鋼の焼入状態圖の研究(第1報)*

鋼の焼入冷却速度測定の新装置ならびに炭素鋼の 焼入硬化性におよぼす最高加熱温度の影響

佐藤知雄** 眞野國夫*** 戸谷三郎** 苫米地顯***

Tomo-o Sato, Kunio Mano, Saburo Toya and Ken Tomabechi : Study of Quenching Diagrams of Steels (Part 1). Application of Oscillograph to Determine the Cooling Rate in Quenching Steels and the Effect of Maximum Heating Temperature on the Hardenability of Them. A method was completed for recording the rapid cooling rate in quenching steels by means of an oscillograph, operated by a thermocouple e. m. f. through a cascade connected with a 3-stage amplifier. The complete assembly includes a quenching tank, a gas quenching unit, a thermocouple amplifier circuit, a sweep circuit, a cathode ray oscillograph and a recording camera. Using this apparatus, (a) the effects of carbon content on the hardenability of steel as indicated by the critical cooling rate were analyzed quantitatively and (b) the effect of maximum heating temperature on this property was studied. As the result of the study, it has been found that (a) the critical cooling rate is lowest at the eutectoid carbon percent, as reported by former investigators, (b) this cooling rate lowers with the rise of the maximum heating temperature, and (c) the relation between the critical cooling rate and the austenitic grain size seems to be linear in every specimen of carbon steel.

(Received October 3, 1954)

I. 緒 言

鋼の焼入硬化性はその鋼の臨界冷却速度、熱的諸要素および冷却剤の冷却能などに支配され、これらに関する研究はすでに非常に多く行われた。しかしながら鋼の焼入れの際の冷却速度は極めて速く、従つて臨界冷却速度を精密に測定することは困難でありこの點が問題とされておつた。近年にいたり各種測定法の技術的進歩にともない、H. G. French⁽¹⁾、T. G. Digges⁽²⁾、俵⁽³⁾等は鋼の焼入冷却速度を測定し、これによつて俵は炭素鋼および特殊鋼の焼入状態圖を構成した。焼入時の温度變化をオシログラフを用いて測定することは従来より試みられ、わが國にてもすでに清水、竹本⁽⁴⁾および石原⁽⁵⁾等によつてなされたが、電磁オシログラフによるものが多い。静電オシログラフを使用する方法は熱電對電壓の直流増幅が困難であることと、電源電壓の變動などに基ずく誤差が大きいために装置が複雑となり、實用上不便となつて利用に成功した例は少く、わずかに C. R. Austin, R. M. Allen および W. G. Van Note⁽⁶⁾の研究においてみるべきものがあるのみである。

しかし鋼の熱變化を測定することは、その他の物理的諸變化を測定することよりも直接的である點が優れておる。

本研究は容易に入手し得るブラウン管、真空管などを用いて熱電對電壓の増幅回路を作成し、静電オシログラフによつて鋼の焼入時の冷却速度測定を行い、これによつて炭素鋼および各種特殊鋼の焼入状態圖の検討、特に最高加熱温度がこれらの鋼の焼入硬化性におよぼす影響を明らかにせんと企てたものである。なお本報告は測定装置および炭素鋼の焼入硬化性におよぼす最高加熱温度の影響に関するものである。

II. 測 定 装 置

1. 冷却曲線の表示法

本測定法は熱電對の熱起電力を擴大し、これと適當な時間軸とを直角軸としてブラウン管上に冷却曲線を得る方法であり、時間軸としてブラウン管の水平軸に適當な鋸齒状波掃引電壓を加えれば螢光膜上の圖形直視も可能となる。また時間軸には電壓を加えずに螢光膜前方に回轉カメラを裝置し、回轉數を可變とすれば冷却速度に適應した時間軸による寫眞撮影も可能である。勿論前者の場合螢光膜上の圖形を直接寫眞に撮影することも出来る。

なおこゝで問題となるのは、熱電對の熱起電力をブラウン管の輝點偏移到必要な電壓まで増幅する方法である。すなわち高利得の直流増幅器が必要となるが、直接結合方式の直流増幅器の基本回路を用いたのでは装置が複雑となり實用には不便である。よつて著者等は熱電對の熱電力をこれと等價な交流電壓に變換した上、CR 結合増幅器を用い

** 東北大學工學部金屬工學科

*** 東北大學工學部通信工學科

* 1953 年 4 月本會東京大會に發表

(1) H. G. French, ASST, **17**(1930), 646.

