

亜共析炭素鋼の熱処理組織と強度特性*

森山 実**・小林 義一***

1. 緒 言

炭素鋼は、熱処理により組織が変わり、また、機械的性質もいろいろ変化する。筆者らは、炭素鋼における熱処理組織と機械的性質の関連について一連の研究を進めており、今回は、炭素含有量の異なる種々の亜共析炭素鋼に、焼なまし、焼ならしおよび焼入れ焼もどし熱処理を施した場合の引張強度、衝撃強度、硬さ等の機械的特性を実験により求め、これらの特性が炭素含有量によりどのように変化するかについて各熱処理毎に系統的に調べたのでその結果を報告する。

2. 実験方法

2-1 試料と熱処理

供試材は、炭素含有量の異なる機械構造用炭素鋼で S15C から S55C までの 8 種類を用いた。その化学分析値を Table 1 に示す。直径 22mm の丸棒で、引張試験用には直径 19mm に丸削りし、衝撃試験用には 10.5×10.5×55mm の角材に形削りしてから熱処理を行なった。

熱処理は、各々の試料について、焼なまし、焼ならし及び焼入れ焼もどしの 3 種類を施した。これら熱処理の委細を Fig. 1 に示す。焼なまし (Annealing) は、同図(a)に示すように、図中右側に示すオーステナイト化温度に加熱後 2 時間保持し、その後炉中冷却した。平均冷却速度 (800°C~600°C) は、3.2°C/min である。焼ならし (Normalizing) は、焼なましの場合と同一条件でオーステナイト化後、(b)に示すように空冷した。このときの平均冷却速度は 90°C/min である。焼入れ焼もどし (Tempering) は、(c)に示すように、先ずオーステナイト化後速かに水焼入れし、その後 600°C に 2 時間保持して焼もどしを行ない、さらに水冷した。なお、焼入れ焼もどし試料については、質量効果の影響を極力抑えるため、あらかじめ引張試験片の標点距離の部分を直径 10.5mm に旋削してから熱処理をした。

2-2 試験

実験に用いた装置を Table 2 に示す。引張試験は、熱処理後の試験片を所定の寸法に仕上げた後、オートグラフ DCS-10T を用いて、引張速度 5 mm/min で試験した。衝撃試験は、シャルピー型衝撃試験機を用い、ハンマの振上角 144° の条件で行なった。なお、引張試験値、衝撃試験値とも、3 本の計測平均値をもってそれぞれの値とした。硬さ試験は、引張試験片の一部を切出して研磨後、ロックウェル硬度計を用いて測定し、10 点の計測値の平均値を求めた。光学顕微鏡観察は、硬さ試験の場合と同様に引張試験片の一部を切出して試料と

* 昭和59年12月 日本金属学会北陸信越支部学術講演会において発表

** 機械工学科助手

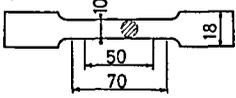
*** 機械工学科教授

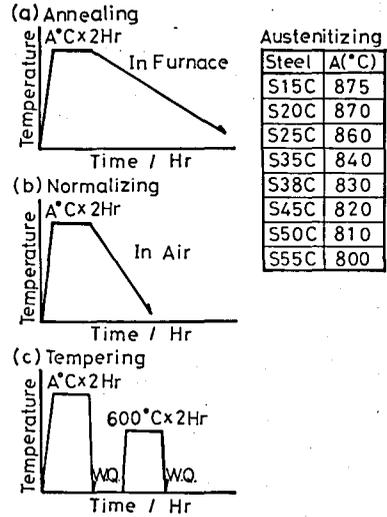
原稿受付 昭和60年9月30日

Table 1 Composition of Hypoeutectoid Carbon Steel /wt%

No.	Steel	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
1	S15C	0.17	0.23	0.40	0.12	0.21	0.17	0.05	0.05
2	S20C	0.20	0.23	0.43	0.29	0.24	0.14	0.06	0.06
3	S25C	0.24	0.24	0.40	0.18	0.20	0.15	0.06	0.09
4	S35C	0.35	0.24	0.70	0.25	0.20	0.16	0.05	0.09
5	S38C	0.38	0.24	0.69	0.20	0.19	0.14	0.05	0.07
6	S45C	0.47	0.25	0.70	0.14	0.18	0.15	0.07	0.06
7	S50C	0.53	0.20	0.70	0.18	0.14	0.02	0.02	0.03
8	S55C	0.55	0.24	0.69	0.23	0.17	0.15	0.05	0.08

