発電用蒸気タービン翼へのレーザー焼入れ

中島 悠也^a，千綿 司雄^a，川人 洋介^b

^a 富士電機(株) (〒191-8502 東京都日野市富士町1番地)

^b (国研)海洋研究開発機構 (〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-5)

Laser Hardening Technique on Steam Turbine Blades for Power Generation

Yuya NAKASHIMA^a, Morio CHIWATA^a and Yosuke KAWAHITO^b

^a Fuji Electric Co., Ltd. (Fuji-machi 1, Hino-shi, Tokyo 191-8502)

^b Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (Natsushima-machi 2-5, Yokosuka-shi, Kanagawa 237-0061)

Keywords : Steam Turbine Blades, Laser Hardening, Temperature Control, Deep Hardened Layer

1. はじめに

世界の電力需要は増加の一途を辿っており、2015年から2040年にかけて、約1.5倍に増加すると予測されている¹⁾。発電方式は燃料消費を伴う火力、原子力発電などの枯渇性エネルギーや水力、太陽光、風力、バイオマス、地熱発電等の再生可能エネルギーに分類できる。これらの発電方式に対して、蒸気タービンは火力、原子力、バイオマス、地熱発電などの幅広い発電システムにおいて採用されている設備である。実際に蒸気タービンを用いる発電方式が発電量の大半を占めており、2018年の国内の発電電力量実績では、国内の発電電力量10,512億kWhの内、約85%が火力、原子力、バイオマス、地熱発電により発電されている²⁾。火力発電においては、燃料の燃焼ガスで駆動するガスタービンによる発電量も

含まれるため、すべてが蒸気タービンによる発電量ではないものの、蒸気タービンは重要な役割を担っているといえる。加えて、蒸気タービンは20年以上の長期間に渡って運転される設備であり、長寿命化が求められる。

本稿では、蒸気タービンの駆動媒体である蒸気中に存在する水分との衝突によるタービン翼の損傷、タービン翼の長寿命化に向けた損傷対策技術として用いられているレーザー焼入れ技術について述べる。

2. 蒸気タービンの役割と摩耗損傷

2.1 蒸気タービンの役割と構造

図1に蒸気タービンの説明の一例として石炭火力発電システムの概念図を示す³⁾。石炭やLNGを燃料とする火力発電システムではボイラもしくは排熱回収ボイラ(HRSG: Heat

図1 火力発電の概念図

Recovery Steam Generator)にて高温高压の蒸気を生成する。この蒸気を蒸気タービンに通気させることで、蒸気の有する熱エネルギーが回転エネルギーに変換され、蒸気タービンに直結された発電機により発電が行われる。なお、蒸気タービンを用いた発電方式は、蒸気を作り出す熱源の種類により分類され、化石燃料の場合は火力発電、核物質の場合は原子力発電、地熱蒸気の場合は地熱発電となる。よって、熱源の種類により蒸気温度圧力が変化し、蒸気タービンのサイズや台数の大小は生じるものの、いずれの発電方式においても基本構造は類似した蒸気タービンが用いられる。

図2に蒸気タービンの全景を示す。蒸気タービンは蒸気を翼で受け止めることで蒸気の熱エネルギーを回転力に変換する機器である。蒸気タービンはローターと呼ばれる軸に対して、タービンブレードと呼ばれる翼を多段に有する構造をしており、多いものでは30段以上の翼を有するものもある⁴⁾。ボイラ等で生成した高温高压の蒸気は翼長の短い翼から長い翼に向かって軸に平行に流れる過程で温度圧力の降下と体積膨張を伴いつつ運動エネルギーに変換される。蒸気の流入する順に高压部、中圧部、低压部と区分されている。次に蒸気タービンの低压部の翼(以下、低压翼と呼称)において発生する侵食損傷について述べる。

