

論 文

UDC 621.785.616 : 621.785.08

冷却母曲線の応用について*

時 弘 義 雄**・田 村 今 男***

Applications of Master Cooling Curve

Yoshio TOKIHIRO and Imao TAMURA

Synopsis:

The estimation of hardness distribution curves of the cross section of steel bars quenched was made from the master cooling curves of coolants and CCT diagrams of steels. These results were in good agreement with the measured hardness distribution curves for respective steels. The results based on the master cooling curve was compared with those by Lamont's method and Wever-Rose's method. In consequence of this comparison, it was found that the method of the master cooling curve was excellent in accuracy and in the range of application for different types of steels and coolants. The critical diameters could be also derived from the master cooling curves and CCT curves. This result was in better agreement with the practical results than that of the Grossman's method.

(Received Nov. 28, 1973)

1. 緒 言

焼入冷却剤にはそれに焼入れられる試片とは独立に、その冷却剤固有の冷却挙動を示す冷却曲線が存在するはずで、これを冷却母曲線と呼び前報¹⁾²⁾までにこの冷却母曲線の導出方法を述べた。実際焼入作業において必要とされるのは、鋼材を冷却剤に焼入れたときの変態挙動および硬化挙動を知ることである。本報では冷却母曲線より焼入試片の必要とする位置の冷却曲線を導出し、これより試片断面の焼入硬度分布曲線を求め、実測結果と比較検討せんとするものである。なお従来 2, 3 の焼入硬度推定方法³⁾⁴⁾が提案されているが、これらの方法と母曲線による推定方法とを比較し、いかなる点で母曲線法がすぐれているかも示す。

GROSSMANNらは鋼材の焼入性の定量的表現として理想臨界直径の概念を提案し、これより焼入試片の中心が50%マルテンサイト組織になる最大直径 D_0 (臨界直径) を求める方法を提案している⁵⁾。この D_0 の値は冷却母曲線を利用することによっても求められる。著者らは、GROSSMANNらの方法による D_0 の値と母曲線による D_0 の値を求め、実測結果と比較した場合母曲線を利用するほうがすぐれていることもあわせて報告する。

2. 冷却母曲線による焼入硬度分布曲線の推定方法

冷却母曲線からその冷却剤に焼入れんとする試片の中

心部冷却曲線を導出するには、焼入試片の $\{(D \cdot W/S)^{1.31} \cdot a^{-0.215}\}$ の値を計算し、これを母曲線の横軸の目盛りに乗じてやればよい。ここに D は試片寸法、(球, 円柱は直径, 正四角柱は断面の一辺の長さなど) W/S は焼入試片と相似で単位寸法における試片の体積と表面積の比、 a は試片の熱拡散率である。いま直径 1.0 cm, 高さ 3.0 cm の銀円柱を 60°C 大豆油に焼入れて求めた冷却母曲線を Fig. 1 に示す。この母曲線から前述の方法で、直径 2.0 cm, 高さ 6.0 cm の SCr3 鋼円柱試片を 60°C 大豆油に焼入れた場合の中心部冷却曲線を導出し、実測冷却曲線と比較したものを Fig. 2 に示す。ただし S の値は試片上部に試片支持棒をとりつけて焼入れしたため、上表面を含まず側面と底面の和をとった。著者らは銀および鋼試片に対し、いろいろの D , W/S の値に対する $\{(D \cdot W/S)^{1.31} \cdot a^{-0.215}\}$ の値を計算し図表にした。この図表の例を Fig. 3 に示す。かかる図表を用意しておくときわめて容易に必要な中心部冷却曲線を、母曲線から導出できる。なお SCr3 の化学成分を Table 1 に示す。

