

特別講演

□第185回春季講演大会学術貢献賞(浅田賞)受賞記念
特別講演(2023年3月8日)

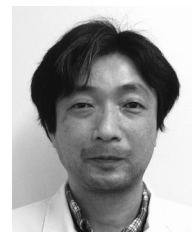
高強度金属材料のギガサイクル疲労と 超音波疲労試験

Gigacycle Fatigue of High-strength Metallic Materials and
Ultrasonic Fatigue Testing

古谷佳之

Yoshiyuki Furuya

物質・材料研究機構
構造材料研究拠点
グループ長



*脚注に略歴

1 はじめに

通常、鋼には疲労限が存在するため、疲労試験は 10^7 回まででよい。しかし、引張強さが1200 MPaを超える高強度鋼では疲労限が消滅し、 10^9 回を超えるギガサイクル域までの疲労試験が必要となる¹⁻³⁾。このようなギガサイクル疲労は、Ti-6Al-4V合金のような高強度の非鉄金属でも生じる。

高強度鋼に着目すると、ギガサイクル疲労は内部破壊により起こる。すなわち、通常の疲労破壊は表面からき裂が発生する表面破壊であるが、高強度鋼において 10^7 回以上で疲労破壊する場合には介在物等の内部の欠陥からき裂が発生する内部破壊が主となる。内部破壊の発生を理解するためには、2重S-N曲線^{4,5)}の考え方が便利である。これは、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、両者の重ね合わせにより実際のS-N曲線が決定されるという考え方である。この考え方に基づく、高強度化により表面破壊のS-N曲線が上昇することで、内部破壊のS-N曲線が出現する。そのため、高強度鋼では内部破壊が出現し、疲労限が消滅するという説明になる。このような特徴から、高強度鋼のギガサイクル疲労＝内部破壊の問題として捉えることができる。

ギガサイクル疲労の研究では、加速試験技術の確立が必要となる。通常の試験法では、比較的高速の100 Hzで試験したとしても、 10^9 回到達に3～4ヵ月を要するためである。それに対して、20 kHzという超高速を実現できる超音波疲労試験⁶⁻⁸⁾を利用すれば、 10^9 回に1日以内に到達する。そのため、超音波疲労試験を用いた加速試験技術の確立することが研究の第

一步であった。次に、様々な材料・条件でギガサイクル疲労特性を評価し、内部破壊の特徴を明らかにした。ここでは、水素の影響、平均応力の影響、寸法効果において通常の疲労とは異なる傾向が認められた。その後、内部破壊のメカニズムを特定し、ギガサイクル疲労強度の予測式を導いた。これが、著者が行ってきたギガサイクル疲労に関する研究の概要である。また、ギガサイクル疲労の研究に付随して、超音波疲労試験の普及促進に繋がるような研究も行ってきた。超音波疲労試験による介在物検査、高温超音波疲労試験装置の開発、規格標準化等である。本報では、このようなギガサイクル疲労と超音波疲労試験に関する著者の一連の研究を紹介する。

2 ギガサイクル疲労

2.1 超音波疲労試験による加速試験技術の確立

超音波疲労試験は1950年代⁶⁾に考案された手法であるが、妥当性の実証ができていなかったため、それまでは有効な試験法として利用することができなかった。従って、加速試験技術確立のポイントは、ギガサイクル疲労(＝内部破壊)における超音波疲労試験の妥当性を実証することであった。そこで、著者らは高強度鋼で内部破壊となる条件に焦点を絞り、通常の疲労試験による結果と超音波疲労試験の結果を比較した。その結果、高強度鋼で内部破壊となる条件では両者がよく一致することが明らかとなった⁹⁾。

また、著者は物質・材料研究機構の疲労データシート作製事業^{10,11)}にも従事しているが、同事業では100 Hzで3年間試

* 2000年3月に九州大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程を修了し、同年4月に科学技術庁金属材料技術研究所(現 国立研究開発法人物質・材料研究機構)に入所した。現在は、同機構の構造材料研究拠点疲労特性グループのグループ長。

