

## 半溶融加工法による複合材料の製造と加工

Processings of Composite Materials by Mashy-State Metal Workings

木 内 学\*

Manabu KIUCHI

溶湯鍛造法・レオキャスト法・コンポキャスト法・半溶融攪拌法・半溶融鍛造法・半溶融接合法など、溶湯あるいは半溶融状態にある金属材料の特性を利用した加工プロセスと、それらを応用した複合材料の製造ならびに加工法の概要について紹介する

## 1. はじめに

半溶融加工法は、素材内部に固相成分と液相成分が定常的または非定常的に共存するいわゆる半溶融の状態にある素材に、荷重または圧力を加え、変形・流動・攪拌・混合・圧入・接合あるいは分離などの加工を加え、所要の形状・寸法・構造・特性を有する製品を得ようとするものであり、鋳造加工、溶接・溶断加工、熱間塑性加工など、現在広く行われている高温域における金属材料の加工法の境界領域に位置する新しい加工技術と考えることができる。この半溶融加工法は、加工法の形態として押し出し、鍛造・圧延など種々のものが考えられるばかりでなく、加工力の著しい低下とそれに伴う加工機械・設備の小型化、高加工率の達成とそれによる加工工程の削減、難加工材の加工への適用、種々の複合材料の製造ならびに加工法として利用、さらに溶湯からの一貫した連続加工プロセスへの適用など多くの可能性を含んでいる。

本報では、このうち半溶融加工法あるいは関連する加工法の応用による複合材料の製造ならびに加工、特に粒子分散強化型複合材料・積層型複合材料の製造・加工の問題について、筆者らがこれまでに得た研究成果をもとにその概要を述べる。

## 2. 溶湯鍛造法とその応用

溶湯鍛造法は、高圧鋳造法あるいはスクイズキャスト法(Squeeze Casting)とも呼ばれ、鋳型内の溶湯に機械的な圧力を加えて、溶湯状態から完全凝固に至るまで高圧力下で成形凝固させると同時に、部分的に固液共存域(半溶融状態)での塑性流動を伴う可能性を含む鋳造法である。この加工法は、収縮巣やマクロ・ミクロポロシティの加圧凝固による除去、含有ガスの悪影響の抑制、製品の均質化と高密度化、凝固組織の微細化などをねらって、ダイカスト法やアキュラッド法の欠点を除き、長所を伸ばす目的で開発され、特に、近年急速に生産量

が増大しつつある自動車用ホイールなど、アルミ合金を素材とする各種製品への適用が注目されている。実際生産への適用に際しては、(1) プランジャー加圧凝固法、(2) 直接押し込み法、(3) 間接押し込み法、などがある(図1参照)。(1)は溶湯の流動が少なく、高静水圧下で成形凝固させるもので、比較的単純な形状の厚肉製品に適用されている。(2)は雄型パンチ押し込みによって溶湯が移動し、その後加圧しながら凝固させる方式である。この場合、パンチの最終位置は溶湯量により左右されるので定量給湯が重要となる。(3)はアキュラッド法に似ているが大きな湯口を必要としないなどの構造上の違いがある。また堅型ダイカストと似ているが、溶湯が噴流あるいは極端な渦を発生しない等の相違がある。

溶湯鍛造法の特徴である加圧下の凝固による製品の機械的性質の改善に関しては多くの検討がなされているが、一方、この加圧凝固という特徴を複合材料の製造に応用する試みが種々行われている。一般に粒子分散強化型複合材料の製造に際して、マトリックス材の溶湯に強化粒子を混入・分散させ、均一な分散状態を維持したまま凝固させ複合化する方法は、マトリックス材と強化粒子の比重の差による分離が発生するために、ほとんど不可能に近い。そこで通常用いられる方法は、コンテナまたは加圧容器の中に、所定の寸法・形状に予成形した強化粒子(あるいは短繊維など)を挿入しておき、これにマトリックス材の溶湯を注入した後パンチを用いて溶湯に加圧し、溶湯を強化粒子(短繊維)の隙間に浸透させ、その状態で凝固させることにより複合化を実現する方法である(図2参照)。強化粒子や短繊維の微細な隙間に溶湯を浸透させるためには大きな加圧力が必要であり、隙間を流動する溶湯の圧力損失は浸透深さとともに急激に増大するので、実際には浸透可能深さに限界が存在するケースが多い。したがって溶湯鍛造法によるこの種の複合材料の製造は薄い板状の製品あるいは小寸法の製品を得るのに適しており、厚肉あるいはブロック状の製品の製造に適していない。

