

〔論文〕

機械駆動用蒸気タービン動翼の腐食疲労現象と寿命向上に関する研究

(第1報：腐食性物質の濃縮域と腐食疲労に関する考察)

秦 聰<sup>\*1</sup> 宮脇俊裕<sup>\*2</sup> 長井直之<sup>\*3</sup> 山下晃生<sup>\*3</sup> 塚本 寛<sup>\*4</sup>

Study on Corrosion Fatigue Phenomena and Lifetime Improvement of Steam Turbine Blades Used for Mechanical Drives

(1st Report : Relation of Corrosive Chemicals Enrichment Zone and Corrosion Fatigue)

Satoshi HATA, Toshihiro MIYAWAKI, Naoyuki NAGAI, Teruo YAMASHITA and Hiroshi TSUKAMOTO

Corrosion fatigue phenomena of low-pressure blade on chemical enrichment zone for mechanical-drive steam turbines were studied by FEA vibration response and fracture surface analysis. Effects of Main factors as corrosive chemicals, corrosion pit size and enrichment concentration are quantitatively analyzed according to useful data and actual samples of blades and operation experience. Based on these detailed studies, blades have been improved to have sufficient integrity under practical chemical enrichment zone.

Keywords : Steam Turbine, Corrosion Fatigue, Wilson Zone, Thermodynamics, Numerical Analysis, ISB

1. 緒言

石油化学プラントにおいてプロセスガス圧縮機を駆動する蒸気タービンは長期運転中に蒸気の流れパスにエロージョンや腐食などのダメージ<sup>(1)</sup>を受け、流体性能・強度に経年劣化を生じる。特に、蒸気の膨張過程で蒸気圧力と温度変化に伴って蒸気中に含まれる極低濃度の腐食性物質が高濃度化し動翼などの回転体表面に析出・付着し、強度を低下させる。

これまでの研究では、蒸気中の不純物が析出し付着する現象を蒸気条件とその発生物質を特定することに主体がおかれ、翼素に析出付着することによる性能への影響やそれを回避するための実践的な手段に関しては十分な研究が行わ

れていない。また、環境と材料強度低下については、その特性は実験にて計測評価されているが、蒸気の膨張過程における運動エネルギーや動的影響、非平衡的な影響を考慮した翼素への付着、腐食性物質の濃縮のメカニズムはまだ十分解明されていない。実際の使用環境において腐食疲労に対し十分な寿命を有するタービンの設計指針と腐食疲労に対する長寿命化を図る技術に関する有用な研究は少ない。

そこで、本研究では腐食性物質の濃縮付着と腐食環境での動翼疲労寿命の影響を多くの設計データと運転実績を評価するとともに、損傷事例に対する解析と分析を行い、濃縮域と強度余裕と損傷の相関及び要因を明確にする。また、実翼改良によって腐食疲労に対する耐力を向上させることを検討した。本報では解析・分析の結果と動翼形状改良について報告し、第2報では耐腐食・耐付着性を有する新しい表面改質法に関する要素試験結果について報告予定である。

\* 1 三菱重工業(株) 広島製作所ターボ機械技術部

E-mail : satoshi hata@mhi.co.jp

\* 2 三菱重工業(株) 高砂研究所

\* 3 三菱重工業(株) 広島研究所

\* 4 九州工業大学 大学院 生命体工学研究科

原稿受付日 平成18年7月14日

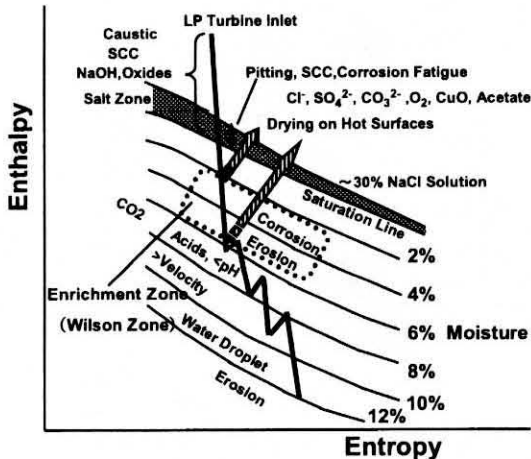


Fig.1 Turbine expansion line and typical damage

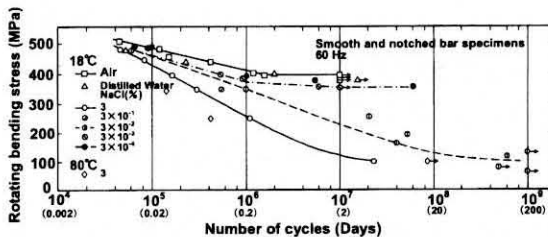


Fig. 2 Decrease of fatigue endurance limit for 13Cr stainless steel under NaCl distilled water

