

様 式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19（共通）

科学研究費助成事業

研究成果報告書



令和 6 年 5 月 24 日現在

機関番号：14101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04176

研究課題名（和文）環境温度と変形速度を考慮したバルク金属ガラス降伏関数の構築

研究課題名（英文）Verification of Yield Function of Bulk Metallic Glass Corresponding to Environmental Temperature and Deformation Rate

研究代表者

吉川 高正（Yoshikawa, Takamasa）

三重大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10505902

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000 円

研究成果の概要（和文）：ジルコニウム基バルク金属ガラスの強度特性に関する、温度と応力速度の効果を明らかにし、機械構造用部品の開発のための設計指針を提示することを目指した。様々な温度条件下で、負荷速度に対して、降伏時の応力状態を最大せん断応力でまとめることで、温度パラメータ下での変形速度-降伏時の最大せん断応力関係で表現できることを示してきた。研究の過程で、予負荷を加えたのちに加熱された本材料が、常温強度やガラス転移温度を下回るにもかかわらず、温度上昇中に破壊や降伏を示す現象を見出した。結果をJSMSや複数の学会で発表するとともに、指導学生が複数の学会賞を受賞し、金属ガラスの応用への一助を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

バルク金属ガラスの強度特性に関する温度と応力速度の効果は、高強度や優れたばね特性を活かした新しい機械構造用部品の開発のための設計指針となる。特に、本課題で実施した複合負荷条件下における負荷速度の実験的制御方法と、最大せん断応力による表現は、ひずみ速度依存性のある材料の強度特性を一意的に相関づけられる。本研究の過程で見出された予負荷下での加熱による破壊現象は、金属ガラス製の耐荷重構造物が温度変動下で強度変化することを示しており、本材料の応用において重要な知見となる。加えて、熱のアシストが加工負荷を下げる可能性が示唆されるため、金属ガラスの加工方法の拡張に役立つと考えられる。

研究成果の概要（英文）：The target of this study is the proposal of strength guideline to design newly structural parts made of metallic glass. Therefore, the dependency of strain rate and environmental temperature on strength properties of zirconium-based metallic glass has been studied. The strong correlation between the maximum shear stress at yielding of this material under high temperature and loading rate (speed) can be shown experimentally. These results were presented on some conferences, and the paper for the results has been prepared now. From this study, a peculiar and important phenomenon has been found. When the preloaded material is heated, the zirconium-based metallic glass shows fracture or yield, even though the preloaded stress is lower than yield stress and also the temperature is much lower than the glass transition temperature of this material. We reported this phenomenon at JSMS. The results of these studies will be able to promote the application of metallic glass.

研究分野：材料力学

キーワード：バルク金属ガラス 降伏関数 環境温度 応力速度 最大せん断応力 ガラス転移温度 破壊

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

バルク金属ガラス（Bulk metallic glass）は非晶質構造をもつ合金であり、熱的安定性が飛躍的に向上したアモルファス合金の一種である。従来の金属材料を凌駕する優れた特性と、十分大きな厚みを実現できるため、バルク金属ガラスは機械構造物材料ばかりでなく、電子・電気分野から情報通信、医療分野まで幅広い応用が期待されている材料である。今後、バルク金属ガラスの産業的応用は広がると考えられる。

バルク金属ガラスによる構造物設計のために、機械的性質を明らかにすることが重要である。機械構造物材料は、引張や圧縮といった垂直応力やせん断応力が三次元的に複合された複雑な応力状態にあり、一般に降伏条件は単純応力条件下の弾性限界だけで規定することはできない。バルク金属ガラスのような新素材については、必ずしも既存の理論が適用できるとは限らない。複合負荷条件下における降伏条件を明らかにすることが、強度や塑性加工の設計指針として肝要である。一方でバルク金属ガラスの降伏応力は強い温度依存性を有し、高温では顕著なひずみ速度依存性が現れる。複雑な形状をもち、複合的な応力条件下におかれる機械構造物は、位置によって変形速度が異なるため、バルク金属ガラス製構造物を加熱条件下で使用するためには温度とともにひずみ速度に対する降伏条件を明らかにすることが重要である。

