



# 溶湯鍛造の現状と将来

木 内 学\*

## Recent Trend of Squeeze Casting

Manabu KIUCHI

### 1. はじめに

近年、鑄造技術の発展は目覚ましいものがあり、鑄造プロセスそのものに関する多種・多様な新技術をはじめ、高速自動造型等に代表される鑄型の新製作技術、セラミックその他の鑄型用新材料の開発、など文字どおり技術革新の直中にある。その中であつて特に注目を集めているのが溶湯鍛造法である。衆知のごとく、溶湯鍛造法は、金型内の溶湯の凝固過程に高圧力を加えて、高品質鑄造品を得ようとする圧力制御鑄造法である。当初その適用範囲に限られていたが、収縮やガスに起因する欠陥を除去するうえで有効な鑄造法であることや、異種材料の複合化に際して繊維間や粒子間にマトリックスの溶湯を浸透凝固させ、これらを固定するのに有力な方法であることから、自動車用ホイールをはじめとする車輛部材や、各種の複合材料の製造法として注目を集め、その適用範囲が急速に広がりつつある。本稿においては、この溶湯鍛造法の加工技術上の特質と現状、あるいは今後のあり方等について、筆者の私見を交えて述べる。

### 2. 溶湯鍛造法の技術的特質

#### 2.1 加圧方式<sup>1)~4)</sup>

従来採用されてきた溶湯鍛造法において、金型内の溶融金属に高圧を付加する方式としては、原理的に(1)プランジャー加圧法、(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)の方式では、圧縮量は凝固収縮および熱収縮に対応する量であり、金型内での溶湯の流動はほとんど起こらない。この場合、製品と金型との間の熱伝達がよく、収縮巣やピンホールなどの欠陥が除去され、凝固組織の微細化により機械的品質に優れた製品が得られる。(2)の方式ではパンチと主型でダイキャビティを構成するため、溶湯の定量供給が重要である。製品は高品質で表面欠陥・内部欠陥共に少なく、容器等に使用した場合の耐圧性が優れている。(3)の方式は太く、短い湯道を通つて溶湯を低速かつ連続した流れとしてダイキャビティ

に導き、加圧凝固させる方式であり、比較的単純形状の指向性凝固しやすい形状の製品に適用すれば、かなりの加圧効果がある<sup>5)~16)</sup>。

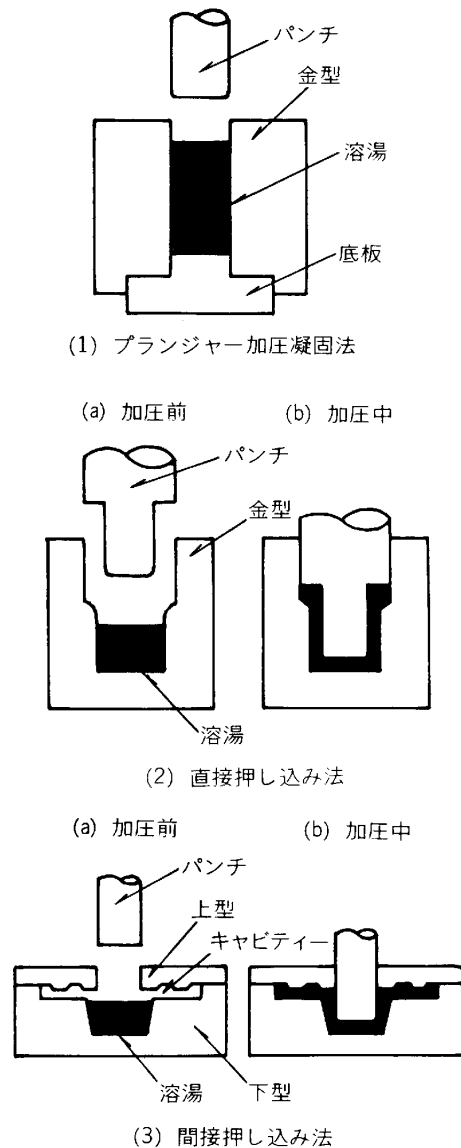


図 1 溶湯鍛造法の基本 3 方式

昭和 59 年 8 月 7 日受付 (Received Aug. 7, 1984) (依頼展望)

\* 東京大学生産技術研究所 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi Minato-ku 106)

実際の製品への適用に際しては、これらの方法を組み合わせる場合も多く、製品の形状いかんによつては、これらの方式の適当な組み合わせにより、はじめて有効な加圧凝固を実現することができる。

