

特殊鋼

2023 **5**
Vol.72 No.3
The Special Steel

特集

金属 3D プリンター技術と業界の最新動向

特殊鋼

5

目次

2023

【編集委員】

委員長	迫間 保弘 (大同特殊鋼)
副委員長	白神 哲夫 (中川特殊鋼)
委員	平地 伸吾 (愛知製鋼)
〃	斎藤 隆 (神戸製鋼所)
〃	西森 博 (山陽特殊製鋼)
〃	深瀬美紀子 (大同特殊鋼)
〃	松原 大 (日本製鉄)
〃	竹内 俊哉 (日本金属)
〃	谷井 一也 (日本高周波鋼業)
〃	吉田 統樹 (日本冶金工業)
〃	上野 友典 (プロテリアル)
〃	佐山 博信 (三菱製鋼)
〃	阿部 泰 (青山特殊鋼)
〃	高橋 秀幸 (伊藤忠丸紅特殊鋼)
〃	番場 義信 (UEX)
〃	池田 祐司 (三興鋼材)
〃	関谷 篤 (竹内ハガネ商行)
〃	平井 義人 (平井)

【特集／金属3Dプリンター技術と業界の最新動向】

I. 総論 金属3Dプリンター技術の概論	近畿大学 京極 秀樹	2
II. 金属粉末を用いる金属3Dプリンターの種類と特長		
1. 造形方式		
1) パウダーベッド方式		
①レーザービームを用いたパウダーベッド方式の特徴	(株)松浦機械製作所 加納 佳明	6
②電子ビーム金属積層造形の特長と造形事例紹介	日本電子(株) 飯田 雅彦	10
2) デポジション方式 (指向性エネルギー堆積法)	ニデックマシンツール(株) 吉村 仁	13
3) バインダージェット方式	(株)パシフィックソーワ 高橋 友	16
III. 金属粉末製造技術と特長		
1. 金属3Dプリンタ用原料粉末の製造に用いられるガスアトマイズ法の特長	山陽特殊製鋼(株) 澤田 俊之	19
2. プラズマ回転電極法についての最近の研究開発動向	東北大学金属材料研究所 千葉 晶彦	22
3. 水アトマイズ法の特徴と最新動向	三菱製鋼(株) 相原 道孝	28
IV. 二次加工技術と造形適用事例		
1. 二次加工技術		
①研磨		
Drylyte®テクノロジー (乾式電解研磨装置DLyte)のご紹介、および組み合わせ研磨による表面改質について	(株)NTTデータ ザムテクノロジーズ 成川 慎一	31
②金属積層造形品の品質改善に使用されるHIP処理とは	金属技研(株) 増尾 大慈	35
③積層造形へのプラスト・ピーニング技術	新東工業(株) 辻 俊哉	38
2. 造形適用事例		
①航空宇宙分野への適用	三菱重工業(株) 橘 孝洋 三菱重工業(株) 足立 将基	42
②各種金型への適用	(株)J・3D 高田 真	45
③金属3Dプリンターの歯科医療への適用	(株)アイディエス 石野 享	50
④銅系粉末を使用した高周波加熱用コイルの3Dプリンタによる造形	電気興業(株) 今増 寿尚 電気興業(株) 大沼 悠人	54

V. わが社の製品紹介

金属3Dプリンタ用Coフリーマルエージング鋼粉末	山陽特殊製鋼(株)	澤田 俊之	57
大型品造形に対応したダイス鋼系3Dプリンタ用 金属粉末LTX™.....	大同特殊鋼(株)	井上幸一郎	58
水素精製用分離膜モジュールの御紹介	日本精線(株)	岩本 博	59
金属積層造形マルチスケール統合シミュレータ 「AM-DT」.....	(株)プロテリアル	鐘ヶ江義晴	60
“特集” 編集後記.....	山陽特殊製鋼(株)	福本 新吾	71

●一人一題：「三つのしんか」.....	佐藤商事(株)	野澤 哲夫	1
---------------------	---------	-------	---

■業界のうごき	61
---------------	----

▲特殊鋼統計資料	64
----------------	----

★倶楽部だより (2023年2月1日～3月31日)	68
---------------------------------	----

☆一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧	70
----------------------------	----

特集／「金属3Dプリンター技術と業界の最新動向」編集小委員会構成メンバー (2022年11月22日現在)

役名	氏名	会社名	役職名
小委員長	西森 博	山陽特殊製鋼(株)	東京支社部長 市場開拓・CS
特別委員	福本 新吾	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 粉末技術2G グループ長
委員	吉原 直	(株)神戸製鋼所	鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット線材 条鋼商品技術部グループ長
〃	深瀬美紀子	大同特殊鋼(株)	技術開発研究所 企画室 主任部員
〃	青山 敦司	日本製鉄(株)	棒線事業部 棒線技術部 棒線技術室 室長
〃	正能 久晴	日本金属(株)	技術部門 技術部 部長
〃	谷井 一也	日本高周波鋼業(株)	富山製造所 技術部 開発室 課長
〃	酒寄 一志	日立金属(株)	金属材料事業本部 技術部長
〃	高橋 秀幸	伊藤忠丸紅特殊鋼(株)	特殊鋼本部 前橋支店 支店長
〃	番場 義信	(株) U E X	仕入部長 兼 仕入部 仕入チームリーダー
〃	関谷 篤	(株)竹内ハガネ商行	技術部長
〃	白神 哲夫	中川特殊鋼(株)	フェロー

一人一題

「三つのしんか」

佐藤商事(株) の ざわ てつ お
代表取締役社長 野 澤 哲 夫



特殊鋼倶楽部の皆様初めまして。佐藤商事株式会社の代表取締役社長の野澤哲夫と申します。どうぞよろしくお願い申し上げます。

新型コロナウイルスが突如現れ、世界が一変してから3年が過ぎ、国内では5月から様々な規制が緩和され、ようやく平常に戻る喜びを感じています。

最近の私は健康維持のため、お酒は控えめに嗜んでおりますが、アルコール人口が減少しているとはいえ、仕事終わりなどに晩酌を楽しみにしている方も多いのではないのでしょうか。アルコールというと今は多様な種類のアルコール飲料が発売されておりますが、日本古来のアルコールと言えば、やはり日本酒ではないのでしょうか。現在、蔵元は約1,500蔵、銘柄は10,000種類を超える日本酒があるそうです。このように絶え間ない努力と熱意により生み出された日本酒を片手に、改めてコミュニケーションを活性化し、人と人とのつながりを再認識してみたいかがでしょうか（因みに最近の私はハイボールで喉を潤しております）。

さて、弊社は2030年に創立100周年を迎えます。これから7年後というとまだ少し先の将来と感じます。一方、2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、まずは最低限達成すべき目標として2030年までに2013年度比で温室効果ガスを46%削減しなければなりません。創立100周年を迎えるまでの7年と削減目標実現までの7年、同じ年月ですが、追う7年と追われる7年で、時間軸の感じ方が全く異なるため不思議な感じがします。デジタル網の発展により、SNSなどを活用した情報発信が進み、瞬時に情報が世界中に拡散される時代となり、目まぐるしい変化が起きております。取引先である自動車業界においてもEVが急速に注目され、まさに100年に一度とも言われる変化に適応していかなければなりません。EVは現在と比較して部品点数が半減する中で、今までと同じビジネスモデルでは、事業継続が立ち行かなくなる可能性があります。

そのような変化に対応するため、弊社では「三つの「しんか」」を進めております。一つ目は、前に進む「進化」、二つ目は深掘りの「深化」、三つ目は新しいことに挑戦するという意味で「新化」です（当て字です）。この三つの「しんか」を行動指針とし、今置かれている立場から、一つ上のステージで勘案する活動に取り組み、会社全体で「しんか」していこうというものです。立場が変われば視野が変わり、行動が変わり、関わる人が変わっていきます。そのようにしていけば、目まぐるしい環境の変化に順応できるとともに、まずは節目となる2030年の創立100周年を迎えることができると考えております。

企業活動を通じ、これからも特殊鋼の「しんか」に貢献できるように活動して参りますので、よろしくお願い申し上げます。

金属3Dプリンター技術と 業界の最新動向

特集

I. 総論 金属3Dプリンター技術の概論

近畿大学 次世代基盤技術研究所 京極秀樹

まえがき

アディティブ・マニュファクチャリング（Additive Manufacturing、以後AMと記述）、とりわけ金属AM技術は、鋳造や機械加工などの従来の加工法では成形できない形状や機能を有する製品を製造できるため、製品の高機能化を可能とする技術であるとともに、設計データから直接製品形状を付与できることから、製品製造のリードタイムの短縮と併せて、環境負荷低減を図る技術としても期待されている。このため、実用化製品への適用が急速に進んできており、航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野、さらには自動車分野などにおいても極めて重要な加工法となってきた。Wohlers Report 2022¹⁾によれば、表1に示すよ

表 1 金属3Dプリンターの販売台数 (2021年)¹⁾

	2021
BLT (China)	*50 (2019)
Farsoon (China)	164
AddUp (French)	*41 (2019)
Acconity (Germany)	25
EOS (Germany)	310
SLM Solutions (Germany)	65
Trumpf (Germany)	100
DMG Mori (Japan)	*28 (2019)
Matsuura (Japan)	6
Sodick (Japan)	*35 (2019)
Renishaw (UK)	*78 (2018)
GE Additive (USA)	210
Velo3D (USA)	23
Total	2,397

(出典：Wohlers Report 2022)

うに、2021年の金属3Dプリンターの販売台数は約2,400台で、ここ数年コロナ禍の影響でほとんど伸びていないが、今後大幅に伸びると予測されている。

最近の金属AM技術の進展は凄まじく、2022年11月に東京ビッグサイトで開催された日本国際工作機械見本市（JIMTOF2022）においては、金属3Dプリンターを中心としたAMエリアが併設され、多くの装置や製品が展示された。また、ドイツ・フランクフルトで開催された世界最大級の3Dプリンター展であるFormnext2022展示会においても、金属3Dプリンターを中心として展示されており、装置については大型化・高速化、さらにはカスタム化が急速に進んできており、製品についてはロケットエンジンなど航空宇宙部品をはじめとして大型部品の造形が可能となっている。一方、自動車部品などの小型部品の大量生産にも対応可能な装置となってきたり、航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野から自動車分野など幅広い分野へ適用されてきている。

また、金属3Dプリンターの機能向上だけでなく、金属AM技術に対応した金属粉末やソフトウェアの開発も盛んに行われている。材料開発については、従来から利用されているSUS316L、M2、Inconel718、Ti-6Al-4V、AlSi10Mgなどに加えて、工具鋼、高強度アルミニウム合金、純銅などの材料の造形も可能となってきた。加えて、トポロジー最適化やラティス構造作成用のソフトウェアがCADソフトウェアに付加されるとともに、AM用熱変形シミュレーションソフトウェアも開

発され、金属AM技術による製品の品質向上の一翼を担っている。加えて、モニタリング技術の開発も行われ、製品品質の安定化に寄与している。

本稿では、金属AM技術における装置の方式と特徴と併せて、最近の金属AM技術の動向について、その概要を述べる。詳細については、II以降で紹介されるので、参照願いたい。

◇ AM技術の分類と特徴^{2)~4)}

1. AM技術の分類

AM技術は、2009年にASTM F42 委員会により、「a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer, as opposed to subtractive manufacturing methodologies」とされ、3次元造形体を作るために一層一層積み上げていく加工法と定義され、7つのカテゴリーに分類された。我が国においては、ASTMならびにISOの規定による7つのカテゴリーの名称は、2020年3月に表1に示すようにJIS B 9441⁵⁾により規定され、AMは「付加製造」と呼ぶことになったが、3Dプリンティングあるいは積層造形と呼ばれることも多く、JISにおいてもこの呼称は規定されている。

金属3Dプリンターに関しては、PBF方式とDED方式が主流であるが、最近ではBJT方式が自動車用などの小型部品の大量生産用として注目されており、また装置が安価であるMEX方式も利用が拡大してきている。

2. AM技術の主な特徴

金属AM技術の主な特徴は次の通りである。

- (1) 従来の加工法では成形できない形状や機能を付与できる。例えば、トポロジー最適化設計した三次元複雑形状やラティス構造により製品の軽量化などの機能を付与できる。
- (2) 一体化製造が可能。例えば、20個の部品を一体化したジェットエンジンの燃料噴射ノズルの例がよく挙げられる。これにより、製造プロセス及び製造期間を大幅に短縮できるとともに、接合部が少ないために製品の寿命を大幅に延ばすことができる。
- (3) 製品の設計・製造のリードタイムを大幅に短縮できる。

このように、金属AM技術は、従来の加工法では難しい高機能の製品を製造できるとともに、生産効率の大幅な向上を図ることができる。

◇ 金属AM技術の動向^{6), 7)}

1. 装置開発の動向

AMPower社の報告を参考として、金属AM技術の現状を技術的成熟度と工業化を指標としたマップを図1に示す。これによれば、レーザーPBF (PBF-LB) は、すでに技術的成熟度が非常に高く、広く工業製品製造に利用されており、電子ビームPBF (PBF-EB) は、技術的成熟度が高く、工業製品に利用されている。粉末を用いたレーザーDED (DED-LB) は、技術的成熟度はかなり高く、工業的に利用されているが、ワイヤを用いたDED-LB

表 2 付加製造 (AM) の分類 (JIS B 9441による)⁵⁾

用語	定義	対応英語
結合剤噴射、バインダージェット	液状の結合剤を選択的に供給して、粉体材料を結合するプロセス	binder jetting (BJT)
指向性エネルギー堆積	集束させた熱エネルギーを利用して材料を溶融し、結合し、堆積させるプロセス	directed energy deposition (DED)
材料押出	ノズル又はオリフィスから材料を押出し、選択的に供給するプロセス	material extrusion (MEX)
材料噴射、マテリアルジェット	造形材料の液滴を選択的に堆積するプロセス	material jetting (MJT)
粉末床溶融結合、パウダーベッドフュージョン	熱エネルギーを利用して粉末床を選択的に溶融凝固するプロセス	powder bed fusion (PBF)
シート積層	シート状の材料を積層し、層間を結合して造形物を形成するプロセス	sheet lamination (SHL)
液槽光重合	容器内の液体光硬化性樹脂を光重合によって選択的に固化するプロセス	Vat photopolymerization (VPP)

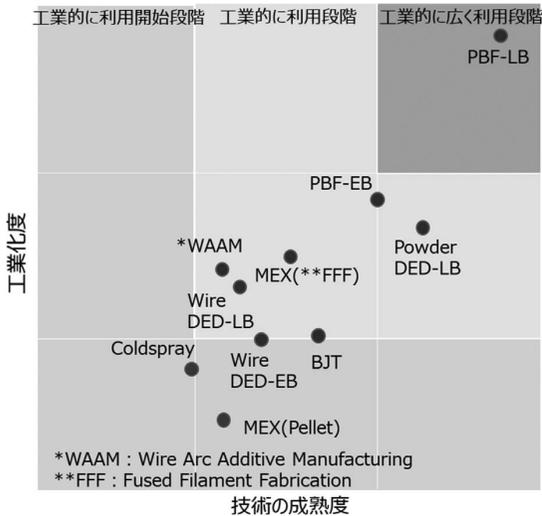


図 1 金属AM技術の技術的成熟度と工業化度のマップ
(参考出典 : <https://www.metal-am.com/ampower-report-2022-shows-additivemanufacturing-growth/>)

および電子ビーム (DED-EB) は、まだ技術的課題があり、工業化の緒に就いた段階である。また、最近注目されているアークを熱源としてワイヤを利用したWAAM (Wire Arc Additive Manufacturing) は、新たな装置開発も行われているが、ワイヤDEDと同じく開発段階にある。BJTは、新たに大手メーカーが装置開発を行ったことから、工業的にも利用段階に入ったところである。フィラメントを用いたMEX (FFF) は、すでに多くの装置販売が行われており、技術的成熟度と工業化度もかなり高い。ペレットを使ったMEXは、まだ技術的課題もあり、開発の余地がある。

2. PBF方式

PBF方式は、熱源がレーザーか電子ビームかによって、その特徴が異なり、レーザーは基本的に光 (電磁波) であるので材料によって吸収率が異なるため、材料の制約を受けやすい。2000年代の半ばから波長 $1.07\mu\text{m}$ 程度の高出力のファイバーレーザーが実用化され、アルミニウム合金の造形が可能となり、最近では 1kW の高出力ファイバーレーザーの開発や波長の短いグリーンレーザーあるいはブルーレーザーの開発により、これまで難しかった純銅の造形も可能となっている。これに対して、電子ビームでは材料の影響はあまり受けず、TiAlなどの高融点材料の造形も可能である。

PBF-LB方式では、PBF-EB方式より細かな粉末

を使用することや溶融現象の違いから、三次元複雑形状品の造形が可能で、表面粗さや精度もよいのが特徴である。しかし、PBF-LB方式では、ベースプレートの加熱温度が低いことから残留応力が大きいものに対して、PBF-EB方式ではパウダーベッドの予備加熱により高温で仮焼結状態にして造形することから残留応力が小さいのが特徴である。

装置開発動向を見ると、PBF装置は航空宇宙分野やエネルギー・産業機器分野の大型製品を対象とすることが多いことから、装置は大型化・高速化に向かっている。一方で、自動車分野などの小型大量生産を目指した取り組みもあり、PBF-LB方式の特徴を生かした製品の高精度化・高機能化を目指した装置開発も行われている。大型および高速造形への要求に対しては、レーザーの高出力化 ($\sim 1\text{kW}$) とマルチ化により対応しており、現在、最も高速造形可能な装置は、SLM Solutions社が開発した $600\times 600\times 600\text{mm}^3$ の造形体積を有する12本のレーザーを備えた大型装置で、造形速度 $1,000\text{cc/h}$ を有している。これに対して、高精度化・高機能化に対しては、TRUMPF社による純銅および銅合金向けのグリーンレーザーを搭載した装置、Velo3D社によるサポートレス造形が可能など高機能化した装置が開発されている。

適用材料についてみると、従来から利用されているAlSi10Mg、ステンレス鋼、インコネル718、Ti-6Al-4Vなどの合金に加えて、高強度アルミニウム合金 (ジュラルミンやScalmalloy)、工具鋼 (H13)、純銅など新たな材料の造形も可能となってきており、適用範囲がますます拡大してきている。

3. DED方式

DED方式については、従来熱源はレーザー、材料は粉末の組合せの装置がほとんどであったが、図2に示すように、レーザーあるいは電子ビームとワイヤの組合せ、溶接の肉盛りと同様にアーク放電とワイヤの組合せによるWAAM、さらには溶射技術である粉末によるコールドスプレーの装置開発も盛んに行われている。DED方式は基本的に単純形状の大型構造物の造形に向いており、基本的に切削などの後加工が必要となることから、切削と組合わせたハイブリッド装置も早くからDMG森精機 (株) により開発されている。

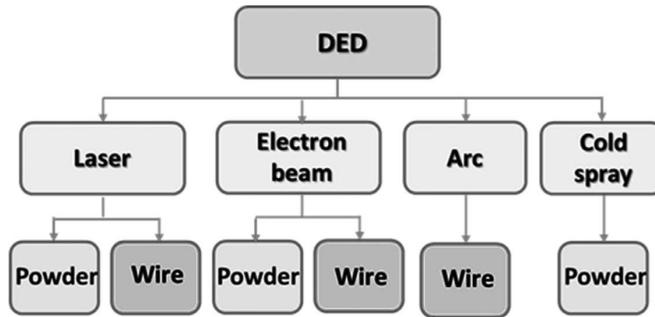


図 2 DEDの分類⁷⁾

最近では、大型構造部材だけでなく、タービンブレードの補修、純銅と銅を組み合わせたマルチマテリアルの製品にも利用されてきている。

4. BJT方式およびMEX方式

上述したPBFおよびDED方式は、溶融凝固現象を利用した造形法であるのに対して、BJTおよびMEX方式は焼結現象を利用した造形法であるため、自ずと密度や組織が異なることから造形体の特性も異なる。後者の方式は、基本的に小型製品を造形するのに利用され、BJTは自動車部品などの大量生産向き、MEXは治工具などの少量生産向きである。BJTに関しては、2022年に新たにHP社ならびにGE Additive社が参入し、造形体の相対密度99.9%以上の造形が可能となり、新たなステージに入り自動車分野などへの適用が進むものと考えられる。

BJTおよびMEX方式とも適用材料は広がっており、PBF方式では造形が難しい、超硬合金の適用も可能となっている。

むすび

これまで述べてきたように、最近の金属AM技術の進展は目覚ましく、金属AM技術の方式もPBFやDEDに加えて、BJTやMEXによる複雑製

品の造形が可能となってきたため、適用方式の選択により製品形状および材質とも適用範囲が大幅に拡大してきている。このため、本技術により製品の高機能化を図るとともに、製品製造のリードタイムを大幅に短縮してコストダウンを図ることが可能で、デジタル化を踏まえた“モノづくり”における必須の技術となってきた。加えて、経済安全保障の観点からも、とりわけ金属AM技術は極めて重要な加工技術の一つとなってきた。

本稿が、読者の皆様の参考となれば、幸いである。

参考文献

- 1) Wohlers Reort 2022, Wohlers Associates Inc. (2022)
- 2) 京極秀樹、池庄司敏孝、図解金属3D積層造形のきそ、日刊工業新聞社 (2017)
- 3) 技術研究組合次世代3D積層造形総合開発機構編、設計者・技術者のための金属積層造形技術入門”、ウィザップ (2016)
- 4) I. Gibson, et al., Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing, Springer (2010)
- 5) 日本産業規格、付加製造 (AM)一用語及び基本的概念、日本規格協会 (2020)
- 6) 京極秀樹、機械技術、70 (13) (2022) 28-31
- 7) 京極秀樹、工業材料、70 (4) (2022) 8-12

Ⅱ. 金属粉末を用いる 金属3Dプリンターの種類と特長

1. 造形方式

1) パウダーベッド方式

①レーザービームを用いた パウダーベッド方式の特徴

(株) 松 浦 機 械 製 作 所 か の う よ し あ き
技術本部 開発研究 マネージャー 加 納 佳 明

まえがき

当社は、1935年創業の工作機械メーカーであり、立形マシニングセンタをはじめとした、横形、5軸機、5軸複合機、リニアモータ機などの中小型機をラインナップし、変種変量生産を得意とする多数のオプションを展開している。本題である金属3Dプリンターは、産学官の連携により1998年より開発を開始し、2003年に量産機の販売をスタートさせた。ここでは当社が採用したレーザービームを熱源とするパウダーベッド方式について、その工法や特徴について述べたい。

◇ パウダーベッド方式（レーザービーム方式）

「パウダーベッド方式（Powder Bed Fusion）」は、日本語で表現すると「粉末床溶融結合法」と

いい、テーブル上に材料となる粉末を一層分敷き、予めプログラムされた箇所を熱源により溶融または焼結し（以下、造形という）、材料を溶融・凝固させる工法である。一層の造形が完了するとテーブルが一層分下がり、リコータと呼ばれる粉末供給装置によって新たな粉末層が形成される。この「テーブルを下げる」、「材料粉末を敷く」と「熱源による溶融・凝固」という一連の動作を製造対象となる3Dモデルのスライスデータに対して繰り返し実行する事で、立体形状を製造する（以下、造形工程という）。

ただし、パウダーベッド方式と一言で表しても材料粉末の種類や溶融に使用する熱源の種類によって、その工法は更に細分化することができる。金属粉末を材料とするパウダーベッド方式では、熱源はレーザービーム（以下、L-PBFという）と

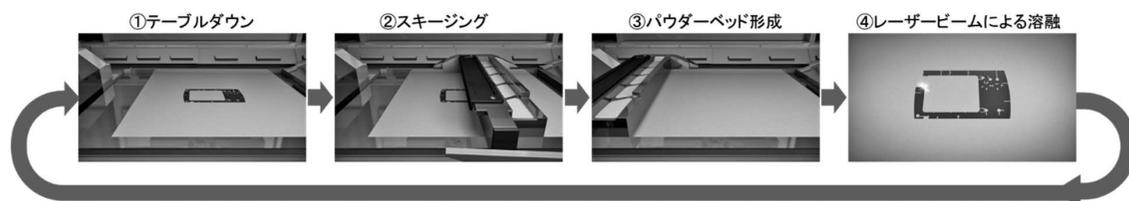


図 1 パウダーベッド方式による造形工程

電子ビームに大別される。以下にL-PBF方式を採用する装置の特徴を述べる。

当社が製造販売する金属3Dプリンター「LUMEXシリーズ」は、開発した当初は熱源にCO₂レーザーを採用していた時期がある。理由として、当時はビーム品質が高く高出力のシングルモードファイバーレーザーが市販されておらず、また低出力であってもとても高価なものであった。その後、ファイバーレーザーの技術が進歩したことで高出力化や低価格化が進み、現在では産業用レーザーの中心として様々な用途に使用されており、3Dプリンター業界においてもファイバーレーザーの採用は大きな効果をもたらした。例えば、過去に当社でも採用していたCO₂レーザーはファイバーレーザーと比較して10μmと波長が長いため、金属材料に対する熱吸収率がとても低く、加えてスポット径が小さく絞れないという欠点があった。そのため、溶融に必要なレーザーパワー密度を得るために高いレーザー出力が要求されるとともに、造形時間は長くなり、また微細な形状の造形には不向きであった。

レーザービームはガルバノミラーによって粉末層上に位置決めされ、プログラムによって特定箇所を溶融する。この溶融時におけるレーザービームの各種パラメーターの組合せを一般的に造形条件と呼び、レーザービームの出力やスポット径、走査速度、ハッチングピッチ、積層厚みなどによって構成され、造形品質に大きな影響を与える。よって、この造形条件が装置メーカーまたはユーザー固有のノウハウとなることが多い。また、この造形条件は材料粉末毎に調整が必要だけでなく、高品質な造形物を製造するためには同じ材料であっても形状毎に造形条件を準備する必要がある、一つの造形物でも数十の造形条件を使い分ける場合もある。

またL-PBF方式では、チャンバー内に不活性ガスである窒素ガスあるいはアルゴンガスを供給して低酸素濃度雰囲気下で造形を行う。これは粉塵爆発に繋がる要因の一つを除去すると同時に、材料粉末によっては溶融時に酸素と結びつくことでその造形物の物性が著しく低下することを防いでいる。

そして、機械装置としてもう一つ重要なことは

ヒュームの回収である。ヒュームとは、金属材料を溶融したときに生じる蒸気が冷却されて微粒子となったものを言い、3Dプリンターだけでなく金属アーク溶接作業などにおいてもその名が知られている。ヒュームの特徴は、粒径はサブミクロンと粉末材料のそれよりもとても小さい。そのため、容易に大気中に浮遊し身体にはとても有害であり、粉末材料やヒュームを取り扱う際には防塵マスクや保護メガネ、手袋などの装着が必須となる。また、L-PBF方式の造形においてヒュームが適切に回収されないと、レーザービームのスポット径に影響するなどして造形品質に悪影響を与える。そのため、装置メーカー各社はチャンパー内のヒュームを効率的に回収するための工夫やより安全に機械を使用頂くための対策を施している。

L-PBF方式による造形の特徴は、その他の工法と比較し微細な形状を実現できる点にある。一層の積層厚みが数十ミクロンと薄く、スポット径を小さく絞ることで微細な形状が造形可能である一方、造形時間がとても長いことが課題の一つである。

◇ LUMEXの特徴と適用事例

当社が製造販売するLUMEXはL-PBF方式を採用しているが、最大の特徴はL-PBF方式の金属3Dプリンターによる付加製造と、当社が創業以来培ってきたマシニングセンタの高速切削による除去加工の二つの技術を1台の機械に融合させた点である。L-PBF方式で製造した造形物は、レーザービームにより金属粉末を溶融・凝固した状態のため、その表面は粉末の余剰硬化によりとてもざらついており、切削加工で得られるような面粗度や寸法精度を期待することはできない。その点を克服したのがLUMEX(図2)であり、「ハイブリッド金属3Dプリンター」と呼んでいる。図3に示すのは、LUMEXで製作した造形物であり、左側は造形のみ、右側が造形と切削を実行し、装置から取り出した状態の写真である。LUMEX工程の特徴は、レーザービームによる造形工程がすべて完了した後に切削工程を実行するのではなく、造形工程と切削工程を交互に実行する点にある。この交互に造形工程と切削工程を繰り返すことで、通常は放電加工によって加工が必要な深溝が刃長



図2 LUMEXシリーズ

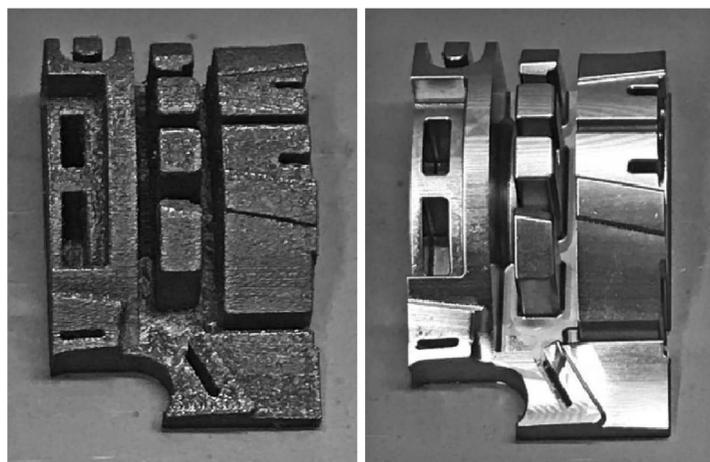


図3 LUMEXによる造形物

の短い工具で切削仕上げすることが可能となる。そのため、金型アプリケーションにおいて3Dプリンターに期待される3次元冷却水管の実現や、低密度造形によるガス抜き構造の配置だけでなく、不要な型分割の低減や放電加工レスなどの効果によるリードタイム短縮を実現することが可能である。ちなみに切削を実行するタイミングは、専用CAMであるLUMEX CAMによって任意に設定することが可能であり、標準設定では10層分の造形工程後に、切削工程を実行する。そして、切削工程が終わればまた次の造形工程が開始され、この造形・切削工程を交互に実行する。

◇ L-PBF方式の課題と最新動向

L-PBF方式を今以上に様々な産業に浸透させるために、世界中の大学や研究機関、装置メーカー、そして民間企業でも技術開発が盛んに行われているが、最も大きな課題と感じるのがコストと品質保証の問題である。

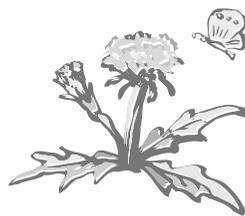
3Dプリンターという新たな工法は、従来工法では実現不可能な新しい付加価値を創造することを期待され、その部品単体またはその部品が組み込まれるユニットの高機能化、高性能化が望まれる。しかし、いくら良い製品ができたとしてもコストと性能のバランスが悪ければ商品化は困難となる。

現在のL-PBF方式による製造コストは、装置や材料粉末の価格、造形時間などの観点からすると安いものではなく、このコストに見合った部品となると、この技術を適用可能な産業は限定されているのが実情である。実際、現時点でL-PBF方式を牽引しているのは、航空・宇宙、医療、モータスポーツの分野であるが、共通していることは部品単価が高いことである。そのため、部品一個当たりの製造コストを削減するため、レーザービームを複数台搭載したマルチビームの適用や、造形速度を向上させるためのビーム成形技術の開発などが行われている。

そしてもう一つがコストにも直結する品質保証の問題である。従来工法の一つである除去加工であれば、その材料となる素材は素材メーカーが品

質を保証してくれるが、3Dプリンターは材料となる金属粉末を溶融・凝固して製品を製造するため、その造形工程における造形物の品質保証は製造者自身が行わなければならない。その保証方法としては、テストピースを同時に造形して後工程で機械特性などを評価する手法が一般的ではあるが、造形時の様々な情報のモニタリング技術が年々進化しており、L-PBF方式が普及する上で、後工程での品質確認工程をどれだけ減らせるかが重要なポイントである。

最後に、当社も装置メーカーとしてこれらの課題解決に取り組むとともに、我々自身がL-PBF方式による製造ノウハウを蓄積し、3Dプリンター市場の発展に貢献できるよう取り組んでいく所存である。



②電子ビーム金属積層造形の特長と 造形事例紹介

日本電子(株) いいだまさ彦
3D積層造形プロジェクト 飯田雅彦

まえがき

近年、次世代のものづくり技術として、欧米を中心に3D積層造形技術の実用化が進んできている。特に金属粉末を用いた3D積層造形装置（金属3Dプリンタ）での造形部品は、バルク材と変わらない機械的特性が得られることや従来工法では加工が難しい材料でも造形できることから、コストダウンや軽量化を目的として航空宇宙や医療等の産業分野への適用が進んでいる。

金属3Dプリンタは、金属粉末を溶融する熱源の違いにより、主にレーザービーム方式（L-PBF）と電子ビーム方式（EB-PBF）の2つに大別される。当社では2014年度から技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）において、電子ビーム方式の金属3Dプリンタの開発を担当し、その試作に成功した¹⁾。また、当社では金属3Dプリンタ装置の試作・改良を経て、2021年3月より産業向け金属3Dプリンタ装置『JAM-5200EBM』の販売を開始した。本稿では、それらの特徴、造形プロセスを説明するとともに、造形事例として医療向け実用部品について紹介する。