## 2. 蒸気の膨張過程と損傷要因

蒸気タービンの低圧段が過熱域から湿り域に膨張する過程で発生する損傷要因をFig. 1に示す。

飽和曲線上近傍では高濃度のNaOHによるSCCやピitting、湿度2%から6%の乾湿交番域<sup>(2)</sup>ではNaCl濃縮による腐食疲労、さらに湿度12%以上の高湿り域ではドレンエロージョン損傷が発生する<sup>(3)</sup>。Fig. 2にタービン動翼材13Crステンレス鋼のNaCl環境下におけるS-N線図<sup>(4)</sup>を示す。腐食疲労強度に及ぼすNaCl濃度の影響は大きく疲労限度が著しく低下するため濃縮域のWilson Zoneでは動翼設計への配慮と実運転での蒸気中不純物の管理が長期連続運転において重要となる。疲労寿命を評価する上で実運転時の腐食環境を把握する必要があるが、複雑な流れ場で高速膨張する状態での腐食性物質の

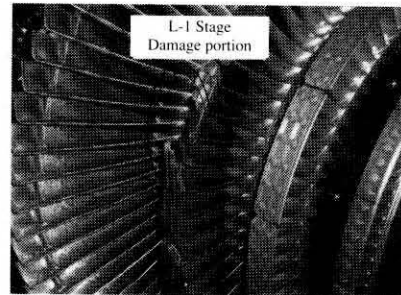


Fig. 3 Typical blade damage of LP section

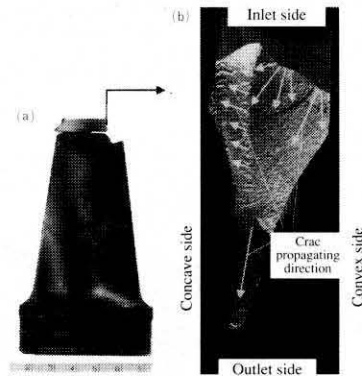


Fig. 4 Crack propagation on fracture surface

濃度変化を定量的に解析することは非常に難しく、応力解析と損傷を含む運転実績で評価していくことが重要である。

## 3. 損傷事例と要因分析

低圧段のL-1段(最終段から1段前流側)の損傷事例をFig. 3に示す。動翼はシュラウド(外周側連結板)と2個のテノンをコーキングして固定され<sup>(5)</sup>、そのテノン部が破損している。

Fig. 4にテノンの破面部の詳細とき裂の進展方向を矢印で示す。き裂の起点は、蒸気出口側のテノンのプロファイル中央側であることがわかる。破面解析で観察されたストライエーション模様<sup>(6)</sup>から高サイクルにて疲労破壊していることが確認された。

