

摩擦攪拌接合を適用した半溶融成形アルミニウム合金継手の組織と機械的性質

金属材料科 岩澤 秀
浜松工業技術支援センター 機械電子科 長津義之 渥美博安*
繊維高分子材料科 針幸達也
株式会社浅沼技研 上久保佳則 高橋正詞 山本健介 杉浦泰夫

Microstructures and mechanical properties of thixocast aluminum alloy joints fabricated by friction stir welding

IWASAWA Shigeru, NAGATSU Yoshiyuki, HARIKOH Tatsuya, ATSUMI Hiroyasu, KAMIKUBO Yoshinori, TAKAHASHI Masashi, YAMAMOTO Kensuke and SUGIURA Yasuo

The aim of this work is to evaluate the effects that FSW has on the microstructural characteristics and mechanical properties of thixocast Al-7% Si-0.5%Mg-1.0%Cu alloys in as-cast, Pre- and Post-T6 heat-treated conditions. No welding defects such as cracking or blowholes were observed, and the onion ring patterns were clearly observed in part of the weld zone in all specimens. The welded zone was divided into highly characteristic microstructures, i.e. stir zone (SZ), thermo-mechanically affected zone (TMAZ), heat-affected zone (HAZ) and base metal (BM). FSW resulted in a significant breakup of eutectic Si particles and subsequently a uniform redistribution in the aluminum matrix in the SZ located in the center of the weld. The TMAZ, which is adjacent to the SZ, has an elongated grain structure. The hardness in the SZ showed a higher value than those in TMAZ and parent metal in the as-cast specimen while in the Pre-T6 heat treated sample adverse trend was exhibited in the hardness profile. Post-T6 heat treatment resulted in the restoration of the hardness in the SZ. The U.T.S. and elongation of the as-cast joint were higher than those of the Pre-T6 heat condition. Post-T6 heat treatment led to the improvement in the strength and elongation, caused by the refinement and spheroidization of eutectic Si particles, and the enhanced matrix strength due to the precipitation of the strengthening phases throughout the material.

keywords : Friction stir welding (FSW), Thixocasting, Mechanical properties, Aluminum alloys, Digital image correlation (DIC)

摩擦攪拌接合 (FSW:Friction Stir Welding) は、良好な機械的性質、低残留応力、熱変形や溶接欠陥の減少及び異種材質への適用が可能であるため、構造部材のアルミニウム合金の接合に使用されている。半溶融成形法は、従来のアルミニウム鑄造法に比べて、鑄物の高強度化及び高品質化を可能とする鑄造法である。

本研究の目的は、半溶融成形したAl-7% Si-0.5% Mg-1.0% Cu合金の鑄造のまま材 (F材)、FSW前にT6処理したPre-T6材及びFSW後にT6処理したPost-T6材の組織と機械的性質に及ぼすFSWの影響を評価することとした。その結果、全ての試料において、接合部に欠陥はほとんど認められず、接合部の一部にはオニオンリング模様が明瞭に観察された。接合部は、特徴的なマイクロ組織、つまり攪拌部 (SZ : Stir Zone)、熱加工影響部 (TMAZ : Thermo-Mechanically Affected Zone)、熱影響部及び母材 (BM : Base Metal)、に分けられた。FSWは共晶Si粒子の分断を促進させ、接合中心部のSZにおいて、アルミニウムマトリックスに均一分散させる。TMAZは、SZに隣接し、伸直した結晶粒構造を示す。F材のSZにおける硬さ値は、TMAZ及び母材よりも高く、T6材をFSWした試料では、その逆の傾向がみられた。FSW後のT6処理は、SZの硬さを回復させた。鑄造のままF材の接合部の引張強さ及び伸びはPre-T6材に比べて高い。Post-T6材は、Si粒子の微細、粒状化及び析出強化相の析出により母相強度が高まることで、引張強さと伸びは向上した。

キーワード:摩擦攪拌接合、半溶融成形法、機械的性質、アルミニウム鑄造合金、デジタル画像相関法 (DIC)

