

## 論文

繰返し温度サイクルによるオーステナイト  
粒径の変化

© 1986 ISIJ

野崎 春男\*・西川 幸男\*・植杉 雄二\*・田村 今男\*<sup>2</sup>

## Change in the Austenite Grain Size Due to Temperature Cycling

Haruo NOZAKI, Yukio NISHIKAWA, Yuji UESUGI and Imao TAMURA

## Synopsis :

The effects of number of temperature cycles, heating-cooling rate and applied stress on the austenite grain size were studied in SCM415 steel.

(1) The austenite grain size of specimens subjected to temperature cycling approaches almost a constant value regardless of the initial grain size. However, the effect of applied stress (4 kgf/mm<sup>2</sup>) on the final austenite grain size is hardly observed.

(2) The initial grain size of 13 μm of the specimens tends to become the fine austenite grain size of 5 μm after three temperature cycles through austenite ⇌ ferrite + bainite transformation. This value of grain size is the same as that attained through austenite ⇌ martensite transformation.

(3) The austenite grain size becomes smaller in the case of the larger heating or cooling rate. The effect of cooling rate on grain refinement is larger than that of heating rate.

(4) In the case of the large initial grain size, the austenite grain size tends to become smaller after one cycle. In the case of the small initial grain size, the austenite grain size tends to become larger during austenization. Therefore the austenite grain size approaches almost a constant value through the repeated temperature cycling.

## 1. 緒 言

結晶粒を微細にすれば強度、靱性ともに上昇する。そのため結晶粒度番号 10 以上の超微細鋼を作る処理法が研究されている。鉄鋼においては変態現象があり、多くの場合実際の性質はフェライト・パーライトあるいは焼もどしマルテンサイトの状態で測定されるにもかかわらず、オーステナイトの結晶粒度を問題にすることが多い<sup>1)</sup>。

GRANGE はオーステナイト結晶粒を微細化する 2 種類の方法を提案した<sup>2)</sup>。一つは鋼をオーステナイト温度域の最下限温度付近に加熱し、この温度で強加工し再結晶を利用して微細化する方法である。もう一つは、鋼を A<sub>3</sub> 点直上の温度と室温の間で繰返し急速加熱冷却し、オーステナイト ⇌ マルテンサイト変態を繰り返すことにより結晶粒を微細化する方法である。この方法により、3~5 μm の超微細オーステナイト粒を得ることが示されている<sup>2)~4)</sup>。

変態超塑性は GRANGE の第 2 の方法のように急熱急冷とは限らないが、応力下で相変態を繰り返すことにより材料に大きな変形を与えるもので<sup>5)6)</sup>、その副次的効果

として結晶粒の微細化が期待される。変態超塑性の従来の研究では、変態を繰り返したとき組織がどのように変化するか報告したものは少なく<sup>7)8)</sup>、特にオーステナイト組織の変化について注目した報告はほとんどみられない。

そこで本研究では、変態超塑性現象の結晶粒微細化効果について検討するため、鋼に繰返し温度サイクルを与えたときのオーステナイト粒径の変化を研究した。

## 2. 実験方法

本研究に用いた試料は、市販の SCM 415 でその化学組成を Table 1 に示す。丸棒供試材より機械加工によって Fig. 1 に示す形状の中空丸棒試験片を作製した。

Fig. 2 は試験片の温度-負荷サイクルを示す。試験片を 1250°C、1 h 真空中にて溶体化後油冷却し出発材とした。オーステナイト初期粒径  $D_0$  として 1100°C、15 min と 850°C、5 min のオーステナイト化により、それぞれ  $D_0=125 \mu\text{m}$  と  $13 \mu\text{m}$  を得た。さらにオーステナイト初期粒径の細かい試料をつくるために、後述する本研究の結果を利用して変態温度域を加熱冷却することにより  $D_0=5 \mu\text{m}$  を得た。 $D_0$  調整後の温度サイクルは上

昭和 60 年 9 月 26 日受付 (Received Sep. 26, 1985)

\* 松下電器産業(株)生産技術研究所 (Production Engineering Laboratory, Matsushita Electric Industrial Co., Ltd., Matsuba-cho Kadoma 571)

\*2 京都大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Kyoto University)

Table 1. Chemical composition of SCM415 (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Fe
0.18	0.29	0.68	0.017	0.014	0.07	1.03	0.16	0.11	bal.

