高速超塑性を利用した金属ガラスの 粉末固化・鍛造加工技術の開発と ゴルフクラブへの応用

河村 能人*   井上 明久**   増本 健***
上原 武雄****   垣内 久嗣*****

1. はじめに

近年、加熱時にガラス遷移現象を示すと共に広い過冷却液体温度域を示すアモルファス合金が見出され、金属ガラスと呼ばれている⁽¹⁾。我々は、この金属ガラスが過冷却液体状態で高速超塑性を示すことを見出すと共に、その発現メカニズムを明らかにした⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。さらに、この高速超塑性を利用することにより、金属ガラス粉末の押出成形によって casting 材や液体急冷薄帯と同じ引張強度を示す真密度バルク材が容易に作製できること⁽⁵⁾、バルク金属ガラスの鍛造加工が容易にできることを明らかにした⁽⁶⁾。また、金属ガラスがゴルフクラブの性能向上に適した低剛性・高強度・高靱性という結晶材料では得られない特異な特性を持つことから、新しいタイプのゴルフクラブの開発に、この超塑性粉末固化・鍛造加工により作製した金属ガラスの適用を試みると共に、その量産化製造技術を確立し、開発した金属ガラス製ゴルフクラブの製品化に成功した⁽⁷⁾。本報では、これら一連の金属ガラスという新物質の新技術開発とそれを用いた新製品開発の概要について紹介する。

2. 高速超塑性の発現とそのメカニズムの解明

従来のアモルファス合金は変形能に乏しかったのに比べ、金属ガラスは過冷却液体状態で著しく軟化し、高速超塑性を示すことが明らかになった。 $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ (at%) 金属ガラスのガラス遷移温度近傍における破断伸びの歪速度依存性を図 1 (a) に示す⁽²⁾。白丸と黒丸は、それぞれ引張試験後にアモルファス相を保持しており密着曲げ可能であったものと、結晶化により脆化したものを示している。破断伸びは温度と歪速度の両方に強く依存し、ガラス遷移温度 ($T_g=652$ K) 以上でアモルファス状態を保持しながら大きな伸びが得られた。 $10^{-2} s^{-1}$ 以上の歪速度で 200% 以上の伸びを示す現象が高速超塑性と呼ばれていることから、金属ガラスは新しいタイプの高速超塑性材料であると言える。

図 1 (b) に、 $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ 金属ガラスの粘性の歪速度依存性を示す⁽³⁾。 T_g 以上において、低歪速度ではニュートン粘性を示し、高歪速度側では非ニュートン粘性を示す。超塑性はこのニュートン粘性により発現する。図 1 (a) に示したような高歪速度側の伸びの低下は非ニュートン粘性遷移が原因であり、また低歪速度側の伸びの減少は結晶化が原因である⁽⁴⁾。

図 1 $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ 金属ガラスの (a) 伸びの歪速度依存性, (b) 粘性の歪速度依存性。

* 熊本大学助教授;工学部

** 東北大学金属材料研究所教授・所長

*** 電気磁気材料研究所所長, 東北大学名誉教授

**** YKK 株式会社研究開発本部主席研究員

***** 住友ゴム工業株式会社研究開発本部研究員

Development of High-Strain-Rate Superplastic Powder Consolidation and Forging Technologies in Metallic Glasses and Their Applications to New Golf Clubs; Yoshihito Kawamura*, Akihisa Inoue**, Tsuyoshi Masumoto***, Takeo Uehara**** and Hisashi Kakiuchi***** (*Kumamoto University. ** Tohoku University. ***The Research Institute for Electric and Magnetic Materials. ****YKK Corporation. *****Sumitomo Rubber Industries LTD)

