

鉄鋼材料の長寿命疲労強度評価

佐々木 哲也^{*1} 本田 尚^{*1} 山際 謙太^{*1}

高圧設備をはじめとする各種産業機器に使用される鉄鋼材料母材（素材）について、荷重繰返し数 10^7 回程度以上の疲労強度特性（超高サイクル疲労強度特性）を明らかにした。また、長寿命領域の疲労試験に使用される各種疲労試験が疲労試験結果に及ぼす影響についても検討した。

キーワード：寿命延伸，超高サイクル疲労，ニッケルクロム鋼，高張力鋼，疲労限。

1 はじめに

産業革命以来、労働現場で使用される各種機械の疲労破壊により、数多くの死傷災害が発生してきた。このため疲労破壊に関する研究が精力的に進められた結果、各種産業機器に使用される鉄鋼材料は明確な疲労限を有し、疲労限以下の応力振幅であれば無限回の繰返し荷重を受けても疲労破壊しないものとされてきた。

しかし、最近になって一部の高強度鋼が荷重繰返し数 10^7 回以上（超高サイクル領域）で疲労破壊することが明らかになり^{1), 2)}、超高サイクル領域での疲労破壊に関する研究が盛んに行われるようになってきている^{3)~7)}。超高サイクル領域で疲労破壊する場合の $S-N$ 線図は図1に示すような形状となり、いったん現れた水平部が荷重繰返し数の増加とともに低下し、疲労限が消失する。このような $S-N$ 線図は二重 $S-N$ 線図と呼ばれる⁸⁾。二重 $S-N$ 線図における単寿命領域では材料表面を起点とする表面破壊であるのに対し、長寿命領域では材料内部の介在物や組織割れを起点とする内部破壊であり、両者の破壊機構は異なることが知られている。

従来の研究によれば、超高サイクル領域で疲労破壊するのはビッカース硬さ HV400 以上、もしくは引張り強さ $\sigma_b=1200\text{MPa}$ 以上の高強度鋼であるとされている⁹⁾が、一般の産業機器で主に使用されているそれ以下の強度の鉄鋼材料による超高サイクル領域での疲労破壊に関

する研究はほとんど行われていないのが現状である。そこで、本サブテーマでは産業機械に使用される各種鉄鋼材料素材の長寿命疲労特性（荷重繰返し数 10^7 回程度以上）を明らかにすることを目的とする。

2 ニッケルクロム鋼切欠き材の長寿命疲労特性

ニッケルクロム鋼は各種産業機械のボルトや回転軸などに広く使用されており、しばしば疲労破壊事故が発生している。ここでは、代表的なニッケルクロム鋼である SNC631 鋼を使用して荷重繰返し数 10^7 回程度以上の疲労強度特性を明らかにする。

1) 実験方法

使用した疲労試験機は、回転曲げ疲労試験機（試験周波数 53-57Hz, 応力比 $R=-1$ ）、超音波疲労試験機（試験周波数 20kHz, 応力比 $R=-1$ ）、油圧サーボ疲労試験機（試験周波数 20Hz, 応力比 $R=0.1$ ）である。

超音波疲労試験機は（株）島津製作所製の USF-2000 であり、この試験機では図2に示すように試験片を 20kHz の縦波で共振させることによって完全両振りの疲労試験を行う。なお、超音波疲労試験機にはロードセルはなく、試験片端面の変位振幅を応力振幅に換算している。そこで、試験片に所定の荷重が負荷されていることを確認するため、試験片にひずみゲージを貼り付けて応力振幅 $\sigma_a=300\text{MPa}$ で疲労試験を行ったところ、図3のような波形が得られた。これにより、設定通りの荷重が負荷されていることが明らかになった。