## 2.2 加圧力のレベル<sup>1)~4)</sup>

溶湯鍛造に必要な加圧力は、鑄造材の種類と鑄込温度、製品の形状・寸法、金型の形状・寸法、加圧方式、あるいは予想される加圧力の伝達効率、等によつて異なる。加圧力の大きさは、製品の内部欠陥である引け巣やガスによるポロシティを除去するのに必要かつ十分なものでなければならないことは言うまでもないが、その必要とされる値を的確に示すのは容易ではない。一般に、アルミ合金に関しては、製品の形状・寸法によつて異なるが、プランジャー加圧法の場合で、少なくとも 500~1000 kgf/cm<sup>2</sup> 程度の加圧力が必要とされている。これに比して、直接押し込み法ではやや低め、間接押し込み法では加圧部と製品部とが離れているため、若干高めの加圧力が必要であるとされている。しかしながら、実際生産の場においては、明らかに加圧力の不足に起因するとみられる残留内部欠陥の発生がみられる場合もあり、溶湯鍛造の本来の目的を達成するためには、従来考えられてきた加圧力のレベルよりも、もう一段高い加圧力の付加について、ハード・ソフト両面から検討する必要がある。

## 2.3 加圧力の伝達効率<sup>1)~4)</sup>

溶湯鍛造法においては、上述の加圧方式により、金型内の溶融金属に加圧することを目指しているが、凝固の進行と同時に加えられる加圧力が、溶湯を介して目的とする部位に常に 100% 伝達される保障はない。例えば加圧方向と凝固収縮方向が一致するプランジャー加圧法においてさえも、加圧力の圧力損失は、金型の温度にも依存するが、概略 20% に達するとの報告がある<sup>2)</sup>。また、加圧方向と凝固収縮方向が異なる間接押し込み法の場合には、その圧力損失は 30~40% にも達するとの報告がなされている<sup>2)</sup>。したがって、実際生産への応用に際しては、金型の設計と加圧方式の両面から、目的とする部位への加圧力の伝達効率について、あらかじめ十分な検討をしておく必要がある。この問題に関しては幾つかの実験結果の報告や、コンピュータを用いた凝固シミュレーターの開発の試みなどがあるが、いまだ十分な情報が得られていない。

## 2.4 加圧のシーケンス<sup>1)~4)</sup>

金型に溶湯が注湯された後は、できるだけ早く加圧力を付加するのが好ましい、とされている。これは、金型内に入った溶湯は直ちに凝固を開始するため、加圧力の付加効果を保ち、かつその伝達効率を上げるためには、加圧の遅れをできるだけ出さないことが望ましいためである。加圧時間の遅れが避けられない場合には、それに見合う加圧力の増大が必要である。また、製品の容量が

小さくて凝固時間が短い場合には、加圧プレスの作動速度を上げるか、または湯溜りを設けて凝固時間を遅らせる等のくふうが必要となる。

加圧力は、金型中の溶湯が凝固を完了するまで保持することが必要である。したがって、必要な加圧保持時間は、製品の形状・寸法、金型の形状・寸法・冷却条件、鑄込温度、加圧方法、等によつて異なる。一般に加圧保持時間は、長めに設定するのが好ましいが、このことは金型の寿命や生産性の低下につながるもので、実際生産に際しては、適正な加圧保持時間に関するきめ細かい管理が必要となる。ただし、幸いなことに、溶湯鍛造法の場合、加圧力により製品と金型が密着するため、他の低圧鑄造法に比較して溶湯の冷却速度は速く、全体としての凝固時間を他の 1/2~1/3 に短縮することができる。

更に加圧速度についても、場合に応じたきめの細かい管理が必要である。プランジャー加圧法の場合には、加圧速度すなわち、ポンチの押し込み速度の影響はあまりなく、加圧中のポンチ速度は溶湯の凝固・収縮速度に対応して定まるが、加圧開始時にポンチが溶湯面に衝撃的に作用するような事態は避けなければならない。直接押し込み法の場合には、加圧速度のコントロールが重要であり、金型内の溶湯の流れができるだけなめらかに進行するように、ポンチ速度の設定と制御を行う必要がある。間接押し込み法の場合にも同様なことが言え、溶湯が層流となつてなめらかに流れてキャビティを充填するよう、ポンチ速度の制御を行うことが必要である。特にこの場合、金型の設計に際しては、できる限り湯道を大きくし、溶湯の金型内への流入速度が過大にならないように注意することが必要である。

