

## 論 文

UDC 621.785.6.08 : 536.24

## 焼入試片の冷却曲線の導出方法\*

時 弘 義 雄\*\*・田 村 今 男\*\*\*

## Method to Derive Cooling Curve of Specimen During Quenching

Yoshio TOKIHIRO and Imao TAMURA

## Synopsis:

A cooling curve whose scale of the abscissa is transformed to  $t/\{(D-W/S)^{1.3} \cdot a^{-0.215}\}$  was proposed as a master cooling curve of the coolant used, where  $t$  is cooling time of a quenched bar

$D$ ,  $W$ , and  $S$  are dimension, weight, and surface area of the bar, respectively, and  $a$  is thermal diffusivity.

$W/S$  is taken for a unit size bar similar to the quenched one.

The curves for various coolants were obtained. A calculated cooling curve of a bar quenched into a still coolant was compared with the measured one of the same bar and in the same coolant, and they coincided well with each other. The method to derive the master cooling curve could be applied for any quenching temperature. A cooling curve of a quenched bar at any inside position could also be inferred by using the curve at the center.

(Received Aug. 10, 1973)

## 1. 緒 言

冷却剤に焼入れた試片の中心部冷却曲線は冷却剤本来の冷却挙動に関係するだけでなく、焼入試片の寸法、形状、材質等によつて変化する。これらの因子の冷却曲線におよぼす影響、すなわち冷却時間と寸法、形状、材質間の関係式を実験的に定めた<sup>1)</sup>。この関係式を用いるとこれらの因子について一般化された冷却曲線を求めることができる。この一般化された冷却曲線が冷却母曲線<sup>2)3)</sup>で、この母曲線を用いるとその冷却剤に焼入れられた試片の中心部冷却曲線を導出できる。

中心部冷却曲線と試片内部の冷却曲線との間にも一定の関係が存在することが推察される。この関係を多くの冷却曲線に基づいて検討し、実験式を導出した。この式より試片内部の冷却曲線を導出すれば、焼入鋼断面の硬度が推定できる<sup>4)</sup>。

## 2. 冷却母曲線の導出方法

## 2.1 寸法について一般化した冷却曲線

冷却時間と試片諸因子間の実験式<sup>1)</sup>を用いて、多くの実測冷却曲線の横軸(冷却時間  $t$ ) の目盛りを  $t/D^{1.31}$  にかえた。これを冷却剤ごとに、焼入試片の形状、材質

が同じで寸法のみ異なる曲線群にまとめた。その一部を Fig. 1, 2, 3 に示す。ここに  $D$  は試片寸法である。Fig. 1 は銀正四角柱, Fig. 2 は SK6 球試片, Fig. 3 は SUS27 円柱試片の中心部冷却曲線に対するもので、冷却剤は静止している。図中の数字は試片寸法(円柱, 球は直径, 正四角柱は底面の一辺の長さ)である。

これらの図をみると、冷却剤ごとにまとめた曲線群は、試片寸法が変わると若干ずれており完全には重なっていない。油は比較的良好に重なっているが水はやや一致しにくい。しかしこの程度のずれは実用上は問題ない。これら曲線群の平均冷却曲線をとつたものを Fig. 4, 5, 6 に示す。Fig. 4 は銀試片, Fig. 5 は SK6 試片, Fig. 6 は SUS27 試片に対するものである。Fig. 4, 5, 6 に示した曲線は試片寸法について一般化された冷却曲線である。

## 2.2 寸法および形状について一般化した冷却曲線

Fig. 4, 5, 6 に示した曲線を見ると、同一冷却剤の円柱および正四角柱の曲線はきわめてよく一致している。

\* 昭和46年10月本会講演会にて発表  
昭和48年8月10日受付

\*\* 山口大学教育学部

\*\*\* 京都大学工学部 工博

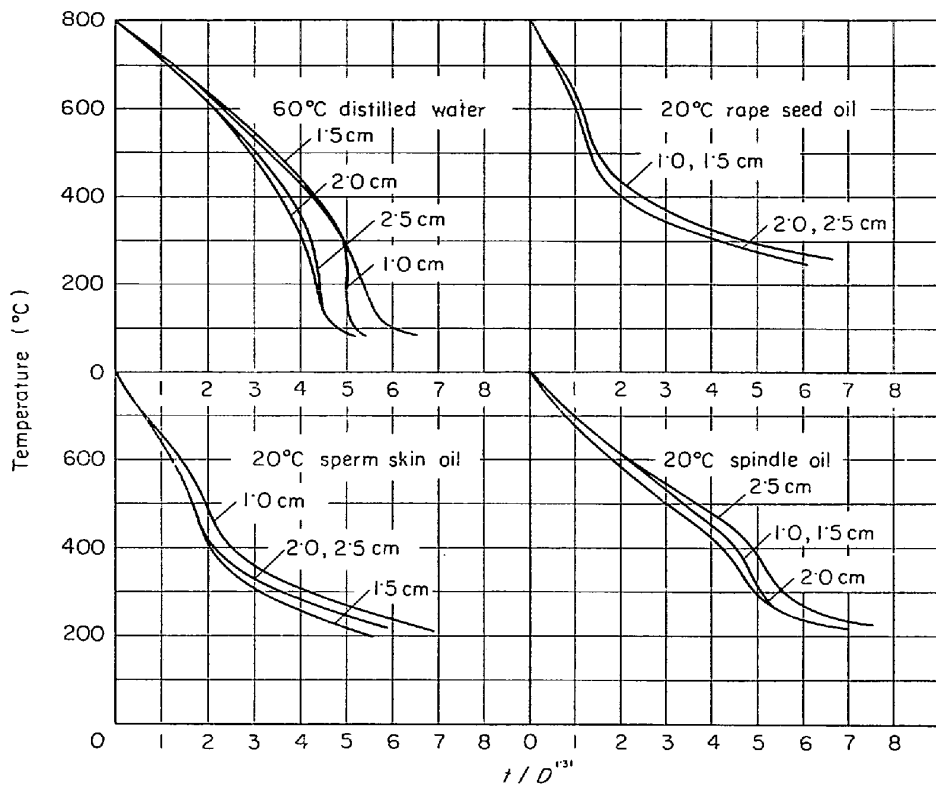


Fig. 1.  $t/D^{1.31}$ -Temperature curves derived from center cooling curves of silver square prism specimens.

