

論文

連続冷却中の相変態進行に対する変態潜熱の影響

大塚 秀幸*・梅本 実**・田村 今男***

The Effect of Transformation Latent Heat on the Progress of Phase Transformation during Continuous Cooling of Steel

Hideyuki OHTSUKA, Minoru UMEMOTO and Imao TAMURA

Synopsis:

A study was undertaken to make clear the effect of latent heat evolution on the cooling transformation behaviour of steel. A method to estimate the influence of transformation latent heat on a cooling curve was developed on the basis of the cooling transformation kinetics. The present method was justified by comparing the cooling curve measured in steel SKS5 (an eutectoid steel containing Ni and Cr) with that estimated. The effect of latent heat evolution on the critical cooling rate was investigated. It was found that the effect of latent heat evolution was much larger on the lower critical cooling rate than on the upper critical cooling rate. Two types of continuous cooling transformation (CCT) diagrams were calculated; one with the cooling curves influenced by the latent heat evolution, and other with those controlled not to be influenced (i.e., controlled to be equal to those of transformation free). It was found that the C curves of the former CCT diagrams were located at higher temperature than the corresponding C curves of the latter, and this trend was stronger for the C curve of larger fraction transformed.

1. 緒 言

近年、冷却速度をコントロールすることにより鋼の組織の種類やその混合割合を制御し、より良い性質を得ようとする試みがおこなわれている。例えば制御圧延後の加速冷却¹⁾は、熱間圧延した鋼板を空冷よりも速い速度で冷却することによりフェライト粒の細粒化及び低温変態組織の生成による強化を図ろうとするものである。このような問題にとつて、連続冷却中の相変態挙動を明らかにすることは非常に重要である。そこで著者らはこれまで、等温変態挙動を基に計算によって連続冷却変態挙動を予測する目的で研究をすすめてきた²⁾。

ところで連続冷却変態に関する基礎的な研究は変態潜熱が発生しても一定の冷却速度になるように制御して行われていることが多い。しかし実際の製造工程等における熱処理では相変態の進行に伴つて変態潜熱が発生する

ため冷却曲線は影響を受け、一定の冷却速度になるよう制御した場合とは変態挙動が異なつてくる^{3)~5)}。そこで本研究では放冷のようにニュートン冷却に従う冷却をした際の変態挙動、臨界冷却速度及び CCT 図に与える変態潜熱の影響を検討した。

2. 実験方法

本研究に用いた試料は市販の 1%Ni 共析鋼 (JIS SKS5) で、その詳しい化学組成は Table 1 に示すとおりである。本研究にこの鋼を使用したのは変態の Kinetics が比較的簡単に取り扱えるペーライト変態で、しかも 1.05%Ni と 0.37%Cr を含有しているため変態の進行は比較的遅く実験が容易であるからである。等温変態中及び連続冷却中のペーライト変態率の変化は、Formaster-F で膨張測定により求めた。ただし、試料は 1200°C で 20 h 真空中で均質化した後、3 mmφ × 10

Table 1. Chemical composition of SKS5 (wt%).

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SKS 5	0.80	0.26	0.32	0.004	0.007	1.05	0.37	0.014	0.01

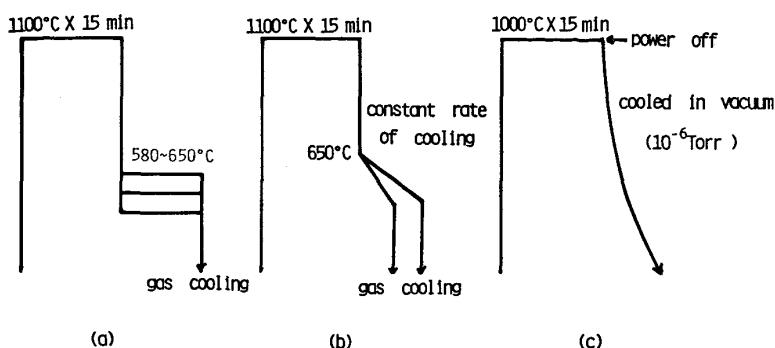
昭和 57 年 5 月日本熱処理技術協会春季学術講演大会にて発表

昭和 60 年 9 月 2 日受付 (Received Sep. 2, 1985)

* 京都大学大学院 (Graduate School, Kyoto University, Yoshidahonmachi Sakyo-ku Kyoto 606)

** 京都大学工学部 Ph. D (Faculty of Engineering, Kyoto University)

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



mm の丸棒試験片に切削加工したものを使用した。

Fig. 1 は本研究において行つた熱処理を模式的に示したものである。等温ペーライト変態の Kinetics の研究にあたつては、Fig. 1(a) に示すように試料を 1100 °C で 15 min オーステナイト化後、直ちに窒素ガスによりこの試料の共析温度 (684°C) 以下の種々の温度に急冷し等温変態させた。また、連続冷却中のペーライト変態の研究にあたつては、Fig. 1(b) に示すようにオーステナイト化後 650°C まで急冷し、その温度から種々の速度で等速冷却させ、冷却中のペーライト変態の進行を測定した。さらに、変態潜熱が冷却曲線に及ぼす影響を調べるため、Fig. 1(c) に示すように 1000°C で 15 min オーステナイト化後 Formastor-F のパワーを切り、そのまま真空中で放冷した。

