



入門講座

素材を形に～素材の加工方法～1

素形材加工技術としての鑄造

Casting Process as the Materials Processing Technology

旗手 稔

Minoru Hatate

近畿大学 次世代基盤技術研究所・所長
工学部機械工学科
教授

1 はじめに

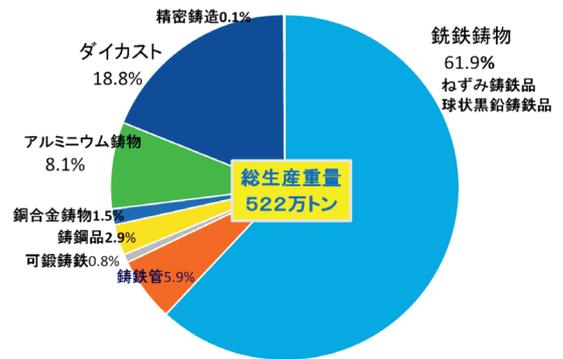
鑄造技術は型を使用して製品形状に成形する素形材加工法の一つである。この技術で成形された製品は鑄物と呼ばれ、5千年の歴史がある¹⁾。我が国の鑄物製造は鍋や釜に始まり、銅鐸、銅鏡や銅銭、大仏や大砲の製造までを考えてもわかるように²⁾、鑄物の歴史³⁾は文明が発展していった歴史学的な経緯、その時代が何故栄えたかなどの地政学的な背景、さらには考古学的な学問体系などを考慮しないと語ることができないし、理解できないと思っている。鑄造は古くから活用されてきた便利な技術であり、工夫する知恵次第で形状に制約を受けない熱間加工品を溶製することができるので、現在でも多くの素形材を供給できる欠くことのできない加工技術であることは周知の事実である。鑄造という技術は工業的にどのようなものがあり、どのように使われているのか、また何故使い勝手が良いのか、技術的にどのように発展しているのか、現状の課題は何か、そのあたりの概要に絞って紹介する。

2 鑄造品の分類とその生産量の推移

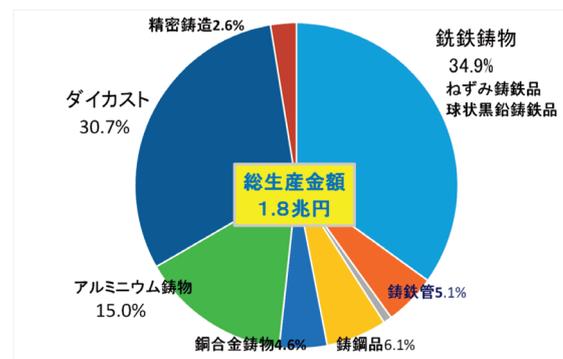
鑄造品は経済産業省の生産動態統計から、ねずみ鑄鉄と球状黒鉛鑄鉄の「鉄鉄鑄物」、「鑄鉄管」、「可鍛鑄鉄」、「鑄鋼品」、「銅合金鑄物」、「アルミニウム合金鑄物」、アルミニウム合金と亜鉛合金などの「ダイカスト」、「精密鑄造品」に分類できる。2016年の生産重量と生産金額で表示すると図1のようであり、生産重量は約520万トン、その市場は約1.8兆円産業である。鑄造品の生産重量のうち鉄鉄鑄物は約60%を占め、その鉄鉄鑄物の生産重量の約60%は自動車用鑄物であるから⁴⁾、自動車産業の動向が如何に鑄物生産量に影響を及ぼすかがわかる。また、世界の鑄物生産量⁵⁾の推移を調査すると、我が国は中国、インド、アメリカに次いで世界第4位である。2005年から2015年までの生産量は世界的には年々増加に推移して

おり、なかでも中国とインドが大きく寄与し、アメリカ、ロシアや日本は減少傾向になっているが、ドイツはほとんど変動していない。

我が国における鑄物製造は大企業でも生産されているが、中・小規模の專業鑄物メーカーに大きく依存している産業である⁶⁾といえる。この中・小規模の專業鑄物メーカーにおける技術力の向上と人材育成は鑄物産業の発展に欠くことのできない重要な課題として直面した。そこで、2004年に我が国の鑄造技術における先進国の地位を今後20年間維持するた



