

レーザ照射加工したチタンの摩耗特性と疲労特性 ならびに熱歪み特性に及ぼす 照射エネルギー密度の影響

大 島 聡 範*・林 忠 夫**

Effects of Laser Energy Density in Laser Radiation Processing on Wear Resistance, Fatigue Strength and Thermal Distortion of Titanium Plate.

Toshinori OSHIMA, and Tadao HAYASHI

Abstract

Titanium is well known as an excellent material for structural components because of small density, good mechanical properties and in particular, outstanding corrosion resistance. A weak point of titanium is that it exhibits comparatively small wear resistance when used for machine elements. In many attempts to improve the wear resistance, surface modification by laser radiation processing is expected to be a promising method.

In this study, laser radiation in oxygen rich atmosphere gas conducted to form hard layer with very hard titanium-oxygen compound film on the surface of titanium plate in order to improve the wear resistance. Herein, the effects of change in laser energy density on the wear resistance as well as fatigue property and thermal distortion are examined. The laser energy density changed with varying moving speed of specimen or oxygen concentration in the atmosphere gas.

The higher laser energy density resulted in thicker hard layer with very hard thin film of TiO₂, and also, higher residual tensile stress around laser processed region. It caused increase in wear resistance, decrease in fatigue strength, and also increase in thermal distortion.

Key words : Laser, Titanium, Wear, Fatigue, Thermal distortion.

1. 諸 言

チタンは軽量で良好な機械的性質を有し、さらに抜群の耐食性を示す優れた構造材料である。しかし、機械部品としての使用においては、やや耐摩耗性に劣ることが難点である。チタンの特性を生かしつつ耐摩耗性を向上させるために、種々の方法が試みられているが、レーザ照射による表面改質は有望視される方法の一つである。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

本研究では、酸素あるいは窒素ガス雰囲気中のレーザ照射によって、チタン表面に硬質の化合物皮膜を伴った硬化層を形成し、耐摩耗性を向上させることを試みた。ここで、レーザ照射時の試料

移動速度および雰囲気ガス中の酸素濃度を変化させることによってレーザエネルギー密度を変化させ、耐摩耗性に及ぼす影響を調べた。同時に表面硬化によって期待される耐疲労性の向上、ならびにレーザ照射にともなう急熱急冷によって発生する熱歪みすなわち反りに対する影響も併せて検討した。

2. 実験方法

2. 1 摩耗試験および疲労試験

供試材は市販のチタン板（JIS 1 種）厚さ5mmを使用した。その機械的性質を表1に示す。これをシャリングによって30mm×150mmの長方形に切断し機械加工によって長さ75mm、平行部幅20mm厚さ5mmの平面曲げ疲労試験片、および6.5×6.5×5mm

* 教 授 機械工学科

** 技 官 機械実習工場

の摩耗試験片を製作した。機械加工後の試験片の片方の表面にレーザ照射加工を行った。照射移動方向は試験片の長手方向として数回反復照射し、試験片平行部の全面に照射加工を施した。

表 1 供試材の機械的性質

試験片	引張強さ MPa	伸び %	ビッカース硬さ
素材	355	49.7	154
焼鈍	365	59.0	137

レーザ照射加工は、(助室蘭テクノセンターにおいて、最大出力1600Wの炭酸ガスレーザー加工機(三菱電機製)を使用して行った。レーザ照射の方法は図 1 に、照射条件は表 2 に示す⁽⁴⁾。レーザエネルギー密度Eは次の式によって表され、被照射試料の移動速度の増加に反比例して減少する。

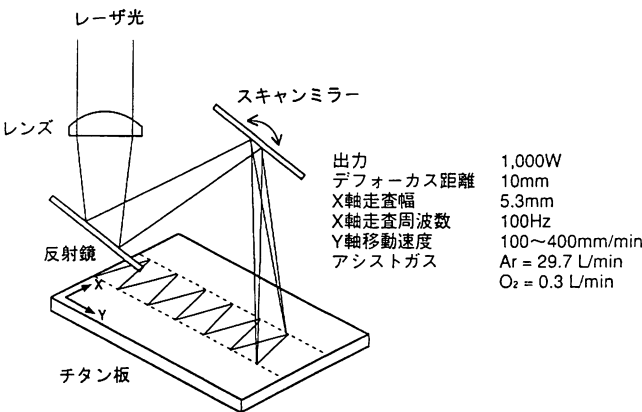


図 1 レーザ照射方法

表 2 レーザ照射条件 (移動速度変化)

