

2018年度会長就任挨拶 —将来に向け、社会に貢献する学会を目指して—

Message from the President —Contributions for Future Society—



油谷 好浩^{*1}
ABURATANI Yoshihiro

この度、船崎健一前会長の後任として2018年度の日本ガスタービン学会会長を拝命することになりました油谷好浩です。本学会は日本ガスタービン会議を前身とし今年で46年という長い歴史のある学会であり、諸先輩の築いてこられた伝統をしっかりと引継ぎ、様々な活動を通して、将来に向けて本学会が社会に貢献していけるよう努力する所存です。皆さんのご協力、ご指導をよろしくお願いします。

さて、私個人の話で恐縮ですが、私がガスタービンに興味を持ったのは中学生の時、日本ガスタービン会議が発足する前になると思います。百科事典にジェットエンジンの断面図が載っており、その絵を見たときに、なんて美しくてカッコいいものが世の中にあるのだろう、こんなものをどうやって設計するのだろう、どうやってこのような形が決まるのだろう、等々、思いを巡らせて何度もその断面図を眺めていたのを思い出します。そして大学では機械工学を専攻し、そのあと就職もガスタービンに携われるメーカーを選んだ経緯があります。私が会社に入ったのが1982年。ちょうどコンバインドサイクル発電が商用化され、ガスタービンがそれまでのピーク電源用からミドルあるいはベース電源として実用化されたころでした。当時のガスタービンは1100℃級で、その後、最先端の技術が投入され、発達してきた結果として、今やコンバインドサイクル発電効率は63%を超えるレベルにまでなっています。ガスタービンは流体力学、熱力学、材料力学、材料工学、伝熱工学、振動工学、制御工学等、すべての機械工学技術を駆使して限界設計に挑むものであり、また各要素が一つのシステムとしてバランスをとることが必要であるなど、機械屋にとってはたいへん面白くて血が騒ぐ研究開発対象であり、しかも今も発展途

上にある機械です。本学会はそのようなガスタービンとそれに関係するエネルギー関連技術を対象とし、国内のみならず海外も含めて産学官すべての関係する人々を結びつけ、その発展と社会の貢献に寄与することを目的として活動しており、今回、その会長になることは本当に光栄なことだと思っています。

ガスタービン学会はこれまで、学術講演会や見学会、教育シンポジウム、セミナーや教科書・学会誌の出版、IGTCやACGTのような国際イベント、更には関係者の裾野を広げるための市民フォーラム、女性参画推進活動、若手懇談・懇親会等、様々な活動を活発に推進しています。これらは熱意に溢れた歴代会長や理事、委員、会員、そして学会事務局の皆さんの活動の賜物であり、引き続き2018年度も渡辺紀徳副会長とともに活発な学会運営をさせていただく所存です。

昨今のエネルギー環境の変化の中で、ガスタービンの重要性は益々増加しています。その特徴は、非常にシンプルで機械であるにもかかわらず、サイクル最適化という視点で様々なバリエーションの可能性を秘めていることだと思っています。環境性能向上のための機器・システムの効率向上や騒音・NOx抑制だけでなく、再生可能エネルギーが益々普及する中で、安定的な電力インフラ確保という課題に対しても、ガスタービンの技術が応えるポテンシャルは大きなものがあります。バイオマスや水素、超臨界CO₂サイクルやエネルギー貯蔵、製造技術でのAM活用等、将来に向けその技術がカバーする領域は膨大にあり、航空機エンジン電動化のような話も含めて、夢が語れる学会でありたいと思います。

将来に向け、環境に優しくかつ全世界の人々の生活の質を高めるためのエネルギーやモビリティ手段として、ガスタービンが更に発展していくための貢献を本学会が担えることを祈念して、私の挨拶とさせていただきます。

原稿受付 2018年4月23日

*1 (株)東芝

〒105-8001 港区芝浦1-1-1

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望特集に寄せて To Special Issue on Current Status of Additive Manufacturing



前川 篤^{*1}
MAEKAWA Atsushi

三次元積層技術は医療分野や航空宇宙産業で実用化が進み、エネルギー分野での研究開発も各国で活発に行われている。わが国においても、技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（略称：TRAFAM）が設立され開発が進められている。TRAFAMは、わが国のモノづくり産業がグローバル市場において持続的かつ発展的な競争力を維持するために、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した次世代型産業用3Dプリンタと超精密三次元造形システムの技術開発を行うことを目的として、平成26年4月1日に設立、現在は、学校法人近畿大学、国立大学法人東北大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構、企業33社の参画を得ている。本年度は5ヵ年計画の最後の1年となり、三次元積層造形技術と粉末材料の多様化・高機能複合化等の技術開発の玉成に取り組んでいる。また、造形レシピ、熱変形シミュレーション技術や造形中のモニタリング技術開発も並行して行っており、国産三次元金属積層技術によるモノづくりの実現がすぐそこまでのところに来ている。

一方、世界に目を向けると、この分野における技術革新のスピードは、極めて速く、海外の三次元積層装置メーカー各社は、大型化、高速化と高精密化を同時に成し遂げた装置を市場に投入してきている。また、これまでの方式とは異なるコンセプトで、造形コストの削減が期待できる装置を市場に投入するメーカーも現れるなど、様々なユーザーの多様な用途に合わせ、三次元積層装置が選べる環境が整いつつある。

更に、三次元積層造形は、地産地消、必要な時に必要とされる場所で、必要な数だけを生産することも可能となるが、この技術は、新たなリスク「違法な製造技術の拡散」を防止（安全保障貿易上のルール遵守）する措置を講ずることが求められる。

設計者の視点からは、従来工法を前提とした設計思想から脱皮し、あらたな三次元積層造形技術をベースとし

た設計を行うことが求められる。これにより、従来設計では達成できなかった性能とコストにより、新たな製品開発が進むことが期待できる。特に、エネルギー分野においては、三次元積層技術が適用できる領域は広く、例えば、産業用ガスタービンでは複雑な構造である燃焼器部品、複雑な内部冷却構造を有するタービン動翼、タービン静翼およびシュラウドなどが挙げられる。燃焼器は、複数の細かい部品を溶接などで接合して製造されるが、三次元積層技術によりこれらを一体化することで低コスト化が可能となる。タービン動翼および静翼では、従来の精密 casting では製造できなかった複雑冷却構造を三次元積層技術により製作することで冷却性能の向上が期待できる。

しかしながら、三次元積層造形は3Dプリンタ装置を導入すれば誰でもすぐに製品を造形できる段階には現状はない。また、これまで精密 casting 材や鍛造材で用いていた金属材料がそのまま三次元積層造形に使えるという訳ではない。素材・金属粉末、シミュレーション・造形レシピと品質管理の手法が確立し、初めて、製品への適用が可能となる。エネルギー分野において、三次元積層技術の適用範囲を広げ、普及させていくためには多くの研究開発課題が残されており、今後も更なる研究開発が必要である。

本特集では、エネルギー分野における三次元積層技術に焦点をあて、その現状と課題を解説し、現在の三次元積層技術を知るのに良い特集となっている。この分野の技術者にとどまらず、幅広い分野の方々にもご一読いただき、今後の三次元積層技術の発展と普及に役立て頂くことを期待する。

最後になりましたが、TRAFAMの設立と研究開発にご支援頂いています経済産業省並びに国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構とTRAFAMの成果をこのような形で紹介いただける機会を与えて頂いた日本ガスタービン学会、更には、本特集を企画・執筆頂いた方々に感謝申し上げ、巻頭言と致します。

原稿受付 2018年4月16日

*1 技術研究組合

次世代3D積層造形技術総合開発機構 理事長
〒103-0027 中央区日本橋一丁目2番19号

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

SLMによる積層造形

Laser Additive Manufacturing

京極 秀樹^{*1} 池庄司 敏孝^{*2}

KYOGOKU Hideki IKESHOJI Toshitaka

キーワード：積層造形，レーザ，粉末床溶融，指向性エネルギー堆積，ニッケル超合金

Key Words：Additive Manufacturing, Laser, Powder Bed Fusion, Directed Energy Deposition, Nickel Superalloy

1. 緒言^{(1),(2)}

アディティブ・マニュファクチャリング（Additive Manufacturing, 以後AMと略す）という言葉は、我が国ではまだ馴染みが薄いように思えるが、2009年にASTMにおいて、それまでのラピッド・プロトタイピングといった積層造形技術を包含した呼び名として決定された。金属積層造形技術は、ここ数年で装置の性能、粉末特性、さらにはソフトウェア性能の急速な向上により、製品の品質が大幅に向上したことから、航空宇宙分野、産業機器分野などで実用化され始めている。とりわけ、これらの分野における製品開発を行っているGE社の動きは凄まじく、2010年にAM技術に関するチームを結成した後、2012年にはサービスビューローであったMorris Technology社とAvio Aero社を買収し、2016年には電子ビーム積層造形装置メーカーであるArcam社とレーザ積層造形装置メーカーであるConcept Laser社を買収して、GE Additive社を立ち上げ、2017年には新たな工場を開設している。このように、GE社はAM技術を次世代のものづくりにおける重要な技術と位置付けている。AM技術はデジタルマニュファクチャリング技術であることから、今後ものづくりの形態を変革する技術として注目され、設計から製造までを統合化したプラットフォームの構築も行われている。

さて、世界的なエネルギー需要の増加に伴うガスタービンの高温化のために、材料開発と併せて製造技術の革新が求められている。2017年10月にミラノで開催されたEuroPM2017の基調講演において、ガスタービン等のメーカーであるGE Baker Hughes社からは、2025年までにインコネルを中心とした耐熱合金の造形にレーザ積層造形装置を50台導入予定との講演があった。産業機器メーカーや航空宇宙関連部品メーカーでは装置導入の動きが加速してきており、インコネルを中心とした耐熱合金について、金属AMによる報告は多く行われている。

特に、インコネル718合金は、高温強度と耐食性を兼ね備えていることから、タービンプレード、航空機エンジン部品や原子力関連部品に利用されている。レーザ積層造形によるレーザ出力、走査速度などの因子が組織や機械的性質に及ぼす影響について検討されており、最適条件を明らかにしている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。また、レーザ積層造形においては、凝固速度が極めて速いために、 casting 材とは組織が大きく異なり、造形体の組織では、柱状晶の γ (fcc) マトリックスに γ'' (bct) Ni_3Nb 析出物が存在する組織となっている⁽³⁾⁻⁽⁷⁾。しかし、熱処理を施すことにより、機械的性質は、溶製材に匹敵することが報告されている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

レーザを利用した装置開発については、装置の高機能化が進んできており、モニタリング機能を搭載した装置も多くなっており、粉末の供給から造形物の取り出しまで可能な自動化技術を搭載した装置の開発も行われている。また、材料開発については、ステンレス鋼や工具鋼などの鉄系合金、チタン合金、アルミニウム合金、銅合金など各種合金に関するレーザ積層造形に関する研究が行われている。

我が国においては、経済産業省のプロジェクトとして、技術研究組合次世代3D積層造形総合技術開発機構（通称、TRAFAM）が装置、金属粉末および制御ソフトウェア開発を三位一体で開発しており、その成果も出てきている。一部装置については2017年後半に上市しており、さらなる開発が期待されている。

本報告では、レーザ積層造形に関する最近の動向として、装置開発状況や材料開発状況について紹介するとともに、本技術により高品質製品を製造する際に重要なレーザ照射時の溶融凝固現象に関しても述べる。

2. レーザ積層造形技術の動向

2.1 装置開発

レーザ積層造形装置の開発の傾向は、高速化・大型化、そして高精度化である。以下に、レーザ積層造形に利用されるパウダーベッド方式とデポジション方式による装置開発の状況について紹介する。

(1)パウダーベッド（Powder Bed Fusion: PBF）方式

パウダーベッド方式の主な大型装置の例を表1に示

原稿受付 2018年3月21日

*1 近畿大学工学部

〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

E-mail: kyogoku@hiro.kindai.ac.jp

*2 近畿大学次世代基盤技術研究所

〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

E-mail: ikeshoji.t@hiro.kindai.ac.jp

す。パウダーベッド方式では、マルチレーザとすることにより高速化を図ってきており、すでに4台搭載した装置も開発されている。代表的な装置として、SLM Solutions社のSLM 500HLやEOS社のM400がある。造形速度は105 cc/h程度である。大型化に関しては、GE社が造形サイズ1 m×1 mの超大型装置“ATLAS”のβ版を、2017年11月にフランクフルトで開催されたformnext2017に展示し、大いに注目を集めた。また、SLM Solutions社も、造形サイズ800 mm×800 mmの超大型装置を展示した。また、TRAFAMにおいても、造形サイズ600 mm×600 mmの装置開発を行っており、大型造形体の造形が可能となっている。このように、航空宇宙関連部品など大型製品の製造を可能とするために、高速化・大型化の方向に向かっている。

一方、装置には高精度化も求められており、表1に示すように5年前に報告²⁾した際の装置に比べて一段と高精度化も進んできている。高精度造形が可能な装置としては、3D Systems社の装置があるが、新たにTRUMPH社やAddUp社は、リコート技術開発により10μm以下の粉末を用いた微細小型製品の造形が可能な高精度造形装置を開発している。

このように、高精度化に関しては、装置においては、粉末のリコート技術やヒューム回収技術の進歩、さらには粉末特性の向上、ソフトウェアの性能向上などと相まって急速に進んできた。これらの技術は高品質製品の製造には極めて重要である。また、高品質製品の製造のために、モニタリング技術開発も重要であることから、盛んに研究開発され始めている。

(2)デポジション (Direct Energy Deposition: DED) 方式

デポジション方式の特徴は、単純形状で大型の製品を造形できる点である。OPTPMEC社、TRUMPH社、BeAM社など多くの企業が装置を開発している。また、我が国においては、DMG MORI社、YAMAZAKI MAZAK社、OKUMA社がデポジション技術と切削技術をハイブリッド化した装置を開発している。さらに、TRAFAMにおいては、2機種のデポジション方式の装置開発を行っており、500 cc/hの高速で高精度の造形が可能な装置開発を行い、上市している。図1に2機種の一次試作機の外観を示す。

表2には、デポジション方式とパウダーベッド方式の特徴を比較している。一般的にはDED方式の方が高速造形および大型製品の造形が可能であるが、造形体の表面粗さや精度が劣る。これに対して、PBF方式は、造形速度は遅く、製品の大きさにも制限があるが、表面粗さや精度に優れる製品の造形が可能である。

このように製品に要求される条件によって装置の使い分けを行うことが重要である。

Table 1 Large-scale L-PBF type machines

Machine	EOS M400	SLM Solutions SLM500HL	Concept Laser X line 2000R	3D Systems ProX400
Build size (mm)	400x400x400	500x280x320	800x400x500	500x500x500
Laser	Fiber laser	Fiber laser	Fiber laser	Fiber laser
Laser power (W)	1000	400/1000	1000x2	500x2
Spot size (μm)	-	80 ~ 120	100 ~ 500	-
Scan speed (m/s)	~ 7	~ 10	~ 7	-
Layer thickness (μm)	20 ~	20 ~ 200	30 ~ 150	10 ~ 100
Build speed (cc/h)	-	105	10 ~ 100	-

Table 2 Comparison of characteristics between PBF and DED

	DED	PBL
Deposition rate	~ 300 cc/h	~ 70 cc/h
Layer thickness	0.3 ~ 1.5 mm	0.03 ~ 0.1 mm
Build size	Limited by manipulation system	~ 500×500 mm
Dimensional accuracy	<0.5mm	<0.1mm
Surface roughness	Ra 10 ~ 200 μm	Ra 5 ~ 10 μm



(a) DED type (Toshiba machine)



(b) DED-Milling type
(Mitsubishi Heavy Industries machine Tool)

Fig. 1 DED prototype machines manufactured by TRAFAM project

2.2 材料開発

適用材料については、装置性能の向上と粉末製造技術の向上により年々拡大している。従来から、ステンレス鋼や工具鋼などの鉄系合金、ニッケル基超合金、アルミニウム合金、チタン合金、コバルト合金などが可能であったが、最近ではこれらの合金の種類も増えてきている。

表3に代表的な材料の機械的性質についてまとめてしておく。

最近では、疲労強度や破壊靱性についても盛んに各種材料のデータ収集がなされており、実用段階に入ってきていることが伺える。

3. レーザによる溶融凝固現象

3.1 高速度カメラによる溶融凝固現象の観察

パウダーベッド上のレーザ走査による溶融凝固現象はレーザ溶接と同様な現象とも推察されるが、異なる点は粉体を溶融凝固させること、レーザ走査速度は数100 mm/sと高いこと、1回の操作による凝固部の幅はせいぜい0.3 mm程度と小さいことがある。高いレーザ走査速度と微小な溶融凝固のため、レーザによる溶融凝固現象の解明には高速度カメラによる観察が必要である。

図2にIN718のパウダーベッド上をレーザ走査した際の溶融池 (melt pool) の挙動を示す。図は左側からレーザを走査した際の1.09 ms毎の画像である。走査方向に対して上側が粉体層、下側が前回走査による凝固部である。レーザ照射部は最も明るく白い部分である。レーザ照射部付近は周囲の粉体の影響もあり涙滴型の形状には観察されていない。その周囲にぼんやりとスモークが観察されるが、これは金属蒸気のヒュームと考えられる。また、溶融池から球形の溶融金属の飛沫、スパッタが生じている。スパッタの寸法は数10 μ mである。

スパッタの寸法、挙動は造形条件により変化するが、スポット径による変化を図3に示す。スポット径 $\phi 0.10$ mmではスパッタは比較的少ないが、スポット径が増大するとスパッタの数が増える。 $\phi 0.25$ mmに至ると、スパッタの数は逆に少なくなるが、100 μ mを超える非常に大きなスパッタを生じるようになる。その原因については検討の余地があるが、スポット径増大により溶融池が広く浅くなることで溶融金属の表面張力が溶融金属の表面的な流動を促すからと考えられる。

IN718の溶融池の様子を模式的に図4に示す。溶融池は先端のレーザ照射部の後方に1 mm程度の長さである。溶融池の形状は全面が粉体層のときには涙滴型となると考えられるが、実際には、粉体層側に扁平で凝固側に膨らんだ非対称の形状となっている。これは粉体層の熱伝導率が凝固金属の約1/20 ~ 1/80と小さいためである。IN718の溶融池の形状、寸法はサーモビューワによる温度分布測定でも確認されている (図5)。凝固部側に高温域が広がっている様子が示されている。また、溶融池の尾部後方が2.5 mm程度800℃以上に留まっている時間は走査速度610 mm/sを勘案すると約4.0 msであり、レーザ走査1パスでは γ' 相は析出しないと推察される。しかし、周囲を何度もレーザ走査するので凝固部が熱影響部にもなり得る。そのため、 γ' 相析出は金属組織を観察して判断しなければならない。

図4の模式図では溶け込み深さは粉体層の2倍程度に

Table 3 Mechanical properties of various alloys (Source: EOS data sheet)

	造形方向	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
IN718	水平	780 $\pm$ 50	1060 $\pm$ 50	27 $\pm$ 5
	垂直	634 $\pm$ 50	980 $\pm$ 50	32 $\pm$ 5
Ti64	水平	1140 $\pm$ 50	1290 $\pm$ 50	7 $\pm$ 3
	垂直	1120 $\pm$ 50	1240 $\pm$ 50	10 $\pm$ 3
AlSi10Mg	水平	270 $\pm$ 10	460 $\pm$ 20	9 $\pm$ 2
	垂直	240 $\pm$ 10	460 $\pm$ 20	6 $\pm$ 2

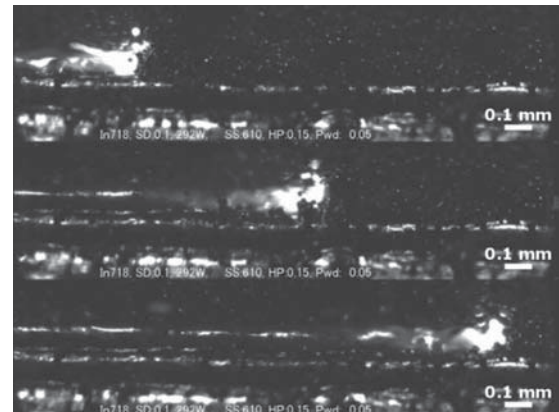


Fig. 2 Melting-solidification behavior of IN 718 observed using a high-speed camera. Spot size: 0.1 mm, Laser power: 292 W, Scan speed: 610 mm/s, Hatching pitch: 0.15 mm, Layer thickness: 0.05 mm.

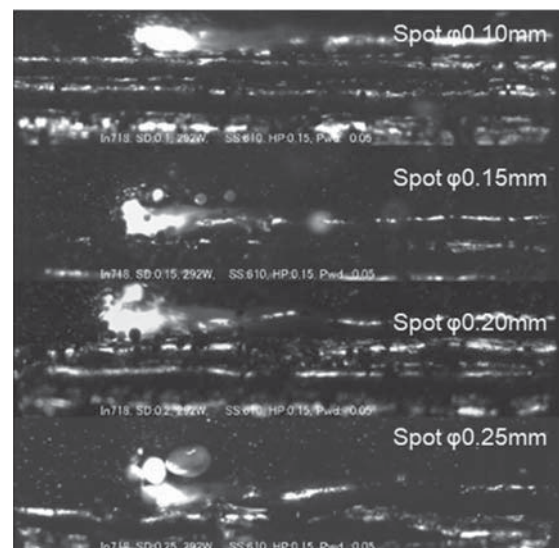


Fig. 3 Spattering behavior of IN 718 observed using by a high-speed camera. Spot size: 0.1 mm, Laser power: 292 W, Scan speed: 610 mm/s, Hatching pitch: 0.15 mm, Layer thickness: 0.05 mm.

描いているが、造形条件により変化し、造形物内部に欠陥を生じることもある。

パウダーベッド溶融における欠陥は3種類に分類でき、熱源走査による欠陥、粉体が原因の欠陥、そして、粉体

の材質による欠陥である。

熱源走査による欠陥は融合不良による欠陥が代表的である。融合不良による欠陥は熱源による溶融範囲が小さいときに、ハッチ幅が広ければ隣の凝固部に溶融部が接せず、また、積層厚さが大きければ底面の凝固部に接せず形成された未溶融部分や空隙（ボイド）である（図6）。断面観察ではいびつな形状の空隙の内側に未溶融の粉体が観察されたりする。

融合不良欠陥は造形物の内部の欠陥であるが、熱源走査による欠陥は表面ではボーリング現象（balling）やハンピング（humping, swelling）による表面の異常な凹凸がある。ボーリング現象は造形物表面に球形のボール状の凝固部が掲載される現象である。ハンピング⁽⁸⁾は溶接ビードのハンピングと同様に溶融金属の表面張力分布が不安定で溶融金属部分が熱源走査方向に対して左右に揺れて異常な凝固部形状になることである。

表面の凹凸形状の異常は造形後の機械的強度、例えば疲労強度に影響するだけでなく、造形中にも他の欠陥を誘発することもある。それが剥離（delamination）である⁽⁹⁾。溶融凝固と冷却による収縮応力によって造形物側面からのき裂が生じる。これが、水平方向への進展し、遂には造形物を水平に破断するに至ると剥離となる。

融合不良欠陥、ボーリング現象、ハンピングは熱源走査のパラメータ調整により根絶可能と考えられる。熱源出力、スポット径、走査速度、ハッチング幅、積層厚さ、パウダーベッド温度についてのパラメータスタディが必要となる。剥離の抑制は側面に凹凸異常を起こさないパラメータ調整とともに、熱応力が集中しないような造形物モデル形状の修正が必要となる場合がある。

粉体原因の欠陥にはガスボア（gas pore）がある。粉体表面の吸着酸素や溶存気体、あるいは、金属蒸気が溶融部に残留して空洞が生じた状態がガスボアである。断面観察では球形の穴として現れる。溶接欠陥で言えばブローホールに当たる。ガスボアは清浄で乾燥した粉体を使用するとともに適切な造形条件で抑制できると考えられている。

粉体の材質が原因の欠陥は高温割れである。パウダーベッド溶融では溶融凝固部組織は柱状晶になりやすいが、凝固した柱状組織が熱収縮する際に、柱状晶同士の狭間

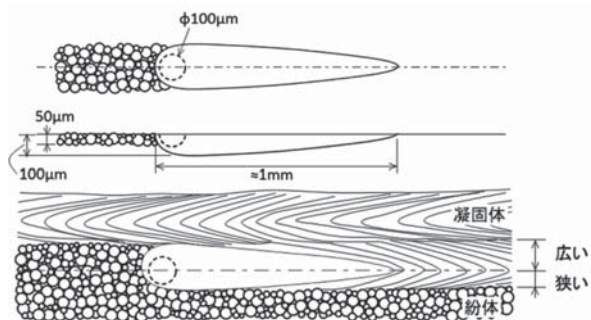


Fig. 4 Schematic of melting- solidification behavior

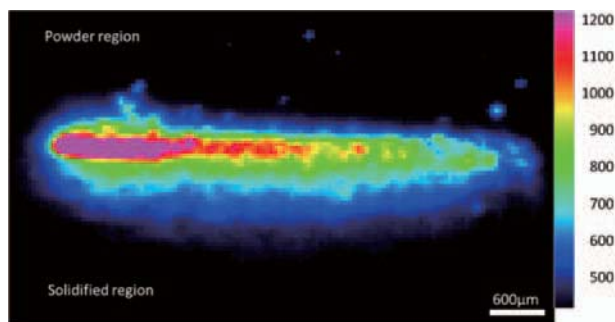


Fig. 5 Observation of melt pool by thermo-viewer

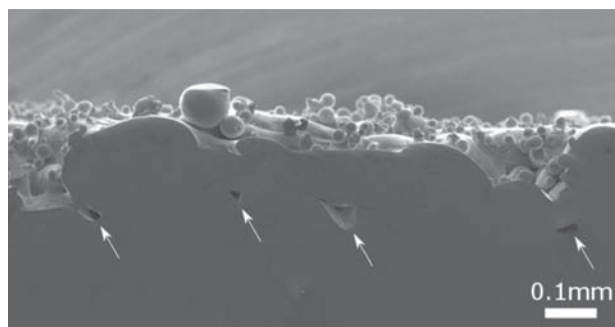


Fig. 6 Lack of fusion near surface

の液相が足りなくなり空隙が生じて割れとなる。高温割れは造形条件、特に、ベースプレートを加熱することで抑制できるとも言われている。一方、粉体の成分を改良することが必要とも言われている。

3.2 シミュレーションによる溶融凝固現象の解析

造形部中の欠陥発生を抑制した造形条件を得るためには膨大な試行回数を要するパラメータスタディが必要となる。試行回数を低減するためにも数値シミュレーションによる溶融凝固現象の解析が試みられている。

溶融凝固現象のシミュレーションにはミクロスケールシミュレーションとマクロ（あるいは、メソ）スケールシミュレーションの2通りの方法がある。ミクロスケールシミュレーションでは、パウダーベッドを構成する粉体を模した微小なスケールで熱源からの入熱、伝熱、粉体の溶融凝固、蒸発、融液の挙動、金属微細組織の形成までも解析対象としたマルチフィジックスシミュレーションを展開する⁽¹⁰⁾。マイクロスケールシミュレーションはパウダーベッドを粉体の諸元を考慮した材料と仮定する方法である。ミクロスケールシミュレーションよりも現象には忠実ではないが、計算リソースは節約できるのでパラメータスタディには有用である。

マクロシミュレーションによる溶融凝固現象の解析の例を図7に示す。IN718粉体に対しレーザ走査を行った際の非定常熱伝導解析を粉体の溶融凝固を考慮して解析した結果である。造形条件は図2の高速カメラと同じとしている。図中最下段では温度分布の広がりや凝固部の形成で非対称になることが表されている。

この解析で予測される溶融池寸法を図8に示す。溶

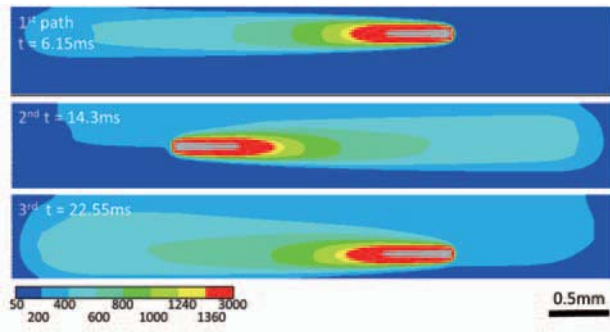


Fig. 7 Results of macro-simulation of melting-solidification behavior

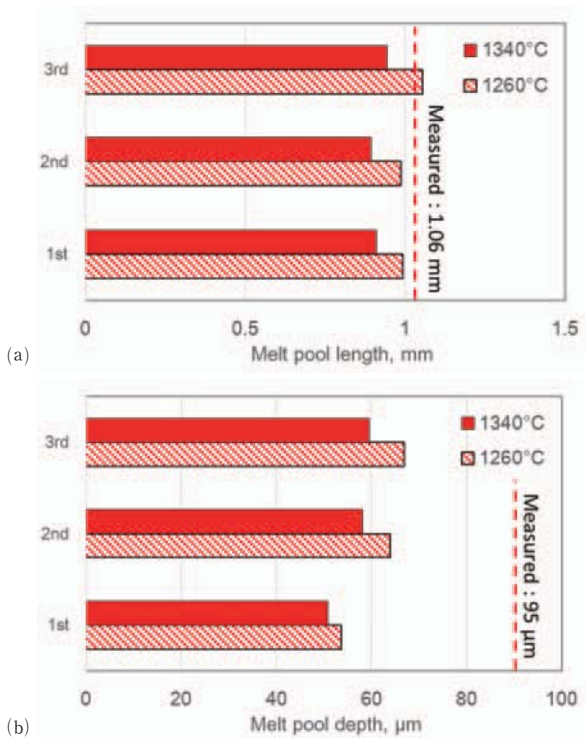


Fig. 8 Dimensions of melt pool of IN 718 evaluated by macro-simulation. (a) Length, (b) Depth

融池の長さは観察された溶融池長さとはほぼ一致する1.0 mm程度となった。溶け込み深さは、造形材の金属組織観察から測定された値の6～7割程度になった。これは、熱源の入熱モデルが深さ方向に不十分だからと考えられる。実際の溶融池のレーザー照射部は金属蒸発によりキーホールが形成され、レーザーはパウダーベッド表面よりも少し深い部分も加熱していると推測されるが、このマクロシミュレーションの熱源モデルには考慮されていない。また、溶融池内部の流動により溶け込み深さは変化するが、このマクロシミュレーションには溶融池の流動は考慮されていない。それら金属蒸発や液体金属の流動はミクロシミュレーションでは考慮されるが、マクロシミュレーションでは、今後、モデル化の方法を検討していく必要がある。

4. 造形例

ここでは、著者ら⁽¹⁾によるIN718に関する造形の例について示しておく。

使用粉末はガスアトマイズ法により作製した平均粒径 $30\mu\text{m}$ のIN718粉末である。造形にはTRAFAMの要素技術研究機である1kWシングルモードファイバレーザを搭載したPBF方式積層造形装置を使用した。造形条件はレーザー照射による粉末層に投入されたエネルギーを計算式(1)により求めた。 E :エネルギー密度 (J/mm^3), P :レーザー出力 (W), v :走査速度 (mm/s), h :ハッチピッチ (mm), t :積層厚さ (mm) である。

$$E = P/vht \quad (1)$$

造形条件は、次のとおりである。

- ・レーザー出力: 250 ~ 400 W
- ・走査速度: 500 ~ 1000 mm/s
- ・ハッチピッチ: 0.15 mm
- ・積層厚さ: 0.05 mm

図9にエネルギー密度に対する造形体の相対密度および組織の変化を示す。エネルギー密度が低い場合には相対密度が低く、エネルギー密度の上昇とともに相対密度が増加しており、ほぼ $50\text{ J}/\text{mm}^3$ 以上では飽和する傾向にある。また、図に示す組織から密度の上昇に伴って、空隙が減少していることがわかる。高密度エネルギーのAでは、ほとんど空隙が認められないのに対して、エネルギー密度の低いDでは、大きな空隙として未溶融欠陥も多く観察される。このような図を作成することにより、レーザー出力や走査速度の影響を検討できるとともに、最適な造形条件を明らかにすることができる。このような検討は、レーザー出力と走査速度のプロセスマップの作成と併せて重要である。

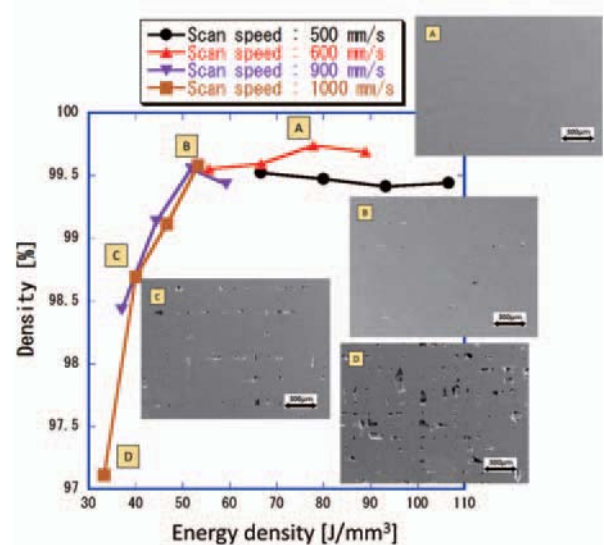


Fig. 9 Relation between energy density and relative density of IN 718

つぎに、造形条件と造形体の引張特性について検討した。図9に示した最適造形条件範囲であるA（レーザー出力：300 W、走査速度：600 mm/s、ハッチピッチ：0.14 mm）そして、B（レーザー出力：250 W、走査速度：600 mm/s、ハッチピッチ：0.14 mm）およびC（レーザー出力：250 W、走査速度：1000 mm/s、ハッチピッチ：0.14 mm）の条件による造形体の破断時の引張強さと伸びを図10に示す。このように、引張特性は造形条件による組織の影響をうけるため、最適造形条件を検討しておくことは品質を担保するために重要である。

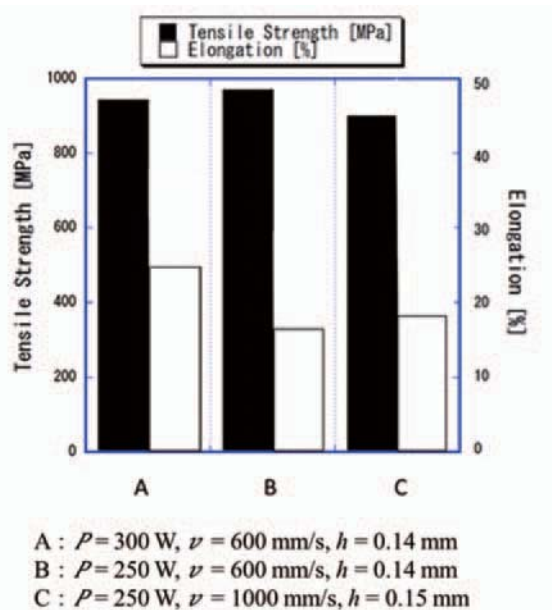


Fig. 10 Comparison of tensile properties among the as-built specimens fabricated by various conditions

5. おわりに

本報告では、レーザー積層造形技術の最近の動向と高品質の造形を行う際に重要な溶融凝固現象について述べた。2013年に本誌で報告した時と比べて、最近のAM技術の進歩は目覚ましく、装置開発もその性能が大きく向上してきている。これに伴って、製品の品質も大幅に向上してきている。品質の向上には、装置、粉末およびソフトウェアの性能向上だけでなく、レーザーによる溶融凝固現象を把握した造形条件の設定が重要であり、これを利用したモニタリング・フィードバック技術の開発が今後のキーとなる。

本報告が、読者の皆様の参考となれば幸いである。

謝辞

本研究は、経済産業省平成26年度産業技術研究開発（三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム（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））及び平成27年度産業技術研究開発（次世代型産業用三次元造形システム技術開発）の委託研究によるものである。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 京極秀樹, 池庄司敏孝, 図解金属3D積層造形のきそ, (2017), 日刊工業新聞社.
- (2) 京極秀樹, 3Dプリンタの可能性, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 42, No. 5 (2014), pp. 420-425.
- (3) K.N. Amato, S.M. Gaytan, L.E. Murr, E. Martinez, P.W. Shindo, J. Hernandez, S. Collins, and F. Medina, "Microstructures and mechanical behavior of Inconel 718 fabricated by selective laser melting", *Acta Materialia*, Vol. 60 (2012), pp. 2229-2239.
- (4) E. Chlebus, K. Gruber, B. Kuznicka, J. Kurzac, and T. Kurzynowski, "Effect of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of Inconel 718 processed by selective laser melting", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 639 (2015), pp. 647-655.
- (5) D. Zhang, W. Niu, X. Cao, and Z. Liu, "Effect of standard heat treatment on the microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured Inconel 718 superalloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 644 (2015), 32-40.
- (6) Q. Jia and D. Gu, "Selective laser melting additive manufacturing of Inconel 718 superalloy parts: Densification, microstructure and properties", *J. Alloys and Compounds*, Vol. 585 (2014), pp. 713-721.
- (7) M.E. Aydinov, F. Brenne, M. Schper, C. Schaak, W. Tillmann, J. Nellesen, and T. Nienendorf, "On the microstructural and mechanical properties of post-treated additively manufactured Inconel 718 superalloy under quasi-static and cyclic loading", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 669 (2016), pp. 246-258.
- (8) J.A. Manriques-Frayre and D.L. Bourell, "Selective Laser Sintering of Binary Metallic Powder," *Solid Freeform Fabrication Symposium*; Austin, TX (1990), pp. 99-106.
- (9) K. Kempen, L. Thijs, B. Vrancken, S. Buls, J. Van Humbeeck and J.-P. Kruth: 'Producing, crack-free, high density M2 HSS parts by selective laser melting: pre-heating the baseplate', in 'Solid freeform fabrication symposium', Austin, TX, (2013), pp. 131-139
- (10) S.A. Khairallah and A. Anderson, "Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.214,11, (2014), pp. 2627-36.
- (11) 立花悠介, 荒木正浩, 池庄司敏孝, 中村和也, 京極秀樹, 金属レーザー積層造形におけるINCONEL718の高速造形条件の検討, 日本機械学会2017年度年次大会DVD論文集, (2017).

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

積層造形プロセスモニタリングおよび部材の非破壊評価

Process Monitoring and Non-Destructive Evaluation of Additive Manufacturing Parts



渡邊 誠^{*1,2}

WATANABE Makoto

キーワード：三次元積層造形，プロセスモニタリング，非破壊評価

Key Words：Additive Manufacturing, Process Monitoring, Non-Destructive Evaluation

1. 緒言

三次元データを基に目的の形状を直接造形できる積層造形法は、切削加工を要さず複雑形状の部材を作成できることから近年注目を集めている。これまで物質・材料研究機構においても、レーザーを熱源としたパウダーベッド方式の三次元積層造形プロセスを用いて、鋳鍛造や切削、塑性加工といった、従来の加工技術では作製することができない複雑なセル構造や冷却構造を内包する、金属部材の作製を試みてきた。これらの微視構造は、高比強度と耐熱性の両立や、冷却効率の大幅な向上が期待でき、輸送機器やガスタービンなどへの応用においても、大きな効果が見込まれる。しかし、実際の材料や部材の造形を通じて、様々なプロセス上の課題に直面している。

例えば、パウダーベッド方式において、原料粉末を一層ずつ敷き詰め造形していくが、粒子供給が適切に行われない場合やレーザーによる過大な入熱となった場合、気孔の形成などが生じ、これら気孔の存在による強度や延性の低下が生じる。また、原料粒子が急加熱による熔融と急凝固を部材表面で繰り返すことで、残留応力が発生し、この残留応力が再分配されることによって部材の変形やき裂の発生に繋がる場合もある。また、未熔融の金属粒子が部材表面に固着するために、造形後の表面処理が不可欠となるとともに、複雑構造の内表面では対処が非常に難しいといった問題がある。さらには、積層造形ならではの現象として、造形部位の形状の違いや造形時に部材を支えるサポートの過不足による、冷却速度の違いにより、部位毎に材料組織や欠陥が異なるといった現象が生じる。また、非常に現実的な問題として、同じ製造装置、原料粉末、プロセス条件、造形形状であっ

ても、造形ステージ上の位置や装置固体毎に、欠陥の存在状態が異なるケースも報告されている。図1には、実際に選択的レーザー溶融法（Selective Laser Melting, SLM）にて作成したTi-6Al-4V合金試料において認められた剥離や変形、未接合などによる失敗例を示している。これらの技術的解決には、作製条件を様々に変化させ、最適なプロセス条件を実験的に探索する方法が用いられているが、材料ごと、部材の形状ごとに、この作業をしなければならず、開発に要する時間とコストが増大する要因となっている。

このような課題に対し、そのメカニズムを一つ一つ解明していくことが重要であり、そのためのアプローチとして造形プロセスのリアルタイムモニタリングが有効であると期待されている。本稿では、レーザーを用いたパウダーベッド方式の積層造形プロセスを中心として、レーザー肉盛りあるいは溶射といった微粒子を吹き付けて積層させるプロセスも含め、これまでに論文などで報告されてきたモニタリング事例について紹介する。また、製造された部材の品質保障も、積層造形プロセスの今後の普及においては重要な課題であり、モニタリング技術は部材の検査という点でも有効な手法となると考えられる。部材の品質評価では、造形終了後の検査も重要と考えられることから、本稿では積層造形体に対して、これまでに報告されている非破壊評価技術についても触れ、現状の技術的な状況について概観することを目的とする。



Fig. 1 Examples of fabrication failure of Ti-6Al-4V specimens by selective laser melting (SLM).

原稿受付 2018年4月10日

*1 物質・材料研究機構 構造材料研究拠点

〒305-0047 つくば市千現1-2-1

E-mail: watanabe.makoto@nims.go.jp

*2 東京大学 先端科学技術研究センター

〒153-8904 目黒区駒場4-6-1

2. In-Situ プロセスモニタリングと非破壊評価

金属の積層造形プロセスとして、大きくは粉末床溶融結合法 (Powder Bed Fusion, PBF) と指向性エネルギー堆積法 (Directed Energy Deposition, DED) に分類されており、さらにそれぞれ、レーザーや電子ビームといった熱源の種類や、粉末かワイヤーかという原料の形態などにより、さまざまなプロセスが開発されている。このようなプロセスにおけるIn-situ モニタリングの重要性は広く認識されており、Evertonら⁽¹⁾やLiuら⁽²⁾などが幅広くまとめている。本節では、選択的レーザー溶融法を中心に、これまでに報告されているIn-situモニタリング技術や非破壊評価技術の報告例について概説する。

2.1 可視光や赤外線などによるモニタリング

早くから開発されてきた技術として、インラインカメラとフォトダイオードによるモニタリングが取り組まれてきた。レーザー照射によって原料粉末が溶融されると、溶融プールは強い輻射を発生する。放射される光の強度と波長は溶融プールの温度に依存するが、この輻射を計測することで溶融プールの状態モニタリングが可能となる。Berumenら⁽³⁾は図2(a)に概略図を示す高速カメラとフォトダイオードを用いたシステムにより、溶融プールのモニタリングを行った。レーザー照射のためのスキャンヘッドを通して、溶融プールからの光を高速カメラおよびフォトダイオードに導く仕組みとなっており、高速カメラにより溶融プールの形状を測定し、フォトダイオードにより平均的な放射光の強さを計測することが可能となっている。このため、溶融プールのみをモニタリングする構成となっており、彼らの実験では1ピクセル当たり $10\mu\text{m}$ の分解能での計測が可能であったと報告されている。図2(b)にカメラによる計測結果の例について示しているが、溶融プールの形態について詳細な情報が得られている。このような溶融プールのモニタリングとプロセス制御へのリアルタイムフィードバックが可能となれば、溶融プールの高精度な制御ができると考えられ、過度な溶融とそれに伴うガス欠陥の発生を抑制することが期待できる。また、図3にはフォトダイオードによるモニタリング結果例を示している⁽³⁾。造形ステージの下降量設定間違いにより粉末供給過剰が発生した際に、粉末の熱伝導がバルク体のそれより悪いことから、溶融プール領域の温度が高くなり、平均輝度スペクトルの大きな変化として、異常を検出することが出来ている。

Clijstersら⁽⁴⁾は同様のセットアップとデータ処理により、カメラで見ている部分の画像だけではなく、造形ステージ全体について、1層ずつのマッピングイメージの取得と、フォトダイオードの信号からの欠陥部可視化を可能とした。モニタリングによるマッピング結果と、X線断層撮影法 (X線CT) による欠陥検出結果と比較し、1mm以上の欠陥について良い一致が得られている。

よりシンプルなモニタリング技術がFurumotoら⁽⁵⁾により報告されている。Furumotoらは図4に示すように、

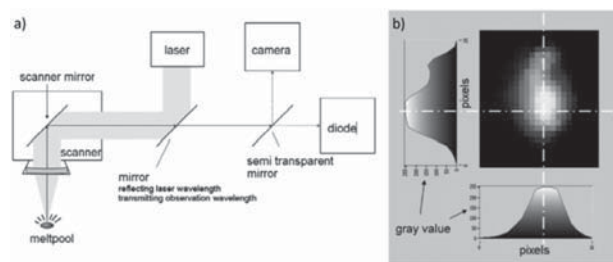


Fig. 2 (a) Schematic showing arrangement of photodiode and camera and (b) an example output from the camera system showing varying intensity values (right) achieved by Berumen^{(1),(3)}.

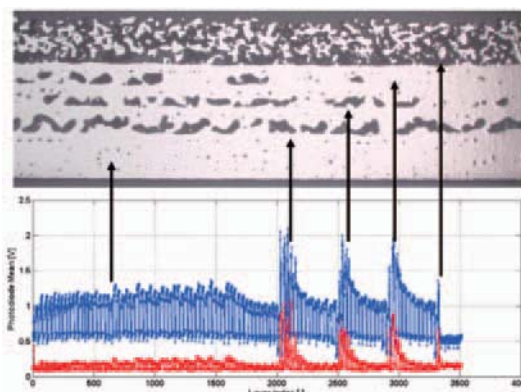


Fig. 3 Microsection and mean photodiode signal (blue) and standard deviation (red) of the part which was built with a building platform adjustment error by Berumen⁽³⁾.

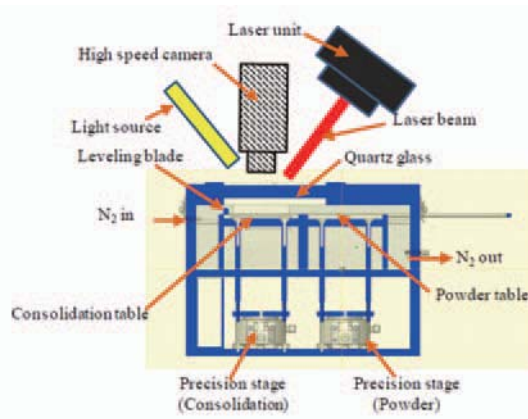


Fig. 4 Experimental arrangement for monitoring of the laser consolidation by Furumoto^{(1),(5)}.

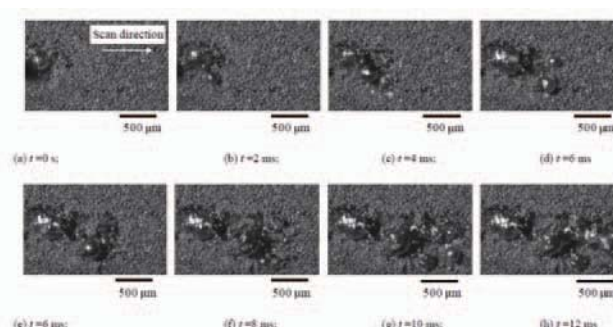


Fig. 5 Consolidation process on powdered surface at the thickness of 1 mm by Furumoto et al.⁽⁵⁾.

