

# JAXA における航空宇宙分野への新たな展開

堀 秀輔<sup>\*1</sup>

## Additive Manufacturing Efforts in Japanese Aerospace Industry

Shusuke HORI<sup>\*1</sup>

<sup>\*1</sup> Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)  
2-1-1 Sengen, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8505 Japan

**Key Words** : Additive Manufacturing, Aerospace Industry, Aircraft, Satellite, Rocket

### 1. はじめに

3D 積層造形 (AM: Additive Manufacturing) は、特に少量多品種生産を特徴とする航空宇宙産業において、ニーズへの素早い対応、低コスト化、高付加価値化等の面で、ものづくりを革新する技術である。欧米諸国が凌ぎを削る中、わが国の産業が今後のグローバル化の中で競争力を持続していくためにも、製造装置開発及び実用化の両面において世界を上回る技術を速やかに習得し、新たな産業構造への対応を図ることが不可欠である。

本稿では、航空宇宙産業における製品への実用化状況について世界のとのベンチマークを踏まえ、当機構における今後の展開について述べる。

### 2. 航空宇宙分野における AM への取組みの必要性

航空宇宙産業は現在、航空機・人工衛星・ロケットいずれの分野においても世界的に供給過多の状況にあり、持続的に競争力を確保するためには、工期短縮や低コスト化の不断の努力が欠かせない。しかし、航空宇宙分野のものづくりは、「少量多品種生産」「極限までの軽量化要求」「高い信頼性要求」で特徴づけられ、一般的な大量生産向けの手法を適用するだけでは、必ずしも低コスト化や納期短縮等の効果が得られない難しさがある。各国の航空宇宙メーカーにおいても、既存プロセスの工夫による低コスト化は限界に近づいている。

ところが、近年の電子ビーム溶融法 (EBM: Electron Beam Melting) や選択的レーザー溶融法 (SLM: Selective Laser Melting) による汎用 AM 装置の登場により、品質の高い三次元プリントが行えるようになったことで、航空宇宙産業のものづくりに以下のような変革が予測されている<sup>(1)(4)など</sup>。

- (1)多数部品から成る複雑コンポーネントを一体物とすることによる少量多品種生産の短納期化・低コスト化
- (2)従来は製造できなかった形状による格段の性能向上・軽量化
- (3)CAD からプリントするため金型等の設備が不要になり、特定メーカーへの依存からの脱却 (参入障壁の低下)

この様に AM は、航空宇宙用部品の納期、コスト、重量を低減し、付加価値を高めるポテンシャルを有するだけでなく、コスト構造やサプライチェーンを含む製造業全体の構造を変革しうる技術である。航空宇宙産業が今後、グローバルな競争の中で競争力を持続していくためには、AM 技術を速やかに習得し、新たな産業構造への対応を図ることが不可欠である。

なお、人類の知的活動領域の拡大を目的とする宇宙探査分野では、究極的なニーズとして、当技術を発展させることで、宇宙空間での製造 (space-based manufacturing) や探査先の材料を使った基地の建設等が実現できる可能性があることも付記しておく<sup>(2)(3)</sup>。

<sup>\*1</sup> 宇宙航空研究開発機構 第一宇宙技術部門 H3 プロジェクトチーム (〒305-8505 茨城県つくば市 2-1-1)  
E-mail: hori.syuusuke@jaxa.jp