レーザ出力	1000W
焦点距離	12"
焦点はずし距離	10mm
振幅	6 mm

試料記号	振動速度 (mm/min)	酸素流量 (L/min)	窒素流量 (L/min)	アルゴン流量 (L/min)
No.1	100	0.3		29.7
No.2	200	0.3		29.7
No.3	300	0.3		29.7
No.4	400	0.3		29.7
No.5	500		15	15

したがって、照射移動速度を変化させれば、照射時のエネルギー密度を変化させることが出来る。また、雰囲気ガス中の酸素濃度が変化すれば、レーザ照射時に生成する酸化チタンの生成熱が増減し、それに伴ってエネルギー密度が変化することも期待される。そこで、移動速度を一定として雰囲気ガス中の酸素濃度を変化させた場合についても検討した。照射条件を表 3 に示す。

表 3 レーザ照射条件 (酸素濃度変化)

	L-E密度 (KJ/cm ²)	走査幅 (mm)	移動速度 (mm/min)	雰囲気ガス成分(%)	
				O ₂	N ₂
No. A	2.5	4.0	300	0.25	
No. B	2.5	4.0	300	0.75	
No. C	2.5	4.0	300	1.5	
No. D	2.5	4.0	300	2.5	
No. E	2.5	4.0	300		100

$E = W/v \cdot d$ (J/cm²) (1)

W：レーザーパワー (W)

v：試料移動速度 (cm/s)

d：レーザ走査幅 (cm)

疲労試験はスパン40mmの3点曲げ方式で、レーザ照射面に引張応力が加わるようにセットし、繰り返し周波数20Hz、応力比0.1の条件により、電気油圧サーボ式疲労試験機を使用して行った。

摩耗試験は自作のピン・オン・ディスク方式の試験機によって、無潤滑、乾式で行った。図 2 に摩耗試験機の概略を示す。レーザ照射によって形成される表面皮膜および表面改質層は非常に薄いものであるから、このような表面の摩耗特性を調べるには、試験片と摩擦円盤が正確に密着した状態で保持されつつ摩擦されなければならない。この条件を満たすために、試験片の保持機構は次のような構造とした。

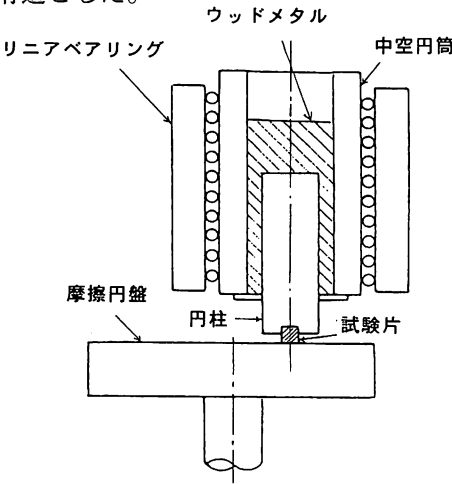


図 2 摩耗試験装置

リニアベアリングによって垂直に保持されて上下にスライドできる中空円筒の中に、先端に試験片を装着した円柱を入れ、摩擦円盤上に円柱を自立させて、試験片の被試験面と摩擦円盤が正確に密着した状態とする。この状態のまま、円柱と円筒の間の空間に低融点合金（ウッドメタル）の溶湯を注入して凝固させ、円柱を固定する。この方式によって、摩擦試験の前後における試験片の勾配の差を5/1000以内に収めることが出来た。

摩擦円盤はビッカース硬さ850程度に熱処理された軸受鋼SUJ2であり、試験表面は400番のエメリーパー仕上げである。円盤の回転数は1450rpmであり、試験円の半径を20mmとして摩擦速度は3m/sとなる。試験荷重は2kgとした。各試験開始前には、円盤の表面を400番のペーパーで研磨し、円盤および試験片の双方の表面をアセトンで洗浄した。試験片の摩耗量測定は連続測定方式とした。縦方向の変位を差動トランスで検出し、その出力を3ペンレコーダに入力して、時間（摩擦距離）－変位曲線を記録した。同時にレーザ式非接触変位センサによって、摩擦円盤の表面の変位も検出して同様に記録し、両者の変位量の差をもって試験片の摩耗量とした。なお、摩耗特性の評価にあたっては、次の式で表される比摩耗量を採用した。

$$W_s = W / PL \text{ (mm}^2/\text{kg)}$$

W：摩耗体積(mm³)

P：試験荷重(kg)

L：摩擦距離(mm)