*現 浜松工業技術支援センター 光科

1 はじめに

固相-液相共存領域の半熔融金属を金型に成形する半熔融成形法は、引け巣、ガスポロシティ及び偏析などの铸造欠陥が極めて少なく、加えて共晶生成する金属間化合物相が微細晶化する緻密な金属組織となることから、従来の铸造プロセスに比べて、高強度・高延性及び高い疲労特性を示す¹⁾。著者らの研究グループは、これまで半熔融成形法を用いて、高強度・高延性合金²⁾、高热伝導率合金³⁾、熱処理フリー合金⁴⁾を開発してきた。

輸送用機械産業では、軽量、複雑形状及び形状自由度の高い構成部材の適用が求められてきているのと同時に多種の金属素材を適材適所に配する、すなわちマルチマテリアル化が進められてきている。マルチマテリアル化には、部材接合が必要不可欠であり、その中でも摩擦攪拌接合（FSW：Friction Stir Welding）は魅力的な部材接合技術である⁵⁾。従来の熔融拡散接合法と比較して、固相接合である摩擦攪拌接合のアルミニウム合金铸件への適用のメリットは、(1) 引け、割れ、偏析及び結晶粗大化など内部欠陥が回避できる、(2) 接合後の歪・変形が少ない、(3) ブリスターが発生しない、(4) 異種材質の接合が比較的容易、(5) 継手効率が良い、などが挙げられる⁶⁾。このような背景から、形状自由度の高いアルミニウム合金铸件に摩擦攪拌接合を適用することで、より一層の複雑形状部材の大型化、高機能化部材の製造が可能となる。特に铸造品質の高い半熔融成形铸件を用いることで高信頼性、高強度部材への応用も期待される。本研究では、半熔融成形铸件への摩擦攪拌接合の実用性を評価するために、基礎的試験として、半熔融成形法により製造したAl-7% Si-0.5% Mg-1.0% Cu合金を用いて摩擦攪拌接合した継手の組織及び機械的性質を調べた。

2 試験方法

2.1 供試材及び摩擦攪拌接合（FSW）

摩擦攪拌接合の供試材には、半熔融成形したAl-7% Si-0.5% Mg-1.0% Cu合金铸件⁴⁾から長さ120mm×幅50mm×厚さ5mmの平板形状に切出した铸造のまま材（以下、F材）及びT6材を用いた。接合後の組織と機械的性質に及ぼす熱処理の影響を調べるために、F材を接合後、T6処理(Post-T6)した試料も用意した。接合前後に行ったT6処理は、

505°C×4時間保持、室温の水中に急冷した後、185°C×4時間の人工時効処理を施した。比較のために、異種材として市販の重力金型铸造したJIS AC 4CH（組成：Al-7% Si-0.35% Mg）合金のF材及びT6*（T6*は、上記T6とは異なり、条件は不明）材も用意した。

表1 試料名と接合配置

試料名	供試材の接合配置	
	AS	RS
THIXO(F)	半熔融成形-F材	半熔融成形-F材
THIXO(T6)	半熔融成形-T6材	半熔融成形-T6材
THIXO(Post-T6)	半熔融成形-F材	半熔融成形-F材
GD(F)	重力金型铸造-F材	重力金型铸造-F材
GD(T6*)	重力金型铸造-T6*材	重力金型铸造-T6*材
THIXO(T6)-GD(T6*)	半熔融成形-T6材	重力金型铸造-T6*材

摩擦攪拌接合用の供試材は、接合端面を#400の耐水ペーパーで湿式研磨した後、エタノール洗浄した。接合には、摩擦攪拌接合専用機 SHH204-718～719型（(株)日立パワーソリューションズ製）を用いて、ルート間隙なしでI型突き合わせとした。直径12mm、ショルダ角4°のショルダーと長さ4.5mmのM6ねじ形状のプロブからなるSCM415製の接合ツールを用いて、回転速度1400rpm、接合速度2.5mm/s、接合ツール傾斜角3°の条件で接合した。表1に試料名と供試材の接合配置を示す。ここでASは、接合ツールの回転方向と接合方向が同じ側、RSは、その逆側を示す。

