

Techno Scope

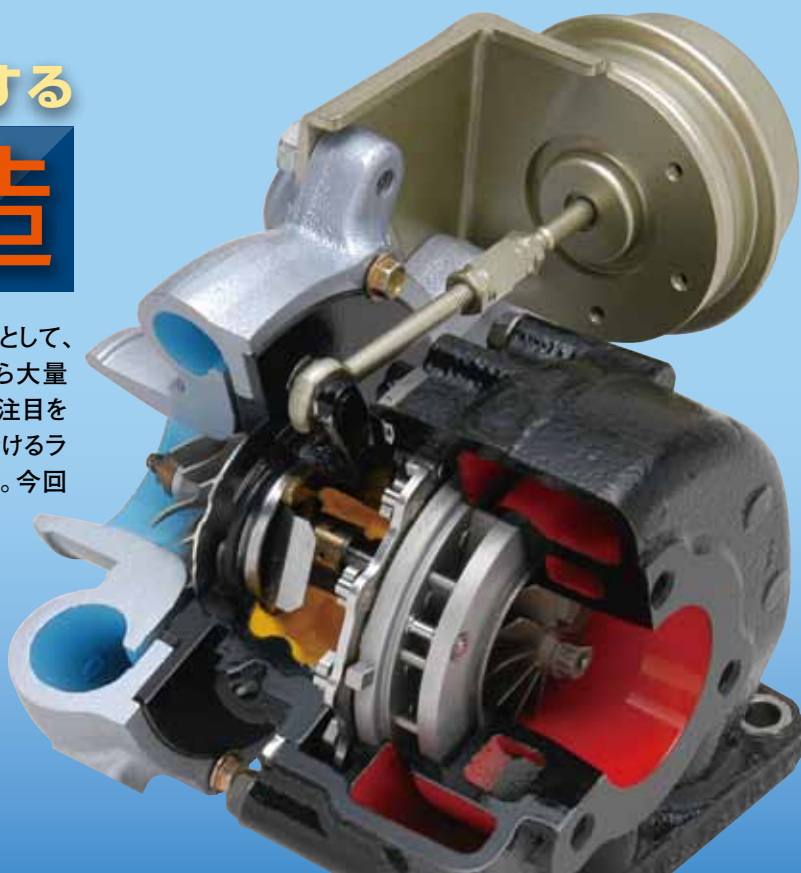
ニアネットシェイプを実現する

精密 鑄造

素材を加工し、効率的に最終製品の形状を作り出す方法として、人類が最も古くから利用している鑄造技術は、一点物から大量生産まで、ものづくりを支える重要な技術である。最近、注目を集めている3Dプリンターも、鑄造分野では、模型試作におけるラピッドプロトタイプング技術として、早くから取り入れている。今回は特に精密鑄造について、最近の技術動向を紹介する。



ガソリンエンジンでは精密鑄造により製造された軽量のチタンアルミ合金タービンホイールを採用している例もある。
(写真提供:三菱自動車工業(株))



ディーゼルエンジンに搭載されているターボチャージャー(写真はカットモデル)は、自動車の燃費向上のためガソリンエンジンにも搭載されるようになっていく。
(写真提供:三菱重工業(株))

古くて新しい精密鑄造技術

一般に、圧延や鍛造等による素材加工、圧延・鍛造(板金プレスを含む)等の素材を必要な寸法・形状に変形させる塑性加工、切削や研削等の機械加工等、複数の工程を経て、素材から最終製品が作り出されている。ニアネットシェイプ成形とは、このような加工工程を極力減らし、高品質と低コスト化を実現する方法である。ニアネットシェイプ成形技術には、精密鍛造や粉末成形、金属粉末射出成形(MIM: Metal Injection Molding)等、いくつかの種類がある。中でも寸法精度が高い精密鑄造は、ニアネットシェイプ成形のニーズに適した成形技術である。

