

# 普通炭素鋼の焼入組織に関する研究

(第4報 長時間焼戻しによる粒状化過程の観察)

時 弘 義 雄\*・福 井 昂\*

Studies on the Queued Structure of a Plain Carbon Steel

(4th Report)

Observation of the Spheroidizing Process of a Plain Carbon Steel during a long Tempering.

Yoshio TOKIHIRO and Takashi FUKUI

## Abstract

The steel with various contents of carbon tempered for a long period of time after quenched in the water (10°C). In this case, the present investigators observed the process of spheroidizing of carbide for each tempering time.

The results obtained are as follows :

- (1) The higher the tempering temperature is, the more rapid the spheroidizing velocity is for the same carbon steel. Especially the low carbon steels have this tendency.
- (2) The time of spheroidizing cementite is shorter for the high carbon steel than the low carbon steel, and the size of spheroidizing carbide is larger.
- (3) The majority of the drop of hardness was done for a very short time, and it was very small to drop the hardness for a long tempering.
- (4) The dispersion of spheroidizing carbides in consequence of tempering for a low carbon steel is better than it done for a long heating of normalized steels.

## 1. 緒 言

鋼の焼戻しに関する研究は古くからおこなわれ、膨大な研究報告がなされている。それらを通観すると、マルテンサイトが崩壊し炭化物が析出する機構、および焼戻しにともなう物理的機械的性質の変化に関するものが多く、従つて焼戻時間も比較的短い。鋼を焼戻す目的は、第一には鋼を比較的低温度で加熱し、焼入れによつて生じたマクロ的内部応力を除去するにある。その第二は強さとじん性を兼ね備えた状態をうるために、比較的高温度で加熱することである。この第二の目的のためには高温で長時間加熱し、炭化物を凝集し表面張力の影響により粒状化することも必要である。かかる実験は炭化物が最も凝集しやすいと思われ650°Cまたはそれ以下の焼戻温度でおこなわれ、650°C以上で長時間加熱した結果に対する報告はすく

ない<sup>1)</sup>。

鋼種についても、焼入硬化の大きい中炭素鋼以上について主におこなわれ、低炭素鋼をふくめておこなわれた研究は非常に稀れである<sup>2)</sup>。そこで筆者らは、焼入れにより均一なマルテンサイト組織とした0.64%Cまでの鋼を、A<sub>1</sub>点直下の温度に長時間加熱し、炭化物の粒状化過程を観察し、あわせて硬度の変化を測定したので以下に報告する。

## 2. 試料および実験方法

### 2.1 実験試料

実験に用いた試料はすべて市販の機械構造用炭素鋼で、直径19mmの丸棒である。実験に際してはこれらを10φ×20mmに機械加工した。Table 1に試料の化学成分を示す。

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A (S10C)	0.105	0.28	0.50	0.017	0.013	0.01	0.01	0.11
B (S20C)	0.208	0.27	0.51	0.047	0.027	tr	—	0.15
C (S30C)	0.32	0.27	0.70	0.022	0.027	0.14	0.05	0.06
D (S50C)	0.49	0.27	0.71	0.018	0.016	0.02	0.01	0.27
E (SK7)	0.64	0.25	0.44	0.015	0.008	tr	0.04	0.31

## 2.2 熱処理方法

試料の加熱はすべて電気マuffle炉を用い空気中でおこなった。炉内の温度調節は電子式温度調節器(±2°C)によった。実験に先立つて各試料の組織を均一にするため、Table 2 にしめす温度に4時間で昇温し、その温度に1時間保持したのち空中冷却(約20°C)した。この焼準試料をTable 3に示す温度に約2時間で昇温し、すこしかくはんした水中(10°C)に焼入れた。この焼入温度の決定はP.P. 熱処理<sup>3)</sup>によった。焼入温度での保持時間は、前報<sup>4)</sup>により最高の硬度をえた0.5時間とした。この焼入試料の顕微鏡組織をFig. 1に示す。

