539.43:539.26:620.179.152

X線による金属材料疲れ破損に関する研究*

(鑄鉄および鑄鋼材料に繰返し応力が作用する場合の
X線回折線半価幅の変化について)

平 修 二**, 本 田 和 男**

X-Ray Study on Fatigue of Metals

(On a Change of Half-Value Breadth due to Stress Cycles
of Cast Iron and Cast Steel)

by Shuji TAIRA and Kazuo HONDA

As a continuation of previous investigation concerned with fatigue of steel, the fatigue process in cast iron and cast steel is studied by observing the half-value breadth of intensity distribution curves taken from X-ray diffraction lines. X-ray photographs were taken at several stages of fatigued specimens subjected to rotary bending. It is found that the fatigue process of cast iron and cast steel is similar to that of steel from the stand point of the change of half-value breadth.

Results conducted are as follows:

(1) As pointed out in the previous papers, on a view of the half-value breadth variation during stress repetition, it is considered that the fatigue process consists of the three sequent stages, that is,

(a) A stage in which the half-value breadth changes markedly with stress cycles (the first stage of fatigue)—in the process, the work hardening is considered to occur.

(b) A stage in which the half-value breadth changes steadily with stress cycles (the secondary stage of fatigue)—the fatigue fine cracks are initiated and grow by the micro-stress concentration around micro-cracks due to stress cycles.

(c) A stage in which the half-value breadth steeply varies until fracture occurs (the tertiary stage of fatigue)—in the process it is considered that the visible cracks, which lead to fracture, are initiated.

(2) At the end of the secondary stage of fatigue the half-value breadth has a constant value irrespective of the magnitude of alternate stresses.

(3) The relation between b/B and $\log n/N$, where b and B are the current and the initial value of half-value breadth and n and N are the current and ultimate number of stress cycles respectively, is represented by a straight line irrespective of magnitude of alternate stress applied. This relation offers the possibility of the non-destructive prediction of fatigue life.

1. 緒 言

筆者らはX線を用いて金属材料の疲れに関する研究を行ないつつあるが、前報までにおいて炭素鋼の焼なまし⁽¹⁾、加工⁽¹⁾、焼入れ⁽²⁾、および焼入れ後種々の温度で焼もどしを行なった材料⁽³⁾に繰返し応力が作用する場合の(310)面、および(211)面回折線の半価幅の変化を観察し、その結果に基づいて疲れの機構につい

て少しく考察を加えるとともに、実用面において重要課題とされている疲れ寿命の非破壊的予知の可能性について述べた。その結果を要約すると次のごとくである。

(1) 炭素鋼の焼なまし材においては(310)面回折線半価幅 b の値は繰返し数 N の増加とともに著しく変化し、かつ3段の変化過程を経て増加する。しかもこの場合の破壊前の半価幅 b の値は負荷応力のいかんにかかわらずほぼ等しい値を示す。

(2) 加工材および熱処理材にあっては逆に3段の変化過程を経て減少し、この場合も破壊前の半価幅 b

* 昭和35年4月2日 第37期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和35年10月27日。

** 正員、京都大学工学部(京都市左京区吉田本町)。

の値はほぼ一定値を示す。

上記実験結果を $b/B - \log n/N$ (B は半価幅の初期値, b は任意の応力繰返し後の半価幅の値, N は破壊繰返し数, n は b に対応する任意の繰返し数) の間の関係で示せば負荷応力に無関係にほぼ 1 本の直線により近似され, この関係を応用すれば疲労度の非破壊的予知の可能性が生れる。

疲労度を非破壊的に予測することは実際面においては非常に切実な問題であるため, 従来より磁気的方法⁽⁴⁾ および超音波による方法^{(5)~(6)} などにより研究が進められてきた。しかし疲れ現象が非常に局所的で, しかも結晶粒内の微視的变化であるため疲労度の予知はほとんど不可能なものとされてきた。

