

# 銅合金の FSW

中 田 一 博

溶接学会誌 第 74 卷 第 3 号 別 刷

平成 17 年 4 月

## 銅合金の FSW\*

中田 一博\*\*



Friction Stir Welding of Copper and Copper Alloys\*

by NAKATA Kazuhiro\*\*

**キーワード** 摩擦攪拌接合, FSW, 銅, 銅合金, 黄銅, 継手強度, 組織, ツール, 接合条件

## 1. はじめに

銅は熱伝導度が大きく、かつ融点も比較的高いために、アーク溶接では十分な溶け込みを確保するためには一般的に予熱処理が必要とされており、溶接が難しい材料である。その一方、銅はアルミニウム及びマグネシウムと同様に基本的には軟らかい金属であるために FSW は比較的容易と考えられている。これまでに無酸素銅を使用材料とした核廃棄物容器<sup>1-6)</sup>やスパッタリング装置用バックキングプレートのシール溶接<sup>7, 8)</sup>についての報告など<sup>9)</sup>があるが、銅合金を対象とした FSW の研究報告は少ない<sup>10, 11)</sup>。また関連報告として Al 合金と Cu 合金の異材接合に関する検討<sup>12, 13)</sup>、FSW とは若干異なるが鑄造組織改質を目的とした Ni-Al 青銅<sup>14-16)</sup>や Cu-Mn 合金<sup>17)</sup>の表面改質に関する FS プロセス適用例がある。

このように銅及び銅合金に対する FSW の接合特性に関する研究は幾つかの実用化製品に対する適用を目的にしたものが先行しており、アルミニウム合金を対象に実施されてきたような基礎的、系統的研究は少ないのが現状である。

そこで本報では著者らの研究結果を中心に銅及び銅合金の FSW 接合性について紹介する。

## 2. 接合パラメータ

図 1 はいわゆる 60 Cu/40 Zn 黄銅板に対して代表的な FSW 接合パラメータであるツール回転速度と溶接速度を変化させた場合の溶接部外観写真とその X 線透過写真を示す。写真中の矢印は溶接欠陥である。図 2 (a) 及び (b)

はそれぞれ無酸素銅及び 60 Cu/40 Zn 黄銅に対して、欠陥の無い良好な接合継手が得られた条件範囲を示す。板厚は 2 mm であり、ショルダー径及びピン径はそれぞれ 15 mm 及び 5 mm である。ツール材質は SKD 61 である。両者はほぼ同様の結果を示しており、比較的広い接合可能条件範囲を有していることが分かる。

しかし板厚が厚くなるにしたがい接合条件範囲は急速に狭くなり、低溶接速度側に限定される。ツール材質や形状、FSW 装置の出力、加圧力及び装置剛性などの能力にも依るが、著者らの結果では板厚 3 mm の高力黄銅では 400 mm/min まで、板厚 5 mm の無酸素銅では 50 mm/min 程度である。また接合部の温度は 700~750℃ に達していると報告されており<sup>5, 6)</sup>、ツール形状及びその材質の最適化を図る必要がある。

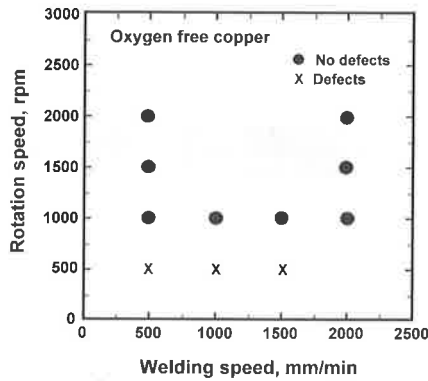
一般的に接合欠陥は低回転速度、高溶接速度の条件で発生し、FSW に特有な表面の溝状欠陥 (図 1 矢印) や内部のトンネル状空洞欠陥及びルート部での Kissing bond (キッシングボンド) が見られる。特にキッシングボンドは外観及び非破壊検査でも検出が難しい。溶接速度が

Rotation speed, rpm	Welding speed, mm/min	Surface appearance	X-ray photograph
500	500		
	1500		
1000	500		
	2000		
1500	500		
	2000		

