

名古拓海

芸術文化キュレーションコース

文化財科学

1. 研究の目的

本研究の目的は、中国や日本における古代の青銅器鑄物を対象として、未だ明らかになっていない鑄造方法を解明することである。鑄造方法が明らかでない理由のひとつは、鑄型が完全な形で出土してこないからである。鑄型の素材は様々であるが、砂型鑄造の場合、鑄物を取り出す際に壊されてしまうので、鑄型が今日まで完全な形で残っている例は非常に少ない。それに加えて、中国殷代の青銅器などは極めて高度な鑄造技術を用いて作られている為、現在の研究者が鑄造を完璧に再現するのは困難と言われている。また、鑄造の実証実験は、成功まで繰り返し試行錯誤をしながら実験を行う必要がある為、大変な労力、時間を必要とすることから、より効率的な方法の選択が求められてきた。

そこで、本研究では3Dスキャンした青銅器のデータを活用し、コンピュータ上で青銅器の鑄造方法を解析していくことを目指した。昨今、コンピュータの性能は著しく向上し、数多くのソフトウェアが開発されてきた。その中で、鑄造のシミュレーションを高い精度で行えるソフトウェアも誕生した。これらのソフトウェアは主に企業での製品開発や研究施設で多く活用されている。本研究では、古代の鑄物にこうした解析技術を適

用し、未だ明らかになっていない鑄造方法を明らかにしていきたい。このことで、様々な条件下での鑄造実験をコンピュータ上で試行することが可能となり、これまで明らかにされていなかった鑄造方法の解明が進むことが期待できる。参考1)

2. 研究の対象

研究の対象は銅鐸、青銅鏡及び殷周青銅器(爵)である。ここでは、爵の鑄造シミュレーション結果を紹介する。

3. 研究方法

まずは、実物の青銅器を3Dスキャンして得たポリゴンデータ(STL)を軽量化した後、クリーニングを行った。次にモデリングソフトウェアを用いて湯口を付けた後、鑄造シミュレーションソフトウェアにより、解析を行った。

4. 結果と考察

図1に爵の鑄造シミュレーション結果を示す。足の1つを湯口として解析したものである。湯が固まり始める前に全体に湯が満ちていた。しかし、詳しく見てみると、湯口を設置した足以外は、先端まで湯が回っていない。従って足から注湯する場合、揚りを付けるなど足の先端まで湯が回るようにする工夫が必要だったのではないかと考える。また、爵の注口(流)付近に湯

口を付け、倒置せずに鑄造シミュレーションを試みた場合では、湯口付近が高温になり、その他の部分では温度が液相線以下になるという結果になってしまった。さらに今回、足から注湯した時は湯口を大きく広げていたのに対し、注口付近に取り付けた湯口は広げず解析したこと、そして、注湯時間も長めに取ってしまったことが原因と考えられるため、湯口位置や注湯方法を工夫するなど、さらなる検討が必要である。

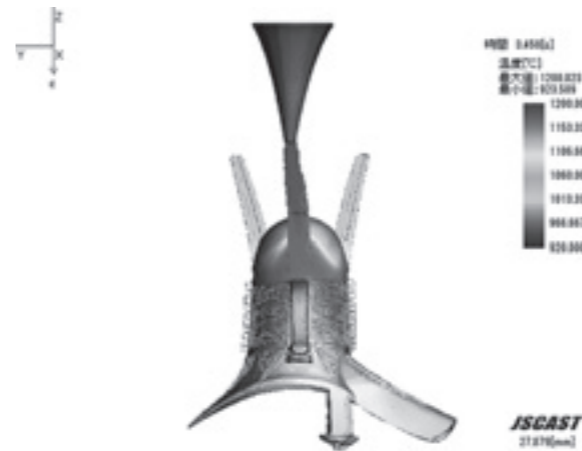


図1) 爵の鑄造シミュレーション時の温度分布

5. まとめ

技術の発達で非常に高精度な鑄造シミュレーションがコンピュータ上で出来るようになった。コンピュータに必要なデータを入力することで、いとも簡単に解析が出来る。しかし、コンピュータ上のソフトウェアの結果はあくまでもコンピュータの中での結果である。やはり、鑄造シミュレーションを行なった後に、再現実験が必要であろう。実際の鑄造現場ではコンピュータとは異なり、気温や湿度を筆頭に様々な変動が起こり得る。コンピュータ上での結果と、再現実験での結果の比較は重要であると考ええる。

[参考文献、引用文献、URL]

参考1) 大中逸雄, 朱金東, 大道徹太郎/青銅器の凝固組織と鑄造のコンピュータ・シミュレーション『古代東アジアの青銅製品鑄造に関する基礎的研究, 研究成果報告書』/ 1998年/pp.105-124

Yuda, Ryoya Purpose of this study is to reveal basic characteristics of 3D formed bronze compact, which is well known as a raw material of Takaoka copperware. Microstructure and mechanical properties were investigated.

三次元積層造形による銅合金粉末の成形に関する研究

湯田 稜也
造形建築科学コース

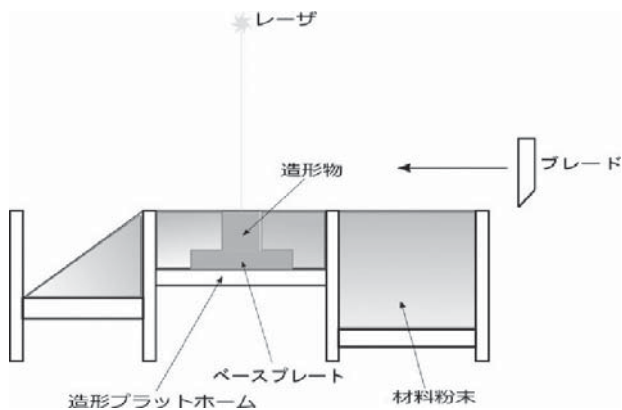
研究概要と目的

近年、製造業を中心に医療、建築、芸術、先端研究など幅広い分野で3Dプリンタ等の付加製造技術（Additive Manufacturing、AM法）が注目されている。最近では、低価格の個人用3Dプリンタも普及し始めている。2020年時点での経済波及効果は約21.8兆円と予想されており、レーザー積層造形を始めとするデジタル製造技術の発展が見込まれている¹⁾。

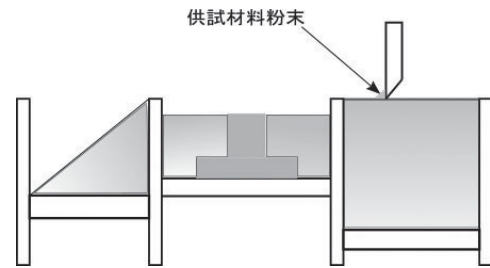
金属粉末を用いたレーザー積層造形により、高密度な造形体が得られるようになり、適用例も始めている。しかし、青銅粉末を用いたレーザー積層造形の研究例及び造形体の金属組織や機械的性質に関するデータはほとんど見られない。本研究では成分に錫を9.51%含む青銅合金を供試材料粉末とした。また、造形装置はドイツEOS社製EOSINT-M280を用いた。様々な造形条件で造形実験を行い、高密度な造形体が得られる条件を探る。また、造形体の組織及び機械的性質等を明らかにすることを研究目的とする。

金属粉末積層造形装置の原理（金属AM法）

一般に、CAD等で作成した三次元データに基づいて二次元のスライスデータに変換したものを金属AM装置の入力データに用いる。金属AMの基本原理を図1に示す。スライスデータに基づいて、薄く敷き詰められた金属粉末層に選択的にレーザーを照射して、金属粉末を溶解・凝固させる。これを積み重ねることにより、金属の三次元形状を得ることができる。このプロセスのメリットとして、切削加工や鋳造では作製が困難な複雑形状を迅速かつ容易に造形できることが挙げられる²⁾。



(a) レーザ照射部の融融・凝固



(b) 照射部を一段下げ、粉末を敷く

図1 金属AM法の基本原理図

実験方法

レーザー積層造形における造形

造形には、レーザーは最大出力400WのYb-ファイバーレーザーを使用し、窒素ガス雰囲気のもと造形した。

造形物は、主に直径10mm×高さ5mm程度の円柱状試験片とし、レーザー照射条件を表1のように変化させて全64条件において作製した。

表1 レーザ照射条件

レーザー出力, P (W)	200, 250, 300, 350
走査スピード, v (mm/s)	300, 500, 700, 900
走査ピッチ, s (mm)	0.06, 0.08, 0.10, 0.12
積層厚, t (mm)	0.04

最適造形条件探索

得られた造形体をワイヤーカット放電加工機で積層方向に対して垂直に切断した後に樹脂に埋込み、切断面が鏡面になるまで研磨した。研磨面の拡大写真を画像処理による白黒二階調化し、気孔の割合から気孔率評価 ($N=5$) を行った。レーザーのエネルギー密度 E_d は供試材料粉末の単位体積あたりに投入されるレーザーのエネルギー量であるため式 (1) のように定義した。

$$E_d = P / (v \cdot s \cdot t) \dots \dots \text{式 (1)}$$

レーザーの出力やエネルギー密度に対し気孔率が最小になる条件を最適造形条件とした。

実験結果と考察

レーザー積層造形における最適条件の検討

図2に走査ピッチ0.10mmにおけるレーザー出力（横軸）と造形体の相対密度（縦軸）の関係を示した。レーザー出力が350W、走査スピー

Nohara, Yuki *Microstructure of the Chinese ancient mirrors stored in Sen-oku-Hakuko Kan were observed without damage to the mirrors. Alpha,delta and lead phases were detected from microstructures.Using those microstructure images quantitative values of copper, tin and lead were estimated.*

画像解析定量法による古代青銅鏡の分析

野原 悠暉

造形建築科学コース

研究概要

3Dタイリング機能をもつマイクロスコープを用いて泉屋博古館所蔵の中国古代青銅鏡の金属組織観察を行った。得られた金属組織から α 相と共析相が検出できた。これらの面積率を画像処理ソフトにより計算し、各相に含まれる主要三元素の成分比及び密度を勘案することで青銅鏡の成分値が非破壊で得られた。

青銅鏡について

青銅鏡は、中国、朝鮮半島や日本から多く出土した古代青銅器のひとつである。中国における青銅鏡製作は、新石器時代に始まり、戦国時代に本格化し、漢代に絶頂期を迎え、その形態を大きく変化させながらも唐代にまで隆盛を継続した。日本においては弥生時代になって輸入され、その模倣を繰り返しながら大量に製作された。青銅鏡がこのように発達した背景には、古代においてそれが単に姿見として自分の顔を映すだけでなく、人の心をも映し出し、さらには邪悪なもの、正体を暴く呪術力を備えもつと考えられたことにあるなどと言われている¹⁾。

研究目的

古代青銅鏡の成分分析に関する研究はこれまで様々な手法で行われてきた。1960年代までは、資料の一部を採取する湿式法などにより精度の高い分析が行われてきた。しかし近年では、文化財保護の観点から、破壊分析は行われず、蛍光X線分析法が用いられるようになった^{2,3)}。資料の表面に照射されたX線が励起した蛍光X線のエネルギーを解析する方法であるため、表面が錆に覆われている出土青銅器の定量分析の分析値は正確ではない。そこで、非破壊で正確な分析値を得ることを目的としてX線に頼らない金属組織定量分析法を確立するための研究を行った。

資料と研究方法

研究対象とした分析資料は泉屋博古館所蔵の古代青銅鏡33面である。写真1は資料の鏡面側をマイクロスコープで直接観察し、金属組織画像を取得しているところである。青銅鏡の表面状態が良ければ、そのまま金属組織写真を取得できる場合が多い。なお、使用したレンズの観察距離は14mmと従来のレンズに比べて長く、資料に接触する危険性は極めて低い。また、鏡面は凸面形状であるため、焦点が合っ

ているのは観察領域のごく一部であるが、資料までの距離を少しずつ変え、焦点のあった画像を複数取得したのち、画像合成する技術(3Dタイリング)によって、ほぼ全面で焦点のあった組織写真を取得することができた。青銅鏡の表面の状態によっては、傷や錆などによって全く金属組織が観察できない資料も多く、これらについては鏡面側のごく一部の領域を、ダイヤモンドペーストを用いて研磨した後、組織観察した。

