

# 半溶融・半凝固加工技術の現状と将来

Recent Trend and Future of Mashy-State / Semi-Solid Metal Processing Technology

木 内 学\*  
Manabu KIUCHI

金属材料を固相成分および液相成分が共存する半溶融状態あるいは半凝固状態とし、これに圧延・鍛造・押出し・射出成形等の各種加工を施し、従来の加工プロセスでは得られない新しい機能を有する金属製品を得ようとする研究が盛んに行われている。本稿では、金属加工技術の新たな可能性を開拓するものとして注目されているこれらの半溶融加工技術・半凝固加工技術の研究開発の現状を紹介する。

## 1. 諸 言

金属材料の内部構造は、溶融あるいは凝固に伴って大きく変化するが、固相から液相または液相から固相へと転移する際のその金属学的・機械的特性の変化を、温度場・応力場・雰囲気、さらに加熱・冷却速度、変形・流動速度、加える力の種類と方向などの制御を通して合目的に誘起しつつ各種の成形加工を行い、板・棒・線・管材あるいは各種の機械部品・機能部品などの製造を目指す半溶融加工・半凝固加工技術に関する開発研究が、近年世界各国でさまざまな角度から推進されつつあり、その将来性・可能性が多くに関心を集めている。

金属材料の半溶融加工技術・半凝固加工技術および関連技術を大別すると、以下の3種類の基幹技術に分類できる。すなわち、

- (1) 半溶融金属・半凝固金属の製造技術
- (2) 半溶融金属・半凝固金属の保持・移送技術
- (3) 半溶融金属・半凝固金属の成形加工技術

である。以下、上記各技術に関する研究・開発の動向と将来性などについて述べる。

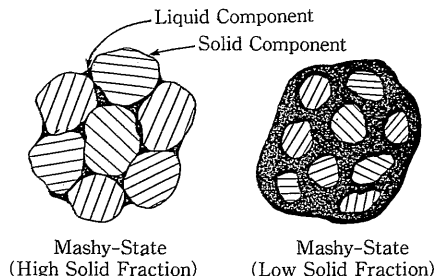


図1 半溶融金属の内部構造概念図

## 2. 半溶融金属・半凝固金属の特性

半溶融金属とは、金属（合金）材料が均一に加熱され、その内部特に結晶粒界が部分的に溶融しているものの、未溶融の結晶粒も固相成分として残存している状態にある金属をいう（図1参照）。加熱の程度により、液相成分が結晶粒界の限られた一部に存在する場合（高固相率状態）もあれば、液相成分中に固相粒子が浮遊しているかのごとき場合（低固相率状態）もある。

他方、半凝固金属とは、溶湯をかくはんしつつ冷却し、発生した初晶デンドライトを破砕して溶湯中に分散させ、溶湯と固相粒子との混合状態を創出したものをいう（図2参照）。冷却およびかくはんの程度により、固相粒子の占める重量比すなわち固相率および固相粒子の大きさが異なる。