## 2.5 金型温度<sup>1)~4)</sup>

金型温度は、製品品質に対してあまり影響を与えないものと考えられており、鑄造性・作業性の面から検討される場合が多い。一般に金型温度が低すぎると、凝固速度が速く、上述の加圧のタイミングを失する恐れがあり、製品内部の不良問題を起こしやすい。他方、金型温度が高すぎると、塗型剤の付着が悪くなり、作業性が悪くなる。連続作業の下においては、溶湯の持ち込む熱と金型の冷却能力、及び周辺部の熱容量とその熱放散のバランスにより、金型温度は一定の範囲に収束してくる。アルミ合金の場合、一般に金型温度は 200~300°C が好ましいとされているが、この点に関しては疑問も多い。従来、金型の温度分布の制御はかなり粗雑であり、簡単な冷却装置を有する程度のものであつたが、最近になつて、金型の温度制御が、製品品質の高度化に重要であることが明らかにされつつあり、この面での技術開発が進められている。

## 2.6 溶湯の鑄込温度<sup>1)~4)</sup>

溶湯鍛造法では、鑄込温度を高く設定する場が多いが、これは主として加圧のタイミングを失しないよ

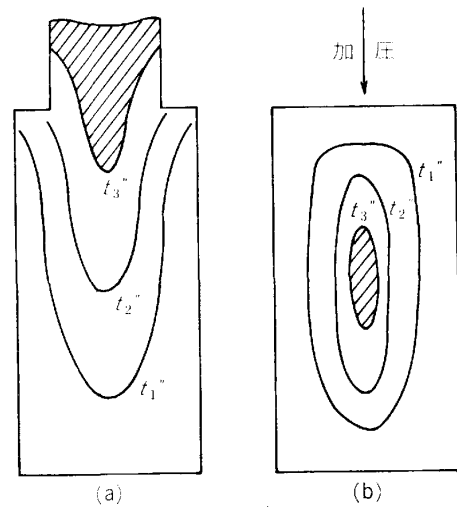
うに、凝固時間を遅らせるためである。特に、小物・薄肉製品の製造に際してはその傾向が強いが、溶湯の温度上昇は、吸収ガスを増大させるのであまり好ましいことではない。また酸化物等の発生を多くし、それらの巻き込みの危険も増すので注意を要する。

2.7 塗型材<sup>1)~4)</sup>

溶湯鍛造法に用いられる塗型材には、潤滑性と離型性が強く求められ、これらの要求を満足するものとしては、黒鉛系塗型剤が最も適していると考えられる。ただし、黒鉛系塗型剤は、塗布に際して膜厚を大きくすることが困難であり、また熱伝導性が良いため保温性が低く、小物・薄肉製品の製造に際してできるだけ凝固時間を長く保ち、加圧効果を上げるためには、その使用に問題がある。更に黒鉛系塗型剤は、製品表面を汚す欠点もある。通常、塗型剤の塗布に要する時間と塗型剤そのものの費用は、製品のコストアップの重要な要因の一つであり、これらの意味からも、より高度な機能を有する塗型剤の開発が強く望まれている。

3. 溶湯鍛造法における加圧効果<sup>5)~10)</sup>

溶湯鍛造法における加圧効果としては、(1)収縮巣およびマクロならびにミクロポロシティの除去、(2)残留ガスの影響の除去、(3)凝固組織の微細化、均質化、(4)機械的特性の向上、などが考えられる(図2参照)。衆知のとおり、必要かつ十分な加圧力の下での溶湯鍛造法では、加圧により、溶湯の全外周面と金型面とは強制的に接触した状態が保持されつつ凝固が進行する。この結果、金型内の製品の各部位はそれぞれ金型から圧縮力を受けつつ凝固し、この加圧圧縮により、収縮巣はもちろん、マクロ的・ミクロ的ポロシティの発生も防除される。また、加圧により、溶湯内のガスの溶解度は増し、凝固時の気泡の発生が抑制される。更に加圧力により、製品の表面と内部との組織や性質の差が少なくなり、かつ共晶合金等では、加圧のみにより共晶が微細化することが知られている。



(a): 重力鑄造法 (斜線部=液相)  
(b): プランジャー加圧法 ( " )

図 2 重力鑄造と溶湯鍛造の凝固様式の相違<sup>3)</sup>

以上の加圧効果により、製品の機械的性質は種々の面から改善される。多くの実験的研究により、例えば Al-Cu 合金等においては、引張強度は時として 1.5~2.0 倍に、伸びが 2.5~3.5 倍増となる等<sup>9)</sup>、その機械的特性値が、他の鑄造法による製品に比較して顕著に優れていることが実証されている(図3参照)。

4. 溶湯鍛造法の応用

4.1 応用技術としての特徴

溶湯鍛造法の実際生産への適用は、種々の工業分野で試みられており、後述するようにその一部は既に量産体制に入っている。その適用分野あるいは適用の目的・ねらいを大別すると、(1)高品質鑄物の製造、(2)健全鑄物の量産、(3)複合材料の製造、(4)鍛造品の代替、(5)鑄造工程の合理化、などに分けられる。これらはいずれも、基本的には溶湯鍛造法の種々の加圧効果を活用したものであるが、応用加工技術としてみた場合、次のような特徴を挙げる事ができる。すなわち、溶湯鍛造

