

# NACHI TECHNICAL REPORT

Materials

Vol. **35** A1  
May/2019

マテリアル事業

■ 寄稿・論文・報文・解説

摩擦攪拌接合の接合機構

「塑性流動ならびに高温変形の観点から」

Mechanism of Friction Stir Welding (FSW)  
"From the Viewpoint of Metal Flow and  
High Temperature Deformation"

〈キーワード〉 摩擦攪拌接合・アルミニウム合金・継手組織  
異常粒成長・塑性流動・流動可視化・作動流体  
高温変化・変形機構

富山大学 都市デザイン学部

教授 柴柳 敏哉 Toshiya Shibayanagi

## 要 旨

摩擦攪拌接合についてその原理、組織学的特徴、接合機構を知るための実験事例、当該接合法の高機能化のための研究課題ならびに今後の展望について述べる。摩擦攪拌接合は回転するツールと被接合材との間で生じる摩擦熱により軟化した材料のツール周囲での塑性流動を基調とする接合法である。塑性流動は金属高温変形に他ならず、その観点から欠陥発生を防ぎ、継手組織の最適化を策定する必要があるが、それには流動の可視化技術、材料の内部状態の動的な取得技術の開発が急務である。

## Abstract

Stated below are the experimentation examples of friction stir welding that were conducted to understand its principles, structural characteristics and joining mechanism. In addition, research challenges to achieve high functionality of said welding method and the future prospect are discussed. Friction stir welding is a joining method that uses plastic flow of the material softened by frictional heat generated between the rotating tool and the material for welding.

Plastic flow is nothing but distortion of metal at a high temperature. It is necessary to prevent occurrence of any defects and optimize the weld structure in consideration of this viewpoint. To achieve this, it is urgent to develop a technology for making fluidity visible and obtaining the dynamic, internal condition of the material.

## 1.はじめに

摩擦攪拌接合(Friction Stir Welding:FSW)は1991年の英国TWIの特許技術であり、アルミニウム合金の固相接合技術として開発された。この独創的な接合法は、例えば日本では新幹線車輛の製造に不可欠な接合技術として、その有用性が広く認知されている。最近では「マルチマテリアル」という概念のもとで異種材料接合技術の中心的な地位にあり、その技術的先鋭化は今でも厳しい競争の中にある。

FSWは塑性流動と呼ばれる金属の高温変形を基調とする界面形成機構によりその接合機構が学術的に理解され、接合プロセス最適化へと技術展開がなされる。大事なことは、接合される側である金属材料の動的な状態変化を制御系にいかによりフィードバックするかという点であり、この観点からFSW技術を眺めてみると接合中の荷重ならびに温度の情報を活かす技術を開拓していく必要がある。

本稿では、筆者の研究例を中心に、FSW塑性流動の材料学的な様相を説明し、さらに可視化技術とその流動解析から得られたツール形状の設計指針とその検証結果について説明する。



## 2. 摩擦攪拌接合の原理

図1にFSWツールの一例を示す。これは筆者が実際に用いてきたものであるが、ツールは突起部(プローブと呼ぶ)とショルダーで構成されている。プローブは例えばM4などのねじ加工が施されていることが多く、また円柱状、テーパ形状、さらに複雑な形状など特許化された形状がこれまでに提案されている。ショルダーはプローブ軸に対して垂直な平面であるものからプローブ根元に向かってすり鉢状になっているタイプも存在する。

ツールの材質は、SKD61やSKH51などの熱間工具鋼が一般的に用いられているが、耐熱性ならびに耐摩耗性を高めるための表面コーティングを施す場合や、鉄鋼材料などの高融点材料に対してはイリジウム製ならびにBNなどのセラミックス製ツールなどが考案されている。接合長さあたりのツールの消耗量が経済性を左右するのでツール材質の開発はこれからもその重要度は揺るがない。

図2はFSW装置の一例である。これは富山県産業技術研究センターに設置されているもので、2次元の接合が可能である。接合装置は剛性が命であるので、この装置のように門型にして剛性を高い

レベルで確保する手法が一般的に採用されている。なお、大阪大学接合科学研究所には「四つ足」型が設置されており鉄鋼材料の接合に用いられている。この他に円筒に対する円周接合を可能にする3次元FSW装置も同研究所は保有している。

FSWのプロセス制御は荷重制御型と位置制御型に大別される。また、レーザーなどの補助熱源を用いることも考案されている。



図1 摩擦攪拌接合ツール

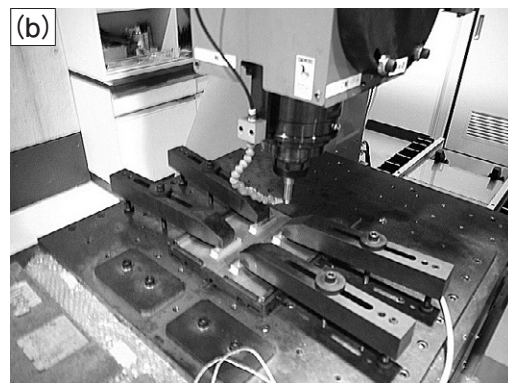
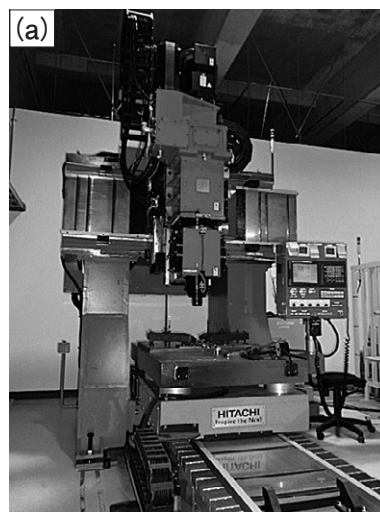


