

特集：最新の加工・製造技術

「最新の加工・製造技術」特集の
企画にあたって新関 良樹*¹
NIIZEKI Yoshiki

キーワード：ガスタービン，製造技術，加工技術，3Dプリンタ，積層造形

Gas Turbine, Manufacturing Technology, Machining Technology, 3D Printer, Additive Manufacturing

9月号は「最新の加工・製造技術」特集を組みました。ガスタービンや過給機，蒸気タービンは基本形が確立して久しいですが，性能向上や軽量化，コスト低減など，さまざまな改良努力が脈々と続けられています。とくに，CFD (Computational Fluid Dynamics) やEFD (Experimental Fluid Dynamics) 等の発展は，詳細な現象の理解を可能とし，結果として，より複雑かつ精緻な形状の実現が求められるようになってきました。また，設計条件もより過酷となっており，耐熱合金をはじめとした様々な新しい素材も開発されています。

このような新しい技術も，現実的なコストや時間の制約の中で最終的な形とするための，製造・加工技術が確立されていなければ，製品として日の目を見ることはできません。

ガスタービン学会誌では，これまで修理・補修技術特集や材料技術に関して，「最新のガスタービンにおける修理・補修技術」(2012年7月号)，「ガスタービンの高温化対応最新技術動向 (その1：発電用)，(その2：航空用)」(2010年3月，5月号)，「航空機エンジンの整備と修理技術」(2005年5月号)，「ガスタービンの材料技術」(2004年5月号)などが組まれてきましたが，生産現場における製造・加工技術に関する特集はこの10年間では見当たりませんでした。

一方で，製造・加工技術は，ガスタービン学会が関わるガスタービン及びエネルギー関連機器に関しても大きな変革の時期に来ていることが感じられます。

一つめは，CAD/CAE/CAM/CAT (Computer Aided Design/Engineering/Manufacturing/Testing) の適用です。計算機を利用した仮想空間における事前シミュレーションの徹底，設計から製造，検査までのデータ一括管理は品質の安定化とリードタイムの大幅短縮に貢献しています。

二つめは，新しい材料の適用や運用など使用条件の多

様化に対する様々な工夫や，複雑な形状を実現できる加工機械や支援ツールの改良・進歩です。

そして，三つめは3Dプリンタに代表される積層造形技術です。「3Dプリンタ」という言葉は，すでに一般の方にも広く知られ，身近なものとなっていますが，製造技術としても注目すべきもので，様々な応用が提案されています。

このような観点から本号特集では，まず「加工・製造技術」特集を，さらに小特集として，「3Dプリンタの可能性」を組んでみました。

前者では，機種毎の最新の動向とともに加工機メーカーの視点からも解説をお願いしました。

また，後者については(解説文中にも指摘されていますように，「積層造形技術」が正しいようですが，小特集のタイトルとしては，あえて一般に馴染みのある「3Dプリンタ」とさせていただきました)ガスタービンへの適用が始まったところ，と言えると思います。その名が示すように，いままでの素材を削る方向の加工から，追加していく方向の加工であり，いままで実現できなかったことを実現でき，これまでの設計の概念を変える可能性を持っています。どんなことができるのか，使ってみたい，と考えている方も多いかと思いますが，まだ知られていない部分も多いかと思いますが，今回は「ガスタービン」「エネルギー関連機器」に，これからこの技術を導入，活用されるかたにも参考になるように，詳しく解説していただくとともに，事例も紹介いただきました。

メーカーにとって，生産技術が重要なことは論を待ちません。加工・製造技術の進歩はガスタービンなどを大きく変える可能性があると思います。ぜひ，幅広い方に一読いただき，新たな可能性を切り開く一助としていただければと思います。

最後に，今回特集では学会員以外の方含めて多数の方々に執筆いただきました。深く感謝申し上げます。

原稿受付 2014年7月22日

* 1 (株)東芝 電力システム社 火力・水力事業部
〒212-8585 川崎市幸区堀川町72-34

特集：最新の加工・製造技術

産業用ガスタービンにおける製造技術開発

岡田 郁生*¹
OKADA Ikuo小熊 英隆*¹
OGUMA Hidetaka妻鹿 雅彦*¹
MEGA Masahiko鳥越 泰治*¹
TORIGOE Taijiキーワード：ガスタービン, GTCC, 超合金, 鋳造, 溶接, コーティング, TBC
Gas Turbine, Combined Cycle, Superalloy, Casting, Welding, Coating, TBC

1. 緒言

世界的エネルギー需要は増加を続け、特に、中国等アジア地域での需要量の増加が著しく、その傾向は今後も続くものと見込まれている。これに対して、ガスタービンコンバインドサイクル発電、いわゆるGTCC発電は、化石燃料を使用する発電設備の中で最も高い効率を発揮し、また、境負荷低減にも優れることから注目されている。加えて、GTCC発電の主機がガスタービンであり、その主要燃料として天然ガスが使用されるが、シェールガス田開発に伴い天然ガスの供給能力も大きく飛躍するとの予測も相まって、この技術分野の発展・伸長に対する期待が益々大きくなっている。

GTCC設備の発電効率は主機であるガスタービンの高温化に依存するところが大きく、当社においても、1980年代初頭から、高温・高効率化および大容量化の開発を進めてきた。即ち、図1⁽¹⁾に示すとおり、1984年にタービン入口ガス温度が1100℃級のD形ガスタービンを開発し、以降、1989年には1350℃級のF形、1997年には1500℃級のG形を、更に、2011年には1600℃級のJ形ガスタービン（図2）を開発した^{(2),(3)}。

このような高温・高効率化技術開発の実績を背景に、2004年度から開始された国家プロジェクト「1700℃級ガスタービン要素技術開発」に参画して、1700℃級の実現に向けて不可欠な要素技術（コーティング、冷却、燃焼、空力）の開発を推進し、その成果を上述の1600℃級J形ガスタービンにいち早く適用しつつ、1700℃級ガスタービンに向けて着実に開発を推進している。また、タービン翼材料用Ni基超合金についても（独）物質・材料研究機構と別途連携して開発を進め^{(4),(5)}、これを1700℃級ガスタービンの国家プロジェクトに展開してきた。そこで、本報では、ガスタービンの高温化実現に向けた製造技術開発について、即ち、タービン翼に関わる製造技術とし

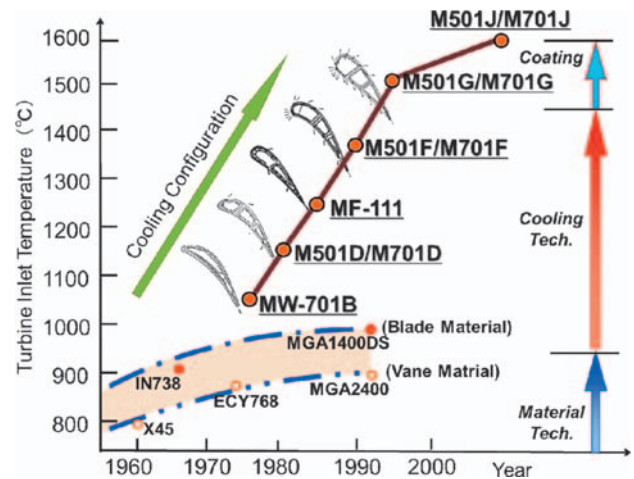


Fig. 1 Trend of turbine inlet gas temperature rise of MHI gas turbine and superalloy development⁽¹⁾

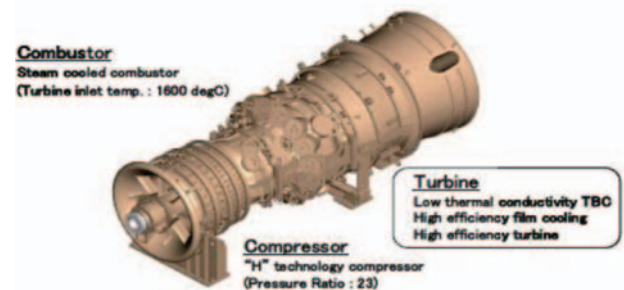


Fig. 2 M501J gas turbine and technical features⁽⁶⁾

て、鋳造技術、溶接技術およびコーティング技術について報告する。

2. 実施内容と結果

2.1 鋳造技術

燃焼ガスの高温化により熱効率を向上させた高効率ガスタービンを実現するためには、耐熱性に優れたタービン精密鋳造翼を安定した品質で製造できる技術の開発が不可欠である。また、タービン翼の高温強度向上のため

原稿受付 2014年8月1日

* 1 三菱重工業㈱

〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

にはNi基耐熱合金製方向凝固翼（一方向凝固，単結晶）の適用が有効であるが，方向凝固翼の鑄造においては異結晶・フレックルなどの結晶性欠陥の抑制が重要である。そこで，以下のとおり検討した。

(1)供試合金

鑄造技術を検討するに当たり，現用のタービン動翼用Ni基合金のMGA1400（表1）を使用した。また，物質・材料研究機構と連携して開発したNi基単結晶合金のMGA1700⁵⁾も用いた。MGA1700は図3に示すとおり，クリープ破断強度，疲労強度等の高温強度のみならず，鑄造性，材料コストも念頭に置き開発した。即ち，貴金属であるReを無添加にしつつ，市販の第2世代単結晶合金と同等以上のクリープ破断強度，疲労強度を有し，特に圧縮保持条件でのクリープ疲労強度に優れている。また，鑄造性は後述の結晶性欠陥の評価により問題ないことを確認した。MGA1700のマイクロ組織を図4に示す。

Table 1 Nominal composition (wt%)⁽⁷⁾

| | Ni | Cr | Co | Mo | W | Ta | Nb | Ti | Al | others |
|---------|------|----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|---------|
| MGA1400 | Bal. | 14 | 10 | 1.5 | 4.3 | 4.7 | — | 2.7 | 4 | C, etc. |

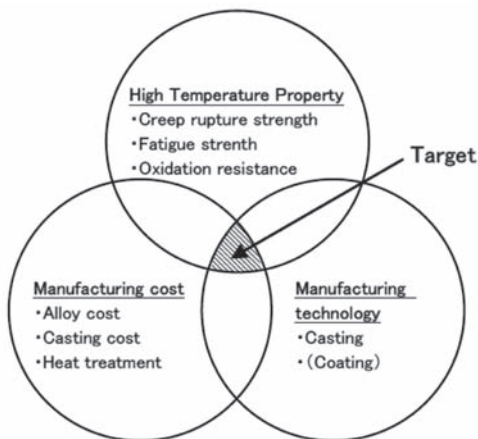


Fig. 3 Development target of new Ni base SC superalloy⁽⁸⁾

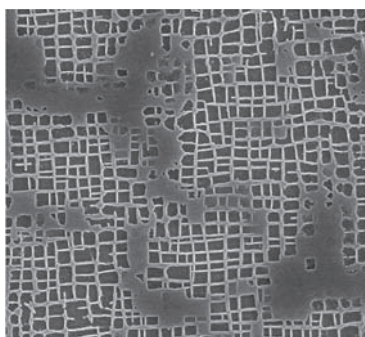


Fig. 4 Microstructure of MGA1700 by SEM

(2)鑄型・中子

方向凝固翼は一般にブリッジマン法により製造され，翼各部位が凝固する際の当該部温度勾配を急峻化する事で，結晶性欠陥を抑制する事ができる。凝固時温度勾配は鑄型加熱温度や引下げ速度など鑄造条件の調整により急峻化できるが，加えて鑄型材質の改善も温度勾配の急峻化に有効である。即ち，鑄型の高温強度を高めて薄肉化する事ができれば，鑄型表面からの放射による抜熱を高め，凝固時温度勾配を高める事が可能である。

鑄型材の高強度化開発にあたっては鑄型製造用スラリのバインダ材質，スラリーへの添加およびサンディングに用いる耐火材材質に関し検討を行い，一般材の約2倍の高温強度を有する鑄型材を開発した（各2体試験，図5）。また中子材についても，その強度を向上させる事で内部冷却構造の微細化や寸法精度の向上など，設計自由度を高める事ができる。中子材の射出成型素材に使用するセラミックス粒子を適正化する事で，一般材の約3倍の高温強度を実現した（各2体試験，図6）。

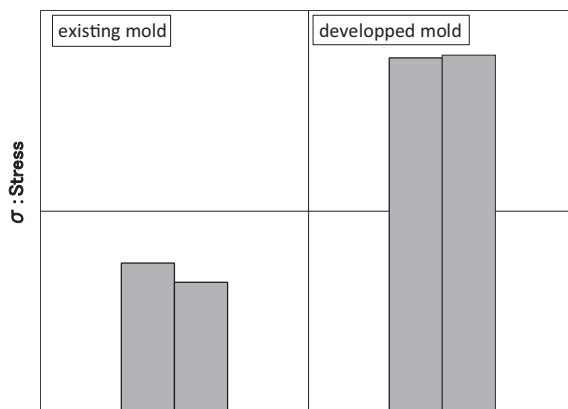


Fig. 5 Result of 3-point bending test of mold materials at 1500degC

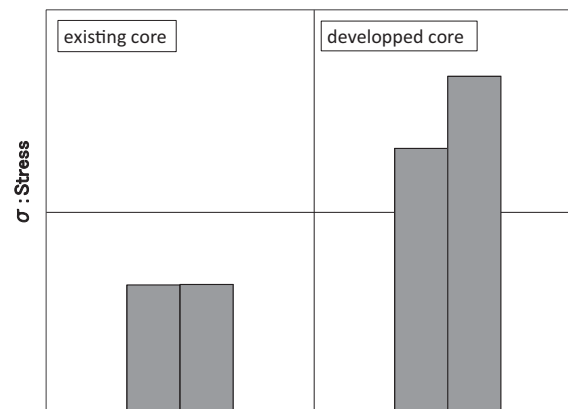


Fig. 6 Result of 3-point bending test of core materials at 1500degC

(3) 鋳造シミュレーション

以上の技術開発に加え、鋳造シミュレーションにより鋳造欠陥の発生が予測できれば、より効果的に鋳造欠陥を抑制可能となり、引いては鋳造条件最適化、品質の向上を図る事ができる。そこで、シミュレーション技術について検討した。方向凝固翼における代表的な鋳造欠陥を図7に、また、これらについてのシミュレーション技術を以下に述べる。

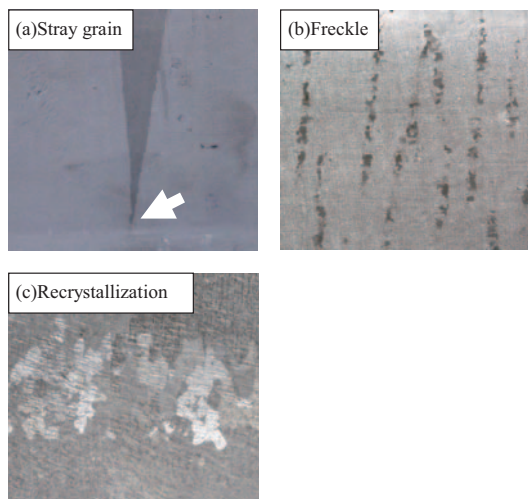


Fig. 7 Macro structure of typical casting defect in directionally solidified blade

i) 異結晶

方向凝固翼において発生しうる鋳造欠陥のひとつに異結晶 (stray grain) が挙げられる。これは鋳物底部で発生させた柱状晶が下部から上部へかけて一方向に成長する過程において、凝固途中で新たな結晶核が発生、成長するもので、強度低下の原因となる。これは鋳物各部位の凝固時温度勾配と結晶成長速度のバランスが崩れた時に発生するので、凝固伝熱解析によりこれらパラメータを計算する事で発生の傾向を予測できる。また単結晶翼鋳造においては鋳型底部の結晶生成・成長とセクタでの結晶選択を正常に進行させるため、より厳密な条件設定が必要であるが、当該部の結晶成長状況についても同時に計算予測可能である。

単結晶試作翼に対する凝固伝熱解析結果を図8に示した。この解析結果を基にして凝固界面における温度勾配や界面の移動速度、即ち、結晶成長速度を算出できる。また、図9は異結晶予測・結晶成長シミュレーション結果である。

ii) フレックル

同じく方向凝固翼における鋳造欠陥であるフレックル (Freckle) は凝固時に生じる局所的な濃度分布に起因する溶湯の比重差により対流が発生し、健全な結晶成長を阻害するために発生するものである⁽⁹⁾。方向凝固翼中に発生したフレックルは強度低下の原因となるため、鋳造条件を調整し、その発生を抑制することが重要である。

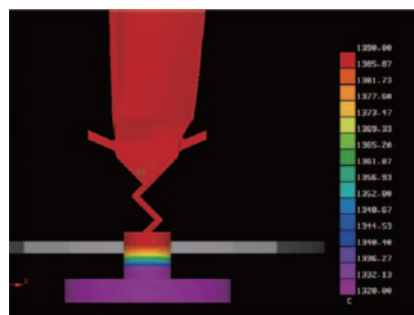


Fig. 8 Result of solidification simulation (temperature)

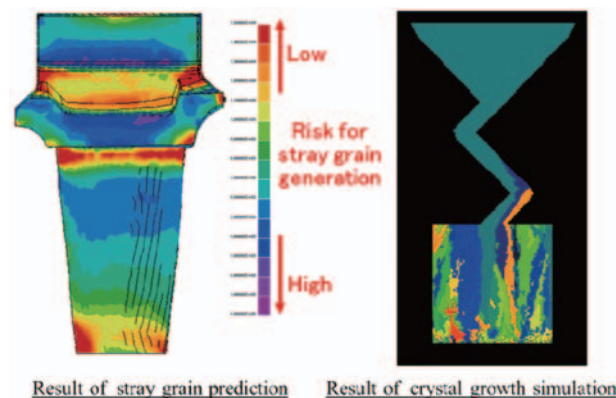


Fig.9 Result of stray grain prediction and crystal growth simulation

そこで、凝固シミュレーションに基づくフレックル発生予測技術の開発を行った。

本手法では凝固途中の鋳物各部位の温度を凝固伝熱解析により計算し、計算結果から成分偏析に伴う液相密度変化、溶湯対流の障害となるデンドライトの間隔等を評価し、フレックルの発生危険度を予測する。

図10は当社所有の鋳造炉を用いて実施した、MGA1400、MGA1700合金の基礎試験体鋳造試験の概要である。また、基礎試験体の表面マクロ組織 (MGA1400) と同試験体について行ったフレックル予測結果を対比して図11に示す。これから、表面マクロ組織とフレックル予測結果が良く一致している。また、溶湯密度変化のみならず、鋳物形状・凝固界面形状の効果も加味することで、更に計算精度を高めることも可能である。

iii) 再結晶

鋳物の凝固・冷却時に発生したひずみが限界値を超えて残留する場合、これに起因して熱処理により再結晶が発生し、当該部の強度が低下する。そこで、再結晶発生を計算予測する手法を構築するため、鋳型、鋳物、その他鋳型支持構造物を解析対象として、鋳造時のFEM弾塑性解析を実施し、鋳造後の残留塑性ひずみを算出した。各部位の温度は、凝固伝熱解析に求め、得られた温度場を弾塑性FEM解析に反映した。解析結果から、鋳物形状変化が大きい箇所では塑性ひずみが大きくなる傾向が認められ、再結晶発生の予測に活用できることが判った (図12)。

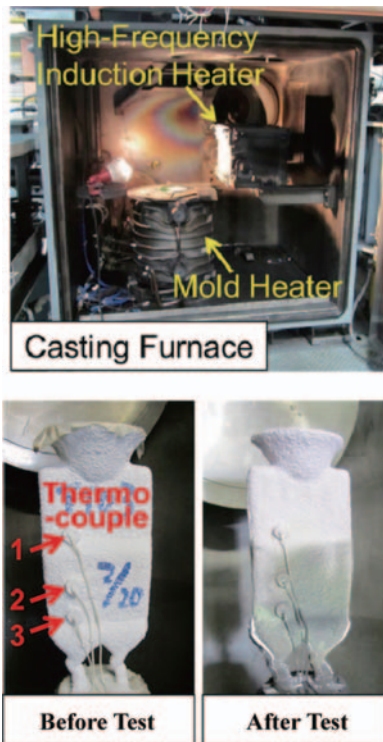


Fig. 10 Overview of casting test

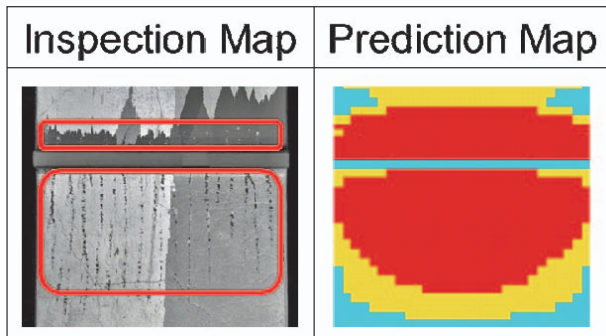


Fig. 11 Result of Freckle inspection and prediction

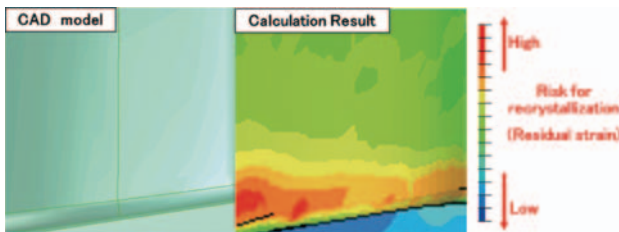


Fig. 12 Result of residual strain calculation

2.2 溶接技術

1700℃級に向けたガスタービンの性能向上や信頼性確保のために、高温部品の内部に複雑な冷却構造等を形成する必要がある。動翼、静翼の場合は、精密鑄造技術を適用しセラミックス中子にてこの構造を付与するが、外表面からも例えばプラグや蓋板と呼ばれるパーツを接合し当該構造を完成する場合があります、そこに溶接技術が適用される。ただし、一般には、動翼や静翼材のようなγ

相析出強化型のNi基耐熱合金は、溶接時の高温割れ感受性が高いことから難溶接材料として位置づけられ、また、図13にその傾向を示すように、AlおよびTiの添加量が多くなると溶接の難度が増すので、健全な溶接を得るためには適切な溶接条件を採用する必要がある。

これに対して、静翼用合金MGA2400は化学組成を表2に示すとおりAl、Ti量は比較的多いものの、合金開発時に溶接性も重視しAl、Ti以外の成分の添加量適正化などにより実用静翼材として十分な溶接性を有している⁽⁶⁾。そして、合金の開発以来、溶接部を備えた実機静翼として豊富な実績を有するが、同時に、高品質溶接の維持を現場の溶接技量にも依存している部分があることは否めない。そこで、ガスタービンの一層の高温化に対応すべく、MGA2400についてその合金特性を活かしつつ、属人的影響を抑え、かつ、信頼性・生産性の向上に展開すべく、自動溶接技術の開発に取り組んだ。ここでは、静翼シュラウド端部を対象にした溶接技術開発状況について報告する。

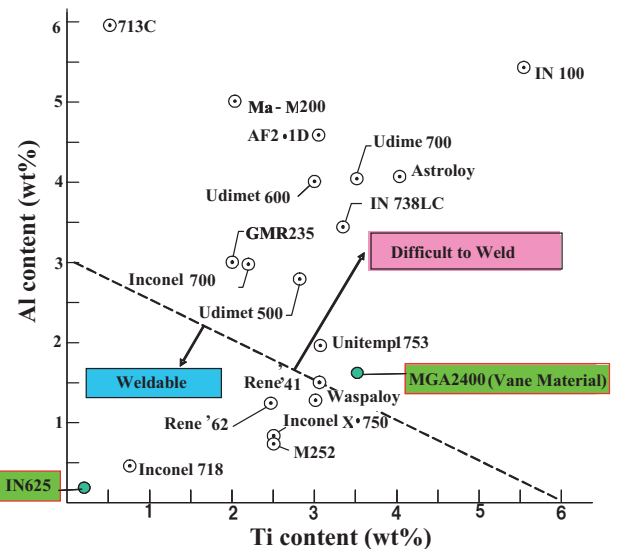


Fig. 13 Weldability of Ni base superalloy

Table 2 Nominal composition (wt%)⁽⁷⁾

| | Ni | Cr | Co | Mo | W | Ta | Nb | Ti | Al | others |
|---------|------|----|----|----|---|-----|----|-----|-----|---------|
| MGA2400 | Bal. | 19 | 19 | — | 6 | 1.4 | 1 | 3.7 | 1.9 | C, etc. |

即ち、溶接部の大きさを考慮し、溶加材にはIN625 (Ni-21.5Cr-9Mo-3.6Nb-0.2Al-0.2Ti-2.5Fwt%) の粉末を使用した。IN625は図13に示すとおりAl、Ti量が低く溶接性に優れている。熱源のレーザーについては、予めIN625の溶解を確保し、更には融合不良も抑制しつつ、母材の過度な溶融も発生させない条件範囲を把握し、図14の設備にてレーザー自動溶接を検討し施工条件を適正化した。具体的には静翼を対象にし、また、この種鑄造品における全自動溶接の課題である溶接位置決めについ

ては、ロボット付帯のレーザセンサを用いて行い、これにより自動補正も実施した。試験溶接部の断面を図15に示すとおり、融合不良はもとより、母材および溶金部にも割れ等異常のない良好な状態を得ることができ、これを基にして自動化条件を決定できた。

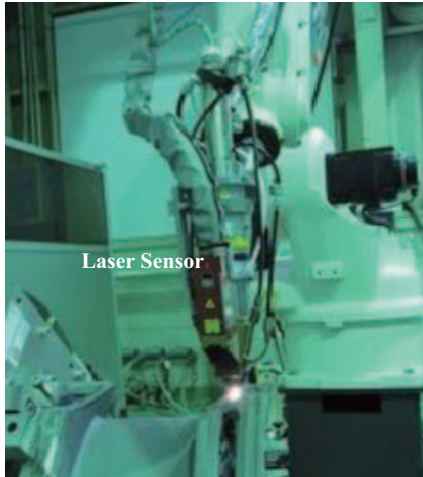


Fig. 14 Automatic laser welding apparatus

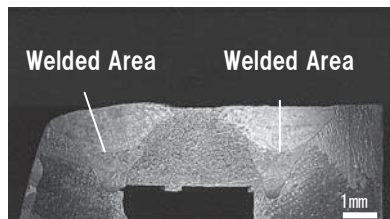


Fig. 15 Cross section of welded sample

2.3 コーティング技術

遮熱コーティング (TBC : Thermal Barrier Coating) は、高い遮熱性 (低熱伝導性) を有するセラミックスを成膜することで冷却部品のメタル温度を低下させ、耐久性や信頼性を向上する技術であり、高温ガスタービンでは必須の技術となっている。現在、1700℃級ガスタービンの開発が進められているが、TBCの使用環境はより厳しくなることが想定されている。そこで、従来よりも遮熱性、信頼性に優れたTBCを実現すべく、材料開発、マイクロ組織の適正化、製造技術の高度化を進めている。ここでは主として、TBCの製造技術開発について述べる。

TBCは1960年代から航空機エンジンに適用が開始され、冷却翼のメタル温度低減に有効な手段 (図16) として発達してきた。現在、TBCの皮膜構成はトップコートとボンドコートの2層から構成されるものが主流となっている。

トップコート材として、高温安定性に優れたイットリア部分安定化ジルコニア (以下、YSZと称す : Yttria partially Stabilized Zirconia) が一般に用いられていることが多い。

トップコートの施工法は、大気圧プラズマ溶射法 (以

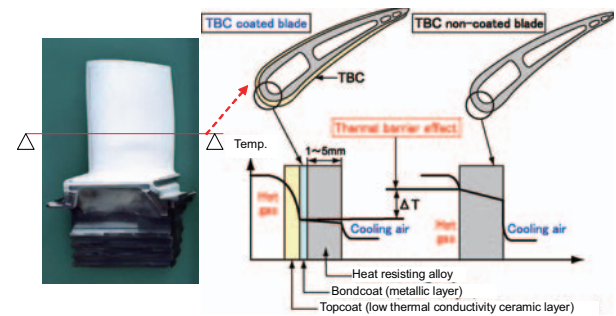


Fig.16 Schematic diagram of Thermal barrier concept on TBC

下、APSと称す : Atmospheric Plasma Spray) や、電子ビーム物理蒸着法 (以下、EB-PVDと称す : Electron Beam Physical Vapor Deposition) が主に使用されているが、産業用ガスタービンでは、遮熱性、施工性、コスト等の観点からAPSが主流となっている。図17は産業用ガスタービン翼に施工したTBCの断面マイクロ組織例で、トップコートをAPS、EB-PVDで施工したものを示す。いずれも、ボンドコートには耐酸化性に優れたMCrAlY (M : Ni, Co, CoNi等) 合金を、低圧プラズマ溶射法 (以下、LPPSと称す : Low Pressure Plasma Spray) 等により施工している。APSによるトップコートの場合、導入した多数の気孔が認められ、これにより遮熱性を高めることができる。一方、EB-PVDの場合はトップコートが柱状晶により構成されており、気孔が少ない分、遮熱性は低いものの高い熱応力緩和性を有し、熱サイクル耐久性に優れる。

施工面では、APSにおけるTBCトップコートの成膜時の飛行中溶射粒子の温度 (図18) および速度等が重要であり、これらと小型試験片におけるマイクロ組織との相関を把握しつつ、耐久性や熱伝導率等の被膜特性と共に、施工条件の選定に反映している。

更に、実部品の施工プログラムの開発においては、小型試験片で得られる良好なマイクロ組織を実現するために

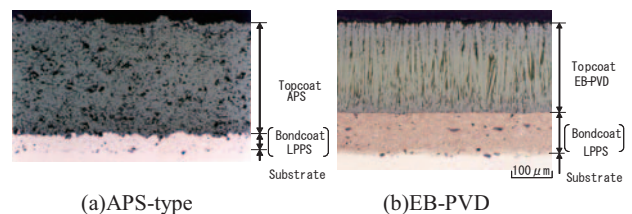


Fig.17 TBC microstructure by APS and EB-PVD

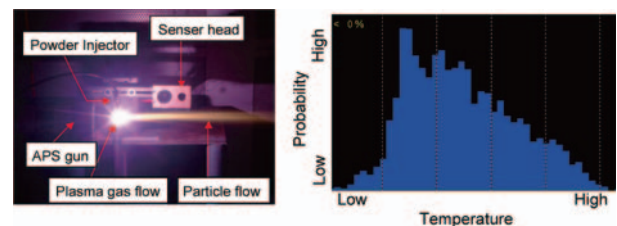


Fig.18 The spray condition monitoring system and powder temperature distribution¹⁰⁾

コンピュータによる施工シミュレーション (図19) を事前に実施し、詳細条件の決定に反映している。

以上の技術開発により、産業用ガスタービンにおいてTBCは温度環境の厳しい冷却高温部品、すなわち、主としてタービン動静翼、燃焼器、分割環に適用されており (図20)、メタル温度を低減してタービン部品の信頼性向上に寄与している。

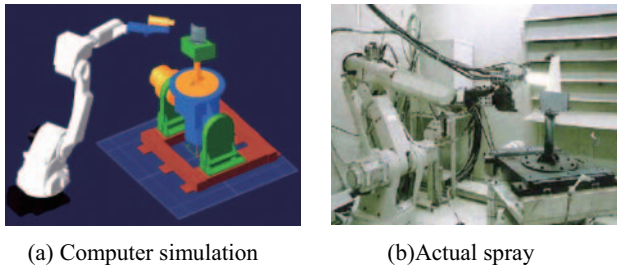


Fig.19 Development of the coating program¹⁰⁾

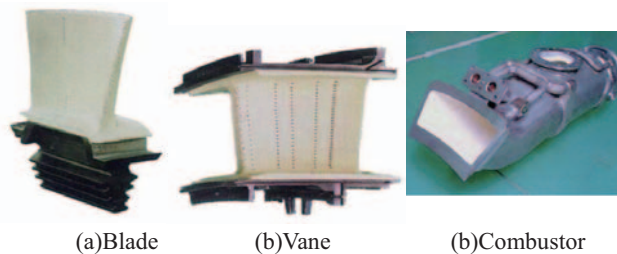


Fig.20 Hot parts of gas turbine with TBC

3. まとめ

GTCC発電の高効率化には、その主機であるガスタービンの高温化・大型化が必要である。その観点から、1700℃級ガスタービンに向けた要素技術開発の一環として製造技術開発も推進しており、鋳造では、方向凝固技術について、シミュレーション技術を含め開発している。溶接技術にはレーザーによる自動溶接技術を開発できた。また、コーティングについては、高信頼性のTBCを開発し、既に1600℃級J形ガスタービンにも適用している。

謝辞

本研究の開発は、経済産業省資源エネルギー庁の補助事業として実施しました。また、一部については、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の「省エネルギー革新技术開発事業」にて実施しました。関係各位に深く謝意を表します。

4. 引用文献

- (1) 小森豊明, GTSJガスタービンセミナー (第41回) 資料集 ('13-1), (2013), pp.57-64.
- (2) 由利雅則, 正田淳一郎, 塚越敬三, 伊藤栄作, 羽田哲, “1600℃級J形技術を適用した発電用高効率ガスタービンの開発”, 三菱重工技報, Vol. 50, No. 3 (2013), pp. 2-10.
- (3) 安威俊重, 正田淳一郎, 伊藤栄作, “J形ガスタービン技術を適用した高効率/高運用性ガスタービンM701F5形の開発”, 三菱重工技報, Vol. 51, No. 1 (2014), pp. 2-10.
- (4) Okada, I., et al, “Development of Ni-base Single-Crystal Superalloy for the Next Generation Gas Turbine”, International Gas Turbine Congress 2007 Tokyo, (2007), pp. 193.
- (5) 種池正樹, 岡田郁生, 下島幸郎, 小熊英隆, 原田広史, 鉄井利光, “高効率ガスタービン向け超耐熱合金の開発”, 第39回日本ガスタービン学会定期講演会 (松本) 講演論文集, (2011), C-17.
- (6) Ito, E., Okada, I., et al, Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010 Glasgow, GT2010-23233.
- (7) Okada, I., Torigoe, T., Takahashi, K. and Izutsu, D, “Development of Ni base Superalloy for Industrial Gas Turbine”, Superalloy, (2004), pp707-712.
- (8) Okada, I., Shimohata, S., Taneike, M., Oguma, H., “Hot parts of MHI industrial gas turbine by precision casting”, 13th World Conference on Investment Casting, (2012), U2.
- (9) C. Beckermann, J. P. Gu and W. J. Boettinger, Metall. Mater. Trans. A, 31A (2000), 2545
- (10) Okajima, Y., Kudo, D., Okaya, N., Torigoe, T., Kaneko, H., Mega, M., et al, “Evolution of Thermal Barrier Coating for Land Base Gas Turbine at MHI”, ITSC2014, Abstract No.4153.

特集：最新の加工・製造技術

航空用ガスタービン

櫻井 幹男*¹
SAKURAI Mikio盛田 英夫*²
MORITA Hideo村上 務*²
MURAKAMI Tsutomu黒木 博史*³
KUROKI Hiroshi池田 修治*³
IKEDA Shuji横田 尋己*⁴
YOKOTA Hiroki中村 武志*⁴
NAKAMURA Takeshi大重慎一郎*⁵
OOSHIGE Shinichirouキーワード：ガスタービン，ジェットエンジン，複合材，金属間化合物，粉末焼結，摩擦接合
Gas Turbine, Jet Engine, CFRP, CMC, TiAl, MIM, LFW

1. はじめに

今後20年間における世界の航空旅客需要は、年平均4.9%の伸びにより現在の2.6倍の15.0兆人キロメートルとなり、ジェット旅客機の新規需要は32,217機と予測されている。さらに航空貨物需要の堅調な伸びも考慮すると、2033年までの世界の航空用ガスタービン（以後、エンジン）の新規需要は80,676基と見込まれている⁽¹⁾。

今世紀に入りジェットエンジンには一段と高い経済性と環境適合性が求められ、産業のグローバル化とともに各エンジン・メーカーは熾烈な競争を繰り広げている。代表的な経済性指標である燃料消費率の改善は、高バイパス比化と軽量化による推進効率の向上ならびに高温高圧化と要素効率化による熱効率の向上により達成される。そのため、現在量産中あるいは開発中の各エンジンには先進材料の開発を伴う高度な設計製造技術が適用されている⁽²⁾。我が国はその革新的な技術開発力、ならびに信頼性が要求されるハードウェアを長年に渡り供給してきた実績が高く評価され、国際共同開発においても確固たる地位を築いている⁽³⁾。

本稿では現在を起点とした前後10年程度を対象期間として、使用材料の進化に伴う設計・生産技術の革新ならびにInformation and Communication Technology (ICT：情報通信技術)を活用した製造変革の動向を、その適用事例とともにご紹介したい。

複合材料ではいわゆる素材と加工の区分自体が成立し難く、機能設計そのものが材料設計を始点とし、加工も

従来基準に照らせば素材段階からの一貫製造である。また、新材料としての金属間化合物は精密铸造によりコスト競争力が付与され、金属粉末射出成形は素材粉末から最終形状（ネットシェイプ）を直接造り込むプロセスであるが、ともに製造付加価値の大部分はいわゆる素材段階にある。さらに、金属材料の進化に対しては基材を溶解させずに接合できる線形摩擦接合の適用、ならびに次世代生産システムの要であるICTについては、切削工程におけるビックデータ活用事例を紹介するが、要素効率の高度化や進化する機体システムへの対応については引用文献⁽⁴⁾を参照願いたい。

2. 複合材料部品の製造・加工

2.1 CFRP部品の製造・加工

民間航空機用ターボファンエンジンでは、燃費低減のために、バイパス比が増大している。高バイパス比の大口径ファンでは、大型化するファン部品の軽量化が重要であり、CFRP（炭素繊維強化プラスチック）適用による重量削減が進められている。図1で主要メーカーのCFRPファン部品適用状況を概観する⁽⁵⁾。2000年代に入って、主要な全メーカーで開発が進められており、CFRPファン部品は本格的展開期を迎えた。製造・加工の点では、積層・硬化工程の自動化、時間短縮によるコストダウンが大きな課題である。CFRPファン部品のパイオニア（第1世代）であるGE90エンジンファンブレード（1990年代）では、1000枚以上のCFRP素材シート（プリプレグ）を手作業で積み重ね（積層作業）、オートクレープで数時間かけて焼き固める製造方法を取っていてコストが高い。2000年代からの第2世代においては、各社が特徴ある材料と製造プロセスの組み合わせによる自動成形を採用し、コストダウンを実現しつつある。

(株)IHIはJAEC（一般財団法人 日本航空機エンジ

原稿受付 2014年7月3日

*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部

〒196-8686 昭島市拝島町3975-18

*2 (株)IHI 民間エンジン事業部 技術部

*3 (株)IHI 技術開発センター エンジン技術部

*4 (株)IHI 技術開発センター 材料技術部

*5 (株)IHI 生産センター 生産企画部

ン協会)の一員として、エアバスA320neoに搭載するPW1100G-JMエンジン用のCFRP製ファンケース、及びStructural Guide Vane (SGV)を開発した⁽⁴⁾。図2にファンケース、SGVを示す。本エンジンのバイパス比は約12に到達して高い燃費性能を実現し、CFRP適用により、ファン大型化による重量増大を抑制した。両CFRP部品においては、自動積層と1個流しフローラインによる生産システムを構築しており、第2世代にふさわしいコストダウンを実現している。本項では、ファンケース・SGV両部品の生産システム概要を紹介する。

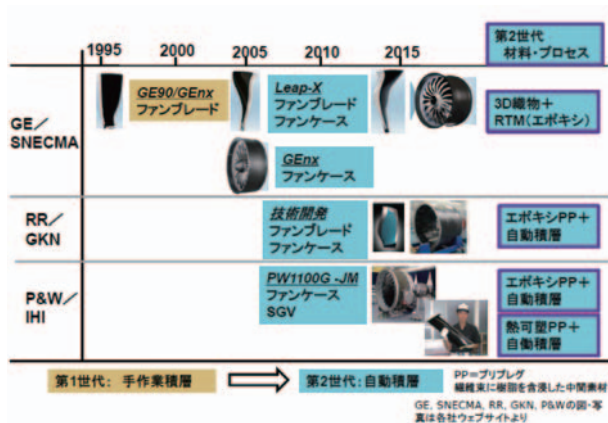


Fig. 1 Composite Fan System : Company map⁽⁵⁾

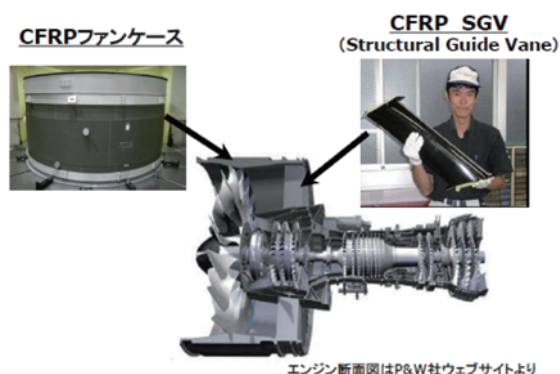


Fig. 2 PW1100G-JM : Composite Fan case and Composite SGV

2.1.1 CFRPファンケースの生産システム

ファンケースはエンジンで最も重い部品であり、CFRP適用による軽量化効果が大きい。空気流路を形成するダクトとしての機能に加えて、ファンブレード飛散 (FBO, Fan Blade Off) 時にブレード破片を止める防弾チョッキのような耐衝撃性 (コンテインメント特性) が要求される。PW1100G-JM用ファンケースは、衝撃時の吸収エネルギーが大きい変性エポキシ樹脂を用いたCFRP素材 (プリプレグ) と、自動積層が可能なフィラメントワインディング (FW) 成形 (芯金上にプリプレグを巻き付ける成形法) を採用し、耐衝撃性とコスト低減の両立を実現した。

樹脂、及びプリプレグの仕様は独自スペックで定められている。プリプレグの形態としては、ロービング

(紐状に炭素繊維を束ねたもの) とNCF織物 (炭素繊維の屈曲していない特殊織物) の2種類を採用した。樹脂・プリプレグ共に、自社品質管理により国内サプライチェーンで製造している。

生産システムは、プリプレグからケース完成品までを1フロアの工場内で、1個ずつ投入・完成させていく1個流しフローライン方式である。プリプレグは、自動FW装置で、定められた積層構成でマンドレル上に巻き付けられる。ロービングプリプレグのFW成形は、繊維直進性が良く、高い機械的物性が得られるが、巻付け速度が遅い欠点がある。物性は少し劣るが、繊維供給速度を速くできるNCFプリプレグを併用することにより、物性と加工速度の両立を図った。また、巻付け方法の工夫により、外側フランジも一体積層を行っている。従来、多くの手作業を必要とした積層作業の自動化により、加工時間・必要人数を削減すると共に、積層精度が向上して、品質的にも安定した。

巻付け積層後、オートクレーブ内で加熱硬化させ、非破壊検査を行う。模擬欠陥による統計的欠陥検出確率検定 (POD; Probability of Detection) により、探傷条件と許容限界を決定した。内部欠陥が無いことを確認した後、各種付属品の接着組立、取合い部の機械加工、最終寸法検査を経て完成に至る。

同一フロアでのフローラインとするには、高い清浄度が要求される積層・接着工程と通常の機械加工工程を混在させる必要がある。このため、積層・接着エリアはインハウスとして区分けし、空調経路を工夫して他工程からのコンタミを防いでいる。この生産ラインは、2014年度後半の本格量産開始に向けて、製造トライアルを行っている。1個流しフローライン化により、数時間の短いサイクルタイムと、少ない工程内仕掛の実現を目指す。

2.1.2 CFRP-SGVの生産システム

SGVは、ファン後流を整流する空力的静翼と、ファンケースを支持する構造部材としての機能を併せ持つ部品で、運航中の鳥衝突に耐える高い衝撃強度が求められる。また、エンジン1台に数十枚が取り付く大量生産品で、タクトタイムは分オーダーとなる。そこで、SGVには、高い耐衝撃性と短い硬化時間を併せ持つ熱可塑性樹脂を用いたCFRP素材 (プリプレグ) を適用した。また、自動積層と高速プレス成形を用いた、1個流しフローライン化により、L/Tと製造コスト削減を図った。

樹脂には、耐熱性・耐環境性の高い、スーパーエンジニアリングプラスチック (スーパーエンブラ) を採用した。プリプレグは独自スペックの1方向強化シート (UDシート) で、ファンケースと同様に、国内サプライチェーンで製造している。

図3にSGV製造工場のレイアウトと主な自動加工機を示す。熱可塑性樹脂は、エポキシ樹脂と異なり、複数回溶融・硬化を繰り返すことができる。本ラインでは熱

可塑性樹脂の再加工性を利用している。プリプレグは汎用的なシート供給装置と産業用ロボットを組み合わせた自動積層装置により、平面状に積層される。その後、複雑形状の部分だけを熱間プレスにより、先に成形する。(予備成形) この予備成形品と、残りの平面状積層体を組み合わせ、再度、熱間プレスにより最終形状まで成形する。プレスの金型温調機には、高速での加熱・冷却が可能で、かつ温度分布を制御できる特殊な装置を適用した。自動積層・予備成形・高速プレス成形を組み合わせることにより、フローラインによる分オーダータクトタイムの生産を可能にした。また、手作業を排除することにより、品質的にも安定した。

CFRP翼本体を成形した後、トリム加工、非破壊検査を行う。ファンケースと同様に、PODにより探傷条件と許容限界を決定した。また、自動判定を適用し、非破壊検査が専門ではないラインマンによる検査を可能にした。非破壊検査後、取付金具等の接着組立、塗装、最終寸法検査を経て完成に至る。

ファンケースではエリア別の清浄度コントロールを行ったが、サイズの小さいSGVでは、加工装置毎のシールド設置と空調管理により、コンタミ防止を図っている。本生産ラインも、ファンケース同様、2014年度後半の本格量産開始に向けて、製造トライアルを行っている。

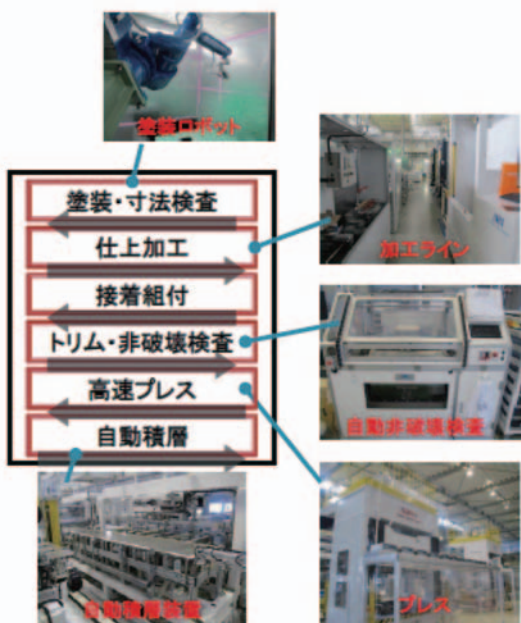


Fig. 3 Manufacturing System of Composite SGV

2.2 CMC (セラミックス基複合材料) の製造・加工

高バイパス比化と並ぶ燃費低減方法が高圧力比化・高温化による熱効率向上である。最新エンジンの総圧力比は50に到達しており、今後、60前後まで増加すると言われている。このような高圧力比エンジンでは、耐熱合金を超えた材料を用いないと、冷却空気量増加により燃費低減効果が相殺されてしまう。次世代耐熱材料として

CMCが期待されている。

SiC (炭化ケイ素) などのファインセラミックスは、軽量で耐熱性が高いが、単体 (monolithic) では、靱性が低く“脆い”ためタービン部品適用は困難である。高強度なセラミックス繊維との複合材料化により、靱性の大幅改善が得られ、構造材料として適用可能性が出てくる。(株) IHIでは、SiC繊維とSiCマトリックスを用いたSiC/SiC CMCのタービン部品基礎開発を進めている⁽⁴⁾。

図4に開発品の例を示す。高完成度・低コストなSiC繊維と高耐酸化性の繊維/マトリックス界面を適用して、低圧タービン用1100℃級の耐熱性と、実用可能なコストを実現している。本項では、IHI CMCの製造プロセスを概観する。

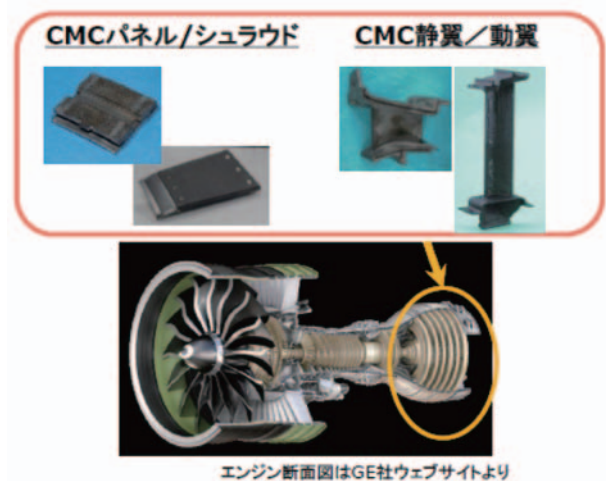


Fig. 4 CMC Parts on Development of IHI

図5にCMCの製造プロセスを示す。SiC繊維には、第2世代と呼ばれる、宇部興産製のZMI繊維を用いている。第3世代SiC繊維 (宇部興産製 SA繊維、日本カーボン製 ハイニカロンタイプS繊維等) よりも耐熱性は劣るが、完成度が高く、実用的なコストを実現している。繊維表面にBN (窒化ホウ素) を、繊維/マトリックス間の界面として、コーティングする。マトリックス中のクラックが界面に到達した時に、繊維に沿った方向に方向転換する。この破壊進展メカニズムが、脆性材料であるセラミックスに高い靱性を付与する。このような機能を持つ界面材料としては、C (炭素) とBNが知られている。BNの方が耐酸化性に優れ、CMCとしての耐熱性は高いが、生成処理温度が高く施工が難しい。化学蒸着 (CVD法) の条件を工夫し、安定したBNコーティング生成を実現した。

BNコーティングを施したSiC繊維を用いて、製品形状の3次元織物に製織した後、SiCマトリックスを含浸・形成させる。この形成工程が長時間を要し、L/T、コスト上の大きな問題になる。以下の3方法を併用して、高い機械的特性と短いマトリックス形成時間の両立を図っている。

- (1)CVI (気相含浸, Chemical Vapor Infiltration) : SiC原料ガスを織物の中で反応させてマトリックスを形成する。緻密で純粋な組織ができるが、含浸・反応時間が長い。主に繊維束内部のマトリックス形成に用いる。
- (2)SPI (固相含浸, Solid Phase Infiltration) : 原料の混合粉末溶液を織物中に含浸させた後に、焼成してSiCマトリックスを形成する。処理時間は短い、繊維束中含浸が困難である。主に、織り目充填マトリックス形成に用いる。
- (3)PIP (液相含浸, Polymer Impregnation and Pyrolysis): ポリマー原料を含浸した後に、焼成してマトリックスを形成する。焼成時の体積収縮により、砕けた塊状組織となる。処理は早い、機械的特性は低い。SPIと同様に、織り目充填に用いる。

マトリックス形成後、仕上げ加工を行う。特殊研削工具の適用や、レーザー援用加工により、高速の機械加工が可能となる。仕上げ加工後、むき出しとなる繊維、界面を保護するため、SiCコーティングを製品表面に施工して完成に至る。

CMCにおいても、CFRPと同様に、品質保証手段として非破壊検査が重要である。空孔、繊維蛇行等の欠陥を探傷するために、種々の非破壊検査手法を適用する。

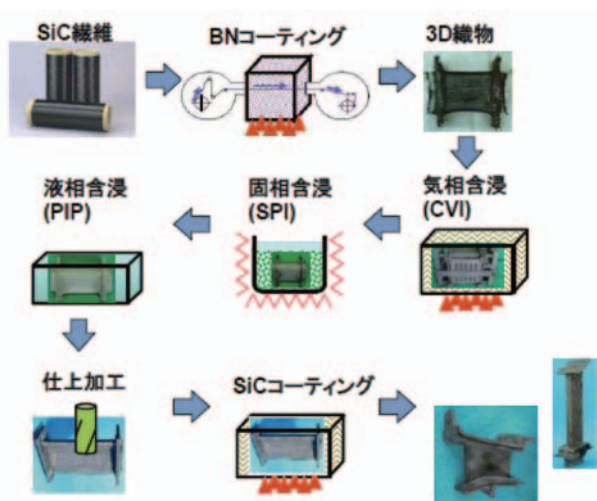


Fig. 5 Manufacturing Process of CMC

3. 新素材

3.1 チタンアルミタービン翼の製造技術

チタンアルミ合金のジェットエンジンへの適用は、軽量化の効果が大きいことから今後、適用部位のさらなる増加が期待されている。世界的にチタンアルミタービン翼の製造技術の開発は大きく分けて casting, 鍛造削出, 粉末積層造形法と三つの方法によって進められている。現段階では三つすべての方法で後工程として多くの機械加工が必要なプロセスとなっており、高コストなプロセスとなっている。そのため、コスト低減はチタンアルミ部材を製造する上で共通課題である。この課題に対して通常のNi基合金翼と同じように精密 casting によるネット

シェイプ製造を適用することにより製造コストは大幅に低下する。しかしチタンアルミ合金のネットシェイプ casting を行うためには幾つもの課題が存在する。

その一つ目がチタンアルミ合金の反応性の高さである。 casting では溶融した金属を casting 型に流し込むが、従来の手法では溶融するための炉つぼや casting 型とチタンアルミ合金が反応し、新たに生成した物質は不純物となって混入してしまう。また casting 型と反応した部分は所定の成分とは異なるため、 casting 後に機械加工 (切削) または化学的な除去など何らかの方法で除去しなければならない。2つ目の課題は融点が1500℃以上と高温であることである。金属素材の溶解は酸素との反応を避けるために真空中で行われる。このため溶解に時間を要すると、合金成分が蒸発し、成分変動を起こす恐れがある。タービン翼の組成は定められた規格を厳重に守る必要があり、溶解時の成分変動は避けなければならない、迅速溶解など成分変動を避ける方策が必要である。3つ目の困難な点は溶融したチタンアルミ合金の「湯流れ性」の低さである。この点が最もチタンアルミ合金のネットシェイプ casting を困難にしている。湯流れ性とは、 casting 型の隅々にまで溶融金属が行き渡る性質を指す用語である。タービン翼には肉厚が数 mm と薄い部分が存在し、湯流れ性が悪いと薄肉部に欠損が生じることになる。従来、湯流れ性の悪い材料の casting では、遠心力を利用した遠心 casting や、湯を吸引して casting 込む吸引 casting などの技術が用いられてきたが、比較的大きなタービン翼部材には不向きである。

これらの課題を解決するため IHI グループは Ni 基合金のタービン翼のネットシェイプ casting 技術やチタン合金部品の casting 技術に関する豊富な知見を活かしてプロセス開発を進めている。開発したプロセスではチタンアルミの溶解部分についてはチタン合金や高融点合金の溶解に用いられる「誘導溶解」を適用し、さらに電磁場応用技術、解析技術、溶解炉制御技術を駆使して改良することにより高温かつ迅速な溶解を可能とした。チタンアルミ合金の湯流れ性や反応性については、IHI の Ni 基合金、Ti 合金の casting に関する豊富な知見と経験、ノウハウの活用に加えて、 casting 解析技術を最大限に活用し解決の目途を得た。現在は個々の課題を解決し、製造プロセスとしての実用化を目指した実証設備開発の最終段階を進めているところである。

3.2 金属粉末射出成形

Metal Injection Molding (MIM: 金属粉末射出成形) は1970年代にアメリカで開発された新しい製造方法である。図6に示すように複数の熱可塑性樹脂よりなるバインダに微小な金属粉を混ぜ合わせることで、一般のプラスチックと同じ射出成形で複雑な形状の成形体を得ることができる。得られた成形体は加熱または溶剤によりバインダを取り除いた後、高温の炉内で焼結されて最終の金属製品となる。

MIMは一体成形でネットシェイプ形状が得られるため切削や組立工程が不要となる。そのため難削材を用いたジェットエンジン部品ではMIMを用いることで製造コストを従来の半分以下にする効果が期待できる。しかしながらMIMは焼結中に自重で変形してしまうことから、従来は数グラム程度の軽く小さな部品が主な適用対象となっており、材料もステンレス等の鉄系が中心であった。

IHIではジェットエンジン材料であるニッケル系の耐熱超合金を用いた圧縮機翼サイズの部品にMIMを適用する研究をしてきた。その結果、プロセス中の変形を抑える独自のバインダを用いることで図7に示すようなジェットエンジン部品の試作に成功し、強度についても図8に示す通り鍛造材と同等レベルの疲労強度を持つことを確認した。今後は、開発した技術を用いて数年内にMIMを量産のジェットエンジン部品へ適用することで大幅なコストダウンを目指す。

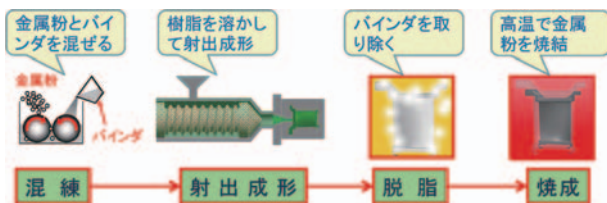


Fig. 6 Schematic diagram of the MIM Process

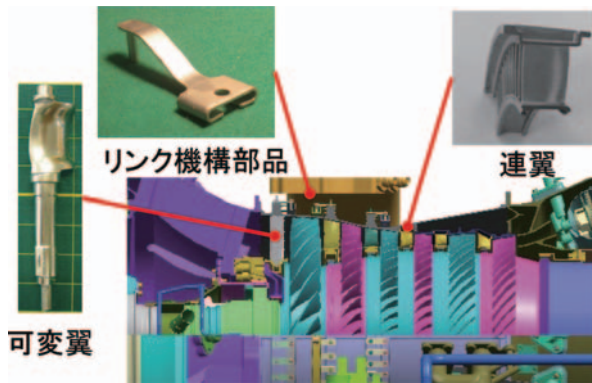


Fig. 7 Prototype of MIM parts

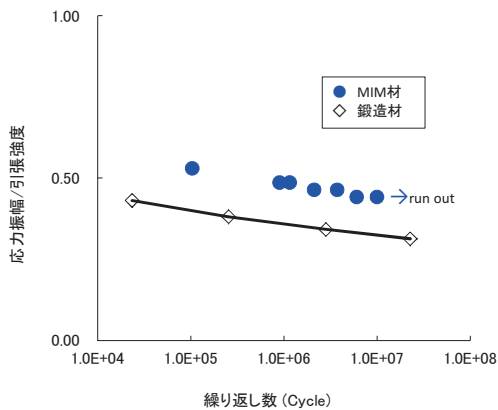


Fig. 8 S-N curve of MIM

4. 新加工技術

4.1 Liner Friction Welding (LFW：線形摩擦接合)

近年のジェットエンジンでは、翼とディスクを一体化したブリスクをファンや圧縮機のロータに採用する事例が増えている。これは、翼とディスクの結合部の重量と、それを支えるためのディスクのボア部の重量削減による軽量化と、翼座と翼座の隙間からの漏れを削減することで性能向上を達成することを目的としている。ファン、圧縮機のディスク、翼の素材には高価なチタン合金が使われることが多く、ブリスクを削り出して製造すると、粗加工段階の切粉として多くの素材が無駄になる。この課題を解決するために、LFW技術を利用して、ブリスクを製造する方法が考案され、戦闘機用エンジンなどで実用化されている。図9に示すように、別途製造した翼部品とディスクを接合することによってブリスクを製造する技術である。

LFWは、一方の部品を他方の部品に押し付け、一方を接合面に対し水平に往復運動させることで摩擦熱を発生させ、接合を実現する技術である。固相接合の一種であり、溶融接合にくらべて、良好な継手組織が安定して得られるため、高い信頼性を求められるブリスク製造に適している。また、継手形状の自由度が高く、軸対称形状に限られる回転摩擦接合に対しても優位性を持つ。IHIは、圧縮機のスプールやシャフトの製造などで長年培ってきた回転摩擦接合の技術を有する。この技術をベースとして、図10に示すようなブリスクの製造を可能とする大型のLFW設備を整備した。



Fig. 9 Blisk Manufacturing by LFW

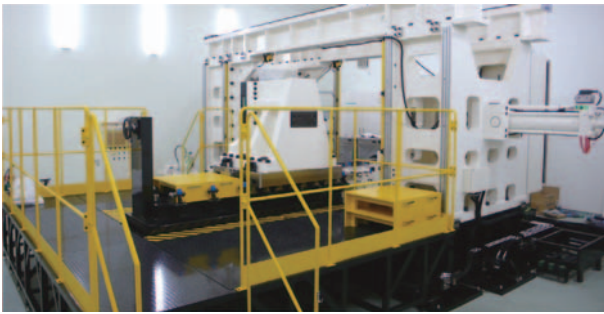


Fig. 10 Picture of LFW Machine

4.2 製造技術とICT

グローバルサプライチェーンとしての次世代生産システムでは需要変動への柔軟かつ機敏な対応が求められることから、製造現場においてもいわゆるボトルネックがシフトする事を前提とした合理化システムの構築が不可欠である。機械加工ラインにおいては切削加工条件の最適化、たとえばMetal Removal Rate (MRR: 単位時間当たりの除去体積) と工具寿命といった背反する合理化ニーズをバランス良く満たす必要があるが、制御変数の多さと工具損耗等の経時変化を伴うことに加えてライン稼働時の変動費等も拘束条件となることから、画一的なデータに基づく単純外挿では処し切れない現実があった。

特に難削材を常用する大型回転部品では、工具刃先での発生温度や切削応力を動的陽解法によりシミュレーションするとともに加工機械から得られる動特性データを対象にビビリ振動解析するなど、ビックデータの活用度合いを大幅に向上させている。たとえば新規開発された素材の場合でも、その高歪速度域での引張応力値等の材料物性値等と独自開発ICT技術とを融合することで、従来数カ月を要した試行錯誤作業が数時間程度までに短縮できている。あるいはMRRと工具寿命を目的関数とした逆解析により切削条件ならびに変動費等も最適化できるなど、さらなるICT技術の進化は品質確保と需要変動対応を前提とした生産性向上の手段として大きな期待を担っている。

5. おわりに

その時々最先端技術を駆使する宿命からも航空用ガスタービンの開発期間は短縮の一途をたどっており、その基盤としての先行研究や要素開発の戦略的実施の重要性が増している。最近の国際共同開発では、技術開発から量産までの進捗状況をMRL (Manufacturing Readiness Level) ⁽⁶⁾により指数評価し、プロジェクト・リスクの把握とその低減管理が求められるケースがある。運用に際しては開発プログラムごとに評価項目やMRLを詳細定義するが、各MRLには到達していなければならないTRL (Technology Readiness Level) が指定されており、各開発パートナーにおける担当部門には従来にも増して緻密な連携ならびに摺り合わせ作業が求められる。

航空用ガスタービン産業は特定少数の技術先進国だけが保有し得る知識集約型の産業であり、技術立国としての我が国の国際貢献度も拡大基調にある。本稿がそのものづくり最前線の理解に資することを期する次第である。

6. 謝辞

CFRP開発の一部は「平成19、20年度次世代航空機エンジン用構造部材創製・加工技術開発」として経済産業省の委託を受けた一般財団法人日本航空機エンジン協会との契約に基づき実施した成果である。また、CFRP部品の製造技術実証研究には、経済産業省のイノベーション拠点立地推進事業「先端技術実証・評価設備整備費等補助金」を活用した。さらに、生産設備の導入に際しては、福島県のふくしま産業復興企業立地補助金の支援を得た。

CMC開発は、経済産業省からの研究委託を受けて2008～2013年度に実施した成果、および独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構から助成を受けて2010～2012年度に実施した成果、および一般社団法人日本航空宇宙工業会から助成を受けて2004～2005年度に実施した結果に基づくものである。

LFW装置は、平成23年度 希少金属使用量削減・代替技術開発設備整備費等補助金の助成をいただいて、整備したものである。

これらの開発を進めるにあたって、関係各位から多くのご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

7. 引用文献

- (1) 一般財団法人 日本航空機開発協会, 民間航空機に関する市場予測2014-2033, 2014年3月, p.1, 2, 56, <http://www.jadc.or.jp/jadc14.pdf>, (参照2014-07-04).
- (2) 公益財団法人 航空機国際共同開発促進基金, 平成25年度航空機等に関する技術開発動向調査報告書, 平成26年3月, p.16-23, <http://www.iadf.or.jp/8361/LIBRARY/MEDIA/H25-chosa-hokokusho/H25-chosa-hokokusho.pdf>, (参照2014-07-04).
- (3) 一般社団法人 日本航空宇宙工業会, 航空宇宙産データベース, 平成25年7月, p.19, http://www.sjac.or.jp/common/pdf/toukei/7-database_H25.7.pdf, (参照2014-07-04).
- (4) ㈱IHI, IHI技報 第53巻第4号 平成25年, p.1-67, http://www.ihico.jp/ihiresearch_development/review_library/review/2013/53_04.html, (参照2014-07-04).
- (5) 公益財団法人 航空機国際共同開発促進基金, 航空機等に関する解説概要, 平成25-3 (2013).
- (6) The Joint Service/Industry MRL Working Group, Manufacturing Readiness Level (MRL) Deskbook Version 2.2.1, Octobe, 2012, http://www.dodmrl.com/MRL_Deskbook_V2_21.pdf, (参照2014-07-04).

