

極細糸半田の断線抑制を目指した加工プロセスの開発

大阪産業技術研究所 金属材料研究部

主任研究員 濱田 真行

(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020027-B3)

キーワード：鉛フリー半田，摩擦攪拌プロセス，組織制御

1. 研究の目的と背景

電子・電気機器の高性能化に伴い、線径 300 μm 以下の極細糸半田の需要が高まっている。一般的に糸半田は、押出用のピレットを製造する「 casting 工程」、フラックスを充填する「押出工程」、線径を細くする「伸線工程」、糸半田をリールに巻き取る「巻取工程」の 4 工程を経て製品となる。極細糸半田の製造では、伸線工程の最終段階で発生する断線の抑制が技術課題になっており、半田の微細組織に注目した取り組みが行われている。

工業的には、Sn-3 mass%Ag-0.5 mass%Cu の鉛フリー半田が広く用いられており、その casting 組織は、初晶の Sn 相と Ag および Cu の金属間化合物粒子（以下、第二相粒子）が晶出した最終凝固部からなる¹⁾。

このような凝固組織を有するピレットを押出加工すると、押出加工後の微細組織は、図 1(a)から(c)に示す組織形態が混在したものになる。図 1(a)は Sn 相（白色の第二相粒子が存在しない領域）と最終凝固部（白色の第二相粒子が密集する領域）が層を形成している。図 1(b)は、層の一部がこぶ状になっている。図 1(c)は、第二相粒子が均一分散している。押出加工後の微細組織の多くは図 1(a)および(b)であり、図 1(c)は極めてまれで、観察される領域もわずかである。

伸線加工後の微細組織にも押出加工後の特徴が残存しており、大部分は図 1(a)の層の間隔を狭くしたような微細組織を有している。その後、塑性変形が生じない程度の張力をかけた状態でリールに巻き取られて製品となる。

極細糸半田の製造において断線を抑制するためには、伸線ダイス通過時に糸半田にかかる引抜力に耐えうる、優れた強度を押出加工後に有していればよい。すなわち、図 1(a)から(c)に示す押出加工後の微細組織を共通の方法で高強度化できれば、断線抑制が期待できる。そこで先行研究では、第二相粒子の微細化による分散強化の増強に取り組んだ。その結果、 casting 条件の最適化による第二相粒子の微細化に成功し、フラックス含有量が 3 mass%の極細糸半田の製造において、歩留まりを大幅に改善することができた²⁾。微細な第二相粒子を有するピレットで製造された極細糸半田は、現在、スマートフォンのカメラモジュールの半田付などに用いられている²⁾。

昨今、カメラモジュールのような微細接合部の半田付において、ぬれ性改善が求められており、フラックス含有量が 6 mass%の極細糸半田の需要が高まっている。フラックス含有量が 6 mass%まで増加すると、図 2 のよう

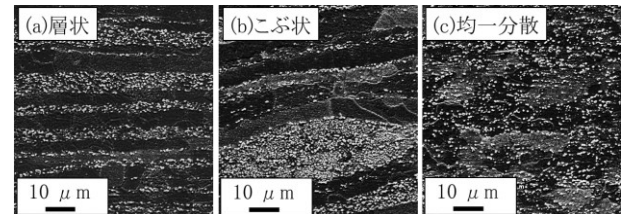


図 1 押出加工後の微細組織の典型例

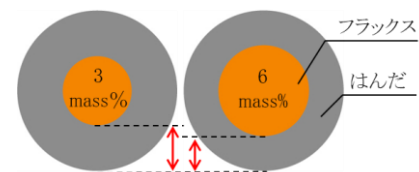


図 2 極細糸半田の断面模式図

に半田肉厚が減少する。その結果、微細な第二相粒子を有するピレットでも断線が起きており、第二相粒子の微細化に加えた、さらなる対策が必要になっている。

図 1(a)から(c)のように第二相粒子の分散状態が異なる微細組織が混在すると、塑性加工時の変形抵抗が変化する。その結果、伸線ダイス通過時の糸半田への引抜力が変動する。高フラックス含有量の極細糸半田の断線は、半田の薄肉化と引抜力の変動の重量により発生していると考えられ、引抜力の安定化が断線抑制に有効と考えられる。引抜力の変動は、不均一な第二相粒子の分散状態に起因しており、分散状態を均一にできれば引抜力は一定値に近づく。すなわち、押出材全体の微細組織が、図 1(c)のように、第二相粒子が均一分散している状態であればよい。