中心部冷却曲線から試片内部のいろいろの位置の冷却曲線が導出できる。すなわち、

(1) 中心部冷却曲線からある試片温度 θ とそれに対

* 昭和48年11月28日受付

** 山口大学教育学部

*** 京都大学工学部 工博

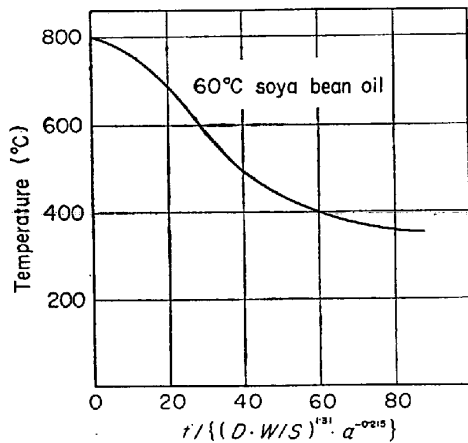


Fig. 1. Master cooling curve for soya bean oil at 60°C by the silver specimen (1.0 cm in diameter).

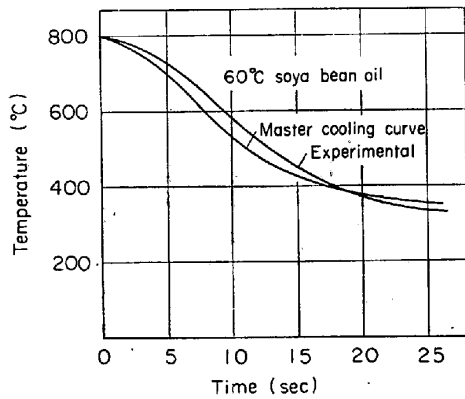


Fig. 2. Comparison of center cooling curve of SCr 3 cylindrical specimens (2.0 cm diameter) derived from master cooling curve with experimental curve.

する冷却時間 t_0 をよみとる。

(2) 試片半径を R とし、試片表面から冷却曲線を探めんとする位置までの距離を x とする。

(3) 試片温度 θ の値に対する位置因子指数 n の値を次式を用いて求める。

$$n = 9.37 \times 10^{-1} - 2.96 \times 10^{-3} \theta + 9.38 \times 10^{-6} \theta^2$$

(4) (1)で求めた t_0 の値に、 $(x/R)^n$ の値を乗じたものが、 x の位置における試片温度 θ に対する冷却時間 t をあらわす。すなわち $t = t_0(x/R)^n$ である。

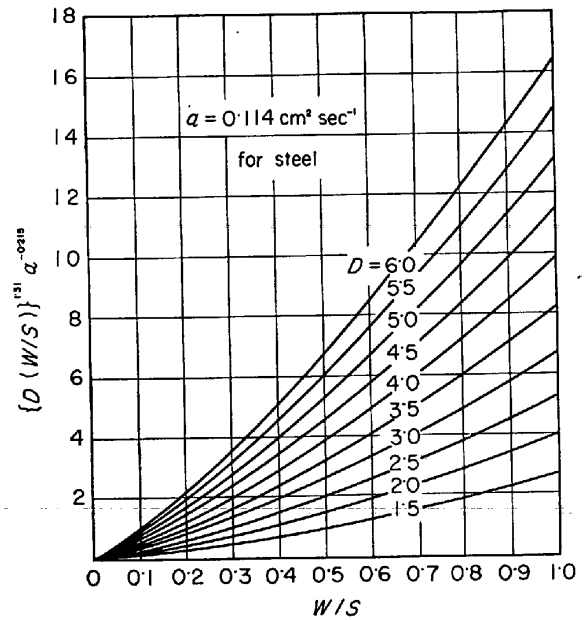


Fig. 3. Relations between W/S and $\{D \cdot (W/S)^{1.31} \cdot a^{-0.215}\}$ for steel specimens of various dimensions, where D is dimension of specimen, W/S is ratio of volume to surface area of specimen in unit size, a is thermal diffusivity of steel.