第43回ガスタービンセミナー開催のお知らせ（予告）

第43回ガスタービンセミナーを下記の通り開催いたします。

今回は、「ガスタービンの最新技術と各種タービン技術の動向」をテーマとしています。最前線で活躍されている方々のご講演を通して、発電用および航空用ガスタービンに関する最新技術動向を学ぶと共に、各種用途のタービンの高性能化につながる幅広い技術分野の知見を高める内容としました。

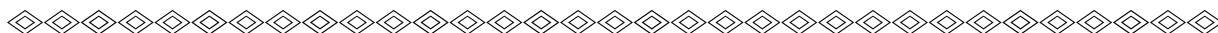
（詳細につきましては、11月号学会誌、ホームページ等で後日お知らせいたします）

1. 日 時 : 2015年1月22日(木) 9:30～17:00 (予定)
23日(金) 9:30～17:00 (予定)
2. 場 所 : 三菱重工横浜ビル 33階 3310会議室
〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい3-3-1
JR京浜東北線(根岸線)桜木町駅下車, 徒歩約10分
地下鉄みなとみらい線 みなとみらい駅下車, 徒歩約5分
3. テーマ : 「ガスタービンの最新技術と各種タービン技術の動向」
4. 参加要領 : 11月号学会誌, 当学会ホームページに掲載予定です。(http://www.gtsj.org/)



○本会共催・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 |
|-----------------|--|-------|---|--|--|
| 日本マリンエンジニアリング学会 | 第84回(平成26年)マリンエンジニアリング学術講演会 | 協賛 | 2014/11/19-21 | 海峡メッセ下関 | 日本マリンエンジニアリング学会 http://www.jime.jp |
| 日本マリンエンジニアリング学会 | 技術者継続教育2014「先進コース」講習会(「船用燃料とその燃焼」「推進軸系」「機装設計II」) | 協賛 | 2014/12/4-5, 2015/1/15-16, 2015/2/26-27 | 東京海洋大学 越中島会館多目的教室, 三宮研修センター 会議室, サポートホール高松 6階62会議室 | 日本マリンエンジニアリング学会 http://www.jime.jp |
| 日本機械学会 関西支部 | 第334回講習会「新エネルギーシステムのフロンティア技術を学ぶ」 | 協賛 | 2014/11/18-19 | 大阪科学技術センター | 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073, FAX:06-6443-6049 E-MAIL: info@kansai.jsme.ne.jp |



▷ 入 会 者 名 簿 ◁

〔正会員〕

古川 樹生(I H I) 濱崎 勝俊(I H I) 大川 啓(防 衛 省) 和田 康弘(三菱日立パワーシステムズ)

〔学生会員〕

西牧 智大(首都大学東京) 中山 義博(首都大学東京) 朱 澄(拓殖大学) 浜島 静香(東京大学)
菊池 浩平(東京大学) 斎藤 寛人(東京大学) 野崎 皓太(法政大学)

2014年度役員名簿

会長 藤谷 康男 (MHPS)
副会長 田沼 唯士 (帝京大)
法人管理担当執行理事 伊東 正雄 (東芝), 鈴木 健 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 正田 淳一郎 (MHPS)
公益目的事業担当執行理事 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 佐藤 哲也 (早大), 武 浩司 (川崎重工), 辻田 星歩 (法政大), 春海 一佳 (海技研), 姫野 武洋 (東大), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大)
理事 桂田 健 (JAL), 松崎 裕之 (東北電力), 渡辺 和徳 (電中研), 渡邊 啓悦 (荏原), 藁谷 篤邦 (本田技術研究所)
監事 塚越 敬三 (MHPS), 藤網 義行 (東京農工大)

2014年度委員名簿 (順不同)

2014年6月26日現在
 ○は委員長

倫理規定委員会 ○幡宮 重雄 (日立), 鈴木 健 (IHI), 伊東 正雄 (東芝), 正田 淳一郎 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 春海 一佳 (海技研)
自己点検委員会 ○幡宮 重雄 (日立), 鈴木 健 (IHI), 伊東 正雄 (東芝), 正田 淳一郎 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 春海 一佳 (海技研)
運営委員会 ○鈴木 健 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 正田 淳一郎 (MHPS), 伊東 正雄 (東芝), 山根 敬 (JAXA), 壹岐 典彦 (産総研), 春海 一佳 (海技研), 太田 有 (早大), 酒井 義明 (東芝), 村田 章 (東京農工大), 堀内 直人 (東京電力), 渡辺 紀徳 (東大), 安田 聡 (MHPS)
企画委員会 ○正田 淳一郎 (MHPS), 鈴木 健 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 山根 敬 (JAXA), 壹岐 典彦 (産総研), 春海 一佳 (海技研), 渡辺 紀徳 (東大)
国際委員会 ○仲俣千由紀 (IHI), 岡井 敬一 (東大), 太田 有 (早大), 小森 豊明 (三菱重工), 葉狩 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研), 船崎 健一 (岩手大学), 松田 寿 (東芝), 三好 市朗 (MHPS), 山根 敬 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)
学術講演会委員会 ○春海 一佳 (海技研), 山本 武 (JAXA), 楠田 真也 (IHI), 齊藤 圭司郎 (三菱重工), 洪川 直紀 (東芝), 高橋 康雄 (MHPS), 武田 淳一郎 (富士電機), 玉井 亮嗣 (川崎重工), 姫野 武洋 (東大), 平野 孝典 (拓殖大), 松沼 孝幸 (産総研), 渡辺 裕章 (電中研)
集会行事委員会 ○山根 敬 (JAXA), 尾関 高行 (電中研), 木村 武清 (川崎重工), 澤 徹 (東芝), 鈴木 正也 (JAXA), 瀬川 武彦 (産総研), 辻田 星歩 (法政大), 中村 友行 (防衛省), 西江 俊介 (三井造船), 西村 英彦 (MHPS), 浜辺 正昭 (IHI), 藤井 達 (日立), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 山形 通史 (富士電機), 吉田 征二 (JAXA), 藁谷 篤邦 (本田技術研究所)
ガスタービン技術普及委員会 ○岡崎 正和 (長岡技科大), 秋山 陵 (日立), 賀澤 順一 (JAXA), 木村 武清 (川崎重工), 齊藤 大蔵 (東芝), 檜山 貴志 (三菱重工), 福山 佳孝 (JAXA), 古川 洋之 (IHI), 細川 哲也 (JALエンジニアリング), 宮原 忠人 (エネルギーアドバンス), 村田 章 (東京農工大), 屋口 正次 (電中研), 山本 誠 (東京理科大), 渡辺 紀徳 (東大)
学会誌編集委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 荒木 秀文 (MHPS), 有岡 和也 (三井造船), 石川 揚介 (東芝), 加藤 千幸 (東大), 阪井 直人 (川崎重工), 櫻井 一郎 (元JAL), 佐藤 哲也 (早大), 潮崎 成弘 (MHPS), 鈴木 康文 (防衛省), 辻田 星歩 (法政大),

寺澤 秀彰 (東京ガス), 寺本 進 (東大), 中野 健 (IHI), 中野 剛 (JALエンジニアリング), 新関 良樹 (東芝), 野原 弘康 (ダイハツディーゼル), 北條 正弘 (JAXA), 堀内 直人 (東京電力), 松崎 裕之 (東北電力), 三嶋 正幸 (中部電力), 山下 一憲 (荏原製作所), 吉野 展永 (IHI), 渡辺 和徳 (電中研), 渡邊 啓悦 (荏原製作所)
論文委員会 ○寺本 進 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 石田 克彦 (川崎重工), 太田 有 (早大), 加藤 大 (IHI), 幸田 栄一 (電中研), 柴田 貴範 (MHPS), 田頭 剛 (JAXA), 姫野 武洋 (東大), 船崎 健一 (岩手大学), 山根 敬 (JAXA), 山本 武 (JAXA), 山本 誠 (東京理科大), 吉岡 洋明 (愛媛大), 渡辺 紀徳 (東大)
統計作成委員会 ○武 浩司 (川崎重工), 恵比寿 幹 (三菱重工), 澤 徹 (東芝), 野村 藤樹 (ターボシステムズユニテッド), 原田 純 (川崎重工), 山上 展由 (MHPS), 山上 舞 (IHI), 吉田 知彦 (MHPS), 米田 幸人 (ヤンマー)
産官学連携委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 壹岐 典彦 (産総研), 岡崎 正和 (長岡技科大), 金津 和徳 (IHI), 幸田 栄一 (電中研), 佐々木 隆 (東芝), 永井 勝史 (川崎重工), 西澤 敏雄 (JAXA), 幡宮 重雄 (日立), 平野 篤 (防衛省), 福泉 靖史 (三菱重工), 藤岡 順三 (物材研), 船崎 健一 (岩手大), 古川 雅人 (九州大), 本阿弥 眞治 (東京理科大), 吉田 英生 (京大)
広報委員会 ○村田 章 (東京農工大), 酒井 義明 (東芝), 佐藤 哲也 (早大), 高橋 康雄 (MHPS), 岡崎正和 (長岡技科大), 姫野 武洋 (東大), 吉田 征二 (JAXA), 山根 敬 (JAXA)
表彰委員会 ○田沼 唯士 (帝京大), 春海 一佳 (海技研), 壹岐 典彦 (産総研), 児玉 秀和 (IHI), 幡宮 重雄 (日立), 山根 敬 (JAXA), 姫野 武洋 (東大)
情報システム化推進委員会 ○村田 章 (東京農工大), 酒井 義明 (東芝), 佐藤 哲也 (早大), 高橋 康雄 (MHPS), 岡崎正和 (長岡技科大), 姫野 武洋 (東大), 吉田 征二 (JAXA), 山根 敬 (JAXA)
調査研究委員会 ○壹岐 典彦 (産総研), 松沼 孝幸 (産総研), 伊藤 栄作 (三菱重工), 岸部 忠晴 (日立), 合田 真琴 (川崎重工), 齊藤 大蔵 (東芝) 高橋 徹 (電中研), 原田 広史 (物材研), 谷村 和彦 (川崎重工), 米澤 克夫 (IHI), 渡辺 紀徳 (東大)
ACGT2014 実行委員会 ○山本 誠 (東京理科大), 小森 豊明 (三菱重工), 葉狩 智子 (川崎重工), 山根 敬 (JAXA)
IGTC2015Tokyo 実行委員会 ○渡辺 紀徳 (東大), 姫野 武洋 (東大), (総務委員会) ○西澤 敏雄 (JAXA), 牧田 光正 (JAXA), 小見 淳介 (IHI), 沼田 祥平 (MHPS), (論文委員会) ○太田 有 (早大), 寺本 進 (東大), 山本 誠 (東京理科大), 西岡 卓宏 (日立), 辻田 星歩 (法政大), 山根 敬 (JAXA), 山本 武 (JAXA), 吉岡 洋明 (愛媛大), 岡井 敬一 (東大), 新関 良樹 (東芝), 玉木 秀明 (IHI), 仲俣千由紀 (IHI), 葉狩 智子 (川崎重工), 福田 雅文 (高効率発電システム研), 三好 市朗 (MHPS), 幸田 栄一 (電中研), 田頭 剛 (JAXA), 檜山 貴志 (MHPS), 長谷川 武治 (電中研), 茨木 誠一 (三菱重工) (展示委員会) ○松田 寿 (東芝), 北山 和弘 (東芝), 猪亦 麻子 (東芝), 岡村 直行 (東芝), 石川 智貴 (東芝), 種橋 信哉 (GE), 井上 俊彦 (川崎重工), 原田 純 (川崎重工), 吉國 孝之 (IHI), 藤木 貴子 (IHI), 西村 真琴 (MHPS), 吉田 知彦 (MHPS), 山形 通史 (富士電機), 牧野 敦 (JAXA), (行事委員会) ○大石 勉 (IHI), 山上 舞 (IHI), 酒井 英司 (電中研), 藤本 秀 (IHI), 堀川 敦史 (川崎重工), 吉田征二 (JAXA), (財務委員会) ○井上 洋 (MHPS), 後藤 仁一郎 (MHPS), 鎌田 直人 (MHPS), 廣川 順一 (IHI)

今月号は「最新の製造・加工」特集としました。本誌ではこれまで組まれることの無かった特集だと思いますが、いかがでしたでしょうか。また、例年通り、ASME 国際ガスタービン会議の報告も掲載されており、盛り沢山の内容となったかと思えます。

「製造・加工」については、ガスタービン・過給機・蒸気タービンメーカーの方に関連する具体的な事例を中心に紹介いただくとともに、加工機メーカーの方やパーツメーカーの方からも、異なった目線からの記事を書いていただきました。

さらに、本号ではその中でも特に今が「旬」の「3Dプリンタ」について、スコープをあててみました。小特集としてはいささかボリューム多めとなりましたが、「3Dプリンタ」関連技術の権威の方や、すでにこの技術をガスタービンに適用されているメーカーの方に執筆をお願いし、3Dプリンタって何？というところから、活用方法、今後の可能性までがわかるような特集としたつもりです。

設計・製造のデジタル化や材料・加工技術の進歩がものづくりを大きく変えていることは論を待ちませんが、なかでも積層造形技術の進歩は、樹脂で形だけを迅速・精密に作製できるところから、様々な実用素材の適用が可能となってきており、今後は「今までに無い形状のものが製造できる」「多品種・少量生産に対応できる」に加えて、「金属・無機素材を含む様々な素材を自由に組み合わせ製造できる」といった特徴を活用することで、大きく「ものづくり」を変えていくことが期待されます。残念ながら、現在この分野は海外が先行しているようですが、日本でも官民を上げて挽回するプロジェクトも始まったようです。

ものづくりは「もの」(コンセプト、付加価値などを考える)と「つくり」(生産・具体化)に分けられる、という解説記事を目にしたことがあります。商品として成功

するためには、「もの」がリードすることも重要ですが、今大きく変わろうとしている「つくり」をうまく使って、これまでに無い「もの」をいかに創造するか、ガスタービンやエネルギー関連機器にとっても重要となります。

近い将来、本号で紹介した加工・製造技術や、さらにこれらを発展させた手法を生かしたガスタービンやエネルギー関連機器が学会誌や講演会を賑わせることは間違い無いと思います。

最後にこの場を借りて、お忙しい中本号記事を執筆いただきました皆様に厚く御礼申し上げます。

(新関良樹)

- 9月号アソシエイトエディター
新関 良樹 (東芝)
- 9月号担当編集委員
有岡和也 (三井造船)
野原弘康 (ダイハツディーゼル)
山下一憲 (荏原製作所)

(表紙写真)

今回の表紙については、【論説・解説】の著者より流用しております。

詳細については、各記事をご参照ください。

- ・「蒸気タービンの製造技術」…………… (P.408 ~ 413)
- ・「マシニングセンタによるガスタービン部品の最新加工技術」…………… (P.414 ~ 419)
- ・「産業用ガスタービンにおける3Dプリンタの活用」…………… (P.439 ~ 442)
- ・「ラピッド・プロトタイプング(RP)による精密鋳造用鋳型及び中子の迅速造型技術の開発」…………… (P.443 ~ 448)

だより

♣事務局 ☒ ♣

秋風が心地よいこの季節、夏の暑さで麻痺していた五感が少しずつ戻り始め、秋の行楽に想いを膨らませている方も多いのではないのでしょうか。

最近「体のメンテナンス」という言葉をよく耳にします。健康維持のための、あれやこれやということでしょうが、年齢が進むにつれて、このメンテナンスに時間と労力そして根気が必要であることを、ひしひしと感じるようになりました。必要不可欠なのはやはり、「健康的な食生活」と“定期的な運動”ですが、かれこれ10年以上も運動不足から抜け出せないでいる私は、なんとか食事面だけで先々まで健康を維持できないかと模索中です。季節の変わり目のこの時期は、体調を崩しやすい時期でもあります。体のメンテナンスにしっかり気を配り、秋の味覚をおいしくいただきましょう。

さて、今年も秋の定期講演会が近づいてまいりました。今年は、10月22、23日と熊本での開催となります。熊本と言えば、ゆるキャラ界のスーパースター“くまモン”がすぐに思い浮かびますが、昔から「水の国」と言われるほど水資源に恵まれた所だそうです。開催場所のある熊本市内の水道も、100%が地下水でまかなわれているとのことで、夏は冷たく、冬温かく、そしておいしい水なのでしょうね。浄水器を使い、ミネラルウォーターを買うのが当たり前のような地域に住む私たちには、うらやましい限りです。

定期講演会の詳細については、本号または学会HPに掲載しておりますのでそちらをご覧ください。参加予定の方は、お早めに参加登録をお願い致します。多くの皆様のご参加を、待ってるモン！

(山本)

学会誌編集規定

2003.8.29改訂

1. 本学会誌の原稿はつぎの3区分とする。
 - A. 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。
 - B. 依頼原稿：本学会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。執筆者は会員外でもよい。
 - C. 学会原稿：学会の運営・活動に関する記事（報告、会告等）および学会による調査・研究活動の成果等の報告。
2. 依頼原稿および投稿原稿は、ガスタービン及び過給機に関連のある論説・解説、講義、技術論文、速報（研究速報、技術速報）、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、その他とする。刷り上がりページ数は原則として、1編につき次のページ数以内とする。

| | |
|----------|--------|
| 論説・解説、講義 | 6ページ |
| 技術論文 | 6ページ |
| 速報 | 4ページ |
| 寄書、随筆 | 2ページ |
| 書評 | 1ページ |
| 情報記事欄 | 1/2ページ |
3. 執筆者は編集委員会が定める原稿執筆要領に従って原稿を執筆し、編集委員会事務局まで原稿を送付する。事務局の所在は付記1に示す。
4. 会員は本学会誌に投稿することができる。投稿された原稿は、編集委員会が定める方法により審査され、編集委員会の承認を得て、学会誌に掲載される。技術論文の投稿に関しては、別に技術論文投稿規程を定める。
5. 依頼原稿および学会原稿についても、編集委員会は委員会の定める方法により原稿の査読を行う。編集委員会は、査読の結果に基づいて執筆者に原稿の修正を依頼する場合がある。
6. 依頼原稿には定められた原稿料を支払う。投稿原稿および学会原稿には原則として原稿料は支払わないものとする。原稿料の単価は理事会の承認を受けて定める。
7. 学会誌に掲載された著作物の著作権は原則として学会に帰属する。但し、著作者自身または著作者が帰属する法人等が、自ら書いた記事・論文等の全文または一部を転載、翻訳・翻案などの形で利用する場合、本会は原則としてこれを妨げない。ただし、著作者本人であっても学会誌を複製の形で全文を他の著作物に利用する場合は、文書で本会に許諾を求めなければならない。
8. 著作者は、学会または学会からの使用許諾を受けた者に対し著作者人格権を行使しない。
9. 本会発行の著作物に掲載された記事、論文などの著作物について、著作権侵害者、名誉毀損、またはその他の紛争が生じた場合、当該著作物の著作者自身又は著作者の帰属する法人等を当事者とする。

付記1. 原稿送付先および原稿執筆要領請求先
ニッセイエブプロ(株) PM部 ガスタービン学会誌担当
〒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

技術論文投稿規定

2010.8.27改訂

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) 投稿原稿は著者の原著で、ガスタービンおよび過給機の技術に関連するものであること。
 - 3) 投稿原稿は、一般に公表されている刊行物に未投稿のものであること。ただし、要旨または抄録として発表されたものは差し支えない。
2. 使用言語は原則として日本語とする。
3. 投稿原稿の規定ページ数は原則として図表を含めてA4版刷り上がり6ページ以内とする。ただし、1ページにつき16,000円の著者負担で4ページ以内の増ページをすることができる。
4. 図・写真等について、著者が実費差額を負担する場合にはカラー印刷とすることができる。
5. 投稿者は原稿執筆要領に従い執筆し、正原稿1部副原稿(コピー)2部を学会編集委員会に提出する。原稿には英文アブストラクトおよび所定の論文表紙を添付する。
6. 原稿受付日は原稿が事務局で受理された日とする。
7. 投稿原稿は技術論文校閲基準に基づいて校閲し、編集委員会で採否を決定する。
8. 論文内容についての責任は、すべて著者が負う。
9. 本学会誌に掲載される技術論文の著作権に関しては、学会誌編集規定7.および8.を適用する。

日本ガスタービン学会誌 Vol.42 No.5 2014.9

発行日 2014年9月19日
発行所 公益社団法人日本ガスタービン学会
編集者 壹岐 典彦
発行者 藤谷 康男
〒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

©2014, 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いません。直接、本学会へお問い合わせください。

特集：最新の加工・製造技術

IHI/ABB製船用過給機の概要及び最新の加工・製造技術の紹介

百瀬 圭*¹
MOMOSE Kei中野 健*¹
NAKANO Ken宮原 和昌*²
MIYAHARA Kazumasaキーワード：ガスタービン，ターボチャージャ，コンプレッサインペラ，タービンロータ，製造技術
Gas Turbine, Turbocharger, Compressor Impeller, Turbine Rotor, Manufacture Technology

1. はじめに

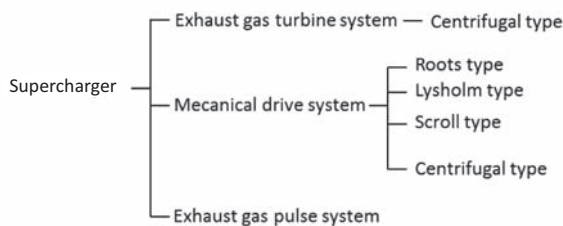
過給機とはエンジンの排気ガスのエネルギーを回収し、エンジン内に圧縮空気を供給する機器である。過給機はエンジンの出力向上や燃費改善に寄与するため、ほとんどの船用ディーゼルエンジンに搭載されている。両者の歴史は古くディーゼルエンジンは1892年、過給機は1905年に発明されている。

また近年の環境問題に対する関心の高まりから、造船、船用分野では国際海事機関IMO (International Maritime Organization) により排気ガスに関する規制が発効されている。環境規制に対応するため、さらなる高圧力比・高効率・過給システムの最適化が要求されている。

本稿では一般的な過給機の構造/特徴、環境規制に対応したIHI/ABB製過給機の製品及び過給機の製造技術について紹介する。

2. 過給機の種類

これまでに実用化された過給機を中心に分類する。圧縮機の駆動方式で分類すると排気タービン式，機械式，排気脈動式に大別できる。過給機の分類を図1に示す。

Fig. 1 Supercharger group⁽¹⁾

2.1 排気タービン式

タービンと圧縮機を1軸に締結した構造を持つ過給機で一般的にターボチャージャと呼ばれる。主に船用大型エンジンには軸流タービン，中/小型エンジンには半径

流タービンが使用される。船用大型エンジン用の高さが2mを越えるものや車両用の片手に乗る大きさのように、エンジンの排気量に合わせて各種のサイズで生産されている。

2.2 機械式

機械式過給機は代表的な3種類の方式に分けられ図2に各々の形式を示す。ルーツ式のロータが3葉で捻じれている物があり、リショルム式との区別が難しい場合がある。判別方法としてルーツ式は機械内部で圧縮しないが、リショルム式は機械内部で圧縮している。リショルム式は内部で圧縮しているため吐出圧力が高い作動点で高効率を得られるが、吐出圧力が低い作動点では逆に必要な駆動力が増える傾向がある。スクロール式は1対の渦巻状の壁を設けて一方を固定し、一方を円運動させることにより、壁間の体積を変化させて圧縮する。カーエアコンに使用されている物と同形状のものが実用化されたが現在は使用されていない。

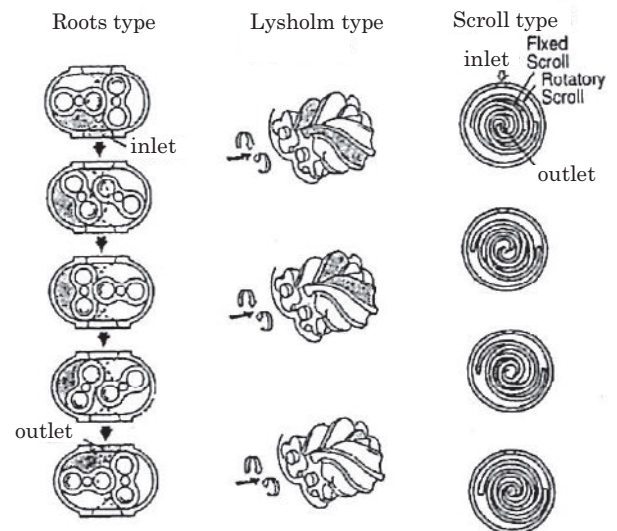


Fig. 2 Supercharger type

原稿受付 2014年7月7日

* 1 (株)IHI 回転機械セクター 開発部

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地

* 2 (株)IHI 回転機械 辰野事業所 生産技術部

2.3 排気脈動式

排気脈動を利用する過給機はハニカム状の回転体をクランク軸からの機械エネルギーまたは排気エネルギーで回転させながら、各セルの反対側から供給される空気を排気パルスで圧縮する。本過給機はターボラグのような応答遅れが無い。国内ではディーゼルエンジンに適用された例がある。

3. 過給機の構造

過給機のタイプとして排気タービン式過給機（以下過給機は全て排気タービン式（ターボチャージャ）を指す）が多く採用されており、タービンと圧縮機が1軸に締結され、その内側もしくは外側に軸受を有する構造となっている。以前の軸受は両端支持が主流であったが、近年では両要素の流体力学的な性能向上に有利な中間支持構造の機種が多くなっている。

過給機には遠心式のコンプレッサが主に採用されており、そのメリットは単段で高圧力比を得ることができる点にある。遠心式のコンプレッサは軽量化のため一般にはアルミ合金が用いられている。船用の大型の過給機では車両用に比べて高圧力比で使用されるなど条件が過酷であるため材料強度の高い鍛造材が用いられ、5軸NCマシンで羽根車を一体で削り出して製造される。一方車両用では量産性を考慮して鋳造法で製造されている。

4. 主なIHI/ABB製過給機の紹介

IHIでは4ストローク機関向けに自社開発の過給機の生産と技術提携先であるABB製過給機のライセンス生産を行っている。⁽²⁾

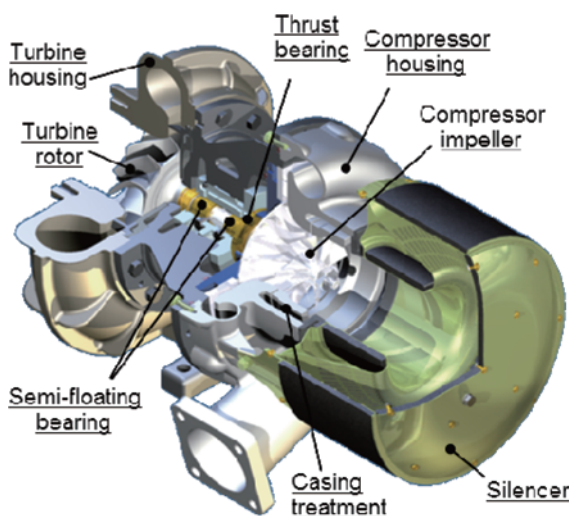


Fig. 3 Cross-sectional view of AT14

4.1 AT14/23形過給機

自社開発品であるAT14/23形過給機について紹介する。図3に過給機断面図を示す。AT14形過給機は主に船用発電機関での実績が多く、これまでに3000台以上が出荷され、低質油運転でありながら良好に運用されている。

AT23形過給機は主に船用主機関に適用されており、大風量設計のコンプレッサを採用しているためAT14と比較して小型だが750kW程度の機関出力まで対応することができる。

4.2 TPS及びA100-M形過給機

ABBからのライセンス生産品であるTPS及びA100-M形過給機について紹介する。TPS形過給機は5種類の形式(44/48/52/57/61)がラインアップされており、このうちIHIは48/52/57のライセンス生産を行っている。コンプレッサの圧力比は5.2であり、およそ400～3300kW程度の機関出力に対応可能である。

TPSの後継機であるA100-M形過給機は6種類の形式(130/135/140/145/150/155)の形式がラインアップされており、コンプレッサの圧力比は5.8であり、およそ500～5200kW程度の機関出力に対応可能である。このうちIHIはA140の生産を2014年度より開始した。

4.3 メンテナンス性向上について

4ストローク機関では低質油運転において、タービン翼/ノズルリング等へ硬質なカーボンが堆積し、性能の悪化や予期せぬロータの接触や摩耗が懸念される。AT14/TPS/A100-M形過給機は市場においても高い信頼性を確認しており、定期的・効果的にタービン洗浄を実施することによりメンテナンスインターバルを8000時間以上とすることができる。図4にAT14形過給機の8000時間以上無開放で運転した後の部品を示す。ベアリング等の摺動部品も健全であり8000時間無開放でも問題ないことを確認している。

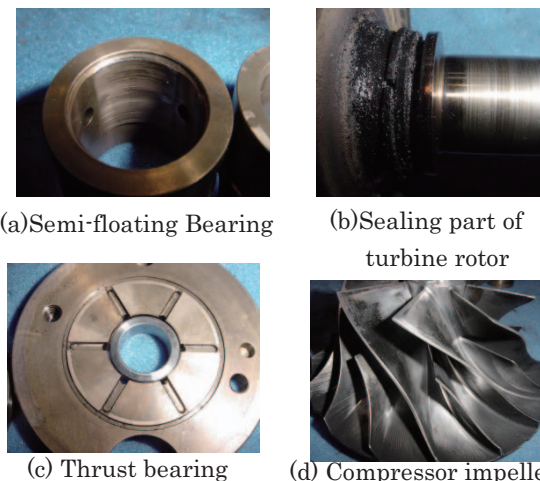


Fig. 4 The picture of AT14 parts after operation on ship

5. 過給機の製造技術の紹介

本項では、過給機の性能を左右する回転体の主要部品であるタービンロータとコンプレッサインペラの製造技術について紹介する。図3に過給機断面図を示す。

5.1 タービンロータ

5.1.1 タービンロータの製造工程

約500～650℃程度の高温ガス下で使用されるタービンロータの翼車部には、耐熱性に優れたニッケル基合金を適用しているが、材料も高価で切削性が悪い事から、精密鋳造品のタービン翼車と心棒材の異種材質を摩擦圧接³⁾により接合する事で、製品要求特性と材料特性を使い分け、製造原価の低減を図っている。図5にタービンロータの製造工程概略を示す。

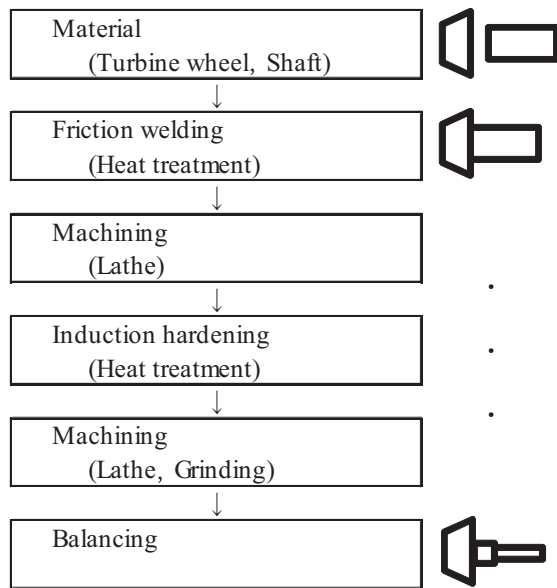


Fig. 5 Manufacturing process of the turbine rotor

5.1.2 摩擦圧接とは

金属結晶は、図6の様に模型的に規則正しく並んだ陽イオンの周りを、自由電子の集団が雲のように包んだ状態にある。図7に示す原子間距離と原子間の力の関係から、別個の金属結晶の清浄な表面を接触させ、両者の表面原子同士を原子位置Bよりも近接させると接合する。

摩擦圧接では、この原理を利用し、例えば異なる金属同士を高速で擦り合わせ、その時に生じる摩擦熱により材料を軟化させ、同時に圧力を加える事で接合する方法である。

摩擦熱と回転により金属表面の酸化被膜、汚れ、吸着ガス等を含む外部表面層はバリとして外部に排出され、内部から露出してくる清浄面同士が接触できる状況を作り、強い圧力を加える事で、両金属の表面原子同士を近接させて結合状態を生み出す。

摩擦圧接の特徴としては、固相状態での接合の為、摩擦面全体での面接合が可能であり、母材同等の接合強度

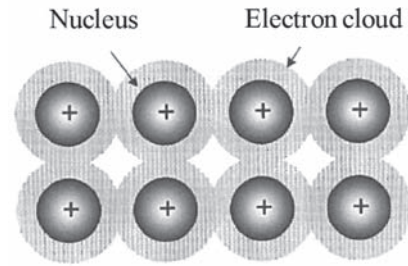


Fig. 6 Metal crystal

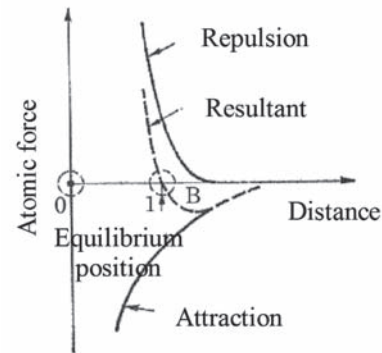


Fig. 7 Relationship between atomic forces and interatomic distance

が得られる事である。更に、接合条件は、回転数、加圧力、時間等の機械的に設定できる項目である為、再現性があり、品質の安定化が可能である。過給機のタービンロータの場合、タービン翼車をチャックした回転テーブルを高速回転させ、静止状態の心棒材を押し付けて一定時間摩擦した後、心棒材側から強い圧力を加えて接合している。図8に摩擦圧接のフローと、接合部の断面図を示す。

5.2 コンプレッサインペラ

5.2.1 コンプレッサインペラの製造工程

過給機のコンプレッサインペラは、アルミ合金の鍛造素材から削り出しにより製造している。図9にコンプレッサインペラの製造工程概略を示す。

コンプレッサインペラの翼面形状は、製品の形状特性から、5軸制御マシニングセンタで、切削工具（以下、エンドミル）を用いて削り出している為、生産効率は加工設備の主軸回転速度、各移動軸および回転軸の速度、加速度が大きく影響していた。

近年では、リニアモータ及びDDモータ等の採用により加工設備の高速化および高精度化が進み、加工用のNCプログラムを作成するソフトウェアCAM (Computer Aided Manufacturing) の進化により、一定水準の加工技術を得られる環境となっている。

従って、今後のコンプレッサインペラ加工の高効率生産においては、切削性の優れたエンドミルの開発と独自の切削条件の確立が重要となる。

切削条件の効率化を追求する為には、エンドミルを試

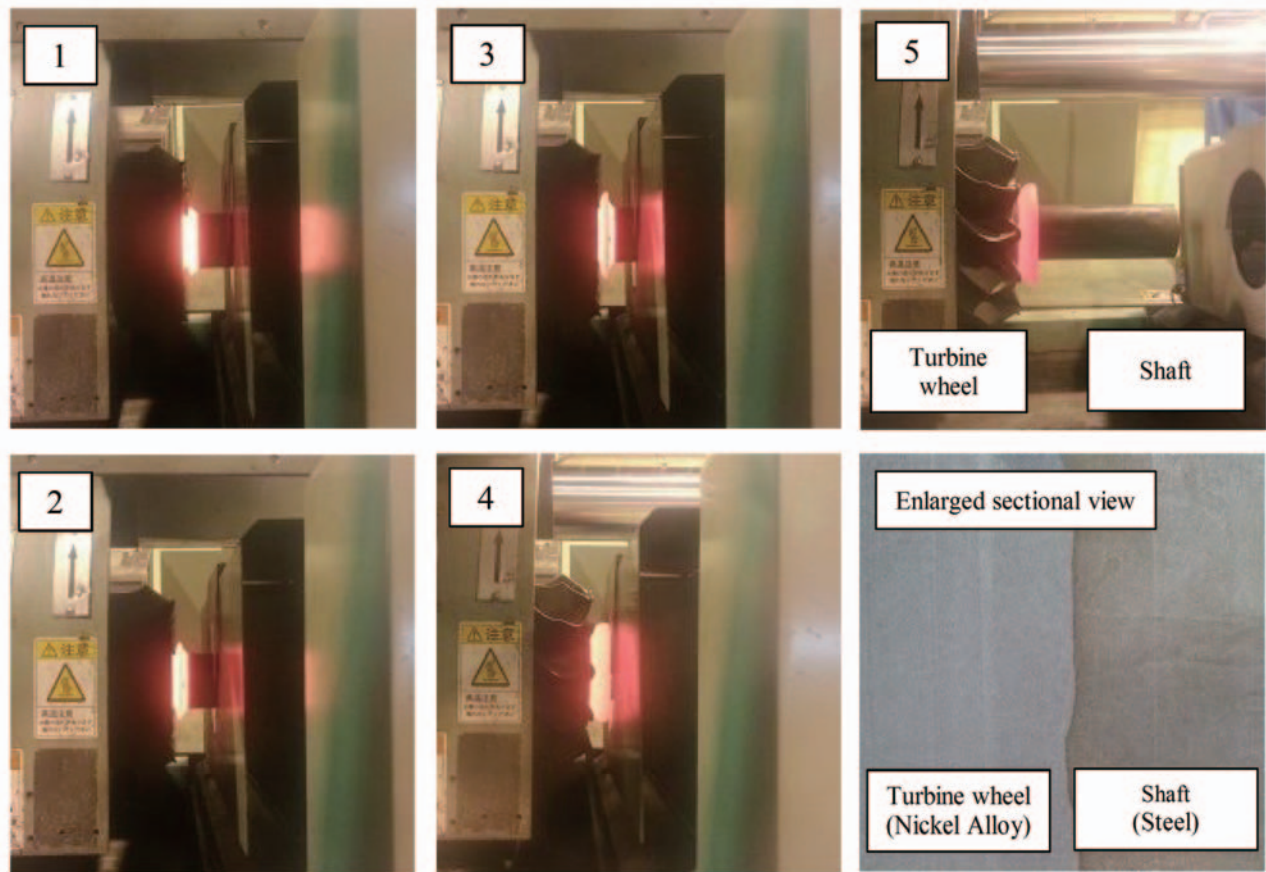


Fig. 8 Process of friction welding and sectional view of turbine rotor

作して評価試験を重ねる必要があり、工具メーカーとのタイアップ対応では時間的な限界が生じた。

対策として、工具研削盤の導入によるエンドミルの内製化を行った結果、短期間での試作評価が可能となり、製品加工へのスムーズな適用が図れた。

現状は、工具の母材、表面コーティングおよび刃先処理も含めた改善に取り組み、技術競争力の向上を図っている。

また、航空機器部品を製造している他社へも、エンドミルの供給を実施している。

参考として図10に翼形状加工風景、図11にエンドミルおよび工具研削風景を示す。

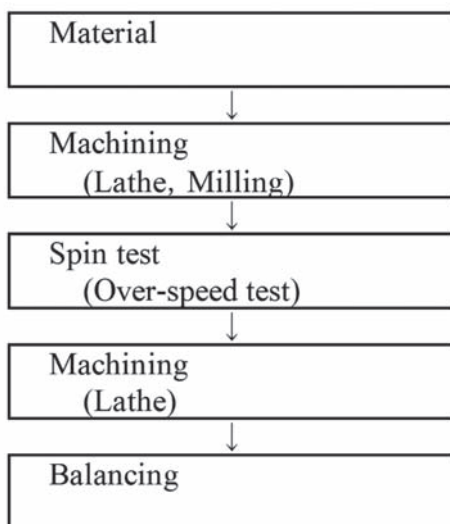


Fig. 9 Manufacturing process of compressor impeller



Fig. 10 Machining center

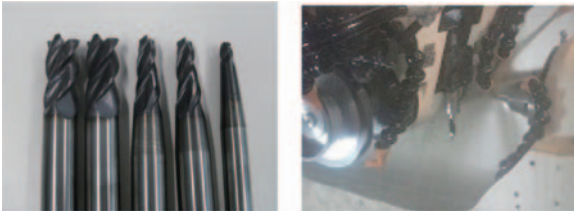


Fig. 11 End mills and tool grinder

5.2.2 工具形状の最適化

一般的なエンドミルの形状は、主に図12に示す各部名称で構成されており、各部の寸法で切削性能が決まる。

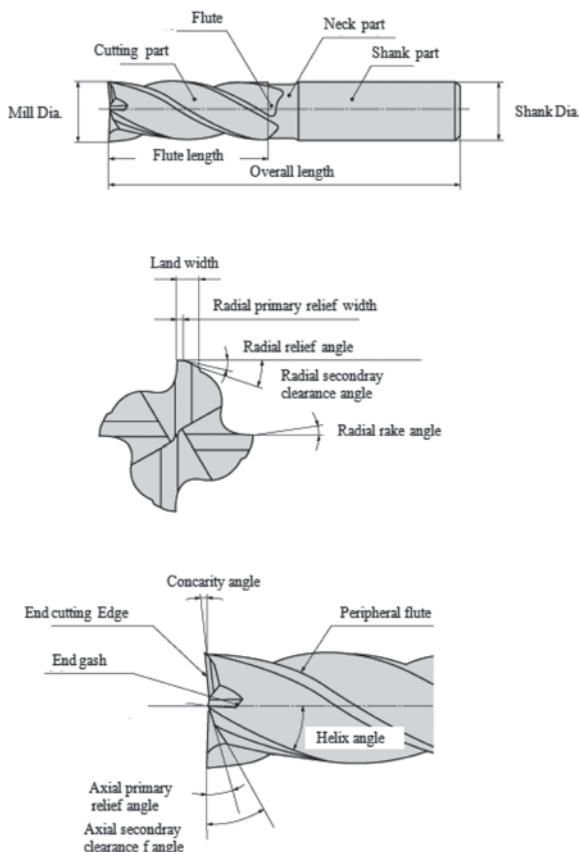


Fig.12 Name of parts for end mills

切削加工時にエンドミルに作用する切削抵抗を図13に示す。

1) 切削トルク

エンドミルの回転方向と逆向きに作用する力であり、過大になると主軸回転数の低下や主軸停止等、切削不能といった不具合に陥る場合がある。

2) 垂直分力

エンドミルの軸方向に作用する力であり、過大になるとホルダーから工具が抜ける等の不具合が生じる。エンドミルのねじれ角の影響が大きい。

3) 送り分力

切削方向に作用する力であり、エンドミルの切れ味または性能を評価する基準となる場合が多い。

4) 背分力

送り分力と垂直方向に作用する力であり、加工仕上げ面の粗さ、うねり、傾き等の加工精度を左右する。

これらの切削抵抗を多成分動力計で測定把握し、切面粗さ、切削形状評価、工具摩耗や損傷状態、切粉形状等、総合的な判断により最適な工具形状設計と切削条件を確立すると共に、継続的に切削技術の向上を行っている。

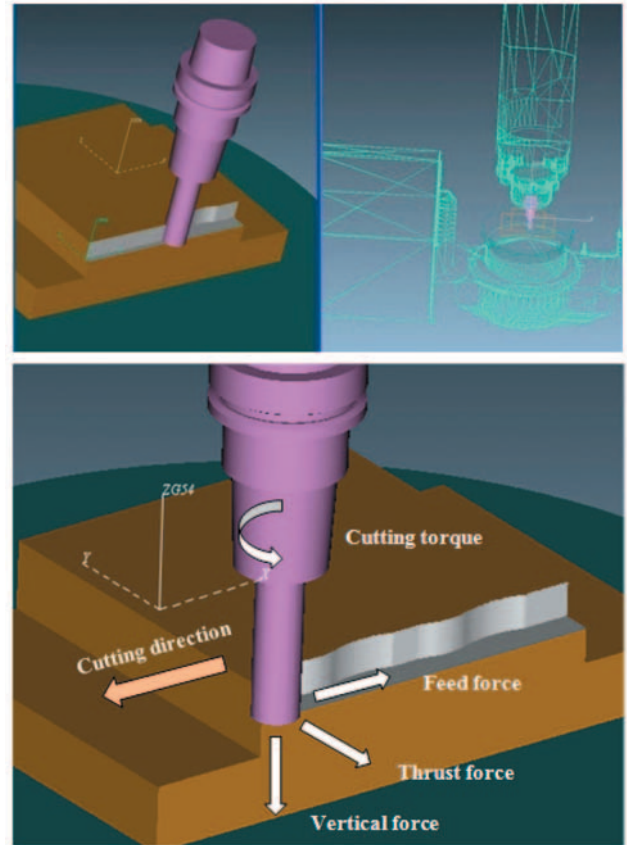


Fig. 13 Cutting force applied to the end mill

5.2.3 切削送り速度の最適化

コンプレッサインペラの翼面形状切削は自由曲面加工であり、図14に示す様な荒加工時では、削り代（切り込み量）が一定とならない為、連続的に切削条件が変化している状態となる。

更に、製品形状の隅部等、一時的に工具接触面積が大きくなる箇所では、切削抵抗が増加する為、ビビリ振動による加工面不良や工具欠損が懸念される。

また、振動発生箇所に合わせて切削条件を設定すると、加工工程全体の送り速度を落とす結果となり、加工時間が長くなってしまう。

対策として、従来は切削送り速度を一定条件としていたのに対し、NCプログラムのシーケンスブロック毎に送り速度指令値を可変させ、切り込み量に応じた単位時間あたりの切削体積を一定とした。

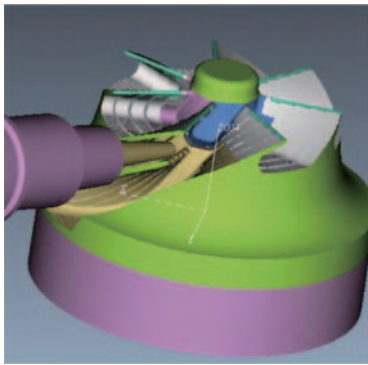


Fig. 14 Rough cutting process

図15に垂直分力と背分力の切削抵抗測定結果を示す。削り代が変化しても、切削抵抗が均一化されている事が分かる。

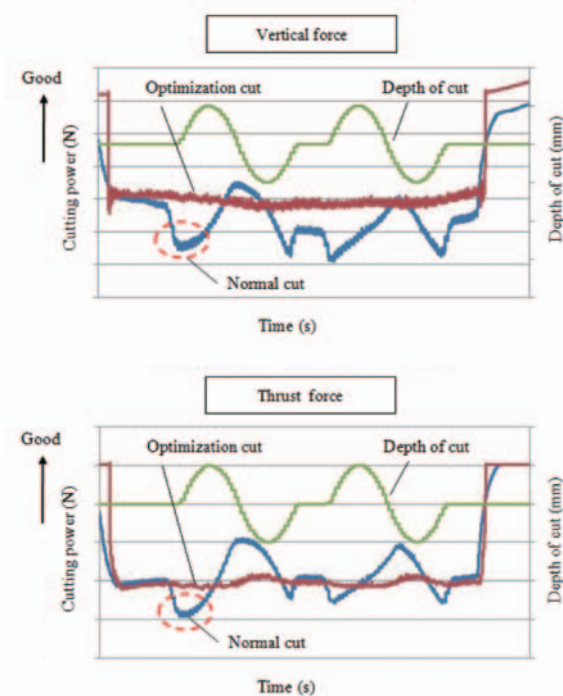


Fig. 15 Cutting power of vertical & thrust force

図16に送り分力の切削抵抗測定結果を示す。

送り速度の最適化による差は無いが、加工ワークから工具が退出する際、エンドミルへの反力が働き、瞬間的な過負荷が発生した。

この箇所について再調整した結果、図17に示す通り実用上問題ないレベルである事を確認でき、削り代の変化に対応した切削送り速度の最適化手法を確立した。

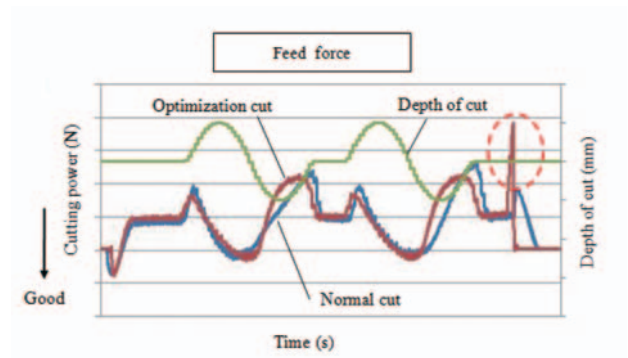


Fig. 16 Cutting power of feed force

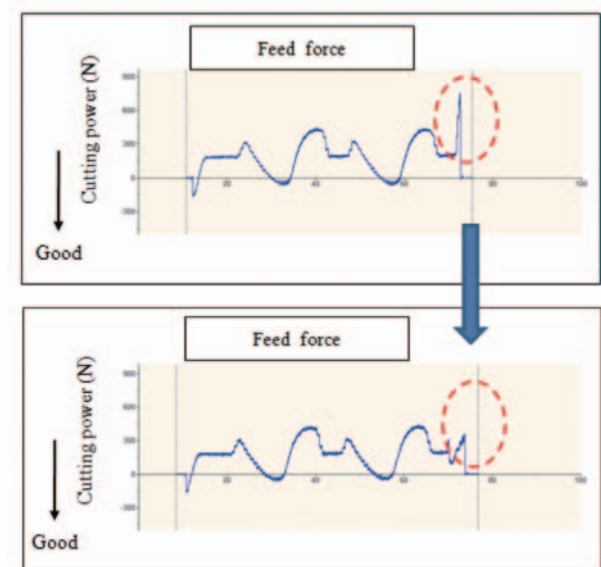


Fig. 17 Cutting power of feed force (after readjustment)

6. おわりに

IHI/ABB製舶用過給機の構造、製品及び弊社で実施しているタービンロータ/コンプレッサインペラの加工技術の紹介を行った。

今後も市場のニーズに合った過給機を開発し、それらの製造を実現する技術を持って機関メーカーと共にクリーンな環境作りに貢献していく所存です。

7. 引用文献

- (1) 池谷 信之, 過給機(1), ENGINE TECHNOLOGY, (2000), Vol.2-No.4, pp.97-102
- (2) 吉川 徹志, ABB/IHI製過給機及び過給システムの最新動向, 第58回特別基金講演会 講演予稿集, (2014), pp.1-6, 公益社団法人 日本マリンエンジニアリング学会.
- (3) 摩擦圧接協会, 摩擦接合技術, (2006), pp.8-12, 日刊工業新聞社.

