

論 文

UDC 620.181.41 : 669.112.227.3

連続冷却途中での冷却速度変更にもなる パーライト変態挙動*

清水 信 善**・田 村 今 男***

Effect of Discontinuous Change in Cooling Rate During Continuous Cooling on Pearlitic Transformation Behaviors of Steel

Nobuyoshi SHIMIZU and Imao TAMURA

Synopsis:

In this investigation, the pearlitic transformation behaviour of steel with the cooling rate discontinuously altered during continuous cooling was studied in relation to the CCT diagram of the steel. The main results are as follows:

- (1) The pearlitic transformation behaviour with the cooling rate discontinuously altered during continuous cooling was different from the transformation behaviour illustrated by usual CCT diagram.
- (2) The pearlitic transformation behaviour and the critical cooling rate with the cooling rate altered at a point during continuous cooling were observed to be related to the incubation period consumed before changing the cooling rate.
- (3) Including the degree of consumed incubation period in usual CCT diagram as a parameter, the transformation behaviour and the critical cooling rate can be estimated from a conventional CCT diagram.
- (4) If the same amount of the incubation period was consumed by either continuous cooling or isothermal holding, the transformation behaviour was virtually the same in subsequent cooling when the cooling started from the same temperature.

1. 緒 言

連続冷却変態線図（以下 CCT 曲線と呼ぶ）は、1つの冷却曲線群による、種々な冷却速度での変態挙動をあらわしている。CCT 曲線の測定法には、種々な冷却速度で冷却を行ない、冷却途中のある温度から室温まで急冷して、そのときの組織および硬さの変化から求める方法¹⁾²⁾、ジョミニー試験より求める Leidholm 法³⁾、熱膨脹試験より求める Cottrell⁴⁾、Rose-Peter⁵⁾、Steven-Mayer 法⁶⁾などがある。また、TTT 曲線より作図的に求める Grange-Kiefer⁷⁾ および計算より求める Manning-Lorig⁸⁾、Pumphrey-Jones 法⁹⁾もある。これら CCT 曲線の測定における冷却速度は、ほとんどの場合冷却速度の急激な変化のないニュートン冷却、ないしは、ほぼ等速に近い状態で測定された CCT 曲線であ

る。

しかし、通常の熱処理操業においては、冷却速度を途中で変更する場合がある。特に油焼入れにおいては、蒸気膜、沸騰、対流の各段階での冷却速度の顕著な変化¹⁰⁾がある。このように、冷却速度が途中で変化すると、先に求めた CCT 曲線で示されるものとは異なった変態挙動を示すため、その曲線をそのまま活用することは合理的ではない。冷却速度を途中で変更した場合に、もとの CCT 曲線はどのように変化し、どのように改良したらよいかを知ることができれば非常に有効で、一般熱処理操業での活用面が大幅に拡大される。冷却速度を途中で変更した場合の CCT 曲線についての研究は、いまだ見当らず、ただ、大和久¹¹⁾が S 曲線のパラドックスとして概括的な説明をしているが、これも実際とは、かなり異なった結果を生じている。

* 昭和 48 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 49 年 11 月 13 日受付 (Received Nov. 13, 1974)

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

*** 京都大学工学部 工博 (Kyoto University)

本研究では、冷却途中の潜伏期の消費とともに、その後の冷却による変態挙動が変化してゆくことから、その消費の仕方を調べ、CCT 曲線との関係について検討し、冷却速度が途中で変化した場合でも適用できる拡大された CCT 曲線を求めることについて述べ、また、等温保持によつて潜伏期を消費した場合のその後の等温または冷却変態挙動についても検討し、CCT 曲線との関係をも明らかにする。更に、連続冷却途中のある点からの臨界冷却速度の求め方についても考察検討した。

2. 供試材および実験方法

供試材の化学組成を Table 1 に示す。この鋼は球状化焼なましをした直径 5.2 mm ϕ の SUJ 2 材である。まず、CCT 曲線を求めるため、冷却速度を変える保護材として、SUS 27 の種々な直径の棒材 (7~28 mm ϕ $\times$ 50 mm) を使用した。保護材の直径を変えることによつて、試片を種々な冷却速度で冷却できるようにした。それぞれの保護材の中心部に 5.4 mm ϕ の孔をあけて、そこに供試材を入れた。脱炭を防止するため木炭中で 1050°C $\times$ 15 min のオーステナイト化後、供試材が保護材に入つたままの姿で空冷し、その空冷途中の種々な温度から供試材のみを取り出して、5% 食塩水中に焼入れして組織を凍結した。その後、硬さ (HRC) 測定と光学顕微鏡観察を行なつて変態量を測定した。この操作を種々な冷却速度について行なうことにより、この鋼の CCT 曲線を求めた。オーステナイト化の温度を高くしたのは、冷却途中でパーライト変態が起らないようにするためである*。組織観察のための腐食には 5% ナイタル液を使用した。

つぎに、冷却速度を途中で変更した場合の変態挙動を求めるために、同一のオーステナイト化後、空冷途中の種々な温度から供試材のみ、または、8 mm ϕ 保護材に入つたまま、二重に用意したより大きな保護材から取り出して常温まで空冷した。その後、硬さ測定および組織観察から変態挙動を調べた。これらの冷却曲線は、供

試材の中心部に外径が 1 mm ϕ の SUS 42 保護シース熱電対を挿入して、ペン書きオシログラフ (U-125M 型日本電子科学(株)製) に記録させた。

つぎに、TTT 曲線を求めるため、同一のオーステナイト化後、ただちに供試材を種々な温度の鉛浴中に焼入れして、その温度に種々な時間等温保持した後、5% 食塩水中に焼入れして組織を凍結した。その後、硬さ測定および組織観察より TTT 曲線を求めた。

さらに、等温保持によつて潜伏期消費後の冷却による変態挙動を求めるため、種々な温度の等温保持による潜伏期の消費途中で、供試材を鉛浴中より取り出して空冷した。その後、硬さ測定および組織観察から変態挙動を求め、潜伏期の等温消費と CCT 曲線との関係について検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 連続冷却途中で冷却速度を変更した場合の変態挙動

3.1.1 連続冷却変態線図

使用した供試材 (SUJ 2) の CCT 曲線図** (オーステナイト化は 1050°C $\times$ 15 min) を求めると、Fig. 1 (a) に示すようになる。すなわち、オーステナイト化温度 (T_A) からほぼ等速な冷却速度で冷却され、パーライト変態の開始とともに変態熱が発生するので冷却速度がおそくなり、変態の終了とともに再びもとの等速に近い冷却速度にもどる。たとえば、 T_A から冷却速度が 7.5°C/sec で冷却されると、58 sec 後の 615°C で変態が開始し、その後冷却速度は変態熱のために点線で示す様に変化し、80 sec 後の 535°C で変態は中止され、その後はもとの冷却速度に近い速度で冷却されマルテンサイト変態をし常温に至る。この低温部は本研究では重要でないので省略し、そのかわり変態状況がわかるように、変態中止線または完了線の直下に硬さ (HRC) とパーライト変態量 (%) を記述した。すなわち、この例の場合の硬さは HRC 55 で、パーライトの変態量は 35%、残りはマルテンサイトである (少量の残留オーステナイトを含む)。

Fig. 1(b) は、Fig. 1(a) の変態熱を修正して作図した CCT 曲線で変態開始線は同じであるが、変態中止線および完了線は、便宜上変態開始前までの速度がそのまま続行されて冷却し、Fig. 1(a) での変態中止または完了時間まで冷却されたと考えたときの変態中止および完了線である。ここでは変態挙動のみの解析を目的とし

** 一般に CCT 曲線の時間軸は対数目盛で表わしているが、ここでは解析を容易にするため、普通目盛で表わすことにし、これを CCT 曲線図と呼ぶ。

Table 1. Chemical compositions of steel used (wt%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
1.05	0.27	0.40	0.017	0.009	1.46	0.08	0.05

* CCT 曲線¹³⁾でオーステナイト化温度が 860°C の場合は冷却途中でパーライト変態が認められるが、1050°C になるとパーライト変態は認められない。このことは、TTT 曲線¹³⁾で 1050°C のオーステナイト化では、パーライトの潜伏期が、パーライトに比べて極度に長時間になっていることから理解できる。なを、供試材の球状化した炭化物粒径は平均 0.5 μ で 1050°C のオーステナイト化で炭化物は完全に固溶した状態である。

