アルミニウム合金の鍛造技術

Journal of The Japan Institute of Light Metals, Vol. 61, No. 9 (2011), 469-474

石川 孝司*

Forging technology of aluminum alloy

Takashi ISHIKAWA*

Keywords: forging, aluminum alloy, light weight

1. ま え が き

環境問題や資源枯渇問題などから製造業に対する制約は厳しくなるばかりであり、特に自動車産業をはじめとする輸送機器の分野では、CO₂の排出量削減、燃費向上から車体、部材の軽量化に対してグラム単位の開発が続けられている。軽量化の手法には、ハイテンのような材料の高強度化による部材の薄肉化、小径化、中空化などの構造最適化、軽量材料への材料置換などがある。アルミニウム合金は、比重が鉄鋼材料の1/3、比剛性は同等、比強度は2~3倍と軽量化には魅力的な材料である。コスト的には鉄鋼材料と比べると不利であり、また、アルミニウム鍛造のアルミニウム総需要に占める比率は鋳物、圧延、押出等と比べると少ないが、部材によっては軽量化、高品質化、工程省略、生産性向上などの観点から最近はその量が増加している。ここでは、アルミニウム鍛造に関する技術推移と開発動向について述べる。

2. アルミニウム鍛造の歴史

日本におけるアルミニウム合金の鍛造は、1932年に航空機のプロペラやエンジン部品などが熱間型打鍛造により外国の模倣で始まった。その後はあまり進歩がなかったが1975年頃から航空機の大形化に伴いその量が増加した。1977年頃からは自転車のハンドルポストやオートバイ用の部品に適用され、航空機以外への展開が始まっている。1981年頃より冷間鍛造による部品がカメラや自転車などに適用され、冷間鍛造の利点が認識され各種の部品製造に浸透した。1985年頃からは鍛造ホイール、斜板式コンプレッサ、VTRシリンダなどの部品が鍛造で製造された。自動車部品のアルミニウム合金化もこの時期であり、アルミニウム鍛造品の量が急に増加を始めている。1989年にはオールアルミニウム合金ボディの自動車が日本で発表され、サスペンションなどにもアルミニウム鍛造品が使用された。また、この時期に新幹線部品やファクトリーオートメーション関連部品にも適用されアルミニウム鍛造品が増加している。また、この間鍛造用ビレット製造技術も進化を続け、押出ビレットから連铸ビレットへ、さらに

図1 日本のアルミニウム鍛造品の生産量推移¹⁾

1993年には、異形連続铸造ビレット製造技術が実用化されている。最近では、自動車の安全性の向上と環境対策のための軽量化への強い志向の中で、強く軽いアルミニウム合金への期待が強まりさらなる生産量の増加傾向にある(図1¹⁾)。2000年以降は自動車用アルミニウム鍛造品の需要が増加し2008年には33,000トンに達している。自動車各社が高級乗用車にアルミニウム合金部材としては大物のアルミニウム鍛造サスペンションを採用したことが影響している。

3. アルミニウム鍛造品の特性

表1²⁾にアルミニウム鍛造の特徴を鋼鍛造と比較して示した。アルミニウム鍛造品は、比強度が高く内部品質が均一で安定しているので、自動車、鉄道車両、航空機などの構造部材として使用されている。鍛造用の合金として、高強度合金の2000系、7000系、耐食合金の5000系、6000系、耐摩耗合金の4000系などが使用されている。

4. アルミニウム鍛造技術の動向

4.1 航空機用鍛造部品

航空機の大形化に伴って鍛造品の一体成形のニーズが強くなり大型プレスの導入も進められた。世界の大型鍛造プレスの能

* 名古屋大学大学院工学研究科マテリアル理工学専攻 (〒444-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)。Department of Materials Science and Engineering, Nagoya University (Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603). E-mail: ishihawa@numse.nagoya-u.ac.jp
 受付日: 平成22年12月15日 受理日: 平成23年2月7日