第二相粒子が均一分散している組織は、強ひずみ加工と呼ばれる塑性加工を応用した組織制御法により、達成できる可能性がある。そこで、複数ある強ひずみ加工法の中で、摩擦攪拌プロセス (Friction Stir Process, 以下 FSP と表記) に注目し、ピレットに FSP をすることで、最終凝固部に偏在する第二相粒子を Sn 相の領域も含めて均一分散させることができると考えた。そこで、予備調査として市販の棒半田に摩擦攪拌用のツールで FSP を行い、断面の微細組織を観察した。第二相粒子の分散状態を観察した結果を図 3 に示す。図 3(a)の未攪拌領域では、Sn 相と最終凝固部が確認でき、最終凝固部に微細な第二相粒子が観察された。一方、図 3(b)の攪拌領域では、Sn 相と最終凝固部を区別することはできず、Sn の単相組織に第二相粒子が均一分散した組織となっていた。この

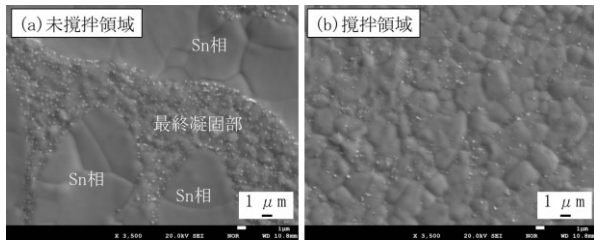


図3 FSPを実施した棒半田の微細組織

結果から、ビレット全体にFSPをすることにより、第二相粒子が均一分散したビレットを製造できることが明らかになった。

そこで本研究では、ビレット全体へのFSPの実施に必要な治具の開発と条件の検討を行い、第二相粒子が均一分散したビレットの製造を目指す。さらに、第二相粒子が均一分散したビレットを用いることで、高フラックス含有量の極細糸半田を製造できることを明らかにする。

2. 実験方法

2・1 ビレットと摩擦攪拌装置

FSPを実施するビレットは、直径が約70 mm、長さが約150 mmの円柱形で、連続鋳造により製造されたものである。合金組成は、Sn-3 mass%Ag-0.5 mass%Cuとした。FSPには、2種類の加工ヘッド（5軸制御および直線制御）を搭載した川崎重工業製摩擦攪拌装置を用いた。装置仕様を表1に示す。

表1 摩擦攪拌装置の装置仕様

加工ヘッド	ツール移動速度	ツール回転数	最大荷重
5軸制御	60~1200 mm/min	300~2000 rpm	1000 kgf
直線制御	20~350 mm/min	225~1800 rpm	4000 kgf

2・2 FSP用の金型と攪拌ツールの設計

FSP時の円柱形ビレットの変形抑制を目的として金型を設計した。（金型材質はS45C）。摩擦攪拌装置のテーブルに直接固定する「土台金型」とボルト締結によりビレットを上から抑える「抑え金型」によりビレット全体を拘束する構造とした。図4にビレットを固定した様子を示す。ボルト締結後、二本の抑え金型間の距離は約41 mmとなり、その間を攪拌ツールが移動しFSPを行う。FSP

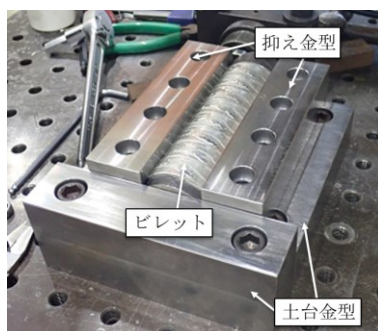


図4 土台金型と抑え金型

終了後、抑え金型のみを取り外して次の箇所にFSPができるようにビレットを再設置し、FSPを行う。この作業を繰り返すことでビレット全体を攪拌する。

図5(a)に示すように、プローブ長を35 mmとすることで、ビレットの中心部まで攪拌できるように設計した。また、12回（以下、パスと表記）のFSPでビレット断面全体を攪拌できるように、プローブはテーパ形状とした。抑え金型との接触を避けるためにショルダ径は40 mmとした。ツールの材質はSKD61（HRC50±2）とし、図5(b)に示す順番でFSPを行った。