X 線を用いれば観察を物体表面の局所に限定することができ, 微視的構造変化に敏感であるため, この構造変化をめいりょうにとらえることができるので, 上述のごとき半価幅の規則的な変化を疲労度の非破壊的予知の方面に発展させたいと考え, 工業用材料として炭素鋼に次いで多量に用いられる鋳鉄, および鋳鋼材料について実験的研究を行なった。

2. 実験方法

2.1 試験片 本実験においては第 1 図に示すごとく小野式回転曲げ疲れ試験片を用いた。その成分分析値は第 1 表 (鋳鉄) および第 2 表 (鋳鋼) に示す。試験片は鋳造後柱状組織を完全に除去し, ひずみ取り焼なましを行なった後, 旋盤加工により所定の形状寸法に仕上げた。これをそのまま試験片として用いたものを以後加工材と呼び, これにふたたび 600°C で 2 時間ひずみ取り焼なましを行なったものを焼なまし材と

第 1 図 試験片形状

第 1 表 鋳鉄試験片分析値 %

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
3.31	1.74	0.72	0.133	0.118	0.15	<0.10	<0.21

第 2 表 鋳鋼試験片分析値 %

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.25	0.29	0.70	0.018	0.017	0.18

第 3 表 試験片耐久限度 kg/mm^2

鋳鉄焼なまし材	鋳鉄加工材	鋳鋼焼なまし材	鋳鋼加工材
8.5	9.0	17.0	21

称した。加工材の加工度は不明であるが切削の場合, できうる限り同一の加工ひずみをうるよう 1 回の切削量, および切削の速度を調整した。

2.2 疲れ試験 本実験に用いた疲れ試験機は小野式回転曲げ疲れ試験機であり, 得られた疲れ限度は第 3 表に示すとおりである。実験は第 3 表に示す疲れ限度の上下数種の負荷応力段階で疲れ試験を行ない, Co の $K\alpha$ 線による (310) 面回折線の半価幅の変化を測定した。

2.3 X 線写真および半価幅の測定法 X 線写真は前報⁽¹⁾におけると同様, 応力繰返しの任意の段階で試験機の運転を中止し, 試験片を背面反射カメラに取付け, 常に試験片を定速で回転せしめて X 線撮影を行なった。二次電圧, および管電流はおおの 30 kV, 15 mA 一定とした。得られた X 線写真の実例を第 2 図 (a), (b) および第 3 図 (a), (b) に示す。第 2 図 (a), (b) は鋳鉄焼なまし材に繰返し応力を加えた場合の (310) 面回折線の変化の状態を示すものであり, 応力繰返しを与えれば X 線回折線幅が増加することが観察される。第 3 図 (a), (b) は鋳鋼加工材に疲れ限度以上の繰返し応力を加えた場合の X 線回折線の変化の状態を示す。X 線回折線幅は繰返し応力により著しく減少することが認められる。

半価幅 b の測定には, 得られた X 線フィルムを自動記録式マイクロフットメータにかけ黒化度の自記曲線を

(a) $N=0$ (b) $N=5 \times 10^5$

$\sigma = 10.0 \text{ kg}/\text{mm}^2$

第 2 図 鋳鉄焼なまし材

(a) $N=0$ (b) $N=5 \times 10^5$

$\sigma = 23.0 \text{ kg}/\text{mm}^2$

第 3 図 鋳鋼加工材

とり, これより半価幅を測定した. 黒化度の自記曲線より半価幅を測定するのであるが, その方法として前報⁽¹⁾においては焼なまし材, 加工材ともに (310) 面回折線 $K\alpha_1$ および $K\alpha_2$ 線による黒化度曲線につき, 第4図 (a), (b) に示すように, 高さの半分の位置における半価幅を測定した. しかしこのような方法は全く簡便法であって, ただ回折線幅の応力繰返しによる変化を調べる点では問題はないが半価幅のもつ物理的意義から考えればはなはだ疑問な点が多い. しかしながら物理的に厳密な意味で提案されている半価幅の決定法^{(9)~(11)}を採用することは本研究の目的からすればあまりにも取扱いが複雑で, 多くのデータを処理するには難点があり, また求める変化量が大きいため実際上かかる厳密さを必要としないと筆者は考える.

