

氏名	松田 裕		
学位の種類	博士(工学)		
学位記番号	甲博理工第461号		
学位授与年月日	平成26年3月25日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
学位論文題目	7075アルミニウム合金の組織および機械的特性に及ぼすマルチパスFSP施工条件の影響		
審査会	主査 伊藤 吾朗	委員 前川 克廣	
	委員 鈴木 徹也	委員 中村 雅史	

## 論文内容の要旨

近年、環境保護の観点から、二酸化炭素排出量の削減や化石燃料使用量の抑制等、省エネルギー化が推進されてきている。この情勢の中輸送機器の分野においては、筐体の軽量化を実現するために、従来使用されている鉄鋼材料よりも軽量なアルミニウム合金を適用する動きが見られる。しかし鉄鋼材料と同程度の強度を有する高強度アルミニウム合金は一般的に、鉄鋼材料よりも塑性加工性に乏しく、成形等に掛かる費用が高くなるという課題を抱えている。そのため、高強度アルミニウム合金の更なる普及を促すためには、当該合金の塑性加工性を向上させる必要がある。この手法の一つとして、超塑性と呼ばれる、材料が巨大な延性を示す現象を応用した成形技術に期待が寄せられている。この超塑性を発現させるためには材料組織が等軸・微細であることが要求される。等軸・微細組織を得るための手法として最近、強ひずみ加工法(Sever Plastic Deformation: SPD)と呼ばれる、元の形状から材料を変形させずに、材料組織の微細化を達成できる手法が注目されている。このSPD法の一つである摩擦攪拌プロセス法(Friction Stir Processing: FSP)は他の手法と比較して、①材料の一部を選択的に処理したり広い領域に処理を施したりすることが可能であるため、処理範囲を選ばない、②処理可能な材料の寸法が大きく取れる等の長所を有している。FSPを用いて広い範囲の組織制御を行う場合、適切な施工間隔にてパスを複数回施す(マルチパスFSP: Multipass FSP: MP-FSP)必要がある。このMP-FSPについて現在、処理に伴う機械的特性の変化や攪拌部の材料組織に関する報告はある程度なされているものの、各パス間の材料組織、特に、パスを重ねる際の施工間隔や施工方向の違いが材料組織に及ぼす影響については、いまだに詳細な報告はなされていない。

そこで本研究では、主に各パス間の材料組織に着目し、MP-FSPを施す際の施工間隔や施工方向を変化させた場合に、巨視的および微視的な組織形態にどのような違いが生じるかについて調査した。また、上述の組織変化が機械的特性に及ぼす影響についても調査した。

第1章では、超塑性と組織制御法についてまとめた後に、MP-FSPおよびFSPの応用元であるFSWについて、現在までに進められている調査・研究等について紹介した。そして、いまだに解決されていない諸問題等について言及したうえで、本研究の目的等を述べた。

第2章で、高強度アルミニウム合金として知られている7075アルミニウム合金のT6材お

およびO材に対しMP-FSPを施す（以降、MP-FSP材と記載）ことで、材料組織がどのように変化するのかについて調査した。その結果、FSP施工間隔がFSPツールのピン直径よりも大きくなると、各パスの間に、FSPにより攪拌された組織（Stir Zone: SZ）や熱機械的影響部（Thermo-Mechanical Affected Zone: TMAZ）とは異なる組織を有する領域（Pass Boundary Zone: PBZ）が明瞭に形成されること、SZは等軸・微細な組織であるのに対し、PBZは粗大な結晶粒と微細な結晶粒の混粒組織であること、およびPBZに存在する粗大な結晶粒中には多数の亜結晶粒が含まれていることを明らかにした。このPBZに含まれる粗大結晶粒中に亜結晶粒が存在することについて、PBZはSZと比較して、MP-FSPにより導入されるひずみおよび熱量が少なく、一部では再結晶に至らなかったことが要因であると推測した。また、FSPを全て同じ向きで施行した場合と、1回のパスごとに施工の向きを180°回転させた場合とで、前者においてはPBZが全て同じ形状および幅を有するのに対し、後者においては形状および幅が異なる2種類のPBZが交互に現れることを見出した。さらに、T6材、O材ともに、PBZの硬度はSZと母材の中間程度となることを示した。

第3章では、上記MP-FSP材による組織変化が機械的特性に及ぼす影響について、室温および高温引張試験により調査した。室温引張試験からは、MP-FSPにより、T6材の強度は低下し、O材の強度は上昇することを見出した。また、高温引張試験からは、母材と比較してMP-FSP材の伸び量が、いずれの調質の場合も約10倍増加することがわかった。この高温引張試験時の変形機構について、SZにおいては粒界すべりを主とするものであるのに対し、PBZにおいては粒界すべりと粒内変形が混在した変形機構であると考えられることから、MP-FSP材において超塑性を一様に発現させるためにはPBZが存在しないことが望ましいこと等の推論を述べた。

