

## 論 文

UDC 669.15-194.52 : 669.15-194.53 : 669.112.227 : 669.112.227.33

# ベイナイト変態の潜伏期におよぼす初析炭化物 あるいはフェライトの影響について\*

清水 信 善\*\*・田 村 今 男\*\*\*

## Influence of the Precipitation of the Primary Carbide or Ferrite on the Incubation Period for Bainitic Transformation

Nobuyoshi SHIMIZU and Imao TAMURA

## Synopsis:

In this investigation, the change in incubation period for isothermal bainitic transformation was observed with precipitation of primary carbide or ferrite from the austenite before the transformation in hyper-eutectoid steel JIS (SUJ 2) or hypo-eutectoid steel JIS (SNCM 8), respectively. The main results are as follows:

- (1) The incubation period for upper bainitic transformation is remarkably shortened with the precipitation of the primary carbide, while that for pearlitic transformation is slightly affected.
- (2) The incubation period for upper bainitic transformation is also remarkably shortened as the content of carbon in austenite is decreased.
- (3) The incubation period for upper bainitic transformation is prolonged with the precipitation of the primary ferrite.
- (4) The incubation period for lower bainitic transformation is shortened with the precipitation of the primary ferrite.

## 1. 結 言

等温変態線図 (TTT 曲線) や連続冷却線図 (CCT 曲線) は、変態挙動を知るために非常に便利な図とされ一般に広く活用されている。そして、これらの変態線図は合金元素や熱処理条件などによつてかなり変化する。このことについては今までにかなり報告されている<sup>1)~5)</sup>。しかし、これらの変態線図を活用する際に、パーライトやベイナイト変態の潜伏期について充分理解しておくことが大切である。このことについては著者らがすでに一部報告した<sup>6)7)</sup>。たとえば、連続冷却において冷却速度が途中で変化すると、CCT 曲線で示される変態挙動とは異なつた挙動を示す。したがつて、正しい変態挙動を知るためにはパーライトあるいはベイナイト変態のそれぞれの潜伏期の消費量を CCT 曲線に組み入れる必要がある。

本研究は、過共析鋼 (SUJ 2) および亜共析鋼 (SNCM 8) を用いて、オーステナイトからベイナイト変態を

おこす前に炭化物あるいはフェライトが析出した場合のベイナイト変態の潜伏期の変化について研究したものである。

## 2. 実 験 方 法

実験に使用した供試材の化学成分を Table 1 に示す。ここで、鋼 SUJ 2 は球状化焼なまし (球状炭化物の粒径は平均  $0.5\mu$ ) を行なつた線材から  $4\text{ mm } \phi \times 40\text{ mm}$  の試片に削り出し、鋼 SNCM 8 は  $900^\circ\text{C}$  で焼なましを行つた線材から  $3\text{ mm } \phi \times 10\text{ mm}$  の試片に削り出したものである。

等温変態の潜伏期を求める熱処理線図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の Process 1 において、脱炭を防止するため木炭中で試片をオーステナイト化したのち、種々な温度の鉛浴に投入してその温度に種々な時間等温保持したのち、5%食塩水に焼入して組織の凍結を行なつた。そして、硬さの測定と組織の観察からこの鋼の等温変態の潜伏期を求めた。さらに、Fig. 1 の Process 2 で示すよう

\* 昭和 51 年 9 月 27 日受付 (Received Sept. 27, 1976)

\*\* 光洋熱処理(株) (Koyo Netsushori Co., Ltd., 146 Takochi Yao Osaka 581)

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

Table 1. Chemical compositions of steels (wt%).

Steel	Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al
SUJ 2		0.98	0.24	0.41	0.017	0.009	0.20	0.05	1.37	—	—
SNCM 8		0.40	0.30	0.71	0.016	0.006	0.13	1.79	0.78	0.24	0.027

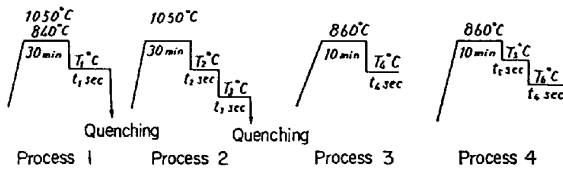


Fig. 1. Schematic diagram showing heat treatment to examine incubation period for transformation in SUJ 2 and SNCM 8 steels.

