

平成 22 年 5 月 24 日現在

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20860011

研究課題名（和文）

不均一構造の導入によるバルク金属ガラスの延性改善

研究課題名（英文）

Shear band evolution and deformation mechanism in bulk metallic glasses

研究代表者

柳 延輝 (Yanghai LIU)

東北大学・金属材料研究所・COE フェロー

研究者番号：70506469

研究成果の概要（和文）：

本研究によって、金属ガラスの降伏応力についての統一スケールリング法則 $\tau_y=3R \cdot (T_g-RT)/V$ , ( $\tau_y$ :降伏強度、 $R$ :気体定数、 $T_g$ :ガラス遷移温度、 $RT$ :室温、 $V$ :モル体積)を見いだした。この式は、基本的な熱力学法則より導かれ、種々の金属ガラスの実験データを用いて実証した。降伏強度とガラス遷移温度の線形関係は、金属ガラスの強度はガラス遷移温度と相関があるが、融点とは相関が無いことを示している。

研究成果の概要（英文）：

In this work, we derive a universal scaling law,  $\tau_y=3R \cdot (T_g-RT)/V$ , that uncovers an inherent relationship of yield strength  $\tau_y$  with glass transition temperature  $T_g$ , molar volume  $V$  of metallic glasses and  $RT$  the room temperature. This equation is derived from fundamental thermodynamics and validated by various metallic glasses with well-defined yielding. The linearity between  $\tau_y$  and  $T_g$  demonstrates that yielding of metallic glasses is correlated intrinsically with glass-liquid transition instead of melting.

交付決定額

(金額単位：円)

|         | 直接経費      | 間接経費    | 合計        |
|---------|-----------|---------|-----------|
| 2008 年度 | 1,330,000 | 399,000 | 1,729,000 |
| 2009 年度 | 1,200,000 | 360,000 | 1,560,000 |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 年度      |           |         |           |
| 総計      | 2,530,000 | 759,000 | 3,289,000 |

研究分野：構造機能材料

科研費の分科・細目：アモルファス材料

キーワード：金属ガラス、MEMS

### 1. 研究開始当初の背景

金属ガラスは、そのランダムな原子構造から由来する極めて高い機械強度と特有の物理特性を持ち合わせており、高いパフォーマンスが要求される次世代の構造・機能材料として期待されている。しかしながら、ガラス遷移温度以下の低温域の特に引張応力に対して延性はない。なぜなら、ひずみ硬化機構が働かないからである。降伏現象において、金属ガラスはひずみ軟化を起こし、変形は極めて不均一に進行する。結果的に、ほとんどの金属ガラスは、一方的なせん断によって破壊に至る。しかしながら、金属ガラスの機械特性の制御因子はいまだ明らかではなく、機械特性と原子構造との正確な相関についても明らかになっていない。

### 2. 研究の目的

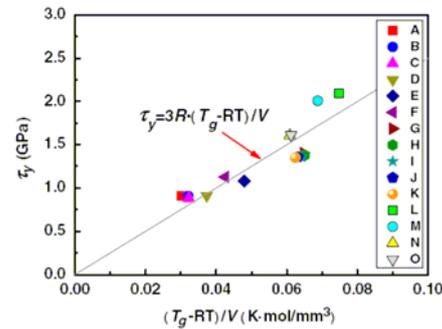
せん断帯は、金属ガラスの変形における塑性ひずみの唯一の伝達キャリアとして知られている。本研究の主要な目的は、せん断帯の核生成と伝播の制御因子を明らかにし、金属ガラスの降伏現象に関するせん断帯の原理を明らかにすることである。本研究計画では、いくつかの代表的な金属ガラス試料に対し、系統的な研究を行う。これによって、金属ガラスの機械特性に関する基礎的な物理係数と原子構造との相関などが明確になり、優れた機械特性を有する次世代の金属ガラスや、高負荷環境下で使用される高性能な構造用材料への応用が期待される。

### 3. 研究の方法

金属ガラスサンプルのアモルファス構造は、X線回折によって確認した。いくつかのサンプルについては、透過電子顕微鏡によってアモルファス構造を確認した。また、示差熱分析によって熱力学因子を評価した。アスペクト比が高さ：幅が 2:1 になるように、2mm 径のインゴットから試料を切り出した。圧縮試験中の応力付加状態と同様に、サンプルのアライメントが降伏強度や延性に非常に影響を及ぼすことから、試料の両端は注意深く磨いて、円柱棒と垂直になるように平面をだした。

