

論 文

UDC 539.54 : 621.785.616.06 : 536.24

冷却母曲線によるジョミニー曲線の推定法*

時 弘 義 雄**・田 村 今 男***

Estimation of Jominy Hardenability Curve by Master Cooling Curve

Yoshio TOKIHIRO and Imao TAMURA

Synopsis:

Hardness values of a steel can be estimated from the CCT diagram if the cooling curve of the specimen is known. By the use of the master cooling curve previously obtained by the present authors, it was found that the cooling curve at any position from the quenched end of a Jominy specimen and hence the Jominy hardenability curve could be estimated accurately. These estimated curves of several steels well coincided with the measured results. Several estimation methods proposed by other researchers were compared with the one from the master cooling curve.

(Received Mar. 3, 1974)

1. 結 言

ジョミニー曲線は鋼の焼入性を表現するものとして広く採用されている。このジョミニー曲線は試片表面上の水冷端からいろいろの距離における冷却曲線がわかるとそれらの冷却曲線群をその鋼の連続冷却変態線図に重ねることにより推定できる。これらの冷却曲線はいろいろのジョミニー距離の点についてあらかじめ求めておくことも一つの方法であるが、一方これらの冷却曲線を一般化し、この一般化された冷却曲線から必要とする位置の冷却曲線を導出する簡単な方法がみつければ、それによって導出するのも一方法である。後者の方法によれば必要とする任意の位置の冷却曲線が描け、詳細にジョミニー焼入曲線を描くうえには有利である。著者らは後者の立場に立ち、冷却母曲線の考え¹⁾を応用してジョミニー試片上の冷却曲線を一般化し、この一般化された冷却曲線を用いてジョミニー焼入曲線を推定したところ、実測結果と比較的よく一致した。なお従来提案されているおもなジョミニー曲線推定方法と^{2)~4)}、著者らの方法とを比較検討した結果についても述べる。

2. 実 験 方 法

ジョミニー試片上の冷却曲線を求めるために使用した試片寸法および形状は JIS に規定してある標準のものである。試片材質は SK 6 でその化学成分を Table 1 に示す。耐熱鋼を使用するほうがスケールの付着などを考

Table 1. Chemical compositions of SK6 specimen.

C	Mn	Si	P	S
0.72	0.48	0.28	tr	0.009

慮すれば有利であるが、温度測定用のアルメルおよびクロメル線の接着が困難なことから、熱伝導度が普通構造用鋼よりやや小さく、冷却挙動を忠実に表現しにくいことなどから SK 6 を使用した。

温度測定には 0.6 mm 直径のアルメルクロメル線を試片表面に銅で接着し、余分の銅を除去して表面をなめらかにして使用した。なおアルメルクロメル線は円周方向に約 3 mm 離して接着した。温度測定点は水冷端より軸方向に 5 mm 間隔ごとに 30 mm の点までの 6 箇所である。

この試片を 800°C に加熱したのち JIS に規定してある方法で焼入れた。試片の加熱はスケールの影響を考慮してアルゴンガスふん囲気中でおこなった。焼入れに使用した冷却水は 15°C の水道水である。冷却曲線の測定には電磁オシログラフを用いた。

3. 実 験 結 果

前述のジョミニー試片を 800°C から焼入れ、試片表

* 昭和48年10月本会講演大会にて発表
昭和49年3月9日受付

** 山口大学教育学部

*** 京都大学工学部 工博

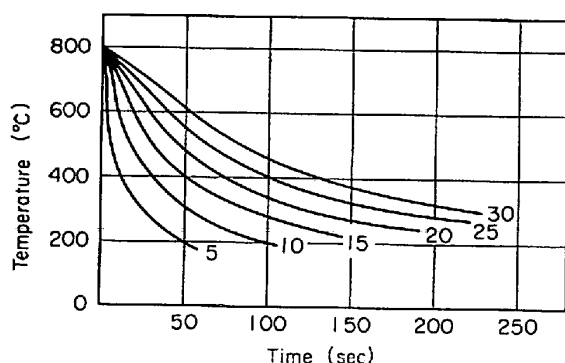


Fig. 1. Cooling curves at various positions from the quenched end on the cylindrical surface of Jominy specimen. Figures are the distances from the quenched end in mm.

