

超高温ガスタービンの開発にむけて



研究ノート

武石 賢一郎*

Development of Ultra High Temperature Gas Turbines

Key Words : Gas Turbine, Heat Transfer, Film Cooling, Combined Cycle, CFD, LIF

1. はじめに

最近の石油価格の高騰で、過去2度起こった石油危機の再来を案じている。化石燃料の大量使用は、エネルギー消費上問題であるばかりでなく地球温暖化問題に深く関連している。そのような中で現在ガスタービンと蒸気タービンを組み合わせたコンバインドプラントが、発電設備として脚光を浴びている。より高効率な発電設備に欠かせない超高温ガスタービンのキーテクノロジーである冷却技術について紹介する。

2. ガスタービンのタービン入口温度

カルノーサイクルの熱効率が示すごとく、サイクル温度が上昇すればするほど熱機関の熱効率は上昇する。ジェット旅客機の推進源としておなじみのガスタービンは、このような理由でタービンの入口温度の上昇に努力が傾けられてきた。ガスタービンの排ガスは十分なエネルギーを有するので、このエネルギーを使って蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動させて発電する機器がコンバインドプラントである。従来の石油あるいは石炭焚きの火力プラントの発電効率が約40%であったのに比べると、1350℃級ガスタービンを用いたプラントでは約48%、最新鋭

の1500℃級ガスタービンを用いると約52%となり、火力プラントに比べ30%高い発電効率を達成することが出来る。この数値は、炭酸ガスの排出量の低減値でもある。

以上のような理由で、航空用ガスタービンおよび産業用ガスタービンは高温化されてきたが、その年代とガスタービン入口温度の関係を図1に示す^[1]。より高温の1700℃級ガスタービンの開発が社会的にも切望されることがわかる。このエンジンが開発されれば発電効率が約56%となる。しかしこの超高温ガスタービンの開発はとてつもなく困難である。なぜなら、ガスタービンのタービンは、ほとんどの金属を溶融させてしまうガス温度1700℃圧力約30気圧の超高温高圧環境下で、3000rpmあるいは3600rpmで回転させて仕事をさせる必要があるからである。

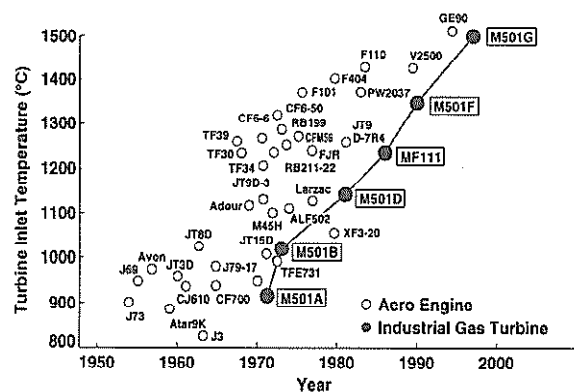


図1 ガスタービンの高温化の趨勢

3. 冷却技術

高温ガスからメタル製のタービン翼を、材料強度が許容する温度まで下げる方法にタービン翼冷却技術がある。最新鋭の1500℃級のガスタービンの構造図を図2^[2]に、そしてそれに用いられているター



* Ken ichiro TAKEISHI
1948年9月生
1974年大阪大学・基礎工学研究科・
物理系専攻・博士前期課程修了
現在、大阪大学・大学院工学研究科・
機械工学専攻、教授、工学博士、
熱工学、伝熱工学
TEL 06-6879-7311
FAX 06-6879-7313
E-Mail takeishi@mech.eng.
osaka-u.ac.jp