3. 実験結果及び考察

3.1 連続冷却変態 Kinetics

連続冷却変態を等温変態から導く一つの方法として著者ら^{2)6)~9)}は連続冷却を階段状の等温保持の集合とみなして、各温度における変態率を加算することにより連続冷却変態が予測できると考え、これまでフェライト⁶⁾、ペーライト⁷⁾、ペイナイト⁸⁾⁹⁾変態について研究をおこなってきた。そこで等温変態 Kinetics から連続冷却変態 Kinetics を導く方法について簡単に述べる。

加算則¹⁰⁾とは冷却曲線を階段状の等温保持の集合として近似し、各温度での保持時間 Δt をその温度での潜伏期 τ で割った値（これを部分核生成時間と呼ぶ）の合計が 1 になつたところで変態が開始するとしたものである。この加算則の考え方を変態が開始した後の変態率に対して拡張する。Fig. 2 に示すように、冷却曲線を階段状の等温保持の集合で近似し、各温度 $T_1, T_2, \dots, T_i, \dots$ での保持時間をそれぞれ $\Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_i, \dots$ また各温度での等温変態で変態率が X になるのに要する時間をそれぞれ $t_X(T_1), t_X(T_2), \dots, t_X(T_i), \dots$ すると、連続冷却により変態率が X になる条件は次式で

Fig. 1. Patterns of heat treatments, (a) to study the isothermal transformation, (b) to study the continuous cooling transformation, (c) to study the effect of latent heat on the continuous cooling transformation.

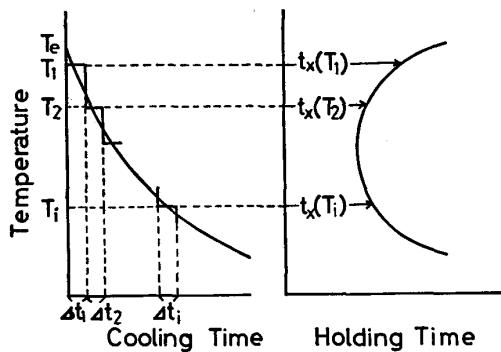


Fig. 2. Diagrams to explain the relationship between the isothermal and continuous cooling transformation.

与えられる。

$$\sum_{i=1}^i \frac{\Delta t_i}{t_X(T_i)} = \sum_{i=1}^i \frac{1}{t_X(T_i)} \cdot \frac{\Delta t_i}{\Delta T_i} \cdot \Delta T_i = 1 \quad (1a)$$

(ただし、 $\Delta T_i = T_{i+1} - T_i$)

分割を十分に細かくすればこの式は積分に書きかえられて

$$\int_{T_e}^{T} \frac{1}{t_X(T)} \cdot \frac{dt}{dT} \cdot dT = 1 \quad (1b)$$

となる¹¹⁾。ここで T_e は変態がおこりうる上限の温度である。また、等温変態挙動は一般に次式で表される。

$$X = 1 - \exp\{-k(T)t^n\} \quad (2)$$

ここで、 t は等温変態時間、 $k(T)$ は変態温度のみに依存する関数で、核生成速度や成長速度によって決まり、等温変態線図 (TTT 図) の C 曲線に対応する²⁾ ものである。 $t_X(T)$ を(2)式から求め⁷⁾、(1a) 及び(1b)式に代入して整理すると次式を得る⁷⁾。

$$X(T_i) = 1 - \exp\left[-\left\{\sum_{i=1}^i \frac{k(T_i)^{\frac{1}{n}}}{\Delta T_i} \cdot \Delta T_i\right\}^n\right] \quad (3a)$$

$$X(T) = 1 - \exp\left[-\left\{\int_{T_e}^{T} \frac{k(T)^{\frac{1}{n}}}{dT} \cdot dT\right\}^n\right] \quad (3b)$$

(3a) 及び (3b) 式は連続冷却中の温度 T における変態率を与える式で、TTT 図の C 曲線の形をあらわす $k(T)$ 及び冷却速度 $-dT/dt$ を含んでおり、いかなる形の C 曲線でも、またいかなる形の冷却曲線に対しても適用できる。

3.2 連続冷却変態速度式のパーライト変態への適用

本節では前節で求めた連続冷却変態速度式の妥当性を変態 Kinetics が比較的取り扱いやすいパーライト変態を使って検討した。Fig. 3⁷⁾ は Formastor-F 膨張測定機により求めた共析鋼である SKS5 鋼の TTT 図で、図中には 1000°C で 15 min オーステナイト化した試料の 5, 50, 95% 変態線を示してある。Fig. 3 より、SKS5 鋼のパーライト変態の nose は 590°C 附近であり、nose 温度では 50% 変態するのに約 20 s かかることがわかる。連続冷却中の変態率を表す(3b)式の $k(T)$ 及び n に SKS5 鋼について著者らが以前実測した⁷⁾ $k(T) = \exp(-1.24 \times 10^{-3}(T-587)^2 - 13.5)$, $n=4.0$ を代入すると温度 T まで冷却したときの変態率は次式のように表すことができる。

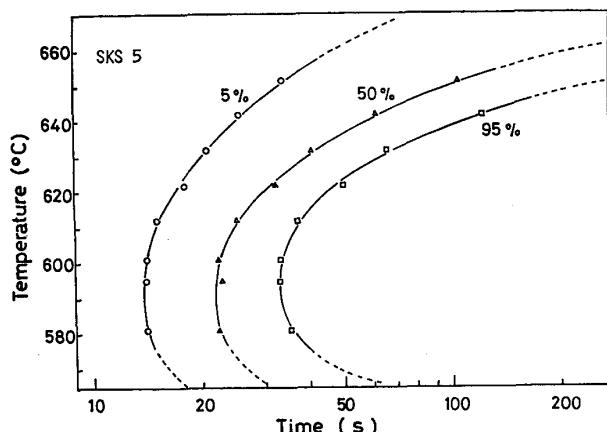


Fig. 3. The TTT diagram of SKS5 steel⁷⁾.