験して得られた 10^{10} 回疲労試験結果と超音波疲労試験の結果を比較可能な形で提供している。これらの結果でも超音波疲労試験の結果は通常の試験結果とよく一致する傾向を示している。疲労データシートでは、高強度鋼以外にもTi-6Al-4V合金¹²⁾やアルミニウム合金¹³⁾等についてもギガサイクル疲労試験結果を開示しているが、このような高強度の非鉄金属でも同様の傾向となっている。

以上の結果から、超音波疲労試験は、高強度金属材料のギガサイクル疲労特性の評価に有効であると判断した。すなわち、超音波疲労試験による加速試験技術が確立された。

2.2 内部破壊の特徴

内部破壊には、通常の疲労（表面破壊）とは異なる特徴があることが分かった。ここでは、代表的なものとして、水素の影響、平均応力の影響、寸法効果について紹介する。

水素の影響は、水素チャージ法により評価した。すなわち、試験片を水素チャージし、超音波疲労試験を用いることで水素が抜ける前にギガサイクル疲労試験を完了させるという方法である¹⁴⁾。その結果、高強度鋼で内部破壊となる試験片では、水素チャージにより疲労強度が大きく低下した。反面、通常の表面破壊となる試験片では水素チャージの影響は小さかった。従って、水素の影響が大きいという点は内部破壊の特徴である。

平均応力の影響に関しては、Ti-6Al-4V合金で注意すべき傾向が観察された¹⁵⁾。平均応力がゼロ（応力比 $R = -1$ ）の条件ではTi-6Al-4V合金のギガサイクル域での疲労強度低下は比較的小さいが、平均応力が引張（応力比 $R \geq 0$ ）の条件

では内部破壊が顕著となり、ギガサイクル域で疲労強度が大きく低下する傾向となった。その結果、耐久限度線図を用いて平均応力の影響を評価すると、修正Goodman線図が危険側となった。通常、修正Goodman線図は安全側の予測を与えると認識されているため、この傾向は非常に危険である。従って、Ti-6Al-4V合金を使用する場合には、ギガサイクル疲労特性に対する平均応力の影響に注意する必要がある。

寸法効果は、高強度鋼で介在物を起点とした内部破壊が生じる場合に非常に大きいことが分かった¹⁶⁾。Fig.1に試験結果の代表例を示すが、疲労試験結果が試験片寸法に依存し、大きな試験片は低い疲労強度を示している。大きな試験片では大きな介在物が存在する確率が高くなるため、内部破壊起点となる介在物寸法が大きくなることが原因である。ここで、疲労試験結果が試験片寸法に依存するという点が、通常の疲労とは決定的に異なる点である。通常の疲労では試験片寸法の影響は小さいため、疲労試験結果を示すことでその材料の疲労特性を明らかにすることができる。しかし、高強度鋼で内部破壊となる場合には試験片寸法の影響が大きいため、疲労試験結果を示しただけではその材料の疲労特性を特定できないのである。

以上のような特徴の中で、特に寸法効果の問題は、早急に解決すべき課題と考えた。これは、高強度鋼のギガサイクル疲労特性を本質的に評価できていないことを意味していたためである。この問題を解決するためには、極値統計により介在物寸法を評価し、介在物寸法から疲労強度を求めるという手順²⁾を確立する必要がある。そのためには、内部破壊メカニズムを解明し、ギガサイクル疲労強度の予測式を求める必