### 3. 世界情勢

#### ①欧州

AM 装置開発を牽引してきたのは欧州である。欧州では早い段階から航空宇宙への適用を目指し、ARCAM 社（電子ビーム溶融）、EOS 社、Concept Laser 社、SLM 社（レーザ溶融）等、現在流通している汎用造形装置の主要メーカーが育ってきた。欧州宇宙機関（ESA: European Space Agency）では、高品質、低コスト、軽量の複雑部品の製造に AM を活用する活動を進めており、EADS 社による航空機エンジンのナセル部品や、人工衛星のアンテナ用部品、スラスタ部品等に AM で製造した部品を適用し、いち早く 2011 年に打上げを行った<sup>(1)</sup>。現在、ESA が主催する AMAZE プロジェクト (Additive Manufacturing Aiming towards Zero Waste and Efficient Production) では、産業界のパートナーを含むコンソーシアムを構築し、2017 年までに 5 年計画で、欧州連合 (EU: Europe Union) の中に自立したサプライチェーンを確立するとしている<sup>(2)</sup>。ただし、設計、製造、品質保証（非破壊検査）の 3 分野が大きな課題としており<sup>(3)</sup>、上記の事例を超える様な成果の報告例は多くない。

#### ②米国

米国では、製造装置、設計、製造プロセス、品質保証、実製品への適用、標準化に至る包括的な取り組みが、America Makes（NAMII: National Additive Manufacturing Innovation Institute）を中心として行われている<sup>(4)</sup>。実用化例としては、GE 社によるジェットエンジンの燃料噴射ノズル（チタン合金）、CRP Technology 社によるキューブサット構造、SpaceX 社によるロケットエンジン部品（ニッケル合金）への実適用が既に行われ、いずれも飛行実証済である<sup>(5)</sup>。ただし、米国全体としてみると、特に構造強度を受け持つ様なクリティカル部品へ適用し重量低減や低コスト化等の AM のメリットまでを実現した例は限定的である。これは、欧州同様、品質保証（特に非破壊検査技術）までを含めた成熟度には達していないためである<sup>(3)</sup>。

#### ③日本

AM の先進国に対し、わが国のものづくりが自律性をもち競争力を持続していくためには、製造装置開発と実用化の両輪を進める必要がある。このうち製造装置開発は、技術研究組合次世代 3D 積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）が中心となり進められている。もう一方の実用化は、現状の事例は少ないが、世界的に上述の状況であることを考慮すると、重量低減や低コスト化等の AM の真価を発揮するような実績や成功事例をインパクトのある分野で重ね、わが国の得意技術である信頼性に裏付けられた技術として世界に発信することが効果的であろう。

### 4. 解決すべき課題

AM において解決すべき技術課題（Technology Gap）として、以下が挙げられる<sup>(5)</sup>。本項では、今後航空宇宙分野への適用を拡大していくための視点として、(2)及び(3)を中心に、特筆すべき事項と対応策を述べる。

- (1)製造プロセスと装置
- (2)材料
- (3)品質保証方法、及び、横断的に必要な技術として、非破壊検査手法（NDE: Nondestructive Evaluation）
- (4)標準化
- (5)モデル及びシミュレーション

#### ①材料特性及びそのばらつき

AM 素材は、凝固方向がほぼ一定であることから柱状組織に近い様相となり欠陥も含まれる。このような材料について、材料データベースや故障に関するナレッジが、産業界全体として十分には構築・共有されていない。このため、早期に、材料特性のばらつきとその支配因子を把握する必要がある。その一つとして、表面粗さと疲労強度の関係についても十分な理解が必要である。なお、特に航空宇宙では、極低温から高温までの広い温度範囲で材料特性の確認が必要である。

## ②粉末／レシピ／ポストプロセス

実績の少ない材料を使用する場合、様々な製造条件が強度等へ与える影響の感度が明らかになるまでは、コントロールを厳しくする必要があり、スペックが厳しくコントロールされた粉末で最適なレシピ及びポストプロセス（熱処理、HIP 処理（Hot Isostatic Pressing）等）を確立し、その組合せにおいて、十分なばらつきデータを整備する必要がある。上記①及び②を効率的に行うには、シミュレーションが有効な手段となる。なお、プロセス確立に際しては、表面粗さ、寸法再現性、清浄度等も、重要な評価項目の一つである。