(a) 鑄物生産重量



(b) 鑄物生産金額

図1 2016年の我が国における鑄物生産重量と生産金額

めに、危機感を感じた学・協会（(公社) 日本鑄造工学会と（一社）日本鑄造協会）は一体となってその方策を打ち出した。「鑄造カレッジ」事業として、鑄造技術者として中核をなす人材を育成する計画を策定し、継続して展開されていることを付記しておく⁷⁾。

3 鑄造技術の定義

鑄造とは、要望する形状の模型を介して、その空間をもつ鑄型を耐火性のある砂や金属などの物質で形作り、その空間に溶融した金属・合金を流し込み、そのまま凝固させることで成形する加工法をいう。鑄造技術は模型の形状を鑄型に、そしてその鑄型から鑄造品へ転写させる技術であるとも解釈でき、複雑な形状になればなるほど、また鑄型に中子を設置しておけば簡単に中空の形状も成形できることなどが他の加工法より優位な技術であると評価できれば、採用される。鑄造でなければ成形できない工業部材も多く、さらにはほとんどの金属材料に適用できて、数グラムから百トンを超える重量の基盤産業部品を供給している現状がある。

鑄造法は鑄型の種類によって分類され、砂型鑄造法と金型鑄造法に大別される。砂型鑄造法は鑄物砂を粘結させる方法によって、生型鑄型、熱硬化型鑄型、ガス硬化型鑄型、自硬性鑄型、凍結鑄型などがあり、金型鑄造法では溶融した金属・合金を充填させるときの溶湯に負荷される圧力の違いによって、重力鑄造法、低圧鑄造法、高圧鑄造法（いわゆるダイカスト法）があり、これら以外の特殊鑄造法には精密鑄造法、遠心鑄造法、消失模型鑄造法、Vプロセス法などがあり、それぞれがさらに細分化される。

4 鑄造方案とCAEの活用

鑄造は固体の材料を液体状態に溶解した後、液体状態のまま鑄型に鑄込むと再び液体から固体へ凝固するといった相変態を伴う熱間加工法である。2次元図面または3次元CAD図面による製品形状が決定されると、健全な鑄物にするためには、図2⁸⁾に示す各種の有効な役割を演じる付属品を設定する鑄造方案を決定しなければならない。すなわち、鑄造品の材質は溶湯を鑄型内の製品空洞部へどのように充填させるか、充填後にどのような順序で凝固させるか、これらの要因が影響する。前者は「湯口方案」であり、後者は「押し湯方案」である⁹⁾。

湯口方案は定性的には溶湯を「静かに速く」充填させ、異物やスラグが混入しないように配慮される。溶湯は非定常・非圧縮性を有する粘性流体の湯流れとして取扱い、溶湯の種類に応じて乱流が起らず、できるだけ層流になるように考

慮する。その指標として、湯口比（＝湯口断面積：湯道断面積：堰の総断面積）から判断されてきた。最近では鑄造CAE技術¹⁰⁾を駆使した有限差分法（FDM）や有限要素法（FEM）によってシミュレーションされ、自由表面の移動を伴う湯流れ解析としてSOLA-VOF法などで計算する手法が導入されている。一方、押し湯方案では鑄物の最終凝固位置近傍に押し湯を設けることにより、押し湯部が最終凝固位置になるように設計して引け巣欠陥を生じさせ、鑄物は健全な無欠陥状態にする工夫が施される。簡単には鑄物の凝固時間は鑄物の体積Vと表面積Aを因子とする鑄物モジュラスM（＝V/A）の2乗に比例するChvorinovの式から評価し¹¹⁾、押し湯を設定する。湯流れと同様に有限差分法（FDM）や有限要素法（FEM）を活用し、充填した溶湯が凝固するまでの過程を非定常・熱伝導解析シミュレーションで計算し、引け巣の発生をなくすためには鑄物製品部が指向性凝固するように設定し、最低限必要な大きさの押し湯が鑄造方案に組み込まれる。

