

特集：ガスタービンにおける伝熱・冷却技術の最新動向

## ガスタービンにおける伝熱・冷却技術の最新動向：総論

### Latest Trends of Heat Transfer Researches and Cooling Technology Developments for Gas Turbine : General Remarks



船崎 健一\*1

FUNAZAKI Ken-ichi

キーワード：ガスタービン，タービン，燃焼器，伝熱，冷却技術，実験，CFD

Key Words : Gas Turbine, Turbine, Combustor, Heat Transfer, Cooling Technology, Experiment, CFD

#### 1. はじめに

航空用ガスタービンエンジンや産業用ガスタービン(以下GTと称す)は、高出力化、高効率化の流れを受け高圧力比化、高温化の努力が重ねられている。GTの高温化に関しては、耐熱合金の開発・改良や遮熱コーティング技術の進歩の効果も大きい。GTにおける伝熱や冷却技術に関する研究の積み重ねの貢献度が最も大きいことは論を俟たないだろう。これまでの日本ガスタービン学会誌では、GTの高温化、高効率化を実現するための伝熱・冷却関連技術に関する特集記事として

・1997年Vol. 25 No. 97「高温・高効率化の歩みと展望(冷却技術)」(巻頭言：川池和彦氏)

・2007年Vol. 35 No. 3「ガスタービンにおける伝熱・冷却」(巻頭言：吉田豊明氏)

が取り纏められている。また、これに関連するものとして、

・2004年 Vol. 32 No. 4 「ガスタービンに関連するCFD(数値流体力学)解析の現状」(巻頭言：大田英輔氏)

が発行されている。筆者も、上記の特集記事の中で、「ガスタービンの冷却問題におけるCFD解析」<sup>(1)</sup>、「翼外面熱伝達率に関する最新研究動向」<sup>(2)</sup>を書かせて頂いている。前回の特集からさらに10年が経過しており、この間GTにおける伝熱・冷却技術についても相当量の研究成果が発表されていることから、このタイミングでの本特集は時宜にかなったものと言えるだろう。

今回の特集記事を総括することを目的として、以下ではGTにおける伝熱・冷却技術の研究開発全般に関する現状を俯瞰するとともに、今後の展望について述べる。また、最後に本特集号の構成について簡単に紹介する。

#### 2. GTの伝熱・冷却技術の最新動向と今後の展望

##### 2.1 2017年IGTI Scholar Lecture

2017年のASME TURBO EXPO(以下TEと称す)において、Ronald Bunker氏(元GE)がEvolution of Turbine CoolingというタイトルでIGTI Scholar Lectureを行っている<sup>(3)</sup>。Bunker氏は、タービンなど高温部品の冷却に関する数多くの研究活動や革新的な冷却技術の開発とともに、多数の解説論文<sup>(4)-(8)</sup>を通じてGTにおける伝熱・冷却研究をリードしている人物である。2017年の講演は、実際の冷却タービン翼が抱える多くの課題を踏まえつつ、企業における第一線のタービン研究者として展開し続けた研究活動、創作活動やそれらの解説、総説記事の集大成とも言うべき内容であり、非常に示唆に富むものである。その主旨は以下に3点にまとめられる。

(1)タービン翼の冷却は1960年前後から始まり、材料や製造面も含めて、およそ50年間に及ぶ技術革新の積み重ねの結果として、冷却効率は0.1から0.7までに向上している。

(2)GTの伝熱・冷却技術の現状(State-of-the-Art; SOA)は、数多くの内部冷却手法をベースにしつつも、40年前から利用が始まった数種類の基本的フィルム冷却手法(shaped, 複合角など)に冷却効率向上の多くを依存している。

(3)今後の冷却技術にとって重要視される事として、新たなエンジン運転環境、種々の要素、システムの統合効果、革新的冷却法、革新的製造法、そして未知数の同定(Quantification of Unknowns)などが挙げられる。特に、Additive Manufacturing(AM)の進展を踏まえた、設計と製造とが融合した新手法の(例えば、micro or skin cooling)への活用。

以下では、Bunker氏の視点を援用しつつ、GTの伝熱・冷却技術の現状と今後の進化の方向性を探ってみる。

##### 2.2 分野別伝熱研究・冷却技術

GTの伝熱・冷却技術の現状を知る上で欠かせない図書がある。一つは、Han, Dutta, EkkadによるGas

原稿受付 2018年10月9日

\*1 岩手大学理工学部 システム創成工学科機械科学コース  
〒020-8551 盛岡市上田4-3-5  
E-mail: funazaki@iwate-u.ac.jp

