純鉄単結晶の磁場中における振り振動による内部摩擦の測定

舟 久 保 熙 康*

Hiroyasu Funakubo : La Mesure de Frottement Intérieur en Torsion sur les Eprouvettes du Fer Pur Monocristallin sous Champ Magnétique. L'essai de frottement intérieur sous champ magnétique de 150 Oe sur les éprouvettes monocristallins du fer pur de différente pureté nous a montré les remarques présentées comme les suivants ;

(i) La variation des valeurs de frottement intérieur de l'éprouvette de $\{100\}[100]$ a la même tendance que celle effectuée sans champ magnétique. Mais, quand l'orientation s'écarte de plus en plus que celle de $\{100\}[100]$, l'effet de champ magnétique augmente.

(ii) La valeur de la contrainte critique produite par le phénomène reversible-irreversible de la valeur de frottement intérieur est si importante sur l'éprouvette de $\{100\}[100]$ (plus de 330 g/mm²). Mais, elle se diminue quand l'orientation s'écarte progressivement de $\{100\}[100]$.

(iii) Dans la condition limitée de cet essai, la variation de frottement intérieur en fonction de la contrainte posée sous champ magnétique sera causée principalement par le glissement.

(Received March 11, 1967)

I. 緒 言

約 1 サイクル/sec の振り振動式内部摩擦測定装置によ

* 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

り、純鉄単結晶薄板試験片について、歪振巾約 1.5×10^{-7} 以上で測定した内部摩擦値の応力依存性の結晶方位による相違についてはすでに報告⁽¹⁾した。この実験は 22°C, 振

(1) 舟久保, 他: 本誌, 29 (1965), 1148.

動周期約 2 sec, つまり 室素の スネークピークの発生する条件下で行なわれたものであるが, 内部摩擦の応力依存性は容易磁化方向と試験片に加えられる振りの最大剪断応力方向とのなす角度と, 最大剪断応力方向に最も近い迂り系への応力の分布とに依存すると考えられる結果が得られた. 本報では飽和磁場中で前報の場合と同様の実験を行ない, 磁化した場合の単結晶試験片の内部摩擦値の応力による変化を測定した結果を報告する.

II. 磁 場 中 内 部 摩 擦 測 定 用 装 置 の 概 要

本実験では長さ 100 mm, 巾 10 mm, 厚さ約 0.5 mm の垂直に設置された試験片の周囲にその全長にわたって均一な磁場をかけるためのボビンを装着した. 試験片の著脱ができるようボビンの上端は試験片下端より下の位置まで上下方向に移動でき, 通電によりボビンに発生する熱で試験片が加熱することを防止できる必要がある. このため前報に用いた装置をさらに改良して使用した. **Photo.1** は本装置の全体を示し, **Photo.2** はボビンの部分を示したものである. **Fig.1** はボビンの中心軸上の磁場の分布で, 中央部より両端に向かってそれぞれ 90 mm までの測定結果である.

通電によつてボビン内に発生する磁場が試験片以外の装置部分に影響することを除くため, 試験片の上下チャック部分は長さ約 25 mm の 18-8 不銹鋼製でベークライト製丸棒 25 φ に連結してある. ただし上部のベークライト部は装置枠に緊定する必要があるため, ボビンの導線上縁より 60 mm 以上は 18-8 不銹鋼丸棒 25 φ となっている. こ

Photo.1 Appareil d'essai sous champ magnétique.

れによつてチャック部が通電時に磁場によるトルクの影響を受けないことを確かめるため, 磁場中で針金 - 慣性円盤

のみより成る系の自由振動周期を測定し, 磁場のない場合と比較した. この系で上部チャックは単に円盤下方に自由

Photo.2 Partie de la bobine.

Fig.1 Distribution du champ magnétique suivant l'axe de bobine.

に懸吊し何ら外的拘束力を受けない状態にあり, したがって磁場によつて影響される場合には, 最も敏感な状態にある. 測定結果をみると前者で 2744 sec, 後者は 2745 sec でこの偏差約 0.3×10^{-3} は内部摩擦値の変動に対しては無視しうる程度にすぎない.

