

# 講演5 3次元モノづくりによる輸送機器、エネルギー機器の新しい生産技術



特集2

川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所 材料研究部 部長  
井頭 賢一郎 氏

## 1. はじめに

当社は、7つの事業部門と本社部門で構成されており、陸海空輸送機器、エネルギー機器、産業機器を主要製品群として事業展開している（図1）。

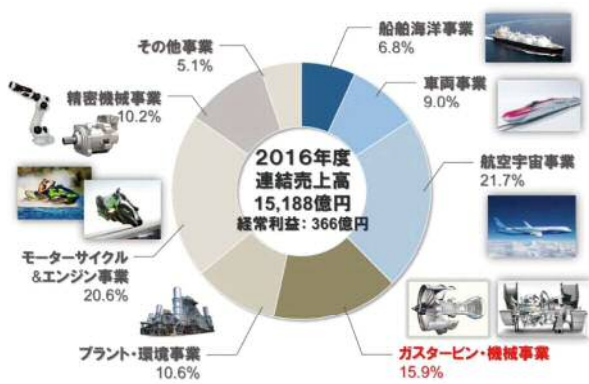


図1 川崎重工の主要製品群



図2 当社製品の概略重量単価

図2は主題にある当社の輸送機器およびエネルギー機器の重量単価の概数を示したものである。これ

によると、航空機（機体、エンジン）および発電用ガスタービンの重量単価が他に比べ非常に大きいことがわかる。ここで、航空エンジンを例にとると、重量単価が大きい要因として、チタン合金やニッケル合金等単価の高い素材が多く利用されており、加えて素材から部品を得る上で、かなりの量が切削除去されていることが挙げられる。特に、航空エンジンの場合、実際に空を飛ぶ部品の重量に対する素材の重量（buy to fly ratio）が10～20であると言われており、換言すれば平均的には素材の90～95%が切削等により除去されているということである。このことは、素材費がかさむという問題だけではなく、一般に難切削と言われるチタン合金やニッケル合金の切削時間が大きくなるため、工場の操業への影響も含め、全体として大きなコスト高の要因となっている。そのため、この分野においても、ニアネットシェイプ技術をはじめとする効率的な生産技術のニーズが高まっており、当社でもコストダウンの期待に加え、以下に示す理由により、革新的な成形、製造技術の開発を積極的に進めている<sup>(1)-(3)</sup>。

先にも示した通り、当社は航空機および航空エン



講師 井頭 賢一郎 氏

※ Boeing社、Airbus社および日本航空機開発協会がそれぞれ、世界の航空輸送需要予測を行っているが、いずれも20年後には、旅客輸送（有償旅客キロ）および貨物輸送（有償トンキロ）共に今の約2.5倍以上の増加（年平均で4%～5%増加）を予測している。これを航空機の運航機数に換算すると、2015年時点での20,814機から、20年後には38,313機に増加することになる。ただし、この間には退役する機体があるため、この代替需要分と新規需要分として、今後20年間に合計33,160機の新造機が必要と予測されている。

ジンを製品とする事業部門を有しており、民間航空機および民需ジェットエンジンの売り上げは2016年度で約2,500億円(同年度総売上の約16%)であるが、今後民間航空機需要の大きな増加が見込まれる<sup>(4)</sup>、\*ことから、これら民間航空輸送システム関連事業を成長分野と位置づけ、10年後の該当事業の売上高倍増を計画している<sup>(5)</sup>。

航空機、航空エンジンには、非常に高度な安全性や信頼性が求められるため、開発から生産、保守に至るまでの多岐に亘る高度な技術と、多額の開発投資が必要となる。さらに、競争の激化に伴い、性能要求はますます高度化しながらも、開発期間は短縮化が求められており、この過大な開発リスクを一社で負うことが困難になってきたため、近年多くの場合が国際共同開発・生産体制を採っている。当社も民需ジェットエンジンについては、Rolls Royce社やPlatt & Whitney社等の開発プログラムに国際共同開発・生産パートナーとして、当初はサプライヤとして参画してきていたが、近年では“Risk and Revenue Sharing Partner”として圧縮機、ギア、燃焼器のモジュールを分担している<sup>(6)</sup>。これらの参画形態では、航空エンジンの開発から生産、そして販売や保守に至るリスクを分担比率に応じて負う反面、同エンジンの販売で得られた利益をシェアに応じて受ける形になっている。そのため、各パートナー会社は完成エンジンメーカーから、担当部位に割り当てられた性能要求、重量要求、コスト要求などの達成を要求されるが、一方、パートナー会社の方では、自社の努力でさらにこれらを改善し、エンジン全体の商品価値を向上し、市場シェアを拡大することで、より大きな利益が得られるため、技術開発のモチベーションが発揮されることになる。また別の見方をすれば、Rolls Royce社、Platt & Whitney社にとって、置き換え可能なメーカーになってしまえば、コスト競争にさらされ消耗戦になってしまう。そのため“Risk and Revenue Sharing Partner”として、“魅力ある”パートナーの立場を維持するためには、開発から設計、さらに生産技術力を常に最新化、高度化する努力を絶やせないということである。

