U.D.C. 621. 165. 51-253. 5:620. 193. 52

蒸気タービン長翼におけるエロージョン防止技術 の開発

Development of Prevention Technology for Erosion Problems of Long Blades for Steam Turbine

発電タービンの大容量化,高性能化の要請に応じて,最終段用の新形長翼の 開発が進められているが,長翼化が進むとともに,最近の発電プラントの中間 負荷運用など運転条件の変化が加わって,翼先端部の耐エロージョン環境がま すます厳しくなる傾向にある。このような新形長翼の信頼性向上を図る目的で, 湿り蒸気中の高速の水滴流動計測技術や,超高速エロージョン試験など,最新 のエロージョン評価及び防止技術の開発を進めてきた。これら広範囲にわたる 高度な評価技術を駆使することによって,水滴エロージョン発生の定量的な評 価と効果の高い防止技術の開発が可能となり,新形長翼開発の基盤技術として 活用されている。

坪内邦良*	Kuniyoshi Tsubouchi
安ヶ平紀雄*	Norio Yasugahira
名村 清*	Kiyoshi Namura
佐藤 武**	Takeshi Satô
金子了市**	Ryôichi Kaneko

1 緒 言

蒸気タービンの最終段長翼は,タービンの出力及び性能を 左右する主要コンポーネントである。日立製作所では,プラ ントの大容量化,高性能化の要請に応じて,図1に示すよう に機種及び出力に合わせた多くの新形長翼を開発,実用化し てきた^{1)~3)}。

タービンの長翼開発では,翼先端部近傍の遷音速流での流 体力学的性能や,翼の長大化に伴う遠心力の増加と各種励振 力の影響に対応する材料強度や翼振動強度など,広範囲な分 野に高度の設計解析及び評価技術が要求される。なかでも, 長翼特有の問題として発生する翼の水滴エロージョンについ ては,その評価法及び防止技術の確立が信頼性の面から重要 視される。

火力発電用の低圧タービンや原子力発電用のタービンは、 一般に、水滴を含む湿り蒸気中で作動するため、翼の後流中 に数十ミクロンメートル以上の比較的大きな水滴が形成され やすい。特に、低圧タービンの最終段長翼の先端部では、蒸 気の湿り度が高く、しかも周速が高速となるので、このよう な粗大水滴が翼面に高速で衝突する頻度が高く、エロージョ ンが発生しやすい環境となる。図2に各種長翼の先端部周速 を比較したが、長翼化が進むにつれて周速も増大し、最近開 発した3,600 min⁻¹用チタン合金製40インチ長翼では、700 m/ s(マッハ数1.7)の水準にまで達している⁴⁾。このチタン合金製 の翼材は、従来の12Cr系翼材よりも比強度及び耐エロージョ ン性が優れた特徴を持っているものの、周速が従来長翼と比 較して一段と高くなるため、エロージョンに対して極めて過 酷な条件にさらされることになる。



囲を示したもので、中小容量機から1,400 MW級の超大形機まで機種及び 出力に合った長翼を開発、実用化している。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所日立工場

148 日立評論 VOL. 70 No. 2(1988-2)







図2 長翼の開発経緯と翼先端部周速レベル 最終段長翼の長大 化に伴って, 翼先端部の周速レベルが増加する。特に, 最新の3,600 min⁻¹ の40インチ長翼では、比強度の高いチタン合金を採用し、翼先端部周速、 が700 m/sと高いレベルに達している。

日立製作所では、このような新形長翼の信頼性をいっそう 向上するため,耐久性の高いエロージョンシールド材の開発 だけでなく、湿り蒸気中の水滴流動計測5や超高速エロージョ ン試験など、エロージョン評価及び防止技術の研究開発も進 めており⁶⁾,その成果を実機設計に反映させている。本論文で は, 主としてこれら最新のエロージョン評価及び防止技術に ついて紹介する。

