

# 普通炭素鋼の焼入組織に関する研究

(第2報 焼入組織におよぼす加熱時間の影響)

時 弘 義 雄\*・福 井 昂\*

Studies on the Quenched Structure of a Plain Carbon Steel

— 2nd Report —

Effect of Heating time on the Quenched Structure of a Plain Carbon Steel.

Yoshio TOKIHIRO and Takashi FUKUI

## Abstract

After heating the steel with various contents of carbon for a long period of time in the air, it was quenched in the water. In this case, the present investigators observed the quenched structure and tested the quenched hardness in various length of holding time.

The results can be summarized as follows :

- (1) The higher the quenching temperature is, the lower the quenched hardness is.
- (2) In the high carbon steel, the drop of hardness is less than that of the low carbon steel.
- (3) The drop of hardness is effected by the thickness of the oxide layer covering the carbon steel, which grows while heating the steel in the air.

## 1. 緒 言

鋼を高温に加熱すればその組織の変化をきたし、これをたくみに利用すればその機械的および物理的性質を改善することができる。鋼を A<sub>1</sub> 点以上の高温から急冷する焼入れについても古くから多くの報告がなされている。これらを通観すると、焼入れ性におよぼす合金元素とオーステナイト結晶粒度の関係、炭素含有量と最適焼入温度の関係、焼入液の冷却能、焼歪みおよび焼割れ等の防止法、均一なオーステナイトをうるための加熱温度および保持時間等に関して詳細な研究報告が数多くある。しかし空中において、焼入温度に長時間保持した場合、その焼入組織がいかに変化するかについての報告は数すくない。

つぎに試料についても、焼入硬化の大きい S40C 以上の高炭素鋼についておもに研究され、低炭素鋼についての報告は少ない。そこで著者らは焼準した炭素鋼を、空气中において長時間加熱後焼入れしたさいにおける焼入組織の変化の過程を観察し、あわせて硬度を

測定したので以下にその結果を報告する。

## 2. 試料および実験方法

実験方法の概要は Table 1 のとおりである。

### 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。実験にさいしてはこれらを 10φ × 20mm に機械加工した。Table 2 に試料の化学成分を示す。

### 2.2 熱処理方法

試料の加熱はすべて電気マッフル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。試料を焼入温度に加熱する前に、各試料の組織を均一にするために Table 3 に示す温度に 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 (平均 20°C) した。この各試料の焼準組織を Fig. 1 に示す。この焼入温度の決定は P.P. 熱処理<sup>1)</sup> によった。各試料の焼入温度を Table 4 に示す。焼入

\*工業短期大学部機械工学教室

Table 1 Outline of the experimental schedule

## 1 st. Normalizing

Normalizing temperature } × 1 hr → Air-cooling  
(°C)

## 2 nd Quenching

Quenching temperature } × { 0.5, 1, 2, 4 } hr → Water-cooling  
(°C) } { 6, 8, 10 }

Experiments : { Hardness  
Microstructure

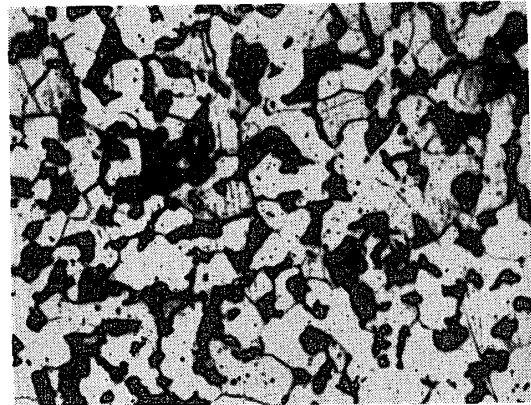
Table 2 Chemical composition of the normalizing specimens (wt %)

Specimen	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni
A (S 10 C)	0.07	0.15	0.15	0.004	0.013	tr	0.08	—
B (S 20 C)	0.208	0.27	0.51	0.007	0.018	tr	0.15	—
C (S 35 C)	0.32	0.26	0.65	0.024	0.030	0.20	0.07	0.04
D (S 50 C)	0.49	0.27	0.71	0.018	0.016	0.02	0.27	0.015
E (S K 7)	0.64	0.44	0.44	0.015	0.008	tr	0.31	0.04

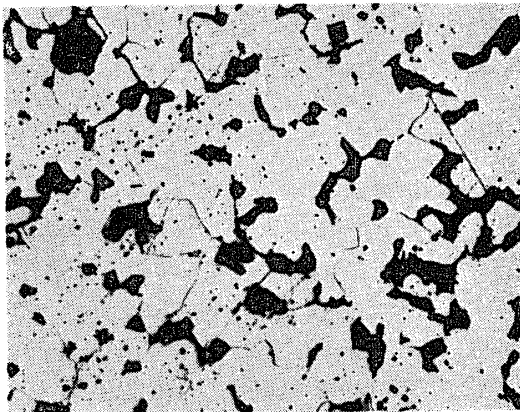
Table 3 Normalizing temperature of specimens