(5) 同様にして試片温度 θ をいろいろかえてそれに対する冷却時間 t の値を求める。これら多くの (θ, t) の点をグラフ上にとりそれらをなめらかな曲線で結べば、それが求める x の位置での冷却曲線となる。

要するに中心部冷却曲線を $(x/R)^n$ に縮小すればよい。焼入温度 850°C に対する 60°C 大豆油の冷却母曲線より直径 2.0 cm 高さ 6.0 cm の円柱形鋼試片の中心部冷却曲線を探め、これからいろいろの x/R の位置での冷却曲線を導出したものを Fig. 4 に示す。図中の数字は x/R の値である。

Fig. 4 に示したような試片断面のいろいろの位置の冷却曲線とその鋼の連続冷却変態線図に重ねると、その鋼の焼入硬度分布曲線が推定できる。硬度推定の規準としては GROSSMANN らの半温時間⁵⁾と、WEVER らの 800°C から 500°C までの冷却時間が等しければ同一鋼種では硬度は等しいとする 2 つの方法があるが、そのいずれによるも大差はない。なおここに多少の問題がある。すな

Table 1. Chemical compositions of specimens used.

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
SK 6	0.72	0.28	0.48	tr	0.009				
SCM 3	0.35	0.23	0.82	0.022	0.006		1.08	0.27	
SCr 3	0.38	0.21	1.08	0.004	0.030		1.06		
SNM 5	0.30	0.25	0.53	0.014	0.021	2.75	2.75	0.59	0.13

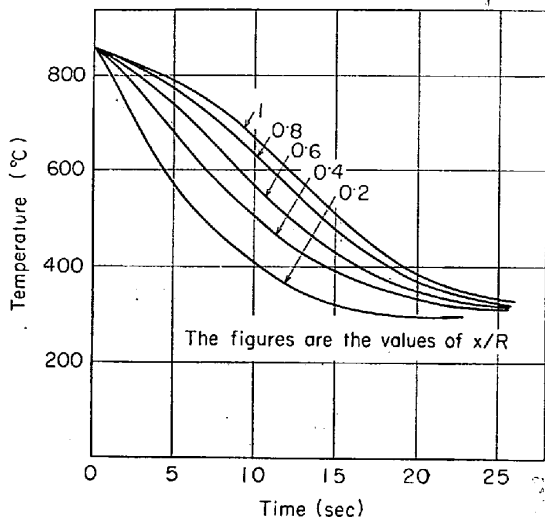


Fig. 4. Calculated cooling curves at various positions of SCr 3 cylindrical specimens quenched into soya bean oil at 60°C.

わち連続冷却変態線図はもともとと同じ形の冷却曲線を示し、しかも1つのパラメーターが変化することによって冷却速度が変わるような一連の冷却曲線群をもとにして作図されている。したがって冷却挙動が異なれば当然連続冷却変態線図の形も異なってくる。しかしその影響は小さいとして無視することとする。

いま上述の例として、Table 1 にその化学成分を示す直径 2.0cm の SCr3 鋼棒を 60°C 大豆油に焼入れたときの試片断面のいろいろの位置の冷却曲線から、焼入硬度分布曲線を求めてみる。Fig. 5 は SCr3 の連続冷却変態線図に Fig. 4 に示した冷却曲線群を記入したものである。図中の数字は x/R の値を示す。いま WEVER ら

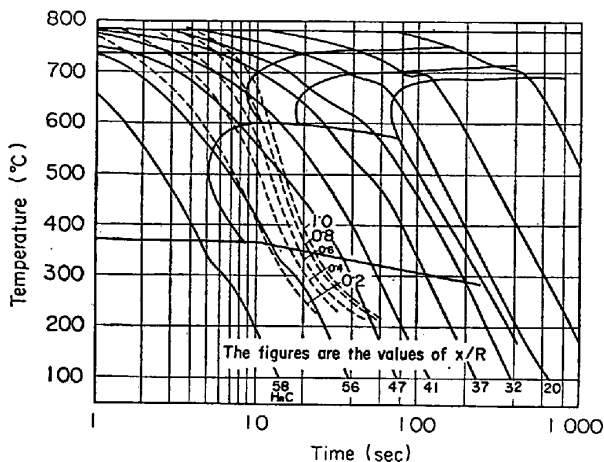


Fig. 5. Continuous cooling transformation diagram of SCr 3 and cooling curves at various positions of SCr 3 specimen of 2.0 cm diameter.

