

半溶融加工法による金属基複合材料の製造および加工

Mashy-State Processings for Manufacturing Metal-Ceramics Composites

木内 学*

Manabu KIUCHI

半溶融状態下における金属材料の特性、すなわち、変形抵抗の著しい低下と変形・流動性の向上、異種材料との混合性・接合性の向上などを利用し、かつ、半溶融押し出し加工・半溶融鍛造加工・半溶融圧延加工などを単独または複合的に適用して、金属基粒子分散強化複合材料・短繊維分散強化複合材料、更にそれらを金属母材と組み合わせた積層型複合材料の製造プロセスと、それら複合材料の棒・線・管・板材への加工プロセスの概要および得られた製品の特性について紹介する。

1. はじめに

近年、工業製品の高機能化に対する要求の高まりとともに、従前の材料では得られない各種の機械的・熱的・電気的・磁気的特性を具備する新しい機能性材料が求められつつあり、そのような新しい材料の開発とそれらの応用技術に関する研究が、盛んに試みられている。

現在、研究・開発が進められている新素材を大別すると

- (1) セラミック繊維・セラミック粒子を強化材とし、アルミニウム合金をマトリックスとする繊維強化金属 (FRM)、あるいは粒子強化金属 (PRM)、
 - (2) 炭素繊維を強化材とするCCコンポジット
 - (3) 同じく炭素繊維あるいはガラス繊維を強化材とする繊維強化プラスチック (CFRP)、
 - (4) 主としてセラミックウイスキーを強化材とする「先進複合材料 (ACM)」と呼ばれる一群の複合材料、
 - (5) 金属間化合物およびそれらを強化材とする複合材料、
 - (6) ニューセラミック・ファインセラミックと呼ばれる一群のセラミック材料
 - (7) アモルファス材料
- などがある。

これらの新素材あるいは新機能性材料の製造および製品への加工には、圧延、押し出し、鍛造、焼結、静水圧押し出し、HIP、CIP、射出成形、ダイキャストなどの従前の加工技術のほかに、溶湯鍛造、コンポキャストイング、半溶融鍛造、半溶融押し出し、半溶融圧延、スプレイフォーミングなどの新しい加工技術の適用が試みられており、さまざまな成果が得られている。しかしながら未解決の問題も多く、製造・加工・応用いずれの技術についても、

*東京大学生産技術研究所 第2部

今後の一層の研究が必要である。また技術的なブレークスルーが可能となれば、極めて大きな効果が期待できる可能性に富んだ分野であるといえる。

本稿では、上述の各種加工法のうち、半溶融加工法によるこれら新素材の製造ならびに加工技術の開発の試みについて、筆者らがこれまで進めてきた研究成果を中心に述べる。

2. 半溶融押し出し法・半溶融鍛造法による粒子強化金属 (PRM) の製造および加工

半溶融加工法による粒子強化金属の製造・加工プロセスの概要および特徴は次のとおりである (図1参照)。

(1) 半溶融状態に加熱した金属マトリックス (例えばアルミ合金) を機械的にかくはんし、この中に強化粒子 (セラミック粒子等) を混入する。半溶融状態でかくはんされた金属マトリックスはスラリー状となり、強化粒子が容易に混入されうると同時に混入された強化粒子を内部に保持する能力が高く、通常、比重差による金属マト

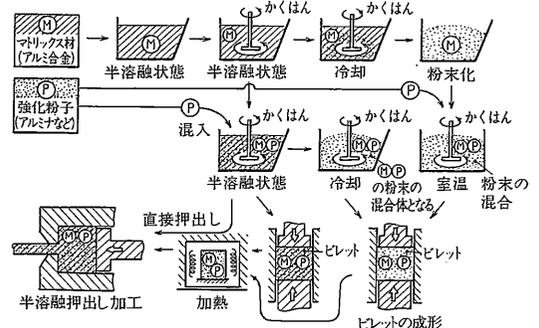


図1 半溶融加工法による粒子強化金属 (PRM) の製造・加工プロセス概念図

リックスと強化粒子との分離は発生しない。

(2) 上記方法で得た混合材に、金属マトリックスが半溶融状態にある温度域で圧延加工・押し出し加工あるいは鍛造加工などを加え、所要の製品を得る。その際、金属マトリックスが半溶融状態にあるため、混合材の流動・変形抵抗は大幅に低下し、かつ変形能が増し、冷間状態はもちろん、熱間状態に比較しても、著しく小さな力で加工することが可能である。

(3) 他方、半溶融状態に加熱した金属マトリックスを機械的に攪拌しつつ冷却することにより、粉末化し、これと強化粒子とを混合することも可能である。このようにして得られた粉末状の混合材を予成形してピレットとし、これを半溶融状態に加熱し、圧延・押し出し・鍛造等の加工を加えることができる。

(4) あるいはまた、(1)の場合の強化粒子の混入の際に、金属マトリックスを冷却しつつかくはんし、全体を、金属マトリックスの粉末（あるいは粒子）と強化粒子との混合状態に移すこともできる。この混合材を取り出し、予成形した後加熱し、半溶融加工により所要の製品を得ることもできる。

