

# 低合金鋼の焼入性について

根本正\*

## The Hardenability of Low Alloy Steels

By Tadashi Nemoto

Hitachi Research Laboratory, Hitachi, Ltd.

### Abstract

The hardenability of low alloy steels containing 0.17~0.23% C, 0~2.19% Cr and 0.41~0.90% Mo was studied by the writer by means of the Jominy test, dilatometric method, hardness measuring and through the observation of their microstructure. The relation between the cooling rate in quenching and the amount of retained austenite was clarified as a result of magnetic analysis conducted as one way of studying the anomaly appearing on the hardenability curves.

The experiment results are summarized as follows:

- (1) The hardenability of low alloy steels increases with the amount of Cr and Mo.
- (2) The transformation rate in Ar' nose for low alloy steels is larger than that in Ar<sub>1</sub> nose.
- (3) The amount of retained austenite grows to the maximum at the cooling rate at which the Jominy hardenability curve traces an anomalous course.

### [I] 緒言

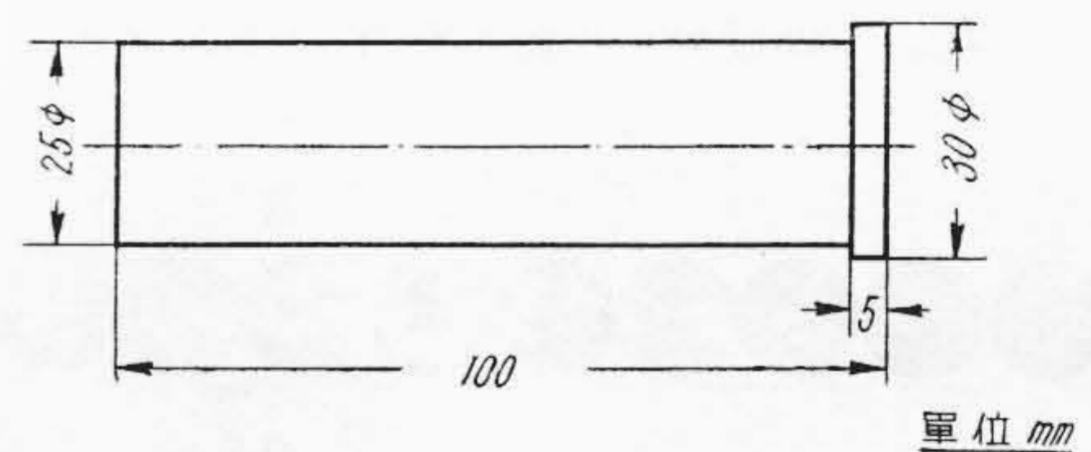
低合金鋼の焼入性を工業的に迅速かつ簡便に知る方法としてジョミニー試験が広く採用されるようになった。また基礎的には恒温変態図や連続冷却変態図から探究されるが<sup>(1)</sup>、低合金鋼の焼入性に関する研究は少いようである。そこで著者は数種の低合金鋼についてジョミニー試験による焼入性曲線を求めて比較検討するとともに焼入冷却速度と変態点、硬さ、組織および残留オーステナイト量との関係を追及して低合金鋼の焼入性特に焼入性曲線に現われる平坦部の生因をあきらかにした。以下本実験およびその結果について述べる。

### [II] 試料および実験

#### (1) 試料

洗鋼、フェロクロムおよびフェロモリブデンを用い高周波電気炉により4種の低合金鋼を熔製した。第1表は試料の化学成分を示す。これらの鋼塊を鍛造後ジョミニー試験片(第1図)、熱膨張および磁気測定試片(5mmφ

\* 日立製作所日立研究所



第1図 ジョミニー試験片  
Fig. 1. Dimension of Jominy Test Piece

第1表 試料の化学成分(%)  
Table 1. Chemical Compositions of Specimens (%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.5% Mo 鋼	0.22	0.37	0.54	0.014	0.022	0.09	0.41
1.0% Cr 0.5% Mo 鋼	0.17	0.31	0.48	0.019	0.024	1.08	0.42
1.0% Cr 1.0% Mo 鋼	0.23	0.35	0.50	0.019	0.018	1.17	0.88
2.0% Cr 1.0% Mo 鋼	0.22	0.30	0.54	0.019	0.024	2.19	0.90

×70mm)ならびに検鏡試片(25mmφ×20mm)をそれぞれ採取した。

(2) 実験

(A) ジョミニー試験

ASTM および SAE の規格では鋼種別に焼入温度が定められているが<sup>(2)(3)</sup>, 本実験では焼入温度は 1,025°C に一定し真空中で同温度に 30 分保持後焼入れを行い, 軸に平行でたがいに 180 度へだてた面を一様に 0.5 mm 研削後水冷端から 0.25 mm おきにビッカース硬さ (微小硬度計) を測定し, 水冷端からの距離と硬さとの関係を求めた。さらに同試験片を 5% 硝酸アルコール溶液で腐蝕し組織を調べた。

(B) 焼入冷却速度と組織および硬さ

25 mmφ×20 mm の試片を用い 1,025°C から各種の速度で冷却後組織と硬さを調べた。この場合試片の中央にあけられた 2 mm の孔に熱電対の先端を挿入し, その間隙を銀片をもって充填した。冷却速度が 100°C/min 以上の場合には六点式電磁オシロにより測温し焼入温度から 400°C までの平均冷却部速度を求め, また冷却速度が 100°C/min 以下の場合にはパイロメータにより測温し焼入温度から 400°C まで等速冷却を行った。