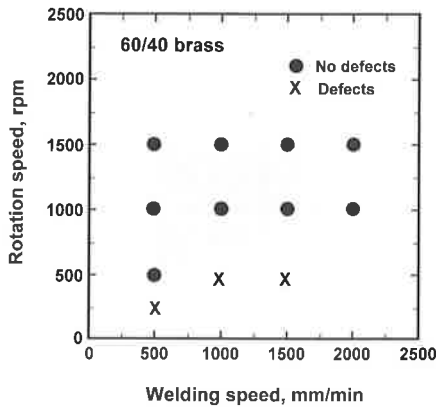
図 1 60 Cu/40 Zn 黄銅板 (2 mm) の FSW 部の外観及び X 線透過写真、ショルダー径: 15 mm, ピン径: 5 mm, 図中矢印: 溝状欠陥

\*原稿受付 平成17年2月10日

\*\*正 員 大阪大学接合科学研究所 Member, Joining &amp; Welding Research Institute, Osaka University



(a) 無酸素銅



(b) 60 Cu/40 Zn 黄銅

図2 接合欠陥の無い適正 FSW 条件範囲 (板厚 2 mm)、シールド径: 15mm、ピン径: 5 mm

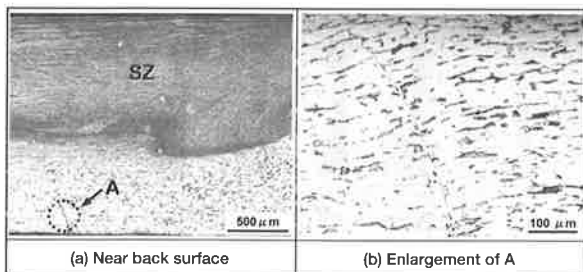


図3 板裏面のルート面に見られたキッシングボンド: 60Cu/40Zn 黄銅, 1000rpm, 2000 mm/min

1000 mm/min 以上の高速溶接ではキッシングボンドが発生しやすく、図3に示すようにマイクロ組織観察により確認されている。銅のように熱伝導度の大きな材料では特にキッシングボンドが発生しやすく、ピン先端部での塑性流動が十分に行われるようにピン先端位置の精密制御及び十分な入熱管理が必要である。

### 3. 形成組織

図4は60Cu/40Zn黄銅のFSW継手の断面組織を示す。マクロ組織的には接合部は母材部と明瞭に識別できる。攪拌部(SZ)の組織は母材部組織と比較して極めて微細な組織を呈しており、良く知られているように動的再結晶により微細等軸晶化したと考えられる。両部の間

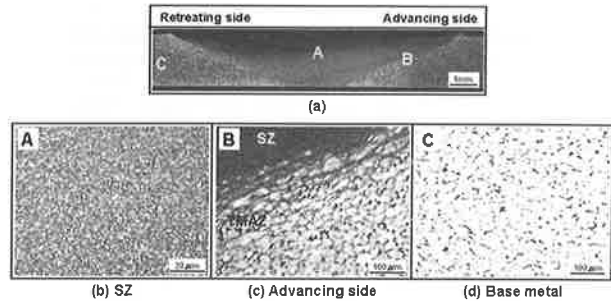


図4 60 Cu/40 Zn 黄銅板 (2 mm) の FSW 部断面における (a) マクロ及び (b) SZ, (c) TMAZ, (d) 母材各部のマイクロ組織; シールド径: 15 mm, ピン径: 5 mm