ねずみ鑄鉄溶湯が鑄型空洞部を充填していく様子とその温度分布の計算例を図3に示す。溶湯が充填した時点では鑄込み側の湯口に対して反対側の位置における温度が低く、この位置で湯周り不良や湯境に起因する欠陥が発生する可能性が示唆される。このように、溶湯が充填した時点における製品各部の温度はそれぞれ異なることがわかる。次に伝熱解析に移行し、溶湯が凝固して引け巣が発生するか否かを判定する。この完全な判定は非常に困難である¹⁰⁾が、固相率、温度勾配（Niyamaパラメータ G/\sqrt{R} ¹²⁾、ここではG：温度勾配、R：凝固速度）や収縮率を温度低下とともに鑄物を要素分割した各位置で計算し、引け巣欠陥位置と鑄物形状変化などを予測する。図4に、図3で溶湯が充填した後凝固解析を実施した例を示す。 G/\sqrt{R} をパラメータとして鑄物断面を追跡していくと、同図の(c)及び(d)に表示した矢印の位置では溶湯の流動が停止し、引け巣の発生危険位置と大きさが推定できる。また、温度変化に伴う収縮率から材料の変形を計算した同図(b)では、この鑄物の外周部から中央空洞部に

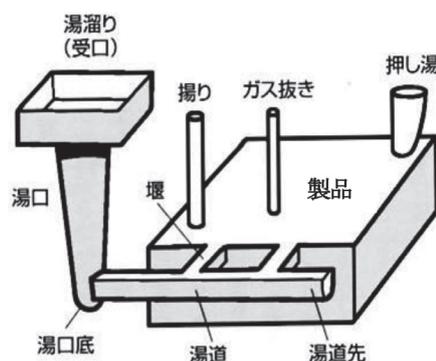


図2 鑄物の製品部と付属する各部の名称

収縮する寸法変化を考慮して製品形状を決定する必要があることになる。これらの鑄造CAE技術の発展により、鑄造方案に要する時間と試作工数の低減が達成され、解析の標準化とそのシステムの構築によるデータベース化がさらに普及すれば、総合システムとして鑄物の高付加価値化と品質向上の具現化さらには鑄造技術の伝承に繋がると考えられる。

5 鑄造技術の特徴と進展

製品形状には、①複雑な3次元形状を有する曲面がある、②中空の要素設計部品である、③大型製品である、これらの

要素が複数ある設計要求であれば、鑄造技術の優位性が発揮できる。例えば、大型船舶のスクリューの場合、形状は3次的に複雑な湾曲を有しており、図面にR部のすべてを指定して機械加工することはできないので、鑄造品として製造される。自動車のシリンダーブロック、エキゾーストマニホールドやブレーキディスクローター、カムシャフトなどは中空の複雑形状であるが、中子を利用した鑄型を作製すれば、1回の加工工程で成形できる利点から鑄造で製造される。最近では、乗用車シリンダーブロックの材質は燃費向上に伴う軽量化対策として、鑄鉄材からアルミニウム合金ダイカスト材へ変更されたが、今後も鑄造技術で製造されると予想でき