2.1 半溶融押し出し加工による粒子強化金属の棒・線・管材の製造

図1は、特に、半溶融押し出し加工による粒子強化金属 (PRM) の製造・加工プロセスの概要を示してある。

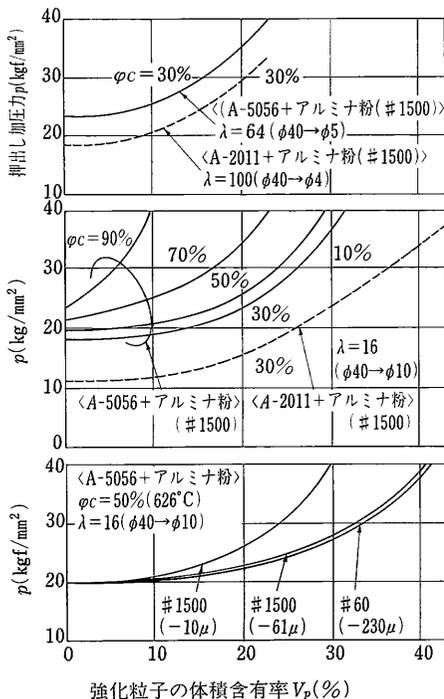


図2 粒子強化アルミ合金の半溶融押し出し加工における押し出し加圧力 p と強化粒子の体積含有率 V_p との関係

セラミック系強化粒子を含む粒子強化金属は、強化粒子の含有率の増加と共に、変形抵抗や硬度が著しく上昇する一方で、伸び変形能が急速に低下するので、冷間・熱間を問わず、加工が非常に困難になる。このような難加工材も、金属マトリックスが半溶融状態となる温度域においては、変形抵抗の低下、変形・流動性の向上などにより、一転して容易に加工できるようになる。

例えば、図2は、定常押し出し時の押し出し加圧力 p と強化粒子の体積含有率 V_p との関係を、押し出し開始時のピレット中の金属マトリックスの固相分率（固相成分の重量パーセント、以下 ϕ_c で示す）をパラメータとして示した結果である。図から明らかなように、 ϕ_c が高くなると V_p が増加すると、ピレット中の液相成分の量が不足して、金属マトリックスと強化粒子間のすべりや強化粒子の回転や移動が起りにくくなり、同時に金属マトリックスの固相成分間におけるすべりあるいは回転に対する拘束も強まるために、必要な押し出し加圧力 p が急激に大きくなる。

一般に、半溶融押し出し加工を適用することにより、 $\phi_c=100\%$ となる温度（固相線温度）あるいはそれ以下の温度域での熱間押し出し加工に比較して、 $1/4\sim 1/5$ の加圧力での押し出しが可能となる。

半溶融押し出し加工により製造された粒子強化アルミ合金の棒・線材の例を図3に示す。適切な加工条件を選択することにより、表面性状および内部構造共に健全な製品を容易に得ることができる。図4は、押し出された粒子強化アルミ合金の機械的特性、すなわち、伸び率 E_t ・シャルピー衝撃値 E および摩耗量 M と強化粒子 (Al_2O_3) の体積含有率 V_p との関係を示す。伸び率 E_t に関しては、 $V_p=0\%$ では $10\sim 15\%$ あったものが、 V_p が増えるに従ってほぼ直線的に減少し、 $V_p=20\sim 30\%$ 近くでは、ほとんどゼロに近づくこと、衝撃値 E についてもほぼ同様な変化がみられること、逆に摩耗量の変化をみると、強化粒子の含有率の増加とともに耐摩耗性が著しく向上すること、などが分かる。

図5は、押し出された粒子強化アルミ合金の、一軸圧縮

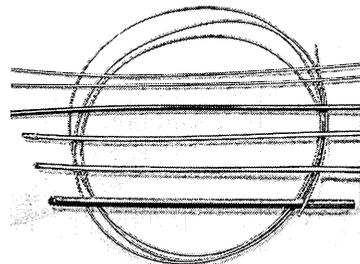


図3 半溶融押し出し加工により製造された粒子強化アルミ合金の棒・線材 (例)

試験の際のひずみ $\epsilon = -0.1$ における変形抵抗 $\sigma_{0.1}$ を縦軸に、試験温度を横軸にとって整理した結果である。例えば、 $V_p = 30\%$ の粒子強化アルミ合金は、マトリックス材そのものに比べ、各温度において約2倍の圧縮変形抵抗

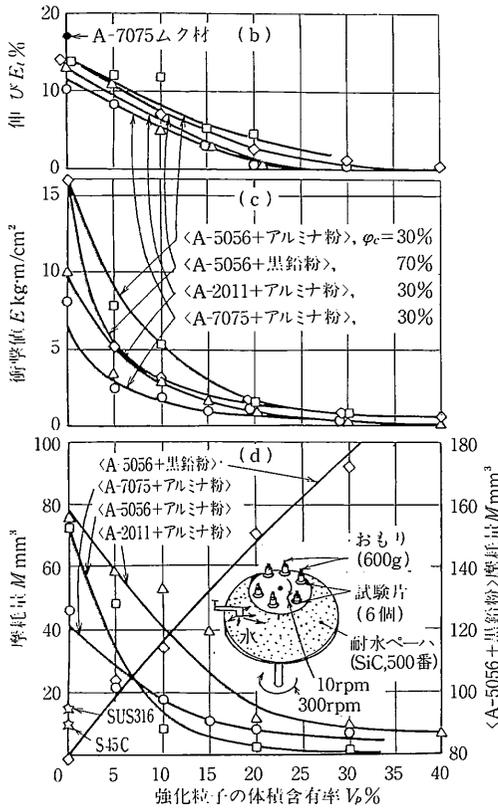


図4 半溶融押し加工により製造された粒子強化アルミ合金の機械的性質

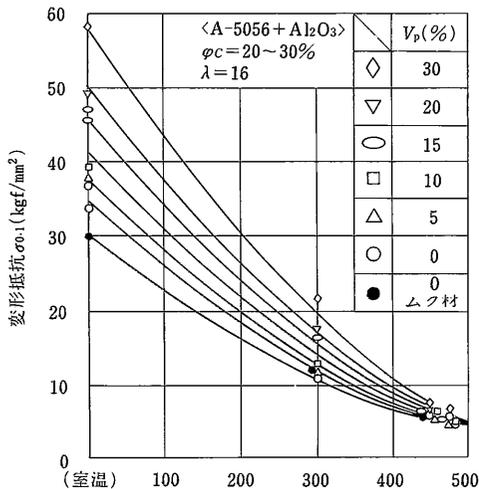


図5 半溶融押し加工により製造された粒子強化アルミ合金の圧縮変形抵抗 $\sigma_{0.1}$ ($\epsilon = -0.1$)

