鋼焼入の際の冷却母曲線について*

田 村 今 男** 多賀谷 正 義***

Imao Tamura and Masayoshi Tagaya: On the Mother Cooling Curve for Hardening Steel. The cooling curve at any point in the quenched specimen depends not only on the cooling characteristics of quenchant but also on thermal constants, size and shape of the specimen. The effects of thermal constants, size and shape of steel and measuring position in it on the cooling curve were examined quantitatively. Then, the curve which showed only the cooling characteristics of quenchant and was not affected by the other factors was derived for several quenchants respectively from the results of experiments in this work and in the 8th report by the authors. Such a curve was called as "Mother Cooling Curve" of a quenchant. The mother cooling curve was obtained by converting the measured $T-t$ curve into $T-t/(s\rho D^n)$ curve, where T was the temperature at the centre of specimen quenched, t was the time after quenching, s and ρ were the specific heat and the density of specimen, respectively, and n was the size factor. The average value of n was 1.35 (1.34 for silver and 1.37 for steel). The conception of the mother cooling curve may be the most reasonable one to express the relationship among hardening factors such as hardenability and size of specimen and cooling ability of quenchant for hardening steel. The mother cooling curve indicates the cooling ability of quenchant and the continuous cooling transformation diagram indicates the hardenability of the steel. The hardening behavior of steel parts, therefore, may be found by comparing the cooling curve, which can be derived from the mother cooling curve and the size factor, with the continuous cooling transformation diagram of the steel.

(Received May 29, 1962)

I. 緒 言

鋼が焼入によつて硬化するか否かは主として鋼の硬化能、寸法および冷却剤の冷却能の三つの因子によつて決定される。これらの間の関係を定量的に究明するために古くから多くの研究がなされているが、その代表的なものは Grossmann ら⁽¹⁾⁽²⁾によつて導出された関係と、Wever お

よび Rose ら⁽³⁾⁽⁴⁾によつて行なわれた連続冷却変態線図に冷却曲線を照合する方法の二つであろう。

Grossmann らは鋼の焼入の際、鋼表面からニュートンの冷却の法則に従う放熱があると仮定して熱移動の式を解

- (1) M. A. Grossmann, M. Asimow, S. F. Urban: *Hardenability of Alloy Steels*, (1939), ASM, 124.
- (2) M. A. Grossmann: *Elements of Hardenability*, (1952), ASM.
- (3) F. Wever, A. Rose: *Stahl u. Eisen*, **74** (1954), 749.
- (4) F. Wever, A. Rose, W. Strassburg: *Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle*, (1954), Stahleisen.

** 大阪大学産業科学研究所 (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University, Osaka)

*** 大阪大学工学部 (Faculty of Engineering, Osaka University, Osaka)

* 焼入冷却剤の研究 (第 17 報)

き、硬化能、寸法および冷却能の間の関係を導出した。これは数式的にきわめて明快に導出されているけれども、仮定に無理があり、実際焼入とはそんなによく一致しない。たとえニュートンの法則に従うと仮定しても、それから冷却曲線を求めて連続冷却変態線図にあてはめる方が合理的であろう。その意味で著者らは今までこの方法にもとづいて種々な冷却剤の焼入強烈度 (Grossmann の H 値) を求めて論を進めてきた。

他方, Wever, Rose らの方法は鋼の連続冷却変態線図に焼入時の冷却曲線をあてはめることにより, その鋼材の硬化挙動を知ろうとするもので, きわめて合理的な方法である。しかし冷却曲線についてはいまだ一般化の域に達していない。

著者らは Wever, Rose らの方法が最も合理的なものであるから, 冷却曲線を一般化することによって彼等の方法を完成することができると考えた。本研究はそのための冷却曲線の一般化の方向を示すものである。

