

# 特殊鋼

2016  
Vol.65 No.4

7

*The Special Steel*

特集／アトマイズ金属粉末「3Dプリンタおよび最近の成形技術」



# 特殊鋼

## 7 目次 2016

### 【編集委員】

委員長	井上幸一郎 (大同特殊鋼)
副委員長	甘利 圭右 (平井)
委員	杉本 淳 (愛知製鋼)
〃	永濱 睦久 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	田代 龍次 (新日鐵住金)
〃	宮崎 貴大 (大同特殊鋼)
〃	赤見 大樹 (日新製鋼)
〃	石川流一郎 (日本金属)
〃	宮川 利宏 (日本高周波鋼業)
〃	戸塚 覚 (日本冶金工業)
〃	井上 謙一 (日立金属)
〃	山岡 拓也 (三菱製鋼)
〃	中村 哲二 (青山特殊鋼)
〃	池田 正秋 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	岡崎誠一郎 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	金原 茂 (竹内ハガネ商行)
〃	渡辺 豊文 (中川特殊鋼)

## 【特集／アトマイズ金属粉末「3Dプリンタおよび最近の成形技術」】

### I. 総論

アトマイズ金属粉末の概論……山陽特殊製鋼(株) 柳谷 彰彦	2
-------------------------------	---

### II. 粉末製造技術と特長

1. 水アトマイズの特長と最新動向について ……大同特殊鋼(株) 金子 亮介	6
2. 不活性ガスアトマイズ装置を用いた高品質、 球状金属粉末の製造の最新動向 ……ドイツALD Vacuum Technologies GmbH社 Christian Lehnert Bernd Sitzmann Franz Pfahls Henrik Franz Michael Hohmann (株)マッポー 福島庄一郎	10
3. ディスクアトマイズの特長と最新動向 ……(株)デュコル 濱本 高郎	18

### III. 粉末成形技術と用途展開

1. 3Dプリンタ (1) 造形方式 ①レーザー方式……近畿大学 京極 秀樹	22
②電子ビーム積層造形技術の新たな可能性 ……東北大学 千葉 晶彦	25
③DED方式積層造形と切削加工を融合したHybrid machine tools……DMG森精機(株) 小田 陽平	30
(2) 適用例 ①航空宇宙分野への適用…三菱重工業(株) 田村 知子	33
②金属積層造形技術の最新動向と金型への適用事例 …(株)NTTデータエンジニアリングシステムズ 酒井 仁史	36
2. HIPの最新動向……金属技研(株) 塩川 豊人	41
3. 焼結……(株)ファインシンター 植田 義久	44
4. レーザークラッディング…大阪富士工業(株) 辰巳 佳宏	48
5. 溶射……トーカロ(株) 宮島 生欣	52

6. ショットピーニング…………… 新東工業(株) 小林 祐次 55

IV. わが社の製品紹介

焼結浸炭歯車に適用したNi-Mo系プレアロイ粉 46F4H  
 …………… (株)神戸製鋼所 谷口 祐司 58

多彩な噴霧プロセスで製造した合金粉末  
 …………… 大同特殊鋼(株) 長瀬 石根 59

金属粉末射出成形品 (Metal Injection Molding/通称MIM)  
 …………… 日立メタルプレジジョン 榎本 喜臣 60

ガスアトマイズ製法による合金粉末  
 …………… 三菱製鋼(株) 山田 武利 61

“特集” 編集後記…………… 山陽特殊製鋼(株) 大谷 浩昭 71

---

●一人一題：「ビジネススクールをめぐる私の人生」  
 …………… 早稲田大学 根来 龍之 1

---



---

■業界の動き …………… 62

---

▲特殊鋼統計資料 …………… 65

---

★倶楽部だより (平成28年4月1日～5月31日)…………… 69

---

☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧 70

---

特集／「アトマイズ金属粉末」編集小委員会構成メンバー

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	大谷 浩昭	山陽特殊製鋼(株)	粉末営業部 部長
〃	澤田 俊之	山陽特殊製鋼(株)	粉末技術部 技術3グループ グループ長
委員	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	軸受営業部 軸受CS室長
〃	田代 龍次	新日鐵住金(株)	棒線事業部 棒線技術部 棒線技術室長
〃	宮崎 貴大	大同特殊鋼(株)	特殊鋼ソリューション部 副主席部員
〃	宮川 利宏	日本高周波鋼業(株)	営業本部 条鋼営業部 担当次長
〃	佐藤 昌男	日本冶金工業(株)	ソリューション営業部長
〃	井上 謙一	日立金属(株)	高級金属カンパニー 技術部長
〃	金原 茂	(株)竹内ハガネ商行	技術部長
〃	甘利 圭右	(株) 平 井	常務取締役

## 一人一題

# 「ビジネススクールをめぐる私の人生」

早稲田大学 ねころ たつ ゆき  
ビジネススクール研究科長・教授 根 来 龍 之



思えば、私が大同特殊鋼に入社したのが昭和52年。退職してある大学の助手になったのが、昭和61年。実に、30年前です。

大同特殊鋼では、知多工場の生産管理課（当時は、鋼材作業課）と本社の生産管理部と社長室企画部にいました。今から思えば、ずいぶん生意気だったと思います。工場にいた時には、年上の営業の方に、「できないものはできないのです」と冷たく言い放ち、本社では「役員達が経営手法を分かっていない」と愚痴ってました。

実は、大同特殊鋼からあるビジネススクールに企業派遣してもらい、卒業して本社勤務となったのでした。たった2年間勉強しただけで知ったかぶりになっていた気がします。

3つの大学を経て、2001年から早稲田大学にお世話になり、2011年からは、社会人大学院であるビジネススクールの責任者をしています（ディレクターから研究科長）。

私がビジネススクールに行った時は、企業派遣がピークにある時で、今は当時の半分になっています。大同特殊鋼も日本のビジネススクールへは企業派遣をしていないようで、もしかしたら「せつかく派遣してもらったのに私が辞めたのも一因かも」とも思ったりしてしまいます。ビジネススクールの責任者を務める今の立場からは、「企業派遣で勉強する機会があることが社員のリクルートに役立つはず」「もし、企業派遣者が辞めてしまっても、日本の産業に貢献するからいいじゃないか」と思っていますが、こちら側の理屈にすぎないような気がします。

私の場合、ビジネススクールに行ったことで人生が大きく変わりました。

業種による違いはありますが、グローバル化の中で、新たな観点でのグローバル経営が求められています。外国人を経営トップや執行役員に配している日本企業も珍しくなくなってきました。また、社内の公用語を英語にする企業も出始めています。このようなグローバル時代の経営を担える人材が質量両面から必要となってきた一方で、人材の供給が追い付かない状況があるように思います。

また、産業変化の時代は、すべてのビジネスパーソンが総合（ジェネラル）マネジメント能力の強化を求められる時代でもあります。少しずつ昇進すると同時に、ローテーションを基本とする日本的幹部育成システムは今なお健在ですし、その良さもあります。しかし時代は、グローバル人材と共に、マネジメントの専門職を必要としてきています。マネジメントの専門職は、単なるOJTではなく、目的意識的に総合マネジメントを学び体験することで育つものです。

ビジネススクールには、自らを成長させ、ステップアップし、もっと面白い人生を生きたいと考える方が入学してきます。総合マネジメント能力を高め、更に学校やプログラムによる多少の違いはありますが、日本のビジネススクールでは、マーケティング、人事、ファイナンスなどの「専門性の強化」も図っています。

是非、ビジネススクールの活用を特殊鋼業界も図っていただきたいと思います。

〔(一社)特殊鋼倶楽部 監事〕

特集

# アトマイズ金属粉末 「3Dプリンタおよび最近の成形技術」

## I. 総論

### アトマイズ金属粉末の概論

山陽特殊製鋼(株) やなぎ たに あき ひこ  
常務取締役 柳 谷 彰 彦

#### まえがき

金属粉末市場は、主にニアネットシェイプによる自動車部品の製造を可能にした粉末冶金により発展してきた。近年では、高い性能が要求される鉄鋼、プラント、電子部品など幅広い分野で高性能金属粉末として活躍している。また、新たな市場として、ものづくりにおいてイノベーションを起こすとされる金属粉末3次元積層造形が注目されており、航空・宇宙産業、金型、生体材料などへの活用が期待されている。ここでは、金属粉末

の製造方法のひとつであり、特に多様な成分調整により高い機能性を発揮する合金粉末の製造方法であるアトマイズ法に着目するとともに、その用途例として、金属粉末3次元積層造形、焼結、表面改質（肉盛溶接、溶射）について解説する。

#### ◇ 金属粉末の市場規模

表1に、過去5年間の国内向け粉末出荷量を示す。用途は主に粉末冶金用が多く、主要顧客は自動車関連産業向けである。ここ数年は自動車の海外生産移行にともなう国内生産の調整もあり、ほ

表 1 粉末の出荷量（単位：t,%）（日本粉末冶金工業会統計）

鉄 粉	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	前年比 (%)
粉末冶金用	110,108	107,643	107,017	110,826	107,872	97.3
その他用	67,259	70,158	62,415	53,247	55,303	103.9
輸 出	31,457	32,868	34,231	44,447	49,465	111.3
合 計	208,824	210,669	203,663	208,520	212,640	102.0
銅 粉	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	前年比 (%)
粉末冶金用	5,653	5,112	4,764	4,882	4,990	102.2
その他用	1,218	1,127	1,081	1,134	1,182	104.2
輸 出	1,260	1,050	1,028	1,140	1,131	99.2
合 計	8,131	7,289	6,873	7,156	7,303	102.1
ステンレス鋼粉	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度	前年比 (%)
粉末冶金用	2,838	2,841	3,014	2,893	2,933	101.4

表 2 粉末冶金製品の品目別生産実績

(経済産業省統計)

品 目	重 量 (t)				金 額 (百万円)			
	2012年度	2013年度	2014年度	前年比%	2012年度	2013年度	2014年度	前年比%
機械部品	92,187	91,893	89,637	97.5	107,455	109,239	107,525	98.4
軸受合金	6,231	6,546	6,657	101.7	12,517	13,962	14,645	104.9
摩擦材料	610	617	705	114.3	4,683	4,450	5,121	115.1
電気接点	58	59	68	115.3	2,714	2,574	2,750	106.8
そ の 他	1,299	1,396	1,397	100.1	19,297	20,351	21,763	106.9
合 計	100,385	100,511	98,464	98.0	146,667	150,577	151,805	100.8

(注1) 「その他」には、「電球及び真空管材料」を含み、磁性材料及び超硬工具用チップは含まず。

(注2) 「集電材料」は「その他」に含む。

ほ横ばいで推移している。表2に、国内の粉末冶金製品の市場規模を示す。粉末冶金製品はその9割以上が自動車関連産業に納入されており、自動車の生産台数に直結した業界となっている。なお、世界的には北米の粉末冶金用鉄粉出荷量は2014年で日本市場の約2倍の規模であり4年連続で増加している。

自動車技術開発は日々進歩しており、それに応じて粉末冶金製品の新たな用途展開が進んでいる。また、自動車以外の業界においても、現在盛んに用途開発が進められており今後益々の拡大が期待される。

#### ◇ 金属粉末の製造方法（アトマイズ法）

金属粉末の製造には、アトマイズ法、機械的粉砕法、化学的プロセスなど様々な工法が適用されている。このうちアトマイズ法は、ノズルから流出させた溶湯に、冷却媒体を吹き付けて、その溶湯を粉砕し、凝固させる工法で、工業的に優れた合金粉末の製造方法である。アトマイズ法は、噴霧媒体として高圧水を使用する水アトマイズ法と不活性ガスを使用するガスアトマイズ法に大別される。前者は、低コストで異形状の微粉末を得るのに適しており、得られた粉末は優れたプレス成形性を活かして機械構造用部品やトライボロジー部品、磁気部品などに使用されている。後者で製造された粉末は、高純度な球状粉末を得るのに有効であり、高い流動性や充填密度を活かして、主に粉体肉盛、溶射、HIP製品などに使用される。加えて溶解を真空や不活性雰囲気中で実施することで、活性元素を含む合金粉末の製造を容易に

きる。この利点を活用して、複雑な成分コントロールが必要とされる金属粉末3次元積層造形用粉末の最も一般的な製造方法となっている。また、高速回転する円盤の剪断力で溶湯を粉末化するディスクアトマイズ法やプラズマの熱および運動エネルギーによって溶湯を粉砕するプラズマアトマイズ法など更に特徴のある工法も適用され始めている。

#### ◇ 金属粉末の加工技術・用途例

##### 1. 金属粉末3次元積層造形

近年、CADデータから積層方式で製品を直接作製する3次元積層造形が新しいものづくり技術として脚光を浴びている。

当初は原料が樹脂に限定されていたが、レーザーや電子ビームといった高エネルギーの熱源を活用することで、金属粉末を用いた産業用の3次元積層造形（以下、金属3D積層造形）が可能となり注目を集めている。金属3D積層造形では、CADデータを水平方向面でスライスしたデータに基づき、各スライス面の必要部位にレーザーもしくは電子ビームといった高エネルギー熱源を照射し、その部位にある金属粉末のみを溶融・凝固させることで微小な固化成形部を形成、これを積み上げて行くことで製品を作製する。そのため、従来の機械加工では制約があり不可能な形状（一例：内部にメッシュ構造を有する部品の一体製造）も製造可能となり、設計の自由度が大幅に高まることが期待される。

図1に現在広く使われているパウダーベット方式の金属3D積層造形装置の構造、図2に造形品の

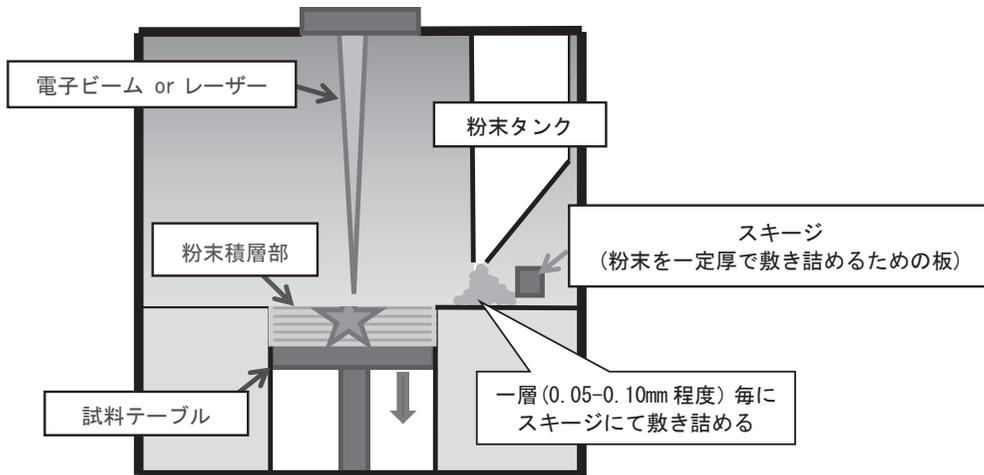


図 1 金属3D積層造形（パウダーベット方式）の模式図

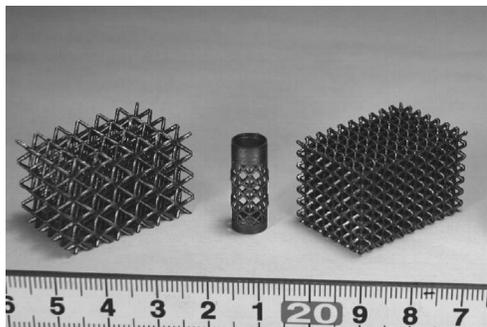


図 2 金属3D積層造形により作製したメッシュ構造品

1例を示す。パウダーベット方式はタンクから金属粉末が供給され、これをスキージと呼ばれる板などで引伸ばすことで粉末を薄く一定厚で敷き詰める。その後必要部位に熱源を当て粉末を熔融・凝固させることで固化成形部を形成する。次にその一定厚分テーブルを下げ、また同じように粉末を敷き詰め再び造形することを繰り返し最終的に製品が完成する。

金属3D積層造形に用いる粉末に求められる特性は主に下記の通りである。

- (1) 粉末を搬送する機構が多いため流動性が高いこと。
- (2) 造形後の製品の密度を確保するため、粉末自体が高密度充填できること。
- (3) 造形時は高エネルギーの熱源で熔融・凝固されるため、ガス放出が少なく低不純物であること。

上記の要求特性を満たす粉末工法として、高純度の球形粉末を高い生産能力で作製できるガスアトマイズ法が現状注目されている。

金属3D積層造形は、ステンレス（SUS316L、SUS630等）、マルエージング鋼（金型等）、Ni基超合金（高温用途）、Ti合金（生体材料等）、といった種々の材料、産業分野で注目を集めており、多くの企業が装置および材料開発に関わっている。

## 2. 焼結

焼結は、粉末を原料とし、これを高温で加熱することにより、接触する粉末界面で原子拡散を起こして結合させる現象であり、自動車部品をはじめ様々な分野に適用されている。金属部品の製造工程として一般的である、溶解、 casting、塑性加工、機械加工からなる工程と比較し、ニアネットシェイプ化による加工コストダウンや、マイクロ組織の微細化による材料特性の改善など、多くのメリットがある。

金型に金属粉末を充填し、プレス成形した成形体を炉内で焼結して製造される部品には、原料粉末として、圧縮性、保形性、焼結性などが要求される。特に成形体の保形性の観点から、水アトマイズ法、機械的粉碎法、化学的プロセスにより製造される不定形状の粉末が用いられることが一般的である。すなわち、不定形状の粉末は金型中でプレス成形されると、粉末同士の接触部がアンカー効果により強く結合し、成形体の強度が高くなるためである。また、焼結性の観点からは、粒

径の小さい粉末を用いると、高密度に焼結されることが知られている。

一方、HIP法や粉末熱間押出法のように、金属粉末を金属缶に充填し、これを真空脱気、封入したピレットを、高温、高圧で固化成形する方法の場合、金属缶への充填密度を高くできる球状粉末が多く用いられる。粉末ハイス鋼など低酸素化により機械的特性が向上する用途も多いため、ガスアトマイズ法により製造される球状、低酸素の粉末が多く用いられている。なお、これらの方法では、圧縮と焼結を金属缶内で同時に進行させるため、プレス成形体のような保形性は必要としない。また、原料粉末の種類に適した固化成形の温度、圧力を選定することにより、真密度の固化成形体を得ることが可能である。

さらに、複雑形状の部品をニアネットに成形、焼結する工法としてMIM（金属粉末射出成形）法がある。

### 3. 肉盛溶接・溶射

耐食、耐摩耗部材の寿命は、これらの部材表面の材料特性により大きく影響を受ける。例えば、化学プラント設備に用いる容器や配管において、腐食性の高い溶液と接する部位には、ステンレス鋼やNi基合金など耐食性に優れた合金を選定することが有効である。しかしながら、これらの合金は、Cr、Ni、Moなど高価な原料を多く含んでいる。一方で、腐食が進行するのは溶液と接する表面のみであるため、容器や配管全体を高価な合金で製造することは必ずしも必要ではない。そこで、材料の低コスト化と部材の長寿命化の手段として、様々な表面処理法が適用されている。代表的なものとして、めっき、熱処理（浸炭、窒化等）、肉盛溶接、溶射、蒸着（CVD、PVD等）などがあるが、ここでは金属粉末を用いる肉盛溶接および溶射について紹介する。

肉盛溶接は、母材となる製品の表面に、酸素-アセチレンガス炎、アーク、プラズマなどを加熱源として溶解した溶接材料を溶着させ、表面に溶接材料からなる被覆層を形成する方法である。ここで、溶接材料の形態として、棒、ワイヤー、箔

帯、粉末などがある。溶接材料として粉末を用いる場合、粉末はタンクからフィーダー内を流れ、肉盛施工部に供給される。その際、フィーダー内で粉末の流動が不安定であったり、閉塞したりすると、被覆層の厚さや材料特性が安定しない。したがって、使用する粉末には優れた流動性が要求され、ガスアトマイズ法により製造される球状粉末が多く使用されている。

溶射は、酸素-アセチレンガス炎、アーク、プラズマなどの加熱源により、熔融または半熔融状態に加熱した溶射材料の粒子を加速させ、母材表面に衝突、堆積させ、溶射材料からなる被覆層を形成する方法である。溶射材料の形態としては、棒、ワイヤー、粉末などがある。粉末を用いる場合は、肉盛溶接と同様に粉末の流動性が重要であるため、ガスアトマイズ法による球状粉末が多く使用される。溶射材料として用いられる合金には、一般的なステンレス鋼やNi基合金のほか、この工法に適した特殊合金として自溶性合金がある。この合金は、NiやCoをベースとし、BやSiといったフラックス成分を含有することにより、溶射による被覆層形成の後、この被覆層を、再度、半熔融状態まで加熱（フュージング処理）することにより、気孔を少なく、母材との密着性を上げることができる。

その他、常温、温間の粒子を母材表面に吹き付け、堆積させる表面処理法として、コールドスプレー、ウォームスプレーが注目されており、近年、盛んに研究されている。さらに、衝突粒子により母材表面を機械的に強化（圧縮残留応力の付与、加工強化、結晶粒微細化強化など）する表面処理法として、ショットピーニングがあり、自動車用をはじめとした機械部品などに広く適用されている。

### むすび

金属粉末3次元積層造形をはじめとした粉末加工技術の進歩や成形技術の革新により、金属粉末の可能性は拡大している。今後も新たな市場が創世され、金属粉末の用途が広がることを期待する。

## Ⅱ．粉末製造技術と特長

### 1．水アトマイズの特長と最新動向について

大同特殊鋼(株) かねこりょうすけ  
粉末製品部粉末工場粉末技術開発室 金子亮介

金属粉末の製造方法は多くの工業的方法があるが、その中でも大量生産可能でコスト的に有利であるという理由から、溶鋼に高圧力媒体を噴射（アトマイズ）して溶鋼を粉末化するアトマイズ（噴霧）法が広く用いられている。高圧力媒体によるアトマイズ法は大別して水アトマイズ法、ガスアトマイズ法の2種類に区分されるが、両者はアトマイズ媒体の違いにより、得られる金属粉末の特性にも大きな違いがある。水をアトマイズ媒体とする水アトマイズ法で製造した金属粉末は、アトマイズ時に粉末化された溶鋼の冷却速度が $10^{4-5}$ K/sと速く、アトマイズの瞬間に凝固が終了するため、粉末形状が不規則になる。不規則形状であることから、アンカー効果（投錨効果）を期待しプレス成形-焼結用に適用されることが多い。また、水アトマイズ法は水の圧力や噴射角度を調整することで粉末粒径、形状などを制御することができる非常に汎用性の高い製造方法である。

ガスアトマイズ法は水アトマイズ法と比較して、アトマイズ時の溶鋼の冷却速度が $10^3$ K/s程度と遅いため、得られる金属粉末は溶鋼の表面張力の影響により規則的な球形となり易く、流動性が高くなる。ガスアトマイズ法はアトマイズ媒体として一般的に不活性ガス（窒素ガスやアルゴンガス）が用いられるため、水アトマイズ法による金属粉

末と比べ、酸素含有量の低い清浄な金属粉末を得ることができる。流動性、清浄度が高いことから、HIP（Hot Isostatic Pressing：熱間等方圧加工）、溶射、PTA溶接法（Plasma Transferred Arc Welding：プラズマトランスファーアーク溶接）、ろう付け等に使用され、最近では3Dプリンター用にも活用されている。

#### ◇ 水アトマイズ粉の製造工程

水アトマイズ粉の製造工程を図1に示す。溶解・アトマイズ工程では電気炉・誘導炉などで溶解した金属（溶鋼）をタンディッシュなどの容器に移し、その底部の細孔より滴下した溶鋼に高圧水ジェットを噴射して金属粉末が製造される。溶解設備は、通常、需要規模で決まるがステンレス鋼粉末や高合金鋼粉末では、数100kg～数t程度の高周波誘導炉が主として使用されている。アトマイズされた金属粉末は水との混合物（スラリー）になっており、ポンプを用いて移送し、固液分離装置にて分離される。ただし、数 $\mu$ m程度の金属粉末を製造する場合、水との分離が困難で生産性や収率が悪化することが多く、スラリーを大型の沈降槽に移送し、金属粉末を沈降させ水と分離する方法が適用されている。固液分離装置や沈降槽を使用して回収された金属粉末は水分を多量に含ん

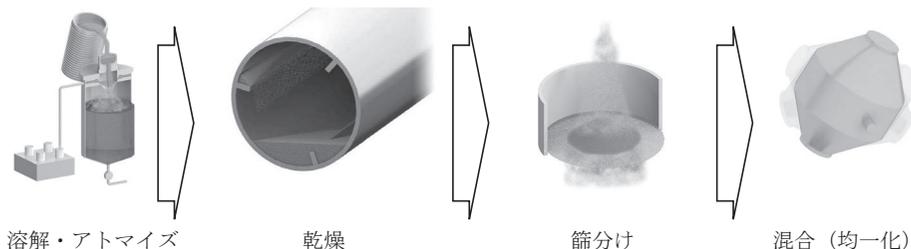


図 1 水アトマイズ粉末の製造工程

でおり、加圧ろ過方式等を用いて脱水し、次の乾燥工程に送られる。乾燥工程では金属粉末の残留水分を完全に除去するために、加熱式や真空式の乾燥設備が用いられている。加熱式乾燥では金属粉末の再酸化を防止するために不活性ガス下での雰囲気制御を実施したり、真空式乾燥では微粉末の飛散に注意する必要がある。乾燥された金属粉末は分級機（篩分け）などを介し、所定の粒度に調整される。プレス成形-焼結用に用いられる金属粉末は約150 $\mu\text{m}$ 以下の粒度に分級されることが多い。その後、偏析防止のため混合工程で均一化され、保管容器へ移し保管される。混合設備としては、ダブルコーン型やV型などの混合機が使用されることが多いが、最近では保管容器をそのまま回転させ混合する方式も使用されている。

金属粉末は異物混入（コンタミ）が発生すると分離が非常に困難であることから、製造ラインは溶解からアトマイズ、回収、分級、混合まで開口部を減らす等の工夫が施されている。コンタミ防止による高品質化に加え、自動ライン化することにより生産性を向上させている。

#### ◇ 水アトマイズノズル

水アトマイズに用いる高圧水ジェットの種類はV型と逆円錐型が代表的であり、生産性や粉末特性などを考慮し使い分けられている。これらの違いを図2に示す。V型は左右に配置されたパイプのスリットもしくは細孔部から水を噴射し、上部にあるタンディッシュ下部の複数の穴から溶鋼を滴下する。生産性に優れ、主に鉄粉製造ラインで使用されている。逆円錐型は円周状のスリットもし

くは細孔部から中央に向かって水を噴射し、タンディッシュ下部にある1つの穴から溶鋼を滴下する。V型対比粉砕効率に優れ、粉末特性の均一性も高い。さらに高圧水ジェットの圧力を高めることで圧縮性流体であるガスをアトマイズ媒体とするガスアトマイズ法よりも比較的容易に微細な金属粉末を得ることが可能である。一般的に数～30MPa程度の高圧水ジェットで製造された平均粒径50 $\mu\text{m}$ 程度の金属粉末はプレス成形-焼結用途に使用され、さらに高圧化された50～200MPa程度の超高圧水ジェットで製造された平均粒径10 $\mu\text{m}$ 程度の金属粉末は射出成形用（MIM: Metal Injection Molding）などに用いられる。最近ではさらなる高生産性、高品質化、微粉化の要求を満たすために、各粉末メーカーはアトマイズ法の開発および高圧ポンプ能力増強等を図っている。

#### ◇ 付加工程

ステンレス鋼に代表される合金粉末の場合、プレス成形時の圧縮性を向上させるために、熱処理工程を付加する場合がある。熱処理工程ではロータリーキルンに代表される連続式またはバッチ式の熱処理炉が用いられる。熱処理を付加することでアトマイズ時のひずみ除去や結晶粒の成長を促進し、プレス成形時の変形能が増大することにより、成形密度は向上すると言われている。

#### ◇ 水アトマイズステンレス鋼粉末の製品例とその適用例

表1に水アトマイズステンレス鋼粉末の製品例を、図3に水アトマイズステンレス鋼粉末の適用

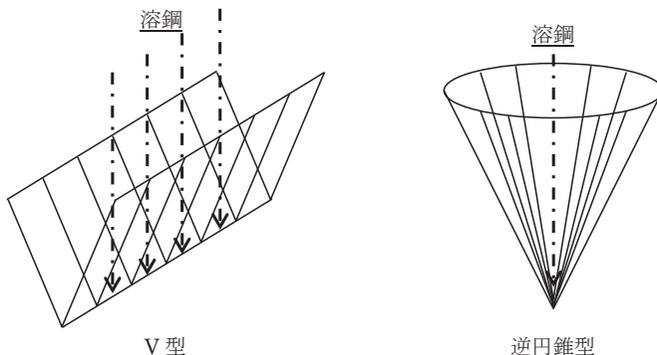


図 2 高圧水ジェットの形状

表 1 水アトマイズステンレス鋼粉末の製品例

	化学成分 (mass%)						粉末特性※1			
	C	Ni	Cr	Mo	Cu	Sn	AD (g/cm <sup>3</sup> )	FR (s/50g)	GD (g/cm <sup>3</sup> )	RV (%)
304L	0.02	10.5	19.0				2.7	25.0	6.3	2.0
304LU	0.02	10.5	19.0		4.0	0.7	2.7	25.0	6.4	2.0
316L	0.02	13.0	17.0	2.5			2.7	25.0	6.4	2.0
316LU	0.02	13.0	17.0	2.5	2.0	0.7	2.7	25.0	6.4	2.0
310L		20.5	25.0				2.6	24.0	6.4	2.0
410L	0.02		12.5				2.7	23.0	6.2	2.0
430L	0.02		17.0				2.7	23.0	6.1	2.0
434L	0.02		17.0	1.0			2.7	23.0	6.1	2.0
444L	0.02		17.0	2.0			2.7	23.0	6.1	2.0

※1 GD、RVは成形圧5.0t/cm<sup>2</sup>で成形。



図 3 水アトマイズステンレス鋼粉末の適用例

例を示す。耐食・耐熱性や強靱性、軟磁性などの特長をもつステンレス鋼粉末は、機械構造部品や焼結フィルター、電子機器部品として広く利用されている。バルク材に比べてニアネットシェイプで部品を製造出来ることから、複雑形状品、小型形状品に適用されている。

#### ◇ 粉末特性に及ぼすアトマイズの影響因子

図4に粉末特性に影響を及ぼすアトマイズの因子を示す。粉末形状については、ジェット流速(圧力)、溶鋼の物理的性質(粘性他)が大きな影響を及ぼす。また、粒度分布や収率についてはアトマイズ媒体の温度(水温)や溶鋼滴下量と水量

の比を表わす比水量が大きな影響を及ぼす。

高圧水ジェットの形状、流速、圧力の管理は、粉末特性維持のために日常の最重要点検管理項目のひとつであり、最近ではアトマイズ近傍の可視化、センシング技術の活用が図られている。

#### ◇ 品質管理

一般的な品質管理項目として粒度分布や見掛密度(AD: Apparent Density)、流動度(FR: Flow Rate)、規定の圧力で成形された成形密度(GD: Green Density)や保形性の指標であるラトラー値(RV: Rattler Value)が管理されている。これらは焼結メーカーで製造される最終製品の寸法や表面

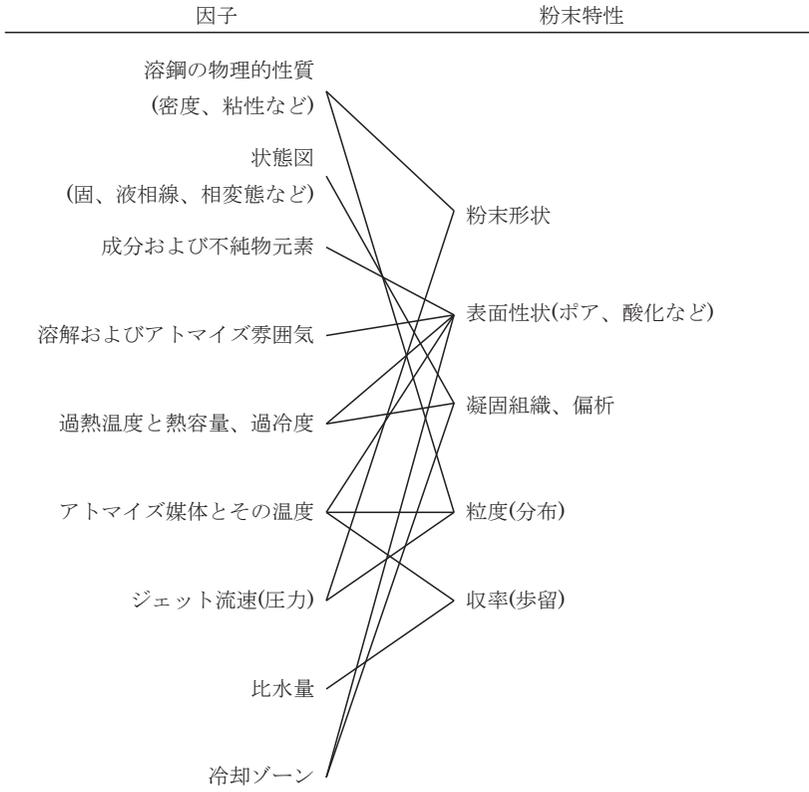


図 4 アトマイズ因子と粉末特性の関係

性状に大きな影響を及ぼすことがあるため、粉末製造メーカーは細心の注意を払い管理している。

また射出成形用に用いられる平均粒径が $10\mu\text{m}$ 程度の微粉末においては、タップ密度 (TD: Tap Density、一定量の金属粉末を規定の容器に充填した後、容器を一定時間上下運動させた後の密度) が重要な品質管理項目として使用されている。