2 低圧タービン内部の水滴流動

2.1 水滴の発生と成長

54

長翼の水滴エロージョンに対する評価及び防止技術を確立 するには、その原因となる湿り蒸気中の水滴の挙動を把握す ることが重要となる。ここでは、その詳細に触れる前に水滴 の発生状況について簡単に説明する。

蒸気タービンでは、作動流体である蒸気の圧力が下流段落 になるほど膨脹して低下する。一般に、この蒸気圧力が飽和 圧力より低下して湿り域に入ると, 凝縮が始まって水滴が発 生する。しかし, 蒸気タービンの段落内では, 蒸気圧力が飽 和圧力以下の理論的な湿り域に達しても水滴が発生せず、過 冷却現象と称する一種の非平衡状態となる。更に蒸気圧力が (HT) 理論的な泪り度で $9 = 10/15 \pm 7 + 7 + 7 = 5 \pm 5$



図3 翼間流路内の水滴挙動 静翼表面に捕集された水滴は翼面で 水膜流となり、後縁端から噴出する。この水滴は蒸気速度に比較して遅 いので、相対的に動翼背面から高速で動翼に衝突する。

2.2 水滴の翼面捕集と後流噴霧

復水衝撃現象で発生した水滴は, 粒径が数ミクロンメート ル以下と小さく、その慣性力も小さいので、ほとんどが蒸気 流に乗って段落内を流下する。しかし、タービン段落内には 多数の静翼や動翼が存在するので、流れが翼面に沿って転向 したり、回転中の動翼によって遠心力の影響を受ける。この ため、微小水滴の一部は、図3に示すように静翼の前縁部や 腹面部に衝突して捕集され、翼面上に水膜流を形成する。こ の水膜流は、後縁端から蒸気中に再び噴出し、数百ミクロン メートルの粗大水滴を形成する。このような粗大水滴は、翼 後流中でしだいに加速されるが、水滴の表面張力よりも蒸気 のせん断力が大きく働くと微細化されて数十ミクロンメート ル程度の水滴となる。この現象を一般に二次噴霧と称し、ウ ェーバ数*1)がある限界値以上になると発生する。

このように翼後縁端から噴出する水滴は、径が大きいので 蒸気速度に比較して低速となるが,図3に示すように回転中 の動翼入口では周速の影響で翼先端背面に高速で衝突する。 これらの現象を正確に把握するため、翼後流中に発生する水 ※1) ウェーバ数(水滴に働くせん断力)/(表面張力)>21~24

IFA I	ι,	土田町	0.1.7 1	亜ウ	又	$C \Delta$	- 4	101-	连9	00	- ',	杰风	· ++	こ記
激な	凝縮	胡象	が起	こり	,	多量	の微	細水	、滴を	と発	生す	る。	20	の現
象を	復水	、衝撃	と称	L,	発	生し	た微	細水	、滴え	が急	速に	成長	す	ると
とも	に圧	力の	回復	現象	が	現れ	る。	この)た&	5,	蒸気	との	潜	熱の
授受	や)	「熱指	数の	変化	な	ど非	可逆	的な	現象	泉を	生ず	るこ	とし	こな
ŋ,	熱力)学的	なエ	ネル	ギ	一損	失を	伴う	22	とに	なる	0		

蒸気タービン長翼におけるエロージョン防止技術の開発 149



Va(静翼出口烝私迷皮) W(周迷) Da(動翼八口小周迷皮) D2(二久噴霧後の小周)Va(静翼出口水滴速度) Us(動翼入口蒸気速度) $D_1(一次噴霧後の水滴径)$ $\delta(静・動翼間の距離)$

図4 静翼後流中における水滴挙動の解析例 3,600 min⁻¹, 33.5インチ翼を例にとり,静翼後流中の水滴加速と動翼への衝突速度の解析例を 示す。粒径,翼間距離によって衝突速度が大きく変化する。

