

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560750

研究課題名（和文）

金属ガラスのマイクロ抵抗シーム溶接

研究課題名（英文）

Micro-resistance seam welding of bulk metallic glasses

研究代表者

福本 信次 (FUKUMOTO SHINJI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：60275310

研究成果の概要（和文）：Zr 基バルク金属ガラスは高強度・低ヤング率を有する希少な材料であり、付加価値の高いデバイスを作製するには汎用構造用材料と溶接することが重要である。本研究では、マイクロ抵抗溶接法によって金属ガラスとステンレス鋼を溶接した。接合界面の組織形成現象を調べることで接合メカニズムを明らかにし、その界面組織と強度の関係を示した。またシート内電位分布を考慮し、通電中のシート間抵抗から通電径を見積もる方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Zr based bulk metallic glasses has superior mechanical properties such as high strength and low Young's modulus. It is necessary to weld metallic glasses to structural alloys to manufacture attractive devices. In the present study, Zr based metallic glass was welded to austenitic stainless steel by micro-resistance spot and seam welding. The microstructural development at the weld interface was investigated, which revealed the welding mechanism. It has been clarified that the weld interfacial structure influenced the weld interfacial strength. Moreover, a novel method considering equipotential surface in the workpieces has been proposed to estimate the current path area at the faying interface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：溶接・接合工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：マイクロ接合，抵抗溶接，金属ガラス，微細組織，界面現象

1. 研究開始当初の背景

巨大化。世界をリードする我が国のバルク金属ガラス (BMG) はこれをひとつのキーワードとして発展してきた。より大きな、そしてガラス形成能に優れた BMG 製作を目指し、組成や製造プロセスの開発が行われてきた。

その結果、丸棒では直径 30 mm を超えるサイズの大きさまで作製可能となり、さらなるスケールアップが期待されている。しかし巨大化ばかりが注目されがちであるが、BMG 特有の性能を部分的に発揮するためには小型製品への適用が有効である。さらにマイクロ

センサーなどの付加価値ある製品を生み出すためにはその溶接技術 (BMG 同士およびの BMG/汎用金属), 中でもマイクロスケール (MS) の溶接技術の開発が必要不可欠である.

2. 研究の目的

自動車産業発展とともに研究され尽くした感のあるクラシックなプロセスであるが, マイクロスケールに適用することで金属ガラスの機能性を生かした付加価値の高い小型デバイスの製作が可能となると予想される. そこで本研究では, 金属ガラスを利用した小型デバイスの作製を前提とし, 金属ガラスのマイクロ抵抗スポット溶接およびマイクロシーム溶接技術の開発およびその接合メカニズムの解明を目的とする.

3. 研究の方法

供試材料には $Zr_{50}Cu_{30}Ni_{10}Al_{10}$ 金属ガラス (BMG) およびオーステナイト系ステンレス鋼を用いた. どちらも厚さは $200\mu m$ とした. BMG の接合面はエメリ紙#4000 で仕上げ, 脱脂洗浄した.

マイクロ抵抗スポット溶接の構成は, トランジスタ型 DC 電源 (ミヤチテクノス製 MDB-2000B) およびサーボモータ式溶接ヘッド (同社製 MH-D20A) とした. 通電時間を $1-9\text{ ms}$, 溶接電流 $300-700\text{ A}$ と変化させて溶接を行った. マイクロシーム溶接はインバータ型 DC 電源 (同社製 IS-110A) およびパネ加圧式溶接ヘッド (同社製 FT-2030) を用いて行った. 電極は陽極側にディスク電極, 陰極側はフラット電極とした. ディスク電極径は 80 mm , 板厚 4 mm , 電極先端曲率 $R2.25$ とした. BMG と SUS304 の異材接合の場合は, SUS304 をディスク電極側に, BMG をフラット電極側にセットした. 通電時間 (t_w) および冷却時間 (t_c) をそれぞれ 10 ms および 20 ms とし, 溶接電流を $300-920\text{ A}$ で変化させた. 溶接速度および電極荷重はそれぞれ 10 mm/s , 49 N とした.

