

## 論 文

UDC 621.785.6.08 : 536.24

## 焼入試片の中心部冷却曲線の一般化\*

時 弘 義 雄\*\*・田 村 今 男\*\*\*

## Unification on Cooling Curves of Quenched Bars at Center

Yoshio TOKIHIRO and Imao TAMURA

## Synopsis:

Cooling curve of a specimen quenched into a still coolant varies with not only the cooling behaviour of coolant but also other factors such as dimension, shape and material of specimen. An examination was made to show the influence of these factors on cooling curves and the following expression was proposed.

$$t = k \{ (D \cdot W/S)^{n_L} \cdot a^{-n_M} \}$$

Values of  $N_L$  and  $N_M$  were determined experimentally by using the many cooling curves obtained from various sorts of coolants, and  $N_L$  and  $N_M$  were evaluated 1.31 and 0.215 respectively. Unification of the cooling curve was made by conversion of cooling time to  $t / \{ (D \cdot W/S)^{n_L} \cdot a^{-n_M} \}$  for each shape, dimension and material.

where,  $t$ : cooling time of the central portion of a specimen during quenching,

$W/S$ : ratio of volume to surface area of a specimen for the unit size,

$a$ : thermal diffusivity,

$n_L, n_M$ : experimental constants.

(Received Aug. 10, 1973)

## 1. 緒 言

焼入れの際の試片の冷却曲線を推定する方法としては、適当な条件の下に解析的に追求する方法もあるが、また実験的に推定する方法も考えられる。すなわちある一定条件の下に焼入れられた多くの冷却曲線を整理し、これら冷却曲線に關係する主要な因子を考察し、これら諸因子と冷却曲線の關係を実験的に定めておく。かかる關係式が決定されると、ある冷却剤にその条件の下で焼入れて得られた冷却曲線は、すべてこれら諸因子について一般化することができる。この一般化された冷却曲線が得られると、その冷却剤に焼入れられる試片の冷却曲線は推定できる訳である。田村らはこの一般化された冷却曲線を冷却母曲線 (master cooling curve) と呼んだ<sup>1)2)</sup>が、その存在の十分な確認にはいたらなかつた。本報告は多くの実験結果に基づいて、これら諸因子と冷却時間の關係を実験的に定めたものである。

## 2. 実験方法

## 2.1 焼入試片

冷却曲線を求めるために使用した試片の材質は、純度 99.99% の銀, SK 6 および SUS 27 である。SK 6,

SUS 27 の化学成分を Table 1 に示す。銀は高温における耐酸化性が大で、焼入れに際して変態を伴わず冷却挙動を適確に表現する。SK 6 は実用的見地から、SUS 27 は焼入れの際変態を伴わず耐酸化性にもすぐれ、熱的性質が焼入用鋼材に比較的近いので採用した。

試片形状は解析的取扱いが便利であることなどを考慮して、球、円柱、正四角柱とした。これら各形状に対する寸法を Table 2 に示す。各試片とも焼入れの際試片支持のための棒を取り付けるため、上端に 5 mm のねじを有するが、球形試片においてはねじ部分の影響を少なくするため、Fig. 1 に示すようにねじ部の下端を細くした。

銀試片の温度測定は銀、アルメル熱電対で、鋼試片はアルメルクロメル熱電対によつた。使用した銀試片を Fig. 2 に示す。鋼試片もほぼ同様である。

## 2.2 冷却剤

使用した冷却剤は水、動物油、植物油および鉱油である。油類の種類はきわめて多いので、そのなかから比較

\* 昭和46年4月本会講演大会にて発表

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

Table 1. Chemical compositions of specimens.

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
SK 6	0.72	0.28	0.48	tr.	0.009	—	—	—
SUS 27	0.08	0.77	1.38	0.002	0.005	19.08	8.56	tr.

Table 2. Dimensions of specimens.

Shape	Dimensions (cm)			
	1.0 $\phi$	1.5 $\phi$	2.0 $\phi$	2.5 $\phi$
Sphere	1.0 $\phi$	1.5 $\phi$	2.0 $\phi$	2.5 $\phi$
Cylinder	1.0 $\phi$ × 3.0	1.5 $\phi$ × 4.5	2.0 $\phi$ × 5.5	2.5 $\phi$ × 6.5
Square prism	1.0 × 1.0 × 3.0	1.5 × 1.5 × 4.5	2.0 × 2.0 × 5.5	2.5 × 2.5 × 6.5

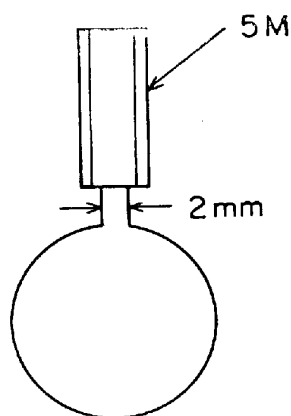


Fig. 1. Spherical specimen used.

的入手しやすく、現在も使用されておりかつ代表的冷却挙動を示すものを選んだ。これら冷却剤の種類および性質を Table 3 に示す。液温は常温の 20°C と油類の冷却能がほぼ最大になる 60°C を選んだ。やし油においては 20°C では液化しないので 30°C をとり、タービン

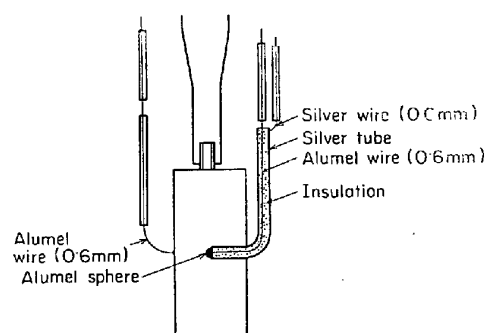


Fig. 2. Silver specimen used.