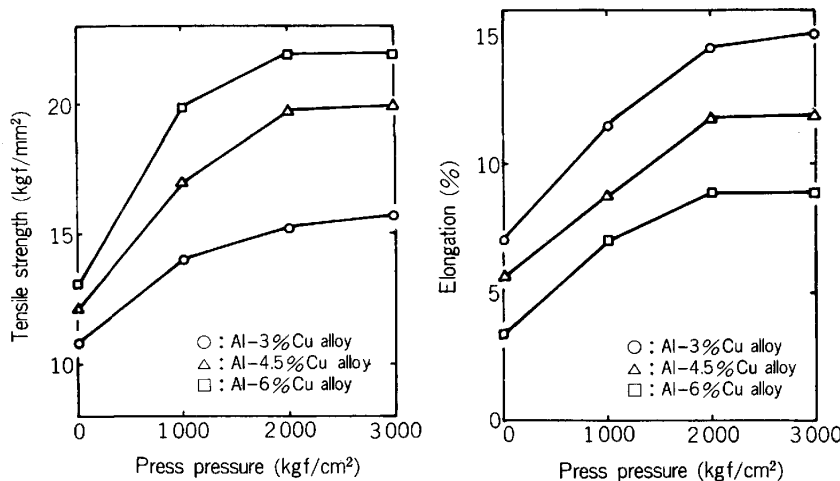


図 3 加圧力が引張強さ、伸びに与える影響の測定例<sup>9)</sup>

法は、高品質鋳物製品の量産技術として優れており、ダイカスト法に比較して、その生産速度は若干劣るものの、含有ガスやマイクロポロシティが少ないことから、種々の焼入れ・焼もどし等の熱処理可能な健全な製品を量産する上で、優位にある。また、加工機械の面からみても、いわゆるダイカストマシンに比較して、相対的に簡単なプレスを用いることが可能である。また、従来型の鋳造法に比較して、押湯が不要であるとか、あるいは脱ガス工程を省略できるなどの面から、歩留り向上、工程の削減をはじめとする、生産性の向上を図ることができる。更に金型鋳造であることから、鋳型すなわち金型の製造には、CAD/CAM システム等の応用が可能である。あるいはまた、鋳造作業そのものは機械化・自動化されているため、熟練技能を必要としない加工技術であるといえる。このことは、溶湯鍛造法を新たに適用する際には大きな利点となる。

4.2 自動車用アルミホイールの製造

高品質鋳造品の量産技術としての溶湯鍛造法が現在最も大規模に適用されているのは、自動車部品とりわけ、

アルミホイールの製造分野である。

自動車用アルミホイールは、従来板材あるいは押し出し材からリム・ディスクを成形し、これを溶接してホイールとする、いわゆる2ピースホイールが主流を占めてきたが、ファッション性すなわち造形性に富むホイールに対する需要が高まり、その製造技術としての鋳造法の開発が進められ、急速に実生産に適用されてきた。アルミホイールは、軽量かつ放熱性に優れており、ホイールとしての機能的な利点も多いが、他方、鋳造法によるホイールはその造形性により、ユーザーのファッション指向にも対応できるため、その生産量は急速増大し、現在年産800万個程度の規模となつている。写真1に製品例を示す。鋳造法としては、重力金型鋳造法を代表とするいわゆる低圧鋳造法が主体となつているが、近年、(株)宇部興産およびトヨタ自工(株)の共同研究により、新しい加圧方式を採り入れた溶湯鍛造プレスが開発され、これを用いた溶湯鍛造アルミホイールの量産が行われている。(図4参照)、独特の傾斜シリンダー注湯方式を採用し、