Table 2 Normalizing temperature of specimens

Specimen	A	B	C	D	E
Normalizing temperature (°C)	900	880	850	800	760

Table 3 Quenching temperature of specimens

Specimen	A	B	C	D	E
Quenching temperature (°C)	900	880	850	800	790

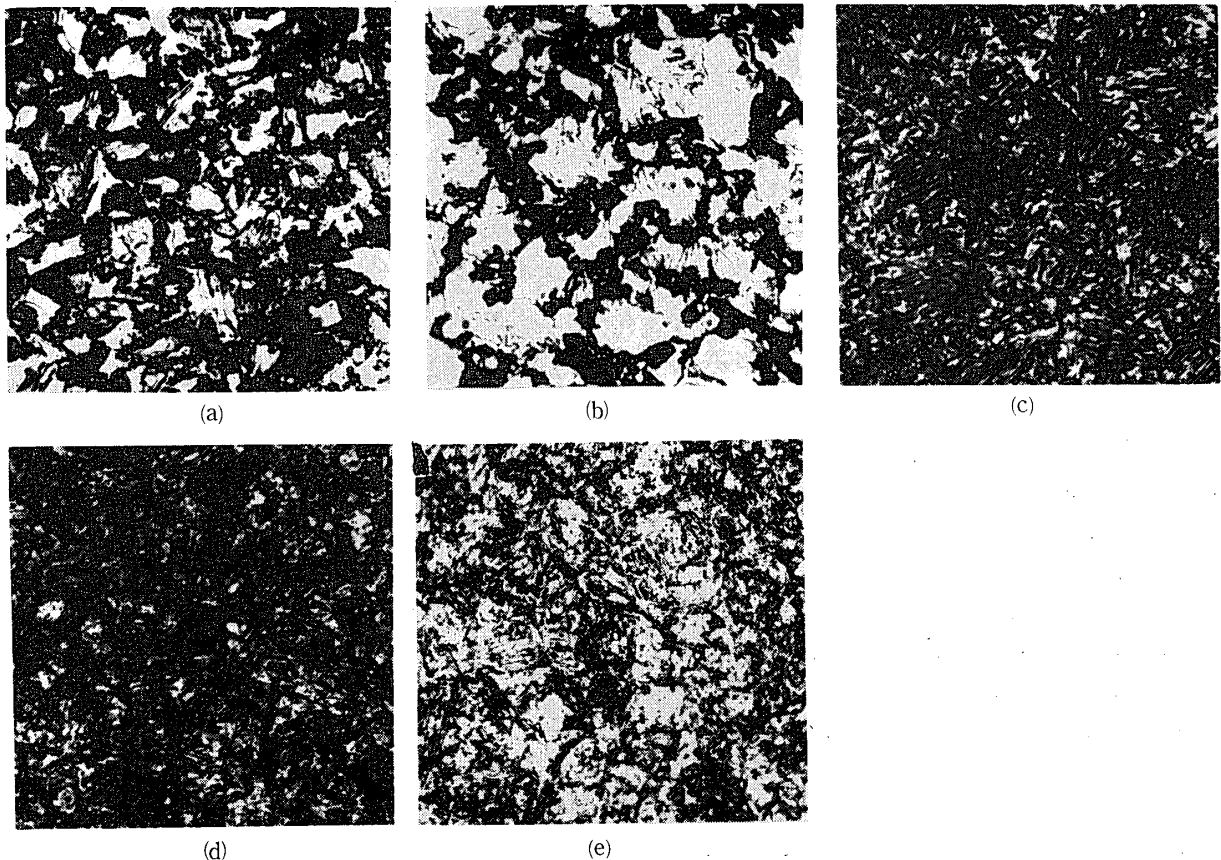


Fig.1 Microstructure of quenched specimens

(a) S10C (b) S20C (c) S35C (d) S50C (e) SK7

Magnif. : ×400

焼入れをおこなった試料は各鋼種ともすべて 650°C, 680°C および 710°C の 3 種の温度に, それぞれ 20 時間, 30 時間, 50 時間, 100 時間, 150 時間および 200 時間保持した. なお 650°C に対してのみ 300 時間保持した.

### 2.3 顕微鏡組織の観察

焼入れ焼戻しをおこなった試料は酸化, 脱炭などの影響を考慮して, 端面を約 2 mm けずり落したのち, 高速鏡面仕上機, パフ研磨の 2 段階で研磨した. 腐食は 5% ピクリン酸アルコール溶液を用いた. 焼戻試料は各鋼種, 各保持時間ごとにすべて顕微鏡写真をとり, 焼戻温度および保持時間が組織におよぼす影響をその写真より観察した.

### 2.4 硬度測定

硬度測定はロックウェル硬度計 B および C スケールによった. 試料はすべて中央を切断し高速鏡面仕上機で研磨したのち, 5ヶ所を測定しその平均値をもつて硬度とした. 測定値はすべて P.P. 熱処理によりショア硬度に換算した. なお焼入時効の影響を考慮して, 低炭素鋼に対しては時効が完了すると思われる約 20 日後に硬度測定をおこなった.

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 実験結果

焼戻温度 650°C における各鋼種の保持時間に対する顕微鏡組織の変化の代表的なものを Fig. 2~4 に示す. これよりみると保持時間の増加とともに炭化物の凝集がおこり, ついには最も安定な粒状化を呈し, さらに粒状化の発達をおこしている. かかる粒状化も炭素量の多い程速かに進行するようで, これは粒状化の際の核となるものが多いことから考えて当然であろう.

炭素量の最も多い SK7 では, Fig. 4 から分るようにさらにセメントタイトの分解がすすんで 150 時間では黒鉛化を生じ, 焼戻時間の増加とともに黒鉛の量も増加している. 黒鉛化は 650°C 以外の温度ではおこっていない. これはマルテンサイト鋼を焼戻した際には 650°C で最も黒鉛化が進行しやすいとしている山中等<sup>5)</sup>の結果と一致している.

焼戻温度が 680°C, 710°C と上昇するにつれて炭化物の凝集速度は促進されるようで, それにつれて粒状化も早く進行している. この様子の代表的なものを Fig. 5~8 に示す. これはセメントタイトは 650°C~

