

金属材料の疲れ過程での微細構造変化

相原 正* 石井 友之**

Microstructural Change of Metallic Material during Fatigue Process

by *Tadashi AIHARA & Tomoyuki ISHII*

The review was made for the studies dealing with the microstructural change during fatigue process. The discussion was made on the plastic deformation by alternating stress and dynamic recovery model.

The references show that at the low stress amplitude the arrangement of dislocation is observed and at the higher stress amplitude the cell structure is observed. And this microstructures lead to the formation of void and further crack propagation. This fact shows that the movement of dislocation plays the considerable role in the fatigue process. But the general interpretation of this process was not yet made. During the process of this plastic deformation, we consider that the recovery process by alternating stress is necessary. We call the process dynamic climb, cross-slip or cutting.

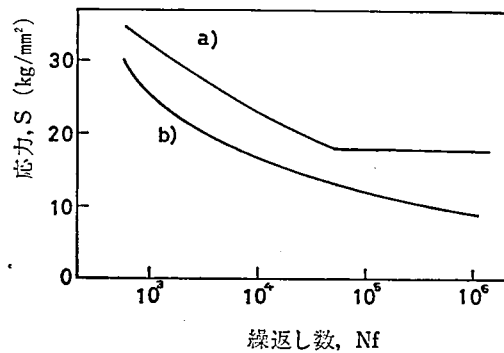
The importance of the relation between strain amplitude and number of cycles was mentioned. Because this relation expresses the fatigue damage more physically than S-N curve.

1. 緒 言

一般に疲れ現象は、その応力では破断に至るまでは至らない応力であっても、それを繰り返し負荷することによって、長い期間の繰り返しの後には破損を生じる現象である。これは 10^6 回以上の繰り返しにおいては、引張り強さの $1/3 \sim 2/3$ という低い応力で起ることが報告されており、実用上問題となっている。したがって疲れに関しては多くの研究がなされているが、疲れの機構についてはなお不明な点が多い。とりわけ、亀裂の発生に至るまでに関しては、十分な研究がなされているとは言い難い。それは従来の研究が、主としてフラクトグラフィーや破壊力学を用いて、どのような場所にクラックの核が生成し、それがどのように進展し破壊に至るかを扱うことが多かったためと考えられる。又実用上の疲れにおいては、表面におけるボイドの生成やクラックの形成が大きな問題となり、内部のマ

* 理工学部機械工学科教授 工業材料

** 理工学部機械工学科講師 機械材料



a) 疲れ限界を示すもの b) 示さないもの

図1 代表的な2種類の挙動を示すS-N曲線

イクロクラックは二次的な影響しか与えないと考えられていた¹⁾ ためである。しかし、近年種々の表面処理技術が進歩し、表面を硬質材料でコーティングすることやショットピーニング、浸炭窒化することなどにより、表面におけるクラックの生成を防止すれば、必然的に内部でのクラックの発生伝播が問題となると考えられる。又容量の大きな材料の繰返し圧縮変形などにおいても、表面のクラック発生に加えて、内部からのクラックの発生が本質的な現象になると考えられる。

そこで、本報告では従来の疲れ過程での微細構造観察結果について概説するとともに、疲れにおける転位の変形モデルを考察する。又、疲れによる内部損傷を知る上で、定荷重試験時のひずみ振幅と繰返し数の関係が有効であることを指摘する。

2. 疲れの進行にともなう塑性変形

変動応力にもその種類が多く、疲れを論じる場合はどのような材料が、どのような条件下で、どのような繰返し負荷を受けたかを明らかにしておく必要がある。しかし、一般には疲れ挙動はS-N曲線で表わされることが多い。すなわち縦軸に応力振幅(S)、横軸に対数でとった破断に至るまでの繰返し数(N)をとる表示がなされる。この表示方法は実用的には非常に有効であるが、その物理的な意味については不明点が多い。

実験事実からS-N曲線は2つのタイプに分類される¹⁾。1つは図1 a) に示されるように明白な疲れ限界を持つものであり、鉄、軟鋼²⁾、Ti-Al-V³⁾ などがこれに属する。他方は図1 b) に示されるように、応力の降下とともに繰返し数も漸次増加するタイプであり、多くの金属例えばCu⁴⁾、Al⁵⁾、18-8 ステンレス鋼^{6,7)} などがこれに属する。これに関しては今のところ一般化した説明はなされていないが、静的な応力-ひずみ曲線と対応させると、前者の疲れ限界を持つ材料が比較的明白な弾性限界を持ち、降伏現象を示すのに対して、後者は弾性限界が明白でなく、低い応力ですでに塑性変形を示す傾向にあることから、微小の塑性変形の繰返しによる損傷が疲れを導くことと関連しているものと考えられる。

