

3Dプリントの量産技術*

The Series Production Technology of Metal Additive Manufacturing

保田 憲孝¹⁾ 佐々木 信之²⁾ 西村 渉³⁾
Noritaka Yasuda Nobuyuki Sasaki Wataru Nishimura

Although mass production using 3D printing has been proven in other countries, it is difficult to find examples of series production in Japan due to manufacturing and management issues. This article will introduce the key concepts to solve these issues.

KEY WORDS

Production・Manufacture

Additive Manufacturing, 3D Printing, Metal, Series Production [D4]

1 はじめに

前号 (Vol.76, No.6, 2021年6月号) では、金属AM (AM: 3D造形を意味する英語 Additive Manufacturingの略) において重要な要素である材料と、設計・デザインについて最新の取組み状況を報告した。今回は金属AM製品の量産化について報告する。金属AM製品の量産化の実例は日本では少ないが、世界に目を向けるといくつかの事例が出てきている (図1, 図2)。これらの事例が量産に至っている背景には、製造上の課題とマネジメント上の課題を克服しているからであると筆者は考える。今回は、これらの課題と対策について述べていくものとする。

2 製造上の課題と対策

金属AM装置は、データを投入してボタンを押せば良品質の製品が出来てくる魔法の箱ではなく、使用材料、製品形状に合わせて最適なパラメータ設定を行う必要がある。パラメータ項目は装置によって多少異なるが、造形スピード、ビームパワー、

積層ピッチ、造形温度 (予熱を行う場合は予熱温度も含む) 等、数十から百を超えるパラメータの設定が必要であり、それらを最適化して初めて良品質な製品が出来上がる。造形製品に合わせたパラメータの最適化のことをレシピ開発と呼ぶ。

本レシピ開発に加え、造形物の形状によっては積層する方向や角度の最適化、複数の製品を同時造形する場合は最適なレイアウトの検討を行う。さらには、製品とならないが造形の補助構造として造形中の温度勾配による残留応力を考慮したサ



図1 ウイングブラケット (courtesy by GE Additive 社)



図2 アクチュエータブラケット (courtesy by Poly-Shape 社)

* 2021年3月31日受付

1) 日本積層造形㈱ 取締役副社長 (営業管掌)

(985-0874 多賀城市八幡一本柳3-8)

E-mail: yasuda.noritaka@jampt.jp

2) 同社 開発部・品質保証部 (同所)

3) LINK3D Inc 環太平洋地区副社長

(2770 Dagny Way, Lafayette Boulder, Colorado 80026 USA)

E-mail: wataru+jsae@link3d.co

ポートの設計等も行う必要がある。レシピ開発とともにこれらが最適化されなければ、造形中に変形や割れが生じ、製品形状ができたとしても中に欠陥ができて必要な強度が得られない。

2.1 造形技術開発手法

造形物形状の違いによりレーザービームあるいは電子ビームの走査面は種々変化する。複雑形状ではそれにあつたレシピが必要とされる所以である。この最も重要なレシピは、以下の手法を用いて総合的に開発している。

- ① データベース構築によるレシピ開発
- ② 実験計画法によるレシピ開発
- ③ シミュレーション技術を用いた開発

(1) データベース構築によるレシピ開発

(a) 材料ごとのレシピデータベース：積層造形においては、材料、装置、生産条件（プロセス）が重要であるが、材料が製造プロセスに及ぼす影響は大きく、また粉末を用いるのでさらに問題を複雑化させている。ステンレス鋼、ニッケル基合金、アルミ合金、チタン合金、コバルト基合金などの一般的材料でも積層造形ではまったく新しい特性を示すので、その効果を最大化するレシピ開発を実施する必要がある。また、アルミ新合金、タングステンカーバイド、超硬合金など、他加工法では扱うことが難しい材料も、材料設計が可能となるのでそれに適したレシピ開発が必要となる。