Table 2 Equipment

Tensile Test Machine	Shimadzu Autograph DCS-10T
Extensomet	Shimadzu ST-50-50-25
Test Piece	JIS Z 2201 No.14A 
Impact Test Type	Charpy
Machine	Shimadzu 30Kgf-m
Test Piece	JIS Z 2202 No.3 10x10x55 U Notch
Hardness Type	Rockwell
Machine	Akashi Model ARK-A
Test Piece	φ18x10
Optical M. Machine	Olympus Model BH
Etching	5% Picral
SEM Machine	JEOL Model T-200
Etching	SPEED Method

**Fig. 1** Heat Treatment

し、バフ研摩後5%ピクリン酸アルコール溶液で腐食した。走査電子顕微鏡観察は、SPEED法⁽¹⁾に基づき、10%アセチルアセトン・1%テトラメチルアンモニウムクロライド・メチルアルコール混合液を使用し、電圧0.5Vで4分間定電位を保つように常時攪拌しながら電解エッチングを行ない、超音波洗浄後T-200型走査電子顕微鏡により観察した。

3. 結果と考察

3-1 焼なまし材の組織と強度

オーステナイト化後、焼なまし(炉中冷却)した亜共析炭素鋼の組織をPhoto 1に示す。同写真において、上段側は光学顕微鏡組織を、下段側は走査電子顕微鏡(SEM)組織を示し、また、左側のAとB、中央のCとD及び右側のEとFは、それぞれS15C、S35C、S55Cの組織を示す(以下同様)。炭素含有量が高くなるほどパーライトの析出量は増えるが、パーライト中のセメントタイトの層間隔はほぼ一定で約0.2~0.4 μ である。結晶粒の大きさは約17~22 μ で粒度8~9に相当する。焼なましした亜共析鋼の引張強度、破断応力、上降伏応力及び下降伏応力をFig. 2に示す。炭素含有量に対し、引張強度と破断応力はほぼ直線的に比例するが、上及び下降伏応力は飽和する傾向を示す。真破断応力とヤング率をFig. 3

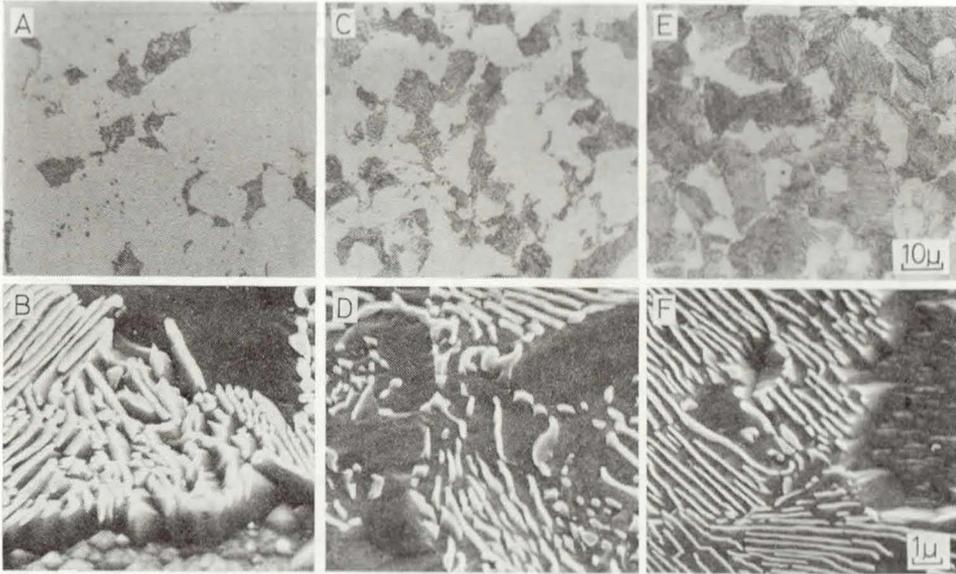


Photo. 1 Microstructures of annealed S15C (A, B) S35C (C, D) and S55C (E, F) carbon steels.

