九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

回転曲げ疲労試験における繰返し速度の拡張について

山本，泰三
株式会社山本金属製作所

廉，本寧
株式会社山本金属製作所

後藤，浩二
九州大学大学院工学研究院海洋システム工学部門

https://hdl.handle.net/2324/4794488

出版情報：Transactions of the JSME (in Japanese). 83 (852), pp.16-00535-, 2017. The Japan Society of Mechanical Engineers
バージョン：
権利関係：

KYUSHU UNIVERSITY

Bulletin of the JSME
日本機械学会論文集
Transactions of the JSME (in Japanese)
Vol. 83, No.852, 2017

回転曲げ疲労試験における繰返し速度の拡張について

山本 泰三[*1]，廉 本寧[*2]，後藤 浩二[*3]

The upper limit extension of loading frequency in the rotating bending fatigue test

Taizoh YAMAMOTO [*1], Benning LIAN [*2] and Koji GOTOH [*3]
[*1, *2] Yamamoto Metal Technos Co., Ltd.
4-7 Setoguchi 2-chome, Hirano-ku, Osaka 547-0034, Japan
[*3] Kyushu University
744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

Received xx Month 201x

Abstract

Fatigue property in gigacycle regime is focused as an important subject in recent years. In such a long-life region, a tremendous long period is required to perform the fatigue tests. In order to overcome this difficulty, special types of fatigue testing machines in rotating bending whose loading type is cantilever bending has been developed. It is known that this type of fatigue machine can be performed much quickly comparing with the tension and compression fatigue testing machines. And these experimental results are consistent with much data obtained by using traditional testing machines like tension and compression fatigue testing machines and the rotating bending fatigue test machines whose loading type is uniform bending named as Ono type, though it is unclear that much data of an ultrasonic fatigue testing machine are consistent with them. Although it prefers to perform the fatigue tests as fast as possible, but the maximum frequency of a rotating bending fatigue test are limited because of the possibility of temperature rise in specimen caused by the cyclic plastic work and the heat transfer from fatigue testing machine. Such local temperature rise might affect the fatigue property. However, the appropriate loading frequency limit is unclear because of the difficulty of the temperature measurement in the fracture portion of a specimen precisely during the rotating bending fatigue test. An in-situ temperature measuring technique is proposed to measure the temperature at the fracture portion of the specimen in real time during the fatigue testing, and the validity to determine the loading frequency of a rotating bending fatigue testing machine is discussed in this study.

Key words： Maximum speed, Loading frequency, Rotating bending fatigue testing machine, Temperature Measuring, Fracture portion, Specimen, Cantilever type, Heat generation

1. 緒　　言

金属材料の疲労試験は結果にばらつきが比較的多いことから，十分な数の試験結果を取得することが重要であるが，広範囲の繰返し数範囲に対する S-N 曲線を得るためには長時間を要する問題がある．一方，近年，複数の負荷条件に対して同時に疲労試験が可能である多連式回転曲げ疲労試験機（Yamamoto, 2011; Yamamoto, 2014; MECHA VOCATION 2015）が開発されており，同試験機を用いることで，引張圧縮疲労試験よりも高能率に必要な試験結果を得られることが確認されている．一方，疲労試験期間の大幅な短縮という観点から近年その利用が拡大しつつある超音波疲労試験は, 負荷方式が構造物や機器が実際に曝されている状況と異なることが多いため, 同試験方法を適用して得られた S-N 曲線を用いて疲労強度を評価してよいのかという点について，必ずしも十分

No.16-00535 [DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
[*1] 株式会社山本金属製作所（〒547-0034　大阪府大阪市平野区背戸口 2-4-7）
[*2] 株式会社山本金属製作所（〒547-0034　大阪府大阪市平野区背戸口 2-4-7）
[*3] 九州大学 大学院工学研究院海洋システム工学部門（〒819-0395　福岡県福岡市西区元岡 744）
E-mail of corresponding author: yamakin@mx1.alpha-web.ne.jp
[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

