

タービン翼列内部の渦構造可視化に関する研究

堤 雅徳* 木下 幸一**

Study on Visualization of Vortex Structure in Turbine Cascade

by

Masanori TSUTSUMI*, Koichi KINOSHITA**

要 旨

軸流タービンは発電用蒸気タービン、発電用ガスタービン、航空用ガスタービンの主要機器として、その実用化から 100 年以上の歴史をもつ成熟機械である。しかしながら現在に至っても、性能向上には不断の努力が払われている。とくに主要部位であるタービン翼列においては、CFD (Computational Fluid Dynamics) やレーザーによる内部流動計測手法などを用いて、二次流れ損失、動翼チップ漏洩損失を低減する技術開発が行われている。本研究ではこれらの損失の主要因となっている翼列内部の渦構造を明らかにするため可視化用簡易風洞を製作し、従来より用いられているスモークワイヤー法の最適化を実施した。その結果、二次流れ渦を明確に捕えるための翼列入口流速、発煙ワイヤーの本数、撚り方、また発煙剤の性状などに関し独自の知見を得ることができた。さらに将来に向けたレーザーによる内部流動の定量的データ取得を見据え、翼列出口において LDV (Laser Doppler Velocimetry) および PDPA (Phase Doppler Particle Analyzer) による試計測を実施し妥当な流速を得た。

Key Words: Turbine, Cascade, Secondary Flow, Vortex, Smoke wire

1. はじめに

蒸気タービン、航空用、発電用ガスタービンに適用されている軸流タービンは、輸送、発電などに欠くことのできないターボ機械として我々の生活を支える基盤技術である。現在、我々人類は石油、石炭や天然ガスなどの化石燃料を大量に消費しているが、これらの資源は有限であるから可能な限りその消費量を減らす必

要がある。また、温暖化に対する厳しい CO₂ 排出規制など環境面からも軸流タービンの性能向上が不可欠である。軸流タービンは発明当時から 100 年以上の歴史をもつ成熟機械であるが、今日でも性能を上げるための技術開発には弛まない努力がなされている。軸流タービンの心臓部といえる翼列については、二次流れ損失と動翼チップ漏洩損失が大きな割合を占める¹⁾。この二次流れとは、翼端壁の存在により発生する渦を伴う流れ²⁾であり、主流方向に対し直角な面内の二次的な流れであるためこう呼ばれる。

*崇城大学工学部宇宙航空システム工学科教授
**東京ダイレック(株) 博士(工学)

これらの二次流れや漏洩損失を低減するために、様々な技術^{3), 4), 5)}が開発されてきた。近年では漏れを伴う二次流れ、剥離制御にプラズマアクチュエータ⁶⁾などの技術に関する研究も盛んに行われている。

このような新技術の効果を検証し、さらに高性能な新技術を案出するためには、翼列内部の渦構造を明らかにする必要がある。そこで本研究では、従来より採用されているスモークワイヤー法による可視化技術^{7), 8)}を最適化し、また最新のレーザー利用による計測技術も駆使しその複雑な流れを詳細に把握する。

2. 実験装置

2.1 可視化簡易風洞

図1に風洞の全体構成図を示す。全体の長さは約1850mm、翼列の高さは200mmであり、ファンから出た空気の流れは拡大ダクトに導かれ、ハニカム、ワイヤメッシュによって減速・整流され、アクリルダクトから翼列に入り出口に放出される。また、同図に示すように拡大ダクトには減速により発達する境界層を排出するため、アクリルダクトと拡大ダクトの間に10mmの隙間を設けた。発煙ワイヤーについては直径0.15mmのニクロム線の単線、および線を撚ったもので、翼前縁から上流側へ35mm、翼端壁から10mmの位置に設置した。

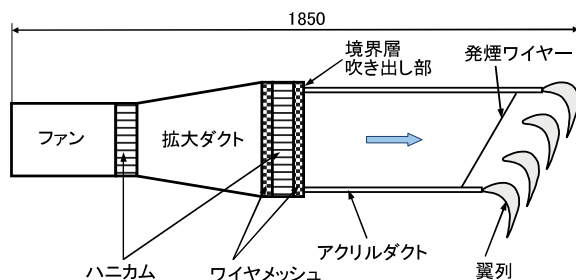


図1 可視化簡易風洞

2.2 供試翼列

表1に供試翼列の仕様、図2に翼列プロフィールを示す。翼列はメタクリル樹脂製で蒸気タービンの調速段動翼形状を採用し、翼幅89mm、翼ピッチ65mm、翼枚数は5枚である。