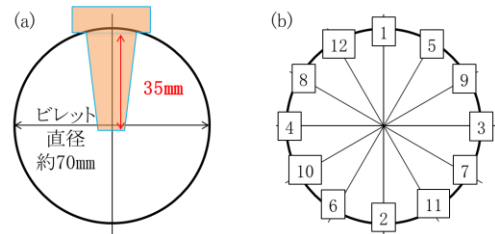


図5 プローブ形状とFSPの順番

2・3 組織観察

FSPで生じた欠陥および微細組織中の第二相粒子の分散状態を確認するために組織観察を行った。FSP後のビレットを帯鋸で切り出し、樹脂包埋後、SiC研磨紙、ダイヤモンドペーストおよびコロイダルシリカを用いて機械研磨した。機械研磨後の試料表面を平面ミリング法により加工し、観察試料とした。FSPによる欠陥の観察には実体顕微鏡（レイマー製）を用い、第二相粒子の分散状態の観察には走査電子顕微鏡（日本電子製 JXA-8530F型）を用いた。

2・4 圧縮試験と引張試験

12パスのFSPを行ったビレット（FSPビレット）の変形抵抗が鋳造ビレットに比べ大幅に上昇した場合、押出装置に過大な負担がかかることになる。そこで、負担の程度を事前に把握するために、圧縮試験により変形抵抗を評価した。

圧縮試験用の試験片は、直径8 mm、高さ10 mmの円柱形とし、機械加工により製造した。インストロン製万能材料試験機（5583型）を用い、二硫化モリブデン系の潤滑剤を試験片に塗布後、N=1、室温にて試験を行った。圧縮率を50%とし、クロスヘッドの移動速度が100 mm/min（初期ひずみ速度 $1.6 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ）で圧縮した。

続いて、伸線工程での断線耐性を事前に把握するために、引張試験を行った。引張試験用の試験片は、直径4 mm、平行部長さ12 mmの丸棒型試験片とし、機械加工により製造した。大阪科学製引張試験機（AHS-1200-F型）を用い、ひずみ速度が $1.0 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 、N=1、室温にて引張試験を行った。

圧縮試験、引張試験ともに試験片は、糸半田製造時の負荷方向を考慮して、図6(a)に示す方向に負荷がかかるように試験片を採取した。また、試験片は、図6(b)で示

すように中心部と外周部の2箇所から採取した。

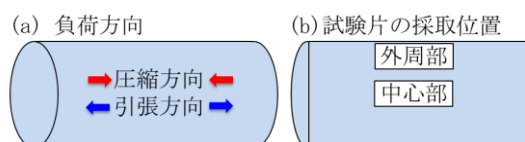


図6 試験の負荷方向と試験片採取位置

2・5 FSPビレットを用いた極細糸半田の製造

FSPビレットを6本製造し、旋盤で円柱形に加工した。FSPビレットを用いた高フラックス含有量の極細糸半田（フラックス含有量6 mass%，線径300 μm）の製造は、半田メーカーに委託した。伸線加工後もFSPの効果が維持されていることを確認するために、直径2.4 mmまで伸線した糸半田の引張試験を行った。インストロン製万能材料試験機（5583型）を用い、150 mm程度に切断した糸半田を、チャック間距離が100 mmの位置で把持した後、クロスヘッド移動速度が10 mm/min（初期ひずみ速度 $1.6 \times 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ）、 $N=4$ で引張試験を行った。また、直径2.4 mmまで伸線した糸半田の組織観察を行い、第二相粒子の分散状態を調査した。