$T_1$ : 760~380°C  $T_4$ : 720~350°C  
 $T_2$ : 760~550°C  $T_5$ : 630°C  
 $T_3$ : 700~400°C  $T_6$ : 450~350°C

に、同じオーステナイト化後、鉛浴に投入してその温度に種々な時間保持することによってオーステナイト粒界に炭化物を析出させ、直ちに別の鉛浴に投入してその温度に等温保持したのち、6%食塩水に焼入して組織の凍結を行なった。そして硬さの測定と組織の観察から潜伏期の変化を求めた。

Process 3 では Formastor-F を使い熱膨脹の変化からこの鋼の等温変態の潜伏期を求めた。さらに Process 4 で示すように、最初の等温保持によつてフェライトを析出させ、次の等温保持によつて潜伏期を求めた。組織観察のための腐食液には5%ニタルおよび5%ピクルルを使用した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 上部ベイナイト変態の潜伏期におよぼす初析炭化物析出の影響

鋼 SUJ 2 の炭化物を完全に固溶 (1050°C × 30 min のオーステナイト化) させたときの等温変態線図を求めると Fig. 2 に示すようになる。この変態線図の中で、変態完了線は本研究において重要でないので、曲線の鼻に当る温度付近を2~3測定し、その他はすでに報告<sup>9)</sup>されているものを参考にして図示した。

Fig. 2 において、まず炭化物を析出し、その後パーライトおよびベイナイト変態を起す温度領域があるが、本研究では、各温度におけるパーライトおよびベイナイト変態の潜伏期をその温度に達してからそれぞれの変態が開始するまでの時間とする。パーライト変態の場合はオーステナイト結晶粒界にまず炭化物の析出が起こり、そのあとに粒界からパーライト変態が起こる。この様子

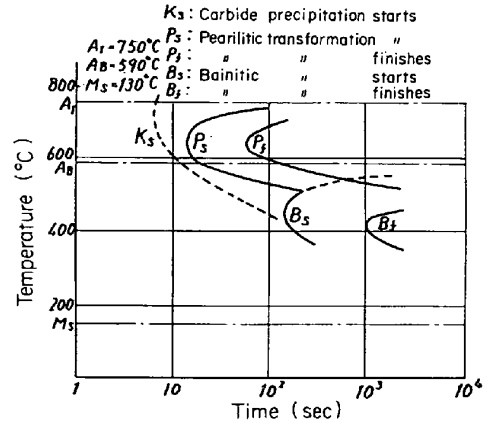


Fig. 2. TTT diagram of SUJ 2 steel austenitized at 1050°C for 30 min. ( $A_B$  temperature is a estimated value)

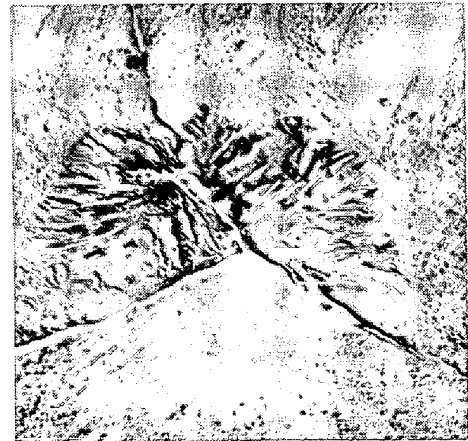
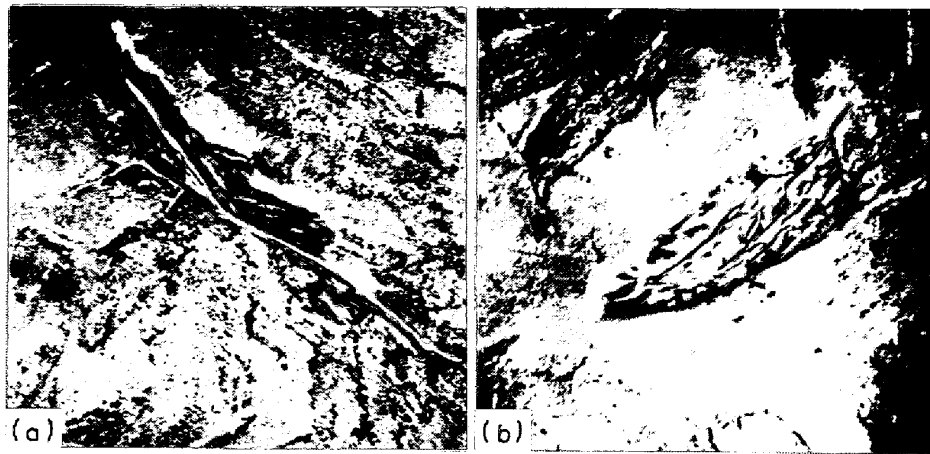