ところで、溶湯鍛造法は、鋳造加工と半溶融加工ならびに熱間塑性加工との複合プロセスへの発展の可能性を

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

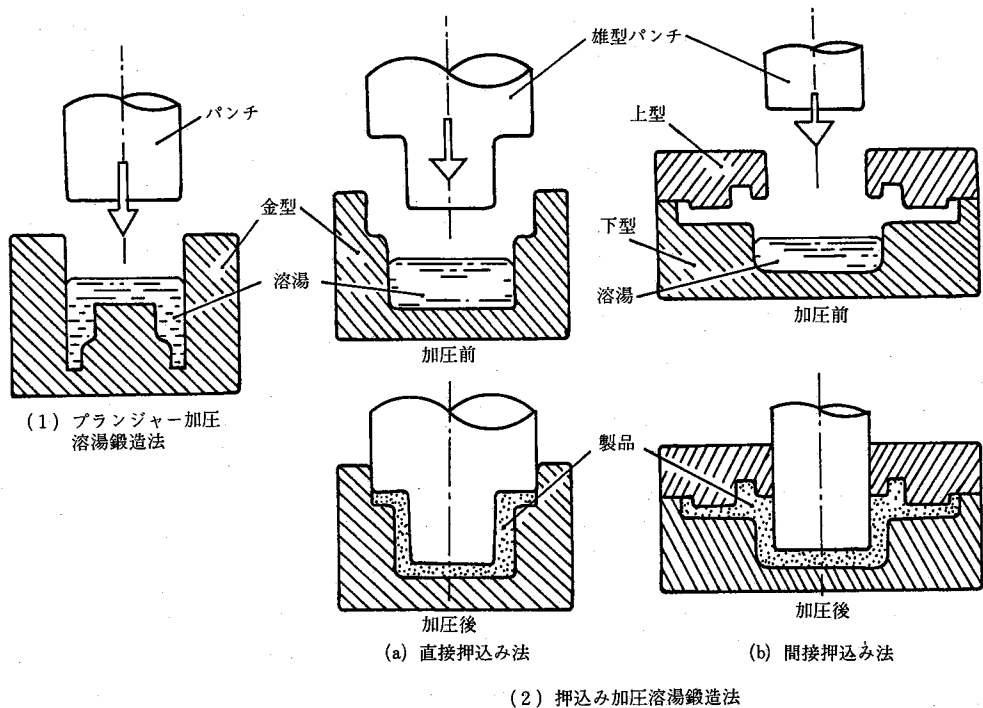


図1 溶湯鍛造法の加圧方式

有しており、このことが種々の複合材料の新しい製造法に結びついてくることが考えられる。例えば、独立に動き得る複数の可動部分から構成される多機能金型(Flexible Die)を導入することにより、溶湯鍛造法で成形・凝固させた予成形材が半溶融温度あるいは熱間加工温度域にあるうちに、同一型内で半溶湯鍛造または熱間鍛造等の塑性加工を加える方法などが考えられる(図3参照)。このような複合プロセスにより、部分的な加圧効果の高度化、あるいは最小の加工力による最適な鍛錬効果の達