ここで、航空エンジンの生産技術・材料技術のグローバルな動きに着目すると、昨今欧米を中心にIoT、AI、ビッグデータといった情報技術の活用や、金

属3D-プリンティングといった新たな技術を活用した新しい“ものづくり”や、金属間化合物や耐熱複合材料といった新しい“材料技術”でイニシアチブを取ろうとする動きが活発化しており、これまで日本が得意としてきた従来の“ものづくり”や“材料技術”の優位性が脅かされつつある。一方、中国や台湾などの新興国には、豊富な資金力を背景に大量に導入した最新設備と、安い労働力を活用し、航空機部品サプライヤとしての存在感を強めているメーカーが増加しており、これもまた日本の航空産業を脅かす存在になってきている<sup>(7)</sup>。

この様な理由から、航空エンジンメーカーにとって、魅力あるパートナーであり続けるために、当社でも各種の最新または独自の生産技術開発を進めており、本稿では主題にある“3次元ものづくり(積層造形)”に関する開発の一例を紹介する。

## 2. 当社の積層造形技術開発例

前項では、今後の航空エンジンの事業ニーズ面から最新のものづくり技術に位置づけられる積層造形の開発モチベーションを述べた。一方、積層造形の技術シーズ面、すなわち幾分将来の発展期待を含めた積層造形装置の生産性(部品サイズ、生産レート)や同装置用金属粉末の価格の観点では、同技術で価値創出できる対象部品は、航空エンジン、およびその構造や使用される材料が航空エンジンに類似する発電用ガスタービンに多くあると判断しており、以下にこれらを対象とした当社における積層造形技術開発の一例を紹介する。

### 2.1 レーザ粉体肉盛(LMD)

航空エンジン部品には、軽量かつ高強度なチタン合金が多く使用されており、その製造は大きな鍛造素材からの削り出しが一般的である。現状では前述したように9割以上を切削除去するため、素材の無駄も切削に要する時間も非常に多い。製造時の素材の無駄の削減、機械加工費の低減を目的とし、ニアネットシェイプ成形技術のひとつとして、レーザ粉体肉盛による革新的な生産技術の開発に取り組んでいる(図3、図4)。

対象としているチタン合金は、酸素親和性が高い材料であり、施工に際しては不活性な雰囲気が必要とする。また施工条件次第では、ポロシティ等の内

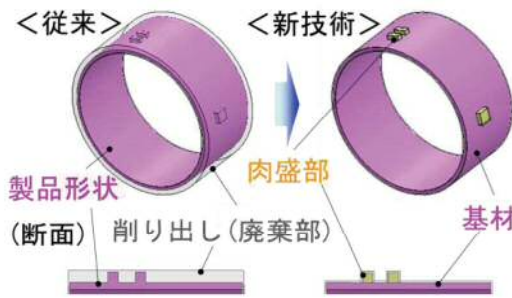
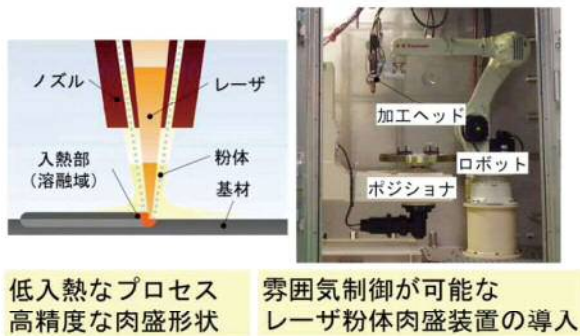