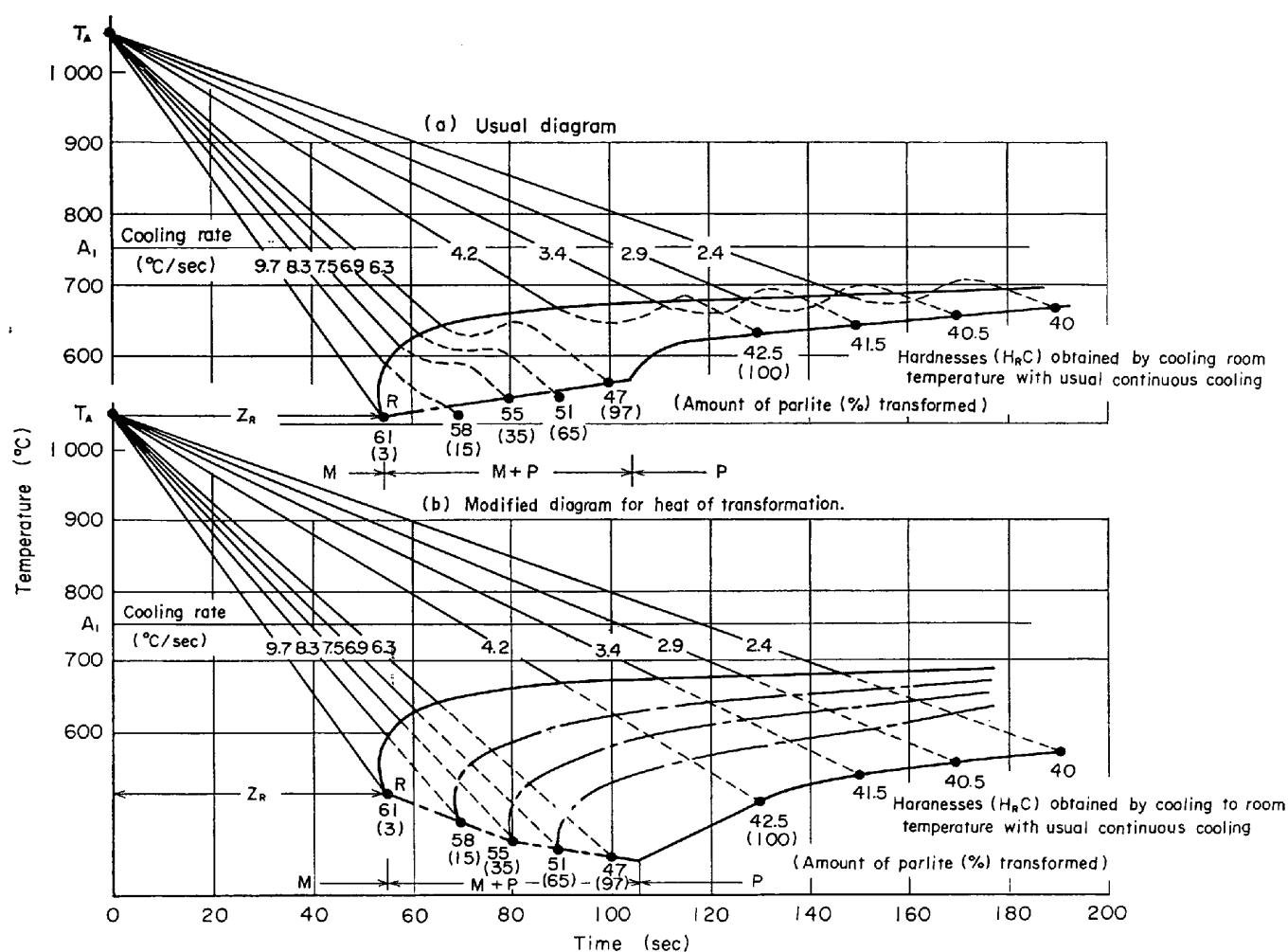


Fig. 1. Continuous cooling transformation diagram of steel used, austenitized at 1050°C for 15 min.

ており、変態途中や完了時を問題にしないので解析の便宜上このようにしても差支えない。それゆえ、これらの線で示される温度は、Fig. 1(a) より低温となつてゐる。たとえば、Fig. 1(b) で冷却速度 7.5°C/sec の場合は、Fig. 1(a) のときと同じように、 T_A から 58 sec 後の 615°C で変態が開始し、変態中止は 80 sec 後である。冷却速度は、変態開始前の速度の 7.5°C/sec がそのまま続行して冷却されたとしたため、変態中止温度が Fig. 1(a) のときより低温になつてゐるが、変態の進行状態は Fig. 1(a) と全く同じで、硬さで H_{RC} 55、パーライト変態量 35% である。

Fig. 1(b) を作成したのは、後述の連続冷却途中で冷却速度を変更した場合の変態挙動の解析を容易にするためである。なお、冷却速度が 9.7°C/sec より速い場合は、パーライト変態は起こらずにマルテンサイトになり、9.7~6.3°C/sec では、パーライト変態が途中で中止されてマルテンサイトになり、6.3°C/sec より遅い場合は、全部パーライト変態を起こす。これらの変態の領域

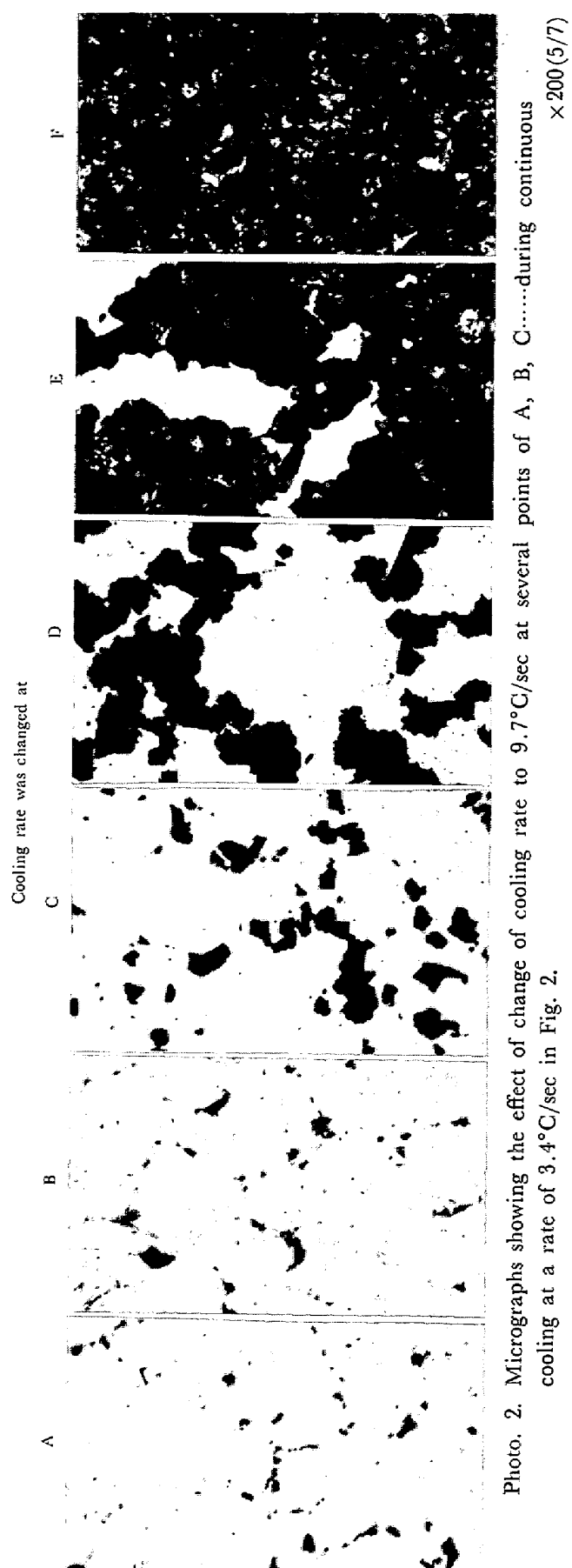
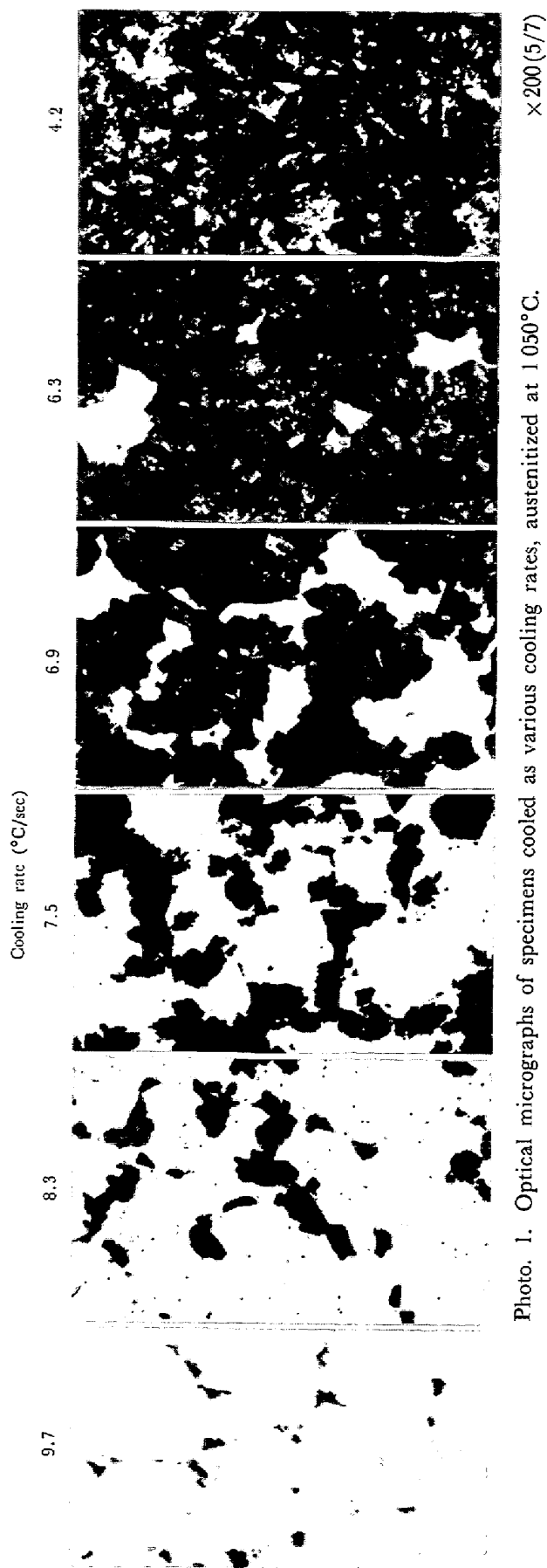
を図の中で、M、M+P、P、によつて示してある。この場合のマルテンサイトには、かなりの残留オーステナイトを含んでいるため、硬さは少し低い値を示している*。

Fig. 1 における種々な冷却速度でのパーライト変態状況は、Photo. 1 に顕微鏡写真で示す。黒色部はパーライト、白色部はマルテンサイト（残留オーステナイトを含む）である。

3.1.2 冷却途中で冷却速度を変更したときの変態挙動

連続冷却途中で冷却速度を故意に変更した場合の変態挙動と、変更しない場合の CCT 曲線との関係について Fig. 2 で説明する。Fig. 2(a) および Fig. 2(b) の変態開始線、中止線および完了線は、それぞれ、先に求めた Fig. 1(a) および Fig. 1(b) のそれと同じものである。いま、Fig. 2(a) で、オーステナイト化後 T_A より冷却速度 3.4°C/sec で冷却してゆくと、E 点で変