表1 アルミニウム鍛造と鋼鍛造の違い²⁾

	アルミニウム鍛造	鋼鍛造
材料切断	・丸棒せん断での切断不可 → 変形大	・丸棒せん断での切断可
材料加熱	・スケールの発生なし ・加熱色がなく目視確認不可 ・加熱温度 475°C±15°C ・材料加熱温度が欠陥やばりの発生に大きく影響する	・スケールの発生あり ・加熱色あり，温度異常の発見容易 ・加熱温度 1200°C±30°C
材料きず	・やわらかく，打きずが付きやすい ・搬送装置に特別な配慮必要	・打きずつきにくい ・搬送装置に特別な配慮不要
鍛造きず	・荒型形状を仕上げ形状に近似させるときずが発生しやすい ・成形時の材料フローきずが発生する ・潤滑濃度は濃いめに	・荒型形状の影響は少ない ・成形時の材料フローきずは発生しない ・潤滑濃度はきずに影響しない
欠肉	・横方向への展延性がよく，型コーナ部への突上性が悪い ・金型にエア抜きが必要 ・潤滑濃度の影響大	・アルミニウムに比較し展延性が少なく，突上性はよい ・深彫り部以外は不要 ・潤滑濃度の影響少ない
ばりの発生	・展延性がよく，ばりの発生大	・ばりの発生小
離型性	・悪い ・金型抜き勾配 5° 以上 ・潤滑剤希釈率 1:25 (黒鉛：水) ・金型温度 100°C 以上必要	・よい ・金型抜き勾配 2° 以上 ・潤滑剤希釈率 1:50 (黒鉛：水) ・金型温度 150°C 以下に下らない
型寿命	・40,000 個／型 ・型摩耗が少ない	・4,000～5,000 個／型 ・型摩耗が大

表2 世界の大型液圧プレス³⁾

国名	社名	能力 (トン)
ロシア	VSMPO	75000
フランス	Interforge	65000
米国	Wyman Gordon	50000 35000
	Wyman Gordon (Gameron)	35000 29000
	Ladish	15000
	Alcoa	50000
	Webermetal	38000
英国	Wyman Gordon (Gameron)	30000
日本	古河スカイ	15000

力を表2³⁾に示す。日本では、15,000トンの液圧鍛造プレスが最大であり、世界でも十指に入る最大級の鍛造液圧プレスである。このような大型プレス設備の導入は、軽量かつ高信頼性、高強度を有するアルミニウム鍛造品を航空宇宙産業、

船舶、車両および半導体、液晶製造装置産業に供給する目的である。

航空機用の大型鍛造部品の製造には、コンベンショナル鍛造法、ノードラフト鍛造法およびシームレス鍛造法の3種類に区分される⁴⁾。コンベンショナル鍛造法は穴型を彫った上下型による一般のばり出し型鍛造である。ノードラフト鍛造法は図2⁵⁾に示すようにコンベンショナル鍛造法と異なり、ダイインサートの中に上下パンチを挿入することで製品形状を形成するもので、抜き勾配は0°～30'と小さい。図3⁵⁾にノードラフト鍛造法のグレンフローをコンベンショナル鍛造法と比較して示すが、グレンフローが切断されることなく製品形状に沿ったものとなるために強度が高い。ノードラフト鍛造で製造した航空機窓枠の例を図4⁶⁾に示す。シームレス鍛造法は、密閉した金型キャビティ内でばりを出さないで成形する鍛造法で図5⁵⁾に一例を示す。ノードラフト鍛造法では、鍛造終了時に上下工具で密閉状態を作るのに対し、シームレス鍛造法では、あらかじめ上下工具で孔型を構成し、そこに押出しラムで材料を流入させる一種の閉塞鍛造である。国産のジェット旅客機製造に関連して、航空機と材料メーカーの連携のもと、高付加価値の大型鍛造部品の国際的な安定供給を実現するため国内での大型鍛造プレス設置の必要性が指摘されている⁷⁾。

4.2 自動車用鍛造部品

自動車生産量は年々増加を続け、環境に与える影響は非常に大きく、燃費向上、CO₂排出量削減さらには安全性向上に

図2 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⁵⁾

図3 コンベンショナル鍛造とノードラフト鍛造のグレインフロー比較⁵⁾

図4 ノードラフト鍛造による航空機窓枠⁶⁾

向けて車体や部材の軽量化に対する要求は厳しさを増している。アルミニウム鍛造部品はそのニーズに必要な軽量で高強度な性質を備えた部品として使用量が増えている。

(1) 鍛造素材製造のためのピーリングレス鍛造技術

図6にアルミニウム鍛造部品のコスト構成を示す⁸⁾。鍛造コストに占める材料費の割合は59%と高く、その内の16%を鍛造用ビレットのピーリング費が占めている。ピーリングは、ビレットを鍛造する際にできる凝固収縮による表面の凹