2.2 蒸気タービンにおける摩耗損傷

蒸気タービンの低压部では蒸気の温度・圧力の低下により、蒸気の一部が凝縮し蒸気中に水滴が発生する。この水滴との衝突により、蒸気タービン翼が損傷する。近年、蒸気タービンの高効率化、大容量化のために低压翼は大型化が進んでいる。周速は半径に比例するため、低压翼先端部の周速は700 m/sに達する場合もあり⁵⁾、蒸気中で凝縮した水滴と低压翼が高速の相対速度で衝突することでドレンアタック・エロージョン(以下、エロージョンと呼称)と呼ばれる侵食が発生する

図3にエロージョン例を示す。本例は運転開始から10年前後経過した蒸気タービン翼である。蒸気中の水滴との衝突によりタービン翼の先端が激しく侵食されており、また、断面写真から翼形状が損なわれている様子がわかる。摩耗の形態としては剣山のような多数の突起状に侵食が進行する。エロージョンにより、翼形状が崩れることで発電効率の低下が生じ、また、侵食形状が鋭い切り欠き状に進展することにより応力集中部となり翼の折損のリスクが増加する。よって、

図2 蒸気タービン全景

エロージョン対策は蒸気タービンの長期信頼性の確保、発電効率の維持のためにも必須となる。

3. エロージョン対策技術

3.1 ステライト貼付け

エロージョン対策としては、蒸気タービン内に発生する水滴の除去など構造的な工夫が行われる一方で、材料側の対策として水滴衝突の激しい部位に対して硬質の材料を被覆することでエロージョンを抑制する対策が行われている。硬質材料被覆によるエロージョン対策として一般的に行われる手法はステライト貼付けである⁵⁾。ステライト貼付けは、高硬度かつ高耐食なコバルト系合金であるステライトの板材を翼の曲面形状に沿って曲げ加工し、銀ろう等により翼に対して接合貼付けするものである。ステライト貼付けは、エロージョンによる摩耗の抑制効果が得られる反面、高価な材料であること、剥離のリスクがあること、翼の曲面形状に沿った加工が難しく貼付け可能な厚みに制限があることなどの問題がある。

3.2 火炎焼入れ

ステライト貼付けよりも安価にエロージョン侵食部を硬化させる技術として火炎焼入れなどが用いられている。火炎焼入れでは、水滴の衝突部位に対してバーナーを用いて局部加熱し、水浴により急冷することで、加熱部位が硬化される。本手法では、翼の加熱・冷却のみで硬化層が得られるため、比較的安価な施工法である。一方で、施工時の周囲環境やバーナーの形状等により加熱温度や加熱部の均一性に影響を受けやすく、安定した品質の焼入れ施工には熟練技能を要するため人の技能への依存度が高いプロセスである。

4. レーザ焼入れ

4.1 焼入れとは

焼入れは、炭素鋼、低合金鋼、マルテンサイト系ステンレス鋼などマルテンサイトと呼ばれる高硬度な金属組織を形成できる材料に対して、高温加熱、急速冷却を行うことにより、マルテンサイト組織を形成し硬化を行う施工法である。図4に焼入れにおける金属組織変化の概念図を示す。上述の材料は、常温では体心立方格子からなるフェライト組織であるが、

