

機関番号：12612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008年度～2010年度

課題番号：20560068

研究課題名（和文）レーザーピーニング処理を用いた航空機部材の軽量化と疲労安全性向上に関する研究

研究課題名（英文）Study of improvement of fatigue strength safety and weight reduction by laser peening treatment in aircraft component materials

研究代表者

越智 保雄 (OCHI YASUO)

電気通信大学・名誉教授

研究者番号：70017416

研究成果の概要（和文）：主に航空機部材として使用される Al 合金，Ti 合金及びステンレス鋼を対象にレーザーピーニング(LP)処理を施し，部材の疲労強度特性向上を図るとともにその向上効果のメカニズムを調査・検討した．用いた全ての材料でLP処理により表面層に高いひずみ硬化と圧縮残留応力が導入され，Al 合金及びステンレス鋼と表面粗さを除去した Ti 合金で高い疲労強度向上特性が得られた．また，Al 合金予き裂材ではLP処理によるき裂進展抑制効果確認された．以上の成果などにより，LP処理は疲労強度信頼性向上とそれによる部材の軽量化に有効であることが明らかとなった．

研究成果の概要（英文）：It is very useful for the reducing of weight and the energy reduction, and the high efficiency to improve the fatigue strength reliability of machines and structures by giving high functional property. In the present study, the laser peening(LP) treatment is performed on aircraft component materials such as Al alloy, Ti alloy and stainless steels. And it is the proposes of the research to improve the fatigue strength reliability and to make clear the mechanism of the improvement. The main results are as followings, (1) In all materials used in this study, it is confirmed to improve the fatigue strength by the LP treatment, and it is clear that the improvement effects are induced from the high compressive residual stress and the strain hardening in the surface layer of the materials by the LP treatment. The restrained effects for fatigue crack propagation process are improve the pre-cracked materials by the LP treatment. And, these effects are also induced from the compressive residual stress and the crack closure effects by plastic deformation near crack tip by the LP treatment. From these results, it is clear that the LP treatment is very useful for the fatigue strength reliability improvement and the weight reduction of the aircraft component materials and other machines and structures.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：レーザーピーニング処理，航空機部材，疲労強度安全性，疲労き裂発生，疲労き裂進展

1. 研究開始当初の背景

(1)各種機械・構造物の破壊事故の原因の多

くが疲労を引き金としているため、航空機に対しても疲労破壊に対する対策が重要な課題である。一方、経済性の面から航空機の軽量化を図るとともに、その疲労破壊を防止して、安全性・信頼性向上を目指すことは、それらの設計・製造及び使用に携わる技術者・研究者にとっては極めて重要な課題となっている。

(2)そこで、本研究では疲労強度を向上させる最新の技術としてレーザーピーニング(Laser Peening, LP)処理に注目した。LP処理は材料表面にパルスレーザーを照射して発生した高圧のプラズマの衝撃力を利用して材料表面に圧縮残留応力の増加やひずみ硬化層を付与させるという技術であり、従来より原子力プラント溶接構造部の応力腐食われ(Stress Corrosion Cracking; SCC)対策として利用されていた。本研究では、LP処理を疲労強度向上に適用するもので、国内・外ではそれまで殆ど検討されていない研究分野であった。

2. 研究の目的

主に航空機部材として使用される各種金属材料に対して、原子力プラント構造部材の応力腐食割れ(SCC)対策として開発されたレーザーピーニング(Laser Peening; LP)処理を施して、部材の疲労強度安全性向上とともに構造物の軽量化を図ること、ならびにそれら向上のメカニズムを解明することを目的としている。

3. 研究の方法

(1)アルミニウム合金 A7050 の展伸材及び鍛造材を用いて回転曲げ疲労及び軸荷重疲労試験を実施して、疲労強度安全性向上と疲労き裂発生・進展抑制に及ぼすLP処理効果の調査・検討を行う。そのため、平滑丸棒試験片の平行部にパルス YAG レーザーによるLP処理を施し、レーザー照射部表面と深さ方向の硬さ測定とX線回折による残留応力測定を実施して、表面硬化層及び圧縮残留応力層の分布を求める。図1にLP処理システムの外観図を示す。