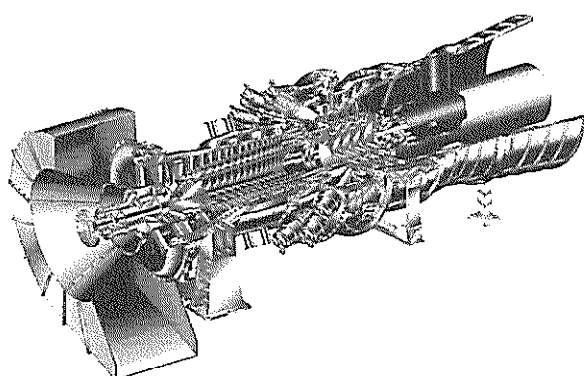


図2 三菱重工業製1500℃級M501形ガスタービンの構造図

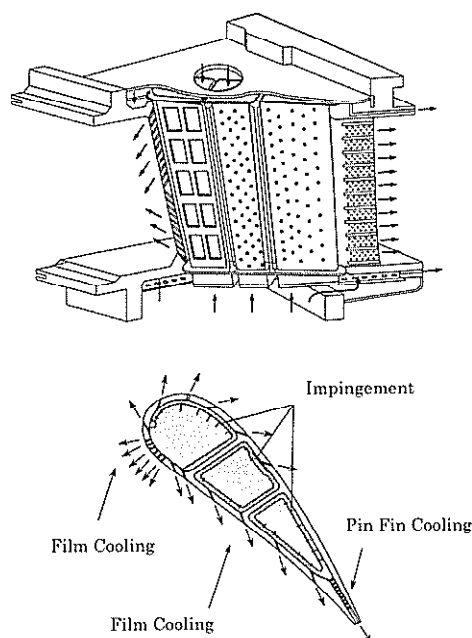


図3 M501型ガスタービン第一段静翼構造

ピン第一段静翼の冷却構造を図3に示す^[3]。圧縮機で作った高圧の空気を用いて、タービン翼の内面を冷却し、さらにその空気をタービン翼表面に開けられた孔から噴出させ、タービン翼表面に沿って流し高温ガスからメタルを守る冷却手法が用いられている。この手法をフィルム冷却と呼び、この技術はアポロ宇宙船が地球帰還時にカプセルの構成材が熔融ガス化して機体を守る手法と原理的に同じであるが、ガスタービンの場合はこれを連続的に実施している点に違いがある。

圧縮機で作った空気を冷却剤に用いるため、タービンの高温化に伴って冷却空気量が増えるため、場

合によっては高温化したが性能は改善しなかったということにもなりかねない。このため、最小の空気量でタービン翼を冷却することが必要であり、タービンの内面およびフィルム冷却について高性能化の研究が実施されている。冷却空気を1%多く使用すると、熱効率を1%程度低下させることから、冷却空気量を如何に少なくして、均一な冷却が可能であるかを追求する研究が必要である。タービン翼の一部で高温域が生じると、その部分は酸化したり場合によっては熔融し設計寿命を満たさない、あるいはエンジントラブルを発生する。

タービン翼にフィルム冷却を適用する場合、吹き出したフィルム冷却空気と高温ガスとの間で混合現象が生じる。冷却空気量を少なくするためにも、フィルム冷却空気と主流高温ガスとの混合が生じにくくかつ幅広く長い距離に渡ってタービン翼面を覆う最適形状を求めることが重要である。タービンを流れる主流は非定常でかつ燃焼器で発生する強い乱れを伴った流れであり、かつタービン翼回りでは種々の渦の発生があり、さらに主流によって引き起こされる二次流れがある。タービン翼面状のフィルム冷却現象は、フィルムの流体的パラメータおよび形状のパラメータに加えて、前記した主流条件がその性能に影響するために、非常に複雑な現象である。

4. フィルム冷却の高性能化の研究

1700℃級ガスタービンを開発するキーテクノロジーは、高性能なフィルム冷却技術と言える。この課題に対して、主流とフィルム冷却空気が混合するメカニズムの詳細をつかみ、混合を抑制する手法、あるいは幅方向に広げることが出来るようフィルム冷却空気流を制御する研究に取り組んでいる。

フィルム冷却孔は従来放電加工であけられていたため、円形であったが、この形状では主流を巻き込み吹き出し点から下流に向かって急激に効率が下がるという欠点があった。このために、フィルム冷却孔の出口を広げ、かつ吹き出し面となす角度を平行に近づける形状をしたシェイプトフィルム孔の名称で呼ばれる形状が採用されるようになった。円孔とシェイプト孔の形状例を図4に示す^[4]。これら2種の模型を用いて低速伝熱風洞による伝熱実験を実施した。フィルム冷却空気としては主流より数十℃温度の高い空気を吹き出し、主流を室温の条件で、