特集：最新の加工・製造技術

蒸気タービンの製造技術

浅井 知*¹
ASAI Satoru永瀬 保夫*¹
NAGASE Yasuo

キーワード：蒸気タービン，3D CAD/CAM，溶接技術，機械加工技術

Steam Turbine, 3D-CAD/CAM, Welding technology, Machining technology

1. 緒言

近年，火力発電は，社会環境の変化により経済性が高く運用特性の優れた信頼性の高いシステムが要求されており，高効率化とより優れた環境性能向上への取り組みが進められている⁽¹⁾。そのなかで，CO₂排出量削減の手段として，ガス焼き火力発電として1600℃級のガスタービンを用いた高効率コンバインドサイクルプラント⁽²⁾や石炭焼き火力発電では，蒸気条件を35MPa，700℃とするA-USC（先進超々臨界圧）プラント⁽³⁾による熱効率向上などがすすめられている。また，既存のガスコンバインドサイクル発電システムと同等の発電効率が可能であるとともに，CO₂を分離して回収する設備を別に設置することなく，高純度の高圧CO₂を回収することができる超臨界CO₂サイクル発電システムの実用化がすすめられている⁽⁴⁾。このシステムは，CO₂，燃料，及び酸素を高圧で燃焼器に注入して燃焼させ，発生した高温高圧の燃焼ガスでタービンを回転させて発電するもので，現在開発がすすめられている250MWクラスのCO₂タービンでは，タービンの入口の圧力が30MPa，温度が1150℃とされている。

このような蒸気温度の高温化に向け，蒸気タービンの材料も高温強度の高いNi基合金等の材料が適用される傾向にあり，その加工技術や溶接技術の開発が必要となってきた。

一方，蒸気タービンの製造現場においても，製造リードタイムの短縮や品質の向上を目指して，トヨタ生産方式含むIE技術を活用した生産技術に加えて，近年のコンピュータ技術の進歩に伴ったIT技術を融合した革新的なものづくりがすすめられている。

本稿では，蒸気タービンの最新の製造技術として，著者らの株式会社東芝京浜事業所ですすめている革新的な生産システムの概要を説明するとともに最新の製造技術として蒸気タービンの高温化，高効率化に対応した溶接技術および加工技術について紹介する。

2. タービン機器における製造技術の取組み

株式会社東芝京浜事業所では，3Dデータを設計から製造まで一貫通貫で活用した図面レスによるモノづくりを目指している。図1はそのイメージ図である。標準化した部位を基にした製品モデルに様々な属性を持たせることにより，製造側で有効活用させようとするものである。

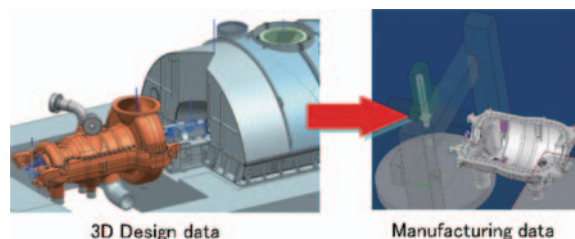


Fig. 1 Image of the utilization for 3D data

2.1 3D CAD/CAM技術

蒸気タービンは，組み合わせるボイラーの蒸気条件によって最適性能を得るため，都度設計となり，形状・寸法が変わる場合が多い。また，これに対応して，加工プロセスの検討，製造データ・CNC（Computerized Numerical Control）プログラムの作成などを，都度行なっている。

これらプロセスのリードタイム削減を目的に，以下の施策を行ってきた。

- (1)部位ごとの設計製造ルール確立（公差，表面性状など）
- (2)部位ごとの設計・製造標準化（モジュール化と製造標準化）

これらを実現するため，3Dモデルを活用したUDF（User Defined Feature）化，および製造要件の付加を行ってきた。UDFとは，設計頻度の高いフィーチャー（特徴形状）を集めたもの（集合体）である。

図2は，その一事例である。蒸気タービンケーシング機械加工工程を対象に，加工部位の標準形状を定義し，それをケーシング素材本体から足し引きして組込む仕組を構築した。これらを，設計段階より利用することにより，製造段階での製造方法検討やCNCプログラムの作

原稿受付 2014年7月4日

*1 (株)東芝 京浜事業所

〒230-0045 横浜市鶴見区末広町2-4

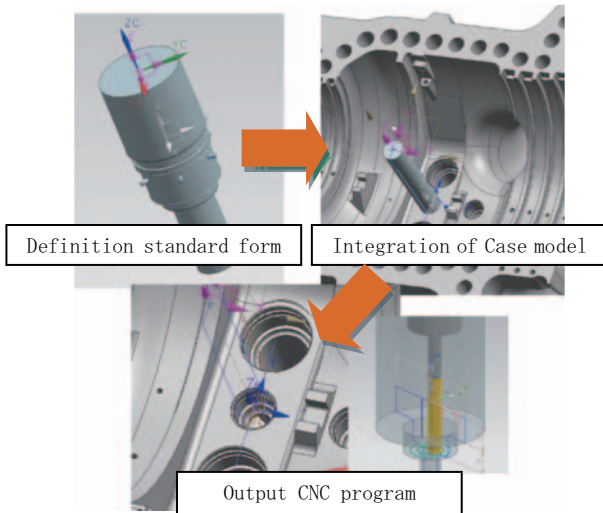


Fig. 2 3D CAD/CAM system with UDF

成時間が短縮された。

また、前記3Dプロセスにおける設計製造連携の仕組みを高度化するため、運用ルールに適合しない設計形状を設計段階で検証できるUDFチェッカソフトを開発している。鋳鋼ケーシングおよび発電機シャフト等、主要製品に対して適用している。

2.2 3Dビューアの活用

作業指示においても図面を用いることなく指示できるシステムを構築した。図3は、製缶溶接工程における一例である。以下の効果を狙ったものである。

- (1)製造工程情報や部品情報を3Dモデルにて視覚的に分かりやすく表示
- (2)溶接作業箇所をわかりやすく表示
- (3)3D設計データが必要な製造指示書、作業標準等とリンク（瞬時に参照できるようにする）
- (4)製造上の留意点をコメント表示（作業者に気づきを与える）

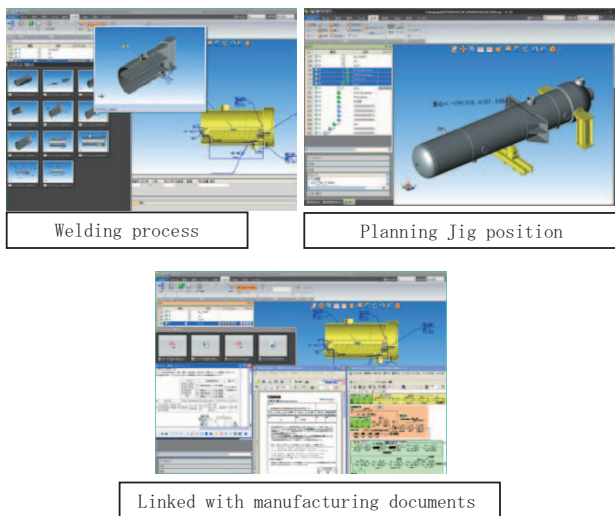


Fig. 3 3D viewer for welding process

さらに、これらの情報を設計側より供給された3Dデータをもとに自動作成するシステムを開発中である。

上記は一例であるが、今後は例えば3Dプリンタの活用など、さらなる3Dの活用を進めていく。

3. タービン機器における最新の溶接技術

最新の溶接技術として、A-USC、超臨界圧CO₂サイクル発電などに適用される蒸気タービンロータの溶接を主に述べる。

3.1 蒸気タービンロータの溶接

図4に蒸気タービンロータの一体型鍛造ロータと異材溶接ロータの構造の一例を示す。異材溶接ロータでは、高圧、中圧、低圧部分をそれぞれ高温強度、靱性等に優れた最も適した材料を採用することが可能であり、加えて小型の鍛造品を活用できる利点がある。蒸気タービンロータは、長時間運転での信頼性が要求されるものであり、溶接部にはきわめて高い品質が必要である。製造にあたっては、軸曲がりのない高精度な溶接と溶接欠陥の発生を抑制し異材溶接部の継手強度を満足する信頼性の高い溶接を実現しなければならない。そこで、ロータ溶接では、溶接の熱影響を低減するため開先幅を最小化し、低入熱溶接を実現する狭開先ホットワイヤTIG溶接法を確立し、適用している。さらに、溶接肉厚は、約150mmに対して、信頼性の高い溶接方法として、ロータを水平状態で回転し、1層1パスにて初層より下向き溶接にて最終層まで自動溶接を行う方法を適用している⁽⁶⁾。図5に溶接状況を示す。

一方、A-USCや超臨界圧CO₂サイクル発電システムでは、700℃をこえる高温で使用されるため、Ni基合

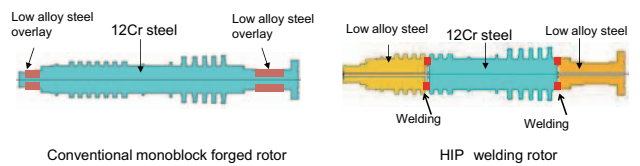


Fig. 4 Welding rotor

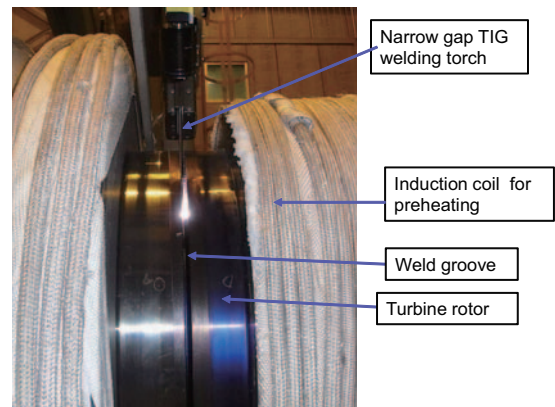


Fig. 5 Welding system

金の適用が必須となる。図6は、1000MW二段再熱蒸気タービン（圧力35MPa、主蒸気/再熱/二段再熱温度700/720/720°C）の設計コンセプトを示したものであり、ノズルボックス、内部ケーシング、超高压、高压、中圧ロータなどにNi基合金が使用される。とくに、ロータは、Ni基合金の大型一体鍛造が困難であるため、フェライト鋼である12Cr鋼やCrMoV鋼との異材溶接構造となる。Ni基合金としては、弊社開発の高温特性および製造性に優れたTOS1X-IIが用いられる。また、超臨界圧CO₂サイクル発電システムに用いるタービンロータも同様にTOS1X-IIとCrMoV鋼の異材溶接構造が適用される。これのNi基合金の溶接は、高温割れ感受性が高いことや、フェライト鋼との異材境界での化学成分の希釈による強度特性の変化などの課題があり、溶接材料の化学成分の適正化ならびに溶接条件の最適化、バタリング法の採用による希釈抑制を図ることで、継手強度の信頼性の高い高品質な溶接部を得ることができた。図7に、これらの溶接部の代表的な断面マクロ写真を示す。とくに、TOS1X-IIと12Cr鋼の溶接では、バタリング法を採用するとともに化学成分を適正化したNi基合金製溶接材料を用いている。

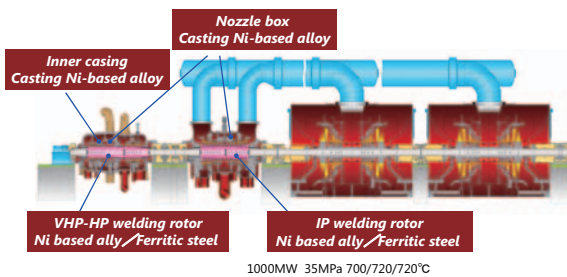


Fig. 6 Design concept of A-USC steam turbine

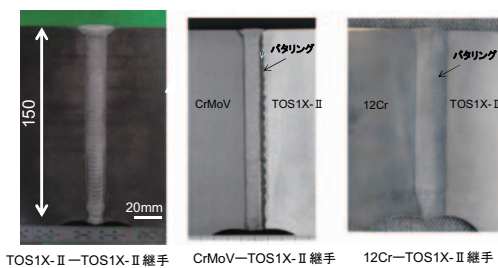


Fig. 7 Sectional macro photograph of welding rotor

3.2 溶接のインプロセス品質管理

溶接施工中に品質確認を行うシステムが開発され運用されている。このインプロセス品質管理システムを用いることにより、欠陥の発生を未然に防止するとともに、欠陥発生時には、その場で補修等の対応を効率的に行うことができる。さらに、従来行われていた溶接後の非破壊検査を省略できる可能性もあり、溶接工程のありかたを一変できるものと考えられる。

一般に、品質確認といっても、機械の動作の異常を検

知するだけでは不十分で、溶接は、対象物の形状誤差および熱変形、または、電源電圧変動、電極ワイヤの曲がりや風などの外乱因子により影響を受ける。これらの外乱因子による変動を認知するため、溶接インプロセス品質管理システムは、ビジュアルに検知することを主とし、表1に示すように5つのセンシングシステムから構成される。

Table 1 Measurement items of in-process quality control system

| System | Monitoring object | Measurement item | Sensor |
|---|--------------------------------------|---|--------------------------------|
| Monitoring system for welding condition | Welding condition | Welding current, Welding voltage, Wire current, Welding speed, Wire feeding speed | Electric signal |
| Sensing system for molten pool shape | Molten pool, Electrode, Wire, groove | Weld pool shape, electrode position, Wire position, groove position | CCD camera |
| Sensing system for backbead shape | Molten pool of back bead | Size of molten pool, Appearance of back bead surface | CCD camera |
| Sensing system for weld bead shape | Bead | Bead appearance, Bead shape, Surface defect | Two CCD cameras (3D) |
| Sensing system for inner defect | Welded region | Inner defect | LUT (Laser Ultrasonic Testing) |

溶接条件モニタリングシステムでは、溶接電流、溶接電圧、ワイヤ速度、ワイヤ電流および溶接速度の各種溶接条件を電気信号にて測定する。溶融池形状モニタリングシステムでは、溶融池の映像をCCDカメラにて撮影し、映像を画像処理することで溶融池形状、電極位置、ワイヤ位置、開先形状を数値化している。裏面センシングシステムは、裏面からCCDカメラにて初層溶接の溶融状況を観察する。溶接ビード形状ビジュアル化システムでは、2つのCCDカメラを用いて、ビード形状を計測し、凹凸形状を表示し、次層溶接可否を判断する。内部欠陥ビジュアル化システムは、レーザ超音波を用い非接触にて溶接部の欠陥を検出している。レーザ超音波はレーザ光を金属表面に照射し、表面の数原子層をプラズマ化し、そのプラズマの反力により体積波を発生させ、発生した超音波は、溶接部を透過し、開先を挟んで伝播した超音波は、母材表面の微小変位として捉え受信レーザにて受信される。現状開先が残存した状態で、溶接部表面から5mm以上であればFBH (Flat Bottom Hole) 1.6φ以上の欠陥検出が可能である。本システムの運用では、あらかじめ適正に溶接可能な裕度範囲を基に決定した閾値となる数値を与え、施工中に閾値を逸脱した場合、溶接オペレータへ警告信号にて異常を知らせ、条件の修正あるいは溶接の中断を行うことで欠陥発生を未然に防止できる。また、溶接中に許容欠陥サイズを超えた欠陥がないことを確認することで品質の保証をおこなうことができる。

図8に蒸気タービンロータの溶接に適用した場合の各センシングシステムの配置を示したものである⁽⁶⁾。

図9は、モニタ画面を示したもので、各計測項目の時

系列データとリアルタイムの判定結果が表示され、逸脱した計測項目が一目でわかるようになっている。また、図10は、レーザ超音波の計測結果を示すモニタ画面で、溶接中に欠陥の位置と大きさを示すことで、基準を超える欠陥の発生を溶接中に確認できる。図11は、これらの

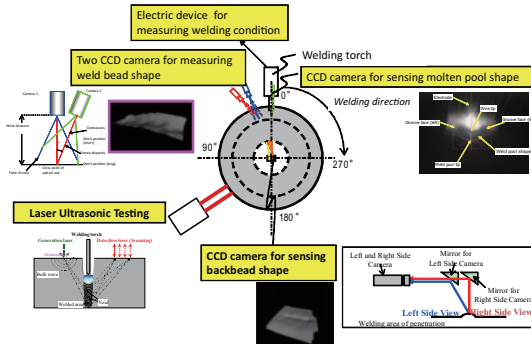


Fig. 8 Arrange of sensors for rotor welding

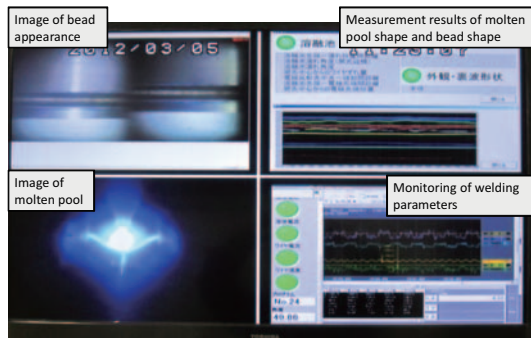


Fig. 9 Monitoring screen

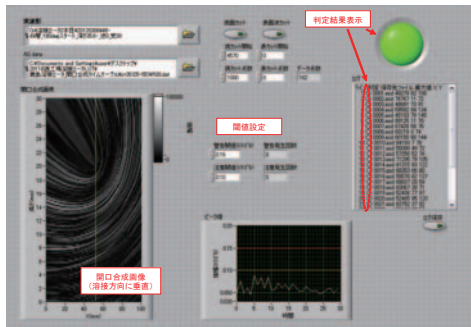


Fig.10 Monitoring screen of LUT result

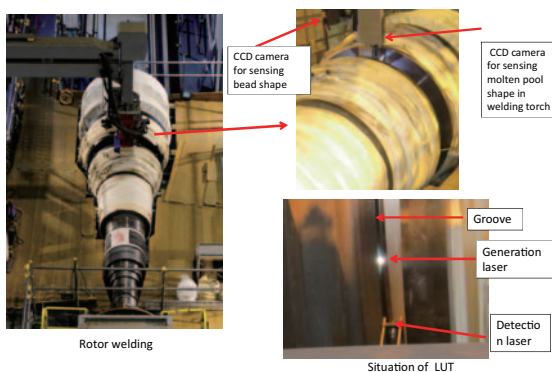


Fig.11 Application to rotor welding

システムを実機タービンロータの溶接に適用した状況を示したものである。本システムは、今後、各種の自動溶接装置に適用拡大されていく。

4. タービン機器における最新の加工技術

次に、A-USCや超臨界圧CO₂サイクル発電システムに用いられるNi基合金の加工技術について紹介する。

4.1 Ni基合金機械加工の特徴

Ni基合金加工の特徴として、以下の点が挙げられる。

(1) 切削抵抗が高い

Ni基合金は、高温でも引張り強度が高い。そのため、切削時の切削抵抗が通常の方法加工に比べ高い。

(2) 切削温度が高い

Ni基合金切削では、切削温度が高くなる。そのため、切削工具の摩耗の進行が速くなる。摩耗の進行を抑えるためには、切削速度を低くしなくてはならない。

以上より、通常の方法に比べ、生産性が低い。

4.2 技術施策

(1) 高温強度の高い切削工具の選定

加工材料の高温強度が高いため、それに耐える硬度の高い切削工具材種の選定が必要になる。しかし、じん性が低くなるため、耐衝撃性に強い加工方法への工夫が必要となる。

(2) 切削抵抗の低い工具、切削方法の適用

切削抵抗を低くするため、切れ刃のすくい角を大きくする方法がある。また、切込み量、および切れ刃の接触長さを短くする工具・加工方法の適用が必要となる。

(3) 切削量の削減（ニアネットシェイプ化）

上記のように機械加工しにくい材料であるため、素材段階で機械加工量を少なくする必要がある。また、切削加工では無く、切断に変更するなどの方法がある。

4.3 各部品への適用事例

タービン主要部品ごとに、Ni基合金加工材料への最新加工技術適用事例を以下に示す。

4.3.1 羽根

(1) セラミック工具による加工

切削工具材種の一つであるセラミックは、切削工具のなかでも高温硬度が高く、Ni基合金加工に適する工具材種の一つである。

図12は、荒加工にてセラミック工具を用いた、Ni基合金材の羽根植込部の加工事例である。切削速度は、適用



| Tool material | | Ceramics |
|---------------|--------|----------|
| Tool diameter | mm | 63 |
| No. of teeth | | 4 |
| Cutting speed | m/min | 520 |
| Feed speed | mm/min | 840 |
| Depth of cut | mm | 1 |

Fig.12 Machining with ceramic cutting tool for Blade

前の40m/minから520m/minまで上昇させることができる。ただし、セラミックは、耐衝撃性に弱い欠点があるため、加工方法にて切削抵抗を軽減させる工夫が必要である。また、熱的な衝撃に対応するため、切削油剤は使用しない。

(2)分割式工具によるクリスマス溝加工

クリスマス溝加工は、切れ刃の接触長さが長く、そのため切削抵抗が高くなり、工具欠損や寸法精度確保が難しい。その対策として、図13に示すように工具をクリスマス溝の層ごとに分割し、1層ごとに加工していく方法を適用した。この方法により、工具欠損を防止し、加工精度を確保できる。

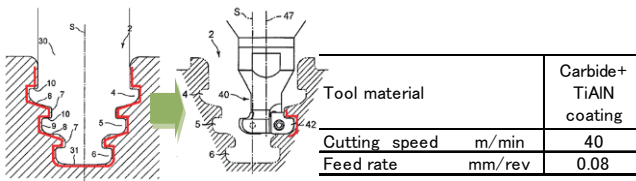


Fig.13 Cutting tool for Christmas groove

(3)ウォータージェットによる切断

ブロック材からの羽根削り出しにおいて、切断加工は有効である。生産性向上のため、ワイヤ放電加工ではなく、アブレッシブウォータージェットによる羽根の切断をNi基合金材にて行った。切断パラメータ、加工状態を図14に示す。これにより、加工能率の向上が図れる。



| | | |
|----------------------|--------|----------|
| Discharged pressure | MPa | 350 |
| Nozzle diameter | mm | 0.35 |
| Discharged flow rate | L/min | 3.7 |
| Feed speed | mm/min | 0.9~18.5 |

Fig.14 Water jet cutting for Blade

4.3.2 ロータ

(1)高圧クーラントによる旋削加工

通常1MPa程度の切削油剤吐出圧を約7MPa程度まで上げ、刃先の冷却性を高め、工具摩耗を抑制する方法である。図15は、Ni基合金材を対象に、通常圧力クーラントと高圧クーラントでの加工時間による切削工具の逃げ面摩耗量を比較したものである。切削速度40, 60m/minとも高圧クーラントの摩耗量が少なく、摩耗抑制効果が得られる。

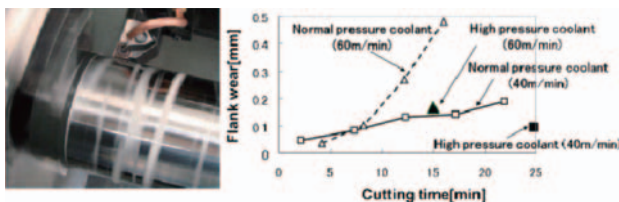


Fig.15 Machining experiment with high pressure coolant

(2)クリスマス溝

本事例は、4.3.1(2)項に記した切削工具の他に、切込み量を少なくするため、層ごとでなく幅方向に工程分割したものである。図16は、Ni基合金材を対象にしたクリスマス溝加工用切削工具の図である。この図のように幅方向に徐々に広げていくように工程分割することにより、切削抵抗を低減させ、寸法精度、面粗さを維持することができる。

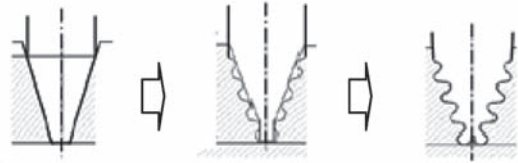


Fig.16 Cutting tools for rotor Christmas groove

4.3.3 ケーシング

(1)水平継手面加工

水平継手面は、蒸気漏れを防止するため、厳しい精度、特に平面度、仕上面粗さが要求される部位である。Fig.17は、傾斜切削工具を用いることにより精度を達成した事例である。傾斜切削とは、切れ刃が切削方向に直角ではなく、傾いた位置にて切削する方法である。



| | |
|---------------|------------|
| Tool material | Carbide |
| Tool diameter | mm 265 |
| No. of teeth | 1 |
| Cutting speed | m/min 80 |
| Feed speed | mm/min 300 |

Fig.17 Machining with oblique edged tool for joint face

(2)大径深穴加工

前述のように、Ni基合金は高温強度が高く、工具刃先の欠損、摩耗が進行しやすいが、特に深穴加工では顕著であり、工具摩耗により切削抵抗が増加し、穴の真直度が悪くなる。

これを解決するために適用したドリルを図18に示す。以下の特徴がある。

①工具内部に切削油剤供給用の穴を設け、切削点近傍より切削油剤を供給する。これにより、切削時の温度を

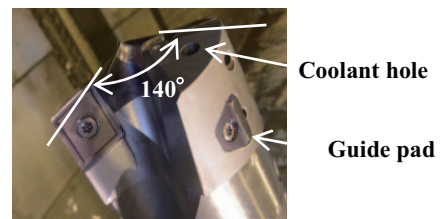


Fig.18 Deep hole drill for Ni base alloy

低下させ、工具摩耗を抑制させる。

- ②140° の工具先端角を設け、かつ工具側面にドリルを穴にガイドするためのガイドパッドを設ける。これにより、穴の曲がりを小さくさせる。

図19は、本工具での加工事例である。一般的に深穴加工においては、切りくず処理性を向上させるため、ステップフィードによる加工が一般的であるが、加工硬化層を切削しないようにノンステップで加工している。これらにより、穴の真直度を許容値以下にて加工できる。



| | | |
|---------------|--------|---------|
| Tool material | | Carbide |
| Tool diameter | mm | 66.7 |
| Cutting speed | m/min | 30 |
| Feed speed | mm/min | 30 |

Fig.19 Machining for deep hole

(3)大径穴ザグリ加工

水平継手ボルト用ザグリ面は、水平継手面に対して、厳しい平行度が要求されている。これを実現するため、切削抵抗が低いヘリカル加工方法を適用した。図20は、その概念図である。ヘリカル切削とは、切削工具が自転しながら、螺旋状に公転して切削するものであり、切削長は長くなるが、切削抵抗が低い。

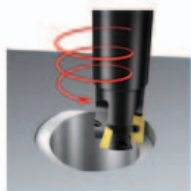


Fig.20 Schematic view of helical cutting

図21は、本加工事例であり、この方法により、平行度の確保が可能となる。



| | | |
|---------------|--------|---------|
| Tool material | | Carbide |
| Tool diameter | mm | 40 |
| No. of teeth | | 6 |
| Cutting speed | m/min | 30 |
| Feed speed | mm/min | 144 |
| Depth of cut | mm | 4.5 |

Fig.21 Machining with milling cutter for counter boring

(4)大径ねじ加工

大径穴ザグリ加工と同様に、ヘリカル切削を適用した。図22は、本加工方法の加工事例である。ヘリカル切削の場合、工具摩耗によりねじ有効径が小さくなり、公差外れとなる問題点があるが、切削条件の適正化により公差内での加工を実現できる。



| | | |
|---------------|--------|---------|
| Tool material | | Carbide |
| Tool diameter | mm | 22 |
| No. of teeth | | 1 |
| Cutting speed | m/min | 16 |
| Feed speed | mm/min | 23 |

Fig.22 Machining with milling cutter for thread

5. 結言

蒸気タービン機器の製造に関して、最近の(株)東芝京浜事業所での取り組みについて紹介した。さらに、最新技術として、今後、蒸気タービンの高効率化として期待されるA-USCや超臨界圧CO₂タービンなどの高温プラント機器の製造に関して、キーテクノロジーである溶接技術と機械加工技術の取り組みについて述べた。製造技術は、使用される材料や機器設計、さらには設備の革新により、日々変化する。今後も、さらなる製造革新に向け、取り組んでいきたい。

6. 引用文献

- (1) 持田尚毅, “火力発電の高効率化と環境性能向上への取り組み”, 東芝レビュー, Vol.68, No.11 (2013), pp. 2-7.
- (2) 服部祐太, 俵盛勝博, “高効率コンバインドサイクル発電システムの最新技術”, 東芝レビュー, Vol.68, No.11 (2013), pp. 8-11.
- (3) 今井健一, 高橋武雄, “火力発電システム用蒸気タービンの高効率化技術”, 東芝レビュー, Vol.68, No.11 (2013), pp. 16-20.
- (4) 高橋武雄, “超臨界CO₂サイクル発電システム”, 東芝レビュー, Vol.68, No.11 (2013), pp. 36-39.
- (5) 浅井知, 齋藤和宏, 村上格, “大容量・高温化対応蒸気タービンの溶接ロータ”, 東芝レビュー, Vol.65, No. 8 (2010), pp. 12-15.
- (6) 浅井知, 小川剛史, 藤田善宏, 大嶽達哉, 星岳志, “タービンロータ溶接インプロセス品質管理システムの開発”, 平成24年度火力原子力発電大会論文集, 2月 (2013), pp139-146

特集：最新の加工・製造技術

マシニングセンタによるガスタービン部品の最新加工技術

石井 正人*¹
ISHII Masato

キーワード：マシニングセンタ、インペラ、ブリスク、ケーシング、ニッケル基耐熱合金、チタン合金、アルミ合金
Machining center, Impeller, BLISK/IBR, Casing, High temperature nickel alloys, Titanium alloy, Aluminum alloy

1. はじめに

ガスタービン部品の複雑化・高精度化が望まれるなか、グローバルなコスト競争もあり、より付加価値の高い加工への要求が高まっている。このため、高速・高精度加工と作業性の良さを両立させた5軸制御マシニングセンタへのニーズが急速に増えている。

近年、工作機メーカーに課せられた課題は、性能の良い機械を開発するだけでなく、機械の性能を最大限に発揮させることができる加工技術も提案することであると筆者は考えている。本稿では、特に5軸加工が必要な部品に着目し、被削材の違いによる、加工技術とそれを引き出すための加工機について紹介する。

2. チタン合金

2.1 インペラ/ブリスク

過給機で使用される遠心圧縮機の部品であるインペラは、複雑な自由曲面形状となっている。このような形状に対し、加工時間の短縮を目的とした弊社独自の特殊工具を紹介する。

2.1.1 特殊工具による加工時間の短縮

翼面を仕上げる際は、ボールエンドミルを使用するの

が一般的であり、表面粗さについては、工具径とピック量で決まる。理論表面粗さの計算式を示す(図1)。

この数式からわかる通り、同じカブス高さの場合、工具Rを大きくすることでピック量Pを広くすることができる。つまり、工具Rを大きくすることで加工パスを削減することができ、加工時間の短縮が図れる。

特殊工具の事例では、R6のテーパボールエンドミルをR15のいわゆるバレル形状の特殊工具に変更することで、仕上げパスの本数を削減し、加工時間を60%短縮することができた(図2)。

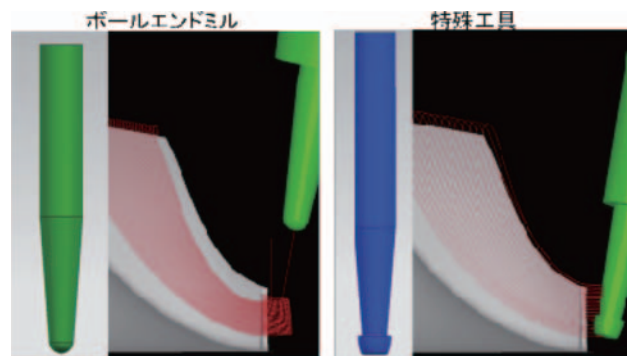
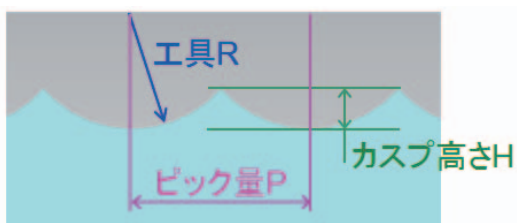


Fig. 2 Special tool



$$H \doteq \frac{P^2}{8R}$$

Fig. 1 Theoretical surface roughness

原稿受付 2014年7月7日

* 1 (株)牧野フライス製作所

〒401-0320 南都留郡鳴沢村7040-8



Fig. 3 Appearance of D300

2.1.2 立形5軸制御マシニングセンタD300

弊社立形5軸制御マシニングセンタD300(図3)は、主軸側にY, Zの2軸、テーブル側にX, A, Cの3軸を配分したトラニオンタイプの立形マシニングセンタである(表1)。

回転軸(A, C軸)には、ダイレクトドライブモータを採用しており、バックラッシュがなく、ロストモーションも少ないため、高い追従性が必要となる同時5軸での高速加工が可能である。また、A軸(傾斜軸)はプラス・マイナス両側に120度傾斜することができ、総可動域は240度になる。さらに、主軸をスリム化したことにより、テーブルとの接近性が良くなった。

また、主軸頭にはクーラントノズルを組み込み、余計な突起物を無くするとともに、6箇所からクーラントが加工点に集中的に噴射する構造を採用した。

加えて最低限の入力で効果的に干渉を防止することが可能な主軸・テーブル干渉防止機能を搭載することで、短い工具を安全に使用でき、さらに加工精度と加工面品位も向上した。

生じる加工面不良(象限突起)を自動最適化により改善する機能として、高精度加工準備運転機能を搭載している。本機能により、機械完成直後と同等の円運動精度にまで修正ができた(図5)。

最後に、直径200mmのチタン合金インペラの加工事例を紹介する。本機能と前述した特殊工具を用いることで、従来の加工時間8.9時間が、4.4時間に半減した(図6)。

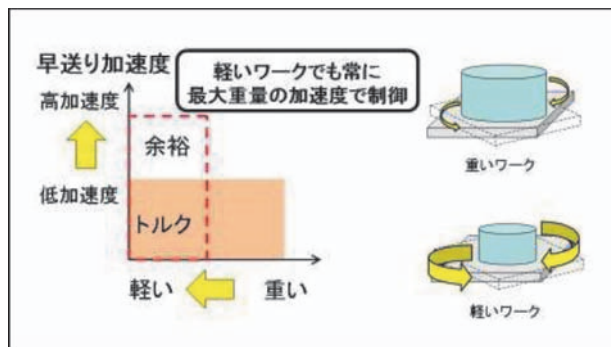


Fig. 4 Inertia active control

Table 1 Specification of D300

| | | |
|-------|---------|---|
| 主軸 | 標準主軸 | 15,000 min ⁻¹ , HSK-A63 7/24 テーパ#40 |
| | オプション主軸 | 20,000 min ⁻¹ HSK-A63 |
| | オプション主軸 | 30,000 min ⁻¹ HSK-F63 |
| ストローク | X, Y, Z | 300×500×350 mm |
| | A C | -120~+120deg 360deg |
| 早送り速度 | X, Y, Z | 60 m/min |
| | A C | 45000 deg/min 54000 deg/min |
| 切削速度 | X, Y, Z | 60 m/min |
| | A C | 45000 deg/min 54000 deg/min |
| テーブル | | φ 300 mm |
| ワーク | 最大サイズ | φ 450×270 (SR290) mm |
| | 積載質量 | 120 kg |

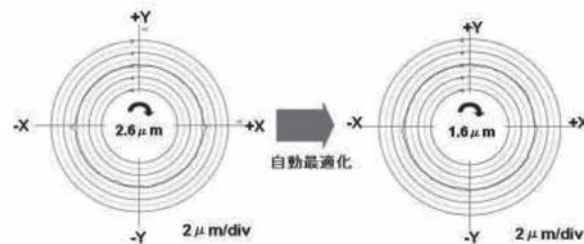


Fig. 5 Preparation operation function for high accuracy machining

次に加工時間の短縮と面品位および形状精度の向上を可能にする機能について紹介する。ワークや取付具により変動する質量に応じて、送り軸の速度や加速度を最適に調整する機能としてイナーシャ適応制御がある。従来は、最大積載量で送り軸のパラメータを設定していたため、ワークが軽い場合には、送り軸モータに余力がありモータ能力を十分に発揮できなかった。しかし、この機能を使用することで、ワーク質量に応じてモータ性能を最大限に引き出すことができ、加工時間の短縮が可能となった(図4)。

また、機械完成直後に比べ、経年変化により円運動精度が低下した状態、つまり軸の送り方向が反転する際に



Fig. 6 Impeller (Dia. 200mm)

2.2 ケーシング

チタン合金の加工では、加工中に刃先に発生する切削熱と切りくずを速く除去することにより、工具寿命を延ばすことができる。主軸内部からクーラントを供給する弊社独自のユニークな技術を紹介する。

2.2.1 高圧大流量スルースピンドルクーラント

一般的なマシニングセンタの5倍の流量である毎分100Lで圧力が7MPaという高圧大流量スルースピンドルクーラントを搭載することにより、切削熱を確実に除去し、工具寿命を延長することができた(図7)。



Fig. 7 High pressure and high flow through spindle coolant

また、高温部を確実に冷やすとともに、刃先へ的確にクーラントを供給することができるため、切りくず詰まりに起因する加工振動や切りくずの二度噛みを抑制することができ、工具のチップングや破損を防ぐことができた(図8)。

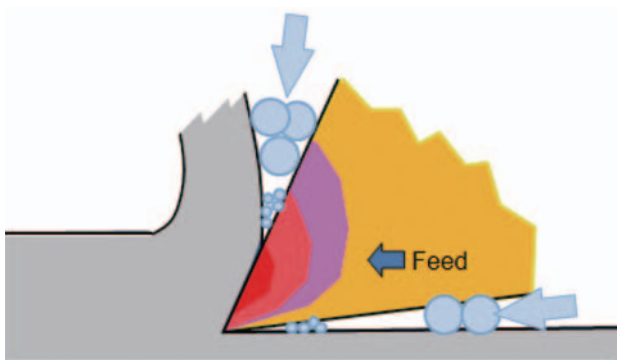


Fig. 8 Control of tool chipping

さらに、高圧大流量スルースピンドルクーラントと独自に開発した水溶性切削油剤を使用することにより従来の加工法に対し

- ・ブロック材からの荒加工条件で2.7倍
- ・切削速度200mm/minの高速仕上げ加工条件で9.1倍の工具寿命を達成した。

2.2.2 横形5軸制御マシニングセンタT1

弊社横形5軸制御マシニングセンタT1(図9)は、主軸傾斜タイプで、フトコロが深く、ワークへの主軸の接近性に優れ、横形マシニングセンタでありながら、立形マシニングセンタのような加工形態をとることができる(図10)。

最大の特長は、高精度、高生産性を大前提に、高速領域にも対応した高トルク主軸を搭載し、高速送りを実現しながら高減衰送り軸の相反する性能を両立させることで、切削能力はチタン合金(Ti-6Al-4V)で毎分200cm³、アルミ合金(A6061)で毎分4500cm³を除去できる。

また、主軸にかかる負荷を監視し、過大な負荷を検知すると、送り速度を自動的に低下させ、刃先にかかる切削力が設定範囲に収まるように自律的に適応制御するAutonomic Spindle Technology (AST) を実装している。

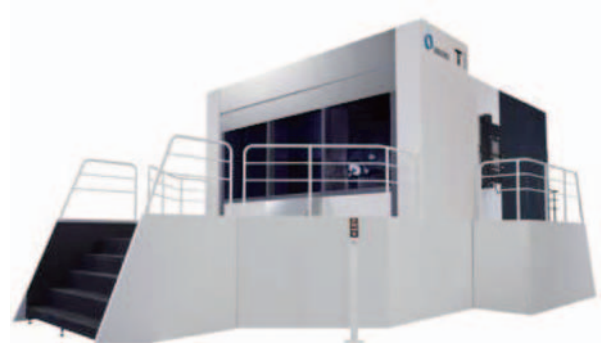


Fig. 9 Appearance of T1

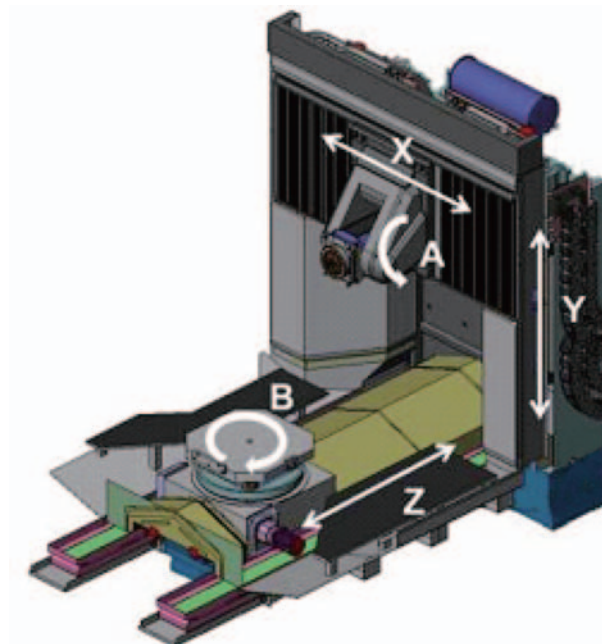


Fig.10 Feed axis structure of T1

さらに、主軸傾斜タイプは、従来機に比べ軽量コンパクトで、剛性の高い傾斜軸を実現しており、X軸とY軸の位置決めやA軸の割出し精度が向上した。

よって、テーブル傾斜タイプの5軸加工機に比べ、工作物の視認性や接近性、段取り性が良好なため、ケーシングの加工に最適な機械である（図11）。

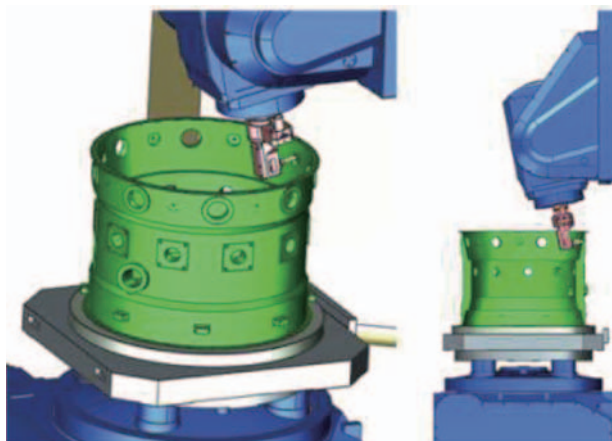


Fig.11 Machining sample (Casing)

Table 2 Specification of T1

| | | |
|-------|---------|-----------------------------------|
| 主軸 | 標準主軸 | 12,000 min ⁻¹ HSK-A100 |
| ストローク | X, Y, Z | 1500×1300×2000 mm |
| | A | -110~+45 deg |
| 早送り速度 | B | 360 deg |
| | X, Y, Z | 25 m/min |
| 切削速度 | A | 3600 deg/min |
| | B | 3600 deg/min |
| テーブル | X, Y, Z | 25 m/min |
| | A | 3600 deg/min |
| ワーク | B | 3600 deg/min |
| | 最大サイズ | 1000×1000 mm |
| | 積載質量 | φ1500×1500 mm 3000 kg |

3. 耐熱合金

3.1 タービンプレード

耐熱性・耐食性・耐酸化性・耐クリープ性など高温特性に優れているニッケル基の耐熱合金は、難削材に分類され、切削加工が非常に難しい。こうした材料を高効率で加工するためにバイパー研削加工機を開発した。

3.1.1 バイパー研削

気孔の多いビトリファイドボンドアルミナ研削砥石を用い、高圧・大流量のクーラントを砥石の中心に向けて外部ノズルから供給することにより、クーラントが砥石に連れ回る空気層のバリアを突き破り砥石内部に浸透する。浸透したクーラントは、遠心力により研削点に供給される（図12）。

また、高圧のクーラントを砥石に供給することにより、砥石の洗浄作用も働く。この研削方式を採用することにより、通常のクリープフィード研削の約8倍の能率で耐熱合金の除去が可能となった（図13）。

タービンプレードの代表的な加工事例を示す（図14）。従来は、複数台の研削盤をワークが渡り歩きながら加工をするが、マシニングセンタにより大幅な工程集約が可能となった。また、バイパー研削を使用することで劇的に研削能率が上がり、加工時間の短縮にも成功した。

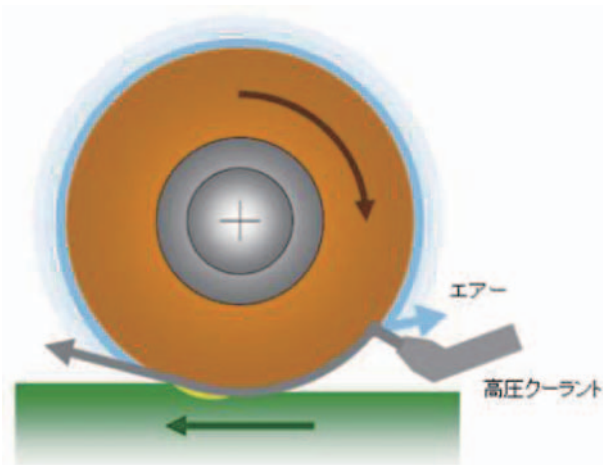
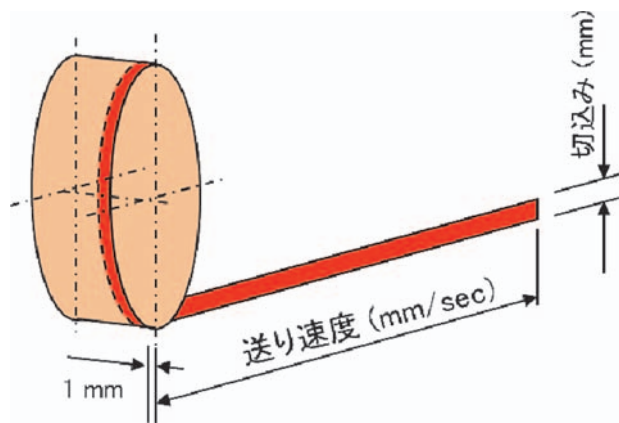



Fig.12 Principle of VIPER grinding



| 研削方式 | 送り速度 | | 切込み mm | Qw mm ² /sec |
|----------|--------|--------|-----------|----------------------------|
| | mm/min | mm/sec | | |
| バイパー研削 | 1000 | 16.7 | 4.0 | 66.7 |
| クリープフィード | 500 | 8.3 | 1.0 | 8.3 |
| 切削 | 100 | 1.7 | 5.0 | 8.3 |

Fig.13 Performance of VIPER grinding



| | 従来の加工法 | バイパー研削 |
|---------|--------------|--------|
| 加工工程 | 8 | 2 |
| サイクルタイム | 40分 | 10分 |
| 加工機の台数 | 5 (もしくはそれ以上) | 1 |

Fig.14 Machining sample (VIPER grinding)

3.1.2 iGRINDER G5

弊社iGRINDER G5 (図15) は、研削のほかに切削や穴あけ、そしてタップなど複合加工が可能で、これまで複数の機械で加工していた難削性の複雑形状部品の高効率生産を1台で実現できる (表3)。



Fig.15 Appearance of iGRINDER G5

Table 3 Specification of iGRINDER G5

| | | |
|-------|---------|---|
| 主軸 | 標準主軸 | 12,000 min ⁻¹ HSK-A63 7/24 テーパ#40 |
| ストローク | X, Y, Z | 520×560×600 mm |
| | B | -90~180 deg |
| | C | 360 deg |
| 早送り速度 | X, Y, Z | 48 m/min |
| | B | 16000 deg/min |
| | C | 36000 deg/min |
| 切削速度 | X, Y, Z | 48 m/min |
| | B | 12000 deg/min |
| | C | 36000 deg/min |
| テーブル | | φ 250 mm |
| ワーク | 最大サイズ | φ 440×310 (SR380) mm |
| | 積載質量 | 120 kg |

加工に使用するX,Y,Z,B,C の5軸のほかに、バイパー研削を可能とするため、研削点にクーラントを供給する特殊なクーラントノズルが装備されている。このクーラントノズルは、2軸制御の回転式ノズルとなっており、ドレス後の砥石径に追従することができるほか、砥石の周りをクーラントノズルが回転するため、常に最適な位置でクーラントを供給することができる (図16)。さらに、砥石をドレスするためのロータリドレッサを機内テーブル上に配置し、複数のダイヤモンドロールを取り付けることができ、ダイヤモンドロールを交換することなく加工に合わせた砥石形状に素早く成形できる (図17)。

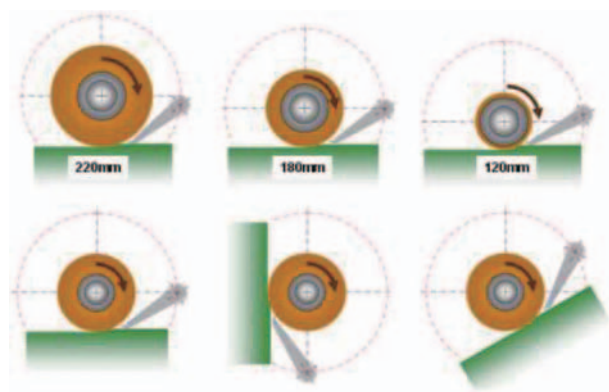


Fig.16 Coolant nozzle



Fig.17 Rotary dresser unit

4. アルミ合金

4.1 インペラ

直径39mmの小型アルミ合金のインペラ加工について紹介する。

4.1.1 直径39mmインペラ

加工パスの見直しと、多刃工具を使用することにより、加工時間の短縮に成功した(図18)。

加工時間：152秒

サイズ：直径39mm×18mm(高さ)

翼数：主翼6翼+スプリッタ翼6翼

加工：母線加工

面粗度：Ra0.3μm



Fig.18 Impeller (Dia. 39mm)

4.1.2 横形5軸制御マシニングセンタN2-5XA

弊社横形5軸制御マシニングセンタN2-5XA(図19)は、高速・高精度加工を可能にしたコンパクトな機械構造が特長である(表4)。主軸には、独自の技術が詰まっており、30番の主軸でもアルミ加工には十分な剛性があり、他にはない優位性となっている。また、主軸の

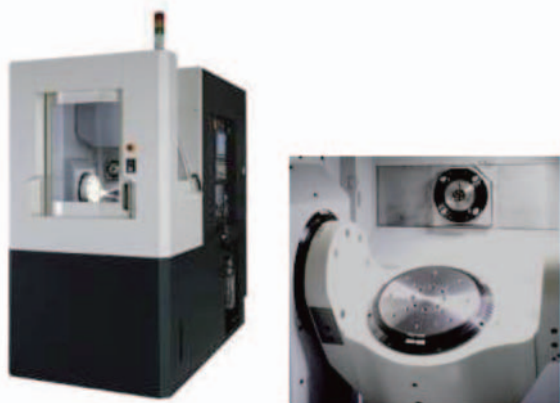


Fig.19 Appearance of N2-5XA

回転速度は0 min⁻¹から2万min⁻¹まで0.8秒で立ち上がる。

横形マシニングセンタのため、切りくずの排出性にも優れており、落下した切りくずは、そのままタンクに回収される。弊社で最も小型のマシニングセンタにあたるこの機械は、主軸がX、Y、Z直行3軸の全ての移動を担当し、Y軸の上にX軸、その上にZ軸をコンパクトに重ねた構造を採用した。これにより、機械サイズを幅1150×奥行き2000×高さ2150mmと小さくでき、設置スペースを削減できる。また、自動化にも対応している(図20)。

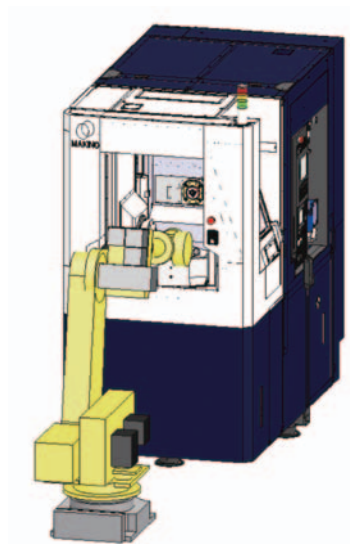


Fig.20 Automation using robot

Table 4 Specification of N2-5XA

| | | |
|-------|---------|----------------------------------|
| 主軸 | 標準主軸 | 20,000 min ⁻¹ HSK-A40 |
| ストローク | X, Y, Z | 300×300×230 mm |
| | A | -120~30 deg |
| | B | 360 deg |
| | 早送り速度 | X, Y |
| Z | | 56 m/min |
| | A | 10800 deg/min |
| | B | 54000 deg/min |
| 切削速度 | X, Y, Z | 32 m/min |
| | A | 10800 deg/min |
| | B | 36000 deg/min |
| テーブル | | φ200 mm |
| ワーク | 最大サイズ | φ300×270 mm |
| | 積載質量 | 30 kg |

5. まとめ

続々と新たな材料が登場し、既存の加工技術が通用しなくなってきているなか、1部品にかかるトータルコストの削減要求はやむことはない。工作機械メーカーとして、常に市場の要求や課題に対し生産能率の向上と生産コストの削減を実現する提案ができるように、機械および加工技術の研究・開発を続けていく。

小特集：3Dプリンタの可能性

3Dプリンタとは、3Dプリンタの可能性

京極 秀樹*¹
KYOGOKU Hideki

キーワード：積層造形，3Dプリンタ，レーザー，電子ビーム，金属粉末

Additive Manufacturing, 3D Printer, Laser, Electron Beam, Metal Powder

1. はじめに⁽¹⁾⁻⁽³⁾

三次元積層造形（3D）技術は、ここ5年の間にレーザー開発、装置機構の改良、さらには粉末技術の開発などにより急速に進歩してきた。これに伴い、航空宇宙分野、自動車産業分野、医療分野などへの適用が急速に進んできている。とりわけ、航空宇宙分野では、昨年（2013年）にGE Aviation社がジェットエンジンにおける燃料噴射ノズルなどへの利用を発表して以来、ロールス・ロイス社、シーメンス社もジェットエンジン部品への3D技術の利用を発表している。このように、3D技術の適用は、航空宇宙分野をはじめとして幅広い分野で今後ますます進むものと考えられる。

さて、3D技術は、1980年代に光硬化樹脂を用いた光造形技術から端を発しているといわれており、その後金属粉末を用いた選択的レーザー焼結（SLS: Selective Laser Sintering）法による積層造形技術が開発された。金属材料を対象とした積層造形技術については、2000年代に入り、ドイツのFraunhofer ILT研究所などを中心にレーザー光源の開発が着実になされるとともに、装置における粉末積層技術や粉末製造技術の改善などが行われ、2008年に各社揃ってファイバーレーザーを搭載した金属積層造形装置が開発され、製品の高密度化、高強度化が図られるようになった。この頃から、アメリカでは2020年を睨んだロードマップの作成、ASTM（American Society for Testing and Materials）F42委員会の立ち上げなどを行った。さらにはドイツ、イギリスなどにおいても国家戦略を策定・実施してきた。アメリカでは、オバマ大統領が、2012年に製造業の復活のための核となる戦略としてAM（Additive Manufacturing）技術開発ならびに人材教育に10億ドルを投資することを発表し、NAMII（National Additive Manufacturing Innovation Institute）、現在のAmerica Makesを設立して以来、我が国をはじめ世界中で本技術に対する注目度が急速に高まり、現在に至っている。

このような背景のもと、我が国においても三次元積層

造形技術、いわゆる3Dプリンティングが新たな加工法として注目されるようになってきた。2013年度には、経済産業省がこのような3Dプリンタへの関心の高まりに対応するため、「新ものづくり研究会」の立ち上げ、さらには、「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム－次世代産業用3Dプリンタ技術開発－」の中で、金属粉末を対象とした国家プロジェクトを2014年度に開始した。今後、府省連携による他の3D関連の研究プロジェクトも開始の予定となっている。

いわゆる3Dプリンタは、最近では樹脂材料を対象とした3Dプリンタから金属材料を対象とした積層造形装置まで、優れた性能を有する積層造形装置が開発され、適用製品や材料も多岐にわたってきている。樹脂材料においては、その種類も色も多彩になってきており、従来から利用されている自動車などの試作品の分野から、最近脚光を浴びている医療分野における生体モデル、インテリア・宝飾など、昨今の3Dプリンタブームによりその裾野を急速に広げてきている。一方、金属材料分野においても、材質も大幅に広がってきており、また積層造形装置の性能の向上により、航空・宇宙、自動車、産業機器用部品、さらにはインプラントなどの医用材料へとその利用範囲はますます拡大してきている。

本技術の最大の特徴は、従来法では不可能であった三次元複雑形状で、かつ表面および内部構造をまで考慮した製品の製造ができる点である。すなわち、位相最適化法などのシミュレーションにより設計された製品の作製や人体などの複雑な3次元形状をCT（Computed Tomography）などで読み取り、データ変換を施すことによりインプラントを作製できるなど、従来の加工法では不可能な形状の製品を加工できる。また、切削加工においては、基本的に表面データを扱うが、三次元積層造形法では、表面および内部構造も取り扱うことができる。例えば、表面へのテクスチャの付与が可能であり、内部をメッシュ構造やラティス構造、さらには傾斜構造にすることも可能である。このような内部構造や表面テクスチャの記述は、航空・宇宙、自動車、産業機器などの製品の軽量化・高機能化はもとより、インプラントなどにおける生体適合性の向上、さらにはインテリア・宝飾な

原稿受付 2014年7月22日

*1 近畿大学工学部

〒739-2116 東広島市高屋うめの辺1番

どのデザイン性の向上を図る上で重要である。

本稿では、金属を中心とした積層造形技術の現状と今後の3Dプリンタの可能性について、国家プロジェクトの内容も踏まえて紹介する。

2. 積層造形技術の種類⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾

3D技術は、最近までRP (Rapid Prototyping), RM (Rapid Manufacturing) 等の名称で呼ばれてきたが、2009年のASTM F42委員会において、これらの技術を総称してAM (Additive Manufacturing) と呼ぶことが決定された。

本技術の最大の特徴は、

- ①従来の切削加工をはじめとする他の加工技術では不可能な形状の製品の作製が可能
- ②製品機能の統合化・個性化が可能
- ③ニーズへの素早い対応が可能

などの多くの利点を有するために、新たな加工法として導入されてきているとともに、ものづくりにおける設計・製造の考え方を革新してきている。

AM技術は、ASTM F 42 委員会により、表1に示すカテゴリーに分類されており、そのほかの規格化も進められており、併せてISOにおいても一部規格化されている。

Table 1 Additive manufacturing categories

| Category | Description |
|----------------------------|---|
| Binder Jetting | Liquid bonding agent selectively deposited to join powder |
| Material Jetting | Droplets of build materials selectively deposited |
| Powder Bed Fusion | Thermal energy selectively fused regions of powder bed |
| Directed Energy Deposition | Focused thermal energy melts materials as deposited |
| Sheet Lamination | Sheet of material bonded together |
| Vat Photopolymerization | Liquid photopolymer selectively cured by light activation |
| Material Extrusion | Material selectively dispensed through nozzle or orifice |

以下に、それぞれのカテゴリーごとの概要を示す。

(1) バインダー噴射 (Binder Jetting)

粉末を敷き詰め、バインダーを噴射して固めて積層していく方法で、従来は金属粉末の積層造形にも利用されていたが、最近では高速化・大型化も進み、大型鋳造品の砂型製造にも利用されている。

(2) 材料噴射 (Material Jetting)

溶融した樹脂等を噴射しながら積層していく方法で、インクジェット法と呼ばれていた方法である。マイクロ製品の造形には有効な方法である。

(3) 粉末床溶融 (Powder Bed Fusion)

レーザー焼結 (SLS) あるいは溶融 (SLM: Selective Laser Melting) と呼ばれている方法で、樹脂粉末及び金属粉末の積層造形に利用されている。図1に選択的レーザー積層造形法の模式図を示す。本法では、CAD

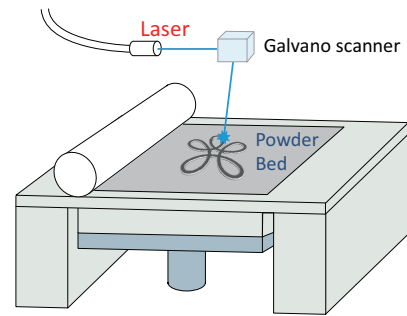


Fig. 1 Powder bed fusion

データをSTLファイルに変換して、ガルバノスキャナーを介してレーザーを照射して、敷き詰めた粉末を焼結あるいは溶融する工程を繰り返すことにより積層造形を行う方法である。本法では、金属においては、ほぼ真密度の造形体ができるようになっており、精度も50～100 μ m程度である。このように他の方法に比べて格段の高精度製品を作製できるが、金額はほとんどの装置で1億円以上である。

(4) 溶融堆積 (Directed Energy Deposition)

図2に示すように、粉末をレーザーあるいは電子ビームで溶融し、溶融物を堆積させながら積層造形する方法である。Sandia 国立研究所の開発したLENS[®]法をはじめ、Fraunhofer研究所などが研究開発を進め、実用機も販売されている。最近では、高精度の製品の作製も可能となってきている。

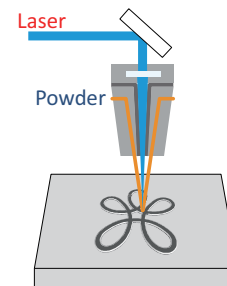


Fig. 2 Direct energy deposition

(5) シート積層 (Sheet Lamination)

紙などのシート材を切断し、接着剤で張り合わせながら造形していく方法である。精密鋳造などの模型として利用されている。

(6) 光造形 (Vat Photopolymerization)

光硬化樹脂に紫外線あるいはレーザーを照射して造形する方法である。3D Systems社をはじめ、我が国ではシーメット社の装置が有名である。製品の形状確認、試作品へ応用されている。

(7) 材料押し出し (Material Extrusion)

溶融物堆積法と呼ばれてきた方法で、最もよく利用されており、最近の3Dプリンタの中心となっているものである。この分野では中心的な役割を果たしているStratasys社をはじめ、多くの企業が参入してきており、

低価格の3Dプリンタが発売されている。Stratasys社には高価格の装置もあるが、一般的には低価格で、操作が簡単であるが、精度は十分とはいえない。しかし、最近では数種類の樹脂を組み合わせることができるなどの応用範囲も広い。

3. 3Dプリンタの現状

3.1 装置

(1)粉末床溶融方式

最近の金属粉末を対象としたレーザー積層造形装置の開発は目覚ましく、レーザーには高出力のファイバーレーザーが使用されてきており、レーザーの高出力化・多重光源化が進んできている。代表的な金属粉末積層造形装置の仕様を表2に示す。各社とも200Wから400Wのファイバーレーザーを搭載する装置を開発している。SLM Solutions社では、高速化のために400Wと1kWの2つのレーザーを搭載した装置を開発しており、造形速度の高速化が図られてきている。金属レーザー積層造形装置については、海外メーカーでEOS社（ドイツ）、Concept Laser社（ドイツ）、SLM Solutions社（ドイツ）、Renishaw社（英国）、Phoenix社（フランス）（2013年、3D Systems社（アメリカ））などがある。我が国では、（株）松浦機械製作所の装置があり、切削機能を有している。

一般的には、表2に示すように造形サイズ \square 250 mmが主流ではあるが、例えば、歯科用材料や宝飾品のような小物の製作に関しては、各社から小型装置が開発されている。これに対して、超大型装置では、Concept Laser社がFraunhofer ILT研究所およびDimler社と共同開発した超大型自動車試作品用装置が開発されており、大型化への傾向も見られる。なお、最近の装置の標準的な仕様は、次のとおりである。

- ・レーザー（ファイバーレーザー：200～400 W）
- ・造形速度（～20cm³/h）
- ・造形精度（～50 μ m）
- ・造形精度（～50 μ m）
- ・造形サイズ（250×250×300 mm程度）

また、電子ビームを光源とした積層造形装置は、ARCAM社（スウェーデン）が開発しており、真空での造形となるため、酸化が問題となるチタンおよびチタン合金を中心としたインプラントや航空・宇宙部品の製造

などに利用され、急速に利用が拡大してきている。

(2)溶融堆積方式

本装置は、上述したように金属粉末を噴射しながらレーザーあるいは電子ビームを照射して溶融金属を堆積して積層造形するものであり、Sandia国立研究所により開発されたLENS[®]（Laser Engineered Net Shaping）法、Fraunhofer ILT研究所で開発されたレーザー金属堆積（LMD：Laser Metal Deposition）法による装置開発が行われている。本来は、補修用として利用されているが、最近では積層造形用としても利用され始めている。本法の特徴は、精度や表面粗さは劣るものの、単層ではなく多層や傾斜材料の積層造形も可能であり、アスペクト比の大きい製品の製造、部分的な修復などが可能である。最近では、真密度で複雑形状・大型品の作製が可能となっており、アルミニウム合金、ステンレス鋼、工具鋼、チタン合金などの材種にも対応できるようになっている。製品例としては、ブレード、ハウジング、金型など幅広い分野の製品の製造が可能となってきた。

3.2 造形体の特性

現在、積層造形により造形される金属材料は、装置の性能向上により多種多様となってきた。金属製品に対応できる材種としては、従来はステンレス鋼、銅合金が中心であったが、最近では、高速度工具鋼、生体材料用コバルトクロム合金、さらには航空宇宙用として利用されている耐熱・耐食用インコネル合金、チタン合金、アルミニウム合金などが可能となってきた。幅広い材質の製造が可能となってきた。その例として、レーザー積層造形による造形体の機械的性質および表面粗さの値を表3に示す。これからもわかるように、溶製材に匹敵する特性が得られるようになってきている。製品例として、インコネル合金のジェットエンジン用タービンブレードの例を図3に示しておく。

電子ビームによる生体材料を中心とした積層造形による機械的性質の値を表4に示す。表5に生体用材料を中心とした溶製材の機械的性質を示す。これらを比較してもわかるように、0.2%耐力、引張強さ、伸びなどの機械的性質も溶製材に匹敵する特性が得られるようになってきている。従来の装置による材料では、密度が不十分



Fig. 3 Turbine blade of latest generation with internal conformal cooling channels to improve performance of jet engines (By the courtesy of SLM Solutions GmbH)

Table 2 Specifications of metal 3D printers⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾

| メーカー 装置 | EOS M280 | SLM SLM280HL | Concept Laser M2 | 3D Systems ProX300 |
|--------------------------|-------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| 光源 | ファイバーレーザー | ファイバーレーザー | ファイバーレーザー | ファイバーレーザー |
| 出力(W) | 200または400 | 400/1000 | 200または400 | 500 |
| ビーム径(μ m) | 100～ | 70～120 | 50～200 | - |
| 走査速度(m/s) | ～7 | ～15 | ～7 | - |
| 積層ピッチ(μ m) | 20 | 20～75 | 20～80 | 10～100 |
| 積層速度(cm ³ /h) | 20 | 20～35 | 2～20 | - |
| 造形サイズ(mm) | 250x250x325 | 280x280x350 | 250x250x280 | 250x250x300 |