残留応力測定は、X線回折装置に応力測定アタッチメントを取り付けて、平行ビーム法によって行った。レーザ照射面の粗さは触針式粗さ測定器によって測定し、照射面から内部への硬さ分布はマイクロビッカース硬度計によって測定した。

2. 2 熱歪み（反り）の測定

供試材は市販のチタン板（JIS 1 種）厚さ3mmである。これを75×30mmの長方形にシャリングで切断したのち、片面にレーザ照射加工を行った。照射域は試験片の長手方向の中心線に沿う幅3mmで、試験片の全長にわたって行った。照射条件は表3に示す。ここでは、移動速度一定として照射雰囲気ガス中の酸素濃度を变化させた。熱歪み、すなわち反りの測定は図3の測定装置によって行った。ボールねじ送り機構によって水平方向に移動する「リニアガイド」の移動台上に試験片を

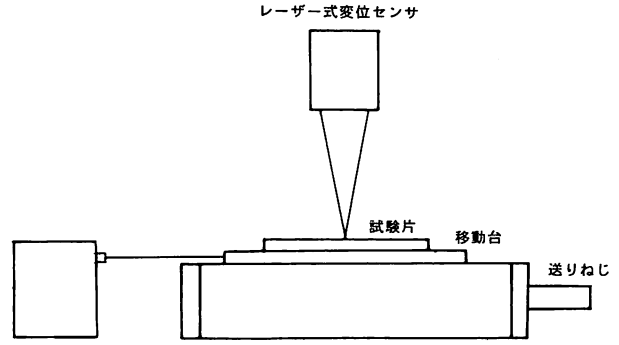


図3 熱歪み（反り）測定装置

置き、支柱に固定された可視光レーザ式センサで、試験片の照射面までの距離を測定しつつ水平方向に移動する。試験片の移動距離をワイヤ巻取り式差動トランスで検出し、レーザ式センサおよび差動トランスの出力をX-Yレコーダに入力することによって、試験片の反りの形状を記録した。本実験のレーザ照射条件において、反りの形態は図4に示すように照射面を下面とする凸面であるからX-Yレコーダの記録は円弧状となる。そこで円弧の最大高さをもって反りすなわち熱歪みの値とした。また前節と同様に、X線回折応力測定装置によって照射面の残留応力を測定した。

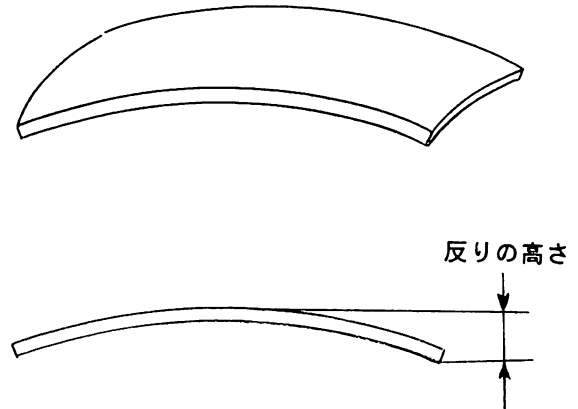


図4 反りの形態

3. 実験結果および考察

3. 1 摩耗特性および疲労特性

図5は移動速度を変えてレーザ照射加工したチタン板の、表面から内部への硬さ分布を示す。0.05mmから0.1mm程度の深さの硬化層が形成されているが、移動速度と最高硬さおよび硬化層の深さの間には明確な関係は見出し難い。しかし、移動速度最小のNo.1は、最高硬さおよび硬化深度ともに最小であり、移動速度最大のNo.4は最高硬さおよび硬化深度ともに最小であることは明確であ