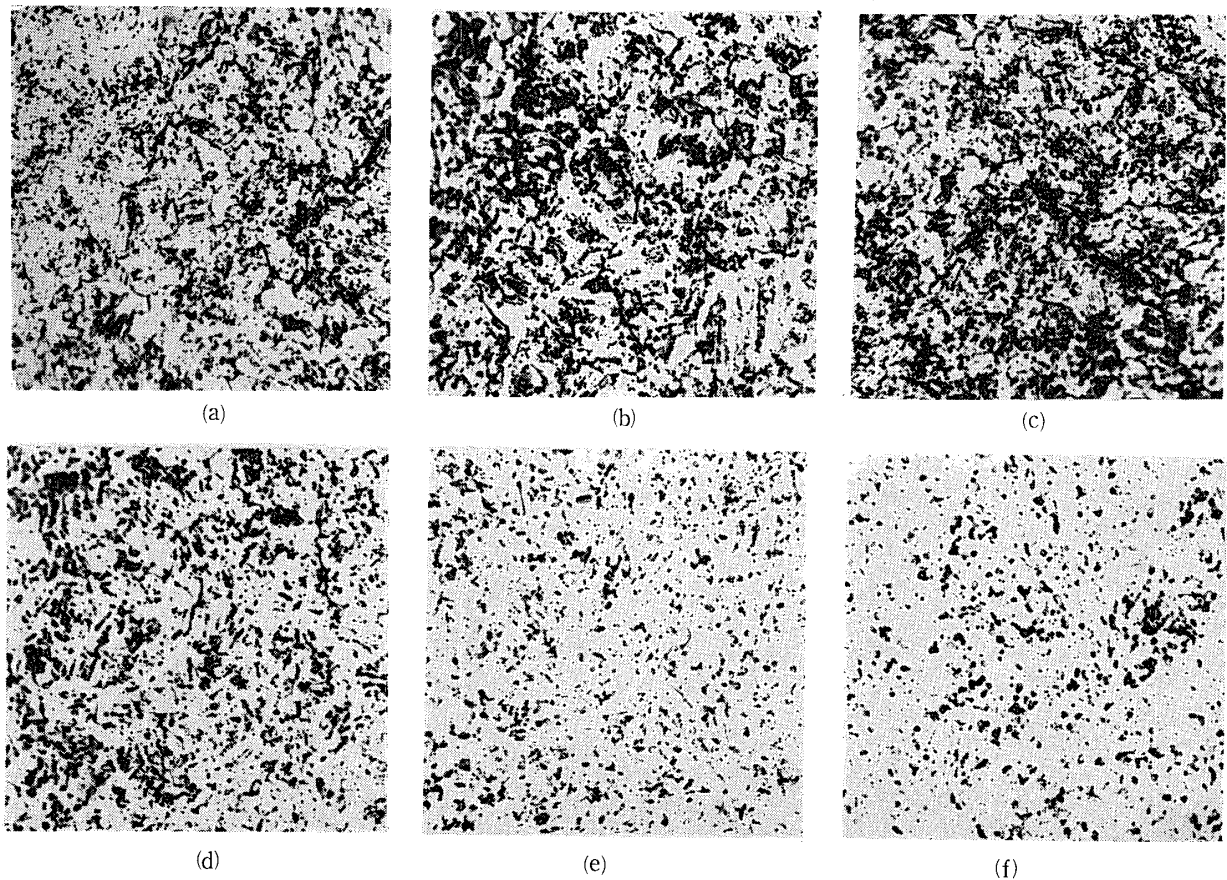


Fig.2 Microstructures of specimens S10C which were tempered at 650°C. Tempering time :  
 (a) 30h (b) 50h (c) 100h (d) 150h (e) 200h (f) 300h Magnif. : ×400

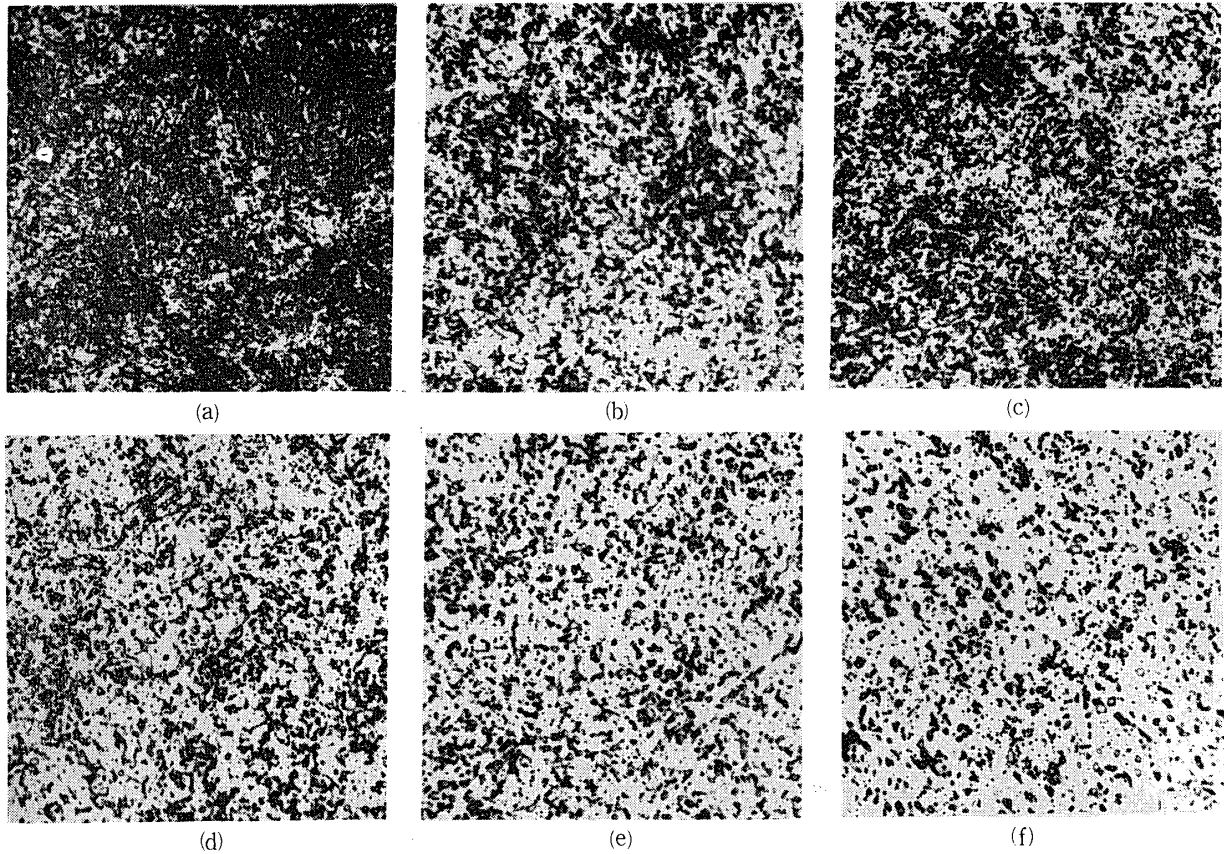


Fig.3 Microstructure of specimens S35C which were tempered at 650°C. Tempering time :  
 (a) 10h (b) 50h (c) 100h (d) 150h (e) 200h (f) 300h Magnif. : ×400