な理解が得られているとは言い難い面も残されている．また，超音波疲労試験では試験中に繰返し塑性変形に起因する局部的な温度上昇が生じ，これが疲労試験に影響を及ぼすことが懸念されるため，試験中の温度環境について適切な制御が要求される（Ebara, 2006; Kirchner et al., 1985; Stanzl-Tschegg, 2006; Ishii, 2004）．一方，多連式片持ち式回転曲げ疲労試験機により得られる疲労試験結果は，過去に多くの実績を有する負荷方法と同じ方法により得られた結果であることから，過去の疲労試験結果や設計規格等で与えられる S-N 曲線と互換性を有するものとして活用されている（酒井他, 2003; 酒井, 西川, 2003）．しかし， JISZ 2274 では荷重の繰返し速度が原則として毎分 1000～5000 回と規定されているため，試験機の能力的にはさらなる高速繰返し負荷が可能でも，有効な試験結果を得るには制限速度範囲内で実験を行う必要がある．繰返し速度が制限されている理由の一つに塑性仕事に起因する試験片の局部温度上昇があるが，回転曲げ疲労試験中に生じる温度上昇に関しては S50C 鋼を対象に赤外線顕微鏡を用いて試料表面の温度を測定した報告（Higuchi et al., 1974）があるものの測定方法の詳細が不明であるなど，必ずしも十分な検証には至っていない．このような背景および確実に有効な疲労試験結果を得るために，必要以上に繰返し速度を抑制して実験を行っているのが現状であろう．本研究では，回転曲げ疲労試験中に生じる塑性仕事に起因する試験片破断部周辺の温度を正確にモニタリングすることで，負荷速度制限の妥当性について検討する．

2.　4 連式回転曲げ疲労試験機

上述のように，広範囲の繰返し数範囲に対する S-N 曲線を得るためには長時間を要すること，さらに特に近年需要が増しているギガサイクル領域の疲労試験に対する試験時間短縮の効果が大きい事を考慮し，本研究では同機種最新式の YRB300L （Yamamoto and Gotoh, 2016）を用いることとした．

Fig. 1　Dual-spindle rotating bending fatigue machine YRB300L (front).

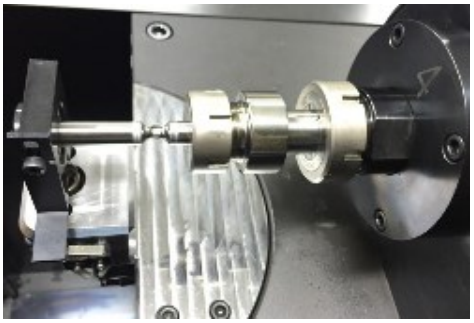

Fig. 2　Dual-spindle rotating bending fatigue machine YRB300L (chucking parts of specimen).

3.　回転曲げ疲労試験用無線式温度監視システム

図 3 は，著者らが新たに開発した無線式温度監視システムの概略図を示す．ツールホルダ内部に増幅器，A/D 変換器を配置し，熱電対のアナログ信号をデジタル信号に変換し，無線インタフェースを持つマイコンを用いて温度計測結果を無線で送信し，受信機に接続された PC により温度計測結果をリアルタイムで表示・記録でき，最大 3 点の温度同時計測ができる．その為，熱電対先端を試験片内部に接触させて温度を計測しながら，データ

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

を無線でパソコンに転送できる．温度監視ツールは，図 4 に示す交換可能な直径の異なるアダプタを組み付けることができ，アダプタの一方を温度監視ツールの Chuck に組み付け，もう一方を試験機本体のコレットチャックに組み付ける事で，片持ち式回転曲げ疲労試験機に取り付けることができる．

