

鋼材の表面硬(軟)化層深さ測定に関する研究

黒木剛司郎, 松嶋 仁, 大森宮次郎

Measurement of Thickness of Carburized or Decarburized Thin Layer of Steel Parts

Kōshiro KUROKI, Jin MATSUSHIMA and Miyajirō ŌMORI

Abstract—The thickness of carburized or decarburized thin layer of steel parts are found to be determinable by a newly developed method which utilizes the relation-ship between the depth of indentation made by a conical indenter and the indenting load. Qualitative considerations done on this method provide a good explanation for the experimental results. The authors propose this method as a quality control means instead of conventional non-destructive testing methods and microscopic examination which are time consuming and impractical.

1. ま え が き

機械部品の耐蝕, 耐摩耗などの表面特性の改善, または, 耐疲労などの強度向上を目的とした金属の表面処理技術の発展と相まって, 鋼材の表面硬化層深さを迅速, 正確に測定する技術の重要性が増大している。また, 工具鋼やばね鋼のごとく熱処理後使用される鋼材では, 脱炭層のごとき表面軟化層の深さを知らねばならないことも必要とされる。これらの表面硬(軟)化層深さを測定する方法としては, 表面と直角な, または, 傾斜した断面でかたさ分布を測定するもの, 順次に微小厚さの表面層を研削除去しつつ表面かたさを測定していくもの, あるいは, 断面の腐蝕により組織を検鏡し, C%を判定するものなどが基本的手段として行なわれている⁽¹⁾。しかし, これらの方法は, いずれも相当な手数を要するので, 簡便な非破壊的手段が要望され, いくつかの方法が開発されている。たとえば *Suffredini*,⁽²⁾ *Vagle*,⁽³⁾ *Dettinger*⁽⁴⁾ などの方法は, いずれも, 表面かたさを, 規定の, または, 特殊の試験荷重を用いたロックウエルかたさによって測定し, これらと浸炭層深さとの相関関係を利用して, 目的を果さんとするものであり, また, 円すい形圧子で試料表面を押圧して生じたくぼみ径と浸炭層深さとの関係を利用した吉越⁽⁵⁾の方法も上記と類似している。さらに, 焼入ロールの表面硬化層深さを測定すべく開発された電磁誘導方式なども⁽⁶⁾利用できよう。

本研究では、比較的浅い表面硬(軟)化層を有する浸炭鋼および脱炭鋼を対象として、まず、そのかたさ分布の模様を詳細に検討するとともに、押込深さ測定の利用した新しい表面硬(軟)化層深さの測定方法を実施し、その結果を定性的考察によって裏づけるとともに、これを、多量生産における検査手段として利用できる有力な方式として提唱するものである。

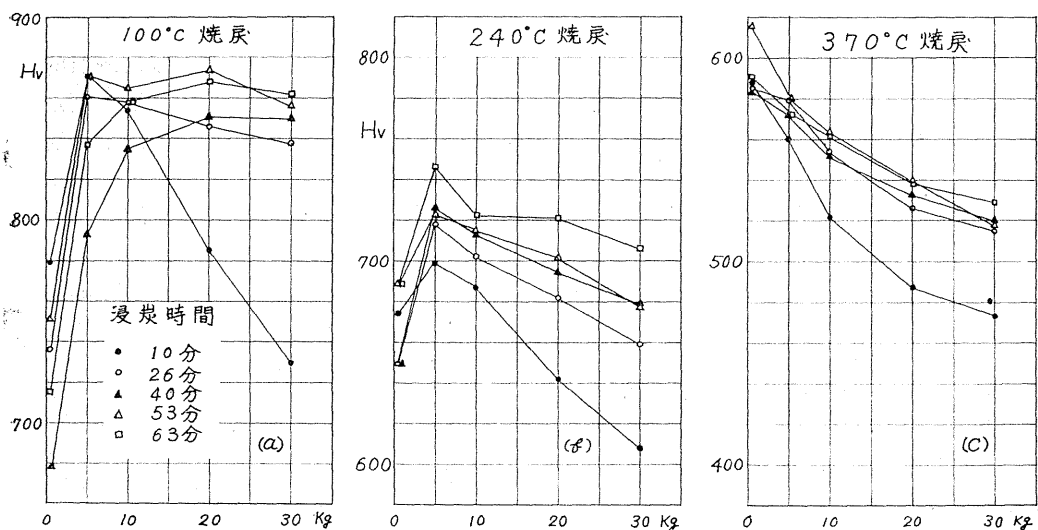
2. 浸炭鋼

2-1 試料およびその表面かたさ

試料は、機械構造用炭素鋼 22種 (S15CK) を素材として、浸炭温度 850°C で、10分～63分の塩浴浸炭を行なった。さらに 850°C より水焼入れしたうえ、 $100\sim 370^{\circ}\text{C}$ で焼戻し、表面をバフ研磨、裏面を研削仕上げして寸法 $64\phi\times 15.5\text{mm}$ の試料群を作製した。第1表に試料番号および浸炭時間、焼戻温度を示す。