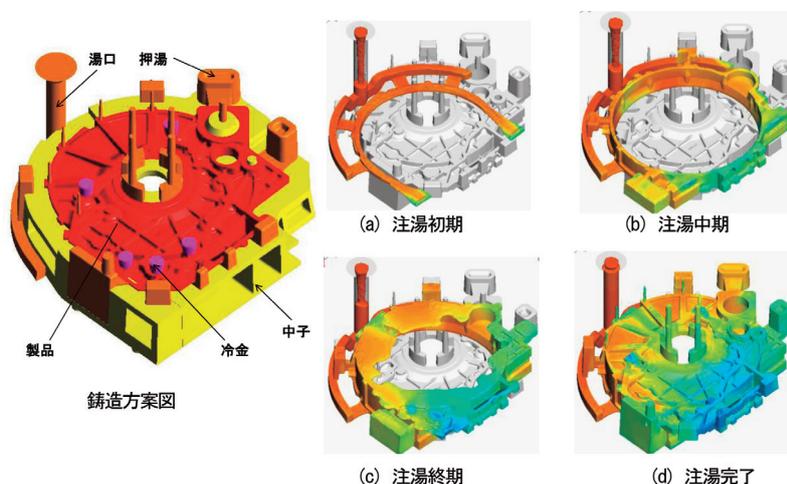


図3 湯流れ解析の例（溶湯の鑄込み開始からの時間経過 (a), (b), (c), (d) の順に充填する様子を温度分布で表示, 使用ソフト: JS CAST)

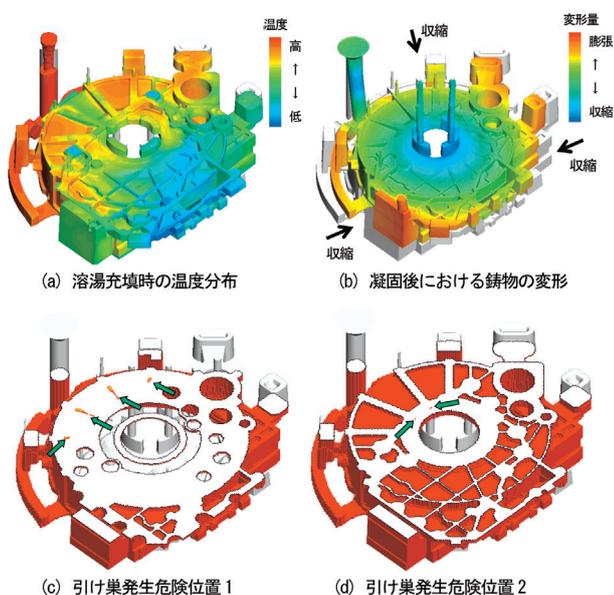
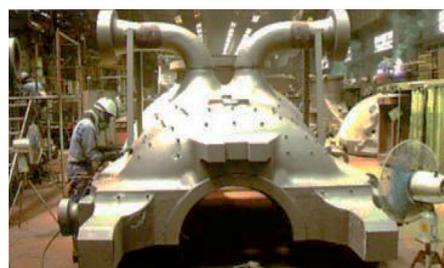


図4 凝固解析の例 ((a): 温度分布表示, (b): 変形量表示, (c), (d): G/\sqrt{R} の評価, 使用ソフト: JS CAST)



(a) 外部車室 (42 トン)



(b) 水力発電部品 (73 トン)

図5 大型複雑形状の鑄物(出所: (株)宇部スチール会社案内カタログ, <http://www.ube-ind.co.jp/ubs/>)

る^{13,14}。また、図5に示すような数10トン以上の大型形状部品では旋盤やフライス盤による加工、さらに溶接で肉厚部を接合することには限界がある。これらが鑄造技術の優位な実用例として列記した。

しかしながら、鑄造品における最大の問題点は引け巣などの鑄造欠陥と鑄造応力の発生であり、鑄造欠陥は前述した鑄造CAEを駆使して対応し、発生する鑄造応力は熱処理によって除去される。ところが、鑄造時における不純物ガスの巻き込みによって凝固現象に想定できない影響が発生することがあり、これらの課題は次のような対応策が検討される。欠陥が発見されるとその対処法を迅速に策定するための追跡調査が展開される。鑄造品の製造工程をロットで管理するのではなく、1品ごとの鑄造品を管理するトレーサビリティという手法¹⁵が最近では導入され、健全な素材材として信頼性を確保するための技術として注目されている。不良品が発生した場合の追跡調査が容易にできるシステムとして構築され、各企業の考え方に依拠して実施されている。また、最近では非破壊で検査する技術が進歩し、X線や超音波による鑄造品を断層観察できる装置が活用されることもある¹⁶。内在する組織不良を含む鑄造欠陥の大きさに関する考えが発注・購買者や設計者と共通の認識をもつ必要がある。あつてはならないが、仮に引け巣などの鑄造欠陥が検出されたとすると、鑄造技術者はこの欠陥の大きさであれば使用可能か否かを破壊力学的見地から判断するための考え方¹⁷を学修し、機械設計者へ説明するための知識をもつことも余儀なくされてきている。