* 連続冷却において、パーライト変態開始以前に炭化物の析出がある¹³⁾。本研究でも粒界に炭化物の析出が認められるが、本研究に与える影響は少ないので省略した。



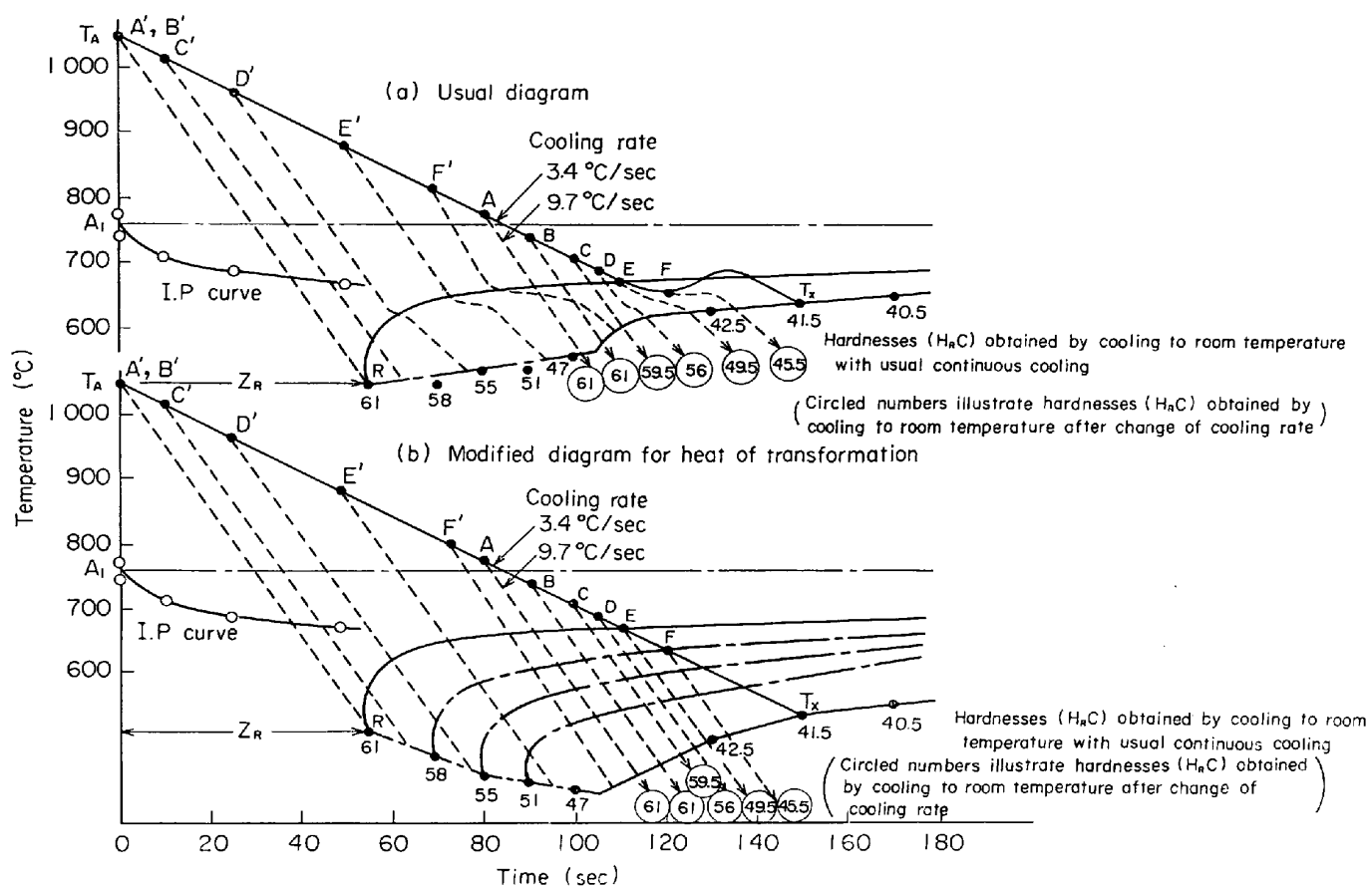


Fig. 2. CCT diagram and transformation behaviors after discontinuous change of cooling rate at several points of A, B, C.....during continuous cooling from T_A to T_X , austenitized at 1050°C.

態が開始し、その後変態熱のため冷却速度がおそくなり、変態は T_X 点で完了する。この場合の常温まで冷却した後の硬さは HRC 41.5 で、組織は 100% パーライトであった。ところが、Fig. 2(a) において、 T_A から冷却速度 3.4°C/sec で冷却する途中の A, B, C, D, E, F 点で、冷却速度を 9.7°C/sec に変更すると、冷却途中に変態熱の影響もあつて、冷却速度はそれぞれ点線で示すようになり常温に至る。この場合の硬さ (HRC) は、それぞれ点線の末端の○内に数字で示してある。たとえば、 T_A より 3.4°C/sec の冷却速度で冷却される途中の D 点で、冷却速度を 9.7°C/sec に変更すると、D 点より点線で示すように冷却が変わり常温に達し、このときの硬さは HRC 56 である。なお、 T_A より 3.4°C/sec で冷却される途中の A, B, C, D, F 点で、冷却速度を 9.7°C/sec に変更した場合の変態の様子は、顕微鏡写真で Photo. 2 に示す。このように、冷却途中で冷却速度を変更すると、先に求めた変更しない場合の CCT 曲線に示されるものとは、異なつた変態挙動を示すことがわかる。

3.1.3 冷却速度変更後の変態挙動と頭初の CCT 曲線との関係

そこで、冷却速度を変更しないときの CCT 曲線との関係を明らかにするために、たとえば Fig. 2(a) で、冷却途中の D 点で冷却速度を変更した場合の硬さは HRC 56 であるから、先に求めた CCT 曲線の変態中止線、また完了線上の同一の硬さ HRC 56 を示す点から、D 点より変更した冷却線 (点線で示す) に平行線を引いて、 T_A - T_X 線と交る点を D' とする。したがつて、冷却途中の D 点で冷却速度を変更する場合に、先に求めた CCT 曲線を用いて知るためには、 D' 点から変更したものと考えればよい。同様に、冷却途中の A, B, C.....点で冷却速度を変更した場合について求めると、それぞれ A', B', C'点が得られる。しかし、変態熱の影響があるため、A, B, C.....点の対応点 A', B', C'点を求めるのはかなり困難である。

そこで便宜上 Fig. 2(b) のように変態熱を修正した線図を用いると、容易に対応点が求められる。すなわち、Fig. 2(b) においても Fig. 2(a) のときと同じ方

法で、 T_A から冷却速度 3.4°C/sec で冷却する途中の A, B, C……点で、冷却速度を 9.7°C/sec に変更して得られた硬さ (HrC と O 内に数字で示す) を、それぞれ先に求めた CCT 曲線の変態中止線、または完了線上の同一の硬さの点から、変更した 9.7°C/sec の冷却線に平行線を引いて T_A-T_X 線と交る点を求めると、それぞれ A', B', C'……点が得られる。Fig. 2(a) で求めた A', B', C'……点と、Fig. 2(b) で求めた A', B', C'……点は、 T_A-T_X 線上においてそれぞれ同じ対等の位置にあることが判明した。このことは、変態熱を修正した CCT 線図で解析しても、同じ結果が得られることを意味するので、以後は、解析の容易な変態熱を修正したもので検討することにする。

このようにして、冷却途中の A, B, C……点で冷却速度を変更する場合のそれぞれの対応点 A', B', C'……点は、先に求めた CCT 曲線図のいかなる位置にあるかを検討するため、A, B, C……点のそれぞれの温度と、A', B', C'……点の T_A からのそれぞれの時間を対応させて決定される点を結んでできた曲線を、I.P 曲線 (潜伏期消費曲線) と定義する (Fig. 2 で I.P curve と示してある)。ただし、I.P 曲線は、A, B, C……点の変態開始線に達するまでの温度範囲とする。変態が開始すれば、潜伏期は消費されてしまうからである。

つぎに、Fig. 2 の場合より遅い 2.4°C/sec で T_A より冷却し、途中で 7.5°C/sec と、 9.7°C/sec の2つに変更した場合について、Fig. 3 に示す。Fig. 3 で示す変態開始線、中止線、および完了線は、Fig. 1(b) と同

じものを示す。Fig. 3 において、 T_A より 2.4°C/sec で冷却される途中の A, B, C……点で、冷却速度を 7.5°C/sec と、 9.7°C/sec にそれぞれ変更して常温まで冷却したときの硬さ (HrC) は、それぞれ変更した冷却曲線 (点線で示す) の末端の O 内に数字で示してある。たとえば、 T_A より 2.4°C/sec で冷却してゆくと T_X で変態が完了し常温まで冷却され、このときの硬さは HrC 40 である。しかし、 2.4°C/sec で冷却する途中の D 点で、速度を 9.7°C/sec に変更して常温まで冷却すると硬さは HrC 49 になり、 7.5°C/sec に変更すると HrC 44.5 になり、5% 塩水に焼入れすると HrC 60.5 となつた。先に求めた CCT 曲線との関係を明らかにするために、これらの硬さを先に求めた CCT 曲線の変態中止線、または完了線上の同一の硬さの点から、変更した冷却曲線に平行線を引き T_A-T_X 線と交わる点を D' とする。同じようにして、A, B, C……点の対応点 A', B', C'……を求めることができる。Fig. 2 で求めたときと同じようにして、A, B, C……点の温度と、これに対応する A', B', C'……点の T_A からの経過時間から求まるそれぞれの点を結んで、I.P 曲線を求めて図示する (Fig. 3 で I.P curve として示す)。

また、Fig. 3 において、 2.4°C/sec で連続冷却する途中の A, B, C, ……点から、冷却速度を 7.5°C/sec と 9.7°C/sec に変更して常温まで冷却した場合の顕微鏡写真を Photo. 3 に示す。