レシピを作るためには、その基礎となる材料ごとの物性値に対応したレシピのデータベース構築が重要であり、粉末特性（粒径、粒度分布、流動性など）を加味したうえで、データベース化しておくことが肝要である。例えば、純銅のレーザ積層については、レーザが粉末で反射し熔融に足るエネルギーが入りにくいので造形は困難である。一方、純銅の電子ビーム積層造形では、製品を造形する前に導電性向上のため金属粉末同士が軽く接触する仮焼結と呼ばれるプロセスがあるが、純銅は熱伝導率が極めて高いため粉末同士が極めて容易に焼結状態になってしまい、以後の造形プロセスに入れない場合が発生する。弊社では、造形パラメータ間を調整したレシピを独自に開発してデータベース化し、電子ビームでの純銅造形を可能にしている。このように、材料ごとのレシピデータベースは非常に重要である。

(b) 各種形状データベース：同じ粉末を使用

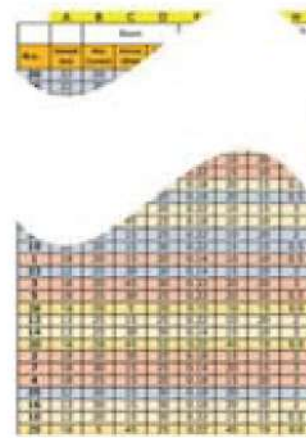


図3 実験条件表

しても、造形物の形状が異なるとビームが造形物表面に及ぼす効果が変わるので、レシピを変える必要がある。ただ、造形物の形状は多岐にわたるので、その都度レシピを開発しては到底生産に間に合わない。そこで、極小形状、薄肉形状、通常形状、大型形状などに適したレシピをデータベース化して使用している。

造形形状毎に、それに対応する造形パラメータの実績をデータベース化することで造形成功率は高まる。

具体的には、大型形状品などの場合は応力変形が大きくなるため、寸法精度、サポート剥がれなど不具合が生じやすい。また、製品全体の品質の均質性を維持するためのビーム照射の安定性に留意するといったことである。弊社では、こういったことを踏まえて、形状ごとに造形パラメータ間を調整し、独自にレシピを開発してデータベース化している。

(2) 実験計画法によるレシピ開発 造形物の欠陥、各種機能特性の向上、および生産性向上を目的としたレシピ開発を実験計画法などの統計手法を用いて、基本形状、材料ごとに実施している。

・実験条件表

複数の造形パラメータを抽出し、実験計画法に基づいたアプローチを実施する。試料の欠陥を画像解析により定量化し、データを分散分析して主効果の確認と各因子の相関を定量化する。図3に、複数の造形パラメータを同時に変更した実験条件表の事例を示す。実験から得られた種々の評価結果との相関を分析し、造形パラメータの相互関係を求めている。

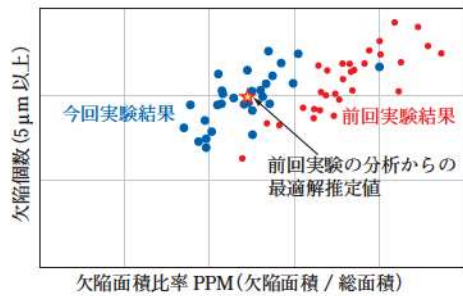


図4 定量化評価

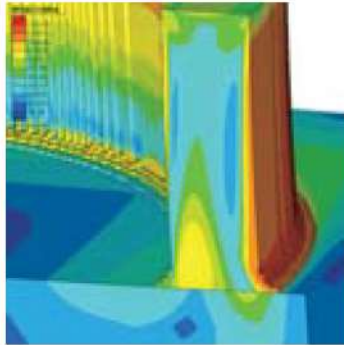


図5 相当応力分布

・定量化評価

ある評価軸を定め、最適な造形因子を定量的に評価した結果事例を図4に示す。例えば、造形条件の最適化により、充填率99.999%を達成するなど、実験自体の成績を定量的に評価する。