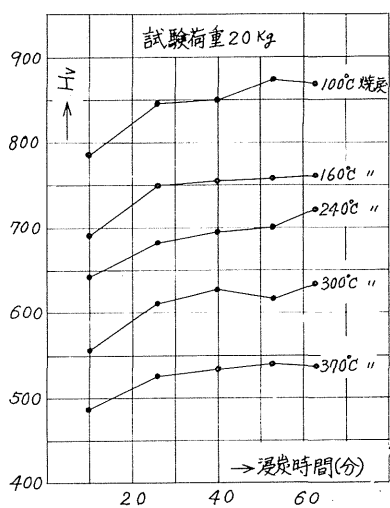
第 1 表

浸炭時間	焼戻温度 $^{\circ}\text{C}$				
	100	160	240	300	370
10分	C-11	C-12	C-13	C-14	C-15
26分	C-21	C-22	C-23	C-24	C-25
40分	C-31	C-32	C-33	C-34	C-35
53分	C-41	C-42	C-43	C-44	C-45
63分	C-51	C-52	C-53	C-54	C-55

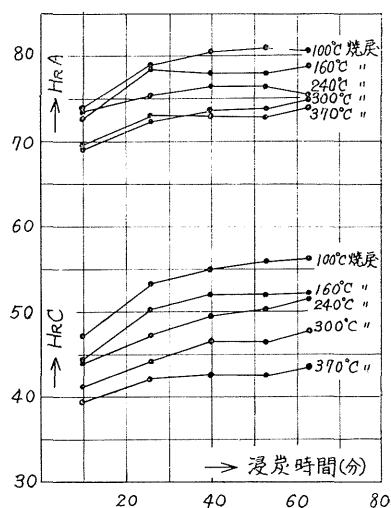


第 1 図 表面かたさ Hv と試験荷重の関係

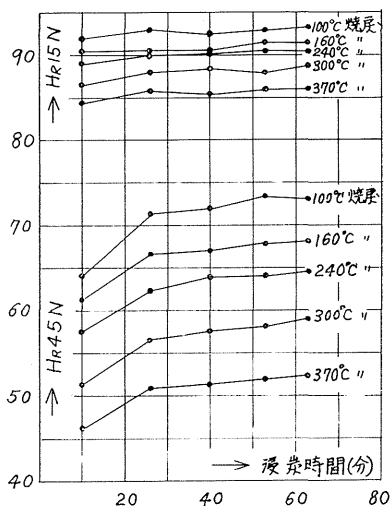
すべての試料の表面について、ショアかたさ H_s , ビッカースかたさ H_V (1, 5, 10, 20, 30kg), ロックウェルかたさ H_{RC} , H_{RD} , H_{RA} , H_{R45N} , H_{R30N} , H_{R15N} などの各かたさを求めた。(10点測定) それらのうち, H_V の測定値を, 使用した試験荷重を横軸として, 各焼戻温度につき浸炭時間ごとに示した例が第1図である。これによれば, 焼戻温度 $100^{\circ}C$ の最高かたさの高いものでは, 試験荷重 1 kg 付近より急激な測定値の上昇を示し, 漸次ゆるやかに最高値に達するのに対し, 焼戻温度を上げるにともない, 最高かたさは低下し, その位置が試験荷重の少ない方へ移る。また, 曲線は右下がりの傾向を示