Photo. 1. Microstructure pearlite formed by holding at 650°C for 14 sec in the SUJ 2 steel austenitized at 1050°C for 30 min. Etched in 5% nital. (×6000)

1例を参考までに Photo. 1 に示す。しかし、ベイナイト変態の場合はパーライトのときと同じようにオーステナイト結晶粒界にまず炭化物の析出が起こつて、そのあとに炭化物にそつてベイナイト変態が起こつていく場合 (Photo. 2 (a) で示す) と、炭化物の析出が先行してることが明確でない場合 (Photo. 2 (b) で示す) も時々見受けられる。

次に、同じオーステナイト化後、 $A_1$  点 (この鋼では750°C) 直上の760°C まで急冷しその温度にそれぞれ0, 5, 30 sec 保持したのち、直ちに  $A_1$  点以下の種々な



(a) Bainite formation with primary carbide (b) Bainite formation without primary carbide

Photo. 2. Microstructure of bainite formed by holding at 450°C for 140 sec in the SUJ 2 steel austenitized at 1050°C for 30 min. Etched in 5% nital. (× 6000)

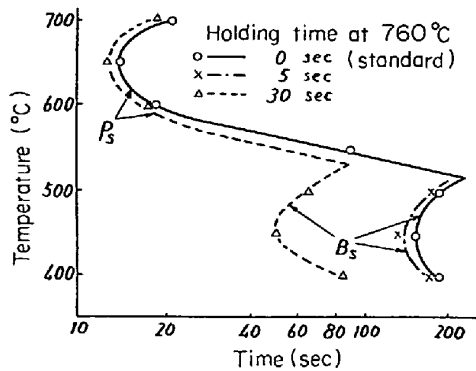


Fig. 3. Influence of holding time at 760°C on the incubation period for isothermal transformation of SUJ 2 steel, austenitized at 1050°C for 30 min.

温度まで急冷しその温度に等温保持して、パーライトおよび 400°C 以上のベイナイト (以下これを上部ベイナイトと呼ぶ) 変態の潜伏期を求めると Fig. 3 に示すようになる。Fig. 2 からわかるように、760°C は  $A_1$  点以上の温度であるからこの温度に保持してもパーライト変態の潜伏期の消費は起こらないが、保持時間が 7 sec になると炭化物の析出が開始する。

Fig. 3 において、760°C での保持時間が 0 sec とあるのは Fig. 2 で示すものと同じものである。760°C での保持時間が 5 sec のときは、パーライトおよび上部ベイナイト変態の潜伏期はそれぞれ Fig. 2 で求めた当初のものとはほとんど変わらない。しかし、760°C での保持時間が 30 sec になると、パーライト変態の潜伏期は当初のものとはあまり変わらないけれど、上部ベイナイト変態の潜伏期は当初のものより著しく短時間側に移動している。このことは 760°C での 5 sec の保持では炭化物の析出は起こらないけれど、30 sec 保持するとかなりの炭化物の

析出が起こっている。すなわち、オーステナイトから最初に炭化物\* (これを初析炭化物と呼ぶ) を析出してオーステナイトの炭素濃度が減少することによつて、パーライト変態の潜伏期はあまり大きな影響を受けない。Cr を含んでいる鋼でもパーライト変態の潜伏期があまり移動しないのは、特殊炭化物反応の起こっていない初期であるため、オーステナイトの合金元素 (この場合は Cr) の濃度にあまり変化がないためと考えられる。

次に、パーライト変態の潜伏期の消費がベイナイト変態の潜伏期にどのような影響を与えるかについて調べるため同じオーステナイト化後、760°C、650°C、550°C まで急冷しその温度にそれぞれ 30 sec、10 sec、30 sec 保持したのち、直ちに 450°C の温度まで急冷しその温度に等温保持して、450°C のベイナイト変態の潜伏期を求めると Fig. 4 に示すようになる。ここで、550°C で 30