溶接中のシート間電圧を測定した. 継手強度はせん断試験によって評価した. また断面および破面を光学顕微鏡, 透過型および走査型電子顕微鏡によって観察した.

4. 研究成果

(1) マイクロ抵抗シーム溶接

溶接電流の増加とともにせん断荷重は増加し, 溶接電流が 923 A の場合は BMG で母材破断した. Fig.1 に引張せん断試験後の BMG 側の破面を示す. 溶接電流が小さい場合は, 溶接ビードが不安定であるが, 電流の増加とともに安定したビードが得られ, 連続溶接が達成されていた. ビードは中央部に明るいコントラストの領域, その外側にグレー

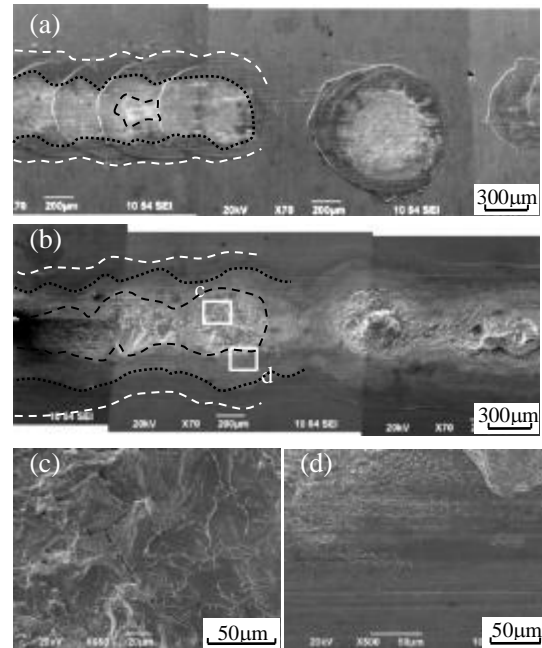


Fig.1 Fracture surfaces of BMG side of the dissimilar joints made with different welding current. (a) 468 A, (b) 827 A, (c)(d) highlighted areas in (b).

White broken lines show the outermost line of dark region. Black dashed lines show the area where intermetallic compounds forms, which is defined as bright region. Black dotted line shows the area where a little inter-reaction occurs, which is defined as gray region.

のコントラストの領域, さらに外側に暗いコントラストの領域が認められた. それぞれの領域の一部を黒破線, 黒点線, 白破線で図中に示した. 最外部の暗いコントラストの領域においては, 一方向に細い筋が様に観察された. これは SUS304 の表面痕が過冷却液相状態の BMG に転写されたものと考えられる. またビード中央部の明るいコントラストの領域は, 脆性的な破面とペインパターンが混在しており, 前者からは Zr, Cu, Ni, Al, Fe, Cr, 後者からは Zr, Cu, Ni, Al が分析された. すなわち, 破断経路は Fe_2Zr などの金属間化合物層から一部 BMG 母材部を経由したと考えられる (領域 1). これらの領域の中間に位置するグレーのコントラストの領域には, 一部にかすかな反応箇所もみとめられる (Fig.1d: 領域 2), これらの各領域の幅はいずれも溶接電流の増加にともない広がっていた.

(2) マイクロ抵抗スポット溶接の通電径見積

2つの電極チップ間では, 電流はシート内で外側に少し膨らんで流れるフリンジング現象が生じる. この電流分布は電極/シート間の通電径 $2r_{es}$ とシート間通電径 $2r$ の差 ($\Delta D=2r-2r_{es}$) に依存して変化する. そこで2次元軸対称モデルを用いて種々の ΔD に対す

