

サーモグラフィによる回転曲げ疲労限度の評価

早 房 敬 祐* 中 本 浩 章*
因 幡 和 晃** 岸 本 喜久雄**

Evaluation on Rotational Bending Fatigue Limits using Thermography

by Keisuke HAYABUSA, Hiroaki NAKAMOTO, Kazuaki INABA, & Kikuo KISHIMOTO

Simplified thermography-using methods are being developed for evaluating the fatigue limits of materials. By these methods, fatigue limits are determined as the load stress applying at the time of a surge in temperature, i.e. temperature changes due to stress amplitude increase on an objects under a cyclic load are measured. Although many such methods have been tested for evaluating tensional compression and bending loads on flat objects, there are almost no examples of actual cases where they had been used for evaluating the rotational bending of shafts. A thorough study had been made on the effectiveness of a thermography-using method for evaluating the rotational bending fatigue of a shaft, including the time dependency of temperature changes and the determination of an objective fatigue limit.

Keywords: Fatigue limit, Fatigue testing, Rotational bending, Thermography, Dissipated energy, Lock-in, Least squares method, S-N curve, Steady state, Inflection point

1. 緒 言

機械構造物の設計を行う際、材料の疲労限度は必要不可欠なデータである。しかし、疲労限度を求めためには多くの試験片に対して長時間の試験を行う必要があり、多大なコストがかかる。これに対して、疲労限度の簡便評価法としてサーモグラフィを用いる方法が開発されている。この方法は繰返し荷重が負荷された試験片について温度変化を計測し、温度が急上昇し始める変曲点を疲労限度とするものである。単一の試験片にて短時間の測定で済むため、疲労限度を求めるコストを大幅に削減できる。この試験で求められた疲労限度は実際の疲労限度と必ずしも一致するものではないが、実際の疲労試験を行う前にこの試験を実施すれば効率的に疲労限度が求められる。

この手法については、平均応力の影響¹⁾、実機への適用²⁾、切欠部の測定³⁾など、様々な研究が行われているが、装置として荷重と測定を同期させるロックイン方式（ロッ

クイン方式とは試験の荷重と熱画像の撮影を同期させる方式)のサーモグラフィが用いられており、装置が高価であることが問題であった。一方、大野らは回転曲げ疲労試験に対してセラミックコンデンサを使って温度測定を行い、疲労限度の推定を行っていることから⁴⁾、温度測定には非ロックイン方式の通常のサーモグラフィでも十分適用できると考えられる。そこで本研究では、回転曲げ疲労試験を対象として通常のサーモグラフィを用いて疲労限度の推定を行い、特に、i) 回転曲げ疲労試験に対する通常のサーモグラフィ適用の妥当性、ii) 応力-温度変化曲線における変曲点の探索法、iii) 温度変化の時間的な影響、の3点について検討を行う。

2. 実験方法

2-1 引張試験及び回転曲げ疲労試験

サーモグラフィによる推定に先立ち、測定対象であるASTM A105試験片について引張試験、回転曲げ疲労試験を実施した。試験片は両者とも図1に示した長さL=210 mm、平行部の径φ10 mmのダンベル型試験片を用いた。引張試験は島津万能試験機UHI 500 kNを使用し、引張強さは494 MPa、降伏応力は323 MPaであった。一方、回転曲げ疲労試験は図2に示す島津小野式回転曲げ

* 風水力機械カンパニー 開発統括部 技術開発室 材料技術グループ

** 東京工業大学大学院

疲労試験機H7型を使用した。回転速度を 2800 min^{-1} とし、試験片は両端部約80 mmをチャックにて固定し、JIS Z 2274に準拠して試験を実施した。これにより、**図3**に示すS-N曲線が得られ、疲労限度は260 MPaとなった。

2-2 サーモグラフィ測定

続いてサーモグラフィによる疲労限度推定法について説明する。基本は前述の疲労試験と同条件だが、回転速度は 800 min^{-1} (13.33 Hz)、試験片表面にはつや消し黒色塗料を施した。温度測定にはNEC avio社製のサーモグラフィ

TH7800N Fusionを用いた。ロックイン方式のサーモグラフィで疲労限度を測定する場合は荷重を徐々に増加させて応力-温度変化線図を得る。これに対して本研究では時間経過の影響を調べるため、時間-温度変化の測定を様々な荷重下で行い、荷重-時間-温度変化データとする。**図4**はサーモグラフィによる温度画像の例であるが、試験片の中心に若干のムラが生じている。よって測定はこの領域を避けた 4×4 ピクセルの範囲とし、その平均値を計測値とした。

3. 実験結果と考察

3-1 時間-温度変化線図

図5に各応力の時間-温度変化データを示す。ここでは、散逸エネルギーへの変換は行わずに温度変化データのままで表示する。温度変化が一定(すなわち定常)となる時間は応力で異なり、高応力ほど長時間となっていることが分かる。応力300 MPaの場合は300 sでも温度上昇が起こっており、定常に達していない。