を持つことがわかる。

図6は、強化粒子の大きさが、粒子強化アルミ合金の圧縮変形抵抗 $\sigma_{0.1}$ に与える影響を示す。図より各体積含有率 V_p に対し強化粒子径が小さいほど、変形抵抗が大となることがわかる。

図7は、半溶融押し加工により製造された粒子強化アルミ合金(A-5056)の棒材のシャルピー試験の際の破面をSEMで観察した結果を示す。強化粒子径が比較的大きい(#60, -230μ) 場合であるが、(a)では、尾根のように見えるA-5056の延性破断面と、その間に点在するアルミナ粒子が観察でき、(b)では、金属マトリックス中に強化粒子がしっかり固定されている様子がわかる。

2.2 半溶融鍛造加工による粒子強化金属製品の製造

粒子強化金属 (PRM) の製造および加工技術として、半溶融押し加工と並んで注目されるのが、半溶融鍛造加工である。既に述べたように、一般に粒子強化金属は、強化粒子の含有率の増加と共に、硬く、脆く、難加工材となるため、これを成形加工するためには、半溶融状態における変形・流動特性の向上を利用することが極めて有効である。

半溶融鍛造加工の基本的な実施形態としては、図8に示す(A) (B) 2種類の方式が考えられる。(A)は、粒子強化金属素材 (または、ピレット) をコンテナ・金型 (ダイ) ・ポンチと共に所定の温度まで同時加熱し、加熱終了後加圧・成形する方法である。(B)は所定の温度まで加熱した

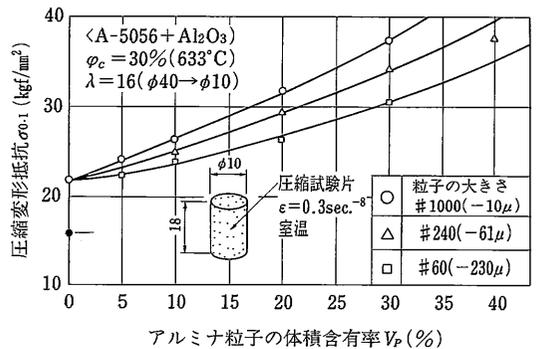
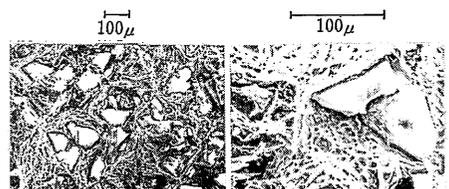


図6 強化粒子の大きさが粒子強化アルミ合金の圧縮変形抵抗 $\sigma_{0.1}$ に与える影響



<A-5056+アルミナ粉 #60, (-230μ)> $V_p = 20\%$

図7 半溶融押し加工により製造された粒子強化アルミ合金の内部構造 (例)

素材 (ピレット) を、適切な温度に予熱した金型に挿入し、加圧成形する方式である。いずれの場合も、素材 (ピレット) 中の強化粒子の体積含有率 V_f 、金属マトリックスの固相分率 ϕ_c 、金型温度 T 、加圧力 p などの加工条件が、製品性状に大きな影響を与える。

図 9 は半溶融鍛造加工により製造された機械部品の外観例を示す。この場合の金属マトリックスは A5056、加熱後のその固相分率 $\phi_c=70\%$ 、強化粒子は Al_2O_3 、その体積含有率 $V_f=20\%$ 、であり、同時加熱方式を採用した結果である。いずれも良好な表面性状を呈している。

半溶融状態に加熱された粒子強化金属素材 (ピレット) の金属マトリックスの固相分率 ϕ_c および強化粒子の体積含有率 V_f が高い場合には、素材中の液相成分が不足し、強化粒子と金属マトリックス間の結合が十分行われず、製品内部がもろくなる傾向があり、離型時の衝撃等で割れその他の欠陥が発生しやすい。一般に、半溶融状態下では、金属マトリックスの粒界または粒表面層が溶解し、半溶融鍛造時にはこの液相成分が強化粒子を包みこんだ状態で加圧成形され凝固するので、強化粒子と金属マトリックスとの結合が強固となり、粒子強化金属と

しての所要の強化効果を得やすい。しかしながら、金属マトリックスの液相成分の量に比して強化粒子の量が過多であると、金属マトリックスが強化粒子を完全に包みこむことができず、あるいはまた、強化粒子がその液相成分中に完全に浸漬できず、金属マトリックスによる強化粒子の固定が十分強固に行われなくなる。

図 10 は、図 8 (B) の方法で、金型を素材 (ピレット) とは別に予加熱した場合の製品の表面性状を示す。この場合も、金属マトリックスは A5056、強化粒子は Al_2O_3 であり、 $V_f=20\%$ 、 $\phi_c=70\%$ 、半溶融鍛造時の加圧力は $p=17.4\text{kgf/mm}^2$ である。