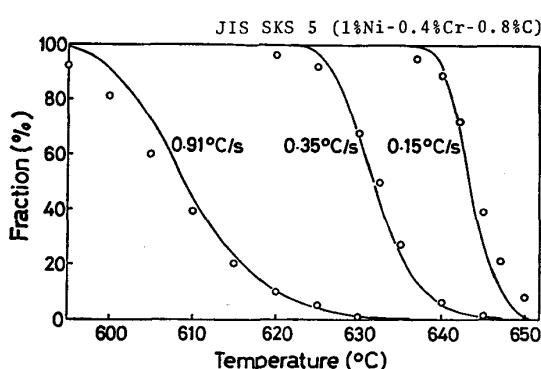


Fig. 4. Comparison of the calculated (solid line) and observed (open circles) cooling transformation behavior of pearlite in SKS5 steel⁷⁾.

$$X(T) = 1 - \exp \left[- \int_T^{T_e} \frac{\exp \{ -1.24 \times 10^{-3}(T-587)^2 - 13.5 \}}{dT} dT \right]^{4.0}$$

$$\dots \dots \dots \quad (4)$$

Fig. 4⁷⁾ は SKS5 鋼の試料を種々の冷却速度で等速冷却した場合の変態率の実測値 (○印) と、(4)式を用いて求めた計算値 (実線) を比較したものである。図中には 0.15°C/s, 0.35°C/s, 0.91°C/s で等速冷却 (すなわち、冷却中に変態潜熱が発生しても、冷却速度が一定になるよう制御しながら冷却) した場合の変態率の変化を示してあるが、実測値と計算値はよく一致している。従つて変態率に対する加算性を仮定することにより、連続冷却中のパーライト変態の進行がかなり精度よく求められることがわかる。

3.3 冷却中の変態に伴う温度変化及び連続冷却変態挙動

Fig. 4 に示した等速冷却の実験にあたつては、冷却中に変態潜熱が発生しても冷却速度が一定になるようにコントロールしていた。しかし、一般の製造工程等における冷却では試料から外部へ出る熱量が熱伝達率及び試料と冷却剤の温度差の関数になつていて、この時変態潜熱の発生により冷却曲線は変態を伴わない試料の冷却曲線に比べて大きく変化する。そこで、冷却中に変態を伴わない場合の冷却曲線と、冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線を比較してみる。

Fig. 5 は両者を比較した例で、実線は SKS5 鋼の試料を Formastor-F を用いて 1000°C で 15 min オーステナイト化後高周波加熱 off の状態にし、約 10⁻⁶ Torr の真空中で放冷した場合の冷却曲線である。また図中的一点鎖線は、変態が遅いために室温まで放冷する間に

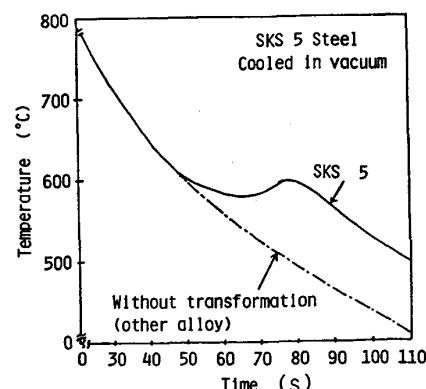


Fig. 5. Cooling curves of SKS5 steel (with transformation) and other alloy (without transformation) under the same cooling condition.

変態のおこらない合金(Fe-3.4Ni-1.5Cr-0.5C)で、SKS5鋼の試料と同じ大きさのものを同じ方法で冷却したときの冷却曲線を示している。ここで縦軸は試料の温度、横軸は高周波電源をoffしてからの時間を示しており、冷却中に変態を伴っているSKS5鋼の場合、冷却曲線は一度極小点を示した後上昇し、極大点を示して再び下降しており、変態がおこらない試料の冷却曲線よりも高温側にくる。これは再輝現象(Recalrescence)として知られており、冷却中の変態潜熱の発生に起因している。

