機械構造用炭素鋼の表面脱炭と疲労強さとの 関係についての研究*

(第2報 表面脱炭鋼の内部応力の分布について)

上 田 太 郎** 上 田 祐 男**

On the Relation between the Surface Decarburization and the Fatigue Properties of Plain Carbon Steel for Machine Construction

(2nd Report: On the Distribution of Internal Stress in the Cross Section
of the Decarburized Steel Bar)

by

Taro UEDA and Sachio UEDA
(Osaka University)

The distribution of internal stress in the cross section of the decarburized carbon steel bars, which were normalized, quenched and tempered, or shot-peened, were measured.

In this measurement of the internal stress, the dissolution method by acid solution was used in order to remove the outer layers of specimen without any effect of workhardening. The results obtained were as follows:

(1) In the outer portion of both the normalized and the heat-treated specimens, containing the decarburized zone, the internal stress acts as tension. This tensile internal stress gets maximum at the surface layer and sharply decreases towards the center of the specimen, till it vanishes at a certain point, which lies at a depth of around 0.5~1.0 mm from the surface, and afterwards changes its sign; this compressive internal stress increases towards the center.

(2) As the depth decarburized increases, each of these maximum tensile internal stress decreases. The maximum value of this tensile stress is about 52 kg/mm² in the specimen, when the depth of decarburized layer is 0.15 mm, and it reduces almost by half when the depth is 0.5 mm. The compressive maximum internal stresses in their center zones are about 3~6 kg/mm².

(3) The distribution of internal stress in the quenched and tempered steel bar after decarburizing is similar to that of the normalized one. The surface maximum tensile stress is 35 kg/mm² in the specimen having a depth decarburized of 0.15 mm, and 15 kg/mm² when the depth is 0.5 mm. Thus the maximum tensile stress decreases as the depth of decarburized layer increases.

(4) The value of maximum tensile internal stress in the normalized steel bar at each depth decarburized is greater than those of the quenched and tempered bar.

(5) The distribution of internal stress in the shot-peened specimen after decarburization is opposite to that of the above mentioned normalized, or heat treated steel bar.

The value of maximum compressive internal stress at the surface layer increases as the depth decarburized increases. That is 32 kg/mm² in the specimen with a depth decarburized of 0.05 mm and is 60 kg/mm² in the 0.5 mm depth specimen.

(Received Oct. 6, 1959)

1. 緒 言

機械部品として多く使用されている鉄鋼材料は、その製造過程において熱間圧延、鍛造あるいは熱処理な

どのため空気中で高温に加熱されて表面に脱炭層の形成される場合が多い。これら表面脱炭した鋼の機械的性質は脱炭によっていちじるしく変化し、ことに疲労強度に及ぼす影響のいちじるしいことは第1報¹⁾で述べたとおりである。

鋼の表面が脱炭して内部層との間に炭素含有量に相

* 原稿受付 昭和34年10月6日、当協会第5期総会講演会にて講演(昭31.5)

** 正員 大阪大学工学部

違が生じ、金属組織が不均一になれば内部応力の発生することは考えられる。また、このような脱炭鋼の表面にショットピーニングを施して、表面層に塑性変形と加工硬化を与えるときは、それらの内部応力の分布は変化することも考えられる。

そこで、これら表面脱炭鋼の内部応力の分布状況、およびその大きさを知ることは前報告の疲労試験結果を考察するうえにも、また、表面脱炭鋼の疲労強度に及ぼす種々の影響を研究するうえにも必要なことと考えられるので、本研究において脱炭後焼準、および焼入れ、焼戻し処理あるいはまた、表面脱炭したものにショットピーニングを施したものについて、その横断面における縦軸方向の内部応力の分布状態を測定することにした。

2. 実験材料および試験片

実験に用いた鋼材は炭素含有量0.61% C の機械構造用炭素鋼で、内部応力測定用の試験片は直径 19 mm の圧延棒鋼より Fig. 1 に示す直径 12 mm、長さ 140 mm の丸棒に旋盤仕上したもので、その化学成分、および脱炭方法は第 1 報の疲労試験に用いた試片と同一である。その方法によって試験片表面に深さ 0.15, 0.3, および 0.5 mm の脱炭層を造り、そののち 920 $^{\circ}\text{C}$ の脱炭処理温度より空冷したもの、および 920 $^{\circ}\text{C}$ より直ちに油中焼入れし、580 $^{\circ}\text{C}$ で 1 時間焼戻しをしたものについて内部応力を測定した。また、ショットピーニングによる内部応力の変化を研究するため脱炭後空冷したものに Table 1 の条件によってショットピーニングを施した。