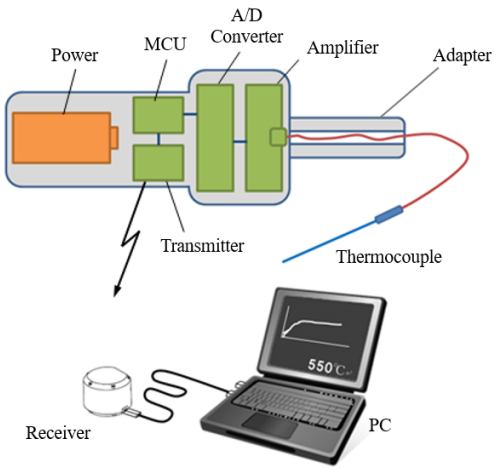

Fig. 3　Construction of the wireless temperature monitoring tool.

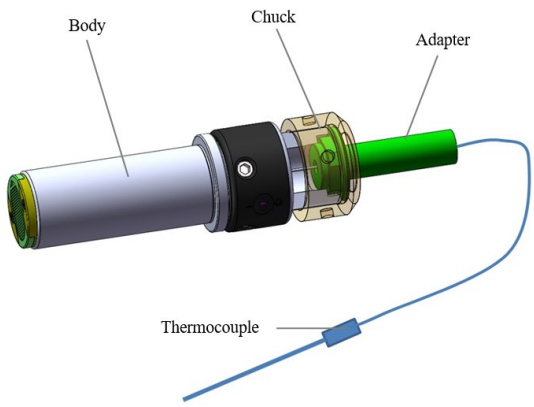

Fig. 4　Appearance of the wireless temperature monitoring tool.

4.　試験条件

4・1 材料および試験片

試験片材料はアルミニウム合金 A6005C (旧 A6N01S) -T5 及び難燃性マグネシウム合金 AZX611-F を用い，図 5 に示す形状として製作した．試験片材料の化学成分と機械的特性を表 1 から 4 に示す．

Table1　A6005C-T5　Chemical composition（wt%）.

Material	Type	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A6N01	T5	0.6	0.05	0.1	0.1	0.7	0.05	0	0.01	Bal.

Table2　A6005C-T5　Mechanical properties.

Material	TS [MPa]	0.2%YS[MPa]	El [%]
A6N01	280	240	8

Table3　AZX611-F　Chemical composition（wt%）.

Material	Type	Al	Zn	Mn	Fe	Si	Cu	Ni	Ca	Mg
AZX611	F	6.0	0.6	0.3	<0.002	0.02	<0.002	<0.002	1.0	Bal.

Table4　AZX611-F　Mechanical properties.

Material	TS [MPa]	0.2% YS [MPa]	El [%]
AZX611	260	200	10

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

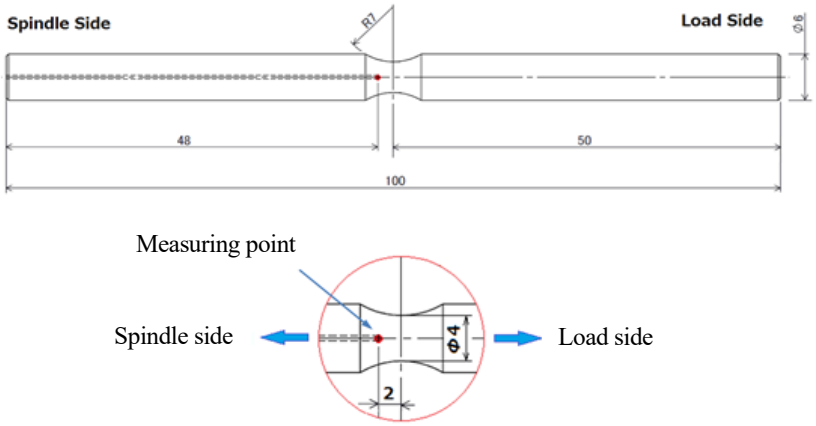

Fig. 5　Specimen for temperature monitoring.

