539.431 : 539.388.1 : 669.35' 5-191

繰返し応力によって 7-3 黄銅が受ける被害について*

石 橋 正**

Fatigue Damage of 7-3 Brass Specimens

by Tadasi ISIBASI

The nature of the fatigue damage of 7-3 brass specimens is quite the same as what occurs in 6-4 brass or in low carbon steel specimens. The damage is confined within a thin surface layer of the specimen and cannot be removed by stress relief annealing. The thickness of the damaged layer becomes greater when the applied stress is high and the number of the stress repetitions is large. The fatigue stressing hardens the material which, however, disappears by stress relief annealing.

By taking x-ray diffraction patterns of the surface as well as of the portions beneath the surface of the specimens, it was revealed that the distortion and fragmentation of the grain in fatigued specimens decrease as the distance of the irradiated grain from the surface increases and it was concluded that, as the thickness of the severely damaged layer reaches some threshold value (of one or two grains thickness), fatigue cracks develop there which, in most cases, lead the plain specimens to break down eventually.

1. ま え が き

焼なまし研摩を繰返し行なって 6-4 黄銅試験片が回転曲げ疲れ試験で受ける被害をしらべた結果明らかになったことは⁽¹⁾⁽²⁾

(1) 疲れ限度以上の応力の繰返しによって試験片が受ける被害は、試験片の表面に著しく集中し、被害を受けた層の厚さは繰返し数の増加とともにしだいに増すが、試料の表面が受ける被害は応力除去焼なましでは除去できない。

(2) 被害層の厚さの増加は結晶粒を単位として進むように思われる。すなわちまず試料の表面に位する結晶粒子が被害を受け、応力の繰返しとともに被害は第 2 層の粒子、第 3 層の粒子へと進む。

(3) 繰返し応力の影響は試料の表面ばかりでなくその内部にも及ぶが、内部の被害は応力除去焼なましで大部分除去される。

以上の結論を得た実験に用いた材料は 6-4 黄銅あるいは低炭素鋼 (0.35% C) で、これらは単相合金でないから被害の拡大には相の混在が影響しているかも知れない。この不安を除くことと、上に得られた実験結果を確かめる意味で単相合金 7-3 黄銅について実験を行なった。それとともに X 線の回折像をとって被害の進行状況について観測した。この論文はそれら

の実験結果を述べ、実験結果から推察される疲れ破壊の内容について説明したものである。

2. 実験材料と実験方法

実験に使用した材料は 7-3 黄銅 (69.85% Cu, Pb trace, 0.01% Fe, balance Zn) で住友軽金属工業会社の竹内勝治博士から寄贈を受けた外径 17 mm の焼なまし (470° または 475°C, 2 h) 抽伸丸棒である。平均の結晶粒度は 0.03~0.04 mm 程度になっている。試験片はいずれもこれらの棒から作った。

材料の顕微鏡組織を第 1 図に示す。第 1 図 (a) は素材 (焼なまし材)、第 1 図 (b) は応力 $\sigma=14.5 \text{ kg/mm}^2$ を $N_1=0.57 \times 10^6$ 回繰返すごとに焼なまし (焼なまし回数 18 回) 応力の総繰返し数が 13.451×10^6 回で破壊した試験片の表面付近、また第 1 図 (c) は 19 回の焼なまし (各回 400°C, 30 分) を経た後応力 14.5 kg/mm^2 を約 1.74×10^6 回繰返して破断したものの表面付近の組織である。

材料の機械性質 (14 本の平均値) は $\sigma_{0.2}=13.2 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_B=35.8 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma_T=104.2 \text{ kg/mm}^2$, 伸び $\varphi=66\%$, 絞り 74% で数値のばらつきは非常にすくない。

疲れ試験片の試験部分の直径は約 11.05 mm で、表面を電解研摩した試験片の回転曲げ疲れ限度は約 13.0 kg/mm^2 , その S-N 曲線は第 2 図に示すとおりで、応力繰返しの速さは毎分約 2500 回である (電解

* 昭和 38 年 4 月 2 日 第 40 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 38 年 6 月 3 日。