3. 測定方法

内部応力の測定方法としては、古くから G. Sachs の引拔鋼棒について縦軸方向の穿孔により、あるいは E. Heyn、および O. Bauer の引拔鋼棒の表面からごく少しずつ旋盤で削り取ることなどにより、引拔鋼棒中の内部応力の平衡を乱してそのときに生ずる変形量を測定し、これから鋼棒の横断面に作用する内部応力の大きさを算出する方法が採用されている。本研究においては表面の脱炭層はわずかであるから、この部分を数回にわけて旋盤で削り取ることは困難であり、またかりに削られたとしても、切削による新しい内部応力の発生があるので、これを防ぐため、著者の研究に

よる酸で表面を溶去して、内部応力を測定する方法を採用した。この方法によれば、旋盤で削るさいに生ずる内部応力の発生を防ぎ、かつ、直径が細くなるまで溶去できるので中心近くまでの内部応力が求められる。

内部応力測定用試験片の両端にきわめて細い十字線を引いた白金板を Fig. 1 に示すようにはりつけ、この十字線の交点を長さをはかるときの標点とした。その標点距離以外の両端を、全部ビニール塗料で被覆して溶去を防いだ。この試験片を 10% 硝酸溶液中に一定時間垂直につるし、かつこれをゆるく回転させるときは、標点距離の部分のみが外部よりなんらの応力を受けることなく、静かに表面より溶け去って細くなる。試験片の表面が溶去されると同時に、溶去前の試験片に存在していた内部応力の平衡が破れ、新たな平衡状態に達しようとして変形する。この長さの変化量を測長コンパレーターにより 1/1 000 mm まで測定し、直径の変化をマイクロメーターを用いて 1/100 mm まで、長さ 10 mm ごとに直角方向に測定し、その平均値を取って、そのときの試験片の直径とした。これらの測定値からつぎに示す計算式を用いて各溶去層に作用する縦軸方向の平均内部応力を求めた。

いま、第 n 回の溶去後における環状層に働く平均内部応力を σ_n とすれば、

$$\sigma_n = (l_n - l_0) \{ r_0'^2 (E' - E) + r_n^2 E \} - (l_{n-1} - l_0) \{ r_0'^2 (E' - E) + r_{n-1}^2 E \} / l_0 (r_{n-1}^2 - r_n^2) \quad (1)$$

で与えられる。

式中の E = 脱炭層のヤング率

E' = 無脱炭部のヤング率

r_0 = 試験片の最初の半径

r_0' = 中心から脱炭層までの半径

r_n = 第 n 回目の溶去後の半径

Fig. 1 Specimen for internal stress

Fig. 2 r_0 = Initial radius of the specimen
 r_0' = Radius of the non-decarburized zone
 r_n = Radius after the n -th dissolution

Table 1 Condition for shot-peening

Type of machine	Centrifugal force type
Shot-size (mm)	0.7 cut wire shot
Shot-velocity (mm/sec)	65
Rotating speed of specimen (rpm)	20

l_0 = はじめの試験片の標点距離

l_n = 第 n 回目の溶去後の標点距離

溶去が進んで無脱炭部との境にきて $r_n = r_0'$ になり、さらに溶去が進めば無脱炭部のみとなって、第 $n+m$ 番目の層における平均内部応力を σ_{n+m} とすれば、

$$\sigma_{n+m} = \frac{(l_{n+m} - l_0)r_{n+m}^2 E' - (l_{n+m-1} - l_0)r_{n+m-1}^2 E'}{l_0(r_{n+m-1}^2 - r_{n+m}^2)} \quad (2)$$

最後に残った中心部の平均応力を σ_c とすれば

$$\sigma_c = E' \frac{l_0 - l_{n+m}}{l_0} \quad (3)$$

これらの (1), (2), (3) 式における r_n , l_n , および r_{n+m} , l_{n+m} の各値は溶去ごとに測定されるから、その層に存在した平均内部応力 σ_n や σ_{n+m} を求めることができる。この場合内部応力の値が正の符号をもつときは引張応力、負のときは圧縮応力である。

4. 実験結果

試験片の表面を 10% 硝酸溶液中で溶去させた後、直径ならびに長さの変化を測定して、それより横断面の各層に作用する内部応力を (1), (2), (3) 式より

Table 2 Modulus of elasticity for pure iron and 0.61% C steel

Heat treatment	Modulus of Elasticity (kg/mm ²)	
	Decarburized zone: E	Non-decarburized zone: E'
Normalized structure	21500	21050
Quenched & tempered structure	21450	20980

