うず電流による脱炭層深さの測定と 脱炭材の疲労寿命向上について

Measuring Decarburized Depth for Steel with Eddy Current
and Improving Fatigue Life of Decarburized Steel

児玉 貞喜*・佐藤 繁美*・佐藤 保夫*
S. KODAMA・S. SATO・Y. SATO

1. 緒 言

今後ばねは軽量化する方向にあり、それに伴って高応力化すると考えられる。そのため、今まで以上に材料欠陥が問題となるが、材料欠陥の一つである脱炭はばねの疲労寿命を低下させるため、ばねの製造にあたって前もって脱炭層深さを知っておくことは重要なことである。しかし、実際に脱炭層深さを測定するには顕微鏡や硬さ試験による破壊検査によっているため、測定位置や試料数に限界があり、非破壊でかつ迅速な脱炭検出法が待たれていた。

ところで、金属材料に交番磁界を作用させたとき誘起されるうず電流を利用した脱炭検出装置が今までに1~2例あることはあったが、脱炭層深さとの相関が悪く実用にまで至っていなかった。しかし、うず電流を用いる方法は簡便で脱炭測定には適していると思われるので、種々検討してみた。その結果、ほぼ定量的に脱炭層深さを測定できるまでになったので、この脱炭検出装置の性能と測定例について報告する。

一方、脱炭の大小を非破壊で判別できれば、脱炭の著しいものは低応力ばねに引当てるなどの配慮ができ、ばねの品質をより安定化させることはできるが、材料在庫の関係から常にこのような手段を講ずることができるとはかぎらない。脱炭材でも簡便な方法で疲労寿命が延ばせる方法があるならばこれにこしたことはない。そのため、ばねに携わるものとしては身近なショットピーニング条件をいろいろ変えることにより脱炭材の疲労寿命を延ばす方法について実験したが、ショットピーニングだけでは寿命を改善できる限界の脱炭層深さが存在することがわかった。そこで、この内容について検討した結果についても報告する。

2. 渦流探傷器による予備実験

磁界浸透深さが交流周波数に依存することはよく知ら

図1 渦流探傷器による周波数依存性

れているが、脱炭検出に適した周波数を探すため渦流探傷器を用いて検討した。

図1は SUP 6 の素材を基準にし、電気炉で加熱時間を変えることにより脱炭層深さを調整した試料について周波数依存性を調べたものである。周波数が高くなると磁界浸透深さが浅くなるが、図1の結果では周波数 64 KHz で脱炭層深さとメータ出力との相関がなくなっている。この結果より、脱炭測定に適した周波数範囲は 32 KHz 以下と判断した。

3. 脱炭検出装置

当検出装置は脱炭検出に必要な最小限の機能を有し、小型軽量、可搬性に富むことを目標に製作した。主要ブロックダイアグラムを図2に示す。発振周波数は 8, 32 KHz で、脱炭検出は2個の検出コイル（プローブ）を含むブリッジ回路の不均衡出力を増幅、表示するもので、特に増幅器の直線性と検出コイルの定電流維持に配慮してある。

測定方法は脱炭を検出しようとする試料と同じ鋼種の

* 日本発条株式会社

図 2 脱炭検出器のブロックダイアグラム

材料を研削し、脱炭層を除いたものを基準材とする。次に、基準材に2個のプロブを当接し、ブリッジの平衡をとる。平衡をとった後は、一方のプロブを基準材に当接したままとし、他方のプロブを脱炭検出材に当てると脱炭層に応じて電流が変化するので、そのときのブリッジの不均衡出力がメータに表示される。

4. 検出器を用いた脱炭測定

4.1 SUP 6 素材の脱炭測定

図3に SUP 6 素材（熱間圧延材，平鋼）の脱炭層深さ (D_m-T) とメータ出力の関係を示す。すべて一直線上にのるまでの精度はないが、相関は十分あり、およその脱炭層深さの推定はできると思われる。