鑄造技術は5,000年もの歴史を持つ技術といわれている。鑄造とは、型に溶融した金属を流し込み、冷却して凝固させることで目的の形状を得る技術であり、通常の鑄造製品の場合、砂にベントナイト(粘土の一種)と水を混ぜた鑄型砂を固めたものを鑄型として使い、製品模型(原型)として木型を用いる。精密鑄造技術も美術品の製造技法として古代から用いられ、模型材料にワックス(ろう)を用いるのが特徴である。現代でも歯科治療に使用する歯冠補綴(しかんほてつ:被せ物)の製作に用いられている。

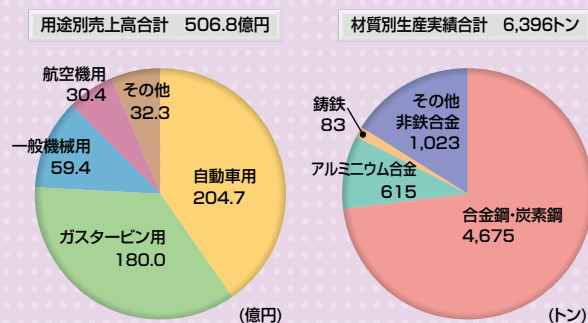
精密鑄造技術の産業への応用は1930年代に始まった。当時、戦闘機にはより高速かつ高高度での飛行能力、高い操縦

性能が求められていた。そこで採用されたのが過給機(ターボチャージャー)であり、タービンブレードの製造には、高度な精密鑄造技術の発達が不可欠であった。

現在、精密鑄造は一般機械、自動車、航空機、ガスタービン等の分野で用いられており、日本では生産量、売上高とも自動車用が半数以上を占め、現代社会を支える重要な産業分野となっている。

精密鑄造品の用途別売上高と材質別生産実績(2012年、国内)

売上高はほぼ拮抗しているが生産量は自動車用が約4,200t、ガスタービン用が約670tである。重量(生産量)当たりの価格は、ガスタービン用や航空機等用では自動車用の5倍以上であり、高品質、高付加価値鑄造品が大きな売上を占めていることが分かる。



(出所:経済産業省 鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計年報)

精密鑄造技術の種類と特長

精密鑄造では、ワックス模型を用いるロストワックス鑄造法他に、セラミック鑄型を用いるセラミックモールド法、石膏鑄型を用いるプラスターモールド法等が代表的である。セラミックモールド法はポンプのインペラ等に、プラスターモールド法は鉄よりも融点の低いアルミ合金等の部品製造に用いられ、ターボチャージャのインペラ（コンプレッサー側）の製造に利用されている。なお、3つの鑄造法の中ではロストワックス鑄造法が最も寸法精度がよく、一般公差は $\pm 0.25 \sim 0.8\%$ である。

いずれの鑄造法でも、適用可能な材料の種類が豊富であり、特に鍛造やプレス加工では成形が難しい耐熱材料等の難加工性材料の成形が可能である。さらに、難加工材料でも鑄肌が美しく、精度の高い鑄物の量産が可能であり、複雑形状で加工工数の多い部品を、少ない工数で製造でき、部品の一体化による強度等の性能向上も期待できる。特に鑄型を高温にして鑄込むロストワックス鑄造法では湯流れ性が高く、肉厚の薄い部品の鑄造が可能で、一般に精密鑄造という場合はロストワックス鑄造法を指す場合が多い。

また、ロストワックス鑄造法では精密な中子を使用することで、塑性加工や機械加工、MIMプロセスでは難しい中空構造を効率的に実現できる。さらに、MIMプロセスと比較して、大型の部品（数g～数十kg）を鑄造できるメリットもある。

精密鑄造の適用例としてよく知られているのは、自動車用ターボチャージャのインペラである。ターボチャージャのタービン部は約 $1,000^{\circ}\text{C}$ の高温と20万rpmを超える高速回転に耐えるため、難削性のニッケル基合金が用いられているが、複雑形状部品の量産化にはロストワックス鑄造法以外に成形法がない。なお、ターボチャージャのハウジングにも精密鑄造技術が用いられる場合があり、 700°C 以下ではダクタイル鑄鉄、 $1,000^{\circ}\text{C}$ 以上ではオーステナイト系ステンレス鑄鋼等が、温度に応じて選択される。

