

## 技 術 資 料

# 焼入性の定量的判定方法

三橋 鐵太郎\*

## ON THE QUANTITATIVE DETERMINATION OF HARDENABILITY (A REVIEW)

*Tetsutaro Mitsuhashi, Dr. Eng.*

### I. 緒 言

構造用鋼にとっては焼入性 (Hardenability) の大小は品質判定の重要な基準である。S. A. E. 規格に於て焼入性の判定方法としてジョミニー試験法が取上げられそれに基づいて非常に多くの鋼種の H-バンドのチャートが発表されるに至り、今日では焼入性は極めてポピュラーな品質判定基準となるに至つた。

焼入性に關する研究は、焼の入るメカニズム、S 曲線との關聯、焼入性の定量的判定法などの分科を包含するであろうが、こゝでは焼入性の定量的判定法の一つとしてジョミニー法のみに関する展望を示すに留める。

文献も便宜上のもののみを掲げたが、詳しくは、S. A. E. Handbook<sup>16)</sup> の巻末、Bullens の本の Hardenability の項<sup>17)</sup> Bucknall and Steven の焼入性反應の綜説<sup>18)</sup> 英國の焼入性研究委員會報告<sup>5)</sup> の巻末の文献集にゆずる。

### II. ジョミニー法確立までの歴史的展望

Jominitiy test が發表される迄の來歴は A. S. M. の焼入性のシンポジウム<sup>1)</sup> に詳しい。この中に、General Motors 研究所の W. E. Jominy が自分の創始になる焼入性試験法を發表した論文がある。

これによると Hardenability とは、the depth to which it will harden below the surface に關するものと定義されている。

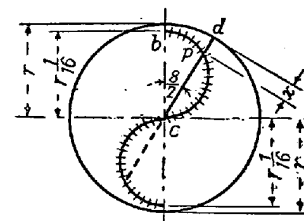
Jominitiy の記述によると、焼入性が最初に取上げられたのは工具鋼に關する Shepherd の P-F 試験で、1934 年の論文<sup>2)</sup> にある。これは 3/4 吋丸棒を 10% 鹽水に焼入して、割つて切斷面を検する方法である。

次に Burns, Moore, Archer が Shepherd と同様の

方法の焼入性試験を發表した。直径 1 吋で長さ 6 吋の丸棒を水に焼入する方法である。これは表面より中心に至る横斷面の Rc 硬度曲線をはかる。

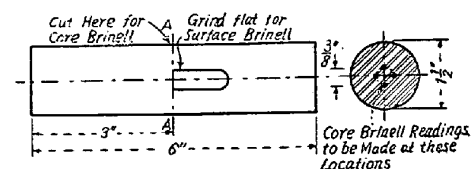
これらの方法は相當に用いられたが工具鋼の如き狭い硬化層を有する鋼 (Shallow hardening steel) にのみ適用されるのであつて、S. A. E. 規格の如き構造用鋼には充分應用できぬうらみがあつた。

油冷した構造用鋼の表面より中心に至る硬度分布をはかるのに、米國の大自動車會社で各種の方法を工夫した。例えば、クライスラーの方法、シボレーの方法がこれである。シボレーの方法は 1 1/2 吋丸棒を用いるものであつた。



$$x = r - ((r - \frac{1}{16}) \cos \theta)$$

第1圖 クライスラー會社の斷面硬度試片



第2圖 シボレー會社の硬度試験片

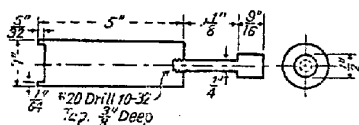
1938 年にカーネギー、イリノイス製鋼會社の Grossmann<sup>3)</sup> が冷却速度が僅か變化しても焼入性が著しく變

\* 機械試験所, 工博

化する事実を取り上げ強調し、これが、のちに Critical size (臨界寸法) の概念を生んだが、この現象は炭素鋼では著しく、合金鋼では大して目立たないのである。