高速カメラ (Photron FASTCAM SA5 model 1300K C2) を、パウダーベッドに垂直に設置することで、図5に例示するように粒子の熔融凝固過程のモニタリングを可能とした⁽⁵⁾。また、この技術によって、1層当たりの積層厚さを変化させた場合の凝固過程への影響について調査することにも成功している。また異なる二つの測定波長を使って、それぞれの放射輝度の比を求めることにより、温度を計測する二色放射温度測定を用いた熔融プールのモニタリングについても多く報告されている。二色温度計測は、測定波長の放射率が等しい場合に対象の放射率に関係なく温度を正確に測定できるという利点がある。測定対象と測定装置との間に、ガラスや煙等、二つの波長に等しい透過特性を有する物質があるような場合にも、放射率変化を測定することなく温度を正確に測定できる利点がある。Islamら⁽⁶⁾は、ハッチ距離100 mm、面積 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ のレーザスキャンに対して、計測範囲15mm径の放射温度計をフロートガラス窓越しに適用し、温度モニタリングを行った (図6)。彼らの研究では、ボーリング現象 (Balling phenomena) への造形条件の影響について調査した。ボーリング現象とは、熔融された粒子が平らに広がらず、複数の粒子が接合することで大きな粒状の塊になってしまう欠陥形態である。図7に示されるように、レーザエネルギーの変化による測定領域内の温度変化が定量的に計測されている。

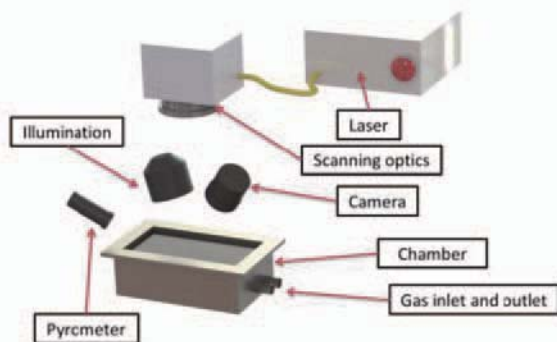


Fig. 6 Test setup with the pyrometer and the CCD camera with the diode laser illumination by Islam et.al.⁽⁶⁾.

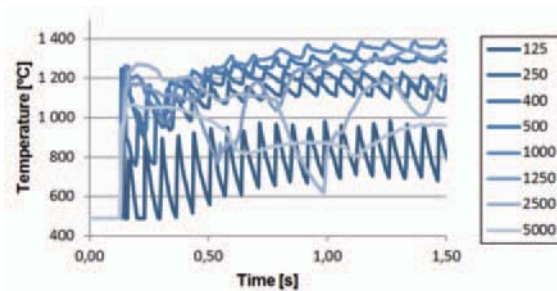


Fig. 7 Temperature measurements with different volumetric energy inputs $[\text{J}/\text{mm}^3]$ by Islam et.al.⁽⁶⁾.

放射温度計測とカメラの組み合わせによるモニタリングは、非接触であり原料粉末の熔融凝固挙動を理解するために有効な手法となっている。一方でこれらを活用しプロセス制御へのフィードバックを実現している報告例は認められない。これは放射測定におけるデータ取得速度の制限によるものと考えられる⁽¹⁾。これに対し、赤外線サーモグラフィーを活用したモニタリング技術が報告されている。Kraussら^{(1),(7),(8)}はサンプリングレート50 Hzの赤外線カメラを、SLM装置 (EOSINT M270, EOS社, ドイツ) の筐体外に、造形ステージに対し $45 \sim 55^\circ$ の角度で設置し、ゲルマニウムシールドガラスを通しての測定を行った。カメラの視野は $160 \times 120 \text{ mm}^2$ 、筐体内への設置は困難であった。制御パラメータのドリフトなどによる造形中の変化や、内部欠陥や気孔の検出を目的としたものであり、20 ms以上に渡る変化が生じればリファレンスデータとの比較により、変化を検出することが可能であった。また、未接合部など $100 \mu\text{m}$ までであれば計測できたと報告されている。1層毎の温度分布モニタリングデータを分析することで、熱拡散率や最大温度といった指標を可視化し、造形体の品質と相関性の高い指標の導出が試みられており、図8には得られた熱拡散率および最大温度分布の例が示されている⁽⁸⁾。また、造形試料の高さが大きくなるにつれ、造形ステージの影響が小さくなることで、熱拡散係数が劇的に低下していくことが定量的に示された。

ここでは主に選択的レーザー溶融法でのビジュアルモニタリング技術を中心に述べてきたが、同様のアプローチは電子ビーム溶融 (EBM) 法や、レーザー粉体肉盛などにおいても、研究開発や実用化が進められている。

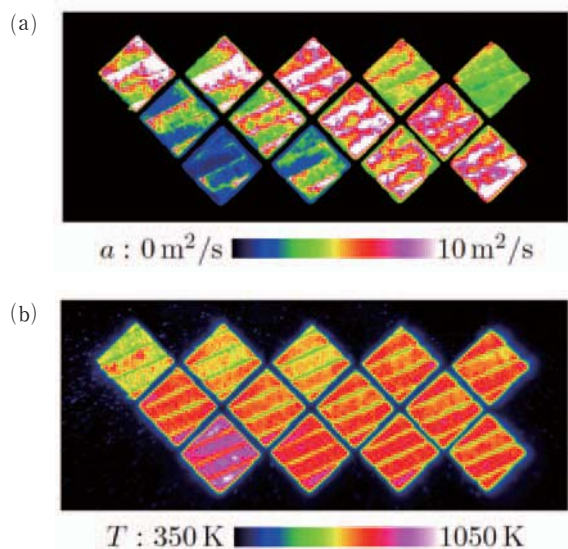


Fig. 8 Mapped key indicators for build height 3.6 mm: (a) thermal diffusivity and (b) maximum measured temperature by Krauss⁽⁸⁾.

電子ビームの場合、電磁コイルの配置によりレーザーのようにカメラを同軸に配置することが難しいなど、それぞれに応じた課題があり個々に対応が進められている。

2.2 超音波やX線による非破壊評価とプロセスモニタリング

前節で述べた視覚的なモニタリングや温度計測によるモニタリングの他に、超音波を利用したモニタリングについていくつかの報告例がある。超音波は一般に部材の非破壊評価技術として利用されている。超音波伝播媒体を通じて探触子などから超音波を部材内部に伝播させ、伝播波形の変化をモニタリングする。内部に欠陥や組織異常などが存在する場合、欠陥による反射エコーの発生や、超音波伝播速度の低下、あるいは振幅の減衰が生じ、部材内部の異常を検知することができる。このような超音波を利用したモニタリング技術の中で、超音波の発生および検出にレーザー技術を用いるレーザー超音波法がある。レーザーパルス照射により瞬間的な熱膨張あるいはアブレーションを発生させることで、非接触にて超音波を発生させる。検出にはレーザー干渉計による表面変位あるいは速度の計測が利用される。図9に模式図を示すが、完全な非接触での計測が可能であることから、曲面への適用も可能であり、積層造形部材の非破壊評価やプロセスモニタリングへの応用が期待されている。

Kleinら^{(9),(10)}はレーザー肉盛により作成した316ss材およびTi-6Al-4V材について、Nd:YAGレーザーを超音波発生に用いたシステムにより、直径0.5～1.5 mmの模擬欠陥を検出している。また、オンラインモニタリングへの応用を念頭に、ウェーブレット変換を活用した超音波波形の分析技術についても開発を行っている。Manzoら⁽¹¹⁾も、造形プロセスモニタリングへの応用を念頭に、Nd:YAGレーザーを超音波発生源として、レーザー肉盛プロセス材の表面および表面直下の異常検知可能性について報告している。Reiderら^{(12),(13)}は接触型の超音波探触子をSLM造形装置の造形ステージ裏側に仕込み、円柱型サンプル（直径20 mm、高さ10 mm）を造形する過程のモニタリングを行った。彼らによれば、超音波による初めてのオンラインモニタリングの報告例である。Aスキャンシグナルから、造形に伴い高さが増加していく

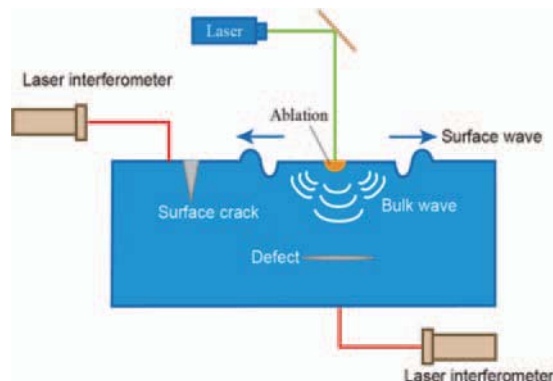


Fig. 9 Schematic of laser ultrasonic measurement.

過程を検出するとともに、造形時に生じた内部欠陥についても不明瞭ではあったが検出することが出来ていた。また、1層当たりの積層厚さが設定値と等しい（40 μm）という仮定のもと、造形に伴う各層の超音波伝播速度の変化を計測しており、造形高さが増加するにつれ、伝播速度が非線形に増加していく挙動が認められた。超音波の伝播速度は材料の弾性率と密度で決まることから、造形が進むにつれ、熱伝達挙動が変化し、上部ほどより緻密化が進んでいたものと推測された。このような造形物の材質に関するデータをインラインでモニタリングできることは非常に有用と考えられる。

超音波探傷は、能動的に弾性波を部材内部に伝播させ、その伝播挙動から材料内部の情報を得ようとするものである。これに対し、部材内部でき裂の発生や大きな変形などが生じた際に放射される弾性波を計測することで、破壊などの検知を行う手法がアコースティックエミッション（AE）法である。AE法は受動的な手法であるが、高感度センサーと組み合わせることで、微視的なき裂発生を検知に非常に有用である。Wangら⁽¹⁴⁾はNi合金やCo合金のレーザー肉盛プロセス中および冷却時のAE計測を接触型の探触子により行った。基材側に探触子を接着し水冷することで計測を可能とした。き裂の発生時間と場所、進展をモニタリングすることに成功し、数値解析による温度解析との対応付けからプロセス最適化に有効であると報告している。また著者ら⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾は、溶融粒子を吹き付けて積層するプラズマ溶射プロセスのAE計測について、図10に示すような複数のレーザー干渉計を適用して非接触でのモニタリングに成功している。多チャンネルでのAE計測により、プロセス中に生じるき裂の発生タイミングや位置、その形態について、温度計測と対応付けて明らかにすることが可能となった。しかし、非常に大きなノイズが発生する環境であることから、微小なき裂発生の検出は困難であった。これに対し、伊藤ら⁽¹⁸⁾は、あるしきい値を超えた信号をAEイベントとして計測する従来の手法ではなく、ノイズも含めたす

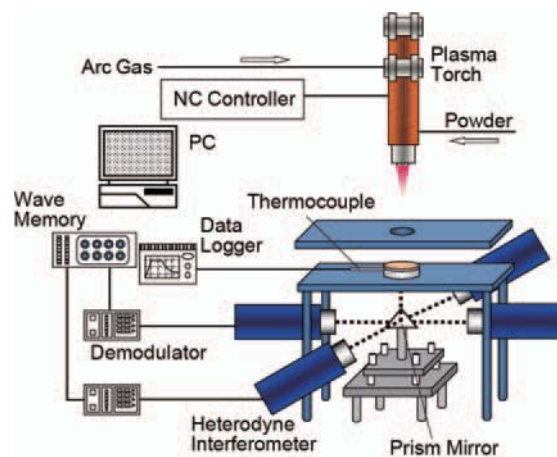


Fig. 10 Schematic of acoustic emission measurement during plasma spray deposition by laser interferometers.

すべての信号を予め計測しておき、プロセス終了後にノイズを除去し、AEイベントを抽出することを可能とする Continuous Wave Memory (CWM) という新しい技術を開発した。この優れた技術により、極めてノイズが厳しい様々なプロセス環境でもAE計測が可能となった。SLMやEBM、レーザー粉末肉盛 (LMD) といった積層造形プロセスへの適用も十分に可能であると考えられる。

X線の利用では、造形部材のX線断層撮像 (X線CT) 法による非破壊検査が広く利用されている。図11はSLMにおいて、異なるレーザスキャン速度で作製されたTi-6Al-4V材のX線CT画像である。スキャン速度900 mm/sを中心として、速度が遅くなっても速くなっても欠陥量が増大していくことが視覚的に明瞭である。また、400 mm/sと1400 mm/sの条件では、欠陥が周期的に並んでおりレーザスキャンパターンとの密接な関係が認められた。また、X線回折は積層造形材においても残留応力評価に用いられている⁽⁹⁾。しかし、表層数10 μ mの残留応力評価となり得られる情報は限られたものとなる。著者が調べた範囲では、X線回折を積層造形プロセスのインラインモニタリングに適用した事例は見つけられなかった。

真空チャンバー中で電子ビームを利用するEBM限定の手法ではあるが、Ritchieら^{(20),(21)}は電子ビーム照射により発生する特性X線を検出することで、プロセス中の元素分析が可能であることを示した。得られるスペクトルの解釈は、バックグラウンドの放射や低いS/N比の影響により複雑であると報告されているが、造形中の金属成分の分析およびそのモニタリングが可能であることは、造形中の蒸発や拡散挙動の理解、また造形物の品質管理においても非常に有用と考えられる。

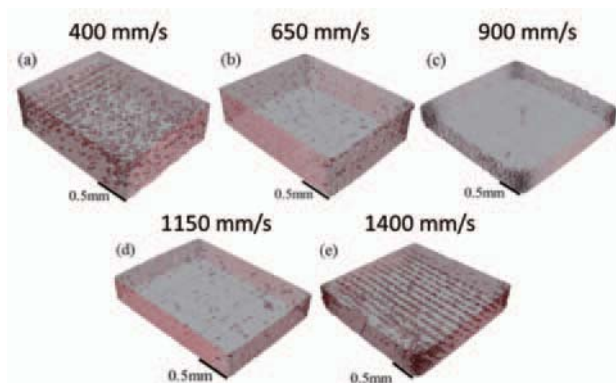


Fig. 11 X-ray CT images of SLM Ti-6Al-4V.

3. 結言

本稿では積層造形プロセスにおいて、これまでに報告されているインラインモニタリングおよび非破壊評価技術のいくつかについて紹介した。現在の市販装置には高速カメラや放射温度計を組み込むことが可能となっており、モニタリング技術の活用が進んでいる。しかし現状では、モニタリングデータを自動分析し、その結果

に基づいて装置のパラメータ制御にフィードバックを自動でかけるといったところまでは来ていない。Scimeら⁽²²⁾が報告しているような取得画像データの機械学習を用いた自動識別など、今後さらに研究開発が進んでいくものと考えられる。また、造形体の変形や内部欠陥を造形プロセス中に検出する技術の開発がさらに進んでいくものと考えられる。非常に複雑な構造を実現できる新しいプロセス技術であり、その品質保障も大きな課題である。モニタリング技術や解析技術と組み合わせた総合的なアプローチが重要である。

参考文献

- (1) S.K. Everton, M. Hirsch, P. Stravroulakis, R.K. Leach, A.T. Clare: Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing, *Materials & Design*, Vol. 95, pp. 431-445, (2016).
- (2) W.-W. Liu, Z.-J. Tang, X.-Y. Liu, H.-J. Wang, H.-C. Zhang: A Review on In-situ Monitoring and Adaptive Control Technology for Laser Cladding Remanufacturing, *Procedia CIRP*, Vol. 61, pp. 235-240, (2017).
- (3) S. Berumen, F. Bechmann, S. Lindner, J.-P. Kruth, T. Craeghs: Quality control of laser- and powder bed-based Additive Manufacturing (AM) technologies, *Physics Procedia*, Vol. 5, pp. 617-622, (2010).
- (4) S. Clijsters, T. Craeghs, S. Buls, K. Kempen, J.-P. Kruth: In situ quality control of the selective laser melting process using a high-speed, real-time melt pool monitoring system, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 75, No. 5, pp. 1089-1101, (2014).
- (5) T. Furumoto, M.R. Alkahari, T. Ueda, M.S.A. Aziz, A. Hosokawa: Monitoring of Laser Consolidation Process of Metal Powder with High Speed Video Camera, *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 760-766, (2012).
- (6) M. Islam, T. Purtonen, H. Piili, A. Salminen, O. Nyrhilä: Temperature Profile and Imaging Analysis of Laser Additive Manufacturing of Stainless Steel, *Physics Procedia*, Vol. 41, pp. 835-842, (2013).
- (7) H. Krauss, C. Eschey, M.F. Zaeh: Thermography for monitoring the selective laser melting process, *23rd International Solid Freeform Fabrication Symposium; Austin, TX, Vol.*, (2012).
- (8) H. Krauss, T. Zeugner, M.F. Zaeh: Layerwise Monitoring of the Selective Laser Melting Process by Thermography, *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 64-71, (2014).
- (9) M. Kelin, J. Sears: Laser ultrasonic inspection of laser cladded 316SS and Ti-6-4, *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics*, Vol., (2004).
- (10) M. Klein, T. Sienicki, J. Eichenberger: Laser-ultrasonic detection of subsurface defects in processed metals_ patent, *Patent US*, Vol., (2007).
- (11) A.J. Manzo, S. Kenderian, H. Helvajian In *Laser 3d*

- Manufacturing Iii; Gu, B., Helvajian, H., Pique, A., Eds. 2016; Vol. 9738.
- (12) H. Rieder, A. Dillhofer, M. Spies, J. Bamberg, T. Hess: Online Monitoring of Additive Manufacturing Processes Using Ultrasound, Proceedings of 11th European Conference on Non-Destructive Testing, October 6-10, 2014, Prague, Czech Republic, Vol., (2014).
- (13) H. Rieder, M. Spies, J. Bamberg, B. Henkel: On- and offline ultrasonic characterization of components built by SLM additive manufacturing, AIP Conference Proceedings, Vol. 1706, No. 1, pp. 130002, (2016).
- (14) F. Wang, H. Mao, D. Zhang, X. Zhao, Y. Shen: Online study of cracks during laser cladding process based on acoustic emission technique and finite element analysis, Appl. Surf. Sci., Vol. 255, No. 5, Part 2, pp. 3267-3275, (2008).
- (15) K. Taniguchi, M. Enoki, M. Watanabe, S. Kuroda, K. Ito: In situ monitoring of cracking behaviors of plasma-sprayed coatings by the laser acoustic emission technique, J. Mater. Res., Vol. 24, No. 10, pp. 3182-3189, (2009).
- (16) K. Ito, H. Kuriki, M. Watanabe, S. Kuroda, M. Enoki: Detection of AE Events due to Cracks in TBC during Spraying Process, Mater. Trans., Vol. 53, No. 4, pp. 671-675, (2012).
- (17) K. Ito, S. Ohmata, K. Kobayashi, M. Watanabe, S. Kuroda, M. Enoki: Crack Monitoring during Plasma Spraying of Ceramic Coatings by Non-Contact Acoustic Emission Method, Mater. Trans., Vol. 51, No. 7, pp. 1272-1276, (2010).
- (18) K. Ito, H. Kuriki, H. Araki, S. Kuroda, M. Enoki: Detection of segmentation cracks in top coat of thermal barrier coatings during plasma spraying by non-contact acoustic emission method, Science and Technology of Advanced Materials, Vol. 15, No. 3, pp. 035007, (2014).
- (19) I. Yadroitsev, I. Yadroitsava: Evaluation of residual stress in stainless steel 316L and Ti6Al4V samples produced by selective laser melting, Virtual and Physical Prototyping, Vol. 10, No. 2, pp. 67-76, (2015).
- (20) M. Ritchie, S.L. Cockcroft, P.D. Lee, A. Mitchell, T. Wang: X-ray-based measurement of composition during electron beam melting of AISI 316 stainless steel: Part I. Experimental setup and processing of spectra, Metall. Mater. Trans. A-Phys. Metall. Mater. Sci., Vol. 34A, No. 3, pp. 851-861, (2003).
- (21) M. Ritchie, P.D. Lee, A. Mitchell, S.L. Cockcroft, T. Wang: X-ray-based measurement of composition during electron beam melting of AISI 316 stainless steel: Part II. Evaporative processes and simulation, Metall. Mater. Trans. A-Phys. Metall. Mater. Sci., Vol. 34A, No. 3, pp. 863-877, (2003).
- (22) L. Scime, J. Beuth: Anomaly detection and classification in a laser powder bed additive manufacturing process using a trained computer vision algorithm, Additive Manufacturing, Vol. 19, pp. 114-126, (2018).

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

Metal Powders for Additive Manufacturing in Aerospace & land turbines. Trends and Challenges

Adeline Riou^{*1}

Key words : Aerospace Turbine, Gas Turbine Additive Manufacturing, Metal powders, Gas atomization

1. Introduction

Since a few years, a strong focus has been put on metal Additive Manufacturing (AM) technologies because of the potential benefits for aerospace and land turbine industries such as :

- design freedom to achieve in particular significant weight reduction , through the use in particular of topology optimization or a better integration of functions
- material savings as well as the reduction of machining and assembly operations.

The intensive research work on AM in various markets has led to the industrialization of the technology in various market segments:

- medical dental& orthopedic implants
- tooling for plastic processing
- more recently the aerospace and energy sectors, in particular for turbine applications.

Therefore the Technology Readiness Level (TRL) of metal AM varies by market segment as shown in the figure 1 below. The current industrialization has led to fast increasing sales of machines for metal AM since 2013, has shown in the figure 2.

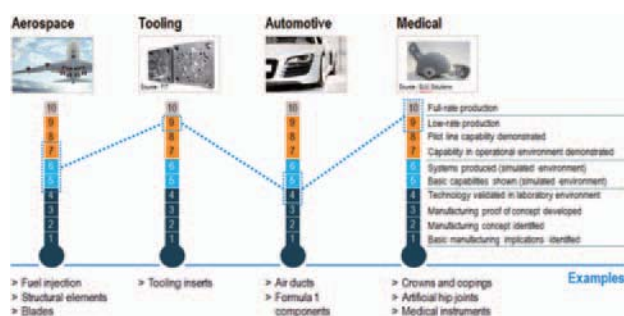


Fig. 1 Technology Readiness Level of metal additive manufacturing by market segment - Source: Roland Berger (1)

Additive manufacturing is seen as an alternative process of investment casting. But, given the high cost of the technologies, they are more targeted at small to medium series of part weight up to a few kilograms. Among the various additive manufacturing technologies shown in Fig. 3 powder bed laser beam melting is the most common for turbine

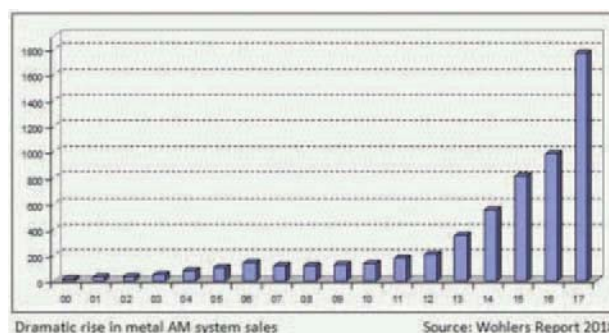


Fig. 2 Sales of machines for metal additive manufacturing in units per year - Source: Wohlers Associates (2)

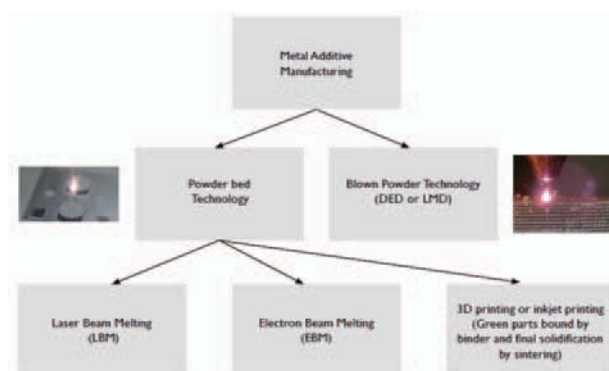


Fig. 3 Main metal powder based additive manufacturing technologies - Source: EPMA (3)

applications.

In this article, an overview will be provided on 3 main points related to metal powders for additive manufacturing

- Metal powder manufacturing process
- Powder characterization
- Alloys for turbine applications.

原稿受付 2018年 4月17日

* 1 Aubert & Duval, 33 av du Maine, 75015 Paris, France

2. Metal powder manufacturing process

The most common process for the production of metal powders for additive manufacturing today is gas atomization, for a wide range of alloys used in AM such as :

- steels
- nickel and cobalt base superalloys
- aluminium alloys.

The gas atomization process starts with molten metal pouring from a tundish through a nozzle. The stream of molten metal is hit by high pressure jets of neutral gas such as nitrogen or argon and atomized into small liquid metal droplets which cool down and solidify when falling inside the atomization tower. Powders are then collected in a container for further post processing operations such as sieving and blending, before final packaging.

Superalloys metal powders are usually produced by VIM gas atomization process, where VIM stands for Vacuum Induction Melting. In this process, the melting takes place in a vacuum chamber. VIM gas atomization process is recommended for superalloys so as to avoid in particular oxygen pick-up when working with alloys with reactive elements such as Ti and Al.

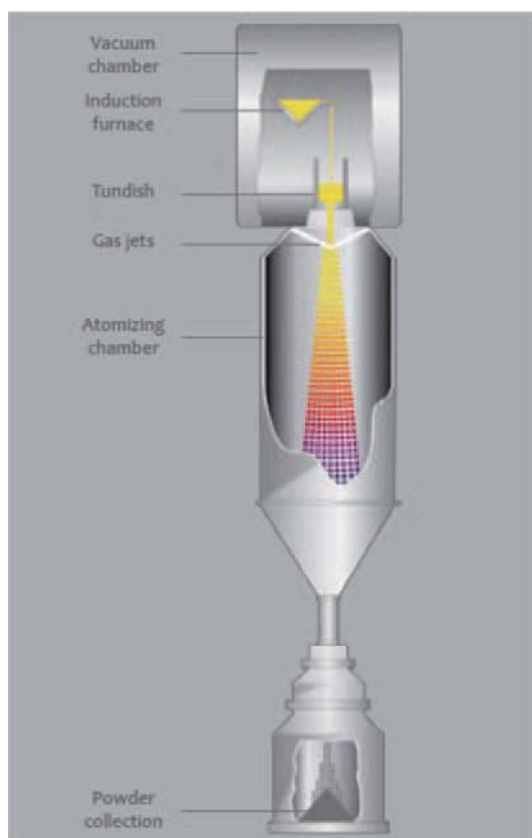


Fig. 4 Sketch of Aubert & Duval VIM gas atomization process

3. Powder characterization

Metal powders shall have the suitable chemistry, morphology, size and physical properties to achieve the targeted material properties with the various additive manufacturing processes. Various standards below are relevant to metal powders for metal additive manufacturing.

3.1 Chemical composition

The chemical composition of chosen metal powders will influence in particular:

- melting temperature
- mechanical properties
- weldability
- thermal properties (thermal conductivity, heat capacity etc.).

Regarding chemical composition, main alloy elements , measured by ICP or Spectrometry are very important but other elements also matters as they may affect significantly material properties in AM process, depending on alloys:

- interstitials, such as Oxygen, Nitrogen, Carbon and Sulfur, measured by combustion and fusion techniques
- trace elements and impurities.

With the gas atomization process, all powder particles have the same chemical composition but finer particles tend to have a higher oxygen content due to the higher specific surface.

The chemical composition can also evolve slightly after multiple uses in additive manufacturing machines.

3.2 Powder Morphology

In additive manufacturing application, a spherical morphology is preferred : it improves indeed the powder “spreadability”, when applying a new layer of powder with the recoating blade on the powder bed.

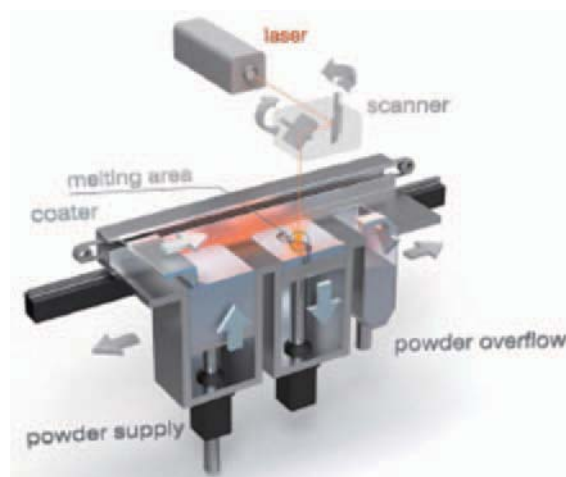


Fig. 5 Sketch of Laser Beam Melting Machine by Concept Laser - Source: EPMA (3)

In some specific additive machines, powder feeding is done by gravity from a powder feeder. For those machines, a key powder characteristics is flowability.

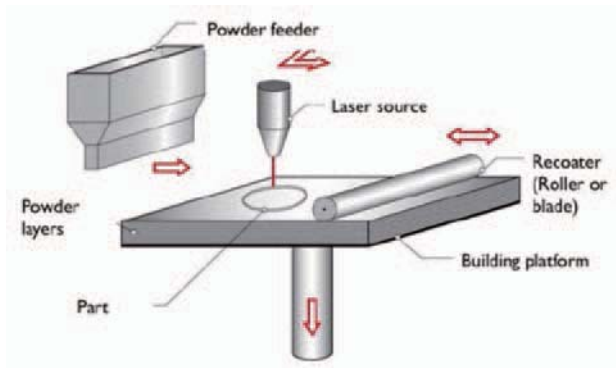


Fig. 6 Sketch of a Laser Beam Melting machine with powder feeding by gravity from a powder feeder - Source: EPMA (3)

Main powder morphology defects to be controlled in powders for AM are :

- irregular powder shapes such as elongated particles
- satellites , i.e. small powder grains stuck on the surface of bigger grains during atomization process
- hollow powder particles, with open or closed porosity.

Porosity content can be evaluated either by SEM observation or by Helium Pycnometry. The presence of excessive amounts of pores with entrapped gas can affect material properties.

3.3 Powder Size

The particle size distribution (PSD) is very important for all additive manufacturing processes. It may vary depending on the machine used and it can influence many aspects such as:

- powder flowability and ability to spread evenly
- powder bed density
- energy input needed to melt the powder particles
- surface roughness.

There are two main methods to measure particle size distribution:

- sieve analysis (4)
- laser diffraction analysis (5)

It is important to note that the PSD results will be dependent of the chosen test methods, which can provide different results in particular depending on powder morphologies.

The PSD is an index indicating what sizes of particles are present in what proportions. It shows the relative particle amount as a percentage of volume, where the total amount of particles is 100 % in the sample to be measured.

The frequency distribution indicates in percentage the amounts of particles existing in respective particle size intervals (blue curve : q_3). The cumulated frequency distribution expresses the percentage of the amounts of particles below a certain size (red curve : Q_3).

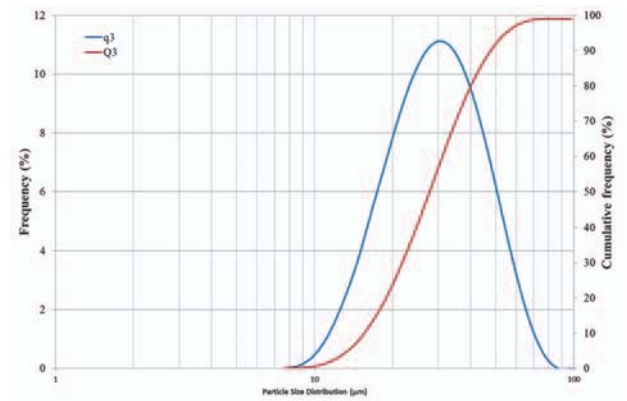


Fig. 7 Particle size distribution % in blue and cumulative % in red

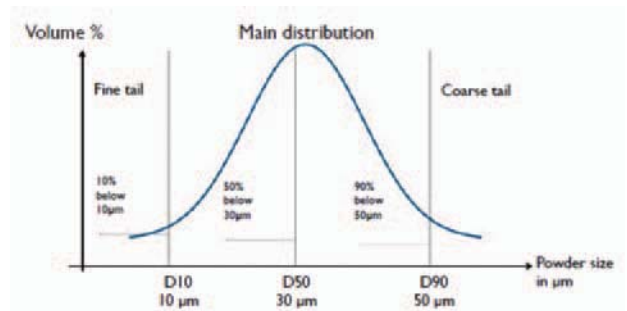


Fig. 8 Example of D10, D50 and D90 - Source: EPMA (3)

A common approach to define the distribution width is to refer to three values as can be seen in Fig. 8

- D10 i.e. the size in microns where 10% of the population lies below D10
- D50, or median, i.e. the size in microns where 50% of the population lies below D50
- D90, i.e. the size in microns where 90% of the population lies below D90

3.4 Physical properties

Physical and rheological properties of metal powders are important for additive manufacturing systems, both for powder handling from powder container to working area , as well as for obtaining uniform layers of powders.

The rheology of metal powders is a complex matter, with several applicable standard test methods, though not always fully appropriate for the particle sizes typical of additive manufacturing systems:

- Apparent density (6)
- Tap density (7)
- Flow rate (8)
- Angle of repose (9)

4. Alloys for turbine applications

In the field of aerospace and land turbines, the focus of additive manufacturing research work has been mainly on nickel and cobalt base superalloys. But other alloys such as special steels, titanium and aluminum are also considered in various turbine applications.

Regarding nickel and cobalt alloys, Aubert & Duval provides alloys such as Ni625, Ni718, HX and CoCrMo F75 which have reached a high Technology Readiness Level in various aerospace and land turbine applications.

Examples of standard chemical compositions, including O & N content, are given below:

Table 1 Chemical composition of Aubert & Duval Pearl® Micro Ni718 powder

Elements	Fe	Al	Cr	Nb	Ni	Mo	Ti	B	Co	Cu	Mn	P	Si	C	S	O	N
Min	Rem.	0.2	17	4.75	50	2.8	0.65										
Max		0.8	21	5.5	55	3.3	1.15	0.006	0.1	0.3	0.35	0.015	0.35	0.08	0.015	0.03	0.03

Table 2 Chemical composition of Aubert & Duval Pearl® Micro HX powder

Elements	Ni	Co	Cr	Fe	Mo	W	Al	B	Cu	P	Mn	Si	Ti	C	S	O	N
Min	Bol.	0.5	20.5	17	8	0.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Max	-	2.5	23	20	10	1.0	0.5	0.01	0.5	0.04	1.0	1.0	0.15	0.1	0.03	0.03	0.03

However, several other alloys, including difficult-to-weld alloys are being evaluated for additive manufacturing processes as can be seen in the figure below. The TRL of all alloys varies but laser welding seems to provide new levels of weldability limits for nickel base alloys compared with conventional welding methods.

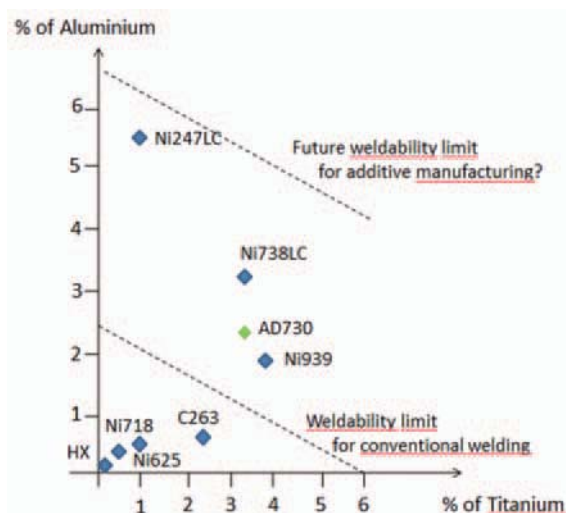


Fig. 9 Examples of alloys used in the field of additive manufacturing for aerospace & land turbines, including AD730 by Aubert & Duval

Depending on targeted applications and the environment of use on the parts considered, a key point of research for all alloys is to optimize their chemical composition for additive manufacturing processes so as to:

- minimize possible defects such as cracking and porosities during laser processing
- maximize mechanical properties, in particular fatigue, creep and high temperature properties.

Hence the trend towards DFAM alloys, i.e. alloys Designed for Additive Manufacturing.

In the longer term, new generations of alloys will be designed exclusively for additive manufacturing processes, providing unique material properties in combination with unique part geometries achievable only with AM technologies.

5. Conclusion

After years of research & development, AM is now reaching high TRL levels in turbine applications and several parts are now launched in production series.

However, further work is needed for several challenges such as:

- standardization
- improved test methods for powder characterization
- new alloys optimized for AM.

References

- (1) Roland Berger - Additive Manufacturing (AM) – Opportunities in a digitalized production, Additive Manufacturing European Conference, Brussels, June 23rd, 2015
- (2) (Wohlers T – Wohlers Report 2018.
- (3) Aumund-Kopp C and Riou A – A Introduction to Additive Manufacturing Technology – EPMA , October 2017
- (4) ISO 4497 Metallic Powders, Determination of Particle Size by Dry Sieving (or ASTM B214 Test Method for Sieve Analysis of Metal Powders)
- (5) ISO 13320 Particle Size Analysis by Laser Diffraction Methods (or ASTM B822 Test Method for Particle Size Distribution of Metal Powders and Related Compounds by Light Scattering)
- (6) ISO 3923, Metallic powders — Determination of apparent density or ASTM B212 Test Method for Apparent Density of Free-Flowing Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel
- (7) ISO 3953, Metallic powders — Determination of tap density or ASTM B527 Test Method for Determination of Tap Density of Metallic Powders and Compounds
- (8) ASTM B213 Test Methods for Flow Rate of Metal Powders Using the Hall Flowmeter Funnel
- (9) ISO 4324, Powders and granules — Measurement of the angle of repose

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

金属粉末積層造形法により作製した耐熱合金における高温強度特性劣化 Degradation of High Temperature Property of Additive-manufactured Superalloys



寛 幸次*¹
KAKEHI Koji



郭 妍伶*¹
KUO Yen-Ling



秋野 一輝*¹
AKINO Kazuki

キーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，超合金，付加製造，積層造形

Key Words：Gas Turbine, Jet Engine, Superalloy, Additive manufacturing

1. 緒言

ベースロードとなるガスタービンの高効率化とともに、太陽光、風力等の再生可能エネルギーの大量導入に対応できる系統安定化対応型先進ガスタービン発電は低炭素社会の実現に向けた重要な開発課題である。タービンホットパーツへ積層造形を適用することにより、高い熱効率を維持しつつ、始動性や負荷追従性、過渡応答性に優れ、繰返し負荷に耐えうるように最適設計された複合冷却構造⁽¹⁾を有するタービン翼や燃焼器を開発することで、太陽光、風力等の再生可能エネルギー利用を促進し、低炭素社会実現に寄与できるものと考えられる⁽²⁾。3Dプリンターを用いた加工プロセスは、正式には Additive Manufacturing (AM) で、和訳は「付加製造」となるが、国内では「積層造形」と呼ばれることが多いため本報では「積層造形」と記述する。

独シーメンスが積層造形技術を使って従来の設計に基づくガスタービンブレードを製造し、それを取り付けたガスタービンの全負荷運転試験を実施し、所定の性能を発揮することを確認した。すなわち、材料粉末を敷き詰めたパウダーベッドにレーザーを照射し、任意の部分を溶融して金属を積層させるSLM方式を採用し、多結晶のニッケル基超合金を原料にブレードを作製した。それらを13メガワットの発電能力を持つ「SGT-400」産業用ガスタービンに取り付け、毎分1万3000回転、1250℃以上の温度条件で試験を実施した。さらに、金属積層造形により内部に冷却構造を持たせた全く新しい設計のタービンブレードの試験も行った⁽³⁾。

さらに、航空宇宙分野では、高価な金属材料を使用

するため、歩留まりの向上と構造部材の軽量化が求められており、金属3Dプリンターの適用が期待されている。タービンディスクでは、鍛造材の結晶組織が均一な部分からディスクを削り出すため、実に9割の材料を除去し⁽⁴⁾、また、燃焼器を包み込む耐圧容器（Combustion casing）では7割の材料を除去するなど、歩留まりが極めて悪いのが実情である。いずれの部材も高価なスーパーアロイ（超合金）を用いて製造されている。また、偏析の少ない均質組織、鍛造後の組織の不均一性およびニアネット成形による精密複雑形状部材への適用などの課題があり、これらを解決するために、エネルギービームにより金属粉末を溶融凝固させる積層焼結を使用した3次元造形技術が注目されている。さらに、タービンブレードのような複雑形状・中空形状の部品の製作、一体造形による加工工程の簡易化、多品種・少量生産が可能という点からも、3Dプリンターが注目されている。

3Dプリンターは本来、試作品の製造をするために使われてきたが、最近では造形精度が向上していることから、航空宇宙分野ではパーツ類を製造する用途で使用されはじめている。例えば、世界最大手のエンジンメーカーであるGE（General Electric Company）は、Boeing777-200ERに搭載される「GE-94B」エンジン用コンプレッサー温度センサー用ハウジング部品において、2015年に3Dプリンター製の部品として初めてFAAの認証を取得した⁽⁵⁾。また、次期大型機用エンジン部品の一部を3Dプリンター製に切り替える⁽⁶⁾。代表例が燃料ノズルで、従来20の部品を1つ1つ溶接していたが1度の工程で完成できるようにした。ほかにも10以上の部品に3Dプリンターを利用する。3Dプリンターなら、鋳型や金型が不要になる。コンピュータの設計通りに成形できるため、金属の塊を削って加工する場合の材料のムダもなくすることができ、製造コストを1～5割減らせる。こ

原稿受付 2018年3月10日

* 1 首都大学東京 大学院 機械システム工学域
〒192-0364 八王子市南大沢1-1
E-mail: kakehi@tmu.ac.jp

のような経緯から、GEは3Dプリンターメーカー大手2社（ArcamとSLM）を同時買収した⁽⁷⁾。また、米プラット・ホイットニー（Pratt & Whitney）も、ボンバルディア（カナダ）の新型機用エンジンに3Dプリンターで製造した金属部品を組み込み、コンプレッサー部品や部品の取り付け金具など20品目で導入を進めている⁽³⁾。

2. 耐熱合金の積層造形

高温で強度、耐食性、耐クリープ性、また用途によっては耐圧性、耐疲労性、耐摩耗性を保つ金属材料を一般に耐熱合金と呼ぶ。一般に700℃前後までは耐熱鋼が用いられるが、それ以上の温度では、一般に「超合金」を用いることが多い。超合金（superalloy）とは、ステンレス鋼や耐熱鋼を上回る耐食性、耐酸化性および高温強度特性を有する「超耐熱合金」の略称である。超合金は、ニッケル基、コバルト基、鉄基に大別できるが、ニッケル基超合金が最も広く使用される。しかし、ニッケル基超合金においては、塑性加工や切削等の加工性が決してよいとは言えず、精密複雑形状部材への適用などの課題があり、これらを解決するために、エネルギービームにより金属粉末を溶融固化させる積層焼結を使用した3次元造形技術の開発が必要とされている。しかし、その造形後の耐熱合金の強度特性に関しては、不明な点が多い。そこで、本報では、積層造形耐熱合金の高温強度特性の劣化要因について概説する。耐熱合金では析出相である γ' 量が大きくなるほど強度が大きくなる。ニッケル基超合金は、一般には、母相である γ 相内に強化相である γ' 相を析出させた析出強化型合金である。 γ 相は面心立方構造を持つニッケル固溶体であり、 γ' 相は Ni_3Al を基本とするL12構造を持つ金属間化合物である（図1(a)）。高強度超合金は、 γ' 相を強化相とする合金である。図2に、主なニッケル基超合金のAl、Ti+Ta添加量と溶接性との関係を示す。両元素の増加とともに、ひずみ時効割れ（strain-age cracking）感受性⁽⁸⁾が高くなり、溶接性が悪くなる。すなわち、3次元積層造形においても、Al、Ti+Ta添量が増加すると割れが生じやすくなる⁽⁹⁾。これは、これらの元素の添加量が高い場合、加熱に伴い、析出強化相である γ' 相が急速に析出して（図3）、基材が即時に硬化し、残留応力が緩和されず割れを生じるためである。

タービンブレードに用いられる高強度の超合金は、Alを5-8 mass%、Ti+Taを7-14 mass%含有しており、積層造形が極めて難しい。ひずみ時効割れ感受性が高くなり、積層造形性が悪くなる。すなわち、3次元積層造形においても、Al、Ti+Ta添量が増加すると割れが生じやすくなる。

そこで、本報では γ' 量すなわちAl+Ti+Ta量に着目して、SUS316L、IN718、IN939およびCM247LCの造形材の高温強度特性について概説する。それらの合金の化学組成を表2に示す。

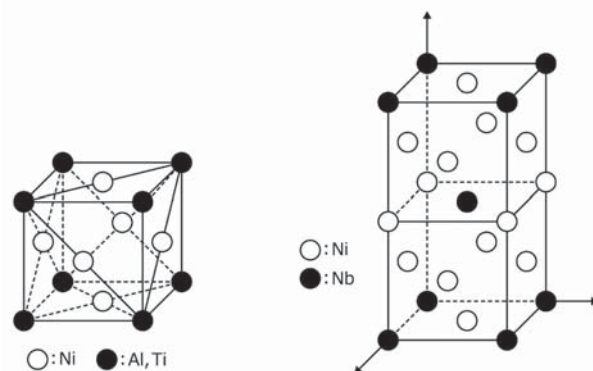


Fig. 1 Crystal structure of (a) the γ' - $\text{Ni}_3(\text{Ti,Al})$ ordered FCC phase, and (b) Crystal structure of the γ'' - Ni_3Nb phase.

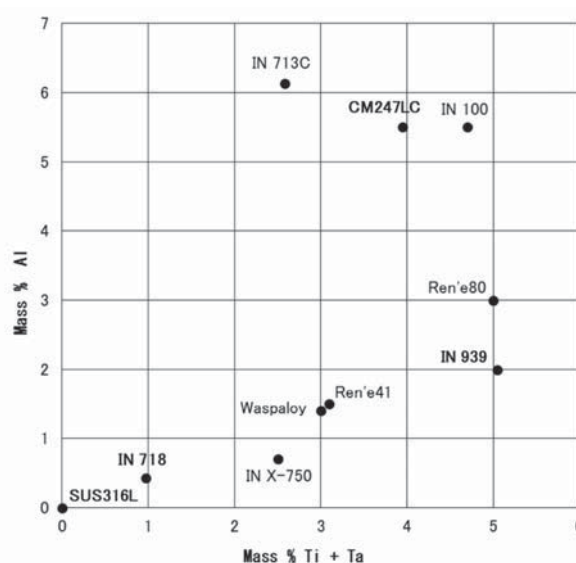


Fig. 2 Effect of Al and Ti+Ta content on susceptibility to strain-age cracking in Ni - base superalloys. Modified from J. N. DuPont, J. C. Lippold, and S. D. Kiser⁽¹⁵⁾

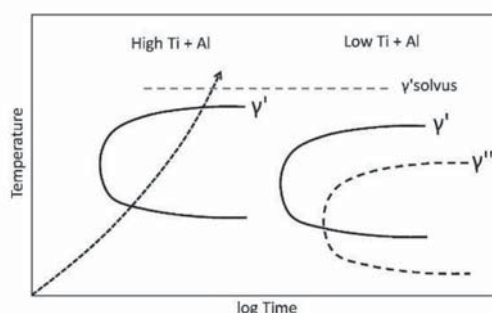


Fig. 3 Schematic illustration of the effect of (Ti + Al) content and heating rate to the solution annealing temperature. Modified from J. N. DuPont, J. C. Lippold and S. D. Kiser⁽¹⁵⁾

Table 1 Alloy explanation and abbreviated words

Abbreviation	Explanation or full spelling
IN718	The alloy IN 718 is γ'' / γ' - hardening alloy with a high-strength, corrosion-resistant which is used from -253 to 704 °C . Its welding characteristics, especially its resistance to postweld cracking, are outstanding. The alloy with good tensile, fatigue, creep-rupture strengths, resulted in its use in a wide range of applications. Examples are components for liquid fueled rockets, rings, casings and various formed sheet metal parts for aircraft and land-based gas turbine engines.
IN939	The alloy IN939 was developed for turbine airfoils and has been used extensively in industrial gas turbines. IN939 is γ' - hardening alloys with their inherent higher temperature capability. This alloy is a reasonable choice among the heat resistant alloys since the chemistry balances the weldability with adequate strength. IN 939 material is today available for reduced risk of cracking in the heat affected zone (HAZ) during welding.
CM247LC	The alloy CM247 LC is a cast superalloy modified from Mar-M247, specifically designed for making the directionally solidified (DS) turbine blade, with low carbon content. The alloy contains higher volume fraction of γ' precipitate and shows higher strength compared with IN939.
IPF map	Inverse Pole Figure map
SLM	Selective Laser Melting
EBM	Electron Beam Melting
C&W	Cast & Wrought
STA	Solution Treatment and Aged
DA	Direct Aged

Table 2 Chemical composition (mass%)

	Cr	Nb	Mo	Ti	Ta	Al	W	Co	C	B	Zr	Hf	Fe	Ni
SUS316L	16.92	-	2.40	-	-	-	-	-	0.024	-	-	-	Bal.	12.08
IN718	19.63	5.05	2.85	1.10	0.02	0.46	-	0.03	0.04	0.002	-	-	Bal.	52.59
IN939	22.5	1.0	-	3.6	1.4	1.9	-	19.0	0.20	-	-	-	0.1	Bal.
CM247LC	7.86	-	0.49	0.76	3.19	5.49	9.78	8.92	0.069	0.015	0.011	1.36	-	Bal.