滴の噴霧現象と挙動を予測する解析法を開発している。その 一例として、3,600 min⁻¹、33.5インチ翼を対象に解析した結 果を図4に示す。同図の(a)から明らかなように、翼後縁端近 傍の二次噴霧で微細化された水滴が急激に加速されるが、微 細化されない粗大水滴は後流中での加速が少ないので、同図 (b)に示したように微細化された水滴の衝突速度よりも100 m/ s以上の高速で動翼に衝突する。このような高速の粗大水滴が 動翼に衝突すると、その場所に翼材料の強度を超える強い衝 撃圧力が発生し、エロージョン損傷を誘発するおそれが大き くなる。したがって、長翼の耐エロージョン性を向上させる には、水滴の衝突域を耐衝撃性の高い材料、いわゆるエロー ジョンシールド材で保護するとともに、粗大水滴の衝突速度 とその量を可能な限り小さくすることが望ましい。同図(b)に は、静動翼間距離に対する水滴衝突速度の関係を示している が、この距離の拡大によっても衝突速度を低下させることが 可能なことが示唆される。

このため、蒸気タービン段落内部の水滴流動計測を目的とし て、レーザ流速計を応用した2カラー4ビーム方式のレーザ 粒子計測技術の開発を進めてきた5)。図5に最近試作した光フ ァイバプローブ構造のレーザ粒子計測装置の外観と主な仕様 を示す。本計測装置は、異径ビーム方式のレーザ流速計によ る混相流計測法⁸⁾を基本として開発したもので、小形プローブ 構造の採用によって, 蒸気タービン内部の高速の湿り蒸気中 の水滴径、数密度及びその速度ベクトルを同時に計測できる 特徴を持っている。光学系は、アルゴンガスレーザを光源と し、その2色4光束のレーザビーム(波長0.488 µmと0.5145 μm)を光ファイバに通してプローブ先端部に導き,同図に示す ように収束レンズで一点に交差させて構成する。測定は、こ のビーム交差部を通過した個々の水滴からの後方散乱光のパ ルス強度と、2方向のドップラ信号を検出して水滴径と速度 ベクトルを求める方式で、計測範囲は水滴径が5~300 µm、 最高速度340 m/sとほぼ静翼後流中の水滴流動条件をカバー

3 翼後流中の水滴挙動特性

3.1 湿り蒸気中の水滴流動計測

前述したように,長翼の耐エロージョン性の評価及びエロ ージョン防止策を確立するためには,静翼後流中の粗大水滴 の発生状況とその挙動を詳細に把握することが重要である。

できる能力を持っている。

3.2 翼後流中の水滴流動実験結果

最終段翼の長翼化が進むにつれて翼先端部周速が高くなり, 耐エロージョン環境がますます厳しくなる。この主因となる 粗大水滴の流動特性を把握し,耐エロージョン特性の評価及 び防止策の確立を図るため、2次元翼列風洞を用いた湿り蒸

150 日立評論 VOL. 70 No. 2 (1988-2)



ファイバ先端部

図5 2カラー4ビーム式レーザ粒子計測装置 光ファイバプローブ構造の2カラー4ビーム式レーザ粒子計測装置で,340m/s以下の高速水 滴の粒径,数及び速度の同時計測が可能である。



図6 湿り蒸気翼列風洞実験装置 任意の湿り蒸気により、翼列の各翼表面に水膜流を形成させることが可能で、実機模擬 環境下での翼後流中の水滴挙動を実現する装置である。

気実験を行った。図6に実験装置の系統と主な仕様を示すが、 所定の湿り蒸気を供給して翼面に水膜流を形成させ、翼後流 中に実機と同等の水滴噴霧流動状況を実現できるよう構成し てある。供試翼は、粗大水滴の発生メカニズムの解明を主目 的とした単独の対称翼形モデルと,実機環境下の流動状況把 握を目的とした実機の<u>1</u>2.5の静翼翼列モデルを採用した。

図7に、湿り蒸気実験に先立って実施した空気実験による 水滴噴霧流動状況を示す。実験は、1枚の静翼(単独翼)を用 いわ低油の冗与生時ではまてが、習俗緑濃却での水晴光動し