油では 20°C では粘度が大きすぎるためこの温度は採用しなかった。

### 2.3 冷却曲線測定装置

試片の加熱装置は操作が簡単でかつ短時間に焼入試片を冷却剤のなかに投入できるものであればよい。この目的に適うものとして田村らの考案した装置<sup>3)</sup>を用いた。

焼入温度は 800°C 一定とした。試片は所定の温度に

Table 3. Properties of coolants used.

Coolants	Temperature*		Flash point	Viscosity Redwood (sec)	
	20°C	60°C		20°C	60°C
Distilled water	20°C	60°C			
Rape seed oil	20°C	60°C	200°C	370(20°)	93(60°)
Soya bean oil	20°C	60°C	227°C	307(20°)	86(60°)
Sperm skin oil	20°C	60°C	200°C	193(20°)	64(60°)
Spindle oil	20°C	60°C	134°C	81(20°)	41(60°)
Coconut oil	30°C	60°C	203°C	179(30°)	73(60°)
Turbine oil		60°C	199°C		125(60°)

\* Cooling curves were measured at these temperatures.

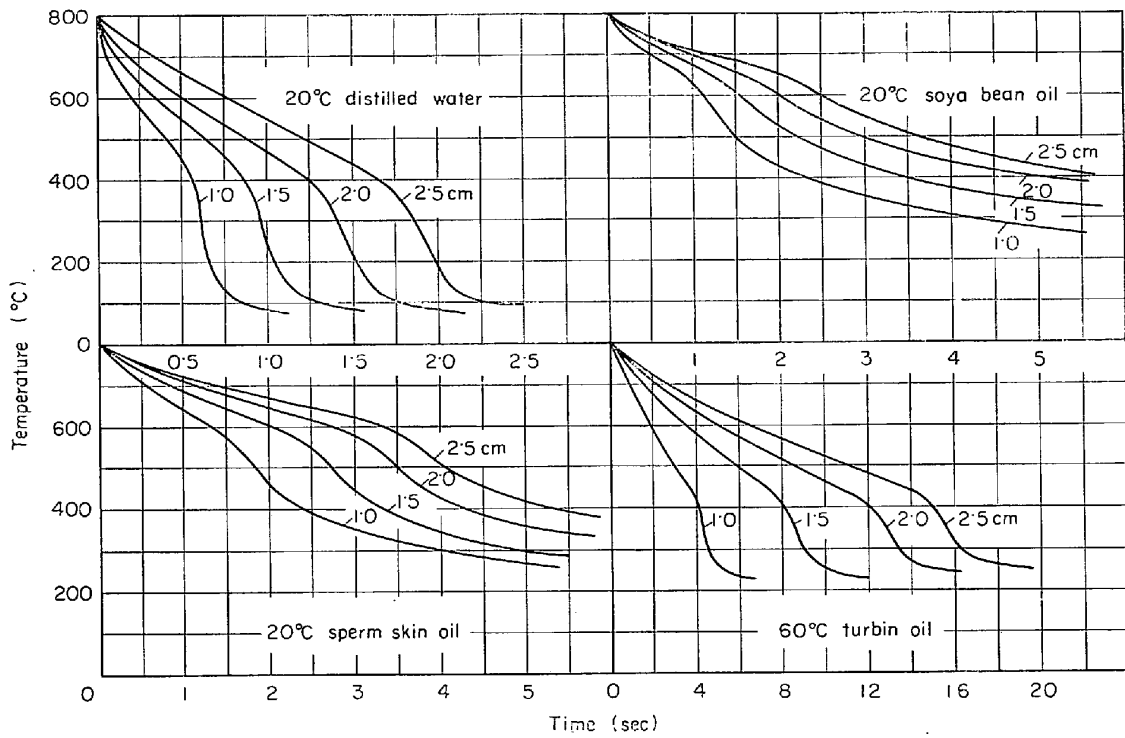


Fig. 3. Cooling curves of spherical silver specimens of various diameters at surface quenched from 800°C.