なため、伸びが十分にでないことが報告されていたが、最近の装置では、造形条件適切に設定を行うことにより、ほぼ真密度に近い造形体が得られるため、延性・強度とも溶製材に匹敵している。硬さについては、高硬度が必要な金型材料については、いまだ十分な硬さは得られていない。また、電子ビームでは組織の異方性が発生しやすいため、造形方向を考慮した評価が必要である。

現在、これらの材料についてもASTMやISOにおいてTi-6Al-4Vなど一部規格化されている。しかし、疲労特性については、十分なデータが示されているわけではなく、試験方法も含めて今後の課題である。疲労強度の例としては、電子ビームによる例を以下に示しておく⁽⁹⁾。

- ・チタン合金 (Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V ELI)
疲労強度@600 MPa : >10⁷サイクル
- ・生体材料用コバルトクロム合金 (ASTM F75)
回転曲げ疲労@610 MPa : >10⁶サイクル

Table 3 Mechanical properties of SLMed metal and alloys used for implant applications (Referred by SLM Solutions Data Sheet)⁽⁶⁾

| Metal or Alloy | 0.2% Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (HRC) | Surface Roughness Rz(μm) |
|--------------------|---------------------------|------------------------|----------------|----------------|--------------------------|
| Ti | >180 | >290 | >20 | - | 36±4 |
| Ti-6Al-4V | >865 | >972 | >10 | 37.3 | 36±4 |
| Ti-6Al-7Nb | >905 | >1020 | >10 | 39.4 | 36±4 |
| Co-Cr-Mo(ASTM F75) | >835 | >1050 | - | 35 | 29±4 |
| 316L | 525±30 | 625±30 | - | 237±4HV | 38±4 |
| 15-5PH | 1050±30 | 1100±50 | 16±4 | 32±3 | 14±2 |
| H13 | - | 1730 | - | 54 | 34±4 |
| Al2Si | 211 | 409 | 5 | 105HB | 34±4 |
| Inconel 718 | 858(±120) | 1150(±140) | 18(±5) | - | 30 |
| Inconel 625 | 410 | 680 | 30 | - | 28 |
| Inconel HX | 400 | 910 | 35 | - | 28 |

Table 4 Mechanical properties of EBMed metal and alloys used for implant applications (Referred by ARCAM Data Sheet)⁽⁹⁾

| Metal or Alloy | 0.2% Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (HRC) | Surface Roughness Rz(μm) |
|--------------------|---------------------------|------------------------|----------------|----------------|--------------------------|
| Ti ASTM grade2 | 540 | 570 | 21 | - | - |
| Ti-6Al-4V | 950 | 1020 | 14 | 33 | - |
| Ti-6Al-4V ELI | 930 | 970 | 16 | 34 | - |
| Co-Cr-Mo(ASTM F75) | 560 | 960 | 20 | 34 | - |

Table 5 Mechanical properties of metal and alloys (Referred by ASM Metals Reference Book & Handbook of Materials for Medical Devices)^{(10), (11)}

| Metal or Alloy | 0.2% Yield strength (MPa) | Tensile strength (MPa) | Elongation (%) | Hardness (HRC) |
|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| Ti ASTM grade1 | 170 | 240 | 24 | - |
| Ti ASTM grade2 | 280 | 340 | 20 | - |
| Ti ASTM grade3 | 380 | 450 | 18 | - |
| Ti-6Al-4V Annealed | 924 | 993 | 14 | 36 |
| Ti-6Al-4V ELI Annealed | 827 | 896 | 35 | 35 |
| Ti-6Al-7Nb | 795 | 860 | 10 | - |
| Co-Cr-Mo(ASTM F75) | 448-517 | 655-889 | - | - |
| 316L Annealed | 170 | 480 | 30 | - |
| 15-5PH H925 | 1070 | 1170 | 10 | 47 |

材質的にみると、装置の高機能化や装置開発、さらにはAM技術に相応しい粉末製造技術の開発などにより、将来的には新たな機能材料、セラミックス、傾斜材料、複合材料等への展開も考えられる。

(2)精度および表面粗さ

また、製品の精度や表面粗さについても、最近の装置においては大幅な向上が見られるようになってきた。現在の金属レーザー積層造形装置では、一般的に製品精度は、形状にもよるが50～100μm程度といわれている。歯科インプラントでは最小±20μm程度の精度で製品が製造できると記載されている⁽⁴⁾。表3のデータから見れば、表面粗さR_zはほとんどの材料で40μm程度であるが、15-5ステンレス鋼では最小15μm程度で、材料によっても変化する。このような精度と表面粗さの向上は、今後の課題となっている。

4. 3Dプリンタの課題

4.1 ハードウェア

金属粉末を対象とした積層造形装置については、上述したように、さらなる高速化、高精度化および大型化が求められている。高速化・大型化については、多光源化による装置開発がなされており、今後もこの方向は進むものと考えられる。併せて、レーザーや電子ビームの高出力化も進んできており、高速化に寄与するものと考えられる。表面粗さについても、鋳造品以上のものが求められてきている。これについては、さらなる微細粉末を利用可能な積層技術の開発が必要となる。

溶融堆積方式の装置においても、大型化が進んできており、精度、表面粗さが改善されれば、さらなる応用範囲が進むものと考えられる。また、多色化に対する要求も求められてきており、今後この方面の研究開発が促進されるものと考えられる。

4.2 ソフトウェア⁽¹²⁾

積層造形においては、一般的にCADデータから形状データをSTLデータに変換して、CAD上で3Dモデリングを行った後、スライスデータを作成して、レーザーや電子ビームを操作して造形する。

プロセスが複雑な生体材料を例にとってみると、生体では形状が複雑であるため、CTなどからDICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) データとして形状を読み取り、STLデータなどに変換する。図4に、医療分野における積層造形プロセスの例を示す。この図に示すように、CTあるいはスキャナから画像データを取り込み、3Dモデリングを行い、シミュレーションを行った後、最終的にCADデータを作成し、これからスライスデータを作成して、造形装置によりインプラントを作製する。具体的に骨構造データの構築の流れについてみると、カスタムインプラントにおけるデータの取り込みは、主として患者のCT画像のDICOM

データから行う。この画像データから必要部分のみをSTLデータあるいはIGES (Initial Graphics Exchange Specification) データとして分離して、インプラントの3Dモデリングを行う。その後、Solid Works, I-DEASなどの3D-CAD上で外表面の形状のスムージング等を行い、3D-CADデータを作成する。さらに、骨内部をCT画像データと照らし合せながら、骨構造に近い3D-CADデータを作成する。このデータにより形状及び構造解析などのシミュレーションを行い、形状最適化を図り、最終的な3D-CADデータをSTLデータに変換して、これにより金属レーザー積層造形装置あるいは電子ビーム装置でインプラントの造形を行う。なお、実際にインプラントに求められる精度は、 $\pm 0.5\text{mm}$ 以内とされている。現在では、手術方法のシミュレーションも行いながらインプラント形状の最適化を図るソフトウェアも開発されている。



Fig. 4 An example of AM process in fabrication of implant

4.3 金属粉末

本技術においては、装置メーカーが粉末を指定することが多く、このため材質的にも制限される場合も多い。欧州においては、いち早くAM用粉末の開発を行っており、昨年(2013年)AS9120(航空宇宙)の認証を受けた粉末製造メーカーもある。

一般的に利用される粉末は、図5に示すようなガスアトマイズ法により作製される球状粉末の場合が多く、 $20 \sim 125 \mu\text{m}$ 程度の粒径である。材種とすれば、粉末製造技術の向上により幅広い材質が可能となってきている。その代表的な粉末材料を以下に示しておく⁽¹³⁾。

- (1)鉄系：SUS (316L, 17-4PH等)系, マルエージング鋼, 工具鋼, 高速度工具鋼等
- (2)チタン系：純チタン, Ti-6Al-4V等
- (3)アルミ系：Al12Si, AlSi10Mg, 7075等
- (4)コバルト系：CoCr (F75)等
- (5)ニッケル系：インコネル718, ハステロイ等

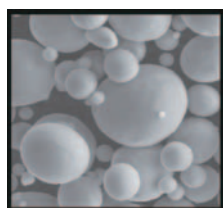


Fig. 5 SEM image of gas-atomized powder

5. 国プロにおける装置開発

5.1 背景

ドイツFraunhofer ILT研究所を中心としたヨーロッパ諸国は、2006年にFANTASIA (Flexible and near-net-shape generative manufacturing chains and repair techniques for complex shaped aero engine parts) プロジェクトにより航空機部品のLMD (Laser Metal Deposition) およびSLM (Selective Laser Melting) 技術開発を実施し、多くの成果を得ている⁽¹⁵⁾。

我が国においても、もの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、地域の中小企業等の持つ技術や資源を活用し、少量多品種で高付加価値の製品・部品の製造に適した三次元積層造形技術や金属等の粉体材料の多様化・高機能複合化等の技術開発及びその周辺技術の開発を行い、次世代のものづくり産業を支える三次元積層造形システムを核とした我が国の新たなものづくり産業の創出を目指すことを目的として、技術研究組合次世代型産業用3Dプリンタ総合技術研究開発機構(通称、TRAFAM)が設立され、国家プロジェクトとして経済産業省「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」が2014年度より5年計画で開始された。

5.2 開発目標

次世代型産業用3Dプリンタ技術開発プロジェクトの目標は、世界最高水準の三次元積層造形装置を開発することで、装置の高速化、高精度化、大型化さらには複層化を目指すものである。光源には、電子ビームとレーザービームの2種類を採用して、表6に示すような目標を達成するものである。

Table 6 Goal of the national project

| タイプ | 積層造形速度 cc/h | 造形物の精度 μm | 最大造形サイズ* mm | 販売価格 (装置本体) |
|---------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|----------------|
| 電子ビーム方式 (中間目標) | 250 | ± 100 | $\square 500 \times 600$ | - |
| 電子ビーム方式 (最終目標) | 500 | ± 50 | $\square 1,000 \times 600$ | 5,000万円 以下 |
| レーザービーム方式 (中間目標) | 250 | ± 50 | $\square 500 \times 400$ | - |
| レーザービーム方式 (最終目標) | 500 | ± 20 | $\square 1,000 \times 600$ | 5,000万円 以下 |

5.3 開発内容

国家プロジェクトで求められている技術開発内容は、次のとおりである。

(1)電子ビーム及びレーザービーム共通

- ①異種金属を傾斜構造で積層することを可能とする。
- ②装置で使用する積層造形用の制御ソフト等を開発する。
- ③粒径 $50 \mu\text{m}$ 以下の金属粉体の使用を可能とする。

(2)電子ビーム

- ①電子ビームの出力は5kW以上、ビーム径は $100 \mu\text{m}$

m以下。

- ②電子ビームコラム陰極の耐久時間は1,000時間以上。
- ③加工室の真空度は 1×10^{-2} Pa 以下。

(3)レーザービーム

- ①レーザーの出力2kW以上。
- ②高速パルス駆動技術の開発。
- ③ガルバノミラーの高速化、数台対応技術開発。

(4)金属等粉末開発及び粉末修飾技術開発

- ①金属粉末の粒径分布の狭幅化、微細化技術の開発。
- ②鉄系、銅系、ニッケル系、チタン系、コバルト系等3Dプリンタ用金属粉末の製造技術の確立。
- ③高温耐熱合金、耐食合金などの新合金材料を、当該産業用3Dプリンタにおいて使用できる技術の確立。
- ④金属粉末の高品質及び低コスト化技術の開発。
- ⑤防錆等粉末修飾技術及び傾斜材料用粉末製造技術の確立。

- ⑥チタン系及び新材料合金を除く各種金属粉体については、粒径 $20 \mu\text{m}$ 以下のものを使用できるように実用化開発する。

(5)周辺技術（高機能複合部材の開発、後加工、未使用粉末の回収等技術）開発

- ①爆発防止等、装置の安全性対応技術の開発。
- ②造形物の自動搬出・ブラスト、粉体自動供給、金属粉体分離、不要粉体自動回収機構等周辺装置の開発。
- ③造形物の精度向上に資する最適な後処理加工技術の開発。
- ④高機能複合部材の開発及び積層条件等の検討。
- ⑤粉末の高性能分級技術の検討。

6. おわりに

金属積層造形技術は、レーザー性能の向上、ソフトウェアの開発などによる装置の高機能化、粉末製造技術の向上などにより自動車、航空宇宙分野から医療分野まで非常に重要な加工技術としての地位を確立してきている。2014年2月に発表された経済産業省「新ものづくり研究会」報告書¹⁴⁾によれば、2020年には、世界における経済波及効果は21.8兆円、装置などの直接効果も1兆円以上と試算されている。積層造形装置の性能も、ここ数年で大幅に向上してきており、一層の拡大が予測される。しかしながら、積層造形装置の性能については、ユーザーからは現状ではまだ種々の面で不足な点も多く、今後は造形品の高精度化および造形速度の高速化が可能だけでなく、ユーザーフレンドリーな操作性を可能とするソフトウェアを搭載した装置開発が求められている。また、材質的にも大幅にその種類が増えてきている

が、今後はAM技術に相応しい材料設計を行っていく必要がある。

このような中、2014年度より経済産業省の国家プロジェクトが開始され、世界最高水準の次世代型産業用3Dプリンタの開発が行われている。本プロジェクトにおいて、我が国の企業に相応しい装置開発がされれば、我が国における設計・製造技術の革新がなされるものと期待される。しかしながら、ユーザー側の本技術に対する理解とものづくりにおける設計・製造技術の変革を行わなければ、本技術を有効利用したとは言い難い。とりわけ、航空宇宙産業をはじめとするものづくりの思想が大きく変わってきており、今後人材育成を含めた国としての施策が重要である。

7. 引用文献

- (1) 京極秀樹, “レビュー: 金属3Dプリンタ開発動向と今後の展開”, 近畿大学次世代基盤技術研究所報告, Vol. 5 (2014), pp.139-143.
- (2) 京極秀樹, “金属粉末レーザー積層造形技術の進展”, 溶接学会誌, Vol.83, No. 4 (2014), pp.250-253.
- (3) 京極秀樹, “研究事例1 アルミニウム合金による積層造形”, 型技術, Vol.25 (2010), pp.23-27.
- (4) 新野俊樹, “総論 積層造形技術の最新動向と期待”, 型技術, Vol.25 (2010), pp.18-22.
- (5) http://www.eos.info/systems_solutions/metal/systems_equipment/eosint_m280 (参照2013-12-20)
- (6) http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500_en (参照2013-12-20)
- (7) <http://www.concept-laser.de/en/industry/automotive/machines.html> (参照2013-12-20)
- (8) <http://cweb.canon.jp/3dsystems/lineup/px/spec.html> (参照2014-07-04)
- (9) <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-q10/> (参照2014-03-08)
- (10) ASM Metals Reference Book Third Edition edited by Baucio, M., (1993), ASM International.
- (11) Handbook of Materials for Medical Devices edited by Davis, J.R., (2003), ASM International.
- (12) Dhoole, E., Advanced Manufacturing Technology for Medical Applications edited by I. Gibson, (John Wiley & Sons, 2005), pp.79-104.
- (13) LPW社カタログ.
- (14) 経済産業省「新ものづくり研究会(平成26年2月)」報告書(2014).
- (15) Gasser, A., Backes, G., Kelbassa, I., Weisheit, A., and Wissenbach, K., “Laser Manufacturing-Laser Metal Deposition (LMD) and Selective Laser melting (SLM) in Turbo-Engine Applications-”, Laser Material Processing, No.2 (2010), pp.58-63.

小特集：3Dプリンタの可能性

Additive Manufacturing のためのソフトウェア

望月 達也*¹

MOCHIZUKI Tatsuya

キーワード：ソフトウェア，積層造形，3Dプリンター，軽量構造

software, additive manufacturing, 3D printer, light weight structure

1. はじめに

近年，家電量販店では個人向けの3Dプリンターが販売され，家庭で手軽に3D造形を楽しむことができるようになった。製造企業では小ロットの部品製造に3Dプリンターを活用する試みがある。3Dプリンターは材料から部品を削り出すものではなく，材料を付け加えて部品を造形するものである。そのため，3Dプリンターによる造形をAdditive Manufacturing（以後，AMと記す）と呼んでいる。NC工作機械とCAD/CAMで機械加工を行うように，3DプリンターとCADおよびAMのためのソフトウェア（以後AMソフトウェアと記す）で造形が行われる。本文では，AMソフトウェアについて解説する。

2. CAMとAMソフトウェア

AMのソフトウェアを解説する準備として機械加工のCAMについて説明する。図1にCAMのソフトウェアを示す。3次元CADで定義された部品形状がCAMに入力される。CAMでは，機械加工の種類ごとにソフトウェアがプログラムされている。具体的には，穴あけ加工，旋削加工，2.5軸加工，3軸加工，位置決め5軸加工，同時5軸加工などである。穴あけではプレートや3次元形状への穴加工を，2.5軸加工では荒加工，側面加工，輪郭加工などを，3軸以上の加工では曲面加工を，それぞれ実行するための工具経路（Cutter Location ;CL）

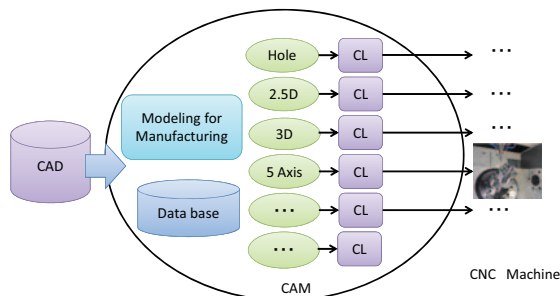


Fig. 1 Functions of CAM

原稿受付 2014年7月9日

*1 静岡文化芸術大学

〒430-8533 浜松市中区中央2-1-1

を計算する。そのCLデータをNC工作機械の制御装置に送信すれば部品は加工される。図2に同時5軸加工を示す⁽¹⁾。この同時5軸加工ではX,Y,Z方向の並進運動と，X軸まわりの回転運動（A軸）およびZ軸まわりの回転運動（C軸）を制御している。

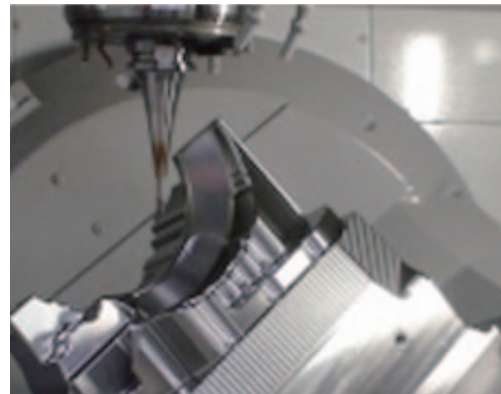


Fig. 2 5 axis CNC⁽¹⁾

機械部品の図面と加工プロセスの事例を図3に示す。機械加工ではCAMを操作する前に加工プロセスを考える必要がある。一方，3Dプリンターによる造形は，材料を除去する方法とは逆に，材料を付加する方法なので図3に示す加工プロセスを考える必要はない。3次元CADで定義された部品形状はSTLの形式でAMソフト

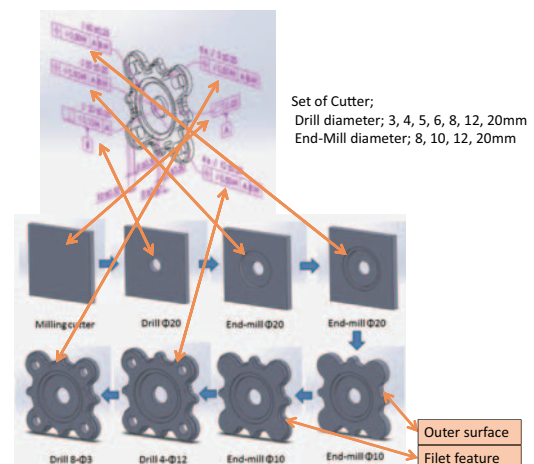


Fig. 3 Process planning for manufacturing

ウェアに入力される。市販されている3Dプリンターは造形方式が異なるので、それぞれの造形に対応するソフトウェアが開発されてきた。造形材料はポリマーと金属である。ポリマーの造形には、四つの方式、1. ポリマーを溶融しながら積層するFDM (Fused Deposition Modeling) ⁽²⁾, 2. 硬化性液体フォトポリマーをノズルからインクジェットプリンターのように噴射するPolyjet⁽³⁾, 3. UV 硬化ポリマーとランプを用いて積層するSLA (Stereolithography) ⁽⁴⁾, 4. 粉末のポリマーをレーザーで焼結して積層するSLS (Selective Laser Sintering) ⁽⁵⁾がある。一方、金属は、金属の粉末をレーザーで焼結して造形するDMS (Direct Metal Sintering) ⁽⁶⁾やSLM (selective laser melting system) ⁽⁷⁾ と、金属の粉末をノズルから噴射しながらレーザーで溶融して堆積するDMP (Direct Metal Deposition) ⁽⁸⁾がある。

DMP以外の造形は、機械加工の2.5軸加工の制御と同じである。X,Y 軸の2軸を同時に制御して最下層を最初に造形する。そして、造形テーブルがZ 軸にそって降下し次の層を造形する。これを繰り返すと部品ができる。そのとき、造形部品を支える必要がある方式(FDM, Ployjet, SLA, DMS, SLM) では、サポートも同時に造形する必要がある。

3. 専用のAMソフトウェア

ユーザのだれもが容易に造形できるように3Dプリンターには専用のソフトウェアが付属している。図4にCADと専用のAMソフトウェアおよび3Dプリンターの構成を示す。市販の多くの3Dプリンターは2.5軸制御で造形しているので、本文ではFDMによる造形を例にAMソフトウェアを解説する(図5)。

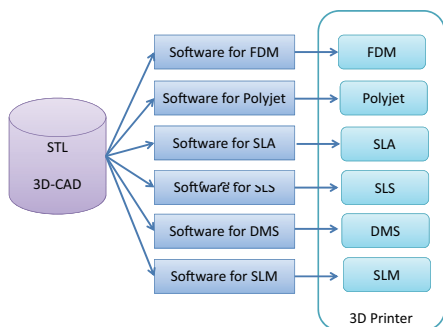


Fig. 4 Software for 3D printer

まず、3次元CADでモデリングしたデータをSTL形式で保存する。このとき、STLの解像度が低いと円柱は角柱になる。解像度が高いとファイルサイズが大きくなり造形用データを作成する演算時間が長くなる。目的にあわせて、解像度を適切に設定する必要がある(図5-1)。AMソフトウェアでSTLデータを開くとCADで定義した座標系で表示される(図5-2, CADのX,Y,Z軸と3Dプリンター

ターのZ軸のピッチ(スライスピッチ)、モデルの造形密度、サポートの造形密度を入力する。樹脂の収縮補正については3Dプリンターを校正する段階で設定している場合が多い。

サポートや造形方向を考えながらX,Y,Z軸まわりにモデルを回転させて造形物の姿勢を決める(図5-3)。そして、Z軸のピッチで造形物をスライスすると造形の各層における輪郭が求まる。次に、造形物を保持するサポートを生成する。各層におけるモデルの輪郭とサポートの輪郭が得られると、選択された造形密度に適応する造形経路を計算する。同じ造形経路で各層を積層するよりも、図5-4に示すように異なる造形経路を交互に積層する方が造形の品質は高くなる。図5-5に造形密度

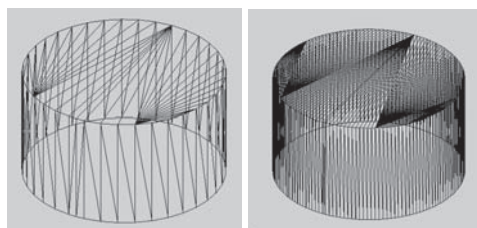


Fig. 5-1 Resolution of STL

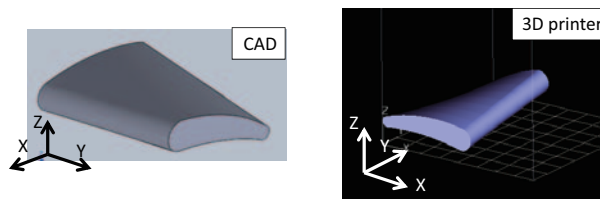


Fig. 5-2 Coordinate of CAD and 3D printer

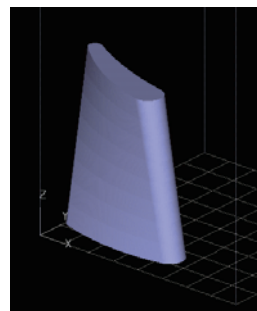


Fig. 5-3 Rotate 90 degrees in X-axis

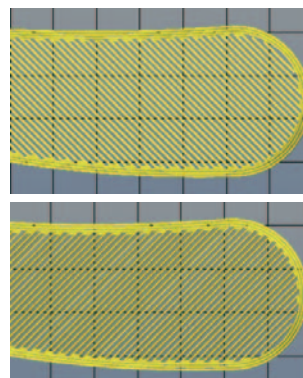


Fig. 5-4 Path

の違いによる樹脂の埋め込み状態を示す。造形スペースに造形経路のデータを配置すれば、造形のデータ処理は完了する(図5-6)。3Dプリンターに造形データを転送して、造形を開始すれば各層が自動的に積層され部品ができあがる。

図5-7に造形経路のGコードを、表1に3Dプリンターで多用するGコードとMコードをそれぞれ示す。G1は造形ヘッドを移動する命令である。例えば、G1 X42.422 Y91.309 E1.08384 F1080の定義は、現在の位置からXが42.422, Yが91.309の位置に直線的に速度1080mm/minで移動し、移動中に樹脂材料を1.08384mm押し出すことを意味する。図5-7からわかるように造形ヘッドの移動はG1命令(直線補間)のみである。それは、STL形式で形状を表現しているからである。

G4は移動を休止する命令である。例えば、G4 P100

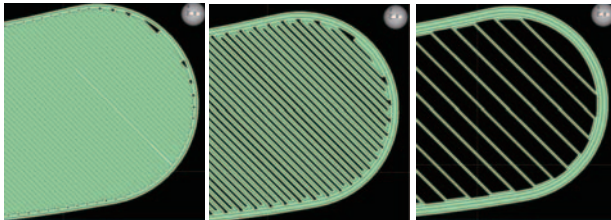


Fig. 5-5 Solid, High density and Low density

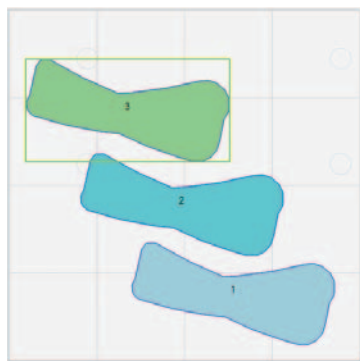


Fig. 5-6 Layout

```
G21 ; set units to millimeters
M107
M104 S270 ; set temperature
G28 ; home all axes
G1 Z5 F5000 ; lift nozzle

M109 S270 ; wait for temperature to be reached
G90 ; use absolute coordinates
G92 E0
M82 ; use absolute distances for extrusion
G1 F1800.000 E-1.00000
G92 E0
G1 Z0.500 F7800.000
G1 X41.188 Y91.800 F7800.000
G1 E1.00000 F1800.000
G1 X42.422 Y91.309 E1.08384 F1080.000
G1 X47.320 Y89.709 E1.40923
G1 X52.256 Y88.230 E1.73460
G1 X57.203 Y86.880 E2.05838
G1 X60.805 Y85.987 E2.29270
G1 X62.211 Y85.642 E2.38415
G1 X67.212 Y84.535 E2.70756
G1 X72.277 Y83.543 E3.03350
G1 X75.178 Y83.046 E3.21931
G1 X77.305 Y82.685 E3.35556
G1 X82.430 Y81.938 E3.68263
G1 X87.549 Y81.320 E4.00817
G1 X90.888 Y81.088 E4.21492
```

Fig. 5-7 G code

Table 1 G and M codes for Printer

| Movement Codes (G) | |
|-----------------------|-----------------------------------|
| G0 | Rapid motion |
| G1 | Coordinated motion |
| G4 | Dwell |
| G21 | Millimeters as units |
| G28 | Go home |
| G90 | Absolute Positioning |
| G92 | Set an origin offset |
| Special functions (M) | |
| M101 | Turn extruder 1 on forward |
| M104 | Set extruder 1 target temperature |
| M106 | Turn fan on |
| M107 | Turn fan off |
| M108 | Set extruder 1 speed |
| M201 | Turn extruder 2 on forward |
| M204 | Set extruder 2 target temperature |
| M208 | Set extruder 2 speed |

の定義は移動を100msec停止することを意味する。G21は単位をmmに設定する命令である。G28は造形ヘッドをホーム位置に戻す命令である。G90は座標を絶対値指定に変更する命令である。G92は現在の位置をホーム位置に設定する命令である。Mコードは3Dプリンターの装置(モデル材とサポート材を押し出す制御(前進, 温度, 速度, ファンのon/off))に関する命令である。例えば、M104 S270の定義はノズルの温度を270度に設定することを意味する。M106はファンをON, M107はファンをOFFする命令である。

4. 汎用のAMソフトウェア

3Dプリンターのための汎用のAMソフトウェアにはMagics⁽⁹⁾やnetfabb⁽¹⁰⁾がある。図6にCADと汎用のAMソフトウェアおよび3Dプリンターの構成を示す。以下に汎用のAMソフトウェアの機能を示す。

(1)部品形状のインポート; CAD形式(CATIA, Pro-ENGINEER, NX, Solidworks, Autodesk Inventor, Solidedge, Parasolid, IGES, STEP, IFC, JT), 3Dファイル形式(STL, X3D, GTS, OBJ, 3DS, NCM, AMF, 3MF, ZPR, PLY, VRML, BINVOX), スライス形式(SLI, CLI, SLC, SSL, SLM, CLS, USF, CLF)がある。

(2)部品形状の編集と修復; CADやCGあるいはスキャ

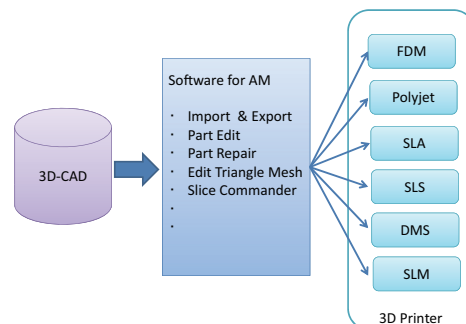


Fig. 6 Application software for Additive Manufacturing

ナーや非接触3次元測定機から出力したSTLデータには、図7-1に示すような不具合が含まれることがある。そのような部位を自動的に検出して修復することができる。それから、STLのスムーズ処理（繰り返し計算）を実行すると図7-2に示す均一なSTLデータになる。また、造形スペースより大きな部品は形状を分割する必要がある。部品の分割は造形後に部品を貼りあわせることを前提に考える。図8に部品分割の最新の事例を示す⁽¹⁾。

(3)部品のレイアウト；複数の部品を造形エリアに自動配置することができる。図9にその一例を示す。図では、自動配置計算の条件として、配置面積を最小、X方向の長さを最小、Y方向の長さを最小、センターリング、および条件のない場合を示す⁽¹⁾。

SLSによる造形ではサポートを生成する必要がないので図10に示すように造形空間に多くの部品を配置（部品の姿勢と位置）することができる。部品を3次元空間に自動配置する機能も平面配置の機能と同様に強化されて

いる⁽²⁾。この機能により材料粉末や造形時間および造形コストを削減することができる。さらに、複数の小物品の配置では造形物を包み込むボックスを図11に示すように定義することができる⁽²⁾。

(4)サポートの生成；SLS以外の造形ではサポートが必要である。サポートの自動生成はAMソフトウェアの重要な機能の一つである。特に、DMSやSLMでは、サポートとモデルが同一の金属で造形されるので、サポートはその除去と仕上げ時間に直接的に関係している。図12にモデルと点接触しているサポートの事例を示す⁽³⁾。



Fig.10 3D Layout for SLS⁽²⁾

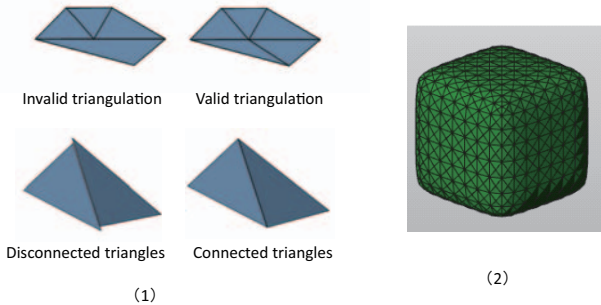


Fig 7 Refine Triangle Mesh and Smooth Triangles⁽¹⁰⁾

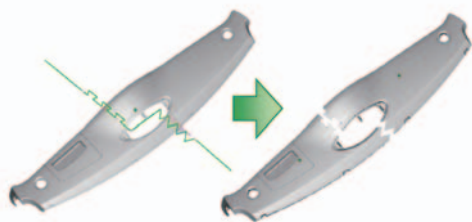


Fig. 8 Cutting⁽¹¹⁾

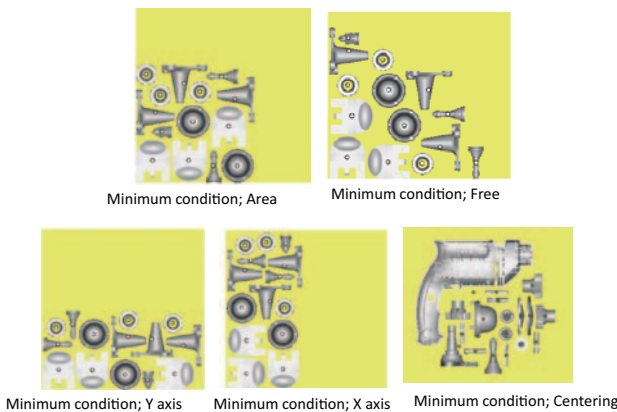


Fig. 9 Layout of parts⁽¹¹⁾

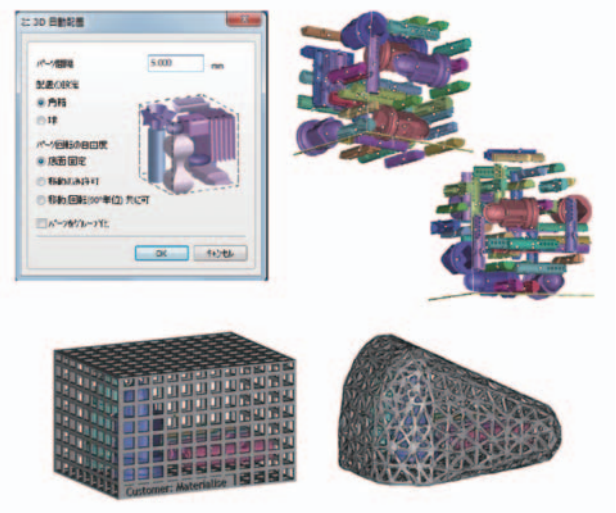


Fig.11 Sinter box⁽¹²⁾



Fig.12 Metal supports⁽¹³⁾

5. Light Weight Structure (LWS)

3Dプリンターの特徴は、NC工作機械では加工できないような形状が造形できることである。そのため、材料内部に空間を定義した機械部品や、螺旋形状のような水管を定義した金型がすでに実用化されている。近年、3Dプリンターの分野ではLWSに関心が寄せられている。2013年12月に開催されたEuro Mold 2013ではLightweight Constructionがテーマの一つになっている。図13にLWSの事例を示す。このモデルは3DCADでLWSを実現したもので、モデリングには3DCADに関する高いスキルが求められる。3DCADはソリッドをベースにモデリング手法が開発されているので、LWSのような形状をモデリングするコマンドは提供されていない。

図13に示すモデルをNC工作機械で加工することはできないが、3Dプリンターで造形することはできる。そのため、汎用のAMソフトウェアにLWSをモデリングする機能が新規に開発されている⁽⁴⁾。図14にLWSのライブラリーユニットを示す。部品の内部をこのユニットでLWSに変換すれば、軽量かつ強度や柔軟性のある部品を造形することができる。図15に示す医療部品



Fig.13 Samples of LWS

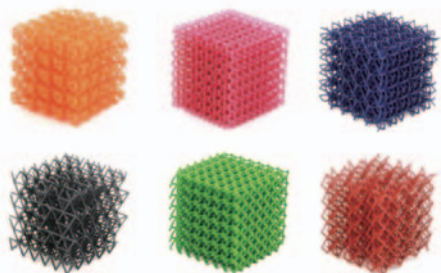


Fig.14 Lightweight structures Unit Library⁽⁴⁾

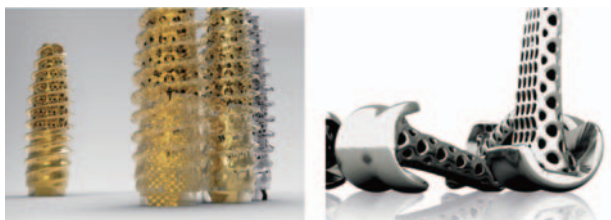


Fig.15 Medical Parts of LWS^{(15),(16)}

はLWSとソリッドの部位が混在しているものである^{(15),(16)}。ソリッドの部位は造形の後で機械加工をしている。

近年、図16に示す軽量で柔軟かつ復元力のあるTPUの粉末材料が開発され、SLSによるLWSの適用分野は服飾やバックの分野にも広がっている⁽¹⁷⁾。TPUはゴムとポリマーの中間的な性質なので、服飾デザインの新しい素材として形の表現に試行されている。



Fig.16 Highly flexible and durable material for 3D Printing: TPU 92A-1

6. 複合型3Dプリンター

工作機械の分野ではマシニングセンターの機能と旋盤の機能とを合わせた複合加工機と呼ばれる工作機械が市販されている。これと同じように、3Dプリンターと2.5軸加工の工作機械とを組み合わせた金属光造形複合加工機がある⁽⁸⁾。この加工機では、SLMで10回の積層を実行した後にエンドミルで1回の切削加工を実行する。このサイクルを繰り返して金属部品を造形加工する。この造形装置のソフトウェアは、SLMのソフトウェアに2.5軸加工のCAMが組み込まれたものになる。この方法で金型を造形すれば放電加工が不要になる。図17にLWSと人工骨の造形事例をそれぞれ示す。

DMPによる3Dプリンターは、金属粉末を噴射するノズルと造形テーブルを同時に制御する5軸CNCシステムである。そのため、造形装置のソフトウェアには、5軸加工のCAMと同様な5軸制御のモーションパスを生成する機能がある。LENSTM850-R⁽¹⁹⁾はDMPの一つである。LASERTEC 65⁽²⁰⁾はDMPによるAMと機械加工のミーリングを複合したものである。freeformer⁽²¹⁾はポリマーの造形を5軸モーション制御で実現したものである。

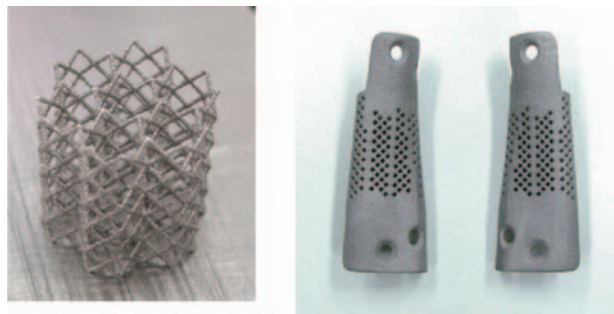


Fig.17 Sample of LWS⁽⁸⁾

7. 今後のAM用のソフトウェア

AMでは造形時間の短縮, 造形表面の品質, 造形材料の多様化がいつも要求されている。現在, 3Dプリンターの多くは, 試作部品や小ロットの部品の製造に使われている。造形時間の短縮はコスト削減や量産部品の製造に関連するので, 各造形方式でいろいろな取り組みが実施されている。FDMではモデル材とサポート材の切り替え時間を短縮するためにサポートをモデル材で造形することで造形時間の40%削減を確認している。また, 三角柱を並べたような中空構造でモデル材を使ってサポートを造形することで造形時間を30%削減できることも確認している。今後は, FDMにおいてもサポートが不要な造形を実現するために5軸制御のモーションプラスが必要になると考えている。

3DプリンターやAMソフトウェアの今後の展望は, 工作機械や金型では加工や成形ができないLWSの部品製造および, 3Dプリンターと加工機の複合化であると考えている。

8. 引用文献

- (1) C&GSYSTEMS INC, 5-AXIS CAM FUNCTIONS, 5軸加工,
http://www.cgsys.co.jp/g/products/CAM-TOOL/5axis_cam.htm, (参照 2014-07-09).
- (2) Stratasys, FDMテクノロジー,
<http://www.stratasys.co.jp/3d-printers/technologies/fdm-technology/>, (参照 2014-07-09).
- (3) Stratasys, PolyJetテクノロジー
<http://www.stratasys.co.jp/3d-printers/technologies/polyjet-technology/>, (参照 2014-07-09).
- (4) 3DSYSTEMS, Stereolithography (SLA),
<http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/stereolithography-sla/>, (参照 2014-07-09).
- (5) 3DSYSTEMS, Selective Laser Sintering (SLS),
<http://www.3dsystems.com/quickparts/prototyping-pre-production/selective-laser-sintering-sls/>, (参照 2014-07-09).
- (6) 3DSYSTEMS, Metal 3D printing for industrial applications
<http://www.3dsystems.com/3d-printers/production/prox-300/>, (参照 2014-07-09).
- (7) SLM SOLUTIONS, the selective laser melting system SLM® 500 HL,
http://stage.slm-solutions.com/index.php?slm-500_en, (参照 2014-07-09).
- (8) OPTOMECC, LENS Technology,
<http://www.optomec.com/printed-metals/lens-technology/>, (参照 2014-07-09).
- (9) Materialise,
<http://www.materialise.co.jp/>, (参照 2014-07-09).
- (10) netfabb,
<http://www.netfabb.com/>, (参照 2014-08-03).
- (11) Materialise, Magics18 リリース! : 最先端の技術を盛り込み, ツールとモジュールを強化,
<http://www.materialise.co.jp/latest-releasemagics-18-1> (参照 2014-07-09).
PDF; Magics18 新機能, 改良点,
http://co.jp.office.materialisebu.iglobe.be/sites/default/files/public/Japanese%20website/SAM/magics_18_-_whats_newjp_0.pdf, (参照 2014-07-09).
- (12) Materialise, Sinterモジュール
<http://www.materialise.co.jp/magics-sintermodule/>, (参照 2014-07-09).
- (13) Materialise, Magics SG+モジュール
<http://www.materialise.co.jp/magics-sgmoziyuru/>, (参照 2014-07-09).
- (14) Mariam Mir, 3-maticSTL Lightweight Structures, Materialise,
http://software.materialise.com/sites/default/files/public/SAM/Products/3-matic/lightweight_structures__presentation_website.pdf, (参照 2014-07-09).
- (15) EOS GmbH, Electro Optical Systems, Additive Fertigung in einem Arbeitsgang mit EOSINT M 280 (Quelle: Within), Herausforderungen der Medizinbranche,
<http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/66918c41e39c1b11/d05335391d6a4957d64dc29be4905963/medizinbroschuere.pdf>, (参照 2014-07-09).
- (16) netfabb, Selective Space Structures (3S) - from Solids to Structures in Seconds
<http://www.netfabb.com/structures.php>, (参照 2014-07-09).
- (17) Materialise, Launch of the First Fully-functional Flexible Material in 3D Printing
<http://www.materialise.com/press/launch-of-the-first-fully-functional-flexible-material-in-3d-printing/>, (参照 2014-07-09).
- (18) 株式会社松浦機械製作所, LUMEX Avance-25,
<http://www.matsuura.co.jp/japan/contents/products/lumex.html>, (参照 2014-07-09).
- (19) OPTOMECC, LENS™ 850-R, Proven Industrial Additive Manufacturing System for Repair, Rework, Modification and Manufacturing,
http://www.optomec.com/wp-content/uploads/2014/04/LENS_850-R_datasheet.pdf, (参照 2014-07-09).
- (20) DMGMORI, LASERTEC 65 Additive Manufacturing, ALL IN 1: Laser Deposition Welding & Milling -additive Manufacturing in Milling quality,
<http://en.dmgmori.com/products/lasertec/lasertec-additivemanufacturing/lasertec-65-additivemanufacturing/>, (参照 2014-07-09).
- (21) ARBURG, A 5-axis 3D printer from ARBURG,
<http://www.3dprinter.net/a-5-axis-3d-printer-from-arburg/>, (参照 2014-07-09).

9. 用語

IGES; Initial Graphics Exchange Specification

STEP; Standard for the Exchange of Product Model Data

IFC; Industry Foundation Classes

JT; Jupiter File Format

STL; Surface-Tessellation-Language File

STL (ASCII) ; Surface-Tessellation-Language File (ASCII)

STL (color) ; Surface-Tessellation-Language File with color

X3D; Extensible 3D-ASCII File

X3DB; Extensible 3D-Binary File

GTS; Gnu Tessellated Surfaces File

OBJ; Wave Front OBJ File

3DS; Autodesk 3D Modeling Format

NCM; netfabb Compressed Mesh

AMF; Additive Manufacturing File

3MF; 3MF Basic Microsoft File

ZPR; Z-Print File

PLY; Stanford Polygon Format

VRML; Virtual Reality Modeling Language

BINVOX; Binary Voxel Format

SLI; Slice Layer Interface (EOS)

CLI; Common Layer Interface (EOS)

SLC; SLC File (3D Systems, Arcam)

SSL; Stratasys Layer File (Stratasys)

SLM; SLM Build File (SLM Solutions)

CLS; Concept Laser Slice File (Concept Laser)

USF; Universal Slice File

CLF; Common Layer File (Arcam)

小特集：3Dプリンタの可能性

金属積層造形技術の量産加工展開

中野 禪*¹
NAKANO Shizuka

佐藤 直子*¹
SATO Naoko

清水 透*¹
SHIMIZU Toru

キーワード：積層造形, 金属, 粉末, 空間造形, 空間構造, レーザー溶融

Additive Manufacturing, Metal, Powder, Space creation, Space structure, Selective Laser Melting

1. 緒言

開発が進み、実用化段階に到達しつつある積層造形技術は、昨今の3Dプリンタブームも相まって認知度も上がり、大きく期待されている。その一方、現状ではまだ課題も多く、完成された技術とは言い難い。先行開発されていた樹脂系は多少大きな拡がりとなっているが、後発の金属やセラミックスに関しては、まだまだこれからという段階である。しかしながら、他の加工法では作れない、複雑で機能的な構造を作製可能な事から、医療や航空機、宇宙産業等を中心に利用が開始されている。本稿では、積層造形技術での産業応用、特に量産を目指しての現状と可能性についてまとめてみる。冒頭にも記載した通り、技術はこれからさらに進展するはずであり、本稿は「現時点で」という注釈を記載しながら、未開発技術の位置づけを検討してみたい。

2. 既存技術

2.1 3Dプリンタと積層造形

最初に3Dプリンタ、積層造形という整理を行いたい。これは技術として何を求めるか、という意味で本稿の位置づけを明確にするものである。

昨今のブームで言う「3Dプリンタ」は定義があいまいであり、時に「個人向けの安価な樹脂造形装置」であったり、「デジタルデータを直接造形するシステム」であったりする。さらに利用先としても、個人向けから、コミュニケーションツール、試作、ラピッドプロトタイプ、量産までと広い違いがある。そのため、特に3Dプリンタと表現した場合、人によってその内容が異なっていると考えた方が自然なほど違いがある。「3Dプリンタ」は狭義には3次元の加工装置であり、機械装置を単独で示す言葉ともなる。また広義には、デジタルデータから立体形状を作り出す技術ともいえ、この場合は迅速に3D形状を作り出す加工技術との組み合わせであり、積層造形に限らず切削加工等も含めて考える方が適当ともいえる。「3Dプリンタ」は技術を言い表す言葉とし

原稿受付 2014年7月8日

*1 (独)産業技術総合研究所

〒305-8564 つくば市並木1-2-1

ては現在不適格と言え、故に本稿では、「積層型造形」技術を「量産」に利用することを目的とした記載として検討を進める。

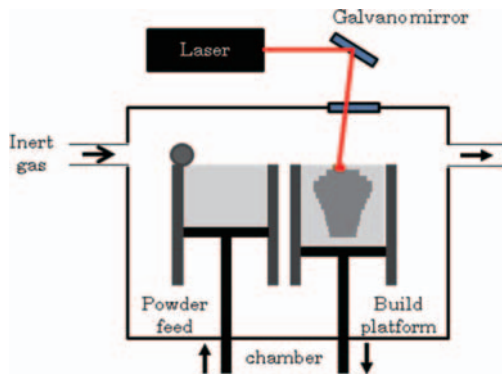
「積層型造形」技術として見た場合、技術的には材料を積み上げ、形状を作り出す手法である。既存の加工方法である、切削や研削といった塊の材料を減らしながら形を作る方法、鋳造や成型といった材料の体積を変えずに形状を変える方法、とは作り方の点から方向性が異なり技術の特徴を表している。削る、変形させるに、加えるという新しい加工法として開発が進んでいる。

2.2 積層造形技術の種類

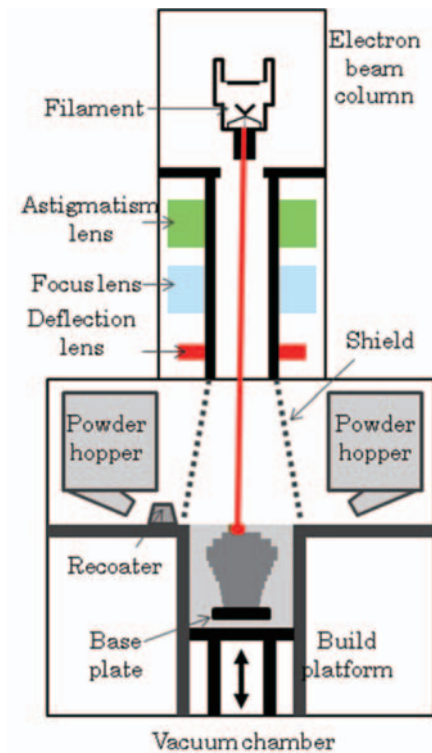
積層造形手法は、対象が樹脂の場合、光造形法から発展し、熔融型積層造形(FDM:Fused Deposition Modeling)、インクジェット法(MJP:Material Jet Printing)、粉末床熔融型(PBF:Powder Bed Fusion)等多様な方式が開発されてきた。それぞれ利用できる材料が異なり、作れる形状に差があり、技術の分岐が進んでいることが分かる。一方金属の造形については、1990年代後半から、シート積層法や樹脂材料に金属粉を混ぜ込んだFDM手法から始まり、PBFを用いた装置、指向エネルギー体積法(DED:Directed Energy Deposition)等が開発されている。樹脂に比べると対応装置の種類は少なく、市販装置のほとんどはPBFであり、わずかにDEDがある。金属製品を作る技術としては、PBFやMJPを用いた砂型造形を用いて鋳造する技術も実用化されている。図1に主流である、PBFの2方式

Table 1 Classification of three types of powder bed fusion systems

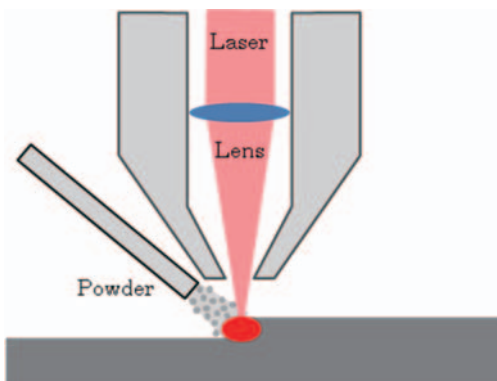
| | Environment | |
|-----|--|--|
| | Inert gas flow | Vacuum |
| SLM | EOS Concept laser SLM solutions Renishaw 3Dsystems Matsuura Kikai | <i>Developing</i> Kyusyu Univ. ASPECT/AIST |
| EBM | - | Arcam |



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 Kinematic image of Three metal additive manufacturing system; (a) selective laser melting, (b) electron beam melting, and (c) directed energy deposition.

とDEDの概要図を示す。PBFが現在主流の方式であるが、PBFは表1に示すように概ね3種に分類できる。一つは熱源(光源)の違いであり、電子ビームを用いたものと、レーザーを用いたものの2種。また環境の違いとして、不活性ガス中で造形する場合と、真空中で造形する場合である。2×2で4通りと思われるが、電子ビームは空気中では吸収され利用できないため、真空下が必然となる。レーザー+真空の組み合わせは現在市販装置ではなく、研究開発装置として、九州大学や図2に示した我々の開発した⁽¹⁾装置がある。

市販の金属積層造形装置としては、レーザー溶融型をEOS⁽²⁾、Concept Laser⁽³⁾、SLM⁽⁴⁾、Renishaw⁽⁵⁾、3Dsystems⁽⁶⁾、松浦機械⁽⁷⁾等から、図3に示した電子線溶融型はArcam⁽⁷⁾から販売されている。小型の装置は100mm角を切るような装置で、主に宝飾品などを対象



Fig. 2 Prototype system of selective laser melting system in vacuum condition. Developed by ALPROT, ASPECT and AIST⁽⁸⁾



Fig. 3 Arcam AB Q20 system; commercial an electron beam melting equipment.⁽⁷⁾

にしている。平均的には250mm角程度の大きさの装置が各社から販売され、大型装置としては500×280×325程度まである。

DED装置はTRUMP社からヘッドが発売されているほか、昨年からの話題として、DMG森精機が開発し発表した。松浦機械とDMG森精機はどちらも工作機械メーカーということもあり、積層型造形が苦手とする表面の加工を切削加工機と複合化する手法を取って解決を図っている。

2.3 FDM金属積層造形装置の特徴

FDM造形装置を比較してみる。光源の違いとして電子線とレーザーがあるが、電子線は数十keVに加速した電子を照射し、その運動エネルギーを熱量として材料に与える。加速電圧は侵入深さに影響し、電流量（単位時間当たりの電子数）との積算で出力となる。電子の運動制御には電磁気的な手法を用いることが可能であり、8000m/sという高速に走査することを可能としている。欠点としては、電子の流れ、即ち電流であるため、加工対象物が絶縁体であると電子のチャージが移動できずに溜り、結果後から飛来する電子が曲げられ加工できなくなる。一方レーザーはフォトン作用であり、物質内部での相互作用も、波動的な取扱いと考えられる。そのた

め、出力もさることながら波長が重要であり、対象材料に対し、吸収効率等が波長で定まる。光は直進性が高く方向を変換させるためには鏡を用いたガルバノメーターによる手法が一般的である。鏡という質量を持つ物質を動かすため走査速度は限界があり、市販装置でも10m/s程度が限界である。光は質量が無いに等しいため、反射等の課題もあり、吸収効率は全般的に低い。その一方取扱い安い、ガス雰囲気中等でも利用できる。絶縁体への照射も可能という利点を持つ。

金属積層造形では、金属粉末原料を融点まで加熱し融かす。金属は活性であり、酸素中（大気中）では酸素を取り込み酸化してしまう。そこで加工雰囲気制御が必要であり通常真空中か不活性ガス中で実施する。レーザー装置は真空、不活性ガス中とどちらも利用可能である。真空の効果として、酸素の絶対量が少なく酸化防止になる他、飽和蒸気圧が低いことから、粉表面に付着した水分、汚染、酸素、窒素などの除去効果、断熱効果、平均自由行程が長く、拡散速度が速いことから、放出された原子がすぐに加工部から離れることが挙げられる。その一方、蒸気圧が低い材料は、僅かな加熱でも蒸気化し、周囲に飛び出すため、チャンバー内、レーザーウィンドウ等へのデポジションを引き起こす。

市販装置が電子線+真空、レーザー+不活性ガスのため電子線・レーザーの特徴と、真空・不活性ガスの特徴が混乱して表現されている。電子線・レーザーはあくまで熱源であり溶融までの加熱の違いとなる。別の見方をすれば、融けてしまえば材料への影響は小さい。一方環境の違いは融けるまでの過程に加え融けた後の凝固や、さらに熱を失うところまで続く。即ち長時間連続して与える影響となる。不活性ガス中で酸素濃度を0.1%以下とした場合と、真空中での酸素濃度0.02ppmの差はプロセスの時間中ワークへの影響を与える。後述するが積層造形は長時間のプロセスであり、その間を通しての差を生み出す。電子線装置とレーザー装置という比較がなされることがあるが、真空対不活性ガスという位置づけになっているのが現状である。レーザー真空装置の販売が開始されたら、環境の違いを切り分けて検討すべきである。

2.4 造形の特徴と留意点

積層型の造形手法として、その加工の特徴は材料を付け加えながら形状を作り上げることにある。既存の切削系の加工は大きな塊上の材料から周囲の材料を削り取り新しい表面形状を作成していく手法である。そのため加工を行うことは材料の体積を減らす。次に樹脂や板金系の成型加工では切削系で作られた金型という塊の隙間に材料を押し込み、形を変える。そのため形を変えているが、作っている形状は金型の転写であり、表面の形状を作っているといえる。材料の体積は変化しない。積層型造形技術の積み上げる加工は、工業的には肉盛溶接等の

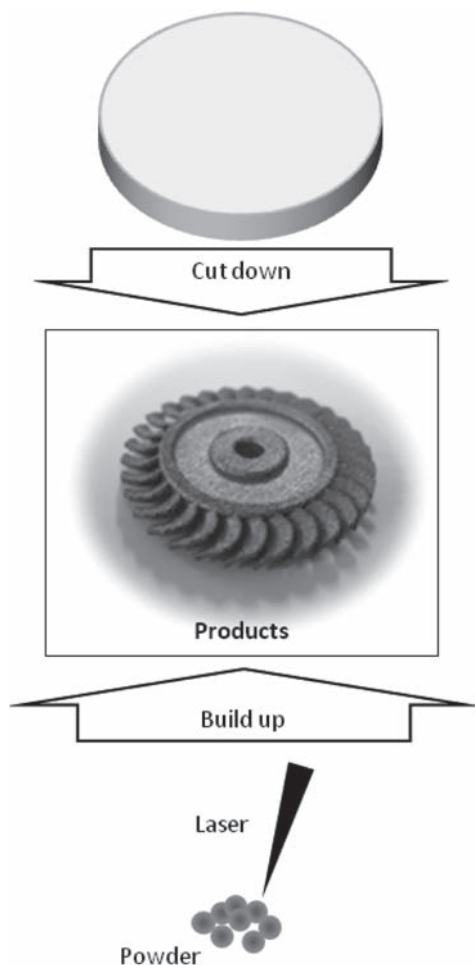


Fig. 4 Comparison cutting process and powder bed fusion

一部が対応していたが、最終的な造形まで行うことはなかった。ただし、目を転じて建築ではきわめて一般的な手法である。後述するが、何を作るか、という観点において、建築を参考にすることは有効である。

積層型の造形として、三つの重要な課題を記しておく。一つには造形体積と工程数の関係であり、もう一つは残留応力との関係、また表面粗さなどの造形精度である。

積層型の造形技術では、作成しようとする部品については無の状態から最終的な造形体積までを全て加工する必要がある。別の加工手法で作成した土台となる構造に、必要な構造だけを付加して作成する事は可能であるが、それでも加工量は造形体積全体となる。後処理で表面の仕上げなどを行うためには、仕上げしろを余分に作成する必要がある。たとえば1Lという体積の構造を作成するためには、1L全体を0から作り上げる必要がある。

参考までに、1Lの体積を直径50 μ mの球体の原料を溶かして作成するとする。単純に素材の球体の体積で除算すれば、必要な原料数は得られ、およそ150億個の原料が必要であることがわかる。一つの粒を1 μ sで融かしたとしても、 1.5×10^4 sの時間すなわち4.2時間が必要である。PBFでは層の数だけ積層を実施する必要があり、この時間が、たとえば1L \sim 10cmの立方体としてみれば、積層厚さ50 μ mとして2000回必要。1回6秒として実に3.3時間必要である。合計7.5時間となる。通常1 μ sでは溶融できないので、実際はさらに長い時間が掛かる。積層造形では、工程数を削減するのは造形体積を減らすことである。すなわち外形にせよ、内部構造にせよ極力造形体積を減らすことが有効である。切削系の構造では表面を作るためバルクの構造となるが、積層造形では無駄にバルク構造を作ることは有効ではない。

次に、図5に示すPBFで発生する残留応力について考慮する。金属のPBFをベースに示す。金属PBFでは、原料粉を敷き詰め造形領域だけを溶融凝固させて形状を作成する。この時原料粉を敷いた状態は粉の間には隙間がある状態、すなわち充填密度・嵩密度があり、完全な体積は無い。これを溶融凝固するため、100%の密度の製品を作ると嵩密度分必ず縮小する。積層では、上の層、上の層と造形していくため、上の層の造形で縮小が必ず起こる。さらに上層を溶融・凝固するとき、既に造形が終了している下層は凝固状態である。すなわち下層は温度が低下しており、その上で融点まで昇温していることになる。融点からは凝固過程で降温していくため線膨張係数に応じた収縮が起こる。熱プロセスにおいても上層が収縮という応力の発生が生じる。プロセス上必ず後から作る層が収縮を起こすため、下に凸のそりを発生させる。通常造形後に熱処理を実施して応力緩和を計ることとなる。一方、できるだけ応力を緩和する造形が求められることも確かである。嵩密度の収縮、熱収縮ともに面積が拡大すれば全体の収縮量が大きくなり、特に形状の外側での応力が高まること分かる。無駄に面積を生

じるような構造、造形長さが長くなるような構造は向かず、できるだけ小さく分離されているような構造が応力の緩和には有効である。なお、PBF以外の手法であっても、同様の残留応力については発生するので考慮が必要である。

造形の工数も、残留応力であっても、無駄な造形を避け最小の造形を行っていくことが望ましいことが分かる。

最後の表面形状性であるが、図6に示したように、PBF等の積層造形ではかならず積層厚さのステップがあ

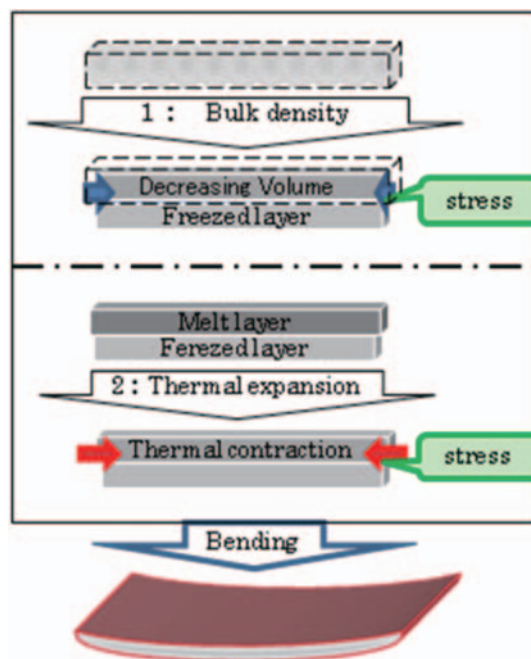


Fig. 5 Mechanism of remaining a residual stress in products. A case of PBF.