いまここで、Fig. 1, 2, 3, において、臨界冷却速度での T_A から変態開始線に達する点を R、時間を Z_R と

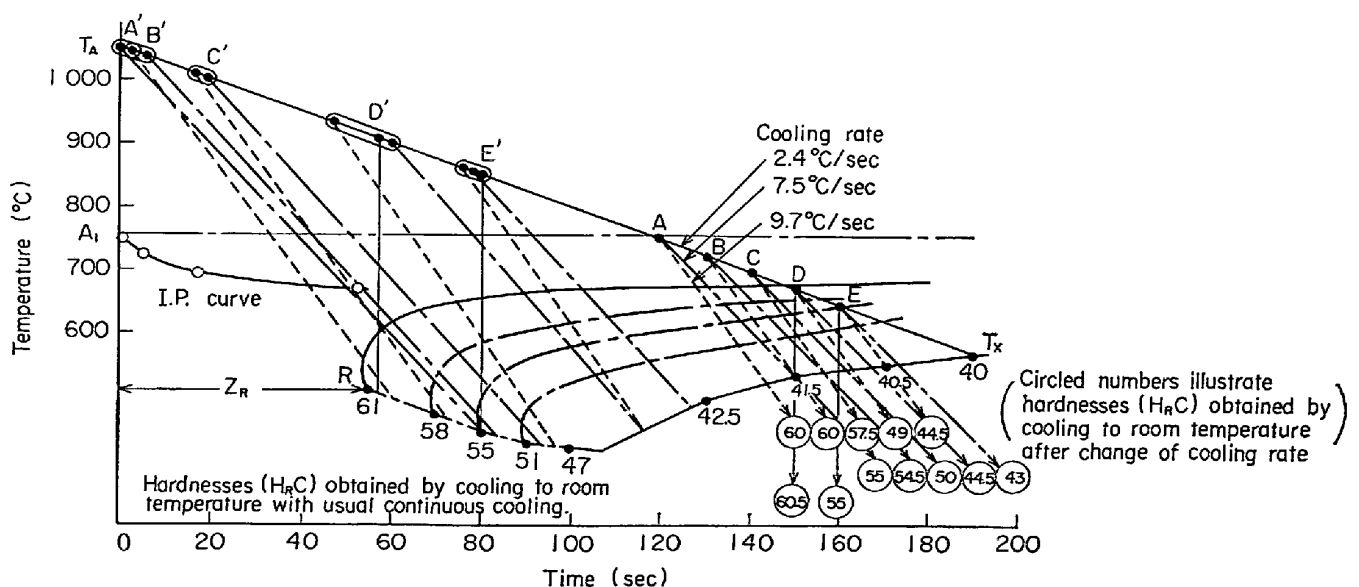


Fig. 3. CCT diagram and transformation behaviors after discontinuous change of cooling rate at several points of A, B, C……during continuous cooling from T_A to T_X , austenitize F at 1050°C .

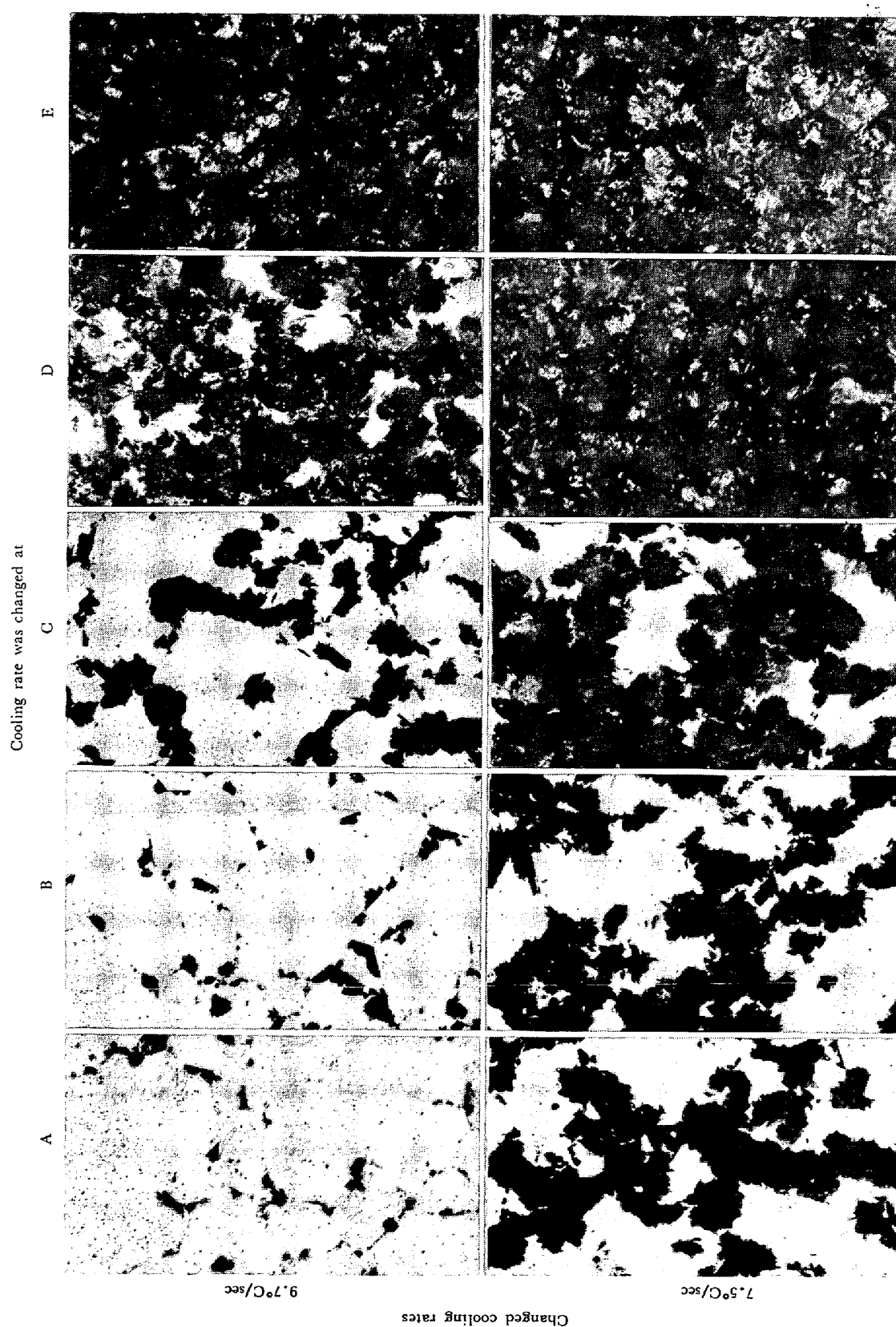


Photo. 3. Micrographs showing the effect of changes of cooling rate to 9.7°C/sec and 7.5°C/sec at several points of A, B, C.....during continuous cooling at a rate of 2.4°C/sec in Fig. 3.

×200 (7/9)

定義しておく。すなわち、 R は CCT 曲線の鼻に相当し、 Z_R は CCT 曲線における臨界冷却速度での潜伏時間に相当する。

3.2 連続冷却途中の潜伏期の消費

3.2.1 潜伏期の消費

連続冷却中に潜伏期が、どのように消費されてゆくかについて検討する。Fig. 1 に示す CCT 曲線を求めたときと同じ条件でオーステナイト化 ($1050^{\circ}\text{C} \times 15 \text{ min}$) 後、種々な温度の鉛浴中に焼入し、その温度で種々な時間保持した後 5% 塩水に焼入して組織を凍結し、硬さの測定および組織の観察から、各温度での等温変態開始時間を求め、これを TTT の記号であらわすことにし、その一部を Table 2 に示す。また、これら各温度での等温変態開始時間を図に示すと、Fig. 4 の TTT で示す曲線となる。また、Fig. 1 で求めた種々な冷却速度での変態開始時間も CCT として Fig. 4 に示す。

つぎに、同じオーステナイト化後、 T_A より冷却速度 3.4°C/sec で冷却し、種々な温度まで達したとき、直ちにその温度の鉛浴に移して、種々な時間等温保持した

Table 2. Consumption of incubation period at various temperatures during continuous cooling at a rate of 3.4°C/sec .

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	TTT (sec)	X_n (sec)	TTT' (sec)	I.P
730	60	95	150	0.08
710	28	100	123	0.18
690	21	105	115	0.52
675	18	110	110	1.0

TTT: isothermal transformation starting time
 X_n : continuous cooling time from austenitizing temperature
 TTT': transformation starting time during isothermal holding at various temperatures after continuous cooling
 I.P: consumption degree of incubation period

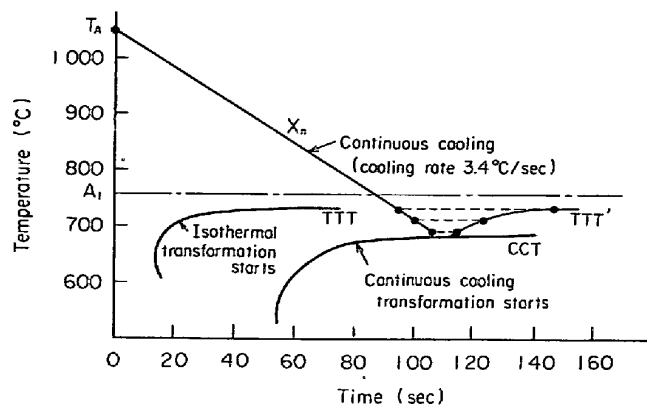


Fig. 4. Transformation starting time (TTT') during isothermal holding at various temperatures after continuous cooling (X_n).