このように変態潜熱の発生により、冷却曲線は大きく影響を受ける。そこで次に変態を伴わない場合の冷却曲線を基にして、変態潜熱の発生に起因する温度変化を伴う場合の冷却曲線及びその時の変態挙動を求める方法について考えてみる。Fig. 6は変態初期の部分(Fig. 5の例では時間で45~55s、温度で600°C付近)を拡大したもので、2本のなめらかな曲線のうち実線は冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線を、一点鎖線は変態を伴わない場合の冷却曲線をそれぞれ模式的に示したものである。まず変態を伴わない場合の冷却曲線(一点鎖線)を階段状の等温保持(一点鎖線)の集合で近似する。図に示す各温度 T_e 、 T'_1 、 T'_2 、…(以下、変態を伴わない場合の階段状の冷却曲線の温度を表すときは'をつけ、変態を伴う場合には'をつけずに表す。また、 $T_1=T'_1$ である。)での保持時間をそれぞれ Δt_0 、 Δt_1 、 Δt_2 、…、また、各ステップ間の温度差 T'_1-T_e 、 $T'_2-T'_1$ 、…をそれぞれ $\Delta T'_0$ 、 $\Delta T'_1$ 、…($\Delta T'_i < 0$)とする。この変態を伴わない場合の階段状の冷却曲線をもとにして、潜熱の発生による温度変化がある場合の冷却曲線を階段状の等温保持の集合として求め

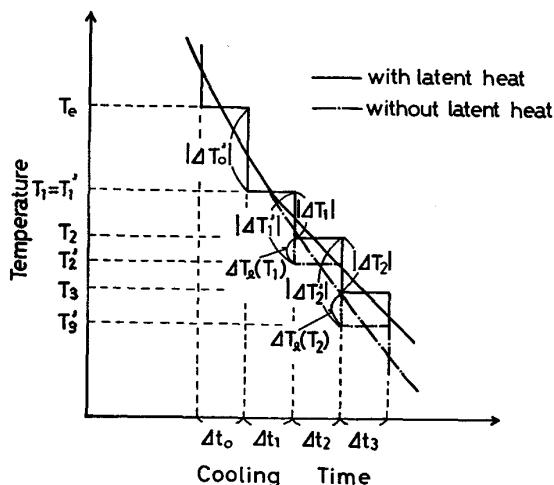


Fig. 6. Schematic cooling curves with latent heat (solid line) and with no latent heat evolved (dotted-dash curve).

る。温度 T'_1 で Δt_1 だけ保持することにより得られる変態率は

$$\Delta X(T'_1) = 1 - \exp [-\{-k(T'_1)^{\frac{1}{n}} \cdot \Delta t_1\}^n] \quad \dots \dots \dots (5)$$

と表せる。この変態に伴い潜熱が発生し、試料の温度が上昇する。この温度上昇 $\Delta T_l(T_1) (>0)$ は次式で与えられる。

$$\Delta T_l(T_1) = \Delta X(T'_1) \cdot \frac{\Delta H}{C_p} \quad \dots \dots \dots (6)$$

ここで ΔH は変態潜熱、 C_p は比熱である。従つて変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合において時間 Δt_1 保持したときの温度低下は、変態を伴わない場合の T'_1 から T'_2 への温度低下 $\Delta T'_1$ に(6)式で表される変態潜熱の発生による温度上昇分を足した ΔT_1 に相当すると考えられる。つまり ΔT_1 は

$$\Delta T_1 = \Delta T'_1 + \Delta T_l(T_1) \quad \dots \dots \dots (7)$$

となる。温度 $T_2 = T'_1 + \Delta T_1$ とすれば T_2 で Δt_2 だけ保持したときの変態率増加及びそれに起因した潜熱の発生に伴う温度上昇 $\Delta T_l(T_2)$ が求まり、前と同様にして ΔT_2 が求められる。以下同様にして計算することにより、変態潜熱の発生に伴う温度変化がある場合の冷却曲線は階段状の冷却曲線 $T_l \rightarrow T_1 \rightarrow T_2 \rightarrow \dots$ で近似できる。

以上のように、冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却速度 $-\Delta T_i/\Delta t_i$ は

$$-\frac{\Delta T_i}{\Delta t_i} = -\frac{\Delta T'_i}{\Delta t_i} - \frac{\Delta X(T_i)}{\Delta t_i} \cdot \frac{\Delta H}{C_p} \quad \dots \dots \dots (8a)$$

すなわち

$$-\frac{dT}{dt} = -\frac{dT'}{dt} - \frac{dX}{dt} \cdot \frac{\Delta H}{C_p} \quad \dots \dots \dots (8b)$$

と表される。従つて冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線は連続冷却中の変態率を表す(3a)式と変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却速度を表す(8a)式において、変態を伴わない場合の冷却速度 $-\Delta T'_i/\Delta t_i$ 、 $k(T_i)$ 、 n 、 ΔH 及び C_p の値が分かれば、計算することができる。また、階段状の冷却中の各温度 T_i における時間 Δt_i の間の変態量 $\Delta X(T_i)$ を足し合わせていくことにより、冷却中の任意の時間、任意の温度における変態率 X が求まる。さらに、変態量 $\Delta X(T_i)$ と保持時間 Δt_i の比から変態速度 dX/dt の時間変化が得られる。

次に、上で述べた方法を実際の鋼(ここではSKS5鋼)に適用した例を示す。つまりFig. 5に示した変態を伴わない試料を真空中で放冷したときの冷却曲線(Fe-Ni-Cr-C合金を使って間接的に求めたもの)を基にして、SKS5鋼を真空中で放冷したときの冷却曲線を計算により求めてみる。まず、Fig. 5に一点鎖線で示

