

金属ガラスの異常軟化現象と剪断帯抑制効果を発見

～“構造若返り”の利用で金属ガラスに常温加工の可能性を示唆～

平成24年9月24日

独立行政法人 物質・材料研究機構

概要

1. 独立行政法人物質・材料研究機構（理事長：潮田 資勝）構造材料ユニット（ユニット長：津崎 兼彰）の土谷 浩一副ユニット長（東北大学金属材料研究所客員教授 平成24年4月1日～平成24年9月30日）、孟 凡強（メン ファンチャン）NIMSジュニア研究員、井 誠一郎主任研究員らは東北大学金属材料研究所（所長：新家光雄）金属ガラス総合研究センター（センター長：牧野 彰宏）との共同研究により、金属ガラス¹⁾に5 GPaの高圧下で巨大な剪断ひずみを付与する事で、硬度や弾性率が顕著に減少する異常軟化現象を発見した。この異常軟化に伴い金属ガラスを常温で変形したときに発生する剪断帯²⁾が抑制されることも明らかにした。
2. 金属ガラスは非晶質金属材料の一種であり、通常の金属と比べ高強度・高耐食性・軟磁性³⁾などの優れた特性を持っている。その理由は、結晶金属材料のような周期的な構造を持たず、転位や結晶粒界も存在しないためである。この優れた特性を利用して、すでに磁気デバイスやゴルフクラブ、ショットピーニング用投射材などに応用されているが、常温で変形すると、変形が局在化しやすく延性に乏しいため応用範囲が限られていた。
3. 土谷らは $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ 金属ガラスの円盤状試料に常温で5 GPaの高圧下で巨大ねじり加工する方法（高圧ねじり加工、High-Pressure Torsion (HPT)）で剪断歪みを付与した時の力学特性の変化をナノインデンテーション法⁴⁾により調べた。その結果、変形量の増加とともに硬さと弾性率が低下し、50回転ねじり加工後は加工前の値と比較して硬さが22%、弾性率が30%と大きく低下した。これは金属ガラスの原子レベルの構造がHPT加工により液体状態に近い状態へと変化する“構造若返り (structural rejuvenation)”によって引き起こされたものである。
4. さらに、ナノインデンテーション後の圧痕を走査プローブ顕微鏡⁵⁾で観察した所、加工前の試料では圧痕の周囲に多数の剪断帯が見られたが、HPT加工量の増加とともに剪断帯の数が減少し、50回転加工後は剪断帯が全く見られなくなった。これはHPT加工により変形の局在化が抑制され、より均質な変形モードへと変化する事を示している。この発見は金属ガラスの常温加工の可能性を示唆するもので、マイクロ～ナノシステムなどへの応用展開を可能にすると考えられる。
5. 本研究成果は文部科学省科学研究費補助金・新学術領域研究“バルクナノメタルー常識を覆す新しい構造材料の科学”及び東北大学金属材料研究所金属ガラス総合研究センター全国共同利用の支援で得られたものである。なお本成果は2012年9月20日発行のApplied Physics Letterに掲載された。

研究の背景

金属ガラスは金属元素を主成分とする非晶質材料の一種で、とりわけ非晶質の安定性が高くガラス転移を示す材料である。通常の結晶性金属材料とは異なり変形を司る転位や結晶粒界などの欠陥が存在しない。そのため同様な化学組成の結晶性金属と比べて金属ガラスの強度は高く、耐食性、軟磁気特性^{*}にも優れているなどの多くの興味深い性質を示し、磁気部品、マイクロギア、ゴルフクラブヘッド、ショットピーニング投射材^{*}などへと応用されている。また材料開発や構造、特性評価に関する研究が国際的にも非常に盛んである。しかし、金属ガラスを常温で変形すると、変形が局在化しやすく剪断帯を形成して破断するため延性に乏しい。そのため応用範囲が限られてきた。

成果の内容

土谷らはこれまで、高圧下で試料にねじり加工を加える加工法（高圧ねじり加工、High-Pressure Torsion (HPT)）をチタン合金、金属間化合物などに適用し、構造・組織の変化と物性、力学特性への影響について調べて来た[文献 1, 2]。本研究ではこの手法を $Zr_{50}Cu_{40}Al_{10}$ の化学組成を有する金属ガラスに適用し、その構造、熱的挙動、力学特性の変化を系統的に調べた。

図 1 はナノインデンテーション法で測定された硬さ（強度）と弾性率を HPT 加工におけるアンピルの回転数に対してプロットしたものである。図で明らかな様に回転数の増加とともに強度、弾性率が著しく低下している。この様に加工することで強度や弾性率が大きく低下する現象は通常の結晶性金属には見られない異常な現象である。また 50 回転加工後の試料を 400°C で 1 時間熱処理すると強度も弾性率もほぼ元の値に戻り、この強度・弾性率低下が微細なクラックなどによるものではなく、原子レベルの構造変化によるものであることを示している。

図 2 はナノインデンテーション後の圧痕の走査プローブ顕微鏡像である。加工前の試料では圧痕の周囲にアーク状の剪断帯が多数みられ、塑性変形が局在化している事を示している。HPT 加工の回転数の増加と共に剪断帯の数は減少し 50 回転加工後は剪断帯生成は抑制されており、塑性変形がより均一に起こっている事を示している。

HPT 加工した試料の構造変化はすでに放射光による動径分布関数の測定により調べられている[文献 3]。それによると、HPT 加工は原子配列をより液体に近い構造へと変化させる、構造若返り (structural rejuvenation) と呼ばれる現象を引き起こす事が明らかになっており、本研究の結果とよく対応するものである。

