

## 特集記事・4

安全性確保のための構造材料寿命評価・予測技術の最前線

# 高強度鋼のギガサイクル疲労特性評価

## Evaluation of Gigacycle Fatigue Properties on High-Strength Steels

古谷佳之  
Yoshiyuki Furuya

独立行政法人物質・材料研究機構  
材料信頼性センター 主任研究員

### はじめに

通常、鋼ではそれ以下の応力では無限回繰返しても疲労破壊しない疲労限が存在し、疲労限は  $10^7$  回までの疲労試験により求めることができる。また、疲労限  $\sigma_w$  は引張強度  $\sigma_B$  (或いはビッカース硬さ  $HV$ ) とよい相関を持ち、 $\sigma_w = 0.5 \sigma_B (= 1.67HV)$  という関係になる。これらは、金材技研疲労データシート<sup>1)</sup> (現 NIMS 疲労データシート) の膨大なデータにより裏付けられている。ところが、鋼の中でも引張強度が 1200MPa を超える高強度鋼では疲労限が消滅し、疲労強度が  $\sigma_w = 0.5 \sigma_B$  より下回る<sup>2,3)</sup>。この現象は、ギガサイクル疲労と呼ばれ、近年、盛んに研究されている<sup>4-6)</sup>。

Fig.1 に引張強度が 1200MPa 以上の高強度鋼の代表的な S-N 曲線を示す。この場合、S-N 曲線は 2 段折れ曲がりとなり、 $10^8$  回付近でも疲労限は認められない。折れ曲がりが生じる応力振幅は通常の疲労限 ( $= 0.5 \sigma_B$ ) にほぼ対応し、破壊形態は折れ曲がり点より高応力では通常の表面破壊、折れ

曲がり点より低応力では試験片の内部を起点とした内部破壊 (フィッシュアイ破壊) となる。従って、高強度鋼における疲労限消滅のメカニズムは、通常の表面破壊のまま  $10^7$  回以上の長寿命域での疲労破壊が生じるのではなく、内部破壊という新たな破壊形態の出現によるものである。この現象は 2 重 S-N 曲線<sup>4,5)</sup> として理解されている。すなわち、表面破壊の S-N 曲線と内部破壊の S-N 曲線が独立に存在し、両者の大小関係により内部破壊が出現するか否か (疲労限を持つか否か) が決定されるという考え方である。内部破壊の S-N 曲線が静的強度に対して鈍感であると仮定すると、表面破壊の S-N 曲線は静的強度の影響を大きく受けるため、低強度の鋼では生じない内部破壊が高強度化により出現することがよく説明できる。また、高強度鋼において内部破壊の起点となるのは主に介在物である。そのため、内部破壊に影響を与える因子として介在物の寸法、形状、物性などが挙げられるが、中でも介在物の寸法が第一因子と考えられている<sup>7)</sup>。

このような内部破壊特性を評価するためには、通常の  $10^7$  回までの疲労試験では十分とは言えない。疲労限がないため打ち切り繰返し数は長ければ長いほどよいが、現実的には  $10^9 \sim 10^{10}$  回のギガサイクル域までの延長が目標となる。仮に打ち切り繰返し数を  $10^{10}$  回と設定した場合、比較的高速の 100Hz で試験したとしても目標繰返し数に到達するまで 3 年を要する。このような長時間の疲労試験は実際にいくつかの機関で進められており、貴重なデータが得られつつある<sup>5,8)</sup>。しかし、設計や製品開発へのフィードバックを考えた場合、3 年という試験期間はあまりにも長すぎる。そのため、簡便な加速試験が必要となる。加速試験を行う上で有力なツールとなるのは、繰返し速度が 20kHz と通常よりも 200 倍以上速い超音波疲労試験<sup>9)</sup> である。20kHz で試験を行えば、1 週間弱で  $10^{10}$  回に到達することができるため、試験期間は許容範囲内となる。このように、超音波疲労試験はギガサイクル疲労特性を評価する上で鍵となる技術である。そこで、本稿では超