鑄造技術の最大の特徴である中子*を利用した中空構造の実現は、青銅器時代から利用されている技術であるが、現代の精密鑄造においてもキーテクノロジーとなる重要な技術分野で、特にタービンプレードの製造においては極めて重要である。高温で使用するブレードには、冷却用の中空構造が必要である。最薄部では肉厚が1mmで、内部空間の幅が1mmという場合もあり、厳しい寸法精度が求められる。このような高精度の中子製造技術はタービン分野では最重要技術の1つである。

また、精密鑄造の特長として、結晶粒制御が可能であり、一方凝固部品や単結晶部品の製造が可能である。このような結晶粒制御により、高温・高速で回転するタービンプレードのクリープ強度が向上し、超高温高効率ガスタービン等の実現を支えている。

*中子（なかご）：鑄物の中空部を作るための鑄型

ロストワックス鑄造法の工程例

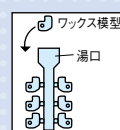
金型製作・ワックス模型成形

金型や中子部分を分割することで、通常の鑄造や機械加工では実現が難しい複雑形状のワックス模型を成形することができる。

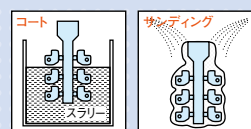


ツリー組立

湯口と複数のワックス模型を繋げて、ツリー状に組み立てる。



コーティング

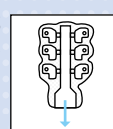


コートとサンディング、乾燥を数回繰り返すことで、鑄型に十分な厚みを持たせる。



脱ろう

加熱し、鑄型内部のワックス模型を溶かし出す。



鑄込み

焼成した鑄型を、約 $1,000^{\circ}\text{C}$ に保持したまま、熔融金属を流し込む。



型ばらし

鑄型を取り除き、鑄物を取り出し、湯口や押湯を切り離す。



切断仕上げ

鑄造時に生成する酸化物等を除去する。



（写真提供：キングパーツ（株））

複雑形状を実現するロストワックス鑄造の工程

ここでは、精密鑄造の例として、ロストワックス鑄造法の工程について詳しく見ていく。

ロストワックス鑄造法では、ワックス模型を製造するための精密な金型を製作することから工程が始まる。

まず、金型を使用して射出成形によりワックス模型を作成する。次に、この複数のワックス模型を、効率よく鑄込むために、ワックス製の湯口(ワックスを抜き取ると共に、熔融金属を流し込む流路)にツリー形状に取り付ける。

製品と湯口のワックス模型を、耐火度が高く、熱膨張の少ないジルコン砂や熔融石英粉等と強力な粘結剤を混合した泥状の鑄型材(スラリー)に浸漬(コート)する。スラリーが乾燥する前に耐火物を振りかけ(サンディングまたはスタッコイング)、乾燥させ、このコートとサンディングを数回繰り返すことによって鑄型に十分な厚みを持たせるのである。

十分に乾燥させた後、ワックス模型と鑄型を加熱することで、内部のワックス模型を溶かし出し、空洞を得る。この工程が「ロストワックス」の語源である。

ワックス模型を溶出した鑄型は高温で焼成された後、熔融した金属を流し込む「鑄込み」が行われる。最後に、金属材料が冷却・凝固した後、鑄型を壊して鑄物を取り出し、切断や熱処理等の加工を行う。

ロストワックス鑄造法の技術開発

ロストワックス鑄造法はほぼ完成されたプロセスともいえるが、その周辺技術である鑄型材料、ワックス材料等には、いっそうの技術開発が求められている。

(独)中小企業基盤整備機構の「精密鑄造品高度化に向けた造形技術の開発(平成18～20年度)」プロジェクトでは、鑄型に用いられるジルコン砂の代替材料の開発が行われた。ロストワックス鑄造法では、スラリーや耐火物粒(スタッコ材)として微細粒子化されたジルコン砂(ジルコンフラワー)を用いる。しかし、ジルコン砂は天然資源であり、資源枯渇、供給不安定、価格高騰、リサイクルが難しい等の課題があった。自動車や航空機分野の他、燃料電池分野等でも薄肉・複雑形状の重要部品に使用される精密鑄造品の製造にジルコン砂は不可欠であり、その代替材料の開発が求められていた。