** 正員、九州大学工学部 (福岡市箱崎町)。

研摩前の機械加工が激しい場合には、その加工の影響は表面下 30μ 以上に及ぶ場合があることが、X線回折で明らかになったけれども、第2図の S-N 曲線は表面をペーパー仕上げした後電解研摩で表面を約 30μ 除去した試験片を用いて求めたものである。

(a) 試験片番号 39
 $\sigma=0$, $N=0$

$\times 200$

(b) 試験片番号 24
 $\sigma=14.5\text{ kg/mm}^2$ で実験
 $N=13.451 \times 10^6$ で破断、その間
 $N_1=0.57 \times 10^6$ 回ごとに焼なまし (400°C , 30 分)
研摩 ($\Delta r \approx 40\mu$) を 18 回繰返す。

$\times 200$

(c) 試験片番号 26
焼なまし (400°C , 30 分) を 19 回繰返した後
 $\sigma=14.5\text{ kg/mm}^2$ で実験
 $N=1.7395 \times 10^6$ で破断

$\times 200$

第 1 図

被害に関する実験の方法は次のとおりである。まず試験片に応力 σ を N_1 回繰返した後、その試験片の表面を研摩紙で Δr_1 の厚さだけ除去した後、それを表面の酸化を防止しつつステンレス管の中で焼なまし (400°C , 30 分) する。次に焼なました試験片の表面を Δr_2 だけ電解研摩して除く。取除くべき層の厚さが薄い場合には、ペーパーによる研摩はやめて電解研摩のみによって必要な量を除去する。しかし電解研摩によって除去した層の厚さは本実験のすべてを通じ $30 \pm 3\mu$ であった (X線撮影の場合には 40μ 除去したことがある)。

一つの試験片では σ , $\Delta r (= \Delta r_1 + \Delta r_2)$ および N_1 を一定に保ち試験片が破壊するまで N_1 回ごとに研摩、焼なましの操作 (ペーパー研摩 $\rightarrow$ 焼なまし $\rightarrow$ 電解研摩、これを以下 A.P. 操作という) を繰返す。多くの試験片につき σ , Δr , N_1 をいろいろに変化して被害の性質をしらべたのである。

3. 実験結果とその検討

実験結果を示す以下の図面中に記入の (8), (3)……などの数字は試験片の番号である。各試験片の寿命は肉太の横線上に書いた黒丸に相当する繰返し数で示され、矢印は破断しなかったもの、また短い縦線間の繰返し数が N_1 に相当しこの点線が示す繰返し数ごとに

(白丸に付記した数字は試験片の番号を示す)

第 2 図 表面を電解研摩した試験片の S-N 曲線

第 3 図 応力 13.5 kg/mm^2 の場合

応力焼なまし (A) (400°C, 30 分) および表面層を横線の上に書いた Δr だけ除去 (P) したのである。

A) $\sigma = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ の場合(第 3 図) 番号(11)の試験片は焼なまし, 研摩の処理を施さないで 25.922×10^6 回の繰返しに耐えて破壊しなかったから, $\sigma = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ では破壊しない場合もあると考えねばならぬ。しかし $\sigma = 13.5 \text{ kg/mm}^2$ のもとでの寿命を番号(4)の試験片の寿命, すなわち 12.0537×10^6 と仮定すれば $N_1 = 3 \times 10^6$ ($\cong 0.25 N_0$) とした番号(28)の試験片は $\Delta r = 40 \mu$ で 9 回の A.P. 操作に耐えた。9 回目の A.P. 操作を終って後は表面研摩を行わずに応力を連続して繰返ししたため, 9 回目の A.P. 操作後 18.053×10^6 回の後に破断した。 18.053×10^6 回は番号(4)の試験片の寿命と大差がない。したがって 13.5 kg/mm^2 の応力を 13.5 kg/mm^2 のもとでの寿命の $1/4$ 回だけ繰返しした場合の被害層の厚さは, 約 40μ 以下だと考えられる。しかし繰返し数が寿命の $1/2$ 近くになれば, その間に表面から 80μ 以上に達する部分まで被害が及んでいることがこの図からわかる〔番号(23)の試験片〕であろう。

B) $\sigma = 14.5 \text{ kg/mm}^2$ の場合(第 4 図) 14.5 kg/mm^2 の応力のもとでの寿命は第 2 図からわかるよう