図5 シームレス鍛造法⁵⁾

図6 アルミニウム鍛造部品のコスト構成⁸⁾

図7 フロントアーム部品⁸⁾

凸や冷却過程で生じる表面層のマクロ偏析を除去する加工で、従来は必要であった。従来技術では鋳型内の冷却配管による冷却と鋳型下部からの水冷による直接冷却の二段冷却であり、それが上記の表面層の凹凸の原因であるため、ピーリングレス鍛造技術では、鋳型に冷却機能を持たせずに直接水冷のみとする断熱鋳造とした⁹⁾。本開発技術により従来必要であったピーリング工程を省略でき、また、ピーリング工程廃止による鍛造棒の矯正廃止および設備償却費の削減により、従来技術に比べ約20%の材料費低減を可能にした。自動車のフロントアームに適用された(図7⁸⁾)。

(2) アルミニウム鍛造サスペンション

自動車の乗り心地や操縦安定性には、ばね上質量とばね下質量の比が影響し、この比が小さいと乗り心地や操縦安定性が低下する。そのためばね上質量に相当するボディ重量だけの軽量化は乗り心地や操縦安定性を損なう結果となり、車体全体の軽量化に伴えばね下質量に関係するサスペンションの

軽量化が重要視されている。サスペンションアームへのアルミニウム鍛造品の適用は、鋳造品と比較して高強度、高信頼性の点で有利であり増加している。

サスペンション部品に要求される材料特性は、剛性、強度、疲労強度、伸び、衝撃値、耐食性である。また安全面からは破断せずに大変形することが望ましい。その点から一般に 6061 合金が使用されている。そして、アルミニウム合金の熱間加工について亜結晶粒組織が高強度化に有利なことから、鍛造温度を高くし、ひずみの蓄積を抑制して再結晶組織ではなく回復組織にするプロセスが提案された^{10),11)}。図 8¹¹⁾ に 6061 合金の鍛造 T6 材の耐力と結晶粒径の関係を示す。再結晶粒を微細化するよりも亜結晶粒組織とすることで耐力は

図 8 6061 アルミニウム合金 T6 材の結晶粒径と耐力の関係¹¹⁾

図 9 溶解・鍛造一貫製造ライン模式図¹³⁾

図 10 ハイマウントナックルの鍛造工程¹⁴⁾

飛躍的に向上している。

また、異形連続鍛造ビレットの半密閉潰し鍛造法が開発された^{8),12)}。従来のばり出し鍛造に比較して鍛造材料の歩留まり向上と鍛造工程の削減を実現した。

(3) 素材・鍛造・熱処理・加工一貫製造ライン

前述のように鍛造品のコストの 50% は材料費が占めているので、いかに安価な素材を使用してコストを低減するかが重要なポイントとなる。図 9 は工場のレイアウト例の概略図を示す¹³⁾。素材工場を鍛造工場内に設置して素材から鍛造、完成品まで一貫通貫で製造する鍛造工場である。

また、自動車会社では、鍛造と機械加工を連結した一貫ラインを構築し実用化している¹⁴⁾。アルミニウム合金製ハイマウントナックルの製造工程例を図 10¹⁴⁾ に示す。素材は 6061 合金で、所定の長さのビレットを高周波誘導加熱装置にて加熱し、ロール成形にて 4 パス予成形を行いその後プレスにて鍛造する。そして、T6 処理、エッチング処理、蛍光浸透探傷検査を経て機械加工の工程と続く。図 11¹⁴⁾ にその生産工程を示す。この鍛造ラインでは、海外生産に対応した少量生産工場に適したコンパクト化を徹底し、たとえば、鍛造プレスは安価な油圧プレスとして構造から見直され、従来 10m を越える高さを 3.8m に小型化している。図 12¹⁴⁾ にその全体図を示す。素材の成形から機械加工までを同じ工場内に配置した一貫ラインを構築したことが特徴であり、タクトタイムも 40 秒/個と長く、熱処理および機械加工と同期した生産速度としている。今後の鍛造工場の一つの方向性を示唆している。この一貫ラインは、材料費は高価でも、鋼の鍛造と比較して低い鍛造温度、低い成形荷重などの有利さを活かして、設備の小型化、省スペース、省投資による製造原価低減の達成によるものと報告されている。

