

レーザーピーニングによる低圧タービン動翼の疲労強度改善

Development of laser peening technology for low pressure turbine blades to improve fatigue properties

株式会社 東芝	千田 格	Itaru CHIDA	Non-Member
	佐野 雄二	Yuji SANO	Non-Member
	廣田 圭一	Keiichi HIROTA	Non-Member
	犬飼 隆夫	Takao INUKAI	Non-Member
	角谷 利恵	Rie SUMIYA	Non-Member
	佐々木 英寿	Hidekazu SASAKI	Non-Member
	村上 格	Itaru MURAKAMI	Non-Member
東芝プラントシステム	野村 光	Hiroshi NOMURA	Non-Member

Some damages were found at the forks of low pressure turbine blades caused by random vibration and steam-flashback vibration. In this study, for the aim of fatigue property improvement, laser peening technology for 12Cr stainless steel was developed and material properties were examined. Laser peening is a process to induce compressive residual stress to the material surface. Fatigue specimens which simulate the stress concentration zone of forks were fabricated and laser peening was applied to the surface of specimens. Residual stress was measured by X-ray diffraction and compressive residual stress was formed on the peened surface. As the results of fatigue test, fatigue strength of the laser peened specimens was improved about 40 percent compared to the unpeened specimens.

Keywords: Laser peening, Fatigue, Residual stress, Turbine blade, 12Cr stainless steel

1. はじめに

フォーク型植込み部を有する低圧タービン翼(図 1)は、低負荷時に発生するランダム振動と負荷急変時に給水加熱器からの逆流によるフラッシュバック振動の影響を受ける。特に、低圧タービン翼とロータを固定するフォーク部は振動応力により損傷が発生した事例も確認されている^[1]。材料の疲労強度を改善するための方法としてはショットピーニング処理があるが^[2]、ピン孔内面のような細管内面については施工が非常に困難であり、有効な対策がなかった。そこで、東芝では材料疲労強度を向上させる方法としてレーザーピーニング(Laser Peening、以下 LP)に着目し^[3]、低圧タービン翼フォーク部への施工技術を開発した^[4]。本研究では、LP 施工した 12Cr 鋼について残留応力測定や疲労試験といった材料評価結果について報告するとともに、低圧タービン翼への適用に向けて開発した実用化技術についても紹介する。

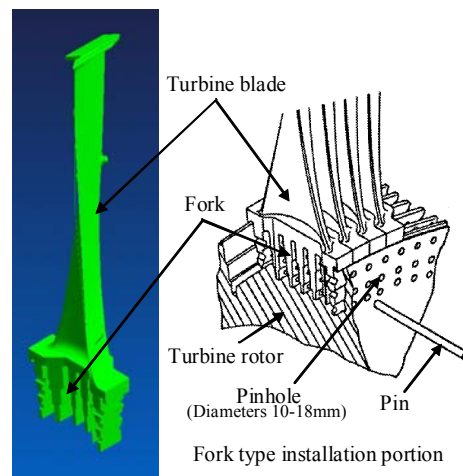


Fig.1 Schematic diagram of low pressure turbine blades

2. レーザーピーニングプロセス概要

LP のプロセス概念図を図 2 に示す。レーザーのパルス時間幅を数 ns まで短パルス化し、数 GW/cm² という高い出力で材料に照射すると、材料の表層がプラズマ化して表面に高圧の金属プラズマが発生する。水中では、水の慣性でプラズマの膨張が妨げられて狭い領域にレーザーのエ

エネルギーが集中するため、プラズマの圧力は空気中の 10～100 倍となり瞬間的に数 GPa に達する。この圧力により衝撃波が発生し、材料表面で衝撃波による動的な応力によって塑性変形が生じ、周囲の未変形部から拘束を受けることによって材料の表層に高い圧縮残留応力が形成される。LP の光源には、水に吸収されにくい Nd:YAG レーザの第 2 高調波(波長 532nm)のパルスレーザを用いることで、水中の構造物への適用も可能とした^[5]。

LP は、ショットピーニングやウォータージェットピーニング等の他のピーニング技術に比べ、高圧の気体や液体の噴流を伴わないために、装置先端の小型化が容易で光ファイバによるレーザ伝送と組み合わせることで狭隘部への施工性に優れている。また、レーザ光は時間的、空間的な制御性に優れるため、施工範囲すべての応力改善を確実に行うことが可能であり、施工対象部以外の周囲の構造物に対して影響を与えることがない。東芝では、原子炉内構造物の細管部に LP 施工した実績があり^[6]、低圧タービン翼フォークについても LP 施工が可能である。また、LP システムをコンテナ等に搭載して輸送することで、発電所など現地で施工を行うこともできる^[6]。