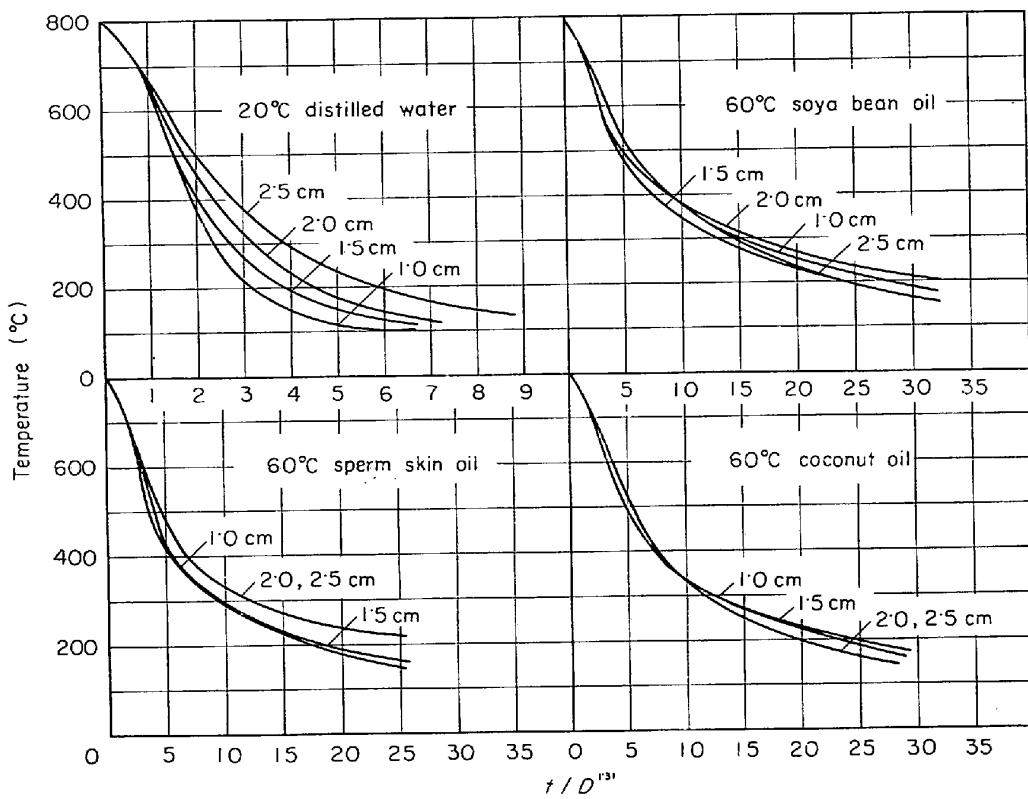


Fig. 2.  $t/D^{1.31}$ -Temperature curves derived from center cooling curves of SK6 sphere specimens.

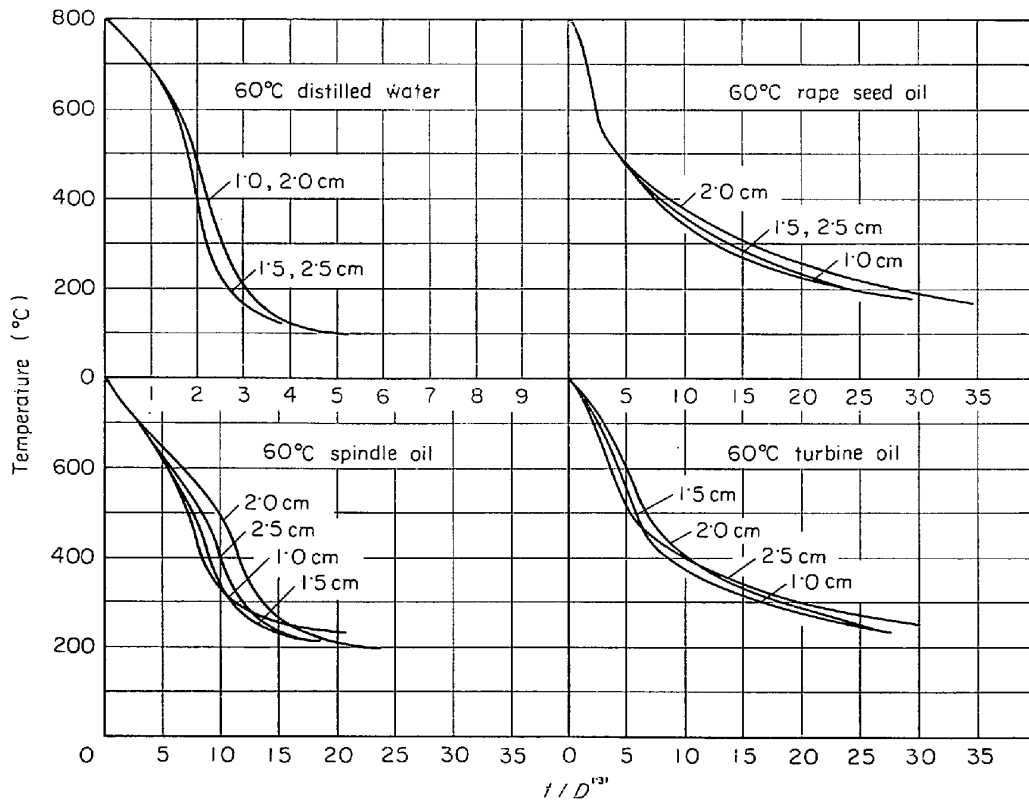


Fig. 3.  $t/D^{1.31}$ -Temperature curves derived from center cooling curves of SUS27 cylindrical specimens.

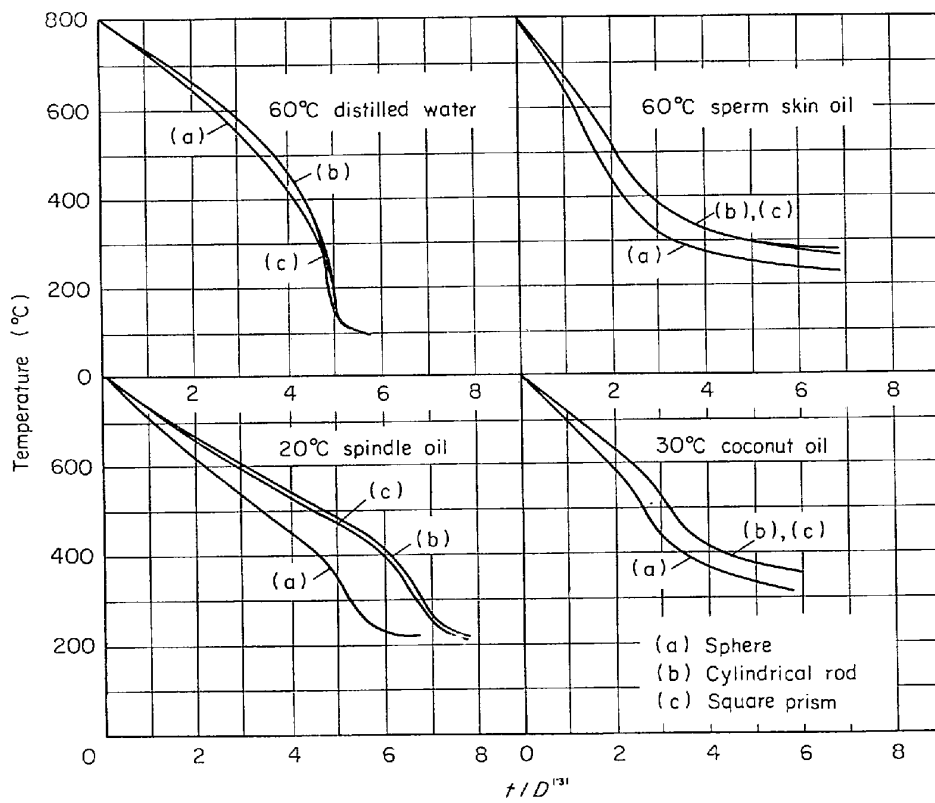


Fig. 4. Master cooling curves normalized on dimensions derived from the cooling curves at center of silver specimens.

