

カムシャフト摩耗対策としてのレーザ焼入れ工法の検証

Verification of Laser Hardening Process as a Countermeasure for Camshaft Wear

山本 周平*

Shuhei Yamamoto

要 旨

カムシャフトのカップリング部にある溝内面の表面硬度を高めるためには、既存の生産ラインへの工程追加の必要が生じた。これを受けて、狭小部への低ひずみな熱処理が可能なレーザ焼入れ工法の導入に取り組んだ。本稿では、その取り組みの中で明らかになった技術課題と、それらに対する解決手法を検証した結果について報告する。

Abstract

To enhance the surface hardness of the inner surface of the groove in the camshaft coupling section, it became necessary to add a new process to the existing production line. Therefore, we introduced a laser hardening method capable of low-distortion heat treatment in narrow areas. This paper reports on the technical challenges identified during this initiative and the results of the verification of the solutions developed to address them.

1 はじめに

4JZ1エンジンの始動性向上のため、カムシャフトとこれに組み付く部品との間における摩耗を低減する必要が生じた。そこで嵌合(かんごう)部のクリアランスを小さくして駆動時の衝撃荷重を抑える対策を講じた。更に品質ポテンシャル改善として、熱処理によるカムシャフト側の表面硬度向上が要求された。

対策が必要となるのは幅約6mmの溝内面の表面硬度であり、このような狭小部への熱処理は、いすゞとしての経験が少ない。また、金属ワークへの熱処理は金属組織の変態などにより必ずひずみを引き起こすため、その修正には仕上工程を伴うことが多い。しかし、熱処理設備導入に当たり、レイアウト上の制約から仕上工程レスが求められ、低ひずみな熱処理工法を選択する必要があった。そこで、十分なノウハウがない中、レーザ焼入れ工法の量産ラインへの導入を試みた。

本稿では、レーザ焼入れ工法を導入するにあたっての技術課題と、それらに対する解決手法の検証結果について報告する。

2 対象部品及び工程導入ライン

焼入れ対象部位は、4JZ1エンジンの排気側カムシャフトにあるカップリング溝である。図1に溝部周辺の3Dモデルを示す。この溝は、図2のように凸形状を有するV/Pump(バキュームポンプ)カップリングと嵌合し、オルダムカップリング構造を形成して、カムシャフトからV/Pumpへ動力を伝達するために設けられている。

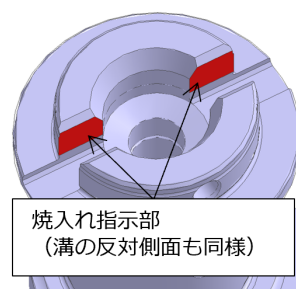


図1 カップリング溝部周辺

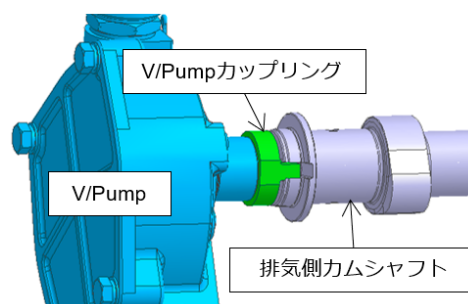


図2 カムシャフトとV/Pumpカップリングの組付図

始動不良が見られたエンジンを調査した結果、カップリング溝が過大に摩耗していた。そのため、耐摩耗性向上を目的に、溝の内面に表面硬度446Hv以上かつ焼入れ深さ0.3mm以上の熱処理を施すことが必要であった。

*PT 技術部

カムシャフトの生産ラインのレイアウトを図3に示す。当該ラインでは鍛造粗材から機械加工等によりカムシャフト単品を製作している。荒加工工程で粗材を切削加工し、熱処理工程でカム部へ高周波焼入れしたあと、仕上・完成工程で研削による仕上、ピン等の圧入、完成検査を行う。



図3 4JZ1カムシャフト機械加工ラインレイアウト図

このラインは、ワーク搬送がガントリローダにより自動化されており、機械加工作業も全自動である。そのため、生産性の観点から、新規焼入れ工程の導入にあたっては既存のガントリローダの範囲内へ組み込み、工程が全自動で完結する必要がある。この要件により、現状の熱処理工程エリアの中へ焼入れ機単体を据え付けるスペースしか確保できない。よって、熱処理によるワークのひずみを修正する仕上工程を追加せずに、最終品質を確保できる焼入れ工法が求められた。