(C) 残留オーステナイト量の測定

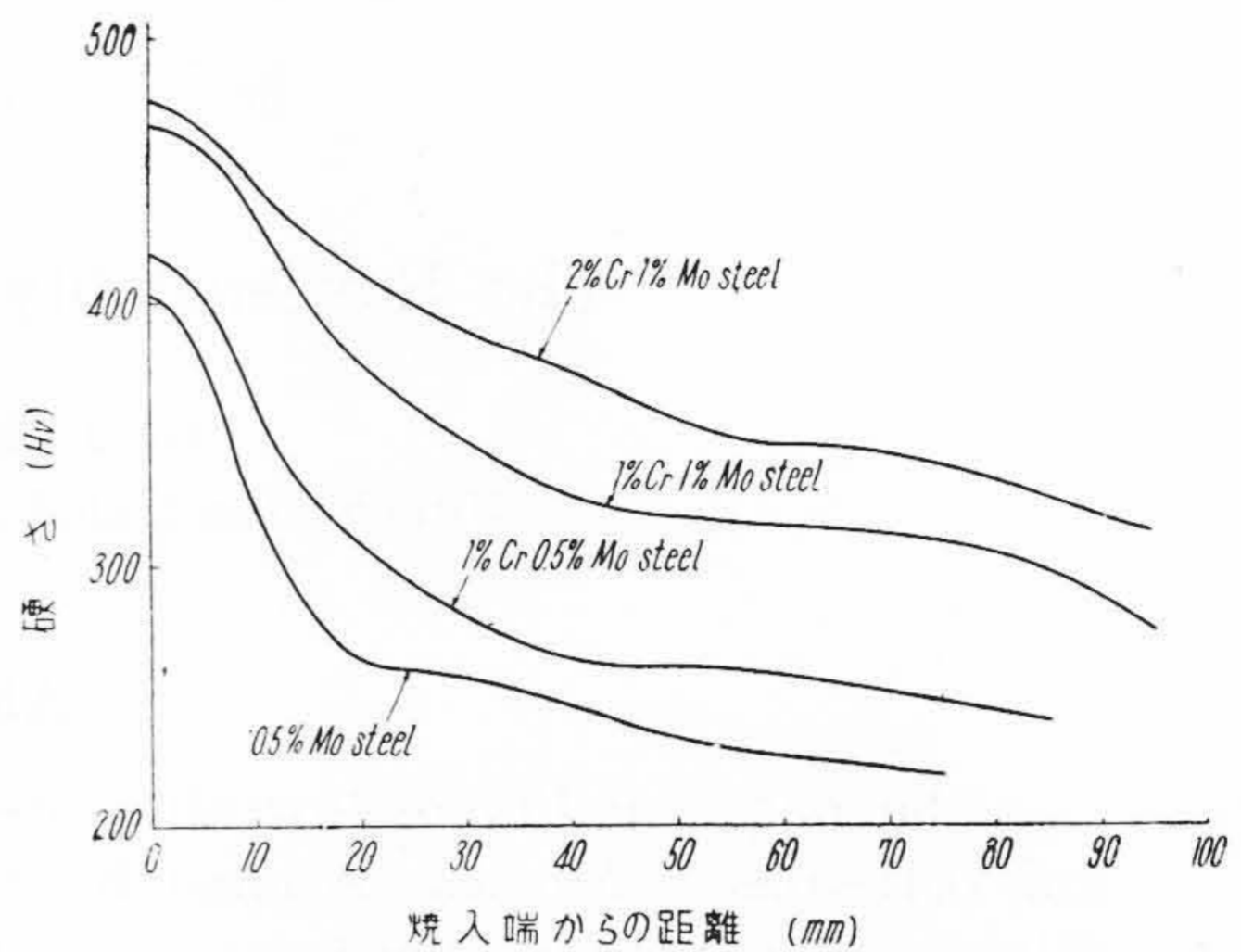
残留オーステナイト量の測定には種々の方法が知られているが, 本実験では焼鈍試料ならびに焼入直後の飽和磁化の強さを測定して次式から残留オーステナイト量を算出した。

$$\gamma_R = \frac{I_{sa} - I_{sq}}{I_{sa}} \times 100$$

$\gamma_R$ : 残留オーステナイト量 (%)

$I_{sa}$ : 焼鈍試料の飽和磁化の強さ (ガウス)

$I_{sq}$ : 焼入直後の飽和磁化の強さ (ガウス)



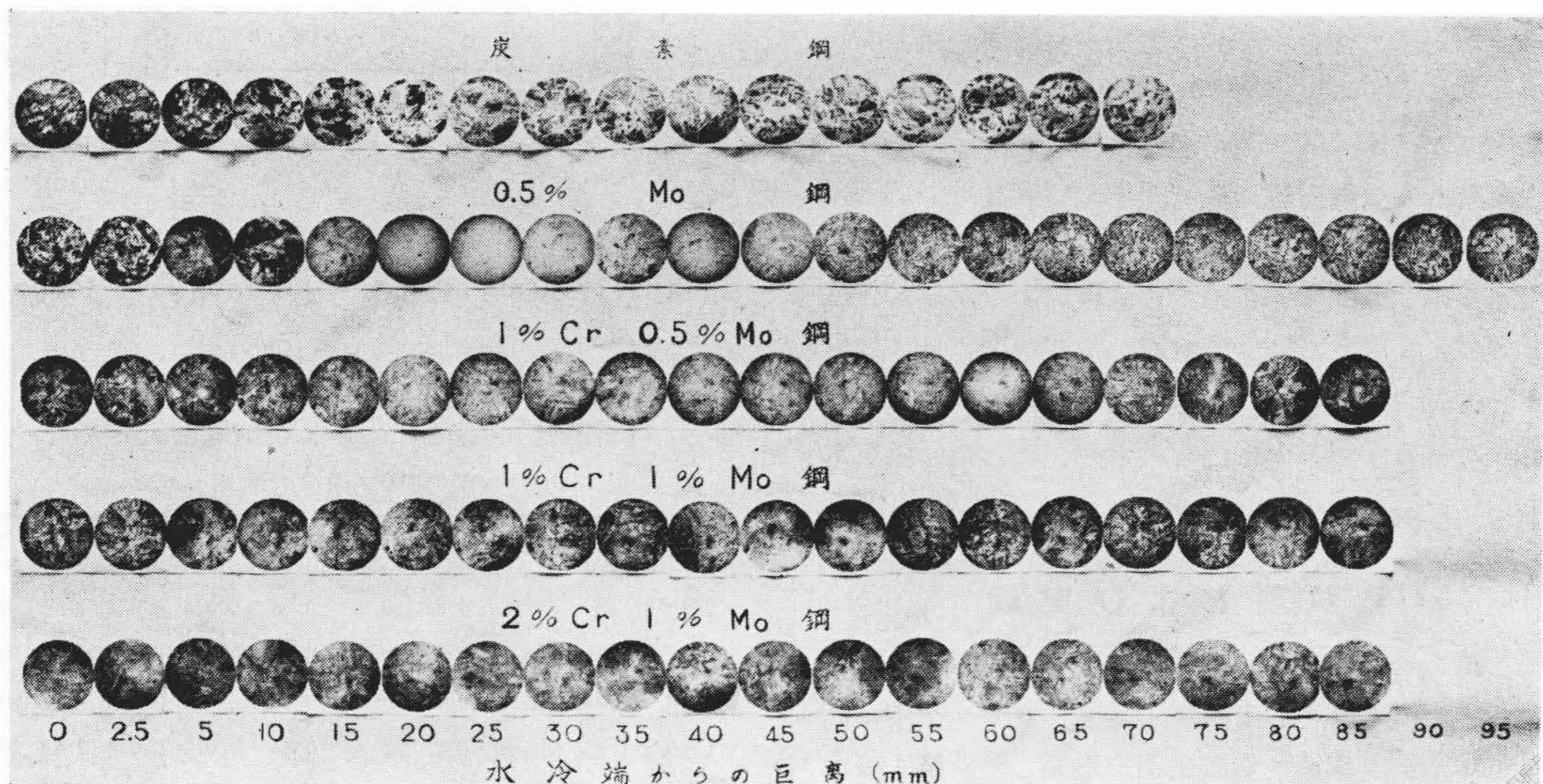
第2図 低合金鋼のジョミニー試験による焼入性曲線

Fig. 2. Jominy Hardenability Curves for Low Alloy Steels

第2表 試料の変態点 (°C)