2.2 組織及び機械的性質の評価

得られた継手の外観、接合方向と垂直断面のマクロ組織及びミクロ組織観察を行った。マクロ観察のための腐食液に改良タッカー氏液（塩酸10%：硝酸10%：フッ酸5%：蒸留水75%）を用いた。ミクロ組織観察では、コロイダルシリカ懸濁液を用いて最終バフ仕上げし、0.5% HF水溶液を用いて組織を現出させ、光学顕微鏡 GX71（オリンパス（株）製）を用いて撮影した。硬さ測定は、マイクロビッカース硬度計 MVK-E（(株)明石製作所製）を用いて、接合断面の板厚中央部の硬さ分布を調べた。引張試験は、接合部が引張方向と垂直になるように切出したダンベル形状の引張試験片を用いた。引張試験片の主要寸法は、平行部長さ40mm、平行部幅6mm、厚さ4mm、肩部半径10mmとし、試験片表面を#400耐水ペーパーで研磨した。引張試験は、オートグラフ AG-250kNplus（(株)島津製作所製）を用いて、室温、

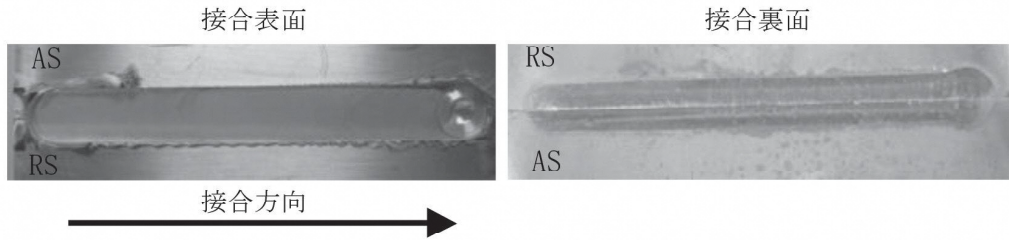


写真1 THIXO(T6)の摩擦攪拌接合後の外観写真

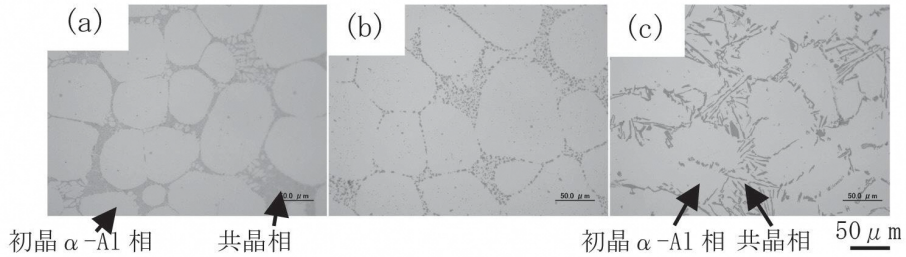


図1 母材組織

(a)THIXO(F)、(b)THIXO(T6)、(c)GD(F)

引張速度0.017mm/sの条件で行った。引張試験中における伸びは、3Dスキャナ ATOS-Core185 (GOM GmBH製) を用いて測定した。

3 結果と考察

3.1 外観及び組織

写真1にTHIXO(T6)の摩擦攪拌接合後の外観写真を示す。接合表面及び裏面ともに接合不良は認められず、健全に接合することができた。いずれの試料においても同様であった。THIXO(F)、THIXO(T6)及びGD(F)の母材組織を図1に示す。THIXO(F)は、半熔融温度領域で固相部分

であった粒状の α -Al相とその間隙に共晶凝固したAl-Si共晶組織から構成されるのに対して、重力金型鑄造材であるGD(F)では、デンドライト成長した初晶 α -Al相とAl-Si共晶相が観察される。THIXO(F)の共晶Si相は、GD(F)に比べて極めて微細であり、これは、THIXO(F)では、成形時の材料温度が低いことに加え、加圧凝固により金型からの抜熱効果が高まるため、共晶温度域における冷却速度がGD(F)に比べて著しく速いためである。T6処理を施したTHIXO(T6)では、粒状 α -Al相形態はほとんど変化しないが、共晶Si相は溶体化処理により、母相内に拡散固溶することで面積率が減少するとともにそ

