

熱処理・硬さ試験

[1] 概要

降伏応力や引張り強度などの静的強さは設計の最も基本的な物理量である。また、繰返し荷重を受けるような部材は、静的強さ以下の応力レベルであっても疲労によって破壊することが知られている。疲労破壊を起こさないようにするため、部材に加わる変動荷重を疲労が生ずる限界応力レベル以下に設計する必要がある。この疲労に対する限界応力を疲労限応力と称し、これを推定する必要がある。

静的強さや疲労限応力の測定法として硬さ試験があり、材料の硬さからこれらの強度が推定できる。引張り試験などと異なり、硬さ試験は極めて小さい領域で測定できるため、溶接部等の硬さの分布を測定することができる。例えば、硬さ値が小さいところでは変形中にひずみが集積しやすく、逆に、硬いところでは脆いという性質があるが、これらを考慮した設計を行うには、材料内の強度の分布を知る必要がある。硬さ試験はこれに適している。

本実験では、硬さ試験の方法を実習するとともに、鉄鋼素材を対象として、その合金および熱処理の影響について調べ、機械材料学の基礎を学ぶ。

[2] 各種硬さ試験法

硬さ試験の基本的な方法はシンプルであり、被測定物に圧子をもって何等かの形式にてくぼみ（圧痕）を生じさせ、圧子に加えた力と圧痕の大きさによって判定するのが基本である。圧痕を生じさせるには静荷重による場合（静的試験法）、衝撃荷重による場合（動的試験法）、あるいは押込んだ圧子で引っかく場合などがある。圧子はもちろん被測定物に比べて著しく硬く、硬さ試験に際してもほとんど変形しないものでなければならない。さらにその形状は精度の良い製作が可能な幾何学的にもシンプルなものであるのが望ましい。実際にはダイヤモンドの円錐、四角錐、球あるいは鋼球などが用いられている。それにより、以下のような代表的な硬さ試験がある。

▶ ブリネル硬さ

鋼球を圧子として被測定物に一定の荷重で押しつけるとき、接触面となる球分面における平均圧力をもって硬さとする。記号は英字大文字 2 文字で **HB** と書く。ブリネル硬さの表記には、圧子の材質記号、圧子の直径および試験荷重に比例する数値を付した記号を用いる。圧子の材質記号は、鋼球のとき **S** とし、タングステンカーバイドのとき **W** とする。例えば、直径 10mm の鋼球を用い、荷重 29.42kN(3000kg)で試験したときのブリネル硬さは、**HBS10/3000** と表す。

▶ ビッカース硬さ

ビッカース硬さ **HV** はピラミッド型をした対面角 $\alpha = 136^\circ$ のダイヤモンド四角錐圧子を試料に押込むとき得られるピラミッド形永久くぼみの表面積で荷重も除した圧力値として与えられる。記号は **HV** と書く。

▶ ロックウェル硬さ

ロックウェル硬さはある規定の荷重を加えたとき被測定物に生じる圧痕の探さにより、その硬さを表すものであり、圧力値をもって硬さとする試験方法とはその趣を異にする。**HR** で表される。ロックウェル硬さ試験には圧子の材質、形状あるいは規定荷重の大きさなどの試験条件により、**A**, **B**, **C**, . . . などのスケールがある。圧子はダイヤモンドコーンまたは 4 種類の鋼球であり、基準荷重 P_0 [N]には 98.07N(10kgf)と 29.42N(3kgf)が用いられ、試験荷重 P_1 [N]には、

147.1N(15kgf), 294.2N(30kgf), 441.3N(45kgf), 588.4N(60kgf)のいずれかが用いられている。荷重と圧子との組み合わせにより JIS では 15 種類のスケールが定められている。硬さの数値には、必ず用いたスケールを添えなければならない。

▶ ショア硬さ

ショア硬さは先端に球状のダイヤモンドを埋込んだハンマーを、一定の高さ h_0 より自由落下させ、跳ね上がり高さ h より吸収された衝撃エネルギーを求めて、硬さの尺度とするものである。上記の押し込み硬さ試験器と異なり、動的硬さ試験器に属する。この試験器は小型、安価で手軽に持運びができ、試料表面にほとんどクボミを作らないので製品検査に使われている。