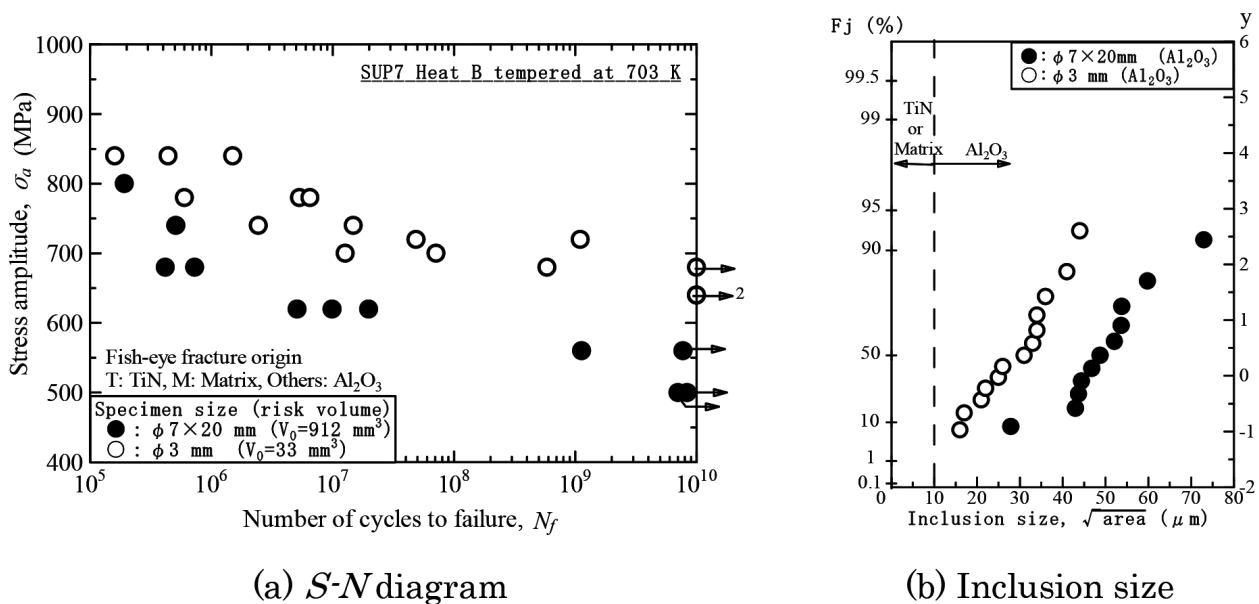


Fig.1 Gigacycle fatigue test results on high-strength steels using two sizes of specimens¹⁶⁾.

要があった。このような経緯により、次節で紹介する研究に着手した。

2.3 内部破壊メカニズムの解明と疲労強度予測式の導出

疲労強度の予測式を求めるためには、内部破壊メカニズムの解明が必要である。具体的は、き裂の発生、停留、伝ばのいずれが支配的かを特定する必要がある。そのためには内部き裂の伝ば速度を測定する必要があるが、内部き裂は直接観察することができない。そこで、Fig.2に示すようなビーチマーク法による内部き裂の伝ば速度の測定を行った¹⁷⁾。大きな内部き裂に対応するビーチマークは比較的簡単に得られたが、発生直後の微小な内部き裂に対応するビーチマークはなかなか得られなかった。無数の試行錯誤の後に、やっと得られたものがFig.2 (a) のようなビーチマークである。また、ビーチマークから内部き裂の伝ば速度を測定した結果がFig.2 (b) である。

