焼入による鋼の弾性率の變化に関する研究*

上 田 太 郎** 条 井 茂**

Taro Ueda and Sigeru Kumei: On the Investigation of the Change of Modulus of Elasticity of Steel due to Quenching.

The change of modulus of elasticity of quenched steel compared with that of annealed steel was measured by the vibration method which can easily measure it with small test pieces suitable for perfect hardening. The test pieces used in this investigation were armco iron, carbon steels with carbon content of 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.9 and 1.3% chrome steel, chrome-molybdenum steel, and leaded free cutting steel. The dimension of the test pieces of carbon steels were 5 mm in diameter and 100 mm in length, and that of special were 8 mm in diameter and 120 mm in length. The test pieces were quenched in oil or water at 800~930° and tempered at 100°, 200°, 300°, 400° and 550°. The modulus of elasticity decreases several per cent by quenching and gradually recovers by tempering up to the value of annealed state. The rate of decreasing in the carbon steels by quenching decreases according as the increase of carbon content and it takes the maximum value 3.5% at 0.6%C and when the carbon content further increases it falls to 3%. The rate of decreasing of modulus of elasticity is 6~6.5% at chrome steel, 3.3% at chrome-molybdenum steel and 4.5% at leaded free cutting steel.

(Received July 12, 1953)

I. 緒 論

材料の弾性率はその應力對歪の關係を現わす係數であり、現在までに多く測定されている⁽¹⁾。しかしその値は材料が加工を受けることによって變化するが⁽²⁾⁽³⁾、また鋼においてはこれを焼入すれば標準組織と異つた組織になるためその値が變化する。鋼の焼入による弾性率はすでに炭素

鋼については本多、橋本兩氏⁽⁴⁾、0.3%C、0.6%C タングステン鋼について本多、松下兩氏⁽⁵⁾、0.6%C クロム鋼については松下氏⁽⁶⁾により測定されているので、本研究においては數種の炭素鋼、ボールベアリング鋼、クロム-モリブデン鋼および鉛快削鋼につき焼鈍状態のもの、焼入したものおよびこれを種々の温度で焼戻したときの弾性率を測定してその變化の狀況を研究した。弾性率の測定には一般に種々の方法が採用されており、靜的に測定する方法と振動を與えて測定する方法とがあり、後者においては横振動法と縦

** 大阪大學工學部精密工學教室

* 1952年4月本會東京大會に發表

(1) 山田、岩佐、本誌、2(1938)、604。

(2) 本多、Tohoku Sci. Rep., 17 (1928)、723。

(3) 河合、金屬の研究、7(1930)、177。

(4) 本多、橋本、Tohoku Sci. Rep., 10 (1921)、75。

(5) 本多、松下、Tohoku Sci. Rep., 8 (1919)、89。

(6) 松下、Tohoku Sci. Rep., 9 (1920)、247。

振動法の 2 種があるが、焼入による弾性率を測定するに際し大型の試験片では焼が均一に入り難く、また歪焼割などを生ずる恐れがある故、本研究では均一に焼の入る小型の試験片を用いて、測定には小型の試験片で正確に規定することの出来る振動法を採用することとした。

II. 供 試 材 料

供試材料は Table 1 の成分を有するアームコ鐵、0.1

Table 1

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Pb
Armco Iron	0.02	0.015	0.06	0.012	0.020	—	—	—
Carbon Steel	0.1	0.3	0.5	0.04	0.04	—	—	—
"	0.2	0.3	0.5	0.04	0.04	—	—	—
"	0.4	0.3	0.5	0.04	0.04	—	—	—
"	0.6	0.3	0.4	0.02	0.02	—	—	—
"	0.9	0.3	0.4	0.02	0.02	—	—	—
"	1.3	0.3	0.4	0.02	0.02	—	—	—
Ball Bearing Steel	1.0	0.3	0.3	0.02	0.02	1.3	—	—
"	1.0	0.3	0.3	0.02	0.02	1.6	—	—
Chrome-Molybdenum Steel	0.4	0.2	0.7	0.03	0.03	0.9	< 0.15	—
Lead Free Cutting Steel	0.5	0.3	0.5	0.04	0.04	—	—	0.2

%C, 0.2 %C, 0.4 %C, 0.6 %C, 0.9 %C, 1.3 %C なる炭素鋼、ボールベアリング鋼、クロム-モリブデン鋼および鉛快削鋼である。試験片の寸法は炭素鋼は直径 5 mm, 長さ 100 mm, 特殊鋼は直径 8 mm, 長さ 120 mm の丸棒を使用した。各試験片は 800~930° で、水または油焼入をした後これを 100°, 200°, 300°, 400°, 550° で焼戻焼入のまゝ、および各焼戻せるものゝ弾性率を測定した。

III. 實 験 方 法

測定は試験片を軽く叩いて横振動させると、試験片はその固有振動数で振動するため、その固有振動数を精密に測定することにある。Fig. 1 において試験片が原振動し易く

Fig. 1. Measuring Apparatus.

