

# 焼もどし炭素鋼の強度性におよぼす セメンタイト粒子の分散の影響\*

美馬 源次郎\*\*

## The Influence of Cementite Particle Dispersion on the Strength Indices of Tempered Carbon Steels.

Genjiro MIMA.

### Synopsis:

The relationships between strength indices (yield strength, tensile strength and hardness) and parameters of microstructure in two commercial plain carbon martensitic steels (0.7% and 1.1% C) have been studied after varying isothermal tempering treatments at 690°C.

The size-frequency distributions of cementite particle diameter on a polished cross-sections of the specimens which tempered at 690°C for various periods of time (6 mn. to 400 h) and the number of ferrite grains per unit area for the specimens after times in excess of 10h have been measured by the use of an optical and an electron-microscope, and from these results, the mean diameter of cementite particles, the mean free ferrite paths, and the ferrite grain size of the specimens after 10 h or longer tempering.

The various relationship which have been proposed between parameters of the microstructure and strength indices are confirmed with the present data. The results which were confirmed the linearity of the relationship derived by Gensamer and co-workers are showed a fairly large experimental scatter and the reverse-(Japanese He) type curve. The strength indices as a function of the mean diameter of cementite particles have been shown the discontinuity at the corresponding values for the tempering time between 1 h and 3 h. From the present results, it is suggested that the strength indices of the tempered steel containing non-coherent particles of cementite depend upon the development of minute ferrite grains which are bound by the low energy boundary, the transition from the construction of low energy boundary to that of ordinary grain boundary, and the growth of ferrite grains which are bounded by the ordinary boundary.

### I. 緒 言

鋼の機械的性質におよぼす球状化セメンタイトの分散の影響は、古くは、セメンタイト粒子の数と硬度<sup>1)</sup>、セメンタイトの大きさと硬さ<sup>2)</sup>、セメンタイトの球状化およびフェライト粒成長と衝撃値<sup>3)4)</sup>、あるいはセメンタイト粒子間の平均距離と強度性<sup>5)~9)</sup>などの関係として研究されており、近年には、NYAM & NUTTING<sup>9)</sup>が焼もどし鋼の硬度は SMITH<sup>10)</sup>の方法で求めた地鉄結晶粒子の大きさの平方根の逆数との関係として報告している。

しかし焼もどし効果が少ない間は地鉄結晶粒子の形状は長い笹の葉状を保ち、かつかかる地質の組織は球状セメンタイトの成長が相当進行した後においてもなお消失しないから、地鉄結晶粒子の大きさを広い焼もどし範囲にわたり SMITH<sup>10)</sup>の方法で測定することは矛盾をおかすことになり、したがって NYAM & NUTTING<sup>9)</sup>の結果は矛盾を含むことになる。TURKALO & LOW<sup>11)</sup>はセメン

タイト粒子の分散と降伏強度との関係についての研究において NYAM & NUTTING の上記誤りを指摘し、セメンタイト粒子間の平均自由距離の対数と降伏強度との関係は 400~1100°F 各 1 h の焼もどしでは直線型になるが、1200°F-12 h では上記直線よりいちじるしく偏ることを認め、後者の資料のみに対して、セメンタイト粒子の平均距離の代りに地鉄結晶粒子の大きさを用いて、両者の関係が直線になると説明している。そしてこの地鉄結晶粒子の大きさを 1200°F-12 h の資料のみに適用する理由として、セメンタイト粒子が地鉄結晶粒子の境界に存在することを挙げている。しかしセメンタイト粒子の大きさは有効焼もどし効果によつて違ふが NYAM & NUTTING および TURKALO & LOW<sup>11)</sup>らが提出している電子顕微鏡写真においても球状セメンタイトおよび

\* 昭和 34 年 11 月本会講演大会にて発表

\*\* 大阪大学工学部 工博

Table 1. Analysis of the steels tested.

Designations	Chemical analysis (%)				
	C	Mn	Si	P	S
0.7%C	0.68	0.44	0.13	0.030	0.035
1.1%C	1.10	0.42	0.24	0.030	0.040

セメンタイト膜の大部分は比較的低温の焼もどしでも、すでに笹の葉状の地鉄結晶粒子の境界にあること、および後者の写真においては  $1200^{\circ}\text{F}$ -12h 焼もどしでも、なおセメンタイト粒子が地鉄結晶粒子内に存在する(副結晶粒子境界上にある一?)ことが明瞭に認められる。ゆえに TURKALO & LOW<sup>11)</sup>の上記理由による選択的な資料処理方法は適当とは考えられぬ。著者は TURKALO<sup>11)</sup>らの実験結果において  $1200^{\circ}\text{F}$ -12h 焼もどしした資料が、より低温の焼もどし試片の資料が示す直線関係に適合しなかつたことは、TURKALO<sup>11)</sup>らの説明以外のより本質的な原因によると考え、本研究を進めた。

## II. 実験に用いた試料および実験方法

実験には Table 1 に示すような 2 種類の炭素鋼を用いた。0.7%C 鋼試片は直径  $3\cdot 0$

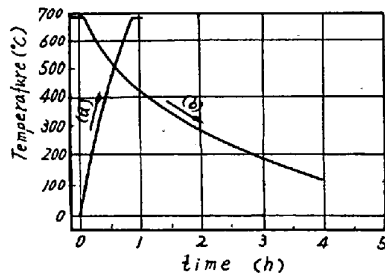


Fig. 1. Heating curve (a) and cooling curve (b) of specimens.

mmの線を、1.1%C鋼試験片は Firth Sheffield 社製、Firth's "U" の直径 10mm の棒鋼をそれぞれ素材として製作した。前者は 200mmに切断した針金を  $840^{\circ}\text{C}$  2h 真空中加熱して  $90^{\circ}\text{C}$  の油中に急冷し、後  $100^{\circ}\text{C}$  1h 保持後空冷した。