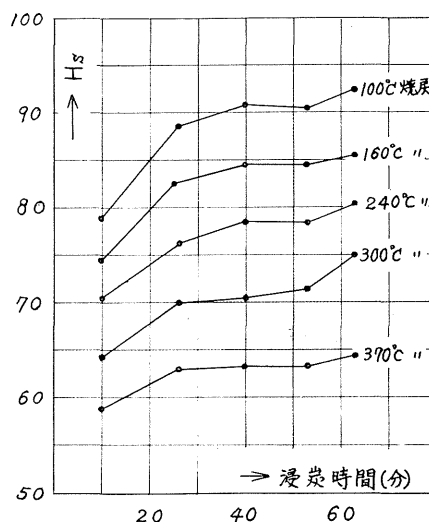
第2図 表面かたさ $H_V(20\text{kg})$ と浸炭時間の関係



第3図 表面かたさ H_{RC} , H_{RA} と浸炭時間の関係



第4図 表面かたさ H_{R45N} , H_{R15N} と浸炭時間の関係



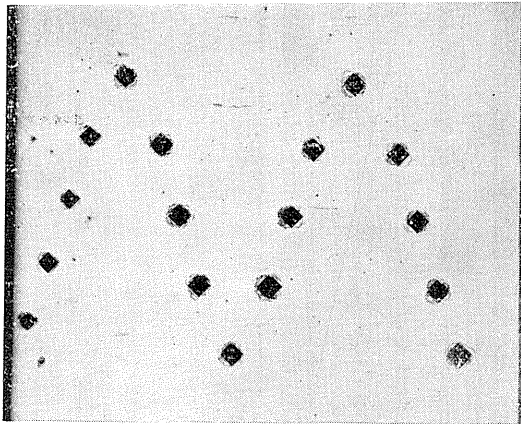
第5図 表面かたさ H_s と浸炭時間の関係

すようになり、右下がりの程度は、いずれも浸炭時間の短いもの程いちじるしい。

さらに、 H_V (20kg), H_{RC} (A), H_{R45N} (15N), H_S について、浸炭時間との関係を各焼戻温度ごとに示した例が第2～第5図である。いずれにおいても、かたさ測定値は、浸炭時間の増加とともに上昇し、その程度は、焼戻し温度の低いかたいものほどいちじるしい。なお、 H_V , H_R においては、それぞれの試験荷重を小さくするほど、(たとえば H_{RC} , D, A または H_{R45N} , 30N, 15N の順に) 曲線の右上がりの傾向は目立たなくなる。

2-2 断面かたさ

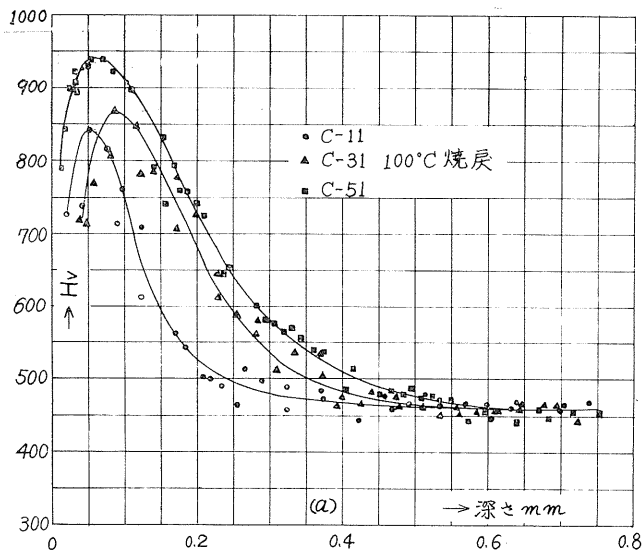
全試料を、切断用砥石を用いて直径の約4分のところで三日月形に切断し、切断による影響を十分に除去したうえで樹脂に埋込み、エメリー紙仕上、バフ研磨したのち、明石微小硬度計により断面かたさ (H_V) の分布を測定した。使用荷重は 300g である。第6図は圧痕の写真例を示す。かたさ分布は、表面より急激に低下しているが、詳細に観察すれば第7図のごとく表面から 0.4~1 mm 程度

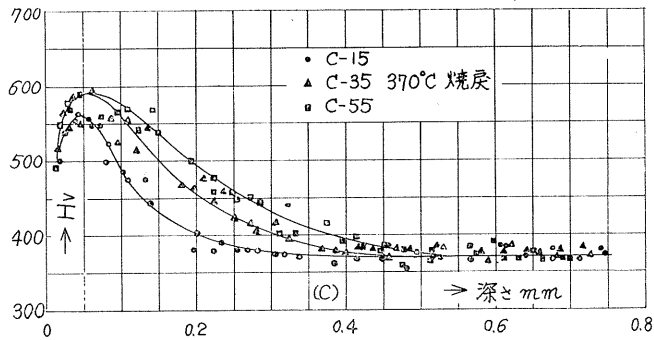
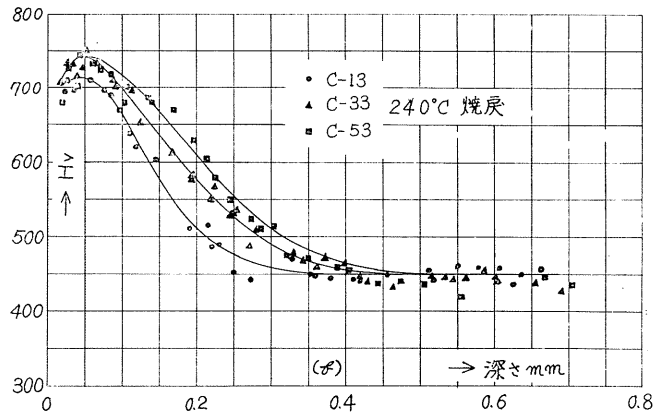


C-15

第6図 浸炭鋼の圧こん

間に、一度かたさ分布の水平となる部分が認められる。なお、全浸炭層深さは浸炭時間とともに増加し、最高かたさは焼戻温度の上昇とともに低下していることがわかる。また、すべての試料において、表面から数10 μ の深さまで、かたさの低い層が存在する。第8図に表面付近の組織の腐蝕図を示