図 3 SUP 6 素材の脱炭層深さとメータ出力の関係

写真 1 ばらつきの原因となる素材組織 (×100) (上) の組織には粒界に初析フェライトが多い

一方、直線関係からはずれる要因としてはっきりしているものに組織の影響があげられる。写真1にその例を示すが (上) の組織には初析フェライトが認められるが、(下) の組織にはそれがない。おそらく熱間圧延後の冷却速度が製鋼メーカーによって異なるためと思われる。

図4 SUP 6 素材 Si 含有量の影響

図5 SUP 6 素材 C 含有量の影響

図6 SUP 6 焼入れ焼戻し後の脱炭層深さとメータ出力の関係

この他に材料化学成分として Si と C の含有量の影響を調べた。Si は電気抵抗 ρ への寄与が大きい成分であるが^{*}、図4の結果では Si 含有量との相関は認められない。図5は C の影響であるが相関は認められるもののメータ出力 13 以下であり、その影響は小さいと言える。

4.2 SUP 6 焼入れ焼戻し材の脱炭測定

図6に測定結果を示す。このときの調質条件は次の通りである。

焼入れ: 950°C×16 min 油冷

焼戻し: 520°C×60 min 水冷

焼戻し硬さ: ブリネルくぼみ径 3.05~3.10 mm

図3の素材脱炭に比べ測定精度が悪くなっているが、この原因としては調質による表面スケールなどの表面状況の変化と調質状態での脱炭を顕微鏡で調べる不確かさ

表1 焼戻し硬さの影響

試験片 No.	焼戻し条件	ブリネルくぼみ径	メータ出力						
(I)	400°C×60 min	2.63	60	54	44	26	20	0	
(II)	425°C×60 min	2.74	36	30	20	4	0	20	
(III)	450°C×60 min	2.85	34	28	18	0	3	23	
(IV)	475°C×60 min	2.90	12	8	0	18	24	42	
(V)	500°C×60 min	3.00	2	0	12	30	33	55	
(VI)	525°C×60 min	3.10	0	2	12	31	37	56

図7 SUP 9 素材の脱炭層深さとメータ出力の関係

が加味されているようである。

しかし、以上の場合は調質硬さのばらつきがブリネルくぼみ径で 0.05 mm あった例であるが、硬さの範囲がさらに大きくなったときの硬さだけの影響を調べた結果を表1に示す。この結果は基準材の硬さを順次変えて測定したものであって、表中のメータ出力 0 が基準材の硬さである。例えば(VI)の出力を 0 にしたとき、(I)は 60 を示しているように、硬さの範囲が広くなりすぎるとメータ出力の変化は大きくなる。しかし、ばね硬さの範囲では基準材に規格の中間の硬さを選ぶことにより測定可能である。

4.3 SUP 9 素材の脱炭測定

図7に SUP 9 素材(熱間圧延材, 平鋼)の脱炭層深さとメータ出力の関係を示す。SUP 6 素材の場合より測定精度は悪いが相関は認められ、およその脱炭層深さの推定はできると思われる。なお、直線関係よりはずれるものの原因ははっきりしており、それは以下の通りである。

(1) D_m-T の値が大きくても粒界にのみ脱炭して

* $\rho = 10 + 5C + 13.5Si + 5.3Mn + 11P + 10S + 4Cu + 1.5Ni + 5.4Cr + 3.4Mo$ ($10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, 20°C)

メータ出力：52
 $D_m - T$ 0.15
 粒界にのみ脱炭

メータ出力：100
 $D_m - T$ 0.14
 フェライトが多い

写真 2 ばらつきの原因となる脱炭組織 (×100)

いるものは直線より下にはずれる。

(2) $D_m - T$ の値そのものは比較的小さくてもフェライト脱炭の多いものは直線より上にはずれる。

この例を写真 2 に示す。

4.4 考察

4.4.1 測定精度

顕微鏡で脱炭層深さを測定する場合、その最小単位は 0.01 mm である (JIS G 0558)。この 0.01 mm の変化は検出器のメータでは約 4~5 の変化分に相当する。一