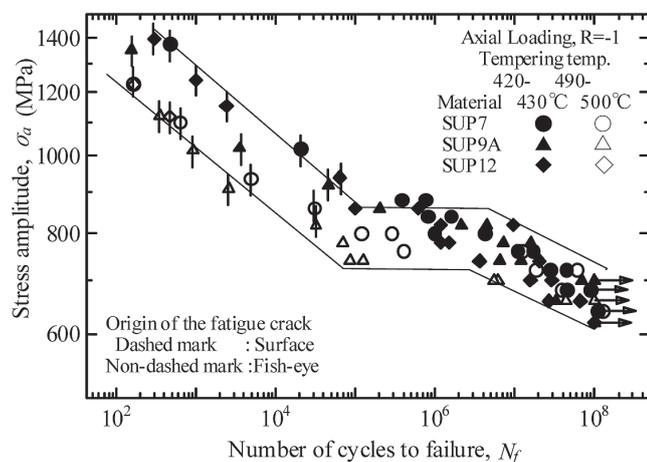


Fig.1 Typical S-N curve for high-strength steels showing gigacycle fatigue<sup>3)</sup>.

音波疲労試験に焦点を絞り、高強度鋼のギガサイクル疲労に関する最近の研究動向を紹介する。

## 2 超音波疲労試験

超音波疲労試験とは、試験片の自由振動とピエゾによって与えられる振動を共振させて行う一種の軸荷重疲労試験である。この方法は1950年代に考案されたが<sup>9)</sup>、妥当性の実証が十分にできなかったため、近年まで実用的な疲労試験法としては用いられてこなかった。疲労試験の超高速化により最初に直面する問題は試験片の発熱であるが、発熱の問題は試験片を冷却するなどの工夫により克服することができた。むしろ、発熱を抑えた状態で試験を行っても通常の疲労試験と一致する結果が得られなかった点が致命的であった。ところが、これらの検討は破壊形態を限定することなしに進められてきたため、高強度鋼のギガサイクル疲労で問題となる内部破壊については検討が成されていなかった。

それに対して、最近、高強度鋼で内部破壊が生じる条件では、超音波疲労試験でも通常の疲労試験とよく一致する結果が得られることが明らかとなった<sup>10-12)</sup>。Fig.2に代表例として、ばね鋼SUP7について100Hzで3年間かけて取得した $10^{10}$ 回までの疲労試験結果と超音波疲労試験結果を比較した例を示す。Fig.2では1点を除き全て内部破壊となっているが、両者はよく一致している。同様の傾向はTi-6Al-4V合金でも確認されている<sup>13)</sup>。このことは、全ての疲労試験を超音波疲労試験で置換えることができるという意味ではなく、“内部破壊が生じる”という限られた条件では超音波疲労試験を適用できることを意味している。しかし、この結論は高強度鋼のギガサイクル疲労試験を行う上では好都合なものであ

る。高強度鋼における長寿命域での疲労破壊は内部破壊によって起こるためである。従って、寿命の短い表面破壊域には通常の疲労試験を用い、寿命の長い内部破壊域のみに超音波疲労試験を用いることで簡単にギガサイクル疲労試験を行うことができる。

このように内部破壊域における超音波疲労試験の妥当性が実証されたことにより、内部破壊に関する新たな研究が展開されるようになった。例えば、種々の溶解法で作製した高強度鋼について系統的なギガサイクル疲労試験を実施し、 $10^9$ 回疲労強度と介在物寸法との関係を明らかにした研究例が報告されている<sup>14,15)</sup>。その結果、介在物微細化の目安や介在物の種類の影響などの新しい知見が得られた。また、内部破壊特性に対する水素の影響を検討した研究例も報告されている<sup>16,17)</sup>。水素チャージした試験片を超音波疲労試験で評価することにより、水素が放出される前にギガサイクル疲労特性を取得するという発想で行われた研究であるが、表面破壊特性よりも内部破壊特性のほうが水素の影響により大きく低下する、すなわち、ギガサイクル疲労強度がより大きく低下するといった知見が得られている。