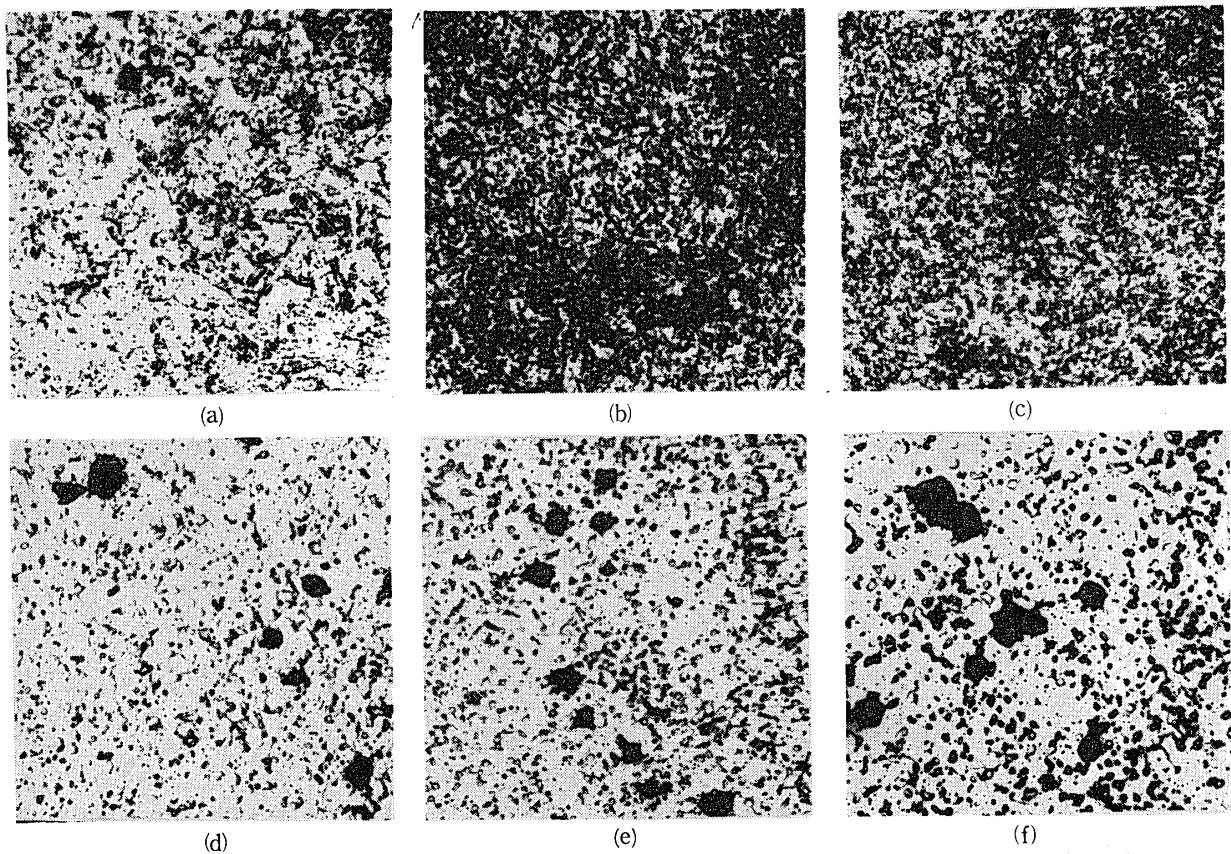


Fig.4 Microstructure of specimens SK7 which were tempered at 650°C. Tempering time :  
 (a) 10h (b) 30h (c) 50h (d) 150h (e) 200h (f) 300h Magnif. : ×400

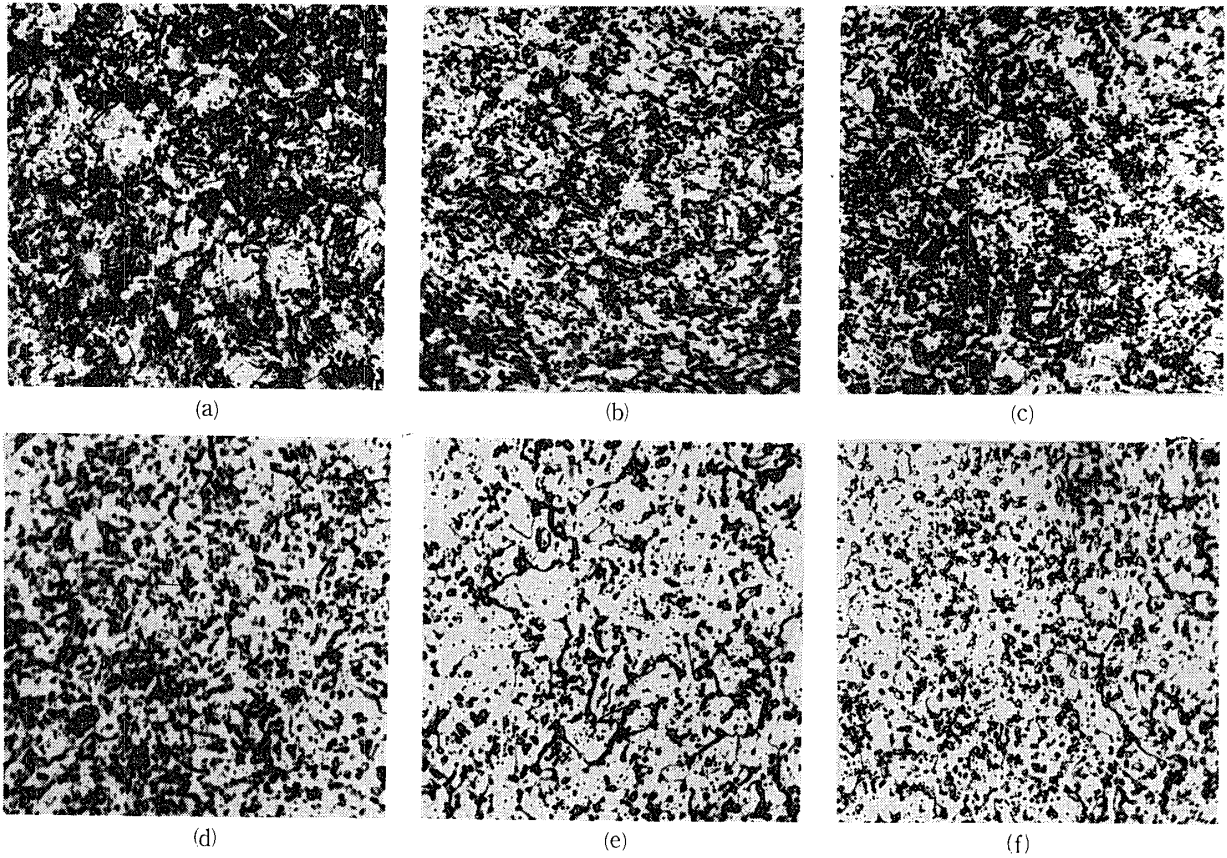


Fig.5 Microstructure of specimens S20C which were tempered at 680°C. Tempering time :  
(a) 10h (b) 30h (c) 50h (d) 100h (e) 150h (f) 200h Magnif. : ×400