半溶融金属と半凝固金属との間には、内部構造の基本的な相違は無いものと考えられる。それらの相違を強いて挙げれば、以下ようになる。（1）半溶融金属の固相

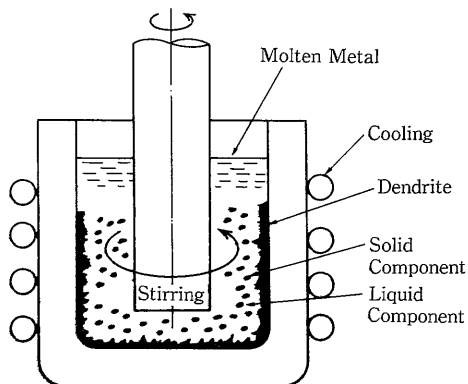


図2 半凝固金属の製造法概念図

\*東京大学生産技術研究所 第2部

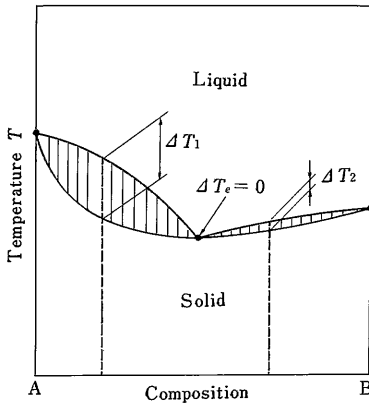


図3 合金の半熔融温度域説明図

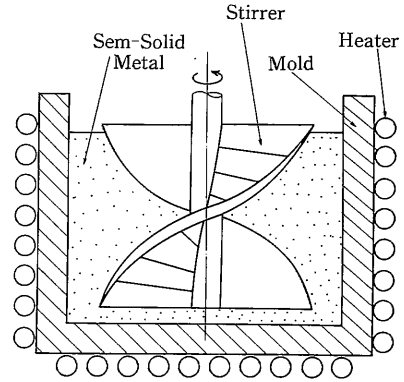


図4 半凝固金属のかくはん保持概念図

粒子は、母材の結晶粒の未熔融部分より成るので、その大きさらびに形状は、母材の結晶粒の形状・粒度に依存するが、半凝固金属のそれは、冷却速度とかくはん方法・かくはん速度に大きく左右される。(2)一般に、両金属とも平衡状態を保つのは必ずしも容易ではないが、半熔融金属では高固相率状態を維持しやすく、半凝固金属では低固相率状態を維持しやすい。(3)固相線温度と液相線温度との差が大きい合金については、均一な半熔融状態をつくり出し維持することが容易であるが、上記温度差が小さい合金および純金属の半熔融状態をつくり出しそれを維持することは難しい(図3参照)。(4)半凝固金属の製造と保持には機械的かくはんを必要とするが(図4参照)、かくはんを加えることにより、金属または合金の種類によらず半凝固状態をつくり出すことができる。(5)粉末の混合体を母材とすることにより、金属学的には存在しえない金属元素の組み合わせを有する半熔融状態をつくりうる。いずれにせよ、(6)低固相率の半熔融金属と半凝固金属の間にはほとんど差がない。

ところで、半熔融金属・半凝固金属の金属学的・機械的特性の主たるものは、概略以下のとおりである。

(1)固相成分・液相成分が共存しており、両者の界面においては、溶融・凝固が繰り返し起こり、活発な拡

散現象が起こっている(図5参照)。ゆえに、溶質元素の局所的な濃度分布は絶えず変化している。

- (2)かくはんや成形加工に際しては、固相成分・液相成分の接触条件・接触形態が絶えず変化し、液相成分の粘性および流動特性、固相成分の変形抵抗および変形挙動は、界面における溶融・凝固・拡散などの影響を受ける。
- (3)結晶粒子間あるいは固相粒子間に液相成分が介在するため、固相粒子間の結合力はほとんど無く、したがって巨視的な変形・流動に対する抵抗が著しく低い(図6参照)。
- (4)半熔融金属・半凝固金属共に、固相率の低下に伴って、スラリー状あるいは粘性流体状の挙動を示し、わずかの外力の作用下で容易に変形し流動する。
- (5)半熔融金属・半凝固金属共に、固相率がある限界値(概略75%)以下となると、かくはんを加えることが可能となり、同時に異種材の粉末・繊維等を混入することが容易となる(図7参照)。適切な固相率の範囲では、金属はスラリー状あるいは粘性流体状となり、混入された異種材を内部に保持する能力が高い。