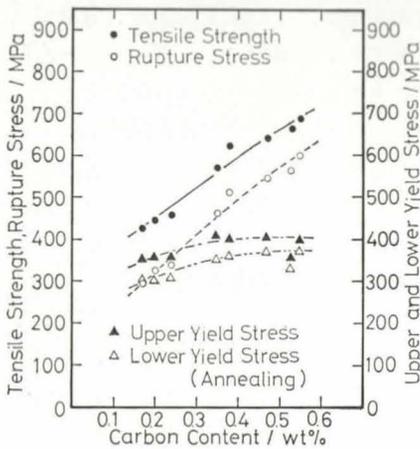


Fig. 2 Tensile Strength, Rupture Stress & Upper and Lower Yield Stress

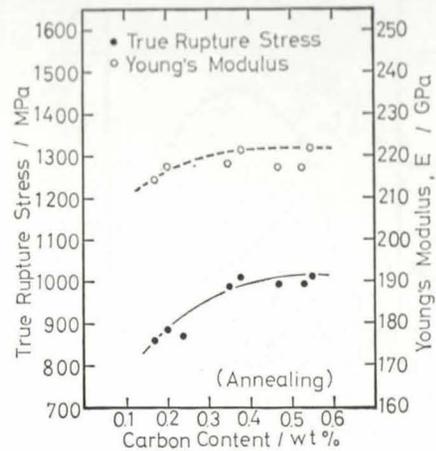


Fig. 3 True Rupture Stress & Young's Modulus

に示す。真破断応力は、炭素含有量にかかわらずほぼ一定で約 1300 MPa であり、破断応力の約 2 ~ 3 倍、また、降伏応力の約 3 ~ 4 倍である。ヤング率は、炭素含有量が増加するとわずかに上昇するが、170 ~ 190 GPa である。降伏点伸びと降伏点降下（上降伏応力と下降伏応力の差）を Fig. 4 に示す。この場合は、両方とも炭素含有量に反比例する傾向を示す。ロックウェル硬さ、伸び及び絞りも Fig. 5 に示す。硬さは、炭素含有量に比例し、従って引張強度に比例する傾向を示す。一方伸びと絞りは、炭素含有量に対し反比例する傾向を示す。引張試験における試験片の吸収エネルギー（破断するまでの荷重と伸びの積の積分値）と

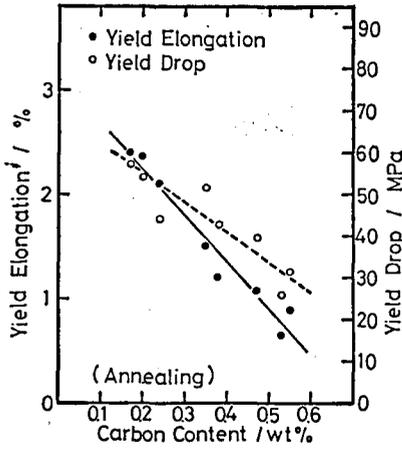


Fig. 4 Yield Elongation & Yield Drop

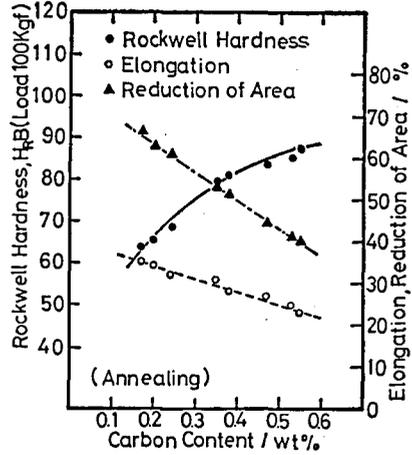


Fig. 5 Rockwell Hardness, Elongation & Reduction of Area

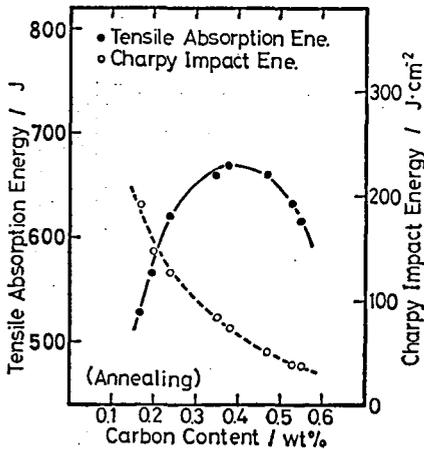


Fig. 6 Tensile Absorption Energy & Charpy Impact Energy

シャルピー衝撃試験値を Fig. 6 に示す。引張吸収エネルギーは、炭素含有量が約 0.4 wt % のとき最大を示し、この値より炭素含有量が増加または減少すると減少する。シャルピー衝撃値は、炭素含有量が低いほど大きな値を示す。引張吸収エネルギーは材料の靱性と関係し⁽²⁾、シャルピー衝撃値と密接な関連があると言われているが、本結果を見る限り、このような事実は必ずしもあてはまらないように思われる。

3-2 焼ならし材の組織と強度

オーステナイト化後、焼ならし(空冷)した亜共析鋼の組織を Photo 2 に示す。この場合も、炭素含有量に比例してパーライトの析出量が増加しているが、焼なましした場合より組織が微細化している。パーライト中のセメンタイト

