

- 1 随筆,集まれエンジニア, 新年号, 特集, 溶接・接合基礎講座, 実験指南, じょうほう通, 受賞者講座, Spot Light・・・etc.
- 2 和文タイトル 「超音波疲労試験による金属材料のギガサイクル疲労特性評価技術」
- 3 和文著者名 古谷 佳之
- 4 英文タイトル 「Gigacycle fatigue of metallic materials evaluated by ultrasonic fatigue testing」
- 5 英文著者名 Yoshiyuki Furuya
- 6 キーワード 疲労, 金属材料, 超音波疲労試験, ギガサイクル, 規格標準化
- 7
- 9
- 10
- 11 著者顔写真 等々のスペース 1~14 行程度
- 12
- 13
- 14

1. はじめに

通常、高サイクル疲労試験の打ち切り繰返し数は 10^7 回である。一般的な鋼の疲労限が、 10^7 回までで決定できるためである。しかし、金属材料の中には 10^7 回では疲労限を確認できないものがあり、中には 10^9 回以上のギガサイクル疲労試験が必要となる場合がある。

鋼の場合、引張強さが 1200 MPa 以上の高強度鋼では通常の疲労限が消滅する¹⁻³⁾。通常の疲労では表面からき裂が発生する表面破壊となるが、高強度鋼では内部破壊が出現することで疲労限が消滅する。また、鋼の溶接継手について、熱影響部 (HAZ) を模擬した試験片でも内部破壊の出現と疲労限の消滅が観察されている⁴⁾。実際、溶接継手の疲労試験では、通常の疲労限は確認できていない⁵⁾。非鉄金属では、疲労限が存在しないものが多い。代表的なものは、アルミニウム合金である。チタン合金でも、Ti-6Al-4V 合金のような高強度の材料では疲労限が存在しないと認識されている。

ギガサイクル疲労特性の評価では、加速試験技術の確立が必要となる。比較的高速の 100 Hz で試験したとしても、通常の試験法では 10^9 回到達に 3~4 ヶ月を要する。そこで有効となるのが、超音波疲労試験である。超音波疲労試験では 20 kHz という超高速の疲労試験を実現でき、 10^9 回であれば 1 日で到達する。超音波疲労試験については、2017 年に日本溶接協会規格 WES 1112 が制定された⁶⁾。これは、現状では、世界で唯一の超音波疲労試験の規格である。

以上のような背景を踏まえ、本稿では、ギガサイクル疲労に関する著者らの一連の研究を紹介する。ここでは、加速試験技術の確立、ギガサイクル疲労強度の予測と疲労限、超音波疲労試験方法の規格標準化の 3 つの観点から最新の研究成果について述べる。

2. 加速試験技術の確立

超音波疲労試験は、1950 年代に考案された試験法⁷⁾であるため、試験法自体はある程度成熟していた。問題は、繰返し速度の影響が未解明で、試験結果の妥当性を確認できないことであった。そこで、著者らは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することで、繰返し速度の影響を明らかにするという地道な研究を行っている。

高強度鋼については、回転曲げ疲労試験により 100 Hz で 3 年間かけて取得した 10^{10} 回までの結果と、超音波疲労試験により 1 週間で取得した結果を比較した。ここでは、内部

破壊となる条件で試験を実施した。その結果、両者がよく一致し、高強度鋼で内部破壊となる場合には繰返し速度の影響が小さいことが分かった。

これらの結果は文献等で繰返し紹介しているが⁸⁾、ここで最近の事例として、高強度ステンレス鋼 SUS630 (17-4PH) の結果⁹⁾を図 1 に示す。この結果では、SUS630 が他の鋼種に比べて、ギガサイクル域での疲労強度低下が大きいことも同時に分かった。