動翼損傷の原因調査を行うためFig. 5に示す要因分析図を作成し実翼材料・破面解析と強度

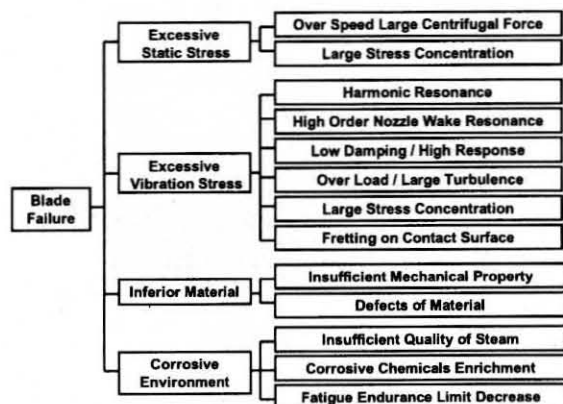


Fig. 5 Root cause analysis for blade damage

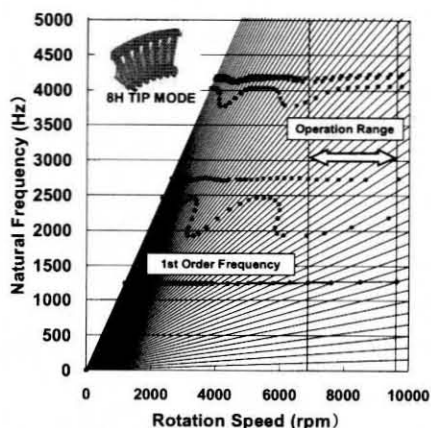


Fig. 7 Campbell diagram and operation range

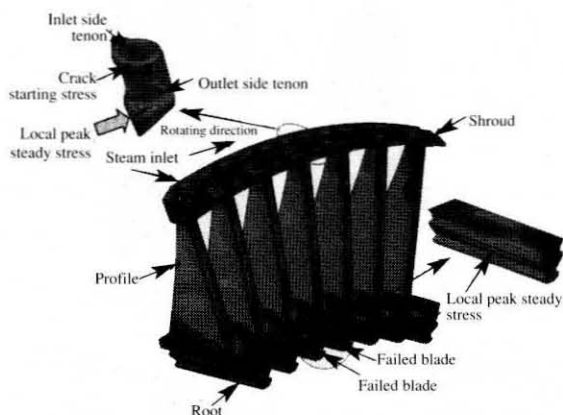


Fig. 6 Static stress analysis result

#### 4. 強度解析評価

損傷したL-1段動翼の静的及び動的応力解析による強度評価を行った。Fig. 6に最大連続回転数での静的応力分布を示す。3次元プロファイルを有する動翼には遠心力と振り戻りトルクが作用し、翼根部とテノン部に高い局所応力(大矢印部)が生じている。テノン部の最大応力点はテノン外側となっており、き裂起点のテノン内側とは異なる位置となっている。疲労強度を評価する場合、その部位における平均的な静的応力に動的な振動応力を加えた応力の降伏点及び疲労限度に対する余裕度が重要であり、静的応力が局所的に大きくても振動応力が小さければ疲労き裂は発生しない。

動的な振動応力を解析する手順として、まず7枚の動翼が一枚のシュラウドで綴られたひとつのグループをディスクも含め振動系としてモデル化しディスクと動翼の連成振動も考慮し、固有振動数と振動モードを求め、Fig. 7に示すキャンベル線図を作成する。運転回転数範囲で最低次振動モードの固有振動数との共振点における振動応答を解析する<sup>(7)</sup>。

通常、有限綴り翼の場合、周方向に同位相で振動するモードを有する最低次固有値とのハーモニック共振において翼根及びテノン部の振

解析を実施した。

基本的な要因として、過大な静的外力と動的外力の作用、材料強度の不足、腐食環境に起因した疲労限度の低下がある。特に、一定速度(低速)で運転され低次共振回避設計をしている発電用蒸気タービンと異なり、機械駆動用蒸気タービンは定格回転数の80%から105%の広範囲かつ高速回転で運転されるため常時共振し遠心力に対しても非常に厳しい条件で動翼を設計しており、要因調査を行う上で共振時の応力と強度評価を腐食環境も想定し行うことが重要である。

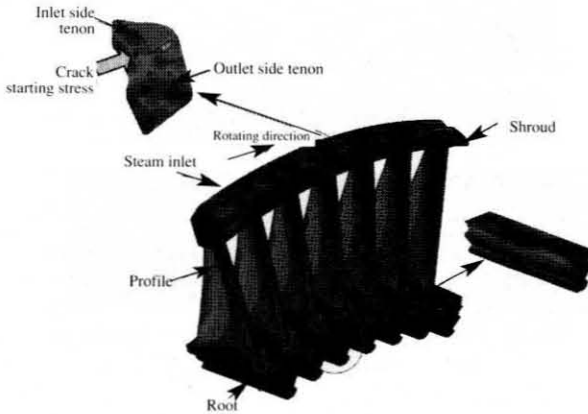


Fig. 8 Vibration stress analysis result for 1st mode

動応力が大きくなる。外部からの励振力による振動応答は、動翼周りの3次元流動解析を行いプロファイル上の定常圧力分布を解析し、ハーモニクスごとのステイミュラス(振動外力/定常外力の実績値)による変動圧力レベル、ダンピングを考慮した動翼振動系の応答解析により作用応力を求め強度評価を行った。

この動翼の場合、最高連続回転数で8H(ハーモニクス)が最低次の共振点となり、その振動応力分布をFig. 8に示す。翼根部とテノン部に高い局所応力(大矢印部)が生じており、特にテノン部の最大応力点はテノン内側であり、き裂の起点とはほぼ同じ位置となっている。これはテノンと動翼先端部の間に加工したR部近傍であり応力集中部に相当する。

静的応力と振動応力の解析値を用い疲労強度を評価するグッドマン線図上に長期運転されている他のL-1段動翼と比較しプロットした結果をFig. 9に示す。L-1段動翼湿り度が腐食性物質濃縮域のWilson ZoneにありFig. 2に示したように疲労強度が低下することを考慮し、さらに安全率をとった非常に厳しい値を疲労強度設計の許容ライン<sup>(8)</sup>としている。