Table 3 Tensile properties at room temperature

	Direction	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
As built	Vertical direction	677	1022	28.1
	Horizontal direction	790	1070	25.2
STA	Vertical direction	1271	1424	18.6
	Horizontal direction	1365	1519	14.7
Cast & Wrought +STA	-	1028	1139	10.5

Table 4 Tensile properties at 650 °C

	Direction	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
As built	Vertical direction	594	862	25.1
	Horizontal direction	742	941	23.8
STA	Vertical direction	1042	1142	10.1
	Horizontal direction	1073	1184	2.6

3. 耐熱合金の高温での強度特性劣化

3.1 ステンレス鋼における溶融凝固界面MPBに沿ったき裂生成による強度劣化^[10]

単相固溶強化合金, 言い換えると, 凝固から室温まで変態点と析出物を有しないオーステナイト系ステンレス鋼の積層材の高温強度特性について述べる。SUS316L 積層材では, 高温延性およびクリープ寿命とも垂直 (vertical direction) 試験片に比べ, 水平 (horizontal direction) 試験片の延性が高くなった (図4)。図5 (電解エッチングをした積層まま材の垂直面) に示すように, 溶融凝固界面 (Molten Pool Boundary, MPB)^[11]に沿った未溶融の欠陥が観察された。光学顕微鏡で観察した欠陥面密度は 1 mm^2 あたり 1.19 個であった。MPBが細長く水平に配向していることから, 積層方向に対して平行な欠陥よりも, 垂直な欠陥長さの方が長くなる。このため, 垂直試験片では, 欠陥に対して垂直方向に引張応力が作用し, 開口形き裂発生点 (図6(a)) となったことが強度および延性低下の主たる要因であると考えられる。また, MPBの結合力がマトリックスに比べて弱いことも要因として考えられる。しかし, 溶体化処理を施した試験片においては, 垂直試験片と水平試験片の延性の差が積層まま材に比べ小さくなりほぼ同等になった。これは, 1080°C という溶体化温度により拡散が進み, ボイドの原因となるMPBに沿った微細な欠陥が焼結されたことに一因があると考えられる (図6(b))。こうしたことから, MPBに沿った未溶融の欠陥に対しては, HIP (Hot Isostatic Press) が有効であると考えられる。

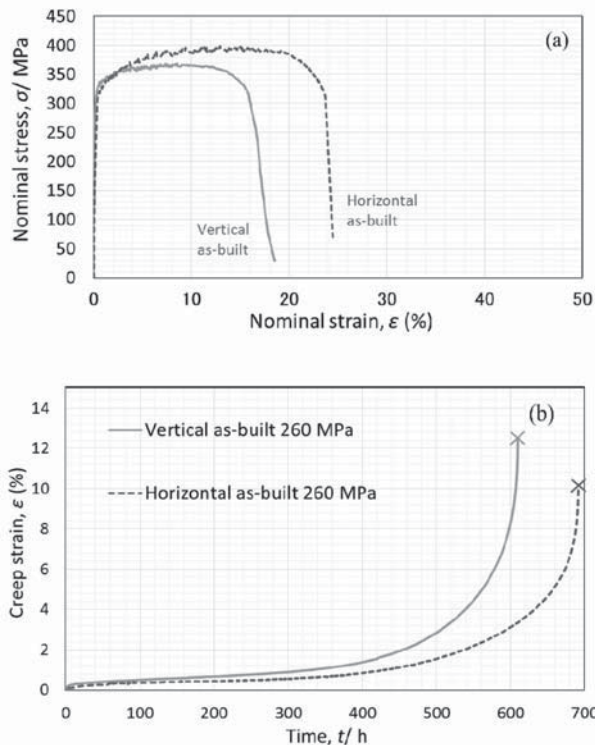


Fig. 4 (a) Stress-strain curves and (b) creep curves of AM specimens at 600°C .

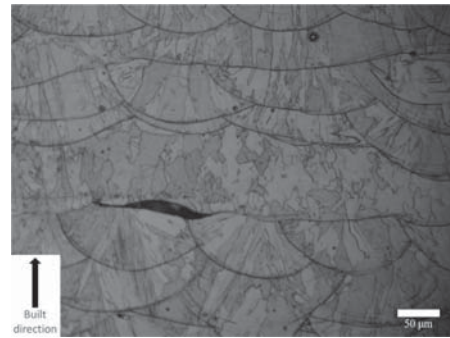


Fig. 5 Optical microscopic image of a crack due to lack of fusion on the vertical plane of as-built specimen.

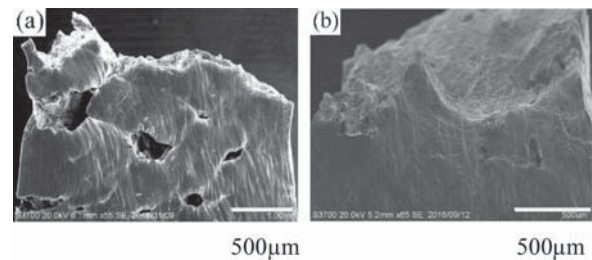


Fig. 6 Side view near the fracture surface of (a) as-built and (b) Solution-heat-treated specimens tested at 600°C .

3.2 析出相による高温強度劣化

航空機用ターボファンエンジンは4つの部位から構成され, 前方から順に, ファン, コンプレッサー (圧縮機), 燃焼器およびタービンの各部位に分けられる。後半部の温度が高くなる燃焼器やタービンには, ニッケル基超合金やコバルト基超合金が用いられている。図7^[12]はボーイング777に搭載されているプラット&ホイットニー PW4000エンジンで使用されている材料の内訳であるが, 全体の39%をニッケル基超合金が占めている。さらにそのニッケル基超合金において, 実にIN718が57%を占めている (図7(b))。用途はケース, ディスクさらには燃料配管に至るまで多岐にわたる。IN718は, ロケットエンジン材料としても使用されており^[13], 航空宇宙材料として広範囲に用いられている。

IN718は, 少量の γ' 相を含有するが, γ'' (Ni_3Nb) が主たる強化相である。 γ'' 相は, 図1(b)に示す正方晶のD022構造をしており, 軸比が $c/a=2.04$ とほぼ2倍であることから, 面心立方構造である γ 母相に対しては整

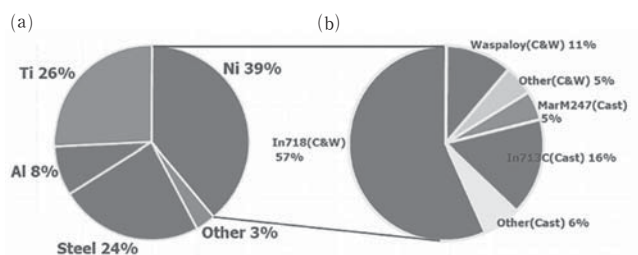


Fig. 7 Materials used in PW4000 aeroengine^[3]. (a) Entire breakdown of material and (b) breakdown of Ni alloys.

合析出しその体積率は約15–20%である⁽¹⁶⁾。図3に示すように、 γ'' 相はゆっくりと析出するため、加熱時に基材を瞬時に硬化させることがなく残留応力を応力緩和により緩和することができる。このため、加熱冷却が繰り返されるプロセスにおいて割れに対する抵抗が高く、積層造形に適した合金であると言える。しかし、 γ'' 相は700℃以上で、非整合界面を有する δ 相に変態するため、700℃以上での使用は困難である。IN718の化学組成を表2に示す。IN718のレーザー積層材におけるビード組織を図8に示す。縦断面は積層するビードが観察され、ビード界面を貫くデンドライトのエピタキシャル成長が観察された(図8(c))、横断面ではレーザーの走査跡が観察され、これらのなす角は約67°である(図8(b))。図9にIN718の積層材と溶解鍛造材の結晶粒組織(IPF map)を示す。レーザービーム入射方向に平行な縦断面では、積層方向に向かって細長く成長していた(図9(a))。これは、凝固金属の結晶方位を維持しつつ結晶が成長するエピタキシャル成長の結果である。比較材の溶解鍛造材では、結晶粒の特定の配向は観られず、均一粒径の結晶粒からなる等軸組織である(図9(b)⁽¹⁷⁾)。表3に室温における積層材と溶解鍛造材の強度特性比較を示す。積層面に水平な方向(horizontal direction)の強度が、積層面に垂直な方向(vertical direction)の強度よりも高いが、延性は低い。STA (solution treatment and aging), すなわち、溶解鍛造材に施される標準熱処理である溶体化時効熱処理を施すと、強化相である γ'' – γ' 相が析出するため、強度特性は大幅に向上したが、延性は半減した。また、積層材を熱処理した試料の強度特性は、結晶粒が粗大な混粒組織であるにも関わらず、既存の溶解鍛造材の強度、延性を若干上回る。しかし、高温(650℃)において、図10、11および表4に示すように、水平(horizontal direction)試験片において高温

延性やクリープ寿命が著しく低下する。クリープ試験片の破面を図12に示す。き裂の起点においてデンドライトに沿った破面が観察された。すなわち、デンドライトに沿ってき裂が発生進展したと考えられる。図8(c)に示すように、デンドライトは主として、積層方向に対して平

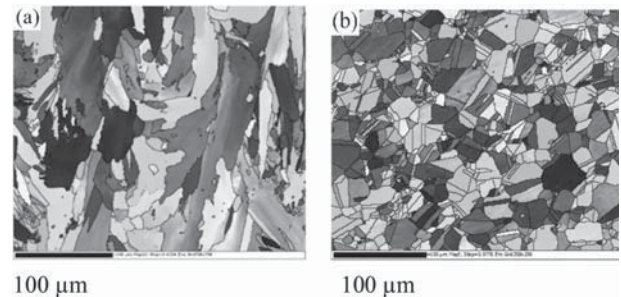


Fig. 9 IPF map of the as-built specimen from the (a) side view and (b) IPF map of the C&W specimen.

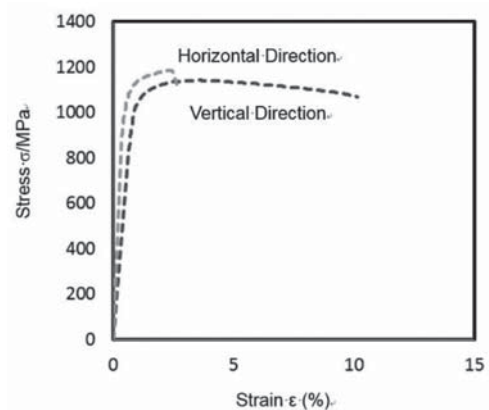


Fig. 10⁽¹⁸⁾ Stress-strain curves of the STA specimens at 650 °C.

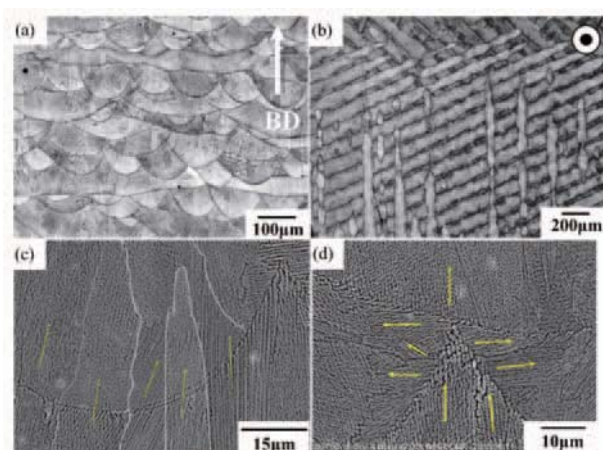


Fig. 8 MPB microstructures of the as-built specimen: (a) side view and (b) top view. The BD (built direction) is shown in each figure. Side view of the SEM (Scanning Electron Microscope) microstructure shows the (c) layer-layer MPBs and (d) track-track MPBs. The dendrite growth directions are shown by arrows.

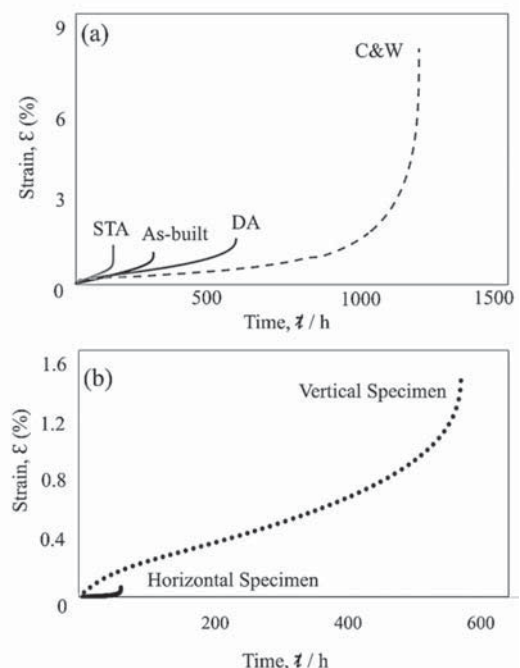


Fig. 11⁽¹⁵⁾ Comparison of creep curves between (a) AM-vertical and C&W specimens, and between (b) vertical and horizontal specimens in the DA material.

行に成長している。水平方向 (horizontal direction) の試験片においては、図13(b)に示すように、デンドライト方向は応力方向に対して垂直になる。一般にデンドライト間は低融点元素の偏析や化合物の析出等により結合力が低下する。そのため、き裂がデンドライト間で容易に発生して進展したと考えられる。それに対し、溶解鍛造材では、鍛造プロセスで形成されるデンドライト組織が鍛造中に破碎され、さらに鍛造プロセス中に再結晶が生じ結晶均一化が進むため、結晶粒均一化と組織均質化がもたらされ (図9(b)), 図11(a)に示すように高温でも延性を有する。積層材の延性改善法としては、溶体化処理温度を高めることによりデンドライト組織を固溶させることが有効であるが、結晶粒の粗大化を伴うため、熱処理の最適化が必要となる。また、この研究で用いた溶体化時効熱処理 (STA) は、溶解鍛造材に最適化された標準熱処理であるが、STA積層材のクリープ寿命が最短となった (図11(a))。すなわち、積層造形法では、従来の溶解鍛造法に最適化された熱処理ではなく、溶体化温度を高めるなどした熱処理の開発が必要である。また、IN718積層材において、HIP処理により横方向の延性が回復することから⁽¹⁰⁾、後処理プロセスについても検討すべきである。

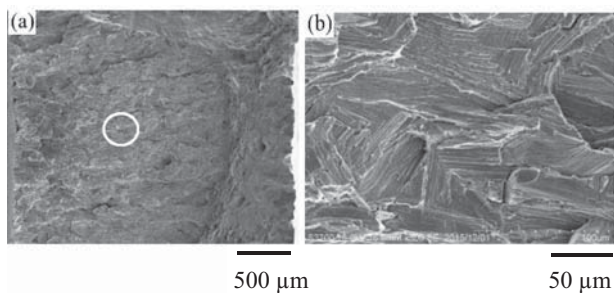


Fig. 12⁽³⁾ Fracture morphology of (a) lower-magnification view of DA-horizontal specimen; (b) magnified image of the circled area in (a).

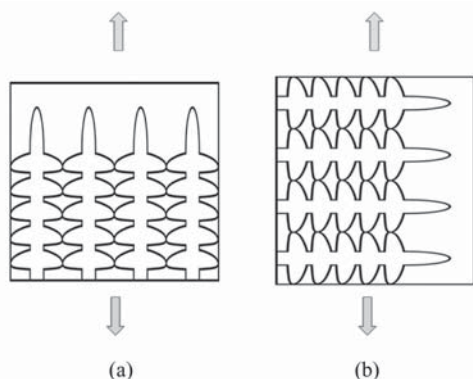


Fig. 13 (a) Schematic illustration of dendrite structure in (a) vertical and (b) horizontal specimens

3.3 再結晶形成による強度低下

IN939は、 γ'' 相は析出しない。そのため γ'' 析出強化型合金では不可能な700℃以上での運用が可能である。

主に鍛造材として、850℃付近で使用される。また、CrとCoの割合が高くなっており、高温クリープ特性が良く、高温酸化、高温腐食に優れた合金であるが、 γ' 相を強化相とする析出強化型合金であり、後述するひずみ時効割れの観点から、IN718に比べて造形は、困難と考えられる。しかし、HAZ (Heat Affected Zone) 割れが起こりにくく、溶接可能な合金であることから、積層造形が適用できる可能性がある。図14にIN939のレーザー積層造形材および鍛造材の650℃、690MPaにおけるクリープ曲線を示す。溶体化熱処理を施したSTA材は、650℃で極めて短い破断時間を示した。図14に示すように、IN939においても、IN718と同様 (図11)、レーザー積層造形材は従来材 (鍛造材) に比べて、極めて短い破断時間を示した。図15にIN939のレーザー積層造形材の組織を示す。積層後には、積層方向に [001] 方位が配向する柱状晶が観察されたが (図15(a)), 熱処理中⁽¹⁸⁾に再結晶 (図15(b)) が形成された。すなわち、再結晶により高温強度が著しく低下するためである。こうしたことから、積層造形材では、再結晶を阻止できる造形プロセスの検討が必要である。 γ' 析出強化型合金でも積層造形材のクリープが従来材よりも劣ることは明らかであり、実用化のためには、造形プロセスの改善等により積層造形材の高温強度特性の改善が必要とされる。

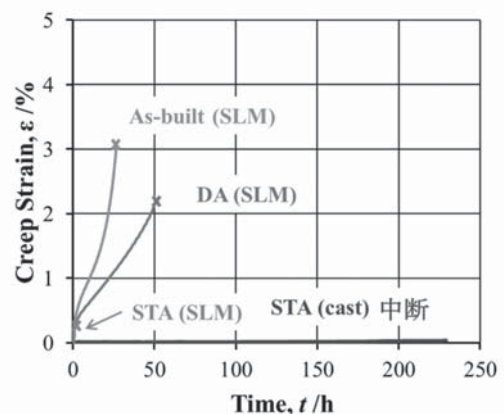


Fig. 14 Creep curves of SLM and cast specimens of IN939 at 650℃, 690MPa.

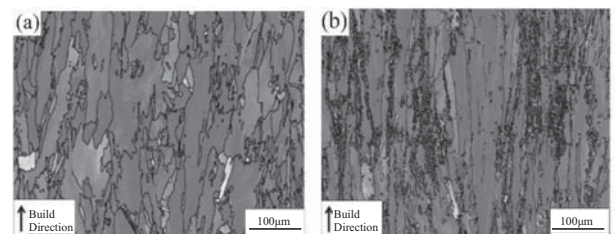


Fig. 15 IPF map of (a) as built and (b) solution-treated (1160℃/4h) IN939 specimens.

3.4 凝固割れ (solidification cracking)⁽¹⁹⁾

図16にAl量、Ti+Ta量ともに高いCM247LCのSLM造形後に観察された割れの組織写真を示す。割れは、デン

ドライ組織と粒界に沿って生成していることが分かる(図17)。また、き裂にそってZrが同定された(図18)。Zrが割れにおいて検出されたことから、この割れは凝固割れが原因であると考えられる⁽¹⁵⁾。Zrの偏析により、固相線温度は700-800℃まで低下する⁽¹⁵⁾。レーザー積層造形機では、溶融時に発生した金属蒸気および凝集して微細な粒子となったヒュームが、レーザーの入射を阻害するとともに、レンズに付着し曇りの原因となる。レーザー積層造形機では、ヒュームを除去するために、積層面に沿って不活性ガスを流す。このガス流は、凝固過程で溶融金属を急冷する。結果として、急速な冷却は凝固時の元素の均質化を阻止し、高濃度のZrを含む低融点の液膜(liquid film)を粒界のデンドライトに沿って形

成させる。この液膜は凝固収縮を吸収することができないため、粒界に沿った割れが生じる⁽¹⁵⁾。実用化のためには、造形プロセスの冷却速度の緩和等の凝固割れ対策が必要とされる。

参考文献

- (1) 高田憲一, 日経ものづくり, No.8 (2009), pp. 63-70
- (2) 日本ガスタービン学会誌, 調査研究委員会活動報告, 44 (2016), pp. 506-526.
- (3) 日刊工業新聞社, ニューススイッチ<<https://newswitch.jp/p/7869>> (参照日2017年02月07日付)
- (4) パネルディスカッション「塑性加工による材質予測の現状と今後」, 第12回天田財団助成研究成果発表会, (2014).
- (5) 浅倉眞司, 日経ものづくり, No.8 (2015), pp. 88-92.
- (6) 日本経済新聞 電子版, 「3Dプリンターで航空機エンジン部品加工 GEなど」
<http://www.nikkei.com/article/DGXNASDZ1900E_Z10C14A7TJC000/> (参照日2016年7月19日付)
- (7) 前田 健二, DX LEADERS, 「アディティブ・マニュファクチャリング戦略でGEがハイエンド3Dプリンターメーカーを買収へ」 <<https://dxleaders.com/business/537>> (参照日2018年1月07日付)
- (8) J. N. DuPont, J. C. Lippold and S. D. Kiser, *Welding Metallurgy and Weldability of Nickel Base Alloys*, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, (2009).
- (9) L.N. Carter, C. Martin, P. J. Withers and M. M. Attallah, *Journal of Alloys and Compounds*, 615 (2014), pp. 338-347.
- (10) 秋野 一輝, 笥 幸次, SUS316L ステンレス鋼積層造形材の強度と組織, 日本金属学会誌, 80 (2016), pp. 772-777.
- (11) W. Shifeng, L. Shuai, W. Qingsong, C. Yan, Z. Sheng and S. Yusheng, *J. Mat. Proc. Technol.*, 214 (2014), pp. 2660-2667.
- (12) D. F. Paulonis and J. J. Schirra, *Superalloys 718, 625, 710 and various Derivatives*, (2001), pp. 13-37.
- (13) 吉田誠, 渡辺義明, 航空宇宙技術研究所技報, TR-1092, (1991), pp. 1-19.
- (14) Y.L. Kuo, S. Horikawa and K. Takehi, *Materials and Design*, 116 (2017), pp. 411-418.
- (15) Y.L. Kuo, S. Horikawa and K. Takehi, *Scripta Materialia*, 129 (2017), pp. 74-78.
- (16) S. Kalluri, K. B. S. Rao, G. R. Halford and M. A. McGaw, *Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives*, (1994), pp. 593-606.
- (17) 西牧智大, 笥幸次, 河上祐介, 日本金属学会誌, 79 (2015), pp. 385-390.
- (18) Y.L. Kuo, Tokyo Metropolitan University, doctor thesis (2017).
- (19) R. Muñoz-Moreno, V. D. Divya, O. M. D. M. Messé, T. Illston, S. Baker and H. J. Stone, *Superalloys 2016*, TMS (2016), pp. 375-382.
- (20) M. Cloots, P. J. Uggowitzer and K. Wegener, *Materials and Design*, 89 (2016), pp. 770-784.

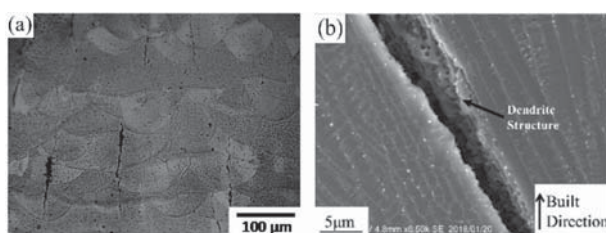


Fig. 16 (a) The crack is orientated perpendicular to the scan direction, (b) dendritic structures at an opened crack in the as-built CM247LC specimen.

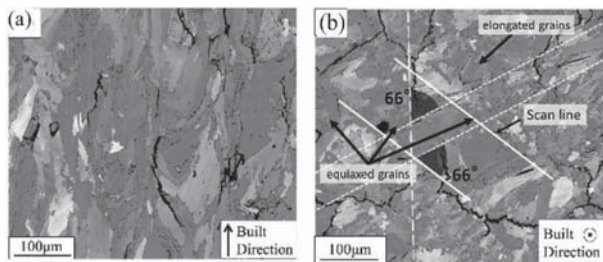


Fig. 17 IPF maps on the (a) vertical and (b) horizontal planes of the as-built specimens. Cracks propagate along the large angle grain boundaries in the build direction.

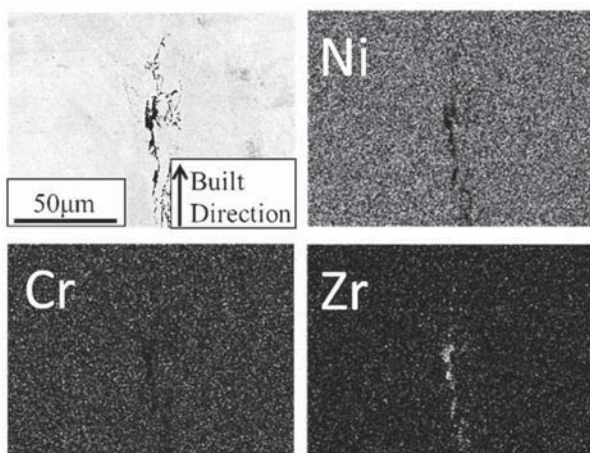


Fig. 18 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) analysis on the vertical plane of as-built CM247LC. Segregation profile of Zr compared to Ni and Cr.

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

ハイエントロピー合金のレーザ粉末積層造形への適用

Selective Laser Melting of High Entropy Alloys



桑原 孝介*¹
KUWABARA Kosuke



尾越 周平*¹
OGOSHI Shuhei



大坪 靖彦*¹
OTSUBO Yasuhiko



陳 美伝*²
CHEN Meichuan



藤枝 正*²
FUJIEDA Tadashi

キーワード：積層造形，3Dプリンティング，粉末レーザ積層造形，ハイエントロピー合金，耐食性

Key Words：Additive manufacturing, 3D printing, selective laser melting, high entropy alloys, corrosion resistance

1. 緒言

近年になってモノづくり技術を変革する技術として三次元積層造形技術の開発が進められている。積層造形は立体モデルの3Dデータに基づいて位置を高精度に制御しながら材料を積み上げていくことで対象とする部品を得る製造技術の総称である⁽¹⁾⁻⁽³⁾。名称としては付加造形（Additive Manufacturing）とも呼ばれることが多く、ASTM international, ISOなどで進みつつある標準類においても“Additive Manufacturing”が一般名称として指定されている。また、一般名称としては3Dプリンティング（3D Printing）ともほぼ同義語として用いられる。

積層造形は1980年代より液相光重合(vat polymerization)、材料押出(material extrusion)など樹脂材料を対象とする手法が精力的に開発されてきた⁽²⁾。企業における設計データの3D-CAD化の進展と相まって試作用途に用いられ、設計プロセスの高速化に大きく寄与した。近年ではこれらの樹脂造形の汎用化、低価格化が進んで個人ユーザでも手軽に積層造形を楽しめるようになりつつある。

一方で、構造体に用いられる金属を対象とする積層造形としては粉末床溶融結合法(Powder Bed Fusion, PBF)、指向性エネルギー堆積法(Directed Energy Deposition, DED)、シート積層法(Sheet Lamination)などの手法が実用化されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。図1に金属を対象とするPBFとDEDの代表的な手法をまとめて示す。PBFでは粉末、DEDでは粉末または線材を原料として用いる。また、金属を溶融、または結合する手段としてはレーザ光、収束電子線、プラズマアークなどが用い

れる。各手法は対象とする材料や所望の部品形状などに応じて使い分けられる。積層造形そのものの加工精度は最も優れているPBFでも0.1 mm前後であり、精度を要する部品への適用には切削加工などによる後仕上げ工程が必要となる。この点を改善するために、加工機能を組み込んで積層造形と後仕上げを一つの装置で実施できる積層造形装置も実用化されている。

積層造形で用いられる金属材料はステンレスなどの鋼材やニッケル基合金、コバルト基合金、アルミニウム合金など多岐に渡る^{(1),(2),(4)-(9)}。レーザ光源とその制御技術の進展によって、表面粗さや寸法精度などの造形精度が向上するとともに造形材に内在する欠陥が大きく低減され、既存の合金については同じ材料の鍛造材と同等以上の材料特性を実現しつつある。このような造形品質の向上により、航空機エンジン部品やガスタービン部品、レース用自動車部品などへの金属積層造形部品、金型部品などへの適用が進められている。

また、既存の材料への積層造形法への適用のみならず、積層造形のプロセスの特徴を活かして新たな材料を開発する動きも進みつつある。特に収束した熱源を用いるPBFやDEDについては積層造形時の溶融部が0.1 mm前後と微小であり、熱源の走査速度は1000 mm/sオーダーと高速である。このような熱履歴は従来の鍛造部品や溶接構造体とは大きく異なるため、得られる材料特性の変化が期待される。このような特性を活かした高強度アルミニウム⁽⁵⁾、白金基金属ガラス⁽¹⁰⁾の造形事例が報告されている。

このような新たな材料への展開として、筆者らはハイエントロピー合金への適用を検討している。ハイエントロピー合金は5種以上の元素が同程度含まれる合金として定義され、過半を占める主要元素が存在しないことが特徴である⁽¹¹⁾⁻⁽¹⁵⁾。いくつかの合金系で強度や耐食性、耐磨耗性など構造材料として求められる特性に優れていることが報告され、ハイエントロピー合金特有の固溶相の

原稿受付 2018年3月28日

*1 日立金属(株) グローバル技術革新センター
〒360-8577 熊谷市三ヶ尻5200
E-mail: kousuke.kuwabara.om@hitachi-metals.com

*2 日立製作所 研究開発グループ
材料イノベーションセンタ

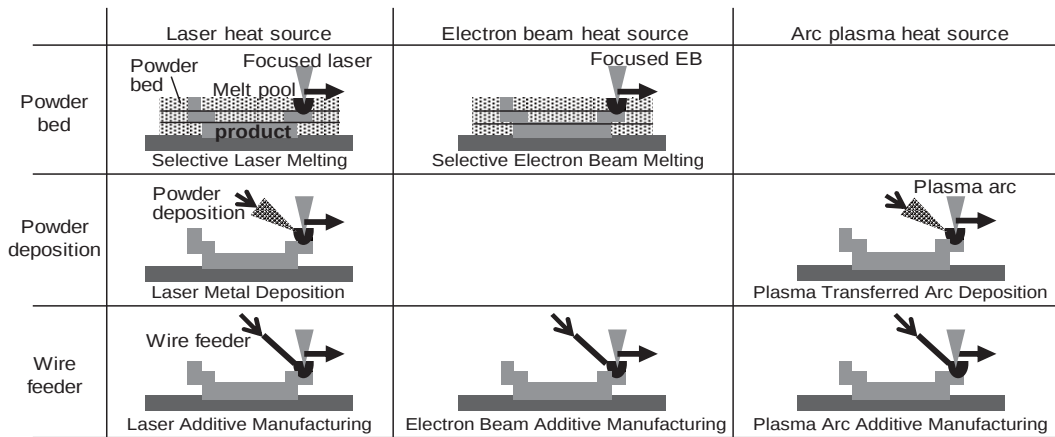


Fig. 1 Typical metal additive manufacturing methods (PB and DED).

生成条件や、機械特性の強化メカニズムの解明など様々なアプローチからの研究が進められている。

一方、ハイエントロピー合金の固溶組織は自由エネルギーのエントロピー項が大きくなる高温域で安定となる傾向があり、より低温で観察される相は製造条件によって異なることが指摘されている^{[14], [15]}。この組織の不安定性に対して筆者らは粉末を局所的に溶融し、急速に凝固する事で造形体の各所の熱履歴を制御できる金属積層造形プロセスを適用することとした。造形装置への入力パラメータで制御できる加熱特性と、大きな温度勾配による急速冷却は、ハイエントロピー合金の組織制御に有効と考えられる。また、一般に高強度材料は難加工材であり、求める部品に近いニアネットシェイプ形状を得られる金属積層造形は有利である。

本報ではPBFにより造形したハイエントロピー合金について報告する^{[16], [17]}。用いるハイエントロピー合金は強度と耐食性を兼ね持つ系としてこれまでに報告されている $\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}$ とした^{[18], [19]}。まず真空ガスアトマイズ法にて該当する組成の粉末原料を製造し、その粉末を用いてSLMにて試験片を造形し、その組織と機械特性、耐食性について評価した。

2. 実験方法

2.1 原料粉末

原料には目標組成の $\text{Co}_{1.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}$ の組成を持つ真空ガスアトマイズ粉を用いた。真空ガスアトマイズの坩堝中で所定組成の原料を溶融して坩堝底部の栓を開放することで出湯、高圧のアルゴンガスを吹き付けて微小液滴に分離した後に凝固させることで真球度の高い合金粉末を得た。得られた粉末を分級することにより、SLMに適する粒度分布の原料粉末を得た。

2.2 SLMプロセス

SLM造形装置としてEOS-M290 (EOS社) (図 2 (a))を用いた。造形時に用いる試験片形状は3次元造形用データ編集ソフトウェア (Materialise Magics) にて設計し、造形装置付属の入力ソフトウェアによりレーザ出

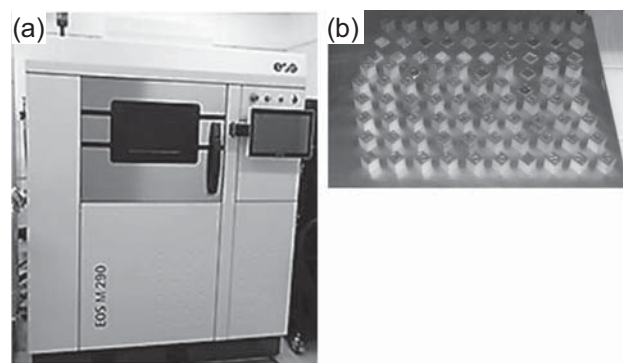


Fig. 2 (a) Selective Laser Melting facility (EOSM290)
(b) typical block-type specimens used in this study.

力、走査速度などの造形条件を付して装置に入力した。

造形に先立ち、造形装置に先に示した原料粉末と基板 (ベースプレート) をセットした。入力ファイルの条件に従って、353 Kの予熱温度に保持した基板の上に一定厚さの粉末を供給した。その後に造形物の各層の断面形状に従ってレーザを走査することで粉末層を局所的に溶融、凝固して造形部を得た。造形中の雰囲気は酸素濃度0.1%以下のアルゴンパージ雰囲気とした。新たな粉末層の供給とレーザ走査を繰り返すことで、角型試験片 ($10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$)、棒状試験片 ($15 \times 15 \times 65 \text{ mm}^3$) を得た。角型試験片の造形例を図 2 (b) に示す。また、比較材として同組成のアーク溶解材 ($50 \times 80 \times 18 \text{ mm}^3$) を作製した。

造形後の試験片には溶体化を目的とした熱処理 (溶体化処理) を施した。溶体化処理はその後の冷却方法に応じて、空冷処理と水冷処理には雰囲気炉を、窒素ガス冷却処理にはガス冷却設備を有する真空炉を用いた。溶体化処理温度は合金の熱力学計算 (Thermo-Calc, SSOL4 database) を元に単相組織が安定となる1393 Kに設定した。

2.3 評価方法

角型試験片の断面組織は光学顕微鏡、走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscopy, SEM)、走査透過電子

顕微鏡 (Scanning Transmission Electron Microscopy, STEM) にて評価した。組成分析には電子線プローブ微小分析法 (Electron Probe Micro Analysis, EPMA) と STEM に付帯したエネルギー分散型 X 線分析分光法 (Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy, EDS) を用いた。

造形物の機械特性は室温 (295 K) での引張試験 (ASTM E8 準拠) とシャルピ衝撃試験 (JIS Z2242 準拠) にて評価した。耐食性の評価には孔食試験 (JIS G 0577 準拠) と沸騰硫酸浸漬試験 (JIS G 0577 準拠) を用いた。孔食試験は白金対極、銀-塩化銀標準電極 (飽和 KCl 溶液中) を用いたマルチポテンシオスタット (東方技研, PS-08) により、高温塩水中 (3.5% NaCl, 353 K) において測定した。また、沸騰硫酸試験では 5% 硫酸に造形材から得た試験片 (10×10×3 mm) を浸漬し、沸騰雰囲気下で保持することで実施した。腐食量は浸漬後に精密天秤にて測定した重量減少量から算出した。

3. 結果と考察

3.1 原料粉の評価

真空ガスアトマイズ法で得られた原料粉末の外観と粒度分布を図 3 に示す。用いた原料粉末は球状であり、SLM における粉末供給で必要となる流動性を有していた。また、原料粉の粒径は $D_{10} = 19.5 \mu\text{m}$, $D_{50} = 35.5 \mu\text{m}$, $D_{90} = 53.8 \mu\text{m}$ であり、SLM に適する粒度範囲 (10 ~ 70 μm) に適合した。また、原料粉および造形体の組成は狙いとする $\text{Co}_{0.5}\text{CrFeNi}_{1.5}\text{Ti}_{0.5}\text{Mo}_{0.1}$ の組成と合致した (表 1)。

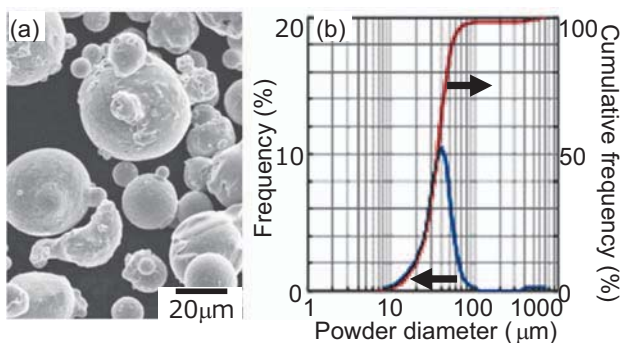


Fig. 3 Powder feedstock of high entropy alloy (a) SEM image of powder, (b) powder diameter distribution

Table 1 Chemical composition of powder feedstocks and SLM product obtained by ICP-OES

	(wt.%)	Co	Cr	Fe	Ni	Ti	Mo	O
	Ideal	27.8	16.4	17.6	27.7	7.5	3.0	
SLM	Powder	28.0	16.9	17.3	27.2	7.6	3.1	0.031
	As built	27.5	16.8	17.4	27.7	7.6	3.0	0.045

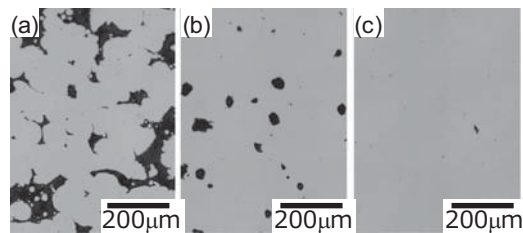


Fig. 4 Cross sections of SLM products, (a) products with lower energy density, (b) products with higher energy density, (c) optimized condition.

3.2 造形材の組織

SLM プロセスにおけるレーザー出力とレーザー走査速度を調整するときに得た造形材の断面組織を図 4 に示す。SLM プロセスにおいて、レーザー出力 P 、レーザー走査速度 v 、レーザーの走査間隔 a 、粉末層の一層厚さ d とすると、原料粉末に加わる熱量は次式で表されるエネルギー密度 E にて整理することができる⁽⁵⁾。

$$E = P / (v \times a \times d) \quad (1)$$

E が適正值より低い場合には図 4 (a) のように原料粉末間に未熔融部分が残る組織となる。一方、 E が適正值よりも大きい場合には気泡状の空隙が多数含まれる (図 4 (b))。エネルギー密度の適正化により欠陥は低減することができ、図 4 (c) のように断面の欠陥面積率が 0.1 % 以下となる造形条件を見出した。以後はこの適正な造形条件にて得た造形材の評価結果について示す。

各試験片のマイクロ組織を図 5 に示す⁽¹⁸⁾。何れも Ni の元素分布を示す。アーク溶解材では粗大な金属間化合物が生じたが (図 5 (a))、SLM 材ではマイクロレベルの相分離は見られなかった。STEM-EDS による元素マッピングでは、溶体化処理材において Ti と Ni が濃化した微小な析出物が確認された (図 5 (c)(d))。同じ領域から得られた制限視野回折図形では母相の FCC 起因の回折点を 2 分する位置に規則化反射が生じたことから、これらの析出物は FCC の規則化相である $\text{L}_{12} - \gamma'$ 相 (Ni_3Al 型) と考えられる。SLM 材 (熱処理なし) にも回折図形には同様の規則化反射が生じており、図 5 (b) のコントラストは微小な析出物に対応すると解釈される。析出物の大きさと溶体化処理後の冷却速度には相関があり、溶融状態から急冷された SLM 材、水冷材、空冷材と冷却速度が遅くなると析出物が大きくなる傾向が見られた。

3.3 造形材の機械特性

前述した SLM 材とその溶体化処理材、アーク溶解材について引張試験片を作製して室温 (295 K) にて引張試験を行った。代表的な試験片の公称ひずみ-応力曲線を図 6 に示す。アーク溶解材は低い応力で破断に至ったが、SLM 材では何れも 1000 MPa 以上の強度と 15 % 以上の破断伸びを示した。引張強度と前項で示した微小析出物の大きさには相関があり、析出物が大きく成長する空冷材、窒素ガス冷却材で引張強度は大きい値となった。一方、破断伸びについては水冷材の方が優れており、最

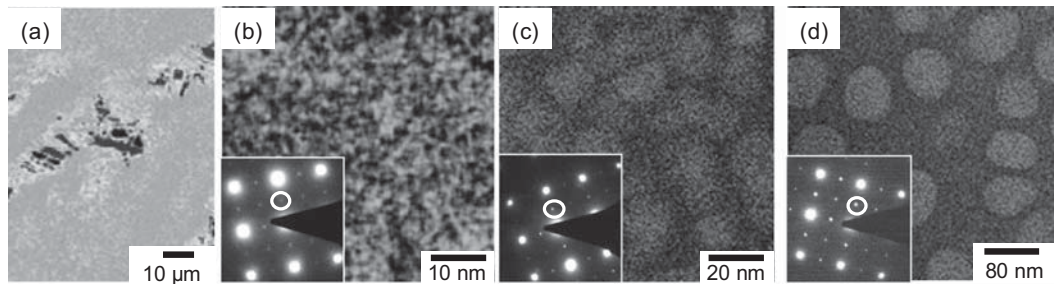


Fig. 5 Ni-elemental distribution in arc-melted and SLM specimens⁽⁸⁾. EPMA was used for (a), and the other figures were imaged by STEM-EDS. Electron-beam diffraction patterns were inserted in (b)(d). (a) arc-melted specimen, (b) SLM specimen (as-built) (c) SLM specimen (ST followed by water quenching), (d) SLM specimen (ST followed by air cooling).

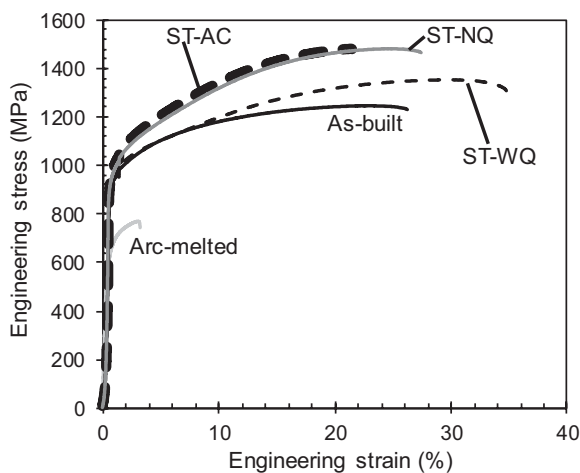


Fig. 6 Engineering stress-strain curves of each specimen, ST: solution heat-treatment, WQ: water quenching, AC: air-cooling, NQ: Nitrogen gas quenching.

大で35 %の伸びを示した。また、窒素ガス冷却材については空冷材と同程度の強度を有しつつ、破断伸びが20 %以上に改善されることが分かった。

造形方向に対する異方性を確認するため、試験片の長手方向をX方向（造形装置横方向）、Y方向（造形機奥行き方向）、Z方向（積層方向）の3方向に分けて造形した（各N = 3）。各試験片をベースプレートから切断して真空炉で1393 Kに昇温して溶体化した後に窒素ガスにて急冷した。この各方向に造形した試験片より得た引張特性を図7に示す。X, Y, Zの各方向に対して異方性は見られず、積層造形によって安定した機械的特性が得られることを確認した。

造形材の室温（295 K）でのシャルピー衝撃値を図8に示す。いずれの試験片においても30 J/cm²以上の衝撃値が得られた。衝撃値は図6より求められる引張伸びと相関があり、伸びの大きい熱処理条件でより高い衝撃値が得られる傾向が見られた。

3.4 造形材の耐食性

開発材は腐食性の高い雰囲気を用いることを想定していることから、高腐食環境下に用いる材料の代表的指標として、高温塩水（353 K, 3.5% NaCl）中の分極曲線と5 %沸騰硫酸中の重量減少を評価した。図9に高温塩

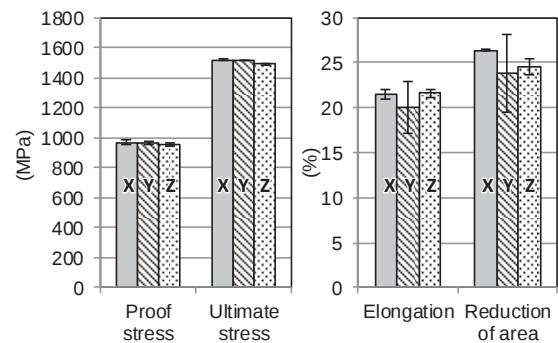


Fig. 7 Tensile properties of ST-NQ specimens along X, Y, Z axis on the building plate;

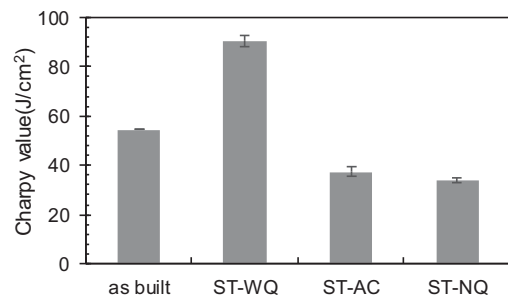


Fig. 8 Charpy values of SLM products

水中で得た分極曲線を示す。試料電位の増加時に腐食電流密度が急増する電位で表される孔食電位は何れも0.80 V vs.Ag/AgCl以上の高い値となった。今回作成した造形材は全般に高い孔食耐性を有していると考えられる。

また、沸騰硫酸中の重量減少速度（図10）については、溶体化処理材の重量減少速度はSLM材よりも低減した。腐食起点は何れも結晶粒界であった。ミクロ組織評価では結晶粒界近辺に組織変化は見られなかったが、粒界偏析などにより周囲よりも優先して腐食する領域が生じたものと考えられる。SLM材で重量減少が大きくなる現象と合わせ、今後より詳細に腐食の過程を評価し、製造プロセスや合金組成の改善に取り組む。

本報のハイレントロピー合金（Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}Mo_{0.1}）の造形材の物性を表2に纏める。溶体化処理材においては高強度耐食部品に用いられるAlloy718よりも強度と耐食性に優れていることが確認された。既に積層造形の特

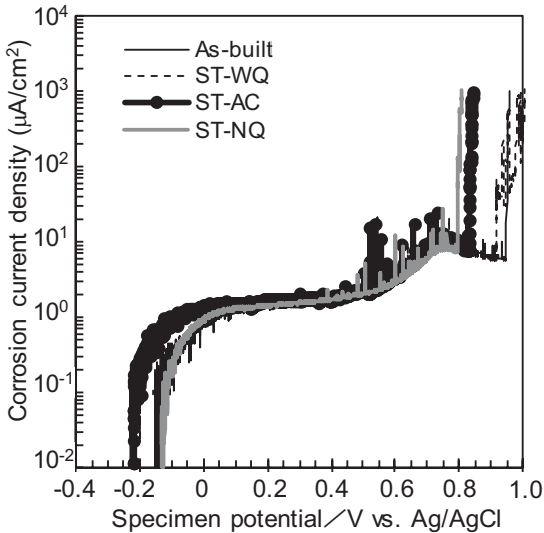


Fig. 9 Polarization curves of SLM product in 3.5 % NaCl solution at 353K. Ag/AgCl (in saturated KCl solution) was used as the reference electrode.