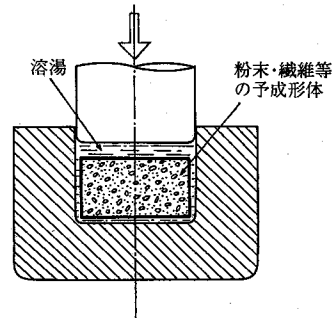


図2 溶湯鍛造法による複合材料の製造

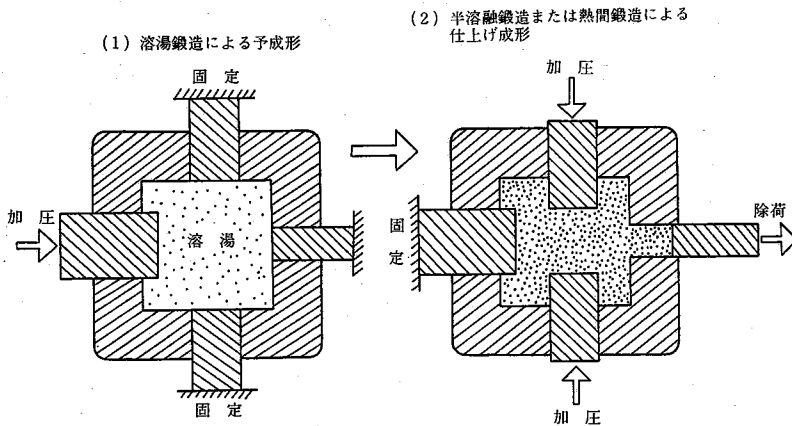


図3 溶湯鍛造・半溶融鍛造・熱間鍛造の複合化

成などが可能となる。また、目的に応じて型内における凝固の程度と塑性的な変形流動の組み合わせ、およびそのシーケンスを制御することにより、上述の複合材料を含む難加工材等のより高度の加工を実現し、従来にはない特性をもつ製品を得る新しい加工プロセスへと展開していくことが期待できる。

### 3. レオキャスト法とその応用

レオキャスト法(Rheocasting)法はMITのFlemings教授らによって開発された鋳造ならびに新材料の製造方法で、凝固途中の金属材料を機械的に強撈拌し、凝固組織であるいわゆるデンドライトを分断して得られる細かい球状晶を液相内に均一分散させ、固液混合の半溶融スラリーとし、これを鋳造・成形することにより、従前的な鋳造プロセスで得られない微細な内部組織を有する製品を製造しようとするものである。このスラリーの粘度や組成は、撈拌速度すなわちせん断速度、冷却速度および固相率に影響され、通常せん断速度を増加すると粘性が減少する。すなわち、このようなスラリーは、流動速度の増大に伴って粘性が低下する、いわゆるチクソトロピー(thixotropy)を有し、撈拌が容易に行われる。このようにして得られたレオキャスト・スラリーからアルミニウム合金、鋳鉄、ステンレス鋼など各種合金の金属学的・機械的的特性の優れた製品が製造できるとされている。

このレオキャスト・プロセス(図4参照)としては、(a)連続式レオキャストにより半溶融スラリーを製造し、(b)このスラリーをショット・チャンバーへ供給し、(c)ダイキャストにより金型へ半溶融スラリーを充填させ、(d)凝固を完了させ製品を得る方法が提案され、このように半溶融スラリーを素材として利用する経済的なダイキャストマシンの開発についても、広範囲な研究が行われている。このレオキャストプロセスの潜在的・実証的な利点としては、(1)溶湯に比較して半溶融スラリーの温度は低く抑えることができるため、ダイスおよびショットチャンバーの寿命の延長を図ることができ、これにより従来経済的に困難であった高融点金属の金型鋳造が可能となる。(2)撈拌により均一かつ細かな内部組織を得ることができるため、健全かつ信頼できる鋳物の製造ができる。(3)ダイキャスト・マシンへの材料を正確かつ自動的に供給できる、などの特性を有している。

レオキャスト法を拡張・発展させた応用的なプロセスとして、チクソキャスト法(Thixocasting process)、コンポキャスト法(Compocasting process)、などがある。