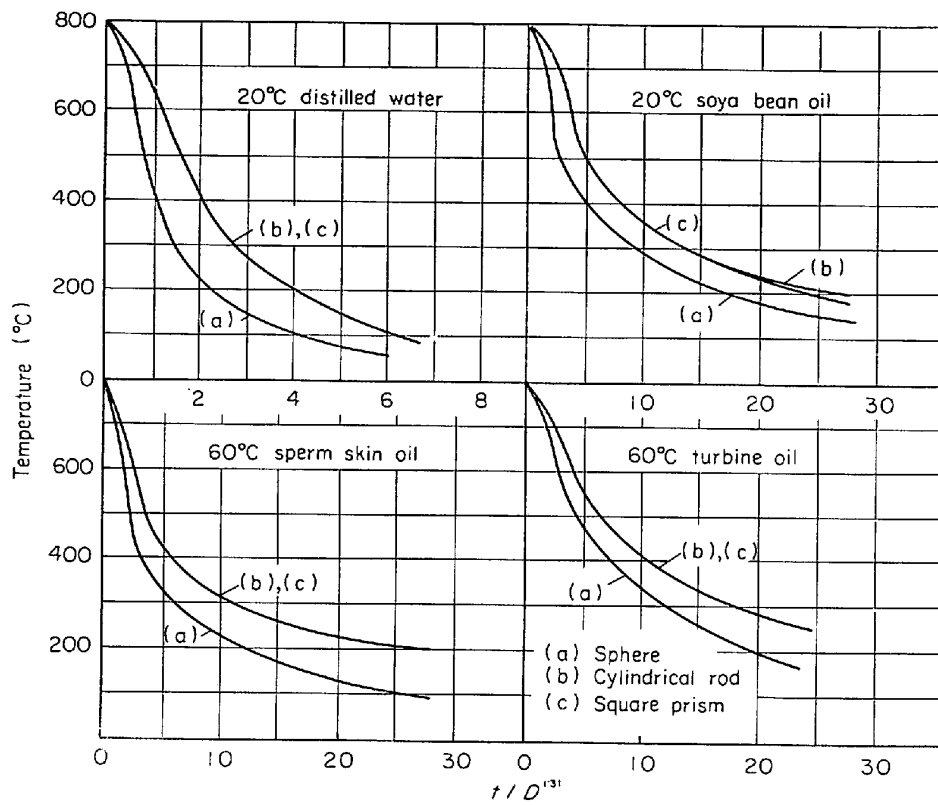


Fig. 5. Master cooling curves normalized on dimensions derived from the cooling curves at center of SK6 specimens.

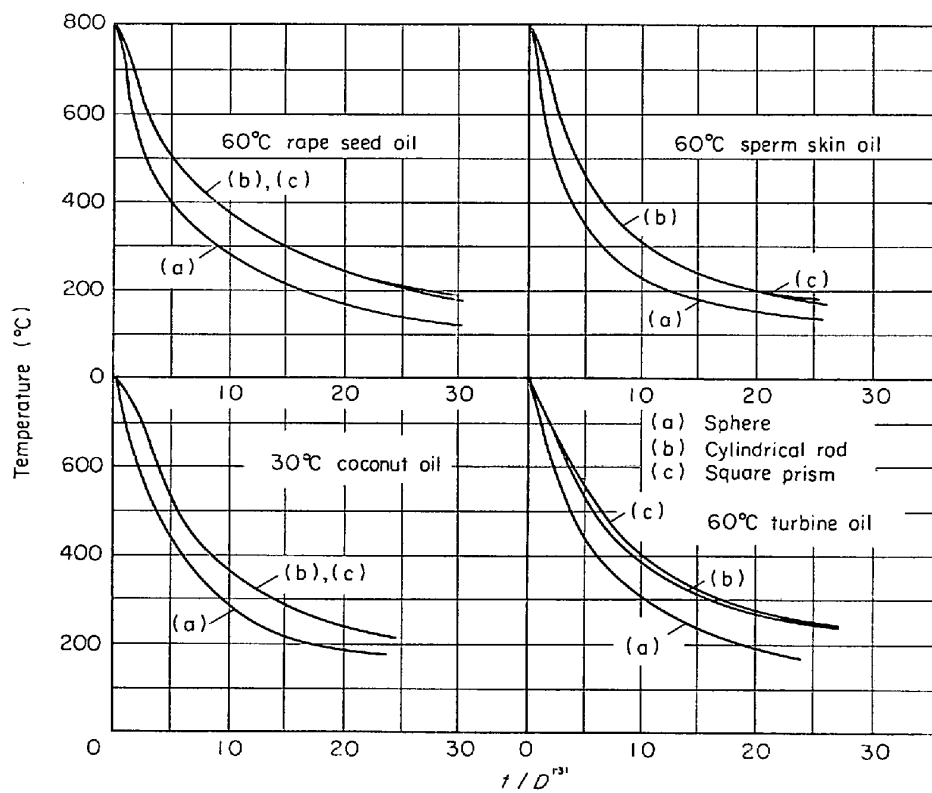


Fig. 6. Master cooling curves normalized on dimensions derived from the cooling curves at center of SUS27 specimens.