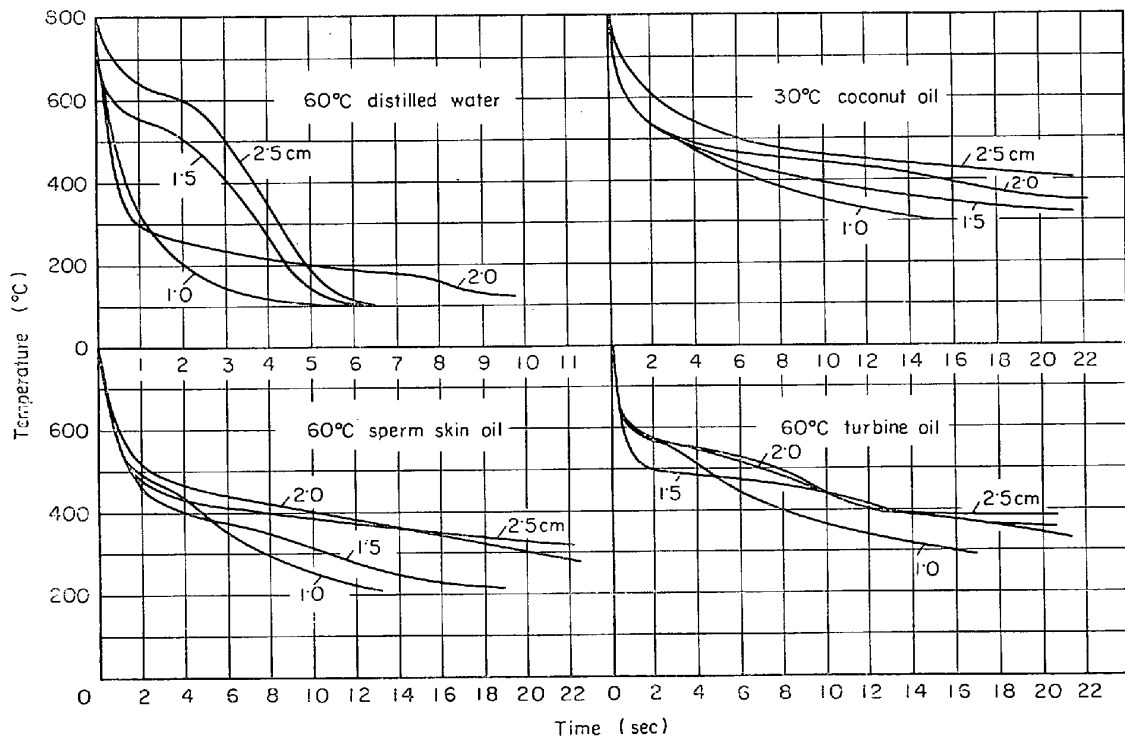


Fig. 4. Cooling curves of SK 6 square prism specimens of various dimensions at surface quenched from 800°C.

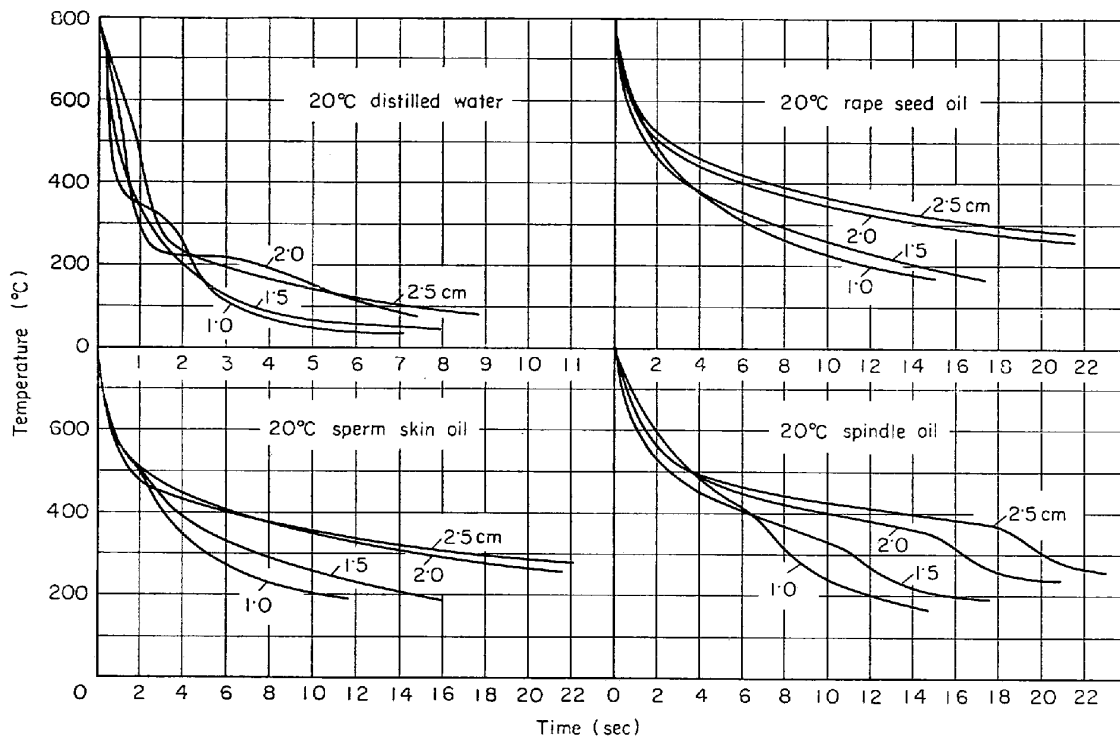


Fig. 5. Cooling curves of SUS 27 cylindrical specimens of various diameters at surface quenched from 800°C.