(3) シミュレーションによるレシピ開発

(a) 造形マクロ解析：固有ひずみ法を用いた数値解析により、応力、歪み挙動を定量的に評価し、形状設計、サポート設計等にフィードバックしている。積層造形特有の現象をどのようにモデルに反映させていくかが重要である。簡単な造形物の例(円筒モデル)で相当応力分布図を図5に示す。応力状態からサポートの位置、形状など検討し、さらに再計算を行い、サポートを考慮した実際の挙動を推定している。積層造形シミュレーションの結果から、現設計自体を変更する必要がある場合もある。

(b) 造形ミクロ解析：マクロ解析では造形パラメータの細かい設定を反映させることはできないので、ビーム照射による局所的造形挙動を調べるためミクロ解析を実施している。図6に、メルトプール形状を与えたビーム照射の状態を示す。これは、ビームスキャンに伴う金属粉末の熔融凝固を模したものである。ビームパワー、ビーム径、スキャン速度、スキャンピッチなど、さまざまな

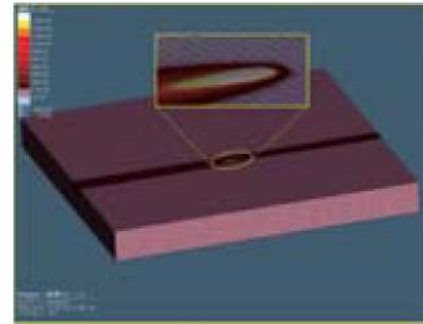


図6 ビームスキャン

造形パラメータを変化させた場合の局所的な熱履歴などを計算することにより、欠陥予測の参考となる。

CADデータから単に構造計算するだけでは、積層造形を模擬することはできない。積層造形のデジタルツインを考える際、設計から実際の製造段階に移行するには、積層造形特有の挙動を組み込んだシミュレーション技法を構築しないと、実際の造形を模擬できないことを弊社でも確認している。造形欠陥(未熔融、クラック、変形その他)の予測、サポート設計の最適化など、今後シミュレーション技術がますます重要度を増していくと考えられる。

2.2 量産製造技術

量産では、製造の観点から、プロセスウインドウを広くとる必要がある。材料の変動、多種多様な造形製品(形状構造の変動)、装置の変動(個体差、日変動等)などの要因に対して、頑健性のあるシステムの構築が必要である。前節においては、個別の造形物における最適化技術について述べたが、造形のモニタリングデータ、時系列データを造形パラメータにフィードバックすることにより、さらに実造形品の高精度化が期待できる。積層造形のデジタルツインを考える際は、この量産データを取り込むことは必須である。

(1) 均質性、量産性の確保 均質性、量産性の確保には粉末の管理、装置の管理が重要である。

(a) 粉末の管理：造形に使用する粉末はリサイクルされるので、その保管および品質維持に注意する必要がある。まず、粉末の長期保管による経時変化、特に酸化に対しては、湿度管理、脱酸素剤の使用に注意している。また、粉末の使用履歴を管理し、バージン粉末の投入基準、廃棄基準等をルール化している。



図7 PREP 粉末製造装置

(b) 装置の管理：レーザ積層装置は比較的再現性が良いが、チャンバ内酸素濃度、ガスフローの管理が重要である。電子ビーム積層装置は、装置個体差、ベースプレート上の造形配置、フィラメント管理等が造形品質に与える影響が大きく、再現性の確保に苦労している。そこで、機械学習等AI手法を取り入れた再現性確保の要件の検討をしている。

(2) PREP (プラズマ回転電極法) 粉末による開発 前述したとおり、積層造形において材料が重要である。積層造形では、材料が粉体の形態をとるため粉体の出来が造形品質に決定的な影響を及ぼす。従来のガスアトマイズ粉末は粉体内にガスを取り込むためガスボイド(空孔のこと。以下ボイドと記載)がかなりあり、造形品の均質性、再現性に多大な影響を及ぼす。しかし、PREP粉末は、製造上の特徴から粉体内部にボイドがほとんどなく、ボイドなしの造形が可能である。また、形状が真球なため流動性についても従来のガスアトマイズ粉末と比べると非常に良く、そのため製造上のトラブルの発生がかなり抑えられる。また、熱効率が良いので造形時間の短縮といったメリットもある。