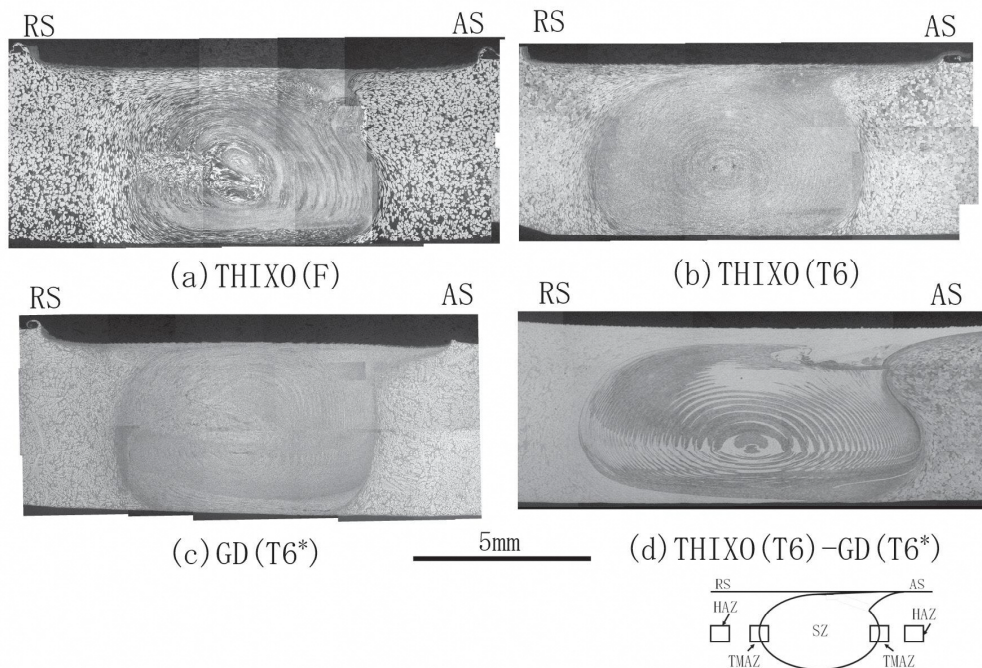


図2 接合垂直断面のマクロ組織

の形状は丸みを帯びた。

図2には、THIXO (F)、THIXO (T 6)、GD (T 6*) 及びTHIXO (T 6) -GD (T 6*) の接合方向と垂直方向の接合断面のマクロ組織写真を示す。いずれも摩擦攪拌接合特有のオニオンリング状の攪拌領域が見られた。ここで、図中の簡略図のように接合部を母材組織とは大きく異なる強攪拌を受けた領域を攪拌部 (SZ : Stir Zone)、その外側で塑性変形の痕跡を残す領域を熱加工影響部 (TMAZ:Thermo-Mechanically Affected Zone) 及び熱影響部 (HAZ : Heat Affected Zone) (後述) に区分けした。ASとRSでは、接合部中心に対して非対称となっており、特に接合上面で顕著であった。THIXO (F) では、SZのRSにおいて板厚中央部あたりで不均一な攪拌組織を示したが、THIXO (T 6) 及びGD (T 6*) では、ほぼ均一な攪拌組織となった。一方、異種材を接合したTHIXO (T 6) -GD (T 6*) では、RSに配置したGD (T 6*) が接合上面及び下部、ASのTHIXO (T 6) がSZ中央部に多く分布しており、さらにSZではAS、RSの供試材が層状に分離している領域が観察された。これらのことは、接合条件及び材料特性によって攪拌組織に違いが生じることを示している。なお、全ての試験片の接合断面において接合不良は観察されなかった。