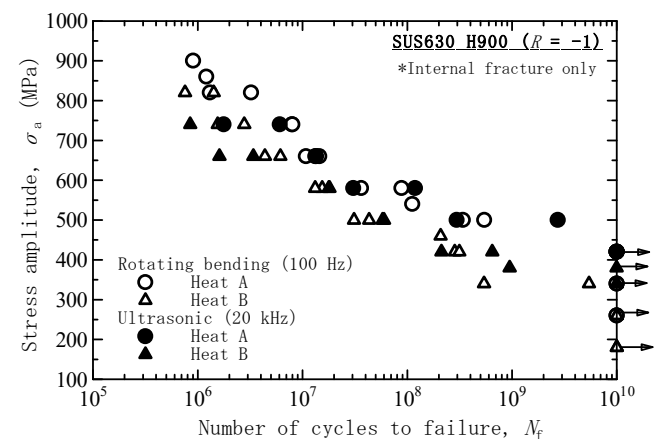


図 1 SUS630 のギガサイクル疲労試験結果

ただし、日本溶接協会の GCF3 小委員会で明らかになったように¹⁰⁾、同じ鉄鋼材料でも低強度で内部破壊が生じない材料では繰返し速度の影響を無視できない。具体的には、超音波疲労試験の結果が、通常の疲労試験結果より高めとなる。従って、繰返し速度の影響は一概には判断できないのであり、材料や条件ごとに調べていく必要がある。

チタン合金については、Ti-6Al-4V 合金について調べた。ここでは、3 年間の回転曲げ疲労試験は行わなかったが、軸力で 10^8 回までの疲労試験結果と比較した。その結果、高強度鋼と同様に、内部破壊となる条件では繰返し速度の影響が小さいことが分かった¹¹⁾。Ti-6Al-4V 合金では、応力比が $R \geq 0$ となる条件や、 $R = -1$ でも低応力の条件であれば内部破壊が生じやすい。ただし、表面破壊となる場合には、繰返し速度の影響が認められた。

アルミニウム合金については、3 年間の回転曲げ疲労試験を実施して繰返し速度の影響を調べた。対象は、A5083P-O、A7075-T6、A6061-T6、A2017-T4 である。その結果、

いずれの材料でも繰返し速度の影響が小さいことが分かった¹²⁾。アルミニウム合金では、応力比が高い条件で内部破壊が出現することがあるが、大半は表面破壊である。ただし、アルミニウム合金についても、鋳造材に関しては繰返し速度の影響が認められるという報告がある¹³⁾。

以上のように、複数の材料及び条件で繰返し速度の影響が小さく、超音波疲労試験を用いた加速試験が有効であることが分かった。傾向としては、高強度の材料と相性がよく、特に内部破壊を示すような材料であれば加速試験が可能な場合が多い。なお、超音波疲労試験では試験片の発熱を抑制するため、間欠試験により実質的な試験速度を落とすことがある。しかし、上記の超音波疲労試験は、WES 1112の基準を満たした上で連続試験により行っている。これは、600 L/min という WES 1112 推奨値の6倍の流量で、強力で試験片を空冷しているためである。このようにして、ギガサイクル疲労の加速試験技術が確立されつつある。

3. ギガサイクル疲労強度の予測と疲労限

ギガサイクル疲労強度の予測については、主に高強度鋼を対象に取り組んできた。高強度鋼で内部破壊が生じる場合には、介在物が起点となる場合が多いため、介在物寸法が疲労強度に大きな影響を与える。また、その場合には試験片寸法の影響が大きいという問題があった¹⁴⁾。この問題を解決するためには、介在物寸法をパラメータとした疲労強度の予測式が必要であった。そのような予測式は既に提案されていたが²⁾、著者は高強度鋼の内部破壊に特化した予測式が必要と考えた。

疲労強度の予測式を求めるためには、内部破壊について、き裂の発生と伝ばのいずれが支配的かを特定する必要がある。そこで、ビーチマーク法により内部き裂の伝ば速度を測定した。その結果、内部微小き裂の伝ばが支配的であることが分かった。この結果に基づき、内部微小き裂用の新しいき裂伝ばモデルを提案し、予測式を導いた。ここまでの内容は既に他の文献⁸⁾で紹介しているため、本稿ではその後の研究で明らかとなった内容を主に紹介する。