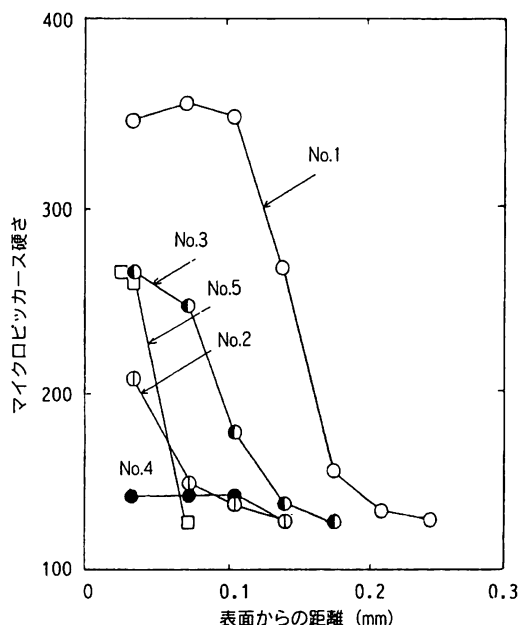


図5 表面から内部への硬さ分布

る。したがって、移動速度の小さいすなわち、照射エネルギー密度の大きいほど、硬さが高く、より深い硬化層が形成されるものと考えられる。

図6は摩耗試験の結果を示す、摩擦距離と摩耗量の関係である。摩耗量は摩擦距離の増加に伴って増大するが、その傾向は照射移動速度によって大幅に異なる。

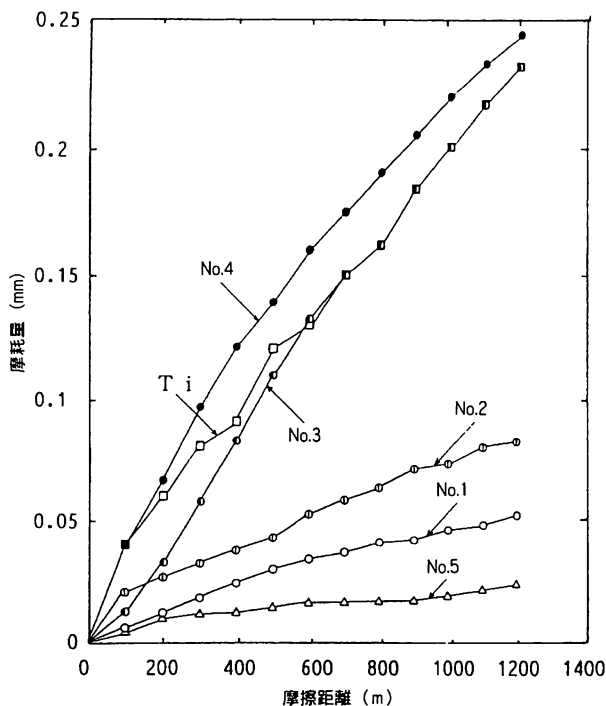


図6 摩耗試験結果

一般的な摩耗過程では、初期における摩耗速度の大きいシビア摩耗から、次第に摩耗速度が減少

して定常マイルド摩耗へ移行し、ほぼ一定の摩耗速度で経過する。

移動速度が100mm/minのNo.1および200mm/minのNo.2は、摩耗速度の大きい初期シビア摩耗から、摩耗速度の小さい定常マイルド摩耗への遷移が比較的早期に行われ、その結果、摩耗速度は非常に小さくなり、良好な耐摩耗性を示す。移動速度が小さくレーザエネルギー密度が大きい場合は、表面に形成されるTiO₂の皮膜の密着性が良好で剝離し難く、また、内部の硬化層も厚く形成されるためであると考えられる。これに対して、移動速度が300mm/minのNo.3および400mm/minのNo.4は、摩擦距離1200mまでの範囲においては、初期シビア摩耗から定常マイルド摩耗へ移行することなく、シビア摩耗のまま摩耗速度の非常に大きい状態で経過する。これは、レーザ照射しない素材Tiの場合とほとんど同じである。移動速度が大きくレーザ照射エネルギー密度が小さい場合は、表面に形成される皮膜の密着性が不十分で剝離しやすく、また硬化層も薄いので、試験の初期に剝離してしまうためであると考えられる。また、No.5は窒素雰囲気中でレーザ照射したものであるが、移動速度が300mm/minと同じであるNo.3と比較して摩耗速度は非常に小さく、耐摩耗性が極めて良好である。窒素雰囲気において形成される皮膜がTiNであり、酸素雰囲気中のTiO₂と比べて、硬度、密着性ともに非常に優れているものと考えられる。

図7は疲労試験の結果を示す。データのばらつきがあり、明確な関係は把握し難いが、移動速度の大きいNo.3、No.4は、移動速度の小さいNo.1、No.2よりも疲労強度が低くなっている。すなわ