所要の焼もどし試験は、上記予備焼入試験片について行なつた。焼もどしは  $690^{\circ}\text{C}$  で(0.1~400)hの範囲に変化し、真空中で Fig. 1 に示すような速度で行なつた。

また別の系列として  $690^{\circ}\text{C}$  にて(7s~3h)の範囲にわたり焼もどし処理を鉛浴加熱と氷水冷却あるいは真空中冷却した。その結果、0.7%C鋼試片が  $690^{\circ}\text{C}$  の鉛浴で  $690^{\circ}\text{C}$  に加熱されるに要した時間は約7秒で、また  $690^{\circ}\text{C}$  から  $500^{\circ}\text{C}$  まで空冷するに要した時間は約17秒で、常温まで冷却するには約9分50秒を必要とすることが判つた。

所要の焼もどし処理を完了した 0.7%C鋼はそのまま引張試験片としたが、1.1%C鋼は焼もどし後厚さ2mm。平行部分の巾5mm、標点距離30mmの引張試験片とした。顕微鏡試験および硬度測定を試料には引張試験後の把持部分を用い、検鏡はいずれの試験片も縦断面にて行なつた。

## III. 実験結果

$690^{\circ}\text{C}$  で(0.1~400)h範囲にわたつて焼もどした各試験片の抗張力および硬度試験結果を 0.7 および 1.1%

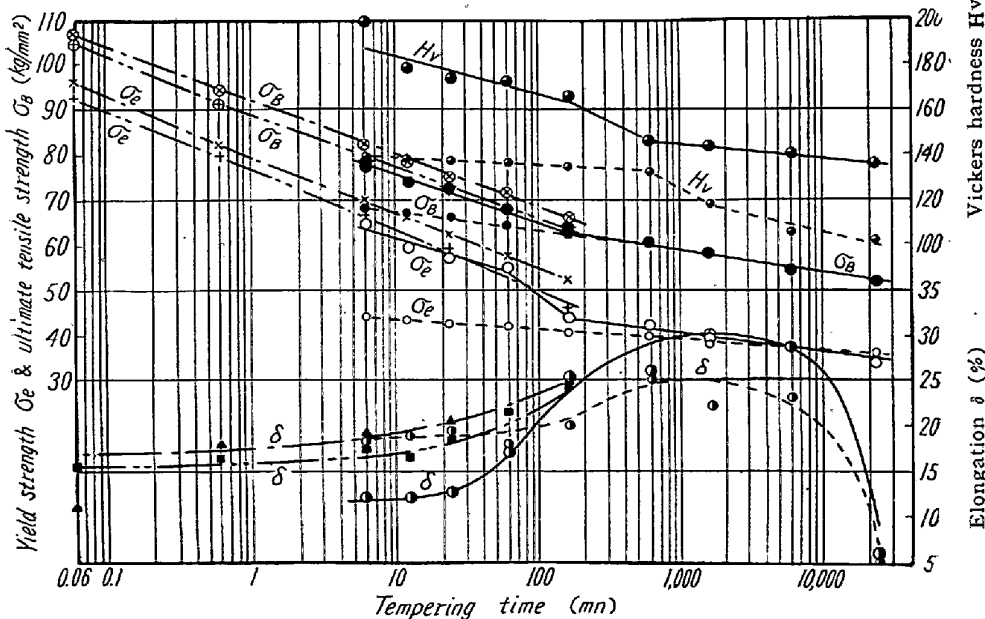


Fig. 2. Effect of isothermal tempering at  $690^{\circ}\text{C}$  upon tensile properties and hardness of 0.7%-plain carbon martensitic steel. Dotted line shows the result of pearlitic steel.

C試料についてそれぞれ示すと Fig. 2 および 3 のようになる。ただし破線は比較のために示した層状パーライト組織の試料を同一条件で焼なました場合の結果である。また Fig. 3 には鉛浴で加熱したのち、氷水中あるいは空气中で冷却する焼もどしを施した試験片の機械的性質をも 1 点および 2 点鎖線にて図示している。この焼もどし系列における氷水冷却した試験片の強度は、上記の真空中で加熱および冷却した試験片のそれに比べると (0.1~3) h の範囲で約 (5~3)  $\text{kg}/\text{mm}^2$  大きい。鉛浴加熱後空冷した試験片の強度は真空中で加熱および冷却し

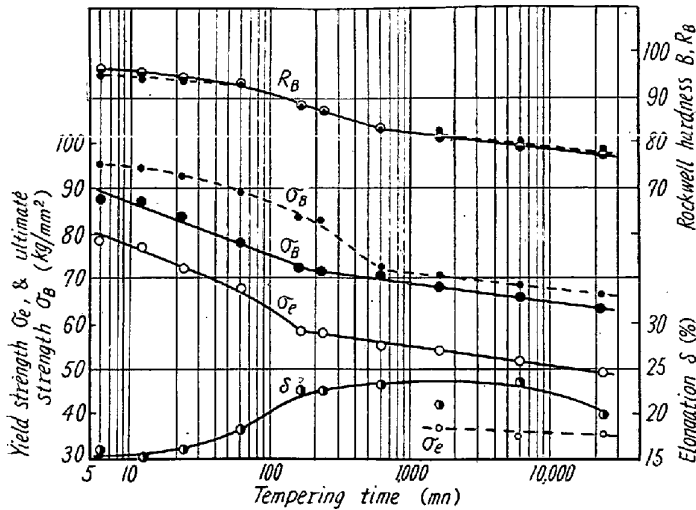


Fig. 3. Effects of isothermal tempering at 690°C upon tensile properties and hardness of 1.1%-plain carbon martensitic steel. Dotted line shows result on pearlitic steel.