など。。

本実験では、ビッカース硬さ試験によって測定を行う。

[3] ビッカース硬さ (Vickers hardness) の測定原理

ビッカース硬さ HV はピラミッド型をした対面角 $\alpha = 136^\circ$ のダイヤモンド四角錐圧子を試料に押し込むとき得られるピラミッド形永久クボミの表面積で荷重も除した圧力値として与えられ、荷重を $P[\text{kgf}]$ 、圧痕の対角線長さを $d[\text{mm}]$ として次式で表される。

HV も kg/mm^2 単位で表した無名数である。

$$\text{HV} = 2\sin 68^\circ \frac{P}{d^2} \quad (1)$$

これは試験荷重 P に依存しないので、均質材の測定では、その厚さに応じて荷重を調節することができる。試験荷重としては通常 $49.04\text{N}(=5\text{kgf}) \sim 490.4\text{N}(50\text{kgf})$ が用いられる。ビッカース硬さを表す場合には、ビッカース硬さを表す英大文字 2 字に続けて、試験荷重に比例する数値を付加した記号を用いる。たとえば試験荷重の場合に $196.1\text{N}(20\text{kgf})$ は、HV20 となる。

ビッカース硬さ試験では圧痕が小さく、精度も良好であるので、局所的な硬さを正確に測定することができる。ただし圧痕自身の寸法が小さいので被測定物の表面仕上げを良くする必要があり、この点で手順を要する。

圧子押し付け荷重を圧痕の表面積で除して得られる圧力を硬さとする点で、ブリネル硬さの場合と同様である。

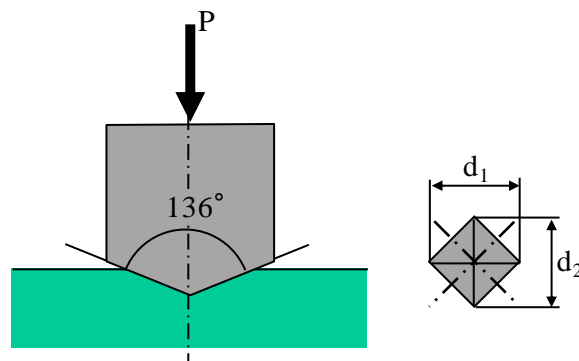


図1 ビッカース硬さ試験法 (圧子と圧痕形状)

[4] 試料の準備

まず、試験片を準備する。金属材料の強度は以下の3個の要因で決定される。

- 合金 錬金術、基材に他の元素を混ぜて（添加して）性能を引き出す。

鉄鋼材料 鋼(炭素鋼)、特殊鋼(ステンレス鋼、工具鋼など)

➤ 5大元素 C, Si, Mn, P, S

➤ その他の添加物 Ni, Cr, Mo, Mn, W, V, Si など

(耐腐食性, 耐摩耗性, 焼入れ性, 強靱性向上のため)

- 熱処理

➤ 添加元素の分散や形状の制御

➤ 組織の制御 (結晶構造, 結晶サイズ)