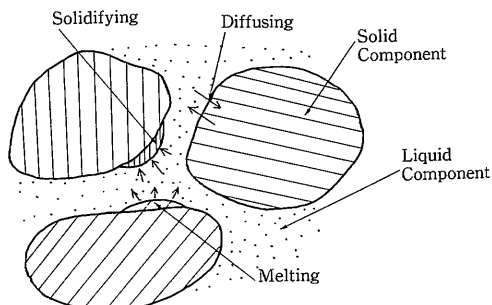


図5 固相成分・液相成分間の凝固・溶解・拡散

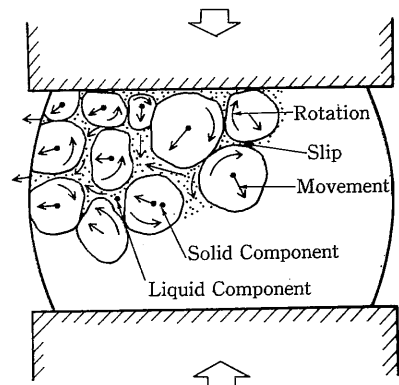


図6 半熔融金属の変形のメカニズム

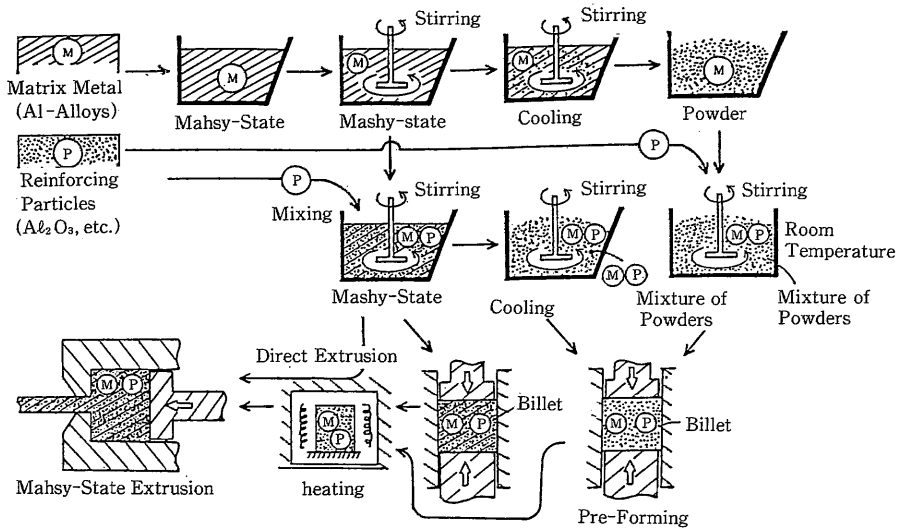


図7 半溶融金属のかくはん混合性を利用した粒子強化複合材料の製造プロセス

- (6) 両金属は液相成分を内部に保持しているため、全体を容易に分離できると同時に、接合して一体化することも容易である。特に液相成分は活性化しており、半溶融金属・半凝固金属間での接合はもちろん、相手が一般の固相金属材料であっても、良好な接合を容易に達成しやすい(図8参照)。
- (7) 上記(4)に関連して、セラミック粒子・繊維などを含有する難加工性材料であっても、半溶融化するにより、低加工力により容易に成形加工を加えることが可能となる。
- (8) 半溶融金属・半凝固金属共に、外力を付加すると、

液相成分と固相成分とが別々に流動する場合がある。外力の付加方法やその際の拘束(境界)条件にもよるが、液相成分が先行して流動する現象が起こる可能性がある。(図9参照)。

- (9) 上記の現象は、固相率が十分高いかまたは十分低い場合には起こりにくく、中間の固相率範囲で顕著になる。

3. 半溶融金属の製造技術

半溶融金属を製造する方法は、大別すると、(1)均一加熱法と(2)加熱かくはん法、とに分けられる(図10参

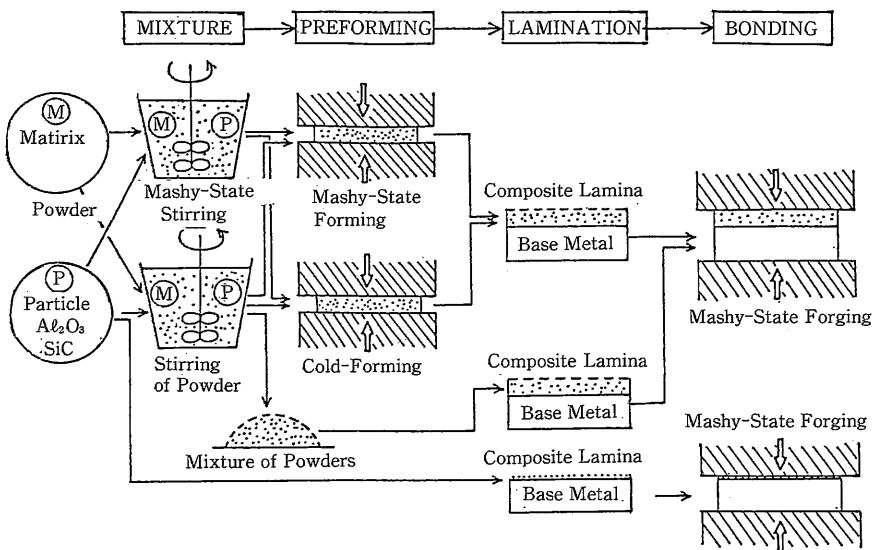


図8 半溶融金属の接合性を利用した積層型複合材料の製造プロセス

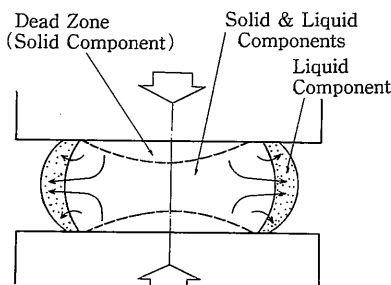


図9 変形に伴う液相成分の流動と自由表面からの流出

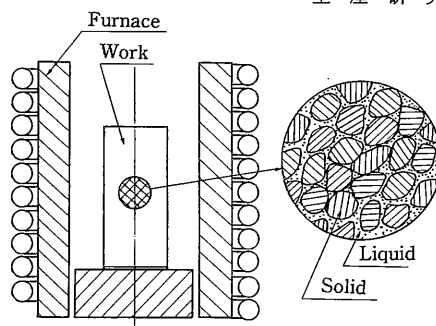


図10 半溶融金属の製造方法(均一加熱法)