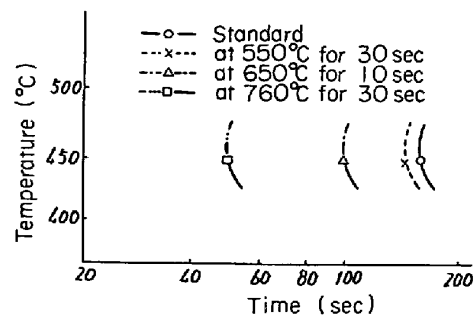


Fig. 4. Influence of holdings at 760°C for 30 sec, 650°C for 10 sec, and 550°C for 30 sec on the incubation period for isothermal bainitic transformation of SUJ 2 steel at 450°C, austenitized at 1050°C for 30 min.

\* 特殊炭化物反応<sup>9)10)</sup>といわれる現象がある。それは変態初期に  $Fe_3C$  であつた炭化物が、次第に合金元素を固溶して安定化し、合金炭化物へと遷移してゆく現象であるが、本研究の場合変態初期を取扱うのでこの現象はほとんど考える必要がなく、本研究での炭化物はすべて  $Fe_3C$  に近いものと考えられる。

sec 保持の場合は  $A_B$  点 (ベイナイト変態の潜伏期の消費の開始する最高の温度<sup>7)</sup>) 以下の温度であるから、この温度に保持するとベイナイト変態の潜伏期が消費されるはずである。しかし、Fig. 2 から理解できるように  $550^\circ\text{C}$  のベイナイト変態の潜伏期はおよそ  $10^3$  sec と推定されるため、30 sec の保持ではベイナイト変態の潜伏期の消費は極めて少ないので、ここではベイナイト変態の潜伏期の消費はないものとして考察を推めることにする。

Fig. 4 において、いずれの温度に保持してもベイナイト変態の潜伏期は当初より短時間側に移動している。しかも、 $760^\circ\text{C}$  で 30 sec 保持した場合が最も短時間で、つづいて  $650^\circ\text{C}$  で 10 sec、 $550^\circ\text{C}$  で 30 sec の順になっている。  $760^\circ\text{C}$  と  $550^\circ\text{C}$  で同じ 30 sec の保持時間においても、 $550^\circ\text{C}$  の場合は当初の潜伏期よりわずかしき変化していないのに比べて、 $760^\circ\text{C}$  の場合は大きく変化している。 Fig. 2 からわかるように  $760^\circ\text{C}$  は  $A_1$  点以上であるからパーライト変態の潜伏期は消費されないが  $550^\circ\text{C}$  ではパーライト変態の潜伏期はおよそ 80% 消費されている。また組織の観察から、 $550^\circ\text{C}$  の場合より  $760^\circ\text{C}$  の場合の方が初析炭化物の析出量が多い。このことは、ベイナイト変態の潜伏期の変化はパーライト変態の潜伏期の消費にはあまり関係せず初析炭化物の析出量に関係していることを示していると言える。また、 $650^\circ\text{C}$  で 10 sec および  $550^\circ\text{C}$  で 30 sec 保持の場合は、Fig. 2 からわかるようにいずれもパーライト変態の潜伏期をおよそ 80% 消費したことになるが、前者の場合の方が保持時間が短いにもかかわらず、ベイナイト変態の潜伏期の短時間側への移動が大きい。これも組織観察から前者の場合の方が初析炭化物の析出量が多いことからパーライト変態の潜伏期の消費はベイナイト変態の潜伏期にあまり関係せず、初析炭化物の析出量のみに関係していることを示すものである。したがって、Fig. 4 に示す結果においても、初析炭化物の析出量が多くなるにつれてオーステナイトの炭素濃度が減少し、そのためベイナイト変態の潜伏期が短時間側に移動することがうかがわれる。

次に、オーステナイト化温度を変えることによつて、炭化物の固溶度合を変えた場合のパーライトおよび上部ベイナイト変態の潜伏期を求めたものを Fig. 5 に示す。ここで、オーステナイト化温度が  $1050^\circ\text{C}$  の場合は炭化物は完全に固溶しているが、 $840^\circ\text{C}$  の場合は Photo. 3 に示すように炭化物はおよそ半分固溶し残りの半分は未固溶の炭化物として残存している。 Fig. 5 において、オーステナイト化温度が  $1050^\circ\text{C}$  から  $840^\circ\text{C}$  になると、