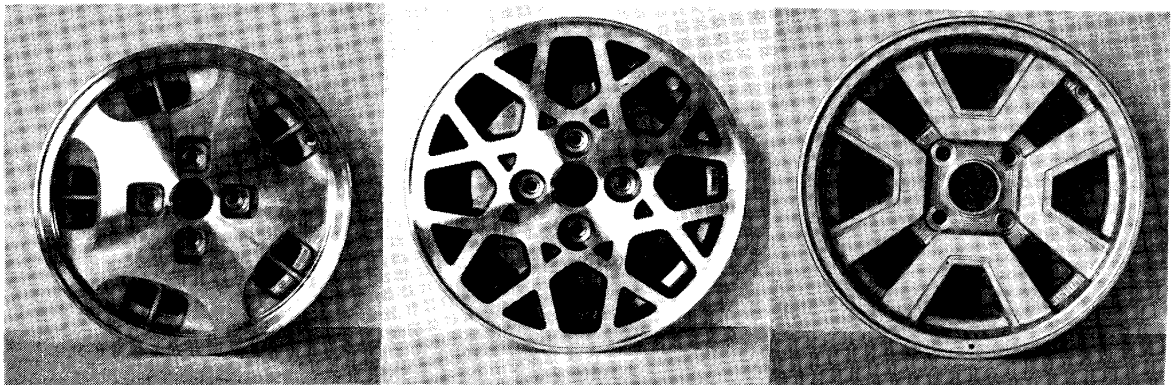


写真1 アルミホイールの製品例

JIS AC4C (T6)	引張強さ/ (kgf/mm <sup>2</sup> )	伸び/ %	硬さ/ (HV 5kg)	シャルピー衝撃値/ (kgf·m/cm <sup>2</sup> )	疲労強さ/ (×10 <sup>7</sup> kgf/mm <sup>2</sup> )
溶湯鍛造品	295	125	105	1.8	12.4
重力鋳造品	280	24	103	0.3	8.5
鍛造品	320	196	105	0.4	—

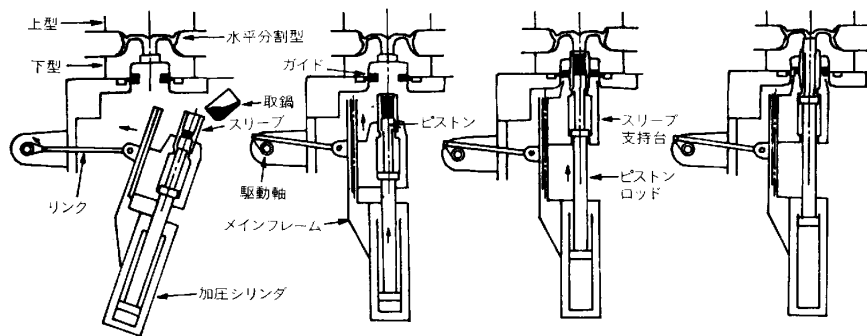


図4 アルミホイールの溶湯鍛造法(例)とその機械的特性<sup>4)</sup>

鋳造サイクルは約 2 min とされている。既にこの溶湯鍛造プレス 10 数台により、月産数万個の生産が行われており、その製品品質は、低圧鋳造品に比して、伸びで 5 倍、衝撃強さで 6 倍、程度の改善がなされたとされている。

#### 4.3 アルミ合金ピストンの製造

高品質鋳造品の量産技術として、溶湯鍛造法が適用されている他の代表的な製品としては、アルミピストンがある。この分野においては、単に鋳造品質の向上のための加圧効果を期待しているばかりでなく、後述するセラミック繊維やウイスキー等との複合化技術として溶湯鍛造法を利用しており、その動向が注目されている。既に公表されているように、ピストンリング溝の耐摩耗性を向上させるために、当該部位に当てはまるアルミナ繊維のプリフォーム体をあらかじめ製造し、これを鋳型内にセットした後注湯し、加圧凝固させて得られる、局部繊維強化アルミピストンが現在量産され、実車に装備されている。これ以外にも同様な試みが行われ、ウイスキーのプリフォーム体や鋳鉄製補強リングを同時加圧鋳造する方法なども開発されている。

#### 4.4 複合材料の製造<sup>12)~25)</sup>

金属材料とセラミック粒子・繊維あるいはウイスキー等との複合材料、すなわち FRM, PRM, WRM などは、現在最も注目されている新工業用素材であり、その製造技術ならびに加工技術については、あらゆる角度から研究が進められている。これら強化材と金属マトリックスとの複合化の方法は多数試みられているが、その中であつて溶湯鍛造法は、最も注目されている加工技術の一つである。すなわち、溶湯鍛造法には加圧効果により、濡れ性のあまり良くない強化材とマトリックス材の組み合わせに対しても、比較的良好的な機械的結合強度が得られやすい、という特徴がある。また、鋳造法特有の造形性に富むことから、強化材としては粉末・繊維・ウイスキーなどを任意に選ぶことができ、かつ複合化して得られる製品形状に制約が少ないという利点がある。