6 鑄造品の具体的な製造例と最近の発展した応用技術の適用

6.1 砂型鑄造品

砂型鑄造品のうち、生型鑄造法による鑄物生産量が最も多い自動車部品は比較的小物に分類される量産品である。主型としてベントナイトと添加剤と水分を混合し、各種造型機（ジョルトスクイズ、ダブルスクイズ、ブロースクイズなどの造型法、高圧や静圧造型法、ディサマティック造型法など¹⁸）を使用して造型する。ねずみ鑄鉄品として製造される乗用車のブレーキディスクローターの例を図6に示す。2枚の円盤の間にはブレーキ作動時の冷却用フィンを紹介した一体成形品設計となっており、主型に中子を設置して鑄造される。この中子の造型にはフェノール樹脂やレジンなどが被覆されたコートサンドを使用して加熱した金型を介して硬化させる熱硬化型鑄型（シェルモールド鑄型）、コールドボックス鑄型やエステルアルカリフェノール鑄型などで造型される。図5に示したような大物の非量産鑄物には自硬性鑄型が使用される

ことが多く、フランなどの樹脂を粘結剤と酸（スルホン酸など）を硬化剤として混練して造型した後に、時間が経過すると硬化剤の酸化反応により硬化させて造型する。鑄鋼の大型鑄物は鑄物砂と製品との焼付きによる欠陥の発生を完全に回避する方策がなく、鑄造後の後処理に費やす作業工数が課題となっている。その作業工数を低減させる技術¹⁹が評価され、導入される企業が増えている。

6.2 金型鑄造品

金型鑄造品は主にアルミニウム合金などの非鉄合金鑄物に広く使用される。金型の空洞部に充填される際に溶湯に加わる圧力が重力のみで特に加圧されない場合は重力鑄造法という。喫茶店のコーヒー・サイホンのような形式で、密封容器内で溶湯表面に不活性ガスを充填して加圧（0.04～0.12MPa²⁰）すると、溶湯内に給湯管を挿入して上方の鑄型へ押し上げて注湯する低圧鑄造法がある。自動車のホイールなど、溶湯の酸化はなく、指向性凝固が実現できるので欠陥のない精密な鑄造品が得られる。溶湯を機械的に10～200MPa²⁰の高圧で注湯する高圧鑄造、いわゆるダイカスト法は量産品の製造に多く活用されている。ホットチャンバマシとコールドチャンバマシに大別される。また、雰囲気制御した真空ダイカスト法、スクイズ法や低速低圧ダイカスト法などもある。図7は、高真空ダイカスト法を採用し、軽量化・一体化・薄肉化を徹底した材料開発が実現された自動車部品の製造例²¹である。また、厚肉ダイカスト品を製造するための手法（最大肉厚48mmで3.7kgの鑄造品）²²や半溶融ダイカスト法などの新技術^{23,24}（文献24は鑄鉄への応用技術である）も開発されている。