照)。

均一加熱法は、母材を出来る限り均一に加熱して、その内部に平衡な半溶融状態をつくり出そうとするものであるが、金属学的特性からの制約もあるため、この方法を適用できる材質は限られている。また、母材の均一な加熱状態あるいは均一な温度分布を実現するために、加熱炉の形状・寸法、加熱方法と昇温制御方式、母材の挿入ならびに保持方法などについて十分検討し、適切な加熱条件を選択しなくてはならない。

加熱かくはん法は、母材を加熱してかくはん可能な半溶融状態を得た後、若干の機械的かくはんを付加し、巨視的にみた平衡状態を実現しやすくしようとする方法である。この場合のかくはんは、半凝固金属の製造に要するかくはんとは異なり、加熱温度の不均一分布に起因する母材内部の固相率の不均一性を除去することを目的としており、比較的低速のかくはんで十分である。また、かくはんの導入により安定した半溶融状態をつくり出すことができるので、加熱および温度制御のみに依存する場合に比較して、広範囲の材質に容易に適用できる。ただし、言うまでもなく、高固相率でかくはんが困難な半溶融状態が求められる場合には適用できない。

半溶融金属の製造技術に関する研究は、次節で述べる半凝固金属の製造技術に比して、いまだ十分なされておらず、まとまった報告もない。必要十分な量の半溶融金属を安定的に供給するためには、既述のように、加熱炉の形状、加熱方式、雰囲気制御、温度制御、母材の挿入・保持・取り出し方法、かくはん方法、工具材料など検討を要する課題が多く残されている。

#### 4. 半凝固金属の製造技術

溶湯から半凝固金属を連続的に製造する技術は、いわゆるレオキャスト法(図11参照)をはじめ、多くの方法について研究がなされてきたが、溶湯をかくはんしつつ冷却し、初晶デンドライトを破碎して溶湯中に分散させるという基本的な考え方は同一であり、大別すると、

- (1) 〈機械的かくはん法+急速冷却法〉
- (2) 〈電磁かくはん法+急速冷却法〉

(3) 〈機械振動法または超音波振動法+急速冷却法〉

(4) 〈上記方法を組み合わせた複合法〉

などがあり、基礎・応用の両面から検討されている。

これまでその多くは小型試験装置による実験室規模の試作研究に留まってきたが、近年、〈機械的かくはん法+急速冷却法〉による実用規模の製造装置も開発され、実用化へ向けての新たな展開が始まっている。〈機械的かくはん法+急速冷却法〉は、モールド内にかくはん子(スターラ)を設置し、モールドを冷却しかくはん子を高速で回転させつつ上部から溶湯を注入し、モールド壁面から成長する凝固層(デンドライト)をかくはん子で破碎し溶湯中に分散させ、溶湯と初晶粒子との混合スラリーを下部より排出する、のがプロセスの基本的な構成である(図12参照)。この方法は、後に続く金型鑄造・ダイキャストあるいは金型鍛造において、凝固完了後の製品の内部組織の微細化・均一化を実現し、その機械的特性の改善を図ると同時に、溶湯と比較して過冷却状態にある半凝固金属を用いることにより、鑄型あるいは金型に加わる熱負荷を低減し、それらの寿命向上を達成する、ことを目的としている。すでに、各種の金属(合金)について、冷却速度やかくはん速度が最終結晶粒度に与える影響や、固相率とみかけの粘度との関係などに関するさまざまな角度からの広範な研究が進められており、結晶粒の微細化についても、半凝固化した後完全凝固させた状態で、