図3 レーザ粉体肉盛り (LMD) の適用コンセプト



低入熱なプロセス  
高精度な肉盛り形状

雰囲気制御が可能な  
レーザ粉体肉盛り装置の導入

図4 レーザ粉体肉盛り (LMD) 装置の概略

レーザ粉体肉盛りの最適な施工条件抽出を目的として、1ビードの施工試験を実施

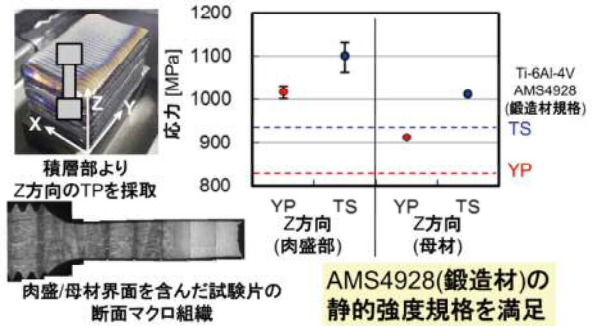
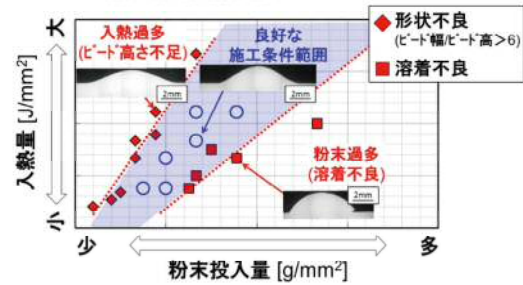


図5 レーザ粉体肉盛り (LMD) 部の品質

部欠陥が発生してしまい、品質に影響を及ぼす。こうした内部欠陥については、施工時のレーザ出力、送り速度、粉末投入量といったプロセスパラメータが複雑に関係しており、肉盛り部を適正品質にするためには、それぞれのプロセスパラメータの感度や相関関係を把握し、最適な施工条件を確立する必要がある (図5)。

また、こうしたプロセス技術開発の一方で、施工品を適切に評価する品質保証技術の開発も重要となる。施工時に内部にポロシティ等が発生した場合は、強度特性に影響を及ぼす可能性が考えられる。各プロセスパラメータでの内部欠陥を定量的に把握し、強度特性との関係性を明確にすることは、実際の製品への適用に向けた重要な項目となる。

航空エンジン部品の品質基準に対する評価技術も確立することにより、1~2メートルサイズの航空エンジン部品への適用を目指す。

なお、本件はJSTによるSIP (戦略的イノベーション創造プログラム) 「革新的構造材料」の一環として取り組んでいる<sup>(8)</sup>。

## 2.2 金属3Dプリンティング

金属3Dプリンティングについては、非常に複雑な構造を有する航空エンジン用燃料噴射弁の低コス

ト化、高信頼性化に向けた製造技術開発<sup>(9)</sup>、発電用ガスタービンの開発リードタイム低減を目的とした性能評価用部品のfast make技術開発<sup>(10)</sup>などを進めているが、ここでは発電用ガスタービン部品への適用を目指し、現在大阪大学と共に、「内閣府SIP革新的設計生産技術三次元異方性カスタマイズ化設計・付加製造拠点の構築と地域実証」の一環で取り組んでいる開発内容<sup>(11)</sup>について紹介する。

タービン翼は、燃料を燃やすことで得る高温高压ガスエネルギーを回転エネルギーに変換する重要部品であり、現行の航空エンジンおよび産業用ガスタービンのタービン翼は、精密鋳造法により生産されている。タービン翼の外形形状は、空力部品であることから、複雑な曲面で構成される。また、高温段のタービンは、翼の内部に冷却空気を通過させる通路を有するものがあるが、少ない空気でも効果的に冷却するために、乱流を発生させるための敷居状の突起や、伝熱を促進するためのピン状の突起など、細かな造形が求められる。

タービン翼の外部および内部形状については、金属3Dプリンティングの自由度の高さを活用し、その空力性能や冷却性能を飛躍的に高められる可能性はあるが、現時点では造形精度や造形速度の点で、現行製法を代替するまでには至っていない (図6)。



しかしながら金属3Dプリンタの性能は年々向上しており、さらに経済産業省指導の下、欧米製現行市販装置の性能を大幅に凌駕する国産金属3Dプリンタの開発が精力的に行われており<sup>(12)</sup>、この成果に期待するところである。ただし、最新のタービン翼については、鋳造時に凝固過程をコントロールすることで、方向性凝固組織化、さらには単結晶化し、高温での耐久性を向上させていることから、金属3Dプリンティングにおいても、このような組織や結晶学的な異方性の導入といった結晶制御がいずれ要求されるようになって考えており、これが実現できればタービン翼の設計・生産技術が大きく進化し、タービン性能の飛躍的な向上が期待できる。(図7)。