◇ 電子ビーム金属3Dプリンタ

1. 製品概要

図1（上）に当社製品の金属3Dプリンタ「JAM-5200EBM」の主な仕様を示す。本装置は熱源に電子ビームを用いたパウダーベッド方式の金属3Dプリンタ（以下EB-PBF装置と表記）である。電子ビーム方式の特徴として、高出力による高融点材料への適用、高速スキャンによる高スループット、真空下造形によるコンタミ低減、ホットプロセスによる低ひずみ、などが挙げられる。

図1（下）に、装置の主要構成を示す。電子ビー



造形方式	パウダーベッド方式
造形範囲	最大φ250mm×400mm(H)
電子ビーム出力	最大6kW
カソード寿命	1,500h以上
チャンバー圧力 (熔融時)	0.01Pa以下
導入ガス (帯電防止)	不要
造形物冷却機構	あり
粉末飛散防止機構	e-Shield
ビーム補正	自動調整(フォーカス・非点・位置歪)
供給電源	3相200V(±10%)35kVA
装置質量	4,900kg

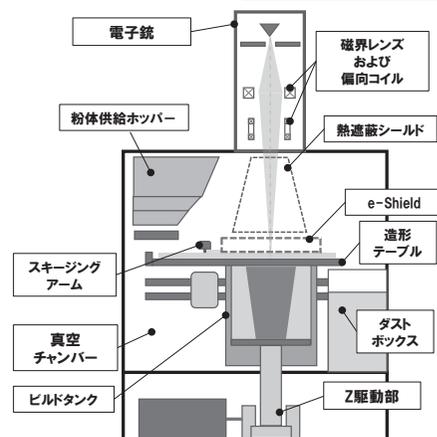


図 1 JAM-5200EBMの主な仕様（上）と主要構成図（下）

ムカラム上部の電子銃には電子源としてLaB₆カソードが搭載されている。このカソードより放出された電子ビームは、下部の磁界レンズや偏向コイルでビーム径や走査範囲が制御される。電子銃の最大出力は60kV-6kWであり、高出力・高エネルギー密度・高速な金属溶融を実現している。

真空チャンバ内は、金属粉末を定量投下する粉体供給ホッパー、ホッパーから投下された金属粉体を櫛状のブレードによって造形面へ押し出し平滑化するスキージングアーム、造形面の温度を保

温し周囲への金属蒸着を防ぐ熱遮蔽シールド、金属粉末の帯電を抑制するe-shield、造形面を昇降させるZ駆動部、造形面で溶融・仮焼結された金属粉末をZ駆動部の下降とともに収納するビルドタンク、余剰粉末を回収するダストボックスで構成されている。

◇ 造形プロセス

当社製品を含めたEB-PBF装置の一般的な造形プロセスを図2に示す。まず始めに、作製する部品の3D-CADデータをスライスデータに変換し、それを装置にセットする。本装置で造形プロセスがスタートすると、ベースプレート加熱が開始される。例えば、Ti-6Al-4V粉末を用いる場合、ベースプレートは本工程で約800℃まで加熱される。本工程が完了後、Zステージが降下し、スキージングアームによって金属粉末が運ばれ、造形テーブル上にパウダーベッドが形成される。次に、パウダーベッド上に電子ビームを照射して粉末を仮焼結させる予熱工程を実施する。この工程は、粉末を仮焼結させて電子ビーム照射による粉末の帯電を抑制すると共に、造形物内部に蓄積される熱応力を緩和する効果がある。予熱による仮焼結の形成が不十分であると、スモーク現象が発生する可能性が高まり、造形継続が困難になる。なお、予熱時の電子ビームは、わざと焦点をぼかして、エ

ネルギーが集中して造形面が溶融されることのないように制御されている。

予熱による仮焼結形成が完了した後、スライスされたモデルデータを基に電子ビームを走査して金属粉末を溶融する。溶融時の電子ビームは、予熱時に比べ焦点を合わせており、金属粉末の融点を超える温度まで加熱し、ビーム照射位置のみ選択的に溶融させている。この溶融工程が終了した後、Z移動ステージが一層分降下して次の層の造形プロセスが開始される。そして、各層毎に上述の造形プロセスを繰り返すことで、最終的に3D-CADデータと同じ3Dの構造体が造形される。

製作された造形物は、予熱工程の繰返しによって形成された仮焼結粉末に覆われている。そのため、予熱工程が存在するEB-PBF装置では、同種の金属粉末を高速に吹き付けて仮焼結体を除去するためのプラスト処理が必須となる。

◇ EB-PBF装置とL-PBF装置の比較

EB-PBF装置とL-PBF装置では、その溶融原理の違いから、EB-PBF装置の方が高い入熱効率をもつ。また一般的に、EB-PBF装置の方が高出力である。既存のL-PBF装置の場合は、複数のレーザーを搭載することで合計1kWを超える出力を実現している。それに対し、当社EB-PBF装置の出力は1つの電子銃で最大6kWであり、L-PBF装置の出力の数倍も大きい。

これらの特徴から、金属粉末を溶融する性能も電子ビームの方が高いといえる。そのためEB-PBF装置は、高融点材料やレーザーに対する反射率の高い材料（例：純銅）でも造形しやすいという利点がある²⁾。また、EB-PBF装置の造形プロセスは全て真空チャンバ内部で行われるため、L-PBF装置よりも酸素等がコンタミするリスクが少ないという利点もある²⁾。

一方で、製作される造形物の面粗度や微細形状の再現性はL-PBF装置の方が優れている。EB-PBF装置では、スモーク現象が発生しにくい比較的大きな粒径（45～105μm）の金属粉末が用いられている。対して、L-PBF装置では非常に小さな粒径（10～45μm）の粉末が使用されている。粒径が小さいほど全体の表面積が大きくなり、小さなパワーで加熱しやすくなるためである。そのため、L-PBF

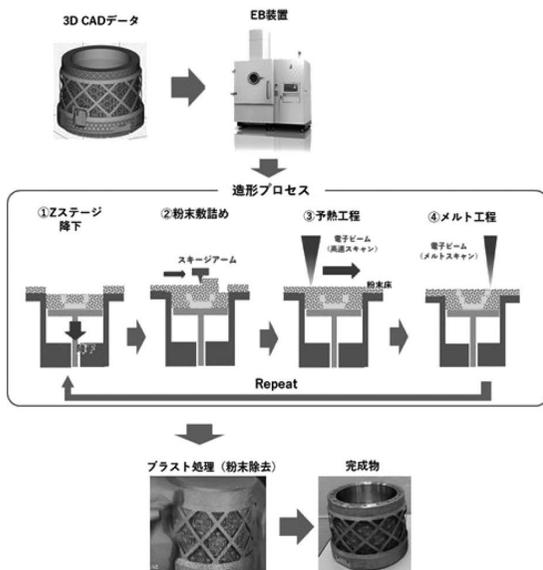


図 2 電子ビーム金属3Dプリンタの造形プロセス

装置で製作された造形物の面粗度や精細さはEB-PBF装置よりも優れている。

また、ビームスキャン速度は、L-PBF装置が数m/sであるのに対してEB-PBF装置は数1,000m/sと極めて高速である。これは、L-PBF装置のビーム偏向がガルバノミラーによる機械的制御で実行されるのに対して、EB-PBF装置のそれは電磁偏向が用いられるためである。

このように、高出力かつ高速スキャン、高い入熱効率という特性と相まって、EB-PBF装置では電子ビームを用いて造形エリア全域を効率的に加熱する予熱工程を実施している。予熱工程は、造形物の残留応力を緩和する効果があり、機械的特性の向上に寄与する他、造形プロセス中の造形物の変形を抑制することができる。L-PBF装置では、出力やスキャン速度、入熱効率の観点から、レーザーを用いた予熱を行うことは現実的ではない。ただし近年では、レーザーを用いなくて、間接的に600℃程度まで加熱できるような機構が開発されてきている。

しかし、EB-PBF装置の予熱で生成される仮焼結体はプラスト処理でしか除去できないため、小さな水管形状や複雑な形状をEB-PBF装置で造形すると、内部の粉末が除去できない場合がある。一方、予熱工程のないL-PBF装置では仮焼結を生成しないため、EB-PBF装置が製作できない入り組んだ水管や微細形状に柔軟に対応できる。そのほか、粉末除去時間が短いため、製作する形状によっては、完成品が目の前に現れるまでの時間は、EB-PBF装置とほぼ変わらない。

◇ 造形事例

図3（左）に、医療分野で実用化されている人工股関節部品を模した造形物を示す。溶融プロセスや溶融条件の改良により、 $30\mu\text{m}$ を下回る算術平均面粗さ（Sa）が得られている。この部品のメッシュ構造部のSEM像を図3（右）に示す。骨組織は、このメッシュ構造内に自然成長することで固定される³⁾。したがって、メッシュ構造は人工関節部品において重要な構造体となる。図3（右）に示したように、当社製品は、人工股関節部品に

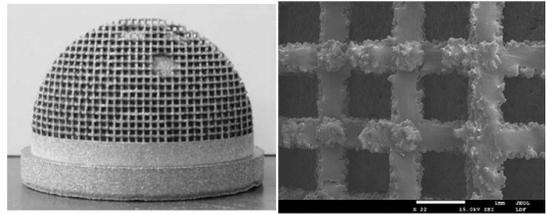


図 3 Ti-6Al-4V部品試作事例
(左) 人工股関節部品の模造品
(右) 人工股関節部品の0.5mm幅メッシュ部 SEM像

求められる1mm以下の微細なメッシュ構造体を形成可能な性能を備える。

むすび

電子ビーム方式の金属3DプリンタJAM-5200EBMは、これまで当社で培った電子ビーム制御技術によって、高品質かつ高い再現性を持つ造形を可能にした。本装置を用いることによって、従来の加工では不可能だった複雑な部品の作製、複数な部品の一体化、コンタミや欠陥の少ない高品質パーツの作製、コスト削減や開発期間の短縮が可能となる。

今後は、造形品の表面粗度の更なる向上や、電子ビーム方式の有用性が示せる材料の造形、そして、より生産効率を向上させるための周辺機器の拡充など、幅広いお客様に安心安全な装置として使用いただけるように、開発を進める予定である。

謝 辞

本技術開発は、2014年度から2016年度に実施された経済産業省委託事業「次世代型産業用3Dプリンタ技術開発及び超精密三次元造形システム技術開発」、並びに2017年度から2018年度に実施されたNEDO「次世代型産業用3Dプリンタの造形技術開発・実用化事業」によるものである。

参 考 文 献

- 1) 平成29年度 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構 ひらめきを形に！設計が変わる新しいモノづくりシンポジウム講演集、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構
- 2) Fu, Z.; Körner, C. Actual state-of-the-art of electron beam powder bed fusion. Eur. J. Mater. 2022, 2, 54-116 [CrossRef]
- 3) 内田、高橋、谷口、三家本. までりあ Vol. 38, 148-150 (1999)

2) デポジション方式（指向性エネルギー堆積法）

ニデックマシンツール(株) 吉村 仁
大型機事業部 開発第2部 開発第4Gr

まえがき

デポジション方式（指向性エネルギー堆積法 Directed Energy Deposition、略称DED）は金属粉末床が必要となるパウダーベット方式（PBF）やバインダージェット方式（BJT）とは異なり、造形箇所に直接金属材料を供給し積層する方式である。積層ノズルは造形形状に応じた積層経路上を移動するように位置制御され、ノズルより供給された金属粉末やワイヤ等の金属材料をレーザーやアークなどの熱源（指向性エネルギー）により基材（ベースとなる金属）とともに溶融・凝固させることで、任意の位置に肉盛溶接して3次元形状を造形していく方法である（図1）。

◇ デポジション方式の特徴

DEDはその積層原理から次の特徴を持っている。

- (1) 造形速度がPBFに比べ最大10倍程度速い。
- (2) 直接金属材料を供給する方式のため、コストや機能面で巨大な金属床を実現しにくいPBFやBJTのように造形サイズの制限を受けにくく、積層ノズルの可動域を拡大することで容易に大型部品の造形を実現することができる。
- (3) 既存部品に形状を付加することができる。
- (4) 造形途中に供給する金属粉末の種類を切り換え、異種金属を複層造形できる。

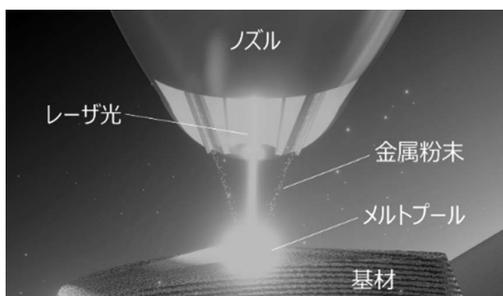


図 1 パウダDEDの原理

- (5) 複数種類の金属粉末の供給を行い、造形箇所にて混合、その際、供給割合を変化させることで、異種金属を傾斜造形可能。

一般的に金属3Dプリンタで部品を製造することで、加工治具レスや部品の一体化等による大幅な納期短縮や、従来工法より形状の自由度が上がることによる部品の高機能化等が期待できる。さらにDEDを用いることで、大型部品の適用が広がるだけでなく、既存部品への形状付加による部品強度の向上、表面コーティングによる機能向上、また損耗した部品の補修など、様々な用途への適用が期待できる。

◇ デポジション方式の積層技術

DEDは金属材料と熱源の正確な供給と照射、金属の溶融・凝固プロセスのコントロールが、高精度・高品質な金属積層造形の実現に不可欠となる。これらを実現する積層造形技術について、弊社のパウダDED方式金属3DプリンタLAMDA®の事例を紹介する。

(1) 積層ヘッド

積層ヘッドの役割は熱エネルギーであるレーザー光と金属粉末を正確に造形箇所へ供給することである。正確な供給により目論見通りの造形ビード形状を得ることが可能になるとともに、金属粉末の歩留まりも向上できる。また、金属の溶融・凝固プロセスを監視する手段を提供する役割も担っている。図2に弊社積層技術のコアである積層ヘッドの構成を示す。

レーザー光は積層ヘッドを通してノズル中心から照射され、正確に基材上に集光される。金属粉末はレーザー光の焦点位置で収束するように、ノズルを通じてレーザー光の周辺から供給される。また、レーザー光と同軸上にカメラを設置することにより、造形方向によらず金属の溶融・凝固部を真上から観察できる。

(2) 積層ノズル

積層ノズルは、粉末供給機能と、溶融部のガスシールド機能を有しており、生産性や積層品質の維持・向上において重要な役割を持つ。弊社では積層ノズルを自社開発しており、流体解析や試作を繰り返し行うことで、他社事例と比較して広範囲なシールド性能を持つノズルを開発できた。図3に弊社積層ノズルの外観、シールド性能確認結果を示す。積層ノズルは中心から不活性ガスを噴射することにより、スパッタやヒュームによる積層ヘッド内へのダメージを抑制するとともに、溶融金属が凝

固するまでの間、大気中の酸素、窒素と反応しない様、空気が入り込むことを防止し、積層物の酸化を防ぐ。特に活性金属（アルミニウム、チタン）の場合は酸素含有量増加に伴う、脆化を防ぐために、不活性ガスによるシールドが不可欠とされている。

(3) モニタリングフィードバック

DEDではレーザーで基材を溶融させながら造形する。積層条件としては、金属粉末の種類や供給量、レーザーパワー、機械軸の送り速度、アシストガス流量等があり、通常、装置使用者はこれら条件を調整し、積層をすすめなければならない。また、内部品質を確認し、最適な条件を決めても、造形物の形状や造形中の放熱による基材の冷却の程度などにより、条件が一定でも金属が溶融する程度が変化し、品質の悪化や形状が崩れる場合がある。例えば、造形中の放熱冷却よりもレーザーによる入熱が大きい場合、基材温度は徐々に上昇し入熱過大で過溶融となり造形に失敗する場合がある。DED方式での高精度造形には、溶融・凝固の適切なコントロールが装置に求められる。LAMDA®はこの課題を解決するためにモニタリングフィードバック機能を有している（図4）。レーザー光と同軸上にカメラを設け、造形中にメルトプール（溶融池）を真上から観察できるようにしている。撮影したメルトプール画像から独自の画像処理アルゴリズムを用いて造形中にその特徴量をリアルタイムに算出し、レーザーパワー制御と送り速度制御により入熱量と造形高さをコントロールする。



図 2 LAMDA®積層ヘッド

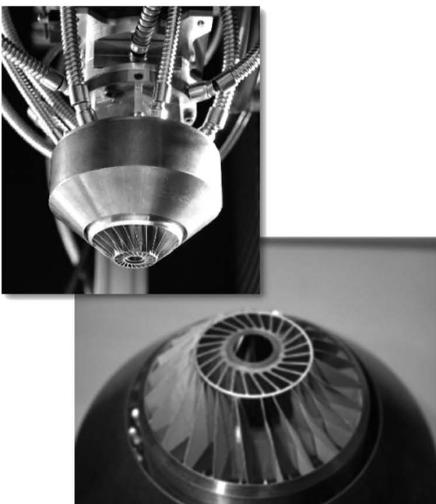
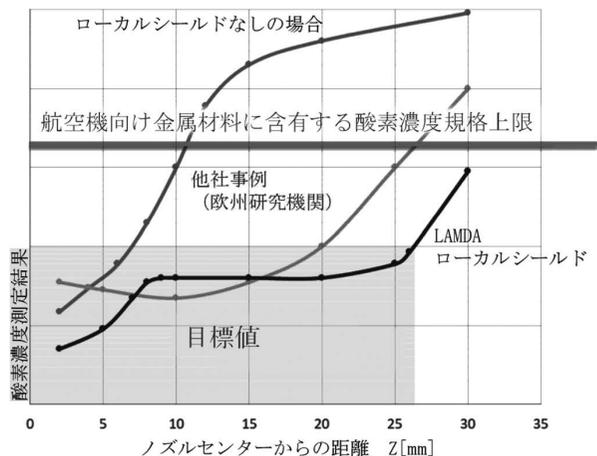


図 3 弊社積層ノズルの外観、シールド性能確認結果



◇ DED造形事例

DED方式では異種金属の複層造形や、補修造形、自由形状の造形など様々な造形が可能である。図5はロケットノズルコーンの模擬形状サンプルである。金属粉末を正確に造形位置に収束させ、モニタリングフィードバックにより入熱量を最適にコントロールすることで、外周に冷却流路を備えた複雑形状の造形を実現した。

むすび

DED方式の金属3Dプリンタは従来の加工方法では実現できなかった形状の実現や、異種金属の複層造形など従来製品の性能を大きく向上させる可能性を秘めており、産業界からの技術に対する期待が大きい。当社は今後も様々な産業分野に向けた開発と造形性能の向上に取り組んでいく。

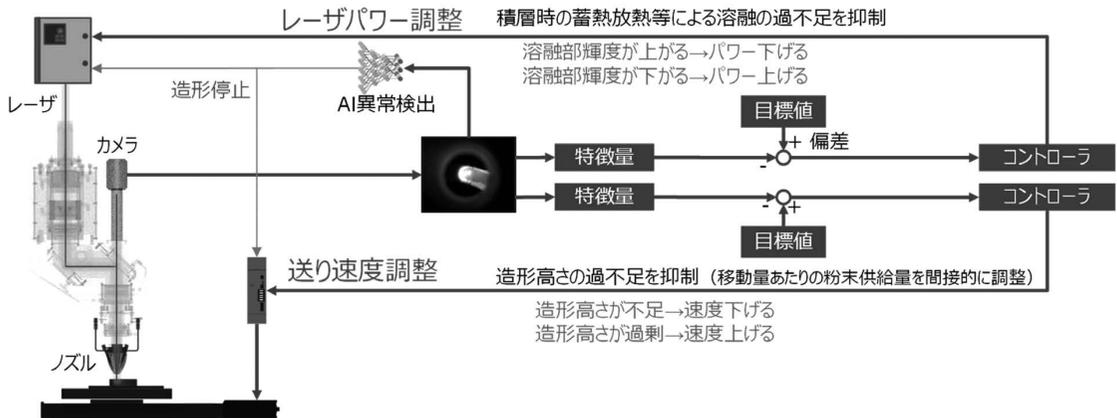


図 4 モニタリングフィードバックの仕組み

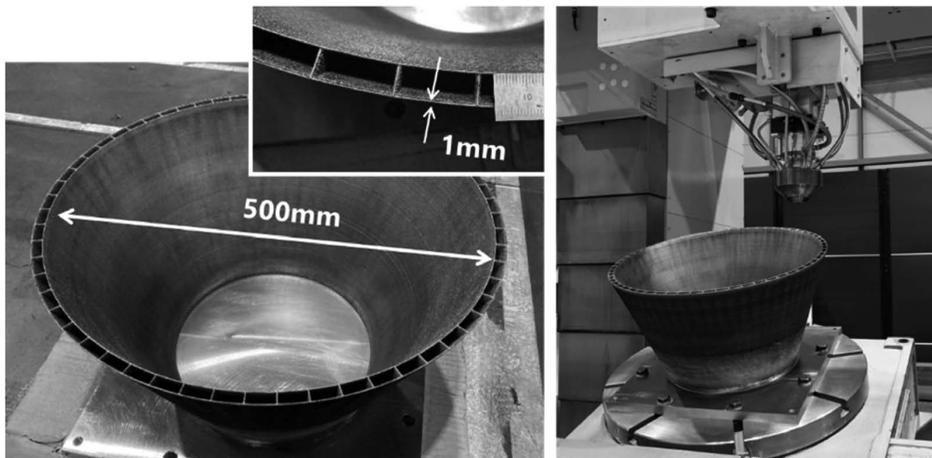


図 5 IN718ロケットノズルコーン模擬形状サンプル

3) バインダージェット方式

(株)パシフィックソーワ 営業本部 たか はし とも
ExOne 3Dチーム サブリーター 高 橋 友

◇ バインダージェット方式の概要

バインダージェット方式は1990年代初頭にマサチューセッツ工科大学で開発された金属3Dプリンタ積層造形方式の1つである。原料には金属粉末を用いており、パウダーベッドフュージョン方式(PBF方式)がレーザーや電子ビームで粉末床を溶融・固着しながら積層造形をしていくのに対し、バインダージェット方式(BJT方式)は粉末床を熱源で溶融せず、バインダーで粉末を固着させることで造形を行う。このためPBF方式は造形にて金属製品となるのに対し、BJT方式は粉末冶金法と同様に成形体を焼結するプロセスが必要となる点が異なる。BJT方式の金属製品を得るまでのプロセスは次項にて、各工程に分けて詳しく解説する。

◇ バインダージェット方式のプロセス概要

BJT方式は造形から乾燥、粉末除去、最後に焼結工程の4工程を経て金属製品を得る工法である。図1にバインダージェット方式の工程概略図を示す。

・使用原料

工程の説明の前に使用原料について解説したい。PBF方式も同じように金属粉末を使用するがその仕様は大きく異なる。PBF方式に用いられる金属

粉末は原料メーカーにて3D用粉末と言った名称で販売、もしくは3D造形装置メーカーが装置専用の標準粉末として販売している。これらの粉末は一般に平均粒径は30~60 μm 程度で、流動性を確保するため粒度分布の上下をカットしたものとなっている。現在まだ生産数量が多くないこと、粒度分布の上下カットすることで歩留まりが低くなることもあり、プロセスコストが高くなり、結果原料単価は1~2万円/Kgと高価である。

一方、BJT用粉末には、主に平均粒径10 μm 前後の金属射出成形(MIM)用原料が用いられている。PBF方式よりも平均粒径が細かい粉末を用いるのは、MIMと同様に焼結により95~99%程度の焼結相対密度を得るためである。MIM用金属粉末はすでに広く使われていることから大量生産されており、プロセスコストも安く数千円/Kgで購入可能である。しかしBJT方式においてもメーカーによっては、メーカー専用粉末が指定されている場合もある。その中でExOne(現DeskTop Metal[®])は、原料を指定しないオープンプラットフォームを打ち出しており、顧客は自由に粉末を選択可能である。この動きは徐々に広まってきており、他メーカーにおいても一部オープンプラットフォーム対応する動きが出てきている。

またBJTは造形時に金属粉末を熱源にて溶融・固着しないため、金属粉末だけでなくセラミック

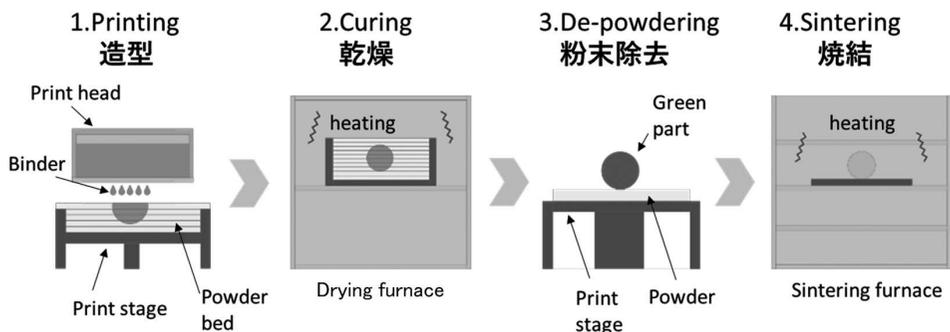


図 1 金属3D積層造形 バインダージェット方式 工程概略図

など幅広い材料に対応できることも特徴の一つである

・造形工程

BJT方式における造形プロセス概略図を図2に示す。BJT方式における造形は最初に粉末床の形成から始まる。メーカーにより多少その構造は異なるが、最初にホッパーから造形ステージに金属粉末が供給する。次にローラーもしくはスキージにて造形ステージ上に落とされた粉末が均され、粉末床が形成される。続いてプリンタヘッドよりバインダーが選択的に塗布される。最後に塗布されたバインダーの浸透・乾燥のためにヒーターにて造形ステージを温める。このサイクルを繰り返すことで、金属粉末内にバインダーで塗布された3D形状を作るところまでがBJT方式における造形となる。

・乾燥工程

バインダーが塗布された金属粉末は、造形が完了した状態では、バインダーで湿った状態であり、固まっておらずそのままでは取り出すことができない。そこで一定の温度を保つ乾燥炉に造形したボックスごと投入し、バインダー内に含まれる揮発成分を気化させる。通常乾燥は大気下で行われるが、酸化しやすい材料の場合は真空乾燥炉を用いる場合もある。実際の処理温度や乾燥時間については、メーカーやバインダーによって異なる。

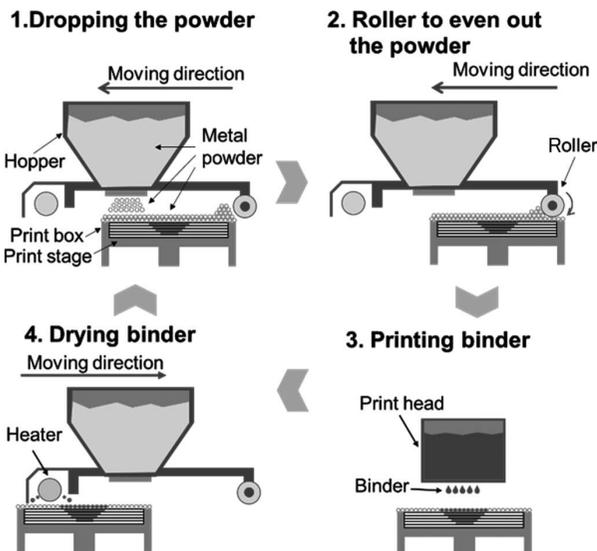


図 2 バインダージェット方式 造形プロセス概略図

・粉末除去工程

乾燥工程が終わると気化成分が飛びバインダーに含まれる樹脂成分が残り、バインダー塗布された部分は金属粉末同士がバインダーで接着された状態となり取り出しが可能な状態となる。この状態は粉末冶金 (PM) やMIMの成形体と似ているので、同じように成形体と呼ばれる。

粉末除去工程では、バインダーを塗布していない金属粉末内に埋もれたこの成形体の取り出す作業を行う。粉末の除去作業には刷毛やエアなどを用いる。BJT方式における成形体はPMやMIMに比べると強度が低く、ハンドリングにおける破損などもあるため、造形形状 (薄肉壁など) に考慮が必要である。

本作業で除去したバインダーが塗布されていない部分の金属粉末はリサイクルが可能で、製造における材料歩留まりは非常に高い。

・焼結工程

最後の焼結工程はPMやMIMでも用いられている真空焼結炉を用いる。処理する材料により異なるが1200~1400℃で焼結を行い95~99%の相対密度を得る。焼結に伴い製品は15~20%程度収縮するため、造形はこの焼結収縮を考慮してモデルをスケールリングして造形を行う。本工程は先に述べたようにPMやMIMでは長い歴史がある技術であり、PMやMIMを扱う企業においてはBJT方式は非常に親和性の高い工法である一方、新しい技術として取り組む企業においてはハードルが高いのも事実である。

◇ バインダージェット方式の特徴

BJT方式にはPBF法のように熱源としてレーザーや電子ビームを用いて粉末床を溶融・固着させないことによる利点がある。1つ目は粉末の急速な加熱・冷却がないため、製品に残留応力が発生しないこと。2つ目は冷却の関係で製品形状によっては必要となる製品形状を支えるためのサポートの造形が不要であること。3つ目はPBF法では一般にZ方向において柱状結晶粒組織を生成すると言われており、この異方性により造形におけるXY方向に比べZ方向の強度が低下すると言われている。対してBJT方式は造形ではなく焼結に

て金属結晶組織を得るため、造形方向による金属組織の異方性はなく、等軸結晶組織となる。

またサポートが不要であることから造形可能範囲内で自由に造形対象のレイアウトが可能で効率的な生産が可能である。造形においては金属の熔融・冷却がないため印字速度も早く、高い生産性が特徴である。加えて前項の使用原料でも述べたが金属だけでなくセラミックなど幅広い材料選択が可能であり、市場にてすでに使用されている比較的安価な材料を使用できる点も大きい。

これらの特徴より原料費比率の高い製品ほど原料単価の差の影響が大きく、効率的な生産も考慮するとより安価な製品部品における活用が期待される。

◇ バインダージェット方式の課題

前項にてBJT方式の優位点を述べたが一方で課題もある。

BJT方式は前項でも述べた通り、金属粉末がバインダーで固められた成形体を作り、焼結することで完成する。PBF方式は熱源で金属粉末を熔融・固着させ金属となり造形時点で強度が出るため、薄肉・微細形状の造形が得意である。BJT方式の成形体は金属粉末同士バインダーで接着されている状態あり、PBF方式のそれに比べると強度は劣る。その状態で刷毛やエアの圧力による金属粉末の除去作業に耐える必要があり、PBF方式に比べると形状に制限が伴う。成形体の強度は主にバインダーに依存しており、各社のノウハウによるところが多い。今後よりBJT方式が普及していくには、ある程度のハンドリングに耐えうる強度、ゆくゆくはロボットによる自動取り出しにも耐えうる強度が成形体には求められる。

PBF方式と異なる点では焼結工程の有無も大きい。焼結工程では製品の収縮、重力による変形、セッター面との摩擦抵抗による収縮違いなど焼結特有の問題も起こる。この解決には焼結を理解した上での製品形状設計への反映、焼結時の姿勢など焼き方の工夫が必要となる。これらはPMやMIM

に携わっている者であれば当たり前のことであるが、馴染みのない者にとってには難解な技術となる。この技術としての導入ハードルの高さを解消するため、簡易に焼結を導入できるようなメーカーによっては専用炉、材料毎のレシピや焼結をシミュレートするソフトの提供などにより解消しようとしている。

◇ 金属積層

バインダージェット方式の今後

レーザーや電子ビームを用いたPBF方式は現在、金属3Dプリンタ方式の中では主流となっており、国内企業での導入、大学の研究開発も盛んに行われている。これらは日本でも同様である。欧米においては航空宇宙・医療に加えて軍事産業の市場が大きく、PBF方式を用いた金属3Dプリンタの適用も進んでいるが、日本においてはそれらの市場は小さくなく、軍事においては皆無である。そのような中で欧米と同じようにPBF方式を用いた部品展開を進めるにもビジネス規模が拡大していないのが実情である。その他の用途としてはダイキャストや樹脂用の内部に中空水管構造を備えた金型入れ子の製造に適用が進んできているが全体から見ればその規模はあまり大きくない。PBF方式は現在のところ粉末単価も高く、生産効率も高いとは言えない中で比較的複雑形状もあり部品単価も高くなる傾向で、比較的複雑高性能で単価が高くても適用が可能な航空宇宙・医療分野以上の広がり難しい。ゆえに金属3Dプリンタ業界においては日本においてどのような分野へ適用できるのかといった出口戦略が課題となっている状況である。

対してBJT方式は製品形状の複雑さという点で劣る部分や焼結を用いる導入ハードルの高さはある一方で、比較的安価な金属粉末を用い効率的な生産で安価に部品製造ができるという特徴を備えている。これらの特徴を活かすことで、PBF方式のターゲット市場とは違った比較的部品コストが安い一般産業部品への適用が期待される。

Ⅲ. 金属粉末製造技術と特長

1. 金属3Dプリンタ用原料粉末の製造に 用いられるガスアトマイズ法の特長

山陽特殊製鋼(株) 粉末事業部 さわ だ とし ゆき
粉末技術部 技術2グループ 澤田俊之

まえがき

金属3Dプリンタ（以下、単に3Dプリンタと記す）は、原料となる粉末やワイヤーを必要な部位にだけ積層していく新たな工法であり Additive Manufacturing（AM）と呼ばれる。大型の母材から塑性加工や切削加工により小型形状の製品を作る従来工法と異なり、材料歩留りが高く、複雑形状の部品を効率よく製造できるなどの特長から、近年、航空・宇宙、自動車、エネルギー、生体材料などの広い分野で適用、検討が進んでいる。本項では、この3Dプリンタの原料として用いられる金属粉末の製造方法のひとつであるガスアトマイズ法について、概要と製造される粉末の3Dプリンタ用としての適合性について解説する。

粉末を原料とする3Dプリンタにはいくつかの造形方式があるが、現在多く利用されているパウダーベッド方式（PBF方式：Powder Bed Fusion）、デポジション方式（DED方式：Directed Energy Deposition）において、原料粉末には高い流動性と数十 μm 程度の粒径が要求される。流動性は、PBF方式においては安定した粉末床の作製、DED方式においては熱源照射部への安定した粉末の供給のために重要となる。また粒径について、微粉末は流動性の低下に影響し、一方、顕著な粗粉末は絞られた熱源による加熱において溶融不良を起こす。したがって、いずれの造形方式で用いる原料粉末においても、過度な微粉末、粗粉末は分級などにより除去される必要があり、10～150 μm 程度のなかで造形方式や造形装置によって、最適な粒径範囲が存在する¹⁾。

また、3Dプリンタによる造形は局所的な溶融、

凝固をともなう現象であることから、凝固過程で生成するデンドライト状やセル状組織の界面に不純物元素が濃縮することで造形割れが発生し、また酸素や窒素などのガス成分が造形体内で非金属介在物を生成することで機械的特性を低下させると考えられる。したがって、原料粉末の成分は、造形体に必要な各種特性を実現する主元素の含有量のほか、ガス成分を含めた不純物含有量が低く抑えられていることも重要となる。

このような、高い流動性、10～150 μm 程度の粒径、低い不純物含有量を満たす金属粉末の製法としてガスアトマイズ法が適しており、さらに大量生産にも対応できることから、現在、3Dプリンタ用原料粉末の製造法として多用されている²⁾。

ガスアトマイズ法には、溶解母材の形態や溶解方式によりいくつかのタイプがあるが³⁾、本項では、耐火物中で母材を溶解し、その溶融金属を高圧ガスで噴霧する最も汎用タイプのガスアトマイズ法について解説する。

◇ ガスアトマイズ法の概要と製造される粉末の特徴

ガスアトマイズ装置の構造の模式図を図1に示す。一般に装置上部に配置される溶解炉において、耐火物中で母材が誘導加熱、溶解される。その後、耐火物下部の細孔ノズルから溶融金属が出湯され、直後に高圧ガスが吹き付けられる。これにより溶融金属は、微細な液滴に分断され、タワー内に噴霧されることで、落下中に冷却、凝固し、金属粉末となる。なお、図1では小型溶解炉を持つ装置に多い耐火物坩堝の底部に細孔ノズルが配置されたタイプを図示しているが、大型溶解炉において

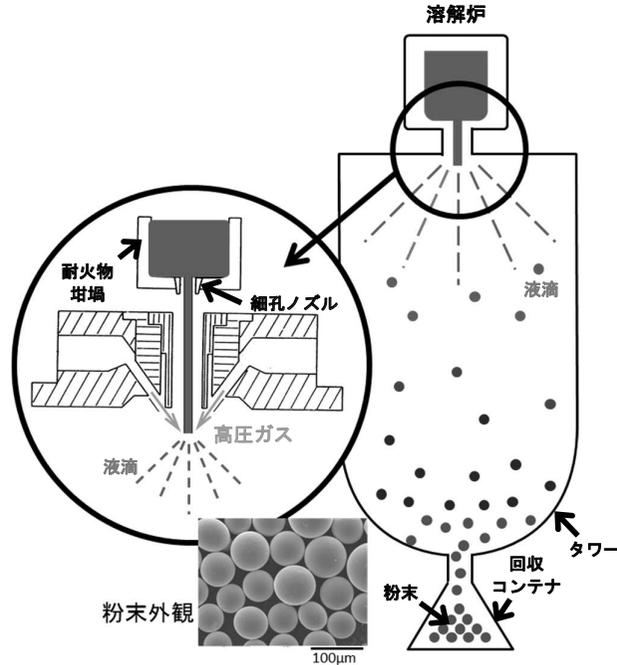


図 1 ガスアトマイズ装置の模式図

は、溶解炉から耐火物製タンディッシュに熔融金属を移し、タンディッシュの底部に配置された細孔ノズルから出湯するタイプもある。

溶解炉の雰囲気には、大気、真空もしくは不活性ガスのタイプがある。3Dプリンタでの利用も多いIN718やマルエージング鋼は易酸化元素であるAlやTiを含有するため、真空もしくは不活性ガス中で溶解する炉を使用することで、製造ロットごとのAl、Ti量が安定した粉末を容易に製造することができる。

噴霧に使用する高圧ガスには、窒素およびアルゴンがある。ガスの価格として比較的安価な窒素が主に用いられるが、AlやTiのような易窒化元素を多く含有する合金や、造形体中に生成する窒化物が各種特性を顕著に低下させる場合にはアルゴンが用いられる。窒素やアルゴンのような不活性ガスで噴霧することで、タワー内も同様の不活性ガス雰囲気となり、分断された熔融金属の液滴表面が酸素と接触することなく、酸化物の生成が抑制される。これによって、液滴がタワー内を落下し、凝固するまでの間に、表面張力によって球状化することができ、球形状の金属粉末が得られる。なお、Al合金においては、高圧空気を噴霧に用い

る場合もあるが、一般に空気を用いると液滴の表面酸化により、製造される粉末が不定形状になりやすい⁴⁾。

ガスアトマイズ法による金属粉末の粒径は、Lubanskaの実験式⁵⁾で表されるように、噴霧ガスの流量や流速、出湯ノズル径、出湯される熔融金属の質量流量などで変化する。しかしながら、実際の生産において、噴霧ガスの流量や流速を過度に大きくすると金属溶湯の吹き上がりの原因となり、出湯ノズル径を過度に小さくするとノズル閉塞の原因となるなど、それぞれの因子には安定操業のための制限がある。安定した生産のためにこれら因子を調整することで、一般にガスアトマイズ法では数十～100μm前後の粉末を高収率で製造することができる。

図1に示すように、液滴が凝固して作製された金属粉末は、タワー下の回収コンテナに堆積する。一般に、タワーと回収コンテナには切り離しのバルブが付いており、これを締めて切り離すことで、製造された粉末が大気開放されることなく、噴霧に用いた不活性ガスが充填されたまま回収コンテナ内で室温付近まで冷却され、表面酸化の少ない金属粉末が得られる。

◇ ガスアトマイズ粉末の金属3Dプリンタ用原料としての適合性

3Dプリンタ用の原料粉末に要求される主な特性として、高い流動性を実現する球形状、10~150 μm 程度の粒径、低い不純物含有量がある。

代表的なガスアトマイズ粉末は、外観形状を図2に示すように概ね球形状を有している。この粉末は、不活性ガス中で溶解した熔融金属を不活性ガスで噴霧し、製造しており、表面張力による液滴の球状化を阻害する液滴表面の酸化物が少ないことから、球形状となっている。

図3に典型的なガスアトマイズ粉末の粒度分布例を示す。概ね数 μm ~数百 μm の範囲の分布を有し、数十 μm 程度の粒径が最も収率が高い。なお、このような粒度分布の粉末を所定の目開きの網で分級することで、用いる造形方式や造形装置に合わせた粒度の原料粉末を得ることができる。

ガスアトマイズ法は水アトマイズ法などの粉末

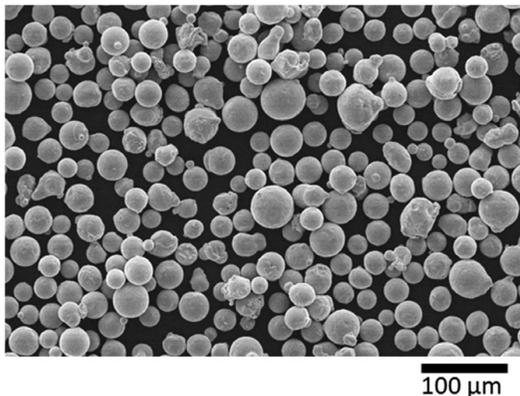


図 2 ガスアトマイズ粉末の外観例

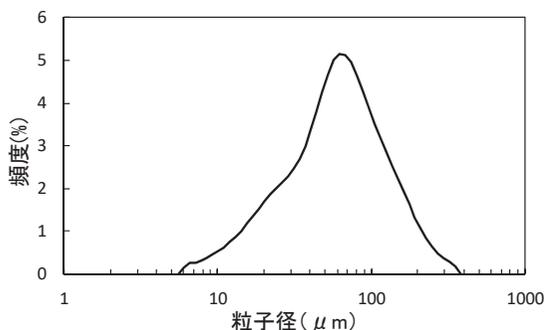


図 3 ガスアトマイズ粉末の粒度分布例

製造法と比較し、低酸素粉末が大量、容易に得られる工法としても知られている。例えば、粒径や合金種類によって変化するが、3Dプリンタの原料として多く用いられる粒度のFe合金やNi合金においては、数十~数百ppmの酸素含有量の粉末が得られる¹⁾。ここで、溶解雰囲気、噴霧ガスを不活性ガスとし、回収コンテナによる粉末回収作業などを工夫することで、酸素含有量の低いガスアトマイズ粉末を得ることができる。

以上のようにガスアトマイズ法は、高い流動性、10~150 μm 程度の粒径、低い酸素含有量の金属粉末を大量、容易に得られる工法である。このような特長は、3Dプリンタ用の原料粉末の必要特性に合致していることから、現在、本用途に多く利用されている。

むすび

現在、3Dプリンタ用として、ステンレス鋼、マルエージング鋼、工具鋼、Ni合金、Co合金、Cu合金、Ti合金、Al合金など、様々な原料粉末がガスアトマイズ法によって製造されている。また、溶解母材の成分を変更することで、容易に製造される粉末の成分を変更することもガスアトマイズ法の特徴であり、従来、溶製法で利用されてきた合金のみならず、3Dプリンタ用に特化した新合金の開発も活発に行われている^{6)~8)}。このように、新合金を含め、多様な合金系のガスアトマイズ粉末を用いることにより、さらに3Dプリンタの活用分野が拡がり、各種部品の製造において、高い形状自由度、工程省略、歩留り改善、短納期化を通じて、CO₂削減などの社会貢献も期待される。

参考文献

- 1) 西面由夏：山陽特殊製鋼技報、27 (2020) 1、29-32
- 2) 技術研究組合 次世代3D積層造形技術総合開発機構編：設計者・技術者のための金属積層造形技術入門、ウィザップ (2016)、37
- 3) Christian Lehnert, Bernd Sitzmann, Franz Pfahls, Henrik Franz, and Michael Hohmann：特殊鋼、65 (2016) 4、10-17
- 4) 田中昭衛、村上勇夫：軽金属、72 (2022) 5、214-219
- 5) H. Lubanska：J. Metals、22 [2] (1970)、45-49
- 6) 桑原孝介、藤枝正、大坪靖彦、陳美伝：日立金属技報、35 (2019)、30-37
- 7) 相川芳和：山陽特殊製鋼技報、28 (2021) 1、54-59
- 8) 吉本隆、紙本朝子：電気製鋼、93 (2022) 1、21-28

2. プラズマ回転電極法についての 最近の研究開発動向

東 北 大 学 金 属 材 料 研 究 所 ち ば あ き ひ こ
(現在 東北大学未来科学技術共同研究センター) 千 葉 晶 彦

まえがき

金属粉末は、粉末冶金、金属射出成形 (Metal Injection Molding)、各種溶射技術など、様々な分野で原料として使用されている。加えて、近年、金属積層造形技術 (Additive Manufacturing (AM)) が、金属粉末の新たな応用分野となった。AM技術の進歩により、信頼性の高いAM製部品の粉末製造がますます重視されるようになった。金属粉末の製造には、いくつかの技術が適用されているが、これらの中で、ガスアトマイズ法 (GA)、プラズマアトマイズ (PA) 法、およびプラズマ回転電極 (PREP) 法が、AM用の球状粉末の製造法として用いられている。PREP粉末に関しては、最近、粒径微細化技術や、量産性に関する研究開発が活発に行われるようになってきている。そこで、本稿では、PREP技術に焦点を絞り、その研究開発経緯や最近の研究成果について紹介し、PREP法の特徴について解説する。

◇ PREP技術開発の歴史

プラズマ回転電極法 (Plasma Rotating Electrode Process: PREP) は、当初は、REP (Rotating Electrode Process) 法として、Starmet Corporation (当時はNuclear Metals Inc.) により開発されたもので、1972年に米国特許を取得した遠心噴霧法の一つである¹⁾。開発当時は、タングステン電極を用いた不活性ガスアークを熱源としていた²⁾。この方法では、タングステン電極から直接回転電極に不活性ガスのアークを移行させて、アークのエネルギーを電極最先端面に伝えることで、回転電極先端を溶融して液滴を生成する。しかし、タングステン・ガスアークの熱源では、電極のタングステンが粉末中に混入することが問題

となったことから、通常のタングステンアークの替りに熱源としてタングステンによる汚染がないプラズマ銃によるプラズマアークを利用したPREP法が開発された。PREP法では、タングステン電極の先に、細かい孔を有する水冷インサートチップが導入されており、不活性ガスがインサートチップの孔を通過した後にプラズマアークが発生する。このため、タングステンの消耗により生じるタングステンの混入汚染を防止することができる³⁾。PREP法では当初、チタン合金用に開発されたが、その後ニッケル合金粉末の製造にも適用された。直径63.5–90mm、長さ250–1,500mm程度の回転電極を使用し、回転速度250rev/sec (=15,000rpm) 程度で操業されていた⁴⁾。Nuclear Metals社では1,400kg/週の生産能力を持っていたと報告されている³⁾。

日本では1970年台から紙屋ら⁵⁾をはじめとして研究が行なわれていたが、得られる粉末粒径が比較的粗大であり、粒径の低減化には限界があること、プラズマアークの制御による安定した溶融速度の達成が困難であること⁶⁾。また、粒径微細化や量産性に関する技術的限界などの問題が指摘され、PREP技術に関する研究開発が衰退していった。

ロシアでは1970年台より、合金粉末に含有するガス欠陥が疲労破壊の起点となるという理由から、ガスレスのPREP粉末の高い可能性に着目してPREP装置開発を行って来ており、平均粒径80 μ m以下のNi基超合金粉末の大量生産技術を確立している。現在まで、第10世代目の量産機をロシアと中国を中心として普及させている。これまで、ロシア製PREP装置は一般産業用途として世に出ることが無かったが、2019年11月にフランクフルトで開催された金属積層造形技術に関する世界最大

規模の展示会 (Formnext2019) に量産用PREP装置の模型を展示し、一般産業用として上市している (ARKON社)。ロシアのCMK社では疲労強度改善の目的で、戦闘機のジェットエンジンのタービンディスクをガスボアの無いPREPのNi基超合金粉末を使用して熱間鍛造なしでHIPのみの工程により製造している。その他に、Ni基超合金を始めとしてTi-6Al-4V合金などのPREP粉末の製造技術、それを使用したHIP焼結技術、金属積層造形部品製造などの研究開発が活発に行われている⁷⁾。中国はPREP技術に関してはロシアに次いで高い技術力を有しており、現在においても、PREP装置に関する研究開発や、PREP粉末を用いたAMに関する研究開発が大学や国の研究機関において、活発に行われている。

図1は、中国 (ロシア) のPREP装置によって作り出されるTi-6Al-4V合金粉末の平均粒径 d と使用する電極回転速度 ω との関係を示した図である^{8), 9)}。電極径70mmと75mmの場合について示している。破線は理論値を示している。筆者の研究グループ (本研究 (黒の実線)) では、電極径25mmが実験的に検証可能できる d と ω の関係であるが、電極の回転速度の高速度 (40,000rpm) 化と電極径の増大 (75mm) 化により達成できる理論曲線を図1に破線によって示している^{10)~12)}。この図より、PREP技術の現状の技術レベルは、これまで考えられてきたように、高機能粉末ではあるが、生産性が悪く、粒径粗大で高コスト粉末の製粉技術であるとの考えは払拭されるべきであると言えよう。

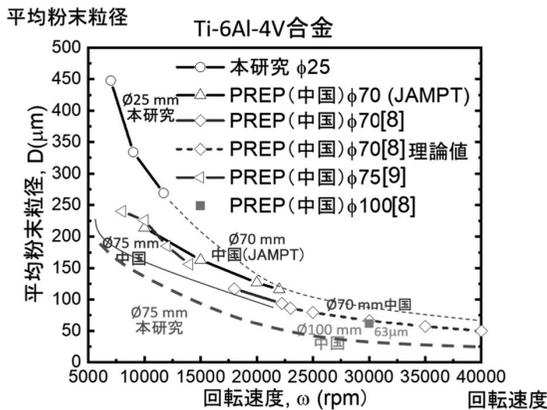


図 1 各種PREP粉末の平均粒径と電極回転速度との関係

◇ PREP法の概要と粉末特性

1. PREP装置の概要

PREPの装置模式図を図2に示す¹⁰⁾。高速回転する被溶解材としての電極棒にプラズマアークを照射し、電極先端面を溶解して液膜を形成させ、遠心力により先端面から液滴を飛び出させる。飛び出した液滴がチャンバー内を飛行中に液滴の材料固有の表面張力によって真球形状に凝固して粉末粒子になる¹³⁾。電極材料を直接、不活性ガスまたは真空雰囲気中で溶融するため、坩堝やチャンバー雰囲気中の酸素による汚染を防止できる¹⁴⁾。また、ガスアトマイズ法のようなガスジェットによる融液の攪拌過程がなく、チャンバー内の1気圧の不活性ガス中を飛行する間にガスの巻き込みが起きないため、ガスボアの無い真球に近い粉末が形成される¹⁰⁾。チャンバーを真空雰囲気とした場合には熱放射のみにより液滴の抜熱が起こるため、冷却速度が遅くなるが、チャンバー雰囲気をHeやArなどの不活性ガスにすることで急冷凝固組織を得ることができる。

2. PREPの噴霧機構

PREPにおいて、回転電極の先端面からプラズマアークにより溶融された金属が遠心力で離脱するメカニズムは、3つの液滴形成モデルが報告されている^{15)~17)}。1つ目は液滴が電極先端面の溶融池から表面張力に対して十分な遠心力を得ると瞬

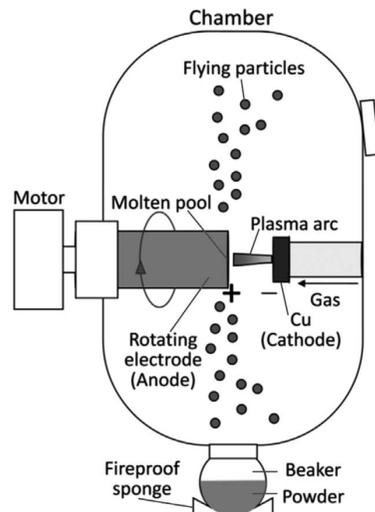


図 2 PREP装置の模式図 atomizer

時に離脱する直接液滴形成 (Direct Drop Formation, DDF) モデル (図3(a))¹³⁾。2つ目は溶融池から粘性により液滴がリガメントを形成し、リガメントの先端から液滴が離脱するリガメント崩壊 (Ligament Disintegration, LD) モデル (図3(b))、三つ目はリガメントが成長してフィルムを形成し、フィルムの端から液滴が離脱するフィルム崩壊 (Film Disintegration, FD) モデル (図3(c)) である。DDFの場合、一次粒子と二次粒子が形成され、粒子サイズ分布に2つのピークが生じる。溶融速度が速くなり、電極の回転速度が速くなるとDDFからLDモデルに移行する。LDの場合、粒度分布は1つのメインピークとなる。FDモデルは、高い電極回転速度の下で発生する。この場合、液体金属は電極の溶融表面から急速に流れ、膜の形で広がり、表面張力により凝集体に分裂し、小さな液滴を形成する。これらのモデルは、式(1)で表されるHinze-Milbourn (Hi) 数により決定することができる¹⁶⁾。

$$Hi = \frac{\mu^{0.17} Q \rho^{0.71} \omega^{0.6}}{\gamma^{0.88} D^{0.68}} \quad (1)$$

ここで、 μ は液体金属の粘度、 Q は溶融速度 (Q は生成される粉末の質量と対応する処理時間から計算される)、 ρ は液体金属の密度、 γ は液体金属の表面張力である。 ω は電極の回転速度で D はその直径である。崩壊モデルは、 $Hi < 0.07$ ではDDF、

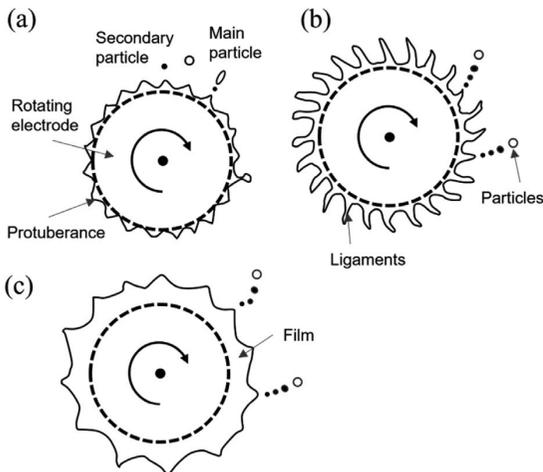


図3 遠心噴霧法の粉末生成機構のモデル (a) Direct Drop Formation (DDF)、(b) Ligament Disintegration (LD)、(c) Film Disintegration (FD)

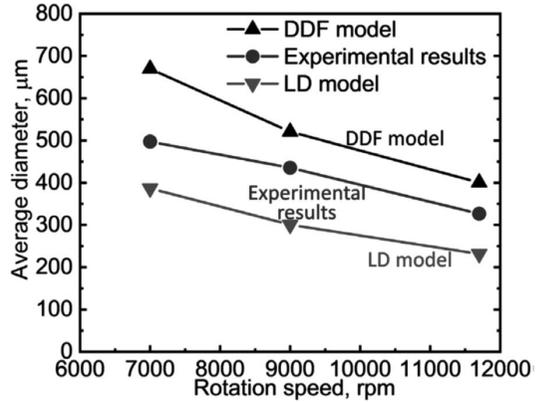


図4 異なる回転数でのDDFモデルとLDモデルに基づく実験結果と計算結果 (回転電極直径: 20mm)

$0.07 < Hi < 1.33$ ではLD、 $1.33 < Hi$ ではFDがそれぞれ主要なモデルとなる。

PREP条件が、式(1)より、 Hi 値が約0.04から0.10の範囲となるTi-6Al-4V合金での製粉プロセスについて考える¹⁰⁾。この Hi 値の範囲では、崩壊モデルはDDFとLDの範囲にあることが分かる。DDF粉末の平均直径 d_{DDF} は、次のように計算できる¹⁸⁾。

$$d_{DDF} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{12\gamma}{\rho D}} \quad (2)$$

また、LD粉末の平均直径 d_{LD} は、次のように求めることができる¹⁹⁾。

$$d_{LD} = 2.0 \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\gamma}{\rho D}} \quad (3)$$

図4は、利用したPREPパラメータに基づいて式(2)と(3)を使用して計算された平均粉末粒径を示している¹⁰⁾。実験結果は、計算されたDDF値とLD値の間にあることがわかる。このことは、DDFまたはLDモデルを使用して高精度で平均直径を予測することは困難であることを示している。したがって、平均粉末直径とPREPパラメータとの関係をより適切に説明するには、新しいモデルが必要であることを示唆している¹⁰⁾。

3. PREP粉末組織の特徴

3.1 PREP粉末の微細組織と凝固速度

図5は、6~9kVA、電流値80AのパワーのPREP装置を使用して製粉した、径20mmのTi-6Al-4V合

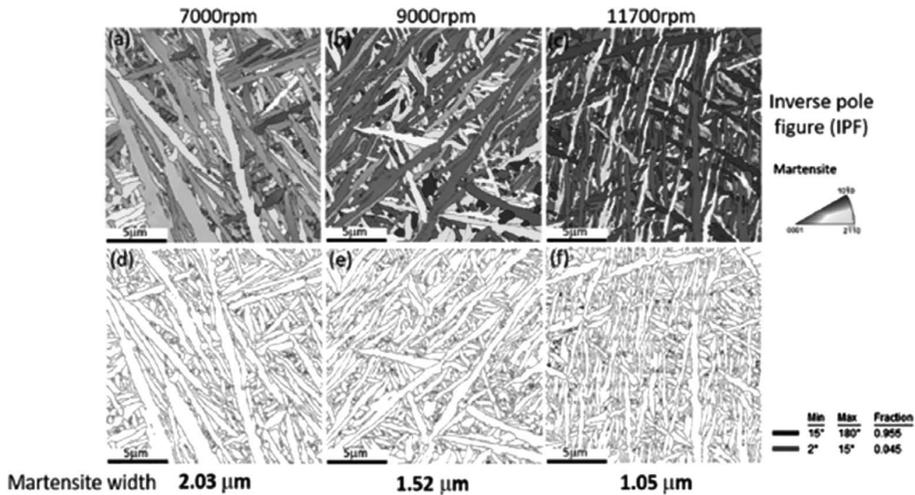


図 5

(a, b, c) (a, d) 7,000、(b, e) 9,000、および (c) の回転速度で製造されたTi64合金粉末の (a, b, c) IPFマップおよび (d, e, f) 粒界マップ、(f) 11,700rpm (回転電極の直径：20mm)。

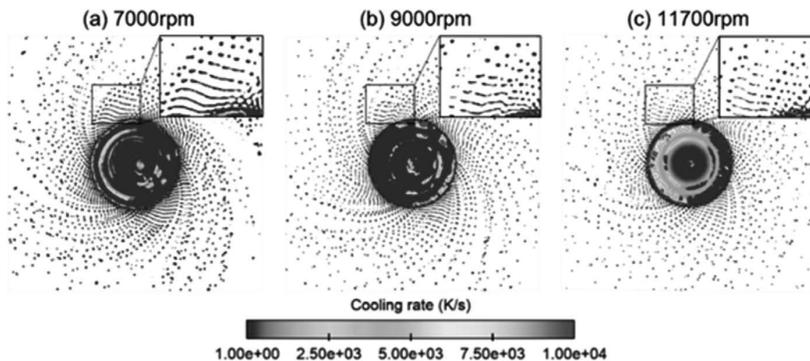


図 6

(a) 7,000rpm、(b) 9,000rpm、(c) 11,700rpmの回転速度でのPREPプロセス中の冷却速度の等高線を含むシミュレーションスナップショット。

金電極棒から得られたTi-6Al-4V合金粉末のEBSD組織を示している¹⁰⁾。電極回転数は、7,000、9,000、および11,700rpmで製造されたTi-6Al-4V合金粉末のEBSDの逆極点図 (IPF) を示している。これより微細組織は、主に針状/ラス状の α' マルテンサイト組織であり、マルテンサイトラス幅の平均幅は7,000 rpmで $2.03\mu\text{m}$ から11,700rpmで $1.05\mu\text{m}$ に減少しており、電極回転数が増すことにより冷却速度が増加することを示している。

図6は、さまざまな電極回転速度でのPREPプロセス中の冷却速度の等高線を含むシミュレーション結果のスナップショットを示している¹⁰⁾。ほとんどの粒子は、 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{K/s}$ のレベルに

達する高い冷却速度に達していることが分かる。このシミュレーションは定性的な結果であり、多少の誤差を考慮する必要があるが、Ti-6Al-4V合金のマルテンサイト組織形成に必要な臨界冷却速度は $(410\text{K/s})^{21)}$ よりも高くなければならないことを考慮すると、シミュレーション結果得られた冷却速度の範囲は実際のPREPでの製粉プロセスに準じていると考えられる。以上の様に、PREP製粉プロセスでの液滴の冷却速度は、マルテンサイト形成の臨界冷却速度 $(410\text{K/s})^{20)}$ よりも高く、これは、図5に示すように、マルテンサイトを含む粉末の微細組織観察結果と一致している。

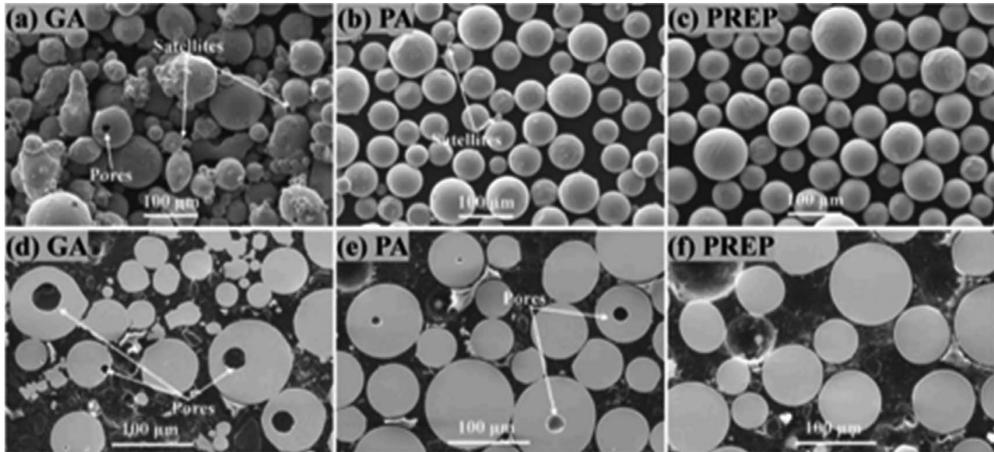


図 7

(a) GA、(b) PA、および (c) PREP を使用して作製したTi-6Al-4V合金粉末の表面形態のSEM画像。
 (d) GA、(e) PA、および (f) PREP によって作製されたTi-6Al-4V合金粉末の断面のSEM画像。

3.2 PREP粉末の形状特性とガスポアフリー
 図7にガスアトマイズ (GA) 法 (図7(a) (d))、プラズマアトマイズ (PA) 法 (図7(b) (e))、およびPREP法 (図7(c) (f)) によって作製されたTi6Al4V合金粉末の表面と断面のSEM像を示す²¹⁾。GA粉末は、サテライト粒子が附着した不規則形状の粉末で (図7(a))、断面観察からはガス欠陥 (ポア) を含んでいる粒子が散見される (図7(d))。また、図7(b) よりPA粉末は真球形状に近い形状であるが、断面観察からは、GA粉末と同様にガス欠陥が観察される (図7(e))。一方、PREP粉末はサテライト付着が無く、ほぼ真球に近い形状であり (図7(c))、断面観察からは、まったくポアは観察されない (図7(f))。この様に、PREP粉末は、球形度が1に近く、かつガスポアの無い粉末を製造する製粉技術と言える。

むすび

PREP技術に関する研究開発の歴史から紐解き、最近のPREP技術の研究開発動向について概説した。本文では触れなかったがPREP粉末の特徴は、円形度 (球形度) が1に近く、アトマイズガスの混入が無く、しかも表面酸化皮膜も他の製粉技術に比べて薄く、流動性が最も高い粉末として優れた特徴を有している^{22)、23)}。PREP技術は、従来一軸固定型の電極回転方式から、センタレス方式によって電極を高速回転する方式が提案されており、

一部実用化がなされている。このセンタレス電極回転システムにより、PREP技術はガスアトマイズ方式よりも生産性の高い製粉技術として、今後一層の技術開発がなされて行くものと期待される。

謝 辞

PREP技術について、共同研究実施者の佐藤司 研究員、王昊特任准教授、山中謙太准教授、青柳 健大助教の各氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Miller, S.A. and Roberts, P.R., 1998, "The Rotating Electrode Process", ASM Handbook, 7, pp. 97-101
- 2) C. A. Thompson, "A Rotating Electrode System for the Generation of Metal Alloy Microspheres", Master Theses, no. December, 2012
- 3) 磯部晋、草加勝司、洞田亮、and 市川二郎、"超合金の粉末冶金について"、電気製鋼、vol. 53, no. 4, pp. 281-299、1982
- 4) A. Lawley, "Atomization of Specialty Alloy Powders.", J. Met., vol. 33, no. 1, pp. 13-18, 1981, doi: 10.1007/bf03354395
- 5) T. Kamiya, "An analysis of the ligament-type disintegration of thin liquid film at the edge of a rotating disk", J. Chem. Eng. Japan, vol. 5, no. 4, pp. 391-396, 1972, doi: 10.1252/jcej.5.391
- 6) 磯西和夫、小林昌彦、時実正治、"プラズマ回転電極法によるTi-6Al-4V合金文粉末の製造" 鉄と鋼、第75年 (1989) 第10号、1913-1920
- 7) H. Chen, H. Ben-fu, and L. Hui-ying, "Numerical analysis of droplet solidification process during PREP", ORDNANCE Mater. Sci. Eng., vol. 28, no. 1, pp. 21-24, 2005, doi:

10.14024/j.cnki.1004-244x.2005.01.006

- 8) Y. Dai, et al., *Advanced Materials Industry*, 8 (2016) 57-60
- 9) J. Tang, et al., *Advanced Powder Technology* 30 (2019) 2330-2337
- 10) Yujie Cui, Yufan Zhao, Haruko Numata, Huakang Bian, Kimio Wako, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Chen Zhang Akihiko Chiba, "Effects of plasma rotating electrode process parameters on the particle size distribution and microstructure of Ti-6Al-4 V alloy powder" *Powder Technology* 376 (2020) 363-372
- 11) Yufan Zhao, Yujie Cui, Haruko Numata, Huakang Bian, Kimio Wako, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi and Akihiko Chiba "Centrifugal granulation behavior in metallic powder fabrication by plasma rotating electrode process, *Scientific Reports* (2020) 10: 18446. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75503-w>
- 12) Yujie Cui, Yufan Zhao, Haruko Numata, Kenta Yamanaka Huakang Bian, Kenta Aoyagi Akihiko Chiba "Effects of process parameters and cooling gas on powder formation during the plasma rotating electrode process, *Powder Technology* 393 (2021) 301-311
- 13) M. Tokizane and K. Isonishi, "Production of Ti-alloy by plasma rotating electrode process", *資源処理技術*, vol. 37, no. 4, 1990
- 14) S. J. Savage and F. H. Froes, "Production of Rapidly Solidified Metals and Alloys", *JOM J. Miner. Met. Mater. Soc.*, vol. 36, no. 4, pp. 20-33, 1984, doi: 10.1007/BF03338423
- 15) M. Zdujčić and D. Uskoković, "Production of atomized metal and alloy powders by the rotating electrode process", *Sov. Powder Metall. Met. Ceram.*, vol. 29, no. 9, pp. 673-683, 1990, doi: 10.1007/BF00795571
- 16) B. Champagne, R. Angers, Rep atomization mechanisms, *Powder Metall. Int.* 16 (1984) 125-128
- 17) K. Isonishi, M. Tokizane, Production of Ti-alloy powder by plasma rotating electrode process, *Tetsu-to Hagane* 12 (1990) 2108-2115, <https://doi.org/10.4144/rpsj1986.37.215>
- 18) Y. Liu, S. Liang, Z. Han, J. Song, Q. Wang, A novel model of calculating particle sizes in plasma rotating electrode process for superalloys, *Powder Technol.* 336 (2018) 406-414, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.06.002>
- 19) T. Kamiya, A. Kayano, Disintegration of viscous fluid in the ligament state purged from a rotating disk, *J. Chem. Eng. Japan* 4 (1971) 364-369, <https://doi.org/10.1252/jcej.4.364>
- 20) S. Cao, B. Zhang, Y. Yang, Q. Jia, L. Li, S. Xin, X. Wu, Q. Hu, C. Lim, On the role of cooling rate and temperature in forming twinned α' martensite in Ti-6Al-4V, *J. Alloys Compd.* 813 (2020), 152247. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152247>
- 21) Yunwei Gui, Kenta Aoyagi, Akihiko Chiba "Development of macro-defect-free PBF-EB-processed Ti-6Al-4V alloys with superior plasticity using PREP-synthesized powder and machine learning-assisted process optimization" *Materials Science & Engineering A* 864 (2023) 144595
- 22) Yufan Zhao, Yujie Cui, Yusaku Hasebe, Huakang Bian, Kenta Yamanaka, Kenta Aoyagi, Takehito Hagsiawa, Akihiko Chiba, "Controlling factors determining flowability of powders for additive manufacturing: A combined experimental and simulation study", *Powder Technology* 393 (2021) 482-493
- 23) Seungkyun Yim, Kenta Aoyagi, Huakang Bian, Yujie Cui, Akihiko Chiba, "Factors determining the flowability and spreading quality of gas-atomized Ti-48Al-2Cr-2Nb powders in powder bed fusion additive manufacturing", *Powder Technology* 412 (2022) 117996

3. 水アトマイズ法の特徴と最新動向

三菱製鋼(株) 広田製作所 あい はら みち たか
製造部 粉末グループ 相 原 道 孝

◇ 概 要

金属粉末の製造方法を大別すると機械的粉碎法、アトマイズ法、熱分解法、電解析出法、還元法などに区分され、このうち溶融金属の粉化を原理とするアトマイズ法には、水・ガス・回転円盤など粉化に寄与する媒体があり、それぞれ水アトマイズ・ガスアトマイズ・遠心アトマイズと呼ばれている。本編では鉄系（ステンレス、工具鋼、超合金系、軟質磁性粉末、etc）を中心とした水アトマイズ粉末について紹介する。

◇ 水アトマイズ粉末の成形

水アトマイズ法では平均粒径が数 μm ～数百 μm の粉末が製造可能で、表1に水アトマイズ粉末の主要な成形方法を示す。

◇ アトマイズ

水アトマイズ法は原材料を溶解炉で溶融させたのち炉底部もしくは溶湯を注いだ取鍋底部の小径ノズルから出湯した溶融金属流に噴霧水（水ジェット）を噴霧し粉化する製法で、合金粉末を製造する最も一般的な方法である（図1参照）。

噴霧媒体の水はガスと比較し圧縮性のはるかに小さく密度が高いためガスアトマイズ法よりも微細な粉末が得られる。溶融金属流の冷却速度が約 10^5 （ $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ）と速く、急速に凝固するため平衡条件下で凝固した材料とは異なり合金粒子中の組成偏析が少なくなる。

急速凝固は粉末形状にも影響を及ぼしガスアトマイズ粉末に比べ異形状となり、アトマイズ時に高温の溶融金属流と水ジェットが接触するため酸

表 1 水アトマイズ粉末の主な成形方法

成形方法	概略	粉末区分
粉末冶金 (Powder Metallurgy)	金属粉末を金型に充填しプレス後焼結を行い成形 材質例（鉄系、ステンレス鋼、工具鋼、超合金系、etc）	粗粉末 主に $-150\mu\text{m}$
金属射出成形 (Metal Injection Molding)	金属粉末とバインダを混練後ペレットにして射出成形機から金型に噴射成形 材質例（鉄系、ステンレス鋼、工具鋼、etc）	微粉末 主に $D_{50} : 10\mu\text{m}$
その他（圧粉磁心など）	圧粉成形後に焼結もしくは歪取温度域での熱処理、コイルと一体成形など 材質例（軟質磁性粉末：Fe-Si-Cr系、Fe-Si系、etc）	微粉末& 粗粉末

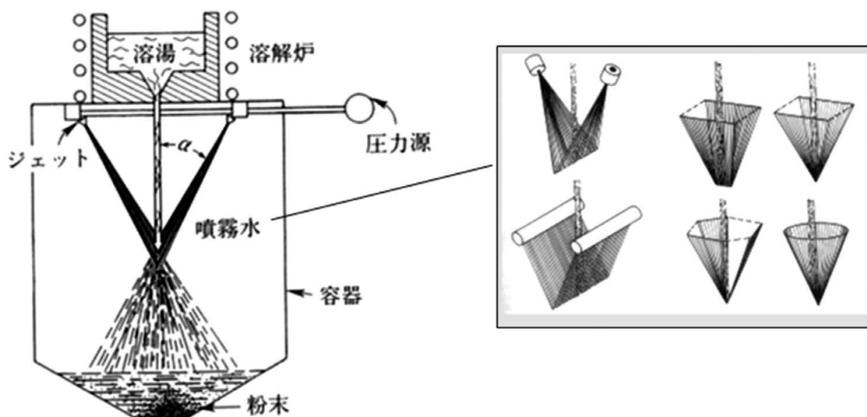
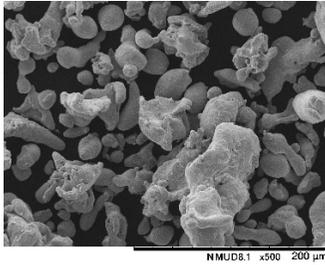
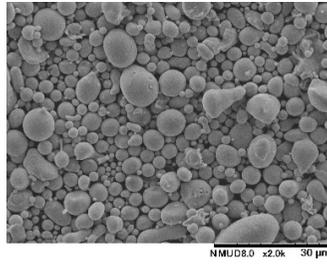


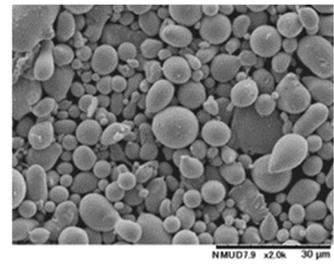
図 1 水アトマイズ装置の概略図^{1), 2)}



粉末冶金用SKH51粉末



MIM用SUS630粉末



軟質磁性粉末 (Fe-Si-Cr系)

図 2 各種水アトマイズ粉末

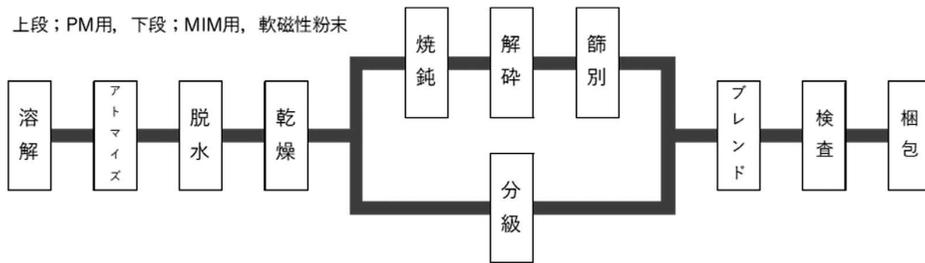


図 3 水アトマイズ法による粉末製造工程

化しやすい。

粉末特性はアトマイズ工程での各パラメーターが重要な役割を担い水ジェット起因では水圧、水量、噴霧角度、噴霧形状など、熔融金属起因では化学成分、出銅温度、出湯径などが主要なパラメーターとなり、粉末特性に影響を与える（図2参照）。

◇ 粉末製造工程

水アトマイズ法による粉末製造工程の一例を図3に示す。

アトマイズ工程で水ジェットを噴霧された熔融金属はスラリーと呼ばれる水と金属粉末の混合体となり脱水・乾燥工程で水分を除去する。脱水にはフィルタープレス・真空ベルト脱水・遠心分離などの選択肢があり、粉末の粒度・鋼種成分・処理量などの特徴に合わせて選定する。乾燥工程は脱水工程と連動した連続式、あるいは非連続のバッチ式を選択が可能で粉末を加熱し含水率を低下させる。

乾燥後、粉末冶金用の粗粉末はアトマイズ時に粉末に生じた内部歪を除去する為の焼鈍、および焼鈍で焼結した粉末を粉砕する解砕を行う。金属

射出成形用の微粉末は分級と呼ばれる粉末粒徑を細かくする処理を行う。分級方式には重力式・慣性力式・遠心力式がある。

粒度調整後の粉末は粒度偏析を防ぐためV型・ダブルコーン型などの回転容器で一定時間混合するブレンドを実施する。ブレンド後に検査サンプルを採取し検査基準を満たせば梱包作業を行う。

一連の工程での注意点は、装置の生産能力もさることながら複数鋼種を同一装置で処理する機会が多く、コンタミネーション（異鋼種混入）防止に最大限の配慮をせねばならないことである。分解清掃、目視確認可能でかつ効率的な作業が求められ、この点についても各粉末製造メーカーの生産ライン設計思想が反映される。

◇ 粉末の検査項目

化学成分は粉末の成形方法に関わらず共通の検査項目だが粉末物性に関する検査項目は異なる。粉末冶金用は金型に粉末を充填しプレス成形する工程でのハンドリングを想定し粒度分布、見掛密度、圧縮密度、ラトラ値、流動度が主要な検査項目である。粒度分布は目安として40μm以上の粉末は目開きの異なる金網を複数段重ねた多段篩別

機で行なう。

密度は粉末をオリフィスから体積が明確な規定容器に無負荷で流し込み測定する見掛密度、金型に充填した粉末をプレスし圧粉体の密度を測定する圧縮密度を指標とする。

ラトラ値は圧粉体の壊れやすさを示す値で、圧粉体を回転容器に入れ一定時間回転させ崩れた重量を計測し算出するので脆い圧粉体ほど値が大きくなる。流動度は粉末がオリフィスから容器に落ちきるまでの時間を測定し粉末粒径、粉末形状の影響を受ける。

金属射出成形用（MIM用）には微粉末が用いられ粒度分布、タップ密度、流動度などが主要な検査項目となる。微粉末は篩いでは目詰りしてしまい粒度分布が測定不可の為、レーザー回折法により測定する。粒子間の摩擦力が大きく流動性が悪い場合密度は偏心カムを持つタッピング装置で充填したタップ密度を測定する。軟磁性粉末も粉末特性は同様の項目を測定するが、保磁力・透磁率などの磁気特性測定が求められる場合がある。

◇ 最近の水アトマイズ粉末の動向

本稿で紹介してきた水アトマイズ粉末の中でも特に金属射出成形（MIM）品は、電子部品、自動車、産業用部品、医療・歯科用、民生品など用途が多岐に渡り今後更なる市場の拡大が見込まれている。各製品が小型化するであろうことを考慮すると、現在主流の粉末の平均粒径：約7～10 μm から更に微粉化へシフトすることも予想される。よ

り細かい粉末を製造するために水ジェットの水圧向上とそれに伴うノズルの開発など、従来の開発の延長となるが粉末粒度を小さく収率よく製造することが必要である。

また、ここ最近の電力代高騰、原材料費上昇によるコストアップを避ける為、粉末製造工程全体で今まで以上のコストダウンが求められる。

今後3Dプリンター用途への拡大も期待されており、金属粉末の代表的な加工方式である粉末床溶融方式（PBF）と指向性エネルギー堆積方式（DED）ではガスアトマイズ粉末が使用されるケースが多い。PBFは粉末を均一な厚みで高密度に敷き詰めるので球状かつ均一粒径の粉末が好まれ、DEDでは粉末とレーザーを造型部分に同時照射するので球状で流動性の良い粉末が望まれるが、粉末が粗大過ぎるとレーザーでの融解が難しくなるなどの欠点もある。注目されるのは金属微粉末を敷詰めバインダーと呼ばれる接着剤を噴射し固相焼結で造型するバインダージェット方式（BJ）で、造形速度が従来機の数倍向上した機種が開発されるなど注目を浴びている。更なる普及に向けガスアトマイズ粉末の長所を取り入れた水アトマイズ粉末の製造を目標として特性改善に努めねばならない。

参考文献

- 1) RANDALL M. GERMAN. Powder Metallurgy Science, P111
- 2) ERHARD KLAR. Metals Handbook Ninth Edition Volume 7 Powder Metallurgy, P29

IV. 二次加工技術と造形適用事例

1. 二次加工技術

①研磨

Drylyte[®]テクノロジー（乾式電解研磨装置DLyte） のご紹介、および組み合わせ研磨による 表面改質について

(株)NTTデータ ザムテクノロジーズ 成川 慎一
アプリケーション営業部 AMソリューション 課長

まえがき

NTTデータ ザムテクノロジーズでは、ドイツEOS社の樹脂及び金属の積層造形機の販売、エンジニアリングサービス、及び受託造形サービスを軸に日本でのAM市場拡大を行っております。

金属積層造形はサポートの除去作業や表面改質など様々は課題があり、弊社では造形技術だけではなく、国内外の後処理技術を様々試し、自社での検証も重ね、蓄積したノウハウの中から、お客様のニーズに適したソリューションをご提供させていただきます。

その中で、後処理技術のひとつとして、乾式電解研磨装置DLyte、および同装置と組み合わせる表面改質する技術をご紹介します。

まず、乾式電解研磨装置DLyteは、スペインバルセロナに製造拠点を置くGPAINNOVA社によって開発され、歯科・医療分野をはじめ、自動車・航空分野への導入が広がり、企業規模に関わらず、様々な用途で使用されております。

また直近では大型モデルや卓上モデルのリリースもあり全世界で800台以上の累計実績となっております。

◇ Drylyte[®]テクノロジーの理論的背景

乾式電解研磨では、エレクトロライト粒子が研磨層内の陰極（カソード）と研磨対象物（アノード）に電気的に接触し、閉回路を発生させます。

このように、固体電解質（エレクトロライト）に電圧をかけ電流を流すと、陽極反応と陰極反応が同時に起こります（酸化還元反応）。

この意味で、金属製の対象物（陽極）が酸化されることで研磨加工が行われることになります。

また、研磨中は常に陽極と陰極が入れ替わる仕組みになっており、金属製の対象物が陽極の時に研磨し、陰極の時に還元という作用になり、品質の高い研磨結果が得られます。

反転するタイミングや時間は材質ごとに異なりますが、予め装置にプリセットされております。

◇ DLyte乾式電解研磨のメリット

DLyte乾式電解研磨と最も比較しやすい研磨技術である湿式電解研磨と比較致しますと、湿式電解研磨は、電解液の温度管理や電流密度の設計など専門知識が必要で、研磨効果としても角ダレが発生しやすいのが一般的かと思えます。

また研磨後の電解液の処理も中和等を必要とし、

環境問題の観点から敬遠されていると聞きます。

一方DLyteでは、一般的な室内環境での使用であれば厳密な温度管理は不要であり、電流密度の設計も必要としないことから、専門知識を必要としません。

イオン交換樹脂からなる乾式の電解質（エレクトロライト）も中和せずにそのまま産廃として廃棄が可能です。

操作面では、材料別の研磨条件がプリセットされており、ボタンを押すだけで、誰でも容易に電解研磨が可能です。

◇ DLyte乾式電解研磨の具体的な特徴

①研削雰囲気と研磨雰囲気を1ステップで実現できます。エレクトロライトに含まれている電解液に代わる薬液が、通電状態でエレクトロライトが研磨対象物に触れると染み出て、層内の湿度が上がります。そして、槽内の湿度環境を変化させることで研磨量を任意に設定できます。高湿度で高電流となり積極的な研磨（研削）、逆に低湿度で低電流となり、バフ研磨（研磨）の雰囲気となります。装置に湿度調整用に精製水噴霧機能や圧縮エアの噴出機能が備わっており、狙う湿度を設定しておけば、自動で研磨層内の湿度を制御できます。

②角・エッジのダレについては、面に比べ、角・エッジにメディア粒子が触れる時間が極めて短い為、湿式電解研磨やパレル研磨に比べ、オリジナルの形状を維持し易いです。

③樹脂との複合材料も研磨可能です。電解研磨の為、樹脂には無反応であり、金属面のみが研磨されます。また、研磨したくない金属面は、一般的なマスキングテープや塗料で保護も可です。

④DLyte研磨による減肉は、他の研磨方法の所要時間と比較すると、圧倒的に寸法偏差が少ない為、造形物のみならず、従来の切削物への適用も可能です。もちろん長時間の研磨では寸法に影響は生じますが、予測しやすい為、コントロールが可能です。

⑤鋼種別の研磨パラメーターがプリセット済みの為、誰でも操作可能です。また独自の研磨パラメーターを設定し、装置に保存することも可能です。

◇ 装置及びエレクトロライトのラインナップ

研磨する対象物の材質、外形寸法や数量、また目的に合ったモデルがラインナップされており。

大学、研究所や小規模ラボでの活用が多い「DLyte Desktop Pro」は、小さい部品や少量の研磨に適した卓上モデルです。研磨可能寸法は最大で外径75mm、高さ50mmと小さいながらも、研磨品質や使いやすさは中大型モデルと同等です。

一方、大型モデルである「DLyte PRO500」は、1個での最大研磨可能寸法は外径500mm、高さ250mmまで、または複数個同時であれば、外径200mm、高さ200mmの研磨可能範囲が8カ所同時で研磨でき、大型製品から小型部品の大量研磨に対応しており、最後まで安定して均一な研磨が可能です。また、AGVやロボットアームを使用し研磨の自動化の機能も付加することが可能です。

更に新たなラインナップとして、電気がチャージされたエレクトロライトがノズルから噴射され、狙った箇所を局所的に研磨できる「DLyte eBlast」もあります。

従来から販売しておりますコンパクトモデル「DLyte 1、DLyte 10、DLyte 100」を含めて、お客様のニーズに合わせて取り揃えております。

エレクトロライトは、大分類としてコバルトクロム、ステンレス、ニッケル系、スチール系、チタン系、アルミ系があり、研磨対象物の状態や研磨目的にあわせて選択できるようになっております。

研磨前の状態が、3Dプリンターで造形したままの状態や、切削面などの状態を確認し、弊社より適したメディアをご提案させていただきます。

◇ 研磨事例

EOSの金属積層造形機M290で造形したマレージング鋼（MS1）のサンプルで、造形したままのサンプルをDLyteのみで研磨した例です（図1 研磨時間別の面粗さ改善具合）。

研磨時間は長いですが、エッジをキープしつつ面粗さが大幅に改善されています。

また、研磨を24時間まで継続した場合、寸法変化はありますが、積層段差も目立たなくなり、面粗さも大幅に改善します。

もう一つの例として、切削面をイメージしたサ

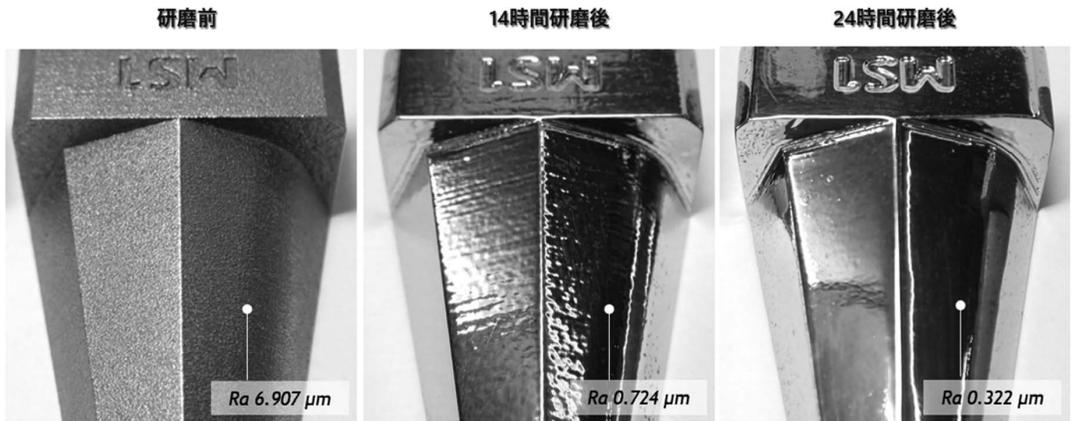


図 1 研磨時間別の面粗さ改善具合

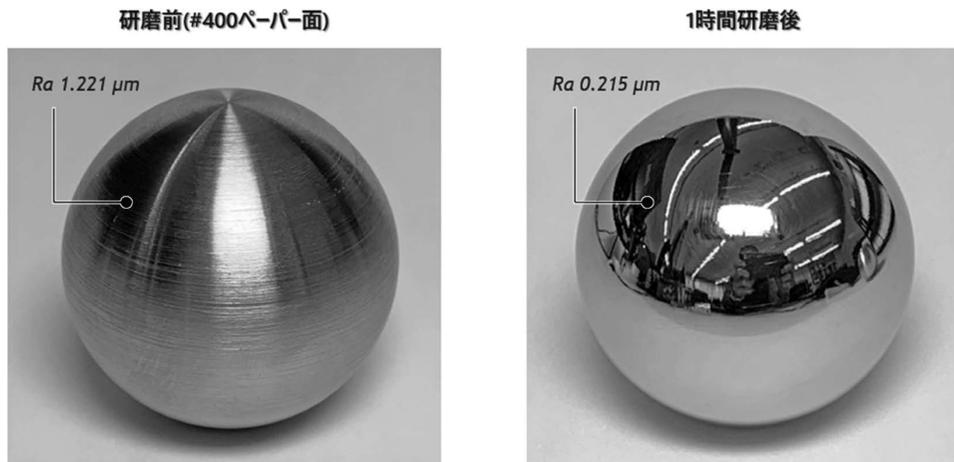


図 2 研磨前の処理例その1

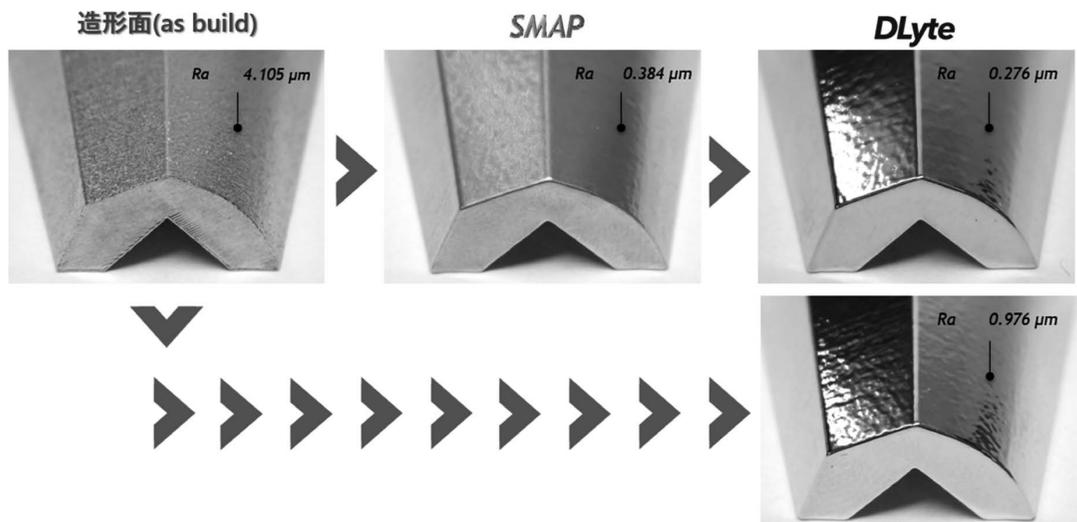


図 3 研磨前の処理例その2

ンプルの鏡面研磨の例です（図2 研磨前の処理例その1）。

金属積層造形物（造形機：EOS M290、材料：インコネル718）の面を、サンドペーパーの400番まで手研磨してから、DLyte研磨を60分間だけ行っています。前処理として手研磨を行ってはいませんが、切削面と同等レベルというイメージで、DLyteで鏡面状態まで研磨することが、短時間で且つ簡単にできるということです。

次に、SMAP*¹で前処理した後にDLyte研磨した組み合わせ研磨例です（図3 研磨前の処理例その2）。

造形直後（造形機：EOS M290、材料：インコネル718）の面から直接DLyte研磨を行うよりも、研磨時間の短縮だけではなく、積層段差やウネリが減少しています。

* 1：SMAPとは東洋研磨材工業株式会社様のエアアを用いた遠心力を応用した投射加工マシンで、メディアは弾性研磨材を使用しています。

むすび

乾式電解研磨装置DLyteがリリースされてから6年が経過し、装置メーカーであるGPAINNOVA社は、あらゆるニーズに対応できるように技術を飛躍的に革新し、アディティブマニュファクチャリングの製品のみならず、従来からある金属加工製品への適用も多く、今後も後処理研磨の自動化、簡略化、再現性を更に追及しております。

弊社、NTTデータ ザムテクノロジーズとしては、DLyte乾式電解研磨技術の向上はもとより、さまざまな技術との組み合わせを自ら検証し、日々、目的に適した最適な後処理方法を探求しております。もちろん自社で実証した上で、自信をもってお客様へのご提案をさせていただきます。



②金属積層造形品の品質改善に使用される

HIP処理とは

金属技研(株) 技術開発本部 ます お ひろ しげ
開発センター テクニカルセクション 増 尾 大 慈

まえがき

金属積層造形は、その独特の製作原理から既存の機械加工や casting 工法では製作困難な形状を再現することができ、軽量化形状や部品一体化形状、複雑流路形状など設計者が理想とする形状自由度の高い高付加価値部品を作製することができる。現在も世界中で金属積層造形を使用した部品開発および製作が行われているが、その殆どが試作もしくは過酷な使用環境以外の部品用途のみにとどまっている。その要因の一つとして、その独特な製作原理に起因する内部欠陥が挙げられ、圧延材や鍛造材のような既存工法と比較して、強度低下もしくは品質のばらつきが生じる可能性が懸念されている。上記の課題を解決する手段として熱間等方圧加圧法：Hot Isostatic Pressing（以下、HIP）が注目されている。本章は、HIP処理の基本から金属積層造形とHIP処理を組み合わせた事例

について説明する。

◇ HIP処理の基本事項

HIP処理は、高温環境下で処理対象物に圧力を作用させて加圧加工する技術である。加圧の方法としては、一軸方向に加圧処理するホットプレスと異なり、主にアルゴンなどの不活性ガスを圧力媒体として使用する為、処理対象物に等方圧を加えることができ、精密鑄造品のような複雑形状についても初期形状を損なうことなく処理することが可能となる。その際の処理環境は、超高温や超高压のような特殊な条件に特化したHIP装置を除き、温度は最大で2000℃、圧力は最大196MPaとなり、高融点金属を含む金属材料やセラミックスも加圧加工でき、航空宇宙、エネルギー、半導体、自動車関連や素材材など様々な分野で利用されている。図1にHIP装置の構造を図2にHIP処理前後の製品モデルを示す。

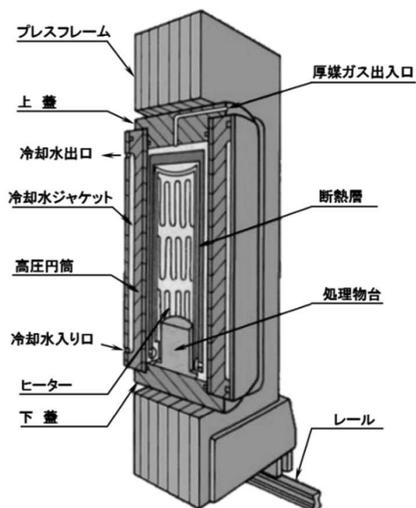


図 1 HIP装置の構造

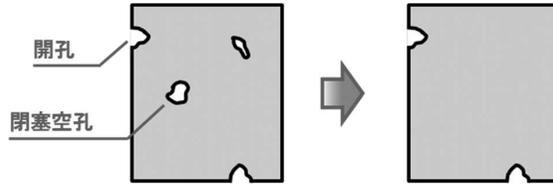


図 2 HIP処理前後の製品モデル

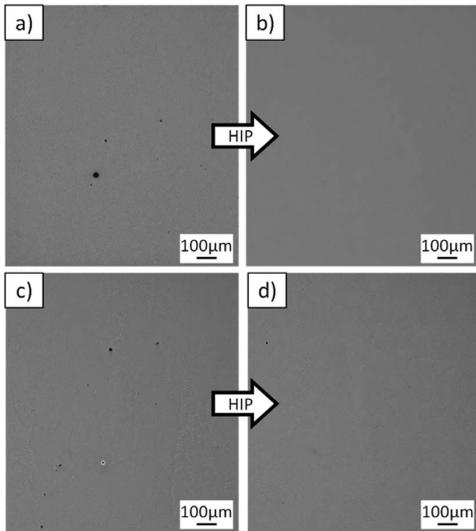


図 3 Ti-6Al-4V造形品HIP前後の断面写真
a)、b) EBm c)、d) SLM

HIP処理の代表的な利用例の一つとして内部欠陥の除去が挙げられる。鋳造品、粉末冶金品はその工法上、製品内部に空孔状の欠陥を内包する懸念があり、それらの内部欠陥は機械的強度や耐疲労性の低下および素材品質のバラツキを生ずる原因となる。HIP処理は高温環境下で等方的に圧縮できる特徴から、製品形状の変形を最小限に抑制しながら内部欠陥を除去することが可能となり、素材の品質向上の手段として利用されている。適用されている一例としては、高温環境下で使用されるガスタービンブレードなどの高速回転部品は、製品中の内部欠陥を起点として破壊が生じる為、HIP処理で破壊起点をなくすことが長期間の安定利用に不可欠となっている。

◇ 金属積層造形品に対するHIP処理効果

金属積層造形といっても、指向性エネルギー堆積法 (DED: Direct Energy Deposition) や粉末床

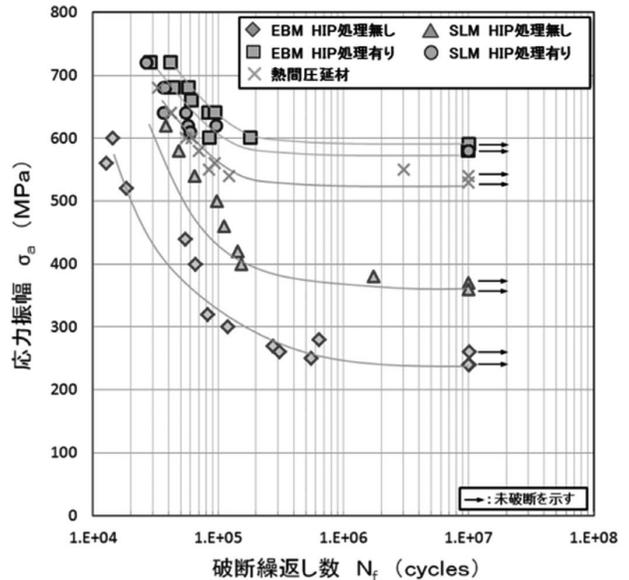


図 4 Ti-6Al-4V造形品のHIP処理効果

溶融結合法『電子ビーム溶融 (EBM: Electron Beam Melting) / レーザー溶融 (SLM: Selective Laser Melting)』の様に多数の方式が存在する。どの方式にも共通することだが、積層造形の基本は、材料となる粉末もしくはワイヤーを必要な所に供給し、供給された材料をレーザーや電子ビーム、アーク等の熱源で溶融させて3次的に積み上げていく。当然、その時の材料の供給状況、熱源によって溶かされた材料のぬれ広がり状況によっては、材料の供給不足や未溶融、溶融ビードの接続不良等が生じ、その可能性は積層レイヤー毎にある事となる。また、上記の現象は造形品の形状や造形方向によっても変動し、複数のファクターが互いに相関しあいながら造形物内部に3次的に分散した内部欠陥を生じさせる要因となる。

一例として、EBM、SLMで造形したTi-6Al-4V造形品の断面写真を図3に、疲労強度を図4に示す。積層造形の条件が適切であれば造形体の密度

は99.5%以上の高密度体を得ることができるが、断面観察結果からも確認できるように、いずれの方式に置いても微小な内部欠陥が存在していることがわかる。これらの内部欠陥は、疲労強度のような動的な強度には大きく影響を及ぼし、EBM、SLMいずれの方式にしても内部欠陥が存在すると一般的な圧延材の疲労強度と比較して2/3もしくは半分程に強度低下する傾向がある。これら造形品に後工程でHIP処理を実施すると、高温と圧力によって内部欠陥が押しつぶされ、欠陥数の低減または欠陥サイズの減少を確認することが出来る。それに起因する形で、各方式造形品の疲労強度も向上し、圧延材と同等の疲労強度となっている。上記の結果より、積層造形品にHIP処理を実施することで、静的および動的強度において強度バラつきを低減させることが可能となる。

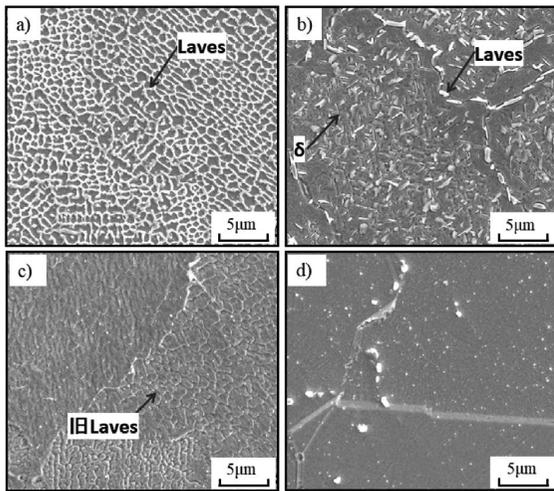


図 5 各HIP温度で処理したNi Alloy718造形品の断面写真 ※溶体化時効処理は未実施
a) As-build (HIP無) b) 980°C c) 1050°C d) 1120°C

金属積層造形で適応される材料種としてはTi-6Al-4Vと同様にNi基合金も適応が検討されている。それらは高温もしくは低温環境下で使用されることが多く、その環境下の中で高速回転部品として使用されるケースもある。図5に示すように析出強化によって強度を確保するNi基合金の場合、積層造形特有の部分的な急速冷却によって、造形後は他工法では見られない金属組織となる。HIP処理は高温処理からの炉冷となるため、内部欠陥除去と同時に組織の安定化も図ることができる。また、図6に示すように一般にNi基造形品のクリープ強度は低いと言われているが、必要となる機械的強度や内部欠陥のサイズ、金属組織に対して溶体化時効処理とHIP処理条件を選択することで調整が可能となる。造形品の品質改善手段として造形材に特化したHIP処理条件の検討も必要と考える。

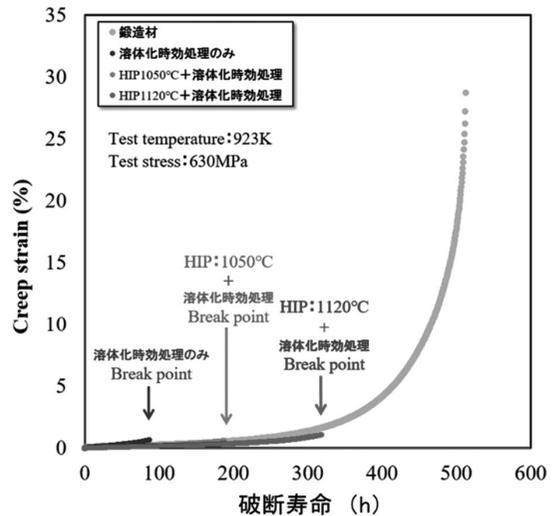


図 6 SLMで造形したNi Alloy718造形品のHIP処理温度とクリープ寿命の関係

③積層造形へのブラスト・ピーニング技術

新東工業(株) サーフエステックカンパニー 辻 俊哉
 開発グループ プロセス開発チーム 副チームリーダー

まえがき

積層造形は、3次元データを基に材料粉末などを一層ごと積層し、3次元の造形物を直接製造する技術である。積層造形は、鍛造や切削加工など従来加工技術と比較して複雑形状の部品を製造可能であること、材料の歩留まりが良いこと、顧客に合わせたオーダーメイド製造が行いやすいなどの特徴から航空機業界や医療業界で多く適用されている。また自動車業界においても、金型レスで部品を造形できるために、自動車の補給部品に対して積層造形の適用が行われ始めている。

積層造形の課題の1つとして、造形品の表面粗さが高く、平均粗さRa5 μ m以上ある。この表面粗さは部品の強度などの機能低下を招くため、一部の部品を除いては表面粗さを低減するための後加工が重要となる。従来であれば、刃具や砥石を用いて切削および研磨加工する方法が一般的であるが、積層造形は複雑形状である場合が多いため、刃具や砥石が入りづらい場合が多い。そのため、ブラストやバレル研磨のような遊離砥粒を用いた

加工技術が多く適用される。

本稿では、金属積層造形品の表面粗さの低減技術としてのブラスト加工や疲労強度向上技術としてのピーニング技術について解説する。

◇ 積層造形の表面構造について

積層造形の表面構造の特徴は、積層段差やレーザー走査痕が大きくなうねりとして存在し、その上に未熔融粉末が残存している表面構造である。図1に積層造形マルエージング鋼の造形角度と表面粗さの結果を示す。図のように、積層造形は造形角度により表面粗さが大きく異なることも特徴である。特にオーバーハング箇所は表面粗さが非常に高い。これらのことから、造形部品は箇所次第で表面粗さに大きくムラがあることが特徴となる。

◇ 金属積層造形向け表面処理技術

1. ブラスト加工

ブラストは多角形状や球状の投射材を圧縮エアや遠心力で加速し、被加工材に衝突させる加工方法である。積層造形へのブラスト加工としては球

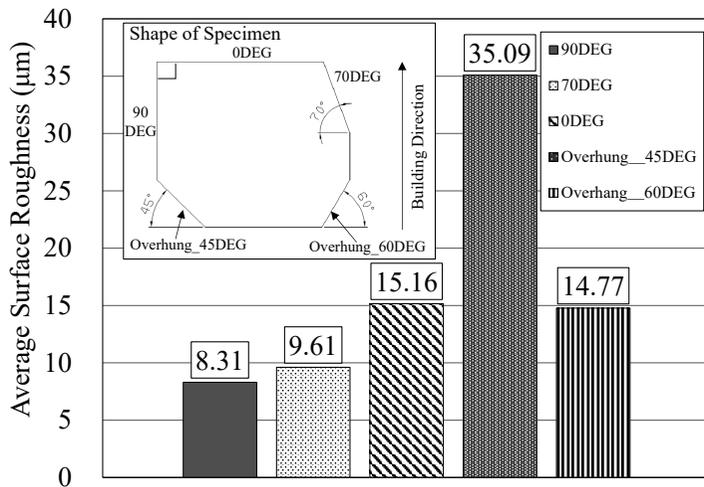
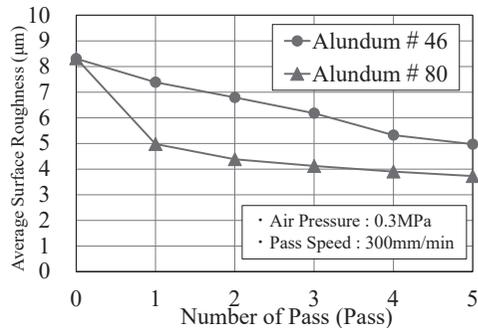
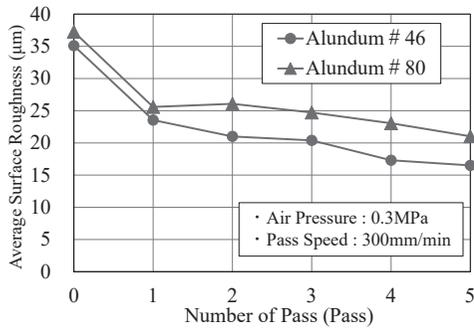


図 1 造形角度と表面粗さ
 (方法：レーザーPBF 粉末：マルエージング鋼)



(a) Overhang_45DEG

(b) 90DEG

図 2 プラストによる表面粗さ変化

状ガラスビーズおよび多角形状アルミナを用いて加工を行う場合が多い。本稿では積層造形マルエージング鋼の造形角度が異なる面に対するプラスト投射材粒度の影響を記載する。

図 2 (a)、(b) に90DEG面およびオーバーハング45DEG面にアラウンド # 46 (粒度300~425µm) とアラウンド # 80 (粒度150~212µm) を用いてエア式プラスト装置で加工した結果を示す。90DEG面の場合、粒度が小さいアラウンド # 80の方が粗さ低減効果は高い。一方、オーバーハング45DEG面の場合、粒度が大きいアラウンド # 46の方が粗さ低減効果は高い。図 3 にプラスト加工前後の各面の鳥瞰図を示す。90DEG面の両プラスト加工後表面は、未溶融粒子や積層痕によるうねりは観察されず、プラストによる表面凹凸のみが観察された。そのため、粒度が小さいアラウンド # 80の方が表面粗さは小さくなった。アンダーカット45DEG面の両プラスト加工後表面には大きなうねり観察された。これは本面の表面粗さが非常に大きくうねりが残存してるためである。このことから、粒度の大きいアラウンド # 46の粗さ低下低減効果が大きいのは、粒子の衝突エネルギーがより高く、高い削食効果が得られたためである。

これらのことから、造形部品は箇所次第での粗さの違いのために、顧客要求粗さを達成できるように適切な加工条件選択重要となる。

2. プラストとのハイブリット加工

一般的なプラスト加工より更に表面粗さを低減させるためには、2段プラスト加工により1段目プラスト加工の表面粗さを均すことやバレル研磨などの他プロセスとの組合せによるハイブリット

Condition	Overhang_45DEG	90DEG
As-built		
Alundum # 46 (5PASS)		
Alundum # 80 (5PASS)		

図 3 表面観察結果

加工が重要となる。本節ではプラストと電子ビーム研磨のハイブリット加工について解説する。

電子ビーム研磨は、被加工材表面に電子ビームを照射し、被加工材表面を『溶融⇒溶融金属の再分布⇒凝固』させる研磨方法である。

本加工法は、表面粗さを低減させるだけでなく、溶融金属の再分布により表面近傍の空孔や微細クラックの大きさおよび数を低減することもできる。

写真 1 に積層造形チタンに電子ビーム研磨およびプラスト加工後電子ビーム研磨した試験片の加工

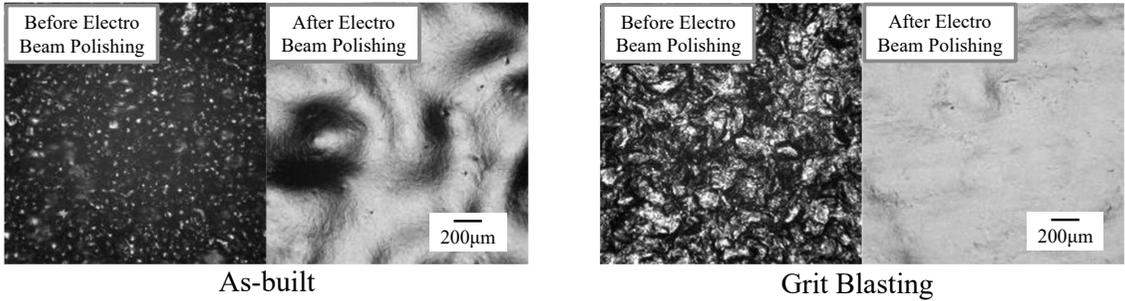


写真 1 表面観察結果

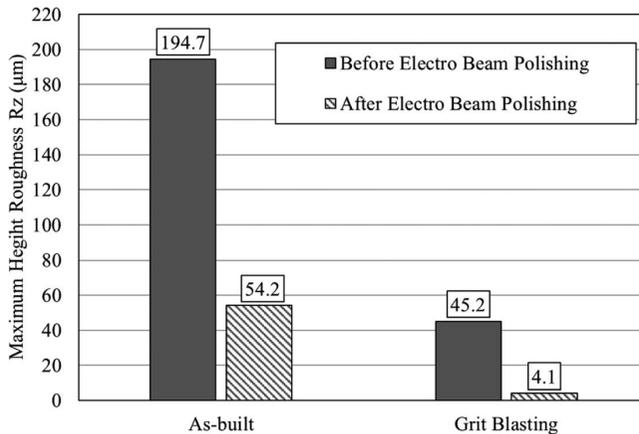


図 4 電子ビーム研磨前後の表面粗さ

表面写真を示す。また図 4 に表面粗さ結果を示す。

積層造形品に電子ビーム研磨を行っただけでは積層造形の大きなうねりが除去できていなかった。一方、プラスト加工後に電子ビーム研磨を行った試験片はブラスト加工によりうねりの影響が低減できていることから大きなうねりが観察されなかった。また電子線は表面の凸部に集中する特性があることから凸部の電子密度が高まり、熔融しやすくなる。そのためブラスト加工により形成された短周期の凹凸構造が電子ビーム研磨の表面粗さ低減に寄与したことが考えられる。

3. ショットピーニングおよびレーザーピーニング

積層造形材は、表面粗さが非常に大きいこと、表面から内部にかけて欠陥が存在することおよび引張残留応力が存在することから従来の製造技術と比較すると疲労強度が低いとされている。そのため、表面粗さの影響や欠陥を無害化する技術や引張残留応力を低減する技術が必要となる。

特に表面粗さが高い積層造形材が残存する場合

は、表面近傍の欠陥よりも表面粗さを起点とした疲労破壊が発生する傾向となる。そのため表面粗さの影響を軽減するための表面処理としてピーニングが有効である。ピーニング技術の代表的なプロセスとしては、ショットピーニングとレーザーピーニングが存在する。

ショットピーニングはショットと呼ばれる球状粒子を被加工材表面に衝突させ、表面近傍に塑性変形を発生させ、圧縮残留応力と加工硬化を付与方法である。一方、レーザーピーニングは単パルスレーザーを水中内にある被加工材に照射することにより、レーザーアブレーションを発生させ、その際に発生する衝撃波により圧縮残留応力を付与方法である。ショットピーニングと比較すると深い圧縮残留応力を付与することが特徴の1つである。

本節では積層造形アルミニウム合金AlSi10Mgの疲労強度に対するショットピーニングおよびレーザーピーニングの影響の調査結果について記載する。

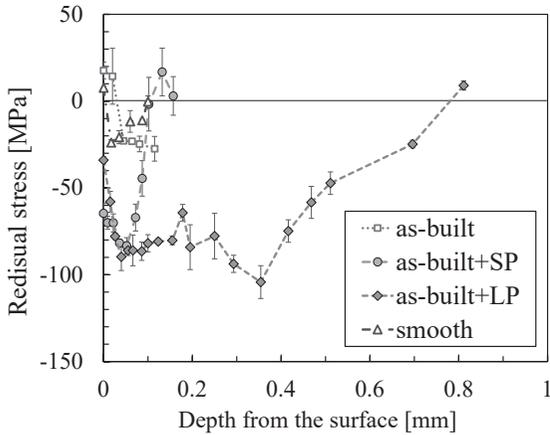


図 5 残留応力分布

試験片はレーザーPBFで造形され、造形肌まま (as-built) と研磨肌 (smooth) を準備した。これらの試験片は焼きなましを施すことにより、積層造形による引張残留応力を除去した。ショットピーニング (SP) およびレーザーピーニング (LP)、造形肌にのみ適用した。

図5に残留応力分布を示す。造形肌 (as-built) および研磨肌 (smooth) は、焼きなましの効果により残留応力はほぼ存在しなかった。一方、ショットピーニング (as-built+SP) およびレーザーピーニング (as-built+LP) は、-100MPa程度の最大圧縮残留応力が付与された。特にレーザーピーニングは表面から0.8mmの深さまで圧縮残留応力が付与されており、ショットピーニングより深い圧縮残留応力付与となった。

図6に平面曲げ疲労試験結果を示す。造形肌 (as-built) は最も 10^7 回強度が低く50MPaであった。一方、研磨肌 (smooth)、ショットピーニング (as-built+SP)、レーザーピーニング (as-built+LP)

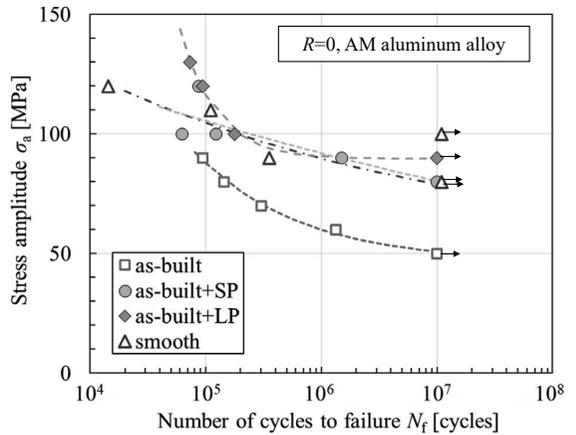


図 6 疲労試験結果

LP) は 10^7 回強度が80~90MPaとなり、60~80%の強度向上が得られた。疲労強度向上の要因としては表面除去による表面粗さの低減やピーニングによる圧縮残留応力付与と考えられる。

むすび

日本国内においても金属積層造形の適用が進みつつあり、今後は試作加工だけでなく量産加工を視野にいたした表面処理プロセス提案や測定/評価が重要になると考える。

本稿では記載しなかったが、弊社では積層造形に適した研磨技術であるバレル研磨の加工提案とその装置も提供している。また試作加工や加工設備だけではなく、表面粗さや残留応力などの加工品質を評価する測定装置も有している。

弊社としては、積層造形の表面処理において『提案⇒試作加工⇒測定・評価⇒加工装置/受託加工』を提供できるワンストップソリューションを提供していきたい。

2. 造形適用事例

①航空宇宙分野への適用

三菱重工業㈱ 総合研究所 製造研究部 たちばな たか ひろ
製造技術第二研究室 上席主任 橋 孝 洋

三菱重工業㈱ 宇宙事業部 技術部 あ だち まさ き
液体ロケットエンジン設計課 主任 足 立 将 基

まえがき

部品のリードタイム・コスト削減、軽量化等のメリットが得られる金属3Dプリンタ技術は、世界を見渡すと、すでに多くの航空宇宙製品に適用されている。本年3月に初飛行したH3ロケットの1段LE-9エンジンにも多数の金属3Dプリンタ部品が搭載され、LE-9エンジンは無事にその役割を果たした。このように、日本の航空宇宙分野でも金属3Dプリンタ技術の適用が本格化している。本稿では、航空宇宙分野における金属3Dプリンタの適用事例や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3Dプリンタ技術の適用状況

前回の2016年7月の特集時点から、世界の3Dプリンタ技術の実用化拡大のスピードはますます加速している。その一例として、航空機のエンジン及び機体、ロケットへの適用状況を以下に紹介する。また、前回時点での製品適用は、Powder Bed

Fusion (PBF) 方式と呼ばれる3Dプリンタ技術で製造する部品がほとんどであったが、近年は、Directed Energy Deposition (DED) 方式の3Dプリンタ技術で製造する部品の実用化も進んでいる。上述のLE-9エンジンにもPBFとDEDの両方式の金属3Dプリンタ部品が搭載された。なお、DED方式とは、レーザーや電子ビームなどの熱源をワークに照射し、金属粉末や金属ワイヤを熔融・凝固させることを繰り返して三次元形状を積層造形する金属3Dプリンタ技術のことである。

1. 航空機

(1) エンジン—GE Aviationの例¹⁾—

ボーイング777Xに搭載されたGE9Xエンジンは、燃料ノズル、温度センサーや燃料ミキサー、熱交換器、セパレーター、低圧タービンプレードなどを含む300点以上の3Dプリント部品が適用されている(図1)。従来工法の300点の部品を7点の部品に統合するなど3Dプリント部品を適用することで軽量化を実現し、同社のGE90エンジンよりも燃費を10%向上させ、FAA認証も取得済みである。



図 1 航空宇宙分野における金属3Dプリンタの適用例

また、同エンジンは、最も強力な民間航空機用ジェットエンジンとして2019年のギネスブック世界記録にも認定されている。

(2) 機体—Airbus Groupの例²⁾—

エアバスのA350 XWBにおいては、客室内の部品の他、パイロン（翼の下にエンジンなどを取りつけるための支柱）など機体のチタン製構造部品にも3Dプリンタ部品が採用されている。3Dプリンタ技術で製造された部品は、従来工法で製造された部品よりも30%程度の軽量化を実現している。

2. 宇宙

(1) ロケット—海外の事例^{3)~7)}—

Rocket Lab社製Electron rocketの小型液体燃料エンジンRutherford (図1) は、燃焼室、インジェクター、ポンプおよびメイン推進薬バルブをEB-PBF（電子ビームを熱源とするPBF）にて製造しており、2018年に打ち上げに成功し、昨年までの時点で260のエンジンが打ち上げに使用されている。

Blue Origin社の月面着陸船BLUE MOONのエンジンであるBE-7にも大型3Dプリンタ技術が使われている。BE-7エンジンは、2020年にNASAの宇宙飛行センターで実施された燃焼試験に成功している。

Relativity Space社は、独自開発した世界最大の金属3D（DED）プリンタ「Stargate」(図1) などを活用し、Terran1やTerranRと呼ばれるロケットを開発している。同社は、95%の部品を3Dプリンタ技術で製造することを目指している。全質量のうち85%を3Dプリンタ（PBFおよびDED）で製造したTerran1は本年3/23に初飛行した。惜しくも2段エンジンの異常で軌道投入はならなかったが、1段エンジンの燃焼後、1段と2段の分離まで成功している。また同社は、3Dプリンタを採用することで、従来工法に比べて、部品点数を100分の1以下とし、製造期間も12分の1（2年→2か月）に短縮、サプライチェーンがシンプルになり、全体的な信頼性が向上するとしている。

(2) ロケット—H3ロケット1段LE-9エンジンの例⁸⁾—

三菱重工では、JAXA殿、XAM殿と共同で、H3ロケット用のLE-9エンジンの12コンポーネントの17部品をPBF方式、3コンポーネントの6部品をDED方式の金属3Dプリンタ技術で製造している(図2)。中でも、噴射器とミキサー配管には、大きなメリットがある。

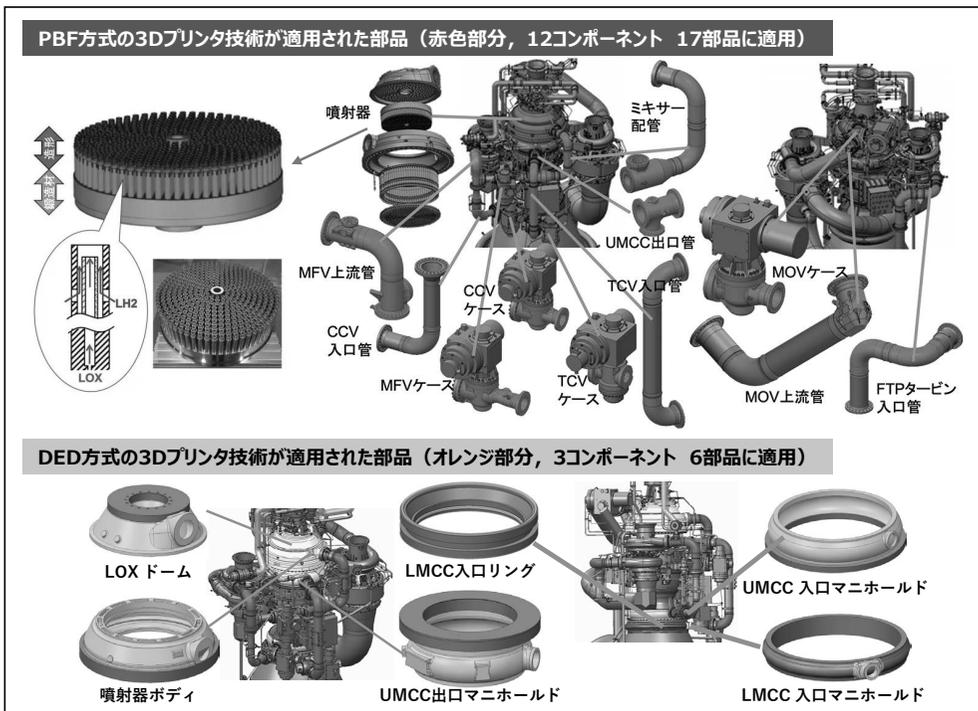


図 2 LE-9エンジンに適用された3Dプリンタ部品

LE-9の噴射器の役割は、燃焼室に液体水素と液体酸素を供給して混合させるもの。約500本の二重円管構造のエレメントがあり、中心部に液体酸素、二重円管の隙間を液体水素が流れる。3Dプリンタであればコアとなる部分を一体造形でき、従来の製造法に比べてコストの50%以上を削減することができた。

もう1つのミキサー配管はシンプルな配管構造であるが、従来複数の部品を組み立てて製造していた部品を1つの部品として一体化できたことで、質量やコストの削減や、配管の肉厚を均等にすることができた。

このように、3Dプリンタ技術でコストダウンを図るだけでなく、部品としての信頼性、機能性も高めることができています。

◇ 実用化拡大に向けた動き

航空宇宙製品に3Dプリンタ技術がさらに浸透し実用化拡大にするためのポイントは前回の2016年7月の特集でも述べた通り2つある。1つは幅広い材料、プロセスの規格化、2つ目は品質保証の信頼性向上である。

1つ目の規格化に関しては、前回の特集時点から、SAE Internationalなどから様々な3Dプリンタ技術用のプロセスや材料の規格が発行されてきている。今後、種々の材料の利用が進むことにより、さらに機能的で重要な部品作りにも3Dプリンタ技術が適用される可能性が増えると期待される。

2つ目の品質保証の信頼性向上については、製品検査がポイントとして挙げられる。航空宇宙関連の部品に対する品質保証の考え方は、基本的に2つある。一つ目は、製品の品質は製品自体で確認すること、二つ目は、難しい製造プロセスの場合、そのプロセス自体を管理することである。難しい製造プロセス分野に入る3Dプリンタ技術は、製造プロセスを管理し、なおかつ製品自体もすべて検査する必要がある。特に、製品検査には時間とコストを要し、検査ができない部品は形がつかなくても使用できない。そのため、3Dプリンタ技術によって複雑で高機能な部品を作れるものの、検査できないことで適用を見合わせているものもある。

今後、造形過程を監視できる精密なインプロセスモニタリングが実物の検査に置き換われば、品

質保証に対する考え方が変わり3Dプリンタ技術の適用部品についても拡大することが期待される。

むすび

現時点で、航空宇宙部品への3Dプリンタ技術の実用化拡大のスピードは衰えることなく、今後数年も益々加速するものと考えられる。三菱重工でも、航空宇宙部品への3Dプリンタ技術の新規適用に向けた開発として、アルミニウム合金ワイヤを用いDED方式で造形するロケット燃料タンクの開発⁹⁾や、L-PBF（レーザーを熱源とするPBF）方式で銅合金製燃焼室とInco718合金製噴射器を一体造形する小型ロケットエンジンの開発¹⁰⁾、樹脂と金属のマルチマテリアル構造の接合部に3Dプリンタ技術を適用することによる信頼性に優れた軽量構造の開発¹¹⁾などを、金属3DプリンタのR&D・製造拠点であるAM-Zone¹²⁾などを活用して推進している。

今後も、航空宇宙部品への適用実績を増やし、3Dプリント部品の安定した品質を示すことで、国際競争力の向上及び3Dプリンタ技術の国内での定着に貢献できればと考えている。

参考文献

- 1) <https://www.geospace.com/propulsion/commercial/ge9x>
- 2) <https://www.theengineer.co.uk/content/opinion/improving-metal-3d-printing-processes-for-aircraft-parts>
- 3) <https://3dprint.com/58203/rocket-lab-electron-rutherford/>
- 4) <https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-successfully-circularizes-orbit-with-new-electron-kick-stage/>
- 5) <https://twitter.com/RocketLab/status/1521949311516299264>
- 6) <https://spacenews.com/blue-origin-continues-work-on-be-7-lunar-lander-engine/>
- 7) <https://www.relativityspace.com/>
- 8) https://www.nttdata-xam.com/solution/am/works/article_411/
- 9) <https://www.nikkan.co.jp/articles/view/645461>
- 10) <https://iafastro.directory/iac/paper/id/58948/abstract-pdf/IAC-20.C4.1.10.x58948.brief.pdf?2020-07-07.11:16:38>
- 11) <https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/584/584120.pdf>
- 12) <https://www.mhi.com/jp/news/21102201.html>
- 13) <https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-08/GE9X%20Additive%20parts.pdf>
- 14) https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2022-05/GEA0029_Engine%20Exploded%20Infographic_17x11_R5_0.pdf?utm_medium=organic+social&utm_source=linkedin
- 15) <https://idarts.co.jp/3dp/rocket-lab-electron-vehicle/>
- 16) <https://www.relativityspace.com/stargate>

②各種金型への適用

FUJIMAKI GROUP たか だ まこと
(株)・3D 営業部長 高 田 真

まえがき

1987年に実用化されたラピッドプロトタイプング (RP) はさまざまな分野 (自動車、航空宇宙開発、医療、家電) で試作期間の短縮や開発のコストダウンの手段として活用されてきた。日本でも2013年頃から金属3Dプリンタが脚光を浴び「第3の産業革命」とまで言われ、新たなモノづくりがはじまる予感を感じさせた。脚光を浴びてから9年、その間も造形技術は進歩し様々な積層造形技術や新たな素材が市場にリリースされてきた。近年では試作品の領域にとどまらず実用製品をダイレクトに製造する装置としても利用されはじめ、取り組みを急速に拡大するユーザーが増えつつある。

ひと言で3Dプリンタと言っても、前述で触れたように近年では様々なタイプの3Dプリンタ (図1) が市場にあるが、今回のテーマ「各種金型への適

用」においては粉末床溶融結合法 (パウダーベッドフュージョン) がもっとも市場で活用されている工法になる。この技術は造形物の機械特性、経時的な安定性、生産性など工業製品としての重要視される側面において製品製造の手段として適しており、最終製品への応用がもっとも進んでいるAM技術の一つである。

本稿では弊社保有のEOS社装置を用いた粉末床溶融結合法 (パウダーベッドフュージョン) の金型部品への適用事例と課題を紹介する。

◇ 金属3D技術の適応事例

AM技術の適用事例 (図2) としては航空宇宙産業、医療産業等における難加工素材や、難加工形状を用いた試作品や開発部品などが多くの展示会やメーカーのホームページで紹介されていることが多く、利用用途としてハードルが高いイメージがあるかもしれないが、実際の利用頻度として



図 1 金型部品製作で使用される様々な装置



図 2 AM技術で紹介される様々な部品

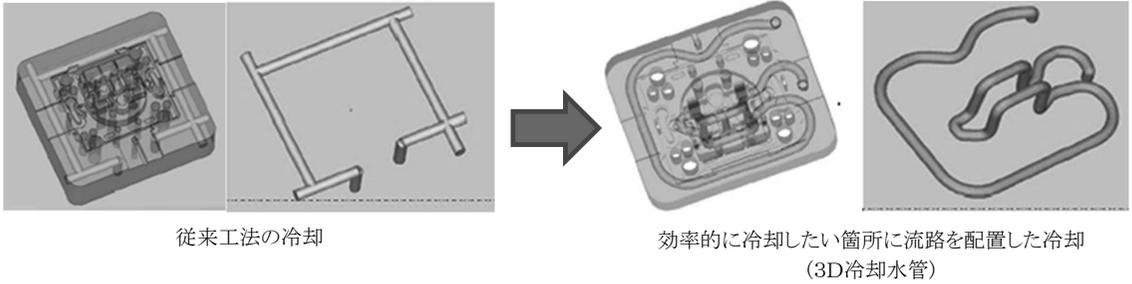


図 3 3次元冷却水管を配置した金型部品への事例

多いのは3次元冷却水管を部品内部に組み込んだ金型部品を金属積層造形する案件である。



◇ 金型部品における生産性の向上と効果実績

金型への一般的な事例(図3)はダイカスト金型や樹脂成形金型で使用する入子部品内部に効果的に冷却可能な3次元冷却水管を配置することで冷却効果を高めてサイクルタイムの短縮(およそ50%短縮)を実現し、反り、ヒケ、焼付きなどの低減効果、ショット数(およそ20~30%)の向上を図る。アイテムとして多くは自動車部品メーカーで日常的に使用されている。未導入のメーカーからは金属積層造形で製作した金型部品についての不安や懸念が少なからず聞こえてくるが、導入メーカーからは流路設計による効果の大小があったとしても、失敗や従来品よりも劣る結果は聞こえてこない。

◇ 金属としての機械的物性値

弊社が保有する金属積層造形装置EOS M290(独EOS社)で造形する金型用素材MS1(マルエージング鋼)はEOS社指定のレーザーパラメータを用いてEOS社純正粉末を用いることで、マテリアルデータ内の値(図4)を安定的に維持することができている。引張り強度、0.2%耐力、破断伸び率、弾性率、硬度、シャルピー衝撃値などの値を市販の従来鋼材と比較しても遜色ない数値を再現できている。またマルエージング鋼は時効処理により硬度調整も可能なため、従来金型と同等の条件で使用が可能である。

◇ 金型部品としての造形工法

3D冷却水管を配置した金型部品の造形工法は大

Material data sheet

Mechanical properties of parts at 20 °C (68°F)		時効処理硬化後	
		As built	After age hardening [2]
引張強度	Tensile strength [6]		min. 1930 MPa min. 280 ksi
(水平方向) - in horizontal direction (XY)		typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	
(垂直方向) - in vertical direction (Z)		typ. 1100 ± 100 MPa typ. 160 ± 15 ksi	typ. 2050 ± 100 MPa typ. 297 ± 15 ksi
0.2%耐力	Yield strength (Rp 0.2 %) [6]		min. 1062 MPa min. 270 ksi
- in horizontal direction (XY)		typ. 1050 ± 100 MPa typ. 152 ± 15 ksi	
- in vertical direction (Z)		typ. 1000 ± 100 MPa typ. 145 ± 15 ksi	typ. 1990 ± 100 MPa typ. 289 ± 15 ksi
破断伸び	Elongation at break [6]		min. 2 %
- in horizontal direction (XY)		typ. (10 ± 4) %	
- in vertical direction (Z)		typ. (10 ± 4) %	typ. (4 ± 2) %
弾性率	Modulus of elasticity [6]		
- in horizontal direction (XY)		typ. 160 ± 26 GPa typ. 23 ± 4 Msi	typ. 180 ± 20 GPa typ. 26 ± 3 Msi
- in vertical direction (Z)		typ. 160 ± 20 GPa typ. 22 ± 3 Msi	
硬さ	Hardness [7]	typ. 33 - 37 HRC	typ. 50 - 56 HRC
靱性(シャルピー)	Ductility (Notched Charpy impact test)	typ. 45 ± 10 J	typ. 11 ± 4 J

[6] Tensile testing according to ISO 6892-1:2009 (B) Annex D, proportional test pieces, diameter of the neck area 5mm (0.2 inch), original gauge length 25mm (1 inch).
[7] Rockwell C (HRC) hardness measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface. Note that measured hardness can vary significantly depending on how the specimen has been prepared.

図 4 マルエージング鋼のマテリアルデータシート (EOS社)



図 5 一体造形イメージ(通常造形)

大きく分けて2パターンある。1つは金型部品(入子)をまるごと造形してしまう一体造形(図5)である。部品そのものの高さが低く、積層回数によるコストへの影響が少ない場合は一体造形で製作する場合がある。もう一つは金型部品が凸形状で3D冷却水管が奥まで必要な金型部品の場合はコ

ストダウンを図るために機械加工で製作可能な部分は市販材を使用して機械加工し、3D冷却流路部だけを金属積層造形により肉盛り加工するハイブリッド造形（図6）である。

ハイブリッド造形のメリットは3次元冷却水管によるサイクルタイムの短縮を図りつつ造形時間の短縮（およそ20～50%）、使用粉末低減によるコストダウンを同時に実現できることである。逆にハイブリッド造形のデメリットは市販材に対して金属3D造形材を溶融するため、境界面が発生す

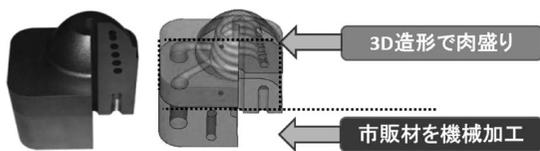
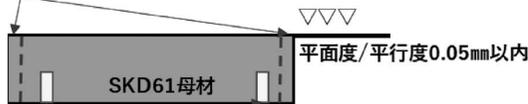


図 6 ハイブリッド造形イメージ（金型適用）

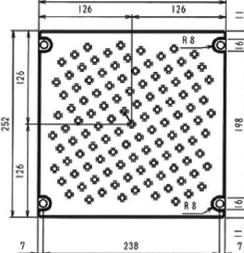
<母材製作>

最終仕上用の仕上代を1～2mm残して製作

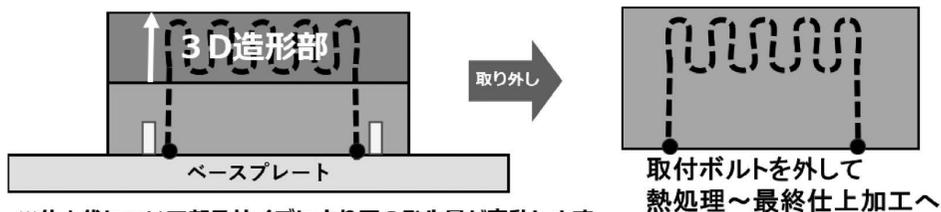


ベースプレート固定用タップ穴2～4カ所(M6/ピッチ20)

[ベースプレート]



<ハイブリッド造形工程>



※仕上代について部品サイズにより歪の発生量が変動します
大型部品の場合は片肉3mm程度必要になる場合もあります

図 7 ハイブリッド造形の母材製作における注意点

る。多くのユーザーから境界面が乖離したり、水漏れが発生する懸念や不安の声が聞くが200件/年間以上のハイブリッド造形実績がある弊社でも乖離による失敗事例は一度もない。とは言え、まったく懸念事項がないわけではない。造形に際してももちろんノウハウが必要になり、装置機種の向き不向き、粉末の選定、レーザーの条件開発が常に必要になる。またハイブリッド造形の母材作成には次のような注意点があげられる。

◇ 【ハイブリッド造形用母材製作の注意点】 (図7)

- ・脱磁をした状態での母材支給が必須
- ・材質はSKD61を推奨（他材質は乖離する可能性がある）
- ・平面度/平行度0.05mm以内が必要（サーフェイス研磨）
- ・最終仕上代を1～2mm程度残した状態で製作（造形時のズレ/歪が発生する為）
- ・ベースプレート固定用タップ（M6）が2～4カ所必要
- ・造形前に焼入れ/焼戻しを実施（硬度は事前に明示）
- ・3次元水管は面取りしないように注意（バリ取りは必須）
- ・造形サイズの注意（造形体積が大きすぎると乖離が発生する可能性有り）

◇ 素材成分とデメリット

従来金型素材は生産する製品や求められる品質によりさまざまな種類の特殊鋼から選定されている。しかし、金属3D積層では使用可能な粉末素材はレーザーの照射条件と金属粉末の溶融状態の最

適マッチングが求められるため、使用可能な素材が限られている。金型としての強度、耐久性が再現可能な素材として多くはマルエージング鋼が使用されている。マルエージング鋼は金型補修用の溶接棒にも使用される素材である。しかし、金型用途としては最低限の役割を果たしているがデメリットもある。

平成25年改正安衛法改正（平成25年1月）により特化則第二類物質にコバルトが追加された。特化則基準は1%未満だがマルエージング鋼は9%前後含有している為、対象となってしまう。

また輸出においても【輸出令第2項（17）】【貨物等省令第1条第22号】および【輸出令第4項（15）】



Material data sheet

Physical and chemical properties of parts

成分規格	Material composition
	Fe (balance) Ni (17 - 19 wt-%) Co (8.5 - 9.5 wt-%) Mo (4.5 - 5.2 wt-%) Ti (0.6 - 0.8 wt-%) Al (0.05 - 0.15 wt-%) Cr, Cu (each ≤ 0.5 wt-%) C (≤ 0.03 wt-%) Mn, Si (each ≤ 0.1 wt-%) P, S (each ≤ 0.01 wt-%)
密度	Relative density
	approx. 100 %
比重	Density
	8.0 - 8.1 g/cm ³ 0.289 - 0.293 t/m ³

図 8 マルエージング鋼の成分表 (EOS社)

【貨物等省令第3条第16号】(図9)に該当する可能性がある為、その場合は経済産業省に対して該非判定書の提出と共に輸出申請が必要になる。

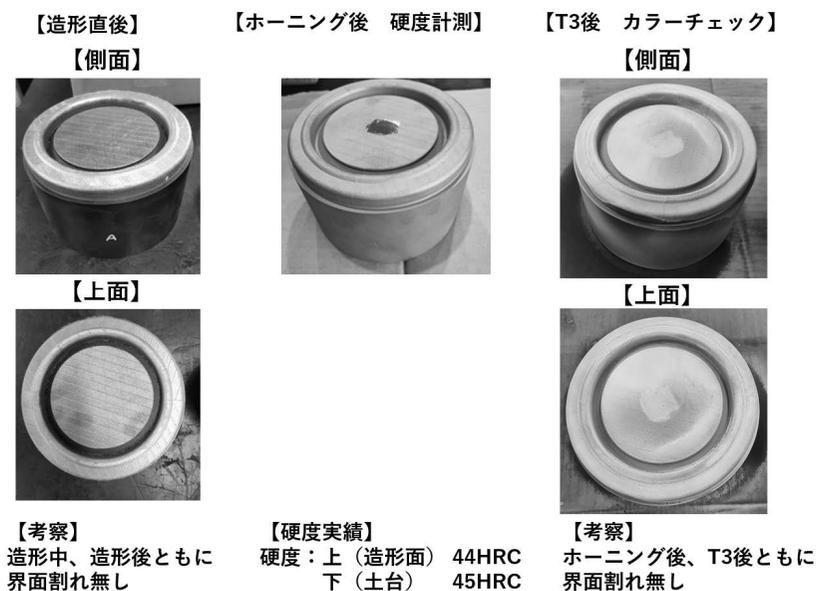
◇ 新規素材開発の動向

近年では国内金属メーカー各社で新たな金属積層造形粉末（金型部品用）の開発、リリースが進んでいる。Coレスマルエージング鋼、SKD61相当工具鋼など特化則の対象から外れた材質や熱伝導率がマルエージング鋼よりも高く冷却効果を更に改善できる材質、輸出規制に該当せず海外での量産型に適応可能な材質など今後の運用に期待値が高い。図に示すダイカスト用金型部品は市販のSKD61鋼材に新開発のSKD61相当の粉末をハイブリッド工法を用いて積層造形に成功した事例である(図10)。

積層造形部の機械的物性値、切削性のテストも市販鋼材と同等の再現を実現し、アルミダイカスト量産での運用も順調に進んでいる。この結果から今後の金属積層造形を用いた金型部品の製作需要はさらに拡大し、スタンダード化が進むことが予想される。金属積層造形を用いた金型部品製作についてご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。

<p>【輸出令 第2項（17）】</p> <p>ガス遠心分離機のローターに用いられる構造材料であって、次に掲げるもの（4の項の中欄に掲げるものを除く）</p> <p>3 マルエージング鋼</p> <p>↓</p> <p>【貨物等省令 第1条 第22号】</p> <p>ガス遠心分離機のローターに用いられる構造材料であって、次のいずれかに該当するもの</p> <p>ハ マルエージング鋼であって、引張強さが20度の温度において1,950メガパスカル以上となるものうち、寸法の最大値が75ミリメートルを超えるもの</p>
<p>【輸出令 第4項（15）】</p> <p>ロケット又は無人航空機に使用することができる構造材料であって、次に掲げるもの</p> <p>4 マルエージング鋼</p> <p>↓</p> <p>【貨物等省令 第3条 第16号】</p> <p>ト ペイロードを300キロメートル以上運搬することができるロケット又は500キログラム以上のペイロードを300キロメートル以上運搬することができる無人航空機に使用することができるマルエージング鋼であって、次の（一）及び（二）に該当するもの</p> <p>（一）次のいずれかに該当するもの</p> <p>1 固溶化熱処理段階で20度の温度において測定した最大引張強さが900,000,000パスカル（0.9MPa）以上のもの</p> <p>2 析出硬化熱処理段階で20度の温度において測定した最大引張強さが1,500,000,000パスカル（1.5MPa）以上のもの</p> <p>（二）次のいずれかに該当するもの</p> <p>1 長さが5ミリメートル以下の板又は管</p> <p>2 厚さが50ミリメートル以下の管であって、かつ、内径が270ミリメートル以上のもの</p>

図 9 輸出規制該当項目



測定結果	①受入		②ホーニング後		③T3後	
	外觀目視	OK	外觀カラーチェック	OK	外觀カラーチェック	OK
	造形部硬さ：(上)	44HRC	造形部硬さ：(上)	-	造形部硬さ：(上)	44HRC
土台部硬さ：(下)	45HRC	土台部硬さ：(下)	-	土台部硬さ：(下)	43HRC	

図 10 SKD61相当材造形テスト

◇ 国内の金属3D造形技術の活用環境

金属3D積層技術の金型への適用は実用化されてからもっとも長く取り組まれてきた用途の一つであり、技術的に確立された分野であると言える。国内でも2014年頃から実用の効果が生産コストの低減に繋がる事例が増加し、当時から取組みを始めているメーカーの現在は自社内で金属3D積層装置を導入し、3次元冷却水管を配置した金型部品で成果をあげている。昨今では様々な産業分野からダイカスト金型、樹脂成形金型に対して3次元冷却水管を配置した金型部品製作のご相談をいただくが、国内産業の全体量から推測するに、未だ一部のユーザーしか取組みを開始していない。

製造業が課題とするCO2排出の低減や環境負荷低減、労働環境の改善などの観点からも大きな効果が期待できるAM技術への取組みに興味がある企業様があれば是非弊社へお問合せをいただきたい。

むすび

本稿では実用化が急伸している3次元冷却水管について示したが金型産業への適用としては熱伝導率や特定化学物質障害予防規則、輸出規制に配慮した新規粉末（国内メーカー製造）を使用した金型部品の量産テストやポラス形状（多孔質形状）を配置したガス抜き構造部品やラティス構造、メッシュ構造を配置した軽量化部品、金型レスで短納期製作するブラケット部品（プレス金型）などが今までの工法では実現できない新たな付加価値として成果をあげている。欧米と比較してまだ実用例が少ない国内産業ではあるが、いずれ新たなモノづくりには欠かせない工法に発展することを確信している。

弊社は金型産業に限らず、試作、開発、共同研究、新規粉末開発、教育セミナーなど様々な角度からのご相談に対してサポートをさせていただきます。

③金属3Dプリンターの歯科医療への適用

(株) アイディエス いし の あきら
 製品開発研究部 課長 石野 享

まえがき

私たちが健康的な生活をおくる上で食事が大きな役割を果たし、食事を美味しく満足にとるためには口の健康が欠かせないことは言うまでもない。近年では、虫歯などで歯を失い口の健康が悪化すると、身体じゅうの健康に影響を及ぼすことが知られるようになり、介護の現場などでも改めて口の健康が見直されている。「口は健康の入り口」ということがしばしば言われているので、目にしたことがある人もいないのではないだろうか。歯を失えば歯医者で入れ歯を作り、歯の代わりとして機能させることで安心して食事や会話を続けることができるという流れが日本の社会に当然のように備わっている。しかしながら、そのような当たり前のプロセスがいま崩れようとしている。

知らない人もいるかもしれないが、入れ歯は歯科技工士という国家資格保有者により作製されている。人の顔や指紋がすべて異なるのと同じように、口の中も一つとして同じではない。つまり入

れ歯は、一人ひとりの口の状況に応じて作られる完全なオーダーメイド品である。しかも、直径わずか数十 μm の髪の毛が口の中に入っただけで違和感を覚えるように、人の口はとて繊細な触覚を備えているため、入れ歯作りには非常に精巧な技術が求められるのである。歯科技工士は、高い技術を持ち人の健康を支える重要な役割を担う人材であるが、長時間労働や賃金などの問題から深刻な人手不足と高齢化という大きな問題を抱えている（図1に歯科技工 世代別の人数の推移（厚生労働省 第7回歯科技工士の養成・確保に関する検討会）を示す）。

このような状況に対応するために作業の効率化が進められ、従来の手作りに近い方法から近年ではデジタル技術が入れ歯作りに取り入れられるようになった。金属3Dプリンターもその一つであり、2018年に新しい技術として国内の歯科技工に使われ始めた。本稿では、金属3Dプリンターの実用例や従来法との違い、歯科技工における金属3Dプリンターの課題やこれからの期待などについて報告する。

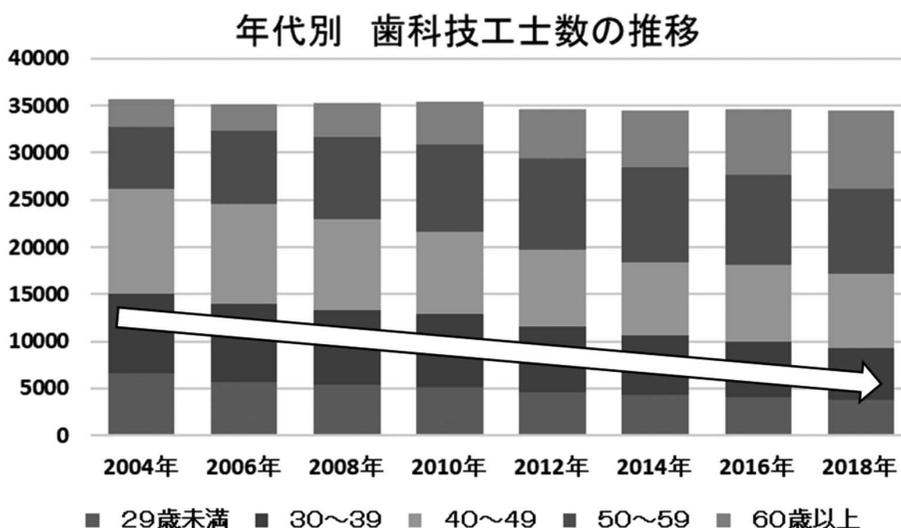


図 1 歯科技工 世代別の人数の推移（厚生労働省 第7回歯科技工士の養成・確保に関する検討会）

◇ 金属3Dプリンターが歯科医療に取り入れられた経緯

前述のように歯科技工はデジタル技術を取り入れて手作業から機械化へ移行しつつある。現状では主に、切削加工がデジタル技術として普及している。これまでの手作業と比べて大きく作業効率の向上に寄与しているが、歩留まりの悪さ、工具の消耗など持続的な生産活動という点では課題があり、工具が届かないアンダーカットの形状には使えないなど入れ歯の設計に制限がかかることも課題とされている。

金属3Dプリンティングは切削加工に比べて歩留まりや設計の自由度が高いことが特長である。さらに、一つ一つ異なるデザインを同時並行的に作ることに適した技術であることから歯科技工と非常に相性が良く、欧米や中国では早くから歯科分野に応用されてきた。写真1に金属3Dプリンターで造形した多種類の歯科補綴物を示す。写真1のように、異なる形状のものを一晩で造形することができる。

この技術が日本国内で使われ始めた経緯としては、国内の大手歯科技工所が金属3Dプリンターの導入を計画し、弊社とともに医療機器製造販売承認に向けて取り組みを開始したのがきっかけである。承認申請においては国立研究開発法人 産業技

術総合研究所の岡崎義光博士の協力を受けて2018年に厚生労働大臣からコバルトクロム合金粉末の医療機器製造販売承認を取得した。これにより金属3Dプリンターによる義歯づくりが歯科医療に利用できるようになった。

金属粉末材料は海外からの輸入品に頼っていたため地政学的供給リスクがあった。それを解消するため、粉末メーカーの山陽特殊製鋼株式会社と協力して日本国内からの供給体制を整え国産材料を調達できるようになった。これに伴い、販売価格も抑えることができた。徐々にではあるが普及に向けた下地づくりも進みつつある。

◇ 適用事例

コバルトクロム合金は高い機械的性質、優れた耐食性などから铸造用の材料として長い間、義歯床（デンチャー）、クラウンブリッジ（主に差し歯のフレーム）の作製に使われてきた材料である。金属3Dプリンター用の材料として薬事承認を受けているのもコバルトクロム合金のみである。

表1に3D造形材と铸造材の機械的性質の比較を示す。積層造形は、铸造で見られるような巣ができにくく、また造形過程で急冷を受けることにより作られる微細な析出物が作用することで、铸造材と比較して高強度・高延性になり疲労強度も向上



写真1 金属3Dプリンターで造形した多種類の歯科補綴物

表 1 3D造形材と铸造材の機械的性質の比較

	引張強さ／MPa	伸び（％）
3D造形材 (造形方向：0° 熱処理なし)	1,280	16
铸造材 (デンチャー用)	880	6

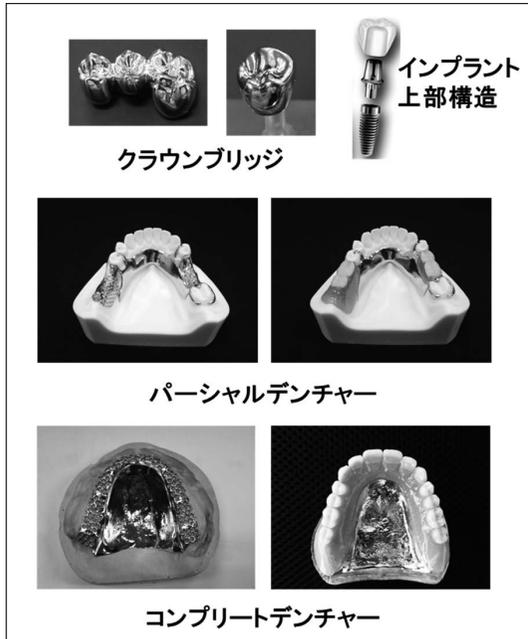


写真2 金属3Dプリンターによる作製が認められている歯科補綴物

することも大きな特長である。これにより、より耐久性のある壊れにくい入れ歯を作ることが期待できる。入れ歯が壊れにくくなれば、経済的な負担や通院を減らすことができ患者にとって大きな利点となるだろう。さらに、将来的に保険適用が認められると医療費の削減にも繋がるかもしれない。

写真2に金属3Dプリンターによる作製が認められている歯科補綴物を示す。クラウン、ブリッジ、デンチャーを作ることが厚生労働省から承認されている。これらは鋳造で作れるものであり、鋳造の守備範囲はほとんど網羅している。以下では各補綴物について説明する。

・クラウン

写真3にクラウンの外観写真を示す。写真の通りクラウンは1本の歯の代わりとなる入れ歯のことである。クラウンは体積が小さいため造形に伴う熱の影響が小さく変形が起きにくいことから技術的な課題が比較的低いため、既に日本国内でも使用されている。金属の上に歯科用の陶材（セラミック）を焼き付けて使用するメタルセラミック修復（いわゆる、差し歯）に使われることが多い（写真3右）。金属3Dプリンターは、造形体の表面が粗くなること（写真3左）が弱点とされている



写真3 クラウンの外観



写真4 ブリッジの外観

が、メタルセラミック修復の場合は、粗い表面が陶材と機械的にかみ合って接合を強化させるという利点もあり、弱点を有利に活かすような使い方も出てきている。

・ブリッジ

写真4にブリッジの外観写真を示す。ブリッジは隣接した複数の歯を置き換える入れ歯のことであり、写真4のように3本とは限らずもっと多い歯を置き換えることもある。そのためクラウンと比べると長尺になり、造形時の熱の影響を受け変形する可能性がある。特に長いものは造形後の熱処理により歪を除去する必要がある。こちらもクラウンと同様に歯科用陶材を焼き付けたメタルセラミック修復として使われている。

・デンチャー

写真5にデンチャーの外観写真を示す。デンチャーは、多くの歯を失った場合（歯列欠損）に適用されるもので、薄い部分は0.5mmくらいの厚さであり面積も広く、形状も複雑なので、熱の影響を受けやすい。よって、造形に伴う変形が課題とされ、クラウンやブリッジと比べると臨床的には応用が遅れている。変形の影響をクリアするには積層造形と造形後の切削加工を併用した方法が有力とされ調査が進められている。

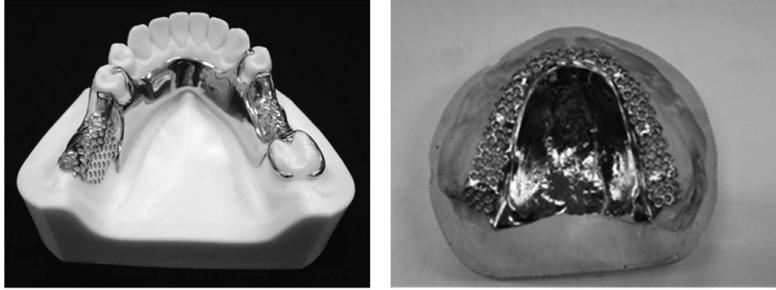


写真5 デンチャーの外観

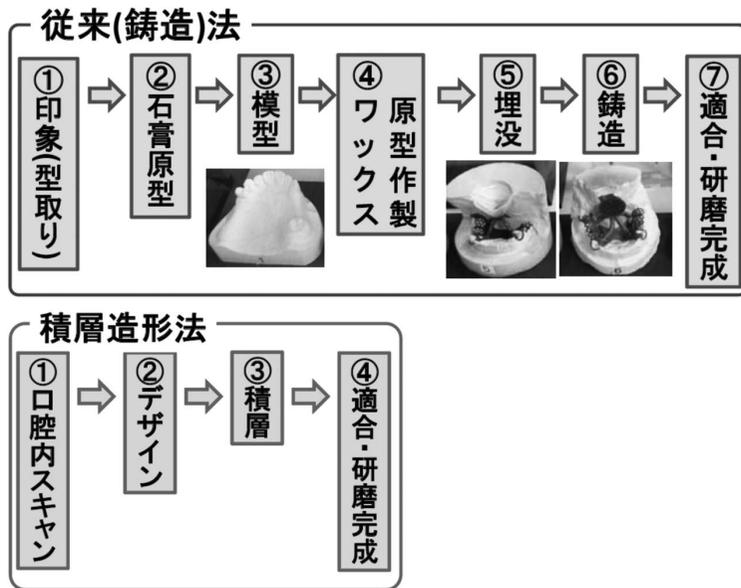


図2 デンチャー作製の流れ
鑄造法と積層造形法

図2にデンチャー作製の流れを示す。鑄造によるデンチャー作製は工数が多く手間暇のかかる仕事である。金属3Dプリンターで造形できるようになると工数を削減することができ作業効率の向上が期待できるため、歯科技工士からの期待は大きい。

むすび

承認取得から5年が経過し、歯科技工士の方から少しずつ問い合わせも増えてきているが、実際にはまだ2社でしか導入されていない。歯科技工用の金属3Dプリンターは数千万円以上と非常に高額なため、小規模経営の歯科技工所は装置を購入

できない（9割以上の歯科技工所が5人未満の従業員で経営されている）。一方で、欧米や中国では既に多くの歯科治療に金属3Dプリンターで作製された歯科補綴物が使われている。さらにフランスでは積層造形が保険適用までされるという状況であり、ますます日本と普及の差が広がっている。この差を埋める具体的な対策が見つかっておらず、普及が最大の課題である。

最近ではチタン系材料の間合せが届いており薬事承認の検討が進んでいる。材料の種類を増やすことでユーザーの選択肢が増え、少しでも普及が促進されるように活動を続け、歯科医療に貢献していきたい。

④銅系粉末を使用した高周波加熱用コイルの 3Dプリンタによる造形

電気興業(株) 高周波統括部 今 ます ひさ なお
開発部 開発課 課長 今 増 寿 尚
電気興業(株) 高周波統括部 おお ぬま ゆう と
設計部 熱処理設計課 大 沼 悠 人

まえがき

弊社で使用している3Dプリンタはパウダーベッド式のレーザーを使用した3Dプリンタである。弊社では3Dプリンタによる造形を用いて高周波誘導加熱用のコイルを製作し提供している。今まで手作業（ロウ付け）により製作していたコイル製作であるが、3Dプリンタで製作された高周波誘導加熱用のコイルについて紹介する。

◇ 高周波誘導加熱について

高周波誘導加熱とは加熱対象のワークの周囲に加熱コイルを配置し、この加熱コイルに高周波電流を印加するとコイルの周囲に磁束が発生する。磁束の影響を受けワークには渦電流が流れ、ワークの持つ電気抵抗によりワークが発熱する。このような手法をもってワークを加熱するのが高周波誘導加熱である。焼入れの場合は、この後加熱した鋼のワークを焼入水で急冷することで硬化させている。

◇ 高周波誘導加熱用コイルに求められる要素

高周波誘導加熱用のコイルは多くの場合、タフピッチ銅やリン脱酸銅などの純銅材料から製作されている。これら材料の導電率はタフピッチ銅が約100 (IACS%) で、リン脱酸銅が約85 (IACS%) となっている (IACS%とは焼鈍標準軟銅の体積抵抗率： $1.7241 \times 10^{-2} (\mu\Omega\text{m})$ を100 (IACS%) として比率で表現した値)。そのため、3Dプリンタでコイルを造形しようとした場合に、その構成材料は少なくとも85 (IACS%) 程度の導電率を有している事が求められる。また、コイルは電流を流している間は発熱し、発熱し続けていけば破損し

てしまうため、冷却水を流して冷却し続ける必要がある。そのためコイル内部に冷却水を流すための水路が形成されており、通電時には冷却水を通してコイルを冷やしながらかワークの加熱を行っている。何らかの不良により冷却水が外に漏れ出してしまうとコイル冷却性能の低下と、加熱ワークへ水がかかればワークの品質不良につながる。このように内部に水を流すという特性上、3Dプリンタによるコイル製作の場合は水が漏れ出ない密度が確保されていることが一つの要点になる。

以上のように、3Dプリンタでコイル製作を行う場合にポイントとして導電率と密度の二つが挙げられ、銅合金粉末の開発により2つの要素をクリアした。

◇ 3Dプリンタ製コイルの特徴

3Dプリンタで製作したコイルの特徴として耐久性の向上が挙げられる。図1に示すコイルはロウ付けで製作されたものであるが、ロウ付け接合部



図 1 ロウ付けコイル

が構造上の破壊されやすい箇所になる。3D造形では部品を継ぎ目なく製作できるので、ロウ付け接合部の破壊による故障を減らすことができる。

またコイルの中にはコイル自体から焼入水を噴射し加熱したワークを冷やすタイプのコイルも存在する。リング状のコイルで内側のワークを加熱する際、噴射する焼入水を流す水路が必要だが、リング内径側にワークが存在するため焼入水水路もリングの内径に沿う形で配置する必要がある。しかしながら、内径側に焼入水水路を配置してしまうと、コイルそのものを冷却するための冷却水水路は、一番発熱し最も冷やしたいリング内径側ではなく、リングの外径側に配置するのを余儀な

くされる。そこで3Dプリンタを活用することで、**図2**のように内側にコイルを冷やす冷却水を流しつつ、焼入水を噴射するということが可能になる。こうすることで焼入水を噴射するという機能を持たせたまま、一番冷やしたいコイル内径側を冷やすことができるので、このタイプのコイルの耐久性はかなり向上する。

◇ 3Dプリンタ製コイルの使用事例

3Dプリンタ製のコイル頭部で焼入を行った事例を紹介する。**図3a**に示すのが実際に3Dプリンタで製作されたコイル頭部で、この事例ではロウ付けで製作されたコイルと同様の寸法設計で製作し

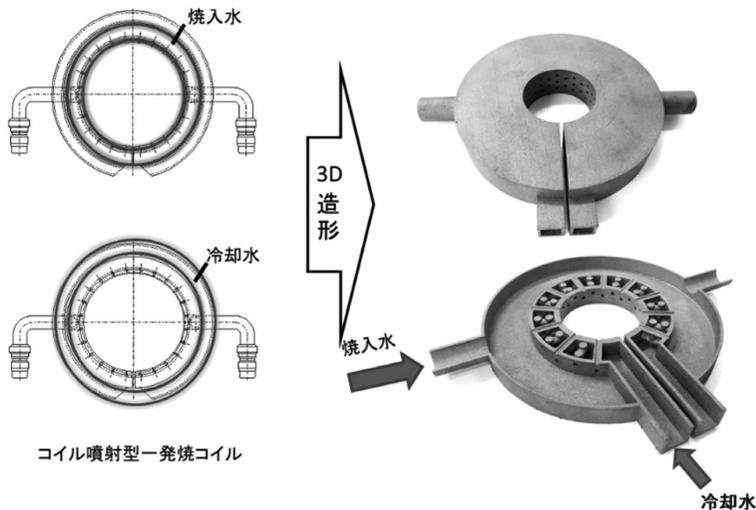
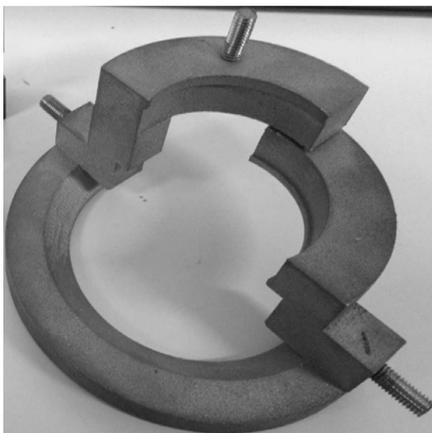
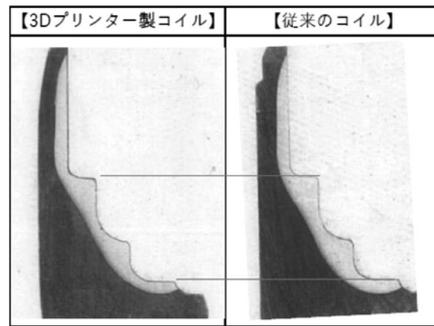


図 2 冷却水路を工夫したコイル



a 3Dプリンタ製のコイル



b 焼入パターン

図 3

ている。この形状でロウ付けによって製作されたコイルと3Dプリンタによって製作されたコイルとで焼入の比較を行った。図3bに示したのがロウ付け製コイルと3Dプリンタ製コイルのそれぞれで焼入した場合の焼入パターンである。3Dプリンタ製コイルでも焼入パターンに品質に関わる差は無かった。しかし、コイルが破損するまでの生産数は3Dプリンタで製作されたコイルの方が約68%増大している。

この事例では形状を変更せずに比較を行っているが、4項で先述したように3Dプリンタの特性を利用し水路形状などに工夫を施すことができればさらに耐久性などの改善につなげることができる。

従来のコイルでは職人が手作業でロウ付けを行っているため製作できる形状には限界があった。3Dプリンタではその限界を超えて複雑な形状のコイルが製作できる。これからも、期待に応える製品を提供していく所存である。



V. わが社の製品紹介

山陽特殊製鋼(株)

金属3Dプリンタ用 Coフリーマルエージング鋼粉末

まえがき

金属3Dプリンタ（以下、単に3Dプリンタと記す）は、航空・宇宙、医療、発電関連の分野で社会実装化が先行して進み¹⁾、近年では、さらに大きな市場規模が予想される金型・工具分野¹⁾での検討、適用も活発化してきている。3Dプリンタによる金型・工具として多く用いられているマルエージング鋼は、空冷以上の急冷をともなう溶体化処理により約32HRCと低硬度で、その後の時効処理により50HRC以上に硬化する合金である²⁾。一方、溶製材の金型として多用されるSKD61は焼鈍状態で低硬度であり、その後、急冷をともなう焼入処理で50HRC以上の高硬度とし、さらに焼戻処理により45~50HRC程度の使用硬さに調整される。このようにマルエージング鋼は、SKD61に代表されるダイス鋼と比較し、急冷状態において著しい低硬度が得られるとともに、その後の熱処理により大幅に硬化できることが特徴のひとつである。

3Dプリンタにおける多くの造形方式において、局部的に絞られた熱源により原料粉末が急速加熱、熔融された後、熱拡散により急速凝固、冷却される。したがって、3Dプリンタで造形したままの材料は概ね急冷状態にあり、マルエージング鋼は溶体化処理後の低硬度、SKD61は焼入処理後の高硬度となる場合が多い。この造形状態の硬さは、熔融、凝固の層を繰り返し積み上げていく3Dプリンタにおいて、造形割れ感受性に大きく影響する。すなわち、急冷状態で低硬度のマルエージング鋼は、高硬度のSKD61と比較し、著しく造形割れを発生しにくい。特に、造形時に大きな熱応力を発生する大型造形物においてこの傾向は顕著であり、3Dプリンタにマルエージング鋼が多く用いられる理由である。

特定化学物質障害予防規則等の改正³⁾にともない、2013年からCo及びその無機化合物に健康障害防止措置が義務づけられた。これにより、約9%のCoを含有する汎用マルエージング鋼は、製造や取扱作業全般について各種措置や届出などが必要となった。このような背景から、当社では特定化学物質であるCoを添加せず、汎用マルエージング鋼の特性を維持する「Coフリーマルエージング鋼粉末」を開発した。

◇ Coフリーマルエージング鋼粉末および造形体の特性⁴⁾

当社が開発したCoフリーマルエージング鋼粉末は、3Dプリンタ用として汎用のマルエージング鋼（18Ni-Grade C）からCoを無添加にするとともに、他の合金元素量も最適化した成分であり、汎用粉末と同様のガスアトマイズ法で製造している。したがって、粉末の形状、粒度分布、流動性、充填性などの特性は汎用マルエージング鋼粉末と同等である。

表1にCoフリーマルエージング鋼粉末を当社保有の3Dプリンタ装置（EOS社製M280）で作製した造形体の特性を示す。Coフリーマルエージング鋼造形体は、汎用マルエージング鋼溶製材と同等の硬さ、引張強度、シャルピー衝撃値および熱伝導率を有している。

むすび

当社が開発した3Dプリンタ用Coフリーマルエージング鋼粉末は特定化学物質であるCoを添加しておらず、取扱いが容易である。また、造形状態での硬さは約35HRCと低く、造形割れを発生しにくいいため、大型造形物への適用が可能と考えられる。造形体の各種特性も汎用マルエージング鋼と同等を維持していることから、更なる3Dプリンタの金型・工具分野への適用拡大に寄与できると考える。特に、複雑な三次元形状の水冷管を内部に含んだダイカスト金型への適用により、金型の冷却効率アップによる製品の製造サイクル短縮、金型の長寿命化が期待される。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）平成30年度 NEDO『TSC Foresight』セミナー（第3回）TSC Foresight 金属積層造形プロセス概要
- 2) 長谷川正義監修：ステンレス鋼便覧（日刊工業新聞社）、（1988.6.30）、501-504
- 3) 厚生労働省ホームページ（<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzensei48/index.html>）
- 4) 山陽特殊製鋼ホームページ（https://www.sanyo-steel.co.jp/technology/images/pdf/25/25_12.pdf）

〔山陽特殊製鋼(株) 粉末事業部 さわだ としゆき
粉末技術部 技術2グループ 澤田 俊之〕

表 1 当社が開発したCoフリーマルエージング鋼粉末の造形体の特性

	Co量 (mass%)	造形硬さ (HRC)	熱処理硬さ (HRC)	引張強度 (MPa)	シャルピー衝撃値 (J/cm ²)	熱伝導率 (×10 ⁻⁶ W/m・K)
Coフリーマルエージング鋼 (3D造形体)	無添加	約35	53	1,850	29.9	17
汎用マルエージング鋼 ²⁾ (溶製材、18Ni Grade C)	8.0-9.5	(約36*)	51-55	1,820-2,100	20.3-32.2	(17*)

* 汎用マルエージング鋼の造形硬さおよび熱伝導率は当社で作製した3D造形体による値

大同特殊鋼(株)

大型品造形に対応したダイス鋼系 3Dプリンタ用金属粉末LTX™

近年、アルミダイカスト金型（以下ダイカスト金型）への3D造形品の適用が拡大している。ダイカスト金型には金型温度を調整するための水冷孔が設けられる。3D造形品では水冷孔を自由に配置できることから適切な金型温度の調整が可能で、鋳造製品の品質向上や金型寿命の改善に効果を発揮している。一般に金型の3D造形はPBF（Powder Bed Fusion）方式の3Dプリンタが使用され、マルエージング鋼粉末が用いられる。一方でマルエージング鋼は人体に有害なコバルトを含有すること、金型特性に重要な熱伝導率が低いこと、造形品の輸出手続きが煩雑なことから従来工法で広く金型用に用いられてきたSKD61系の金属粉末を3Dプリンタで造形したいというニーズがある。しかしながら、SKD61は造形したままの硬さが非常に高く造形時に割れが発生する。これに対応するため当社では2021年4月に3Dプリンタ用に合金設計した金型用ダイス鋼系粉末HTC™を発売、市場に浸透しつつある。HTC™はSKD61対比炭素量を低減することにより造形まま硬さを低下させて割れ発生を防止し、ケイ素含有量を低減して熱伝導率をマルエージング鋼の2倍に向上させることによりダイカスト用高性能鋼材並みの金型性能が得られる。しかしながらマルエージング鋼に比べると造形時に割れやすく、造形には十分な注意が必要であった。また、近年では3D造形金型の大型化ニーズも増大し、3Dプリンタも大型造形に対応する設備が登場していることからマルエージング鋼に近い造形性のダイス鋼系粉末LTX™を開発した。LTX™の位置づけを図1に示す。LTX™はHTC™と同様に5%クロム系ダイス鋼でコバルトは非含有、造形まま硬さを低減するため炭素量は0.25%まで低減し、ケイ素、クロム、モリブデン、バナジウムはHTC™と同量含有する。特徴はニッケルを6%

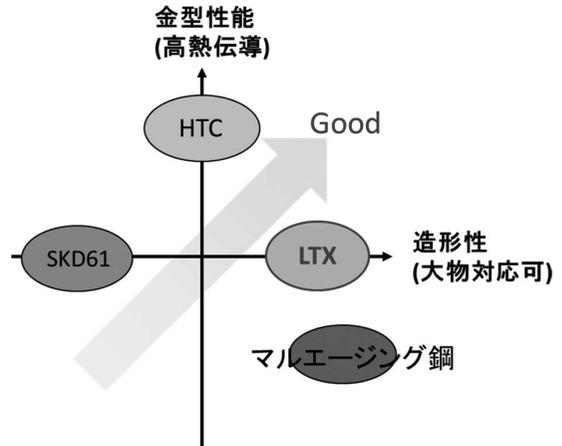


図 1 “LTX”の位置づけ

含有し、マルテンサイト変態開始温度（Ms点）を200℃程度まで低下させていることである。SKD61やHTC™はMs点が300℃以上にあるため、造形時のベースプレート加熱を200℃まで上げて造形物は常に焼入れられた状態で造形が進行する。このため焼入れ硬さが高い材料は造形時に発生する熱応力で割れが発生する。Ms点が200℃のLTX™ではベースプレートによる加熱とレーザーによる加熱で造形品の大部分がMs点以上の過冷却オーステナイト（ γ ）状態で保持される。過冷却 γ はマルテンサイトに比べて大幅に強度が低く、造形時に発生する熱応力微小なひずみを導入することにより低減することができ、大型品を造形しても割れが発生しにくい。機械的性質、窒化特性等はSKD61とほぼ同等である。熱伝導率は低ケイ素化の効果をニッケル添加が打ち消しているためSKD61とほぼ同等、衝撃値は低炭素化の影響でSKD61対比向上する傾向にある。造形レシピはHTC™と同じ条件で対応可能である。詳細な特性は当社webサイト（https://www.daido.co.jp/products/powder/dap_am2/index.html）を参照いただきたい。

HTC、LTXは大同特殊鋼(株)の商標または登録商標です。

〔大同特殊鋼(株) 機能製品事業部 次世代製品開発センター 井上幸一郎〕

水素精製用分離膜モジュールの御紹介

まえがき

当社は、ステンレス鋼線トップメーカーであると共に、ミクロンオーダーのSUS繊維を焼結して作る高粘度ポリマー用フィルターや、SUS短繊維粉末を焼結したオールメタルの超精密半導体製造用ガスフィルター“NASclean”で、半導体の微細化や、有機EL・液晶ディスプレイの大型化など、常に最先端のものづくりに貢献している。

今回、紹介する水素精製用分離膜モジュールは、半導体製造用ガスフィルターの製品化で培った技術と、水素のみ選択透過するパラジウムの特性を利用して開発した、画期的な超高純度水素精製器である。

◇ 特徴

次世代エネルギーの主役と考えられている水素の製造には、主にPSA（圧力スイング吸着）や深冷分離による精製が行われているが、超高純度化や小型化が求められる分野においては、分離膜方式の精製にも期待が寄せられている。

水素分離膜には、ゼオライトやシリカを用いた分子篩や、非パラジウム系の金属膜を使ったものがあるが、いずれも水素の高純度化や加工性、品質安定性に難がある。

金属膜の中でもパラジウム膜は水素透過膜として古くから有望視されており、その実用化に向けた取り組みは、数多くの企業や研究機関で進められてきた。

しかし、多孔体基材にCVD法やメッキ法でパラジウム膜を形成させる方法は、無欠陥で均質な膜の形成は至難であり品質が安定しない。

当社は、無欠陥のPd-Cu圧延箔を円筒状にし、箔のバックアップにSUS不織布を装填しアセンブリする事で、安定した品質と十分な強度を兼ね備えた多重管構造とすることで効率的に水素透過を行える分離膜モジュールの製品化に成功した。



図 1 水素精製用分離膜モジュールのミニマムキット一式

箔はPd-Ag箔より強度のあるPd-Cu箔を採用しており、450℃程度に加熱する事で最も良好な透過性能を得られ、300℃以下の温度でもPd-Ag箔のような水素脆化は起こらない。

図1は、当社の最も基本的なモジュールのセットで、モジュール、カートリッジヒーター、断熱カバー、温度コントローラーで構成されている。

カートリッジヒーターは、円筒型エレメントの内側に外部より挿入する内部加熱方式とすることで、スタート時間の短縮と、加熱効率の向上を図っている。

また、水素の透過には温度と共に、1次側と2次側の水素分圧差が必要である。

純度は原理的に100%だが、2次側のアウトガスを十分にパージする事で実績として9Nまで達成している。

むすび

2050年カーボンニュートラルに向けた取り組みが大手企業を中心に始められており、水素の回収精製など様々な研究が行われ、当社の水素精製用分離膜モジュールにも多くの問合せが国内外から寄せられている。

水素精製以外にも様々な目的で企業や研究機関から相談を頂いている。

パワー半導体製造や、ガス分析装置用途、他、高純度水素を必要とされるあらゆる需要に応えるべく、現在、更なる性能向上に鋭意取り組んでいる。

(株)プロテリアル

金属積層造形マルチスケール 統合シミュレータ「AM-DT」

まえがき

プロテリアルでは金属積層造形の取り組みのひとつとしてデジタル化を推進しています。金属積層造形品は一品一葉の製造プロセスでつくられるため、造形品の機能を評価する手段が限定的でした。そのため、設計に必要な情報等が得られないことから、用途の拡大を妨げる要因となっていました。そこで当社は、シンガポールA*STAR（科学技術研究庁）のInstitute of High Performance Computing (IHPC) と共同で、金属積層造形品の機能をデジタルに評価し、設計に必要な情報を得ることをめざし、デジタルツインを実現するシミュレータの開発に取り組んでいます。

◇ 特長

今回開発したマルチスケール統合シミュレータ Additive Manufacturing Digital Twin (AM-DT) は、金属粉末投入、レーザーなどによる局所溶融、急冷凝固、製品冷却など、金属積層造形における物理現象を、それぞれに適した異なるスケールで

コンピュータシミュレーションすることが可能です。これにより、造形時の温度履歴や造形品の材料組織・欠陥・機械特性、造形後の変形・残留応力の予測が可能となります。このシステムは金属積層造形品のあらゆる部位の特性を予測できるため、より実体に近い評価や、お客様が金属積層造形品を使用する前提で実施する輸送機器、機械設備、化学プラント等のシミュレーションのためのデータ提供が可能となり、これまでにないデジタル空間でのシステム評価が可能となります。この成果により、設計段階から金属積層造形品を構成部品として組み込むことが可能となり、金属積層造形品の普及に大きく貢献することが期待されます（適用例を図1に示します）。

むすび

プロテリアルにおける金属積層造形のデジタル化の一例として、マルチスケール統合シミュレータAM-DTを紹介しました。今後は更に各種材料に対して検証を行い、早期の本格運用をめざします。

また、プロテリアルでは、他のデジタル化の取り組みとして、3D積層造形試作支援サイト [Addurn](#) を公開中です（図2）。

〔(株)プロテリアル かわがえよしはる
グローバル技術革新センター デジタル開発部 鐘ヶ江義晴〕

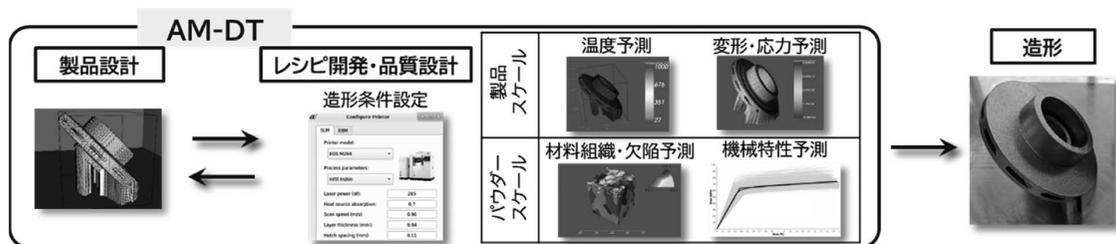


図 1 AM-DTの適用例



図 2 金属3Dプリンタ試作支援サイトAddurn

業界のうごき

佐久間特殊鋼、社外連携事業を始動 「部品加工マッチングサービス」

佐久間特殊鋼は、デジタル技術の活用を推進するデジタルシフトの一環で、新たに「部品加工マッチングサービス」を開始した。佐久間特殊鋼のホームページ上に設置した独自のプラットフォームを活用し、加工業者が遊休設備などの情報を登録し、部品加工を必要とするユーザーはその情報を検索できる。佐久間特殊鋼は双方のニーズ・シーズを結び付け、円滑に加工業務をコーディネートする。

同社はかねてRPA活用による業務プロセスの省力化などに注力。2021年にDX推進宣言を行い、同年末に経済産業省からDX認定事業所に変更された。これまで展開してきた社内の取り組みに加えて、部品加工需要と遊休設備のマッチングをはじめとする社外連携事業を本格始動した。既存取引先を対象に提携先の拡大に努めながら、機能、利便性向上を図っていく。将来は非取引先にもネットワークを拡充する方針。(3月14日)

住友商事、米国産レアアース安定調達 米社と独占販売代理店契約を締結

住友商事は、米国のレアアース生産者であるMPマテリアルズとの間で、日本向けレアアースの独占販売代理店契約を締結した。日本は主に中国からの輸入でレアアースの調達を賄ってきた。世界的な電化・脱炭素化によってレアアースの需要が加速する中、国内需要家の調達先の多様化・安定化に貢献していく。

ネオジムやプラセオジムなどのレアアースの需要は世界で急速に増加している。これらのレアアースは最も強力なネオジム鉄ボロン磁石の原料として使用され、電気自動車や風力発電用モータ、各種電子機器など先端産業の発展を支えている。

MPマテリアルズは米国ネバダ州の世界最大級のレアアース製造・販売会社。同社のマウンテンパス工場はカリフォルニア州の厳しい環境規制の下、鉱石残渣も含め、生産工程における廃棄物・排水を再利用する環境負荷の低い操業を実現している。

(2月24日)

名古屋特殊鋼、大型平面研削盤を導入 電動車向け高精度金型加工を強化

名古屋特殊鋼は、自動車部品生産用金型の加工機能強化に向け、6月をめどに最新鋭の超精密大型平面研削盤を導入し、今夏にも稼働をスタートする。高い精度要求に対応可能な一貫生産体制を構築し、大型金型需要を捕捉する構え。

同社はかねて自動車部品用金型を生産している。近年は大手自動車部品メーカーが大型金型の加工を外注するケースが増え、大型加工需要が拡大する傾向にある。導入する超精密大型平面研削盤は長さ3,000ミリ×幅1,200ミリの製品に対応し、誤差を3～5マイクロメートル未満に収められる。

6月までに本社近隣にある第2工場内の恒温室に設置し、高精度金型の一貫生産体制を強化する。需要家から旺盛な引き合いがあり、夏頃にも稼働を始めたい考え。EV用モータ、車載電池用金型の上下面研磨のほか、電池製造設備向け部品加工に活用する方針。(2月15日)

阪和興業、三沢興産株式20%取得 住友電工と事業提携契約

阪和興業は三沢興産の株式20%を取得し、住友電気工業と事業提携契約を締結した。三沢興産の株主は80%が住友電工、20%が阪和興業となった。阪和興業は、三沢興産の海外事業の拡大、国内外の商材開拓などでシナジーを追求するとともに、

住友電工および住友電工グループとの間で相互に製品販売面での協力関係を深めていく方針。

三沢興産は1934年設立で、鉄鋼製品に加え電子材料、建材、光通信関連製品、環境対策関連製品などの分野でも業容を拡大してきた。現在は住友電工の子会社として、硬鋼線材や二次製品、PC鋼材、特殊鋼材、電子材料・特殊金属、自動車・建機・農機・OA機器・電気機器の部品、電気設備機器、工作機械や各種研究検査機の国内販売、輸出入を行っている。

住友電工が三沢興産の創業者から保有株式の買い取り要請を受け検討を進める中、阪和興業から資本参加を通じた事業提携の打診があった。

(3月28日)

藤田商事、浦安で長尺旋盤を増設 生産性向上、材料から一貫対応

藤田商事は浦安機械加工センター(浦安第2鉄鋼団地内)で長尺汎用旋盤1台を増設した。導入したのはNC機能搭載の長尺旋盤で、加工能力は最大外径490ミリ、加工可能長さ10メートル。長尺加工物の生産性向上が目的で、2月中に本稼働させる。

浦安機械加工センターは多数の長尺汎用旋盤、CNC旋盤、BTA深穴加工機、ラジアルボール盤、フライス盤、横中ぐり盤などを持つ。加工量全体から見て長尺の比率は高くはないが、長尺物でも材料手配から加工まで一貫で対応できる。市場では長尺に対応できる加工メーカーが減少しており、同社は需要の受け皿としての役割も果たしていく。

昨年12月には茨城支店に全自動高速超硬丸鋸盤1台を増設した。CNC制御の全自動高速超硬丸鋸盤で、多品種・多数の異なる材料を連続で切断し、仕分けする。特に長めのシャフト品の切断で時間短縮が進んでいる。(2月14日)

業界のうごき

三井物産、LCAプラスで新サービス GHG排出量の妥当性を認証

三井物産は、製品ごとにCO₂など温室効果ガス（GHG）排出量を可視化できるプラットフォーム「LCA Plus（プラス）」で算定結果の妥当性を認証する新サービスを開始する。早期かつ廉価の検証が可能で、ライフサイクルアセスメント、カーボンフットプリント関連のISO規格や経済産業省のCFPガイドラインにも対応する。

LCAによる環境情報の認証では、サステナブル経営推進機構（SuMPO）が運営する「エコリーフ」が知られるが、検証に半年ほどかかることや費用面から手が出ないケースがあった。LCAプラスの新サービスは、エコリーフのサブブランドと位置づけられる。

LCAプラスは三井物産の鉄鋼製品本部とパフォーマンスマテリアルズ本部が連携する新規事業で、SuMPOと共同開発し昨年8月に提供を開始した。登録会員は100社を超え、2025年度に1,000社超を目標としている。

（3月16日）

三菱商事、業務支援ツールを開発 鉄鋼製品の見積もり・受発注

三菱商事・総合素材グループは、鉄鋼製品の流通事業者とサプライヤーが見積もりや受発注のやり取りをクラウド上で行える「PaSS-Portal（パス・ポータル）」の提供を5月にも開始する。特に鋼管の継手やバルブのような小ロット多品種の取引で業務を効率化できる仕様としており、鉄鋼業界の川中領域におけるデジタル化や標準化を後押しする狙い。

パス・ポータルは商事の産業素材DXタスクフォースがこれら課題を踏まえ、業務支援クラウドサービスとして開発。ウェブブラウザからロ

グインするため導入が容易で、流通事業者とサプライヤー間の見積もりから受発注、納品や請求まで一気通貫で行える。

注文書や見積書は半自動でデータ化できるほか、取引案件ごとに立ち上がるチャットルームでメールやファクスに代わるやり取りができ、進ちょく状況も案件ごとにステータスで確認できる。

（3月22日）

メタルワンと日本IBMが構築 自動車鋼材流通の電子PF

メタルワンと日本IBMは、自動車鋼材流通のデジタル・プラットフォーム「MetalX」（メタルエックス）を構築した。4月からメタルワンがサービスの提供を開始する。自動車鋼材の調達や加工、流通に関わる複数企業のデータや業務プロセスをつなげてサプライチェーン管理の自動化や高度化を図るとともに、円滑なコミュニケーションの確立に寄与する。

サプライチェーン参画企業を1つの企業体に見立て、同じシステムでデータを共有。自動車部品から鋼材までの部品表（BOM）情報を保持し、自動車メーカーの生産計画に基づいて高炉メーカーへの発注に必要な鋼材の所要量を自動で算出する。第1弾として企業横断型のBOM情報を管理する「原単位連関表」を利用した一連の算出サービスを提供する。

鋼材の注文変更や納期管理が可能なツールの導入や、受入・検収・請求の電子化への対応も進めていく。

（3月31日）

愛知製鋼、ステンレス鋼用電炉を刷新 炉容積拡大で原料配合比率を最適化

愛知製鋼は、ステンレス鋼の生産能力増強のため、知多工場のステンレス鋼用50トン電気炉（1号電気炉）の炉殻と制御システムを刷新し、1月から稼働開始した。炉容積拡大に

よる原材料配合比率の最適化により製鋼工程で安定的な供給能力を確保する。可視化・最適化によるスマートファクトリーの実現に向けたIoT基盤の構築、溶解効率向上によるCO₂低減も図る。総投資額は約10億円。

「2030年ビジョン」に基づく成長戦略で、2026年度までにステンレス鋼材の供給能力を2019年度比で4割増強（年間9万トン体制）する目標を掲げている。製造プロセス改革は3ステップで実行する計画で、今回の電気炉刷新は第1ステップに当たる。

今年に圧延ラインの合理化と生産性向上、2026年に下工程の熱処理や酸洗・検査ラインなど精整分野の設備増強と整流化を計画している。

（3月17日）

山陽特殊製鋼、高炭素鋼で新商品 高硬度と高靱性を両立

山陽特殊製鋼は、高硬度と高靱性を両立する高炭素鋼「TOUGHFIT」（タフフィット）を商品化した。合金成分と熱処理条件の最適化によって、高炭素鋼における「硬くなれば脆くなる」というトレードオフの問題を克服した。焼入焼戻しによる700HVの高硬度状態で、同じ硬さの従来鋼に比べ10倍以上の靱性値を示す。

山特とコマツ、大阪大学（現在は名古屋工業大学が引き継ぎ研究中）の産学連携チームは、高炭素鋼を素材とする高硬度部品が鋼中の結晶粒界に沿う割れ（粒界破壊）を生じ易いことに着目。結晶粒界を強化し、結晶粒内の組織状態を適正化する合金成分と熱処理条件を見出したことによって、その問題を解消した。コマツはトンネル掘削機の Cuttering 用材料として実用化している。

浸炭処理を伴わない焼入れ熱処理で靱性を損なわず硬度を高められるため、部品製造工程のCO₂排出削減にも寄与できる。

（3月31日）

業界のうごき

JFEスチールが取引40周年式典 韓国・現代BNGスチールと千葉で

JFEスチールは17日、現代BNGスチールとの取引40周年式典を東日本製鉄所千葉地区で開催した。門田純JFE副社長は「1982年に取引を開始し、度重なる環境変化を協力して乗り越えてきた。今後も知恵を出し合い変化の局面を乗り越えていきたい」と挨拶し、現代BNGの李善雨代表理事は「厳しい時期を経験しながら両社の関係は強固になっている。今後50年、100年の歴史につながると期待している」と述べた。

両社は累計110万トンのクロム系ステンレス鋼帯の取引を通じて韓国の自動車業界、家電業界に高品質の製品を供給してきた。現在も定期的な技術交流を通じて両社の品質向上や新規鋼種の開発・拡大で協力している。

鉄鋼業界において40年に及ぶ海外間取引は極めて稀なケースとなる。それぞれ川崎製鉄、三美綜合特殊鋼の時代に始まり、企業再編を経る中で両社間の取引の伝統を継承してきた。

(2月20日)

大同特殊鋼、知多第2に特殊溶解設備 VAR2基、2024年度末稼働

大同特殊鋼は、知多第2工場に特殊溶解設備の真空アーク再溶解炉(VAR)を2基新設する。石油、化学、ジェットエンジンや発電用タービンに使われるニッケル基合金や、半導体製造装置や医療関連設備に使用されるクリーンステンレスなど、需要拡大が見込まれる付加価値の高い高級鋼の増産体制を構築する。投資額は52億円で、2024年度末に稼働開始する予定。

同社はこれまで、世界最大級の25トン真空誘導溶解炉(VIM)やVARの増設を渋川工場で行い、高級鋼の生産体制整備を進めてきた。渋川工場では今回のVAR増設のスペースを

確保できないため、敷地に余裕のある知多第2工場に新設する。2基新設により同社のVARは14基体制となり、生産能力は約20%増加する。

知多第2工場は高級鋼圧延製品の星崎工場(名古屋市南区)に近いため、圧延製品のリードタイム短縮も目指していく。(3月22日)

日本製鉄、大型高炉水素ガス吹込み 26年から実証試験、君津第2高炉

日本製鉄は、東日本製鉄所君津地区の第2高炉を改造し、2026年1月から水素系ガスを炉内に吹き込む技術の実証試験を始める。海外でも珍しい大型高炉での水素還元の実証試験に乗り出し、競争が激化する脱炭素技術で世界をリードしたい考えだ。このほど具体的な実施時期や手法を明らかにした。

実証試験のベースとなるのは、2008年度から高炉3社を中心に取り組んできた国家プロジェクト「COURSE50」。高炉で水素を用いるための新しい操業条件を見だし、試験高炉(炉内容積12立方メートル、出鉄能力日量約35トン)で検証作業を実施した。今回は約400倍の規模となる4,500立方メートルの君津第2高炉で実証する。製鉄所内で得られるコークス炉ガス由来の水素の活用を前提に開発を進める。

第2高炉の改造工事は長期休止は伴わず、通常操業中に行う。(2月10日)

プロテリアル子会社が増産投資 窒化ケイ素基板、能力倍増

プロテリアルと完全子会社であるプロテリアルフェライト電子(本社・鳥取市)は、モータの制御や電力変換を行うパワーモジュール向けに供給している窒化ケイ素基板の増産投資を決めた。十数億円を投じ、2023年後半にプロテリアルフェライト電子の生産能力を2021年度比2倍に増

強する。主にEV分野の需要増に対応し、焼結炉などを増設する。

EVの普及に向け、駆動モータ制御に使われるインバータ、コンバータの小型化、高周波数化、高効率化が開発課題となっている。パワー半導体(半導体デバイス)で発生する熱による特性劣化への対策強化も欠かせない。

窒化ケイ素基板はインバータ、コンバータに組み込まれるパワーモジュールの絶縁基板に使われる。回路内の電流リークを防止し、パワーモジュールの強度を高めるほか、熱を銅部分へ放出し、パワー半導体の特性劣化を防ぐ役割もある。(2月14日)

三菱製鋼、JATIMの増資引き受け 財務基盤を強化、45億円

三菱製鋼は、インドネシアの特殊鋼電炉一貫の連結子会社、ジャティム・タマン・スチール(JATIM)に対する増資を決定した。JATIMは大幅な生産効率改善や拡販策が実り、2021年度から安定した黒字基調を維持し、足元はほぼフル操業状態にある。次の成長ステージに向けて財務基盤を強化する。3月末に実施する増資は5,000億ルピア(約45億円)で三菱製鋼が全額を引き受ける。同社の出資比率は現行66.54%から74.98%に高まる。

三菱製鋼は2014年8月にJATIMに資本参加し、インドネシア唯一の特殊鋼一貫メーカーとして、自動車・建設機械などの主要顧客の現地調達ニーズに応じてきた。2018年1月に株式を追加取得して連結子会社化し、2021年度に営業黒字化した。アセアン市場の需要増加に応えるべく拡張投資を計画し、将来的には再生エネルギー電力を活用したグリーンスチールの生産も検討課題としていく。(3月3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	構造用鋼				特殊用途鋼							計	合計
	工具鋼	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	その他			
'21 暦年	221,395	4,709,058	3,726,591	8,435,649	374,891	987,441	2,578,832	580,434	4,875,054	493,548	9,890,200	18,547,244	
'22 暦年	206,094	4,161,155	3,482,662	7,643,817	318,691	838,284	2,439,490	475,955	4,516,055	447,854	9,036,329	16,886,240	
'20 年度	161,061	3,578,698	2,956,593	6,535,291	309,316	702,538	2,114,557	428,594	4,153,666	397,469	8,106,140	14,802,492	
'21 年度	227,889	4,669,266	3,691,309	8,360,575	359,466	975,524	2,584,063	571,328	4,747,315	487,191	9,724,887	18,313,351	
'22. 1-3月	58,692	1,133,091	910,122	2,043,213	82,074	220,665	621,363	131,479	1,134,062	122,232	2,311,875	4,413,780	
4-6月	54,666	1,003,201	855,459	1,858,660	78,750	218,728	596,110	118,904	1,134,452	114,063	2,261,007	4,174,333	
7-9月	46,999	996,288	849,948	1,846,236	76,617	200,068	638,774	115,906	1,146,735	101,301	2,279,401	4,172,636	
10-12月	45,737	1,028,575	867,133	1,895,708	81,250	198,823	583,243	109,666	1,100,806	110,258	2,184,046	4,125,491	
'22年 1月	18,209	378,351	298,237	676,588	25,175	76,825	204,627	40,835	403,226	40,020	790,708	1,485,505	
2月	22,658	362,211	300,079	662,290	28,144	71,123	205,466	42,810	348,389	34,340	730,272	1,415,220	
3月	17,825	392,529	311,806	704,335	28,755	72,717	211,270	47,834	382,447	47,872	790,895	1,513,055	
4月	18,786	339,219	291,299	630,518	27,161	71,108	200,101	40,680	384,959	37,949	761,958	1,411,262	
5月	17,608	333,873	300,345	634,218	24,043	71,240	196,022	41,215	394,593	38,242	765,355	1,417,181	
6月	18,272	330,109	263,815	593,924	27,546	76,380	199,987	37,009	354,900	37,872	733,694	1,345,890	
7月	16,090	320,424	296,553	616,977	25,760	73,427	209,409	40,154	363,507	32,149	744,406	1,377,473	
8月	15,308	329,391	274,061	603,452	22,611	62,534	222,303	36,578	401,647	35,116	780,789	1,399,549	
9月	15,601	346,473	279,334	625,807	28,246	64,107	207,062	39,174	381,581	34,036	754,206	1,395,614	
10月	16,490	357,381	301,222	658,603	28,608	68,094	190,015	38,150	372,924	41,187	738,978	1,414,071	
11月	15,324	345,164	300,086	645,250	26,549	68,296	197,861	34,586	384,759	35,699	747,750	1,408,324	
12月	13,923	326,030	265,825	591,855	26,093	62,433	195,367	36,930	343,123	33,372	697,318	1,303,096	
'23年 1月	10,758	331,191	262,646	593,837	23,487	64,599	164,079	34,868	387,230	32,249	706,512	1,311,107	
2月	12,306	321,354	252,217	573,571	26,558	57,958	162,938	36,468	334,507	31,260	649,689	1,235,566	
前月比	114.4	97.0	96.0	96.6	113.1	89.7	99.3	104.6	86.4	96.9	92.0	94.2	
前年同月比	54.3	88.7	84.1	86.6	94.4	81.5	79.3	85.2	96.0	91.0	89.0	87.3	

出所：経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

形状別

(単位：t)

年月	形鋼	棒鋼	管材	線材	鋼板	鋼帯	合計
'21 暦年	278,898	6,065,226	856,955	3,846,183	1,081,675	6,422,384	18,551,321
'22 暦年	293,422	5,402,883	1,019,267	3,386,987	1,083,496	5,701,276	16,887,331
'20 年度	237,286	4,512,899	780,205	3,099,528	935,791	5,241,093	14,806,802
'21 年度	286,265	6,051,725	877,842	3,749,037	1,115,176	6,239,200	18,319,245
'22. 1-3月	70,771	1,461,908	244,217	897,420	267,034	1,473,559	4,414,909
4-6月	71,956	1,339,400	254,912	814,997	272,696	1,420,368	4,174,329
7-9月	84,129	1,313,407	263,763	798,334	277,872	1,435,102	4,172,607
10-12月	66,566	1,288,168	256,375	876,236	265,894	1,372,247	4,125,486
'22年 1月	21,233	472,269	85,072	299,898	85,549	521,885	1,485,906
2月	21,597	484,203	87,412	275,110	83,726	463,906	1,415,954
3月	27,941	505,436	71,733	322,412	97,759	487,768	1,513,049
4月	22,479	440,709	93,362	281,028	98,222	475,462	1,411,262
5月	24,502	455,424	84,364	263,527	90,490	498,868	1,417,175
6月	24,975	443,267	77,186	270,442	83,984	446,038	1,345,892
7月	41,729	447,779	92,640	258,723	82,034	454,554	1,377,459
8月	16,861	408,817	98,612	267,493	97,178	510,582	1,399,543
9月	25,539	456,811	72,511	272,118	98,660	469,966	1,395,605
10月	21,063	455,338	90,559	301,824	90,234	455,050	1,414,068
11月	25,686	429,672	82,444	299,399	87,905	483,218	1,408,324
12月	19,817	403,158	83,372	275,013	87,755	433,979	1,303,094
'23年 1月	19,898	411,241	78,269	261,088	89,757	450,854	1,311,107
2月	16,185	406,995	71,180	257,956	66,834	416,414	1,235,564
前月比	81.3	99.0	90.9	98.8	74.5	92.4	94.2
前年同月比	74.9	84.1	81.4	93.8	79.8	89.8	87.3

出所：『経済産業省生産動態統計』から作成。

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	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		
'21 曆年	245,486	2,716,911	1,455,748	4,172,659	49,883	399,243	1,459,480	124,703	61,853	95,991	2,191,153	6,609,298
'22 曆年	240,621	2,647,463	1,418,096	4,065,559	60,774	373,650	1,457,325	114,890	71,058	91,912	2,169,609	6,475,789
'20 年度	211,779	2,240,670	1,213,083	3,453,753	55,083	328,523	1,232,187	108,689	56,572	82,995	1,864,049	5,529,581
'21 年度	247,110	2,752,134	1,092,322	3,137,987	36,133	300,281	1,125,634	93,152	45,860	73,500	1,674,560	4,996,127
'22年 6月	19,943	218,744	121,484	340,228	3,882	31,703	133,659	9,712	7,250	7,177	193,383	553,554
7月	20,128	231,998	122,059	354,057	4,248	31,614	126,212	9,248	6,547	7,464	185,333	559,518
8月	18,215	201,777	111,210	312,987	3,185	26,829	101,871	8,189	4,925	7,616	152,615	483,817
9月	21,172	228,226	123,791	352,017	3,721	30,942	113,074	9,209	5,754	9,168	171,868	545,057
10月	20,185	217,124	117,525	334,649	8,701	34,403	117,978	9,690	5,333	8,395	184,500	539,334
11月	19,319	209,822	115,273	325,095	8,713	32,445	119,009	9,984	5,384	7,461	182,996	527,410
12月	17,614	203,853	111,764	315,617	8,400	30,511	112,074	7,960	5,274	6,631	170,850	504,081
'23年 1月	17,273	194,923	96,843	291,766	7,239	25,625	104,030	7,483	4,498	6,249	155,124	464,163
2月	18,899	207,662	107,158	314,820	7,802	29,904	105,918	8,194	5,570	6,692	164,080	497,799
前月比	109.4	106.5	110.7	107.9	107.8	116.7	101.8	109.5	123.8	107.1	105.8	107.2
前年同月比	92.8	93.1	92.6	92.9	193.3	98.0	83.9	66.2	83.8	91.5	87.7	91.1

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

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	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		
'21 曆年	8,055	246,632	158,245	404,877	24,939	38,834	144,605	29,563	168,305	22,668	428,914	841,846
'22 曆年	10,897	221,700	136,904	358,604	21,346	37,569	156,975	22,390	137,751	16,870	392,901	762,402
'20 年度	6,109	225,231	149,743	374,974	25,103	34,654	118,733	24,034	145,894	22,503	370,921	752,004
'21 年度	7,544	239,228	149,869	389,097	21,922	36,386	140,730	29,025	139,691	23,830	391,584	788,225
'22年 6月	9,965	235,519	143,029	378,548	25,580	38,079	135,043	27,688	161,691	20,630	408,711	797,224
7月	9,211	224,039	138,083	362,122	23,037	38,143	143,161	23,582	155,867	19,530	403,320	774,653
8月	10,099	233,714	151,418	385,132	23,725	36,519	156,782	27,165	199,220	26,602	470,013	865,244
9月	10,567	227,351	143,353	370,704	22,840	36,087	158,521	23,893	158,711	25,119	425,171	806,442
10月	10,644	227,059	140,180	367,239	22,444	37,856	151,554	23,042	136,776	23,914	395,586	773,469
11月	10,472	225,398	143,009	368,407	24,487	37,084	150,496	21,897	140,504	19,005	393,473	772,352
12月	10,897	221,700	136,904	358,604	21,346	37,569	156,975	22,390	137,751	16,870	392,901	762,402
'23年 1月	10,139	223,278	146,521	369,799	19,537	35,904	157,955	23,252	162,728	21,153	420,529	800,467
2月	10,506	217,654	135,080	352,734	22,415	32,434	139,638	24,843	140,379	20,826	380,535	743,775
前月比	103.6	97.5	92.2	95.4	114.7	90.3	88.4	106.8	86.3	98.5	90.5	92.9
前年同月比	110.0	86.7	89.0	87.6	83.5	81.2	101.9	81.4	91.3	95.2	92.9	90.5

出所: 経済産業省『鉄鋼生産内訳月報』から作成。

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	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		
'21 曆年	78,090	352,845	202,875	555,720	11,864	65,865	261,863	14,113	18,074	7,971	379,750	1,013,560
'22 曆年	81,587	253,146	197,352	450,498	11,832	52,605	258,437	12,975	14,050	8,869	358,768	890,853
'20 年度	64,494	277,040	177,841	454,881	11,736	53,793	217,355	14,206	16,535	5,470	319,095	838,470
'21 年度	77,786	312,576	208,973	521,549	13,253	62,840	253,404	15,438	16,809	10,270	372,014	971,349
'22年 6月	79,817	265,365	202,893	468,258	12,736	57,865	242,550	14,588	15,204	10,985	353,928	902,003
7月	79,045	247,674	200,718	448,392	12,604	57,098	243,366	12,730	14,304	10,928	351,030	878,467
8月	80,639	251,111	201,328	452,439	12,412	56,466	247,760	12,021	14,508	10,256	353,423	886,501
9月	78,376	248,813	195,425	444,238	12,322	52,575	247,329	11,034	14,674	9,900	347,834	870,448
10月	81,517	253,927	197,247	451,174	12,256	52,776	251,765	12,057	14,023	9,854	352,731	885,422
11月	80,549	248,667	198,668	447,335	12,831	52,074	251,946	11,374	14,344	8,965	351,534	879,418
12月	81,587	253,146	197,352	450,498	11,832	52,605	258,437	12,975	14,050	8,869	358,768	890,853
'23年 1月	81,879	256,088	200,010	456,098	7,543	54,067	253,500	12,829	13,916	9,251	351,106	889,083
2月	80,951	261,811	202,544	464,355	5,468	53,055	253,884	11,681	13,805	9,534	347,427	892,733
前月比	98.9	102.2	101.3	101.8	72.5	98.1	100.2	91.1	99.2	103.1	99.0	100.4
前年同月比	106.5	79.3	96.1	85.8	42.0	85.4	99.9	77.9	77.4	104.0	93.6	90.3

出所: 一般社団法人特殊鋼倶楽部『特殊鋼鋼材需給月報調査』から作成。

(注) 2018年3月より経済産業省『鉄鋼需給動態統計調査』から特殊鋼倶楽部業界自主統計化へ変更した。

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	快削鋼	ピアノ線材	計	高炭素鋼	合金鋼	計	
'21 曆年	41,270	437,028	558,747	995,775	198,944	846,790	122,324	73,541	1,241,600	2,866	5,394,930	5,397,827	7,676,441
'22 曆年	39,183	381,705	495,244	876,949	166,355	786,178	97,860	71,081	1,121,474	3,180	4,900,636	4,903,816	6,941,422
'20 年度	30,661	286,158	400,957	687,115	139,795	757,155	88,335	64,008	1,049,293	2,961	4,065,480	4,068,440	5,835,508
'21 年度	42,446	428,197	548,765	976,962	197,417	846,850	121,221	64,398	1,229,885	3,006	5,313,266	5,316,272	7,565,565
'22年 5月	2,663	29,932	36,235	66,167	10,733	67,245	9,011	8,650	95,639	228	504,954	505,181	669,651
6月	4,433	38,104	46,606	84,710	16,297	77,790	10,335	7,368	111,790	475	448,505	448,980	649,913
7月	3,489	32,206	40,279	72,485	14,017	64,387	11,931	3,143	93,479	203	408,382	408,585	578,038
8月	3,385	27,597	33,042	60,639	12,231	59,601	4,918	4,633	81,383	183	380,267	380,450	525,856
9月	2,646	29,962	34,361	64,322	13,818	61,311	8,725	4,471	88,325	166	402,565	402,731	558,024
10月	3,266	26,411	43,620	70,031	14,265	68,475	6,331	5,522	94,594	244	384,935	385,179	553,070
11月	3,244	39,194	46,008	85,203	10,636	55,160	4,360	9,811	79,966	410	369,508	369,918	538,331
12月	2,472	33,450	43,639	77,089	17,478	61,462	5,095	8,211	92,346	271	412,499	412,770	584,677
'23年 1月	2,279	20,230	35,874	56,104	15,328	51,258	4,206	5,078	75,871	209	316,903	317,112	451,365
2月	2,656	35,479	43,007	78,486	8,746	63,109	5,235	3,877	80,967	335	338,286	338,621	500,731
前月比	116.5	175.4	119.9	139.9	57.1	123.1	124.5	76.4	106.7	160.6	106.7	106.8	110.9
前年同月比	73.5	126.6	98.8	109.6	70.1	86.8	78.9	70.2	83.2	159.9	93.5	93.5	93.7

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					計	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			高炭素鋼	合金鋼	計	
'21 曆年	3,425	7,333	282	12,395	11,674	237,726	18,620	280,679	310	7,765	274,257	282,022	573,769
'22 曆年	4,066	16,285	236	12,418	11,486	264,312	20,503	308,955	171	7,158	178,218	185,376	514,853
'20 年度	3,570	8,042	435	11,445	8,396	188,470	15,730	224,477	250	6,395	358,609	365,004	601,343
'21 年度	3,909	9,290	270	12,657	12,725	249,314	19,380	294,346	270	7,528	237,040	244,568	552,383
'22年 5月	557	1,023	27	1,126	1,040	22,944	1,608	26,744	19	349	14,659	15,008	43,351
6月	346	1,438	17	913	750	28,947	1,877	32,504	21	1,006	11,867	12,873	47,181
7月	324	2,109	21	1,326	1,293	28,501	1,975	33,115	26	743	13,910	14,653	50,227
8月	304	393	8	1,005	729	21,910	1,827	25,479	28	1,043	14,712	15,755	41,959
9月	303	2,256	19	737	611	18,289	1,505	21,160	22	168	12,849	13,017	36,759
10月	279	841	13	1,183	850	14,550	1,881	18,477	3	490	12,386	12,876	32,477
11月	254	2,118	39	986	802	19,805	1,647	23,278	・	176	17,530	17,706	43,355
12月	249	1,421	13	944	697	15,737	1,478	18,869	-	866	14,835	15,701	36,240
'23年 1月	187	1,455	49	925	842	17,348	1,755	20,919	3	1,639	13,235	14,873	37,438
p 2月	183	1,437	64	777	597	12,428	1,315	15,180	17	946	11,880	12,826	29,642
前月比	97.9	98.7	130.2	83.9	70.9	71.6	74.9	72.6	593.6	57.7	89.8	86.2	79.2
前年同月比	77.9	109.0	444.4	64.9	64.9	51.7	102.2	55.7	109.2	86.3	75.3	76.0	64.8

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	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				
'21 曆年	7,846,958	1,154,054	3,818,910	379,007	4,448,340	765,762	-	222,252	119,477	11,205	102,086	55,176	15,414
'22 曆年	7,835,481	1,184,552	3,813,269	406,156	4,201,320	747,543	-	232,300	126,560	11,795	107,418	52,146	17,596
'20 年度	7,969,529	1,064,697	3,670,709	275,189	4,656,632	790,406	-	184,423	105,357	8,726	94,870	50,322	9,885
'21 年度	r 7,545,141	1,130,201	3,684,025	384,446	4,215,826	742,108	-	228,906	122,697	11,671	103,732	49,494	16,675
'22年 5月	420,233	56,416	206,566	27,928	261,433	49,341	-	r 13,807	8,348	711	r 9,085	4,290	1,533
6月	r 668,627	102,623	308,462	34,457	327,896	59,575	-	r 19,973	11,295	1,010	r 9,141	4,947	1,547
7月	699,708	107,455	356,957	38,341	349,335	60,894	-	r 19,350	10,660	976	r 9,488	3,768	1,424
8月	584,291	90,642	293,765	32,976	290,042	55,432	-	r 16,556	8,998	833	r 9,050	4,928	1,393
9月	r 757,790	115,750	369,095	36,358	395,163	69,750	-	r 20,440	11,637	1,243	r 8,763	4,476	1,508
10月	r 694,157	107,244	331,958	37,226	359,159	62,914	-	r 21,864	r 11,344	1,159	r 9,073	3,290	1,411
11月	r 767,241	113,308	371,870	32,284	377,079	68,593	-	22,342	r 11,718	1,216	r 8,466	4,158	1,342
12月	699,025	103,577	356,975	30,893	344,364	59,443	-	20,822	10,514	1,114	r 8,489	5,081	1,405
'23年 1月	620,474	90,380	256,178	26,232	382,338	61,931	-	16,133	8,364	922	r 9,296	3,244	1,291
2月	-	-	313,203	28,924	426,726	69,748	-	19,830	9,815	953	8,880	4,001	1,241
前月比	-	-	122.3	110.3	111.6	112.6	-	122.9	117.3	103.4	95.5	123.3	96.1
前年同月比	-	-	100.2	88.8	120.3	108.4	-	101.8	95.5	119.7	109.4	119.4	89.3

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:訂正値

特殊鋼需給統計総括表

2023年2月分

鋼種別	項目	月別					
		実数 (t)	前月比 (%)	前年同月比 (%)	2015年基準指数 (%)		
工 具 鋼	熱間圧延鋼材生産	12,306	114.4	54.3	59.7		
	鋼材輸入実績	183	97.9	77.9	59.5		
	販売業者	受入計	17,971	102.3	90.4	66.6	
		販売計	18,899	109.4	92.8	71.9	
		うち消費者向	15,885	109.2	93.4	84.0	
		在庫計	80,951	98.9	106.5	137.1	
	鋼材輸出船積実績	2,656	116.5	73.5	55.7		
	生産者工場在庫	10,506	103.6	110.0	126.7		
	総在庫	91,457	99.4	106.9	135.8		
	構 造 用 鋼	熱間圧延鋼材生産	573,571	96.6	86.6	83.8	
販売業者		受入計	323,077	108.6	98.8	49.4	
		販売計	314,820	107.9	92.9	48.2	
		うち消費者向	249,475	107.0	94.9	56.8	
		在庫計	464,355	101.8	85.8	132.0	
鋼材輸出船積実績		78,486	139.9	109.6	95.5		
生産者工場在庫		352,734	95.4	87.6	100.8		
総在庫		817,089	98.9	86.6	116.4		
ば ね 鋼		熱間圧延鋼材生産	26,558	113.1	94.4	73.9	
		鋼材輸入実績	1,437	98.7	109.0	352.6	
	販売業者	受入計	5,727	194.1	142.9	27.0	
		販売計	7,802	107.8	193.3	37.2	
		うち消費者向	2,325	111.2	83.8	50.0	
		在庫計	5,468	72.5	42.0	44.8	
	鋼材輸出船積実績	8,746	57.1	70.1	55.6		
	生産者工場在庫	22,415	114.7	83.5	86.8		
	総在庫	27,883	103.0	69.9	73.3		
	ス テ ン レ ス 鋼	熱間圧延鋼材生産	162,938	99.3	79.3	71.0	
鋼材輸入実績		15,180	72.6	55.7	104.9		
販売業者		受入計	106,302	107.3	92.4	42.4	
		販売計	105,918	101.8	83.9	42.2	
		うち消費者向	51,665	105.1	81.5	92.4	
		在庫計	253,884	100.2	99.9	185.7	
鋼材輸出船積実績		63,109	123.1	86.8	72.0		
生産者工場在庫		139,638	88.4	101.9	121.2		
総在庫		393,522	95.6	100.6	156.2		
快 削 鋼		熱間圧延鋼材生産	36,468	104.6	85.2	71.1	
	販売業者	受入計	7,046	96.0	55.4	49.8	
		販売計	8,194	109.5	66.2	57.0	
		うち消費者向	7,876	108.7	85.8	56.6	
		在庫計	11,681	91.1	77.9	86.3	
	鋼材輸出船積実績	5,235	124.5	78.9	54.7		
	生産者工場在庫	24,843	106.8	81.4	89.5		
	総在庫	36,524	101.2	80.3	88.5		
	高 抗 張 力 鋼	熱間圧延鋼材生産	334,507	86.4	96.0	81.0	
		販売業者	受入計	5,459	125.1	95.6	53.1
販売計			5,570	123.8	83.8	54.8	
うち消費者向			4,746	127.1	82.6	70.8	
在庫計			13,805	99.2	77.4	125.9	
生産者工場在庫		140,379	86.3	91.3	74.0		
総在庫		154,184	87.3	89.9	76.9		
そ の 他		熱間圧延鋼材生産	89,218	92.1	84.6	64.5	
		販売業者	受入計	35,867	106.4	103.0	88.5
			販売計	36,596	114.8	96.8	90.3
	うち消費者向		35,577	116.9	100.4	96.8	
	在庫計		62,589	98.8	87.8	117.8	
	生産者工場在庫	53,260	93.3	86.2	77.0		
	総在庫	115,849	96.2	87.0	94.7		
	特 殊 鋼 鋼 材 合 計	熱間圧延鋼材生産合計	1,235,566	94.2	87.3	78.6	
		鋼材輸入実績計	29,642	79.2	64.8	36.5	
		販売業者	受入計	501,449	108.4	96.6	49.3
販売計			497,799	107.2	91.1	48.9	
うち消費者向			367,549	108.0	92.7	63.8	
在庫計			892,733	100.4	90.3	140.0	
鋼材輸出船積実績計		500,731	110.9	93.7	77.9		
生産者工場在庫		743,775	92.9	90.5	94.7		
総在庫		1,636,508	96.9	90.4	115.0		

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) 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に含まない。

倶楽部だより

(2023年2月1日～3月31日)

理事会 (3月29日・対面+Web会議)

- ①2022年度事業報告案について
- ②2022年度決算見込み案について
- ③2023年度事業計画案について
- ④2023年度予算・会費案について
- ⑤2023年度貿易一般保険包括保険特約の締結について
- ⑥役員改選及び運営委員会社案について
- ⑦会員・委員会・組織等の現状について

運営委員会

本委員会 (3月23日・対面+Web会議)

- ①2022年度事業報告案について
- ②2022年度決算見込み案について
- ③2023年度事業計画案について
- ④2023年度予算・会費案について
- ⑤2023年度貿易一般保険包括保険特約の締結について
- ⑥役員改選及び運営委員会社案について
- ⑦会員・委員会・組織等の現状について

総務分科会・財務分科会 (3月20日・対面+Web会議)

総務分科会

- ①2022年度事業報告案について
- ②2023年度事業計画案について
- ③役員改選及び運営委員会社案について
- ④会員・委員会・組織等の現状について

財務分科会

- ①2022年度決算見込み案について
- ②2023年度予算案について
- ③2023年度会費案について

海外委員会

本委員会 (3月16日・対面+Web会議)

- ①2022年度事業報告案について
- ②2022年度決算見込みについて
- ③2023年度事業計画案について
- ④2023年度海外調査事業案について
- ⑤2023年度予算案について
- ⑥2023年度賦課金徴収方法について
- ⑦2023年度WTO負担金について
- ⑧2023年度貿易一般保険包括保険特約の締結について

専門部会 (3月1日・対面+Web会議)

海外委員会調査事業最終報告「特殊鋼生産を取り巻く環境変化と地政学リスクの検討」について

専門部会 (3月9日・対面+Web会議)

- ①2022年度事業報告案について
- ②2022年度決算見込みについて
- ③2023年度事業計画案について
- ④2023年度海外調査事業案について
- ⑤2023年度予算案について
- ⑥2023年度賦課金徴収方法について
- ⑦2023年度WTO負担金について
- ⑧2023年度貿易一般保険包括保険特約の締結について

専門部会 (3月30日・対面+Web会議)

- ①海外委員会調査事業最終報告「中国の特殊鋼需給動向調査・中国特殊鋼業の現状と展望、技術と価値からみた競争力について」について
- ②2023年度海外調査事業テーマについて

商社分科会 (3月3日・対面+Web会議)

- ①最近の貿易保険を巡る情勢等について
- ②2023年度貿易一般保険包括保険特約の締結について

市場開拓調査委員会

調査WG (3月31日・対面+Web会議)

- ①2022年度調査事業「主要国におけるカーボンニュートラル進展と日本の特殊鋼産業への影響」最終報告
- ②2023年度市場開拓調査事業テーマについて
- ③2023年度特殊鋼の最終用途別需要実態調査について

編集委員会

本委員会 (2月8日・Web会議)

2023年7月号特集「特殊鋼の技術と用語のやさしい解説 (用語解説・鉄鋼用語編) (仮題)」の編集方針、内容の確認

小委員会（3月23日・Web会議）

- ①委員交代の報告
- ②2023年9月号特集「切削加工（仮題）」の編集内容の検討

人材確保育成委員会

2022年度ビジネスパーソン研修講座（2月16日、17日）

- テーマ：企業活動シミュレーション
- 講師：コベルコビジネスパートナーズ(株) ビジネス研修部 研修開発グループ シニアコンサルタント 今岡 伸一氏
- 方式：対面研修方式
- 受講者：29名

流通海外展開委員会

講演会（2月21日）

- 演題：①伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社の紹介
- ②2023年の世界経済見通し
- 講師：①伊藤忠丸紅鉄鋼(株) 自動車鋼材本部 特殊鋼・線材部長 塗師 康史氏
- ②丸紅経済研究所 経済調査チーム長 チーフ・エコノミスト 井上 祐介氏
- 方式：オンライン配信（東京・名古屋・大阪地区同時）
- 聴講者：203名（3地区全体）

カーボンニュートラルWG

第20回会合（3月1日・Web会議）

第21回会合（3月24日・Web会議）

[大阪支部]

運営委員会（2月14日・対面+Web会議）

- ①2022年度事業実績
- ②2022年度収支見込
- ③2023年度事業計画案
- ④2023年度収支予算案
- ⑤2023年度役員改選案

講演会（2月21日・二団体共催）再掲

- 演題：①伊藤忠丸紅鉄鋼株式会社の紹介

②2023年の世界経済見通し

- 講師：①伊藤忠丸紅鉄鋼(株) 自動車鋼材本部 特殊鋼・線材部長 塗師 康史氏
- ②丸紅経済研究所 経済調査チーム長 チーフ・エコノミスト 井上 祐介氏
- 方式：オンライン配信（東京・名古屋・大阪地区同時）
- 聴講者：49名（大阪地区）

[名古屋支部]

部会（対面会議）

- 企画部会（2月7日）
- 工具鋼部会（2月15日）

人材確保育成委員会（3月22日・対面会議）

- ①2023年度役割分担
- ②研修テーマの提案依頼
- ③2022年度実績と2023年度計画

生産性向上研修（2月9日・三団体共催）

- テーマ：顧客満足度向上のための組織マネジメント
- 講師：ビジネスファイターズ合同会社 代表 飯田 剛弘氏
- 方式：Web研修方式
- 参加者：14名

中堅社員研修（2月16日・三団体共催）

- テーマ：中堅社員に求められる能力（フォローアップ研修）
- 講師：(株)名南経営コンサルティング 三軒 佳氏
- 方式：Web研修方式
- 参加者：30名

技術講演会（2月17日・三団体共催）

- 演題：ステンレス鋼の至近の技術動向と今後の展望について
- 講師：JFEスチール(株) 矢沢 好弘氏
- 方式：オンライン配信
- 申込者：230名

一般社団法人特殊鋼倶楽部 会員会社一覧

(社名は50音順)

【会 員 数】 (正 会 員) 製造業者 25社 販売業者 100社 合 計 125社	【販売業者会員】		
【製造業者会員】 愛 知 製 鋼 (株) 秋 山 精 鋼 (株) (株)川口金属加工 高周波熱錬(株) (株)神戸製鋼所 合同製鐵(株) 山陽特殊製鋼(株) J F E スチール(株) J X 金 属 (株) 下村特殊精工(株) 大同特殊鋼(株) 高砂鐵工(株) 東北特殊鋼(株) 日鉄ステンレス(株) 日 本 金 属 (株) 日本高周波鋼業(株) 日 本 精 線 (株) 日 本 製 鉄 (株) 日本冶金工業(株) (株)広島メタル&マシナリー (株)不二越 (株)プロテリアル 三菱製鋼(株) ヤマシンスチール(株) 理 研 製 鋼 (株)	愛 鋼 (株) 青 山 特 殊 鋼 (株) 浅 井 産 業 (株) 東 金 属 (株) 新 井 ハ ガ ネ (株) 粟 井 鋼 商 事 (株) 伊 藤 忠 丸 紅 鉄 鋼 (株) 伊 藤 忠 丸 紅 特 殊 鋼 (株) (株)ISSリアライズ (株)U E X 確 井 鋼 材 (株) ウ メ ト ク (株) 扇 鋼 材 (株) 岡 谷 鋼 機 (株) カ ネ ヒ ラ 鉄 鋼 (株) 兼 松 (株) 兼松トレーディング(株) (株)カムス (株)カワイスチール 川 本 鋼 材 (株) 北 島 鋼 材 (株) ク マ ガ イ 特 殊 鋼 (株) 小 山 鋼 材 (株) 佐 久 間 特 殊 鋼 (株) 櫻 井 鋼 鐵 (株) 佐 藤 商 事 (株) サ ハ シ 特 殊 鋼 (株) (株)三悦 三 協 鋼 鐵 (株) 三 京 物 産 (株) 三 興 鋼 材 (株) 三 和 特 殊 鋼 (株) J F E 商 事 (株) 芝 本 産 業 (株) 清 水 金 属 (株) 清 水 鋼 鐵 (株) 神 鋼 商 事 (株) 住 友 商 事 (株) 住友商事グローバルメタルズ(株)	大 同 興 業 (株) 大同DMソリューション(株) 大 洋 商 事 (株) 大 和 特 殊 鋼 (株) (株)竹内ハガネ商行 孟 鋼 鉄 (株) 辰 巳 屋 興 業 (株) 千 曲 鋼 材 (株) (株)テクノタジマ (株)鐵鋼社 デルタステール(株) 東京貿易マテリアル(株) (株)東信鋼鉄 (株)トーキン 特 殊 鋼 機 (株) 豊 田 通 商 (株) 中 川 特 殊 鋼 (株) 中 島 特 殊 鋼 (株) 中 野 ハ ガ ネ (株) 永 田 鋼 材 (株) 名 古 屋 特 殊 鋼 (株) ナ ス 物 産 (株) 南 海 モ ル デ ィ (株) 日 金 ス チ ール (株) 日 鉄 物 産 (株) 日 鉄 物 産 特 殊 鋼 (株) 日 本 金 型 材 (株) ノ ボ ル 鋼 鉄 (株) 野 村 鋼 機 (株) 白 鷺 特 殊 鋼 (株) 橋 本 鋼 (株) (株)長谷川ハガネ店 (株)ハヤカワカンパニー 林 田 特 殊 鋼 材 (株) 阪 神 特 殊 鋼 (株) 阪 和 興 業 (株) (株)平井 (株)フクオカ 藤 田 商 事 (株)	古 池 鋼 業 (株) (株)プルータス (株)プロテリアル特殊鋼 平 和 鋼 材 (株) (株)堀田ハガネ (株)マクシスコポーレーション 松 井 鋼 材 (株) 三 沢 興 産 (株) 三 井 物 産 (株) 三井物産スチール(株) (株)メタルワン (株)メタルワンチューブラー (株)メタルワン特殊鋼 森 寅 鋼 業 (株) (株)山一ハガネ 山 進 産 業 (株) ヤ マ ト 特 殊 鋼 (株) 山 野 鋼 材 (株) 陽 鋼 物 産 (株) 菱 光 特 殊 鋼 (株) リ ン タ ツ (株) 渡 辺 ハ ガ ネ (株)

“特集” 編集後記

今月号は、「金属3Dプリンター技術と業界の最新動向」と題して特集を企画いたしました。本誌でも金属粉末を用いたアプリケーションについては数回特集され、前回特集の2016年からは既に7年が経過しており、その当時から比べますと金属3Dプリンター市場は著しく拡大し、様々な分野で適用が進んでおります。

今回の特集では、Ⅰ．総論で3Dプリンターの市場規模や技術の概要について分かりやすくまとめました。Ⅱ．には適用される3Dプリンター装置の種類と特長、Ⅲ．には原料として使用される金属粉末の製造技術や特長など、写真やイラストを多用し、読者の皆様により理解を深めていただけるよう編集しました。また、Ⅳ．では造形品を取り扱う上で欠かせない二次加工技術と造形適用事例に関し、航空・宇宙、金型、歯科医療および高周波コイルなど適用が進んでいる個別事例について、各社の最新の動きや新商品を詳しく紹介いたしました。

3Dプリンター技術は、製造工程の短縮・省エネ化によりカーボンニュートラルを加速させる上で大変重要な技術であり、近年では産官学が協力し各種研究会や講演会なども盛んに行われております。適用市場は今後益々拡大していくと見込まれており、一過性のブームで終わらせることなく、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。

本特集をお読みいただき、少しでも3Dプリンター技術への理解を深められ、また興味を持って下されば幸いです。

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各位、編集委員会での活発な議論をいただいた編集委員各位に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます。

〔山陽特殊製鋼(株) 粉末営業部 部長 福本 新吾〕

特 集 / 特殊鋼のやさしい技術解説③

- I. まえがき
- II. 製鉄、製鋼
- III. 圧延、二次加工
- IV. 材質
- V. 熱処理（鋼材組織）

9月号特集予定…切削加工の基礎と最近の動向

特 殊 鋼

第 72 卷 第 3 号
© 2 0 2 3 年 5 月
2023年4月25日 印 刷
2023年5月1日 発 行

定 価 1,252円 送 料 200円
1年 国内7,434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 脇 本 眞 也
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。