た焼もどし試験片のそれに比べると約 (1.7~1.5) kg/mm<sup>2</sup> 大きいのみでその差は非常に小さい。ゆえにこれら系列の 690°C における焼もどし効果におよぼす冷却の影響の違いは非常に小さく、実際的には両者の焼もどし効果はほとんど等しいと考えてよい。

Fig. 2 および 3 に示すように、強度性は焼もどし時間の対数的増加に伴って 2 段階\* に低下するが、伸び率の変化は単調でなく、きわめて短い時間の焼なましによつて急激に増加し、その後ほとんど変化しない。しかし (1~10) h の範囲では、伸び率は時間の対数的増加にしたがつてシグモイダル形に増加し、(10~100) h の間では平坦な最大点に達する。さらにそれ以上の長時間焼もどしによつては伸び率は減少の傾向を示す。またその減少は 1.1%C 鋼においてはきわめて少ないが、0.7%C 鋼においては相当いちじるしい。

予備焼入れのままの試験片およ

\* 実験範囲以上の短時間の変化は考慮外にした。

び焼入れ—焼もどした試験片の代表的顕微鏡組織を示すと Photo. 1 および 2 のようである。写真から明かなように、両鋼種とも短時間の焼もどしによつて焼入れ組織はいちじるしく変化するが、約 1 h 以下の焼もどしでは Photo. 1: No. 2~5, 9, 10 および Photo. 2: No. 2, 3, 7 に示すようにセメンタイト粒子の大きさが漸次増大する組織的变化のみしか認められない。そしてこの間、これらの写真のように、いわゆるフェライト結晶粒界 (大角) は認め難いが、肥厚したセメンタイト膜および球状セメンタイトによる笹の葉状輪郭が認められ、これら笹の葉状は焼入組織に見られるマルテンサイトの笹の葉形状とほとんど同一である。また焼なましが約 3 h になつてフェライトにいわゆる粒子境界 (大角) が現われ始めると笹の葉形状に輪郭されたフェライトは消失し始める。さらに時間が増し約 10 h になると、いわゆるフェライト結晶粒子境界が全面にわたつて明瞭に現われ

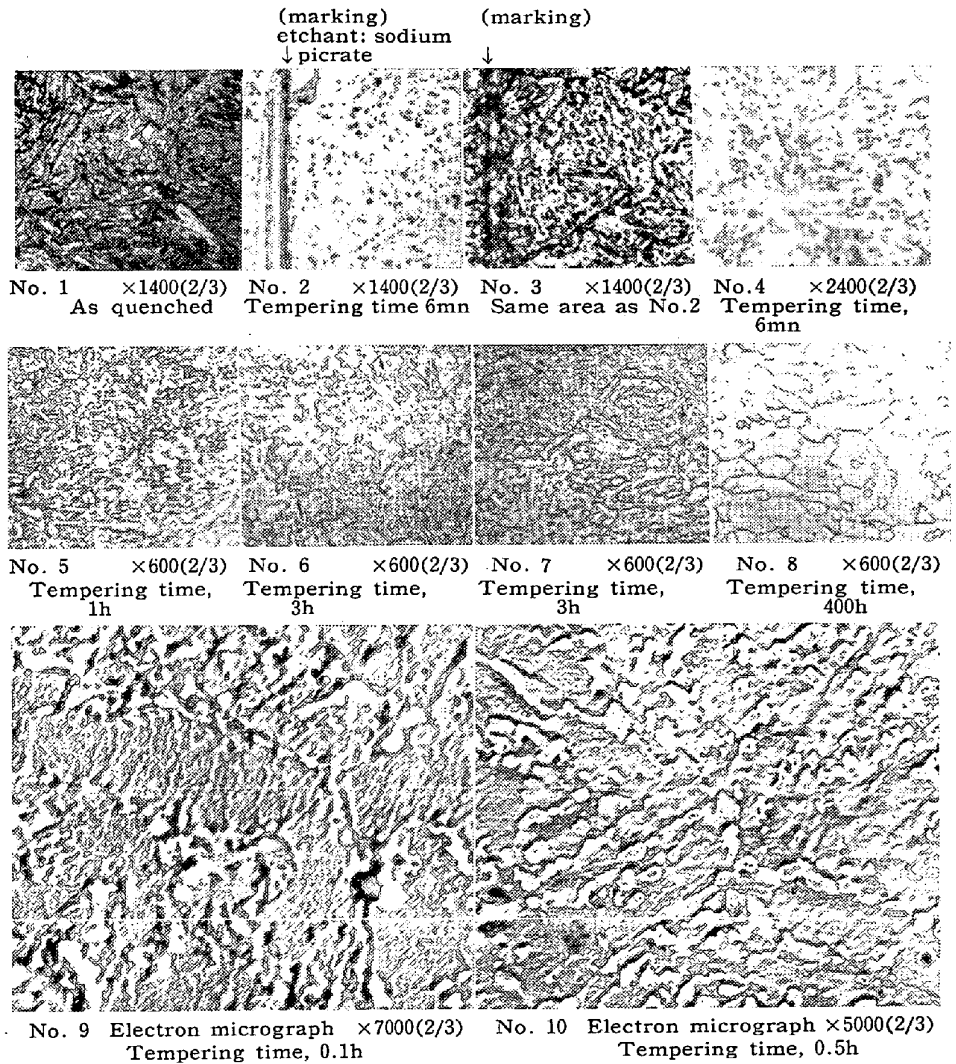


Photo. 1. Microphotographs of the martensite of 0.7%C-steel tempered at 690°C for various periods of time. Etchant: 1pct HNO<sub>3</sub> aq.-solution.