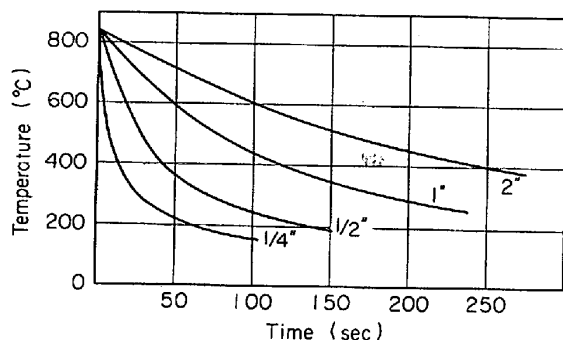


Fig. 2. Cooling curves at various positions from the quenched end of Jominy specimen. Figures are the distances from the quenched end in inch (by RUSSELL).

面上の各測定点における冷却曲線を求めた結果を Fig. 1 に示す。図中の数字は水冷端から各測定までの距離を mm で示したものである。これらの冷却曲線はすべて同一の形状を示し、変態の影響はほとんど現われず、Newton の冷却法則に従う冷却にきわめて類似した冷却挙動を示している。この結果これらの冷却曲線群を横軸（時間軸）方向に一定の割合で拡大または縮小することにより、1つの冷却曲線にほぼ重ね合わされる。すなわち測定位置に影響されない冷却曲線（ジョミニー試験の冷却母曲線）は製作可能である。

RUSSELL⁵⁾は En100 鋼のジョミニー試片を 850°C から焼入れて、試片側面上のいろいろのジョミニー距離の冷却曲線を求めている。これを Fig. 2 に示す。図中の

数字は水冷端からの距離をインチで示したものである。

Fig. 1 と Fig. 2 を比較してみると両者の冷却曲線の形状はきわめてよく似ており、焼入温度が変わっても母曲線化が可能であることがわかる。

4. ジョミニー試験における冷却母曲線

ジョミニー試片上の冷却曲線は、冷却母曲線概念を利用すればこの冷却曲線に関与するおもな因子について一般化できる。以下この因子について考察する。

ジョミニー試片の冷却はその冷却曲線の形状から推察して、大略 Newton の冷却法則に従うとみなしてよい。この場合の冷却挙動は熱伝導論より導くことができる⁶⁾⁷⁾。この解の諸式で試片に関与するおもな因子は熱放散比 h 、熱拡散率 a および焼入端からの距離 Z である。このうち a および h はジョミニーテストをするような鋼種に対してはあまり変わらないと考えられるので、冷却曲線に関与するおもな因子は Z のみである。すなわちジョミニー試片の冷却曲線のある温度における冷却時間 t は近似的に Z のみの関数とみなされる。この t と Z の関数関係は冷却母曲線を求めたときと同様にして、次式のように仮定する。

$$t = kZ^n \quad (k: \text{比例定数}) \quad (1)$$

n は多くの冷却曲線より実験的に定める定数で、この n をジョミニー焼入試片の位置因子指数とする。

(1) 式は焼入端からの距離 Z の変化によって生ずる多くの冷却曲線群は、その冷却時間 t を $1/Z^n$ に縮小すればすべて大略重ね合わされるとの意味をもっている。

Fig. 1 に示す 6 個の冷却曲線について、試片温度を 700°C より 250°C までの間で 50°C 間隔にとり、その各温度に対する t および Z の値を (1) 式に入れて n の値を求めた。この n の値を各温度ごとに平均したものを Table 2 に示す。Fig. 1 に示した冷却曲線の n の値の全平均は 1.38 である。

Fig. 2 に示した RUSSELL の冷却曲線群に対しても (1) 式を適用して、試片温度を 700°C より 50°C 間隔にとりこれら各温度に対する n の値を求めた。この結果を各温度ごとに平均して Table 2 のなかに示してある。

RUSSELL の冷却曲線における n の値の平均値は 1.43 である。筆者らの冷却曲線の全平均 1.38 とほぼ一致し

Table 2. Values of position factor n for Jominy specimen.