した、実測により求めた変態を伴わない場合の冷却曲線が指数関数的に単調に減少することから、この冷却はニュートン冷却に従うものと仮定する。一般にニュートン冷却は、単位時間内の単位断面積当たりの表面付近における熱の移動量 $(dQ/dt)_s$ 、試料の表面温度 T_s 、冷却剤の温度 T_0 、熱伝達率 C を用いて

と表せる。ここで熱の移動量 dQ は、試料の比熱 C_P 、
温度上昇 dT を用いると、冷却の場合には

$$dQ = -A \cdot C_P \cdot dT \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

で表される。ただし、 A は定数である。本研究の場合、試料は直径 3 mm と小さくまた冷却速度が比較的遅いことから試料内での温度分布は無視できるものと仮定して試料の温度 $T = T_s$ とおき、(10)式をニュートン冷却を表す(9)式に代入して整理すると

となる。この式は、変態を伴わない試料をニュートン冷却した場合の温度変化を表している。Fig. 5 に一点鎖線で示した変態を伴わない場合の冷却曲線は、(11)式において $C/(A \cdot C_P) = 0.007(1/s)$ とおくと精度よく表せることができた。また、パーライト変態によって発生する潜熱つまりエンタルピー変化であるが、KRAMER¹² らによるカロリーメーターを使つた実験によると、潜熱はラメラ間隔によりわずかに変化するが、Fe-0.8%C 共析鋼のパーライト変態に対して 18.0-18.4 (cal/g) の範囲の値をとる。本研究で用いた SKS5 鋼の場合、Fe-0.8%C に 1.05%Ni を含むが、Ni 量による変態潜熱への影響は小さいと考えられるので、パーライト変態の潜熱 ΔH の値としては中間の 18.2 (cal/g) を用いる。さらに比熱 C_P の値としてオーステナイトとパーライトの平均値¹² 0.15 (cal/g·°C) を用いることとする。SKS5 鋼を真空中で放冷したときの冷却曲線は連続冷却中の変態率を表す(3a)式と変態潜熱による温度変化がある場合の冷却速度を表す(8a)式において、変態を伴わない場合の冷却速度 $-\Delta T'_i / \Delta t_i = 0.007(T'_i - T_0)$ ((11)式において $C/(A \cdot C_P) = 0.007(1/s)$ とおいたもの), $k(T) = \exp(-1.24 \times 10^{-3}(T - 582)^2 - 13.5)$, $n = 4.0$, $\Delta H = 18.2(\text{cal/g})$ 及び $C_P = 0.15(\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C})$ を代入して求められる。ただし、保持時間 Δt_i を一定(変態開始から終了までの時間を十分細かく、最低 50 等分した時間)とした。SKS5 鋼を真空中で放冷したときの冷却曲線を計算により求めると Fig. 7 の破線のようになり、実測値(実線)と良い一致を示しているのがわかる。こ

ここで図中の一点鎖線は変態を伴わない場合の冷却曲線(実測値)である。以上のように、連続冷却中の変態率を表す(3a)式と変態潜熱による温度上昇分を考慮に入れた場合の温度変化を表す(8a)式から連続冷却中に変態潜熱が発生する場合の冷却曲線を計算できることがわかつた。

変態を伴う場合の冷却曲線を求める過程で、変態率 X 及び変態速度 dX/dt の時間変化が求められる。SKS5 鋼におけるパーライト変態の場合、Fig. 7 に破線で示した冷却曲線の計算過程で求められた変態率 X 及び変態速度 $-dX/dt$ の時間変化は Fig. 8 のようになる。これらの曲線から、冷却曲線の傾きが最大のところ、つまり温度上昇率が最大のところでほぼ変態速度は極大になり、かつ変態率が約 50% になっていることがわか

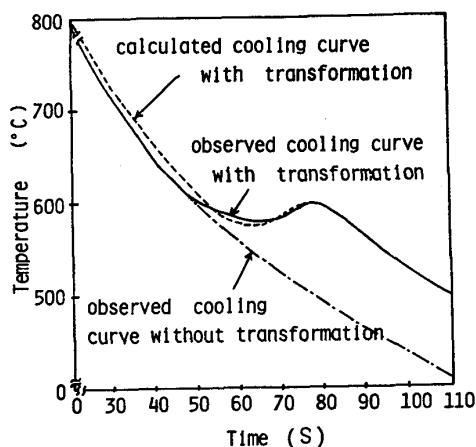


Fig. 7. Comparison of cooling curves. - - - calculated with transformation taken into account, — observed in SKS5 steel, —— observed for specimen without transformation.

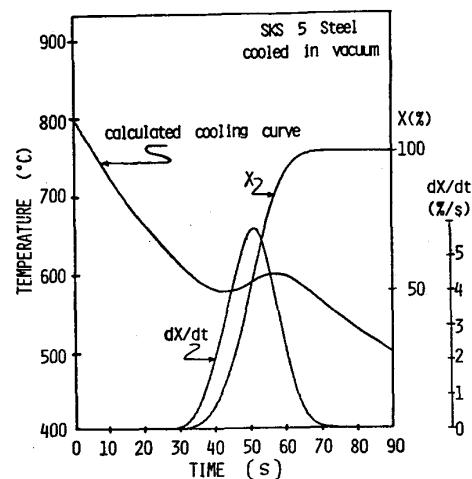


Fig. 8. Calculated fraction transformed and the rate of transformation for SKS5 steel together with the calculated cooling curve with latent heat evolution taken into account.