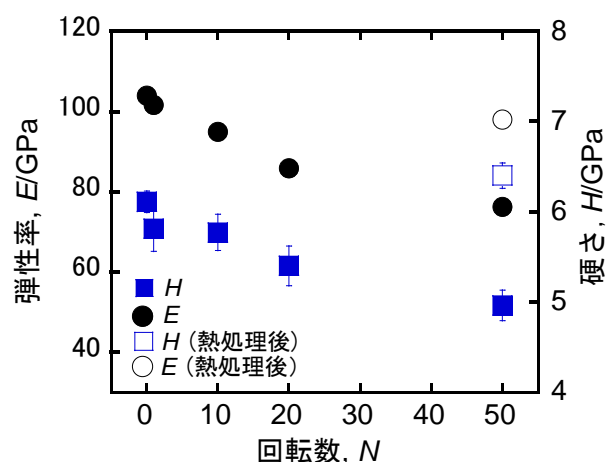


図 1 HPT 加工による弾性率と硬さの変化。□, ○は 50 回転加工した試料を 400°C で 1 時間熱処理した後の値。

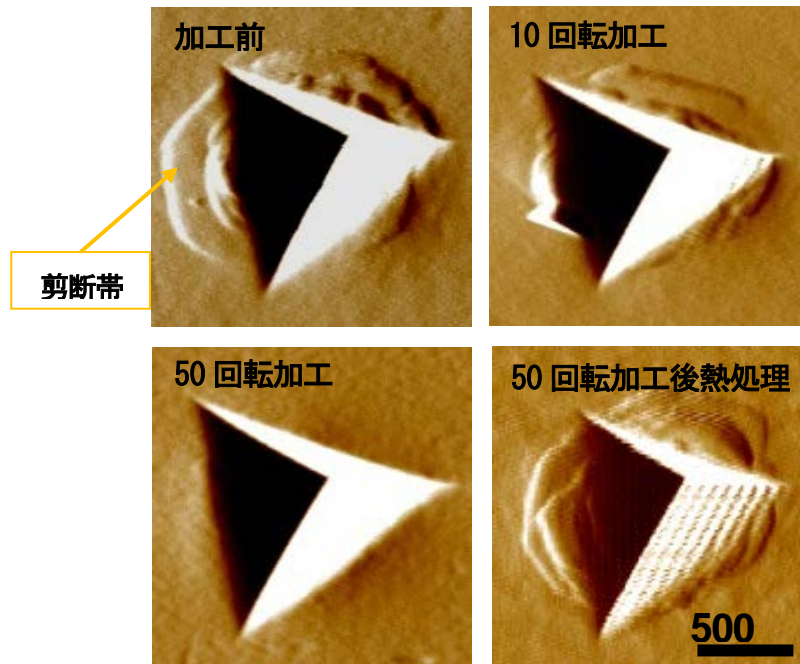


図2 ナノインデンテーション圧痕の走査プローブ顕微鏡像の HPT 加工と熱処理 (400°C, 1 時間) による変化

波及効果と今後の展開

本研究は、構造若返りにより金属ガラスの力学特性が顕著に変化し、変形の局在化を抑制する事を世界で初めて明らかにしたものである。金属ガラスの加工は従来ガラス転移以上の温度域で行われていたが、本研究の成果は金属ガラスの常温成形の可能性を示唆するもので、金属ガラスの応用拡大につながるものである。

掲載論文

題目：Reversible Transition of Deformation Mode by Structural Rejuvenation and Relaxation

著者：F. Q. Meng, K. Tsuchiya, S. Ii, Y. Yokoyama

雑誌：Applied Physics Letter, 101, 121914 (2012)

用語解説

- 1) 金属ガラス：金属元素を主成分とする非晶質合金の一種。特に過冷却液体状態が安定でガラス転移を示し、結晶化が始まる前に凝固させる事ができるので casting が可能である。
- 2) 剪断帯：剪断変形が帯状の狭い領域に集中して発生する現象。
- 3) 軟磁性：容易に磁気モーメントが反転し、保磁力が小さく透磁率が大きいことを特徴とする磁性材料。パーマロイやソフトフェライトなどが知られている。コイルやトランス等の磁心、磁気シールド等に用いられる。
- 4) ナノインデンテーション法：圧子の押し込み荷重と深さを連続的に測定し、押し込み深さ—荷重

曲線から硬さやヤング率を算出する方法。

- 5) 走査プローブ顕微鏡：先端を尖らせた探針で、物質の表面をなぞるように走査し、表面形状を拡大観察する顕微鏡。

本件に関するお問い合わせ先

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

独立行政法人物質・材料研究機構

企画部門広報室 TEL：029-859-2026、FAX：029-859-2017

研究に関すること

独立行政法人物質・材料研究機構

構造材料ユニット

副ユニット長 土谷浩一

TEL：029-859-2117

E-mail：TSUCHIYA.koichi@nims.go.jp

参考文献

[1] K. Tsuchiya and O. Ciuca, Materials Science Forum, 667-669(2011)17.

[2] D. Geist, S. Li, K. Tsuchiya, H. P. Karnthaler, G. Stefanov, C. Rentenberger, Journal of Alloys and Compounds, 509(2011)1815-1818.

[3] W. Domowski, Y. Yokoyama, A. Chuang, Y. Ren, M. Umemoto, K. Tsuchiya, A. Inoue, T. Egami, Acta Materialia, 58(2010)429.