第 7 図 浸炭鋼断面かたさ Hv (300g)

す。

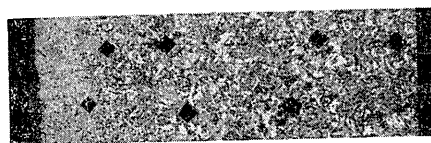
3. 脱炭鋼

3-1 試料および表面かたさ

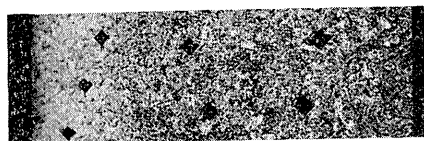
試料は、炭素工具鋼 3 種 (*SK-5*, $50\phi \times 15mm$), ばね用炭素鋼 3 種 (*SUP-3*, $70 \times 45 \times 10mm$), 機械構造用炭素鋼 8 種 (*S45C*, $50\phi \times 15mm$) を素材とし、電気炉で常温より $1000^{\circ}C$ 迄加熱し、以後 $1000^{\circ}C$ 一定として、加熱時間により異なる脱炭層深さをもつ試料群を作製した。このようにして作製された試料は、まず表面に附着した酸化皮膜を除き、裏面を研削し、次に表面を順次 50μ 研削仕上しながら、表面かたさ (HRC) と脱炭時間との関係を調べた。その結果を第 9 図に示す。測定値は各試料ごとに 10 点測定を行なってその平均値をとり、また最高かたさと最低かたさを記入してある。この結果より明らかなように試料として使用するためには、ある程度の研削仕上を行なった方が、かたさのばらつきに対し、有効であることがわかる。いずれの試料においても、脱炭時間が増加するほど、かたさが漸次低下する傾向が明らかである。

3-2 断面かたさ

脱炭鋼においては、試料全面にわたってのかたさ分布に、ある程度のばらつきが見られ



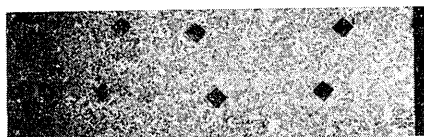
C-11



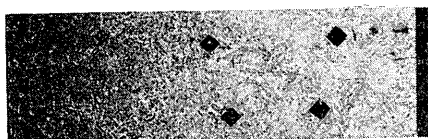
C-31



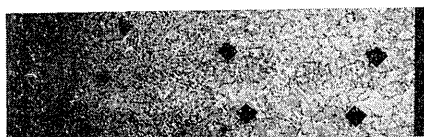
C-51



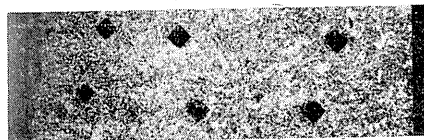
C-13



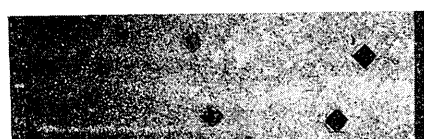
C-33



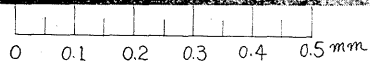
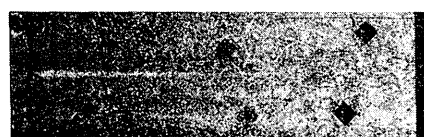
C-53



C-15

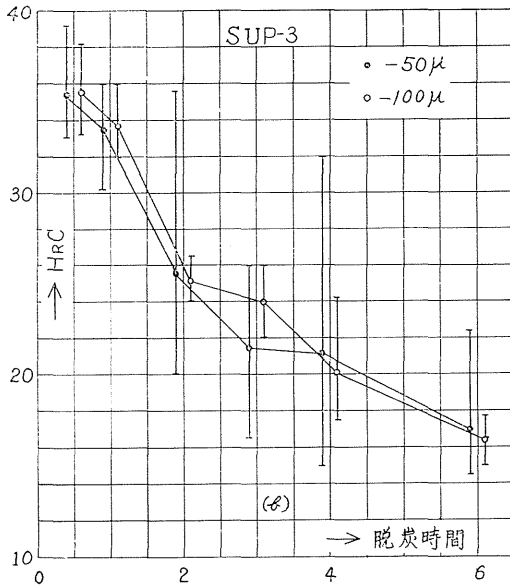
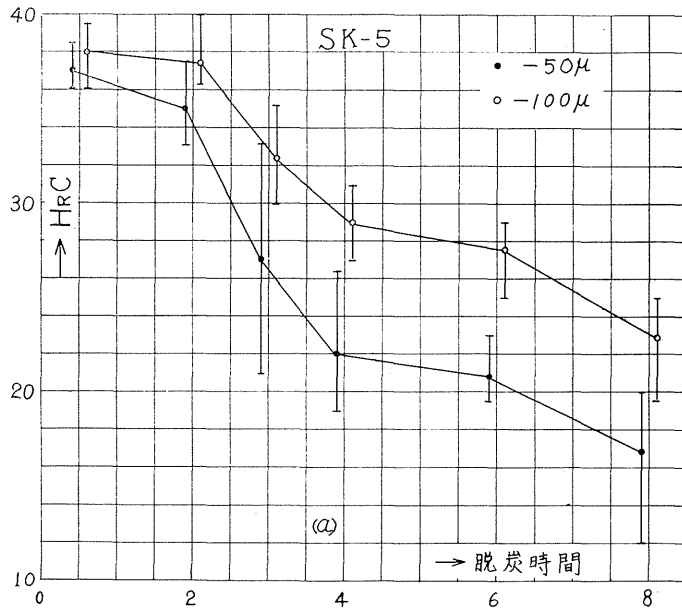