Fig. 3 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

算出するさい必要となる鉄、および硬鋼のヤング率の値については、これまで多く測定されているがまちまちであるので、著者の一人が測定した値を採用することとし、その値は Table 2 に示している。

(I) 焼準組織の脱炭鋼棒の内部応力

深さ 0.15, 0.3, および 0.5 mm の脱炭層をもつ 3 種類の直径 12 mm の試片についての測定結果、およびこれより算出した各層における内部応力の分布を図示したものが Fig. 3~Fig. 5 である。

Fig. 3 は深さ 0.15 mm の脱炭層をもつ試験片についての結果で、試験片を表面から溶去してゆくと内部応力の平衡が破れて、新平衡状態に達するために長さは伸び、内部応力の分布は実線で示すように外層部には引張内部応力、中心部には圧縮内部応力が存在し、

Fig. 4 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 5 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

表面層における引張内部応力の最大値は約 52 kg/mm^2 に達し、中心部の圧縮内部応力の最大値は 5 kg/mm^2 にすぎない。

脱炭層が 0.3 mm 、あるいは 0.5 mm と深くなっても Fig. 4 や Fig. 5 に示すように内部応力の分布状態は脱炭層 0.15 mm の場合と同様である。しかし、その大きさは脱炭深さが増すほど小さくなり、脱炭深さ 0.3 mm の棒の最大引張内部応力は約 40 kg/mm^2 であり、 0.5 mm 深さのものでは約 27 kg/mm^2 となつて、脱炭深さ 0.15 mm の約 $1/2$ に減少する。また、引張内部応力から圧縮内部応力へ移り変わる点は脱炭深さが増すとともに中心部へ移動している。

(II) 焼入れ、焼戻し調質処理した脱炭鋼棒の内部応力

脱炭処理した試験片を油中焼入れ後焼戻しの調質処理したものについて求めた値を示すと Fig. 6~Fig. 8 である。

Fig. 6 は、脱炭深さ 0.15 mm 試片の溶去による長さの変化、および内部応力の分布状態を示し、溶去するとともに標点距離はしだいに伸び、表面層には引張内部応力、内部には圧縮内部応力が存在していることは焼準組織の試片と同様であるが、その値はそうとう小さくて最大引張内部応力は 34 kg/mm^2 となり、 0.3 mm 、 0.5 mm と深くなっても Fig. 7, Fig. 8 に示すように同じような分布状態である。異なる点は、焼準鋼に比べて表面層に働く最大内部応力の値は小さく、脱炭深さが深くなるに従い一層小さくなって 0.3 mm で、 22 kg/mm^2 、 0.5 mm で 15 kg/mm^2 である。

(III) ショットピーニングを施した脱炭鋼棒の内部応力

深さ 0.05 、 0.15 、 0.3 、 0.4 および 0.5 mm の脱炭

深さを有する丸棒試験片に Table 1 に示す条件でショットピーニングを施し、その横断面における内部応力の分布状態を測定した結果を Fig. 9~Fig. 13 に示している。

Fig. 9 は 0.05 mm のごく浅い脱炭層をもつものにショットピーニングを施した場合の内部応力の分布曲線を示したもので、表面には圧縮内部応力、中心部には引張内部応力が存在しており、ショットピーニングを施さない上記の二つの場合と正反対の分布状態を示している。また、これらの表面層の最大圧縮内部応力は、脱炭深さが 0.05 mm のとき 32 kg/mm^2 、これより増すに従い大きくなって、 0.5 mm のものでは 60 kg/mm^2 に達していて、この変化状況もまたショットピーニングを施さない場合と正反対である。

Fig. 7 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 6 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 8 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 9 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 10 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 11 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

5. 実験結果の考察

(I) 焼準組織の場合

焼準組織をしいずれの脱炭深さの試験片においても、横断面に存在する内部応力の分布状態はよく似ており、表面層に引張内部応力、内部には圧縮の内部応力が存在して平衡状態にある。

炭素鋼棒の表面で脱炭反応がおこれば、表面部にはフェライトの多い層が形成され、内部の炭素は外部へ拡散して炭素量を平均しようとする。したがって、表面の脱炭反応速度と内部より外部への炭素の拡散速度

