

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

蒸気タービンの性能向上と翼浸食低減をめざした
湿り蒸気の挙動に関する研究

Study on Behavior of Wet Steam in Steam Turbine
for Improvement of Performance and Reduction of
Blade Erosion

申 請 者

氏 名

長尾	進一郎
Shinichiro	Nagao

専攻・研究指導
(課程内のみ)

--

2006 年 3 月

一般に火力発電事業用の蒸気タービンでは出口付近の2, 3段落が、また原子力発電用タービンでは大半の段落が、水分を含む気液二相流、いわゆる湿り蒸気中で作動している。湿り蒸気で作動するタービン段落においては多くの場合、動翼の浸食や熱効率の低下が生じることが知られており、これらに関しては従来から数多くの研究が行われている。しかしタービン内部の気液二相流の挙動は複雑かつ構造による差が大きく、その全てが解明又は予測可能となっているとは言えない状況である。加えて最近の最終段翼の長大化は湿り蒸気の影響を増大させる傾向にあり、従来に増して精度良い影響評価と効果的な対策が求められている。

こうした背景に基づき本研究は、(1)タービン内の湿り蒸気の挙動を解析によりシミュレートし、水滴発生、成長、軌跡、衝突速度、翼の浸食、損失増加など、湿り蒸気の挙動とその影響の概要をスルーして予測可能とする。(2)試験タービンや風洞を用いて、湿り蒸気の挙動、翼浸食や効率への影響、影響低減策の効果を広範囲に把握し、また解析方法の検証を可能な範囲で行う。(3)これらの知見を実機の通路部や最終段翼の設計に適用し、その運転結果を評価して、予測・評価方法の妥当性を確認する、ことを目的とする。

本研究の構成は以下である。

- 第1章 序論
- 第2章 湿り蒸気の挙動の解析による予測
- 第3章 湿り蒸気の挙動の実験的解明
- 第4章 湿り蒸気の影響低減技術の検証
- 第5章 実機での浸食低減方法と確認
- 第6章 結論

第1章では代表的蒸気タービンの蒸気条件、蒸気タービン内の湿り蒸気の挙動の概要、近年の最終段の長翼化傾向を概観し、動翼の浸食などに対する湿り蒸気の影響低減の必要性を説明した。また湿り蒸気流れに関する従来の研究のあらましを述べると共に、本研究の各章の内容を示した。

第2章では、タービン内で水滴が発生してから排出されるまでの各挙動について上流より数値的に解き進める手法と、試験タービン及び実機で解析した結果を示した。本手法では湿りの形態を微小水滴、粗大水滴、翼面の水滴、壁面の水滴などに分類した上で個々の水滴のレベルまで分解し、相互間の形態の変化を含めて挙動を追跡することで、湿り蒸気の挙動をできるだけ詳細に解析することを試みた。解析の結果、以下の点が明らかとなった。

まず基本的特性である水滴発生過程の解析において、発生点の線図上の湿り度値、膨張速度と水滴径の関係等は従来の研究結果をほぼ裏付けた。発生水滴径は $1\mu\text{m}$ 以下で、膨張速度等の条件で大きな差異が生じる。続いて液相の各挙動について、微小水滴発生後の成長は当初水滴径からオーダーが変わる程の増加はないこと、

微小水滴の軌跡計算に基づく翼への付着率は水滴径が大きいほど大きく、試験タービンの翼列毎の付着率は3～8%であることを示した。また静翼後縁から噴霧する水滴の直径は0.05～0.3mmと微小水滴に比べ粗大で、噴霧後の軌跡は静翼では緩やかに外周側へ、動翼では急速に外壁に達する。湿りを構成する液相の形態に関しては、出口で排出される液相中の微小水滴の比率は高湿り度条件でも88%と大半が微小水滴のまま排出されること、一方で翼に付着した水滴はその後、翼面水分、粗大水滴を経て壁面に至る等、複雑に形態変化することが示された。出口における湿り度分布は、平均湿り度が小さい場合は翼高さ中央付近で相対的に大きい、湿り度が増すに従い外周側で最大値を持つ分布となる。続いて影響面に関しては、粗大水滴の動翼衝突および浸食量の解析より、翼の浸食量は湿り度が大きいほど大きく、回転数増加によっても顕著に増大すること、動静翼間距離の拡大により浸食低減の効果が得られることを示した。また湿り損失のうち復水損失は出口湿り度によらずほぼ一定であるが、加速損失、制動損失などが出口湿り度に応じて増加する結果、湿り度の増加によって合計損失が増加する。出力重みつき平均湿り度に対する湿り損失係数は、試験タービンで約0.33～0.54であった。