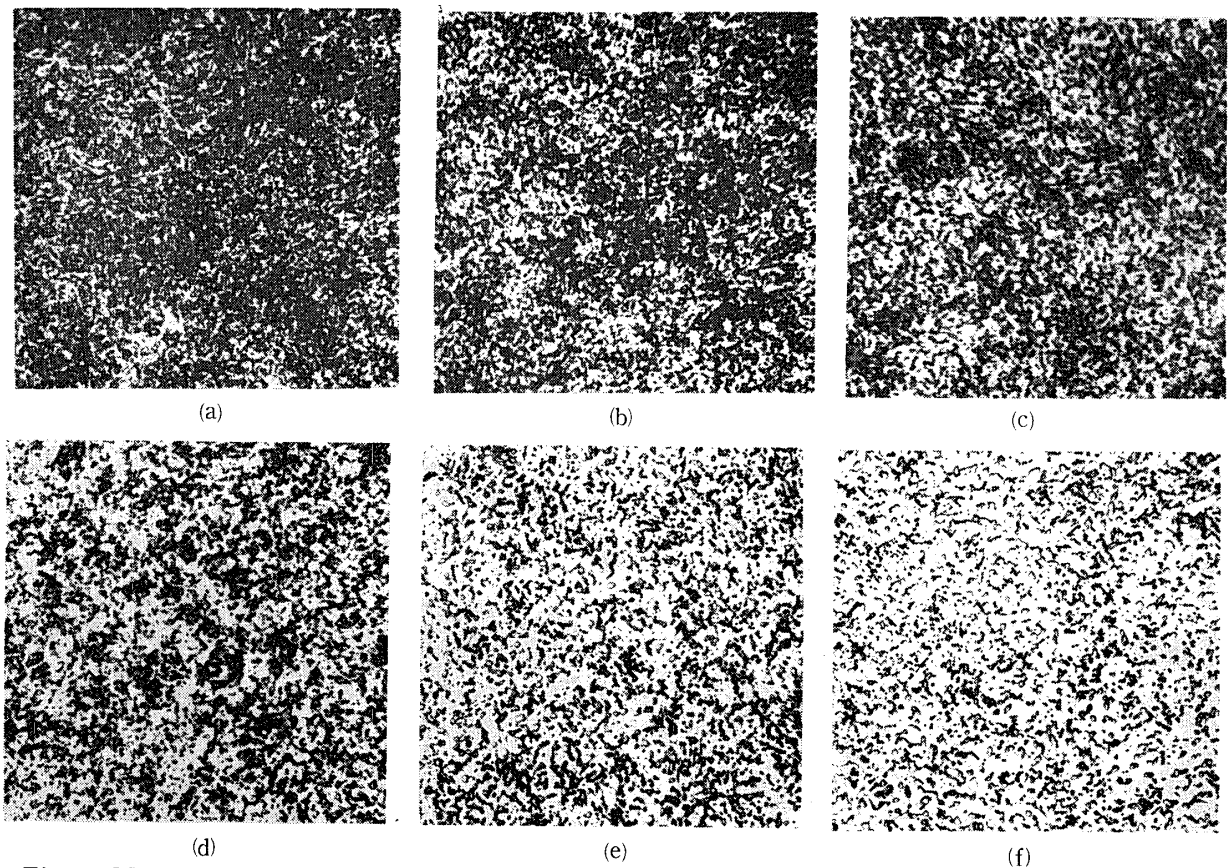


Fig.6 Microstructure of specimens S50C which were tempered at 680°C. Tempering time :  
(a) 10h (b) 30h (c) 50h (d) 100h (e) 150h (f) 200h Magnif. : ×400

