

## 低炭素鋼の機械的性質と組織に 及ぼす浸炭硬化処理の影響\*

堀内 富雄\*\*・小林 義一\*\*\*

(平成6年9月30日 受理)

### Effects of Carburized Hardening on the Mechanical Properties and the Microstructures of Low Carbon Steels

Tomio HORIUCHI, Yoshikazu KOBAYASHI

The low carbon steels (S15CK) were carburized by pack carburizing, and then these steels were heat-treated for primary quenching and secondary quenching. The transformation of the mechanical properties and the microstructures with varying carburized depth and hardening processes were investigated. The strength properties were improved with increasing carburized depth, but the elongation and the reduction of area were decreased markedly as quenched into water and oil in secondary quenching. In the carburizing of 5 hours the maximum hardness of the case was seven times the hardness of material as quenched into water in secondary quenching. In the test piece for tensile test quenched into water and oil as secondary quenching the quasi-cleavage fracture was observed.

### 1. 緒 言

機械部品には歯車や伝動軸のように表面は硬く、内部は粘り強いという、相反する機械的性質を要求される場合があり、種々の表面硬化処理が行われている。表面硬化法のひとつである固体浸炭法は、炭素濃度の調節や自動化が困難であるために、現在では用いられることが少ないが、小物部品や試作品の表面硬化、そして工学実験などでは有用である。ここでの熱処理は固体浸炭剤と品物を浸炭箱に入れ密閉して加熱・浸炭し、第一次焼入れと第二次焼入れを行った後、焼戻しするが、これらの過程での機械的性質や顕微鏡組織の変化についての報告、特に浸炭層深さを変えたときの引張特性についての詳細な研究<sup>(1)</sup>はほとんど見あたらない。筆者らはすでに固体浸炭法により低炭素鋼に浸炭し、第一次焼入れした後、第二次焼入れ温度から水冷、油冷および空冷したときの硬さ試験および顕微鏡組織観察を行い、低炭素鋼の硬さと組織に及ぼす浸炭熱処理の影響について報告した<sup>(2)</sup>。今回は浸炭硬化処理過程での特性の変化、とりわけ引張特性がどのように変化するかを明らかにするために、固体

\* 平成5年11月 日本産業技術教育学会第7回北陸支部大会に発表

\*\* 機械工学科 技官

\*\*\* 機械工学科 教授

表1 熱処理

	浸炭	第一次焼入れ	第二次焼入れ	
		一次油焼入れ	二次水焼入れ	二次油焼入れ
熱処理条件	900°Cあるいは950°C で30分から5時間保持 ↓ 徐冷	900°Cで1時間保持 ↓ 油焼入れ	780°Cで1時間保持 ↓ 水焼入れ	780°Cで1時間保持 ↓ 油焼入れ

浸炭法により低炭素鋼に浸炭し、さらに第一次焼入れと第二次焼入れを施した試験片について、引張試験、硬さ試験および顕微鏡組織観察を行い、浸炭硬化処理による低炭素鋼の機械的性質と組織の変化について調べたので報告する。

## 2. 試験片の作成と実験方法

### 2-1 試験片の作成

供試材には熱間圧延した外径19.0mmのS15CK(JIS G 4051)を用い、汎用旋盤でセンタ穴とチャック部を加工した後、CNC旋盤でJIS 14A号引張試験片(平行部直径10.0mm, 標点距離50.0mm)に加工した。また浸炭層の微小硬さ測定試料および顕微鏡組織観察試料として、直径10.0mm, 長さ50.0mmの丸棒試験片も併せて製作した。尚、引張試験ではデータのばらつきが予想されたため、1測定点あたり8本の引張試験片を準備した。また、ここで用いた供試材の機械的性質は引張強さが434MPa, 破断強さが287MPa, 伸びが40%, 絞り率が69%, 硬さが139HV0.3であった。また顕微鏡組織はフェライトと層状パーライトから成り、平均結晶粒径が約20 $\mu$ , 粒度番号は約9であり浸炭用鋼として適切な値を示した。