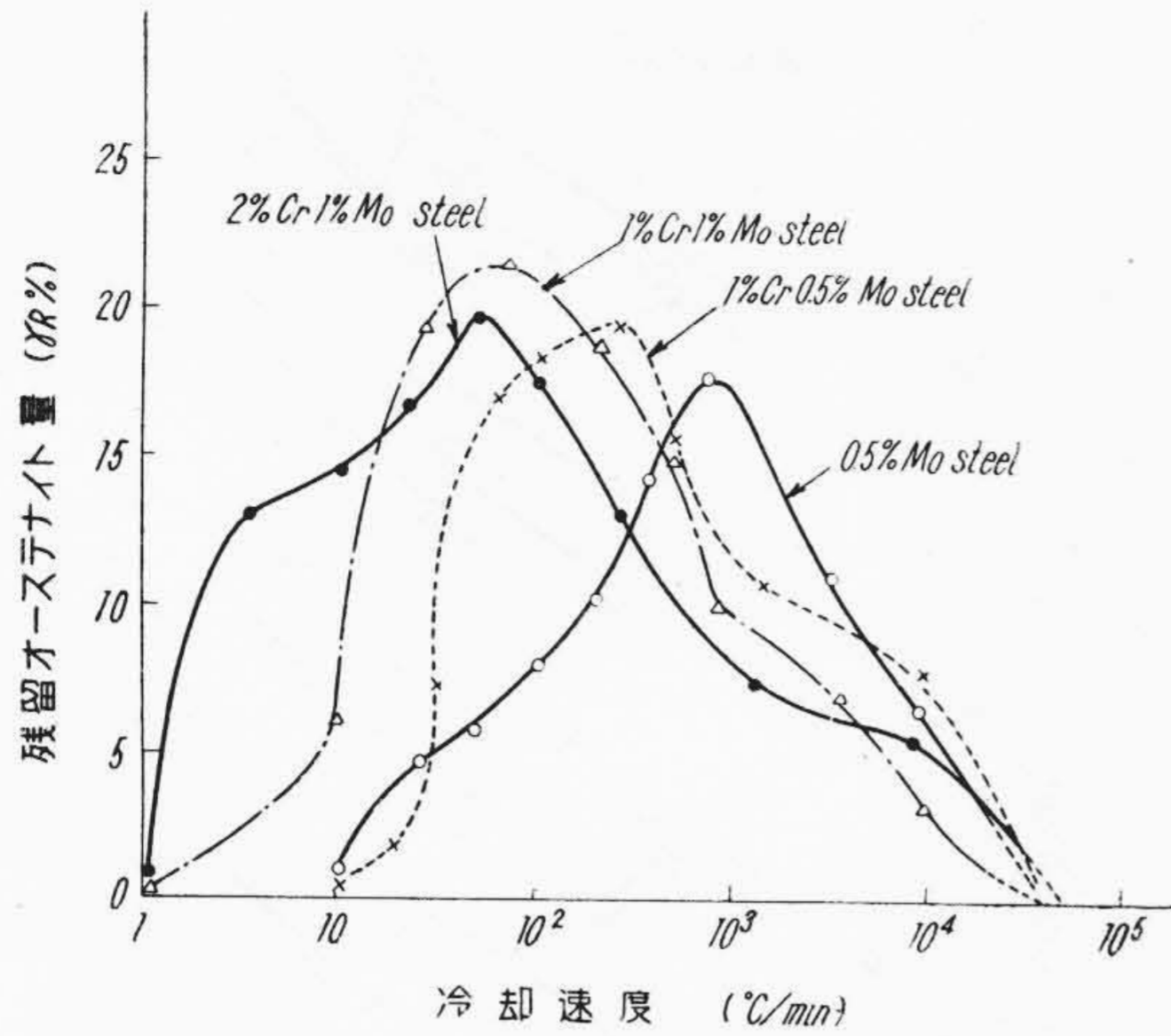
Table 2. Transformation Temperature of Specimens (°C)

鋼種	加熱		冷却	
	開始	終了	開始	終了
0.5% Mo 鋼	730	830	770	690
1.0% Cr 0.5% Mo 鋼	760	830	760	680
1.0% Cr 1.0% Mo 鋼	770	840	760	—
2.0% Cr 1.0% Mo 鋼	770	840	760	—