事実銅の場合すでに4 g/mm² のせん断応力で転位が運動することが認められており⁸⁾、これは金属がごくわずかの力で変形し得る可能性を示している。又通常の結晶をすべり変形させるに必要なせん断応力の実測値は表1に示すように鉄で1.7kg/mm² であり、実用的な鋼の強度の約¹/₂₀から¹/₄₀であり、疲れが問題となるような耐力よりかなり低い応力で十

分材料が塑性変形することを示している。又、Levinstein-Robinson によれば純銅においては、流動応力と転位密度の間には図2に示されるような関係を持ち、約 0.1 kg/mm^2 付近の応力でさえ顯著に転位密度を増加させることが示されている。このことから疲れを考える場合、この微小の塑性変形は疲れにおいても重要な役割を演ずると考えられるので、この方面における従来の研究結果について次に概説する。

3. 疲れの際の微細構造変化に関する従来の研究

Lukáš ら⁹⁾ は純鉄に繰返し応力を加えた場合、高応力振幅ではセル構造をとるが、低応力では帯構造ができることを示している。又、Vingsbo¹⁰⁾ はオーステナイトステンレス鋼を用いて、低応力域では組織変化が少ないこと、高応力では転位ループを含むもつれた転位およびセル壁を観察している。又そこにおける空孔子の役割を重要視している。

Klesnil ら¹¹⁾ は銅の単結晶を用いて、せん断によるクラック成長に関連してすべり帯やセル構造が形成することを認めている。Feltner ら¹²⁾ は Al および Cu について高応力疲れの場合は明白なセル構造ができ、低応力では双極子などにより構成されるもつれた転位組織が現われることを観察している。

小倉ら¹³⁾ は500kVの電子顕微鏡を用いてアルミニウムの疲れ組織を調べ、疲れクラックに近い部分で比較的規則的な配列をした下部構造を観察している。Weiss¹⁴⁾ は 18-8Nb 鋼で転位のもつれた組織およびセル構造を観察している。伊吹ら¹⁵⁾ は炭素鋼を用いて、繰返し数の増加に従ってフェライト部の硬さは増すが、パーライト部の硬さは増さないことを報告しているが、これは、内部の不均一変形ではあるが塑性加工が進行していることを示している。小切間ら¹⁶⁾ はオーステナイト鋼の高サイクル疲れでは、 α' マルテンサイトを形成させるほどではないが、疲れによる組織変化を観察しており、繰返し数の増加とともに転位の配列化やセル化の傾向があることを示している。さらに中川ら¹⁷⁾ は 99.99% の Al を用いて、室温の疲れでは $2 \sim 4 \mu$ のセルが形成され、高温の疲れでは $5 \sim 9 \mu$ のセルが形成することを示した。同時にループが消滅する際に空孔子を放出して孔が形成され、それが連結することによってマイクロ・クラックに発達すると述べている。栗谷ら¹⁸⁾ は純銅について疲れの際の内部組織を調べて、表面との関連性を検討している。Marukawa ら¹⁹⁾ は銅の単結晶の疲れは、転位群の切断モデルで説明できると述べている。稲中ら²⁰⁾ は曲げによ

表1 結晶をすべり変形させるのに必要な臨界せん断応力の実測値
(幸田⁸⁾ による)

| 金 属 | 臨界せん断応力(kg/mm^2) |
|-----|-----------------------------|
| Al | 0.08 |
| Cu | 0.05 |
| Fe | 1.7 |

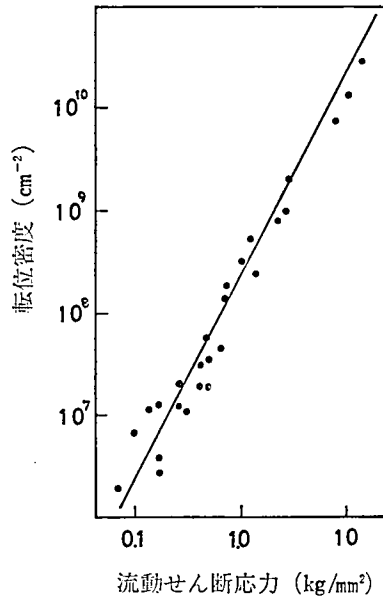


図2 純銅における流動応力と転位密度の関係 (Levinstein-Robinson による)