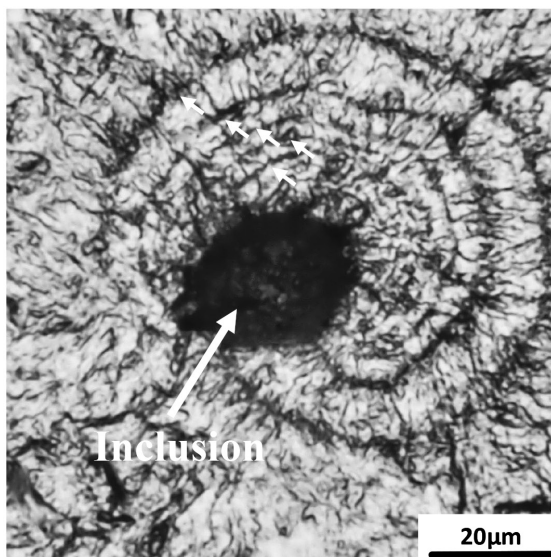
内部き裂伝ば速度の測定で鍵となっていたのは、極低速でのき裂伝ばの有無である。ギガサイクル疲労をき裂伝ばで説明するためには、格子間隔よりも遥かに小さい量で伝ばする極低速でのき裂伝ばが必要であった。Fig.2 (b) の結果では、微小な内部き裂が極低速で伝ばしていることを確認できる。すなわち、内部微小き裂の伝ばによりギガサイクル疲労を説明できることを示している。従って、破壊力学により内部微小き裂の伝ば寿命を評価すれば疲労強度の予測式を導くことができる。ただし、き裂伝ばモデルに通常のパリズ則を用い

ると介在物寸法の影響が過大評価され、妥当な予測式を導くことができなかった。そこで、内部微小き裂用の新しいモデルを提案し、予測式を導いた¹⁸⁾。このようにして、5材種の高強度鋼について疲労強度の予測式を求めることができた¹⁹⁾。

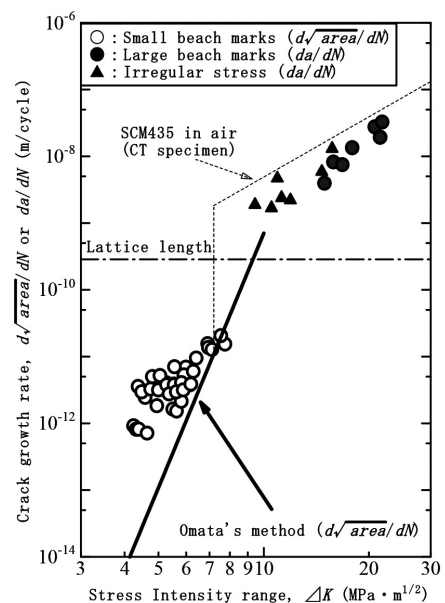
予測式を求める際には蓄積した膨大なデータを分析したが、その過程で疲労限が存在する可能性があることが分かった。10⁹~10¹⁰回の間にS-N曲線の折れ曲がり点が出現すると予測されたことから、10¹¹回まで試験すれば疲労限の存在を確認できることが分かった。そこで、10¹¹回までの試験を新たに実施し、疲労限の存在を確認した²⁰⁾。また、上記の予測式は、酸化物系介在物を起点して疲労破壊したデータを用いて求めたものである。そのため、他の介在物への適合性は不明であった。そこで、MnSを対象に適合性の評価を行った²¹⁾。ここでは、MnSの評価を行うための材料を作製し、疲労試験を実施した。その結果、MnSの細く伸びた形状を考慮するための有効寸法を定義すれば、酸化物系介在物と同様に評価できることが分かった。このように、現在は予測精度を高めるための研究を行っている。

3 超音波疲労試験

超音波疲労試験の普及促進に繋がる研究として最初に行ったのは、超音波疲労試験が介在物検査に応用できることを示した研究である²²⁾。超音波疲労試験を用いれば介在物を起点として内部破壊した破面を簡単に作製することができ、これ



(a) Small beach marks



(b) Crack growth rate

Fig.2 Internal crack growth rates measured by a beach mark method¹⁷⁾.