予測式を導く過程で、蓄積した多数のギガサイクル疲労データを分析した結果、ギガサイクル域で新たな疲労限が出現する可能性があることが分かった。具体的には、疲労寿命曲線が $10^9 \sim 10^{10}$ 回付近で折れ曲がり、水平となることが示唆された。そこで、新たな疲労限の存在を確認するため、 10^{11} 回までの疲労試験を実施した¹⁵⁾。 10^{11} 回までの疲労試験は、超音波疲労試験でも約2ヶ月を要する。図2は、介在物寸法の影響を除外するために、破壊力学パラメータで整理した疲労寿命曲線である。黒塗りのダイヤモンド(◆)が 10^{11} 回試験の結果であるが、疲労寿命曲線が水平になると仮定した予測線と非常によく一致している。すなわち、疲労限が存在することの証拠である。また、図3は 10^{11} 回試験後に強制的に内部破壊させた破面であるが、停留き裂の痕跡が確認された。つまり、新たに確認された疲労限も、通常の疲労限と同様にき裂の停留支配となっていることが分かった。疲労限の存在は、学術的な意義だけでなく、実用的な意義も大きい。なぜなら、疲労限に比べて十分に小さい応力であれば無視してもよいことを意味するためである。

次に、介在物の種類の影響について調べた。それまでの研

究は酸化物系介在物を主な対象としていたが、MnSも検討が必要な介在物であった。図4に、疲労破面で観察されたMnSの代表例を示す。MnSの特徴は、細く伸びるという点である。そのため、細く伸びた長手方向に力が作用した場合の疲労被害は小さいが、横方向に力が作用すると疲労被害が大きくなる。圧延や鍛造等の加工により細く伸びるため、加工度が影響することも知られていた。図5は、MnSを多く含む鋼材を特別に作製して、加工度の影響を調べた結果である¹⁶⁾。これらのデータを分析した結果、疲労強度の違いは介在物寸法の違いのみで説明できることが分かった。また、酸化物系介在物との違いも認められなかった。ただし、細く伸びている場合には有効介在物寸法を定義する必要があった。細く伸びた介在物の中央付近でき裂が発生し、両端付近はき裂の発生・成長に寄与しない。そのため、細く伸びた介在物では中央付近だけが有効な寸法となる。

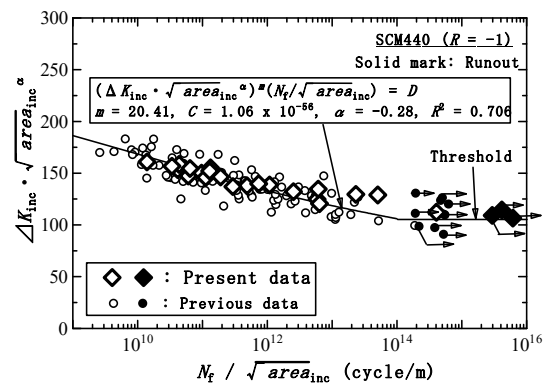


図2 10^{11} 回疲労試験結果をプロットした疲労寿命曲線 ($\sqrt{\text{areainc}}$ は介在物寸法)

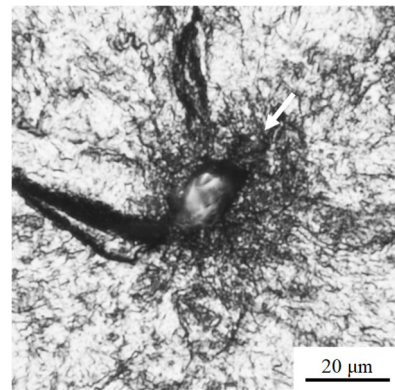


図3 10^{11} 回試験後に強制的に内部破壊させた破面 (矢印で示す黒い領域が停留き裂の痕跡)

