

振り疲労試験における疲労累積の実験的研究*

追分重義

宇野和雄

(昭和43年9月30日受理)

An Experimental Study on Accumulation of Fatigue Energies in the Torsional Fatigue Test

by Shigeyoshi OIWAKE and Kazuo UNO

Previously the authors reported, how and why the fatigue torque T_w and other factors to quantify fatigue effects in the torsional fatigue test, could be measured and obtained.

In this study, the experiment was carried out to obtain those values with more accuracy, reconditioning the chucking device of specimens so that the torque at the spot nearer to the specimen could be measured and making the repeating speed smaller, than in the previous experiment.

Overstresses less than the yielding point, i.e. 11.5~20.3 kg/mm² were repeated on S 35 C specimens at the speed of 15 cps. The transitions of T_w/T , q_a and Q/W through the stress-repeated life showed some remarkable characteristics, which are appreciable from the criterion of the so-called stages of fatigue process.

Here, T_w =fatigue torque, T =testing torque, Q =fatigue heat generation per a cycle, W =fatigue work per a cycle, q_a =increase of Q per a cycle.

1. 緒 言

各方面の微視的研究によって、金属は弾性限度以内でも、ある大きさ以上の応力の繰返しを受けると、局所的な塑性流れを生じ、塑性たりをともなった破壊を生ずることが知られている^{1),2),4)}。本研究は疲れ過程に供試材の微視構造に局所的に累積していくエネルギーの量的変化を巨視的に把握しようとする著者らの従来の研究の一環である⁵⁾。

著者らはさきに⁵⁾、① 西原式曲げ振り疲労試験機による繰返試験中の試験軸に沿うトルクの解析をおこない、② 試験片の前後の試験軸部位に貼った抵抗線ひずみ計によるひずみから、いわゆる疲労トルクを算出し、③ 一方試験部の表面温度を測定し、④ これから疲労累積の目安を得る。理論を述べ、実験結果を示した。

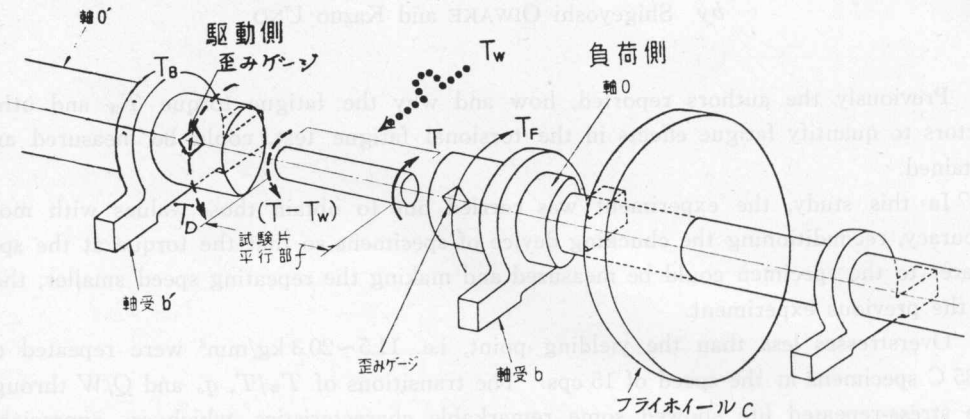
本実験では、① 試験機の試験片掴み部を改造し、トルク検出のためのひずみゲージをこ

* 日本機械学会北海道支部第12回講演会(1968.10.11, 室蘭)講演。

れに貼り、② 負荷用フライホイールの質量を増すとともに、繰返速度を減らした。①によって、さきの報告での疲労トルクの求値に影響した軸受損失、駆動軸の回転慣性等を考慮しなくてもよいようにし、疲労トルクの検出精度を高めた。②によつては、さきには困難であった繰返初期(約 $10^0 \sim 10^3$ サイクル)の現象の測定ができた。実験値はいわゆる疲れ過程の4段階³⁾から評価できるように思われた。