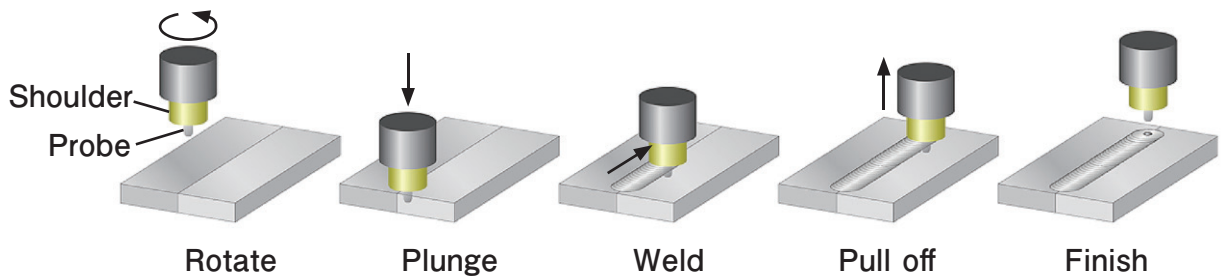
図2 2次元摩擦攪拌接合装置  
(富山県産業技術研究開発センター)

図3(a)はFSWの各過程を図的に示したものである。これは付合せ接合の場合である。開先位置に回転するツールが圧入されるところから接合が開始する。被接合材とツールの間で発生する摩擦熱により材料の温度が上昇し軟化した材料がツール周囲で流動をはじめ。所定の時間静止させた後、ツールを所定の速度で移動させるとツール後方に接合された領域が残されていく。この接合領域の外観はアーク溶接にみられるビードと類似の周期的な鱗状を呈しており、FSWでも「ビード」と呼ぶ。ツールが所定の位置まで移動するとそこで移動を停止してツールは上方へ引き抜かれていき、その結果として停止位置には凹みが残される。これにてFSW継手が得られた。FSWは左右非対称な接合である。図3(b)に示したように、ツール移動方向とツール回転の方向(接線

方向)が同じである側を前進側(advancing side)と呼び、互いに逆の場合を後退側(retreating side)と呼ぶ。また、上下方向にも非対称で、これはショルダーの回転にともなうねじりと圧縮の変形の影響を反映したものである。

FSWはツール近傍で材料が強制的に攪拌されて左右に配された母材の一部が機械的に接触混合されて新生面の接触が促進されて最終的に接合界面形成に至ると理解されている。この強制攪拌に伴う材料の「流れ」は塑性流動と呼ばれている。固相接合と理解されるFSWにおいて流動という用語は奇異に感じられるかもしれないが、これは「高温変形」と読替えることで違和感はなくなる。この塑性流動こそがFSWの原理を理解する要となる。

(a) 接合過程模式図



(b) 左右非対称性説明図

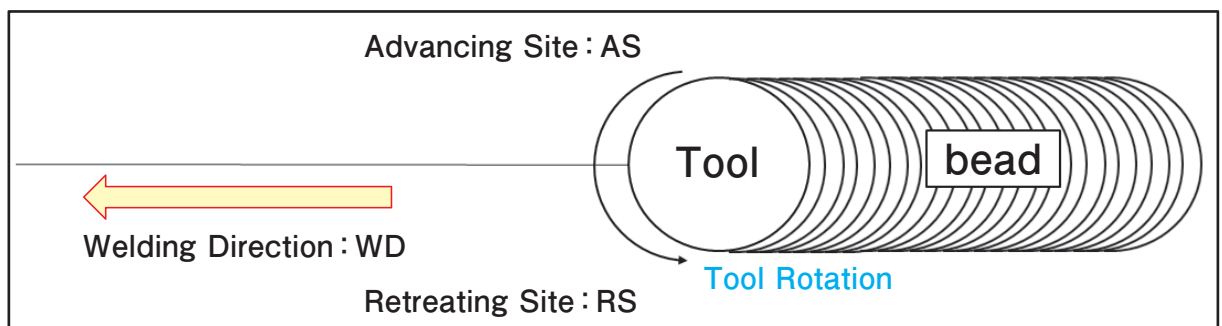


図3 摩擦攪拌接合プロセス

### 3. FSWの塑性流動：可視化実験の有効性

図4は、トロント大学のグループが提案したスポットFSWの場合のツール周囲の塑性流動モデルである。プローブ根元付近に母材が「吸い込まれる」場所があり、ここからプローブの回転がもたらす旋回下降流に材料が巻き込まれていく。左右の材料がこの流れに沿ってプローブ先端部に到達するとそこから周囲の母材を押し広げるようにして材料が送り出されていく。この繰り返しにより攪拌領域が徐々に広がっていく。図5にはプローブ先端部で攪拌領域が形成されはじめた初期状態の組織を示した。攪拌領域がプローブ先端部から形成されはじめることを実験的に証明したデータである。