$\sigma_s$ 、 $\sigma_{osc}$ はそれぞれ静的局所応力と振動応力であり、材料の引張強度 $\sigma_B$ で正規化している。

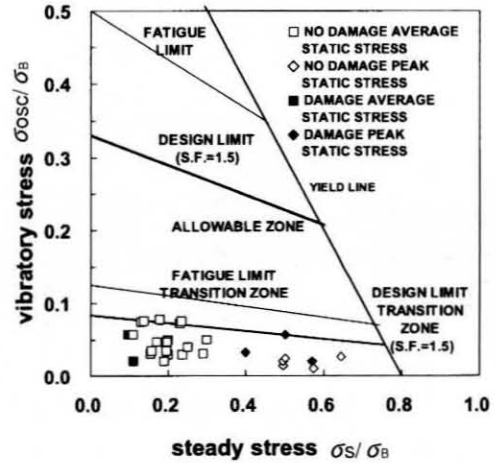


Fig. 9 Design experience on goodman diagram

損傷例は振動応力が非常に小さく許容値以下となっているが、長期運転後に損傷したことから、水質・蒸気管理に関係した腐食疲労破壊が考えられ、詳細な破面解析及び腐食性物質の分析をおこなった。また、同一仕様の動翼は80例以上の蒸気タービンに適用され、それらは健全であることから、この損傷事例での特異性を検討した結果、設計及び製作に関する問題はないことを確認している。

## 5. 蒸気中腐食性物質の濃縮と腐食疲労

テノン破面解析の結果をFig. 10に示す。疲労き裂の起点近傍に典型的な直径約20 $\mu$ mの腐食ピットが観察された。

腐食疲労は環境的な要因を含むため、実機使用条件の評価も難しく、まだ明らかになっていない部分もあるが、基本的な腐食ピット発生メカニズムをFig. 11に示す<sup>(9)(10)</sup>。腐食性物質の種類や濃度レベルにも影響されるが、濃淡電池作用や選択的な不動態化作用で生じるぜい化が関係していると考えられている<sup>(11)</sup>。

腐食疲労の発生機構は、①腐食ピット底での応力集中、②塑性変形域がアノードとなる電気化学的侵食、③保護被膜の破断部分の電気化

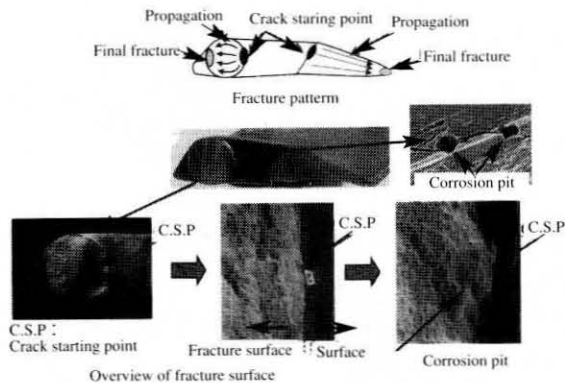
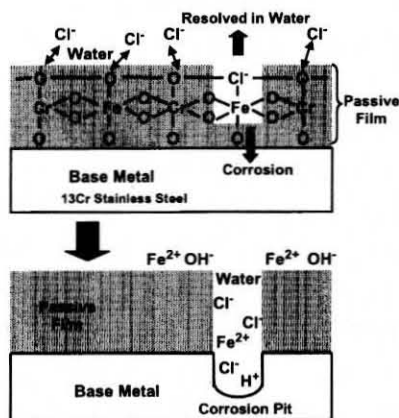


Fig.10 Corrosion pits on fracture surface

Fig.11 Mechanism of corrosion pit generation<sup>38)</sup>

学的侵食、④吸着による表面エネルギーの低下、⑤これらの複合作用に分類される。

環境と作用応力で発生した腐食ピットがき裂の進展に関与する可能性についても検討が必要である。

典型的な腐食ピット<sup>(12)</sup>が複数観察されたことから実機は非常に濃度の高い腐食環境にあったことが考えられるため、テノン破面表面に付着した腐食性物質の濃度分析を行った。Fig.12にNa、Cl、Kについて代表点における濃度を示す。NaとClは最高4,000ppm、Kは1,700ppmと比較的高い値となっている。