第 4 図 応力 14.5 kg/mm^2 の場合

に約 5.5×10^6 回である。 N_1 ならびに Δr を変化した場合の実験結果を第 4 図に示す。

14.5 kg/mm^2 のもとでの寿命の約 10% の繰返し数ごとに A.P. 操作を繰返した試験片(24)では, $\Delta r \cong 40 \mu$ として 18 回の A.P. 操作を経た後 A.P. 操作を行わずに応力を繰返ししたところ 3.241×10^6 回の後に破断した。破壊までの応力繰返しの総数は約 13.45×10^6 強でこれは $\sigma = 14.5 \text{ kg/mm}^2$ での寿命の 2 倍強にあたる。したがって $\sigma = 14.5 \text{ kg/mm}^2$ のもとで寿命の $1/10$ の繰返し数間に生ずる被害層の厚さは, ほぼ 40μ 程度と考えられる。しかし 18 回の A.P. 操作を繰返した後の破壊までの繰返し数は, 上に述べたように, 3.241×10^6 でこれは 14.5 kg/mm^2 のもとでの寿命の約 $1/2$ に当るから, 材料はすでに 18 回の A.P. 操作中に, なんらかの被害を受けていたと想像される。この被害が A.P. 操作に伴って行なった焼なましの繰返しのために起ったものであるらしいことは後に述べる試験片番号(15), (26)あるいは(29)の結果からもわかる。

表面層を除去することによって試験片の寿命が著しく延びることは, 繰返し応力による被害が表面付近に集中していることを示すものである。第 4 図 (b), (c) などは応力繰返し数が増すにつれて被害層の厚さが増すことを示している。第 4 図 (d) からわかるように 14.5 kg/mm^2 のもとでの寿命の約 $1/2$ に相当する回数だけ応力の繰返しを経た試料では, 被害層の厚さは 160μ (これは約 4 粒子の大きさに相当する) 以上にも及ぶことがわかるであろう。

第 5 図 応力 15.5 kg/mm^2 の場合

C) $\sigma = 15.5 \text{ kg/mm}^2$ の場合 (第5図) 応力 15.5 kg/mm^2 に対する寿命は第2図からわかるように約 3×10^6 回である。 15.5 kg/mm^2 の応力を加えた場合の結果を第5図に示す。この図(a)からわかるように寿命の約11%だけ応力を繰返す場合には、約 40μ (1粒子に相当)の厚さが大きい被害を受けるから、この層を除去すれば繰返し応力の被害はほぼ除去される。番号(15)の試験片は16回のA.P.操作を行なった後 1.52×10^6 回強の応力繰返し後に破壊した。 1.52×10^6 回は 15.5 kg/mm^2 のもとでの寿命の約1/2である。これについては $\sigma = 14.5 \text{ kg/mm}^2$ のもとで実験した番号(24)の試験片について述べたことと同様のことがいえるであろう。第5図(b)から 15.5 kg/mm^2 のもとでの寿命の約1/4の繰返しを受ける間に生ずる被害層の厚さは約 100μ (約3粒子)で寿命の約43%強だけ繰返す場合[第5図(c)]の被害層の厚さは約 200μ (5粒子)以上であることがわかる。

上に説明した実験結果はいずれも繰返し応力によって7-3黄銅が受ける被害は、表面に著しく集中することを示すとともに、被害を受ける層の厚さは応力の増加あるいは繰返し数の増加に伴って増加することを示している。このことは6-4黄銅⁽¹⁾あるいは炭素鋼⁽²⁾で得られた結果と全く同じである。

表面付近の被害はおそらく extrusion あるいは intrusion の発生と深い関連を持つものであろう。しかし上に述べた実験は、大きい被害を受けた表面層を除去しても、試験片の寿命が無限に延びるとは考えられないことを示している。これに関連して気付く第1の点は、A.P.操作を行なう実験では、実験の途中で N_1 回ごとに繰返す焼なまし (400°C , 30分) が試験片の寿命に影響しないかということで、第2の点は応力の coxing の影響である。

第1の点をしらべるため試験片を、A.P.操作時の焼なましのときと同様に、ステンレス製の円筒中に、で

第6図 応力 14.5 kg/mm^2 で試験した試験片番号(9) [第4図(b)参照]の横断面のかたさ分布(直交する直径上の値, 測定面は電解研磨する)