上限温度  $T_{max}$  を  $830^{\circ}\text{C}$ 、下限温度  $T_{min}$  を  $300^{\circ}\text{C}$  とした。 $830^{\circ}\text{C}$  は本実験における加熱変態終了温度  $A_f$  点直上の温度であり、粒成長を防ぐためこの温度を選んだ。加熱速度  $\dot{T}_h$  と冷却速度  $\dot{T}_c$  は  $20\sim 640^{\circ}\text{C}/\text{min}$  とした。負荷応力を与える場合は、 $4\text{ kgf}/\text{mm}^2$  を変態開始直前から変態終了直後の間で一定引張荷重により与えた。1回の温度サイクルで生じるひずみは高数%であり<sup>9)</sup>、一定荷重は一定応力とみなすことができる。特に温度サイクルを繰り返す場合には1サイクルごとのひずみの増加に応じて荷重を調整し、負荷応力が一定になるようにした。ひずみの測定には、ゲージ長さ  $10\text{ mm}$  のひずみゲージ型伸び計を用い、温度測定は試験片の外表面中央部にアルメルクロメル熱電対を取り付けて行つた。

組織観察は温度サイクルの上限温度または下限温度で、中空部に冷却水を流し急冷した試験片を用いて行つた。急冷した試験片の中央部を切り出し、引張軸方向に平行な面をエメリー紙による機械研磨とアルミナ粉末によるバフ研磨の後、腐食して観察した。光学顕微鏡組織観察用の腐食液として2% ナイタルを用いた。またオーステナイトは急冷後室温でマルテンサイト組織であるので、ピクリン酸飽和水溶液(ピクリン酸  $5\text{ g}$ +ラウリルベンゼンスルホン酸ナトリウム  $4\text{ g}$ +過酸化水素水

数滴+水  $100\text{ g}$ ) を約  $80^{\circ}\text{C}$  に加熱して用い、旧オーステナイト粒界を現出させた。粒径は、得られた組織写真上に直交する線分を引き、これと交わる粒の数から計算した。

### 3. 実験結果

Fig. 3 はオーステナイト初期粒径  $D_0=5$  または  $125\ \mu\text{m}$  材に温度サイクルを繰返し与えたときのオーステナイト粒径の変化を示す。温度サイクルは加熱冷却速度  $\dot{T}$  を  $150$  と  $500^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、負荷応力  $\sigma$  を  $0$  と  $4\text{ kgf}/\text{mm}^2$  で行つた。オーステナイト粒径は、加熱変態が終了し  $T_{max}(830^{\circ}\text{C})$  に達した直後急冷した組織から測定した。

$\dot{T}=150^{\circ}\text{C}/\text{min}$  の場合、オーステナイト初期粒径が異なつても数サイクルでオーステナイト粒径は  $7.0\ \mu\text{m}$  程度の一定値に収束する。オーステナイト粒径に対する負荷応力 ( $\sigma=4\text{ kgf}/\text{mm}^2$ ) の影響はほとんどみられない。 $D_0=125\ \mu\text{m}$  材に  $\dot{T}=150^{\circ}\text{C}/\text{min}$  で温度サイクルを  $10$  回繰返し、オーステナイト粒径が一定値に収束した組織を Photo. 1 に示す。(a) は  $\sigma=0$ 、(b) は  $\sigma=4\text{ kgf}/\text{mm}^2$  の場合で、両者の組織に差異はみられない。

Fig. 3 で、 $D_0=125\ \mu\text{m}$  材では、1サイクルでオーステナイト粒径は  $15\ \mu\text{m}$  程度まで微細化する。これは、1サイクル目はオーステナイト $\rightarrow$ フェライト+ベイナイト変態であり、加熱変態でベイナイトから塊状オーステナイトが多数生成するためである<sup>9)</sup>。また、2サイクル目以降はオーステナイト粒径は小さいのでオーステナイト $\rightarrow$ フェライト+パーライト変態であると考えられる。 $D_0=5\ \mu\text{m}$  材は、 $\dot{T}=150^{\circ}\text{C}/\text{min}$  の温度サイクルでオーステナイト $\rightarrow$ フェライト+パーライト変態させるとオー