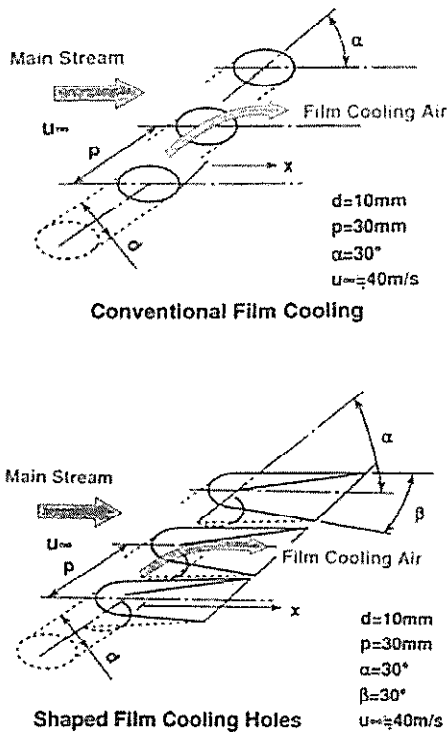


図4 フィルム冷却孔形状

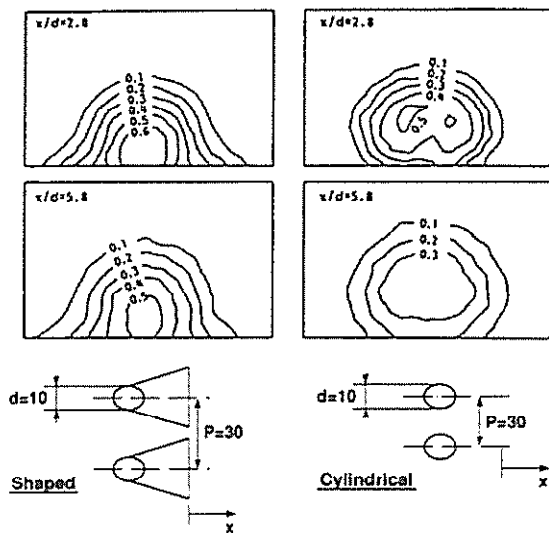


図5 円孔とシェイプト孔によるフィルム冷却効率比較

吹き出したフィルム冷却空気と主流の混合の状態を、下流での空間の温度分布を計測した。その結果を図5に示す^[4]。フィルム冷却の性能を表す指標をフィルム冷却効率と呼ぶが、円孔からの吹き出しの場合、フィルム冷却効率の最高点は壁から離れた空