以上のように超音波疲労試験は適用条件に制限はあるものの、高強度鋼のギガサイクル疲労特性の評価に有効である。しかし、超音波疲労試験の適用範囲の線引きについては明確になっていない部分もある。例えば、内部破壊でなくても、試験片の表面に人工的な微小欠陥を導入した場合には超音波疲労試験の結果と通常の疲労試験の結果が一致することが報告されている<sup>13)</sup>。このことは、人工微小欠陥とよく似た製造欠陥を起点として破壊する鋳造材についても超音波疲労試験が適用できる可能性があることを示している。また、アルミニウム合金や銅などの非鉄金属では疲労限がないことが古くから指摘されているが、このような材料についても超音波疲労試験の適用の可否を明確にする必要がある。従って、適用可能な条件と材料を明確にすることが、今後の超音波疲労試験の研究に求められている。

## 3 超音波疲労試験による介在物検査

超音波疲労試験は、疲労特性だけでなく、介在物を評価する観点からも有力なツールである<sup>18,19)</sup>。なぜなら、内部破壊破面上では介在物を観察することができ、内部破壊破面は超音波疲労試験により容易に作製することができるためである。

介在物の評価にはASTM法やJIS法などいくつかの手法が存在するが、実用的に広く用いられているのは極値統計法<sup>7)</sup>である。極値統計法は、近年、ASTM E 2283として標準化された。従って、介在物検査を行う上での鍵は如何に効

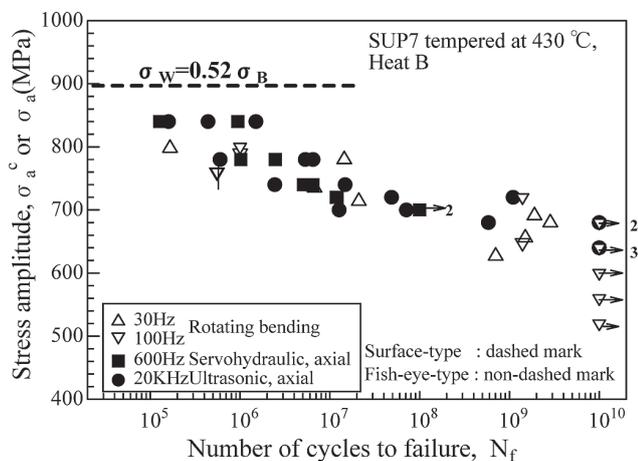


Fig.2 Fatigue test results for a JIS-SUP7 spring steel, comparing ultrasonic fatigue testing with conventional fatigue testing<sup>12)</sup>.

率よく介在物寸法の極値分布を測定するかという点に集約される。極値分布を測定するという観点からは、内部破壊破面は有力な情報源となる。疲労は最弱リンクモデルとなるため、試験片中でも最も大きな介在物を起点として内部破壊するためである。すなわち、内部破壊破面で起点となった介在物の寸法を測定すれば自動的に極値分布が得られることになる。一方、内部破壊破面を作製するためには $10^7$ 回程度までの疲労試験が必要となる。また、信頼できる極値分布を得るためには少なくとも20点のデータが必要である。通常の100Hzで疲労試験を行った場合、 $10^7$ 回に達するまで1日かかるため、20点のデータを得るためには疲労試験だけで1月近くかかることになる。それに対して、超音波疲労試験を用いれば $10^7$ 回は10分で到達する。従って、20点のデータは1日もあれば取得できる。このように、内部破壊破面を用いた介在物検査は、超音波疲労試験を用いることによりはじめて実用的な検査法となる。