弊社では、このPREP粉末の製造装置(図7)をもち、PREP粉末に適したレシピ開発を行い、より優れた積層造形品の開発を進めている。造形品中のボイドが少ないことから疲労特性に優れた航空機部材(チタン合金)を開発した。特許第6785491号「チタン合金PREP粉末を用いた積層造形品(※HIPなし)は、アトマイズ粉を用いた積層造形品(HIPなし)より高い疲労強度(10^7 回)を示し、アトマイズ粉を用いた積層造形品(HIPあり)と同等の疲労強度(10^7 回)を示し、PREP粉を用いることの効果を実証している」(本記述は特許をそのまま引用したが、特許文内の

HIPはHot Isostatic Pressingの略で、等方圧での熱処理により、粉末の焼結、拡散接合、内部欠陥除去等を可能にするプロセスを意味している。)

前述のシミュレーションによるレシピ開発では、材料粉末は真球を仮定している。したがってPREP粉末の形状はシミュレーションと親和性が高いため、製造シミュレーションには不可欠と思われる。したがって、PREP粉末は設計、製造、量産のデジタルツインを構成するデジタルイクイップメントの一環として位置づけられる重要なデバイスと考えられる。

3 マネジメントの課題

上述した製造上の課題のほか、量産には供給責任の観点で安定して設備が稼働し続けるための管理が必要となってくる。製造を行う3Dプリンタは複数になるが、その場合、レシピ管理はアナログ手法では追い付かず、シミュレーションソフトウェアなどを用いて効率良く開発する必要がある。また、故障した場合の対処、保守部品の在庫管理や調達、需要が増えた場合の設備の増設、品質を保証するためのデータ、これらすべてを統合的にマネジメントすることが量産の必須条件となる。

3.1 量産に必要な要件

AMで量産を行うには、設備の安定確保、材料の認定、プロセスの再現性、認証の取得、費用を明確にすることが必要である。

- ・設備・消耗品の安定確保
- ・材料の認定
- ・プロセスの再現性を証明する能力
- ・認証の取得
- ・資金確保とコスト削減

以上については少なくとも計画段階で明確にしておく必要がある。特に設備の安定確保は供給責任の観点で重要であり、外国製が多い3Dプリンタが故障した場合の対処、保守部品の調達や在庫管理から、需要が増えた場合の増設時に影響する認証手続きなども考慮し、それらを準備しなければならない。

(1) 材料の認定 材料の認定においては、材料メーカーの認証と監査があるが、それは新規材料における納入仕様や購買仕様だけではなく、コスト削減のため再利用する微粉末をも対象となる。