で回復する。同図中,計算値は実測値の傾向とよく一致して おり、前述した解析法がエロージョンの評価に有効なことが 確認できる。

図9に実機模擬環境下での静翼翼列後流中の水滴流動の計 測結果の一例を示す。同図は、入口湿り度4%で、ほぼ実機 最終段入口に相当する蒸気条件で実験したもので、動翼入口 部に相当する位置の速度ベクトルの平均値と、その速度及び 水滴径の頻度分布の実測値を示す。本実験例では、一部低速 の水法が方ナナフィのの 正均性役的の の水泣の

いた低迷の空风美缺ではめるか、異後極端部での水脵争動と	の水滴が仔仕するものの、半均粒径約30 µmの水滴のはとんど
粗大水滴の発生状況がよく観察できる。図8は、この粗大水	が190m/s前後の速度まで加速されており、図4の解析で予測
滴の後流中の加速状況を示したもので、単独翼による湿り蒸	した結果とほぼ一致する傾向が得られている。
気実験の実測値と計算値とを比較してある。実測値は、二次	これらの湿り蒸気実験によって、動翼先端部に衝突する水
噴霧で微細化した水滴の流動特性とほぼ同様の加速傾向を示	滴の径,量及び速度ベクトルが把握でき,水滴によるエロー
しており、翼弦長の70%の下流位置で主流の約70%の速度ま	ジョン発生の詳細な評価が可能となる。また、本実験では、

蒸気タービン長翼におけるエロージョン防止技術の開発 151



図7 翼後縁端からの水滴の発生 翼後縁端からの粗大水滴発生機 構を把握するため実施した空気実験の状況を示す。後縁端部で水膜から 大きな水滴が噴出していることが分かる。

Vs .

図8 翼後流中の水滴速度の実測値と計算値の比較 湿り蒸気中 での単独翼の後流中の水滴流動の実測値と計算値を比較しているが,計 算値は実験値の傾向とよく一致する。

翼後流中の水滴発生及び流動特性に影響を及ぼすパラメータ すべて (圧力,湿り度,蒸気速度など)の効果を把握することができ, 4.2 5
実機のエロージョン特性評価法に反映させるとともに,エロ 図12
ージョン防止策として有効な種々の方策を検討している。 を示す シシー
4 長翼の耐エロージョン特性 チタン
4.1 超高速回転エロージョン装置の概要 したも 水滴衝 性に関する研究は,流体力学的現象解明を重視したものと, 過時間

図 9 静翼後流中の水滴噴霧流動 翼列風洞実験による湿り蒸気 中の静翼後流中の水滴噴霧流動特性の実験結果を示す。実験条件はほぼ 実機最終段と同じ蒸気条件である。

材料の破壊機構評価に重点を置いたものに分けられる。前者 は、蒸気風洞あるいはモデルタービンなどによって、実際の 静翼後縁端から噴出する水滴の挙動とエロージョン発生機構 の関係が把握できる。後者は、高速で回転する試験片に水滴 を衝突させるものであり、浸食量の定量的評価が可能である。 新形長翼の開発に当たって、エロージョン発生評価に重要 な上記二つの手法を組み合わせた超高速回転エロージョン試 験装置を駆使して長翼材の耐エロージョン特性に関する研究

験装置を駆使して長異材の耐エローション特性に関する研究 を進めている。

図10及び図11に超高速回転エロージョン試験装置の系統, 及び高速回転ディスクの外観を示す。本試験装置の特徴は, 湿り蒸気で作動する静翼翼列を装備したことによって,実際 に静翼後縁から噴出,飛散する水滴が,実機翼先端部形状を 模擬した試験片に衝突するように構成した点であり,タービ ン運転条件を想定した翼材の耐エロージョン性の評価が可能 である。また,回転ディスクは,最大1万5,000 min⁻¹であり, すべての新形長翼の運転条件を模擬できる。