2.1 焼入れ工法の比較

これまで、インラインの焼入れ設備としては、高周波焼入れの実績がほとんどである。過去の知見から、カップリング溝に対しての高周波焼入れはひずみが大きく、仕上工程が不可欠であると予想された。そこで、低ひずみな焼入れを特徴とするレーザ焼入れ工法の導入を検討した。

表1に高周波焼入れとレーザ焼入れそれぞれの特徴を示す。レーザ焼入れではレーザ光が照射されたワーク表面のみが急速に加熱されたあと、ワーク内部への熱伝導で急冷される。これにより、表面の金属組織が硬度の高いマルテンサイトへ変態し、焼入れが行われる。よって、必要な入熱量が少なく済み、その結果ワークのひずみが小さい。その反面、焼入れ深さは1mm程度が限界であり、それ以上を狙うと表面が溶融する恐れがあるため、更に深さが求められる場合には適さない⁽¹⁾。

表1 高周波焼入れとレーザ焼入れの比較

	高周波焼入	レーザ焼入
入熱範囲	狙い部位とその周辺一帯	狙い部位とその近傍のみ
焼入歪み	大きい ※レーザと比べて	小さい
焼入深さ	10 mm程度まで	1 mm程度まで
複雑形状への適用	形状に合わせたコイルが必要	レーザ光が入射できれば可能

レーザ光が入射できれば焼入れが可能のため、複雑形状への適用についても優位性がある。今回は、カップリング溝内面という狭小部への低ひずみな焼入れという要件から、レーザ焼入れが適していると判断し、採用した。

3 技術的課題及び解決手法

レーザ焼入れ工程の量産立ち上げに当たり、事前にテストピースによる試作を行った結果、次の3点が技術的課題であることが分かった。

①熱処理ひずみに伴う溝幅の寸法不良

②溝周縁エッジ部の局所的な膨張

③製作公差によるレーザ照射位置の変動

次節から、それぞれの具体的な事象、解決手法の仮説とその検証結果及び考察について述べる。

3.1 熱処理ひずみに伴う溝幅の寸法不良

3.1.1 事象の把握

カップリング溝の寸法規格は $5.83 \pm 0.08 \text{ mm}$ と高い寸法精度が要求されている。2.1章で述べたとおり、レーザ焼入れはワークのひずみを小さく抑えられるが、完全にゼロではない。溝部の仕上工程を追加できないという制約もあり、ワークのひずみ量を事前に把握する必要があると考え、設備導入前に事前調査を行った。

テストピースとして、カムシャフトを試作メーカーに提供し、同社が所有する試験機を用いて、表2に示すレーザ条件で焼入れ試作を行った。試作の様子を図4に示す。レーザ光を溝内面に入射させるため、テストピースに対してレーザを斜め方向から照射した。

表2 試作時のレーザ条件

レーザ種	半導体レーザ
レーザ出力	900 W
レーザ移動速度	400 mm/min
レーザ照射角度	25°
レーザスポットサイズ	4 mm×4 mm

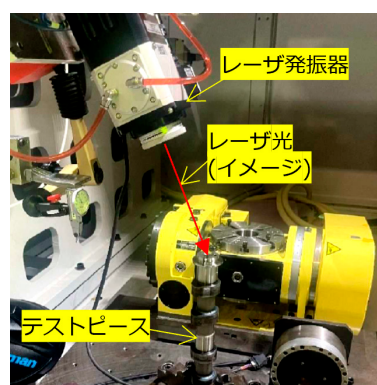


図4 試作時の試験機内

次に、焼入れ前後のカップリング溝幅を図5に示す「溝開き側」「溝止まり側」の2地点で測定した。測定結果を図6に示す。焼入れ後、溝幅が全体的に縮小する方向に変形しており、溝幅が規格下限値より小さくなる場合も確認できた。開き側は止まり側よりも大きく変形しており、溝形状としては、止まり側から開き側に向かって幅が狭くなっていくテーパ状であった。