チクソキャスト法(図5参照)は、(a)レオキャスト法の連続法で製造された半溶融スラリー

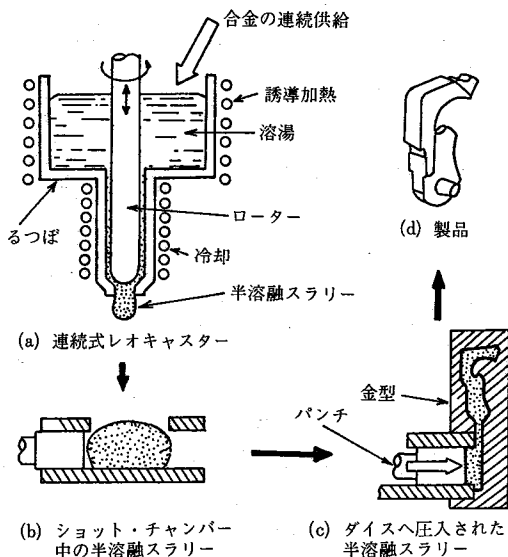


図4 レオキャスト法の概略図

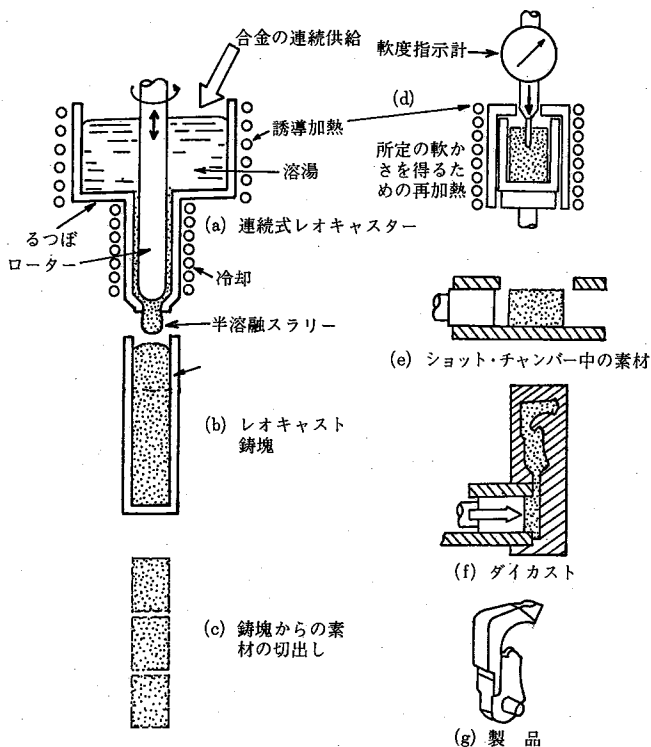


図5 チクソキャスト法の概略図

を、(b) いったん完全凝固させ、(c) これから必要量を切り出した後、(d) 半溶融状態まで再加熱して、(e)、(f)、(g) ダイキャストマシンで鋳造する方法である。この方法でステンレス鋼などのダイキャスト品の製造に成功したとの報告もある。