2. 理 論

第1図は本実験のために一部改造した後の試験片近辺の試験機の構造、トルクの構成、ゲージ貼付部位等を示す。



第1図

繰返試験中の任意のサイクルが、これまでの疲労累積エネルギーに上積みするエネルギーを S 、該サイクル中の平行部の発熱量を Q とする。両量の和は該サイクル中に負荷側の回転質量の慣性仕事のうち試験部に失った仕事、いわゆる疲労仕事 W である。すなわち

$$W = S + Q \quad (1)$$

$$W = \left\{ T^2 - (T - T_w)^2 \right\} / (I\omega^2/2) \quad (2)$$

ここに I は負荷側の回転質量の慣性モーメント、 ω は試験機の間軸の回転の角速度で、繰返速度は、 $\omega/(2\pi)$ である。(2)式の W は1サイクル当りの機械的仕事の単位、(1)式の W はこれを熱量の単位に換算したものである。疲れ過程にある発熱中の試験部は、内部に熱源を持つ無限長円柱として取り扱って

$$Q = (4\alpha/d)\theta \quad (3)$$

θ は円柱の表面温度と周囲温度との差、 d は試験部の直径、 α は熱伝達率で、自然対流における層流領域に対する Fishenden & Saunders の式を用い

$$\alpha = c''(\theta/d)^{0.25}, \quad c'' = 1.01 \quad (4)$$

とした。(3) 式の Q は一般に単位時間当りであるから、これを繰り返し1サイクル当りに換算したものが(1) 式の Q である。

3. 実験と考察

第1表は供試材の化学成分と機械的性質である。第2図は試験片の形状、寸法で、試験部の径 $d=12$ mm, 隅肉の長さを含めた長さ $l=40$ mm である。供試試験片は16本, 応力振幅は降伏点以下の過大応力 $13.5\sim 20.5$ kg/mm² である。なおこの疲労試験片と材質, 形状, 他の寸法は同じで, 試験部の径のみ18 mmの較正用試験片を作り, その試験部にストレインゲージを貼り, 静および繰返し振りを与え, 試験部摺み部間のトルクの較正をおこなった。しかし, 疲労試験片のときでも, 較正用試験片のときでも, 試験部の端とその側の摺み部とは同じトルクを受け, かつ較正用試験片は上述の試験で疲労しないものと仮定して, 疲労試験中の試験部両端のトルクを実験値から算出した。

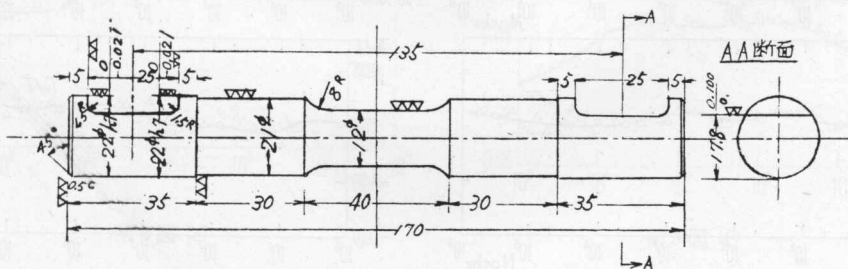
本試験における(2), (3), (4) 式中の定値は, $I=14.44$ mm kg sec², $\omega=98.06$ rad/sec である。

第3図(a)~(f)は実験によって得られた T_w/T , θ , Q/W , $q_a \sim N$ 線図の一部である。

第 N サイクルの q_a は, そのときの1サイクル当りの試験部の発熱量を Q kcal/cycle とすると

第1表

| 材 料 | | S 35 C | | | | |
|-----------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------|-------|
| 化学 成分 (%) | | C | Si | Mn | P | S |
| | | 0.32 | 0.26 | 0.64 | 0.015 | 0.013 |
| 機 械 的 性 質 | 引 生 材 | 降 伏 点 | 抗 張 力 | 延 伸 率 | 収 縮 率 | シャルピー |
| | | 52 kg/mm ² | 70 kg/mm ² | 30% | 71% | 23 |
| | 振 り 焼 鈍 材 | 降 伏 点 | 抗 張 力 | 延 伸 率 | 収 縮 率 | |
| | | 33.2 kg/mm ² | 57.1 kg/mm ² | 40.0% | 64% | |
| 振 り 焼 鈍 材 | 降伏振り応力 | 振り破壊係数 | 耐久限度 | 剪断弾性係数 | | |
| | 20.3 kg/mm ² | 54.2 kg/mm ² | 11.5 kg/mm ² | 8.203 kg/mm ² | | |
| 焼 鈍 | | 840°C に分焼鈍, 後炉中冷却 | | | | |