一方で、焼入れ前後で溝幅のばらつきに顕著な差異は見られなかった。

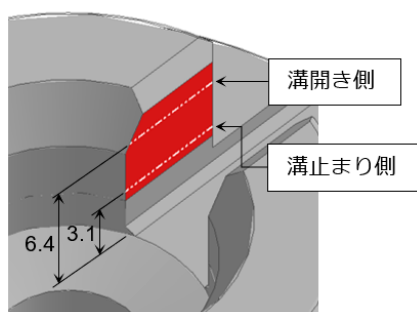


図5 溝幅測定地点(赤色部:焼入れ指示範囲)

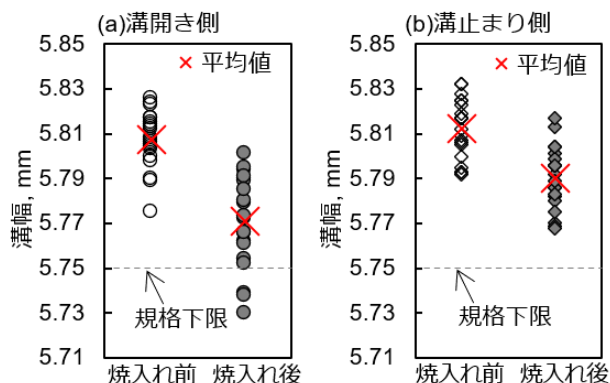


図6 溝幅測定結果(N=20)

(テストピース5本に対して各地点で4箇所ずつ測定)

3.1.2 問題解決の仮説

開き側の変形が大きいのは、止まり側と異なり、物理的拘束を受けていないためと考えられる。熱処理を施す以上この変形は避けられないが、焼入れ前後で溝幅のばらつきに顕著な差異はない。このことから、焼入れ前に、溝部を焼入れ後の変形とは逆向きのテーパ状にすることで、変形の影響を吸収し、溝幅寸法不良を防止できると考えた。

3.1.3 検証方法

仮説に基づき、焼入れ前のテストピースに対してカップリング溝を、開き側に向かって幅が広がるテーパ状に加工した。テーパの角度は 0.1° 、 0.2° 、 0.3° の3水準を準備した。それぞれのテストピースを試作メーカーの試験機を用いて表2のレーザ条件で焼入れした。その後、図7に示すPosition 1～4の地点において三次元測定で取得した溝内面の座標から溝幅を算出した。

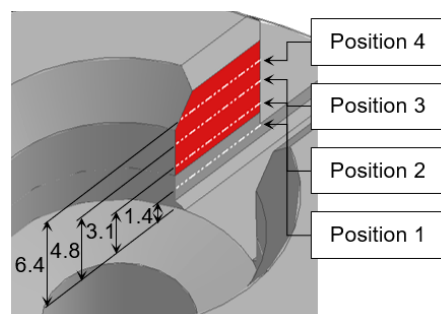


図7 溝幅測定地点(赤色部:焼入れ指示範囲)

3.1.4 検証結果

溝幅の測定結果を図8に示す。Position 1が止まり側、Position 4が開き側に相当する。テーパ角 0.1° では、焼入れ後も開き側に向かって溝幅が縮小する傾向が残った。一方、 0.3° では、事前のテーパ加工が焼入れ後も残り、開き側に向かって溝幅が拡大した。 0.2° では、焼入れ指示範囲外であるPosition 1～2にかけて事前のテーパ加工が残ったが、Position 2～4にかけてはテーパが緩やかになった。