III. 実 験 法

実験に用いた試験片は前報の実験に用いたものと同一で, 5×10^{-5} mmHg 真空中 850°C 8 hr 焼鈍後炉冷し再使用した. 測定中のボビンの加熱による試験片の昇温を避けるため, ボビンの外壁, 内壁と挿入した魔法瓶外壁の間にそれぞれ 5°C の冷水を緩やかに流し発生熱を吸収させたが, この条件で一測定中の実験温度は $22^\circ \pm 0.5^\circ\text{C}$, 試験片の軸方向の温度勾配は最大 0.5°C であった. 温度測定は魔法瓶内壁に沿つて試験片中央部付近まで熱電対を挿入固定し, 精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ の温度記録計によつて連続測定した.

150 Oe の定磁場を発生するために直流電流を通した。
Fig.2 は使用したボビンの磁場と直流電流との関係であ

Fig.2 Relation entre la force de champ magnétique et le courant mis en charge.

る。また、結晶方位の異なる試験片を 150 Oe の定磁場中においた場合の試験片の磁化の程度を調べるため、実験に用いた各試験片の磁化曲線を弾動検流計式磁束計により求めた。

IV. 測定結果および考察

Figs. 3, 4, 5, 6 はそれぞれ前報の **Figs. 4, 5, 6, 7** に対応する試験片についての実験結果を示したものである。

図からわかるとおり、内部摩擦の応力依存性は結晶方位により異なり、その傾向は前報の磁場のない場合と相似している。Fig.6 に示す試験片の場合は応力による内部摩擦の変化は 330 g/mm^2 付近まではほとんど認められず、磁場のない場合の結果とほとんど同様である。これに対し Fig.3 に示す試験片では、磁場のない場合に比べては小さいが、Fig.6 の場合の数倍に達する著しい応力依存性があり、また約 $100 \sim 170 \text{ g/mm}^2$ 付近に可逆、不可逆変化の遷移点が認められる。

また、実験に使用した磁場の強さ 150 Oe は、測定中に試験片の温度上昇を防ぐための最大限の大きさであつたが、この値は各方位の試験片全部について必ずしも飽和磁場であるとはいえない。Fig.7 に示すように Fig.6 の試験片 (以下 A 試験片という) は、磁化が飽和値の約 93% に達し飽和磁場に近いが、Fig.3 の試験片 (以下 B 試験片という) の磁化は、飽和値の約 75% である。Fast, Verrijp の行なつた 24 cm 長、0.07 cm 径、粒径長 1 cm 以上のカーボニール鉄線の 20°C 、0.8 サイクル/sec の振り振動による内部摩擦変化の磁場による影響についての実験⁽²⁾についてみると、外部磁場が 150 Oe の場合には内部摩擦値の剪断応力に対する変化は飽和磁化の場合に近い。この実験に用いた試験片の主な結晶方位は明らかでないが、われわれの実

験結果と照合すると {100} 方位に近いものではないと考えられ、これらの結果からわれわれの実験における 150 Oe の

Fig.3

Fig.4

Fig.5

Fig.6

Fig.3~6 Courbe expérimentale obtenue sous champ magnétique de 150 Oe d'une éprouvette monocristalline du fer pur.

磁場では、磁化による影響は方位が [100] に近いものも、それ以外のものも飽和状態に近いと考えることができよう。

前報ならびに今回の実験条件で、結晶方位による内部摩擦の応力依存性が生ずる原因として、主につぎの三つがあげられる。

一つは外力による結晶格子の弾性的歪みによつて生ずる固溶している格子間窒素の動きが、外力の格子に対する負荷方向により異なること。

つぎは試験片内の磁区の磁化が外力による延び歪みの方向に近い [100] 方向にならぶこと。さらに、外部からの剪断応力の試験片の迂回系に対する分力の大きさである。

以下これらについて検討する。

(2) J.D.Fast and M.B.Verrijp: Métaux, **36** (1961), 398.

1. 格子の弾性変形による窒素の動き

侵入型窒素原子は格子に加わる歪みの方向により格子間

Fig.7 Différence de la magnétisation des échantillons A et B en fonction du champ magnétique mis aux échantillons.