4・2 温度測定方法

本試験機は，図 6 に示すように中空の回転軸の両側に試験片を取り付ける構造であり，無線式温度監視ツールを片側に取り付ければ，反対側の試験片に熱電対を接触させることで回転曲げ疲労試験中の試験片の中心部温度を測定することができる．また，高速で回転しても振れないように，ベアリングユニットを組付けた．試験片は，図 5 に示すように片側端面から試験片中心近傍まで直径 0.5 mm の熱電対接地用の穴を開けており，熱電対（JIS C1605-95 ClASS2 K 種）は温度監視ツールよりスピンドル内部を通し，試験片中心部までの穴に沿って組付けた．表 5 に各温度測定で行った試験条件を示す．

Table5　Fatigue testing conditions for temperature monitoring.

Material	Applied stress amplitude (MPa)	Rotational speed (rpm)
A6005C-T5	15	3000
		5000
		6000
AZX611-F		3000
		5000
		6000

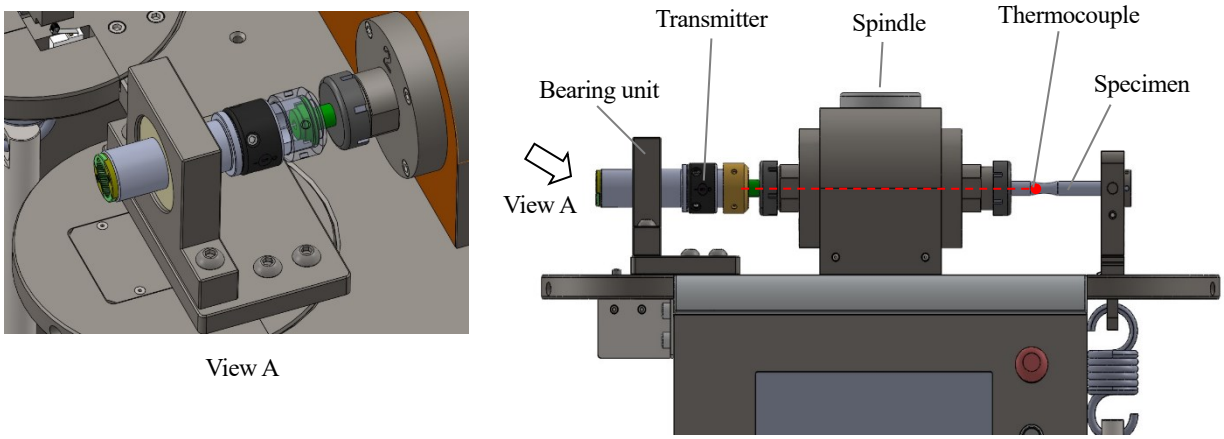

Fig. 6　Construction of the wireless temperature measuring system.

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

4・3 疲労試験

本実験では，片持ち回転曲げ疲労特性を調査するため，図 1，2 で示す 4 連式回転曲げ疲労試験機（㈱山本金属製作所製） を用い，実験環境は室温，大気中で行なった．

5. 実験結果

5・1 試験片中心部の温度測定結果

表 5 に示す温度測定条件にて，図 6 に示すように無線式温度監視ツールをセットし，各素材での載荷中の試験片最小断面部近傍の温度を測定した．

測定結果を図 7，図 8 に示す．各負荷回転速度において，試験開始後に温度は上昇するが，いずれの負荷条件においても温度上昇の度合いは緩やかとなり，それぞれ一定の値に収束する傾向を示した．なお，負荷回転速度が大きいほど，温度上昇量も大きいことが確認できる．しかしながら，いずれの測定結果でも温度上昇量は 20 度に満たないことから，本研究で採用した片持ち式回転曲げ疲労試験方法では，疲労試験結果に影響を与えるような発熱は生じないことを確認した．