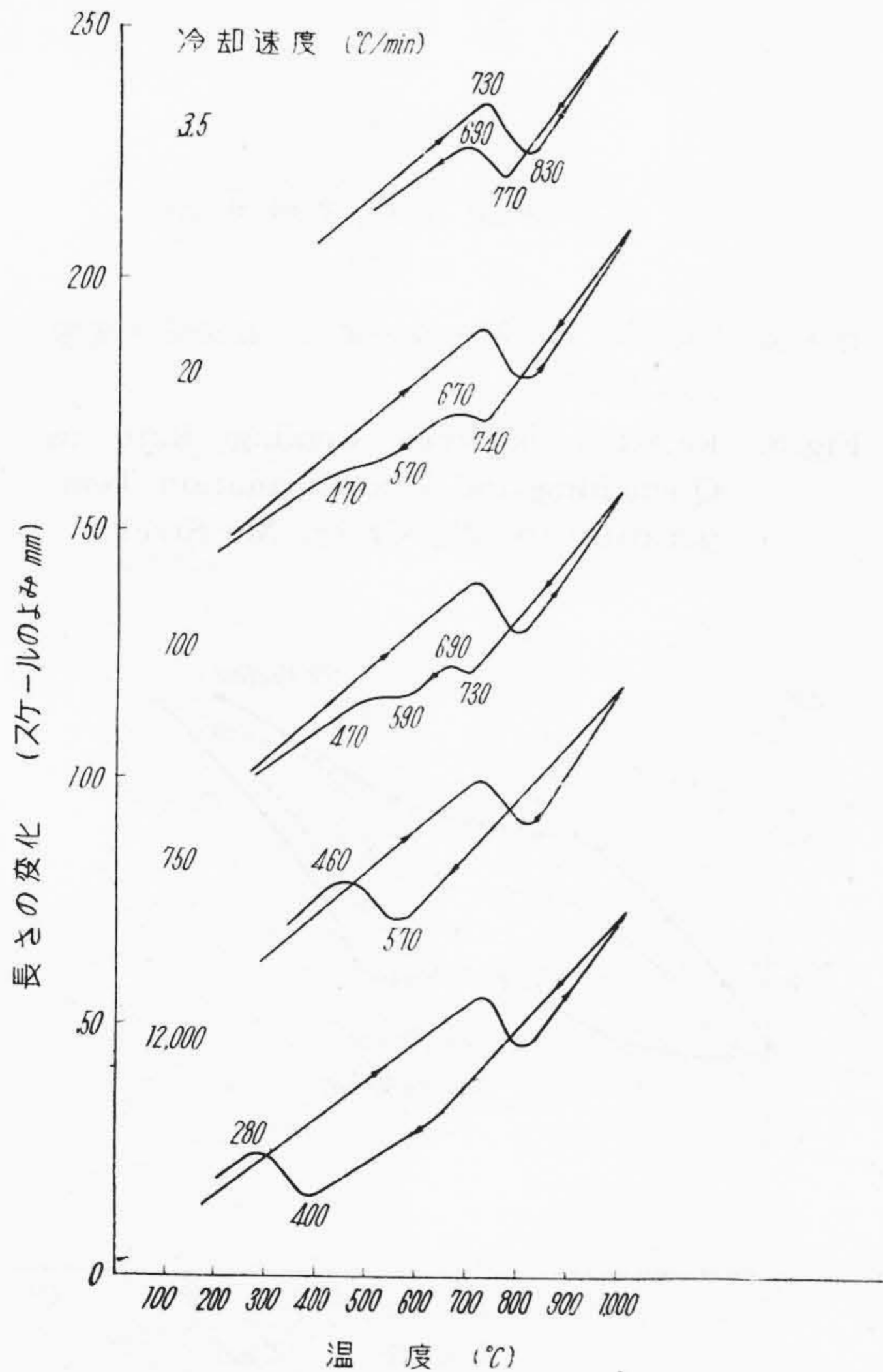
第3図 低合金鋼のジョミニー試験片の水冷端からの距離と組織との関係

Fig. 3. Relation between Microstructure Distance and from Quenched-End of Jominy Test Piece for Low Alloy Steels



第4図 焼入冷却速度と残留オーステナイト量との関係

Fig. 4. Relation between Cooling Rate in Quenching and Amount of Retained Austenite in the Low Alloy Steels



第5図 0.5%Mo鋼の焼入冷却速度と変態点との関係

Fig. 5. Relation between Cooling Rate in Quenching and Transformation Temperature for 0.5% Mo Steel