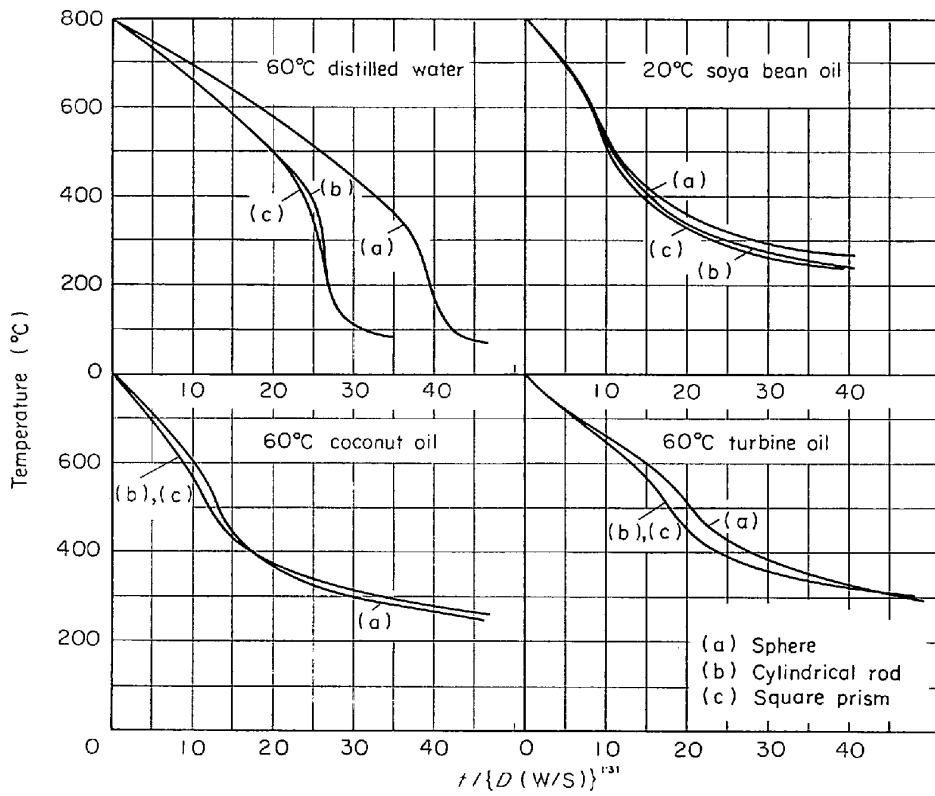


Fig. 7.  $t / \{D \cdot (W/S)\}^{1/3}$ -Temperature curves derived from the cooling curves at center of silver specimens.

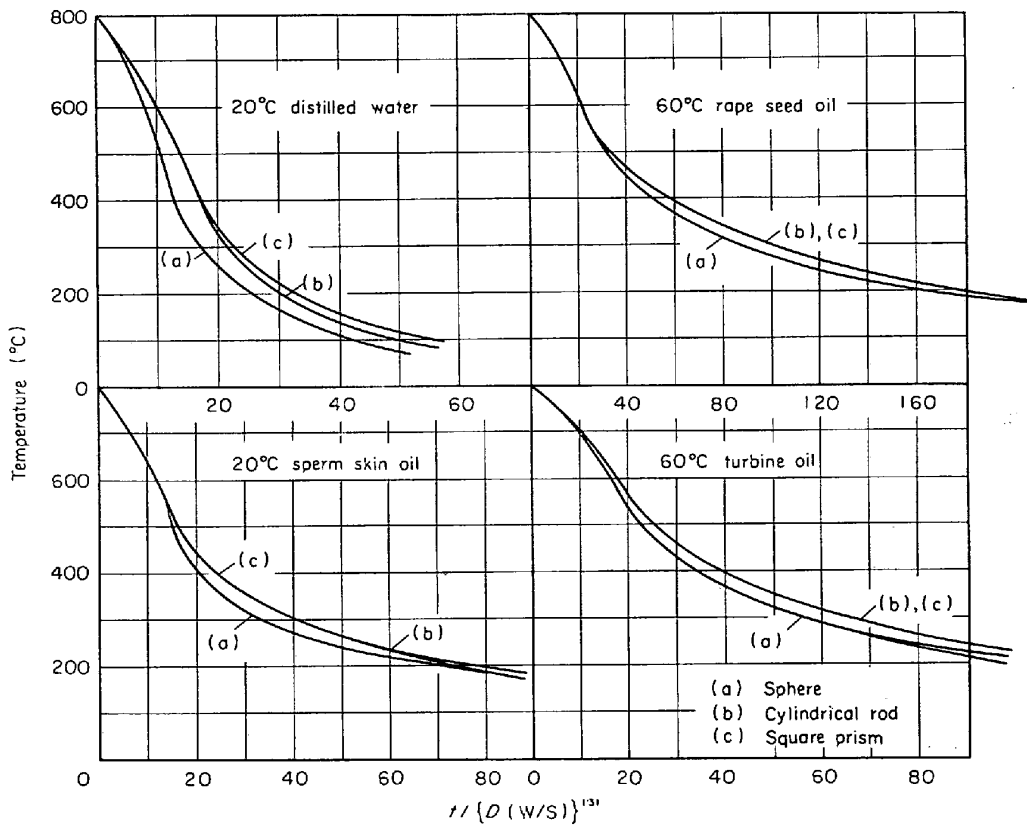


Fig. 8.  $t / \{D \cdot (W/S)\}^{1/3}$ -Temperature curves derived from the cooling curves at center of SK6 specimens.

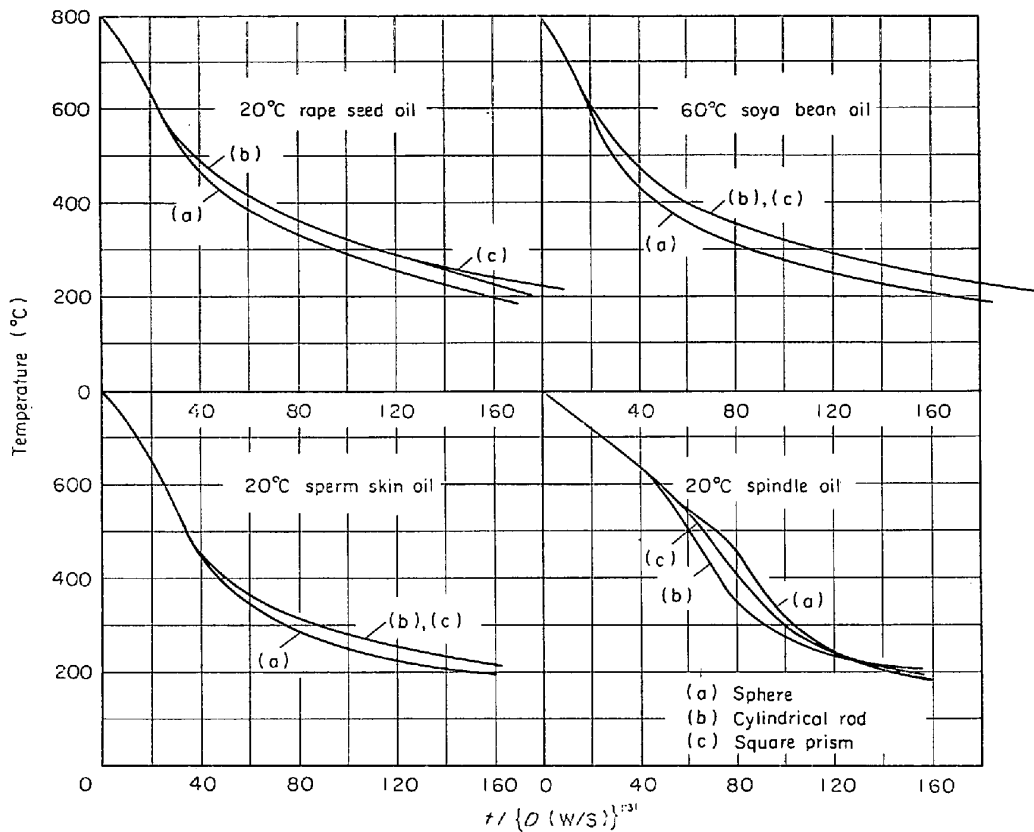


Fig. 9.  $t/\{D \cdot (W/S)\}^{1.31}$ -Temperature curves derived from the cooling curves at center of SUS27 specimens.