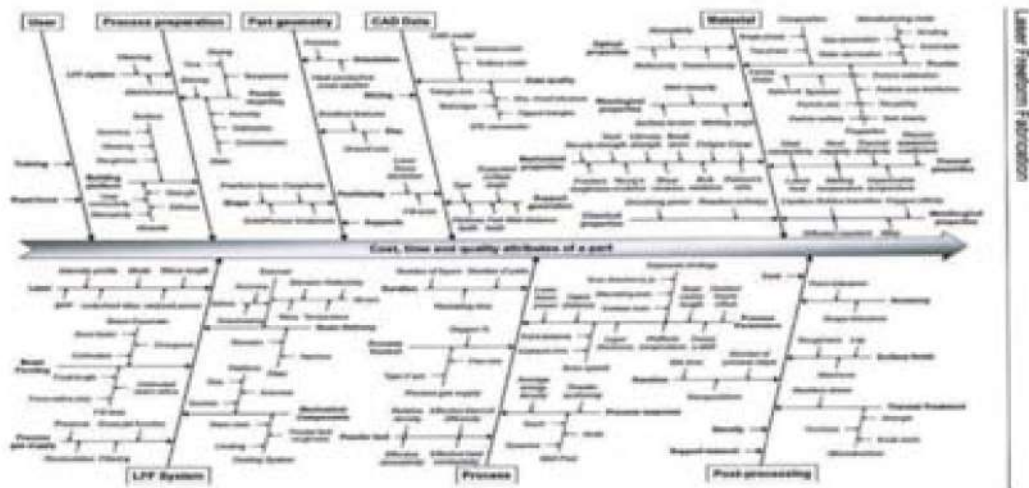


図8 Cellular design for laser freeform fabrication(ハンブルグ工科大学オラフ・レーマ博士, 2009年)

バージン粉末に加えリサイクル粉末も含めた材料管理には課題があり、システムが欧米数社から提供されているものの、作業現場と認証手続きに則した実用的なものが求められている。またAMに特化した新材料も現れてきており、その材料に特有の品質管理が求められるケースも考えられる。

(2) プロセスの再現性 プロセスの再現性は先に述べたレシピにより担保していくものであるが、量産の造形ではさらに複雑になる。熱源から金属粉体までに発生するヒュームによる干渉や発生したメルトプールがスパッタ現象と呼ばれる突発的な破裂現象によって周辺に各種の影響を及ぼす問題のほか、レーザ発信器や電子ビーム陽極の経時劣化による溶融性能への影響が実際の造形で発生する。ほかにも、各種3Dプリンタのセンサーデータの挙動にも特徴があり、これらを理解・管理しておかないとプロセスの再現は不可能といえる。

(3) 認証とデータ管理 材料の認定やプロセスの再現性で記載したとおりであるが、認証により必要とされるデータのアウトプットはさまざまな要因の影響を受ける。3Dプリンタの製造元や機種によって異なるが、造形中に生成される以下の情報は3Dプリンタから取得できる。

- ・ジョブ情報 - 注文ID, 材料, レシピ, 造形時間
- ・スライスレイヤ固有の情報と各種ハードウェアのセンサ値 (約 100 万個/造形)
- ・造形中に撮影されたスライスレイヤごとの画像
- ・ユーザメッセージ (エラー, 警告など)

しかしながら、製品の結果に影響を与える要因をすべて考慮するとその数は数百種類に及ぶと考えられている。2009年にハンブルグ工科大学のオラフ・レーマ博士が発表した金属積層造形の論文にある特性要因図(図8)では、当時の考察だけでも約200種類の要因が考えられた。現在の最新3Dプリンタはレーザ源が12個あり、センサの種類も増えていることを考えると、デジタル管理しなければならない要因はさらに増える。

このようなAMの性質を踏まえ、ISO, SAE, ASTM, APIなどの規格設定機関は、量産を成功させるためのガイダンスを提供し、製品開発、製品性能、品質管理において、標準規格を設定し始めている。AMを量産に適用する場合、これらの標準規格を採用し、特定の製造仕様を開発して、顧客ごとに製品の品質とパフォーマンスを保証する必要がある。管理すべきデータが多様であることから、データマネジメントが重要となる。

- ・製造ライフサイクル全体を見渡し、各工程で生成される独立したデータの集約を自動化する
- ・それらを品質改善とエンジニアリングのため、包括的で実用的なデータとして解析をする
- ・CTQデータ(CTQ: Critical to Quality, 成果に重要な影響を与える要因)を特定し、記録・管理する