3. 実験結果

3・1 FSP条件の検討

本研究で設計した攪拌ツールのプロープ部分をビレットに押し込むための条件を調査した。

金型にビレットを固定し、5軸制御ヘッドの最大押し込み荷重と最大回転数（1000 kgf，2000 rpm）で押し込んでみたが、プロープをビレット内に押し込むことはできなかった。直線制御ヘッドの最大押し込み荷重と最大回転数（4000 kgf，1800 rpm）で押し込んだところ、プロープ全体を押し込むことができた。最大押し込み荷重のまま、回転数を1000 rpm下げた条件でも押し込むことができたが、最大回転数に比べ、押し込みに要する時間が長くなった。プロープの押し込み条件と結果をまとめたものを表2に示す。

プロープを押し込むことができた表2の条件2と3で、1パス123 mmの長距離FSPを行った。ツールの移動速度と前進角はそれぞれ、100 mm/minと 3° とした。条件2では、攪拌ツールが60 mm程度進んだ辺りから、ツールの移動に伴ってショルダ部が徐々にビレットに沈み込み、大量のバリが生じた。一方、条件3では、ショルダ部のビレットへの沈み込みは発生せず、バリの量も少なく、FSP後の表面もきれいな状態であった。

続いて、条件3の長距離FSP部の断面を切り出し、観察試料を作製した。図7に観察試料の外観を示す。攪拌領域と未攪拌領域を目視で確認することができ、攪拌領域の形状は、プロープの形状とほぼ一致していた。続いて、内部欠陥の有無を確認するために実体顕微鏡による観察を行った。攪拌領域内および攪拌領域と未攪拌領域との境界部に内部欠陥は認められなかった。以上の結果

より、表3に示す条件を長距離FSPの実施条件とした。

3・2 FSPビレットの製造

表3に示す条件で12パスの長距離FSPを実施し、FSPビレットを製造した。12パス終了後のビレット外観を図8に示す。FSPの都度バリを除去したこともあり、FSP部分が細くなった。続いて、FSPビレット中の内部欠陥の有無を確認するために、長距離FSPの攪拌開始部と攪拌終了部付近の断面を切り出して、観察試料を作製した。作製した観察試料の外観を図9に示す。

図9(a)および(b)は、12パス目が上に来るように配置

表2 プロープの押し込み条件と結果

条件	加工ヘッド	負荷荷重	ツール回転数	結果
1	5軸制御	1000 kgf	2000 rpm	×
2	直線制御	4000 kgf	1800 rpm	○（押し込み時間：短）
3	直線制御	4000 kgf	1000 rpm	○（押し込み時間：長）

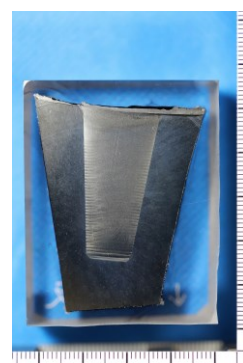


図7 長距離FSP断面の観察試料

表3 ビレットへの長距離FSPの実施条件

	押し込み荷重	回転数	移動速度	移動距離	前進角
押し込み	4000 kgf	1800 rpm	—	—	—
攪拌	4000 kgf	1000 rpm	100 mm/min	123 mm	3°

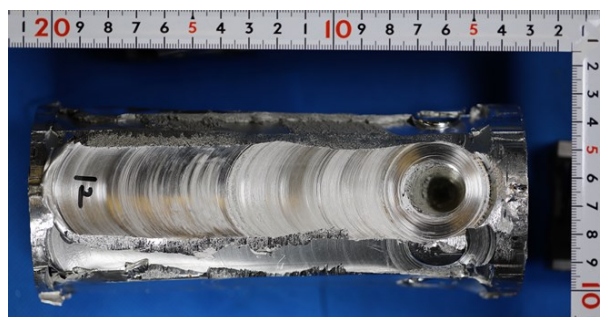
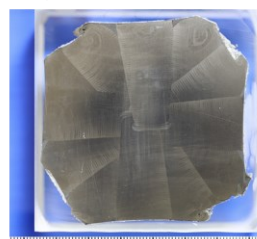