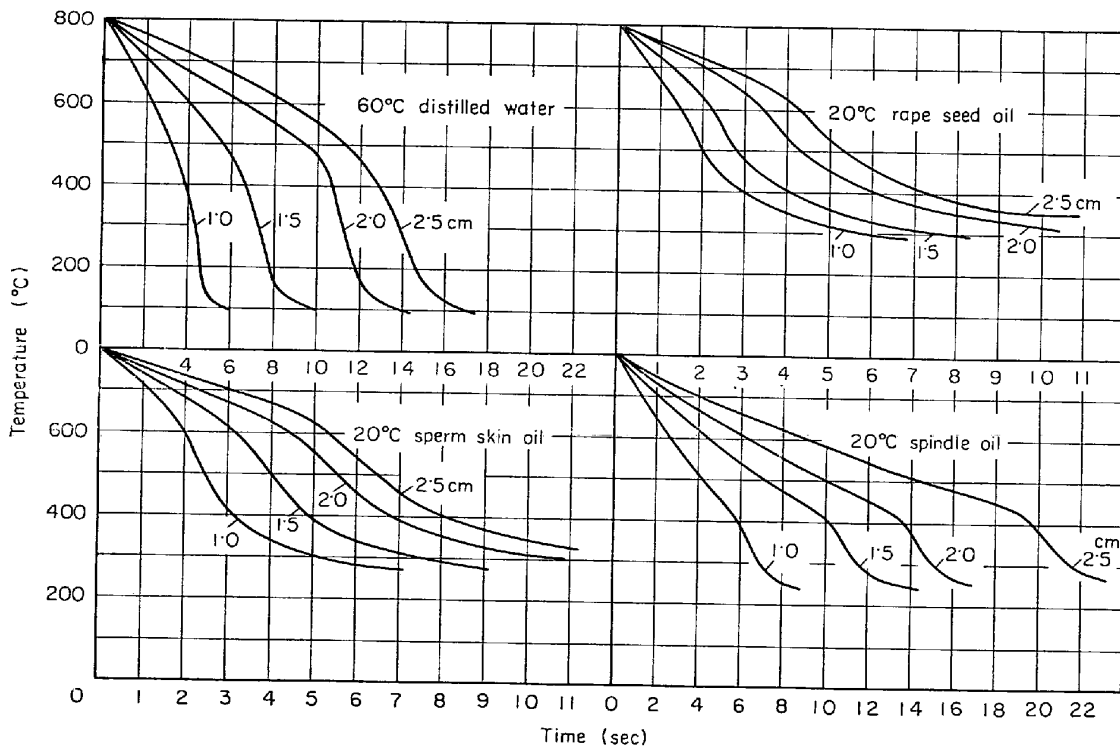


Fig. 6. Cooling curves of silver square prism specimens of various dimensions at center quenched from 800°C.

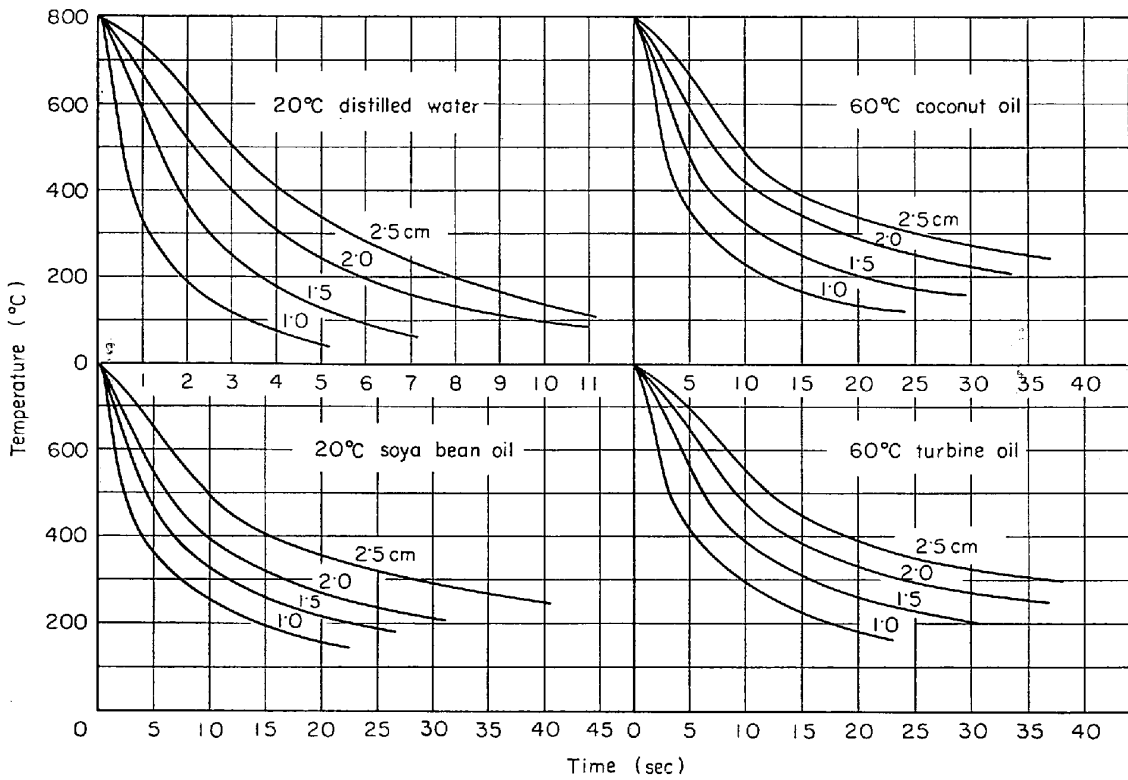


Fig. 7. Cooling curves of SK 6 spherical specimens of various diameters at center quenched from 800°C.

