定の条件で T 6 処理したものを T 62 と呼ぶ。
	T 7	焼入れ後、最高強度を得る焼もどし温度および時間より長時間焼もどしたもの 4032 合金では高温で使用する場合の寸法安定化。7075 合金では耐応力腐食われ性改善（T73）。いずれも強度はよりやや低下する。
	T 8	焼入れ後、冷間加工をおこなってから焼もどし処理したもの 機械的性質の向上をはかるため、あるいは矯正、寸法精度向上のため冷間加工をおこない、冷間加工の効果が認められる場合を示す。

TX52 焼入れ後 1 ～ 5 % の永久ひずみを圧縮矯正で与え残留応力を除去したもの。鍛造材に多く用いられる。

TX53 焼入れ後、急激な温度変化を与え熱ひずみによって残留応力を除去したもの。

表 9 鍛 造 品 の 熱 処 理 条 件¹⁵⁾

合 金	熱処理記号	溶体化処理温度 (°C)	焼入れ水温 (°C)	人 工 時 効		備 考
				温度(°C)	時間(Hr)	
2014	T4 T6 T652	495～505	60～80	165～175	10	1 ～ 5 % 冷間圧縮
2218	T61 T72	505～515	空 冷	165～175 230～240	10 6	
2219	T6 T852	530～540	水 冷	185～195 170～180	26 18	1 ～ 5 % 冷間圧縮
2618	T61	520～535	100°C	192～205	20	
4032	T6	505～520		165～175	10	
6061	T4 T6	515～550	水 冷	170～180	8	
7075	T6 T652	460～475	60～80	115～125	24	1 ～ 5 % 冷間圧縮
	T73 T7352	460～475	60～80	100～110°C×6～8 Hr →170～180°C×6～8 Hr		1 ～ 5 % 冷間圧縮

10

航空機用から民需へと広がって行くのは明らかである。

一方、鑄造・板金・溶接・機械加工などひとつの部品や構造物を作る競合技術の進歩もまた著しいものがあり、競合関係はより以上に厳しくなる。またある部分では、例えば鍛造と鑄造、鍛造と機械加工など有機的な結びつきによつて、より優れた製品が生み出されることも考えられる。

粉末冶金材料や超塑性材料が実用に供されるのもそう遠いことではない。

参 考 文 献

- 1) Aluminum Forging Design Manual, Aluminum Association, USA (1967)
- 2) H. W. Berdin: *Machinery*, Feb. (1964)
- 3) "Facts and Guide Line Tolerances of Precision Aluminum Forging", Forging Ind. Asso., USA (1978)
- 4) Forging Design Handbook, ASM (1972), 114
- 5) 阪上, 池永: R & D神戸製鋼技報, 21 [3] (1979), 87.
- 6) アルミニウムハンドブック, 軽金属協会編, 朝倉書店 (1963) 446.
- 7) T. Altan, et al.: "Forging Equipment, Materials and Practices", MCIC, Oct (1973)
- 8) Metals Handbook, ASM (1970), Vol. II, 128.
- 9) H. Meyer-Nolkemper: *Aluminum*, **55** (1979), 286
- 10) Aluminum Impacts Design Manual & Application Guide, Aluminum Association, (1979) 6
- 11) 工藤, 大和久: 冷間鍛造ハンドブック, マグネ (1973) 236.
- 12) 佃, 高田: 軽金属, 29 [9] (1979) 403.
- 13) 浅見, 田中: 軽金属, 30 [7] (1980) 403.
- 14) "アルミニウムハンドブック" 軽金属協会 (1978).
- 15) Aluminum Standards and Data, Aluminum Association, USA (1978) 52
- 16) Lyle, J. P. & Cebulak, W. S.: *Met Trans. A*, **6A** (1975) 685
- 17) Ahlborn, H. & Mertz, D.: *Aluminum* **47** (1971) 730