図8 FSPビレットの外観

(a)攪拌開始部



(b)攪拌終了部

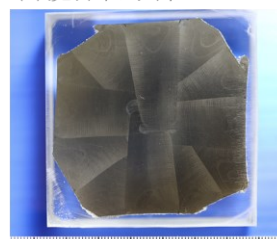


図9 FSPビレット断面の観察試料

している。実体顕微鏡を用いて観察した結果、内部欠陥は認められなかった。続いて、図 8 に示す FSP ビレットから、図 6 (b) に示す外周部と中心部の組織観察ができるように試料を切り出し、観察試料を作製後、第二相粒の分散状態を観察した。その結果を図 10 に示す。図 10 (a) の外周部および図 10 (b) の中心部ともに、同程度の結晶粒径を有する Sn の単相組織中に、第二相粒子が均一分散した微細組織であった。両者の第二相粒子の分散状態に顕著な違いは認められなかった。続いて、鋳造ビレットについても FSP ビレットと同様に外周部と中心部の研磨試料を作製した。同じ倍率で撮影した微細組織を図 11 に示す。図 11 (a) の外周部および図 11 (b) の中心部ともに、典型的な Sn-3 mass%Ag-0.5 mass%Cu の鋳造組織であった。

続いて、FSP ビレットと鋳造ビレットの第二相粒子の粒子サイズを比較するために、外周部を拡大して撮影したものを図 12 に示す。図 12 (a) の FSP ビレットでは、1 μm を超える第二相粒子が確認されたが、図 12 (b) の鋳造ビレットの第二相粒子は、サブミクロンオーダーであった。よって、長距離 FSP の実施により第二相粒子が粗大化していることが明らかになった。第二相粒子の粗大化は予備実験では確認されておらず、長距離 FSP に限定された挙動である。大型のツールを用いたことによる入熱量の増加に関係する現象と予想される。第二相粒子の粗大化を抑制するためには、粗大化メカニズムの解明と粗大化抑制手法の検討が必要となり、研究遂行の中で見出され

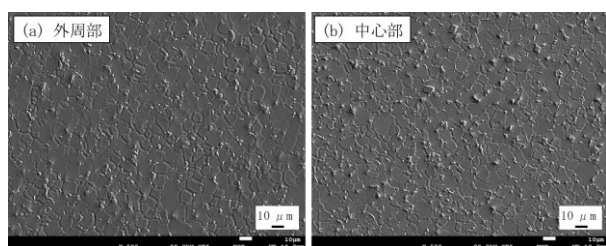


図 10 FSP ビレットの微細組織

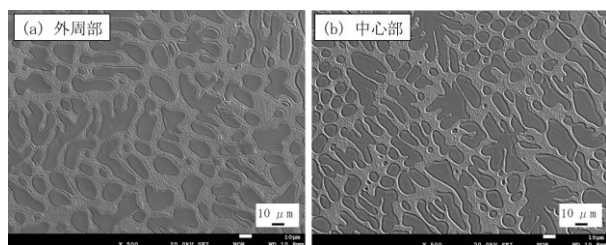


図 11 鋳造ビレットの微細組織

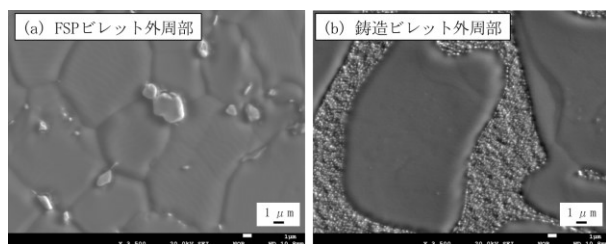


図 12 FSP ビレットと鋳造ビレットの拡大組織

た新たな課題といえる。一方、長距離 FSP により第二相粒子が粗大化したものの、第二相粒子が均一分散したビレットを製造するという、本研究の目的は達成されている。そこで、第二相粒子の粗大化抑制に関しては今後の検討課題として、当初計画に沿った研究遂行を優先する。

3・3 圧縮試験および引張試験

FSP ビレットと鋳造ビレットの外周部と中心部について、圧縮試験を行った結果を図 13 に示す。

変形抵抗はすべての試験片で、真ひずみの増加とともに上昇した。変形抵抗は、鋳造ビレット（中心部）が最も高く、続いて鋳造ビレット（外周部）、FSP ビレット（外周部）、FSP ビレット（中心部）となり、FSP の実施により変形抵抗が低下することが分かった。したがって、極細糸半田の製造において、ラムの移動速度（以下、押出速度）一定で押出加工した場合、FSP ビレットでは加工に要する荷重は、鋳造ビレットよりも低減すると考えられる。