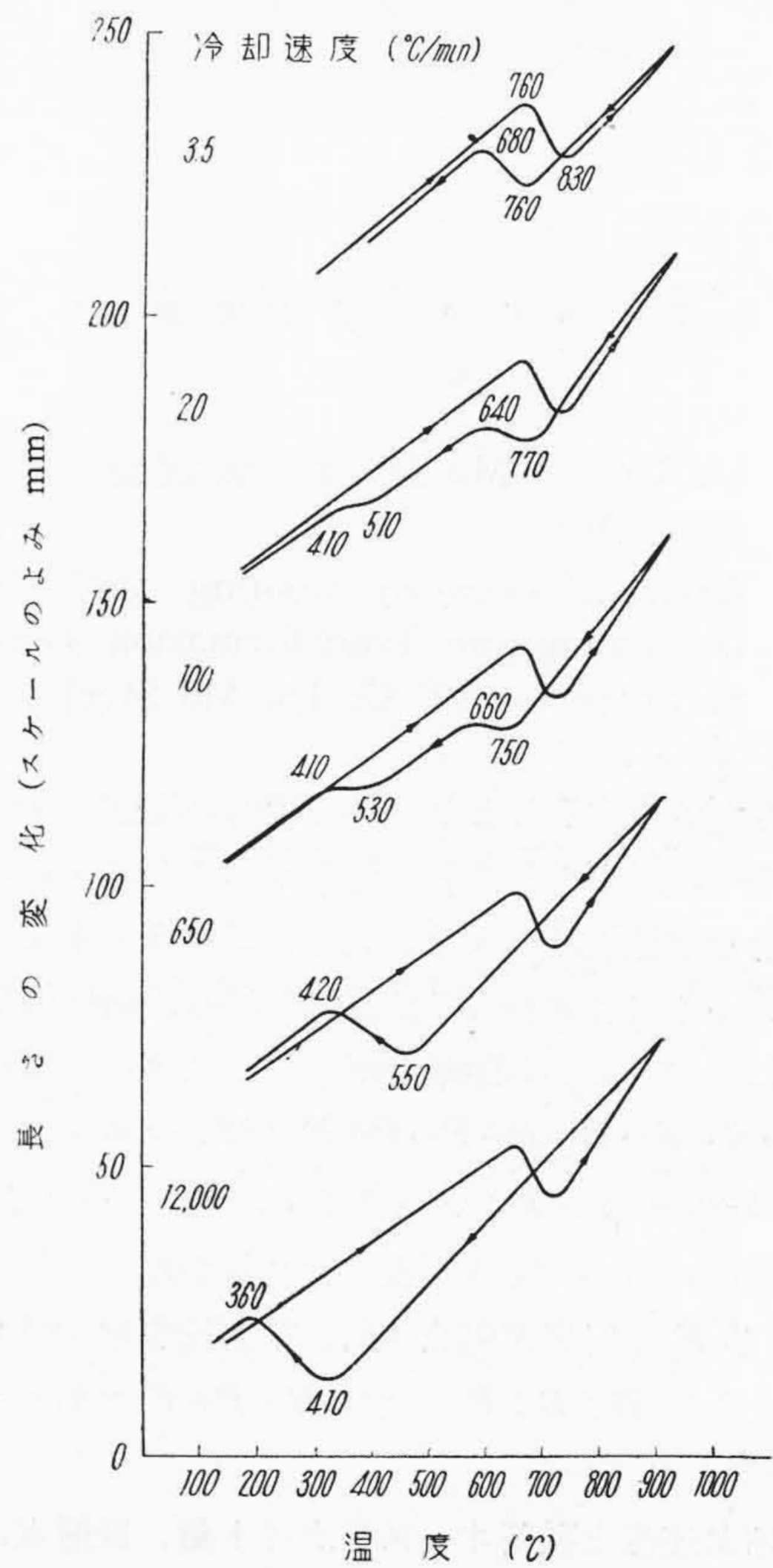
〔III〕 実験結果

(1) 変態点

第2表は各試料の変態点を示す。これからわかるように Cr および Mo の含有量が増すにしたがい、加熱に際しての変態点は上昇し冷却に際してのそれらは降下する。

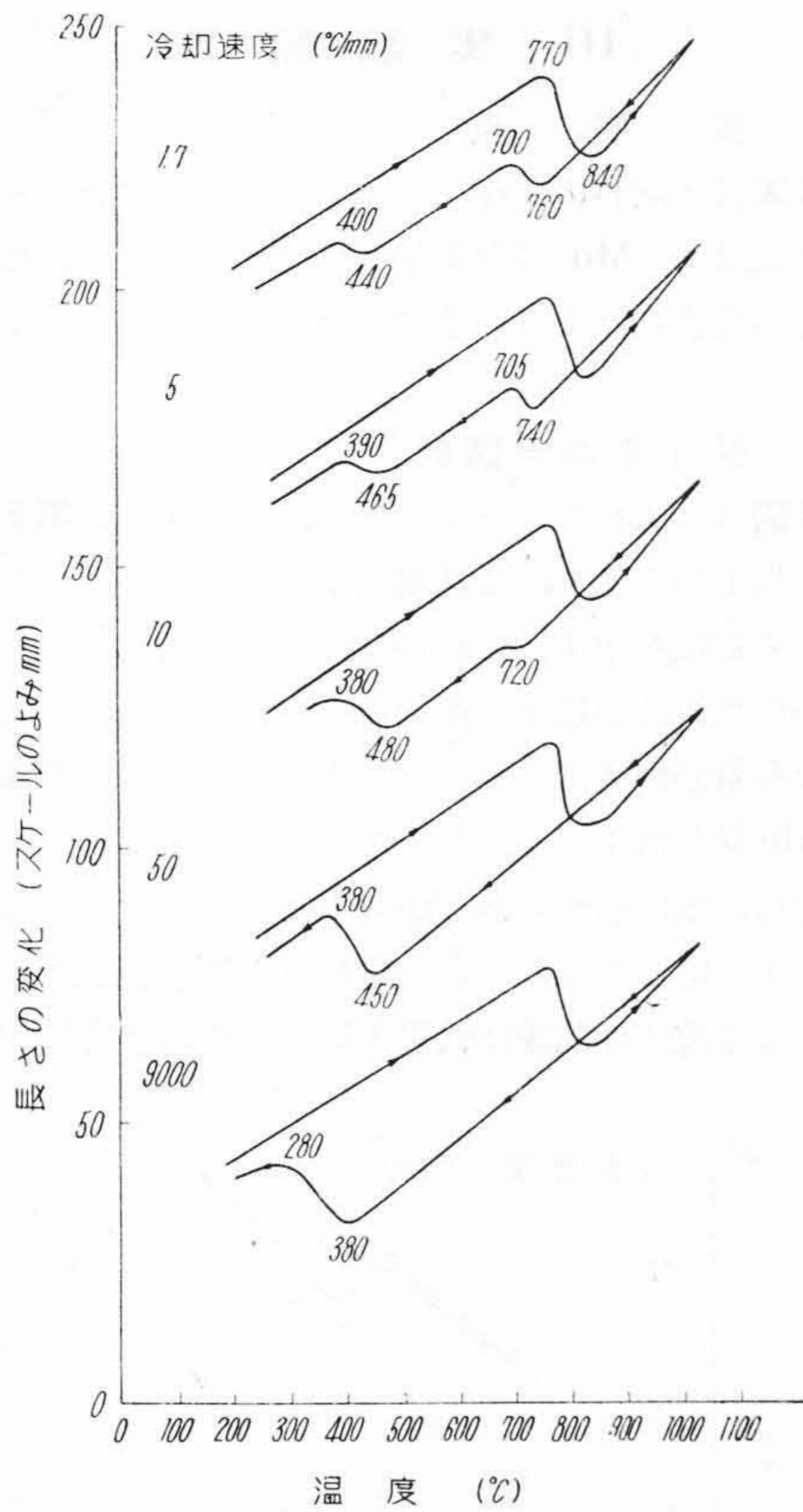
(2) ジョミニー試験

第2図は各試料のジョミニー試験の結果を、第3図は各試料および参考までに低炭素鋼の水冷端からの各位置における組織を示す。これから知られるように硬さは水冷端からの距離が増すと漸次降下し、降下の割合は特殊元素含有量が増すにしたがい減少する。すなわち Cr および Mo 量が増すにしたがい焼入性が增大する。また焼入性曲線は水冷端からある距離の範囲においてあきらかに硬さが一定となり、さらに離れると再び硬さが減少する。かかる焼入性曲線は低炭素鋼のように水冷端から連