Turbine Heat Transfer and Cooling Technology<sup>9)</sup>であり、もう一つは日本ガスタービン学会が発行する「ガスタービン工学」<sup>10)</sup>である。両者とも2010年頃までのTEで公表された研究成果等を基に、伝熱の基礎から始まり、外部熱伝達、内部冷却、フィルム冷却、回転の効果やディスクキャビティ内部流、実験手法及び数値解法までの分野をカバーしており、それぞれの分野のSOAを知る上で重要な資料となっている。これらの図書を参考に、伝熱研究・冷却技術の主要分野における最新動向を紹介する。

**2.2.1 外部熱伝達** 外部熱伝達については、数値解析への依存性の高まりとともに、近年のTEでは外部熱伝達のみを扱うテーマは少なくなっており、エンドウォール部や翼先端部など、より複雑な流れ場での伝熱に関心が寄せられている。実際、以前には発表件数が多かった主流乱れやwake通過による遷移関係のセッションが最近はほとんど設けられていない状況である。翼先端部に関しては、Zhang, Heによる解析記事<sup>11)</sup>が参考になる。幾つか重要な点を拾い上げてみると、

- (1)翼先端部での熱流体特性に対する重要な影響因子として、入口流れの状態（例えば、よどみ点圧力、温度の非一様性、スワール、ホットストリーク）、ケーシングとの相対的運動（言い換えると、翼列試験の妥当性の検証）が今後の検討課題であること。
- (2)高速流（transonic flow）と低速流（subsonic flow）とで、熱伝達分布に定性的な違いがあること。
- (3)翼先端部での冷却空気噴出と流れとの干渉効果は相当なものであることと、この現象を深く掘り下げることで流れの効果的な制御手法の探索の可能性があること。

表面粗さについての研究も、現在は大半が数値的手法によるもので、筆者の解説記事<sup>12)</sup>で取り上げた研究以後本質的な進展は見られないまま、全体としては停滞モードに入っていると言っても過言ではないだろう。なお、表面粗さが伝熱、冷却に与える効果についてはBons<sup>13)</sup>によって詳しく解説されている。表面劣化のプロセスが確率論的かつ原因毎に大きく異なること、表面粗さに関するパラメータが多く、各種パラメータが境界層遷移や伝熱現象に深く影響することなど、表面粗さはチャレンジングなテーマであるが、multiphysicsなテーマでもあり工学的、工業的価値も十分にあることから、新たな視点での取り組みが待たれる。

**2.2.2 内部冷却** 内部冷却技術は、伝熱研究の基本であり、GT登場以前からの膨大な研究成果の蓄積があるが、GT固有の状況と相俟ってより複雑な内部冷却方法が開発されている。ここで、固有の状況としては、回転する機器でありながら2000Kにも達する高温環境下で使用されること、部品が総じて小さく（肉薄）、結果として熱流束が大きいことが挙げられる。そして、冷却に利用可能な空気の使用量にも厳しい制約があること、相対

的に熱伝導の低い高温材料が用いられることから冷却ムラの影響が顕在化しやすいこと、また、高付加価値な部品であるため精密製造など比較的高コストな製造方法が適用されること、なども挙げられる。

内部冷却の基本は、適正な圧力損失というコストで対流熱伝達を促進することであり、それを実現するための①流動形態、②伝熱面形状、③流路断面形状の選定と伝熱面積の拡大を図ることが重要である。対流熱伝達の強さを示すものが熱伝達率 $h$ であり、それは温度境界層の特性の一つでもある。熱伝達率は、一般にレイノルズ数 $Re$ 、プラントル数 $Pr$ や表面粗さに依存するが、流れの状態によっても大きく変化する。また、熱伝達率によって内部流路内に発生する渦構造の存在は重要であり、壁から離れた流れ場だけでなく、壁面上の境界層の挙動にも影響を及ぼすため、境界層が通常の平衡乱流境界層とは異なる特性を示すことも稀ではない。

