

論 文

UDC 669.112.227.33 : 669.15'26-194 : 669.15'26'28-194 : 669.14'24'26'28-194

鋼の連続冷却におけるベイナイト変態の潜伏期について*

清水 信 善**・田 村 今 男***

On the Incubation Period for Bainitic Transformation during Continuous Cooling in Steels

Nobuyoshi SHIMIZU and Imao TAMURA

Synopsis:

The process of the consuming incubation period for bainitic transformation during continuous cooling of steels was examined in the relation with consumption of incubation period for ferritic or pearlitic transformation by steels of JIS SUJ2, SCM5, and SNCM8. The main results are as follows:

- (1) There is a critical temperature (A_B) at which the consumption of incubation period for bainitic transformation starts during continuous cooling.
- (2) The consumption of incubation period for bainitic transformation is progressed independently of any consumption of incubation period for ferritic or pearlitic transformation.
- (3) The bainitic transformation behaviour after a change of cooling rate during continuous cooling shows a different manner from that indicated by a usual CCT-diagram of the steel because of the different way in consumption of the incubation period. The estimation method of the transformation behaviour in such a case was explained by using usual CCT-diagram.

1. 緒 言

等温変態線図 (TTT曲線) や連続冷却変態線図 (CCT曲線) は、合金元素^{1)~4)}、オーステナイト化条件^{5)~7)}、結晶粒度⁸⁾⁹⁾、熱処理時の外力や圧力¹⁰⁾ その他種々な条件^{11)~14)}によつて変化する。このことは、フェライト、パーライトおよびベイナイトなどの変態の潜伏期* も上記の条件によつて変化することを意味する。

しかしフェライトやパーライト変態の潜伏期についてはいままでにしばしば議論されているが、ベイナイト変態については、それが独立した潜伏期をもつものと想像されるが、それについて明らかに示した研究はないようである。TTT 曲線ではベイナイト変態のための潜伏期があることは誰も認めているであろうが、いままでベイナイト変態の潜伏期に対して関心が寄せられなかつたように思われる。1, 2 の文献⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾において、独立した潜伏期をもつという考えが間接的に示されているにすぎない。

* 潜伏期を核生成時間、変態開始時間、潜伏期時間などと呼ぶ場合がある。

著者らは、ベイナイト変態においてもフェライトやパーライト変態とは別に独立した潜伏期をもつという観点に立つて、それぞれの潜伏期の消費が互いにどのように影響し合い、また、ベイナイト変態の潜伏期がどのように消費されてゆくかについて研究した。さらに、連続冷却途中で冷却速度を変更した場合のベイナイト変態挙動についても研究した。

著者らは前報¹⁵⁾で、連続冷却におけるパーライト変態の潜伏期の消費がその後の冷却における変態挙動や臨界冷却速度に大きく影響することを明らかにした。したがつて、本研究においてもベイナイト変態の潜伏期の消費を明らかにすることは、ベイナイトの変態挙動を知るための重要な課題であると考えられる。

2. 実 験 方 法

実験に使用した供試材の化学組成をTable 1に示す。ここで、S-1 は SUJ2 に相当する鋼種で、球状化焼なまし (球状炭化物の粒径は平均 0.5μ) を行なつた線材から $4\text{ mm}\phi \times 40\text{ mm}$ の試片を削り出したものである。

* 昭和51年1月27日受付 (Received Jan. 27, 1976)

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

*** 京都大学工学部 工博 (Department of Metal Science and Technology, Kyoto University)

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

Steel No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
S-1 (SUJ 2)	0.98	0.24	0.41	0.017	0.009	0.05	0.37	—
S-2 (SCM 5)	0.47	0.33	0.81	0.015	0.007	0.05	0.97	0.17
S-3 (SNCM 8)	0.40	0.30	0.71	0.013	0.007	1.78	0.85	0.22

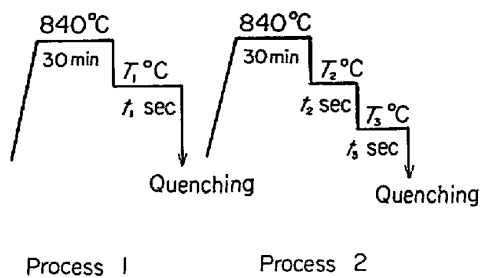


Fig. 1. Schematic diagram showing heat treatment to find incubation period for transformation in S-1 steel.

