

立命館大学理工学部 酒井達雄

1 緒言

20 世紀は科学技術の進歩と相俟って、各種製品の大量生産と大量消費が進行し、人類の生活を豊かにした反面、廃棄物処理の問題をはじめ大気汚染や地球の温暖化など、人類の存亡にも直結する新たな環境問題を招く結果となった。一方、大量消費による地球資源の枯渇も大きな課題であり、社会の長期的発展と持続可能な産業構造の確立が、21 世紀における人類共通の大きな命題になっている。

以上の観点から、産業界ではすでに部品の再利用や各種リサイクルに関する研究が活発に展開されており、廃棄物処理や材料リサイクルを当初から勘案した新製品の販売形態や課金制度も導入されつつある。また、資源節約やトータルコストの低減を趣旨とするエコデザインの立場から、製品や材料を従来以上に長期間有効利用するための基礎研究も、近年、盛んになってきた。長期間にわたる製品の安全利用を保証するためには、部材の長期疲労特性を明らかにする必要があり、現在、国内外で当該分野の研究が活発に展開されている。

2 金属材料の超長寿命疲労研究の趨勢

金属材料の長寿命域における疲労特性については、これまで日本材料学会や日本機械学会等のいくつかの研究組織で、広範な研究が行われてきた。¹⁾³⁾ 従来から疲労限度を求める際に 10^7 回付近の応力繰返し数における破断・非破断を参照してきた経緯より、これらの研究では金属材料の疲労限度の実験的確認とその物理的意味の解明を主眼としながら、疲労限度に及ぼす変動応力や環境の影響等についても多くの研究成果を蓄積してきた。しかし、 10^7 回を遥かに超える超長寿命域における疲労特性については、超音波疲労や音響疲労などの超高速負荷による実験的研究が行われたものの、50Hz 程度以下の通常の負荷速度における疲労特性が組織的に研究された例はないようである。

近年、関心が集まっている金属材料の超長寿命域における特異な疲労特性、すなわち、一旦水平になった S-N 曲線が長寿命域で再び低下する 2 段折れ曲がり現象を通常の試験速度で実験的に調べ、長寿命域における破壊が介在物を起点とした内部起点型破壊であることを始めて明らかにしたのは内藤ら⁴⁾、浅見ら⁵⁾と思われる。金属材料技術研究所の疲れデータシート企画において、各種金属材料に対する大量の実験結果が報告されており、いくつかの材種については長寿命域における実験結果も多数含まれているが、当初はとくに長寿命疲労特性の解明を主目的にした企画でなかったように思われる。しかし、その後、当該グループでも表面起点型破壊と内部起点型破壊に応じて S-N 曲線が 2 段に折れ曲がることを、温度の影響等も含めて明らかにしている。⁶⁾⁷⁾

最近になって、多くの研究者が当該分野の研究に取り組み貴重な実験結果が多数報告されている。村上らは、内部起点型破壊の起点介在物周辺には金属顕微鏡で観察すると黒く見

える領域(Optically Dark Area: ODA)が形成され、これが介在物にトラップされた水素によるものであると報告している。⁸⁾⁹⁾ 一方、材料強度確率モデル研究会の共同研究として推進されている SUJ2 鋼、SCM435 鋼等に関するラウンドロビンテストにおいても大量の実験結果が報告されており、一連の実験結果より、従来の S-N 曲線の 2 段折れ曲がり現象が、実は表面起点型破壊に対する S-N 曲線と内部起点型破壊に対する S-N 曲線が別の場所にずれて重なって現れる二重 S-N 特性であることを報告している。¹⁰⁾¹¹⁾ なお、回転曲げ荷重下ではこの特徴が顕著に表れ、軸荷重下では各 S-N 特性の差が低下することが示されている。¹²⁾ また、日本材料学会疲労部門委員会組織構造分科会では、SNCM439 鋼に関する共同研究が行われており、超長寿命疲労特性に対する貴重な大量のデータが蓄積されつつある。¹³⁾¹⁴⁾