すくため、原振動の節點に相當する 2 點でこれを軽く懸垂する。今試験片を叩くとこのときに生ずる不規則な振動と原振動以外の倍振動は直ちに減衰して消滅し原振動だけ残る。圖の如く試験片の節點外におかれた弱磁場のコイル中に試験片を入れておくと振動のためにビクアップコイルに電圧が誘起され、この電圧を増巾して電磁オシログラフに入れる。一方別に 1000 回の音叉共振器を用いて標準振動数を入れ、試験片の振動波形と 1000 回の振動波形を寫真にとり、それを比較して試験片の固有振動数を測定す

る。この求むる固有振動数を f とすれば、試験片の断面が圓形で直径が長さに比べて小さい場合は弾性率は次式で與えられる。

$$E = 4 \pi^2 \rho l^2 f^2 / k^4 m^4 \dots \dots \dots (1)$$

但し E : 弾性率, f : 振動数, l : 長さ, ρ : 密度, m : 係數, k : 棒の断面の慣性半径, また別に炭素鋼の弾性率を縦振動法により測定した。それは豫め試験片を磁化しておきそれを中央で固定する。しかしこれに 20~30 kC の共振器による交番電圧を試験片の共振點前後において急に變化させると共振點附近で樂音が聞えるから、これで共振點を見出す。この場合共振點と弾性率の關係式は次式で與えられる。

$$\text{すなわち } E = 4 l^2 \rho f^2 \dots \dots \dots (2)$$

但し E : 弾性率, f : 振動数, ρ : 密度, l : 長さ, 本研究においては主として横振動法により測定したが、その精度を見るに試験片の外面は研磨仕上、両端は旋盤仕上をし、その寸法を直径は 1/200 mm 以下、長さは 1/20 mm まで測定すると (1) 式にて計算するときの誤差は直径、長さ、密度、振動数などの誤差を入れて 0.5% 程度になる。この横振動の式は棒の直径が長さに比べて比較的小さいと考え、單純な曲げの式から導かれているから、棒の断面が長さに比べて比較的大きくなると誤差が入ってくる。今その補正值を C とすると C は近似的に次式で與えられる⁽⁷⁾。

$$C = 1 + 2m \cdot \rho(m) \cdot k^2 (3 - \zeta E/G) / l^2 + m^2 \rho^2(m) k^2 (1 + \zeta \cdot E/G) / l^2 - 4\pi^2 \cdot \rho \cdot \zeta \cdot k^2 \cdot f^2 / G \dots \dots \dots (3)$$

但し k : 慣性半径, ζ : 断面の形状に關する常數, G : 剛性率; 本研究においてはこの補正值を使用しないときは弾性率の絶対値は 1~2% 小さく出る。しかし弾性率の變化だけを比較する場合はこの誤差はあまり影響しない。

縦振動法で測定した場合の誤差は測定法よりわかるように共振器の周波数の變動による誤差と、周波数測定の場合の誤差が入るので相當大きくなると思われる。

IV. 測 定 結 果

鐵ならびに炭素鋼についての結果は Fig. 2~4 に示されている。Fig. 2 は 930° 水焼入したアームコ鐵, 930° 水焼入した 0.1% 炭素鋼, 900° 水焼入した 0.2% 炭素鋼である。圖は横軸に熱処理、すなわち焼入した場合および 550° に焼戻した場合を示し、縦軸に弾性率をとつてゐる。焼鈍状態の弾性率はアームコ鐵では 21490 kg/mm², 0.1% C 鋼で 21460 kg/mm², 0.2% C 鋼で 21480 kg/mm² となりほぼ近い値である。これを焼入すると弾性率はアームコ鐵で 21410 kg/mm², 0.2% C 鋼で 21180 kg/mm², 0.2% C 鋼で 21200 kg/mm² となり、何れも減少し、アームコ鐵ではその變化は少く 0.4%, 0.1% C, 0.2% C 鋼では 1.3% である。またこれを焼戻すと弾性率は焼入れたものよりも増大してくる。

Fig 3~4 は 0.4~1.3% C 炭素鋼の焼入、焼戻による變化の狀況を示したものである。何れも縦軸に弾性率および

(7) E. Goens, Ann. d. Phys., 11 (1931), 649.

硬度（硬度はロックウェル A スケールで測定し、ブリネル硬度數に換算して示してある）をとり、横軸には焼鈍した場合、焼入した場合およびそれを 100°, 200°, 300°, 400°

Fig. 2 Effect of Quenching and Tempering of Carbon Steel on Modulus of Elasticity and Hardness.

Fig. 3 Effect of Quenching and Tempering of Carbon Steel on Modulus of Elasticity and Hardness.