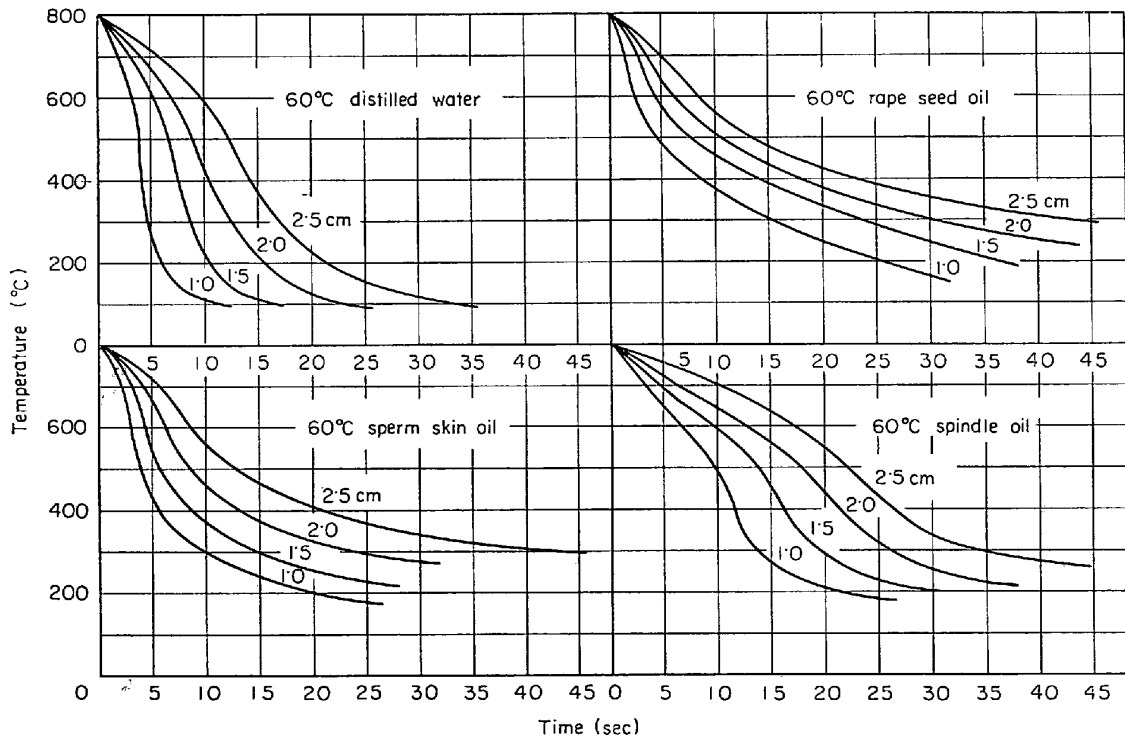


Fig. 8. Cooling curves of SUS 27 cylindrical specimens of various diameters at center quenched from 800°C.

保たれた上記装置の炉内に装入し、試片が焼入温度に到達後、銀試片は約 1 min、鋼試片は約 10~15 min 保持したのち焼入れた。鋼試片は酸化防止のためアルゴンガスふん囲気中で加熱した。

冷却剤は静止状態である。焼入槽は直径 15 cm の円柱形でこれに冷却剤を約 15 cm の高さまで入れた。焼入試片は冷却剤のほぼ中央にくるようにした。冷却曲線の測定は電磁オシログラフによつた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 表面部冷却曲線

Table 2 に示した試片を Table 3 の冷却剤中に焼入れて試片表面の冷却曲線を求めた。これら冷却曲線の数はきわめて多いのでその一部のみを Fig. 3 から Fig. 5 までに示す。Fig. 3 は銀球、Fig. 4 は SK 6 正四角柱、Fig. 5 は SUS 27 円柱試片についてである。図中の数字は試片の寸法（球、円柱は直径、正四角柱は底面の一辺の長さ）を示す。

銀試片の冷却曲線は冷却の 4 つの段階がみとめられ<sup>3)</sup>、試片寸法の変化が冷却曲線に影響を与えることがわかる。鋼試片では熱伝導度が大きくないため、試片表面の冷却では寸法の差異による差が少なく、かつ沸騰などによる偶然性に左右され規則性を認めがたい。

#### 3.2 中心部冷却曲線

中心部冷却曲線の一部を Fig. 6 より Fig. 8 までに示す。Fig. 6 は銀正四角柱、Fig. 7 は SK 6 球、Fig. 8 は SUS 27 円柱形試片で、図中の数字は試片の寸法を示す。これらの冷却曲線はすべて試片寸法の影響をうけており、同一冷却剤に焼入れた同一材質の試片の冷却曲線は、試片寸法とともに規則的に変化している。よつてすべての形状の試片に対する冷却曲線は、その冷却時間と寸法の間にある一定の関係が存在することがうかがえる。

### 4. 冷却曲線に関する試片因子

一般に沸騰を伴う冷却剤に焼入れた場合の冷却曲線の形状はきわめて複雑であるが、これらの曲線を微小区間に分割して考えれば、それらの区間では熱伝達率ないしは熱放散比はほぼ一定として、近似的に Newton の冷却法則が成立しているとみなしてよいであろう。したがつて冷却曲線の形状に関する試片因子の挙動は、実際焼入れの場合もほぼ Newton 冷却と同じ挙動をすると考えてよいであろう。よつて Newton 冷却における解を求め、この解のなかに含まれる冷却曲線に関する試片因子について考慮し、実際の冷却曲線に対するそれらの影

Table 4. The values of  $n_D$  for the various specimens.

Specimen	Sphere	Cylinder	Square prism
Ag (surface)	1.14	0.88	1.01
Ag (center)	1.22	1.15	1.22
SK6 (center)	1.45	1.26	1.30
SUS27 (center)	1.37	1.22	1.35

響を把握すればよいといえる。

球、無限円柱無限正四角柱の Newton 冷却における解を求めると、焼入試片の寸法、形状、材質が関係する主要因子であることがわかる。

#### 4.1 試片寸法と冷却時間との関係

寸法因子としては球、円柱は直径、正四角柱では底面の一辺の長さをとればよい。

FRENCH<sup>4)</sup> は 720°C における焼入試片の冷却速度  $V$  の寸法  $D$  による変化を考察している。著者らは FRENCH の考え方を発展させ、冷却の全温度範囲において、冷却時間  $t$  は寸法  $D$  の関数とみなし次式を仮定した。

$$t = k_1 D^{n_D} \dots \dots \dots (1)$$

ここに  $k_1$  は比例定数、 $n_D$  は実験定数である。

Newton 冷却における解では  $t$  と  $D$  の関係は、無限級数中における  $\exp(t/D^2)$  の項などで示される。これらの項はいずれも  $D$  のべき級数に展開できるので、Newton 冷却においては  $t$  と  $D$  の関係は近似的に (1) 式のようにおきうる。前述したように実測冷却曲線に関する試片因子の影響は、Newton 冷却における場合とほぼ同じとみなされるので、実測冷却曲線に対しても  $t$  と  $D$  の関係を (1) 式のようにおくことは妥当であろう。