続いて、図 14 に圧縮試験前後の試験片外観を示す。鋳造ビレットでは外周部、中心部ともに試験片の表面に凹凸が認められた。試験片全体を考えた時に、試験片内の変形抵抗が不均一で、塑性変形が局所的に進行したためと考えられる。

一方、FSP ビレットでは、試験片表面に顕著な凹凸は認められなかった。これは、FSP により第二相粒子が均一に分散したことで、試験片全体で均一変形したためと考えられる。

続いて、引張試験により得られた真応力-真ひずみ曲線を図 15 に示す。

鋳造ビレットの外周部と中心部の最大応力は 46 MPa で最も高くなった。一方、FSP ビレットの外周部と中心部は最大応力が低下し、それぞれ、32 MPa と 27 MPa で

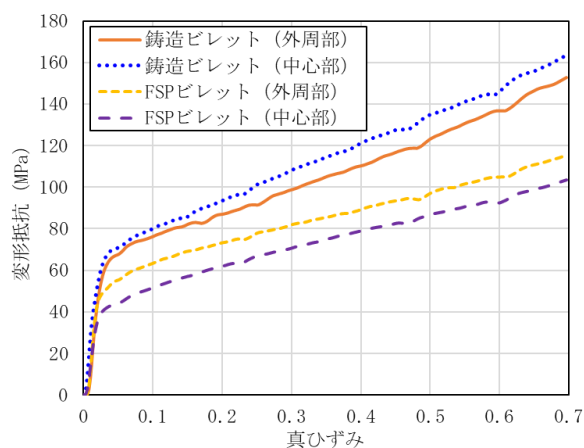


図 13 変形抵抗と真ひずみの関係

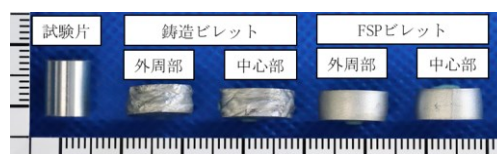


図 14 圧縮試験前後の試験片の外観

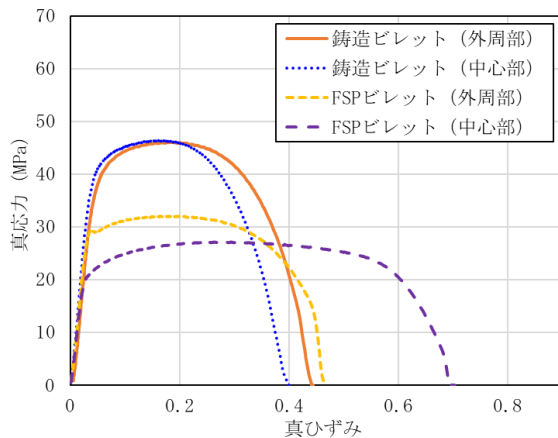


図 15 FSP ビレットと鋳造ビレットの真応力－真ひずみ曲線



図 16 引張試験前後の試験片外観

あった。引張試験における最大応力の低下は、伸線時の引抜き力への耐性の低下につながるため、FSP ビレットを用いた糸半田製造において、断線の多発が懸念される。一方、FSP ビレットは鋳造ビレットに比べ、破断に至るまでの真ひずみ量、すなわち延性が増加する傾向があった。延性の増加は、断線抑制に効果があると思われるが、断線抑制にどの程度寄与するのか予想することはできない。その点については、極細糸半田の製造において確認する必要がある。

続いて、図 16 に引張試験前後の試験片外観を示す。鋳造ビレットでは外周部、中心部ともに試験片の平行部表面に凹凸が認められたが、FSP ビレットでは凹凸は認められなかった。平行部の表面状態は、圧縮試験の試験片の外観と極めて類似しており、第二相粒子の分散状態に起因する均一変形の起こりやすさが反映されたものと考えられる。