具体的な応用例としては、まずシラスバルーン-金属系複合材料の製造がある<sup>12)~19)</sup>。これは軽量性・耐火耐熱性・断熱性などの特性を有するガラス質微細中空球であるシラスバルーンを用いて、金属系軽量複合材料を製造しようとするものであり、製造方法としては、プレパック法、プレス加圧法、コンプレッサー加圧法(図 5 参照)などが提案されている。これらはいずれも溶湯に加圧しつつシラスバルーンの間隙を充填し、かつ加圧凝固させることにより、複合体を得ようとするものであり、溶湯鍛造法の直接的な応用と考えることができる。この複合体の製造には、この他プレミックス法なども提案されているが、いわゆる溶湯鍛造法の応用とは多少異なる。

金属系繊維強化複合材料、いわゆる FRM の製造に

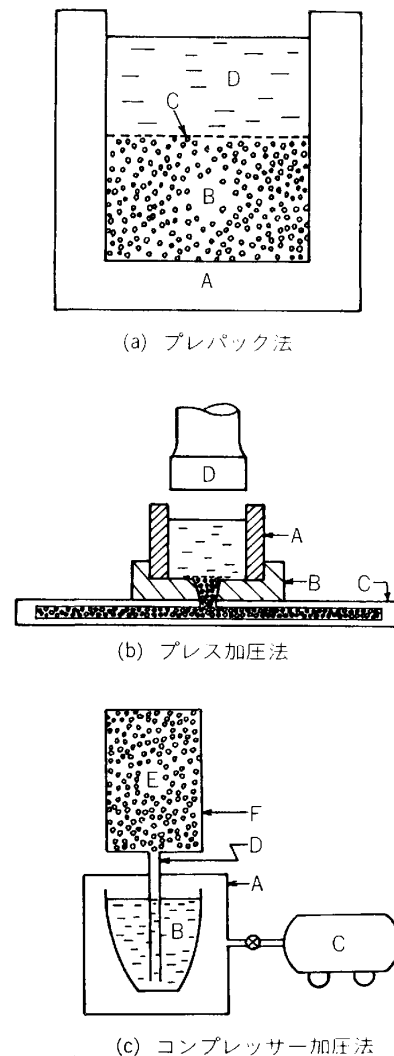


図 5 粒子分散型複合材料の製造法<sup>12)</sup>

も、溶湯鍛造法が様々な形で応用されている。図 6 にはその一例を示すが、一般にこれらの場合、所要の方位ならびに間隙をもつて配列され固定された強化繊維を、余熱した後、金型内に挿入し、マトリックスの溶湯を注入すると同時に  $500 \sim 1000 \text{ kgf/cm}^2$  に加圧保持し、強化繊維間に溶湯を浸透させ、凝固させて所要の複合体を得る。この場合、加圧力を増すほど、得られる複合体の特性、特にその強度のばらつきが少なくなることが知られている。また、溶湯の鋳込温度は、加圧力と共に重要な因子であり、温度が高いほど粘性が低下し加圧力の伝達が有効に行われるが、他方強化繊維に与える熱的影響の問題もあり、繊維の特性についても配慮が必要である。この方法は繊維の配列・複合体の形状等により種々な製品の製造への応用が検討されており、板・棒・線・管材をはじめ、ディスク、フランジ、各種の機械部品等の試作が行われている。

先に述べたプレパック法・プレス加圧法等は、一般の粒子分散強化複合材料の製造にも応用されており、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -

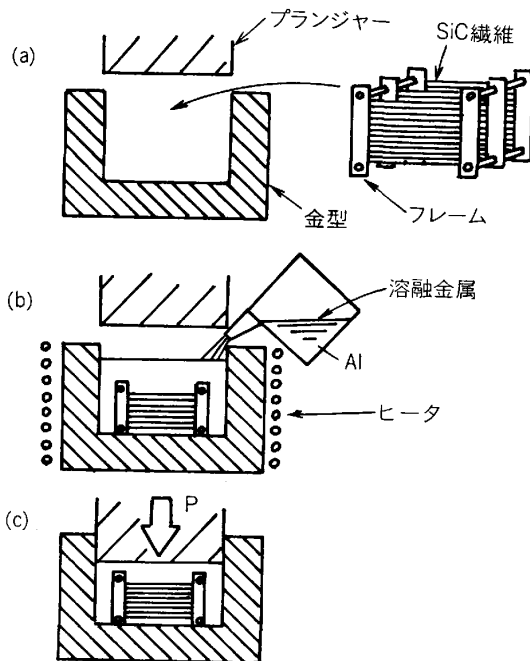


図 6 繊維強化複合材料の溶湯鍛造法による製造例<sup>19)</sup>

$O_3$ , SiC 粒子等とアルミ合金との複合化などへの適用が試みられている。ただしこれらの場合、強化粒子が細くなるに従って、溶湯を粒子間隙に浸透させるのが困難となり、加圧力の大きさにもよるが、細粒化すると共に、複合化可能な厚みまたは径の最大値は低下してくる。