第2図

$$q_a = \left\{ (Q + \Delta Q) - Q \right\} / \left\{ (N + \Delta N) - N \right\} \text{ kcal/cycle}^2 \quad (5)$$

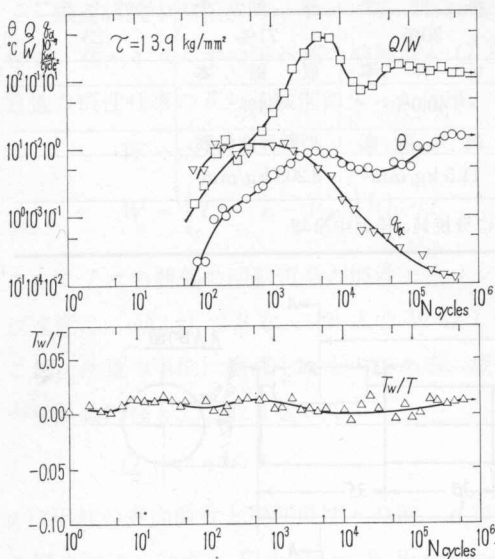
で、 q_a は第 N サイクルにおける 1 サイクル毎の発熱量の増加を表わす。

疲れ過程中の第 N サイクルにおける疲労累積エネルギー $\sum_{i=1}^N S_i$ と供試材の微視構造の変化との関連が問題であるので、 S に関する線図が最もほしい。しかし S は W の大部分を占めるために、線図の明示の都合上、 Q に関する諸元の変化を線図とした。

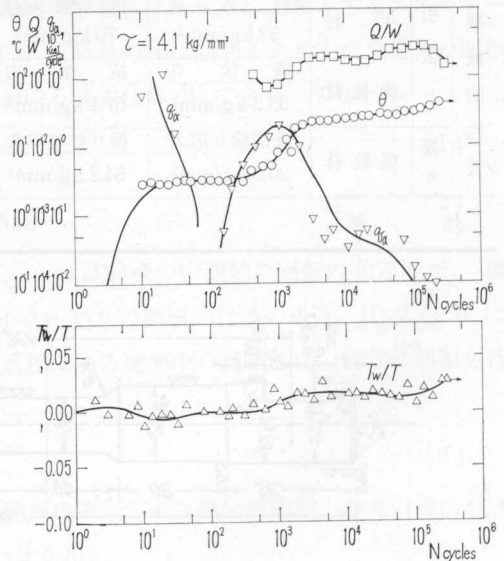
応力振幅 18 kg/mm^2 以下では、試験トルク T の変化から $10^{2.3} \sim 10^3$ サイクルで初期の加工硬化が完了した様相を示す。 T_w/T もこのとき飽和域に達し、 q_a は全寿命中唯一のピーク点にある

このことは、微視的塑性変形による q_a がピークに達するや、飽和点にちょうど達した T_w によって、材料のすべり帯のうちのあるものの幅が増し始めるために、 S のサイクル当りの上積量が増し始め、いわゆる疲れ過程の第 1 段階から第 2 段階へ入るものと解釈されよう。降伏点にきわめて近い 19 kg/mm^2 以上の応力振幅では、 T_w/T が飽和したときに q_a はピークに達するが、 T の変化を見ると材料は軟化し始めることがわかった。