実機に対する解析を試験タービンと相似の形状で行い、実機とスケールモデルでは、水滴径、付着率、加速距離などが異なり、相似とはならないことを確認した。実機では膨張速度が小さいため微小水滴径は試験タービンよりも大きく、翼への付着率も大きめとなった。このため動翼への衝突水滴量は試験タービンより多いが、動静翼間の加速距離が長いため浸食は逆に少なめとなった。一方湿り損失は粗大水滴量が多いことなどにより、試験タービンより大きめである。

第3章では、低圧蒸気タービンと蒸気風洞の2つの試験装置を用いて、タービン内での湿り蒸気の挙動の観察、計測を実施し基本的な挙動を明らかにすると共に、解析結果と比較が可能なものについて評価検証を行った。湿りの起源となる復水現象を蒸気風洞翼列で観測し、復水衝撃波の存在や湿り度と水滴発生位置の関係などを確認した。またレーザーを用いた光学計測装置によりタービン出口で微小水滴の計測を行い、水滴径は0.05～1.6 μ mの範囲にあって解析結果に比べてやや大きいこと、湿り度の分布は解析同様、平均湿り度が増加するにつれて外周側で湿り度が顕著に大きい分布となることを示した。ポアスコープ・プローブを用いて最終段静翼背側面を観測し、後縁に沿う水膜や後縁からの水滴噴霧など、静翼での水分の流れの概要を把握した。続いて蒸気風洞での翼後縁から噴霧する水滴の観測により、二次噴霧後の水滴径を把握しウェーバ数23～26との結果を得た。フォトカウンタ・プローブを用いて試験タービン最終段静翼下流にて粗大水滴径を計測し、タービンでの水滴径分布を得た。さらに試験タービン最終段翼に浸食試験片を装着して浸食量計測を行い、段落入口圧力が大きいほど、また動静翼間距離が大きいほど浸食が低減するとの解析結果を実験的に裏付けた。試験タービンでの湿り度と効率の関係の計測では湿り損失係数が約0.6であり、前述の解析

結果はこれより小さめであるが、類似の傾向を予測している。

第4章は、外周壁や静翼面での水分除去、動静翼間距離拡大など、湿り蒸気の影響を軽減する各種施策の有効性を定量的に把握し、設計に適用するためのデータと、影響を許容内に低減する手段を得ることを目的とし、実験を主体に評価検証した。外周壁の水分除去試験結果から、湿り度10%において全液相のうち除去される割合は4~5%で、湿り度が小さくなるとその比率が下がること、解析結果を基にすると実際に除去される外周壁上の水分は50%弱と推定されることを示した。最終段静翼後縁に設置した水分除去スリットは、翼出口マッハ数が高くなると除去効率が低下する。最終段静翼の背側・腹側面に設置した水分除去スリットの最適な吸込圧力比は0.9前後であること、最終段静翼面に設置する場合、背腹の翼面圧力が等しい位置で、翼高さ方向は外周寄りの25~30%の範囲が最適で、この条件で粗大水滴量はほぼ半量となり、動翼浸食も半減できるとの結果が得られた。最終段の動静翼間距離を増加すると、粗大水滴の加速が促進され動翼への衝突速度が減少するだけでなく、動翼へ到達前に外周側へ移動する水滴が増加して衝突水滴量自体が減少し、翼の浸食量は減少することが、解析および浸食試験結果で裏付けられた。動静翼間距離拡大では湿り損失のうち制動損失などが改善し、損失量も低減できることを解析で示した。