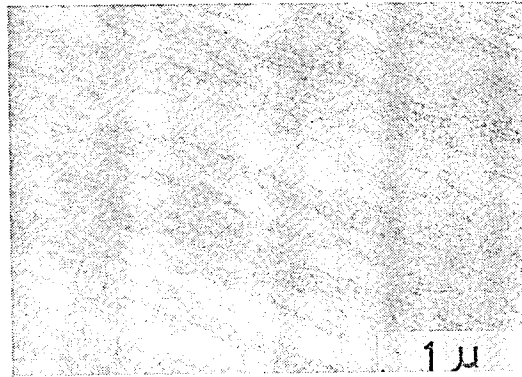


写真1 18-8-Mo 鋼の疲れ試験後に観察されたもつれた転位群。

る疲れ試験を行ない、低応力では転位の集積、高応力では配列化、転位クラスターおよびセル構造を認めている。Kiritani ら²¹⁾は Al-6.5 at % Zn 合金に繰返し負荷をかけ、弾性限界を越える応力振幅ではマトリックスに均一な転位変化が起こるのに対して、それより低い応力では粒界での転位配列が優先的に起こることを調べている。著者の一人も²²⁾ 18-8Mo 鋼に繰返し負荷を加えた際に、写真1に示すような転位の配列化が起こることを認めている。

以上の結果を総括すると、比較的低い繰返し応力では転位の配列化が起り、双極子や環状転位が多く観察されると同時に、もつれた転位群や集積転位群を形成する。さらに応力が高くなると多くの金属でセル化の傾向が観察され、傾角粒界や双晶境界やすべり帯などを形成する。また繰返し数の増加とともに、それらの組織はさらに配列化やセル化が進行し、やがてはボイドの形成やクラックの核生成へとつながってゆくものと考えられる。そこで繰返し負荷の際のボイドの生成やクラックの核発生する現象を、転位の運動から考えると次のような過程を経ることが推察される。

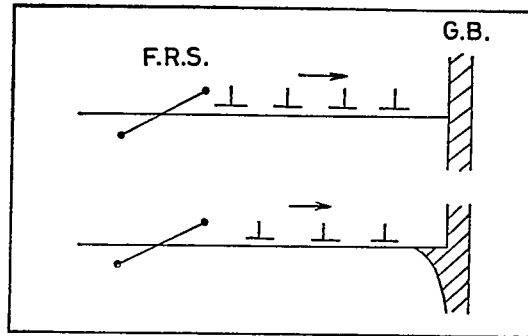
4. ボイド又はクラックの生成機構

4.1 界面におけるボイドの生成

今のところ、変動応力と一方向流れ応力との転位の運動の差異について、論じた論文は少ない。しかし、結晶の変形が可逆的でなく、すなわち、一度塑性変形したものは逆の応力をかけても、元の結晶へは戻らない事実を考えれば、ここではまず、通常の一方向応力による転位の増殖、運動、消滅を基本的に踏襲できるものと考えられる。そこで増殖は Frank-Read 源又は Gilman-Johnston の機構による²³⁾。すなわち図3に示される増殖源から生成された転位群は粒界のような消滅可能な場所まで運動し、そこで消滅すると同時に粒界に段差を残し、これが重なってボイドとなり、やがてクラックへと発展すると考えるものである。ここでは粒界を考えたが、実際の合金では非金属 inclusion、析出物、第2相などの界面においても同様であると考えられる。

4.2 粒内におけるボイドの生成

次に粒内におけるマイクロクラックの生成について述べる。これは粒内に前節で述べたような異相界面が存在しない場合でも、図4に示されるように粒内に亜粒界又はもつれた転位がある場合、そこに転位が集まり転位密度が上昇する。そこでそれらの転位の芯を通



F.R.S.: フランクリード源 G.B.: 粒界

図3 転位の消滅による粒界段差の形成

り、空孔子がパイプ拡散することによって、多くの空孔子が集まりボイドとなり、さらにマイクロクラックへと進展することが考えられる。ここでは、もつれた転位群とは双極子や環状転位などの集合をも含めて考えるものとする。