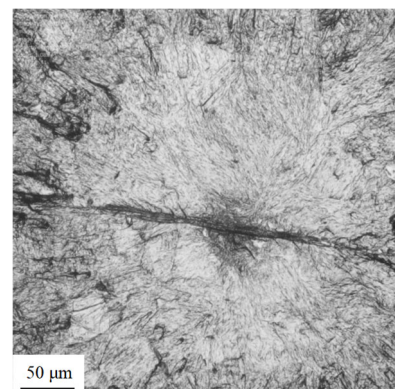


図4 疲労破面で観察されたMnS

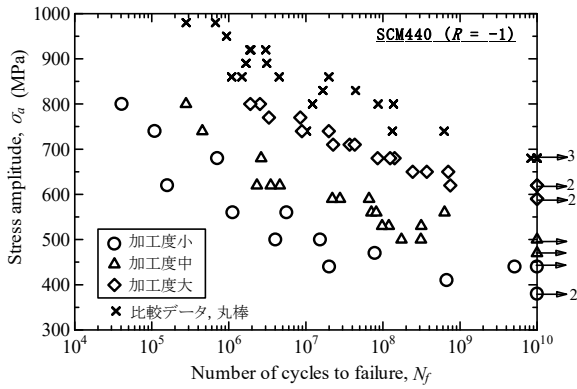


図5 MnSが多い材料の疲労強度と加工度の影響

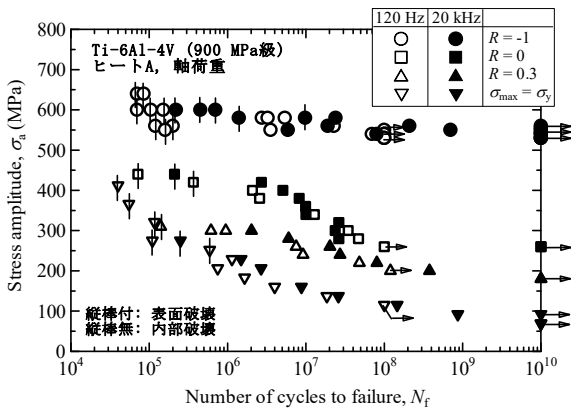
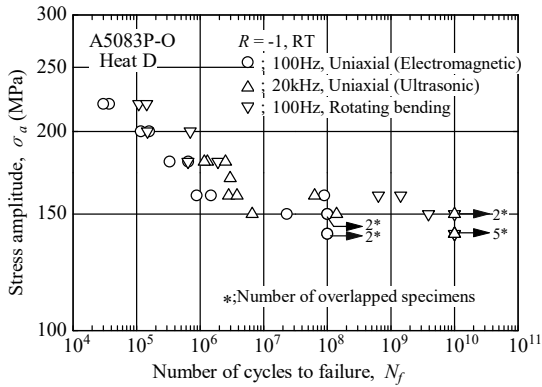
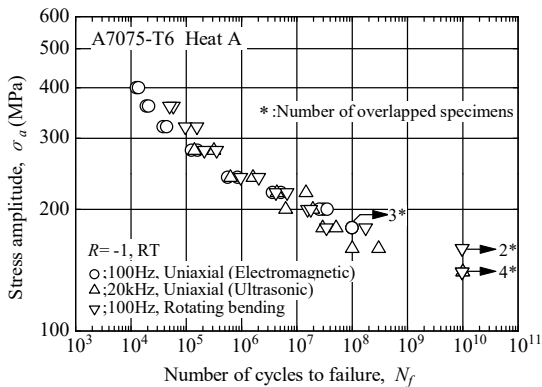


図6 Ti-6Al-4V合金のギガサイクル疲労試験結果



(a) A5083P-O



(b) A7075-T6

図7 アルミニウム合金のギガサイクル疲労試験結果

非鉄金属については、主に疲労限について新しい知見が得られた。疲労限が無いと思われていた材料でも、高強度鋼と同様に、ギガサイクル域で新たな疲労限が存在することが分かったのである。図6は、Ti-6Al-4V合金について、応力比を変えた複数の条件でギガサイクル疲労試験を行った結果である¹¹⁾。10⁹回以降での試験片の破断が皆無であることが分かる。他にも、ヒートや熱処理を変えた複数のデータがあるが、すべて同じ傾向となっている。すなわち、Ti-6Al-4V合金の全てのデータがギガサイクル域で疲労限が存在することを示している。