Fig. 12 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

Fig. 13 The distribution of longitudinal internal stress in the cross section of decarburized carbon steel bar and the change of length caused by dissolution

との差により、炭素含有量に勾配が生じて組織が異なり、比重は表面におけるフェライトの7・86から内部の0・61% C鋼の7・83へとしだいに減少して、ここに内部応力が生ずる。すなわち、試片の表面部は脱炭により収縮しようとするけれども、横断面における脱炭部の面積は、内部の脱炭していない部分の面積に比べていちじるしく僅小であるため、表面層は引張られることになって、ここに引張の内部応力が発生する。内部は表面層の収縮しようとする作用により圧縮応力を受け、これらあい反する二つの応力によるひずみ力の大きさが等しくなって平衡状態にあると考えられる。

Fig. 14 は、表面における最大内部応力と脱炭層の深さとの関係を図示したもので、脱炭焼準および脱炭焼入れ、焼戻しの調質処理したものは実線曲線で、脱炭焼準後ショットピーニングしたものは点線曲線で示している。

この図にみられるように、焼準鋼では脱炭深さが深くなるにつれて最大引張内部応力の値はしだいに減少し、脱炭深さの深いものは浅いものに比べていちじるしく減少している。この減少は脱炭深さが増せば脱炭部の面積が増加し、収縮しようとして内部に及ぼす圧縮力が増し、そのため内部の収縮変形は増大するため外側の受ける引張応力は小さくなり、内部の圧縮応力の値は大きくなってくる。

(II) 焼入れ、焼戻し調質処理した場合

脱炭後調質した試験片における内部応力の分布状況は、上掲の脱炭焼準の試験片と同様であるが、最大内部応力の値は Fig. 14 に示すように脱炭深さが深くなるに従い表面における最大引張内部応力は小さくなっていることは、焼準組織のものと同様であるがその値

はいずれも小さい。

一般に鋼は焼入れ、焼戻し処理を受けると熱応力と変態応力とが発生し、試験片の内部と外部に収縮、あるいは膨張の不均一ひずみが生ずる。すなわち、焼入れのための急冷により試験片の表面温度は急激に低下するが、内部へゆくにつれて冷却は遅れ、この冷却速度の遅速による収縮状況の不同により熱応力が発生し、また、表面部は内部より早のマルテンサイト化して膨張し、ここに変態応力が発生する。これら二つの応力が同時におこり、表面部に圧縮、内部に引張の内部応力が発生することは多く研究されている。焼入れによりマルテンサイト組織となって膨張したものを焼戻しすれば、ソルバイト組織となって収縮するため、焼入れにより生じた内部応力は小さくなる。このように脱炭していない焼入れ、焼戻し鋼における内部応力の分布は脱炭試験片を焼入れ、焼戻し処理したときの内部応力の分布とちょうど正反対となっている。これは前節で述べたように、脱炭によって表面部の組織はフェライトに近くなって収縮し、かつ、焼入れによってマルテンサイト変態はおこらないのに対し、中心部ではマルテンサイト変態がおこって膨張するため、引張られる結果となって引張の内部応力が発生し、これを焼戻しするときは中心部のマルテンサイト組織が、ソルバイト組織となって中心部は収縮して表面の内部応力が減少するのは当然である。

(III) ショットピーニングを施した場合

表面に引張内部応力、中心部に圧縮内部応力が存在している脱炭鋼棒の表面に、ショットピーニングを施したときの内部応力の分布状態は、ショットピーニング前の脱炭のままの試片における分布とは正反対となり、表面の脱炭部には圧縮内部応力、中心部には引張内部応力が存在し、Fig. 14 の点線曲線で示すように、表面における最大圧縮内部応力は、脱炭深さが増すに従って増大している。このように、表面の脱炭層にショットピーニングを施せば、ショットの衝突により打ちたたかれて表面層だけ塑性変形をおこして伸ばされるために、圧縮内部応力の発生する結果となる。この最大値は脱炭深さの増加とともに上昇している。

ショットピーニングは、脱炭深さのいかにかわ

Fig. 14 Relationship between the surface maximum internal stress and the depth of decarburized layer

Table 3 Maximum internal stress at surface

Depth of decarburized layer (mm)	Decarburized only σ_1 (kg/mm ²)	Decarburized + shot-peened $\sigma_1 + \sigma_3$ (kg/mm ²)	Shot-peened only σ_2 (kg/mm ²)
0・15	+52	-35	-89
0・3	+40	-45	-85
0・4	+33	-50	-83
0・5	+25	-60	-85