なお、図3の写真に示すフローガイドは翼高さを調整するために設けた。

表1 供試翼列仕様

翼	高	h	200mm
翼	幅	W	89mm
ピッチ		t	65mm
幾何学的入口角度		β_{1g}	30°
喉	幅	o	23mm
ゲー ジ ング		o/t	0.354

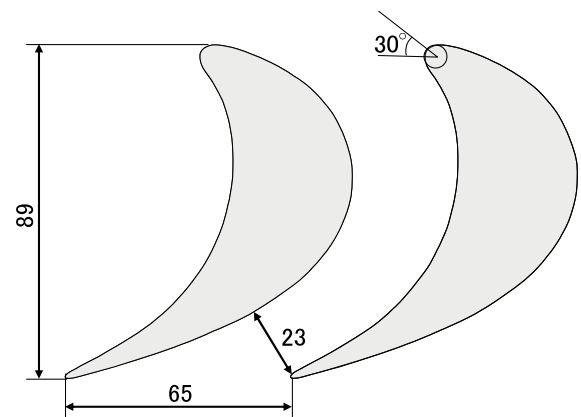


図2 供試翼プロフィール

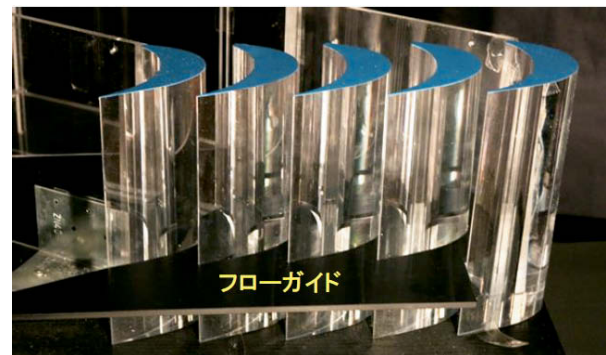


図3 供試翼列写真

2.3 発煙ワイヤー

図4に実験に用いた発煙ワイヤーの写真を示す。ワイヤーは直径0.15mmのニクロム線であり、単線、および撚り線を採用した。撚り方については2本と3本の線を長さ10mm当りに撚り数が5、10の2種類のものを製作した。

また、ワイヤーを張る位置については図5に示すように、翼列入口の境界層厚さを層流とし

て計算した結果より決定した。実験では翼列入口の流速を 0.4～1 m/s の範囲で変化させたが、境界層厚さは 16mm から 25mm 程度であり、ワイヤーの位置は端壁から 10mm であるため確実に境界層の中に埋没する。