さらに、同じ段の健全な動翼についてテノン、プロファイル、翼根の表面解析を行った結

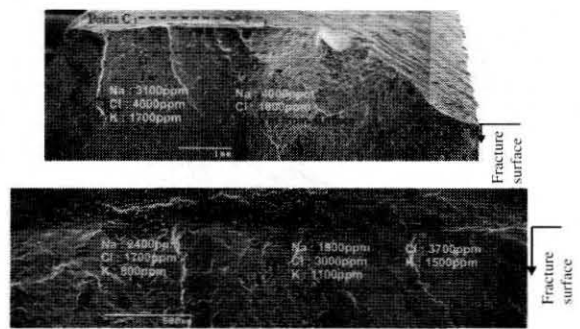


Fig.12 Corrosive chemicals concentration of deposits on fracture surface

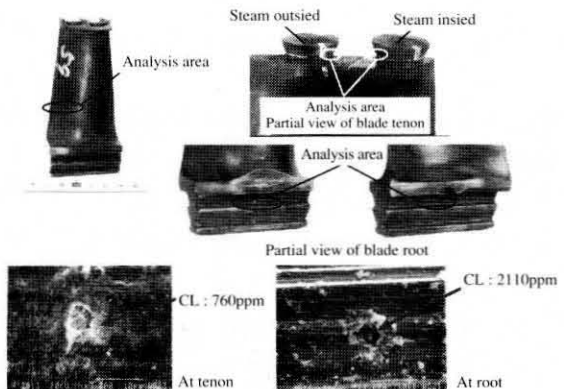


Fig.13 Corrosion pits on sound blade and corrosive chemicals concentration inside of pits

果、Fig.13に示すように同様な腐食ピットが観察され、腐食ピット内部からも2,000ppm程度のClが検出された。

また、高圧側から低圧側の蒸気通路において腐食環境レベルの相対比較をするために各段の動翼プロファイル表面の腐食ピット及び微小ピット数を計測し分布を調査した結果をFig.14に示す。湿り領域にある低圧3段(L-2、L-1、L-0)における腐食ピット発生頻度は高く、特に腐食性物質の濃縮域にあるL-1段が最も高いピット発生比率となっていることがわかる。また過熱域におけるピットは停止中に発生した可能性がある。

同様に表面に付着した腐食性物質の濃度分布をFig.15に示す。米国で24台の事業用蒸気ター

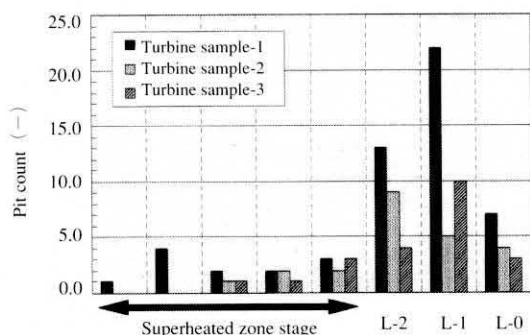


Fig.14 Corrosion pit No. of each stage and profile

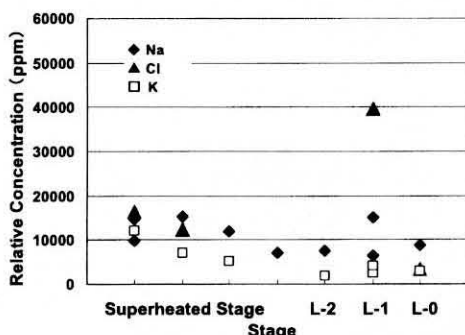


Fig.15 Corrosive Chemicals Concentration Profile of Deposits

ビンの損傷したL-1段の付着物から検出されたCl濃度は1,000ppmから90,000ppmとなっており<sup>(13)</sup>、Fig.15に示すL-1段でも40,000ppmと同程度の濃度であり、腐食環境と乾湿交番域での腐食性物質の濃縮が損傷に大きく関係していると考えられる。このことから、通常の疲労と腐食疲労を区別し判断する付着物Cl濃度の閾値は数1,000ppmレベルになると考えられる。

## 6. 濃縮域と強度余裕に関する考察

実機運転中の各段動翼表面における腐食性物質の析出と付着、液体／固体の相及びその濃度は、水質管理レベルで決まる蒸気中腐食性物質の濃度と蒸気タービン翼設計に関係する膨張過程での温度と圧力により状況が異なる。蒸気温度と圧力に対して飽和曲線上近傍に存在するNaCl過飽和の高濃度域と蒸気中のCl飽和濃度を