方、メータの最小目盛は 2 であるので十分 0.01 mm の脱炭層深さの変化分に対応した表示をすることは可能である。

しかし、次のような理由からメータ出力 ± 5 程度の誤差は避けられない。すなわち、うず電流の変化は立体的 (三次元的) であるのに対し、顕微鏡または硬さによる脱炭層深さの測定は一次元ないしはせいぜい二次元的なものであるため、どうしても脱炭層深さとメータ出力の関係で表示した場合は誤差が生じる。したがって、うず電流の発生した空間内において均一に脱炭していた場合にはもっと精度が良くなると思われるが、脱炭の性質上局部的に脱炭層深さが変化していることは十分考えられるため、このような誤差は避けられない。

また、フェライト脱炭の大小によってもメータ出力が変化する。すなわち、脱炭層深さが割合深いのにフェライト脱炭の少ないものはメータ出力が小さくなる。

4.4.2 表面状況

測定の際まず脱炭 0 の基準材の上に 2 個のプローブを当接してブリッジの平衡をとるが、この際基準材としては通常脱炭を 0 とするため 0.3~0.5 mm 研削したものをを用いる。一方、被測定材は通常黒皮 (熱間圧延や熱処理による) のままであるため、酸化スケールや表面あらさの変化による影響がメータ出力で 25~30 でてくる。したがって黒皮で脱炭していないものでも 0 を示さずメータ出力で 25~30 を示す。

また、ショットピーニング後は残留応力や表面あらさの影響が大きくなって脱炭測定はできなかった。

5. 脱炭層深さと疲労寿命の関係

脱炭層深さによって疲労寿命がどの程度低下するかを確認するため、種々の脱炭層深さを有する試料を作成して疲労試験を行った。

5.1 試料および実験方法

表 2 に試料の諸元を示すがこのうち B, C, D は納入された材料の中から素材脱炭の程度に応じて選んだものであるが、完全に脱炭層のない材料が得られなかったため、研削して脱炭層を取り除いたものを A として加え

表 2 試料の諸元

試 料 No.	材質サイズ	素材の脱炭層深さ (引張応力側中央部) (メータ出力)	試料作成方法 (備 考)	焼入れ焼戻し条件	焼入れ焼戻し後の 脱炭層 (引張応力側中央部) (メータ出力)
A	SUP 6 8 ^t ×70 ^b ×550 ^f	10以下	0.3 mm 研削	焼入れ, 950℃×16 min 油冷 焼戻し, 520℃×60 min 水冷 焼戻し硬さ, H _B 388~401 (3.10~3.05)	20~25
B		30前後	素材のまま		30~35
C		60前後			45~55
D		80~90			60~70
E		160前後	電気炉で脱炭 (800℃×60 min)		80~90

表3 ショットピーニング条件

ショットサイズ	φ0.7 スチールショット
ショット量	87 kg/min
インペラ周速	51.3 m/sec
コンベアスピード	6 m/min
パス回数	2パス
アークハイト	0.35~0.40 mmA
カバレッジ	90% 以上

表4 疲労試験条件

疲労試験機	協会型(互理式)
試験速度	500 rpm 10°回打ちり試験
試験応力	65±40 kg/mm ²
セッティング	120 kg/mm ²

た。また、極端に脱炭の多い試料として電気炉で脱炭させたEも加えた。B~Eの素材脱炭状況を写真3に示す。なお、表2を見ると素材時と調質後とでメータ出力に変化が認められるが、これは熱処理中に内部よりの炭素の拡散と表面フェライト層がスケールとして剝離したためなどによると思われる。

ショットピーニング条件は表3に示すように、アークハイトが0.35 mmA 以上でカバレッジが90% 以上を満足するようにした。実験用のショットピーニング機でこれらを満足させるには、コンベアを2パスする必要があった。また、疲労試験の条件を表4に示す。

5.2 疲労試験結果

図8に素材の脱炭層深さと疲労寿命との関係を、図9に焼入れ焼戻し後の脱炭層深さと寿命の関係を示すが、いずれも脱炭層が深くなるにしたがって疲労寿命の低下していることがわかる。以下の章で脱炭の多い材料の疲労寿命を向上させる方法について述べる。