Temp.(°C)	700	650	600	550	500	450	400	350	300	250	mean
n											
Authors	1.33	1.46	1.45	1.50	1.52	1.49	1.40	1.32	1.22	1.11	1.38
RUSSELL	1.41	1.43	1.44	1.39	1.41	1.51	1.49	1.47	1.43	—	1.43

ている。Table 2 からわかるようにこの程度の差は実験誤差範囲内にある。このことから 800°C 以外の焼入温度に対しても(1)式は成立し、 n の値は焼入温度に関係なく一定とみなしてよい。よつて n の値として、RUSSELLの冷却曲線と著者らの冷却曲線に対する値の全平均をとつて 1.40 とする。

Fig. 1 および Fig. 2 に示した冷却曲線群の横軸(時間軸)の目盛りを $t/Z^{1.40}$ におきかえると Fig. 3 および Fig. 4 をうる。Fig. 3 は著者らの求めた冷却曲線に、Fig. 4 は RUSSELL の冷却曲線に対しておこなつたものである。これらの図から横軸を $t/Z^{1.40}$ とすることにより、すべての冷却曲線はきわめてよく一致することがわかる。なお Fig. 3 は Z の単位として cm を、Fig. 4 は in. をとつて示してある。よつてジョミニー試片の冷却曲線の一般化すなわち冷却母曲線は求められる。

ジョミニー試片の冷却母曲線は単位ジョミニー距離の冷却曲線とみなされる。よつて単位距離の冷却曲線(冷却母曲線)を横軸(時間軸)方向に $Z^{1.40}$ 倍すれば、焼入端から Z の位置における冷却曲線をうる。このよう

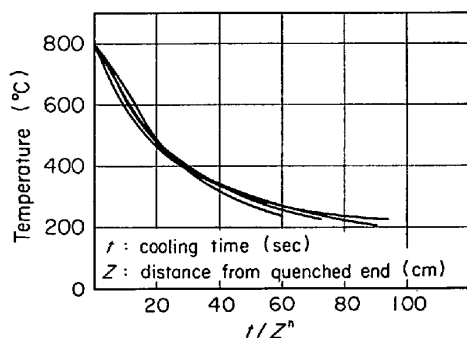


Fig. 3. t/Z^n -temperature curves normalized from the cooling curves taken at various positions on a Jominy specimen, where n is 1.40 , (by present authors).

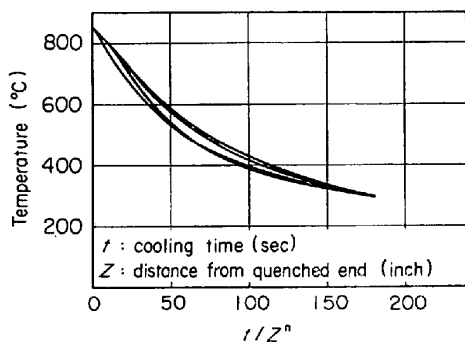


Fig. 4. t/Z^n -temperature curves normalized from the cooling curves taken by RUSSELL at various positions on a Jominy specimen, where n is 1.40 .

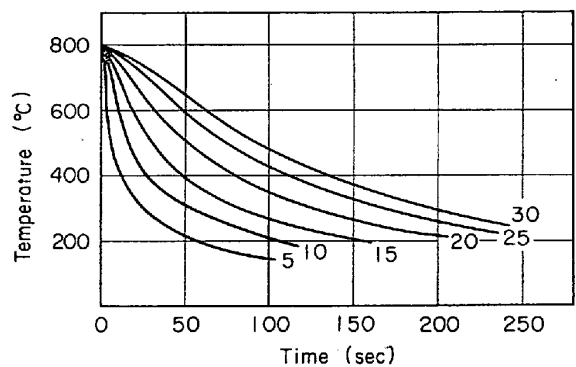


Fig. 5. Cooling curves at various positions from the quenched end of Jominy specimen derived from the master cooling curve. Figures are the distances from the quenched end in mm.