### 2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究課題は、将来的に科学技術の発展と産業への応用が期待されるバルク金属ガラスについて、材料力学的観点から、環境温度や変形速度を含めた降伏現象を実験的に明らかにし、強度設計のための指針となる降伏関数を提示することが目的である。ジルコニウム基バルク金属ガラスに対し、軸方向負荷とねじりを組み合わせた複合負荷条件下において、常温からガラス転移温度付近の温度条件に対する降伏応力を実験的に調査し、降伏関数に対する環境温度の影響を明らかにすることを目指した。また、顕著なひずみ速度依存性を発揮する高温状態での変形速度による降伏関数への影響を明らかにすることを目指した。

### 3. 研究の方法

軸力-ねじり複合負荷条件下のジルコニウム基バルク金属ガラスに対して、申請時点での予定は、2020 年度から 2021 年度にかけて環境温度の影響を調査し、2021 年度～2022 年度にかけて変形速度の影響を調査したうえで、2023 年度に総括を目指していた。2020 年度～2021 年度にかけて、世界的な感染症対策期に重なったため、2020 年度～2021 年度上期にかけては、資材準備と実験方法を検討し、2021 年度後半から、同時に環境温度と変形速度の影響を実験的に調査した。加えて、2021 年後半に、本課題の比較対象として変形速度を限りなく遅くした条件での実験を開始した。

本研究では、所属機関が所有する環境制御型複合負荷試験機（Autograph AG-10TC：島津製）を用い、 $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  バルク金属ガラス（Orbray 製：旧アダマンド並木精密宝石）に対して調査した。環境制御型複合負荷試験機は、引張・圧縮の軸力とともに、クロスヘッド上の回旋機構によってねじり負荷を同時に加えることができ、薄肉円管試験片に軸応力-せん断応力複合負荷状態を与えられる。また、試験機に付帯している電気炉によって、これらの応力状態を様々な温度条件下で調査することができる。

複合負荷下での変形速度の影響を調査する方法として、軸力、もしくはねじりについてあらかじめ特定の負荷を一定に加えておき、他方の負荷を増大させて、破損する応力を調査する方法を用いた（図 1）。申請までの段階で、単軸引張、単軸圧縮、単純ねじりそれぞれによって降伏する応力と速度依存性には差が認められていた。また、金属ガラスが非常に大きな弾性ひずみを示すことも知られていた。すなわち、複合負荷において軸力とねじりを同時に増大させたとき、実験条件としての変形速度を一意的なパラメータとして表現することが困難であるため、一方の負荷をあらかじめ加えて維持したうえで、他方を増大させるときの速度をパラメータとして用いた。これらの操作は、電気炉内で環境温度を調整したうえで行った（図 1）。また、破損応力について、降伏関数が決定していない立場から、最大せん断応力でまとめる手法をとった。

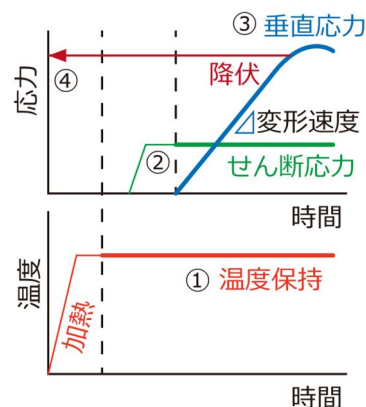


図 1 実験操作手順の例 温度を維持し、一方の応力を一定で保持したのち、ある速度で他方の応力を上昇させる。図はせん断保持、垂直応力変化の場合。

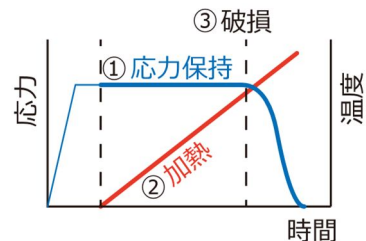


図 2 実験操作手順の例 応力を維持して（速度ゼロ）、加熱したときに破損を調査する例

同時に、上記の手法において、あらかじめ特定の温度条件下ですべての負荷を行うのではなく、予負荷を保持してから加熱する実験（図2）において、熱膨張による負荷を相殺しても加熱途中で材料が破損する現象が見いだされた。この現象は、加熱途中の熱膨張を相殺する程度の非常に低速の負荷条件であり、本研究課題の比較対象としても、かつ本研究課題の背景的な産業応用にとっても重要なものであると考えられた。そこで、本研究課題の一環として、変形速度が熱膨張のみで負荷を維持しながら、環境温度を上昇させたときの特性について調査した。