の層間隔は、炭素含有量にかかわらずほぼ一定で約 0.1~0.3 μ である。結晶粒の大きさは約 14~20 μ で、粒度 8.5~9.5 に相当する。焼ならしした亜共析鋼の引張強度、破断応力、上降伏応力及び下降伏応力を Fig. 7 に示す。各応力とも、炭素含有量に対しほぼ比例して上昇するが、その傾きは同じではなく、引張強度と破断応力の方が、上及び下降伏応力と比較して大きい。また、これらの強度は、焼なましした場合と比較して全体的に高い値を示し、組織が微細化するほど強度が高くなることを示している。なお、下降伏応力については、ホール・ペッチの関係⁽³⁾により結晶粒径の平方根に反比例すると言われているが、傾向的には一致する。真破断応力とヤング率の測定結果を Fig. 8 に示す。真破断応力は、炭素含有量が約 0.3wt % 以上ではほぼ一定で約 1300MPa であり、これは焼なましした場合と一致し、熱

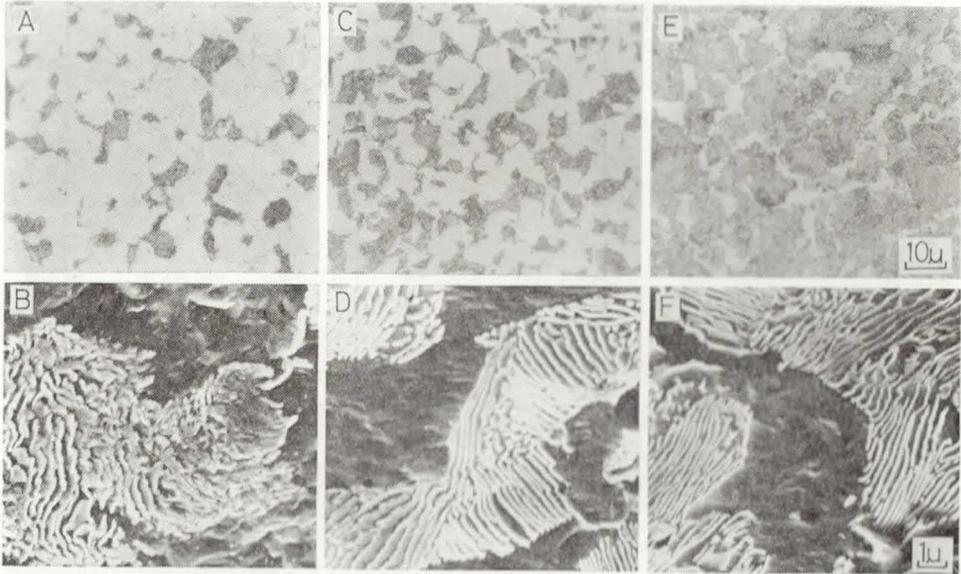


Photo. 2 Microstructures of normalized S15C (A, B), S35C (C, D) and S55C (E, F) carbon steels.