ツールが移動する場合は塑性流動が複雑になり、進行方向に対して左右で流動の様子が異なる。材料はadvancing sideからツール周囲の旋回下降流動に巻き込まれていくが、retreating side側の材料はプローブ周囲の流動を迂回するようにしてツール後方へと流れていく(ツール移動があるので相対的には流れていくと見える)。

さて、この「見てきたような話」は本当だろうか？古い時代の塑性流動研究は接合前に母材に埋め込んでおいたマーカーの接合後の位置から流動を「合理的に想像」した例があり、その他の後続の研究も「状況証拠的」な事実からの高度な推察により導き出された

ものがほとんどである。

動的に流動を見ることは実際には容易ではない。何故なれば、金属は可視光に対して不透明であるので通常の方法では内部状態を非破壊で観察できないからである。これに対して二通りの解決策がこれまでに提案実行されてきた。

一つ目は、強力なX線を用いて透視する方法である。筆者の知る限りにおいて世界で最も精度良く観察できる装置が大阪大学接合科学研究所に設置されており、この装置では二台のX線検出器(撮像装置)により三次元的な位置情報の取得が可能になっている。彼らはWやMoの微小球の動きを計測しツール周囲の流動を定量的に解析することに成功している。

二つ目は、金属に類似した変形挙動(流動挙動)を示す透明な物質を用いて「物理的相似性」を仮定した上で、その物質の流動挙動から金属内で進行する現象を模擬しようとするものである。樹脂(PVC)を用いた研究例が我が国では最初の事例である。筆者のグループは透明作動流体としてニュートン流体(麦芽糖水溶液など)と非ニュートン流体に属する擬塑性流体のそれぞれについてこれまで流動観察を行なってきた。

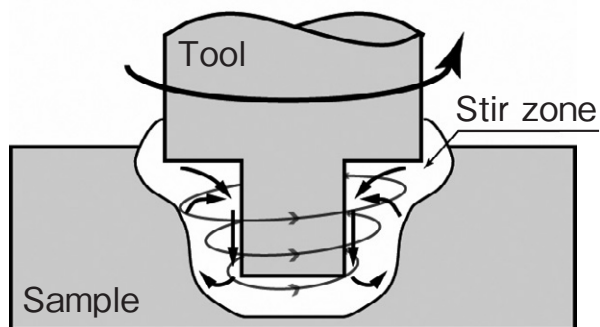


図4 摩擦攪拌スポット接合における塑性流動モデル

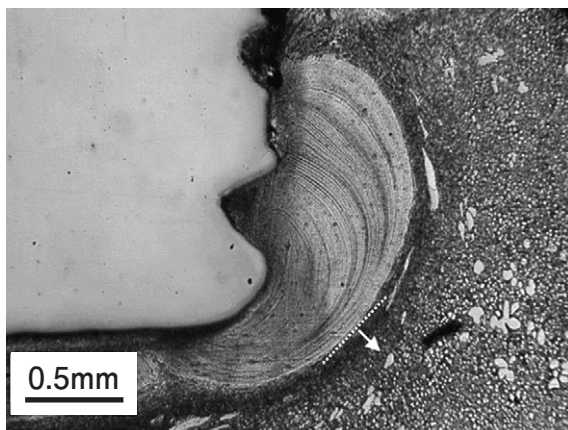


図5 摩擦攪拌スポット接合時のプローブ先端部に形成されだした攪拌領域

図6は観察実験装置の概略である。トレーサー粒子を懸濁した液体を入れた容器の両側からスリット光を当てて、その光路上に浮かび上がる映像をビデオカメラにて撮影するものである。なお、撮影された映像から異なる時刻でのスナップショットを2枚選び、粒子画像速度計測法(Particles Image Velocimetry: PIV)にて定量的に目的の領域の流速を求めることができる。

図7は観察例であるが、ここではニュートン流体を用いている。この流体では金属が降伏点を持つことを模擬できないが、粘性の温度依存性が大きい流体を用いてツールと流体に温度差を与える(ツールを加熱)ことで擬似的に流体内に粘性勾配を持たせることができる。なお、擬塑性流体を用いた流動観察にも成功しており、粘性の異なる2つの流体を用いて「異種材FSW流動」を想定した流動観察の結果も得ているが、本質的に同じなので本稿ではニュートン流体による観察結果のみを紹介する。

図7(a)は攪拌後期のスナップショットであるが、プローブ周囲に集まってきている粒子群の存在が見て

取れる。これは摩擦攪拌スポット接合で一般的に観察される組織によく似ている。動画を解析すると、流動の様子は図4の流動モデルで説明できることがわかり、このような単純な観察技法によりFSWの塑性流動を動的に観測できる可能性がここに示されたのである。図7(b)はPIV解析結果の一例である。図中の矢印は速度ベクトルを表しており、ツール周囲で複雑な流動が生じることが示唆される。