るとともにフェライト結晶粒子の成長はすでに始まっている。しかし粒子形状はなお細長いものが多い。すなわち両試料ともにセメンタイトは全焼なまし範囲内で連続的に球状化するが、地質のフェライトの顕微鏡組織は焼なまし時間が約 3 h 付近で結晶粒子境界を始めて現わすような不連続的な組織変化を現わす。

#### IV. 結果の整理

さて、焼もどし時間が 10h 以上の試片につき面積 6400mm<sup>2</sup> なる 1000 倍の顕微鏡写真の中に存在するフェライトの全粒子数から算出した粒子の平均直径の対数を焼もどし時間の関数として図示すると Fig. 4 のように直線形となる。すなわち、焼もどし時におけるいわゆるフェライト粒子の成長は球状セメンタイトの共存においても、その大きさの対数が焼もどし時間の対数に正比例するように起る。また 0.7% C および 1.1% C 試料のこれら直線の勾配、すなわち 0.210 および 0.162 が示すようにそれら試料のフェライト粒子の成長速度は炭素

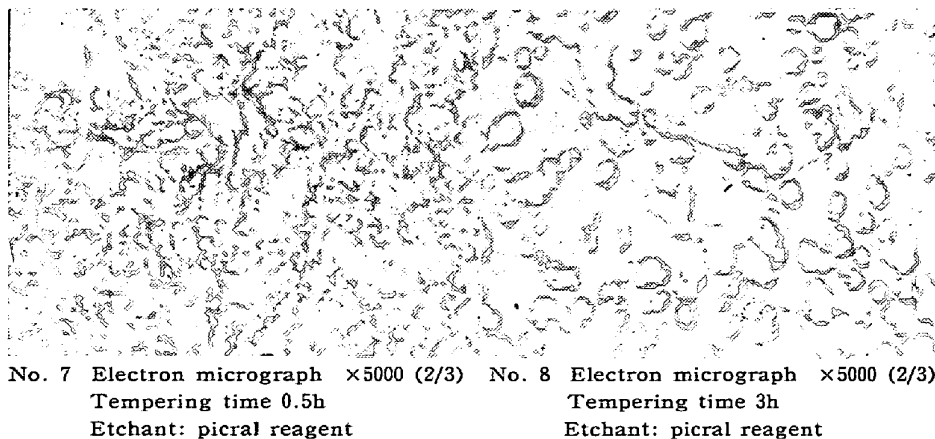
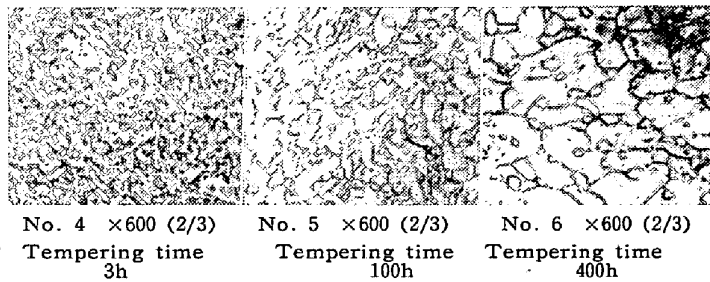
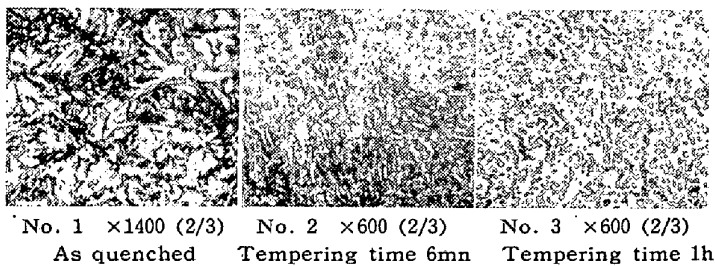


Photo. 2. Microphotographs of 1.1% C-steel tempered at 690°C for various intervals of time.  
Etchant: 1pct HNO<sub>3</sub> aq.-solution.

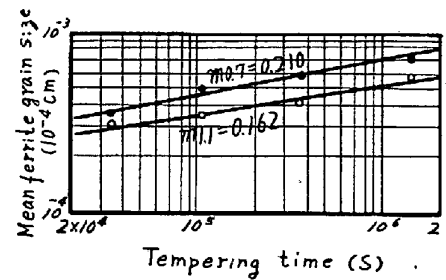


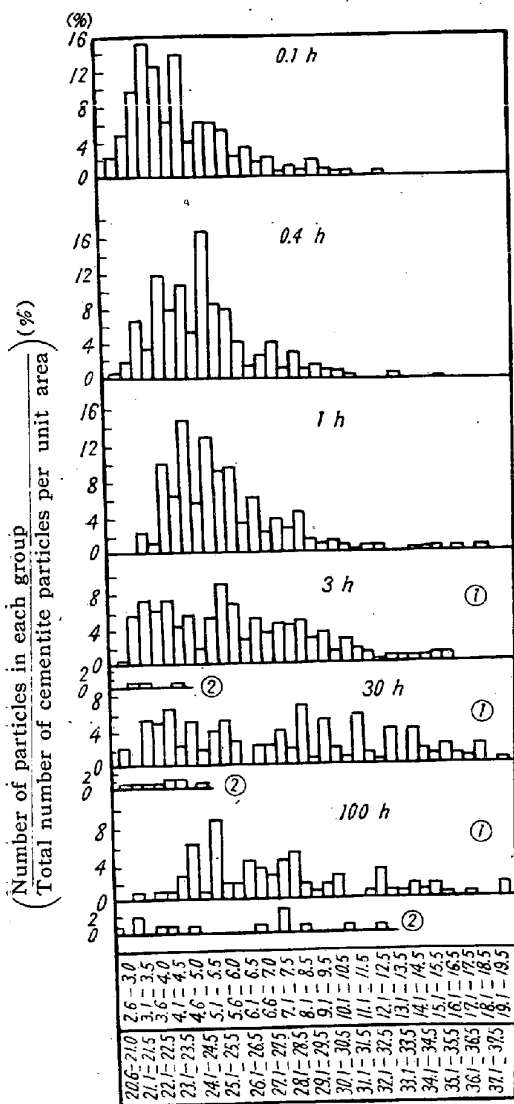
Fig. 4. Measured mean ferrite grain growth vs. isothermal tempering at 690°C of 0.7% C and 1.1% C-steels.