にして母曲線から、 Z が 0.5 cm , 1.0 cm , 1.5 cm , 2.0 cm , 2.5 cm , 3.0 cm の位置の冷却曲線を導出したものが Fig. 5 である。Fig. 1 と Fig. 5 を比較してみると両者はきわめてよく一致している。したがって冷却母曲線から必要とする位置の冷却曲線は、正確かつ簡単に導出できるといえる。

焼入温度を 750°C から 900°C までいろいろ変化させて冷却曲線を求めたが、その形状は 800°C の場合とほとんど同じであつた。冷却母曲線は、試片のいろいろの焼入端からの位置の冷却曲線を、一定の割合で拡大または縮小することにより重ね合わせることができるといふ意味をもっている。その一定の割合をあらわす指数 n の値は、前述したように焼入温度が 800°C でも 850°C でも一定の値 1.40 をとつてよかつた。

普通に用いられる焼入温度範囲内ではジョミニー試片上の冷却曲線の形状はほぼ同じであること、 800°C でも 850°C でも同じ n の値を用いてよいことなどを考えれば $n = 1.40$ はすべての焼入温度に対して適用してさしつ

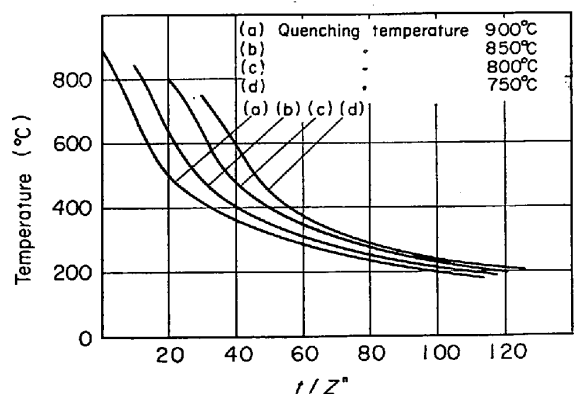


Fig. 6. Master cooling curves of Jominy specimen quenched from various quenching temperatures, where n is 1.40 .