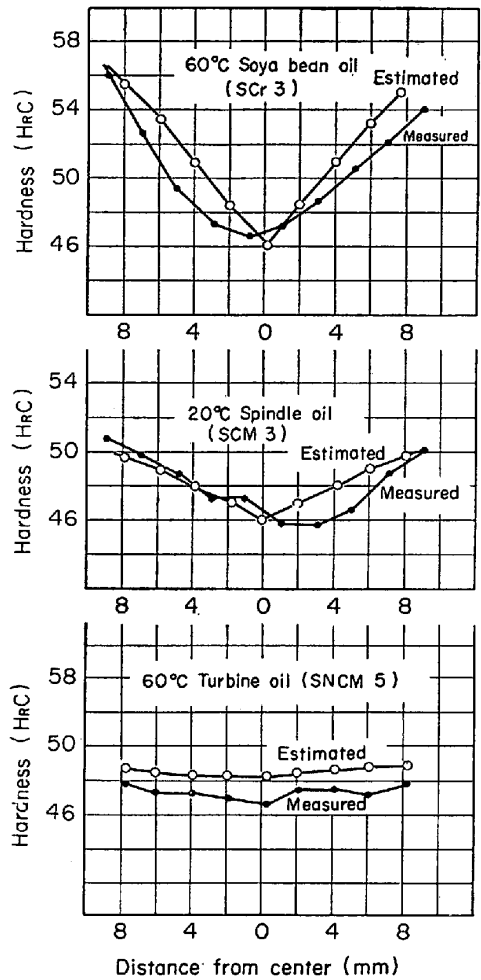


Fig. 6. Comparison of estimated hardness distributions by master cooling curves with measured hardness distributions.

の考えに従って、Fig. 5 に示したいろいろの位置の導出冷却曲線の 500°C における冷却時間を読みとり、その冷却時間に相当する位置を連続冷却変態線図上の 500°C の線上に定める。その定められた位置より硬度が推定できる。このようにして x/R の 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 および中心の各位置に対し硬度を求め図示すれば Fig. 6 のようになる。なお図中には実測硬度も示してある。Fig. 6 をみると推定硬度は実測硬度とかなりよく一致し、冷却母曲線による焼入硬度分布推定法は、実際焼入作業に対し有意義なものとなっていることがわかる。

3. 従来の断面硬度分布推定方法と冷却母曲線による推定方法との比較

鋼材を焼入れた際の断面の硬度分布を机上で推定する方法はきわめて少なく、LAMONT⁴⁾のジョミニー曲線を利用する法、WEVER および ROSE³⁾の方法などがあるにすぎない。いまこれらの方法と冷却母曲線を利用する方

法とを比較検討する。

3.1 ジョミニー曲線を利用する方法との比較

LAMONT は焼入れされる丸棒の直径, ジョミニー試片の水冷端からの距離, 冷却剤の焼入強烈度との関係曲線を, r/R のいろいろの値に対して与えている. ここに R は丸棒の半径, r は丸棒の中心から硬度を求めんとする位置までの距離である. いま r/R のある値のときに試片直径および焼入強烈度がわかると, 上記の線図よりこれに応ずるジョミニー距離が定まる. このようにして多くの r/R の値に対する硬度を求めれば焼入硬度分布曲線が推定できる.

この方法で SCr3, SCM3 の直径 2.5 cm, 長さ 6.5 cm の丸棒を, 20°C 蒸溜水, 20°C 鯨油に焼入れた際の硬度分布曲線を求め Fig. 7 に示す. 図中には母曲線による推定硬度分布曲線と実測硬度分布曲線も示している. Fig. 7 をみると蒸溜水に焼入れた場合は三者とも同程度の一致を示しているが, 鯨油については, ジョミニー曲線を利用する方法は実測結果とあまりよい一致はえられなかつた. しかし母曲線を利用した場合は実測結果と比較的よく一致している.