Specimen	A	B	C	D	E
Normalizing temperature (°C)	900	880	850	800	770

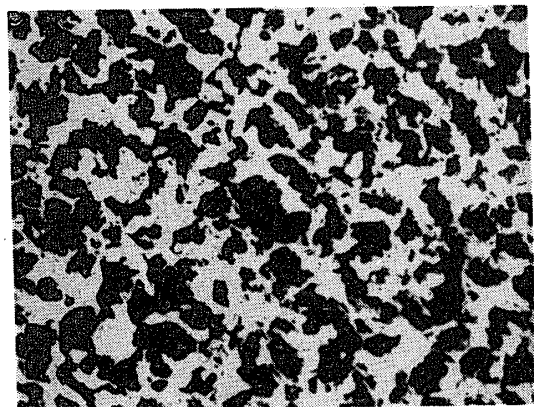
温度での保持時間は各試料ともすべて、1/2, 1, 2, 4, 6, 8 および10時間とし、その後すこしかくはんした水 (10°C) に焼入れをおこなった。



(b)



(a)



(c)

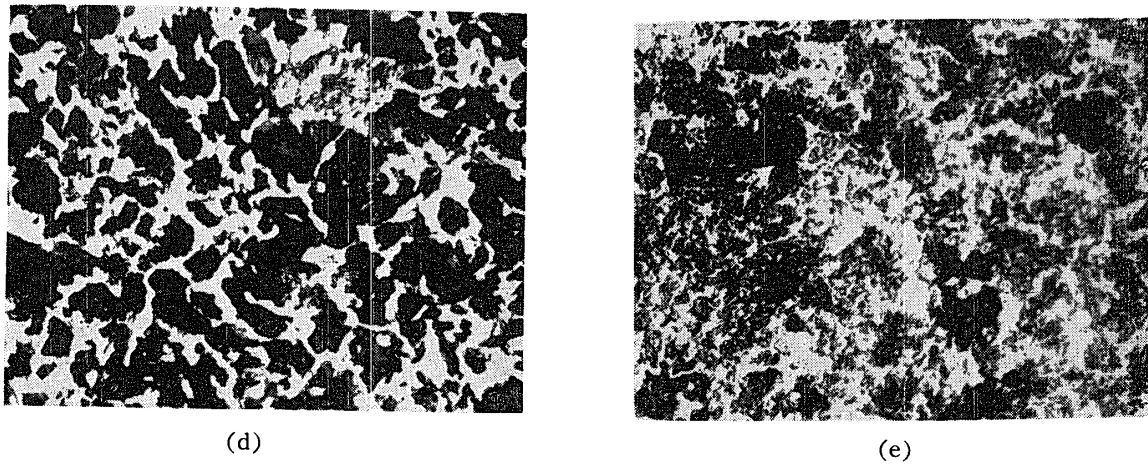


Fig. 1 Microstructure of specimens which were air-cooled from normalizing temperature. Heated at (a) 900°C, (b) 880°C, (c) 850°C, (d) 800°C, (e) 770°C Magnif. : ×320

Table 4 Quenching temperature of specimens

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

### 2.3 顕微鏡組織の観察

焼入れをおこなった試料は、端面を約2mmけずりおとした後、高速鏡面仕上機、バフ研磨の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。焼入試料は各鋼種、各保持時間ごとにすべて顕微鏡写真を撮り、焼入温度での保持時間が組織におよぼす影響を観察した。

### 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。試料は脱炭等の影響を考慮して、端面より約2mmけずりおとし高速鏡面仕上機で仕上げた。測

定にあつては試料断面の周辺4箇所と中央1箇所の5箇所を測定し、その平均値をもつて硬度とした。測定値はすべてこれをP.P.熱処理によりショア硬度に換算した。なお硬度測定にあつては時効の影響を考慮して、焼入後時効が完了すると思われる約20日後におこなつた。

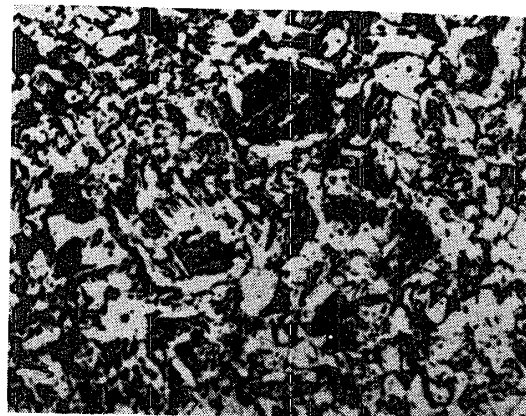
## 3. 実験結果および考察

### 3.1 実験結果

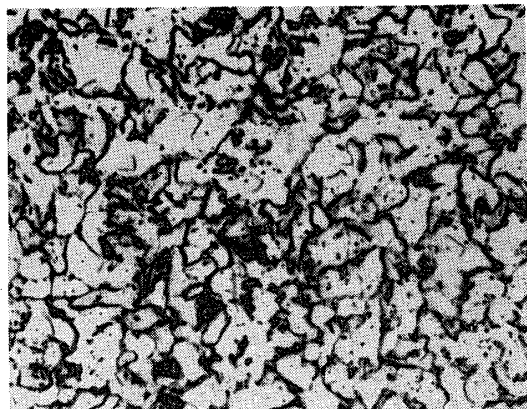
焼入温度での保持時間による各鋼種ごとの組織変化をFig. 2~6に、また硬度と保持時間の関係をFig. 7に示す。S10Cにおいては、保持時間が増しても硬度の低下量はわずかであることがわかる。このことはFig. 2に示す顕微鏡写真によつても、S10Cでは保持時間が2時間以後では組織の変化がほとんどなく、ほぼ均一な低炭素マルテンサイトになつていることから当然と思われる。