きるだけ空間を少なくして(酸化を防ぐためである)密閉し、疲れ試験片と同様の焼なまし(加熱冷却)を19回繰返した後、表面を約 31μ 電解研磨した試験片を応力 14.5 kg/mm^2 で試験した[試験片(26)]。この試験片は 1.74×10^6 回弱の応力繰返し後に破壊した。 1.74×10^6 回なる繰返し数は供給状態の試験片の 14.5 kg/mm^2 のもとでの寿命 (5.5×10^6 回)の約32%弱である。また番号(29)の試験片(16回焼なまし後、表面を 31μ だけ電解研磨して応力 15.5 kg/mm^2 で実験)の寿命は 2.33×10^6 回弱であった。この繰返し数は 15.5 kg/mm^2 のもとでの寿命 (3.0×10^6 回)の約75%にあたる。75%という数字は寿命のばらつきに近い値であるけれども、これらの結果を上記説明した番号(24)および(15)の試験片の結果などとあわせ考えれば、焼なましの繰返しによって寿命がいくぶん縮まる傾向にあることがわかる。しかし焼なましの繰返しによる結晶粒子の増大は認められなかった(第1図参照)。

応力の coxing の影響は、A.P.操作ごとに試験片の表面を研磨し去るため、実験の初期には表面下に位していた部分が、A.P.操作の繰返しごとに Δr の

第7図 第6図の試験片を焼なましました (400°C , 30分) 場合のかたさ分布 (測定面は電解研磨する)

第8図 被害層の厚さ

厚さずつ表面に近づくために起ると考えられるものであるが, coxing の影響は試料のかたさの増加と密接な関係があると考えられる. したがって coxing が試験片の寿命に及ぼす影響は応力を繰返しした試験片のかたさと, 応力繰返し後焼なましした試験片のかたさとを比較すればほぼ明らかになると考えられる.

この目的のために番号 (9) の試験片 [第 4 図(b)参照; $\sigma = 14.5 \text{ kg/mm}^2$ で実験, A.P. 操作の繰返し 10 回後破壊したもの] の破面から数 mm 離れた部分から試料を切出し, それについてそのままの状態およびそれを焼なまし (400°C , 30 分) した後でのかたさを測定した. 測定結果を第 6 図および第 7 図に示す. この図から, 応力の繰返しによって高まったかたさは上記の焼なましによって低下し常態に復することがわかる. したがって coxing の影響は A.P. 操作によってその都度除去されたと考えてよいように思われる. 結局, 焼なましの繰返しが試験片の寿命をいくぶん弱めるらしいことは確かであるが, その影響は試験片全体にわたって起ると考えるべきであるから, 応力の繰返しによって試験片の表面が, 他の部分よりはるかに大きい被害を受ける事実は焼なましの繰返しによって影響されないと考えてよいであろう.

第 8 図は試験片に加える応力とそれによって生ずる被害層の厚さの関係を示すもので, 図中の上向きの矢印は被害層の厚さがその点が示す値より厚いことを, また下向きの矢印を付けた被害層の厚さはその点が示す値より薄いことを示す.

4. X 線による観察の必要性

疲れ限度の応力では破壊は起らないから A.P. 操作法では, 疲れ限度の応力による被害は測定できない. また A.P. 操作法は次のような種々の疑問に答えることもできない.

extrusion, intrusion は表面に起る現象であるから extrusion, intrusion によって起る被害は, 表面より浅い部分に限られるであろう. 第 9 図で AB は試験

(a)

(b)

(a) 中の肉太線はすべりを示す

(b) 中の d は試験片の直径, σ_{w0} は疲れ限度

第 9 図 説明図

片の表面を示し, $ABB'A'$, $A'B'B'A'$ ……はそれぞれ結晶粒子を意味し, AC あるいは BD はある繰返し数後の被害層の厚さとする. 被害が l の深さまで及んだ後 (すなわち第 1 層の粒子が被害を受けた後) なお応力の繰返しを続けても, $A'B'$ は物体の内部であって自由表面ではないからこの面には extrusion, intrusion は自由表面である AB 面ほど起りやすくない. 回転曲げの場合には, 応力は, 特別の応力集中源が発生しない限り, 表面から内部に向かって減少している. したがって extrusion, intrusion は内部に進むにつれてますます起り難くなる. それにもかかわらず, 被害は前にも述べたように, しだいに内部に進むとすれば,

(a) $ABB'A'$ 部分が被害を受けたために $A'B'$ の応力が著しく増大し extrusion, intrusion によらない被害が起るのではないか.