後、5% 塩水に焼入し組織を凍結して硬さの測定および組織の観察を行なった。このときの T_A からの変態開始までの時間を TTT' であらわし、この値を Table 2 に示す。また、冷却速度 3.4°C/sec で冷却する途中等温保持に移行するまでの時間を X_n とし、これも Table 2 に示してある。このように、連続冷却と等温保持の組合せによつて求めた変態開始時間を各温度ごとに結んだ線で示すと Fig. 4 の TTT' で示す曲線となる。

等温保持中その温度では、潜伏期の消費速度が同じであると仮定すると、連続冷却における冷却途中での X_n までの潜伏期の消費量 (I.P) は次式で示される。

$$I.P = \frac{TTT - (TTT' - X_n)}{TTT} \quad (1)$$

ただし $I.P \leq 1$

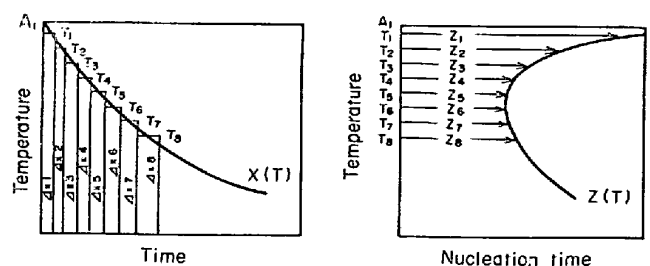
たとえば、 T_A より冷却速度 3.5°C/sec で 730°C まで冷却されたときの潜伏期の消費量は、Table 2 または Fig. 4 から、 $TTT = 60_{(\text{sec})}$, $TTT' = 150_{(\text{sec})}$, $X_n = 95_{(\text{sec})}$, が得られ、これを (1) 式に代入すれば、

$$I.P_{(730^{\circ}\text{C})} = \frac{60 - (150 - 95)}{60} = 0.08 \text{ となる。同じように}$$

して、冷却速度 3.4°C/sec の場合の各温度までの潜伏期の消費量を求めると、Table 2 に示すようになる。

$I.P = 1$ のとき潜伏期を 100% 消費したことを示す。

一方、SCHEIL ら⁴⁾¹²⁾は連続冷却による冷却は Fig. 5 に示すように、 $T_1, T_2, T_3, \dots$ の各温度で、 $\Delta X_1, \Delta X_2, \Delta X_3, \dots$ の時間等温保持しながら冷却したときの、この段階を無限に細かくしたときと同じであると考えた。いま、 $T_1, T_2, T_3, \dots$ の温度における等温保持のときの潜伏期を、それぞれ $Z_1, Z_2, Z_3, \dots$ とすると、連続冷却の場合はこれらの温度でそれぞれ $\Delta X_1/Z_1, \Delta X_2/Z_2, \Delta X_3/Z_3, \dots$ だけ潜伏期を消費しながら冷却してゆき、これらの和が 1 になったとき潜伏期を全部消費して変態



$\Delta X_1, \Delta X_2$, etc; infinitesimal subdivisions of cooling time.
 T_1, T_2 , etc; temperatures to be held for $\Delta X_1, \Delta X_2$, etc, respectively.
 Z_1, Z_2 , etc; nucleation time corresponding to T_1, T_2 , etc, respectively.

Fig. 5. Schematic diagram showing how incubation period is consumed during continuous cooling ($X(T)$).¹²⁾

が始まる。すなわち、連続冷却の場合の温度 T_n までの潜伏期の消費量 ($I.P.(T_n)$) は

$$I.P.(T_n) = \Delta X_1/Z_1 + \Delta X_2/Z_2 + \Delta X_3/Z_3 \dots \dots \dots$$

$$\Delta X_n/Z_n = \sum_{X=0}^{X_n} \Delta X(T)/Z(T)$$

$$= \int_{A_1}^{T_n} \frac{dX(T)/dT}{Z(T)} dT \dots \dots \dots (2)$$

で示される。

連続冷却速度が 3.4°C/sec の場合の潜伏期の消費を、(2) 式によつて 10°C ごとに区分して図的計算で求めると、Table 3 に示すようになる。ここに示す $Z(T)$ は、各温度における等温変態開始時間で、Fig. 4 に示す TTT 曲線の各等温開始時間の値と同じものであるが、ここでは特にこれを等温核生成時間と呼ぶことにする。

3.2.2 CCT 曲線との対応

Fig. 2 で示した I.P 曲線と、Table 2 で求めた I.P および Table 3 で求めた I.P を、まとめて Fig. 6 に

Table 3. Consumption degree of incubation period calculated by E. Scheil's equation (2) at various temperatures during continuous cooling at a rate of 3.4°C/sec . (refer Fig. 5)

Temp. ($^\circ\text{C}$)	Nucleation time $Z(T)$ (sec)	$\frac{dX/dT}{Z(T)} dT$	Consumption degree of incubation period I.P
750	2 400		
740	100	0.03	0.03
730	60	0.05	0.08
720	35	0.08	0.16
710	28	0.11	0.27
700	22	0.13	0.40
690	20	0.15	0.55
680	18	0.16	0.71
670	17	0.17	0.89

$dX = 2.95 \text{ sec}, dT = 10^\circ\text{C}$

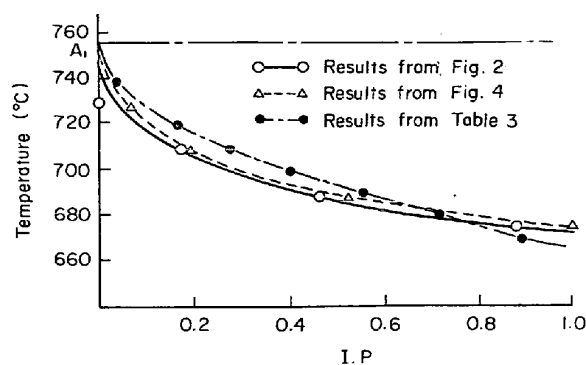


Fig. 6. Consumption degree of incubation period during continuous cooling at a rate of 3.4°C/sec .

あらわすと、3 者がほとんど同じ関係にあることがわかる。すなわち、Fig. 2 において定義した I.P 曲線は、連続冷却において Z_R を 1 としたときの潜伏期の消費状況を示した曲線であるといえる。Fig. 2 において、CCT 曲線における臨界冷却速度 (9.7°C/sec) での変態開始線に達するまでの時間を Z_R とし、 A' , B' , C' ……の各点の T_A からの経過時間をそれぞれ $Z_{A'}$, $Z_{B'}$, $Z_{C'}$ ……とすると、 $Z_{A'}/Z_R$, $Z_{B'}/Z_R$, $Z_{C'}/Z_R$, ……は、連続冷却途中の A , B , C , ……点までに消費された潜伏期と同じ関係にあることがわかる。また、F 点のように少し変態した場合の $Z_{F'}$ は、変態中止線上の同じ変態量に対応する時間と、同じ位置にあることがわかる。

同じようにして、Fig. 3 に示した I.P 曲線についても検討したが、Fig. 2 の場合のときと全く同じ関係にあることが明らかになった。また、Fig. 2, Fig. 3 において、連続冷却途中の A , B , C ……点で冷却速度を変更しなかつた場合の冷却曲線は、当然、すべて先に求めた CCT 曲線の T_X 点を通り、また、 $A'-T_X$, $B'-T_X$, $C'-T_X$, ……線もすべて T_X 点を通り変態挙動を示すことになる。

以上の結果から、連続冷却途中で冷却速度を変更した場合の変態挙動、ならびに冷却途中のある時点からの臨界冷却速度を作用的に求める方法について Fig. 7 で説明する。いま、オーステナイト化後、 T_A より冷却速度 α (温度/時間) で冷却曲線 X で冷却する途中のある時点 A , B , C で、冷却速度を変更する場合は、まず A , B , C のそれぞれの対応点 A' , B' , C' を求めて、 A' , B' , C' から変更した冷却曲線に平行線を引けば、先に求めた CCT 曲線から変態挙動が求められる。 A' , B' , C' 点を求める方法は、(2) 式によつて冷却速度 α のときの各温度に

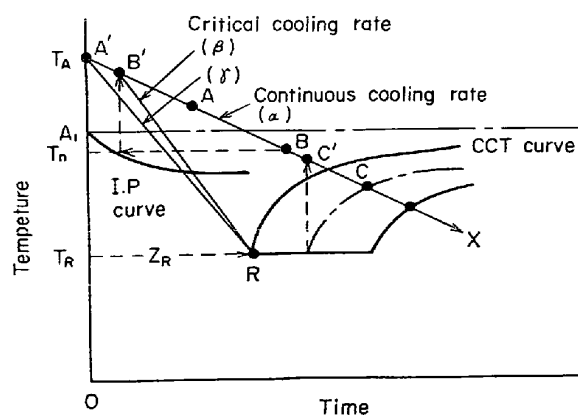


Fig. 7. Schematic diagram showing a method to find transformation behavior and critical cooling rate when the cooling rate is altered during the continuous cooling.

達するまでの潜伏期の消費を計算で求める (Table 3 で求めた方法を参照). このようにして求めた各温度に達するまでの消費を, 先に求めた CCT 曲線での臨界冷却速度で温度 T_A から変態開始点 R に達するまでの時間 Z_R を 1 として, CCT 曲線図上にプロットして, これらの点を結んで I.P curve を図示する (Fig. 7 の I.P curve 参照). A 点は A_1 以上の温度であるから, I.P = 0 となり, したがって A' 点は T_A 点と同じ位置となる. B 点から水平線を引き I.P curve と交わる点から垂直線を引き, T_A -X 線と交わる点が B' 点となる. C までに変態した同一変変量の変態中止線から垂直線を引き, T_A -X 線と交わる点が C' 点である.

3.2.3 臨界冷却速度

つぎに, 臨界冷却速度が潜伏期の消費にともなつて, 変化してゆくことについて述べる. Fig. 7 において, T_A から連続冷却したときの CCT 曲線で示される臨界冷却速度を γ (温度/時間) とし, γ で冷却したときの変態開始点を R とし (R は CCT 曲線の鼻に当たる点である), そのときの温度を T_R とする. T_A よりある冷却速度 α で冷却し, その冷却途中の変態開始までの点, A および B からの臨界冷却速度は, それぞれの対応点, A' および B' と R を結んだ線の勾配となる. すなわち, 連続冷却途中の A 点からの臨界冷却は A'-R 線で示される. A 点は A_1 以上の温度でいまだ潜伏期を消費していないので, 初期の CCT 曲線上の臨界冷却速度 (T_A -M 線) の γ と同じである. B 点からの臨界冷却は B'-R 線で示され, この冷却速度を β (温度/時間) とする. B 点は A_1 以下の温度で潜伏期を消費しているため, β は γ より大きい冷却速度となる.

