

# 金属材料の疲労の話

名古屋大学大学院 工学研究科 マテリアル理工学専攻  
 極限構造材料分野 教授 宮田隆司

Prof. Takashi Miyata  
 Department of Materials, Physics and Energy Engineering  
 Nagoya University

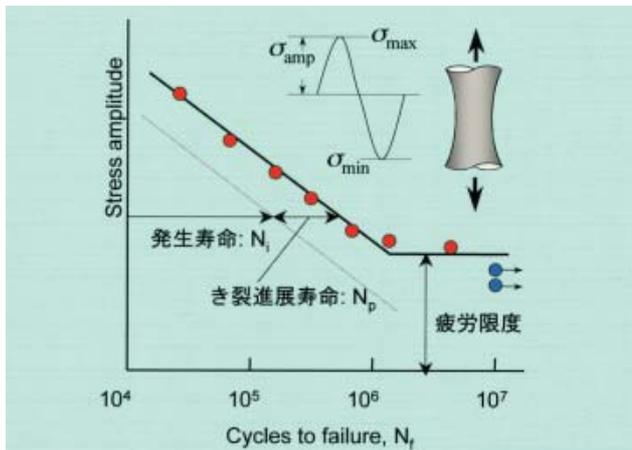


## はじめに

長時間ストレスにさらされると、ついには耐えきれなくなってひび割れが生じ、それが拡大して瓦解する。これは人あるいは人間関係ではなくて金属材料の話である。金属が一回では到底壊れないような小さな負荷でも数万回、数十万回の繰返し負荷(応力、英訳では文字通り Stress)を受けるとミクロンオーダーのき裂が生じ、最終的には破断してしまう金属疲労については航空機事故の際にしばしば話題となることもあって多くの方がご存知だと思う。構造物・機器の破損の80%以上はこの疲労が原因と言われている。ここでは金属疲労が何故起こるか、と疲労き裂の芽が比較的早い段階にできているという話を紹介したい。

## 疲労損傷と研究の歴史

疲労に関する研究の歴史は古く、19世紀前半には金属の疲労に関する認識があり、研究論文も現れたようであるが、1850 - 1860年代に機関車車軸の損傷事故解析から鋼の負荷応力(応力振幅)と疲労寿命(破断までの繰返し数)との関係が求められた。このS-N線図(第1図)は材料の疲労強度の一つの表現として現在も用いられている。疲労における「き裂」の認識は古くからあったようであるが、実用的レベルで配慮される契機となったのが1954年の世界最初のジェット旅客



第1図 疲労強度の評価：S-N線図

機コメット号の連続事故と同時代の大型回転機械の事故である。航空機、自動車などの輸送機器では軽量化を律則するのが疲労強度であることから、その研究が営々として現在まで続けられている。構造物の設計規準にいち早く疲労設計が取り入れられたのは橋梁の分野であるが、道路橋、鉄道橋など社会基盤施設に生じる疲労損傷対策はむしろこれからの課題である。我が国の橋梁における本格的な溶接構造の全面的採用は東海道新幹線、東名高速道路が最初と言われる。東海道新幹線の橋梁では開通10年後から溶接部を起点とする疲労損傷が報告され、補修・補強がなされつつ供用されている。道路橋の設計供用寿命は50年程度とされ、多くの橋梁ではその年限に近づきつつある。

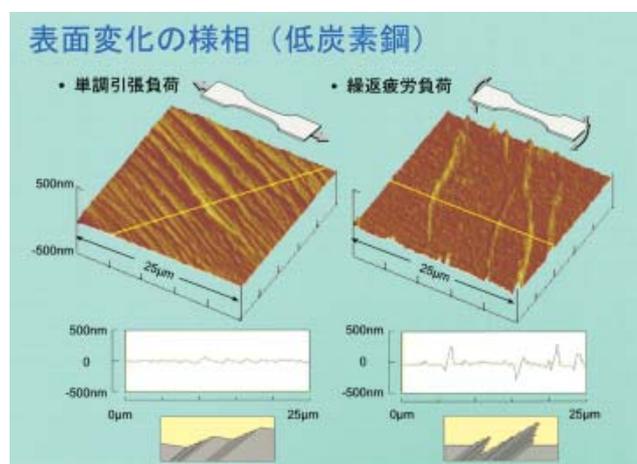
## 何故金属は疲労する？

金属が疲労を起こすのは、人間が考える動物であるためにストレスを感じ、精神的に疲労するのと同様、金属の持つ根源的な性質による。金属の特徴は加工により様々な形に成形することができることにあり、それは金属が塑性(永久)変形するからである。金属の塑性変形は格子欠陥(原子配列の乱れ、しわ)、転位の移動によるものであり、転位の移動は絨毯のしわを移動させるのが比較的簡単にできるように、小さな応力のもとでも可能である。この転位の移動、すなわち微視的レベルでのすべりが疲労の原因と言ってよい。従って塑性変形を示す金属材料では疲労は必ず起こるものである。