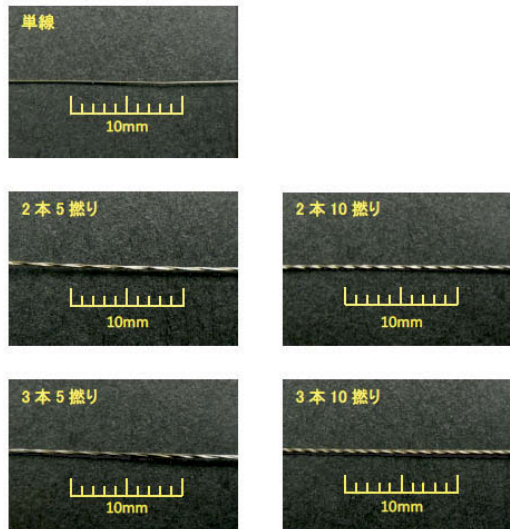


図4 発煙ワイヤー写真

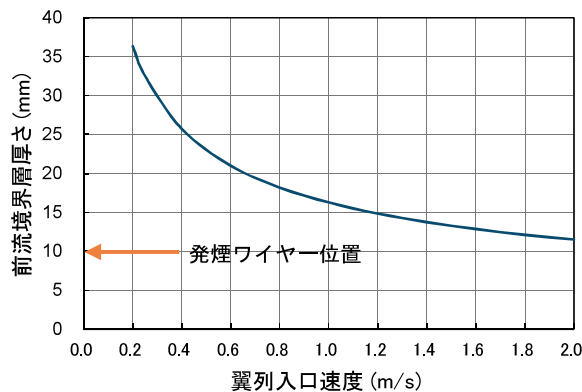


図5 前境界層厚さと発煙ワイヤー位置

2.4 発煙剤

発煙剤については流動パラフィンとアルミナの混合比を変えて調合した。混合比については流動パラフィンのみ、流動パラフィンとアルミナの体積比率が 1 対 0.5、および 1 対 1 の 3 種類を選定した。

3. 実験結果

3.1 可視化条件

翼列入口流速、印加電圧、ワイヤーの本数、撚り方などが発煙時間などに与える影響を定量的なデータとして取得するため実験を行った。

なお、発煙剤については、流動パラフィンとアルミナの体積比率を 1 対 0.5 としたものをを用いた。

(1) 発煙ワイヤーの抵抗

図 6 に 0.15mm 直径のニクロム線の本数、撚り方による抵抗値の変化を示す。抵抗は単線で最大となり、約 15Ω である。また、本数を 2 本、3 本と増して行くと線の断面積が増えるため抵抗値は小さくなる。撚り方については 5 撚り、10 撚りでは抵抗に殆んど差がない。これは、撚り方では線の断面積が変化しないためと考えられる。

(2) 翼列入口流速を印加電圧

図 7 に発煙を開始したときの印加電圧と翼列入口流速の関係を示す。電圧は 8～14V であるが、同図より流速が速くなるほど印加電圧が高くなることが分かる。発煙に至るには発煙剤が蒸発する熱量を与える必要があるが、流速が大きくなるほど対流により発煙剤表面から奪われる熱量が増加するため、印加電圧が高くなると考えられる。線の本数、撚り方については、単線の場合、抵抗値が大きいので、2 本撚り、3 本撚りに比べ、高い電圧が必要となる。また、本数が多いほど抵抗値が小さくなるので、印加電圧も小さくなる。

(3) 翼列入口流速と発煙ワイヤーの単位時間当たり発熱量

図 8 に発煙に必要な印加電圧と発煙ワイヤーの抵抗値から求めた単位時間当たりの発熱量と翼列入口流速の関係を示す。図 7 と同様に翼列入口流速が増せば、単位時間当たりの発熱量は増加傾向にある。また、線を撚った場合、ワイヤーの断面積が大きいほど、単位時間当たりの発熱量が増える傾向にある。

(4) 翼列入口流速と発煙時間

図 9 に発煙時間と翼列入口流速の関係を示す。発煙時間は翼列前流側に張ったワイヤーの長さ

方向に一樣な煙が継続する時間を目視で求めたものであり 6~22秒である。時間の絶対値についてはかなりの誤差を含むが、流速が大きくなるほど発煙時間が短くなることが分かる。