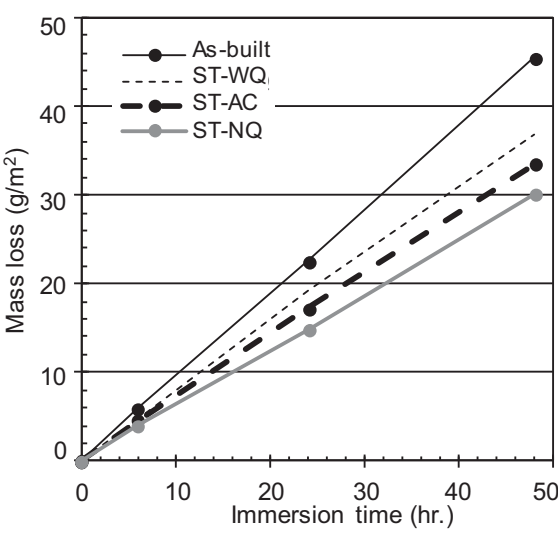


Fig. 10 Mass loss curves of SLM products obtained by the immersion tests in boiling 5% sulfuric acid.

Table 2 Typical properties of high entropy alloys obtained in this study

		Co _{1.5} CrFeNi _{1.5} Ti _{0.5} Mo _{0.1}					Alloy718
		Arc-melted	SLM				roll
		-	Solution heat-treated* ¹			Aging treated* ²	
			Water quench	Air cooling	Nitrogen quench		
Tensile properties	Proof stress (MPa)	665	888	888	939	961	1169
	Tensile stress (MPa)	775	1225	1345	1471	1508	1321
	Tensile elongation (%)	3.0	22	29	17	21	27
Charpy value (J/cm ²) * ³		-	54.5	90.7	37.3	33.7	90
Pitting potential V _{C100} (V vs. Ag/AgCl) * ⁴		-	0.87	0.94	0.82	0.79	0.62
Weight loss rate in 5% boiling H ₂ SO ₄ (g/m ² · h) * ⁵		-	0.95	0.92	0.70	0.63	1.16

*¹ 1393K *² 1339K -10hr solution heat treatment and 922K -8 hr. aging treatment.
*³ JIS Z 2242 -V notch *⁴ Obtained in 3.5% NaCl at 353K, *⁵ Obtained after 48hr. immersion.

性を活かした部品試作も示されており、早期の実用化が可能と期待される²⁰⁾。ハイエントロピー合金特有の相安定性や、溶体化処理後に生じる微小析出物の性状で機械特性を調整できる点など組織と特性の関連についても興味深い点が多く、今後も評価を継続する。

4. 結言

新たな製造技術として注目されている金属積層造形法を適用し、ハイエントロピー合金 (Co_{1.5}CrFeNi_{1.5}Ti_{0.5}Mo_{0.1}) を造形した。レーザ積層造形法におけるプロセス条件を見出し、特に熱処理材においてナノメートルオーダーの微小析出物が均一に生じることを確認した。そして、熱処理条件と機械的特性、耐食性との関係性を評価した。得られた造形物は高い強度と延性、耐食性を有しており、既存のニッケル基合金よりも過酷な環境で用いることがで

きる可能性がある。また、本材料の特性を支配している微小領域での相分離挙動や、ハイエントロピー合金中の微細組織と特性との相関については詳細な検討を継続する予定である。

謝辞

本研究で実施したミクロ組織評価は文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業のご支援を頂いて北海道大学の渡辺誠一教授のご協力にて実施しました。本研究にご協力頂いた関係者に謝意を表します。

参考文献

(1) Bandyopadhyay A. and Bose S. Additive Manufacturing, (2015), pp. 97-142 CRC PRESS.
(2) Yang L., Hsu K., Baughman B., Godfrey D., Medina

- F., Menon M. and Wiener S., Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, (2017) pp. 1-44, Springer International Publishing.
- (3) Additive manufacturing - General principles - Terminology, ISO/ASTM 52900 (2015).
- (4) 小泉雄一郎, 千葉晶彦, 野村直之, 中野貴由, 金属系材料の3次元積層造形技術の基礎, まてりあ, 56 (12) (2017), pp. 686-690.
- (5) 中本貴之, 木村貴広, 四宮徳章, 金属粉末積層造形法を活用した高性能部材の開発, まてりあ, 56 (12) (2017), pp. 704-707.
- (6) Körner C., Helmer H., Bauereiß A. and Singer R.F., Tailoring the grain structure of IN718 during selective electron beam melting, MATEC Web Conf. 14 (2014) pp. 08001.
- (7) Dehoff R. R., Kirka M. M., Sames W. J., Bilheux H., Tremsin A. S., Lowe L. E. and Babu S. S., Site-specific control of crystallographic grain orientation through electron beam additive manufacturing, Mater. Sci. Technol. 31 (8) (2015) pp. 931-938.
- (8) Sun S-H, Koizumi Y., Kurosu S., Li Y-P. and Chiba A., Phase and grain size inhomogeneity and their influences on creep behavior of Co-Cr-Mo alloy additive manufactured by electron beam melting, Acta Mater. 86 (2015) pp. 305-318.
- (9) Sun S-H, Koizumi Y., Kurosu S., Li Y-P., Matsumoto H. and Chiba A., Build-direction dependence of microstructure and high-temperature tensile property of Co-Cr-Mo alloy fabricated by electron-beam melting (EBM), Acta Mater. 64 (2014) pp. 154-168.
- (10) TANAKAホールディング株式会社プレスリリース <<http://pro.tanaka.co.jp/topics/fileout.html?f=130>> (参照日 2018年3月19日).
- (11) Yeh J. W., Chen S. K., Lin S. J., Gan J. Y., Chin T. S., Shun T. T., Tsau C. H. and Chang S. Y., Nanostructured High-Entropy Alloys with Multiple Principal Elements: Novel Alloy Design Concepts and Outcomes, Adv. Eng. Mater. 6 (2004) pp. 299-303.
- (12) Cantor B., Chang I.T. H., Knight P. and Vincent A. J. B., Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, Mater. Sci. Eng. A 375-377 (2004), pp. 213-218.
- (13) Zhang Y., Zuo T. T., Tang Z, Gao M. C., Dahmen K. A., Liaw P. K. and Lu Z. P., Microstructures and properties of high-entropy alloys, Prog. in Mater. Sci. 61 (2013), pp. 1-93.
- (14) Tian F., Varga L. K. and Vitos L., Theoretical design of single phase high-entropy alloys (2017), pp. 1-16, LAP Lambert Academic Publishing.
- (15) Gao M. C., Yeh J-W., Liaw P. K. and Zhang Y., High-Entropy Alloys Fundamentals and Applications (2016) pp. 181-265, Springer International Publishing Switzerland.
- (16) Fujieda T., Shiratori H., Kuwabara K., Kato T., Yamanaka K., Koizumi Y. and Chiba A., First demonstration of promising selective electron beam melting method for utilizing high-entropy alloys as engineering materials, Mater. Lett. 159 (2015) pp. 12-15.
- (17) Shiratori H., Fujieda T., Yamanaka K., Koizumi Y., Kuwabara K., Kato T. and Chiba A., Relationship between the microstructure and mechanical properties of an equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy fabricated by selective electron beam melting, Mater. Sci. Eng. A656 (2016) pp. 39-46.
- (18) Fujieda T., Shiratori H., Kuwabara K., Hirota M., Kato T., Yamanaka K., Koizumi Y., Chiba A. and Watanabe S. CoCrFeNiTi-based high-entropy alloy with superior tensile strength and corrosion resistance achieved by a combination of additive manufacturing using selective electron beam melting and solution treatment, Mater. Lett. 189 (2017) pp. 148-151.
- (19) Chou Y. L., Yeh J. W. and Shih H. C. The effect of molybdenum on the corrosion behaviour of the high-entropy alloys Co1.5CrFeNi1.5Ti0.5Mox in aqueous environments, Corr. Sci. 52 (2010) pp. 2571-2581.
- (20) 株式会社日立製作所ニュースリリース <<http://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2016/02/0215.html>>, (参照日 2018年3月19日).

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

金属積層材料のガスタービン高温部材適用における課題と展望

Research Issue and Prospective of Additive Manufacturing Materials Application to Gas Turbine Hot Section Parts



今野 晋也*¹
IMANO Shinya



佐藤 順*¹
SATO Jun



王 玉艇*¹
WANG Yuting



太田 敦夫*¹
OTA Atsuo

キーワード：ガスタービン, ジェットエンジン, 粉末, ワイヤ, AM造形, 3Dプリンタ

Key Words : Gas Turbine, Jet Engine, Powder, Wire, Additive Manufacturing, 3D Printing

1. 緒言

Additive Manufacturing (以下, AMと称する) いわゆる3Dプリンターを用いた3次元積層造形が金属材料部材の製造プロセスにも導入され, 航空機部品, 競技用自動車部品や各種プロトタイプ部品などに適用が広がっている。特に金属粉末を用いたパウダーベッドタイプのAM造形機が注目されているが, 金属ワイヤを用いた造形機にも注目が集まりつつある。金属粉末を用いたパウダーベッドタイプのAM造形は, 複雑な構造の製作が可能であり, これまで溶接等により複数の部材で構成されていた部品を一体で成形することができる。また, 精密 casting では造形できなかった複雑な冷却構造の造形が可能となることから, 冷却性能の向上に寄与することが期待されている。金属ワイヤを用いた造形では, 造形精度は金属粉末を用いたパウダーベッドタイプに劣るものの, 造形速度が速いことから, 大型部材の積層造形に適しており, 従来の大型の casting 部材との置き換えが期待される。

しかし, 粉末を用いた積層造形では酸素, 窒素の混入が避けられないことなどから, 高温強度に優れた材料の適用が困難であるという問題がある。ワイヤを用いた積層造形では, 粉末材で見られるコンタミの影響は避けられるものの, 高強度材はワイヤにできないため, 粉末材と同様に高強度材を適用することが困難であるという問題がある。本報では, これらの積層材に関わる課題と課題の解決に向けた展望について述べる。表1に本文で言及する耐熱材の化学成分を示す。

Table 1 Chemical composition of the alloys as mentioned

	Alloy 718	Alloy 939	Alloy 738LC	Alloy 263	Alloy 740	USC 800	COW AL	Alloy 720Li	Alloy 247
C	0.04	0.15		0.06	0.03	0.04	0.01	0.02	0.16
Si			0.09	0.4	0.5				
Ni	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	Bal.	47.5	Bal.	Bal.
Cr	19	19	16	20	25	17	15	16.2	8.2
W		1.6	2.5			2	16	1.3	10
Mo	3		1.7	5.8	0.5	6		3	0.6
Fe	19			0.7	0.7				
Hf									1.5
Co			8.5	20	20	23	Bal.	14.6	10
Al	0.5	1.9	3.5	0.45	0.9	4	3.7	2.5	5.5
B		0.01	0.01			0.012		0.01	0.015
Ta		1.4	1.7						3
Nb	5.1	1	2		2				
Ti	0.9	3.7	3.5	2.15	1.8			5	1
Zr		0.1	0.05						0.05

[wt%]

2. 粉末材料

2.1 粉末製造における課題

レーザおよび電子ビームを用いたパウダベッド方式, 粉末を用いたLMD (Laser Metal Deposition) 方式の造形に用いる粉末は主にガスアトマイズ法が用いられる。Ti合金などの一部の用途ではプラズマアトマイズが用いられる場合もあり, その他の製造法に関する研究も進められているが, コストや量産性の観点から産業用ガスタービンに適用されるには時間を要すると考える。

パウダベッド方式に用いることのできる粉末の粒径範囲が狭く, また, 従来の溶射やHIP用粉末と比較すると細粒となることから, 従来のガスアトマイズ装置で製造した粉末では1/3程度, 場合によっては1/5以下の粉末しか使用できない場合もあることからコスト高となることが問題である。その他, コスト高となる要因として, ガスアトマイザおよび分級装置等の清掃にかかる費用が挙

原稿受付 2018年4月18日

* 1 三菱日立パワーシステムズ(株) ターボマシナリー本部
AM技術推進室
〒317-0073 日立市幸町3-1-1

げられる。特に溶解する合金成分を変える場合、コンタミ回避のため徹底した清掃が必要となる。

また、高真空中で溶解を行っても、ガス噴霧時には不活性ガスが導入され、溶湯が大量の不活性ガスと接触するため高純度の不活性ガスを用いても酸素および窒素の混入は避けられない。このため、ガスアトマイズで製造される粉末の酸素や窒素の含有量は、真空溶解製造される高強度Ni基合金（一般的には20ppm以下）よりも多く、100ppm以上になることが一般的である。また、粉末を分級、ビン詰め、AM造形機に挿入する過程で大気と接触するリスクもある。

三菱日立パワーシステムズ株式会社（以下、MHPS）では、小型のガスアトマイザ（溶解重量1～10kgクラス）により、AM用粉末を作製し、材料開発に利用するとともにAM用粉末製造のノウハウを蓄積している。図1は粉末の製造研究に用いているガスアトマイザの外観および粉末AM材開発フローである。

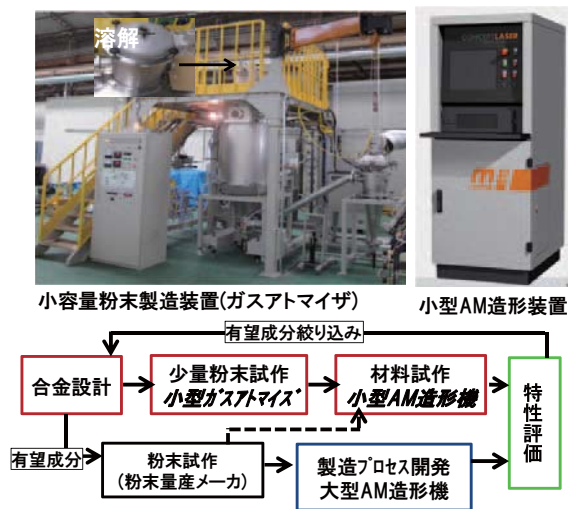


Fig. 1 Gas Atomizer in house and flowchart of alloy development for AM

図2にMHPSで作成した粉末のSEM像を示す。粉末形状はほぼ球状である。大きな粉末と小さな粉末が結合するサテライト粒も少ない。ガスアトマイズ条件が適切でないと、粉末同士の結合、噴霧チャンバの壁などとの接触により粉末形状が乱れてしまう。粉末の形状は粉末の流動性にも影響を及ぼすだけでなくガスアトマイズ条件の良し悪しの判断基準の一つと考えている。

当該ガスアトマイザを用いた場合の酸素の含有量は100ppm前後（1kg溶解での実績）である。アルゴンガスの純度、脱酸材の利用、原料素材の投入方法等を検討し、酸素、窒素の含有量を極力下げることが試みているものの、酸素含有量を20ppm以下に下げることが現実的でないと考えている。このため、酸素が混入する問題については、材料開発により解決する必要があると考えている。

図3に作製した粉末の粒度分布の一例を示す。ガス噴霧ノズルはSLM法に用いる粉末の製造用に開発したものをを用いた。溶解重量は約8kgであり、この条件ではSLM法で用いる粉末を約4kg採取できた。

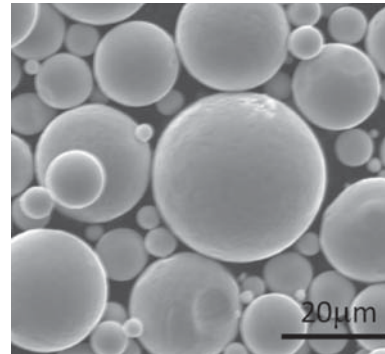


Fig. 2 SEM micrograph showing house made gas atomized powder (Alloy equal to alloy718)

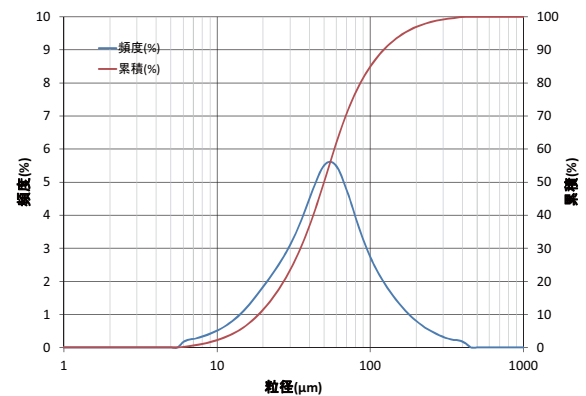


Fig. 3 Powder size distribution plot for house made gas atomized powder (Alloy equal to alloy718)

粉末製造における課題として粉末の低コスト化を挙げたが、自社内で粉末製造技術を検討してきた経験から、コスト高となる要因の収率の問題については噴霧条件やノズル形状、噴霧チャンバ構造等の最適化により、さらに収率は上げられ高強度Ni基鍛造材や精密鑄造の歩留りと同等以上にできると考えている。

清掃コストについては、AM造形機でも問題であるが、近年は、「One Machine One Material」、つまり、材料ごとに専用の造形機を用いることで、清掃コストやコンタミ混入のリスクを下げる方法が一般化しつつある。ガスアトマイザにおいても、「One Gas Atomizer One Material」という生産体制が取れば、清掃コストの問題は大きく改善され则认为。そのためには、大型機による大量生産だけでなく、それぞれの材料の生産規模に合わせて、小型、中型のガスアトマイザも複数取りそろえた生産体制が必要であると考えている。

2.2 粉末材料の材料開発における課題

高温部品には、 γ' 相 ($\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$, L12構造) により析出強化された高強度Ni基合金が用いられている。一般的には、 γ' 相の析出量を増やすことにより強度が向上するため、特に高温、高応力に曝されるタービン静翼材、タービン動翼材では γ' 相の構成元素であるAlおよびTiが多量に添加されている。これらの元素は溶解プロセス中に酸化しやすいため、大気溶解では多量に添加できなかったが、溶解技術の進歩により、高真空溶解や真空アーク再溶解法等が可能となり、酸素や窒素の含有量を下げることが出来るようになったため、多量添加が可能となり、 γ' 相の析出量が30%、現在は50%を超える高強度Ni基合金が一般的となった。これらの合金において本来の強度を得るため、酸素、窒素の含有量の上限規定を20ppm程度とするのが一般的であり、実際は10ppm以下の場合が多い。前述の通りガスアトマイズを用いた粉末製造ではこれらの規定は達成出来ない。AM造形用の粉末を選定、開発する上では、このことを考慮する必要がある。

また、パウダベッド式のAM造形では、レーザ方式、電子ビーム方式、いずれも急冷凝固となり、精密鑄造材と比較すると金属組織が微細となる。このため、結晶粒が粗大な精密鑄造材と比較すると高いクリープ強度を得る上で不利な組織となる。また、AM造形では、急冷凝固に伴い大きなひずみが発生し、これが残留するという問題がある。

筆者らは、上記の問題点を解決するため、図1のフローにより、従来の高強度Ni基合金とは異なる合金設計思想により、化学成分と熱処理条件を最適化する試みを行っている。また、複雑な冷却構造を用いることによる冷却性能の向上を狙っていることから、造形にはSLM方式のみを用いている。

タービン静翼用の材料では、AlおよびTiの添加量を最小限にしながらも強度を保てる化学成分とした。急冷凝固特有の微細組織を熱処理により、精密鑄造材と同等な組織にする試みもなされているが、筆者らは急冷凝固特有の組織を活用することで、タービン静翼の使用環境におけるクリープ強度を高めることを可能とした。その結果、クリープ耐用温度 (59MPaの破断時間が 10^5 時間となる温度) はタービン静翼に用いられるAlloy939相当材の精密鑄造材を上回り、クリープ破断絞りも50%以上と高い延性を得た。また、低サイクル疲労寿命 (LCF) も大きく向上することが分かっている。Alloy939相当材 (精密鑄造材) と比較して引張強さが向上し、さらに延性も向上している。図4(a)は開発材 (以下MHA3300と称する) の室温における引張強さと破断絞りの関係を示す。図4(b)にMHA3300のクリープ耐用温度、低サイクル疲労寿命の評価結果を示す。図5にMHA3300によりSLM方式を用いて試作したタービン静翼の縮小モデルを示す。SLM方式の利点を生かし内部構造も複雑化す

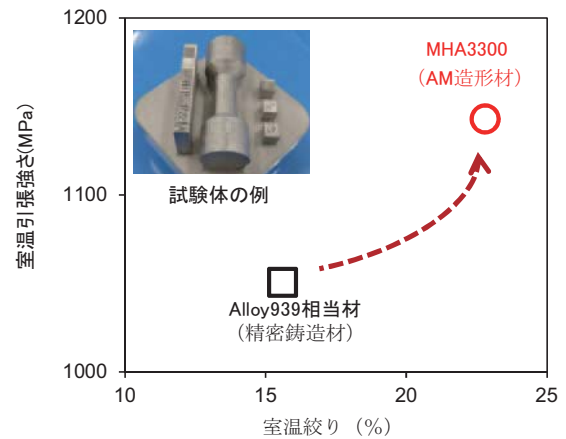


Fig. 4 (a) Room temperature tensile strength and shrinkage of MHA3300 (by AM) and Alloy (by casting) equal to Alloy939

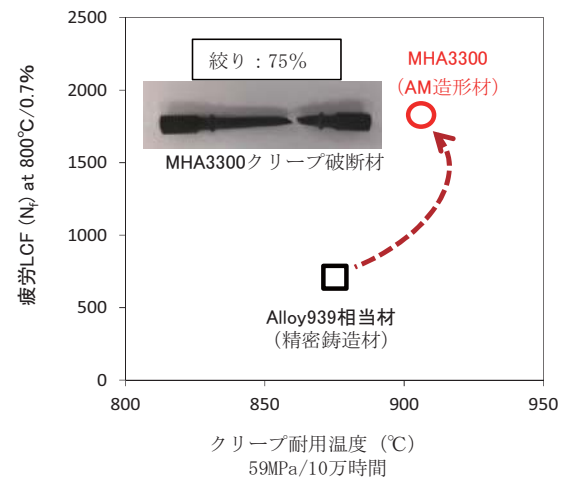


Fig. 4 (b) Heat resistant temperature and Low cycle fatigue resistance (800°C) at room temperature of MHA3300 (by AM) and Alloy (by casting) equal to Alloy939



Fig. 5 MHA3300 Trial part (reduction model of gas turbine nozzle)

ることが出来た。また、表面粗さも精密鑄造材と同等以上であり、MHA3300の造形性が良好であることも確認している。

開発材の疲労強度や延性が優れているのは急冷凝固組織を生かした細粒結晶粒によるものであるが、一方でタービン動翼に作用するレベルの高応力領域のクリープ

強度は、従来のAlloy939相当材（精密鑄造材）よりも低下する。このため、タービン動翼など高応力に曝される部品に適用範囲を広げるためには異なる思想での開発が必要である。現在、戦略的創造研究推進事業の先端的低炭素化技術開発（ALCA）「次世代ガスタービン高温部品への適用を目指した革新的耐熱超合金粉末に関する研究」において、タービン動翼材レベルの強度を有するAM材の基礎研究がおこなわれている。MHPSはこの研究の一部を受託し、AM材に適した新しい合金系の探索と合金設計を実施している。図6は、開発のベース合金としているAlloy738LCについて、粉末を用いたSLM方式により試験片を作製した試験片の外観写真と金属組織を示す。クラックや顕著なボイドは観察されず、充填率は99%以上であった。当該材はAlおよびTiが多く高温でも γ' 相が析出するため、一般的には加熱を行わないと溶接が困難な材料であるが、入熱量の小さなSLM方式でも、施工条件を最適化することで、加熱無しで施工できることが確認できた。



Fig. 6 Test pieces of alloy738LC and optical micrograph of test piece cross section

図7に当該材のクリープ試験結果の例を示す。標準熱処理材では、1121℃で熱処理をおこなっているが、結晶粒は極めて微細であり、施工時に導入されたひずみが残留していることがEBSP分析により確認された。標準熱処理材では、クリープ延性は高いもののクリープ破断時間はAlloy738LC精密鑄造材（この条件における予想破断時間は約400h⁽¹⁾）と比較して1/10程度であった。粗大化材は溶体化温度を1250℃として、結晶粒を粗大化させたものである。粗大化材のクリープひずみ速度は、標準熱処理材と比較して大きく低下しているが、延性が大きく低下し、クリープ破断時間の改善は見られなかった。図8に、標準熱処理材と粗大化材のSEM組織を示す。精密鑄造材では、立方体形状の1次 γ' 相が規則正しく配列されることが知られているが、標準熱処理材では1次 γ' 相の形状が丸みを帯びており、不規則に配置されている。粗大化材では、立方体形状の γ' 相が規則性をもって析出しており、精密鑄造材の組織に近くなっている。クリープ速度が大きく改善した理由として、結晶粒径が大きくなったことに加えて、ひずみが除去されたことや、これにより γ' 相の析出形態が改善されたことも影響していると考えられる。

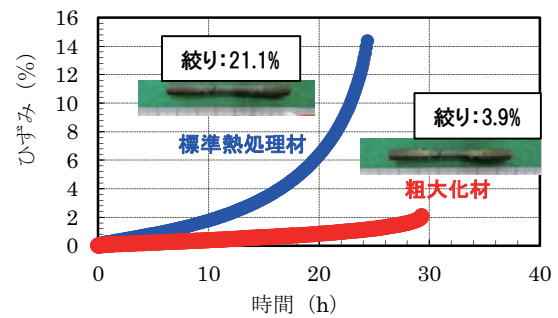


Fig. 7 Creep curves of alloy 738LC by AM (980 °C, 98MPa)

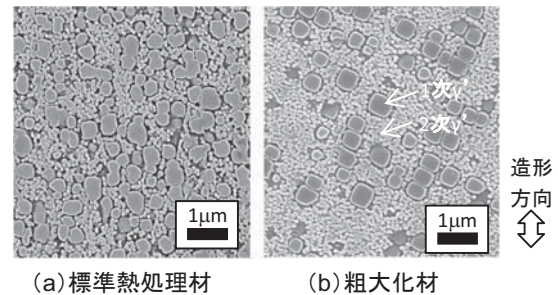


Fig. 8 SEM micrograph showing micro-structure of alloy 738LC AM by standard and modified (coarsen) heat-treatment

粗大化材で延性が大きく低下した原因については、次のように考察する。粉末プロセスによるAM材では、前述のとおり100ppmを超える酸素が混入することが不可避である。酸素が混入することによる影響について十分に解明されている段階ではないが、筆者らは微細に分散したAlを主体とした酸化物が、施工ひずみの緩和、再結晶や粗大化を妨げ、クリープ破断時間および破断延性を低下させる要因になっていると考えており、このような仮説に基づきAlloy738LC材の成分改良、熱処理改良を進めている。図9に、Alloy 738LCおよび改良材（SLM方式によるAM施工材）のクリープ試験結果を示す。改良材のクリープ破断時間は、Alloy738LC（AM材）の10倍程度となっており、クリープ破断時間だけを見ればAlloy738LCの精密鑄造材の強度レベルに近づいている。しかし、クリープ破断延性および組織安定性が十分でないという問題があり、これらの問題点の原因解明と対策を進めている。

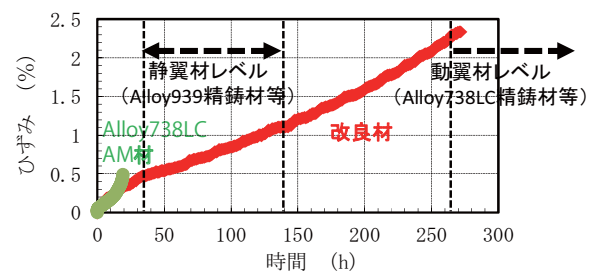


Fig. 9 Creep curves of modified alloy738LC and alloy738LC (780 °C, 490MPa)

3. ワイヤ材料

3.1 ワイヤ材の製造における課題

ワイヤ材料は粉末材料と異なり、製造時の酸素や窒素の混入を容易に避けられることから、AlやTiを多く含む高強度Ni基合金であっても、粉末材で問題となる強度低下の問題は発生しない。しかし、AlやTiを多く含む高強度Ni基合金は一般的に鍛造性、冷間加工性が悪いためワイヤ化するのが困難である。

Ni基合金においてAlやTiの添加量が多くなると強化相である γ' 相が増加し強度が向上する一方で γ' 相が高温まで安定となり、高温での鍛造性を悪化させる。図10は、 γ' 相強化型合金であるAlloy263、Alloy740およびUSC800について、温度と γ' 相の安定析出量の関係を計算した結果である。Alloy263、では使用温度である700～800℃において10%程度の γ' 相が析出するが、950℃以上では γ' 相が固溶する。このため、 γ' 相の固溶温度以上では熱間鍛造が容易であり、 γ' 相の固溶温度以上から急冷して γ' 相の析出を抑制することで、室温での加工も容易となる。しかし、使用時の強度を上げるために、 γ' 相の安定性を上げて、700～800℃における γ' 相を増やすと、 γ' 相の固溶温度が上がることで鍛造できる温度が狭くなり、鍛造性が悪化する。また、 γ' 相の固溶温度以上から急冷しても γ' 相が安定なため冷却中に γ' 相の析出を抑制することができず、室温で γ' 相が析出した状態となり、冷間加工性が悪化する。以上の理由からNi基合金では、高強度材ほどワイヤの製造が困難となる。筆者らは γ' 相の固溶温度が1000℃を超える熱間鍛造および冷間加工が困難になると考えている。

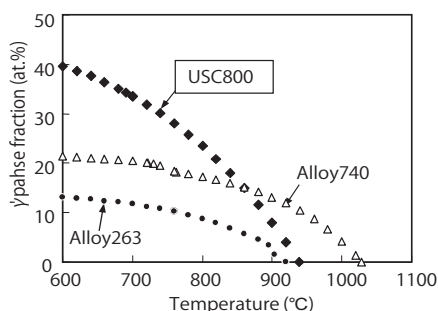


Fig. 10 Temperature influence on gamma prime precipitation of alloy USC800

MHPSで開発したUSC800⁽¹⁾は、通常のNi基合金とは異なる合金系 (Nb, Ti, Taを含まない) とすることで700～800℃で約30%の γ' 相が析出するにも関わらず、 γ' 相の固溶温度がAlloy263と同等レベルとしている。このことから、高強度であるにも関わらず熱間加工性と冷間加工性が良好であり、熱間加工と冷間加工により容易にワイヤを製造することができる。同様な思想により東北大学および大同特殊鋼らにより開発されたCOWAL合金⁽³⁾についても、USC800と同様にAM造形に用いる高強度ワイヤとして期待できる。

前述の通り、 γ' 相の固溶温度が高い合金は鍛造が困難であるが、1100℃を超える温度では γ' 相による析出強化機能が弱くなり、また、整合に析出していた γ' 相が鍛造中に非整合化することで、強化機能がさらに弱くなる。この特性を利用し γ' 相の固溶温度が1100℃を超えるAlloy720Liなどの高強度合金が鍛造材として航空機エンジンのディスク等に用いられている。これらの合金は、高温鍛造は可能であるが、鍛造温度からの冷却中に γ' 相が整合かつ微細に析出してしまうため、一般的には冷間加工は困難とされている。そのため、AM造形に用いるワイヤへの適用も難しい。筆者らは、これらの合金について、鍛造後の冷却速度を制御することで冷却中に整合 γ' 相が析出することを抑制し室温での冷間加工を可能とするプロセスを開発した (MHプロセス⁽²⁾⁽⁴⁾)。図11にこのプロセスの原理の模式図を示す。

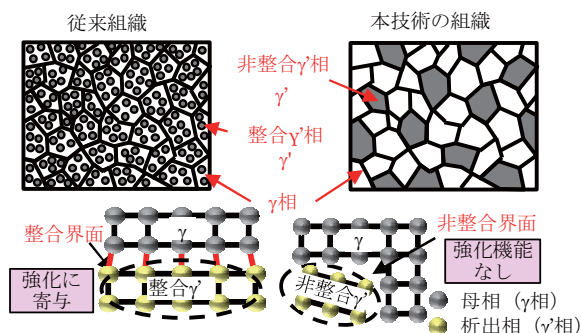


Fig. 11 Brief mechanism of MH process

このプロセスを用いることで、Alloy738LCやAlloy247等の精密鋳造タービン動翼材レベルの材料についてもワイヤ化が可能である。図12に当該プロセスを用いて製作したワイヤおよび冷間加工前の鍛造素材の例を示す。

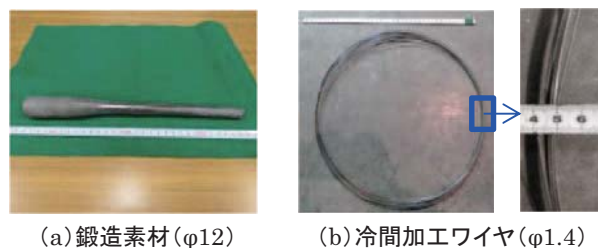


Fig. 12 High strength wire of modified alloy738LC

これまでは、高強度Ni基合金のワイヤ化は困難と考えられていたが、最新の知見を用いれば上記のとおり、動翼材レベルの高強度Ni基合金であってもワイヤ化が可能となっており、ワイヤ方式のAM造形に適用されることが期待できる。

3.2 ワイヤ方式AM造形への期待と課題

粉末方式のAM造形と比較すると、ワイヤ方式のAM造形に関する研究報告例は少なく、このことから注目度が低いと考えられる。AM造形用のワイヤ材の材料開

発事例は見当たらず、従来の溶接用汎用材が用いられている。ワイヤ方式のAM造形を用いた場合のメリットの一つは粉末方式で問題となる酸素や窒素混入の影響を避けやすいため、粉末方式では使用が難しい高強度Ni基合金が適用できるポテンシャルがあることである。粉末方式では、Alloy939よりも高温強度の高い高強度Ni基合金の適用が課題であり、多くの研究開発が行われており、今後さらに高強度な耐熱材の適用が期待されている。一方、これまでの知見では、Alloy939レベル以上の材料はワイヤ化が困難であることから、ワイヤ方式のAM造形のメリットを生かすことが出来なかった。しかし、前節で述べた通り、最新の知見を用いればAlloy939レベルの静翼だけでなくAlloy247レベルの動翼材のワイヤ化が可能となっている。動翼材レベルの高強度ワイヤによるAM造形を実現するためには、施工性（いわゆる溶接性）に課題がある。ワイヤを用いたAM造形は、粉末方式のAM造形と比較して施工速度が速いというメリットがある反面、ワイヤを溶かすための入熱量が大きくなり、高強度Ni基合金では溶接割れが発生しやすくなる。しかし、国内でも注目を浴びつつある電子ビームを用いたワイヤ方式のAM造形機（図13参照）では、施工中にワークを局所的に加熱することが可能であることからタービン動翼材クラスのワイヤ材も施工できる可能性がある。



Fig. 13 Wire electron beam additive manufacturing system ⁽⁴⁾

造形精度については、粉末を用いたSLM方式に及ばないものの、切削加工や研削加工による仕上げ加工が許容される大型部材について適用範囲が広がることが期待される。

4. 纏め

本稿では、金属積層材料のガスタービン高温部材適用における課題と展望について述べた。SLM法を用いたタービン静翼の実用化等、金属積層材料の今後の適用拡大に期待したい。また、高強度ワイヤを用いたAM造形の今後の展開にも期待している。

謝辞

本研究成果の一部は、内閣府SIPプログラム「革新的構造材料」、先端的低炭素化技術開発（ALCA）および経済産業省NEDO「戦略的省エネルギー技術革新プログラム」によるものである。ここに謝意を表する。

参考文献

- (1) “Alloy IN-738 Technical Data”, The International Nickel Company, Inc., 15Cl-81 5789 (1981).
- (2) 今野晋也, 佐藤順, 鴨志田宏紀, 芝山隆史, 太田敦夫, 火力プラントの効率向上に寄与する高強度鍛造Ni基合金の合金設計及び革新的製造技術, 三菱重工技法, 52 (2) (015), pp. 30-35.
- (3) 横田恭平, 大崎元嗣, 小柳禎彦, 高林宏之, 超高耐熱合金COWAROY®の材料特性, 電気製鋼, 87 (2) (2016) pp. 103-106.
- (4) A. Ota and S. Imano, Microstructure control using a high amount of incoherent gamma prime phase to improve hot and cold workability of high strength Ni-base forged superalloys, Proceedings of the 1st International Conference on Advanced High-Temperature Materials Technology for Sustainable and Reliable Power Engineering (123HiMAT-2015) (2015), pp. 316-319.
- (4) <http://www.sciaky.com>

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

産業用ガスタービンにおける金属積層造形技術の適用事例

Application of Additive Manufacturing to Industrial Gas Turbine Engine Components



野村 嘉道^{*1} 中山 健太郎^{*2} 堀川 敦史^{*1} 藤光 利茂^{*1}

NOMURA Yoshimichi NAKAYAMA Kentaro HORIKAWA Atsushi FUJIMITSU Kazushige

キーワード：ガスタービン，金属積層造形，3Dプリンタ，圧縮機，燃焼器

Key Words：Gas Turbine, Additive Manufacturing (AM), 3D Printer, Compressor, Combustor

1. 緒言

産業用ガスタービンの部品は，自動車や家電製品といった他分野の部品に比べ，一般的には，少量生産，高い品質要求，ステンレス鋼やチタン合金，Ni基耐熱合金など多様材料を使用，複雑形状，中空構造などの特徴がある。これに対して，現在は，精密鋳造法や機械加工で対応している。しかしながら，精密鋳造は，金型を作製する必要がある為，設計変更には迅速な対応が困難，金型で成形可能な形状に制限される，などの課題がある。また，機械加工では，チタン合金やニッケル合金など非常に高級な材料の素材から製品を削り出すため，無駄になる素材費は決して小さくなく，また，難削材料ゆえ加工時間を含めた加工費が非常に高額になること，高度な加工技術や加工機が必要であること，などの課題がある。

このような背景に対し，最近では，金属積層造形すなわちAdditive Manufacturing（以降，AM）を製造技術として適用し，製造期間の短縮，設計変更への柔軟な対応，切削工程低減による材料費や加工時間低減，さらに，“金型で成形可能な形状”，“機械加工しやすい形状”など従来製法の制約を取り去った自由度の高い設計による高性能化が出来ると考えられている。特に，航空宇宙・エネルギー分野としては金属積層造形技術に非常に大きな期待をしており，差別化のキー技術として，各社が競い合うように実機適用検討を進めている。

AM技術については，当社も非常に注目しており，ガスタービン部品の設計・製造期間の短縮，従来製法では実現できない形状による部品高性能化などを期待し，技

術開発や試作評価を進めている。さらに，技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構（TRAFAM）に参画し，産官学連携による効率的な研究開発にも取り組んでいる。

本稿では，当社の産業用ガスタービンにおける金属積層造形技術の適用事例として，圧縮機や燃焼器での検討事例，さらにはTRAFAMでの取り組みについて紹介する。

2. ガスタービン圧縮機におけるAM技術の活用事例

当社では，ガスタービンの開発段階において，圧縮機部品の“複雑形状の実現”と“開発期間の短縮”という目的のため，AM技術の活用を進めている⁽¹⁾。その一例として，計測プローブと静翼の事例を紹介する。

2.1 計測プローブへの適用検討

開発における試作試験において，圧縮機内部の流れを把握するために，流路にプローブを挿入して，圧力や温度を実測することが重要である。しかしながら，流路にセンサを挿入するということは流れを阻害するということであり，実環境とは異なる流れ場を計測していることになる。この影響を小さくするため，プローブは可能な限り小型で，流れ場に対する影響が小さい形状であることが望まれる。このような複雑形状を実現するため，AM技術の活用を始めている。

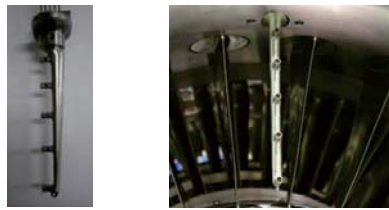
図1にAMで製造したプローブの例を示す。(a)は圧縮機入口の全圧，(b)は圧縮機出口の全圧と全温，(c)は静翼翼面の静圧（背側5点，腹側2点），(d)は静翼前縁部（Leading Edge：LE）の全圧と全温をそれぞれ計測するものである。いずれもAM技術を適用することによって，従来は流れに曝されていた配線類をプローブ内部または背面に設置し，さらにプローブの支柱を流線型や翼型にすることができている。比較のため，(e)に

原稿受付 2018年3月10日

*1 川崎重工業(株) 技術開発本部 技術研究所
〒673-8666 明石市川崎町1-1

*2 川崎重工業(株) 航空宇宙システムカンパニー 技術本部
〒673-8666 明石市川崎町1-1

は従来型の静翼前縁部の全圧を測定するプローブを示している。



(a) Inlet total pressure probe for compressor



(b) Outlet total pressure and temperature probe for compressor



(c) Static pressure sensor



(d) LE probe



(e) LE probe (conventional)

Fig. 1 Sensor probes made by additive manufacturing

本プローブをAMで製造し、それを開発機に投入するにあたり、検討課題として挙げられるのが、造形精度の確保と表面粗さの改善である。

2.1.1 計測プローブの造形精度の確保

計測プローブは、図1に示す通り、プローブ先端が微細かつ複雑な管構造となっている。AMでプローブを製造する際は、この部位の形状精度を確保し、プローブとしての要求性能を満足させる必要がある。

一般的に、AM技術は、造形方向によって形状精度は異なることが知られている。例えば、ベースプレートに垂直に立つ円筒形状は、良好な形状精度が得られるが、ベースプレートに平行な円筒では、条件次第では少し潰れたような形状になる傾向がある。今回は、プローブ先端管構造部の造形精度確保を最優先と考え、図2に示すようにプローブ先端をベースプレートに対して垂直に配置し、管構造部の形状崩れを回避している。

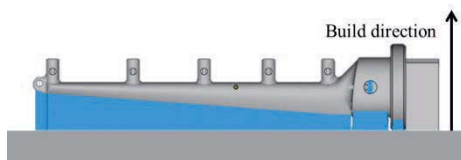


Fig. 2 Layout for making probe

2.1.2 計測プローブの表面粗さ改善

本プローブにおいて、As builtの表面粗さは $Ra = 8 \mu m$ 程度と粗く、疲労強度には注意を払う必要がある。図3にAs built表面 ($Ra = 14 \mu m$) と機械加工面 ($Ra = 1$

μm) のAM試験片を用いた疲労試験結果を示す。図の縦軸は、Bar材の室温における引張強度⁽²⁾を1とした時の疲労強度の比で表している。本図より、疲労強度は表面粗さに大きく起因することが分かる。

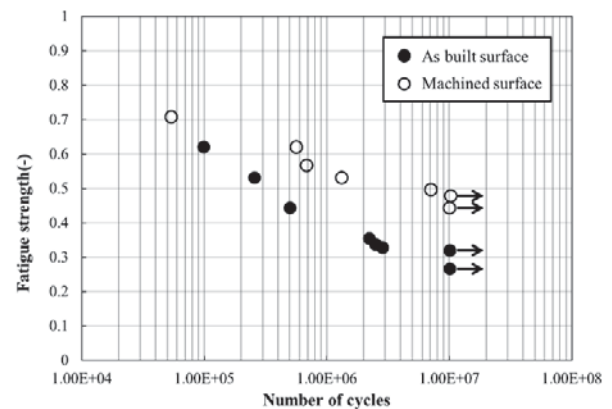


Fig. 3 Fatigue strengths of specimens with different surface roughness

以上から、当社で製造した計測プローブは、造形後、表面仕上げ処理を施し、ガスタービン開発試験機への投入を行っている。

2.2 静翼への適用検討

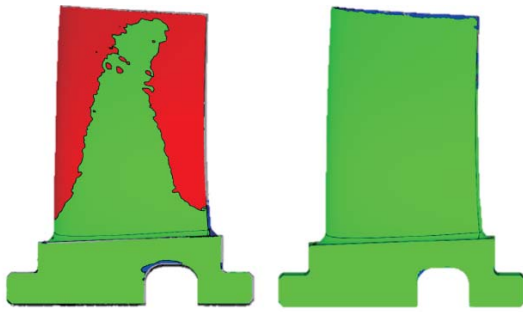
圧縮機静翼の試作部品製造においては、部品加工期間に加えて、治工具製造やNCテープ作成などの製造準備期間、素材調達期間などを見てもおく必要がある。よって、部品全体の製造期間は半年から1年に亘ることもあり、開発期間の多くを占めている。

ガスタービンの開発期間を短縮するためには、試作部品の製造期間を短くすることが非常に有効である。そこで当社では、静翼試作品製造に対し、AM技術を適用することにより、製造期間を1ヶ月程度に短縮することが可能になると考えている。

静翼をAMで製造する際に大きな問題となるのが、寸法精度である。静翼は薄く、3次元曲面を有する複雑な形状であるため、造形時に熱変形が生じる可能性が高い。図4(a)に、AMにより製造した静翼の非接触3次元寸法計測結果を示す。図中に濃く示されている箇所は寸法公差外であることを表している。翼形状は性能に大きく影響するため、このようなAM静翼は採用できない。

そこで当社では、近年注目されているAM造形時の変形解析ソフトウェアの活用を進めている。解析により起こり得る変形を予測し、その変形を相殺するようなCADデータを作成し、そのデータを用いて造形することで、変形を抑制することが可能と考えている。図4(b)は解析結果をもとにCADデータを修正し、そのデータで造形した製品の寸法計測結果である。図4(a)で見られた寸法外れは改善され、寸法精度を満足する製品が得られていることがわかる。

図5には、従来製法すなわち鍛造材から機械加工で削り出した通常の静翼(奥)とAMで製造した静翼(手前)



(a) Made by original data (b) Made by modified data

Fig. 4 Geometry measurement results of stators made by additive manufacturing

を示す。AM造形後には、空力性能と強度の問題から表面仕上げのみを実施している。図5からもわかるように、両者の形状に有意な差は無く、試作試験の用途を十分に果たす静翼をAMで製造することができている。



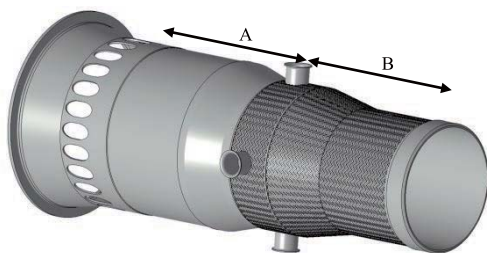
Fig. 5 Stators made by conventional manufacturing (back) and by additive manufacturing (front)