(b) あるいは $A'B'$ は結晶の境界などであるため自由表面 AB に extrusion, intrusion が生じた結果 $A'B'$ 付近がたとえば porous になり, その小穴が $A'B'B'A'$ 内から新たな extrusion, intrusion の発生を可能にするのではないか.

(c) $ABA'B'$ 部分はほとんど荷重を負担し得ない状態になっていて, そのため $A'B'$ の応力が増大し被害は $A'B'$ より内部に及ぶのではないかなどがそのおもな原因と考えられる. しかし (c) は事実と反すると思われる.

これらの疑問に答えるためには, 被害の程度が試料の自由表面からその内部に向かってどのように変化しているかを知る必要が起る. このため試料表面よりいろいろの深さにある部分の X 線回折像を撮影して観察を行なった.

5. X 線回折像による観察と検計

使用した X 線装置は Norelco および島津製のもので, 対陰極はいずれも Co であるが Norelco では Fe のフィルタを用い, 島津製ではフィルタは用いなかった. またスリットの出口の直径も Norelco では 0.86 mm であるが, 後者では 1.08 mm あるいは 1.53 mm である.

X 線の回折像によって被害の程度をしらべることは, 必ずしも容易ではなくあいまいな点も多い. よってまず回折像によって求めた被害層の厚さが, A.P. 操作で求めた厚さと同じ値を与えるか否かを検査した. 第 10 図は $\sigma = 15.5 \text{ kg/mm}^2$ を $\sim N_0/4 = 0.75 \times 10^6$ 回繰返しした試験片の表面からいろいろの深さにある部分の回折像を示す (Norelco 使用). この図で (17-2) は表面, (17-4) は表面から約 1 粒子深さ (49μ),

(17-5) は表面から約 2~3 粒子の深さ (100μ), (17-10) は表面から 4~5 粒子の深さ (184μ) に位する部分の回折像である。(17-2) では太い点であった回折像は (17-4) ではいくぶん細く鋭くなり, (17-5), (17-10) では鋭さがさらに増している。したがってこの場合大きい変形をした結晶粒子は表面より 2~3 粒子層位以内にとどまっていることを示す。これは第 5 図(b) に示した結果(約 100μ) とだいたい一致する。

第 11 図は $\sigma=15.5\text{ kg/mm}^2$ の応力を寿命の約 43% ($=1.3\times 10^6$ 回) 繰返した試験片の回折像を示す。この図で (16-2) は試験片の表面, (16-3) は表面下約 50μ , (16-5) は表面下約 100μ , (16-7) は表面下約 140μ , (16-9) は表面下約 180μ 付近の写真である。これらの写真から結晶粒子のわん曲などは表面下 180μ (16-9) の深さでも必ずしも緩和されていないらしく見える。これも第 5 図(c) に示した結果とほぼ一致する。

(17-2). 表面

(17-4), 49μ (400)

(222) (311)

(17-5) 100μ (17-10) 184μ

[μ で示した数字は表面からの深さを示す。試験片番号(17)]

第 10 図 応力 $\sigma=15.5\text{ kg/mm}^2$ を 0.75×10^6 ($\cong N_0/4$) 回繰返した後の状態

疲れによる被害が回折像のはん点のぼけによって一義的に表わせるとはむろんいえないけれども、はん点が大きくなっていることは、Wood⁽³⁾たちによれば、結晶粒中に広範囲のすべりが起っていることを示すけれども、たとえすべりが起ってもそれが局部に集中していれば、はん点は鮮鋭になるから、はん点の鮮鋭化のみをもって直ちに被害が無いとはいえないけれども、A.P. 操作で求まる被害層の厚さははん点の広がりか止む部分までであるとみなしてよろしいことが、上に述べたことからわかるように思われる。

第 12 図は平滑材に $\sigma=14.0\text{ kg/mm}^2$ の応力を繰返して破断した番号 (43) の試験片 (第 2 図参照) の表面から種々の深さにおける回折像である (撮影の際フィルタは使用せず)。この材料の疲れ限度は約 13.0