これらはデータマネジメントに必須の事項であり、製品のライフサイクル全体で生成されるデータの種類を理解し、組織内の認証取得の課題を削

Additive Manufacturing Process Maturity Model

A DATA MINDSET IS CRITICAL TO ACHIEVE AN AUTOMATED AND PREDICTIVE STATE OF MANUFACTURING

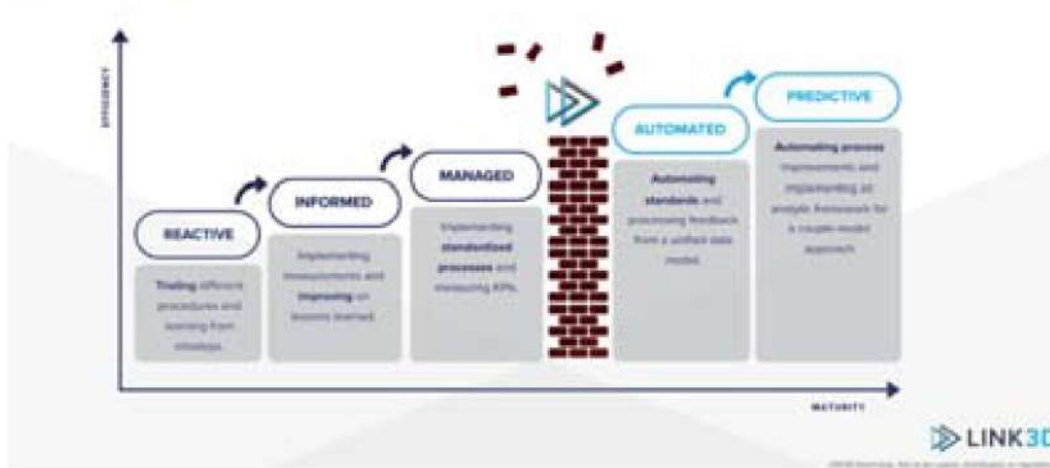


図9 AM組織の成長モデル

減するための戦略を作成することが重要である。

(4) 資金確保とコスト削減 量産を考えると、莫大なコストに見合った利益を確保できるかは経営層の最大の関心事だが、現場から提出される概算の多くは予測を誤った算定となってしまう。AMに関わる工程は設備、材料、プロセスの多岐にわたり、かつ認証取得に関わるデータは膨大なものにもかかわらず、管理を人力に頼ることも、その確立されていない認証取得にかかる膨大な労力や時間を見誤るからである。設計においても生産コストを削減するためにDfAM (Design for Additive Manufacturingの頭文字をとった略称、トポロジー最適化などAM技術で製造可能となる自由な設計の意味)とMfAM (Modified for Additive Manufacturingの頭文字をとった略称、AMの生産性向上のために最適化した設計の意味)のバランスが大事である。リサイクル材料の効率的な管理には一層の発展が求められる。そのため、生産性向上のためにデータマネジメントはMES (製造実行システム) の活用が有効だが、将来の変化に対応できるようにシステムには拡張性と柔軟性が求められる。

3.2 AM戦略

AMは新しい技術であり、それに精通した技術者は絶対数が少なく新規採用もできないため、社内の技術者が成長できる環境が必要となる。AMはインダストリ4.0へ向けた製造業のDXを進め

るのに有効なパスとなるが、導入の段になると既存技術との比較により否定的側面が助長されてしまう。また、経営者・中間管理職が新しい技術を効果的に展開する能力は不足しており、より進まない。欧米と比較して日本での導入が遅れている原因は、導入戦略の欠如である。

(1) AM成長モデル AMの技術導入から量産に向けて成長していくステージを順に説明する(図9)。

- ・リアクティブステージ (REACTIVE: 反応型)
- ・インフォームドステージ (INFORMED: 情報提供型)
- ・マネージドステージ (MANAGED: マニュアル管理型)
- ・オートメイトドステージ (AUTOMATED: 自動管理型)
- ・プリディクティブステージ (PREDICTIVE: 予測管理型)

AM技術を導入すると最初はREACTIVEな段階から始まる。さまざまなテスト造形による技術学習の段階であり、時々必要に応じて依頼された部品を個々に製造する。インフラ整備は最低限であり、3Dプリンタ、材料、プロセスだけの限られたノウハウをもった一握りの技術者が担当し、「できるだけ早く造形してお持ちします」となる。(リアクティブステージ)