(2) T. G. Digges, ASM, **26** (1938), 408.

(3) 俵, 鐵と鋼, **24**(1938), 327.

(4) 清水, 竹本, 電氣製鋼, **18** (1942), 259.

(5) 石原, 本誌, **6** (1942), 511.

(6) C. R. Austin, R. M. Allen and W. G. Van Note, ASM, **30** (1942), 747.

て増幅し、さらに整流器を通して再び直流電圧に変換する方式を採用した。なお微小直流電圧をこれと等価な交流電圧に変換する方法は種々考えられるが、ここでは繼電器（搬送用 209 型有極繼電器）を商用周波数で駆動して機械的に断続する方法を用いた。

この方法は機構が簡単であり、かつ動作も比較的安定である。本法によれば振幅が熱起電力の $1/2$ に等しい 50 c/s の交流電圧が得られるから、これを普通の CR 結合増幅器によつて所要電圧まで増幅すれば良い。熱電對の熱起電力が 10 mV のとき、 120 mm ブラウン管にて垂直軸上最高 6 cm の偏移を與える条件を考慮し、電圧感度を 0.4 mm/V とすれば加すべき電圧は 150 V となるから、増幅度 (A) は約 85 db と計算される。さらに交流直流變換部分および整流器の損失を約 10 db と考えれば増幅器は約 96 db の利得を有するものが必要である。従つて 3 段の CR 結合増幅器で 5 極管 2 個を使用すれば、この要求を満足する増幅器が得られることになり、本装置においては UZ-6c6 真空管 2 個、UY-76 真空管 1 個を使用した。

整流器としては 2 極管全波整流方式を用い、入力電圧の急激な變化に対しても速應するように時定数を出来るだけ小さく設計した。しかし時定数を必要以上に小さくすると出力直流電圧に含まれるリップル電圧が大となり、ブラウン管の輝點が垂直軸方向に長さを有するようになって測定精度を低下させる。また装置を簡便にするため電源として電池を使用することを避け、また増幅器の入力回路の直流交流變換部分は特に注意して、誘導その他の雑音が少く、かつ安定に動作するよう製作した。

Fig. 1 は本装置増幅部の配線圖である。各真空管に加

Fig. 1 Thermocouple amplifier circuit diagram.

える高電圧電源は定電圧放電管を用いて安定化し、また繼電器駆動用電源には電圧調整器を用いて繼電器が最も安定に動作するようにした。

2. 装置の特性

Fig. 1 の回路装置を用いて測定した結果、増幅器の増幅度を最大 (R_1, R_2 および R_3 の抵抗により任意の増幅度が得られる) にした場合、熱電對の熱起電力 1 mV におい

て輝膜上の偏移が約 3 cm となり、熱電對としてアルメルクロメルおよび白金-白金ロジウムのいずれを用いても所期の要求を満足しうるものである。Fig. 2 はアルメルクロメル熱電對を用いて測定した場合の入力 (熱電對の示す温度すなわち mV) と出力 (増幅後の電圧 V) および螢光面上の輝點偏移長との關係を示す。この場合の雑音電圧は輝點偏移 0.1 cm 程度でほとんど問題にならない。

鋼の焼入れ冷却速度の測定上問題となる點の二三を本装

Fig. 2 In put-out put relationship of amplifier.

置について考察すると、第一に熱起電力の變化に対する輝點の速應性であり、これは主として整流部分の回路定数によつて著しく影響される。入力電圧が突然零になつた場合、すなわち冷却速度が無限大のとき、螢光膜上の輝點偏移が入力電圧の 37% に減少するまでの時間をもつて時定数とした。時定数が大なるほど速應性は悪く、焼入時の急激な温度變化に追従せず歪圖形が得られることになる。實驗に使用した装置の時定数は約 0.01 sec であつて、この程度の時間内に急激に變化する温度變化を測定する場合には實際の温度變化と異なる圖形が得られる。このことは測定の場合常に考慮されなければならない問題である。

第二は電源電圧の變動に対する装置の安定性である。装置の中で増幅器の電源には定電圧放電管を用いて電圧の安定化が計られてあるので問題外であるが、繼電器の動作は電源電圧に敏感であるためこゝにも自動電圧調整器を用いておる。

第三に本装置の測定精度である。測定精度はブラウン管の輝點の大きさによつて決定され、また輝點の偏移長によつても左右される。したがつて使用するブラウン管の直径が大なるものほど一般に精度が高くなるのは勿論である。本實驗に使用したブラウン管の直径は 120 mm であり、有効偏移を 69 mm

(時間軸を加えて測定する場合) とすれば、輝點の直径が約 0.1 cm となり測定温度の 2% 以下の誤差をもつて温度變化を圖形に表示することが可能である。

3. 圖形の解析

冷却曲線記録にはカピネ乾板カメラ (時間軸採用) および 80 mm オッシロペーパー用廻轉カメラ (時間軸不採用) を用いた。前者は冷却速度が極めて大きいときに、また後

者は冷却速度の比較的小さいときに用い記録結果はそれぞれ Fig. 3 および Fig. 4 に示してある。すなわち Fig.