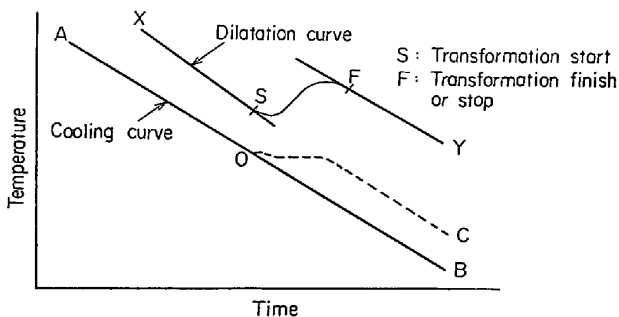


Fig. 2. Schematic diagram showing dilatation and cooling curves to find transformation temperature.

S-2 は SCM 5, S-3 は SNCM 8 に相当する鋼種で、850°C で焼なましを行なった線材から 3 mmφ×10 mm の試片を削り出したものである。

変態の潜伏期および連続冷却における変態挙動の測定には、Formastor-F 装置 (富士電波工機(株)製) あるいは加熱炉に鉛浴炉を組合せたものを用いた。すなわち、加熱炉に鉛浴炉を組合せた場合は Fig. 1 に示すように脱炭を防止するため試片を木炭中で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った。そして、硬さの測定と組織の観察よりこの鋼の等温変態の潜伏期を求めた。さらに、鉛浴を二つ使って、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することによって潜伏期を消費し、直ちに 500°C 以下の種々な温度の別の鉛浴に投入してその温度に等温保持したのち、5%食塩水に焼入して組織の凍結を行なった。そして、前述と同じ方法で潜伏期を求め

た。

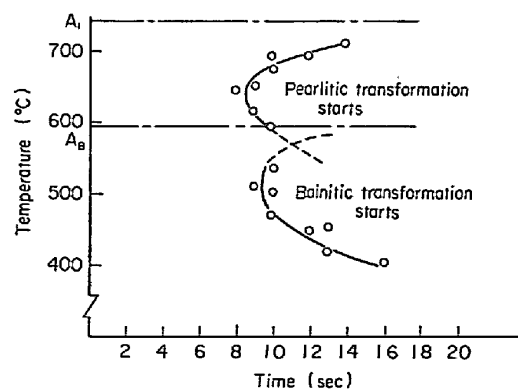
Formastor-F の場合は Fig. 2 に示すように、連続冷却途中で変態熱のため冷却速度が変化しないように調節した。すなわち、連続冷却 A→B で示す途中 O 点で変態が開始すると、変態熱のため O→C のように冷却過程が変化するのが普通である。しかし、本研究の変態挙動の解析を容易にするため、冷却速度が A→O→B で示すように一定になるように強制的に調節した。また、X→Y で示す曲線は熱膨脹の変化曲線で、S 点は変態開始、F 点は変態中止または完了を示す。熱膨脹の変化と硬さの測定および組織の観察から変態挙動を求めた。また、連続冷却途中で冷却速度を変更する場合は、Formastor-F に数値制御装置を組合せる方法を用いた。

硬さの測定は微小硬度計とロックウェル C スケールを使用した。組織観察のための腐食液には 5% ナイタルを使用した。

3. 実験結果と考察

3-1 パーライトの潜伏期の消費がベイナイトの潜伏期に与える影響

840°C×30 min でオーステナイト化した鋼 S-1 の等温変態の潜伏期を求めた結果を Fig. 3 に示す。ここで曲線の点線で示した部分は推定線であり、パーライト変態の潜伏期とベイナイト変態の潜伏期はそれぞれ別々の C 曲線を示している。いま、ベイナイトの C 曲線の最高

Fig. 3. Incubation time to start for isothermal transformation of austenite in S-1 steel at various temperatures below A_1 , austenitized at 840°C for 30 min.