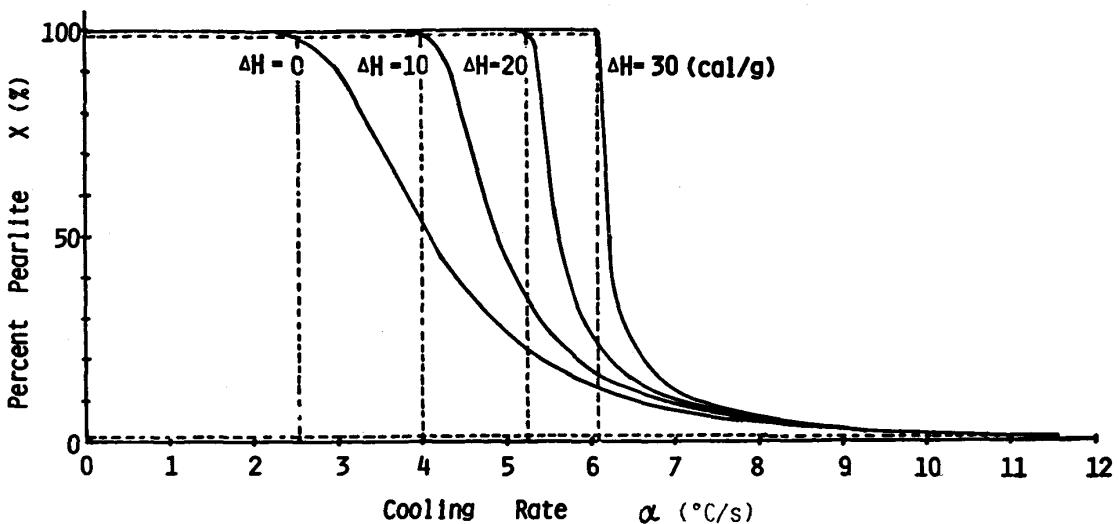


Fig. 9. Variation of transformed fraction as a function of cooling rate for latent heat $\Delta H=0, 10, 20$, and 30 (cal/g) for an imaginary material of the same transformation kinetics with SKS5 steel.

る。このように冷却曲線の形から冷却中の変態の進行がかなりの程度把握できる。

3.4 臨界冷却速度に及ぼす変態潜熱の影響

臨界冷却速度は一般に変態が開始する直前の冷却速度で表すことが多い。しかし試料が冷却中に変態を伴う場合には変態潜熱の発生によつて冷却曲線は影響を受け、変態を伴わない場合と大きく違つてくる。また、変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合と、変態潜熱が発生しても変態を伴わないときの冷却と等しくなるよう温度をコントロールした場合とでは冷却速度及び冷却後の変態率は異なつてくる。そこで冷却方法及び冷却速度による変態率の違い及び臨界冷却速度の違いについて検討してみる。

まず、冷却方法及び冷却速度が冷却後の変態率に対してどのような影響を及ぼすか計算により求めてみる。今、(8a)式の変態潜熱 ΔH に、試料となつてゐる合金固有の値を代入すると、(8a)式は変態潜熱の発生に伴う温度変化がある場合の冷却速度を表すことになる。また、(8a)式で $\Delta H=0$ とおくことは冷却中に変態潜熱が発生しても、変態を伴わない試料の冷却と等しくなるよう温度をコントロールすることになる。従つて、(8a)式の ΔH の値を変化させることは冷却方法を変えることに相当する。そこで、連続冷却中の変態率を表す(3a)式と変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却速度を表す(8a)式において、 $k(T_i)$, n , 比熱 C_P がわかれば、変態潜熱 ΔH 及び変態を伴わない試料を冷却した場合の冷却速度 $-AT'_i/At_i$ が変化したときに、変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線及びある温度 T まで冷却したときの変態率がどのように

変化するかがわかる。今仮に相変態の進行は SKS5 鋼と同じであり ($k(T_i)$, n が SKS5 鋼の場合と同じ), 変態を伴わない試料を冷却したときの冷却速度 $-AT'_i/At_i$ を一定 (等速) とする。変態潜熱 ΔH の値を 0, 10, 20, 30 (cal/g) と変化させそれぞれの場合に室温まで冷却したときのパーライト変態率を計算により求める。Fig. 9 はその結果を示したもので図の横軸は変態を伴わない試料を冷却したときの冷却速度である。この図から同じ冷却速度のところで比較すると変態潜熱 ΔH の値が大きい程変態率が大きくなつてゐることがわかる。これは、変態が進行している最中の真の冷却速度は変態潜熱が大きいほど横軸の冷却速度より遅くなるため、変態温度域を通過する時間が長くなり、室温まで冷却したときの変態率が多くなるからである。

次に、臨界冷却速度に与える変態潜熱の大きさの影響を検討してみる。臨界冷却速度は一般に変態開始直前の冷却速度、もしくは変態を伴わない試料で測定された冷却速度で表される。今、冷却中にパーライトが 1% 生成する冷却速度を上部臨界冷却速度、パーライトが 99% 生成する冷却速度を下部臨界冷却速度とする。この定義を使うと上部及び下部臨界冷却速度はたとえば Fig. 9 でパーライト変態率が 1% 及び 99% のところでひいた横線と各 ΔH のときのパーライト変態率と冷却速度の曲線との交点として求められる。 ΔH を連続的に変化させ求められた上部及び下部臨界冷却速度を変態潜熱 ΔH の値に対してプロットすると Fig. 10 が得られる。この図から上部臨界冷却速度 α_u は変態潜熱の大きさによつてほとんど変化しないが、下部臨界冷却速度 α_l は変態潜熱 ΔH の大きさに影響をうけ、 ΔH が増加すると