また，応力振幅の違いによる温度上昇量を把握する為，試験片素材が A6005C-T5 に対し，負荷応力 80MPa，148MPa にて，試験回転数 6000rpm で温度測定を行った．図 10 に測定結果を示すが，負荷応力が 15MPa の際は，試験片が未破断であった為，収束した値を表示温度とし，80MPa，148MPa では，破断直前の温度を表記している．破断に至った２つの負荷応力においても，応力振幅 15MPa の時と同様，載荷開始後に温度上昇したが，破断に至るまでの温度上昇量は 20℃程度であることが分かった（Gotoh et al.,2016）．

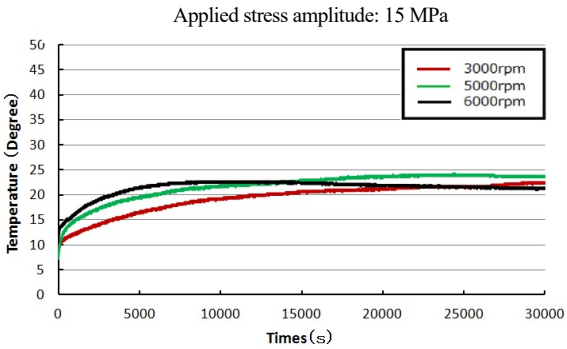

Fig. 7 Results of temperature monitoring (material: A6005C-T5).

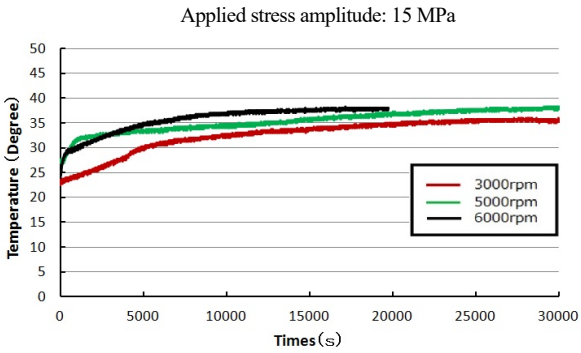

Fig. 8 Results of temperature monitoring (material:AZX611-F).

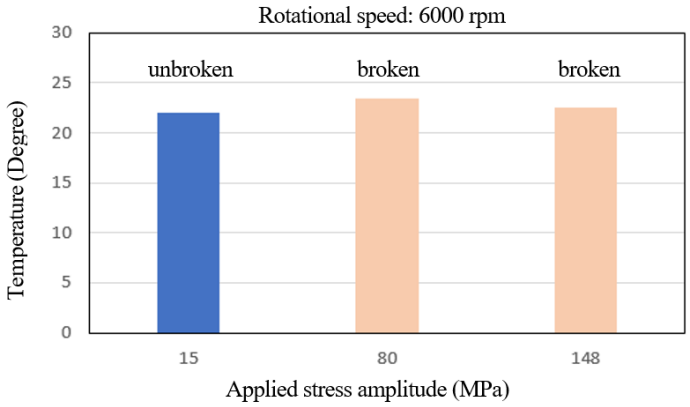

Fig. 9 Results of temperature monitoring (material: A6005C-T5).

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

5・2　熱電対接触用の穴が及ぼす疲労試験結果への影響

本研究で提案する測定装置を利用して回転曲げ疲労試験中の温度変化を把握するためには，試験片中心近傍まで熱電対接地用の穴加工を施す必要があるが，その穴が疲労試験に及ぼす影響について確認する必要がある．そこで表 2，3 に示す A6005C-T5 素材を用いて穴あけ加工有無の試験片を製作し，図 1 で示した試験機を用いて疲労試験を実施した．なお，穴あけ位置は図 7 に示したものと同じである．

試験結果を図 10 に示すが，穴あけ加工が疲労試験結果にはほとんど影響していないことが確認できる．本試験は回転曲げであるため，試験片の軸心に穴をあけても表面に発生する応力にはほとんど影響しない．すなわち，本研究で提案する試験中の温度モニタリングを用いながら疲労試験を行っても，試験結果に問題は無いと考えられる．