ところで、この観察に用いたツールは実際のツールよりも大きいもので金属にねじ切りしたものであるが、CADと3次元プリンタの援用により作製したツールでも同様の実験ができる。流動観察結果をCAD設計にフィードバックして3次元プリンタで試作しそれを流動観察結果に供するという循環を繰り返すことで最適形状が導き出されるであろう。すなわち、通常の機械加工では困難な形状のFSWツールを造り出せる時代がそこまできており、FSW技術の新たな展開が期待できる。

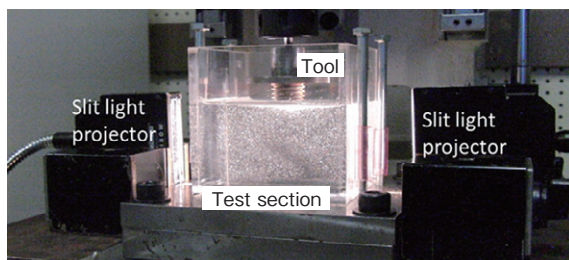
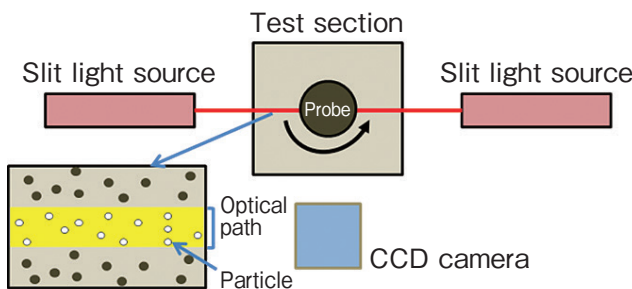
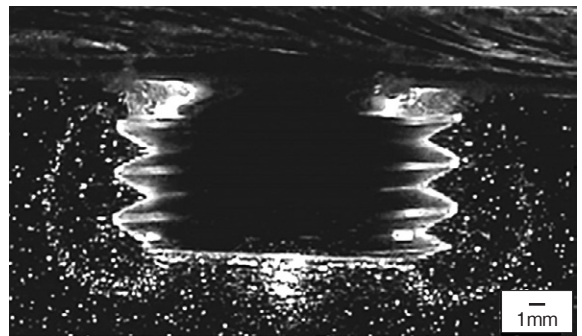


図6 透明作動流体を用いた塑性流動観察システム

(a) 撮影動画のスナップショット



(b) PIV解析結果

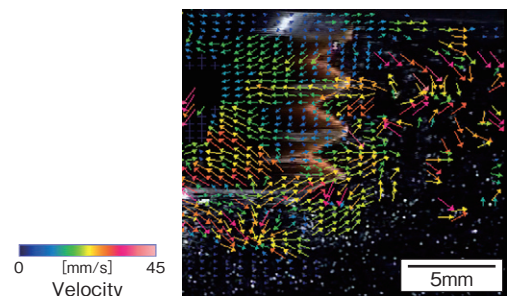


図7 塑性流動の観察例

## 4. 摩擦攪拌接合継手組織：その組織は安定なのか

継手組織は接合プロセスを反映して形成され、その組織が継手の諸性質に支配的な影響をおよぼす。したがって、塑性流動の制御は継手組織を通じて継手強度に影響するのである。接合プロセスの最適化とは塑性流動の最適化に帰着する。本節ではFSW特有の組織を概説し、さらにその熱的安定性について述べる。

図8はFSW継手の断面組織の一例である。材料は7075アルミニウム合金である。図を見てわかるように、継手中央部の大半を占める領域に玉葱を輪切りにしたような層状の組織が現われている。これがFSW特有の継手組織で、通称「オニオンリング(onion rings)」と呼ばれている。

図9はオニオンリングを含めてFSW継手組織を分類図示したものである。材料は6061-T6アルミニウム合金である。摩擦攪拌により形成された領域(A)をStir Zone(SZ)と呼び、これがオニオンリングに対応する。SZは等軸微細多結晶組織となっており、その平均結晶粒サイズは小さいものでは1ミクロン程度にまでなることが知られている。図10にツール回転速度とSZ結晶粒サイズの関係を示した。

母材よりも小さな結晶粒が出現する理由としては動的再結晶が一般的に受入れられている。動的再結晶は材料ごとに発現条件が異なるが、ほぼ全てのFSW条件において材料の温度は通常の再結晶温度領域に達しており、ひずみ速度も(これの実測値は現在までに信頼できる値は見当たらないが)動的再結晶発現に必要な値に達していることは確かと考えてよい。高温変形との関連については次節で述べる。

図9において、SZの外側に隣接して熱機械的影響部(Thermal mechanically affected zone: TMAZ)がCで示される領域に存在している。ここでは母材結晶粒が変形した組織が観察されるが動的再結晶に至らなかった高温変形組織である。そのさらに外側(D)に熱影響部(Heat Affected Zone: HAZ)が接しており、ここでは熱のみの影響を受けた組織と

なっている。HAZの外側には熱影響を受けなかった領域すなわち母材(E)がある。上下方向で見ると、ショルダー直下の領域(B)はその他の領域とは異なる組織となっているが、この領域は本節後半で述べる「異常粒成長」の発現箇所となっている。