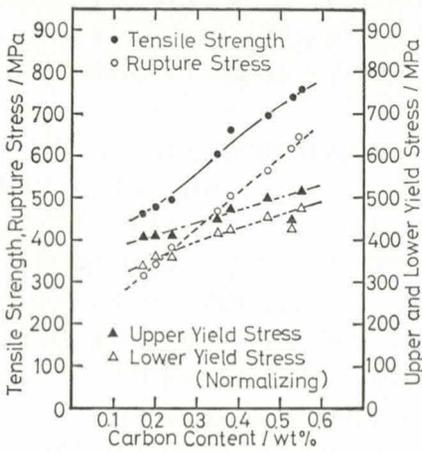


Fig. 7 Tensile Strength, Rupture Stress & Upper and Lower Yield Stress

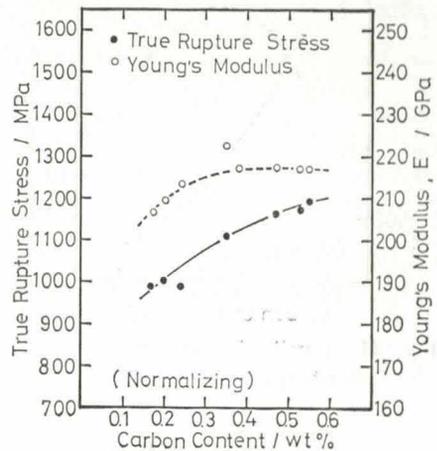


Fig. 8 True Rupture Stress & Young's Modulus

処理による差異は認められない。ヤング率は、炭素含有量に比例して高くなるが約190～210GPaであり、焼なましした場合より約20GPa高い。降伏点伸びと降伏点降下は、Fig. 9に示すように、炭素含有量に反比例する傾向を示すが、降伏点伸びは、焼なましした場合と比較してやや大きいのに対し、降伏点降下は、ほぼ同じ値を示す。降伏点伸びが大きいことは、低炭素鋼の絞りを行なう場合、ストレッチャ・ストレーン⁽⁴⁾の原因となるので注意を要する。ロックウェル硬さ、伸び及び絞り性をFig. 10に示す。焼なましした場合と同様の傾向

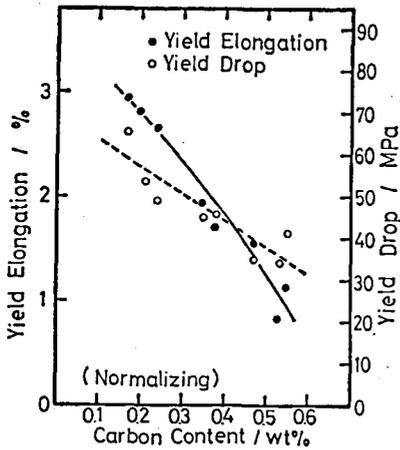


Fig. 9 Yield Elongation & Yield Drop

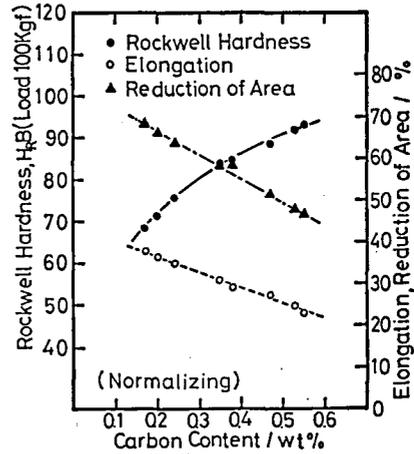


Fig. 10 Rockwell Hardness, Elongation & Reduction of Area

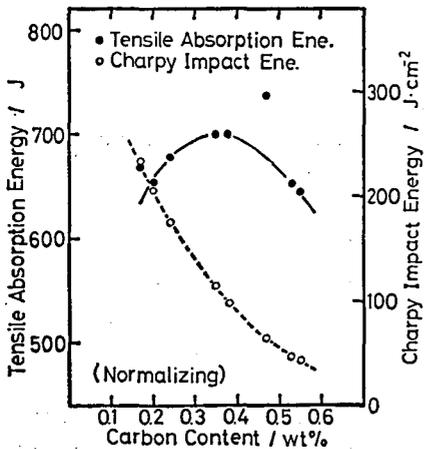


Fig. 11 Tensile Absorption Energy & Charpy Impact Energy

を示すが、各値とも焼なましした場合より高く、このことは、組織が微細化しているためである。引張吸収エネルギーとシャルピー衝撃値を Fig. 11 に示す。この場合も焼なましした場合と同様の傾向を示すが、引張吸収エネルギー、シャルピー衝撃値とも、焼なましした場合より高い値を示す。

3-3 焼入れ材の組織と強度

オーステナイト化後、水焼入れした亜共析鋼の組織を Photo 3 に示す。同写真において、S15C (A及びB) の場合は、結晶粒界に沿ってフェライトが析出し、粒内はマルテンサイト組織である。これは、鉄中の炭素の拡散速度が大きいことためフェライトの析出を生じたものである。S35C (C及びD) の場合は、粒界部にフェライト

の他、トルースタイトが析出している。Dの写真の右下側にトルースタイトの SEM 組織が観察される。S55C (E及びF) の場合は、粒界にフェライトは認められず、一部トルースタイトが析出しているが、全体的にはほぼマルテンサイト組織である。DとFには、マルテンサイト特有の針状組織が観察される。水焼入れしたままの亜共析鋼のロックウェル硬さを Fig. 12 に示す。硬さは、炭素含有量に比例してほぼ一様に増加する傾向を示す。

3-4 焼もどし材の組織と強度

オーステナイト化後水焼入れし、さらに 600°C で 2 時間焼もどした亜共析炭素鋼の組織を Photo 4 に示す。S15C (A及びB) の場合は、焼入れした時の粒界に生じたフェライトは、焼もどししてもそのまま残り、マルテンサイトであった部分は、焼もどしによって粒状