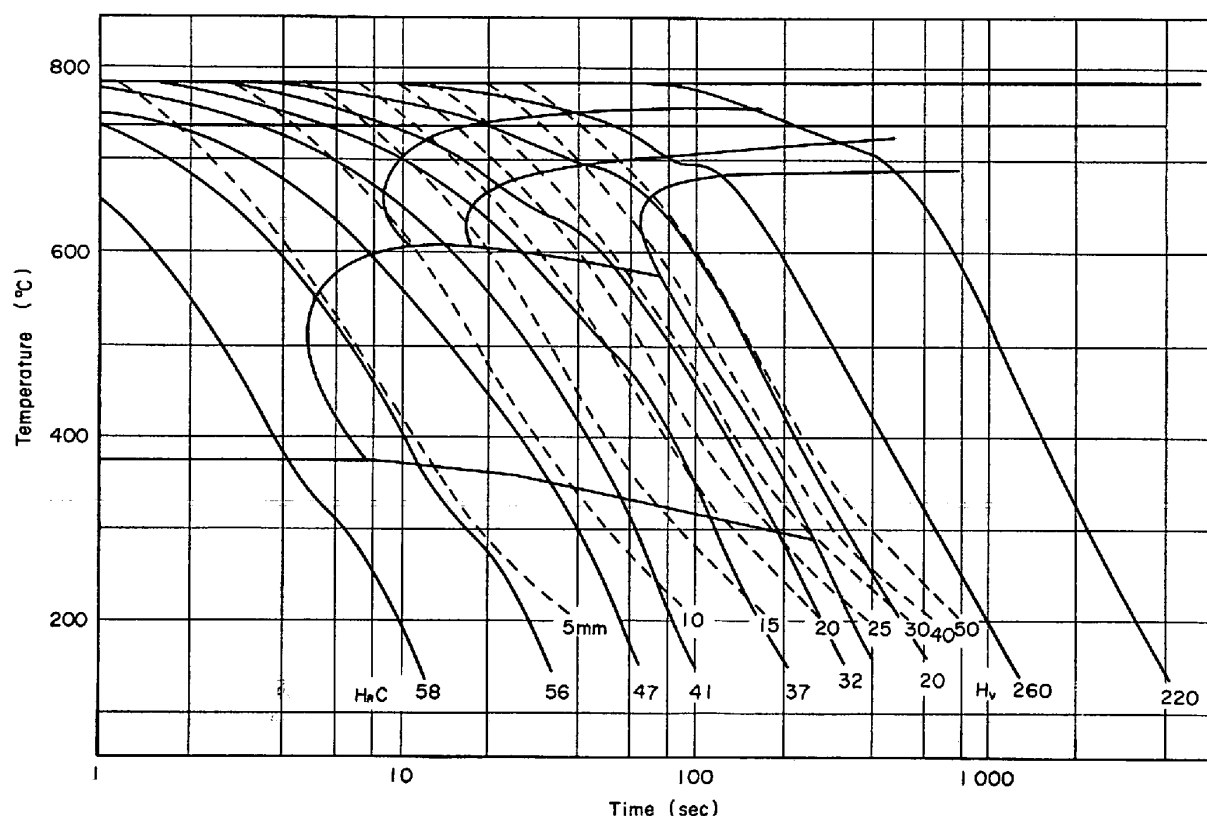


Fig. 7. Continuous cooling transformation diagram of SCr3 and cooling curves at various positions from the quenched end of Jominy specimen derived from master cooling curve.

かえない。

焼入温度が異なれば異なつた冷却母曲線を必要とする。そのため焼入温度 900°, 850°, 800° および 750°C に対してジョミニ試片の冷却母曲線を求めた。その結果を Fig. 6 に示す。これらの冷却母曲線を利用すれば必要とする焼入端からの位置の冷却曲線は容易に導出でき、ジョミニ焼入曲線を推定するうえに便利である。

5. ジョミニ曲線の推定

5-1 冷却母曲線による推定

ある焼入温度におけるジョミニ試片の冷却母曲線を横軸（時間軸）方向に $Z^{1.40}$ 倍拡大して、水冷端から Z の位置の冷却曲線を求める。この冷却曲線をその鋼の連続冷却変態線図に重ねると、 Z の位置における硬度が推定できる。硬度推定にあたっては WEVER ら⁸⁾ のいうように、800°C から 500°C までの冷却時間が等しければそ

の硬度は等しいとするか、GROSSMANN らの半温時間を基準にとればよい。 Z をいろいろ変えてそれぞれの位置の硬度を求めれば、ジョミニ焼入曲線は推定できる。

いま Table 3 に化学成分を示す SCr3 のジョミニ焼入曲線を求めるため、冷却母曲線を用いて水冷端からいろいろの位置の冷却曲線を導出し、(Fig. 5 にしめた曲線) これらの曲線群を連続冷却変態線図に重ねたものを Fig. 7 に示す。図中の数字は水冷端からの距離を mm で示したものである。Fig. 7 から求めた推定ジョミニ曲線を Fig. 8 に示す。図中には実測結果も示してある。Fig. 8 には Table 3 に化学成分を示す SCM3 についても同様にして推定ジョミニ曲線を求め、実測結果とともに示した。Fig. 8 をみると母曲線による推定ジョミニ曲線と実測曲線はよく一致し、母曲線による推定方法が有効な手段であることがわかる。なお連続冷却変態線図はすべて文献 9) による。

Table 3. Chemical compositions of specimens used.

Specimens	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
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

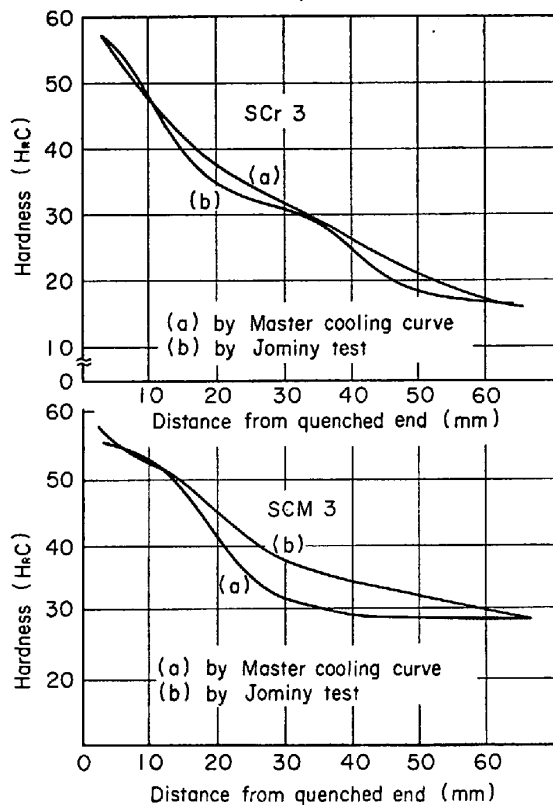


Fig. 8. Comparison of Jominy curves driven from master cooling curve with measured Jominy curves of SCr3 and SCM3.