らず、同一条件で施したものであるから、いま脱炭のみによって生ずる表面最大内部応力を σ_1 、ショットピーニングのみによって生ずる表面最大内部応力を σ_2 とすれば、脱炭後ショットピーニングしたものの表面最大内部応力は、 σ_1 と σ_2 との和で与えられる。したがって、これからショットピーニングのみによって生ずる内部応力 σ_2 を求めると Table 3 の結果となり、脱炭深さにかかわらず約 85 kg/mm² の圧縮内部応力の生ずることが知られる。

6. 総 括

表面脱炭した機械構造用炭素鋼材の疲労破壊を論ずるさい、実用的見地から大きな影響を与えようと考えられる表面脱炭による内部応力の分布状態を、直径 12 mm なる 0.61% C 炭素鋼棒の脱炭層をもつ焼準組織のもの、ならびにこれを焼入れ、焼戻し調質したもの、および脱炭焼準したものにショットピーニングを施したものについて求めた。この場合の内部応力の測定は、10%硝酸溶液中で表面より漸次溶解し、そのときの直径および長さの変化を求め、これより縦軸方向の内部応力を算出する方法によった。その結果を総括すると、

(1) 表面脱炭した焼準鋼棒の横断面においては、表面に縦軸方向の最大引張内部応力、中心部には圧縮内部応力が分布している。

(2) 脱炭深さが増すにつれて最大引張内部応力は減少する。脱炭深さ 0.15 mm では約 52 kg/mm² の最大引張内部応力が存在し、深さが 0.5 mm になれば約 27 kg/mm² となって半減している。中心部における圧縮の最大内部応力は 3~6 kg/mm² 程度である。

(3) 脱炭した鋼に焼入れ、焼戻しの熱処理を施せば内部応力の分布状態は焼準の場合と同じであるけれども、表面に存在している最大引張内部応力の値はいちじるしく減少する。

脱炭深さ 0.15 mm では 35 kg/mm²、脱炭深さが 0.5 mm となれば 15 kg/mm² となって脱炭深さが増すにつれて減少している。

(4) 脱炭鋼に存在する内部応力の分布はショットピーニングを施すことにより正反対となり、表面層に圧縮内部応力、内部に引張内部応力が存在する。

脱炭層が深くなるにつれて表面の最大圧縮内部応力は増加し、脱炭深さ 0.05 mm で 32 kg/mm²、深さ 0.5 mm では 60 kg/mm² に及んでいる。

(5) 第1報で脱炭によって疲労耐久限の減少することを述べたが、その理由として表面層に存在する最大引張内部応力が大いに影響するものと考えられる。すなわち、脱炭鋼棒の表面に作用している最大引張内部応力に繰返曲げ荷重による最大引張応力が加わると、表面における実働引張応力はいちじるしく大となり、これがフェライト部の真の破断力をこえて、微小き裂が無脱炭鋼に比べて早く発生するからである。

また、のちに報告するように、脱炭鋼にショットピーニングを施せば疲労限は上昇するが、その理由の一つは表面部に圧縮内部応力が存在して実働応力が小さくなるためと考えられる。

終りにのぞみ、試験片にショットピーニング加工していただいた神奈川県工業試験所技師大野明氏に厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 上田太郎, 上田祐男, 材料試験, 8, 65, 170 (昭34)
- 2) G. Sachs, Zeits. Metallkunde, 19, 352 (1927)
Metall wirtsch., 10, 783 (1931)
- 3) E. Heyn and O. Bauer,
Inst. z. Metallsg., 1, 16 (1911)
Stahl u. Eisen, 32, 2097 (1912)
- 4) Taro Ueda, Science Reports, Tohoku Imp. Univ.,
Series 1, 26, 434 (1939)
Tech. Reports, Osaka Univ., 3, 21 (昭28)
- 5) 本多, 橋本, Tohoku Sci. Rep., 10, 75 (1921)
- 6) 本多, 松下, Tohoku Sci. Rep., 8, 89 (1919)
- 7) 松下, Tohoku Sci. Rep., 9, 247 (1920)
- 8) 上田太郎, 久米井茂, 日本金属学会誌, 17, 12, 623 (昭28)
- 9) H. Bühler, H. Buchholtz u. E.H. Schulz, Arch.
Eisenhüttenwes., 5, 413 (1931)
- 10) H. Bühler, H. Buchholtz, Arch. Eisenhüttenwes.,
6, 247 (1932)