粒度分布測定においては、複数の篩網を積み重ねて一定量の金属粉末を篩分けして測定する方法が一般的である。しかしこの方法は微粉末の粒度分布測定には不向きであるため、微粉末の粒度分布測定においてはレーザー回折法が用いられている。近年、各測定装置メーカーが独自の手法を用いた粒度分布測定装置の開発が進んでいる。

## 2. 不活性ガスアトマイズ装置を用いた高品質、球状金属粉末の製造の最新動向

ドイツ ALD Vacuum  
Technologies GmbH社

クリスチャン レナート  
Christian Lehnert  
ベルンド ジッツマン

Bernd Sitzmann

フランツ ファルス  
Franz Pfahls

ヘンリック フランツ  
Henrik Franz

マイケル ホーマン  
Michael Hohmann

翻訳協力 (株)マツポー 産業機械一部  
マテリアルプロセスグループ

ふくしま しょういちろう  
福島 庄一郎

### 要 約

本誌は不活性ガスアトマイズ装置を用いた高品質、球状金属粉末の製造の最新動向をお伝えするものです。代表的な粉末のシステムパラメーターをご紹介します。適正な特性を有する高品質の金属粉末を量産する最先端の製造設備として、真空誘導溶解炉に不活性ガスアトマイズを組み合わせた（VIGA）あるいは電極を用いた真空誘導溶解不活性ガスアトマイズ（EIGA）の詳細についてご説明差し上げます。生産効率、操業コスト及び品質だけではなく、VIGA及びEIGAの最先端の動向をご紹介します。

### ま え が き

近年、3D金属プリンター及び他の積層造形技術（AM）の急成長により金属粉末の需要は急激に増加しています。積層造形法には優れた流動特性をもつ球状の粉末が必要であり、その特性を有する粉末を用いる事により、複雑形状の製品が必要最小限の材料で、かつ鋳造品よりも低コストで製作する事が可能となります。航空産業は金属粉末のニーズを急増させている主なけん引役です。しかしながら、金属粉末の需要はそれだけにとどまらず、医療、電気機器、工具さらには家庭用器具にまで広い用途に発展しています。

航空宇宙産業で最も需要の高いアプリケーションは、真空あるいは不活性ガス制御下で行われる合金溶解及び粉末アトマイズ法で製造される素精

らしい品質を有する金属粉末を必要としています。様々な他分野におけるアプリケーションは、ここまで厳しい要求は行われなくてもいいかもしれませんが、真球に近い形状、特定の粒径分布、優れた流動特性、低酸素、窒素濃度の高純度といった性質を有する粉末を大量にコストパフォーマンスに優れた製法で行う事を要求されます。市場において、川下工程は不活性ガスアトマイズ法のみが厳しい粒形状及び不純物レベルの管理基準を満たすことができます。高品質粉末の一般的な用途は、3Dプリント、MIM（金属粉末射出成型）、プラズマブレーキ及び高合金材料用の圧縮工程に用いられます。今日、不活性ガスアトマイズ法は高グレード金属粉末製造にとって主力製法となっています<sup>1)</sup>。

最新の不活性ガスアトマイズ装置は、酸素及び窒素濃度を下げ、合金内の不純物を減らすために、溶解プロセスは真空または不活性ガス雰囲気下で行われ、アトマイズ工程は不活性ガス雰囲気下で行われます。良質の溶湯がアトマイズノズルシステムへ、そこから高圧不活性ガスジェットへと導かれる独自のアトマイズ技術が開発されています。溶湯金属の流れとガスジェットの組合せがアトマイズタワー内において、球状で微細な粉末を作成するための微液滴のスプレーを作成します。

ガスアトマイズのサブシステムは、様々な溶解技術と図1に示した溶解方法を組み合わせています（図1）。

過去何十年かの期間に様々な種類の材料の粉末化の要求に応えるべく種々の溶解手法が取り組ま

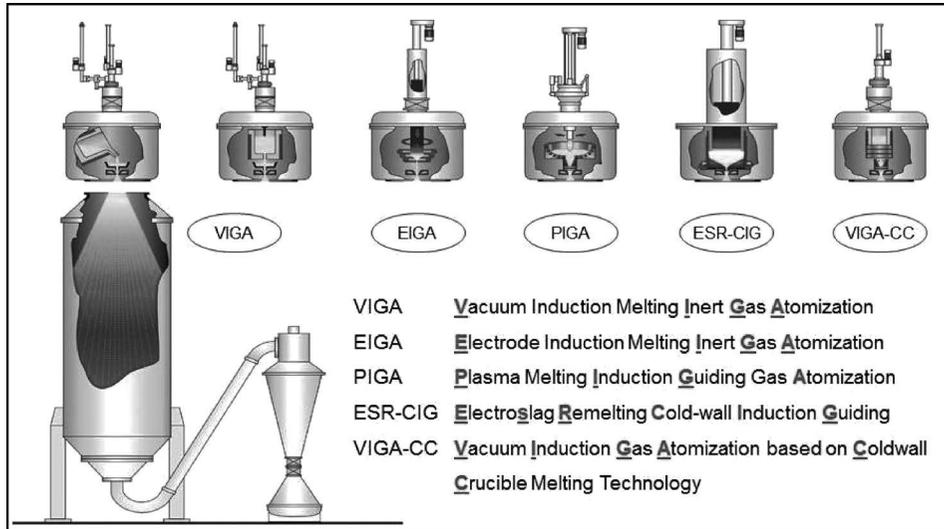


図 1 不活性ガスアトマイズを用いたさまざまな溶解技術の組み合わせ

れ、多くの溶解とアトマイズシステムの組み合わせが考え出されました。今日、VIGA及びEIGA技術は球状、高品質金属粉末向けとして最も採用されている金属粉末製法です。

#### ◇ VIGA装置と技術の最新動向

VIGAプロセス及び関連装置は様々な用途に用いられる金属およびそれらの合金を球状の特定の粒径サイズで、正確な化学組成、そして低い非金属成分特性を有する粉末へと変換させます。その手順は以下の通り：

- ・純金属材料を誘導加熱を用いてセラミックあるいはグラファイト坩堝の中で真空または不活性ガス雰囲気状態で溶解します。
- ・要求する溶解均一性、温度及び化学組成を満たすため、追装、合金添加、サンプリング及び温度測定手順を行います。いったん要求された溶解特性が達成されたら、溶湯は坩堝の上部あるいは炉底からタンディッシュ／またはオリフィスへと移送されます。タンディッシュはアトマイズノズル部での閉塞を避けるために抵抗加熱あるいは誘導加熱を用いて予熱されます。
- ・タンディッシュからアトマイズノズルシステムのタンディッシュオリフィスへと流れ込んだ高純度の溶湯は、アトマイズ工程中の高圧不

活性ガスジェットの運動エネルギーによって分散されます。

- ・アトマイズされた溶湯の滴はアトマイズノズル下部に設置された垂直アトマイズタワーを通過する間に凝固します。表面張力と重力が作り出す力の組み合わせによって粉末の形状が決まります。
- ・粉末とガスの混合物は搬送チューブを介してサイクロンへと搬送され、そこでガスと粉末は分類されます。量産用VIGAシステムはコスト削減のためにガスリサイクルシステムを用います。
- ・粉末はそれから篩や分級と言った川下工程に用いるため、真空タイトな粉末コンテナに回収・保管されます。必要であれば、基準を満たさない（オーバーサイズまたはアンダーサイズ）粉末は、フィードストックの一部として規格外の用途に用いることでリサイクルされます。

VIGAシステムを用いた粉末製造法は、高融点ニッケル基合金、M<sub>2</sub>CrAlYプラズマスプレー粉末、貴金属、鉄、コバルト及びクロム基合金、高合金鋼及び高純度銅、アルミ及びマグネシウム合金を含みます。はんだや真鍮といった低い融点の金属粉末の製造にも用いられます。VIGAシステムを用いた粉末は、摩耗あるいは酸化防止用表面コー

ティング、試作品の製造あるいは積層造形といった様々な用途に用いられています。VIGAシステムを用いた粉末は、商用及び軍事用のガスタービンエンジンの部品の長寿命化とエンジンのパフォーマンス向上を実現するサーマルバリアコーティング (TBC) 用の材料として航空産業に、またパワーエンジニアリング、エレクトロニクス、バイオメディカルデバイス、ケミカル、スパッタリングターゲット材、積層造形法 (例3Dプリンター) 用のフィードストック、金属射出成型 (MIM) 及び熱間等方圧プレス (HIP) といった様々な用途に適用されています。

VIGA装置の設計及びエンジニアリングは、真空誘導溶解炉 (VIM) に不活性ガスアトマイズユニット (IGA) を組込んでシステム構成を行います。同じVIGAでも溶解及びタンディッシュ容量、溶湯材料、異なる形状、サイズ、純度及び脱ガスの有無、合金プロセス、サンプリング及び温度測定の必要性の有無といった要求事項の内容を設計に反映させ、異なるVIGAシステムを提案します。

フレキシビリティの高いVIGAシステムは1-2リットル/5-15kgバッチの効率的な溶解が行えるR&D用途のラボサイズから金属粉末を大量にかつ効率よく製造できる量産用の300L/2,000kgバッチの量産タイプまで設計・製作が可能です<sup>2)</sup>。最も大きな2,000kgバッチのVIGAシステムはサイクルタイムが約6時間、アトマイズ時間が2時間以上で高品質、ハイグレードの金属粉末を年間最大

2,000トンまで製造する事が可能です。一般的な小型中型及び大型のVIGAシステムのパフォーマンスデータを表1に示します。

溶湯合金がタンディッシュに注ぎ込まれたら、次に高品質粉末製造及び粒度分布制御にとって重要なパラメーターはオリフィスを通る溶湯送り速度です。溶湯送り速度はオリフィスの外径によって決まります。一般的には溶湯速度は10~20Kg/分でその時に用いられるオリフィス径は3-8mmです。小型のVIGAシステムではそれよりも遅い溶湯速度で5Kg/分、一方大型のVIGAシステムはアトマイズ時間を制限するためにより早い溶湯速度が用いられます。粉末の粒径分布をコントロールするための他の重要なプロセスパラメーターは、ガス-金属比だけでなく、アトマイズガス圧力、流れと温度、ノズル設計 (VIGAではクローズカップルノズルが用いられます)。耐火物の浸食とオリフィス側壁からの材料の落下がほとんどない環境下でのアトマイズ工程により、常に安定した溶湯の流れとアトマイズガス特性を維持する事ができる、信頼性の高いアトマイズプロセスを開発するため、ALDは、技術開発に挑み続けています。

クローズカップルノズルシステムを用いたVIGAシステムはNi基合金、高合金鋼及びCo-Cr基合金で $30\mu\text{m} < d_{50} < 90\mu\text{m}$ の流動分布を持つ粉末の製造が可能です。概して粉末の流動分布は材料特性に強く依存し、より低い融点を持つ材料のプロセス

表 1 小型、中型及び大型VIGAシステムのパフォーマンスデーター

Performance data for different VIGA models		VIGA2B	VIGA35	VIGA300
最大坩堝サイズ(L)	l	2	35	300
処理量(kg) インコネル 718 基準	kg	15	260	2250
溶解電力	kW	40	250	1250
溶解流速	kg / min	10 - 20	10 - 20	10 - 20
アトマイズ時間	min	1	17	150
サイクル時間	h	1 - 2	3 - 4	6
アルゴン流量	m <sup>3</sup> / h	1500 - 2100	1500 - 2100	1500 - 2100
粉末 1kgあたりのアルゴン消費量	m <sup>3</sup> / kg	1.7 - 2.3	1.7 - 2.3	1.7 - 2.3
最大年間粉末生産量	t	20	500	2000

では $d_{50}$ の値が $20\mu\text{m}$ 未満の粒度分布を実現する事も可能です。粒度分布は1.5から2.5の範囲の $d_{84}/d_{50} = d_{50}/d_{16}$ の幅/標準偏差を用いた常用対数分布(ガウス分布)に準じます。VIGAシステムを用いて製造されたインコネル718の一般的な流動分布及びステンレス粉末のSEM写真を図2に示します。

コンファインド、クローズカップル式アトマイズノズルは様々な合金向けに様々な $d_{50}$ の値を容易に実現する設計を可能にします。VIGAプロセス中の酸素ピックアップ現象は真空システムエンジニアリングと高純度アトマイズガスにより最小限に抑えられます。わずか30~100ppmの低酸素濃度の粉末を製造する事が可能です。

VIGAシステムは最適処理能力、低コスト、粉末品質の改及びエンドユーザー様の要求事項を満足させるべく設計及びエンジニアリングを行っています。経済的な生産を実現するため、システムは容易なメンテナンスと高い信頼性を持ち合わせていなければなりません。それらを実現するために、設計の特徴として、VIGAシステムには以下の機構が含まれます。

- ・注湯方法：バッチサイズと材料の冶金的要求事項によって、溶湯の出湯方法を上からとするのか炉底とするのかが選択されます。(2ページにあります図1の左端2つのVIGA溶湯断面スケッチ参照ください) 中型から大型サイズのVIGAシステムですと安全面と操作性から、上から出湯するのが最も一般的ですが、小型のVIGAですと両方の方法を検討する事になります。
- ・雰囲気制御：セパレーションバルブが真空溶

解チャンバーとアトマイズユニット間に用いられます。このセパレーションバルブは溶解中(溶解チャンバーが)真空でアトマイズチャンバーが不活性雰囲気と各チャンバー内の雰囲気を分けるためにアトマイズ工程のみ開くように設計されています。この機構により、アトマイズユニット内が不活性ガス雰囲気下でも溶解チャンバーの清掃を行う事が可能にします。アトマイズユニット内の残留水蒸気、酸素及び窒素を少なくできるおかげで粉末の品質を向上させることができます。

- ・大型VIGAシステム用には誘導溶解炉付ダブルドアシステムが用いられます(図3)：それぞれのメルトチャンバードアに各々1つずつ誘導溶解炉を備えており、そのおかげで、溶解中に待ち時間を作ることなく素早く炉体交換を実施する事ができます。つまり1つの炉体で溶解を行っている最中に、(もう一つの扉に備わっている)炉体は清掃、再築炉を行って次の溶解の準備をする事ができるのです。この設計を用いることで1つのガスアトマイズシステムに異なる炉体サイズを設置する事が出来、そのおかげで設備のダウンタイム(休止時間)が最小となりフレキシブルな生産方法を実現する事が可能となりました。生産性は約15%向上しました。
- ・小型及び中型VIGAシステム向けクイックチェンジ炉体：スチールフレーム、誘導コイル及び耐火物から構成される誘導炉体モジュールは、1つのパーツとして容易に交換する事ができます。水冷電力ケーブルはク

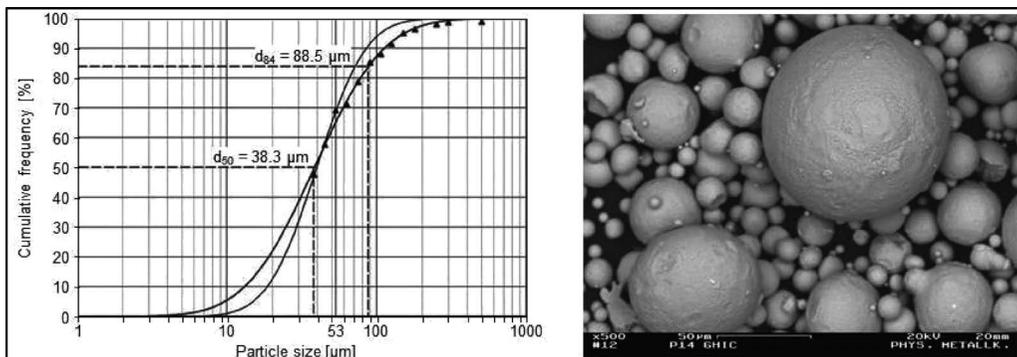


図 2 VIGAシステムを用いて製造されたインコネル718の粒度分布とステンレス粉末のSEM写真

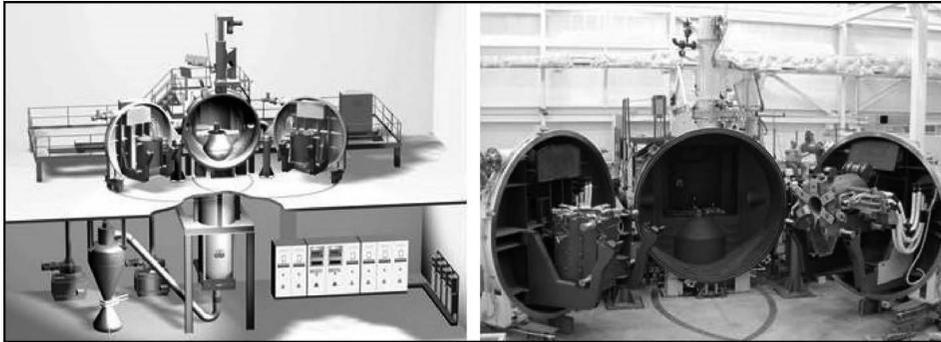


図 3 それぞれのドアに誘導溶解炉体を配置したダブルドア式大型VIGAシステム

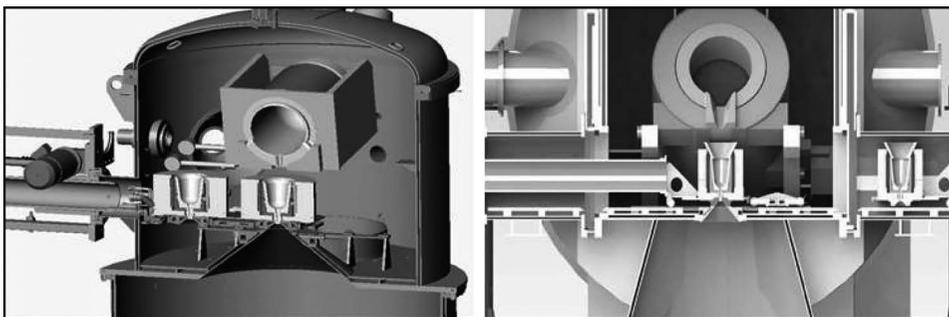


図 4 中型から大型VIGAシステム用2重タンディッシュシステム

イックフィットコネクターで接続され、新しい誘導炉体モジュールは素早く取付けられ、即使用可能となります。得られる利点は、誘導炉体モジュールは外段取りで準備ができ、別の大きさの誘導炉体モジュールを選択されることで1つのVIGAシステムで様々なサイズの炉体を用いたアトマイズが可能です。

・二重式タンディッシュシステムは中型から大型サイズのVIGAシステムに用いられます。(図4)：異形の2つのタンディッシュが1つの移動式カートにセットされることで容易に移動する事ができます。最初のタンディッシュノズルが閉塞した時、隣の予熱されていたタンディッシュシステムがアトマイズ位置へと移動し、アトマイズ工程を継続します。二重式タンディッシュシステムは新しい金属粉末の開発を容易にし、プロセスの最適化、安全性の向上そしてノズルの清掃が必要な時はいつでも(隣のタンディッシュでアトマイズを継続できるので)製造ロスを最小限にする事

ができます。さらに大型のVIGAシステム用には、2つのタンディッシュをそれぞれ独立したカートに搭載し、タンディッシュ交換時にはメルトチャンバーと切り離すためにロックバルブで仕切って、メルトチャンバー内の雰囲気を維持したままいつでもタンディッシュの交換を行う事ができます。

・ガスリサイクル及びホットガスアトマイズシステム：アトマイズガス消費量の低減、微細金属粉末の製造及びアトマイズ内の不活性ガス流量パターンの制御と調整による粉末形態の改善を目的としたVIGAシステムが今日開発されています。

#### ◇ EIGA装置と技術の最新動向

反応性及び高融点金属粉末を高品質で球状に製造するには一般的なVIM(真空誘導溶解)とは異なる設備、技術を必要とします。例えば、チタンやジルコニウムといった酸素、窒素及びカーボンに対して高い反応性を持つ金属はセラミックヤグ

ラファイト坩堝内で高純度の溶解を行う事はできません。これらの材料の粉末を製造するために、コールドクルーシブルタイプのアトマイズプロセス (CICAP)、プラズマ回転電極プロセス (PREP)、プラズマワイヤーアトマイズプロセス (PWAP) 及び電極誘導溶解不活性ガスアトマイズ (EIGA) が開発されてきました。

EIGA設備及びプロセスは、反応性、高融点、及び貴金属粉末を高品質で製造するためにセラミックを用いないアトマイズ装置としてALDによって設計、開発がすすめられてきました。今日、EIGAは航空宇宙産業、医薬、エネルギー、化学、エレクトロニック等の産業用のチタン、ジルコニウム、ニオブウム、タンタル及び貴金属合金粉末を高品質で製造するために最も採用されている製法の一つです。EIGAプロセスは様々な材料を粉末にできるプロセスです。というのは最大2500℃の融点の材料やVIGAだと反応性が高くて製造できなかった材料の粉末化も可能にするからです。

EIGAシステムは円錐形の誘導コイルを使った特殊な設計によりセラミック坩堝を用いず、不活性雰囲気下で垂直に取り付けられた電極を回転させながら、底部から連続的に溶解する装置です (図5)。円錐形誘導コイルの設計とゼネレーターの周波数は電極表面の底部を最適な溶解速度で溶

解できるように設計されています。溶湯の流れはすぐに高速ガスアトマイズを行う不活性ガスアトマイズの環状スリットの中心へと導かれます。最終的にそこでアトマイズ化された微液滴はタワー内を移動中に凝固し、球形の微細粉末となり真空タイトな粉末回収コンテナで回収されます。製造された粉末の回収も含めて全固定は完全不活性雰囲気下で行われます。独立したローディングチャンバーは溶解チャンバーまたはアトマイズタワーの換気 (大気置換) することなく新しい電極を交換する事ができます。

VIGAと異なりEIGAはフリーフォールノズルを用いているので $d_{50}$ 値はVIGAよりもやや高く、粒径分布は一般的にチタン及びその他の合金では $50\mu\text{m} < d_{50} < 120\mu\text{m}$ です<sup>5)</sup>。VIGA同様、粒度分布は1.5から2.5の範囲の $d_{84}/d_{50} = d_{50}/d_{16}$ の幅/標準偏差を用いた常用対数分布 (ガウス分布) に準じます。EIGAプロセスで製造されたより高いガス-金属比により真球に近い形状になります<sup>6)</sup>。EIGAシステムで製造したTiAl6V4の一般的な粒度分布図とSEM写真を図6に示します。

今日のEIGAシステムは事前に先端形状を円錐形状にした円柱の電極を用いることで溶解プロセス開始時の誘導加熱の信頼性を高めています。一般的な円柱状の電極は直径50~70mmで長さが

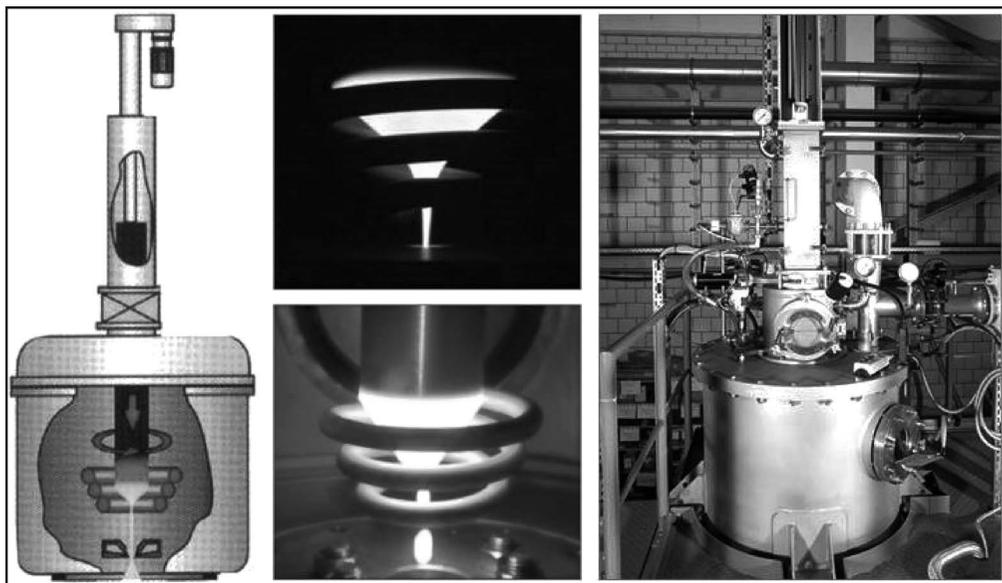


図 5 EIGAシステムの断面スケッチ、電極溶解及びメルトチャンバーの写真

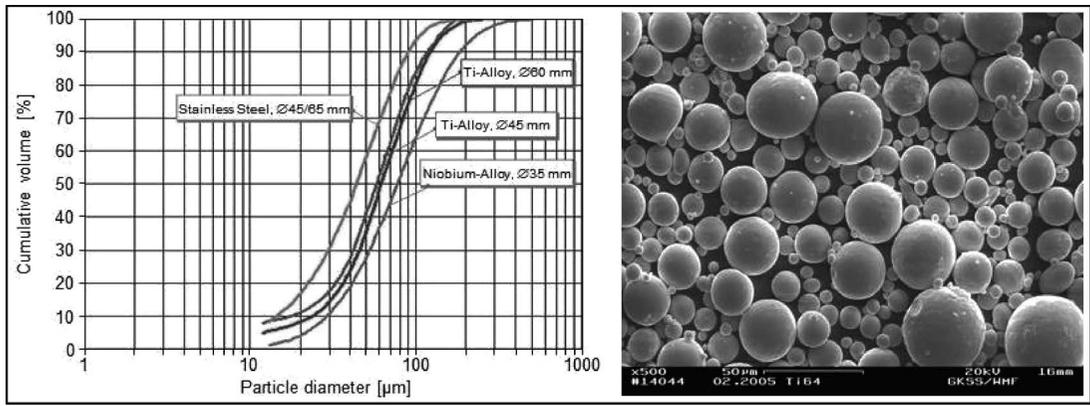


図 6 EIGAで製造されたTiAl6V4 合金粉末の粒度分布図とSEM写真

表 2 異なるEIGAモデルのパフォーマンスデータ

Performance data for different EIGA models	EIGA50-500	EIGA100-1000	EIGA150-1000*	
最大電極寸法	mm * mm	50 * 500	100 * 1000	150 * 1000
処理重量/バッチ(TiAl6V4ベース)	kg	4.4	33.4	74.3
溶解電源出力	kW	60	180	250
溶解速度	kg / min	0.5	1.5	2.5
アトマイズ時間	min	9	23	30
サイクルタイム	min	15	45	60
アルゴン流量	m <sup>3</sup> / min	12	17	22
1Kgあたりのアルゴン消費量	m <sup>3</sup> / kg	24	11	9
最大年間生産量	t	70	250	400

\*Estimated Values

500~1,000mmである。その他の形状の電極（長方形や六角形）もまた使用可能でありEIGA装置のフレキシビリティを高めている。通常、電極は表面処理なしの鋳造または鍛造法で製作されています。EIGA粉末で規格外となったものをリサイクルする方法として規格外の粉末をプレスで固めて電極を製作し、EIGAに再利用する事も可能です。EIGAプロセスはより大きな電極を用いてのテストに成功した場合、スケールアップと製造コスト削減に最も期待の持てるプロセスです。EIGAプロセスのスケールアップ製造は現在反応性及び高融点金属粉末に対する市場のニーズが急速に高まってきていることから早急に実現させる必要があります。EIGAの大型化は、最大径150mm、最

大長さ1,000mmの電極を用いたシステムであり、2017年に量産用として開発エンジニアがなされます。溶解速度を3~5倍高めることで製造コストを低減し、その結果、アルゴンガス消費量も劇的に減らす事が期待できます。さらに生産性の改善としては、半自動電極交換から半自動溶解さらに完全自動電極交換といった電極のハンドリング装置の開発が行われています。溶湯温度2500℃を超える材料プロセスの研究も現在進行中です。異なるタイプのEIGAモデルでのパフォーマンスデータを表2に示します。

◇ 結論

積層造形法及び3Dプリンターアプリケーション

は様々なアプリケーション向けに不活性ガスアトマイズ用いて製造される高品質の金属粉末の需要を急速に高めました。VIGA及びEIGAプロセス及びシステムは、真空あるいは不活性ガス雰囲気で原材料を溶解し、不活性ガスアトマイズ装置を組み合わせたものです。VIGA及びEIGAシステムは、特定の粒径が再現可能で、粉末は球状、素晴らしい流動特性、最小限の酸素及び窒素濃度を有する多くの種類の金属粉末を大量にかつ効率の良いコストで製造する、という市場要求を満足させるのに最も適したシステムである。様々な大きさや構成を変えることができるVIGA及びEIGAシステムは、新しいコンポーネント例えば二重タンディッシュシステムやクイックチェンジ誘導炉体といった、材料特性やコスト及び製造要求事項を満足させるためのシステム構成について、時間をかけて改善／最適化されてきました。VIGAシステムの現在の傾向は、粉末の品質とさらなる製造コストの低減を行うためにガスリサイクルやホットガスアトマイズシステムといったサブアッセン

ブリー装置の開発が注目されています。EIGAの発展すべき方向は、製造コストを低減するためにより大きな電極を用いた設備とプロセスのスケールアップに注視すべきである事は明確です。

#### 参考文献

- 1) M. Hohmann, G. Brooks, C. Spiegelhauer, Stahl und Eisen, 125 (2005), 4, 35-41
- 2) S. Pleier, M. Hohmann, "Innovative design of large scale metal powder production plants for advanced materials", Proc. of Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Kyoto/Japan 2000
- 3) M. Hohmann, N. Ludwig, German Patent DE 4102101 C2, 1991 and United States Patent US 5,284,329, 1994
- 4) M. Hohmann, W. Diemar, N. Ludwig, W. R. Zenker, From Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials (1992), Vol. 1, Powder Production and Spray Forming, 27-39
- 5) R. Gerling, M. Hohmann, F.-P. Schimansky, Materials Science Forum, Vols. 539-543 (2007), 2693-2698
- 6) S. Pleier, W. Goy, B. Schaub, M. Hohmann, M. Mede, R. Schumann, From Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials (2004), 2, 49-55



### 3. ディスクアトマイズの特長と最新動向

(株)デュコル 粉体事業部 はまもと こう ちゅう  
濱 本 高 郎

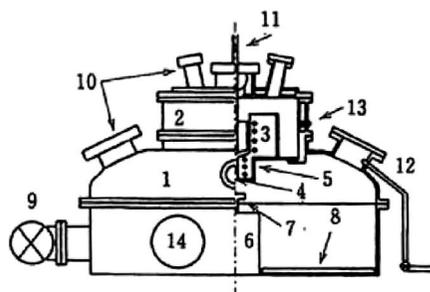
#### ◇ ディスクアトマイズの特長

ディスクアトマイズ法は溶融した金属を高速で回転するディスク上に連続的に流下し、ディスク上面に形成させた溶融膜を高速回転により液滴状に飛散させて粉末を製造する方法である。この方法では流下量と回転数を制御することで粒子径の揃った粉末を製造することができる。また、一般的には粉化された溶融金属は不活性ガス中で冷却固化するため、製造される粉末は酸素含有量の低い粉末が得られ、形状は球状を呈する。

#### ◇ 遠心粉末製造装置

ディスクアトマイズ概念図を図1に示した。溶融した金属は高速回転の中心に流れ落ち、ディスク表面に広がるとともに遠心力で外周に引張られ薄い溶融膜を形成する。溶融膜はディスクの周端で支えを失い滴状となり、遠心力によりその液滴が分離・飛散され、微粒化が起こる。微粒化された溶湯は溶湯自らの持つ表面張力により球状化されながら雰囲気ガスもしくは放射冷却により冷却され、凝固して粉体となる。

図2は遠心粉末製造装置の概略図である。装置は大別して噴霧室(1)と溶解室(2)に分けられ、溶解室の中には溶解炉(電気炉又は高周波誘導炉)があり、その中にノズル付きのつぼを置くようになっている。ノズルの部分は下方の噴霧室中に突出した形になるため、ノズルを加熱する目



- 1：噴霧室 2：溶解室 3：電気炉
- 4：ノズル付きのつぼ 5：ノズルヒーター
- 6：高速回転モーター 7：回転盤
- 8：粉末回収プレート 9：真空ポンプ
- 10：のぞき窓 11：ストッパー
- 12：ガス流入口 13：ガス流出口
- 14：回収口