GT用内部冷却技術については、インピンジメント冷却、乱流促進体付流路、ピンフィンなど代表的手法をはじめ近年研究例が増加しているディンプル、latticework（格子状（ラティス）流路による冷却手法）などが「ガスタービン工学」に詳述されている。Ligraniは、その解説記事<sup>14)</sup>の中で、2003年までの内部冷却技術とそれ以降に開発された技術との比較などを行っており、技術の進歩を理解する上で大変有用な資料を提供している。Fig. 1～4は、Ligraniによって整理された、種々の内部冷却技術（主に伝熱促進デバイス）による熱伝達率の増加率 $(\overline{Nu}/Nu_0)$ と摩擦係数の増加率 $(f/f_0)$ との関係を示す。Fig. 1は2003年までに発表された内部冷却技術の熱流体特性である。この図から、 $f/f_0=20$ あたりまでは $\overline{Nu}/Nu_0$ と $f/f_0$ の間に弱い正の相関（Reynoldsのアナロジーに相当）が成立し、 $f/f_0=20$ を超えると $\overline{Nu}/Nu_0$ はほぼ頭打ちの状態になることが分かる。また、収集されたデータの中で乱流促進体のデータが最も多く、 $\overline{Nu}/Nu_0$ や $f/f_0$ のレンジがもっとも広くピーク値も大きいことが分かる。この性質から、乱流促進体付流路は設計の自由度の高い手法であり、内部冷却に多用される理由もそこにあると言える。Swirl chamberは翼前縁部の冷却などによく用いられる方法で、比較的低損失で高い熱伝達率が得られるのが特徴である。ピンフィンは乱流促進体に類似の傾向を示しているが、熱伝達的にはやや劣っている。ディンプルは低損失であるが、熱伝達率増加率も限定的である。Fig. 2には、いわゆる伝熱促進デバイスの総合性能として多く用いられる $\overline{Nu}/Nu_0/(f/f_0)^{1/3}$ を示す。この総合性能は、同じ消費エネルギーに対する熱伝達率の利得と考えることができ、1を下回った場合にはデバイス導入のメリットが薄いことを意味する。この評価指標で見た場合は、Swirl chamberが秀でており、乱流促進体やディンプルがそれに続く。

Fig. 3には2003年以降に報告された乱流促進体等の熱流体特性が既往のものとの比較で示されている。新た



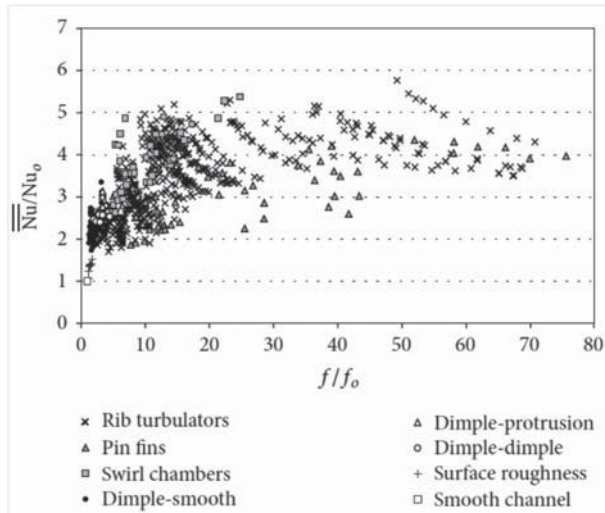


Fig. 1 Heat transfer enhancement achieved by several types of devices versus the increase in pressure loss<sup>13)</sup>

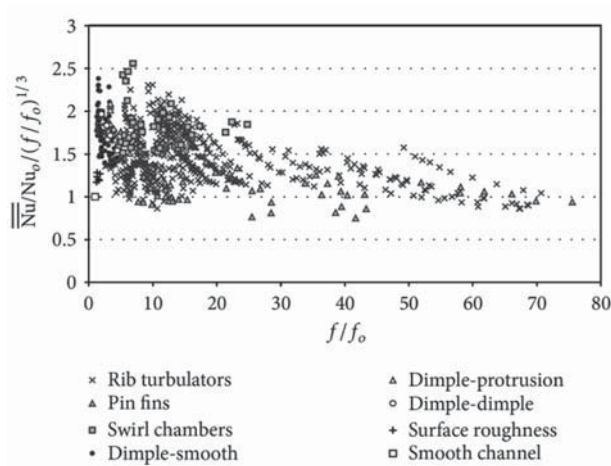


Fig. 2 Thermal performance parameters of several types of devices versus the increase in pressure loss<sup>13)</sup>