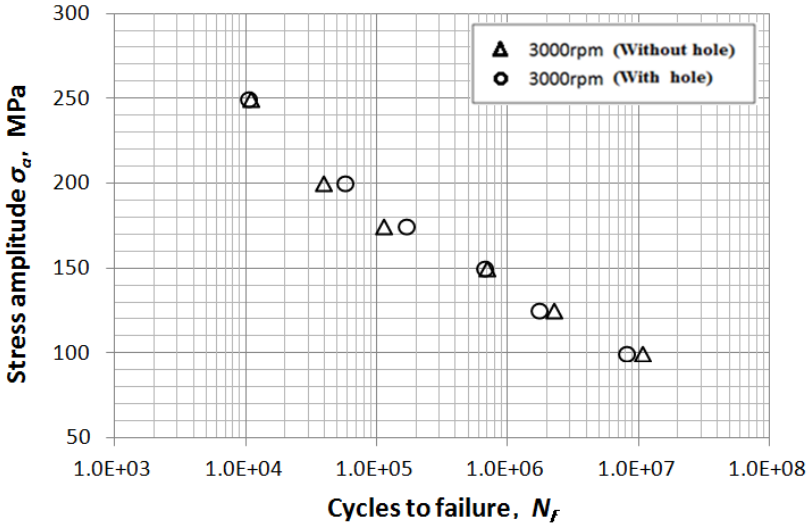

Fig. 10　Effect of thermocouple insert cylinder shape hole on fatigue test results.

5・3　速度制限超過条件における回転曲げ疲労試験結果

表 2，3 に示すアルミニウム合金 A6005C-T5 を用いて図 7 に示す形状（ただし，熱電対測定用穴開け加工無し）の試験片を製作し，現在の JIS 規格における回転曲げ疲労試験の制限負荷速度（5000 rpm）を上回る 6000 rpm と，50Hz/60Hz の一般的なモータ出力で疲労試験結果に影響を及ぼす温度上昇が生じないとされる回転数の 3000 rpm（酒井，西川, 2003）で疲労試験を行い，負荷回転速度の拡張可能性を検討した．

試験結果を図 11 に示すが，負荷速度 6000rpm と 3000rpm の試験結果の相違は通常の疲労試験結果で生じるばらつきと同程度とみなせる．また，4.2 に示した負荷速度 6000rpm における温度上昇測定結果も参照すれば，本研究で利用した片持ち式回転曲げ疲労試験では，負荷速度を少なくとも 6000 rpm まで上昇させて実施しても適切な疲労試験データの取得が可能であると考えられる．

仮に，試験速度を 3000rpm から 6000rpm に変更した場合，10^8 の負荷回数を与えるために必要な時間は，23.1 日から 11.6 日に短縮できる．近年その必要性が指摘されているギガサイクル疲労試験（負荷回数 10^9 回）の場合では，約 115 日の試験期間短縮を達成できる．

ただし，ここで示した検討結果は限られた材質，試験片形状，負荷方式（片持ち式）での評価であり，従来多用されている小野式回転曲げ疲労試験を含む全ての回転曲げ疲労試験で，負荷速度 6000rpm まで問題なく負荷速度を上昇できるとは言い難いことに留意すべきである． その為，規格そのものを更新するには，他の材料を用いて同様の検討を行うことが必要であろう．

