



J. Komotori

S. Kikuchi

塑性加工を利用したハイブリッド表面改質を施した鋼の疲労特性に関する研究

小茂鳥 潤* 菊池 将一**

1. 緒言

機械構造物の構成材料としては、近年でも鋼が中心的役割を担っている。とくに最近では、それらの安全性確保とさらなる疲労特性の向上を目的として、表面改質が施されることが多い。なかでも、窒化、浸炭、高周波焼入れ、ショットピーニングなどに関しては、これまで様々な観点から研究・開発が実施され¹⁾⁸⁾、その成果により数多くの機械部品に対してすでに適用されている。

しかしながら、科学技術の進歩とも関連して機械・構造システムの使用環境が年々過酷なものとなってきたため、前述の表面処理単独では満足な強度や機能向上が果たせないということが問題点としてクローズアップされるようになってきた。このような要求にこたえるためには、これらの改質技術を複合化することが一つの解決法であるという観点から、近年では複合表面改質に関する研究も数多く行われている⁹⁾¹²⁾。

本研究ではそのような複合表面改質のひとつとして、ショットピーニングと比較して小さい粒子を高速度で基材に衝突させる微粒子ピーニング (Fine Particles Bombardment; FPB) 処理と窒化処理との複合表面処理に着目することとした。

これまで、通常のショットピーニングと窒化処理とを組み合わせ、それにより疲労強度の向上を目指した研究は報告されているが、その場合のショットピーニングは、窒化処理によって形成されたぜい性な化合物層を除去するための後処理として位置づけられていることが多かった。しかしながら最近、軟窒化処理を施した鋼にショットピーニングを施すことにより、さらなる圧縮残留応力が導入され、それにより疲労強度が向上することが報告されていることから、複合表面改質処理が注目を浴びている¹³⁾。本研究で着目したFPB処理は、従来のショットピーニングと比較して、最表面において高硬さ、高圧縮残留応力を付与することが可能である¹⁴⁾。したがって、通常の窒化処理を施した鋼の後処理としてFPB処理を施すことにより、さらなる圧縮残留応力の導入が期待できる。

そこで本研究では、窒化処理とFPB処理の両者を組み合わせた複合表面改質処理に着目し、かかる処理を施した鋼の疲労特性について詳細に検討することを目的とした。とくに、表面改質処理によりもたらされる残留応力と硬さ変化に注目し、疲労破壊機構に及ぼすFPB/窒化複合表面改質処理の影響について検討・考察を加えた。

2. 実験方法

供試材としては、表1に示す化学成分を有するクロムモ

リブデン鋼 (SCM435H) を用いた。まず同材の丸棒 ($\phi=16\text{mm}$) を、図1に示すような切欠き ($\alpha=236$) を有する砂時計型の試験片に機械加工した後、最小径部に電解研磨を施した (以下、未処理材と呼ぶ)。その後、図2に示す条件のもと NH_3 雰囲気中で窒化処理を、表2に示す条件のもとで、吸引式投射装置を用いてFPB処理を施した。なお、FPB処理を行う際には、小型旋盤を用いて試験片を回転させることにより、最小径部の全周にわたり均一に処理が施されるように留意した。

試験片の準備は図3のフローチャートに従い行った。本研究では、未処理材に加え、窒化処理およびFPB処理をそれぞれ単独で施した試験片 (以下、NシリーズおよびFシリーズ) ならびにFPB処理後に窒化を施した試験片 (FNシリーズ) および窒化処理をまず施し、その後FPB処理を施した試験片 (NFシリーズ) の合計5シリーズを準備した。

表1 化学成分 (wt %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
0.37	0.21	0.82	0.011	0.013	0.09	1.10	0.15	0.01	0.10	0.017