4.2 タービン翼材の耐エロージョン特性の比較

図12にタービン翼材の耐エロージョン特性試験結果の一例 を示す。同図は,最終段長翼を構成する翼母材,エロージョ ンシールド材について,12Cr系合金鋼とステライト材,及び チタン合金材の単位時間当たりの体積エロージョン量を比較 したものである。実験は,実機長翼先端部の運転条件を模擬し, 水滴衝突速度として約570 m/s相当で実施した結果で,運転経 過時間に対するエロージョン浸食量の特性からその特徴を列

152 日立評論 VOL.70 No.2(1988-2)

真空チャンバ

図10 回転噴流エロージョン試験装置系統図 湿り蒸気で作動するノズル翼列の翼後縁から離脱した水滴が, 高速回転する試験片に衝突し,エロージョンを発生させる。

図|| 高速回転ディスク外観 最高回転数|万5,000 min⁻¹の超高速 回転ディスクに装着した試験片は,実機最終段長翼の先端部と同一周速 で回転する。

挙すると次のようになる。

 (1) 翼材によってその特性が著しく相違し、特に初期エロージョン量の変化が顕著である。
 (2) エロージョンシールド材は、初期及び定常域でのエロージョン量が他の翼材に比較して格段に少なく、極めて高い耐

図12 タービン翼材の耐エロージョン特性 最終段長翼を構成する 翼材の耐エロージョン特性の一例であり、シールド材が格段の耐エロー ジョン性を持っている。

蒸気タービン長翼におけるエロージョン防止技術の開発 153

図13 エロージョン発生状況 運転時間の進行とともに,試験片表 面が鋭い凹凸面で覆われ,典型的な湿り蒸気中の水滴による損傷の様相 を呈する。

5 エロージョン防止策とその効果

最終段長翼の長大化に伴って、長翼先端部の水滴エロージ ョン問題がますます厳しくなる傾向にある。先端部周速が700 m/sに達するような新形長翼では、 信頼性を確保するために従 来よりもいっそう積極的なエロージョン防止策の採用が不可 欠となる。前述したような, 翼後流中の水滴挙動特性や翼材 の耐エロージョン特性からエロージョン防止策を検討すると, (1) 翼後流中の粗大水滴の発生防止あるいは分離除去 (2) 静翼後流中の水滴の微細化と十分な加速 (3) 水滴の衝突域の翼材の耐エロージョン性の向上 に分離できる。このうち(3)のエロージョン対策は、既に従来 から採用されてきたもので、水滴の衝突域である長翼先端の 前縁部を耐エロージョン性の優れたエロージョンシールド材 によって保護する方法である。図12にそのエロージョン特性 を比較してあるが、従来の12Cr系合金鋼の翼材で十分な実績 を持つステライトに加えて, 最新のチタン合金製の翼材に対 するシールド材(Ti-15Mo-5Zr-3A1)を選定しており、他の翼 材に比較して耐エロージョン性が極めて良い。

一方,(1)の防止策は、エロージョンの原因となる粗大水滴

の発生を抑制あるいは分離・除去する方法であり、図14に代表的なエロージョン防止構造例を示す。大別すると、動翼の

エロージョン性を持っている。

(3) チタン合金製の翼母材及びシールド材ともに、従来の12 Cr系合金鋼と同等以上の耐エロージョン性を持っている。

図13にはエロージョンシールド材について,運転経過時間 に対応した試験片のエロージョン発生状況を示す。いずれの 供試材料も表面が鋭い凹凸面状に浸食され,典型的な湿り蒸 気中の水滴によるエロージョンこん跡の様相を呈している。 エロージョン損傷部は,試験片先端部の背面部に集中してお り,前述した静翼後縁部から噴出する水滴の挙動を実証する とともに,実機長翼の耐エロージョン性を評価する上で極め て有用な情報を得ることができる。

このように流体力学的な観点から長翼材料のエロージョン 特性に及ぼす種々のパラメータとして、水滴の衝突速度*Ud*、 エロージョン発生限界速度*Ucr、*衝突水滴径*D、*衝突水量*W* の影響を把握すると、単位面積当たりのエロージョン量とし て次式で評価することが可能となる。