量の少ないものがより大きく、また 1.1% C 鋼のフェライト粒子の大きさは 0.7% C 鋼のそれよりも常に小さい。なおこれら直線に相應する式を求めると 0.7% C 鋼に対しては  $d = 4.13 \times 10^{-5} t^{0.210}$  また 1.1% C 鋼においては  $d = 5.49 \times 10^{-5} t^{0.162}$  が得られる。ただしここで  $d$  は [Å] で表わしたフェライト粒径で、 $t$  は [s] で表わした焼もどし時間を表わしている。

つぎに各試験片の任意の断面の 3000 倍の面積 10<sup>4</sup>

mm<sup>2</sup> なる顕微鏡写真中に存在するセメンタイト粒子の大きさを 1/10mm の精度で測定して算出した試料の任意の箇所の面積 1μ<sup>2</sup> 中に存在する粒子の大きさの分布状態を二、三の焼もどし時間について示すと Fig. 5 のようになる。

図から明かなように、焼もどし時間が短い間はセメンタイト粒子の大きさの分布状態は比較的狭い範囲に明瞭な最大が現われるが、時間が増すとその分布曲線は扁平にかつ広範囲に分散する。すなわちセメンタイト粒子の大きさは焼もどし時間が短いものでは比較的よく揃っているが、焼もどし時間が増加すると粒子の大きさにいちじるしいむらを生じる。1.1% C 鋼においても同様な結果が認められた。今、測定した任意の断面の単位面積内に存在するセメンタイト粒子数  $N_s$ 、およびセメンタイト粒子断面の平均直径  $2\bar{r}$  を用いて直線—平面分析法<sup>12)</sup>にてセメンタイト粒子の平均直径、 $2\bar{R} (= \pi \bar{r})$ 、セメンタイトの分率  $f_c (= 4/3 \cdot 1/\bar{r} \cdot N_s \cdot \bar{R}^3)$  および任意の直線



Diameter-group of cementite particles intersected by a random cross-section,  $\times 10^4$ , ( $\mu\text{m}$ )

Fig. 5. Histogram representing distributions of cementite particle diameters in a area  $1\mu^2$  of 0.7% C-steel.

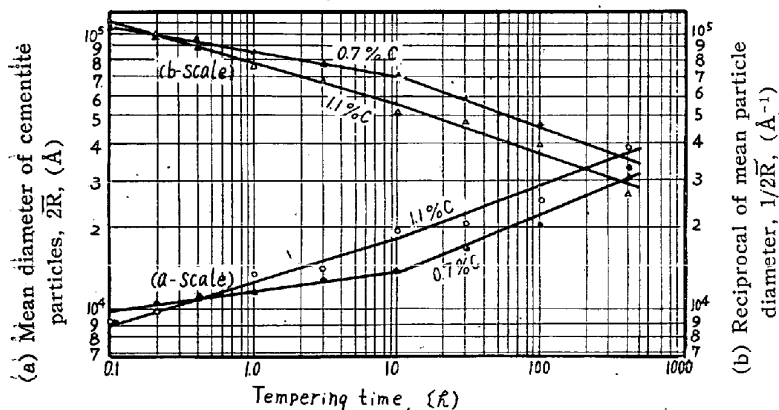


Fig. 6. Mean diameter of cementite particles and reciprocal of the mean diameter of cementite particles as a function of logarithmic tempering.

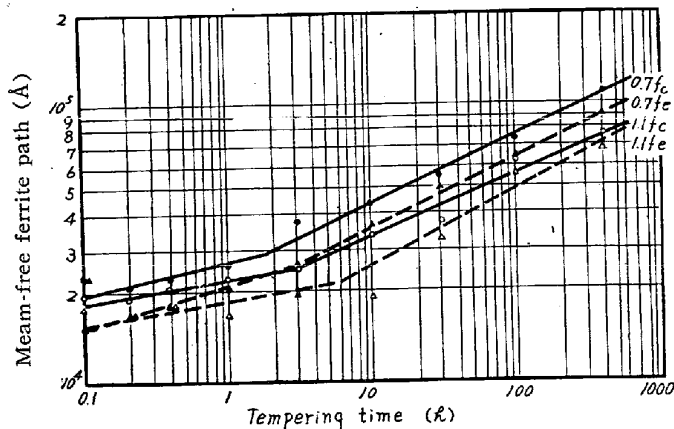


Fig. 7. Logarithmic mean-free ferrite path as a function of logarithmic tempering time.

と交る単位長さ当りの界面数  $N_L (= N_v \cdot \pi \bar{R}^2 = N_s / 2\bar{R} \cdot \pi \bar{R}^3 = \pi / 2 \cdot \bar{R} \cdot N_s$ , ただし  $N_v$  は単位体積中に含まれるセメント粒子数を示す) などを求めて表示すると Table 2 のようになる. この  $f_e$  の値は両試料とも  $f_e^*$  の値の約 2 倍になった. これは恐らく真の値よりも少し大きく測定された  $\bar{r}$  が  $f_e$  に影響を与えたためと考えられる.