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

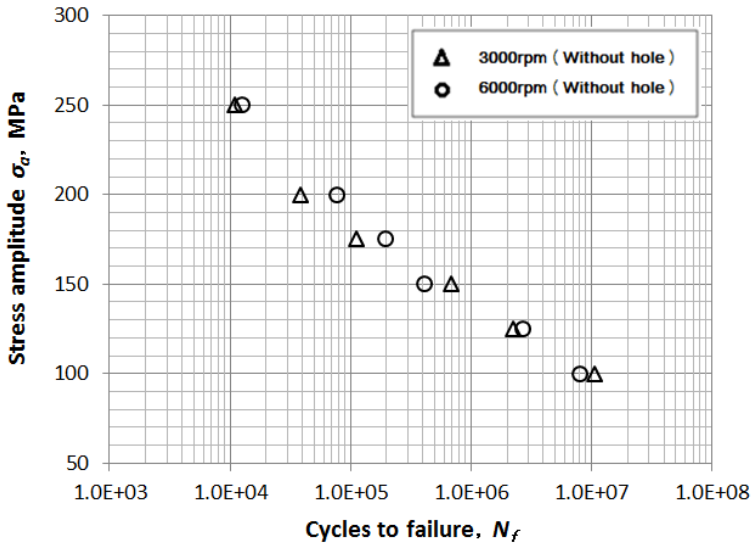

Fig. 11　Influence of rotating speed on fatigue test results.

6.　結　　言

開発した無線式温度監視システムは回転曲げ疲労試験中に試験片破断部の温度をリアルタイムでモニタリングすることができ，回転曲げ疲労試験の負荷速度限界値を調査する有効なツールであることが分かった．また，この測定結果から下記の事が確認された．

1) 試験片破断部近郊の温度上昇は，JIS 規格を満足する 3000 rpm と同規格で定められた速度制限（5000 rpm）を上回る 6000 rpm で比較すると，若干 6000 rpm の方が高いが，疲労寿命に影響を与えるような温度上昇はない．
2) 試験中の試験片温度を測定する為に，熱電対用の穴を試験片破断部周辺まで穴を空けたが，これの疲労試験結果に及ぼす影響は十分小さい．
3) 片持ち式回転曲げ疲労試験を適用する場合，JIS 規格で定められた速度制限（5000 rpm）を超える回転速度 6000 rpm まででの試験実施が，今回評価した材料では可能であると考えられる．

文　　献

Ebara, R., The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing – Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening, International Journal of Fatigue, Vol. 28 (2006), pp. 1465-1470.

Gotoh, K., Nakagome, S. Yamamoto, T. and Enomoto, M., Fatigue performance of Light metals (A6005C and AZX611) and their FSW joints, Proceedings of 4th European Conference JOIN-TRANS 2016 on Joining and Construction of Rail Vehicles (2016).

Higuchi, M., Imai, Y. and Takenaka, M., Heat generation associated with rotating bending fatigue of a steel and deduction of the fatigue notch factor, Bulletin of the JSME, Vol. 17, No.113 (1974), pp. 1389-1396.

Ishii, H., Yamada, T. and Okada, Y., Very high cycle fatigue strengths of thin sheet metals, Proceedings of VHCF-3 (2004), pp. 420-426.

Kirchner, H. O. K., Kromp W., Prinz F. B. and Trimmel P., Plastic deformation under simultaneous cyclic and unidirectional loading at low and ultrasonic frequencies, Materials Science and Engineering., Vol. 68 (1985), pp. 197-206.

酒井達雄，田中伸明，岡田憲司，古市真知子，西川出，菅田淳，金属材料疲労強度データベースによる SCM435 鋼の超長寿命確率疲労特性の解析，日本機械学会論文集 A 編, Vol. 70, No. 696（2003), pp. 2004-2008.

酒井達雄，西川出，疲労の基礎と最近の話題，5.疲労強度データベースと S-N 曲線回帰法，材料, Vol. 52, No. 6 (June 2003), pp. 709-715.

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535]
© 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers

新堂正俊，松田亮，古木辰也，廣垣俊樹，青山栄一，無線多機能ホルダシステムを用いたエンドミル工具の多点加工温度モニタ，砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2015), pp. 359-364.

Stanzl-Tschegg, S., Fatigue crack growth and thresholds at ultrasonic frequencies, International Journal of Fatigue, Vol. 28 (2006), pp. 1465-1470.

Yamamoto, T., Kokubu, A., Sakai, T., Kiyama, I. and Nakamura, Y., Development and fundamental performance of dual-spindle rotating bending fatigue testing machine with special device providing corrosive environments, VHCF5 (2011).