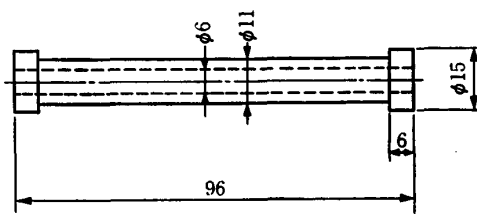
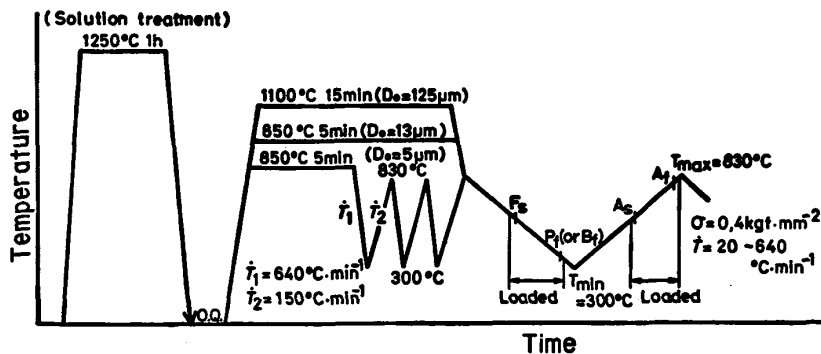


Fig. 1. Dimensions of specimen used (mm).



$D_0$ : Initial grain size of austenite  $\sigma$ : Applied stress  $\dot{T}$ : Heating or cooling rate

Fig. 2. Schematic temperature-loading diagram showing experimental procedure.

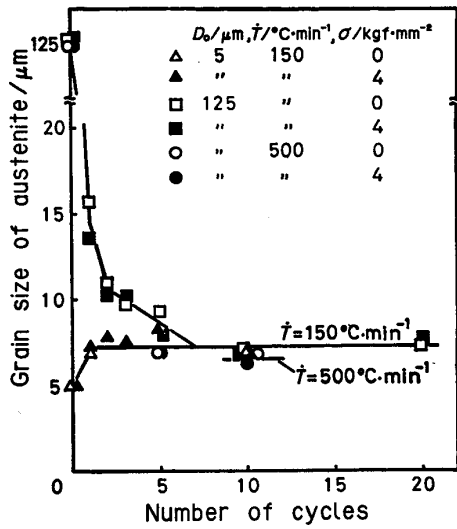
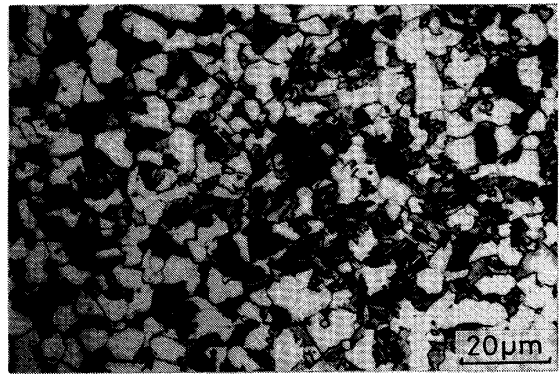
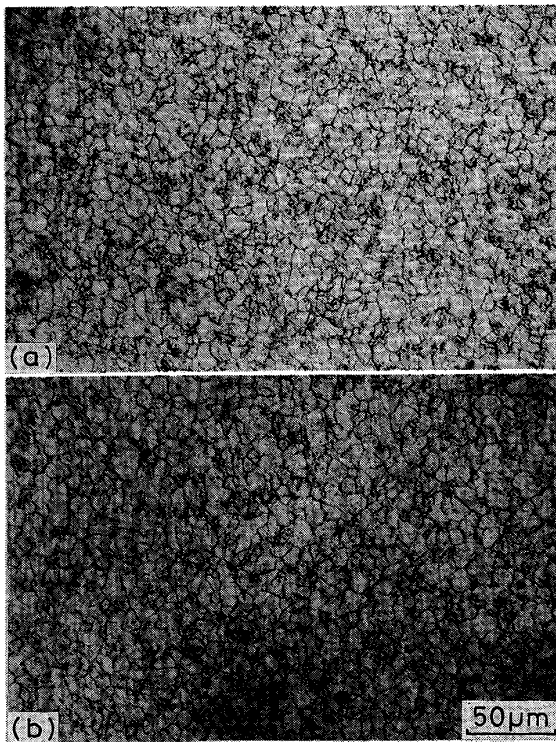


Fig. 3. Variation of austenite grain size with number of temperature cycles between 300°C and 830°C.