3. ガスタービン燃焼器におけるAM技術の活用事例

当社では、産業用ガスタービンの燃焼器に対し、更なる低NO_x化技術の開発に取り組んでいる。その研究開発段階におけるAM技術活用事例について紹介する。

3.1 燃焼器ライナー部品

図6に当社ガスタービンのDLE (Dry Low Emission) 燃焼器を示す。パイロット・メインバーナの燃焼領域にはインピンジメント冷却構造、追焚きバーナの燃焼領域には対流冷却構造を採用している。対流冷却部では、冷却効率を高めるW字型のリブを用いているが、低NO_x化を目的とした燃焼器冷却空気量の削減のため、対流冷却適用範囲の拡大や対流冷却効率の向上について検討を進めている。



A) Impingement/film cooling part B) Convection cooling part

Fig. 6 Image of gas turbine DLE combustor liner

その研究開発段階での種々の異なる形状を持つ少数試作において、AM技術を活用した燃焼器ライナー部品を試作し、燃焼試験等を行っている。

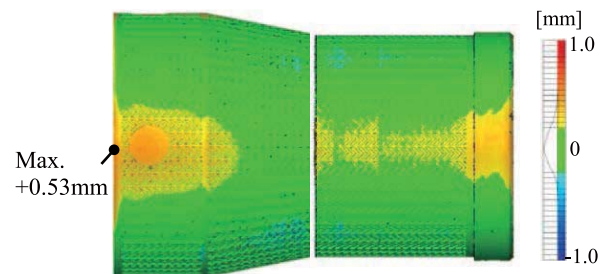
3.1.1 ライナー対流冷却部品の試作

AMで試作した燃焼器ライナー部品例を図7に示す。W字型に加え、燃焼器軸方向にもリブを加えることにより冷却効率の向上と共に機械的強度の増加を狙っている。



a) Trial piece

b) Structure of ribs



c) Difference of 3D data of trial piece from that of drawing

Fig. 7 Trial piece of combustor liner, convection cooling parts made by additive manufacturing

造形用3Dデータに対し、AMにて試作した部品の形状差は最大で0.5mm程度であった。また、本試作品を溶接する際、細かな気泡の発生や不純物の析出が確認され、かつ溶接部の収縮についても従来製法より少し大きめとなっており、従来製品ではあまり見られない事象が確認された。その後のコーティングプロセスでは、特異な現象は確認されていない。

3.1.2 燃焼試験での状態確認

AM試作部品を用いて、燃焼器リグ試験設備（低圧環

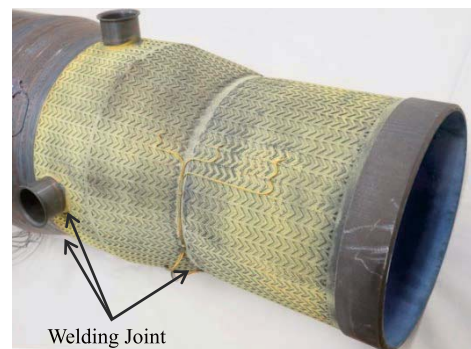


Fig. 8 Trial piece of combustor liner, convection cooling parts after combustor rig test

境)における燃焼器要素試験を実施した。試験時の燃焼器出口温度は、対象としているガスタービンの定格負荷相当である。図8に試験後の燃焼器部品を示す。AM試作部品に異常な高温箇所が発生、変形・座屈、コーティング剥離等は見られず、健全な状態を維持しており、リグ試験用試作部品として使用可能と判断している。

4. 航空エンジン分野への適用検討事例

当社では、将来技術として航空エンジン部品への適用も検討している。具体的には、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（以降、NEDO）の助成事業「環境適応型小型航空エンジン研究開発」プロジェクトの中において、図9に示す燃焼器燃料噴射弁の試作・評価を実施してきた。

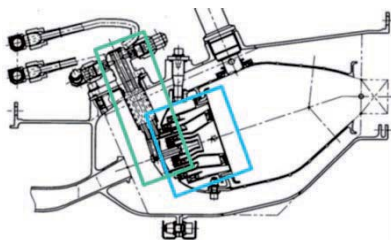


Fig. 9 Combustor and fuel injection valve

本部品は、燃焼器の高性能化を実現するため複数の燃料供給ラインを有する複雑形状部品であり、従来製法では、多くの子部品や接合プロセスが必要となることから、かなり高価になると予測される。よって、低コスト化を実現する新たな製造技術としてAM技術に注目し、プロジェクトの中で技術開発を進めてきた。この技術により、削り出し加工や精密鋳造法で対応が困難な複雑形状部品の製造も可能になると考えている。

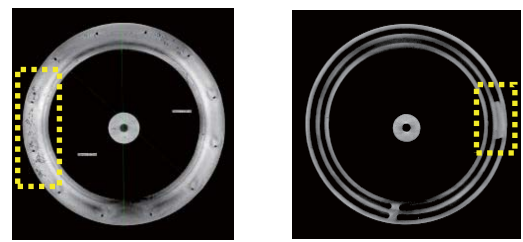
複雑な形状を有する燃料噴射弁を精度よく造形するキー技術としては、造形姿勢がある。これに対しては、3次元データを用いて、事前に十分な造形姿勢検討を行い、造形姿勢による形状差異を確認している。これらの検討に基づいて、造形を実施した結果を図10に示す。



(a) Trial piece of swirler (b) Trial piece of injector

Fig. 10 Swirler and fuel injector made by additive manufacturing⁽³⁾

上記の試作・評価により、造形寸法精度、耐圧性に関するデータの取得、金属粉末サイズと造形品質の関係把握等、成果が得られている。同時にAMに対する課題も抽出されている。例えば、造形品に内在する欠陥や金属粉末残存などである。本試作品に対し、X線CT観察や



(a) Porosity (b) Remaining metal powder

Fig. 11 X-Ray test results of fuel injector

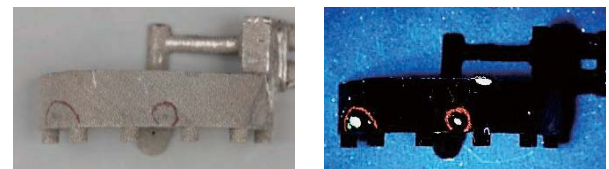


Fig. 12 Cross section photo and Fluorescent penetrant inspection result of fuel injector

切断検査を実施した結果を図11、図12に示す。断面積が大きく変化するような部位では、空孔が発生していることがわかる。また、微細配管の一部には、造形素材である金属粉末の一部が抜けずに、閉塞している様子が確認されている。蛍光浸透探傷検査でも、明確に空孔指示が出ていることがわかる。

このような欠陥については、造形条件の最適化、部品形状の見直し、金属粉末性状の適正化、などの対策が有効であり、その後の試作において、ほぼ解決することができている。

本試作検討により、AM技術による“複雑な燃料通路を含めた一体成形”への見通しが得られたと考えている。また、同時に、仕上げ加工まで含めても、従来法に対し、製造コスト低減ができることを確認している。

課題としては、内部通路の表面粗度、寸法精度、材料強度や品質の安定性と再現性、検査方法や工程管理、造形速度などが挙げられるが、設計-製造間での技術のすり合わせを行いながら、前向きに、実現性検討を進めていく必要があると考えている。

5. 産官学プロジェクト (TRAFAM) での検討事例

欧米のAM市販装置の性能を凌駕する国産のAM装置開発が、TRAFAMを中心に精力的に行われている⁽⁴⁾。当社もこれに参画し、AM装置開発の一環として、ガスタービン・航空宇宙部品への技術適用を検討している。

具体的には、TRAFAM開発機である大型電子ビーム3Dプリンタ（パウダベッド方式）や複層レーザービーム3Dプリンタ（デポジション方式）を用いて、図13に示す模擬部品を一例に、装置性能を見極める試作を進めている。

これらの試作品では、当初、表面が粗い、断面形状が大きく変わる部位で内部欠陥が発生している（図14）、などの課題が見られたが、造形条件を含むプロセスの見



Fig. 13 Trial samples made by TRAFAM additive manufacturing machine^{(5), (6)}

直しなどで改善の可能性が確認されている。

また、構造部品にAM技術を適用していく上では、機械的特性データの取得は非常に重要である。本プログラムにおいて、当社は開発装置で試験片を作製し、上記模擬形状部品に用いる材料の機械的特性データ取得を進めている。データ取得に際しては、造形条件の最適化、粉末や熱処理条件の適正化などを進めていく必要がある。

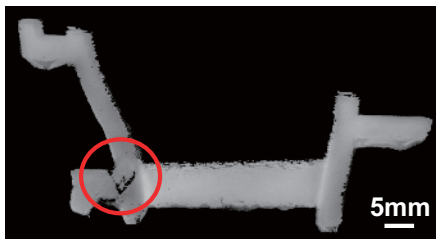


Fig. 14 X-Ray test result of trial sample⁽⁵⁾

平成31年技術開発完了時目標として、大型電子ビーム3Dプリンタについては、“1000mm×1000mm×600mm、造形速度500cc/h、寸法精度20 μ m”，また、複層レーザビーム3Dプリンタについては“300mm×300mm×300mm、造形速度500cc/h、寸法精度20 μ m”を掲げ、それぞれの方式において、市販機を凌駕する性能を目指している。これら2機種をはじめ、TRAFAMで開発中の装置が、各々当初の目標を満足するような高性能化を実現した際には、ガスタービン・航空宇宙分野の大物部品に対しても、AM技術の適用が加速的に進んでいくものと思われる。

6. まとめ

当社の産業用ガスタービン部品を中心に、AM技術の適用検討例を紹介した。今後、圧縮機や燃焼器を中心に、ガスタービン部品におけるAM技術の適用範囲を拡大していくためには、“製造コストの低減”，“さらなる造形

速度の向上”，“造形精度・表面粗さの改善”，“様々な耐熱材料での造形技術確立”，“大型部品・複雑部品に対応する造形技術の確立”などが必要である。

製造コスト低減については、金属粉末コスト低減が有効であると考えられるため、今後の粉末メーカなどの動きに期待したい。また、その他の要素については、装置の機能向上や大型化、各種材料のパラメータ開発・最適化等が必要であり、装置メーカとユーザが、今後、積極的に取り組んでいくものと思われる。

さらに、量産部品への適用を考えると、“品質保証のしくみ（装置、方法）”，“製造方法の安定性（バラツキや再現性）把握”，“プロセス管理のキーパラメータの把握”，“評価試験などの標準化”などが非常に重要になる。加えて、航空エンジン部品の製造をする際には、様々な認証作業プロセスも必要となり、まだ多くの課題があると認識している。

しかしながら、欧米では装置メーカ、ユーザが一体となり、実機適用に向けて、積極的に開発、試験を進めている。さらには、ラティス構造なども採用し、AMでしか実現できない高付加価値製品の設計技術も取得し始めている。当社をはじめ、国内のユーザ、装置メーカは、AM技術を最大限活用し、今まさに起こっているグローバルなモノづくり環境においても、イニシアティブを取っていかねばならないと感じている。

参考文献

- (1) 中山健太郎, 酒井祐輔, 圧縮機開発試験, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 4 (2017), pp. 243-247.
- (2) William F. Brown, Jr. and Chuck Gibson, Aerospace Structural Metals Handbook, 1999 (35th) Edition (1998), CODE1307 p. 49, CINDAS/USAF CRDA Handbooks Operation Purdue University.
- (3) NEDO「環境適応型小型航空機用エンジン研究開発」川崎重工業報告資料, (2013)
- (4) 技術研究組合次世代3D積層造形技術総合開発機構, ～設計者・技術者のための～金属積層造形技術入門, (2016), p. 40
- (5) 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」第3回シンポジウム講演集, p. 39
- (6) 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」第3回シンポジウム講演集, p. 46

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

エネルギー機器材料の3次元積層造形技術の開発

Development of Additive Manufacturing Method for Energy System



日野 武久^{*1}
HINO Takehisa



大西 春樹^{*1}
OHNISHI Haruki



只野 智史^{*1}
TADANO Satoshi



中谷 祐二郎^{*1}
NAKATANI Yujiro

キーワード：3次元積層造形，ニッケル基合金，コバルト基合金，鉄基合金

Key Words：Additive Manufacturing Ni based alloy, Co based alloy, Fe based alloy

1. 緒言

3次元積層造形（Additive Manufacturing, 以下AMと記載）は，電子ビームまたはファイバーレーザーにより必要な部分の金属粉末を溶解し，凝固させて金属部品を製作する技術である。複雑な形状や強度の高い金属などの難しい造形が可能であり，航空宇宙産業，自動車分野，医療分野等に幅広く適用されつつある⁽¹⁾。

ガスタービンや蒸気タービン，発電機などのエネルギー機器においても，開発／適用がなされてきており，GE Oil&Gas社は，イタリアの工場内に積層造形の工場を作り，ガスタービン用の燃料ノズルの製造を2016年から行っている⁽²⁾。またSiemens社では，2016年にスウェーデンに工場を作り⁽³⁾，ガスタービン燃焼器の補修を行っているほか，燃焼器ノズルやガスタービン動／静翼の開発⁽⁴⁾を行い，3次元積層造形により試作した動翼を使用してフルロードの運転試験を実施している⁽⁵⁾。

これらガスタービン，蒸気タービン等の発電機器は長時間使用されること，故障などにより受ける影響が大きいことから，材料には高い信頼性が要求されるが，現状，積層造形材料のデータは十分ではない。このため電力機器に使用される材料について造形試験を行い，金属組織および強度評価を実施，データの蓄積を行っている。

本稿ではニッケル基，コバルト基，鉄基合金について評価結果の一部を紹介する。

2. 電子ビーム積層造形

3次元積層造形装置は，大きくパウダーベッド方式とデポジション方式に分けられる。

パウダーベッド方式はパウダーを1層ごとに敷き詰める工程と造形したい部分にレーザや電子ビームなど高エネルギービームを照射する工程を繰り返し造形する方式であり，デポジション方式は，粉末やワイヤーなど造形材料を供給した位置にレーザや電子ビームなどの高エネルギービームを同時に照射，任意の部分を溶融させ，積層させる方式である。

一般的にデポジション方式に対しパウダーベッド方式は，造形速度は劣るもの造形精度は高いという特徴がある。パウダーベッド方式，デポジション方式とも高エネルギー熱源として電子ビームを用いたものとレーザを用いたものがある。本報告では，上記のうち電子ビームのパウダーベッド方式を選択し評価を行った。

本手法は，①真空中で溶解するため，ガスの巻き込みなく高密度な積層造形材を得やすい，②酸化等の影響が少ない，③電子ビームを磁場コイルで制御するため，機械的な駆動部がなく高速走査が可能となる，④高速走査による予熱を実施することで造形物の残留応力が少ないなどの特徴がある。

本報告で使用した“Arcam”社製“A2X”の装置緒元⁽⁶⁾を表1に示す。造形エリアは200×200×380mmであり，造形速度は15-22mm³/s⁽⁷⁾である。

Table 1 Specification of Arcam A2X⁽⁶⁾

Max. build size	200×200×380mm
Max. beam power	3000 W
Build atmosphere	2×10 ⁻³ mbar (partial pressure of He)
Min. beam diameter	250 μm

原稿受付 2018年3月29日

*1 東芝エネルギーシステムズ(株)
構造材料・高機能材料開発部 材料技術・構造開発担当
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4
E-mail: takehisa.hino@toshiba.co.jp
E-mail: haruki.ohnishi@toshiba.co.jp
E-mail: satoshi.tadano@toshiba.co.jp
E-mail: yuujiro.nakatani@toshiba.co.jp

3. 造形事例

3.1 ニッケル基合金の積層造形

ニッケル基合金についてはArcamの標準材として Alloy718⁽⁸⁾があり、また“Rene142⁽⁹⁾”, “CMSX-4⁽¹⁰⁾”等の材料について造形の報告がある。我々は析出強化型Ni基合金“Rene80” (Ni-14Cr-9.6Co-4.0Mo-2.9Al-4.9Ti-4.2W-0.06Zr-0.15C-0.02B) と同等粉末を使用し造形性評価⁽¹⁾を行った。図1に造形後試験片外観、図2に合金組織を casting 材 (等軸晶、以後、 casting 材は等軸晶の材料を示している) と比較示す。なお積層造形材および casting 材とも同様な溶体化熱処理後に2段階時効熱処理を行った。



Fig. 1 Appearance of specimens

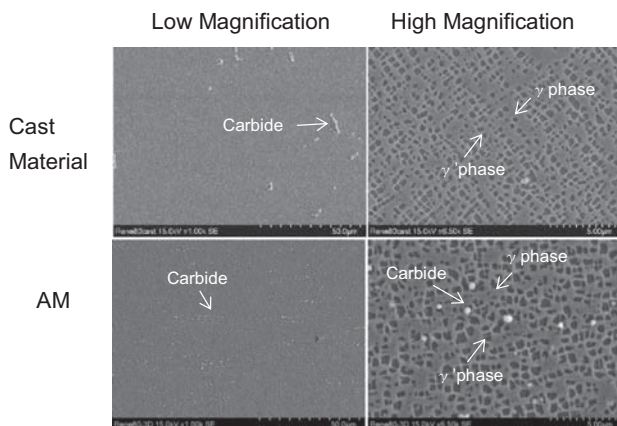


Fig. 2 Microstructure of cast and AM material

積層造形材の試験片表面および内部にクラックは認められなかった。積層造形材および casting 材とも γ 相中に γ' 相が析出した二相組織となっていたが、積層造形材では炭化物は球状でしかも造形方向に並んで析出しているのに対し、 casting 材は、粗大な炭化物がランダムに析出していた。また同一条件で熱処理を行ったが、 casting 材は矩形の γ' 相が析出していたのに対し、積層造形材の γ' 相は矩形ではなくややいびつな形状となった。図3に通常の溶体化温度から50℃高い温度で熱処理を行った積層造形材の合金組織を示す。熱処理条件を最適化することによって、積層造形材においても矩形の γ' 相を得ることができた。

積層造形材は多くの空孔を含んでおり、熱間等方圧加圧 (Hot Isostatic Pressing, HIP) によりその空孔の

量を低減できることが多く報告されている。通常熱処理材とHIP処理後に溶体化熱処理と2段階時効熱処理を行った材料 (以下、HIP材と記載) のX線CT画像を図4に示す。通常の熱処理材では面積率で0.1%程度空孔を含んでいたが、HIPを行うことによりX線CTの検出限界以下まで空孔を低減させることができた。

図5に室温引張強度を示す。積層造形材の0.2%耐力、引張強度はほぼ同様であることがわかる。また積層造形材の伸び (Elongation; 以下、ELと記載)、絞り (Reduction of Area; 以下RAと記載) は casting 材の2倍程度となった。

図6に通常熱処理材 (HIP無し材) とHIP材のクリープ破断寿命を示す。図には casting 材のクリープ強度⁽¹²⁾も併せ示している。HIP無し材は casting 材に対し、ややクリープ寿命が短い、HIPにより casting 材とほぼ同様なクリープ強度が得られることが明らかとなった。

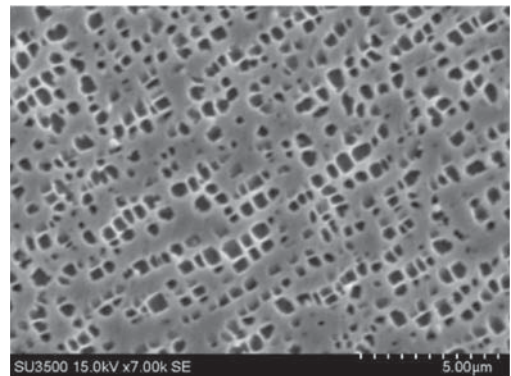
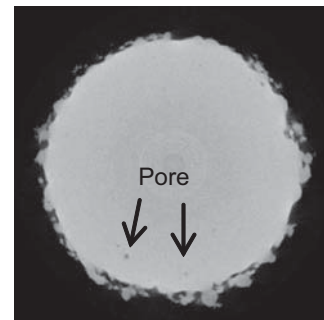
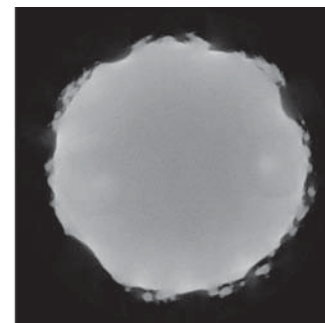


Fig. 3 Microstructure after developed heat treatment



Non HIP



HIP

Fig. 4 X-ray CT image of non-HIP and HIP specimens

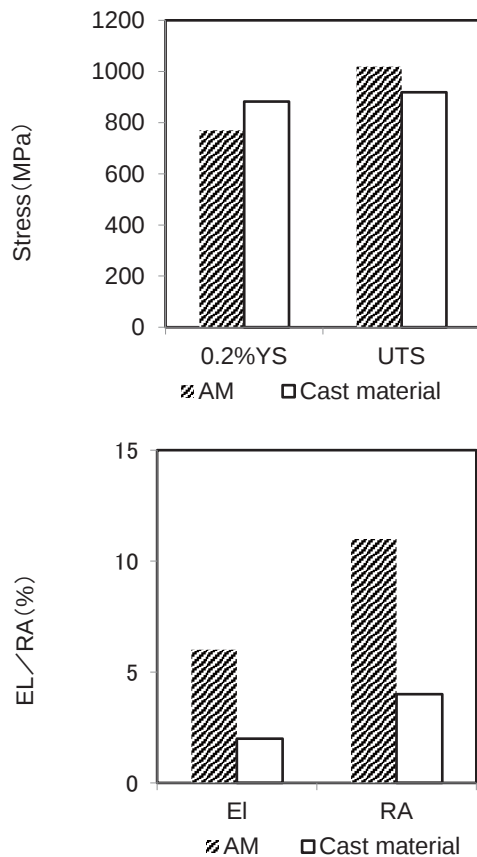


Fig. 5 Tensile properties of cast and AM material of Ni-based alloy

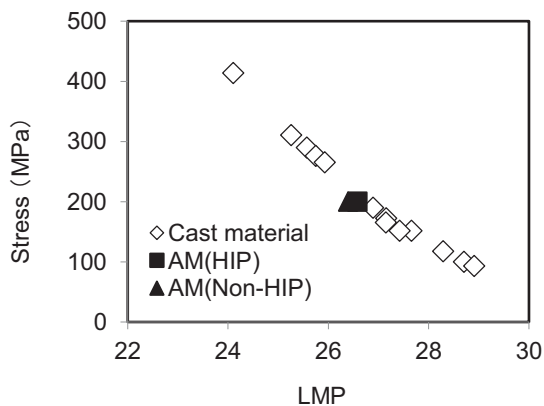


Fig. 6 Creep properties of cast and AM material of Ni-based alloy

3.2 コバルト基合金の積層造形

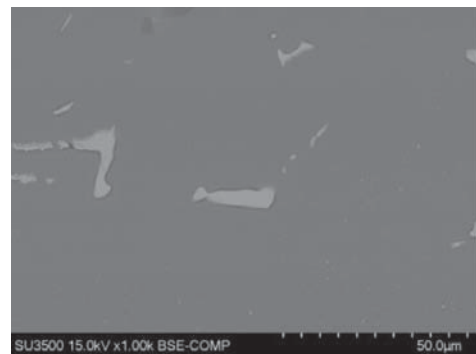
コバルト合金では生体材料であるASTM-F75の造形例は多いが、エネルギー機器用材料の造形例は少ない。そこでガスタービン静翼材として用いられる“Mar-M509” (Co-21.5Cr-10Ni-7W-0.6C-0.2Ti-3.5Ta-0.5Zr-0.1B) と同等粉末を用いてコバルト基合金の積層造形材を造形、特性を評価した。図7に造形物の試験片外観、図8に積層造形材の組織を casting 材と比較して示す。 casting 材は数十ミクロン以上のサイズの炭化物が析出しているのに対して、積層造形材では、上記のNi基合金と同様

に数ミクロンサイズの細かい炭化物が、造形方向に沿って析出していた。図9に溶体化/時効熱処理を行った材料について引張試験を行った結果を casting 材の特性と比較して示す。0.2%耐力、引張強度は、 casting 材と同様の特性を得ることができた。またニッケル基合金と同様に伸び、絞りも casting 材に対して2倍程度となった。

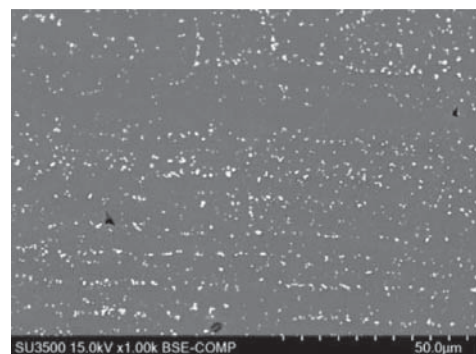
図10に同材のクリープ強度を casting 材¹³⁾と比較して示したものを示す。クリープ寿命にばらつきはあるものの casting 材並の特性が得られることを確認できた。



Fig. 7 Appearance of AM specimens



Cast material



AM

Fig. 8 Microstructure of cast and AM material of Co-based alloy

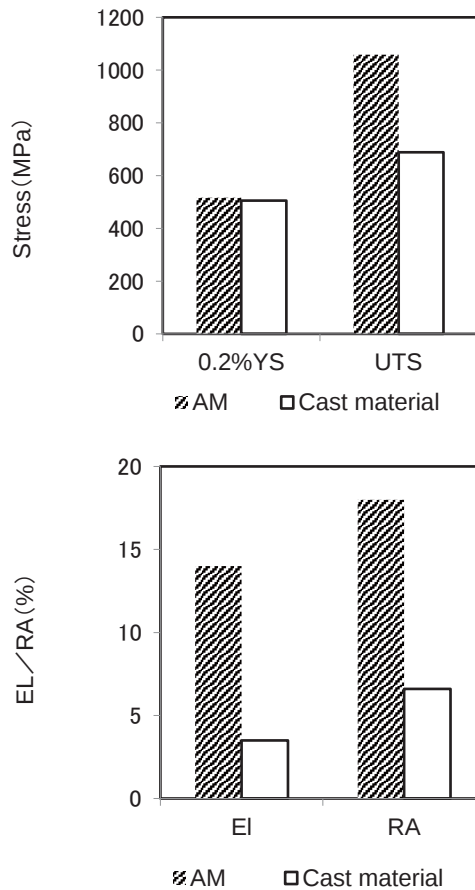


Fig. 9 Tensile properties of cast and AM materials of Co-based alloy

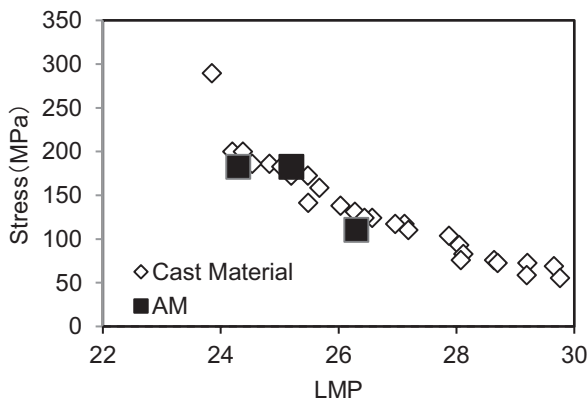


Fig. 10 Creep properties of cast and AM materials of Co-based alloy

3.3 鉄基合金の積層造形

鉄基合金について低合金鋼 (SNB-16; Fe-1.0Cr-0.58Mo-0.6Mn-0.29V-0.28Si-0.41C), 高Cr鋼 (12Cr鋼; Fe-10.5Cr-1Co-2.5W-0.2V-0.1Nb-0.1C-0.03N) の造形結果^[4]を示す。

図11は高Cr鋼の積層造形材の試験片外観である。造形時に材料粉末として窒素, アルゴンガスにてアトマイズを行った粉末を使用した。図12に使用したアトマイズ粉末の断面組織およびその粉末によって製造した材料の断面組織を示す。

アルゴンガスアトマイズにて造形した粉末には粉末内

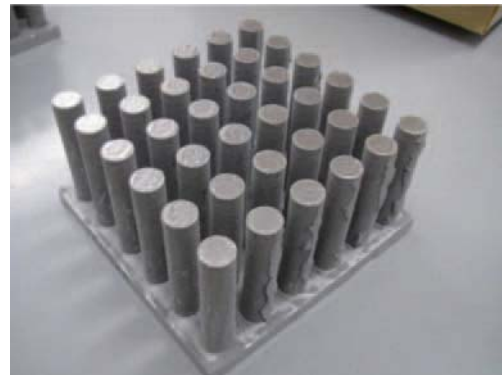


Fig. 11 Appearance of 12Cr-AM alloy

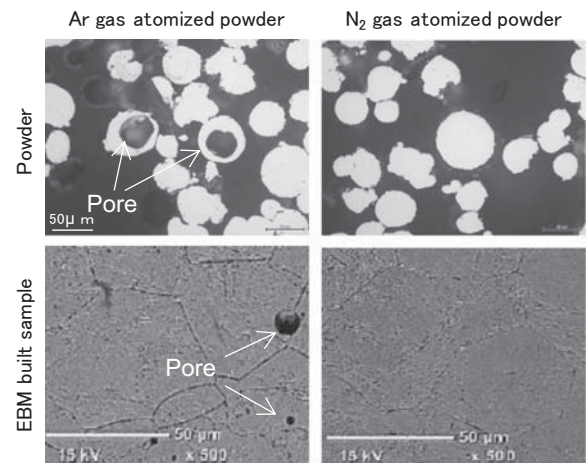


Fig. 12 Microstructure of gas atomized powder

部に空孔が認められたが、窒素ガスアトマイズ粉には目立った空孔は認められない。また同粉末を使用して造形した積層造形材にもアルゴンガスアトマイズ材には空孔が認められるものの、窒素ガスアトマイズ材には空孔は認められなかった。これは造形材の品質が粉末の品質に依存することを示しており、高Cr鋼では窒素と親和性の高いCr等が窒素と反応することによって、ガスが材料内部に取り込まれ、その結果、空孔が少なくなったと推測している。

図13にアルゴンガスアトマイズ材の室温引張特性を示す。空孔を含んでいると考えられるものの0.2耐力、引張強度、伸び、絞りは鍛造材並みの値が得られた。

図14にクリープ特性を示す。アルゴンガスアトマイズ材に対し、窒素ガスアトマイズ材は優れた特性を有し、鍛造材並のクリープ特性を有していることが確認できた。

図15に室温での回転曲げ疲労特性を示す。窒素ガスアトマイズ材を用いて作製し、HIP処理を行った積層造形材と鍛造材の値を比較して示している。積層造形材 (HIP材) は鍛造材と同等以上の疲労強度を有していることが確認できた。

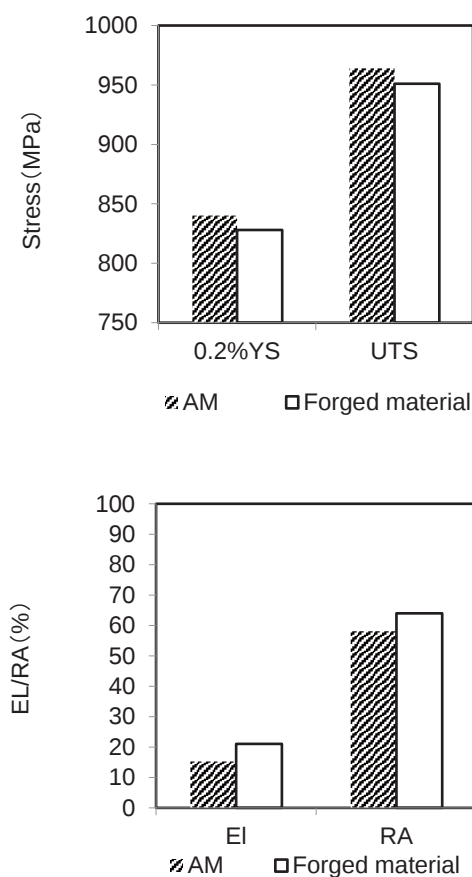


Fig. 13 Tensile properties of 12Cr alloy steel

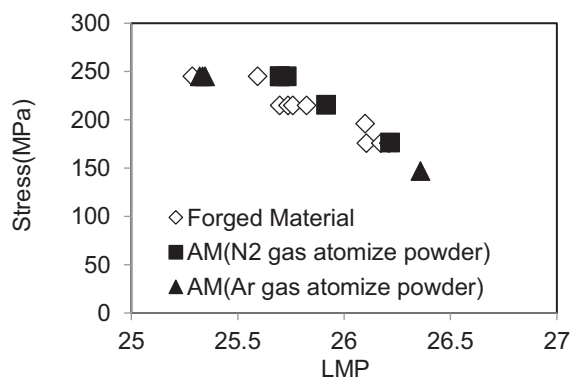


Fig. 14 Creep properties of 12Cr alloy steel

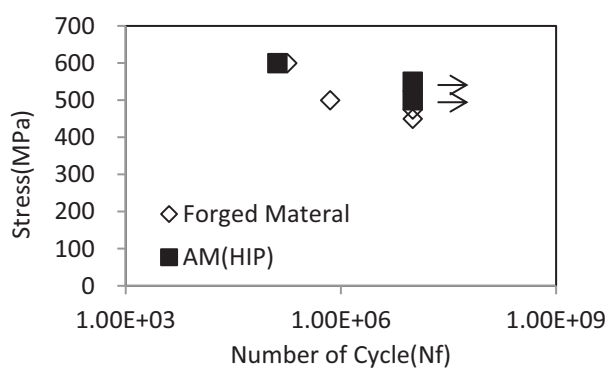


Fig. 15 HCF properties of 12Cr alloy steel

図16に低合金鋼にて試作したボルトを示す。ネジ部は丸棒形状とし、焼入れ焼戻し熱処理の後に切削にてネジ加工を行った。

ネジ加工後のボルト外観とネジ部の断面組織を図17に示す。切削抵抗などは鍛造材と変わることなく、問題なく加工を行うことができた。また断面組織観察の結果、偏析等のない均一な組織であることを確認した。

図18にボルト材の室温引張特性を鍛造材と比較し示す。のび、絞りなどは鍛造材に対して若干低いものの0.2%耐力、引張強度は鍛造材以上の値を得ることができた。



Fig. 16 Bolt manufactured with low alloy steel

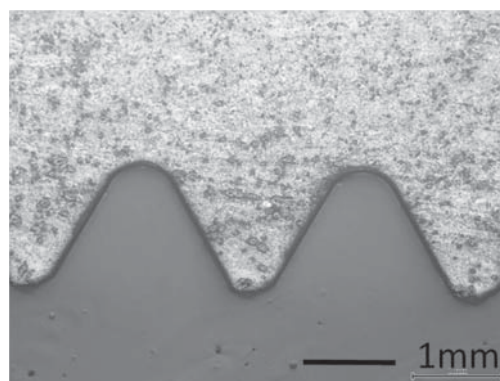


Fig. 17 Cross section micrograph of AM bolt

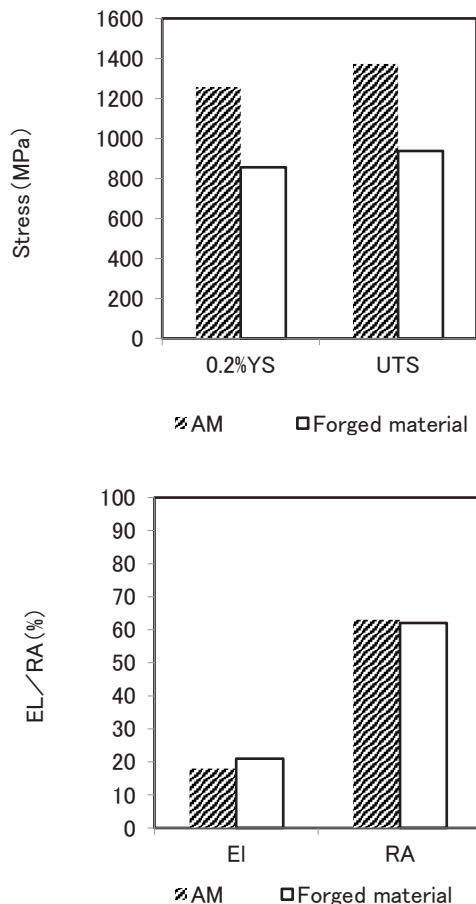


Fig. 18 Tensile properties of low alloy steel

4. まとめ

ニッケル、コバルト、鉄基合金について電子ビーム積層造形手法により造形を行い、合金組織、機械特性の評価を行った。いずれの材料も造形可能であり、材料粉末、造形パラメータ、熱処理方法を最適化することによって、良好な組織、機械特性を得ることができた。

積層造形材の引張などの静的強度は鍛造材とほぼ同様な特性を示した。クリープ、疲労などの動的強度は空孔などの影響を受けるが、材料粉末、HIPを含めた熱処理の最適化により特性の改善を図ることができた。

今後、得られた知見により複雑製品形状の造形試験を行い、試作、製品製作、補修などへの3次元積層造形の適用を図っていきたい。

謝辞

12Cr鋼、Ni基合金について東北大学金属材料研究所千葉研究室との共同研究結果を使用させて頂きました。本研究を共に推進頂いた東北大学金属材料研究所千葉晶彦教授、小泉雄一郎准教授（現在、大阪大学教授）、青柳健大助教、紀伊正研究員に感謝の意を表します。

商標について

本稿中の“Arcam”および“A2X”はGE-Additive社、“Rene80”、“Rene142”はGE社、“CMSX-4”はSPS technology社、“MM509”はMartin metal社の商標です。

参考文献

- (1) 金属技研ホームページ: <https://www.kinzoku.co.jp/core_technology/additive_manufacturing.htm> (Accessed on 5 March, 2018).
- (2) Manufacturing automation ホームページ <<https://www.automationmag.com/process/6000-ge-oil-gas-to-use-robotics-and-3d-printing-in-upgraded-talamona-plant>> (Accessed on 5 March, 2018)
- (3) Siemens社プレス資料 <<https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=en/pressrelease/2017/power-gas/pr2017020154pgen.htm>> (Accessed on 5 March, 2018)
- (4) Siemens社プレス資料 <<https://www.siemens.com/press/en/feature/2014/corporate/2014-03-3d-druck.php>> (Accessed on 5 March, 2018)
- (5) Siemens社プレス資料 <<https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/industry-and-automation/additive-manufacturing-3d-printed-gas-turbine-blades.html>> (Accessed on 5 March, 2018)
- (6) アーカム社ホームページ <<http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf>> (Accessed on 5 March, 2018)
- (7) 千葉晶彦, 電子ビームを用いた金属Additive Manufacturing技術の最新動向, 精密工学会誌, Vol82, No7, 2016, pp624-628
- (8) HTL社ホームページ <<http://www.htlco.co.jp/arcam.html>> (Accessed on 5 March, 2018)
- (9) Lawrence Murr et.al, Microstructures of Rene 142 nickel-based superalloy fabricated by electron beam melting, Acta Materialia 61 (11) pp 4289-4296
- (10) Ramsperger et.al, Microstructure of the Nickel-Base Superalloy CMSX-4 Fabricated by Selective Electron Beam Melting, Metall. Mater. Trans.A, vol. 47, issue3, (2016), pp1469-1480.
- (11) 日野武久ほか, 電子ビーム積層造形性に与える粉末粒径および電気抵抗の影響日本溶接協会 第1回表面改質技術研究委員会 2017-5
- (12) NAS CR-135138 <<https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770016292.pdf>> (Accessed on 16 May, 2017)
- (13) Aero Space Structural Metals Handbook, CINDAS/ USAF CRDA Handbook operation Purdue Univ. Code4311 p19
- (14) 大西春樹ほか, 電子ビーム積層造形で作製した12Cr耐熱鋼の機械的特性, 日本鉄鋼協会, 2017秋季講演大会概要集, 322

特集：エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望

積層造形製品へのHIP効果とその影響を活かした工程最適化

Application of HIP on Additively Manufactured Parts and Process Optimization with Its Beneficial Effect

増尾 大慈^{*1} 唐土 庄太郎^{*1} 近藤 大介^{*1}
MASUO Hiroshige MOROKOSHI Shotaro KONDO Daisuke

キーワード：積層造形, HIP, トポロジー最適化, 疲労特性

Key Words: Additive Manufacturing, HIP, Topology Optimization, Fatigue property

1. 金属技研の積層造形事業内容

金属技研株式会社は、精密機械、自動車、航空・宇宙、エネルギー、液晶・半導体、電気・電子、医療などの幅広い分野に向けて、熱処理や機械加工で培ってきた業界トップレベルの金属加工技術を活かし、顧客の製品開発に設計段階から参画し、試作・量産・検査・品質保証の一貫したモノづくりにより、高度な積層造形部品を提供している。

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鋳造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。近年、世界的な積層造形ブームにより、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加速しているが、その中で積層造形技術を有効に活用して事業展開している国内事例はほんの一握りしかなく、多くが試作もしくは過酷な使用環境以外の部品用途にのみとどまっている等の課題も多い。

本誌では、金属技研が実施している積層造形事業の活動内容について、エネルギー分野製品に向けて必要不可欠なHIP処理とその効果を事例を交えて紹介する。

2. HIP処理の基本事項

HIPとはHot Isostatic Pressing(熱間等方圧加圧法)の略称であり、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、精密鋳造品の様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2,000℃、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、自動車関連や素形材など様々な分野で利用されている。

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つき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ることが長期間の安定利用に不可欠となっている。

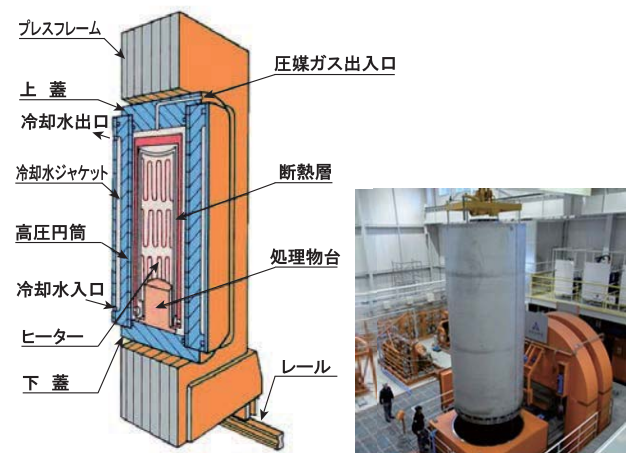


Fig. 1 HIP装置の構造

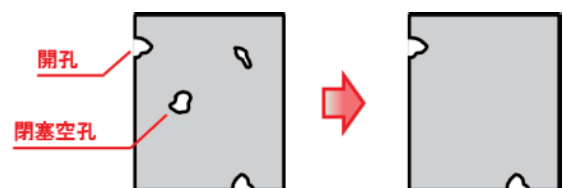


Fig. 2 HIP処理前後の効果イメージ

原稿受付 2018年3月9日

*1 金属技研(株) 技術本部 テクニカルセンター
〒243-0424 海老名市社家字宇平713

2.1 積層造形部品の熱処理提案

積層造形の課題の一つ目として、その独特な製作原理に起因する内部欠陥が挙げられる。圧延材や鍛造材のような既存工法で作製した素材と同様な考えで造形体を認識していると、強度低下もしくは品質のばらつきにより品質要求の達成が困難となる可能性がある。また造形時の熱履歴が既存工法とは異なる為、一般的な金属組織と異なる特有な結晶組織となりやすい。その為、造形方式の種類に併せて後工程で金属組織を整え、目的とする強度数値を満足させることも考慮する必要もある。

金属技研では上記の課題を解決する手段として、積層造形部品にHIP処理を実施する事を推奨している。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。

2.2 金属積層造形品のHIP処理

金属積層造形といっても、指向性エネルギー堆積法(LMD: Laser Metal Deposition)や粉末床溶融結合法『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。EBMとSLMは同じ粉末床溶融結合法のカテゴリーに分類され方式としては非常に似通っているが、工程中の熱履歴が異なる為、同じ形状を造形してもSLMは微細な金属組織、EBMは圧延材よりは微細だがSLMと比較すると一回り大きい金属組織となる傾向にある。金属組織の差は素材強度に影響を及ぼし、同じ材質でも方式によって強度差を生む結果となる。

一例として、EBM, SLMで造形したTi-6 Al-4 V造形品の金属組織を図3に、引張強度を図4に示す。造形直後の引張強度では、微細組織を持つSLMの方がEBMの引張強度より1割ほど高く、伸び値は低い傾向となっている。それに対してHIP処理を実施した後では、処理中の高温環境により金属組織が調質され、EBMとSLMの組織差は無くなり、結果として引張強度の差も解消され、圧延材の引張強度、伸び値と同等の数値となる。

また、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

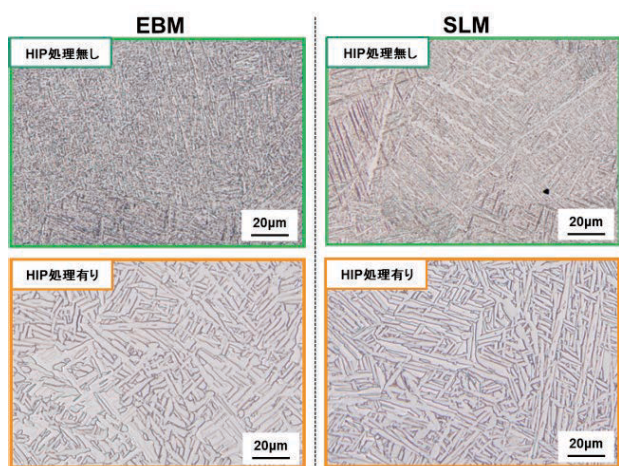


Fig. 3 HIP処理前後のEBM, SLM造形品の金属組織⁽¹⁾

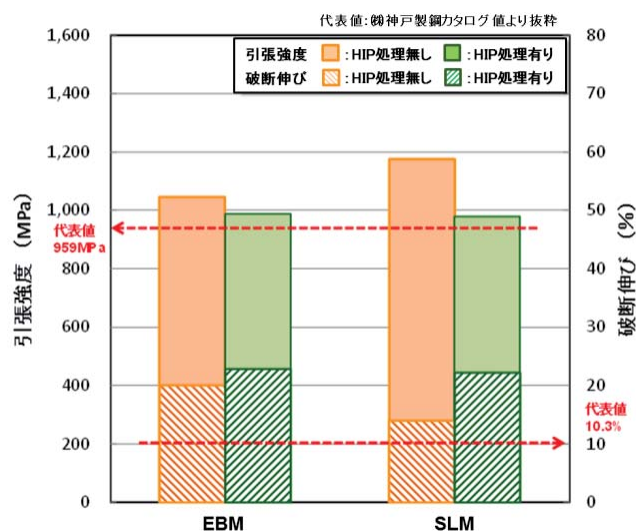


Fig. 4 HIP処理前後のTi-6Al-4V
EBM, SLM造形品の引張強度⁽¹⁾

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三次元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 6 Al 4 V造形品の断面写真を図5に、疲労強度を図6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図4に示した引張強度のような静的な強度に影響を及ぼすほどの大きさではないが、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