図 11 素材の成形から機械加工までの一貫通貫生産工程¹⁴⁾

図12 アルミニウム鍛造・機械加工一貫製造ライン模式図¹⁴⁾

(a) コンピュータ用ヒートシンク

(b) コンプレッサ用スクロール

図13 背圧付加の鍛造品例¹⁵⁾ 図14 アルミニウム合金と鋼の冷間鍛造接合¹⁷⁾

4.3 精密鍛造部品

図13は押出鍛造金型に背圧装置を装備して、コンピュータ用ヒートシンクとスクロール型コンプレッサ部品を鍛造したもので、成形荷重に対してわずかな背圧を付与することで高精度化が実現できた¹⁵⁾。また、サーボプレスの出現により、スライドモーションコントロールによる工程削減等有効性が

図15 アルミニウム合金と鋼の冷間鍛造接合界面のTEM像と分析結果¹⁷⁾

報告¹⁶⁾されており、今後の新たな鍛造プロセスの開発に期待がかかっている。

4.4 アルミニウム合金と鋼の冷間鍛造接合

部材の軽量化、高機能化に対して、異種材料の接合は今後ますます重要である。アルミニウム合金と鋼のアーク溶接は、脆弱な金属間化合物の生成のため不可能とされ、摩擦攪拌溶接 (FSW) が有効とされている。著者らは、鋼およびアルミニウム合金円柱材をコンテナ内に接合面を研磨して上下に積み重ね、これに冷間後方押出鍛造を施すことによって成形と圧接を同時に行った (図14¹⁷⁾)。接合強度測定、接合界面のミクロ、ナノ観察を行った結果、金属間化合物の存在は認められず (図15¹⁷⁾) 強固な接合強度が得られることを報告している。今後の展開が期待できる。

5. ま と め

リサイクル性の優れた軽量材料として今後ますます期待されるアルミニウム合金の特に鍛造技術について紹介した。素材産業、鍛造産業と川下産業、さらに学と官の強い連携による技術革新により日本の技術の国際競争力をなお一層高めていかななくてはならない。

参 考 文 献

- 1) 平成 21 年度版素形材年鑑, 素形材センター (2010).
- 2) アルミニウム鍛造ハンドブック, 日本鍛造協会アルミニウム鍛造技術会, (2004), 120.
- 3) 古河電工技報, 116 (2005), 73-74.
- 4) 尾崎幸一, 原田雅行: 塑性と加工, **30** (1989), 1114-1120.
- 5) A. S. M.: Forging Design Handbook, (1973).
- 6) 加工技術データベース HP: <http://unit.aist.go.jp/dmrc/db-dmrc/bulk-metal-forming/basic/al-hot.htm>
- 7) 新エネルギー, 産業技術総合開発機構: 超大型鍛造用プレス機を利用した革新的部材の開発に関する調査研究, (2003).
- 8) 櫻井久之: 塑性と加工, **49** (2008), 378-383.
- 9) 中井 学: アルミニウム鍛造技術会第 37 回技術講座, (2004), 3-4.
- 10) 稲垣佳也, 福田篤実: 神戸製鋼技報, **59** (2009), 22-26.
- 11) 中田 守, 稲垣佳也, 福田篤実, 武林慶樹: 塑性と加工, **49** (2008), 288-292.
- 12) 國井正志, 土田孝之: アルミニウム鍛造技術会第 37 回技術講座, (2004), 1-2.
- 13) 福田篤実, 竹内浩二: 神戸製鋼技報, **52** (2002), 87-89.
- 14) 森下弘一: 素形材, **47** (2006), 47-52.
- 15) 関口常久: 素形材, **47** (2006), 35-41.
- 16) 安藤弘行: 日本塑性加工学会鍛造分科会第 35 回実務講座テキスト, (2008), 47-52.
- 17) T. Ishikawa, Y. Yoshida, N. Yukawa, M. Kamiyama, H. Ogitani and T. Suganum: Steel Research International, **81** (2010), 322-325.