図3 ドレンアタック・エロージョンにより侵食されたタービン翼外観および翼断面

炭素鋼や低合金鋼ではおよそ 800℃ 程度以上に加熱することで面心立方格子からなるオーステナイト組織に変態し始め、900℃ 程度で完全にオーステナイト組織に変態が完了する材料種が多い。このときに体心立方格子よりも面心立方格子のほうが原子間距離が拡張されるため、材料中に含まれる炭素原子が鉄の原子間に侵入する。炭素の侵入したオーステナイト組織を冷却するとフェライトに組織が戻るが、この時に急速冷却することで面心立方格子中の炭素が排出されないまま体心立方格子に変態する。この結果、原子間距離の短い体心立方格子中に炭素が侵入したままとり、歪んだ体心立方格子が得られる。この歪んだ体心立方格子がマルテンサイトと呼ばれる焼入れ組織である⁶⁾。結晶格子が歪んでおり、変形が起こりにくく高硬度な金属組織となる。以上から、焼入れ組織を得るためには、オーステナイト組織への変態が可能な温度への加熱、炭素の拡散を防ぐための急速冷却が必要となる。金属材料は過度の高温加熱によって組織の粗大化や鋭敏化と呼ばれる劣化現象が生じる場合があり、強度や耐食性の低下を生じる。焼入れにおいては、オーステナイトへの変態が完了し、かつ、金属組織の粗大化等の劣化抑制を目的として高温に加熱しすぎないようにするために、オーステナイト化が完了する温度から +50℃ 程度で加熱が行われる。そこで、タービン翼(材質: SUS420J1)の火炎焼入れでは 950~1000℃ の温度帯を狙って加熱を行っている。

なお、本稿のように部品の一部を焼入れする場合、部分加熱が可能な熱源としてバーナー、誘導加熱、レーザ等を用いる。以上から、焼入れプロセスにおいては、高温加熱できる熱源と急冷のための冷却手法の選定が重要となる。

4. 2 レーザ焼入れの特徴

レーザ焼入れは被焼入れ材の加熱手段としてレーザを用いたものである。図 5 にレーザ焼入れの構成を示す。炭素鋼、低合金鋼、マルテンサイト系ステンレス等の焼入れ性が良好な材料に対して、レーザを照射することで被焼入れ材の表層が局所加熱される。次にレーザ照射部を走査することで、必要な範囲のみを加熱することができ、部分的な焼入れが行われる。レーザ焼入れではレーザ照射部のみへの局所加熱が行われることで、他の加熱方法と比較して被焼入れ材への総入熱量が小さい。この結果、他の加熱方法においては急冷のために冷却水や冷却油などの被焼入れ材の急冷のために液体を要するが、レーザ焼入れではこれらの冷却剤が不要であり、自然空冷で焼入れ組織が得られる利点がある。図 6 にタービン翼に対して火炎焼入れとレーザ焼入れを行った場合の温度履歴を示す。温度測定においては、火炎焼入れでは熱電対がバーナー加熱により溶け落ちるため放射温度計を使用し、レーザ焼入れでは、放射温度計がレーザ光の干渉を受けるため熱電対を使用した。焼入れ対象はタービン翼であり、火炎焼入れでは水浴槽を設けて急冷を行っている。一方、レーザ焼入れでは水浴槽は設けず、自然空冷で冷却を行った。レーザ焼入れでは、レーザ照射面の裏側にて温度測定を行っているため、レーザ照射面はより高温に加熱されており、1200℃ に加熱されていることを 4. 4 項にて後述する表面温度計測手法にて確認している。タービン翼の材質であるマルテンサイト系ステンレスの SUS420J1 (13%Cr 鋼) においては、焼入れ層の軟化抑制のため 600~800℃ 前後の温度帯を素早く冷却する必要がある。レーザ焼入れでは、1000~600℃ まで、

図 4 焼入れによる硬化現象の概念図

図 5 レーザ焼入れにおけるレーザ照射方法および温度分布の概念図

図 6 レーザ焼入れと火炎焼入れにおける温度履歴の比較

水冷設備がなくとも冷却速度はほぼ同等である。このことから、レーザ焼入れにおいては冷却設備を設けなくとも十分な冷却速度が得られることがわかる。

この他のレーザ焼入れの利点としては、被焼入れ材の有する様々な形状に対して汎用性が高いことも挙げられる。レーザは複数のレンズを組み合わせた光学系により、レーザの照射範囲や形状を自由に設定できること⁷⁾、レーザ照射部のみに入熱が行われることから、微小部位や複雑形状の加熱に向いている。一方、バーナーによる加熱では、必要部位の周囲の加熱が避けられず、レーザのような局所加熱が難しい。また、誘導加熱では加熱対象に合わせた加熱コイルを加熱対象毎に製作する必要があるため、高コストとなりやすい。