### 2-2 熱処理

熱処理は表1に示すように、まず浸炭処理として浸炭箱(铸铁製, 110×180×100mm, 肉厚5mm)に固体浸炭剤(DURFERRIT CARBURISING GRANULATE, KG30)と試験片を入れ密閉し、浸炭深さを0.5mmから2.2mmにするために、電気炉で900°Cあるいは950°Cで30分から5時間保持した後、徐冷した。次に900°Cに加熱保持後、第一次焼入れ(油焼入れ)した。さらに第二次焼入れとして、780°Cに加熱保持後、水焼入れまたは油焼入れを行った。第一次焼入れおよび第二次焼入れともに試験片の脱炭を防止するために、浸炭箱に試験片と浸炭剤を入れ加熱保持した。尚、以下の熱処理条件において浸炭とは浸炭したまま、一次油焼入れとは浸炭後第一次焼入れしたまま、二次水焼入れと二次油焼入れとは浸炭後第一次焼入れしさらに第二次焼入れ(水焼入れあるいは油焼入れ)し

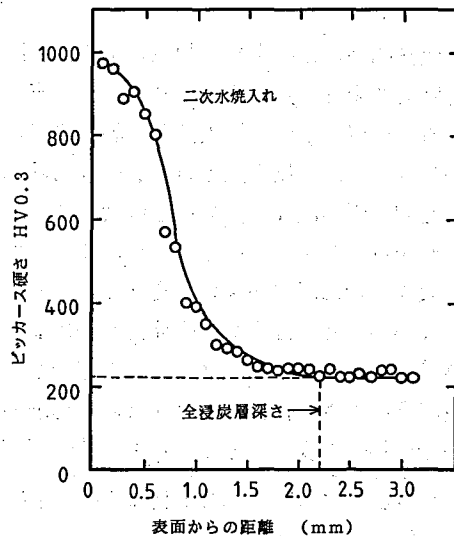


図1 全浸炭層深さの測定

たままであることを意味する。

### 2-3 試験方法

引張試験にはインストロン型引張試験機を用い、引張速度 $3\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$ で行った。微小硬さ測定は直交する2方向について、試料の表面から $0.1\text{mm}$ おきに $3.1\text{mm}$ までの微小硬さを荷重 $0.3\text{kgf}$  ( $2.94\text{N}$ ) で測定し、その平均値を硬さとし、これより図1に示す硬さ曲線を作成し、硬さがほぼ一定となる表面からの最小の距離を全浸炭層深さとした。顕微鏡組織観察は主として光学顕微鏡を用いたが、より微細な組織については走査型電子顕微鏡を用いて観察した。

## 3. 実験結果および考察

### 3-1 引張特性

図2は浸炭深さを変えたときの各熱処理における引張強さの変化を示す。いずれの熱処理においても全浸炭層深さが増すにつれ、引張強さは増加し、また同じ全浸炭層深さでも浸炭、第一次焼入れ、第二次焼入れと熱処理を施すたびに引張強さが増加した。特に二次水焼入れした場合は全浸炭層深さが約 $2.2\text{mm}$ のときは生材の約2倍の強度を示した。

図3は浸炭深さを変えたときの各熱処理における破断強さの変化を示す。破断強さはいずれの熱処理においても引張強さと同様に全浸炭層深さの増加につれ増大し、また約 $2.2\text{mm}$ の深さではいずれの熱処理においても引張強さとほぼ同じ値を示した。しかし全浸炭層深さが浅い場合、破断強さは二次水焼入れの場合には引張強さとほぼ同じ値を示したが、二次油焼入れではやや低下した。さらに浸炭と一次油焼入れの場合、破断強さは生材と同様に引張強さと比べてかなり低下した。