AM技術をもった部署が現れたことが社内に知

られるようになり、少しずつ造形数が増え工程管理を始めだす。簡易的な受注管理や予定表が共有される。電子メールでのやりとりで3Dファイルと規定の表計算への情報の入力と提出が求められる。スケジュールのマニュアル管理や部署間での費用の付け替えが手作業で行われる。(インフォームドステージ)

さらに造形量が増えると、造形全般に手作業が標準的な管理を行い、後工程を含む作業指示書の発行とともに最適化された工程管理を行おうとする。効率化を図るため現場の工程に沿った社内システムの構築が計画される。その後、コストセンターから利益を生もうとする事業組織となり、量産へ向けた体制が整われようとする。(マネージドステージ)

この段階で工程管理にも最先端のソフトウェアを採用するようになる。品質管理システム(QMS)が必要となり認定プロセスに則った作業を行い、その指示を自動化で賄う。リアルタイムな造形の監視が行われ、造形全般が統一されたシステムで一元化され、コスト削減のため作業の効率化が進む。(オートメイトドステージ)

これらのシステムと既存のハードウェアおよびソフトウェアが全体的に連結され、データが相互補完的に通信される。データは解析されることを想定してデータレークに蓄積され、さまざまな予測的処理が行えるようになる。最適パラメータと材料の選択が自動的に行われ、将来的には機能要件を加味して設計も自動的に行われる。また、造形中のセンサデータから欠陥発生の予測が行われ、その対応処理に関しても自動で行われる。品質管理も各産業においてAMに適した認証基準が策定され、システムがその管理を代行する。現場での手作業にはAR/VR技術で補完され、確実な工程作業が進められるようになる。(プリディクティブステージ)

(2) AM技術導入へのマネジメント変革 これらの成長には別の次元で痛みが伴う。それは企業内で発生する新しい技術の導入に対する抵抗である。既存技術の責任者は品質を維持するために保守的であることが必要だからである。しかし、今まではAM技術の品質が既存技術に追いつくまで待とうとする企業がほとんどであったが、可能

性を信じAM技術の理解を深めるためにも導入を徐々に進めていく方向に企業戦略が変化してきた。

AM技術が破壊的であるといわれて久しいが、それは一つの部品を製造するにあたり多くの工程をAMでは短縮している点であり、それは大きな利点である。しかし、広範囲な部署に影響を与えるため、導入においてそれぞれの機能的部署から多様な課題が提起され、既存技術と比較され、評価は低いものとなる。多くの場合、ここで量産へ向けたAM技術導入の機運は薄れ、生産技術開発部門で細々と技術検証が何年も行われる。これが各メーカーでの現状ではないだろうか。

AM技術を量産のために導入するには、全社が協力する横断的な組織運用が可能な体制を整えるか、新しくAMセンターを設立し予算と権限を与え、独立させることが効果的となる。海外でもこれがトレンドとなっており、そこでの成功体験を得て巣立っていく技術者がAM技術導入の一層の促進を図るのである。

4 おわりに

企業内にAM技術の導入を確実に進めるには、各部署に対して横断的に決定権のある経営者レベルでの強烈なリーダーシップが重要である。大胆で中長期的なAM戦略とビジョンが必要である。目論んだ収益に対する膨大な投資リスクが伴うが、海外でAM技術導入を積極的に進めている例は数多く、そのツールは国内でも調達可能なものばかりである。社内で将来の製造業に対する危機意識を生み出し、解決するための明確なビジョンを共有する必要がある。それにより、AM技術の導入とそのリソースの確保が可能となるであろう。

本稿が皆様方の課題克服の参考となり、日本でも金属AM技術を使った量産の成功事例が出てくることを切に願う。

フェイス



保田憲孝



佐々木 信之



西村 渉