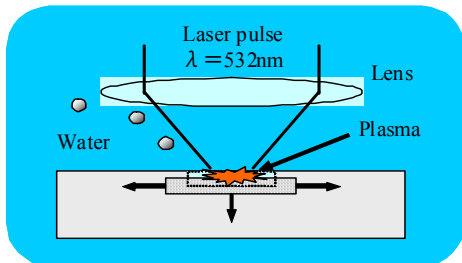


Fig.2 Schematic diagram of laser peening process

3. 供試材及び実験方法

3.1 供試材

供試材には 12Cr 系ステンレス鍛鋼を用いた。供試材の化学成分を表 1 に示す。疲労試験には図 2 に示す形状の試験片を用いた。タービン翼フォーク部のピン孔を模擬するため、平板試験片側面に半円状の半割れ孔を設けた。半割れ孔については、ドリルにより下穴をあけてからリマ加工により所定の大きさになるように加工した。

Table 1 Chemical composition of 12Cr stainless steel

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
0.14	0.20	0.40	0.02	0.002	0.60	11.9	0.10

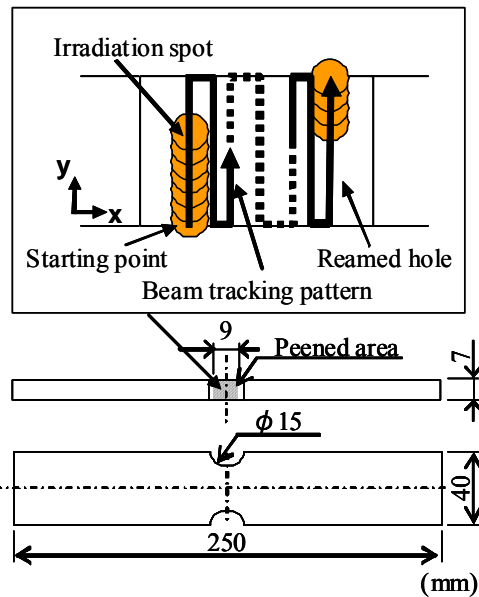


Fig.3 Shape and dimensions of fatigue specimens

3.2 実験方法

LP 施工条件を表 2 に示す。パルスエネルギーとスポット径は固定条件とし、単位面積あたりの照射密度を変えて施工した。施工部位は、図 3 に示すように疲労試験片側面に設けた半割れ孔表面中央部である。

LP 施工後の試験片について、組織観察、硬さ測定、X 線回折装置による残留応力測定、および疲労試験を実施した。疲労試験は、室温・空気雰囲気、平均応力 200MPa で応力振幅 σ_a を変えて実施した。

Table 2 Laser peening conditions

	LP1	LP2
Pulse Energy	70mJ	70mJ
Spot Size	φ 0.7mm	φ 0.7mm
Pulse Number Density	45 pulse/mm ²	27 pulse/mm ²

4. 実験結果

疲労試験片 LP 施工部の外観観察結果及び断面組織観察結果を図 4 に示す。未施工材と比較して、LP 施工による組織上の変化は特に認められなかった。

LP 施工した試験片の深さ方向の硬さ分布を図 5 に示す。施工条件 LP1 及び LP2 により LP 施工した試験片は未施工材と比較して硬化する傾向が認められた。

LP による残留応力への影響を調べるため、X 線回折装置を用いて測定を実施した結果を図 6 に示す。図 6

より、未施工材においては、測定方向によらず試験片表面において約400MPaの圧縮残留応力を形成しているものの、試験片内部では概ね0MPaであった。

一方、施工条件 LP1、LP2 ではともに残留応力の分布に差が見られ、疲労試験片の長手方向 σ_x の方が板厚方向 σ_y と比較して高い圧縮残留応力を形成しているが、いずれの施工条件においても概ね800 μm 深さまで圧縮残留応力が付与されていることが確認された。