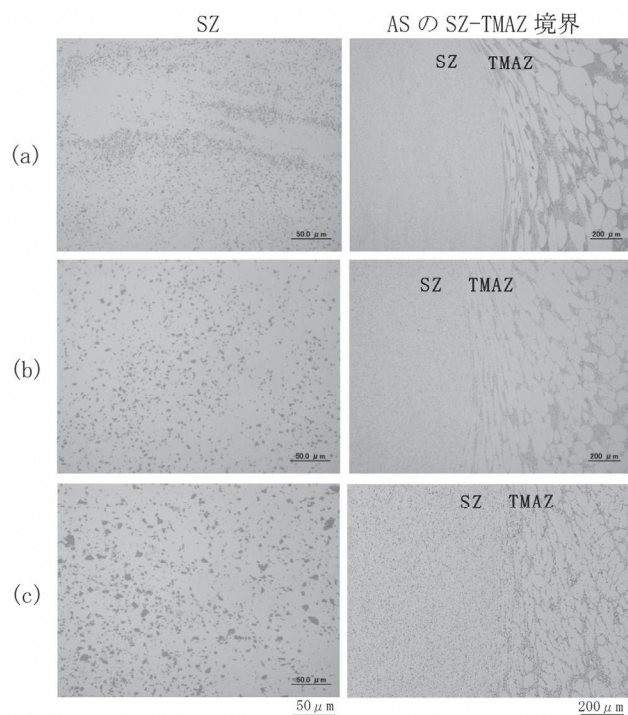


図3 SZ及びASのSZ-TMAZ境界のマイクロ組織

(a)THIXO(F)、(b)THIXO(T6)、(c)GD(F)

図3には、THIXO (F)、THIXO (T 6) 及びGD (F) のSZ、ASのSZ-TMAZ境界のマイクロ組織を示す。いずれの試料ともTMAZでは、塑性流動により初晶 α -Al相が板厚方向に引延ばされた変形組織を呈した。SZでは、接合中において、摩擦熱による温度上昇及び強塑性変形を受け、母材組織で見られた α -Al相の形状は完全に消失し、 α -Al母相に微細なSi粒

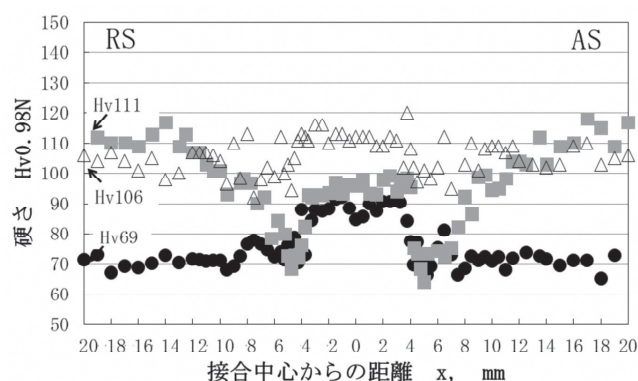


図4 硬さ分布

●THIXO(F)、■THIXO(T6)、△THIXO(Post-T6)

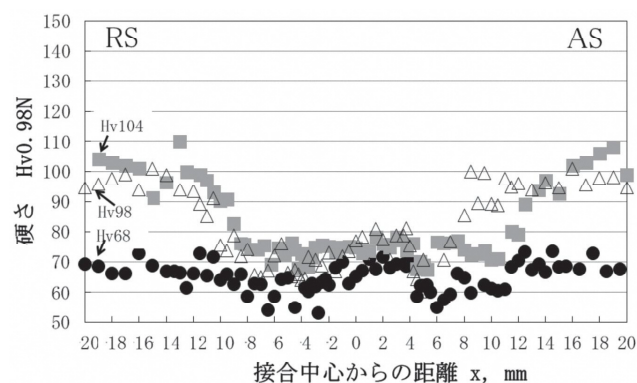


図5 硬さ分布

●GD(F)、■GD(T6*)、△THIXO(T6)-GD(T6*)

子が分散した形態となった。分散したSi粒子の大きさは、GD (F) に比べてTHIXO (F) 及びTHIXO (T 6) は微細であり、これは、もとの母材における共晶Si相の大きさを反映している。

図4にTHIXO (F)、THIXO (T6) 及びTHIXO (Post-T 6)、図5にGD (F)、GD (T 6*) 及びTHIXO (T 6) -GD (T 6*) の接合部断面の板厚中央部の硬さ分布を示す。横軸は、接合中心 ($x=0$) からの距離を示す。接合中心から $x=20$ mm部分の硬さを母材硬さとし、図中に示す。図4において、THIXO (F) では、SZで最も硬さ値は高く、TMAZから母材部への移行領域 (AS、RSとも4~6mm) で