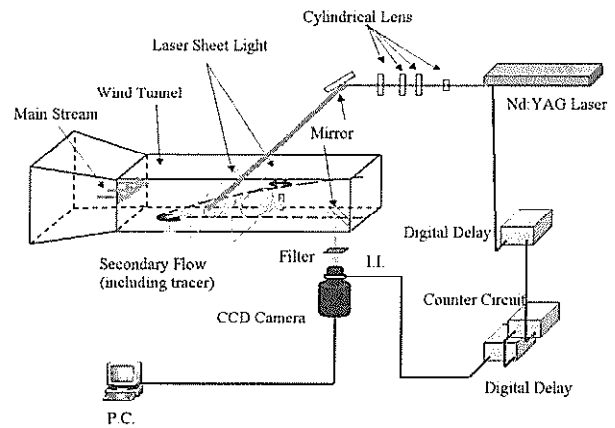


図6 LIFを用いたフィルム冷却現象の解明とその効率の測定

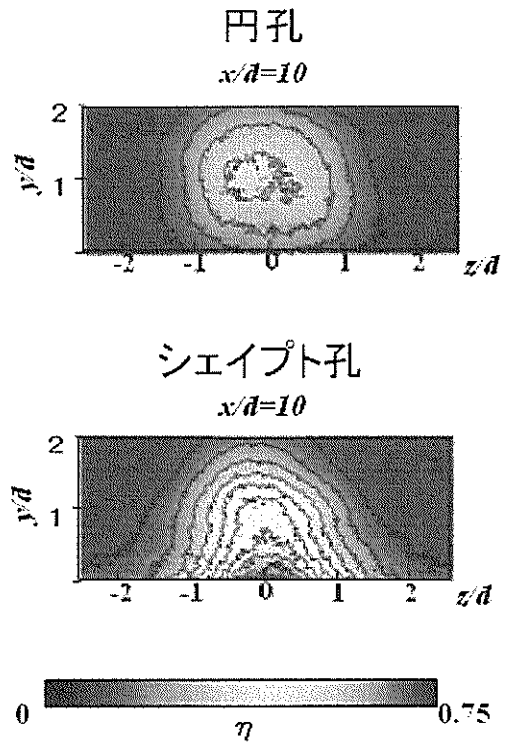


図7 LIFによるフィルム冷却効率測定例

中に位置し、壁面には存在しないことが解る。一方、シェイプトフィルム孔からの吹き出しの場合、フィルム冷却効率の最高点は壁に付着し、かつ横方向に広がりを見せ広い範囲をフィルム空気が覆っていることが解る。この図より、シェイプト孔からの吹き出しの場合、円孔からのそれに比較して約2倍効率が良いことが解る。フィルム冷却現象は主流との干渉を伴った非定常現象故、図6に示すような光学系

を用いて時々刻々の混合現象を解明している。フィルム冷却空気に微量のアセトントレーサとして混合し、フィルム冷却空気として吹き出す。フィルム冷却空気と主流の混合する下流の流動場に、シート状のレーザー光を当て、アセトンが発する蛍光の強度をCCDカメラで測定することによりフィルム冷却効率を測定した。アセトントレーサとして用いた場合、濃度拡散と温度拡散の間にアナロジーが成り立つことを利用した測定方法であるが、Laser Induced Fluorescence(LIF)強度を測定することによって瞬時の2次元面における混合の状態が測定できることと、パルスレーザーを用いているため時々刻々の非定常現象を測定することが出来る。さらにParticle Image Velocimetry(PIV)を併用すれば、フィルム冷却空気および主流の速度ベクトル、変動成分の測定が可能である。図6に示す光学系で、図4に示す円孔とシェイプトフィルム冷却孔から吹き出した場合のフィルム冷却効率の測定例を図7に示す。流れの場を乱すことなく詳細な混合の状況が測定されている。

フィルム冷却をタービン翼に適用する場合、前述した多くのパラメータの影響を考慮しなければならない。従来は模型を用いて、主要なパラメータにつき実験的にデータを得て、これらのデータを設計に用いてきた。しかし、最適化するためには多くの実験を実施することは費用の面でも困難である。現在では、Computational Fluid Dynamics(CFD)でフィルム冷却孔の形状の最適化を行う努力がなされて

いる。CFDの解析精度の検証のために、また複雑な現象の直接的な把握のために実験的研究も従来以上に緻密で精巧さが要求されている。

5. あとがき

1700℃級超高温ガスタービンを実現させるキーテクノロジーは制御されたフィルム冷却であると考えている。フィルム冷却の最適化を目指して、フィルム冷却空気と主流との混合現象の解明と、混合の抑制技術を構築しなければならない。CFDを用いた流動場の予測解析が進む中、CFDの精度検証を高精度な実験データとの比較により実施し、CFDの精度向上も平行して実施する必要がある。これらの組み合わせにより、1700℃級のガスタービンのタービン翼に適用出来る技術開発が可能となる。応用性の強い研究ゆえ、産官学連携体制で強力に進めたいと考えている。

参考文献

- [1] 日本ガスタービン学会調査研究委員会成果報告書1997
- [2] 塚越, 秋田, 西田, 日本ガスタービン学会誌, 25, pp.2-7, 1998
- [3] 岩崎, JSME第73期通常総会講演会資料集(V), pp.452-454, 1996
- [4] Takeishi, K., Int. Symposium on Heat Transfer in Turbomachinery, Athens, Greece 1992

この記事をお読みにになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6395-4895 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前、ご所属、希望日時(選択の幅をもたせてください)、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。