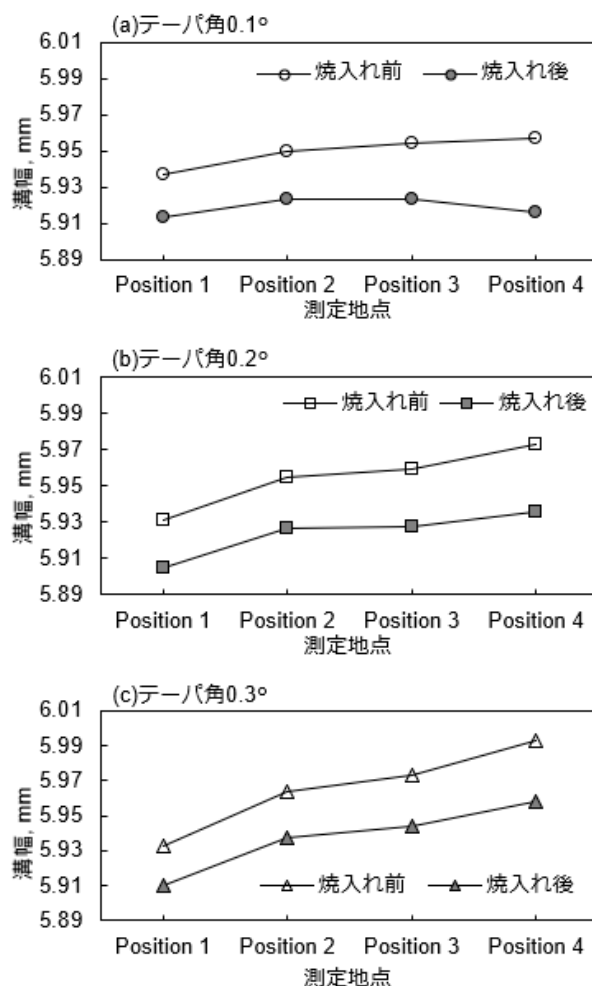


図8 テーパ加工した溝の焼入れ前後の幅測定結果

3.1.5 考察

テーパ角 0.1° では、焼入れ後の変形量の方が大きく、開き側で溝幅が縮小する傾向が残った。一方、 0.3° では変形量に対して角度が過大であり、焼入れ後にも事前のテーパ加工が残ったと考えられる。 0.2° では、テーパ角と変形量のバランスが比較的良好であり、焼入れ後の溝形状として、今回の水準の中では最も理想に近い。

よって、溝の変形に対する解決手法として、前工程で、あらかじめ溝形状に 0.2° のテーパ角を設ける工法が有効であるといえる。

3.2 溝周縁エッジ部の局所的な膨張

3.2.1 事象の把握

テストピースを試加工する中で、図9のA部及びB部のように溝周縁のエッジ部に、溶融したような膨張が確認される場合があった。コントレーサによる測定の結果、当該部は $30\sim 60\mu\text{m}$ の凸形状であることが判明した。この凸部の影響により溝幅寸法が規格を下回る可能性があるため、対策が必要となった。

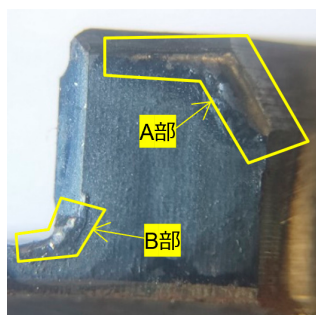


図9 エッジ部が膨張した様子

3.2.2 問題解決の仮設

エッジ部はレーザからの入熱に対して体積が小さいため、ほかのフラット部と比べて過熱しやすく、溶融によって膨張が生じたと推察される。そのため、エッジ部への入熱を抑制する手段として、「レーザ照射パスの変更」と「エッジ部周辺の焼入れ指示の除外」の2つのアプローチで、この問題の解決を図ることとした。

3.2.3 検証方法

検証には据え付け済みの量産設備を用いた。設備の構成を図10に示す。本機はマシニングセンタをベースに製作された5軸機であり、A軸を除く各軸はCNC制御(コンピュータ数値制御: Computerized Numerical Control)が可能である。

プログラムによりXZ座標を変更し、図11のようにレーザ照射パスを変更した。変更後のパスは、図9のA部の膨張への対策として、途中でZ方向にオフセットすることで、A部付近への入熱抑制を目的としている。レーザ条件は表2と同様である。

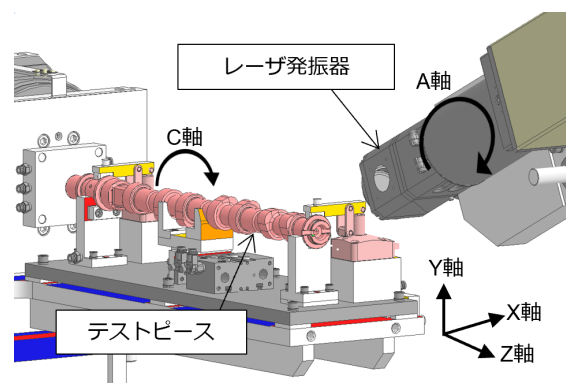


図10 量産設備の構成(3Dモデル)