図4は浸炭深さを変えたときの各熱処理における真破断強さの変化を示す。真破断強さは二次水焼入れと二次油焼入れでは全浸炭層深さの値にかかわらず引張強さとほぼ同じ強さを示した。また浸炭と一次油焼入れの場合、真破断強さは全浸炭層深さの増加につれて減少し、約 $1.0\text{mm}$ で極小値を示した後増加し、約 $1.5\text{mm}$ を越えると引張強さとほぼ同じ値を示した。

図5は浸炭深さを変えたときの各熱処理における伸びの変化を示す。伸びは生材で約39%を示したものが、浸

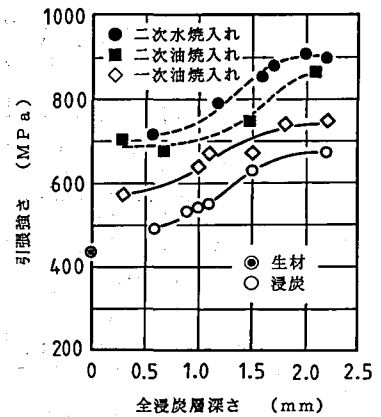


図2 引張強さ

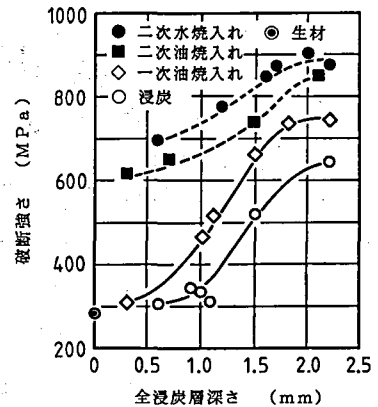


図3 破断強さ

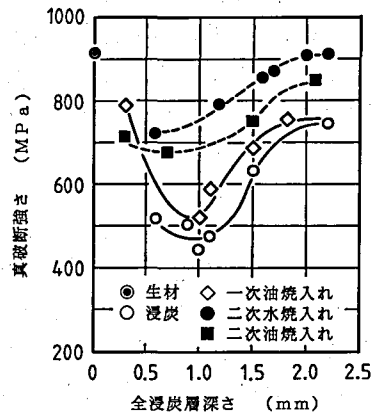


図4 真破断強さ

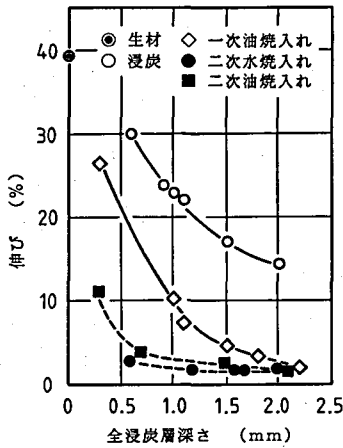


図5 伸び

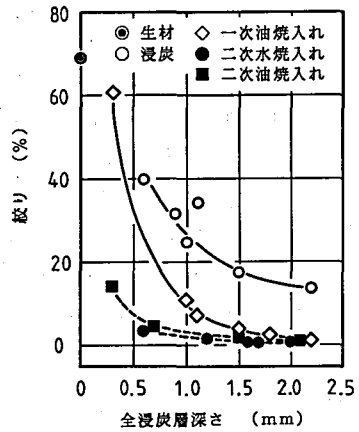


図6 絞り

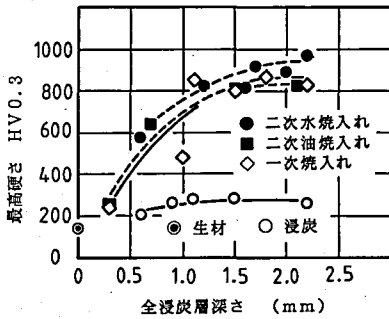


図7 最高硬さの変化

炭の場合、全浸炭層深さが約0.5mmから約2.0mmの間では約30.0%から約14.0%まで減少した。また全浸炭層深さが同じ場合、第一次焼入れ、第二次焼入れと熱処理を施すたびに伸びは減少し、特に二次水焼入れと二次油焼入れでは全浸炭層深さが約0.5mmから約2.2mmの間では約4.0%から約2.0%であり、わずかの伸びで破断した。