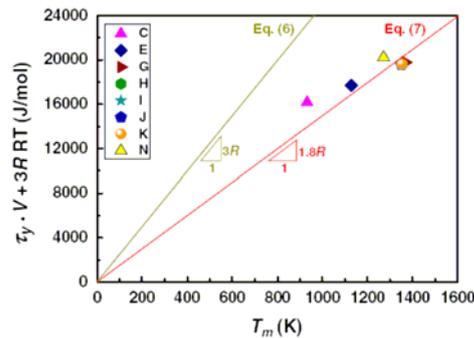
### 4. 研究成果

基本的な熱力学法則を則ることで、金属ガラスのせん断変形による降伏現象とガラス遷移とを結びつける基本的なスケールング則を見つけ出すことに成功した。その式



は以下のように書ける： $\tau_y = 3R \cdot (T_g - RT) / V$ 。  
 $\tau_y$ : 降伏強度、 $R$ : 気体定数、 $T_g$ : ガラス遷移温度、 $RT$ : 室温、 $V$ : モル体積である。  
 図1 種々の金属ガラスの降伏強度とガラス遷移温度との相関

図1は、15の金属ガラスの降伏強度の実験データを示しており、スケールング則と良い一致を示している。この結果は、金属



ガラスにおけるせん断帯の生成と降伏現象が応力誘起のガラス遷移現象であることを明瞭に示している。

図2 種々の金属ガラスの融点と降伏強度との相関

長い間、せん断帯の形成は局所的な融解の結果であると信じられてきた。このスケールング則によって、金属ガラスにおけるせん断帯の形成と降伏現象が、局所的なガラス遷移現象かそれとも局所融解現象かを明確に示すことができた。このスケールング則を用いれば、もし降伏強度が融解によって依存をしているなら、 $T_g$ の項を融点  $T_m$  に換えて、 $\tau_y = 3R \cdot (T_m - RT) / V$  と書くことができる。この関係式は、 $\tau_y$  と  $T_m/V$  とが傾き  $3R$  の式で関係づけられる。また、ガラスの遷移温度はよく約  $0.6 T_m$  として書くことが知られている。この  $\tau_y = 3R \cdot (T_g - RT) / V$  に従えば、融点  $T_m$  と金属ガラスの強度は  $\tau_y = 3R \cdot (0.6 T_m - RT) / V$  と書ける。明らかに両

者の式の主な違いは  $\tau_y$  vs  $T_m/V$  のプロットにおける傾きである。図2に示すように、傾きが  $3R$  ではなく  $1.8R$  である  $\tau_y = 3R \cdot (0.6T_m - RT)/V$  の式の方が、実験結果とよくあっていることが分かる。この結果は、疑いようもなく、金属ガラスの降伏現象が金属ガラス遷移と密接に繋がっており、融解現象とは関係ないことを示している。降伏強度とガラス遷移との相関は明らかに、金属ガラスの外部応力による弾性不安定化が、機械エネルギーによって引き起こされたガラス遷移であることを示している。そして、金属ガラスの強度が、不規則固体中の局所的な構造のフラストレーションや欠陥によって支配されていることを示している。この一般的なスケージング則は、不規則固体や非平衡固体における変形のメカニズムを理解する上で非常に大きな意味を持ち、強度を改善し、新しい金属ガラスの設計に役立てることが期待できる。

次に、金属ガラスの延性に影響する因子について検討した。せん断遷移帯 (Shear Transformation Zone (STZ)) における協調的せん断モデルによれば、金属ガラスにおける局所構造とエネルギーとは、STZ と potential energy landscape との相関で表され、応力のかかっている金属ガラス中の1つの STZ における全ポテンシャルエネルギーバリアは  $W = (8/\pi^2)\mu\gamma_c^2\zeta\Omega$  と書ける。ここで、 $\gamma_c$  は臨界せん断ひずみ、 $\zeta \approx 3$  相関因子、 $\Omega$  は STZ の活性化体積である。そして、STZ 活性化におけるバリアエネルギー密度 ( $\rho$ ) を STZ 体積に対して規格化し、次のような式で定義した  $\rho = W/\Omega = (24/\pi^2)\mu\gamma_c^2$ 。さらにこの式を再構成し、以下の式を得た。

$$\rho = (6/\pi^2) \cdot (\sigma_y^2/\mu).$$

この式は、 $\rho$  が通常の機械試験で取得可能な2つのパラメータ、降伏強度  $\sigma_y$  とせん断剛性率  $\mu$  に依存していることを示している。