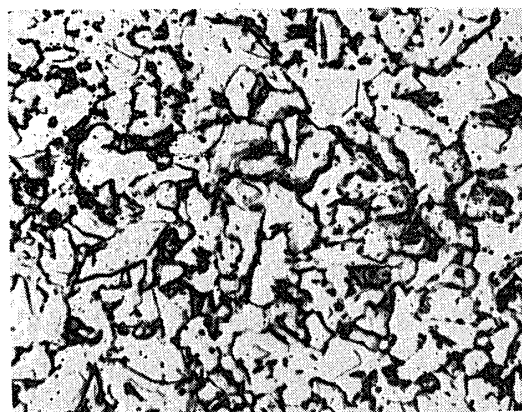
(a)



(b)

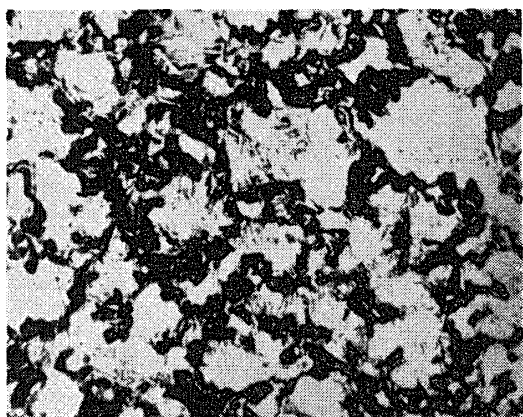


(c)

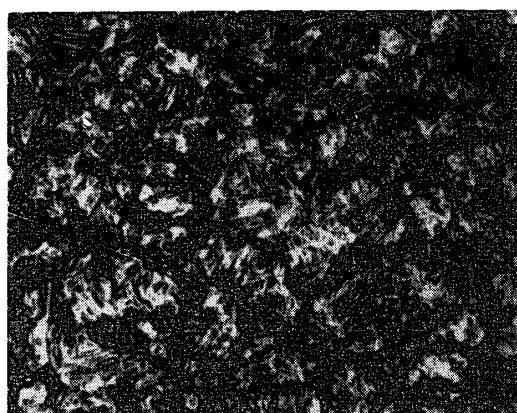


(d)

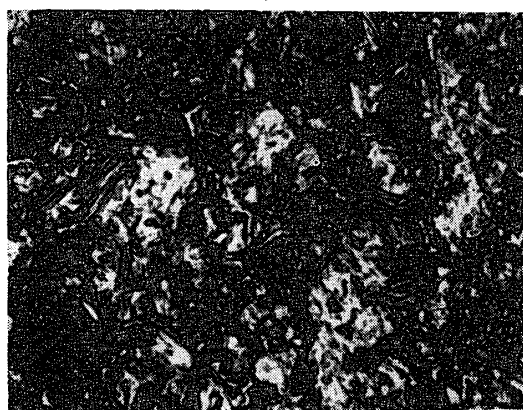
Fig 2 Microstructure of specimens A which were heated at 900°C and quenched in water(10°C)  
Holding time (a) 0.5 h, (b) 2 h, (c) 6 h, (d) 10 h Magnif. : ×320



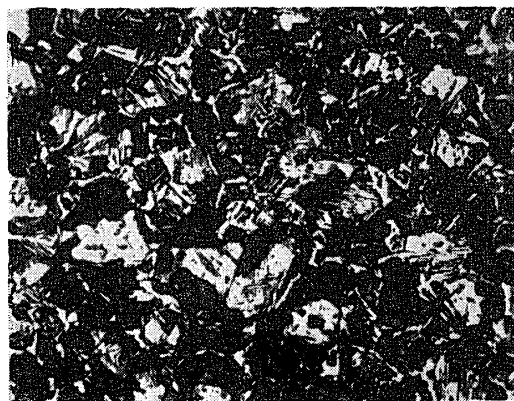
(a)



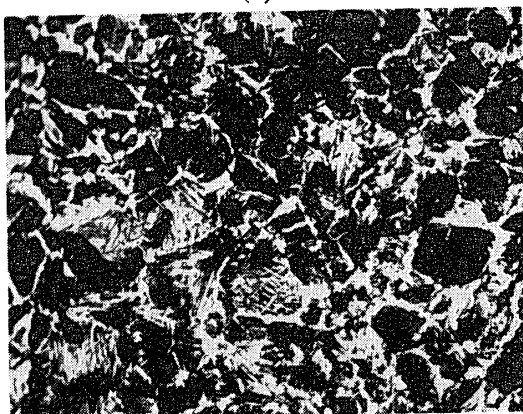
(b)



(c)



(d)