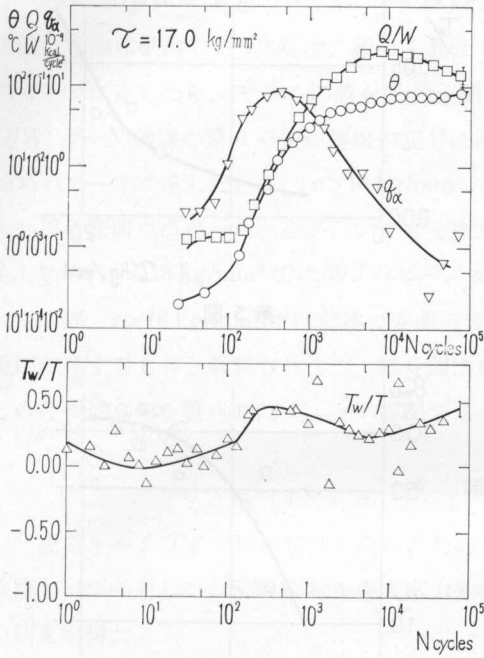
すなわち過大応力振幅全般に亘っていえば、 $5 \times 10^0 \sim 1 \times 10^3$ サイクルが第 2 段階の開始点と解釈され、このときには T_w は飽和点に達し、 q_a は繰り返しの全寿命中唯一のピークに在った。第 4 図は試験を応力振幅の大きさで 5 群に区分し、 q_{amax} と、これを生じたサイクル N の各群の平均値を置点した N 、 $q_{amax} \sim \tau$ 線図である。曲線 $q_{amax} \sim \tau$ が τ 軸と材料の耐久限度 $\tau_w = 11.5 \text{ kg/mm}^2$ で交わり曲線 $N \sim \tau$ が材料の降伏点 $\tau_{yp} = 20.3 \text{ kg/mm}^2$ と交わっていることは理論的である。第 5 図は q_{amax} を生ずるサイクルにおける $T_w/T \sim \tau$ 線図である。



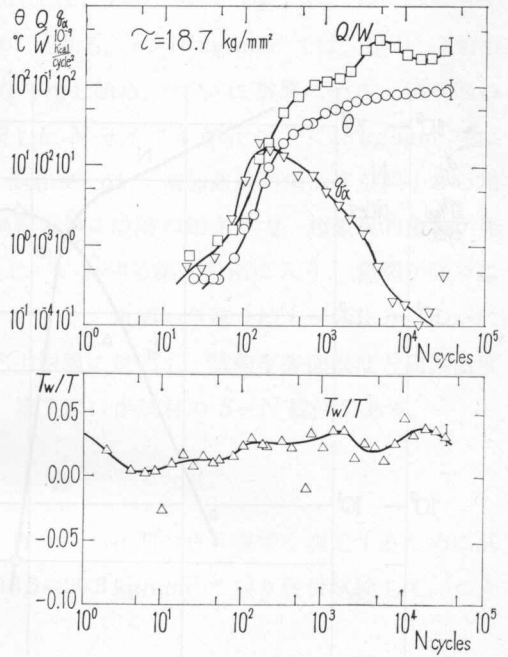
第 3 図 (a)



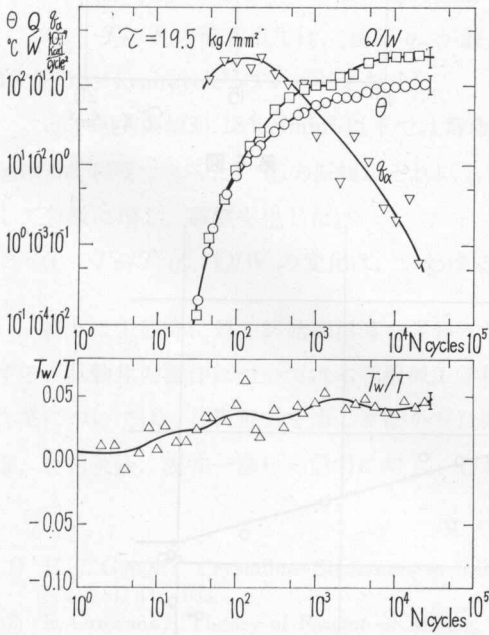
第 3 図 (b)