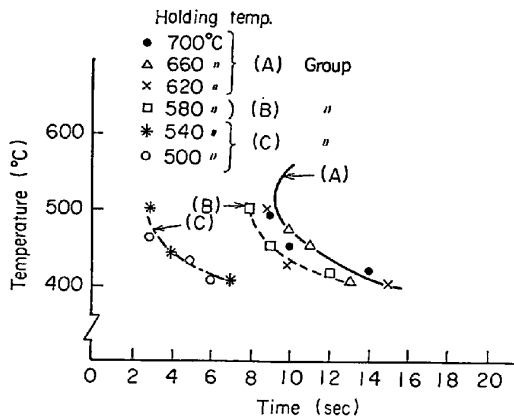


Fig. 4. Influence of 6sec holding at a temperature above isothermal transformation temperature on the incubation period for isothermal bainitic transformation of S-1 steel, austenitized at 840°C for 30 min. No reduction of incubation period is observed when held at 700, 660, and 620°C, whereas holding at 580, 540 and 500°C is observed to reduce the incubation period.

温度（曲線の点線部分が無限大の時間になったときの温度）を A_B と定める。

次に、種々な温度で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を明らかにするため、同一オーステナイト化後、種々な温度に急冷してその温度で 6sec 等温保持することによって潜伏期を消費したのち、500°C 以下の種々な温度に等温保持してベイナイト変態の潜伏期を求めた。その結果を Fig. 4 に示す。Fig. 4 において、700, 660, 620°C の場合は曲線 A で示すように、当初 Fig. 3 で求めたときの潜伏期と大差がない結果を示した。このことは、620°C 以上の温度で潜伏期を消費しても、ベイナイト変態の潜伏期には変化がないことを示している。すなわち、620°C 以上の潜伏期は Fig. 3 からわかるようにパーライトの潜伏期である。したがって、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はほとんど影響を与えないことを示唆したものである。

しかし、580°C になると曲線 B で示すようになり、また、540°C, 500°C になると曲線 C で示すようにいずれも当初の潜伏期より短時間になっている。このことは、これらの温度での潜伏期の消費はベイナイト変態の潜伏期に影響を与えることを示すものである。また、540, 500°C の場合はこの温度で潜伏期を消費された分だけ、それ以下の温度でのベイナイト変態の潜伏期が短くなっていることがわかる。

以上の結果から、この鋼のベイナイト変態の潜伏期に

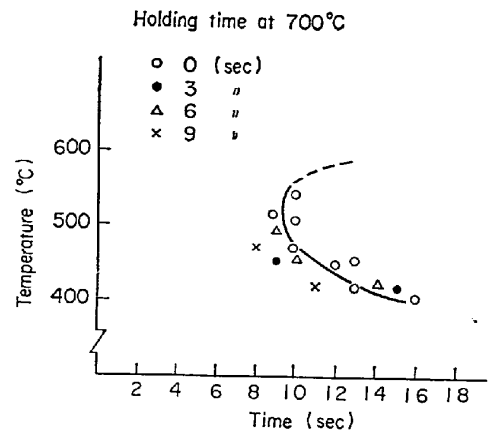


Fig. 5. Influence of holding time at 700°C on the incubation period for isothermal bainitic transformation of S-1 steel, austenitized at 840°C for 30 min.