第5章では、本研究により得られた翼浸食と性能に及ぼす湿り蒸気の影響評価方法と損失の低減施策を、実機、特に大型最終段翼開発に適用する方法を説明した。代表事例として最大級の先端周速(約700m/s)を持つ40インチ・チタン翼の開発において、水分除去機構、動静翼間距離拡大、耐浸食材装着などの対策を講じることによって、浸食量を実績のある33.5インチ翼と同レベルに抑制可能であると評価した。約14000時間運転後に行った翼の詳細検査で、浸食量が当初予測した範囲に入っていること、さらに14年間運用後の調査において浸食量は予測範囲で問題が無いことが示された。

第6章では本研究で得られた成果を総合して結論を記述し、今後の課題を示した。すなわち本研究で提案した解析手法はタービン内の湿り蒸気の挙動、それによる翼浸食と性能に及ぼす影響の定量的推定を概略において可能とすると考えられる。また解析と実験検証に基づく知見・手法を総合的に実機最終段翼開発、浸食評価などに適用し、運用後の浸食量を調査した結果から、本研究において提示した予測評価・影響低減手法が大筋で妥当であり、実用に耐え得るものであるとの結論を得た。

研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
(論文 1)	The Development of Three-Dimensional Aerodynamic-Design Blade for Turbines、ICOPE97、1997.7、T.Tanuma・S.Nagao・T.Sakamoto・N.Ikeda・M.Matsuda・K.Imai
(論文 2)	Aerodynamic Development of Advanced Steam Turbine Blades、1995 International Joint Power Generation Conf.、1995.9、T.Tanuma・S.Nagao・T.Sakamoto・S.Kawasaki・M.Matsuda・K.Imai
(論文 3)	Secondary Flow Effect on Water Movement over Surface of Steam Turbine Cascade、ICOPE93、1993.9、K.Funazaki・H.Matsubara・S.Nakano(岩手大)・T.Tanuma・S.Nagao
(論文 4)	Performance Evaluation of Geothermal Steam Turbine with Scale Deposits、1992 Joint Power Generation Conf.、1992.10、H.Kawagishi・S.Nagao・S.Kawasaki
(論文 5)	Investigation of Wet Steam Flow for Steam Turbine Repowering、1992 Joint Power Generation Conf.、1992.10、T.Sakamoto・S.Nagao・T.Tanuma
(論文 6)	Advanced Nuclear Turbines for Large Output、Int.Conf.on Technology of Turbine Plant Operating with Wet Steam、1988.10、T.Hirabayashi・A.Ohji・A.Suzuki・S.Nagao
(論文 7)	Water Droplet Size Measurements in an experimental Steam Turbine Using an Optical Fiber Droplet Sizer、ASME Transaction (Heat Transfer),Vol.108、1986.11、K.Tatsuno・S.Nagao
(論文 8)	Development of 52-inch Last Stage Blade for Large Steam Turbines、1986 Joint Power Generation Conf. 86-JPGC-Pwr-41、1986.10、A.Suzuki・S.Hisa・S.Nagao・H.Ogata
(論文 9)	蒸気タービンにおける湿り蒸気の挙動と影響、ターボ機械 Vol.14, No.6、1986.6、長尾進一郎
(論文 10)	Advanced Technologies for Nuclear Power Plants 52-in LSB, MSR, Full -Capacity Turbine Bypass System、2 nd International Topical Meeting on Nuclear Power Plant Thermal Hydraulics and Operations、1986.4、A.Suzuki・T.Ozeki・M.Sasaki・S.Nagao
(論文 11)	Water Droplet Size Measurements in an Experimental Steam Turbine Using an Optical Fiber Droplet Sizer、ASME Winter Annual Meeting、1984.12、K.Tatsuno・S.Nagao
(総説 1)	蒸気タービンの湿り蒸気の影響低減技術、ターボ機械 Vol.31, No.8、2003.8、田沼唯士・長尾進一郎・山本悟(東北大)
(総説 2)	改良型 BWR (ABWR) 原子力タービン、日本機械学会「21 世紀の発電事業に対応した蒸気タービン技術に関する調査研究分科会」報告、2002.5、長尾進一郎・浅沼裕
(総説 3)	蒸気タービンの効率向上、ターボ機械 Vol.27, No.1、1999.1、長尾進一郎・山田政之