2000年11月8日受理

3. 超塑性粉末固化・鍛造加工技術の確立

(1) 金属ガラス粉末の固化成形技術の開発

従来のアモルファス合金粉末の固化成形法としては、爆発成形法や銃衝撃法などの動的高圧成形法、圧力数 GPa 以上の静的超高压成形法、さらに剪断が作用する押出成形法などが報告されている⁽⁸⁾。最も実用的な押出法でも、従来のアモルファス合金は難加工材料であるために、金属製コアを持つ特殊な構造のピレットが必要であり、押出条件もごく狭い範囲に限られていた⁽⁸⁾。ところが、金属ガラス粉末の固化成形では、超塑性を示す温度において、通常のピレットを用いた押出成形でも真密度バルク化が可能であった⁽⁵⁾。図 2 に、 $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ バルク材の引張強度の押出比依存性を示す。ここで、押出比 1 は 1 GPa でのホットプレスを示している。

図 2 超塑性押出法により固化成形した $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ バルク金属ガラスの引張強度の押出比依存性。

図 3 (a) 押出鍛造加工実験のダイス, (b) $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ バルク金属ガラスの押出鍛造加工条件マップ。

ホットプレスでは、真密度は得られたが粉末間の接合が不十分であるために、十分な強度が得られなかった。しかし、押出比が 4 以上では、剪断の作用によって粉末が強固に接合した結果、1500 MPa の高い引張強度が得られた。このように粉末冶金法により鑄造材や液体急冷薄帯と同じ引張強度を持つバルクアモルファス合金が作製できることを世界に先駆けて明らかにした。

(2) バルク金属ガラスの鍛造加工技術の開発

鍛造加工では、温度と圧力と速度の 3 条件が重要である。一例として、図 3 (a) に示す実験用ダイスを用いた場合の $Zr_{65}Al_{10}Ni_{10}Cu_{15}$ 金属ガラスの押出鍛造加工条件マップを図 3(b) に示す⁽⁶⁾。金属ガラスの鍛造加工性は通常の結晶材料に比べて温度・速度・圧力に著しく影響されることから、温度と圧力あるいは温度と加工速度を精度良く制御する必要があることが分かった。特に、温度の制御が極めて重要であり、20 K の温度減少は約 10 倍の圧力上昇に相当することが分かった。

4. 金属ガラス製ゴルフクラブの開発と製品化

(1) 金属ガラス製ゴルフクラブの開発経緯

ゴルフ競技においてクラブに要求される最も重要な性能の 1 つに「飛び」がある。飛びに重要なクラブとボールの反発特性を向上させるためには、クラブ側から見た場合にはボールが衝突するクラブのフェース面の剛性を低くすることが効果的であることから、低弾性率・高強度・高靱性を有する Zr 基金属ガラスに着目した⁽¹⁾。

Zr 基金属ガラスプレートの製造法としては、鑄造法と上述の粉末固化・鍛造加工法があるが、後者は前者に比べて形状精度面で安定しており、薄肉平板形状のアイアン・パターフェースの作製に好適である。さらに、鑄造法では繰り返し使用可能な溶解坩堝が無く、またバッチ式生産となると共に製品の歩留まりが悪いために量産化が困難である。一方、粉末固化・鍛造加工法では、工程が複雑であるためにコストは多少高くなるが、歩留まりと生産性が良く、さらに品質も安定していることから、比較的多くのフェース枚数が必要となるアイアンやパタークラブの製品化には適している。そこで、アイアン・パタークラブの開発には、フェース材料として粉末固化・鍛造加工金属ガラスプレートを適用することにした。

(2) 金属ガラスプレートの量産化技術の確立

金属ガラス粉末は、高圧ガスアトマイズ法により作製し、その固化成形は押出法により行った。まず作製した金属ガラス粉末を銅缶(直径 42 mm)に入れ封缶して押出ピレットを作製した。このピレットを超塑性が出現する 678 K の温度で、押出比 4 の条件で押出成形を行い、直径 19 mm 長さ 1000 mm の丸棒バルク材を作製した。このバルク材を所定の長さ切断後、旋盤によって表面の銅材を旋削し、その後自由鍛造によってプレス速度 0.5 mm/s で厚さ 3 mm のプレート材を作製した。鍛造温度は超塑性が出現する 683 K で