溶湯鍛造法を用いてウィスカーのプリフォーム体（焼結体）にマトリックスの溶湯を含浸させ、いわゆる WRM を製造するプロセスの開発も行われている。この場合、ウィスカーのプリフォーム体の空隙率は相当高く、したがって溶湯鍛造後、得られる WRM のウィスカーの体積含有率は概略 15~20% が限度とされている。

#### 4.5 クラッド材の製造<sup>20)~22)</sup>

上述の複合材料の一種ではあるが、若干異なる側面を有するクラッド材の製造にも、溶湯鍛造法の適用が試みられている。これは、いわゆる圧接（摩擦圧接、爆発圧接、ロール圧接など）とは異なり、铸ぐるむことにより、クラッド化しようとするもので、その加圧効果により、異種金属間の拡散が助長され、機械的特性が改善されることが知られている。このため各種工業用素材あるいは機械部品等の軽量化、耐食性向上、耐熱化など、所要の機能を満足するためのクラッド化を促進する上で、溶湯鍛造法を有効に活用する試みが様々な形で進められており、今後この分野での有力な接合方法となり得る。

この種の铸ぐるみ法として最も広く実用化されているものに Al-Fin 法がある。これは、あらかじめアルミニウム合金浴で、鋼または铸铁製部材にアルミニウム合金を溶融浸漬被覆し、これを直ちに金型内にセットして溶

湯を注入して铸ぐるみ、部材表面に付着した融液層と母材溶湯とを融合させる方法である。Al-Fin プロセスそのものは、これまで重力铸造法によって行われてきたが、これに溶湯鍛造法を適用することにより、挿入した部材と母材溶湯との密着が良くなり、製品品質の安定化に有効であることは良く知られている。これらの場合、鋼または铸铁部材と母材溶湯との界面においては、加圧効果により拡散反応が促進され、発生する合金層の厚さは、加圧力と凝固が完了するまでの時間、あるいは接合面周辺の溶湯の量に比例して増加する。したがって、加圧下での铸ぐるみにおいて、所要の製品を得るためには、加圧力の適正な設定と凝固時間の制御が重要である。

### 5. 今後の技術的課題<sup>28~32)</sup>

現在、溶湯鍛造の実用化は、ほとんどアルミ合金に限られているが、今後、銅合金・鋼製品への適用技術が順次開発されていくと考えられる。また、対象となる製品も、自動車・家電製品などから、一般機械部品等へと逐次拡大していくことが予想される。しかしながら、これらが実現するためには以下に示すような技術的課題を克服することが必要となる。

#### 5.1 新加圧方式の開発

銅系・鉄系の素材を扱うためには従来の加圧方式では、注湯・加圧の時間的遅れが、許容値を越える恐れがある。すなわち、金型内における溶湯の流れを乱さず、かつより短くなる許容時間内に溶湯をキャビティーに充填させ、必要十分な加圧をするためには、これらの手順を従来方式以上に迅速かつなめらかに処理する技術が必要となり、そのための新たな加圧方式の開発が要求される。

#### 5.2 新金型材質の開発

溶湯鍛造では、ダイカストほどの衝撃的な湯流れは存在しないものの、銅合金以上の高融点金属では、その金型に与える熱的衝撃が大きく、型寿命が著しく低下する恐れがある。そのため、セラミック系材料をはじめとする型材料、あるいは金型の表面処理、塗型材、冷却方法その他の金型の温度制御技術、などについての研究開発が必要である。セラミック系の型材料については、近年精力的な研究が進められ、除々にその成果が上がりつつあるので、大いに期待できるものと考えられる。

#### 5.3 偏析防止技術の開発

加圧下の凝固に特有の現象として、低融点成分が、最終凝固域に偏析する問題がある。この現象の解明と防止技術については、種々の角度から検討されているが、振動付加法等により、改善される可能性もあり、これらを実現する加圧プレス機構・強度の面からも検討することが望まれる。

#### 5.4 定量注湯技術の開発

正確な定量注湯は溶湯鍛造の最も重要な要素技術であるにもかかわらず、これまで必ずしも満足できる結果が得られていない。定量注湯は、作業の安定化、製品品質の均一化に寄与するばかりでなく、それにより金型設計の自由度が増し、加圧プレス最適設計あるいは最適稼働が可能となり、ひいては製品コストの低減を達成できる。これらの意味から、この定量注湯技術の開発は極めて重要であるが、ロボットを含む加工機の知能化が急速に進んでいる現状から判断して、この問題についても近い将来、大きな躍進が期待できる。