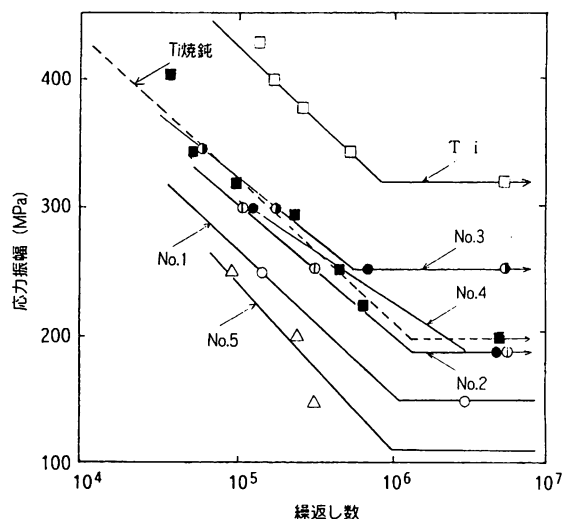


図7 疲労試験結果

ち、照射エネルギー密度が大きく、皮膜が強固で硬度が高く耐摩耗性の良好なものは、疲労強度が低い傾向を示している。窒素雰囲気中の照射によるNo.5も、この傾向に沿っている。一般に、金属材料の疲労強度は、材料の表面硬さと相関が強く、硬さの高いものは疲労強度も高いことが期待されるものである。したがって図7の結果は、硬さと疲労強度の関係における一般的な傾向とは相反するものである。

図8は図6および図7の結果をまとめて、移動速度と疲労強度および耐摩耗性の関係を示したものである。ここで、摩耗特性としては比摩耗量を用いて、その増加方向逆にプロットして耐摩耗性を表した。また疲労強度は、 6×10^6 回における時間強度を用いた。図8において、耐摩耗性は、移動速度200mm/min以下で大きい、200mm/minから300mm/minの区間で急激に低下し、300mm/min以上では低い値でほぼ一定となる。一方、疲労強度は100mm/minから300mm/minの区間で増加し、300mm/minで最高となったのちやや低下する。すなわち、移動速度の増加すなわち照射エネルギー密度の減少に伴って耐摩耗性は低下し、疲労強度は向上する。

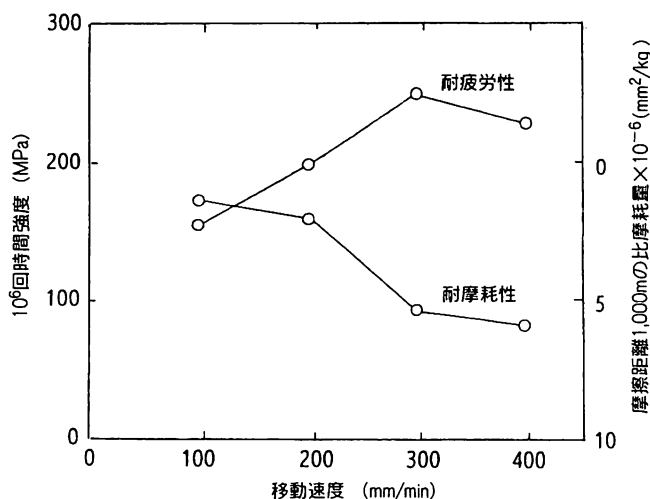


図8 移動速度と疲労強度および耐摩耗性の関係

図9はレーザ照射加工によって得られた最高硬さと、疲労強度の関係を示す。ここでは両者の間に明確な関係は認められないが、硬さの増加に伴って疲労強度は低下する傾向が見られる。したがってこの結果は、前述のように、硬さの増加に伴って疲労強度も増加するという一般的な関係からはずれたものである。

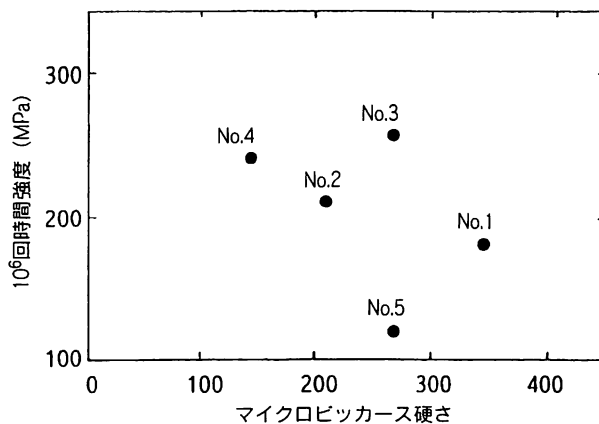


図9 最高硬さと疲労強度の関係

図10はレーザ照射加工面の表面粗さと疲労強度の関係を示す。両者の間に明確な関係は認められないが、粗さの増加に伴って疲労強度も増加する傾向が見られる。これは、表面粗さが増加すれば切欠効果によって疲労強度は低下するという、一般的な傾向から外れたものである。