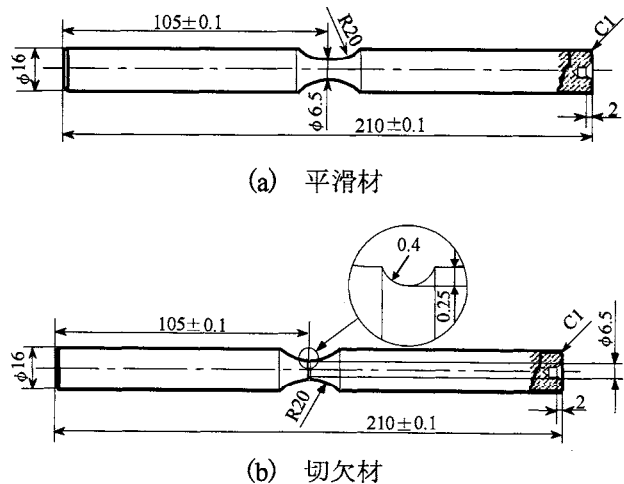


図1 試験片形状

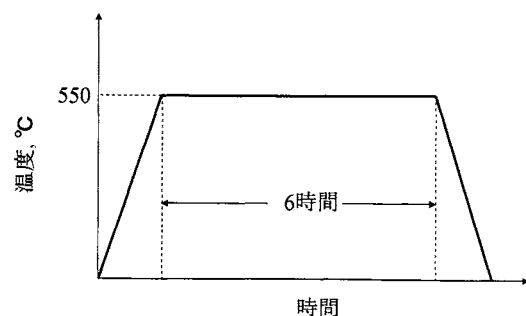


図2 窒化処理条件

なお、窒化処理のみを施したNシリーズの試験片は、化合物層を除去する目的で、疲労試験直前に電解研磨を施している。

疲労試験は室温・大気中において小野式回転曲げ疲れ試験機(3000rpm)を用いて行った。破断後の試験片については、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破面観察を行い、破壊起点を特定した。また残留応力は、表3に示す測定条件のもと、Cr-K α 線2 θ 回折線を利用して $\sin^2\phi$ 法(半価幅法)により求めた。その際測定には、微小部X線応力測定装置(リガク製・PSPCシステム)を用いた。なお、測定は試験片最小径部において行い、X線検出器の走査線方向は試験片軸と一致している。また、深さ方向の残留応力分布の測定は以下のような手順により行った。まず、試験片最小径部が5mm四方残るようにビニールテープでマスキングし、その状態で表面における残留応力を測定した。次に、さらされている部分を電解法により研磨した後、同様な条件のもとで残留応力測定を行った。その際、電解研磨

表2 FPB処理条件

投射材	SKH59
投射材硬さ	HV 800~1100
投射材粒径	#300 (平均粒径:55 μ m)
投射圧力 MPa	0.6
投射時間 秒	60
投射距離 mm	100

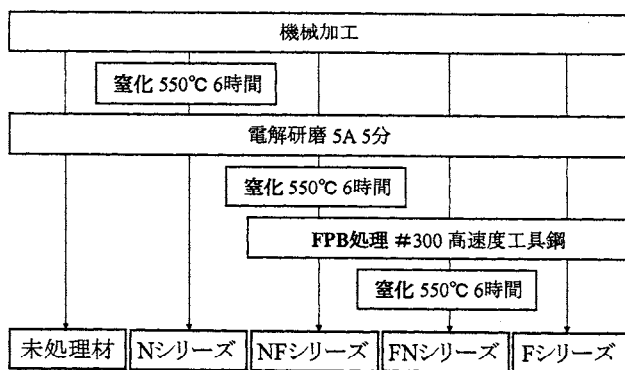


図3 処理工程フローチャート

表3 残留応力測定条件

管電圧 kV	40
管電流 mA	30
ピーク角度 deg	156.4
測定 ϕ 角度 deg	10, 20, 30, 35, 40
ビーム径 mm ϕ	2
応力定数 MPa / deg	-317.91

による除去量は、ダイヤルゲージを用いてその都度測定した。なお、切欠底の残留応力測定は困難であるため、平滑材($\alpha=1.06$)を用いて測定を行った。組織観察は、試験片最小径部横断面を鏡面状に研磨した後、ナイタール腐食を施し光学顕微鏡を用いて行った。

3. 実験結果および考察

3.1 複合表面改質処理を施した鋼の硬さと残留応力分布

図4に、試験片最小径部横断面上において硬さ分布を測定した結果を示す。その際、負荷荷重は0.1kgとした。

まず、単独の表面改質処理を施したFシリーズとNシリーズに注目して比較を行うと、窒化処理と比較してFPB処理により形成される硬化層は浅く、また硬さレベルも低いことがわかる。これら2つの処理を組み合わせさせた複合表面処理材の場合には、処理の順序とは無関係に、(i)表面近傍においては窒化処理のみを施した試験片より高硬さとなっていること、(ii)内部になるに従いNシリーズと同様の硬さ分布へ推移していることがわかる。

図5にX線を用いて残留応力を測定した結果を示す。本研究では、深さ方向の残留応力分布は試験片表面を逐次研磨することにより測定した。したがって、表面層を除去することによる応力の再配分が生じるものと考えられるが、この点に関しては補正していない。同図より、窒化処理後