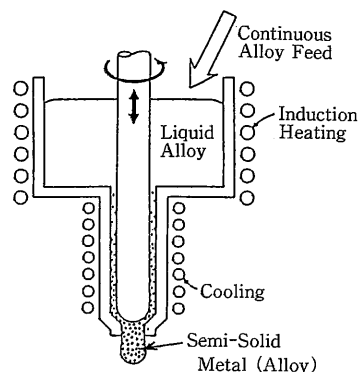


図11 レオキャスト法概念図

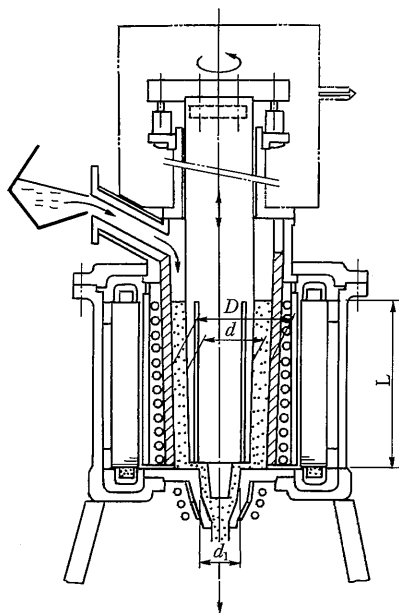


図12 半凝固金属の連続製造装置概念図

平均粒径 $30\sim 40\mu\text{m}$ 程度の製品が得られている。

溶湯中の初晶粒径は、主として冷却速度とかくはんにより加わるせん断速度により定まる。特に冷却速度に大きく依存し、冷却速度が高いほど微細化が可能であるが、モールドの機械的強度とのかねあいもあり、冷却速度を上げるのは必ずしも容易ではない。このため、最終凝固時の平均粒径を $10\mu\text{m}$ 程度まで細粒化することはかなり困難であると考えられる。他方、平均粒径 $10\mu\text{m}$ 程度に細粒化できれば、最終製品の機械的特性を大幅に改善できることが予想されるため、現在この目標に向かって、かくはん・冷却技術に関連する各種要素技術の開発努力が進められている。

主たる研究課題を列挙すると以下ようになる。

- (1) 半凝固金属のみかけの粘性および流動変形抵抗の定量的評価技術の開発：液相金属は一般にニュートン流体とみなせるが、固液共存状態にある半凝固金属は非ニュートン流体の挙動を示す。しかしながらその基本的特性を示すせん断応力( $\tau$ )とせん断速度( $du/dx$ )との関係については、現状では定量的かつ一般性のある形で十分には解明されていない。
- (2) 固相率の計測・評価技術の開発：半凝固金属に求められる適切な固相率は、後工程で行われる各種の成形加工によって大きく異なる。比較的低固相率が望ましいと考えられるストリップキャストイングや、比較的高固相率が望まれる型鍛造などにも適宜対応するためには、広い範囲に渡る固相率の制御技術が必要となる。適切な固相率を得るためには、固相率の測定技術が必要不可欠となるが、現状では有効な

インライン測定方法が見いだされていない。

- (3) かくはん条件が結晶組織に与える影響の評価技術の開発：かくはん速度すなわち半凝固金属に加えるせん断速度が最終状態における結晶組織や粒度に与える影響についても不明な点が多い。かくはん速度が最終製品内部の細粒化に有効であることは判明しているが、その定量的な影響の度合、冷却速度とかくはん速度との組み合わせが結晶粒の方位、析出物の分散状態、内部欠陥の発生の有無、等に与える微視的・巨視的影響など、今後検討すべき課題は多い。
- (4) 結晶粒子の合体・成長のメカニズムの解明とその定量的評価技術の開発：かくはん中およびかくはんを停止した後、結晶粒子が合体あるいは成長する挙動の解明は、固相率を制御するうえで極めて重要であるが、この問題に関する情報は極めて少ない。かくはん速度が遅い場合には、かくはん中にも初晶粒子の合体が生じ、比較的大きな塊状の粒子が形成されることが明らかになっているが、高速かくはん時の初晶粒子の成長・合体あるいは再溶解の挙動は依然として不明である。かくはん停止後の結晶粒径の増大は、保持時間の $n$ 乗に比例する、との報告もあるが、詳細は必ずしも明らかではない。いずれにしても、初晶粒子の合体・成長は、最終製品の結晶粒度を直接左右するので、今後、これらの挙動の解明と定量的な評価技術の開発が望まれる。

一方、〈電磁かくはん法+急速冷却法〉および〈機械的振動法または超音波振動法+急速冷却法〉については、いまだ具体的な成果を論議できる段階に至っていない。電磁かくはん法そのものは、鉄鋼の連続製造の分野において、(1)組織の等軸晶化、(2)中心偏析の低減、(3)モールド内の不均一凝固殻成長の防止、(4)モールドからの抜熱量の向上、(5)最終凝固域でのV偏析防止、などを促進する手段として広く活用されているが、機械的かくはん法に比較してかくはん速度が著しく遅く、従来用いられている電磁かくはん法そのものは、多くの場合、半凝固金属の製造には不十分であると考えられる。また、機械的振動法も、ある程度までの初晶粒子の微細化・等軸晶化を促進する効果は期待できるが、既述のような意味での微細粒化の達成は期待できない。超音波振動法については、その初晶粒子の微細化に対する効果はほとんど明らかになっていないが、半凝固金属の流動性を高める効果はあり、その保持・移送技術の開発に関連して、利用される可能性は大きい。