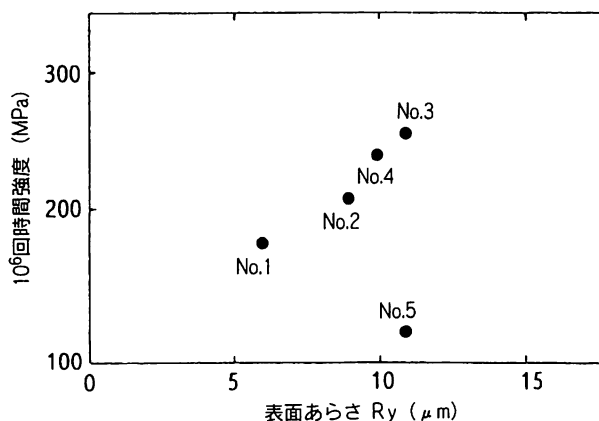


図10 表面粗さと疲労強度の関係

これらの結果から、本実験においてレーザ照射加工したチタンの疲労強度を支配するのは、表面硬さおよび表面粗さではなく、他の要因であると考えられる。

疲労強度を支配するその他の要因としては、まず、表面に存在する残留応力が考えられる。レーザ照射加工では表面は急速加熱、冷却を受けることから、その際に発生した熱応力が残留する可能性は大きく、またチタンの同素変態に伴う体積変化も応力発生の原因となり得るものである。そこで、表2の条件でレーザ照射加工した試験片について、X線回折応力測定装置によって表面残留応力の測定を行った。その結果、レーザ照射面には引張り残留応力が検出された。図11は照射移動速度と照射面の残留応力および疲労強度の関係であ

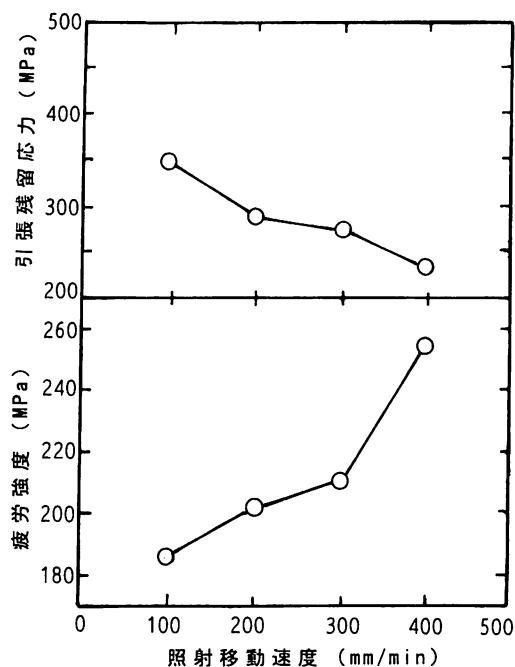


図11 移動速度と疲労強度および引張残留応力の関係

る。レーザ照射面の引張り残留応力は、移動速度の増加に伴って減少し、それに伴って疲労強度は増加することがわかる。図12は図11の移動速度を、式(1)によって照射エネルギー密度に換算したものである。エネルギー密度の増加に伴って、引張り残留応力は増加し、疲労強度は低下し、とくにエネルギー密度3から5までの区間で、引張り残

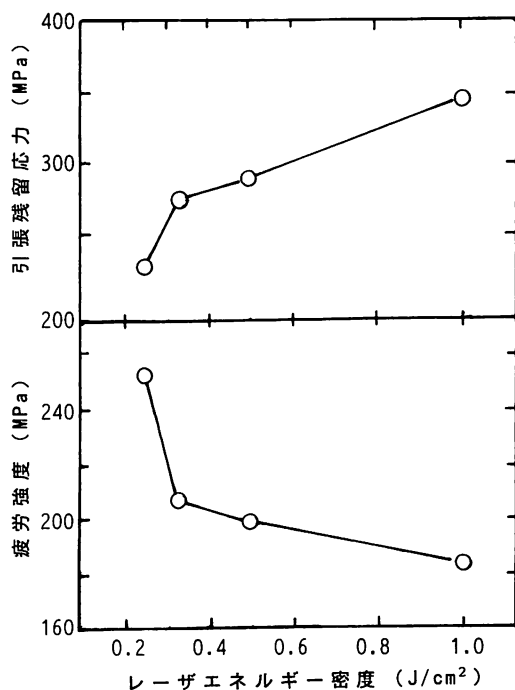


図12 レーザエネルギー密度と引張残留応力および疲労強度の関係

留応力の急激な増加と、それに伴う疲労強度の急激な低下が生じる。

図13は疲労強度と引張り残留応力の関係を示す。引張り残留応力の増加に伴う疲労強度の低下が明確に示される。

ここで、レーザ照射によってチタン板の表面に引張り残留応力が発生する理由は、レーザ照射によって、急熱され溶融した表面が、照射終了後の急速冷却に伴って凝固し収縮することによるものと考えられる。したがって、レーザ照射におけるエネルギー密度が増加すれば、表面の溶融層は深くなるので、それに伴って引張り残留応力も増加することが理解される。また、冷却過程において823℃の変態点を通る際の、 β から α への格子変態に伴う体積収縮も、引張り残留応力の発生を助長すると考えられる。