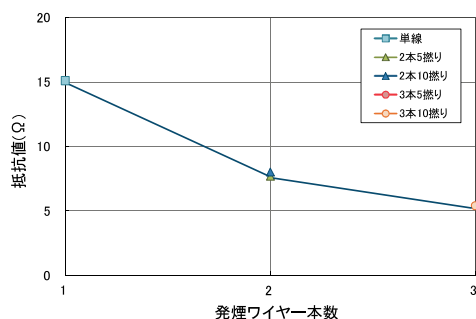


図 6 発煙ワイヤー本数と抵抗値

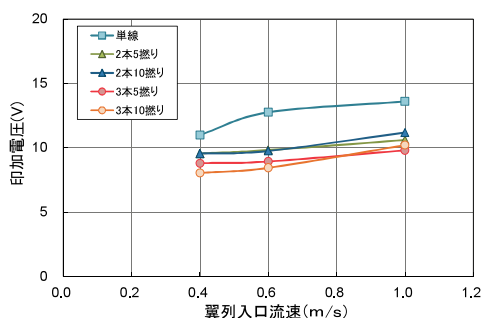


図 7 翼列入口流速と印加電圧

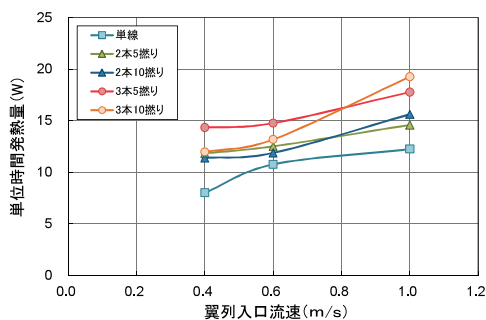


図 8 翼列入口流速と単位時間発熱量

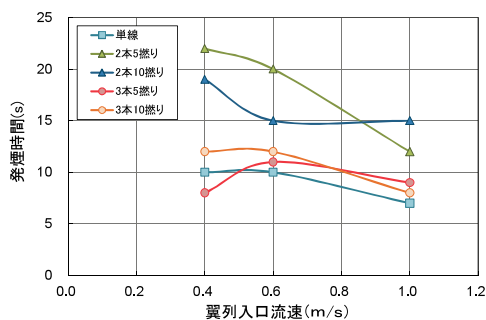


図 9 翼列入口流速と発煙時間

3.2 可視化結果

図10~図21に翼列入口流速、およびニクロム線の本数、撚り数、発煙剤の混合比を変えた場合の可視化結果を示す。実験では 1m/s 以上の流速の場合には発煙を明確に捉えられなかったため、流速は凡そ 0.4、0.6、1m/s の3種類とした。

(1) 翼列入口流速の影響

図10~図12に翼列入口流速を3種類変えた場合の可視化結果を示す。発煙ワイヤーは3本の5撚りを用いた場合であるが、翼列前縁より下流に向かい馬蹄形の渦が見られる。渦は翼背面側に巻き上がるが流速が高くなるほど渦の巻き上がりが小さくなる傾向がある。これは図5に示すように流速が高くなるほど前流境界層が薄くなり馬蹄渦の大きさが小さくなると考えられる。



図10 流速 0.4m/s (ワイヤー：3本5撚り)

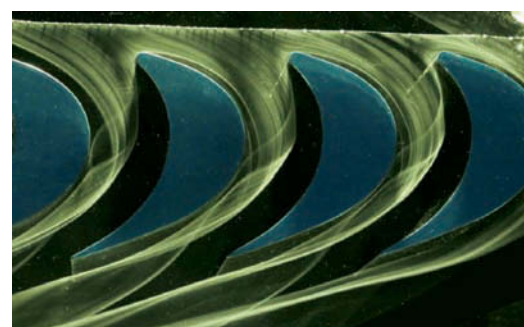


図11 流速 0.6m/s (ワイヤー：3本5撚り)

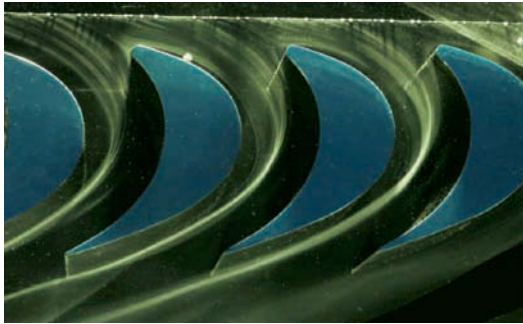


図12 流速 1m/s (ワイヤー：3本5 撚り)



図15 ワイヤー：3本5 撚り (流速 0.4m/s)

(2) 発煙ワイヤー本数の影響

図13～図15に翼列入口流速が 0.4m/s の条件においてワイヤー本数を3種類変えた場合の可視化結果を示す。なお撚り数は5である。図より単線の場合は煙が殆んど見えず、本数を増すことにより煙の濃度が高くなる。これは本数が増すことによりワイヤーの表面積が増え、付着する発煙剤の量が多くなるためと考えられる。



図13 ワイヤー：単線 (流速 0.4m/s)



図14 ワイヤー：2本5 撚り (流速 0.4m/s)