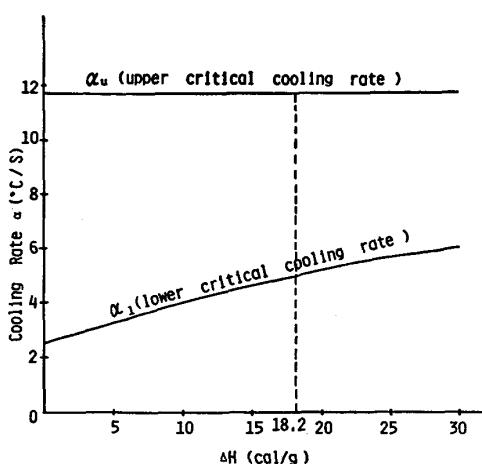


Fig. 10. The upper (α_u) and lower (α_l) critical cooling rate as a function of latent heats for an imaginary material of the same transformation kinetics with SKS5 steel.

ともに速くなることがわかる。これは、変態潜熱 ΔH が大きくなるほど変態中の冷却速度が遅くなるため室温まで冷却したときの変態率が多くなり、99% の変態を得るための冷却速度が速くなるからである。また、上部 (α_u) 及び下部臨界冷却速度 (α_l) の比 α_u/α_l は ΔH の増加とともに小さくなり、 $\Delta H=0$ の場合にその比が $4.63 (= (\ln 0.01) / (\ln 0.99))$ であつたのに対し、共析鋼の場合 ($\Delta H=18.2$ (cal/g)) にはその比は 2.35 へとほぼ半分の大きさになる。

3.5 CCT 図に及ぼす変態潜熱の影響

連続冷却変態線図 (CCT 図) は、ある冷却曲線群に沿つて冷却した場合の変態の開始と終了などを表示したものであり、連続冷却中の相変態挙動を知る上で非常に便利なものである。ところで最近 Formastor-F 等の装置によつて、冷却中に変態潜熱が発生しても冷却速度が一定になるように冷却をコントロールして連続冷却変態挙動を測定することが行われている。しかし、一般の熱処理においては変態潜熱により冷却中の変態挙動は大きく影響を受ける。そこで、潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却曲線と同じになるように温度をコントロールした場合の CCT 図と、冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の CCT 図をそれぞれ計算によって求め、変態潜熱の発生が CCT 図にいかなる影響を及ぼすかについて検討してみる。

まず、変態潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却曲線と同じになるように温度をコントロールした場合の CCT 図は次のようにして求められる。連続冷却中の変態率を表す(3a)式において対象とする合金の $k(T_i)$ 及び n の値を代入すると、任意の冷却速度 $-AT_i/dt$

に対して温度 T まで冷却したときの変態率 X が求まる。従つてある冷却曲線群に属する種々の冷却曲線に沿つて冷却した場合の、ある一定の変態率に達するまでの時間及びその時の温度が得られ、CCT 図を求めることができる。次に、冷却中に変態潜熱の発生による温度変化がある場合の CCT 図は次のようにして求められる。まず、連続冷却中の変態率を表す(3a)式と冷却中に変態を伴う場合の冷却速度を表す(8a)式に対象とする合金の $k(T_i)$, n , ΔH 及び C_P の値を代入する。このとき変態を伴わない試料を冷却した場合の冷却速度 $-AT'_i/dt$ を決めると、変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線及びある温度 T まで冷却した場合の変態率が求められる。従つて変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線群に属する種々の冷却曲線に沿つて冷却した場合の、ある一定の変態率に達するまでの時間及びその時の温度が得られ、CCT 図を求めることができる。

SKS5 鋼におけるパーライト変態において、冷却がニュートン冷却に従う場合に変態潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却曲線と同じになるように温度をコントロールした場合及び変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線群に対してそれぞれ CCT 図を求めてみる。連続冷却中の変態率を表す(3a)式及び冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却速度を表す(8a)式において $k(T_i) = \exp(-1.24 \times 10^{-3} (T_i - 582)^2 - 13.5)$, $n = 4.0$, $C_P = 0.15$ (cal/g°C) を代入する。ここで $\Delta H = 0$ とおけば変態潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却曲線と同じになるように温度をコントロールして冷却することになる。そのときの冷却曲線に対してある変態率に達するまでの時間及び温度が求まる。5, 50, 95% 変態線に対する計算結果を示すと Fig. 11 の一点鎖線のようになる。また、 $\Delta H = 18.2$ (cal/g) とおけば、変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線に沿つて冷却することになる。5, 50, 95% 変態線に対する計算結果を示すと Fig. 11 の実線のようになる。これら二つの図を比較すると、冷却中に変態潜熱の発生による温度変化がある場合の CCT 図 (実線) は、変態潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却速度と同じになるように冷却をコントロールした場合の CCT 図 (一点鎖線) よりも、全体的に高温側へ移動していることがわかる。また、同一変態率を示す曲線の位置関係を比較すると、5% 変態線は実線 ($\Delta H = 18.2$ (cal/g)) と一点鎖線 ($\Delta H = 0$ (cal/g)) に大きな差はないが、50% 及び 95% 変態線は実線の方が一点鎖線よりも大きく高温側にシフトしている。その結果、変態潜