一般にジョミニー曲線を利用する方法は, 焼入強烈度および試片寸法の大きい場合に適用するのがよく, これ

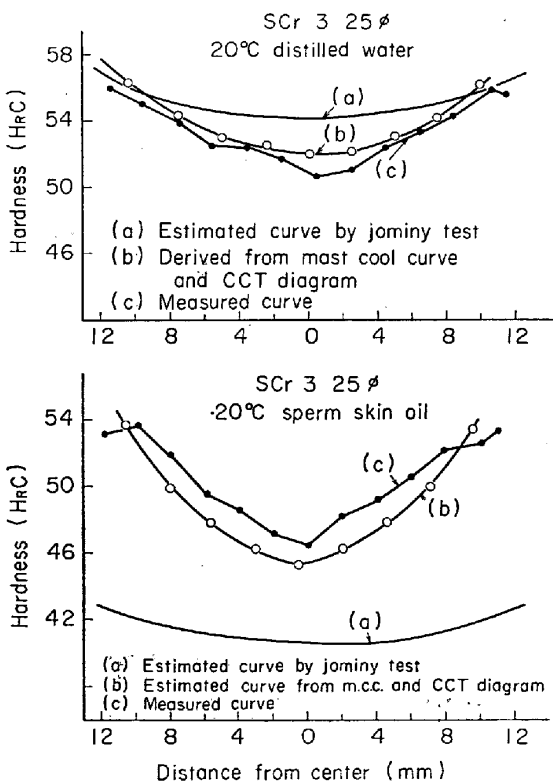


Fig. 7. Estimated hardness distribution curves by master cooling curves, Jominy curves and measured curves (continued).

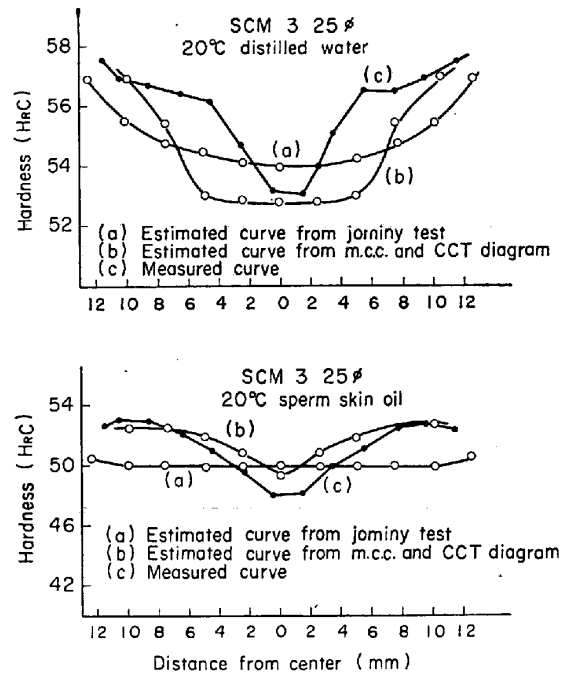


Fig. 7. Estimated hardness distribution curves by master cooling curves, Jominy curves and measured curves.

らの曲線を利用する方法は, いかなる試片寸法および形状の場合でも適用でき, 広い範囲の冷却剤に対し比較的良好に実測結果と一致する.

3.2 WEVER および ROSE の方法との比較

WEVER および ROSE³⁾は直径 2.8 cm, 4.8 cm および 9.5 cm の 34Cr4 鋼を水焼き入れしたときの, 試片断面各位置における 800°C から 500°C までの冷却時間を測定し, これとその鋼のジョミニー曲線から焼入断面の硬度分布を推定し, 実測結果とよく一致すると述べている. 著者らは彼らの方法を用いて, 直径 2.8 cm の SCM3 の丸棒を 20°C の水に焼入れた際の断面硬度分布曲線を求めた. これを Fig. 8 に示す. 図中には母曲線を用いて求めた硬度分布曲線および実測硬度分布曲線も示す.

Fig. 8 をみると WEVER らの方法による曲線は実測結果とあまりよい一致をみていない. これは彼らの示す図を用いたのでは, 試片直径の小さい場合には試片中心から少し離れた位置ではすでに 800°C から 500°C までの冷却時間が正確に定めにくいことが原因であろう. 一方母曲線を利用する方法は実測結果と比較的よく一致している.