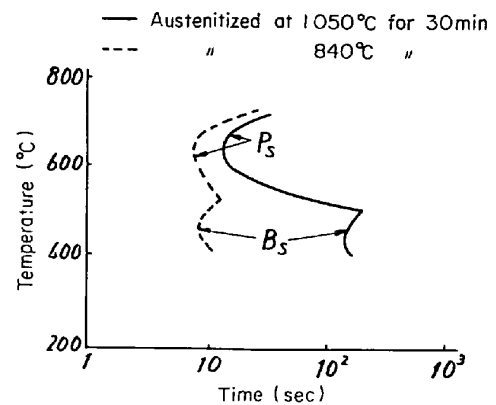


Fig. 5. Influence of austenitizing temperature on the incubation period for pearlitic and bainitic transformation of SUJ 2 steel.

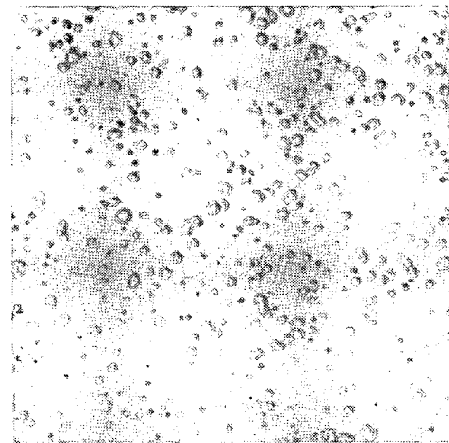


Photo. 3. Microstructure of SUJ 2 steel quenched into 5% brine from austenitizing at  $840^\circ\text{C}$  for 30 min. Etched in 5% picral. ( $\times 800$ )

パーライト変態の潜伏期はほんのわずかに短時間側に移動したものに比べて、上部ベイナイト変態の潜伏期は著しく短時間側に移動している。すなわち、オーステナイト化温度が低くなると、未固溶の炭化物が多くなりオーステナイト中の炭素濃度が減少し、さらにオーステナイト結晶粒が小さくなり変態の核生成位置が増加する。そのために上部ベイナイト変態の潜伏期が短時間側に移動することを示したものである。

一方、今井ら<sup>1)2)11)12)</sup>は等温変態図におよぼす各種因子について報告している。そのなかで、Cr, Mo, V, W, Ti, Nb などの炭化物生成元素を含有すると、過冷オーステナイトを安定にしたり、炭素の拡散をおそくすることによつて、パーライト段階が著しく長時間側に移動する。しかし、ベイナイト段階は少ししか長時間側に移動しない。また、オーステナイトの結晶粒が大きくなると、パーライト段階は長時間側に移動するが、ベイナイト段階はあまり移動しない。これはパーライトの核発生がオ

ーステナイト結晶粒界に起こるため、結晶粒が大きくなると粒界が少なくなり、核発生がおそくなるためであると述べている。このことと Fig. 5 に示した結果を総合すると、パーライト段階の移動はおもにオーステナイト結晶粒の変化と合金元素の炭化物への固溶によるもので、オーステナイト中の炭素濃度の変化にはあまり大きな影響を受けないことを示したものである。これに反して、ベイナイト段階の移動はおもにオーステナイト中の炭素濃度の変化によるものであることを示している。このようにパーライト変態の潜伏期とベイナイト変態の潜伏期が異なつた挙動を示していることから、それぞれの変態における核生成の機構もかなり異つたものであると推測される。

パーライト生成の核は古くにはセメンタイトと考えられていた<sup>14)</sup>が、その後フェライトもセメンタイト同様パーライト生成の核になりうるということが明らかにされ<sup>15)16)</sup>、現在では亜共析鋼ではフェライト、過共析鋼ではセメンタイトがその生成核と考えられている<sup>17)</sup>。一方、ベイナイト生成の核については一般的にフェライトと考えられている<sup>17)18)</sup>。このことから、Fig. 3 および Fig. 4 に示した結果においては試片が過共析鋼であるからパーライト生成の核はセメンタイトで、ベイナイト生成の核はフェライトと考えられる。したがって上部ベイナイト変態において、オーステナイト中の炭素濃度が高くなるとベイナイト変態の潜伏期が長時間側に移動するのはベイナイト生成の核であるフェライトの発生が困難になるためであろうと考えられる。しかし、この核生成の難易については明らかでないので今後の研究をまたねばならない。