## 5. 半溶融金属の成形加工技術

半溶融金属の成形加工法としては、すでに、(1)半溶融圧延法、(2)半溶融鍛造法、(3)半溶融押し法、(4)半溶融ダイキャスト法、などの開発と応用が試みられて

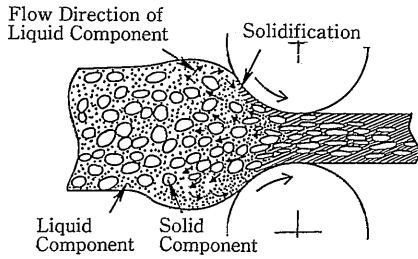


図13 半溶融圧延法概念図

いる。以下にそれらの加工法の概要と特徴を示す。

5.1 半溶融圧延法

これまで試みられている半溶融圧延加工は、板材を対象としたものであり、圧延機の入口側に設置された加熱炉により金属素板を均一に加熱し、半溶融状態とした後、ロール間へ送り込み圧延する方法が採られているが、素板の固相率の高低により、ロールバイト内での素板の変形・流動の挙動は大きく異なる。

素板の固相率が高い場合(たとえば90%以上)、その変形は熱間圧延の場合とほぼ同様であり、素板内の固相成分と液相成分は一体となって圧下され、均一に圧延された製品が得られる。

素板の固相率が約70%以下になると、ロールギャップにおける素板内の液相成分と固相成分の流動・変形は、それぞれ単独に起こるようになる。ロールから加わる圧力によって素板中に誘起される静水圧の分布の影響により、ロールギャップの内の液相成分は固相成分の間隙をぬって流動を始め、圧力が解放されている方向、すなわち、ロールギャップ入口側かつ素板の表面に向かって流出してくる。流出してきた液相成分は、通常、ロールによって冷却され凝固しつつ再びロールギャップに引き込まれ圧延されて製品となる。この間、固相成分は、互いに拘束し合いながら圧延され、長手方向に展伸して製品となる。固相率が著しく低い場合、固相成分は液相成分

中に浮遊しているかのごとき状態となり、圧延によって全く変形を受けなくなり、元のままの形でロール間を通過し、液相成分の凝固相中に分散した状態で製品となる。このような圧延時の液相成分と固相成分の挙動の概要を図13に示す。

したがって、半溶融圧延後の製品(板材)の内部組織は、高固相率下での圧延の場合を除き、板厚方向に不均一性を有するのが普通であり、中心部は圧延前の固相成分が主体となって構成され、表層部は圧延前の液相成分が主体となって構成される場合が多い、また、固相成分がロールにより展伸される程度は、板厚中央部から表層部へ向かって次第に大きくなり、液相成分が凝固して構成される内部組織の割合の大小のみならず、固相成分から成る内部組織についても、板厚方向の不均一性が発生しやすい(図14参照)。このような液相成分・固相成分の流動・変形特性に起因する製品の不均一性は、望ましい場合と望ましくない場合とがある。そのために、半溶融圧延法の最も重要な技術的課題は、液相成分の流動を任意に制御し、目的とする製品の内部組織を作り込みうる技術を開発することにある。

5.2 半溶融鍛造法

半溶融鍛造法の開発はまだまだ始まったばかりであり、多くは知られていないが、その基本的なプロセスは、ピレットを所要の半溶融状態(温度)に加熱し、これを金型内へ挿入し、圧縮成形、主として密閉形型鍛造を施し、製品を得ようとするものである(図15参照)。

通常、鍛造加工の初期には、ピレットの一部が金型に接触し拘束されているにすぎず、その表面の多くは自由表面である。したがって、外力の付加に伴い、半溶融圧延の場合と同様、ピレット内部における液相成分単独の流動と表面からの一部の流出が起こりやすい。流出した液相成分はピレットの表面に集積し、ピレットと共に変形・流動して金型内に充填し、冷却され凝固して製品となる。ゆえに、半溶融鍛造製品の内部組織にも不均一性が発生しやすく、通常、表層部には液相成分より構成される組織が多くなる。

このような内部組織の不均一性は、製品に要求される特性からみて好ましくない場合もあるが、逆に、液相成分の流動特性を利用して、製品に内部から表層へ向かって傾斜分布する機械的特性を付与することも可能である。たとえば、球状化黒鉛鋳鉄のピレットを半溶融鍛造することにより、中心部には靱性の高い母材を残存させ、表層部には硬度の高い白鋳鉄を発生させ、耐摩耗性と靱性とを合わせ有する機械部品を製造することも可能である。また、半溶融金属の良好な接合性を利用し、2種類以上の母材を組み合わせたピレットを半溶融鍛造することにより、成形と接合とを同時に行い、種々の複合化製品を製造することも出来る。