II. 冷却曲線に關与する因子

鋼の焼入の際の冷却曲線は焼入冷却剤そのものの冷却挙動に依存することはもちろんであるが, 同じ冷却剤中に焼入しても, その冷却曲線は鋼材, あるいは冷却曲線測定のために便宜上使用した試片 (著者らは銀をよく用いた) の熱的性質, その試片の寸法, 形状, および測定位置によつて変化する。冷却曲線をニュートンの冷却と仮定すれば, これらの諸因子は数式的に解決がつくわけであるが, 実測の冷却曲線の形はニュートンの冷却から少々はなれているようである。それ故, 多くの実験を行なつて, これらの諸因

子の冷却曲線におよぼす影響を究明し, これらの諸因子に關係しない, 冷却剤の冷却挙動のみを示す一般化された冷却曲線を導出することができれば, このような一般化された冷却曲線から, 具体的な鋼焼入の場合の冷却曲線を導出することができるわけである。このような方法によれば冷却がニュートンのであつてもなくても一般化および具体化が可能である。

著者らはすでにこのような一般化された冷却曲線を冷却母曲線 (Mother Cooling Curve) と呼び, この概念を第 8 報⁽⁵⁾において提案した。すなわち銀円柱の冷却曲線におよぼす直径の影響を研究し, 冷却曲線を温度と t/D^n の關係として図示するならば直径に關係しない冷却曲線をうることを示し, (この場合寸法因子 n の値は表面部で 1.14, 中心部で 1.34) さらに直径 D の代りに (体積)/(表面積)を用いることによつて他の形状にも適用できることを示した。ここに t は焼入瞬間からの時間である。

III. 鋼による冷却曲線の測定結果

銀の場合についてはすでに第 8 報⁽⁵⁾で報告したのであるが, 鋼の場合について同様な測定を行なつた。Table 1 に示す SUJ 2 および SK 6 の 2 種の鋼について, 種々な直径の丸棒試片を作成して, その表面および中心に熱電対を熔接して, 電磁オシログラフで冷却曲線を測定した。用いた冷却剤は水 20°, 60°C (SUJ 2 のみ), 80°C (SK 6 のみ), ナタネ油 30°C, 60-スピンドル油 30°C, 110-ダイナモ油 30°C であつた。これらの液体の性状を Table 2 に示す。鋼材の加熱は木炭中で行ない, 焼入条件は Table 1 に示

Table 1 Chemical compositions and quenching condition of steels used.

Steel	Chemical composition (%)								ASTM grain size (No.)	Quenching temp. (°C)	Holding time (min/25 mm)
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu			
SUJ 2	0.98	0.21	0.36	0.019	0.011	1.40	—	0.19	9	845	40
SK 6	0.78	0.23	0.32	0.024	0.038	0.40	0.21	—	8	820	30

Table 2 Properties of quenchants used.

Quenchant	Sp. gr. (15°C)	Flash point (°C)	Viscosity Redwood (sec)	Acid value	Iodine value	Saponification value
Rape seed oil	—	300	188.6 (40°)	6.58	104.3	180
60-Spindle oil	0.8981	145	66.8 (30°), 40.3 (50°)	0.062	—	—
110-Dynamo oil	0.9001	186	324.2 (30°), 120.0 (50°)	0.03	15.4	—

City Water (Osaka), PH 6.9, Fe 0.1 mg/L, Cl₂ 9 mg/L, Hardness 3.8.

† なお, ここに一つの問題がある。それは冷却方法が変ると, 鋼の連続冷却変態線図そのものが変化してくるということである。すなわち, 一つのパラメータの変化によつて冷却曲線が変化するように一つの冷却曲線群について一つの連続冷却変態線図が決定されるのであつて, たとえば直線的冷却群によるものと, ニュートンの冷却群によるものとで, 僅かながら連続冷却変態線図が変化する。しかしこれは比較的僅少であるから, 以下の著者らの研究においてもこれを無視する。

されている。冷却曲線の一例として SUJ 2 の場合を示すと Fig. 1 のようである。(a) は中心部, (b) は表面部を示す。この場合, たとえば Fig. 1(a) の水 20°C, 70 mm 直径の冷却曲線のように, 明らかに変態による発熱が認められる場合には補正線で示すように補正を行なつたが, 不明瞭な場合には, そのままの曲線を用いて以後の処理を行なつた。

(5) 多賀谷, 田村: 本誌, 20 (1956), 124.