(3) 発煙ワイヤー撚り数の影響

図16、図17に翼列入口流速が 0.4m/s の条件においてワイヤーの撚り数を5、10と2種類変えた場合の可視化結果を示す。なお本数は3本である。図より撚り数が5の場合の方が10に比べ煙の濃度が高く鮮明であることが分かる。これは撚り数が5の方がワイヤーの表面に溜まる発煙剤の量が多くなるためと考えられる。



図16 ワイヤー：5 撚り3本 (流速 0.4m/s)



図17 ワイヤー：10 撚り3本 (流速 0.4m/s)

(4) 発煙剤混合比の影響

図18に流動パラフィンとアルミナの体積比率と発煙時間の関係を示す。なお、翼列入口流速は 0.4m/s である。同図より発煙時間は体積比

率が流動パラフィン 1、アルミナ 0.5 の時が最も長くなることが分かる。

また、図19～図21に翼列入口流速が 0.4m/s

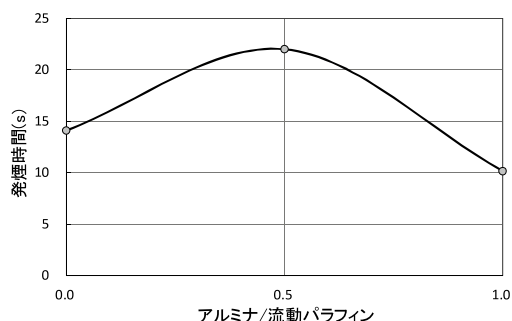


図18 発煙剤混合比と発煙時間（流速 0.4m/s）

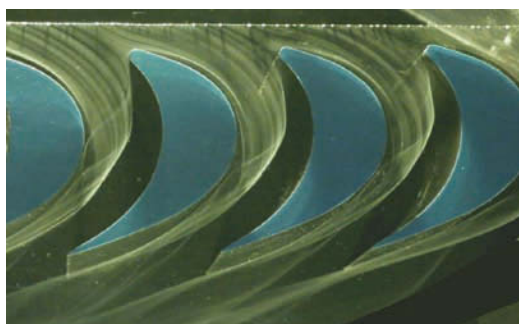


図19 流動パラフィン 1：アルミナ 0（流速 0.4m/s）

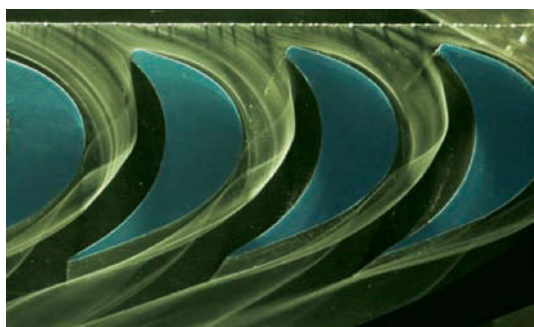


図20 流動パラフィン 1：アルミナ0.5（流速 0.4m/s）

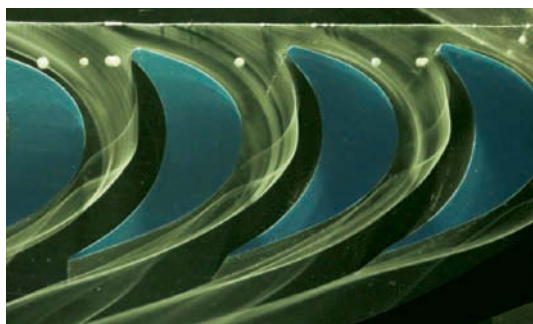


図21 流動パラフィン 1：アルミナ 1（流速 0.4m/s）

の条件において、流動パラフィンとアルミナの体積比率を 3 種類変えた場合の可視化結果を示す。なおワイヤー本数は 2 本、5 撚りである。これらの図よりアルミナを混合しない場合には煙の濃度が薄く、アルミナの量が増すほど煙の濃度が高くなる傾向が見て取れる。ただし、流動パラフィンとアルミナの体積比率が 1 対 1 の場合には煙の濃度にむらが多く、発煙剤がワイヤーから落ちて玉になっている。これはアルミナの重量が増してワイヤーに発煙剤が留まることができないためと考えられる。このように発煙剤が玉となって落下するためワイヤーに付着する発煙剤の量が減り、図18に示すよう発煙時間が短くなると思われる。以上の結果より発煙剤における流動パラフィンとアルミナの体積比率は 1 対 0.5 がもっとも可視化に適していると考えられる。