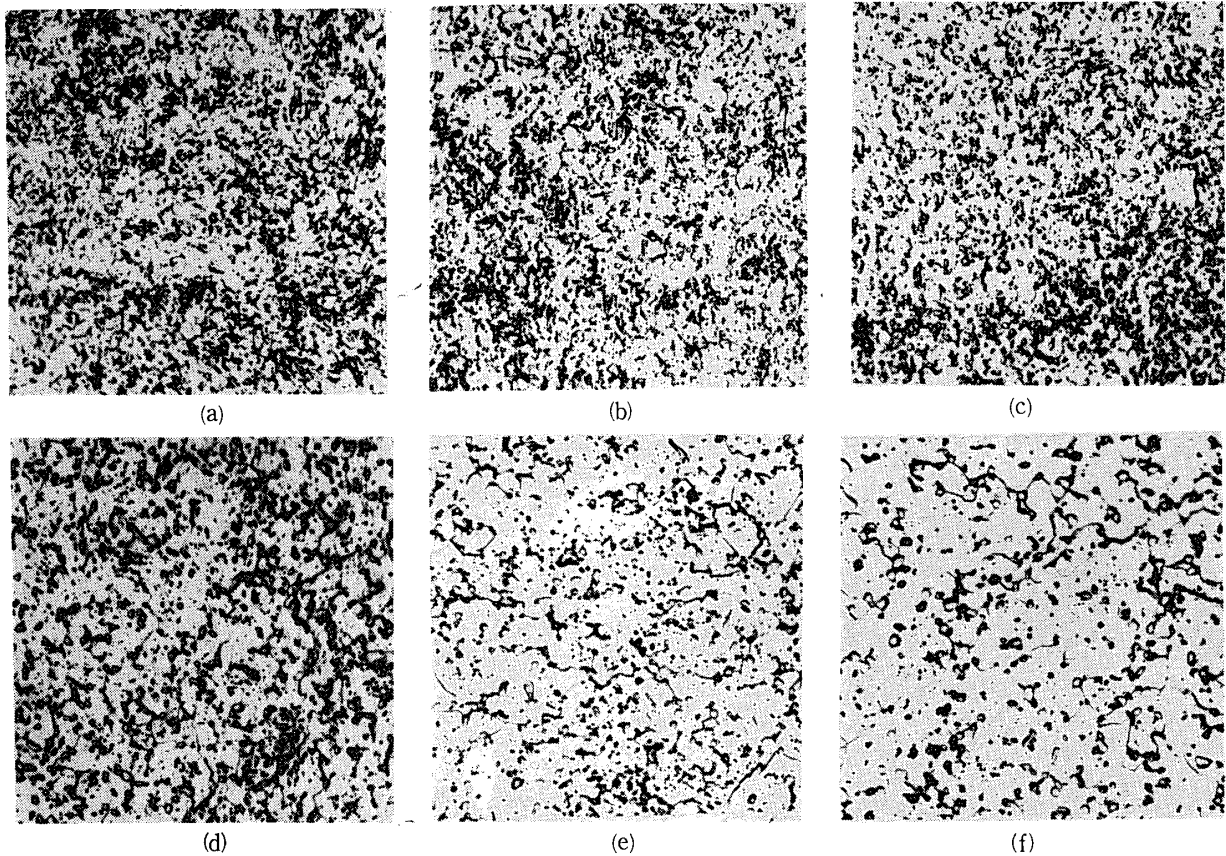


Fig.7 Microstructure of specimens S20C which were tempered at 710°C. Tempering time :  
 (a) 10h (b) 20h (c) 50h (d) 100h (e) 150h (f) 200h Magnif. :  $\times 400$

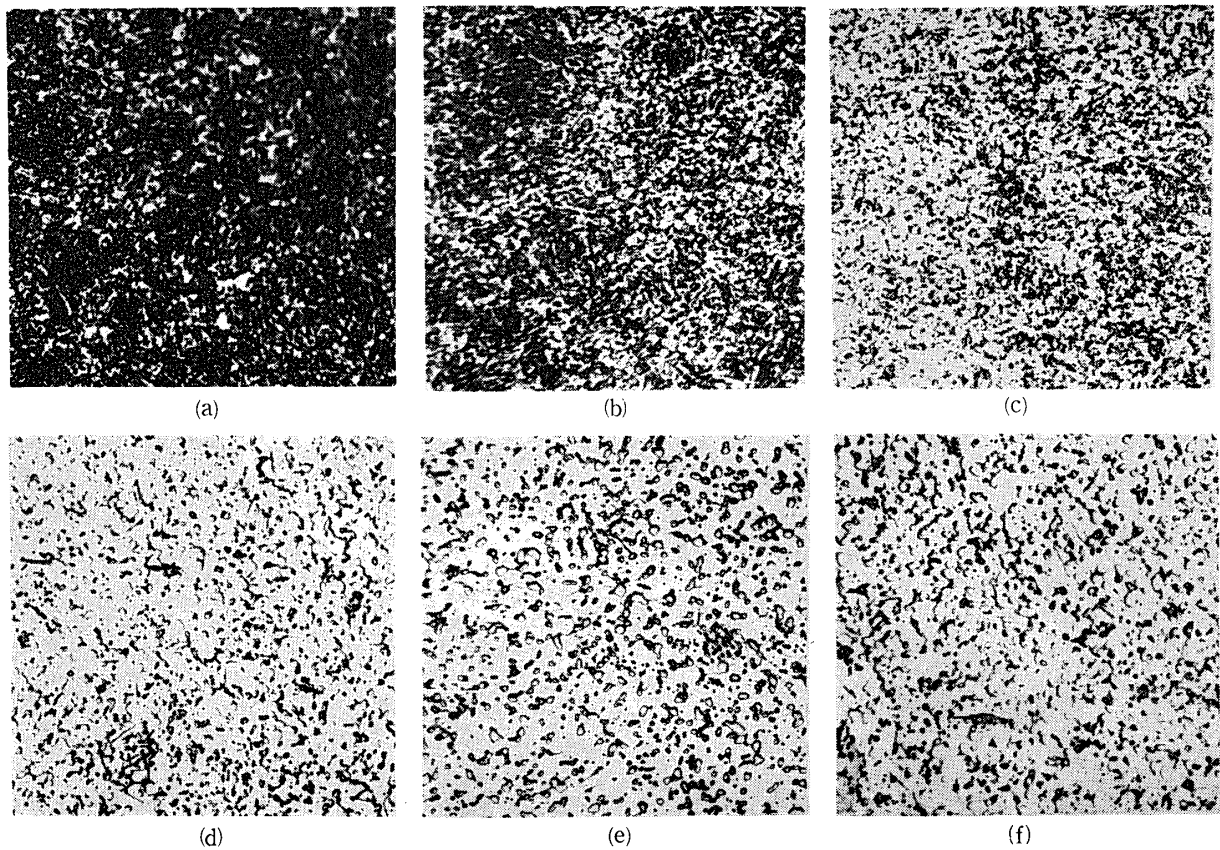


Fig.8 Microstructure of specimens S50C which were tempered at 710°C. Tempering time :  
 (a) 10h (b) 20h (c) 50h (d) 100h (e) 150h (f) 200h Magnif. : 400

680°C で最も凝集が進行しやすいとする結果<sup>5)</sup>と矛盾するようであるが、これはおそらく次のような原因に基づくものであろう。炉内各部は常に均一な温度ではなく、多少の温度変動があることが考えられる。この炉内の温度変動は炉内温度が高くなるにつれて当然その偏差も大きいと考えられる。この温度変動は試片に局所的な濃度のゆらぎを生じさせる訳で、この局所的な濃度のゆらぎは温度の高い710°Cにおいて最も著しいと考えられる。この濃度のゆらぎは当然炭素の拡散を促進する訳である。従つて710°Cにおいて炭化物の凝集が速におこなわれるのであろう。