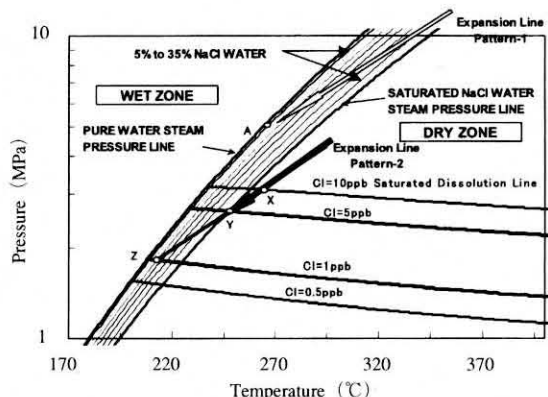


Fig.16 Cl concentration in steam expansion and deposit/dissolved condition

パラメータに変化させた場合の定常平衡状態<sup>(14)</sup>での解析結果をFig.16に示す。

膨張過程の違いを白と黒の矢印で比較し考察する。蒸気中のClが10ppbである場合、Cl飽和濃度より温度と圧力が高い領域で膨張すると(膨張線1：白矢印)、蒸気飽和ライン(A点)まで到達してもNaCl水溶液は生じないため動翼表面は高濃度の腐食環境に曝されない。一方、蒸気中のClが5ppbである場合、Cl飽和濃度となる温度と圧力で膨張すると(膨張線2：黒矢印)、過飽和ライン(Y点)で30%の高濃度NaCl水溶液が生じ動翼表面は厳しい腐食環境に曝される。この解析結果から蒸気中のClが1ppbから5ppbの非常に極低濃度の場合でも厳しい腐食環境<sup>(15)</sup>が起り得ると考えられる。

実際には湿度に対応した蒸気ミストによる翼表面洗浄効果があり、またテノンや翼根などの隙間のある形状も影響し、流れがよどむ部位では洗浄効果よりも腐食性物質の濃縮が主体的になり疲労限度の低下が顕著になると考えられる。

一方、数ppbレベルの蒸気管理には限界があり、使用環境に対する強度余裕を向上させるには、発生応力の低減と流れのよどみがない動翼形状及び結合方法の改良が必要である。

L-1段動翼の損傷は、乾湿交番域での腐食性



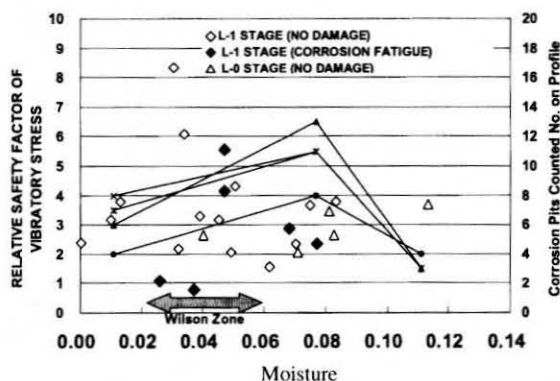


Fig.17 Relation of Wilson enrichment zone, actual moisture and fatigue strength safety factor

物質の濃縮度と振動応力レベルに関係する。そこで、実機設計のL-1段とL-0段の湿り度とウィルソン領域での疲労強度低下を考慮した許容値に対する相対的な安全率の関係を実際の腐食ピット数分布と比較しFig.17に示す。濃縮域にある場合、安全率が大きくても腐食疲労損傷が発生していることがわかる。また、濃縮域で腐食ピット数がピークになる分布とはほぼ同じ傾向にある。

## 7. 腐食ピットとき裂進展に関する考察

初期き裂の発生と進展に腐食環境のみが関与しているのか、あるいは腐食ピットそのものが応力集中として作用した通常の疲労現象であるのか以下に考察する。0.03%~3%~22%NaClの各濃度腐食環境中の試験片を用いた疲労試験<sup>(6)</sup>で得られている繰返し曲げ応力と観察された腐食ピットの間をFig.18に示す。また、き裂が進展する限界の応力拡大係数<sup>(7)</sup>から求めたピットあるいはき裂の大きさと繰返し応力の関係ラインも示している。さらに、損傷事例の解析・分析結果から得られた実機に作用する振動応力と観察された腐食ピットを比較し示している。

この結果から100 $\mu$ m以下の腐食ピットに100MPa以下の低い繰返し応力が作用する場

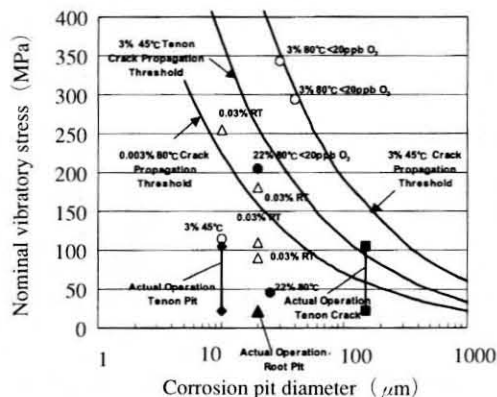


Fig.18 Relation of corrosion pit size and vibration stress in comparison with crack propagation limit line