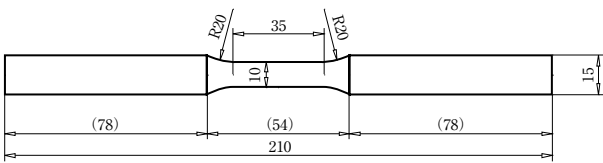


図1 回転曲げ疲労試験片
Fig. 1 Test specimen

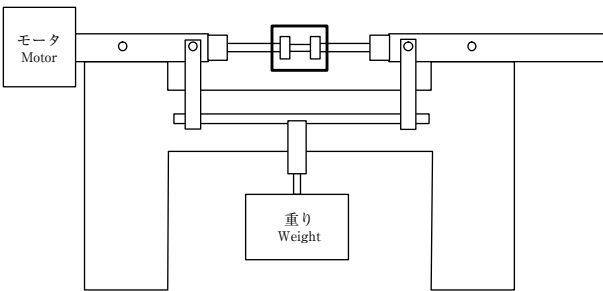


図2 回転曲げ試験機
Fig. 2 Rotational bending test

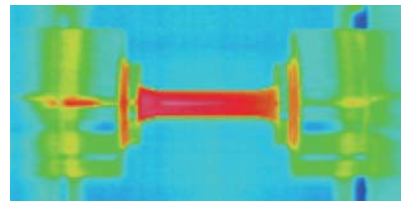


図4 温度分布
Fig. 4 Temperature distribution

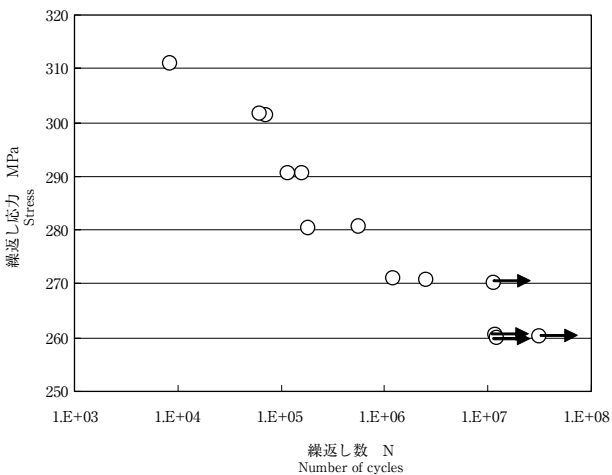


図3 ASTM A105におけるS-N曲線
Fig. 3 S-N curve for ASTM A105

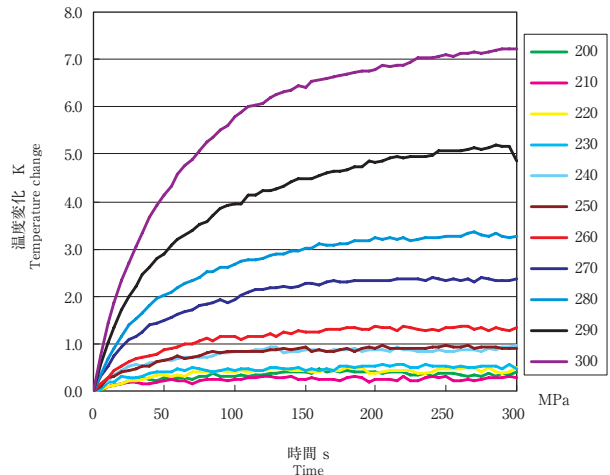


図5 時間-温度変化曲線
Fig. 5 Time - temperature change curve

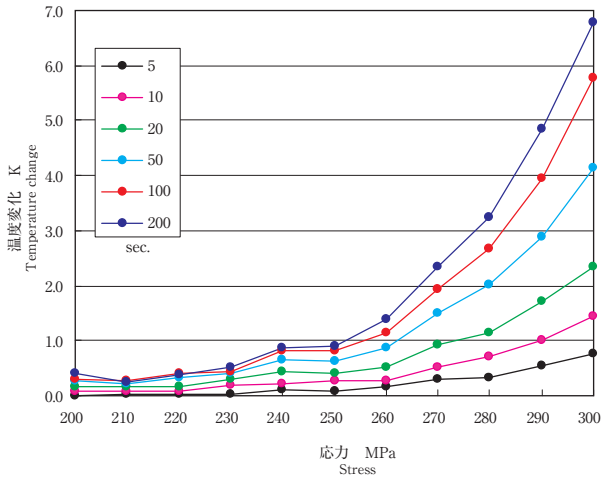


図6 応力-温度変化曲線
Fig. 6 Stress - temperature change curve

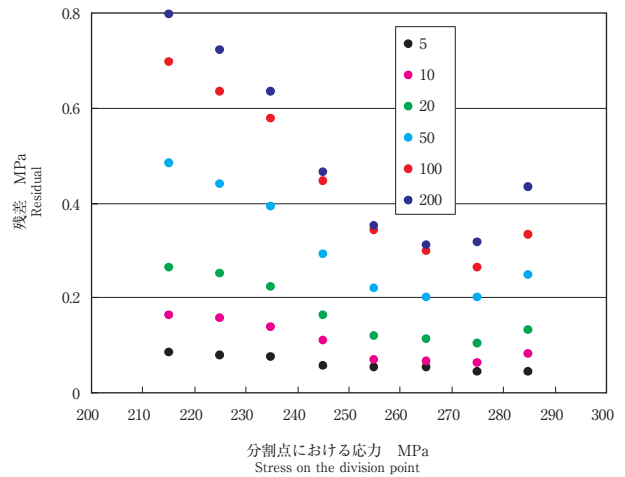


図8 応力-フィッティング残差曲線
Fig. 8 Stress - residual curve

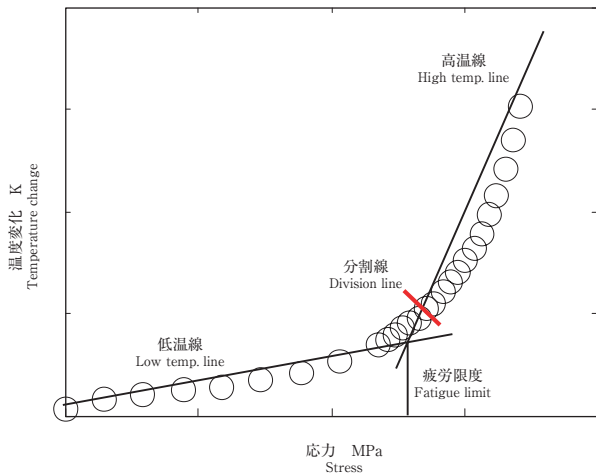


図7 2直線近似による疲労限度の決定
Fig. 7 Intersection of two lines

3-2 応力-温度変化線図

図5の5, 10, 20, 50, 100, 200 sにおける温度データを抽出し、各経過時間における応力-温度変化線図として整理したものを図6に示す(前述のように、通常の試験ではこの図が直接得られる)。これにより、いずれの時間でも温度変化は250~270 MPaを境に急激な上昇に転じている。疲労限度は図7に示すような温度上昇が異なる2本の直線を引いてその交点を求めるが、どの値が境になっているのかは必ずしも明瞭ではない。

3-3 疲労限度判別法

前述の問題に対して客観的に疲労限度を求める方法を以下に示す。

表1 図8に基づく測定時間と疲労限度の関係
Table 1 Fatigue limit for case shown on Fig. 8

測定時間 Time [s]	5	10	20	50	100	200
疲労限度 Fatigue limit [MPa]	276	273	273	273	274	265

- (1) 応力-温度変化線図のプロットについて、低温側、高温側の二つのグループに分ける
- (2) 二つのグループについて、それぞれフィッティング直線を描く
- (3) プロット数 n に対してグループの分け方は $n-3$ とありある。フィッティングの残差が最小となる場合が最適なフィッティング直線になっていると考えられるため、残差最小となる組合せを探索する