一般に WEVER らの方法は試片の直径が小さい場合には適用が無理なようである. また水以外の冷却剤に対しての適用も困難である. これに対し母曲線を利用する方法は, 水のみでなく, 多くの冷却剤に適用できる点, お

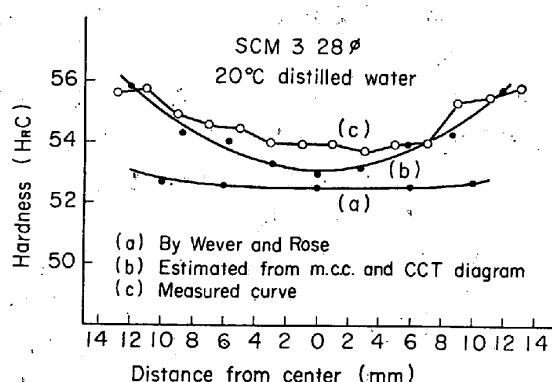


Fig. 8. Estimated hardness distribution curves by master cooling curves, Wever and Roses' method and measured curves.

よびいかなる寸法、形状の試片にも適用できる点、実測結果と比較的よく一致する点などにおいてすぐれている。

4. GROSSMANN らの方法による臨界直径と冷却母曲線による臨界直径

冷却母曲線概念は元来冷却剤の冷却能の定量的表示法として提案されたものであるが、この母曲線を利用することによりいろいろ重要な値を求めることができる。その一つとして臨界直径がある。従来この臨界直径を求めるには GROSSMANN らの方法が用いられている。以下に GROSSMANN らによる方法と母曲線による方法とを比較検討する。

4.1 GROSSMANN らによる方法

GROSSMANN らは理想臨界直径 D_I 、冷却剤の焼入強度 H 、中心が 50% マルテンサイト組織になる最大直径 D_0 との関係熱移動の式を用いて求め、便利な線図を与えている。 D_I および H の値がわかればこの線図から D_0 の値が求まる。 H 値については多くの研究者がいろいろの冷却剤について求めている⁷⁾ のでそれを利用する。

D_I の求め方については、GROSSMANN は鋼材の化学成分より焼入性倍数を決定しそれより D_I を求める方法を示している。そのほか GROSSMANN はつぎのような D_I の

求め方も示している。すなわちいろいろの直径の鋼棒を熱放散比 $h = \infty$ で冷却したときの中心における半温時間を計算している。またジョーミニー試片においてそれと等しい半温時間を示すジョーミニー距離を求めている。そしてこのジョーミニー距離とこの鋼棒直径との間に関係曲線を与えている。したがってこの関係を用いると、ジョーミニー試片において 50% マルテンサイトを生ずる位置がわかるとそれより D_I の値が求まる。

以上 2 つの方法のいずれかによつて D_I を求めれば D_0 の値が定まる。このような方法で Table 1 に化学成分を示す SCM3, SGr3, SK6 の鋼棒を 20°C 蒸溜水 ($H=0.4 \text{ cm}^{-1}$)、20°C 鯨油 ($H=0.12 \text{ cm}^{-1}$) に焼入れたときの 100% マルテンサイトに対する臨界直径を求めたものを Table 2 に示す。Table 2 の欄内の右側の数字は GROSSMANN らの方法で求めた臨界直径の値で、上段が焼入性倍数を利用したもの、下段はジョーミニー焼入曲線より求めたものを示す。単位はすべて cm である。GROSSMANN らの方法では 50% マルテンサイトに対する臨界直径が与えられる。後述するように母曲線法による 100% マルテンサイトに対する臨界直径が与えられるので、これらの値の比較のため文献 8) の図を利用して GROSSMANN らの値を 100% マルテンサイトに対する臨界直径に換算した。