(総説 4)	蒸気タービンにおける水滴と湿り度の計測、ターボ機械 Vol.23, No.5、1995.5、長尾進一郎・坂本太郎
(総説 5)	コンバインドサイクル機器における流体解析技術、東芝レビュー Vol.50, No.1、1995.1、長尾進一郎・芳根俊行
(総説 6)	蒸気タービンの効率向上技術、電気新聞、1993.8、長尾進一郎
(総説 7)	蒸気タービンの翼列開発技術、東芝レビュー Vol.48, No.5、1993.5、長尾進一郎・野本秀雄・松浦俊博
(総説 8)	蒸気タービンの効率向上技術、電気現場技術 Vol.26, No.301、1987.6、長尾進一郎・川岸裕之
(総説 9)	52 インチ蒸気タービン最終段翼の開発、火力原子力発電 Vol.37, No.9、1986.9、鈴木篤英・檜佐彰一・長尾進一郎・尾形久男
(総説 10)	52 インチ蒸気タービン最終段翼、東芝レビュー Vol.41, No.5、1986.5、鈴木篤英・檜佐彰一・長尾進一郎・尾形久男
(総説 11)	高性能改良型 26 インチ羽根、東芝レビュー Vol.38, No.7、1983.7、松浦俊博・長尾進一郎
(総説 12)	蒸気タービンの模型試験、ターボ機械 Vol.9, No.9、1981.9、小林正・長尾進一郎
(総説 13)	蒸気タービン内の湿り蒸気流れの解析、ターボ機械 Vol.6, No.4、1978.4、長尾進一郎
(講演 1)	タービン翼開発における流体解析技術の適用、機械学会講演会 1996.4、長尾進一郎・田沼唯士
(講演 2)	光ファイバを用いた粒径測定装置による粒子密度、湿り度の測定、昭和 62 年電気学会産業応用部門全国大会、1987.6、辰野恭一・梅田利也・長尾進一郎
(講演 3)	蒸気タービンにおける湿り蒸気流れの影響、第 16 回ターボ機械講演会、1985.5、長尾進一郎
(講演 4)	光ファイバを用いた粒径測定装置 - タービン中の水滴径の測定 - 、第 2 回センシングフォーラム、1985.4、辰野恭一・長尾進一郎
(講演 5)	蒸気タービンの模型試験、日本機械学会第 587 回講演会、1984.10、長尾進一郎
(講演 6)	液滴計による蒸気タービン内の水滴径の測定、第 14 回ターボ機械講演会、1983.11、辰野恭一・長尾進一郎
(講演 7)	ボアスコープによるタービン内部湿り蒸気流れの可視化、日本機械学会講演論文集 830-7、1983.6、川岸裕之・長尾進一郎・今村卓也
(講演 8)	三次元タイムマーチング法による湿り蒸気タービン流れの解析、日本機械学会講演論文集 830-4、1983.4、長尾進一郎

その他 (論文)	Investigation of Riblets in a CDB, DCA and 65-S Compressor Cascade, IGTC99 Kobe, 1999.11、S.Nagao・F.A.E.Breugelmans(VKI)
(論文)	Experimental and 3D CFD Investigation in a Gas Turbine Exhaust System、IGTI Turbo Expo98、1998.6、B.Sultanian(GE)・S.Nagao・T.Sakamoto
(総説)	1500 級コンバインドサイクルシステム用蒸気タービン、日本機械学会「21 世紀の発電事業に対応した蒸気タービン技術に関する調査研究分科会」報告、2002.5、長尾進一郎・浜野博・大久保貴司
(講演)	タービンにおける流れの利用、日本機械学会「流れを利用する」セミナー、1992.11、長尾進一郎