得られた金属組織写真をもとに、各構成相の面積率を求め、定量値に換算した。

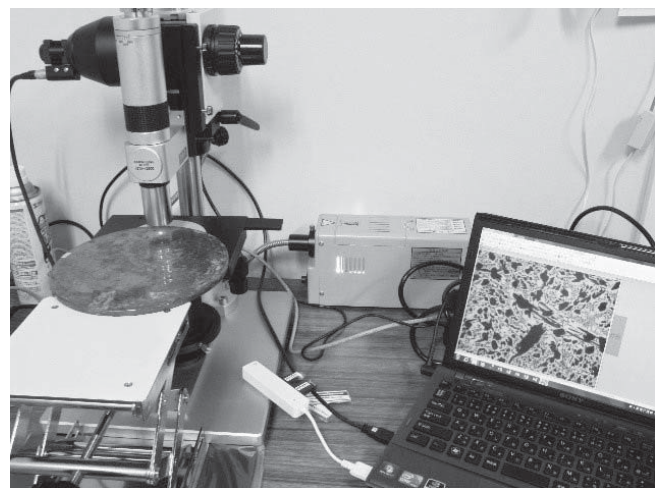


写真 1. 青銅鏡の金属組織観察

原理

古代青銅鏡の多くは銅(Cu)、錫(Sn)、鉛(Pb)を主要成分とし、金属組織は、 α 相、 δ 相、Pb相からなる。 δ 相は細かな α 相と共に共析組織を形成している。 α 相はCu84%、Sn16%の過飽和固溶体、 δ 相はCu68%、Sn32%の金属間化合物であるから、それぞれの面積率が分かれば、銅(Cu)、錫(Sn)、鉛(Pb)のおよその含有量を求めることができる。

研究結果

調査対象とした33面のうち写真2、3に素文鏡(M96)と素文八稜鏡(M98)の組織写真を示す。いずれも北宋の鏡である。組織には α 相(灰色)や共析相($\alpha + \delta$)が判別できた。また、Pb相(黒色)が分布している様子も観察できた。これらの相の面積率を画像解析によって求め、成分値に換算したデータを、蛍光X線分析によって得た

レーザーによる表面除去加工挙動の基礎的検討

Study on laser ablation behavior of aluminum anodized layer

野中 美和

Nonaka, Miwa

造形建築科学コース

緒言

アルミニウム合金には、耐食性、表面硬化や意匠性などの機能を付与するために陽極酸化処理が施されている。しかし、溶接加工では陽極酸化処理による皮膜（アルマイト）は、溶接欠陥発生の原因となるため、機械加工や化学処理で除去する必要がある。これらは手作業による工程であるため、溶接品質への影響が懸念される。

一方、建築や機械などの製造現場では、地球環境への負担軽減や安心・安全なものづくりのニーズが高まっている。例えば、様々な加工工程の前処理や後処理方法を、湿式の化学処理から環境負担の小さい乾式処理へ転換することなどが検討されている。その一例としてレーザーによるアブレーション現象を利用した材料表面除去技術¹⁻⁴⁾がある。最近では、レーザー発振効率がよく、高輝度でかつ、装置がコンパクトになるファイバーレーザーが用いられるようになり、新たな表面除去技術の開発が進んできた。

本研究では、レーザーアブレーション手法による表面層の除去技術に着目し、建築用資材である陽極酸化処理したアルミニウム合金について、溶接の前工程である陽極酸化皮膜（アルマイト層）の除去処理へ適用するための技術開発を目的に、アルマイト層に及ぼすレーザービーム照射の影響について検討した。

供試材料と実験方法

供試材はAl-Mg-Si系のA6063-T5アルミニウム合金の押出板材（幅300、長さ450、厚さ3（mm））を用いた。そして陽極酸化処理により膜厚5、10 および20 μm のアルマイト層を形成させたものを試験片とした。

実験には最大出力20Wのファイバーレーザーを用い、図1のように高速度カメラ撮影及び赤外放射温度計による動的温度測定をしながら、レーザーを進行方向に垂直に走査して照射した。照射条件は、レーザー出力20W、レーザー移動速度200mm/min、レーザー走査周波数100Hzとし、パルス周波数を20、50および70kHz、焦点位置でのビームスポット径を変化させるために、 $f\theta$ レンズの焦点距離（ f_L ）を100、160および254mmで変化させた。実験後、表面粗さ測定、走査型電子顕微鏡（SEM）による表面および断面の観察、およびEPMAによる成分分析、さらに断面硬さ分布測定を行った。

実験結果と考察

図2にアルマイト皮膜厚さ20 μm の試験片について、パルス周波数50kHzの場合でのレーザー照射部の表面外観の一例を示す。

レーザーキャン方向は図の上下方向で、レーザーは左から右に向かって移動した。照射範囲は幅10mmで長さ20mmとした。

図3に皮膜厚さ20 μm について、 f_L が160mmでパルス周波数（a）50kHzおよび（b）20kHzの場合でのレーザー照射前後を含む照射部全域の表面粗さ分布を示す。なお、粗さは図2に示すように照射部中央をx-x'方向に測定した。図3（a）の場合、起伏が大きく、表面から約30 μm まで部分的に皮膜が除去された。図3（b）の場合では、表面から約30 μm まではほぼ均一に除去されており、アルミニウム合金も一部除去された。

図4に図3の各試験片の表面のSEM像を示す。（a）の場合、白色部分はアルマイト皮膜であり、除去が不十分であることを示した。（b）の場合、レーザー照射部全域でアルマイトが除去されていた。

アルマイト層を比較的除去できた、 f_L 160mm、パルス周波数20 kHzの条件で、皮膜厚さが20および5 μm の試験片表面のEPMAによる組成像および酸素マッピングの結果を図5に示す。組成像（a）および（c）で島状（濃い灰色）の部分は、それぞれ（b）および（d）の酸素濃度が高く（白色）になっており、熔融した跡がみられないため、アルマイト皮膜が残っていることを示している。

図6にレーザー照射部の縦断面における、基材A6063合金の表面からのピッカース硬さ分布（②～④）および未照射部の硬さ分布（①）を示す。いずれも、母材最表面は内部に比べてわずかに低いものの、アルマイト除去後の基材A6063合金の硬さに変化はみられなかった。レーザー照射による基材への熱的影響はないと考えられる。

結言

- ・ファイバーレーザーのスキニング照射により、アルマイト皮膜の除去が可能であることを示した。
- ・レーザー周波数およびレンズ焦点距離により、皮膜除去の程度に影響を与えることが分かった。また、レーザー照射による基材への熱的影響による硬さ低下は認められなかった。

[主要参考文献]

- 1)大脇桂:溶接技術, 62 (2014)11, pp.61-66.
- 2)Omar Abdel-Kareem, M.A. Harith: "Evaluating the use of laser radiation in cleaning of copper embroidery threads on archaeological Egyptian textiles", Applied Surface Science 254 (2008) 5854-5860
- 3)Rui Bordalo, Paulo J. Morais, Helena Gouveia, and Christina Young: "Laser Cleaning of Easel Paintings: An Overview", Hindawi Publishing Corporation Laser Chemistry Volume 2006, Article ID 90279, 9 pages doi:10.1155/2006/90279
- 4)M.S.F. Lima, J.-D. Wagnière, S.P. Morato, N.D. Vieira Jr.: "Elimination of Lubricants from Aluminum Cold Rolled Products Using Short Laser Pulses", Materials Research, Vol.5, No.2, 205-208, 2002.

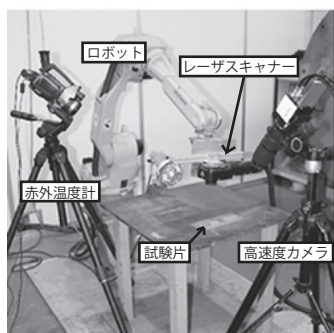


図1 レーザによる表面除去加工の評価システム概観

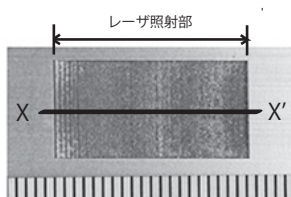


図2 レーザ照射部の表面外観（皮膜厚 20 μ m）

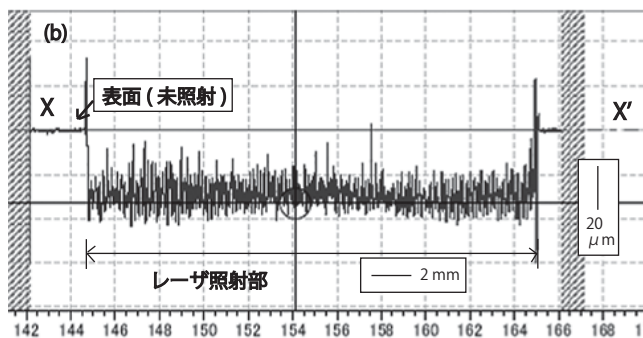
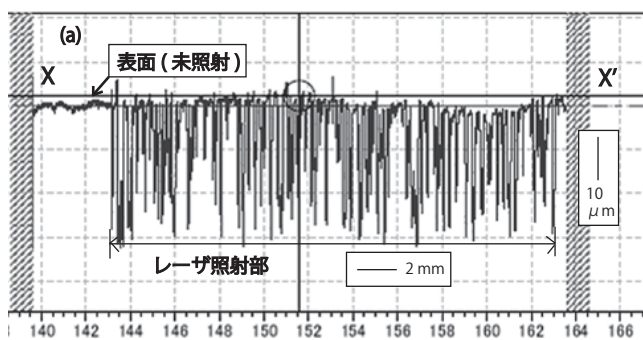


図3 レーザ照射部の表面粗さ分布（皮膜厚 20 μ m）
パルス周波数 (a) 50kHz, (b) 20kHz

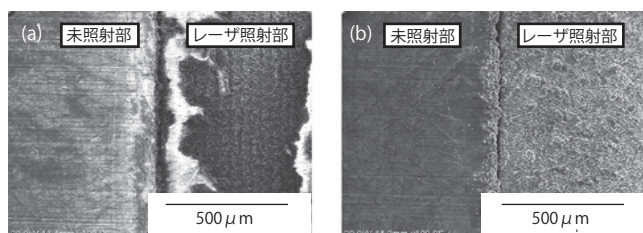


図4 レーザ照射部の表面のSEM観察結果（皮膜厚 20 μ m）
パルス周波数 (a) 50kHz, (b) 20kHz

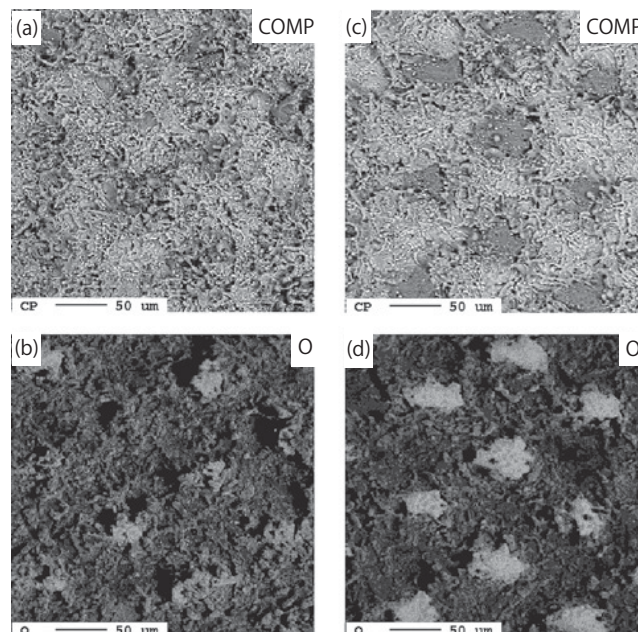


図5 レーザ照射部の表面のEPMA分析結果（パルス周波数 20kHz）
皮膜厚 20 μ mの試料表面の (a) 組成像および (b) OのX線像
皮膜厚 5 μ mの試料表面の (c) 組成像および (d) OのX線像