一旦軟化し、それより外側 (AS、RSとも7mm付近) で僅かな硬さの回復が見られるものの、それより外側では母材の硬さと同程度であった。THIXO (T6) では、SZは母材よりも低い硬さを示し、AS、RSとも約5mmで最軟化を示し、THIXO (F) よりも低い硬さとなった。THIXO (Post-T6) では、接合後にT6処理したことでSZの硬さは回復し、Hv値約110と、母材部より高い硬さを示した。しかし、AS、RSともにx=6~8mm付近で若干の硬さの低下が確認された。図5において、GD (F) では、THIXO (F) とは異なり、SZにおける硬さの増加がみられなかった。接合前にT6処理した継手のGD (T6*) 及びTHIXO (T6) -GD (T6*) では、THIXO (T6) とは異なりSZの硬さは低いままであった。図4及び図5に示したように、一般に摩擦攪拌接合した接合部においてTMAZから外側に組織は母材と同じながら硬さが母材とは異なる領域が存在し、この領域は熱影響部 (HAZ) と呼ばれる。本試験において、その範囲は、接合中心部からAS、RSともに約14mmまで見られた。

摩擦攪拌接合では、ツールと被接合材との相対運動により発生した摩擦熱により、接合部分の温度が上昇するとともに塑性流動も加わり、結晶組織の再配列が生じる⁷⁾。本試験に用いた合金では、接合中に曝された温度及び時間により析出物の溶解、析出及び粗大化に加えて塑性流動による共晶Si相及び晶出化合物相の分断、微細化により接合部の硬さ変化がもたされたと考えられる。

本研究では、接合中の試料各部における温度履歴は測定していないものの、接合中のSZの温度は、析出相の溶解温度以上に達し、そこから接合断面方向外側に離れるにつれて温度が低下する温度勾配が生じていたと考えられる。このことから、SZでは、接合前に析出していた析出相が母相に固溶することにより過飽和固溶体が形成され、その後の冷却時または自然時効により析出硬化し、硬さが増加したものと考えられる。THIXO (T6) では、SZの硬さが母材硬さよりも低いのは、接合中の温度が溶体化処理温度も低く、そのため固溶元素の過飽和度が低いとためと考えられる。GD (F)、GD (T6*) 及びTHIXO (T6) -GD (T6*) においてSZの硬さが低いのは、比較材として用いたAC4CH合金では、半溶融成形材に比べて、析出硬化に寄与するMg量が低いこと、Mgと共存することで析出硬化が促進されるCu量が含

まれていないために溶質元素の過飽和度が低く、十分な析出硬化が得られなかったと考えられる。一方HAZでは、接合中の温度は、過飽和固溶体を形成する析出相の溶解温度以上には達せず、接合前に存在していた析出相の時効が促進され、析出相の粗大化が生じ (過時効状態)、硬さが大きく低下したと考えられる。

表2 引張試験結果

試料名	引張強さ (MPa)	伸び (%)	破断位置
THIXO(F)	246	5.2	母材部 (AS)
THIXO(T6)	256	5.3	TMAZ-HAZ境界 (AS)
THIXO(Post-T6)	328	8.0	TMAZ-HAZ境界 (AS)
GD(F)	189	5.9	TMAZ-HAZ境界 (AS)
GD(T6*)	207	4.6	TMAZ-HAZ境界 (AS)
THIXO(T6)-GD(T6*)	221	5.4	TMAZ-HAZ境界 (AS)

表2に引張試験結果を示す。伸びは、接合部を含んだ30mmを標点距離として測定した。THIXO (F) の引張強さと伸びは246MPa及び5.2%であり、母材よりも低い引張特性を示した⁴⁾。THIXO (T6) の引張強さ及び伸びは、それぞれ253 MPa、5.3%と、THIXO (F) とほぼ同程度であり、接合前の熱処理の効果は著しく低下した。THIXO (F) 及びTHIXO (T6) の引張強さは、比較材のGD (F) とGD (T6*) と比べて、いずれも約50MPa 上回った。このことは、半溶融成形材を用いることで、普通の重力金型鑄造材よりも高い引張強さの継手を作製できることを示している。

THIXO (Post-T6) では、引張強さ328MPa、伸び8.0%となり、接合後のT6処理により強度と延性が大きく向上した。これは、接合後のT6処理により、試料全体、特にHAZの母相強度が高まったことによる。GD (F) とGD (T6*) では、半溶融成形材に比べて低い引張強さ及び伸びを示した。THIXO (T6) -GD (T6*) では、低強度のGD (T6*) の影響により、THIXO (T6) に比べて低強度であった。THIXO (F) 以外、破断位置は同材種ではAS、異材種接合のTHIXO (T6) -GD (T6*) では、RSのTMAZ-HAZ境界付近だった。