る電位分布を求めた。有限要素法解析のソルバーには、汎用有限要素法解析ツールである ANSYS 11.0 を用いた。電極/シート間の通電領域からシート間通電領域まで電流を与え、後者の電位を 0 V とした。なお、メッシュサイズは $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ とし、室温での材料定数を用いた。Fig.2 はこの解析によって得られた等電位面の一例を示したものである。等電位面は電極端部で大きく変化する。そのためシート端部で電位測定を行なっている場合、その測定電位はシート界面から板厚 t の母材抵抗による電圧降下と接触抵抗による電圧降下の和を測定していることになる。測定電位に含まれる板厚はシート間の通電径と電極/シートの通電径との差が大きくなるほど薄くなった。そこで種々の ΔD に対する等電位面の解析結果からこの板厚 t を求め、以下の近似式を得た。

$$t = 2.17 \times 10^{-4} \Delta D^2 - 0.28 \Delta D + 100 \quad (1)$$

そこで、シート間電位差を測定し、そこからもめたシート間抵抗をもとにシート間の通電径を以下のように見積もった。測定したシート間電位差は接合界面での接触抵抗と Fig.2 で示した厚さ $2t$ の母材抵抗を含んでいるはずである。ただし、通電直後の急激な BMG 熔融によって接触抵抗が通電初期に消失していると考えられる。そこで通電 1 ms 以降は、接触抵抗はないものと仮定した。Fig.3 は、このようにして見積もった通電径と破面において測定した領域 1 および領域 2 の直径を示したものである。通電径は領域 1 と領域 2 の間に存在し、やや領域 1 に近い値に見積もられた。領域 1 は SUS304 の極表面が熔融した領域であり、ほぼ妥当な評価であったと考えられる。

(3) 溶接界面の形成プロセス

BMG/SUS304 接合部界面の組織は一様ではなく接合界面中央は BMG と SUS304 が熔融混合した領域、その周囲は SUS304 の界面近傍がわずかに熔融した領域、そしてさらにその外側は BMG が液相あるいは過冷却液相となり押し出された領域で構成されていた。継手の強度は BMG と SUS304 が界面近傍で熔融混合している領域が主に支配しているので、その部分を TEM により詳細に観察した (Fig.4)。接合界面中央部には Fig.4b に示すような SUS304 と BMG の両金属にまたがった $\text{Fe}_{23}\text{Zr}_6$ を含む共晶組織の反応層が観察された。Fig.4c はその共晶組織における SADP 像である。さらにその周りの BMG 側では SUS304 あるいは接合部中央の化合物が流入し、組織が一部結晶化した領域が観察された (Fig.4a 中破線部)。この反応層と一部 SUS304 が流入した部分以外の BMG はアモルファス構造を維持していた (Fig.4d)。

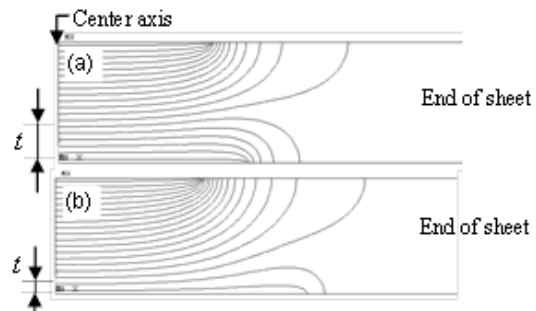


Fig.2 Equivalent potential as a function of ΔD . (a) $\Delta D=124\ \mu\text{m}$, (b) $\Delta D=437\ \mu\text{m}$

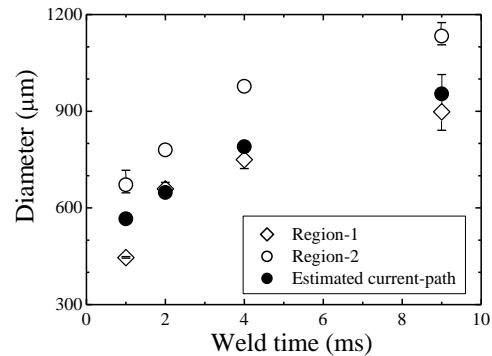


Fig.3 Measured areas and current-path area estimated by dynamic resistance.