## ③欠陥

AM では、ガスアトマイズ法に由来する粉末内の小さな球状欠陥が最終形状の各所に残存して含まれるため、欠陥サイズ、位置の分布を把握し、破壊靱性値やき裂進展解析等の破壊力学的評価を行う必要がある。航空宇宙分野では通常、検査等でスクリーニングできない欠陥を含む材料について有限のミッション時間・回数の健全性を保証する「損傷許容設計」を実施している。ただし、従来の損傷許容設計では主として溶接部の欠陥を対象としていたのに対し、AM 素材では微細な欠陥が体積全体に含まれている点に差異があり、このような材料を対象とした設計技術、信頼性評価技術を早期に構築し、高い信頼性を確保しなければならない。非破壊検査や切断検査には、より細かい検出精度で、体積全体を確認できる手法が必要となる。

## ④雰囲気影響（水素脆性等）

AM 素材に対する雰囲気影響は十分に評価が行われていない。ロケットエンジンや水素関連機器で使用する場合は特に、表面粗さや欠陥に起因する各種応力集中条件のもと、水素環境下での広い温度・圧力範囲において、強度特性、疲労特性、破壊靱性、き裂進展特性等に対する影響を確認する必要がある。

## ⑤品質保証（NDE 含む）

様々な試作品に対し、硬さ計測、欠陥サイズの統計分布等を取得し、上記①～④の検討で得られた強度等との関連を調査する必要がある。これらは、材料試験で確認されたばらつきの裏付けや、最悪値の推定・評価等に使用する。以上の活動を通じ、許容できる欠陥サイズ・分布等を見極め、適切なプロセスコントロールまたはスクリーニング（NDE 等）を設定する必要がある。

## 5. JAXA における今後の展開

JAXA においては、次世代の航空機、人工衛星、ロケットへの適用・実証を目標として、AM に関し上述の評価活動を含む各種研究開発を実施している。具体的な活動例を紹介する。

### ①航空機

航空技術部門では、次世代ファン・タービン技術実証プロジェクトを推進しており、軽量化によるジェットエンジンの高効率化を実現するための技術開発（Fig.1）の一環として、AM に関し次の活動を行っている。

ファンや低圧圧縮機は、従来チタン合金が使用されており、近年は徐々に複合材化が進んでいる。更に将来の技術として、AM によるラティス構造を利用した、複合材よりも軽量の構造を検討している。

高圧タービン翼は、冷却のために内部に複雑な冷却構造を有し、精密鋳造により製造される。AM を使用すれば、従来製造法では実現できなかった冷却効果の高い内部構造も可能となることから、材料や構造に関する基礎的な研究開発を行っている。

### ②ロケット

現在、宇宙輸送の自律性の確保及び国際競争力の確保を目的として H3 ロケットを開発しており、2020 年度に試験機 1 号機の打上げを予定している<sup>(6)</sup>（Fig.2）。高い信頼性と低コスト化を両立した第一段エンジン（LE-9）はそのキー技術であり、低コスト化を達成するの手段の一つとして AM の導入も検討している。特にコスト効果

の高い部品であるバルブ、配管、ケーシング等 (Fig.3) を候補部品とし、材料評価や試作試験等を行う予定である。

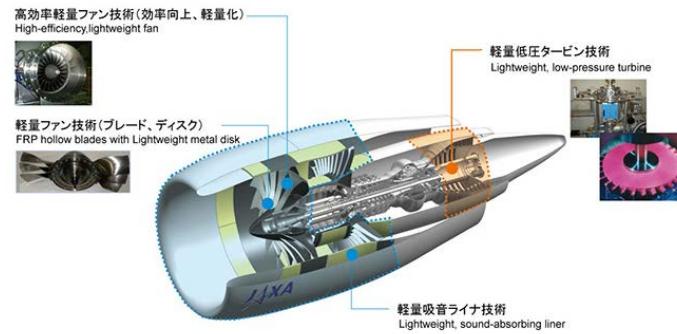


Fig.1 Technology Development in JAXA for Light-weight and High-efficiency of Next Generation Jet engine