一つの冷却曲線について、試片温度 50°C ごとに (1) 式から  $n_D$  の値を求め、これらを平均したものをその冷却曲線における  $n_D$  の値とした。さきに述べたすべての冷却曲線についてかかる方法で  $n_D$  の値を求めたが、その数はきわめて多いので、それらを試片形状および材質ごとにまとめて平均したものを Table 4 に示す。これらの値は田村ら<sup>25)</sup> が同様な式のもとに、銀円柱表面および中心、鋼円柱中心部冷却曲線について求めた値（それぞれ 1.14, 1.34, 1.37）に比較的よく一致している。よつて従来円柱形試片にに対して仮定された (1) 式はすべての形状の試片に拡大しうるといえる。

Newton 冷却における冷却曲線に対して  $n_D$  の値を求めてみた。その結果を Table 5 に示す。これらの冷却

Table 5. Values of dimension factor exponent  $n_D$  for the cooling curves at center which obey Newton's law.

Specimens	Heat transfer ratio $\text{cm}^{-1}$	Sphere	Cylinder	Squara prism
Ag	0.08	1.15	1.12	1.15
SK 6	0.2	1.15	1.19	1.18
SUS 27	0.2	1.15	1.15	1.17
Ag	0.16	1.35	1.31	1.42
SK 6	0.8	1.36	1.33	1.39
SUS 27	0.8	1.38	1.36	1.43
Mean		1.26		

曲線の試片寸法は1.0, 1.5, 2.0, 2.5 cmとし、試片材質は銀, SK 6 および SUS 27 を想定してそれぞれの熱拡散率を用いた. すなわち銀  $1.532 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ , SK 6  $0.114 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$ , SUS 27  $0.0489 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  とした. これらの値の出所については後に述べる. 冷却剤は水および油を想定して, それらの熱拡散比を銀試片では水  $0.16 \text{ cm}^{-1}$ , 油  $0.08 \text{ cm}^{-1}$ , 鋼試片では水  $0.8 \text{ cm}^{-1}$ , 油  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  とした.

Table 4 と Table 5 を比較すればわかるように, 実測冷却曲線と Newton 冷却における冷却曲線の  $n_D$  の値はほぼ等しい. よつて (1) 式を仮定する際に Newton 冷却を基礎としたことは妥当であつたといえる.  $n_D$  を寸法因子指数と名付ける.

4.2 試片形状と冷却時間の関係

Newton 冷却では焼入試片ごとに異なつた形の解が与えられ, それらの解から試片形状因子を見出すことは困難である. FRENCH<sup>4)</sup> は鋼試片を用いての冷却曲線測定の研究において,  $720^\circ\text{C}$  における試片中心の冷却速度

Table 6. The values of  $n_s$  for the specimens of varios dimensions.

Specimens	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm
Ag (surface)	1.18	0.90	0.92	0.64
Ag (center)	1.05	1.24	1.20	1.26
SK 6 (center)	1.43	1.41	1.34	1.31
SUS 27 (center)	1.48	1.63	1.43	1.23

$V$  は試片表面積  $S$  と体積  $W$  の比  $S/W$  の関数であるとしている. 彼はこの式について何らの説明も加えていないが,  $S$  が試片の放熱量に,  $W$  が保有熱量に関係することを考えれば一応うなずけるものがある. 著者らは彼の考えを発展させ, 試片の全温度について冷却時間  $t$  と  $W/S$  の間に次式が成立つとした.

$$t = k_2 (W/S)^{n_s} \dots \dots \dots (2)$$

$k_2$  は定数,  $n_s$  は実験的に定めるべき定数である. 高さが等しく, 直径と底面の一辺の長さの等しい円柱と正

Table 7. Values of shape factor exponent  $n_s$  for the specimens at the center which obeys Newton's law.

Specimens	Heat transfer ratio $\text{cm}^{-1}$	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm
Ag	0.08	1.10	0.985	1.05	1.02
SK 6	0.2	1.01	1.01	1.00	1.04
SUS 27	0.2	1.00	1.01	1.05	1.02
Ag	0.16	0.958	1.06	1.03	1.03
SK 6	0.8	1.02	1.05	1.02	1.03
SUS 27	0.8	0.989	1.07	1.06	1.05
Mean		1.03			

四角柱ではその  $W/S$  の値は等しい。かかる 2 つの試片の中心部冷却曲線はいずれの冷却剤においてもその形がほぼ等しく、(2) 式の妥当性を裏付けることができた。

実測冷却曲線について試片温度  $50^{\circ}\text{C}$  間隔ごとに  $n_s$  の値を求め、それらの値を平均したものをその冷却曲線の  $n_s$  の値とした。このようにしてすべての冷却曲線についての値  $n_s$  を求めたが、その数はきわめて多いので試片材質および寸法ごとにまとめて平均した値を Table 6 に示す。Table 4 と Table 6 を比較すればわかるように  $n_D$  と  $n_s$  の値はきわめてよく一致しており、 $n_s$  の値に  $n_D$  の値を用いてもよいとした従来の報告<sup>2)</sup> に対する実験的根拠がえられた。

参考として Newton 冷却における中心部冷却曲線を用いて  $n_s$  の値を求めた。この値を Table 7 に示す。Table 6 と Table 7 の値を比較すると、Newton 冷却の場合はやや値が小さくなっているがいずれも近似している。今後この  $n_s$  を形状因子指数と呼ぶ。