海外ではヨーロッパを中心にした研究グループが、各種金属材料の超長寿命疲労特性に関する多くの研究成果をあげている。Bathius らのグループは超音波疲労試験機による加速試験により、種々の金属材料に対する $10^9 \sim 10^{10}$ 回程度の超長寿命疲労特性を系統的に調べている。¹⁵⁾¹⁶⁾ Stanzl-Tschegg らも超音波疲労試験で超長寿命域におけるき裂進展挙動を丹念に調べ、貴重な結果を報告している。¹⁷⁾¹⁸⁾ また、Mughrabi は他の研究者の実験結果を参照しつつ、長寿命疲労特性に関する独自のモデルを構築し、興味深い論文を発表している。¹⁹⁾²⁰⁾ 他方、近年、油圧サーボ式超高速疲労試験機が開発され、Ritchie らはこれを用いてタービン用材料の超高サイクル疲労試験を実施し、貴重な結果を報告している。²¹⁾

金属材料の超長寿命疲労現象に対する関心が高まる中、当該分野の国際会議がしばしば開催されるようになった。1998 年には Bathius らによりパリで EUROMECH 382 が開催され、金属材料のギガサイクル疲労に関する多くの研究発表があった。²²⁾ 2001 年には第 2 回目にあたる Very High Cycle Fatigue 2001(VHCF2001)がウィーンで開催され、活発な研究討論が展開された。²³⁾ 第 3 回目(VHCF-3)は 2004 年 9 月に日本で開催することになり、現在、その準備が進められている。

また、昨年、日本材料学会創立 50 周年を記念した国際研究集会(ISMS-21)が大阪で開催され、金属材料の超長寿命疲労に関する O S が組まれ、Bathius, Ritchie らを迎えて有意義な研究討論があった。²⁴⁾ さらに、昨年 12 月には東京ビッグサイトで EcoDesign2001 が開催され、この中に金属材料の超長寿命疲労に関する特別セッションが設けられ、Bathius らをはじめ前述の本学会疲労部門委員会組織構造分科会や材料強度確率モデル研究会のメンバー多数の参加を得て、当該分野の集中的な研究討論が行われた。²⁵⁾

3 金属材料の超長寿命疲労特性の特徴

近年、金属材料の超長寿命疲労特性に関する多くの実験結果が報告されているが、紙面の都合上、筆者らの実験結果を

もとにその特徴を簡潔にまとめることとする。Fig. 1 は軸受鋼(SUJ2)に対する回転曲げ疲労試験結果であり、実験結果は○印で示した表面起点型破壊と●印で示す内部起点型破壊に明確に分離されることがわかる。²⁶⁾ したがって、これまで「S-N 曲線の2段折れ曲がり現象」のような表現が用いられてきたが、超長寿命域まで含めた特異な疲労特性について、表面起点型破壊と内部起点型破壊のそれぞれに関する S-N 曲線が別々の場所にずれて現れる「二重 S-N 特性」として解釈できることがわかる。

また、Fig. 2 は同一材料(SUJ2)に対する軸荷重下の疲労試験結果であり、ここでも△印で示す表面起点型破壊と○印、●印で示す内部起点型破壊に分離され、各破壊形式ごとに S-N 曲線が別の場所に現れている。²⁷⁾ また、表面起点型破壊よりも内部起点型破壊の方が S-N 曲線の勾配が著しく緩やかな特徴が見られる。なお、両形態の破壊が混在する応力レベルの幅は回転曲げの方がやや広いようである。しかし、両破壊形態の分離は軸荷重下より回転曲げ荷重下の方が明確になる傾向がある。これは両荷重様式で応力分布が著しく異なることによるものと思われる。

Fig.3 は内部起点型破断試験片の破面写真で、同図(a)に示すとおり表面に接する Fish-eye が観察され、Fish-eye の中心付近には介在物があり、同図(b)に示すとおり、介在物周縁には凹凸の激しい細粒状の領域が観察される。²⁸⁾ この領域を筆者らは破面の特徴を忠実に表現する観点から、細粒状領域(Fine Granular Area: FGA)なる用語で表すようにしている。この FGA は SUJ2 のような高強度鋼に対して多数報告されており、超長寿命域における内部起点型疲労破壊に関与する特徴的な破面様相といえる。このようなき裂生成段階あるいはき裂発