Fig.3に介在物検査結果の代表例を示す<sup>19)</sup>。Fig.3では、検鏡面検査法(従来法)と超音波疲労試験による介在物検査法による測定結果を極値確率紙にプロットし、両者を比較した。極値確率紙を用いた解析では横軸の介在物寸法と回帰直線の傾きが重要な着眼点となるが、従来法よりも大きな介在物を検出し、回帰直線の傾きは同程度となっている。この結果は、超音波疲労試験による介在物検査が妥当だけでなく、従来法に比べて精度が高いことを示している。このような超音波疲労試験を用いた介在物検査は鉄鋼メーカーの研究開発部門でも使用されはじめています。

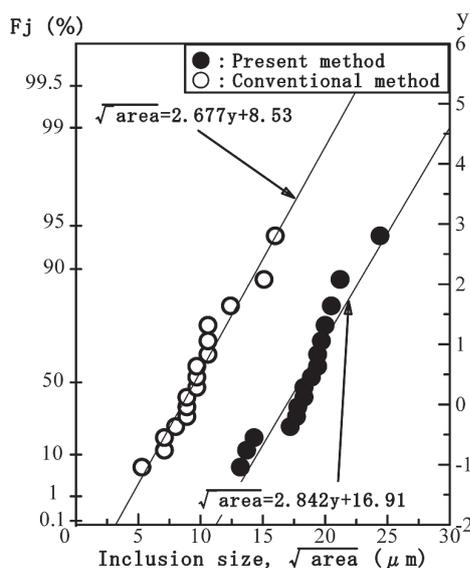


Fig.3 Extreme value distribution of inclusion sizes measured in a JIS-SUP12 spring steel, plotted on a Gumbel probability paper<sup>19)</sup>.

## 4 超音波疲労試験技術の開発動向

超音波疲労試験の可能性を最大限に引出すためには、周辺技術を拡充し、より多くの条件下で試験できるようにする必要があります。例えば、超音波疲労試験は自由振動を利用しているため、通常は平均応力がゼロ(応力比 $R = -1$ )の条件しか試験できないという問題がある。この問題を解決するためには、超音波疲労試験機を引張試験機に組み込み、静的な荷重を付与した状態で振動させるといった工夫が必要になる。この方法は、海外では実績のある技術であるが、近年、国内でも研究例が報告され、高強度鋼のギガサイクル疲労特性評価における妥当性が確認された<sup>20)</sup>。このような改良が成された超音波疲労試験機は国内の試験機メーカーから市販され、今では誰でも利用できる技術となっている。

また、疲労試験では試験片寸法は重要なファクターであるが、特に高強度鋼のギガサイクル疲労では寸法効果が大きいことが指摘されている<sup>8)</sup>。そのため、大きな試験片を用いたほうがより安全側のデータとなるが、超音波疲労試験で使用される標準的な試験片は試験部の直径が3mm程度で、疲労試験片としては小さいほうの部類である。そこで、超音波疲労試験片を大型化する試みが成されている<sup>21)</sup>。その際には、単に試験片の直径を大きくするだけでなく、試験部に平行部を設けることにより効率的に危険体積<sup>7)</sup>(有効体積)を大きくする工夫が成されている。このような大型化した試験片を用いても、高強度鋼のギガサイクル疲労特性評価において妥当な結果が得られることが確認されている<sup>21)</sup>。高強度鋼のギガサイクル疲労特性評価における試験片寸法の重要性を示すため、Fig.4に種々の試験片を用いた超音波疲労試験の結果、Fig.5に起点となった介在物の寸法を示す。このように大きな試験片を用いると、大きな介在物が起点として出現するよ