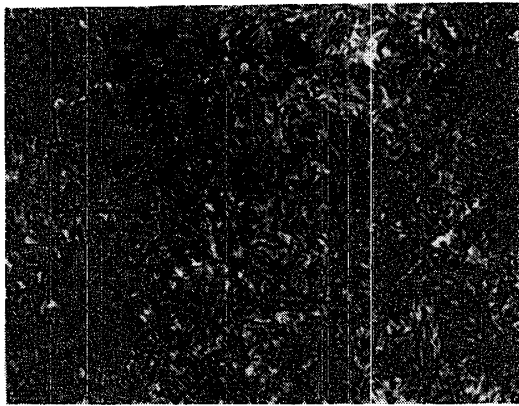


(e)

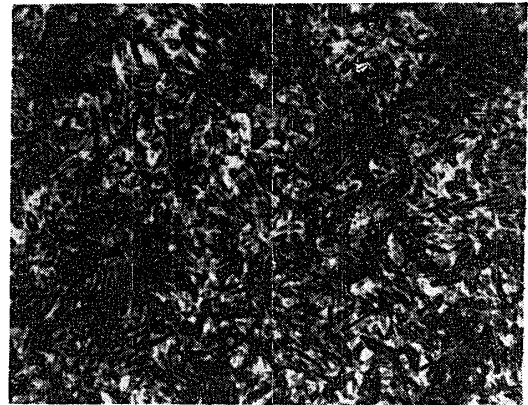
Fig. 3 Microstructure of specimens B which were heated at 880°C and quenched in water (10°C)

Holding time (a) 0.5 h, (b) 2 h, (c) 4 h, (d) 8 h, (e) 10 h

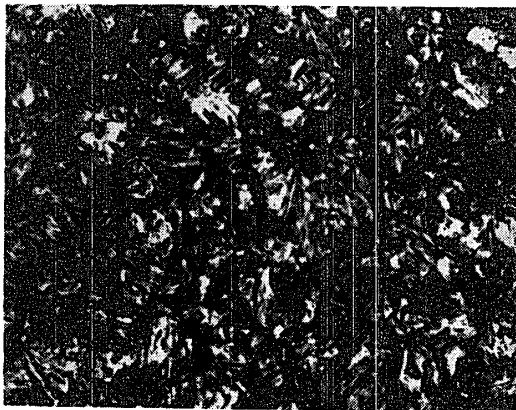
Magnif. : ×320



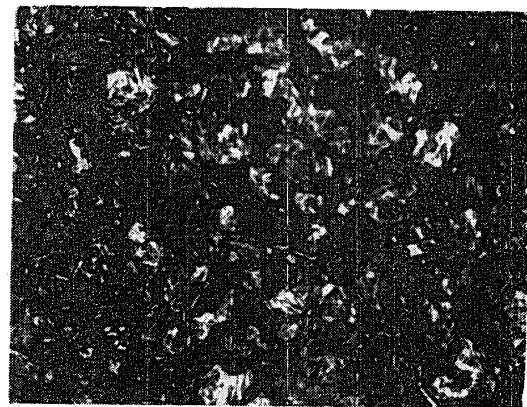
(a)



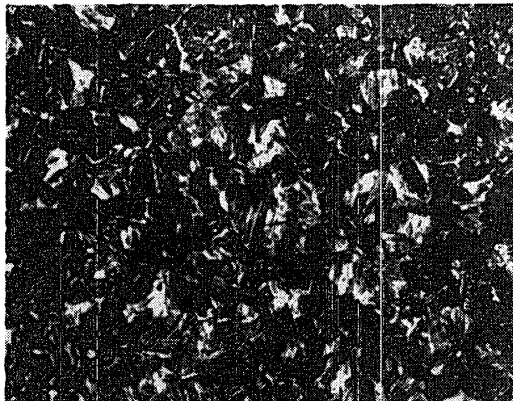
(b)



(c)



(d)

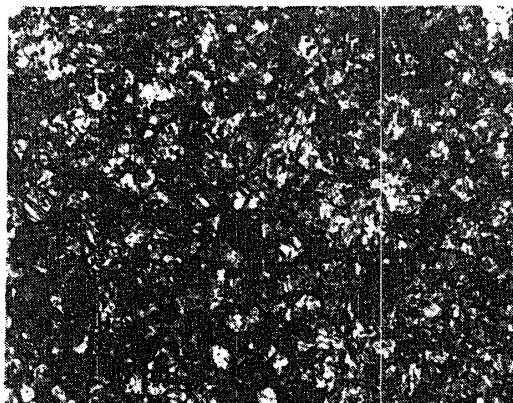


(e)

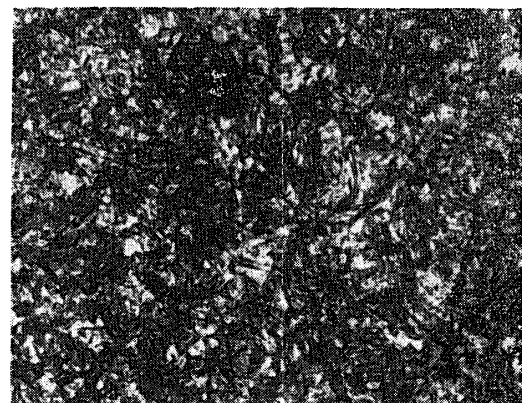
Fig. 4 Microstructure of specimens C which were heated at 850°C and quenched in water (10°C)