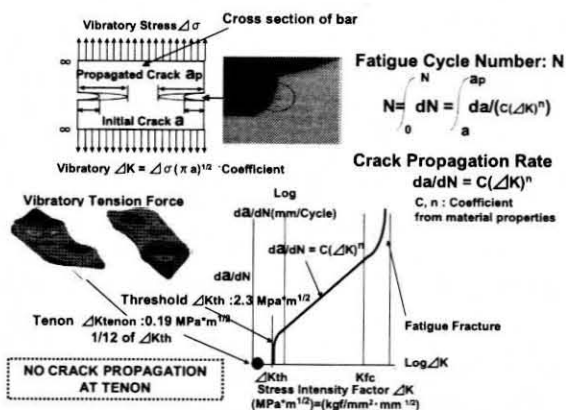


Fig.19 Tenon Caulking Stress Raiser and Crack Propagation Limit

合き裂が進展する可能性があると考えられる。また22%NaClの高濃度腐食環境において特に酸素雰囲気中ではさらに低い繰返し応力でも20 $\mu$ m程度のさらに小さい腐食ピットが発生し疲労破壊している。損傷事例でも同様に低い繰返し応力で疲労破壊し腐食ピットが発生している。腐食ピットそのものが応力集中源となる形状作用に加えて腐食環境が大きく関係していると考えられる。

テノンコーキングは塑性加工であるため、コーキング後に微小な加工しわが発生しており、このしわにより応力が集中し初期き裂として、き裂進展することも考えられるため、Fig.19に

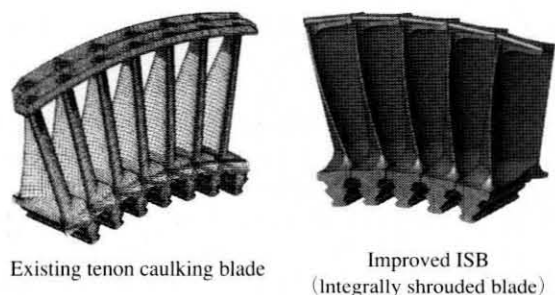


Fig.20 Improved ISB for corrosion fatigue strength

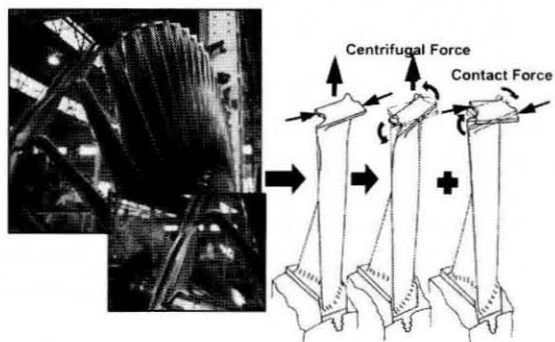


Fig.21 Mechanism of ISB twist back infinite coupled

示すように実際の加工しわと作用する振動応力から求めた応力拡大係数をき裂進展の限界値と比較し評価した。その結果、大きい励振力が作用するとして厳しい評価を行った場合、き裂進展する可能性があると考えられる。

## 8. 耐腐食性を向上した動翼形状改良

前述の検討結果から、外周側を連結板となるシュラウドを2個のテノンでコーキングして有限の枚数で綴り固定する動翼構造を高速高出力の機械駆動用蒸気タービンL-1段の濃縮域に適用することはエンドユーザの水質蒸気管理レベルのリスクを考慮すると改善を図る必要がある。

そこで、Fig.20に示すように動翼プロファイルと先端のシュラウドを一体化してテノン構造を無くし、Fig.21に示すTWIST BACK振りトルクによる全周綴りで動翼最低次モードを無くし固有振動数を高くしたISB (Integrally Shrouded

Blade)<sup>18)</sup>を開発した。同様な解析を行いテノン部に相当するシュラウド部の遠心応力と振動応力は著しく低減できたことを確認している。また、この改良動翼は損傷翼の対策として交換し順調に長期運転されている。

## 9. 結論

機械駆動用蒸気タービン低圧段の腐食疲労について損傷事例に対する解析と分析を行い濃縮域と強度余裕と損傷の相関及び要因について考察し、以下の結果を得た。

- (1) 損傷例では振動応力は許容値以下となっており設計・製作に問題はなく、長期運転後に損傷したことから水質・蒸気管理に関係した腐食環境に起因すると考えられる。
- (2) 腐食性物質の濃縮域にあるL-1段が最も高いピット発生比率と付着物濃度を示し厳しい腐食環境下にあった。通常の疲労と腐食疲労を区別する付着物Cl濃度の閾値は数1,000ppmレベルになると考えられる。
- (3) 実機運転中の各段動翼表面における腐食性物質の析出と付着、液体／固体の相及びその濃度は、蒸気中腐食性物質の濃度と蒸気タービン翼設計に関係する膨張過程での温度と圧力に関係し、蒸気中のClが1ppbから5ppbの非常に極低濃度の場合でも厳しい腐食環境が起り得る。
- (4) 100 $\mu$ m以下の腐食ピットに100MPa以下の低い繰返し応力が作用する場合き裂が進展する可能性があり、22% NaClの高濃度腐食環境において特に酸素雰囲気中ではさらに低い繰返し応力でも20 $\mu$ m程度の小さい腐食ピットが発生し疲労破壊している。
- (5) 損傷事例では低い繰返し応力で疲労破壊し腐食ピットが発生し、腐食ピットそのものが応力集中源となる形状作用に加えて