当然予想されるように、金型温度が一定限界以下になると、金型による素材 (ピレット) の冷却が急速かつ過度に起り、液相成分の凝固が進行してその量的不足が発生するため、金属マトリックスと強化粒子の接合が強固に行われ得なくなり、内部構造特に表層部の構造および表面の健全な製品を得ることは難しくなる。同時にまた金型内への素材の未充填、あるいは内部の空隙の発生などの欠陥が生じる。これらはいずれも鍛造される時点で、素材 (ピレット) の流動性が低下するために発生する。

半溶融鍛造加工では、金型温度が製品性状に与える影響が大きいが、健全な製品を得るために必要な金型の下限温度は加工条件により異なる。

図 11 は、粒子強化アルミ合金の半溶融鍛造時の加圧力 p と金型温度 T について、目視による判定により健全な製品を得るための加工条件の限界線を推定した例である。図中、製品内部の接合が不十分かつ欠落部のある場合は ●▲■印、内部の接合には問題はないが、金型に未充填の部分が多少ある場合は ○▲■印、健全な製品が得られた場合は ○△□印で示してある。製品性状に対する金型温度 T の影響は前述のとおりであるが、金型温度 T が低くても鍛造加圧力 p を上げることにより、良好な製品を得ることができる場合がある。図中の加工限界線より、強化粒子の体積含有率 V_f が大きくなるに従い、必要な鍛造加圧力 p が大きくなるが、この結果は、固体状態・半溶融状態を問わず、 V_f の増大に伴って起る粒子強化金属の変形抵抗の増大に対応している。

半溶融鍛造加工により製造された粒子強化金属製品の機械的特性は、半溶融押し加工により製造された製品と基本的に同様であるので説明は省略する。

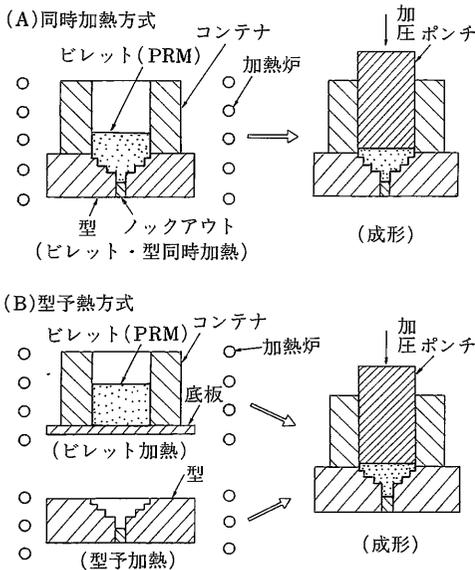


図 8 粒子強化金属の半溶融鍛造加工プロセス概念図

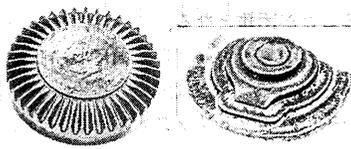


図 9 半溶融鍛造加工により製造された粒子強化アルミ合金の機械部品 (例)

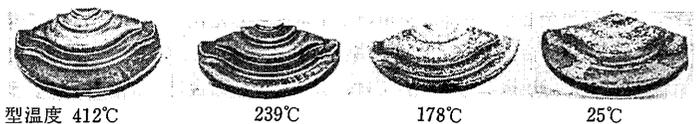


図 10 粒子強化アルミ合金の半溶融鍛造品の表面性状に与える金型の予熱温度の影響

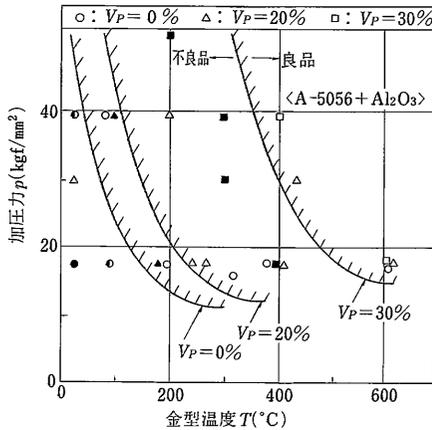


図11 粒子強化アルミ合金の半溶融鍛造に必要な金型温度 T と加圧力 p

3. 半溶融圧接法による粒子強化積層金属 (PRCM) の製造

一般に粒子強化金属は、硬く、耐摩耗性に秀れている代りに、伸び変形成能や耐衝撃性などに劣り、その脆性が利用面で大きな制約となっている。この問題に対する解決策の一つとして、粒子強化金属を通常の延性金属上に積層し、表層に硬度・耐摩耗性を持たせ、裏金となる延性金属により衝撃強さあるいは二次加工性を持たせることが可能である。

その場合、粒子強化金属のライナーと裏金との接合、あるいはライナー内部における強化粒子と金属マトリックスとの接合が十分強固に行われる必要があるが、これを達成するには半溶融圧接加工あるいは半溶融圧延加工が、極めて有力な手段となる。

3.1 半溶融圧接加工による粒子強化積層金属の製造

半溶融圧接加工を適用した粒子強化積層金属の製造プロセスの概要を図12に示す。以下、ライナーとなる粒子強化金属は $\langle A5056 + Al_2O_3 \rangle$ からなり、裏金としては、A1050, A5052を用いた場合について説明する。図に示すプロセスに従って裏金と複合層とを積層化した(組み合わせた)素材を、ライナー内の金属マトリックスおよび場合によっては裏金も半溶融状態になるまで加熱し、所定の温度に一定時間保持し、均一性を確保した後に、金型内にセットし、プレスにより加圧圧接し、製品を得る。図13に、ライナーとして用いたA5056粉と Al_2O_3 粉との混合粉、および裏金としてA5052を用いて圧接成形した粒子強化積層アルミ合金の横断面の写真を示す。