円柱と正四角柱では、直径と底面の一辺の長さが等しくかつ高さが等しい試片においては、その  $W/S$  ( $S$ は試片表面積、 $W$ は体積)の値は等しい。寸法について一般化した冷却曲線は換言すれば単位寸法に対する冷却曲線である。よって  $W/S$  が形状因子であれば円柱と正四角柱の寸法について一般化した曲線は一致するはずである。逆にこれら両者の曲線が一致したことは、形状因子として  $W/S$  をとつたことの正しいことを示すものといえる。

寸法について一般化した曲線の横軸の値に  $1/(W/S)^{1.31}$  を乗じ、 $t/\{D \cdot W/S\}^{1.31}$  とした。そのうちの一部を Fig. 7, 8, 9 に示す。Fig. 7は銀試片、Fig. 8は SK6 試片、Fig. 9は SUS27 試片に対するものである。なお  $W/S$  の値としては寸法について一般化した冷却曲線は単位寸法の冷却曲線とみなされるので、 $D=1$  に対するものをとつた。

Fig. 7, 8, 9 をみると、一般化した冷却曲線は銀試片の水の場合を除くと大体において一致している。スピンドル油の場合も一致しにくい、これは水と同様に沸点が低く、冷却曲線の測定においてもやや再現性に劣ることが原因であろう。銀球試片の水の冷却曲線が円柱および正四角柱の冷却曲線と一致しにくいのはつぎのような

理由によるものであろう。

銀球試片を水に焼入れると、球の上部表面に大きな気泡が付着して低温度まで離脱せず、断熱体となつて熱伝達を妨げる。これが銀球試片を水焼入れしたときの冷却曲線が、銀円柱および正四角柱のそれより時間軸方向に伸びている主な理由と思われる。鋼球試片においてはかかる大きな気泡は付着せず、したがって鋼球の冷却挙動は他の形状の試片と大きなへだたりはない。この原因は銀の熱伝導度が大きく、水の沸点が低いことおよび蒸気圧にも関係があると思われる。

Fig. 7, 8, 9 に示した各冷却剤ごとの曲線群は、試片形状の変化とともに若干ずれているので、これら曲線群の平均冷却曲線をとると、これは試片の寸法および形状について一般化された冷却曲線となる。

### 2.3 寸法、形状、材質について一般化された冷却曲線

前述の寸法および形状について一般化した冷却曲線の横軸の値に  $a^{0.215}$  を乗じ、 $t/\{(D \cdot W/S)^{1.31} \cdot a^{0.215}\}$  とした。ここに  $a$  は試片の熱拡散率である、これらの冷却曲線群の一部を Fig. 10 に示す。この図から明らかなように SK6 と SUS27 の冷却曲線はきわめてよく一致しているが、銀と鋼とでは一致度はよくない。とくに水に

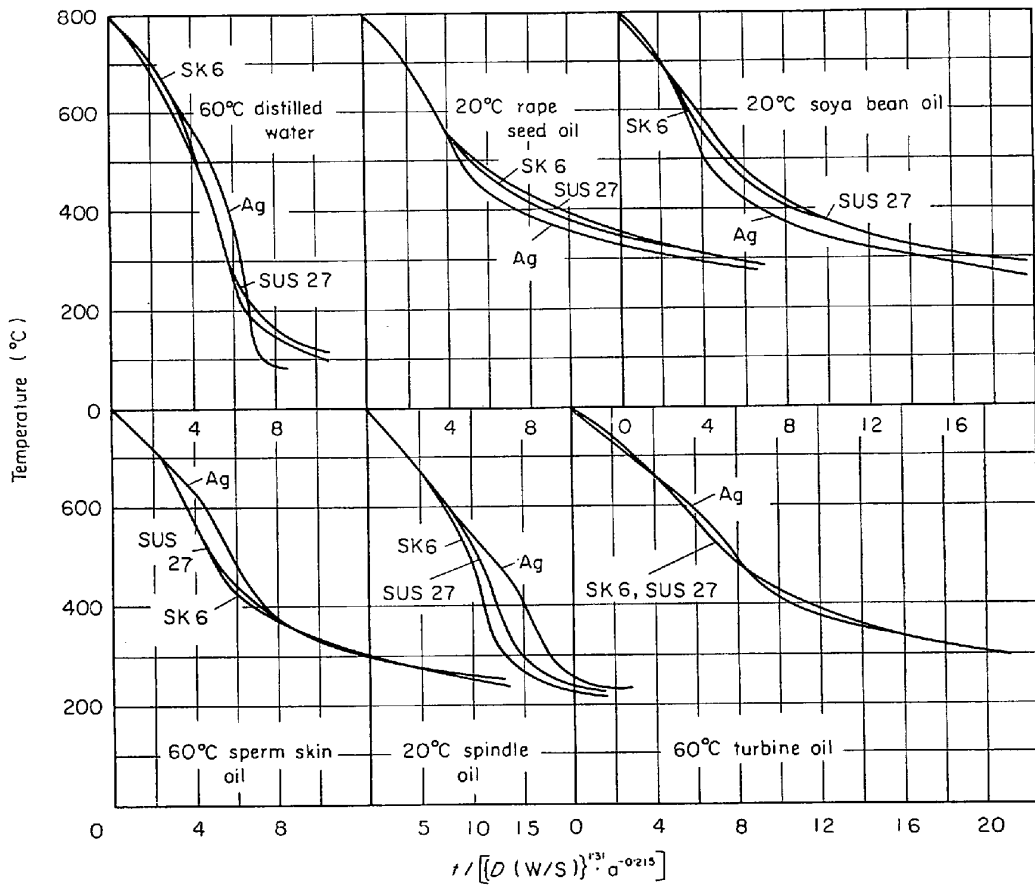


Fig. 10.  $t / [D(W/S)]^{1.31} a^{-0.215}$  Temperature curves of Ag, SK6 and SUS27 specimens at center quenched into several coolants.

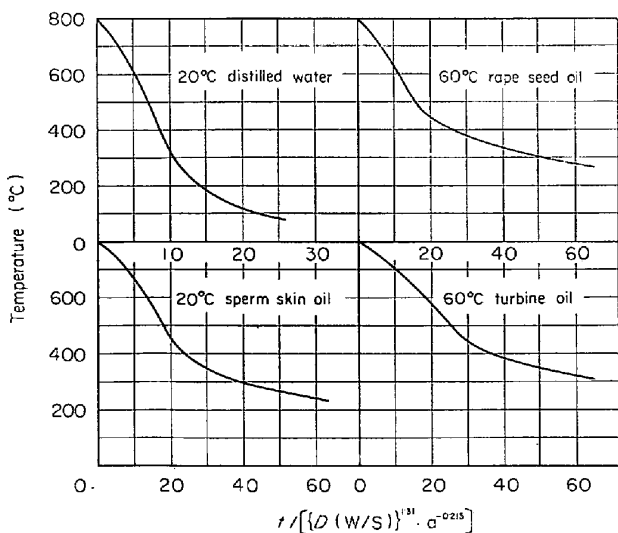


Fig. 11. Master cooling curves normalized on dimensions, shapes and materials of specimens at center quenched into several still coolants.