影響を与えるのは、620~580°C の間のある一定の温度以下で潜伏期を消費した場合である。すなわち、Fig. 3 で仮定として示した温度 A_B と Fig. 4 で得た温度 620~580°C の間のある一定温度とはほぼ一致した位置にある。このことから、ベイナイト変態の潜伏期の消費が起こるのは温度 A_B 以下であることがわかる。

また、700°C での等温保持時間を 0, 3, 6, 9 sec と変えることによつて、パーライト変態の潜伏期の消費量を変えた場合のベイナイト変態の潜伏期を求めた結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5 からわかるように、700°C での等温保持時間が変化しても（ただし、等温保持時間はパーライトの変態開始時間以内とする。変態が開始時間以上になるとパーライト変態の潜伏期を全部消費してしまい、変態による影響がでてきて複雑になる）ベイナイト変態の潜伏期はほとんど変化しない。このことは前述の Fig. 4 の結果と同じように、ベイナイト変態の潜伏期はパーライト変態の潜伏期の消費には影響されず、しかもベイナイト独自の潜伏期をもっていることを示したものである。

以上の結果から、 A_B はベイナイト変態の潜伏期が消費される最高の温度であると定義される。

3.2 フェライトの潜伏期の消費がベイナイトの潜伏期に与える影響

フェ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、鋼 S-3 を用いて調べた。

鋼 S-3 を 850°C × 5 min のオーステナイト化後 650°C まで急冷してこの温度で等温保持して潜伏時間を求めると、378 sec と 396 sec で平均 387 sec であった。そして、この潜伏期の後にフェライトが析出していたの

で、これはフェライトの潜伏期である(図は省略する)ことが知られた。また、同じオーステナイト化後 450°C まで急冷してこの温度で等温保持して潜伏時間を求めると 20sec と 21sec であった。これはベイナイトの潜伏期である。

次に、同じオーステナイト化後 650°C まで急冷し、この温度で 350sec 等温保持してから(このときフェライトの潜伏期は約 90% 消費される)、直ちに 450°C まで急冷してこの温度で等温保持してベイナイト変態までの潜伏期を求めると 21sec および 22sec であった。これは前者の 20sec および 21sec の結果とほぼ同じである。この結果から、フェ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ほとんど影響を与えないことがわかる。鋼 S-3 の等温変態曲線において、650°C はフェライト変態の潜伏期の鼻に当たる温度であり、450°C はベイナイト変態の潜伏期の鼻に当たる温度である。

HIGGINS ら¹⁶⁾は、En26 鋼においてオーステナイト化後 710~600°C の温度に等温保持することによつて 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。著者らの結果と多少異なるのは、著者らが用いた鋼より TTT 曲線でのフェライトおよびパーライト段階が著しく長時間のものであり、また、710~600°C での保持時間も著者らより長時間であること、そして、著者らがベイナイト段階の鼻に当たる温度の 450°C でのベイ

ナイト変態の潜伏期の変化を求めたのに対して、彼らは鼻に当たる温度(En26 鋼で 450°C)より著しく低い温度の 320°C で行なっているためと考えられる。さらに、合金元素の影響も考えられるので、これらの点については、今後の研究を待たねばならない。

3.3 連続冷却途中で冷却速度を変更した場合のベイナイト変態挙動と CCT 曲線の関係

鋼 S-2 を 850°C × 10 min オーステナイト化したときの CCT 曲線*と、同じオーステナイト化後 3.5°C/sec で連続冷却する途中で冷却速度を 10°C/sec に変更した場合の変態挙動(ここでは硬さの変化で表す)を求めた結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 において、オーステナイト化温度 T_A から種々の冷却速度で常温まで冷却したときのそれぞれの硬さを () 内に示す。そして、オーステナイト化温度 T_A から 3.5°C/sec の冷却速度で冷却する途中で冷却速度を 10°C/sec に変更して常温まで冷却したときのそれぞれの硬さを○内に示す。

Fig. 6 において、たとえばオーステナイト化温度 T_A から 3.5°C/sec の冷却速度で冷却すると、ベイナイト変態を起こし、 T_x 点でベイナイト変態は中止され、さらに冷却して行くと M_s 点に達してマルテンサイト変態を起こして常温にいたる。このときの硬さは Hv 496 で