つぎにセメント粒子の平均直径, あるいは平均直径の逆数を焼もどし時間の関数として  $\log \times \log$  座標で表わすと Fig. 6 のように焼なまし時間 (3~10) h の範囲で折れた 2 本の直線枝になる. すなわち (3~10) h の範囲を境としてそれ以下の範囲内では成長が急速で, それ以上では遅くなる. つぎに  $P = (1-f)N_L^{1/2}$  で算出した任意の直線上にあるセメント粒子間の距離  $P$  は Fig. 7 に示すように  $\log \times \log$  直角座標では焼もどし時間について (3~10) h の範囲に折点をもつ 2 本の直線枝になる. なお  $f$  は  $N_L$  に比べて小さいため  $f_e$  と  $f_c$  との上記違いは  $\log P$  の値にほとんど影響しないことは上式から容易に理解できる.

つぎに Fig. 3 および 4 の焼もどし時間が 10 h 以上の試験片の降伏強さおよび抗張力をフェライト粒子の平均直径の逆数の関係として示すと Fig. 8 となる. すなわち図に明かなように両因子は炭素量の違いによつてそれぞれ独立した直線となる. この結果はフェライト単一組織の降伏強さはフェライト粒子の平均直径の平方根の逆数の直線関係になるという Petch<sup>13)</sup>の結果と同じくなる. また焼もどし試料の降伏強さ, および抗張力をそれぞれセメント粒子の平均直径の逆数の関数

\* 計算により求めたセメントの分率

Table. 2. Volume fractions  $f_c$ ,  $f_e$  diameter of cementite particles,  $2\bar{R}$  and number of cementite particles intersected by the line  $N_L$ .

Steel (Designation)	Tempering time (h)	Fraction of cementite based on chemical composition, $f_c$	Average number of cementite particles per unit area, $N_s$ (Per mm <sup>2</sup> )	Mean diameter of cementite particles intersected by a random cross section. $2\bar{r} \times 10^4$ (mm)	Diameter of cementite particles $2\bar{R} \times 10^4$		Number of cementite particles intersected by the line, $N_L$ (Per mm)	Fraction of cementite based on linear and planar analysis, $f_e$
					Uniform size particle (mm)	Non-uniform size particle (mm)		
0.7% C	0.1	0.104	531,578	5.80	8.70	9.11	380.61	0.110
	0.2		480,249	6.81	10.20	10.68	402.93	0.287
	0.4		427,000	7.23	10.80	11.31	382.73	0.292
	1.0		378,975	7.32	10.94	11.47	341.46	0.263
	3.0		240,837	8.11	12.14	12.72	240.60	0.205
	10.0		191,600	8.88	13.20	13.82	208.08	0.205
	30.0		125,119	10.68	15.90	16.65	163.66	0.183
	100.0		74,300	13.23	19.80	20.73	120.96	0.179
400.0	33,800	20.28	30.40	31.73	81.74	0.188		
1.1% C	0.1	0.169	579,312	5.71	8.54	8.97	407.84	0.243
	0.2		543,150	6.22	9.34	9.77	416.60	0.270
	0.4		484,568	6.41	9.64	10.07	383.29	0.259
	1.0		448,000	8.57	12.84	13.46	354.37	0.388
	3.0		285,000	9.30	13.94	14.61	326.90	0.320
	10.0		197,000	12.36	18.54	19.42	300.43	0.393
	30.0		136,600	13.06	19.70	20.51	220.06	0.297
	100.0		82,500	15.59	23.40	24.49	132.91	0.257
400.0	35,000	24.60	39.00	38.64	106.23	0.281		

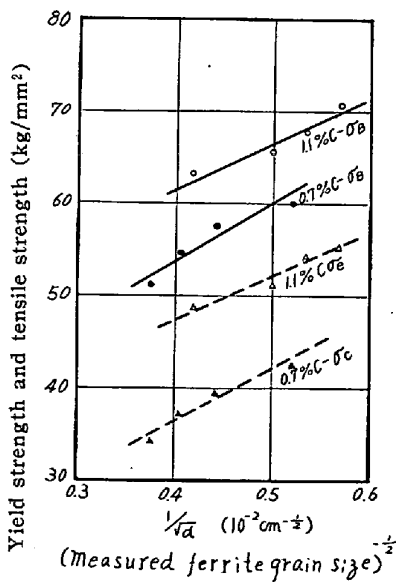


Fig. 8. Yield strength and ultimate tensile strength as a function of reciprocal of (mean ferrite grain size)<sup>-1/2</sup>

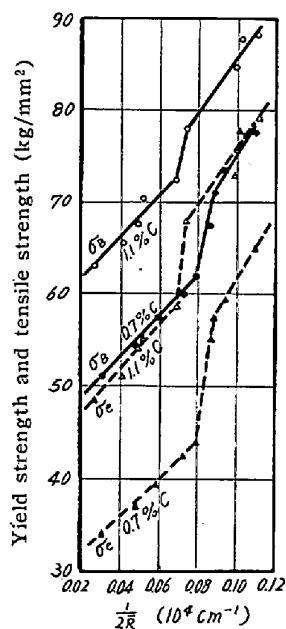


Fig. 9. Yield strength and ultimate tensile strength as a function of reciprocal of the mean diameter of cementite particles.