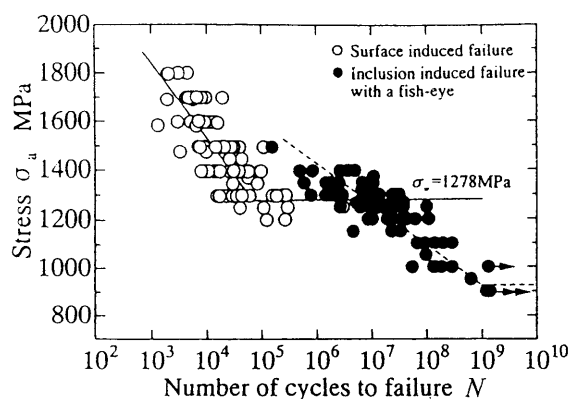


Fig. 1 S-N diagram of SUJ2 steel in rotating bending.

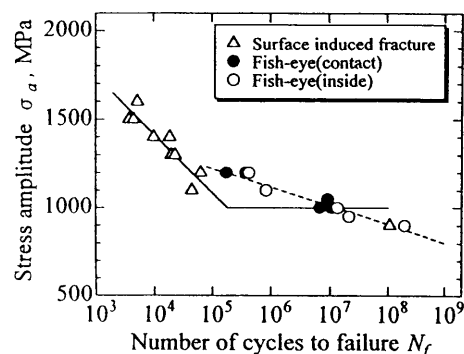
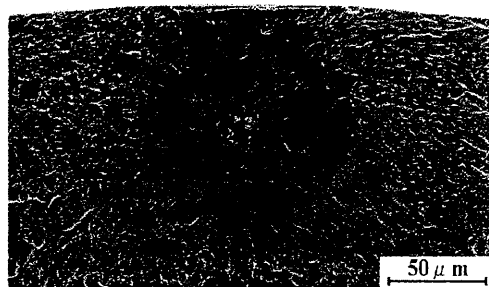
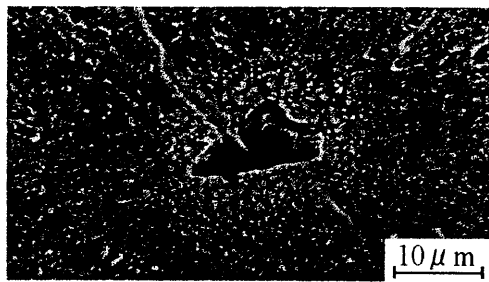


Fig. 2 S-N diagram of SUJ2 steel in axial loading.



(a) Fracture surface of interior inclusion-induced failure.



(b) Fracture surface around the inclusion in (a).

Fig. 3 Fracture surface of a specimen in long life region.

生直後のき裂進展挙動を直接観察することは容易でなく、まだその直接的な観察結果はないが、破断寿命に占める FGA 形成寿命は極めて長く、内部起点型破壊の金属材料の疲労寿命の大部分を占めると考える研究者が多い。^{29), 30)}

4 金属材料の長寿命有効利用とエコデザイン

例えば、機械構造物を従来の耐用年数の 10 倍程度まで長期間利用できれば、材料消費量は 10 分の 1 程度に節約できることになる。機械構造物の多くの部分が金属材料で構成されているから、金属材料の消費量も 10 分の 1 程度で賄えることになる。これは原材料の大幅節約だけでなく、製鉄・製鋼時の環境負荷も 10 分の 1 に低減できることを意味する。

折しも、国内外とも厳しい経済環境が続いており、既設機械構造物の更新は容易でなく、保守・管理技術と組み合わせて設計寿命以上に製品を長期使用せざるを得ない現実がある。こうした社会的背景の中で、金属材料の超長寿命域における疲労特性に新たな関心が集まり、ギガサイクルあるいはそれ以上の超高サイクル域における疲労特性に関する研究が、現在、国内外で活発に展開されているのは自然な流れと考えられる。しかし、このような長寿命域における疲労特性を種々の材料に対して系統的に調べることは、時間的にも、技術的にも、経済的にも極めて大きな困難を伴う。したがって、種々の規模で何らかの共同研究を組織して、計画的にこれに取り組む必要があるであろう。

これまで、当該分野の研究については主として機械構造物の信頼性保証や材料強度学的興味から行われてきたが、緒言や第 2 節でも述べたとおり、金属材料の超長寿命疲労に関する研究は、機械構造物のエコデザインの観点に立つ新たな展開が期待されるであろう。

<参考文献 略>