寸法因子  $D$ 、形状因子  $W/S$  はともに長さの次元をもち、 $n_D$ 、 $n_s$  はそれらの指数でその値はきわめて近い。したがって冷却時間と寸法および形状の関係式として

$t = kD^{n_D} \cdot (W/S)^{n_s}$  の代わりに  $n_D$  と  $n_s$  の平均値  $n_L$  を用いて

$$t = k_3 (D \cdot W/S)^{n_L} \dots \dots \dots (3)$$

とおいてもその値にほとんど変わらない。よって関係式をできるだけ単純化するため、(1)、(2) 式をまとめて (3) 式とする。なお  $k_3$  は比例定数である。(3) 式においては寸法に対する一般化はすでにおこなわれているので、 $W/S$  の値は  $D=1$  に対するものをとらなければならない。 $n_L$  の値は中心部冷却曲線におけるすべての  $n_D$ 、 $n_s$  の平均値をとって 1.31 とする。

#### 4.3 試片材質と冷却時間との関係

Newton 冷却においては冷却曲線に関係する試片材質因子は熱拡散率  $a$  である。よって実測冷却曲線においても材質因子として  $a$  をとることとする。

##### 4.3.1 熱拡散率の値

熱拡散率の値は銀に対しては田村ら<sup>6)</sup> が以前に使用した  $1.532 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  をとつた。

鋼の熱拡散率については French<sup>4)</sup> は  $0.10 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  と  $0.17 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  の間にあるとしている。GROSSMANN<sup>7)</sup> はジョーミニー試片の熱拡散率は  $0.0387 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  から  $0.116 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  の間で変化するとしている。AUSTIN<sup>7)</sup> は共析鋼におけるマルテンサイトの熱拡散率として常温で  $0.114 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  を与えている。また RUSSELL<sup>8)</sup> はジョーミニー試片側面上の冷却曲線を求める計算において、 $0.05806 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  をとつている。これらのいずれの値が正確なものであるかは判明しない。よって著者らはこれらの平均的なものとして  $0.114 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  をとつた。

SUS 27 についてはこれまでに求められている値が見つからないので、つぎように計算した。この鋼の熱伝導度は温度とともに直線的に変化し、 $38^{\circ}\text{C}$  で約  $0.0397 \text{ cal}/(\text{sec} \cdot \text{cm} \cdot \text{deg})$ 、 $816^{\circ}\text{C}$  で約  $0.0655 \text{ cal}/(\text{sec} \cdot \text{cm} \cdot \text{deg})$  である<sup>9)</sup>。この平均値を焼入途中における熱伝導度とみなすと  $0.0526 \text{ cal}/(\text{sec} \cdot \text{cm} \cdot \text{deg})$  となる。比熱も温度上昇とともにわずかながら上昇し、その値は  $50^{\circ}\text{C}$  から  $800^{\circ}\text{C}$  までの間に  $0.122 \text{ cal}/(\text{g} \cdot \text{deg})$  から  $0.153 \text{ cal}/(\text{g} \cdot \text{deg})$  になっている<sup>10)</sup>。この平均値  $0.138 \text{ cal}/(\text{g} \cdot \text{deg})$  をもつて平均見かけ比熱とした。比重は製造法によつてわずかにその値を異にする ( $7.70 \sim 7.90$ )<sup>11)</sup> が製造法が不明なためそれらの平均値をとり、常温における値として 7.80 とした。比重も温度上昇に伴う体積増加によりその値を減少するが、その値は無視できるほど小さい。したがって焼入中の比重としては 7.80 を採用した。こ

Table 8. Values of material factor exponent  $n_M$  for the specimens at the center which obey Newton's law.

Specimens	Coolants	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm
Sphere	Distilled water	0.222	0.261	0.275	0.284
Cylinder	"	0.238	0.248	0.279	0.284
Square prism	"	0.240	0.286	0.320	0.321
Sphere	Oil	0.404	0.415	0.432	0.441
Cylinder	"	0.384	0.404	0.361	0.354
Square prism	"	0.403	0.428	0.377	0.379
Mean		0.335			



Table 9. The values of  $n_M$  for the specimens of various shapes.

Specimens	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm
Sphere	0.244	0.347	0.220	0.117
Cylinder	0.280	0.289	0.281	0.197
Square prism	0.226	0.141	0.088	0.148

Table 10. The values of the standard deviation and 95% confidence limit of  $n_D$ ,  $n_s$  and  $n_M$ .

	Standard deviation	95% confidence limit
$n_D$ (Ag surface)	0.0381	1.01 ± 0.074
$n_D$ (Ag center)	0.0343	1.19 ± 0.067
$n_D$ (steel)	0.0343	1.35 ± 0.067
$n_s$ (Ag surface)	0.102	0.91 ± 0.196
$n_s$ (Ag center)	0.081	1.21 ± 0.159
$n_s$ (steel)	0.153	1.40 ± 0.030
$n_M$	0.035	0.215 ± 0.069

これらの諸数値を用いて計算すれば、SUS 27 に対する熱拡散率として  $0.0489 \text{ cm}^2 \cdot \text{sec}^{-1}$  をうる。

4.3.2 冷却時間と熱拡散率の関係

Newton 冷却において熱拡散率  $a$  と冷却時間  $t$  はともに指数関数  $\exp(a \cdot t)$  の項に入っている。同一冷却剤においてもそれに焼入れられる試片材質によつて熱放散比  $h$  の値は異なる。  $t$  は  $h$  の関数でもあるので、  $a \cdot t = \text{一定}$  という簡単な形では表わされない。したがつて  $t$  と  $a$  の関係を次式のようにおいて、Newton 冷却の冷却曲線の場合この  $n_M$  がほぼ一定値となるかどうかを調べてみた。

$$t = k_4 \cdot a^{-n_M} \dots \dots \dots (4)$$

ここに  $k_4$  は比例定数である。  $n_M$  の値を Newton 冷却の冷却曲線に対し、試片温度  $50^\circ\text{C}$  ごとに (4) 式から求め、試片寸法、形状ごとにまとめたものを Table 8 に示す。  $h$  の値が異なる場合  $n_M$  の値に若干の差が生ずるが、この程度の差異はやむをえないであろう。