#### 5.5 新素材の開発

これまでの溶湯鍛造法またはその製品は、既存の材料による、既存の鋳造または鍛造製品の代替、としての役割を果たしてきたが、今後、溶湯鍛造の特質をより以上に活かし得る新素材の開発も期待される。これには二面の意味があり、量的にも質的にも加圧効果がより大きく期待できる素材の開発と、溶湯鍛造によつてはじめて製造し得る新しい機能を有する素材の開発、とがあるが、いずれにしても様々な可能性が残されており、今後期待されるところは大きい。

### 6. 結 言

本稿では溶湯鍛造法の特質と応用の現状について、筆者の私見を交えて述べた。調査の範囲が必ずしも十分ではなく、議論の偏りもあり得ると思われるが、この分野に関心を持つ研究者・技術者に多少の参考になれば幸いである。なお、本稿をまとめるに際しては以下に示す論文・解説・展望等の文献を参照し、またその一部を引用した。各著者の方々に改めて謝意を表す。

#### 文 献

- 1) 鈴木鎮夫, 白柳 格: 日本機械学会誌, 81(1978) 714, p. 62
- 2) 西田義則, 松原弘美, 白柳 格, 鈴木鎮夫: 日本金属学会会報, 19 (1980), p. 895
- 3) 鈴木鎮夫, 井沢紀久, 西田義則, 白柳 格, 松原弘美: 国立機関技術開発研究事業成果普及発表会テキスト (1980), p. 1
- 4) 白柳 格, 鈴木鎮夫: 塑性と加工, 22 (1981), p. 754
- 5) 石丸 博, 金子純一, 菅又 信: 軽金属, 31 (1981), p. 712
- 6) 時末 光, 青木頭一郎: 軽金属, 27 (1977), p. 168
- 7) 時末 光, 野本光輝, 青木頭一郎: 軽金属, 28 (1978), p. 343
- 8) 野本光輝, 時末 光, 加藤数良, 青木頭一郎: 軽金属, 29 (1979), p. 70
- 9) 野本光輝, 時末 光, 加藤数良, 青木頭一郎: 軽金属, 30 (1980), p. 212
- 10) 野本光輝, 時末 光, 加藤数良, 青木頭一郎: 軽金属, 31 (1981), p. 83
- 11) 時末 光, 加藤数良, 青木頭一郎, 草香和彦: 軽金属, 31 (1981), p. 30
- 12) 今川耕治, 長田純夫, 北原 晃, 秋山 茂, 上野英俊, 徳広祐之輔: 軽金属, 23 (1973), p. 282
- 13) 秋山 茂, 今川耕治, 長田純夫, 北原 晃, 上野英俊, 徳広祐之輔: 軽金属, 26 (1976), p. 219
- 14) 秋山 茂, 今川耕治, 長田純夫, 北原 晃, 上野英俊, 徳広祐之輔: 九州工業技術試験所報告 (1977) 18, p. 1030
- 15) 長田純夫, 今川耕治, 北原 晃, 秋山 茂, 上野英俊, 徳広祐之輔: 九州工業技術試験所報告 (1977) 18, p. 1038
- 16) 長田純夫, 今川耕治, 北原 晃, 秋山 茂, 上野英俊: 九州工業技術試験所報告 (1981) 27, p. 1699
- 17) 長田純夫, 松田公扶: 鋳物, 53 (1981), p. 686
- 18) 高田与男, 福井 泉, 佃 誠: 軽金属, 31 (1981), p. 8
- 19) 中田栄一: 塑性と加工, 22 (1981), p. 799
- 20) 高田与男, 佃 誠: 軽金属, 30 (1980), p. 473
- 21) 長田純夫, 松田公扶: 鋳物, 53 (1981), p. 300
- 22) 中田栄一, 香川 豊, 富田 剛: 鋳物, 53 (1981), p. 610
- 23) 長田純夫, 松田公扶: 鋳物, 54 (1982), p. 657
- 24) 森 信幸, 空野博明, 北原 晃, 大城桂作, 松田公扶: 日本金属学会誌, 47 (1983), p. 1132
- 25) 福永秀春, 合田公一: 日本機械学会論文集, 50 (1984), p. 1054
- 26) 千々岩健児, 白髭勝男: Al-ある, (1982) 2, p. 11
- 27) 中田栄一, 香川 豊, 寺尾星明: 日本複合材料学会誌, 9 (1983), p. 115
- 28) 占部素臣, 高須賀俊蔵: アルトピア, (1982) 2, p. 9
- 29) 藤井恒弥: アルトピア, (1983) 5, p. 9
- 30) 阪本実比古: Al-ある, (1983) 8, p. 8
- 31) 佃 誠: Al-ある, (1982) 6~7, p. 7
- 32) 中西喜代蔵: アルトピア, (1983) 3, p. 9