臨界冷却速度が冷却途中での潜伏期の消費量に応じて変化する様子を一般式で示すと次のようになる. I.P = 1 のときに変態が開始するのであるから, T_A からの臨界冷却速度 γ は (2) 式より

$$\frac{1}{\gamma} \int_{A_1}^{T_R} \frac{dT}{Z(T)} = 1 \dots \dots \dots (3)$$

すなわち

$$\gamma = \int_{A_1}^{T_R} \frac{dT}{Z(T)} \dots \dots \dots (4)$$

冷却速度 α で冷却している途中の温度 T_n からの臨界冷却速度を β とすると

$$\frac{1}{\alpha} \int_{A_1}^{T_n} \frac{dT}{Z(T)} + \frac{1}{\beta} \int_{T_n}^{T_R} \frac{dT}{Z(T)} = 1 \dots \dots \dots (5)$$

が成立する.

実際の場合に, これらの関係式が成立つかどうかを検討してみる. いま, Fig. 2 において, 臨界冷却速度は

T_A -R 線で示され, この冷却速度は $9.7^\circ\text{C}/\text{sec}$ である. いま, (2) 式を使つて T_A より冷却速度 $9.7^\circ\text{C}/\text{sec}$ で R 点まで冷却したときの潜伏期の消費量を, 10°C 区分ごとに求めると Table 4 に示すようになる. すなわち, R 点 (温度は 520°C , 時間は 55sec の点) では, Fig. 2 の CCT 曲線で示すところでは, 潜伏期の消費量は 1 であるが, (2) 式を用いて計算で求めると, Table 4 に示すように 0.962 となり, ほぼ 1 に等しい値を示すことから, (2) 式を使用しても大差がないことがわかつた. つぎに, Fig. 2 において, T_A より $3.4^\circ\text{C}/\text{sec}$ の速度で冷却する途中の C 点および D 点からの臨界冷却速度は, それぞれ対応点の C' および D' と R を結んだ線で示される. すなわち, C'-R 線および D'-R 線が作図から求められる臨界冷却曲線であり, C'-R 線の勾配から冷却速度は $11.1^\circ\text{C}/\text{sec}$ となり, D'-R 線の勾配から冷却速度は $14.8^\circ\text{C}/\text{sec}$ となる. また, C 点および D 点までの潜伏期の消費量は, それぞれ $Z_{C'}/Z_R$ および $Z_{D'}/Z_R$ である. すなわち, $Z_{C'}/Z_R$ は 0.20 で $Z_{D'}/Z_R$ は 0.46 である (Fig. 2 より $Z_{C'} = 10\text{sec}$, $Z_{D'} = 25\text{sec}$, $Z_R = 55\text{sec}$). (5) 式において, T_n は C 点では 710°C , D 点では 690°C および T_R は 520°C を代入し, また, T_A から R まで臨界冷却速度 ($9.7^\circ\text{C}/\text{sec}$) で冷却したときの潜伏期の消費量は, (2) 式から求めると 0.962 であつたから, 1 の代わりに 0.962 を代入し, C 点からの臨界冷却速度を β_C とし, D 点からの臨界冷却速度を β_D とすれば, (5) 式はそれぞれ次のように書き替えられる.

$$\frac{1}{\alpha} \int_{A_1}^{710^\circ\text{C}} \frac{dT}{Z(T)} + \frac{1}{\beta_C} \int_{710^\circ\text{C}}^{520^\circ\text{C}} \frac{dT}{Z(T)} = 0.962 \dots (5c)$$

$$\frac{1}{\alpha} \int_{A_1}^{690^\circ\text{C}} \frac{dT}{Z(T)} + \frac{1}{\beta_D} \int_{690^\circ\text{C}}^{520^\circ\text{C}} \frac{dT}{Z(T)} = 0.962 \dots (5d)$$

ここで, $\frac{1}{\alpha} \int_{A_1}^{710^\circ\text{C}} \frac{dT}{Z(T)}$ は $Z_{C'}/Z_R$ に等しく 0.20 である.

また, $\frac{1}{\alpha} \int_{A_1}^{690^\circ\text{C}} \frac{dT}{Z(T)}$ は $Z_{D'}/Z_R$ に等しく 0.46 であるから, これらを, それぞれ, (5c) および (5d) 式に代入して, β_C および β_D を計算で求めると, β_C は $11.0^\circ\text{C}/\text{sec}$ となり, β_D は $14.6^\circ\text{C}/\text{sec}$ となる. これらの計算結果は, 各温度ごとに潜伏期の消費量として Table 4 に示してある. すなわち, T_A より C 点 (710°C) まで $3.4^\circ\text{C}/\text{sec}$ の冷却速度で冷却したときの潜伏期の消費量は, Fig. 2 の $Z_{C'}/Z_R$ 関係から 0.20 であつた.

C 点から R 点 (520°C) までの冷却速度 β_C を (5c) 式で求めると, β_C が $11.0^\circ\text{C}/\text{sec}$ のとき, R 点に達したときの潜伏期の消費量が 0.968 となり, 0.962 に最も

Table 4. Consumption degree of incubation period calculated by equation (2) with various cooling patterns in Fig. 2.

		$\begin{array}{c} 9.7^{\circ}\text{C/sec} \\ T_A \xrightarrow{\quad} R \\ (1050^{\circ}\text{C}) \quad (520^{\circ}\text{C}) \\ \textcircled{1} \end{array}$		$\begin{array}{c} 3.4^{\circ}\text{C/sec} \quad 11.0^{\circ}\text{C/sec} \\ T_A \xrightarrow{\quad} C \xrightarrow{\quad} R \\ (1050^{\circ}\text{C}) \quad (710^{\circ}\text{C}) \quad (520^{\circ}\text{C}) \\ \textcircled{2} \end{array}$		$\begin{array}{c} 3.4^{\circ}\text{C/sec} \quad 14.6^{\circ}\text{C/sec} \\ T_A \xrightarrow{\quad} D \xrightarrow{\quad} R \\ (1050^{\circ}\text{C}) \quad (690^{\circ}\text{C}) \quad (520^{\circ}\text{C}) \\ \textcircled{3} \end{array}$	
Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Z (sec)	$\frac{dX/dT}{Z}dT$	I.P	$\frac{dX/dT}{Z}dT$	I.P	$\frac{dX/dT}{Z}dT$	I.P
750	2 400	Tr					
740	100	0.010	0.010				
730	60	0.017	0.027				
720	35	0.030	0.057				
710	28	0.037	0.094		0.200		
700	22	0.047	0.141	0.041	0.241		
690	20	0.052	0.193	0.045	0.286		
680	18	0.058	0.251	0.051	0.337	0.038	0.460
670	17	0.061	0.312	0.054	0.391	0.040	0.538
660	15	0.069	0.381	0.061	0.452	0.045	0.583
650	15	0.069	0.450	0.061	0.513	0.045	0.628
640	14	0.074	0.524	0.065	0.578	0.049	0.677
630	15	0.069	0.593	0.061	0.639	0.045	0.722
620	15	0.069	0.662	0.061	0.700	0.045	0.767
610	16	0.065	0.727	0.057	0.757	0.043	0.807
600	17	0.061	0.782	0.054	0.811	0.040	0.847
590	19	0.055	0.837	0.048	0.859	0.036	0.883
580	22	0.047	0.884	0.041	0.900	0.031	0.914
570	27	0.039	0.923	0.034	0.934	0.021	0.935
560	45	0.023	0.946	0.020	0.954	0.015	0.950
550	105	0.010	0.956	0.009	0.963	0.007	0.957
540	170	0.006	0.962	0.005	0.968	0.004	0.961
530	—	Tr	0.962	Tr	0.968	Tr	0.961
520	—	Tr	0.962	Tr	0.968	Tr	0.961

 $dT=10^{\circ}\text{C}$ Cooling rate ($^{\circ}\text{C/sec}$) : $9.7 \rightarrow dX=1.04$, $11.1 \rightarrow dX=0.91$, $14.6 \rightarrow dX=0.685$

I.P : Consumption degree of incubation period Z : Nucleation time

① Consumption process of incubation period with cooling from T_A to R at critical cooling rate.② Consumption process of incubation period with cooling from T_A to R through C when the cooling rates are 3.4°C/sec from T_A to C and 11.0°C/sec from C to R which is calculated from Eq. (5c) as a critical cooling rate.③ Consumption process of incubation period with cooling from T_A to R through D when the cooling rates are 3.4°C/sec from T_A to D and 14.6°C/sec from D to R which is calculated from Eq. (5d) as a critical cooling rate.

近い数字になることを示している。また、同じようにして、 T_A から D 点 (690°C) まで 3.4°C/sec で冷却した後の臨界冷却速度 β_D を (5d) 式で求めると、 β_D は 14.6°C/sec となった。前述のように、臨界冷却速度を作図的に求めると、C'-R 線および D'-R 線で示され、それぞれの勾配から 11.1°C/sec および 14.8°C/sec であった。これは (5c), (5d) 式より計算で求めた $\beta_C = 11.0^{\circ}\text{C/sec}$, $\beta_D = 14.6^{\circ}\text{C/sec}$ とほとんど一致する値を示している。

つぎに、冷却途中のある点からの臨界冷却速度が変化する様子を示すため、いま (3) 式を A_1 から T_n までと、 T_n から T_R までに分割すると、

$$\frac{1}{r} \int_{A_1}^{T_n} \frac{dT}{Z(T)} + \frac{1}{r} \int_{T_n}^{T_R} \frac{dT}{Z(T)} = 1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

となる。(5), (6) 式より

$\alpha > \gamma$ の場合は $\beta < \gamma$ が成立する。

すなわち、初期臨界冷却速度 γ より速い速度で冷却する途中の点 T_n からの臨界冷却速度は、初期臨界速度より遅くなるということである。このことは、階段焼入またはオースフォームのときに見られるように、オーステナイト化後から臨界冷却速度より速い速度で冷却し、途中で冷却の変更、中断保持または加工を行なつてから焼入する。この場合の冷却途中からの臨界冷却速度の求め方に役立つ。ただし、加工することによって潜伏期の消