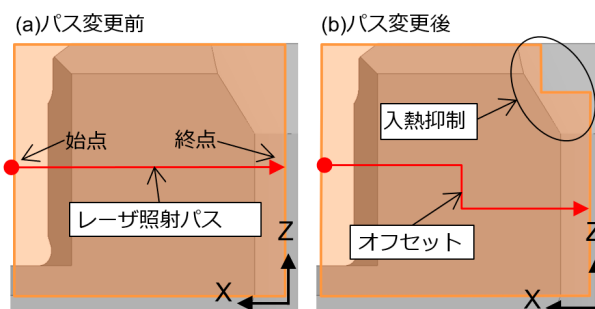


図11 照射パス変更前後
(橙色部:レーザが直接入射する範囲)

エッジ部への入熱を更に抑制する目的で、図12のように焼入れ指示範囲(焼入れ深さ 0.3mm 以上が必要な領域)を縮小し、エッジより 1mm の範囲から焼入れ指示を除外した。この変更に合わせて、照射パスの終点側を 0.1mm 短縮した。一方、本来の目的である溝内面の耐摩耗性改善を維持するため、エッジ周縁の面取りを縮小及び廃止し、焼入れ範囲の減少を最小限に抑えた。

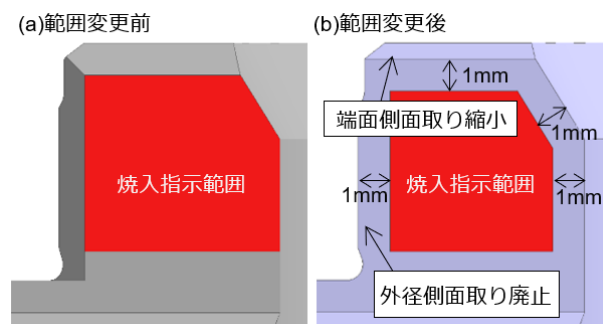


図12 焼入れ指示範囲変更前後
(赤色部:焼入れ指示範囲)

変更後の照射パスで、テストピースに対して焼入れしたあと、溝内面の状態を観察して、エッジ部の膨張が見られないかを確認した。また、図13に示す位置での切断面検査による焼入れ深さ測定で、要求品質を満たしているかを調査し、照射パスと指示範囲の変更による効果を確認した。

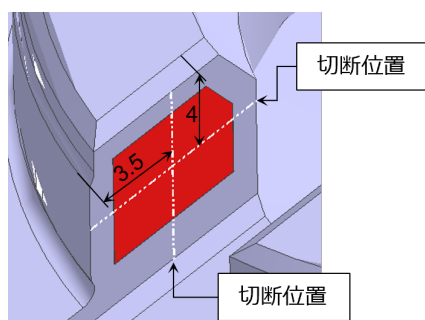


図13 焼入れ深さ測定での切断位置
(赤色部：焼入れ指示範囲)

3.2.4 検証結果

対策前後の溝内面の状態を図14に示す。対策後のエッジ部に膨張は確認されなかった。焼入れ深さの測定結果を図15に示す。写真は、焼入れ後のテストピースを所定の位置で切断し、断面をナイトール液でエッチング後、顕微鏡で観察したものである。焼入れされた部分のみが黒く変色している。焼入れ指示範囲の外縁において、要求品質である焼入れ深さ0.3mm以上が確保できた。