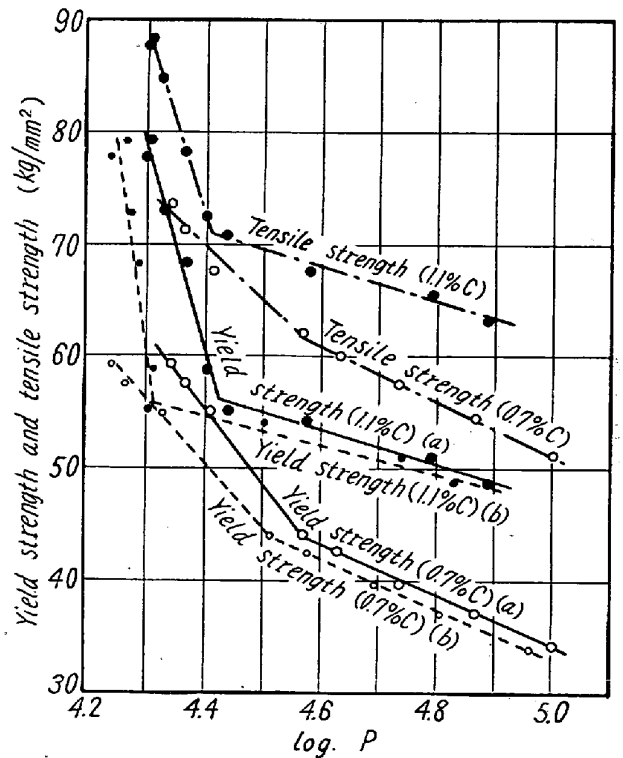


Fig. 10. Yield strength and ultimate tensile strength as a function of logarithmic mean-free ferrite path.

として図示すると Fig. 9 のようになる。図に示すように、降伏強さおよび抗張力は強度軸の方向に明瞭な不連続変化が現われる。この結果は降伏強さおよび抗張力の不連続変化がセメンタイト粒子の大きさ以外の因子によることを明瞭に示している。この強さの不連続を起す因子は後で考察するようにマルテンサイト変態に伴なつて生じたもので焼もどし効果の少ないフェライト中に残存する因子によると考えることができる。つぎに兩種試料の強度性と  $\log P$  との関係をみると Fig. 10 の曲線のように、いずれの場合にも  $\log P$  のある値で折れた 2 本の直線枝となる。この折点の  $P$  は 0.7% C および 1.1% C 鋼に対してそれぞれ約  $3.73 \times 10^4 [\text{Å}] \cdot \{(3 \sim 10) \text{ h 焼なましに対応}\}$ 、および約  $2.63 \times 10^4 [\text{Å}] \cdot \{(3 \sim 10) \text{ h 焼なましに対応}\}$  である。この結果は最近 TURKALO & Low が発表した結果とよく一致している。なお本実験では上述の直線より離れる点はいずれも  $\log P$  軸に対する角 ( $t$ ) がより大きい別の一直線を形成する。この Fig. 10 に示した結果は焼もどし効果がある臨界量以下の比較的小さい範囲内では単位  $\log P$  当りの降伏強さあるいは抗張力の減少が比較的急激に起るが、その焼もどし効果はその臨界量以上になると単位  $\log P$  当りの強さの減少はいちじるしく緩慢になることを意味している。このような結果はつぎに説明するようにマルテンサイト組織の焼もどしによつて生じた微細結晶のフェライトに起因するのと考えられる。

#### IV. 考 察

転位論によるオーステナイト-マルテンサイト変態の解明<sup>14)~21)</sup>はまだ十分ではないが、マルテンサイト変態は単純な迂り変形および双晶変形と違う、他のある塑性変形方法によつて起ると考えることの妥当性は、現在ではすでに多くの人々に認められている。マルテンサイト変態がある塑性変形法によつて起るとすれば、マルテンサイト変態生成物は焼なまししたフェライトよりも多種の、またより多様な格子欠陥を含むことになる。またマルテンサイト結晶は炭素原子を過飽和に溶解する軸比が 1.0 に近い体心立方晶で、かつ組織的には板一断面が笹の葉一状の微細結晶の集合体である。なおマルテンサイト結晶粒子境界はオーステナイト-マルテンサイト境界面模型による解析<sup>15)</sup>および Frank 模型を用いた発展的断熱変態論<sup>21)</sup>から考えても、境界エネルギーの小さい双晶境界

に似た比較的安定なものであると考えることができる。このようないろいろの構造因子と強度との関係を考えるとマルテンサイト組織をもつ鋼の強度が大きいこともまた、この鋼を焼もどした場合にその強度が低下する機構も、現象的にはつぎのように説明することができる。

マルテンサイト組織の鋼の強さが大きいことは、マルテンサイト組織が：(1) 格子欠陥の密度が大きいこと、(2) 微細結晶の集合体であること、および (3) 母体の鉄がきわめて多量の炭素原子を侵入型で、かつ過飽和の状態に溶解していることなどに帰因すると考えてよい。またこのようなマルテンサイト組織の鋼を 690°C で恒温焼もどしすると、短時間 (約 0.2 h 以下) にて過飽和の炭素原子はセメンタイトの型にて析出すると同時に、母体結晶格子は体心正方晶系から体心立方晶系に変化し上記 (3) の因子による強化の総てが消失する。また (1) の中の小角境界以外の他の因子による強化も短時間の焼なましによつてその全部を消失し、各種の格子欠陥はそれぞれ平衡濃度に達する。ただマルテンサイト微細結晶の粒界は比較的安定なために点および線型格子欠陥のように簡単に消失せず、3 h 程度の焼もどし時間まで存在する。また焼もどし時間の増加による強化因子 (2) の劣化、すなわちフェライト微細結晶の成長と平行にセメンタイト粒子の凝集も進む。焼もどし時間がさらに増加して約 (1~3) h になると、マルテンサイト変態にて生じた結晶粒子境界面が普通 (大角) の結晶粒子境界面に遷移し、それ以後はフェライト結晶はいわゆるフェライト粒子として成長する。したがつて微細結晶境界面が消失した大角境界面のいわゆるフェライト粒子境界を生ずる。この遷移期の焼もどしでは、フェライト地質組織の強度は不連続的に低下するものと考えられる。つぎに焼もどし時間がさらに増加するとセメンタイト粒子は益々凝集するとともに地質のいわゆるフェライト粒子もしいに成長し、この組織的变化に相応した漸進的な強度の低下を起す。もちろん、上記変化は 0.7% C 鋼と 1.1% C 鋼とによつて数量的には多少違ふが、本質的にはまったく同様に考えることができる。以上のように考えると本研究にて得られた諸結果は十分理解することができる。