図 2 遠心粉末製造装置概略図

的でノズルヒータ(5)がつけてある。噴霧室(1)の直径は2~3.5m、中心部に高速モーター部(6)が立ち上がり、ノズルと中心軸を合わせて高速回転盤(7)が取り付けられる。噴霧室の内部はガス置換に先立って、真空排気できるようにし(9)、溶解室も噴霧室を通じて真空中に排気できる。真空排気後、窒素、アルゴン等の不活性ガスによるガス置換を行うが、噴霧時も高速回転モーターのパージガスとして、装置内に顕著な流れを生じない程度の微量のガスを流しながら噴霧を行う。溶解室は噴霧室とは絶縁しておらず、噴霧室からのガスが溶解室に流入し、自動排気弁(13)よりガスが流出できる構造である。試料はつぼ内で溶解され、所定の温度に保持した後、ストッパ(11)をあげることによりつぼ下部のノズルを通してディスク上面へ垂直に自由落下する。生成した粉末は噴霧室下部にある受け容器(14)から粉末を回収する。受け容器自体も噴霧室同様にガス置換しており、ダンパを介して密閉した状態で分離できる構造であるため、雰囲気壊さずに粉末が回収できる。



図 1 遠心粉末製造法概念図

### ◇ ディスクアトマイズ法のパラメータ

ディスクアトマイズ法の噴霧条件を制御し、またそれにより生成される粉末の性状を決める因子としては次のようなものが考えられる。噴霧溶湯の物性、すなわち密度、粘性、表面張力など。回転条件、すなわちディスク直径、材質、形状、温度、回転速度。溶湯の注湯速度及び注湯温度。雰囲気ガスの組成、温度、密度、粘性、熱伝達能、流速等である。

### ◇ 亜鉛及び亜鉛合金の噴霧実験

#### 1. 目的

回転速度は直接遠心力に関係し、遠心噴霧の噴霧諸因子の中で最も重要な因子と考えられる。そこで、融点も低く比較的取り扱いの容易な亜鉛を対象に回転速度のみを変化させて噴霧を行い、生成率や粒径に与える影響を調べる。また、溶湯の成分の違いは大きく噴霧状態を変化させることが予想される。そこでZn-Al合金を用いて、噴霧された粉末の粒径と成分について検討する。

#### 2. 方法

先述の遠心粉末製造装置を用い、カーボンつぼを使用、ノズル径を $\Phi 1.4\text{mm}$ とした。ディスクはカーボン製 $\Phi 20\text{mm}$ として、噴霧温度は $827\text{K}$ でAr雰囲気中で回転速度を $20,000\text{rpm}$ 、 $30,000\text{rpm}$ 、 $40,000\text{rpm}$ と変化させて噴霧した。生成した粉末はその全量を回収し、ふるいにより分級してそれぞれの重量を測定し、生成率と粒度分布を得た。

Zn-Al合金の噴霧においては溶湯の成分以外の噴霧条件をできるだけ一定に保つという目的で、一回の噴霧条件で異なった組成の合金を噴霧し、得られた粉末の粒径と組成の関係を調べる。すなわち、アルミニウムと亜鉛の融点と比重の違いを利用してつぼ内に下部から組成の異なる溶湯をつくり、それを底部から連続的に注湯して噴霧を行い、得られた粉末を亜鉛の場合と同様にふるい分け後それぞれの重量を測定し累積粒度分布を得ると共に、それぞれの粒度のものを化学分析にかけ粒度とアルミニウム含有率の関係を調べる。なお、噴霧条件は噴霧温度 $927\text{K}$ 、カーボン製ディスク $\Phi 30\text{mm}$ 及び $\Phi 20\text{mm}$ のものを回転数 $30,000\text{rpm}$ で製造した。

### 3. 結果と考察

図3-1にそれぞれ生成粉末の累積粒度分布と中心粒径（累積粒度分布50%に相当する粒径）及び $300\mu\text{m}$ 以下の粉末生成率を示す。累積粒度分布はほぼ対数正規分布に近い形をしており、回転数が大きくなるほど微粒側にシフトしていているが、傾きに相当する幾何標準偏差はほぼ同等になっている。中心粒径は回転速度の増加に伴い減少しており、 $300\mu\text{m}$ 以下の粒子の生成率も回転速度の増大に伴って増加している。

幾何標準偏差に大きな変化がないことは、この噴霧条件の領域では基本的に同一の噴霧機構によって微粒化が起こっていることを裏付けている。また、累積粒度分布の微粒側へのシフトは中心径の減少と回転速度の関係は回転速度に対して反比例よりややゆるやかな相関関係で微粒化されているように見える。 $300\mu\text{m}$ 以下の生成率が回転速度の増大に伴って増加することは粒子径の減少が影響していることも一つの実事であるが、累積粒度分布を $300\mu\text{m}$ に外挿してみれば明らかのように $300\mu\text{m}$ 付近の粒子径の粒子は少なく、それが全体の生成率の値に与える影響は小さい。むしろ、微粒化に伴って飛しょう距離が短くなり、これが亜鉛の噴霧の場合には容器壁に衝突して付着する損失分を低減させている効果大きい。

図3-2には亜鉛-アルミニウム合金の噴霧の場合の累積粒度分布と各粒度ごとのアルミニウム含有量を示した。微粒のものほど亜鉛が多く、粒径が増すほどアルミニウムが多くなっていることは亜鉛に富むものほど微粒化しやすいことを示している。ディスク径 $\phi 20\text{mm}$ のものが、 $\phi 30\text{mm}$ の

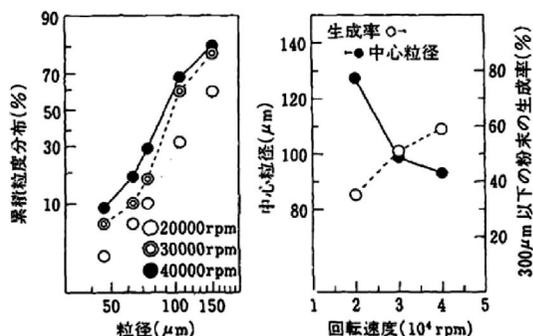


図 3-1 亜鉛粉の累積粒度分布と回転速度と中心粒径及び生成率の関係

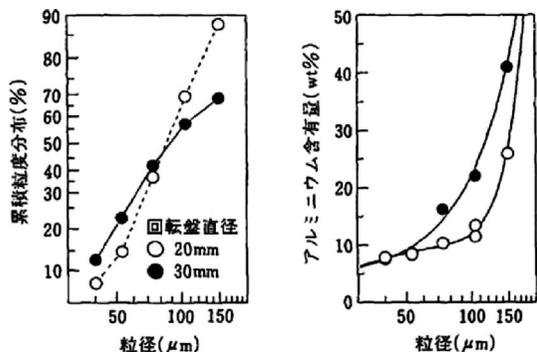


図 3-2 Zn-Al合金粉の粒径と累積粒度及びAl含有量の関係

ものより顕著にこの傾向を示しているが、φ30mm径の場合は周速が大きく初速度も増大するため、飛しょう距離の大きくなるアルミニウムが富む粉末は、噴霧容器壁に衝突・付着してしまうものが多くなる。

遠心噴霧の噴霧因子のいくつかについて検討を行った結果以下のことが明らかとなった。①回転速度の増加は粒子の微細化をもたらす。②微細粒子ほど飛しょう距離が短くなり、粒子の位置的分布は内側に寄ってくる。③溶湯組成が変化し、表面張力や比表面張力が小さくなると、生成される粉末の粒径は粗大化し、飛翔距離も大きくなる。④溶湯とディスクの濡れ性も噴霧の様子を変える重要なパラメーターである。

### ◇ ハイブリッド噴霧法

ハイブリッド噴霧法は流体ジェットに基づく分裂法と融体の自己不安定性分裂法の両者を取り入れたものであり、ガス噴霧法により、金属溶湯を数10～数100μmに分裂させ、下部に設置してある回転ディスク上全面にガス噴霧流により満遍なく均一に吹き付け、均一で希薄な溶融膜を形成させながら回転ディスクを高速観点させることで、回転ディスク先端から微細液滴を飛散させて製造する方法である(図4)。遠心アトマイズ法に比べて、より微細な粉末を製造することが可能である。

#### 1. 各鉛フリーハンダ合金微細球状粉末の製造

鉛フリーハンダ合金には様々な合金系が開発されているが、本実験では次の4種類の合金を用いた。Sn-3Ag-0.5Cu合金(No. 1)、Sn-Zn-X-Y-Z合金(No. 2)、Sn-Ag-X合金(No. 3)、Sn-Ag-Cu-X-Y

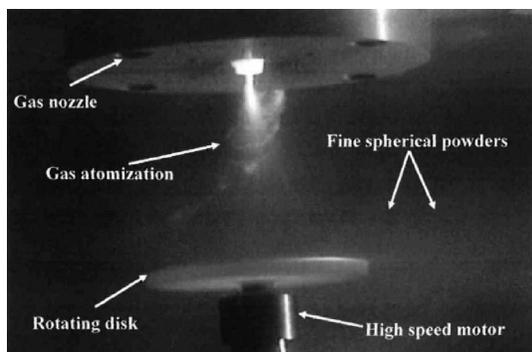


図 4 ハイブリッド噴霧法

合金(No. 4)。

各合金の溶解は特種炭万炉を用いアルゴン雰囲気にて溶解し、各合金の融点より200～400Kまで温度を上げ、溶湯ノズル直径1.0～2.0mmと変化させてから溶湯を落としガス噴霧を行った。なお、Sn-Zn系の場合、Zn(融点693K)の融点温度以下で行った。ガス噴霧条件は噴霧ガスにN<sub>2</sub>ガスを用いて圧力0.2MPaで行い、ガス噴射口から回転ディスクまでの距離を70mmとして行った。遠心噴霧は直径φ70mmの黒鉛製と軟鋼製のディスクを用い、回転ディスクの回転数は5,000～40,000rpmと変化させて粉末を製造した。なお、噴霧開始約1時間前から噴霧チャンパー内にN<sub>2</sub>ガスを導入し、チャンパー内の酸素分圧を50ppm以下として粉末を製造した。

#### 2. 溶湯温度の影響

一般的に溶湯の温度を変化させると表面張力、粘性、密度が低下するとされている。本試験では鉛フリーハンダ合金を代表するSn-3Ag-0.5Cu(No. 1)を用い、合金融点より473～903Kと温度を変化させて粉末製造した。他の条件は溶解量：約2,000g、溶湯ノズル直径：φ2mm、噴霧圧力：0.2MPa、噴霧角度：0.7rad、回転ディスク内酸素分圧：約10ppm以下である。

結果は熔融温度の増大と共に返金粒子径は微細化され、903Kでは約9μmと非常に細かくなっていた。また、25μm以下の粉末の収率も温度が高くなるほど増加していた。このことから粉末の微細化には温度依存性があることが明らかとなった。

#### 3. 回転速度の影響

最適条件として、溶湯温度：903K、回転ディ

スク材質：軟鋼製、金属溶湯ノズル径：φ1.5mmとし、回転数を10,000～40,000rpmの各回転数で生成した25μm以下の平均粒子径と収率の関係を調べた。

結果はディスクの回転数の増大とともに25μm以下の収率は増加し、回転数：40,000rpmでは約60%と高い収率を得た。また、この回転数では45μm以下の収率は約90%と高い収率を得ていた。平均粒子径では12.1μmと非常に微細な粉末が製造されていた。SEMで各回転数で生成された粉末を観察すると、粉末は球状を呈し、表面は凹凸のない平滑な粉末であることが観察される。

#### 4. 小括

本研究では進化するエレクトロニクス機器の高密度実装を実現させるための鉛フリーハンダ微細球状粉末の製造条件と微細化の関係を調べ、製造された粉末の表面性状について検討した。以下に得られた結果を述べる。

①ハイブリッド噴霧法において鉛フリーハンダ粉末の微細化には溶湯ノズル径：φ1.5mm直径として、溶湯温度の増大と回転数の増大により微細化が促進され、微細球状粉末を効率よく生成できることを明らかにした。

②鉛フリーハンダ合金は軟鋼製回転ディスクを使用することで、ディスク上全面に健全な雨水溶融膜を形成させ微細球状粉末を効率よく製造できることを明らかにした。

③ハイブリッド噴霧法で製造された各粉末の深

さ方向の酸素分布を測定し結果、生成粉末の酸素はごく表面層（6nm）に存在していることを明らかにした。

#### ◇ ディスクアトマイズの最新動向について

これまでディスクアトマイズ法による生産設備は半田粉（融点180℃程度）が主流で製造技術として確立している。用途としては主にソルダーペーストとしてプリント基板の印刷や微細部品のハンダ付けなどに使用されている。

一方、高融点の金属については従来の製造法としてガスアトマイズ法・水アトマイズ法・レップ法等で製粉されてきたが、粒度分布・製造効率が悪く高価なものになっている。ディスクアトマイズ法は半田粉を製造する用途以外ではあまり普及していない。その理由に溶湯炉、ディスク材、製造条件等未開拓であり、これまで大きな需要もなかったため開発自体がなされていなかった。近年では3Dプリンター材料・電池材料・触媒・焼結品材料・射出用材料・溶射用材料等々球状金属粉末のニーズがでてきている。少量多品種、微粉末化の傾向があり、今後更なる技術開発が期待される分野である。

#### 参考文献

- 1) 遠心噴霧法による粉末製造に関する研究、菅広雄
- 2) 遠心噴霧粉末製造法の噴霧諸因子、原田幸明、菅広雄
- 3) アトマイズ法による均質な金属微細球状粉末の創製に関する研究、皆川和己

# Ⅲ. 粉末成形技術と用途展開

## 1. 3Dプリンタ

### (1) 造形方式

#### ① レーザー方式

近畿大学 工学部教授 京極秀樹

従来、ラピッドマニファクチャリングと呼ばれていた積層造形技術は、2009年にASTM F42委員会によりアディティブマニファクチャリング (Additive Manufacturing、以後AMと記す。) と呼ぶことになった。これに伴って、AM技術は7つのカテゴリーに分類され、金属積層造形に利用されるカテゴリーは、主に粉末床溶融 (Powder Bed Fusion、以下パウダーベッドと記す。) 方式と指向性エネルギー堆積 (Directed Energy Deposition) 方式である。後者のデポジション方式については、③を参照していただきたい。

金属積層造形においては、光源としてレーザーと電子ビームが用いられる。ここでは、レーザーを光源としたパウダーベッド方式の装置の現状と適用例について紹介する。

本技術は、テキサス大学オースティン校のDeckardとBeamanを中心に研究が進められ、金属粉末を用いた選択的レーザー焼結 (SLS: Selective Laser Sintering) 法が開発され、1987年に積層造形装置が開発された。1988年に当大学のベンチャー育成事業によりDTM社が設立され、1992年に第1号のSLS装置が発売された。本法においては、金属粉末に樹脂を添加あるいはコーティングした粉末が用いられ、その後に溶浸という工程が必要であるため、間接的な積層造形法である。その後、1989年にドイツ・EOS (Electro Optic Systems) 社が設立され、金属粉末を直接レーザー焼結する装置が開発された。これは、前者と異なり金属粉末のみを直接積層造形し、後工程を必要と

しない方法で、金属積層造形においては、現在直接法が主流となっている。金属粉末積層造形については、2000年代に入りファイバーレーザーの高出力化や粉末の製造技術の発展に伴い、各社の装置の高性能化が進み、最近の装置では、ほぼ真密度の造形物が作製できるようになってきた。

#### a. 粉末床溶融 (パウダーベッド) 方式

金属積層造形装置 (以後、金属3Dプリンタと記す。) には、パウダーベッド方式が多く、レーザー焼結 (SLS: Selective Laser Sintering) あるいはレーザー溶融 (SLM: Selective Laser Melting) と呼ばれることが多い。本法では、図1に示すように、樹脂粉末あるいは金属粉末の積層造形に利用されている。CADデータあるいはCTスキャンによるDICOMデータなどをSTLデータに変換して、

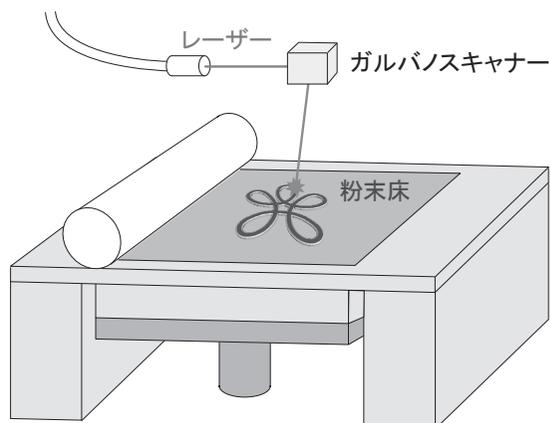


図 1 パウダーベッド方式の原理

ガルバノスキャナーを介してレーザーを照射して、敷き詰めた粉末を焼結あるいは溶融・凝固する工程を繰り返すことにより積層造形を行う。

現状では、200Wから400Wのファイバーレーザーを搭載した造形エリア250mm×250mmサイズの装置がほとんどであるが、高速化・大型化も進んできている。代表的な大型金属3Dプリンタの仕様を表1に示す。最近の特徴は、

- ①1kWの高出力のファイバーレーザーを搭載するなどレーザーの高出力化
- ②2台あるいは4台のファイバーレーザーを搭載するなど多重光源化
- ③□250mmから□500mm以上への造形エリアの大型化

が進んでいるとともに、

- ④溶融池（メルトプール）のモニタリング機能の付与

などが挙げられる。

このように、ここ数年で造形速度の高速化、さらには大型化が進んできているとともに造形物の格段の高精度化が進んでいる。代表的な例としてEOS社の1kWのYbファイバーレーザーを使用した造形サイズ400mm×400mmの装置M400がある。本装置の特徴は、高速・高精度を図るためのリコータ、パウダーベッド等のモニタリングシステム、さらには本体造形部に接続して粉末処理および製品の自動取出しが可能なリサイクリング・フィルタリングシステムを装着できるようになっている点である。大型化・高速化については、SLM Solutions社が、他社に先行して多重光源化を進めており、SLM500HLでは4台光源を搭載した装置を開発しており、自動化機構やモニタリ

ング機能を搭載している。また、大型化については、2012年にConcept Laser社がFraunhofer研究所およびDimler社と共同で造形サイズ600mm×400mmのX Line 1000Rを開発したが、2015年にさらに大型の800mm×400mmの超大型装置X Line 2000Rを開発している。各社とも航空宇宙部品製造においては、製品の品質保証が重要であるため、メルトプールのモニタリング機能を搭載した装置を開発しており、今後フィードバック機能を搭載した装置開発が行われると予測される。

また、注目されるのは、ドイツのConcept Laser社が、“AM Factory of tomorrow”と題して、金属3Dプリンタのモジュール化およびシステム化を、オランダのAdditive Industries社もモジュール化したMetalFAB1システムを提案している点である。このように、ドイツのIndustrie 4.0におけるスマート工場を意識した取り組みが進んできている。近いうちにマस्पロダクションへと移行することが予測される。

レーザー方式においては、電子ビーム方式と異なり多くの材種に対応できる。ステンレス鋼をはじめ、マルエージング鋼、工具鋼、生体材料用コバルトクロム合金、さらには航空宇宙用として利用されている耐熱・耐食用インコネル合金、チタン合金、アルミニウム合金などがあり、表2に示すように機械的性質も溶製材に匹敵する特性が得られるようになってきている。

適用製品では、タービンブレードや噴射ノズルなどの航空宇宙分野の製品が多く、GE社では航空機エンジンの主要部品を本技術により製造すると発表しており、タービンブレードや噴射ノズルなどの材質には、TiAlやInconel 718などが適用され

表 1 代表的な大型金属3Dプリンタの仕様（各社ホームページより）

装置	EOS M400	SLM SLM500HL	Concept Laser X line 2000R	3D Systems ProX400
造形サイズ (mm)	400×400×400	500×280×320	800×400×500	500×500×500
レーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー	ファイバーレーザー
出力 (W)	1,000	400/1,000	1,000×2	500×2
スポット径 (μm)	—	80~120	100~500	—
走査速度 (m/s)	~7	~10	~7	—
積層厚さ (μm)	20~	20~200	30~150	10~100
造形速度 (cm <sup>3</sup> /h)	—	105	10~100	—

表 2 主な材料の機械的性質 (SLM Solutions社ホームページより抜粋)

Metal or Alloy	0.2% Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRC)
Ti	>180	>290	>20	—
Ti-6Al-4V	>865	>972	>10	37.3
Ti-6Al-7Nb	>905	>1,020	>10	39.4
Co-Cr-Mo (ASTM F75)	>835	>1,050	—	35
316L	525 ± 30	625 ± 30	—	237 ± 4HV
15-5PH	1,050 ± 30	1,100 ± 50	16 ± 4	32 ± 3
H13	—	1,730	—	54
Al12Si	211	409	5	105HB
Inconel 718	858 (±120)	1,150 (±140)	18 (±5)	—
Inconel 625	410	680	30	—
Inconel HX	400	910	35	—

ている。自動車の試作品においては、Al10SiMg合金が多く用いられている。また、医療用材料としては、人工股関節、人工膝関節などの生体用インプラントにTi6Al4V合金などが適用されている。

#### b. ハイブリッド方式

我が国では、パウダーベッド方式と切削機能を複合化した金属光造形装置を(株)松浦機械製作所が松下電工(株)(現パナソニック(株))と共同で2003年に開発している。また、2014年にソディック(株)がほぼ同様の複合機を開発してお

り、金型への適用をはじめている。これらの装置では、パウダーベッド方式で10層程度の積層造形を行った後、ミリングを行うプロセスを繰り返しながら、積層造形していき、最終製品を高精度で作製できる点が特徴である。このため、射出成型用金型などにおいて冷却水管を最適位置に配置できるとともに、最終製品として作製できるなどの長所を有するため、冷却水管、深い溝や高いリブを有する高精度・高機能金型製作に威力を発揮している。

## ②電子ビーム積層造形技術の新たな可能性

東 北 大 学 ち ば あ き ひ こ  
金 属 材 料 研 究 所 千 葉 晶 彦

### ま え が き

金属積層造形技術は、製造部品の3次元のCADデータがあれば金型なしで、どのようなデザインでも制約がなく成形ができるネットシェイピング技術である。また、同時に金属合金部品の高強度化にとって必須な金属組織制御が可能な加工プロセス技術である。前者についてはよく知られているが、後者の機能を併せ持つことはほとんど知られていない。熱源（電子ビーム・レーザービーム）の条件（エネルギー密度、走査速度、走査間隔など）や走査パターンなどを熱流動解析や凝固学的手法に基づいて最適化することで、これまで複雑な冶金学的なプロセス、例えば、熱間鍛造加工でしか成しえなかった組織微細化や偏析除去などの組織制御が可能である。また、単結晶の金属部品製造プロセスとしての機能があることも最近明らかにされている。この組織制御機能を用いると、一つの部品の金属組織を部位によって選択的に形成制御が可能となる。例えば、ガスタービンディスクの中心領域を等軸な微細結晶粒として高強度化する。一方、周囲は高温にさらされるために、柱状晶か単結晶とすることで、単結晶タービンブレードとディスクとを一体化させて製造することも可能である。このような加工プロセスが可能となれば、飛躍的な軽量化や耐熱強度の向上が期待できる。

本稿では、電子ビーム積層造形技術に見いだされる“組織制御機能”に着目して、実例を交えながら既存の金属加工技術との違い、金属積層造形技術の“革新性”について考えてみたい。

### ◇ 電子ビーム積層造形プロセス

本題に入る前に電子ビーム積層造形プロセスについて概説する。電子ビーム積層造形技術は、以下の二つのタイプが知られている。一つは、三次元CADデータに基づく電子ビーム走査により50～

100 $\mu\text{m}$ 程度の厚さに敷き詰めた金属粉末床（パウダーベッド）を選択的に溶融・凝固させた層を繰り返し積層させて三次元構造体を製作する（パウダーベッド溶融結合法）。また、もう一つは繰り出した合金ワイヤーを電子ビームにより溶融させ液滴を基板の上に堆積（デポジション）させて三次元構造体を製作するタイプ（指向エネルギー体積法）である。前者のタイプは高精度な積層造形加工技術として航空機部品や人工関節などの医療用製品の製造技術として広く普及している。本稿では、前者のパウダーベッド方式の電子ビーム積層造形技術に焦点を絞って説明する。

電子ビーム方式による金属積層造形技術は、真空中での造形を基本とするため、装置構成が複雑となる。パウダーベッド方式に限って言えば、電子ビームでの選択的溶融プロセスに入る前にパウダーベッド表面を700～1000 $^{\circ}\text{C}$ の高温に予備加熱する必要がある。この予備加熱プロセスはレーザー方式には無く、EBMに独特なプロセスである。この予備加熱プロセスは造形物の残留応力を低減させる効果があり、極めて重要である。ここでは、Arcam社の電子ビーム積層造形装置A2Xを例にして電子ビーム積層造形技術と装置概要について説明する。

#### 1. 装置構成と造形法

図1に(a)電子ビーム積層造形装置外観および(b)造形装置概略図を示す。また、図2は、造形プロセス開始時からの一層分のプロセス（①スタートプレート加熱→②パウダーベッド形成→③パウダーベッド予備加熱→④選択的溶融→⑤ステップダウン）を模式的に示す。次に述べる手順により造形を行う。以下の括弧内の数値は図1(b)に現れる数字と対応している。

- A) 加熱されたタングステンフィラメント(1)から放出された電子はアノード(2)を通過して加速される。
- B) 加速された電子はフォーカルコイル(3)

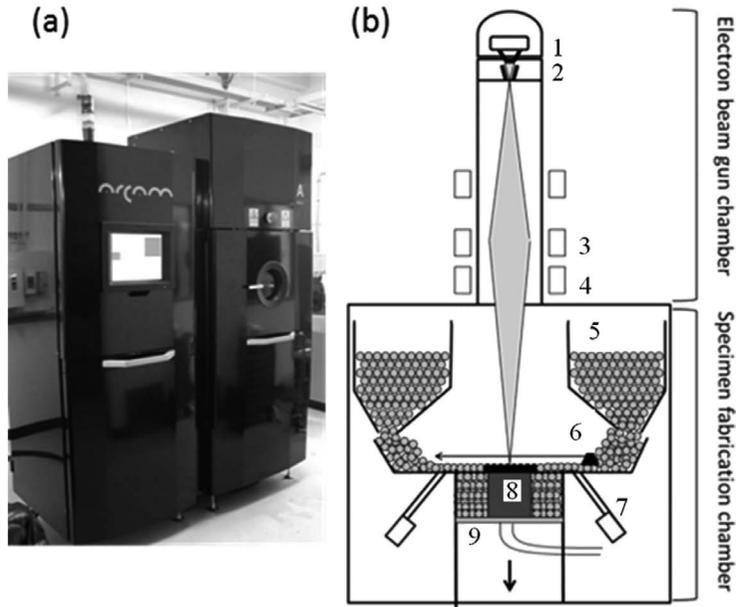


図 1 (a) EBM装置の外観および (b) 装置チャンバの模式図

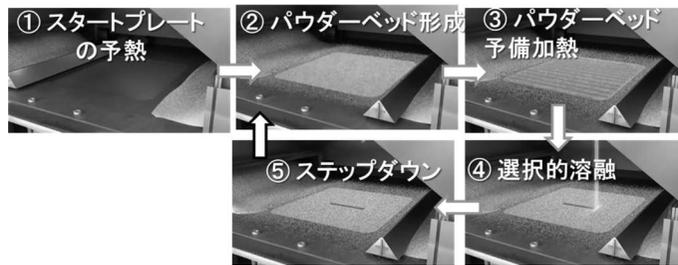


図 2 電子ビーム積層造形の1層分の造形プロセス

により焦点が合わされ、ディフレクションコイル (4) により走査 (偏向) される。

C) 電子がパウダーベッドに照射された時の運動エネルギーが熱に変換され、この熱によって金属粉末が加熱あるいは溶融する。まず、造形開始時に、電子ビーム照射によりスタートプレートのみを600~1000℃の温度に加熱する (図2①)。この予備加熱されたスタートプレート上にレーキアームによって厚さ50~80μmのパウダーベッドを形成する (図2②) と、スタートプレートの余熱によってパウダーベッドは加熱され、スタートプレートと同程度にまで昇温させることができる。600~1000℃の温度に加熱されたパウダーベッドに電子ビームを照

射し予め定めていた温度に到達するまで加熱する (図2③)。その後、目的とする造形物の3DCADデータの2Dのスライスデータ領域を選択的に溶融する (図2④)。

D) 2Dスライスデータによる溶融プロセスが終了した後、ステージ (9) が1層分降下し (図2⑤)、パウダーホッパー (5) からレーキアーム (6) を用いて新たにパウダーベッドを形成する。その際に供給される粉末の量は、センサー (7) を用いて一定量になるようにレーキアームの位置を随時調整する。

E) 以上の過程を繰り返し行い、2Dスライスデータの溶融層を繰り返し積層し、製品 (8) 形状に成形する。

### ◇ 電子ビーム積層造形における溶融凝固現象

金属積層造形技術の基本は、素形材生産の基本と同様に溶融凝固プロセスである。しかし、金属積層造形ではCADデザインに基づく一層一層の数十 $\mu\text{m}$ 規模の局所領域の選択的な溶融凝固プロセスであり、局所領域（メルトプール）の溶融凝固現象を高精度に制御して積み上げる casting 技術の一種であると言える。大量に溶融金属を製造して、一度に大型の鋳塊を得る従来の金属生産プロセスとはこの点が決定的に異なる。最新のモニタリング技術や制御技術を駆使することにより、メルトプールに発生する欠陥や凝固の際の微細結晶組織までもを制御して、各種の素形材製品や機械部品を自由な形状デザインにネットシェイプで生産する新規な加工プロセスとして進化させることが可能である。

図3に電子ビーム照射によるパウダーベッドの溶融池（メルトプール）形成と凝固過程を模式的に示す。電子ビーム積層造形では、60~80 $\mu\text{m}$ の平均粒径の金属合金粉末（粒径分布は、40~120 $\mu\text{m}$ ）を用いる。またパウダーベッドの積層厚さは、

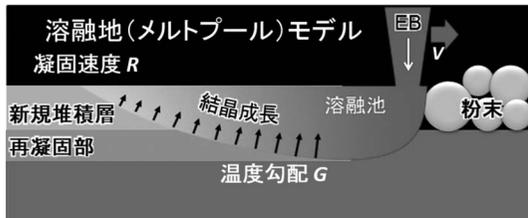


図 3 パウダーベッドの電子ビーム照射によるメルトプール形成と凝固過程

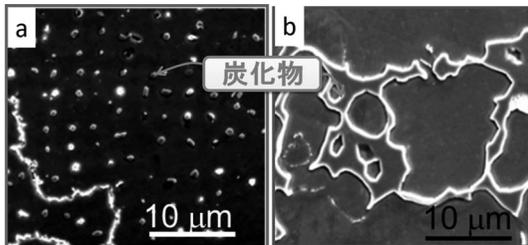


図 4 Co-28Cr-6Mo-0.23C-0.20N合金の微細組織（走査電子顕微鏡像）。(a) EBM積層造形により形成された組織。(b) 水冷銅鋳型を用いた鋳造まま組織。急速溶解・急速凝固効果により、数百nmサイズの炭化物が均一分散した組織が形成できる。

50~100 $\mu\text{m}$ であるためパウダーベッド一層には粉末粒子は2から3個程度が重なったものとなっている。メルトプールの最大深さはおよそ200 $\mu\text{m}$ 程度であることが、チタン合金の積層造形実験などにより明らかにされている。すなわち、溶融深さはパウダーベッドの積層厚さの凡そ2倍程度に及ぶと考えられる。このことより、電子ビーム積層造形の溶融プロセスでは、パウダーベッド層の溶融とパウダーベッドの直下の既溶融凝固層の再溶融プロセスとが同時に起こると推察できる。電子ビーム積層造形での溶融凝固現象の最大の特徴は、パウダーベッド粉末層と既凝固層（最表面凝固層）との融合であり、エピタキシャルに溶融凝固が起こることである。この凝固プロセスでは残留応力の発生が少なくと予測できるが、実際に電子ビーム積層造形で製造される金属部品には残留応力の発生が少なく、造形中での変形や反りの発生、内部き裂の発生がない。

金属合金の凝固組織は、固液界面（マッシーゾーン）での温度勾配（ $G$ ）と凝固速度（ $R$ ）によって決まる。メルトプールの $G$ と $R$ は電子ビームのエネルギー密度、走査速度、ビーム走査間隔などによって変化させられることから、電子ビーム照射操作により造形物の凝固組織を制御することが可能となる。この特徴を利用することにより、電子ビーム積層造形技術により単結晶部品の製造や、析出物などを微細に分散させた金属合金開発の新規プロセスとしての可能性が期待できる。

### ◇ 電子ビーム積層造形による微細析出物の形成制御

電子ビーム積層造形法により作製した人工関節などの生体用Co-28Cr-6Mo合金試験片の横断面のSEM組織を図4（a）に示す。比較のために、金型を用いた鋳造法で作製した同配合組成合金のSEM像も併せて示す（図4（b））。図4（b）には粗大な $\text{M}_{23}\text{C}_6$ 系炭化物の晶出物が確認され、典型的な鋳造組織が観察される。晶出物の大きさは数10 $\mu\text{m}$ オーダーであり、不均一に形成している。これに対して図4（a）に示されるように、電子ビーム積層造形法で得られる組織はサブミクロンオーダーの微細炭化物が均一に形成された組織である。これは、電子ビーム積層造形は急速溶融・急速凝