C-35



C-55

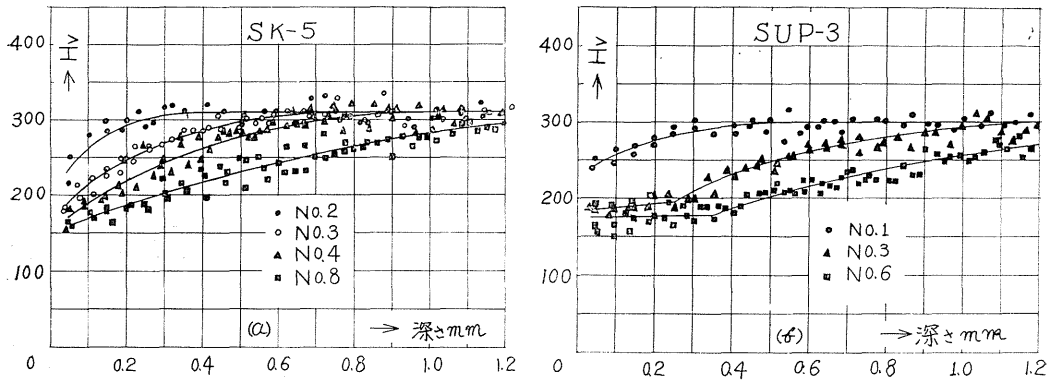
第 8 図 浸炭鋼組織写真



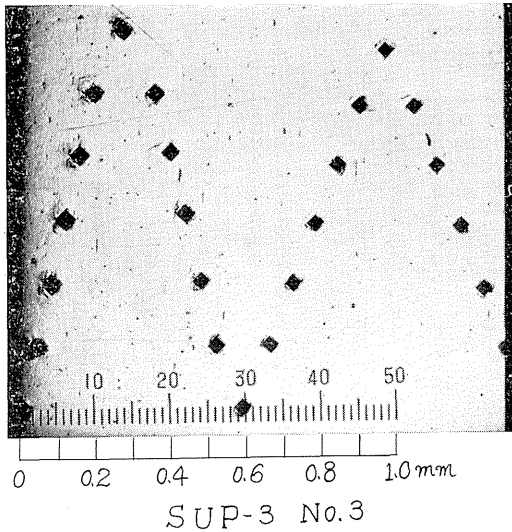
第9図 脱炭鋼の表面かたさ HRC と脱炭時間の関係

ることはやむを得ないので、次の方法によって断面かたさ測定用の試料を作製した。まず第9図の各試料ごとに、その平均値附近のかたさ (H_{RC}) 分布測定を更に行い、ばらつきの少ないことを確認したのち、その部分を切断する。次に切断による影響を十分に除去したうえで樹脂に埋込み、以下浸炭鋼と同様な処置をほどこしたのち、同様な方法で断面かたさ (H_V) の分布を測定した。第10図はその例であり、第11図は圧痕の写真例、第12図に表面付近の組織の腐蝕図を示す。第10図で、No. に続く数字は、脱炭時間すなわち $1000^{\circ}C$ の加熱時間を意味している。以上の結果より、試料作製の際の加熱時間の増加にともない、脱炭層深さは漸次増大していくこと、また SK-5、

SUP-3、S45C において脱炭形式に差異を示すことがわかる。例えば、SUP-3 において、長時間加熱の試料表面下には、ある深さまで完全フェライト層があり、ついで次第に炭素量が増していく型を示し、SK-5 については、完全フェライト層が存在しないで表面から炭素量の増加していく型を示すといえる。



第10図 脱炭鋼の断面かたさ分布 Hv(300g)