試料 No. B
メータ出力：32

試料 No. C
メータ出力：50

試料 No. D
メータ出力：78

試料 No. E
メータ出力：168

写真3 試料 No. B~E の素材脱炭組織 (×100)

図 8 SUP 6 素材のメータ出力 (D_m-T 推定値) と折損回数の関係

図 9 SUP 6 焼入れ焼戻し後のメータ出力 (D_m-T 推定値) と折損回数の関係

6. 疲労寿命の改善

脱炭材の疲労寿命を向上させるようなショットピーニング条件を見いだすために一定の脱炭層深さを有する試料に各種のショットピーニングを施し疲労試験を行った。これらの試料の表面あらさ、硬さ、残留応力の測定からショットピーニングの効果を判断した。

6.1 試料および実験方法

試料の形状および焼入れ焼戻しの条件は表 2 と同様に

表 5-(a) ショットピーニング条件と液体ホーニング条件

条件	ショット サイズ	ショット流量	インペラ周速	コンベア スピード
A	φ0.4 カット ワイヤ	95 kg/min	56.4 m/sec	6 m/min
B	φ0.7 スチール ショット	87 kg/min	51.3 m/sec	
C	ガラスビーズ φ0.2~φ0.3	水：ガラス ビーズ 2:1	噴射圧力 5 kg/cm ²	試料移動速度 3 mm/min

表 5-(b) ショットピーニング条件の組み合わせ

No.	組み合わせの条件	アークハイト	カバレッジ
(1)	A 2パス	0.25 mmA	95%以上
(2)	B 2パス	0.39 mmA	90%以上
(3)	B 5パス	0.44 mmA	95%以上
(4)	B 10パス	0.46 mmA	95%以上
(5)	(2)+(1)	0.40 mmA	95%以上
(6)	(2)+C	0.46 mmA	95%以上

表 6 X線応力測定条件

装 置	ストレインフレックス MSF
X線管球	Cr
フィルタ	V
管電圧	30 kV
管電流	10 mA
検出器	シンチレーション計数管
照射マスク	2×4 mm
2θ 走査範囲	145°~168°
入射スリット発散角	1.02°
受光スリット発散角	1.02°
ステップ幅	0.5°
プリセットタイム	2 sec
ピーク位置決定法	半価幅中点法
応力計算法	sin ² ψ 法

図 10 残留応力測定部

表7 折損回数と表面あらさ

した。焼入れ焼戻し後の脱炭層深さがメータ出力で50～60 ($D_m - T$ 0.11～0.13)を示す試料を選びだし、表5の条件でショットピーニングを施行した。

疲労試験は表4の条件で行った。

次に、表6にX線応力測定条件を示す。残留応力の測定部は図10に示すように疲労試験後、未折損の試料は中央部を、疲労破断した試料は破断の影響が少ないと考えられる破断面から20～30 mmの位置とした。残留応力分布の測定は測定部を局部的に電解研磨し、X線応力測定装置を用いて各深さの残留応力を求めた。得られた値にそれまでの除去層についての補正をして真の残留応力とした。

6.2 実験結果

脱炭層深さは板幅の中央部に比べてこば部の方が多いことと、応力集中の関係で折損の起点はほとんどこば部にあった。また、板幅の中央部に起点のあるものは疲労寿命が延びていた。

表7に疲労試験結果を示すが、ショットピーニング条件(5)、(6)のとき疲労寿命が向上している。すなわち、0.7スチールショット(以下0.7SSとする。)で打った後、さらに0.4カットワイヤ(以下0.4CWとする。)によるショットピーニングまたは液体ホーニングを施すことが有効であると認められる。しかし、条件(1)、(2)、(3)、(4)では折損回数に顕著な差がないので、ショットサイズ、パス回数の効果はあまりないと思われる。

6.3 考察

6.2の実験結果から2度打ちのショットピーニングによって疲労寿命が向上した。この寿命の向上の原因について、表面あらさ、硬さ、残留応力の各項の影響を考察する。

6.3.1 表面あらさ

表7に表面あらさと折損回数を示す。表面あらさは板幅中央部とこば部について測定した。中央部の表面あらさと折損回数との間には明瞭な関連性は認められない。しかし、こば部の表面あらさと折損回数との間には関連性が認められる。すなわち、こば部の表面あらさが小さいものほど疲労寿命が延びている。