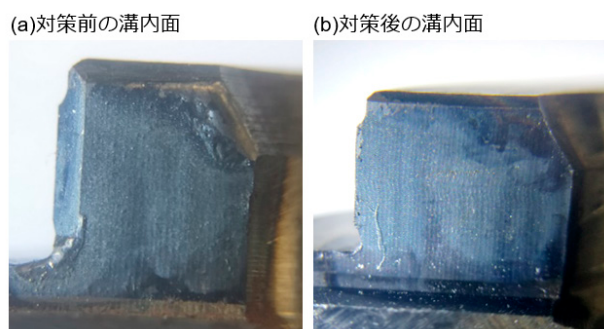


図14 対策前後の溝内面

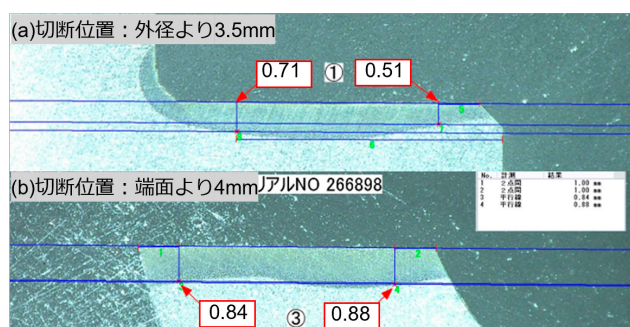


図15 焼入れ深さ測定結果
赤枠囲いの数値：焼入れ指示範囲周縁での
焼入れ深さ(mm)

3.2.5 考察

対策後のエッジ部に膨張が確認されなかったことから、照射パス及び焼入れ指示の変更で、エッジ部への入熱を抑制できたと判断できる。また、面取りの縮小

及び廃止がエッジ部周辺の体積を増加させ、エッジ部の過熱を抑制する副次的効果をもたらしたと考えられる。

3.3 製作公差によるレーザ照射位置の変動

3.3.1 事象の把握

レーザ焼入れは局所的な処理が可能である一方、レーザ照射位置がわずかでもずれると要求品質を満たせなくなる可能性がある。一例を図16に示す。

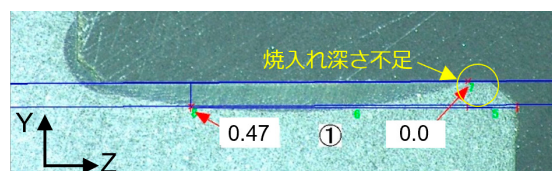


図16 狙いからZ軸方向に0.4mm外れた位置で
焼入れされたワークの焼入れ深さ結果

対象のワークは、機械加工時の製作公差を有している。この公差により溝位置とレーザ光の相対位置が変動するため、照射が意図した位置からずれてしまう場合がある。工程内でこの公差の影響を吸収する必要があるが、量産設備には機内測定機能が備わっていない。そのため、溝位置の変動を補正できず、ほかの手法による対応が必要となった。

3.3.2 問題解決の仮説

本機は照射座標をCNCにより高精度に制御可能であるため、想定される溝位置の最悪条件下でも要求品質を確保できれば、量産時に公差による問題が発生する可能性は低いと判断した。そこで、図面上で製作公差を積み上げ、溝位置の変動が最大となる最悪条件を算出し、その条件下で要求品質を満たすかどうかを検証した。

3.3.3 検証方法

図面上で検討した溝位置のXYZ軸方向の変動域を、表3に示す。各要因の公差を積み上げて、最悪条件を算出した。ここで、表3のXYZ座標のそれぞれが最大値となる場合を上限条件、最小値となる場合を下限条件と定義した。NCプログラムにより照射座標を変更し、これらの条件を再現した。

表3 溝位置変動域の検討結果

	X MAX / MIN	Y MAX / MIN	Z MAX / MIN
溝エッジ位置公差	+0.25 / -0.25	-	-
ジャーナル径公差	+0.05 / -0.05	+0.05 / -0.05	-
溝位置度	-	+0.05 / -0.05	-
ワーク長手位置	-	-	+0.2 / -0.2
計	+0.3 / -0.3	+0.1 / -0.1	+0.2 / -0.2

検証には、照射パス変更時と同様に据え付け済みの量産設備を使用した。レーザ条件も表2と同様である。各条件に基づきテストピースに焼入れを行い、切断面検査による焼入れ深さの測定により、要求品質を満たしているかを確認した。切断面検査における切断位置は図13と同様である。

3.3.4 検証結果

上限条件及び下限条件における焼入れ深さの測定結果を図17に示す。両条件とも、要求品質である焼入れ深さ0.3mm以上を満たしていることが確認された。また、いずれの条件でもエッジ部に膨張は認められなかった。