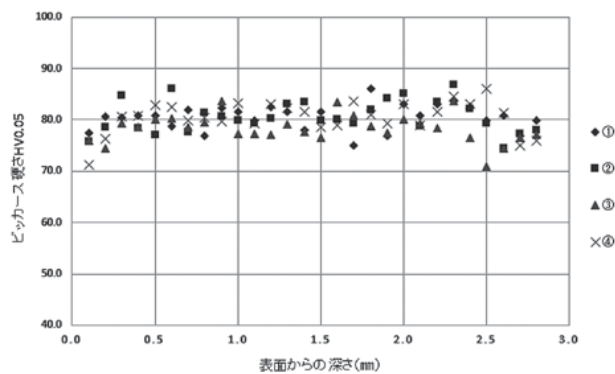
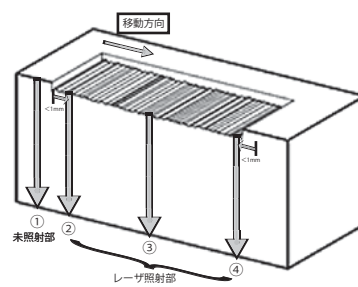


図6 レーザ照射部断面のピッカース硬さ分布（皮膜厚 20 μ m, パルス周波数 20kHz）

三角縁神獣鏡の組織観察と成分分析

Microstructure observation and chemical analysis on the triangular rimmed deity and beast mirrors

栗田 佳之以

Kurita, Kanoi

造形建築科学コース

1. はじめに

奈良県天理市の黒塚古墳は、古墳時代前期（3世紀後半から4世紀代）に築かれた大和古墳群のひとつである。平成9・10年にかけて奈良県立橿原考古学研究所によって行われた発掘調査により三角縁神獣鏡が33面も出土したことで脚光を浴び、貴重な文化遺産として今後の研究が期待されている。三角縁神獣鏡は、縁の断面が三角形であり、神仙と霊獣がモチーフとなっている鏡の総称である。全国では400面以上の出土例があるが、中国から日本へ伝わったという説がある一方、中国での出土例は見られないなど、謎の多い鏡であり、多くの研究者の注目を集めている。本研究では、この三角縁神獣鏡の成分を非破壊で明らかにし、今後、黒塚鏡に纏わる数々の謎を明らかにするための基礎的データを提供することを目的とする。

古代青銅鏡の分析例としては、まず近重眞澄氏による「東洋古銅器の化学的研究」が初期の代表的な研究としてあげられる¹⁾。小松茂氏と山内淑人氏は、秦～明の中国鏡50面、日本の古鏡3面を含む56面を分析し、成分の種類と量によって6種類に分類した²⁾。また、田辺義一氏による青銅器計84点の分析報告があり、そのうち41面が青銅鏡である³⁾。いずれも湿式法や発光分光分析などによる分析例であり、個々の分析位置においては精度の高いデータであると考えられる。三角縁神獣鏡の分析についていえば、村上隆氏による椿井大塚山古墳出土の出土鏡25面についてのEPMAおよびSEM-EDXによる分析報告例がある⁴⁾。また、資料の破壊を伴わない分析としては、沢田正昭氏が蛍光X線分析法による出土青銅鏡157面の分析を行った⁵⁾。文化財保護の観点から、今日ではこうした蛍光X線分析法による非破壊定量分析法が主流である。資料を全く傷つけることがないので、対象が貴重な文化財であっても、安心して分析を行うことができるが、X線の脱出の深さは数十ミクロンまでであるため、表面の情報しか得ることはできない。つまり、表面が腐食していたり、鍍金や偏析などによる成分の偏りがあったりする場合には、地金の正確なデータを反映していない。状態のよい伝世品などでは、かなり資料の素材データを正確に分析できると考えられるが、出土した考古遺物の場合は、表面が厚い腐食層に覆われていることが多く、蛍光X線分析で地金の正確な成分を知ることは、この腐食層を除去しない限り難しい。

黒塚古墳出土三角縁神獣鏡の鏡背面の銀白色部分のデジタルマイクログラフ観察を実施した際、腐食が軽度で金属組織をそのまま観察できる領域があることを発見した。図1は黒塚6号鏡の一部であるが、鏡背面の神像の付近で金属組織を検出できた。その後の調査で、鏡面側では組織観察できる領域が拡大することがわかった。本研究では、組織観察から得られた組織写真を画像解析し、それぞれの金属相の割合を算出することで、組成を明らかにすることに挑戦した。



図1. 黒塚6号鏡（部分）

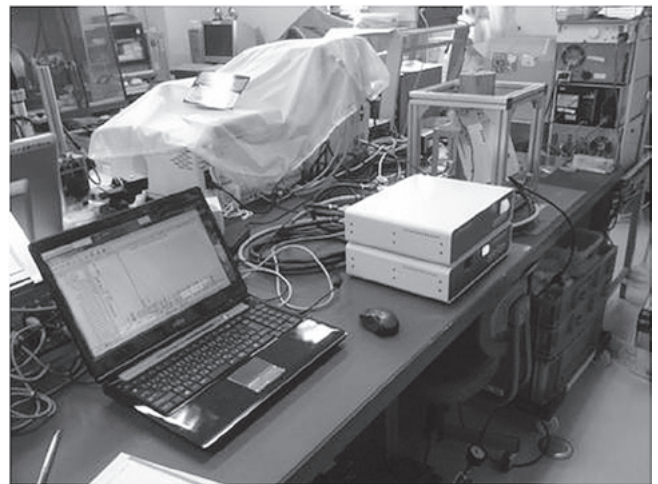


図2. 蛍光X線分析装置（上）とデジタルマイクログラフ（下）

2. 資料および調査方法

今回、調査の対象としたのは、黒塚古墳から出土した33面の三角縁神獸鏡である。

図2に使用した蛍光X線分析装置並びにデジタルマイクロスコープの装置外観を示す。組織観察は図に示すように、鏡面側を直接観察した。この際、3Dタイリング機能を用い、凹凸面でも広範囲でピントのあった画像を取得することができた。得られた金属組織画像をAdobe Photoshop および三谷商事製画像処理ソフトWin ROOF を用いて解析し、各相の面積率を求めた。

3. 結果および考察

まず、蛍光X線分析により、出土青銅鏡はいずれも、主要構成元素がCu、Sn、Pbの三元系青銅合金であることを確認した。図3(a)は黒塚6号鏡から検出した金属組織である。 α 相および $\alpha+\delta$ 共析相およびPb相で構成されている。 α 相は銅のFCC固溶体であり、 δ 相は $Cu_{41}Sn_{11}$ 構造の金属間化合物相、共析組織はこの α と δ が均一微細に混在する組織をいう。高錫青銅では、 α 相はSnを最大16%固溶し、 δ 相はSnを32%含む。PbはCuにほとんど固溶しないため、単独で相を形成する。 α 相は δ 相に比べて腐食しやすく、金属組織の α 相の部分が優先的に腐食している様子が観察できた。このため、蛍光X線で定量分析を行うと、Cuが腐食流出した結果、相対的にSnが高い組成を示してしまう。

ただし、 α 相、 δ 相、Pb相はそれぞれ、本来の組成がわかっているため、これらの面積率を求めることによって、およその成分値を計算することが可能である。図3(b)は、試作したCu-23Sn-3Pb 鑄造試験片の金属組織である。EPMAの点分析により α 相は固溶限度のCu-16Sn組成、 δ 相はCu-32Sn組成であることを確認した。そこで、この画像から α 相、 δ 相、Pb相の面積率を画像解析によって求め、全体の組成を計算したところ、表1の結果を得た。Pbの量は本来の1/2と少なかったが、CuとSnの割合はほぼ、原材料の配合通りとなり、本法によって、高精度に定量分析できることが明らかとなった。Pbが少なくなったのは、偏析によるものと考えられるが、蛍光X線のデータなどもふまえて補正すればよい。

本法で分析した結果、黒塚6号鏡の主要3元素の割合は、およそCu78%、Sn19%、Pb3%となった。33面の分析データは、近日中、公刊される黒塚古墳の調査報告書で公開する予定である。

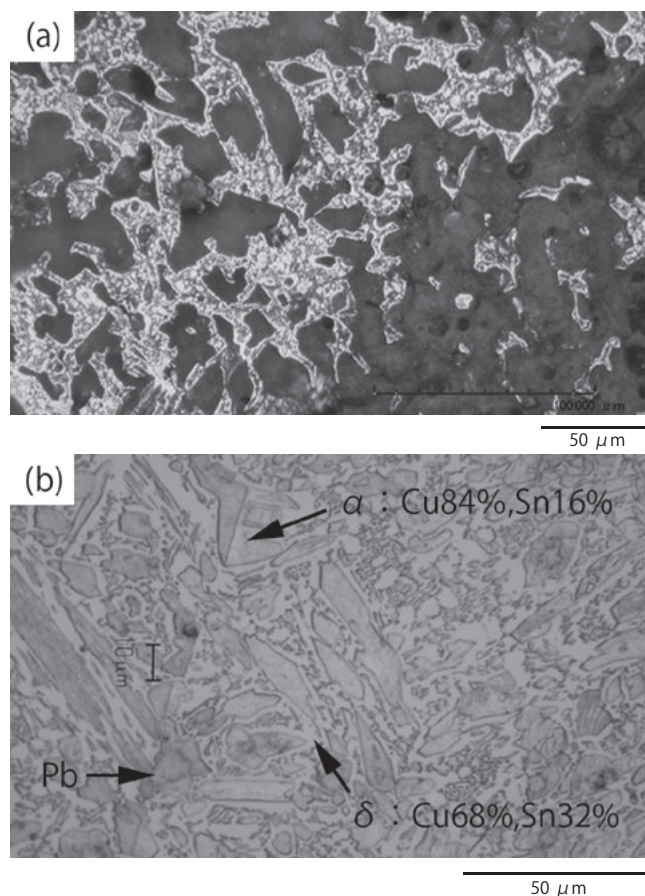


図3. 黒塚鏡および試作試験片の鑄造組織の比較
(a) 黒塚6号鏡の金属組織 (b) 鑄造試験片 (Cu-23Sn-3Pb) の金属組織

表1. 鑄造試験片の組織写真からの分析値およびEPMAによる分析値の比較

	Cu	Sn	Pb
組織写真からの計算値	75.4	23.2	1.5
原材料の配合比率	74	23	3

[参考文献]

- 1) 近重真澄 1918「東洋古銅器の化学的研究」『史林』第3巻 第2号 pp.1-35.
- 2) 小松 茂・山内淑人 1937「古鏡の化学的研究」『東方学報』8巻 pp.11-31.
- 3) Giichi, Tanabe. 1962. 'A study on the Chemical Compositions of Ancient Bronze Artifacts Excavated in Japan'. "Journal of the Faculty of Science, University of Tokyo, Sec.V: anthropology". Vol.2, Part 3. pp.261-319.
- 4) 村上 隆 2011「三角縁神獸鏡の組成と金属組織…椿井大塚山古墳出土の三角縁神獸鏡を中心に…」『学叢』第33号 pp.41-47
- 5) 沢田正昭 1981「古鏡の化学」『日本の美術 古鏡』第178号 pp.88-94.