500° で焼戻したときの温度をとつている。Fig. 3 A は 0.4 %C 鋼で、焼鈍せるものゝ弾性率は 21240 kg/mm²、焼入すると 20770 kg/mm² となりその減少率は 2.3 % である。これを種々の温度で焼戻すとき、焼戻温度が 100° のときはあまり變らないが、温度が上昇するにつれて弾性率は増大し硬度は減少している。Fig. 3 B は 0.6 %C 炭素鋼で、焼鈍せるものは 21020 kg/mm² で、焼入すると 20310 kg/mm² となり 3.5 % 減少する。焼戻温度が 100° のときはほとんど變化しないけれども 200~300° の間で急に増加している。Fig. 4 A は 0.9 %C 炭素鋼で焼鈍した場合 20700 kg/mm²、焼入した場合 20070 kg/mm² となり 3.1 % 減少する。焼戻温度 100° では弾性率は變化せずそれより上昇するにつれ次第に増大する。Fig. 4 B は 1.3 %C 炭素鋼で焼鈍状態で 20840 kg/mm²、焼入すると 20240 kg/mm² となり 3 % の減少である。100° 焼戻では値はほとんど變らない。硬度は以上何れの場合も 100° では餘り減少しないが

100~300° で著しくなる。Fig. 5 は縦軸に弾性率、横軸に炭素量をとつた場合の圖で○印は焼鈍試験片、●印は焼入

Fig. 4 Effect of Quenching and Tempering of Carbon Steel on Modulus of Elasticity and Hardness.

試験片を横振動法で測つた場合、△印および▲印はそれぞれ焼鈍焼入したものを縦振動法で測つたものである。この縦横両振動法による差異は縦振動法による測定の場合の誤差によるものと思われる。弾性率は一般に炭素量の増加とともに減少し 0.9 %C で最小となつてゐる。1.3 %C の鋼は 0.9 %C の鋼より少し大きくなつてゐる。焼入した場合

Fig. 5 Relations between Modulus of Elasticity and Carbon Content in Hardened, Annealed Carbon Steel.

には何れも焼鈍状態のものより弾性率は減少しており、炭素量が増すにつれて減少し 0.9 % で最小値を示している。その減少率は 0.6 %C の鋼が最大値を示している。Fig. 6 は 1 %C, 1.3 %Cr, 0.3 %Mn のボールベアリング鋼で 930° 油焼入したものである。焼入したときの弾性率は 20530

kg/mm², 焼鈍状態で 21810 kg/mm² で焼入による減少は 6% である。この場合も炭素鋼における如く 100° 焼戻で

Fig. 6 Effect of Quenching and Tempering of 1.3%Cr-Steel on Modulus of Elasticity and Hardness.

Fig. 7 Effect of Quenching and Tempering of 1.6%Cr-Steel on Modulus of Elasticity and Hardness.

はあまり変化しないが、200~300° 焼戻で著しく増加している。硬度はほぼ一様下つてゆく。Fig. 7 A は 1% C, 1.6% Cr, 0.3% Mn のボールベアリング鋼を 850° 油焼入したもので弾性率は焼鈍状態で 21900 kg/mm², 焼入すると 20500 kg/mm² となり 6.5% 減少している。Fig. 6 の Cr 1.3% ものに比べて焼入したものは同じ値であるが、焼鈍状態では少し高くなっている。200~400° に焼戻すときは弾性率は著しく回復する。また硬度は 200~300° 焼戻により降下している。Fig. 7 B は上と同じ試料を 900° 油

焼入したもので硬度はあまり變らないが、焼入した時の弾性率は少し高くなつて 20600 kg/mm², 焼入により 6% 減少している。Fig. 8 A は 0.4% C, 0.9% Cr, 0.7% Mn,

Fig. 8 Effect of Quenching and Tempering of Cr-Mo Steel and Lead Free Cutting Steel on Modulus of Elasticity and Hardness.

0.15% Mo のクロム-モリブデン鋼で、焼鈍せるものは 21660 kg/mm², 焼入すると 20940 kg/mm² となり、0.4% C 炭素鋼より少し高い。また焼戻温度の増加に對して弾性率は徐々に變化している。焼入による減少は 2.3% である。Fig. 8 B は 0.5% C, 0.2% Pb の鉛快削鋼で焼鈍せるとき 21440 kg/mm², 焼入すると 20450 kg/mm² となり 4.5% 減少する。やはり 200~300° で弾性率が増している。