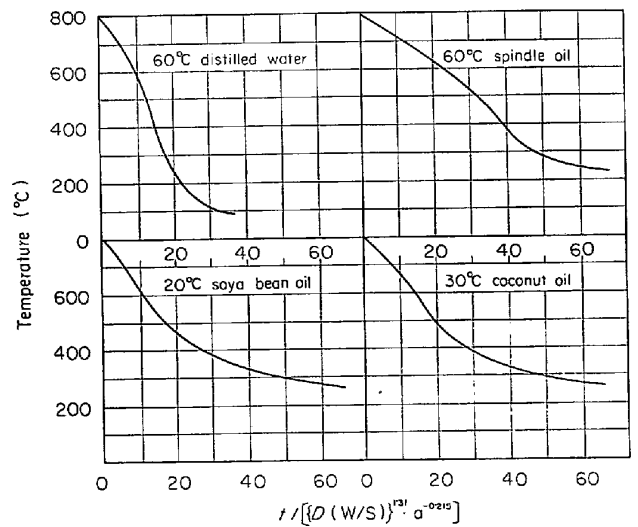


Fig. 11. Master cooling curves normalized on dimensions, shapes and materials of specimens at center quenched into several still coolants (continued)

対する一致度が悪くついでスピンドル油である。一般に特性温度や沸点の低いもの程一致度が劣るようである。かかる冷却剤は実測冷却曲線においても再現性が劣る。

銀と鋼とでは特性温度の値も異なり冷却曲線の形状も一致しないために、横軸方向にのみ拡大または縮小したのでは、銀試片と鋼試片の冷却曲線が重なりにくいのは

当然である。しかし温度軸方向にも移動することは操作上繁雑である。この程度の相違は著者らの最終目的とする焼入硬度推定に対してほとんど影響を与えない。したがってこれをもつて寸法、形状および材質に対する一般化とする。

Fig. 10 に示した寸法、形状、材質について一般化された冷却曲線の平均的冷却曲線をとると Fig. 11 のようになる。冷却曲線に影響を与える主な試片因子は寸法、形状、材質である。よつて Fig. 11 に示した冷却曲線は試片に関係しない冷却曲線となり、これがそれぞれの静止冷却剤の試片中心部の冷却母曲線である。

### 3. 冷却母曲線より導出した中心部冷却曲線と実測冷却曲線との比較

焼入試片の寸法、形状、材質とそれを焼入れる冷却剤の種類がきまれば、その冷却剤の冷却母曲線を用いることにより試片の中心部冷却曲線が導出できる。この導出冷却曲線と実測冷却曲線との一致度を調べてみた。

Fig. 12 の(a), (b)および(c)で示す曲線は、直径 1.0cm, 長さ 3.0cm の SK6 鋼円柱をそれぞれ 20°C 蒸留水, 20°C なたね油および 20°C 鯨油に焼入れたときの実測中心部冷却曲線と、母曲線から導出した冷却曲線を示す。(d)は底面の一辺 1.5cm, 高さ 4.5cm の正四角柱を 20°C のスピンドル油に、(e), (f) は底面

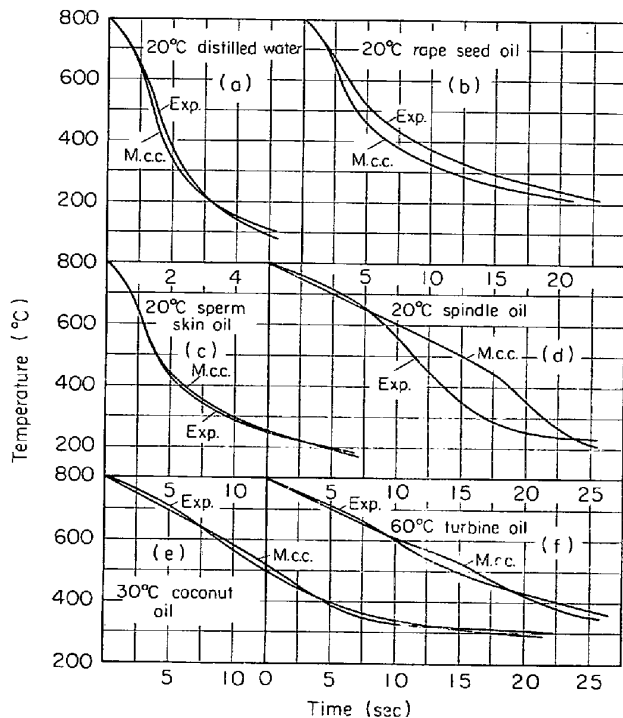


Fig. 12. Comparison of cooling curves derived from Master cooling curves with experimental cooling curves.

の一辺 2.0cm, 高さ 5.5cm の正四角柱をそれぞれ 30°C および 60°C のやし油とタービン油に焼入れたさいのものを示している。

Fig. 12 から明らかなように実測冷却曲線と導出冷却曲線は、実験誤差と考えられる範囲内で一致している。スピンドル油はやや一致しにくい、これはスピンドル油に銀試片を焼入れた際には膜沸騰の段階が長く、特性温度も低く(約450°C)あらわれるのに対し、鋼試片では特性温度もかなり高く(約 550°C), 銀試片と鋼試片の冷却曲線の形状の差異が他の油の場合よりも大きいため、銀および鋼試片の冷却曲線を平均した母曲線の形状が鋼材の冷却曲線の形状と異なるためである。もし鋼試片のみを基準にした冷却母曲線を用いて導出冷却曲線を描けば、それは実測冷却曲線とよく一致するであろう。

### 4. 焼入温度を変化させた場合の諸因子の考察

これまでに求めた母曲線は焼入温度はすべて 800°C 一定であつた。焼入温度が変化した場合にも一般化因子として寸法、形状、材質のみを考え、その因子指数も 800°C のときの数値をそのまま適用して差し支えないかを検討する。

冷却曲線の一般化として寸法、形状、材質因子に、試片寸法  $D$ , 体積と表面積の比  $W/S$ , 熱拡散率  $a$  をとつたが、その基準としたものは熱拡散比一定の Newton 冷却であつた。Newton 冷却の解によると、焼入温度が変化してもこれら 3 個の因子以外に考慮しなければならないものはない。よつて一般化因子として  $D, W/S, a$  のみで十分である。

実際焼入れの冷却曲線と Newton 冷却における冷却曲線とはその形状が多少異なるので、一般化因子として  $D, W/S, a$  をとるにしても、それらの指数値まで 800°C における値を採用してよいかどうかは検討しなければならない。そのために SUS27 の直径 1.0cm の円柱形試片を、焼入温度を 850°C, 800°C, 750°C, 700°C と変化させていろいろの静止冷却剤に焼入れ、その中心部冷却曲線を求めた、そのうちの一部を Fig. 13 に示す。SUS27 を使用したのは焼入温度を比較的高温にまでとれること、高温における耐酸化性が大きいことおよび冷却挙動が焼入鋼に類似していることなどのためである。