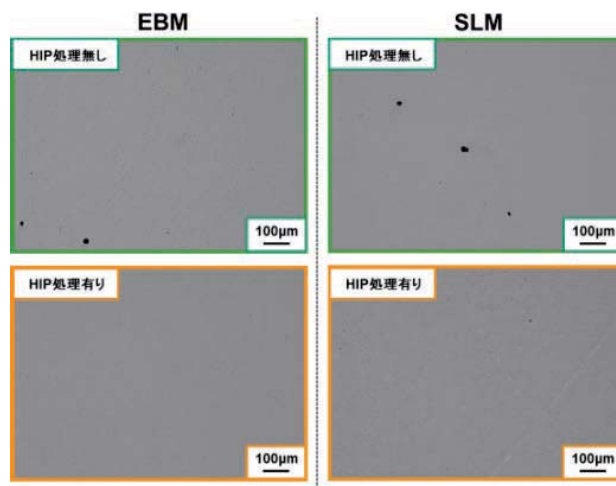


Fig. 5 HIP処理前後のTi-6Al-4V
EBM, SLM造形品の断面観察結果⁽¹⁾

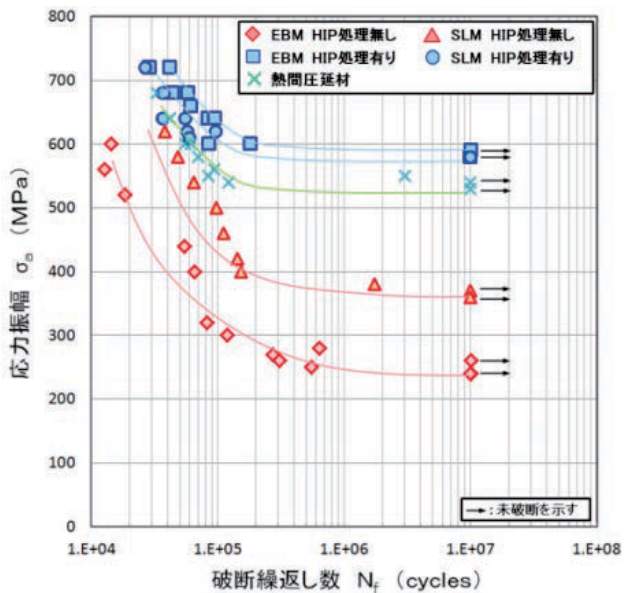


Fig. 6 HIP処理前後のTi-6Al-4V
EBM, SLM造形品の疲労強度⁽¹⁾

で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縮小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。

2.3 HIP処理を用いた事例

HIP処理を用いた事例を図7に示す。記載した事例は、Ti-48Al-2Nb-2Cr粉末を用いEBMで製作したブレード形状サンプルとなり、HIP前後でX線CTによる内部欠陥を確認した画像となる。

造形の場合、粉敷き、ビーム条件、熱分布等の影響により図5の様な内部欠陥が確認されているが、適切な条件でHIP処理を行うことにより、内部欠陥が小さく、もしくは、除去されていることが確認されている。

また、積層造形とHIP処理は、相性が非常に良く、造形のみで相対密度95%以上を有するため、従来低密度な対象物に必要なカプセルが必要なくHIP効果を得る事が可能となる。

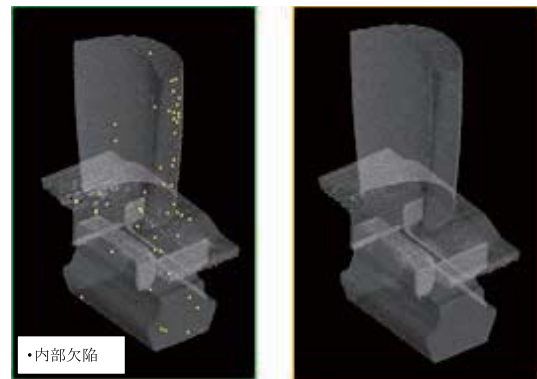


Fig. 7 HIP処理前後のTi-48Al-2Nb-2Cr,
EBM造形品の内部欠陥写真

2.4 諸外国のHIPの事例

国際標準規格であるISOやASTMでも現在積層造形の規格整備が行われている。その中でもEBM, SLMが分類として含まれる粉末床溶融結合法では、規格内でHIP処理について記載があり、その重要性を示している。その他の造形方法においても図8からもわかるように、HIP処理により各工法によるバラつきが収束し、強度・伸び値ともに、鍛造材と同等の品質となっていることが確認できる。

上述の規格にも明記されているが、すべての造形品にHIPを適応するという明記はされておらず、要求される品質ClassによってHIP処理の有無を規定している、諸外国では、特に図9に示す人工股関節やタービンブレード

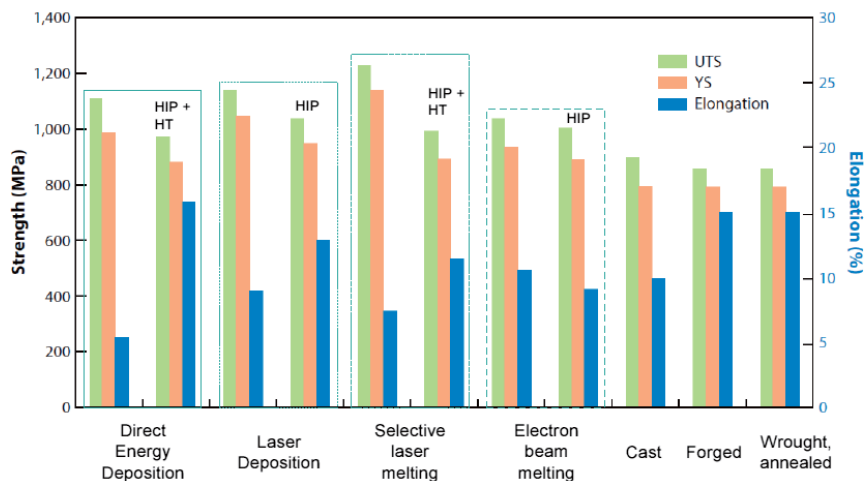


Fig. 8 各造形方法におけるHIP処理効果⁽²⁾

ドなど、造形品に対して高温環境下での使用や振動部材や回転部材、製品寿命を向上させる必要がある部品に対してHIP処理が、製品の寿命を延ばし、高付加価値化となるプロセスとなることが期待される。



左) タービンプレード⁽³⁾ 右) 人工股関節⁽⁴⁾

Fig. 9 HIP処理が使用されている造形製品例

3. 積層造形技術の実部品への展開について⁽⁵⁾

欧米では積層造形技術の普及とHIP処理の併用による造形品品質の安定化が図れたことで、実用部品への展開が進みつつある。その中で重要視されているのが、積層造形以外の周辺工程の技術連携および整備である。積層造形には、造形検討・処理の基本的なプロセスに加え、材料特性の把握と品質管理、テストピースによる事前検証、レーザービーム熱源造形での応力除去とワイヤーカット処理、HIP処理、サポート除去、機械加工、面粗度改善処理、非接触寸法測定、X線CTによる内部欠陥検査、強度試験などの、金属積層造形に関わる一連のプロセスすべての整備と管理が必要となる。一例として金属技研が実施している造形工程フローを図10に示す。プロセス設計をする際、個々の工程のみに注目して設計するのではなく、前後工程を意識した形状設計、プロセス設計を実施し、造形のメリットを最大限活かす必要がある。

また実部品の造形対応の際には、各工程管理として航空宇宙業界品質管理JIS Q 9100を始めとする品質管理体制の構築は不可欠であり、CADモデル、造形工程、造

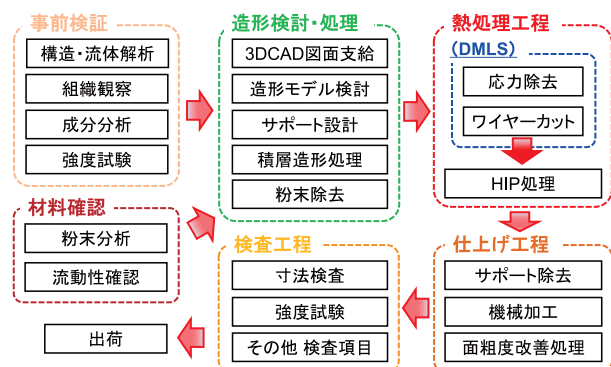


Fig. 10 積層造形部品を製作する際の工程フロー例

形品測定結果、粉末材料成分と特性の測定結果などの情報管理とトレーサビリティの確保が必要となる。HIP処理は、従来より航空宇宙分野や医療分野等々に使用されてきた実績があり、造形技術を使用した場合においても規格管理に組み込みやすいと考える。

本項では、積層造形技術を実用部品への適応する際の課題と、それに対するHIP処理の関係性について説明する。

3.1 積層造形部品の設計とHIP処理

積層造形の課題の一つとして、積層造形でメリットが得られる形状を生み出せないという事が挙げられる。多くの場合、既存の形状をそのまま金属積層造形で製作するとコスト高となり、得られるメリットは少ない。何故ならば既存形状は長い年月をかけて量産性の向上・低コスト化を図るために既存工法に合わせて改善した結果であり、設計思想と製作原理の異なる積層造形では同じメリットを得ることは難しい。一方、既存工法では特有の形状制限（加工ツールアクセス、肉厚、抜き勾配等）があり、本来理想とする形状からの変更を余儀なくされる場合もあるが、積層造形では形状の制限が少なく、理想的な複雑形状を再現しやすいという特徴がある。積層造形で製作しやすい対象製品を想定する際は、既存形状のイメージにとらわれず付加価値の高い理想形状に近い形状であることが重要となる。

上記課題の解決策の一つとして、積層造形技術と相性が良いといわれているトポロジー最適化構造や3次元ラティス構造等の高付加価値形状の適応が挙げられる。図11にトポロジー最適化とラティス構造を使用した部品形状例を示す。本形状により、部品の軽量化だけではなく、工程の短縮化も達成されており、造形技術を最大限に活かした形状設計が可能となる。

しかし、そのような形状には造形方式と材料の組み合わせの実証を行い、サポートが必要になる製品面の傾斜角度、穴、棒、板厚、鋭角のCAD形状再現性、寸法精度、造形後の粉末除去性等、造形限界の特性を事前に把握す



Fig. 11 トポロジー最適化とラティス構造を使用した部品設計の例

る必要がある。上記項目は、造形物のサイズ、材料の種類、凝固収縮の発生、変形防止サポートの追加と造形後の除去、残留応力を考慮する必要がある、すべてを満たす造形条件開発も困難で、かつ造形後の強度・金属組織など造形体品質と両立させることは難しい。HIP処理は、圧力媒体にガス圧を使用していることから、どのような複雑形状においても処理することが可能であり、内部欠陥除去の他に金属組織の調質効果により部品全体の強度・金属組織を安定化させることが出来る。積層造形特有の形状品の後処理としてHIP処理は非常に相性がいい処理といえる。

3.2 積層造形部品の仕上機械加工とHIP処理⁶⁾

積層造形の課題の二つ目として、造形後の寸法精度や表面粗度の問題が挙げられる。積層造形品の機械加工においては単純なブロックからの加工ではなく、ほとんど完成に近い形状を仕上げ加工する場合が多い。その為、加工治具や工程設計次第で出来上がりの寸法や状態が異なってしまうので造形品の設計段階で考慮すべき項目となる。特に3.1項で紹介したトポロジー最適化形状は、数値で自由に計算するので、得られた結果のままでは積層造形すら出来ない場合が多い。実用部品として使用する為には、算出されて複雑なトポロジー最適化形状を、造形可能な形状へ修正し、かつ最終的な機械加工の工程で必要になるつかみ部分や基準面を付ける等、ものを作り上げるための詳細設計を行う必要がある。

造形技術とHIP処理の相性を語る際、造形体の寸法精度に与えるHIP処理の影響は欠かせない評価項目と言える。通常、粉末焼結のようにHIP処理前の密度が低い場合、高密度化するにつれて処理前の空間体積分が収縮し、HIP処理後の寸法が変化する。しかし、積層造形品

の大部分は造形直後で99%以上の高密度体となっており、HIP処理による寸法収縮は殆ど見られない。内部欠陥の除去を目的に仕上げ加工前にHIP処理を実施しても、寸法変形が無いのでHIP前品と同様に加工することが出来る事もHIP処理のメリットと言えるだろう。

3.3 積層造形部品の検査方法とHIP処理

積層造形の三つ目の課題として、検査方法が挙げられる。粉末床溶融結合法の積層造形法では未溶解部となる粉末を環境負荷低減、コストダウンを目的にリサイクルして使用する。しかし、リサイクル時に多少の粉末劣化が生じる為、常に一定品質として認識するのではなく材料組成管理は必須となる。特に物性、プロセスへの影響が大きいと考える酸素の変動においては材料組成規格値内の管理が必要であり、分析手法を含めた各ユーザーでの管理規格が求められる。また造形時、造形エリア内に材料粉末が安定的に供給されることは造形品質には重要であり、粒子径分布や粉末流動性の確認も必要となる。

しかし、実際に上記粉末管理を行ったとしても内部欠陥は発生してしまう。それは、内部欠陥の発生要因が粉末だけではなく、形状や造形条件など複数のファクターが関係しているからに他ならない。現在、造形体内部の内部欠陥の把握にX線CTを使用した例が多数挙げられている。当然、製品形状でのCT像による評価が行えることが望ましいが、現状では透過能力と解像度のバランス、測定に必要なコスト面において全ての形状を評価する事は難しい。

もし造形プロセスの中にHIP処理が入っている場合、造形中の内部欠陥は除去されている為、開口した欠陥の確認として浸透探傷検査の実施のみに変更、もしくは全数検査ではなく抜き取り検査に変更する等、実運用に併せた管理方法に変更することが可能となる。



Fig. 12 トポロジー最適化による部品設計の流れ

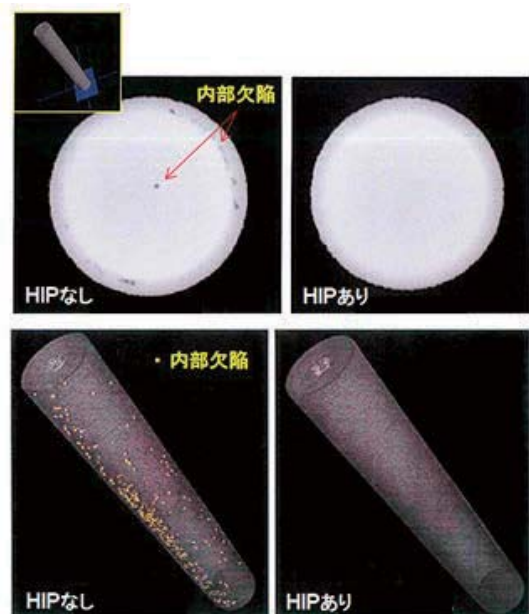
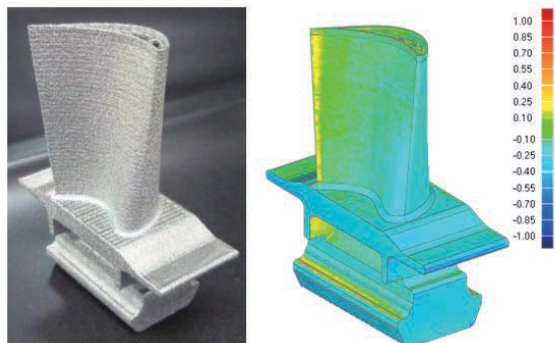


Fig. 13 造形品のHIP処理効果

次に積層造形の検査項目として形状寸法の確認が必要である。形状確認は積層造形法を用いる自由設計や一体化による性能向上を目的とした形状であることから従来多く使用されている接触式の計測手法だけでは全容を評価しきれない場合が多い。その為、現在では複雑形状やシャープエッジなものまで計測し、形状の全容を確認する事ができる3Dスキャナを併用した評価が実施されている。



左) 造形品外観 右) 3DCADモデルとの比較

Fig. 14 3Dスキャナによる寸法測定例

3Dスキャナの測定結果は、客先に報告する検査報告のデータになることは勿論だが、実部品を量産する際のサポート設計や造形配置、造形角度等の造形データの健全性を評価し、品質向上を図る為の重要なツールとなる。健全性を評価する際、造形に関するどの工程で寸法が変化しているのかを把握することが必要で、その原因を取り除く事が改善活動の主目的となる。HIP処理は、その処理による変形が少ない事もあり、寸法変化の要因として除外されることが多い。検査工程の簡略化に貢献するだけでなく、検査工程そのものに悪影響を与えない事も積層造形とHIP処理の相性の良さを示す例となるだろう。

4. まとめ

積層造形技術を使用して事業展開している欧州メーカーでも新しいコンセプト開発から最終販売まで、各工程で試行錯誤を繰り返し9ヶ月～24ヶ月の製品開発期間が必要な場合があるという。特に試作の用途ではなく正規部品として使用する際には、複雑形状を仕上加工するための機械加工装置や造形物の要求品質を確認・管理する為の分析・測定あるいは品質確認装置等、周辺装置の拡張も視野に入れ検討する必要がある。

HIP処理は、今までも精密鑄造品の内部欠陥除去や高密度粉末焼結品の作製など、金属材料を扱う多くの業界で使用されてきた。国内ではあまり表に出ない技術の為、

知名度は少ないが、欧米では当たり前のようになっている。特に近年の積層造形技術の普及により、その有益性が改めて見直されており、造形技術実用化には不可欠な技術として認識されつつある。このような認識の違いもあり、欧米メーカーと比較して国内メーカーの造形技術は5年ほど遅れていると言われている。

金属技研では、本投稿にて明記してきた造形技術、品質管理手法とHIP処理技術を併せて持つ造形受託メーカーとして、欧米との技術レベル差を埋め、顧客の積層造形量産体制をサポートする為、図15に示す技術支援内容と下記の技術提案を強化している。

- ・トポロジー最適化設計を始めとした造形メリットの高い形状提案
- ・設計から熱処理、HIP処理、仕上げ加工まで、顧客が満足する高度な造形プロセス提案
- ・安定的な造形対応を実施できる品質管理体制と環境整備

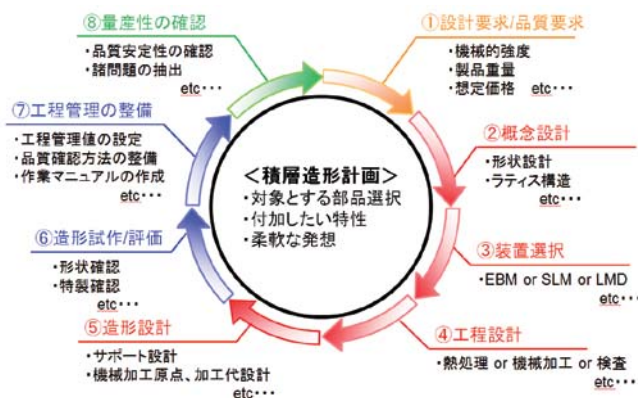


Fig. 15 金属技研の技術支援範囲

参考文献

- (1) 唐土庄太郎, 増尾大慈, 矢倉孟: 粉体粉末冶金協会講演概要集, 115 (2013)
- (2) Lewanowski, J.J. and Seifi, M., 2016 Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties. Annual Review of Materials Research, 46, pp. 151-186.
- (3) SIEMENS Gas Turbine blade
<https://www.siemens.com/press/en/>
- (4) Arcam AB :
<http://www.arcam.com/solutions/orthopedic-implants/>
- (5) 増尾大慈, 金属積層造形の適用事例および適用に向けての準備事項, 材料の科学と工学, Vol. 52, No. 5, 2016
- (6) 京極秀樹, 次世代の“ものづくり”における重要な対策, 金属積層造形技術入門

特集「わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者」(その2)

“Japanese Pioneers in Research and Development of Gas Turbine” (Part 2)

吉田 英生^{*1}

YOSHIDA Hideo

本年1月号に引き続き標記特集(その2)をお届けします。今回は全員が学界関係の先駆者——筆者にはつい「大先生」と口に出てしまう方々です。

1月号発行後あるいはそれ以前の準備中に、「貴重な特集、ただしもう20年早く企画してほしかった」といったお声を複数いただきました。確かに20年前なら、今回の特集で取り上げた方々のご存命の場合102～80歳で、部下や弟子の方々も多数いらっしゃったので、大きく異なる内容になっていたと思います。ともあれ、こうして平成が終わる1年前に、明治～大正～昭和～平成の3～4時代を生き抜かれた先駆者の記録をとどめることができたことに、あらためて感謝申し上げる次第です。

(その1)で序論を執筆いただいた前問孝則氏の『日本の名機をつくったサムライたち(さくら舎 2013)』のまえがきに次のような文章があります：

「確かに、彼らの多くは八〇代後半から九〇代の長寿であった。エネルギーな活躍ぶりは、その強靱な肉体にも裏打ちされていたのであろう。」

そこで以下のように棒グラフにしてみましたところ、まさにそのとおりだと実感した次第です。

最後に、1月号16ページの1号ガスタービン関係者記念撮影でお名前が判明している方々は以下のとおりです。

③池田英正、④山内正男、⑥須之部量寛、⑦不破廣行、⑬佐藤義、⑭飯田平八郎、⑯藤本康、⑳重見孝、㉑根矢清、㉒三輪光砂、㉓梶山泰男、㉔比気正(以上敬称略)

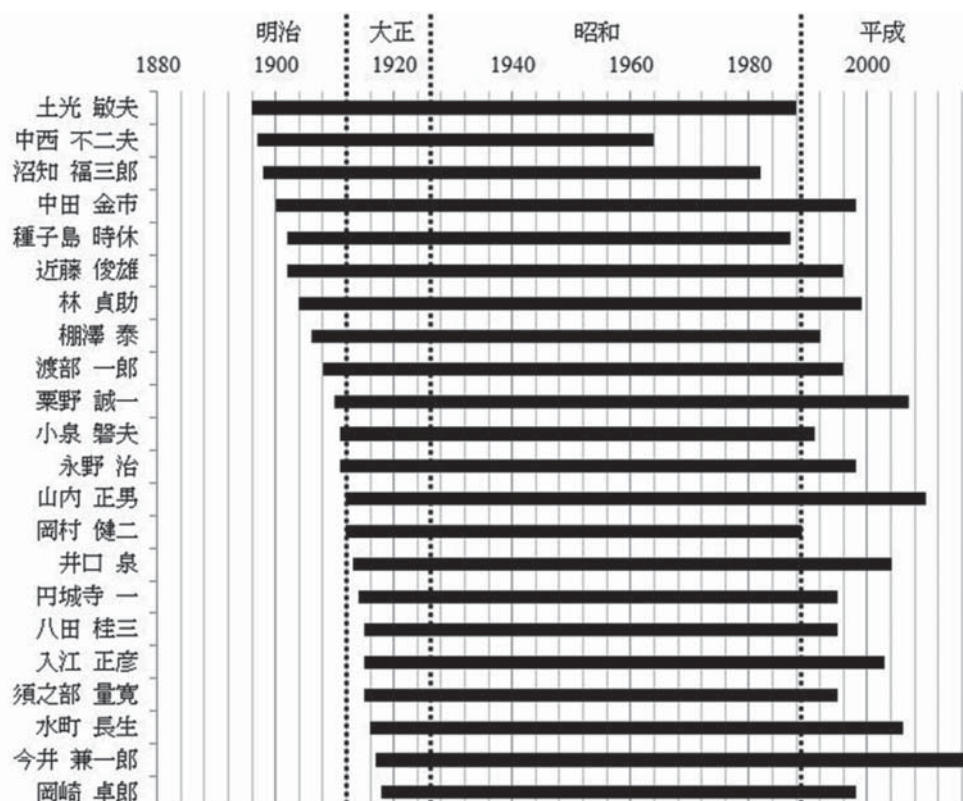
また、1月号17ページ脚注で文章を引用しました近藤敏雄氏の写真を(株)パイロットコーポレーションでお探しいただきましたので、ご紹介させていただきます。



近藤 俊雄 1902 (M35) 年10月6日-1996 (H8) 年3月6日

原稿受付 2018年3月29日

*1 京都大学工学研究科航空宇宙工学専攻
〒615-8540 京都市西京区京都大学桂
E-mail: sakura@hideoyoshida.com



特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

中西 不二夫

NAKANISHI Fujio

1897 (M30) 年1月19日 - 1964 (S39) 年6月11日



中西不二夫は1897 (M30) 年岡山県に生まれ、1920 (T9) 年7月10日に東京帝国大学工学部機械工学科を卒業した。同月に東京帝国大学工学部講師となり、同時に東大の航空研究所を兼務している。翌年7月には助教授に昇任し、8月には工学部と兼務するかたちで航空研究所の所員になっている。1937 (T12) 年から航空学第二講座を分担したが、1925 (T14) 年から2年間にわたりイギリス、フランス、ドイツ、アメリカに航空機用発動機研究のため留学した。帰国後、1929 (S4) 年から航空学第三講座を分担し、1931 (S6) 年に工学博士の学位を取得した。1935 (S10) 年4月に東京大学工学部教授に任じられ、同時に航空研究所所員にも任命されている。1937 (S12) 年には日本学術会議学術部第17特別委員会委員を務めた。1938 (S13) 年から航空原動機学第一講座を担当。1943 (S18) 年には航空研究所所長に就任し、以降様々な役職を歴任しており、その兼務先には大阪大学、中央航空研究所、陸軍航空技術研究所、航空評議会、東京帝国大学第二工学部設立準備委員会、航空局、科学研究費調査委員会、工業品規格統一調査専門委員会、科学技術審議会などがある。

終戦に伴う航空研究所廃止により、同研究所員並びに同所長は自然消滅したが、引き続き理工学研究所の設立の業務に係わった。一方、工学部においても終戦に伴い航空原動機学第一講座担当は自然消滅したが、引き続き内燃機関学第一講座、次いで高速内燃機関学講座を担当して学生の教育・研究に当たった。またこの間に理工学研究所教授を併任した。

1954 (S29) 年航空学科再開に伴い、再び航空原動機学第一講座を担当し、以後一貫して航空原動機の教育・研究に携わった。

その後1954 (S29) 年から1956 (S31) 年まで工学部長に任じ、1957 (S32) 年に定年を迎えて名誉教授となった。この間、昭和30年には東京大学生産技術研究所の観測ロケット研究連絡会委員を委嘱されている。東大の定年後は科学技術庁に出向の形で移り、航空技術研究所所長を務めたが、1964 (S39) 年に現職のまま67歳で他界した。正三位、勲二等旭日重光章を授与されている。

中西のもともとの研究分野は材料強度学であり、1928 (S3) 年に発表された軟鋼の降伏に関する研究が最初の顕著な業績とされる⁽¹⁾。1931 (S6) 年の学位論文の題目

は「軟鋼ノ降伏点ニ就テ (英文)」となっている。中西は降伏を局所的な応力ではなく断面全体の安定性の観点から理論的に考察し、理論による降伏点の実験とよく一致することを確認した。更にこの理論を発展させ、降伏点には断面の安定性に関するものと局所的な応力に関するものの2種類があることを示した。その後これらの基礎的な知見を円筒などの複雑な形状の構造に発展させ、様々な降伏現象を解明している。

材料強度学の研究は第2次世界大戦の前から晩年に至るまで長期にわたるが、大戦中は主に航空研究所における航空原動機の研究開発に携わっており、中断されていたものと思われる。戦後にこの分野の研究を再開し、晩年まで活発に学会発表も行った。日本機械学会論文集に1965 (S40) 年に掲載された単著の論文⁽²⁾では、1964 (S39) 年4月3日に通常総会講演会にて発表となっており、その日付が死去直前であることや会員資格の「名誉員・正員」という記載に現れる研究への姿勢に感銘を受ける。

航空原動機に関する初期の重要な研究に、1938 (S13) 年の日本航空学会誌に発表された「飛行機のロケット推進に就て」⁽³⁾がある。今日で言うラムジェットエンジンの特性を理論的に解析した論文で、ジェットエンジンの性能解析手法を初めて提示した研究として注目される。レシプロエンジン・プロペラによる推進法と性能を比較し、ロケット推進 (今日で言うジェット推進) は用途によっては有用なものである可能性を示して、ジェットエンジンが高速飛行に適した推進機関であることを示唆した重要な論文である。脚注には「このほか圧縮機を用いて圧縮を行う方法もあるが、これは別の機会に論ずる積りである」と述べられており、ジェットエンジン技術の基礎の確立に向けて、精力的に研究が進められている様子が如実に表れている。

また、それ以前からデトネーションに関する理論研究を行っており、1928 (S3) 年以降、機械学会に数編の論文を発表している⁽⁴⁾。

レシプロエンジンの力学に関する研究も多く見られ⁽⁵⁾、当時問題となっていた星型発動機の平衡の問題に対し、8気筒や12気筒のV型エンジンの平衡に関する新たな提案などを行っている。また、回転軸の振り振動とプロペラの曲げ振動との連成振動の実験、弁およびばねのおど

りとサージング、カム形状の最適化の解析、摩擦吸振器の理論などの研究を行っている。その他、圧力計測に用いる光学的示圧計の開発なども行っており、研究の範囲は非常に広い。

一方、東京帝国大学航空研究所が関係した様々な航空機の開発で、中西は発動機担当として研究開発に参加している⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。

同研究所の研究開発機として知られる「航研機」は1938 (S13) 年に航続距離の世界記録を樹立したが、発動機の開発には中西も中心的に参加し、1935 (S10) 年から主として力学関係を担当した。発動機はBMW-9型を改造する方針で、陸軍の開発チームと航空研究所の田中敬吉、富塚清、中西らが合同で開発にあたり、1937 (S12) 年に耐久試験を終えて5月25日の初飛行を成功させた。発動機の製造は川崎造船所が担当している。

1940 (S15) 年、陸軍と朝日新聞社からの資金により、東京・ニューヨーク間無着陸親善飛行を目指す「キ77」長距離研究機 (A-26) の研究開発が始められた。その基礎設計が東大の航空研究所に依頼され、中西も設計チームの一員として参加している。設計検討の結果、発動機には中島飛行機のハ105が選定された。

他方、高速研究機「キ78」の研究が1939 (S14) 年に始まっている。この年、陸軍から航空研究所に研究依頼があり、世界最高速の航空機の実現が最終目的とされた。航空研究所ではこれを「研三」と名付けて研究を開始した。発動機を担当した所員には富塚、中西、田中、栗野誠一、西脇仁一らの名前が見える。「キ78」は1943 (S18) 年に時速699.9キロの国内最高速度を記録した。

中西は材料強度学の研究から出発したが、その後ジェットエンジンの性能解析の基礎を築き、航空研究所の発動機開発に携わって日本の航空原動機の発展をリードした。東大の定年後、航空技術研究所の所長在任中に亡くなったが、戦後に戻った材料強度学の研究を最後まで続けていた姿が印象的である。

本稿をまとめるにあたり、多くのアドバイスを頂いた高田浩之東京大学名誉教授に御礼申し上げます。

(文：寺本 進^{*1})

参考文献

- (1) 前田清志, テクノライフ選書 日本の機械工学を創った人々, オーム社, 1994, pp. 122-123.
- (2) 中西不二夫, ヒステリシスループの形, 繰返しによる形の変化および繰返し後の塑性流動応力の上昇 (第2報, ねじりの場合の理論), 日本機械学会論文集 (第1部), 31巻226号, 1965, pp. 915-921.
- (3) 中西不二夫, 飛行機のロケット推進に就て, 日本航空学会誌, 第5巻第39号, 1938, pp. 205-214.
- (4) 中西不二夫, 浅野彌佑, デトネーションとシリンダ壁温度に関する一実験: 一定容積内におけるガスの燃焼に就ての続報, 機械学会誌, 40巻246号, 1937, pp. 615-616.
- (5) 日本航空学術史編集委員会, 日本航空学術史 (1910-1945), 丸善, 1990, pp. 284-285.
- (6) 日本航空学術史編集委員会, わが国航空の軌跡: 研三・A-26・ガスタービン, 丸善, 1988
- (7) 日本航空学術史編集委員会, 東大航空研究所試作長距離機 航研機, 丸善, 1999
- (8) 秋本実, 研究機開発物語, 光人社, 2003

原稿受付 2018年4月10日

* 1 東京大学工学研究科航空宇宙工学専攻

〒113-8656 文京区7-3-1

E-mail: teramoto@thermo.t.u-tokyo.ac.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

渡部 一郎

WATANABE Ichiro

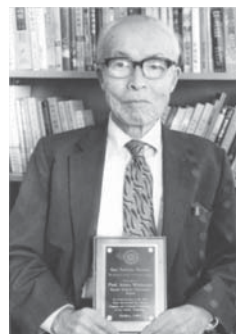
1908 (M41) 年4月13日 - 1996 (H8) 年1月4日

渡部一郎は、1908 (M41) 年4月に福島県に生まれ、1996 (H8) 年1月に87年の生涯を終えた。旧制第五中学校（現在の都立小石川高校）では飛び級により4年間で卒業し、旧制第一高等学校に入学した。その後、東京帝国大学工学部機械工学科に入学し、1931 (S6) 年3月同大学を卒業した⁽¹⁾⁻⁽²⁾。卒業後、1年間古河電工に在籍した後、大学時代の恩師富塚清教授からの勧めもあり大学に戻り、同大学大学院に進学した。大学院生の時には、水力実験室でバイパス流路の流入角度の影響、三角堰の流量係数、プロペラ水車の後流に関する研究等に取り組んだ⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。

1934 (S9) 年4月東京帝国大学航空研究所嘱託として発動機部に所属し、1936 (S11) 年8月東京帝国大学助教授に任ぜられ、航空研究所所員に補せられた。研究所において、気化器および過給機の研究⁽⁶⁾⁻⁽⁹⁾に従事し、高空性能実験室では発動機の実機実験を実施し、発動機の高空性能の修正推定法を確認した。具体的には、1938 (S13) 年5月、11,651,011kmの国際周回飛行および1万kmの平均速度186.192km/時の2つの世界新記録を樹立し、その際、航研長距離機の気化器の開発を担当した。又、高々度発動機用高圧力比過給機の研究に取り組み、1943 (S18) 年9月、陸軍より研究委託された高々度用試験飛行機の最高々度9,200mの試験飛行の成功に貢献した。このように発動機の高空性能向上の研究開発に取り組んでいた。

1945 (S20) 年8月に太平洋戦争が終り、連合軍総司令部の命令によりわが国の航空機に関する活動が全面禁止され、航空研究所が廃止・解散させられたことに伴い、浪人時代を過ごすことになった。

1946 (S21) 年7月慶應義塾大学工学部教授として赴任し、1947年8月工学博士の学位が授与された。戦前の慶應義塾大学工学部の所在地は日吉であったが、校舎は戦災を受けて四分之三を失い、溝ノ口の日本光学の工場に仮住まいした。進駐軍に接収された日吉校舎の返還の目途がつかず、工学部は1950 (S25) 年武蔵小金井の横河電機の工場跡に移転した。このように混乱した中であって、熱機関としてのガスタービンの将来性に注目して、慶應義塾大学に赴任して、直ちにガスタービンに関係する研究に着手し、終戦間もなく大学としての設備が十分ではなかったにも拘らず、日本機械学会等の学会誌



75歳頃

や論文集に遠心送風機⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾やエジェクタ⁽¹³⁾に関する論文を発表している。1955 (S30) には遠心圧縮機に関する一連の研究により義塾賞（慶應義塾大学における学術上有益な研究業績を挙げた教員を表彰）を受賞している。

1957 (S32) 年、慶應義塾大学から派遣されて3ヶ月半にわたり海外の教育研究事情の視察に出掛けた。当時は海外渡航の機会も少ない中であって、欧米の研究教育機関を訪ね、研究室訪問を通して、多くの研究者とのネットワークを構築し、研究する上で貴重な体験をした。このような数々の経験を踏まえて、研究成果を積極的に海外に情報発信することに努め、特に、米国機械学会ガスタービン部門の講演会にて研究成果を数多く発表した。同時に、大学院生、そして若手教員を海外の学会に派遣し、国際的な活動を絶えず心掛けた。研究のあり方については、1967 (S42) 年の三田評論の対談⁽¹⁴⁾や随想⁽¹⁵⁾で「これからの研究は世界的レベルにならないといけない。五年ぐらいでは世界的レベルになりませんから、十年とか二十年は研究をやっていかなければならないと思う」と述べている。終戦の混乱期を経て、ようやく社会が落ち着いてきた時期に既に世界レベルの研究を志向していたことがわかる。

その後もガスタービンに関する研究に精力的に取り組む、ラジアルタービン内部流れや脈動流下の性能に関する研究を始めとして、遠心圧縮機の性能に及ぼすレイノルズ数の影響、遠心圧縮機や斜流圧縮機羽根車、インデューサそしてディフューザ内の流れの研究、レゾナンスチューブを始めとする各種熱流体機器に関する研究、二次元・三次元ディフューザの乱流境界層流れと剥離流れ等、流体機械ならびにそれに関連した熱と流れの基礎的な研究まで幅広く取り組んだ。

慶應大学における講義については、主に流体機械を担当し、講義の際には余り雑談や冗談は無く、大変真摯な話し方であった。渡部は、多くの教科書を書き、出版した教科書や便覧の編集では、空気機械から内燃機関、熱力学の分野⁽¹⁶⁾⁻⁽²⁰⁾までカバーしている。

産学連携についての取り組みに関し、産業界との技術交流を図る目的で設置された一般財団法人慶応工学会の発展に腐心し、運営委員会を設けて機構改革などの充実に努めたことから判るように産学協同による工学研究の必要性を認識していた。

1960 (S35) 年より高村塾長のもとで常任理事を1期3年半務め、大学全体の教育研究の業務に携わった。工学部の日吉復帰は工学部関係者の悲願であり、当時の宗宮知行工学部長と共に復帰に向けて奔走し、日吉復帰の具体化を図ったが未だ機熟さず、理事任期中には日吉移転に至らなかった。しかし、10年後の1971 (S46) 年に日吉地区 (矢上台) への移転が実現した。

ここでちょっと見方を変え、渡部のあだ名を紹介すると、白 (うす) と呼ばれていた。後年、慶應義塾大学での授業中、しゃがんで黒板にチョークを走らせている姿は白と言うあだ名を思い起こす。それはどっしりとした安定した渡部の研究態度を表している。白と呼ばれたのは以前のことであり、門下生の間ではなべちゃんと呼ばれ、研究室名もなべ研で通用した。

1974 (S49) 年3月には27年8ヶ月にわたる慶應義塾大学工学部 (後に理工学部) 機械工学科における研究と教育の生活に幕を閉じた。この間、学部と大学院の整備と充実に尽力し、研究室では学部、修士課程ならびに博士課程の学生を熱心に指導し、多くの人材を企業、大学、研究所に送り出した。

1974 (S49) 年3月に慶應義塾大学退職後、名誉教授の称号を授与され、引き続き青山学院大学教授、そして1977 (S52) 年4月より関東学院大学教授、更に1984 (S59) 年からは関東学院大学工学総合研究所顧問として、教育と研究の指導に当たった。この時期、米国機械学会ガスタービン講演会に度々参加し、その都度、報告記をガスタービン学会誌に纏めていた^{21)~23)}。海外の大学や企業を訪問する機会が多かったが、見学先で先方が説明する際、メモを取ることに懸命になり過ぎて、相手が強調している点を聞き逃すことがあってはならないので、説明を受けた際、内容を頭に入れて、夜、宿泊先のホテルで見学した内容と細かい数字をしっかりと反芻して記録に留めることが良いと研究室で語っていた。

学会活動に目を転じると、ガスタービンに関係することが第一に挙げられる。1969 (S44) 年6月、米国機械学会ガスタービン部門のTom Sawyer氏らが来日し、日本機械学会との共催による国際ガスタービン会議を東京で開催したい旨の申し入れがあった。渡部を始めとするわが国のガスタービン関係者の間でこの問題に関して意見交換がなされた結果、米国側の申し入れを受け入れることになり、開催の準備に取り掛かった。1971 (S46) 年10月、東京九段北の丸公園の科学技術館でわが国初のガスタービン国際会議が開催され、併せて会議の組織委員長として会議の運営に尽力した²⁴⁾。講演発表と併せてガスタービンの展示会を含む大規模な企画であり、参加者の数も想定以上で、わが国のガスタービン関連企業からの協力もあり、予想以上の成功を収めた。この様に国際会議開催の準備の段階から中心的な役割を果たし、会議終了後もガスタービンに関する学術団体設立に向けた

活動が続いた。会議で組織された産官学の研究者や技術者のネットワークを活かす為にガスタービン協会またはガスタービン工業会を作ったかどうかとする意見が出され、その様な要望を踏まえて、設立準備委員会において議論を重ね、1) ガスタービンに関する情報の国際的視野での交換と配布 2) ガスタービンに関する懇談の場の提供を二つの柱として、1972年6月に日本ガスタービン学会の前身である日本ガスタービン会議が設立され²⁵⁾、その初代会長に就任した。設立後は会議の運営、法人化委員会委員長などを務め²⁶⁾、1976 (S51) 年5月に日本ガスタービン学会に組織変更され、ガスタービン学会の創立から運営が軌道に乗るまでの揺籃期²⁷⁾に多大な貢献をした。

ガスタービン会議設立の頃、学生との間に以下のようなやりとりがあった。研究室の大学院生を集めて、ガスタービン会議設立の計画を話され、最後に、「皆さんにも雑用が増えることになると思うが、設立に賛成してくれるか」と問われ、偉い先生なのに我々のような若輩にも配慮いただいていることに感じ入ったことを門下生の一人は述懐している。

渡部は立場上、多くの国際会議に出席し、発言する。このような場合、当然英語でスピーチするが、決して流暢なものとは言えず、アメリカ流の発音と異なり、旧制第一高等学校で学習した英国風でゆっくりと正確に話す。このことは科学技術の分野では大切なことであり、大学院生は正確に話すように心がけていた。

以上のように長年にわたり研究と教育に尽力した功績に対して1983 (S58) 年4月勲三等旭日中綬章が授与された。

渡部の趣味を語ると、テニスに始まりテニスに終わるのかもしれない。硬式テニスがまだ十分に普及していなかった少年時代から、東京・田端にあったわが国有数の歴史を誇るポプラクラブ²⁸⁾でテニスに親しんだ。旧制第五中学校在学中には、同クラブの鹿島次郎氏と組んだダブルスで1924 (T13) 年関東中学大会で優勝したり、その後進学した旧制第一高等学校時代には庭球部の選手として旧制第三高等学校 (京都) との対抗戦などでも活躍した。このポプラクラブを当時主宰していた針重敬喜氏 (早稲田大学英文科卒、わが国の硬式テニスの草分けの一人で永く日本庭球協会理事などを歴任) の長女八重子様は渡部夫人である。慶應義塾大学矢上台の工学部親善テニス大会等に参加されるなど、高齢になっても、テニスを続けられ、晩年に白内障の手術を受けた後、視力が大幅に回復し、テニスボールがよく見えるようになったことを大変喜び、もっと早く手術を受けていればテニスをするのに具合が良かったと述懐する位、テニスの話をする時には目元が緩むのが印象に残る。

太平洋戦争中、家族は山形県に疎開し、戦争終了後、家族が疎開先から戻るまで、現在の表現を借りれば、渡部は東京で単身赴任の生活を過ごした。その間、航空研

究所の廃止に伴い、慶應義塾大学に移るまで浪人生活が続け、その頃、御茶ノ水のニコライ学院に通ってロシア語を学び、後年、石川島播磨重工業の浜島操氏と共同でソ連の学術書を翻訳出版し、又、レニングラード工科大学に出張する機会²⁹⁾を持ったのは、浪人時代のロシア語の学習が反映していたのではないかと推察される。

子息渡部康一氏（慶應義塾大学理工学部名誉教授）の談によれば、渡部は家庭で研究や仕事の話や殆どしないので、ガスタービンに関係する話をあまり聞いたことはないとのことである。慶應義塾大学の日吉矢上台に移転後、昼食時には助手や院生と一緒に居室の前にある会議室のテーブルを囲みながら、海外出張の話や昔話をすることが続いていた。そのような折、航空研究所で愛羊会と呼ぶLambのHydrodynamics輪講会で谷一郎、曾田範宗、川下研介先生らとの交友の話やテニスの話を聞くことができたが、航空研究所時代の専門的な話題を学会誌などで語る記事や回顧談を見ることは非常に少ない³⁰⁾。

大学関係の仕事を離れた後も、弟子達が集まり、不定期ながら研究成果を発表するターボ研究会が続き、渡部は欠かさず出席し、必ず前列で質問や意見を述べ、併せて、研究会の終了後は懇談会に移り、門下生から近況の報告を受け、いつまでも門下生達の研究の進展を心配していた。渡部から直接教えを受けた門下生も既に現役を引退しているので、ターボ研究会も自然に消滅した状況にあるが、晩年になっても渡部の研究に対する真摯な姿を見ることができた。

このように飾らぬ人柄と最後まで研究者としての姿勢を崩さなかった渡部の姿を門下生は忘れることができない。

渡部一郎に関する年代記については、友人の水町長生東京大学名誉教授、ならびに門下生の有賀一郎慶應義塾大学名誉教授が纏めた「渡部一郎先生を偲ぶ」と題する追悼記^{1)・2)}を中心にして、ガスタービン学会や三田評論の文献資料、そして、子息の渡部康一慶應義塾大学名誉教授から話を直接伺い、さらに門下生の目を通して、できるだけ年代と内容の正確さに努めたことを記し、併せて資料収集と原稿作成に協力頂いた方々に謝意を表す。

(文：本阿彌 眞治^{*1)})

参考資料

- (1) 有賀一郎、渡部一郎先生を偲ぶ、三田評論 979号 (1996) 94-95
- (2) 水町長生、渡部一郎先生を偲ぶ、ガスタービン学会誌, 24巻93号 (1996.6) 110
- (3) 渡部一郎、側流に関する実験、応用物理 2巻5号 (1933), 191-193
- (4) 渡部一郎、一般三角堰の流量係数に就て、機械學會誌36巻 (1933) 199号, 765-766
- (5) 渡部一郎、プロペラ水車の後流に就て、機械學會誌 37巻 207号 (1934) 420-423
- (6) 渡部一郎、直線翼遠心超過送込機の翼数に関する小考察、

機械學會論文集 1巻2号 (1935) 135-139

- (7) 渡部一郎、柴田浩、ルーツ送風機に依るラトー・ターボ過給器の性能実験、機械學會誌 38巻 (1935) 213号, 29-30
- (8) 渡部一郎、F.C. Stokes, 航空發動機用氧化器の發達、日本航空學會誌 3巻20号 (1936) 1439
- (9) 渡部一郎ほか、遠心超過送込機の翼数、導流翼数を変化した場合の実験並にサージ現象に関する考察、機械學會誌, 40巻242号 (1937) 399-400
- (10) 渡部一郎、佐藤 豪、遠心送風機のディフューザ内の流動に関する考察、機械学会誌50巻344号 (1947) 75-78
- (11) 渡部一郎、遠心送風機の翼車翼型に関する実験的研究 第1,2報、機械學會論文集14巻47号 (1948) 32-43
- (12) 渡部一郎、遠心送風機の翼車翼型に関する研究 第4報 翼数の問題、機械学会誌52巻 (1949) 368号 265-
- (13) 渡部一郎ほか、空気エゼクタの実験的研究 第1報 面積比の性能に及ぼす影響、機械學會論文集 21巻 (1955) 304
- (14) 山崎恵三、特集工学部の現状と将来、渡部一郎教授に聞く、これからの工学教育、三田評論 67巻664号 (1967) 24-28
- (15) 渡部一郎、大学のあり方を考える、三田評論, 85巻735号 (1974) 53-55
- (16) 渡部一郎監修、岡野修一、笠原英司編修、エネルギー機械、基礎シリーズ、実教出版 (1967)
- (17) 渡部一郎、岡野修一、笠原英司、原動機、実教出版 (1973)
- (18) 渡部一郎、機械工学全書14巻空気機械、コロナ社 (1982)
- (19) 渡部一郎、内燃機関、コロナ社 (1982)
- (20) 渡部一郎、機械工学講座17、熱力学、共立出版 (1975)
- (21) 渡部一郎、ASMEアムステルダム大会に参加して、ガスタービン学会誌, 12巻46号 (1984) 27
- (22) 渡部一郎、ASMEヒューストン大会に参加して、ガスタービン学会誌, 13巻50号 (1985) 36
- (23) 渡部一郎、ASMEデュッセルドルフ大会に参加して、ガスタービン学会誌, 14巻54号 (1986) 29
- (24) 渡部一郎、日本ガスタービン学会の回顧と展望、ガスタービン学会誌, 20巻79号 (1992) 35
- (25) 渡部一郎、日本ガスタービン会議の発足に当って、ガスタービン会議会報, 1巻1号 (1972.9) 1
- (26) 渡部一郎、法人化委員会報告、ガスタービン会議会報, 1巻3号 (1974.3) 61
- (27) 渡部一郎、1977年国際ガスタービン会議を終えて、ガスタービン学会誌, 5巻18号 (1977) 1
- (28) 針重敬喜、テニスの人々 (1968.8)
- (29) 渡部一郎、レニングラード工科大学に出張して、ガスタービン学会誌, 9巻36号 (1982) 59
- (30) 第2回ガスタービンに関する座談会記録 (内燃機関部門主催)、機械学会誌 17巻58号 (1951) 175