#### V. 結 言

本研究をまとめるとつぎのような結論を導くことができる。

(1) 0.7% C および 1.1% C の工業用炭素鋼のマルテンサイト組織を 690°C 恒温にて焼もどした場合に

\* セメンタイト粒子間の距離、すなわち平均自由フェライト行路がセメンタイト平均直径の 5 倍程度の範囲。

得た顕微鏡組織ではセメント粒子寸法の分布傾向は両試料ともによく似ており、比較的短時間(約 1 h 以下)の焼もどしでは均一である。しかし焼もどしの時間が増加すると、とくに 3 h 以上になるとその粒子寸法の分布状態は悪くなる。

(2) 両試料とも、焼もどし時間が約 1 h 以下ではいわゆるフェライト粒子の境界線は認められない(3 h で一部分に認められる)。またいわゆる粒子境界線が十分に現われた焼もどし時間が 10 h 以上の試験片においては、両試料とも焼もどし時間 (s) の関数としたフェライト粒子の平均直径 (cm) は  $\log \times \log$  直角座標では直線となり、それぞれ

$$d = 4.131 \times 10^{-5} \times t^{0.210} \quad (0.7\% \text{ C 鋼})$$

$$d = 5.49 \times 10^{-5} \times t^{0.162} \quad (1.1\% \text{ C 鋼})$$

なる実験式を得た。

(3) 焼もどし時間 (h) の関数としたセメント粒子の平均直径あるいはその逆数を  $\log \times \log$  直角座標で表わすと、両試料とも 10 h 付近で折れた 2 本の直線枝となる。

(4) 焼もどし時間 (h) の関数とした平均自由フェライト行路は  $\log \times \log$  直角座標で約 (2~6) h で折れた 3 本の直線枝となる。

(5) 焼もどし時間が 10 h 以上の試験片では、両種試料ともフェライト粒子の平均直径の平方根の逆数の関数とした降伏強さおよび抗張力はそれぞれ別個の直線となる。

(6) セメント粒子の平均直径の逆数の関数とした降伏強さおよび抗張力は 1.1% C 試料では  $1/2\bar{R} = (0.07 \sim 0.075) \times 10^4 \cdot \text{cm}^{-1}$ 、また 0.7% C 試料では  $1/2\bar{R} = (0.08 \sim 0.09) \times 10^4 \cdot \text{cm}^{-1}$  の範囲で、強さに不連続が表われる。しかしこの不連続は両試料とも焼もどし時間が (1~3) h に相応している。なおこの不連続についての考察を行なった。

(7) 平均自由フェライト行路の対数、 $\log P$  の関数とした降伏強さおよび抗張力は両試料とも、ある  $\log P$  にて折れた 2 本の直線枝になる。またこの 2 本の直線枝に折れる原因について考察した。(昭和 35 年 5 月寄稿)

## 文 献

- 1) S. SHIMURA u. H. ESSER: Stahl u. Eisen, 50 (1930), 1674
- 2) W. A. WOOD: Phil. Mag., 10 (1930), 1073
- 3) C. H. DESH & A. T. ROBERTS: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 107 (1933), 249
- 4) 小林誠一: 水曜会誌, 5 (1926), 807
- 5) M. GENSAMER, E. B. PEARSALL & G. V. SMITH: Trans. Amer. Soc. Metals. 28 (1940), 380
- 6) M. GENSAMER, E. B. PEARSALL, W. S. PELLINI & J. R. LOW: Trans. Amer. Soc. Metals, 30 (1942), 983
- 7) M. GENSAMER: Trans. Amer. Soc. Metals. 36 (1946), 44
- 8) C. S. ROBERTS, R. C. CARRUTHERS & B. L. AVERBACH, Trans. Amer. Soc. Metals, 44 (1952), 1150
- 9) E. D. NYAM & J. NUTTING: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 184 (1956), 148
- 10) C. S. SMITH: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 175 (1948), 15
- 11) A. M. TURKALO & J. R. LOW, Tr: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 212 (1958), 750
- 12) R. L. FULLMAN: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 197 (1953), 447. J. Metals, 5 (1953), 447
- 13) N. J. PETCH: J. Iron & Steel Inst. (U.K.), 174 (1953), 25
- 14) J. W. CHRISTIAN: Proc. Roy. Soc., [A] 206 (1951), 51
- 15) F. C. FRANK: Acta. Met., 1 (1953), 15
- 16) H. SUZUKI: Sci. Repts. Research Inst., Tohoku Univ., [A] 6 (1954), 30
- 17) B. A. BILBY: Phil. Mag., [VII] 44 (1953), 782
- 18) Z. S. BASINSKI & J. W. CHRISTIAN: Phil. Mag., [VII] 44 (1953), 791
- 19) A. SEEGER: Z. Metallkunde, 44 (1953), 247
- 20) M. A. JASWON: Tras. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 200 (1954), 678 (discussion)
- 21) H. KNAPP & U. DEHLINGER: Acta Met., 4 (1956) 289