コンポキャスト法(図6参照)は、半溶融スラ

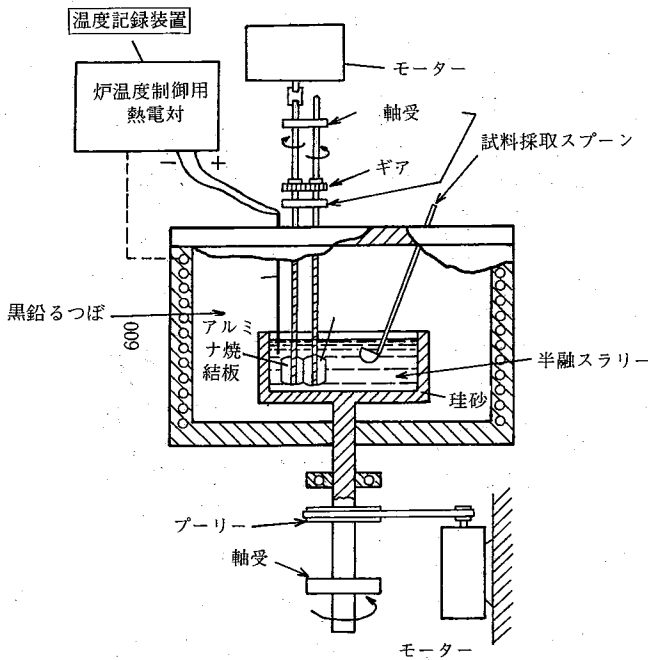


図6 コンポキャスト法の概要

リーに種々の異種の材料，すなわち短繊維や粒子状の強化材などを添加して複合材料を製造する方法である。この方法によれば，これまで金属の融液中に全く添加できない濡れ特性の悪い材料，あるいは少量しか添加できない材料でも，半熔融スラリーを攪拌しつつ添加することにより，多量に添加することが可能となる。例えば，固相および液相が共存し得る温度範囲において，半熔融スラリーを攪拌しつつ濡れ性の悪いセラミック粒子を添加すると，半熔融スラリー中に存在する初晶粒子によるセラミック粒子の機械的な捕足が起り，添加粒子の浮上，沈降および凝集を防止するとともに，添加後の混合時間の増加に伴い添加粒子と液相との反応が結合を促進させ，濡れ性の悪い粒子を含む複合材料の溶製が可能となる。また，この方法は固液共存範囲の広い合金の選択，厳密な温度制御，機械的強攪拌を行うための装置など，必要とされる条件は多いが，ほとんどあらゆる粒子の添加・分散に適用可能となり，種々の複合材が製造できるなど，工業的応用の面における多様性を有する優れた方法といえる。

さらに，レオキャスト法を応用したプロセスとして，このほかに合金の精製方法としてのレオリファイニング法(Rheorefining process)，チクソキャスト法と同様にして鍛造加工を行うチクソフォーミング法(Thixoforging process)なども試みられ，レオキャスト法の応用面での多様性を示している。

以上のように，レオキャストならびにそれより発展した各種のプロセスは，基本的に鍛造加工と半熔融

加工ならびに熱間塑性加工との複合化を指向しており，今後さらに拡張・発展の可能性を有している。特に，コンポキャスト法あるいはチクソフォーミング法などは，各種の複合加工プロセスへと発展することが予想され今後の動向が注目される。

#### 4. 半熔融加工法の応用

半熔融加工法の応用としては種々の形態が考えられるが，最も可能性が高いのは，押し出し加工，密閉鍛造，圧延加工などである。筆者らは数年来，半熔融押し出し加工法の開発を進めてきたが，既に多くの成果を得ており，難加工材とされている A-7075, A-5056 その他のアルミ合金についても，線材・棒材・小径薄肉の管材等の製造にこの加工法が容易に適用できることを示した。その結果，同一の加工率を達成するのに，従前的な熱間押し出し加工と比較して，数分の一の加工力で押し出しが可能であること，製品の品質は熱間押し出し加工によるものに十分匹敵し得ること，あるいはまた，この種の材料の押し出し加工において最も問題となり易い表面割れの発生防止については，むしろ好ましい加工条件が得られることなどを明らかにした。さらに，一連の研究において，半熔融押し出し加工に関する以下の特性なども明らかにした。

(1) 加工プロセスの簡便さ，加工効率，製品品質等，種々の見地からみて，半熔融押し出し加工法は実際加工への適用が十分可能であり，特に薄肉製品・細物製品への適用，あるいは高力アルミ等の難加工材への適用，などの面でその特性を活かし易い。(2) ピレットの固相成分  $\phi$  (固相成分の重量比) が低下するとともに，製品の引張り強さは低下する。その度合は固相分率  $\phi=100\%$  の場合に比して  $\phi=0\%$  近傍で約  $1/3$  程度となる。ただし，押し出し後の製品に若干の冷間加工を加えると，この引張り強さの低下は容易に回復する。(3) 製品の伸び率は，ピレットの固相分率およびダイカストの温度条件によつて影響を受けるが，全体的に伸び率は鍛造材に比較して優れており，熱間加工材に近い値を示す。(4) ダイスの温度管理が十分行われるならば，ピレットの固相分率  $\phi=0\%$  の近傍からの押し出しが可能であり，このことは，将来，溶湯からの直接押し出し加工法の開発の可能性があることを示している。これらの結果，今後の技術的可能性としては，溶湯からの連続直接押し出し加工法の開発が考えられ，筆者らによるものを含めて既にいくつかの方式が検討されている。ただし，以下においては筆者らの研究結果をもとに，半熔融加工法の複合材料の製造および加工への応用に関連する問題を中心に紹介する。

上述の半熔融押し出し加工は，半熔融状態での素材の特性を，主として，押し出し加圧力の低減，高加工率の達成の面から利用しようとするものであるが，半熔融状態での素材の特性としては，このほかにも，接合性，分離性，