鍮器の製作技術の発生と伝承

Origination and technical tradition of Korean high tin bronze ware

朴廷模

Park, Jungmo

文化マネジメントコース

はじめに

韓国には、鍮器という伝統的的金属工芸品がある。これは、錫 22% 程度含有の高錫青銅である。図1は韓国で販売されている鍮器である。匙、皿、碗のほか、仏具や銅鑼など様々な製品が作られている。

この鍮器の製作方法には、鑄造、方字（鍛造）、バンバンチャ（半鍛造）の3種類がある。¹⁾ 図2に鑄造された鍮器碗の鑄造直後の製品と鑄型の様子を示す。生型鑄造で作られていることがわかる。鍛造、半鍛造はいずれも熱間鍛造により成形される。これらの技法はいずれも、無形文化財に指定された匠人（鍮器匠）が、その技術を後世に伝承している。本研究では、鍮器の歴史を整理するとともに、その金属学的な特徴を明らかにすることを目的としている。



図1. 韓国で販売されている鍮器の例

れ、国家が必要に応じて鍮器を購入した。民間にも鍮器匠が多くなり、数多くの鍮器が製作されたが、地方ごとに差が現れ始めた。

韓国の鍮器を地域別に見ると、以北の山間地方では主に大きい鍮器が作られ、安城地方では小さい食器類や祭器などが作られた。

特に、鑄造は安城で作られたもの、方字は納清で作られたものが有名であった。安城の鍮器はソウルの兩班家で使う器が特別注文を受けて製作された。韓国では特別に注文を受けて製作したことを「マチュム」と言ったので、ここから「安城マチュム」という言葉ができた。納清で作られた鍮器を「納清良大鍮器」と言うが、ここでは比較的大きなものを鍛造したので「良大」という言葉が使われるようになった。北朝鮮では鍮器を「良大」と呼び、韓国では「方字」と呼ぶ。この他にも順天では鑄物鍮器と方字鍮器の製作方法を折衷した技法であるバンバンチャ鍮器がある。^{2~6)}

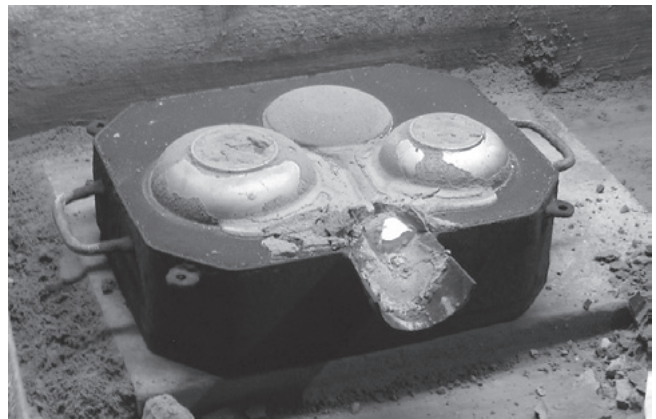


図2. 鑄造直後の製品と鑄型

鍮器の歴史

鍮器とは銅に錫 22% 程度を含む高錫青銅をいう。¹⁾ 鍮器の原形は三国時代からみられるが、熱処理を施した現在の高錫青銅器は、統一新羅時代（7C）のもので確認されている。その一部は日本にも伝えられて佐波理と呼ばれ、今も正倉院や法隆寺に保管されている。

文献上に鍮が初めて出たのは『三国史記』の新羅職官志の鐵鍮典である。ここは景德王（742～765）時に設置された鉄器と鍮器類を製造する機構で、当時新羅では鉄器と鍮器の生産に国家が関与した。高麗時代に至ると銅器製作の技術が発達して、この頃上流層の家庭ではバンバンチャ技法で製作した鍮器を食器に使い始め、その後、民間でも鍮器を使うようになった。朝鮮時代に入ると、李圭景氏の『五州書種博物考辨』（1832年）には銅 80% に錫 20% の比率で配合すれば良いと記録されている。そして、銅と錫を溶解するとき銅の損失はあまりないが、錫の損失は 5% 以内なのでこれを考慮して製作された。また、鍮器はより一般的になり、鍮器製造の専門人が集まって鍮器匠の町が各所で形成さ

鍮器の金属学的特徴

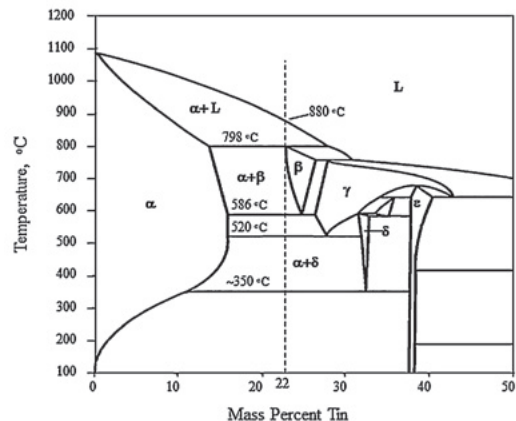


図3. Cu-Sn 二元系平衡状態図 (出典: Binary Alloy Phase Diagrams, ASM,1990)

図3に Cu-Sn 二元系平衡状態図を示す。鍮器は常温では加工が難しい。錫を 20% 程度含む高錫青銅は軟らかい α 相と硬くて脆い δ 相

からできているからである。δ相は錫を 32% 含む金属間化合物であり非常に複雑な結晶構造をしている。これを 586℃以上に加熱すると、このδ相がβ相に変態する。β相は BCC 構造であり、加工が容易になる。従って、塑性加工するときには 586℃以上に加熱して熱間加工が施される。また、これが冷えると再びδ相が析出し、脆くなってしまふ。そこで、586℃以上に加熱した状態から水中に投入する焼入れという熱処理が行われる。この熱処理は原子が拡散する時間を与えず、δ相の再析出を妨げる。焼入れは鋼を硬くする熱処理方法として有名であるが、高錫青銅においても実は行われている。但し、高錫青銅は硬くて脆いδ相を消失し軟らかいβ相がでるように焼き入れをするので、硬さは逆に軟らかくなる。⁷⁾

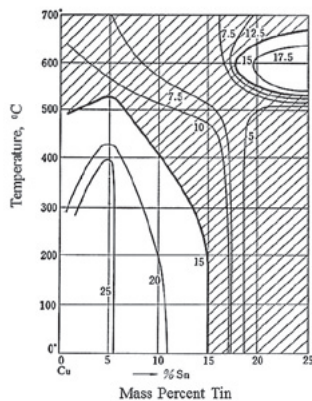


図4. 熱間加工に適した温度 (出典：非鉄金属および合金濱住松二郎、内田老鶴園)

図4は加熱した青銅の Izod 衝撃試験のデータをまとめたもので、加工の難しい脆性域が斜線で示されている。錫が 15%以下では、鍛造可能温度域が低温側で広く、室温で加工しても割れにくい。15～18%では全ての温度域で鍛造が難しい。18%以上で熱間鍛造が可能となる。錫が 22%になると熱間鍛造可能な温度域が広がって、作業がしやすくなることわかる。

図5はバンバンチャ鍮器の各工程における形態と金属組織である。鑄造品の組織はデンドライト状のα相と共析組織である。熱間鍛造したものはデンドライトが破壊され、α相に双晶がみられる。また共析組織もみられる。さらに鍛造加工を進め、これを焼き入れするとα相とマルテンサイト組織となる。

韓国出土の鍮器の組織について

図6は高麗時代に製作された鍮器鉢と皿の外観と金属組織を示す。

いずれも、硫黄化合物の Cu₂S を含む。これは、現代の鍮器には見られない不純物である。鉢は鑄造後、皿は熱間鍛造後、焼き入れして作られたことがわかった。

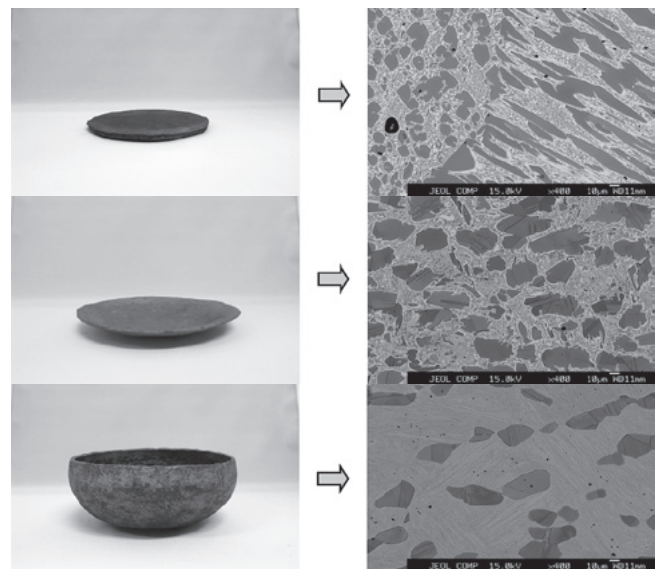


図5. 加工による金属組織変化
上：鑄造材、中：熱間鍛造、下：熱間鍛造で鉢にしたのち焼き入れをしたもの

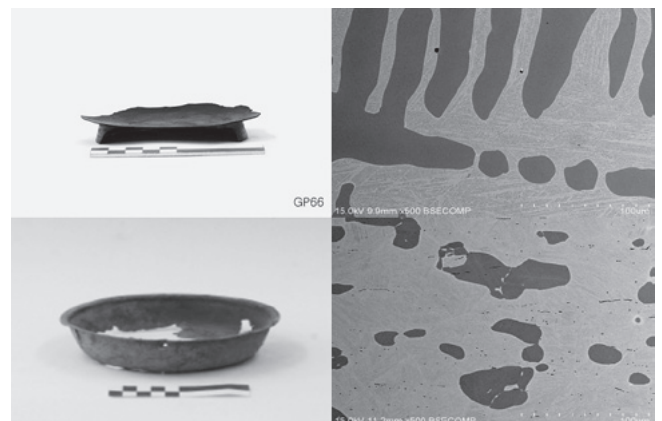


図6. 高麗時代に製作された鍮器鉢(上)と皿(下)の外観と金属組織

[参考文献]

- 1) 長柄毅一 (2010) 金属組織観察による高錫青銅の熱処理技術と製作技術の解明、東亜文化第8号、(財)東亜細亜文化財研究院、273～290
- 2) 洪正實 (1989) 鍮器、大圓社
- 3) 安貴淑 (2002) 鍮器匠、華山文化
- 4) 李圭景、訳：崔炷 (2008) 五州書種博物考辨、學研文化社、91～92
- 5) 金夏廷 (2006) 作品「WAVE」シリーズについて、68～110
- 6) 崔炷 (1999) 鑄造鍮器、大韓金属学会会報第12巻第1号、1～9
- 7) 長柄毅一 (2010) 現在のインド、韓国における高錫青銅器の加工と熱処理、アジアの高錫青銅器、富山大学、23～30

難燃性マグネシウム合金の摩擦攪拌接合性

Study on weldability for friction stir welding of noncombustible magnesium alloy

中山 航太郎

Nakayama, Kotaro

造形建築科学コース

緒言

マグネシウム合金は軽量で比強度が金属中最大であり、減衰能にも優れているため、パソコンや家電・電子機器の筐体や音響製品部材など家電生活用品分野で利用されている。マグネシウム合金は670Kを越える温度から発火し易くなるため、耐火性が要求される建築、車輛、自動車などの分野での利用は限られていた。しかし、最近、カルシウム (Ca) の添加により、発火温度を200~300K上昇させた難燃性マグネシウム合金が開発された¹⁾。今後は耐火基準の厳しい建築・鉄道車輛分野などにおいて構造材としての応用が期待される。難燃性マグネシウム合金を構造材として利用するには、種々の加工法の適用性を検討する必要がある。特に溶接性は重要な加工性能と言える。一般的にアーク溶接などの熔融溶接ではブローホールやマグネシウム酸化物であるスマットの巻き込みなどの欠陥や溶接変形の発生などの課題がある。

いっぽう、近年、母材を溶融せず固相状態で強固な接合が可能な摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW) 法が開発された²⁻⁴⁾。この接合法は拘束治具で固定した材料に、回転ツールと呼ばれる円柱状工具を回転させながら押し付けることにより発生する摩擦熱により材料が融点以下の温度まで加熱され、内部で攪拌・塑性流動して接合する方法である。FSWの主な特長として接合部である攪拌部では再結晶により結晶粒が微細化すること、入熱量が少ないため溶接変形が小さいことなどが挙げられる。そこで、本研究では難燃性マグネシウム合金のFSW接合性に及ぼす接合条件の影響を明らかにし、接合継手の組織および機械的性質について検討した。

実験方法

使用材料はAZ31およびAZ31にCaを1mass%添加した難燃性マグネシウム合金AZX311押出材を板幅70mm、長さ200mmに機械加工したものである。板厚はいずれも3mmである。これらの化学組成を表1に示す。

図1に本研究で用いたFSW装置 (日立製作所製) および接合ツールの外観を示す。接合は2枚の試験片を突合せて、接合線を対称に4ヶ所で固定し、試験片の端から25mmの位置でツールを挿入し、3秒間保持した後、接合を開始し、接合長は150mmとした。

接合条件はツール回転数を1000~3000rpm、移動速度を100~1000mm/minの範囲内で変化させた。ツールの前進角は3°、ツールの試験片への押込量を0.2mmとした。そして接合可能な最適条件範囲を求めた。また、接合継手についてミクロ組織観察、硬さ試験および引張試験により評価を行った。