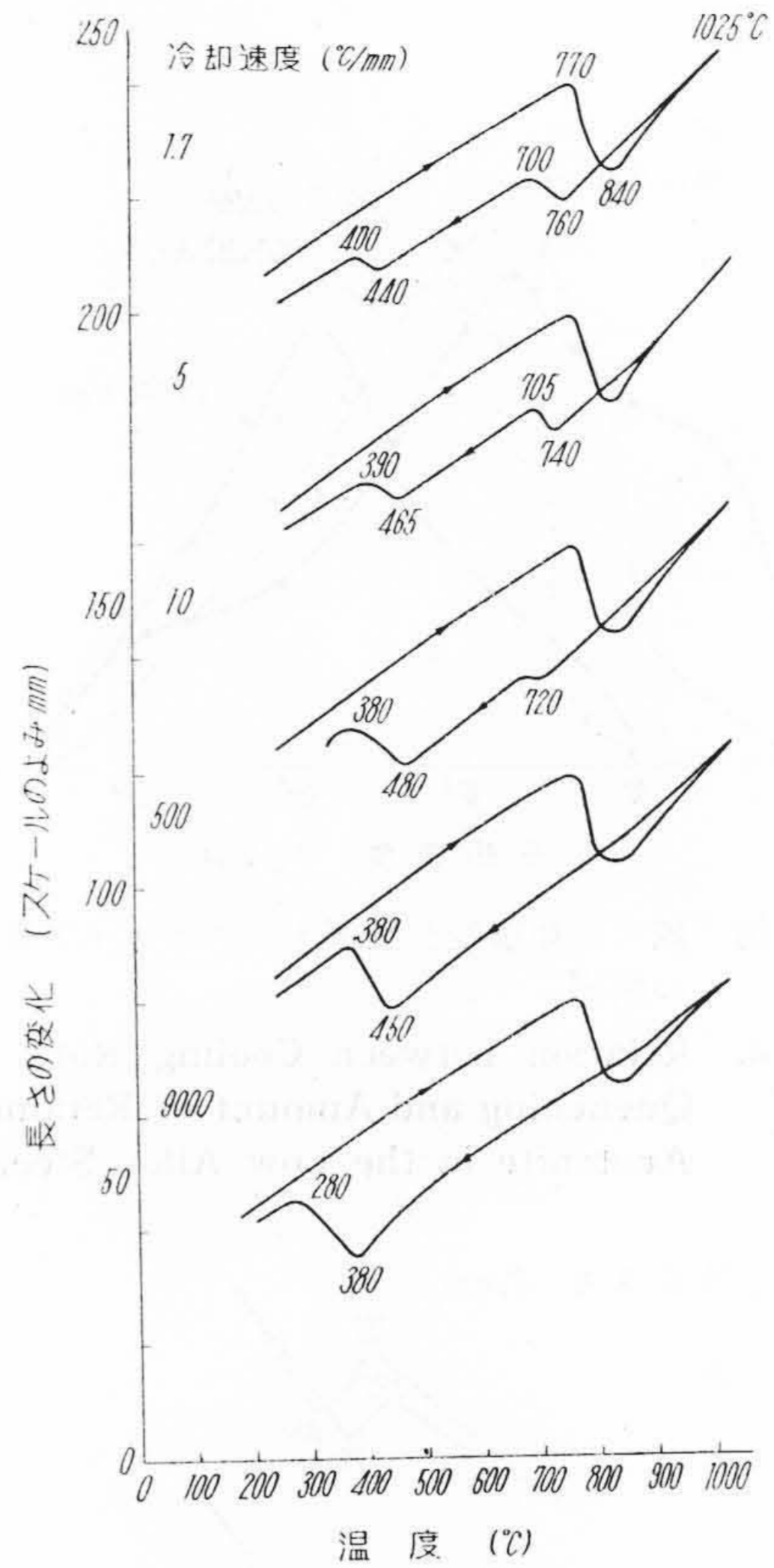
第6図 1% Cr 0.5% Mo 鋼の焼入冷却速度と変態点との関係

Fig. 6. Relation between Cooling Rate in Quenching and Transformation Temperature for 1% Cr 0.5 Mo Steel



第7図 1% Cr 1% Mo 鋼の焼入冷却速度と変態点との関係

Fig. 7. Relation between Cooling Rate in Quenching and Transformation Temperature for 1% Cr 1% Mo Steel



第8図 2% Cr 1% Mo 鋼の焼入冷却速度と変態点との関係

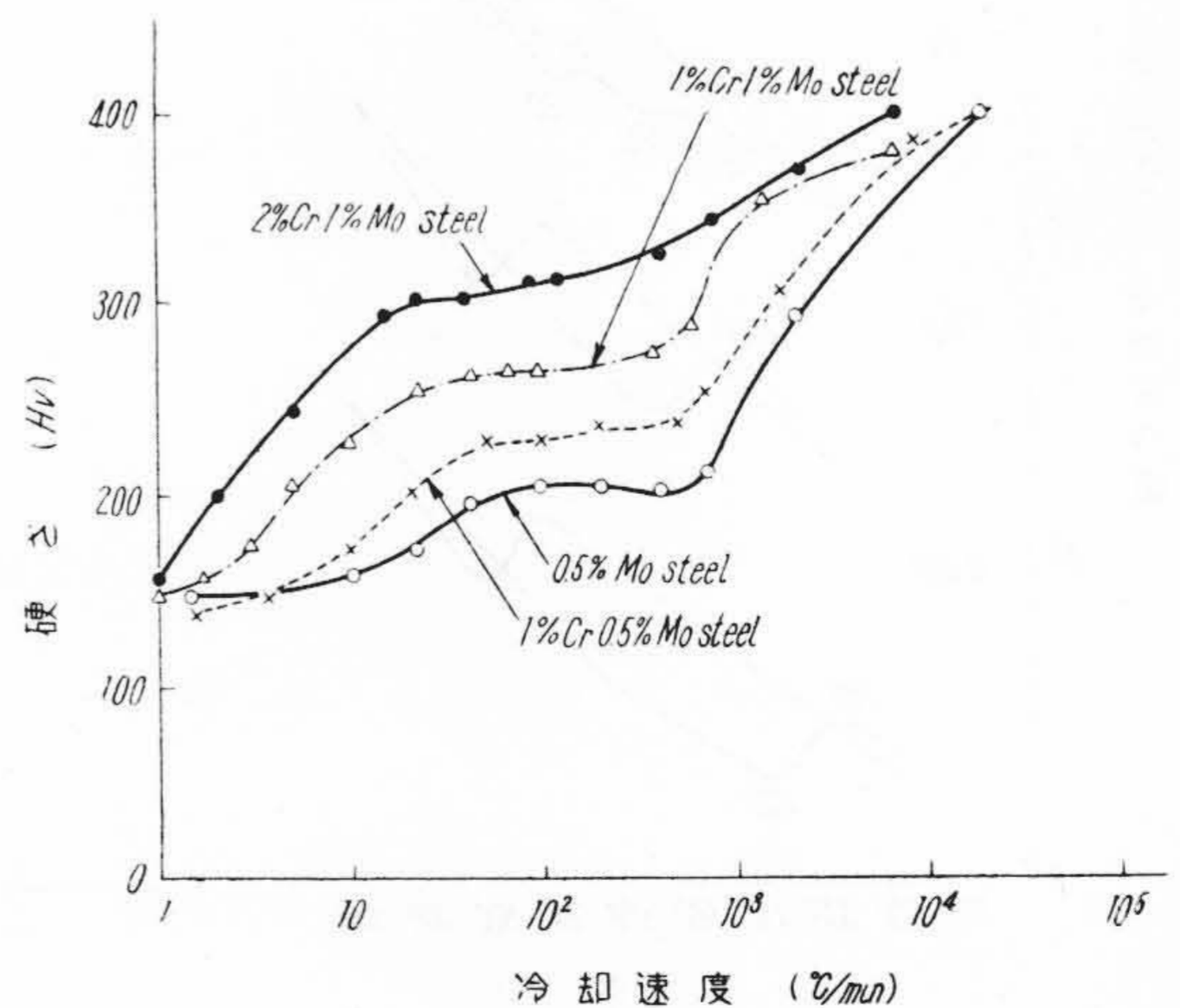
Fig. 8. Relation between Cooling Rate in Quenching and Transformation Temperature for 2% Cr 1% Mo Steel

続的に硬さが減少することなくある距離の範囲に平坦部を有するので、以下これを異常性と呼ぶことにする。この異常性を示す位置は焼入性が大きい試料ほど水冷端から離れる。つぎに各試料の各位置における組織は低炭素鋼の場合には水冷端から距離が増すにしたがい  $M \rightarrow M + B \rightarrow B \rightarrow B + F \rightarrow B + P + F \rightarrow P + F$  ( $M$ : マルテンサイト,  $B$ : ベーナイト,  $F$ : フェライト,  $P$ : パーライト) の順序で変化するが、特殊元素の含有量が増すにしたがい  $P$  および  $F$  の析出が阻止され、異常性を示す位置の組織は主として  $B$ ,  $B + F$  または  $B + P + F$  であるが少量の  $M$  も現われている。