未施工材及びLP施工材の疲労試験結果を図7に示す。未施工材の疲労強度が150MPaであるのに対し、LP1は210MPa、LP2は200MPaとLP施工により約1.4倍向上することが明らかとなった。これは、LP施工による表面圧縮残留応力付与と硬さの上昇により、未施工材と比較して表面き裂の発生と進展が抑制されたためと考えられる。疲労試験後の試験片破面観察結果を図8に示す。未施工材、LP施工材共にき裂の起点は試験片半割孔端部コーナー部であり、試験片内部からき裂の発生は認められなかった。

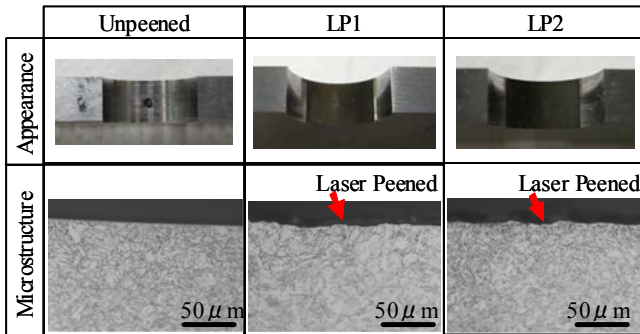


Fig.3 Appearance and microstructures of the specimens

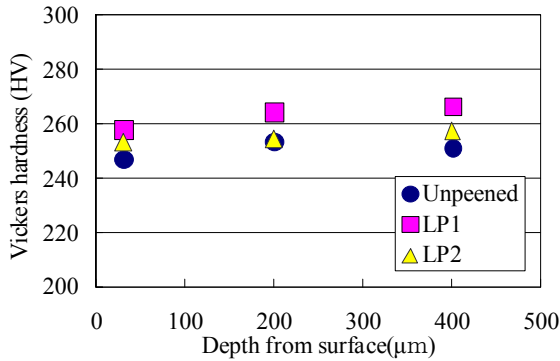
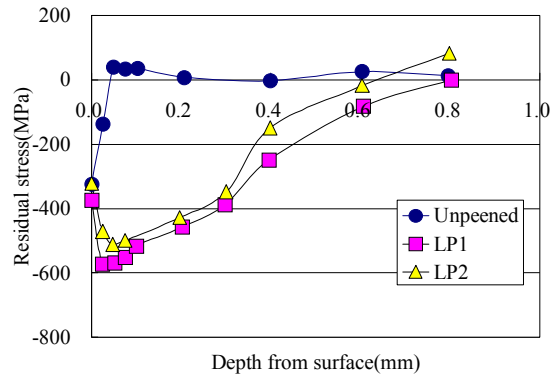
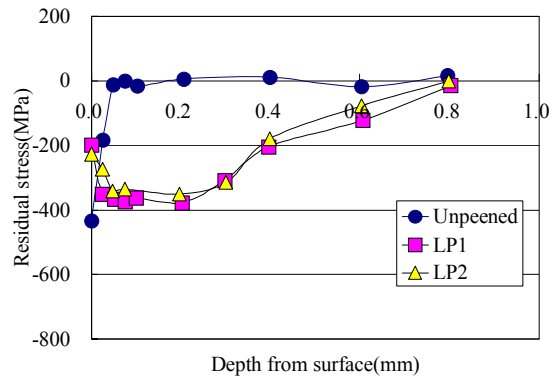