図6は浸炭深さを変えたときの各熱処理における絞りの変化を示す。絞りは伸びとほぼ同じ傾向を示し、いずれの熱処理においても全浸炭層深さが増すにつれて減少した。また全浸炭層深さが同じ場合、絞りは第一次焼入れ、第二次焼入れと熱処理を施すたびに減少した。

### 3-2 硬さ特性

図7は浸炭深さを変えたときの各熱処理における最高硬さの変化を示したものである。浸炭の場合、全浸炭層深さが約1.0mmを越えると、最高硬さは280HV0.3ではほぼ一定となったが、一次油焼入れ、二次水焼入れおよび二次油焼入れでは全浸炭層深さの増加とともに急増し、約1.5mmにおいては800HV0.3、また約2.2mmでは850HV0.3から930HV0.3の値を示した。

5時間浸炭したときの各熱処理における硬さの変化を図8に示す。浸炭の場合、浸炭部の

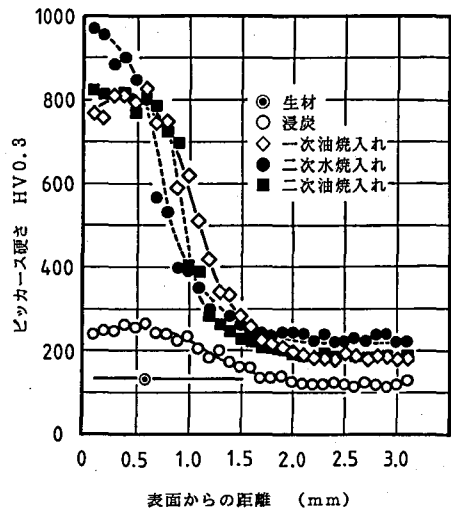