(3) 冷却速度と残留オーステナイト量, 変態点, 硬さおよび組織との関係

(A) 残留オーステナイト

第4図(前頁参照)は各鋼種についてえられた焼入冷却速度と残留オーステナイト量との関係である。これから各鋼種とも水あるいは油焼入れの場合よりもはるかに小

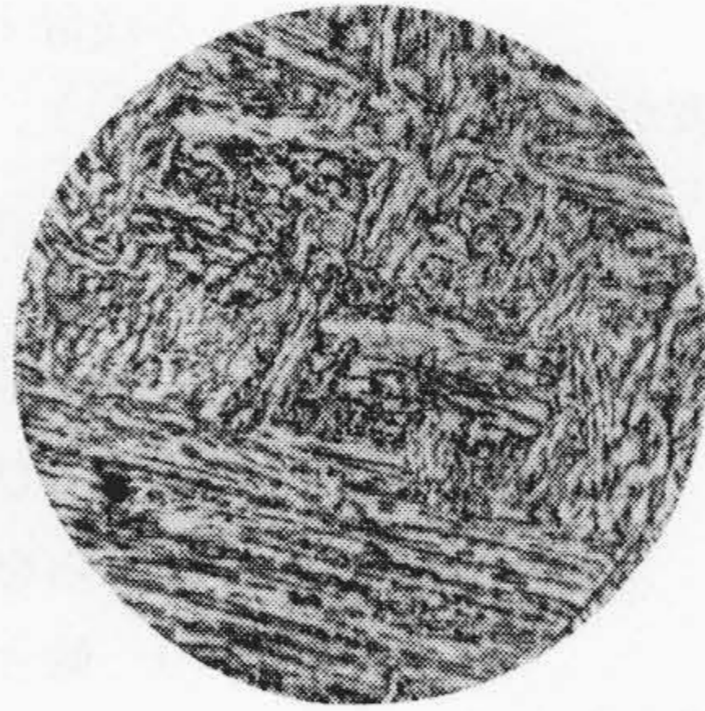


第9図 焼入冷却速度と硬さとの関係

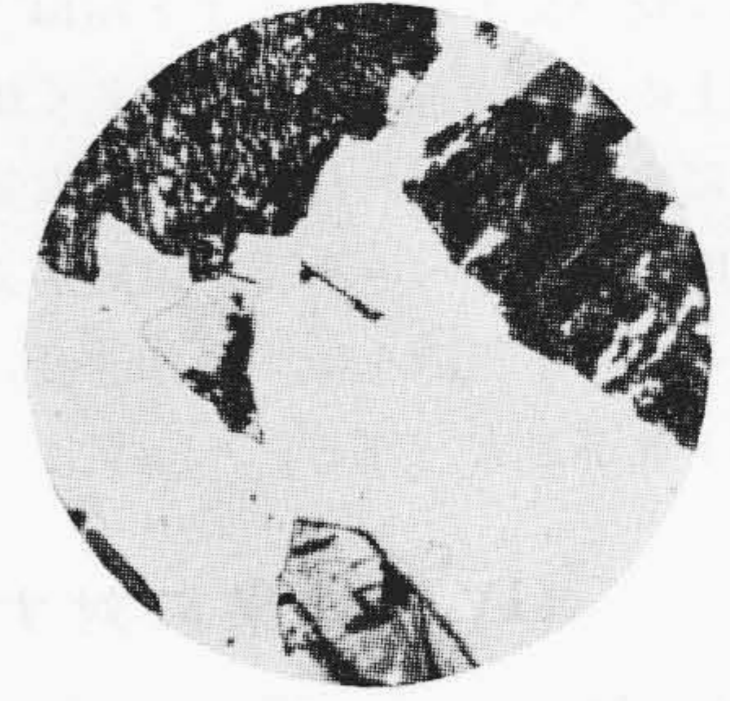
Fig. 9. Relation between Cooling Rate in Quenching and Hardness of Low Alloy Steels



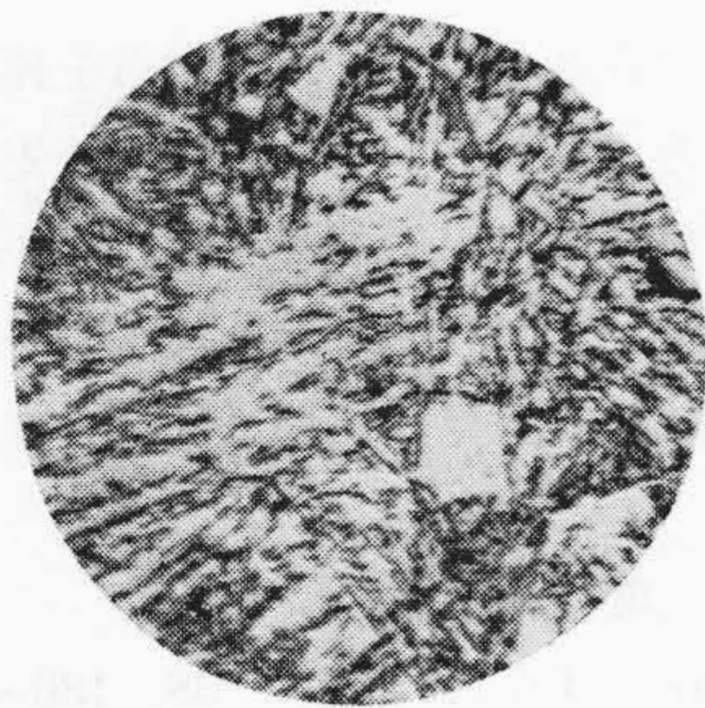
第10図 0.5% Mo 鋼の顕微鏡組織  
冷却速度 20°C/分 ×450  
Fig. 10. Microstructure of 0.5% Mo Steel  
Cooling Rate: 20°C/min ×450



第11図 0.5% Mo 鋼の顕微鏡組織  
冷却速度: 750°C/分 ×450  
Fig. 11. Microstructure of 0.5% Mo Steel  
Cooling Rate: 750°C/min ×450



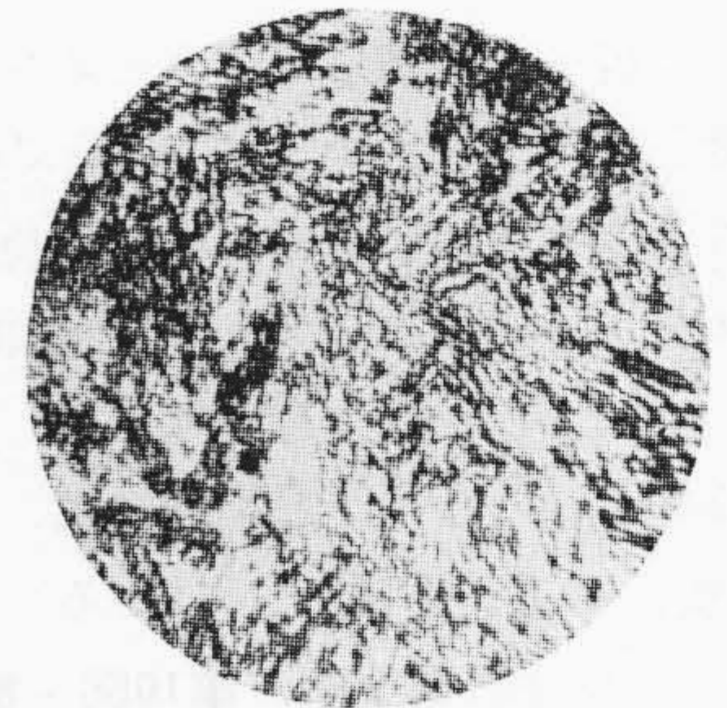
第12図 1% Cr 0.5% Mo 鋼の顕微鏡組織  
冷却速度 10°C/分 ×450  
Fig. 12. Microstructure of 1% Cr 0.5% Mo Steel  
Cooling Rate: 10°C/min ×450