実験結果

図2に一例として、AZX311について回転数2000rpm、移動速度100mm/minでの接合継手の外観を示す。接合部表面は平滑であり、欠陥も発生せず良好な接合継手が得られた。図3は図2で示した接合継手の断面マクロ組織および接合部の各部位でのミクロ組織を示したものである。中央の攪拌部は再結晶組織であり、微細な結晶粒が形成された。ツール回転方向と移動方向が一致するAS側および各方向が一致していないRS側でのTMAZ (熱機械的影響部) は、再結晶温度以下ではあるが、塑性流動の影響を受けて組織は変形していた。図4に各材料の最適接合条件範囲を示す。AZX311はAZ31に比べて無欠陥の条件範囲は狭いが、接合可能範囲は広がった。

図5に接合継手の硬さ分布を示す。図中のSZは攪拌部の領域を示し、点線は各母材の硬さを示す。AZ31の場合、攪拌部の硬さは母材とほぼ同等であった。AZX311の場合、攪拌部の硬さは最大でHV80となり、母材に比べて高くなった。

図6にツールの移動速度を変化させた場合の接合継手の引張試験強度を示す。図中の点線は各母材の引張強さを示す。AZ31およびAZX311の接合継手の引張強度は移動速度に関係なく母材に比べて低下し、AZ31の場合で141~161MPa、AZX311の場合で165~185MPaであった。破断位置は全て攪拌部であった。母材強度に対する接合部強度の比率である継手効率率はAZ31の場合で66~75%、AZX311の場合で58~65%とやや低い値であった。これは引張試験を接合したままの状態で行ったため、試験片表面の性状の影響を受けた可能性があるためと考えられる。

結言

- (1) 難燃性マグネシウム合金の最適接合条件範囲を明らかにした。
- (2) 難燃性マグネシウム合金の接合継手の引張強度は165~185MPaであり、継手効率は58~65%であった。

[主要参考文献]

- 1) 坂本満、上野英俊：部材の軽量化による輸送機器の省エネ化 - 難燃性マグネシウムの研究開発 - ; Synthesiology Vol.2 No.2 pp.127-136 (Jun.2009)
- 2) 中田一博 大阪大学 接合研究所：マグネシウム材料の最近の固相接合技術 (FSW) について；溶接学会全国大会講演概要 第82集 (2008-4)
- 3) 坂井裕司 関西大学 他：難燃性マグネシウム合金の接合特性；溶接学会全国大会講演概要 第78集 (2006-4)
- 4) 山本尚嗣、廖金孫、中田一博：難燃性 Mg 合金の摩擦攪拌点接合および抵抗スポット溶接；JJapan Inst.Metals,Vol.74,No.5 (2010) ,pp.307-313

表 1. AZ31 および AZX311 の化学組成

	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Ca	Mg
AZ31	3.2	0.94	0.37	0.008	0.002	0.0003	0.0004	0.00	Bal.
AZX311	3.1	0.63	0.39	0.015	0.003	<0.002	<0.002	0.99	Bal.

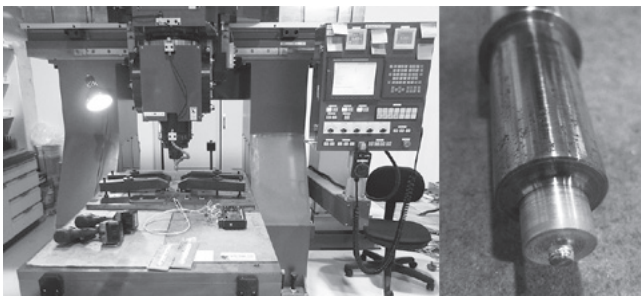


図 1. 摩擦攪拌装置と接合ツール

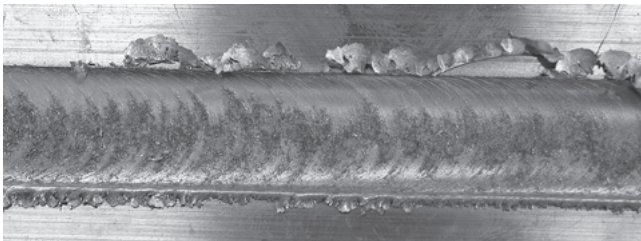


図 2. AZX311 の接合外観 (2000rpm、100mm/min)

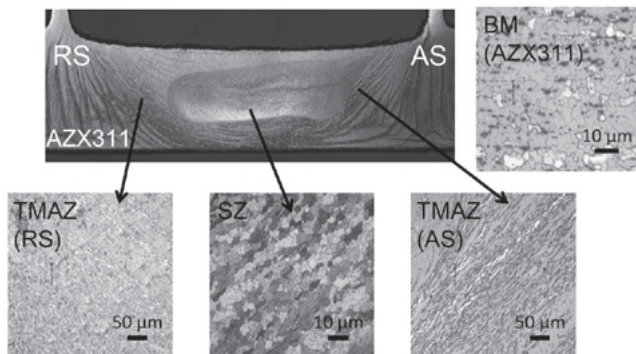


図 3. AZX311 の接合部のマクロ組織およびミクロ組織 (2000rpm、100mm/min)

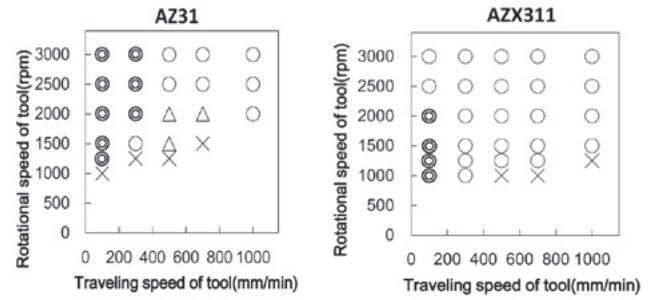


図 4. 各材料の最適接合条件範囲
 (◎: 無欠陥、○: 未接合部有り、△: 再現性なし、×: 接合できない)

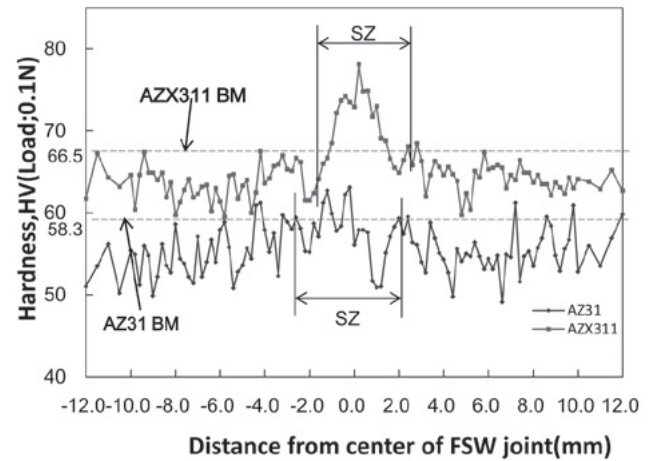


図 5. 接合継手の断面硬さ分布 (2000rpm、500mm/min)

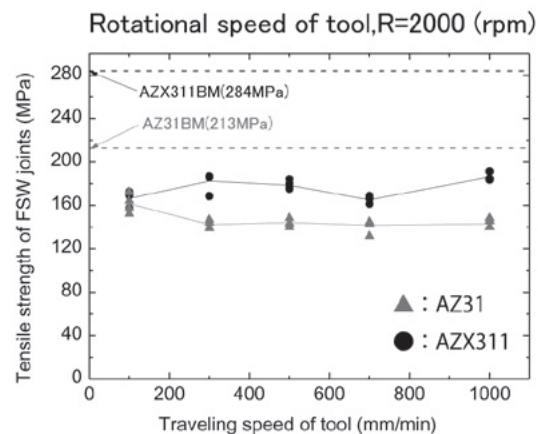


図 6. 接合継手の引張強度

難燃性マグネシウム合金のレーザー溶接 Laser Welding of Noncombustible Magnesium Alloy

牧 聡美
Maki, Satomi
造形建築科学コース

1. 緒言

マグネシウム合金は比重が小さく比強度が高く、電磁シールド性に優れているなどの長所がある反面、活性な金属で発火点が低いため、铸造や切削加工での発火など取扱いに注意を要する短所もある。最近ではCaなどの添加により難燃性を付与するなどの改善¹⁾がなされ、構造材としての利用を可能にしてきた。マグネシウム合金を構造材として利用するには溶接加工が必要となるが、従来のアーク溶接²⁾では、酸化反応で発生したスマットによる作業環境への影響や溶接変形などの問題がある。最近では、レーザー溶接や摩擦攪拌接合の適用について検討されている。特にビーム品質に優れたファイバーレーザーを用いた溶接の研究が行われている³⁾。

本研究では、ファイバーレーザーによる難燃性マグネシウム合金の溶接性を明らかにするため、最適溶接条件や接合継手の組織、機械的性質について検討した。

2. 供試材料および実験方法

供試材料は、カルシウム (Ca) を約1wt%添加した難燃性マグネシウム合金AZX311およびAZX611の押出材 (厚さ3mm) である。比較のためにマグネシウム合金AZ31およびAZ61も使用した。実験にはファイバーレーザー加工機 (IPG製、最大出力7kW、波長1,070nm) を使用し、ビードオンプレート溶接および突合せ溶接を行った。図1に本実験で使用したファイバーレーザー加工機の発振器 (a) および溶接状況 (b) を示す。

ビードオンプレート溶接では、レーザー出力を1~3kW、溶接速度を0.5~4.5m/minと変化させた。突合せ溶接では、レーザー出力1.5、2.0および3.0kW、溶接速度1.5、2.0および3.5m/minの3条件を行った。なお、すべての条件で焦点位置は試料表面とし、酸化防止のためシールドガスにアルゴンガスを用いた。ガス流量は20L/minとした。

溶接後、溶接ビード外観観察、断面組織観察、硬さ試験および引張試験により評価検討した。

3. 実験結果および考察

図2はAZX311について出力1.5kW、溶接速度1.5m/minの溶接条件における溶接ビード外観および溶接部のマイクロ組織である。溶接ビードは裏側まで貫通しており、ビード幅は約2mmであった。溶接部の組織は、溶融境界から内部に向かって粗大なデンドライト状の組織が成長し、中央付近では等軸晶的な組織が観察された。本条件では、内部割れやブローホールは一部を除き観察されなかった。

図3にAZ31およびAZX311の裏波溶接可能な条件範囲を示す。

AZ31の場合、溶接速度1m/min、出力1.1kW以下で部分溶け込みとなった以外はすべて裏波ビードを形成できた。しかしAZX311では、2m/min以下の低速度で出力が2kW以上の条件範囲で割れが発生し、溶接ができなかった。このことからAZ31の方がAZX311よりも溶接可能な条件範囲が広いことがわかった。

図4に出力1.5kWの条件で溶接速度と溶接ビード幅の関係を示す。なお、表面のビード幅をWsおよび裏面のビード幅をWbとして示した。速度の増加と共に表、裏いずれもビード幅は狭くなる傾向にあったが、裏面の方がその傾向が顕著であった。AZ31は蒸気圧の高い垂鉛の含有量が多いため、ビード幅が広がったと考えられる。

図5および6には、AZ31およびAZX311の硬さ分布を示す。硬さは突合せ溶接した3条件の溶接部での板厚中心部で測定した。AZ31は母材と溶融部の硬さに変化は見られなかったが、溶融部の硬さのばらつきは母材部に比べて小さくなった。これは母材の結晶粒が溶融部では微細で均一になったことに起因すると考えられる。一方、AZX311は母材部に比べ、溶融部はやや低下した。これは結晶粒サイズが粗大化し、軟化したためと考えられる。

図7にAZ31およびAZX311の溶接継手の引張破断強度を示す。いずれの材料も継手強度は母材の強度を下回った。また、条件を変化させても強度の差はほとんどなかった。図の下にはそれぞれの条件での継手効率と破断位置を示す。AZ31ではいずれも母材部で破断し、継手効率は87~90%程度となった。AZX311ではいずれも溶接部で破断し、継手効率は67~80%と低い値を示した。これは溶融部が軟化したことが一因であると考えられる。