図8 5時間浸炭したときの硬さの変化

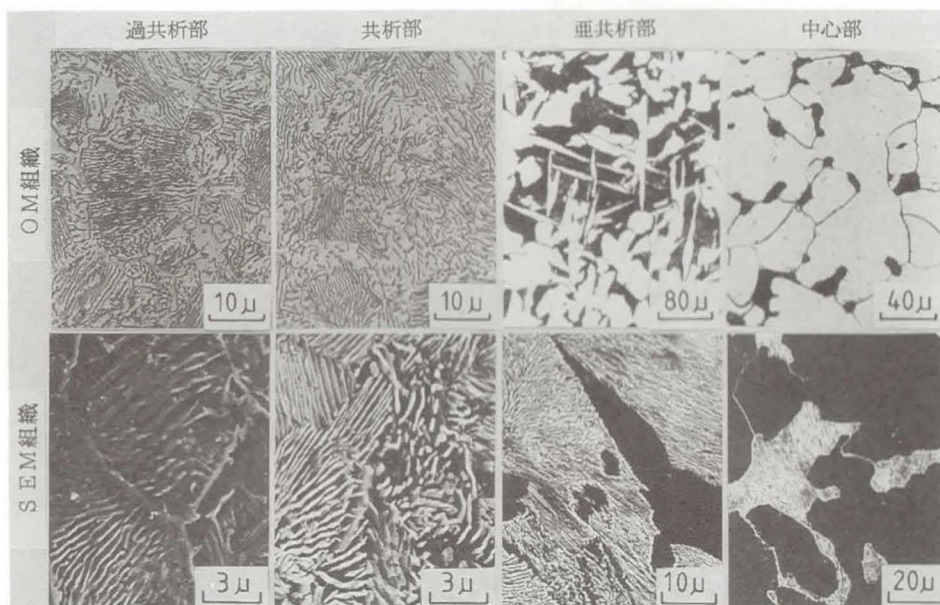


写真1 浸炭のままの顕微鏡組織

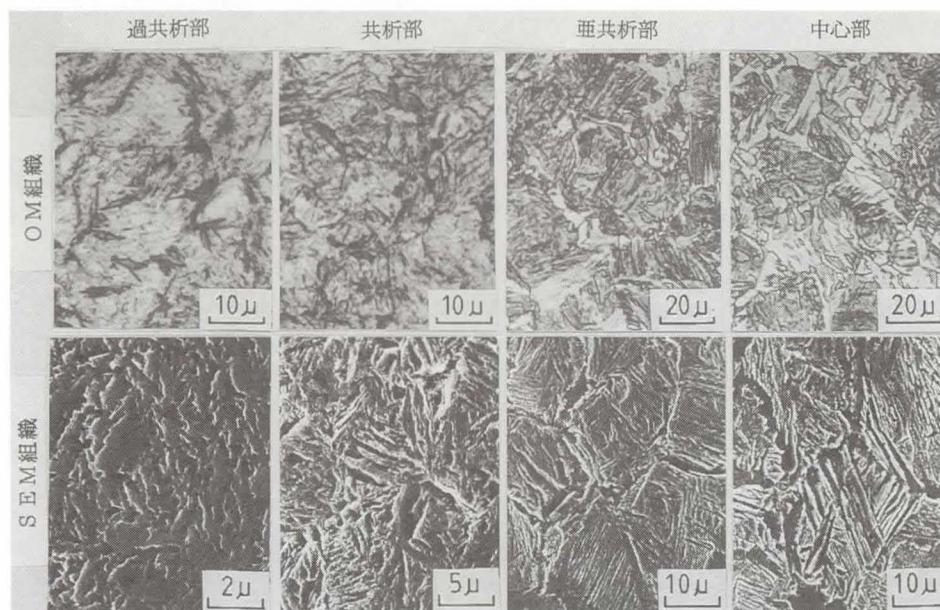


写真2 一次油焼入れのままの顕微鏡組織

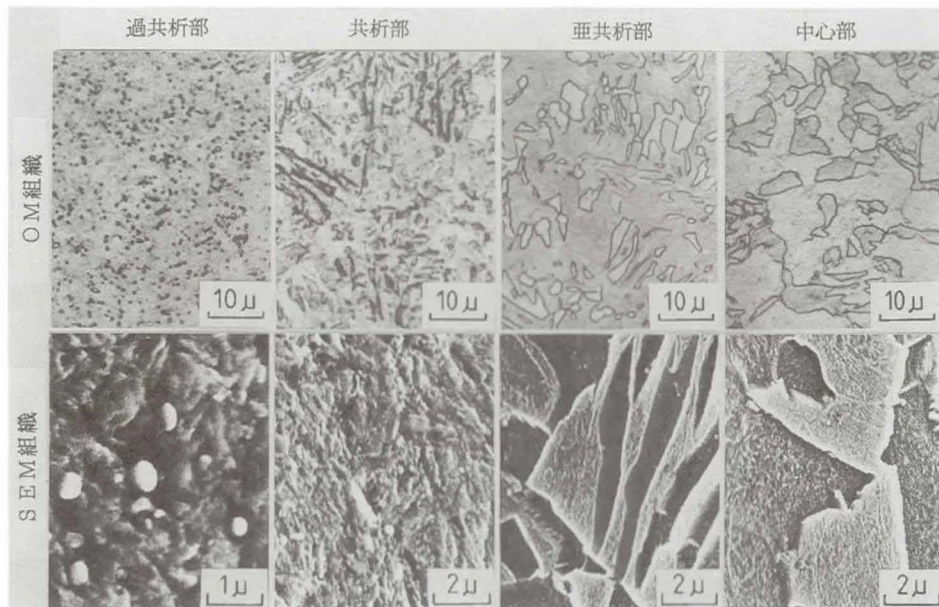


写真3 二次水焼入れのままの顕微鏡組織

硬さは生材の約2倍を示したが、中心部は長時間加熱のために組織が粗大化し、生材よりわずかに軟化した。また全浸炭層深さが同じ場合、第一次焼入れ、第二次焼入れと熱処理を施すたびに硬さを増した。さらに一次油焼入れでは表面から約0.3mm前後の距離で最高硬さを示したが、二次水焼入れと二次油焼入れでは表面から約0.1mmで最高硬さを示し、そして約0.5mmを越えると急激に低下した。