$D_0=125\mu\text{m}$   $\dot{T}=500^\circ\text{C}/\text{min}$   $\sigma=0\text{ kgf}/\text{mm}^2$   
Photo. 2. Optical micrograph showing ferrite-bainite structure attained after five temperature cycles and cooling continuously.



$D_0: 125\mu\text{m}$   $\dot{T}=150^\circ\text{C}/\text{min}$   
(a)  $\sigma=0\text{ kgf}/\text{mm}^2$  (b)  $\sigma=4\text{ kgf}/\text{mm}^2$

Photo. 1. Optical micrographs showing fine prior austenite grain structure attained after ten temperature cycles.

ステナイト粒径は大きくなる。

$\dot{T}=500^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合、最終のオーステナイト粒径は  $\dot{T}=150^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合に比べわずかに小さくなる傾向がみられる。また5サイクル目で、ほぼ最終のオーステナイト粒径が得られている。Photo. 2 は  $\dot{T}=500^\circ\text{C}/$

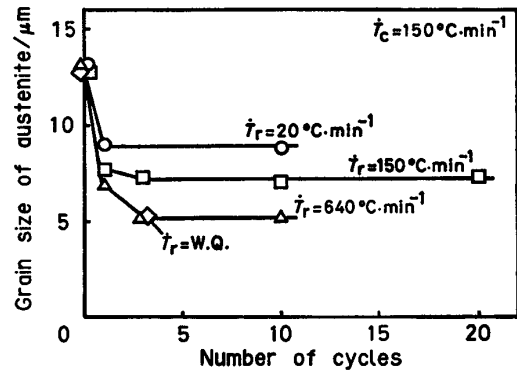
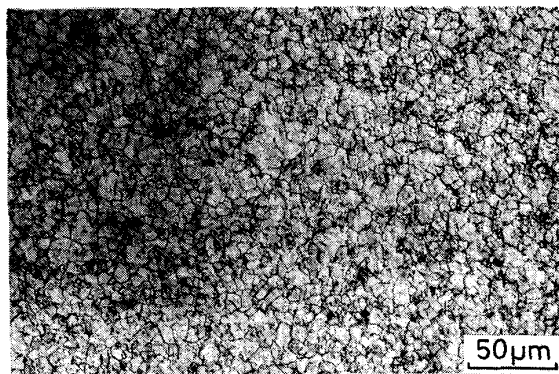


Fig. 4. The effect of cooling rate ( $\dot{T}_r$ ) on the variation of austenite grain size with number of temperature cycles.

min で温度サイクルを5回繰り返した後のオーステナイト組織からさらに同じ  $\dot{T}$  で冷却変態させた組織で、フェライト・ベイナイト組織である。これより  $\dot{T}=500^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合にはオーステナイト細粒化時にオーステナイト $\rightarrow$ フェライト+ベイナイト変態が起こることがわかる。

Fig. 4 は、 $D_0=13\mu\text{m}$  材を用いて加熱速度  $\dot{T}_c$  を  $150^\circ\text{C}/\text{min}$ 、冷却速度  $\dot{T}_r$  を  $20\sim 640^\circ\text{C}/\text{min}$  で温度サイクルを繰り返したときのオーステナイト粒径の変化を示す。温度サイクルを繰り返すにつれ、オーステナイト粒径は小さくなり一定値を示す。冷却速度の大きい方が最終のオーステナイト粒径は小さい。特に  $\dot{T}_r=640^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合、Photo. 3 に示すように3サイクル目で  $5.0\mu\text{m}$  の微細なオーステナイト粒が得られる。図中に併記したように、これは冷却を水冷により行いオーステナイト $\rightarrow$ マルテンサイト変態を利用した場合と同じ値である。 $\dot{T}_r=640^\circ\text{C}/\text{min}$  で冷却した組織は、Photo. 2 に示した  $\dot{T}_r=500^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合とほぼ同様のフェライ



$D_0 = 13 \mu\text{m}$  Cooling rate  $\dot{T}_r = 640^\circ\text{C}/\text{min}$   
Heating rate  $\dot{T}_c = 150^\circ\text{C}/\text{min}$

Photo. 3. Optical micrograph showing austenite structure of grain size,  $5.0 \mu\text{m}$ , attained after three temperature cycles through austenite  $\rightleftharpoons$  ferrite + bainite transformation.