に調査されたものは、熱伝達率の増加率という点では特段優れたものはなく、その意味で対流熱伝達での限界が見えてきたとも言えるが、一方で、比較的低下圧力損失で十分な伝熱特性を示すものも見出されており、冷却設計の自由度拡大という観点で更なる研究の余地があることを示唆している。Fig. 4にはLigraniが呼称するところの、Reynoldsアナロジー指標 (Reynolds Analogy Performance Parameter) を示す。大半が1を大きく下回っており、アナロジー成立からはほど遠い状態であることがわかる。これは、デバイスによる比較的大きな渦構造によるものと推定される。また、この指標が指数関数のような関数で近似されうることも興味深い。

既に見たように、アナロジーが成立しない領域こそ挑むべき領域と言えるが、このような流れ場、温度場の非相似的要因による伝熱制御に関する理論的研究については、故笠木伸英先生の門下生による解説記事<sup>14)</sup>で詳述されている。扱う流れ場としては比較的単純なものではあるが、新進気鋭の伝熱研究者による理論とDNSを駆使した研究成果は、GTにおける伝熱研究にも活かせるも

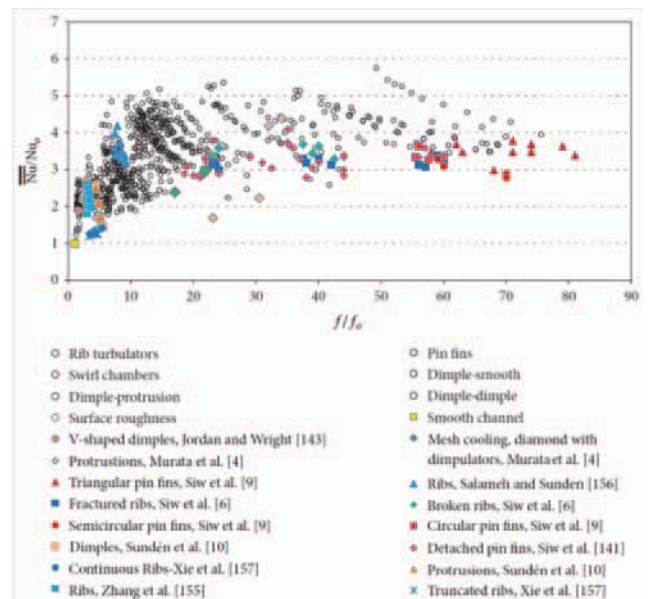


Fig. 3 Heat transfer enhancement achieved by several types of devices including those appearing after 2003<sup>13)</sup>

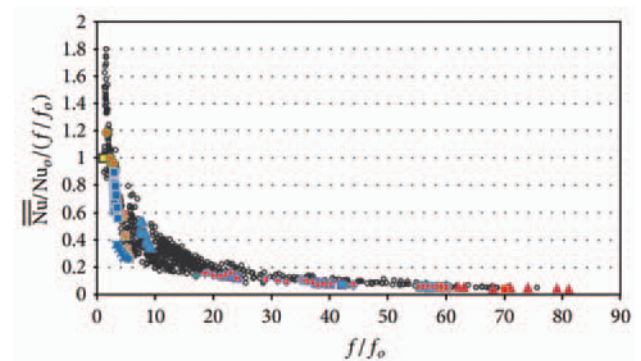


Fig. 4 Reynolds analogy performance parameters of several types of devices versus the increase in pressure loss<sup>13)</sup>

のである。

内部冷却技術は原則的に組み合わせることが可能であり、今後も既存の手法の改善とともに組み合わせが提案されるであろう。

**2.2.3 フィルム冷却** Bunker氏も述べているが、冷却効率改善はフィルム冷却技術の進展に負うところが大きい。Fig. 5に、冷却効率の変遷とフィルム冷却技術の進歩との関係を示す<sup>15)</sup>。この図から、80年代中頃、shaped holeの導入により劇的な冷却効率の向上が達成され、90年代以降にTrenchの導入で更に冷却効率が向上していることがわかる。Shaped holeに代表される冷却孔出口形状の工夫や、複数の冷却孔の組み合わせによるフィルム効率の上昇については膨大な研究例が存在している、主として実験的研究についてはEkkad, Hanの解説記事<sup>16)</sup>に詳しい。また、実験とCFD (RANS) を併用して同様の調査を行った研究例<sup>17)</sup>もある。

Shaped Holeには様々な形状が提案されているが、それらを踏まえて、Pennsylvania State UniversityのThole教授のグループによってbaselineとなるshaped holeが