一般に、半溶融圧接加工においては、ライナー中の金属マトリックスあるいは裏金の固相分率 ϕ_c が低くなるほど、界面において、ライナー・裏金双方が互いにかみ合い良好な接合面を形成する。また、ライナー中の金

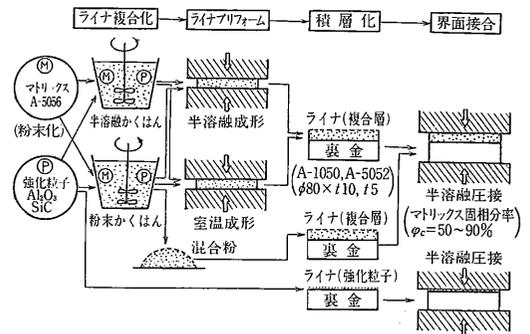


図12 半溶融圧接加工法による粒子強化積層金属の製造・加工プロセス概念図

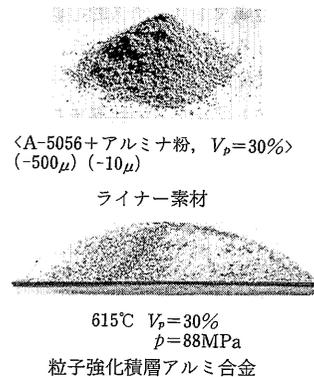


図13 ライナー素材(強化粒子と金属マトリックス粉との混合粉)と半溶融圧接加工後の粒子強化積層アルミ合金の例

属マトリックスの固相分率 ϕ_c が低くなるほど、ライナー中のマトリックスと強化粒子との良好な接合を得やすい傾向がある。

しかしながら、成形時に作用する加圧力も接合を達成する上で重要な条件因子であり、加圧力が高くなるほど、ライナー・裏金間の界面の接合、およびライナー中のマトリックスと強化粒子との接合のいずれもが促進され、強固な接合を得やすくなる。

圧接加工時に、ライナー中の金属マトリックスのみが半溶融状態となり、裏金は固相状態に留る場合の製品性状は、金属マトリックス・裏金共に半溶融状態となる場合の製品性状と比較して、問題を起しやすく、特にライナーの強化粒子の体積含有率が増すにしたがって良好な製品性状を確保することが困難となる。これは、後者の場合、裏金中の液相成分がライナーとの界面における接合を促進するのみならず、その液相成分がライナー中にも侵入し、ライナー中の金属マトリックスの液相成分と共に強化粒子の固定に役立つことを意味し、特に、マトリックスの液相成分が不足する場合には、その補助効果が顕著になる。

図14は、ライナーと裏金との接合面あるいはライナーのせん断強さ τ_{max} と、ライナー中の強化粒子(Al_2O_3)の体積含有率 V_p 、との関係を示す。図より V_p が増すとともに τ_{max} が増加すること、また加圧力 p の増加とともに τ_{max} が増加すること、がわかる。これは、加圧成形時にライナーと裏金との界面において、 V_p 、 p の増加とともに強化粒子が裏金により多く喰い込む形で接合するためと考えられる。ただし、図の破線部は、ライナー・裏金間の界面がせん断破壊する前に、ライナー内部がせん断破壊したことを意味する。

さらに、金属マトリックス・裏金の固相分率 ϕ_c が増大するにつれて、 τ_{max} が増加する傾向があるが、これは、 ϕ_c が大きいほど、半溶融圧接加工後の裏金(A5052)の強度が増すので、その影響が出ているものと考えられる。いずれにしても、図14の場合の裏金(A5052)のせん断強さは、12.5kgf/mm²(O材)~17.0kgf/mm²(H38材)であるので、図より必要十分な ϕ_c と p の下での圧接加工により、ほぼ裏金のせん断強さに等しい接合強度が得られることがわかる。

図中の黒丸は、半溶融状態にならない裏金(A1050)を用いた場合の結果である。 V_p の増加また ϕ_c の増加に対しても、 τ_{max} がほぼ横ばいになっている。これは、裏金が半溶融状態にならないために、界面の接合状態が他の条件によって大きく影響されないためである。

3.2 半溶融圧延加工による粒子強化積層板材の製造

半溶融圧延加工による粒子強化積層板材の製造手順は図15に示すとおりである。まず、所定の金属マトリックス粉末と強化粒子との混合粉またはそれを予成形した複合層を、基板の表面に積層し、これを、ロール入口直前

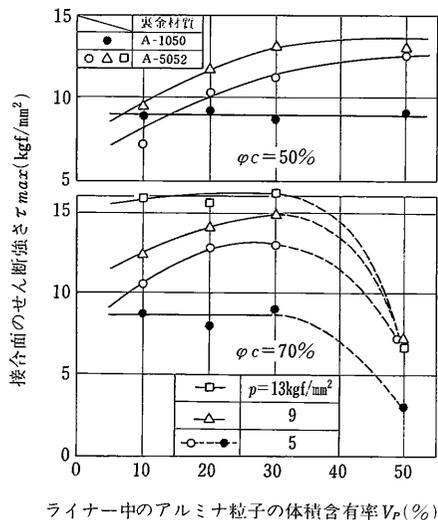


図14 半溶融圧接加工により製造された粒子強化積層アルミ合金の接合強度(せん断強さ τ_{max})に与える加圧力 p と強化粒子の体積含有率 V_p の影響

に設置した加熱炉に挿入し、基板または積層した複合層中の金属マトリックスが所定の半溶融状態になるまで加熱する。加熱した積層素材は、半溶融状態の均一化を図るため、一定時間炉中に保持した後、ロール間に挿入し圧延を行う。なお、圧延開始時のロールの表面温度は室温または所定の温度に予熱しておく。