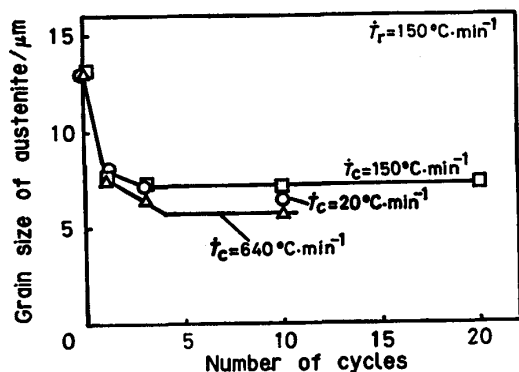


Fig. 5. The effect of heating rate ( $\dot{T}_c$ ) on the variation of austenite grain size with number of temperature cycles.

ト・ベイナイト組織で、フェライト粒はやや小さく、ベイナイト量が多くなる傾向がみられた。オーステナイト  $\rightleftharpoons$  マルテンサイト変態の場合でもオーステナイト粒径は数サイクルで一定値となるので<sup>4)10)11)</sup>、このような急冷をおこなわなくともオーステナイト粒は十分微細化されることが明らかとなった。

Fig. 5 は、 $D_0 = 13 \mu\text{m}$  材を用い冷却速度  $\dot{T}_r = 150^\circ\text{C}/\text{min}$ 、加熱速度  $\dot{T}_c = 20 \sim 640^\circ\text{C}/\text{min}$  で温度サイクルを繰り返したときのオーステナイト粒径の変化を示す。温度サイクルとともにオーステナイト粒径は小さくなり一定値を示す。ここでは  $\dot{T}_r = 150^\circ\text{C}/\text{min}$  なので、変態様式はすべてオーステナイト  $\rightleftharpoons$  フェライト + パーライト変態である。この変態様式でも  $\dot{T}_c = 640^\circ\text{C}/\text{min}$  の場合には  $6.0 \mu\text{m}$  程度の微細粒が得られる。また最終のオーステナイト粒径の加熱速度による差異は冷却速度ほど大きくない。

#### 4. 考 察

##### 4.1 オーステナイト粒径とフェライト・パーライト平均粒径の関係

Fig. 6 は、フェライト・パーライト平均粒径  $\bar{D}$  と変態前のオーステナイト粒径の関係を示す。オーステナイト粒径が小さいか冷却速度が大きいほど、冷却変態後に得られる粒径  $\bar{D}$  は小さい。オーステナイト  $\rightarrow$  フェライト + パーライト変態では、オーステナイト粒界に優先的にフェライト核が形成される。したがって変態後の粒径  $\bar{D}$  はオーステナイト粒径と変態温度域での冷却速度により決まるものといえる。

同様に加熱変態の場合は、オーステナイト核は主としてフェライト・パーライト界面に形成される<sup>12)~14)</sup>。そのため Fig. 7 に示すように、変態前の粒径  $\bar{D}$  と変態後のオーステナイト粒径の関係は冷却時と同じ傾向にある。変態前の粒径が変態後の粒径に及ぼす影響は、加熱変態の方が冷却変態より大きい。

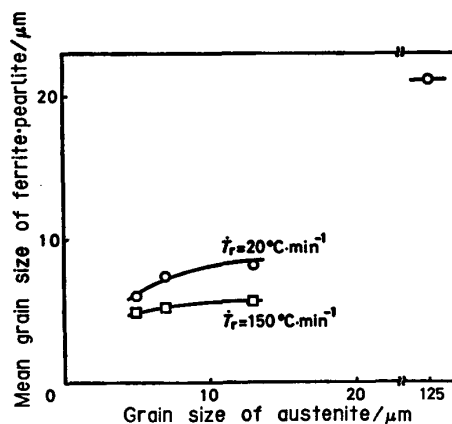


Fig. 6. The relationship between mean grain size of ferrite-pearlite ( $\bar{D}$ ) and grain size of prior austenite ( $D_g$ ) on cooling.