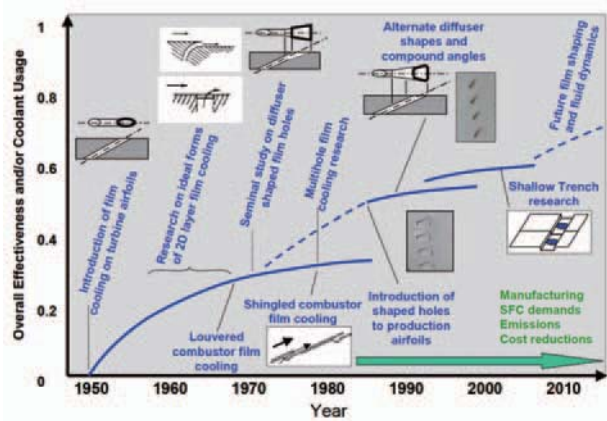


Fig. 5 Historical advancement in cooling efficiency due to the development of film cooling holes<sup>15)</sup>

設計されて、7-7-7という名称で公表されている<sup>18)</sup>。また、最適形状の探索<sup>19)</sup>を試みるのも当然の流れであろう。最適化の過程で問題視されるのが、CFDによる予測精度である。予測精度の向上には、High Fidelityな計算手法、例えばLESなどを用いるべきであるが、繰り返しの計算を多数行う最適化問題には不向きであるため、RANSの乱流モデルの選定及びモデル定数のtuningへの取り組みが行われている。この課題へのアプローチの一つとして機械学習 (Machine Learning, ML) などに多くの関心が寄せられている<sup>20)</sup>。Milaniら<sup>21), 22)</sup>は、乱流モデルの中でも研究例の比較的少ない乱流熱流束に着目して、フィルム効率の予測に際し、熱拡散係数の推定をMLで行った予測値をLESや乱流プラントル一定とした場合の結果と比較している。その比較の結果をFig. 6に示す。MLでの推定値を用いることでLESに近い結果が得られているが、改善の余地はまだ多い。

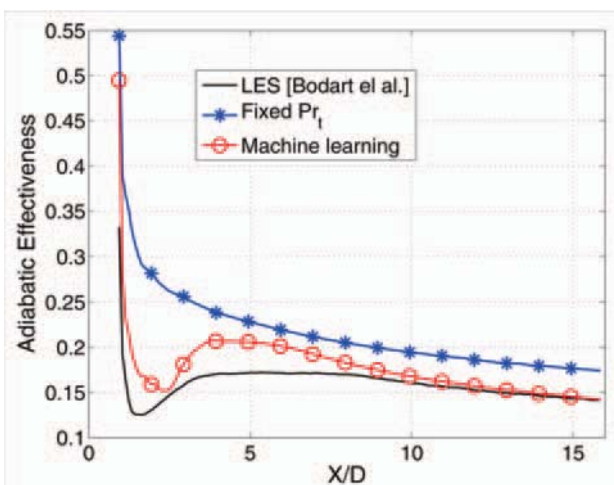


Fig. 6 A comparison of spanwise-averaged film effectiveness<sup>21)</sup> (by courtesy of P.M. Milani of Stanford University)

### 3. GTの伝熱・冷却技術を支える実験的手法の最新動向

タービン翼列における実験的手法の最新動向、主に空力計測の最新動向については、筆者の解説記事<sup>23)</sup>を参照頂きたいが、以下には上記の記事の中では触れなかった装置や手法について簡単に述べる。なお、多孔プローブやPIVの最新動向については、上記の解説記事が掲載されている特集号「航空エンジン・発電プラントの技術進歩を支える最新の試験計測技術」に詳述されている。

#### 3.1 大型試験装置

伝熱に関する伝統的な実験的手法は、単純化された流れ場 (例えば平板翼や二次元直線翼列) において、翼表面における温度計測や熱移動量計測、また、熱移動と物質移動のアナロジーを利用して濃度計測や物質移動量計測により、フィルム効率や熱伝達率を決定している。最近の傾向としては、実機に近い流れ場において上記のような計測が欧米や中国の大学や研究機関で盛んに行われるようになってきていることが挙げられる。Fig. 7には、Pennsylvania State UniversityのSTART (Steady Aero Thermal Research Turbine) プロジェクト<sup>24), 25)</sup>で整備が進められている装置群を示す。米国DOEとPWのサポートを受けてのプロジェクトであり、熾烈な低燃費化競争に打ち勝つための投資の一つとみることができる。一方、これらの諸外国の旺盛な設備投資の状況と我が国の研究機関や大学の現状 (特に運営費交付金の削減) とを照ら