実測冷却曲線についても試片温度  $50^\circ\text{C}$  ごとに  $n_M$  の値を求め、それらを平均したものをその冷却曲線における  $n_M$  の値とした。このようにしてすべての冷却曲線について  $n_M$  の値を求めたが、その数はきわめて多いのでそれらを試片寸法、形状ごとにまとめて平均した値を

Table 9 冷却に示す。Table 8 と Table 9 を比較すると Newton 冷却の場合がやや値が大きい、比較的近似している。また両者ともほぼその値は一定しているので、Newton 冷却を基礎として  $t$  と  $a$  の間に (4) 式を仮定したのは妥当であろう。  $n_M$  の値としては Table 9 の全平均をとり  $0.215$  とする。  $n_M$  を材質因子指数と呼ぶ。

これまでに求めた  $n_D$ ,  $n_s$ ,  $n_M$  の値は多くの値を平均したものである、それらの標準偏差、95% の信頼限界を Table 10 に示す。

5. 冷却曲線の試片諸因子に関する一般化

静止冷却剤に焼入れた試片の中心部冷却曲線の冷却時間  $t$  と、試片寸法、形状、材質については (3) (4) 式を総合して次式が成り立つといえる。

$$t = k(D \cdot W/S)^{n_L} \cdot a^{-n_M} \dots \dots \dots (5)$$

ここに  $k$  は比例定数、  $n_L = 1.31$ ,  $n_M = 0.215$  である。したがつてその冷却剤に焼入れられた試片の中心部冷却曲線の標軸 (冷却時間) の目盛りを  $t / \{(D \cdot W/S)^{n_L} \cdot a^{-n_M}\}$  におきかえると、その曲線はその冷却剤に焼入れられた試片の寸法、形状、材質について一般化された冷却曲線となる。これが田村らの提案した冷却母曲線である。

結 言

焼入冷却曲線に関係するおもな試片因子は、寸法、形状、材質である。これら諸因子の冷却曲線におよぼす影響を実験的に定めるため次式を仮定した。

$$t = k(D \cdot W/S)^{n_L} \cdot a^{-n_M}$$

ここに  $t$  は冷却時間、  $D$  は試片寸法、  $W/S$  は試片体積と表面積の比、  $a$  は熱拡散率、  $k$  は比例定数である。

銀、SK 6、SUS 27 の円柱、球、正四角柱 ( $D = 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 \text{ cm}$ ) の試片を、静止している水、各種の油に焼入れて多くの冷却曲線を求めた。これらの冷却曲

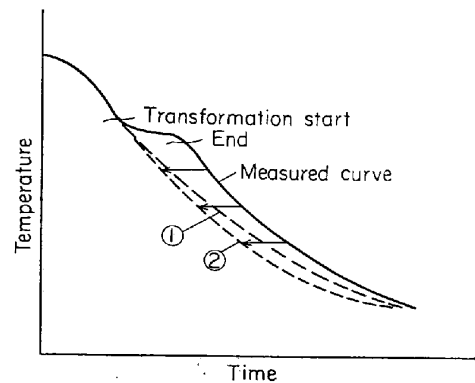


Fig. 9. Correcting method for the cooling curve due to the transformation heat.

線から実験定数  $n_L$ ,  $n_M$  の値を求めたところそれぞれ  $n_L=1.31$ ,  $n_M=0.215$  をえた。ある冷却剤に焼入れられた試片の冷却曲線の横軸(冷却時間)の目盛りを  $1/\{(D \cdot W/S)^{n_L} \cdot a^{-n_M}\}$  に改めると、それは試片の寸法、形状、材質について一般化された冷却曲線となる。これが従来提案されていた冷却母曲線である。

#### 付 録

変態を伴う試片を焼入れると発熱のため Fig. 9 に示すように冷却曲線に凹凸を生じる。これを補正する方法として、図中の ① に示すように変態開始点と冷却の終わりをなめらかな曲線で結ぶ方法と、② のように変態開始点と終了の時間的おくれを、それ以後の冷却時間から一様に引き去る方法とが考えられる。いずれが正しいかの理論的判定は困難である。著者らは ② の方法をとった。 $n_D$ ,  $n_S$ ,  $n_M$  の値を求める際に用いた冷却曲線は、すべてこのようにして補正した曲線である。

#### 文 献

- 1) I. TAMURA and M. TAGAYA: Trans. JIM, 5 (1964), p. 67
- 2) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, 20 (1956), p. 124
- 3) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, B-15 (1951), p. 538
- 4) H. J. FRENCH: ASST, 17 (1930), p. 646
- 5) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, 26 (1962), p. 651
- 6) 多賀谷, 田村: 日本金属学会誌, 20 (1956), p. 357
- 7) M. A. GROSSMANN: Elements of Hardenability, (1952), p. 61, [ASM]
- 8) T. F. RUSSELL: Iron Steel Inst, Spec. Rept. No. 24, (1939), p. 283
- 9) 日本鉄鋼協会編: 鉄鋼材料便覧, (1967), p. 56 [丸善]
- 10) ASM: Metals Handbook, (1948)p. 315
- 11) 岡本: 鉄鋼材料, (1968), p. 253, [コロナ社]