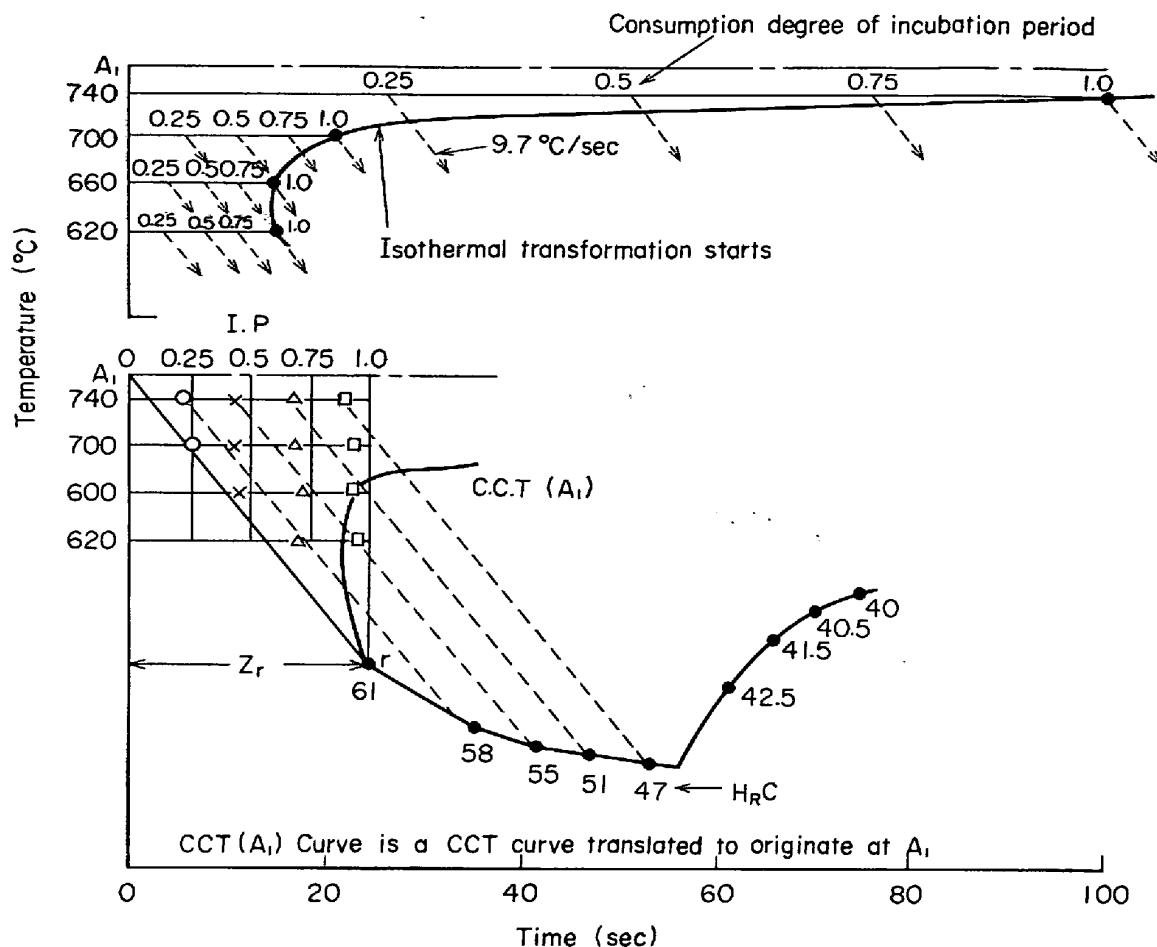


Fig. 8. Cooling transformation behaviors after partial consumption of incubation period during isothermal holding at various temperatures, austenitized at 1050°C.

費が、どのように変化するかについては明らかではないので、加工後の臨界冷却速度については今後の研究を待たねばならない。

$\alpha = \gamma$ の場合は $\beta = \gamma$ が成立する。

すなわち、初期臨界冷却速度と同じ速度で冷却する途中 T_n からの臨界冷却速度は、初期臨界冷却速度と同じである。

$\alpha < \gamma$ の場合は $\beta > \gamma$ が成立する。

すなわち、初期臨界冷却速度より遅い速度で冷却する途中 T_n からの臨界冷却速度は、初期臨界冷却速度より速くなる。しかも、(5) 式より $\frac{1}{\alpha} \int_{A_1}^{T_n} \frac{dT}{Z(T)} \rightarrow 1$ に近づくにつれて、 $\beta \rightarrow \infty$ に近づく。すなわち、潜伏期の消費が多くなるにつれて、その後の臨界冷却は速くなり、潜伏期を全部消費したときの臨界冷却速度は、無限大の速さに達することを意味する。このことは、大和久¹¹⁾の意見とは逆になるが、彼はほとんどこのような深い考察はしていないように思われる。

以上のように、連続冷却途中のある時点から冷却速度を変更した場合の変態挙動や、連続冷却途中のある時点

からの臨界冷却速度の変化は、先に求めた CCT 曲線図上で容易に、作図によつて求めることができることを、Fig. 7 を用いて示した。

3.3 等温保持による潜伏期消費とその後の冷却による変態挙動

3.3.1 等温保持後の冷却変態挙動

種々な温度で等温保持して、潜伏期を消費させてから冷却すると、どのような変態挙動を示し、また、これら

Table 5. Hardness (HRC) obtained by cooling at a rate of 9.7°C/sec after consumption of incubation period in various degree during isothermal holding at various temperatures.

Temp. °C \ I.P.	0.25	0.5	0.75	1.0
740	58.5	55	51	47
700	60.5	58	54	50
660	61.5	60	56	52.5
620	61.5	61.5	59.5	56

I.P.: Consumption degree of incubation period

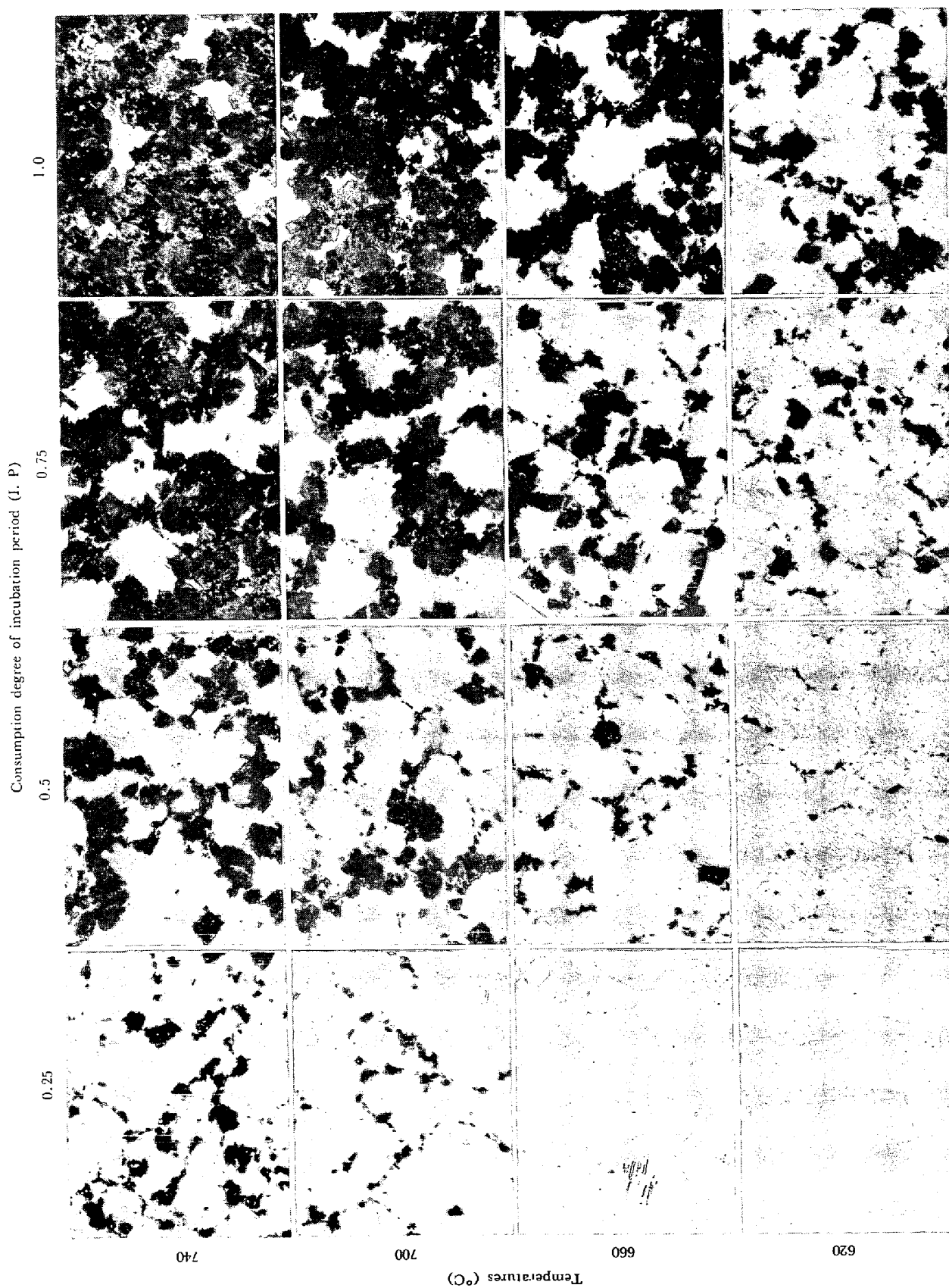


Photo. 4. Micrographs showing effect of consumption of incubation period during isothermal holding at various temperatures following cooling at a rate of $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$. $\times 200(2/3)$

の変態挙動は先に求めた CCT 曲線といかなる関係にあるか検討する. Fig. 8 に示すように, 先の CCT 曲線を求めたときと同じオーステナイト化 ($1050^{\circ}\text{C} \times 15 \text{ min}$) 温度 T_A より, 740°C , 700°C , 660°C および 620°C の鉛浴中に急冷して, それらの温度で等温保持し, 潜伏期をそれぞれ, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 消費させた後, すべて同じ冷却速度の $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ で常温まで冷却した場合の変態挙動を調べると, 硬さ (HRC) は Table 5 に示すようになり, 組織は Photo. 4 に示すようになる. すなわち, 同一温度では潜伏期の消費が多くなるほど硬さは低くなり, 変態したパーライト量は多くなる. また, 潜伏期の消費量が同一の場合は, その潜伏期に消費した等温保持温度が低くなるほど硬さは高くなり, 変態したパーライト量は少なくなっている. このように, 潜伏期の消費量と等温保持温度によつて, その後同じ冷却速度で冷却しても種々異なつた変態挙動を示すことが明らかになつた. これらの変態挙動が, 先に求めた CCT 曲線 (Fig. 1(b)) といかなる関係にあるか検討する.

