④ 溶湯鍛造を用いた複合加工*

Squeeze Casting as Hybrid Metal Forming Process and for Composite Fabrication*

西田 義 則**

Yoshinori NISHIDA**

キーワード：溶湯鍛造，成形法，適用事例，複合材料，製造法

1. は じ め に

金属を高圧下で凝固させたら，違った現象が観察され，優れた材料が得られるかもしれないとの考えからの研究は古くからあった^{1,2)}．一方，固相材料を塑性加工により製品化するよりも，一部分が溶融している状態で成形する方が，変形抵抗が小さく容易であるだろうとの考えからの成形技術の発達もあった³⁾．前者に端を発したと思われる方法は高圧 casting 法，後者は半融鍛造法⁴⁾などと呼ばれる場合がある．しかし，その違いを明確に区別することは困難である．そこで，同一のプロセスであり，方案の種類の違いと考えた方がよいであろう．これらのプロセスを表現する言葉としては，ロシア語の直訳である「溶湯鍛造」が一度用いられると⁵⁾，広く普及した．国内での研究はほぼ30年前に始まり⁶⁾，初期の10年ぐらいの間に生産技術としての可能性は明らかになっていたと思われる．しかし，商業的に本プロセスの採用が増えるに至らなかった理由は，高度経済成長の時代においては生産性があまり良くなく，過剰品質であったためと思われる．しかし，近年は商品やその品質に多様性が要求されるようになり，また本プロセスは民生用の複合材料製品製造法のホープと考えられるようになり，急速に本プロセスを採用するところが増えている．

ここでは，鑄造と鍛造の中間に位置する溶湯鍛造法の特徴を説明し，幾つかの適用例を紹介する．

2. 鑄造技術と鍛造技術

この2つの製造技術は金属製品を作る技術として広く工業的に利用されており，極めて重要な技術である．これらの技術の違いと共通点などを考えることにより溶湯鍛造法の特徴を整理することが出来る．

2.1 概念の違い

2.1.1 鑄 造 法

鑄造は溶融金属を型内に注ぎ，金属が液相状態にあるうちに製品の形状になり，その後に凝固して固相の製品になる．従って，液相状態では非常に複雑な形状になることができるため，鑄造法は複雑な製品製造に適する．また，鑄型は砂で作製することもできるため，製造コストが安いのが普通である．しかし，金属が液相から固相に相変化する際に種々の問題が生じる．この相変化する速度が速いか遅いかで，材質が決まる．また，凝固収縮にともなう鑄造欠陥が発生する．更に，液相から固相になるとガスの許容溶解度が急激に減少することにもとづくガス欠陥も生じる．鑄造法の長所は低コストで複雑形状の製品を製造できることであり，短所はある程度鑄造欠陥を必ずともなうことである．

2.1.2 鍛 造 法

鍛造法は固相状態の金属を変形させて製品形状を付与する技術である．この技術では材料を塑性変形することによる流れ組織を有しているため，強度が高く，性質に方向性がある．固相材料の塑性変形には限界が存在し，加工限界と呼ばれており，この限界のため鍛造により複雑形状製品製造には限界がある．また，材料によって塑性加工性が異なるため，

*原稿受付 平成元年6月27日
** 名古屋工業技術試験所 Government
Industrial Research Institute, Nagoya

鍛造に適する材料は塑性加工性の優れた材料のみである。一方、鍛造では固相状態の素材を变形するため、大きな変形荷重を必要とし、成形用の型は高強度材料で作製せねばならない。また、装置も大がかりなものになる。従って、鍛造では製造コストが高くなる。

2.2 鋳造と鍛造の組み合わせ

鋳造と鍛造を組み合わせる製造技術を考えた場合、完全に液相状態にある金属を鍛造することはできない。そこで、熔融金属を鋳型内に密閉状態にし、高圧力を加え、高圧下で凝固させるか、又は半溶融状態にある金属の加工が対象となる。①半溶融状態にあると変形抵抗が小さく、小さい力で製品形状に成形することができる。また、②液相が残存しているため複雑形状の製品成形がしやすい、などのメリットが期待できる。

3. 溶湯鍛造法における基礎現象と成形方法

溶湯鍛造法は、鋳型内の溶湯にプレスにより機械的に高圧力を加えて製品を成形し、凝固が完了するまで加压を保持する方法であると定義されている⁹⁾。

前述のように、このプロセスを鋳造の面から見ると、高圧下での鋳造と考えることができる。従来の鋳造では、鋳型温度、注湯温度、溶湯中ガス、合金成分等を変えることにより鋳造品の材質改善の努力がなされてきた。溶湯鍛造法では、それに更に圧力のファクターを加えて、鋳造品の材質改良を狙ったものである。そこで、溶湯鍛造法における凝固に影響のある基礎現象は次のようである⁹⁾。