Holding time (a) 0.5 h, (b) 2 h, (c) 4 h, (d) 8 h, (e) 10 h

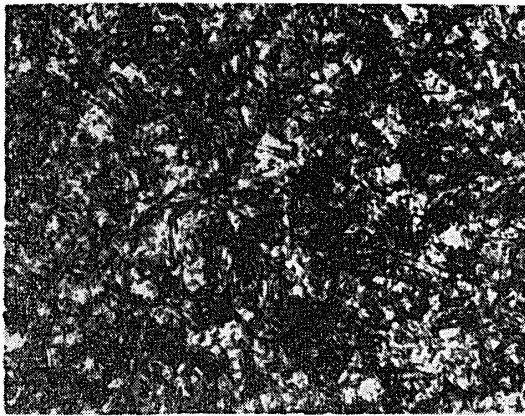
Magnif. :  $\times 320$



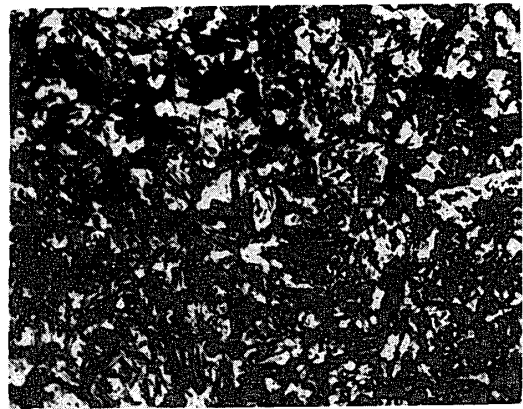
(a)



(b)



(c)

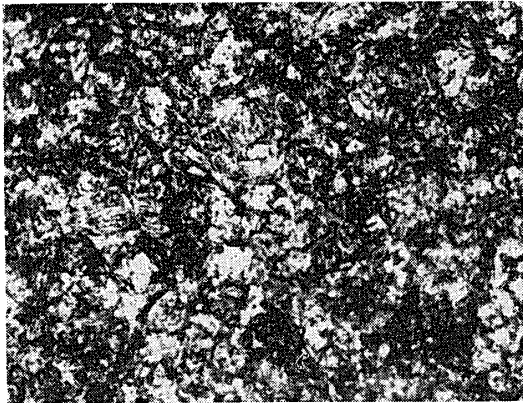


(d)

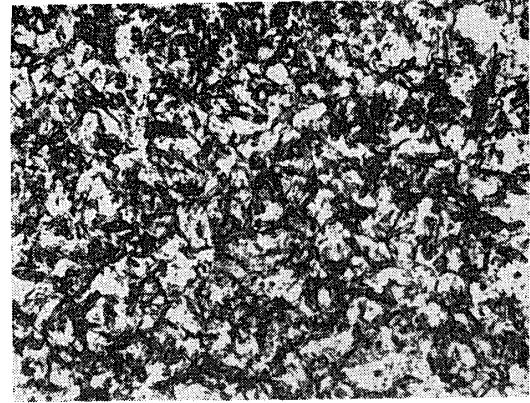
Fig. 5 Microstructure of specimens D which were heated at 800°C and quenched in water (10°C)

Holding time (a) 1 h, (b) 4 h, (c) 8 h, (d) 10 h

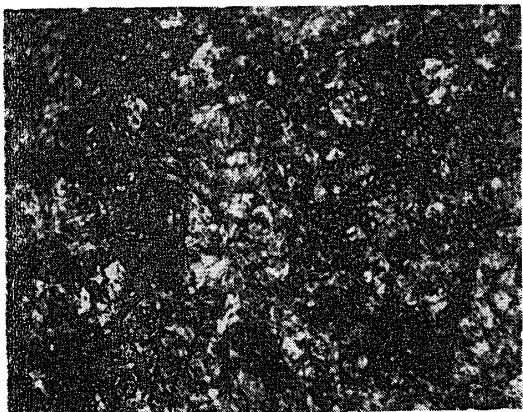
Magnif. : × 320



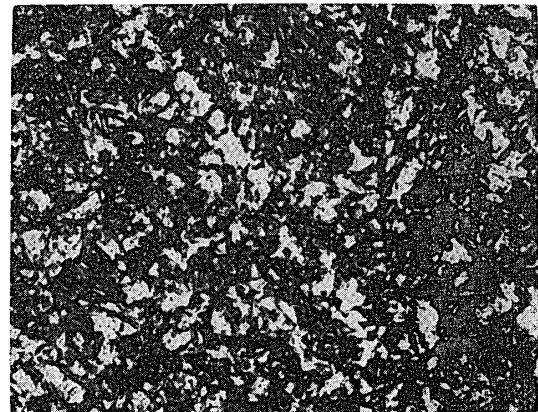
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 6 Microstructure of specimens E which were heated at 770°C and quenched in water (10°C)

Holding time (a) 1 h, (b) 4 h, (c) 8 h, (d) 10 h.