* 一般に CCT 曲線の時間軸は対数目盛で表しているが、ここでは解析を容易にするため等間隔の目盛で表わすことにした。

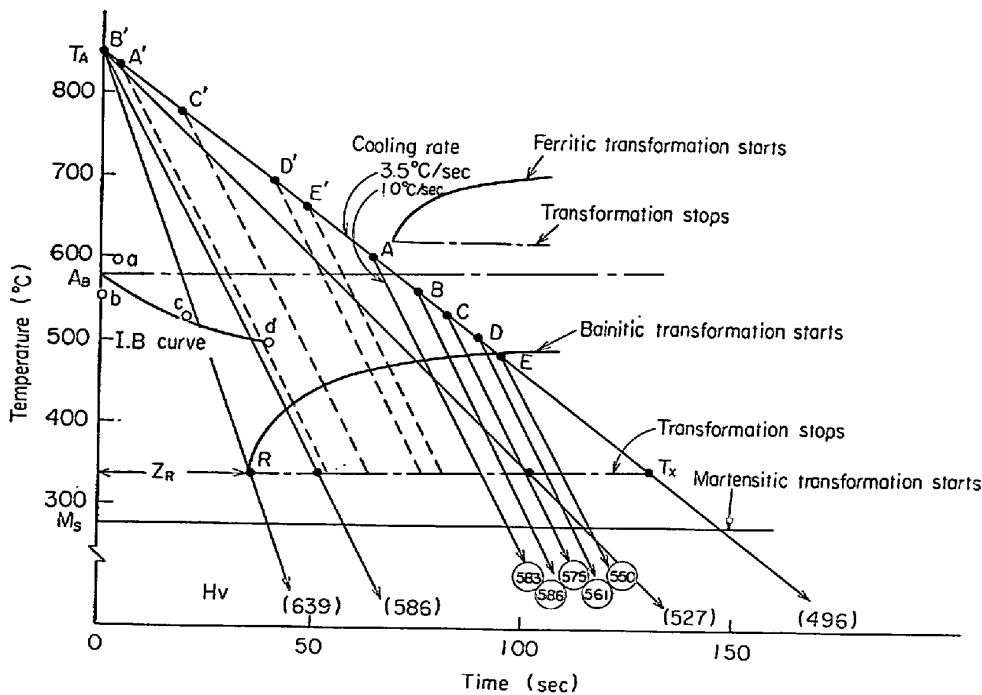


Fig. 6. CCT diagram for S-2 steel and transformation behaviors after discontinuous change of cooling rate at several points of A, B, C during continuous cooling T_A to T_x , austenitized at 850°C for 10 min.

ある。

いま、 T_A から $3.5^\circ\text{C}/\text{sec}$ で冷却していく途中の点 A (600°C), B (550°C), C (525°C), D (500°C), E (475°C) で、それぞれ冷却速度を $10^\circ\text{C}/\text{sec}$ に変更して常温まで冷却すると、硬さはそれぞれ Hv 583, 586, 575, 561, 550 となる。これらの硬さの挙動は、CCT 曲線で示されるものとは異なっていることがわかる。

そこで、冷却途中の A, B, C……点で冷却速度を変更したときの変態挙動を CCT 曲線で知るため、変更後の冷却速度で冷却したときのそれぞれの硬さの値を CCT 曲線の変態中止線の同じ硬さの位置にプロットし、その位置から変更後の冷却曲線に平行線を引いて T_A-T_X 線と交わる点をそれぞれ A', B', C'……とする。A, B, C……で冷却速度を変更し、変更後の冷却速度で冷却したときに示す実質の変態挙動は、それぞれ A', B', C'……から変更したものとしてこの CCT 曲線を用いて判断してもよいと思われる。

Fig. 6 において、冷却途中の点 A, B, C……の温度とこれらに対応する点 A', B', C'……の時間を結んだ点をそれぞれ a, b, c……とする。これら a, b, c……点を結んでできた曲線を I.B curve と名付ける。ただし I.B curve は、A, B, C……点の変態開始線に達するまでの温度範囲とする。変態が開始すると潜伏期は消費されてしまうからである。