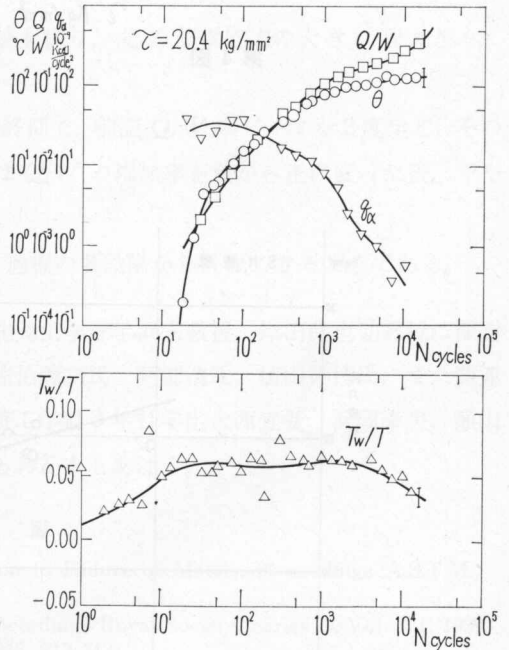
第3図(c)



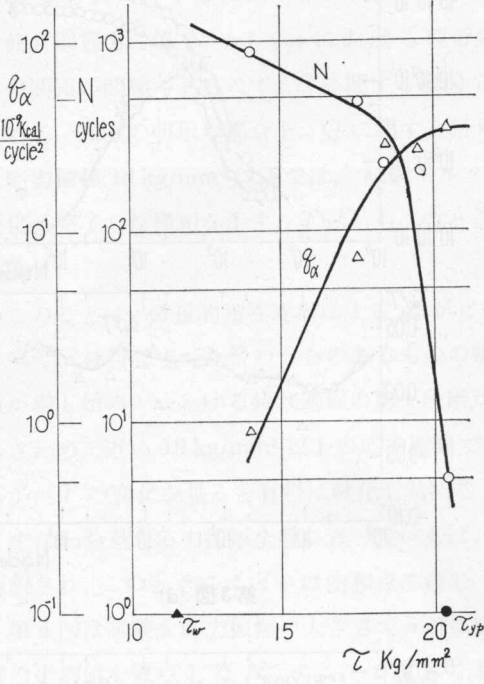
第3図(d)



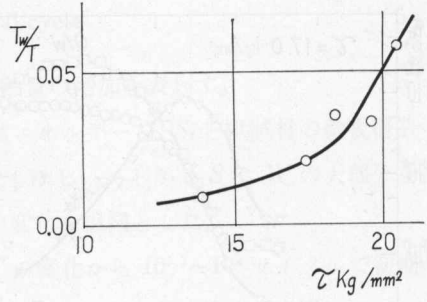
第3図(e)



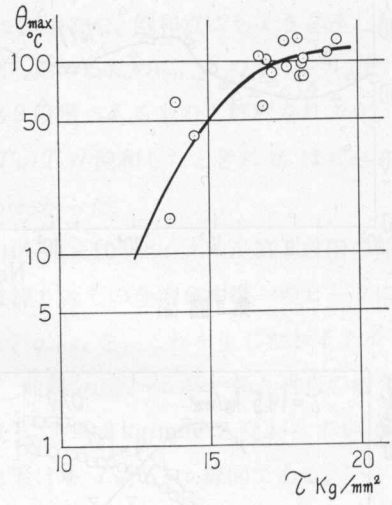
第3図(f)