3.1 凝固に対する圧力の効果

高圧下では常圧下とは異なった熱力学的状態になり、更に急激に加圧するため、金属の結晶核生成や成長速度が変わってくる。そして、異なった凝固組織を示す。また金属中に溶解しているガス量も圧力の影響をうける。

3.1.1 断熱圧縮現象

溶湯鍛造法では、溶融状態または半凝固状態の金属を急激に圧縮し、高圧下へもってゆく。これは、熱力学的には断熱圧縮である。一般に、どのような物質でも断熱的に圧縮すると温度変化が起こり、その変化は式(1)により与えられる⁹⁾。

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s = \frac{T \left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P}{C_p} \quad (1)$$

T, P, V, 添字 S, Cp はそれぞれ温度、圧力、1 モル当

図1 断熱圧縮による液相金属の温度上昇と圧力の関係。

たりの体積、エントロピーそして定圧比熱である。従って、溶湯鍛造のように急激加压によって溶融金属の温度変化 ΔT は式(2)のようになる。

$$\Delta T = \int_0^P \left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_s dP \quad (2)$$

$(\partial T/\partial P)_s$ は一般には圧力により少し変化すると考えられるが、常圧下での値を用いて ΔT を推定することができる。幾つかの金属についての計算結果が図1に示してある。この計算は各金属が完全に液相状態にある場合の結果であるが、固相がまじっていても、また固相だけの場合も同様な温度変化が起こる。

3.1.2 凝固点温度上昇

高圧下では、平衡状態図自体が常圧下のものと異なっている。そして、凝固点温度も変化するが、普通の金属では高い方へ移動する。これらの凝固点温度は熱力学的には、固相および液相の等温圧縮率、常圧下での定圧比熱とを用いて計算が可能である。しかし、一般に式(3)のクラウジウス・クラペイロンの式で計算され、図2のようになり、Jayaraman ら¹⁰⁾の測定値と比較して示してある。

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T(V^l - V^s)}{\Delta H} \quad (3)$$

ΔH , V^l , V^s は凝固のエントルピー、1 モル当たりの液相および固相の体積である。これらの値として常圧下での値を用いれば、常圧下での凝固点温度の圧力変化の勾配が得られる。

3.1.3 圧力ギャップによる材質改善の可能性

溶湯鍛造法による凝固は、単純に高静水圧下での凝固ではない。急激に高圧が加えられるため、常圧と高圧の圧力ギャップが凝固に影響を与える。たとえば、圧力衝撃が核生成および結晶成長に影響を与

図2 高圧下におけるアルミニウムの凝固点温度の圧力変化。

図3 断熱圧縮による液相アルミニウムの発熱と凝固点温度上昇の比較による過冷部分。

えるであろう。さらに、高圧下での凝固点移動、断熱圧縮による金属自体の温度上昇などがある。そこで、常圧下での凝固点温度に達してから加圧した場合、凝固点温度の圧力による上昇分から断熱圧縮による温度上昇を差し引いた分が、急激圧縮による過冷された分の温度となる。この温度差による過冷帯をアルミニウムについて計算した例が図3に示して

図4 Al-25.4%Si合金を200MPa下で凝固させたときのミクロ組織、(a)液相線温度より上で加圧開始、(b)重力鑄造。

ある。圧力上昇にともなう凝固点温度上昇と断熱圧縮による温度上昇の差はあまり大きくない。しかし、熔融金属が凝固点温度にあれば、急激加圧により過冷状態が得られ、急激な結晶核生成が起り、微細な凝固組織が得られるであろうことを意味している。

一方、合金の場合は構成元素それぞれに対する圧力の影響が異なるため状態図が複雑に変化する。1つの例としてAl-25.4%Si合金を200MPaの圧力下で凝固させた場合の組織写真が図4である。けい素は凝固時に体積が増えるため、圧力下ではSi側の液相線は低温側へ移動するであろう。すなわち、急激加圧により過熱状態になる。しかし、得られる組織は図4のように初晶が幾分小さくなり、共晶が微細になる。亜共晶Al-Si合金や、他の合金系についても同様に初晶が幾分小さくなり、共晶組織が微細になることが観察されている⁷⁾。従って、Si側の液相線が高圧下で低温側へ移動することが、共晶組織微細化の原因ではないと考えられる。高圧力を急激に加えることによる圧力ショックや、金属が型に押し付けられることにより熱伝達が良くなり急冷されることなどが関係あるものと考えられる¹¹⁾。