腐食環境が大きく関係している。

- (6) テノンや翼根などの隙間があり流れがよどむ部位では洗浄効果よりも腐食性物質の濃縮が主体的になり疲労限度の低下が顕著になると考えられる。一方、数ppbレベルの蒸気管理には限界があり、使用環境に対する強度余裕を向上させるには、発生応力の低減と流れのよどみがない動翼形状及び結合方法の改良が必要である。

- (7) これらの結果から、従来の有限枚数綴りの問題点が明らかにされ、耐腐食性を向上した全周綴り方式のISB改良動翼に改められた。

本研究の遂行にあたり三菱重工業(株)高砂研究所金子康智氏、小城育昌氏、森一石氏、広島研究所山田義和氏、及び広島製作所池野恭一氏、伊住修氏には解析・分析に関してご助力とご指導を頂いた。ここに記して謝意を表す。

#### <参考文献>

- (1) Saga.M, Hata. S. et al., Repair Technologies of Mechanical Drive Steam Turbines for Catastrophic Damage, Proceedings of the 34th Turbomachinery Symposium (2005), pp.15-23
- (2) The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power Systems p.12
- (3) Jonas Otakar, Understanding Steam Turbine Corrosion 84 (1984) pp.55-2 ~ 55-28
- (4) Ebara Ryuichiro, et al., Corrosion Fatigue Behavior of 13Cr Stainless Steel for Turbine Moving Blade, Mitsubishi Heavy Industry Technical Bulletin Vol.15 No.3 May 1978, pp.1-10
- (5) Naumann Hekmut G., Steam Turbine Blade Design Options: How to Specify or Upgrade, Proceedings of 11th Turbomachinery Symposium, pp.29-49
- (6) 木原・博著, フラクトグラフィ (倍風館)
- (7) Wagner L.F, Griffin J.H, Forced Harmonic Response of Grouped Blade Systems: Part I -Discrete Theory, Transaction of the ASME, Vol.118, January 1996, pp.130-136
- (8) Ebara Ryuichiro, et al., Corrosion Fatigue Strength of 13 Cr Stainless Steel for Steam Turbine Blades, Mitsubishi Heavy Industry Technical Bulletin Vol.19 No.5 September 1982, pp.537-543
- (9) 江原, 日本鉄鋼協会, 西山記念技術講座, 鉄鋼材料の環境割れ, 昭和57年10月
- (10) 阿部, ステンレスの基礎, キッチン・バス工業会会報 No.55, 平成11年4月
- (11) H.H.ユーリック著, 腐食反応とその制御 (第2版)
- (12) Ebara Ryuichiro, et al., Corrosion-Fatigue Behavior of 13Cr Stainless Steel in Sodium-Chloride Aqueous Solution and Steam Environment, American Society for Testing and Materials, Corrosion-Fatigue Technology, pp.155-168
- (13) Steltz W.G, et al. Verification of Concentrated Impurities in Low Pressure Steam Turbines, Transactions of the ASME, Vol.105, January 1983, pp.192-198
- (14) Bischoff James L, et al. Liquid-Vapor Relations for the System NaCl-H<sub>2</sub>O : Summary of the P-T-x Surface from 300°C to 500°C, American Journal of Science, Vol.289, 1989, pp.217-248
- (15) Allmon.W.E. et al., Deposition of Salts from Steam, International Water Conference (1983), pp.127-138
- (16) Maday M.F. et al., Stress Corrosion Cracking Behavior of Two Ni-Cr-Mo-V Steels in Caustic Solutions and Pure Oxygenated Water, Corrosion Vol.45, No.4, pp.273-281
- (17) Ebara Ryuichiro .et al., Corrosion Fatigue Process of 12 Cr-Stainless Steel, ISIJ Inter-national, Vol.30 (1990), No.7, pp.535-539
- (18) Katayama Kazuso, et al., High-Speed and Large Capacity Compressor-Driving Turbines for Chemical Plants, Mitsubishi Heavy Industry Technical Bulletin Vol.14 No.5 September 1977, pp.1-9