3・4 極細糸半田の製造

極細糸半田を製造するために FSP ビレットを 6 本製造した。製造したビレットは、押出装置に装填するために旋盤で円柱形に加工した。旋盤加工後の FSP ビレットを図 17 に示す。寸法の比較のために鋳造ビレットも示す。

鋳造ビレットと同じ押出速度で FSP ビレットの押出加工を行った。圧縮試験から予想された通り、FSP ビレットの押出加工に必要な荷重は鋳造ビレットよりも低い値

となった。

押出加工の後、線径 2.4 mm まで伸線加工を行った糸半田（伸線材）で引張試験を行った。150 mm 程度の糸半田をチャック間距離の 100 mm 位置で把持し、引張試験を行った。表 4 に $N = 4$ の引張試験における、最大荷重と破断変位の最大値、最小値および平均値を示す。また、図 18 に表 4 の平均値に最も近い値を示した荷重－変位曲線を示す。

表 4 より最大荷重の平均値は鋳造ビレットの方が高く、破断変位は FSP の方が高い値となっており、図 15 に示した引張試験と同じ傾向であった。この結果より、FSP ビレットの伸線材の微細組織は、第二相粒子が均一に分散した状態が維持されていると予想され、一方、鋳造ビレットの押出材では第二相粒子の分散状態が不均一であると考えられる。そこで、押出および伸線加工により第二相粒子の分散状態がどのように変化しているのかを確認するために、組織観察を実施した。FSP ビレットの押出材と伸線材の組織写真を図 19 に、鋳造ビレットの押出材と伸線材の微細組織を図 20 に示す。

図 20 (a) および (b) に示す FSP ビレットの押出材と伸線材の微細組織は、図 11 の FSP ビレットと同様に第二相粒子が均一に分散していた。一方、図 20 の (a) および (b) に示す鋳造ビレットの押出材と伸線材の微細組織は、押出材で観察された層状の組織が、伸線材においても間隔が狭くなった状態で観察され、第二相粒子が層状に偏在していた。続いて、第二相粒子の粒子径に注目すると、押出材と伸線材ともに FSP ビレットの方が鋳造ビレットよりも粗大であった。よって、伸線材の引張試験において鋳造ビレットの最大荷重の平均値が高いのは、第二相粒子が微細であるためで、FSP ビレットの破断変位の平均値が高いのは、第二相粒子の分散状態が均一であるためと示唆される。

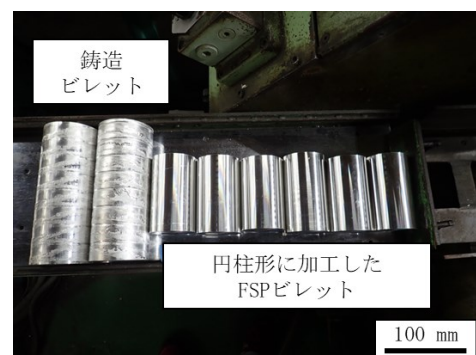


図 17 円柱形に加工した FSP ビレット

表 4 伸線材（直径 2.4 mm）の引張試験結果

種類	項目	最大値	最小値	平均値
FSP ビレット	最大荷重 (N)	92	84	88
	破断変位 (mm)	31	22	25
鋳造ビレット	最大荷重 (N)	163	158	160
	破断変位 (mm)	21	15	18