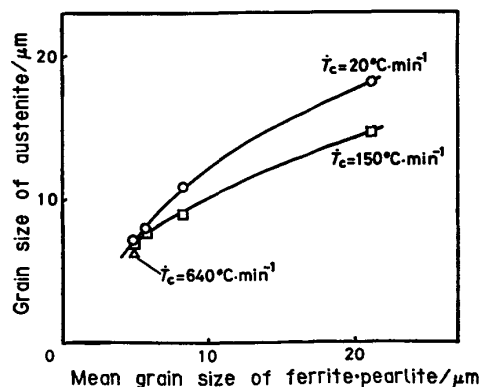
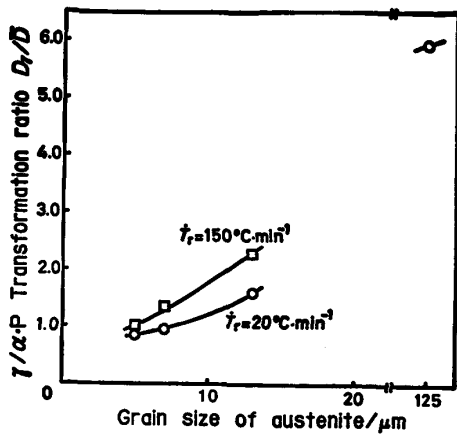


Fig. 7. The relationship between grain size of austenite and mean grain size of prior ferrite-pearlite on heating.



$\bar{D}$ : Mean grain size of ferrite-pearlite

Fig. 8. The relationship between  $\gamma/\alpha$ -P transformation ratio ( $D_\gamma/\bar{D}$ ) and austenite grain size ( $D_\gamma$ ) on cooling.

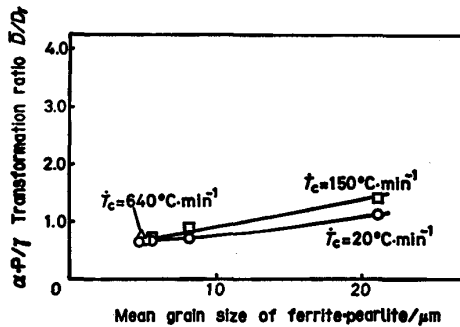


Fig. 9. The relationship between  $\alpha$ -P/ $\gamma$  transformation ratio ( $\bar{D}/D_\gamma$ ) and mean grain size of ferrite-pearlite on heating.

このように変態後に得られる組織の粒径は、前組織の粒径と加熱あるいは冷却速度に依存することが示された。それらの微細化効果について検討するため、Fig. 6と Fig. 7 を前組織の粒径と変換比の関係として新たに整理した。

Fig. 8 は冷却時のオーステナイト粒径  $D_\gamma$  とフェライト・パーライト平均粒径  $\bar{D}$  の比、すなわち変換比 ( $D_\gamma/\bar{D}$ ) と変態前のオーステナイト粒径の関係を示す。すでに報告されているように<sup>15)</sup>、変換比はオーステナイト粒径に大きく依存して変化する。オーステナイト粒径の減少につれて変換比は減少し1に近づく。また冷却速度が大きい方が変換比は大きい。このようにオーステナイト粒径や冷却速度が大きいほど変態による細粒化効果は大きい。

Fig. 9 は加熱時の変換比 ( $\bar{D}/D_\gamma$ ) と変態前のフェライト・パーライト平均粒径の関係を示す。冷却時と同様に、フェライト・パーライト平均粒径や加熱速度が大きいほど変換比は大きい、それらの影響は冷却時に比べ

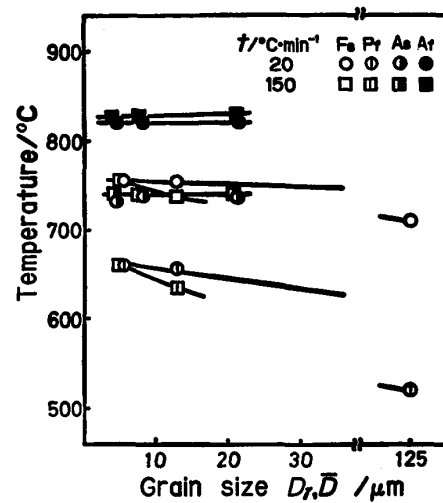


Fig. 10. Transformation temperature for various austenite grain size and mean grain size of ferrite-pearlite.