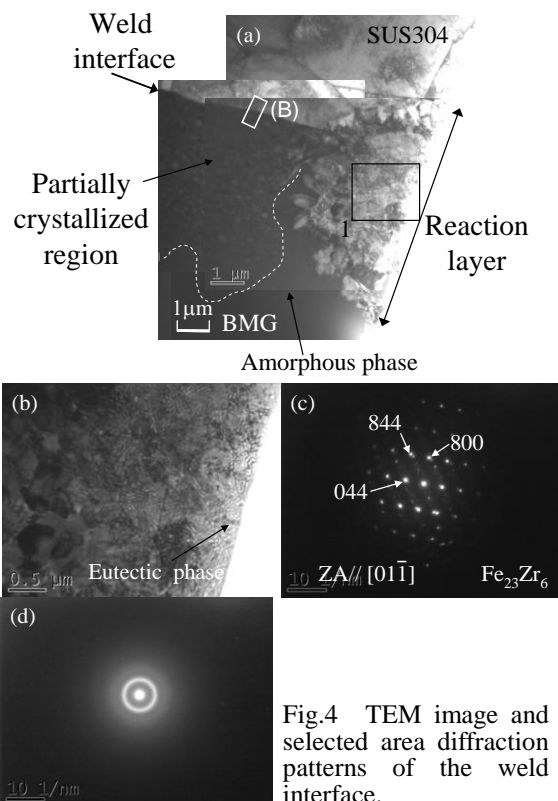


Fig.4 TEM image and selected area diffraction patterns of the weld interface.

(a) Cross section TEM image, (b) Highlighted area in 1, (c) Selected area diffraction pattern in eutectic phase, (d) Selected area diffraction pattern in amorphous phase.

Fig.5はFig.4aの(B)で示す領域におけるZrとFeのEDX分析結果である。BMG側はFeを含んだ相が流入し、結晶化しているため30at%前後のFeが計測された。これに対しSUS304側には接合界面から約100nmまでの領域において、わずかではあるがZrの拡散が認められた。SUS304中にZrの拡散が認められたことからこの界面においては、固相のSUS304と液相のBMGが接触する固液反応によって接合していたと考えられる。

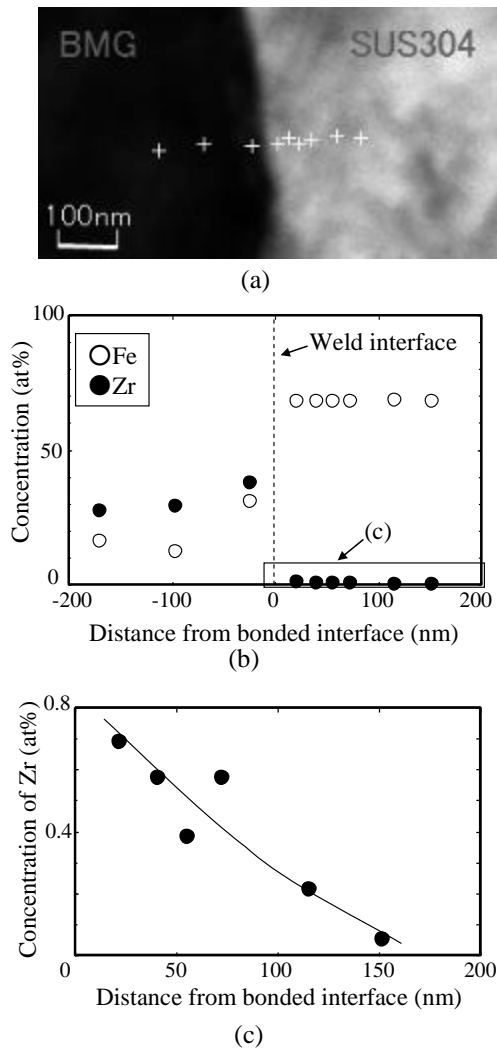


Fig.5 Bright field image of weld interface as shown in Fig.4a-(B),(a); and distribution of Fe and Zr near the weld interface, (b). (c) shows highlighted area in Fig5b.