第13図 1% Cr 0.5% Mo 鋼の顕微鏡組織  
冷却速度: 200°C/分 ×450  
Fig. 13. Microstructure of 1% Cr 0.5% Mo Steel  
Cooling Rate: 200°C/min ×450



第14図 1% Cr 1% Mo 鋼の顕微鏡組織  
冷却速度: 80°C/分 ×450  
Fig. 14. Microstructure of 1% Cr 1% Mo Steel  
Cooling Rate: 80°C/min ×450



第15図 2% Cr 1% Mo 鋼の顕微鏡組織  
冷却速度: 80°C/分 ×450  
Fig. 15. Microstructure of 2% Cr 1% Mo Steel  
Cooling Rate: 80°C/min ×450

さい冷却速度において残留オーステナイト量が最大となり、また著しく冷却速度が小さい範囲においても残留オーステナイトがあきらかに存在する。かように焼入冷却速度の変化により残留オーステナイト量が著るしく相違することは主として冷却過程における変態生成物の差異によるものと考えられる。

(B) 変態点

第5図(前頁参照)~第8図は各試料の焼入冷却速度と変態点との関係を示す。これから変態点は冷却速度とともに漸次降下しその降下率は Cr および Mo の含有量とともに増加するが、いずれの試料の Ar' 変態速度も大きいことが知られる。

(C) 硬さ

第9図は各試料の焼入冷却速度と硬さとの関係を示す。これからわかるように硬さは焼入冷却速度とともに増加するが、ある冷却速度範囲において硬さの増加が一たん停止後再び増加する。この現象は Cr や Mo の含

有量が多い鋼ほど冷却速度が小さい範囲に現われる傾向がある。このことはつぎの顕微鏡組織から説明される。

(D) 組織

第10図~第15図は各試料の焼入冷却速度による組織の変化を二三の試片について示したものである。0.5% Mo 鋼の場合(第10図および第11図)冷却速度が 20°C/min では F+P+B+M の混在組織であり、750°C/min では少量の F が析出しているがほぼ均一な上部ベーナイト組織である。1% Cr 0.5% Mo 鋼の場合(第12図および第13図)には冷却速度 10°C/min のものは F+P+B+M の組織である。写真中の角錐状の痕跡はライヘルト社製微小硬度計のダイヤモンドの圧痕である。その硬さは F が  $H_{mv}=186$ , P+B が  $H_{mv}=286$ , B+M が  $H_{mv}=548$  であきらかに組織の差が硬さに現われる。冷却速度 200°C/min のものは少量の F と上部のベーナイトの組織からなる。つぎに 1% Cr 1% Mo 鋼(第14図)および 2% Cr 1% Mo 鋼(第15図)の場合には冷却速度 80°C/min

でほぼ均一な上部ペーナイト組織である。

以上のように各鋼種とも著しく焼入冷却速度が小さい場合にも  $M$  が現われ、特殊元素量が増すほど小さい冷却速度で均一なペーナイト組織がえられるが、この均一なペーナイト組織を示す冷却速度において残留オーステナイト量が最大となる。

#### 〔IV〕 結果に対する考察

Cr や Mo のような C との親和力が強い元素を含む低合金鋼においては  $Ar_1$  変態速度が遅延するのに反し  $Ar'$  変態速度は促進されることは周知であるが、ジョミニー試験による焼入性曲線に現われる異常性(第2図)に関する研究は少い。ただ河井氏は A. Lindholm と同様な方法で連続冷却変態図を求めてその原因を追求し中間段階における硬さの不連続性が主因であることを指摘している<sup>(4)</sup>。今焼入冷却速度と硬さとの関係(第9図)と焼入冷却速度と残留オーステナイト量との関係(第4図)とを照合すると硬さ曲線が異常性を示す位置の冷却速度は残留オーステナイト量が最大となる冷却速度範囲とほぼ一致する。このことから冷却速度が増しても一たん硬さの増加が停滞するのは、この範囲で軟いオーステナイトが約 20% 残留するためと考えられる。また焼入冷却速度と硬さおよび組織(第9図, 第10図~第15図)から知られるように異常性を示す位置における組織は主として上部ペーナイトからなり、ジョミニー試験において焼入性曲線が異常性を示す位置の組織(第2図および第3図)とよく一致するので焼入性曲線に現われる異常性はオーステナイトが残留するために生ずる現象であると考えるのが至当であろう。

イトが残留するために生ずる現象であると考えるのが至当であろう。

#### 〔V〕 結 言

以上 0.5% Mo 鋼, 1% Cr 0.5% Mo 鋼, 1% Cr 1% Mo 鋼および 2% Cr 1% Mo 鋼の焼入性について述べたがこれらを要約するとつぎのようになる。

(1) 低合金鋼の焼入性は Cr および Mo 量が増すにしたがい増大し、その焼入性曲線に異常性が現われる。

(2) その異常性を示す位置は Cr および Mo 量が高いものほど水冷端から離れ、その位置の組織は主として上部ペーナイトである。

(3) 残留オーステナイト量は異常性を示す冷却速度範囲において最大となる。

擧筆するにあたり懇篤なる御指導を賜わった村上武次郎博士ならびに今井勇之進博士に深甚なる敬意を捧げるとともに御援助を願った日立製作所日立研究所兼先前所長、三浦所長ならびに終始御指導御鞭撻下された小野健二博士に感謝の意を表す。また実験に熱心に協力された八重樫敏雄君、顕微鏡組織の撮影に援助された小林、作山両氏に深謝する。

#### 参 考 文 献

- (1) C. A. Lindholm: Tr. A. S. M. 38, 180~208 (1947)
- (2) ASTM Standards, I, A 255~48T, 566 (1952)
- (3) SAE Hand Book, 303 (1947)
- (4) 河井: 鉄と鋼 39, 1159 (1953)



#### 日 立 製 作 所 所 有 鉄 鋼 関 係 商 標 一 覧 (その2)

(第16頁より続く)

商 標	登 録 番 号	類 別	指 定 商 品
S A I	464726	6	特殊鋼
S G T	464727	6	特殊鋼
C R D	464728	6	特殊鋼
H D C	464729	6	特殊鋼
S B D	464730	6	特殊鋼
S C D	464731	6	特殊鋼
D A C	464732	6	特殊鋼