原稿受付 2018年4月12日

* 1 E-mail: honamis@rs.tus.ac.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

栗野 誠一

AWANO Seiichi

1910 (M43) 年12月10日 - 2007 (H19) 年9月4日



栗野誠一は福井市生まれ、父親の転任に伴い千葉県の佐原町に移り住み、佐原中学校、木更津中学校、水戸高校を経て、東京帝国大学工学部機械工学科を1934 (S9) 年3月に卒業し、同年4月に東京帝国大学航空研究所嘱託になった。

この嘱託となった事情は、富塚清著「航研機」の編集後記に栗野自身が「私は1934年(昭和9)東大工学部の機械工学科を卒業した。卒業したものの、当時は『大学は出たけれど』の一大不況の時代であり、就職先もままならぬ時代であった。航空学科の教授で駒場の航研の所員でもあった恩師富塚清先生から『航研にでも来てみるか』とのお誘いを戴き、ここに私の楽しい研究生生活が始まった。身分は嘱託、月給は75円、その財源は三井高公氏(三井家11代当主)よりの寄付金百万円によるものだったらしい」と書いている⁽¹⁾。

嘱託として入所した栗野は、田中敬吉教授の指導を受け、燃焼ガスのis線図の作成を始め、燃料が濃い状態の燃焼ガスのis線図⁽²⁾や理論空燃比と燃料が薄い状態の燃焼ガスのis線図⁽³⁾について研究成果を発表している。

これに続いて、栗野は、自ら作成したis線図を用いて航空用ガソリンエンジンの性能解析に取り組み、燃料消費率を減らすためには、17-20程度の薄い空燃比を使えばよいことなどを明らかにしている⁽⁴⁾。

ここに引用した東京帝国大学航空研究所報告と彙報はいずれもインターネット上でCiNiiから自由にアクセスしダウンロードできる。

1939 (S14) 年4月に東京帝国大学助教授、東京帝国大学航空研究所員になった栗野は、航空研究所が1940 (S15) 年1月に陸軍から委託された高速研究機「研三」のプロジェクトに参画しエンジン開発を担当した。

このプロジェクトでは新たなエンジンを開発するのではなく、川崎重工がライセンス生産のためにドイツから輸入していたダイムラー・ベンツのエンジンDB601Aのブースト+300mmHgで1,175HPtという最大出力を1,500HPに向上させることを目的としていた。

栗野は先の理論的な研究から得られた知見と手法を基に、(1)遠心過給高ブースト化、(2)メタノールの気化熱で吸気温度を下げ、吸入空気量を増加させるメタノール噴射、(3)メタノールはアンチノック効果があることからさらなる高ブースト化で高出力化し、1942 (S17) 年5月の地上試験で、ブースト+550mmHg、2,600RPMで

1,550HPの出力を達成し、飛行試験でも1943 (S18) 年12月に高度3,527mで699.9km/hと当時の最高速度を得ている⁽⁵⁾。

なお、この「研三」機キ-78の主翼には、谷一郎航空研究所所員が開発した層流翼がわが国で初めて用いられた⁽⁵⁾。

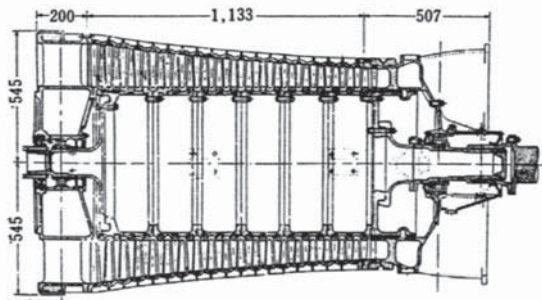
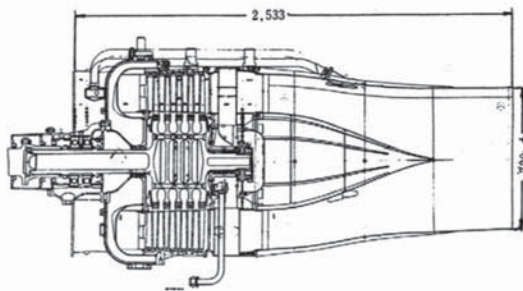
栗野は1940 (S15) 年頃から、将来の航空原動機はピストンエンジンに代わりガスタービンになると考えて研究を始めており、その研究成果を「ロケット推進と組合せた航空用燃焼タービンの熱力学性能」と題して1942 (S17) 年7月9日に日本機械学会の講演会で発表した。ところが、陸軍は講演用の掛け図まで取り上げ、出版も差し止めた。

この時代、高速におけるジェット推進の必要性を理論的に論じたラムジェットの研究⁽⁶⁾はあったが、ターボジェットとターボプロップについてはまだ良く理解されておらず、当時の航空用エンジンの専門書⁽⁷⁾においても、元々ページ数の少ないジェットエンジンの章の中でもターボジェットとターボプロップについての記述は極めてわずかしかない。

これに対して、栗野の研究報告は、自ら作成した燃焼ガスのエントロピ線図に基づいてターボプロップやターボジェットの可能性を予測し、熱力学的な性能計算法と計算結果を示したものであり、従来のものに比べて画期的な研究であった。そのために陸軍が即座に機密扱いにしたものと思われる。この報告は、発表から3年後の1945 (S20) 年3月になって、配布先を限定した秘密報告として印刷されている⁽⁸⁾。

栗野の研究発表からジェットエンジンの重要性を認識した陸軍は、航空研究所との間に委託研究「研八」を開始し、1942 (S17) 年9月に石川島芝浦タービンに試作命令を下した。これにより軸流19段の圧縮機(図1)、4本のキャン型燃焼器、5段の軸流タービン(図2)からなるターボ・プロップエンジン「ネ-201」の設計製作が開始された⁽⁹⁾。

当初の計画では1943 (S18) 年中に完成する予定であったが、回転機械についての知識不足から具体化に苦労した上、さらに試作1号機の19段軸流圧縮機がバーストして、製作し直したので、開発は大きく遅れ、1945 (S20) 年4月に2台目がようやく完成したが、終戦時には石川島芝浦タービンで試運転中であつた⁽⁹⁾。

図1 ネ-201 19段圧縮機⁽⁹⁾図2 ネ-201 5段軸流タービン⁽⁹⁾

また、林貞助らのジェットエンジンの開発も、栗野の研究発表がきっかけになり、ジェットエンジンの重要性を強く意識した陸軍が川崎航空機に開発を命じたものである。

東京帝国大学航空研究所はGHQの航空禁止令によって1945（S20）年12月31日に廃止され、栗野の東大助教授・航空研究所所員という職は自然消滅した。栗野はそれまで併任していた第一工学部の授業担当からも1946（S21）年3月末に退職し、1947（S22）年1月13日に日本大学教授に就任した。

栗野は、日本大学でも得意とした性能解析を続け、ガスタービンの解説記事やジェットエンジンの展望記事を専門誌に数多く寄稿した。航空再開を記念した日本応用力学会の応用力学・1952（S27）年8月号の航空特集号にも、他の航空関連の専門家と並んでジェットエンジンの専門家として依頼されて寄稿している⁽¹⁰⁾。

この日本応用力学会は、航空禁止令によって解散した日本航空学会の権利義務を継承した日本科学文化協会から名称変更した学会である。同学会は、航空再開により1953（S28）年6月には再び日本航空学会と改称している。

さらに栗野は、軍関係から払い下げられた工作機械を揃えて学内の試作工場を充実させ、動力計を試作し、自らの熱機関の試験研究に用いるとともに、外部からの要望を受けて1,000台に及ぶ動力計を供給するなどしている。

また、栗野は、研究分野をエネルギー全般に広げ、日本機械学会からの依頼を受けて南極基地の建設に当初から協力した。そこではディーゼルエンジンで発電して排熱回収し融雪造水と温水作成を行うコージェネレーションを世界で初めて実現し⁽¹¹⁾、南極で使用する風車も設計・製作し、昭和基地で実地試験もおこなっている⁽¹²⁾。

栗野の功績として忘れてはならないのは、「日本航空

学術史：1910-1945」（1990）とその姉妹編の「研三・A-26・ガスタービン—わが国航空の軌跡」（1998）及び「航研機—東大航空研究所試作長距離機」（1999）の3部作をまとめ上げて、丸善から出版し後世に残したことである。

「日本航空学術史：1910-1945」は1946（S21）年秋、日本科学文化協会において、わが国航空学術・技術のありのままの記録を残そうと、東大航空研究所の元所員等で日本航空学術史編集委員会が組織され、1年ほどで原稿はまとめられたが、当時の財政事情で印刷に到らず長い間そのままになっていたものである。

委員会のメンバーの中では長命であった栗野は、80歳を前に編纂・出版に着手し、10年余をかけて非常な努力の末、姉妹編の2冊も含めて、3部作の出版にこぎつけたのである。

本稿をまとめるにあたって貴重な情報と資料を提供していただいた日本大学の石井進常務理事、庄司秀夫名誉教授に深く感謝致します。また、原稿を読んで下さり、数々のアドバイスをいただいた高田浩之東京大学名誉教授にお礼申し上げます。

（文：筒井 康賢*1）

参考文献

- (1) 富塚清, 航研機, (1996), p. 201, 三樹書房.
- (2) 田中敬吉, 栗野誠一, 過濃混合気ガスのエントロピ線図, 東京帝国大学航空研究所報告, Vol. 9, No. 118, (1935), pp. 493-528.
- (3) 田中敬吉, 栗野誠一, 理論的並びに過剰空気量の下における燃焼ガスのエントロピ線図, 東京帝国大学航空研究所報告, Vol. 10, No. 128, (1935), pp. 282-297.
- (4) 田中敬吉, 栗野誠一, ガソリン発動機のサイクルに及ぼす混合気比並びに圧縮比の影響, 東京帝国大学航空研究所彙報, No. 144, (1936), pp. 507-526.
- (5) 日本航空学術史編集委員会, 研三・A-26・ガスタービン—わが国航空の軌跡, (1998), pp. 1-101, 丸善.
- (6) 中西不二夫, 飛行機のロケット推進に就て, 日本航空学会誌, Vol. 5, No. 39, (1938), pp. 205-214.
- (7) 富塚清編, 航空発動機, (1943), pp. 1303-1343, 共立出版.
- (8) 栗野誠一, ロケット推進と組合せた航空用燃焼タービンの熱力学性能, 東京帝国大学航空研究所報告, Vol. 23, No. 327, (1945), pp. 147-188.
- (9) 日本航空学術史編集委員会, 日本航空学術史：1910-1945, (1990), p. 130, 丸善.
- (10) 栗野誠一, ターボ・ジェットの高空性能, 応用力学, Vol. 5, No. 29, (1952), pp. 82-93.
- (11) 栗野誠一, 竹内貞男, 南極資料, No. 84, (1985), pp. 63-79.
- (12) 栗野誠一, うず電流形電磁ブレーキをそなえた静翼付き風力タービン, 日本機械学会論文集B編, Vol. 46, No. 401, (1980), pp. 57-66.

原稿受付 2018年3月16日

* 1 高知工科大学名誉教授
E-mail: tsutsui@msi.biglobe.ne.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

八田 桂三

HATTA Keizo

1915 (T4) 年3月30日- 1995 (H7) 年6月13日



はじめに

八田桂三は、教育、研究、科学技術行政、大学・学協会運営等幅広い分野に多大の足跡を残しているが、ここではそのうちのジェットエンジンやガスタービンに関する事柄を中心として記すこととする。八田の業績一般については、弟子の一人である田中英穂が八田に捧げた追悼の辞⁹⁾の中に簡潔にまとめている。

最初のジェットエンジン研究

八田桂三は、京都に生まれ、1937 (S12) 年に東京帝国大学工学部機械工学科を卒業、同年同学航空研究所の研究業務を嘱託され、1938 (S13) 年に同学工学部講師、1939 (S14) 年に同学助教授に任じられた。1942 (S17) 年6月に航空研究所所員に兼補。八田は、この間の状況について、次のように振り返っている¹⁾。

「敗戦前と申しますか戦時中と申しますか始めの約10年間は工学部が本務で旧航空研究所が併任でしたが、事実上は航空研究所の方に入りびたっておりまして。戦争がひどくなるに従い、ピストンエンジンの改良や丁度新しく始まった許りのジェットエンジン、ラムジェットエンジン、(両方を当時加熱噴流推進と呼んでおりました。)やロケットエンジンなどの具体的試作開発などに関係させられ、忙しくきりきりまいをしていました...。」

これより、八田の研究人生が、ピストンエンジンのみならず、ジェットエンジンとともに始まっていることが分かる。しかし、1938 (S13) 年ころ、ジェットエンジンは未だよく知られていなかった。それに関して八田はこう書き記している³⁾。

「日本におけるジェットエンジンの歴史をのべるには、日本航空学会誌昭和13年7月号に掲載された中西不二夫先生の論文「飛行機のロケット推進について」にふれないわけにはいかない。この論文のロケット推進とは、当時日本ではそう言っていたのだが、今日のジェット推進のことである。(中略)しかし発表当時東大航研以外では殆ど何の関心も呼ばなかった。」

すなわち、1938 (S13) 年当時、まだジェットエンジンへの関心はあまり高くなかったのであるが、この頃既に東大航研においては、中西・八田らによりジェット推進に関する基礎研究が開始されていた。日本航空学術史⁴⁾によると、八田は、1938 (S13) 年から1945 (S20)

年までの間に、次の三つの研究を実施している。

1. 加熱噴流推進装置に関する研究

主務者 八田桂三
職名 東大助教授 航空研究所員
期間 昭13-昭20

2. 動圧ロケット (Ram Jet) の研究

主務者 中西不二夫
八田桂三
職名 東大教授 航空研究所員
東大助教授 航空研究所員
期間 昭13-昭20.3

3. 振動燃焼ロケット (V-1原動機) の基礎的研究

主務者 中西不二夫
八田桂三
職名 東大教授 航空研究所員
東大助教授 航空研究所員
期間 昭20.1-昭20.8

これらのうち、1. は、加熱噴流推進装置の諸方法やそれぞれの性能に関する研究で、試作研究も行っている。2. は、Ram Jet についての基礎研究で空気取入口の絞りと推力の限界値の関係についての理論的研究や気流中における燃焼の研究で、さらに模型実験を実施している。3. は、1945 (S20) 年1月に開始されたが、途中で終戦となる。

このように八田桂三は、1938 (S13) 年時点ですでに、中西不二夫を助けて現在のジェットエンジンに関する研究に着手している。

東京帝国大学航空研究所

八田が研究者生活をスタートした東京帝国大学航空研究所は、設立当初は越中島にあったが、関東大震災を契機に、1931 (S6) 年ころに東大農学部敷地西端 (現在の駒場リサーチキャンパス) に移設された。国家の期待を担う学内で最も近代化された研究所として莫大な予算が投じられ、その設備などは立派なものであった⁵⁾。しかし、1945 (S20) 年8月に終戦を迎えると、GHQの航空禁止令により、航空研究所は廃止される。この間の状況について、八田は次のように述べている²⁾。「技術である航空が運航、生産だけでなく、航空に関するいっさいの研究、教育まで禁止されたのは、ある意味では戦時中

の日本の航空技術の実力の大きさを示すものかもしれませんが。しかし、それにしてもまさか風船爆弾のためでもあるまいとおもいますが、気球（飛行船に非ず）の研究、教育まで禁止したり、旧東京帝大航空研究所の私の研究室にあった空気源用ターボブローまで、ジェットエンジンに関する研究に使ったという理由で米軍がガス切断して破壊、持ち去ったりしたのですから、同じころ行われた理研の仁科研究室のサイクロトロン破壊が後でアメリカ本国で問題となったように、やはり戦争につきものの現場における行きすぎもあったようにも思います。」

航空研究所が廃止され、八田は1946（S21）年4月、東京大学助教授として本務の工学部に戻り、暫定的に設けられた工学部内燃機関学科の助教授を務めた後、機械工学科の助教授として約8年を過ごす。

航空再開

1952（S27）年、講和条約が発効し航空の研究・教育が可能になると、東大は、1954（S29）年4月、工学部に航空学科を再開し学生の受入れを開始すると同時に、駒場の理工学研究所（戦前の航空研究所が解体された後、その一部で作られた研究所）に新しく航空部門を増設する。

八田は1954（S29）年7月、その新しく出来たターボジェットの講座の教授に就任し、流体機械の非定常流体力学問題などを主たる課題として研究を開始した。そして、田中、高田らと共に、ジェットエンジンやガスタービンの非定常流動現象や、翼列フラッターなどの流体関連現象の流体力学的解明に先鞭をつけ、わが国のガスタービン開発に大きく貢献する。

八田はその傍ら、1956（S31）年8月から1968（S43）年10月まで、工学部航空学科の教授を併任し学生の教育・研究の指導も行った。

理工学研究所は、1958（S33）年に再び航空研究所となり、さらに1964（S39）年には宇宙航空研究所となる。この間、八田は1970（S45）年11月から1972（S47）年2月まで宇宙航空研究所の所長を務めた。

一方、国は通産、運輸の両省から出た要求を併せ、航空技術審議会で審議の上、1955（S30）年7月、総理府に航空技術研究所を発足させる。（これは、後に科学技術庁所属となる。）

八田は、その審議の途上、政府が海外研究施設調査のために派遣した航空技術調査団（団長守屋富次郎東大教授）に原動機班長のような形で参加し、1953（S28）年10月から翌年2月まで約4ヶ月にわたり、欧米諸国の状況をつぶさに視察・調査して、航空技術研究所の試験・研究設備の計画などに貢献した。

戦後のジェットエンジン、ガスタービン開発の始まり

航空宇宙学会誌上の随想⁽²⁾で八田は、こう述べている。「戦後のジェットエンジン開発の始まりは、1952（S27）年に通産省の助成をうけて試作を行った大宮富士工業

（現富士重工大宮工場）のJO-1で、実は私がたきつけたものです。」

しかし、このJO-1は部品の製作が大部分完了した段階で、通産省の方針もあって1953（S28）年7月 石川島重工、富士重工、富士精密、新三菱重工の4社の共同出資により設立された日本ジェットエンジン株式会社（のち川崎航空機が参加）に組立及び運転が引き継がれる。かくてJO-1は日本ジェットによって、1955（S30）年に運転試験が行なわれた。しかしその段階で種々の検討が行われた結果、新構想のもとに再出発する方が得策であるとして、1955（S30）年12月JO-1の試作研究は打ち切られることになった。

日本ジェットは、これらの経験も参考として、防衛庁のジェット中間練習機向けのターボジェットJ3の開発を進めていくことになる。その後日本ジェットは解散したが、J3の生産は石川島播磨重工に引き継がれ、実用エンジンとして成長していく。JO-1の詳細については、高田による回想⁽⁶⁾を参照されたい。

八田が指導的役割を果たしたのは航空エンジンだけではない。八田は次のように述懐している⁽²⁾。

「占領期間中航空は禁止でしたが、ガスタービンのほうは航空用でなければよいわけで、運輸省の運輸技術研究所や通産省の機械試験所、あるいは大学などでもしだいに研究が進められるようになり、占領末期には民間重工業各社でも研究開発が進めはじめられました。私が多少関係したのは三菱長崎の運輸省航海訓練所の練習船北斗丸用船用ガスタービン⁽⁷⁾や、通産省の助成を受けて試作研究を行った三菱横浜の発電用ガスタービン（2SC-IRE型式で、当時としてはいろいろの技術開発が行われました）などが記憶に残っております。」

ここで触れられている「北斗丸用船用ガスタービン」とは、運輸省の補助金を得て三菱重工業（当時三菱造船）長崎造船所にて開発・製作され、1954（S29）年に運転が開始された廃熱再生式2軸オープンサイクル型式の我が国初の実用ガスタービン（商船用では世界で2番目）のことである。

また、後者の「三菱横浜の発電用ガスタービン」に関しては、高田（当時八田・岡崎研究室の学生だった）による興味深い記述がある⁽⁸⁾。「昭和26年夏、東日本重工（現三菱重工）の横浜造船所では2軸中間冷却・再熱・再生式の2500HP船用ガスタービンの試作研究が始まった。秋頃だったと思うが、研究室の学生一同・大学院の先輩たちも一緒に機械科の会議室に呼び集められ、圧縮機の翼列の計算を手伝わされた。岡崎先生が黒板に式を書き、我々はそれに従ってタイガー計算機を回す。造船所の課長さんたちも来て居られた。八田先生はお茶を入れて下さった。」当時のガスタービン研究開発の一部の雰囲気とともに八田の人柄も伝わってくる。

八田をめぐる話がもう一つある。1957（S32）年11月、三菱の長崎造船所で防衛庁向け試作ガスタービンの軸流

圧縮機の翼が旋回失速のため全損するという事故が起きた。八田は、岡崎、田中、高田らと共に、この非定常現象の究明と対策に当たり、問題の解決のため努力した。その後、新しく設計された軸流圧縮機は航空技術研究所における要素単独試験で、性能と安全が確認され所期の目的を達した。これは多分日本で最初の、実機における旋回失速による事故であっただろう。

ジェットエンジン、ガスタービンの発展期

航空技術研究所は1963 (S38) 年、創立以来進めて来た設備整備と研究成果を活用してジェットエンジン3社〔石川島播磨重工 (IHI)、川崎重工 (KHI)、三菱重工 (MHI)〕の協力のもとに、垂直離着陸 (VTOL) 機用リフトエンジンの研究開発を開始した。ジェットエンジン研究委員会が作られ、八田は委員長、岡崎、田中、高田らは委員としてこれに参画した。JR-100, JR-200, JR-220 が順次試作され、1971 (S46) 年6月にJR-100Fを搭載したフライイング・テストベッドによる自由飛行に成功した。

1971 (S46) 年、通産省工業技術院の大型工業技術開発制度のもとに、「航空機用ジェットエンジンの研究開発」が始まった。これは、低公害で低燃費の高バイパス比ターボファンエンジンFJR710を開発しようとするもので、航空宇宙技術研究所と国内エンジンメーカー3社 (IHI, KHI および MHI) の協力により、大学等の支援も受けて行われた。

八田はこれに対し、工業技術協議会・大型技術開発部会のジェットエンジン分科会長として貢献した。第1期 [1971 (S46) ~ 1975 (S50)] および第2期 [1976 (S51) ~ 1981 (S56) 年度] を通じて、合計9機のエンジンが試作され、性能試験だけでなく、実用化も視野に入れて、耐久試験、耐環境性試験、高空性能試験も行われた。このうち、高空性能試験はイギリスの国立ガスタービン研究所で行われたが、その際に示された好成績がその後、日、英共同開発のRJ500へ、さらには日、英、米、独、伊の5か国共同開発のV2500へとつながる契機となった。

さらにFJR710は、1977 (S52) 年に研究が開始された航空宇宙技術研究所のファンジェットSTOL機「飛鳥」に搭載されることになり、空中試験などを経て1985 (S60) 年に初飛行し、その後4年間にわたって約100回の飛行試験を終了して任を終えた。

1978 (S53) 年、通産省工業技術院は、省エネルギー技術の研究開発を総合的に進めるため「ムーンライト計画」を創設し、その一環として1978 (S53) 年度から1987 (S62) 年度まで「高効率ガスタービンの研究開発」を実施した。このプロジェクトには、多くの民間企業が技術研究組合を作って参加し、国の研究所も航空宇宙技術研究所を始め、科学技術庁や通産省の研究所が多数参加した。

八田はこの高効率ガスタービンの研究開発に対して、産業技術審議会委員、省エネルギー技術開発部会・高効

率ガスタービン分科会長として主導的役割を果たした。

これは、当時としては夢のような高いタービン温度と、複雑な配置の2軸レヒートサイクル (中間冷却つき) ガスタービンに挑むと共に、更なる高温に備えた基盤技術の研究をも含んだ壮大なプロジェクトであった。

ここで培われた高温ガスタービン技術は、わが国のガスタービン・メーカーの技術能力を飛躍的に高め、それ以後のガスタービンの開発に際して、世界に伍して活躍する基盤となった。

東大退官後

八田は、1975 (S50) 年に東京大学を定年退官。東京大学名誉教授。退官にあたって次のように述べている⁽¹⁾。「航空用ピストンエンジンの我国での開発の初期時代からその終焉まで、またジェットエンジンやガスタービンの本当の開発の初期から今日の隆盛にいたるまでの様子をまのあたりみたり体験したりする事ができた事は、ある意味では幸運だった。」

東大退官後、八田は東海大学工学部教授を経て、1980 (S55) 年から1985 (S60) 年まで運輸省航空事故調査委員会委員長を務める。1995 (H7) 年死去。生まれ故郷の京都に眠る。

本稿執筆にあたって、多くの有用な情報をいただいた高田浩之東大名誉教授にお礼申し上げます。

(文：望月 貞成^{*1)})

参考文献

- (1) 八田桂三、停年退職にあたって、1975年4月、東京大学宇宙航空研究所報告、第11巻 第2号
- (2) 八田桂三、ジェットエンジン再開、1985年3月、日本航空宇宙学会誌、第33巻 第374号、pp. 25-27
- (3) 八田桂三、日本の航空エンジンの技術の歴史、1992年4月、日本航空宇宙学会誌、第40巻 第459号、pp. 188-191
- (4) 日本航空学術史編集委員会編 日本航空学術史1910-1945, 1990, p. 133
- (5) 東京大学先端科学技術研究センター、先端研ヒストリー、先端研設立までの歴史、1. 航空研究所、http://30th.rcast.u-tokyo.ac.jp/history/history_02.html
- (6) 高田浩之、JO-1の話、2009年11月、日本ガスタービン学会誌、Vol. 37, No. 6, , pp. 399-400
- (7) 日本ガスタービン学会、ガスタービンギャラリー、北斗丸500馬力ガスタービン http://www.gtsj.org/gasturbine/gallery/g_98.html
- (8) 高田浩之、ガスタービンと出会った頃、日本ガスタービン学会誌、Vol. 37, No. 5, 2009年9月, p. 325
- (9) 田中英穂、八田桂三先生を追悼する、日本ガスタービン学会誌、Vol. 23, No. 91, 1995年12月, p. 103

原稿受付 2018年3月30日

* 1 東京農工大学名誉教授
E-mail: motizuki@cc.tuat.ac.jp

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

水町 長生

MIZUMACHI Nagao

1916 (T5) 年7月31日 - 2006 (H18) 年12月15日

水町長生先生は佐賀県佐賀市に生まれ、佐賀高等学校理科甲類を経て、1940 (S15) 年3月東京帝国大学工学部機械工学科を卒業し、同年3月31日付で東京帝国大学航空研究所研究嘱託 (常勤) を命ぜられた。1941 (S16) 年7月陸軍に臨時召集、同年12月召集解除の後、1945 (S20) 年7月東京帝国大学助教授に任ぜられ、同大学第二工学部航空原動機学科に勤務。同年12月同大学航空研究所廃止により理工学研究所業務嘱託兼務となり、続いて同大学第二工学部機械工学科に勤務の後、同学部の東京大学生産技術研究所への改組にともない、1951 (S26) 年3月同研究所勤務。そして同年4月より1954 (S29) 年3月まで東京大学工学部 (分校) 兼務となった。1958 (S33) 年8月東京大学より工学博士の学位を授与され、同年10月東京大学教授に昇任し、熱原動機学部門を担当した。その間1953 (S28) 年5月からは東京大学大学院数物系 (現・工学系) 研究科機械工学課程を担当して大学院学生の指導と育成にあたり、東京大学の停年に関する規定により1977 (S52) 年4月1日停年退官した。退官後、直ちに千葉工業大学教授として勤務し、1987 (S62) 年3月同大学を定年退職した。

航空研究所においては、航空発動機の燃料消費率の低減に関する研究に従事し、その成果はA-26機の周回飛行長距離世界記録の樹立に貢献した。また冷却器の装備法の研究を行い、その結果は研三高速機の世界最高速度記録達成に寄与した。また、航空発動機用排気タービンの研究を行い、排気タービン付き航空発動機的不安定運転限界を明らかにし、わが国航空機の高々度飛行における運転の安定性に貢献した。

第二工学部、生産技術研究所においては、主として熱原動機学、特にガスタービン工学およびそれに関連する諸分野の研究に従事した。初期の段階では、未だ解明が不十分であったガスタービンの特性に関する研究を行った。1949 (S24) 年より1951 (S26) 年にかけてガスタービンの運転安定性に関する解析的研究を行い、開放サイクルガスタービンの安定性を明らかにするとともに、運研1号ガスタービンの実験結果を用いて、このタービンの安定性を吟味し、特に始動時の際に安定性が問題になることを明らかにした⁽¹⁾。1951 (S26) 年より1955 (S30) 年には軸流タービン翼列の研究を行い、タービン翼列内の3次元流れの諸損失を実験的に求め、タービン翼列の



性能を評価する流量係数と速度係数との関係を明らかにした⁽¹⁾。また1951 (S26) 年以來ラジアルタービンの全体性能について理論的考察を行い、最高効率を得るための条件を明らかにし、ラジアルタービンの主要諸元の決定法を見出し、設計法を確立した。これに基づいて設計試作した研究用ラジアルタービン (図1、図2) により実験を行い、ラジアルタービン特有の動翼損失分布や出口旋回流特性等を解明し、理論的研究の妥当性を確認するとともに、タービンは最大効率90%という世界最高の高性能を示すなど有益な資料を得た^{(4),(5)}。その後、1960 (S35) 年より1963 (S38) 年にかけて、日本機械学会においてラジアルガスタービンに関する研究分科会が設けられ、水町教授も参加した。その経緯の一部を分科会の研究概要報告書⁽⁶⁾から抜粋引用させていただき、下記に記す。

機械学会の研究協力委員会の研究題目の一つとして「ラジアルガスタービンの研究」が採り上げられ、1959

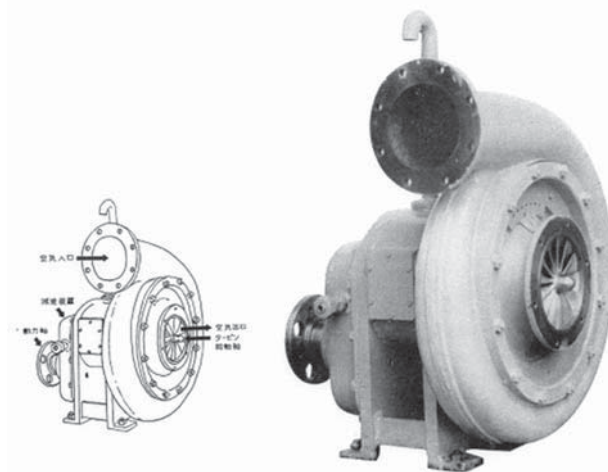
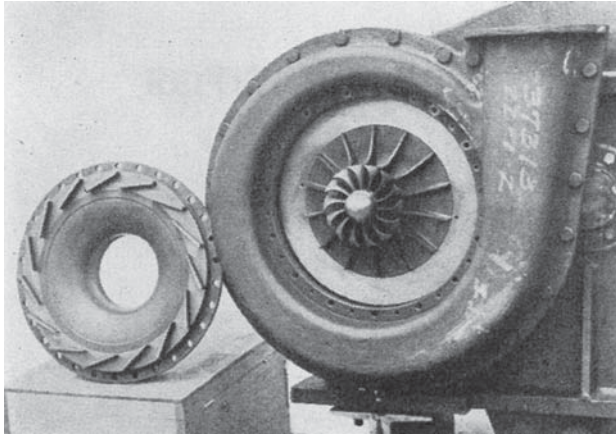


図1 試作ラジアル空気タービン⁽²⁾

試作ラジアルタービンの主要目⁽²⁾

タービン膨張比 1.3
 空気流量 0.43kg/s
 タービン入り口空気温度 50℃
 回転数 10,700rpm
 回転羽根直径 250mm

図2 試作2号ラジアルガスタービン⁽³⁾試作2号ラジアルガスタービンの主要諸元⁽³⁾

タービン全膨張比	2.0
タービン入り口ガス温度	600℃
ガス流量	0.52kg/s
回転数	35,000rpm
出力馬力	110馬力
動翼外径	204mm
タービン出口外径	108mm
タービン出口内径	40mm

年10月5日ラジアルガスタービンに関心を持つと思われる研究者、会社の技術者に集まっていた第1回の会合を開いた。その後、1959年10月16日第2回会合、1959年11月21日研究者側の鹿島次郎（早稲田大学教授）、藤井澄二（東京大学教授）、水町長生（東京大学教授）、渡部一郎（慶応義塾大学教授）が集まり、前2回の研究準備会の結果を検討し、研究項目とその担当者を決めた。さらに、1959年12月7日の打ち合わせを経て研究計画とその予算を立案した。その結果、(1)翼車の動翼のピッチの影響と(2)ラジアルガスタービンのノズルの研究を水町教授が担当することとなり、(1)の実験用ラジアルタービンは三菱日本重工業・横浜造船所で作製、実験は航空研究所の5,000馬力、圧力比3.0の空気源を用いて実施し、(2)は東京大学生産技術研究所でノズル実験用装置を用いて実施し、ノズルおよび動翼の空気力学的特性を明らかにした^{(7),(8),(9)}。

また、1963（S38）年より内燃機関用ラジアル排気タービンの非定常流特性の研究を行い、エンジン排気を模擬する脈動流発生装置を用いた実験を行うとともに、特性曲線法を用いてシリンダ・排気管・ラジアルタービンからなる流路系の特性を明らかにした^{(9),(10)}。

ラジアルタービンの応用に関する研究として、1958（S33）年より1962（S37）年にかけて寒冷発生用の膨張タービンの研究を行い、高性能膨張タービンの設計法を明らかにした結果、寒冷空気発生用、液体空気製造用お

よび除湿機用膨張タービンの設計に実用化され、工業界に大きく貢献した⁽⁹⁾。また、1961（S36）年より1976（S51）年にかけて車両用ガスタービンの研究を行い^{(9),(10)}、車両の走行特性とガスタービン特性とのマッチング、制御法、各構成要素の性能改善、小型熱交換器の開発等について研究した。当時、環境汚染の少ない新原動機として注目を浴びていた自動車用ガスタービンの開発研究の初期の段階において産業界を指導した。特に、トヨタ自動車関係では中村健也率いる開発チームから伊藤亮三、西山園、北野正夫が水町研究室の受託研究員として開発設計を担った。その成果により、ガスタービンを原動機とする試作車を作製して実車試験を行ったが、諸般の事情により実用化には到らなかった。

以上のようにラジアルガスタービンの発展に多大な貢献をされた先生は、1971（S46）年わが国で初めて開催された国際ガスタービン会議で実行委員会の論文委員長、1972（S47）年設立の日本ガスタービン会議（現、日本ガスタービン学会）の会報編集幹事主担当として会報創刊号の発刊に尽力した。1974（S49）年同会議第3期会長、1977（S52）年開催の国際ガスタービン会議の副組織委員長かつ実行委員長、1983（S58）年開催の国際ガスタービン会議の組織委員長等を歴任され、ガスタービンに関する学術の国際交流を盛んにするとともに、日本ガスタービン学会の発展にも大いに寄与された。

（文：吉識 晴夫*1）

参考文献

- (1) 東京大学生産技術研究所 10周年誌、生産研究、Vol. 11, No. 6 (1959.6)
- (2) 水町長生、試作ラジアル空気タービン（ラジアル・ガスタービンの研究 その1）、東京大学生産技術研究所 生研リーフレット、No. 50 (1957)
- (3) 水町長生、試作2号ラジアルガスタービン（ラジアルガスタービンの研究 その2）、東京大学生産技術研究所 生研リーフレット、No. 65 (1959)
- (4) 水町長生、ラジアルガスタービンの研究、東京大学 生産技術研究所報告、Vol. 8, No. 1 (1958.12)
- (5) 水町長生、高性能ラジアルガスタービンの研究、機械の研究、Vol. 10, No. 9～12 (1958.9～12)
- (6) ラジアルガスタービン研究分科会 研究概要報告書、日本機械学会、(1963.5)、金沢大学附属図書館蔵
- (7) ラジアルガスタービン研究分科会 研究成果報告書、No. 2-1、日本機械学会、(1964.2)、金沢大学附属図書館蔵
- (8) ラジアルガスタービン研究分科会 研究成果報告書、No. 2-2、日本機械学会、(1967.4)、金沢大学附属図書館蔵
- (9) 東京大学生産技術研究所 20周年誌、生産研究、Vol. 21, No. 5 (1969.5)
- (10) 東京大学生産技術研究所 30周年誌、生産研究、Vol. 31, No. 5 (1979.5)

原稿受付 2018年3月31日

*1 東京大学名誉教授

特集：わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者

岡崎 卓郎

OKAZAKI Takuro

1918 (T7) 3月12日 - 1998 (H10) 10月23日



岡崎卓郎は1918 (T7) 3月愛知県に生まれ、第一高等学校から東京帝国大学に進学、1940 (S15) 3月に工学部航空学科原動機専修を卒業した。原動機専修の第1期生3人の1人であり、ほかに熊谷清一郎、藤平右近がいた。当時就職は割り当て制で、岡崎は三菱重工名古屋の発動機製作所に決まっていたが、実質的には一回も行かず、陸軍の短期現役、続いて予備役に引張られ、1945 (S20) 8月26日に召集解除となった⁽¹⁾。履歴書によれば、

昭和15年4月5日「短期現役技術候補生トシテ陸軍航空技術学校二入校」

8月10日「任陸軍航空中尉補第二陸軍航空技術研究所附」

9月15日「航技中尉」

昭和17年8月9日「現役満期」

8月10日「予備役 引続キ臨時召集ノタメ同隊二応召」

昭和19年9月15日「任陸軍技術大尉」

昭和20年2月1日「補陸軍航空審査部附」

8月26日「召集解除」

となっている。余談であるが、岡崎と同期だった藤平右近は東大で特別講義をした折 (1962, 3 (S37, 8) 頃)、「自分は卒業に際し、先生から『お前は身体が頑健そうだから海軍に行け』と言われ、海軍に行って、今なら億単位の金を使ってロケットの開発研究をやった」と話した。当時はジェットにもロケットの用語がなされたが、藤平のは本来の意味のロケットで、「秋水」に搭載された「KR-10」などだったのだろう。同じような経緯で岡崎は陸軍に派遣されたものと推察される。陸軍時代の経歴をやや詳しく述べるのは、岡崎が後年述懐しているように、大学卒業に続くこの5年が「指導教官のいない大学院」に相当する時代であり⁽¹⁾、岡崎は単に頭脳明晰というばかりでなく、この第二陸軍航空技術研究所時代に培った諸々の経験が彼の工学に対する思想や哲学の源泉になっているように思われるからである。

1942 (S17) 11月10日付第二陸軍航空技術研究所業務分担表によれば、所長は絵野澤静一少将、岡崎中尉は主任金子武雄技師のもと高等官の一人として第一研究室に所属し、設計、調査、文庫、特許の業務に従事した。隣室の第二研究室は発動機全般の研究業務を担当し、その

中には岡崎が超過給機の研究で協力することになる十森寛一大尉や井伊谷鋼一中尉の名前がみえる。第三研究室は点火栓等電気関係、第四研究室はロケット内燃タービン、軸流送風機その他となっている。また、1943 (S18) 3月25日付の第四研究室編成表では、研究室が前年よりも相当に強化され、庶務機材掛、研究掛に加えて三つの設計掛から成っている。研究主任心得は小笠満治少佐で、岡崎は第三設計掛の掛附高等官の一人として、掛長三谷大尉のもと「ネ101ノ設計及試作指導」に従事した。第二設計掛は「ネ201ノ設計及試作指導」、第一設計掛は「補助ロケットノ設計及試作指導」、研究掛は「『ロケット』二関スル基礎研究」をそれぞれ分担し、体制が急速にターボジェットやターボプロップの開発に移行したことが窺える。ネ101はカンピーニ式エンジンロケット (エンジン「ハ40」(1075馬力) で1段送風機を回す加熱ダクトファン) で、三谷大尉が担当、東大航研八田桂三所員が関わり、第一研究室と兼任だった岡崎はエンジンとファンを繋ぐ延長軸の設計等を受け持った。ネ201はタービンプロペラロケット (19段軸流圧縮機、5段軸流タービン、軸出力1870馬力級ターボプロップ、後年ターボジェット化したネ201-IIを経てネ130へ展開) で、担当十森大尉、東大航研栗野誠一主導であった。一方、第一設計掛の補助ロケットは、ネ0 (ラムジェット推力60kg)、ネ1 (カンピーニ式ジェット推力190kg)、ネ3 (軸流圧縮機ターボジェット推力350kg)、ネ4 (遠心圧縮機ターボジェット推力280kg) で川崎航空機工業の林貞助主導であり、同社からは林のほか永田大典を始め多くの技術者が囑託として設計業務全般に携わった。

岡崎が本格的なターボジェットの開発研究に携わったのはネ130であり、その開発の苦労を戦後「ネ130——軸流圧縮機を中心として——」の記事に纏め「機械の研究」に発表している⁽²⁾。関わりの最初は1944 (S19) 12月13-15日で、ネ130の基本方針決定会議が東大航研所員を交えて松本の陸軍疎開研究所で開かれた。第二航技研から絵野澤少将、小笠少佐、岡崎大尉ほか、東大航研から中西不二夫教授、木村秀政教授、栗野所員らが出席し、各要素検討の後、推力900kg、最高温度750℃、重量900kgという基本計画値を決定した。ネ130は、1944 (S19) 7月にドイツから潜水艦で持ち帰られた軸流圧

表1 「ネ-130」タービンロケット主要要目表

軸流空気圧縮機	第1～4段	22.8 kg/s(地上静止)
空気流量	第5～7段	22.45 kg/s
		0.35 kg/s(1.5%)
冷却空気流量	出口	3.01 ata/入口 0.845 ata=3.56 (地上静止)
圧力比		9,000 r.p.m.
回転数		306.2 m/s
外段		7 (S.B. 10列, M.B. 7列)
外翼		650 mm (一定) 内径 504～584 mm
翼長		74.5～34(S.B.) 69.0～32 (M.B.)
軸流速	第1列 S.B. ～第7段 M.B.	165 m/s
	第10列 S.B.	142 m/s
駆動馬力	4,155 PS	効率 83% (ディフューザ効率 85% を含む) 地上静止
ター	1段	

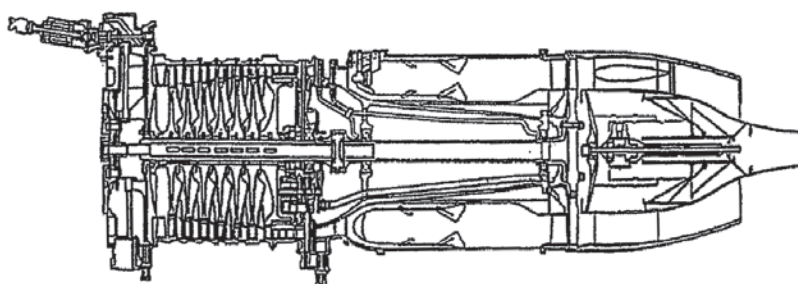


図1 「ネ-130」タービンロケットエンジン (陸軍)

縮機ターボジェットBMW003Aの縮小写真図面を参考に計画された複数のターボジェットのひとつである。海軍はネ20（推力490kg）に注力し、陸軍はネ130に注力した。よく知られているように、ネ20は終戦直前双発の特攻機「橘花」で飛行した。一方、ネ130は陸軍初のジェット戦闘攻撃機キ201「火龍」の双発エンジンとして計画されたが、地上試験で計画回転数（9000rpm）まで回したところで終戦となった。顧みるに、1944（S19）12月に上述の会議で諸目標を決定、石川島芝浦タービン（工場長土光敏夫、実務担当井口泉ほか）に発注、1945（S20）1月末設計終了、3月に1号機完成、立川の第二陸軍航技研に於いて運転中6月26日8000rpmで圧縮機第1段動翼破損、改修後爆撃を逃れ松本に疎開して7月から試運転再開、8月初め計画回転数9000rpm達成というのは驚異のスピードである。岡崎は、大学で3年後輩の秋山良雄や中村良夫らと石川島芝浦タービンに出向、昼夜兼行で突貫作業に取り組んだ。結果として、圧縮機の圧力、流量、推力等はほぼ予定通り出た上、圧縮機効率がほぼ80%であることも後日確認できたものの、終戦翌日の8月16日異物吸入により再び破損して終了した。当時、ターボジェットの試作は海軍が主務、薬液ロケットは陸軍が主務と縄張り協定があったが、ネ201の試験を1944（S19）12月末まで続行していた陸軍の要望によりそのターボジェット化したものをネ130と改称、仕様を他の試作と合わせ陸軍が担当することになったものである。ネ20やネ130の他に、中島・日立共同制作によるネ230（推力885kg）や三菱によるネ330（推力1300kg）の

試作があったが、試運転初期乃至組立段階で終わった。因みに、呼称の下二桁30は3000馬力級の意味で、頭の1, 2, 3は製造所を指し、何も付けないのは海軍空技廠を表した。表1にネ130の設計仕様、図1に断面図を示す⁽³⁾。

大学を出て4、5年の若いエンジニアが国産初の軸流ターボジェットの設計・開発に携わり、設計点に至る試運転に立ち会った訳だが、それがどれほど刺激的で興奮に満ちたことかは想像に難くない。「機械の研究」の記事の中で岡崎は幾つかの指摘をしている。まず、「未知の世界に踏み入るとき、技術の進歩が過去の経験でいかに促進され、また方向を曲げられたかを認識すべき」という。当時過去の経験とはエンジン過給機と蒸気タービンであろうか。圧縮機で、「遠心式は効率の悪いものと決めてかかり、軸流式は神秘的で高級とされていた」とある。「過給機は空気力学的に研究されず、Try & Errorであり、効率が悪いのは遠心圧縮機の空気取り入れ口損失を分離して考えなかったから」という。実際岡崎は、井伊谷鋼一の「一段超過給機の研究」に協力者として加わり、周速500m/s、圧力比4.5程度のものの実用性を追究し、音速を超えても扇車の著しい性能低下はなく、構造上も耐えうることを確認している⁽³⁾。また、ネ130の仕様が推力当たりの重量や空気流量が共に大きい保守的設計だったことに関して、「新しいものをやるときは、発明家的設計者の段階が一つ必要だが、経験により、すでに安全と認められた範囲にのみ設計を限定していた。蒸気タービンの設計者には想像もできない

ことだし、ピストンエンジンの設計者は十分な理論的基礎を持たず、押し切って行くだけの実力と自信を欠いていた」という。ターボジェット「性能は戦後大いに向上したが、技術的な問題自身は本質的に差はない」と断言する新進気鋭の岡崎から見れば、ネ130の軸流圧縮機の設計は革新的とは言えなかったのであろう。「ネ20とネ130の設計における最も大きな違いは軸流圧縮機にあり、ネ20が100%反動度であるのに対し、ネ130は50%反動度であった」という。圧力上昇を全て動翼が引き受ける100%反動度の場合、軸受の負荷が過大になる（ネ20の永野治は軸受で苦労した）のに対し、50%反動度では半減して楽になっている。空力性能的にも50%反動度が優れているが、さらにその採用には、「100%反動度では静翼の反りが大きくなり、反りの大きな翼列の空力予測が外れるから」という理由があった。「当時翼列の空力は、単独翼のデータを翼列干渉係数で補正して出すものと皆思っていた」そして「戦時中の軍の圧力なら翼列風洞を作ることなどわけはなかったろうに、単独翼の試験は行われても、翼列風洞実験は行われなかった」という。結論として、ネ130の軸流圧縮機の設計を振り返り、岡崎は、「それまでの経験を越さない原則の下では、比較的賢明な設計がなされていた」が、「経験の解釈が甚だ機械的で、物理的認識に欠けていたのは事実」ということ、「設計に必要となって実験を始めても間に合わないことが多いが、次の機会に役立つ訳であり、将来に対する地図即ち基礎的資料を整えておく」ことが重要と指摘している。