すでに著者らは、パーライト変態において連続冷却途中で冷却速度を変更したとき、その変態挙動は、冷却途中までに消費したパーライトの潜伏期に関係していることを明らかにした¹⁵⁾。さらに、連続冷却におけるパーライトの潜伏期の消費は、 A_1 変態点から開始する潜伏期の消費曲線 (I.P curve) によって示されることを提唱した¹⁵⁾。これと同様に Fig. 6 に示した I.B curve は、 Z_R を全潜伏期 (すなわち、 $Z_R=1$) として、 T_A から T_X まで連続冷却したときのベイナイトの潜伏期の消費を示す曲線と考えられる。すなわち、連続冷却の場合のベイナイトの潜伏期の消費は、温度 A_B から開始されることを示している。ここで、 Z_R は T_A から臨界冷却速度で冷却したときのベイナイト変態開始点 R に達するまでの時間である。

3.4 連続冷却におけるベイナイトの潜伏期の消費

連続冷却におけるパーライトの潜伏期の消費については、著者らによってすでに報告されている。すなわち、パーライトの等温潜伏期を $Z_p(T)$ 、連続冷却速度を $X(T)$ とすれば、連続冷却によって温度 T_n まで冷却したときのパーライトの潜伏期の消費量 $I.P$ は

$$I.P_{(T_n)} = \int_{A_1}^{T_n} \frac{dX(T)/dT}{Z_p(T)} dT \dots\dots\dots (1)$$

(ただし、 $I.P_{(T_n)} \leq 1$)

で示される。

一方、連続冷却におけるベイナイトの潜伏期の消費は Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6 で示した結果から明らかなごとく、フェライトやパーライトの潜伏期の消費と無関係のものである。すなわち、ベイナイトの等温潜伏期を $Z_B(T)$ 、連続冷却速度を $X(T)$ とすれば、連続冷却によって温度 T_m まで冷却されたときのベイナイトの潜伏期の消費量 $I.B$ は

$$I.B_{(T_m)} = \int_{A_B}^{T_m} \frac{dX(T)/dT}{Z_B(T)} dT \dots\dots\dots (2)$$

(ただし、 $I.B_{(T_m)} \leq 1$)

で示されることになる。

(2) 式で示すように、連続冷却におけるベイナイト変態の潜伏期の消費は温度 A_B から開始され、また、その消費量はベイナイト独自の等温潜伏期に関係している。Fig. 6 で示した $I.B$ curve は (2) 式を用いて計算したものと同一になると思われる⁶⁾。ただし A_B は鋼種などによって変化する。

MANNING¹⁷⁾ らが連続冷却における潜伏期の消費を等温潜伏期から求めるに際して、ベイナイトについてはパーライトおよびフェライトとは区別して取扱っていることは著者らの示したことと一致する。しかし、彼らはベイナイトの潜伏期の開始温度を計算の便宜上から 1130°F (610°C) の一定に定めている。しかしながら等温変態の潜伏期において、フェライトおよびパーライトの曲線とベイナイトの曲線が、交錯している場合と分離している場合がある¹⁸⁾¹⁹⁾ ことから理解できるように、ベイナイト変態の潜伏期の消費が開始される温度を鋼種によらず一定の 1130°F とするよりも、著者らの示した A_B とする方が妥当と考えられる。また、彼らは TTT 曲線において、ベイナイトが独自の曲線をもっていることについては何らふれていない。

一方、AARONSON⁴⁾ はベイナイト変態が開始する最高の温度 B_S の存在することを提示し、 B_S は共析温度より $100\sim 300^\circ\text{C}$ 以下にあると説明している。また、ZENER²⁰⁾ は B_S は T_0 にほぼ等しいと説明している。ここに、 T_0 はその鋼のオーステナイトの自由エネルギーと、そのオーステナイトと同じ濃度のフェライトの自由エネルギーが等しくなる温度である。共析鋼のようにオーステナイトがパーライトあるいはベイナイトのいずれかに変態する場合は B_S の存在を認めやすいが、フェライトの変態が先行して起こりその後パーライトあるいはベイ