小さい。変換比 ( $\bar{D}/D_\gamma$ ) は全体に1に近く、フェライト・パーライト平均粒径が小さい場合には変換比は1より小さくなり、オーステナイト粒径は変態により大きくなる。

変態により生成した粒の粒径は核生成頻度、成長速度と元の粒径に依存する<sup>16)</sup>。析出核の核生成頻度は

$$I = B \cdot \exp[-(4G_c + Q)/kT]$$

ここに、 $B$ : 定数、 $4G_c$ : 核生成のための活性化エネルギー、 $Q$ : 溶質原子の母相における拡散の活性化エネルギー、 $k$ : ボルツマン定数、 $T$ : 絶対温度である。冷却変態での核発生のための駆動力は平衡温度より過冷されるほど大きく、核生成頻度はある過冷温度で最大となる<sup>17)</sup>。Fig. 10 は冷却時と加熱時の変態温度区間を示す。冷却時ではオーステナイト粒径や冷却速度が大きい方が冷却変態開始温度  $F_s$  点は低くなり、単位粒界面積あたりの核生成頻度は大きいと考えられる。加熱時ではフェライト・パーライト平均粒径や加熱速度により加熱変態開始温度  $A_s$  点はあまり変化がなく、また平衡温度との差も小さいと考えられる。そのため核生成の駆動力も小さく、冷却時に比べ核生成頻度が小さいと考えられる。加熱時の変換比が冷却時より小さい原因の一つとして、このことが考えられる。また加熱変態では、パーライトがすでにオーステナイト化し、フェライトがオーステナイト化する段階では新たな核生成はなく、すでにあるオーステナイトの成長だけという報告もある<sup>18)</sup>。さらに加熱変態中ではオーステナイトの合体も生じる<sup>18)</sup>。したがって加熱時の変換比が冷却時より小さく、1より小さくなる場合もある原因として、これらの三つの原因が考えられる。

大きなオーステナイト粒に温度サイクルを1回与えると、フェライト・パーライト平均粒径も大きいので冷却時と加熱時の変換比は共に1より大きく生成するオーステナイト粒は微細化する。小さなオーステナイト粒に温度サイクルを与えると、冷却時の変換比は1であるが、フェライト・パーライト平均粒径が小さいので加熱時の変換比は1より小さくなり、生成するオーステナイト粒は変態前より大きくなる。温度サイクルを繰り返すと、このように大きなオーステナイト粒は微細化するが小さなオーステナイト粒は大きくなり、最終のオーステナイト粒径は初期粒径によらず一定値に収束する。 $\dot{T}=150^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の場合、オーステナイト粒径は $7.0\ \mu\text{m}$ に収束した。この収束時における冷却時の変換比は1.4、加熱時の変換比は0.7で、温度サイクル1回を通じての変換比は約1である。つまり最終のオーステナイト粒径は、加熱時と冷却時の変換比の積が1となるオーステナイト粒径に収束する。

#### 4.2 オーステナイト粒径に及ぼす負荷応力の影響

未再結晶域で加工されたオーステナイトでは、伸長したオーステナイト粒の内部に多数の変形帯が観察される<sup>19)</sup>。オーステナイト $\rightarrow$ フェライト変態に際しては、オーステナイト粒界とともに変形帯がフェライト核の生成場所として働くので、加工されたオーステナイトから生成するフェライト粒は微細化する。変形帯の密度は圧延率が30%付近以上で急が増加することが報告されている<sup>20)21)</sup>。本研究で $\sigma=4\ \text{kgf}/\text{mm}^2$ で変態を繰り返した場合、オーステナイト粒径に及ぼす負荷応力の影響はほとんどみられなかつた。応力下の変態により生じるひずみは高数%であり<sup>9)</sup>、これは変形帯が形成されるほどの変形量ではない。変態を繰り返す場合には大きなひずみが得られるが<sup>5)6)</sup>、変態がおこるたびにオーステナイト・フェライトの変態界面が移動し、変態前の加工履歴は消されるので変形帯の形成は考えられない。しかし不完全変態を繰り返した場合には、加工履歴が蓄積され、微細化に対する負荷応力の効果がみられる<sup>8)</sup>ようである。

### 5. 結 論

SCM 415 を用いて温度サイクルを繰り返したときのオーステナイト粒径の変化を研究した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 初期粒径の異なるオーステナイト組織に一定の加熱冷却速度で温度サイクルを与え変態を繰り返したとき、オーステナイト粒径は数サイクルで一定値に収束する。加熱冷却速度を大きくすることにより最終のオース