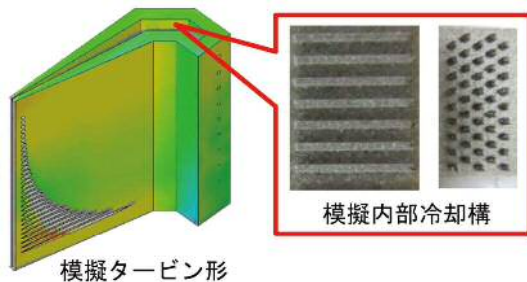


図6 金属粉末3Dプリンティングによる造形評価

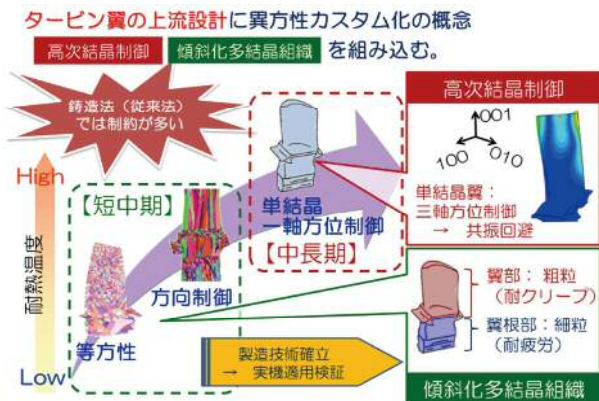


図7 革新的異方性カスタム化タービン翼開発の方向性

### 3. 最後に

冒頭でも述べたように、航空エンジンメーカーおよびそれらのパートナー企業では、今後大幅に増大する航空機、航空エンジンの需要に対応すべく、低コスト、ハイレート生産に適合する新しい製造技術の

採用や、年々厳しくなる低燃費、低エミッション要求に適合する新材料の採用に対し、これまでになく積極的かつ具体的な取り組みを進めている。

当社では、ここで紹介した技術以外にも、革新的塑性加工技術、リニア摩擦接合 (LFW: Liner Friction Welding) や金属粉末射出成形 (MIM: Metal Injection Molding) を航空エンジン部品製造に適用するための技術開発や、軽量耐熱複合材料として期待されている繊維強化セラミック複合材料 (CMC: Ceramic Matrix Composite) の材料開発および部品化技術開発も鋭意進めている。これらについてはまた別の場でご紹介したいと思う。

### 参考文献

- (1) Y. Imamura, Y. Sakane, K. Mikami, K. Ikawa, H. Iwasaki, H. Ogishi, T. Hirakawa, Proceedings of the Asian Congress on Gas Turbines (ACGT2016)
- (2) Y. Imamura, K. Ikawa, Y. Sakane, H. Iwasaki, T. Hirakawa, Proceedings of the 12th ICTP, Sept.17-22, Procedia Engineering (in press)
- (3) 井頭, 大阪冶金学会誌, vol.57, pp.44-48 (2017)
- (4) [http://www.jadc.jp/files/topics/109\\_ext\\_01\\_0.pdf](http://www.jadc.jp/files/topics/109_ext_01_0.pdf)
- (5) [http://www.khi.co.jp/ir/pdf/presentation\\_1604\\_2.pdf](http://www.khi.co.jp/ir/pdf/presentation_1604_2.pdf)
- (6) [http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001640/pdf/059\\_h02\\_00.pdf](http://www.meti.go.jp/committee/summary/0001640/pdf/059_h02_00.pdf)
- (7) [http://c-astec.sakura.ne.jp/HP\\_DATA/heisei22nenndosinkoukokuchousa.pdf](http://c-astec.sakura.ne.jp/HP_DATA/heisei22nenndosinkoukokuchousa.pdf)
- (8) JST SIP 革新的構造材料 成果報告会 2016 予稿集 / 成果集
- (9) NEDO 環境適応型小型航空機用エンジン研究開発報告書 (2012)
- (10) 中山, 酒井, 日本ガスタービン学会誌, Vol.45, No.4 pp.37-41(2017)
- (11) 野村嘉道, まてりあ, Vol.54, No.10 pp. 511-512(2015)
- (12) ~設計者・技術者のための~金属積層造形技術入門 (2016), ISBN978-4-903944-19-7