(5) 最終可視化結果

以上の実験結果より最も可視化に適した条件は翼列入口流速が 0.4m/s、発煙ワイヤーは 3 本 5 撚り、発煙剤の混合比は流動パラフィンとアルミナの体積混合比率が 1 対 0.5 となることが明らかとなった。最終的に得られた可視化写真を図22に示す。同図より翼前縁側に発生した背面側と腹面側の馬蹄渦が見られ、腹面側の馬蹄渦は腹背面の横断流と混合し、通路渦として背面側に巻き上がることが分かる。翼腹面側に煙が無い領域があるがこれは前流境界層内部の流体の殆んどが通路渦になっているためであり、空気の流れは存在する。

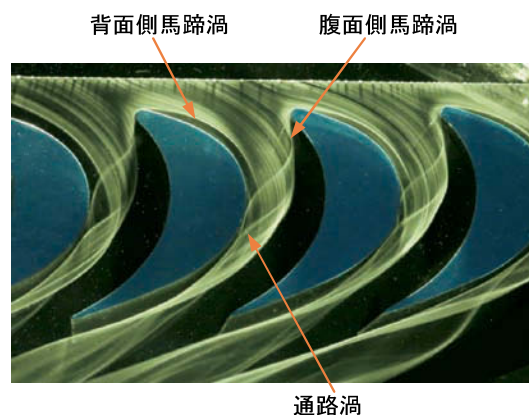


図22 最終可視化結果

3.3 レーザーによる翼列出口流速計測

簡易可視化風洞の翼列出口における流速の定量的計測が可能であるか確認するため、TSI社のLDV（Laser Doppler Velocimetry）およびPDPA（Phase Doppler Particle Analyzer）による試計測を実施した。

計測ではシーディングに加湿器の水滴を用い、図23に示すように翼列出口側よりビームを照射し、出口の流速、および水滴径を計測した。なお、翼列入口の流速は0.4m/sの条件である。

図24に翼列出口の水滴径分布を示す。同図より1~2 μm の水滴が多くカウントされていることが分かる。また、図25に翼列出口の流速分布を示す。同図よりカウント数の高い流速は約1m/sであり、熱線流速計で求めた値とほぼ一致する。今回の計測によりシーディングとしては1~2 μm の粒子を用いれば、本簡易風洞において流速計測が可能であることが明らかとなった。今後は、流れ場の速度パターンを計測