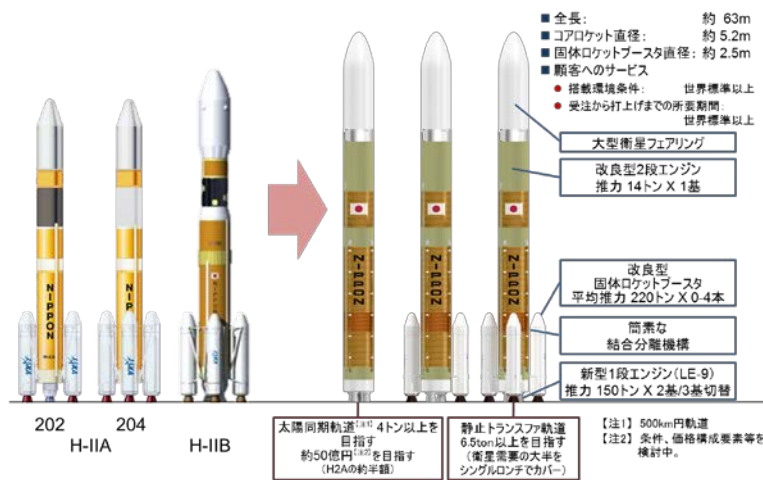


Fig.2 Development of the H3 Launch Vehicle <sup>(6)</sup>

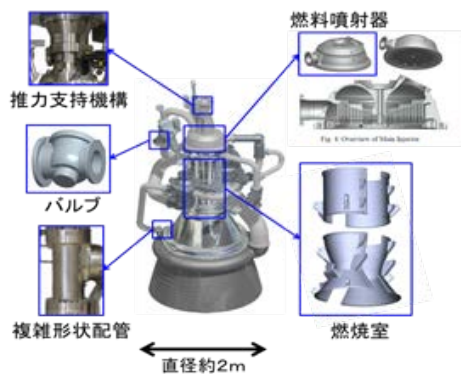


Fig.3 Candidates of AM Parts in the New LE-9 Engine

## 6. おわりに

グローバルな競争の中でわが国のものづくりが自律性を持ち競争力を持続していくためには、AMについて、製造装置開発と実用化の両輪を進め、新たな産業構造への対応を図ることが不可欠である。JAXAにおいては、次世代の航空宇宙産業に必須の技術であるとの理解の下、航空機・宇宙機・ロケット等へのAMの実用化を目的

とした研究開発を進めており、現在開発中の H3 ロケット第一段エンジンへの適用も検討している。これらの大型プロジェクトの成功を通じ「信頼性」を示すことで、わが国の AM 技術の発展にも貢献できればと考えている。

## 文献

- (1) Ghidini, T., “An Overview of Current AM Activities at the European Space Agency. 3D Printing & Additive Manufacturing”, *Industrial Applications Global Summit*, London, UK, (2011).
- (2) European Space Agency, “Applying a Long-Term Perspective: Laurent Pambaquian Interview”, *ESA homepage*, (2014).
- (3) Jess, M., Waller, Bradford, H., Parker, Kenneth, L., Hodges, Eric, R., Burke, and James, L., Walker, “Nondestructive Evaluation of Additive Manufacturing State-of-the-Discipline Report”, *NASA/TM-2014-218560*, (2014).
- (4) Macy, B., “America Makes National Additive Manufacturing Innovation Institute”, *TTCP TP1-5 Joint Workshop*, (2014), slides 9-13.
- (5) Jeff, Haynes, “Additive Manufacturing Development Methodology for Liquid Rocket Engines”, *National Space and Missiles Materials Symposium (2015)*, Space Access & Propulsion, Aerojet Rocketdyne Slides.
- (6) JAXA, “新型基幹ロケットの開発状況について”, *JAXA 報告資料*, 科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会 宇宙開発利用部会 (第 22 回), 2015 年 7 月 2 日.