4. 結言

難燃性マグネシウム合金についてファイバーレーザー溶接の適正溶接条件範囲を見出し、溶接継手の組織の特徴、硬さおよび引張強度など機械的性質を明らかにした。

[主要参考文献]

- 1) 坂本 満、上野 英俊：部材の軽量化による輸送機器の省エネ化；Synthesiology, Vol.2 No.2 (2009), pp.127-136
- 2) 上山智之、中田一博：難燃性マグネシウム合金の溶接性；軽金属溶接, Vol.50 No.4 (2012), pp.140-144
- 3) Yuji Sakai, Kazuhiro Nakata, Takuya Tsumura, Mitsuji Ueda, Tomoyuki Ueyama, Katsuya Akamatsu : Fiber Laser Welding of Noncombustible Magnesium Alloy ; Materials Science Forum, Vols.580-582(2008), pp.479-482

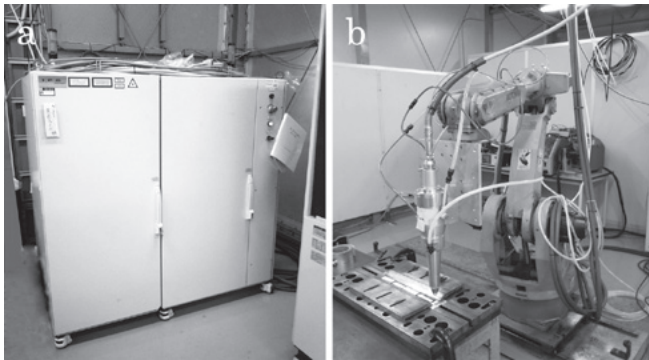


図1. ファイバーレーザ加工機外観 (a) および溶接実験状況 (b)

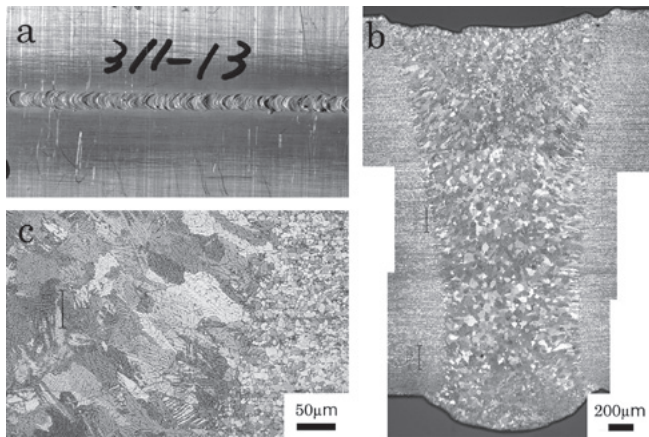


図2. 溶接ビード外観 (a) および溶接部断面ミクロ組織 (b,c)

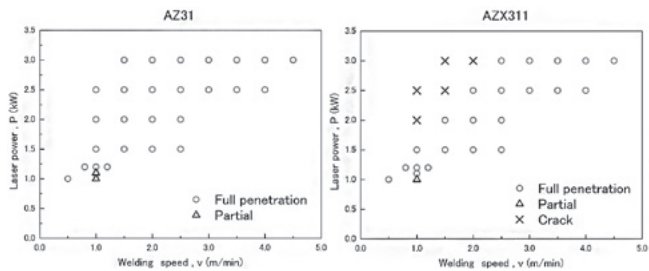


図3. 適正溶接条件範囲

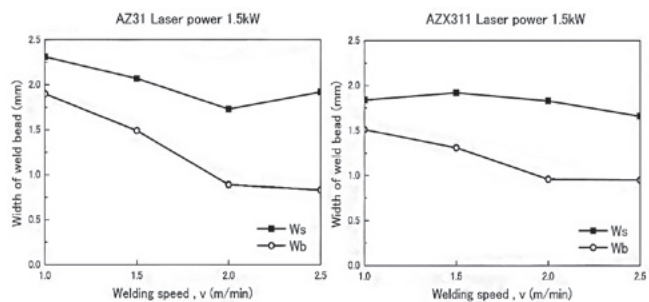


図4. 溶接速度がビード幅に及ぼす影響

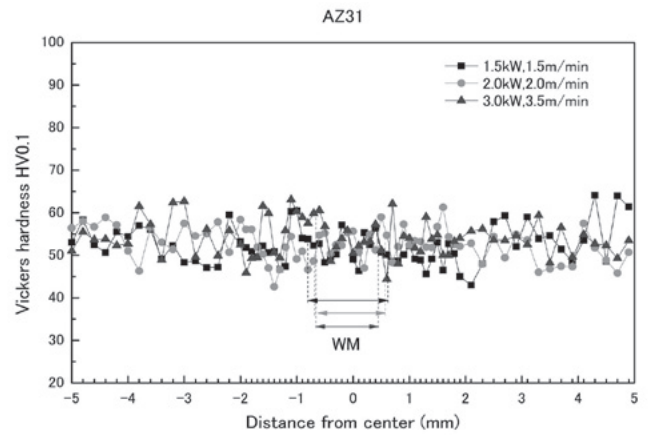


図5. AZ31 溶接部の硬さ分布

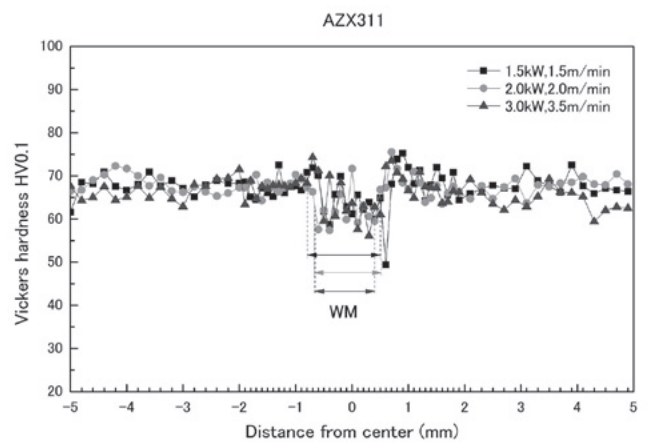
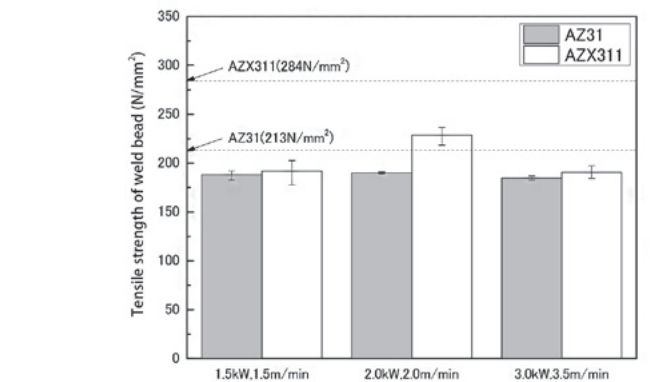


図6. AZX311 溶接部の硬さ分布



Joint efficiency (%)	88.3	67.5	89.1	80.5	86.6	67.1
Fracture site	BM	WM	BM	WM	BM	WM

図7. 溶接継手の引張強度

インド亜大陸で出土した青銅器の金属組織と製造方法

Compositional and microstructural analysis of copper wares excavated at Indian ruins

川口 菜月

Kawaguchi Natsuki

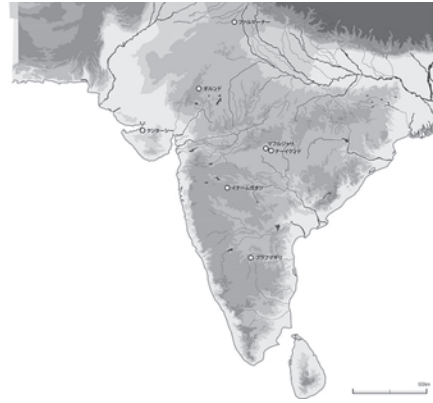
造形建築科学コース

はじめに

正倉院や法隆寺に伝世する青銅器の多くは、奈良時代に大陸（朝鮮半島）から伝来した。これらの中には、錫を15～25%程度含む高錫青銅と呼ばれるものがある。この高錫青銅は鑄造のままでは極めて脆く、鑄造加工するには550℃以上に加工して、熱間で加工しなくてはならない。また、冷却後の脆さを改善するために、加工後、焼入れ熱処理が施されるというユニークな特徴がある。このように、製作のために高度な技術を必要とする高錫青銅は韓国、中国、ミャンマー、タイ、ベトナム、インド等で見られるが、その起源は明らかにされていない。今回、起源地の最有力候補とされるインドで出土した、紀元前に作られたと見られる青銅器遺物を多数調査する機会を得た。成分分析と金属組織評価を行うことにより、それらの製造方法を類推し、青銅器の起源と伝播の状況を明らかにすることを研究の目的とする。

資料

今回調査を行った151点の資料は、ファルマーナ遺跡、ギルドン遺跡（GLD）、クンターシー遺跡（KTS）、マフルジャリ遺跡（MHR）、ナーイクンド遺跡（NKD）、イナムガオン遺跡（INM）、ブラフマギリ遺跡（BRG）、ラーイプル遺跡（Raipur）から出土した151点の資料である。地図1にこれらの遺跡の位置を示す。時代は明らかでないものもあるが、例えばファルマーナ遺跡は紀元前2500～2400年頃、マフルジャリ遺跡は紀元前800年頃に作られたと考えられてい



遺跡地図／小茄子川歩氏作成

る。

インド各地の遺跡から出土した資料を種類ごとに分類すると、馬具11点、蓋2点、腕輪36点、指輪14点、壺1点、鏡23点、錐5点、棒9点、釣り針7点、火箸4点、鑿2点、斧3点、鈴1点、小刀6点、鉢4点、矢尻3点、飾り金属1点、針1点、フック1点、釘1点、不明5点、その他11点となる。今回分析した資料の外観を写真1～6に示す。

実験方法

資料からマイクロカッターで試験片を小さく切りだし、樹脂に埋め



【写真1】 資料写真 (a) マフルジャリ蓋 (径11.55cm高さ5.45cm)



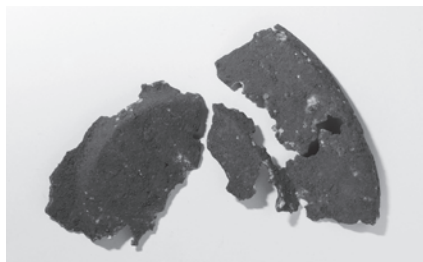
【写真2】 資料写真 (b) マフルジャリ腕輪 (長さ6.1cm幅6.55cm)



【写真3】 資料写真 (c) イナムガオン腕輪 (長さ4.85cm幅4.55cm)



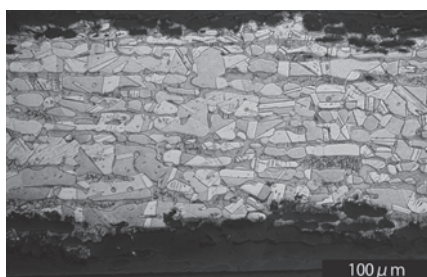
【写真4】 資料写真 (d) ナーイクンド鈴 (長さ2.3cm幅4.5cm)



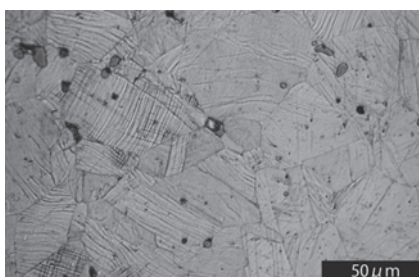
【写真5】 資料写真 (e) ブラフマギリ蓋 (長さ15.9cm幅1.4cm)



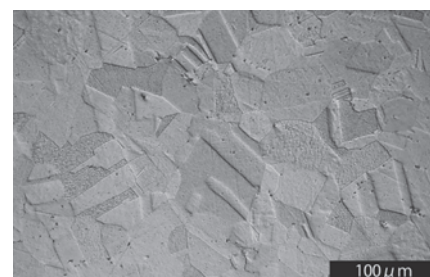
【写真6】 資料写真 (f) ブラフマギリ腕輪 (長さ5.45cm幅5.68cm)