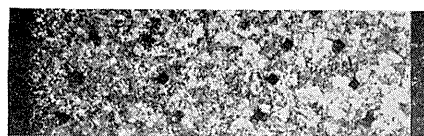


第11図 脱炭鋼の圧こん

4. 表面かたさと断面かたさの関連について

第2節でえられた結果より、浸炭硬化層を有する表面かたさと断面かたさの間の関連を考察してみる。もし試料表面に硬化層がなく、表面から中心部にわたって均質ならば、第1図の H_V の測定結果は、試験荷重と無関係にほぼ一定となるはずである（かたさ基準片のごとき試料で測定すれば確認される）。しかし、第1図のごとく H_V 値は焼戻温度、浸炭時間ごとに多種多様の変化を示し、硬化層の表面かたさに与える影響の複雑なことを示唆している。いま第7図の断面かたさ分布を見

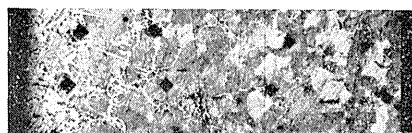
ると、各試料群には、表面より $50\sim 100\mu$ の間に最高かたさの位置があり、それより表面および中心へ向かって、かたさが低下していくことがわかる。一方、 H_V や H_R の表面かたさ測定において、圧子の侵入深さを、そのくぼみ寸法やかたさ値より推定すれば、試料の硬軟による差異はあるが、 H_V において最大 $30\sim 50\mu$ 、 H_R でも最大 $90\sim 120\mu$ の程度である。従って、第1図～第4図に見られる複雑な結果は、表面と最高かたさの位置付近の間の急激に断面かたさの変化する領域において見られるものであって、これらを断面かたさの測定結果と照合すれば、ある程度の相関は認められる。たとえば、第1図の試験荷重の小さい範囲での H_V の値の低下は、断面かたさにおいて認められる表面付近の軟化層の存在によるものであり、試料の焼戻温度の上昇とともに、その影響の減少することもうなづける。また、浸炭時間の短く浸炭層の浅いものほど、第1図の右下がりの傾向がいちじるしいことも当然である。また第2図～第5図において、焼戻温度すなわち断面の最高かたさの等しいものでも、浸炭時間が増せば表面かたさの上昇する現象も、浸炭層深さの



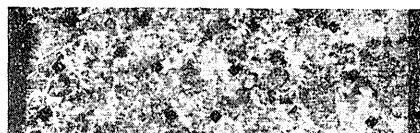
SK-5 No. 2



SK-5 No. 4



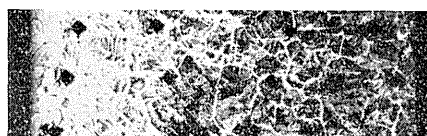
SK-5 No. 8



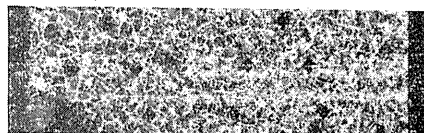
SUP-3 No. 1



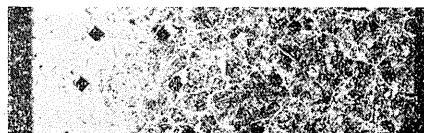
SUP-3 No. 3



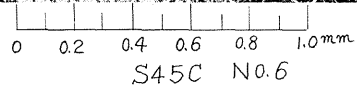
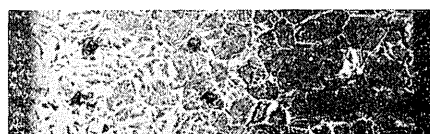
SUP-3 No. 6



S45C No. 1



S45C No. 3



S45C No. 6

第12図 脱炭鋼組織写真

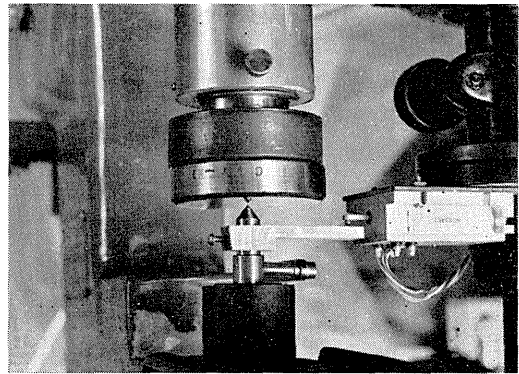
増加あるいは断面かた分布曲線の勾配の低下と関係している。第3節の脱炭層について見られる表面かたさと断面かたさの関係についても同様な相関がある。これらの相関関係に着目した表面変質層深さの測定方式が、前述(2)~(5)の諸氏の方法である。