4.3 空孔子によるボイドの生成

応力により空孔子が拡散することは Nabarroらによって示されているが、これと同様のことが疲れの場合も起こり、応力軸に平行な界面にボイドが生成することが考えられる。これはクリープの際に述べられているように、高温低応力の場合に顕著になることから、疲れの場合も同様のことが言えるものと考えられる。又この現象そのもののだけが主として起らない場合も、ほかの疲れ現象の進行に並行して起こり、何らかの影響を与えていることが十分推察される。

4.4 結晶の回転によるクラックの形成

応力負荷により多結晶金属中の結晶粒が回転をすることは、良く知られた実験事実である。これは疲れにおいては、応力方向が変動するために結晶と結晶の回転が繰り返されることとなり、そこに今まで述べられてきた機構とは異なった変形により、クラックが形成される可能性がある。これは直接粒界クラックとなり、さらに発展して破断に至るものと考えられるが、応力が比較的低く、ひずみが小さな場合はその効果は小さいものと予想される。

5. 加工硬化の動的回復

前節で述べたように、疲れは結晶が塑性変形し、それによってボイドが生成され、さらにクラックとなりそれが進展して破壊に達するという機構を考えた。転位の運動を考えた場合、常に加工硬化により、その転位のさらなる運動が妨げられることが、十分考えられ

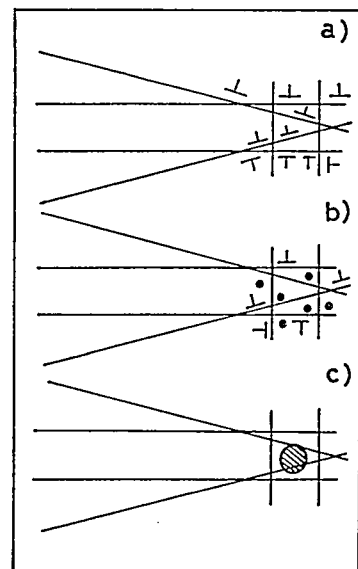


図4 もつれた転位上での空孔子の集合とボイドの生成

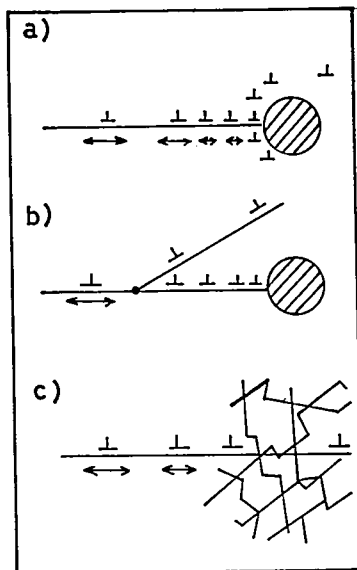


図5 疲れにおける加工硬化の回復過程
(助走モデル)

る。しかし、繰返し数が多くなるといつかは破壊へと導かれるような材料，すなわち，S-N曲線で明白な疲れ限界を示さない材料では，加工硬化の回復が起こっていると考えられる。それは通常の一方方向応力では回復されないが，繰返し応力では回復する機構である。そこで疲れにおいては図5 a), b), c) に示されるような，さらなる転位の進行が考えられる。すなわち図5は通常の加工硬化の回復過程と似ているが，ここで大きな違いは，これらの転位の上昇やクロススリップや切断が，転位の予備的な振動または助走を前提としている点であり，このような転位の活性化が通常の静的なせん断応力では越えることのできない障害を，越えるのではないかと考えられ，このモデルを提案する。図中の矢印は予備振動を表わしている。しかし，この機構の実験的な立証は，疲れ試験中に転位の運動を観察できる装置の完成を待たなければならないものと考えられる。

6. ひずみ振幅と繰返し数の関係

緒言で述べたようにS-N曲線は実用的であっても，今まで述べてきたような微細構造変化を考えた場合は，物理的な意味が不明確で，組織との対応が難しい。そこで著者はこのような微細構造と関連した研究においては，図6に示されるような，縦軸に伸び振幅，横軸に繰返し数をとる曲線の特徴を明らかにしておくことを提案したい。ここでは疲れ試験は定応力振幅での繰返し負荷を与えるものとする。このような表現をとると，断面の収縮，膨張や微小な座屈などをできるだけ小さく押えれば，縦軸は材料内の内部構造変化を示すこととなり，多少物理的な意味が明らかになるものと考えられる。