本実験においては前報における半価幅の測定法を改め, 第4図 (c) および (d) に示すとき測定法を用いた. すなわち焼なまし材の場合は第4図 (c) に示すような方法で $K\alpha_1$ 線のみの半価幅の値を測定し, 加工材の場合は $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線の分離を試み, 焼

なまし材の場合と同様 $K\alpha_1$ 線のみの半価幅を求めることを試みた. 本方法は前報において用いた便宜的方法に比し, さらに改善された方法と考えられ, 焼なまし材, 加工材ともに $K\alpha_1$ 線のみの半価幅を求める点において統一的にその半価幅 (微視的ひずみ量) を対比できるものとする. 加工材の場合の半価幅の測定法を次に簡単に述べる. 第4図 (d) において,

(i) 回折強度分布曲線の基準線 A-B を引き, この直線が回折強度分布曲線と接する点を C および C' とする.

(ii) $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線間の距離 e を計算で求める (この距離 e は焼なまし材の場合の回折強度最大点間の距離を実測することによっても求める).

(iii) C および C' 点より距離 e に等しく E および E' を求め, E, E' を通って水平線 A'-B に垂線を引き, この直線が回折強度分布曲線と交わる点を G および G' とする. 曲線 C-G は $K\alpha_1$ 線の影響を, 曲線 C'-G' は $K\alpha_2$ 線の受けない真の回折強度曲線と言える.

(半価幅) $b = b' \cos \theta$

(a)

(半価幅) $b = 2b' \cos \theta$

(c)

(半価幅) $b = b' \cos \theta$

(b)

(半価幅) $b = 2b' \cos \theta$

(d)

第4図 X線回折線半価幅の測定法

(iv) $C'-E$, $C-E'$ の中点を通して直線 $A'-B$ に垂線を引き、これが回折強度分布曲線と交わる点を h_1 および h_2 とすると、これが $K\alpha_1$ および $K\alpha_2$ 線の回折強度最大の位置である。

(v) 曲線 $F-E'$ を h_2-h_2' に関して GC の対称の位置に求める。 $F-E'$ が h_1-h_1' と交わる点を H とすると $H-h_1'$ だけ $K\alpha_1$ 線の回折強度 (h_1-h_1') は影響を受けることになる。ゆえに $h_1'-H$ に等しく h_1-H' をとれば回折強度 $H'-h_1'$ が真の $K\alpha_1$ 線のみによることになる。

(vi) 求める半価幅は $(H'-h_1')/2$ の点における値を焼なまし材 [第 4 図(c)] と同様にして求めればよいことになる。

本方法といえども完全な方法とは言い難く、とくに作図法を用いるための誤差、および基準線の引き方により相等影響を受けることはいうまでもない。本研究では第 4 図 (d) に示すごとく回折強度分布曲線の曲率が急激に変化する点間を結ぶ直線をいちおう基準線として求めることにした。しかしこの問題は今回の実験のごときフィルム法によらず、ディフラクトメータ法を採用することにより解決をみるものと考えている。フィルム法による方法を採用している限りにおいては厳密な基準線の決定はほとんど不可能なものと考え、半価幅の測定法および再現性に関しては現在検

討中であり、近く報告の予定である。

3. 実験結果

3.1 焼なまし材 第 5 図は鑄鉄の焼なまし材に耐久限度以上の 12 kg/mm^2 , 10 kg/mm^2 および耐久限度以下の 8 kg/mm^2 の 3 種類の負荷応力を加えた場合の半価幅 $b \text{ mm}$ と応力繰返し数 N の間の関係を求めたものである。第 6 図は鑄鋼の焼なまし材に耐久限度以上の 30 kg/mm^2 , 25 kg/mm^2 , 20 kg/mm^2 , 耐久限度以下の 15 kg/mm^2 , および 10 kg/mm^2 の 5 段階の負荷応力を加えた場合の回折線半価幅 $b \text{ mm}$ と応力繰返し数 N の関係を求めたものである。