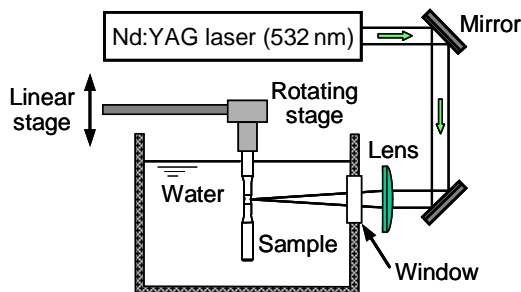


図1. LP処理システムの外観図

その後、LP処理試験片及び未処理試験片を用いて、高サイクル回転曲げ及び軸荷重疲労試験を実施して、それぞれの疲労強度曲線

(S-N 曲線)を求めるとともに、疲労き裂発生・進展挙動の観察と疲労破面の走査電子顕微鏡観察によりき裂の発生起点の特定を行う。一部の試験片には平行部に直径 0.3mm、深さ 0.3mm の人工微小穴を開け、疲労予き裂を導入して、予き裂材に対してき裂進展経路にLP処理を施して、疲労き裂進展挙動に及ぼすLP処理の抑制効果を検討する。さらに、展伸材に対しては、回転曲げと軸荷重の荷重方式の違いとLP処理効果の関係を、また、鍛造材に対しては鍛造方向に対する疲労強度の異方性とLP処理効果の関係について調査・検討を行う。

(2)チタン合金 Ti-6Al-4V の観点曲げ疲労試験による疲労強度安全性向上に及ぼすLP処理効果の調査・検討をおこなう。そのため、アルミニウム合金と同様に試験片平行部にLP処理を施し、未処理材とLP処理材に対して高サイクル回転曲げ試験を実施して、疲労強度安全性向上と疲労き裂発生・進展挙動へのLP処理効果の調査・検討を行う。また、Ti合金の場合、特にLP処理による表面の粗さの影響が大きいと思われるため表面粗さとLP処理効果の関係を詳細に調査する。

(3)オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L に関しても同様に高サイクル回転曲げ疲労強度向上に及ぼすLP処理効果を調査・検討する。SUS316L鋼に関しては従来の表面処理法であるショット・ピーニング(SP)処理や窒化・浸炭処理による効果と比較・検討を行う。

4. 研究成果

本研究では主に航空機部材を対象にレーザーピーニング(LP)処理を施して、疲労強度安全性向上と部材の軽量化を目指すこと、及びそれらの向上のメカニズムを明らかにすることを目的とした。用いた材料はAl合金(展伸材、鍛造材、鋳造材)、Ti合金(Ti-6Al-4V)及びオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316L)などで、それらの材料に対してLP処理を施して強度安全性向上の確認を行うとともに、疲労き裂進展挙動の抑制効果を調査・検討した。得られた主な成果は以下である。

(1)用いた全ての材料でLP処理により表面層に高いひずみ硬化と高い圧縮残留応力が導入されることが明らかとなった。その結果、全てのAl合金とSUS316L鋼では高い疲労強度向上効果が得られた。一例として図2と図3にSUS316L鋼のLP処理による表面層のひずみ硬化による硬さ分布図とX線回折による残留応力分布図をそれぞれ示す。図より表面層 500 μ m程度までの硬化層と圧縮残留応力の存在が確認された。また、図4には一例としてAl合金展伸材(A7050-T7451)の疲労試験結果を示す。図より明らかにLP処理により