かうした情勢がアメリカの全自動車材料界にあつた時に Jominy が A. Z. Boegehold と共に 1938 年に所謂 Jominy test を発表<sup>4)</sup>したのであつた。それ以前の方法が全体焼入法であつたのに反して、この方法は一端焼入法 (end quench) であつた點に獨創があつた。又、それは最初滲炭鋼の焼入性を知る目的で行われた。

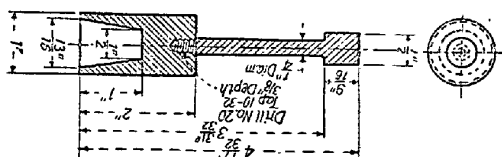
Jominy の最初に用いた試片の寸法を第 3 圖に示す。



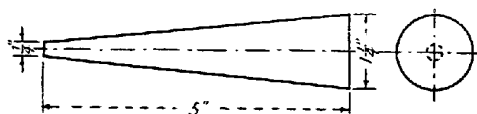
第 3 圖 Jominy の最初の試片

これは縁がついていて今日の標準試片とは一寸異なつてゐる。

一端焼入法は急速にひろまつたが、Jominy の方法は低合金鋼には適用して良い結果をうるが、更に狭い焼入範囲を有する炭素鋼には充分でない點の改良が發表された。所謂 L 形試片<sup>14)</sup> (第 4 圖) と圓錐形試片<sup>15)</sup> (第 5 圖) とはその具體化である。



第 4 圖 L 型試片 (Jominy: T.A.S.M vol. 27 p. 1072)



第 5 圖 圓錐型試片 (O. V. Greene and C. B. Post: S.A.E. Transactions July 1941 p. 278)

その後多くの人の研究により、Jominy test を適用するに當り、その結果の再現性が統計的なものであることが認められた。その中で最も多く働いたのは Ekholm<sup>6)</sup> ではなからうか。之が S.A.E. で取上げられた。そして H-Band の概念が確立されて、米國規格には 1946 年に、S.A.E. handbook 1947 年にのせられた。

他方 Jominy test そのものゝ確實性の検討も詳しく行われた。最も古いものは G. T. Williams<sup>5)</sup> のもので

最も包括的なものは英國の焼入性委員會のものである<sup>6)</sup>。勿論その他に多數の文献がある。

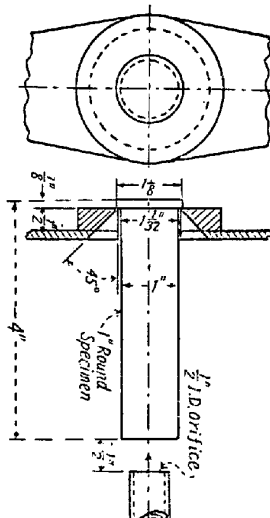
以上の先達の仕事により、焼入性をジョミニー法で定量的に決定する爲の準備はすべて成つたと考えられる。

本來のジョミニー試験法は、炭素鋼の如き狭い焼入範囲の材料及び、空氣焼入鋼の如き焼の入りすぎる鋼の硬化性をしらべるには不適當である。前者に關しては L 型試片があるが、後者に關しては例えば A.S.M. 編 Metalshand book (1949 年) の Hardenability の項に試片の提案がある。こゝでは、構造用鋼に廣く用いられるジョミニー法のみに關して述べる。