1945 (S20) 8月末岡崎は中西不二夫教授に招かれ、東京帝国大学第一工学部内燃機関学科研究嘱託に就き、1947 (S22) 6月同講師、同年9月助教授、1958 (S33) 1月東京大学教授に昇任、航空原動機学第三講座を担当した。

岡崎は内燃機関及びジェットエンジンに関連する流体力学、伝熱学等の研究で業績を挙げた。まず、「燃料液滴の蒸発燃焼」に関する理論的研究である。ディーゼルやガスタービンでは液体燃料を微粒化して高温空気中に噴霧して燃焼させるが、岡崎は燃料液滴の蒸発過程を熱伝導と物質移動の方程式を連立させて解くことに成功、平衡火炎面の存在と液滴燃焼速度の関係を厳密な解析解を与えた。伝熱過程と蒸発過程を交互に解く従来の手法に対し、画期的であり、これは熱・物質伝達に関わる広範な分野での先駆的研究として国内外で高く評価されている。また、蒸気タービンの関連で、「膜状復水に及ぼす空気混入の影響」の研究も行った。これらの研究をもとに、岡崎は1957 (S32) 10月「物質伝達を伴う熱伝達に関する二三の研究」で東京大学より工学博士の学位を授与された。その後、ガスタービンやジェットエンジンの開発が盛んになるにつれ、圧縮機内部の非定常流

動に関するトラブルが増大してきた。旋回失速や翼列フラッタの諸問題である。岡崎は翼列に対してセミアクチュエータディスクと称する一種の連続体モデルを導入し、後進と共に現象を定式化することに成功した。また、航空機のエンジン騒音が社会問題化するに及び、ジェット騒音やファン騒音の問題にも取り組んだ。これらの研究業績に対し、1963 (S38) 年度、1964 (S39) 年度、1969 (S44) 年度の日本機械学会論文賞を授与されている。しかし受賞の度に岡崎が言うのは、「論文賞では駄目だ、技術賞でなければ」であった。岡崎は優れた理論家と考えていた我々には多少意外であったが、これは、今にして思えば、終戦前の突貫工事で完成させた軸流ターボジェットネ130の経験から、技術開発がいかに重要でかつ困難であるか、身にしみて解っていたからこそ発言だろう。

研究に関して岡崎は、「研究にとって一番重要なものは『研究の動機』である。動機には実現したい願望がなければならない。それが基本的な推進力となるからだ。同時に動機には第一歩を踏み出せる20-30%の可能性がなければならない」としている⁽⁴⁾。可能性は個人個人の境界条件によって変化するから、「他の人が全く気付かなかったり、誤った解釈をしてしまったり、不可能と判断したことが、自分では十分可能な範囲に入ってくる」ことが望ましい。そして「個人の境界条件とは、能力に加えてそれまでの研究の経験」だが、経験と言っても単に本を読んだとか年数を経ているといったことは関係なく、『ある閾値を超えた経験』だけが数に入る。「若い人でも、むしろ若いから恵まれた境界条件をもつ人」も多いとしている。岡崎は陸軍時代「初めの内は大分しごかれたが、それから後は、中尉のうちから大分古株でのんびり過ごしていた」とか、「研究は人から強制されたことはなくむしろ自由過ぎたけれど、次々に問題が向こうから飛び込んできた」というから、若くて恵まれた境界条件をもつ人の一人だったのだろう。研究グループに関しては、「多様な特性の色々違った境界条件をもつ人が大勢いることが望ましい」と言う。画一的でなく、「色々違った偏向を受けた変わり者が出て来るようにした方がよい。何かにぶつかった時に強い反発の出る可能性があり、それが貴重なもの」と考えるのだ。また、研究の成果については、「研究の成果を直接利用する立場にならなければならない、内容の理解も評価も批判も十分には出来ないもので、100編の論文を読んで、1編でもピンと来るものがあれば多とすべき」としている。岡崎はMITガスタービン研究所所長のE. S. Taylor教授が来日した折質問に立って、「MITのガスタービン研究所の運営の方法、特に経済面についてお話を聞きたい」と要請し、教授から「研究所の運営で最も大切なことは、各人が自らの好奇心で研究が進められるような『雰囲気』を作ること、金は必要だが、多過ぎるのは少な過ぎるのと同程度に悪

いことで、適正量が大切、そして金は企業から出してもらう金が良い、というのはガスタービンを製作している人々と直接接点を保てる点が貴重、また、建物や設備に使うのは準備金の半分までにし、経営の融通性を確保すべき、さらに、教授が同時に指導できる人数はせいぜい4人」といった回答を引き出している⁽⁵⁾。彼我の違いはあるものの、研究室や研究グループ運営の参考にしていただけたと思われる。

岡崎の教育指導方針は「相手の気付きを待つ」ことにあった。安直に教え過ぎる効率主義を排し、常々「教えないでいるのは随分『気力と忍耐』が要るもの」だと言っていた。研究テーマや攻略方法もなるだけ自分で考え、自分で見出せるように仕向けていた。相談に行くといくらでも時間を取って貰えたが、直截的な回答が得られた試しはなかった。ポツリポツリとした遣り取りの中に、後からヒントと気付くキーがあったり、ずっと先の話の結論が先回りしていたりした。そのポツリポツリも相手の能力を見極めた上で発せられたのだろう。弟子たちは各人各様に何とかして解決策に辿りついた。今年(2018)は岡崎卓郎生誕100年であると同時に、東京帝国大学工科大学に航空学講座が設置されて100年目にあたる。東大航空原動機専修(今は航空宇宙推進)の卒業生に訊くと、航空の通常講義を別にして、最も印象に残るのは、「原動機演習」、「卒論」、「卒業設計」と言う。「原動機演習」は3年の夏と冬、岡崎が問題を作り、岡崎が担当した。通常の演習書にあるような問題でなく、やや難解だが実機に関係しており、実務に携わった折に役立った。「卒論」は4年の春から秋、2、3人で組んで必ずエンジン関連の実験を行う。取得データの語る「物理的意味」の解釈に協同して頭をひねらねばならない。「卒業設計」は4年の秋から冬、個人個人新規性のあるエンジンを設計して仕様を決定、現寸大の図面を描く。このときは企業の実務担当者に来てもらって指導を仰ぐ。このようなやり方は、戦後新生航空学科再開以後継続して現在も実施されている。現場尊重、実物主義の伝統が守られている訳であるが、この伝統の中に岡崎の工学や技術に対する思想や哲学が息づいているように感じる。書籍や文献調査による該博な知識に加え、大学卒業後陸軍で過ごした5年間の実務経験、過給機を回し、実ターボジェットを設計・試験するような「閾値を超える経験」が根底にあり、岡崎はそれらを学生に伝えようとしたのではなかろうか。「どうせ自分の甲羅に似せて穴

を掘るよりしようがない、自分もそうだったし、後輩も同じだ」と一見突き放したように見えるが、岡崎は本質において「親切」だった。

岡崎は1978(S53)東京大学を定年退官し、東京大学名誉教授の称号を授与された。引き続き、日本大学生産工学部において教鞭をとり、1992(H4)9月まで後進の指導に当たった。

さらに岡崎は、八田桂三と共に、ガスタービンの「理論と実際を知る権威」として、戦後黎明期にあった我が国の産業用ガスタービンやジェットエンジンの開発に助言を与えてきた。特に、昭和20年代後半に作られた三菱重工業横浜造船所の2500馬力ガスタービン、戦後我が国初のジェットエンジンJO1、同じく量産ジェットエンジンJ3、航空宇宙技術研究所研究開発用リフトエンジンJR、工業技術院大型プロジェクトによる高バイパス比ファンエンジンFJR、同じくムーンライト計画による複合発電用高効率ガスタービン等の開発において大きく貢献した。岡崎は1975(S50)第7期の日本航空宇宙学会会長、1977(S52)第2期の日本ガスタービン学会会長を務め、学界、産業界の発展と国際交流に貢献した。

以上、岡崎卓郎は航空原動機学の優れた研究者、教育者であると同時に、我が国原動機産業の指導者として偉大な足跡を残した。1991(H3)11月永年の功績により、勲三等旭日中綬章を授与され、1998(H10)10月23日逝去、最終的に正四位に叙せられた。

(文中の敬称は省略している)

数多くの資料をご提供頂いた川崎重工業株式会社北原一起氏に深く感謝申し上げます。

(文：梶 昭次郎*1)

参考文献

- (1) 工学部ニュース No.96 (昭和53年)
- (2) 機械の研究 第6巻第8号 (昭和29年)
- (3) 日本航空学術史 (1910-1945) (1990)
- (4) 日本機械学会論文集 研究随想 (昭和59年)
- (5) ガスタービン及びジェットエンジン (1956)

原稿受付 2018年3月19日

*1 東京大学名誉教授

E-mail: s.kaji@jcom.home.ne.jp



土佐山田の高知工科大学

Kochi University of Technology in Tosayamada



野崎 理^{*1}
NOZAKI Osamu

平成26年8月にJAXAを退職し、高知工科大学に着任しました。大学では若い学生たちと触れあえるので、学生たちとバンドをやろうと密かな夢を抱いていたのですが、いまだかつて私の研究室にはギターを弾くような学生は一人も現れず、私の願いは叶っていません。他に趣味もないので、ここでは大学とその周辺の紹介をさせていただきます。高知出身の諸先輩方が何人もおられるので、私は大学周辺のきわめてローカルな話題に絞らせていただきます。

平成16年に高知市で秋季講演会が開催され、多くの会員がお越しになり台風の目を経験されたと思います。しかし、会場はかるぽーと、見学先は室戸方面でしたので、高知工科大学をご存じの方は少ないかも知れません。高知市の東隣に南国市があり、さらにその北東の香美市に大学があります。高知駅から土讃線の（電車ではなく）汽車で香川方面へ30分ほど行った土佐山田という駅で下車します。特急停車駅ですが、売店の大手コンビニは夜8時に「閉店」します。この駅からバスに20分ほど乗るとようやく大学に到着します。つまり、かなり田舎です。大学から一番近いお店でも一生懸命歩いて20分かかるので、教職員も学生も大学からあまり外には出ません。通勤は皆さん自家用車ですので、仕事帰りに「居酒屋で一杯」などほとんどないようです。娯楽がないので、学生たちにとっては勉強するには打って付けの環境です。

そういう土佐山田ですが、意外に観光スポットがあります。まず桜の名所である鏡野公園が大学に隣接しています。1年のうちのほんの10日間程度ですが、大学周辺が桜で囲まれて、一般の方々が大勢お花見に訪れ屋台も出てとても賑わいます。大学から車で南東へ5分ほど行くと日本三大鍾乳洞の一つである龍河洞があり、通常のコースだけでなく、若い人には冒険コースもお奨めです。大学から北東へ車で10分ほど行くとアンパンマンミュージアムがあり、子供たちに大人気のようです。筆者も近いうちに孫を連れて訪れたいと思っています。そういう地域なので、週末や春休み、夏休みの時期などは高知だけでなく本州のナンバーの乗用車や観光バスを多く見かけます。

高知というと椰子の木が茂る暖かな土地という印象をお持ちの方が多くかと思いますが、夏はジリジリ音がしそうなほど暑い反面、冬は東京より寒く感じます。椰子の木らしきものは見つけましたが、枯れていました。決して

して年中暖かい所ではありません。ただ、陽射しがとても強く、冬でも日中は陽が射すと暖かさを感じますが、陽が沈むとともに気温が急降下し、日付が変わる頃には車のフロントガラスが霜で真っ白。そういう気候に、どんなよりした北陸で生まれ育った私は未だになじみません。

高知に来る前は、自立しない杯や穴の開いた杯で酒を飲まされると覚悟しておりましたが、アルコールは一切飲めないという男性が多いのは意外でした。その反面、女性は皆さんかなり強いようです。

最後に大学の中身も少し紹介させていただきます。平成9年に高知県の出資により私立大学として開学し、平成21年に公立大学法人となりました。教育に関してはシステム工学群、情報学群、環境理工学群、経済・マネジメント学群の四つの学群があり、研究等に関しては総合研究所、フューチャー・デザイン研究所、地域連携機構があります。地域連携に関してはバイオマス発電所のベンチャーが本学会誌でも紹介⁽¹⁾されました。それ以外にも龍河洞の案内用の多言語対応アプリ⁽²⁾、救荒植物を活用した地域ブランドの開発⁽³⁾、高知空港での野菜販売⁽⁴⁾など、地域の活性化に貢献しています。

次に高知で定期講演会が開催される時は、台風さえ来なければ良い季節のはずですので、ぜひもう一泊して土佐山田にもお越し下さい。お待ちしております。



桜が満開の鏡野公園と大学

参考文献

- (1) 永野正朗, 宿毛バイオ発電所における取組みについて, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 2 (2017), pp. 68-73.
- (2) 学生が龍河洞案内アプリを開発<<http://www.kochi-tech.ac.jp/kut/newsfiles/b01m00001555.html>>
- (3) 「高知県有用植物ガイドブック」が一般発売<<http://chiikirenkei.org/20161216/3335/>>
- (4) 高知龍馬空港に季節の風を！<<http://www.kns.gr.jp/column/1708.html>>

原稿受付 2018年4月2日

* 1 高知工科大学システム工学群
〒782-8502 香美市土佐山田町宮ノ口185



学校で習わない英語 (17)

English Which Is Not Taught in School (17)



吉中 司*¹
YOSHINAKA Tsukasa

－W－章 (つづき)

【英語】 : knock on wood または touch wood

【意味】 : 「神頼みをする」

【説明】 : この言葉は、何か望み事を言った後、「それが叶えられます様に」という意味で、付け加えられます。しかし、何故、木または木で作られた物を軽く叩いたり、それに手を触れたりすると、望み事が叶えられるのか、という点は、よく分かっていません。今まで見つかった三つの推測を列挙しておきましょう。

1. 偶像を崇拝する、或る原始宗教では、守護神が木の中に住んでいると信じられていた(参考資料4)。
2. キリスト教徒の迷信では、木の十字架やじゅずに触れると、望み事が叶えられると信じられていた(参考資料1と4)。
3. ギリシャ神話に出てくる復讐の女神ネメシスの怒りを和らげるには木に触れると良い、という話があった(参考資料1)。

言葉の由来は、上に言ったように不明ですが、今日、この言葉は日常会話に良く出てきます。以下、一例です。

或る会社が、納入期日の決まった単品製品を作り、目下、納入前の社内試験中だとしましょう。この製品の設計と製作が大幅に遅れたため、期日までにそれを納入出来るかどうか、関係者全員、大変心配していました。

ところが、試験進捗が予想以上で、急速にスケジュールに迫り着き始めたのです。この良い報告を受けた部長が、「この調子が続いて呉れるのを、神頼みにしたい心境だよ」と部下につぶやきました。この部分を英語にすると、“I knock on wood, for keeping this fantastic pace.”と言った後、オフィスの木製のデスクなり本箱を、こぶしで軽くコツコツと、二度ほど叩きます。もっともこの例文の後半分は、口に出さなくとも動作で示せば、話し相手はそれが何を意味しているか、理解してくれます。

【英語】 : wrap up

【意味】 : 「終える」、「けりをつける」

【説明】 : 副詞の‘up’には、「(何かを)し終えて」という意味もありますので、熟語全体としては、「(ファイルとか何かが机の上に散らばっているのを)閉じ終える、またはたたみ終える」と考えると、この意味合い、理解し易いでしょう。

この言い回しの使用例の一つ挙げましょう。これは参考資料20にあった、ニュースの見出しの一部です。「ギリシャ政府は、EUからのペールアウト終了の協議を始めたのなら、現状の報告を今年末までに終えるべきだ」ですが、“Greece Must Wrap Up Review by Year-End to Start Talks on ….”でした。

原稿受付 2018年3月12日

*1 独立コンサルタント

E-mail: tsuyoshi@videotron.ca

ところでこの熟語、命令形でよく使われます。例えば、ダラダラと続いている会議に不満を持った上司が、会議室から出て行く前に、「お前たち、早くこの討論にけりをつけるよ」と言い渡しました。これを英訳すると、“Wrap up this discussion quickly!”となります。

－Z－章

【英語】 : ground zero

【意味】 : 「災害の中心地」、「被害の最もひどい場所」

【説明】 : 元々この言葉は、アメリカが核爆発実験をしていた1940年代の初めに作られたもので(参考資料1)、地球表面上の位置で、爆発が起こった場所から一番近い所、という意味です(参考文献21)。ですから、若し爆発が空中で起これば、地表上の爆発直下点が「グラウンド・ゼロ」です。悲しい話ですが、広島と長崎には、この「グラウンド・ゼロ」があります。

今日では、この言葉、核爆発だけでなく、人災または天災でおおきな被害が出た場合、被害の一番大きかった地点、または災害の源を「グラウンド・ゼロ」と呼ぶようになりました。例の、2001年に起こった9/11テロ事件のグラウンド・ゼロは、ニューヨーク市のワールド・トレード・センターのあった場所です。また、2014年3月に発生した伝染病エボラのグラウンド・ゼロは、参考資料22によると、その発祥地、ギニア国内で、シエラ・レオネ、リベリアとの国境近くにあるゲッケドゥー(Gueckedou)です。

終わりに

この連載、2年足らず続きましたが、これでお終いです。本学会会員の皆様に役立ちそうな熟語を、350のコレクションから選んだつもりですが、如何だったでしょうか。

残りの熟語も、将来何等かの形で、皆様にお話しできる機会のあることを、願っています。

有難うございました。

参考資料 (参考資料は本連載を通した番号で示しています)

1. "QPB (Quarterly Paper Book Club) Encyclopedia of Word and Phrase Origins", by Robert Hendrickson, published by Facts On File, 2nd Edition, 2004
4. "Oxford Dictionary of English Idioms, Third Edition" Edited by John Ayto, Oxford University Press, 2009
20. "The New York Times" Online News, 25 September, 2017
21. "https://en.wikipedia.org/wiki/Ground_zero"
22. "www.BBC.com/news/world-africa-28755033"

2017年度通常総会報告

公益社団法人 日本ガスタービン学会の2017年度通常総会は、2018年4月23日(月)14時より、東芝エネルギーシステムズ(株)本社15階会議室において開催された。出席者は委任状提出者、議決権行使者を含めて1,213名であり、定款に定められた成立要件である総正会員数の過半数970名を満たし、総会は成立した。

報告事項

2017年度事業報告・監査結果報告
2018年度事業計画および収支予算

以上について担当理事より報告された。

決議事項

第1号議案：計算書類および財産目録の件 承認
第2号議案：理事選任の件 10名の候補者全員を承認

第3号議案：名誉会員候補者の件 承認

第4号議案：終身会員候補者の件 承認

以上の通り、いずれの議案も原案通り承認された。

総会終了後、別室にて第1回臨時理事会が開催された。出席理事の互選により油谷好浩君が新会長に、副会長には渡辺紀徳君が選定され、また法人管理及び公益事業担当の執行理事13名が決定された。その後、総会会場にて新役員体制が油谷好浩新会長から報告され、新旧会長から挨拶があった。引き続き名誉会員推薦状授与式、学会賞授与式が行われた。

なお、2017年度通常総会添付書類（2017年度事業報告、計算書類および財産目録、2018年度事業計画・収支予算）は、学会ホームページの会員ページに掲載されている。



2018年度役員

会長	油谷 好浩（東芝）
副会長	渡辺 紀徳（東大）
法人管理担当執行理事	壹岐 典彦（産総研）（兼務）、大石 勉（IHI）、北山 和弘（東芝エネルギーシステムズ）、寺本 進（東大）、福泉 靖史（三菱重工）
公益目的事業担当執行理事	壹岐 典彦（産総研）、北山 和弘（東芝エネルギーシステムズ）（兼務）、黒瀬 良一（京大）、高原 雄児（航装研）、谷村 聡（MHPS）、辻田 星歩（法政大）、福山 佳孝（JAXA）、松岡 右典（川崎重工）、山本 悟（東北大）、山本 誠（東京理科大）
理事	大塚 裕也（本田技術研究所）、川岸 京子（物材機構）、高橋 俊彦（電中研）、千葉 秀樹（酒田共同火力）、萩川 宏樹（JALエンジニアリング）
監事	田沼 唯士（帝京大）、佃 嘉章（三菱重工）



後列(左から)：福泉 靖史、北山 和弘、山本 悟、福山 佳孝、川岸 京子、谷村 聡、大塚 裕也、黒瀬 良一、千葉 秀樹、松岡 右典、高原 雄児、高橋 俊彦、萩川 宏樹

前列(左から)：壹岐 典彦、辻田 星歩、山本 誠、寺本 進、油谷 好浩、渡辺 紀徳、田沼 唯士、佃 嘉章、大石 勉

2017年度 学会賞審査報告

2017年度学会賞審査委員会委員長 筒井 康賢
TSUTSUI Yasukata

本学会では、ガスタービンおよびエネルギーに関連する優れた論文の著者や優れた技術の開発者に対し2年に一度学会賞として論文賞・技術賞・奨励賞を贈り、表彰しております。

2017年度はその表彰の年に当たりますので、2013年11月から2017年10月までを対象期間とし、論文賞・奨励賞候補には学会誌および英文電子ジャーナルに掲載された技術論文の著者、技術賞候補にはこの期間に完成した新技術の開発者を対象として学会誌、学会ホームページを通じて募集しました。その結果、論文賞については奨励

賞対象と重複する7件を含めて21件、技術賞については1件の候補の推薦がありました。

学会賞審査委員会では、審査方法に関して過年度と同様とし、論文賞・奨励賞については各委員による書面評価による審査、また、技術賞については書類審査とヒアリングによる審査を実施しました。その結果、論文賞2件を推薦し、理事会に報告しました。そして理事会における審議により、その推薦内容が承認され、以下のとおり、論文賞2件授賞が決定いたしました。

論文賞

Verification and Application of Fluid-Structure Interaction and a Modal Identification Technique to Cascade Flutter Simulations

(JGPP Vol. 8 No. 3 2016年12月)

東京大学 立 石 敦
渡 辺 紀 徳
姫 野 武 洋
(株)IHI 青 塚 瑞 穂
室 岡 武

航空用エンジンファンで生じる翼振動現象であるフラッターは、発散的な振幅増大を伴う自励振動現象であり、翼の破損につながるため、設計時には数値解析による綿密な検討が行われる。一般にターボ機械のフラッター解析は、単一翼振動モードを対象とし、翼構造解析と空力解析を別々に行う分離型解析が主流である。しかし研究開始当初、繊維強化複合材料を使用した軽量な翼や高速巡航用プロペラでは、複数翼振動モード間の空力的連成が顕著に生じるため、分離型解析では正確な現象予測が困難なことが示唆されていた。そこで著者らは、空力・構造間の連成効果を的確に取り込んだフラッター解析を実現するための時間領域の流体-構造連成解析と、その解から振動パラメータを見通しよく抽出するためのモード同定を組み合わせた、独自のフラッター解析法を

開発・提案した。

本論文では、提案手法の綿密な検証と実問題への応用例を包括的に取り上げた。検証は、平板翼列に生じる古典的曲げねじりフラッターを対象とした。揚力面理論(LINSUB)を用いた空力弾性解析結果を参照解として数値解析結果を評価し、提案手法がLINSUBの解を良好に再現することを示した。

実問題への応用例として、試験で失速フラッターが生じたIHI製の遷音速ファンに対して発生位置の再現を試みた。解析結果は試験での発生位置を的確に再現したが、低回転数側ではフラッター発生点を高流量側に算出した。このミスマッチの原因について流れ場の観点から考察し、解析精度向上の指針を抽出した。

論文賞

A Study on Unsteady Flow Phenomena at Near-Stall in a Multi-Stage Axial Flow Compressor by Large-Scale DES with K Computer

(JGPP Vol.9 No.3 2017年2月)

九州大学 山 田 和 豊
古 川 雅 人
中木戸 智 史
田 村 優 樹
川崎重工業(株) 松 岡 右 典
中 山 健太郎

ガスタービンに用いられる多段軸流圧縮機では、騒音や破損の原因となる旋回失速の発生を予測することが重要な課題である。従来、翼端漏れ流れは圧縮機の安定性に関連するといわれ、主に翼端失速が研究されてきている。その結果、スパイク型失速の初生は翼端近傍での局所的な前縁はく離に起因した竜巻状はく離渦に支配されていることが明らかにされている。しかし、単段の低速軸流圧縮機で得られた知見が、実機の高速多段軸流圧縮機に適用できるかは不明である。本研究では、産業用ガスタービンの実機に使用される多段軸流圧縮機を対象に、「京」コンピュータを用いて大規模DES (Detached Eddy Simulation) を実施し、多段軸流圧縮機における旋回失速初生について調査した。解析対象は全14段の多

段軸流圧縮機であるが、事前の試験結果から2段あるいは5段、6段で旋回失速の発生が疑われることから、圧縮機的前方段について最大約20億計算格子による全周非定常DESを実施した。計算から得られた膨大な非定常三次元データに対して知的可視化処理を施し、渦構造および限界流線のトポロジー解析を行うことで、失速開始前後における非定常流動現象を詳細に解析した。解析の結果、対象とした軸流圧縮機では、失速直前に静翼列のハブ側負圧面に発生したコーナー失速を起点として、軸方向に連なる大スケールの失速セルが非軸対象性を伴って短時間で急速に成長し、旋回失速の発生へと至る非定常流動現象が明らかとなった。

次号予告 日本ガスタービン学会誌2018年7月号 (Vol.46 No.4)

特集 特殊用途タービン

論説・解説

巻頭言 船崎 健一 (岩手大学)

船用主機排熱利用VPCシステムの実船実証試験 大塚 厚史 (三井E&Sマシナリー)

地熱発電用蒸気タービンの最新動向 酒井 吉弘, 和泉 栄, 田部井 崇博 (富士電機)

水素コジェネレーションシステム 島 潔 (大林組) 足利 貢, 山口 正人 (川崎重工業)

断熱圧縮空気エネルギー貯蔵システムによる風力発電所出力制御実験

蓮池 宏 (エネルギー総合工学研究所), 林泰弘, 伊藤 雅一, 光岡 正隆 (早稲田大学)

潮流発電用タービン (仮題) 宮川 和芳 (早稲田大学)

IHI製船用過給機の下水汚泥焼却炉への適用 内田 渡 (IHI)

地熱発電の最近の開発動向および適用技術 柴田 佑 (三菱日立パワーシステムズ)

ロケットエンジン用ターボポンプのタービン技術動向 川崎 聡 (JAXA)

研究だより

超小型ガスタービンの研究開発と産業応用 松原 幸治 (新潟大学)

東西南北地水火風

室家 健 (丸紅パワーシステムズ)

※タイトル、執筆者は変更する可能性があります。

第4回 日本ガスタービン学会女性参画推進イベント 開催報告

猪亦 麻子

INOMATA Asako

日本ガスタービン学会では、ガスタービンおよび関連技術に携わる女性技術者同士のネットワークと、共に成長していける場を提供することを主な目的として、女性参画推進委員会の活動を続けています。

2017年度の2回目は、現場で働く方との交流を目的として、工場見学とそこで働く女性技術者の方からの講演、意見交換会を企画し、2018年1月18日に、名古屋地区に於いて総勢29名の方にご参加いただき実施しました。

最初の見学先である三菱重工航空エンジン株式会社では、MRJにも搭載されるPW1200Gエンジンの開発に関するご講演をいただき、世界中を飛んでいるエンジンの開発・製造の一端を担われる方々の自信に満ちたお姿に憧れを抱くとともに刺激を受けました。

その後に展示ルーム、エンジン組立工場の一部を見学させていただきました。明るく、見える化が進んだ工場を興味深く拝見させていただきました。その後の意見交換会では、三菱重工航空エンジン株式会社では女性の活躍を積極的に後押しされている様子をご紹介いただきました。

二つ目の見学先のMRJミュージアムでは2班に分かれ、案内役の方からの説明をいただきながら見学しました。入口では身分証明書の確認等の入館手続きがありま

したが、いざ中に入るとわかりやすい展示で安心しました。一般の方でも技術やデザインコンセプトが理解しやすい展示でした。MRJのデザインには日本的なモチーフが取り入れられているとのことでしたが、展示方法にもわかりやすく伝えるための細やかな配慮が感じられました。また組立工場を周囲から見学できるコースとなっており、量産が進むと複数のMRJが並び、さぞかし壮観な眺めであろうと思いを馳せました。参加者の方からは、技術をどのように「見せる」のかも、重要な視点であると実感したという声をいただきました。

講演会終了後は交流会の会場に移動し、男性も含め活発な意見を交わすとともに、参加者同士の交流を深めました。ガスタービン関連技術分野では、女性が少数でありそれぞれの所属組織内ではネットワークが作れない場合も多いため、学会を通じて所属組織の枠を超えたネットワークを広く提供できるよう、企画・検討を進めていきたいと思っております。

最後に、今回の企画・準備、当日の案内までご対応いただきました三菱重工航空エンジン株式会社、三菱重工業株式会社及びMRJミュージアムの皆様に厚く御礼申し上げます。

(女性参画推進委員会委員)



講演会の様子



工場見学の様子

第30回ガスタービン教育シンポジウム開催のお知らせ

当学会では毎年、学生及びガスタービン開発に携わる新人技術者を対象とした標記シンポジウムを開催しております。第30回教育シンポジウムを下記の通り開催いたしますので、会員・非会員を問わず積極的にご参加ください。

- 日時：2018年7月5日(木)、7月6日(金)
- 場所：東芝エネルギーシステムズ(株) 京浜事業所タービン工場 (神奈川県横浜市鶴見区末広町1-9)
JR京浜東北線 鶴見駅よりバス約15分
- プログラム：5日(木) 9:30- 受付 (タービン工場299号館1F大会議場)
10:00-10:10 開会の挨拶
10:10-11:40 「ガスタービン概論」 渡辺紀徳 (東京大学)
11:40-12:40 昼食
12:40-14:10 「ガスタービンと伝熱工学」 村田 章 (東京農工大学)
14:20-15:00 「東芝におけるタービン関連技術紹介」 (東芝エネルギーシステムズ)
15:00-17:00 見学会 (官学参加者 (予定))
京浜事業所タービン工場、タービン羽根工場
ガスタービン補修工場
東芝ガスタービン保守技術の紹介 (企業参加者)
6日(金) 17:00-18:30 懇親会
9:00- 受付
9:20-10:50 「ガスタービンと流体工学」 山本 誠 (東京理科大学)
11:00-12:30 「ガスタービンと燃焼工学」 岩井保憲 (東芝エネルギーシステムズ)
12:30-13:30 昼食
13:30-15:00 「ガスタービンと材料工学」 齊藤大蔵 (東芝エネルギーシステムズ)
15:10-16:40 「ガスタービンと制御工学」 垣内大紀 (IHI)
16:40-16:50 アンケート記入
16:50-17:00 閉会の挨拶

注：都合により講演順番が入れ替わる場合もございますので、最終プログラムはホームページにてご確認ください

- 定員：60名 ※申込み多数の場合お断りすることがございます。
- 対象者：大学、大学院、高等専門学校在籍者、ならびに技術者 (ガスタービン初心者)
- 参加費 (税込)：学生 (会員：¥4,320, 非会員：¥7,560), 社会人 (会員：¥10,800, 非会員：¥19,440)
参加費には、テキスト (ガスタービン工学) 代金が含まれております。
- 懇親会：参加費 無料
- 受講証の発行：2日間の講義を受講された方には、「ガスタービン教育シンポジウム受講証」を発行します。
- 申込方法：下記の申込書に必要事項を明記し、学会事務局宛に、郵便、ファクシミリ、電子メールのいずれかにより2018年6月20日(水) (必着) までに、お申し込み下さい。学会ホームページからも申込ができます。
- 参加費の支払：当日支払いですが、事前の支払いも受け付けます。事前に支払う場合は、その旨を学会事務局にお知らせ下さい。

○昼食：当日、食堂は利用不可となるため、各自準備ください。なお、実費弁当申し込みを承ります (飲み物付きで700円程度です)。

○宿泊施設：斡旋はいたしませんので必要な方は各自手配してください。

注：開催場所案内図及び詳細については当学会ホームページをご覧ください。(http://www.gtsj.org/)

★今年度は関西地区にて、2018年11月に第31回教育シンポジウムを開催いたします。

第30回ガスタービン教育シンポジウム参加申込書

(2018年7月5日, 7月6日)

公益社団法人日本ガスタービン学会 行

FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095 E-mail: gtsj-office@gtsj.org

氏名		国籍		性別	男・女
所属				学年, 入社年度	
連絡先	〒			昼食申込	5日・6日
TEL				懇親会	参加・不参加
E-mail				GTSJ会員No. () / 非会員	

注) 外国籍の参加者には、申込書に記載した情報の他に別途、パスポート番号などを伺うことがございます。詳しくは、申込受付後にご連絡いたします。

第46回日本ガスタービン学会定期講演会・講演募集

下記の日程で、第46回日本ガスタービン学会定期講演会を、鹿児島県鹿児島市で開催いたします。講演をご希望の方は、期日までに学会ホームページより講演の申し込みをお願いします。

主 催 公益社団法人 日本ガスタービン学会
協 賛 協賛団体は学会ホームページ
 (http://www.gtsj.org/) をご覧ください。
開 催 日 2018年10月10日(水)、11日(木)
講演会場 かごしま県民交流センター
 〒892-0816 鹿児島市山下町14-50
 http://www.kagoshima-pac.jp/
 Tel: 099-221-6600
見 学 会 2018年10月12日(金)

※ 会期中のご宿泊は各自で手配ください。

講演関連日程

講演申込締切 2018年 6 月22日(金)
 講演採否連絡 2018年 7 月27日(金)
 論文原稿締切 2018年 8 月27日(月)

募集講演

「研究報告」及び「技術紹介」に関する講演を募集いたします。「研究報告」の対象は、ガスタービン及びエネルギー関連技術に関する未発表の研究とします。一部既発表部分を含む場合には未発表部分が主体となるものに限ります。「技術紹介」は、既発表の研究のレビューや関連情報（例えば、試験設備、設備運転実績）の紹介などとなります。講演論文集では「研究報告」と「技術紹介」の別を明示いたします。

ガスタービン本体およびその構成要素、補機・付属品、補修技術、ガスタービンを含むシステムやユーザーの計画・運用および保守実績に関する講演、ターボチャージャー、蒸気タービンなどに関する講演に加え、ガスタービン関連の技術（材料、製造、溶射など）に関する講演も歓迎します。

講演時間

論文1件につき、講演15分、討論5分、合計20分です。

登壇者の資格

原則として、本会会員もしくは協賛団体会員に限ります。（1人1題目の制限はありません。）

講演申込方法と採否の決定

学会ホームページ (http://www.gtsj.org/) で講演題目・著者・登壇者・概要（200文字以内）などを登録してください。講演申し込み後すぐに、受付完了をお知らせするEメールが自動返送されますので、申し込み内容

をご確認ください。学会ホームページからの申し込みができない場合には事務局にお知らせください。

締切後の申し込みは受け付けません。

講演採否は、7月27日(金)までにEメールで連絡します。

公益社団法人 日本ガスタービン学会事務局

電話番号：03-3365-0095

FAX番号：03-3365-0387

Eメールアドレス：gtsj-office@gtsj.org

講演論文原稿の提出

講演会に先立ち、講演論文原稿をご提出いただきます。原稿は講演論文集原稿執筆要領（学会ホームページに掲載）に従って、A4用紙2～6ページ（技術論文に同時投稿または30日以内に投稿予定の場合は8ページまで可）で作成し、所定の講演論文原稿表紙を付して、期限までにEメールに添付した電子データ（PDF形式）として提出してください。原稿執筆要領および原稿表紙用紙は、講演採否の連絡時にお届けします。

技術論文としての学会誌への投稿

原稿執筆要領に記載の要件を満たす「研究報告」の講演原稿は、著者の希望により、講演会終了後に通常の技術論文として投稿されたものとして受理されます。技術論文としての投稿を希望される場合は、講演論文原稿提出時に原稿表紙の所定欄に希望ありと記入し、さらに技術論文原稿表紙、論文コピー2部を添付していただきます。詳細は原稿執筆要領をご覧ください。

日本ガスタービン学会学生優秀講演賞

学生による「研究報告」の内、特に優秀な発表に対して表彰を行います。表彰された発表に対しては表彰状および副賞が授与されます。エントリー希望者は、申込時に所定欄の「エントリーする」に印をつけてください。

学生講演会参加旅費支援

学生が登壇者として講演会に参加する際の旅費の一部を補助する予定です。申請方法や審査方法については、8月上旬までに学会ホームページ等でお知らせします。



かごしま県民交流センター

○ 本会協賛行事 ○

主催学協会	会合名	共催 協賛	開催日	会場	詳細問合せ先
日本航空宇宙学会・宇宙航空研究開発機構	第50回流体力学講演会／ 第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム	協賛	2018/7/4-6	宮崎市民プラザ	URL: http://www.jsass.or.jp/web/index.php
日本機械学会 関西支部	第356回講習会「実務者のための振動基礎と制振・制御技術」	協賛	2018/7/30-31	大阪科学技術センター 8階 中ホール	URL: http://www.kansaijsme.or.jp/
日本エネルギー学会	第27回日本エネルギー学会大会	協賛	2018/8/8-9	日本大学理工学部 駿河台キャンパス	URL: http://www.jie.or.jp/publics/index/591/
日本流体力学会	日本流体力学会 年会2018 ／日本流体力学会創立50周年記念シンポジウム	協賛	2018/9/3-6	大阪大学豊中キャンパス	URL: http://www.nagare.or.jp/



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

石原 剣(IHI)
王 吉鵬(ダイハツディーゼル)
高橋 由博(ひいらぎこどもクリニック)
永田 弘樹(本田技術研究所)

高木 利憲(出光興産)
古澤 卓(東北大学)
下平 栄史(日立金属)

植阪 弘和(ダイハツディーゼル)
三坂 孝志(東北大学)
安藤 友香(防衛装備庁)

〔学生会員〕

田中 雄大(関西大学大学院)

佐々木 英里(早稲田大学)

〔学生→正会員〕

岡本 竜一(IHI)
秋野 一輝(川崎重工業)
齋藤 誠志朗(九州大学大学院)
森口 昇太(東北大学大学院)
玉田 岳洋(三菱日立パワーシステムズ)
齊藤 拓馬(早稲田大学大学院)

中西 仁(IHI)
上坂 峻也(川崎重工業)
齋藤 拓海(JFEエンジニアリング)
小池 裕司(三菱重工業)
村田 遼(三菱日立パワーシステムズ)

任 憲鵬(IHI)
矢崎 和貴(川崎重工業)
鈴木 晃純(電力中央研究所)
平山 卓(三菱重工業)
上田 翔太(明電舎)

〔賛助会員〕

JFEスチール(株) 東日本製鉄所(千葉地区)

編集後記

新緑がまぶしい季節となりました。立夏を過ぎ陽射しにも夏の気配が感じられます。会員の皆様におかれましてはいかがお過ごしでしょうか。

ガスタービン学会は新年度を迎え、油谷会長、渡辺副会長の下での新体制となりました。学会誌編集委員会も、本学会及びガスタービン業界のさらなる発展に向けて、より一層充実した紙面を目指してまいります。

さて今月号の特集企画は「エネルギー分野における三次元積層技術の現状と展望」「わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者（その2）」の2本となっております。1月号で特集しました「わが国におけるガスタービン研究・開発の先駆者（その1）」が大変好評であったため、その続編としてさらに6名の先駆者についてご紹介しています。

三次元積層造形技術については、2014年9月号の小特集以来の企画となります。現在重要度が高い分野である反面、記事として出していただけると難しいかと危惧しておりましたが、巻頭言を含め10編の記事を寄稿していただくことができました。個人的興味から提案した企画ではありましたがこの分野には知識も人脈もなく、編集委員の皆様にはご心配をおかけしましたが、結果として積層プロセス、プロセスモニタリング、粉末技術、材料と特性、部材適用事例、HIPによる効果など、様々な取り組みをご紹介いただくことができ、読み応えのある企画になったかと存じます。私個人も今回大変勉強になり

ました。今後も広い分野においてキーとなる技術として、注目していく必要があると思います。

最後になりましたが、本号企画にあたりご多忙の中原稿をご執筆くださいました方々には、編集担当一同心より御礼申し上げます。なお、前号で予告いたしました特集記事の一部を諸事情により変更させていただきましたこととお詫びいたします。

(川岸 京子)

- 5月号アソシエイトエディター
川岸 京子（物質・材料研究機構）
吉田 英生（京都大学）
- 5月号担当委員
阪井 直人（川崎重工業）
原 浩之（三菱日立パワーシステムズ）
馬場 勝（IHI）

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用およびお借りしています。

詳細については、下記記事をご参照ください。

- ・「金属積層材料のガスタービン高温部材適用における課題と展望」…………… (P.210 ~ 215)
- ・「産業用ガスタービンにおける金属積層造形技術の適用事例」…………… (P.216 ~ 220)
- ・「エネルギー機器材料の3次元積層造形技術の開発」…………… (P.221 ~ 226)

だより ✠事務局✠

初夏の日差しを感じる季節となりましたが、皆様いかがお過ごしですか？就職や転勤などで、この春新生活を始められた方も、そろそろ周りの環境に馴染まれた頃でしょうか。通勤途中には新社会人らしいフレッシュな姿を目にする機会も多く、毎年この時期になると自分が社会人になった頃のことを思い出されます。

私が就職した頃は、バブルの絶頂期。恥ずかしながら私も“平野ノラ”のようなヘアスタイルをしていた時代です。地元の大学に進学し、そのまま地元で就職しようと考えていたはずが、ついバブルの波に流され、友人たちと揃って東京に就職してしまいました。上京したばかりの頃は、人の多さに戸惑ったり、待たずに電車が来ることに感動したり、完璧だと思い話していた標準語の

アクセントはズレていたり…。初めての慣れない一人暮らしも、紙の路線図を握りしめて新人研修の会場に向かった日々も、今では懐かしい思い出です。

さて、学会では4月23日に通常総会が無事終了し、新体制での運営がスタートしました。会員の皆様には、議決権行使にご協力いただき、ありがとうございました。今年度は、早くも4月に第1回見学会を開催済ですが、計画されている行事の数を考えると、なんと、5月以降は月に1件のペースで何かの行事が開催されることになっています（汗）。事務局内も少しあわただしくなりそうですが、スタッフ4名のチームワークで乗り切って行きたいと思いますので、今年度もどうぞよろしく願います。

(山本 由香)

学会誌編集および発行要領（抜粋）

2017年2月8日改定

1. 本会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 依頼原稿：学会誌編集委員会（以下、編集委員会）がテーマを定めて特定の人に執筆を依頼する原稿。執筆者は本学会会員（以下、会員）外でもよい。
 - B. 投稿原稿：会員から自由に随時投稿される原稿。執筆者は会員に限る。
 - C. 学会原稿：本学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および会員による調査・研究活動の成果等の報告。
- 1.2. 技術論文の投稿については、「技術論文投稿要領」による。
- 1.3. 英文技術論文の投稿については、Instruction to Authors, JGPP (International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems) による。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、論説・解説、講義、技術論文、寄書（研究だより、見聞記、新製品・新設備紹介）、随筆、書評、情報欄記事の掲載欄に掲載することとし、刷り上がりページ数は原則として以下のとおりとする。

論説・解説、講義	6ページ以内
技術論文	技術論文投稿要領による
寄書、随筆	3ページ以内
書評	1ページ以内
情報欄記事	1/2ページ以内
3. 原稿の執筆者は、本会誌の原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局（以下、編集事務局）まで原稿を提出する。編集事務局の所在は付記1に示す。
4. 依頼原稿は、編集委員会の担当委員が、原稿の構成、理解の容易さ等の観点および図表や参考文献の書式の観点から査読を行う。編集事務局は査読結果に基づいて、執筆者への照会、修正依頼を行う。
5. 投稿原稿のうち技術論文以外のものは、編集委員会が審査し、本会誌への掲載可否を決定する。
6. 投稿原稿のうち技術論文の審査、掲載については、技術論文投稿要領に従う。
7. 依頼原稿の執筆者には、本学会の事務局（学会事務局）から原則として謝礼（図書カード）を贈呈する。
8. 依頼原稿および投稿原稿の執筆者には、抜刷を10部贈呈する。なお、非会員の第一著者には掲載号学会誌1部も贈呈する。
9. 本会誌に掲載された著作物の著作権は原則として本学会に帰属する。本学会での著作権の取扱いについては別途定める著作権規程による。
10. 他者論文から引用を行う場合、本会誌に掲載するために必要な事務処理及び費用分担は著者に負うところとする。

付記1 原稿提出先および原稿執筆要領請求先（編集事務局）
 ニッセイエブプロ(株) 企画制作部
 学会誌担当：高橋 邦和
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 TEL：03-5733-5158
 FAX：03-5733-5164
 E-mail：eblo_h3@eblo.co.jp

技術論文投稿要領（抜粋）

2017年8月25日改定

1. 本学会誌に技術論文として投稿する原稿は次の条件を満たすものであること。
 - 1) 主たる著者は本学会会員であること。
 - 2) ガスタービン及びエネルギー関連技術に関連するものであること。
 - 3) 学会誌原稿執筆要領に従って執筆された、モノクロの日本語原稿であること。
 - 4) 一般に公表されている刊行物に未投稿であること。ただし、以下に掲載されたものは未投稿と認め技術論文に投稿することができる。
 - 本学会主催の学術講演会・国際会議のプロシーディングス
 - 特許および実用新案の公報、科学研究費補助金等にかかわる成果報告書
 - 他学協会の講演要旨前刷、社内報・技報、官公庁の紀要等の要旨または抄録
2. 原則として刷り上がり8ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円（税別）の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
3. 著者がカラー1ページあたり50,000円（税別）を負担する場合には、カラー印刷とすることができる。
4. 投稿者は、学会誌原稿執筆要領に従って作成された印刷原稿または原稿電子データを、技術論文原稿表紙とともに学会誌編集事務局に提出する。
5. 投稿された論文は、論文委員会が論文査読に関する内規に従って査読を行い、掲載可否を決定する。
6. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
7. 本技術論文の著作権に関しては、学会誌編集および発行要領（抜粋）9.および10.を適用する。

日本ガスタービン学会誌
 Vol.46 No.3 2018.5

発行日 2018年5月18日
 発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
 編集者 辻田 星歩
 発行者 油谷 好浩
 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13
 第3工新ビル402
 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387
 郵便振替 00170-9-179578
 銀行振込 みずほ銀行 新宿西口支店
 (普) 1703707
 印刷所 ニッセイエブプロ(株)
 〒105-0004 東京都港区新橋5-20-4
 Tel. 03-5733-5158 Fax. 03-5733-5164

©2018, 公益社団法人日本ガスタービン学会

複写をご希望の方へ

本学会は、本誌掲載著作物の複写に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。

本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、一般社団法人学術著作権協会より許諾を受けて下さい。但し、企業等法人による社内利用目的の複写については、当該企業等法人が公益社団法人日本複写権センター（一般社団法人学術著作権協会が社内利用目的の複写に関する権利を再委託している団体）と包括複写許諾契約を締結している場合にあっては、その必要はございません（社外頒布目的の複写については、許諾が必要です）。

権利委託先 一般社団法人 学術著作権協会
 〒107-0052 東京都港区赤坂9-6-41 乃木坂ビル3F
 FAX：03-3457-5619 E-mail：info@jaacc.jp

複写以外の許諾（著作物の引用、転載、翻訳等）に関しては、(社)学術著作権協会に委託致しておりません。直接、本学会へお問い合わせください。