5. 表面硬(軟)化層深さを測定する新しい方法について

前節までの結果よりして、従来の単一の押込かたさ測定値により表面硬(軟)化層深さを求める方式にも、一応の根拠があることが考えられる。しかし、かたさなる量が押込みに対する抵抗として与えられる H_V , H_R においては、圧子と試料間の接触圧力が、試験荷重と釣合った最終状態でのくぼみ寸法をかたさ値の根拠にとるため、表面硬(軟)化層のごとき不均質層が呈する抵抗は、最終状態での平均的な値としてのみ与えられ、これから直接不均質層の各深さにおける抵抗値⁽¹⁾(これが直接その点の H_V かたさと関連すると考えられることは、*Tabor* のかたさ理論からも推察できる)を知ることはできない。そこで不均質層のかたさの変化を求めるには、試験荷重を変化させ(くぼみ深さを段階的に変化させ)ることにより得られるところの、各深さまでの平均かたさより推定する方式も考えられるが、ここでは、つぎのごとき押込深さ曲線を利用する新しい方式を試みることにする。

5-1 押込深さ曲線を求める実験

断面かたさの分布において、最高部かたさ、および、最低部かたさが同一でも、浸炭層深さ、または脱炭層深さが異なるもの、すなわち、かたさ分布の勾配を異にするものでは、荷重~押込深さの関係曲線が異なることが予想される。第13図に示すごとき装置によって、その測定を行なった。ロックウエルかたさ試験機に、非接着型歪ゲージを引用した市販変位計を設置し、初荷重 10kg を加えた点を測定基準点とし、浸炭鋼においては、更に荷重を 224kg まで、脱炭鋼においては、140 kg まで逐次附加し、直接押込深さを測定した。変位計の感度は歪 $10^{-3}/0.1mm$



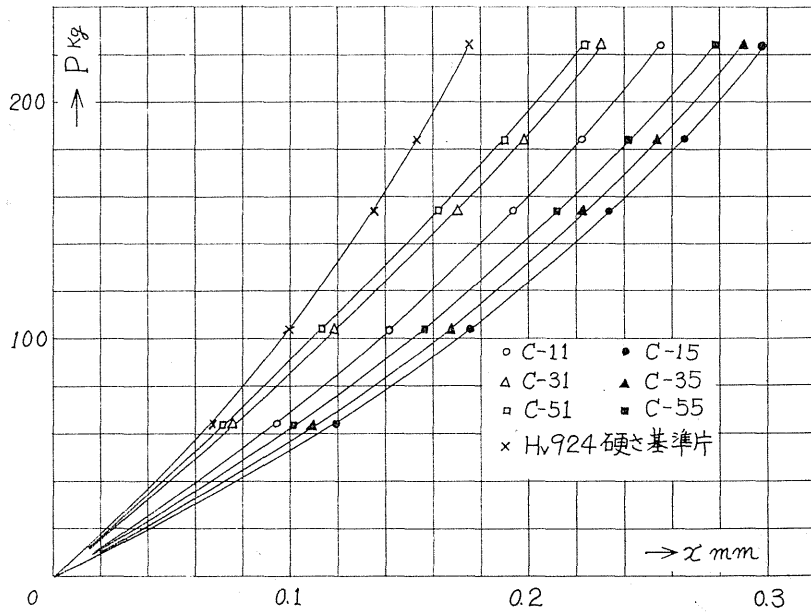
第13図 測定装置

であり、 $\pm 0.4mm$ までの直線性を有している。なお、通常の頂角 120° のロックウエルかたさ用円すい圧子では侵入量が少ないので、頂角 90° のダイヤモンド円すい圧子を使用した。測定上留意すべき点は、第13図に示すように、圧子の動きを、鋼球をかいして変換器に伝えているので、その接触点の仕上げを十分行なう必要がある。

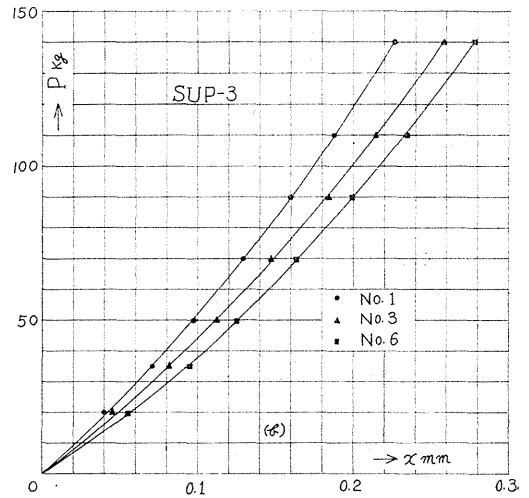
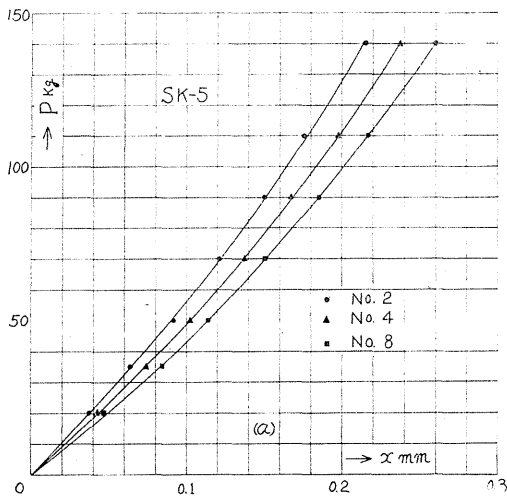
第14図は浸炭鋼、第15図は脱炭鋼の測定結果の一例であるが、最高部かたさ、および最低部かたさが同一でも、かたさ分布の勾配が異なれば、曲線の形状も相違し、勾配のゆるやかなもの、すなわち浸炭鋼の場合は、浸炭層の厚いものほど、同一荷重に対する押込深さが小さく、また脱炭鋼の場合には、脱炭層の厚いものほど、同一荷重に対する押込量が多いことが明らかになる。