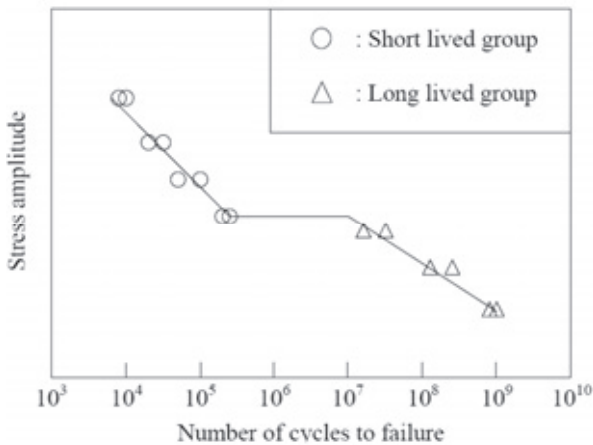


図1 二重 $S-N$ 線図の模式図

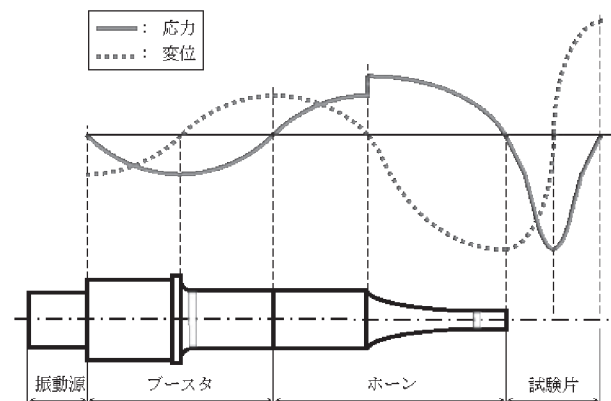
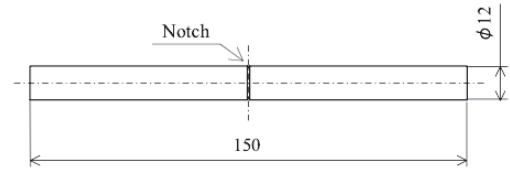


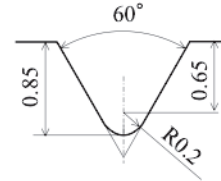
図2 超音波疲労試験機のしくみ

*1 機械システム安全研究グループ。

表1, 表2に供試材の化学成分と機械的性質をそれぞれ示す. 熱処理として焼入れ(850℃, 90分保持後油冷), 焼戻し(570℃, 300分保持後空冷)を施した. また, 図4に試験片形状を示す. 本研究では研究例の少ない切欠き材を対象とした. 機械要素にはねじの谷部や軸の段差部などの応力集中部が多数有り, 実際に切欠き部からの

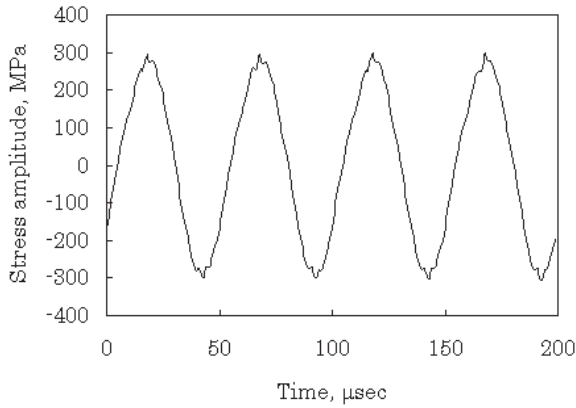


(c) 油圧サーボ用疲労試験片



(d) ノッチ部の詳細形状

図4 試験片形状



疲労破壊事例が多数ある.

図3 超音波疲労試験機による荷重波形

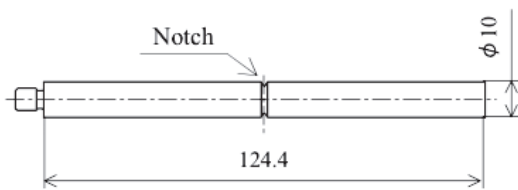
表1 供試材の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu
0.31	0.27	0.49	0.010	0.010	0.03

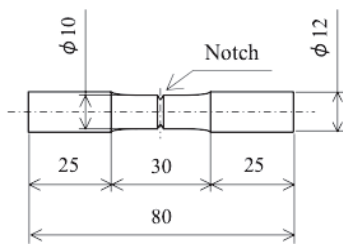
Ni	Cr
2.57	0.78

表2 供試材の機械的性質

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
876	956	21



(a) 超音波疲労試験片



(b) 回転曲げ疲労試験片

2) 実験結果

図5に実験結果のS-N曲線を示す. いずれの試験方法でもSNC631鋼切欠き材では荷重繰返し数 10^7 回以上の疲労限の消失は見られなかった. 3種の疲労試験機による疲労限を比較するために, 油圧サーボ疲労試験機による応力比 $R=0.1$ の疲労限を修正Goodman線図で応力比 $R=-1$ に換算した結果を図6に示す. 超音波疲労試験機による疲労限は回転曲げ疲労試験機や油圧サーボ疲労試験機による疲労限よりも若干高い値となったが, これは速度効果で説明できる¹⁰⁾.