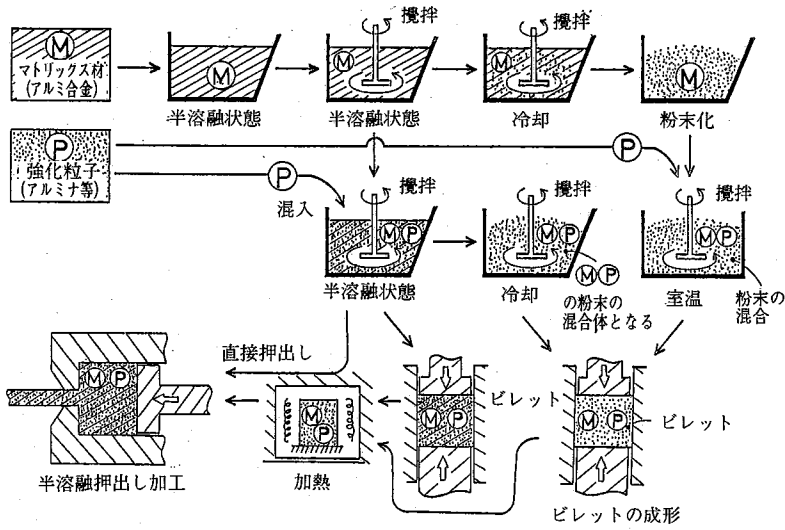


図7 粒子分散強化複合材料の半溶融製造ならびに加工プロセスの概要

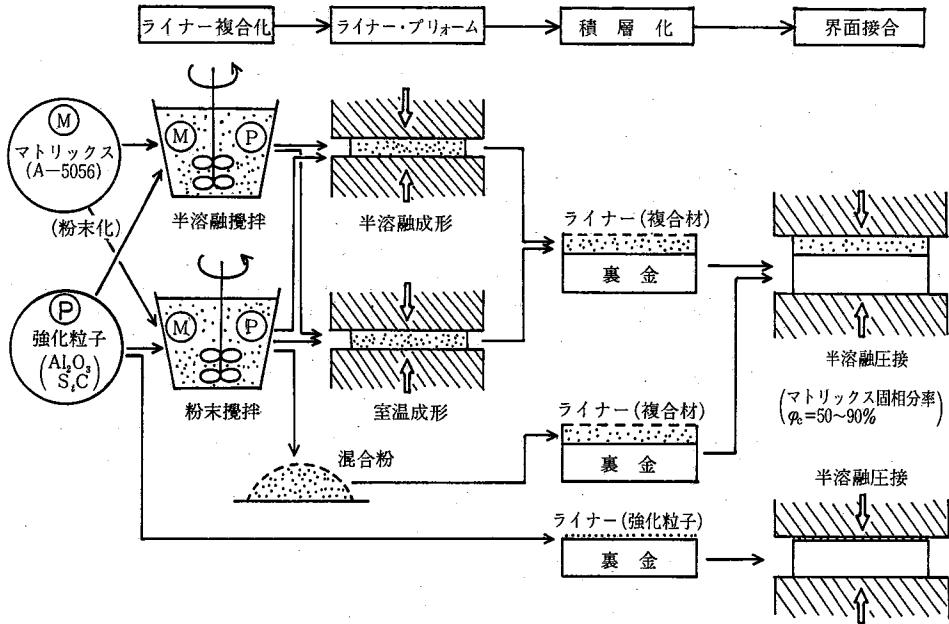


図8 粒子分散強化積層複合材料の半溶融製造・加工プロセス概要

攪拌性、混合性などがあり、それらを利用した新しい加工プロセスの開発が考えられる。筆者らは、既に、これらの特性のうち、接合性を利用してクラッド材の製造ならびに押し出し加工法の開発を行い、界面の接合性の良好な積層型複合材料を得ることに成功している。

さらに、攪拌混合性・接合性を利用した粒子強化複合材料の製造および加工プロセスの開発も進めている(図7参照)。このプロセスの概要と特徴は次のとおりである。(1) 半溶融状態に加熱され、粒界の結合や拘束が解放されたマトリックス材(例えばアルミ合金)を機械的