アルミニウム合金でも、新たな疲労限の存在を示すデータが得られている¹²⁾。図7にギガサイクル疲労試験結果の代表例を示すが、アルミニウム合金では材種によって疲労限が出現する寿命域が異なる。図7(a)のA5083P-Oでは疲労寿命曲線が10⁷回付近で折れ曲がる傾向を示している。一方、図7(b)のA7075-T6では10⁹回以降でも疲労強度が低下しているが、10⁹回以降での破断は皆無である。他にも複数のデータがあるが、傾向としては焼きなまし材(O材)では10⁷回付近で疲労限が出現するのに対して、析出硬化型(T材)ではギガサイクル域で疲労限が出現する。

以上の結果を素直に解釈すれば、ギガサイクル疲労の問題は、単に疲労寿命曲線の折れ曲がり点が出る寿命域の問題として理解することができる。つまり、折れ曲がり点が出ると通常の高サイクル域に出現すれば通常の疲労となり、それより長寿命域であればギガサイクル疲労となる。また、メカニズムに関しても、高強度鋼の内部破壊で停滞き裂が確認されていることから、全ての場合において停滞き裂支配の可能性が高い。つまり、通常の疲労限とギガサイクル域の疲労限とで出現するメカニズムも同じと思われる。

4. 超音波疲労試験方法の規格標準化

超音波疲労試験が広く使用されない背景には、繰返し速度の影響に加えて、試験方法を定めた規格が無いという問題があった。そこで、青山学院大学の教授であった小川武史先生の発案により、日本溶接協会にて規格作成を目指すことになった。日本溶接協会には、GCF3小委員会の成果があった。GCF3小委員会では、超音波疲労試験のラウンドロビン試験を行い、各機関で取得した結果がよく一致するという成果を得ていた¹⁰⁾。この結果から、試験方法を統一できる手応えがあった。

規格の作成は、まずは日本溶接協会に規格作成を提案し、原案作成委員会が発足してから具体的な作業に取り掛かるという流れになるが、実際には、小川先生の指示により、前倒して規格原案の作成に着手していた。そのため、原案作成委員会が発足して以降の流れは非常にスムーズで、1年足らずで規格の制定に至った。そのようにして完成したのがWES 1112である。WES 1112の制定は2017年であるが、2022年には語句の修正を加える改定を行った。

WES 1112の反響は、特に海外で大きかった。そのため、制定から1年後には、企業からの要望に応える形で英訳版が出版された。2021年には、超高サイクル疲労の国際会議であるVHCF8でWES 1112についての講演を行った¹⁷⁾。Plenaryで講演させて貰ったこともあり、VHCF8では大きな反響があった。また、米国のASTMでは、超音波疲労試験を含む超高サイクル疲労試験法についてGuideを作る動

きがある¹⁸⁾。詳細は文献¹⁸⁾に記載してあるが、WES 1112 が大きな影響を与えていることが分かる。WES 1112 では、高温での超音波疲労試験¹⁹⁾は、難易度が高いため範囲外とした。しかし、ASTM では高温も含めた野心的なものを作ろうとしている。

5. まとめ

ギガサイクル疲労特性の評価には、超音波疲労試験が有効である。超音波疲労試験では繰返し速度の影響が問題となるが、複数の金属材料及び条件で繰返し速度の影響が小さいことが分かっている。すなわち、超音波疲労試験でも妥当な結果が得られることが分かっている。

ギガサイクル疲労強度の予測に関しては、高強度鋼で内部破壊となる場合には疲労強度の予測式が提案されている。この予測式は、酸化物系介在物だけでなく、MnS にも適用できる。また、通常の疲労限が無い場合でも、ギガサイクル域で新たな疲労限が出現することが明らかとなった。具体的には、高強度鋼、Ti-6Al-4V 合金、アルミニウム合金において、 $10^9 \sim 10^{10}$ 回付近に新たな疲労限が存在することが分かった。従って、ギガサイクル疲労の問題は、疲労限が出現する寿命域の違いとして理解することができる。

超音波疲労試験方法の規格標準化については、日本溶接協会の WES 1112 が、現状では世界で唯一の規格である。WES 1112 の反響は特に海外で大きく、米国の ASTM でも超音波疲労試験を含めた超高サイクル疲労試験法の規格開発が進められている。