3.2 溶解ガスと圧力

一般に、熔融金属中には数種類のガスが溶解する。この溶湯を冷却して凝固させると、気泡となり機械的性質を害するガスがある。その原因は、固相中に固溶できるガス量が液相金属中に溶解できるガス量よりもずっと少ないからである。そこで、凝固時に高圧力を加えるとガスが固相中に固溶できる限界が

拡大するため、ガス欠陥のない製品が得られる。それは、水素のような2原子よりなるガス分子が溶解する場合は Sieverts の法則が適用でき、固相中に溶解できるガス量は圧力の平方根に比例して増加するからである¹²⁾。

3.2 成形方法

金属が凝固する際に高圧力を作用させるならば、材質改善が行われるであろうことを述べた。一方、鑄造法では金属が凝固する際の凝固収縮により収縮巣が生じる。これを除くために指向性凝固をさせるか、押湯をもうけて溶湯補給を行い、健全な鑄物を得る方法が取られている。溶湯鍛造では、プランジャで加圧することにより凝固収縮量を圧力で押し込んでやる方法をとっている。この場合、最終凝固部分が製品内にあっても、凝固直後の変形抵抗の小さい部分を製品内に押し込むことができるため健全な製品が得られる。

製品成形方法は大きく分けて図5のように4種類になるであろう。

1) プランジャ加圧凝固法

この方法は型部分に製品形状があり、パンチは単に圧力負荷手段としてのみ作用する方法である。

2) 直接押込法

パンチが製品形状の一部を受け持ち、製品成形

する方式であり、そのため加圧過程でパンチが進入すると溶湯が大きく流動する。この方式では、製品の肉厚や形状を一定にするためには一定量の溶湯を注ぐことが重要である。

3) 間接押込法

多数個取りの方式であり、充填方向が直角方向である場合が多く、圧力ロスが比較的大きい。また、加圧前に凝固する部分があり、それが有効圧力を低下させるであろう。

4) 押上げ法

溶湯充填と加圧の動作が連続的に行われるのが特徴であるため、加圧前に型内での凝固がない。しかし、溶湯用スリーブ内で生じた固相の除去をせねばならない。

これらの方法のうち、実際には押上げ法が生産プロセスとして最も普及している¹³⁾。また、ダイカスト機械を転用し、溶湯鍛造の条件になるように方案を定めた方法での生産も行われている。

4. 技術の要点及び適用事例

溶湯鍛造法の間接押込法や押上げ法がダイカスト法などの他の圧力を利用する鑄造法と違う点は溶湯の充填速度が0.1m/s以下で、ダイカストの約1/100であり、湯道やゲート断面積がずっと大きく、凝固

図5 溶湯鍛造法の代表的方案。

終了まで圧力が製品部分に有効に作用していることである¹⁴⁾。健全な製品を得るためには、注湯後又はキャビティに充填後、凝固があまり進まないうちに加圧開始しなければならない。そこで、溶湯鍛造に適した製品は、本質的には表面積の小さい形状である。しかし、押上げ法のように充填と加圧が連続的に行える方法や、製品の一部分を他のプランジヤで部分加圧をすることができるため、形状の制約はあまりない。圧力は 50MPa 以上が必要であることが経験的に明らかになっている。製品はパンチによる加圧方向に位置している方が良く、間接押込法のように直角方向では有効圧力がある程度低下する。

溶湯鍛造法で得られた製品の特徴は次のようである。

1) 収縮巣、気孔がない。2) 凝固組織が細かい。3) 強度、伸びが重力铸造よりかなり優れている。4) 鑄造の組織に近い組織を有する。5) 材料組織に鍛造材のような方向性がない。6) 製品肌がきれいで、寸法制度が優れている。7) 肉厚、偏肉製品が作れる。8) 複雑形状が成形できる。9) 耐圧漏れ性がよい。10) 熱処理ができる。11) 溶接ができる。12) 複合材料、鋳ぐるみが製造できる。

これらの特長から、溶湯鍛造法の適用製品分野は次のようであろう。

- (1) 強度、耐衝撃性を必要とする製品。
- (2) 気密性、耐圧性を必要とする製品。
- (3) 熱間鍛造品や機械加工品の代替。
- (4) 複合材料、鋳ぐるみ製品。

現在、生産されている製品としては、自動車用のアルミホイール¹³⁾、ブレーキやクラッチ用のマスターシリンダ¹⁵⁾、2 ピースアルミホイールのディスクそしてトップリング溝部を複合材料化したピストン¹⁶⁾が上記のそれぞれに該当する代表的製品である。図