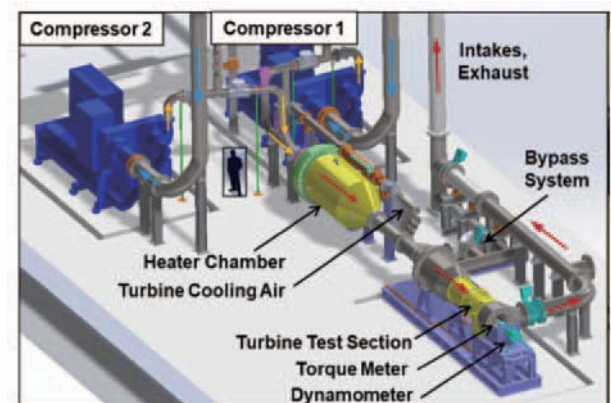


Fig. 7 Test facility for START project (by courtesy of Prof. Thole in PennState University)



し合わせると、我が国は、GT関連の基盤施設、設備の整備面や予算面で遅れを取っていることは間違いなく<sup>26)</sup>、若手の教員や学生への訴求力を失うことで人材育成面でも弱体化し、結果としてGT関連の研究開発力が衰退することが大いに危惧される。

### 3.2 MRV

伝熱研究、特に内部冷却やフィルム冷却に関する研究では、それぞれの流路内での流れ場情報が重要となることが多い。従来の方法では、アクリルなどの透明な材料で供試体を製作し、PIVやLDVなど光学的な方法で流れ場計測を行っている<sup>27)</sup>。この手法の欠点は、内部構造が複雑な場合にはレーザー光の影の発生や構造的に視認性が劣化して計測困難な領域が発生すること、アクリル材による光の屈折現象により正確な測定が困難になることなどである。後者の現象については、アクリル材などの屈折率に一致するように屈折率を調合した特殊な液体の中に供試体を入れるIndex Matching法<sup>28)</sup>などである程度回避可能であるが、液体の毒性、視認性の問題や計測出来る内容への制約など、課題は多い。

光学的なアプローチが困難な場合の可視化や定量的測定手法としては、近年MRI (Magnetic Resonance Imaging) を応用したMRV (Magnetic Resonance Velocimetry) に注目が集まっている。完全に非侵襲で視認性も必要としないMRVは、元々医療、特に心臓内や大動脈内の血流計測に用いられていたが<sup>29)</sup>、GTを含む工業製品関係の研究開発への応用も活発になっている<sup>30)~33)</sup>。簡単に導入できる装置ではないが、更なる利用拡大が期待される。

## 4. 本特集号の構成について

以下に今回の特集号で取り上げたテーマについて述べる。

はじめに、企業における研究開発状況の紹介として、大北洋治氏 (IHI) には、航空エンジンにおける冷却技術について解説して頂いている。航空用固有の特徴である軽量化への強い要求、作動点が複数あること、また、燃焼器形態の差異などがタービンの冷却設計にどのように関係するかなどを踏まえつつ、冷却技術の最新動向やエンジンや航空機全体の熱管理システムなどが説明されている。

続いて、谷口智紀氏、都留智子氏、堀内豪氏 (KHI) には、川崎重工の産業用GTの冷却翼開発の現状について解説して頂いている。川崎重工固有の冷却技術 (稠密突起, Lattice, Nekomimi cooling hole など) の最近の発展状況に加え、冷却翼設計に関する解析技術や実機環境下での伝熱・冷却性能特性の測定技術が紹介されている。羽田哲氏、堀内康広氏 (MHPS)、石坂浩一氏 (MHI) には、MHPSの産業用GTのタービン翼冷却技術の紹介をお願いしている。同社は中型から大型GTを製品群として有しており、大規模な実験装置を用いた基礎研究や実証用設備などを活用した実環境下実験などを通