いま, Fig. 1(b) における種々な冷却速度の連続冷却において, T_A から A_1 までに達する冷却時間による潜伏期の消費は, 全く無い筈であるから, T_A から A_1 までの冷却時間をすべて零として, A_1 を起点にした冷却変態曲線に Fig. 1(b) を書き替えると, Fig. 8 に示す CCT(A_1) 曲線のようになる. Fig. 8 において, たとえば, 740°C で潜伏期を 0.25 (740°C における等温潜伏時間は 100 sec であるから, 潜伏期の 0.25 を消費するのは, この温度で 25 sec 保持することに当たる) だけ消費した後, $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ で常温まで冷却したときの硬さは Table 5 から HRC 58.5 であるから, CCT(A_1) 曲線の変態中止または完了線の同一の硬さの点から, 冷却速度 $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ の冷却線に平行な線を引き, 温度 740°C の線と交る点を, ○印でプロットする. 同じようにして, 740°C で潜伏期をそれぞれ 0.5, 0.75, 1.0 消費した後, $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ で冷却した場合についても, それぞれ, ×, △, □印でプロットする. つぎに, 同じ方法で, 700°C , 660°C , 620°C についても, 潜伏期の消費が 0.25 のときは○印, 0.5 のときは×印, 0.75 のときは△印, 1.0 のときは□印でそれぞれプロットする. ○, ×, △, □印の位置は, 臨界冷却速度 ($9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$) での A_1 点から変態開始線に達するまでの時間を Z_r とした場合, Z_r を 1 とし (すなわち, $I.P=1$), それぞれの温度で Z_r を 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 に分割した点とほぼ同じ位置にあることが明らかになつた. 以上の結果から, 前述の (1) 式において, 等温での潜伏期の消費

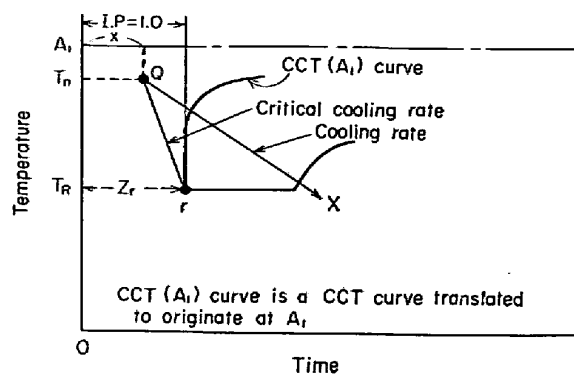


Fig. 9. Schematic diagram showing a method to find transformation behavior and critical cooling rate, after the incubation period is consumed by isothermal holding at a temperature.

速度が時間に関係せず同じであると仮定したが, この仮定は大体正しいと判断され, 従つて (1) 式は成立すると考えられる.

つぎに, 等温保持によつて潜伏期を消費した後の冷却による変態挙動の求め方について Fig. 9 で説明する. Fig. 9 に示した CCT(A_1) 曲線は, 先に求めた CCT 曲線を A_1 を起点に書き替えたものである. A_1 からの臨界冷却速度での変態開始点を r , 時間を Z_r とする. 温度 T_n で潜伏期を x だけ消費した後, 任意の冷却速度の $Q-X$ 線で冷却した場合の変態挙動は, Z_r を 1 とし (すなわち, $I.P=1$), 温度 T_n で x 時間経過した Q 点を求め, Q 点から冷却曲線 X を引けば, その変態挙動は CCT(A_1) 曲線によつて示されることになる.

3.3.2 等温保持後の臨界冷却速度

つぎに, 等温保持によつて潜伏期を消費した後の臨界冷却速度の求め方について, Fig. 9 で説明する. 前述の等温保持後の冷却変態挙動の求め方と同じような方法で, 温度 T_n で潜伏期を x だけ消費した後の臨界冷却線は, $Q-r$ 線で示す線となる. 従つて, 潜伏期の消費量 x が多くなるにつれ, 臨界冷却速度は速くなる. そして, x が Z_r と等しくなつたとき (潜伏期を全部消費したとき) 臨界冷却速度は無限大の速さになる.

3.4 連続冷却による潜伏期消費と等温保持による潜伏期消費の関係

連続冷却途中で冷却速度を変更する場合, 変更後の冷却速度が同じでも, 変更前の潜伏期の消費量の違いによつて, 変更後に異なつた変態挙動を示すことは前述の Fig. 2 および Fig. 3 で明らかになつた. また, 等温保持の場合においても, 潜伏期の消費量の違いによつて, その後の冷却が同じでも異なつた変態挙動を示すことは, Fig. 8 および Table 4 で明らかになつた. そこ

Table 6. Hardnesses when the incubation period of specimen in austenite state was consumed in the same degree by both ways continuous cooling to and isothermal holding at the same temperature and then the specimens were cooled by $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$.

Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Consumption degree of incubation period	Continuous cooling	Isothermal holding
710	0.18	HrC 59.5	HrC 61.0
690	0.52	56.0	56.5
675	1.0	49.5	49.5

で、連続冷却によつて消費する潜伏期と、等温保持によつて消費する潜伏期がいかなる関係にあるかを検討してみる。

いま、連続冷却と等温保持による潜伏期の消費を同じにし、その後どちらも同じ温度から $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ の同じ冷却速度で常温まで冷却した場合の変態挙動（硬さ HrC で示す）は、Table 6 に示すような結果が得られたオーステナイト化は、どちらも同じで $1050^{\circ}\text{C} \times 15 \text{ min}$ 。たとえば、オーステナイト化後から冷却速度 $3.4^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ で 710°C まで冷却し、その後冷却速度を $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ に変更して常温まで冷却した場合の硬さは HrC 59.5 である。冷却速度が $3.4^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ で 710°C まで冷却されたときの潜伏期の消費は Table 2 で示したように 0.18 であった。つぎに、同じオーステナイト化後、 710°C の鉛浴中に急冷して、その温度で 5 sec 間保持（この温度での等温全潜伏時間は 28 sec であるから、潜伏期の消費 0.18 は当たる保持時間は、約 5 sec になる）した後 $9.7^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ で常温まで冷却すると硬さは HrC 61 となった。以下、同じような方法で実験した。

この結果から連続冷却による潜伏期の消費量と、等温保持による潜伏期の消費量が同じで、同じ温度から同じ冷却速度で冷却した場合、ほぼ同じ変態挙動を示すことがわかる。このことは、連続冷却における潜伏期の消費の仕方 (Fig. 6 に示すように、加速的に速くなる) と、等温保持による潜伏期の消費の仕方 (Fig. 8 で説明したように、等速である) の相違はあるが、潜伏期の消費量が同じで、同じ温度からの冷却による変態挙動に対してはほぼ同じ作用をすることがわかった。

4. 結 論

連続冷却途中で冷却速度を変更する場合に、どのような変態挙動を示すか、これが冷却速度を変更しないときの CCT 曲線といかなる関係にあるかを検討し、更に、

等温保持によつて潜伏期を消費した後の冷却による変態挙動についても、CCT 曲線との関係について検討した結果、つぎのようなことが明らかとなった。

(1) 連続冷却途中で冷却速度を変更した場合の変態挙動は、冷却途中までに消費された潜伏期に関係し、また、変態途中ならば途中までに変態した量に関係し、冷却速度を変更しないときの CCT 曲線で示される変態挙動とかなり違うことを示した。

(2) 冷却速度変更後の変態挙動を、変更しないときの CCT 曲線から推定する方法を提案した。それは、臨界冷却速度で冷却したときの潜伏期を全潜伏期量として、冷却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。

(3) 連続冷却途中の点からの臨界冷却速度は、それまでに消費された潜伏期に関係し、潜伏期の消費量が多くなるにしたがつて臨界冷却速度は速くなる、この臨界冷却速度は、潜伏期の消費量を CCT 線図に組み入れることにより、作図によつて求めることができる。

(4) 等温保持によつて潜伏期を消費した時点からの冷却による変態挙動および臨界冷却速度は、消費した潜伏期の量と保持温度に関係する。この変態挙動と臨界冷却速度は、CCT 線図を A_1 を起点に書き替えた線図に、潜伏期の消費量と保持温度を組入れることにより作図によつて求められる。

(5) 等温保持による潜伏期の消費量が同じでもそのときの保持温度が異なれば、また、保持温度が同じでも潜伏期の消費が異なるとその後の冷却が同じでも異なつた変態挙動を示す。これは、潜伏期の消費により過冷オーステナイトに何らかの変化が起こっていることを意味する。

(6) 連続冷却による潜伏期の消費と等温保持による潜伏期の消費において、それぞれ消費の仕方は異なるが、消費量が同じでそのときの温度も同じなら、その後の冷却変態挙動にほぼ同じ影響をおよぼす。

文 献

- 1) 日本鉄鋼協会編：鋼の熱処理 5 版，(1969)，p. 10 [丸善]
- 2) 大和久：S 曲線，(1969)，p. 63 [日刊工業]
- 3) C. A. LIEDHOLM: Trans. ASM, 38(1947)，p. 180
- 4) C. L. M. COTTREL: JISI, 175 (1954)，p. 273
- 5) A. ROSE and W. PETER: Stahl u. Eisen, 72 (1952)，p. 1063
- 6) W. STEVEN and G. MAYER: JISI, 174(1953)，p. 33
- 7) R. A. GRANGE and J. M. KIEFER: Trans.

-
- ASM, 29(1941), p. 85
- 8) G. K. MANNING and C. H. LORIG: Trans. AIME, 167(1946), p. 442
- 9) W. I. PUMPHREY and F. W. JONES: JISI, 159 (1948), p. 137
- 10) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, **B**-15(1951), p. 538
- 11) 大和久: S 曲線, (1969), p. 172 [日刊工業]
- 12) E. SCHEIL: Arch. Eisenhüttenw., 12(1935), p. 565
- 13) Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Max-plank Inst. Eisenforsch, p. I -225D~p. I -225E
-