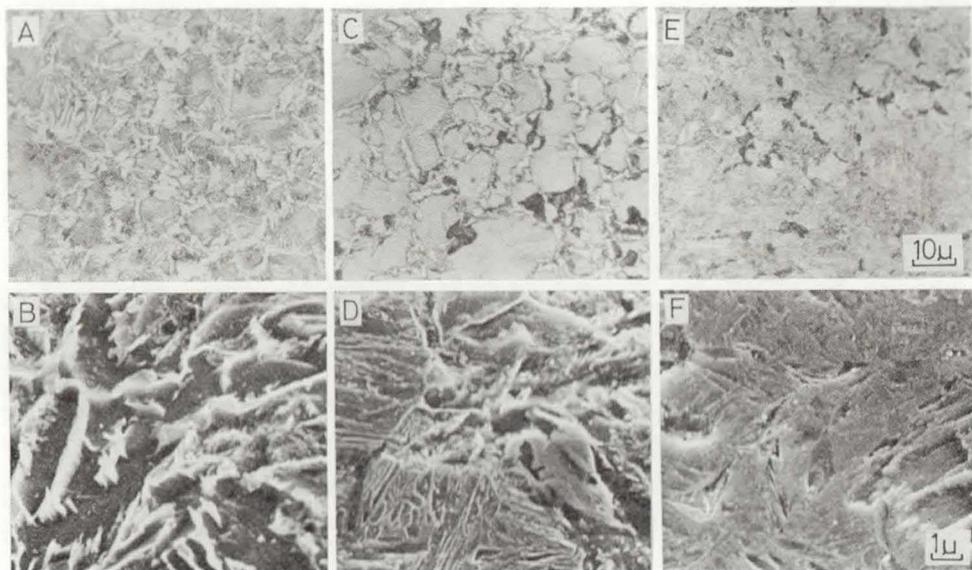


Photo. 3 Microstructures of quenched S15C (A, B), S35C (C, D) and S55C (E, F) carbon steels.

の炭化物 (Fe_3C) が生じている。Bに示す組織によると、粒界部に生じたフェライト中にも炭化物の析出が少量認められるが、炭化物は一様に分散している状態ではなく、また結晶粒界がはっきりしなくなっている。S35C (C及びD) の場合は、粒界部に生じたフェライトの影響はまだ幾らか残るが、かなりの粒状炭化物が析出している。S55C (E及びF) の場合は、全面に均一に粒状炭化物が析出し、フェライト中に炭化物が浮遊した状態で混合している。これらの組織は、今迄の焼なまし、焼ならし及び焼入れ組織とは本質的に異なる構造と言える。焼入れ焼もどしした亜共析炭素鋼の引張強度、破断応力、上及び下降伏応力を Fig. 13 に示す。各強度とも炭素含有量に対してリニアに増加し、その勾配もほぼ等しい。引張強度は、焼なまし及び焼ならしした場合よりも高く、逆に、破断

応力は最も低くて降伏応力よりも低いことはきわめて特徴的である。上及び下降伏応力は、炭素含有量に対し、焼なましした場合に観察されたような飽和する傾向を示さず、また、焼なまし及び焼ならしした場合よりもかなり高い。これは、比較的柔かいフェライト中に硬い炭化物が粒状かつ均一に分散しているためと考えられ、炭化物の析出形態としては理想的状態と言える。真破断応力とヤング率を Fig. 14 に示す。真破断応力は、炭素含有量が0.4%