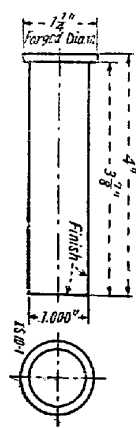
### III. ジョミニー試験法

S. A. E. Handbook (1950) によると、ジョミニー試験法は次の如くに記されている。

要點は第 6、7 圖の如き試片を適當温度に適當時間加熱した後、垂直に吊下げて下から噴水で冷却し、冷却し



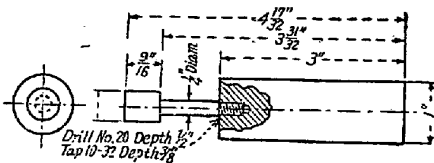
第 6 圖 ジョミニー試片の保持具噴水口



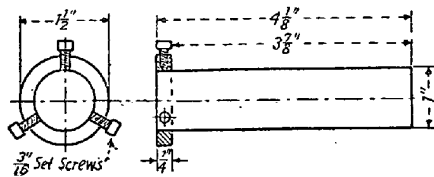
第 7 圖 標準ジョミニー試片

たのちに試片を軸に平行に削つてその面の硬度を冷却端より 1/16 吋ごとに吊下端に亘つて測定する。あらかじめ一端焼入試片の各部の冷却速度は、丸棒試片の中心の冷却速度と比較してあるので、それによつて常用丸棒鋼材の焼入性を知ることが出来る。

S.A.E の試片は直径 1 吋長さ 4 吋で、一定の保持具がきめてある。この他に第 8, 9 圖の如き, AB の兩試片があつて、各々と標準試片との関係が調べてある。又、小形試片用には第 11 圖のものがある。又、焼入加熱前に S.A.E. できめた温度で 1 時間焼準し、空冷することになつてゐる。硬すぎれば Ac<sub>1</sub> 下 100°F で加熱してセメントサイトを球状化する。

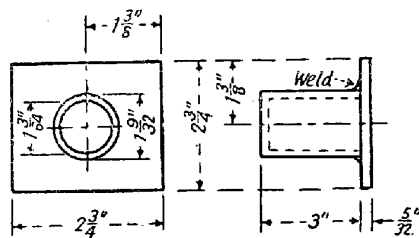


第 8 圖 S.A.E. ジョミニー試験 Optional Test 用 A 試片



第 9 圖 S.A.E. ジョミニー試験 Optional Test 用 B 試片

焼入加熱の場合には冷却端でスケーリング及び脱炭があつてはならないから、調節雰囲気中で加熱するかそれが出来なければ第 10 圖の如き耐熱鋼で作つた治具を冷却端にはめて、底部には黒鉛か、カーボンの圓板をあてて加熱する。



第 10 圖 冷却端脱炭防止治具

焼入の爲の加熱時間は 30 分である。

噴水口の直径 1/2 吋、噴水口より試片下端迄は 1/2 吋、水温は 40-85°F、水の自由高 2 1/2 吋の圧力を用いる。試片は爐より 5 秒以内に保持具にうつす。保持具上で一端焼入の爲、少くとも 10 分間冷却する。

焼入がすんだら 180° はなれた二面を軸方向に 0.015 吋 (0.38mm) の深さに軟化せぬ様に注意しつゝグラインダーで削り、その面のロックウエル C 硬度を 1/16 吋ごとに測る。

この時研磨で焼入組織が戻らぬ様にする。それをチエツクするには

No.1 5% HNO<sub>3</sub> aq

No.1 50% HCl aq

の二液を用い、試片を湯で洗い、No.1 で黒くなる迄エツチし、湯で洗う。No.2 に 3 秒浸し、湯で洗う。衝風で乾かす。こうして黒くなつた組織をグラインダーで除去する。

S.A.E. よりもイギリスの標準<sup>5)</sup>の方が研磨代を更にこまかく規定している、即ち 0.020 ± 0.005 吋削ると書いてある。この方法を所定のグラフ用紙にプロットして測定値をよみとる。

又、粒度が焼入性に大きくきいて來るので、ジョミニー法では普通細粒の鋼の焼入性のみを考え、粗粒鋼は別にしてある。

#### IV. ジョミニー試験法の確實性

ジョミニー試験法の確實性を、イギリスの焼入性委員會で試験した結果<sup>6)</sup>を抄記する。

(a) C 0.4%, 1.0% 鋼: Mn 鋼 (En 14) Mn-Mo 鋼 (En 16) につき水温を 13, 24, 40°C, 1% C の Cr-Mo 鋼につき 4, 24, 48, 60°C に變え、他を一定条件にして實驗をしたが、冷却水温が 4-60°C の範圍で變化してもその影響は普通の實驗誤差範圍を出ない。

