

金属疲労の研究におけるマイクロとマクロの結合

城野 政 弘

工学部機械工学教室第1講座では、主として金属材料の疲労についての研究を行っている。金属材料が、比較的低いレベルの荷重でもそれが繰り返し作用する場合には、破壊することがあるといういわゆる疲労の現象は、19世紀半ば鉄道の実用化にともなう車軸の破損に関する工学的な要求から研究が始まり、wöhlerのS-N曲線、疲労限度（鋼の場合、ある応力で 10^7 回の繰り返しに耐えた場合それ以下の応力では疲労破壊がおこらないといわれ、この応力を疲労限度あるいは耐久限度という）が求められるなどの工学的な回答を始め、以後100年以上にわたって、図1(a)に示すように工学的なマクロ因子（主として繰り返し応力）と疲労寿命の定量的な関係ならびにそれに影響する諸因子の定量的な把握という立場から数多くの研究が積み重ねられてきている。

一方疲労に関する微視的な面からの研究は、これとは別に、光学顕微鏡による観察、X線回折、結晶塑性学に関連した1930年代、電子顕微鏡、転位論の発達にともなう1950年代以降のご

とく、新しい実験的、理論的手段の開発に刺激されて進められてきたようで、疲労損傷と思われる多くのマイクロな現象が見出され、いろいろな疲労機構のモデルも提案されてきている。

しかしながら、これによりただちに疲労の機構が解明され、マクロな現象と定量的に結びつけられるとはとてもいい難く、いまだに実際の機械構造物の破壊の原因の多くは疲労によるものだといわれている。これは疲労現象は本来材料あるいは部材の様な変形などで規定されるのではなく、ある微小部の特性およびその挙動で支配される局所的な破壊現象であるにもかかわらず、その現象の定量的な把握が充分でなかったことが原因と考えられる。そこで本研究室では、応力因子よりもマイクロな疲労損傷に一步近く、疲労を直接支配すると考えられる工学的に測定可能なマクロな因子をとりあげ、これを定量的に把握することが、マイクロな側からの研究すなわち疲労損傷の機構と工学的なマクロな側からの要求とを結びつける1つの有力な手段であると考え、研究を進めてきた。このような因子として、まず材料に繰り返し応力が作用するときの応答ともいふべき、繰り返し塑性ひずみ因子をとりあげ、原理的に極めて直線性のよい高感度の伸び計を試作することにより、試験片の0.01mm程度の弾性伸びに含まれる0.1 μ 程度の微小な繰り返し塑性ひずみをも分離して検出することを可能とし、この微小な繰り返し塑性ひずみを応力とともに疲労試験中連続して測定することにした。そして応力因子と疲労寿命（破断繰り返し数）の関係を、図1(b)のごとく応力因子と塑性ひずみ因子の関係と、塑性ひずみ因子と疲労寿命の関係との2つに分けて考える。このようにすると、後者の塑性ひずみと破断寿命の関係は、平滑試験片では極く低い繰り返し数（約10回）から 10^7 回の破断繰り返し数に至る