◇ 焼入れ 結晶構造を変化する温度 (変態点) を超える温度に加熱した後, 水や油にて急冷して, 非結晶化し強度を高める手法

◇ 焼き戻し 焼入れ後, 靱性を調整するため, 変態点以下の温度に再加熱し, 冷却する

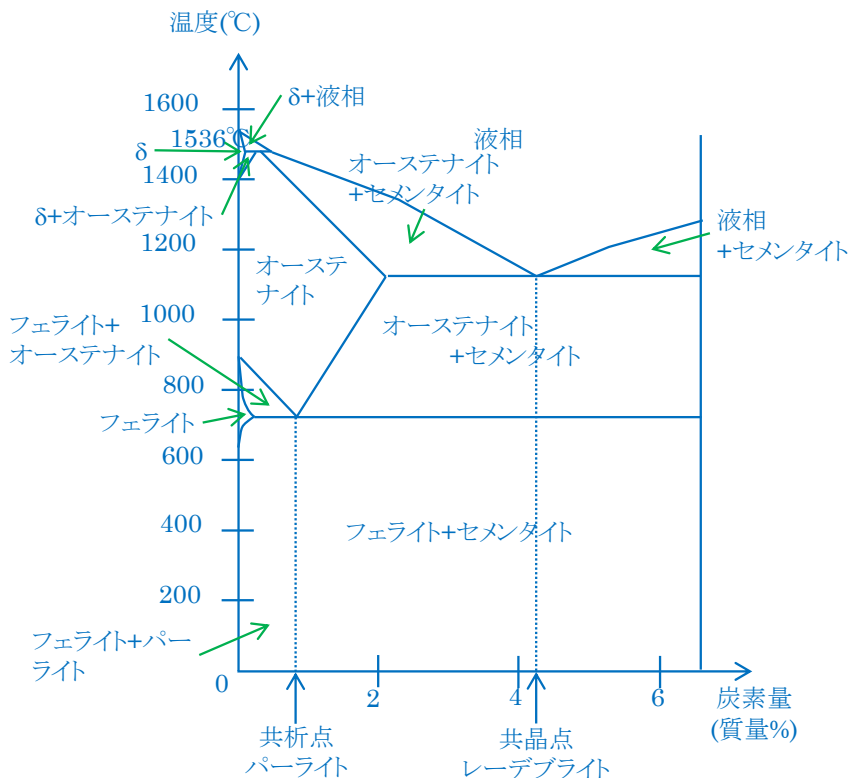
◇ 焼きなまし (焼鈍) 加熱後, 炉内で徐々に冷却 (炉冷) して, 結晶組織を調整し, 加工しやすいように軟らかくする。加工硬化による内部のひずみを取り除き、組織を軟化させ、展延性を向上。

◇ 焼きならし 大気中で焼きなましより少々高速で冷却 (空冷) して硬くて粘り強い性質にする。内部のひずみを取り除いたり、組織を標準の状態に戻したり、微細化したりする。

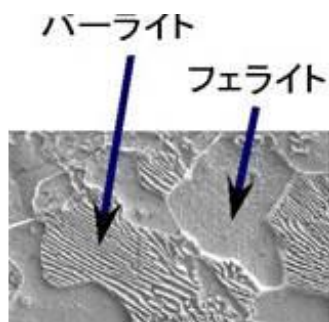
鉄鋼材料

➤ 常温 (冷間) では BCC 構造 (オーステナイト), 熱間では FCC 構造 (フェライト) に変態

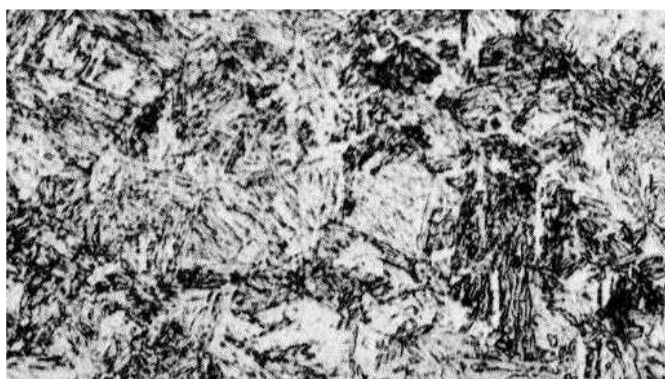
➤ 炭素鋼の状態図



炭素含有量が多いと、固溶できず、鉄と化合物を作る。この化合物 Fe_3C をセメンタイトと呼ぶ。これは、セラミックスであり、硬くて脆い（延性がない）。ゆっくり冷却するとまず Fe のみ結晶化（フェライト）し、固溶限界に達するとセメンタイトが析出する。セメンタイトが層状に析出したものをパーライトと呼ぶ。