 $\frac{E}{A} \propto D^{k} (Ud - Ucr)^{m} \left(\frac{W \cdot T}{A}\right)^{n}$ ただし E:エロージョン量 A:被エロージョン面積 T:運転時間

k, m, n: 翼材特有の定数 日立製作所では、このエロージョン評価式を用い、すべての最終段長翼の運転状態に対応した寿命評価を行うとともに、 金属組織学的な見地からよりミクロ的な破壊機構の解明と耐力向上に努め、実機長翼の開発設計に反映させている。

図14 低圧タービンのエロージョン防止策 低圧タービン段落内 の各種エロージョン防止策の構造例を示す。長縁前縁部のエロージョン シールド材に加え,粗大水滴の発生原因となるドレンの各種分離機構が 採用される。

154 日立評論 VOL. 70 No. 2 (1988-2)

実機に採用されている。

(2)の防止策は、図4に示したように静翼と動翼との翼間距離を広げて、発生した粗大水滴の微細化と水滴の加速を促進することによって、動翼への水滴の衝撃エネルギーを緩和する方法である。図15にエロージョン量に対する静動翼間距離 るの影響を実験的に評価した一例を示す。本実験は、前述した超高速回転エロージョン装置によって得られたもので、翼間距離るを従来より1.4倍に拡大することによってエロージョン 発生量が10%以上低減されており、エロージョン防止策の一つとして効果的であることを実証している。

6 結 言

以上,蒸気タービン最終段長翼での水滴エロージョン評価 及び防止技術として,最近開発した翼後流中の高速水滴流動 計測技術と超高速エロージョン評価技術を中心に紹介した。 蒸気タービンの大容量化,高性能化及びコンパクト化の要請 に応じて長翼化が進むとともに,発電プラントの中間負荷運 用など運転条件の変化に伴ってますます耐エロージョン環境 が過酷な条件にさらされる傾向があるが,これらの計測評価 技術とエロージョン防止策によって信頼性の高い新形長翼の 開発が可能となった。

図15 静・動翼間距離によるエロージョン量の変化 静・動翼間 距離の拡大が、エロージョン低減策として効果的であることを定量的に 実証できた。

遠心力によって飛ばされた水滴を効果的に分離,除去するド レンキャッチャと,静翼翼面や側壁面に形成される水膜を吸 引して粗大水滴の発生を抑制するスリットやドレンセパレー

60

今後,更に精度向上と実績を積み重ねることによって,蒸 気タービンの信頼性をいっそう向上させるとともに,性能の 向上へも反映させていきたい。

終わりに,本論文の2カラー4ビーム方式のレーザ粒子計 測法に関し御指導をいただいた慶応大学工学部教授の前田昌 信工学博士に対し,深く感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 黒田,外:蒸気タービン用3,000 rpm, 40 in翼の開発,火力原 子力発電, 27, 3, 637~646(昭51-3)
- 2) 池内,外:大容量蒸気タービン用52インチ長翼の開発,火力原 子力発電, 37, 1, 34~44(昭61-1)
- 3) 名村,外:高性能・高信頼性蒸気タービン長翼の開発,火力原 子力発電, 37, 11, 1209~1220(昭61-11)
- 4) 久野,外:大容量蒸気タービン用チタン合金製40 in長翼の開発,日立評論,69,10,925~932(昭62-10)
- 5) 吉田,外:レーザ流速計による翼後流中の水滴計測,日本機械 学会日立地方講演会論文集,73~75(昭61-9)
- 6) 柏原,外:高性能・高信頼性蒸気タービン長翼の開発,日本機 械学会創立90周年記念シンポジウム論文集(昭62-11)
- 7) M. J. Moore, et al. : Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separators, 1976, Hemisphere Publishing Corporation.
- 8) 前田,外:混相流中の粒子群の粒径と速度の非接触測定,日本

タがあり、いずれもエロージョン防止策として有効で、一部機械学会論文集(B),52,474

膨機械学会論文集(B), **52**, 474, 564~569(昭61-2)