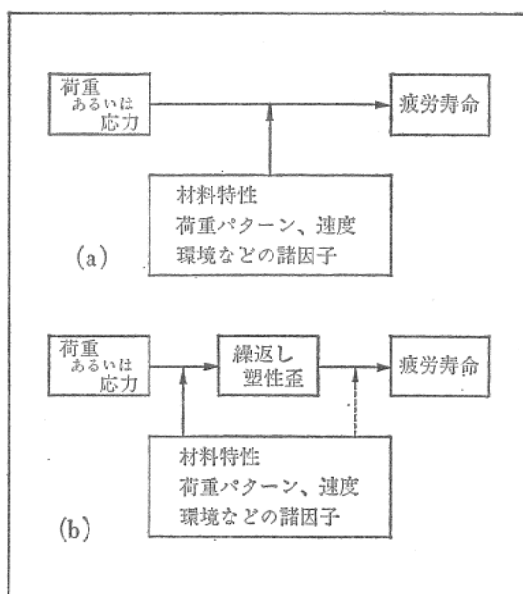


図 1

広い範囲にわたり、材料毎に両対数線図上でほぼ1本の直線関係で表わすことができ、しかも荷重が時間とともに不規則に変動するランダム波あるいはある規則に従って変動するプログラム波の場合をも含めて同じ関係になるなど、通常の場合には、材料特性のみに支配され、荷重履歴、温度、繰返し速度の影響など応力因子と疲労寿命の関係には複雑に影響する要因の影響をほとんど無視しうることから、繰返し塑性ひずみが疲労寿命を支配する主な因子であることがわかった。この場合前述の累積損傷の非線形性などの複雑さは、荷重履歴、試験条件などによる材料の繰返し軟化、硬化の違いによるもので、応力-塑性ひずみ関係へのこれら諸因子の影響を調べることにより明らかにできる。しかもこの場合はいちいち疲労試験による破断試験を行わなくても、1本の試験片で、いくつかの条件での測定値をつぎつぎに測定し、試験片毎のばらつきを避けて比較できるなど、実験手数、精度の上からも便利な方法である。

さらに疲労限度以下の低い応力レベルに対する塑性ひずみの挙動をも調べた結果、変動荷重のもとでは、疲労限度以下の応力に対応する極く微小な繰返し塑性ひずみでも疲労損傷は進むことが明らかとなり、従来のように疲労限度を考えた疲労設計というものが、実際上は危険である場合があることが示唆され、また事実実物部材でも非常に低い、普通の条件では破壊しないと考えられるような応力で疲労破壊が生じたという報告例があることを考え合わせると、従来あまり関心がもたれなかった疲労限度以下の領域における疲労現象が重要視されねばならないと思われる。

以上述べたように、疲労を支配する主要なマクロな因子は繰返し塑性ひずみであることがわかったが、このような塑性ひずみにより生ずる疲労損傷は結晶粒内のすべり、表面の凹凸、あるいは微小部に集中したひずみなど局所的なものであり、これをマクロな因子と定量的に結びつけて工学的な要求を満すためには、マイクロな現象の定量的な測定と、場合によってはその統計的な処理をも併せ、疲労過程を明らかにする必要がある。普通に用いられる電子顕微鏡によ

るマイクロな研究では、レプリカあるいは透過薄膜を用いるため、その方法の制約から疲労損傷の連続した観察は困難であり、また薄膜試料の場合には、実際の厚い試料の疲労挙動と同じであるかどうか疑問な点も多い。これに対し、破壊面の解析などに最近よく使用されるようになってきた走査型電子顕微鏡では、電子線により試料表面からたたき出される2次電子により像を得ることから、大きな試料のまま観察することができ、疲労の研究には好都合である。そこで本研究室では、走査型電子顕微鏡に小形の疲労試験装置を組み込み、疲労試験をしながら直接試験片表面を連続して観察することができるようにした。またこの装置を用いると任意の荷重状態で試験機を止め、諸種の定量的な測定をすることもできる。引張試験のみを電子顕微鏡内で行い得るものは、特殊付属品として、市販されているようであるが、繰返し疲労試験をもできるものはあまり他に類をみないものである。このような試験により、繰返し荷重による疲労の進行にともなう、試験片表面のすべり帯の変化、微視亀裂の発生過程およびそれが巨視亀裂へと移行する段階の観察をはじめ、特殊な測定法と併せることにより、結晶粒内のマイクロなひずみ分布や、疲労亀裂の進展過程を支配すると考えられる亀裂先端の微小部の繰返しひずみの分布などの定量的な測定が可能であり、また表面凹凸形状の測定などはミニコンピュータと連結して自動的に測定、処理を可能としている。

なお、現在、昭和49年度文部省科学研究費で設置した、さらに分解能の高い電界放射型走査電子顕微鏡(分解能 30 \AA)内に組み込むべく、同様の疲労試験装置を設計、試作中であり、これによりさらに詳細なマイクロな疲労過程の観察ならびに定量的な把握が可能となるものと考えられ、マイクロな疲労機構からマクロな疲労現象を定量的に把握することができると期待される。またこのような研究を通じて、将来は疲労機構を考えた本質的な疲労設計の方針が見出されるであろうし、ひいては新しい材料の開発への一助となることを願っている。