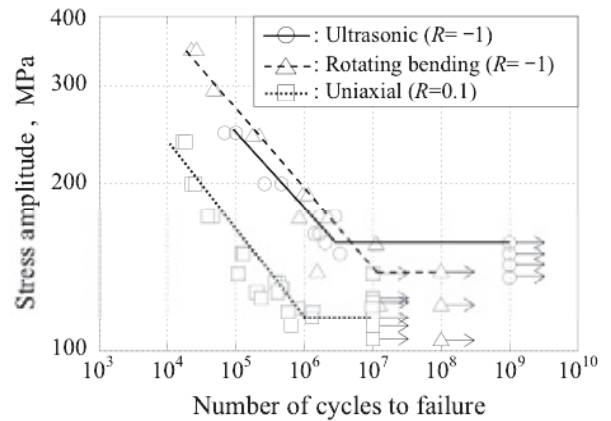


図5 SNC631鋼切欠き材のS-N線図

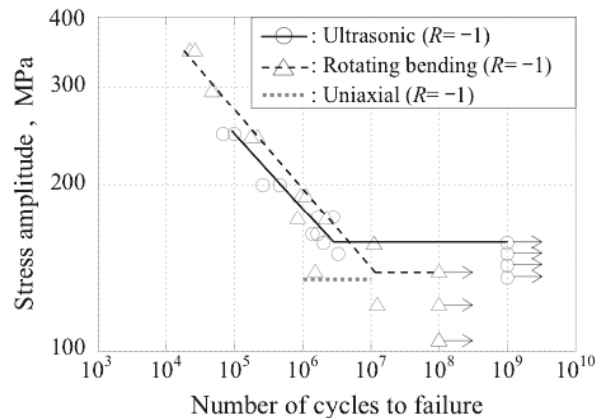


図6 SNC631鋼切欠き材の疲労限の比較

3 500～600MPa 高張力鋼の長寿命疲労特性

高張力鋼は各種産業機械に広く使用されている。ここでは、500～600MPa 級高張力鋼を使用して、荷重繰返し数 10^7 回程度以上の疲労強度特性を明らかにする。

1) 実験方法

使用した疲労試験機は、回転曲げ疲労試験機（試験周波数 50Hz, 応力比 $R=1$ ）である。供試材は 500MPa 級高張力鋼 SM490A, 600MPa 級高張力鋼 WEL-TEN 590RE である。

表 3, 表 4 に供試材の化学成分と機械的性質をそれぞれ示す。また、図 7, 図 8 はそれぞれ試験片形状, 供試材の組織観察結果である。

表 3 (a) SM490A の化学成分

C	Si	Mn	P	S
0.17	0.38	1.44	0.022	0.003

表 3 (b) WEL-TEN590RE の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.06	0.24	1.95	0.009	0.004	0.02

Cr	Mo	Ti
0.02	0.06	0.09

表 4 供試材の機械的性質

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SM490A	356	535	28
WEL-TEN590RE	621	671	35

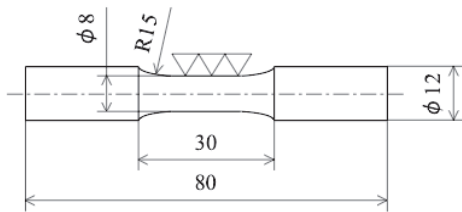
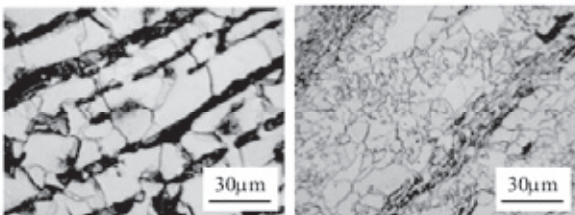


図 7 試験片の形状



(a) SM490A (b) WEL-TEN590RE

図 8 供試材の組織

2) 実験結果

図 9 に実験結果の $S-N$ 線図を示す。SM490A については荷重繰返し数 10^7 回以上で破断せず、明瞭な疲労限を示している。そして破断は全て表面起点の疲労破断であった。一方、WEL-TEN590RE については荷重繰返し数 10^7 回以上でも破断しており、×印は内部起点、それ以外は表面起点の疲労破断であった。