大幅な疲労強度の向上と寿命のばらつき抑制効果が得られることが明らかとなった。

(2)Ti 合金(Ti-6Al-4V)ではLP処理による表面層のひずみ硬化と圧縮残留応力導入効果は得られたが、表面の粗さの増加による影響

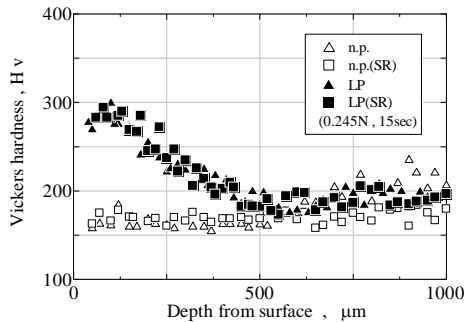


図 2. SUS316L 鋼の硬さ分布

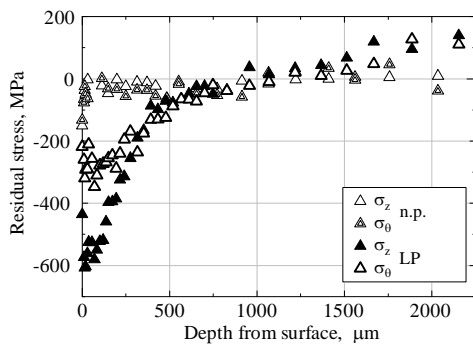


図 3. SUS316L 鋼の残留応力分布

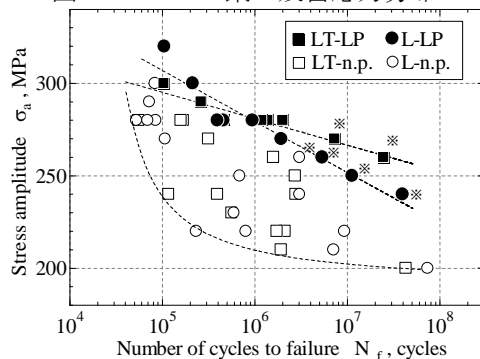


図 4. Al 合金展伸材の回転曲げ疲労試験結果

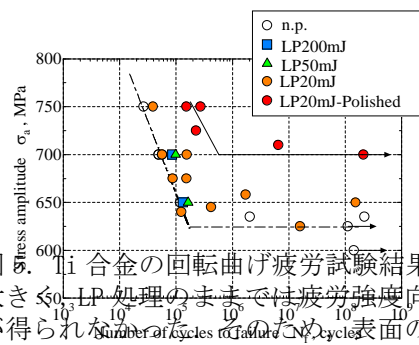


図 5. Ti 合金の回転曲げ疲労試験結果が大きい。LP 処理のままでは疲労強度向上効果が得られなかった。このため、表面の粗さを除去した表面研磨材の試験をすることによって疲労強度向上が得られることを明らかとした。図 5 はその結果で、表面研磨材(LP20mJ-P)は疲労強度向上が明らかである。

(3)Al 合金展伸材に対して回転曲げと時期

荷重疲労試験を実施した結果、回転曲げ疲労強度は図 4 に示すように全寿命域で疲労強度向上効果が得られたが、軸荷重疲労強度は 2×10^6 サイクル以上の高サイクル域では LP 処理材は未処理材より低強度となった。この下人をき裂発生起点の応力拡大係数を考察することで明らかとした。図 6 に Al 合金展伸材の軸荷重疲労試験の結果を示す。

(4)Al 合金鍛造材の回転曲げ疲労試験結果を 7 に示す。疲労強度は鍛造方向に対して平行な LT 材(a)と直角の ST 材(b)で異相性が現れ、LP 処理による疲労強度向上効果は両材と

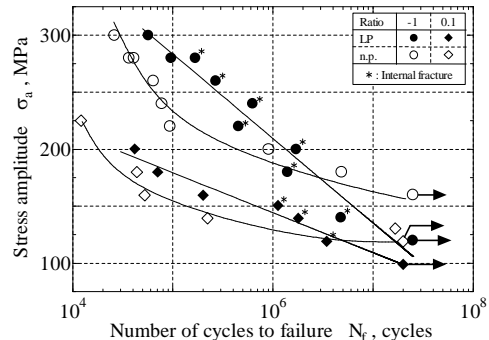
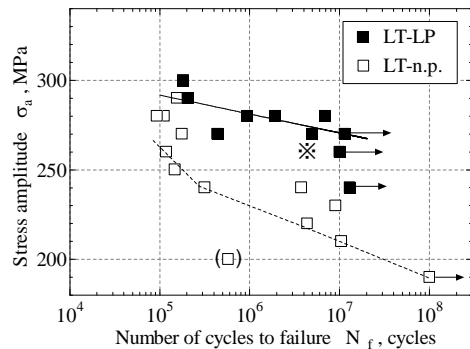
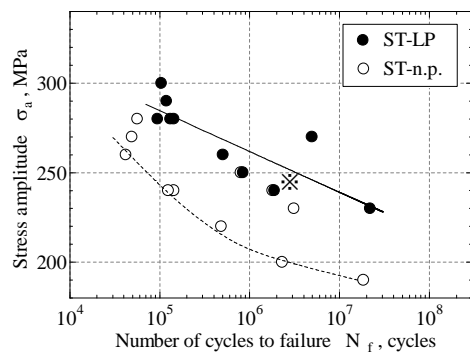