各焼戻時間に対する硬度変化を、各焼戻温度ごとに測定したものを Fig. 9~11 に示す。これからみると硬度は焼戻しの初期すなわちマルテンサイトの崩壊とともに速かに低下し、その後の硬度の低下率はわずかである。また焼戻温度の高い程短時間内に大きく低下している。これらの傾向は650°C以下の温度に対しておこなわれた他の実験結果<sup>6)</sup>ともよく一致している。

つぎに S10C 焼準鋼を650°C で長時間加熱した際の粒状化過程を Fig. 12 にしめす。これからわかるように粒状化は200時間でおこるようで、これは Fig. 2 に示した同じ S10C の焼入焼戻しによる粒状化開始時間とほぼ一致している。しかし焼準鋼の粒状パーライトが層状パーライトを母体としてできるため、炭化物の粒度が不そろいでしかもその分散度が悪いのに反して、焼入焼戻しによつてえられる炭化物は粒度も比較的よくそろい、また分散度も極めてよい。これは焼入れによつて均一な低炭素マルテンサイトが生じ、炭素がマトリックスに一樣に分布したため焼戻しによつて炭化物が全面に析出したものである。分散度がよく粒度の比較的そろっている方が機械的性質もすぐれてい

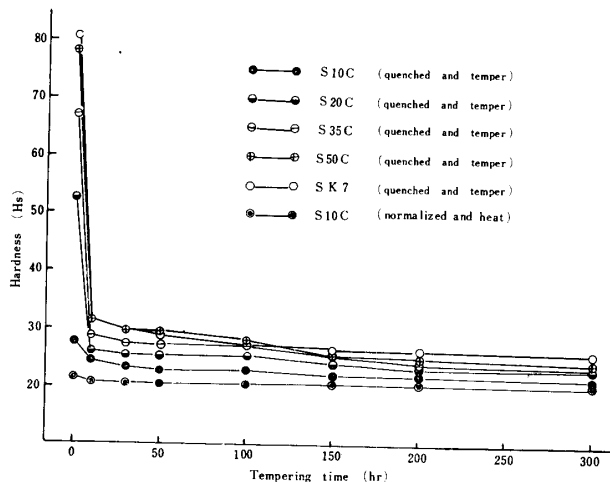


Fig.9 Relation between hardness and tempering time at 650°C

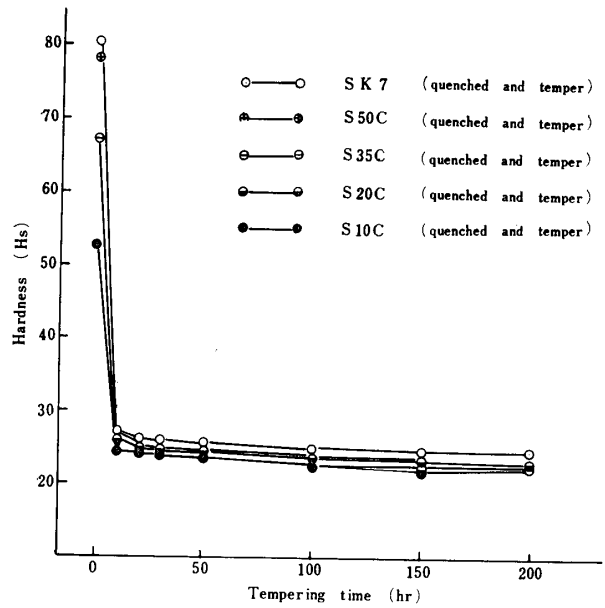


Fig.10 Relation between hardness and tempering time at 680°C

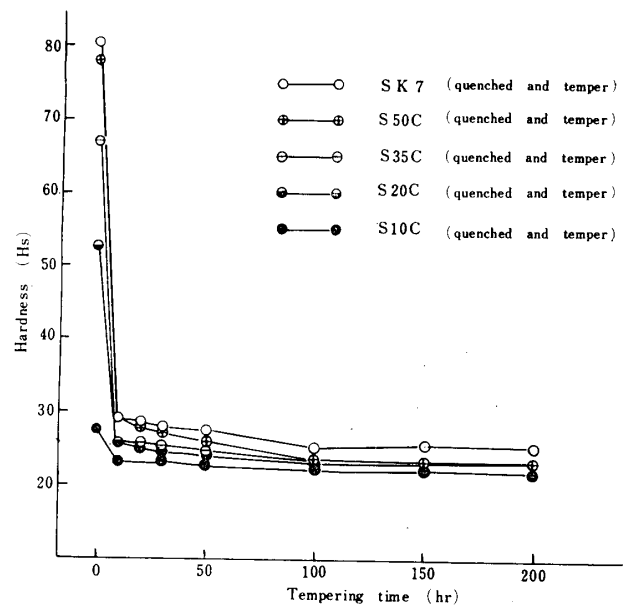


Fig.11 Relation between hardness and tempering time at 710°C

るので、方法としては複雑ではあるが粒状化処理としては焼入焼戻しの方がすぐれているといえる。

### 3. 2 硬度低下に対する考察

焼戻しによる硬度低下は炭素の拡散による炭化物の凝集に基づくとして、J.H.Hollomon等<sup>7)</sup>は拡散の式を変形してつぎの様な実験公式を与えている。

$$H = f [T (c + \log t)]$$

ここに  $T$  は焼戻温度を絶対温度であらわしたものの、 $t$  は焼戻時間、 $c$  は炭素量によつて定まる定数である。この式から分るように硬度は対数曲線的に低下す