5.2 冷却母曲線による推定ジョミニー曲線と他の方法による推定曲線との比較

ジョミニー曲線を机上で求めようとする試みは広くアメリカにおいておこなわれているが、そのなかで代表的なものは FIELD 法²⁾、CRAFTS および LAMONT 法³⁾、OREHOSKI および HODGE の法⁴⁾である。以下これらの方法と母曲線による方法とを比較する。

5.2.1 FIELD 法との比較

FIELD 法は理想臨界直径に基づいて算出する方法である。FIELD 法によるジョミニー曲線を、母曲線法によるものおよび実測結果とともに Fig. 9 に示す。

Fig. 9 をみると SCM3 に対しては FIELD 法のほうが母曲線法より実測結果とよく一致するように見えるが、これは FIELD 法が 3 元合金特殊鋼によく適合するよう考案されているためで、SCr3 でわかるようにその他の鋼種では母曲線を利用したほうがすぐれている。また FIELD 法では水冷端から遠ざかると実測結果と一致しにくく、これは津谷¹⁰⁾の SCM4 による結果でも同様である。

FIELD 法は焼入性の大きい鋼や小さい鋼に対しては適用できない。たとえば SK5 は小さすぎて、SNM5 は大きすぎてともにジョミニー曲線を求めることができない。

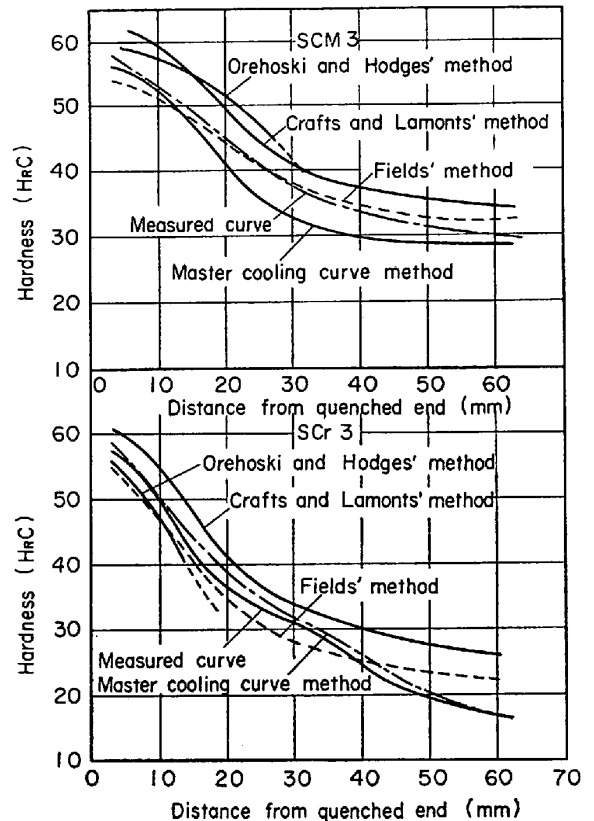


Fig. 9. Comparison of Jominy curves from master cooling curve with the ones by some methods and measured curves.