に攪拌し、この中に強化粒子(例えばアルミナ)を混入する。既述のコンポキャストの場合と同様、半溶融状態で攪拌されたマトリックス材には、強化粒子がその濡れ性に関係なく容易に混入する。すなわち混入された強化粒子は半溶融マトリックス中の固相成分により機械的に捕捉され、浮上、沈降、凝集等が防止される。(2) また、この混入の過程で攪拌しつつ適当な冷却速度でマトリックスならびに混入した粒子全体の温度を低下させることにより、マトリックス材と強化粒子の混合粉末を製造することも可能である。(3) 上記の方法で複合化さ

れた材料を、マトリックス材が半溶融状態にある温度域で、押出し加工・鍛造加工などにより所要の管・棒・線材・その他の製品に加工する。通常、このような複合材料では、強化粒子の割合を増すとともに急速に硬化かつ脆化し、その加工は非常に困難となるが、半溶融加工法を適用するとマトリックス材が半溶融状態になり、その液相成分の変形・流動を容易化する効果により複合材の変形抵抗は著しく低下し、またその変形能が増し、加工が容易に行われる。(4) 半溶融状態に加熱したマトリックス材を、機械的に攪拌しつつ冷却することにより、粉末化できることが見出され、この方法により得られたマトリックス材の粉末と強化粒子を混合し、いわゆる粉末冶金の手法により複合材を製造し、これを半溶融加工することも可能である。

さらに筆者らは、このようにして得られた粒子分散強化(あるいは短繊維強化)複合材料と、通常の合金材料とを半溶融接合する粒子分散強化積層複合材料の製造、ならびにそれらの二次加工プロセスの開発、あるいはまた、通常の合金材料の表層部を強化粒子により直接強化する半溶融直接接合プロセスの開発などを進めている(図8参照)。前者は上述の方法により製造した粒子分散強化複合材料のライナーと、マトリックス材その他の材料の裏金との半溶融接合を図る方法であり、具体的にはプレスによる半溶融圧接、あるいは半溶融圧延による連続的な製造プロセスを採用することも可能である。後者は半溶融状態にあるマトリックス材の表層部に強化粒子を圧入することにより、表層部のみを複合化する方法である。いずれの場合にも、半溶融状態における材料の特性を利用して特殊機能を有する複合材料を効率よく製造し、それらを容易に二次加工して種々の製品を得ることに成功している。これらのプロセスは現在なお開発を進めつつあり、その多様な可能性が期待されている。

## 5. おわりに

本稿においては、半溶融加工法ならびにその関連技術

である溶湯鍛造法・レオキャスト法等の概要と、それらを利用した粒子(短繊維)分散強化型あるいはそれらの積層型複合材料の製造ならびに加工の可能性等について述べた。金属材料と各種繊維・セラミック等との複合化による新しい材料の開発は、金属材料単独では得られない諸特性を有する工業用材料を提供できる可能性があるため、これまでに多くの試みがなされているが、その場合に最も問題となるのはやはり製造・加工方法であり、所要の複合化を安定的に実現する製造方法、得られた複合素形材を板・棒・管材等に加工し、さらにそれらを二次加工して最終製品を得るための方法を開発することが重要な課題となる。

このような見地から考えると、半溶融加工法は、従来の加工法にないその特徴により、この分野において多くの技術的可能性を示しており、今後大きく発展していくことが予想される。しかしながら、この種の問題は一般論としての可能性とは別に、個々の技術として具体化していくことは困難であるのが常であり、それを克服していくために検討すべき問題は多い。今後、各方面からの研究あるいは協力が望まれる。

(1982年3月18日受理)

## 参考文献

- 1) 千々岩健児: 機誌, 80-704 (1977), 593
- 2) 鈴木鎮夫, 中田栄一: 機械学会第477回講習会テキスト, (1978) 57
- 3) Fleming, M. C. et al.: Japan-U. C. Joint Seminar on Solidification of Metals and Alloys, (1977) 1
- 4) 中田栄一: 鋳物, 52-5 (1980) 292
- 5) 木内 学: アルトピア, 10-1 (1980) 63
- 6) 木内 学: 生産研究, 32-3 (1980) 63
- 7) 木内 学: 塑性と加工, 22-247 (1981) 767
- 8) 木内 学: 総合鋳物, 22-12 (1981) 8