固のプロセスにより造形物が形成されることを示唆している。このことは、電子ビーム積層造形法は、従来の鑄造技術では実現不可能な微細な晶出物を均一分散する組織を形成させるプロセスとして活用できることを示しており、インプラント製品応用だけでなく一般工業製品への適用に関しても高いポテンシャルを有していると云える。

### ◇ 電子ビーム積層造形による単結晶組織制御の可能性

図5 (a) および (b) は、電子ビーム入射方向に平行に造形した生体用Co-28Cr-6Mo合金の丸棒試料の横断面の電子線後方散乱回折法 (EBSD) によるIPFマップを示す。電子ビーム入射方向をND、y軸はRDとして表している。電子ビームの走査方向は、図5 (a) ではx軸、y軸に平行、図5 (b) ではx軸とy軸に対して45°傾けた方向である。図5 (a) より、ND断面とRD断面のいずれもが左下に示す逆極点図の<100>方位色である赤色であることから、ND断面とRD断面のいずれもが<100>方向に配向しており、ほぼ単結晶であることを示している。また図5 (b) ではND断面は<001>方向に配向しているものの、RD断面は<001>から<001>軸回りに45°回転した<011>方向に配

向している。これらのことより、電子ビーム積層造形プロセスにおける溶融凝固は電子ビーム入射方向と走査方向に<001>配向した一方向凝固成長により起こることが示唆される。電子ビーム照射条件を最適化することで、造形物を単結晶成長させることができる。筆者はこれまでFZ法やブリッジマン法などの単結晶成長プロセスで同合金の単結晶作製を試みたが、すべて失敗に終わっている。これは、生体用Co-28Cr-6Mo合金では900℃付近で高温相のfcc相からhcp相に固相変態するために、既存の結晶成長法での単結晶成長が難しいためであると考えられる。この事実から考えると電子ビーム積層造形法は既存のプロセスでは得難い単結晶が容易かつ高速に得られるプロセスであることを意味している。電子ビーム積層造形法の溶融凝固プロセスは新たな凝固学分野における研究対象としても興味深い。

### むすび

金属積層造形技術のうち電子ビーム積層造形を中心に、その組織制御技術としての革新性に着目して説明を試みた。冒頭で触れたように、金属積層造形技術は金型を必要としない、ネットシェイプでの加工技術であると同時に、金属合金粉末を用いて数

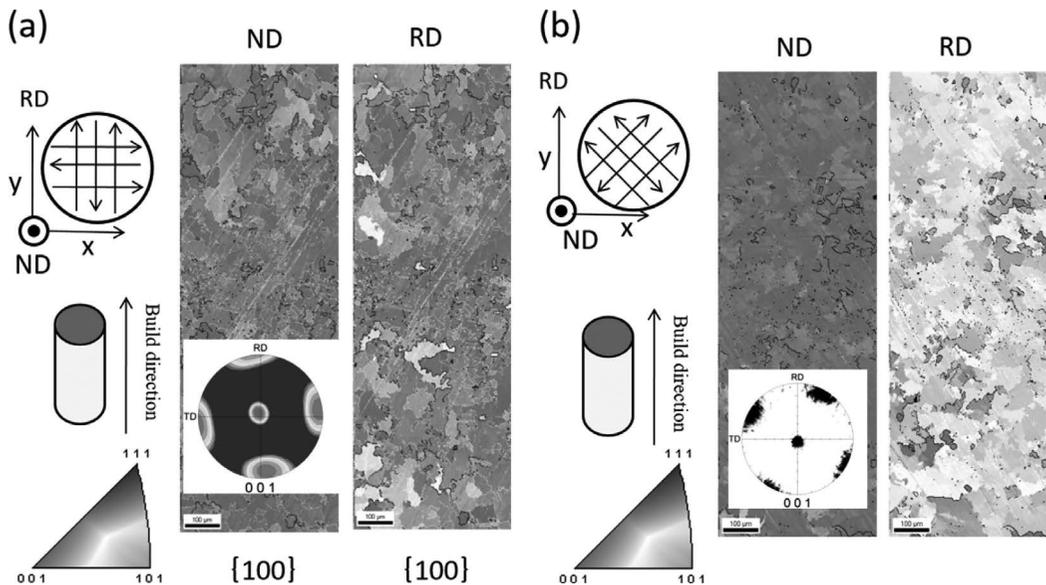


図 5 丸棒試料の垂直断面のEBSDによるIPFマップ。電子ビーム入射方向をND、y軸はRD、x軸はRDとして表している。電子ビームは (a) x軸、y軸に平行、(b) x軸とy軸に対して45°傾けた方向に走査させている。

10～数100 $\mu\text{m}$ の局所領域の溶融ゾーン（メルトプール）を形成させ、その凝固過程の最適化に関する金属加工学的な学術・技術分野であると言える。既存の鑄造工学技術（Casting）に基礎を置いてはいるが、局所領域に関する溶融凝固現象を2次元と3次元に亘ってincrementalに高精度に制御するインクリメンタル鑄造（Incremental casting）技術と捉えることができる。形状付与と同時に組織制御も行

える新たな（革新的な）金属加工プロセスとしての発展の可能性を有していると考えられる。これに関連して、最近、電子ビーム積層造形技術を用いて、単結晶のガスタービンブレード製造や、金属セラミックス複合材料部品の製造に関する研究開発が行われるようになって来ている。今後、組織制御や新たな材料開発ツールとしての電子ビーム積層造形技術の様々な可能性についても注目されている。



# ③DED方式積層造形と切削加工を融合した Hybrid machine tools

DMG森精機(株) 先端加工技術部 お だ よう へい  
AM加工技術グループ 小 田 陽 平

## まえがき

積層造形は英語ではAdditive Manufacturing (以下、AM) と呼ばれ、2009年にASTM INTERNATIONALで呼称が決定されたものである。一方、切削加工を含む除去加工は対比としてSubtractive Manufacturing (以下、SM) と呼ばれている。近年、この金属造形技術の進歩により適用範囲が広がり、工業用の製品にも使用される例が増加している。たとえば、航空宇宙分野において部品内部に複雑な形状を造形することによる軽量化や冷却性の高効率化の実現<sup>1)</sup>、冷却管を効率的に配置し、冷却時間を短縮できる金型などの例が挙げられる<sup>2)</sup>。このAMの世界市場規模は、2009年に10億ドル程度であったが2012年には20億ドル以上になっており、2021年には108億ドルまで規模が拡大すると予想されている<sup>3)</sup>。

このように注目されているAMであるが、大きく粉末床溶融結合方式 (Powder Bed Fusion、以下、PBF方式) と指向性エネルギー堆積法 (Directed Energy Deposition、以下、DED方式) に分類され、多くのメーカーで製品化されている。以前より、積層速度が遅い、機械装置が高価である、SMと比較して精度のオーダーが1~2桁劣るというデメリットが多く挙げられているが、企業の研究開発によりこれらの問題も解決されてきている。当社においてもHybrid machine toolsとして、LASERTEC 65 3D、LASERTEC 4300 3Dを開発、販売している。この機械はAM、SMを1台の工作機械で行うことができ、AM工程後のSM工程により精度を向上させることが可能となっている。

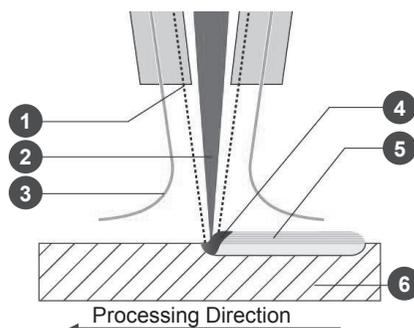
本稿ではこれらの特徴、アプリケーション事例などを述べる。

## ◇ DED方式の特徴

上述したように金属を積層造形する方法として、DED方式、PBF方式が多くの装置で採用されている。また、金属粉末を溶融させる熱源としてはレーザーのほか、電子ビームも挙げられる。本稿では、当社で採用しているDED方式の特徴について述べる。

図1に示すように、DED方式は②レーザーを対象部に照射し④メルトプールを生成し、そこに③キャリアガスとともに①の金属粉末を吐出し、積層する方向にレーザーヘッドを運動させて積層を行う。この方式の長所としては、PBF方式と比較し、下記の5点が挙げられる。

- 1) 積層速度が速い
- 2) 複数の材料を同時に吐出でき、新規材料開発が可能
- 3) ベース材形状の制限が少なく、修復に利用可能
- 4) ベース材材質の制限が少なく、コーティングに利用可能



- |                           |                      |
|---------------------------|----------------------|
| 1 Powder                  | 4 Melt Pot           |
| 2 Laser Beam              | 5 Deposited Material |
| 3 Shielding / Carrier Gas | 6 Workpiece          |

図 1 Directed Energy Deposition方式

5) 通常雰囲気ではレーザーヘッドを運動させて積層するため、製品の大きさがベース機械にのみ制限される

一方、欠点としてはPBF方式に比べて積層精度が劣ること、レーザー、金属粉末、キャリアガスを同時に使用するために、プロセスパラメータの組み合わせが複雑であることが挙げられる。ここで、従来の工作機械にAM機能を付加する際のポイントとしては、積層速度を可能な限り速くし製品の大まかな形状を製作する、精度はSM工程で確保する、工作機械へのインターフェイスを可能な限りシンプルにして操作性を簡単にする、機械コストの抑制などが挙げられる。PBF方式では、積層速度が遅く且つガルバノミラーを搭載したレーザーヘッドを搭載する必要がある。また、チャンバー内にて積層するため、特に大型ワークの場合、チャンバーサイズも大型となり、不活性ガスの充填時間、コストの増加、積層後のワークのハンドリングの煩雑さなどが問題となる。一方、DED方式では、積層速度が速く且つ機内の任意の位置で積層することが可能である。また、シンプルな構造のレーザーヘッドとなる。これらの点を考慮し、DED方式を採用することとした。

#### ◇ LASERTEC 3Dの特徴

当社では、対象ワークに応じて工作機械をベー

スとした2種類のHybrid machine toolsを開発している。まず、5軸制御立形マシニングセンタをベースにしたLASERTEC 65 3Dの外観と積層状態を図2に示す。最大ワークサイズΦ600mm×500mmまで対応が可能であり、レーザーは2.5kWのダイオードレーザーを使用している。さらに、旋盤をベースにした複合加工機のLASERTEC 4300 3Dの外観を図3に示す。最大ワークサイズΦ600mm×1,100mmまで対応可能、レーザーは3.0kWのダイオードレーザーであり、OPで最大10kWまで対応している。両機種ともに、レーザーヘッドは自動で交換が可能であり、積層、切削を任意に工程設計することができる。また、SM工程中には機外にある待機位置に収納されるため、クーラント、切りくずの飛散から保護することができる。

#### ◇ アプリケーション事例

LASERTEC 3Dのアプリケーションは、①完成品、試作、②修復、③コーティングが挙げられる。①完成品加工の対象としては、試作品や素材から削り出すと多くが切りくずとなる、つまり歩留まりが悪い製品、別の部品であったものを一体化した製品、アンダーカット形状がある製品などである。たとえば、LASERTEC 65 3Dにおいてはブリスクの高さ約60mmのブレード部分の積層を行い、AM、SM工程ともに約30分で切削加工で仕上



(a) 外観

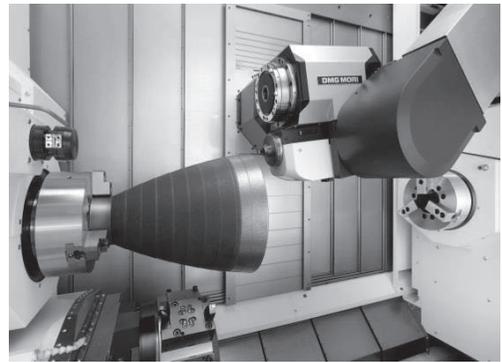


(b) 積層状態

図 2 LASERTEC 65 3D



(a) 外観



(b) 積層状態

図 3 LASERTEC 4300 3D

げることが可能である。さらに、LASERTEC 4300 3Dにおいては図3 (b) に示す長さ約700mmのロケットノズルの積層を約10時間で行うことが可能である。このように1台の機械でAM工程後、切削加工にて仕上げ加工を行うことができるのが大きな特徴である。

#### ◇ 高品質製品の実現および今後の課題

上述したように、DED方式ではプロセスパラメータの組み合わせが多く、最適条件を選定するには経験を要する。さらに、金属粉末の品質、粒度分布などにより、積層ワークの品質は大きく異なる。当社では、レーザ出力、粉末流量、送り速度などのパラメータが積層材料の空孔率、歩留まり、機械的強度（引張強さ、降伏応力など）に及ぼす影響を研究している。また、積層ワークの金属組織観察、組成分析の実施、さらにメルトプールの形状、温度モニタリングシステムの開発など

を行ない、高品質製品の実現に向け取り組んでいる。今後、残留応力の測定と、その低減にも取り組んで行く。

PBF方式の製品においては、プロセスパラメータを材料別に最適化して販売しているメーカーもあり、AM機はアプリケーション技術を確認し、最適なトータルアプリケーションを顧客に提供する必要がある。また、チタンやアルミなどの可燃性金属粉の積層造形に対する要求に対しても実用的、且つ安全に取り扱うことも重要な技術であり、研究を進めている。今後、これらの機械の研究開発を通して、業界の発展に貢献できれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) [https://www.eos.info/eos\\_airbusgroupinnovationteam\\_aerospace\\_sustainability\\_study](https://www.eos.info/eos_airbusgroupinnovationteam_aerospace_sustainability_study)
- 2) <http://www.industryweek.com/technology/rapid-2014-hybrid-manufacturing-steals-show>
- 3) Wohlers Report 2015, Wohlers Associates (2015)

## (2) 適用例

### ①航空宇宙分野への適用

三菱重工業(株) 防衛・宇宙ドメイン たむらともこ  
航空機・飛昇体事業部 飛昇体技術部 材料技術開発課 田村知子

#### まえがき

一般に3Dプリンタと呼ばれる Additive Manufacturing (以下AMと称す。)は、比較的少量多品種生産である航空宇宙分野において、部品のリードタイム短縮、コスト低減、軽量化等の機能向上の面で非常に有望な技術として注目されている。本稿では、金属材料を対象とした金属AMの航空宇宙分野における適用状況及び実用化拡大に向けた動きについて述べる。

#### ◇ 航空宇宙分野における金属AMの適用状況

航空宇宙分野では、欧米の航空宇宙メーカーを中心に、金属AMの開発が進められている。これまでは試作品としての適用が中心であったが、ここ数年で量産及び実用化拡大に向けた動きが加速している。その一例として、航空機の機体及びエンジン、ロケットに対する適用状況を以下に紹介する。

なお、以下で紹介する金属AMは、全て Powder Bed Fusion と呼ばれる方式である。Powder Bed Fusion方式は、粉末を敷いた領域をレーザまたは電子ビーム熱源によって選択的に熔融結合して3次元形状を造形していくものであり、金属AMの中では最も一般的に用いられている。

#### 1. 航空機

##### (1) 機体—Airbus Groupの例—

Airbus Groupは、Airbus A350XWBブラケットを金属AM用に最適化設計し、強度を維持したまま部品重量を30%以上軽減した<sup>1)</sup>(図1(a)参照)。AM最大の強みは、従来の製造方法では実現出来ないデザインによって部品の機能を向上出来る点であり、今回の例はその好例と言える。

また、金属ではないがAirbus A350XWBには樹

脂AM部品が1,000点以上採用される等、金属に限らずAMの活用が推進されている<sup>2)</sup>。

##### (2) エンジン—GE Aviationの例—

GE Aviationでは、金属AMの研究を長年進めており、2015年からはAirbus A320neo及びBoeing 737MAXに搭載されるLEAPエンジン用の金属AM燃料噴射ノズル(エンジン1機当たり19個のノズルを搭載、図1(b)参照)の量産を開始した。金属AM燃料噴射ノズルは、従来品と比較して25%の軽量化、部品点数の削減及び内部冷却構造の最適化を実現する等、複数の点で機能向上を実現している。なお、GE Aviationでは、2014年に5,000万ドルを投資し、米国アラバマ州AUBURNにノズル量産用のAM工場を建設した。当面は10台の金属AM装置で年間1,000個のノズルを量産し、2020年までには、更なる設備投資によって、ノズルの生産数を年間40,000点まで拡大することを目標としている<sup>3)、4)</sup>。

また、GE傘下のAvio Aeroでは、Boeing 777X等に搭載されるTiAl (Titanium aluminide) 製ブレードの試作を進めている(図1(c)参照)。Avio Aeroは、2013年にイタリアミラノ市郊外のCAMERIにブレード量産用の金属AM工場を建設した。この工場では最大60台の金属AM装置が導入可能であり、量産準備を進めている<sup>5)、6)</sup>。

#### 2. 宇宙

##### (1) ロケット—NASAの例—

NASAでは、ロケットエンジンメーカーであるAerojet Rocketdyneと共に金属AM小型燃料噴射器、燃料ポンプ等を試作し、地上燃焼試験を実施した<sup>7)、8)</sup>(図1(d)参照)。また、NASAは2015年にAerojet RocketdyneとSpace Launch System (SLS) に搭載される大型ロケットエンジンRS-25の生産契約を締結した<sup>9)</sup>。上記地上燃焼試験

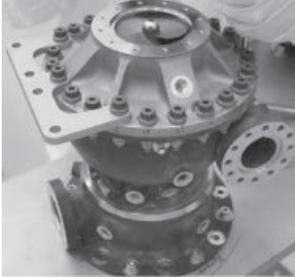
	
<p>(a) Airbus A350XWB 用ブラケット<sup>1)</sup> 【Airbus Group】</p>	<p>(b) LEAP エンジン用燃料噴射ノズル<sup>3)</sup> 【GE Aviation】</p>
	
<p>(c) TiAl (Titanium aluminide) 製ブレード<sup>6)</sup> 【Avio Aero】</p>	<p>(d) ロケットエンジン用燃料ポンプ<sup>8)</sup> 【NASA】</p>

図 1 航空宇宙分野における金属AM適用例

等の実績を生かした金属AMの適用が期待される。

#### (2) ロケット—Space Xの例—

Space Xでは、2014年に金属AMバルブケースを適用したMerlin 1Dエンジンを搭載したFalcon 9ロケットを打ち上げた。従来の鋳造品と比べ、金属AMではリードタイムを約1か月から2日弱まで短縮した<sup>10)</sup>。

#### ◇ 実用化拡大に向けた動き

先述した通り、航空宇宙分野では金属AMの実用化が開始されており、数年内には実用化の拡大が本格化すると考えられる。但し、金属AMの実用化拡大には、航空宇宙分野にとって最も重要な『安定した品質の確保』が大きな壁となっている。鋳造及び鍛造等の従来の製造法では、長年の使用実績から品質の安定化が図られているが、まだ新しい技術である金属AMでは品質のばらつきが懸念され、今後の実用化拡大にブレーキをかける可能性がある。

現在この課題への対策として、航空宇宙用金属

AMの標準化に向けた取り組みが進められている。米国の標準化団体であり航空宇宙用の規格を刊行するSAE Internationalでは、2015年、SAE Additive Manufacturing委員会(AMS-AM)の初会合を開催し、金属AMの粉末、プロセスに関する標準の制定に向けた取組を開始した<sup>11)</sup>。制定が検討されているAMS規格を表1に示す。本標準の具体的な制定時期は未定だが、これによって金属AM部品の品質安定化が図られ、実用化拡大の一助となると考えられる。

#### むすび

数年前のAdditive Manufacturingブーム以来、欧米の航空宇宙メーカを中心に金属AMの開発が加速し、本格的な量産及び実用化拡大まで秒読みという段階になった。今後は、金属AMが鋳造や鍛造等と同様に製造方法の選択肢の1つとして定着することが予想される。

弊社においてもH3ロケット(\*1)に搭載される第1段エンジンLE-9に対し、工程簡素化による

表 1 金属AMに関するAMS規格<sup>12)~15)</sup>

AMS No.	内容	名称
AMS 7000	航空宇宙用AM部品	Additive Manufacture of Aerospace parts from Ni-base Superalloy 625 via the Laser Powder Bed Process
AMS 7001	粉末	Ni Base 625 Super Alloy Powder for use in Laser Powder Bed Add Mfg Machines
AMS 7002	プロセス	Process Requirements for Production of Ni-base 625 for Production of Aerospace parts via Laser Powder Bed Additive Manufacturing
AMS 7003	プロセス	Laser Powder Bed Fusion Process

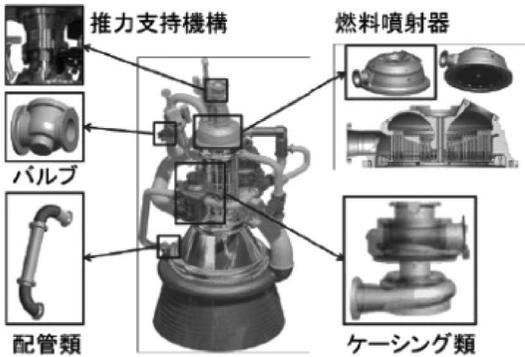


図 2 第1段エンジン (LE-9) に対する金属AMの適用候補例<sup>16)</sup>

低コスト化の一案として金属AM部品の適用を検討している (図2参照)。本プロジェクトの成功を通じて安定した品質を示すことで、国際競争力の向上及びAM技術の国内での定着に貢献出来ればと考えている。

\* 1) 2020年度、試験機1号機の打ち上げを予定

参考文献

1) <http://additivemanufacturing.com/2014/10/30/concept->

laser-gmbh-a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb/  
 2) <http://blog.stratasy.com/2015/05/06/airbus-3d-printing/>  
 3) <http://www.gereports.com/post/91763815095/worlds-first-plant-to-print-jet-engine-nozzles-in/>  
 4) [http://www.geaviation.com/press/other/other\\_20140715.html](http://www.geaviation.com/press/other/other_20140715.html)  
 5) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/MAG/20150219/404885/>  
 6) <http://www.metal-am.com/news/002896.html>  
 7) <http://www.nasa.gov/content/3-d-printed-engine-parts-withstand-hot-fire-tests>  
 8) <http://www.nasa.gov/centers/marshall/news/news/releases/2015/successful-nasa-rocket-fuel-pump-tests-pave-way-for-3-d-printed-demonstrator-engine.html>  
 9) <http://www.nasa.gov/press-release/nasa-awards-contract-to-restart-development-of-engines-to-power-agency-s-journey-to>  
 10) <http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-space-creates-printed-engine-chamber-crewed>  
 11) <http://www.metal-am.com/news/003391.html>  
 12) <http://standards.sae.org/wip/ams7000/>  
 13) <http://standards.sae.org/wip/ams7001/>  
 14) <http://standards.sae.org/wip/ams7002/>  
 15) <http://standards.sae.org/wip/ams7003/>  
 16) 堀秀輔, “JAXAにおける航空宇宙分野への新たな展開”, 日本機学会2015年度年次大会講演論文集, F042008, 2015. 9.13-16, 札幌

## ②金属積層造形技術の最新動向と 金型への適用事例

（株）NTTデータエンジニアリングシステムズ さか い ひと し  
カスタマー＆サービス事業本部 **酒 井 仁 史**

### まえがき

三次元CADデータから直接三次元形状の造形が可能である積層造形技術（Additive Manufacturing、以下AMと略す）は、1987年に実用化されてから四半世紀が経つ。

古くはラピッド・プロトタイピング（RP）と呼ばれ、製品の開発期間短縮および開発コスト低減の有力な手段として自動車、家電、医療等、幅広い業界において広く認知、活用されてきたが、造形技術の発展に伴い試作品だけではなく、実際の製品を直接製造するためのツールとしての利用が急速に拡大してきている。

一般的には7種類あると言われている積層造形技術の中でも、粉末床溶融結合法／パウダーベッドフュージョンタイプと言われる技術は造形物の機械特性、経時的な安定性、生産性の面で製品製造の手段として適しており、最終製品への応用が最も進んでいるAM技術の一つである。

本稿では、粉末レーザー溶融型金属積層造形機で世界No. 1のシェアを有する独EOS社のAMシステム、「EOS Mシリーズ」を例にレーザー溶融によるAMシステムの特徴と金型への応用事例を紹介する。

### ◇ レーザ溶融型AMシステムの概要と開発トレンド

#### 1. レーザ溶融型AMシステムの仕組み

レーザー溶融型AMシステムでは、三次元形状を多数の積層面にスライスし、一層毎に粉末材料を撒き、形状断面部にレーザービームを照射しその熱でレーザー照射された部分を溶融・凝固させる。これを繰り返すことにより三次元形状を積層的に造形するものである（図1）。

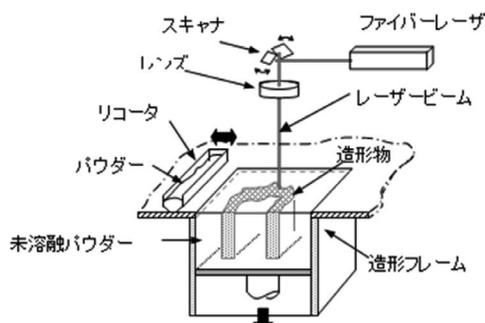


図 1 レーザ溶融型AMシステム

#### 2. レーザ焼結型AMシステムの機器構成

EOS社のレーザー溶融型金属AMシステム（EOS Mシリーズ）の概要を図2に示す。

EOS Mシリーズは金属材料専用のシステムで高出力のイットリビウム・ファイバレーザを搭載する。アルミニウム、チタン等の活性金属を造形する場合はアルゴンガスの供給装置が必要となる。AMの活用は、金属材料を用いるアプリケーションでの実績が際立っており、本稿でも後段においてその活用事例の一部を紹介する。

#### 3. 金属積層造形機の開発トレンド

近年技術開発のトレンドとなっているのが、装置の大型化、生産性の向上、品質管理の3点である。

装置の大型化は既にほとんどの欧米メーカーは大型機（250mm角以上の造形範囲を有する装置）を上市しており、各社出揃った感がある。EOS社もM400という大型機をリリースしており、その販売実績も堅調である。

生産性の向上は、部品単価への寄与度が高く、最終製品の生産設備としての普及を進めるためには、その対応が急務となっている。EOS社は昨年のFORMNEXT（欧州最大のAM展示会）にて、

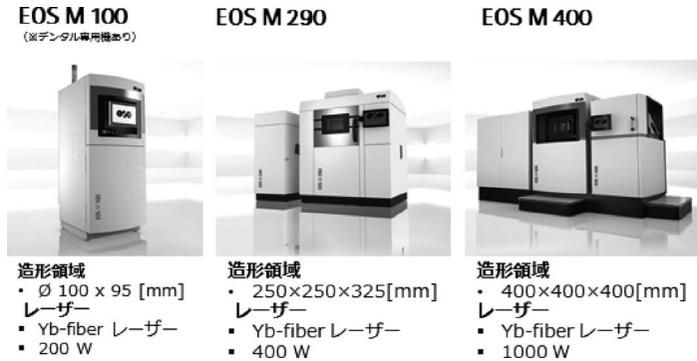


図 2 EOS Mシリーズ概要

表 1 モニタリング項目

モニタリング項目	主な計測項目
Machine condition	レーザ、スキャナ、冷却水、駆動系、フィルター類の状態など
Process condition	レーザ出力、造形チャンバー内温度、湿度、プラットフォーム温度など
Powder bed	材料粉末の供給状態
Melt pool	材料の熔融状態

M400に400Wレーザを4本搭載した最新モデルM400-4を発表している。M400-4では従来機と比較し最大で約4倍の生産性向上を達成している。

3点目の品質管理について、EOS社の取り組みをご紹介します。品質管理は、最終製品への適用が進む中でその重要性が増しており、EOS社では品質に影響を与える因子をモニタリングする機能の開発に注力している。表1に代表的なモニタリング項目を示す。

特に、リアルタイムで熔融状態を監視し、製品の可否をその場で判断できるMelt pool Monitoringは非常に注目されている技術である。図3は意図的に欠陥が発生する照射パラメータを画像中心部の周囲と色が異なる箇所（黄色箇所）に割り当てMelt Pool Monitoringを用いて信号を取得した結果である。

正常部と異常部に明確な差が表れていることが確認できる。

最終製品の量産となると、常に同じものが同じ品質（寸法精度、機械強度、金属組織、微細欠陥の有無等）で製造できること（再現性）が強く求められる。また破壊検査なしでの造型密度（内部

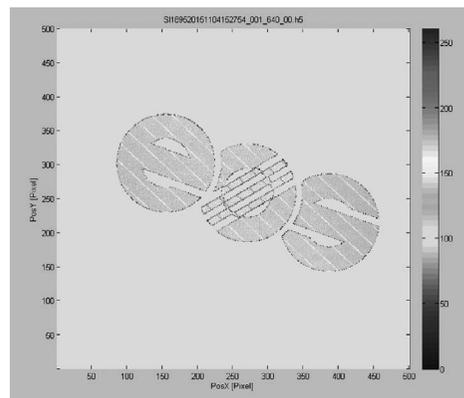


図 3 Melt Pool Monitoring

気孔）や微小欠陥の確認もニーズが高い要求事項である。Melt Pool Monitoringはこういった要求に応えられる可能性を持つ技術であり、EOS社はその開発を急いでいる。

量産設備として造形機を考えた場合に、モニタリングしたデータを品質管理とは違う視点で有効利用できる可能性もある。

当社では、設備のダウンタイムを最小化し、保守費用を低減する事を目的にIoTを使ったシステムの開発を進めている。最終製品の生産設備としての第一歩がモニタリングデータの品質管理への利用とすれば、2歩目は生産設備としての稼働率向上、ダウンタイムの最小化が求められると考えている。設備が異常を示してから対応するのではなく、モニタリングしている豊富なセンサー情報から故障を予測し、設備をダウンさせない為の積極的予防保守の実現を目指している。2014年度から取り組みを始め社内設備を用いた実証実験を経

て、現在はパイロットユーザーに協力いただきながらフィールド試験を実施中である。

### ◇ 材 料

マルエージング鋼、ステンレス、アルミニウム、チタニウム合金、ニッケル基合金、コバルトクロム、これらEOS社が提供する金属材料以外にも、要望に応じ純正材料以外の材料を使用することも可能である。但し、新規材料開発には、材料特性に合わせたレーザー照射パラメータの開発が必要となり、金属材料、金属積層造形プロセスに関する深い知見、専門知識が必要となるうえ、開発には時間、コストがかかる。最終製品を作るAMでは、多様な材料の選択肢は非常に重要なファクターとなってきており、弊社では、そういった要求に応える為にAM研究所という開発拠点を大阪に設け、新規金属材料開発も積極的に推進し、成果を上げている。新規材料開発に興味をお持ちの企業様があれば、共同研究、受託開発を問わずサポートさせて頂きたいと考えており、是非一度弊社へお問い合わせ頂きたい。

### ◇ AMのアドバンテージと適用事例

昨今、製造業にとって、生産活動で発生するCO2排出量の削減はひとつの大きなテーマとなっているが、環境負荷低減の観点からも、AM技術は大きなアドバンテージを持つ。

AMを製造に活用することで、過剰な在庫を持たないオンデマンド製造の実現や、ある国で生産した製品を世界中に出荷する代わりに、各国に置かれた造形機に3次元データを送り地産地消型製

造を行うといったことも可能となる。また、除去加工と違い、AM技術は必要な部分だけを成形する工法である為、材料使用量の削減も期待できる。これらはAMの持つアドバンテージのほんの一例であり、AMには環境的視点だけでなく、ものづくりのプロセス全体で、既存工法には無い様々なアドバンテージがある。

図4にその代表的なものをまとめる。

現在AMという視点で見ると、最も活用されている積層造形技術は金属造形技術であり、その取り組みが活発な代表的分野は、航空宇宙、医療、金型である。

航空宇宙ではGE社のLEAPエンジン用フェューエルノズルの事例(図5)が非常に有名であり、読者の中にもどこかで目にされた方がおられると推察する。この事例は、3次元チャンネルによるフローの最適化や、それに伴う軽量化、部品点数削減によるロウ付け箇所低減による堅牢化などAMのアドバンテージを多数織り込んだAM部品のお手本とも言える事例である。



図 5 GE Aviation社 “フェューエルノズル”



図 4 AMの代表的なアドバンテージ

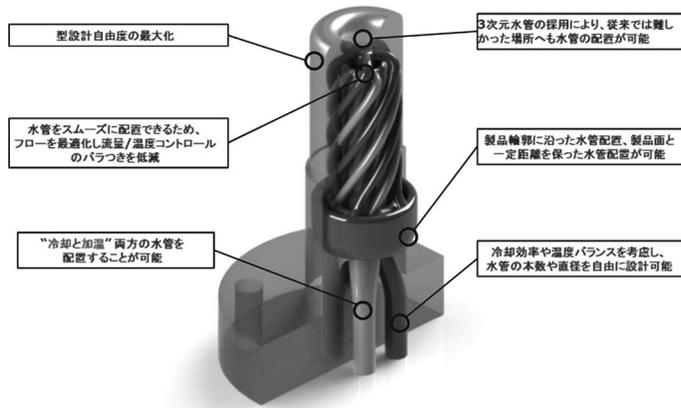


図 6 金属造型が金型へもたらすアドバンテージ

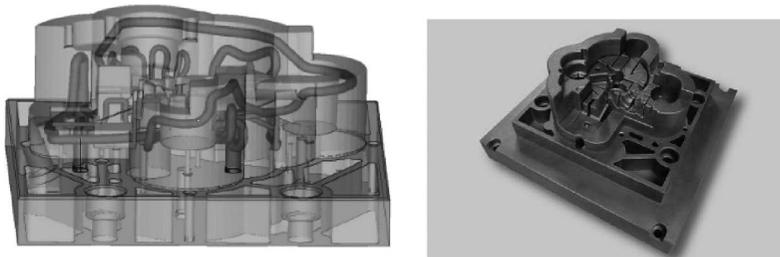


図 7、8 CCCイメージ (左図) 金属造型インサート (右図)