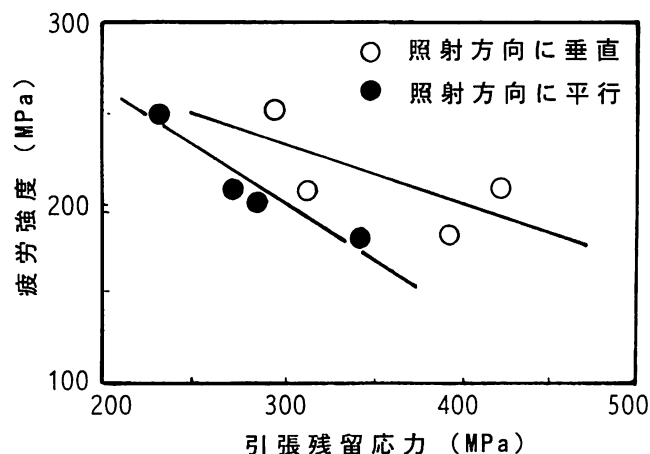


図13 疲労強度と引張残留応力の関係

3. 2 熱歪みの発生特性

レーザ照射によって、チタン板表面に金属皮膜を形成する方法は、耐摩耗性の向上に効果的であることが明らかになったが、板が薄い場合には、照射時の急熱、急冷によって板に反りが発生することが問題となる。そこで、レーザ照射条件と反りの度合いの関係について検討を行った。ここでは、レーザ照射における雰囲気ガス成分すなわち酸素濃度と、反りすなわち熱歪みの発生の関係について調べた。

照射面を凹面とする反りの発生から予測されたとおり、X線応力測定によって、照射面には引張り残留応力が検出された。

図14は、照射雰囲気中の酸素濃度と反りの高さおよび引張り残留応力の関係を示す。雰囲気中酸素濃度の増加に伴って、反りおよび残留応力は直線的に増大する。

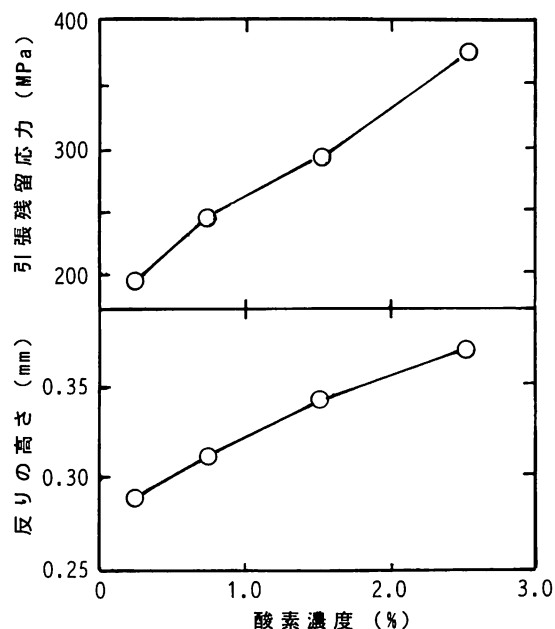


図14 酸素濃度と引張残留応力および反りの高さの関係

し、表面直下部分も熱収縮するので引張り応力が発生し、照射面を凹面とする反りが発生する。したがって、熱影響部が深く形成されれば、それだけ反りも大きくなると考えられる。また、前項で述べたと同様に、冷却過程で変態点を通過する際の体積収縮もこれを助長するものであろう。