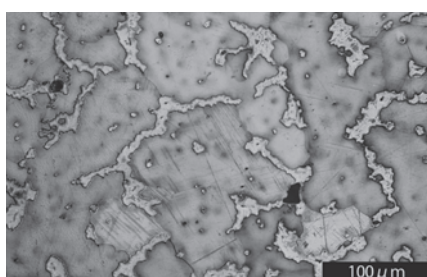
【写真7】組織写真 (a)



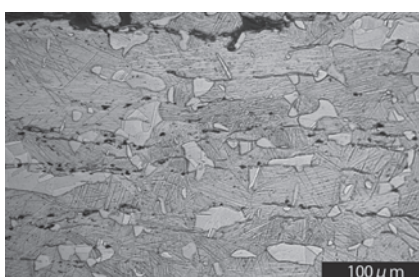
【写真8】組織写真 (b)



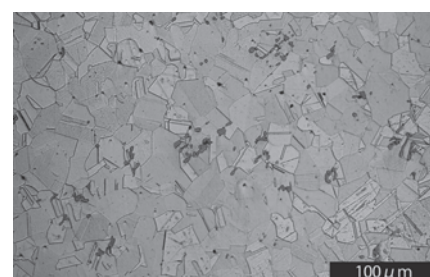
【写真9】組織写真 (c)



【写真10】組織写真 (d)



【写真11】組織写真 (e)



【写真12】組織写真 (f)

込んだ後、研磨した。その後、ダイヤモンドペーストを用いて鏡面になるまで琢磨した。表面は、エタノール、塩酸、塩化鉄(III)、蒸留水の混合液により、エッチングして光学顕微鏡により顕微鏡観察を行った。

成分分析にはEPMA(日本電子製JXA-8200)を使用し、加速電圧15kV、ビーム電流 2×10^{-8} A、ビーム径50 μ mの条件でZAF法による定量分析を行った。1資料あたり5ヶ所のデータを取り、平均値を求めた。

結果

表1に典型的な分析資料の化学組成(抜粋)を示す。純銅に近いもの(INM23)、錫を7~10%含む通常の青銅(MHR51、NKD36、BRG45)が多く、中にはヒ素や硫黄を多く含むものも数多く見られた。MHR38、BRG12のような高錫青銅は今回分析した151点のうち2点あった。こうした青銅は金属組織からその製法を類推することができる。MHR38の蓋は双晶を含む α 相、 β 相からなることから、冷間鍛造の後焼き鈍しが施されていることが分かる。MHR51の腕輪は、双晶を含む α 相、粒状 Cu_2S 、すべり線があることから、冷間鍛造の後焼き鈍しが施されている。INM23の腕輪は双晶を含む大

【表1】化学組成(抜粋)

NO	名称	composition (%)					
		S	Fe	Cu	Sn	As	Pb
MHR38	lid	0	0.2	Bal.	16.8	0	0.1
MHR51	bangle	0.2	0.5	Bal.	7.8	0.4	0.4
INM23	bangle	0.0	0.0	Bal.	0.1	0.0	0.1
NKD36	bell	0.0	0.0	Bal.	9.5	0.9	0.0
BRG12	lid	0.4	1.4	Bal.	21.2	0.0	0.0
BRG45	bangle	0.4	0.3	Bal.	7.6	0.0	0.2

きな α 相が見られることから、冷間鍛造の後焼き鈍したものと判断した。NKD36の鈴は、 α 相と $\alpha + \delta$ 共析相からなり、鑄造で作られたと考えられる。BRG12の蓋は α 相、 β 相、マルテンサイト、片状 Cu_2S があることから、熱間鍛造の後、焼き入れが施されたと思われる。BRG45の腕輪は双晶を含む α 相、粒状 Cu_2S があることから、冷間鍛造の後焼き鈍しがされていることが分かった。今後より多くの資料を分析し、これらのデータと共に、器種、成分、組織を分析することにより、高錫青銅の起源と伝承が明らかになると期待する。

【主要参考文献】

- 国際研究集会『アジアの高錫青銅器—製作技術と地域性—』2010年
- 総合地球環境学研究所インダス・プロジェクト『インダス考古学の展望 インダス文明関連発掘遺跡集成』2010年

陽極酸化処理した A6063 アルミニウム合金板材の 摩擦攪拌接合

Friction stir welding of anodized A6063 aluminum alloy plates

藤井 絵梨奈

Fujii Erina

造形建築科学コース

1. 諸言

Al-Mg-Si系合金の6000系アルミニウム合金では、耐食性、意匠性、耐摩耗性などを高めるため陽極酸化処理が施されている。しかし、陽極酸化処理により形成されるアルマイト皮膜は、アーク溶接などの熔融溶接では溶接不良の原因となる。一方、近年、アルミニウム合金に対して、回転する工具を押し付けて発生する摩擦熱で塑性流動を起して固相状態で接合する摩擦攪拌接合（Friction Stir Welding：FSW）法が開発された。図1にFSW法の概略を示す¹⁾。アルミニウム合金のFSWは、鉄道車両、自動車への実施例がある²⁾。しかし、陽極酸化処理など表面処理したアルミニウム合金の接合性に関する研究はみられない。

そこで、本研究では、陽極酸化処理したA6063アルミニウム合金のFSWの接合性について検討した。

2. 使用材料および実験方法

使用材料は、Al-Mg-Si系A6063-T5アルミニウム合金の押出板材（寸法：長150×幅45×厚3 mm）であり、表面および裏面に厚さ5、10および20 μm のアルマイト皮膜を形成させた。比較のために未処理材も使用した。接合面は切削加工によりアルマイト皮膜を除去し、平滑に仕上げた。接合は、ツール位置を制御するタイプの摩擦攪拌接合装置を用いて突合わせによる摩擦攪拌接合を行った。接合条件は、ツール前進角を3°、試験片へのツール押込み量を2.7 mm、接合長さを130 mmとし、ツール回転速度を500～3000 rpm、接合速度を200～1000 mm/minと変化させた。接合後、接合部の断面組織観察、硬さ試験および引張試験を行った。

3. 実験結果および考察

図2にアルマイト皮膜なしおよび皮膜厚20 μm の場合の最適接合条件範囲を示す。アルマイト皮膜なしの場合、回転数500 rpm以下では接合不可能であり、接合速度が700 mm/min以上の条件で突合せ面の未接合部分であるキッシングボンド（KB）が観察された。一方、皮膜厚20 μm では、断面での攪拌領域が拡がり、接合速度1000 mm/minまでキッシングボンドは観察されず、良好な接合継手が得られた。

図3に皮膜なしおよび皮膜厚20 μm の接合部の表面外観および断面マクロ組織を示す。いずれも表面欠陥はなく、皮膜なしの場合は大きなバリが発生した。また、皮膜の存在により、深さ方向への攪拌域が拡がる傾向が認められた。さらに、接合部表面直下0.2 mmで水平

上に破碎したアルマイトが分布している様子がSEMで観察されたが、攪拌部内部への分散は認められなかった。

図4に板厚中央の攪拌部（Stir Zone）から熱加工影響部（TMAZ）および熱影響部（HAZ）の境界部の逆極点図方位マップ（IPFマップ）を示す。HAZでは約100 μm の結晶粒組織が観察され、TMAZでは、塑性変形の痕跡を残した細く伸びたような結晶粒組織が観察された。攪拌部では、約10 μm の微細な結晶粒が観察された。アルマイト皮膜の有無に関わらず、ほぼ同じ傾向を示した。

図5に皮膜なしおよび皮膜厚20 μm の接合部のビッカース硬さ分布を示す。いずれも攪拌部および熱影響部での硬さはHV55～68程度まで低下する傾向を示した。

図6に引張試験結果を示す。素材と比較すると、アルマイト皮膜の有無に関係なく引張強さは低下し、皮膜厚さおよび接合速度に関係なくほぼ一定の値を示した。素材の引張強さに対する接合継手の引張強さの比である継手効率率は77%であった。また、接合継手の破断位置はいずれも接合部でなく熱影響部であった。

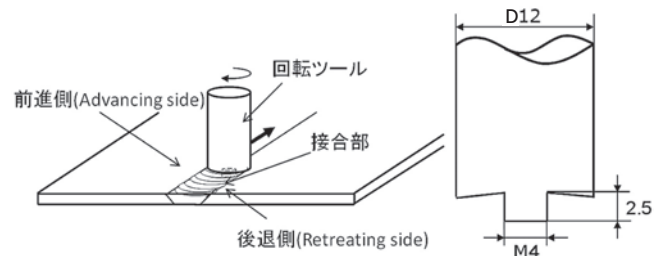


図1 FSWの概略および接合ツール形状

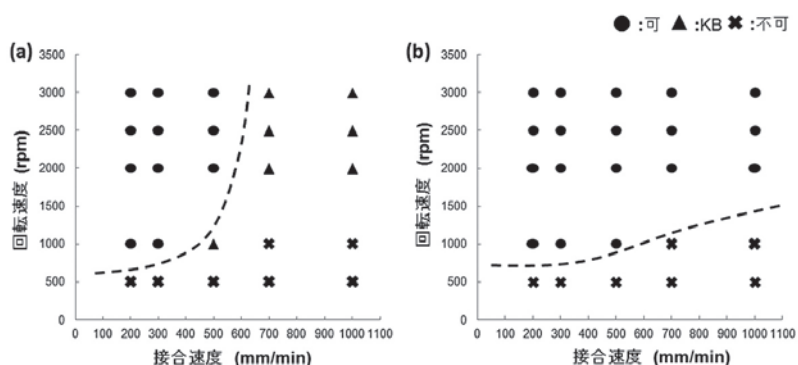


図2 最適接合条件範囲 (a) 皮膜なし (b) アルマイト皮膜厚20 μm

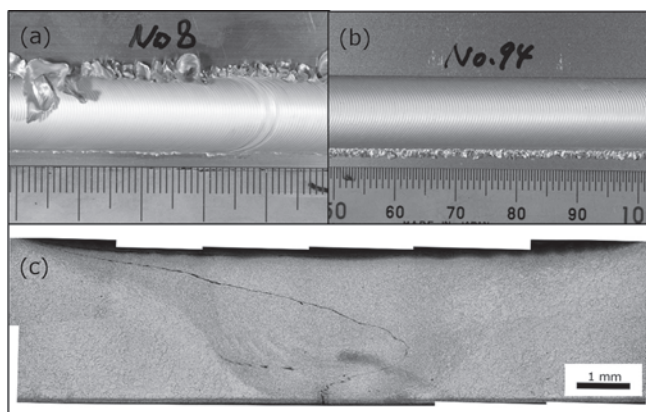


図3 接合部表面外観および断面マクロ組織 (2000 rpm、1000mm/min)
(a) 皮膜なし (b) アルマイト皮膜厚20 μm (c) 接合部断面マクロ組織

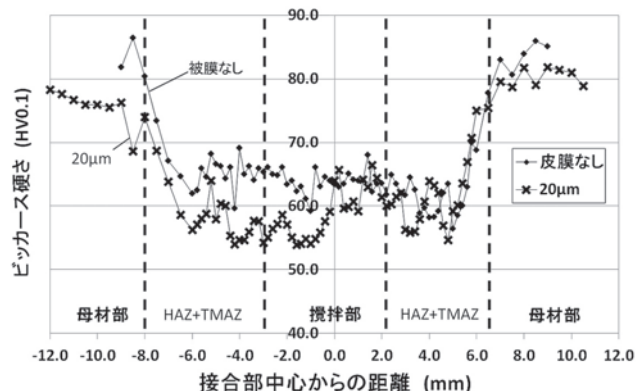


図5 接合部断面の硬さ分布 (2000 rpm、1000 mm/min)