### 3-3 組織観察

写真1は浸炭のままの代表例として950°Cで5時間浸炭し、約2.2mmの全浸炭層深さを持つ試料の顕微鏡組織であり、上段は光学顕微鏡組織（OM組織）、下段は走査型電子顕微鏡組織（SEM組織）を示す。炭素濃度がもっとも高い表面付近は過共析組織であり、粒界には網目状の初析セメンタイトが観察され、また粒内は層状パーライト組織であった。中心部に向い炭素濃度が低下するにつれて、層状パーライトだけの共析部、粒界に初析フェライトが析出した亜共析部と変化し、中心部は粗大化した組織が観察された。このように浸炭時間の増加とともに深く浸炭され、中心部組織は粗大化したため、浸炭のままの試料の強度特性は生材より向上したものの、伸びと絞りは逆に低下した。

写真2は約2.2mmの全浸炭層深さを持つ一次油焼入れのままの試料の顕微鏡組織である。浸炭により生じた過共析部の網目状初析セメンタイトの分断と中心部組織の微細化を目的としてオーステナイト領域から油焼入れすると、過共析部ではやや粗大なマルテンサイトだけの組織となり、また中心部ではウィドマンステッテン・フェライトと低炭素マルテンサイト

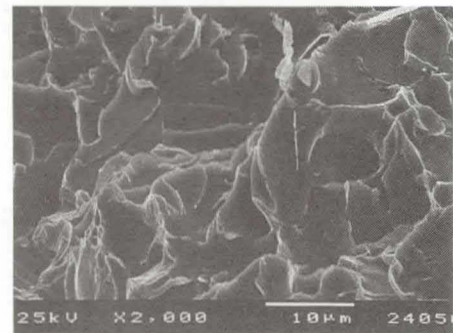


写真4 二次水焼入れのままの中心部破断面

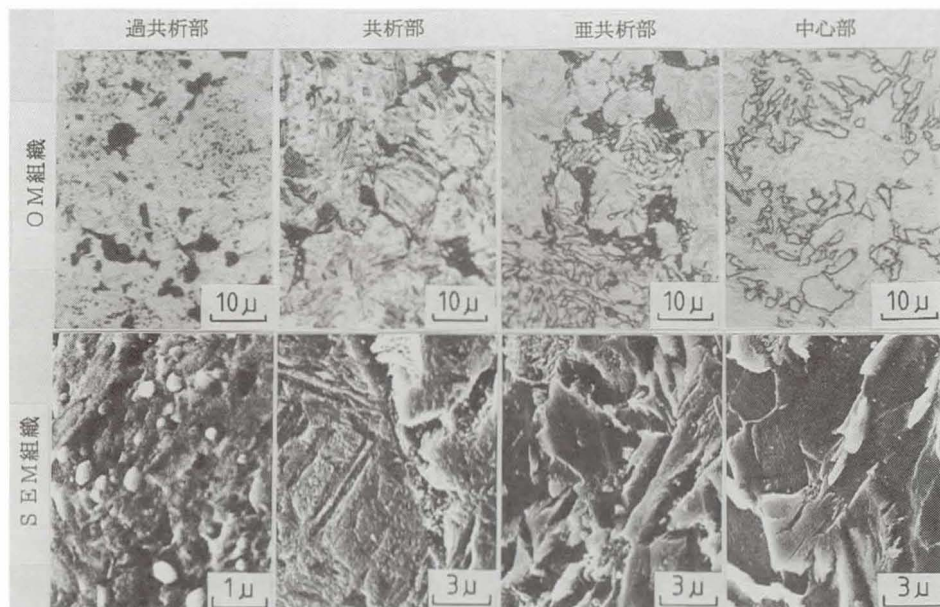


写真5 二次油焼入れのままの顕微鏡組織

の混合組織が観察された。このように浸炭後、第一次焼入れした試料の場合、浸炭層の過共析部はやや粗大なもののマルテンサイトだけの組織であることがこの部分の硬さを著しく増加させ、さらに浸炭の試料に比べ引張強さ、破断強さおよび真破断強さを著しく増加させたと考えられる。