これらの実測曲線はニュートンの冷却とはいえなくても、冷却剤の冷却挙動、試片の熱的性質、寸法および測定位置

この値は銀の場合の 1.34 と非常によく一致している。 $n=1.37$ を用いて冷却曲線を温度と t/D^n の関係として図示す

Fig.1 Cooling curves of SUJ2 steel specimens in various diameters quenched from 845°C into several quenchants, (a) at centre, (b) at surface.

についてのある種の函数であると考えられる。

まず中心部冷却曲線について考える。すなわち測定位置の因子を中心部と固定して、第 8 報の場合と同様に温度 $T(^{\circ}\text{C})$ が t/D^n についてのある種の函数であると考えて寸法因子 n を最小自乗法で算出すると Table 3 のようにな

Table 3 The value of n for quenchants.

Quenchant	Temp. of quenchant	Value of n for	
		SUJ 2	SK 6
City water	20°	1.73	1.44
City water	60°	1.56	—
City water	80°	—	1.14
Rape seed oil	30°	0.89	1.37
60-Spindle oil	30°	1.24	1.22
110-Dynamo oil	30°	1.35	1.79
Mean value of n for each steel		1.35	1.39
Mean value of n for the two steels		1.37	

った。ここに t は焼入瞬間からの時間 (sec), D は試片直径 (cm) である。 n の値は冷却剤および鋼種によって多少変動しているが、これらを平均すると $n=1.37$ となった。

と各直径の冷却曲線は Fig. 2 のように重なってくる。(a) は SUJ 2, (b) は SK 6 の場合である。この一致度は、最初の子想よりも実験精度が悪く、必ずしも満足なものではないが、実験の性質からいつて比較的一致度はよいものと考えられる。もちろん Table 3 に示す各場合についての n の値を用いるとさらによく一致するわけであるが、一般化のために平均値を用いたわけである。これらの曲線を平均して、各冷却剤について 1 本の曲線として示すと Fig. 3^{††} のようになる。SUJ 2 と SK 6 とは比較的良好一致を示している。

表面部冷却曲線は Fig. 1 (b) に示したように直径が変化しても実験誤差内でほとんど一定の曲線を示す。曲線の主な変化は変態による発熱のためである。これは銀の場合と趣を異にするもので、鋼の熱伝導度が悪いためである。このことは Wever, Rose の論文⁽³⁾中の Bild. 6 を参照しても、表面では直径の影響をほとんど受けていない。Fig. 1 (b) の各冷却剤についての平均冷却曲線を Fig. 4 に示す。一致度はよい。

IV. 試片の熱的性質についての考察

以上の結果から試片材質の種類にかかわらず寸法因子は銀の場合も、鋼の場合も大略 1.35 程度であり、試片寸法の影響はこれで判明したわけであるが、温度と t/D^n の関係で示された曲線において、同じ冷却剤についての第 8 報に示した銀の場合と本報の Fig. 3 とはかなり相違している。

この相違を解決するために冷却剤の冷却挙動を示す因子および試片の熱的性質の因子を含んだ定数 K を考え

$$T = F_1 \{ (K/D^n) \cdot t \} \quad (1)$$

としてみる。ここに F_1 は函数を意味する。さきに冷却曲線は必ずしもニュートンの冷却でなくてもよいことを述べたが、もし、ニュートンの冷却であるとすれば、変数 $(K/D^n) \cdot t$ は指数函数の冪の項に入るべきもので、 $(K/D^n) \cdot t$ は次元のない値でなければならない。しかして実際は $n=1.35$ の値をとるけれども、大略 $n=1$ と考えると K は [長さ]/[時間] の次元を示し、cm/sec の単位のものである。しかも K は冷却剤の冷却挙動と試片材質の熱的性質を含む値である。このような観点から