プロジェクトでは、精密鑄造品の表面品質を決定するプライマリーコート(精密鑄造鑄型の1層目及び2層目)用の人工材料を開発した。材料には融点が高く、熱膨張係数が低い Al_2O_3 - SiO_2 系の合成ムライト(人工セラムックス砂)が採用された。



精密鑄造による部品の例

(写真提供:キングパーツ(株))

スプレッドライヤ(噴霧乾燥)方式で合成された粒状の合成ムライトは、スラリーとスタッコ材に使用されている天然ジルコン砂と同等以上の鑄肌を実現できることが確認され、国産化率100%という目標が達成されている。

また、ジルコン砂はセラミック中子にも使用されており、この代替材料の開発もプロジェクトの目的の1つである。セラミック中子は鑄造後にアルカリ水溶液で溶解させるため、材料には熔融シリカが用いられている。同プロジェクトでは代替材料としてアルミナを使用したセラミック中子を開発した。セラミック中子は比較的小型のものはCIM(Ceramic Injection Molding)法、大型のものはスリップキャスト法*により製造され、鑄造メーカーでの製造が可能になった。高精度のセラミック中子の国産化は国際競争力を強化する上で極めて重要である。

また、ワックスの代替材料の開発と性能向上も解決すべき課題である。現在、石油由来のワックスが約70%であるが、資源の枯渇は確実であり、価格も高騰している。さらに、大型の精密鑄造品の製造には、大型のワックス模型が必要であるが、ワックス模型を大型化すると自重を支えきれないため、補強材を使用する必要がある。加えて、ワックス材料の融点が60℃前後であるため、ワックス模型の製造からコート・サンディング・脱ろうまでの工程で、温度管理が必要という課題が指摘されている。これらの課題の解決には、いっそうのワックス材料の性能向上が必要である。

注目される3DプリンターとRP技術

鑄物には、熔融金属を流し込むための鑄型が必要であり、鑄型の作成には製造する鑄物と同じ形状を持つ模型が必要である。最近、3Dプリンターについてさまざまなメディアで取り上げられているが、鑄造技術の分野では30年以上前からラピッドプロトタイピング(RP)技術として、3Dプリンターを活用した模型の試作が行われている。ラピッドプロトタイピングを直訳すると迅速試作品製作であるが、RP技術の原理である「層を積み重

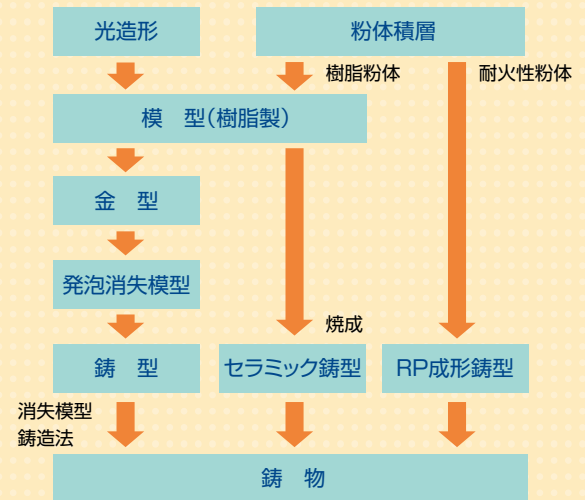
*スリップキャスト法：セラムックス成形法の一つで、セラムックス粉末のスラリーを成形型に注ぎ、乾燥させて、成形する方法。