6.3 特徴のある鑄造品

消失模型鑄造法（フルモールド法）は模型を発泡ポリスチレンで作製して適当な鑄型で造型する。この模型は鑄型内に置いておき、そのまま注湯して溶湯の熱で模型を分解・燃

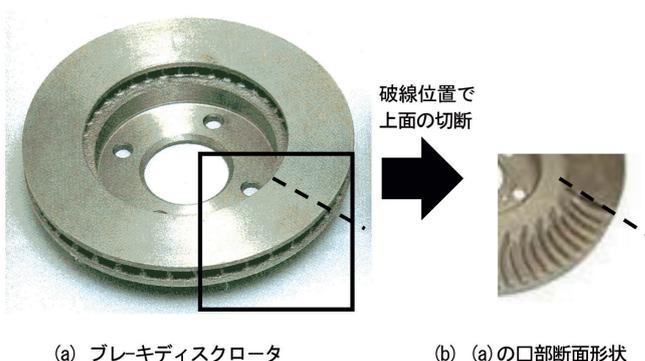


図6 乗用車ブレーキディスクローターの例（ねずみ鑄鉄品）

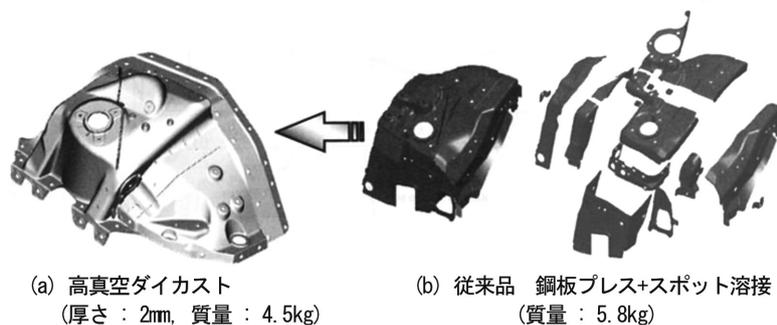


図7 NISSAN GT-Rのストラットハウジングの一体成形品

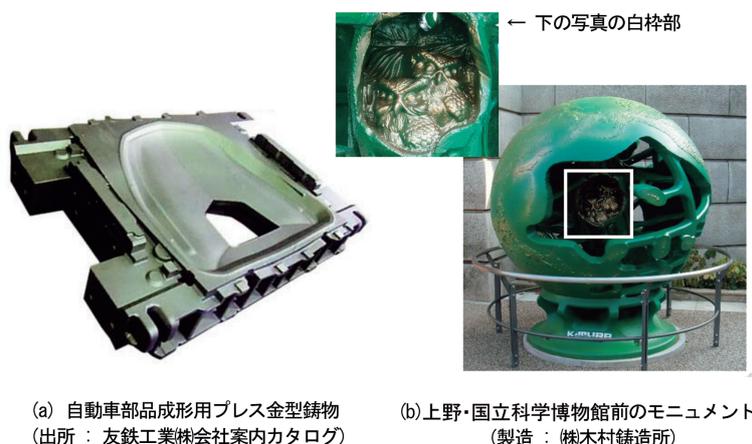


図8 消失模型鋳造法で溶製された鋳物の例

焼・消失させる。この方法では模型を抜く必要がないので、いわゆる「抜けこう配」を考慮した模型設計にしくなくてもよいことが最大の特徴・利点であり、製品歩留りの向上と加工工数の低減が図れる。それ故、図8に示すような自動車用プレスなど各種の金型用鋳物や中空の形状が複雑である鋳物（ここではモニュメントの例を示す）を製造する場合に重宝される。また、インフラ・環境整備に欠くことのできない鋳鉄直管は遠心鋳造法²⁵⁾で製造される。円筒中空品であるが、中子を必要としない長尺製品が図2に示した付属物なしで製造できる。

Vプロセス法は薄肉で直線性が高く、湾曲した形状、例えばグランドピアノのフレーム、鋳物ホーロー浴槽、門扉や建築用景観鋳物と構造部材（デパート外壁を彩るカーテンウォール²⁶⁾など）、さらには地下鉄のセグメント構造材料²⁷⁾などの鋳造品製造に広く適用される。ポリビニルフィルムで模型と分割面を覆い、鋳物砂のみを充填させてその面もフィルムで覆って減圧したまま模型を抜き取った後に鋳造する。湯流れ性がよく、良好な鋳肌の鋳造品が得られる。鋳造後に鋳型内を大気圧に戻して解砕すれば、鋳物砂はそのまま再生処理をしなくても再度使用できる。