じたタービン冷却翼開発の最新動向が紹介されている。大学、研究機関における研究状況については、武石賢一郎氏 (徳島文理大)、都留智子氏 (KHI) から、タービン動翼内部流路の熱流動特性に関する研究について紹介頂いている。突起付流路について突起の稠密化によるメリットやピンフィンと内面流路の形状との干渉効果、ラティス流路などの革新的な冷却構造における流れ場の特徴を、MRIなどを駆使して定量的計測などにより明らかにしている。次に、船崎健一氏 (岩手大) からは、流れ制御デバイスを用いたフィルム効率改善に関する研究例が紹介されている。実用化までの幾つかの課題克服は必要なものの、圧力損失というペナルティーを上回るフィルム効率向上の可能性が示されている。村田章氏 (農工大) には、翼後縁部カットバック面のフィルム冷却に関する研究例の紹介をお願いしている。流れ場・熱伝達計測及びLES解析のそれぞれに様々な精緻化に関する工夫が施されており、同種の取り組みを行う際に参考になる内容となっている。最後に、酒井英司氏 (電中研)、Kerry KLEMMER氏 (プリンストン大)、Francesco MONTOMOLI氏 (インペリアルカレッジ) には、GTの伝熱問題における不確かさ評価についての解説をお願いしている。タービン翼の耐久性評価を数値的に行う場合に、運転条件や形状のばらつきに起因した温度分布の不確かさを評価することが重要になるが、多くのパラメータが関係するため、MC (モンテカルロ) 法では膨大な計算量が必要となるため、PCE (Polynomial Chaos Expansion) 法など最新の効率的評価方法が紹介されている。

## 5. おわりに

特集号の巻頭言、が当初の依頼内容ではあったが、無理を言って総論的な内容への変更を認めて頂いたことに感謝する。改めて伝熱・冷却問題の過去・現在・未来を俯瞰的に見ることが出来たのではないかと密かに自負している。1997年の特集号は、当時の一流の研究者、技術者が結集して取りまとめられたものであり、日本におけるGTの勢いや学会の活況の状況が伺える。その特集号の総論を担当された故川池和彦氏には、筆者が企業でGTの伝熱研究を始めた頃大いに励まされた。また、本文にも登場した笠木先生には、伝熱研究の基礎や研究室運営の指針などを教わった。二人の恩師から受けたものを次の世代に発展的に引き渡すのが今の私の役目でもあるが、本稿でその責務のほんの一部でも果たしていることを切に願っている。