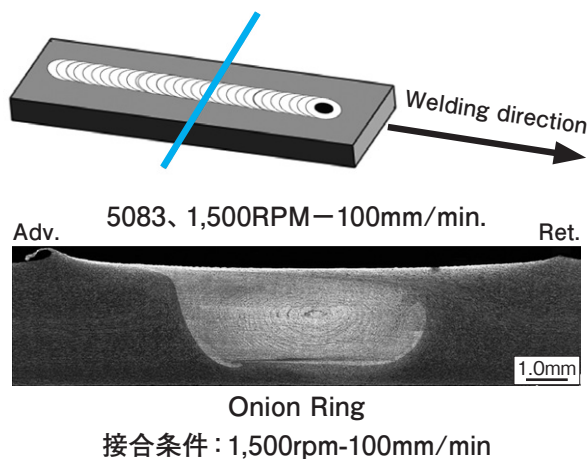
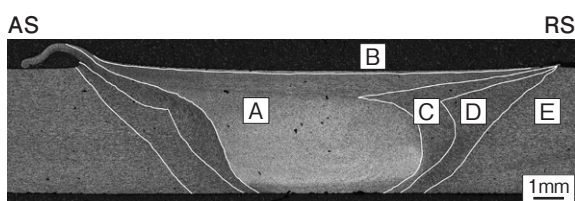


図8 摩擦攪拌接合材の継手断面マクロ組織 (5083アルミニウム合金)



- A・・・攪拌部 (Stir Zone : SZ)
- B・・・表面層 (Surface Layer : SL)
- C・・・機械的熱影響部 (Thermal Mechanically Affected Zone : TMAZ)
- D・・・熱影響部 (Heat Affected Zone : HAZ)
- E・・・母材 (Base Metal)

図9 摩擦攪拌接合継手における各組織領域 (6061アルミニウム合金)

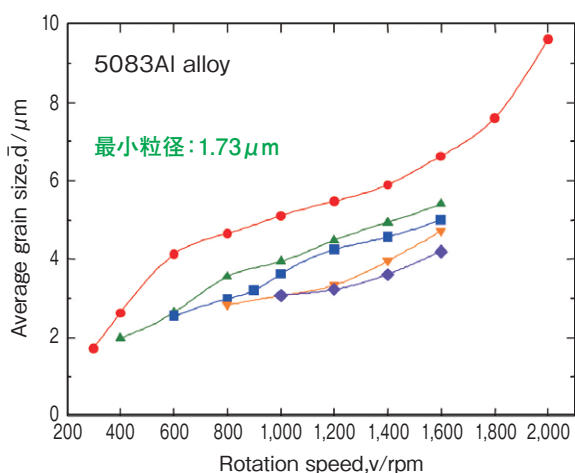


図10 摩擦攪拌接合継手攪拌領域における平均結晶粒径とツール移動速度の関係 (5083アルミニウム合金)

熱処理型合金のFSWの場合、熱影響は深刻な状況を継手組織にもたらす。つまり、母材の析出組織が失われて「析出物が再固溶した」組織になる。全ての場合でこうなるのではないが、入熱量が大きいとSZ、TMAZ、HAZにてそれぞれの到達温度とその温度域にさらされる時間に応じて組織が変化する。結晶粒も成長する可能性はあるが、一般的なFSWではこれに十分な時間が与えられないため、結晶粒増大よりも析出物消失効果の方が大きい。

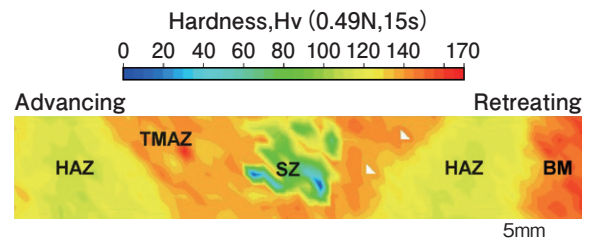
図11に7075アルミニウム合金のFSW継手断面におけるマイクロピッカース硬さ分布の測定結果の例を示す。図より、SZで軟化していることが明らかである。溶接・接合は材料屋にとっては厄介な工程である。とくに最近の材料デザインは高度に制御された加工熱処理プロセスを基本としており、合金設計もこれに呼応し、あるいは双方が協調的に連動して絶妙の組織を造り出しこれまでにない高強度合金に仕上げるので、その組織を消滅させ、場合によっては予期せぬ組織をもたらすのであるからFSWプロセスの負の側面が強調されることになる。

もう一つ厄介な現象を本節の最後に紹介する。異常粒成長(Abnormal Grain Growth)である。これは、古くは純銅の二次再結晶に報告例があり、工業的に積極活用した例としては電磁鋼板(Goss方位粒)が有名である。特定の条件を満足した結晶粒がその周囲の粒を蚕食しながら優先成長し最終的には数百倍ほどに成長する現象である。異常粒の頻度は極めて低く、それが成長を開始した直後の状態を捉えた例がほとんど報告されていないため成長条件を組織との対応において厳格に定めることができていないが、集合組織やひずみ分布などが組織崩壊の引き金を引く要因であるとされている。