参考文献

- 1) 江村秀樹、浅見克敏、日本機械学会論文集 A 編、55-509(1989)、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).
- 4) H. Nishikawa and Y. Furuya: Gigacycle Fatigue Fracture of Low Strength Carbon Steel, Tested using a Simulated Heat Affected Zone Microstructure, ISIJ International, 59(2019), 1926-1928, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-086>.
- 5) Y. Furuya, H. Nishikawa, H. Hirukawa, N. Nagashima and E. Takeuchi: Catalogue of NIMS fatigue data sheets, Science and Technology of Advanced Materials, 20(2019), 1055-1072, <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1680574>.
- 6) WES 1112: 2017, 金属材料の超音波疲労試験方法.
- 7) W. P. Mason, J. Acoust. Soc. Am., 28(1956), 1207.
- 8) Y. Furuya, H. Hirukawa and E. Takeuchi: Gigacycle fatigue in high strength steels, Science and Technology of Advanced Materials, 20(2019), 643-656, <https://doi.org/10.1080/14686996.2019.1610904>.
- 9) Y. Furuya, H. Nishikawa, H. Hirukawa, N. Nagashima and E. Takeuchi: Data sheets on gigacycle fatigue properties of SUS630 (16Cr-4Ni-4Cu) stainless steel, NIMS fatigue data sheet, No. 120, National Institute for Materials Science, Tsukuba, (2016), <https://doi.org/10.11503/nims.1184>.
- 10) 受託研究報告書, 超高サイクル疲労 (GCF) 評価に関する研究 (Phase I), 日本溶接協会, (2011).
- 11) Y. Furuya, H. Nishikawa, H. Hirukawa, N. Nagashima and E. Takeuchi: Fatigue properties of titanium alloys disclosed in NIMS fatigue data sheets, Science and Technology of Advanced Materials: Methods, 3(2023), 2285711, <https://doi.org/10.1080/27660400.2023.2285711>
- 12) Y. Furuya, H. Nishikawa, H. Hirukawa, N. Nagashima and E. Takeuchi: Gigacycle fatigue properties of wrought aluminum alloys, Materials Performance and Characterization, 12(2023), 63-77, <https://doi.org/10.1520/MPC20220082>.
- 13) X. Zhu, J. W. Jones, and J. E. Allison: Effect of frequency, environment, and temperature on fatigue behavior of E319 cast aluminum alloy: stress-controlled fatigue life response, Metallurgical and Materials Transactions A, 39(2008), 2681-2688, <https://doi.org/10.1007/s11661-008-9631-1>.
- 14) Y. Furuya: Notable size effects on very high cycle fatigue properties of high strength steel, Mater Sci Eng A, 528(2011), 5234-5240, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.03.082>.
- 15) 古谷佳之, 高強度鋼の 10^{11} 回ギガサイクル疲労特性, 鉄と鋼, 105(2019), 1173-1178, <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.TETSU-2019-071>.
- 16) Y. Furuya: Gigacycle fatigue of high-strength steel caused by MnS inclusions, Mater Sci Eng A, 824(2011), 141840, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.141840>.
- 17) Y. Furuya, Y. Shimamura, M. Takanashi, and T. Ogawa: Standardization of an ultrasonic fatigue testing method in Japan, Fatigue Fra Eng Mater Struct 45, (2022): 2415-2420, <https://doi.org/10.1111/ffe.13727>.
- 18) M. Haghshenas and J. Simsiriwong: Very high cycle fatigue behavior of additively manufactured metals using ultrasonic fatigue testing: a critical assessment of potentials and challenges, Materials Performance and Characterization, 12(2023), 186-196, <https://doi.org/10.1520/MPC20220090>.
- 19) Y. Furuya, K. Kobayashi, M. Hayakawa, M. Sakamoto, Y. Koizumi and H. Harada: High-temperature ultrasonic fatigue testing of single-crystal superalloys, Materials Letters, 69 (2012), 1-3, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2011.11.066>.