Magnif. : × 320

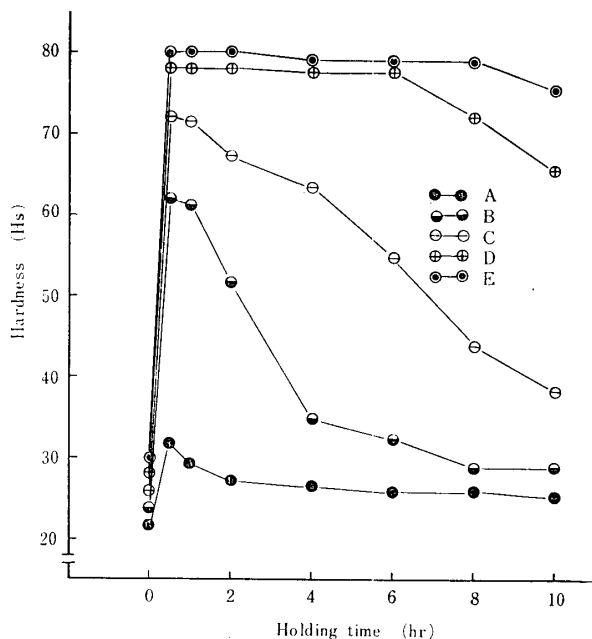


Fig. 7 Relation between holding time and hardness for quenched specimens A, B, C, D and E

つぎに S20C の硬度と保持時間の関係を見ると、4 時間までは硬度は急激に低下し、その後 8 時間まで徐々に低下しその後変化はない。顕微鏡組織では、Fig. 3 にしめすように保持時間 2 時間においては、オーステナイト結晶粒界にかなりトルースタイトを生じている。保持時間 6 時間以後では門間<sup>2)</sup>のいつているように、焼入れのさいの冷却速度の低下のために A<sub>3</sub> 変態と Ar<sub>1</sub> 変態とが同時におこつたと思われ、その結果初析フェライト量も保持時間とともに増し、また Ar<sub>1</sub> 変態のおこる温度によるトルースタイト→ソルバイト→パーライトへの変化もこの順序に保持時間の増加につれて進行している。しかも長時間加熱では、ある部分においてはウッドマンステッテン組織を呈している。なお、保持時間 8 時間および 10 時間でも、顕微鏡組織では全く同様であり、硬度の変化と顕微鏡組織の変化がよく一致している。

S35C では、保持時間 2 時間以後からは時間の増加とともにほぼ直線的に硬度は低下している。顕微鏡組織は Fig. 4 に示すように、保持時間の増加とともに S20C と全く同様な変化をたどり、硬度の変化と顕微鏡組織の変化はよく一致している。

S50C においては保持時間 6 時間までは硬度の変化はほとんどなく、以後急激に低下している。一方顕微鏡組織も 8 時間保持では、マルテンサイトの地にわずかに微細なトルースタイトを混じり、10 時間ではそれがかなり発達した結節状トルースタイトになつていて、

硬度の低下する状態と顕微鏡組織の変化とがよく一致している。SK7 においても S50C と同様に、硬度が低下する 8 時間以後に微細なトルースタイトを生じ、硬度の変化と一致している。

以上を総括すると、硬度の変化と顕微鏡組織はつねに一致しており、硬度低下の理由は焼入れにさいして試料の一部にパーライト変態を生ずるため、このパーライト変態の形態と量が硬度の低下量を定めているといえる。

### 3.2 結果に対する考察

つぎにかかる硬度低下と組織の変化がいかにしておこるかを考察してみる。この原因としては、オーステナイト結晶粒の粗大化と冷却速度の低下が考えられる。焼入理論によれば、Ar<sub>1</sub> 変態はつぎのような二つの変化に分解して考えられる。すなわち、

(第 1 段変化)  
炭素を固溶した γ 鉄 → 炭素を過飽和に固溶した α 鉄 → α 鉄 + Fe<sub>3</sub>C の混合物。

(第 2 段変化)

したがって完全に焼入れされた状態とは、第 1 段変化を完了してしかも第 2 段変化が完全に阻止されたときである。しかるに高温での長時間加熱によりオーステナイト結晶粒が粗大化すれば、上述の第 1 段変化につづいておこる第 2 段変化進行のさいの核となるべきものがすくなくなり、かえって焼きは入りやすくなるはずである。また焼入温度では、保持時間 2 時間以上ではほとんど結晶粒度が一定である<sup>3)</sup>し、真空加熱では長時間保持して焼入れても硬度が低下しない<sup>4)</sup>ことから考えても、組織および硬度の変化は冷却速度の低下のみによるものと考えられる。

試料、加熱温度および冷却剤が同じである場合には冷却速度に影響するものは試料表面の酸化とそのあらさである<sup>5)</sup>。そこでまず試料表面に生ずるスケールと冷却速度の関係について考察する。