航空宇宙、医療分野の事例は、メーカーのプレゼンやホームページなどでも目にする事が多く、花形な扱いの事例であるが、実は金型こそが、金属造型技術が実用化されて以来最も長く取り組まれてきた用途であり、技術的に確立された分野であると言える。図6に金属造型を金型に適用した場合のアドバンテージを示す。

金型への適用で一般的な事例は、コンフォーマルケーリングチャンネル（CCC、3次元水管）を型内部に配し、サイクルタイムの低減や反り、ヒケの低減といった品質改善、歩留まりの向上等が挙げられる。

図7、8に示す事例のインサートは既に100万ショット以上使用されており、耐久性は従来工法で作られたインサートと比較しても全く遜色がない。シミュレーションを用いて導き出した最適な冷却水管を配置し、サイクルタイムは66秒から44秒と36%の短縮を達成している。

CCCの効果はサイクルタイムの削減だけに留ま

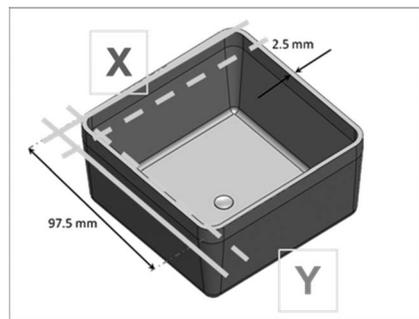


図 9 成型品の計測

らない。図9、10、11に示す事例は製品の反り低減に重点を置いた事例である。製品のサイズは97.5mm×50mm×2.5mmであり、成型樹脂はPA66を使用している。薄肉の箱型である為製品の反り、変形が問題となりやすい形状である。CCC無しのインサートではX:Y方向の寸法バラつきが15-52%であったものに対して、金属積層造形で作成したインサートでは15-19%まで低減させるこ

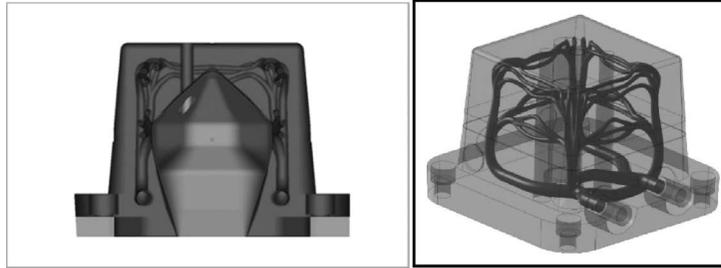


図 10、11 中空構造（左図）CCCイメージ（右図）

とに成功している。

また、本事例では金型の構造を中空構造とすることで、18%の造形時間短縮を達成しながら、金型としての耐久性確保、付加価値としての冷却性能向上（サイクルタイムを33%短縮）、均一な冷却による反りの低減を実現させている。

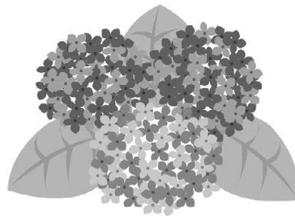
### むすび

本稿で示した活用事例以外にも、ラティス構造を用いて大幅な軽量化を実現しながら従来品と同等以上の強度を確保した金型や、メッシュ構造のCCCを有するインサートなど、今までにない新たな

な付加価値を備えた金型が造形技術によって実現されている。金型への適用に限らずAMは欧米を中心に着実に“ものづくり”に欠かせないツールとして利用され始めており、新たな高機能部品の製造方法として、普及・発展していくものであると考えている。

### 参考文献

- 1) 酒井仁史：「金属積層造形装置の現状と応用の可能性」（型技術 2009）
- 2) 酒井仁史：「新たな製造法 “アディティブマニュファクチャリング（AM）” その使い所と勘所」（素形材 Vol. 54 No. 2 2013）



## 2. HIPの最新動向

金属技研(株) 小川豊人  
姫路工場技術課技術係

### まえがき

HIP (Hot Isostatic Pressing : 熱間等方圧加圧法) とは、材料を高温に加熱しながら、全方位よりガスで均等に加圧する方法であり、1955年ごろに米国のバテル記念研究所で核燃料要素集合体の拡散接合用に開発されたものと言われている。1960年代末に超鋼合金、粉末ハイスで工業化が進み、さらに鑄造製品であるジェットエンジンのブレードへの適用などに実用化が広がった。

現在、HIP処理の利用技術としては、(1) 粉末材料の加圧焼結、(2) 焼結品の残留欠陥の除去、(3) 鑄造品の内部欠陥除去、(4) 拡散接合、(5) クリープ部品の再生などが挙げられる。ここでは、粉末材料の加圧焼結および焼結品の残留欠陥の除去について、ニアネットシェイプ (NNS) や3Dプリンタ製品とのかかわりを含め説明する。

### ◇ HIPによる粉末焼結について

HIPではガス媒体による加圧のため、除去できる欠陥(空間・空孔)は、**図1**に示すように、材料の内部欠陥などの閉鎖系の空間のみである。材料の表面欠陥などの外部と導通している空間は加圧ガスとの圧力差が生じないため、そのままでは除去できない。そのため、拡散接合や粉末焼結は、

カプセルなどで接合部である空間を覆う必要がある。こうすることで、材料同士の空間を内部欠陥と同等の状態にし、空間を除去する。空間が少なければ、HIP後の形状はほとんど変化しないが、粉末焼結のように空間が多いと形状も大きく変化する。

HIPによる粉末焼結は、大きく分けて①カプセル設計、②カプセルリング、③真空封止、④HIP処理、⑤カプセル除去(機械加工)の5つの工程である。

### ①カプセル設計

カプセルの設計方法は色々あるが、大きく分けると2種類ある。1つ目は、既製品の素材(市場での流通が多い金属管など)をもとに設計する方法で、シリンダのような単純形状のカプセルを設計するときによく用いられる。既製品の素材を使用することで、カプセルの材料費と加工費を抑えることができ、リードタイムも短縮することができるが、使用粉末量の増加や仕上げ加工量が多くなる傾向がある。2つ目は仕上げ形状から算出する方法で、インペラやバルブボディのような複雑な形状または、大型の単純形状のカプセルを設計ときに用いられる。この方法の場合、カプセルの材料費と加工費は上がるが、粉末費とHIP後の機械加工費を抑えることができる。以上より、カプセル設計では単純なカプセル費用だけでなく、カ

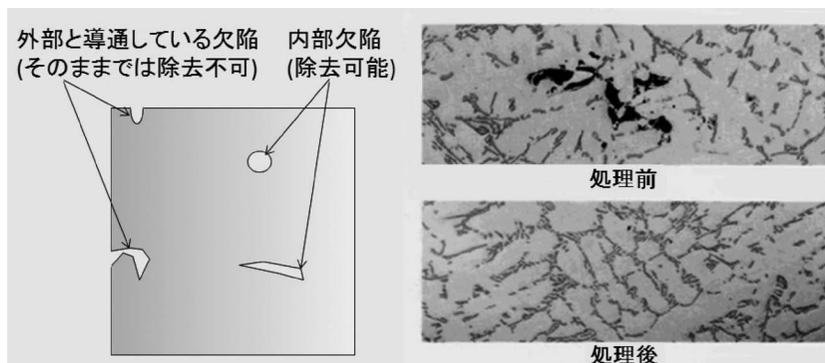


図 1 欠陥除去模式図及び鑄造品の内部欠陥除去例

プセル、粉末、機械加工のトータル費用の概算を算出し、カプセル製作方法を決定する必要がある。

HIP後の形状については、HIP前にカプセル内に充填した粉末の充填率だけでなく、カプセルの強度や処理条件にも依存する。図2は円柱形状のカプセルをHIP処理したもので、左側のカプセルは上下のフタを厚くし板厚を不均一にし、右側のカプセルは板厚を同一にしたものである。両者とも粉末と充填率は同じであるが、板厚が不均一なものは、中央が大きく変形し、鼓形になっているのに対し、板厚が同一なものは、均等に変形しており、円柱形状が維持されている。このようにカプセルの板厚によってHIP後の形状を変えることができる。この現象をうまく利用することで、HIP後の形状を仕上げ形状に近づけるニアネットシェイプ成形が可能となる。製品を大型化するにあたり使用粉末量やHIP後の機械加工費を削減するため、このニアネットシェイプ技術の精度を高める必要性が増している。現在では、3D CADや、有限要素解析などを使用し、ニアネットシェイプのカプセルを設計することが多くなってきている。

## ②カプセルリング

カプセルを組立て、TIG溶接などで継目を溶接し、その中に粉末を充填する。このとき、粉末の充填率があらかじめ算出した設計値より低いと変形が大きくなるため、目的の形状が採取できなくなる。粉末充填においては、粉末を設計値以上に充填することが重要になる。粉末の充填率を高める手段として、ハンマや振動機で振動を与える方法や、プレス装置で押し固める方法などがある。

カプセルリングの注意事項としては、充填ムラがある。一つのカプセルの中で充填率が低い箇所が

存在すると、その部分が局部的に変形し、目的の形状を得られない。HIP後の形状をニアネットシェイプで製作する場合は、カプセルの製作精度と粉末充填率を設計値に近づける必要がある。

カプセルをTIG溶接により製作するときの精度については、定盤や固定治具などを使用することなどで、向上させることができる。充填率については、円柱などの単純形状の場合、上蓋を開けた状態で粉末を充填し充填質量と高さで管理すると制御し易くなる。複雑形状の場合、粉末充填用のパイプをカプセルに数箇所溶接し、充填用パイプから粉末を充填し、粉末質量とカプセル内部の体積で計算する。海外では、複雑なカプセルのみならず、単純形状であっても異物混入防止、粉末の酸化（大気との接触）防止の点より、充填用パイプからの粉末充填が多く適用されている。

また、カプセルには、粉末充填用とは別に次工程で使用する真空封止用パイプを取付けておく必要がある。

## ③真空封止

真空封止用パイプからカプセル内部を真空にし、カプセルの気密性をヘリウムリークディテクタなどで確認する。カプセル内部を真空にすることで、HIP中にカプセル内の大気により粉末表面が汚染されることを防ぐことができる。一般的にはカプセル全体を加熱しながら排気し、粉末に吸着している水分、ガス、および油分などを排出する。最近では、粉末を空気と触れないように製作～保管することができ、加熱時に粉末から発生するガスを抑えられるようになっている。このように管理された粉末では加熱せずに真空封止を行うこともある。封止作業は、真空封止用パイプをプレスで

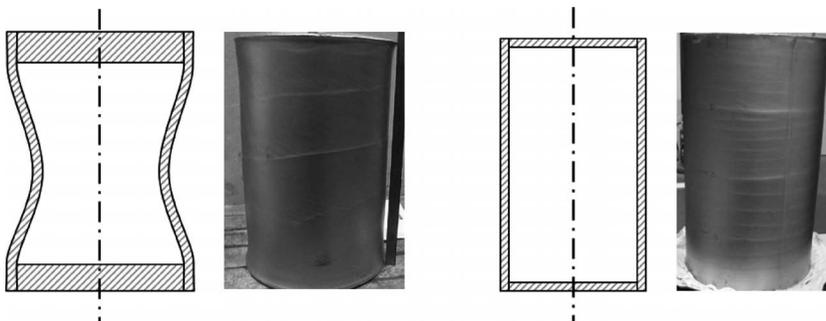


図 2 カプセルの板厚による変形への影響（左：板厚不均一、右：板厚同一）

圧接する方法や、バーナで加熱後に鍛接する方法がある。その後、パイプを切断し、切断箇所をTIG溶接等により完全に封止する。

#### ④HIP処理

一般的なHIP装置の構造を図3に示す。外側には高圧に耐えるための圧力容器とその蓋をサポートするプレスフレームがあり、圧力容器内部には高温に耐えるための断熱層と加熱装置がある。HIP処理の汎用的な使用温度は300~2000℃、圧力は10~196MPa、加圧媒体として主にアルゴンガスを使用する。処理条件は昇温と加圧のタイミングにより、同時昇温昇圧型、昇温先行型、昇圧先行型の3タイプに分けることができ、粉末焼結においては、カプセルを加熱し軟化させてから加圧する昇温先行型が多く採用されている。

これにより、変形によるカプセルへの負荷を低減し、カプセルが破壊されるのを防止し、気密性を維持できる。HIP処理における冷却は、圧力媒体ガスの放出及び炉体の冷却水との熱交換であるため時間がかかる。そのため、HIP処理と焼入れなどの熱処理を同時に行うことは困難であったが、最近ではHIP装置の開発も進みURQ (Uniform Rapid Quench) 炉などの冷却機構を搭載した急冷可能な装置も開発されている。

また、HIP処理品の大型化が進み、それに併せ装置も大型化し、現在では、世界最大のHIP装置

としてワークサイズがφ2,050mm×H4,200mm、積載可能質量が25,000kgのGiga-HIP<sup>®</sup>がある。

#### ⑤カプセル除去 (機械加工)

HIP後の焼結体のカプセルを機械加工などで除去し、最終形状へ仕上げる。製品によっては、嵌めあい部などの機能上必要な箇所のみ加工し、必要部以外を加工せずに使用する場合や粉末と同種のカプセルを使用することでカプセルを残したままにする場合もある。

カプセル除去では、カプセル材と焼結体の線膨張係数差に注意する必要がある。カプセル材の線膨張係数が焼結体よりも大きい場合は、HIP後、焼結体がカプセルに締め付けられ圧縮応力が発生し、逆にカプセル材の線膨張係数が焼結体よりも小さい場合は引張応力が発生する。これらの状態で加工すると応力が開放され、焼結体が割れることがある。そのためカプセル除去の際は、加工順序に注意する必要がある。

#### ◇ 3Dプリンタとのかかわり

現状では3Dプリンタで製作した焼結体は、内部に微細な空孔ができ、クリープ強度が低下することがある。そこで、HIP処理を施すことにより空孔を除去し、クリープ強度を改善させることができる。その他の問題として、現状の3Dプリンタは材質に制限がある。ただし、粉末開発が進むことで

微細な空孔や、材質の制限等の問題は解消されていくと予想される。3Dプリンタによる粉末焼結とHIPによる粉末焼結を比較すると、小型ネットシェイプ品に関しては、3Dプリンタが適していると考えられる。大型製品については、3Dプリンタでは装置の制約が大きく、対応した場合でも製作時間、サポートに使う粉末量、サポートの除去費などが考えられるためニアネットシェイプによる、HIP処理が有効と考えられる。

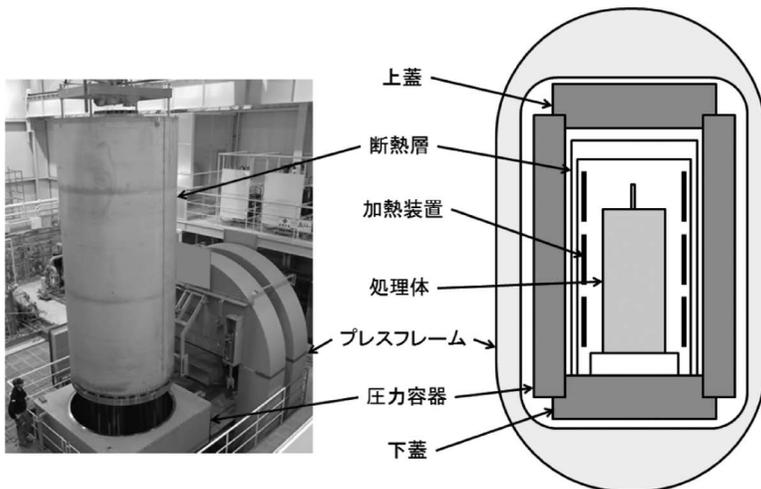


図 3 一般的なHIP装置の構造

### 3. 焼 結

(株)ファインシンター うえ だ よし ひさ  
開発生技部 開発室 植 田 義 久

#### ま え が き

一般的に焼結とは、金属の粉末を金型に入れて加圧成形した後、融点以下の高温で加熱して製品を作る工法である。特徴として①複雑な形が出来る②高精度部品が大量生産できる③複合材料が作れる④多孔質材料が作れる⑤高い経済性と優れた環境性をもつ、といった利点がある。

焼結の起源は紀元前3000年ごろ、エジプトで鉄粉を用いて鉄器を作ったのが始まりと言われている。この時代、人類はまだ金属を溶かすほどの高温を生み出す技術が無かったため、鉄粉を融点以下の温度で焼結し、熱間で鍛造して作っていたものと考えられている。

焼結の工業化が始まったのは20世紀になってからである。1879年、トーマス・エジソンが発明した白熱電球のフィラメントは京都の竹の炭素繊維を使ったことが知られているが、大量生産をするために竹に代わる材料が必要となり、1910年、米国GE（ゼネラルエレクトリック）社のW. D. クーリッジがタングステンの微粉を加圧成形し保護雰囲気中で焼結したタングステンフィラメントが最初と言われている。

それから「マイカー元年」と呼ばれた1966年自動車生産量の増加に伴って焼結機械部品の生産量が急増し、現在においては焼結製品の多くは輸送機関連部品となっている。

今回、自動車部品を中心にその製法と製品の紹介をする。

#### ◇ 2層成形法によるバルブシート (必要な材料を必要な部分に)

バルブシートとは、エンジンの吸排気バルブが閉じたときにバルブと密着するポート円周部品で、燃焼室の気密を保つための重要な部品である。バルブ開閉の摩擦に強い材質のものがシリンダーヘッドに組み込まれている。

バルブの当たるシート面には耐摩耗性の高い高価な材料（シート材）を使用している（図1斜線部）。しかし、必要なのはバルブ着座側のみであるため、反対の圧入側には安価な材料（図1白部）を使用して2層とし、製品としてのコストパフォーマンスを向上している。

この2層境界角度を立てる事で、更にシート材の量を必要最低限に減らす技術を開発したことにより、更なるコストパフォーマンスの向上した例を紹介する。

まず2層成形するには第一原料粉末（基材：図2白部）を充填した後、仮押しで境界面を成形し、その後第二原料粉末（シート材：図2斜線部）を充填し本加圧する。

通常の成形プレスでは、仮押し圧力は本加圧する軸とは別にエア圧などから得るが、その方法だと得られる加圧力が比較的小さなものになる。

成形後45°境界面を成立させるためには、基材の粉充てん仮押し状態の角度は60°程度で形状保持す

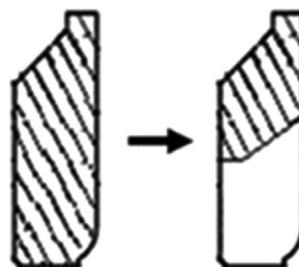


図 1 バルブシート製品写真と2層境界位置（断面）

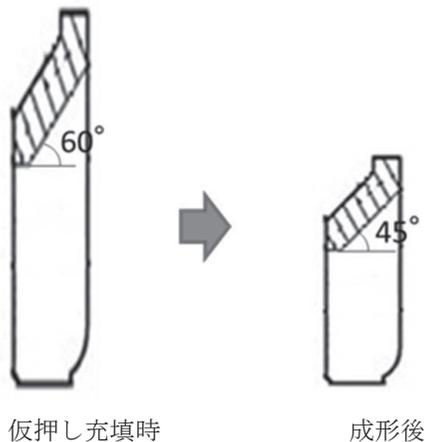


図 2 成形金型充填時断面図

る必要があるが（図2）、従来の仮押し圧力ではその斜面が保持できず、基材の60°斜面が崩れて2層の境界面が乱れ、シート材側に基材が入交り、品質の確保が困難であった。従って境界面60°斜面を得ようとする、仮押し圧力は比較的大きな圧力が必要になる。しかし、成形プレスの上ラム稼動スペースに上パンチ、粉箱、仮押しパンチ、などが収まる空間を確保しなければならないが、現状の成形プレスではその空間を確保することが難しい。

そこで、成形プレスの上ラムに仮押し機能を持たせる特殊構造を検討し、スペースの問題と加圧力の問題を解決した。

また反面、60°仮押し斜面を保持させるために、仮押し圧力を上げすぎると、境界面の乱れは無くなるが、2層境界部の粉同士の絡みが悪くなるため、2層境界部のシート材と基材の密着性が下がり、成形後、もしくは焼結後に2層が剥離してしまうため、仮押し圧力の適性を行い、これまで問題であった境界位置の層乱れを発生させず、2層境界部の粉同士の密着性も確保できる境界角度アップ成形技術の開発、実用化した。

#### ◇ 横2層シンクロナイザーリング （異なる特性を併せ持つ）

シンクロナイザーリングはマニュアルトランスミッション構成部品で、減速比切り替え（シフトチェンジ）を円滑に行い、運転操作を容易にする

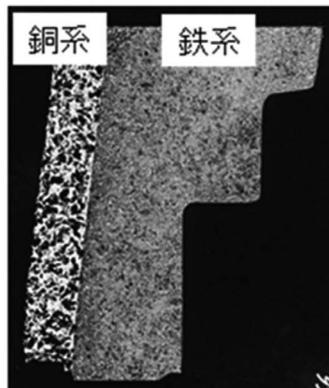


写真1 シンクロナイザーリングとその断面写真

ための部品である（写真1）。

一般仕様のシンクロナイザーリングは強度重視の高力黄銅品を、高負荷仕様は摩擦特性重視でMo溶射品を使用するが、これら2つの要求を満たせる高性能・低コストの製品が求められ、それを実現したのが本2層シンクロナイザーリングである。

先述バルブシートは縦2層であるが、ここで紹介するシンクロナイザーリングは横方向の2層構造を持つ（写真1）。

強度が必要なスプライン外周部は焼結冷却過程で焼き入れ効果を得る鉄系のシンターハードニング材を用いて強度特性を確保し、摩擦特性が必要な内径側には銅を主原料とする焼結摩擦材を用いることにより成立させた。

2層方法は、先に鉄系外周スプライン部を成形・焼結させてから、それを再度金型に挿入し、その内径側に摩擦材を充填し成形する。つまりスプライン部そのものを金型の外型として配置させ、その内径に摩擦材料をインサート成形し、摩擦材の焼結と同時にスプライン部と摩擦材を焼結接合させる。

更に焼結時、外側スプラインの鉄系部は寸法が内径方向へ収縮、逆に内径摩擦材部は外径方向へ膨張となるよう材料設計しており接合強度を増す設計であることも特徴である。

近年、日米を始めオートマチック車が主流となってきているものの、欧州を中心にマニュアル車の人気は根強い。

#### ◇ 温間金型潤滑成形によるエンジンスプロケット（高密度化の方法）

温間成形とは金型と粉末を百数十度に加熱して、粉末の変形抵抗を低減した状態でプレスする成形方法である。この方法により、圧粉体の密度を上げることができるため、高強度を求められる部品に使用される方法で、従来工法の2回成形・2回焼結の代替えとして発展してきた。

一方金型潤滑成形は、通常原料粉末内部に添加している潤滑剤を、金型内壁に付着させて成形する方法である。通常の原料粉に添加する潤滑剤は、成形時の粉と粉の摩擦力の発生を抑え、成形エネルギーを無駄なく利用できる反面、製品の構成成分ではないため、焼結時に脱ワックスされて消失するため部品密度を下げてしまうのであるが、この金型潤滑はそのデメリットを解消する方法である。

この二つの方法を合わせた温間金型潤滑成形を用いてエンジン用スプロケットの生産を行っている（写真2）。

本製品には、高疲労強度が要求されたため、製品密度を $7.3\text{g}/\text{cm}^3$ 以上にする必要があった。そこで、Fe-Mo-Mn系低合金鋼粉を採用し、均一な

潤滑剤の金型への塗布を得るため、間欠塗布が可能な2流体スプレーノズルを用いて、塗布圧、塗布量、塗布時間などの各種条件を制御できる塗布装置の開発を行い、内部潤滑剤を低減することにより、従来以上の高密度化を達成した。この結果、従来の焼結スプロケットと同コストで疲労強さ40%向上を果たし、薄肉化によってエンジンのコンパクト化にも貢献した製品である。

#### ◇ 粉末冶金法を活かしたABS用モーターコア（粉末の特性を活かす）

一般のモーターは、電磁鋼板をプレスで打ち抜いて積層したコアを使用していることから、コアの端面に凹凸形状を設けることができず、コアの周りに関連部品が配置されているので、モーターの小型化には制限があった。

本コアは粉末成形の特性を活かした三次元形状であり、コア端面の凹形上部に関連部品を内蔵し、モーターの小型化を実現した（写真3）。

従来使用していた粉末冶金の材料では、電磁鋼板製コアと同等の磁気特性を得ることは難しいので、原料メーカーが新規に開発した絶縁被覆鉄粉を採用して磁気特性を確保した。

三次元形状のため成形では、金型構成を上パンチ3段、下パンチ3段構成とし、各パンチの作動をコンピューター数値制御するCNCプレスを使用した。開発当初は両端面にある12本の細長い脚部を加圧する上下パンチが数個の成形で変形してしまったが、金型の応力解析をもとに製品形状、金型形状の検討を行って解決した。



写真2 スプロケット



写真3 モーターコア

原料の絶縁被覆鉄粉は、鉄粉の周りを絶縁被覆膜（リン酸亜鉛皮膜）とバインダー（樹脂）でコーティングすることで、渦電流を低減し、交流磁気特性を確保できる粉末冶金ならではの原料である（図3）。

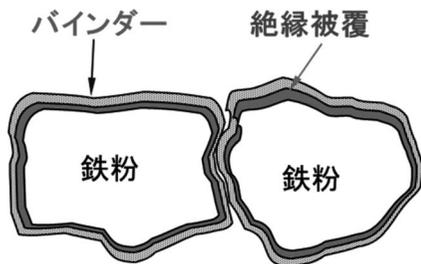


図 3 絶縁被覆鉄粉

## むすび

はじめに説明したように、焼結工法では金属を溶かして固めるのではないので、原料粉末の特性を活かした付加価値のある製品が製造できる。

今回、製法を中心に4点ほど製品の紹介をしたが、耐摩耗性や摩擦特性、磁気特性といった材料特性を活かせる工法でもあるので、興味があれば関連資料に目を向けてもらえると幸いである。

## 参考文献

「粉末粉末冶金協会二十年史」 社団法人日本粉末粉末冶金協会  
「粉末冶金その歴史と発展」 木村 尚 著  
「粉末冶金五十年」 日本粉末冶金工業会



# 4. レーザークラッディング

大阪富士工業㈱ 技術センター たつ み よし ひろ  
 レーザープラズマ接合研究所 **辰 巳 佳 宏**

## まえがき

レーザー光を熱源とした溶接の中に、表面改質を目的としたレーザークラッディングがある。

本施工法は低入熱、低希釈を特長とし、基材表面を僅かに溶かし込むことにより、表面処理層は溶融結合し、基材への熱影響も僅かとなる。また、今まで溶接熱影響の問題で困難であった薄物、小物、熱影響部高感受性材料（鋳鉄、工具鋼、2相ステンレス鋼、Ni高合金等）への肉盛溶接による表面改質が可能となる。

本報告では、レーザークラッディングとアーク溶接、溶射との特性比較及び熱影響部高感受性母材への溶接性や溶接材料と適用部品について述べる。

## ◇ 施工法による特性比較

レーザークラッディングは、レーザー光を基材に照射し、溶接材料として粉末を送給し、表面処理層を形成する。本施工法は熱量のコントロールができることから、表面処理の目的により基材への溶込み制御が可能となる。

表1に粉末を用いて表面処理を行うプラズマ溶射、粉体プラズマアーク溶接との特性比較を示す様に、プラズマ溶射法は、非移行型アークを発生させ、その中に溶射材料（粉末）を送給することにより、溶融またはそれに近い状態で基材に吹き付け表面処理層を形成する。トーチ（溶射装置）と母材は通電しないことから、表面処理層と基材

表 1 施工法による特性比較

施工法	プラズマ溶射	レーザークラッディング	粉体プラズマ溶接
原理図	<p>非移行型アーク中の温度が1万度近くあり。母材温度200℃</p>	<p>レーザー光線に熱量はなく、母材に当たる事で熱を発生</p>	<p>移行型アーク中の温度が1万℃近くある</p>
肉盛厚(mm)	0.05~0.5	0.5~3	2~3
肉盛量(kg/hr)	<2	<5	<5
熱負荷	極低い	低い	高い
溶け込み(%)	0	1~10	10~30
密着力(Mpa)	80	800	800
ポロシティ(%)	20	0	0

は溶融接合でなく、機械的に接合（アンカー効果）している。このことから、基材への熱影響はなく、金属、セラミック、プラスチック等広範囲の基材に表面処理は可能であるが、表面処理材の密着力は弱く、ポロシティが存在する問題がある。

粉体プラズマアーク溶接法（PTA: Plasma Transferred Arc）は、トーチ（PTA装置）と基材との間に移行型プラズマアークを発生させ、その熱（約1万℃）により、溶接材料（粉末）とともに基材を溶融し表面処理層を形成する。そのため、表面処理層と基材は溶融結合し高い密着力を示し、ポロシティの発生もない。しかし、基材への熱負荷が大きく、初層の表面処理層は基材を20%程度含んだ組成となる。

対して、レーザークラディングは、熱源であるレーザー光に熱量はなく基材に当たることで熱を発生させて、表面処理（肉盛溶接）を行うことから、下記に示す特長が得られる。

- ・材料特性や目的性能に合わせて熱量のコントロールができる。
- ・低熱負荷・高密度入熱で高精度に施工を行うことから、従来困難であった部材（薄物、小物等）への表面処理が可能となる。
- ・低熱負荷で施工できることから、アーク溶接に比べ、熱影響による母材脆化を抑制できる。
- ・低溶込み溶接が可能のため、薄膜の高品質な皮膜を形成できる。
- ・基材表面を僅かに溶かし込むことにより、表面処理層は従来のアーク溶接法と同様に溶接結合し、溶射法のような剥離の問題はない。

図1に表面処理層と基材境界部断面のEDXライ

ン分析結果を示すように、粉体プラズマアーク溶接法では表面処理層中に、基材のFeが希釈（20%程度）した成分になるのに対して、レーザークラディングにおいては、表面処理層にほとんどFeが希釈（5%以下）せず、溶接材料成分そのままの肉盛溶接が可能となり、高品質・性能、低コスト化につながる。

## ◇ 特殊鋼への肉盛溶接

レーザークラディングは、高密度・低熱負荷の加熱特性により、基材の熱影響を低く抑えられることから、従来のアーク溶接法では割れの問題（熱影響部の硬化に伴う割れ）で困難とされてきた鋳鉄、高合金鋼の肉盛溶接の割れリスクが低減できる。さらに、溶接熱影響により組織変態を引き起こしやすい二相ステンレス鋼や熱影響部に高温割れが生じやすい高合金オーステナイトステンレス鋼、高合金Ni材のように、今まで肉盛溶接が困難であった基材への適用が可能となる。

### 1. 鋳鉄への肉盛溶接

図2に示す様に、従来のアーク溶接では、基材（球状黒鉛鋳鉄）の融点（1140℃）が溶接材料（ステライト合金）の融点（1350℃）より高い場合、基材への熱影響は大きく、鋳鉄基材中の黒鉛は溶融し、ピッカース硬度Hv580程度の硬質焼入れ層を形成し、溶接割れリスクが大きくなる。しかし、レーザークラディングでは、表面処理層と基材境界部で僅かに組織変化（境界においても球状黒鉛が原型をとどめて存在している）が認められるが、その範囲は100μm程度で、従来のアーク溶接法の1mmに比べ、1/10となり、高品質の肉盛が可