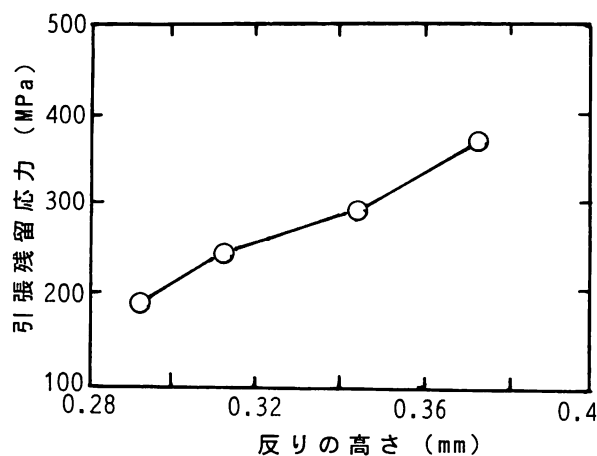


図15 反りの高さと引張残留応力の関係

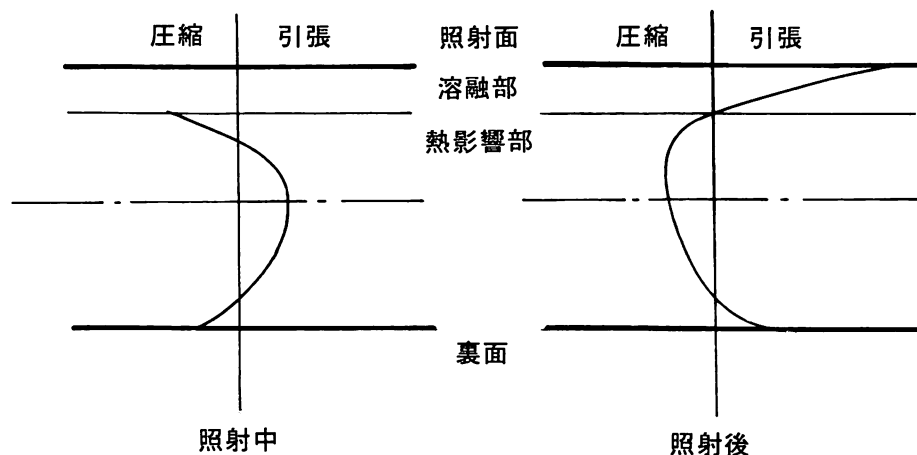


図16 レーザ照射による残留応力の発生機構

図15は反りの高さと引張り残留応力の増加の関係を示す。これらの結果より、酸素濃度の増加に伴って照射面の反りが増大し、同時に引張り残留応力が増加することがわかる。

ここで、レーザ照射によって反りの発生する機構は次のように考えられる。

図16はその概念図である。レーザ照射に伴う急熱によってチタン表面は溶融し、その直下部分も加熱されて膨張する。この部分は内部の低温部分に拘束されており、また加熱によって変形抵抗は低下しているので、熱膨張変形の大部分は塑性変形によって吸収され、実際の膨張変形は少ない。この状態から、照射終了に伴って表面は凝固収縮

照射雰囲気中の酸素濃度が増加にともなって反りが増大するのは、酸素濃度の増加によって、チタンと酸素の反応に伴って発生する反応熱が増加し、照射エネルギー密度が増大した結果、熔融部および熱影響部が深く形成され、引張り残留応力が増大することによるものと考えられる。このことからすれば、前節において、試料移動速度の変化によって照射エネルギー密度を変化させた場合についても、試験片の熱歪みに及ぼす影響は同様であると考えられる。

4. 総 括

チタンの耐摩耗性を改善することを目的として、酸素ガス雰囲気中でレーザ照射加工を行い、次の結果を得た。

- (1) レーザエネルギー密度の増加に伴って、照射面には、より強固な表面皮膜および硬化層が形成され、耐摩耗性は向上する。しかし、それに伴って照射面の引張残留応力は増大し、その結果、疲労強度は低下する。
- (2) レーザ加工時の雰囲気ガス中の酸素濃度の増加に伴って、照射面の引張残留応力は増大し、熱歪み（反り）は増加する。これは、酸化チタン生成の反応熱の増加によって、レーザのエネルギー密度が増加したことによるものと考えられる。

謝 辞

本研究は、北海道科学・産業技術振興財団の、産学等共同研究開発事業委託金によって実施された、「高機能金属皮膜形成に関する研究」の一環として行ったものであり、同財団の多大の御支援に対して深く感謝の意を表するとともに、共同研究のメンバーとして各パートを担当された函館工業技術センター、室蘭テクノセンター、旭川工業技術センター、室蘭工業大学、共伸機工(株)ならびに調整役をつとめられた助道央テクノポリス開発機構の各位に感謝する。

参 考 文 献

- (1) 鹿田順生：機械の研究、vol.43.No.3、(1991) 336
- (2) 沓名宗春：まてりあ、vol.34.No.6(1995)724
- (3) 最新レーザ加工技術総覧、(1996)産業技術調査会
- (4) 高機能金属皮膜形成に関する研究、(1997)北海道科学・産業技術振興財団

(平成9年11月28日受理)