WEL-TEN590RE の内部起点による破断例 2 サンプルについて、走査型電子顕微鏡による観察を行ったところ、 10^6 回近傍で破断したサンプルは図 10 に示すような表面近傍の空洞が疲労破断の起点であることがわかった。この空洞は介在物が脱落して形成されたものと考えられる。一方、 10^7 回近傍で破断したサンプルは図 11 に示すような介在物（試験片表面からの深さ $30\mu\text{m}$, 主成分 Mg, Al, S, Ca）が起点となっていた。

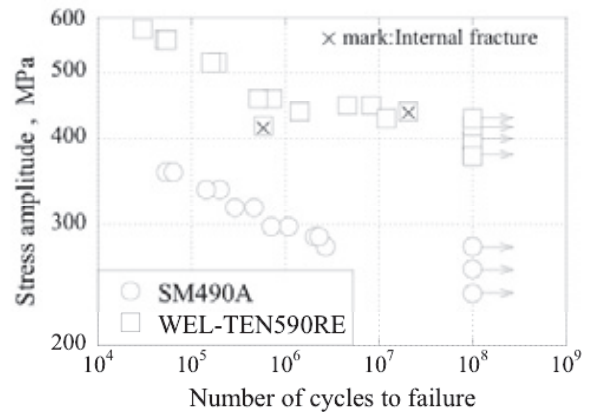
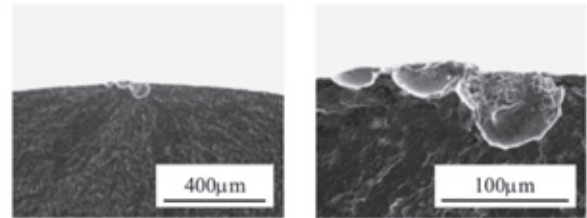
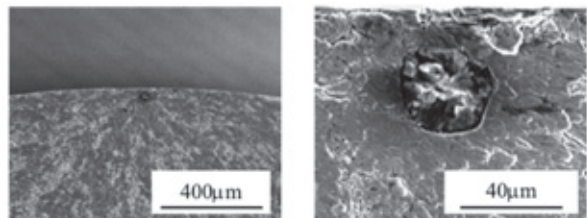


図 9 500～600MPa 級高張力鋼の $S-N$ 線図



(a) Macrograph. (b) Void.

図 10 起点部の空洞



(a) Macrograph. (b) Inclusion.

図 11 起点部の介在物

4 800～1000MPa 級高張力鋼の長寿命疲労強度評価

ここでは、移動式クレーンをはじめとする各種産業機器で、軽量化を目的として近年使用が増加している 800～1000MPa 級高張力鋼を使用して、荷重繰返し数 10^7 回程度以上の疲労強度特性を明らかにする。

1) 実験方法

使用した疲労試験機は、回転曲げ疲労試験機（試験周波数 50Hz, 応力比 $R=1$ ）、超音波疲労試験機（試験周波数 20kHz, 応力比 $R=1$ ）である。供試材は 800MPa 級高張力鋼 WEL-TEN 780P、1000MPa 級高張力鋼 WEL-TEN 950PE である。

表 5、表 6 に供試材の化学成分と機械的性質をそれぞれ示す。また、図 12、図 13 はそれぞれ超音波試験片形状（回転曲げ試験片形状は図 7 と同一、ただし $\phi=6\text{mm}$ ）、供試材の組織観察結果である。

表 5 (a) WEL-TEN780P の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.08	0.32	1.38	0.006	0.002	0.03

Cr	Mo	Nb	B
0.02	0.45	0.3	0.0007

表 5 (b) WEL-TEN950PE の化学成分

C	Si	Mn	P	S	Ni
0.14	0.31	1.44	0.008	0.001	0.02

Cr	Mo	Nb	B
0.02	0.56	0.3	0.0008

表 6 供試材の機械的性質

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
WEL-TEN780P	812	829	26
WEL-TEN950PE	1020	1041	22