A: l'échantillon de la Fig.6
B: " Fig.3

距離が伸縮するため不安定な位置から安定な位置への動きが生ずる。Polder⁽³⁾の弾性余効についての理論的研究と、Dijkstra⁽⁴⁾, Kunz⁽⁵⁾の実験結果から判るように[111]方向に外力が働らく場合は体心立方晶の単位胞の各稜の歪みは等しく、窒素の動きによる内部摩擦変化は最小(理論上0)となり、[100]方向に働らく場合最大にならねばならない。

本実験は窒素のスネークピーク⁽⁶⁾のあらわれる条件で実施したにもかかわらず、[100]方位のFig.6の場合よりも、[111]方位のFig.3の方が効果が大きくあらわれた。したがって窒素原子の動きが結晶方位に対する外力の方向により異なるために生ずるものとは考え難い。

2. 応力による試験片内の磁壁、磁区の移動、排列

普通消磁状態の純鉄試験片内の磁区の磁化方向は、六つの<100>稜方向に均等に分布しており、伸び応力がその中の一つの<100>方向に加わると他の<100>磁区は消滅し、一方向の180°磁区だけが残る。磁区を単一の方向に排列するのに要するエネルギーは応力が[100]方向に加わっている場合が最も小さく、他の方向になるにつれて多くのエネルギーを必要とする。前報のFigs.4と7はこの磁区の排列に要するエネルギー損の違いに大きく依存していることは明らかである。また前報のFig.4の場合にくらべ

て、本報のFig.3の場合、磁区はほとんど全部試験片軸方向に排列しており、内部摩擦の変化割合の差は、応力により磁区を排列するのに要するエネルギーの差に相当すると考えられる。本実験のFigs.3と6の場合には、試験片内の磁区が軸方向に排列している状態で内部摩擦に相違があるので、これは応力による磁化方向の変化や磁区の分布の変化に相違があるために生じたものと考えられる。

3. 剪断応力による迂り

{110} 迂り面上の[111] 迂り方向への分力の係数⁽⁷⁾を

Table 1 に示す。係数はB試験片の方がA試験片よりかな

Table 1 Coef. de la composante max. de la Contrainte de Cisaillement max. sur les systèmes de glissement {110} - [111] des échantillons expérimentés.

Echantillons	Coef. de la Composante max. de la Contrainte de Cisaillement max. sur les directions [111] dans les plans {110}
FO22S-2-4	0.735
FO16S-1-5	0.671
FO18S-2-2	0.711
FO21S-5-1	0.595

り大きく、迂りやすい状態にある。したがって迂りを生ずる分力係数の大小と内部摩擦の応力依存性の実験結果には密接な関係があることがわかる。

焼鈍状態の試験片でも、中に存在する転位のために限界剪断歪は、理論上の限界剪断歪 10^{-1} よりはるかに小さい約 10^{-5} 付近まで低下する⁽⁸⁾。これに基づいて前報ではFig.4の可逆-不可逆遷移点の最大剪断応力に分力係数を掛けた限界剪断応力約 37 g/mm²、限界剪断歪にして約 10^{-6} がこのときの微視的(工学的に対して)弾性限応力に相当するものと考えた⁽⁹⁾。これに対し本実験のFig.3の場合には約2.5倍に増加し、限界剪断応力は約 95 g/mm²、限界剪断歪にして約 10^{-5} となる。

また他方、結晶方位の異なるA試験片では限界剪断応力約 150 g/mm² までは限界値に達せず、磁場のある場合でも約 210 g/mm² までは限界値に達していない。これに関連して、純鉄単結晶試験片を 100 Oe 以上の磁場中で高周波横振動(振動数不明)によつて内部摩擦測定した際、限界剪断応力約 15 g/mm² で結晶方位には依存しないことが報告されている⁽¹⁰⁾。これは本実験の結果とは著しく異なっている。著者らが純アルミニウム単結晶試験片を、本実験と同じ低周波条件で内部摩擦測定を行なつた結果⁽⁶⁾は、結

(3) D.Polder: Philips Res.Rep., 1 (1946), 5.