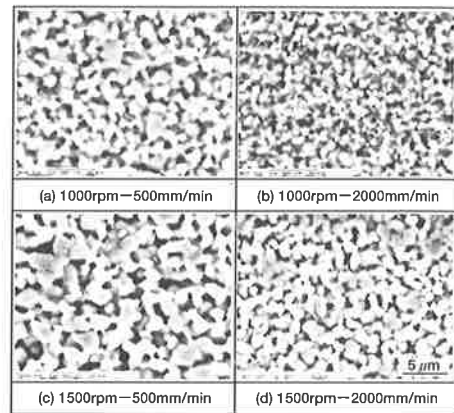


図5 接合条件によるSZ部の組織変化: 60 Cu /40 Zn 黄銅

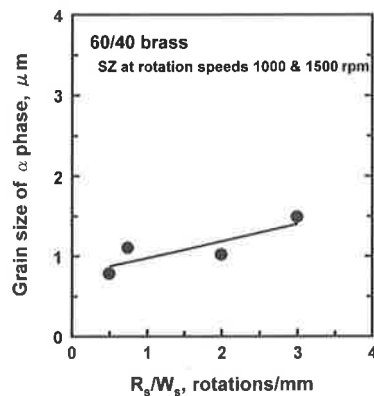


図6 入熱パラメータ  $R_s/W_s$  と  $\alpha$  相粒径との関係: 60 Cu/40 Zn 銅

には母材組織が引き延ばされたいわゆる熱的・機械的影響部 (TMAZ) が存在する。図5はSZ部のSEMによる拡大写真を示す。大部分は $\alpha$ 相であり、 $\beta$ 相はエッチングにより優先的に腐食され、その後がポイド状となっている。この組織写真よりツール回転速度が小さいほど、溶接速度が早いほど結晶粒は小さくなっており、接合条件により結晶粒径が大きく異なることが分かる。図6は平均結晶粒径と単位接合長あたりの摩擦発熱量に比例する入熱パラメータ  $R_s/W_s$  ( $R_s$ : ツール回転速度,  $W_s$ : 溶接速度)<sup>10)</sup>との関係を示すが、両者は比例関係にあり、 $R_s/W_s$  が小さい、すなわち入熱が減少するほど結晶粒径は小さくなる。ただし、入熱が不足すると図7に示すよ

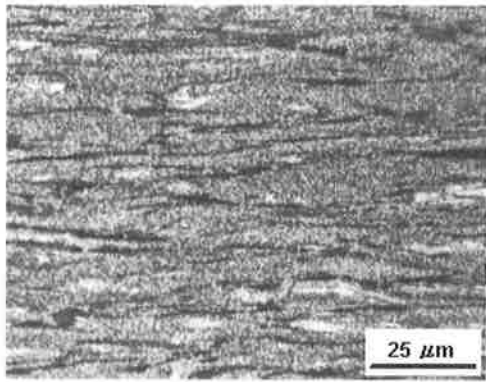


図7 低入熱条件で見られたSZ部の縞状組織；  
1000 rpm, 2000 mm/min, 60 Cu/40 Zn 黄銅

うにSZ部でもTMAZ部に似た縞状組織を呈し、また溶接欠陥の発生の危険性も高くなる。

#### 4. 継手強度

図8は60 Cu/40 Zn黄銅のFSW継手の断面における硬さ分布を示す。SZ及びTMAZ部では母材硬さ（約HV100）に比して著しく高い値を示し、溶接速度が速いほど顕著であった。図9はSZ部のTEM写真であるが、α相中に多数の転位が観察される例があり、β相の挙動と合わせて今後の詳細な検討が待たれる。これに対して無酸素銅では圧延材である母材硬さよりも低下し、接合条件による変化は小さかった。

図10は代表的な溶接条件として、回転速度1000 rpm一定で、溶接速度を変化した場合のFSW継手引張試験結果を母材と比較して示す。溶接速度500 mm/minでは母材破断であり、図8の硬さ分布と対応しており、SZ及びTMAZ部の強度は母材よりも高いことを示している。一方、1000及び2000 mm/minではSZ部で破断しており、これは図3に示したキッキングボンドの存在により、そこが破断の起点となったためである。SZ部の強度を調べるために、SZ部のみから小型引張試験片を採取して引張試験を行った結果が図11である。SZ部の引張強さ及び0.2%耐力はいずれも母材よりも増加しており、特に耐力は約2倍になっている。また溶接速度が速いほどいずれの値も増加する傾向にあり、硬さ変化と対応していることが分かる。しかし伸びは若干低下する傾向を示した。無酸素銅の場合もやはり硬さの変化と同様の傾向を示したが、SZ部の強度は母材（圧延材）よりも低下した。

#### 5. ツール

本稿で紹介した無酸素銅や黄銅は高温強度は比較的低いためにツールとしては工具鋼でも接合が可能であった。しかし、Al青銅や隣青銅、キューロニッケルなどの銅合金ではツール先端のピンが容易に破断し、接合は困難であった。K. Savolainenら<sup>14)</sup>は、銅合金に対して種々のツール材質で実験を行い、表1のような結果を得ている。PCBNセラミックツールは全ての銅材料に適用可能で

