F231 赤外線カメラを用いた過渡応答法による回転円板の熱伝達計測

Heat Transfer Measurement of Rotating Disk Surface Using Transient Technique with Infrared Thermometer

○正 内田 竜朗 (東芝)
正 猪亦 麻子 (東芝)

正 大友 文雄 (東芝)

Tatsuro UCHIDA, Fumio OOTOMO and Asako Inomata
Toshiba corporation, 2-4, Suehiro-cho Tsurumi-ku Yokohama

Recently, the transient technique using infrared thermometer has widely been used for measuring the distribution of local heat transfer. In this study, To obtain high-precision measurement of the rotating disk surface temperature field, we have proposed a phase-locked method. The effects of two parameters, on the heat transfer phenomena the rotational Reynolds number $Rer0$ from 0 to 1.8×10^6 and the penetration flow Reynolds number Res from 2×10^4 to 7×10^4 , were observed. Non-dimensional disk casing gap-to- radius ratio ($s/r0$) fixed 0.026. The present results showed that as the rotational Reynolds number increases, nusselt number tends to 2×10^3 to 3×10^3 increase at test condition.

Key Words: Inlet fogger, Gas turbine, Power boost, Wind tunnel test

1. はじめに

二酸化炭素排出量削減を目指して火力発電機器への高効率化要求は従来に増して一層高まっている。高効率化を実現するためにガスタービンではタービン入口温度 1600℃の実証が行われ¹⁾, 蒸気タービンでは主流蒸気温度が 700℃を超える蒸気タービンの開発が進められている²⁾。これらタービンの高効率化を目的とした高温化に伴って翼植込み部には強度を維持するためのディスク冷却が採用されている。ディスク冷却は貫通流量がある同心回転二円板の伝熱問題としてこれまでに多くの研究がなされてきた³⁾。これらの研究の多くは回転体に熱電対を埋め込み、空間的に離散温度データを取得し、熱伝達率を導出した結果について報告したものである。また、近年、赤外線カメラの高性能化により物体表面の温度場を非定常で面計測することが可能となり、過渡応答法によって冷却翼内部流路の熱伝達率分布を計測した事例が報告されている⁴⁾。

本稿では回転するディスクの冷却設計指針を得るために回転円板表面の温度場を位相同期した非定常面計測を行い、過渡応答法によって熱伝達率を評価した。これらの結果について報告する。

2. 過渡応答法による熱伝達計測

初期温度 T_i の物体表面に接する流体の温度を T_g まで上昇させる場合、熱伝達率を h とすると物体表面の温度 T_w の時間変化は式(1)で定義される。

$$\frac{T_w - T_i}{T_g - T_i} = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 t}{\rho c \lambda}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{t}}{\sqrt{\rho c \lambda}}\right) \quad \text{式(1)}$$

ここで、 t 、 ρ 、 c 、 λ はそれぞれ時間、物体の密度、比熱、熱伝導率である。

初期温度、および、流体温度、物体表面温度の時間変化を実測して反復法によって式(1)から熱伝達率が得られる。

3. 熱伝達率計測試験

3.1 試験装置と試験条件

熱伝達率計測試験装置概略図を図 1 に示す。

この試験装置は過渡応答法による熱伝達計測を実現するた

めにプロア (120Nm³/min) から供給する空気の内、一方をそのまま回転ディスクへ供給する (以下、冷風) 系統、他方をヒータ加熱して供給する (以下、温風) 系統の 2 系統に分岐・合流して回転ディスク部と接続する構成である。試験手順は、まず、計測開始前に冷風を供給し、ディスク表面温度を初期温度 T_i 一定に保っておく、次に、2 つの三方弁を同時に開閉して温風へ切り替えて、 T_g に到達するまで通風し、この間、ディスク表面温度計測を行う。初期温度 T_i は熱電対により半径方向外向きの流れに変わった直後の $r/r0=0.55$ 位置にて、ディスク表面温度 T_i および T_w は FIIR 製赤外線カメラ SC7500 により $r/r0=0.56$ から 0.76 の範囲にて計測する。尚、赤外線カメラによる温度計測では赤外線を透過するようにケーシングの一部を Ge 材料で構成した。

Fig.1 Heat Transfer Measurement Experimental Set-up

回転ディスクとケーシングとの隙間 s とディスク半径 $r0$ との比で定義される無次元隙間 $G=s/r0$ は 0.026 に固定した。ディスク半径を代表長とする回転レイノルズ数 $Rer0$ が 0 から 1.8×10^6 の範囲で変化するようにモータ回転数をインバータ制御し、赤外線カメラによって計測する半径方向外向き流れの流路を流動する貫通流量から算出される平均流

速, およびディスク半径を代表長とする貫通レイノルズ数 Re_s が $2 \times 10^4 \sim 7 \times 10^4$ の範囲で変化するようにブロー流量を調整する。赤外線カメラによる撮像は回転位同期を行い, 回転ディスク上の同一領域を計測した。

3.2 試験結果

回転レイノルズ数 Rer_0 が 1.6×10^5 , 貫通レイノルズ数 Re_s が 7×10^4 条件の試験結果を図 2 に示す。

Fig.2 Experimental result

図 2 は撮影した赤外線カメラ画像から $r/r_0=0.71$, 45° 位置 (上流側から見て 12 時の方向から反時計回り) の温度とこの計測結果を式(1)で代入して反復法によって算出した熱伝達率の時間変化変化をプロットした。この図から熱伝達率は $582 [W/m^2K]$ である。

回転レイノルズ数 Rer_0 と貫通レイノルズ数 Re_s を変化させ, ヌセルト数 Nu と回転レイノルズ数 Rer_0 の関係に整理した結果を図 3 に示す。

Fig.3 Local Nusselt number on a rotating disk

これらの試験結果から得たヌセルト数と回転レイノルズ数の関係を過去の貫通流量の無い場合の試験結果上に貫通レイノルズ数 $Re_s=2 \times 10^4$ の条件の結果をプロットすると図 4 のようになる。

Fig.4 Nusselt number as a function of Reynolds number

図 4 から貫通流の無い場合, $Rer_0=1 \times 10^5$ 以下の層流領域でヌセルト数は 2 桁のオーダーであるが, 貫通流のある本試験結果の場合, ヌセルト数は 3 桁のオーダーに上昇することが認められた。

4. まとめ

赤外線カメラを用いた過渡応答法による回転円板の熱伝達計測を行った。この結果, 貫通流の無い過去の試験結果に対して貫通流がある場合, ヌセルト数は 3 桁のオーダーに上昇することが認められた。

今後, 乱流領域の試験を進めるとともに, 回転ディスクとケーシングとの隙間 s を変化させた試験を進める所存である。

高速度赤外線カメラによる画像の撮影はコーンズテクノロジー株式会社, フォリアーシステムジャパン株式会社殿のご協力を得た。ここに付記して関係者に深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 由里雅則, 正田淳一郎, 塚越敬三, 伊藤栄作, 羽田哲, “1600°C級 J 形技術を活用した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.
- 2) 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.
- 3) 武石賢一郎, 松浦正昭, 中原崇文, “回転円板上の伝熱に関する研究(第 1 報)”, 第 23 回日本伝熱シンポジウム 講演論文集(1986), pp.111-113
- 4) 船崎健一, “感温液晶を用いた過渡応答熱伝達率計測法の精度: 数値実験による評価”, 日本ガスタービン学会誌 Vol.28, No.5, pp.397-404.