ジョーミニー焼入試片上で 50% マルテンサイトを生成する位置を求めるのは、顕微鏡組織によるのが普通である。しかし合金鋼においてはその位置は顕微鏡組織からは明瞭に定めにくい。著者らも SMC3 および SGr3 においてそれを求めることが困難であつた。したがつてつぎのようにして 50% マルテンサイトの位置を定めた。すなわち普通鋼および低合金鋼においては、各種マルテンサイト % に対する硬度はほぼその炭素量によつて定まる。一方炭素量と各種マルテンサイト % における硬度との関係線図が与えられている⁹⁾。よつて炭素量がわかると 50% マルテンサイトの硬度がわかり、その硬度におけるジョーミニー試片水冷端からの距離が求まる。

4.2 冷却母曲線による方法

冷却母曲線を利用して臨界直径を求めるにはつぎのよ

Table 2. Critical diameters for 100% martensite in SCM 3, SGr 3 and SK 6.

	SCM 3		SGr 3		SK 6	
	20°C Distilled water ($H=0.4 \text{ cm}^{-1}$)	2.0 cm 4.1 cm 2.8	2.2 cm	2.8 cm 2.0	0.7 cm	0.4 cm 0.6
20°C Sperm skim oil ($H=0.12 \text{ cm}^{-1}$)	1.0	2.7 1.5	1.1	1.6 1.1		

うにすればよい。

(1) 焼入れんとする鋼材の連続冷却変態線図上に、冷却剤の冷却母曲線と相似でパーライト変態開始線（またはベイナイト変態開始線）に接する、すなわち上部臨界冷却速度を有する冷却曲線をひく。

(2) この冷却曲線の 800°C から 500°C までの冷却時間 t_1 の値をよむ。

(3) 焼入れんとする冷却剤の冷却母曲線の 800°C から 500°C までの横軸の値 t_m を読む。

(4) この t_1 と t_m の間には冷却母曲線作製の際に明らかにしたように次式が成立つ。

$$t_1 = t_m \{ (D_0 \cdot W/S)^{1.31} \cdot a^{-0.215} \} \dots\dots\dots (1)$$

ここに D_0 は臨界直径、 W/S は臨界直径を求めんとする棒と相似で直径 1.0 cm の丸棒の体積と表面積の比を、 a は鋼材の熱拡散率を示す。

(5) (1)式において D_0 以外のすべての数値は既知であるので、これより臨界直径 D_0 の値は求まる。

いま SCM3 を鯨油に焼入れたときの臨界直径を求めするために、SCM3 の連続冷却変態線図上に冷却母曲線より臨界冷却速度を有する冷却曲線を求めて描いたものを Fig. 9 に示す、Fig. 9 に示した冷却曲線から $t_1 = 4$ sec、また 20°C 鯨油の冷却母曲線から $t_m = 0.65$ をうる。これらの値と $a = 0.114 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ の値を(1)式に入れて臨界直径 $D_0 = 2.0 \text{ cm}$ をうる。同様にして Table 1 に化学成分を示す SCr3 および SK6 の丸棒を 20°C の水および鯨油に焼入れたときの臨界直径を上記と同様にして求めた値を Table 2 の左側の欄に示す。単位はすべて cm である。

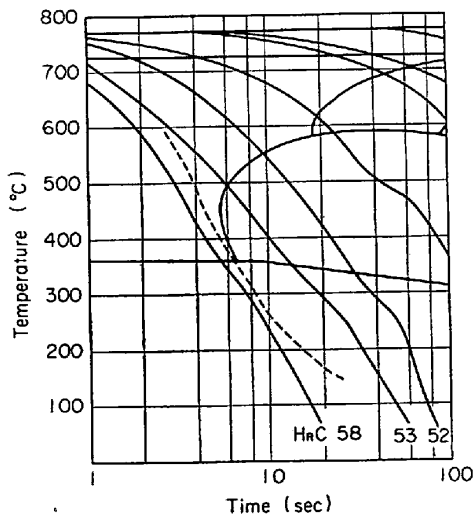


Fig. 9. Continuous cooling transformation diagram of SCM 3 and cooling curve of sperm skin oil at upper critical cooling velocity.