(b) 噴水の自由高さ

1% C の C 鋼, Mn-鋼, Mn-Mo 鋼で高さを 1, 1 3/4, 2 1/2, 5, 10, 20 吋に、焼入性の異なる低 Ni-Cr-Mo 鋼 3 種で 1 1/2, 2 1/2, 3 1/2 吋に變えて試験したが、この範圍では硬度曲線は大して變化しない。

(c) 噴水口の直径

(b) と同様の 6 鋼種につき、水量一定で径 1/4, 1/2 吋水量約 50% で径 1/8 吋、又径 3/8, 1/2 及び 5/8 吋で噴水の高さ 2 1/2 吋にして試験したが、Mn 鋼のみは口径が小になると焼入性が僅かに増すが、その他は著しい影響を與えなかつた。

(d) 噴水口より試料迄の距離

前記の 3 種の低 Ni-Cr-Mo 鋼について、噴水口より試料迄の距離を 1/4, 1/2, 3/4 吋に變化した結果、焼入性曲線には著しい變化はなかつた。

(e) 試験片の長さ

Jominy test では3 & 4 吋が普通であるが、前記 Ni-Cr-Mo 鋼で1 & 2 吋も試験したが、4 吋を3 吋にへらしても焼入性の曲線は殆んど影響せず、2 吋と1 吋の長さでは曲線が3 & 4 吋の曲線よりも上に(硬度が高く)出る。その程度は焼入性の大きな鋼程大きい。

#### (f) 一端水冷時間の長短

7 種の鋼につき 10min 間一端水冷をした後全體を水冷した場合と 25-30min の一端水冷をしてフランジ側が手で觸られる位まで冷却したものを比較した結果兩者の曲線がよく一致することが認められた。

### V. H-バンド

焼入性の定量的測定に當り、統計的な取扱いは非常に問題を簡單化した。或は統計的というのはいきなりかもしれないが、いくら注意しても熔解作業及びその後の取扱そのものから来る必然的な材質の不均質、偏析その他によつて結果がばらつくことゝ、そのばらつきにある範囲があること、よつて一端焼入したときの Jominy test の試片上の硬度の曲線は所謂線ではなくして、ある帯(バンド)であることの認識があつて初めて焼入性を定量的に取扱得ることになつた。

焼入性のバンドが公表された始めは 1944 年 7 月の S.A.E. (アメリカ自動車技術標準委員會) と A.I.S.I. (アメリカ鐵鋼協會) の共編 "Contributions to the Metallurgy of Steel" No.11 で、1947 の 7 月號にも載つている。A.I.S.I. の 1945 年 6 月の "Steel Products Manual, Section 10" にも H-鋼 (H-バンドを確定した鋼) とその H-バンドがのせられている。

英國の規格鋼のジョミニ法による硬度曲線の分布、即ちこれが H-バンドに當るのだが、これに關する實驗は Craft and Lamont<sup>8)</sup> がやつている。

例えば En16 鋼の同一成分の 19 種の熔解のジョミニ試験の結果が圖示されている。

これはアメリカ材料試験協會(A.S.T.M)の Standards

1946 で假規格になり、S.A.E. Handbook 1946 年版 (pp 311-324) にジョミニ法は初めて載つた。

規定した H-バンド内の焼入性を有する鋼であることを表示する目的で、普通の鋼種記號の終りに H なる記號をつける。例えば 4140H という如くである。しかし第 1 表如く、この H のついた鋼と、ない鋼では化學成分が多少ちがつている。