第4章では、MP-FSP材中にPBZを形成させないようにFSP施工間隔を設定しても、FSP施工中にツールがずれてしまうという問題があることに着目し、FSP施工中のツールのずれ量とFSP施工条件の相関関係について調査した。その結果、母材強度が低いほど、FSP施工中のずれ量が大きくなる傾向にあること、ツールのずれ量がFSPを施工する際のツール回転数とツール送り速度の比（ $N/v$ 比）に比例する可能性があることを示した。

第5章では、第2章から第4章にて得られた実験結果および考察等をまとめ、本研究にて得られた知見等は摩擦攪拌プロセスを用いた広範囲の組織制御を実施するうえで、これまで詳細な報告のなされていなかった各パス間の組織について言及したこと、特に、パスを重ねる間隔がピン直径よりも大きくなると、各パス間に攪拌部とは異なる組織が明瞭に形成されることを新たに見出したこと、当該組織は攪拌部とは機械的特性、特に超塑性発現条件が異なることを明らかにしたこと等を述べた。また、摩擦攪拌プロセスを広範囲にわたって施工する際の材料組織と機械的特性の変化については、組織制御だけでなく、材料表面組織の複合化や材料内部欠陥の除去等に摩擦攪拌プロセスを適用する際にも活用可能であり、また、ツールのずれ量とFSP施工条件に関する知見については、摩擦攪拌プロセスの応用元である摩擦攪拌接合においても非常に有益な知見となること等も述べた。

これらより本研究にて得られた知見等は、高強度アルミニウム合金の更なる普及に寄与するものであるとともに、超塑性成形、摩擦攪拌プロセスおよび摩擦攪拌接合の今後の発展に大きく貢献するものであると考えられることから、工学的・社会的に有用なものであると判断する。

## 論文審査の結果の要旨

材料特性を向上させる手法として強ひずみ加工による組織制御法があり、これを行うことにより、結晶粒が微細化され、室温下における機械的特性の向上や、高温下における超塑性（材料が巨大な延性を示す現象）の発現が期待される。摩擦攪拌プロセス(Friction Stir Processing: FSP)は、処理範囲を狭くも広くもできること、処理後の形状がバルク材に近く、処理可能な母材の寸法も大きく取れることなどの長所がある。FSPを用いて広い範囲の組織制御を行う場合、適切な施工間隔でパスを複数回施す(マルチパスFSP: Multipass FSP: MP-FSP)必要がある。本論文は、航空機用構造材に用いられている7075アルミニウム合金のT6材およびO材を供試材として、このMP-FSPについてこれまで調べられてこなかった各パス間の材料組織および室温・高温での機械的性質に及ぼす施工間隔や施工方向の違いの影響について、詳細に調査したものである。

まず、FSP施工間隔が大きくなるにつれて、攪拌領域(Stir Zone: SZ)や熱機械的影響部とは異なる領域(Pass Boundary Zone: PBZ)が各パスの間に生じることを明らかにしている。また、FSPを全て同じ向きで施行した場合と、1回のパスごとに施工の向きを180°回転させた場合で、前者においてはPBZが全て同じ形状および幅を有するのに対し、後者においては形状および幅が異なる2種類のPBZが交互に現れることを見出している。ミクロ組織について、SZでは析出物がほとんど存在しない等軸・微細粒組織(粒径: 4~5 $\mu\text{m}$ )となるのに対して、PBZでは、析出物が多数存在し、亜結晶粒を内包した粗大粒と、微細粒とが混在することを見出している。そしてこの要因として、PBZはSZと比較して導入されるひずみおよび熱量が少なく、一部では再結晶に至らなかったことを挙げている。

各領域の硬さについて、T6材では母材>PBZ>SZ、O材ではSZ>PBZ>母材となることを示し、金属の強化理論から考察している。MP-FSP材の室温引張試験において、母材と比較してT6材は強度が低下し、O材は強度が上昇するという、ビッカース硬さ試験に矛盾しない結果を得ている。一方高温引張試験においては、MP-FSPを施すことにより、伸びが約10倍に増加することを明らかにし、SZにおいては粒界すべりが主たる変形機構であるのに対し、PBZにおいては粒界すべりと粒内変形の混在した変形機構であると考察している。さらに、FSP方向によるPBZ形状の相違に、FSP施工中のツールのずれが関係すると考察し、これに関連し母材硬さが小さいほどツールずれ量が大きくなることも明らかにしている。

これらより本研究にて得られた知見等は、高強度アルミニウム合金の更なる普及に寄与するものであるとともに、超塑性成形、摩擦攪拌プロセスおよび摩擦攪拌接合の今後の発展に大きく貢献するものであると考えられることから、工学的・社会的に有用なものであると判断され、よって、本論文は博士(工学)の論文にふさわしいと判定された。