半溶融圧延加工により、強化粒子を基板表層部へ直接圧入することも可能である。この場合には、強化粒子のみを基板表面に積層した状態で加熱し、基板が所定の半溶融状態に達した後に圧延する。強化粒子を基板表層部へ十分深く圧入するためには、圧下率・圧延温度・強化粒子粒度などの加工条件を適切に組み合わせ選択する必要がある。

この場合、半溶融圧延時のみかけの圧下率(1-(製品厚さ)/(初期積層厚さ+基板厚さ))、が高いほど、強化粒子の圧入深さ(形成される複合層厚さ)が増し、同時に、基板が強化粒子を完全に包みこんで固定し、安定した内部構造を得ることができる。みかけの圧下率が低い場合には、ロールギャップ内で基板に作用する静水圧が十分高くないため、強化粒子間への液相成分の浸透が十分ではなく、強化粒子の固定が不確実となり、圧入深さも不均一となりやすい。

熱間圧延加工により、同様な強化粒子の圧入を試みても、基板表面に、強化粒子が一粒、一粒、断続的に圧入されるにすぎない。一方、基板の固相分率が著しく低く、その変形抵抗が過度に低下すると、ロールギャップ内で、強化粒子間への液相成分の浸透に必要な静水圧を基板中に保持できず、この場合にも安定した複合層の形成が阻害される。

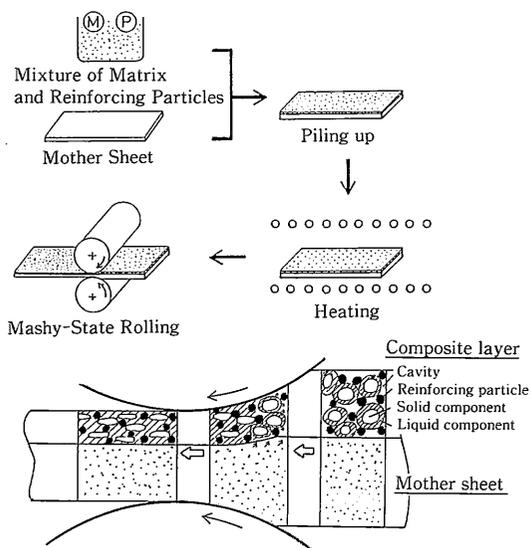


図15 半溶融圧延加工による粒子強化積層板材の製造プロセス概念図

したがって直接圧入法により、基板表層部に、強化粒子が多重に圧入された均一な複合層を形成するためには、基板内部には、強化粒子間へ浸透するに十分な量の液相成分と、同時に、必要な静水圧を保持するのに十分な基板の変形抵抗が必要である。例えば、図16に示すA5052を基板とする場合、 $T=610\sim 620^{\circ}\text{C}$ (固相分率 $\phi_c=96\sim 86\%$) の範囲で、強化粒子が均一に圧入され積み重なり、高濃度に強化粒子を含む均質な複合層が形成される。図16は、適切な条件下で半溶融圧延した場合、強化粒子の粒度が製品の内部組織に与える影響についても示しているが、いずれの粒度の場合も、粒子間に液相成分が良く浸透し、強化粒子が何重にも圧入されていることがわかる。図17は、直接圧入法により形成された複合層の、重錘10kgf使用によるピッカース硬さ、ならびに、一定条件下の摩耗試験による摩耗量を示す。なお、ここで示す摩耗量は、基板の摩耗体積に換算してある。その他、純鉄とA5052H112のピッカース硬さおよび摩耗

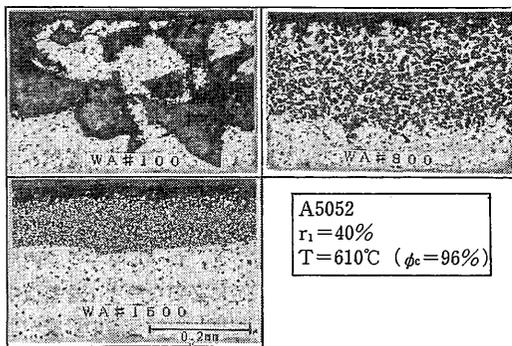


図16 直接圧入法により製造された粒子強化積層アルミニウム合金板材の表層（強化層）の内部構造

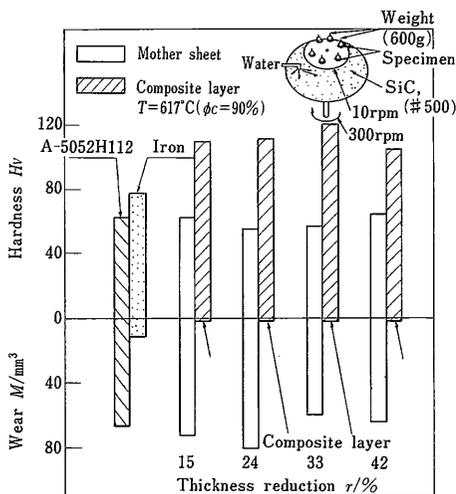


図17 直接圧入法により製造された粒子強化積層アルミニウム合金の強化層の硬さおよび摩耗量

量を、比較のために示してある。図より、基板と粒子強化された複合層とを比較すると、その硬さおよび摩耗量の差は顕著であり、とくに複合層の摩耗量は基板のそれに比べ極端に少ないことがわかる。なお、製造された粒子強化積層アルミニウム合金板材は表層部の高硬度、耐摩耗性と同時に、基板に依存する二次加工性を有している。