主なRP技術

	光造形法	溶融体積法	薄板積層法	粉体固着法
成形体材料	光硬化性樹脂	熱可塑性樹脂	紙樹脂フィルム	樹脂、砂、金属(粉末)
断面形状成形法	レーザ光スキャン	加熱塗布	カッター切断 レーザ切込み	レーザ加熱 バインダ塗布
固化積層手法	レーザ光照射	冷却固化	接着剤・貼合せ	加熱融着 糊固化

RP技術の代表例と、鑄造工程への応用例を示した。ここでは所謂「3Dプリンター」方式のみを紹介したが、この他にもワックス塊を切削加工してワックス模型を製造する方法もあり、専用のワックス(マシナブルワックス)も市販されている。RP技術は試作品製造には適しているが、現製品の模型製造に適しているとはいえない。

RP技術を応用した鑄造工程



(出所:北海道立工業試験場報告 No.305)

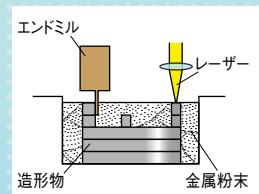
ねて形を作る」ことから、積層造形と訳される場合もある。RP技術にはインクジェット法や光造形法等、さまざまな種類がある。

「光造形」は「ステレオリソグラフィ」とも呼ばれるRP技術で、特定の波長の光を照射すると硬化する樹脂を用いて積層造形を行う。「粉体固着法」では、粉体に、石膏や砂、金属、樹脂やワックス等が用いられ、粉末をバインダーで結合させる方式と、レーザー等により融着させる方式がある。「溶融堆積法」は、ABS樹脂やナイロン樹脂等の熱可塑性樹脂を用いる方式で、専用ノズルから加熱して軟化させた樹脂を射出して層を形成していく方式である。「薄板積層法」は、文字通り紙やプラスチック等の薄いシートを断面形状に切り取り、接着剤で貼りあわせていく方式である。

期待されるRM技術の実用化

現在、RP成形体はワックス模型用金型の試作工程で用いられているが、耐火性材料を積層して直接鑄型を製造する技術の開発も行われている。経済産業省は平成25年度から「超精密三次元造形システム技術開発プロジェクト」を開始している。これは、ものづくり産業の基盤技術である鑄造の生産プロセスの革新的技術開発として、高速三次元(3D)積層造型システムを構築するものである。プロジェクトでは5年以内に砂型(鑄造鑄型)を現在の10倍の速度で製造できる積層造型装置の開発を目指している。同プロジェクトにより、試作品製作の期間とコストの大幅な削減が期待されるが、日本のものづくりにおいてはRP技術を試作に留まらず、鑄造鑄型の低コスト・高速生産等の量産化へ展開したRM(Rapid Manufacturing)

3Dプリンターによる金型製作の仕組みと製作例



0.05mm厚の金属粉末材料をレーザーで焼結、積層する。0.5mmまで積層した時点で、切削加工により仕上げる。写真は電動ドライバーの金型。
(写真提供: (株)松浦機械製作所)

技術の実用化がより重要になっていくであろう。RM技術の実用化によって、大型一点鑄造物や高品質、高付加価値鑄造品の低コスト・短納期での生産が可能になる。

現在、自動車用ターボチャージャーの精密鑄造品の日本の世界シェアは約60%であるが、中国、韓国等の製品が徐々にシェアを伸ばしている。精密鑄造は、設計、製造、検査等、ものづくりの全ての技術を結集する総合技術であり、そこに関わる技術者の「技能」に負うところが大きい分野でもある。つまり、技術そのものの高度化に加えて、確かな技能の確実な伝承や、これまで以上のユーザーに対する用途開発・用途提案が求められている。複雑形状の「カタチ」だけを売るビジネスモデルではなく、精密鑄造品が実現する「機能」を提案・提供していくことが、今後いっそう求められるのではないだろうか。

- 取材協力 早稲田大学・中江秀雄名誉教授、(一社)日本鑄造協会、(株)ブライソン・ジャパン、三菱自動車工業(株)、三菱重工業(株)、キングパーツ(株)、(株)松浦機械製作所
- 文 石田 亮一