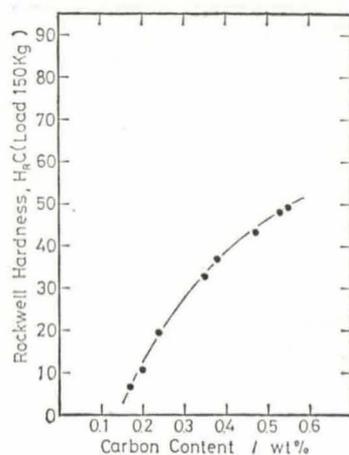


Fig. 12 Rockwell Hardness after Quenching

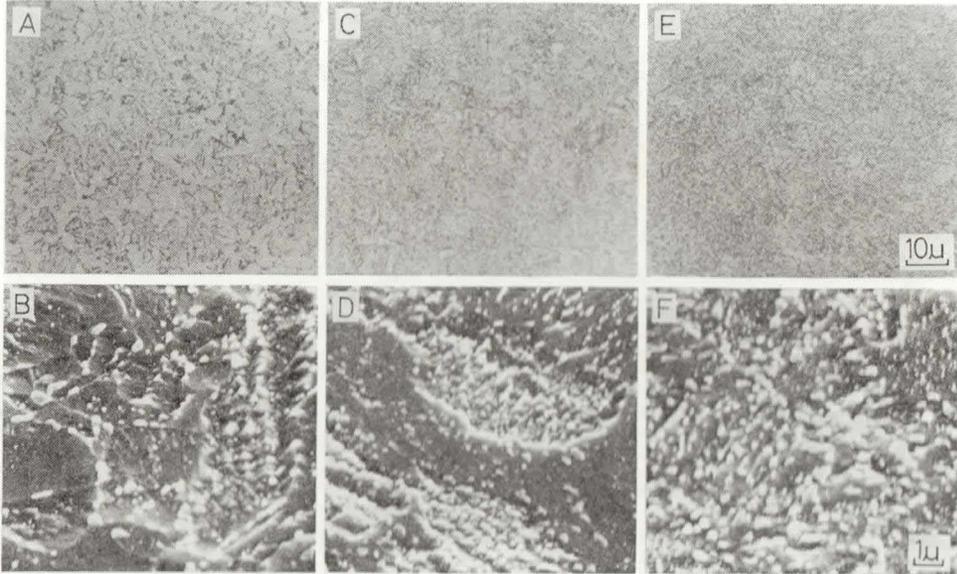


Photo. 4 Microstructures of tempered S15C (A, B), S35C (C, D) and S55C (E, F) carbon steels.

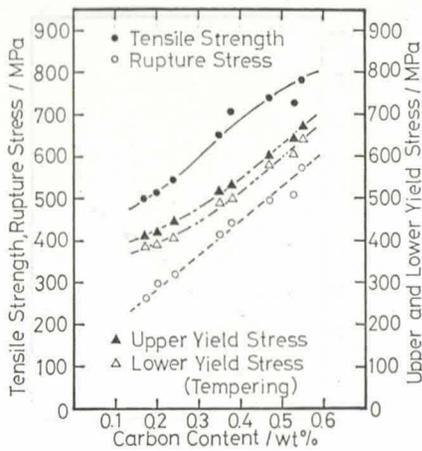


Fig. 13 Tensile Strength, Rupture Stress & Upper and Lower Yield Stress

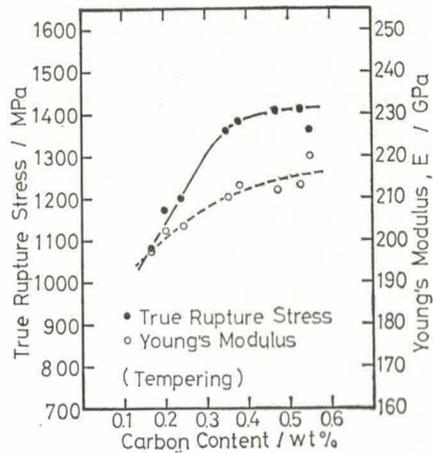


Fig. 14 True Rupture Stress & Young's Modulus

以上ではほぼ一定で 1400MPa を示し、焼なましや焼ならしした場合より約 100MPa 高く、また、引張強度の約 2 倍に相当する。ヤング率は、炭素含有量が増加するほど高くなるが、約 200~220GPa である。降伏点伸びと降伏点降下は、Fig. 15 に示すように、炭素含有量が約 0.4wt % の点で極小を示す特異な形となる。この原因が、熱処理条件によるものか、または、炭化物の析出形態に基づく固有のものかは今後検討する予定である。降伏点伸びは、