本節の最初に述べたように、強化粒子と金属マトリックス粉との混合粉を積層材とし、半溶融圧延加工により、粒子強化複合層を基板上に任意の厚さに積層させることが可能である。以下、この場合の、製造条件が製品の内部組織・接合特性に与える影響について述べる。

半溶融圧延加工により複合層を積層かつ圧着する場合、圧下率の増加にしたがい、複合層の金属マトリックスと基板との液相成分が相互に相手側に入り込んで強固な接合状態を構成しやすくなる。図18は、基板としてA1050およびA5052を用いた場合の、各条件因子（圧下率・圧延

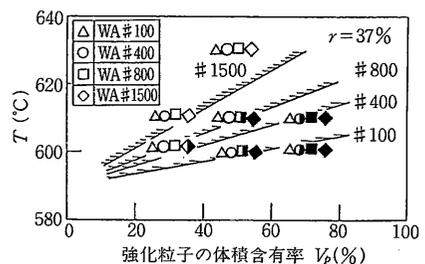
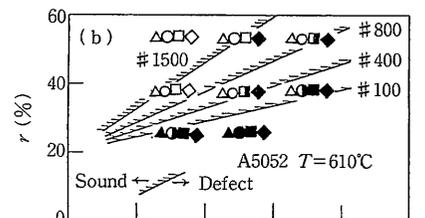
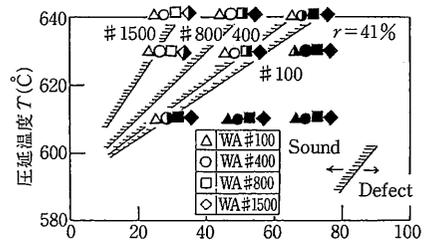
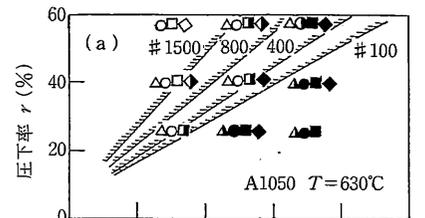


図18 半溶融圧延加工による粒子強化積層アルミニウムの製造に要する温度および圧下率

温度・強化粒子の体積含有率・粒度)が基板と複合層との接合, および複合層内部の強化粒子と金属マトリックスとの接合強度に与える影響について調べた結果を示す。図中各線の左側の条件の範囲で接合強度に秀れた粒子強化積層アルミ合金板材を得ることができる。これらの結果より, (1)みかけ圧下率が大きいほど, (2)圧延温度が高いほど, (3)強化粒子の含有率が低いほど, (4)強化粒子の粒度が粗いほど, (5)A1050基板を用いるよりもA5052基板を用いる方が, 接合強度の高い製品の得られる圧延条件範囲が広いことがわかる。ただし, 接合強度の判定は, 形削りバイトを用い, 切込み深さ0.2mmの条件下で切削したときの切屑の状態の観察により行い, 切削により金属マトリックスと強化粒子との分離が発生せず, 通常の切屑が得られた場合を良とし, △○□◇の記号で表し, 粉末状の切屑が得られた場合を否とし, ▲●■◆で表し, 両方の切屑が混在している場合を▲●■◇で表してある。なお, 一回の半溶融圧延では, 複合層と基板, あるいは複合層内部の強化粒子と金属マトリックスとの接合強度が十分得られない場合には, 適切な条件下で繰り返し半溶融圧延加工を施すことにより, 欠陥の少ない内部構造を有する粒子強化積層板材を得ることができる。更に, 繰り返し半溶融圧延により, 強化粒子の細粒化, 高含有率化も達成でき, しかも, 表面の平滑性をも改善することができる。

図19には, 半溶融圧延加工により製造された粒子強化積層鋼板と, それを冷間曲げ加工により管に成形した事例を示す。

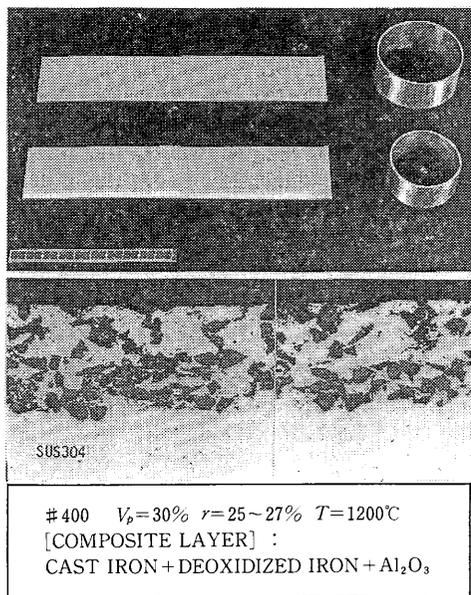


図19 半溶融圧延加工により製造された粒子強化積層鋼板と二次成形により製造された管の事例

5. 半溶融加工法による繊維強化金属 (FRM) の製造

半溶融鍛造加工および半溶融押し出し加工を利用した繊維強化金属 (FRM) の製造・加工プロセスの概要を図20に示す。この場合の繊維強化金属は, いわゆる短繊維強化型であり, 製造・加工プロセスは2段階より構成されている。

すなわち, (1)まず, 100~200程度のアスペクト比を有するセラミック短繊維を, 適当な粘度をもつ溶媒中に分散させ, これに金属マトリックス粉を混入し, 両者を均一に分散させ混合した後, この粘性スラリー混合体を, 特別に設計したノズルを用いた押し出し法あるいは押し出し延伸法により棒状に押し出しかつ延伸させつつ, 強化繊維を一方に整理させた複合素材を製造する。