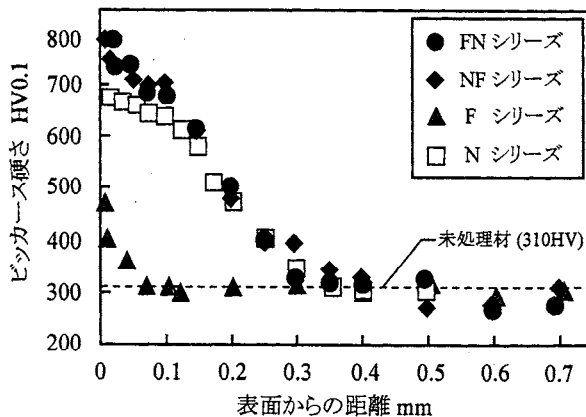


図4 ビッカース硬さ分布

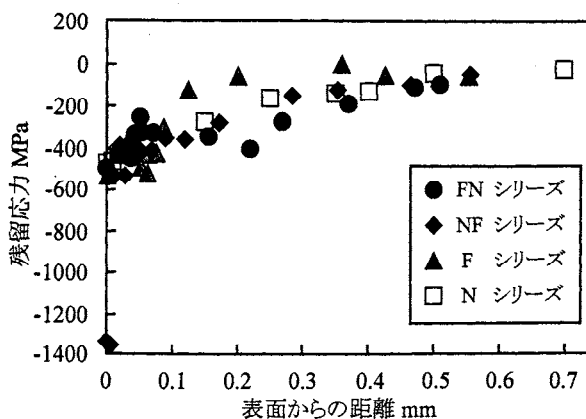


図5 残留応力分布

にFPB処理を施したNFシリーズの表面には、1400MPa程度の極めて大きな圧縮残留応力が生起していることがわかる。これは、一段目の処理によって形成された窒化層にFPB処理を施すことでとくに材料の表面層が強加工され、この強加工領域が窒化層に拘束されることで、極めて大きな圧縮残留応力が生起したものと考えられる。

それに対して、FPB処理後に窒化処理を施したFNシリーズの試験片の場合には、FPB単独の処理を施した試験片と比較して圧縮残留応力の大きさは若干ではあるが小さく、その値はNシリーズとほぼ同程度であることがわかる。これは、二段目のプロセスとして施された窒化処理時の熱影響により、一段目で導入された残留応力が開放されてしまうためと考えられる。

3.2 疲労特性に及ぼすFPB/窒化複合表面改質処理の効果

図6にFPB処理と窒化処理をそれぞれ単独で施したFシリーズとNシリーズの疲労試験結果を示す。同図から、いずれの処理を施した場合にも、基材と比較して疲労強度が上昇していることがわかる。また、その割合は窒化処理を施したNシリーズの方がFシリーズと比較して大きい。図5に示した通り、両シリーズの表面に存在する圧縮残留応力の値には大きな差が認められないことから、かかる疲労強度差は、表面硬さがFシリーズと比較してNシリーズの方が高いことに起因するものと考えられる。なお、Nシリーズの試験片は、疲労試験直前に最表面の化合物層を電解研磨により除去している。化合物層は高硬さであるが脆いため、疲労強度の向上を妨げることが指摘されている。この点も疲労強度の上昇の一要因となったものと考えられる。

次に、複合表面改質の効果について考える。FシリーズとFNシリーズ(図7)およびNシリーズとNFシリーズ(図8)とに分けて比較すると、いずれも二段目の処理により疲労強度が向上していることがわかる。なお、SEMIによる破面観察の結果、すべての試験片が表面破壊を呈していた。

FNシリーズの場合(図7)には、二段目に施す窒化処理により残留応力は開放されるものの、硬さの著しい向上がもたらされることが強度上昇の要因と考えられる。しかしながらこの場合の強度レベルは、窒化を単独で施したNシリーズと同程度であり、疲労強度という観点からは、複合表面改質の効果は認められない。本研究で着目した複合表面処理の有効性を検討するのであれば、本来、疲労特性のみならず摺動特性や腐食特性なども考慮に入れて総合的に判断する必要があるものと考えている。

次に窒化処理後にFPB処理を施したNFシリーズの場合(図8)には、一段目の窒化処理により疲労強度が大きく上昇しているため、二段目の処理による効果はそれほど大きなものではないが、最終的には最も高い疲労強度を示していることがわかる。これは、前項で述べたとおり、二段目に施したFPB処理により非常に大きな圧縮残留応力が導入されたためと考えられる。