### 3.2 ベイナイト変態の潜伏期におよぼす初析フェライトの影響

鋼 SNCM 8 の 860°C×10 min のオーステナイト化における等温変態線図を求めると Fig. 6 に示すようになる。この変態線図のなかで、変態の完了線は本研究において重要でないので、すでに報告<sup>13)</sup>されているものを参考にして図示した。

次に、同じオーステナイト化後、630°C まで急冷してその温度にそれぞれ 0, 300, 900, 3600 sec 保持したのち、直ちにそれぞれ 450°C, 400°C, 350°C まで急冷しその温度に等温保持して、ベイナイト変態の潜伏期を求めると Fig. 7 に示すようになる。Fig. 7 において、630°C での保持時間が長くなるにつれて 450°C および 400°C におけるベイナイト変態の潜伏期は当初より長時間側に移動している。しかも、400°C 場合より 450°C の場合の移動の方が著しい。しかし、350°C におけるベイナ

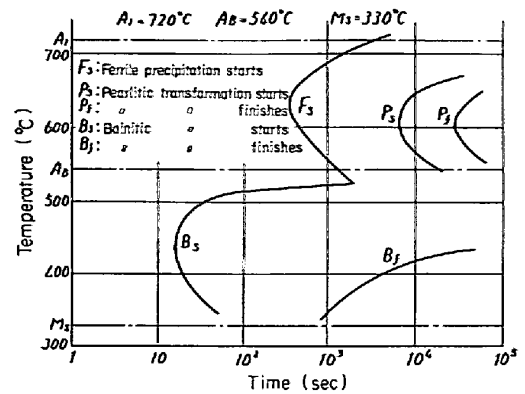


Fig. 6. TTT diagram of SNCM 8 steel austenitized at 860°C for 10 min. ( $A_B$  temperature is a estimated value)

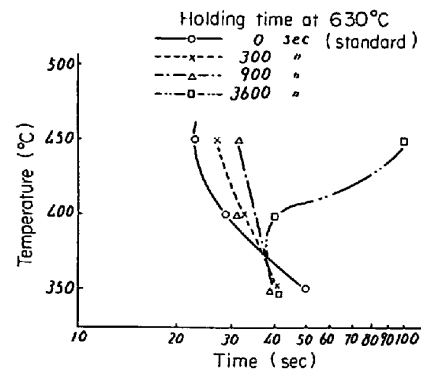


Fig. 7. Influence of holding time at 630°C on the incubation period for isothermal bainitic transformation of SNCM 8 steel, austenitized at 860°C for 10 min.

イト変態の潜伏期は 630°C で保持することによつて当初よりわずかに短時間側移動している。すなわち、およそ 370°C を境にして移動方向が異なつていることを示している。630°C に保持すると Fig. 6 からわかるように、350 sec でフェライトの析出変態が開始し、8000 sec でパーライト変態が開始する。630°C での保持時間が長くなるにつれてフェライトの析出量が増加し、オーステナイト中の炭素濃度は上昇する。

ベイナイトは一般に 350°C を境に形態が異なり上部および下部ベイナイトに分類される<sup>19)20)</sup>。Fig. 7 に示した移動方向の異なる温度 370°C は上部および下部ベイナイトに分類される温度であると考えられる。したがって Fig. 7 に示した結果から、フェライトの析出によつてオーステナイト中の炭素濃度が上昇すると、上部ベイナイト変態の潜伏期は長時間側に移動するが、下部ベイナイト変態の潜伏期は短時間側に移動する。

HIGGINS ら<sup>21)</sup>は En 26 鋼においてフェライトの析出によつて 320°C でのベイナイト変態の開始が促進されると報告している。このことと著者らの示した 350°C