THIXO (F)、THIXO (T6) 及びTHIXO (Post-T6) の引張破断直前における試験片平行部の伸びの分布をDIC (デジタル画像相関法) により測定した結果を図6に示す。図4に示した硬さ分布と対比すると、

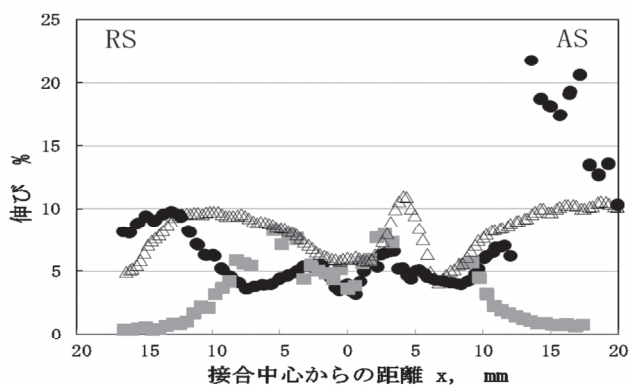


図6 3Dスキャナによる伸びの分布

●THIXO(F)、■THIXO(T6)、△THIXO(Post-T6)

硬さの低いところで大きな伸び値を示した。このように引張特性は、摩擦攪拌接合により母相強度と晶出化合物の性状変化に影響を受け、硬さの最も低い領域で破断した。このことは、摩擦攪拌接合した継手の強度向上には、これらの軟化領域の組織制御が必須であり、接合条件、合金設計及び接合前後の熱処理工程などの検討が重要である。

4. まとめ

半溶融成形したAl-7% Si-0.5% Mg-1.0% Cu合金を用いて摩擦攪拌接合した継手の組織及び機械的性質を調べた。結果を要約する。

- (1) 接合欠陥の無い、健全な摩擦攪拌接合継手を作製できた。
- (2) 接合部は、オニオンリング形状のマクロ組織を示し、母相 α -Al中に微細Si粒子が微細に均一分布した攪拌部(SZ)、粒状 α -Al相が塑性変形した熱加工影響部(TMAZ)、母材と同じ組織を示す熱影響部(HAZ)及び母材組織から構成されていた。
- (3) 接合断面の硬さ分布は、接合前の析出状態及び接合中の熱履歴により大きく影響される。
- (4) 半溶融成形材において、接合前の熱処理は引

張特性に大きな影響を及ぼさなかった。接合後のT6処理は、引張特性を大きく回復させた。

- (5) 半溶融成形材に摩擦攪拌接合を適用した継手の引張特性は、従来の重力铸造材を用いた継手と比べて良好であった。
- (6) 継手の引張破断位置は、硬さの最も低い領域(HAZ)で生じた。継手の強度向上には、接合中のHAZにおける析出組織の制御が必須である。

参考文献

- 1) 岩澤秀他：チクソキャスト法により製造したAl-7% Si-0.5% Mg合金の組織と機械的性質．軽金属，50(8)，371-375(2000)．
- 2) 岩澤 秀：半溶融成形による铸造用アルミニウム合金の諸特性．日本铸造工学会第150回全国講演大会概要集，p.114，千葉(2007)．
- 3) 山本健介 他：半溶融成形したAl-Si-Mg合金の熱伝導率に及ぼすCu添加量の影響．日本铸造工学会第168回全国講演大会概要集，p.78，高知(2016)．
- 4) 山本健介 他：半溶融成形したAl-Si-Mg合金の機械的性質に及ぼすCu添加量の影響．日本铸造工学会第170回全国講演大会概要集，p.43，秋田(2017)．
- 5) 篠田 剛：摩擦攪拌接合および摩擦圧接の铸造品への適用．铸造工学，83(12)，695-701(2011)．
- 6) 佐藤 裕：摩擦攪拌(FSW)プロセス．あたりあ，42(2)，214-220(2003)．
- 7) Z.Y.Ma et al.：Recent Advances in Friction Stir Welding/Processing of Aluminum Alloys:Microstructural Evolution and Mechanical Properties．Critical Reviews in Solid State and Materials Science，Vol.0(0)，(2017)．