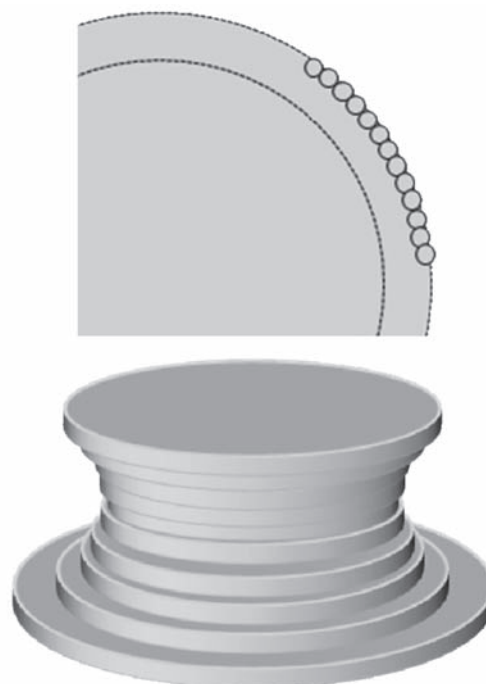


Fig. 6 Surface roughness of powder bed fusion relate to the powder size and layer thickness.

る。面内についても、端部は粉の大きさに決まる。粉が結合するかしないか、層のステップ、どちらもデジタル的である。精度を向上するためには、ステップサイズを小さくする、すなわち粉の大きさを小さくし、積層厚さも小さくする方法となる。しかしこの手法では造形に必要な原料数が増え、そのまま工数が増える。粗加工と高精度の仕上げ加工を組み合わせることはPBFなどの現状の積層造形では行にくい。プロセスのさらなる高度化が求められる部分である。

3. 何を作るか～空間造形の考え方

積層造形における最大の課題として、何を作るか、という点がある。以前は、すぐに形が作れるから、ラピッドプロトタイプとして、また試作への適用、金型の作成等が言われていた。しかしながら、一部の試作等以外はほぼ成立していない。前述のプロセスの特徴や留意点などを考慮すると、これらの対応はそもそも向いていない事が分かる。たとえば、ラピッドプロトタイプングや試作では、切削や成型で作っていた構造をそのまま作りたいというのが基本形である。しかしながら、加工工程数でみて、切削や、成型の一部だけを見た場合には工数は増え、原料コストも高い点から成立することが難しい。さらに、製品の設計も、表面を作るための切削や成型加工でバルク構造体が基本設計であるのに、バルク構造は作りにくくかつ表面も切削・成型程高品位にはならない。早く、安く作りたいという思想では合わないのである。また金型を作る場合、一般的な金型はバルクの塊であり、その点でも造形で作成するのは工数の点でも応力の点でも厳しい事がわかる。加えて積層型造形は金型では作れない複雑な形状を持つ製品を生み出せるのに、その技術を使って古い金型を作るのは時代に逆行している。しかしながら一部の金型において生産性向上に効果を得ている事実もある。これは金型を作ったというより、内部に冷却水管等を最適に配置したと考えるのが正解であり、新しい金型技術として捉えるべきである。

では、何を作るか、という命題については、やはり特徴を生かす事が重要とある。積層という特徴から、造形

の体積が小さい構造であること、造形の単位寸法が小さく応力集中を避ける構造となる。造形体積が小さいというのは小さい部品という意味ではなく、見かけの体積に比べ実体が小さいということとなる。ここで先述の積層造形が一般的な建築の分野を考える。建築では大きなビルやスカイツリーのような構造物を積み上げて作っている。建造物は実態としての建物のための構造ではなく、建物の中に空間を用意し、その空間を機能として利用している。みかけの大きさは非常に大きい、必要な機能（空間）を作成し、そこに必要な強度を保ち有意義な人工物としている。工業部品についても見かけの大きさより実体の構造を小さくし機能としての空間を造形していくことに長けているのである。空間を作り内部に機能的な空間を作っている例として、先の冷却水管を用意した金型であったり、図7に示したような、人工骨としてポーラス（多孔質）構造であったり、これからの利用が期待されるラティス構造である⁹⁾。ポーラスもラティスも実態構造はさることながら空間の設計が重要な造形物であり、さらに通常の切削や成型加工では自在に作成する事は不可能と言える。唯一積層造形だけが少ない制約で作成できる。いままでの加工方法では、実体の3次元形状を作成する事が重要であったが、積層造形では、機能的な3次元の空間を作成し利用することが可能となったのである。さらに空間というのは表面積（比表面積）が大きく、表面相互作用を利用するような部品へも有効な機能性・付加価値を生み出す事が可能である。

4. タービンへの応用

ヨーロッパでは、ジェットエンジン向けの部品、タービンブレードや燃料インジェクタ等に関して積層造形による量産事業が動き出している。ここで注意が必要な点として、既存の部品の作り方を変えただけではない、という点がある。積層造形に合わせて設計の変更を行い、積層造形だから作れる形状を生み出して、その結果性能の向上を図る、という転換が重要である。ヨーロッパの量産事業でも、組み立て工程を経ていたインジェクタを直接製造し工数の削減を計り、しかも燃料・空気の流路

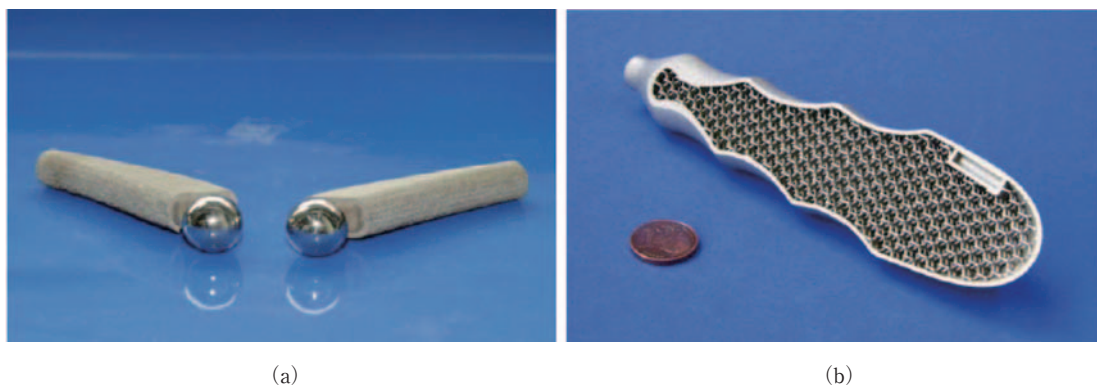


Fig. 7 Products samples⁹⁾; (a) a surgical implant with porous shell and dense core, (b) a handle for a surgical instrument with honeycomb structure.

を最適化し、混合効率を向上していく。タービンブレードも冷却配管系を最適設計にし、さらに肉厚の最適化等を計り、ラティス構造等により高強度での軽量構造の実現を狙える。このように空間の造形技術は空間ならではの流体への応用、熱工学への適応は非常に有効なジャンルである。さらに運動機械として見た時慣性質量を最小にし、かつ強度は増加することも可能である。切削だから使っていた理屈の設計を早期に見直し、積層ならではの設計にすることで、最終的なタービン性能を向上することを旨とする。タービンは流体を相手にし、熱を利用し仕事を行うので、仕事の変換や制御のためにブレードをはじめとした固体構造物が存在していると考えられる。とすればそもそもが空間技術であり、表面の相互作用を利用した道具であるタービンと、自在な3次元空間を作成する積層造形は実に結合性が高い技術であると考えられる。80%は置き換えが可能とも言われていて置き換えによる性能向上が大いに期待できる。既存の設計で部品を加工する技術として見るとコストも性能も合わない結果で使えない、という結論を出したがるのであるが、設計を変えることにより全く違う解を得ることができる。

5. 材料に関する検討

最後に重要な課題である材料についても記す。金属の積層造形ではまだ高々10種強の材料しか利用できていない。その一方、鋳造用の材料や、バルクの板材と同様の材料を利用したいのにできないという意見がある。しかしよく考えてみれば、既存のまま置き換えたいから今の材料が使いたいのである。既存の材料は既存の加工技術に合わせて進化した材料なのであり、鋳造用の材料はすが入りにくい、流れ性が良い、などの特徴を持った材料である。切削で用いる材料は、素材材段階までの作りやすさや、加工時の加工性が優れている材料である。近年自動車で使われるようになったハイテン鋼にしても、成型加工が可能のように作られてきた材料であると言える。一方これらの材料が積層造形という加工にあっているかは疑問である。積層造形では急加熱・急冷却というプロセスであり、熔融時には液体として固体との濡れ性や凝固時の結合性などが重要であるし、粉としての敷きやすさや嵩密度の向上が重要課題である、そこに加え光や電子の吸収効率が高い、などの特性が求められる。このようなプロセス上の条件を考慮すれば、最終的に得られる組織は均一化された切削用のバルク材料とは一線を画したものになる。例えば、X-Y-Zの積層方向に応じた異方性を有する材料である。また積層造形で利用できる材料は切削や成型では加工が困難になる可能性もある。しかし逆手にとれば積層造形で加工できれば、切削や成型で加工ができなくても良いという考え方もできる。これらを踏まえれば積層用に特化し調整した素材を開発していくことは極めて重要である。切削も成型もできなく

て良いと割り切れば専用の材料でより付加価値の高い材料を生み出していくことも可能である。DEDを用いてTiAl材料を傾斜機能に作製する報告¹⁰⁾も成されているが、切削・成型では加工困難な材料・構造であっても積層造形では加工が可能である。今まで加工できなかったので使えなかった材料など、実際は有効な材料が隠れている可能性は非常に高い。

6. 結言

金属の積層造形に関して、ヨーロッパ系企業から5年遅れているという意見がある。人によっては複数のメーカーから造形用の装置が販売され、その台数が現在圧倒的であり、国際市場を席卷していることを挙げる。しかしながら造形装置や造形技術はまだ未完成でありこの差を大きいとは感じない。その一方海外の製品メーカーが設計を変えて、積層造形の特性を生かした高付加価値製品へシフトを始めていることは真実彼我の差を感じる場所である。既存技術の置き換えとして見るのではなく、機能的な空間構造を造形する空間造形により最高性能の製品を生み出す技術として、開発を進めていくことが今後の展開に重要である。そのためには、材料・設計技術を合わせて高め、最終的な製品でどれほど高機能化、高付加価値化を実現できるかが特に鍵となる。熱・流体システムは、空間（流路）を利用し、表面における相互作用を利用するシステムであり、積層型の造形技術とは相性が良い。我々も利用技術を高め世界に先行した有意義な技術となるように開発を進めたい。本稿での空間造形という考え方とその先の高付加価値製品への道を拓くポイントが今後の開発の助けになれば幸いである。

7. 参考文献

- (1) 中野禪, 堀場欣紀, 松崎邦男, 佐々雅祥, 清水透, 萩原正, 「レーザー応用粉末積層造形法による金属成形装置の開発」平成24年度塑性加工春季講演会講演論文集 (2012) pp227-228.
- (2) <http://www.eos.info/en/>, (参照2014-07-01).
- (3) <http://www.concept-laser.de/>, (参照2014-07-01).
- (4) <http://www.stage.slm-solutions.com/>, (参照2014-07-01).
- (5) <http://www.renishaw.com/>, (参照2014-07-01).
- (6) <http://www.3dsystems.com/>, (参照2014-07-01).
- (7) <http://www.matsuura.co.jp/japan/contents/products/lumex.html>, (参照2014-07-01).
- (8) <http://www.arcam.com/>, (参照2014-07-01).
- (9) Claus Aumund-Kopp, Matthias Busse, Juan Isaza, Frank Petzoldt, "Medical Instruments Produced by Selective Laser Melting -Chances and Possibilities", Proceedings DDMC2012, pp.140-147.
- (10) Shizhkovsky I, Missemer F., Smurov I., "Direct metal deposition of functional graded structures in Ti-Al system", Physics Procedia 39 (2012), pp.383-391.

小特集：3Dプリンタの可能性

産業用ガスタービンにおける3Dプリンタの活用

小牧 孝直*¹
KOMAKI Takanao原口 英剛*²
HARAGUCHI Hidetake

キーワード：ガスタービン，3Dプリンタ，付加製造技術，3D-CAD

1. 概要

近年、新しいものづくり技術として3Dプリンタへの期待が高まっている。背景として、米国政府が製造業の戦略的分野と位置付けたことにより各国の政府・企業が精力的に取り組み始めたこと、個人向けの低価格機の販売により産業の裾野が広がったことが挙げられる。

当社では産業用ガスタービンの開発・製造において2000年から3Dプリンタを活用しており、本稿では当社における3Dプリンタの活用の取り組みを紹介する。尚、3Dプリンタは付加製造（Additive Manufacturing）技術と国際的には呼ばれているが、本稿では敢えて3Dプリンタと標記する。

2. 三菱ガスタービンの開発経緯

ガスタービンコンバインドサイクル（GTCC）の高効率化にはガスタービンの高温化が重要な役割を果たしている。当社は、1984年にタービン入口温度1100℃級M701D形ガスタービンを開発して以来、GTCC発電プラントの高効率化、低エミッション化、高信頼性化を目的とした技術開発を進め、タービン入口温度1600℃級でGTCC熱効率61.5%以上も達成可能となるM501J形を2011年に開発した（図1）。

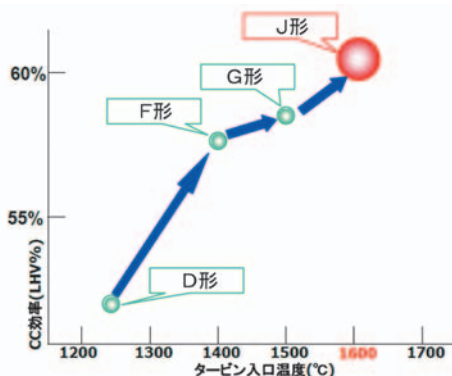


Fig. 1 Progress in the development of Mitsubishi gas turbine models

原稿受付 2014年7月7日

- *1 三菱日立パワーシステムズ(株) ガスタービン技術本部
高砂ブレード・燃焼器製造部 生産技術課
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1
- *2 三菱重工(株) 技術統括本部 高砂研究所 製造技術研究室
〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1

ガスタービンの高温化にはタービン翼や燃焼器などいわゆる高温部品の性能や信頼性の向上は必須であり、特に高温部品のメタル温度を制限値内に抑えることは重要で、そのため高温部品の構造は複雑化してきている（図2，3）。

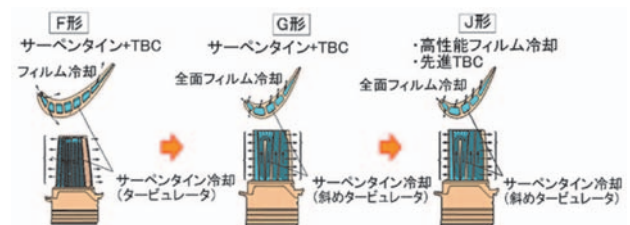


Fig. 2 Transition of the turbine cooling structure (row #1 blade)

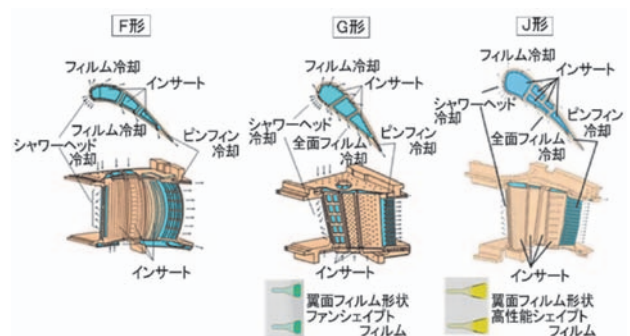


Fig. 3 Transition of the turbine cooling structure (row #1 vane)

3. 3Dプリンタの原理

3Dプリンタは、3D-CADデータから2Dスライスデータを作成し、造形機にて1層1層造形し3D-CADデータの形状を成形する造形技術である（図4）。

3Dプリンタの特徴として、板金・鋳物部品などで必要となる金型設計・製作や、削り出し加工部品などで必要となる治具の設計・製作を必要とせず3D-CADデータから直接造形できるため、早く形のできるメリットがある。またインプットとなるデータがデジタルデータのため、実寸での造形だけでなく縮小・拡大しての造形が容易であり、産業用ガスタービンのような大型構造物を造形する場合に縮尺を容易に変更できるメリットは大きい。

一方、3Dプリンタの造形ではオーバーハング部（図

4) を支持するためにサポート材を付加する必要があり、付加したサポート材を造形後に物理的・化学的手法により除去する後処理が必要となる。また、造形時間を低減するためにはサポート材の体積を低減する必要があるが、3D-CADデータをどの方向で積層すればサポート材を最小化できるのか、サポート材を最小化した場合にモデル材を支持できる強度は確保できるのか、といった造形時間の短縮を図る一方で、造形方向によっては造形品質に影響があるためサポート材の低減を犠牲にして造形物の品質を確保するといった最適な造形方案を決定する必要がある。

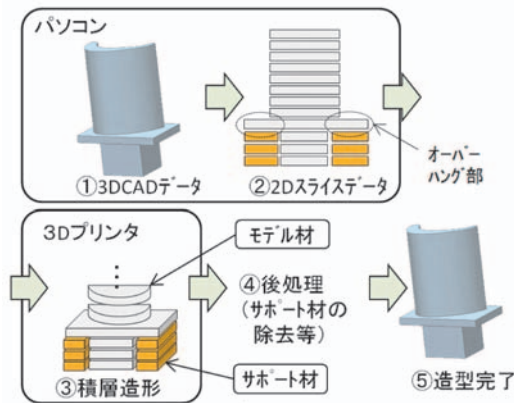


Fig. 4 The principle of the 3D printer

4. 当社での3Dプリンタの導入

ガスタービンの開発・製造に対して、当社では2000年から3Dプリンタの活用を開始した。活用当初は造形メーカーに3D-CADデータを送付し光硬化性樹脂で造形していたが(図5)、造形コストが高く、依頼してから納品までに時間が掛かるといった課題があり、そのため造形対象を最小限に抑える必要があった。

3Dプリンタ活用の具体的な用途は後述の5章に記載するが、社内で3Dプリンタの活用が進み優位性が確認されるにつれて、より低コスト・短納期で造形したいというニーズが増加したため、2007年に熱可塑性樹脂で造形するストラタシス社(米国)のDimension SST1200を導入した。熱可塑性樹脂で造形するDimension SST1200を選定した理由として、精度では光硬化性樹脂よりも劣るが熱可塑性樹脂でも要求値を満たせること、熱可塑性樹脂の方が強度では優位であり活用範囲を広げることが出来ること、造形物の重量が光硬化性樹脂より軽くハンドリング性が良いこと、装置の導入コスト・運用コスト・造形コストが光硬化性樹脂より優位であったことなどが挙げられる。

社内に3Dプリンタを設置することで情報セキュリティが向上することも、3Dプリンタの活用が進んだ要因として挙げられる。設計者が3Dプリンタで作りたいモデルは開発品であり機密性が非常に高く社外に3D-CADデータを提出すること自体を嫌う。社内に装

置を導入したことによりデータや造形品のやり取りが全て社内ですべて完結出来るため、設計者が気軽に3Dプリンタを活用し始め3Dプリンタの活用拡大が進んだ。

社内に3Dプリンタを導入しその活用が更に広がった結果、燃焼器部品などの複雑な溶接構造物を部品ごとに色分けして造形したい、更に精度良く薄物を造形したいという熱可塑性樹脂では実現できないという造形ニーズが高まった。そこで石膏粉末材料をバインダで固めてフルカラーで造形可能な3DSYSTEMS社(米国)のZPrinter650を導入した。

一方、Dimension SST1200では造形サイズが小さくガスタービン部品を実寸で造形するには限界があり、大型造形物を造形する際は複数に分割して造形したものを接合する必要があったため精度の低下を招いていた。性能試験などの用途で精度良く一体で大型造形物を造形したいというニーズに対応するため、ストラタシス社(米国)のFORTUS900mcを導入した。



Fig. 5 Photo-curing resin molded model

Table 1 3D printers installed in the company

| 機種 | Dimension SST1200 | ZPrinter650 | FORTUS 900MC |
|---------------------------------|--|---|---|
| 外観 |  |  |  |
| 造形分類 | 材料押出し | 粉末床溶融結合 | 材料押出し |
| 造形サイズ [*] X×Y×Z(mm) | 254×254×305 | 254×381×203 | 914×609×914 |
| 造形材料 | ABS樹脂 | 石膏 | ABS樹脂, PC等 |
| 特徴 | ・小型の造形機 ・産業用途では廉価に導入可能 | ・フルカラー造形 ・高解像度により微細な構造も造形可能 | ・造形サイズが大 ・多種の材料で造形可能 |

注) 造形分類は ASTM International の定義による

5. 3Dプリンタの用途

前章に記載の通り3Dプリンタは3D-CADデータから直接成形可能な技術であり、産業用ガスタービンにおける用途として開発リードタイム短縮・開発コスト低減、製造現場での治具としての利用、教育・プレゼン品質の向上が挙げられる。

5.1 開発リードタイム短縮・開発コスト低減

ガスタービン開発における3Dプリンタの利点として、設計形状を早く・正確に製造で確認できる点が挙げられる。製造現場では3D-CADデータの利用はCAMで作成したNCプログラムの確認などに限定されており、これまでは設計が3D-CADデータから2次元の図面を作成して初めて設計の意図する形状を確認出来ていたのに対し、3Dプリンタを用いることで設計が3D-CADデータを作成した翌日にはモデルを直接手に取って確認することが可能となる。タービン翼のような複雑な内部構造もモデルを分割し造形することで、製造での形状確認が容易となり早期に製造性を検証することが可能となる(図6)。また3Dプリンタでは造形物の縮尺を容易に変更できることから、実物は数メートルもある車室の加工性を縮小モデルを用いて視覚的に検討し、加工上の懸念事項があれば設計にフィードバックすることで早期に課題を解決することが可能となる(図7)。このようにガスタービンの開発で3Dプリンタを用いることで、設計・製造がコンカレントにガスタービンを開発することができ、これにより開発期間の短縮と開発時点からの製品品質の作り込みが可能になる。



Fig. 6 Model of a turbine blade

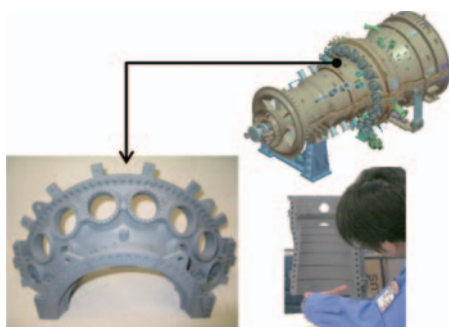


Fig. 7 Verification of workability of a casing

新設計時の性能試験においても同様に3Dプリンタを用いることで開発期間が短縮可能となる。燃焼器の開発において性能試験の一つとして燃焼特性確認のための気流・流量試験を実施するが、これらの試験では製品同等の強度や耐久性は要求されずボルト等で締結可能な強度があれば十分試験に使用することができる。これまでは3D-CADデータから図面を作成し、金型や治具を設計・製作してから試験用部品を製作する必要があったが、

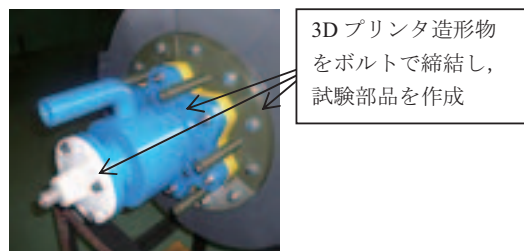


Fig. 8 Performance test of combustor parts

3Dプリンタを用いることで金型・治具製作が不要となり、開発コストの低減や開発期間を短縮することが可能となる。

5.2 製造現場での治具としての利用

試験用部品と同様に、3Dプリンタ造形物を治具に適用することにより製品の3D-CADデータに基づく正確な治具を早く・安く製造現場へ提供可能になる。現状の3Dプリンタの能力では機械加工で要求される精度を実現することは困難ではあるが、板金部品の溶接位置合わせなどの要求精度であれば、治具としての活用が十分可能である。また自由曲面を有する治具を設計する場合、従来であれば管理断面の座標値を図面に記載し、その座標値を用いて治具製作していたのに対し、3Dプリンタでは3D-CADデータのみで形状定義・製作が可能となり、複雑な図面指示や読解を省略することが可能になる。

当社では、タービン静翼のインサート溶接の罫書き治具(図9)、放電加工の水受け治具(図10)、ロボットの教示治具、計測点の位置決め治具などで3Dプリンタで造形した治具を製造現場で幅広く活用している。

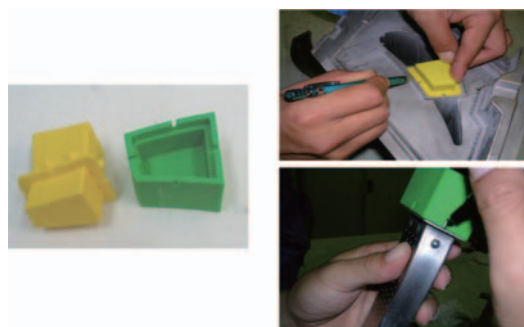


Fig. 9 Scribing jig for welding of turbine vane inserts

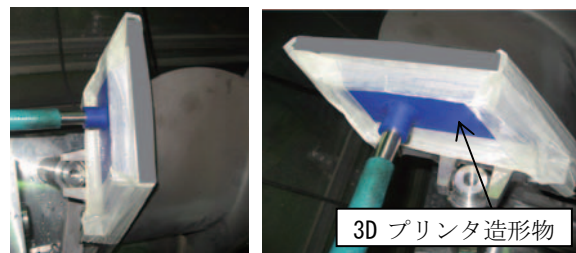


Fig. 10 Water receiving jig for electrical discharge machining of turbine vanes

また当社ではガスタービンの製造を中国やタイなどの海外拠点でも実施しており、海外拠点においても3Dプリンタで造形した治具を活用している。グローバルで同じ品質を確保するには製造プロセスは当然のことだが治具も重要な要素となり、3Dプリンタで造形した治具を必要な時に必要な拠点に早く供給することで、グローバルでの品質の確保に寄与している。

5.3 教育・プレゼン品質の向上

当社では社内でのガスタービンの構造説明や海外パートナーのメンテナンス教育に3Dプリンタで造形した模型を用いている（図11, 12）。ガスタービンのような複雑な構造を図面や文章のみで理解することは難しく、ガスタービンの縮尺模型を用いて説明することで構造の理解が容易となる。

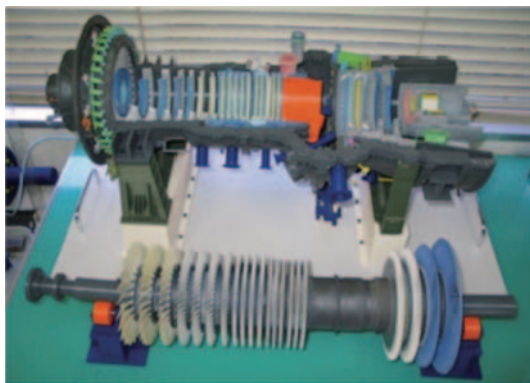


Fig. 11 Gas turbine model (M701F type)



Fig. 12 Gas turbine model (M501J type)

3Dプリンタ造形物を用いて新設計部品の形状・構造の説明を実施することで、図面寸法や画像のみでの説明と比べて形状・構造の理解が容易となるため、当社では3Dプリンタ造形物を用いて客先説明し、プレゼン品質の向上においても活用している。

6. 結言・謝辞

本稿では産業用ガスタービンの開発・製造における3Dプリンタの活用事例を紹介した。

現時点では3Dプリンタの装置開発や要素技術の研究において日本は欧米に大きく後れを取っているが、総合的・中核的な技術研究開発組織が設立されたことや国産3Dプリンタの装置開発が国家プロジェクトで進められていることから、今後3Dプリンタは益々発展していくことと予想される。

本稿が産業用ガスタービンにおける3Dプリンタの活用の参考になれば有難い。最後に、本稿執筆のお声をかけて下さったガスタービン学会誌編集委員の方にこの場をお借りして謝辞を表したい。

7. 引用文献

- (1) 新ものづくり研究会 報告書, "3Dプリンタが生み出す付加価値と2つのものづくり", 経済産業省 (2014), http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/seisan/new_mono/pdf/report01_02.pdf, (参照2014-05-12).
- (2) 由里雅則, 正田淳一郎, 塚越敬三, 伊藤栄作, 羽田哲, "1600℃級J形技術を適応した発電用高効率ガスタービンの開発", 三菱重工技報Vol.50 No.3 (2013), pp.2-10.
- (3) 安威俊重, 正田淳一郎, 伊藤栄作, "J形ガスタービン技術を適用した高効率/高運用性ガスタービンM701F5形の開発", 三菱重工技報Vol.51 No.1 (2014), pp.2-10.
- (4) 新野俊樹, "付加製造(Additive Manufacturing)技術の概要", プラスチック成形加工学会誌 第26巻4号 (2014), pp.142-147.

小特集：3Dプリンタの可能性

ラピッド・プロトタイピング（RP）による精密铸造用铸型及び 中子の迅速造型技術の開発

三島 勝則*¹
MISHIMA Katunori

キーワード：ガスタービン，精密铸造，セラミック中子，3Dプリンター，レーザー
Gas Turbine, Investment Casting, Ceramic Core, 3D Printer, Laser

1. 開発の背景及び目的

本研究開発は、平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業（サポイン）として採択され、国からの委託事業として管理法人日本铸造協会の下で、キングパーツ(株)、妙中鋳業(株)、伊藤忠セラテック(株)、(株)アスペクトのコンソーシアムにより実施したものである。

精密铸造の川下産業である航空機・産業用ガスタービン、及び自動車等の産業では、新規開発リードタイムの短縮により市場競争力を強化する要求が強い。しかし精密铸造産業では、顧客の要求から金型設計・製作、及び铸造方案等の検討に時間が掛り、川下産業が要求する開発リードタイムに対応できないでいる。

特に現在精密铸造で採用されているラピッド・プロトタイピングでは、ワックスパターンの代わりに光造形、又は粉末焼結により製作された樹脂模型を用いる為、工期が1～2週間必要なことと、この方式ではセラミック中子を用いた铸型のラピッド・プロトタイピングの実現が不可能であった。

本題では、ラピッド・プロトタイピング（RP）技術を用い、耐火材料粉末を焼結して精密铸造用中子と铸型を铸造方案を含めて一体同時成形し、そのまま金属を注湯できる铸型を製造し、試作品を短納期で完成させ、川

下産業へ実体铸物として提供し、開発リードタイムの短縮を図る取組みについて報告する。

2. 研究開発組織と役割分担

平成21年にサポイン案件の採択を受け、日本铸造協会を管理法人とした研究開発体制を発足させ、研究開発を開始した。主幹企業はキングパーツ(株)で、同じ精密铸造メーカーである妙中鋳業(株)、耐火材メーカーである伊藤忠セラテック(株)、及びラピッド・プロトタイプ成形機（LS装置）のメーカーである(株)アスペクトが参画した。またアドバイザーとして、ユーザーサイドの(株)IHI キャスティング、及びラピッド・プロトタイピングに精通している東京大学生産技術研究所新野研究室にも参画して頂いた。

3. 新規開発技術の開発課題と開発目標

3.1 今回の開発方法と従来の研究開発との相違

精密铸造業界では、現在川下産業からの開発リードタイム短縮要求にこたえるために、

- ・ 铸物設計段階から電子情報を交換し、コンカレントエンジニアリングを行う。
 - ・ 3次元CAD/CAMを用いて金型設計・製作の期間を短縮する。
 - ・ 試作に先立ち、铸造シミュレーションにより铸造方案の絞り込みを行う。
- などの方策を駆使して、新規品リードタイムの短縮に努めている。

また光造形（SLA）技術あるいは粉末焼結積層造形（レーザー・シンタリング LS）技術を用いて短時間にプラスチックモデルを迅速作成し、これらをワックス模型の代わりに消失模型として用い、この後は通常の造型作業工程にて铸型を製作し、金型製作せずにサンプル铸物を製作している。

しかし、この方式でも造型作業を含めると2週間以上のリードタイムが必要となり、また複雑なセラミック中子を必要とする铸物には適用できず、これら高度に複雑

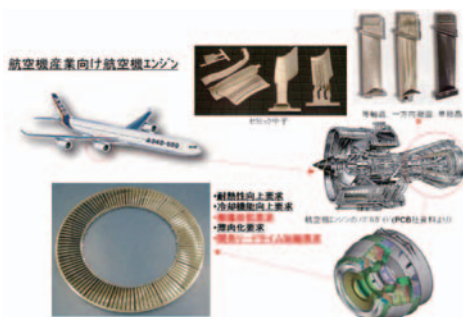


Fig. 1 The use of a typical investment casting (Hollow blade with core)

原稿受付 2014年7月1日

* 1 キングパーツ(株) 铸造部
〒720-0002 福山市御幸町下岩成879-1

な鋳物のリードタイムの抜本的な短縮には直接貢献できていない。

本研究は、ラピッド・プロトタイピング (RP) 技術の中でも粉末焼結積層造形 (LS) 技術を用い、耐火粉末材料を直接焼結できる装置を開発する。

また、これと並行して、耐火物粉末材料の開発を行い、レーザーで焼結しやすく同時に精密鋳造用中子及び鋳型に適用できる材料を開発する。次に精密鋳造品の提供を迅速に実現する。更には、精密鋳造鋳型と中子を一体で造型出来る技術の開発と確立を実施して、新製品開発のリードタイムの短縮を実現するものである。図2から図4にリードタイム短縮の要因を模式図として示す。

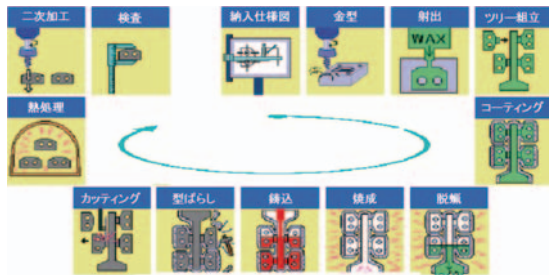


Fig. 2 The conventional investment casting method

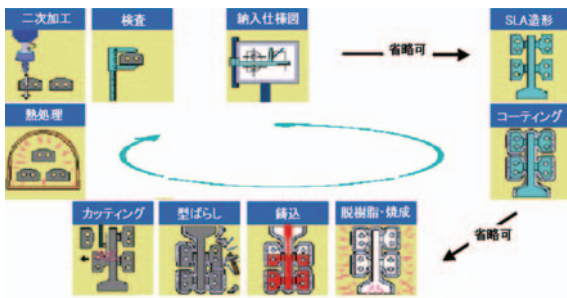


Fig. 3 Investment casting method with SLA

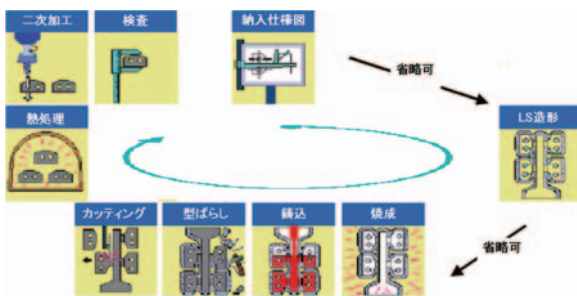


Fig. 4 Direct investment casting method with LS

当該開発では、基本的には樹脂成型用の粉末焼結積層造形装置をベースとして使い、耐火物の仮焼結を可能とするため、高出力レーザー (CO₂レーザー400W) を搭載できるようにすると同時に、耐火物粉末材料が樹脂に比べ比重が重い為、装置の耐荷重を大きくする改良を行う。この設備を用いて精密鋳造メーカーにてレーザービームによる一次焼結及びその後の二次焼結により高温注湯に耐える精密鋳造中子や精密鋳造鋳型を直接造型出来るようにする。

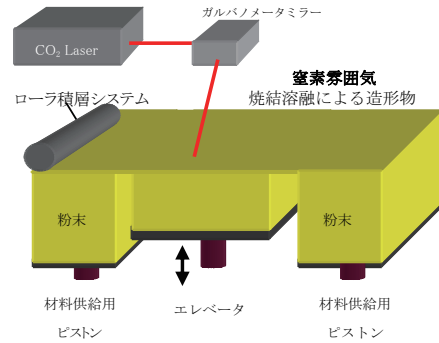


Fig. 5 The outline of Laser Sintering (LS) equipment

3.2 研究開発の技術的課題

- 1) 粉末焼結積層造形装置の改良開発 {高出力レーザー (CO₂レーザー400W) の搭載, 及び耐火粉末材料の搭載, 及び耐火粉末材料の搭載の為の改良}
- 2) 耐火材料の材質と粒子形状及び粒度分布の適正化
- 3) 耐火材料粉末の流動性の最適化
- 4) 造形温度とレーザー出力の適正化
- 5) 走査パターンの適正化
- 6) 上記改良に伴う装置ソフトウェアの改良
- 7) 焼結していない砂の除去方法の開発
- 8) 二次焼結条件の設定開発
- 9) 造形された中子の物性改良のための配合材料の検討と評価
- 10) 中子の造形試験
- 11) 鋳型の造形試験
- 12) 中子及び鋳型の実用化試験 (得られた鋳物の評価)

3.3 研究開発の方法と分担

3.3.1 ラピッド・プロトタイピング (RP) 装置の開発・改良 (アスペクト)

- 1) 400WCO₂レーザー及び搭載耐荷重改良設計変更
- 2) 造形温度とレーザー出力の適正化
- 3) レーザ走査パターンの適正化
- 4) ソフトウェアの改良

3.3.2 耐火物粉末材料の開発 (伊藤忠セラテック)

- 1) 耐火材料材質と粒子形状及び粒度分布の適正化
- 2) 耐火粉末材料の流動性の最適化
- 3) 造形後の中子及び鋳型は他の物性改良のための配合材料の選択と評価

3.3.3 造形試験 (キングパーツ)

- 1) テストピースによる一次焼結及び二次焼結条件の確立
- 2) 中子 (比較的小物) の造形試験
- 3) 一体化鋳型 (比較的大物) の造形試験

3.3.4 精密鋳造試験 (妙中鋳業・キングパーツ)

- 1) 中子 (比較的小物) の鋳造試験及び鋳物の品質評価
- 2) 鋳型 (比較的大物) の鋳造試験及び鋳物の評価
- 3) 鋳造後の砂の除去方法の改善

3.4 開発テーマごとの目標値

- 1) RP装置の開発改良
造型品の大きさ：鋳型外径寸法300mmW×300mmL×500mmHを実現する設備の開発
- 2) 耐火物粉末材料の開発
鋳型強度：破壊係数 (MOR) で一次焼結後 3 MPa以上、二次焼結後10MPa以上を得る材料を開発
- 3) 造型試験
リードタイム短縮：中子造型24時間以内、鋳型48時間以内
- 4) 精密鋳造試験
鋳物の表面粗さ：Ra6.3程度を確保

4. 開発の成果

4.1 既存のRP装置の改良

(株)アспект社製SEMplice550を改造：30W CO₂レーザーを米国SYNRAD社製400W CO₂レーザーに換装した。レーザー出力を既存設備の30Wから400Wへ換装した後の稼働中にレンズやミラーが加熱により焼損する問題が発生した。これに対する改善項目として：

- 1) 光学系全てに粉塵対策のカバーを設置
- 2) レーザ光軸のアライメントの再確認・修正
- 3) レーザ光幅を一定の大きさに規制し、レンズの外側にレーザーが漏れるのを防止
- 4) レーザ・ウィンドウを軽量化し、メンテナンスを容易化

以上の対策を実施した結果、400Wフルパワーでの連続稼働が可能になった。

4.2 ソフトウェアの改良

鋳物に要求されるあらゆる形状を形作るための造形機能を拡張するため以下のソフトウェアを開発し追加導入した。(個別の機能の詳細については省略)

- 1) 多重輪郭描画機能
- 2) 多重塗りつぶし描画機能
- 3) 造形物固定用ベース板使用機能
- 4) 3次元オフセット機能

以上のソフトウェアの開発・導入により、中子及び鋳型の一体造形が可能となった。

4.3 耐火物粉末材料の開発

本開発課題のRPに用いる耐火物粉末材料として、材質としてはセラミック中子用途に用いられている熔融シリカを選定するとともに、RPに特有な必要特性について検討した。

4.3.1 耐火物粉末材料の材質と粒子形状及び粒度分布適正化

既存RP装置で用いられる樹脂粉末は平均33 μ m程度で、粒の揃った球状に近い粉末であることを確認した。市販されている熔融シリカ粉末の中で、これに近い性質を持った材料を選定して以降の実験を行った。

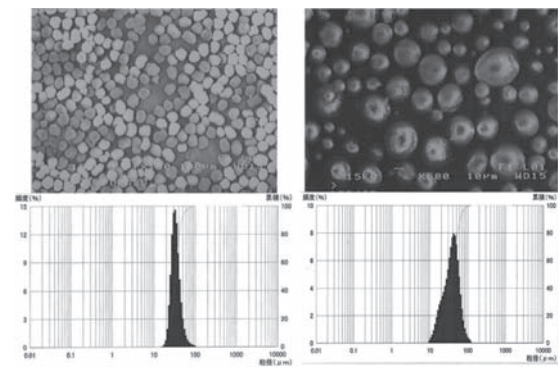


Fig. 6 Resin Powder for RP Fig. 7 Spherical silica powder

4.3.2 耐火物粉末材料の流動性の最適化

耐火物粉末材料の流動性を評価する指標として安息角を選択し (図8)、各種耐火物粉末材料を用いて「リコート」性を評価した (図9)。

この結果「リコート」性に関する因子として、耐火物粉末の平均粒径と安息角が良い指標であることが確認できた (図10)。

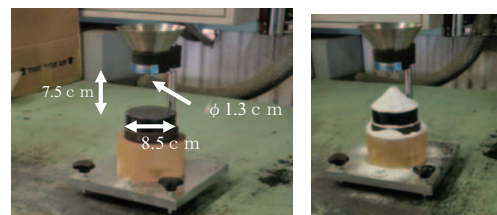


Fig. 8 Angle of repose measurement of refractory powder material

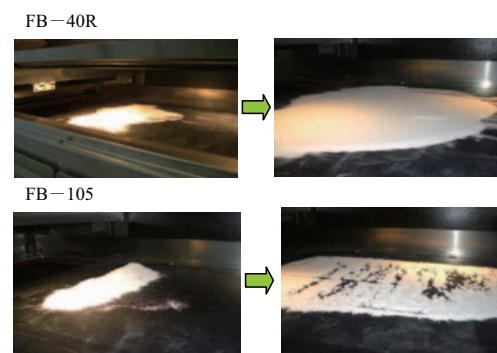


Fig. 9 Recoating test of fused silica powder

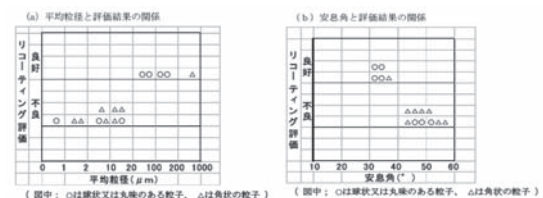


Fig.10 The factors for recoating state

4.4 造形試験

テストピース (TP) による一次焼結及び二次焼結条件の確立。

4.4.1 研究内容

材料開発にて配合選定したシリカ系 (FB-40R)、ア

ルミナ系 (AX-116) 各耐火物粒子と有機バインダー A の混合材料を用いて RP 装置により熱的特性 TP (ペンダント状), 機械的特性 TP (板形状) 測定用の一次焼結体を製作し, 二次焼結後の特性を確認, 及び無機バインダー含浸, 二次焼結後の特性を確認した。

(ア). 熱的特性把握試料 ($\phi 25\text{mm} \times t6\text{mm}$ ペンダント形状) の作成, 及びこれを用いた熱的特性の把握

(イ). 機械的特性把握試料 ($W25\text{mm} \times t6\text{mm} \times L100\text{mm}$) の作成, 及びこれを用いた機械的特性の把握 (有機バインダー: バインダー A とナイロンを配合して実施した)

(ウ). 一次焼結を二次焼結において強度を上げるため, 各種無機バインダーを含浸させ, その後で二次焼結を行う試験を実施した。

4.4.2 熱的特性の把握

シリカ系 (FB-40R), アルミナ系 (AX-116) 各耐火物粒子と有機バインダー A の混合材料を用いて RP 装置により熱的特性把握試料 (ペンダント形状, 図11) の測定結果を表1に示す。測定方法はレーザーフラッシュ法による。

レーザー焼結条件 (熱的特性把握試料)

- ・レーザーパワー: 115W
- ・走査速度: 5.04m/S
- ・走査間隔: 0.15mm
- ・積層ピッチ: 0.12mm
- ・二次焼結温度: 1300°C

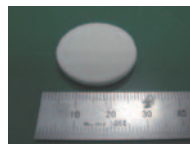


Fig.11 Sample for thermal characterization

Table 1 Result of thermal properties measurement

| 製法 | | 熱伝導率 (W/(m·K)) | | 比熱 (J/(g·K)) | | 密度 (g/cm ³) |
|-----------|-------|----------------|-------|--------------|-------|-------------------------|
| 精密鋳造鋳型 | 初層側 | 常温 | 0.907 | 常温 | 0.77 | 2.09 |
| | | 250°C | 0.973 | 250°C | 0.957 | |
| | | 500°C | 0.96 | 500°C | 1.01 | |
| | | 750°C | 1.033 | 750°C | 1.063 | |
| | | 1000°C | 1.193 | 1000°C | 1.193 | |
| | バック層側 | 常温 | 0.793 | 常温 | 0.79 | 1.91 |
| | | 250°C | 0.83 | 250°C | 0.97 | |
| | | 500°C | 0.83 | 500°C | 1.053 | |
| | | 750°C | 0.997 | 750°C | 1.183 | |
| | | 1000°C | 1.143 | 1000°C | 1.303 | |
| LS法による試験片 | 含浸無し | 常温 | 0.22 | 常温 | 0.55 | 1.35 |
| | | 500°C | 0.3 | 500°C | 0.85 | |
| | | 1000°C | 0.38 | 1000°C | 0.92 | |
| | 含浸有り | 常温 | 0.25 | 常温 | 0.49 | 1.54 |
| | | 500°C | 0.36 | 500°C | 0.78 | |
| | | 1000°C | 0.49 | 1000°C | 0.89 | |

ラピッド・プロトタイピング (RP) 法にて製作した TP は, 熱伝導率・比率とも低い結果となった。これは, 焼結体の密度が低い為, 熱の伝わりが遅いものと考えられる。

4.4.3 機械的特性の把握

機械的特性把握には, 有機バインダー 2 種類を実施した。シリカ系 (FB-40R), アルミナ系 (AX-116) 各

耐火物粒子と有機バインダー A の混合材料とシリカ系 (FB-40R), アルミナ系 (AX-116) 耐火物粒子と有機バインダー (ナイロン) の混合材料を用いて RP 装置により機械的特性把握試料 (板形状, 図12) を製作し評価した。測定結果を図13に示す。

レーザー焼結条件 (機械的特性把握試料)

- ・レーザーパワー: 115W
- ・走査速度: 5.04m/S
- ・走査間隔: 0.15mm
- ・積層ピッチ: 0.12mm
- ・バインダー: 有機バインダー A

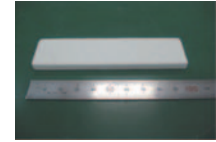


Fig.12 Sample for mechanical characterization

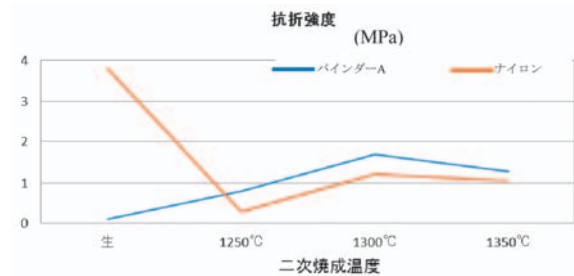


Fig.13 Flexural strength of the secondary sintering temperature

4.4.4 無機バインダー含浸による抗折強度の改善

一次焼結体を無機バインダーに含浸処理させた後に二次焼結 (1300°C) させた (抗折強度向上の目的)。コロイダルシリカの種類は SiO₂ 濃度 40% (平均粒径 18nm) と SiO₂ 濃度 50% (平均粒径 25nm) の 2 種類を実験した。含浸条件は減圧状態で 0.5 時間含浸した。その結果を図 14 に示す。

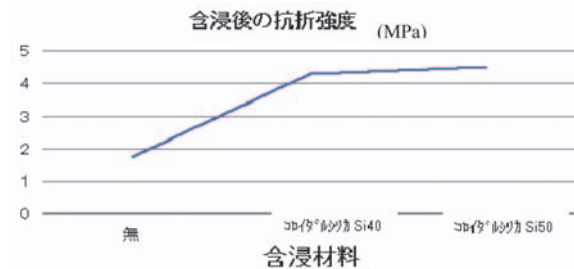


Fig.14 Flexural strength of the impregnation

コロイダルシリカを含浸することにより, 含浸処理をしないものと比較して Si40, Si50 とも抗折強度が 2 倍以上 (1.7MPa→4.3~4.5MPa) 高くなった。

4.4.5 研究成果

材料開発結果, 熱的特性把握及び機械的特性把握から現状での適正材料は, シリカ系 (FB-40R), アルミナ系 (AX-116) 各耐火物粒子と有機バインダー (A) の混合材料であり, 二次焼結温度は, 1300°C が適切であると判明した。また, コロイダルシリカを含浸することにより抗折強度が 2 倍以上 (1.7MPa→4.3~4.5MPa) 高くなり, 含浸処理の効果は十分あることが把握された。強度目標にはまだ足りないが, 鋳造試験が出来る強度にはなったものとする。

5.1 中子 (比較的小物) の造形試験

5.1.1 研究内容

材料開発, 及び特性実験結果をもとにラピッド・プロトタイプング (RP) 装置によりL250mm中子の一次焼結体を製作。その後, 無機バインダー含浸 (コロイダルシリカ), 乾燥後二次焼結実験を実施し二次焼結条件を確立する。完成したL250mm中子の品質確認 (3Dデータと比較) を行う。

- 1) 中子の造形試験
- 2) 製作品の品質確認
- 3) 製作した中子の特性調査として, 寸法精度ならびに中子の溶出性を調査する。

5.2 250mm中子の造形実験

シリカ系 (FB-40R), アルミナ系 (AX-116) 各耐火物粒子と有機バインダー Aの混合材料を用いてRP装置により製作した。

レーザ焼結条件

- ・レーザパワー: 115W
- ・走査速度: 5.04m/S
- ・走査間隔: 0.15mm
- ・積層ピッチ: 0.12mm
- ・バインダー: 有機バインダー A
- ・積層時間: 6時間 (2個)

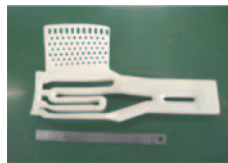


Fig.15 Primary sintered body

5.2.1 二次焼結実験

一次焼結体を無機バインダー含浸, 乾燥後ムライトビーズ (平均粒径110 μ m) に埋め二次焼結を実施した。決定した二次焼結条件, 及び二次焼結完了した中子を図16に示す。

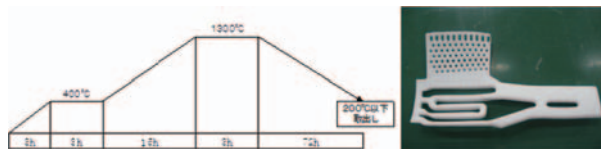


Fig.16 Secondary sintering conditions and the secondary sintered core

5.3 一体鋳型の一次焼結品の製造

シリカ系 (FB-40R), アルミナ系 (AX-116) 各耐火物粒子と有機バインダー Aの混合材料を用いてラピッド・プロトタイプング (RP) 装置により一体鋳型を製作する。

レーザ焼結条件

- ・レーザパワー: 115W
- ・走査速度: 5.04m/S
- ・走査間隔: 0.15mm
- ・積層ピッチ: 0.12mm
- ・バインダー: 有機バインダー A
- ・積層時間: 24時間 (2個)



Fig.17 Primary sintered body (cutting)

5.3.1 二次焼結実験及び結果

一次焼結体を無機バインダー含浸, 乾燥後アルミナボール (粒径1~2mm) に埋め二次焼結を実施した。

二次焼結条件は割れが予測されるためL250mm中子よりも更に冷却時間を長くした。二次焼結条件を, 及びその結果を図18に示す。

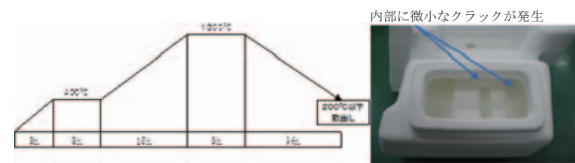


Fig.18 Secondary sintering condition of integranted mold and the result

6. 精密鋳造実験

RP装置にて製作した中子及び鋳型に溶湯を注湯し, 出来上がった鋳物の品質を確認し, 試作品として使用に耐えるサンプルが迅速に製作できる条件を確立する。最終的には表面粗さRa6.3程度の精密鋳造品を作製し, 新規開発リードタイムの抜本的短縮を実現 (中子造形24時間以内, 鋳型48時間以内の実現) する。

6.1 RP中子 (比較的小物) を用いた鋳造試験及び鋳物の品質評価

6.1.1 研究内容

ラピッド・プロトタイプング (RP) 装置にて製作したL250mmブレード用セラミック中子を使用してWAX成型し, 従来方法で造形・脱ロー後大気鋳造し, 寸法 (収縮), 鋳肌 (面粗度, 肌荒れの有無), 強度 (鋳造時の破損の有無) 等セラミック中子としての性能を確認した。

1) WAXパターンの成型

ラピッド・プロトタイプング (RP) 装置にて製作したL250mmブレード用セラミック中子を使用してWAXパターンの成型を実施した。

また, 成型されたWAXパターンのX線検査を行ったところセラミック中子の破損は無く, WAX成型時に必要な強度が確保できていることが確認できた。

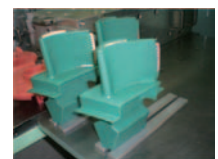


Fig.19 WAX pattern

2) ツリーの組立

X線検査の結果, 破損の無い事が確認されたWAXパターンを1ツリー2個付けで組立を実施した。

3) 造形作業

組立てられたツリーを従来方法でコーティングを行い, 鋳型を完成させた。

4) 脱ロー・鋳造

完成した鋳型を脱ロー・焼成後SCS13について鋳造を行なった。

[鋳造条件]

- ・鋳型焼成温度 1000 $^{\circ}$ C
- ・鋳込み温度 1600 $^{\circ}$ C

6.2 鋳造品の評価

6.2.1 寸法 (収縮)

中子と同一条件で造型されたW25×L100×T6の板状テストピースをWAX内に封入し、従来方法にて造型・脱ロ後SCS13で鋳造した鋳造品の寸法を測定して中子の収縮率を確認した。

収縮率は2.5～5.1とバラついたが、鋳肌粗さの影響もあり、正確な値は把握できなかった。

6.2.2 肌 (面粗度, 肌荒れの有無)

収縮率確認用に鋳造した板状テストピースの鋳造品を使用して面粗度の測定を実施した。結果としてRa12.7～14.7であった。



Fig.20 The measurement of surface roughness

6.3 鋳造試験

鋳造試験は、一体鋳型を鋳造する為のカップに取り付けし一体鋳型焼成後SCS13材を鋳造した。鋳造試験状況写真を図21に示す。



Fig.21 The photo of casting test

6.4 一体鋳型鋳造品の評価

6.4.1 一体鋳型の面粗度・断面外観面



Fig.22 The photo of surface roughness comparison

面粗度の測定 (3点平均) : 表面Ra24.2程度にとどまった。

6.5 研究成果

一体鋳型の鋳造試験結果では、一体鋳型の二次焼結の際に使用するアルミナボールによる砂かみが鋳造品の表面・内部とも確認され、中子割れも数箇所確認された。アルミナボールの砂かみについては二次焼結後の除去方法を改善する必要がある。また、面粗度の比較測定結果では、表面Ra7.1・内部Ra24.2で、目標のRa6.3を達成出来ていないが、今後の事業化に向けた補完研究で、品質の作り込みを行う予定である。大きな成果は、一体鋳型ができ、この鋳型で鋳造ができ、鋳物を製造できたことである。

7. おわりに

7.1 成果のまとめ

本研究開発については、既存のLS (レーザ・シンタリング) 装置のハード、及びソフトを開発改善し、耐火物粉末を直接焼結することにより、ラビッド・プロトタイプング用セラミック中子、及び鋳型を一体で造形する基礎的な技術開発を完了した。

さらにLS法による造形能力の限界等、いままで未知の情報を蓄積できたと考える。

これはLS装置メーカーが従来所有していたノウハウに加えて、耐火物材料メーカーと精密鋳造メーカーの知識の集約が出来て、初めて実現できたと考える。

7.2 今後の課題

LS法の本来持っている欠点から次のような課題が明白となった。

- 1) 積層条件に必要な「リコータ性」に制約され、使用できる材料は粒度、及び粒子形状に制約があり、このため造形される鋳型の表面粗さと密度が一般の精密鋳造鋳型と異なる。
- 2) 一次焼結 (レーザ・シンタリング) のみでは、所定の鋳型強度は得難く、二次焼結もしくは無機バインダーによる含浸等の後処理が必要となる。
- 3) 大型鋳型を造形する時、二次焼結時の鋳型変形をいかに最小限に抑えるかが問題となる。

これらの課題については、引き続き補完研究により「実用化」に向けて継続して開発を進めている。

最後に本研究開発を進めるにあたり、セラミック中子の必要特性について有益な助言を頂いたIHIキャスティング、及びLS技術について親切にご指導頂いた東大・生産技術研究所の新野助教授、また総合的にご指導いただいた中国経済産業局の皆様、心より感謝申し上げます。

タグチメソッドを用いたフィルム冷却用流れ制御デバイスの最適化手法に関する研究

Study of Optimization Technique Using Taguchi Method for Flow Control Device (FCD) of Film Cooling

川端 浩和*¹
KAWABATA Hirokazu

船崎 健一*¹
FUNAZAKI Ken-ichi

中田 諒大*¹
NAKATA Ryota

田川 久人*²
TAGAWA Hisato

堀内 康広*²
HORIUCHI Yasuhiro

ABSTRACT

This study executes CFD-based and experiment-based optimizations using Taguchi Method to maximize the performance of flow control device (FCD) for the enhancement of film cooling effectiveness on a flat plate, where two semi-spheroid-shaped FCDs for each hole are attached on the upstream side of the hole. Film cooling effectiveness distributions of all test cases with different shapes and arrangements of FCDs created by use of L18 orthogonal array are obtained from the experiment and RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) CFD for the sake of a direct comparison between CFD-based and experiment-based optimal FCDs. It is found from the comparison that the control factor levels of optimal FCDs determined by these two approaches coincide each other. The validity of CFD-based optimization using RANS have been confirmed.