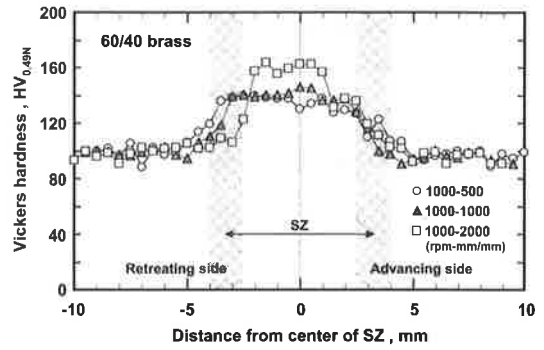


図8 FSW継手断面における硬さ分布；60 Cu/40 Zn 黄銅

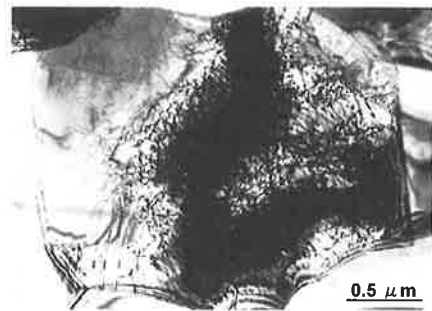


図9 SZ部のα相のTEM組織例；60 Cu/40 Zn 黄銅, 1000 rpm, 500 mm/min

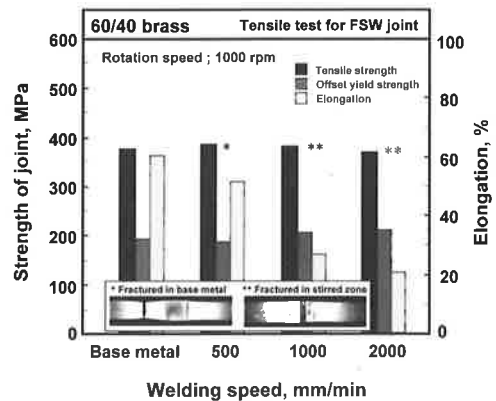


図10 FSW継手引張試験結果；60 Cu/40 Zn 黄銅, 溶接のまま

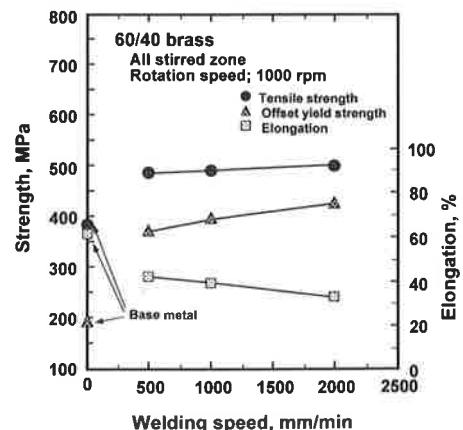


図11 SZ部のみ引張試験結果；60 Cu/40 Zn 黄銅

表1 各種銅材料のFSWに適用可能なツール材質  
(文献11)から著者作成)

ツール材質	銅材料			
	無酸素銅 (OFC)	焼結銅 (高酸素含有)	Al青銅 (CuAl5Zn5Sn)	キューブニッケル (CuNi25)
工具鋼 (H13) (Uddeholm QRO90SUPREME)	良好	良好	不良	不可
ニッケル基耐熱合金 (IN738LC, IN939, IN738LCmod)	優れている	優れている	可	不可
HIPed TiC-NiMo (TiC/NiMo=3/2/1)	不可	不可	不可	不可
焼結TiC-NiW (TiC/NiW=2/1/1)	不可	不可	不可	不可
タングステン (W)	良好	良好	不良	不可
多結晶立方晶窒化硼素* (PCBN)	良好	良好	良好	良好

\*非常に脆いので特別のセッティングが必要である。



図12 極厚無酸素銅 (50 mm) のシール溶接に用いられたFSWツール外観写真(文献5);ピン材質:ニッケル基超合金 Nimonic 105, ピン長:約50 mm, ショルダー材質:焼結タングステン合金

あるが、脆いのが欠点であり使いこなすためには特別のセッティングが必要としている。L. Cederqvist<sup>3)</sup>は、板厚50 mmの極厚無酸素銅に対して図12に示すような特殊形状のツール(ピン:ニッケル基超合金 Nimonic 105, ショルダー:焼結タングステン合金)と強力なFSW装置を用いて溶接に成功している。FSW条件はツール加圧力:90 kN, 溶接速度:80-120 mm/min, ツール回転速度:350-450 rpm, ツール前進角度:3~4°と報告されている。

## 6. おわりに

今後の課題としてはやはり銅合金に適用可能なツールの開発になる。比較的強度の低い純銅系の無酸素銅やタフピッチ銅に対しては現状のツールで対応可能であるが、銅合金となると実用的に耐えうるツールの開発が材質と形状の両面から検討する必要がある。チタン合金や鉄鋼に対するものと同様の対応が必要になるのであろう。今後の展開が期待される。