(4) L.J.Dijkstra: Philips Res.Rep., 2 (1947), 357.

(5) F.W.Kunz: Acta Mét., 3 (1955), 126.

(6) J.L.Snoek: Physica, 8 (1941), 711.

(7) 舟久保, 岩尾: 本誌, 30 (1966), 1121.

(8) A. H. Cottrell: Theoretical Structural Metallurgy, (1962), 228, Edward Arnold, London.

(9) G.Collette et H.Funakubo: Colloque International sur le Fer de très haute Pureté, Paris, Sépt. (1966).

(10) R.R.Hashiguti, N.Igata and M.Ueki: Acta Mét., 12 (1964), 947.

晶方位に関係なく 限界剪断応力は約 118 g/mm² で、これは他の実験結果⁽¹¹⁾ で得られた値とほぼ等しい。アルミニウムの場合にくらべ純鉄が基礎的性質上非常に異なる点は、 $\{110\}$ の他に $\{112\}$, $\{123\}$ 面も考えられること、応力による磁化の変化があることである。鉄の場合の分力係数を $\{110\}$ 面以外のものについて、A, B両試験片について計算した結果も Table 2 に示したが、このような

Table 2 Comparaison des Coef. de la Composante max. sur $\{110\}$, $\{112\}$ et $\{123\}$ des Contraintes de Cisaillement max. des éprouvettes A et B.

Eprouvettes	Coef. de la Composante max. de la Contrainte de Cisaillement max.
B	$(\bar{1}01) \langle \bar{1}11 \rangle$ 0.735
	$(112) \langle \bar{1}11 \rangle$ 0.675
	$(213) \langle \bar{1}11 \rangle$ 0.727
A	$(0\bar{1}1) \langle \bar{1}11 \rangle$ 0.595
	$(12\bar{1}) \langle \bar{1}11 \rangle$ 0.678
	$(132) \langle \bar{1}11 \rangle$ 0.666

迂り系が働いても限界剪断応力が $\{110\}$ の場合にくらべ大きく異なることはない。したがって、鉄の場合磁場の中で限界剪断応力値が大きくなり、とくに $\{110\}$ [100] 方位をもつ A 試験片の場合に著しい点に問題があるといえよう。Fig. 6 の実験条件では、磁化容易方向である $(100) \langle 100 \rangle$ は、振りの剪断応力の方向であり、これに直角な $\langle 100 \rangle$ 方向は試料軸でかつ磁場をかけた場合の磁化の方向であ

(11) B. Jaoul et I. Bricot: Rev. Méta., **52** (1955), 629 および Etude de la plasticité et application aux Métaux, Duno1, (1965), 284.

る。このような条件下で測定された限界値が他の方位のもの3倍以上になる点については、今後さらにこれにおよぼす不純物、格子欠陥などの影響とともに検討を要する。

なお、高周波測定が本実験と異なる結果を示したことについては、最大剪断応力方向、試験片寸法、振動数、実験温度など試験片の機械的、磁氣的性質⁽¹²⁾に影響を与える因子にも差異があつたと考えられ、簡単には比較できない。

V. 総 括 お よ び 結 語

150 Oe の磁場中で結晶方位の異なる純鉄単結晶試験片の応力による内部摩擦変化を測定し、つぎの結果が得られた。

(1) 試料面が $\{100\}$ 、試料軸が $[100]$ に近い試験片の内部摩擦変化は磁場をかけない場合とほぼ同様で、方位がこれからずれるにつれて磁場の効果は著しい。

(2) 応力の増加に伴なつて生ずる内部摩擦の可逆 - 不可逆変化現象の限界点は、 $\{100\}$ [100] 試験片では大きく、330 g/mm² までの測定範囲内では認められず、方位がこれからずれるにつれて小さくなる。

(3) 応力による内部摩擦変化は主として迂りに起因するものと考えられる。

終りに本実験実施に当り、貴重な討論をいただいた金属材料技術研究所 電磁気材料研究部 前田 弘技官、本実験装置の試作に御協力いただいた同所技術課 信田茂雄、星 勉両技官に厚く謝意を表します。

(12) J.L. Snoek: Physica, **5**, 8 (1938), 663.