Key words : Turbine, Control, Film cooling, Heat transfer, Optimization

1. はじめに

ガスタービン用フィルム冷却はガスタービンの更なる高効率化を目標として様々な高性能化手法が提案されている。近年、CFDを用いた最適化は、高性能計算機の大規模化によって、実践的なツールとして用いられるようになってきており、Leeら⁽¹⁾はRANS解析を用いて冷却孔形状を最適化することにより、更なる高性能フィルム冷却の可能性を示すなどの研究報告もある。

一方で、フィルム冷却のRANS解析は、LES解析を行うよりも計算コストが少ない点を考慮すると、最適化に用いる計算手法としては有効であるが、実験結果とのかい離が大きいことが知られており、定量的な評価を行うのには限界があるのが現状である⁽²⁾。従って、CFDを用いた最適化の信頼性については、真に最適解を得られるのか評価することが重要であると考えられる。CFD結果の信頼性を評価するには実験を行い、得られた結果を

比較する必要があるが、最適化手法の多くはサンプル数が膨大になり、実験での再現が難しいため最適化手法の信頼性について検証した例は殆ど無いのが現状である。

本研究では、著者らが提案したフィルム冷却用流れ制御デバイス (FCD)⁽³⁾の最適化を、実験とCFDの両者で行うことにより、FCDの最適形態を導くとともに、CFDの精度検証を試みた。最適化手法にはタグチメソッドを用いており、実験とCFDは同条件で行っている。最適化手法にタグチメソッドを選択したのは、遺伝的アルゴリズムなどを用いたサンプル数の多い最適化手法に比べると、非常にサンプル数が少なく、実験とCFDを同条件で行うことが可能になるためである。

主な記号

| | |
|-------|---------------|
| A ~ G | : 制御因子 |
| BR | : 吹き出し比 |
| DR | : 密度比 |
| d | : 冷却孔直径, mm |
| T | : 温度, K |
| U | : 流速, m/s |
| Y | : 面平均フィルム冷却効率 |

原稿受付 2013年9月3日

校閲完了 2014年8月18日

* 1 岩手大学

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

* 2 (株)日立製作所

- η : フィルム冷却効率
- ϕ : 全体効率
- ρ : 密度, kg/m^3
- 添え字
- 2 : 二次空気
- i : タグチメソッドの実験番号 ($0 \leq i \leq 18$)
- opt : 最適形態
- w : 壁面
- ∞ : 主流

Table 1 Control factors

| | |
|---|--------------------|
| A | FCD のフィレット半径 |
| B | O' から冷却孔中心(O)までの距離 |
| C | 下流側の FCD 幅 |
| D | 上流側の FCD 幅 |
| E | FCD の高さ |
| F | FCD のスパン方向幅 |
| G | FCD の開き角度 |

2. タグチメソッドを用いたロバスト最適化

本研究では、フィルム冷却効率を向上させるための単目的の最適化について予測精度の検証を実施している。フィルム冷却の高性能化には本来、熱流束や空力損失の評価を含めた多目的最適化の精度検証が必要であると考えられるが、多目的最適化ではサンプル数が多く、問題が複雑化してしまう。そこで、本研究では将来的に多目的の最適化の精度検証を実施することを念頭に、基礎研究として、単目的の最適化の精度検証を試みている。

2.1 最適化対象

本研究では、冷却孔の上流側に取り付けるFCD形状を変化させることで、冷却孔下流領域のフィルム冷却効率を向上させるための最適化を行う。図1に、冷却孔形状と、FCD形状を示す。本研究で用いた冷却孔は冷却孔直径 $d (=20\text{mm})$ の単純円筒型冷却孔である。冷却孔の傾斜角は 35° 、供試体の肉厚は $2d$ 、ピッチは $3d$ である。冷却孔上流には半楕円体形状のFCDを1ピッチあたり2個取り付けた。それらは、図1中に示すAxis 1に沿って傾けることで、スパン方向に開き角度を有する。図中のA~Gは表1に示す制御因子であり、FCDの最大高さ位置はO'である。ここで、FCD同士のスパン方向の距離は $1.5d$ で固定した。これは、各制御因子の寸法値が変化した時に、FCD同士の干渉を防止し、 $-1.5 \leq z/d \leq 1.5$ の範囲からFCDがはみ出すことの無いようにするためである。主流のレイノルズ数 (Re) は、岩手

大学所有の風洞試験装置での実験を可能にするために $Re=16,400$ とした。

2.2 最適化手法

図2に、本研究の流れと最適化の手順を示す。本研究ではFCDを最適化するためにタグチメソッドを用いる。最初に、制御因子と誤差因子をL18直交表へ割り付け、18形態のFCD形状 (Case i , $0 \leq i \leq 18$) を得る。その後、実験とCFDで性能 (フィルム冷却効率) 調査を行い、各手法の最適化を実施する。最後に、両手法で得られた最適形態の比較を行った。

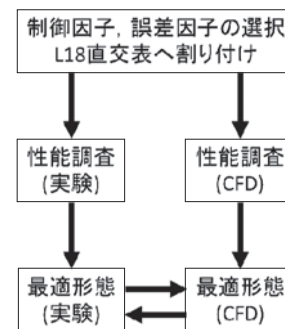


Fig. 2 Method of research

表2に、各制御因子の水準を示す。各制御因子の水準については、FCD同士の干渉を防ぎ、冷却孔とFCD距離が離れないように設定した。FCDと冷却孔が近くなるようにするのは、FCDから発生した渦が崩壊する前に二次空気と干渉させるためである。さらに、流れ方向のFCDの寸法値 (C, D) を異なる寸法値に設定できるようにし、FCD上を通過する主流の剥離規模が変化するようにした。タグチメソッドを行う際に設定する誤差要因は、吹き出し比 (Blowing Ratio: $BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty$) とし、 $BR=0.5, 0.75, 1.0$ の3条件に変化させ、 BR に対してロバスト性の高いFCD形状を探索する。本研究では単純円筒型の冷却孔に対してFCDを適用しているため、冷却孔出口を拡大したShaped holeよりも、 BR が高くなった際に冷却空気の貫通性が高くなってしまふ。従って、FCDを適用した際にも高い BR ではFCDの効果が低減してしまう可能性があるため、今回は BR を誤差要因にすることで、 BR に対してロバスト性の高いFCD形状を探索することとした。さらに、 BR に対してロバスト

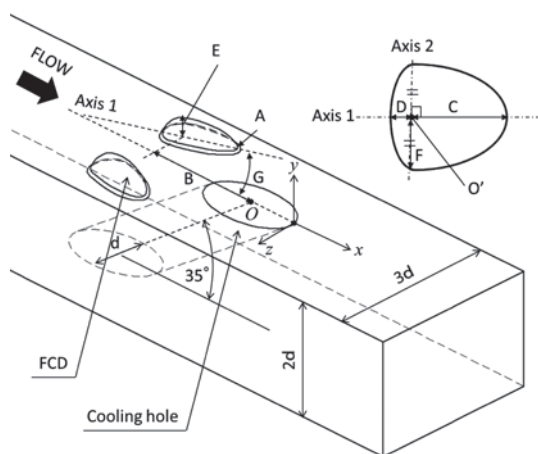


Fig. 1 FCD and cooling hole geometry

Table 2 Control factors and levels

| | Level 1 | Level 2 | Level 3 |
|---|---------|---------|---------|
| A | 0.15d | 0.05d | |
| B | 1.75d | 2.0d | 2.25d |
| C | 0.35d | 0.75d | 1.0d |
| D | 0.35d | 0.75d | 1.0d |
| E | 0.15d | 0.3d | 0.5d |
| F | 0.15d | 0.3d | 0.5d |
| G | 0° | 7.5° | 15° |

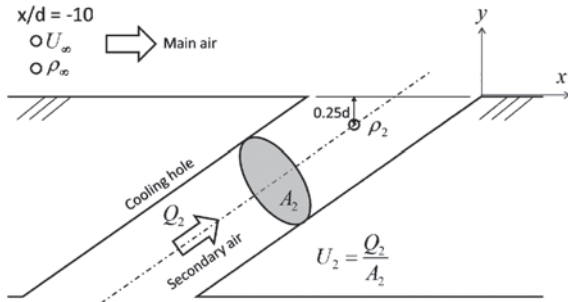


Fig. 3 Definition of BR

性を持たせることにより、翼面やエンドウォールフィルム冷却への広い適用性を持たせることを目標としている。

図3に、BRを定義するための流速、密度の定義位置を示す。ここで、 U_∞, ρ_∞ は $x/d=-10$ における主流流速、密度である。 U_2, ρ_2 は $y/d=-0.25$ の冷却孔内部での二次空気流速、密度である。ただし、 U_2 は実験においては計測することが難しいため、冷却孔に流入する二次空気体積流量 Q_2 を冷却孔断面積 A_2 で除した値で定義した。

タグチメソッドを用いたフィルム冷却の最適化の研究例はSakaiら⁽⁴⁾の研究が知られており、タグチメソッドのうち、望大特性により最適化を行っている。本研究でも、フィルム冷却効率向上を目的として、望大特性によりタグチメソッドの適用を試みた。望大特性のSN比は式(1)で表される⁽⁵⁾。

$$S/N_i = -10 \log \frac{1}{n} \left(\frac{1}{Y_{i, BR=0.5}^2} + \frac{1}{Y_{i, BR=0.75}^2} + \frac{1}{Y_{i, BR=1.0}^2} \right) \quad (1)$$

$$\phi_i = \frac{Y_{i, BR=0.5} + Y_{i, BR=0.75} + Y_{i, BR=1.0}}{3} \quad (2)$$

ここで、 $n(=3)$ ：誤差要因の数、 Y_i ：(Case i における)特性値であり、本研究では $0 \leq x/d \leq 10, -1.5 \leq z/d \leq 1.5$ の領域での面平均フィルム冷却効率を特性値として用いた。また、3つのBRにおける Y_i を平均することで、全体効率を式(2)で定義した。

3. 実験

3.1 実験装置

図4に、伝熱試験用実験装置の外観図を示す。フィルム冷却効率の計測は、岩手大学の所有する伝熱試験用風洞で実施した。試験装置は主流と二次空気の2つの空気システムを有しており、伝熱試験を行う際にはヒーターで二

次空気が加熱される。供試体はテストセクションの側面に設置されており、4つの冷却孔を有する。赤外線カメラを使用した温度計測を可能にするために、供試体の正面には赤外線透過ガラス (ZnSe) を設置している。主流流速と主流温度は $x/d=-10$ の、テストモデルから十分に離れた位置で計測を行っており、I型熱線流速計で計測した主流の乱れ度は1%程度である。二次空気の温度は供試体一番上の冷却孔内部へ熱電対を挿入し、冷却孔出口から5mm内側の位置で計測した(図3参照)。FCDは岩手大学の所有する3Dプリンタ (Dimension Elite) を用いて作成し、供試体へ両面テープで取り付けた。

図5には流れ場計測用実験装置の外観図を示す。冷却孔下流領域の流れ場計測試験は岩手大学の所有する環境風洞で実施した。流れ場計測は三次元レーザードップラー流速計を用いて行った。計測を可能にするためのトレーサ粒子はトランジションダクトの側面から主流中に流入させている。主流の乱れ度は1%程度である。本研究では実験装置のサイズの関係で、空力試験と伝熱試験を実施する風洞が異なっているが、両風洞で発生する主要な現象は変わらないと判断した。

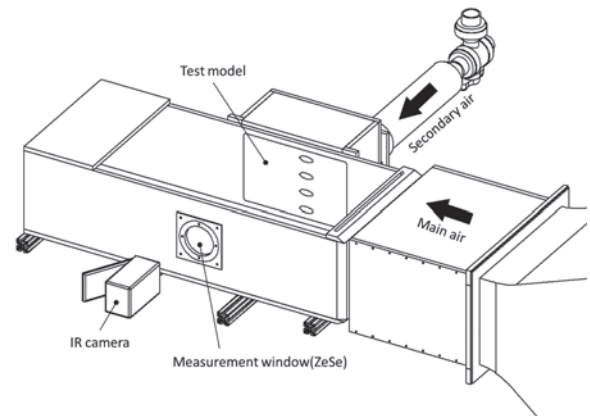


Fig. 4 Experimental facility (heat transfer measurement)

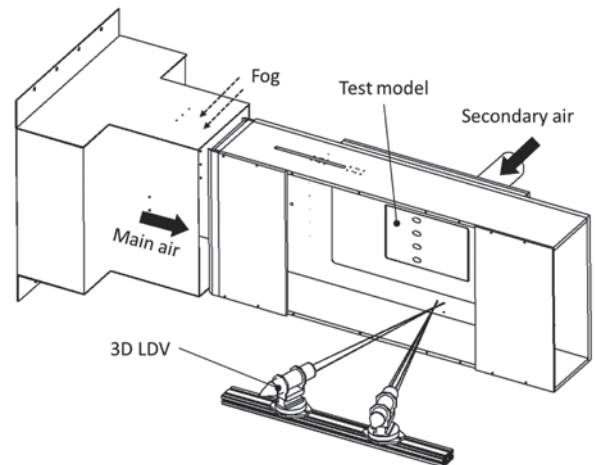


Fig. 5 Experimental facility (aerodynamic measurement)

3.2 実験手法

(1) フィルム冷却効率計測

本研究では赤外線カメラを用いて供試体壁面の温度を測定し、過渡応答法を用いてKawabataら⁽³⁾の行った研究と同様に式(3)の壁面フィルム冷却効率を算出する。赤外線カメラで取得した温度は、実験後に別途試験を行うことで較正を行っている。較正試験には専用の試験平板を製作し、表面に取り付けた熱電対で取得した温度データと、赤外線カメラで取得した温度データを用いて較正データを取得した。実験に用いた供試体はABS樹脂製であり、熱伝導率は $0.19\text{W}/(\text{mK})$ である。計測時間は90秒であるため、実験中は冷却孔近傍の領域を除いて、熱伝導の影響は少ない。

$$\eta = \frac{T_w - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (3)$$

(2) 流れ場計測

本研究では、3次元LDVを用いた3次元の流れ場計測を行っている。プローブはy軸に対してそれぞれ 25° 傾けており、Dantec製のBSA Flow Softwareにより、回転行列を用いて流れ方向、スパン方向、壁面法線方向の流速をそれぞれ算出している。計測点数 N は750点とし、式(4)で表されるように、平均値を計測点の各方向の流速として算出している。

$$u, v, w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i, v_i, w_i \quad (4)$$

流れ場計測は $x/d=3.0$, $0 \leq y/d \leq 2.5$, $-1.5 \leq z/d \leq 1.5$ の範囲で行い、計測グリッドは2mm間隔とした。

3.3 実験条件

主流と二次空気との密度比 ($DR = \rho_2 / \rho_\infty$) は実験によって多少の変動は存在するが、フィルム冷却効率計測時は $DR \approx 0.85$ 、流れ場計測時には $DR \approx 1.0$ とした。 $x/d=0$ の位置での99%境界層厚さは伝熱試験時で $0.75d$ 、空力試験時では $1.0d$ である。

3.4 不確かさ解析

面平均フィルム冷却効率の不確かさはFCDの形態によって異なると考えられるが、全条件で不確かさを求めるのは実験数が多くなり難いため、Kawabataら⁽³⁾の過去に行った実験データから算出した。面平均フィルム冷却効率の不確かさは、過去5回の計測データの標準偏差を元に算出し、今回は $\pm 5.3\%$ である。

4. 数値解析

4.1 計算領域・格子

本研究では、3節のフィルム冷却実験と同体系かつ同条件の数値解析を実施した。図6に計算領域と、主流入口境界に与えられた速度プロファイルを示す。計算領域はスパン方向に1ピッチであり、L18直交表で作成さ

れる18形態全てのFCDの解析で同じ計算領域を用いた。計算格子の作成の際には、FCD上の表面格子や格子密度の設定を全条件で統一している。

図7には計算格子を示す。本研究では計算格子の変化により、同じタグチメソッドを行った場合に、結果の差異が現れるのか調査するために3種類の計算格子 (Grid A, B, C) を準備した。各計算格子の格子数は以下の表3に示す。計算格子はFCD形状を再現するためにANSYS ICEM CFDを用いて非構造格子で作成した。Grid Aは最も計算格子が細かくっており、それに対してGrid BはFCD周辺の格子を粗くしたものである。Grid CはFCD周辺の格子密度はGrid Aと等しいが、冷却孔下流領域の壁面格子がGrid Aよりも粗くなっている。壁面付近にはプリズム格子を設置しており、プリズム層厚さは主流側ダクトで $0.1d$ 、冷却孔内で $0.02d$ である。壁面第一層計算格子の y^+ はどの計算格子でも1以下である。

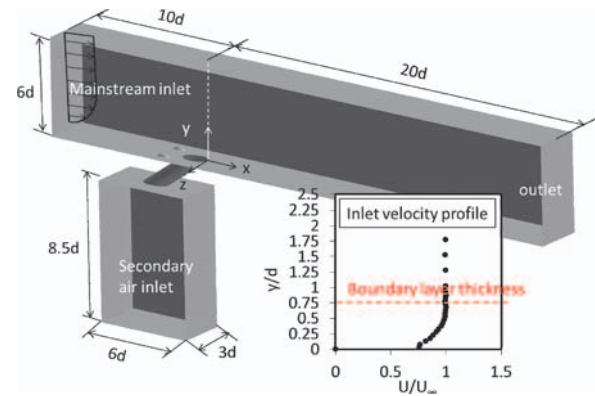


Fig. 6 Computational domain

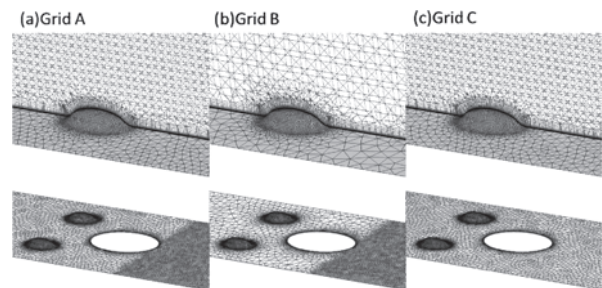


Fig. 7 Computational grids

Table 3 Number of grids

| | Number of grids |
|--------|-----------------|
| Grid A | 8,000,000 |
| Grid B | 6,800,000 |
| Grid C | 5,000,000 |

4.2 解析要領

本研究ではANSYS CFX13を用いてRANS解析を行った。乱流モデルにはShare Stress Transportモデルを用いた。最適化のプロセスではフィルム冷却効率を用いて

SN比を算出するため、主流入口境界にはフィルム冷却効率試験時に得た速度分布 (図6 参照) と温度、二次空気には質量流量と温度を与えた。乱れ度は主流と二次空気の境界で一様に1%を与えた。出口境界は静圧0 Pa、壁面境界は断熱壁面とし、ダクト上面は対称境界を用いた。

5. 結果と考察

5.1 フィルム冷却効率分布 (実験とCFD結果の比較)

図8にはL18直交表で定めた全18形態のFCDについて、実験で得られたBR=0.5の場合のフィルム冷却効率分布 (0 ≤ x/d ≤ 10, -1.5 ≤ z/d ≤ 1.5) を示す。Case05, 10, 13, 17についてはスパン方向に広い冷却面積となっていることが確認され、さらに、Case13, 17は冷却孔のセンターライン上のフィルム冷却効率が高くなっていた。

図9にはCFD (Grid A) で得られたBR=0.5の場合の

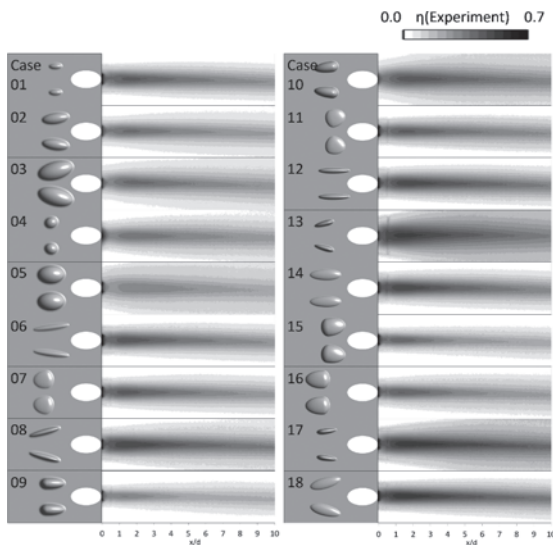


Fig. 8 Film cooling effectiveness distribution obtained by Experiment (BR=0.5)

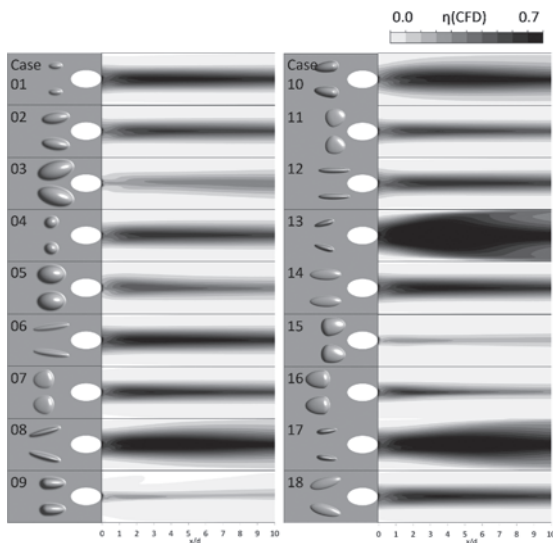


Fig. 9 Film cooling effectiveness distribution obtained by CFD (BR=0.5)

フィルム冷却効率分布を示す。CFDにおいては、RANSでは温度の拡散を十分に解くことができないために、実験結果と比較すると、全体的にフィルム冷却効率が過大に評価されている。一方で、定性的なフィルム冷却効率分布の傾向は実験とCFDの両者で一致していることが分かり、Case13, 17ではフィルム冷却効率分布がスパン方向に広がっている。

5.2 最適化結果とSN比の信頼性 (実験結果)

図10に、実験結果から得た要因効果図を示す。図中横軸のA ~ Gと数字は表2の水準値を示している。今回はフィルム冷却効率を向上させるために、SN比を最大にする組み合わせを最適条件として選択する。

SN比を最大にするための組み合わせを選択すると最適水準はA2 B2 C1 D2 E3 F1 G3の組み合わせとなった (これはCase13と一致している)。特にSN比が高かったのはE, F, Gとなっており、他の因子に比べるとSN比へ与える影響度が高くなっている。

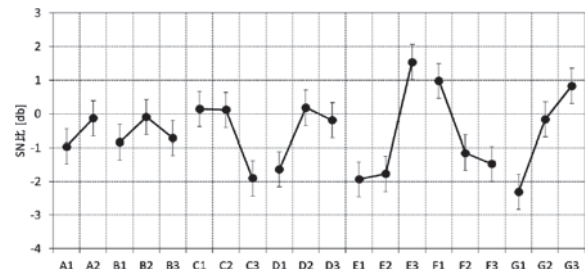


Fig.10 Plots of control factors effects (Experimental result)

面平均フィルム冷却効率は ± 5% の不確かさを持つため、この時、SN比の不確かさを求める。特性値 y_i の場合のSN比と、特性値がX倍された時のSN比の差は以下の式で求められる。

$$\begin{aligned} \Delta S / N_i &= -10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_i \frac{1}{(XY_i)^2} \right) - \left(-10 \log \frac{1}{n} \left(\sum_i \frac{1}{(Y_i)^2} \right) \right) \\ &= 10 \log \left(\frac{\sum_i \frac{1}{(Y_i)^2}}{\sum_i \frac{1}{(XY_i)^2}} \right) = 10 \log X^2 \end{aligned} \tag{5}$$

特性値が5%増加した場合、SN比は $X=1.05$ を代入することでSN比はどのFCD形態の場合でも一様に0.43増加することが分かる。特性値が5%低下した場合は $X=0.95$ を代入するとSN比は0.42低下することが分かる。

以上を加味すると実験による最適水準は因子E,Fに関しては逆転する可能性がなかったが、他の因子については最適水準が逆転する可能性があることが分かった。

S/N_{opt} と ϕ_{opt} の、要因効果図からの推定値と、確認実験結果との差は表4へ示す。SN比については両者の差が0.965dbであり、一般的なタグチメソッドの再現性の

Table 4 Predicted and confirmed value (experiment)

| Predicted value | | Confirmed value | |
|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| S/N_{opt} | ϕ_{opt} | S/N_{opt} | ϕ_{opt} |
| 6.894 | 0.232 | 5.929 | 0.227 |

基準 (± 3 db) から考えて、再現性があることを確認した。 ϕ_{opt} の推定値と確認実験値との差は、確認実験値の2.2%であった。

5.3 最適化結果とSN比の信頼性 (CFD結果)

実験の場合は、計測による不確かさのため、SN比は特性値の不確かさの影響を受けてばらつきを持つことになる。一方でCFDの場合は特性値に完全な再現性があるために、同じ数値解析ではSN比の変動は起こらない。しかし、設計者が数値解析を行う場合には計算格子の作成方法や乱流モデルの選択等に差異が生じるために、これによってSN比は変動すると考えることもできる。今回は計算格子の作成方法が異なることによって、SN比にばらつきが生じると仮定して、Grid A～Cまでの結果を重ねることでCFDにおけるSN比の信頼区間と見なす。

図11にはGrid A～CまでのSN比の要因効果図を示す。Grid AとGrid Cに関しては両結果が殆ど一致している。一方でGrid BについてはGrid Aとの結果の差異が見られる。SN比を最大にする水準を最適値として選択した場合、最適形態はGrid A, Cの場合はA2 B2 C1 D2 E3 F1 G3なのに対し、Grid BではA2 B1 C1 D3 E3 F1 G3となり、因子B, Dにおいて最適水準に格子依存性が見られた。Grid Bで最適化結果が他のGridに比べて変化したのは、FCD周辺の計算格子が粗いために、FCDから発生する渦の解像がGrid A, Cよりも十分に行われなかったためであると考えられる。Grid AとGrid Cの最適化結果は一致したことから、冷却孔下流領域の表面格子は最適化結果に及ぼす影響が小さいことが分かった。

得られた最適解を実験とCFDで比較すると、Grid AとCで得られた最適水準は実験結果と一致した。従って、実験値で得られたSN比は不確かさを含んでいるものの、実験で得られた最適化の傾向を捉えることができていた。と ϕ_{opt} の、要因効果図からの推定値とCFDを用いた確認実験との差 (表5) はGrid Aで1.442db, Grid Bで

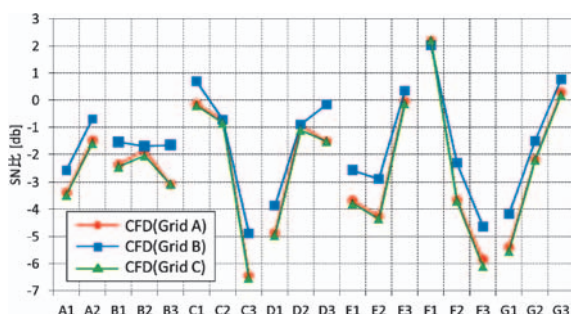


Fig.11 Plots of control factors effects (CFD result)

Table 5 Predicted and confirmed value (CFD)

| | Predicted value | | Confirmed value | |
|--------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | S/N_{opt} | ϕ_{opt} | S/N_{opt} | ϕ_{opt} |
| Grid A | 12.872 | 0.345 | 11.430 | 0.369 |
| Grid B | 8.760 | 0.313 | 10.226 | 0.336 |
| Grid C | 12.700 | 0.350 | 11.308 | 0.373 |

1.466db, Grid Cで1.392dbとなり、実験値と同様に再現性を確認した。 ϕ_{opt} の推定値と確認実験値との差は最大6.8%であった。

5.4 最適形態の流れ場

図12に、実験とCFDで得られた最適形態とFCDを取り付けない場合 (BASE) の面平均フィルム冷却効率を示す。最適形態の場合、CFD結果においては実験値に比べると過大にフィルム冷却効率が評価されているが、BASEと比較すると最適形態は、フィルム冷却効率がどの吹き出し比においても高くなっていることが分かり、タグメソッドによるフィルム冷却効率の改善が観察される。

図13に、実験によって得られた最適形態と、BASEにおける $x/d=3.0$ での渦度を示す。BASEはFCDが存在しないために、kidney vortexだけが存在していることが分かる。一方、最適形態では冷却孔下流領域のkidney vortexの両脇に正負の渦度が観察される。これはFCDから生成された渦であり、二次空気を壁面へ押し下げる向きに渦が回転していることが分かる。

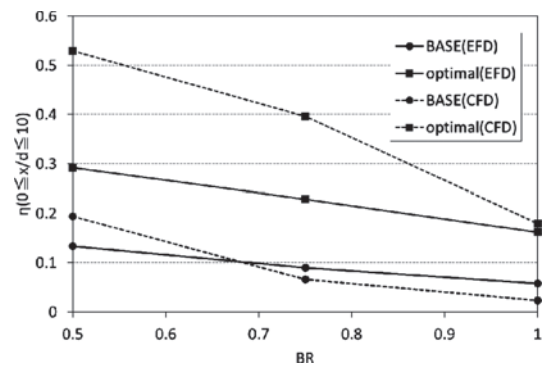
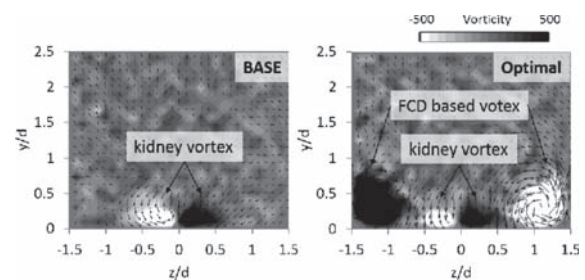


Fig.12 Spatially averaged film effectiveness

Fig.13 Vorticity distribution ($x/d=3.0$)

6. 結言

本研究では、タグチメソッドを用いて、BRを誤差要因としたFCDの最適化を実施した。フィルム効率を最大化することを目的とした最適化を実施した結果、各BRにおける面平均フィルム効率が向上することを確認し、以下の知見が得られた。

1. CFD (Grid AとGrid C) 結果から得られたFCDの最適水準は、実験結果と一致した。従って、実験値で得られたSN比は不確かさを含んでいるものの、CFDでは、実験で得られた最適化の傾向を捉えることができる。
2. CFDで取得したSN比は格子依存性が確認でき、計算格子の選択方法によっては、制御因子の最適水準が異なる傾向が観察された。従って、実験結果における最適化の傾向を捉えるためには、実験の傾向を定性的に捉えられるだけの格子品質が必要となる。
3. FCDの最適形態においては、冷却孔のセンターライン上に発生しているkidney vortexの両脇に、渦を発生させることができ、二次空気を壁面へ付着させる効果を生み出している

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁から、エネルギー使用合理化先進的技術開発費補助金（高効率ガスタービン技術実証事業）の支援を受けている。ご支援に対し深く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) Lee, K.D., et al., "Multi-Objective Optimization of Film-Cooling Holes Considering Heat Transfer and Aerodynamic Loss", ASME Paper, GT2011-45402, (2011)
- (2) 山根敬, "航空エンジン用高温部品の伝熱解析技術の動向", 日本ガスタービン学会誌, Vol.38, No.3, (2010), pp32-39
- (3) Kawabata, H., et al., "Experimental and Numerical Investigations of Effects of Flow Control Devices Upon Flat-Plate Film Cooling Performance" ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95197, (2013)
- (4) 酒井英司, 高橋俊彦, "内部冷却リブと孔後方突起を有する平板フィルム冷却のロバスト最適化", 日本ガスタービン学会誌, Vol.41, No.4, (2013), pp54-60
- (5) 松岡由幸, ロバストデザイン, 森北出版, (2013)
- (6) 高橋大地, 船崎健一, 川端浩和, "ガスタービンフィルム冷却内部及び外部流れ場に関する研究", 可視化情報シンポジウム2013

流れ制御デバイスによるフィルム冷却性能の向上

Improvement of Flat Plate Film Cooling Performance by Flow Control Device

船崎 健一*¹
FUNAZAKI Ken-ichi中田 諒大*¹
NAKATA Ryota川端 浩和*¹
KAWABATA Hirokazu田川 久人*²
TAGAWA Hisato堀内 康広*²
HORIUCHI Yasuhiro

ABSTRACT

This paper deals with effects of flow control devices (FCDs) on flat plate film cooling. Aiming for improvement of film effectiveness of discrete cooling holes, a new type of device is invented and patented by the authors. The performance of base-type FCD applied conventional cylindrical hole is thoroughly investigated and reported in this study. The cooling hole pitch is an important parameter in this study to explore a possibility of reducing the cooling air by the application of the FCD. Three hole pitches, 3.0d, 4.5d and 6.0d, are examined, where d is a hole diameter. It is found that the applied FCDs are quite effective in increasing the film effectiveness.

Key words : High pressure turbine, Film cooling, Flow control

1. はじめに

近年、エネルギー消費問題及び地球温暖化問題、電力需要の増加等を背景に、ガスタービンにはさらなる高効率化が求められている。ガスタービンの高効率化手法として、タービン入口温度の高温化が挙げられる。しかしながら、タービン入口温度の高温化に伴い、燃焼器直下流に位置する高圧タービン部は過酷な熱負荷に曝される。そのため、コンポーネントの冷却に広く採用されているフィルム冷却には、より一層の高性能化が求められる。また、冷却に用いる冷却空気は圧縮機からの抽気となるために、同時に冷却空気量削減も非常に重要である。

高効率なフィルム冷却を達成するためには、冷却孔下流に発生するCounter Rotating Vortex Pair (CRVP)を制御、抑制することが重要である。その制御手法としては、冷却孔出口形状を変化させる手法と、冷却孔周囲の形状を変化させる手法などが挙げられる。近年のガスタービン用フィルム冷却に用いられる冷却孔は、冷却孔出口形状を変化させたShaped hole⁽¹⁾が広く採用されている。このShaped holeは、単純円筒形状の冷却孔と比較して高いフィルム冷却効率を示すことが知られているが、比較的加工コストが高いのが欠点である。一方

で、冷却孔周囲の形状を変化させた手法としては、冷却孔上流に三次元形状のデバイス⁽²⁾を設けたものなどがShaped holeに代わる技術として、過去に提案されているが、Shaped holeと比較して高い性能を示す例は少ないのが現状である。

そこで本研究では2つの三次元形状の流れ制御デバイス (Flow Control Device: FCD) を冷却孔上流に流れ方向に対し、斜めに取付けることにより、フィルム冷却における流れ場を制御し、単純円筒形状の冷却孔でありながら、Shaped holeに近い性能を示すことと、冷却孔ピッチを拡大することで冷却空気削減の可能性を探ることを目的として調査を行った。

記号

| | |
|-----------|-----------------------------|
| BR | 吹き出し比 |
| C_p | 全圧損失係数 |
| d | 冷却孔直径, mm |
| DR | 密度比 |
| h | 熱伝達率, W/(m ² /K) |
| \dot{m} | 質量流量, kg/s |
| p | 冷却孔スパン方向ピッチ |
| P | 圧力 Pa |
| Re | レイノルズ数 |
| T | 温度, K |
| u, v, w | 流速, m/s |
| U | 流れ方向流速 m/s |

原稿受付 2013年9月3日

校閲完了 2014年8月18日

* 1 岩手大学

〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

* 2 (株)日立製作所

| | |
|----------|--------------------|
| ζ | 流れ方向渦度 |
| η | フィルム冷却効率 |
| θ | 無次元温度 |
| ρ | 密度 kg/m^3 |
| ζ | 流量平均全圧損失 |

添え字

| | |
|----------|------|
| ∞ | 主流 |
| 2 | 二次空気 |
| f | 流体 |
| t | 総量 |
| w | 壁面 |

2. 実験

2.1 実験装置

図1に実験装置の外観図を示す。計測には、岩手大学の所有する回流式風洞を使用した。主流は主流用送風機で供給し、風洞内で整流及び縮流された後、260mm × 620mmの亚克力製矩形テストセクションダクトへ流入する。二次空気は、主流とは別の送風機により供給され、層流流量計を経て、プレナムチャンバーに流入する。また、二次空気流路途中には、二次空気加熱用のヒーターが設置してあり、伝熱試験の際はこのヒーターを用いることで、二次空気を加熱し、主流との温度差を実現している。主流入口流速は、ピトー管を用いてテストセクションダクト入口より150mm下流の位置で計測している。本研究では、フィルム冷却性能を伝熱、空力の両面から評価するために、伝熱試験と空力試験を行っており、それぞれ試験時のセッティングが異なる。壁面フィルム効率、熱伝達率の計測時は、セレン化亜鉛 (ZnSe) 製の円形計測窓を供試体正面に設置することで、赤外線カメラ (NEC Avio) による供試体壁面温度の計測を可能としている。

3D-LDV (Laser Doppler Velocimetry) による流れ場計測は、ダクト側面に設置してある3軸トラバース装置に、LDVプローブを取り付けることで試験を行う。この際、ZnSe製の計測窓は取り外して、亚克力板と交換している。また、空間温度場計測、全圧損失計測の際は、LDV計測を行った際と同様の3軸トラバース装置を使

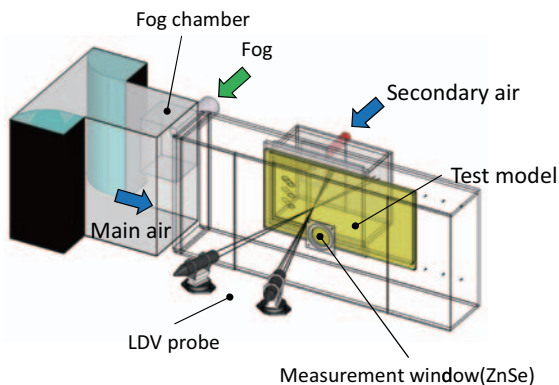


Fig. 1 Experimental facility

用してプローブを設置している。テストセクションダクト側面には、ABS樹脂製の平板供試体を取り付けられており、表面には黒色塗料を塗布している。ABS樹脂の熱物性値に関しては、熱伝導率、比熱、密度を試験前に測定しており、それぞれ0.214 (W/mK), 1.42 (kJ/kgK), 1.031 (kg/m³) である。

2.2 冷却孔形状

図2に本研究で用いた冷却孔形状を示す。本研究では、冷却孔形状を変化させるために、供試体冷却孔部分をはめ込み式としている。本研究で使用した冷却孔形状は、単純円筒型のCylindrical holeと、冷却孔出口が拡大しているShaped holeの2種類であり、傾斜角 $\alpha = 35\text{deg}$ である。供試体の冷却孔スロート直径 $d = 20\text{mm}$ で、供試体の厚さは $2d$ (40mm) である。また、冷却孔はスパン方向に三つ配置している。Shaped holeの冷却孔出口におけるlaid-back角 β と拡大率 γ はそれぞれ10degとなっている。また、本研究では冷却孔ピッチ p の効果を調査するために、 $p = 3.0d, 4.5d, 6.0d$ の3種類の供試体を使用している。

2.3 Flow Control Device (FCD)

FCDはフィルム冷却における冷却孔下流の流れ場を制御することを目的として製作した。図3にFCD形状、設置位置を、表1にFCDの各設計パラメータを示す。今回使用したFCDは三次元の半楕円体形状となっており、FCDの曲面形状は楕円体の方程式によって決定している。本研究ではパラメトリックスタディーを行い、Kawabataら⁽²⁾の採用したFCDと比較して、高いフィルム効率を示したことから、本形状、設置条件を採用した。FCDの高さ、短辺、長辺はそれぞれ $0.5d, 0.5d, 2.0d$ となっている。また、FCD底部にはフィレットが設けてあり、フィレット半径は $0.15d$ である。FCD設置位置に関しては、冷却孔中心より $1.5d$ 上流の位置に、それぞれ流れ方向に対して30度の開き角度を持つように設置しており、FCD中心間の距離は $0.75d$ である。本研究では、FCDをCylindrical holeに取り付け、FCDを取り付けない場合の条件と性能比較を行っている。冷却孔形状とFCDの組み合わせは表2に示す。

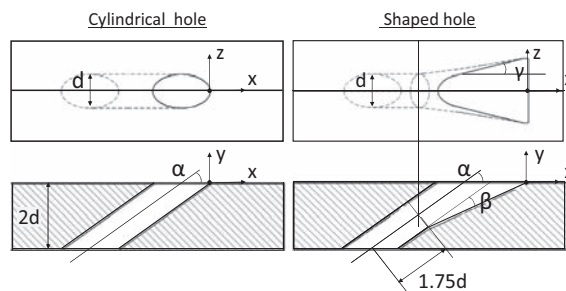


Fig. 2 Film cooling hole geometries

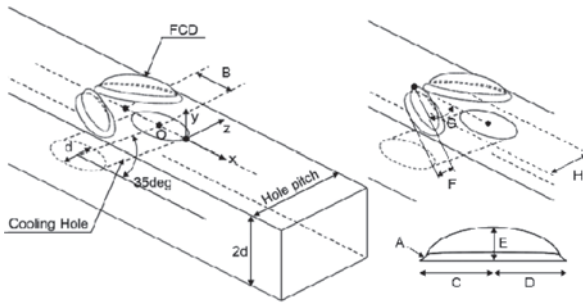


Fig. 3 Test model and flow control device

Table 1 Control factors

| | |
|---|----------------------------|
| A | フィレット半径:0.15d |
| B | 冷却孔出口中心から FCD 中心までの距離:1.5d |
| C | x 軸方向の FCD 半値幅 (上流):1.0d |
| D | x 軸方向の FCD 半値幅 (下流):1.0d |
| E | FCD 高さ:0.5d |
| F | z 軸方向の FCD 半値幅:0.25d |
| G | FCD の開き角度:30deg |
| H | FCD 中心間距離:0.75d |

Table 2 Combination of cooling hole geometries and FCD

| | Hole geometry | p | FCD |
|--------------|------------------|------|-----|
| C.H._3.0d | Cylindrical hole | 3.0d | × |
| C.H._4.5d | | 4.5d | |
| C.H._6.0d | | 6.0d | |
| S.H._3.0d | Shaped hole | 3.0d | × |
| S.H._4.5d | | 4.5d | |
| S.H._6.0d | | 6.0d | |
| C.H.FCD_3.0d | Cylindrical hole | 3.0d | ○ |
| C.H.FCD_4.5d | | 4.5d | |
| C.H.FCD_6.0d | | 6.0d | |

2.4 実験条件

本研究では、冷却孔直径 d を代表長さとし、主流レイノルズ数 $Re=16,400$ とした。吹き出し比 (BR) は式(1)で定義し、 $BR=0.5, 1.0$ の2条件で実験を行った。二次空気を加熱して行う伝熱試験時の主流と二次空気の密度比 $DR(=\rho_2/\rho_\infty)=0.85$ であり、二次空気を加熱しない空力試験では $DR=1.0$ としている。また $x/d=0$ における99%境界層厚さは約 $1.0d$ であり、主流乱れ度 (Tu) は1%程度である。

$$BR = \rho_2 U_2 / \rho_\infty U_\infty \quad (1)$$

3. 計測手法

3.1 伝熱試験

(1) 壁面フィルム効率、熱伝達率

本研究では、赤外線カメラを用いて供試体壁面の温度を計測することにより、式(2)、(3)で示されるフィルム効率 η および、熱伝達率 h を算出している。これらの算出にはKawabataら⁽²⁾の用いた過渡応答法を用いている。実験時の主流温度はテストセクションダクト入口に

設置した熱電対、二次空気温度は上下2つの冷却孔内に設置した熱電対で取得した温度の平均でそれぞれ定義する。撮影範囲は x 軸方向に $0 \leq x/d \leq 10$ 、スパン方向には、各冷却孔1ピッチ分とした。赤外線カメラで計測した温度は、実験後に行う較正試験で得た較正曲線により、較正を行った。また、計測範囲内で温度上昇が得られない地点に関しては熱伝達率を算出することができないため、今回はNo Dataとして取り扱っている。

$$\eta = \frac{T_\infty - T_w}{T_\infty - T_2} \quad (2)$$

$$h = \frac{-\lambda(dT/dn)}{T_w - T_\infty} \quad (3)$$

(2) 空間温度場計測

供試体壁面法線方向の空間温度場を計測するために、櫛形熱電対を使用した伝熱計測を行った。実験にはKawabataら⁽²⁾が使用したものと同様の櫛形熱電対を用いている。計測は $x/d=3.0$ の位置で行い、計測範囲は、スパン方向に5mm間隔で $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$ 、壁面法線方向には、 $0 \leq y/d \leq 2.5$ で1mm間隔、計50点のトラバース計測を行った。また、本研究では式(4)で無次元温度を定義しており、 T_f は計測点毎の温度を示す。

$$\theta = \frac{T_f - T_\infty}{T_2 - T_\infty} \quad (4)$$

3.2 空力試験

(1) 全圧損失係数計測

計測にはKawabataら⁽²⁾が用いたものと同様の櫛形全圧プローブを使用しており、計測は、計測可能最下流位置である $x/d=20.0$ の位置で行った。計測範囲は、スパン方向に10mm間隔で $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$ 、壁面法線方向には、 $0 \leq y/d \leq 2.5$ とし、壁面法線方向に1mm間隔50点のトラバース計測を行った。全圧損失係数 C_p を式(5)で定義し、 $P_{t,ref}$ は式(6)で定義しており、プレナム手前の配管で取得した全圧を二次空気全圧として定義している。また、各全圧管は標準L型ピトー管で較正を行っている。

$$C_p = \frac{P_{t,ref} - P_t}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (5)$$

$$P_{t,ref} = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_2 + \dot{m}_\infty} P_{t,2} + \frac{\dot{m}_\infty}{\dot{m}_2 + \dot{m}_\infty} P_{t,\infty} \quad (6)$$

(2) 流れ場計測

本研究では、冷却孔下流の三次元流れ場を計測するために、3D-LDV (Dantec社製)を用いた計測を行った。計測は $x/d=3.0$ の位置で行い、計測範囲は $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$ 、 $0 \leq y/d \leq 2.5$ で、各方向2mm間隔の計測を行った。各点におけるサンプリング数は750点としている。また、LDV計測を行うには、流れ場にトレーサー粒子を混入する必要があるため、テストセクションダクト入口より220mm上流から主流に粒子を混入している。計測に使

用した粒子の平均径は $1 \mu\text{m}$ である。また、流れ方向渦度を式(7)で定義する。

$$\zeta = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (7)$$

3.3 不確かさ解析

本研究における、不確かさ解析にはKline and McClintock³⁾の手法を用いている。熱伝達率の誤差要因として考えられるのが、主流温度、二次空気温度、壁面温度、壁面初期温度、温度拡散率、熱伝導率であり、壁面温度については、 $\eta=0.5$ を対象とする。K型熱電対、IRカメラの温度読み取り誤差はそれぞれ、 $\pm 0.7\text{K}$ 、 $\pm 1\text{K}$ である。結果として、熱伝達率の不確かさは $\pm 6.8\%$ となる。また、熱伝達率の不確かさ解析結果から、フィルム効率の不確かさは $\pm 9.5\%$ である。空力試験に関しては、実験に使用した圧力変換機の誤差はフルスケールで $\pm 0.25\%$ であり、式(4)で定義される全圧損失係数の誤差は $\pm 3.8\%$ である。また、3DLDVによる流れ場計測の誤差は、95%信頼区間に基づいて主流流速の誤差を算出すると、 $\pm 1.4\%$ であった。

4. 結果と考察

(1)壁面フィルム効率、熱伝達率

図4に実験で得られた冷却孔1ピッチ分の壁面フィルム冷却効率分布を示す。コンター上の白線(図7は黒線)は供試体の継ぎ目である。図4(a)には $BR=0.5$ における、壁面フィルム冷却効率コンターを示す。 $p=3.0d$ において、C.H., S.H.はFCDを設けない形態であるが、S.H.は冷却孔出口が流れ方向及び、スパン方向に拡大していることにより、二次空気の運動量が低減され、壁面への付着性が向上している。このため、冷却孔出口付近の局所的なフィルム冷却効率が高くなっており、二次空気のスパン方向への拡散性もC.H.に比べると大きいことがわかる。また、FCDを設けたC.H. FCDはC.H., S.H.に比べ、二次空気がスパン方向に広く分布しており、隣の冷却孔からの二次空気と干渉している様子も見受けられる。また、C.H.と比較して、冷却孔出口付近における、局所のフィルム冷却効率も向上していることがわかる。冷却孔ピッチが $4.5d$, $6.0d$ に拡大したモデルに関しては、 $p=3.0d$ と1ピッチ当たりで比較してC.H., S.H.においては、二次空気の付着していない範囲が増加している。しかし、C.H. FCDではFCDを設置したことにより二次空気拡散性が向上しているため、 $p=4.5d$, $6.0d$ においても、他の形態に比べて依然として広い付着面積を有していることを確認できる。

図4(b)には $BR=1.0$ における、壁面フィルム冷却効率分布を示す。吹き出し比の増加に伴い、二次空気の運動量が増加し、CRVPが大規模化するために、全体的に二次空気の壁面付着性は $BR=0.5$ の条件に比べて低下している。特に、C.H.では、二次空気のLift-off効果が顕著に

表れ、全冷却孔ピッチに渡り、壁面付着性が著しく低下している。しかしながら、S.H. $3.0d$, $4.5d$, $6.0d$ においては、二次空気運動量の低減効果が発揮されたことで、C.H.と比較して、局所のフィルム冷却効率は高い値を示している。また、FCDを設けたC.H. FCDに関しては、FCDを適用している冷却孔形状がC.H.であり、C.H.は高吹き出し比条件でフィルム冷却効率が極端に低下するものの、FCD無しモデルに比べ、BRが増加しても高い壁面付着性とスパン方向拡散性を維持している。

図5には、各冷却孔ピッチにおける1ピッチ当たりのスパン方向平均フィルム冷却効率 ($0 \leq x/d \leq 10$) を示す。供試体をはめ込み式としているために、そのつなぎ目でグラフ中に若干不連続な箇所が見受けられる。図5(a), $p=3.0d$ において、S.H.は他の形態と比較して、冷却孔出口付近のフィルム冷却効率が大幅に高くなっていることがわかる。これは、冷却孔出口が拡大することで、二次空気の運動量を削減し、出口付近でのlift-offが抑えられている効果である。しかし、S.H.はフィルム冷却効率の減衰が大きく、下流側のフィルム冷却効率はC.H.に近づいていく。C.H. FCDでは、C.H.と比較して、全領域でフィルム冷却効率の向上を確認することができる。また、C.H. FCDでは冷却孔下流領域におけるフィルム冷却効率の減衰がS.H.と比較して抑えられており、下流側においてもC.H. FCDのフィルム冷却効率は依然としてS.H.を上回っている。 $BR=1.0$ においても、FCDの効果は発揮されており、二次空気のLift-offにより、二次空気の壁面付着性が低下し、フィルム冷却効率を大きく落とすC.H.からの効率上昇は非常に大きいと言える。S.H.とC.H. FCDを比較すると、S.H.フィルム冷却効率が極端に高くなる冷却孔出口付近以降ではC.H. FCDのフィルム冷却効率が上回っており、FCDの効果の高さを伺うことができる。

図5(b), (c), $p=4.5d$, $6.0d$ においては、冷却孔ピッチが拡大したことで、 $p=3.0d$ と比較して無冷却の領域が増えるため、平均フィルム冷却効率としては低くなる。しかしながら、フィルム冷却効率のグラフの傾向は $p=3.0d$ の条件と同様の傾向を示しており、S.H.に対して、C.H. FCDが優位性を示す結果となっている。

図6には各吹き出し比における、各形態の単位面積 ($0 \leq x/d \leq 10$, $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$) 当たりの面平均フィルム冷却効率を示す。この結果は全てC.H. $3.0d$ の結果で各吹き出し比毎に正規化している。 $p=4.5d$, $6.0d$ においては、冷却孔ピッチがそれぞれ $p=3.0d$ の1.5倍、2倍であり、同じBRでも、単位面積当たりの二次空気流量は $2/3$ または、半分であるため、全体的にフィルム冷却効率は減少している。図6(a)を見ると、 $p=3.0d \sim 6.0d$ の全ピッチにおいて、C.H.に比べS.H., C.H. FCDの両形態は高いフィルム冷却効率を示した。C.H. FCDについては、全ピッチに渡って、S.H.の効率をも上回っている。さらに、C.H. FCDは、冷却孔ピッチを拡大した $p=4.5d$, $6.0d$ においても、FCD無しC.H. $3.0d$ モデルより高いフィルム冷

却効率を示しており、少ない二次空気量で効率良く冷却がなされていることを表している。

図 6 (b)には $BR=1.0$ における、各形態の面平均フィルム冷却効率を示す。 $BR=1.0$ においては、二次空気のLift-offにより、C.H.の性能が極端に低下している関係で、相対的にS.H., C.H. FCDは全ピッチで高い面平均フィルム効率を示しており、特に $p=3.0d$ においては、S.H., C.H. FCDは4倍以上のフィルム冷却効率となっている。 $BR=1.0$ においては、C.H. FCDはS.H.の面平均フィルム冷却効率を上回ることができなかった。これは、S.H.は比較的吹き出し比の変化に強く、 $BR=1.0$ の条件でもフィルム効率の低下が小さいためである。しかしながら、C.H. FCDはS.H.のフィルム効率に迫っており、全ピッチに渡り、S.H.と同等の性能を示している。さらに、図 4 のフィルム冷却効率のコンターからもわかるように、S.H.と比較して、C.H.FCDの方が広い付着面積を有しており、二次空気付着面積でみると、広い面積を均一に冷却できるC.H.FCDの方が優位であると考えられる。また、図 5 のスパン方向平均のグラフからも、C.H.FCDが下流側でS.H.のフィルム冷却効率を上回ることがわかるため、FCDが非常に有用であると言える。

図 7 には $p=3.0d$ における、熱伝達率の分布を示す。図中の黒の領域は実験中に温度上昇が得られなかった領域であり、熱伝達率を算出することができなかったため、No Dataとして取り扱っている。 $BR=0.5$ では各条件で二次空気吹き出しの影響を受け、冷却孔下流の領域で熱伝達率が高くなっている。C.H.とS.H.を比較すると、S.H.では熱伝達率の分布がC.H.に比べスパン方向に広がっているものの、出口付近の熱伝達率は抑えられている。また、C.H.FCDでは、冷却孔出口付近から、高い熱伝達率が二股に分かれたように分布している。これは、FCDから発生した縦渦の存在領域を示唆しており、冷却孔出口近傍の領域では高い熱伝達率を示している。 $BR=1.0$ では、二次空気の運動量増加に伴い、熱伝達率も全体的に増加していることがわかる。特に、C.H., C.H.FCDでは、高い二次空気運動量により、全体的に高い熱伝達率となっており、C.H.FCDは縦渦による熱伝達率上昇も加わるため、高い熱伝達率が広く分布している。S.H.は、二次空気運動量が冷却孔出口で削減されるため、 $BR=1.0$ においても他の形態に比べて、低い熱伝達率に抑えられている。

図 8 には、 $p=3.0d$ におけるスパン方向平均熱伝達率のグラフを示す。平均処理の際は、図 7 に示したNo Dataの領域は処理に含めないようにしている。図 7 から読み取れたように、冷却孔形状がC.H.の場合は、S.H.に比べ両吹き出し比ともに高い熱伝達率を示している。また、S.H.は吹き出し比増加に伴う熱伝達率増加が比較的小さいことがわかる。C.H.とC.H.FCDを比較するとFCD適用による熱伝達率上昇は冷却孔出口付近に限定的であり、下流側ではC.H.と同等の熱伝達率を示している。

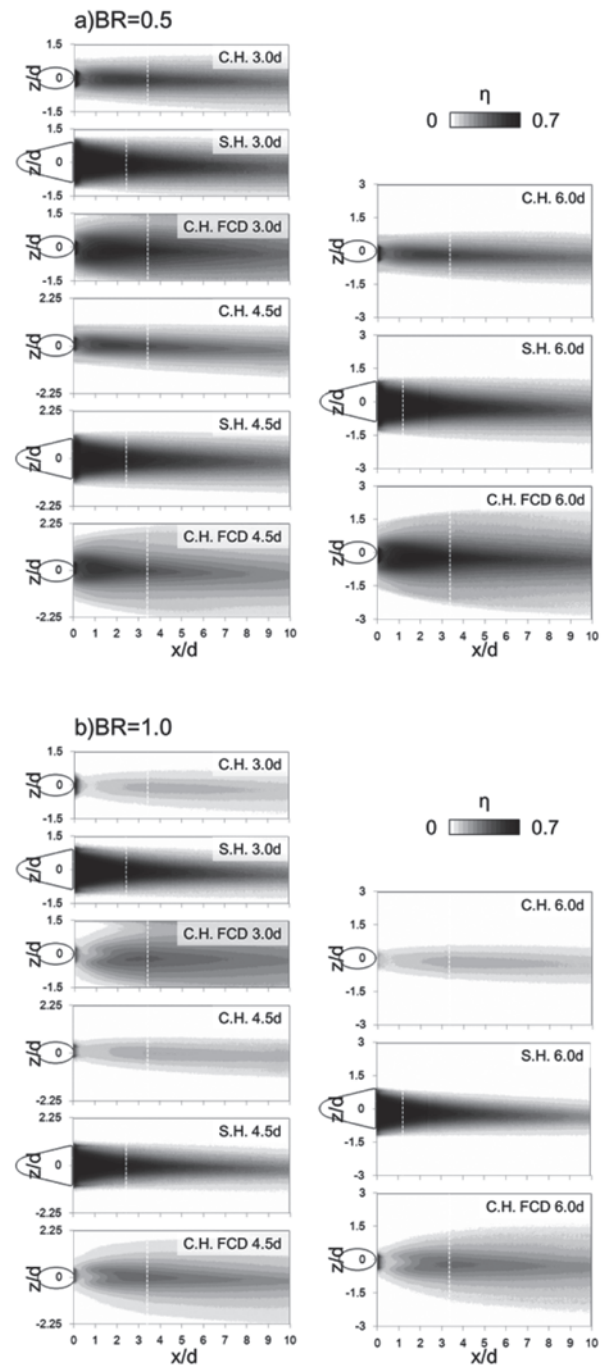


Fig. 4 Film effectiveness distribution for each hole pitch: (a) $BR=0.5$, (b) $BR=1.0$

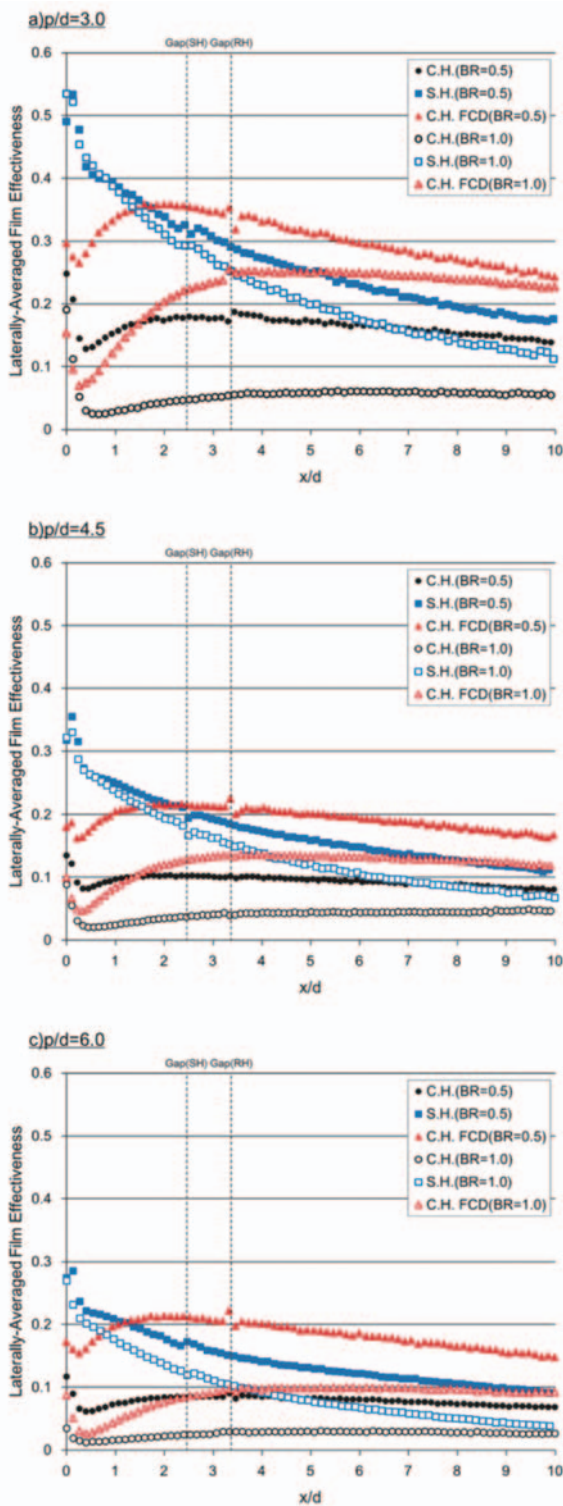


Fig. 5 Laterally-averaged film effectiveness of all test cases : (a) $p=3.0d$, (b) $p=4.5d$, (c) $p=6.0d$