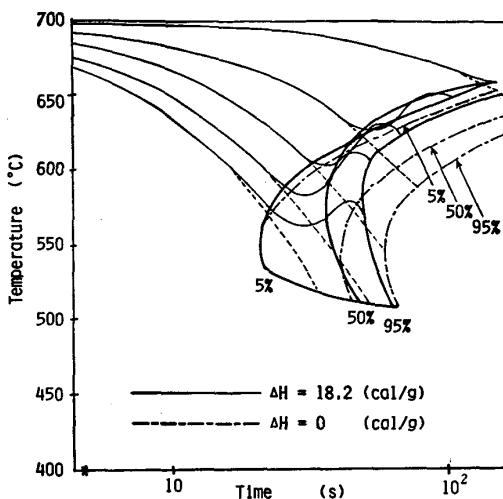


Fig. 11. Comparison of two calculated CCT diagrams. The solid C curves are those with the influence of latent heat evolution, and the dot-dash C curves are those without the influence of latent heat evolution.

熱が発生する場合には高温側で 5, 50, 95% 変態線がほとんど同じ位置に集まり、特に 50% 変態線は 5% 変態線よりも一部高温側にきている。このように、変態潜熱の影響により冷却曲線が複雑な形になる結果、CCT 図も大きく変化する。従つて CCT 図を作成したり使用したりする場合には変態潜熱発生による影響の取扱い方に十分注意する必要がある。

4. 結 論

冷却中に変態潜熱が発生する場合に冷却曲線がどのような影響を受けるか定量的に明らかにする目的で、冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却速度を表す式を導いた。またこの式と加算則を基に導いた連続冷却中の変態率を表す式を用いて、変態潜熱が冷却中の相変態挙動や臨界冷却速度及び CCT 図にいかなる影響を及ぼすかについて検討した。得られた主な結果は次のとおりである。

(1) 変態率に対する加算則を使って、等温変態 Kinetics から連続冷却変態 Kinetics を表す式が次のように導かれた。

$$X = 1 - \exp \left[- \left\{ \int_T^{T_e} \frac{k(T)^{\frac{1}{n}}}{dT} \cdot dT \right\}^n \right]$$

この式の妥当性を SKS5 鋼における冷却中のパーライト変態挙動で確認した。

(2) 冷却中に相変態を伴う場合、冷却曲線は変態潜熱の発生により、相変態を伴わない場合に比べ高温側に移動する。

(3) 冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却速度は変態を伴わない試料を冷却したときの冷却速度 $-\Delta T_i / \Delta t_i$ 、変態潜熱 ΔH 及び比熱 C_P を用いて

$$-\frac{\Delta T_i}{\Delta t_i} = -\frac{\Delta T'_i}{\Delta t_i} - \frac{\Delta X(T_i)}{\Delta t_i} \cdot \frac{\Delta H}{C_P}$$

で与えられる。この式と、変態率に対する加算則から導いた連続冷却中の変態率を表す式を用いて、冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の冷却曲線及び変態挙動を計算できる。SKS5 鋼による冷却の実験からこの方法の妥当性が確認された。

(4) 冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合には、変態潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却曲線と同じになるように温度をコントロールした場合に比べて冷却後の変態率が大きくなる。また、変態潜熱の影響は上部臨界冷却速度に対してはほとんどないが、下部臨界冷却速度は変態潜熱が大きくなるほど速くなる。

(5) 冷却中に変態潜熱の発生に起因する温度変化がある場合の CCT 図は変態潜熱が発生しても変態を伴わない試料の冷却曲線と同じになるように温度をコントロールした場合の CCT 図に比べて高温側へ移動し、特に 50%, 95% 変態線においてその傾向が著しい。

文 献

- 1) 大内千秋、大北智良、山本定弘: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 969
- 2) 梅本 実、田村今男: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 383
- 3) 松津伸彦、矢田 浩、下橋清実: 鉄と鋼, 6 (1980), S 574
- 4) 渡辺 敦、近藤裕計、谷口尚司、菊池 淳: 日本国金属学会講演概要 (1985 年 4 月), p. 205
- 5) P. K. AGARWAL and J. K. BRIMACOMBE: Metall. Trans., 12B (1981), p. 121
- 6) 梅本 実、西岡伸夫、田村今男: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 292
- 7) M. UMEMOTO, K. HORIUCHI and I. TAMURA: Trans. ISIJ, 23 (1983), p. 690
- 8) M. UMEMOTO, K. HORIUCHI and I. TAMURA: Trans. ISIJ, 22 (1982), p. 854
- 9) 梅本 実、堀内一也、田村今男: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 461
- 10) E. SCHEIL: Arch. Eisenhüttenwes., 12 (1935), p. 565
- 11) J. W. CAHN: Acta Metall., 4 (1956), p. 572
- 12) J. J. KRAMER, G. M. POUND and R. F. MEHL: Acta Metall., 6 (1958), p. 763