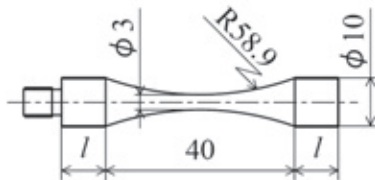
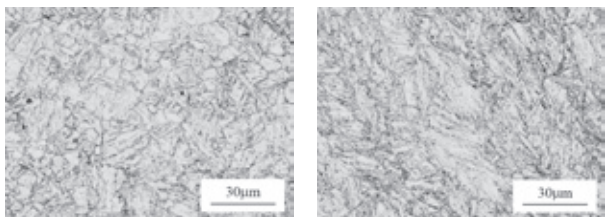


図 12 超音波試験片の形状



(a)WEL-TEN780P (b) WEL-TEN950PE

図 13 供試材の組織

2) 実験結果

図 14 に 800 ~ 1000MPa 級高張力鋼の回転曲げ疲労試験による $S-N$ 線図を示す。比較のため、前節の SM490A、WEL-TEN590RE の結果も併せて示している。WEL-TEN 780P、WEL-TEN950PE の回転曲げ疲労試験では全て試験片表面からの破壊で、内部破壊した例はなかった。このため、荷重繰返し数 10^7 回以上の超高サイクル領域で破壊した試験片はなかった。

図 15 に WEL-TEN 780P の超音波疲労試験による $S-N$ 線図を示す。荷重繰返し数 10^7 回以上の超高サイクル領域で破壊した試験片が 1 本あった。この試験片の破断面を走査型電子顕微鏡で観察したところ、低倍率の観察結果（図 16 (a)）からフィッシュアイが確認できた。また、高倍率の観察結果（図 16 (b)）から、試験片表面より $380\mu\text{m}$ の深さにある隣接した 2 個の介在物が疲労破壊の起点となっていることがわかった。

図 17 に本研究で対象とした高張力鋼の引張強さと疲労限の関係を示す。高張力鋼母材（素材）では、引張強さと疲労限がほぼ比例することがわかる。

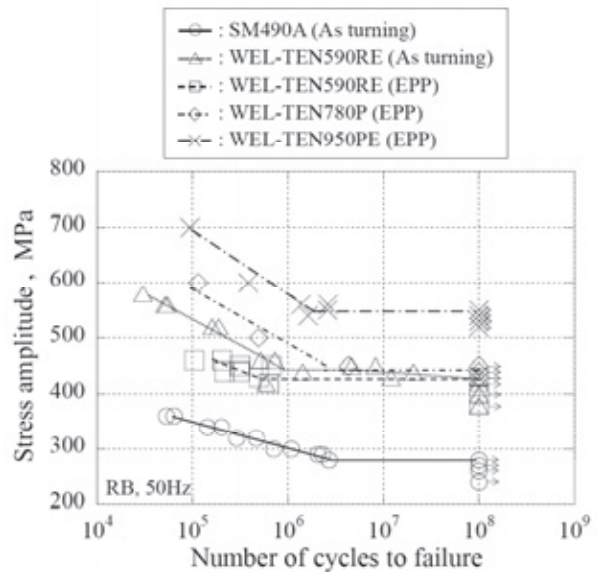


図 14 500 ~ 1000MPa 級高張力鋼の $S-N$ 線図（回転曲げ）

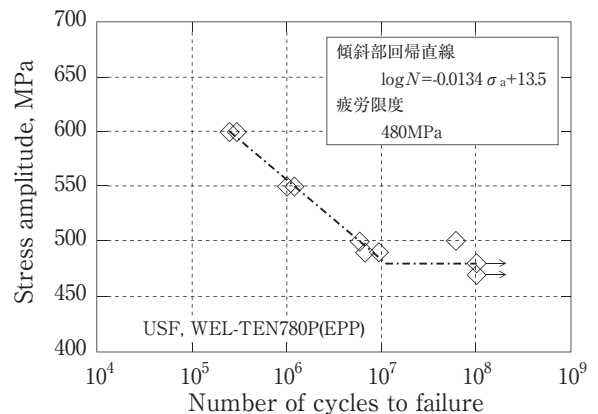
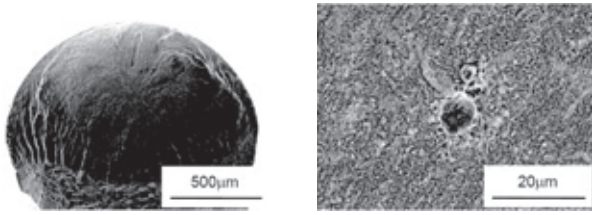