6.3.2 硬さ

図11に各ショットピーニング条件ごとの硬さを示す。疲労試験後、未折損の試料は中央部を切断し、ショットピーニング面から0.05 mm入った位置の硬さを測定した。ショットピーニング前の硬さとはショットピーニングを行なわなかった面から0.05 mm入った位置の硬さである。また、疲労試験後、折損した試料は破断面から10 mm程度はなれた場所を切断し、未折損の試料と同様に硬さを測定した。

図11より、ショットピーニングによって加工硬化が認められる。しかし、ショットピーニング条件による差は少なく、したがって、加工硬化と疲労寿命の関連性は明らかでない。

6.3.3 残留応力

図12は各ショットピーニング条件ごとの残留応力分布の例である。条件(1)、(2)、(3)、(4)のピークの

図 11 ショットピーニング前後の硬さ

図 12 ショットピーニング条件ごとの残留応力分布

図 13 0.1 mm 深さの残留応力と折損回数の関係

位置およびその値には顕著な差は認められない。一方、2度打ちをした条件(5)、(6)では表面層の残留応力が(2)に比べて多少大きくなっている。しかし、ショットおよびガラスビーズが小さいためクロッシングポイントに変化していない。

我々の今までの研究結果¹⁾によると板厚の1%前後の残留応力と折損回数との間に良い相関が認められるので、ここでは0.1 mm深さの残留応力と折損回数との関係を調べてみた。図13にその結果を示す。残留応力が高いものほど折損回数は多くなる傾向にある。このことから、表面から0.1 mm程度までの残留応力が高い条件(5)、(6)は疲労寿命に効果があると思われる。

7. 疲労寿命の改善限界

6章において、脱炭層深さがほぼ一定な試料を用いて疲労寿命を改善できるショットピーニング条件を見いだした。そこで、この章では寿命向上に効果のあるショットピーニング条件(5) (0.7 SS, 2パス+0.4 CW)を施した場合、どの程度の脱炭層深さを有する試料まで寿命を改善できるか実験を行った。

試料は表2のものを使用し、実験方法は6章と同様にした。なお、条件(6) (0.7 SS, 2パス+液体ホーニング)も寿命を向上させるが、液体ホーニングの作業は時間がかかり、実用的でないので省くことにした。

7.1 実験結果

図14、図15に種々の脱炭層深さを有する試料の折損回数とメータ出力 (D_m-T 推定値) との関係を示す。図中の○印は5章で行った実験結果であり、このショッ

図 14 素材のメータ出力 (D_m-T 推定値) と折損回数の関係 図 15 焼入れ焼戻し後のメータ出力 (D_m-T 推定値) と折損回数の関係

トピーニング条件は(2) (0.7 SS, 2パス) である。一方、●印は条件(5)のショットピーニングを施したときの結果である。

素材の脱炭層深さがメータ出力で90 (D_m-T 0.14),

図16 表面あらさと折損回数の関係

焼入れ焼戻し後のメータ出力で 70 ($D_m - T$ 0.17) 以下では条件(5)のショットピーニングを行うことによって疲労寿命が大幅に延びている。しかし、脱炭層深さがこれ以上になると寿命を向上させることはできず、この脱炭層深さが寿命の改善可能な限界値と考えられる。

7.2 考察

前述したように、ショットピーニングによって疲労寿命を改善できる脱炭層深さの限界が明らかになったので、これらの関係と表面あらさ、硬さ、残留応力との対応について考察する。

7.2.1 表面あらさ

図 16 にこば部と中央部の表面あらさと折損回数との関係を示す。図中には疲労寿命の改善限界を超える脱炭層を有する試料は別記号で区別した。なお、表面あらさ計の触針形状の違いのため、こば部の表面あらさは低く