V. 實驗結果の考察

焼入された鋼は組織が變化しかつ内部歪が生ずることにより、種々の物理的變化を生ずる。すなわち Fig. 2~8 に示す如く硬度は増加し弾性率は減少する。低温加工せる金屬の弾性率の變化は本多氏⁽²⁾により次の如く説明されている。すなわち r なる距離にある 2 原子間に作用する力が引力 f および析力より成ると考えて、その力を $f = a / r^{m+n} - b / r^n$ と假定し、外力による伸の割合を p_1 , 縮の割合を p_2 とし引張力により最初の r_0 が $r = r_0(1 + p_1)$ に、壓縮力により $r = r_0(1 - p_2)$ に變化したとする。試験片の弾性限内における伸 p_1 に相當する外力は $F = -Kp_1(1 - p_2)$, 弾性率は $E_1 = -dF/dp_1 = K(1 - 2p_2)$ となり、外力を受けていないときの弾性率を E_0 とすると $E_1 = E_0(1 - 2p_2)$ で表される。同様に壓縮力をうけている場合は $E_2 = E_0(1 + 2p_2)$, しかして低温加工せる金屬にてはその各小部分は張力および壓力を受けて互に釣合の状態にあるから平均の弾性率は次の

如くなる。

$$E = (E_1 + E_2) / 2 = E_0 \{1 - p(\rho_1 - \rho_2)\} \dots \dots \dots (4)$$

しかして張力と壓力は互に釣合っているから

$$\rho_1(1 - p\rho_{10}) = \rho_2(1 + p\rho_2) \dots \dots \dots (5)$$

$$(4) (5) \text{ より平均の弾性率は } E = E_0(1 - 2p^2\rho_1^2) \dots \dots \dots (6)$$

すなわち弾性率は減少する。今試験片を焼入せる場合には焼入による内部歪が生じて内部には引張應力および壓縮應力が作用して釣合状態にあるから、張力を受けている部分の弾性率 E_1 と壓縮力をうけている部分の弾性率 E_2 は上述の如く異り、その平均値 E は (6) 式で與えられ内部歪のない場合の E_0 に較べて小さい。すなわち焼入によつて生ずる内部歪によつて E は減少する。マルテンサイトを生じないアムコ鐵を焼入した場合においても、組織の變化はないが内部歪は生ずるから同様な理由により弾性率が減少する。

Fig. 9 Schematic Diagram of the Change of Modulus of Elasticity E . a-curve Represents the Increase of Modulus of Elasticity by Structure. b-curve Represents the Decrease of Modulus of Elasticity by Internal Stress. R-curve Represents the Total Change of Modulus of Elasticity.

それを合成せるものは R 曲線となり弾性率の減少となつて現われる。しかしてその變化は炭素量が多くなるほど大きくなる傾向にあるが、これは Fig. 9 にて焼入により生ずる内部應力が炭素量の増加につれて大きくなつて $-\Delta E$

の影響が大きく出るためである。しかし焼戻して焼戻温度を次第に上げてゆくことにより弾性率は焼鈍時の値に近づく。それは組織がマルテンサイトからトルースサイト、ソルバイトなどに變化してゆくとともに内部歪は次第に消失するためである。

焼戻温度が $100 \sim 300^\circ$ の間で弾性率の回復が大きく現われるのは、この温度範囲内で内部歪が著しく減少するためである。また Cr, Mo などを含む特殊鋼の弾性率も炭素鋼の場合と同様の變化をするが、その變化の値は炭素鋼に較べて大きい。これはこれらの特殊鋼の組織的な相違および内部應力の大きさの相違によると考えられる。

V. 總 括

(1) アムコ鐵, $0.1\%C, 0.2\%C, 0.4\%C, 0.6\%C, 0.9\%C$ および $1.3\%C$ 炭素鋼, ホールペアリリング鋼, クロム-モリブデン鋼, 鉛快削鋼につき焼入焼戻を行つて熱處理による弾性率の變化を測定した。

(2) 炭素鋼および特殊鋼において焼入を行うと弾性率は減少する。

(3) 炭素鋼においては弾性率は焼入ならびに焼鈍何れの状態においても炭素量の増加とともに減少し、 $0.9\%C$ において最少値をとる。 $1.3\%C$ になれば少しく増加する。焼入による減少率は炭素量が増すとともに大きくなり、 $0.6\%C$ で最大に達して 3.5% の減少となる。 $0.9\%C$ および $1.3\%C$ では約 3% 減少する。

(4) ホールペアリリング鋼の弾性率は炭素鋼より大きい。また焼入による減少率は大きく 6% に達する。クロム含有量が多いものほどこの減少率は大きく、 $Cr 1.6\%$ において 6.5% となる。

(5) クロム-モリブデン鋼の弾性率は炭素鋼より少し高い値をとり、焼入による減少率は 3.3% で炭素鋼より大きい。

(6) 鉛快削鋼は焼入による減少率は 4.5% である。

(7) これ等鋼の焼入による弾性率の減少はマルテンサイト化による弾性率の増加と内部歪による弾性率の減少との二つの効果の合成結果によるものと推論した。