での結果と一致するが、彼らは 320°C 以上のベイナイトについては検討していない。

本研究において、上部ベイナイトと下部ベイナイトが相反した傾向を示したのは、それぞれの変態の核生成の機構が異なるためであると推測される。それは、上部ベイナイト変態においてはまずフェライトが核生成するため、オーステナイト中の炭素濃度が上昇するとフェライト核生成が困難になる。一方、下部ベイナイト変態ではまずセメンタイトが核生成するため、オーステナイト中の炭素濃度が上昇するとセメンタイト核生成が容易であると考えればこの現象は理解できるからである。しかし変態のための核生成に関しては種々の説<sup>22)</sup>があり、鋼種によつてかなり異なるものと考えられ、ここで簡単に論ずることは危険であろう。また、Fig. 7 に示した結果から、上部および下部ベイナイト変態の潜伏期はそれぞれ異なつた性質のものであることが理解できる。

Fig. 7 の上部ベイナイトに関しては Fig. 3 を逆の面から検討したもので、いずれも上部ベイナイト変態の潜伏期はオーステナイト中の炭素濃度の影響を受けることを示している。

#### 4. 結 言

過共析鋼を用いて過冷オーステナイトから最初に炭化物を析出させたり、あるいはオーステナイト化温度を変えることによつて炭化物の固溶度を変化させたり、または、亜共析鋼を用いて過冷オーステナイトから最初にフェライトを析出させることなどによつてオーステナイトの炭素濃度が変化すると、等温変態におけるベイナイトの潜伏期がどのように変化するかを調べた。その結果、次のようなことが明らかになつた。

(1) 初析炭化物の析出によつて上部ベイナイト変態の潜伏期は著しく短時間側に移動する。しかし、パーライト変態の潜伏期の移動は少い。

(2) オーステナイト化温度の変更によりオーステナイト中の炭化物の固溶量が減少すると、上部ベイナイト変態の潜伏期は著しく短時間側に移動する。

(3) 初析フェライトの析出によつて上部ベイナイト変態の潜伏期は長時間側に移動するが、下部ベイナイト変態の潜伏期は短時間側に移動する。

終りに、本研究を行うにあたり研究に協力していただいた愛知製鋼(株)研究部研究員相沢武氏に感謝の意を表します。

#### 文 献

- 1) 村上武次郎, 今井勇之進: 日本金属学会誌, 7 (1943), p. 145
- 2) F. WEVER and A. ROSE: Stahl u. Eisen, 74 (1954), p. 749
- 3) E. C. BAIN and H. W. PAXTON: Alloying Elements in steel, ASM (1961)
- 4) R. H. ABORM: Welding J., 20 (1940), p. 414
- 5) J. F. LIBSCH, W. P. CHUANG, and W. J. MURPHY: Trans. ASM, 42 (1950), p. 121
- 6) 清水信善, 田村今男: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2375
- 7) 清水信善, 田村今男: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 1349
- 8) Atlas zur Warmbehandlung der Stähle, Max-Planck Inst. Eisenforsch, p. II-225D
- 9) E. HOUDREMONT: Handbuch der Sonderstahlkunde, (1956)
- 10) 鉄鋼工学講座: 鋼の熱処理技術, (1969), p. 44 [朝倉]
- 11) 今井勇之進: 日本金属学会, 8 (1944), p. 166
- 12) 鉄鋼工学講座: 鋼の熱処理技術, (1969), p. 41 [朝倉]
- 13) 日本鉄鋼協会編: 鋼の熱処理 5 版, (1969), p. 365 [丸善]
- 14) F. C. HULL and R. F. MEHL: Trans. ASM, 30 (1942), p. 381
- 15) S. MODIN: Jernkont. Ann., 142 (1958), p. 37
- 16) M. HILLERT: Varmländska Bergsm. Fören. Ann. (1958), p. 29
- 17) M. HILLERT: Decomposition of Austenite by Diffusional Processes, Interscience, (1962), p. 197
- 18) H. I. AARONSON and C. WELLS: Trans. Met. Soc. AIME, (J. Metals, October), 206 (1956), p. 1216
- 19) E. S. DAVENPORT and E. C. BAIN: Trans. Met. Soc. AIME, 90 (1930), p. 117
- 20) Y. OHMORI and R. W. K. HONEYCOMBE: Proceedings ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 1160
- 21) G. T. HIGGINS and H. J. AXON: JISI, 198 (1961), p. 46
- 22) 大森靖也: 鉄と鋼, 57 (1971), p. 1562