Photo. 3 Oscillograph records obtained from quenching a hot junction of thermocouple at 900° in (a) rape-seed oil (b) spindle oil and (c) air.

Fig. 4 Oscillograph records obtained from quenching of steels.

○ Martensite, ● Martensite+Trace; Troostite+, ● Martensite +5~50 % Troostite,
△ About 50:50 structure, ▲ Trace Martensite, × Troostite
.....Upper critical cooling rate

Fig. 5 Change of micro-structure due to cooling rate and max. heating temp.

3 は 1 掃波 2.5 sec にて熱電對の熱接點のみを 900° より (a) 菜種油 (b) スピンドル油中に焼入および (c) 空中に放冷した場合の冷却曲線を示す。また Fig. 4 は鋼片の焼入冷却曲線であるが、(a) は 900~100° の全冷却曲線、(b) (c) はブラウン管の有効使用面積を擴大するた

め、400° において入力为零となるごとく調整して測定したもので、従つて 400° 以下は負の電壓となり、圖のごとき曲線が得られる。後者によれば寫眞解析能力が倍加する。なおこれらの寫眞にはそれぞれの測定時に用いた時間軸を記入、また Fig. 2 より温度軸を求めて記入した。

III. 試 料

焼入冷却速度の測定に用いた炭素鋼は 0.3~1.2 % C の 5 種類で各試料の化學組成ならびに焼入温度を Table 1 に示した。なおこれらの焼入温度はそれぞれの鋼の變態點上約 50° である。

Table 1 Chemical composition and quenching temp. of specimen.

Specimen No.	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Q. T.
1	0.35	0.28	0.46	0.020	0.016	895
2	0.50	0.31	0.43	0.024	0.021	875
3	0.65	0.27	0.21	0.028	0.020	825
4	0.95	0.27	0.21	0.023	0.024	800
5	1.18	0.30	0.24	0.025	0.033	800

試料は直径 5 mm の圓柱とし、その中心に小穴を穿ち熱電對 (アルメル-クロメル) の熱接點をそれに挿入して試料の中心部において密着させ、試料の中心部における冷却速度を測定した。なお熱電對の熱接點を能うる限り小さくして、温度變化のおくれを少なくするようにした。また任意の種々なる冷却速度を得るため、冷却劑を變化させ、また試料の長さを種々變えて一端焼入を行つた。

IV. 實驗結果ならびに考察

前記試料を真空中にて焼入温度に加熱 10 min 間保持した後冷却劑中に焼入れ、または空氣中に放冷して冷却曲線を求めた。また最高加熱温度の影響を實驗する場合は、まず焼入温度に 10 min 間保持し、その後 10°/min の加熱速度にて加熱、1000° または 1100° にて 10 min 間保持

Q. T. : Maximum heating temp. is quenching temp. shown in Table 1.

Fig. 6 Relation between carbon content of steels and upper critical cooling rate when cooled from various maximum heating temp. written on curves.

した後、10°/min の冷却速度にて再び冷却、各焼入温度に 10°/min 間保持した後焼入を行つた。

焼入れ後の試料は熱電對密着部の顯微鏡組織を検べ、さらに冷却曲線を解析してこれより Ar' または Ar'' 點を求め、かつ冷却速度を決定した。冷却速度の決定には種々