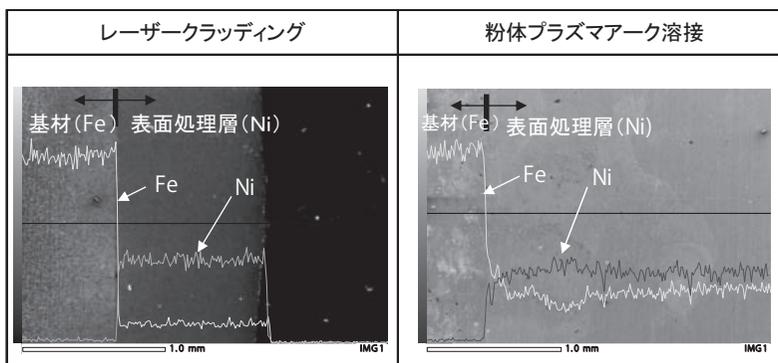


図 1 EDXによる断面ライン分析結果

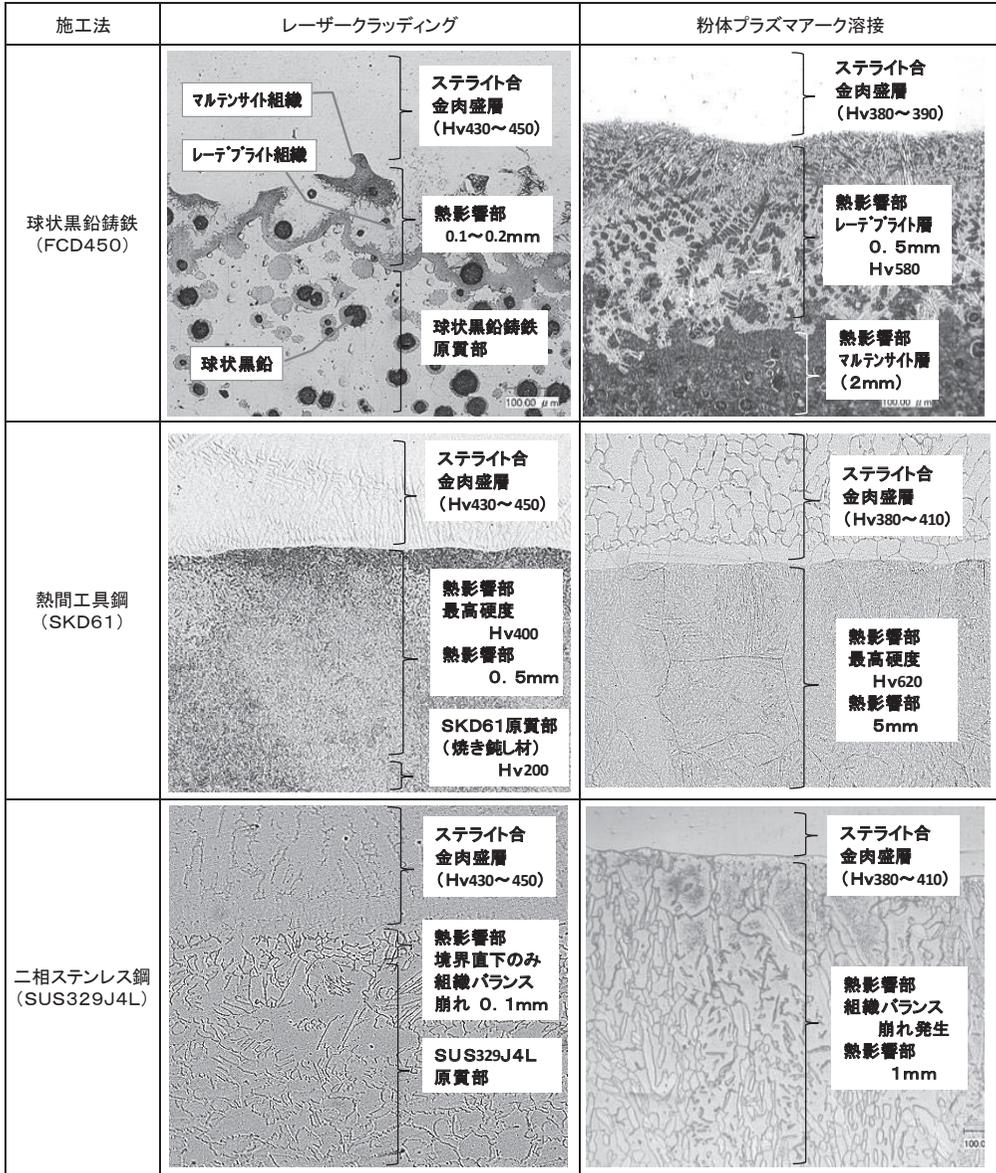


図 2 特殊鋼への肉盛断面マイクロ組織 (×100)

能となる。

## 2. 熱間工具鋼への肉盛溶接

熱間工具鋼SKD61は、焼入れ硬化性が高く、従来のアーク溶接法では、最高硬さHv630程度まで上昇し、熱影響範囲は5mm程度(600℃以上に加熱された領域)となる。レーザークラッディングでは、熱影響範囲は0.5mm程度で、最高硬さもHv370程度に抑えることができ、割れリスクを低減できる。

## 3. 二相ステンレス鋼への溶接

海水や塩化物環境で使用される2相ステンレス鋼(SCUS329J4L)は、耐食性の観点からフェライト相とオーステナイト相の比率が1:1となる様に設計されている。しかし、従来のアーク溶接法では、熱影響部の組織変化(二相のバランスが崩れ)により、耐食性とじん性が劣化する。そのため、低入熱のアーク溶接が行われているが、基材原質部に比べ耐食性、じん性が劣化した状態で、

使用されているのが現状である。

レーザークラディングでは、ほぼ二相のバランスの崩れがない溶融結合の肉盛溶接が可能で、海水腐食環境での耐食性の劣化がないことを確認できている。

#### ◇ 溶接材料、表面処理層の特性と適用例

##### 1. 溶接材料

レーザークラディング用の粉末材料は、50～150 μmの粒径品が用いられている。精密な溶込み制御が必要な場合は、狭い範囲で粒径を絞る必要がある。

溶接材料としては、粉体プラズマアーク溶接用と同じ傾向にある。具体的には、Co基合金（ステライト合金、トリバロイ合金）、Ni合金（インコネル、ハステロイ等）と特殊材料（WC/NbC炭化物複合金）が多く使用されている。

また、Ti、Al、Cu合金の肉盛溶接も可能であるが、Ti、AL合金の異種金属の肉盛溶接に対しては、従来のアーク溶接では表面処理層と基材の境界に脆い金属間化合物を生成するため、割れの問題が発生し肉盛溶接できなかつたが、レーザークラディングにおいては、境界部金属間化合物の生成を最小限に抑えることができるため、割れリスクを減少できる。

##### 2. 表面処理層の特性

レーザークラディングの表面処理層は、短時間で加熱、溶融後に急速冷却となるため、表面処理層の組織は、微細化、高硬度となる。

ステライトNo. 6の肉盛を行った場合、アーク溶接ではHv440（多層肉盛で希釈無の肉盛層）に対して、レーザークラディングはHv460となる。また、ハステロイCにおいては、アーク溶接でHv200に対して、レーザークラディングはHv220となり、耐食性の向上も確認できている。

##### 3. 適用例

アーク溶接法（熱影響が大き過ぎる問題）、溶射法（表面処理層の密着力の問題）では適用できない部品及び要求性能を満たしていない部品が多くある。そのため、レーザークラディングの低熱負荷、低希釈の特長を活かして、本溶接法でなければ施工できない部品への適用が進んでいる。

具体的には、バルブ・スクリュウ・ガスタービンブレードへのCo基合金を中心とした耐摩耗材表面処理、各種刃先への高機能化表面処理、ピンストン等のシール溝・海水ポンプ部品（二相ステンレス鋼）への耐食・耐摩耗材表面処理の適用が進んでいる。

また、薄膜肉盛（0.5mm程度）が可能なることから、従来のアーク溶接、溶射の代替だけでなく、他の表面処理法（メッキ、焼入れ等）の分野への適用拡大が期待できる。

#### むすび

近年、レーザークラディングの研究は、レーザー設備の進歩（消費電力からのレーザー光線への変換率向上）により活発に行われている。当社においては、レーザークラディング装置1号機（高出力ディスクレーザー）を2014年度、2号機を2015年に導入し、基礎研究とともに、適用を進めている。

産業用機械、プラント部品等において、メンテナンスの負担低減を行い長期間使用に対応可能とすることで、イニシャルコストとともにランニングコストを含めた総合的なコスト低減要求がある。そのため、表面処理による長寿命化は重要な課題となっている。レーザークラディング技術は、今まで表面処理が困難であった部品への適用拡大が期待できる。

# 5. 溶 射

トーカロ(株) みやじまきよし  
溶射技術開発研究所 宮島生欣

## ◇ 緒 言

溶射は、粉末や線材にした材料を燃焼炎やプラズマジェット中に投入し、加熱、溶融させて基材に吹き付け、皮膜を形成させるコーティング手法である。皮膜材料の選択自由度が大きいこと、被加工物の形状やサイズに制限が少ないこと、成膜速度が比較的大きく、厚膜化できることなどの利点から、多くの産業分野で利用されている。すなわち、溶射手法を用いることで、様々な金属や合金、セラミックス、あるいはこれらの混合材であるサーメットを0.01mmから1mmオーダーで成膜させることが出来る。

金属材料の溶射に関しては、1910年頃にスイスで溶射装置が開発<sup>1)</sup>されて以来、様々な材料や溶射方法が実用化されており、現在では使用環境や皮膜の特性に応じてその応用分野も多岐に渡り、航空機、ガスタービン、自動車、製鉄、製紙など幅広い産業分野へと展開するとともに、近年では半導体製造、医療機器分野など、その適用分野はますます広がっている。

本稿は、金属粉末の成形に関する特集号であることから、溶射技術の概要を紹介するとともに、溶射の材料別市場規模で約40%（他はセラミックス、サーメット）を占める<sup>2)</sup>金属材料に関する製品適用例を紹介する。

## ◇ 溶射技術の概要

溶射システムの模式図を図1に示す。熱源となるフレームを発生させる溶射ガン、フレーム中に溶射材料を投入する材料供給装置、基材すなわちその表面に皮膜が形成される被加工物、溶射ガンを走査させるハンドリングツール（ロボットなど）からなる。

溶射ガンのフレーム中で溶融された溶射粒子はフレームの流れによって加速され、基材に到達すると扁平しながら直ちに冷却凝固する。これらの

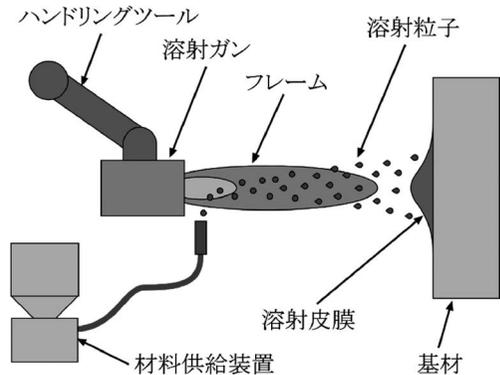


図 1 溶射システムの模式図

溶射粒子が次々に基材に到達し、積み重なって皮膜を形成する。

一般的なプラズマ溶射のフレームは直径数10mm程度の広がりを持っているが、基材の全面を覆うためには溶射ガンと基材とを相対的に走査する必要がある。現在ではロボットに溶射ガンを持たせて走査する方法が主流であるが、人が溶射ガンを手で持って走査する旧来の方法も一部で行われている。現地工事など、ロボットを持ち込むことができない場合がこれにあたる。

溶射材料を溶融し加速させる熱源には従来、ガス燃焼炎が多用されてきたが、この方法では溶射材料が十分に溶融せず、皮膜が多孔質になるため、低融点の自溶合金材料を使いさらに溶射後ガス燃焼炎などを用いて皮膜を再溶融・緻密化する方法が採られてきた。

これに対して、高温（約1万℃以上）プラズマジェット中に材料粉末を投入し、溶融と加速を行い成膜する方法がプラズマ溶射である。この方法により高融点材料やセラミックス材料も成膜できるようになった。

大気中のプラズマ溶射（APS: Atmospheric Plasma Spraying）を用いて金属材料を成膜すると皮膜中にはその酸化物が数%形成される。この酸化を抑制する方法として減圧プラズマ溶射（LPS: Low

Pressure Plasma Splaying) がある。

粉末材料を音速のガス燃焼炎（ジェット）中に投入・加速させ、その衝突エネルギーによって皮膜を形成させる高速ガスフレーム溶射（HVOF: High Velocity Oxy-Fuel）は、WC-Coなどの超硬材料を成膜するために開発された方法であるが、金属材料の溶射も実用されている。

近年、低温（常温～約1000℃）で超音速の作動ガスによって材料粉末を加速・衝突させ、皮膜を形成するコールドスプレー（CS: Cold Spray）が開発されており、CSによって形成された銅やアルミニウムの皮膜は、緻密度や熱伝導率などの特性がバルク材と同等の値を達成している<sup>3), 4)</sup>。

溶射製品の一般的な製造工程を図2に示す。

溶射に先立ち、油分などの汚れは溶射皮膜と基材との密着を阻害することから、基材は脱脂や洗浄によって清浄化される。

次に、溶射皮膜が附着してはいけない部分にマスキングを施す。マスキング材には、耐熱性のあるテープや金属製の治具が使用される。

溶射皮膜と基材との結合力は、アンカー効果と呼ばれる機械的結合によるとされている<sup>1)</sup>。すな

わち、基材表面の粗さの凹部に溶射粒子が食い込み、または粗さの凸部を啜え込むことによって結合している。従って、基材表面が平滑な場合、十分な結合力が得られず、成膜が不可能となり、容易に皮膜剥離を生じることとなる。そのため、溶射前処理として粗面化処理が必須である。粗面化処理は、圧縮空気ですり材を吹き付けて行うブラスト法が主流である。

粗面化処理された基材に対して、溶射ガンと基材を相対的に走査しながら溶射を行うが、1回の走査すなわち1パスで成膜する膜厚は0.01から0.05mm程度であるので、所定の膜厚になるまで走査を繰り返して溶射皮膜を形成する。

溶射後、マスキング材を除去する。

溶射皮膜は溶射粒子の積層構造であり、溶射したままの表面にはざらつきやうねりがあるので、必要に応じて研削や研磨によって表面粗さを調整する。また、精密な寸法が求められる場合も、この時に寸法調整が行われる。

#### ◇ 金属溶射皮膜の適用例

##### 1. ガスタービンブレードへの耐高温腐食皮膜

発電用ガスタービンや航空機用ジェットエンジンのブレード（図3-①）など高温環境下で使用される部品には耐熱合金が使用されており、高温酸化や減肉による高温強度特性の低減を防止するため、MCrAlY合金溶射皮膜（MはCoNi、NiCo、Co、Ni）が施されている。溶射プロセスは、前出のLPS、HVOF、APSなどがあり、部品の形状や成膜コストに応じて使い分けられている<sup>5)</sup>。

また、当該部品の熱効率向上による高温化に伴い、ZrO<sub>2</sub>系セラミック皮膜が熱遮蔽皮膜（TBC: Thermal Barrier Coating）として研究されており、MCrAlY合金溶射皮膜は、セラミック皮膜と基材との熱膨張差の緩和や、結合力を向上させるボンドコートとして重要な役割を果たしている。

##### 2. ボイラ管の高温腐食対策としてのNi-Cr溶射

石炭火力発電所などの熱交換器として使われているボイラ（図3-②）の高温腐食には、バナジウム腐食、硫化腐食、塩化腐食などがあり、それぞれ腐食機構は異なるが、腐食対策として実用化されている溶射皮膜材料はNi-Cr合金が主流を占めている。その理由は、NiおよびCrが40～60%の範

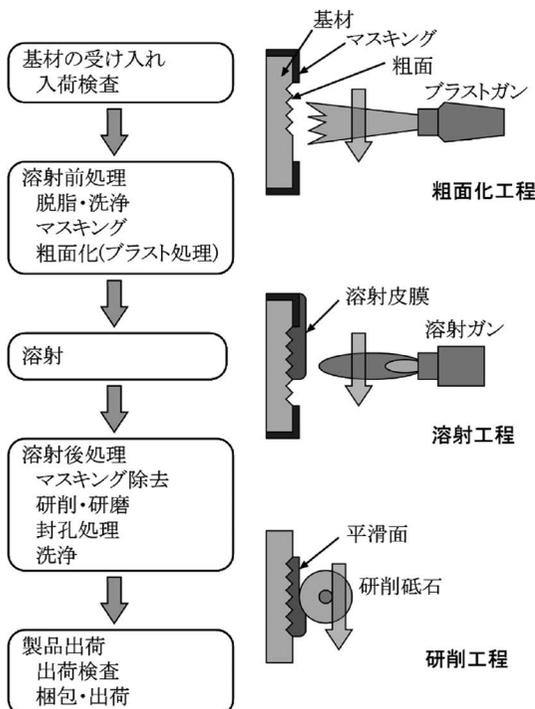


図2 溶射製品の一般的な製造工程

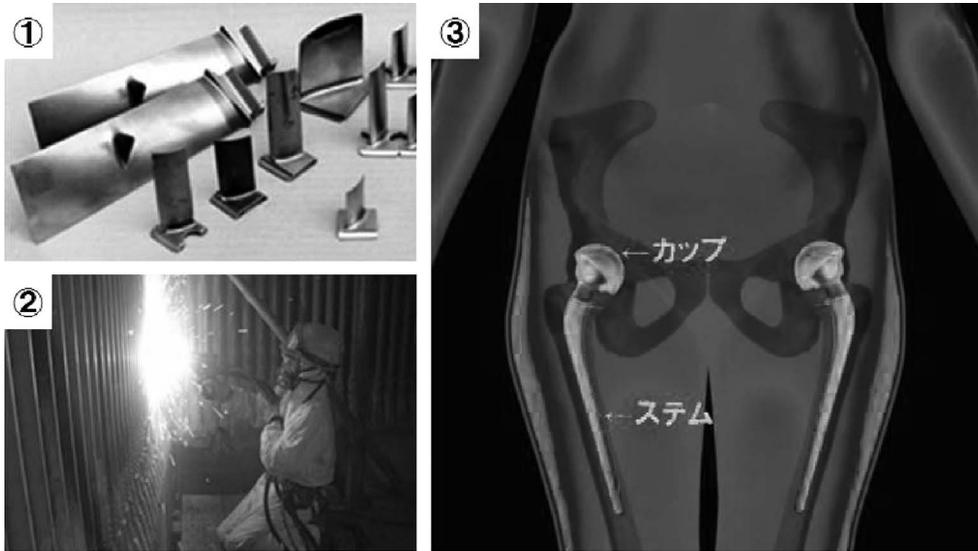


図 3 金属溶射皮膜の適用例  
 ①発電用ガスタービンプレード  
 ②ボイラパネルへのNi-Cr溶射  
 ③人工股関節部材 (カップ、ステム)

囲であれば、上記腐食に対して万能的に耐えることが実証されており、Ni-Cr材料が比較的安価で容易に入手できるからである。

重油燃焼ボイラで発生したバナジウム腐食および硫化腐食防止用に施工したNi-Cr溶射皮膜は、皮膜の気孔が使用中に $V_2O_5$ で封孔され、20年の使用に耐えている実績がある。

一方で、都市ゴミ焼却プラントにおけるHClガスなどによる腐食環境では、溶射皮膜の気孔部から腐食成分が内部へ侵入して伝熱管を腐食させるため、寿命が5年程度である<sup>6)</sup>。

### 3. 整形外科用インプラントへのチタン溶射

インプラントの中で、骨折部の治療に用いられるチタン合金製人工股関節部材 (図3-③) には、骨との固着をはかるために、骨と接する表面の一部をポーラス構造にする必要がある<sup>7)</sup>。その方法のひとつとして、純チタンをLPSで成膜している。

一般に溶射皮膜、特にLPS皮膜は緻密なイメージがあるが、この適用例では、溶射条件を制御することによって多孔質性と密着力を両立させている。

### 参考文献

- 1) 日本溶射協会編：溶射技術ハンドブック、(1998)、3、23
- 2) デジタルリサーチ社：2013年度版溶射市場の現状と展望、(2013)
- 3) 伊藤義康、須山章子：コールドスプレーで作製された銅皮膜の熱的・電気的特性、材料、59-2 (2010)、143
- 4) 菱田元樹、藤田雅、榊和彦：コールドスプレーによるナノ準結晶粒子分散アルミニウム合金皮膜の作製、日本金属学会誌、73-6 (2009)、421
- 5) 水津竜夫、西迫駿、荒井正行：CoNiCrAlY皮膜の高温酸化特性に及ぼす溶射プロセスの影響、材料、65-4 (2016)、313
- 6) 原田良夫：溶射法の概要とボイラ管への適用、溶接学会誌、77-7 (2008)、30
- 7) 前原克彦、土居憲司、松下富春、佐々木佳男：チタン合金製人工股関節部材の生体活性化処理、神戸製鋼技報、50-2 (2000)、49

## 6. ショットピーニング

新東工業(株) プラスト事業部 こばやし ゆうじ  
プラストテクノロジーグループプロセスチーム 小林 祐次

### まえがき

ショットピーニングは、直径0.05mm～1mm程度のショットと呼ばれる金属あるいは非金属の球を対象となる金属の表面に高速で打ちつけ、加工後の表面近傍において、硬さの向上や圧縮残留応力の付与といったピーニング作用を得る手法で、得られる効果は疲労強度の向上である。

自動車を始め、航空機の部品などに適用される技術で、部品の軽量化や信頼性向上に役立っている。

### ◇ ショットの重要性

ショットが金属表面に衝突したとき、痕が生成される。すなわち、塑性変形が起こっている。その塑性変形層直下は、変形に抗し圧縮残留応力が発生している。そのため、疲労亀裂の発生と進展を抑制し、疲労強度が向上するといわれている。したがって、塑性変形を起こす材料であればショットピーニング効果が見込めるので、ほとんど全ての金属に対してショットピーニングを適用することができるが、使用するショットの硬さは被処理物よりも若干高いものが用いられる。

ショットの製造方法は主に二つ。アトマイズによる方法と、伸線材をカットして製造する方法(Conditioned Cut Wire: CCW)である。当然、アトマイズにより製造されたショットは安価だが、鑄巣によりもろい欠点がある。一方、CCWは、製造工程上コストがかかるため、高価であるものの、アトマイズ品に比べて寿命が長い。また、直径0.3mmより細かい線材の切断は背エイドが低く、硬すぎる伸線材は切断できないので、市販されるショットの仕様の幅は鑄鋼ショットに比べ狭い。鑄鋼ショットは、炭素量と熱処理によって硬さを調整する。一般的によく使用される硬さは400～700HV。最近では1,200HVのものもある。最近のトレンドとして直径0.1mm程度の小さなショット

を用いることが多くなっているが、直径が小さいショットの製造については、粉末冶金の技術が活用されている。

アルミのように対象物が軟らかい場合は、軟らかいショットを使用するか、ガラスのような比重の軽いショットを使用する。最近ではガラスよりもじん性の高いジルコニアビーズの適用が拡大してきた。様々な制約により、投射速度が遅い場合は比重の大きいタングステンカーバイトが使われる事がある。

### ◇ 金属粉末焼結3Dプリンタ材への ショットピーニング

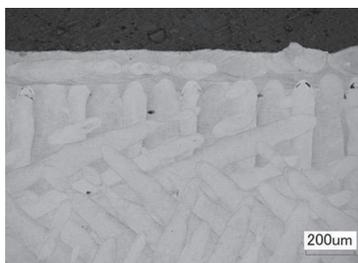
金属粉末にレーザーを照射することにより溶融させ、逐次粉末を追加することにより金属製品を造形する、いわゆるメタルの3Dプリンタ品は、モノづくりの根幹を変える技術として注目を浴びている。しかし、溶融金属を逐次積層する方法ため、材料内部に空孔が発生したり、粉末が溶融しきれずに残存し、材料としての強度に問題が発生する恐れがある。これまでの研究成果から、静的強度はバルク材と遜色ないといわれているが、疲労強度についての報告は少ない。そこで、弊社では沖縄高等専門学校政木准教授と共同で3Dプリンタ材の疲労強度について調査を行っている。2016年4月現在、実験は継続中である為、詳細をお知らせできないが、せつかくの機会なので本稿にて一部を紹介する。

用意した粉末はマルエージング鋼 MS1で、それを図1に示すような積層方向で円柱を造形した。造形された円柱から、砂時計型の疲労試験片を機械加工によって製作した。図2に、試験片の長手方向の断面組織観察写真を示す。これらの写真より積層方向に従って組織が大きく異なることがわかる。

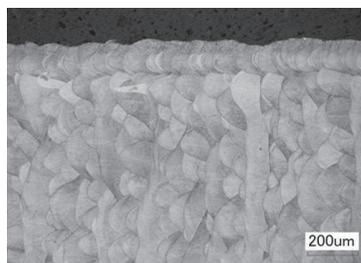
用意した試験片は固溶化熱処理を行い均質化した後、ショットピーニング加工された。紙面の都



図 1 積層方向

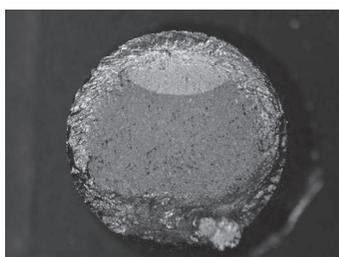


H 積層造形材の長手方向断面

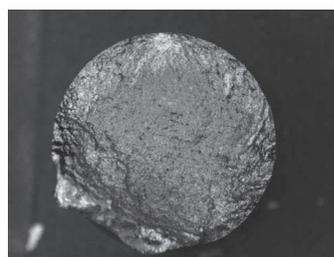


V 積層造形材の長手方向断面

図 2 積層造形材の断面観察



ショット粒径大の破断面



ショット粒径小の破断面

図 3 疲労試験後の破断面観察

合で詳細は割愛するが、ショットの直径が大きな条件と小さな条件の2種類を適用した。

回転曲げ疲労試験を行った結果、ショットピーニング加工を適用した試験片は、すべて内部を起点として破断したことが確認された。図3に示すように、ショットの直径が大きい条件のほうが亀裂の起点が深いことがわかる。一般に、ショットの直径が大きいほうが、圧縮残留応力の付与層は深い。したがって、疲労亀裂の発生はショットピーニングにより導入された圧縮残留応力によって抑制され、亀裂発生深さは、残留応力の付与深さに依存すると推測される。疲労破壊の形態は内部介在物による破壊である為、低サイクル領域ではショットピーニングの影響が顕著なものの、高サイクル領域ではショットピーニングの影響が少ないことが解ってきた。引き続き実験を進め現象を明らかにしたい。

#### ◇ 生産現場におけるX線残留応力測定

前述のとおり、ショットピーニングに期待されるのは圧縮残留応力の付与である。したがって、圧縮残留応力の大きさを評価する必要があるが、現状、X線回折現象を利用した方法が用いられる。

金属材料が引張り・圧縮を受けると、その金属格子は伸びたり縮んだりすることによってその格子面間隔は変化する。この格子面間隔の変化(歪)をX線の回折現象を利用して測定する。既知の材料の場合、ヤング率に歪を乗することによって残留応力を算出する。国内外で数多く利用されるX線応力測定装置は $\sin^2\psi$ 法により演算を行うが、この方法の場合、測定に約10分から15分程度要する。

従来、ショットピーニング工程の管理は、回転検知や圧力センサなどとともにアークハイトによる工程能力の保証が行われている。しかし、残留

応力はショットピーニング加工前の被加工材の機械的性質に大きく依存するため、正しいショットピーニング工程を経たとしても被加工材の品質は決定されない。一方、X線による応力測定法の普及に伴い、主に自動車産業においてショットピーニング工程の評価として残留応力値が用いられるようになってきた。

歯車やばねなどの自動車にとって重要な部品は、品質向上やトレーサビリティの確保を目的に1個流しの工程がとられるようになってきた。もちろん、ショットピーニング工程においても1個流しが主流になりつつある。このような環境の中、ショットピーニング工程の評価も本来は、残留応力で行うべきである。

したがって、潜在的な市場ニーズとしては、10秒程度で測定が完了するX線応力測定装置だと思われる。また、近年ドイツを中心とするヨーロッパ圏から、インダストリー4.0という考え方が提唱されている。これは、物の生産ラインにおいて発生するすべての事象をデータとしてとらえ、物と情報を連結し工場全体の最適化をはかったり、製造物そのものに従来になかった付加価値を生み出そうという考え方である。インダストリー4.0の実現のためには、あらゆる事象のデータ化が必要だが、従来のX線による残留応力測定では1測定当たり10分から15分要するので、インダストリー4.0の思想に当てはまらない。もし製造工程のサイクルタイム以下で残留応力が測定できるのであれば、ショットピーニング工程においてもインダストリー4.0の思想を当てはめることができる。

筆者らは、短時間且つインラインでの使用を前提としたX線を利用し残留応力測定装置を開発し

た。従来のX線応力測定装置とは異なり、同じ材質、同じ形状のものが流れてくるラインにおける検査機の位置づけである。X線による残留応力測定は材料の結晶粒の大きさ、配向性に大きな影響を受けるため、インラインX線応力測定装置で評価できる材料かどうかを事前にチェックする必要がある。このように、いくつかの制約事項があるものの、約10秒程度の測定時間かつ、インラインでの使用を前提とした応力測定装置が実現できた。図4にインラインで使用できる評価装置を組み込んだショットピーニングマシンの3Dモデルを示す。

ショットピーニングマシンをユーザーが購入する前に検証実験を行い設備の運転条件を検討し、設備の構成を決定する。検証実験の段階からインラインでの応力測定を盛り込むことによって、品質管理の質の向上と、品質管理のコストダウンが実現できる。

#### ◇ 今後の展望

ショットピーニング技術は自動車産業を中心に積極的に活用され、低燃費且つ高い信頼性の自動車生産のためには欠かせない技術となっている。今後も、材料や熱処理の技術開発が進み、それに対応させるために、ショットピーニング工程も少しずつ変化していくことが予想される。

また、ショットピーニング工程だけでなく部品の製造工程全般に対する品質保証には、今後さらに力点が置かれると予想しているが、これまで評価していない又は評価できなかったパラメータをインラインで評価できれば、今後の日本のモノづくりに貢献できると考えている。

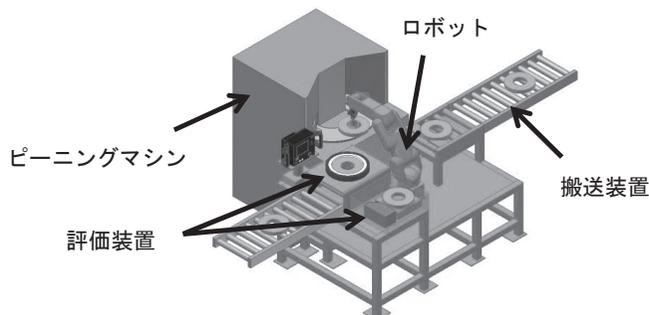


図 4 評価装置を組み込んだショットピーニングマシン

# IV. わが社の製品紹介

■ ㈱神戸製鋼所

## 焼結浸炭歯車に適用したNi-Mo系 プレアロイ粉 46F4H

### まえがき

焼結鋼部品は溶製鋼部品と比較して切り出し加工が不要なため材料歩留が極めて高く製造コスト低減が期待されます。しかし、焼結体中には内部空孔があるため溶製鋼よりも疲労強度が低く、自動車用トランスミッションにはクロム・モリブデン鋼などの溶製鋼を浸炭焼入れした歯車（以下、溶製鋼歯車）が多く使用されています。焼結鋼を浸炭焼入れした歯車（以下、焼結浸炭歯車）の実用化のためには、疲労強度を一般的な焼結部品の水準から溶製鋼に匹敵する水準まで大幅に向上させることが求められます。

当社で製造しているNi-Moプレアロイ鋼粉アトメル46F4H（0.5Ni-1.0Mo）は浸炭材の疲労強度が高く、粉末鍛造により真密度まで高密度化することで溶製材と同等の疲労強度が得られることがわかっています<sup>1)</sup>。

そこでアトメル46F4Hを用いて焼結歯車を作製し、粉末鍛造に代えて低コストの高密度化手段として歯車を転造加工することで歯面の緻密化を行ったところ、溶製鋼歯車に匹敵する疲労強度を得ることができました。以下に、アトメル46F4Hの特長および46F4Hを適用した焼結浸炭歯車の特性をご紹介します。

### ◇ アトメル46F4Hの特長

アトメル46F4Hは、水アトマイズ製法により製造した0.5Ni-1.0Mo組成を持つプレアロイ鋼粉です。フェライト硬化能が大きいNiを最小限に抑えたことにより、合金鋼粉にもかかわらず純鉄粉に近い圧縮性が得られます。

Ni-Mo系合金鋼粉は、Crのような易酸化元素を含まないため吸熱型変成ガス（RXガス）雰囲気中での焼結、浸炭処理における酸化の懸念がありません。特にアトメル46F4Hは、Niによって靱性を確保しつつMoによって焼入れ性を向上させていることから、焼結浸炭用の材料としてバランスの取れた成分になっています。

### ◇ 焼結浸炭歯車の特性

図1にアトメル46F4Hを用いて作製した焼結浸炭歯車の疲労強度特性を溶製鋼歯車と比較した結果を示します。転造処理を行なった焼結浸炭歯車は溶製鋼歯車と同等以上の歯元曲げ疲労強度ならびに面圧疲労強度が得られます。

アトメル46F4Hは自動車用トランスミッションギアに適用可能であり、製造コスト低減に寄与するものと考えられます。今後は溶製材に匹敵する様々な高強度焼結部品への展開が期待されます。