精密鋳造品²⁸⁾は、その名前の通り精密で寸法精度が高い鋳造品が最終製品として製造できるネット・シェイプ成形法である。製品形状の模型をロウ(wax)で作製し、細かい粒状の各種セラミックスを懸濁させた有機溶媒にロウ模型を漬けて乾燥する。この工程を数回繰り返すとセラミックスが付着し、被覆された状態となり、加熱してこのロウを溶かして除去するとセラミックス鋳型となるので、ロストワックス鋳造法やインベストメント鋳造法ともいわれる。鋳型はセラミックス製であり、高温加熱して鋳造することができるので、航空機や発電に欠かせないタービブレードなどのNi基やCo基高融点合金でも容易に鋳造することが可能となる。強度を必要とする重要部品から実物大のクワガタ(手足の先は1mm以下)まで、製造できる例を図9²⁹⁾に示す。このように、精密で寸法精度の高い技術に発展している。

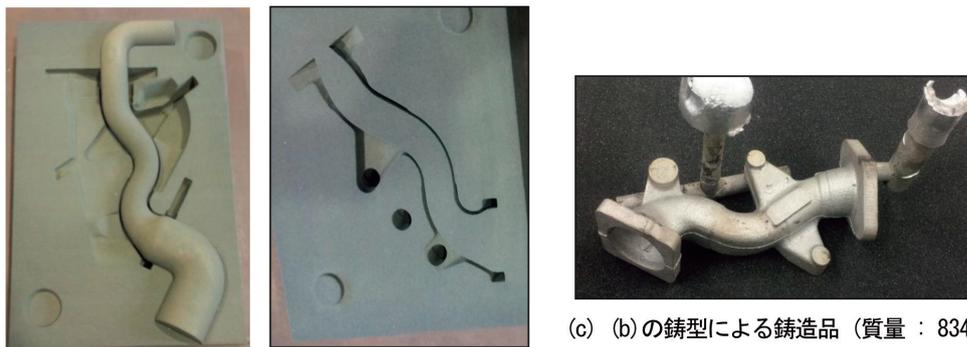
6.4 鋳造技術への3Dプリンター造型の適用

中子を使用すれば中空形状が複雑な製品でも1回の加工工程で溶製できることを鋳造の特徴として挙げた。簡単な例として図10に示すように、3Dプリンター造型を利用すれば、中子と主型の一体造型が可能となる。この発想は日本鋳造工



(a) 工業製品 (b) 強度を必要とする重要保安部品 (c) 実物大の昆虫の鋳造品

図9 精密鋳造法で作製された鋳物 (提供：(株) キャステム)



(a) 中子を設置した造型 (b) 中子と主型の一体造型

(c) (b)の鋳型による鋳造品 (質量：834g)

図10 鋳造コンテストで大学生・院生が考案した鋳型とアルミニウム合金鋳物の例



図11 3Dプリンターによる鋳型の一体造型

型を活用すれば、大幅に低減できる技術として注目され³⁰⁾、今後ますます開発が進む新しい技術である。

7 おわりに

素形材を成形する加工法として重宝される鋳造技術は、さらに適用領域を拡大させるために、新しい技術を導入・融合する必要があり、その一つとして3Dプリンター造型の活用を紹介したが、生産技術的な工夫次第でかなり複雑な形状を有する一体鋳造品の製造技術が開発され、実用化された例もある³¹⁾。鋳造すると凝固現象を必ず伴うことから考えると、設計した合金の凝固特性を活用した複合材料化の研究へ展開することも必要である。例えば、溶湯から化合物粒子を晶出させた合金開発の例である^{32,33)}。溶湯を清浄化する技術として取鍋精錬・真空脱ガスを実施した溶解設備を導入し、インバー合金の熱膨張率を遥かに下回る熱膨張係数がゼロとなる鋳鋼材料の製造技術が開発された例もある³⁴⁾。このように、鋳造技術の特性を活かした材料開発の一例を記したが、さらに躍進する技術要素を秘めていると考えている。鋳造加工という要素設計技術を簡単に紹介しただけであり、各種鋳造法の現状と鋳造技術のより詳しい解説は他の文献^{35,36)}を参照されたい。