Fig. 13 から明らかなように、焼入温度が異なつても同一冷却剤に対する冷却曲線はほとんど同じ形状をしている。冷却母曲線はもともと相似な形状の冷却曲線を一



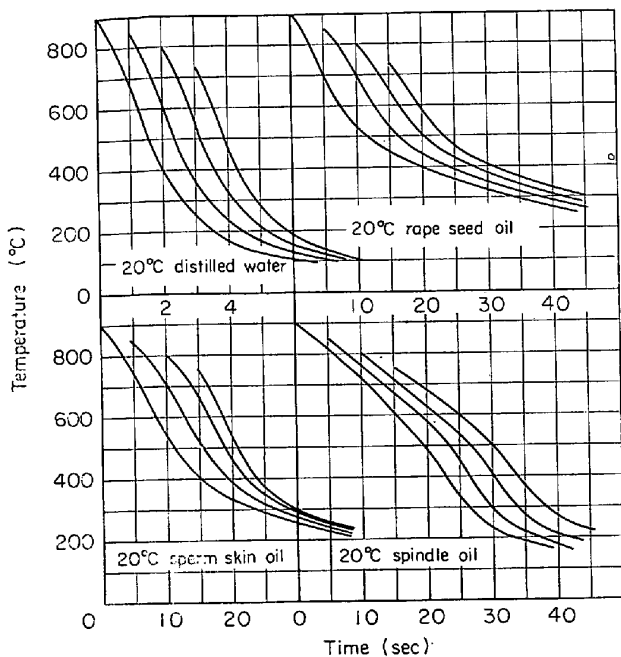


Fig. 13. Cooling curves of SUS27 cylindrical specimens quenched from 750°, 800°, 850°, and 900°C.

定の割合で拡大または縮小する方法によつて重ねんとするものである。800°Cでの形状と他の温度での形状が同じであれば、800°Cのときと同一の割合で拡大または縮小することによつて重ねることが可能と考えられる。すなわち 800°C以外の焼入温度に対しても、800°Cのときの寸法因子指数  $n_D$ 、形状因子指数  $n_S$ 、材質因子指数  $n_M$  の値を適用しても差し支えないであろう。

田村ら<sup>5)</sup>は SUJ 2, SK 6 の種々な直径の円柱形試片を 845°C, 820°C から水、油脂、鉱油などに焼入れてその中心部冷却曲線を求め、これより  $n_D$  の値を計算しこれら静止冷却剤に対する全平均として 1.37 をえている。これは前報<sup>1)</sup>で求めた 800°Cにおける SK 6, SUS 27 に対する  $n_D$  の平均値 1.40 ときわめて近い。このことから 800°Cにおける  $n_D$  の値を他の焼入温度の場合に適用してもよいだろうことがうなづける。

### 5. 中心部冷却曲線より任意の測定位置の冷却曲線の導出方法

これまで述べてきたことにより任意の寸法、形状、材質の試片をある冷却剤に焼入れた際には、その冷却剤の冷却母曲線を用いればその試片の中心部冷却曲線が導出できることがわかった。しかし実際焼入作業において必要とするのは焼入鋼材の断面硬度分布の推定である。WEVER, Rcse らの方法<sup>4)</sup>を適用して硬度推定をおこなうとしても、中心部冷却曲線から内部の任意の位置にお

ける冷却曲線を導出する方法を確立しなければならない。

#### 5.1 測定位置についての一般化の方法

田村ら<sup>5)</sup>は丸棒の中心部冷却曲線から試片内部の冷却曲線を導出する方法を提案したが、その結果は必ずしも満足すべきものではなかつた。そこで著者らはこの問題の解決方法として、焼入試片の全温度範囲にわたつて、試片中心部の冷却時間と任意の測定位置の冷却時間との一定の関係が存在することを仮定した。すなわち試片の寸法、形状、材質に対する一般化と同様に測定位置についても一般化できるはずで、中心部冷却曲線を横軸（時間軸）方向に縮小する一定の割合をみつければよいと考えた。

焼入試片の冷却過程は試片温度の変化とともに熱放散比は変化するものであるが、微小区間に分割して考えればそれぞれの区間では熱放散比一定とみなされる。よつて寸法その他の因子を考えたときと同様に、測定位置の影響をみるにも Newton 冷却の解を基準としてとつた。

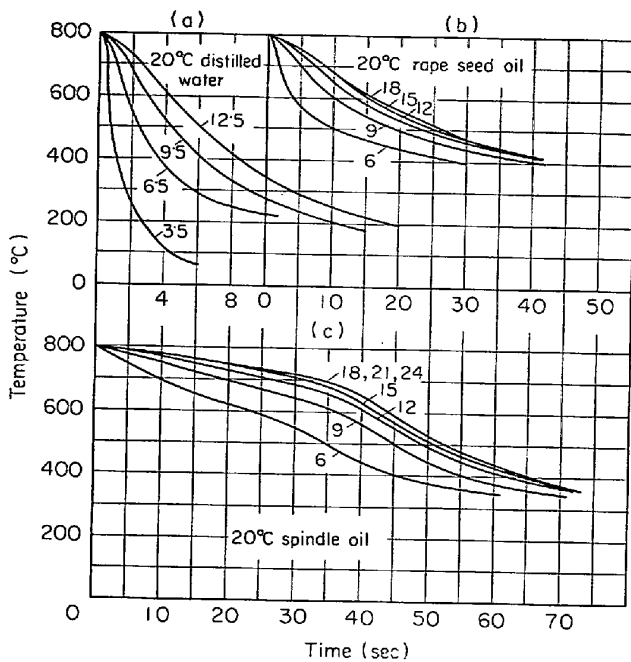
Newton 冷却の解の諸式においては、冷却時間  $t$  は指数関数の項に、測定位置を示す  $r/R$  ( $R$ : 試片半径,  $r$ : 中心より温度測定位置までの距離) は Bessel 関数または正弦関数のなかに含まれている。指数関数, Bessel 関数, 正弦関数はそれぞれ従属変数のべき級数に展開できるので、冷却時間と測定位置の関係を示す式をつぎのようにおいた。

$$t/t_0 = (x/R)^n \dots\dots\dots (1)$$

ここに  $t$  は温度測定位置における焼入瞬間よりある温度までの冷却時間,  $t_0$  はその断面の中心における焼入瞬間よりその温度までの冷却時間,  $R$  は試片半径,  $x$  は試片表面より温度測定位置までの距離,  $n$  は位置因子指数で、多くの冷却剤について試片内部のいろいろの位置の冷却曲線を求め、それに対する計算から定める定数である。

いま SUS27 の直径 2.5cm, 3.6cm, 4.8cm の円柱形試片を前報で述べた静止冷却剤に 800°C から焼入れ、表面から 3mm 間隔ごとに温度測定位置をかえて試片中心までの冷却曲線を求めた。これら冷却曲線の一部を Fig. 14 に示す。(a)は直径 2.5cm の円柱を 20°C の蒸留水に、(b)は 3.6cm 直径の円柱を 20°C のなたね油に、(c)は 4.8cm 直径の丸棒を 20°C スピンドル油に焼入れた際のものである。

これらの曲線を見ると、測定位置が変わつても同じ冷却剤においては冷却曲線の形状はきわめて類似している。そして中心部に近づくほど冷却曲線は接近し冷却時間の差が少なくなつていく。これは WEVER ら<sup>4)</sup>がクロ



The figures are the distances from surface mm.  
 Fig. 14. Cooling curves at various inner positions of SUS27 cylindrical specimens.