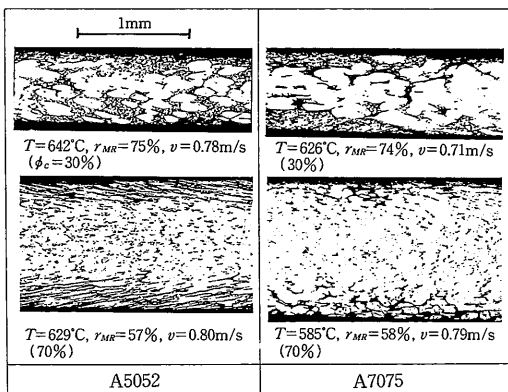


図14 半溶融圧延後の板材の内部組織

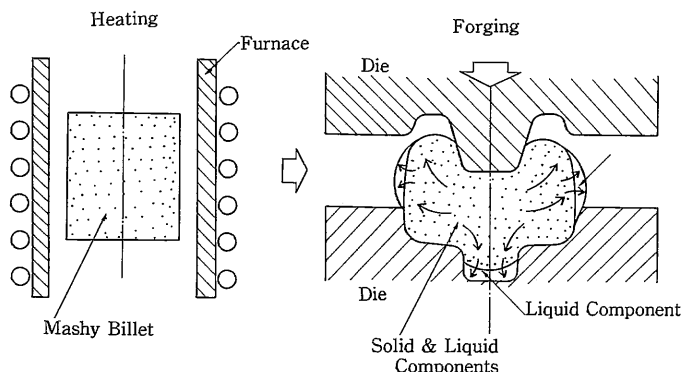


図15 半溶融鍛造概念図

半溶融鍛造技術の研究開発はようやく緒についたところであるが、その可能性は大きく、今後さまざまな方向へ発展するものと考えられる。ただし、この場合も、液相成分の流動を制御する技術、あるいは目的とする製品の内部組織を得るために望ましいビレットの形状・寸法および鍛造工程の設計技術などの開発が必要である。

### 5.3 半溶融押し法

半溶融押し法の加工工程は、熱間押し加工のそれと基本的に同じである。すなわち、この場合、加熱炉により均一な半溶融状態に加熱したビレットをコンテナに挿入し、ラム（ポンチ）を介して加工力（加圧力）を付加し、ダイスを通して所要の製品へと押し出す（図16参照）。ビレットは、固相率が約75%以下になると、自重で崩れる場合があるので、そのような場合には、加熱、取出し、コンテナへの挿入に際して、適当な容器あるいはパレット等を用いて保持する必要がある。

押し法の場合には、半溶融化したビレットはコンテナ内で密閉状態下におかれ、ダイス孔からの流出のみが許容されているので、流動・変形の自由度が低く、内部の固相成分・液相成分がそれぞれ単独に流動することは起こりにくい。多くの場合、押し開始時に若干の液相成分が先行して流出する傾向があることを除けば、両者は一体となってほぼ均一に流動・変形してダイスから押し出されてくる。したがって、定常的かつ安定した加工を行いやすい。

半溶融押し法は、他の半溶融加工法に比して、最も広範囲に研究されており、各種のAl合金・Cu合金の棒・線・管・形材などの製品例が紹介されている。既述の理由により、製品の内部組織および機械的特性共に均一性を得やすく、操業技術の観点からみても比較的容易であるので、今後さまざまな分野で適用される可能性がある。特に、難加工性材料あるいはセラミック系の強化粒子・強化繊維を含む各種の金属基複合材料の加工には不可欠の技術となるものと考えられる。

### 5.4 半溶融ダイキャスト法

半溶融ダイキャスト法として現在開発が進められているプロセスは、いわゆるプラスチックの射出成形法と類似しており、ペレット状あるいはフレーク状の金属素材をホッパーを介して高温スクルー混練機へ導き、半溶融状態に加熱し混練した素材を混練スクルーをそのままラムとして用い、ノズルを通して金型内へ高速で射出し、成形し凝固させて製品を得る方法である（図17参照）。

この方法は、現在、Mg合金の成形加工プロセスとして開発が進められ、この分野における重要な課題となっている加工の安全性・安定性の確保、あるいは高圧鑄造・ダイキャスト・その他の従来技術と比較しての製品品質の高度化や高生産性の達成、などさまざまな面から有望視されており、すでに一部実用化の段階に至っている。

### 6. 半溶融加工法・半凝固加工法の可能性

上述のごとく、半溶融加工法・半凝固加工法は、従前の加工技術によっては得られないさまざまな特徴・利点を有している。今後、金属加工技術に求められる大きな課題、特に、省エネルギー化、省資源化、環境保護のためのクリーン化、高品質高機能化、などの観点からそれ