らを分析することにより介在物の評価を行うことができる。特に極値統計を行うためのデータを取得するためには最適である。また、試験片寸法を大きくする技術¹⁶⁾と組み合わせることで、高い精度での評価が可能となる。この方法の利点の一つは、介在物を顕微鏡で直接観察できる点である。直接観察で介在物の存在を示すことで、データの説得力が増す。また、通常の方法では検出された介在物が有害か否かを判断するのに高度な知識が必要となるが、破面を用いた介在物検査ではその判断は必要ない。

次に行ったのは、高温超音波疲労試験装置の開発である²³⁾。この開発の目的はタービンプレード材の評価であったため、1000℃という高い温度での試験を目標とした。超音波疲労試験は、共振を利用して試験片を疲労破壊させる試験法である。ヤング率が温度に依存するため、試験片や装置の共振点も温度によって変わる。そのため、試験片や装置の共振点を温度変化に対応させつつ、応力計算についても新たに解を求める必要があった。そこで、共振点の調整と装置を試験片の熱から保護するための断熱機能を備えた治具 (Rods) を開発するとともに、応力計算を行うためのプログラムを作製した。このようにして、Fig.3に示す装置が完成した。この装置では、通常の疲労試験結果と比較して良好な結果が得られた。

近年では、超音波疲労試験法の規格標準化に取り組んでいる。2017年には、日本溶接協会規格WES 1112: 金属材料の超音波疲労試験方法の作成を行った²⁴⁾。これは、超音波疲

労試験法を定めた世界で初めての規格である。翌年には、海外からの要望に応じて英語版のWES 1112も発行された。また、2021年には超高サイクル疲労の国際会議 (VHCF8) でWES 1112の講演を行った²⁵⁾。これらの海外への発信に対しては、予想以上の反響があった。例えば、米国のASTMではMaterials Performance & Characterizationという雑誌で超高サイクル疲労の特集号が企画される等の具体的な動きが始まった²⁶⁾。今後、海外規格へと波及していくことが期待される。

4 まとめ

ギガサイクル疲労の研究には加速試験が必要であるが、その際には20 kHzという超高速を実現できる超音波疲労試験が有効である。超音波疲労試験では試験結果の妥当性が議論となるが、高強度金属材料のギガサイクル疲労試験では良好な結果が得られる。超音波疲労試験を活用することにより、ギガサイクル疲労の様々な特徴が明らかとなった。近年では、高強度鋼でギガサイクル疲労強度の予測式を得る手法も確立された。また、ギガサイクル疲労を示す材料では通常の疲労限は消滅しているが、ギガサイクル域には新たな疲労限が存在していることも明らかとなった。このようにギガサイクル疲労の研究は成熟しつつある。

超音波疲労試験自体に関する研究も進展している。超音波疲労試験を介在物検査に利用するというアイディアは、超音波疲労試験が広く利用されるきっかけとなった。また、高温超音波疲労試験装置の開発等、試験技術の開発も進んでいる。近年では、国内の学協会において超音波疲労試験法の規格が作成され、規格標準化の動きも進展している。規格標準化の動きは海外へと波及する兆候を見せている。すなわち、超音波疲労試験とギガサイクル疲労の研究は海外でも盛んになることが予想される。

従来材のギガサイクル疲労の研究は成熟しつつあるように見えるが、新しい材料ではこれからである。新しい材料には、例えば、積層造形材がある。積層造形材では内部の欠陥が問題となるため、ギガサイクル疲労が懸念される材料といえる。

参考文献

- 1) 江村秀樹, 浅見克敏: 日本機械学会論文集A編, 55 (1989) 509, 45.
- 2) 村上敬宜: 金属疲労 微小欠陥と介在物の影響, 養賢堂, (1993).
- 3) 金澤健二, 阿部孝行, 西島敏: 金材技研材料強度データシート資料No.9 高強度鋼の疲労特性, (1995).