5.2 位置因子指数  $n$  の値

測定位置をかえて求めたすべての冷却曲線について、750°C より 50°C おきにすべての冷却剤および測定位置に対して、(1)式を適用して  $n$  の値を計算した。これら  $n$  の値を試片寸法および温度ごとにまとめて平均したものが Table 1 である。Table 1 によつて  $n$  の値と試片温度との関係を図示したものが Fig. 15 である。Fig. 15 をみると  $n$  の値は試片温度  $\theta$  の関数となつている。いま  $n$  の値を  $\theta$  の 2 次関数であらわされるとして、最小二乗法により関数形を定めるとつぎのようになる。

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

$\theta$  の値を 750°C から 50°C おきに 400°C までとり、それぞれの  $\theta$  の値に対する  $n$  の値を (2) 式によつて計算した結果を Table 1 に併記しておいた。なお Fig. 15 中の白丸は実測結果による  $n$  の値である。

800°C 以外の焼入温度に対しても、中心部冷却曲線は 800°C の場合と変わらないことはすでに述べた。したがつて (2) 式で示す  $n$  の値は、800°C 以外の焼入温度の場

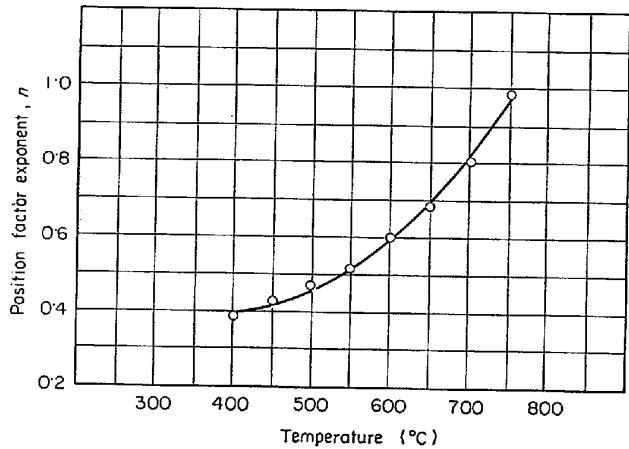


Fig. 15. Relation between position factor exponent  $n$  and terminal temperature of specimen during quenching.

Table 1. The values of position factor exponent  $n$ .

Diameters Temp. °C	2.5 cm	3.6 cm	4.8 cm	Mean	Calculated values from equation (2)
750		0.971	0.982	0.976	0.958
700	0.838	0.793	0.772	0.801	0.817
650	0.731	0.675	0.618	0.675	0.696
600	0.656	0.622	0.516	0.598	0.595
550	0.592	0.560	0.422	0.524	0.514
500	0.558	0.482	0.364	0.468	0.453
450	0.526	0.413	0.307	0.415	0.412
400	0.504	0.457	0.255	0.380	0.391
350	0.564	0.635	0.252		
300	0.735	0.603	0.399		
250	0.831	0.531	0.338		

合にも適用して差支えないであろう。

### 5.3 中心部冷却曲線より任意の測定位置の冷却曲線の導出方法

まず何らかの方法によつて試片をある静止冷却剤に焼入れたときの中心部冷却曲線を求める。それにはその冷却剤の冷却母曲線が有力な手段となる。その冷却曲線よりある温度に対する中心部冷却時間  $t_0$  を読む。その温度における位置因子指数  $n$  の値を (2) 式によつて求める。この  $n$  の値を用いて  $(x/R)^n$  の値を計算する。ここに  $R$  は試片半径、 $x$  は試片表面より測定位置までの距離である。 $t_0$  にこの  $(x/R)^n$  の値を生ずれば、その温度における試片表面より  $x$  の位置の冷却時間  $t$  が生ずる。このような操作を中心部冷却曲線上の多くの温度に対して行ない、それに対する測定位置の冷却時間を定める。これら多くの  $(t, \theta)$  の点をグラフ上にとり、これらの点をなめらかな曲線で結べばその位置における冷却曲線をうる。

このようにして定めた任意の位置の冷却曲線をその鋼の連続冷却変態線図に重ねると、その鋼の変態挙動と冷却後の硬度が定まる。測定点をいろいろ変えてその点の冷却曲線を導出し硬度を求めれば、その断面の硬度分布曲線がえられる。

## 結 言

任意の寸法、形状、材質の試片をある静止冷却剤に焼入れたときの中心部冷却曲線の横軸 (冷却時間  $t$ ) の値を、 $t/\{(D \cdot W/S)^{1.31} \cdot a^{-0.215}\}$  とすると、それは焼入試片の寸法、形状、材質について一般化された冷却曲線で、これがその静止冷却剤の冷却母曲線である。ここに  $D$  は試片寸法、 $W/S$  は試片体積と表面積の比、 $a$  は熱拡散率である。なお  $W/S$  の値としてはその試片と相似で単位

寸法に対するものをとる。

各種の寸法および形状の鋼試片をいろいろの冷却剤に焼入れて求めた実測冷却曲線と、それぞれの冷却剤の冷却母曲線を用いて求めた導出冷却曲線とを比較したところ、両者はきわめてよく一致し母曲線が実用上十分役立つことが判明した。

中心部冷却曲線から試片内部の任意の位置の冷却曲線の導出方法として、焼入瞬間からある温度に到達するまでの中心部冷却時間  $t_0$  と、任意の位置のその温度に到達するまでの冷却時間  $t$  との間に次式を仮定した。

$$t/t_0 = (x/R)^n$$

ここに  $x$  は試片表面より温度測定位置までの距離、 $R$  は試片半径である。

SUS27 円柱形試片を用いて多くの冷却剤に対しいろいろの測定位置での冷却曲線を求めた。これらの冷却曲線から  $n$  の値を計算すると、 $n$  は試片温度  $\theta$  の関数となっており、この関係を最小二乗法によつて表わすと次式のようになった。

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

これよりいろいろの  $\theta$  の値に対する  $n$  の値を計算し、これと中心部冷却時間  $t_0$  を用いて任意の測定位置の冷却時間  $t$  を求めれば、その位置の冷却曲線が定まる。

## 文 献

- 1) 時弘, 田村: 鉄と鋼, 60(1974)6, p. 661
- 2) I. TAMURA and M. TAGAYA: Trans. JIM, 5 (1964), p. 67
- 3) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, 20(1956), p. 124
- 4) F. WEVER and A. ROSE: Stahl u. Eisen, 74 (1954), p. 749
- 5) 田村, 多賀谷: 日本金属学会誌, 26(1962), p. 651