図 6. Al 合金展伸材の軸荷重疲労試験結果



(a)LT 材(鍛造方向に平行)



(b)ST 材(鍛造方向に直角)

図 7. Al 合金鍛造材の回転曲げ疲労試験結果も明らかに得られたが、LT 材の方が ST 材よりも LP 処理材、未処理材とも二疲労強度が高くなった。これらの原因は鍛造による結晶粒・微視組織の変形やき裂の発生特性の違いにより考察した。

(5)Al 合金展伸材及び SUS316L 鋼の試験片表面に微小穴を開け疲労予き裂を導入した予

き裂材の疲労き裂進展過程において、き裂進展方向に LP 処理を施してき裂進展過程に及ぼす LP 処理の効果を調査・検討した。その結果、微小穴からのき裂発生とき裂進展が大幅に遅れるというき裂進展抑制効果が明らかとなった。この原因は、き裂先端付近の圧縮残留応力の存在とそれによるき裂先端の閉口による効果であることが明らかとなった。図 8 は Al 合金展伸材の予き裂材に軸荷重疲労試験を行った結果を示す。予き裂長さが $1500\ \mu\text{m}$, $2500\ \mu\text{m}$ 時に LP 処理を施した結果き裂が大幅に停留しき裂進展抑制効果が明らかとなっている。

(6) SUS316L 鋼に対して従来の表面処理手法であるショットピーニング(SP)処理, ショットレスピーニング処理及び低温ガス窒化・低温ガス浸炭処理を施し疲労強度安全性への効果を調査・検討し, LP 処理効果との比較・検討を行った。その結果, LP 処理はたのいずれの処理よりも圧縮残留応力の導入効果が大きく, 疲労強度向上効果が大きいことが明らかとなった。

以上の研究成果により, LP 処理は航空機部材などの疲労強度信頼性向上に対して有効であり, 結果として部材の軽量化に対しても有効な手法であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 8 件)

- ① 越智保雄, 松村隆, 鈴木佑司, 政木清孝, 柿内利文, 佐野雄二, 足立利文, 鍛造アルミニウム合金の高サイクル疲労特性における異方性とレーザーピーニング処理の影響, 材料試験技術, 第 56 巻, pp. 3-10, 2011, 有。

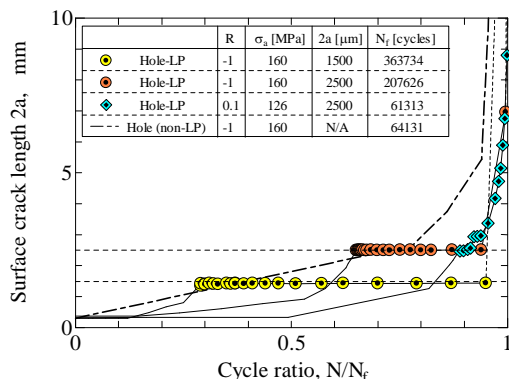


図 8. Al 合金展伸材の予き裂材疲労き裂進展挙動に及ぼす LP 処理効果

- ② 越智保雄, 松村隆, 五十嵐崇亮, 政木清孝, 柿内利文, 佐野雄二, 足立隆史, Al 合金の軸荷重下における高サイクル疲労強度および疲労き裂進展特性に及ぼすレーザーピーニング処理の影響, 材料, 第 59 巻, pp. 932-937, 2010, 有。
- ③ Y. Ochi, T. Matsumura, T. Ikarashi,

K. Masaki, T. Kakiuchi, Y. Sano, T. Adachi, Effects of Laser Peening Treatment without Protective Coating on Axial Fatigue Property of Aluminum Alloy, Procedia Engineering, Vol. 2, pp. 491-498, 2010, 有。

- ④ K. Masaki, Y. Ochi, T. Matsumura, T. Ikarashi, Y. Sano, Effects of Laser Peening Treatment on High Cycle Fatigue and Crack Propagation Behaviors in Austenitic Stainless Steel, J. of Power and Energy Systems, JSME, Vol. 4, pp. 94-104, 2010, 有。