学会で大学生・大学院生を対象にして開催された鋳物コンテストにおいて、鋳造方案が設計された例である。実用的には図11に示すように、中空部品の中子点数が3Dプリンター造

参考文献

- 1) 石野亨：鑄物五千年の足跡，日本鑄物工業新聞社，(1994)
- 2) 中江秀雄：新版 鑄造工学，産業図書，(2008)，1.
- 3) 日本鑄造工学会・鑄物の科学技術史研究部会編：鑄物の技術史，日本鑄造工学会，(1997) (非売品)
- 4) 旗手稔：ふえらむ，20 (2015) 9，423.
- 5) A.F.S.：Modern Casting，106 (2016) 12，25.
- 6) 永島昂：中央大学経済研究所年報，48 (2016)，271.
- 7) 旗手稔，角田悦啓：素形材，57 (2016) 2，28.
- 8) 西直美，平塚貞人：トコトンやさしい「鑄造の本」，日刊工業新聞社，(2015)，69.
- 9) (一財) 素形材センター編：新版 鑄鉄の生産技術，素形材センター，(2012)，319.
- 10) (一社) 日本鉄鋼協会編：第5版 鉄鋼便覧 第3巻 材料と組織と特性，(2014)，40.
- 11) 梶山正孝：鑄造技術の基礎，素形材センター，(1978)，139.
- 12) 新山英輔：鑄造伝熱工学，アグネ技術センター，(2001)，127.
- 13) 日産自動車(株)中央研究所・材料研究所編：新素材がクルマを変える，工業調査会，(1992)，91.
- 14) (一社) 軽金属学会編：自動車軽量化のための生産技術，日刊工業新聞社，(2003)，69.
- 15) 長坂悦敬：素形材，51 (2010) 3，24.
- 16) 宮澤雅美，大門弘典：鑄造工学，85 (2013) 12，900.
- 17) 野口徹，堀川紀孝：鑄造工学，85 (2013) 12，852.
- 18) 加山延太郎：鑄物のおはなし，日本規格協会，(1985)，126.
- 19) 土居康純，井戸啓彰，牧野浩，村田証一，安川省吾，中川揮：素形材，51 (2010) 12，48.
- 20) 大中逸雄，荒木孝雄：溶融加工学，コロナ社，(1987)，117.
- 21) 浅井宏一，大杉泰夫，八下田健次：鑄造工学，82 (2010) 12，819.
- 22) 古田昌伸：素形材，58 (2017) 3，24.
- 23) 相田悟：素形材，58 (2017) 3，37.
- 24) 板村正行，糸藤春喜，安達充：素形材，58 (2017) 3，45.
- 25) (一財) 素形材センター編：新版 鑄鉄の生産技術，素形材センター，(2012)，97.
- 26) 日本鑄物協会編：ユーザーのための鑄造品ハンドブック，丸善，(1992)，354.
- 27) 和氣慎：鑄造工学，87 (2015) 3，202.
- 28) (一社) 日本鑄造協会ロストワックス精密鑄造教本編集委員会編：ロストワックス精密鑄造，産業図書，(2015)
- 29) (株) キャステムより提供
- 30) 岡根利光，今村聡，梶野智史，松本純一，綾 信博：産総研TODAY，14 (2014) 1，4.
- 31) 佐藤高浩，張鐘植，清水元裕：鑄鉄の特性向上と材料開発，(独) 日本学術振興会・鑄物第24委員会鑄鉄分科会，(2017)，238.
- 32) 西内滋典，橘堂忠，松元秀人：鑄造工学，79 (2007) 3，133.
- 33) 小林武，明石巖，丸山徹，阿部弘幸，杉谷崇，若井寛明：鑄造工学，81 (2009) 12，650.
- 34) 半田卓雄，来栖直敏：素形材，55 (2014) 12，28.
- 35) 特集 鑄造技術の進歩－21世紀の最初10年を振り返って－，鑄造工学，82 (2010) 12.
- 36) (財) 素形材センター・素形材技術解説書制作委員会編：ものづくりの原点 素形材技術，日刊工業新聞社，(2005)

(2017年6月1日受付)