図12は5083アルミニウム合金で観察された異常粒組織である。図の上部すなわちショルダーが接触していた領域に粗大な結晶粒群が存在している。これが異常成長粒である。粒成長は非可逆的な組織変化であるのでひとたび成長がはじまると塑性変形を施さないかぎり微細結晶粒状態に戻すことは

不可能である。すなわち本現象が発現するとその継手は強度劣化を起こし使い物にならなくなる。通常、このような高い温度に継手・部材が晒されることはないが、例えばFSWとアーク溶接を組み合わせるような複合接合プロセスを策定する場合は十分に注意が必要となる。

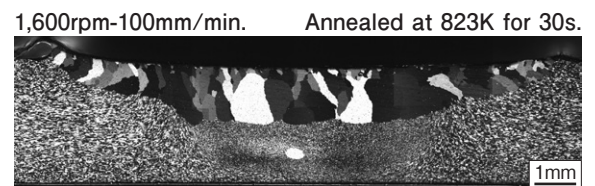
FSW継手に発現する異常粒成長はショルダーからもたらされるひずみが完全に解消されずに残留することが指摘されているが、最近の研究ではショルダー直下領域に形成される周期的な方位分布が重要な組織因子として作用する事実が見出されている。これについては今後の詳細な組織解析が望まれる。



Hardness Distribution in FSW nugget, A7075/A7075,  $r=30 \text{ s}^{-1}$ ,  $v=2.5 \text{ mm s}^{-1}$

接合条件：1,800rpm-150mm/min

図11 摩擦攪拌接合継手の断面硬さ分布 (7075アルミニウム合金)



接合条件：1,600rpm-100mm/min、後熱処理条件：823K-30s.

図12 後熱処理を施した摩擦攪拌接合継手に観察された異常成長粒 (5083アルミニウム合金)



## 5. 高温変形の観点でとらえた塑性流動

ツール周囲での塑性流動が物質供給のバランスを崩すと、そこにボイドやクラックなどの接合欠陥を形成するに至る。すなわち、ツール周囲で流動する材料が移動するツール後方に回りきることができずに空隙が生じてしまう。したがって、塑性流動の最適化こそが無欠陥継手にとって最重要項目となるが、本節では高温変形の観点から塑性流動の本質に迫り、この問題の解決の糸口を探ることにする。

金属材料(セラミックスもそうであるが)の変形を議論する場合、材料組織、変形温度、変形応力、ひずみ速度が既知であることが最低限必要である。これらをふまえて変形の支配方程式が導出され、我々はそれを用いた現象の制御を実現しようとするからである。

FSWの場合はどうであろうか。流動する金属の温度、応力、ひずみ速度の3つの情報を正確に測定しているだろうか。FSWが研究対象となり出した頃、何もわからなかった。試料表面に熱電対をとり付けて測定する、あるいはサーモグラフィーで測る程度が精一杯で、流動している金属がどれくらいの範囲にあって、それをどのように測定するかは未知の領域であった。やがてこれに答えを出そうとした動きが興り、ツール内にトンネルを開けて熱電対を挿入しツール表面に温接点が顔を出すようにして流動している温度を直接測定する手法が提案された。測定値の転送方法は無線式が考案され、動的に温度変化を知ることができるようになった。この手法はさらに洗練・改良されて商品化されるに至っている。

応力については、動力側の電力変動をモニターする方法にはじまり、6分力計による精密測定(ただしスポット接合のみ)や推力測定系を備えた装置へと測定技術が向上してきている。最近では、振動計測も可能になってきており、周波数解析によるさらに詳細な材料状態のモニタリングが実現する日が近い。

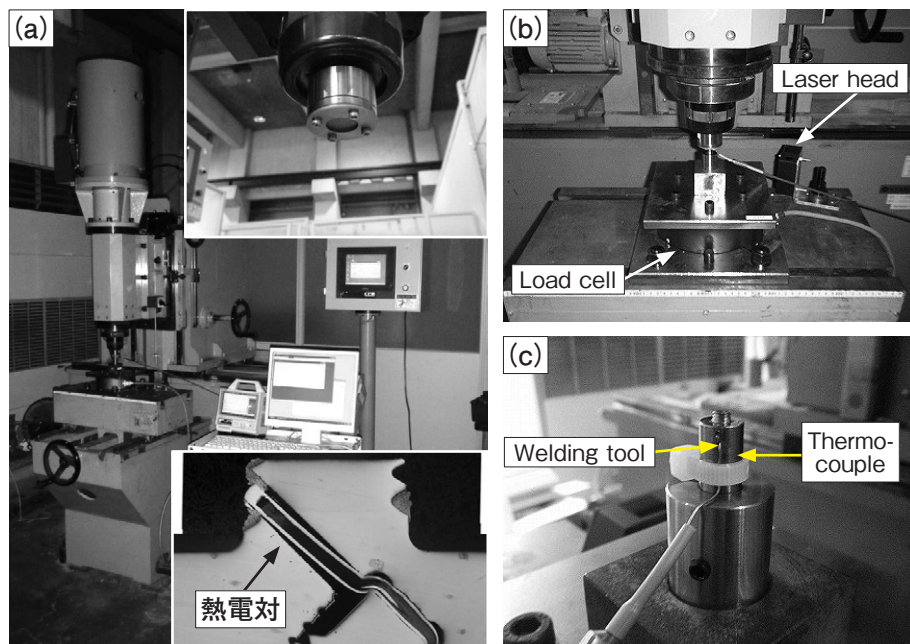
ひずみ速度は難題であった。現在でもこれは動的測定ができていない。筆者の知る限り2つのアプローチがかつて試されている。第1の方法は高温変形中に急冷する方式で、これによって凍結