Fig.4 Measurement results of hardness distribution



(a) σ_x



(b) σ_y

Fig. 6 Residual stress distributions of the specimens

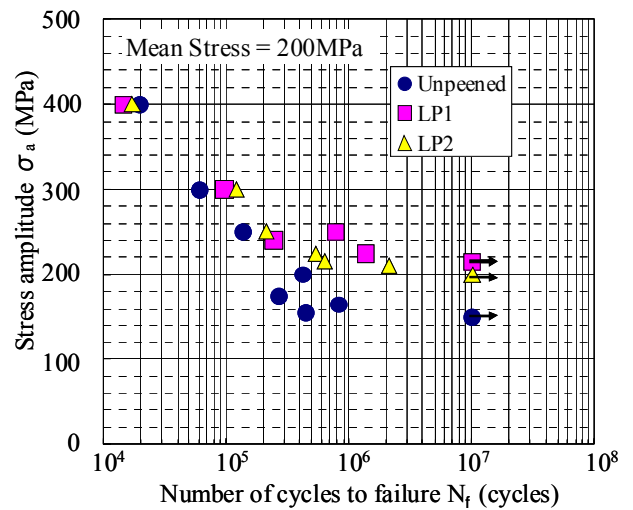


Fig.7 S-N curves for unpeened and peened specimens

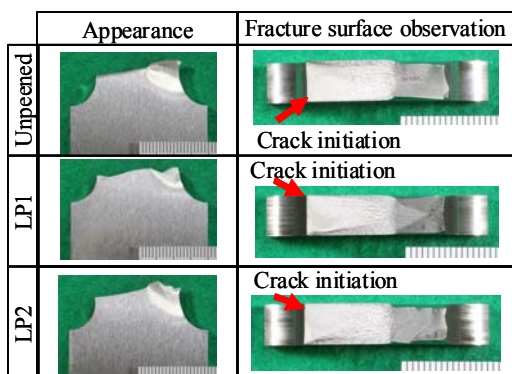


Fig.8 Appearance and fracture surface of the specimens

5. 低圧タービン翼への適用

前述の材料試験によりレーザピーニングの効果を確認し、低圧タービン翼向けの施工システムを開発した。システム概念図を図9に示す。2つの動翼を連結して水槽内の治具に固定し、図10に示すような小型のレーザ照射ヘッドをピン孔内に挿入してレーザピーニング施工を行う構成となっている。レーザ発振器から照射されたレーザ光は光ファイバにより伝送され、照射ヘッド内に設けられた非球面ミラーで反射してピン孔表面に照射される。図3に示した疲労試験片の場合と同じ方法でピン孔表面にレーザ光を照射することで、低圧タービン翼ピン孔表面のレーザピーニング施工を実施する。東芝では、すでに実機低圧タービン翼へ施工実績があり、ピン孔表面への施工を完了している。

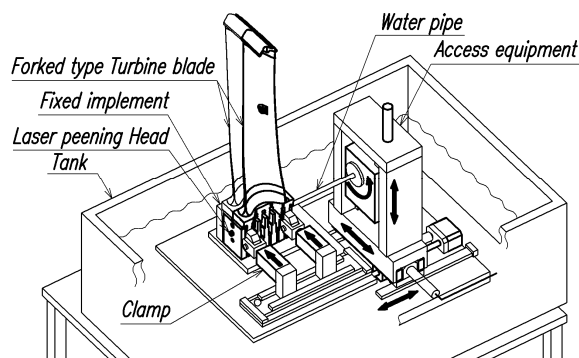


Fig.9 Schematic diagram of laser peening system for low pressure turbine blades

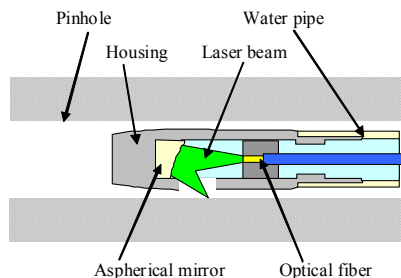


Fig.10 Schematic diagram of laser peening head

6. まとめ

低圧タービン翼ピン孔への適用を目的として、12Cr 鋼向けレーザピーニング技術を開発し、残留応力と疲労強度の改善効果を確認した。特に、疲労についてはピン孔を模擬した試験片を用いて強度が1.4倍向上することを確認した。東芝ではタービン機器の信頼性向上に向けて、今後もレーザピーニングを適用していく予定である。

参考文献

- [1] 河原他, “浜岡原子力発電所5号機低圧タービン損傷事象の長期対策”, 日本保全学会 第5回学術講演会, 2008, pp.441-442.
- [2] ショットピーニング技術協会編著, “金属疲労とショットピーニング”, 現代工学社, 2004
- [3] K. Masaki, et al., ”Influence of Laser Peening Treatment on High-Cycle Fatigue Properties of Degassing Processed AC4CH Aluminum Alloy”, Journal of the Society of Materials Science of Japan, Vol. 55, No.7, 2006, pp.706-711.
- [4] Y. Sano, et al., “Residual stress improvement mechanism on metal material by underwater laser irradiation”, Journal of the Atomic Energy Society of Japan, Vol.42, 2000, p.567.
- [5] Y. Sano, et al., ”Underwater laser shock processing to introduce residual compressive stress on metal”, Materials Science Research International, Special Technical Publication, 2, 2001, 453.
- [6] I. Chida, et al., ”Laser based maintenance technology for PWR power plants”, Proc. 13th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE13), Beijing, China, 2005

(平成25年6月21日)