Yamamoto, T., Kokubu, A., Sakai, T. and Nakamura, Y., Development and several additional performances of dual-spindle rotating bending fatigue testing machine GIGA QUAD, VHCF6 (2014).

山本泰三，廉本寧，後藤浩二，回転曲げ疲労試験中の塑性仕事に起因する局部温度上昇の検討について，日本機械学会年次大会 (2016).

株式会社山本金属製作所ホームページ，極限環境下におけるギガサイクル 4 連式回転曲げ試験機の開発，MECHA VOCATION 2015 Vol. 22, p.13 <http://www.yama-kin.co.jp/news/2014/image/141204081.pdf>（参照日 2016 年 8 月 27 日）.

References

Ebara, R., The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing – Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening, International Journal of Fatigue, Vol. 28 (2006), pp. 1465-1470.

Gotoh, K., Nakagome, S. Yamamoto, T. and Enomoto, M., Fatigue performance of Light metals (A6005C and AZX611) and their FSW joints, Proceedings of 4th European Conference JOIN-TRANS 2016 on Joining and Construction of Rail Vehicles (2016).

Higuchi, M., Imai, Y. and Takenaka, M., Heat generation associated with rotating bending fatigue of a steel and deduction of the fatigue notch factor, Bulletin of the JSME, Vol. 17, No.113 (1974), pp. 1389-1396.

Ishii, H., Yamada, T. and Okada, Y., Very high cycle fatigue strengths of thin sheet metals, Proceedings of VHCF-3 (2004), pp. 420-426.

Kirchner, H. O. K., Kromp, W., Prinz, F. B. and Trimmel, P., Plastic deformation under simultaneous cyclic and unidirectional loading at low and ultrasonic frequencies, Materials Science and Engineering., Vol, 68 (1985), pp. 197-206.

Sakai, T., Tanaka, N., Okada, K., Furuichi, M., Nishikawa, I. and Sugata, A., Statistical Fatigue Properties in Ultra-Long-Life Regime for SCM435 Steels Based on JSMS Database on Fatigue Strength of Metallic Materials, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A Vol.70, No.696 (2003), pp. 2004-2008 (in Japanese).

Sakai, T., Nishikawa, I. Fundamentals and Recent Topics on Fatigue, V: Databases on Fatigue Strength and Regression Method of S-N Curves, Material, Vol. 52, No. 6 (June 2003), pp. 709-715,

Shindou, M., Matsuda, R., Furuki, T., Hirogaki, T. and Aoyama, E., Multipoint simultaneous monitoring of end-mill processing temperatures with wireless telegraphic multifunctional tool holder, Transactions of the Abrasive Technology Conference (2015), pp. 359-364 (in Japanese).

Stanzl-Tschegg, S., Fatigue crack growth and thresholds at ultrasonic frequencies, International Journal of Fatigue, Vol. 28 (2006), pp. 1465-1470.

Yamamoto, T., Kokubu, A., Sakai, T., Kiyama, I. and Nakamura, Y., Development and fundamental performance of dual-spindle rotating bending fatigue testing machine with special device providing corrosive environments, VHCF5 (2011).

Yamamoto, T., Kokubu, A., Sakai, T. and Nakamura, Y., Development and several additional performances of dual-spindle rotating bending fatigue testing machine GIGA QUAD, VHCF6 (2014).

Yamamoto, T., Lian, B. and Gotoh, K., The study of the heat generation caused by the cyclic plasticity work during rotating bending fatigue test, JSME (2016).

Website of Yamamoto Metal Technos CO., LTD., Development of Gigacycle Dual-Spindle Rotating Bending Fatigue Testing Machine under ultimate environment, MECHA VOCATION 2015 Vol. 22, p.13 (online), available from < http://www.yama-kin.co.jp/news/2014/image/141204081.pdf >, (accessed on 27 August, 2016) (in Japanese).

[DOI: 10.1299/transjsme.16-00535] © 2017 The Japan Society of Mechanical Engineers