例えば図6のIでは繰返し数の増加とともに振幅が減少してくることから，材料の加工

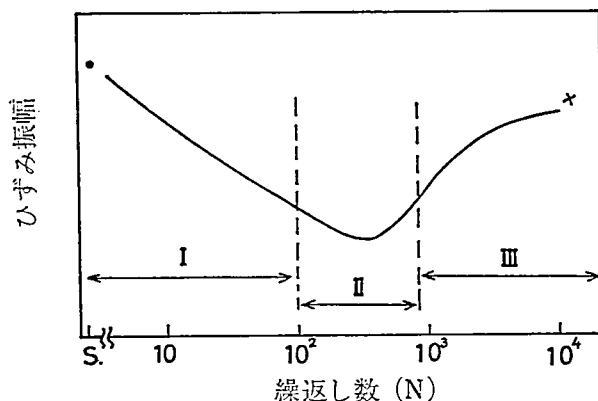


図6 定荷重疲れ試験におけるひずみ振幅と繰返し数の模式的関係

硬化を示すこととなり、IIの部分では、この加工硬化と疲れの進行による回復とが、釣合ってくる領域である。IIIでは疲れが進行し、やがてはボイドの生成、クラックの形成そして破壊へと至るものである。このように伸び振幅と繰返し数曲線は、組織と対応させることも可能であり、転位による運動モデルとも関連させることができることから、種々の材料において、この特性を測定することを提案する。

7. 結 言

疲れによる組織変化の中でも、ボイドやクラックが生成するまでの微細構造変化に注目し、従来の研究による、内部構造変化を系統だてて分類するとともに、転位論による疲れの際の微細構造変化を概説した。同時に動的な加工硬化組織の回復モデルを提唱した。

さらに、定応力の振幅で疲れ試験を行なった場合の、伸び振幅と繰返し数の間の関係が、疲れの際の内部構造変化と対応させることができると推察されるので、今後内部構造変化と疲れとの関連性を論じる場合、この関係を基調にして討論することを提案するものである。

参考文献

- 1) D. McLean (田中, 米谷, 布村訳) : 金属の機械的性質, (1967) [共立出版], p. 347
- 2) S. Stanzl and R. Mitsche : Proc. 1st Int. Symp. High-Power Ultrasonics, p. 59
- 3) D.K. Benson, J.C. Grosskreutz and G.G. Shaw : Met. Transa., **3** (1972), p. 1239
- 4) B. Weiss and K.L. Maurer : Metall, **22** (1968), p. 915
- 5) K.L. Maurer and B. Weiss : Aluminium, **45** (1969), p. 609
- 6) J.H. Driver and R.W.K. Honeycombe : J.I.S.I., **209** (1971), p. 729
- 7) T. Ishii, K. Kromp and B. Weiss : Arch. f. d. Eisenhüttenw., **45** (1974), p. 803
- 8) 幸田 : 金属物理学序論, (1970), [コロナ社], p. 339, p. 181
- 9) P. Lukáš, M. Klesnil and P. Ryš : Z. Metallkunde, **56** (1965), p. 109
- 10) O. Vingsbo : Phil. Mag., **17** (1968), p. 441
- 11) M. Klesnil and P. Lukáš : Phil. Mag., **17** (1968), p. 1295
- 12) C.E. Feltner and C. Laird : Trans. AIME, **242** (1968), p. 1253
- 13) 小倉, 幸島 : 日本金属学会誌, **34** (1970), p. 746
- 14) B. Weiss : Arch. f. d. Eisenhüttenw., **41** (1970), p. 155
- 15) 伊吹 : 沼津工専研究報告, **6** (1971), p. 21
- 16) 小切間, 平山 : 日本金属学会誌, **35** (1971), p. 575
- 17) 中川, 幡中, 川辺, 山田 : 材料, **20** (1971), p. 968
- 18) 栗谷, 福田 : Memoirs of Inst. Sci. Ind. Res., **27** (1971), p. 131
- 19) Marukawa and Sanpei : Acta Metallurgica, **19** (1971), p. 1169
- 20) 幡中, 木川, 川辺, 山田 : 日本金属学会誌, **36** (1972), p. 995
- 21) M. Kiritani and S. Weissmann, Met. Transa., **3** (1972), p. 1229
- 22) 石井, K. Kromp, B. Weiss : 鉄と鋼, **61** (1975), p. 963
- 23) 鈴木 : 転位論入門, (1975), [アグネ], p. 111