#### 4. 研究成果

##### 4-1. 各種温度条件下における変形速度の影響

ある特定の環境温度下で垂直応力とせん断応力のいずれかを一定で保持し、他方の応力を所定の速度で増大させるとき、増大させていく応力成分の速度で一意的に変形速度を指定することが可能である。また、破損した時点の複合的な応力状態は最大せん断応力でまとめることができる。3に述べた実験方法によって得られた、各種温度条件下に置かれた  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  バルク金属ガラスの、変形速度-最大せん断応力関係を図3に示す。高温条件下に置かれた本材料は、弾性変形ののち、最大応力をして軟化による応力低下を示すため、降伏による破損状態は、最大応力状態を用いた。また、変形速度については、弾性と考えられる負荷開始範囲で計測し、ひずみ速度と比例関係のある応力増大速度を用いた。いずれも対数表現すると、各温度条件下で線型的な相関関係が認められた。垂直応力を一定としてせん断応力を増大させた場合も、逆の場合も同じ相関関係に従っており、負荷経路に依存しない汎用的な相関関係が得られた。この関係は663Kを境に傾向が変化しているため、最大せん断応力-速度関係に基づいて、663K前後で異なる降伏関数を検討した。

##### 4-2. 予負荷条件下における加熱による破損現象

常温において、 $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  バルク金属ガラスが破損しない応力を予負荷として維持し、加熱したとき  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  バルク金属ガラスのガラス転移温度に達していないにもかかわらず、材料が脆性的に破壊したり、延性的に降伏する現象が認められた。この現象は負荷を支える構造用部材が温度変動下に置かれたときに、設計時の耐荷重を下回る可能性を示すという実用上の問題を提示するとともに、熱膨張以外の変形速度がゼロとしての、本研究課題の基準状態を示す。単軸引張、単軸圧縮、純せん断応力を横軸の応力で維持し、加熱したときに破損した温度（縦軸）の関係を図4に示す。比較的高い応力の作用下に置かれた材料は、加熱中に脆性的に破断し、低い応力にさらされた材料は降伏して塑性流動する現象が現れた。破損もしくは降伏する破損形態はかなり狭い応力条件で切り替わる。また、流動を生じ始める温度は、応力の上昇とともに低下していく傾向が認められる。軸応力下、せん断応力下いずれの場合も、破損する温度条件はかならず本材料のガラス転移温度以下であり、加熱前に作用させた予負荷条件は、当然ながら常温で破壊しない応力である。図4の低応力-低温度近傍は材料が破損しない領域をあらわしており、それぞれの線は、変形速度条件が作用していない、温度条件も含めた降伏（破損）曲面の一つをあらわしている。本課題の実験の派生的な成果であるが、図4の1000MPaよりも大きな軸応力下でたかだか200（450K近傍）で脆性的に破断する現象は、この材料が実用化されるとき設計において重要な問題を提起している。

##### 4-3. 公表・謝辞

本課題の結果4-1については、2022年度（2023年3月）に学会発表と一部は学会誌解説において公表（DOI: 10.2472/jsms.72.219）し、現在論文投稿を準備中である。結果4-2については、同様に2022年度に学会誌で公表（DOI: 10.2472/jsms.72.242）するとともに、複数の学会発表を実施した。後者の結果は、指導学生が日本材料学会第7回材料WEEKで優秀研究発表賞、日本機械学会東海支部第72期総会・講演会でベストプレゼンテーション賞を受賞するとともに若手優秀後援フェロー賞候補（結果待ち2024年報告書時点）となった。本研究課題の助成によって得られた成果は、金属ガラスの応用や実用化において非常に重要な知見になるとともに、将来の科学技術の担い手である若手の育成にも大きな影響を与えた。末尾ながら謹んで謝意を示す。