## 参考文献

- 1) C-G Andersson and R. E. Andrews: Fabrication of Containment Canisters for Nuclear Waste by Friction Stir Welding, 1<sup>st</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, June 1999, Thousand Oaks, CA, USA (CD-ROM).
- 2) C-G Andersson, R. E. Andrews, B. G. I. Dance, M. J. Russel, E. J. Olden and R. M. Sanderson: A Comparison of Copper Canister Fabrication by the Electron Beam and Friction Stir Processes, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, June 2000, Gothenburg, Sweden.
- 3) L. Cederqvist, R. E. Andrws: A weld that lasts for 100,000 years: FSW of Copper Canisters, 4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, April 2003, Park City, Utah, USA (CD-ROM).
- 4) T. Kallgren, R. Sandstrom: microstructure and temperature dependence in Copper welded by the FSW-process, 4<sup>th</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, April 2003, Park City, Utah, USA (CD-ROM).
- 5) L. Cederqvist: FSW to seal 50 mm thick copper canisters-a weld that lasts for 100000 years-, 5<sup>th</sup> International Symposium on FSW, 2004 Sept., Metz, France (CD-ROM).
- 6) T. Kallgren, L. Z. Jin, R. Sandstrom: Finite Element Modelling of Friction Stir Welding on Copper Canister, 5<sup>th</sup> international Symposium on FSW, 2004 Sept., Metz, France (CD-ROM).
- 7) K. Okamoto, M. Doi, S. Hirano, K. Aota, H. Okamura, Y. Aono and T. C. Ping: Fabrication of backing plates of copper alloy by friction stir welding, 3<sup>rd</sup> International Symposium on Friction Stir Welding, Sept. 2001, Kobe, Japan.
- 8) 日立伸銅:銅へのFSW適用で高性能・精密接合実現, 溶接技術, 49-9, (2001) 108-111.
- 9) K-S Bang, W-B Lee, Y-M Yeon and S-B Jung: Study on Weldability of Cu (OFC) by Friction Stir Welding, International Welding/Joining Conference-Korea 2002, Oct. 28-30, 2002, Gyeongju, Korea, 522-527.
- 10) H. S. Park et al: Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60%Cu-40%Zn copper alloy, Materials Science Engineering A, 371 (2004), 160-169.
- 11) K. Savolainen, et al: Friction Stir Weldability of Copper Alloys, 5<sup>th</sup> international Symposium on FSW, Sept 2004., Metz, France (CD-ROM).
- 12) L.E. Murr, Y. Li, R.D. Flores, E.A. Trillo and J.C. McClure, Interaction vortices and related microstructural features in the friction-stir welding of dissimilar metals, Materials Research Innovations, 2-3(1998), 150-163.
- 13) L. E. Murr, Y. Li, R. D. Flores, E. A. Trillo and J. C. McClure, Microstructures in friction -stir welded metals, Journal of materials Processing and Manufacturing Science, Vol. 7-2 (1998), 145-161.
- 14) M. W. Mahoney, W. H. Bingel, S. R. Sharma and R. S. Mishra, Microstructural Modification and Resultant Properties of Friction Stir Processed Cast NiAl Bronze, Materials Science Forum, Vols. 426-432 (2003), pp. 2843-2848.
- 15) K. Oh-ishi, A. M. Cuevas, D. L. Swisher and T. R. McNelley, The Influence of Friction Stir Processing on Microstructure and Properties of a Cast Nickel Aluminum Bronze Material, Materials Science Forum, Vols. 426-432 (2003), pp. 2885-2890.
- 16) W. A. Palko, R. S. Fielder and P. F. Young, Investigation of the Use of Friction Stir Processing to Repair and Locally Enhance the Properties of Large Ni Al Bronze propellers, Materials Science Forum, Vols. 426-432 (2003), pp. 2909-2914.
- 17) S. P. Lynch et al: Friction-Stir Processing of a High-Damping Mn-Cu Alloy used for Marine Propellers, Materials Science Forum, Vols. 426-432 (2003), 2903-2908.
- 18) K. Nakata, Y. G. Kim, M. Ushio, T. Hashimoto and S. Jyogan, Weldability of High Strength Aluminum Alloys by Friction Stir Welding, ISIJ (The Iron and Steel Institute of Japan) International, Vol. 40 (2000), pp. S 15-S 19.