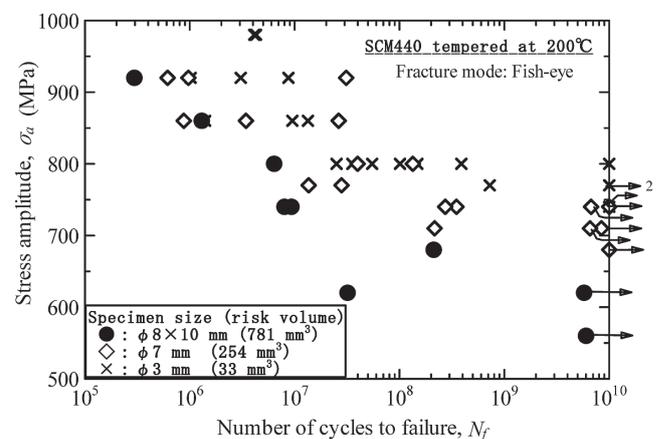


Fig.4 Ultrasonic fatigue test results using various specimens for a vacuum-melted JIS-SCM440 steel<sup>21)</sup>.

うになり、ギガサイクル疲労強度は大きく低下する。この結果は、単にギガサイクル疲労特性評価の観点からだけでなく、介在物評価の観点からも大きな試験片の使用が望ましいことを示している。

上記以外にも超音波疲労試験の周辺技術の開発は様々なものが行われている。米国ミシガン大学では、ジェットエンジンのタービブレード材を対象とした高温試験用の超音波疲労試験機が開発が進められている<sup>22)</sup>。タービブレードでは流体振動によりkHzオーダーの高速振動が発生するため、20kHzの超音波疲労試験は周波数が近く、好適な試験法と考えられている。また、超音波疲労試験を用いたねじり疲労試験<sup>23)</sup>や3点曲げ疲労試験<sup>24)</sup>といったユニークな試験技術の開発も行われている。このように、超音波疲労試験の研究は世界的規模で活気を帯びつつある。

## 5 まとめ

以上のように、高強度鋼のギガサイクル疲労特性評価には超音波疲労試験が有効であることが明らかとなった。この発見により、従来は評価が困難であったギガサイクル疲労特性が、簡単に評価できるようになった。これは革命的なことであるが、超音波疲労試験の研究はまだ始まったばかりで、適用範囲の明確化など研究課題は多く残されている。また、介在物検査という新しい用途が生まれ、より広範な条件に適用するための周辺技術の開発が進むなど超音波疲労試験の研究は更なる広がりを見せている。このような研究を通して、超音波疲労試験の可能性を最大限引出していく必要がある。

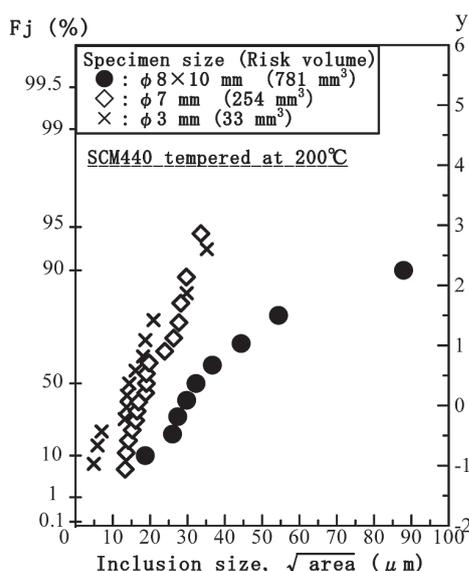


Fig.5 Inclusion sizes appearing at fish-eye fracture origin of a vacuum-melted JIS-SCM440 steel, plotted on a Gumbel probability paper<sup>21)</sup>.