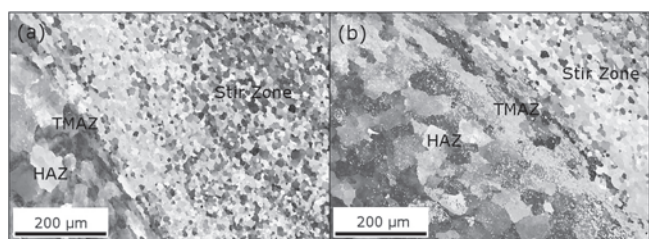


図4 HAZ-TMAZ-SZ境界部断面のIPFマップ (2000 rpm、1000 mm/min)
(a) 皮膜なし (b) アルマイト皮膜厚20 μm

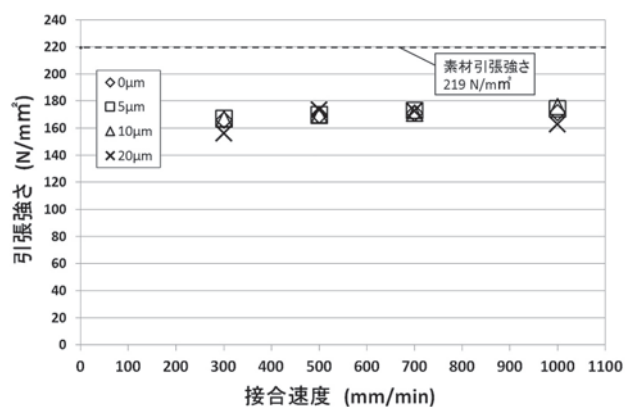


図6 引張試験結果 (2000 rpm)

【主要参考文献】

- 1) 社団法人 溶接学会 編：『摩擦攪拌接合 —FSWのすべて—』；産報出版、12-31 (2006)
- 2) 例えば、酒井康士：鉄道車両へのアルミニウム合金適用の現状と今後の展開；軽金属、第56巻 第11号 (2006)、584-587

陽極酸化処理したアルミ板材の 摩擦攪拌スポット接合

Friction Stir Spot Welding of Anodized Aluminum Alloy Plates

寶田 良春

Takarada Yoshiharu

造形建築科学コース

緒言

アルミニウム合金は、家庭日用品から工業用部品、航空機、自動車、新幹線、船舶材料、建築用装飾品まで幅広く利用されている。このようなアルミニウム製品の表面には耐食性、意匠性、耐摩耗性など優れた性能を付与するため陽極酸化処理がなされている。しかし、陽極酸化処理で形成されたアルマイト皮膜は、接合においては障害となるため除去工程が必要となる。近年、英国溶接研究所、TWI(The Welding Institute)によって、母材を溶融せず固相状態で強固な接合が可能な摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding, FSW)法が開発された。この技術をもとに日本では、川崎重工業㈱が抵抗スポット溶接に替わる方法として摩擦攪拌スポット接合(Friction Stir Spot Welding, FSSW)法を開発した。ロボットとの組み合わせにより、三次元形状への接合が可能となった。

本研究では、アルミニウム合金のより簡便で強固な接合法を確立することを目的として、陽極酸化処理したアルミニウム合金板材でFSSWによる接合実験を行った。接合の組織観察、硬さ分布測定、引張せん断試験により、陽極酸化皮膜の散在による接合性能への影響について検討した。

供試材料

供試材料は、建築用サッシにも用いられるAl-Mg-Si系アルミニウム合金A6063-T5板材を用いた。寸法は板厚3mm、幅45mm、長さ150mmである。陽極酸化処理していないものと、5 μ m、10 μ m、20 μ m、硬質アルマイト(17 μ m)の陽極酸化皮膜が付いた4種類の表面処理材を用いた。

実験方法

○接合実験

接合試験には、ロボット摩擦攪拌スポット接合装置(川崎重工業㈱製)を用いた(図1)。図2に示すように、接合のツールを被接合材に圧入し、接合、引抜を行う。接合のツールの材質は熱間金型用合金工具鋼SKD61である。まず、皮膜のないものと皮膜厚さ20 μ mの板材で接合可能範囲を確かめた。接合時間を6sと8s、回転数を500~2500rpm、加圧力を2940~5880Nの条件で接合可能範囲を求めた。なお、本実験では加圧力および回転数を一定としたときに広範囲の接合が可能な条件で実験を行ったため接合時間は8sと一定とした。

○組織観察

各々の条件で作製した試料を接合中央部で、部材の幅方向に切断し、機械研磨、パフ研磨を行った後、光学顕微鏡、走査型電子顕微鏡(SEM)

を用いてそれぞれの組織を観察した。その際、試料は2%水酸化ナトリウム水溶液によりエッチング処理をした。エッチング時間は360sとした。ただし、電子プローブマイクロアナライザ(Electron Probe Micro Analyzer, EPMA)分析は、エッチングを行う前の状態で分析を行った。

○硬さ分布測定

組織観察した試料それぞれについてツール最深部から高さ1.2mm、接合の中心から左右約5mmの範囲においてピッカース硬度計により硬さ分布の測定を行った。なお負荷荷重は0.98N、荷重保持時間は10sとした。

○引張せん断試験

1250rpm、4900N、8sの条件で接合した継手試料について引張せん断試験を行った。試験には油圧万能材料試験機を用い、それぞれの表面処理材についてn=5以上となるよう引張せん断試験を行った。

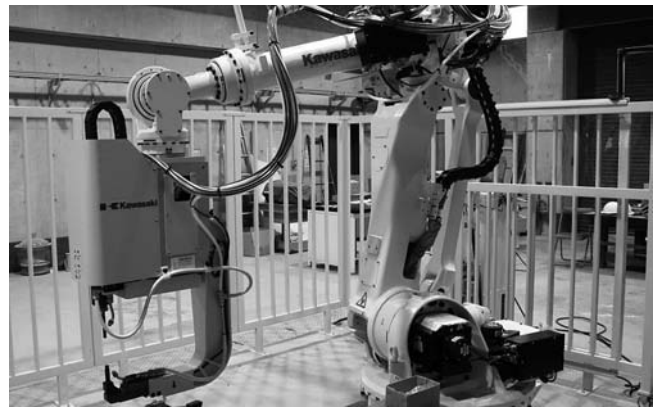


図1. ロボット摩擦攪拌スポット接合装置 (川崎重工業㈱製)

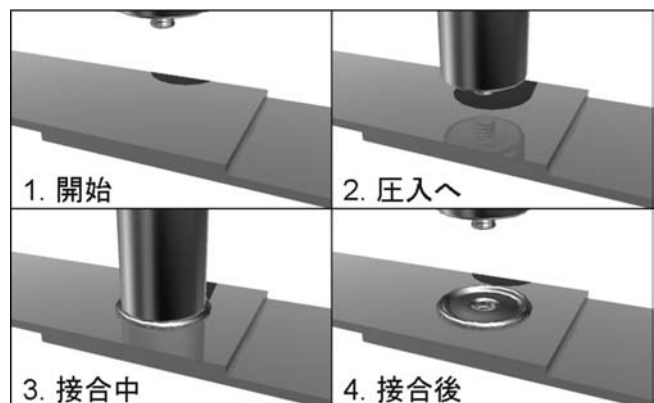


図2. FSSW接合のプロセス

実験結果および考察

図3に接合条件1250rpm、4900N、8sで接合した継手断面のマクロ組織を示す。陽極酸化皮膜がある場合の方が、ない場合に比べてツールの圧入深さは増加し、攪拌の領域が広がる傾向を示した。内部には破壊された皮膜が帯状に偏在している様子が観察された。これは、陽極酸化皮膜があることによってツールとの間に発生する摩擦熱が大きくなり、接合部の温度がより高くなったためと考えられる。

図4に図3と同じ接合条件で接合した試料のビッカース硬さ分布を示す。攪拌部付近では、皮膜の有無に関係なく母材部に比べて、硬さは低下した。しかし皮膜がある場合は、ない場合に比べて攪拌領域全域で硬さは高かった。また、皮膜がある場合は、接合の中心から約7mmで母材の硬さ程度に戻っており、皮膜がない場合よりも軟化した領域は狭いことがわかる。EPMA分析の結果(図5)、硬さ測定をした領域には、陽極酸化皮膜に起因する酸素の分布は見られなかった。攪拌領域で軟化が抑えられたことに皮膜は関係していないと考えられる。

図6に接合条件1250rpm、4900N、8sで作製した接合継手の引張せん断荷重を示す。皮膜厚さ5μmの継手が最も高い数値を示した。皮膜

なしが最も低い数値となった。皮膜のない場合の引張せん断荷重の平均値は最も高い数値を示した皮膜厚さ5μmと比べ、約3割程度であった。これは、皮膜なしでは接合の圧入深さが浅いため接合面積が小さくなり、引張せん断荷重が低くなったものと考えられる。

【主要参考文献】

- 山口裕 アルミニウムの陽極酸化処理と装飾的表面処理 軽金属 第59巻 第4号 (2009), 204-215
- 岡村久宣、青田欣也、坂本征彦、江角昌邦、池内健二 アルミニウム合金摩擦攪拌接合部の酸化物の挙動及びその機械的特性に及ぼす影響 溶接学会論文集 第19巻 第3号 (2001), 446-456
- Yasunari Tozaki, Yoshihiko Uematsu, Keiro Tokaji, Effect of tool geometry on microstructure and static strength in friction stir spot welded aluminium alloys, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 2230-2236
- 藤本光生 アルミニウム合金摩擦攪拌点接合の開発に関する研究 (2008)

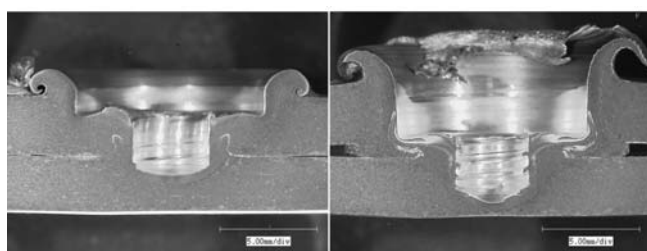


図3. FSSW継手断面図 (左: 皮膜なし 右: 陽極酸化皮膜厚さ20μm)

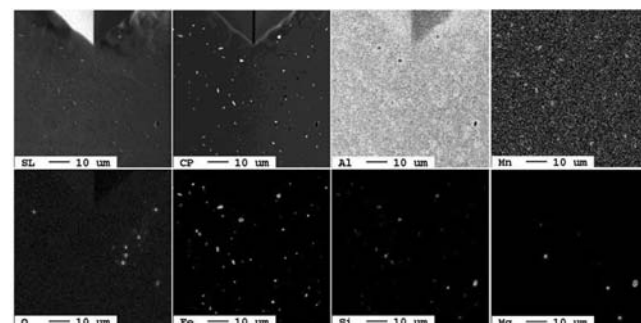


図5. EPMAによる断面のX線像 (皮膜厚さ20μm)

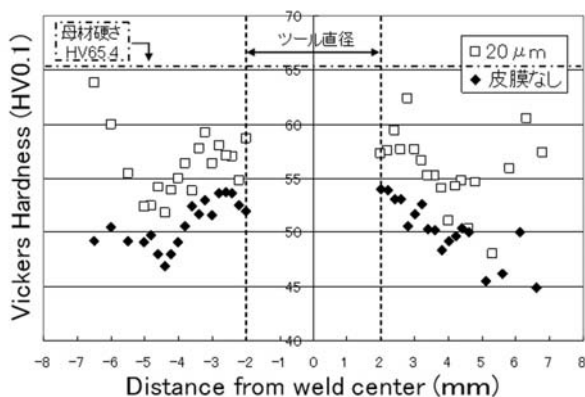


図4. A6063 FSSW継手断面のビッカース硬さ分布

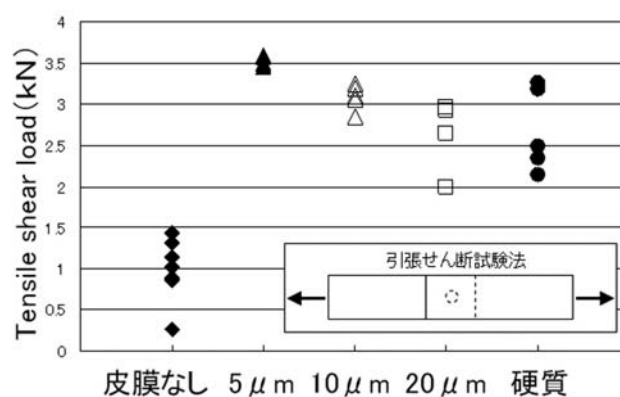


図6. A6063 FSSW継手の引張せん断荷重