第 5 図、および第 6 図からわかるごとく両材料ともに負荷応力が耐久限度以上の場合、回折線半価幅 b は応力繰返し数の初期に急激に増加し、以後は比較的徐々に、破壊前ふたたび急激に増加する。このような現象は前報炭素鋼において得られた結果と同様であって、疲れの過程を (310) 面回折線半価幅の変化でみる

第 5 図 鑄鉄焼なまし材 $b-N$ 曲線

第 6 図 鑄鋼焼なまし材 $b-N$ 曲線

第 7 図 鑄鉄焼なまし材 $b/B-\log N$ 曲線

第 8 図 鑄鋼焼なまし材 $b/B-\log N$ 曲線

とき3段の変化を示すことが確認される。負荷応力が耐久限度以下の場合は、第1段階、第2段階の過程はめいりょうにあらわれ、ある繰返し数以後は一定値をとる。

第5図および第6図において得られた結果を、半価幅の変化比 b/B (B は半価幅の初期値, b はある応力繰返し点における半価幅の値) と応力繰返し数 $\log N$ の関係において示したのが第7図および第8図である。耐久限度以上の負荷応力の場合はわずかにこう配を異にする直線により表わされる。しかも第2段階より第3段階に移る点の b/B の値はそれぞれの負荷応力に対してほぼ等しい値を示す。耐久限度以下の負荷応力の場合は耐久限度以上の場合と異なり、ある繰返し数以後は横軸に平行となる。

3・2 加工材 第9図および第10図は鋳鉄、および鋳鋼の加工材に耐久限度以上の 14.0 kg/mm^2 , 10.0 kg/mm^2 (鋳鉄), 35.0 kg/mm^2 , 31.0 kg/mm^2 , 27.0 kg/mm^2 , 23.0 kg/mm^2 (鋳鋼), および耐久限度以下の 6.0 kg/mm^2 (鋳鉄), 19.0 kg/mm^2 , 15.0 kg/mm^2 (鋳鋼) の各種の繰返し応力を加えた場合の半価幅 b の変化と応力繰返し数 N の関係を求めたものである(加工材の場合は加工ひずみの不均一性に基く初期値 b に少々の差異を生ずるので個々の試験片の平均値をもって初期値 b を決定した)。

この場合も前報炭素鋼について得られた結果と同様、応力繰返しの初期に半価幅 b は急激に減少し(第

第9図 鋳鉄加工材 $b-N$ 曲線

第10図 鋳鋼加工材 $b-N$ 曲線

1段の減少), その後比較的徐々に(第2段の減少), 破壊前ふたたび大きく減少する(第3段の減少)。特に鋳鋼の場合は破面のX線回折線半価幅の値をも同時に印で示した。また図中の $\oplus$ 印は $b/B - \log n/N$ 曲線(第16図および第17図)の破断前の値をそう入したもので実測値ではない。

第11図および第12図は半価幅の変化比 b/B と $\log N$ の関係を求めたものである。この場合も耐久限度以上の負荷応力が作用する場合は、こう配を少々異にする直線により示される。また負荷応力が耐久限度以下の場合は、ある繰返し数以後(第2段階)は焼なまし材の場合と同様横軸にはほぼ平行な直線により示される。また加工材の場合も破壊前の b/B の値は負荷応力に関せずほぼ等しい値を示す。

4. 実験結果の考察

筆者らは前報において炭素鋼の焼なまし材に繰返し応力が作用する場合のX線回折線はん点のばけ, およびそのばけたはん点の位置の微小変化, 加工材, および熱処理材に繰返し応力が作用する場合のX線回折線の鮮鋭化, 焼入れ後焼もどしを行なった材料の回折はん点の位置の移動などの現象より, X線回折線半価幅の変化に影響を及ぼす主因子は micro-stress であ