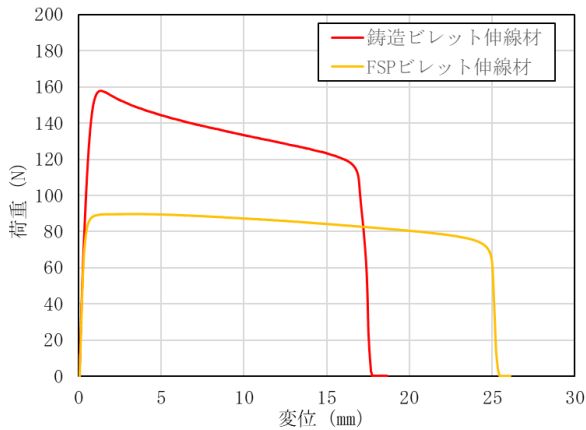


図 18 伸線材の荷重—変位曲線

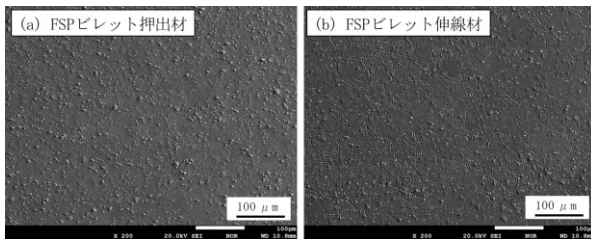


図 19 FSP ビレットの押出材と伸線材の微細組織

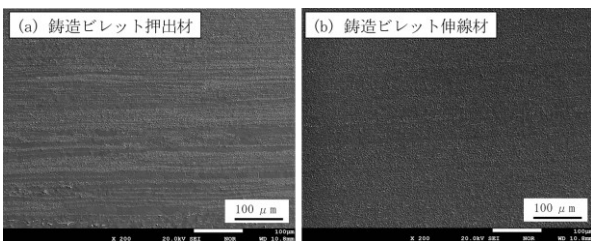


図 20 鋳造ビレットの押出材と伸線材の微細組織

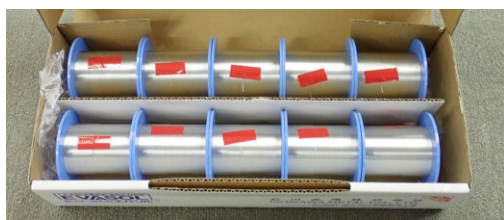


図 21 FSP ビレットで製造した極細糸半田

続いて、線径 2.4 mm から 300 μm まで伸線し、伸線できた極細糸半田の巻き取りを行った。完成品を図 21 に示す。FSP による第二相粒子の粗大化により、伸線時の断線多発が懸念されたが、フラックス含有量が 6% でも極細糸半田を製造できることが分かった。第二相粒子が粗大であっても均一分散していれば、高フラックス含有量の

極細糸半田が製造できることから、極細糸半田の断線抑制においては、第二相粒子の微細化による高強度化と同等もしくはそれ以上に、第二相粒子の均一分散化が有効であると考えられる。

本研究の遂行により見出された課題である第二相粒子の粗大化メカニズムの解明と粗大化抑制手法の開発が達成されれば、微細な第二相粒子が均質分散した FSP ビレットの製造が可能になる。さらなる、高フラックス含有量の極細糸半田の製造や極細化が期待できる。

4. 結論

本研究では、第二相粒子の分散状態に注目した半田ビレットの組織制御に取り組み、フラックス含有量の増加により発生する伸線工程での断線抑制を目指した。FSP による組織制御に取り組んだ結果、第二相粒子が均一に分散した FSP ビレットを製造することができた。

FSP ビレットは、第二相粒子の粗大化により、圧縮試験における変形抵抗と引張試験における最大応力が低下した。一方、第二相粒子の分散状態が均一であることにより、均一な塑性変形が支配的になり、引張試験において延性が増加した。

FSP ビレットを用いてフラックス含有量が 6 mass% の極細糸半田の製造に取り組み、直径 2.4 mm の糸半田の引張試験をした結果、伸線後でも FSP の効果を有していることが確認された。また、線径 300 μm まで伸線することができ、極細糸半田の製造に成功した。

本研究では、FSP により第二相粒子が粗大化したが、今後そのメカニズムを解明し、FSP の実施において、第二相粒子の粒子径を制御する技術を確立すれば、フラックス含有量のさらなる増加や線径 300 μm を大きく下回る極細糸半田の製造が可能になると考えられる。

謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団 2020 年度一般研究開発助成（一般研究開発助成 AF-2020027-B3）により実施したものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 科学技術振興機構 A-STEP 研究開発成果，<https://www.jst.go.jp/a-step/seika/index.html>，（参照：2024-05-21）。
- 2) JEITA 鉛フリー半田実装編集委員会編：鉛フリー半田実装技術，（2003），27，コロナ社