$$K = a^2 c / k = h a^2 = (c/k) \cdot (k/sp) = c/sp \quad (2)$$

と置いてみる。ここに c は表面熱放散率 (熱伝達率) cal/

†† この図において、焼入温度の相違による不都合を除くために、横軸を平行移動させて、800°に原点をおくようにして図示した。この可能性はすでに第 3 報第 4 報、第 5 報、第 7 報で示した。〔多賀谷, 田村: 本誌, B-15 (1951), 589; 16 (1952), 107; 16 (1952), 342; 17 (1953), 217.〕

$\text{cm}^2/\text{sec}/^\circ\text{C}$, h は試片の熱伝導度 $\text{cal}/\text{cm}/\text{sec}/^\circ\text{C}$, a^2 はその熱拡散率 cm^2/sec , h は熱放散比 cm^{-1} ($h=c/k$) であ

であるが、ニュートンの冷却の場合これを定数と仮定する。本研究の場合、ニュートンの冷却でなくても差支えないから c は温度の函数であつてもよく、その方がより一般的である。($s \cdot \rho$) は試片の単位体積当りの熱容量である。それ故 (1) 式を書き換えると

$$T = F_2 \{ c t / (s \rho D^n) \} \quad (3)$$

となる。

このような考察をもとにして、本報の Fig. 3 の曲線および第 8 報の銀についての温度 $-t/D^n$ 曲線を $T-t/(s \rho D^n)$ 曲線に書き改めると Fig. 5 のようになる。($s \cdot \rho$) の値は銀の場合 $0.626 \text{ cal}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$, 鋼の場合 $1.104 \text{ cal}/\text{cm}^3/^\circ\text{C}$ を用いた^{†††}。水に関しては少し不満足であるが、それでも銀, SUJ 2, SK 6 共に一致を示している。

Fig. 5 の曲線はすなわち試片寸法, 形状, 材質に関係しない中心部の冷却母曲線であるといふことができる。この冷却母曲線は (3) 式によつて熱伝達率を因子として含んでいることがわかる。そして一つの冷却剤について一つの冷却母曲線が決定される。形状に関しては第 8 報において示したと同様に (体積)/(表面積) の値を直径 D の代りに用いることによつて解決される。(詳細は第 8 報参照)

V. 測定位置に関する考察

Wever, Rose らは彼等の論文⁽³⁾ 中 (Bild. 6) に直径 28, 48 および 95 mm のクロム鋼 (34Cr 4) を水焼入したときの 800°C から 500°C までの冷却時間を種々な位置で測定した結果を示している。これらの試片の半径を R とし, 中心から測定位置までの距離を r とし, r/R と $800^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ 冷却時間の関係に書き改めると Fig. 6 のようになる。表面部 ($r/R=1.0$) における冷却時間は Fig. 4 に示したものと大略一致しており, 試片寸法によつてあまり相違のないことがわかる。上記の寸法因子 $n=1.37$ を用いて $r/R-t/D^n$ の関係に書きかえたと Fig. 7 のようになる。中心部 ($r/R=0$) では三つの点がきわめてよく一致している。すなわち上記の寸法因子は一般性のあることを示している。本報の実験精度は予期したほど高くはなかつたが, n の値は多くの実験の平均であるためこのような一般性のある値が得られたものと考えられる。

中心部から離れて, 測定位置が表面に近づくに従つて, 直径 28 mm の試片はかなり離れてくるが, 他の二つはよく一致している。直径の小さい

試片では測定精度が下るためであろう。表面部でも少し離れている。表面部で $n=1.37$ を使用するには少し n が大

††† 附録参照

Fig. 2 Temperature- t/D^n curves of steel specimens in various diameters derived from centre cooling curves, (a) for SUJ 2, (b) for SK 6, where n is 1.37.