4.3 レーザ焼入れにおける高深度化

4.2 項にて述べた通り、レーザ焼入れでは、被焼入れ材の最表層が選択的に加熱されるため、高深度の焼入れ層を得ることが不得手であり、焼入れによる硬化深さは1 mm 前後となることが多い⁷⁾。しかしながら、2.2 項で述べた通り、エロージョンはタービン翼を経年的に侵食させることから、翼表面からできるだけ深い範囲において硬化層が得られるような高深度の焼入れ手法が求められる。なお、タービン翼のエロージョン部の肉厚は10 mm 程度となることがあるため、10 mm 前後の焼入れ硬化層が得られることが望ましい。焼入れによる硬化層深さを増加させる手段としては、レーザの出力を増加し、加熱領域を広げる手法があるが、出力を向上しすぎると、被焼入れ材表面の温度が融点を超えてしまい、表面溶融が生じる。また、表面溶融しない加熱温度帯であっても、4.1 項に述べた通り、金属組織の劣化のリスクがあるため、加熱温度は低い方が望ましい。本稿では、表面温度の上昇を抑え、入熱量を向上する方法として、レーザ照射範囲の拡大を検討した。図7 にレーザ照射面積とレーザ加熱における非焼入れ材内部の深さ方向の温度勾配の関係を示す。10 mm 厚の SUS420J1 材に対して4.4 項で述べる手法にて表面温度が1200℃となるようにレーザの出力を制御し、裏面に設置した熱電対にて裏面の温度を測定した。レーザは波長940 nm、980 nm の半導体レーザ、ビームサイズ40×10、20、40 mm のものを用いた。表面と裏面の温度差と素材の厚さから素材内部の深さ方向の平均温度勾配を算出した。

図7 レーザ照射面積と深さ方向温度勾配の関係

レーザ照射面積の増加に伴い、深さ方向の温度勾配が減少した。よって、レーザ照射面積の拡大により、表面溶融を抑制しつつ、より深くまで加熱領域を広げることが可能であることが示唆された。図8 にレーザ照射面積の差異による焼入れ層の断面硬度分布の比較を示す。レーザ照射面積が大きい場合(ビームサイズ40×40 mm)は図7 と同様の半導体レーザ、出力とした。レーザ照射面積の小さい場合(ビームサイズ12×2.5 mm)の焼入れにおいては、レーザは波長808 nm の半導体レーザを用い、表面溶融が生じないレーザ出力として500 W でレーザ照射した。レーザ照射面積の拡大により10 mm 程度の深さまで焼入れ層が得られ、レーザ焼入れにおいても高深度な焼入れ層が得られることを確認した。図9 にレーザビームサイズ40×40 mm にてタービン翼にレーザ焼入れを行った例を示す。タービン翼の肉厚全体に渡って焼入れ硬化層が得られており、エロージョンの抑制に優れたタービン翼が得られることを確認した。

4.4 品質安定化のための焼入れ施工プロセス

レーザ焼入れでは、適切なレーザ照射条件を与えなければ、過入熱や入熱不足により表面溶融や硬化層深さの不足が生じる。しかしながら、タービン翼は、複雑な曲面形状を有して

図8 各レーザビームサイズにおける深さ方向硬度分布

図9 大面積レーザ照射による焼入れ層の硬度マッピング

おり、焼入れの始点と終点では翼の断面形状や肉厚が全く異なる。よって、焼入れ施工中に翼の形状や肉厚に応じてレーザ照射条件を変えながら焼入れを行うことが必須である。そこで、レーザ照射範囲の温度測定を行いレーザ照射範囲の温度が一定になるようにリアルタイム温度フィードバックを採用している。図10に装置構成の模式図を示す。レーザ照射による加熱部から放出される輻射光をサーモビューワで検知しレーザ出力にフィードバックをかけることで、レーザ照射部の温度が一定になるように制御される。図11に温度制御例を示す。レーザ出力を変動させながらレーザ照射を行うことでレーザ照射範囲における加熱温度は一定に保たれており、焼入れ範囲全体に渡って安定した焼入れが施工できていることがわかる。