された変形組織を実際のFSW組織と比較照合してひずみ速度を推定するものである。第2の方法は、動的再結晶理論をベースにしており、サブグレインサイズとZener-Hollomon parameterの関係が既知である場合においてひずみ速度を算出するやり方である。いずれの方法においても、得られたひずみ速度は10の1乗から3乗の範囲にあり、高速変形であることが窺い知れる。ただし、この高いひずみ速度での変形領域がツール周囲のどの範囲までおよんでいるのかは未解明である。SZ内が微細結晶粒組織のままでも有り続ける理由とこの高速変形モードを矛盾無く説明しなければならず、高温変形研究の対象としてはとり組むべき課題が多く残されている。

図13は筆者がトロント大学で学んだ測定技術を阪大のFSW装置に組み込んだ時の写真である。六分力計を下側にとり付け、その上に熱電対を内挿した接合ツールをセットし、試料は上部から回転しながらツールに降りてくる方式になっている。この方法でツール先端の試料温度、鉛直軸荷重、軸回りのトルクを同時に計測できる。

計測結果の一例を図14に示した。ここでは純アルミニウム板に摩擦攪拌スポット接合を施した時の変位と温度の時間変化(a)、ならびに荷重とトルクの時間変化(b)が示されている。プローブ先端が試料に接触した瞬間から温度が上昇しはじめ、ショルダーの接触に伴う急激な温度上昇へ移行していくことがわかる。ショルダーによる発熱量の多さが理解できる。荷重変化は変動が大きいがトルクが最大値を示した後に低下し一定の変動範囲にとどまることがわかる。荷重並びにトルク変動は材料からの反力(すなわち材料内では変形応力)を反映しているが、ツールと材料間での摩擦状態の変動も含まれているのでより詳細な解析が今後の課題である。

これらの情報をもとに変形機構を推定するのが材料科学の役目である。高温変形は点欠陥や転位の運動挙動を出発概念とするが、変形機構図なるものがAshbyらによって提案されており、これを用いて一定の見通しのもとで変形状態の理解が可能になっている。図15は、先ほどの図14の結果を基に算出した温度と応力の値をプロットしたものである。高温クリープ領域から動的再結晶領域にまたがる範囲にデータ点が入っている。先の高速変形との整合性は依然として疑問のままではあるが、従来からいわれている動的再結晶によるSZ組織形成とは符合する結果である。また、クリープ領域にも含まれているということは超塑性変形の可能性も示唆されているということである。これらの考察はより精密な測定データをもとに、流動可視化データもふまえた総合的な議論を必要とするが、近い将来においてFSWの変形機構が定式化され、欠陥抑制の具体的な指針に結びつけられ工業的には動的測定データをもとにした高度制御系を備えたFSW装置へと展開されていくことを期待する。



(a) 接合装置全景と試料セット状態ならびに熱電対を装填したツール断面写真  
 (b) ロードセル(六分力計)の上に接合ツールをセットし、レーザ変位計を設置した状態  
 (c) 熱電対を装填した接合ツール

図13 摩擦攪拌スポット接合の温度・荷重同時計測システム

## 6. 今後の展望

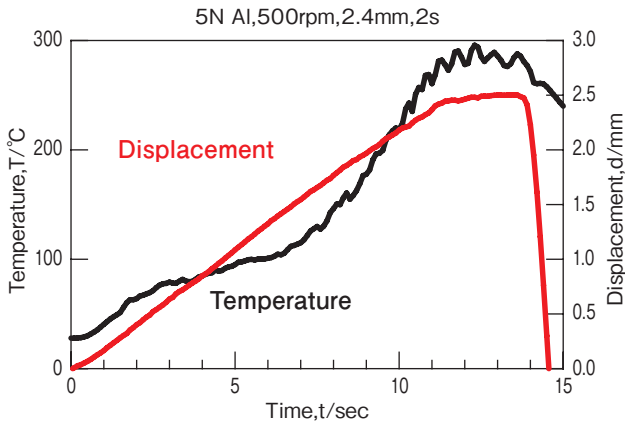
溶接は熱および物質移動を扱う総合的な学門・技術である。FSWでは回転ツールと被接合材との接触界面での摩擦発熱量とその熱伝導過程の動的な制御が必要で、そのためには接合中の材料の温度を高精度に測定する技術開発が強く望まれる。単に温度を計測するだけではなく、計測値をもとにして材料が今どのような状態にあるのかを理解する接合装置(制御システム)の開発が喫緊の課題である。

接合ツールの形状も重要技術課題である。ツール極近傍の流動については旋回下降流を基礎としてこれが理解され、具体的には円周方向と垂直(軸)方向のそれぞれの流束がねじの形状によって制御できることが知られている。近い将来、3次元プリンタ技術によって被接合材料の塑性変形特性に応じたツール形状が現場で出力され滞滞なく生産に用いられるようになるであろう。