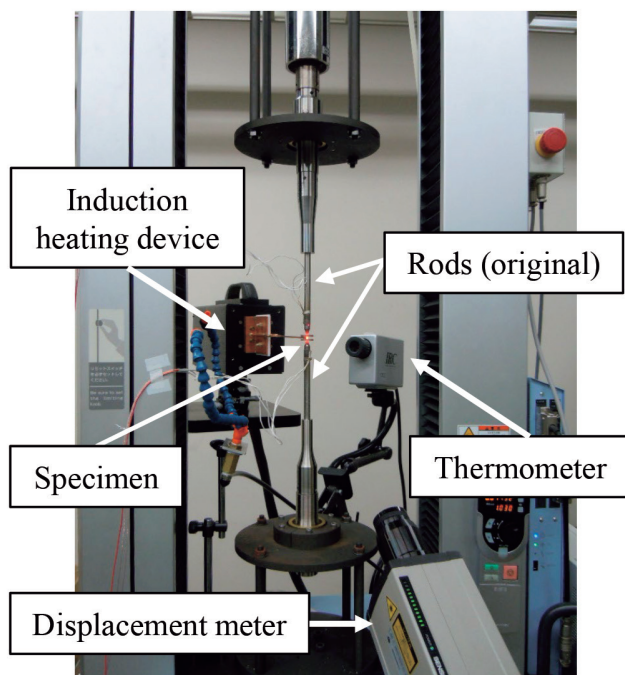


Fig.3 Developed high-temperature ultrasonic fatigue testing system. (Online version in color.)

- 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) W.P.Mason : J. Acoust. Soc. Am., 28 (1956), 1207.
- 7) C.Bathias and P.C.Paris : Gigacycle Fatigue In Mechanical Practice, New York, Marcel Decker, (2004).
- 8) H.Mayer:Fatigue Fra. Eng. Mater. Struct., 39 (2016), 3.
- 9) Y.Furuya, S.Matsuoka, T.Abe and K.Yamaguchi : Scr. Mater., 46 (2002), 157.
- 10) Y.Furuya, H.Nishikawa, H.Hirukawa, N.Nagashima and E.Takeuchi : Science and Technology of Advanced Materials, 20 (2019), 1055.
- 11) 古谷佳之, 阿部孝行, 竹内悦男, 松岡三郎 : 物質・材料研究機構 構造材料データシート資料No.19 高強度材料の超音波疲労特性, (2013).
- 12) 古谷佳之, 竹内悦男, 長島伸夫 : 物質・材料研究機構 構造材料データシート資料No.20 チタン合金の疲労特性, (2016).
- 13) H.Hirukawa, Y.Furuya, H.Nishikawa, N.Nagashima and E.Takeuchi : Science and Technology of Advanced Materials: Methods, 2 (2022), 232.
- 14) 蛭川寿, 古谷佳之, 早川正夫 : 鉄と鋼, 93 (2007), 600.
- 15) 竹内悦男, 古谷佳之, 長島伸夫, 松岡三郎 : 鉄と鋼, 96 (2010), 36.
- 16) 古谷佳之 : 鉄と鋼, 95 (2009), 426.
- 17) 古谷佳之 : 鉄と鋼, 101 (2015), 228.
- 18) 古谷佳之 : 鉄と鋼, 101 (2015), 494.
- 19) 古谷佳之 : 鉄と鋼, 102 (2016), 415.
- 20) 古谷佳之 : 鉄と鋼, 105 (2019), 1173.
- 21) 古谷佳之 : 鉄と鋼, 106 (2020), 799.
- 22) 古谷佳之, 松岡三郎, 阿部孝行 : 鉄と鋼, 88 (2002), 643.
- 23) 古谷佳之, 小林一夫, 早川正夫, 坂本正雄, 小泉裕, 原田広史 : 日本機械学会論文集A編, 78 (2012) 789, 718.
- 24) WES 1112 : 金属材料の超音波疲労試験方法, 日本溶接協会, (2017).
- 25) Y.Furuya, Y.Shimamura, M.Takanashi and T.Ogawa : Fatigue Fra. Eng. Mater. Struct., 45 (2022), 2415.
- 26) Y.Furuya, H.Nishikawa, H.Hirukawa, N.Nagashima and E.Takeuchi : Materials Performance and Characterization, <https://doi.org/10.1520/MPC20220082>.

(2023年3月29日受付)