- (4) 残差最小となる組合せに対して2直線の交点を求め、疲労限度とする

図6に対して本手法を適用した結果は図8となり、グループ分けの閾値に対するフィッティングの残差を表している。これにより、残差が最小となるのは265か275 MPaでグループ分けした時であることが分かる。図8より、2直線の交点を求めて疲労限度を算出した結果を表1に示す。実際の疲労限度である260 MPaに対し、提案手法で求められた疲労限度は265~276 MPaとなっておりどの測定時間においても概ね良好な結果が得られている。測定時間が長いほど正解に近い結果が得られており、より定常に近い温度分布の方が高精度であることが分かった。

4. 結 言

本研究では回転曲げ疲労試験に対し、非ロックイン方式のサーモグラフィを用いて試験片の温度上昇を計測し、疲労限度の推定を行った。得られた結果を以下に示す。

・回転曲げ試験について測定を行い、高応力になると定常に達するまでの時間が長くなった。

・回転曲げ疲労試験片の疲労限度について、荷重と測定の同期処理のない非ロックイン方式のサーモグラフィでも推定可能であることを示した。

・応力-温度変化線図における変曲点の自動探索法を提案し、得られた値は実際の疲労限度とほぼ一致していることを示した。

参 考 文 献

- 1) J.C.Krapez and D.Pacou, Thermography detection of damage initiation during fatigue tests, Proceeding of SPIE, No.4710, (2002), pp.435-449.
- 2) Yaoita, T., Application of Thermography to Measurement of Stress and Determination of Fatigue-limit Using Dissipated Energy, Journal of JSNDI, Vol.51, No.6, (2002), pp.333-337.
- 3) Irie, Y., Inoue, H., Mori, T., Takao, M., Evaluation of Fatigue Limit of Notched Specimen by Measurement of Dissipated Energy, Proceeding of M&M2009 conference, (2009), OS1302.
- 4) Ohno, H. and Koibuchi, K., The Rapid Method of Estimating the Rotating Bending Fatigue Limits by Capacitance Thermometer for Rotator, Journal of the Society of Materials Science Japan, Vol.16, No. 161, (1967), pp.115-122.