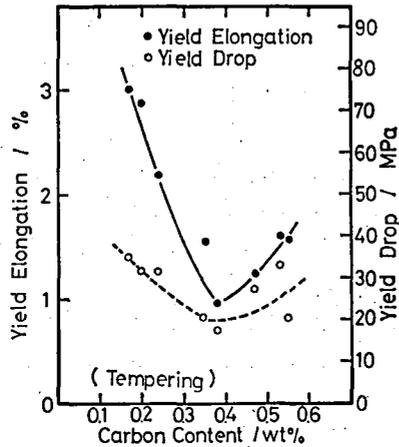


Fig. 15 Yield Elongation & Yield Drop

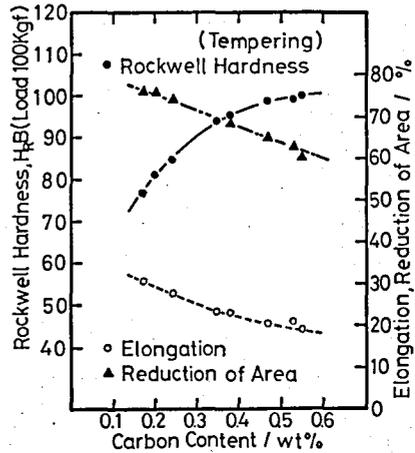


Fig. 16 Rockwell Hardness, Elongation & Reduction of Area

焼なまし及び焼ならした場合とそれほど変わらないが、降伏点降下はかなり小さい。ロックウェル硬さ、伸び及び絞り値を Fig. 16 に示す。各値とも焼なまし及び焼ならした場合と同様な傾向を示す。焼なまし及び焼ならした場合と比較して、絞りと硬さは高い値を示すが伸びは逆に一番低い値を示し、焼ならした場合の70~80%程度である。引張吸収エネルギーとシャルピー衝撃値を Fig. 17 に示す。引張吸収エネルギーは、炭素含有量約 0.3wt% で極小を示し、約 0.45wt% で極大を示す特異な傾向を示し、焼なまし及び焼ならした場合と比較して最も小さい値を示す。シャルピー衝撃値は、炭素含有量に対し一様に減少する傾向を示すが、焼なまし及び焼ならした場合と比較して格段に高い値を示す。比較的柔かいフェライト中に硬い炭化物が粒状に分散していると、衝撃強度は大きく改善されることを示している。

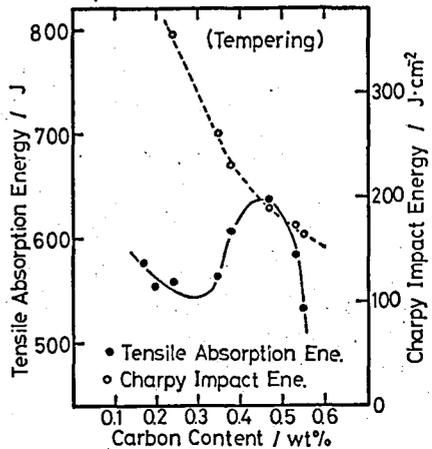


Fig. 17 Tensile Absorption Energy & Charpy Impact Energy

4. 総 括

機械構造用炭素鋼 (S15C~S55C) について、オーステナイト化後、焼なまし、焼ならし及び焼入れ焼もどし熱処理を施し、これら材料の組織、引張強度、衝撃強度及び硬さ測定を行ない、組織と機械的性質との関連について実験的に調果した結果、次のことがわかった。

- (1) 焼なまし及び焼ならした場合の組織はフェライトとパーライトの混合組織であるが、焼ならした場合の組織の方が微細化している。

- (2) 焼入れした場合の組織はマルテンサイト組織であるが、低炭素鋼においては粒界にフェライトが生じ、また、中炭素鋼においては粒界にフェライトとトルースタイトが生じた。焼もどした場合は、マルテンサイトの部分はフェライトと粒状炭化物 (Fe_3C) に分解して析出するが、もともとあった粒界部のフェライトはほぼそのまま残る。
- (3) 各熱処理において、引張強度、破断応力、上・下降伏応力及び硬さは、炭素含有量に比例して上昇し、伸び、絞り及び衝撃強度は下降する。ヤング率と真破断応力は、炭素含有量に比例してわずかに上昇するが、大きくは変化しない。また、引張吸収エネルギーは、炭素含有量約0.4~0.5%のときに最大を示す。
- (4) 焼なましした場合と焼ならしした場合の機械的性質を比較すると、引張強度、破断応力、真破断応力、上及び下降伏応力、硬さ、伸び、絞り、引張吸収エネルギー及び衝撃強度などの点で、後者の場合が優る。
- (5) 焼入れ焼もどした場合は、焼なまし及び焼ならしした場合と比較して、引張強度、真破断応力、上及び下降伏応力、絞り、衝撃強度、硬さ等の点で優れているが、伸びと引張吸収エネルギーは劣る。これは、焼もどし組織特有の柔らかいフェライト中に硬い炭化物が分散した組織のために生じていると予想される。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、終始強力な御指導をいただきました元長野工業高等専門学校教授片山修一先生に深く感謝の意を表します。

文 献

- (1) 黒沢文夫, 田口勇, 谷野満, 日本金属学会会報, 20(5), p.377 (1981).
- (2) ジョン・ウルフ編, 材料科学入門Ⅲ 機械的性質, p. 8 (1967); 岩波書店.
- (3) 須藤一, 田村今男, 西沢泰二, 金属組織学, p.220 (1982), 丸善.
- (4) ガイ, 金属学要論, p.282 (1964), アグネ.