4.3 GROSSMANN らの方法と冷却母曲線による方法との比較

Table 2 をみると、GROSSMANN らのジョミニー曲線を利用する方法と、冷却母曲線を利用する方法とではいずれの鋼種でもその値が近い。焼入性倍数を用いて理想臨界直径を求めそれより臨界直径を導いた場合は、必ずしも前二者とその値が近似していない。焼入性倍数は 2, 3 の仮定の上に立つてその値を求めるのであるが、その仮定は必ずしも正しくないとして批判を加えられている¹⁰⁾¹¹⁾。また焼入性倍数の値も実験者によつて若干差がある。著者らは AISI で採用しているものをつた。焼入性倍数を用いて求めた臨界直径の値が他の方法による値と異なるのは、この焼入性倍数に原因があると思われる。

冷却母曲線を利用して求めた臨界直径の値と焼入性倍数を用いた場合とでは、SCM3 においてかなりの差がある。いずれが実際と一致するかを実験的に検討してみた。すなわち焼入性倍数による臨界直径 4.0 cm および 2.7 cm の SCM3 の丸棒と、冷却母曲線による臨界直径 2.0 cm および 1.0 cm の SCM3 の丸棒を、それぞれ 20°C の水および鯨油に焼入れて中心部硬度を測定した結果を Table 3 に示す。Table 3 から明らかなように冷却母曲線により臨界直径を求めた丸棒は、中心部も完全硬化しているが、焼入性倍数を用いて臨界直径を求めた丸棒の場合は、中心は完全にマルテンサイト組織にはなっていない。

以上のことから臨界直径を求める場合には、冷却母曲線を利用したほうが焼入性倍数を利用したものより精度がすぐれている。また、冷却母曲線を利用する方法はその求め方においても GROSSMANN らの方法より簡単である。

Table 3. Comparison of hardness at the center of SCM 3 bars, which were quenched into water and oil, with critical diameters derived from Grossmann's method and present author's method.

Diametes of specimens	Coolants	Hardness (H _R C)	
4.0 cm	20°C water	51.7	Grossmann
2.0	"	56.7	Present authors
2.7	20°C Sperm skin oil	48.0	Grossmann
1.0	"	57.3	Present authors

5. 結 言

焼入冷却剤の冷却母曲線を用いて焼入試片の中心部冷却曲線を導出し、これより試片内部のいろいろの位置の冷却曲線を求め、これらの曲線群をその鋼材の連続冷却変態線図に重ねると、その焼入試片断面の硬度分布曲線が推定できる。このようにしていろいろの鋼材を水および各種の油に焼入れたときの、試片断面の焼入硬度分布曲線を求め実測結果と比較したところよく一致した。

焼入鋼の断面硬度分布推定法にはほかに 2, 3 の方法がある。これらの方法と比較しても実測結果との一致度、適用できる鋼種範囲などにおいても母曲線を用いるほうがすぐれている。

冷却母曲線を応用すれば臨界直径も求められる。しかもその求め方においても GROSSMANN らの方法より母曲線を利用するほうが簡単である。

文 献

- 1) 時弘, 田村: 鉄と鋼, 60 (1974) 6, p. 661
- 2) 時弘, 田村: 鉄と鋼, 60 (1974) 6, p. 671
- 3) F. WEVER and A. ROSE: Stahl u. Eisen, 74 (1954), p. 749
- 4) J. L. LAMONT: Iron Age, (1934) oct., p. 14
- 5) M. A. GROSSMANN: Elements of Hardenability, (1952), [ASM]
- 6) F. WEVER, A. ROSE, and W. STRASSBURG: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, (1954), [Stahleisen]
- 7) 鉄鋼工学講座: 鋼の熱処理技術, (1969), p. 69 [朝倉書店]
- 8) 大和久: 焼入性—焼きの入り方, (1967), p. 135 [日刊工業]
- 9) J. M. HÄDGE and M. A. OREHOSKI: Trans. AIME, 167 (1946), p. 627
- 10) J. H. HOLLOMON and L. D. JAFFE: Trans. AIME, 167 (1946), p. 601
- 11) J. GLEN: Iron Steel Inst. Spec. Rep. No. 36, (1946), p. 601