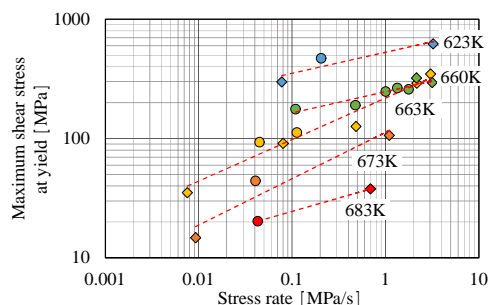


図3 623K～683K 下の  $Zr_{55}Cu_{30}Al_{10}Ni_5$  金属ガラスの変形速度（応力速度）と破損時の最大せん断応力の相関。複合負荷条件の応力経路にかかわらず、変形速度-降伏応力の明瞭な相関関係がある。

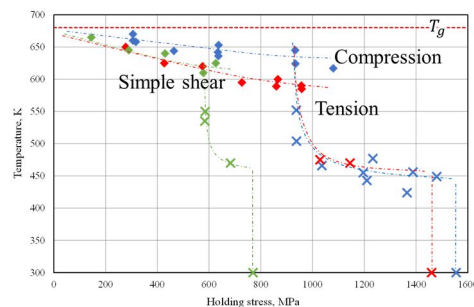


図4 各種負荷条件で、応力（横軸）を維持して変形速度を停止しながら加熱したときに破損した温度（縦軸）の関係。×は脆性的破壊、○は延性的降伏。ガラス転移温度よりも低温で常温破壊応力よりも低応力で破損する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 YOSHIKAWA Takamasa	4. 巻 72
2. 論文標題 Experimental Study for Yield Surface of Metallic Glass and Methods	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 219～221
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.72.219	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 YOSHIKAWA Takamasa、HATTORI Syoya、URANISHI Yusuke、BABA Sotaro、INABA Tadashi	4. 巻 72
2. 論文標題 予負荷を受けたZr55Al10Cu30Ni5金属ガラスの機械的性質に及ぼす熱の影響	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Materials Science, Japan	6. 最初と最後の頁 242～247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2472/jsms.72.242	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 川口楓茉, 吉川高正, 馬場創太郎, 稲葉忠司
2. 発表標題 Zr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスの加熱を用いた打抜き加工の実験的研究
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部 第73期総会・講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2024 (TEC24)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 浦西佑輔, 吉川高正, 馬場創太郎, 稲葉忠司
2. 発表標題 予負荷を受けたZr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスの加熱に伴う機械的性質の変化
3. 学会等名 日本材料学会 第9回材料WEEK
4. 発表年 2023年

1．発表者名 川口楓茉，吉川高正，馬場創太郎，稲葉忠司
2．発表標題 Zr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスの変形挙動を応用した打抜き加工技術の検討
3．学会等名 日本材料学会 第9回材料WEEK
4．発表年 2023年

1．発表者名 山田諒，吉川高正，稲葉忠司，馬場創太郎
2．発表標題 環境温度と応力速度の影響を考慮したZr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラス降伏関数の構築
3．学会等名 東海支部第72期総会・講演会および第54回学生員卒業研究発表講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2023 (TEC23)
4．発表年 2023年

1．発表者名 浦西佑輔，吉川高正，稲葉忠司，馬場創太郎
2．発表標題 予負荷を受けたZr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスの加熱に伴う機械的性質の変化
3．学会等名 東海支部第72期総会・講演会および第54回学生員卒業研究発表講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2023 (TEC23)
4．発表年 2023年

1．発表者名 田中璃玖，吉川高正，稲葉忠司，馬場創太郎
2．発表標題 熱・力学的負荷下におかれたZr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスのせん断帯の発生に関する観察的研究
3．学会等名 東海支部第72期総会・講演会および第54回学生員卒業研究発表講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2023 (TEC23)
4．発表年 2023年



1. 発表者名 服部祥也, 吉川高正, 馬場創太郎, 稲葉忠司
2. 発表標題 力学的負荷下における Zr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスの加熱に伴う機械的性質の変化
3. 学会等名 日本機械学会 東海支部 第71期総会・講演会 TOKAI ENGINEERING COMPLEX 2022 (TEC22)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 服部祥也, 吉川高正, 馬場創太郎, 稲葉忠司
2. 発表標題 力学的負荷下における Zr55Al10Cu30Ni5バルク金属ガラスの加熱に伴う機械的性質の変化
3. 学会等名 日本材料学会 第7回材料WEEK
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------