熱と物質の移動現象を動的に最適化するスマートなFSW技術の展開は、ものづくりが情報技術と強く結びつけられる今後の社会において個々の継手に対するトレーサビリティという観点でも注視すべき事項である。すなわち、各接合装置からの接合時の種々の信号(温度や振動、荷重など)が継手の信頼性保証の根拠データとなり、さらに他の関連加工装置や合金設計や加工装置への有用な情報源となる。

高精度接合データの取得・蓄積とそれを読み抜く知能(もしかしたらAIに置き換えられるかもしれないが)の融合が今後益々重要度を増す接合技術、とりわけ異種材料の接合技術の目標になるであろう。すでに欧州ではこのポイントに気付いている研究者(古くから筆者とは顔見知り)がいることを付記して本節の結びとする。

(a) 変位と温度の時間変化



(b) 荷重とトルクの時間変化

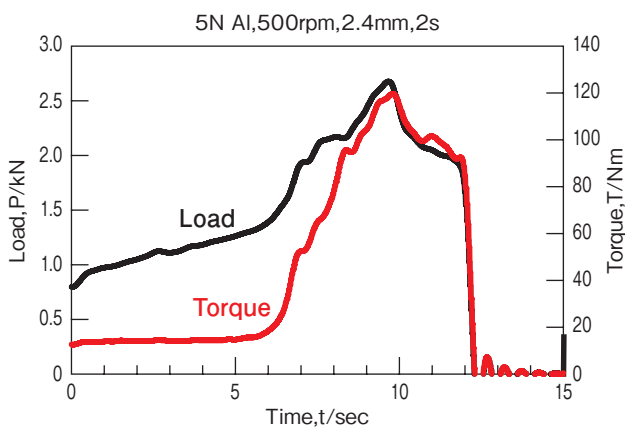
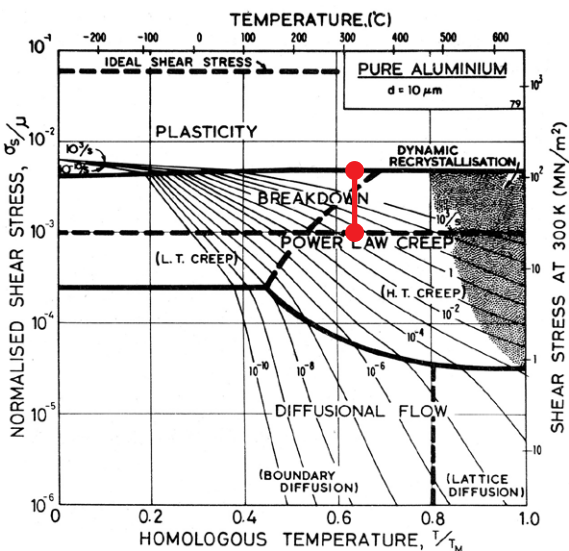


図14 温度・荷重同時計測例(純アルミニウム)



高純度アルミニウムに対する摩擦攪拌スポット接合実験時の温度計測値と応力推算値を書き込んでいる。<sup>1)</sup>

図15 変形機構領域図を用いた摩擦接合時の金属塑性流動の変形機構の推定

## 7. おわりに

FSWは1991年に基本特許取得後、TWIの戦略的なマネージメントのもとでFSW装置が世界へ浸透していき瞬く間に産業応用へと展開され四半世紀を超えて今なお技術の深化と汎化が進行中である。日本の大学界ではおそらく初号機となる装置が1990年台後半に大阪大学接合科学研究所に導入された。筆者もその当時、黎明期といえる手探りの、見よう見まねの時期を経験した一人である。昨日うまくいったのに今日はダメ、何故だ?失敗と成功と疑問点だらけの接合技術であった。ほぼ全ての研究者が最適接合条件を実験的に明らかにすることからこの世界に足を入れた。その結果、合金ごとに接合可能条件や継手組織の特異性が明らかにされていった時代が長く続いた。

2000年前後になって、材料学的にこれをとらえる動きが出はじめ、トロント大学での挑戦的な取り組みなど幾つかの研究グループが高温変形の観点から塑性流動を議論するようになった。筆者はトロントに客員研究員として一年間滞在したが、彼らの独創的な手法とアイデアの数々に何度もノックアウトされたことは懐かしい思い出である。

本稿では、その時のことを思い出しながら、FSWの塑性流動とその制御について筆者の得た知見のいくつかを紹介した。プローブ周囲での金属塑性流動の制御とそれによる健全な継手組織の創出がFSW研究者に課せられた課題であり、高信頼性継手を得るためには不可欠なアプローチであることは論を待たない。本稿が新たな研究開発の一助になれば幸いである。

## 8. 謝辞

本稿で紹介したデータは筆者が大阪大学接合科学研究所、トロント大学T.H.North教授研究室ならびに富山大学での研究成果から引用したものである。とくに可視化研究は全てが富山におけるデータである。これらの研究に協働していただいた大学院生ならびに学部生の皆様には記して謝意を表わす次第である。

### 参考文献

- 1) H.J.Frost and M.F.Ashby, "Deformation-Mechanism Maps", Pergamon Press (1982), 26.