かつた。母曲線法を利用すると連続冷却変態線図さえあればすべての鋼種に適用できる点、その算出法も FIELD 法より簡単である点ですぐれている。

FIELD 法は一定の水冷端からの距離に対してしか硬度が求められないが、母曲線を利用すれば必要とする位置の硬度はすべて求められ、詳細な曲線を描きうる。

炭化物を形成しやすい元素を含有している低合金鋼においては、ジョミニー曲線は水冷端からの距離とともに一様に低下せず、2 カ所以上に変曲点を有する形状を示すことがあるのは一般によく知られた事実である。著者らの実験においても Fig. 9 に示す SCr3 においてこのことが認められる。これは変態中に生成するベイナイトがおもな原因である。FIELD 法は理想臨界直径に基礎を置いているのでそのジョミニー曲線はすべて一様に低下し、このような形状は予測することはできない。母曲線を利用すれば組織の推定も可能であるので、その付近を詳細に調べるによりかかる形状でも可能である。

5.2.2 CRAFTS および LAMONT 法との比較

この方法はロックウェル硬度に対して、合金元素量、炭素量および結晶粒度の影響が加算的にきいてくるとして求めるので、加算法ともいわれている。この方法は、

FIELD 法よりも実際的でかつ実測結果とよく一致するとされている¹¹⁾。津谷¹⁰⁾の結果をみても FIELD 法よりすぐれている。SCr3 および SCM3 についてこの方法と母曲線を利用する方法とで曲線を求め、実測結果とともに Fig. 9 に示す。これを見ると母曲線法は実測結果と比較的よく一致するが、CRAFTS らの法では十分な一致はえられない。Fig. 10 には SNCM5 および SK6 について求めた結果を示した。SNCM5 においては CRAFTS らの法によると実測結果と著しく異なり実用にならない。SK6 においては母曲線法より一致度がよいが、これは CRAFTS らの法で SK6 の曲線を求めるにあたって、関係線図中に C ベース硬度および M ベース硬度の値がなく¹¹⁾、外挿法によってそれらの値を推定したが、この推定の方法によつて曲線の形状はかなり変化するので、このようなよい一致をみたのはむしろ偶然といえる。

以上みてきたことから CRAFTS らの法と母曲線法を比較すればつぎのようにいえる。

(1) CRAFTS らの法は中炭素低合金鋼を主体としているのに対し、母曲線法は連続冷却変態線図さえあればすべての鋼種に適用できる。

(2) 推定方法も母曲線法が簡単であり、実測結果との一致度でも母曲線法がまさっている。

(3) CRAFTS らの法は FIELD 法におけると同様限られた水冷端からの位置の硬度しか得られず、詳細な曲線

の推定はできない。母曲線法は必要に応じていくらでも詳細に曲線の推定ができる。

5.2.3 OREHOSKI および HODGE の方法との比較

OREHOSKI らは鋼の炭素含有量と理想臨界直径を利用してジョミニー曲線を求める方法を提案している⁹⁾。この方法によって求めたジョミニー曲線と母曲線を利用した曲線および実測結果を Fig. 9 に示す。OREHOSKI らの方法では 50% マルテンサイト以上の硬度を示す部分に対してのみ曲線を描きうるので、マルテンサイト化しない部分は求められない。Fig. 9 をみるとこの方法で求めた曲線は SCr3 においては実測結果と比較的よく一致するが、SCM3 に対してはあまりよい一致はえられない。

OREHOSKI らの方法と母曲線法を比較すればつぎのようである。

(1) OREHOSKI らの方法ではマルテンサイト化しない部分に対する曲線は描けないが、母曲線法では水冷端から遠い位置に対しても曲線を描くことができる。

(2) OREHOSKI らの方法は焼入性のとくに大きい鋼や小さい鋼には、関係線図が与えられていないので描けないが、母曲線法は連続冷却変態線図さえあればすべての鋼種について描きうる。

(3) 算出に要する手数は両者とも同程度である。

以上従来提案されてきたジョミニー曲線推定方法と著者らの提案する母曲線法との比較をまとめるとつぎのようである。

(1) 従来の方法は中炭素低合金鋼を対象としたもので、その他の鋼種への適用は困難である。母曲線法は連続冷却変態線図さえあればすべての鋼種に適用できる。

(2) 従来の方法では水冷端から遠ざかると推定曲線は実測結果と一致しにくい、または描けない。母曲線では必要とする位置の硬度はほとんどすべて求められ、詳細な曲線の推定ができるとともに、水冷端から遠ざかった位置でも実測結果とよく一致する。