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6件)

(1) S. Fukumoto, M. Minami, A. Soeda, M. Matsushima, M. Takahashi, Y. Yokoyama, K.

Fujimoto: Microstructural development at weld interface between Zr-based glassy alloy and stainless steel by resistance microwelding, *Journal of Physics*, 2012 (accepted). 【査読有】

(2) 福本信次, 副田輝, 南匡彦, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: シート間抵抗計測による異材マイクロ抵抗スポット溶接における通電路の見積もり, 18th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology on Electronics", (2012) 339-342. 【査読有】

(3) 南匡彦, 福本信次, 副田輝, 高橋誠, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: 金属ガラスとステンレス鋼のマイクロ抵抗スポット溶接部の微細組織, 18th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology on Electronics", (2012) 335-338. 【査読有】

(4) 福本信次, 副田輝, 南匡彦, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: Zr基金属ガラスとステンレス鋼のマイクロ抵抗シーム溶接, 17th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology on Electronics", (2011) 317-321. 【査読有】

(5) 副田輝, 福本信次, 横山嘉彦, 南匡彦, 松嶋道也, 藤本公三: ステンレス鋼と金属ガラスのマイクロ抵抗スポット溶接におけるナゲット形成現象, 17th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology on Electronics", (2011)313-316. 【査読有】

(6) 福本信次, 南匡彦, 副田輝, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: マイクロ抵抗溶接による金属ガラス/ステンレス鋼接合部の組織制御, 16th Symposium on "Microjoining and Assembly Technology on Electronics", (2010) 247-250. 【査読有】

〔学会発表〕(計6件)

(1) 福本信次, 副田輝, 南匡彦, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: シート間抵抗計測による異材マイクロ抵抗スポット溶接における通電路の見積もり, 第18回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム. (2012年2月1日, パシフィコ横浜).

(3) 南匡彦, 福本信次, 副田輝, 高橋誠, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: 金属ガラスとステンレス鋼のマイクロ抵抗スポット溶接部の微細組織, 第18回「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム. (2012年2月1日, パシフィコ横浜).

(4) S. Fukumoto, M. Minami, A. Soeda, M. Matsushima, M. Takahashi, Y. Yokoyama, K. Fujimoto: Microstructural development at weld interface between Zr-based glassy alloy and stainless steel by resistance microwelding, International symposium on materials science and innovation for sustainable society, ECO-MATES 2011, Nov.28-30, 2011. (Suita,

Osaka)

(5) 福本信次, 副田輝, 南匡彦, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: Zr 基金属ガラスとステンレス鋼のマイクロ抵抗シーム溶接, 第 17 回 「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム. (2011 年 2 月 3 日, パシフィコ横浜)

(5) 副田輝, 福本信次, 横山嘉彦, 南匡彦, 松嶋道也, 藤本公三: ステンレス鋼と金属ガラスのマイクロ抵抗スポット溶接におけるナゲット形成現象, 第 17 回 「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム. (2011 年 2 月 3 日, パシフィコ横浜)

(6) 福本信次, 南匡彦, 副田輝, 松嶋道也, 横山嘉彦, 藤本公三: マイクロ抵抗溶接による金属ガラス/ステンレス鋼接合部の組織制御, 第 16 回 「エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術」シンポジウム. (2010 年 2 月 2 日, ワークピア横浜)

[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◇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

福本 信次 (FUKUMOTO SHINJI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 60275310

(2) 研究分担者

山本 厚之 (YAMAMOTO ATSUSHI)

兵庫県立大学・工学研究科・教授

研究者番号: 70220449

(3) 連携研究者

()

研究者番号: