

3D プリンティング用粉末に求められる特性と適用合金

西面 由夏*

SAIMEN Yuka

1. はじめに

3Dプリンティング技術（AM: Additive Manufacturing）は、切削加工、塑性加工等に次ぐ第3の加工法とされ、複雑構造を有する高機能製品の開発や金型等を効率的に製造する次世代技術として、航空・宇宙、自動車、エネルギー、生体材料等、様々な分野で技術開発が活発化している。当初は樹脂造形に限定されていたが、レーザーや電子ビームといった高エネルギーの熱源を用いる造形装置の開発に伴い原料に金属粉末を用いた造形が可能となり、産業部品の作製に金属3Dプリンティングの適用が広がっている¹⁾。

本稿では、金属3Dプリンティングに関する技術・応用事例について、“粉末”の観点から紹介する。

最初に金属3Dプリンティングへ求められる特性を整理したうえで、その粉末製造方法として広く知られているガスアトマイズ法に関して工法と特徴を紹介し、3Dプリンティング技術との適合性を解説する。後半では当社製品鋼種例を紹介する。

2. 3D造形用粉末に求められる特性

3Dプリンティングに求められる特性を粉末の観点から考えた場合、下記の5点が挙げられる。

①流動性、②拡がり性、③充填性²⁾、④適切な粒度分布、および合金成分の⑤不純物が少ないことである。

① 流動性

3Dプリンティングに一般的に用いられる手法として、粉末床溶融結合法（パウダーベッド）と指向性エネルギー積層法（デポジション）がある。図1、2にそれぞれの模式図を示す。パウダーベッド方式では、金属粉末をタンク等の粉末供給部からリコータと呼ばれるブレード・刷毛等で積層造形部へ引き伸ばすことで、粉末を薄く一定厚さで敷き詰める。その後、積層造形部内の必要部位へ熱源を当て、選択的に溶融させて造形する。

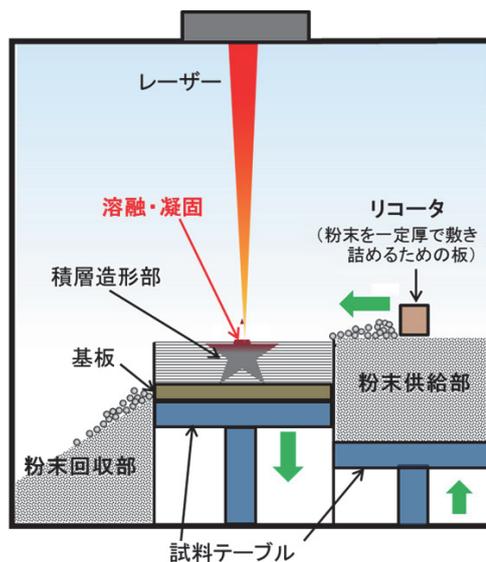


図1 パウダーベッド方式の模式図

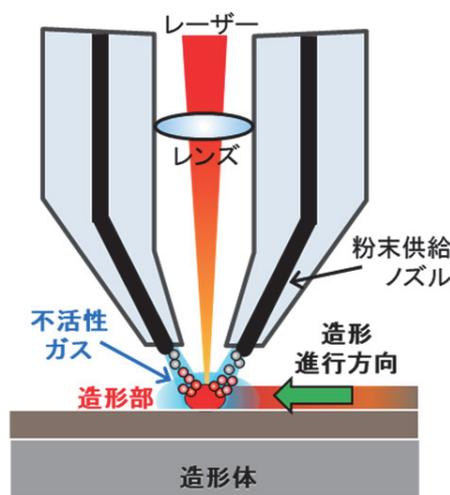


図2 デポジション方式の模式図

デポジション方式は、肉盛溶接に類似しており、金属粉末を供給しながらレーザーを照射し溶融金属を堆積し、ノズルを3次元的に移動させることで造形物を積み上げ

* 粉末事業部 粉末技術部 技術2グループ

る。

このように3Dプリンティングでは、タンクからの原料粉末の供給やノズルからの噴射など粉末を搬送する機構が多く、これらを安定的に行うために流動性の高い粉末が求められる。

② 拡がり性

パウダーベッド方式では粉末を引き伸ばした際の、粉末の敷き詰め方が、造形物の品質へ大きく影響する。敷詰不良（非充填部）が発生した場合には欠陥の原因となる。そのため均一な拡がり性を有する粉末が求められる。

③ 充填性

造形体の高密度化や、原料粉末が溶融・凝固する際の体積変化抑制のために、粉末には高充填性が要求される。高充填性の為には、粉末が球形状であることが望ましい。

④ 適切な粒度分布

所定の熱源エネルギー量により粉末を溶融させるために、粉末には適切な粒度分布への調整が重要である。粗大粉が混入した場合には、未溶融を伴う造形欠陥の発生、または粉末の敷き詰め不良やノズル閉塞の原因にもなり得る。また微粉は、流動性を阻害する要因となるため、適切な粒度調整が必要である。

⑤ 不純物が少ない

3Dプリンティングでは、凝固過程で成長したデンドライトやセル界面に偏析する不純物により割れが発生する可能性がある。また、酸素や窒素などのガス成分は、造形体中で非金属介在物を生成し、機械的性質に大きな影響を及ぼす場合がある。そのため3Dプリンティングで溶製材と同等の特性を得るためには、原料粉末の不純物を少なくすることが望ましい。

このような3Dプリンティング用金属粉末の製造には、一般的にガスアトマイズ法が多用されている³⁾。主な金属粉末の製造方法は、先の「山陽特殊製鋼の3Dプリンティング用粉末事業への取り組み」にて紹介している。様々な手法の中でガスアトマイズ法は、3Dプリンティング用粉末として求められる特性を満足し、且つ生産性の観点からも優れた粉末製造方法である。以下にガスアトマイズ粉末の適合性について解説する。

3. ガスアトマイズ粉末の特徴と3Dプリンティングへの適合性⁴⁾

ガスアトマイズ法で製造される粉末外観の一例を図3に示す。一般的にガスアトマイズ法で得られる金属粉末は球形状である。一方、噴霧媒体として高圧水を使用する水アトマイズ法で得られる粉末は、突起の多い不定形状になり

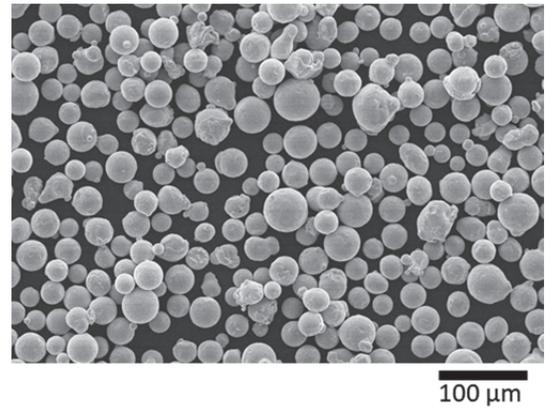


図3 ガスアトマイズ粉末の外観例 (Ni基超合金)

やすい。この違いの要因は、それぞれのアトマイズ法における「冷却速度」と「溶湯の表面張力」の2つの差異から説明が可能である。すなわち、ガスによる冷却速度は水に比べて小さい。このことは、ガスアトマイズの場合、冷却媒体（ガス）の衝突により生成した液滴が、表面張力により球状化するだけの凝固時間を有していると理解されている⁵⁾。さらにガスアトマイズの場合は、水アトマイズと比較して溶湯の表面張力を低下させる酸化物の生成が極めて少ないことが二つ目の要因と言える⁶⁾。

粉末が球形状であるということは、前章で示した3Dプリンティング用粉末へ求められる特性の中で、①流動性と②拡がり性の向上に大きく寄与すると言える。また粒子表面に凹凸があると粒子間摩擦が増加し、充填性が低下すること⁷⁾から滑らかな表面を有する球状粉は、③充填性の観点からも有利であると言える。

図4にガスアトマイズ法で製造される粉末の粒度分布例を示す。本工法で製造される粉末は、噴霧条件（アトマイズ温度、噴霧圧力、出湯スピード etc.）により変化するものの、概ね100 μm前後を中心に数μm～数100 μmまでの広い粒度分布帯域を持つ対数正規分布として得られる。粒度分布帯域が広がることにより、大きな粒子の隙間に小さな粒子が入り込み、空隙率が低下するため⁷⁾、前章③充填性の観点で有利であると言える。さらに、ガスアトマイズ法は冷却媒体としてアルゴンや窒素等の不活性ガスを用

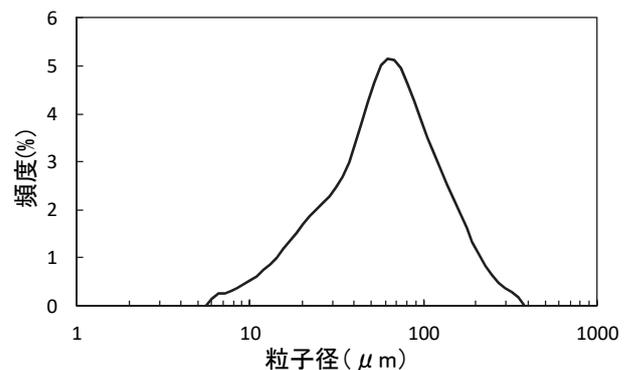


図4 ガスアトマイズ粉末の粒度分布例

いているため、酸素値が低い粉末製造法としても知られており、数10 ppm～数100 ppmの酸素レベルを有する金属粉末の製造が可能である。このことは⑤不純物が少ないという要求特性とも合致する。

4. 当社ガスアトマイズ粉末の特徴

図5にガスアトマイズ法の模式図を示す。原材料を真空中で溶解した後、ノズルから鉛直下方に落下させ、周囲から高圧の不活性ガスを吹き付けることで、小さな液滴に分断させる。分断された熔融金属は、噴霧チャンバ内で落下する間に表面張力により球形化しながら凝固し、球状粉末が得られる。

また3Dプリンティング用粉末でよく用いられる析出硬化タイプの合金はTiやAl等を含有している場合が多い。このような活性元素を含有した粉末においても、当社の真空溶解-不活性ガスアトマイズにより工程中の酸化が最小限に抑えられるため、一般的な大気溶解-不活性ガスアトマイズ法と比較して成分が安定する。これにより造形物の材料特性のばらつきが抑えられる利点もある。

5. 当社金属粉末の3Dプリンティング適用例

一般的には造形方式や熱源によって図6に示すような粒径の粉末が使用されている。粒度分布は造形装置により異なる。適切な造形条件を設定すれば所定粒度分布を広げることでも可能で、結果として材料コスト低減につながる。

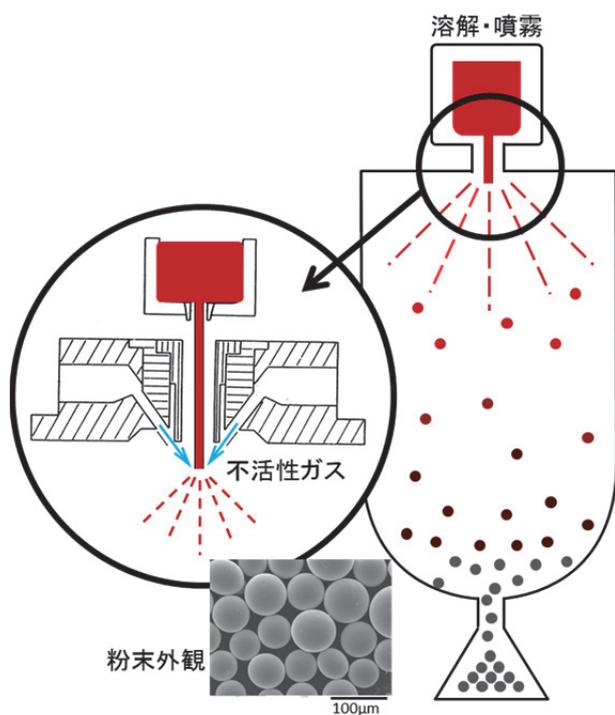


図5 ガスアトマイズ法の模式図

当社では3Dプリンティング用合金粉末として、鉄基、ニッケル基、コバルト基、および銅基など多数の合金粉について実績がある。それら製造合金粉末の例を図7に示す。マルエージング鋼のQM300、ステンレス鋼のPSS316LやPSS630、ニッケル基超合金のPI718等、コバルト基合金のCoCrMo合金等の汎用材料を始め、カスタマイズ組成にも対応可能である。

現在3Dプリンティングに使用される材料は、SUS630、マルエージング鋼、Ti-Al-V等、多くが析出強化タイプの合金であるということが特徴として挙げられる。これらの合金は、造形時には強度（硬度）が低く、時効（熱処理）することで所定の化合物が析出し強化される。このため、造形時にはクラック等の欠陥が発生しにくく健全な造形が可能であり、造形後の熱処理によって所定の強度が得られるため、3Dプリンティングには都合のよい材料と言える。以下では、汎用鋼の中でも現在実用化に進んでおり、当社の製品としてラインナップしている鋼種について紹介する。

5.1 ステンレス鋼

ステンレス鋼は、優れた耐食性および耐熱性を有し、化学工業をはじめとする各種産業用機械、一般家庭用品、自動車部品ほか、原子力発電プラントなどその用途は極めて広範囲に渡り、種類も多く、3Dプリンティング用材料としても多くの用途が検討されている。

ステンレス鋼の造形時に問題となる欠陥は、溶接時に

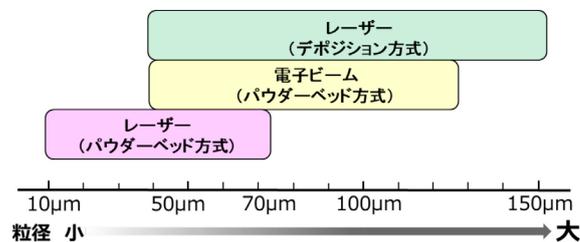


図6 3Dプリンティングに用いられる粉末粒径

	特徴	用途
Fe基	PSS316L	高耐食性 耐食部品
	PSS630	高耐食・高強度 耐食部品・耐食金型
	QM300	高強度・高靱性 金型
	開発鋼 Co-free QM300	高強度・高靱性 金型
Ni基	Alloy C276	超耐食性 耐食部品
	Alloy X	耐酸化性・高温強度 高温部材
	PI718	高温強度・高耐食 タービン・航空機部材
	PI625	高耐食性 耐食部品
Co基	PS21	高耐食性・高強度 耐食耐熱部品
	CoCrMo	高耐食性・高疲労強度 生体材料等
Cu基	開発鋼 Cu合金	造形性改善・高電気伝導

※上記以外の合金（設計）にも対応します。

図7 当社3Dプリンティング用粉末の合金例

発生する欠陥と同様で、オーステナイト系では高温割れ、フェライト系・マルテンサイト系および二相系ステンレスでは低温割れである。欠陥の発生原理等は専門書へ譲るが、割れ感受性の高い合金を造形するにはこのような欠陥発生を考慮した、材料、造形条件、サポート設計の適正化が必要となる。当社では、溶接材料における過去の知見を参考とし、不純物低減等の原料における最適化も含めた3Dプリンティング用粉末の成分設計を行っている。

5.2 マルエージング鋼

マルエージング鋼は低C－高Ni鋼の高張力鋼である。オーステナイト化温度から冷却してマルテンサイト化した後、時効処理により金属間化合物を析出させて高張力化する。造形時にはマルテンサイト化した状態であるが、低Cであるため、軟かくて粘りことから造形時の欠陥は発生しにくい。その後、造形体を時効硬化することで高い引張強度、疲労強度および靱性が得られることから、主に金型や航空機部品、原子力などの分野で使用されている。マルエージング鋼として最も広く使用される18Niマルエージング鋼は、時効硬化元素としてCoを含んでいるため、粉末として扱う場合に特定化学物質障害予防規則により健康障害防止措置を講ずる必要がある。このような背景から、マルエージング鋼の特性を維持しつつ、特定化学物質であるCo添加を回避したCoフリーマルエージング鋼を開発した。詳細は後述の「山陽特殊製鋼の3Dプリンティング技術」にて紹介する。

5.3 ニッケル基超合金

航空・宇宙機器において、高温かつ高強度が必要とされる部位には、ニッケル基超合金が使用され近年3Dプリンティングの適用が進んでいる。ニッケル基超合金は大別すると、非析出硬化型と析出硬化型に分類できる。これらニッケル基超合金は母相が γ 単相であるために、本質的に造形時には、凝固割れや液化割れ等の高温割れが発生しやすい⁶⁾。HastelloyXやAlloy600に代表される非析出硬化型の造形性は、オーステナイト系ステンレスと同等程度で、高温割れの原因となる不純物が低い材料を用いることで健全な造形が可能である。

析出硬化型は高い高温強度を有する材料であるため、結果として変形能が小さく、ひずみが加わり割れが発生すると考えられる。当社では、これまで造形が困難とされていたAlloy713Cについて、不純物の低減および造形条件の最適化を実施し、健全な造形体作製を達成している。詳細は「山陽特殊製鋼の3Dプリンティング技術」内にて紹介する。

5.4 コバルト基合金、銅合金

生体材料として使用されるCoCrMo合金では当社粉末

にて薬事認証を取得し、国産材料として初めて、歯科医療機器製造用3Dプリンティング粉末として実用化されている。詳細は「歯科医療対応3Dプリンティング用コバルトクロム合金粉末」にて紹介する。

また近年、熱伝導性や導電性が必要とされる部品の材料として銅合金の造形が注目されているが、これまで高密度造形体の作製が困難であった。当社では造形性と造形体の熱伝導性を両立した銅合金を開発した。詳細は「金属3Dプリンティング用銅合金粉末の造形体に及ぼすZr添加量の影響」を参照されたい。

6. おわりに

ガスアトマイズ法は、広い粒度分布幅を持つ球状粉末が得られる、酸素を低くコントロールできる、という特徴を有し、3Dプリンティング用粉末としての要求特性に合致することを説明した。また、製品鋼種例を紹介すると共に、健全な造形体を得るための当社での取り組みを概説した。当社は、今後も造形技術向上と用途拡大に寄与していくと共に、ユーザー要求に応じた粉末の開発を通して、市場創生を推進していきたい。

参考文献

- 1) 柳谷彰彦：特殊鋼，65(2016)4，2.
- 2) 京極秀樹：まてりあ，57(2018)4，140.
- 3) 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.
- 4) 相川芳和：光技術コンタクト，56(2018)10，23.
- 5) 河合伸泰，佐藤義智，関義和：資源処理技術，33(1986)4，39.
- 6) 金属学会：改定4版金属データブック，丸善株式会社(2004)，71.
- 7) 鈴木道隆：粉体工学会誌，40(2003)5，348.
- 8) 篠崎賢二：溶接学会誌，6(2000)5，447.