図 6 6061 合金材料を用いて溶湯鍛造法で製造した 2 ピース・アルミホイールのディスク。

6 にアルミホイールのディスクを示す。これは加工材である 6061 合金を用いて溶湯鍛造により製造したものである。高強度材を用いることにより、他の鑄造法による製品よりも軽量化することができ、コスト差をなくすることができる例である。

5. 複合材料製造への適用

溶湯鍛造法の特長の 1 つは、各種の金属基複合材料製造プロセスの中で最も経済的な方法であることである。

5.1 製造法

溶湯鍛造法により複合材料を製造する方法では、ウスカや繊維などの強化材料を前もってプリフォームとして成形しておくか、または型内に前もって充填しておき、それに圧力を利用して熔融金属を浸透させ、そのまま圧力下で凝固させる。この複合化法で重要な点は次のようである。

- (1) 熔融金属が凝固する前に浸透を完了させること。
- (2) プリフォーム内に存在している空気と熔融金属の置換を上手に行うこと。

複合材料の強化用に用いられるセラミック系の繊維や粒子は熔融金属に対し、一般にぬれ性が悪い。ぬれ性を知る方法としては、図 7 のように固体上に置かれた液滴が固体に接する角度（接触角）で判断されている¹⁷⁾。この角度と液体や固体の界面張力の間に Young の式と呼ばれる式(4)の関係がある。

$$\gamma_{SG} = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos \theta \quad \text{----- (4)}$$

γ_{SG} : 固相-気相の界面張力

γ_{SL} : 固相-液相の界面張力

γ_{LG} : 液相-気相の界面張力

θ : 接触角

ここで、プリフォームの繊維間隙の空間を半径 r の毛細管状であると仮定すると、接触角 θ の材料でできた毛細管内へ熔融金属を押し込むために必要な圧力 ΔP は式(5)のようになる¹⁸⁾。

図 7 液体と固体間の接触角と界面張力のバランス。

図8 接触角をパラメータとした場合の毛細管半径と液体を圧入するために必要な圧力。

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r} \quad (5)$$

従って、ぬれ性の悪い材料のプリフォームに対して、浸透を開始させるためには ΔP 以上の圧力が必要である。この関係を図8に示してある。

一方、浸透を開始すると、細い隙間を流れるため、大きな流動抵抗が存在する。細管内の流れと両端の圧力差との関係は式(6)のポワズイユ(Poiseuille)の式により与えられる¹⁹⁾。

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\pi(P_1 - P_2)r^4}{8L\mu} \quad (6)$$

r : 管半径

L : 管の長さ

μ : 流体の粘性係数

V : 流量

t : 時間

ここで、管内の流体の平均流速を $\bar{V}$ とすると、式(6)は次のようになる。

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{8\bar{V}L\mu}{r^2} \quad (7)$$

流体をアルミニウムと考え、 $\mu = 2.9\text{cP}$ 、管の長さ $L = 5\text{cm}$ として計算した結果が図9に示してある。平均流速の大きさにより管両端の圧力差は違ってくるため、 $\bar{V}$ をパラメータにとってある。実際に複合化する時の $\bar{V}$ は 1cm/s ぐらいと思われるため、半径

図9 平均流速をパラメータにとった場合の毛細管半径と両端の圧力差の関係。

$1\mu\text{m}$ の間隙に押し込むために必要な圧力は数十 MPa 以上であることが知られる。同じ半径の間隙に対して、ぬれ性に基ずいて必要になる圧力は接触角が 180° の場合について考えてみても、図8から数 MPa であることがわかる。従って、この2種類の圧力の和が圧入に必要な圧力である。しかし、一般には流動抵抗の方が、ぬれ性に基づく圧力よりも大きいことがわかる。

一方、図9から知られることは、1つのプリフォーム内でも繊維間隙が大きい部分には低い圧力で押し込むことができ、間隙の小さい部分には高い圧力が必要である。そこで、間隙の大きい所に先に溶融金属が進入し、間隙の小さい所には空気が閉じ込められることになる。しかし、得られた複合材料について、経験的には残存空気の悪影響はほとんどない。

もし、プリフォームの予熱温度が金属の熔点以下であるならば、溶融金属の浸透過程で繊維との熱交換により金属の一部が凝固するであろう。生じた固相が繊維表面に成長すると考えると、みかけ上繊維体積率が増加したことと同じになり、繊維間隙が小さくなり、より高い圧力を必要とすることになる。