ナイト変態をする場合は変態組織が複雑になり、それがパーライトであるかベイナイトであるかの判断も明らかでない場合が起こり、そのため B_S の存在について十分な説明ができないことを認めている⁴⁾。 T_0 以下の温度で無拡散変態の駆動力が発生するから、 T_0 をベイナイト変態開始の最高温度とすることは物理的意味において非常に明確であるが、現象はそれほど単純ではない。

著者らの示した A_B はベイナイト変態の潜伏期をもとにして定義したもので、その物理的意味については今後の研究をまたねばならない。それ故、今ここで A_B 、 B_S および T_0 の是非を簡単に論ずることは早計であろう。

3.5 冷却速度変更によるベイナイト変態挙動を CCT 曲線から作図的に求める方法

連続冷却途中で冷却速度を変更した場合のベイナイトの変態挙動を CCT 曲線を使って作図的に求める方法について Fig. 7 によつて述べる。 Fig. 7 において、 T_A から冷却速度 α で冷却したときのベイナイト変態挙動は T_A-A 線で示される。しかし、冷却の途中 Q 点で冷却速度を β に変更した場合の冷却は $Q-B$ 線で示されるが、その変態挙動をこのままの曲線で示すと $Q'-C$ 線で示されることになる。この方法はすでに前報¹⁵⁾において、パーライト変態について述べた。すなわち、 T_A から α で冷却される場合のベイナイトの潜伏期の消費量を種々の温度について(2)式によつて求める。 Z_R を全潜伏期として、各温度の潜伏期の消費量を図上にプロットして $I.B$ curve を作成する。 Q 点から時間軸に平行線を引き $I.B$ curve と交る点を求め、その点から温度軸に平行線を引き T_A-A 線と交わる点が Q' 点である。 Q' 点から $Q-B$ 線に平行線を引くと $Q'-C$ 線が得られる。

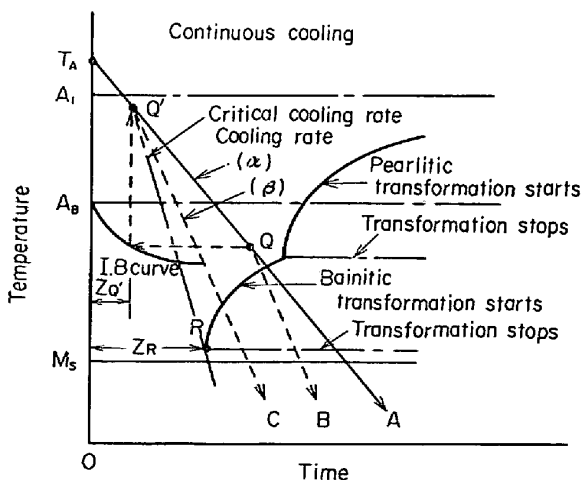


Fig. 7. Schematic diagrams showing a method to find bainitic transformation behavior when the cooling rate is discontinuously altered during the continuous cooling.

また、 Q 点からの臨界冷却速度は $Q'-R$ 線で示されることになる。ここで R は T_A から臨界冷却速度で冷却したときのベイナイト変態開始点である。いま、 Q 点からの臨界冷却速度を γ とすると、潜伏期の消費量が1になつたとき変態が開始するから、(2)式は次のようになる。

$$\frac{1}{\alpha} \int_{T_A}^{T_Q} \frac{dT}{Z_B(T)} + \frac{1}{\gamma} \int_{T_Q}^{T_R} \frac{dT}{Z_B(T)} = 1 \quad \dots (3)$$