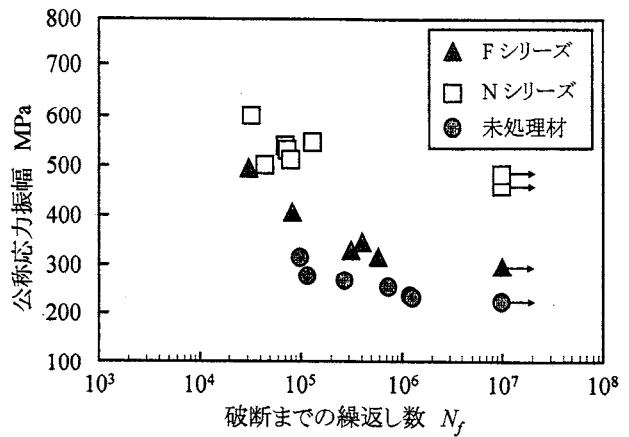


図6 単一処理材の疲労試験結果

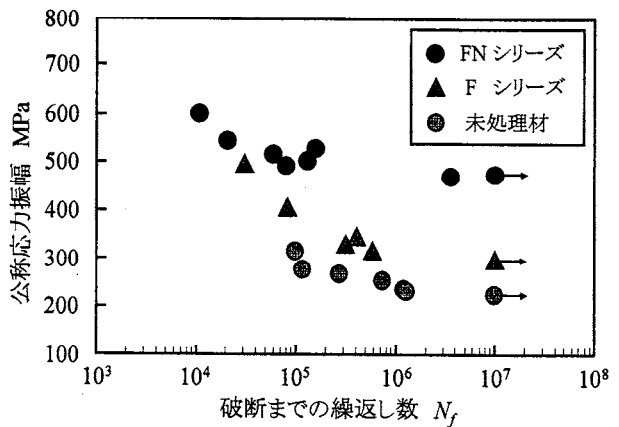


図7 疲労試験結果

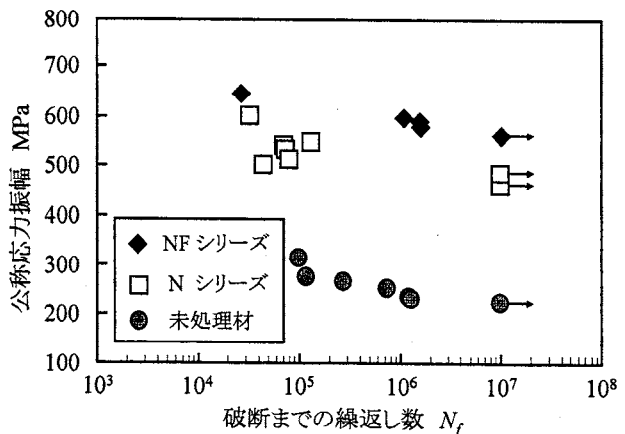
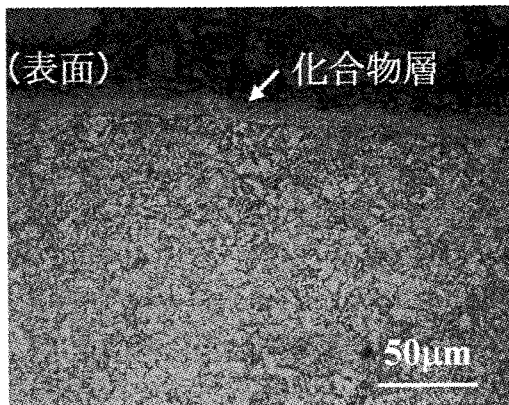
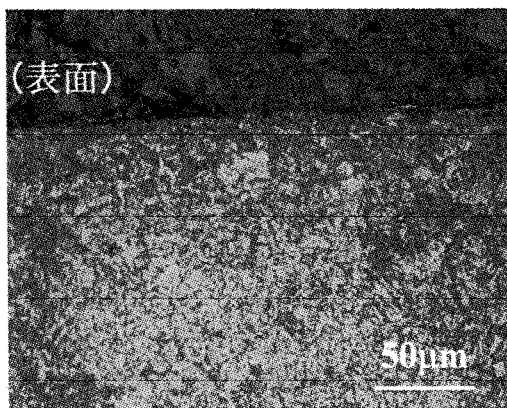


図8 疲労試験結果

図9にNFシリーズおよびFNシリーズの試験片の横断面を金属顕微鏡により観察した結果を示す。表面から十分離れた部位の組織には、両シリーズで差は認められないが、FNシリーズの表面近傍には窒化処理にともない形成された化合物層の存在が確認できる。それに対して、NFシリーズの場合にはそのような層の存在は認められない。これは、二段目に施したFPB処理が化合物層を除去する効果も有していることを示すものである。化合物層は高硬さであるが脆いため、疲労強度の向上を妨げることが指摘されている。したがって、NFシリーズの疲労強度向上要因のひとつとして、このような化合物層の除去も考えられる。