### 参考文献

- 1) 関ら：日本機械学会第12回機要素潤滑設計部門講演論文集、2012、p.103-106

（㈱神戸製鋼所 鉄鋼部門 谷口 祐司）  
鉄粉本部 鉄粉工場 鉄粉技術室

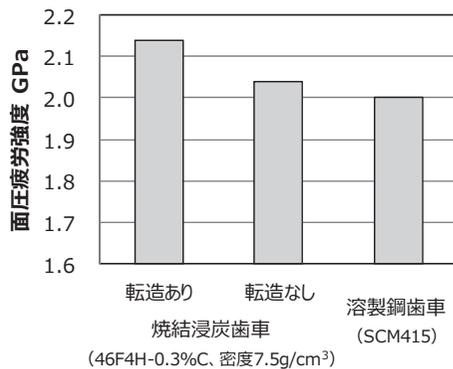
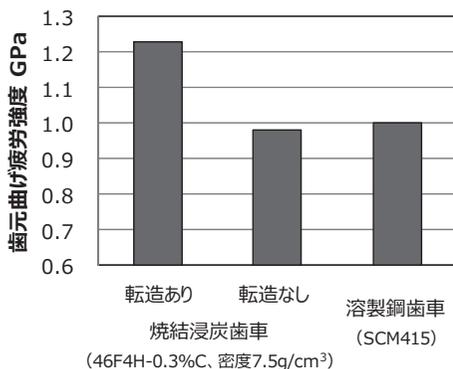


図 1 歯車の疲労強度特性比較（歯車形状：モジュール3平歯車）

## 多彩な噴霧プロセスで 製造した合金粉末

### まえがき

当社の粉末製品は1971年から研究開発、1984年から事業化し、30年以上お客様に御愛顧戴いております。

自動車分野を始めとする焼結機械部品用、エレクトロニクス用、肉盛用、MIM（金属射出成形）用の既存分野から最新のハイテク分野に至るまで、水アトマイズ、高圧水アトマイズ、ガスアトマイズの製造プロセスでお応えしています。更に、当社独自のレビテーション溶解ガスアトマイズでは水冷銅坩堝による半浮遊溶解により、溶解時の不純物の上昇が少なく、スパッタリングターゲット用、ろう付け用活性金属粉末の製造も可能としています。

高機能部品のお客様のニーズに対応するため、造粒、絶縁コーティング、熱処理、フレック化処理などの2次加工技術も保有すると共に、新たな開発ニーズや技術課題に対応するため、各種分析、及び解析による技術サービスも充実させています。

#### ◇ 焼結用ステンレス粉末

当社特殊鋼製鋼工場で精錬された低炭素、低窒素組成の鋼片を原料として使用するため、圧縮性に優れた粉末の製造が可能です。安定した粒度分布と粉末形状で品質バラツキが少ない粉末を提供できます。

#### ◇ MIM（Metal Injection Molding）用粉末

当社独自の微細粉末用高圧水アトマイズ技術により、高球状度、高タッパ密度のMIM用粉末が製

造できます。低い収縮率のMIM製品が製造可能となり、寸法精度が向上します。

#### ◇ 軟磁性粉末

当社の水アトマイズ技術による高球状度化や、合金設計技術により、透磁率やコアロスが高特性の粉末を製造することが可能です。リアクトル、インダクター用途に最適で、2次加工（粉末熱処理、表面改質）技術も備え、お客様のニーズに合わせた粉末の提供が可能です。

#### ◇ 肉盛・HIP・3Dプリンター用粉末

当社のガスアトマイズ技術により、Co、Ni、Fe系の高球状度な合金粉末の製造が可能です。流動性が良く、低酸素濃度の合金粉末です。表面硬化肉盛、溶射、ろう付け接合に使用でき、近年、注目されている3Dプリンター用途に適した粒度、形状、流動性の粉末を提供することも可能です。

#### ◇ 高合金粉末

当社の水アトマイズ技術により製造したCo系耐摩耗合金、Ni系耐熱・耐食合金粉末です。一例として、焼結体の耐摩耗性を向上するための硬質粒子として、鉄基合金などに混合し使用できます。

#### ◇ チタン系材料・スパッタリングターゲット用粉末

独自のレビテーション溶解ガスアトマイズ技術により、極めて低不純物の合金粉末製造を達成（注：但し、不純物レベルは原料の純度に依存します）し、半導体用途のターゲット材料にも適用可能です。難溶解のチタン系材料も低不純物の粉末製造が可能です。

〔大同特殊鋼(株) 粉末製品部 ながさ いわね〕  
粉末ソリューション室 長瀬 石根

表 1 当社製品適用代表例

製品区分	製造プロセス	粉末形状	成分例	粒度例	用途
1. 焼結用 ステンレス粉末	水アトマイズ	異形状	Ni系: 304L、316L Cr系: 410L、434L、444L	≤150μm	カムシャフトロブ、 カメラ部品、錠前部品
2. MIM用粉末	高圧水アトマイズ	異～球形状	Ni系: 304L、316L、310S Cr系: 420J2、440C、630	D50=10μm	携帯電話、PC、時計、 自転車、歯科部品
3. 軟磁性粉末	水アトマイズ 高圧水アトマイズ	異形状	Fe-Si、Fe-Si-Cr、Fe-Si-Al Fe-Ni、Fe-Co	≤150μm、 D50=10μm	リアクトル、インダクター、 電磁クラッチ
4. 肉盛・HIP・3D 用粉末	ガスアトマイズ	球形状	Co、Ni系合金 DEX20、40、60、80、SKD61	≤150μm、 60～250μm	PPW、金型（粉末ハイス） 自動車用バルブ
5. 高合金粉末	水アトマイズ	異形状	Co、Ni、Fe系合金	≤150μm	バルブシート、化学工業装置、 ターボ部品、プッシュ
6. チタン系材料・ ターゲット用粉末	レビテーション溶解 ガスアトマイズ	球形状	Ti-36Al、Ti-6Al-4V、 Ni基超合金	≤500μm	高純度ターゲット、ろう材、 医療部品、航空部品、刃物

注) D50は粒度分布の中央値の粉末粒径を示す。

## ■ 日立メタルプレシジョン

### 金属粉末射出成形品 (Metal Injection Molding / 通称MIM)

当社は自動車部品、一般産業機械、エレクトロニクス等、様々な分野のお客様へ精密鋳造品、金属粉末射出成形品 (MIM)、カッター・パンチユニットといった商品群を提供しておりますが、その中で金属粉末射出成形品 (MIM) を紹介させていただきます。

#### ◇ 金属粉末射出成形品 (Metal Injection Molding / 通称MIM) とは

MIM (「ミム」と呼びます) は比較的歴史が浅く、1970年代にアメリカで実用化された金属部品の製造方法の一つです。プラスチックの射出成形技術と粉末冶金技術を融合させた特徴を持ち、機械加工、ダイカスト、精密鋳造、粉末冶金に次ぐ第5世代の金属加工技術として期待され、日本では1980年代に量産が開始されています。

#### ◇ 製造工程

まず、①金属粉末と樹脂及びワックスからなるバイндаを混練する②それらをプラスチックと同じ成型機を使って金型に射出成形を行う③溶媒、加熱によって成形体からバイндаを取り除く④高温で焼結を行い出来上がりです。

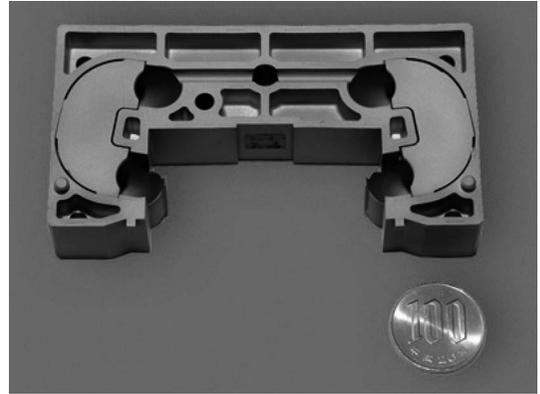
#### ◇ 特徴

一番の特徴は①形状の自由度が高く、3次元の複雑形状の成形が容易に実現できるという点にあります。金属部品がプラスチックと同じ感覚で成形でき、薄肉シャープエッジ、狭スリット、細孔形状にも対応可能です。また②焼結性に優れた微細な粉末を使う為、高い相対密度が得られ、高強度、高靱性の製品が製作できます。③材質面ではステンレスをはじめ各種難加工材等、幅広い材料の選択が可能です。

#### ◇ 当社製MIMの特徴

##### 1. 自社金型設計、製作対応：

金型のメンテナンスからお客様の設計変更まで



柔軟に対応致します。

##### 2. 様々な材質への対応と高い開発力

特殊鋼メーカーである日立金属の冶金技術を継承し、ステンレス材、ダイス鋼及び高速度工具鋼、耐熱合金、低熱膨張材、封着合金といったお客様のニーズに合わせた幅広い材質に対応しています。また、様々な製造技術の開発を行っており、MIMでは困難な肉厚製品の実現、通常の金型構造では成形困難な中空部品etcアンダーカット形状の実現を可能にしています。

##### 3. MIM業界最大級のサイズの製造

MIMは小物部品への適用が多いですが、弊社では業界最大級サイズの製品の製造が可能です。一例として外寸 (100×50×20mm)、重量 (300g) クラスの製品の量産を行っています (製造に適したリデザインの提案実施)。

##### 4. 精密鋳造で培った品質保証

精密鋳造で自動車 (TS取得)、航空機、ガスタービン、原子力分野の部品を製造しており、MIMも同様に高度の品質保証システムで、お客様のご要望にお応えします。

最後に既存の製法では悩ましい部品形状、困り事「このような形状がMIMでできないだろうか？ MIMで解決できないだろうか？」といった事がございましたら是非、当社、営業センター宛にお問い合わせ下さい。電話または当社HPからメールでのお問い合わせも可能です。宜しくお願い致します。

日立メタルMIM

検索



日立メタルプレシジョン 営業センター 高機能部品グループ えのもと よしおみ 榎本 喜臣

## ガスアトマイズ製法 による合金粉末

アトマイズとは、[粉碎する、細分化する]という意味で、タンディッシュ底部の注湯ノズル穴から高温で溶けた合金（溶湯）を流し、その溶湯の流れに高圧の水または、不活性ガスを吹き付け、溶湯を液滴に粉碎、凝固させる合金粉末の製造技術になります。

当社は、これまで水アトマイズ製法により、粉末冶金用やMIM用微粉末、高速度工具鋼（ハイス）、ステンレス鋼、磁性材料の合金粉末を製造して来ました。しかし近年では、合金粉末の要求として、低酸素で球形状の粉末を必要とされる用途も増えてきております。そのような新しい分野に対応するため、これまでに培ってきた粉末製造の技術を生かし、水アトマイズ製法による粉末の品質改良に加えて、ガスアトマイズ製法による粉末製造の開発を行っております。当社のガスアトマイズ粉末の開発設備は、溶解チャンバー内の雰囲気制御も可能で、活性な元素を含む合金なども視野に入れて開発を進めております。

これまでに、ガスアトマイズ製法で開発に取り組んできました主な粉末としては、以下のような分野で使用されています。

- ①自動車エンジンのバルブシート用粉末（Co合金粉末、Fe合金粉末）
- ②溶射用粉末（Ni合金粉末）
- ③軟質磁性材料粉末（Fe合金粉末）

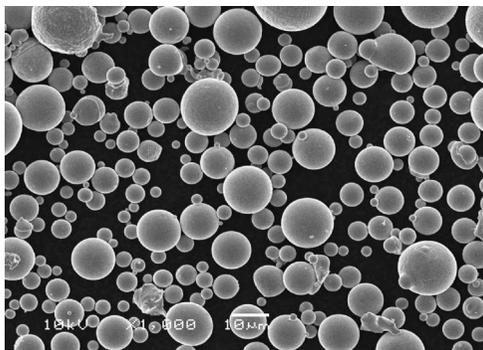


写真1 ステンレス粉末のSEM写真

### ④3Dプリンター用微粉末

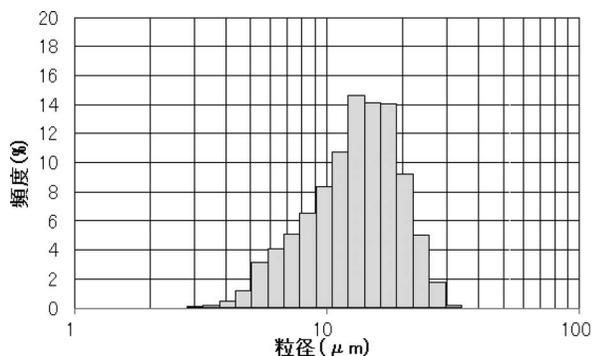
直近では、今後需要の拡大が期待されるMIM用や3Dプリンター用の粉末製造の開発にも取り組みも行っております。特に3Dプリンター用の粉末としては、成形体寸法精度を向上させるために、高品質で高特性の粉末が要求されます。要求される粉末特性としては、粉末の流れ性（流動性）が良く、球形状で、さらに粒度分布の幅が狭い均一の大きさの粉末が求められます。また粒径としても比較的小さい微粉末を製造する技術も必要となってきます。また、粉末の鋼種系もステンレス鋼からNi基合金など多岐に渡り、高付加価値の用途への展開も期待されています。これらのニーズに対応するために、開発を進めておりますが、開発の内容としましては、適正な粉末形状・粒度分布を得る為に、溶湯の注湯条件やアトマイズ時のガスジェットのスプレー条件等のアトマイズ方法の試験をはじめ、粉末の評価としましては、画像処理装置を用い粉末形状の評価も実施することで、適正なアトマイズ条件の確立を目指しております。

写真1の粉末は当社のガスアトマイズ装置で試作を実施しましたステンレス粉末の写真となります。

グラフ1はその粉末の粒度分布を示します。

粉末形状および粒度分布につきまして、まだ課題は残っておりますが、当社のガスアトマイズ試験装置にて3Dプリンター用粉末をはじめ、各分野、用途で使用される粉末の製法開発を行うことで、要素技術の確立を行い、早期の量産化を目指しています。

〔三菱製鋼株 やまだ たけとし〕  
技術開発センター 山田 武利



グラフ1 ステンレス粉末の粒度分布

# 業界のうごき

## 愛鋼、衣浦工場の機能強化 条鋼加工の一大拠点に

愛鋼は基幹拠点である衣浦工場の機能強化を図る。4月1日に愛知製鋼から隣接地を購入。今年度スタートの3カ年中期計画の期間内に新工場棟を建設し、加工設備の新設や移設を行い、条鋼加工を軸とした一大拠点を築く考えだ。

同社は衣浦工場を「条鋼の加工センター」と位置付けて積極的に能力増強を実施。レイアウト変更も並行して実施したが、条鋼切断・穴あけ加工を中心に高い稼働率が続く中で能力不足、スペースの狭隘化が徐々に表面化していた。

購入したのは敷地約1万8千平方メートルで、投資額は約3億8千万円。衣浦工場と新工場の役割分担は未定だが、条鋼関連の加工業務を中心に据え、生産効率向上を狙って本社（棒鋼切断）、上野（磨棒鋼の引抜）、東海（鍛造品機械加工・線材加工）の各工場から設備・機能の移転を検討するほか、最終製品に近い工程まで踏み込んだ加工領域の拡大も視野に入れる。（4月11日）

## 浅井産業グループのテックイトウ 「浅井フォージ」に社名変更

浅井産業グループの熱間鍛造品メーカー、テックイトウ（本社・茨城県稲敷市）は、浅井産業や鋳物製品を加工・販売する浅井ショウワなど、グループ企業との事業シナジーの追求を本格化する。浅井産業グループの位置づけを明確にする狙いで、4月1日付で「浅井フォージ」に社名変更する。グループ連携と技術力を生かし、高付加価値品の販路開拓、拡販を目指す。

テックイトウは複雑形状、少量多品種への対応力が強み。2007年11月に浅井産業66%出資の子会社となり経営面

で関係を深めたが、事業シナジーは小さかった。他株主の出資比率はキャタピラー・ジャパン18%、創業家16%。今後もキャタピラー関連を主力としつつ販路開拓を図り、特に技術力を生かせる高付加価値分野を深掘りする。

16年上期中に生産管理・工程進捗管理の新システムを導入し、納期精度を高めるなど、製造基盤も強化する。（4月1日）

## ウメトクのタイ現地法人 PVD増設、稼働順調

ウメトクのタイ現地法人、ウメトク・タイランド・エンジニアリング（UTTE）が昨年10月に本稼働させたPVD（物理蒸着）装置が順調に稼働している。PVD増設に伴い工場を増築。総投資額はPVD装置が約1億8千万円、工場増築が約5千万円。

PVDは金属などに物理的に薄膜を形成する蒸着法の一つ。金型の表面にPVD処理を施すことで長寿命化を図りトータルコストを低減する。化学的に薄膜を形成するCVDに比べ低温で処理するため処理物の変形、変寸が少なく、金型だけではなく様々な分野で需要が増加している。

UTTEは2基のPVD装置を稼働させていたが、処理量が能力の上限に近づいたことや薄膜の多様化への対応、今後のタイでの金型需要の成長を考慮し増設を決断。昨年5月に設置し8月に試運転、10月から本格稼働に入った。UTTEのパンプリー工場では真空熱処理を中心にPVD3基、CVD4基による金型の表面処理も行っている。（4月4日）

## 大洋商事・中国子会社が工場拡張 在庫拡充、品質管理向上

大洋商事は中国・浙江省平湖市の子会社、大洋特殊金属（浙江）の本社・工場を平湖経済開発区内で移転・拡張する。日本電産シンボの中

国工場向けに特殊鋼棒鋼の切断加工品、鍛造品などを納入しており、在庫体制の拡充、品質管理の向上を狙いに隣接地に移転し、工場建屋を約3倍の6千平方メートルに拡張する。1万平方メートルの土地使用権取得（50年）を含む投資額は約4億円。11月に完成し、年内に移転する予定。

大洋特殊金属は2004年設立で切断機8台などを持ち、特殊鋼切断品や鍛造品などを日本電産シンボ・中国工場に供給する。現在は同工場内に立地するが、隣接地に自前の工場を建設する。鍛造品の扱い数量増や鋼材置き場の品質管理向上などに対応する。

タイでは児島金属工業との熱間鍛造合弁が5月に工場建屋を完成し、1,600トン型打鍛造プレスラインを導入して7月にホットランを開始する。（5月6日）

## 辰巳屋興業、新本社ビル完成間近 7月4日から業務開始

辰巳屋興業は、建て替え工事を進めていた新本社社屋が完成に近づいたことを受けて、7月4日から同所での業務を開始することを決めた。移転後も旧倉庫の解体などを進め、年内めどに周辺の整備を終える計画だ。

同社は2014年末、旧建屋が老朽化していたことや今後の事業継続性がかんがみだ上、17年に設立70周年を迎えることに合わせて、本社ビルのリニューアルを決断。東側土地の取得などを通じて敷地面積を2,156平方メートルに拡張し、地上5階建て・RC造の社屋の建設を進めていた。

現在名古屋商工会議所ビル内にいる事務部門のほか、自動車部品部名古屋支店、グループ商社のタツミ商事の社員計約60人が移動する。今後旧部品倉庫の解体と新倉庫棟の建設、周辺の整地、自社車両用駐車場の整備などを推進し、年内にすべての工事を完了したい考えだ。（5月25日）

# 業界のうごき

## ハヤカワカンパニー

### 南アフリカ進出、レアメタル販売

ハヤカワカンパニーは南アフリカに進出する。今月上旬にレアメタルの輸出などを手掛ける現地法人を設立、上海をはじめとする他の海外拠点と連携しながら幅広い製品を扱って業容を拡大し、2017年12月期売上高3億円を目指す。

南アフリカには連絡事務所を置き、約2年前からビジネスノウハウの蓄積を進めてきた。一方、レアメタル関連業務は主に日中間でゲルマニウムやマグネシウムなどの取り扱いを行い、着実に実績を拡大してきた。多拠点間取引の活発化によるレアメタル事業の更なる拡大を目標に掲げ、主要産出地域のアフリカに新会社を設立する。

中南部ザンビア産のニッケル、コバルトの輸出入向けを目指し、需要動向を見ながら段階的に品種を拡大していく。当面は販路の確保、情報収集を進めながら、年内をめどに本格的な営業活動を始動する。(4月6日)

## マクスコーポレーション

### 北関東の物流拠点を移転・拡張

マクスコーポレーションは、栃木県にある特殊鋼の主力物流・加工拠点を移転・拡張する。北関東営業所(栃木市)を佐野市の佐野田沼インター産業団地内に移転し、鋼材物流センターを開設する。即納強化、顧客サービス充実や安全面の向上が狙い。現在の北関東営業所・倉庫に比べ敷地は2倍以上、倉庫は1.5倍に拡大する。5月9日に新体制で業務を開始する。

北関東営業所・倉庫が業容の拡大から手狭となり、安全対策を含めて顧客対応力を高めるために移転・拡張する。倉庫部門は今回の移転を機に鋼材物流センターとする。総投資額は約12億円。

移転先は北関東自動車道・佐野田沼ICまで車で5分と至近。切断機は移設・新設を合わせて18台で、工具鋼対応が3台、構造用鋼対応が15台。在庫保管能力は5千トン超で、当面は約4千トンを在庫する予定。人員体制は24人で変わらない。(4月22日)

## 愛知製鋼、ステンレス異形鉄線を開発 コンクリート二次製品の補強材向けなど

愛知製鋼はステンレス鉄筋コンクリートバー「サスコン」にコンクリート二次製品などの補強材としての需要拡大を見込んだ新製品「CD6」を開発。6月から販売を開始する。「JIS G 3532鉄線」が規定するコンクリート用異形鉄線としての断面形状、機械的性質を満たす業界初のステンレス異形鉄線。

耐候性、耐食性など高い耐久性と優れたひび割れ分散性を持ちながら、既存の異形鉄線と同じように扱える点などが特徴。公共工事向けを主体に、当面年間2億円(既存のCD4と合計)の販売を目指す。

CD6(正式名・ASCON-CD6)は、直径5.8ミリ、断面積0.2640平方センチメートルで、0.2%耐力440N/平方ミリメートル以上、引張強さは540N/平方ミリメートル以上。製造・販売は子会社の愛鋼が担当する。

建築分野でも耐震やインフラ整備で耐久性向上ニーズが年々高まっており、同社では商品PRを強化して市場への浸透を図る。(5月31日)

## 秋山精鋼、埼玉工場の倉庫建替え 立体自動倉庫を導入、17年夏完成

秋山精鋼は埼玉工場(埼玉県八潮市)の倉庫と事務棟を建て替えることを決めた。新たに自動倉庫設備を導入して在庫管理を効率化するとともに、労働・安全環境も改善する。投資総額は9億円強。

新倉庫は1,720平方メートルで立体

倉庫部分が660平方メートル、梱包などの作業スペースが1,060平方メートル。自動倉庫設備のラック数は約840棚で、在庫能力は1,700トン程度を予定する。事務棟は565平方メートルの2階建てで1階は事務所、2階は会議室とする。

新倉庫に自動クレーンを2基導入。現倉庫では有人クレーン3基で作業を行っているが、自動倉庫設備のコンピューター制御により搬入・搬出オペレーションは1人で可能となる。

7月から現倉庫を解体し、9月に新倉庫を着工。完工は2017年7月頃を予定する。新倉庫への移行期間は現在の材料倉庫を一時的に製品倉庫として使用し、駐車場内に臨時の材料倉庫を建設する。(5月30日)

## 新日鉄住金の棒線事業ブランド 高機能商品、34品目を選定

新日鉄住金は棒線事業ブランド「SteelLinC」の推進戦略を深化する。棒鋼・線材のハイエンド・高機能商品群を「XSTEELIA」としてブランド化し、該当する個別商品を随時紹介してきたが、新たに明確な基準を設定し34品目を選定。今後は商品体系として明確に示す。

34品目は同社の棒線生産の約3割に相当する。各商品の強みを「見える化」し、顧客に対する訴求力を高める。メンバー会社の加工製品をラインアップに加えることも検討する。

「自社独自に顧客との共同開発品で、広く提供できる」「自社だからこそ提供できる特徴的な性能を持つ」などの観点で基準を満たす34品目を選定した。商品体系では4つの需要分野(自動車・建機、産機・電機、建築・土木、共通分野)に分けて、3つのメリット(高強度・軽量化、工程省略・易加工性、環境対応その他)のどれに高パフォーマンスを発揮するかを品目ごとに提示する。(4月27日)

# 業界のうごき

## 大同特殊鋼、車用型鍛造品のタイ生産 2017年度に量産開始

大同特殊鋼のタイ子会社（DSTH）は、自動車用型鍛造部品の新型熱間高速横型鍛造機を稼働開始した。試作品の出荷を月内に開始し、2017年度前半に月産20万個の量産体制を確立して、成長が見込まれるASEAN地域でトランスミッション用型鍛造部品の現地調達ニーズに対応する。

DSTHは、日系自動車トランスミッション用型鍛造部品の現調ニーズの対応の高まりに対応し、15年1月に設立。日本・米国に次ぐグループの型鍛造製品製造拠点として、新工場を建設し新型鍛造機を導入した。月産能力は100万個。知多型鍛造工場で実績のある熱間高速横型鍛造機で、従来の高速横型鍛造機と縦型鍛造機の強みを併せ持ち、ニアネットシェイプによる製品品質の向上、高い生産性と歩留まりが追求できる。

DSTFは特殊鋼鋼材の物流・営業、タイ進出グループ企業のサポートも手掛ける。（4月25日）

## 日本高周波鋼業が新中期計画 設備投資165億円

日本高周波鋼業は2020年度を最終年度とする5カ年グループ中期経営計画を策定した。強靱な事業体質と安定した収益体質の構築に向け企業体質の変革を目指し、20年度に連結売上高450億円程度、売上高経常利益率5%以上を目指す。5年間の設備投資計画は165億円（うち特殊鋼130億円）で減価償却費100億円を大きく上回る。神戸製鋼所グループでの役割強化では、神鋼が17年に上工程を加古川製鉄所に集約するのに伴い、小ロット特殊品の取り込みを進める。

特殊鋼では自動車向けなど高付加価値製品を拡大し、富山製造所の省エネ投資や分塊ミル改造更新などで

コスト競争力を高める。省エネ投資（加熱炉、熱処理炉のリジネバーナー化、LNG化）は20年度まで順次進め、分塊ミルは19年度に立ち上げる予定。角ビレットの角・丸ビレット化、丸棒や平板のサイズ拡大など対応製品拡大や新規需要取り込みも加速する。（5月2日）

## 日本冶金工業、広幅コイル化に成功 高ニッケル合金「NAS625」

日本冶金工業は高ニッケル耐食合金「NAS625」の広幅コイル製造に成功した。昨年末に高ニッケル耐食合金「NASNW276」の4フィート幅コイルの製造に成功。この製造ノウハウの活用や熱延条件の最適化により、NAS625でも広幅コイル化に成功。このクラスの合金は高温域での強度が非常に高く、広幅熱延コイルの生産に成功したのは世界でも1、2社に限られる。

高ニッケル耐食合金は過酷な腐食環境下で使用され、近年は溶接作業の効率化の点などから板幅の広いコイル製品のニーズが高まっている。主な需要分野はプレート式熱交換器、オイル・ガス精製機器、化学タンク、水処理設備など。

NASNW276の4フィート幅コイル製品はすでに販売開始しており、2016年度は400～500トンを見込む。NAS625 4フィート幅コイルについては、製造条件の更なる適正化を図り、17年度までに本格的に製造販売を開始する予定。（4月20日）

## 日立金属、アジアで工具鋼拡販 切断、表面処理設備を増強

日立金属はアジアにおける工具鋼の加工サービス体制を拡充する。韓国、タイ、台湾の工具鋼加工・販売拠点で切断機増設、表面処理設備導入などを行う。総投資額は約10億円です。いずれも2016年度内に実施する。

加工を含むソリューション営業を強化することによりアジアでの工具鋼販売を伸ばし、18年度に15年度比4割増の販売を目指す。PVD（物理蒸着）装置を中心とする表面処理設備をアジア拠点で導入するのは初めて。

工具鋼のグローバル拡販は特殊鋼事業の柱のひとつ。ヒタチ・メタルス・コリアで切断加工の増強、表面処理の導入、ヒタチ・メタルス・タイで切断加工の増強、台湾日立金属で表面処理の導入を行う。

日立金属が安来工場で生産する工具鋼の月産量は約6千トン（15年度）。18年度は月7千トンへの拡大を目指しており、アジアでも拡販を進める。（5月31日）

## 三菱製鋼が中期経営計画を策定 「特殊鋼」「ばね」でシナジー追求

三菱製鋼は2016年度を初年度とする中期経営計画を策定した。（1）特殊鋼事業とばね事業のシナジー効果を強みにグローバル展開する（2）素形材事業を3本目の柱にすることを目標に上流・下流取り込みのためのM&A、自動車用途拡大に取り組むにより20年度に売上高1,700億円（15年度は1,065億円）、海外売上高比率47%（同38%）、経常利益85億円（同33億円）を目指す。

特殊鋼事業では室蘭特殊鋼に3年間（16～18年度）で約90億円を投じ老朽設備更新・戦略投資を行う。19年度以降は室蘭コンビナートのコストダウン・生産性向上・品質向上のための設備投資を検討する。

素形材事業では材料から組み立てまでの一貫モデル構築に向けた特殊溶解炉の新設・増設（VIM新設、粉末用ガスアトマイズ量産炉新設、水アトマイズ溶解炉増設）やM&Aも視野に入れたターボチャージャー市場における一貫モデルの強化に取り組む。（5月27日）

文責：（株）鉄鋼新聞社

# 特殊鋼統計資料

## 特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別生産の推移

### 鋼種別

(単位: t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼						計	合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他		
'14 暦年	264,684	4,822,532	3,996,687	8,819,219	438,207	1,027,943	3,000,538	695,384	5,969,185	688,579	11,819,836	20,903,739
'15 暦年	247,346	4,645,724	3,564,630	8,210,354	431,529	986,169	2,755,748	615,811	4,953,652	674,565	10,417,474	18,875,174
'14 年度	267,588	4,796,279	3,938,090	8,734,369	436,613	1,028,923	2,973,816	680,990	5,806,585	669,583	11,596,510	20,598,467
'15 年度	241,082	4,638,379	3,487,357	8,125,736	421,420	962,553	2,725,384	593,245	5,048,694	694,055	10,445,351	18,812,169
'15. 4-6月	60,525	1,173,819	896,254	2,070,073	111,707	261,081	649,693	159,815	1,200,756	161,156	2,544,208	4,674,806
7-9月	59,635	1,133,855	831,969	1,965,824	107,590	240,666	708,543	150,821	1,239,829	180,294	2,627,743	4,653,202
10-12月	59,805	1,162,076	889,670	2,051,746	104,260	233,655	669,291	143,237	1,263,233	168,804	2,582,480	4,694,031
'16. 1-3月	61,117	1,168,629	869,464	2,038,093	97,863	227,151	697,857	139,372	1,344,876	183,801	2,690,920	4,790,130
'15年 3月	23,864	413,104	321,429	734,533	36,771	84,405	248,684	60,048	403,933	57,000	890,841	1,649,238
4月	20,346	387,610	305,813	693,423	34,040	82,033	204,655	48,023	408,292	57,378	834,421	1,548,190
5月	20,087	397,436	298,168	695,604	40,148	85,194	220,406	55,855	422,368	52,270	876,241	1,591,932
6月	20,092	388,773	292,273	681,046	37,519	93,854	224,632	55,937	370,096	51,508	833,546	1,534,684
7月	19,899	377,911	287,163	665,074	39,689	81,302	231,194	46,716	418,894	58,592	876,387	1,561,360
8月	19,958	371,851	275,582	647,433	32,407	74,792	231,656	51,008	380,222	57,956	828,041	1,495,432
9月	19,778	384,093	269,224	653,317	35,494	84,572	245,693	53,097	440,713	63,746	923,315	1,596,410
10月	20,394	402,461	299,964	702,425	37,564	83,798	218,605	49,508	437,902	59,017	886,394	1,609,213
11月	19,260	390,478	300,827	691,305	31,554	77,314	208,399	49,438	427,479	57,804	851,988	1,562,553
12月	20,151	369,137	288,879	658,016	35,142	72,543	242,287	44,291	397,852	51,983	844,098	1,522,265
'16年 1月	19,652	384,132	272,319	656,451	31,459	68,014	236,824	40,581	476,198	60,238	913,314	1,589,417
2月	20,714	381,932	292,531	674,463	31,851	77,302	234,331	50,867	419,546	54,824	868,721	1,563,898
3月	20,751	402,565	304,614	707,179	34,553	81,835	226,702	47,924	449,132	68,739	908,885	1,636,815
4月	20,509	371,936	284,602	656,538	33,144	72,342	208,460	41,618	389,380	60,765	805,709	1,482,756
前月比	98.8	92.4	93.4	92.8	95.9	88.4	92.0	86.8	86.7	88.4	88.6	90.6
前年同月比	100.8	96.0	93.1	94.7	97.4	88.2	101.9	86.7	95.4	105.9	96.6	95.8

出所: 2013年12月まで『経済産業省生産動態統計』、2014年1月より経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

(注) 2014年1月より上記のとおり統計調査が変更されたため、それ以前の数値との連続性はない。

また、鋼種別合計と形状別合計は、出所が異なることから一致しない。

### 形状別

(単位: t)