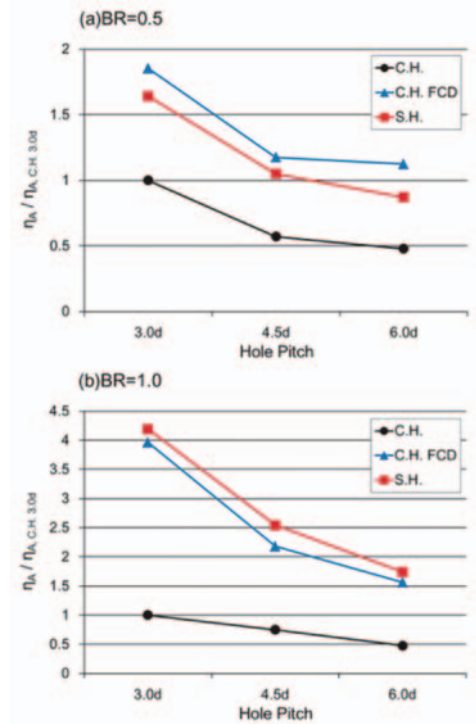


Fig. 6 Spatially averaged film effectiveness for each hole pitch: (a) $BR=0.5$, (b) $BR=1.0$

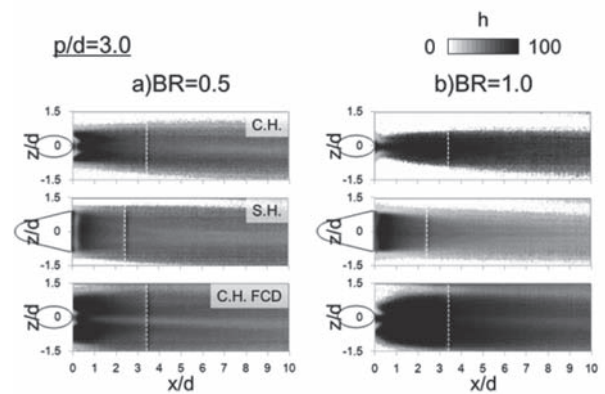


Fig. 7 Heat Transfer Coefficient distribution for $p=3.0d$

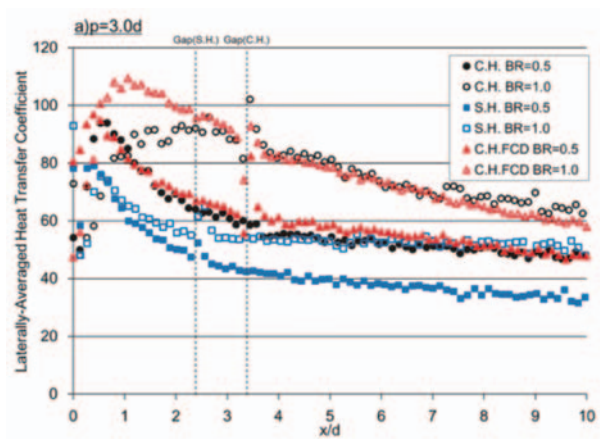


Fig. 8 Laterally-averaged Heat Transfer Coefficient for $p=3.0d$

(2)空間温度場分布

図9に実験で取得した、各ピッチ条件の無次元温度の分布を示す。図9(a) $p=3.0d$ の形態では、計測範囲内に冷却孔が3つ存在しているために、それぞれのコンターに、両端の冷却孔から吹き出した二次空気を確認できる。C.H.とS.H.を比較すると、C.H.に比べ、冷却孔出口が拡大しているS.H.では二次空気のLift-offが抑制されるために、壁面付着性が高く、無次元温度の高い領域も壁面寄りに存在しており、前述したとおり壁面フィルム効率でもC.H.よりも高い値を示した。FCDを設置した形態であるC.H. FCDは、FCDから発生する縦渦によって壁面付着性とスパン方向の拡散性が大幅に向上しているため、隣り合った冷却孔から吹き出した二次空気同士が互いに干渉合っている様子(領域(A))が確認でき、その領域(A)では、二次空気の巻き上がりを確認できる。C.H. FCDは、この広い拡散性と、高い付着性により、高いフィルム効率を示していたと考えられる。

図9(b),(c)の $p=4.5d, 6.0d$ においては、 $p=3.0d$ の条件と同様にS.H.は、C.H.に比べて二次空気の付着性が高くなっており、無次元温度の高い領域がより壁面近くに存在していることがわかる。また、FCDを設置したC.H. FCDの条件では、二次空気の付着性、スパン方向拡散性ともに向上している。さらに、温度場の端では二次空気の巻き上がりがわずかに確認できるが、 $p=3.0d$ と違い、FCDから発生した縦渦どうしの干渉が起こっていないために、二次空気の巻き上がりも弱くなっている。

また $BR=1.0$ においては、吹き出し比の増加に伴い、CRVPが強まるために、 $BR=0.5$ の条件と比べて温度場が壁面から離れていることが分かる。また、C.H.では無次元温度コアの値自体も低くなっており、主流とのミキシングが促進されていると考えられる。しかしながら、S.H.では BR が増加しても、壁面付近に無次元温度の高い領域が存在し、二次空気の付着性を保っている。C.H. FCDにおいては、二次空気のコアは若干壁面から離れるものの、FCDの効果により、付着性を維持しており、高い拡散性のため、二次空気どうしの干渉も確認できる。S.H.とC.H. FCDは前述の通り、同等のフィルム効率を示していたが、二次空気の付着面積としてはC.H. FCDのほうが、全ピッチに渡って、優位になる傾向にあった。

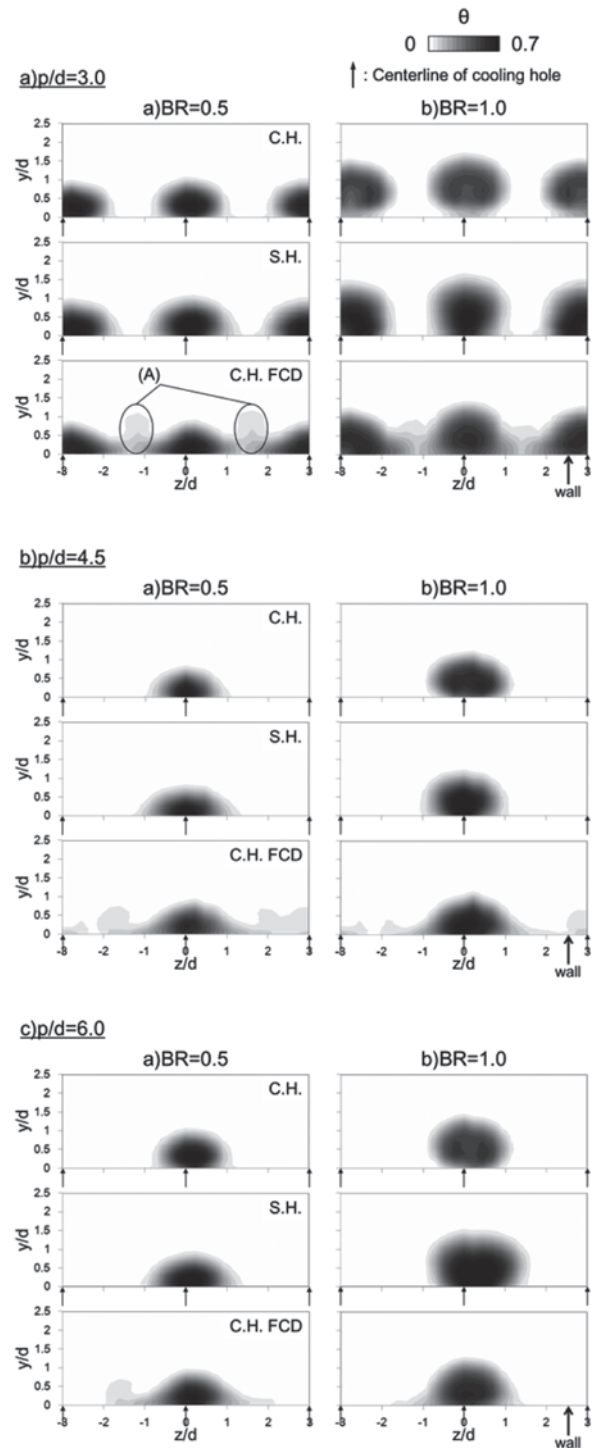


Fig. 9 Local temperature on normal planes to model surface: (a) $p=3.0d$, (b) $p=4.5d$, (c) $p=6.0d$

(3)三次元流れ場計測

図10(a),(b),(c)に3D-LDVによる流れ場計測で取得した $x/d=3.0$ における、流れ方向渦度のコンターを示す。また、 $y/d < 0.2$ の領域は、壁面反射の影響で十分なサンプリングが得られなかった部分があったことから、データの記載は行っていない。

図10(a), 吹き出し無し、FCD無しの条件においては、主だった渦は確認することができない。しかし、FCD

を設置した条件においては、 $p=3.0d$ から $6.0d$ まで全ての条件で、FCD存在位置下流において渦のペアを確認することができる。これはFCDから発生した縦渦である。特に、 $p=3.0d$ においては、FCDどうしの間隔が狭いために、隣り合ったデバイスから発生した渦どうしが干渉している。この渦は、互いに強め合うような渦であるため、 $p=3.0d$ では、 $p=4.5d$ 、 $6.0d$ に比べ渦が大きくなっている。ピッチが拡大するにつれて、FCDどうしの距離が離れていくために、この縦渦は小規模化していく傾向にある。しかしながらこの渦は、どの冷却孔ピッチにおいても、冷却孔センターライン位置では、二次空気を壁面に押さえつけ、拡散を促進するような向きになっている。また、渦どうしが干渉している部分では、二次空気を巻き上げる向きの渦度となっている。また、 $p=3.0d$ 、 $4.5d$ の条件では、正負の渦ペアが2つ存在しているが、これは計測面中央の冷却孔に設置したデバイスから発生した縦渦と、両側の冷却孔に設置したデバイスから発生した縦渦が流れ着き、互いに干渉しているものである。

図10(b)は $BR=0.5$ の渦度コンターを示す。C.H., S.H.を見ると二次空気吹き出しによるCRVP(渦(A))が形成されていることが分かる。このCRVPは二次空気のlift-offを促進し、冷却性の悪化を招く原因となっている。しかしながら、S.H.ではC.H.と比較してCRVPを構成する時計回り、反時計回りの渦が離れて存在していることと、CRVPの強度自体も弱くなっていることから付着性の高い流れ場を形成していると考えられる。また、C.H.FCDにおいては、渦(B)は二次空気吹き出しにより発生したCRVPであり、前述の渦(A)と同じものである。渦(C)はFCDから発生した縦渦である。FCDを設けた形態ではC.H.と比べて、CRVPが弱まっていることから、FCDを設置することで、FCDから発生する縦渦がCRVPを抑制し、フィルム効率改善に寄与していると考えられる。

図10(c)に $BR=1.0$ の渦度コンターを示す。吹き出し比が増加したことにより、 $BR=0.5$ に比べ、冷却孔から発生するCRVPが強まっていることがわかり、この傾向は特にC.H.において顕著に表れ、S.H.におけるCRVPはC.H.と比較すると小規模であることがわかる。しかし、C.H.FCDでは縦渦の大きさは $BR=0.5$ と同程度であり、吹き出し比に依らないことがわかる。この縦渦の効果により、前述の壁面フィルム冷却効率の結果からも確認できたように $BR=1.0$ においても、依然としてCRVP抑制効果を発揮していると考えられる。

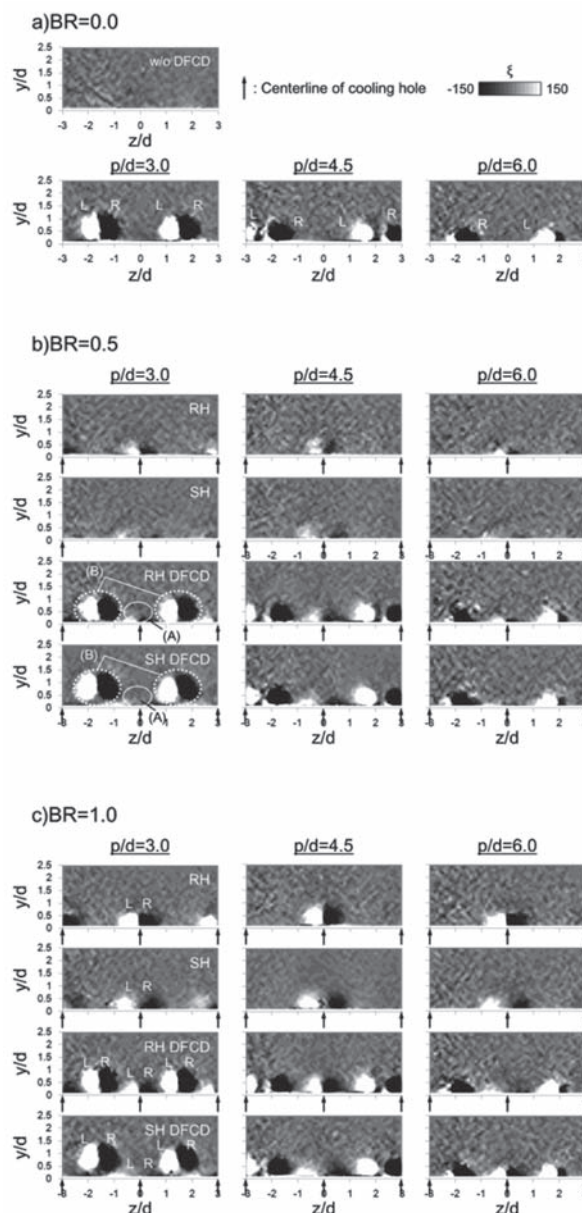


Fig.10 Velocity fields at $x/d=3.0$ Vorticity
: (a) No injection, (b) $BR=0.5$ (c) $BR=1.0$

(4)全圧損失係数計測

定量的な空力性能の評価を行うために、 $-3.0 \leq z/d \leq 3.0$, $0 \leq y/d \leq 2.5$ の範囲で流量平均した全圧損失係数を、各冷却孔ピッチ毎に図11(a), (b), (c)に示す。各冷却孔ピッチにおける結果は、二次空気吹き出しを行わず、FCDを設けない場合の結果で正規化している。全冷却孔ピッチにおいて、二次空気の吹き出しを行わない場合でも、FCDを設置した条件では、FCDから生成した縦渦と主流とのミキシングが起こるため、FCD無しの条件と比較して、全圧損失が増加していた。

図11(a) $p=3.0d$ では、 $BR=0.5$ においては、C.H.とS.H.の損失は同程度となっているが、FCDを設置した形態については、FCDを設けないC.H.に比べて損失が大きくなっていることがわかる。これは、二次空気吹き出しに

よる二次空気と主流とのミキシングによる全圧損失と、FCDから発生する縦渦と主流空気とのミキシングによる全圧損失のためであると考えられる。 $BR=1.0$ においては、 $BR=0.5$ と比較してS.H.の損失は上昇しているものの、C.H.の損失が減少しており、C.H.では主流に運動量を与えている可能性がある⁽⁴⁾ためであると考えられる。図11(b), (c)は $p=4.5d$, $6.0d$ の形態であり、この計測範囲に存在する冷却孔は1つであるので、先ほどの $p=3.0d$ に比べて、単位面積当たりの二次空気流量は少なくなっている。しかしながら、基本的な損失の傾向は $p=3.0d$ の条件と変わらず、FCDを設けた形態では損失が比較的高くなっており、吹き出し無し条件と比較して、約1.4倍～1.6倍程度の損失増加となっていた。

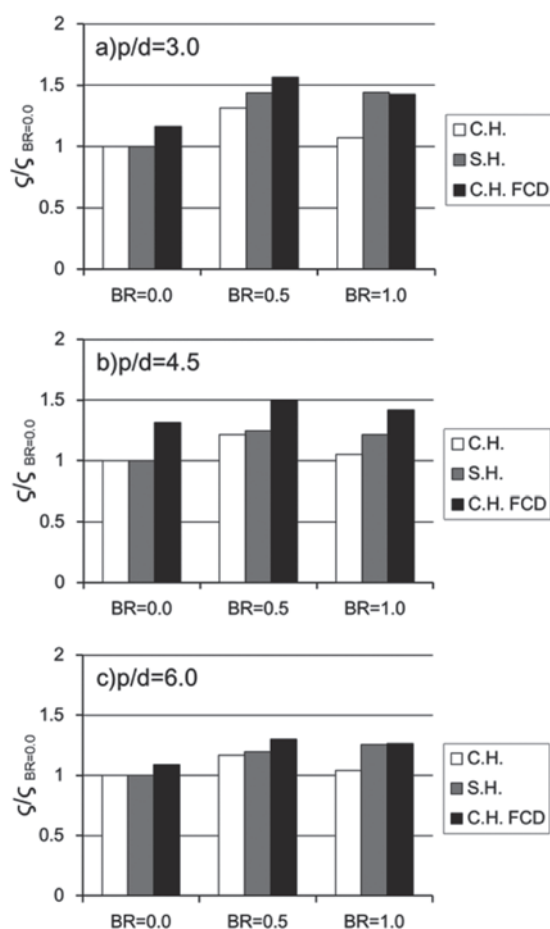


Fig.11 Mass averaged total pressure loss coefficient
: (a) $p=3.0d$, (b) $p=4.5d$, (c) $p=6.0d$

5. 結言

本研究ではフィルム冷却性能の改善、向上を目的としてFCDを冷却孔上流に取り付けた。FCDを取り付けた際の伝熱、空力特性を明らかにするために4種類の実験を行った。以下に、本研究により得られた知見を示す。

- ・ $BR=0.5$ において、C.H.FCDは、FCDを設けないC.H., S.H.よりも高いフィルム冷却効率を示した。 $BR=1.0$ においては、C.H.FCDはS.H.と同等の面平均フィルム

冷却効率を示していたが、C.H.FCDの方が広い付着面積を有しており、スパン方向平均でみると下流側でC.H.FCDの方が高いフィルム冷却効率を示していた。しかしながら、熱伝達率では冷却孔形状がC.H.のものはS.H.よりも高い熱伝達率を示す傾向にあった。特にC.H.FCDは、下流側ではC.H.と同程度の熱伝達率だが、冷却孔出口近傍の領域では縦渦の影響により熱伝達率が上昇していた。

- ・ C.H.FCDは冷却孔ピッチを広げた場合、C.H. $3.0d$ に比べ、単位面積当たりの二次空気流量が減少しているにも関わらず、フィルム冷却効率は高くなっていた。このことより、FCDを冷却孔上流に設置することで冷却空気量を削減できる可能性が示された。
- ・ FCDを設けた形態では、FCDから発生した縦渦がCRVPと逆回転であることが流れ場計測の結果から明らかになった。この縦渦が、二次空気の壁面付着性、拡散性を向上させ、フィルム冷却効率の向上に寄与した。
- ・ FCDを設けた形態では、二次空気吹き出しによる二次空気と主流とのミキシング起因の全圧損失と、FCDから発生する縦渦と主流空気とのミキシング起因の全圧損失の複合効果により、FCD無しの条件と比較して空力損失は増加する傾向にあった。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁から、エネルギー使用合理化先進的技術開発費補助金（高効率ガスタービン技術実証事業）の支援を受けている。ご支援に対し深く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Chia, H. L., Graham P., Peter I. "Influence of Film Cooling Hole Angles and Geometries on Aerodynamic Loss and Net Heat Flux Reduction" ASME Turbo Expo 2011, GT2011-45721
- (2) Kawabata. H., Funazaki. K., Ryota. N., Daichi. T., "Experimental and Numerical Investigations of Effects of Flow Control Devices Upon Flat-Plate Film Cooling Performance" ASME Turbo Expo 2013, GT2013-95197
- (3) Kline, S. J. and McClintock, F. A., 1953, "Describing Uncertainties in Single Sample Experiments", Mechanical Engineering, Vol.75, pp.3-8.
- (4) Ranjan. S., Jens. F., Torsten F., "Suction and Pressure Side Film Cooling Influence on Vane Aero Performance in A Transonic Annular Cascade" ASME Turbo Expo2013, GT2013-94319, 2013

2014年ASME国際ガスタービン会議

1. 全般

田沼 唯士*1
TANUMA Tadashi

1. 会議概要

2014年6月16日(月)から20日(金)までの5日間、ドイツ西部のビジネスの中心都市DüsseldorfでASME International Gas Turbine Institute主催のTurbo Expo 2014 Turbine Technical Conference and Exposition (国際ガスタービン会議)が開催された。会場は旧市街地から5キロほど北西のCongress Center Düsseldorf (CCD)で、ライン川東側河畔にあり、会議の休憩時間にはライン川の岸辺を散策する出席者が多かった。図1はライン川の岸辺から見たCCDである。

ASME Turbo Expoは、航空エンジン、ガスタービン、蒸気タービン、風車、ファン及び送風機等のターボ機械の研究開発成果や応用技術に関する技術講演会と製品及びサービスに関連する展示会で構成される。最近ではオーガニックランキンサイクルや超臨界CO₂などの発電用新サイクルの研究発表なども増えている。スコープの拡大に伴い、年々参加者が増加しており、2014年は参加者が3000名を大きく上回る規模となった模様である。日本ガスタービン学会はParticipating Organizationとして協賛しており、今年度は展示会に提供されたブースでの展示を行った。

2. プレナリーセッション

初日に開催されたプレナリーセッションには例年と同様に多数の聴衆が集まり、座席が急遽追加された。図2はIGTI Board ChairのKaren Thole教授(中央)とBoardメンバー(右側)、キーノートセッション講演者(左側)である。



Fig. 1 Congress Center Düsseldorf

原稿受付 2014年8月5日

*1 帝京大学 ジョイントプログラムセンター
応用流体力学・エネルギー機械系
〒173-8605 東京都板橋区加賀 2-11-1

キーノートのテーマは「ライフサイクルコスト低減技術」で、SiemensのPratyush Nag氏とAlstomのDr. Charles Soothill氏は欧州を中心とした最近の再生可能エネルギー電力の増加を背景として、発電用ガスタービンや発電用蒸気タービンの性能向上だけでなく、急速起動や負荷追従性などの柔軟な運転特性が必要となっていることを示し、ライフサイクルコストを低減できる技術開発の重要性を訴えた。Rolls-Royce DeutschlandのDr. Karsten Muhlenfeld氏は航空エンジンの最近の技術動向とメンテナンスコスト低減技術等の動向を述べた。

3. 技術セッション

発表される論文数は年々増加しており、2012年のCopenhagen以降は1000編を超え、本年は1230編と過去最高となった。Committee別ではTurbomachinery 303, Heat Transfer 216, Structures & Dynamics 163, Combustion, Fuels & Emissions 131に続いて、2011年に新設されたSteam Turbine Committeeが51編(内11編はJournalへ推薦された)と5位に入っており、注目される。

4. 展示会

日本ガスタービン学会は、今回初めて展示会にブースを設けてGTSJの紹介、日本のガスタービン開発史、東日本大震災におけるガスタービンの状況などを紹介した。

5. 所感

ドイツ開催のためか、SiemensやAlstomなどのメーカーの若手技術者が多数参加して、活発に発言していたのが印象的だった。日本からも注目を集める論文発表が多数あり、来年のTurbo Expo 2015モンテリオールでも多くの研究成果が発表されることを期待したい。



Fig. 2 Opening plenary session (by courtesy of ASME IGTI)

2. 航空用ガスタービン

浅子 知昭*¹
ASAKO Tomoaki

1. 概要

航空用エンジン関連のセッション数は、全部で11であった。セッションの内訳は、チュートリアルセッションが1つで、残りの10セッションがテクニカルセッション（論文発表）である。なお、テクニカルセッションでの発表数は、47件であった。また、これとは別にターボ機械とのジョイントセッションとして騒音関係の3つのセッションがあり、その中では14の発表があった。なお、今年度はパネルセッションが1件もなかったことが特徴である。

セッションの内容は、チュートリアルセッションでは、米空軍研究所出身の方がコアエンジンの圧縮機とタービンのマッチングなどの基礎的な内容を発表していた。残りの論文発表のセッションとして、①エンジン環境の影響として、パーティクル吸込みと氷・水吸込みの2セッション、②エンジンサイクル・概念設計がIとIIに分かれて2セッション、③オペラビリティ、④インレット、⑤ノズル、⑥プロペラ、⑦オイル・ガスシステム、⑧革新推進システムがそれぞれ1セッションずつ設定されていた。なお、セッション数、発表件数とも筆者による集計値となっている。

以下にそれぞれのテクニカルセッションでの発表の概要を示す。

2. パーティクル吸込み/氷・水吸込み

パーティクルの吸込みに関しては、耐エロージョンコーティングの試験結果についての報告（GT-25066）、砂粒などが高温下の金属にぶつかった時の跳ね返り率・堆積率を試験的に求めた結果（GT-25686, 25687）などが示された。また、氷・水の吸込みに関しては、氷と金属との接着強度モデルに関する研究の発表（GT-25171）、翼に付着する氷の成長から剥離までをシミュレートできるモデルの開発と試験結果との比較を示したもの（GT-25839）、アイスクリスタルなど比較的温度が高い時に発生する着氷現象のシミュレーションと検討（GT-25847）、エンジンが雨を吸い込んだときのエンジン性能への影響についての検討（GT-26556）などの発表があった。

3. エンジンサイクル・概念設計

このセッションでは、ファンのオフデザイン状態で

原稿受付 2014年7月16日

*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター
エンジン技術部
〒196-8686 昭島市拝島町3975-18

作動する時のエンジン性能予測精度を向上させる方法（GT-26449）、オープンロータをリージョナルジェット機用エンジンに適用した場合の評価（GT-26091）、二重反転ファンと通常ファンの比較（GT-26008）、米国DODで取り組んでいる試験の検証方法の効率化のため統計的モデルの活用方法（GT-25359）、ロバスト設計に関する新たなプロセス（GT-27137, 27017）や、市販のガスタービン性能シミュレーションソフトに組み合わせることでできる電動+ガスタービンのハイブリッド推進のシミュレーションツールの開発の紹介（GT-27047）、ヨーロッパで行われているLEMCOTEC（Low Emission Core Engine Technology）プロジェクトによるコアエンジンの熱効率向上に対する取組の紹介（GT-25040）などがあった。

4. オペラビリティ

ここでは、グラウンド渦や離陸時の先行機の翼端渦を吸い込んだ場合のファン特性の解析（GT-26481）、圧縮機のディストーションの影響の評価（GT-26627）、境界層吸込ファンの空力特性に関する発表（GT-26142）、入口ディストーションのエンジン性能への影響評価（GT-26666）などが示された。部屋に入りきらないほどの聴講者がおり、関心の高さが伺えた。

5. インレット

インレット関係として、補助動力装置のポップアップ型のインテークの研究（GT-25204）、民間機用エンジンのインテークにディストーションが生じている時のCFD解析に関する報告（GT-25772, 26472）、将来の低ファン圧力比のエンジンに要求されるであろう非常に短いインレットのナセルに関するスタディの報告（GT-26369）などがあった。

6. ノズル

ここでは、ローブミキサや丸ノズルの入口旋回流の影響に関する検討（GT-25691, 26486）、CFDによる騒音予測に関する研究（GT-27290）などが報告された。

7. プロペラ

プロペラ関係としては、二重反転プロペラの特性を精度よく予測する方法（GT-25057）やダクト付の二重反転ファンエンジンの概念設計結果（GT-26292）などの発表があった。

8. オイル・ガスシステム

このセッションでは、エンジン振動モニタリングのためのリグ試験結果 (GT-25726), AGB (Accessory Gear Box) の設計・評価ツールの紹介とそれを用いた最適検討 (GT-27287), オイルジェットの特性研究 (GT-26028) などの発表があった。

9. 革新推進システム

この中では、LPTの二次空気システムの検討 (GT-26184), エンジンカウル内に置かれる機体補機の伝熱試験とシミュレーションの比較結果の報告 (GT-25255) や米国の高空試験装置の圧縮機システムのサージ挙動の解析結果 (GT-25068) などが発表された。

3. 産業用ガスタービン

武田 拓也*¹
TAKEDA Takuya

産業用ガスタービンは” Electric Power”, ” Industrial & Cogeneration”, ” Oil & Gas Applications”, ” Marine” のCommitteeが中心であるが、本年はガスタービンを用いた発展的なサイクルが” Cycle Innovations”, ” Supercritical CO₂ Power Cycles”, ” Organic Rankine Cycle Power Systems” でも取り扱われていたため、これについても触れる。

産業用ガスタービンの論文発表数の合計は129件であり、筆頭発表者の国別にみると、アメリカが36件と最も多く、イタリア (17件), 中国 (16件), ドイツ (11件) が続いた。日本の論文件数は5件であった。大学の発表が70件、企業の発表が59件とほぼ同数であり、Cycle InnovationsやOrganic Rankine Cycleの先進的なCommitteeは大学の割合が多く、Electric PowerやMarine の製品に直結しているCommitteeは企業の割合が多かった。

1. Electric Power : 発電用途

論文件数は12件で、昨年より1件増加。ガスタービンのうち、主に大型のガスタービンを取り扱うCommitteeである。昨今の火力発電には太陽光、風力などの再生可能エネルギーとの調和が求められている関係で、発表も再生可能エネルギーの導入が進んだ場合の負荷変化率の予測や出力の平準化についての発表が多かった。その他はSiemensによる従来機の性能向上 (GT-27015, 27435) やモニタリングについての発表があった。GE, Siemens, MHIなどのガスタービンメーカーのパネルセッションでは新機種や改良機についての説明があって注目を浴びていた他、再生可能エネルギーへの対応についてのパネルセッションもあり再生可能エネルギーへの関心の高さが感じられた。

2. Industrial and Cogeneration : 産業用途と熱電併給

論文件数は12件で、昨年より2件増加。主に中・小型のガスタービンを取り扱うCommitteeである。圧縮機のInlet Foggingを実施した際の圧損や液滴分布についての発表 (GT-26497) やコージェネレーションシステムの最適化 (GT-25027, 27028), 吸気フィルタの性能劣化と経済性評価 (GT-25670) など様々な内容の発表があった。ガスタービンメーカーとしてはAlstomによる技術開発状況の発表 (GT-25371) があった。

3. Oil & Gas Applications : 石油・ガス産業用途

論文件数は22件で、昨年より2件増加。駆動源のガスタービン本体に関する発表の他、ガス圧縮機など石油・ガス産業全般について取り扱うCommitteeである。発表はガスタービン圧縮機やガス圧縮機に関する発表が多く、圧縮機の洗浄 (GT-25053, 25272), ガス圧縮機の作動マップ (GT-25135), 性能や排出ガスのモニタリング (GT-25242, 25443) の他、駆動用ガスタービンの工場試験についての発表 (GT-26380) もあった。本分野は石油・ガス会社の関心が高いためか今年は5件のTutorialセッションが組み込まれ、湿り圧縮やガス生産のシステムについての説明があった。

4. Marine : 船舶用途

論文件数は9件で、昨年より3件増加。船舶用のガスタービンを取り扱うCommitteeであるが、9件中4件がRolls-Royce関係と偏っていた。他の発表としてはディーゼルエンジンの過給機の電動アシストに関する発表 (GT-25667) があった。

5. Cycle Innovations : 革新サイクル

論文件数は38件と多く、昨年より5件増加。発表はSOFCの性能、制御 (GT-26851, 25246) に関するものや太陽光を利用したサイクル (GT-26787, 25137) など分野は多岐にわたる。中間冷却・再生サイクルの航空エンジンの発表 (GT-26010など) も行われていた。航空用エンジンの設計と展望のTutorialセッションでは航空

原稿受付 2014年7月16日

* 1 三菱日立パワーシステムズ(株) 研究所
〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2

用エンジンの高温化の歴史の他、ファンとケーシングの自重によるバイパス比の最適点や中間冷却・再生サイクルを採用した次世代エンジンについて触れられていた。

6. Supercritical CO₂ Power Cycles : 超臨界CO₂ 発電サイクル

論文件数は20件で、昨年より6件増加。アメリカ(Bechtel)が昨年に引き続き発表していた他、超臨界CO₂による腐食・浸食についての発表(GT-25136, 26061)、後述のOrganic Rankine Cycleとの比較・組み合わせの発表(GT-26500, 26648)などがあった。その

他は超臨界状態での物性の影響や伝熱モデルの検証などがあり、全体として基礎的な研究が中心であった。

7. Organic Rankine Cycle Power Systems : 有機ランキンサイクル

今年新たに設けられたCommitteeで、論文件数は16件であった。R11・R245faなどの有機媒体を作動流体としたサイクルのCommitteeである。主として性能評価やシステム計算などのサイクルの評価に関する発表が中心であったが、試験の評価に関する発表(GT-25112)や高分子流体のCFDに関する発表(GT-26204)もあった。

4. 小型ガスタービンおよびセラミックス

壹岐 典彦*¹
IKI Norihiko

マイクロタービン・ターボチャージャー・小型ターボ機械関連に関しては、26件の論文が発表されている。その他にもサイクルイノベーションのセッションでマイクロガスタービンや燃料電池ハイブリッドなど小型ターボ機械に関連する論文が8件発表されている。このうち、マイクロガスタービンもしくはミニジェットエンジン関係が14件、ターボチャージャー関連が13件であり、SOFC関連が4件、オーガニックランキンサイクル1件、テスラタービン1件、磁性流体の軸受けが1件発表された。なおオーガニックランキンサイクルのセッションは別にあり、16件の論文が発表されている。

セラミックス関連の論文件数は14件であり、セラミックス基複合材CMCに関連するものが7件、遮熱コーティングTBCに関するものが6件であった。セラミック単身を主とした論文は発表されなかった。

1. マイクロタービン・小型ターボ機械

ガスタービンシステムについては、燃料を変えて検討したものが比較的多く、バイオマスガス化・廃棄物熱分解・消化ガスを対象に燃焼器のCFD解析を行ってEGRも検討したもの(GT-25560)、メタン-水素混合燃料について部分負荷運転の実験データと燃焼器の3D CFD解析により水素濃度と部分負荷運転を検討したもの(GT-26631)、JP8-キャノラバイオディーゼル混合燃料を用いて小型ジェットエンジンで試験したもの(GT-27340)、天然ガスとバイオマスを燃料とし経済性を検討したもの(GT-27109)が発表された。またマ

イクログスタービン試験装置に関するものが3件(GT-25391, 25811, 26123)報告され、フォイル軸受を用いた8kWのマイクロタービンの発電機の開発(GT-27306)が発表された。さらにEGRと高湿分空気について検討したもの(GT-26917)、二次空気システムに着目しマイクロタービンの圧縮機とタービンについてCFD解析したもの(GT-26582)が発表された。要素技術としては、熱交換器に関して、小型再生器のCFD解析(GT-25297)、気温・湿度・標高を条件に再生器の効果を検討したもの(GT-25317)、ガスタービン排気の長時間暴露により再生器の素材の比較をしたもの(GT-25334)が発表された。また小型ターボジェットエンジンについて、ファジー理論によるスピード制御を適用したもの(GT-27158)が発表された。

燃料電池に関してはSOFCについて、MGTとのハイブリッドシステムの試験(GT-25246, 25918)、さらに緊急停止(GT-25432)について検討が行われている。また、エジェクターを用いたアノードガス再循環システムの試験結果(GT-25585)が発表された。

ターボ過給機については、2ステージのターボチャージャーの発表が多く、マッチング方法(GT-26682)、メーカーの効率マップをスケーリングする方法(GT-25224)、圧縮機入口の流れのゆがみの性能への影響(GT-26530)、UAVのプロペラ推進用エンジンのターボチャージャーのモデリング(GT-25193)が発表された。またCFDを用いて脈動する流れへの応答を調べたもの(GT-25829)、車両用ターボチャージャーについて周波数ミスマッチングによる振動について調べたもの(GT-27217)、鋳造ホイールに由来するミスマッチング(GT-25099)、ラジアルタービンホイールの温度分布(GT-26327)、車両用ターボチャージャー内の伝熱現象

原稿受付 2014年7月25日

*1 (独)産業技術総合研究所
エネルギー技術研究部門 ターボマシニンググループ
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

を分析したもの (GT-25179) が発表された。材料や寿命に関わり、ターボチャージャーの疲労寿命の改善手法 (GT-25999)、ガソリンエンジン用の過給システム可変タービンの材料を候補の中から数値シミュレーション援用により選択する手法 (GT-27119) が発表された。製造技術としては5軸のフランクミリングフライスによるインペラ加工 (GT-25014) が発表された。

軸受けについて、ターボチャージャーのオイルフリーのスラスト・フォイル軸受 (GT-25940)、磁性流体軸受の試験 (GT-25219) の発表があった。

2. セラミックス

CMCについて、炭化ケイ素コーティング・ジルコニアコーティングの歪みのX線回折測定 (GT-26281)、冷却構造をもつ高圧タービンペーン (GT-27136)、炭化ケイ素ウィスカーを組み込んだジルコニア強化アルミナ

(GT-25590) が発表された。また、FOD損傷 (GT-25981, 26955)、温度を上昇させたクリープ試験 (GT-26245) が発表された。更にガラスセラミックスのゆっくりとしたクラック成長について調べてセラミック単身やCMCへ知見適用を検討したもの (GT-27325) が発表された。

TBCについて、電子ビーム蒸着により基盤へセラミックトップコートを行って寿命への影響を調べたもの (GT-25444)、バーナにより周期的に加熱して寿命を調べたもの (GT-26325)、プラズマ風洞を用いたエロージョン試験 (GT-25523)、温度勾配と機械的負荷をかけたコーティング層のX線による内部応力分布計測 (GT-26919)、プレカーサ溶液を用いた溶射 (GT-26244, 26254) の発表があった。

その他にセラミックの空孔について、流体抵抗の推定と音の吸収 (GT-26864) の発表があった。

5. ターボ機械の性能と流れ

5.1 軸流関係 5.1.1 ファン・圧縮機

佐久間康典*¹
SAKUMA Yasunori

渡辺 紀徳*¹
WATANABE Toshinori

軸流ファン・圧縮機の空気力学関係では11セッションで56件の講演があった。昨年と同様、ドイツと中国からの論文の数が目立っている。また、例年通り非定常流れ、設計法と数値解析のセッションでも同分野の発表があった。一方、近年はファンおよび送風機というセッションも設けられており、今回は軸流関係が6セッションで28件の論文が発表された。更に、Structures & Dynamics Committeeとの合同で空力励振と減衰に関するセッションが5つあり、軸流関係の論文も多数発表されている。

流れ制御に関する発表が計20件と多数にのぼった。ケーシングトリートメント (CT) に関するものでは、遷音速軸流圧縮機に対して種々のCTによる失速抑制効果を実験的に検証したもの (GT-26099, 26102, 26103, 26298)、周方向溝型CTが翼端漏れ流れに及ぼす影響を数値的に調べたもの (GT-26495, 26691) などがあつた。また、ケーシング吹き出しに関して4件の論文発表があつた。後方で抽気した空気を動翼前縁上流で吹き出す形式を取り扱った例では、失速抑制効果への翼端間隙幅の感度を調べたもの (GT-25042)、吹き出し付近の流れ場の詳細観察を行ったもの (GT-27219) があつた。

遷音速回転翼列の翼端前縁上流に配置したDielectric

Barrier Dischargeプラズマアクチュエータ (DBD-PA) による失速抑制について実験的に調べた研究があり、スパイク型失速の圧縮機に適切な周波数で高電圧のDBD-PAを作動させて有意な効果が得られることが示唆された (GT-25294)。

翼端漏れ流れに関し、上流静翼からの後流が動翼の翼端漏れ渦の形成と挙動に与える影響を2次元PIVによる実験 (GT-26120) と数値解析 (GT-26121) で検討した結果が報告された。また、上流でのスパン方向全圧分布と動翼翼端間隙が、漏れ流れと漏れ渦の挙動に与える影響を数値的に調査した研究 (GT-26573) があつた。ケーシング壁と翼をアクリルで製作し、ヨウ化ナトリウム水溶液 (屈折率がアクリルに近い) を内部に満たした回転翼列試験機で、漏れ渦の構造を直接撮影した結果についても報告がなされた (GT-27195)。

静翼に関して、ハブシュラウドのキャビティ形状とラビリンスシールのクリアランスを変化させて流れを調べたもの (GT-23528)、片持ち静翼とシュラウド付き静翼の二次流損失を比較した研究 (GT-26095)、遷音速ファンの静翼形状の三次元最適化を数値的に行った研究 (GT-25857) などが見られた。

動翼の形状劣化を前縁・後縁半径や翼厚み、スタガー角など様々なパラメータによって表現し、それらの影響度を調べた研究 (GT-25544)、前縁のエロージョンが圧縮機性能に及ぼす影響を調べた実験 (GT-20523)、動翼

原稿受付 2014年7月24日

*1 東京大学大学院 工学系研究科 航空宇宙工学専攻
〒113-8656 文京区本郷7-3-1

前縁の曲率の滑らかさ及び連続性の影響を数値的に調査した研究 (GT-25804) などがあった。

近年注目を集める圧縮機上流からの過剰噴霧冷却に関して、翼表面に付着した噴霧が液滴を形成し、後縁から飛散する過程について遷音速直線翼列風洞を用いて実験的に調査した研究 (GT-25645) や、四段軸流圧縮機を対象に入口噴霧が作動特性に及ぼす影響を計測した研究

(GT-26807) なども発表された。

はじめに触れた空力励振に関するセッションには従来に比べて非常に多くの出席者があり、活発な議論が行われていた。また、ファンおよび送風機の分野でも、6つのうち2セッションが騒音と振動に関するものであった。流体関連振動の研究の動向が注目される。

5.1 軸流関係 5.1.2 タービン

吉田 毅^{*1}
YOSHIDA Takeshi

「軸流タービンの空気力学」では、13セッションにわたり、1件の講演キャンセルを除いて合計61件の発表があった。昨年の米国サンアントニオでの39件からは大幅な増加がみられ、特に欧州域からの発表が昨年度の18件から今年度は34件と大幅に増加した。これには欧州開催ということで、MTU, Siemens, Alstomといった大手タービンメーカーと共同研究を実施している欧州の研究機関からの発表が多数あったことが関係しているようである。現に、一昨年のコペンハーゲン開催でも59件と発表件数が多かった。また、中国からの発表は、昨年の3件に対して今年は9件と大幅に増加している。一方で日本からは、本セッションに限って言えば、一昨年「蒸気タービン」が委員会として独立したことも関係して、前回と同様、3件とやや少なかった。

全体としては講演件数が多いこともあり、セッションの区分は、伝熱・冷却、設計問題、エンドウォール・プロファイリング、二次流れ、シュラウド・リムシールからの漏れ、非設計点、非定常性など、軸流タービンにおける一連の課題が網羅され、開催期間中のほぼ全ての時間帯でセッションが開催された。講演テーマの傾向としては、特にエンドウォール・コンタリングと翼端隙間からの漏洩に関するテーマが比較的多いと感じられた。

筆者の知る限りにおいて盛況であった講演の幾つかを紹介する。ケンブリッジ大Whittle研究所のDr J. D. Coull氏 (Rolls-Royce シニア・リサーチ・フェロー) の講演 (GT-25261) は、翼先端形状に関してキャビティ・

チップ型とウイングレット・オーバーハング型を組み合わせたキャビティ・ウイングレット型を提案し、CFDによってチップ漏洩低減効果の可能性を示した。150人収容の会場が満席となり、後方も立ち見で一杯になっていたため、もし会場がより広ければさらに多くの聴講者を集めたものと想像される。また、その翌日の同じくケンブリッジ大Whittle研究所のDr. R. Miller氏による、製造・組立段階で生じるエンドウォールの段差が効率に与える影響を段差の実測値に基づき評価した結果の発表 (GT-25326) も大変盛況であった。更にピックアップするとすれば、米国海軍兵学校 (Naval Academy) のDr. R. Volino氏による講演 (GT-27006, 27013) は、ムービングベルトを用いて翼列に流入するノズルウェークの移動を再現し、実験的手法によりその影響を評価したもので、聴講者から活発な質問が寄せられていた。

全体の傾向としては、冒頭にも述べたエンドウォール・コンタリングに関する発表が、次に示すとおり比較的多く見受けられた。Rolls-Royce (GT-26628), アーヘン工大 (GT-26784, 26785), 中国航空工業集団 (GT-26190, 26587), ミュンヘン連邦軍大 (GT-25908), バージニア工大 (GT-26475), 上海交通大 (GT-26823)。その他では、Rolls-Royce, Chong Cha氏による冷却ガス注入を伴うタービンの効率計算方法 (GT-26656), マサチューセッツ工大 T. Palmer氏によるチップ・キャビティ内渦構造とチップ・インジェクションに関する検討 (GT-25783) も興味深く、活発な質疑も見られた。

原稿受付 2014年7月15日

*1 川重テクノロジー(株) ソリューション事業部
〒673-0014 明石市川崎町3-1

5.2 遠心関係

玉木 秀明*¹
TAMAKI Hideaki

遠心ターボ機械を扱うセッションは9セッションあり、計45件の講演がなされた。遠心ポンプ、振動水柱型空気タービンの発表もなされたが、ここではラジアルタービン、遠心圧縮機の講演について報告する。

ラジアルタービンのセッションでは、昨年引き続きエンジンの排気脈動がタービン性能に及ぼす影響を調査するための基礎研究が活発に行われている。スクロール形状と脈動流の影響を調べたもの (GT-26150, 26151, 25764)、脈動による非定常特性を計算コストの少ない1次元、準3次元モデルでシミュレートする試み (GT-25913)、ノズルの有無による脈動流下での斜流タービン性能の比較 (GT-26152) が報告された。また、慣性モーメント低減による過渡応答特性向上を目的とした斜流タービンの形状最適化 (GT-25850)、半羽根付きラジアルタービンの研究 (GT-26097) などがあつた。

産業用遠心圧縮機に関するものとして、インペラ出口流れを一様化するための翼形状定義手法とその設計指針 (GT-26642)、インペラボス比を考慮した遠心圧縮機の設計方法 (GT-25431)、インペラ表面粗さがR134aを作動流体とする2段遠心圧縮機性能へ及ぼす影響 (GT-25480)、前段圧縮機によって生じた流れ分布が後段圧縮機性能へ及ぼす影響を調べたもの (GT-26614)、窒素圧縮機への不等ピッチ・不等ソリディティ3次元羽根付きディフューザ適用 (GT-26487)、ポリユート代表断面の図心から回転軸までの距離を代表断面の径方向幅でわった形状パラメータ (slenderness) と圧力損失係数の関係を調べたもの (GT-26831)、ポリユートを数値解析する際の計算コストと計算精度について調査したもの (GT-27274)、多段遠心圧縮の数値解析におけるフロントおよびリアキャピティのモデリングの重要性を述べたもの (GT-25830)、1次元解析を用いた多段遠心圧縮機の実機性能改善事例 (GT-25156)、1次元性能予測手法を組込んだ圧縮機性能オンラインモニタリング手法の開発 (GT-25088) などが報告された。

過給機用遠心圧縮機に関するものとしては、1次元性能予測モデル高度化のためインペラ入口逆流 (循環) を考慮した損失モデルの提案 (GT-25853)、試験データから圧縮機各部の流動状態、損失係数を予測する簡易モデルの構築と圧縮機開発への適用 (GT-26720)、循環型ケーシングトリートメントが羽根無しディフューザの定常・非定常特性へ及ぼす影響 (GT-27185)、スクロールを5つのセクションに分割し各部の表面粗さの変化に対する圧縮機性能の感度を調べ、加工コストの低減に結びつける試み (GT-26949)、断面積分布、舌部の位置、出口管路広がり角がスクロール性能に及ぼす影響を調べたもの (GT-26849)、インペラ上流に設置されたベーンによってオフデザイン性能の改善が可能であること (GT-25815) が報告された。

遷音速および高圧力比遠心圧縮機に関しては、設計圧力比が約8の遠心圧縮機羽根付きディフューザ内部流れを実験およびCFDで調べたもの (GT-25104)、流量係数が従来になく大きい遷音速斜流圧縮機の性能と作動域について述べたもの (GT-25378, 25365)、長羽根、短羽根のスweepが圧縮機性能に及ぼす影響と両者の最適な組合せを調べたもの (GT-27062)、フィレット半径を流れ方向に変化させることにより、それによる性能低下を抑えることができること (GT-26660) などが報告された。

設計技術、流れ場の解析に関するものとしては、羽根付きディフューザとインペラのマッチング手法について複数の実機データをベースに検討したもの (GT-25003)、羽根付きディフューザのハブ部に現れるコーナーはく離に対して境界層吸込みを適用した解析を行うと定常、非定常で結果が異なってしまうこと (GT-26985)、羽根付きディフューザの翼端部にクリアランスを設けると圧縮機性能が向上する可能性があることを詳細な内部流れ計測によって示したもの (GT-26896, 27175) などが報告された。

原稿受付 2014年7月22日

*1 (株)IHI 開発本部

〒235-8501 横浜市磯子区新中原町1番地

5.3 非定常流れと数値流体力学

加藤 大雅*¹
KATO Hiromasa

非定常流れに関連するセッションは10セッションで45件の講演があった。昨年の9セッション43件とほぼ同数だが、最適化などのセッションにも非定常流れ解析を用いた研究が増え、それらを含めるとより広い分野に浸透してきた。地域別に見ると欧州からの講演が最も多く45件中24件を占める。中国は8件、米国は6件、日本は3件、インドから2件、南アフリカから1件という構成だった。非定常CFDを行った研究は33件あり、インハウス開発のコードが主流だが、商用製品を用いたものも11件あった。

圧縮機関連では翼端漏れ流れに関する研究が多く、計算能力の発展とともにLESやDESによる解析もより多くなっている。DESを用いた例として、翼端漏れ流れにおける制御デバイスの効果の調査 (GT-25150) や、遷音速圧縮機でのスパイク型失速初生 (GT-27275) の研究、軸流圧縮機静翼列の流れ場を調べたもの (GT-25944) があげられる。LESの例としては、失速点近傍における翼端隙間の影響を調べたもの (GT-27094) がある。もちろんURANSも多く使われており、1.5段軸流圧縮機の翼端漏れ流れの研究 (GT-25086) や、ウインドミル状態での軸流圧縮機の流れ場の研究 (GT-25609) などがあった。さらに、Time Transformation法による2.5段および6段軸流圧縮機の非定常流れ解析 (GT-26846) や、ストラットを含むファン流れ場の音響への影響を調査したもの (GT-26847)、そして圧縮機3.5段の全周計算から可変静翼の影響を調べたもの (GT-25145) など、URANS計算はさらに大規模化している。Harmonic Balance法による解析例では、1.5段ファン流れ場を調査したもの (GT-25457) や、陰的レンゲクタ法を用いて省メモリと高計算効率を狙った解法の研究 (GT-26474) が挙げられる。GPGPUで高速化したコードによる失速点近傍でのRotor 67のURANS解析 (GT-25502) もあった。設計関連では非定常オイラーソルバーによる不安定領域での性能も含めた軸流圧縮機の設計手法の研究 (GT-26491) も興味深い。旋回失速に関するセッションでは、高圧圧縮機3段のURANS全周解析 (GT-25635) や、遠心圧縮機流れ場をTime Inclination手法を用いて

調査したもの (GT-27097) があった。その他の遠心圧縮機関連では、ディフューザ流れ場のURANS全周解析 (GT-25862) や、サージ近傍での挙動 (GT-27336) を調査したものもあった。

タービン関連の非定常解析では低圧タービンの研究が多かった。DNSの計算負荷を低減させる手法の研究 (GT-25685) と、その手法を利用してレイノルズ数依存性を調べた研究 (GT-25689) があり、DNSによるパラメトリックスタディという方向性も近い将来十分実現可能であることが示された。その他、空力と熱伝達をRANS, URANS, LESで解析し実験と比較したもの (GT-25828) や、周期的な後流の流入下における直線翼列流れのDNS解析 (GT-25071) があった。URANSによる研究では、非定常流入境界条件が遷移に与える影響の調査 (GT-25891) や、コンタリングの効果 (GT-25524)、部分挿入ノズルを含む超音速衝動型タービンの複雑な流れ場の調査 (GT-26071) などの発表があった。

高圧タービン関係では、全周解析による主流とパージ流れの相互干渉の調査 (GT-26755) や、異なる過渡翼列モデルを用いて低い計算コストでの非定常解析と全周解析を比較した研究 (GT-26043) があった。また、非構造格子上のLESにおけるSGSモデルと格子品質の影響に関する研究 (GT-25876) では動静翼境界の扱いの重要性も議論された。共役熱伝熱解析の例としては、URANSの解を平滑化することにより時間スケールの違いに対応する手法 (GT-25582) や、1.5段全周解析と2ピッチ分の共役熱伝熱解析による高温ストリークの影響を調査したもの (GT-25963) がある。さらに、直交格子とImmersed Boundary法を用いたLESで後流とフィルム冷却の干渉を調査した研究 (GT-26117) もあった。その他、LESの大規模データマイニングとしてDMDなどの情報抽出手法の研究 (GT-26963) も見られた。

CFDモデリング関係では、近年のLESの産業界への浸透をふまえ、LESの適切な利用ガイドラインをまとめた発表 (GT-25434) や、Harmonic Balance法の複数段への適用方法の研究 (GT-25230) が紹介された。

原稿受付 2014年8月1日

*1 岩手大学 工学部 機械システム工学科
〒020-8551 盛岡市上田4-3-5

6. 伝熱関係

武石 賢一郎*¹
TAKEISHI Kenichiro

荒木 勝人*²
ARAKI Masato

伝熱全体*¹

伝熱のセッションでは、ターボ機械に次いで二番目に多い総数216編の論文が発表された。その中で、ターボ機械、燃焼、蒸気タービンとの共同セッションが、それぞれ45編、14編、8編あった。フィルム冷却関連が58編、内部流関連が53編と、この2分野が例年通り論文数の多い分野である。

フィルム冷却*¹

フィルム冷却効率への種々因子の影響として、衝撃波 (GT-25024)、音響 (GT-26318) 内部流の影響 (GT-25975) 主流に対向した吹き出し角度 (GT-26232) が実験的に調べられた。孔形状の最適化によるフィルム冷却効率の向上として、大北等が提案したArrow形状に似たSYCEE孔の性能とF形級GTの一段静翼への適用例が報告された。(GT-25774)、猫耳孔 (GT-25845)、Sister孔 (GT-25970, 25971)、フィルム孔前方に置かれた流れ制御機構 (GT-25751, 26070)、旋回を与えた場合 (GT-25798) などが報告された。クレータのフィルム孔出口形状を最適化し制御されたクレータ形状に付きLES解析が実施され、従来のクレータフィルム冷却に比べ100%のフィルム冷却効率の向上が見られた (GT-26800)。また、トレンチでは、従来の直線状のトレンチから折れ線上の形状を遺伝的最適化数値解析的手法によって得られた形状を、赤外線カメラを用いて実験的に調べた結果、従来のトレンチ形状に比べ最高で56%のフィルム冷却効率の向上が確認されている (GT-25144)。フィルム冷却翼へのTBCの厚みの影響、デポジションの影響が調べられた (GT-26250, 27117)。シェイプトフィルム冷却孔にデポジションが付着してプラグインが生じた場合のフィルム冷却効率は75%低下することが報告された (GT-25576)。シェイプトフィルム冷却の風洞実験で冷却媒体としてミストを用いた場合の二相流混合の速度場およびミストの粒子径分布がPDPAによって測定され、ミスト流と主流との混合場の定量的データが報告された (GT-26169, 26170)。タービン動翼のプラットフォームのフィルム冷却、静翼と動翼間のシール空気によるプラットフォームの冷却効果、プラットフォームの形状の違いに

よるフィルム冷却への効果など、この部分が現在最も関心がもたれている分野と考えられる (GT-25621, 25659, 26479, 25655, 27103, 26771)。なおL. Wrightによるプラットフォーム冷却技術がレビュー記事としてまとめられているので有用である (GT-26373)。

翼外面の熱伝達率*¹

2段の高負荷タービンの流動伝熱解析をsliding-mesh unsteady CFDを用いて1段および2段のタービンを解析した結果につき報告された。1、2段静翼のタービン動翼の位相とともに変化する熱伝達率への影響が明らかにされた (GT-25883)。3D静翼と円柱形状の端壁面からなる軸流タービンの端壁面の熱伝達率の分布を高精度に赤外線カメラを用いて測定した結果が報告された。この結果は、数値解析の検証用データとして用いられる (GT-26105)。エンジンの実機条件で対流伝熱に加えて放射伝熱が影響する場合の熱物性値の変化も考慮した放射補正を行う方法の提案と高温試験による精度検証の結果が報告された。翼列試験から高温状態で使用される実機のメタル温度推定に有用な方法である (GT-25701)。非定常法で局所の熱伝達率を測定する方法で、一次元的な形状と見なせない場合の2次元、3次元の形状の熱伝達率を求める方法の提案があった (GT-26622, 26973)。

燃焼器壁*¹

インピンジメント冷却とエフェュージョン冷却を組み合わせた燃焼器壁の冷却効率が感温塗料によって調べられた (GT-26416)。また積層冷却燃焼器壁構造の冷却効率が赤外線温度分布測定で調べられ、エフェュージョン冷却単独の場合に比べて、45%から141%効率が向上することが明らかになった (GT-26692)。またCMC製のレーザー加工されたエフェュージョン冷却壁とトレンチの組み合わせに対して、燃焼器壁の冷却効率を約1500K、5気圧の条件で試験された実験結果が報告された。エフェュージョンのみのケースに比べてエフェュージョンとトレンチの組合せた冷却構造は高い冷却効率を示した (GT-26909)。

内部冷却*²

例年同様にインピンジメント冷却、乱流促進体 (ピンフィン、リブ) を主として、Swirl Chamber, Lattice (Matrix) 冷却などの先進冷却技術と合わせて、12セッションで51件の発表 (53編の論文中、著者の知る限りキャンセル2件) があり、昨年の53件と同程度であった。それぞれ

原稿受付 2014年7月29日

* 1 徳島文理大学 大学院工学研究科・システム制御工学専攻
理工学部・機械創造工学科
〒769-2193 さぬき市志度1314-1

* 2 三菱重工業(株) 技術統括本部 高砂研究所
ターボ機械研究室
〒676-8686 高砂市荒井町新浜2-1-1

の冷却構造で熱伝達率と圧損を検証しており、インピンジ冷却では、熱負荷が高いタービン翼前縁部を想定した壁形状に対して、回転の影響を比較検証した計測結果 (GT-26181) やRace Track孔 (平行な2辺とこれらの辺を繋ぐ円弧で形成) を傾斜させた影響を静止場で検証した計測結果 (GT-26219) の他、平板に対して冷却空気の脈動による非定常変動の影響を検証した計測結果 (GT-25897) など、基礎データ取得分析に関する研究が多い印象を受けた。ピンフィン冷却では、ピンフィンの配置や様々な形状での計測結果 (GT-25348) や、上流側に多孔壁を配置して孔サイズやピッチの影響を検証した計測結果 (GT-25767) などが、リップ冷却ではV字タービュレータとその改良形状での計測結果 (GT-26147) などが、そして先進冷却技術としては、“Double Swirl Chambers” の効果をCFDで解析した結果 (GT-25851) や、2層式のMatrix冷却構造で主要な形状パラメータの影響を検証した計測結果 (GT-25384) などが報告されており、今後の展開に注目したい。

Conjugate Heat Transfer*2

Heat Transfer Committee内で新たに独立したTrackとして設けられた昨年の18件に対して、昨年同様に冷却翼を扱った解析が大半で、全体では3セッションで16件の発表 (17編の論文に対して、著者の知る限りキャンセル1件) があった。特に冷却翼の内部インピンジメント冷却或いは対流冷却と壁面フィルム冷却を組み合わせた解析では、TBC有無で冷却効率分布を試験計測結果と比較検証した報告 (GT-25346) や、壁面内側の対流冷却の流れ方向を主流に対して逆流と順流で比較した解析結果 (GT-25901) など、複雑な冷却構造で冷却効率の分布を線や面で最適化していくうえで有効な解析手法である事を示しており、印象的であった。一方リムキャビティを対象にした解析では、シール空気量を変化させて動翼後流の段間キャビティとその後流段動翼の熱負荷及