(16-2), 表面

(16-3), 49μ (400)

(222) (311)

(16-5), 100μ (16-7) 140μ (16-9), 183μ

[μ で示した数字は表面からの深さを示す。試験片番号(16)]

第 11 図 応力 15.5 kg/mm^2 を $N_1=1.3\times 10^6$ 回繰返した後の状態

kg/mm² で試験片の直径は約 11.04 mm であるから、表面下約 400 μ までの部分は疲れ限度以上の応力を受けている。第 12 図では表面の回折はん点に認められるぼけは内部に進むにしたがっていくぶん減少し、表面下約 450 μ ではかなり鮮明になり繰返し応力による結晶の変形が著しく減少していることを示している。同様の結果は $\sigma=14.5$ kg/mm² で実験した番号 (32) の試験片 (第 2 図参照) の回折像 (第 13 図) についてもいえる。番号 (32) の試験片では表面下約

580 μ くらいまでの部分が疲れ限度 (13.0 kg/mm²) 以上の応力になっている。第 13 図でも表面下約 600 μ の部分の回折像は第 12 図の 450 μ くらいの部分の像とほとんど同じ様相を呈し、この深さにはもはや繰返し応力の作用がほとんど現われていないことがわかる。

また第 10~13 図からわかるように、はん点が表面より内部に進むにしたがって鮮鋭化することは、被害層中の塑性変形は表面より内部に向かって減少することを示している。応力こう配が存在する本実験では、

(43-1), 表面

(43-2) 200 μ

(400)

(222) (311)

(43-4), 300 μ

(43-6) 400 μ

(43-7), 450 μ

(μ で示した数値は表面からの深さを示す)

第 12 図 応力 $\sigma=14.0$ kg/mm² を $N=5.6439 \times 10^6$ 回繰返しして破断した試験片 (番号 43) の破面より離れた部分の反射像

これは当然のことのように思われるけれども、一方疲れ限度以上の応力を受ける試験片では、第 12, 13 図に示したように、被害層が試験片の中心部まで達せずとも試験片は破壊するから、試験片を破壊に導くものは被害層そのものの発生ではないことがわかる。すなわち被害層がある厚さになれば被害層中にき裂が発生し、そのき裂がその後の応力の繰返しにともなって拡大するため、試験片は破壊すると考えるのが適當のように思われる。

疲れ破壊には必ず塑性変形が先行する。Petch⁽⁴⁾によれば、同一の拘束条件のもとでは結晶粒子が大きいほど応力の集中が大きくなるため、その結晶のすべり抵抗は小さくなる。また大久保たち⁽⁵⁾は繰返し応力の場合にも、Petch がいうように、試験片の表面に位する結晶のうち結晶粒子が大きいほどひずみの集中が大きいことをめっき法によって明らかにしている。したがって疲れ限度以上の大きさの応力の繰返しを受ける試験片では、試料の表面に接する結晶粒子のうち、そ

(32-1), 表面

(32-2) 200 μ

(400)

(222) (311)

(32-3), 280 μ

(32-5), 535 μ

(32-6), 600 μ

(μ で示した数値は表面からの深さを示す)

第 13 図 応力 $\sigma = 14.5 \text{ kg/mm}^2$ を 6.5947×10^6 回繰返しして破断した試験片 (番号 32) の破面より離れた部分の反射像

の寸法が大きいものが小さい寸法の粒子より大きい被害を受けるはずである。

第 9 図の横線を引いた区画は結晶粒子を表わすもので AB が試料の表面である。表面に位する結晶 ABB'A' に extrusion, intrusion が起れば、その結晶ではひずみの集中は減るから、結晶中にき裂が発生する危険性は、extrusion, intrusion が生じない場合より減るであろう。しかし extrusion, intrusion の発生そのものが疲れき裂発生の主原因ならば、最初の疲れき裂は表面の粒子（たとえば第 9 図の ABB'A'）に発生するであろう。また試験片の表面の大きい粒子に接して存在する第 2 層の粒子のうち粒の大きい結晶には、転位の集積が他の粒子より大きく起り得ると考えられるから、もし転位の集積が疲れき裂発生の主原因ならば、き裂は表面下の第 2 層（あるいは第 3 層）の粒子に発生すべきである。