(3)式で求めた γ と $Q' \rightarrow R$ 線で示した冷却速度はほぼ一致することは前報¹⁵⁾から理解できる。

以上、連続冷却におけるベイナイトの潜伏期について述べたが、連続冷却途中でフェライトまたはセメンタイトなどの析出変態があると、ベイナイト変態の潜伏期はかなり変化するので(2)、(3)式は成立しないことになる。このことは次報にゆずる。また、過共析鋼を球状炭化物の存在する温度範囲でオーステナイト化した場合、Fig. 4, Fig. 5におけるパーライト変態の潜伏期の消費段階で、残存炭化物の成長によりマトリックスのC濃度に変化して、ベイナイトの潜伏期に影響を与える可能性が考えられる。しかし、本研究のようにオーステナイト化によつておよそ半分(0.5% C)に当る炭化物を固溶した場合の残存炭化物の成長は、パーライト変態以前ではほとんど起こらない²¹⁾ので残存炭化物の影響は非常に小さいと考えられる。

4. 結 言

フェライトおよびパーライト変態の潜伏期の消費とベイナイト変態の潜伏期の関係、連続冷却におけるベイナイト変態の潜伏期の消費、および連続冷却途中で冷却速度を変更した場合のベイナイト変態挙動について研究した結果次のようなことが明らかになった。

(1) ベイナイト変態の潜伏期は、フェライトおよびパーライト変態の潜伏期の消費にほとんど無関係で独自の潜伏期をもち、独自の消費の挙動を示す。

(2) 連続冷却において、ベイナイト変態の潜伏期の消費が開始する独自の温度 A_B が存在する。

(3) 連続冷却途中で冷却速度を変更した場合のベイナイト変態挙動は、通常の CCT 曲線で示される変態挙動とは異つた挙動を示す。

(4) 冷却速度変更後の変態挙動を CCT 曲線から推定する方法を提案した。それは、ベイナイトの臨界冷却速度で冷却したときの潜伏期を全潜伏期として、冷却速度変更までに消費した潜伏期量だけ経過したものとみなし、そこから変更した冷却速度で冷却曲線をひくことにより達成できる。

終りに、本研究を行なうにあたり協力していただいた富士電波工機(株)取締役技術部長峰松裕行氏に謝意を表します。

文 献

- 1) 村上, 今井: 日本金属学会誌, 6 (1942), p. 145
- 2) 日本熱処理技術協会編: 熱処理の基礎, (1) (1970), p. 192
- 3) E. C. BAIN and H. W. PAXTON: Alloying Elements in Steel, ASM (1961)
- 4) H. I. AARONSON: Inst. Metals Monograph No. 33 (1969), p. 270
- 5) 近藤: 日本金属学会誌, 7 (1943), p. 193
- 6) 須藤, 本間: 日立評論, 40 (1958) 6, p. 749
- 7) J. F. LIBSCH, W. P. CHUANG, and W. J. MURPHY: Trans. ASM, 42 (1950), p. 121
- 8) 日本鉄鋼協会編: 鋼の熱処理 5 版, (1969), p. 4
- 9) R. H. ABORM: Welding J., 20 (1940), p. 414
- 10) 金沢: 日本金属学会誌, 26 (1962), p. 9
- 11) E. S. DAVENPORT: Trans. ASM, 29 (1939), p. 837
- 12) 大和久: S 曲線, (1969), p. 15 [日刊工業]
- 13) 鉄鋼工学講座: 鋼の熱処理技術, (1969), p. 41
- 14) 金子: 金属熱処理原論, (1967), p. 157 [丸善]
- 15) 清水, 田村: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2375
- 16) G. T. HIGGINS and H. J. AXON: JISI, 198 (1961), p. 46
- 17) G. K. MANNING and C. H. LORIG: Trans. AIME, 167 (1946), p. 442
- 18) R. F. HEHEMANN and A. R. TROIANO: Metal Prog., 70 (1956), p. 97
- 19) 日本熱処理技術協会編: 熱処理の基礎, (1) (1970), p. 176
- 20) C. ZENER: Trans. Amer. Inst. Min. Met. Eng., 167 (1946), p. 550
- 21) 中野, 木下: 私信