5-2 押込深さ曲線と表面硬(軟)化層深さの関連に関する考察

一般に、特定の荷重で圧子を試料中に押込むとき、その押込量は、圧子と試料との接触



第14図 浸炭鋼，荷重～押込深さ曲線



第15図 脱炭鋼，荷重～押込深さ曲線

面に生ずる応力の圧子軸方向の成分を、接触面全体で積分した値が、押込荷重につらいうという条件で決定されるはずである。Tabor⁽⁷⁾は、角すい圧子を押込むときの接触圧力に二次元のくさび押込の平面ひずみ問題の解を拡大適用することにより、押込かたさの解析を行ない、ピッカースかたさが降伏応力の約3倍の値になることを示している。

試料が硬化性材料であり、しかも、表面変質層のごとく、不均質な場合の接触圧力を解析することは、今日の段階ではきわめて困難であるが、非硬化性均質材の変形抵抗、ある

いは圧縮降伏応力とピッカースかたさとが比例関係にあるという事実より、第一近似的に類推すれば、変質層の押込みに対する変形抵抗も、表面より中心へ向かってかたさ分布に応じて、軟化すれば小さく、硬化すれば大きくなることが想像される。従って、上記の実験でえられた事実、すなわち、最高最低部かたさが同一で、かたさ分布の勾配(変質層深さ)が異なれば、それに対応して、押込荷重～深さ曲線の変化するということは、定性的に納得できる結果であろう。

6. む す び

以上の実験ならびに考察を通じて、押込荷重と圧子侵入深さの関係曲線が、浸炭層深さ、あるいは脱炭層深さの異なることにより、すなわち、かたさ勾配の異なることにより、明瞭に判別できることが明らかになった。したがって、この押込深さ測定を原理とする新しい硬(軟)化層深さの測定法は、以下のごとく、多量生産における検査手段として活用できる。

検査の対象となる浸炭製品は、いずれも最高かたさ、ならびに最低かたさを等しくしており、浸炭層厚さ、すなわち、かたさ分布の勾配の相違のみが問題となる場合である。従って、規定の浸炭層厚さ、ならびに、その正負の許容範囲の限界になる浸炭層厚さを有する基準片3個を用意し、それらについて、荷重～押込深さの関係曲線を求めておく。そして、検査すべき品物について求めた曲線が、これらの曲線の範囲内に含まれれば、合格と考えてよいわけである。なお、曲線の形状が、基準のものに比較して、きわめて異常であれば、浸炭層深さは合格でも、熱処理操作などの欠陥で、断面かたさ分布に特異の傾向を有することも検知できることになる。以上の手法は、脱炭層を有する場合についても同様に適用できる。

この方法の特長としては、(1)1 mm以下のきわめて浅い領域において、わずかな硬(軟)化層の深さの差異を明白に検出できること、(2)単に硬(軟)化層深さのみならず、断面かたさ分布曲線の大体の形状も(基準試料と比較することにより)予測できること、(3)硬軟両変質層深さとも、同一原理で計測できること、などがあげられる。

なお、本実験においては、荷重付加装置として市販ロックウエルかたさ試験機を使用した。大荷重を付加する場合には、剛性に難点があり、また圧子行程にも機構上の制約があるので、実用化に際しては、専用試験機が望ましい。さらに、浸炭(脱炭)層深さが数mm程度の大きい場合も同一原理で測定できると思われるが、圧子侵入量が増大するので、圧子の材料としてダイヤモンドのごとき素材は無理であり、これに代るものとして超硬合金のごとき新しい材料を採用する必要が生じよう。

参 考 文 献

- (1) SAE Handbook. 1955, P. 117, 173
- (2) R. Suffredini, ASTM Bulletin, July, 1957, P. 74
- (3) M. C. Vagle, Metal Progress, July, 1963, P. 84
- (4) O. Dettinger, Werkstattstech. u. Maschinenbau, 45-3 (März, 1955), s. 138
- (5) 吉越, カタサ研究会資料 36-202 (昭36,7)

- (6) 日立製作所勝田工場資料 (昭38,8)
- (7) D. Tabor, *Hardness of Metals*, (1951), Oxford