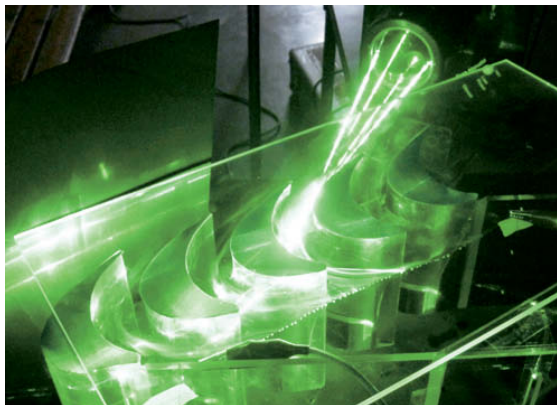


図23 レーザービーム照射状況

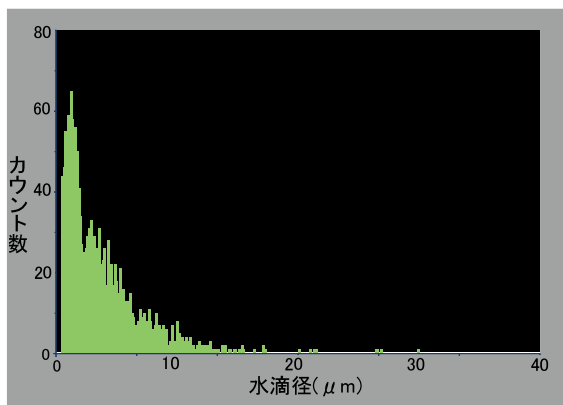


図24 翼列出口水滴径分布

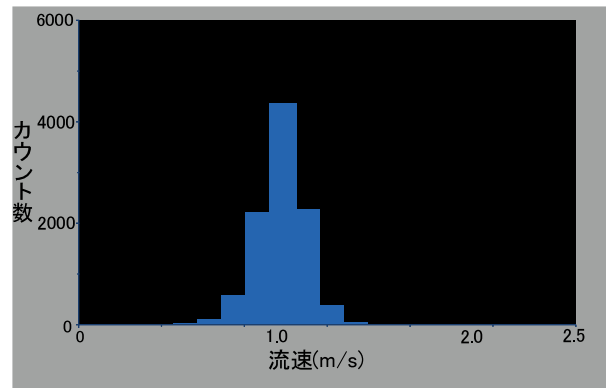


図25 翼列出口流速分布

できるPIV（Particle Image Velocimetry）を試してみる予定である。

4. おわりに

本研究では軸流タービン翼列の高性能化のために、二次流れ渦や漏れ渦構造の解明を目的としてスモークワイヤー法の最適化を実施した。得られた成果を以下に要約する。

- (1)翼列入口の流速については0.4~0.6m/sの条件を採用することにより馬蹄渦の発生、成長を可視化できることが分かった。
- (2)発煙ワイヤーについては、直径0.15mmの単線を3本撚り合わせることで煙の濃度を高め、均一にすることができ、10秒前後の発煙時間を確保することが可能となった。なお、撚り数についてはワイヤー長さ10mm当たりの撚り数が10より5の方が良い結果を与えることが分かった。
- (3)発煙剤については流動パラフィンとアルミナの体積比率を検討した結果、各々の比率を1対0.5にすることにより、煙の濃度が高く、発煙時間も長くなることが明らかとなった。
- (4)LDV、およびPDPAを用いたレーザー計測により、シーディングとして1~2 μm の粒子を採用すれば、本簡易風洞の翼列出口の流速を精度良く計測できることが確認できた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、三菱日立パワー

システムズ㈱の大山宏治 技師長には奨学寄附金をもって多大なるご支援を頂きました。ここに心より御礼申し上げます。また、本研究は平成27年度の卒業研究として実施したものです。可視化簡易風洞の製作から詳細計測に至るまで、様々な困難を強いチームワークで克服してくれた松田真史君、松村光記さん、三浦雄太君に深く感謝致します。

文集，第74巻，第746号（B編）（2008），pp. 2075-2083.

参考文献

- 1) 大森，清國，高温・高性能蒸気タービン，東芝レビュー，Vol. 56（2001），pp. 17-20.
- 2) Langston, L. S., Nice, M. L., and Hooper, R. M., "Three-Dimensional Flow within a Turbine Blade Passage," ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 99, No. 1 (1977), pp. 21-28.
- 3) Deich, M. E., Filippov, G. A., and Lazarev, L. Y., "Method of Profiling and the Aerodynamic Characteristics of Cascade," C. E. Transactions, Atlas of Axial Turbine Blade Characteristics (1965), pp. 129-146.
- 4) Sauer, H., Müller, R., and Vogeler, K., "Reduction of Secondary Flow Losses in Turbine Cascades by Leading Edge Modifications at the Endwall," ASME Paper 2000-GT-0473 (2000), pp. 1-7.
- 5) Harvey, N. W., Brennan, G., Newman, D. A., and Rose, M. G., "Improving Turbine Efficiency Using Non-Axisymmetric End Walls: Validation in the Multi-Row Environment and with Low Aspect Ratio Blading," Proceedings of ASME Turbomachinery Exposition 2002, GT-2002-30337 (2002), pp. 1-8.
- 6) 松沼，瀬川，リング型プラズマアクチュエーター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，第42回日本ガスタービン学会定期講演会（熊本）講演論文集，(2014)，pp. 75-79.
- 7) 堤，平野，松田，近藤，藤川，低アスペクト比蒸気タービン翼列の2次流れに関する研究（第1報：損失発生機），日本機械学会論文集，第74巻，第746号（B編）（2008），pp. 2067-2074.
- 8) 堤，平野，松田，近藤，藤川，低アスペクト比蒸気タービン翼列の2次流れに関する研究（第2報：2次流れ制御技術），日本機械学会論