写真3は約2.2mmの全浸炭層深さを持つ二次水焼入れのままの試料の顕微鏡組織である。耐摩耗性の向上を主目的とする第二次焼入れにおいて水焼入れすると、過共析部ではマルテンサイト中に球状セメンタイトが分散した組織となり、これが引張強さ、破断強さおよび硬さを増加させ、そして耐摩耗性を向上させる原因であると思われる。また中心部は低炭素マルテンサイトとフェライトの混合組織であり粘り強く、伸び易いと考えられるが、実際の引張試験では、伸びと絞りほとんどゼロの値を示した。この原因を調べるために全浸炭層深さが約2.2mmの試料の引張破断面の走査型電子顕微鏡観察を行った。その結果を写真4に示す。これによると引張破断面では、わずかに塑性変形を示した擬劈開破面<sup>(3)</sup>が観察されたが、これは外側が硬い組織のため変形しにくく、外周部に一旦き裂が生じると中心に向かってき裂が急速に伝播し脆性破壊を起こしたものと考えられる。

写真5は約2.2mmの全浸炭層深さを持つ二次油焼入れのままの試料の顕微鏡組織である。二次油焼入れの顕微鏡組織は二次水焼入れとほぼ同じ組織となるが、この場合のほうが冷却速度がやや遅いため結晶粒界に微細パーライトが析出し、過共析部、共析部および亜共析部でこれが観察された。またこの微細パーライトの存在が水焼入れした場合と比べ、引張強さと破断強さをやや減少させ、逆に伸びと絞りをやや増加させた原因であると考えられる。さらに中心部では二次水焼入れの場合と同様に擬劈開破面が観察された。

#### 4. 総 括

低炭素鋼を固体浸炭法により浸炭し、第一次焼入れおよび第二次焼入れの硬化処理を行い、これらの過程での機械的性質と組織の変化について調べたところ、次のことがわかった。

- (1) 引張強さ、破断強さおよび真破断強さは全浸炭層深さが増すにつれて増加し、また全浸炭層深さが同じ場合は浸炭、第一次焼入れ、第二次焼入れと熱処理を施すたびにこれらの値は増加した。伸びと絞りも全浸炭層深さが同じ場合、熱処理を施すたび減少し、特に二次水焼入れと二次油焼入れの場合は浸炭の場合と比べ、著しく減少した。
- (2) 浸炭部の最高硬さは5時間の浸炭により浸炭のままでは生材の約2倍、そして一次油焼入れで約6倍、さらに二次水焼入れでは約7倍まで上昇した。
- (3) 二次水焼入れおよび二次油焼入れの場合、中心部はフェライトと低炭素マルテンサイトの混合組織であったが、擬劈開破面を持つ脆性破壊を生じた。

本研究を進めるに当たり、ご協力頂きました電子制御工学科・芳賀 武教授、学生課・羽賀文夫実習係長、小林茂夫実習主任、関 廣治技官、深井郁夫技官に感謝の意を表します。

尚、本研究は平成4年度文部省科学研究費・奨励研究(B)の援助により行われたものであり、関係各位に感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- (1) 例えば、門間、矢島：鉄鋼Ⅲ 新版材料篇、日本金属学会（1967）、p.317
- (2) 森山、小林、堀内：長野工業高等専門学校紀要、第18号（1988）、p.59
- (3) 村上、大南：破壊力学入門、オーム社（1979）、p.103