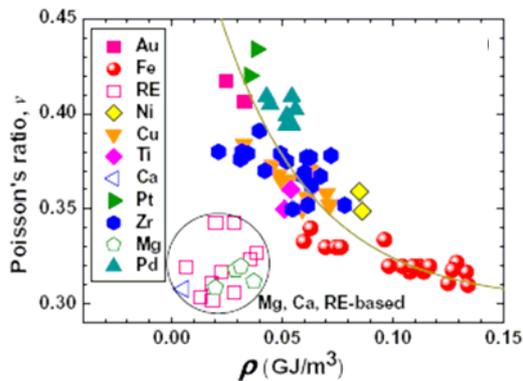
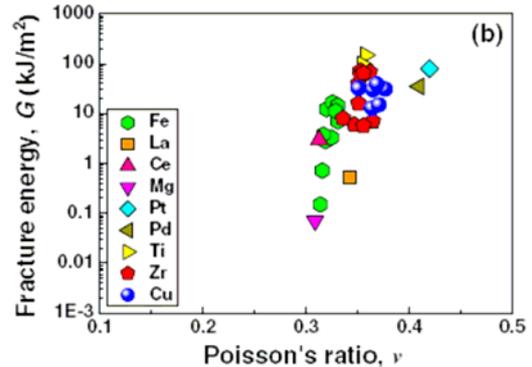
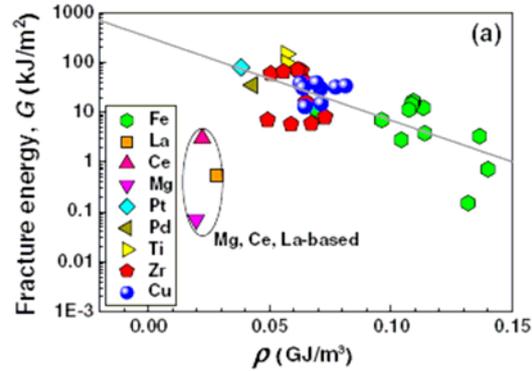


図3は、低いバリアエネルギー密度をもつ金属ガラスが、より高いポアソン比  $\nu$  を持

っており良い延性を示すことを示している。

図4は、種々の金属ガラスに対して、延性と直接相関がある破壊エネルギー  $G$  とバリアエネルギー密度  $\rho$  との相関を調べた図である。図で示すとおり、破断エネルギー  $G$  はバリアエネルギー密度  $\rho$  と密接に関係



していることが分かる。つまり、バリアエネルギー密度が低くなればなるほど、破断エネルギーが高くなる。 $G$ - $\rho$  プロットと  $G$ - $\nu$  を比較すると、金属ガラスの弾性変形によるエネルギーメカニズムの観点から導き出された  $\rho$  基準の方が、ポアソン比基準 (図4(b)) よりも明確に金属ガラスの延性と明らかな相関があることが分かった。

エネルギーの観点から、金属ガラスの弾性変形特性について調査することによって、STZ を活性化するためのバリアエネルギー密度と延性の相関を明らかにした。一般的に、延性のある金属ガラスは小さなバリアエネルギー密度を有しており、その値は  $0.07$ - $0.08 \text{ GJ/m}^3$  程度であり、それ故、せん断帯が容易に形成される。この知見は、延性金属ガラスとその材料の持つせん断帯形成能力とを直接結びつけており、金属ガラスの延性とエネルギーの重要性を示している。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

1. **Y.H. Liu**, K. Wang, A. Inoue, T. Sakurai and M.W. Chen. Energetic criterion on the intrinsic ductility of bulk metallic glasses. Scripta Materialia **62** (2010) 586-589 査読有
2. **Y. H. Liu**, C. T. Liu, W. H. Wang, A. Inoue, T. Sakurai, M.W. Chen. Thermodynamic Origins of Shear Band Formation and the Universal Scaling Law of Metallic Glass Strength. PHYSICAL REVIEW LETTERS. **103** (2009) 065504 査読有
3. **Y. H. Liu**, K. Wang, D Pan, Hao Wang, K. Nakayama, A. Inoue, W. H. Wang, M. W. Chen. Plastic Deformation-Assisted Synthesis of Metallic Glass Nanostructures. **50** (2009) 1890 査読有

[学会発表] (計 1 件)

1. **Y. H. Liu**, M. W. Chen. Mechanical behavior of microsized metallic glasses. The Third International Conference on the Characterization and Control of Interfaces for High Quality Advanced Materials, and Joining Technology for New Metallic Glasses and Inorganic Materials. Set. September 6<sup>th</sup> (2009) Kurashiki, Japan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柳 延輝 (Yanhui LIU)

東北大学・金属材料研究所・COE フェロー

研究者番号：70506469