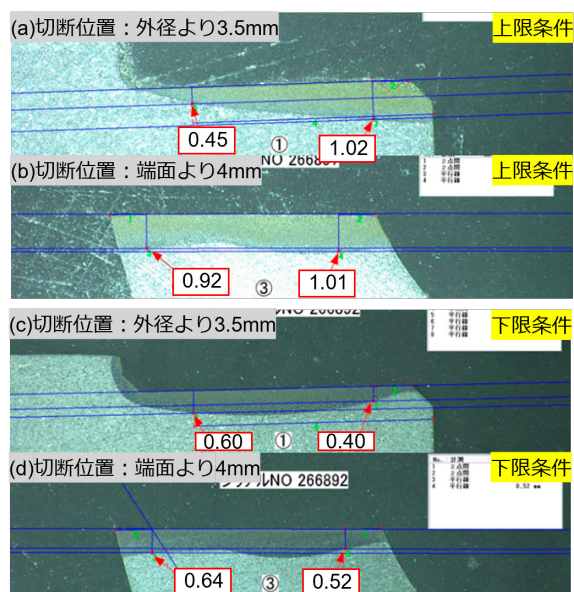


図17 焼入れ深さ測定結果 (a)(b)上限条件(c)(d)下限条件、赤枠囲いの数値：焼入れ指示範囲周縁での焼入れ深さ(mm)

3.3.5 考察

測定結果から、ワークの製作公差が最悪条件となった場合でも、要求品質を確保できると考えられる。また、焼入れ深さの検証結果には要求規格に対して十分なマージンがある。よって、公差による変動域内で照射座標を管理することで、量産時に不良品が発生する可能性は低くなると判断できる。ただし、ばらつきを判定するにはデータ数が不足しているため、量産開始後に継続して測定を行い、確認していく必要がある。

4 おわりに

本稿では、カムシャフトのカップリング溝部という狭小部への低ひずみな焼入れを目的として、レーザ焼入れ工法を既存の量産ラインへ導入する取り組みについて報告した。明らかとなった3つの技術課題について、それぞれ問題解決の仮説の立案及び検証を行った。

その結果、焼入れ後の寸法精度及び焼入れ深さの両面で、要求品質を満たす結果が得られた。

技術課題①『熱処理ひずみに伴う溝幅の寸法不良』

事前調査により、熱処理ひずみによって焼入れ後に溝がテーパ状に変形し、溝幅の規格を満たさない可能性があることが判明した。そこで、変形量を見越して、焼入れの前工程であらかじめ変形と逆向きのテーパ状に加工することで、影響を吸収できると考えた。

検証の結果、テーパ角が 0.2° のとき、焼入れ後の溝形状が良好であることを確認した。

技術課題②『溝周縁エッジ部の局所的な膨張』

試加工する中で、溝周縁のエッジ部が溶融したように膨張する場合があった。エッジ部への入熱が過大であるという仮説のもと、レーザ照射パス及び焼入れ指示範囲の変更により解決できると考えた。

検証の結果、ワーク形状変更による副次的効果もあり、エッジ部での膨張は確認されず焼入れ深さも要求品質を満たした。

技術課題③『製作公差によるレーザ照射位置の変動』

ワークが有する製作公差によりレーザ照射位置が変動することで要求品質を満たさない恐れがある。そこで、公差の積み上げから最悪条件を算出し、その条件下で焼入れしても品質が確保されるかを確認した。

検証の結果、最悪条件下でも規格に対して余裕をもって品質を満たすことを確認した。よって、公差による変動域内で照射位置を管理することで、量産時に問題が起こる可能性を低減できると判断した。

今回検証したのは、試作段階で明らかになった課題に対してである。量産開始後もレーザ焼入れ工法の課題を把握できるよう、この工程を継続して観察し、改善に努めていく。

今回の検証に当たり数多くの試作を行っており、関係者の方々にはテストピースの準備や測定をはじめ、さまざまな場面で多大なご協力をいただきました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- (1) 長野幸隆：レーザーによる表面熱処理，レーザー研究，第8巻，第4号(1980)，p612-618