第 1 表は Sisco<sup>15)</sup> より取つたものだが、この内 H のない鋼の成分は AISI 1947 年規格、1948 年 S.A.E. 規格と同一で、1948 年版の U.S.S. Carilloy steel のカタログにも同じものが載つている。又 H のついている鋼の成分は S.A.E. 1950 年版にあるものと同一である。この表の如く、H のついた鋼の化學成分は、本來の規格よりも廣くなつている。これは 4140H で指定された H-バンドの中に焼入性が入れれば良いので、成分がひろげであるのである。しかしあくまでも H 付の鋼種の規定は暫定的なものであつて、實驗により狭まるものである。

S.A.E Handbook (1950) 所載の圖面をみると、第 14 圖の如くに、點線の H バンドと實線の H バンドがある。然るに點線の方は、S.A.E の 4150 化學成分のみにより熔解した鋼の焼入性の限界であり、實線の方は 4150H の標準バンドと記してある。

所が圖の如くに 4150H のバンドの方が狭くなつてゐる。しかも #4150H の成分範囲は #4150 よりも廣いので疑問が起るが、こゝに規定した H バンドの鋼はこの範囲内の化學成分のもので、細粒のものが適合する。製鋼屋の操業の便利の爲に示してあるのであつて、更に成分の許容範囲の但し書(第 2 表)があるので、H-鋼の方は化學成分の方は相當に廣くなつてゐる。この場合には焼入性の方が指標になつてゐるので、斷面積 200 平方吋以下、幅は 18 吋以下、重量は 10,000lb 以下の棒鋼、ピレット、鋼塊と寸法の制限があり、更に電氣爐又は平爐鋼ときめられてある。

第 1 表 H を指定したものと然らざる三種の低合金鋼の成分限界 (1947年)

鋼種 No.	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
4140	0.38~0.43	0.75~1.00	0.20~0.35		0.80~1.10	0.15~0.25
4140H	0.37~0.45	0.70~1.05	0.20~0.35		0.80~1.15	0.15~0.25
8640	0.38~0.43	0.75~1.00	0.20~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.15~0.25
8640H	0.37~0.45	0.70~1.05	0.20~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.15~0.25
8740	0.38~0.43	0.75~1.00	0.20~0.35	0.40~0.70	0.40~0.60	0.20~0.30
8740H	0.37~0.45	0.70~1.05	0.20~0.35	0.35~0.75	0.35~0.65	0.20~0.30

VI. ジョミニー法の確實性の疑問

さきに V. 節でジョミニー試験法の確實性に就いて述べたが、これは H-バンドの思想を採用した時の再現性に関するものであつて、ジョミニー試験法と、普通の大型焼入試片内の焼入結果との関係に就いては、疑問の點が澤山残つている。

第一に、Jominy はジョミニー試片の冷却端より一定距離の點の冷却速度の曲線を硬度試験によつて決定して發表している。S.A.E. Handbook では一定のものを決定した (第 12 圖) が、一層詳しい研究を Russel と Williamson<sup>6)</sup> が行つている。

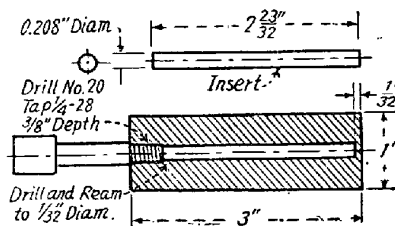
第 2 表 H-鋼の標準化學成分よりの標準偏倚許容差

元素	規定成分の限界%	寸法範圍の標準變化 上限以上又は下限以下の%	
		斷面積 100 平方吋以下	100—200 平方吋
C	0.25 以下	0.01	0.02
Mn	0.25~0.75	0.02	0.03
	0.90 以下	0.03	0.04
	0.90~2.10	0.04	0.05
P	上限以上	0.005	0.01
S	0.60 以下	0.005	0.01
Si	0.35 以下	0.02	0.02
	0.35~2.20	0.05	0.06
Ni	1.00 以下	0.03	0.03
	1.00~2.00	0.05	0.05
	2.00~5.30	0.07	0.07
Cr	0.90 以下	0.03	0.04
	0.90~2.10	0.05	0.06
Mo	0.20 以下	0.01	0.01
	0.20~0.40	0.02	0.03
V	下 限	0.01	0.01