Fig. 3 Averaged temperature- t/D^n curves of SUJ 2 and SK 6 specimens at centre quenched into several quenchants, where $n=1.37$.

り, Grossmann らの焼入強度 H の 2 倍の値に相当する。 s は比熱 $\text{cal}/\text{g}/^\circ\text{C}$, ρ は密度 g/cm^3 である。すなわち c は主として冷却剤の冷却挙動を示し, 一般に温度の函数

きすぎるようである。著者らの銀の場合、表面では $n=1.14$ であつた。

面部と中心部を一致するように A, M の値を決定して t の r/R に対する分布を示すと、Fig. 7 に付記したような曲線

Fig. 4 Averaged temperature-time curves of SUJ 2 and SK 6 specimens at surface quenched into several quenchants.

Fig. 5 Temperature- t (spD) curves of SUJ 2, SK 6 and silver specimens at centre quenched into several quenchants.

焼入冷却過程をニュートンの冷却とすれば測定位置の影響は大略ベッセル函数あるいは余弦函数で示される。今、 $800^{\circ}\sim 500^{\circ}\text{C}$ 冷却時間 t を

Fig. 6 $r/R-t$ ($800\sim 500$) curves of 34Cr 4 steel specimens in various diameters derived from F. Wever and A. Roses' data⁽³⁾.

$$t = A J_0 (r/R \cdot M) \quad (4)$$

とあらわして、Fig. 7 の 95 mm 直径の曲線について、表

Fig. 7 $r/R-t$ ($800\sim 500$)/ D^n curves of 34Cr 4 steel specimens in various diameters derived from Fig. 6, where $n=1.37$.

となる。ここに J_0 は第 1 種 0 次のベッセル函数、 A および M は定数である。 r/R が $0.4\sim 0.9$ のところできちんと離れている。しかし適当な実験式を作成することによつて必ずや測定位置の関係も発見できるものと考えられる。

VI. 冷却母曲線の作成法とその応用

以上の結果にもとづいて、冷却母曲線を作成するには、最も容易に正確に測定できる方法によつて、必要とする冷却剤の冷却曲線 ($T-t$) を測定する。著者らはさきに銀円柱試片を用いて精度、再現性のすぐれた冷却曲線測定装置を考案し⁽⁶⁾、それによつて多くの冷却剤の冷却曲線を測定したが、このような適当な方法によつて冷却曲線を測定するわけである。銀円柱試片の場合を例にとれ

ば、その銀試片の中心部冷却曲線を測定し、焼入瞬間から各温度に達するまでの時間に $1/(spD^n)$ を乗じて、温度 T と $t/(spD^n)$ の関係として図示すれば、これが試片寸法、材質に関係しない、その冷却剤の冷却挙動のみを示す中心部の冷却母曲線である。この際 $n=1.35$ を用い、 $(s \cdot p)$ の値は銀の場合 $0.626 \text{ cal/cm}^3/^{\circ}\text{C}$ である。

このようにして求めた冷却母曲線から、現実に焼入しようとする鋼の中心部冷却曲線を知るには、冷却母曲線における焼入温度から各温度に達するまでの $t/(spD^n)$ の値に、その鋼材の $(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot D_{Fe}^n)$ を乗ずると、その鋼材の中心部冷却曲線が得られる。すなわち、温度 T と $\{(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot D_{Fe}^n) t / (spD^n)\}$ の関係で示される。ただし冷却母曲線と同じ冷却剤中に焼入した場合に限るわけで、他の冷却剤中に焼入するときはその冷却剤の冷却母曲線を使用しなければならない。この場合、鋼の $(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe})$ の値は $1.104 \text{ cal/cm}^3/^{\circ}\text{C}$ で $n=1.35$ である。

(6) 多賀谷, 田村: 本誌, B-15 (1951), 535 および 16 (1952), 652.