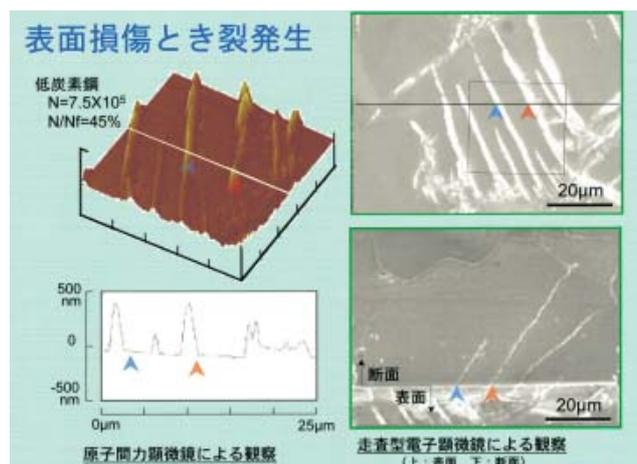
## 疲労破壊のメカニズムと疲労き裂の芽

金属の疲労破壊過程は通常、き裂の発生と進展過程に分けられる。疲労き裂の生成過程が明らかになってきたのは、透過型(TEM)あるいは走査型電子顕微鏡(SEM)の発達によるところが大きい。最近では原子間力顕微鏡(AFM)によってさらに微細な領域での観察が可能となり、金属材料の組織や強化機構などと疲労き裂生成との関係が明らかにされつつある。

繰返し応力が作用すると、その表面にせん断応力成分によって結晶の特定の面に沿ってわずかに非可逆的なすべりが集中的に発生する。第2図の下に示すように、形成されたすべり帯が応力の繰返しとともに発達し、繰返し負荷の場合には局部的に入り込み (Intrusion) や突き出し (Extrusion) と呼ばれる微視的凹凸 (数十ナノオーダー) ができ、それが成長してついには結晶粒単位のき裂となる (第3図)。第3図は左が原子間力顕微鏡による観察、右が走査電子顕微鏡による表面と内部断面の観察結果である。内部に欠陥がある場合や高力アルミニウム合金や高強度合金鋼のように非金属介在物などの材質の欠陥に敏感な材料を除いて一般の構造用金属材料のき裂生成はこの機構によると言われる。このことはある意味好都合で、き裂が重大損傷に至るほど進展拡大する前に発見することが可能となる。



第2図 負荷による金属表面の変化 (原子間力顕微鏡による観察)

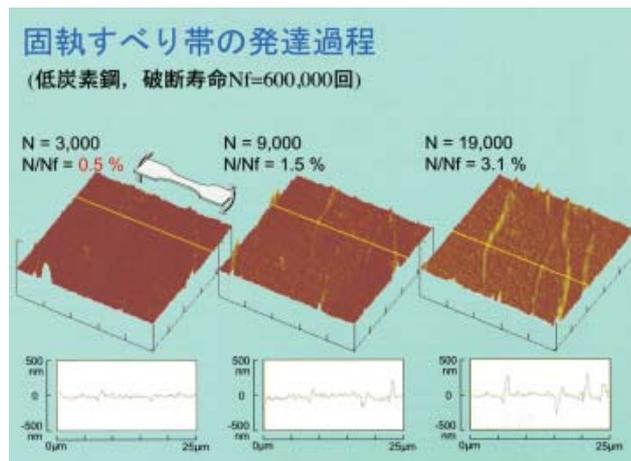


第3図 疲労き裂の生成

繰返しすべりによって発生したき裂は、結晶粒界が抵抗となって停留することがあり、これが疲労強度に関係する。材料の組織や固溶強化などの強化機構、すなわち材質が大きく影響するのはほぼこの段階までである。応力が高い場合や多数回の繰返しによってき裂は粒界を突破し、内部方向に材料組織に依存した方

向性を示しながら進展するが、徐々に方向を変えて引張り応力に垂直な方向へ安定したき裂進展をするようになる。超音波検査など実機における検査で検出されるミリメートル単位のき裂は条件にもよるが疲労損傷過程全体では中期もしくは後期の過程である。

第4図は表面の凹凸の状況を原子間力顕微鏡で観察した例である。破断寿命が60万回であるのに対し、かなり早い段階に疲労き裂の芽ともいべき凹凸 (突き出し、入り込み) が形成され、長い時間をかけてき裂となる。



第4図 き裂の芽: 表面凹凸の繰返し数による変化 (原子間力顕微鏡による観察)

## おわりに

金属の疲労破壊は金属が塑性変形するというその特徴を持つ限り避けられないものであり、繰返し応力を受けるとどんな構造物・機器でも起こりうる。また、外力のみによるばかりでなく、温度変化、温度勾配による熱応力の繰返しも疲労の原因となるし、回転機器では共振が思わぬ疲労損傷を招くことがある。大型構造物ではき裂の生成を抑制することは一般にかなり困難であるので疲労損傷が予測される場合には、供用中の維持管理が極めて重要になる。いずれにせよ、構造・機器の設計、施工、維持管理者すべてが「疲労」の認識を共有することが損傷防止にとって最も重要なことであろう。

### 宮田隆司 (みやたたくし) 氏 略歴

昭和47年3月 東京大学大学院工学系研究科博士課程、船舶工学専攻 修了 (工学博士)  
 昭和47年4月 名古屋大学工学部講師  
 昭和49年4月 同 助教授  
 昭和49年6月 西独・Stuttgart大学材料研究所 (MPA) 客員研究員 (～昭和51年3月まで)  
 平成 2年6月 同 教授  
 平成 9年4月 名古屋大学大学院工学研究科 教授 (改組による)  
 平成15年4月 名古屋大学評議員

主な研究内容: 各種構造材料の強度、破壊、疲労に関する研究、破壊力学及び溶接構造の安全性、信頼性評価