## 参考文献

- (1) 船崎健一, ガスタービンの冷却問題におけるCFD解析, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 32, No. 4 (2004), pp. 270-277.
- (2) 船崎健一, 翼外面熱伝達率に関する最新研究動向, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 35, No. 3 (2007), pp. 147-155.
- (3) Bunker, R.S., Evolution of Turbine Cooling, ASME TURBO EXPO 2017, GT2017-63205, 2017.
- (4) Bunker, R.S., A Review of Turbine Shaped Film Cooling Technology, ASME Transaction Journal of Heat Transfer, Vol. 127, No. 4 (2005), pp. 441-453.
- (5) Bunker, R.S., Gas Turbine Heat Transfer: 10 Remaining Hot Gas Path Challenges, ASME Transaction Journal of Turbomachinery, Vol. 129, No. 2 (2007), pp. 193-201.
- (6) Bunker, R.S., The Effects of Manufacturing Tolerances on Gas Turbine Cooling, ASME TURBO EXPO 2008, GT2008-50124, 2008.
- (7) Bunker, R.S., Film Cooling: Breaking the Limits of Diffusion Shaped Holes, International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems (Turkey), 2009.
- (8) Bunker, R.S., Gas Turbine Cooling: Moving from Macro to Micro Cooling, TURBO EXPO 2013, GT2013-94277, 2013.
- (9) Han, J.C., Dutta, S. and Ekkad, S., Gas Turbine Heat Transfer and Cooling Technology, 2<sup>nd</sup> edition, CRC Press, 2013.
- (10) 日本ガスタービン学会, ガスタービン工学, 2013.
- (11) Zhang, C. and He, L., Turbine Blade Tip Aero-Thermal Management: Some Recent Advances and Research Outlook, Journal of the Global Power and Propulsion Society, Vol. 1 (2017), pp. 271-287.
- (12) Bons, J.P., A Review of Surface Roughness Effects in Gas Turbines, ASME Transaction, Journal of Turbomachinery, Vol. 132, No. 2 (2010).
- (13) Ligrani, P., Heat Transfer Augmentation Technologies for Internal Cooling, International Journal of Rotating Machinery, Vol. 2013 (2013).
- (14) 岩本薫, 長谷川洋介, 福島直哉, 深潟康二, 完全発達平行平板間乱流における非相似伝熱制御を施した際の流れ場と温度場の様子, 伝熱, Vol. 55, pp. 1-8 (2016).
- (15) Bunker, R.S., Film Cooling : Breaking the Limits of Diffusion Shaped Holes, International Symposium on Heat Transfer in Gas Turbine Systems (2009).
- (16) Ekkad, S. and Han, J.C., A Review of Hole Geometry and Coolant Density Effect on Film Cooling, Frontiers in Heat and Mass Transfer, Vol. 6, 8 (2015).
- (17) Sun, X., Zhao, G., Jiang, P., Peng, W. and Wang, J., Influence of Hole Geometry on Film Cooling Effectiveness for a Constant Exit Flow Area, Applied Thermal Engineering, Vol. 130 (2018), pp. 1404-1415.
- (18) <https://www.mne.psu.edu/turbine/PublicShapedHole.html> (参照日2018年10月13日)
- (19) Wang, C., Zhang, J. and Zhou, J., Optimization of a Fan-Shaped Hole to Improve Film Cooling Performance by RBF Neural Network and Genetic Algorithm, Aerospace Science and Technology, Vol. 58 (2016), pp. 18-25.
- (20) 三坂孝志, 浅海典男, 出田武臣, 大林茂, フィルム冷却効率予測のための計測データ駆動型乱流モデリング, 第45回日本ガスタービン定期講演会(松山)講演論文集(2017), pp. 291-297.
- (21) Milani, P.M., Ling, J., Saez-Mischlich, G., Bodart, J. and Eaton, J.K., A Machine Learning Approach for Determining the Turbulent Diffusivity in Film Cooling Flows, ASME Transaction, Journal of Turbomachinery, Vol. 140, Feb., (2018).
- (22) Milani, P.M., Ling, J. and Eaton, J.K., Physical Interpretation of Machine Learning Models Applied to Film Cooling Flows, ASME TURBO EXPO GT2018-76927, 2018.
- (23) 船崎健一, タービン翼列(実験的アプローチの最前線), 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 4, pp. 208-215.
- (24) Barringer, M. et al., The Design of a Steady Aero Thermal Research Turbine (START) for Studying Secondary Flow Leakages and Airfoil Heat Transfer, ASME TURBO EXPO 2014, GT2014-25570, 2014.
- (25) Town, J., et al., State-of-the-Art Cooling Technology for a Turbine Rotor Blade, ASME TURBO EXPO 2017, GT2-17-64728 (2017).
- (26) 渡辺紀徳, 大型・実機条件試験装置の重要性, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 45, No. 4, p. 207.
- (27) Funazaki, K., Odagiri, H., Horiuchi, T. and Kazari, M., Detailed Studies on the Flow and Heat Transfer Characteristics inside a Realistic Serpentine, ASME TURBO EXPO, GT2018-76225 (2018).
- (28) Budwig, R., Refractive Index Matching Methods for Liquid Flow Investigations, Experiments in Fluids, Vol. 17 (1994), pp. 350-355.
- (29) Stankovic, Z., Allen, B.D., Garcia, J., Jarvis, K.B., Markl, M., 4D Flow Imaging with MRI, Cardiovascular Diagnosis and Therapy, Vol. 4, No. 2 (2014), pp. 173-192.
- (30) Elkins, C.J. and Alley, M.T., Magnetic Resonance Velocimetry: Applications of Magnetic Resonance Imaging in the Measurement of Fluid Motion, Experiments in Fluids, Vol. 43 (2007), pp. 823-858.
- (31) Ling, J., Yapa, S.D., Benson, M.J., Elkins, C.J., and Eaton, J.K., 3D Velocity and Scalar Field Measurements of an Airfoil Trailing Edge with Slot Film Cooling: The Effect of an Internal Structure in the Slot, ASME TURBO EXPO 2012, GT2012-68364 (2012).
- (32) Issakhanian, E., Elkins, C.J. and Eaton, J.K., Film Cooling Effectiveness Improvements Using a Nondiffusing Oval Hole, ASME Transaction Journal of Turbomachinery, Vol. 138 (2016).
- (33) Tsuru, T., Ishida, K., Fujita, J. and Takeichi K., Three-Dimensional Visualization of Flow Characteristics Using a Magnetic Resonance Imaging (MRI) in a Lattice Cooling Channel, ASME TURBO EXPO, GT2018-76409 (2018).