(2)次に上記方法で得られた複合素材を加熱し, 溶媒を除去した後に, 半溶融温度域に加熱し, 液相成分を含む金属マトリックスの流動特性を利用することにより, 繊維の損傷を防ぎつつ, かつ一方に整理させた繊維の配向性を乱すことなく, 半溶融鍛造加工・半溶融押し出し加工・半溶融圧延加工などにより, 低加圧力・高加工率

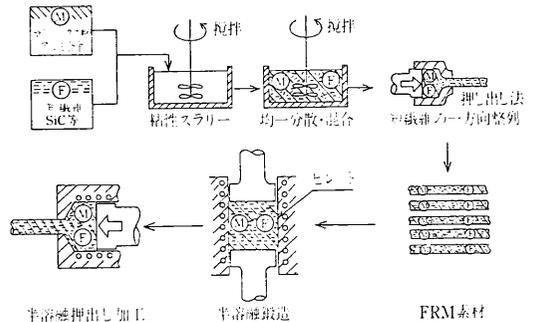


図20 半溶融加工法による短繊維強化金属 (FRM) の製造・加工プロセス概念図

2 3 4 5 6 7 8

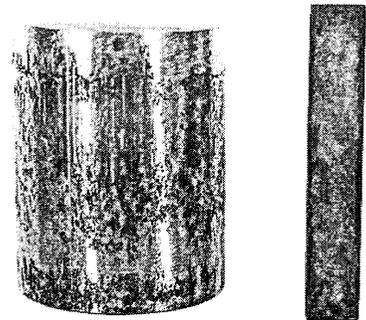


図21 半溶融鍛造加工により製造された短繊維整理強化アルミ合金の中間製品 (例)

で所要の製品を製造する。

図21は、本プロセスを適用して製造した短繊維強化アルミ合金の中間製品、すなわち押し出し用ピレットと板状製品の外観を示す。これらの製品の場合、強化繊維として、Sic短繊維($\phi 0.015 \times$ 約3mm)を用いているが、よく知られているように、Sic繊維は、引張り強度には秀れているものの、脆く、曲げ変形能に劣るため、加工中の流動に伴う曲げや繊維相互の接触などにより、繊維の破損が起りやすい。したがって繊維の損傷を防ぎつつ、かつ一方向に整列させ、図21に示すような製品を得ることは、実際問題としては容易ではない。しかしながら、この場合も金属マトリックスの半溶融状態における特性が、上述の目的達成のために有効に利用でき、他の加工法では得られない成果を得ることができる。図21に示す短繊維強化アルミ合金製品の場合も横断面の観察や、溶解法による内部繊維のチェックにより、製品内部における、強化繊維の損傷あるいは折損の防止と、一方向への整列が、ほぼ期待どおりに達成されていることが判明している。

図22は、図21に示した製品をピレットとし、半溶融状態から押し出した棒材($\phi 10\text{mm}$)の外観を示す。押し出し条件、すなわち、減面率、強化繊維の含有率、および金属マトリックスの固相分率、を適切に組み合わせることにより、表面性状の良好な製品を得ることができる。この棒材の構断面における繊維の分布は均一で、良好な分散状態となっており、かつ繊維が押し出し方向にほぼ完全に整列している。

6. ま と め

本稿では、半溶融加工法を、種々の粒子強化金属、粒子強化積層金属、短繊維強化金属等の製造および加工に応用する問題について、筆者らの研究成果を中心に示した。この種の金属基複合材料の製造に関しては、半溶融加工法ばかりでなく、コンポキャスト法、溶湯鍛造法、粉末冶金法、溶射法、など多くの技術開発が進め

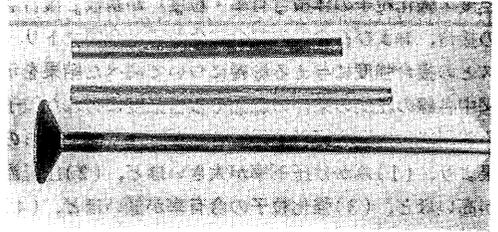


図22 半溶融押し出し加工により製造された短繊維整列強化アルミ合金の棒材

られており、それぞれ特徴ある製造法が提案されている。ところが、得られた金属基複合材料を二次加工し所要の製品を得るための加工技術については、従来、有効な方法がなく、それゆえに、通常、複合化すると同時に最終製品形状を得る試みがなされている。しかしながら、このことが技術的な障害となり、この種の複合材料の応用範囲を限定している場合も多い。

金属基複合材料の二次加工技術という面からみると、最も可能性に富んでいるのが半溶融加工法の応用であり、本稿でも示した通り、各種の半溶融加工法を単独あるいは組み合わせて適用することにより、棒・線・管・板材、あるいは機械部品その他の成形品など、所要の製品を比較的容易に製造することができる。半溶融加工法は、難加工材化した金属基複合材料の加工技術として、最も広範囲に適用が可能であり、今後の発展が期待できる。本稿がこれらの問題に関心を持つ研究者・技術者にとって多少なりと益するところがあれば幸いである。

(1990年5月2日受理)

参 考 文 献

- 1) 木内 学：生産研究，32-3 (1980)，63.
- 2) 木内 学：塑性と加工，22-247 (1981)，767.
- 3) 木内 学：総合鋳物，22-12 (1981)，8.
- 4) 木内 学：生産研究，34-6 (1982)，179.
- 5) 木内 学：日本機械学会誌，88-804 (1985)，1240.
- 6) 木内 学：鉄と鋼，71-1 (1985)，12.