#### 3.2.1 スケール厚さと冷却速度の関係

酸化性ふんい気で鋼を高温に加熱するときは、スケール厚さは加熱時間とともに放物線的に増すといわれている<sup>6)</sup>。また焼入温度では、スケール厚さは炭素含有量にはほとんど無関係であり、保持時間と加熱温度のみによつて定まる<sup>7)</sup>。S10C, S20C 等のように低炭素鋼では保持時間 6 時間以上では、焼入温度が高いためスケール厚さはほぼ一定となる。

スケールを有する鋼を焼入れすれば、冷却にさいしてのスケールと素地金属の熱膨脹率の差にもとづく応力発生によつてスケールははく離する<sup>8)</sup>のである。試片の焼入状態を詳細に観察した結果によると、スケールの薄い間（加熱温度が低く保持時間の短い場合）

はスケールと素地金属との密着性が悪く<sup>9)</sup>、焼入試片が冷却剤にふれると同時にスケールは飛び散りただちに焼入液と素地金属が直接々触る。一方スケールが厚くなるにつれて素地金属との密着性をまし<sup>9)</sup>、試料が冷却剤にふれてもしばらくははがれずにとどまっている。

Pilling<sup>10)</sup>によれば焼入れのさいにおける温度降下は次の3段階よりなるといわれる。第1段階は試料表面が蒸気膜でおおわれた冷却の非常におそい段階(蒸気膜段階)、第2段階は盛んに沸騰のおこる最も冷却の速い段階(沸騰段階)、第3段階は主として冷却剤が対流によつて冷却される比較的冷却のおそい段階(対流段階)である。第1段階の長い程焼入硬化は小さい。スケールの薄い間は焼入れと同時に試料表面は盛んに沸騰し、蒸気膜段階が短かく沸騰段階の長いことが観察される。スケールが厚くなるとはがれにくいいため、スケールと素地金属との間にできたすきまに浸入した冷却剤が蒸気膜となり、蒸気膜段階がのびて冷却速度が低下するようである。

このように考えるとスケール厚さと冷却速度は密接な関係があり、スケールが厚くなるにつれて冷却速度も低下するであろう。この結果は Fig. 7 の硬度—保持時間曲線にも明らかに表われており、加熱温度の低い程(炭素含有量の多いもの程)スケールも薄く、硬度低下開始が保持時間の長時間側にずれている。

### 3.2.2 表面粗さと冷却速度の関係

試料の表面粗さが冷却速度に影響することは古くから認められており<sup>9), 11), 12)</sup>、一般に表面があらくなると、焼入れに際して生じた蒸気泡は試片表面から離れやすくなり、速かな熱伝達がおこなわれて冷却速度は大となるといわれる。本実験のように空中で高温加熱すれば Wüstite と素地金属の比重の差により試片表面の形状が変化することが考えられる。この様子を知るために S50C を 800°C に加熱し、保持時間 0.5h, 2h, 6h の後に空冷した試料の表面あらさを測定してみた。この結果をたて 100 倍、横 300 倍にして Fig. 8 に示す。これから明らかなように、試片表面は保持時間の増大とともに、すなわちスケール厚さの増大とともに変化しスケールが厚くなる程表面はなめらかになっている。

一方表面あらさと硬度との関係をみると Fig. 7 からわかるように、S50C に対しては保持時間 6 時間までは、表面あらさは変化しているにもかかわらず硬度は変化していない。したがってこの程度の表面あらさの変化では焼入硬度に変化はないと考えられる。なお

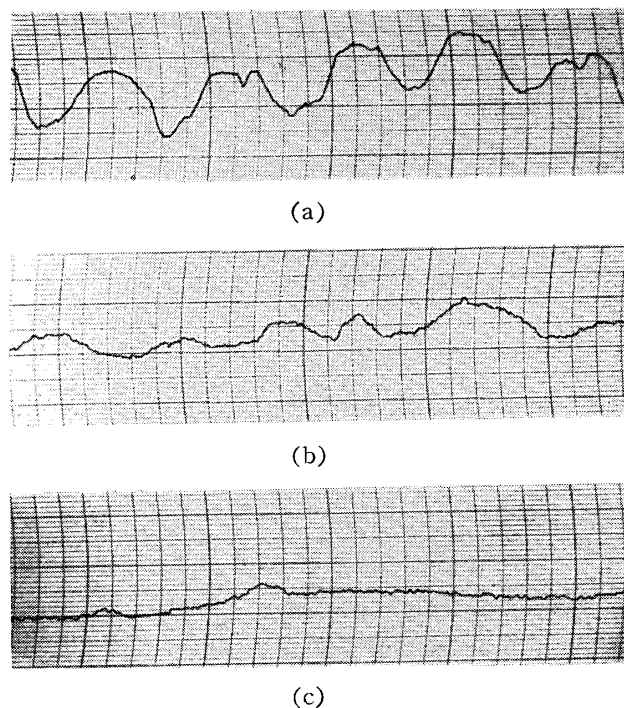
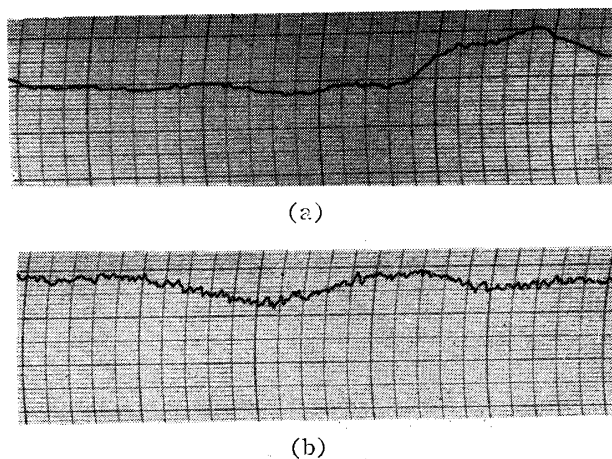


Fig. 8 Surface roughness curves of specimens which are heated at 800°C for a long in the air  
Holding time a) 0.5h, b) 2 h, c) 6 h.