(3) 算出方法においても従来の方法と同程度の手数かそれより簡単である。

(4) 従来の方法は、鋼種によつてはその推定曲線は実測結果とあまりよい一致をみないものがあるが、母曲線法による曲線はすべての鋼種についてほぼ実測結果と一致する。

6. 結 言

ジョミニー試片上の冷却曲線は冷却母曲線の利用すれば、試片の冷却挙動に関与するおもな因子について一般化できる。この一般化された冷却曲線（冷却母曲線）を用いて、水冷端から Z の距離の冷却曲線を求める

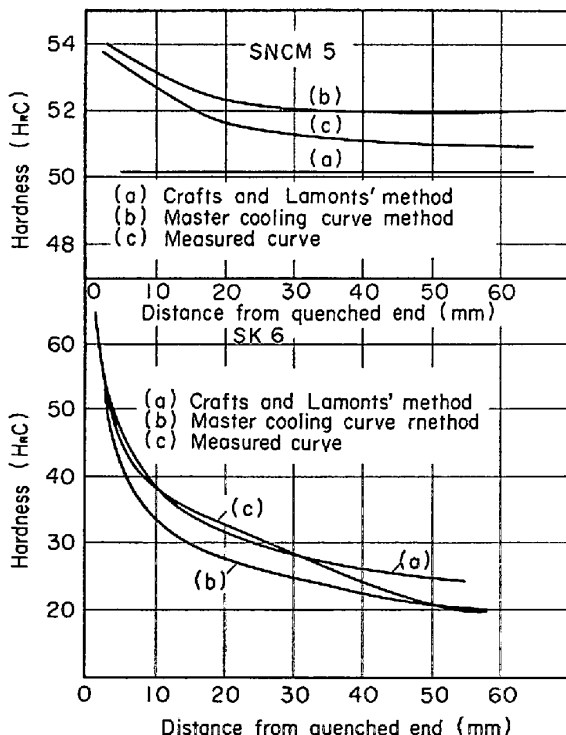


Fig. 10. Comparison of Jonmiuy curves derived from master cooling curves with that by CRAFTS and LAMONTS, method and measured curve.

には、この母曲線を $Z^{1.40}$ 倍時間軸方向に拡大すればよい。母曲線から求めたいいろいろの水冷端から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ジョミニー曲線が推定できる。この推定結果は比較的良好な実測結果と一致した。

ジョミニー曲線を従来提案されている FIELD 法、CRAFTS および LAMONT 法、OREHOSKI および HODGE 法で求め、これらの曲線と冷却母曲線を利用する法とで求めた結果を比較したところつぎのような結論をえた。

(1) 従来の方法は主として構造用低合金鋼を対象としたものであり、適用できる鋼種に限界があるが、母曲線法は連続冷却変態線図さえあれば、すべての鋼種に適用しうる。

(2) FIELD 法、CRAFTS らの法は水冷端からの距離が大きになると実測結果と一致しにくい。OREHOSKI らの法はマルテンサイト化しない部分に対しては曲線は描けない。母曲線法はすべての水冷端からの距離に対してほぼ実測結果と一致する。

(3) 従来の方法は限られた水冷端からの距離の硬度しかえられず詳細な曲線の推定はできない。母曲線法に

よると必要に応じていくらかでも詳細な曲線の推定ができる。

(4) 算出方法も従来の方法と同程度かむしろ簡単である。

文 献

- 1) 時弘, 田村: 鉄と鋼, 60 (1974), 6, p. 661
- 2) J. FIELD: Metal Prog., 67 (1943), 3, p. 402
- 3) W. CRAFTS and J. L. LAMONT: Trans. AIME, 167 (1956), p. 698
- 4) M. A. OREHOSKI and J. M. HODGE: Iron Age, (1952), July, p. 125
- 5) T. F. RUSSELL: Iron Steel Inst. Spec. Rep., (1939) 24, p. 283
- 6) 児玉: 日本機械学会誌, 36 (1933), p. 262
- 7) 川下: 熱伝導論, (1966), p. 220 [オーム社]
- 8) F. WEVER and A. ROSE: Stahl u. Eisen, 74 (1954), p. 749
- 9) F. WEVER, A. ROSE, and L. LADENMACHER: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, (1961) [Stahleisen]
- 10) 津谷: 日本金属学会誌, 22 (1958), p. 472
- 11) 大和久: 焼入性焼きの入り方, (1956) [日刊工業]