図4 各製造工程で得られる $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ 金属ガラス。

ある。最終プロセスでは、金属ガラスプレートを超塑性が出現する 683 K で打抜くと同時にスコアラインを付けている。図4に、各工程で得られる金属ガラスの外観写真を示す。

このようにして作製した $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ 金属ガラスプレートは、約 1500 MPa の高い引張強度、約 80 GPa の低い弾性率、2.2% の高い弾性伸び、約 1800 MPa の高い曲げ破壊強度を示す。これらの機械的特性は、商用の Ti-6Al-4V 合金に比べ、引張強度は約 1.5 倍、弾性伸びは約 10 倍、弾性エネルギーは約 20 倍であり、ゴルフクラブのフェース材料として優れた機械的特性を有している。

(3) 金属ガラス製ゴルフクラブの開発と製品化

金属ガラスを使用したアイアンとパタータイプのクラブの設計にあたっては、フェースの裏面部分を貫通構造にすることにより、金属ガラスフェースの反発性能を最大限に生かせる設計とした。特に、アイアンクラブは、シャフトとグリップを軽量化してヘッド部分に質量を持たせ、軽く振っても金属ガラスフェースの反発性能によって大きく飛ばせる設計とした。図5は、超塑性粉末固・鍛造加工プロセスによって作製した $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ 金属ガラスプレートを使用したアイアン(5番アイアン)のマシンテストの結果である。金属ガラスフェースアイアンの反発効率は、チタンフェースアイアンに比べて約 3.5% 向上しており、飛距離も増大していることがわかる。新開発のアイアンとパターゴルフクラブは、1998年8月からウッドクラブと共に全国発売されている(図6)。反発性能の良さに加えてマイルドな打球感が多くのゴルファーに評価されており、販売実績が伸びている。

5. おわりに

本研究開発では、金属ガラスという新物質に対して、高速超塑性が発現することを見出すと共に、それを利用した粉末固・鍛造加工技術を開発した。さらに、この技術によって作製したバルク金属ガラスを用いた新しいタイプのゴルフクラブを開発すると共に量産化技術を確立して、その製品化に初めて成功した。

本研究で開発したゴルフクラブは、現在主流となっているチタン合金に替わる新素材として今後の発展が期待できる。また、工業化に成功した粉末冶金バルク金属ガラスは、機械的性質以外にも耐食性に優れている点から生体適応材料とし

図5 $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ 金属ガラス製ゴルフクラブ(5番アイアン)のマシンテスト結果。

図6 開発した $\text{Zr}_{65}\text{Al}_{10}\text{Ni}_{10}\text{Cu}_{15}$ 金属ガラス製アイアンおよびパタータイプゴルフクラブの外観写真。

ての実用化研究も始まっており、多方面で本研究開発の成果が活用されようとしている。

なお、金属ガラスの粉末固・鍛造加工および金属ガラスを用いたゴルフクラブに関する特許を日本国内で28件出願中である。そのうち、国外に出願した基本的な特許はすでに米国および欧州で登録になっている。

文 献

- (1) A. Inoue: *Bulk Amorphous Alloys: Preparation and Fundamental Characteristics*, Trans Tech Publications, NH, USA, (1998).
- (2) Y. Kawamura, T. Shibata, A. Inoue and T. Masumoto: *Scripta Metall. Mater.*, **37**(1997), 431.
- (3) Y. Kawamura, T. Shibata, A. Inoue and T. Masumoto: *Mater. Trans., JIM*, **40**(1999), 336.
- (4) Y. Kawamura, T. Nakamura and A. Inoue: *Scripta Metall. Mater.*, **39**(1998), 301.
- (5) Y. Kawamura, H. Kato, A. Inoue and T. Masumoto: *Int. J. Powder Metall.*, **33**(1997), 50.
- (6) Y. Kawamura, T. Shibata, A. Inoue and T. Masumoto: *Acta Mater.*, **37**(1998), 253.
- (7) 日本ダンロップカタログ, V.I.P. Vintage Model AMORPHOUS FACE, (1998).
- (8) 河村能人, 増本 健, 井上明久, 井村 徹: まてりあ, **37**(1998), 133.