もし鋼材の形状が丸棒でないときは D_{Fe} の代りにその鋼材の (体積)/(表面積) を用いればよい (第 8 報⁽⁵⁾ 参照)。

測定位置についてはいまだ結論的なものを得ていないが、中心部の冷却母曲線を用いて焼入温度から各温度に達するまでの $(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe}) t / (s \rho D^n)$ を求めて、Fig. 7 のような図を各到達温度ごとに作成し、 $r/R=0$ のところに $(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe}) t / (s \rho D^n)$ の値をプロットし、Fig. 7 と相似形の曲線を描くと各位置におけるその到達温度の $(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe}) t / (s \rho D^n)$ の値を知ることができる。この値を $\{(S_{Fe} \cdot \rho_{Fe}) t / (s \rho D^n)\} \cdot D_{Fe}^n$ に変換して、温度と各到達温度におけるこの値との関係を図示すると、その位置における冷却曲線が近似的に得られるわけである。

以上のようにして得られた鋼の冷却曲線を、その鋼の連続冷却変態線図の上に書くと、その鋼の焼入変態挙動が手にとるように判明するわけである。しかして各種焼入冷却剤の冷却能の表示法として冷却母曲線そのものを用いるようにすれば、他のまぎらわしい因子が入らず、その冷却剤の熱伝達率を含む、冷却挙動のみを示し、きわめて好都合である。著者らの過去の研究結果から多数の冷却剤の冷却母曲線が容易に作成できる。

VII. 結 言

2 種の鋼を用いてその表面部および中心部の冷却曲線を測定し、寸法因子 n を決定した。 n の値は 1.37 となり、これは第 8 報で報告した銀の場合の 1.34 ときわめてよく一致を示し、またこの値は Wever, Rose の測定値をも完全に満足させ、一般的な寸法因子として採用できることを示した。さらに銀の場合と比較して、温度を $t/(s \rho D^n)$ の

函数として図的に曲線を求めることによつて、試片寸法、形状、材質に関係しない冷却母曲線を得ることができる。この冷却母曲線は冷却剤の熱伝達率を因子とする冷却挙動を温度の函数として示すものである。また測定位置についても近似的な算出が可能であることを示した。

このような冷却母曲線の概念は、焼入硬化因子の相互の関係を定量的に表現するために最も適切かつ合理的なものであつて、冷却母曲線から導出された実際焼入の際の冷却曲線を連続冷却変態線図上に照合することによつて、その鋼材の焼入硬化挙動を定量的に知ることができるわけである。すなわち冷却母曲線が冷却剤の冷却能を示し、連続冷却変態線図が鋼の硬化能を示すものである。

最後に本研究の実験に助力された赤松克太郎、酒井真一の両氏に感謝する。

附 録

銀および鋼の密度と比熱の積はつぎのようにして求めた。著者らがすでに第 10 報⁽⁷⁾ で求めたように銀の平均密度は 10.21 g/cm^3 、平均比熱は $0.0613 \text{ cal/g/}^\circ\text{C}$ であるから、これらの積として、 $s \cdot \rho = 0.626 \text{ cal/cm}^3/^\circ\text{C}$ とした。

鋼の場合、第 11 報⁽⁸⁾ において、鋼の焼入の際の熱伝導度 k を求めた。それによると $0.069 \text{ cal/cm/sec/}^\circ\text{C}$ であつた。同様にして Grossmann⁽²⁾ は鋼の焼入の際の熱拡散率 a^2 を $0.0625 \text{ cm}^2/\text{sec}$ ($0.0099 \text{ in}^2/\text{sec}$) としている。 $a^2 = k/s\rho$ であるから、比熱と密度の積 $s\rho$ を $1.104 \text{ cal/cm}^3/^\circ\text{C}$ と求めた。

(7) 多賀谷, 田村: 本誌, 20 (1956), 357.

(8) 多賀谷, 田村: 本誌, 20 (1956), 428.