いずれにしても表面付近に発生したき裂が試験片の内部に向かって進む条件が満たされる場合には、試験片は疲れ破壊を起し、しからざる場合には破断しない訳であるから、疲れ限度は試験片の表面付近に疲れき裂が発生しない応力ではなく、たとえき裂は発生しても、それが伝ばしない応力であるという Wadsworth⁽⁶⁾ や渡辺たち⁽⁷⁾ の見解は正しいように思われる。

表面付近に疲れき裂が発生する条件は被害層の厚さと密接な関係があり、表面からある深さまでの部分（この深さを ϵ_0 とかく）が少なくとも疲れ限度以上の応力を受けることが必要のように思われる。 ϵ_0 間が疲れ限度以上の応力を受けて著しい被害を受ければ、 ϵ_0 間に微細なき裂が発生しそれが拡大するか否かで試験片が破壊するか否かが決まるとすれば、このような考えは切欠き材の疲れ限度については、すでに多くの実験によってある程度確認されていることである。

6. 結 論

繰返し応力によって 7-3 黄銅が受ける被害は、試験片の表面付近に著しく集中し、応力焼なましでは回復し得ないものである。この被害は主として extrusion, intrusion の発生によるものであろう。かかる意味の表面層以外の部分に起る被害（変化）は応力焼なましによって除去し得る性質のもので加工硬化が主である。これらの事実はすでに 6-4 黄銅や低炭素鋼の試験片についても明らかにされたことで、この研究でそれを再確認したわけである。

また試験片の表面ならびに表面下種々の深さの部分の X 線の反射像を撮影し、被害層がある厚さ（表面下 1~2 粒子くらいの厚さ）になれば層中に微細なき裂が発生し、疲れ限度以上の応力のもとでは、発生したき裂は応力の繰返しに伴って拡大し、試験片を破壊に導くであろうと考えられる結果が得られた。疲れ限度の応力でもき裂発生に必要な厚さの被害層が必ず発生するか否かはまだ十分明らかでない。

本研究に使用した 7-3 黄銅を寄贈して下さった住友軽金属工業会社の竹内勝治博士に深く感謝するとともに、疲れ試験を担当した真武友一助教授（九州大学工業教員養成所）および X 線回折写真を撮影した大穂一助手に深く感謝する。また本研究に対し文部省から科学研究費の援助を受けたことを感謝する。

文 献

- (1) 石橋, 機械学会論文集, 28-194 (昭 37-10), 1301.
- (2) 瀬戸口, 第 40 期通常総会講演会前刷集, No. 85 (昭 38-4), 5.
- (3) F.P. Bullen, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **216** (1953), 332; W. A. Wood ほか, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, **220** (1954), 255.
- (4) N.J. Petch, *J. Iron Steel Inst.*, **174-1** (1953-5), 25.
- (5) 大久保・ほか 2 名, 機械学会論文集, 28-191 (昭 37-7), 774.
- (6) N.J. Wadsworth, *Phil. Mag.*, **6, 8-ser.** (1961-3), 397.
- (7) 渡辺・熊田, 第 38 期通常総会講演会前刷集, No. 37 (昭 36-4), 67.

低 温 ポ ン プ 法

真空をつくる低温ポンプ法 (Cryopumping) という新しい技術が開発された。密封されたチェンバー内の低温パネルにチェンバー内の空気が触れて凝縮し、これに伴って気圧が下がる。これが低温ポンプ法の原理である。

この方式によって 10^{-6} ないし 10^{-12} torr の超真空が得られる。低温パネルは液体ヘリウムによって絶対零度に近い低温に保たれる。4.2°K (絶対零度よりも 4.2°C 高い温度) でたいがいの気体は低温パネルに凍

りつく。

真空をつくる在来の方法はロータリー法と拡散法とを兼ねたものであった。まずロータリー法である程度の真空をつくり、これを拡散ポンプで 10^{-7} torr まで低下させていた。これに比べると低温ポンプは温度低下速度が速く、気圧も 10^{-9} torr 以下に達する。したがって超真空をつくる方式としてすぐれているのである。

[New Scientist, 18-334 (1963), 99]

(日本科学技術情報センター提供)