- ⑤ 佐野雄二, 政木清孝, 越智保雄, 秋田貢一, 梶原聖太郎, 放射光を利用したマイクロ CT によるアルミニウム合金疲労き裂の可視化, 材料, 第 57 巻, pp. 395-400, 2008, 有。

- ⑤ 政木清孝, 越智保雄, SUS316L の疲労特性に及ぼす低温ガス窒化ならびに低温ガス浸炭の影響, 材料, 第 57 巻, pp. 563-568, 2008, 有。

[学会発表](計 19 件)

- ① 越智保雄, 松村隆, 鈴木佑司, 政木清孝, 柿内利文, 佐野雄二, 足立隆史, 鍛造アルミニウム合金の高サイクル疲労特性における異方性とレーザーピーニング処理の影響, 第 246 回材料試験技術シンポジウム, 東京, 2011 年 1 月 25 日。

- ② 亀山洋平, 政木清孝, 久森紀之, 佐野雄二, 秋田貢一, 越智保雄, LP 処理した Ti-6Al-4V 合金の疲労特性に及ぼす表面研磨の影響, 日本機械学会年次大会, 名古屋, 2010 年 9 月 7 日

- ③ 佐々木龍介, 松村隆, 越智保雄, 政木清孝, 酒井達雄, 佐野雄二, チタン合金 Ti-6Al-4V の回転曲げ疲労特性に及ぼすレーザーピーニング処理の影響, 日本材料学会第 59 期総会講演会, 札幌, 2010 年 5 月 23 日。

- ④ 越智保雄, 五十嵐崇亮, 菌部祐介, 松村隆, 政木清孝, 柿内利文, 佐野雄二, 足立隆史, Al 合金の軸荷重下における高サイクル疲労強度及び疲労き裂進展特性に及ぼす LP 処理の影響, 日本材料学会第 14 回破壊力学シンポジウム, 沖縄, 2009 年 10 月 23 日。

- ⑤ 鈴木博文, 久森紀之, 政木清孝, 佐野雄二, 秋田貢一, 越智保雄, レーザーピーニングにより改質処理されたチタン合金の疲労特性評価, 日本材料学会第 14 回破壊力学シンポジウム, 沖縄, 2009 年 10 月 23 日。

- ⑥ Y. Ochi, K. Masaki, T. Matsumura, Y. Sano, Laser and Shot Peening Effects on High Cycle Fatigue Property in Austenitic Stainless Steel, The 7th EEUROMECH Solid Mechanics Conference (ESMC2009), Lisbon,

2009, 9, 7.

- ⑦ Y.Ochi, K.Masaki, T.Matsumura, T.Ikarashi, Y.Sano, effects of Laser Peening Treatment on High Cycle Fatigue and Crack Propagation Behaviors in Austenitic Stainless Steel, The 17th Inter. Conf. on Nuclear Enging (ICONE17), Brussels, 2009, 7. 12.
- ⑧ 柿内利文, 鈴木佑司, 政木清孝, 越智保雄, 松村隆, 佐野雄二, 日本機械学会 M&M 2009 カンファレンス, 札幌, 2009 年 7 月 24 日.
- ⑨ Y.Sano, T.Adachi, K.Masaki, Y.Ochi, K.Akita, K.kajiwara, Effects of Laser Peening without Coating on Fatigue Properties of Aluminau Alloys for Aeronautics, Proc. of the 6th Inter. Conf. on Photo-Exited Processes and Applications(ICPEPA2008), Sapporo, 2008. 9. 9.
- ⑩ 五十嵐崇亮, 松村隆, 越智保雄, 柿内利文, 佐野雄二, 足立隆史, 航空機用展伸アルミニウム合金の軸疲労特性に及ぼすレーザピーニング処理の影響, 日本材料学会第 57 期総会講演会, 鹿児島, 2008 年 5 月 24 日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越智 保雄 (OCHI YASUO)

電気通信大学・名誉教授

研究者番号：70017416

(2) 研究分担者

松村 隆 (MATSUMURA TAKASHI)

電気通信大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：00251710

(3) 連携研究者

柿内 利文 (KAKIUCHI TISHIFUMI)

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：20452039