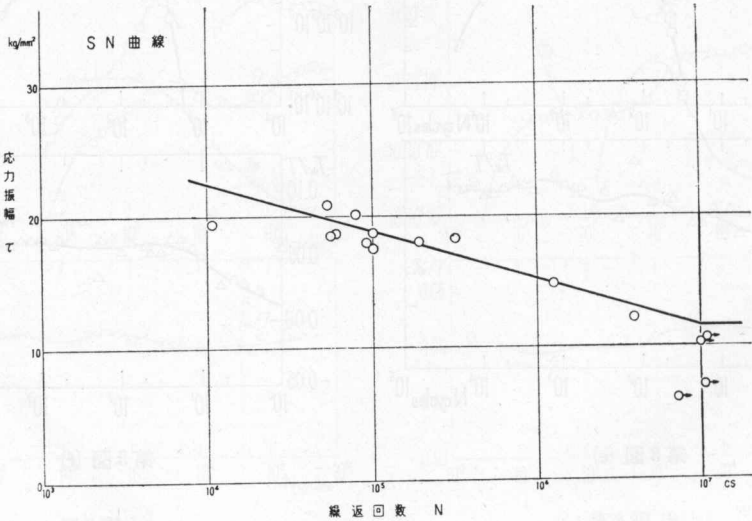
第 4 図



第 5 図



第 6 図



第 7 図

つぎに Q/W の変化であるが、 $\tau < 18 \text{ kg/mm}^2$ では、ピークを2つ生ずる。始めのピークの値は全個体平均して 0.220 で、後のそれは 0.207 である。 $\tau > 18 \text{ kg/mm}^2$ では、 Q/W は始めのピークに達したら、ややこの値を保ち、間もなく増し始め、ついに破壊に至る。第3図の Q/W , $\theta \sim N$ 曲線の終りの短い縦線の記号は破壊した N サイクルを示す。 $\tau < 18 \text{ kg/mm}^2$ では始めのピークに達したとき、 $\tau > 18 \text{ kg/mm}^2$ では飽和または、増加曲線の増加率が減少から増大へ移る変曲点に至ったときが、いわゆる疲れ過程の第3段階の始まりで、超微視的亀裂が発生し始め、 $\tau < 18 \text{ kg/mm}^2$ では第2のピークを生じ、いわゆる第4段階に入り、亀裂が徐々に口を広げ、 $\tau > 18 \text{ kg/mm}^2$ では前述の変曲点後間もなく、亀裂の急速な拡大が始まり、ついに破壊に達するものと解釈されよう。第6図は各応力振幅に対して、試験部表面温度と周囲温度との差の最高値を置点した $\theta_{\max} \sim \tau$ 線図である。第7図は供試材の $S \sim N$ 線図である。

4. 結 言

疲労トルク T_w の検出精度を高めるためと、繰り返し初期の疲れ現象を測定するために試験機を一部改造した。S 35 C 材を過大応力振幅 $13.5 \sim 20.5 \text{ kg/mm}^2$ で振り疲労試験して、つぎの結果を得た。

① T_w/T の飽和点は $10^{2.3} \sim 10^3$ サイクル、その値は応力振幅の大きい程大きく、 $0 \sim 0.06$ くらいであった。このサイクル数は応力振幅の大きい程小さかった。

② T_w/T の飽和点では、前記 q_a が最大値を採り、その値は応力の大きい程大きく、 $10^{-9} \sim 10^{-8} \text{ kcal/cycle}^2$ のオーダーであった。

③ 応力振幅が 18 kg/mm^2 以下では寿命の終期で、前記 Q/W のピークを2度生じ、その値は 0.2 程度であった。応力振幅がそれ以上では Q/W の増加率を負から正に変わった後、ややして急激に増し、破壊を生じた。

④ T_w/T , q_a , Q/W の変化は、いわゆるれ過程の各段階から評価できるようである。

終りに本研究に対し終始御指導を賜わった北大工学部半沢宏教授、岸田路也助教授に深謝する。試験片の製作については本学機械工学科佐伯義二氏、阿部清氏、埴山祥博氏、また関連作業については、日夜努力を惜しまなかった機械工学科3年目学生大西宣弘、浜岡幸夫、瀬山肇、野村英隆、坂井一彦らの諸君に対し、心からお礼申しあげる。

文 献

- 1) H. J. Gough: Crystalline Structures in Relation to Failure of Metals, Proceedings A.S.T.M., Vol. 33, 1933.
- 2) E. Orowan: Theory of Fatigue of Metals, Proceedings Royal Society, Series A, Vol. 171, 1939.
- 3) 横堀武夫: 日本機械学会誌, Vol. 58, No. 441, 1955, 712-714.
- 4) P. J. E. Forsyth: A Two Stage Process of Fatigue Growth, Proc. Crack Propagation Symp. Cranfield, the College of Aeronautics, 1962.
- 5) 追分・宇野: 振り疲労試験におけるトルクの解析, 日本機械学会, 精機学会第11回講演会論文集, 昭41.9.30札幌, 北見工大研報 2, 1 (1967), 11.