び空力特性への影響を評価した報告 (GT-25276) などがあったが、キャビティ内流れの解析精度については十分な議論がなく、今後更なる発展が期待される分野だと感じた。

ロータ内部流れ*2

10セッションで43件の発表 (42編の論文に対して、著者の知る限り追加1件で、最終原稿の受付手続き上の不備で登録から漏れていたとの事) があり、少なかつた昨年の22件に対して、その反動のせいか例年に比べても増加していた。リムシール関連では、回転外周側フィンと内周側フィンの間へ周期的に配置した縦壁によってシール空気の圧力上昇を狙った形態で、シール効率向上を確認した計測結果 (GT-25626) などが示された。質疑応答では圧力上昇に要するエネルギー損失に関して質問があり、全体システム効率として最良となっているかという観点で議論が深められていた。キャビティフローに関してディスク中心孔部に軸方向流がある場合の回転キャビティ内流れについて、回転数と軸方向流量の影響を回転キャビティ内ディスクメタル温度分布の変化から検証した計測結果 (GT-27174) や、ロータ内部流れの検証用として製作中の1.5段タービン回転試験装置について、キャビティ内流れに影響のある回転レイノルズ数が航空エンジン実機条件と同等の世界最大級で、また様々な計測を可能とする試験装置の概要 (GT-25570) についての発表では、多くの聴衆の関心を集めていた。シール要素として、回転-静止間ではリーフシール (GT-27046)、カーボンファイバー製ブラシシール (GT-25684) の開発検証状況が報告された一方で、静止-静止間では実機適用実績のある板状の膜シールの劣化影響にも着目して実機使用済み品を用いたシール試験結果 (GT-26388) に関する発表などがあり、一般的に消耗品とされるシール部品の長寿命化を図ろうとする取り組みの一端が垣間見えた。

7. 燃焼および燃料関係

馬場 宗明*1
BABA Soumei

1. 全般

Combustion, Fuel and Emission committeeの主催で30件の一般セッションと、2件のパネルディスカッション、1件のチュートリアルが催された。それぞれの会場

原稿受付 2014年7月22日

*1 (独)産業技術総合研究所 エネルギー技術研究部門
熱・流体システムグループ
〒305-8564 つくば市並木1-2-1

は80～160人程度の収容となっており、30分間にわたる発表・質疑応答では活発な議論が行われた。論文発表数は131件、パネル発表数は7件と、昨大会に比して僅かに減少した。発表者の所属機関は、Academia 80件、Industry 36件、Government 15件である。国別内訳ではドイツとアメリカがそれぞれ33、29件と例年通り多くを占めており、さらにイギリス (15件)、中国 (11件)、イタリア (8件)、インド (8件) と続く。日本か

らは3件の発表が行われた。三菱日立パワーシステムズからは、石炭ガス化複合発電IGCCパイロットプラントのNO_x排出量低減に寄与する多孔同軸噴流バーナーに関する発表が行われた (GT-25298)。JAXAからは、TechCLEAN Projectにおけるデュアルインジェクタの開発 (GT-25988)、燃焼器ライナからの空気噴射によるNO_x排出量低減 (GT-25871) の2件の発表が行われた。日本の発表数は全体では10番目、アジア内では中国、インドに続く3番目であり、一昨年の6件に比すると停滞している印象が持たれる。我が国の技術力アピールの場とすべく、次回大会での発表数の増大に期待したい。

2. 個別セッション

2.1 燃焼の不安定性およびその制御手法

希薄予混合燃焼による低NO_x燃焼方式で問題となる燃焼振動、逆火、吹き消えといった燃焼不安定性の解明ならび制御手法に関して多くの発表が行われた。

不安定現象の解明については、特に高濃度水素含有燃料を用いた予混合バーナーを対象とした研究例が多く見受けられた。高速度カメラを用いた旋回燃焼器内の逆火に対するPIV観察実験 (GT-25553, 27023)、火炎伝播速度・燃焼速度の計測 (GT-26420, 26742, 26811)、着火遅れおよび層流火炎速度の測定実験 (GT-25412)、予混合火炎の保炎性に及ぼすノズル入口温度、圧力、形状の影響に関する実験的検討 (GT-25477)、環状燃焼器の火炎伝達関数に基づく熱音響モデルの検討 (GT-25036)、音響ノイズや圧力変動と乱流燃焼振動との相関関係 (GT-26018, 26020) などが報告された。

また、燃焼ノイズや熱音響不安定の低減を図る受動的または能動的な制御方法としては、吹き消え抑制用軸流空気噴流 (GT-27002)、CO₂噴流による逆火抑制 (GT-25446)、パイロットバーナー (GT-25199, 26715)、渦停留型燃焼器 (GT-25207)、音響ダンパー装置 (GT-25873) マルチノズル (GT-26164) ヘルムホルツ共鳴器 (GT-25228, 26907)、多孔ライナ (GT-27203) による燃焼不安定の抑制効果に関する発表が行われた。

2.2 燃料多様化

代替燃料である高濃度水素含有燃料や、石炭・バイオマス由来の合成燃料の利用については、2.1節に述べたように不安定性現象の解明に関する基礎的研究は大学や研究機関が主となり行われている。一方で、企業による実証試験の成果発表としては、高濃度水素含有燃料を用いたSiemens社製15～50MW級燃焼器 (GT-25527, 26023, 26293) やAlstom GT26ガスタービン (GT-25813) での試験報告がなされており、実用化に向けた技術開発が加速していることが伺える。また、高炉からのオフガスの利用に関する研究も報告されていた (GT-25455)。

2.3 数値流体解析

定常モデルのRANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) と非定常モデルのLES (Large Eddy Simulation) を用いたCFD解析を取り扱った発表はともに10件以上見受けられ、着実に解析精度の向上と解析手法の最適化が図られていることがわかる。RANSを用いた研究として、非予混合火炎を用いたNO_x排出量低減 (GT-25598)、NO_x排出に及ぼすマルチノズル配置の影響解析 (GT-26174)、高温空気クロスフロー流におけるNO_x生成 (GT-26711)、自動点火に関する研究 (GT-25843) などの報告がなされた。また、URANSを用いた旋回予混合火炎の逆火解析 (GT-25139)、等温乱流旋回火炎解析 (GT-25008) に関する報告がみられた。一方、LESによる非定常解析を用いた研究としては、マルチノズル旋回流の希薄予混合火炎の解析 (GT-25612)、旋回火炎の熱音響不安定性 (GT-26200)、噴霧火炎の乱流モデルに関する解析 (GT-27225)、Alstom社製燃焼器に対する解析 (GT-26053) などの発表があった。その他、VOF/OPM/LESのカップリングによる液体噴射モデル解析 (GT-26124) や、予混合火炎に対するRANS/LESハイブリッド解析 (GT-25831) の報告があった。また、予混合旋回火炎に対するLESとRANSの比較 (GT-25352, 25919) や、スワラ流れ解析に関するURANSとDES (Detached Eddy Simulation) との比較 (GT-25784) が報告されており、各解析手法の得手不得手やノウハウが蓄積されつつあるように感じられた。

8. 制御と診断

権田 幸謙*¹
GONDA Yukinori

1. 全般

制御と診断、計測の3つの分野がControls, Diagnostics & Instrumentation (CDI) コミッテの主管により取

り纏められてる。筆者はCDIのうち制御 (Control) のセッションに論文 (共著) 投稿を行い、共著者により論文発表が行われた。

2. 制御・診断・計測 (CDI) 分野の動向

CDI技術プログラムとして、合計12セッションが執り行われ、制御が2.5 (うち、1セッションは制御・診断共通分野で0.5とした)、診断が4.5、計測が5であった。論文数はそれぞれ11件、14件、13件であり、合計38件であった。

今回、診断においては、風力エネルギー (Wind Energy) との状態監視に関する共著論文セッションを設けている。そこでは、風力エネルギー分野の4件の論文発表がCDIに加えて行われた。

セッション数としては昨年まで減少傾向にあったが今年度は昨年の1.5倍となり、特に診断と計測に増加傾向がみられている。他分野との共同セッションなどの取り組みが功を奏しているのか、今後の発展に期待される。論文数としては、30件半ばを中心に毎年増減しており今年度は平均的な件数である。また、パネルでもStructures & DynamicsのProbabilisticコミッティと計測とモデリングにおける不確かさ (uncertainty in measurement & modelling) に関する共同パネルを実施している。

チュートリアル・セッションでは、Meggitt Sensing Systems社の講師により、振動監視の基礎 (Basics of Vibration Monitoring) が行われ、多くの聴講者が参加しており、計測手法や計測データを基にした診断方法への関心の高さを表している。

原稿受付 2014年8月18日

*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部 技術開発センター 制御技術部
〒190-1297 西多摩郡瑞穂町殿ヶ谷229

3. 制御

筆者はControlsセッションで航空用エンジンの燃料システムの熱収支性や燃費向上を図る新たな可変燃料システムに関する論文 (GT-26809) を投稿し、共著者により発表が行われた。既存の燃料システムに変速機を組み込んだ燃料ポンプを適用することで、昨今機体及びエンジンで課題とされている熱収支問題に対して改善策を提案する研究である。

最近ではエンジン制御に関わる論文は少なくなっており、特に航空エンジン用燃料システムに関する分野はほとんどなく、他には電動化エンジン向け電動燃料システムの開発 (GT-26277) のみであった。世の中ではエンジンシステムおよび機体システムにおいて熱収支問題が課題であるとされ続けているが、実際には個別の仕様条件に合わせた対応すなわちノウハウゆえ論文にはならないのであろうか。

一方、診断あるいはモニタリングについては、それらに関わる計測を含めた議論やモデルベースの研究の発表が行われた。特に、流動する航空機エンジン計測データを分析するためのモデルベース異常検出手法 (GT-27172) など、モデルベースデザイン制御においてエンジン計測データにより異常検出された状態とモデル予測の差について、その結果をモデルに反映するアーキテクチャの研究が様々行われている。

CDIでは、傾向として、エンジンのモニタリングや状態を推定するための計測の手法や、計測したデータをエンジンモデルへ反映させるための研究が進められており、今後もこの分野が進んでいくと思われる。

9. 材料, 構造および製造技術

尾関 高行*1
OZEKI Takayuki

1. 全般

材料、構造および製造技術に関してはManufacturing Materials and Metallurgy Committee主催が5セッション/18件、Structure and Dynamics Committee主催のうち Fatigue, Fractures and Life Predictionの5セッション/22件とProbabilistic Methodsの1セッション/5件の論文発表が行われた。その他、各委員会よりパネルセッションやチュートリアルセッションが実施された。筆者の聴講したManufacturing Materials and Metallurgyについて概要を紹介する。

原稿受付 2014年7月22日

*1 (一財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所
〒240-0196 横須賀市長坂2-6-1

2. Manufacturing Materials and Metallurgy

チュートリアルセッションでは、高温材として用いられる材料について、化学種やその結晶構造などについて発表されたほか、損傷があった場合の原因解析について、物理的因子から金属を調査することが重要であることが発表された (“金属は嘘をつかない”)。損傷部材の解析チームはOEMだけでなく様々な関係者が関わる必要性があることも述べられた。また、産業用ガスタービン (以下、GT) について、点検時期の決定に考慮する要因や点検時に補修が必要な損傷形態について紹介されたほか、ロータやケーシングの寿命の考え方についての発表があった。

パネルセッションは計4セッションが開かれた。一つは積層造形法のセッションで、各社3Dプリンターや

レーザ補修に関する技術が発表された。レーザ補修では航空エンジンにおける高圧タービン翼の一方凝固材や単結晶材、FクラスのGT動翼のチップ部に適用した例などが紹介された。加工技術のセッションでは、短時間でタービン部材の加工が可能な精密電解加工のほかに、遮熱コーティング（以下、TBC）上から冷却孔の加工が可能な放電加工についての発表があり、様々なTBCに対しても適用できることが述べられた。寿命予測のセッションでは、圧縮機翼やロータについて、材料試験や損傷解析による寿命予測や寿命延伸の取組みが紹介された。熱疲労については冷却孔からのき裂の進展が紹介されたほか、熱疲労寿命モデルをW501Fの初段動翼に適用した例などが発表された。また、TBCの寿命には、トップコートとボンドコート界面に生じる界面酸化物層が重要な因子であり、様々なボンドコートの熱時効結果などが発表された。補修技術のセッションでは、ニッケルベースやコバルトベースなどの航空エンジンやGTに用いられている材料の補修が可能なレーザ肉盛補修や、MCrAlYコーティングをストリップすることなく、クラックなどを補修できるレーザハンド溶接の発表があった。また、これらの新しい技術の活用や処理中部品の管理により効率的な製造につながる事が述べられた。

論文発表では、メーカーや大学などから材料開発、コーティング技術、製造・補修技術を中心に発表があったので、概要を記載する。

材料開発では、レニウムの含有率を1.5%まで低下させた超合金（CMSX-8）と、レニウムを含有していない超合金（CMSX-7）の単結晶材が開発され、それぞれ破断特性などが従来の材料と同等以上であることが報告された（GT-25155）。また、コバルトベースのHAYNES NS-163を飽和するまで窒化処理させた超合金のクリープ強度や引張強度が、固溶強化型超合金よりも優れた性能を示す一方で、高温酸化の影響が大きく、耐食コーティングが必要であることが述べられた（GT-25452）。

コーティング技術では、高速フレーム溶射で施工された酸素分散強化金属層やGTの燃焼器用にNASAが開

発したYbGd-YSZコーティング、デトネーション溶射によるCr3C2-NiCr-CeO2コーティングについて、熱サイクル試験の結果などが報告された（GT-25640, 26359, 26447）。また、施工方法による微細構造の違いをモデル化し、解析的にTBCの熱伝導率に影響する因子を調査した報告もあった（GT-26751）。ボンドコートについては、MCrAlYコーティングにルテニウム、モリブデン、イリジウムを添加した場合の遷移型のアルミナ層への影響や、CMSX-4上に陰極アークで施工されたNiCrAlYコーティングの微細構造を観察した結果が述べられた（GT-26391, 25537）。TBCの寿命予測については、複数のバーナーリグ試験を一度に同条件で試験できる装置を用いて、高い再現性ではなく離を評価する手法や、モンテカルロ法を用いた確率的な手法について報告された（GT-25372, 25961）。

製造技術では、鍛造で作られた航空用エンジンディスクにおいて、逆アルゴリズムから熱伝達率を求めることで温度を推定し、焼き入れ時の応力を解析する手法が報告されたほか、ブローチ加工で施工されるタービンディスクのクリスマスツリー部の表面下の微細構造の組織や欠陥を光学顕微鏡やSEMで観察した結果など、加工部品の品質管理について報告された（GT-25827, 26972, 26815）。

補修技術では、PSMによる7FAの初段静翼の損傷とその修理について、クーボンリペアなどの一連の補修技術および補修時の改良点が述べられた（GT-25693）。各補修技術については、単結晶材や一方凝固材のレーザ肉盛補修の溶接後熱処理過程において、溶接材料にボロンを含めておくことで、熱影響部による割れに対する自己修復機能を持たせるとともに、シリコンを含有させることで、耐酸化性が向上することが報告された（GT-26412）。また、ホウ素とシリコンを含まないロウ材について、 hafnium とジルコニアの組合せにより融点が低下したことや、IN738に対して接合が可能であったことが発表された（GT-25025）。

10. ローターダイナミクスとベアリング

安藤 正晴^{*1}

ANDOH Masaharu

1. 全般

ローターダイナミクスとベアリングに関するセッションはStructures & DynamicsのCommitteeの中に

原稿受付 2014年7月7日

*1 (株)IHI 航空宇宙事業本部 エンジン技術部
〒196-8686 昭島市拜島町3975-18

RotordynamicsとBearing & Seal Dynamicsのセッションがあり、それぞれ39件、25件の論文発表が行われた。昨年の28件と29件に対し、僅かではあるが論文数は増加している。しかしながら、全64件の論文中、日本の論文は日立製作所の遠心圧縮機用ダンパシールの開発（GT-26693）の1件のみであった。日本のローターダイナミ

クス関連の技術力をアピールするためにも、来年以降の論文数増加を期待したい。

2. ローターダイナミクス解析

スクイズフィルムダンパ（以下SFD）/流体軸受で支持したロータの挙動や、ロータ/ステータ間の接触問題に対して、動解析や非線形解析を用いて実現現象を再現する手法の研究が多くなされていた。ロータ挙動に関しては、SFDが油膜破断した際の非線形挙動について数値モデル化し、SFDのダンパ部半径隙間やオイル粘性によって、SFDの減衰性能を改善できることを示した論文（GT-27221）やテイルテイングパッドジャーナル軸受（以下TPJB）で支持されたロータを正弦波スイープ信号で励起した際のロータ挙動について、数値的・実験的に調査した論文（GT-26275）等があった。聴講者が多く質疑も活発であり、関係者の関心が高い発表内容であった。一方、接触問題に関しては、Rolls-Royce, Snecmaが1件ずつ発表していた。Rolls-Royceはオーバーハングロータの接触自励振動（Bouncing）をMATLABによる簡易モデルで評価（GT-26826）し、SnecmaはFANロータのラビングを34自由度の軸モデルで再現する手法（GT-25253）について研究していた。実機との検証がなされていないが、簡易モデルで接触問題を評価でき、参考にする価値がある。

また、実機における振動トラブルの予防や不具合箇所

の特定を目的とする論文も多くみられた。例えば、クラックロータの安定性を評価し、あるクラック深さまでは不安定性が改善されることを示した論文（GT-26741）、損傷を模擬したロータモデルの検証に関する論文（GT-27341）、Higher Order Spectra（HOS）とHigher Order Coherences（HOC）を実験と解析で比較し、HOCが故障診断に適していることを示した論文（GT-25090）等があった。

3. ベアリング、シール

フォイル軸受、TPJB、三円弧軸受など様々な軸受について研究がなされていた。例えばフォイル軸受のハウジングとフォイルの摩擦によりフォイルの剛性が増加することを示した論文（GT-25038）、TPJBのホットクリアランスが軸受諸元を与える影響を調査した論文（GT-25566）、三円弧軸受に作用する荷重の方向が軸受特性に与える影響を調査し、荷重の方向によっては高い安定性を得られることを示した論文（GT-25482）等があった。

聴講者は各セッションともに40～50人程度で、特にSqueeze Film Dampers & Journal Bearingsセッションへの関心が高い印象だった。質疑はTexas A&M UniversityのLuis San Andrés先生を中心に、モデル化式の構築理論や実験との検証をどのようにしているのかについて活発な議論が行われ、各社・各研究機関とも積極的に情報収集を行っていた。

11. 蒸気タービン

妹尾 茂樹*1
SENOO Shigeki

蒸気タービンは、12論文セッションで、51件の論文が発表された。これに加えHeat Transfer Committeeとの共同2セッションに8件の論文が発表され、合計59論文と、昨年の45件より増加した。さらにパネルセッションが2件と、チュートリアルが1件、実施された。

パネルセッション”The Measurements and Validation of Steam Turbines in Power Plants”では、6つの蒸気タービンメーカーより、実機計測の紹介があった。内容は、プラント性能試験、低圧段長翼のピトー管と湿度計のトラブル試験、歪みゲージや非接触振動計を用いた長翼振動計測、高圧タービン車室の非常常温度計測、軸振動計測、原子力タービンや地熱タービン環境中でのSCC（Stress corrosion cracking）材料試験などである。実機計測は、発電システムとして統合されていて、かつ相似

則（蒸気タービン実機のレイノルズ数は一般的に大きく合わせる事が難しい。また表面粗さ、相変化および液滴径、構造減衰などは厳密な相似則が成立しない）などの仮定を用いない状態での現象把握のため、重要である。一方、縮小モデル試験も、試験条件の設定が容易、不確かさを評価しやすい、低コストなどの利点がある。さらに、今後増える実機計測として、長期モニタリングが挙げられた。増加する再生可能エネルギー電力の変動を緩和するため、より広い運用条件での性能と信頼性を向上させるためのデータ取得が主目的である。

パネルセッション”Industrial Power Generation Applications”では、GEが紙会社向け抽気蒸気タービンの設計思想、Siemensが10MWクラスの多軸タービン、Man Diesel & Turboが自社製品、MHPSが紙会社向け抽気タービンにおける特殊制御手法（紙切れ時の制御）の紹介をした。今後の開発や市場動向について議論された。

原稿受付 2014年7月4日

*1 三菱日立パワーシステムズ(株)

〒317-0073 日立市幸町3-1-1

チュートリアル” Steam Turbine Low Pressure Last Stages Technology Challenges”では、最終段の流体設計、湿り蒸気特性とエロージョン対策、排気室との干渉が講義された。約200人収容の部屋から聴講者が溢れたが、session co-chairのStuttgart大学Vogt教授の機転により、急遽別室で映像中継されるほど盛況であった。Denton教授は、蒸気タービンの0.1%効率向上は7百万ドルの経済的効果があるため、一年100人のエンジニアをかける価値があると、若い研究者を励ました。その効率向上のためには、低圧段出力の約10%に相当する排気運動エネルギー損失を低減すること、すなわち最終段の長翼化が有効である。しかし、低圧蒸気タービンの設計は、体積膨張率が大きいため流れが三次元的であることに加え、高周速、低ハブ/チップ比、高マッハ数、非平衡凝縮を含む湿り蒸気による損失機構解明とその低減などの技術課題が多く、40年以上取り組んできたDenton教授にとっても、未だにchallengingな問題だと述べた。長翼化すると動翼相対流入マッハ数が、先端と根元の両方で大きくなる問題に対し、外周側に凹となる流線曲率を導入して、根元反動度を増加、先端反動度を減少させることが有効である。凹流線曲率導入には、子午面側壁形状、静翼スロート面積を外周で絞り内周で拡げること、静翼を周方向や軸方向に湾曲させること、入口全圧を内周で小さく外周で大きくする分布をつける等の手法がある。また、低圧蒸気タービンは、Vortex designや、準三次元設計では不十分で、完全三次元設計が重要であると述べた。Schatz氏は、湿り蒸気の現象とそれに対する計測・解析法の現状を述べた。Suerken氏は、エロージョン対策として、静動翼間距離の最適化、静翼後縁厚み最小化、動翼前縁シールドもしくは焼き入れ、側壁および静翼スリットからの水膜除去、および静翼加熱による水膜蒸発を紹介した。また、エロージョンが進み動翼表面が荒れてくると、水滴が荒れによりで

きた突起部に衝突するため翼母材まで運動エネルギーを持った状態で到達できなくなり、エロージョンの進行が飽和してくることを示した。Hogg教授は、最終段と排気室との一体流体解析において、NLH (Nonlinear harmonic) 法を用いることで、完全三次元解析とほぼ同じ精度で、短時間評価できることを紹介した。

湿り蒸気解析は、補正係数などの調整はあるものの、凝縮核生成はGyarmathyモデル (1962)、液滴成長はYoungモデル (1982) が主流となっており、解析を使った現象分析に研究の重点が移ってきている (GT-25177, 25491, 25584)。今後は、翼面に付着する水滴、水膜 (GT-25652)、後縁からの再放出などのモデルの開発などが進むものと思われる。湿り度計測に関しては、light extension methodを用いた微細水滴計測 (GT-25245, 27241)、optical photography probeを用いた粗大水滴計測 (GT-25401) が報告された。また、実機大試験装置を用いた湿り損失評価 (GT-26012) や、一次元垂直音速ノズルを用いた高圧蒸気中での非平衡凝縮現象試験結果 (GT-27241) は重要な知見を提供した。

最終段の性能と信頼性評価は、多段、排気ディフューザまたは排気室一体のものが主流で、非設計点での解析・試験も多い。その他、効率向上に重要な要素として排気室、バルブ、シールに関する発表があったが、中短翼の流体性能に関する発表は無かった。また、材料のクリープ、疲労、SCC等に関するセッションで6件の発表があった。

開催地がドイツだったこともあり、SiemensとAlstomからの発表が多く、質疑時に両社技術者からの積極的な質問やコメントが印象的だった。アジアからの発表や出席者も年々増えている。特に中国から、市販コードを用いた大規模なCFD解析の論文が増えており、研究や設計へのCFD利用が増えていると思われる。

12. 展示

富永 純一*1

TOMINAGA Junichi

展示会はTURBO EXPO期間中の2日目から4日目までの3日間(6/17~19)、会場のCCD Congress Center内のExhibit Hallにて行われた。開催時間は最初の2日間が12:30~18:30、3日目が11:30~14:30であり、展示会場の先に昼食会場があることもあって、午前のセッションが終わる頃には多くの人々が集まり賑わっていた。

プログラムに掲載されている出展者リストによると、出展ブースは大小合わせて約100と例年と同程度で、ガスタービンメーカーからの出展は少なく、その一方で流体・構造解析のソフトウェア、計測機器や部品メーカーなどの企業が多く出展し、かつ活発な展示を行っているように見受けられた。出展のほとんどが北米とヨーロッパからとなっており、国別では米国が43で最も多く、自国開催のドイツが22、英国の10と続き、アジアからは日本2、韓国1となっている。

メインエントランスを入った正面には、GEとANSYSの比較的大きなブースがあり、ひときわ目立っていた。しかしながら、GEのブースには実機やモデルはなく、パネルのみの展示となっていた。GE以外のガスタービンメーカーについては、Dresser-Rand、MAN Diesel & Turboのブースはあったが、自国開催にも関わらずSIEMENSは出展していなかった。

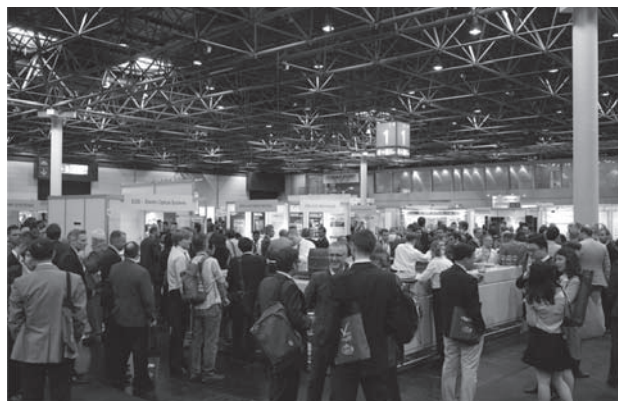
解析ソフトウェアベンダーのANSYSやNumecaのブースでは、自社製品の解析事例の紹介やデモンストレーションが行われていて、その他のソフトウェアベンダーのブースにおいても、出展者による熱心な説明が行われていた。

計測機器および部品メーカーのブースでは、自社製品の实物を動作させたり、見学者に触らせたりするなど積極的な展示を行っていた。特に、AICON 3D Systemsは光学式のCoordinate Measuring Machine (CMM)を使用して圧縮機翼の三次元計測のデモンストレーションを行い、また、Mee Industriesはガスタービンの吸気

加湿システムを実際に動作してフォグを多く発生させていた。両社のブースは、互いに向かい合っていたこともあり、他のブースと比べてアクティブな展示コーナーとなっていて、多くの見学者を惹きつけていた。

展示会場の一角にはステージが設けられており、設計・解析ソフトウェアベンダーを中心とした出展者によるプレゼンテーションが行われていた。展示の最終日(4日目)の13:45からはクロージングセレモニーが開催され、参加者投票で選ばれた最も優れた展示の表彰と来年のカナダ、モントリオールで開催されるTURBO EXPO 2015の告知が行われた。

過去のTURBO EXPOの展示会と比較して、実機や大きなモデルの展示が少ないように感じられたが、昼時の展示会場の雰囲気は非常に活気があり、各ブースだけではなく、通路や所々に配置したテーブルで多くの人々が懇談もしくはディスカッションをしていた。展示会は各社の技術動向などの情報を入手すると同時に、出展者を始め、学会関係者、参加企業の技術者など、多くの人々とのネットワークを構築する絶好の機会であり、来年のモントリオールのTURBO EXPOに参加予定の方々には、積極的に展示会に足を運ぶことをお勧めします。



展示会場風景 (ASME/IGTI提供)

原稿受付 2014年7月28日

* 1 (株)東芝 電力・社会システム技術開発センター
回転機器開発部 ターボ機器技術担当
〒230-0045 横浜市鶴見区末広町 2-4

ASME Turbo Expo 2014展示 実施報告

国際委員会

2014年6月16日～20日、ドイツ/デュッセルドルフにてASME Turbo Expoが行われました。皆様ご存じのとおり、この学会では展示も行われておりますが、今年はGTSJが初めて出展を実施しました。ASME/IGTIからは、GTSJがTurbo ExpoのParticipating Organizationとなっていることから、展示ブース提供の便宜を図っていただきました。国際委員会では展示ワーキンググループを組織し、展示の準備と実施に当たりました。

ブースではポスター4枚を準備し、壁面に展示しました。ポスターの内容は、学会紹介1枚、日本のガスタービン技術紹介1枚、東日本大震災におけるガスタービンの状況調査2枚です。これら4枚は展示ワーキンググループにて今回新たに作成しました。東日本大震災におけるガスタービンの状況調査は、2012年度にGTSJ調査研究委員会が取り纏めた報告書のサマリ版として作成したものです。

また、ブースでの配布用に、学会紹介パンフレット英語版、JGPP(International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems)の紹介パンフレット、東日本

大震災に関する調査研究報告書英語版、記念品として学会ネーム入りクリアファイルを準備いたしました。IGTC2015の1st Circularもブースにて500部配布し、ASME Turbo Expoに参加した諸外国の方々に来年日本で開催されるIGTC2015の宣伝活動を活発に行いました。IGTC2015の参加者増に貢献できるか、乞うご期待です。

ブースに立ち寄ってくださった方々からは、日本の会社や製品に関する情報についての問い合わせが多数あり、情報ハブとしての役割の必要性が感じられました。また、若い方からは留学、インターンシップの可能性についての問い合わせがありました。これらについては、国際委員会にて可能な活動を議論していきたいと思っております。

今回の展示に当たっては、デュッセルドルフ近郊にあるMitsubishi Hitachi Power Systems Europe GmbH (MHPSE)様にポスター印刷をご協力いただきました。また、展示案内には、ASME Turbo Expo参加の学会員の方々にご協力いただきました。皆様のご協力に感謝いたします。

ASME Turbo Expo 2014 参加報告

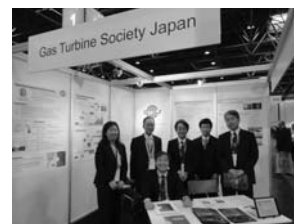
事務局 中村優美

今回、初めてASME Turbo Expoに参加してまいりました。初日にブース設営後、GTSJ展示ブースで国際委員会メンバーと共に来訪者の対応にあたり、GTSJやIGTC2015の紹介をいたしました。ブースで直接お話しすることで、IGTCの雰囲気も多少なりとも伝えられたように思います。webページでの情報掲載だけでなく、積極的な広報活動が有効であると感じました。展示会場閉館時には、イベントやセッション会場に赴き、本会議の運営の様子を見てまいりました。一般講演、招待講演の他、表彰式など多数のイベントやコーヒープレイクの時間など、研究発表ばかりでなく交流の場として有意義に過ごせるようなプログラム構成になっており、参加者が会場のあちこちでディスカッションをしている姿が印象的でした。私もASME/IGTI事務局でTurbo Expoを仕切っているKristin Barrangerさんにご挨拶し、展示ブース実現へのご協力にお礼を申し上げますとともに、今後の協力関係について話し合うことができました。お忙しい

中、とても親切に対応していただき、ありがたく感じました。

会場はデュッセルドルフ郊外にあったのですが、参加者ネームカードの裏側に周辺の公共交通機関無料パスがついており、慣れない切符の購入や電車の乗降に悩まなくて済みました。たいへん助かりましたが、ちょっと真似できないサービスです。

今回の貴重な経験を通し、国際会議の実際や運営の方法について、様々なことを学びました。この経験を今後の学会活動に生かして行きたいと思っております。



2014年度第1回見学会報告

山形 通史

YAMAGATA Naofumi

尾関 高行

OZEKI Takayuki

2014年6月27日(金)に、(株)東京ガス横須賀パワーステーションと(一財)電力中央研究所の見学会が開催された。参加者は、重工業関連メーカー、電力・ガス会社、大学・研究所関係、学生などの23名が集まった。

最初に横須賀市にある追浜駅に集合し(株)東京ガス横須賀パワーステーションの現地を訪問した(写真1)。

発電所は、電気事業法改正により東京電力が1999年に募集した電力卸供給事業に入札し、落札されたことをうけて建設された火力発電設備とのことである。

バスにて現地到着したが、敷地に入った時点で、発電所の狭い敷地内に各種設備がコンパクトに配置されていることがわかった。発電所管理棟内の会議室にて、発電所の保守業務を請け負っている富士電機担当者より、会社概要および設備概要を説明していただいた。敷地面積が約1万5千㎡、建設工事は2003年に開始され、運転開始が2006年6月とのことで、運開後8年が経過している。発電所運用は、年間運転時間2700時間程度(ミドル30%利用率)でDSS(毎日起動停止)が実施されているとのことであった。発電設備形式は、シーメンス製1100℃級のガスタービンSGT5-2000E(旧名称V94.2)形を使用した排熱回収型コンバインドサイクル方式を採用しており、都市ガス13Aをサイロ式燃焼器で燃やしている。発電端出力は239,700kW(大気温度5℃時)、発電端効率は51%(低位発熱量基準)である。また、復水器冷却水には、水資源の有効活用を目的に隣接する下水処理場の処理水の再使用がされ、発電所排水を公共下水へ排水することとあわせて、海への排水がなく環境にやさしい発電所として運用されていた。

概要説明後に、構内を徒歩にて視察を行い、あらためてシンプルにまとめられた施設であることを体感した。

構内見学後には中央操作室の見学を行い、会議室にて質疑応答が活発に行われた。

続いて、横須賀市内をバスで1時間ほど乗車し、一般

財団法人電力中央研究所の横須賀地区に移動した。初めに、会議室でエネルギー技術研究所の高橋毅所長に電力中央研究所および横須賀地区の全体概要を紹介して頂いた後、2班に分かれてヒートポンプ研究開発実験棟、燃料高度利用実験棟、火力次世代燃料高度燃焼試験棟の3設備を見学した。ヒートポンプ研究開発実験棟は産業・業務用の各種ヒートポンプの開発と評価に活用されており、高温水循環ヒートポンプ、蒸気製造ヒートポンプ、熱風製造ヒートポンプ、ターボ冷凍機、冷・温水チラーの性能評価に用いられている。また、寒冷地の大気環境をも再現して、試験をすることが可能となっている。燃料高度利用実験棟では、石炭火力発電所におけるバイオマスの混焼率の向上を検討するために、バイオマスを熱処理して炭化させ、性状を石炭に近づけることを目的に研究している。見学した装置では、異なる炭化度合いの試料を製造することができ、炭化プロセスのエネルギーバランスを評価するとともに、炭化物の粉碎性や燃焼性を評価している。さらに見学では、木材チップの炭化前後の粉碎性の違いを、コーヒーミルで粉碎することで体験した。火力次世代燃料高度燃焼試験棟は、低品位燃料の導入拡大に向けた設備である。実機同様のバーナを用いて、固体・液体の各種燃料の燃料特性評価や燃焼技術開発を行っており、実際に燃焼状態を計測窓から観察した。また、レーザ計測が可能な乱流燃焼モデリング炉では、燃焼現象の詳細解明に取り組み、燃焼数値解析技術の高度化を検討している。

いずれの見学施設においても活発な質疑応答がなされ、時間が足りないと感じるほど盛況裡に見学会は終了し、記念撮影(写真2)をした後に解散となった。

最後に、本見学会を実施するにあたり多大なご尽力・ご協力を頂いた東京ガス横須賀パワーおよび電力中央研究所の関係者の皆様、そして参加して下さった皆様に、心より御礼を申し上げます。(集会行事委員会委員)



写真1 (株)東京ガス横須賀パワーステーション



写真2 (一財)電力中央研究所 横須賀地区

第24回ガスタービン教育シンポジウム報告

吉田 征二
YOSHIDA Seiji

2014年7月3日(木)、4日(金)の二日間にわたり、第24回ガスタービン教育シンポジウムが、神奈川県横浜市の株式会社東芝京浜事業所タービン工場にて開催された。

この教育シンポジウムは学生や若手技術者などガスタービン初学者を対象に、ガスタービンの基礎知識を学んで頂く目的で、第一線で活躍されている各専門家による講義と、実際のガスタービンとその関連の製造及び研究開発施設等の見学を併せた企画である。今回も、1日目に講義2テーマと特別講義および東芝タービン工場などの見学を実施し、2日目に講義4テーマを実施した。

今年度は9月に三菱日立パワーシステムズ株式会社高砂工場でも教育シンポジウムの開催を予定しているため、関西方面からの参加者はほとんど無く、参加者数は52名(学生26名、社会人26名)と、昨年と比べると社会人の参加者がやや少なかった。

1日目は集会行事委員会の山根委員長による開会挨拶の後、3テーマの講義、(1)ガスタービン概論(渡辺紀徳氏)、(2)ガスタービンと燃焼工学(岩井保憲氏)、(3)超臨界CO₂サイクル発電システムの開発(高橋武雄氏)が行われた。その後、官学参加者は二班に分かれて、(a)蒸気タービンの製造と組み立てを行っている東芝京浜事業所タービン工場、(b)低圧蒸気タービンの最終段のタービンブレードを製造している東芝ジーイータービンコンポーネンツ(株)、(c)発電用ガスタービンの修理を行っている東芝ジーイー・タービンサービス(株)の見学を行った。一方、企業参加者は東芝のガスタービン技術の紹介ビデオを視聴した。

設備見学終了後、東芝京浜事業所本工場内の食堂にて懇親会が行われた。シンポジウム出席者の約7割の方が懇親会に参加し、また、東芝関係者の方のご参加もあり、会場の各所で参加者同士の活発な議論と相互交流がなさ

れ、参加者の方には有意義な時間を過ごしていただけたと思う。

2日目は、前日に引き続きガスタービン関連の4テーマの講義、(4)ガスタービンと伝熱工学(村田章氏)、(5)ガスタービンと流体工学(山本誠氏)、(6)ガスタービンと材料工学(屋口正次氏)、(7)ガスタービンと制御工学(古川洋之氏)が行われた。

それぞれの講義ではガスタービンの基礎から最新の技術動向までを専門家の立場から説明がなされ、受講者にとって今後の研究・仕事などを進める上で多いに役立つ内容となっており、熱心な聴講・質疑応答が行われた。

全講義終了後、2日間の講義に出席した参加者に受講証が手渡された。また、参加者には、今後の教育シンポジウムの運営及び教材に関するアンケートに御協力頂いた。アンケート結果は次回以降の企画及び教材の改訂に反映する予定である。

本シンポジウムでは昨年出版された「ガスタービン工学」を教材として用いており、その執筆者の先生方を中心に講師をお願いしている。「ガスタービン工学」は学会ホームページから購入することができ、今回の参加者のうち2名が事前に教材を購入して受講していた。講義では時間の都合もあり、教材の一部しか扱うことができなかったが、参加された皆様にはこの教材を有効に活用し、ガスタービンの知識をさらに深めるのに役立てて頂ければ幸いである。

最後に、講義、資料等の作成・準備にご尽力して頂いた講師の先生方々に感謝すると共に、会場の提供、見学会及び懇親会についてご協力を頂いた株式会社東芝の関係者各位に深く感謝いたします。

(集会行事委員会委員)



講義風景

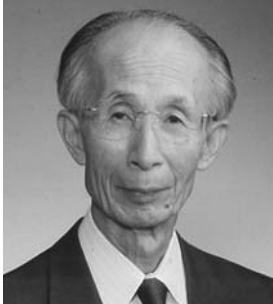


懇親会風景

2014年7月10日 90歳にて逝去されました。

同氏は本学会の前身「日本ガスタービン会議」より役員・評議員を歴任され1988年には会長を務められました。また本学会の創設にも力を尽くされ、本学会の発展に多大の尽力をされるとともに我が国のガスタービン工業の発展のためにも大いに貢献されました。

ここに謹んで哀悼の意を表します。



略歴

1946年 東京帝国大学第二工学部卒業
 1946年 石川島芝浦タービン(株)
 1947年 商工省機械試験所
 1955年 総理府航空技術研究所
 1966年 科学技術庁航空宇宙技術研究所 原動機部長
 1982年 同所 科学研究官
 1983年 日本工業大学 教授
 早稲田大学 理工学部 客員教授
 1995年 日本工業大学 名誉教授
 2004年 日本工業大学 客員教授
 [本会関係略歴] 1972年入会
 GTCJ 評議員 (1, 2, 3, 4期)
 GTSJ 理事 (1, 3, 4, 7, 8期, 12期副会長, 13期会長)
 監事 (16期)
 1994年4月名誉会員

松木正勝先生を偲んで

佐々木 誠*1

本学会名誉会員、元会長の松木正勝先生は病氣療養中の所、平成26年7月10日にご逝去されました。享年90歳でした。誠に哀惜の念に堪えません。

先生は昭和21年9月に東京帝国大学第二工学部をご卒業、同年10月石川島芝浦タービン株式会社に勤務された後、昭和22年9月に商工省機械試験所に任官され、昭和30年12月に創立直後の総理府航空技術研究所に転任されました。以来、同所原動機部門において一貫して航空機用ジェットエンジンの研究を主導され、その発展に力を尽くされました。

昭和31年には原動機部圧縮機研究室長に任ぜられ、急務であったジェットエンジン要素試験設備の整備計画を推進されるとともに、翼列風洞や高速回転翼列試験機による研究に従事されました。

昭和38年からはVTOL機用超軽量リフトジェットエンジンの研究開発を開始され、JR100、JR200エンジンの開発と同エンジンによる高度制御の研究を進め、FTB (Flying Test Bed) の自由飛行を成功に導かれました。これと並行して、要素試験設備の大型化を図るとともに、将来を展望した高圧圧縮機、高温タービン、遷音速ファンなどの研究を先導されました。

昭和41年には原動機部長に就任され、昭和46年からは通商産業省大型プロジェクト制度による航空機用ジェットエンジンの研究開発を開始し、わが国初の高バイパス比ファンエンジンFJR710の要素研究を推進され、同プロジェクトを成功に導かれました。

昭和53年には航空宇宙技術研究所の低騒音STOL実験機「飛鳥」にFJR710エンジンの搭載が決定し、これを受けて飛行用エンジンの研究開発を強力に推進され、実験機飛行試験の成功へと導かれました。

この間、昭和54年にはSTOLプロジェクト推進本部副本部長、昭和57年には科学研究官を歴任され、昭和58年に定年により退官されました。

退官後は日本工業大学教授および早稲田大学客員教授として若い技術者の育成に力を注がれました。

このように、先生は戦後の航空エンジン研究の草創期から実用エンジンへの発展期まで、ジェットエンジンにかかる多くの研究開発を先導されるとともに、特に学界、産業界との連携に尽力され、高効率産業用ガスタービンの研究開発への技術支援を含め、卓越した先見性と指導力によりエンジン技術の発展に貢献されました。FJR710エンジンの成功がその後の民間における実用エンジンの国際共同開発に繋がったことは良く知られている所です。本学会をはじめ内外の関連学会においても多大な貢献をされ、日本機械学会賞、ISOABE (国際エアブリージングエンジン学会) 賞など多くの表彰を受けられました。

先生は誠に博識で、何事もその本質を理解する姿勢を貫かれ、退官後も後進との技術論を楽しみに、つい最近まで指導を続けておられました。

偉大な先達であられた先生のご功績を偲び、改めて哀悼の意を表し、謹んでご冥福をお祈りいたします。

*1 元航空宇宙技術研究所研究総務官

第42回日本ガスタービン学会定期講演会（熊本）・見学会のお知らせ

第42回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会を以下のように開催します。
多数のご参加をお待ちしております。

主 催：公益社団法人 日本ガスタービン学会

協 賛：協賛団体は日本ガスタービン学会ウェブサイト (<http://www.gtsj.org/>) をご覧ください。

開催日：講演会 2014年10月22日(水), 23日(木), 見学会 2014年10月24日(金)

開催場所：熊本市国際交流会館 熊本市中央区花畑町4-18

<http://www.kumamoto-if.or.jp/kcic/default.asp>

Tel: 096-359-2020

講演会：

- ・一般講演 : 空力, 燃焼, システム, 伝熱, 材料等
- ・企画セッション: 「負荷変動対応型先進的ガスタービン技術」
- ・特別講演 : 「マグネシウム新時代の到来 -KUMADAI マグネシウム合金-」
河村能人氏 (熊本大学 先進マグネシウム国際研究センター センター長)
「『くまモン』を活用した熊本県のブランド推進戦略 (仮)」
成尾雅貴氏 (熊本県 くまもとブランド推進課)

参加登録費 (税込)：

- ・会員・協賛団体会員 : 14,040円 (ただし, 学生は論文集有りで4,320円, 論文集無しで1,080円)
- ・会員外 : 19,440円 (ただし, 学生は論文集有りで7,560円, 論文集無しで4,320円)

懇親会：

- ・第1日目の講演会終了後, 熊本交通センターホテルにて開催いたします。
住所: 熊本県熊本市中央区桜町3番10号, Tel: 096-326-8828, <http://www.kyusanko.co.jp/hotel/>
懇親会参加費: 3,240円 (税込)

見学会：

- ・日時 : 10月24日(金)
- ・見学先 : 日立造船, ジャパンマリンユナイテッド, 熊本大学先進マグネシウム国際センター等
- ・定員 : 40名程度, 先着順, 講演会参加登録者に限ります。
- ・参加費 : 6,480円 (税込)
- ・申込締切日: 10月3日(金)

参加申込方法：

学会HP (<http://www.gtsj.org/>) から登録されるか, 本号掲載参加申込書に必要事項をご記入の上, 学会事務局宛にお申込み下さい。参加登録は, 受付の混乱を避けるため, 事前登録をお願いします。講演者も参加登録をお願いします。

市民フォーラム：

10月21日(火)に熊本大学(黒髪北地区)にて大学生・一般の方を対象とするフォーラムを開催します。参加は無料です。詳細につきましては学会ウェブサイトにて随時掲載します。

第42回日本ガスタービン学会定期講演会・見学会 (2014年10月22～24日)

参加申込書

(公社) 日本ガスタービン学会 行 FAX: 03-3365-0387 TEL: 03-3365-0095

参加者の連絡先 (複数人申込まれる場合は、代表者の方の連絡先)

| | |
|----------|---|
| 会社/大学等名称 | |
| 所在地 | 〒 |
| TEL/FAX | |
| E-MAIL | |

参加者名

| フリガナ 氏 名*1 | 所 属 | TEL/FAX E-MAIL | 所属学会 (GTSJ会員 番号) | 会員 資格 (正/学) | 懇親会 (22日) (3,240円) | 見学会 (24日) (6,480円) |
|---------------|-----|-------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | | | 出席 欠席 | 参加 不参加 |
| | | | | | 出席 欠席 | 参加 不参加 |
| | | | | | 出席 欠席 | 参加 不参加 |
| | | | | | 出席 欠席 | 参加 不参加 |

*1 登壇者の方は氏名の後に○を記入してください。

論文集無し (学生のみ) の場合は、下記の参加登録費の金額に反映してください。

【事務局への連絡事項】

払込方法 (○印をつけてください) 参加登録料・参加費入金予定日 月 日 (10月21日までに払込みください)

- 銀行 (みずほ銀行 新宿西口支店 普通 1812298)
- 郵便振替 (00170-9-179578)
- 現金書留

送金金額 _____円 (内訳: 参加登録費 _____円 懇親会参加費 _____円 見学会参加費 _____円)

当日支払いは原則として受け付けません。(当日不参加の場合でも参加費はお支払いいただきます。)

*請求書の発行について

- 要 宛名 ()
- 不要

*領収書の発行について

- 要 宛名 ()
- 不要

第42回日本ガスタービン学会定期講演会(熊本)プログラム(案)

- 第1日 -

(一般講演 講演時間15分 討論5分、*印:登壇者、学:学生優秀講演賞の審査対象講演、連名者の所属が省略されている場合は後者と同じ)

| A室(ホール) | | B室(第3会議室) | |
|------------------|--|-----------|--|
| 8:50 | <<一般講演>> 燃焼 座長:武田淳一郎(富士電機) A-1 超臨界CO ₂ タービン向け燃焼器の開発 岩井保憲, 伊東正雄, *森澤優一, 鈴木伸寿(東芝) A-2 水素ガスタービンの燃焼方式に関する総括 *湯浅三郎(首都大) A-3 水素混焼技術の開発 *小田剛生, 櫻澤俊明, 木下康裕(川崎重工) A-4 L20Aガスタービン リキッドスタンバイ型DLE燃焼器の開発 *松尾佳憲, 松本匡史, 緒方正裕(川崎重工) | 10:00 | <<一般講演>> 材料・空力 座長:姫野武洋(東大) B-1 δ プロセスを用いたInconel718鍛造材の均一微細粒化 学 *西牧智大, 寛幸次(首都大), 河上裕介(同和鍛造) |
| 10:10 | <<一般講演>> 燃焼 座長:渡邊裕章(九大) A-5 航空機用環状燃焼器内乱流噴霧燃焼場のラージ・エディ・シミュレーション *西家隆行(数値フローデザイン), 牧田光正(JAXA), 中村直紀(エイ・エス・アイ総研), 黒瀬良一(京大) A-6 対向衝突噴流による混合における流路形状の影響 *長尾 隆央(IHI), 松野 伸介(IHI), 林光一(青山学院大) A-7 高圧力比化が予混合2段燃焼器の燃焼特性に及ぼす影響 *山本武, 下平一雄, 黒澤要治, 吉田征二(JAXA) A-8 流体素子により空気流量配分制御を行う予混合燃焼器の燃焼特性 *吉田征二, 山本武, 下平一雄, 黒澤要治(JAXA) | 11:40 | B-2 レーザービーム積層造形法により作製したIN718造形材の組織と強度と特性 学 *中山義博, 寛幸次(首都大), 近藤大介(金属技研) B-3 羽根付きディフューザを有する遠心圧縮機に発生する失速と前縁渦の関係 学 *藤澤信道, 原昇太郎, 太田有(早大), 後藤尚志(IHI) B-4 遷音速遠心圧縮機のサージ点近傍における非定常流動現象の大規模DES解析 学 *神崎大, 西澤崇(九大), 古川雅人, 山田和豊(九大) B-5 超小型遠心圧縮機内部流れの数値解析 -羽根車入口コーン形状の影響- 学 *米村淳, 金子雅直(法大院), 辻田星歩(法大) |
| 昼休み(11:40~12:40) | | | |
| 12:40 | <<一般講演>> 伝熱 座長:山本武(JAXA) A-9 吸気噴霧冷却システムにおけるダクト内での液滴合体分離の影響 *都築宣嘉, 宇多村元昭(東工大), 明連千尋, 柴田貴範(MHPS) A-10 ガスタービン翼面フィルム冷却における流れ制御デバイスの効果 *川端浩和, 船崎健一(岩手大), 田川久人, 堀内康広(MHPS) A-11 非定常RANSによる流体・熱伝導連成解析 *山根敬(JAXA), 田中雄飛(東京農工大院) A-12 主流加熱ヒーター及びIRカメラを用いた熱伝達率計測手法の高精度化検討 *長谷貴昭, 水上聡, 伊藤栄作(三菱重工) | 12:40 | <<一般講演>> 空力 座長:平野孝典(拓大) B-6 2次元圧縮機翼列のresolved LESとRANSの比較 学 *大内拓也(東大院), 寺本進(東大) B-7 ガスタービン用多段軸流圧縮機の失速点近傍における非定常流動現象の大規模DES解析 学 *中木戸智史(九大), 山田和豊, 古川雅人(九大), 松岡右典, 中山健太郎(川崎重工) B-8 軸流圧縮機におけるサージ・旋回失速共存系の非定常内部流動の可視化 *三井博明, 岡俊介, 太田有, 大田英輔(早大) B-9 模型エンジンを利用したマイクロジェットデバイスの騒音低減性能評価に関する研究 学 *福本将太, 大宮修一郎(東大院), 和田恵(サイエンス・サービス), 生沼秀司, 長井健一郎, 石井達哉(JAXA), 金子成彦(東大) |
| 14:00 | <<一般講演>> 空力 座長:春海一佳(海技研) A-13 3枚翼ジャイロミル型風車の性能向上に関する研究 *朱澄(拓大院), 平野孝典, 川端康介(拓大), 平本政明(元東大), 藤本一郎(拓大) A-14 2次元風車翼周りに及ぼす離散プラズマ電極の効果検討 *松田寿, 大西悠太, 大友文雄, 田中元史, 内田竜朗, 大迫俊樹(東芝) A-15 リング型プラズマアクチュエータによるタービン翼列の漏れ流れ制御に向けた平板基礎実験 *松沼孝幸, 瀬川武彦(産総研) | 14:00 | <<一般講演>> システム 座長:壹岐典彦(産総研) B-10 熱電可変型マイクロガスタービンに関する研究 学 *加藤彬, 土屋利明(金沢工大) B-11 マイクロガスタービン起動時の動作解析 学 *関慧一(東北大), 竹田陽一, 中野晋(東北大) B-12 卓上ガスタービンの開発 学 *中山翔太(高知工科大), 筒井康賢(高知工科大) |
| 15:10 | <<一般講演>> 空力 座長:松沼孝幸(産総研) A-16 流体構造連成解析による遷音速ファン翼列のフラッター解析 *立石敦(東大院), 渡辺紀徳, 姫野武洋, 井上智博(東大) A-17 遷音速ファンの流れ場と失速特性に周方向溝型ケーシングトリートメントが及ぼす影響 *佐久間康典, 渡辺紀徳, 姫野武洋(東大), 加藤大, 室岡武, 周藤由香里(IHI) A-18 剥離を伴う遷音速タービン翼の非定常空力特性 *木村泰徳, 柴田貴範, 中野晋, 尾崎修一(MHPS), 平野孝典, 藤本一郎(拓大) A-19 航空機用低圧タービンの厚翼化に関する研究 *岡村泰博, 浜辺正昭(IHI), 船崎健一(岩手大学) | 15:10 | <<一般講演>> システム・補機 座長:筒井康賢(高知工科大) B-13 航空機の運航を考慮したエンジンシステム設計・評価法の開発 学 *津郷光明, 秋山直輝(東京農工大), 福山佳孝(JAXA) B-14 小型ターボジェットエンジンを用いた発電システム構成における非設計点性能の予測 *藤本恭介, 土屋利明(金沢工大) B-15 熱交換器を搭載する航空機エンジンの過渡特性 学 *秋山直輝(東京農工大), 福山佳孝(JAXA) B-16 インピーダンスポンプ内流れの流体構造連成解析 学 *岡本竜馬(東大院), 渡辺紀徳, 姫野武洋, 井上智博(東大) |
| 16:40 | A室(ホール) | 16:40 | |
| 16:50 | <<特別講演>> | | 司会:武田淳一郎(富士電機) |
| 18:00 | 「くまモン」を活用した熊本県のブランド推進戦略(仮) 熊本県 くまもとブランド推進課長 成尾 雅貴 | | |

第42回日本ガスタービン学会定期講演会(熊本)プログラム(案)

- 第2日 -

| 時間 | A室(ホール) | 時間 | B室(第3会議室) |
|------------------|--|-------|---|
| 9:20 | <<一般講演>> 蒸気タービン・計測 座長: 洪川直紀(東芝) A-20 液滴衝撃エロージョンの数値シミュレーション *鈴木正也(JAXA), 山本誠(東理大) A-21 重ね塗りPSP/TSPによる超音速タービン翼列周り流れ場の定量的可視化解析 *森英男, 大村尚登, 前田恭平, 大淵貴之(九大), 中野晋, 小野英樹, 築瀬祐太(MHPS) A-22 遠心圧縮機の翼振動に関する研究(非接触翼振動計測によるき裂検知) *下原直人, 村江祥太, 服部博明(IHI) | 9:20 | <<一般講演>> 燃焼 座長: 斉藤圭司郎(三菱重工) B-17 デトネーション燃焼器を搭載した超小型ガスタービンの熱効率評価と基礎実験 *高橋洋人(首都大院), 櫻井毅司(首都大) B-18 超小型ガスタービン用灯油燃料燃焼器への多孔質体を用いた予蒸発燃焼の検討 *原田亮(首都大院), 櫻井毅司, 湯浅三郎(首都大) B-19 淀み点逆流燃焼における排気性能に及ぼす噴射形態の影響 *野崎皓太, 廣井巧(法大院), 中村聡志(新潟原動機), 山田秀志(JAXA), 林茂(法大) |
| 10:20 | <<一般講演>> 材料 座長: 玉井亮嗣(川崎重工) A-23 発電用1,300°C級ガスタービン動翼の経年劣化評価 *伊藤明洋(中部電力) A-24 実機使用した単結晶Ni基超合金の第一段高圧タービン動翼先端部の単純時効に伴う γ' 相の形態変化 *三浦信祐(防衛大), 山本詩歩(東北大院), 近藤義宏(防衛大) A-25 ガスタービン翼のTBCを対象としたはく離の非破壊検出手法の開発—適正な検出条件の検討— *尾関高行, 酒井英司, 藤井智晴, 高橋俊彦(電中研) A-26 高効率ガスタービン動翼用ニッケル基超合金の開発 *小熊英隆, 種池正樹, 岡田郁生(三菱重工) 原田広史, 横川忠晴(物材研) A-27 高効率ガスタービン用遮熱コーティングの開発状況 *鳥越泰治, 岡嶋芳史, 妻鹿雅彦, 岡田郁生(三菱重工) 正田淳一郎, 塚越敬三(MHPS) | 10:20 | <<一般講演>> 着氷・液滴 座長: 高橋康雄(MHPS) B-20 ファン通過による液滴温度変化を考慮した着氷シミュレーション *林亮輔(東理大院), 山本誠(東理大) B-21 アイスクリスタル着氷の成長に関する数値シミュレーション *古田小春(東理大院), 山本誠(東理大) B-22 巡航条件での着氷によるファン動翼性能変化に関する数値解析 *山本充俊, 鎌形柱太, 山本誠(東理大), 賀澤順一(JAXA) B-23 過冷却液滴の凍結プロセスに関する数値的研究 *大澤航一郎(東理大院), 山本誠(東理大) B-24 気流中に放出する水膜の分裂形態に関する研究 *松崎悠(東北大院), 鳥山温美, 竹田陽一, 中野晋(東北大), 佐藤公仁弘(東北電力) |
| 昼休み(12:10~13:10) | | | |
| 13:10 | A室(ホール) <<特別講演>> マグネシウム新時代の到来 - KUMADAI マグネシウム合金 - 熊本大学先進マグネシウム国際研究センター センター長 河村能人 司会: 寛幸次(首都大学東京) | | |
| 14:10 | A室(ホール) <<企画セッション>> 負荷変動対応型先進的ガスタービン技術 司会: 渡邊裕章(九大) 1. 火力原子力発電技術協会RE研究会の活動紹介 2. (総括) 負荷変動対応型先進的ガスタービン技術について 非定常現象シミュレーション技術等 3. 「負荷変動対応型先進発電設備に関する技術可能性調査」プロジェクト紹介 4. 発電システム 5. 大規模・中規模GTの発電量制御、効率維持技術 6. 小規模GTの発電量制御、需給予測技術、負荷追従制御技術 7. 航空機転用GT運用における系統安定化制御技術 8. 高負荷変動時の材料特性評価技術 パネルディスカッション 船橋信之(火原協) 渡辺紀徳(東大) 壹岐典彦(産総研) 高橋徹(電中研) 伊藤栄作(三菱重工) 岸部忠晴(MHPS) 合田真琴(川崎重工) 米澤克夫(IHI) 齊藤大蔵(東芝) 座長: 渡辺紀徳(東大) | | |
| 16:50 | <<学生優秀講演表彰式>> | | |

次号予告 日本ガスタービン学会誌2014年11月号 (Vol.42 No. 6)

特集「過酷な環境で使用されるガスタービン(仮題)」

航空用ガスタービンの着氷問題 室岡 武 (IHI)

大型航空機における補助エンジンの高空での運用について 山地 直太 (JALエンジニアリング)

上越火力発電所 ガスタービン設備の寒冷地対策について 中村 肇 (中部電力)

ガスタービン吸気フィルターの寒冷対策について 味崎 隆久, 澤田 信明 (東北電力)

過酷環境に対する中小型ガスタービンについて 瀬立 良太 (三菱日立パワーシステムズ) 他

MGTを用いたバイオガス・コジェネレーション・システム 山田 貴延 (北見工業大学)

ロケットエンジン用ターボポンプのタービン技術 内海 政春, 川崎 聡, 島垣 満 (宇宙航空研究開発機構)

※タイトルは変更する可能性があります。