第11図 鋳鉄加工材 $b/B - \log N$ 曲線

第12図 鋳鋼加工材 $b/B - \log N$ 曲線

り、二次的因子としてすべり帯の発生に基く結晶粒の fragmentation の影響および種々の格子欠陥の影響が考えられることを述べた。本論文においては、(310) 面回折線の半価幅の変化を疲れの機構との関係においてさらに考えてみたいと思う。

一般に金属材料に繰返し応力が負荷されれば、次に示す関係式に従って特定の結晶粒内で、しかもある特定の結晶面で塑性変形(すべり)を起すものと考えられる。

$$\tau = \mu \sigma_n^{(12)}$$

τ はすべり面の臨界せん断応力、 μ は方位係数、 σ_n は真応力を表わす。すなわち、本実験に用いたとき体心立方金属においては(110)、(123)、(112)面などがすべり面として作用することが考えられ⁽¹³⁾、しかも上記の関係よりこれらのすべり面が負荷応力の方向に対し、そのすべり面の臨界せん断応力 τ 以上の応力が作用する方位にある結晶粒内ですべり変形が起るものと考えられる。したがって疲れ破損がすべり帯の発生に基くとする従来の研究結果より考えれば、筆者らが追求している(310)面回折線の半価幅の変化は、疲れ破損そのものの進行度を観察しているものではなく、破損の進行に伴う結晶粒内の微視的变化を(310)面回折線の半価幅の変化を通じて観察していることになる。このような考えのもとに以下半価幅の変化を疲れの機構との関係において考察することにする。

4-1 焼なまし材 焼なまし材に繰返し応力が負荷されれば上述のごとく、ある特定の結晶粒内で、しかもある特定の結晶面ですべりが優先的に起るものと考えられる。Wood⁽¹⁴⁾、Gough⁽¹⁵⁾、Hempel⁽¹²⁾、Head⁽¹⁴⁾、Forsyth⁽¹⁶⁾らの金属学的研究によればすべり線は応力繰返し数の比較初期に現われる。またこのすべり線は応力繰返し数 N の増加とともにその幅を増加し、普通の塑性変形においてみられるとき著しいすべり帯の発達とは認められない。ゆえに応力繰返し数の比較初期においては、すべり帯の発生に基く加工硬化の現象が起りうるものと考えられる。すなわち、すべり面上で転位源において形成された転位はすべり面上をすべり方向に沿って移動し、結晶粒界、析出物、不純物などに出会えばたい積することが考えられ、したがって加工硬化を起しX線回折線の半価幅は加工硬化曲線と同様、放物線的に増加することになる。次に負荷応力が逆の方向に作用する場合も同様であって、すべりはその結晶面における臨界せん断応力の大きさが転位の集積による逆応力の大きさと平衡するまで進行するものと考えられる。疲れの場合は負荷応力の大きさが全過程を通じて不変であるため、加工硬化は応

力繰返し数の比較初期に飽和値に達することが考えられる。筆者らが称している疲れの第1段階は、この過程をいうのであって、応力繰返し数の比較初期における半価幅の急激な増加は加工硬化によるものと解釈される。

上のごとき考えはかたさがある繰返し数の点で最大値を示すという事実⁽¹⁷⁾、および残留応力の値が 10^5 繰返し数近傍で最大値を示し以後減少するという実験結果⁽¹⁸⁾とも一致する。

すべり帯の端に転位が集積すればそのまわりには応力の集中が起ることが推察され、したがってここで micro-crack が発生することが考えられる。すなわち第1段階で発生、蓄積された micro-stress は fine crack の発生を促し、この fine crack の発生、および成長に伴って micro-stress は減少するものと考えられ、したがってかたさ、残留応力などは下降するものと想像される。しかしながらX線の場合は micro-crack の発生に伴う局所的応力集中(micro-crack とマトリックス間の表面における micro-stress の差)および結晶の不完全性の増加などの影響のために回折の規則性は乱され、半価幅の値は徐々に増加の傾向をたどるものと考えられる。この段階における micro-crack の成長に必要なエネルギー(micro-stress)はすべり帯とマトリックスの境界におけるエネルギー差(応力の集中と考えてもよい)により与えられるものと想像される。ゆえに上述の考えから筆者らは第2段階における半価幅の増加過程は micro-crack の発生、成長によるものと解釈している。