テナイト粒径は小さくなる。最終のオーステナイト粒径に対する負荷応力 ( $4\ \text{kgf}/\text{mm}^2$ ) の影響はほとんどみられない。

(2) オーステナイト初期粒径  $13\ \mu\text{m}$  から冷却速度  $640^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、加熱速度  $150^{\circ}\text{C}/\text{min}$  で温度サイクルを3回繰り返すことによりオーステナイト粒径は  $5.0\ \mu\text{m}$  になる。これはオーステナイト $\rightarrow$ フェライト+ベイナイト変態を利用したものであるが、冷却を水冷により行つた場合と同じ値であり、オーステナイト $\rightarrow$ マルテンサイト変態のような急熱急冷を行わなくとも十分微細化されることが明らかとなつた。

(3) オーステナイト $\rightarrow$ フェライト+パーライト変態において、変態1回後に得られる粒径は前組織の粒径が小さいか、加熱または冷却速度が大きいほど微細となる。また前組織と変態後の組織の粒径の比(変換比)に対する加熱速度の影響は冷却速度のそれに比べ小さい。すなわち結晶粒微細化には加熱速度より冷却速度の効果が大きい。

(4) 前組織の粒径や加熱または冷却速度が大きいほど変換比は大きい。冷却時の変換比は、前組織の粒径や加熱または冷却速度が同じ場合には加熱時より大きく、オーステナイト粒径が小さくなるに従い減少し1に近づく。加熱時の変換比は、フェライト・パーライト平均粒径が小さい場合には1より小さな値となる。このように温度サイクルを繰り返すと、前組織のオーステナイト粒径が大きい場合は微細化され、小さい場合は加熱変態の効果によりオーステナイト粒径は大きくなる。そして最終のオーステナイト粒径は、加熱時と冷却時の変換比の積が1となる粒径に収束する。

終わりに、本研究の遂行にあたり終始適切なお助言をいただいた京都大学 牧 正志助教授に深く感謝致します。

### 文 献

- 1) 田村今男: 鉄鋼材料強度学 (1969), p. 102 [日刊工業新聞社]
- 2) R. A. GRANGE: Trans. ASM, 59 (1966), p. 26
- 3) R. A. GRANGE: Metall. Trans., 2 (1971), p. 65
- 4) L. F. PORTER and D. S. DABKOWSKI: Ultrafine Grain Metals, ed. by J. J. BURKE and V. WEISS (1970), p. 133 [Syracuse Univ. Press]
- 5) D. OELSCHLÄGEL and V. WEISS: Trans. ASM, 59 (1966), p. 143
- 6) 野崎春男, 植杉雄二, 西川幸男, 田村今男: 日本金属学会誌, 49 (1985), p. 260
- 7) 田中雄一, 井川克也: 日本金属学会誌, 38 (1974); p. 352
- 8) 早乙女康典, 井口信洋: 熱処理, 19 (1979), p. 302

- 9) 野崎春男, 西川幸男, 植杉雄二, 田村今男: 塑性  
と加工, 26 (1985), p. 200
- 10) G. SAUL, J. A. ROBERSON and A. M. ADAIR:  
Metall. Trans., 1 (1970), p. 383
- 11) K. NAKAZAWA Y. KAWABE and S. MUNEKI:  
Mater. Sci. Eng., 33 (1978), p. 49
- 12) G. R. SPEICH and A. SZIRMAE: Trans. Metall.  
Soc. AIME, 245 (1969), p. 1063
- 13) D. P. DATTA and A. M. GOKHALE: Metall.  
Trans., 12A (1981), p. 443
- 14) C. I. GARCIA and A. J. DEARDO: Metall.  
Trans., 12A (1981), p. 521
- 15) 関根 寛, 丸山忠克: 製鉄研究, 289 (1976),  
p. 11920
- 16) 梅本 実, 田村今男: 日本金属学会会報, 24  
(1985), p. 262
- 17) 尾崎良平, 長村光造, 足立正雄, 田村今男, 村上  
陽太郎: 金属材料基礎学 (1978), p. 110 [朝倉書  
店]
- 18) A. ROOSZ, Z. GACSI and E. G. FUCHS: Acta  
Metall., 31 (1983), p. 509
- 19) 田中智夫: 鉄鋼の高温変形挙動 (日本鉄鋼協会鉄  
鋼基礎共同研究会高温変形部会編) (1979), p. 55
- 20) I. KOZASU, C. OUCHI, T. SAMPEI and T.  
OKITA: Proc. Int. Conf. Microalloying-75  
(1976), p. 100
- 21) 杉本正勝: 鋼の熱間加工の金属学 (日本鉄鋼協会  
鉄鋼基礎共同研究会高温変形部会編) (1982),  
p. 136