4. 5 レーザ焼入れプロセスの高効率化

これまでにレーザ焼入れにおける高深度化や品質安定化について述べたが、更なる焼入れプロセスの改善のため、被焼入れ材へのレーザ光の吸収率向上による高効率化も検討している。図12に各金属材料に対するレーザ吸収率の波長依存性を示す⁸⁾。焼入れをはじめとして、切断や溶接など高出力を要するプロセスに利用されるレーザは、高出力で光ファイバーによる伝送が可能で取り回しが容易な半導体レーザ(波

長0.8~1.1 μm)、ファイバレーザ(波長:1.07 μm)、ディスクレーザ(波長:1.03 μm)が中心となっている⁹⁾。これらのレーザの波長帯は1 μm 付近の近赤外波長領域を利用しているため、金属材料に対する吸収率が低い。一方、レーザ波長が短くなるほど金属に対するレーザ吸収率が向上する特性がある。よって、短波長のレーザを熱源として用いることでより高効率にレーザ焼入れ施工ができる可能性がある。図13に青色レーザを示す¹⁰⁾。レーザ光の光路に水槽を設け、水中にレーザを透過することでレーザ光を可視化しており、青色のレーザが発振・集光されている様子がわかる。1素子あたり4W、454nm(青色領域)のレーザ発振が可能な半導体素子64個を用いており、各素子から発振されるレーザ光を光学系で集光させた構成の青色レーザを開発した。本レーザを用いた焼入れ性の検討を行っている。

5. おわりに

レーザ焼入れをはじめとして、溶接・接合などのレーザプロセスの実用化が進展している。青色レーザ等の新たなレーザの開発により、これまでレーザが不得意としていた銅などのレーザ吸収率の低い材料へのレーザプロセスの可能性もあり、より広範囲の材質やプロセスへのレーザの活用が期待される。

(Received August 21, 2020)

図10 レーザ焼入れ設備構成

図11 温度フィードバック焼入れ施工プロセス

図12 各金属材料に対するレーザ吸収率の波長依存性

図13 256 W 青色レーザによるレーザ発振の様子

文 献

- 1) IEA ; World Energy Outlook 2019, (2019), <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019#electricity>
- 2) 経済産業 ; 2018年度エネルギー需給実績(確報), 参考資料4 (2020), <https://www.meti.go.jp/press/2020/04/20200414002/20200414002-1.pdf>.
- 3) 北陸電力(株) ; 火力発電について(2020), http://www.rikuden.co.jp/about_energy/karyoku.html.
- 4) ターボ機械協会 ; 蒸気タービン新改訂版, p.2 (日本工業出版, 2016).
- 5) ターボ機械協会 ; 蒸気タービン新改訂版, p.164 (日本工業出版, 2016).
- 6) 荒木 透, 金子秀夫, 三本木貢治, 橋口隆吉, 盛 利貞(編); 鋼の熱処理技術, p.32 (朝倉書店, 1974).
- 7) 江嶋 亮 ; 溶接学会誌, **89**, (1), 70 (2020).
- 8) 宮崎俊行, 宮沢 肇, 村川正夫, 吉岡俊朗 ; レーザ加工技術, p.18 (産業図書, 1991).
- 9) 片山聖二 ; 溶接学会誌, **89**, (1), 5 (2020).
- 10) H. Wang, Y. Kawahito, Y. Nakashima ; *Optics Letters*, **42**, (12), 2251 (2017).

~~~~~