なる方法が考えられるが、本実験においてはそれぞれの試料について Ar' 點上 100° 間の平均冷却速度をもつて冷却速度と定めた。Fig. 5 に最高加熱温度と冷却速度による顕微鏡組織の變化を各試料について記録した。圖中破線は上部臨界冷却速度を示してある。Fig. 6 は Fig. 5 より求めた上部臨界冷却速度と鋼の C 量の關係を各最高加熱温度について圖示したものである。曲線に附記した温度は最高加熱温度、また Q. T. は Table 1 に示した焼入温度を最高加熱温度としたものである。従來の研究結果と同じく炭素鋼の臨界冷却速度は共析組成附近において最小となる結果が得られた。依⁽³⁾の研究によると 0.3 % C 鋼の上部臨界冷却速度は 2600°/sec であるが、本研究においては 0.35 % C 鋼の直径 5 mm の試料はすでに水焼入によつて完全にマルテンサイト組織となり、この場合の冷却速度は 580°/sec である。本研究においてはトルースタイトの消失する冷却速度を上部臨界冷却速度としておるから、0.35 % C 鋼においてはその速度は 450~470°/sec となる (Fig. 5 参照)。本実験における試料は實用鋼で、Mn および Si を含有しておるから純炭素鋼の場合より臨界冷却速度はやゝ低いと考えられるが、H. Esser⁽⁷⁾, French, Klopsh⁽¹⁾ および清水、竹本⁽⁴⁾等の研究結果と大差ない。1000° および 1100° の最高加熱温度に加熱保持後焼入れた結果をみるに、焼入性は最高加熱温度を高くしたものにおいて良くなり、また C 量が多くなるほどこの傾向が著しい。(Fig. 6)。また焼入温度に加熱しそのまま焼入れた場合と同じく、共析點附近において臨界冷却速度が最低となつておる。すなわち 0.35 % C 鋼についてみると、895° に加熱しそのまま焼入れた場合より、最高加熱温度 1000° に保持後 895° にて焼入れた試料において臨界冷却速度が 120°/sec だけ小となつておる。たゞし低炭素鋼では最高加熱温度 1000° と 1100° との差は現われなかつた。しかし過共析鋼では最高加熱温度の影響が現われ、最高加熱温度の高い場合に焼入性の増加が認められる。しかし炭素鋼

Fig. 7 Grain growth of the specimens heated at max. heating temp.

では存在する炭化物が單純なセメンタイトであつて、オーステナイトに対する溶解速度が速いため、最高加熱温度の高低により炭化物がその焼入性におよぼす影響は比較的小さく、むしろオーステナイト結晶粒の成長がその鋼の焼入性におよぼす影響の方が大きいと考えられる。

Fig. 7 は各試料を最高加熱温度に加熱後、普通の焼入温度まで下げてから焼入した場合の最高加熱温度とオース

(7) H. Esser, Arch. Eisenhütt., 7(1933), 319.

テナイト結晶粒度番號との關係である。すなわちオーステナイト結晶粒は最高加熱温度への加熱によつて成長し、このため粒界面が小となり、トルースタイトの析出が困難となつて鋼の焼入性は向上する。その成長度は高炭素鋼において著しく、またこの場合 0.35 % C および 0.5 % C の試料においては 1000° にて成長が停止しておつて、これらの結果と Fig. 6 における臨界冷却速度の結果とを對比すれば、臨界冷却速度が結晶粒度に影響されておるものと斷ずることが出来る。

Fig. 8 Relation between critical cooling rate and A.S.T.M. grain size number of carbon steels.

イト結晶粒度と臨界冷却速度の關係は直線的な關係にあり、またオーステナイト結晶粒度が鋼の焼入性におよぼす影響は共析組成附近において小さく、低炭素鋼および高炭素鋼において著しい。なお同圖中の破線(1.09 % C)は C. R. Austin⁽⁸⁾等によつて得られた結果で、臨界冷却速度はマルテンサイト對トルースタイトの量比が 50:50 の場合を採用してある。

V. 結 言

本研究においてはオシログラフを用い簡単に鋼の冷却速度を測定することに成功し、各種炭素鋼の臨界冷却速度を決定して次の事柄を明らかにした。

(1) 鋼の變態點以上約 50° の温度に加熱し各種冷却劑中に焼入れて得た炭素鋼の臨界冷却速度は従來の結果とほぼ一致した。

(2) 焼入れ温度以上の高温に加熱することにより臨界冷却速度は低くなり鋼の焼入性は向上する (Fig. 6)。殊に高炭素鋼においてこの傾向が著しい。この原因はセメンタイトの挙動によるよりも、むしろオーステナイト結晶粒の成長によるものと考えられる (Fig. 7)。

(3) 同一炭素鋼においては、臨界冷却速度とオーステナイト結晶粒度とは直線的關係にある (Fig. 8)。

終りに臨み、金子秀夫博士の有益なる助言に對し、また浅井巖工學士の實驗上の助力に對し感謝する。

(8) C. G. Austin, W. G. Van Note and T. A. Prater, ASM, 31(1943), 517.