- 急冷すると BCC 構造になれず、非結晶構造となる。炭素鋼の焼入れによる非結晶構造をマルテンサイトと呼ぶ。



● 塑性加工

- 加工硬化（転位による強化）
- 結晶組織制御（結晶粒微細化による強化、高磁性化など）

直径 $\phi 25$ mmの丸棒鋼材（S25C および S55C の2種類）から、厚み 10 mmの円板状試験片を切出す。電気炉に試験片を入れ、 $15^\circ\text{C}/\text{min}$.で昇温し、 900°C で保持する。炉を開けて、試験片を火箸でつかんで取り出し、水の中に入れ、かき混ぜるようにして急冷する（焼入れ処理）。試験片を半分に切断し、耐水研磨紙で荒い番数（#140）から細かい番数（#2000）まで順番に切断面を研磨する。結晶構造観察の試験片はアルミナ砥粒にてバフ研磨し、ナイトール（硝酸-アルコール液）およびピクリン酸にて腐食する。

試料表面の研磨の程度は試験方法に応じて異なる。ビッカース硬さ試験では圧痕が小さいので仕上げは特に平滑でなければならない。

[5] 硬さ試験手順

図2の本実験で使用する試験機は、1.961Nから196.1N(200gfから20kgf)の荷重を加えることができる。

- 1) 電源を入れる。操作ボックスにタイトル画面が表示され照明筒ランプが点灯してことを確認、タイトル画面のNEXTボタンを押して、図3の測定画面を表示させる。

- 2) 試料をバイスに固定する。このとき、試料が圧子や対物レンズに当たらないよう、上下ハンドルを反時計方向に回して、上下軸を下げて作業する。(圧子やレンズは高価である。また、購入に時間がかかるため、実験ができなくなるので最大の注意を払うこと。)
- 3) 操作パネル上の左下のパワータレットスイッチを押して、レンズを試料の上に回転移動させる。
- 4) 上下ハンドルを時計方向にゆっくり回して、試料がレンズ等にぶつからない様注意しながら、焦点を合わせる。バイスを前後左右に動かして、圧痕をつけたい位置に試料を移動させる。焦点が狂っているならば再度焦点を合わせる。
- 5) 計測顕微鏡(オクラー)を操作し、ゼロセットを行う。計測つまみを **CLOSE** 側にゆっくり回し、計測線(圧痕の対角線を計るためのもの)を移動させて、2本の計測線の内側が重なるようにする。2本の計測線の隙間がちょうど無くなったとき、操作パネルのゼロスイッチを押す。計測つまみを回しすぎると計測線が刻まれているガラスが割れるので注意する。
- 6) 試験力の選択をする。試験切り替えノブを回して、指定された試験荷重に合わせる。操作パネルで、試験力速度および保持時間を選択する。保持時間は圧痕の回復が起こらないよう、少しの間圧子を押し付けた状態で保持するための時間である。鉄鋼材料ではおおよそ 10~15 秒程度とされる。
- 7) スタートスイッチを押す。自動的にタレットが回転して圧子が試料の上に移動し、圧痕をつける。
- 8) 左の測定つまみを操作して、圧痕の左側頂点に左側計測線の内側を合わせる。同様に、右側のつまみを操作して圧痕の右側頂点に計測線を合わせる。くぼみ値入力スイッチを押す。 d_1 の表示が固定される。(図 4 参照)
- 9) オクラーを 90° 回転させて、(8)と同様にして上下方向の計測線を合わせる。 d_2 が変化するとともに硬さ値の表示も変化する。くぼみ値入力スイッチを押すと硬さ値が固定される。この値を記録し、一点分の硬さ試験は終了する。
- 10) バイスを移動して、次の点での測定を同様にして行う。前回の圧痕があればその加工硬化の影響があるため、その直径の 4 倍以上離れた場所を選ぶ。
- 11) 全点終わった後、上下軸一番下にまで下げ、試験片を治具から取外す。電源スイッチを **OFF** にし、照明筒ランプが消灯するのを確認する。