図 15 800MPa 級高張力鋼の $S-N$ 線図（超音波）



(a) 低倍率 (b) 高倍率

図 16 WEL-TEN780P 超高サイクル領域疲労破面の SEM 観察画像

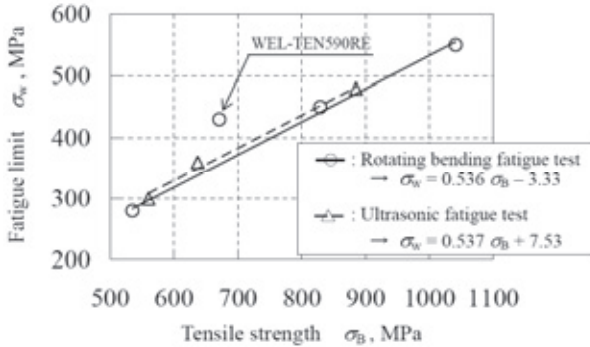


図 17 高張力鋼の引張強さと疲労限の関係

5 結論

- 1) ニッケルクロム鋼 SNC631 の切欠き材では全ての試験片が切欠き底を破壊起点としており、荷重繰返し数 10^7 回以上の疲労限の消失は見られなかった。
- 2) 500MPa 級高張力鋼 SM490A を用いた回転曲げ疲労試験では、荷重繰返し数 10^8 回まで内部破壊せず、明瞭な疲労限を示した。
- 3) 600MPa 級高張力鋼 WEL-TEN590RE を用いた回転曲げ疲労試験では、荷重繰返し数 10^8 回までの試験で 17 本中 2 本が介在物起点の内部破壊を示した。
- 4) 800MPa 級高張力鋼 WEL-TEN780P, 1000MPa 級高張力鋼 WEL-950PE を用いた回転曲げ疲労試験では、荷重繰返し数 10^8 回までの試験で内部破壊せず、明瞭な疲労限を示した。一方、WEL-TEN780P を用いた超音波疲労試験では、荷重繰返し数 10^8 回までの

試験で 11 本中 1 本が介在物起点の内部破壊を示した。

謝 辞

本研究は東京電機大学大学院理工学研究科知能機械工学専攻修士課程（平成 22 年 3 月修了）の坂本国雄君の協力により実施された。記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 内藤武志, 植田秀夫, 菊池雅男. 浸炭焼入材の疲労破面観察. 材料; 1983: Vol.32, No.361: 1162-1166.
- 2) 江村秀樹, 浅見克敏. 高強度鋼の疲労強度特性. 日本機械学会論文集 A 編; 1989: Vol.55, No.509: 45-50.
- 3) 小林英男, 轟章, 大村敏一, 佐野尊, 竹花立美. 二相ステンレス鋼の超高サイクル疲労特性とき裂進展寿命評価. 圧力技術; 2005: Vol.43, No.3: 146-150.
- 4) 竹内悦男, 古谷佳之, 長島伸夫, 宮原健介, 松岡三郎. Ti-6Al-4V 合金のギガサイクル疲労特性における速度効果. 日本機械学会論文集 A 編; 2004: Vol.70, No.696: 1124-1130.
- 5) 皮籠石紀雄, 小川遵, 陳強, 後藤真宏, 森野数博. Ni 基超合金の疲労強度に及ぼす繰返し速度の影響. 日本機械学会論文集 A 編; 2006: Vol.72, No.722: 1542-1549.
- 6) Bathias C. Relation Between Endurance Limits and Thresholds in the Field of Gigacycle Fatigue. ASTM Spec Tech Publ, No.1372; 2000: 135-154.
- 7) 高橋恭平, 小川武史. 超音波疲労試験によるオーステナイト系ステンレス鋼の超高サイクル疲労強度評価. 日本機械学会論文集 A 編; 2006: Vol.72, No.723: 1731-1736.
- 8) 越智保雄, 酒井達雄. 疲労の基礎と最近の話題 3. 金属材料の超長寿命域における疲労特性. 材料; 2003: Vol.52, No.4: 433-439.
- 9) 沢井達明, 木村勇次, 津崎兼彰, 竹内悦男, 松岡三郎. 改良オースフォームを適用した 1800MPa 級ばね鋼の長寿命疲労特性. 日本機械学会論文集 A 編; 2002: Vol.68, No.665: 49-56.
- 10) 毛利雅志, 上田貴志, 鈴木章彦. 日本機械学会講演論文集; 2001: No.01-16: 239-240.

(平成 22 年 9 月 21 日受理)