5.2 溶湯鍛造法の利点

複合材料製造法は多数あるが、その中で溶湯鍛造

法が工業的には最も経済的で実用的であると思われる。このプロセスの利点は次のようである。

- イ) 最終製品に近い形状で複合材料製造が可能である。
- ロ) 複合材料が製品の一部分に含まれるだけでよい場合に適する。
- ハ) 繊維や溶湯に特別な処理を施さなくても複合化が可能である。
- ニ) 製造コストが安い。

一方、溶湯鍛造法では加圧装置や金型を用いるため、製造できる製品の大きさに限界がある。

5.3 溶湯鍛造法による複合材料の例

溶湯鍛造による複合材料は、ウスカや短繊維によって強化された材料の開発研究が主である。初期には SiC ウスカが主に研究され、技術的にはほぼ実用化できる段階にあると思われる。しかし、民生用に複合材料を用いるにはコストが重要であるため、窒化けい素ウスカ²⁰⁾、チタン酸カリウム・ウスカ²¹⁻²³⁾、そしてアルミナ短繊維などで強化した材料、すなわち製造コストの安くなる可能性のある複合材料の開発が盛んに行われている。実用化の例として最も代表的なものが、ディーゼルエンジン用ピストンのトップリング溝部の摩耗を抑制するため、この部分だけにアルミナ・シリカ系の短繊維を複合

図 10 アルミナ短繊維により強化したディーゼルエンジン用ピストン (エー・エム・テクノロジー提供)。

化したものが用いられている¹⁶⁾。その後、ディーゼルエンジンの排ガス規制強化に対応するため、図 10 に示すようにアルミナ短繊維で強化したピストンが採用されようとしている²⁴⁾。

6. お わ り に

本プロセスは、自動車用の小物製品製造を中心に多くの企業により採用され、金属製品製造プロセスとして主要な地位を確立しつつある。また、複合材料製造プロセスとして優れているのであるが、複合材料の評価データが少ないことなどが原因で、実用化されているものは極めて少ない。しかし、機械の性能に対する厳しい要求から、複合材料を採用せざるを得ない例が種々出てきそうである。本拙文が、これらの技術の発展に少しでも役立てば幸いである。

参 考 文 献

- 1) G.Welter:Z.Metallk.,23(1931),255.
- 2) 佐野忠雄, 本田和男:日本金属学会誌, 20(1965), 696.
- 3) V.M.Plyatskii:Shtampovka iz Zhidkogo Metalla,Moscow,(1964),英訳 Extrusion Casting (Primary Sources),1965.
- 4) 栗野泰吉, 鈴木鎮夫, 落合正男:塑性と加工, 4(1963-2),109.
- 5) 柳沢昇雄:金属, 35(1965),3月1日号(No.5),33.
- 6) 鈴木鎮夫, 落合正男, 伊藤 勝, 白柳 格, 栗野泰吉:名古屋工業技術試験所報告, 10(1961),299.
- 7) 鈴木鎮夫:鋳物, 41(1969),524.
- 8) 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),895.
- 9) Y.Nishida and H.Matsubara:Z.Metallk., 71(1980),189.
- 10) A.Jayaraman,W.Klement Jr.,R.C .Newton and G.C.Kennedy:J.Phys.Chem.Solids,24(1963),7.
- 11) Y.Nishida and H.Matsubara:British Foundryman,69(1976),274.
- 12) 西田義則, 鈴木鎮夫:軽金属, 22(1972),628.
- 13) 松原永吉, 村上秀樹:自動車技術, 34(1980),749.
- 14) 後藤靖夫:鍛造技術, Vol.12(1987),19.
- 15) 矢幡茂雄:第2回アルミニウム鍛造技術講座資料(1987),34.
- 16) 堂ノ本忠:自動車技術, 37(1983),884.
- 17) 小原嗣朗:日本金属学会会報, 14(1975),581.
- 18) A.W.Adamson:Physical Chemistry of Surfaces, 4th Ed.(1982),John Wiley & Sons,Inc.
- 19) W.J.Moore:Physical Chemistry,(1955),東京化学同人.
- 20) 松原弘美, 西田義則, 白柳 格, 山田 守:軽金属, 39(1989),338.
- 21) 大泉真哉, 西田義則, 榎 寛, 山田 亨:アルトピア, 18(1988),41.
- 22) 西田義則, 今井恒道, 山田 守, 松原弘美, 白柳格:軽金属, 38(1988),515.
- 23) 菅沼克明, 藤田輝昭, 新原皓一, 鈴木信幸:軽金属学会第75回秋期大会講演概要(1988),81.
- 24) 日経ニューマテリアル, No.63(1989),32.