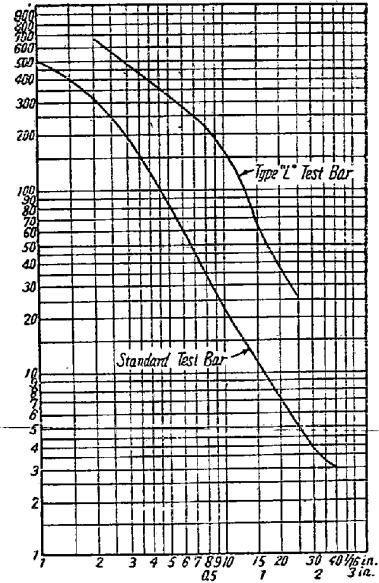
詳しく研究すると、低合金鋼は大體似た冷却速度で冷却するが、すべての合金鋼が同一ではない。ことに Si-Cr-鋼、Si-Mo 鋼は著しく異なつた冷却速度をもつていといわれている。

前記の如く、ジョミニー法は再現性を得るのに容易であるが、換言すれば微細な相異に對してはジョミニー法は鈍感な方法であつて、言はば近似的な方法である。

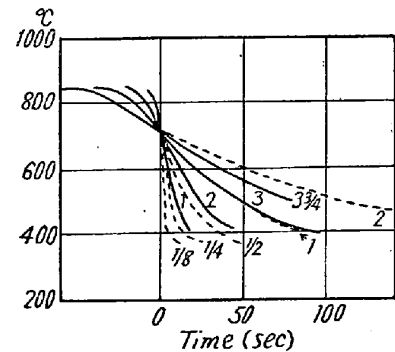
又、オーステナイト粒度はいくら熱處理を繰り返して



第 11 圖 S.A.E. 小形試片用挿込型  
ジョミニー試片

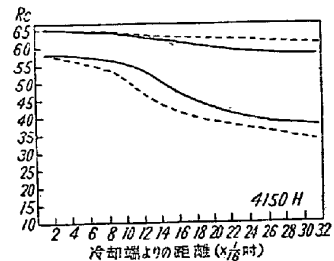


第 12 圖 ジョミニー標準試片及び L 型試片の冷却端よりの距離と冷却速度 (S.A.E.)  
縦軸は 1300°C に於ける冷却速度 °F/sec  
横軸はジョミニー試片の冷却端よりの距離



---- Jominy 試片の各點の冷却曲線  
— 油冷棒の冷却曲線  
數字 上列は油冷棒の直径 (吋)  
下列は Jominy 試片の冷却端よりの距離

第 13 圖 Jominy 試片各點及び油冷棒材中心の冷却速度



冷却端よりの距離 ( $\times 1/16$  吋)  
---- SAE 4150 の化學成分のみによつてとかした鋼の焼入性の限界  
— 4150H に對する標準バンド

第 14 圖 4150H のバンド

も生れつきのものであつて、粒度は再現し得ると考えられているが同一の考察がジョミニ法による焼入性に下されたが、最初の熱処理の影響が後まできいてくると云われている。Pumphrey & Jones<sup>5)</sup> は Cr-Mo 鋼について Northcott and Mc Lean<sup>20)</sup> は Ti 鋼に關してこの點を研究した。

Crafts and Lamont<sup>6)</sup> は油冷した丸棒の中心の冷却速度と、ジョミニ試片の冷却端よりの各寸法の位置の冷却速度を比較したが、その結果を 700°C で切り合はせると第 13 圖の如くになり、冷却端より 7 吋の位置が 3 吋丸棒中心の冷却速度と殆ど同一であり、他の點は形は似ているが、兩者の嚴密な關聯はさう簡單ではない。