また、構造材料の疲労において内部破壊が問題となった点は、疲労限の消滅以外にも大きな意味がある。例えば、疲労の研究は150年以上の歴史の間に修正グッドマン則や修正マイナー則といった幹となる学問体系はほぼ確立されているが、これらは表面破壊の結果から導き出された経験則である。そのため、内部破壊という全く新しい破壊形態が出現した場合には妥当性を再確認する必要がある。また、表面破壊の場合には疲労強度は引張強度や硬さといった静的強度によって決定されてしまうため、材料科学を駆使する余地は少なかった。ところが、内部破壊の場合には介在物の寸法や種類といった材料科学的なファクターが大きく影響するようになる。特に、Ti-6Al-4V合金のように組織自体(ファセット)が起点となる場合には、材料科学抜きにメカニズムを語ることはできない。このように、内部破壊が問題となったことにより、疲労研究は再び材料科学を必要とする段階へと入っている。

## 参考文献

- 1) 西島敏, 石井明, 金澤健二, 松岡三郎, 増田千利: 金材技研疲労データシート資料No.5, (1989)
- 2) 江村秀樹, 浅見克敏: 日本機械学会論文集A編, 55-509 (1989), 45.
- 3) 金澤健二, 阿部孝行, 西島敏: 金材技研疲労データシート資料No.9, (1995), 16.
- 4) S. Nishijima and K. Kanazawa: Fat. Fra. Eng. Mat. Struct., 22 (1999), 601.
- 5) 酒井達雄, 武田光弘, 塩澤和章, 越智保雄, 中島正貴, 中村孝, 小熊規泰: 材料, 49 (2000), 779.
- 6) 村上敬宜, 野本哲志, 植田徹, 村上保夫, 大堀学: 材料, 48 (1999), 1112.
- 7) 村上敬宜, 金属疲労: 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, (1993)
- 8) 阿部孝行, 古谷佳之, 松岡三郎: 鉄と鋼, 88 (2002), 786.
- 9) W. P. Mason: J. Acoust. Soc. Am., 28 (1956), 1207.
- 10) Y. Furuya, S. Matsuoka, T. Abe and K. Yamaguchi: Scripta Mater., 46 (2002), 157.
- 11) 古谷佳之, 松岡三郎, 阿部孝行, 山口弘二: 日本機械学会論文集A編, 68-667 (2002), 477.
- 12) 阿部孝行, 古谷佳之, 松岡三郎: 日本機械学会論文集A編, 70-696 (2004), 1050.
- 13) 竹内悦男, 古谷佳之, 長島伸夫, 宮原健介, 松岡三郎: 日本機械学会論文集A編, 70-686 (2004), 1124.
- 14) 古谷佳之, 松岡三郎, 木村利光, 速石正和: 鉄と鋼, 91 (2005), 630.

- 15) Y. Furuya, H. Hirukawa, T. Kimura and M. Hayaishi : *Metall. Mater. Trans. A*, 38 (2007), 1722.
- 16) 松原幸生 : *CAMP-ISIJ*, 18 (2005), 470.
- 17) 蛭川寿, 古谷佳之, 早川正夫 : *鉄と鋼*, 93 (2007), 600.
- 18) 古谷佳之, 松岡三郎, 阿部孝行 : *鉄と鋼*, 88 (2002), 643.
- 19) Y. Furuya, S. Matsuoka and T. Abe : *Metall. Mater. Trans. A*, 34 (2003), 2517.
- 20) 古谷佳之, 松岡三郎 : *日本機械学会論文集 A 編*, 71-709 (2005), 1201.
- 21) 古谷佳之 : *日本機械学会論文集 A 編*, 73-732 (2007), 957.
- 22) J. Z. Yi, C. J. Torbet, Q. Feng, T. M. Pollock and J. W. Jones : *Mater. Sci. Eng. A*, 443 (2007), 142.
- 23) S. E. Stanzl-Tschegg, H. R. Mayer and E. K. Tschegg : *Ultrasonics*, 31 (1993), 275.
- 24) H. Q. Xue, H. Tao, F. Montembault, Q. Y. Wang and C. Bathias : *Int J Fatigue*, 29 (2007), 2085.

(2008年9月1日受付)