さらにこの点を確認するため、S20Cを880°Cに加熱し保持時間をいろいろ変化させたのちこれを約200°Cに加熱した酸化鉄中に入れて徐冷した。このときの試片表面粗さの変化を測定し、たて100倍、横300倍に拡大したものを保持時間の増大とともに Fig. 9 に示す。これからみると保持時間1時間以後は、表面あらさにほとんど変化はない。これに対し、Fig. 7 から明らかなように硬度は、保持時間の増大とともに大きく低下している。以上の結果から、この程度の表面あらさの変化は硬度にはほとんど影響を与えないと考えてよいようである。





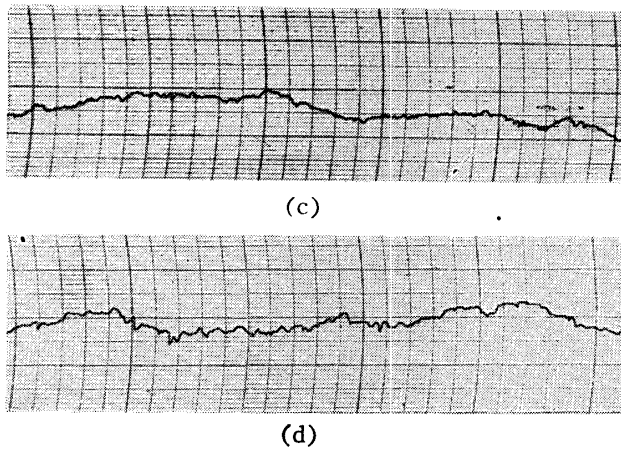


Fig. 9 Surface roughness curves of specimen which are heated at  $880^{\circ}\text{C}$  for a long time in the air  
Holding time a) 1 h, b) 2 h, c) 6 h, d) 10 h

試料を空冷もしくは酸化鉄中で徐冷して表面あらさを測定したのは、急冷すればスケールが表面からはがれあらさの測定が不可能であつたからである。なお徐冷途中で表面あらさが変化することも考えられるが、この点について注意深く観察したところによればその変化はほとんどないと思われる。

以上の結果から、空中加熱による保持時間の変化が焼入組織および硬度に影響を与えるのは、表面粗さの変化ではなく、生成したスケールのはく離性の相違による冷却速度の変化が大きく影響すると思われる。

#### 4. 結 言

以上得られた結果を要約するとつぎのとおりである。

(1) 空気中において鋼を長時間保持したのち水焼入れをおこなうと、焼入硬度は低下する。

(2) S10Cにおいては保持時間6時間、S20Cでは8時間以上保持しても、焼入硬度は変わらない。

(3) S50Cでは6時間、SK7では8時間保持までは焼入硬度は一定であるが、それ以上保持したのち水焼入れをおこなうとその焼入硬度は次第に低下する。

(4) 長時間保持によつて焼入硬度が低下する原因は、高温加熱によつて鋼表面に生じたスケールのはく離性の相違による冷却速度の変化で、加熱による表面粗さの変化はほとんど影響しないようである。

おわりに本実験をおこなうにあたり御教示をいただいた金属材料技術研究所依田連平博士、横浜国立大学横山享教授、および終始御激励を賜つた山口大学教育学部杉宏三教授に深く感謝の意を表わす。

#### 参 考 文 献

- 1) 大和久：“P.P.熱処理”，オーム社，(1964) p.190
- 2) 門間：“炭素鋼”，日本金属学会，(1951) p.10
- 3) 河合：鉄と鋼，27, 767 (1941)
- 4) 門間：“新制金属講座鉄鋼Ⅱ”，日本金属学会，(1965) p.161
- 5) H. J. French：Trans. A. S. S. T., 17, 161 (1930)
- 6) M. H. Davis, M. T. Simnard and C. E. Birchnall：J. Metals, 3, 889 (1951)
- 7) 三島，粗山：鉄と鋼，30, 231 (1944)
- 8) U. R. Davis：Inst. Metal Monograph and Rep. Series Series 5, 291 (1948)
- 9) R. F. Tylecote：J. Iron and Steel Inst., 195, 380 (1960)
- 10) N. B. Pilling and T. D. Lynch：Trans. Met. Soc. Amer. Inst. Min., Met. and Pet Eng., LXII, 665 (1920)
- 11) 佐藤：金属の研究，10, 63 (1933)
- 12) W. Peter：Arch. Eisenhüttenwes., 21, 395 (1950)

(昭和42年4月12日受理)