## VII. ジョミニ法による焼入性 そのものゝ研究の發達

ジョミニ法の發明により 1 吋丸棒で 4 吋丸棒までの焼入性が短時間で試験されるに至つたので焼入性の研究が著しく進歩した。そのうち焼入性の判定に特に關係のあるもののみをあげてみよう。

焼入性に最も關係の多いオーステナイト粒度の影響は Grossmann<sup>9)</sup>, Clark and Richards<sup>10)</sup> が定めたが、これらは Al 脱酸であつて、Si 脱酸の時は別の焼入性を示すという報告が Kramer, Siegel と Brook<sup>11)</sup> によつて行われた。

Morris and Mc Quaid<sup>12)</sup> も市販鋼に對する Si, Al を加えた時の焼入性を詳しく検討している。これによると分析と粒度とが同一でも焼入性は異なると言つているから、最終的結論はまだまだむづかしい。粒度調整 (Grain size control) は Al で行うのであるから、焼入と粒度との關係は必然的に脱酸の問題に一致する譯である。

Bain<sup>13)</sup> の本に焼入性の定量的計算に關する Grossmann, Asimov, Urban の研究が引用されているがこれらの研究があつてジョミニ法の全面的活用の基礎がかたまつたものと云えよう。

なお最近までの焼入性研究の全體を展望するには、Bucknall and Steven<sup>19)</sup> の論文が良い。

英國の委員會報告<sup>5)</sup> には同一鋼材内の焼入性の變化を詳しく研究した論文がのつている。

同一の棒鋼内でも焼入性が相當に異なる。殊に中心部に焼入性のわるい所があり、その差の生ずる原因は化學分析、分光分析によつては判明しないものであつて、Bardgett<sup>21)</sup> によれば O<sub>2</sub> 又は H<sub>2</sub> の偏折によるもので

あろうということになつている。

かゝる變化は、ジョミニ試験法で現われる曲線の差を研究して現われたのであるが、H-バンドの概念を用いればこうした小さい差異はバンドの中に入つてしまうので何も出て來ないのであるから、H-バンドの概念は實用的ではあるが、近似的であると云われる所以である。(昭和 27 年 8 月寄稿)

### 文 献

- 1) A.S.M.: Hardenability of Alloy steels (1938)
- 2) B. F. Shepherd: T.A.S.M. 22 (1934) 979
- 3) Grossmann: Metal Progress 33 (1938) 373
- 4) W. E. Jominy and A. Z. Boegenhold: T. A. S.M. 26 (1938) 574
- 5) G. T. Williams: T.A.S.M. 28 (1940) 157
- 6) L. F. Eklrolm: Metal Progress 48 (1945) 673
- 7) Boegenhold: S.A.E. Journal (1949) Oct. Nov
- 8) Iron and Steel Institute (London): Symposium on the Hardenability of Steel
- 9) Grossmann: Trans A.I.M.E. 150 (1942) 227
- 10) K. I. Clark and J. H. Richards: Trans. AFA 52 (1944) 1325, 1308
- 11) L. R. Kramer, S. Siegel, I. G. Brooks: A.I. M. E. Tech. Pub. 2029, Metals Tech. 13 (1946) June.
- 12) (1) の本の p. 95
- 13) E. C. Bain: Alloying Elements in Steels (1938)
- 14) W. L. Jominy: T. A. S. M. 27 (1939) 1072
- 15) O. V. Greene and C. B. Post: S.A.E. Transactions, 1941 July 278
- 16) S.A.E. Handbook (1950)
- 17) Bullens: Steel and its Heattreatment
- 18) F. T. Sisco: Modern Metallurgy for Engineers (1948) 252
- 19) E. H. Bucknall and W. Steven: Hardening Response of Steels. Progress. in Metal Physis (1949) 235
- 20) Northcott, L. and McLean, D. F: Iron & Steel Inst. 157 (1947) 492
- 21) W. E. F. Bardgett: Iron & Steel Inst. 157 (1947) 65