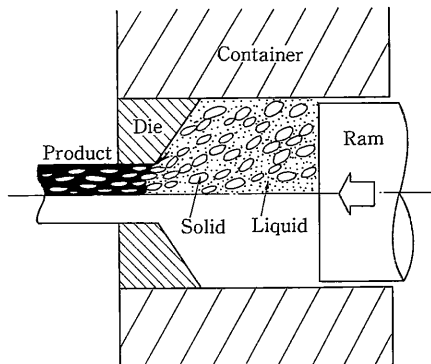


図16 半溶融押し法概念図

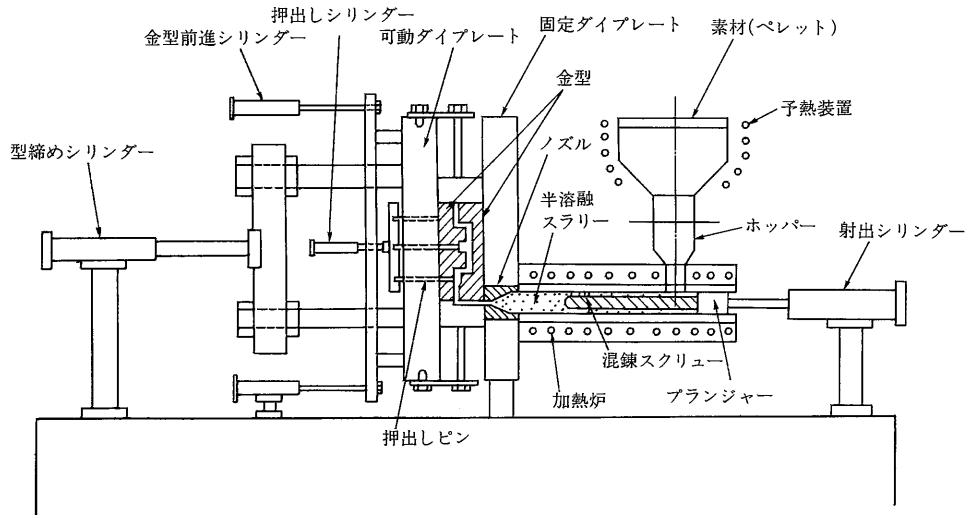


図17 半溶融ダイキャスト法概念図

らを整理すると以下ようになる。

- (1) 被加工材の変形抵抗が著しく低いので、小さな加工力で大きな加工率を達成することが可能であり、加工機械・設備の小型化・簡易化、ひいては加工プロセスの省エネルギー化に寄与しうる。
- (2) 被加工材の流動性・変形性が高いので、いわゆる Near Net Shape 製品を少ない工程数で得ることが可能となり、加工工程の短縮・合理化、素材の節減や歩留まりの向上を達成できる。
- (3) 半凝固加工法を体系化し、溶湯から半凝固金属を経て製品に至る一貫した加工技術を構築することにより、金属加工分野で加熱・冷却の繰り返しにより消費される膨大な熱エネルギーの節減に大きく貢献できる。
- (4) 半溶融加工法を適宜応用することにより、従来の加工法では困難であった難加工材の、長尺、細径、薄肉素形材の大量生産が実現でき、用途の拡大とともに切削加工等の後工程における素材の節減・歩留まりの向上に貢献できる。
- (5) 結晶粒の微細化、析出物の均一分散化などを通して、製品の機械的特性を改善するとともに、内部欠陥の発生を防止し、製品機能の高度化や使用寿命の向上を図ることが可能となり、ひいては省資源・廃棄物の削減等に貢献できる。
- (6) 固相・液相の二成分が共存する状態から、多様な内部構造を有する熱間加工性あるいは冷間加工性に秀れた素形材の製造が可能となり、これらを通じて金

属加工分野全体の発展に貢献できる。

## 7. 結 言

以上、半溶融加工技術・半凝固加工技術の現状と将来への可能性の概要を示したが、これらの内容を実用的な技術として確立するためには、既述の各要素技術をはじめ、温度・雰囲気制御技術、高温使用に耐える工具材料技術、大容量急熱・急冷技術、液相成分・固相成分の流動制御技術など、さまざまな角度からの研究開発が必要となる。1980年代後半を境に、これらの技術の実用化に対する関心が世界的にも急速に高まり、現在各地で本格的な開発競争が始まっている。我が国の金属加工技術の将来にとっても極めて重要な研究開発課題であり、すでに通産省基盤技術研究開発プロジェクトとしてR&D会社も設置され官民挙げての努力が傾注されている。極めて大きな可能性を有する分野でもあるので今後急速な発展が期待できる。

(1990年3月22日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 金属の半凝固加工プロセスに関する調査研究報告書：(株)日本機械工業連合会、(株)金属系材料研究開発センター、1988-3。
- 2) 木内 学：半溶融金属の特性と塑性加工，金属学会会報，21-9，(1982)。
- 3) M. KIUCHI, et. al.: Application of Mashy-State Working Processes to Production of Metal-Ceramics Composites, Annals of the CIRP vol. 36, (1987), 173~176。