年月	形鋼	棒鋼	管材	線材	鋼板	鋼帯	合計
'14 暦年	299,735	6,106,683	1,442,497	4,313,948	2,290,323	6,460,443	20,913,629
'15 暦年	270,761	5,828,923	1,081,718	4,123,192	1,508,876	6,073,343	18,886,813
'14 年度	304,098	6,106,807	1,393,173	4,234,850	2,176,351	6,393,357	20,608,636
'15 年度	269,744	5,701,404	1,009,207	4,171,024	1,580,711	6,091,727	18,823,817
'15. 4-6月	62,075	1,483,772	242,195	1,058,712	405,789	1,425,162	4,677,705
7-9月	56,400	1,411,432	249,211	1,023,200	354,025	1,561,847	4,656,115
10-12月	69,256	1,433,814	265,065	1,027,324	363,037	1,538,448	4,696,944
'16. 1-3月	82,013	1,372,386	252,736	1,061,788	457,860	1,566,270	4,793,053
'15年 3月	24,911	521,071	97,325	355,990	141,393	509,519	1,650,209
4月	13,460	478,005	94,543	341,915	146,619	474,619	1,549,161
5月	28,741	504,118	70,930	358,140	118,648	512,326	1,592,903
6月	19,874	501,649	76,722	358,657	140,522	438,217	1,535,641
7月	13,941	469,357	87,732	348,822	151,881	490,598	1,562,331
8月	14,788	457,999	88,253	328,539	103,581	503,243	1,496,403
9月	27,671	484,076	73,226	345,839	98,563	568,006	1,597,381
10月	31,802	490,424	90,332	352,020	118,758	526,848	1,610,184
11月	16,188	495,654	80,439	345,923	101,009	524,311	1,563,524
12月	21,266	447,736	94,294	329,381	143,270	487,289	1,523,236
'16年 1月	17,173	408,955	94,828	347,752	177,400	544,280	1,590,388
2月	34,629	463,368	83,439	341,773	142,082	499,578	1,564,869
3月	30,211	500,063	74,469	372,263	138,378	522,412	1,637,796
4月	28,306	461,199	77,545	331,767	108,276	476,634	1,483,727
前月比	93.7	92.2	104.1	89.1	78.2	91.2	90.6
前年同月比	210.3	96.5	82.0	97.0	73.8	100.4	95.8

出所: 『経済産業省生産動態統計』から作成。

(注) 2014年1月以降の形状別合計と鋼種別合計は、出所が異なることから一致しない。

### 特殊鋼鋼材の鋼種別販売(商社+問屋)の推移 (同業者+消費者向け)

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼							計	合計
		機械構造用炭素鋼	合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'14 暦年	317,333	3,825,877	4,085,067	7,910,944	266,107	471,325	3,031,187	190,197	120,507	39,810	4,119,133	12,347,410	
'15 暦年	315,222	3,799,665	4,044,736	7,844,401	251,940	451,168	3,015,291	172,597	122,078	35,288	4,048,362	12,207,985	
'14 年度	315,143	3,796,580	4,075,391	7,871,971	241,867	459,359	3,036,399	185,102	126,093	28,652	4,077,472	12,264,586	
'15 年度	319,413	3,811,785	4,049,269	7,861,054	265,198	443,260	3,005,738	169,510	114,666	35,504	4,033,876	12,214,343	
'15年 8月	23,573	290,661	325,257	615,918	24,342	32,818	238,406	13,075	8,847	2,611	320,099	959,590	
9月	27,576	316,124	333,382	649,506	23,336	37,054	250,983	16,366	10,196	2,938	340,873	1,017,955	
10月	28,059	323,886	343,500	667,386	21,719	36,836	257,220	14,408	10,502	3,419	344,104	1,039,549	
11月	27,356	320,940	336,537	657,477	20,522	36,278	251,142	14,763	8,811	3,241	334,757	1,019,590	
12月	25,926	316,011	330,174	646,185	19,968	35,926	249,879	15,009	8,608	2,921	332,311	1,004,422	
'16年 1月	26,085	305,692	331,670	637,362	17,528	34,783	245,768	11,422	8,718	2,930	321,149	984,596	
2月	26,623	316,755	339,371	656,126	22,885	36,233	254,888	14,533	9,173	2,368	339,700	1,022,449	
3月	28,995	329,306	346,236	675,542	21,170	38,022	261,712	17,125	8,899	3,706	350,634	1,055,171	
4月	26,836	340,236	350,650	690,886	20,230	37,488	258,886	16,358	11,488	2,983	347,433	1,065,155	
前月比	92.6	103.3	101.3	102.3	95.6	98.6	98.9	95.5	129.1	80.5	99.1	100.9	
前年同月比	103.6	105.2	103.1	104.1	96.0	99.3	104.3	128.0	101.2	93.0	103.9	104.0	

出所: 経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から作成。

### 特殊鋼熱間圧延鋼材の鋼種別メーカー在庫の推移

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼							計	合計
		機械構造用炭素鋼	合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'14 暦年	10,503	226,316	135,782	362,098	22,297	37,890	122,870	31,045	186,664	33,489	434,255	806,856	
'15 暦年	8,514	219,348	126,553	345,901	26,641	37,142	126,895	26,973	173,408	26,569	417,628	772,043	
'14 年度	8,552	212,735	120,601	333,336	24,229	35,151	116,398	25,803	181,594	33,355	416,530	758,418	
'15 年度	6,741	212,593	129,143	341,736	25,337	35,403	107,219	24,867	151,569	34,374	378,769	727,246	
'15年 8月	7,459	229,677	137,164	366,841	27,642	35,589	115,943	29,603	193,178	33,021	434,976	809,276	
9月	7,097	221,675	124,068	345,743	24,333	38,201	122,128	29,968	213,900	40,904	469,434	822,274	
10月	8,191	209,341	122,260	331,601	27,619	40,153	112,254	26,221	179,107	34,112	419,466	759,258	
11月	8,801	229,466	128,195	357,661	24,247	39,018	121,157	29,776	174,174	36,335	424,707	791,169	
12月	8,514	219,348	126,553	345,901	26,641	37,142	126,895	26,973	173,408	26,569	417,628	772,043	
'16年 1月	8,899	237,378	137,557	374,935	26,768	36,930	123,303	28,254	193,991	31,746	440,992	824,826	
2月	8,035	238,580	147,509	386,088	24,796	38,452	123,844	31,722	188,488	38,181	445,483	839,606	
3月	6,741	212,593	129,143	341,736	25,337	35,403	107,219	24,867	151,569	34,374	378,769	727,246	
4月	7,860	223,881	129,602	353,483	28,186	33,342	109,401	25,890	156,042	41,889	394,750	756,093	
前月比	116.6	105.3	100.4	103.4	111.2	94.2	102.0	104.1	103.0	121.9	104.2	104.0	
前年同月比	99.1	101.5	100.8	101.2	123.8	103.3	99.7	99.1	92.4	118.6	99.9	100.5	

出所: 2013年12月まで『経済産業省生産動態統計』、2014年1月より経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

(注) 2014年1月より上記のとおり統計調査が変更されたため、それ以前の数値との連続性はない。

### 特殊鋼鋼材の流通在庫の推移 (商社+問屋)

(単位:t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼							計	合計
		機械構造用炭素鋼	合金鋼	計	ばね鋼	軸受鋼	ステンレス鋼	快削鋼	高抗張力鋼	その他			
'14 暦年	53,199	201,643	148,119	349,762	11,009	52,983	140,388	14,860	10,308	1,767	231,315	634,276	
'15 暦年	61,896	202,211	146,758	348,969	13,423	52,972	134,135	11,968	11,624	1,683	225,805	636,670	
'14 年度	58,240	210,206	147,346	357,552	12,927	49,435	140,051	13,509	10,900	1,581	228,403	644,195	
'15 年度	61,699	200,931	139,603	340,534	13,258	53,426	135,679	14,121	11,473	1,763	229,720	631,953	
'15年 8月	59,942	205,556	141,265	346,821	11,467	52,669	133,509	13,365	10,879	1,440	223,329	630,092	
9月	59,548	206,860	141,705	348,565	12,376	54,281	139,417	13,910	10,921	1,508	232,413	640,526	
10月	58,944	206,238	141,042	347,280	12,450	52,892	136,494	14,323	11,396	1,677	229,232	635,456	
11月	59,920	206,589	140,426	347,015	12,510	52,179	132,827	12,431	11,388	1,686	223,021	629,956	
12月	61,896	202,211	146,758	348,969	13,423	52,972	134,135	11,968	11,624	1,683	225,805	636,670	
'16年 1月	64,189	204,161	142,374	346,535	12,863	51,280	135,861	14,213	11,475	1,723	227,415	638,139	
2月	64,109	200,964	139,898	340,862	13,069	51,051	135,133	13,986	11,545	1,666	226,450	631,421	
3月	61,699	200,931	139,603	340,534	13,258	53,426	135,679	14,121	11,473	1,763	229,720	631,953	
4月	60,103	193,718	134,767	328,485	12,230	50,775	130,361	13,763	11,188	1,643	219,960	608,548	
前月比	97.4	96.4	96.5	96.5	92.2	95.0	96.1	97.5	97.5	93.2	95.8	96.3	
前年同月比	102.1	86.9	96.2	90.5	100.4	104.1	95.7	106.6	105.9	129.1	99.1	94.5	

出所: 経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から作成。

## 特殊鋼鋼材の輸出入推移

### 輸出

(単位：t)

年月	工具鋼	構造用鋼			特殊用途鋼				その他の鋼			特殊鋼鋼材合計
		機械構造用炭素鋼	構造用合金鋼	計	ばね鋼	ステンレス鋼	ピアノ線材	計	高炭素鋼	その他合金鋼	計	
'14 暦年	52,548	499,166	590,092	1,089,258	191,603	1,152,266	151,020	1,494,889	13,742	6,189,852	6,203,594	8,840,290
'15 暦年	57,172	445,437	540,719	986,156	188,707	1,052,226	129,239	1,370,172	11,388	5,291,875	5,303,263	7,716,762
'14 年度	69,904	507,842	583,116	1,090,958	184,341	1,157,029	142,126	1,483,496	13,457	6,085,408	6,098,865	8,743,223
'15 年度	39,898	415,754	516,291	932,045	186,734	1,009,771	141,761	1,338,266	10,648	5,375,494	5,386,142	7,696,351
'15年 7月	3,380	36,450	39,906	76,357	18,360	98,095	8,028	124,483	715	438,241	438,956	643,176
8月	2,870	31,803	37,619	69,422	18,319	84,737	11,395	114,451	782	458,715	459,497	646,241
9月	3,280	32,412	41,495	73,907	17,718	86,003	8,414	112,135	946	377,277	378,223	567,545
10月	3,802	38,841	42,835	81,676	14,710	85,711	15,126	115,547	1,180	443,638	444,818	645,842
11月	3,022	32,900	41,949	74,849	14,656	68,364	6,727	89,747	871	415,945	416,816	584,433
12月	3,110	36,123	44,304	80,427	13,618	83,654	9,698	106,970	666	435,155	435,822	626,329
'16年 1月	3,142	31,332	30,060	61,392	10,436	79,237	17,041	106,714	454	449,853	450,308	621,555
2月	2,913	28,856	43,150	72,005	16,122	75,645	9,246	101,013	865	444,536	445,401	621,333
3月	3,853	34,135	47,027	81,162	15,497	89,351	15,998	120,845	949	601,841	602,791	808,651
4月	7,194	33,903	51,361	85,264	15,868	82,171	12,702	110,741	758	410,418	411,176	614,376
前月比	186.7	99.3	109.2	105.1	102.4	92.0	79.4	91.6	79.8	68.2	68.2	76.0
前年同月比	213.2	82.1	106.2	95.1	101.9	90.7	73.7	89.7	82.5	95.0	95.0	94.6

出所：財務省関税局「貿易統計」から作成。

### 輸入

(単位：t)

年月	工具鋼	ばね鋼	ステンレス鋼						快削鋼	その他の鋼			特殊鋼鋼材合計
			形鋼	棒鋼	線材	鋼板類	鋼管	計		高炭素鋼	合金鋼	計	
'14 暦年	6,417	3,475	596	12,390	14,954	164,225	15,702	207,868	84	20,344	835,935	856,279	1,074,124
'15 暦年	3,699	4,890	524	13,359	10,752	135,755	13,244	173,634	64	18,660	774,060	792,720	975,009
'14 年度	6,053	2,369	625	12,085	13,268	145,697	15,267	186,942	77	18,717	758,538	777,255	972,696
'15 年度	3,663	5,131	566	12,821	10,742	149,710	13,631	187,471	70	17,640	826,552	844,192	1,040,527
'15年 7月	303	238	50	1,129	858	11,479	1,249	14,764	16	2,176	63,628	65,804	81,124
8月	238	381	53	1,199	653	12,548	1,009	15,461	2	822	58,234	59,056	75,137
9月	246	947	40	1,187	583	9,807	1,077	12,694	18	2,913	83,621	86,534	100,439
10月	217	201	36	1,467	1,153	14,210	1,303	18,170	-	1,326	64,259	65,584	84,172
11月	299	153	53	1,031	676	10,506	1,380	13,647	-	998	71,619	72,617	86,715
12月	358	1,120	44	1,092	1,125	13,375	816	16,452	17	1,932	76,535	78,467	96,413
'16年 1月	293	209	56	878	902	13,384	1,002	16,222	-	921	84,547	85,468	102,192
2月	306	252	41	760	798	15,010	1,131	17,739	-	79	92,495	92,574	110,871
3月	449	322	93	872	1,091	17,616	1,325	20,998	17	2,692	52,982	55,674	77,460
p 4月	261	253	34	789	1,045	12,261	1,145	15,274	-	1,664	79,187	80,851	96,640
前月比	58.2	78.5	36.7	90.5	95.8	69.6	86.4	72.7	-	61.8	149.5	145.2	124.8
前年同月比	60.4	89.6	110.7	79.4	105.5	109.2	90.8	105.3	-	1,040.2	137.5	140.0	132.4

出所：財務省関税局「貿易統計」から作成。

(注) p:速報値

## 関連産業指標推移

(単位：台)

(単位：億円)

年月	四輪自動車生産		四輪完成車輸出		新車登録・軽自動車販売		建設機械生産		産業車輛生産		機械受注額	産業機械受注額	工作機械受注額
	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	うちトラック	フルドーザ	パワーショベル	フォークリフト	ショベルトラック			
'14 暦年	9,774,665	1,357,761	4,465,624	488,473	5,562,888	851,314	7,340	r 170,010	r 114,690	14,722	96,920	56,976	15,094
'15 暦年	9,278,321	1,309,749	4,578,078	466,776	5,046,510	817,234	-	r 164,166	r 115,473	12,776	100,891	54,189	14,806
'14 年度	9,590,733	1,364,318	4,490,724	r 498,061	5,297,111	831,464	7,589	r 171,448	r 114,356	14,384	97,805	60,752	16,847
'15 年度	9,187,599	1,279,403	4,582,525	447,339	4,937,734	808,174	-	157,736	114,320	12,288	101,838	54,576	13,990
'15年 7月	841,928	121,217	415,735	39,801	425,093	68,141	396	15,985	11,540	1,383	8,155	3,509	1,299
8月	605,070	86,321	322,494	35,054	327,048	54,622	-	11,732	8,323	835	7,916	4,539	1,070
9月	828,932	114,029	419,005	41,204	479,373	78,226	-	13,606	10,428	1,159	8,384	4,253	1,097
10月	813,216	111,598	416,472	38,911	380,087	63,875	-	13,464	9,544	1,154	8,918	4,209	1,031
11月	788,431	108,110	414,870	34,956	388,816	73,815	-	12,126	9,193	982	8,050	3,096	1,144
12月	749,776	98,297	411,865	35,326	369,459	60,484	-	11,871	r 8,907	894	8,130	3,815	1,072
'16年 1月	732,982	94,004	335,556	26,230	382,875	52,908	-	11,032	8,172	816	9,347	3,884	1,003
2月	r 766,898	r 105,672	369,410	35,278	r 451,328	67,852	-	12,148	8,962	850	8,487	4,574	1,019
3月	889,595	120,074	404,004	42,286	635,901	100,754	-	13,577	9,724	890	8,951	11,525	1,162
4月	643,901	88,342	369,131	33,576	324,748	54,435	-	12,120	7,587	914	7,963	2,814	992
前月比	72.4	73.6	91.4	79.4	51.1	54.0	-	89.3	78.0	102.7	89.0	24.4	85.4
前年同月比	90.3	81.1	97.2	78.0	101.6	98.7	-	85.6	80.1	82.9	91.1	111.6	73.7

出所：四輪自動車生産、四輪完成車輸出は(一社)日本自動車工業会『自動車統計月報』、

新車登録は(一社)日本自動車販売協会連合会『新車・月別販売台数(登録車)』、

軽自動車販売は(一社)全国軽自動車協会連合会『軽四輪車新車販売確報』、

建設機械生産、産業車輛生産は『経済産業省生産動態統計』、

機械受注額は内閣府『機械受注統計調査』、産業機械受注額は(一社)日本産業機械工業会『産業機械受注状況』、

工作機械受注額は(一社)日本工作機械工業会『受注実績調査』

(注) r:訂正值

特殊鋼需給統計総括表

2 0 1 6 年 4 月 分

鋼種別	月別		実数 (t)	前月比 (%)	前年 同月比(%)	1995年基準 指数(%)	
	項目						
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産		20,509	98.8	100.8	92.3	
	鋼材輸入実績		261	58.2	60.4	177.8	
	販売業者	受入計	25,240	94.9	95.0	122.7	
		販売計	26,836	92.6	103.6	131.7	
		うち消費者向	19,442	90.2	104.9	207.1	
		在庫計	60,103	97.4	102.1	166.8	
	鋼材輸出船積実績		7,194	186.7	213.2	200.9	
	生産者工場在庫		7,860	116.6	99.1	70.1	
	総在庫		67,963	99.3	101.7	144.1	
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産		656,538	92.8	94.7	120.9
鋼材輸入実績		46,847	163.0	150.2	3074.1		
販売業者		受入計	678,837	100.5	101.5	205.5	
		販売計	690,886	102.3	104.1	210.7	
		うち消費者向	464,572	102.3	104.3	217.4	
		在庫計	328,485	96.5	90.5	136.7	
鋼材輸出船積実績		85,264	105.1	95.1	503.7		
生産者工場在庫		353,483	103.4	101.2	118.1		
総在庫		681,968	100.0	95.8	126.4		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産		33,144	95.9	97.4	77.9
	鋼材輸入実績		253	78.5	89.7	-	
	販売業者	受入計	19,202	89.9	94.5	128.7	
		販売計	20,230	95.6	96.0	135.8	
		うち消費者向	4,380	108.8	96.5	35.3	
		在庫計	12,230	92.2	100.4	384.8	
	鋼材輸出船積実績		15,868	102.4	101.9	125.4	
	生産者工場在庫		28,186	111.2	123.8	87.7	
	総在庫		40,416	104.7	115.6	114.5	
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産		208,460	92.0	101.9	77.1
鋼材輸入実績		15,274	72.7	105.3	391.9		
販売業者		受入計	253,568	96.7	103.8	168.8	
		販売計	258,886	98.9	104.3	173.3	
		うち消費者向	63,452	105.6	114.2	111.3	
		在庫計	130,361	96.1	95.7	117.9	
鋼材輸出船積実績		82,171	92.0	90.7	80.8		
生産者工場在庫		109,401	102.0	99.7	74.4		
総在庫		239,762	98.7	97.5	93.0		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産		41,618	86.8	86.7	47.0
	販売業者	受入計	16,000	92.7	131.3	95.1	
		販売計	16,358	95.5	128.0	98.8	
		うち消費者向	15,902	94.8	128.3	111.8	
		在庫計	13,763	97.5	106.6	60.1	
	生産者工場在庫		25,890	104.1	99.1	115.2	
	総在庫		39,653	101.7	101.6	87.4	
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産		389,380	86.7	95.4	166.3
		販売業者	受入計	11,203	126.9	101.7	90.4
			販売計	11,488	129.1	101.2	93.0
うち消費者向			8,129	142.3	106.0	151.0	
在庫計			11,188	97.5	105.9	84.4	
生産者工場在庫		156,042	103.0	92.4	93.1		
総在庫		167,230	102.6	93.2	92.5		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産		133,107	88.4	95.5	56.8
		販売業者	受入計	37,700	85.3	94.2	304.4
			販売計	40,471	97.0	98.8	327.8
	うち消費者向		36,544	97.7	98.8	678.9	
	在庫計		52,418	95.0	104.7	395.6	
	生産者工場在庫		75,231	107.8	111.3	44.9	
	総在庫		127,649	102.1	108.5	70.6	
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計		1,482,756	90.6	95.8	110.0
		鋼材輸入実績計		96,640	124.8	132.4	1221.9
		販売業者	受入計	1,041,750	98.7	101.8	182.2
販売計			1,065,155	100.9	104.0	187.2	
うち消費者向			612,421	102.1	105.4	181.9	
在庫計			608,548	96.3	94.5	137.6	
鋼材輸出船積実績計		614,376	76.0	94.6	183.1		
生産者工場在庫		756,093	104.0	100.5	99.2		
総在庫		1,364,641	100.4	97.8	113.3		

出所: 鋼材輸入実績及び鋼材輸出船積実績は財務省関税局『貿易統計』、

それ以外は経済産業省『経済産業省生産動態統計』、『鉄鋼生産内訳月報』、但し総在庫は特殊鋼倶楽部で計算

(注) 1.熱間圧延鋼材生産、生産者工場在庫及び総在庫は、2014年1月より『経済産業省生産動態統計』から『鉄鋼生産内訳月報』に変更されたため、それ以前の数値との連続性はない。

2.鋼材輸入実績は速報値を掲載。構造用鋼の鋼材輸入実績とは高炭素鋼の棒鋼及び合金鋼の棒鋼、線材を加算したもの。

3.総在庫とは販売業者在庫に生産者工場在庫を加算したもの。生産者工場在庫は熱間圧延鋼材のみで、冷間圧延鋼材及び鋼管を含まない。また、工場以外の置場にあるものは、生産者所有品であってもこれを含まない。

# 倶楽部だより

(平成28年4月1日～5月31日)

## 総会 (5月31日)

- ①平成27年度事業報告について
- ②平成27年度決算報告について
- ③新任理事選任について

- ①平成27年度事業・収支報告
- ②平成28年度事業計画(案)・収支予算(案)
- ③役員人事

平成27年度会計監査 (5月23日)

## 海外委員会

- ・ステンレス鋼公正貿易連絡会 (4月15日、5月20日)

2団体共催説明会 (4月18日)

「平成28年度第1・四半期の特殊鋼需要見通し」

講師：経済産業省製造産業局鉄鋼課  
課長補佐 佐藤 淳一 氏

参加者：44名

## 市場開拓調査委員会

- ・特殊鋼PR展示アドホックWG  
高機能金属展に参加 (4月6～8日)
- ・高機能金属展参加の反省会 (4月27日)

## [名古屋支部]

運営委員会 (4月26日)

- ①平成27年度事業報告(案)・決算報告(案)について
- ②平成28年度事業計画(案)・収支予算(案)について
- ③第47回名古屋支部総会について

## 編集委員会

- ・小委員会 (4月22日)  
9月号特集「特殊鋼評価試験のやさしい解説」(仮題)の編集内容の検討
- ・本委員会 (5月11日)
  - ①7月号特集「特殊鋼評価試験のやさしい解説」(仮題)の編集方針、内容の確認
  - ②1月号以降の特集テーマ選定

人材確保育成委員会 (4月8日)

- ①新事業(新入・若手社員研修)について
- ②平成28年度人材確保育成事業について

## 流通委員会

- ・工具鋼分科会 (5月13日)
- ・説明会 (4月5日)  
「平成28年度第1・四半期の特殊鋼需要見通し」  
講師：経済産業省製造産業局鉄鋼課  
課長補佐 成瀬 輝男 氏  
参加者：35名

## 部会

- 工具鋼部会 (4月21日)
- 構造用鋼部会 (4月22日)
- ステンレス鋼部会 (4月27日)

二団体共催：新入社員研修 (4月27日)

- ①大同特殊鋼(株)知多工場見学
- ②講義Ⅰ：特殊鋼の知識  
講師：大同特殊鋼(株) 多田 雅人 氏
- ③講義Ⅱ：社会人としての基礎マナー  
受講者 70名

中国特鋼企業協会来訪 (4月11日)

## [大阪支部]

運営委員会 (5月22日)

# 一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覽

(社名は50音順)

<p>[会 員 数]</p> <p>(正 会 員)</p> <p>製造業者 24社</p> <p>販売業者 100社</p> <p>合 計 124社</p>	【販売業者会員】		
<p><b>【製造業者会員】</b></p> <p>愛 知 製 鋼 (株)</p> <p>秋 山 精 鋼 (株)</p> <p>(株)川口金属加工</p> <p>(株)神 戸 製 鋼</p> <p>合 同 製 鐵 (株)</p> <p>山 陽 特 殊 製 鋼 (株)</p> <p>J F E ス チ ール (株)</p> <p>J X 金 属 (株)</p> <p>下 村 特 殊 精 工 (株)</p> <p>新 日 鐵 住 金 (株)</p> <p>新 日 鐵 住 金 ス テ ン レ ス (株)</p> <p>大 同 特 殊 鋼 (株)</p> <p>高 砂 鐵 工 (株)</p> <p>東 北 特 殊 鋼 (株)</p> <p>日 新 製 鋼 (株)</p> <p>日 本 金 属 (株)</p> <p>日 本 高 周 波 鋼 業 (株)</p> <p>日 本 精 線 (株)</p> <p>日 本 冶 金 工 業 (株)</p> <p>日 立 金 属 (株)</p> <p>(株)不 二 越</p> <p>三 菱 製 鋼 (株)</p> <p>ヤ マ シ ン ス チ ール (株)</p> <p>理 研 製 鋼 (株)</p>	<p>愛 鋼 (株)</p> <p>青 山 特 殊 鋼 (株)</p> <p>浅 井 産 業 (株)</p> <p>東 金 属 (株)</p> <p>新 井 ハ ガ ネ (株)</p> <p>粟 井 鋼 商 事 (株)</p> <p>伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株)</p> <p>伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株)</p> <p>井 上 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株) U E X</p> <p>確 井 鋼 材 (株)</p> <p>ウ メ ト ク (株)</p> <p>扇 鋼 材 (株)</p> <p>岡 谷 鋼 機 (株)</p> <p>カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株)</p> <p>兼 松 (株)</p> <p>兼 松 ト レ ー デ ィ ン グ (株)</p> <p>(株)カ ム ス</p> <p>(株)カ ワ イ ス チ ール</p> <p>川 本 鋼 材 (株)</p> <p>北 島 鋼 材 (株)</p> <p>ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株)</p> <p>ケ ー ・ ア ン ド ・ アイ 特 殊 管 販 売 (株)</p> <p>小 山 鋼 材 (株)</p> <p>佐 久 間 特 殊 鋼 (株)</p> <p>櫻 井 鋼 鐵 (株)</p> <p>佐 藤 商 事 (株)</p> <p>サ ハ シ 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株)三 悦</p> <p>三 協 鋼 鐵 (株)</p> <p>三 京 物 産 (株)</p> <p>三 興 鋼 材 (株)</p> <p>三 和 特 殊 鋼 (株)</p> <p>J F E 商 事 (株)</p> <p>芝 本 産 業 (株)</p> <p>清 水 金 属 (株)</p> <p>清 水 鋼 鐵 (株)</p> <p>神 鋼 商 事 (株)</p> <p>住 友 商 事 (株)</p>	<p>大 同 興 業 (株)</p> <p>大 同 D M ソ リ ュ ー シ ョ ン (株)</p> <p>大 洋 商 事 (株)</p> <p>大 和 興 業 (株)</p> <p>大 和 特 殊 鋼 (株)</p> <p>(株)竹 内 ハ ガ ネ 商 行</p> <p>孟 鋼 鉄 (株)</p> <p>田 島 ス チ ール (株)</p> <p>辰 巳 屋 興 業 (株)</p> <p>千 曲 鋼 材 (株)</p> <p>(株)テ ク ノ タ ジ マ</p> <p>(株)鐵 鋼 社</p> <p>デ ル タ ス テ ー ール (株)</p> <p>東 京 貿 易 金 属 (株)</p> <p>(株)東 信 鋼 鉄</p> <p>特 殊 鋼 機 (株)</p> <p>豊 田 通 商 (株)</p> <p>中 川 特 殊 鋼 (株)</p> <p>中 野 ハ ガ ネ (株)</p> <p>永 田 鋼 材 (株)</p> <p>名 古 屋 特 殊 鋼 (株)</p> <p>ナ ス 物 産 (株)</p> <p>南 海 鋼 材 (株)</p> <p>日 金 ス チ ール (株)</p> <p>日 鉄 住 金 物 産 (株)</p> <p>日 鉄 住 金 物 産 特 殊 鋼 西 日 本 (株)</p> <p>日 本 金 型 材 (株)</p> <p>ノ ボ ル 鋼 鉄 (株)</p> <p>野 村 鋼 機 (株)</p> <p>白 鷺 特 殊 鋼 (株)</p> <p>橋 本 鋼 (株)</p> <p>(株)長 谷 川 ハ ガ ネ 店</p> <p>(株)ハ ヤ カ ワ カ ン パ ニ ー</p> <p>林 田 特 殊 鋼 材 (株)</p> <p>阪 神 特 殊 鋼 (株)</p> <p>阪 和 興 業 (株)</p> <p>日 立 金 属 商 事 (株)</p> <p>日 立 金 属 工 具 鋼 (株)</p> <p>(株)日 立 ハ イ テ ク ノ ロ ジ ー ズ</p>	<p>(株)平 井</p> <p>(株)フ ク オ カ</p> <p>藤 田 商 事 (株)</p> <p>古 池 鋼 業 (株)</p> <p>(株)ブ ル ー タ ス</p> <p>(株)堀 田 ハ ガ ネ</p> <p>(株)マ ク シ ス コ ー ポ レ ー シ ョ ン</p> <p>松 井 鋼 材 (株)</p> <p>三 沢 興 産 (株)</p> <p>三 井 物 産 (株)</p> <p>三 井 物 産 ス チ ール (株)</p> <p>(株)メ タ ル ワ ン</p> <p>(株)メ タ ル ワ ン チ ュ ー プ ラ ー</p> <p>(株)メ タ ル ワ ン 特 殊 鋼</p> <p>森 寅 鋼 業 (株)</p> <p>(株)山 一 ハ ガ ネ</p> <p>山 進 産 業 (株)</p> <p>ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株)</p> <p>山 野 鋼 材 (株)</p> <p>陽 鋼 物 産 (株)</p> <p>菱 光 特 殊 鋼 (株)</p> <p>渡 辺 ハ ガ ネ (株)</p>

## “特集” 編集後記

特殊鋼市場と比較すると百分の一程度の金属粉末は、従来の主な用途が焼結部材であったこともあり、読者の皆様には馴染みの薄い業界であったかと存じます。近年では、多様な成形法が開発され、自動車業界から電子部品業界まで幅広く金属粉末が使用されるようになってきています。本誌でも、これまでに数回特集されていますが、前回特集の2008年から既に8年が経過しております。今回の特集では、新技術・新市場をご紹介しますとともに、アトマイズの基礎知識も織り交ぜ、金属粉末についてよりご理解を深めていただけるよう編集しました。

特に注目されている金属3Dプリンタについては、各種造形方式のメカニズムとそれぞれの特長、また、適用例として金型、航空宇宙分野について詳しくご紹介していただきました。3Dプリンタは2013年、米国の一般教書演説でオバマ大統領が、これまでの製造業にイノベーションをもたらす画

期的造形法として取り上げたこともあり、世界的に大きなブームとなっております。日本でも、2014年に発足された、経済産業省の国家プロジェクト 技術研究組合「次世代3D積層造形技術総合開発機構：TRAFAM」が主体となり、金属3Dプリンタの技術・設備開発および最適金属粉末の開発を進めていただいております。

このチャンスを活かし、読者の皆様のお力添えも得て、ブームを実需につなげていき、新たな市場を創生していくことが、我々金属粉末に携わる者の使命であると認識しております。

最後になりましたが、本特集号の編集に際し、快くご寄稿をいただきました執筆者の皆様、編集委員会での活発な議論をいただいた編集委員の皆様および事務局各位にこの場をお借りして厚く御礼申し上げます。

〔山陽特殊製鋼(株) おおたに ひろあき〕  
粉末事業部 大谷 浩昭

## 特 集／特殊鋼に要求される特性とその評価方法

- I. 総論
- II. 各特殊鋼製品の評価試験とその適用
- III. 会員メーカーの新しい評価試験技術

11月号特集予定…世の中で活躍する特殊鋼

## 特 殊 鋼

第 65 卷 第 4 号  
© 2 0 1 6 年 7 月  
平成28年6月25日 印 刷  
平成28年7月1日 発 行

定 価 1,230円 送 料 100円  
1年 国内7,300円 (送料共)

発 行 所  
一般社団法人 特 殊 鋼 倶 楽 部  
Special Steel Association of Japan

〒103-0025 東京都中央区日本橋茅場町3丁目2番10号 鉄鋼会館  
電 話 03(3669)2081・2082  
ホームページURL <http://www.tokushuko.or.jp>

編集発行人 小 澤 純 夫  
印刷人 増 田 達 朗  
印刷所 レタープレス株式会社

本誌に掲載されたすべての内容は、一般社団法人 特殊鋼倶楽部の許可なく転載・複写することはできません。