[6] 課題および考察

実験中に指示する。

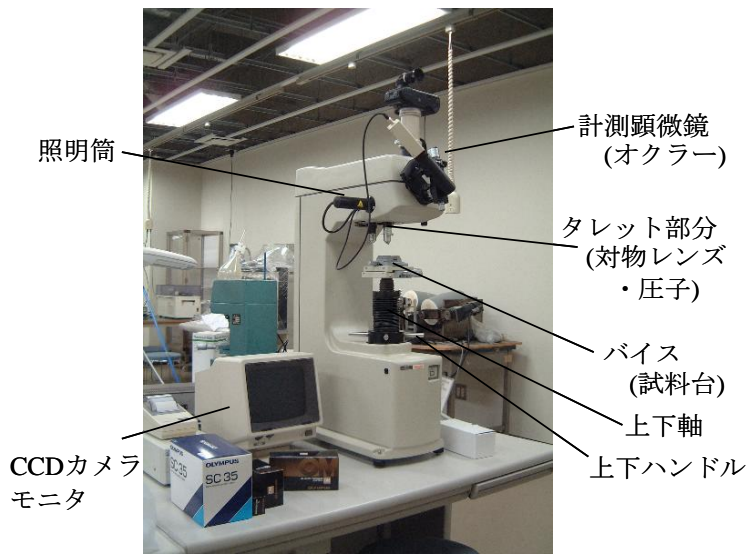


図2 ビッカース硬さ試験器

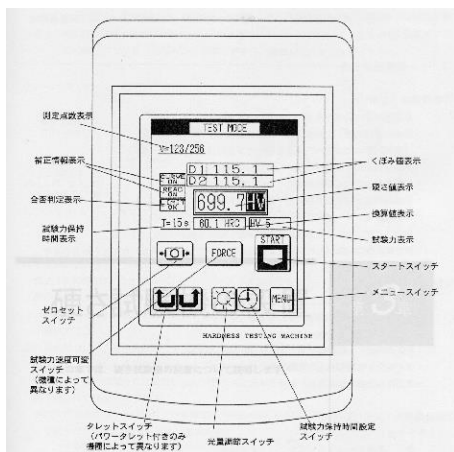


図3 操作パネル

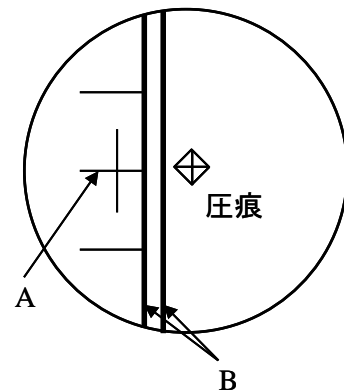


図4 圧痕対角線の測定方法

[7] 参考資料

➤ 測定個所について

くぼみには盛り上がり型と沈降型がある。一般に加工硬化しやすい材料は沈降型に、十分に加工されて加工硬化しない材料は盛り上がり形に属する。これらの圧痕周辺での加工硬化を含む変形は、次の圧痕での対角線長さの測定の際に誤差を生じる原因となるので注意を要する。

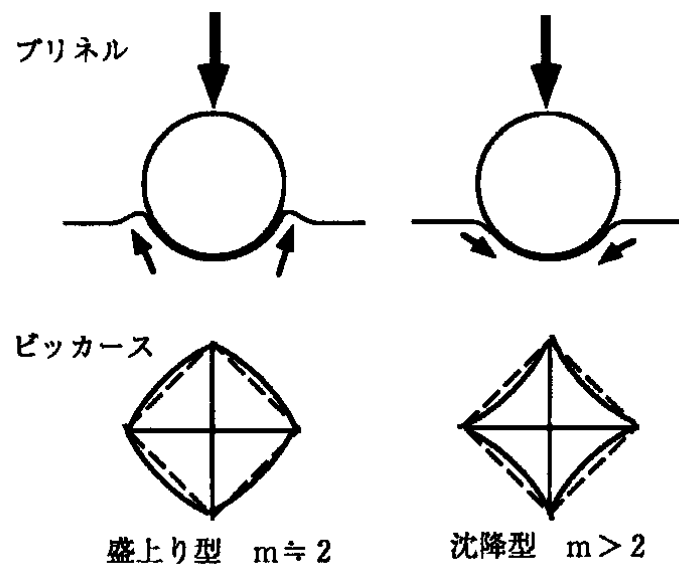


図5 圧痕形状