また第2段階において成長した micro-crack がある臨界の大きさになれば、急激に材料を破壊に導く半巨視的割れに成長するものと考えれば、第2段階終了点における半価幅の値が負荷応力のいかにかわらずほぼ一定値を示すことが理解される。第3段階における半価幅の急激な増加過程は半巨視的割れの成長によるものであり、この過程においては結晶粒の fragmentation も相当に進行するものと考えられ、第1段階、および第2段階とは全くその機構を異にするものである。

4-2 加工材 前報においては加工材に繰返し応力が作用する場合のX線回折線半価幅の減少過程に対しては、初期の加工により結晶粒内には全く at random な方向のひずみが存在し、このような状態にある結晶粒に一定方向、および大きさの繰返し応力が作用すれば、ひずみの方向が繰返し応力の方向に整方位化されると同時に、焼なまし材において起るがごとき材料を破壊に導く方向の変化も同時に進行するであろうとの

抽象的説明を行なった。すなわち、加工状態にある金属結晶中には相当高度の内部応力、塑性変形に基く結晶粒の微細化、および種々の格子欠陥が存在するものと考えられる。

いま最も簡単に図式的に加工状態にある金属結晶の状態を刃状転位の集積によるものとすれば第13図のごとく描き得る(A-B, A'-B', A''-B'' はすべり面)。このような状態の金属結晶にX線が入射すれば当然回折線の幅は広がるのが考えられ、またある特定方向、および大きさの繰返し応力が作用すればすべり面 A-B, A'-B', A''-B'' ですべりが起り、初期にすべり面上に集積していた転位は繰返し応力によるエネルギーを得てより安定な位置に移動し配列を換えることが考えられる。この場合の転位の運動に対しては初期に存在する格子欠陥などが影響を及ぼすことはいままでのない。このような考えに対する実験的事実はまだ見当たらないが Forsyth⁽¹⁹⁾ による実験結果、および Stokes⁽²⁰⁾ による加工軟化に対する考えとも相通ずるものであると考えられる。すなわち、加工材に繰返し応力が作用する場合の半価幅の値の著しい減少は、ひずみ方向の整方位化(内部応力の回復による減少)によるものと考えられる。

しかし他方においては前述のごとく焼なまし材において述べたごとき半価幅の値を増加せしめる方向の変化も同時に進行し、筆者らが観察している半価幅の変

第 13 図

第 14 図 鑄鉄焼なまし材 b/B - $\log N$ 曲線

化には常に前者の影響が優先的に観察されるために、加工材に繰返し応力が作用する場合は、半価幅の値は常に減少することになる。

5. 実験結果の応用

筆者らは前報におけると同様、本実験において得られた b - N の関係を半価幅の変化比 b/B と応力繰返し数比 $\log n/N$ の関係で示したのが第14~17図である。炭素鋼において得られた結果と同様、焼なまし材の場合は単調に増加する1本の直線、加工材の場合は単調に減少する1本の直線(ともに負荷応力に無関係)で近似されうることが認められる。ゆえに本研究結果を換言すれば、半価幅の値をX線で非破壊的に測定することができれば、対応する応力繰返し数比 n/N が求まり、したがって炭素鋼における場合と同様、疲労度の非破壊的検出の可能性が存在することになる。

実際疲労度をうんぬんするには、負荷応力が変動する場合について本研究を実施すべきであることはいままでもなく、この問題については近く報告する予定である。

6. 結 論

前報炭素鋼について得られた結果を鑄鉄、および鑄鋼について検討を加えた結果次のような結論を得た。

(1) 鑄鉄および鑄鋼の焼なまし材、加工材に繰返し応力が作用する場合のX線回折線半価幅 b の変化は、ほぼ炭素鋼における場合と同様3段の増加(焼なまし材)、および3段の減少(加工材)過程をたどって破壊するに至る。