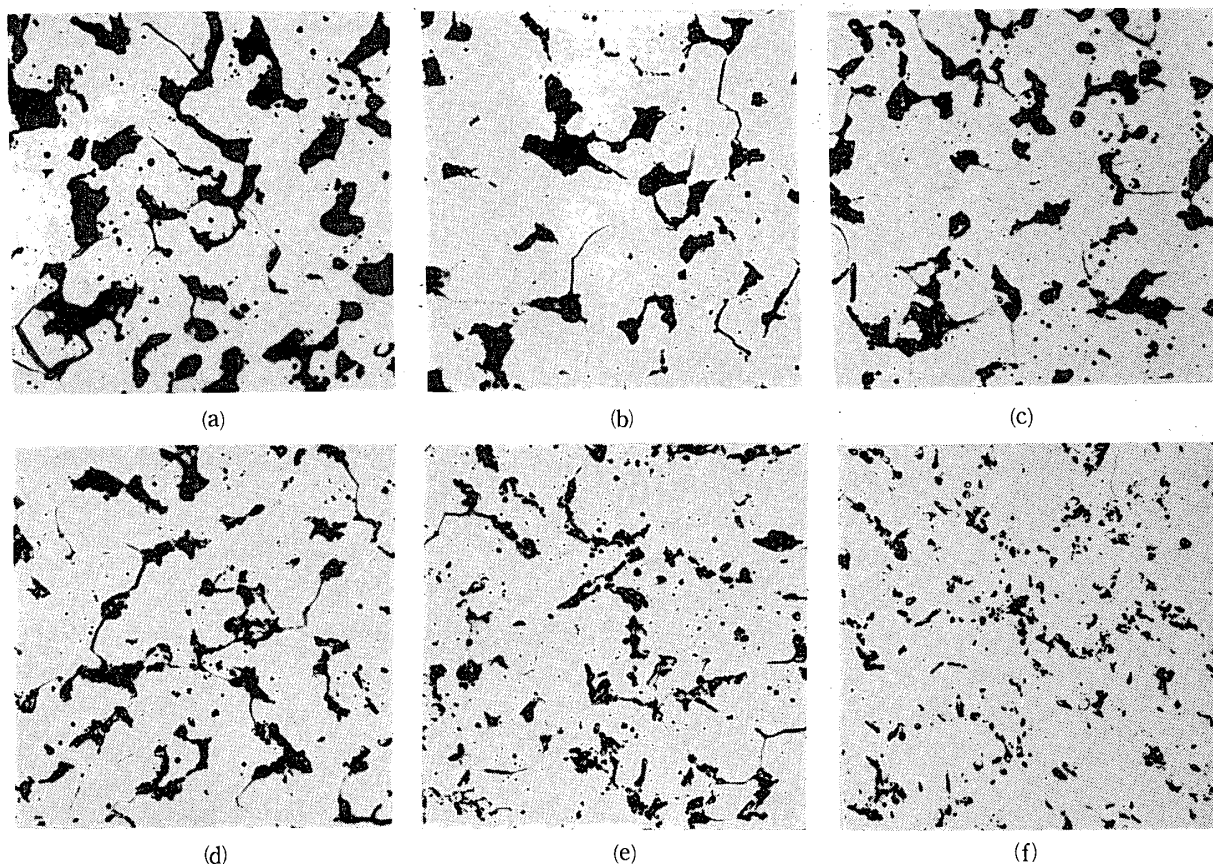


Fig. 12 Microstructure of specimens S10C which were heated at 650°C. after normalized.  
Holding time: (a) 10h (b) 30h (c) 50h (d) 100h (e) 200h (f) 300h Magnif.:  $\times 400$

る。この対数曲線的に低下することは筆者らの結果と一致している。一方 Turkalo<sup>8)</sup>, 美馬<sup>9)</sup>等は硬度の低下にはフェライト結晶粒度の粗大化も貢献するとしてフェライト粒度と硬度の関係を求めている。また最近邦武<sup>10)</sup>はこの両者を総合し、さらにフェライト中の転位密度の変化を考慮したものが硬度低下の原因であるだろうとしている。本実験から推察するとHollomon等のいうmean ferrite patheが主な原因であり、フェライト粒度、転位密度等は副次的なものと思われる。

#### 4. 結 言

焼入れした普通炭素鋼を、650°C以上A<sub>1</sub>点直下の温度で長時間焼戻し、その炭化物粒状化過程を観察しつぎの様な結論をえた。

(1) 同一鋼種においては焼戻温度の高い程粒状化の進行速度は早いようである。特に低炭素鋼に対してはこの傾向がいちじるしい。

(2) 同一温度に対しては、炭化物粒状化に要する時間は炭素含有量の多い鋼種程短かく、セメンタイト粒も大きい。

(3) 焼戻しにともなつて硬度は極めて短時間に低下し、長時間加熱による硬度の低下量は極めてわずかで

ある。

(4) 焼戻しにともなつて得られる粒状セメンタイトの分散度は、焼準組織のものを長時間加熱して得られる炭化物の分散度よりすぐれている。

おわりに本実験をおこなうにあたり終始御激励をたまわつた山口大学教育学部杉宏三教授に感謝する。

#### 参 考 文 献

- 1) E. C. Bain: "Alloying Elements in Steel" A. S. M. (1966), 182.
- 2) E. D. Hyam, J. Nutting: J. Iron and Steel Inst. (U. K.), 148, (1956), 148.
- 3) 大和 久: "P. P. 熱処理", オーム社, (1964), p 190.
- 4) 時弘, 福井: 山口大学工学部研究報告, 18, 2 (1967), 7.
- 5) 山中, 日下: 鉄と鋼, 44, (1958), 1180.
- 6) C. R. Austin, B. S. Norris: Trans. A. S. M., 26 (1938), 778.
- 7) J. H. Hollomon, L. D. Jaffe: Met. Techns. Tech., Publ. No. 1831 (1945), 1.
- 8) A. M. Turkalo, J. R. Low: Trans. M. S. A. Inst. 212 (1958), 750.
- 9) 美馬: 鉄と鋼, 47 (1961), 699.
- 10) 邦武: 日本金属学会講演予稿, 61 (1967), 288.

(昭和42年10月19日受理)