(a) FNシリーズ



(b) NFシリーズ

図9 組織写真

4. 結言

本研究ではFPB処理と窒化処理を組み合わせた複合表面改質プロセスについて、とくに疲労特性に着目してその効果について検討・考察を加えた。具体的には、SCM435H鋼に、FPB処理と窒化処理の処理順序を変化させた二種類の複合表面処理を施し、その各々について室温・大気中で回転曲げ疲労試験を行った。また、従来のFPB処理および窒化処理の単一表面処理を施した材料も準備し、複合表面処理材との比較を行った。

その結果、窒化処理を施した後にFPB処理を施すことにより、未処理材と比較して疲労強度が大幅に向上し、すべての試験片シリーズの中で最も高い疲労強度を示すことが明らかとなった。その理由は、二段目のFPB処理により、単に疲労強度の低下要因として作用することが知られている化合物層が除去されるのみならず、とくに材料の表面層が強加工され、この強加工領域が窒化層に拘束されることによって導入された1400MPa程度の高い圧縮残留応力によるものである。窒化処理とFPB処理の順序を逆にした場合には、表面近傍に導入される圧縮残留応力値は500MPa程度であり、その効果は前者の場合と比較すると劣る結果が

得られた。これは、二段目に施される窒化処理の熱影響で、一段目の残留応力が開放されるためである。

5 謝辞 本研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の補助のもとに行われた。記して感謝の意を表す。

6. 参考文献

- 1) 小茂鳥潤, 井上史, 神田倫明, 清水真佐男, 三阪佳孝, 川崎一博: 浅い硬化層を有する超急速過熱高周波焼入れ材の疲労強度と破壊機構, 日本機械学会論文集 (A編), 63, 606(1997)240.
- 2) H.J. Spies and P. Trubitz: Fatigue behaviour of nitrided steels, *Fatigue* 96,2,(1996)1409.
- 3) P. De la Cruz, M. Oden and T. Ericsson: Influence of plasma nitriding on fatigue strength and fracture of a B-Mn steel, *Mater. Sci. Eng.*, A242, (1998) 181.
- 4) M. Pellizzari, A. Molinari and G. Straffellini: Thermal fatigue resistance of gas and plasma nitrided 41CrAlMo7 steel, *Mater. Sci. Eng.*, A352,(2003)186.
- 5) M. M. Tosic and R. Gligorijevic: Plasma nitriding improvements of fatigue properties of nodular cast iron crankshafts, *Mater. Sci. Eng.*, A140, (1991)469.
- 6) Chang-Min Suh, Jeong-Ki Hwang, Kwang-Soo Son and Ho-Kyung Jang: Fatigue characteristics of nitrided SACM 645 according to the nitriding condition and notch, *Mater. Sci. Eng.*, A392,(2005)31.
- 7) K. Genel, M. Demirkol and M. Capa: Effect of ion nitriding on fatigue behaviour of AISI 4140 steel, *Mater. Sci. Eng.*, A279,(2000)207.
- 8) K. Shiozawa, L.Lu: Very high-cycle fatigue behaviour of shot-peened high-carbon-chromium bearing steel, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 25,(2002)813.
- 9) 米倉大介, 小茂鳥潤, 清水真佐男, 清水博美: 浸炭焼入れとWPC処理を組合わせたハイブリッド表面処理による鋼の疲労強度の改善, 日本機械学会論文集 (A編), 68, 667(2002)509.
- 10) N. Limodin, Y. Verreman and T. N. Tarfa: Axial fatigue of a gas-nitrided quenched and tempered AISI 4140 steel (effect of nitriding depth), *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 23,(2003)811.
- 11) 鈴木秀人, 西野創一郎, 伊藤金弥, 山田壮一, 森谷光孝: 「インターヒート」処理による球状黒鉛鉄の複合組織化と疲労強度特性の診断, 日本機械学会論文集 (A編), 63, 610(1997)1147.
- 12) 鈴木秀人, 片平和俊, 山田壮一: 超急速加熱処理によるFDI鉄のメゾ材料化と高水準疲労信頼性の発現, 日本機械学会論文集 (A編), 63, 615(1997)2263.
- 13) 衛藤洋仁, 松井勝幸, 安藤柱: 軟窒化処理材におけるショットピーニング効果に関する研究, 日本機械学会論文集 (A編), 69, 688(2003)1746.
- 14) 米倉大介, 野田淳二, 小茂鳥潤, 清水真佐男, 清水博美: WPC処理を施したフェライト・パーライト鋼の疲労破壊特性, 日本機械学会論文集 (A編), 67, 659(2001)1155.