なっている。

図 16 より、脱炭層深さが大きいものほど表面あらさも大きく、このような表面あらさが応力集中の原因となって寿命が低下していると思われる。また、改善限界を超える試料の表面あらさはこば部で 28μ 以上、中央部で 36μ 以上である。

次に、図 17 に脱炭層深さと中央部の表面あらさの関係を示す。図より明らかなように、脱炭層深さと表面あらさとの間に良い相関が認められる。

7.2.2 硬さ

図 18 にショットピーニング面から 0.05 mm 入った位置の硬さと折損回数の関係を示す。硬さが高くなるほど疲労寿命は延びる傾向にある。また、改善限界を超える試料の硬さは Hv 300 以下になっている。

次に、脱炭層深さと硬さの関係を図 19 に示す。表面

図 17 メータ出力と表面あらさ（中央部）の関係

図 18 硬さと折損回数の関係

図 19 メータ出力と硬さの関係

図 20 残留応力分布 (ショットピーニング条件(5))

図 21 0.1 mm 深さの残留応力と折損回数の関係

図 22 メータ出力と 0.1 mm 深さの残留応力の関係

あらさの場合と同様、脱炭層深さと良い相関が見られる。

7.2.3 残留応力

図 20 に残留応力分布の測定結果の例を示す。脱炭層深さが深くなるほど表面およびピークの残留応力は低下

し、ピーク位置とクロッシングポイントが深くなる傾向にある。これは脱炭層があるため、表面層の強度は低下しており、そのためショットピーニングによって塑性変形する量は多くなるが、残留応力としてはあまり残らないことから生じる現象であると考えられる。

次に、図 21 に 0.1 mm 深さの残留応力と折損回数との関係を示す。残留応力と折損回数との間には相関が認められる。また、改善限界を超える試料の残留応力は低く -63 kg/mm^2 以下になっている。

さらに、脱炭層深さと 0.1 mm 深さの残留応力との関係について調べた。その結果を図 22 に示す。表面あらさ、硬さと同様、脱炭層深さと残留応力との間に良い相関が認められる。

8. 結 言

うず電流を用いた脱炭検出器の性能とショットピーニングによる脱炭材の疲労寿命向上について検討した結果、下記の点を明らかにした。

(1) 脱炭層深さの推定においてばらつきの要因となるものとして、熱間圧延後の空冷速度による組織の違い、脱炭状態の違い、すなわち、フェライト脱炭と部分脱炭、含有 Si 量、C 量があるが、調査したばね鋼はほぼ定量的に脱炭層深さを推定することができる。

(2) 焼入れ焼戻した材料については硬さの影響を受けるが、規格値の中心の硬さを有する材料を基準材とすれば、規格内の硬さの材料はほぼ脱炭層深さを推定できる。

(3) ショットピーニング施した材料は脱炭層深さの測定が不可能である。

(4) 疲労寿命を向上させる適正なショットピーニング条件は 0.7 SS によるショットピーニング後、さらに 0.4 CW または液体ホーニングを行う 2 度打ちのショットピーニングである。

(5) 2 度打ちのショットピーニングによってこば部の表面あらさが平滑化し、表面近傍の残留応力が多少高くなる。これらのことが疲労寿命向上に寄与している。

(6) 素材の脱炭層深さがメータ出力で 90 ($D_m - T 0.14$)、焼入れ焼戻後のメータ出力で 70 ($D_m - T 0.17$) 以下のものは 2 度打ちのショットピーニングによって疲労寿命を改善できる。

(7) 疲労寿命を改善できなかったもののショットピーニング後の表面あらさ、硬さ、および表面近傍の残留応力は 36μ 以上、Hv 300 以下、 -63 kg/mm^2 以下である。

終りに本研究にあたり渦流探傷器の貸出し、ならびに脱炭検出器の製作に御協力いただいた原電子測器 (株) 佐伯技術部長殿、川上殿他各位に対して謝意を表しま

す。また、弊社技術本部長大野明博士をはじめ小山主査には終始適切な助言をいただき深く感謝いたします。また、実験に際して協力していただいた塩田、阿久津、工藤の各氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤, 日本発条社内報告 研 276-061, -095, -103.