(2) 半価幅の変化比 b/B と応力繰返し数比 $\log n/N$ の関係は、これも前報同様負荷応力に無関係にほぼ1

第 15 図 鑄鋼焼なまし材 b/B - $\log N$ 曲線

本の直線により近似され、本法による疲労度の非破壊的検出の可能性の存在が認められる。

(3) 焼なまし材および加工材の両者につき半価幅の変化を測定した結果から、焼なまし材の場合の疲れの過程を (a) 加工硬化過程, (b) micro-crack の発生, 成長の過程, (c) 半巨視的割れの発生, 成長の過程, 加工材の半価幅の減少の過程は micro-stress の回復によるものと考えられる。

終りに、本研究を遂行するに当たり試験片の提供を賜った神戸製鋼所および同研究所 山本俊二技師に對して厚くお礼申上げる。

文 献

- (1) 平, 本田, 機械学会論文集, **26**, 167 (昭 35-7), 926.
- (2) 平, 本田, 日本金属学会誌, **24**, 6 (昭 35-6), 331.
- (3) 平, 本田, 日本金属学会英文誌, **1** (1960), 17.
- (4) 上田, 田中, 日本金属学会誌, **17** (昭 28), 17.
- (5) 榎木, 藤井ほか 2 名, 機械学会論文集, **24**, 139 (昭 33-3), 161.
- (6) I. Konishi, Y. Sawaragi, & Others, *Proc. 1st. Japan Congr. Test. Mater.* (1958), 41.
- (7) W.P. Mason, *Piezo-electric crystals and their application to ultrasonics*.
- (8) 榎木, 藤井, 明石, 寺石, 関西支部 35 期定時総会講演会前刷, 講演番号 411 (昭 35-3).
- (9) F. W. Johnes, *Proc. Roy. Soc. Lond., Sec. A*, **166** (1938), 16.
- (10) L.G. Finch, *Nature*, **163** (1949), 402.
- (11) A.R. Stokes, *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **61**, (1948), 382.
- (12) M.R. Hempel, *ASTM Spec. Tech. Publ.*, No. 237 (1958).
- (13) E. Schmid Z. *Electro. Chem.*, **37**, (1931), 447.
- (14) F.P. Bullen, A.K. Head, & W.A. Wood, *Proc. Roy. Soc. Lond., Sec. A*, **216** (1953), 332.
- (15) H.J. Gough, *Proc. ASTM*, **33** (1933), 3.
- (16) P.J.E. Forsyth, *J. Inst. Metals*, **80** (1951-52), 181.
- (17) 平, 村上, 材料試験, **9** (昭 35), 374, 372.

第 16 図 鋳鉄加工材 b/B - $\log N$ 曲線

第 17 図 鋳鋼加工材 b/B - $\log N$ 曲線

- (18) 永井, 金属物理, **5** (昭 34), 29.
- (19) P.J.E. Forsyth & C.A. Stubbington, *J. Inst. Metals*, **83** (1954), 173.
- (20) 日本金属学会編, 転位論の金属学への応用 (昭 28), 丸善.

雑誌複写料金について

本会においてはかねてより雑誌の複写に応じております。下記によりお申込みください。

料 金 (各フィルム付)

四 切 (200 mm×300 mm) 1 枚 70 円

八 切 (150 mm×200 mm) 1 枚 40 円

キャビネ (100 mm×150 mm) 1 枚 30 円

フィルム (35 mm×25 mm) 1 枚 20 円

料金は必ずお申込みと同時に本会へお申込みください。複写に応ずる雑誌は本会備付のものに限りま
す。期間は受付けてから、10~20 日間です。送料本会負担。なお学会誌文献紹介欄の文献紹介番号で
お申込みの方がおられますが、間違いが多いので、必ず申込方法に従ってご記入願います。

申込方法: 下記事項をご記入の上お申込みください。

- (1) 雑誌名 (2) 著者名 (3) 題名 (4) 年次 (5) 巻号数 (6) ページ
- (7) 大きさ (四切, キャビネ等) (8) 送付先 (9) 依頼者氏名 (ふりがな付)。