$$\frac{dF(\Delta t)}{d \log_{10} \Delta t} = \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi'(\log_{10} \lambda) \times \left[\frac{2 \cdot 303 \Delta t}{\lambda} e^{-\frac{\Delta t}{\lambda}} \right] d \log_{10} \lambda \quad (14)$$

となる。(14) 式右辺の括弧内のかん数は intensity function とみなされ、 $\tau = \Delta t$ においてかなりするどいピークを示し、その両側で急激に零に近づく。もし分布かん数 $\Phi'(\log_{10} \lambda)$ がこの範囲で const. であると考えると、

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2 \cdot 303 \Delta t}{\lambda} e^{-\frac{\Delta t}{\lambda}} d \log_{10} \lambda = 1 \quad (15)$$

の関係があるから、

$$\frac{dF(\Delta t)}{d \log_{10} \Delta t} = [\Phi'(\log_{10} \lambda)]_{\lambda = \Delta t} \quad (16)$$

となる。(13) 式、(16) 式の関係によつて、近似的に $\Phi(\nu)$ の値がクリープ曲線より決定できる。

Fig. 18 は各試料に対して瞬間的クリープ曲線より求めた分布かん数 $\Phi(\lambda)$ の値を示す。なお 0.01 秒～10 秒の範囲の値は振動試験により求めた値で、10 秒附近はクリープ試験のものと重複しているが、両者のデータはほぼ一致している。すなわち、カーボンを入れることにより $\Phi(\nu)$ の曲線のピークが retardation time の大なる側に移動するとともに、カーボン含有量の増大

とともに $\Phi(\nu)$ の値が大きくなることを知る。

4. 結 論

以上詳しく述べた事柄を結論すれば、つぎのことが云える。すなわちカーボン含有量の増加とともに、その剛性が増大し、After effect が顕著になり、したがつてクリープ量が増大する。さらに Hysteresis effect もカーボン含有量とともに増し、応力-歪曲線においてえがくループの面積 (Fig. 4 に相当する) が増加するとともに、当価動的剛性係数や当価動的粘性減衰係数の振巾依存性がより顕著となる。

なお本研究を行うに際して、京都大学西原利夫教授、国井修二郎教授の絶大なる御指導、御助言をえていることを附記して、深く感謝の意を表する。また防振ゴム試料の製作について、住友電気工業株式会社ならひに朝日金属株式会社の絶大なる御支援をえていることに對して厚く感謝の意を表するものである。

注：—

- 1) 榎木、得丸 ‘Hereditary 特性を有する非弾性体の動力学的挙動に対するモデル的考察’、材料試験、第2巻、第5号 (1953)
- 2) 榎木、菅井、荷重速度一定試験における防振ゴムの力学的挙動’日本機械学会第30期定時講演会にて講演 (1953. 4)、日本機械学会論文集に掲載予定
- 3) 榎木、得丸 ‘振動試験における防振ゴムの力学的挙動’ 日本機械学会第30期定時講演会にて講演 (1953. 4)

鋼の金属組織と疲労進行過程との関係について*

上 田 太 郎** 田 中 政 夫**

On the Relation between Microscopic Structure of Steels and Process in Progress of Fatigue.

by Tarō UEDA and Masao TANAKA

In order to research for the relation between the microscopic structure of steels and the process in progress of fatigue, we measured the changes of magnetic properties due to torsional fatigue in 0.8% C steel wires with various heat-treatments and as drawn. The changes of magnetic properties were measured from differential hysteresis loops between the test- and standard specimen on the cathode-ray oscillograph. From this experimental results, we found that the processes in progress of fatigue differed between the steels with fibre structure and heat-treated structure. That is, in the steel with fibre structure, fatigue did not make progress until a certain number of cycles of twisting stress was repeated, and after that made progress rapidly. But in the steels with heat-treated structure, fatigue made progress gradually or rapidly with the increase of the number of cycles.

1. 緒 言

金属の疲労破壊経過の究明は、今日の機械の高性能化に伴う重要研究課題の1つとなつている。

一般に金属材料を構成する結晶格子は繰返応力の作用することによつて、その性質が次第に変化してくることは、よく知られた事実である。それゆえ金属材料の疲労進行過程の機構の研究方法として疲労の進行による、物理的または機械的性質の変化を測定して、これよ

* 原稿受付 昭和28年6月10日

** 正員 大阪大学工学部

り推察する方法が今まで多く行われている。たとえば、最近では疲労に伴う電磁気的性質¹⁾²⁾、内部摩擦³⁾、検鏡組織⁴⁾などの変化を測定し、これにより疲労進行過程の機構を究明しようとした論文が発表されている。

しかし、これらのものはいずれも同一試料について、異なる金属組織をもつものについて検討されていないので、著者等は 0.8% C 鋼に種々の熱処理を施し、また冷間引拔加工して、これらにつき金属組織と疲労進行過程との関係を求めるため本研究を行つたのである。

2. 供試材料および試験片

供試材料は Table 1 に示す成分を有する直径 4.5

Table 1. Chemical Composition (%)

C	Cr	Si	Mn
0.80	0.15	0.25	0.30

mm の炭素鋼棒を常温において線引して、直径 1.7 mm とした鋼線で、これを 75 mm の長さに切断し、Table 2 に示すごとき種々の熱処理を施したものを試験片とした。すなわち、A 試験片は引拔のまゝの繊維組織を持

Table 2. Heat Treatment of Test-specimens.

Test-specimen	Heat Treatment
A	As Drawn
B	Annealed at 800°C
C	Water Quenched at 800°C, Tempered at 250°C
D	" " at 400°C
E	" " at 600°C

つもので、B 試験片はこれを 800°C で焼鈍し、パーライト組織にしたもの、C 試験片は 800°C より水焼入した後、250°C で焼戻し、初期ソルスタイト組織をもつもの、D 試験片は同じく 400°C で焼戻し、ソルスタイト組織としたもの、E 試験片は同じく 600°C で焼戻しソルバイト組織としたものである。

以上の 5 種の異なる金属組織をもつ鋼線につき、振り疲労試験を行い、その疲労進行過程にいかなる相違があるかを研究した。

3. 実験方法

Fig. 1 は本実験に用いた鋼線用振り疲労試験機の略図である。試験片 a は上部のレバークランク機構によつて繰返振り運動を与えられると、下部の重錘 b の慣性によつて繰返振り応力を受ける。試験機の繰返振り速度は毎分 250 回である。なお、この試験機では、試験片は繰返振り応力のほかに、重錘による引張応力も受けるが、その値はわずかで、無視し得る。また試験片の振りを受ける標点距離は 35 mm である。

Fig. 1 Reversed Torsion Inertia-type Testing Machine for Wire Specimens.

一方、疲労進行過程は鋼線の磁気的性質の変化より推察することとした。すなわち、鋼線の磁気履歴曲線を陰極線オシログラフ装置のブラウン管上に描かしめ、これが疲労進行とともにいかに変化するかを測定した。Fig. 2 は磁気履歴曲線測定装置の配線図である。試

Fig. 2 Measuring Circuit for Hysteresis Loop.

験片に一定数の繰返応力を与えるごとに、これを試験機より取り外し、Fig. 2 の磁気履歴曲線測定用線輪の中に挿入してブラウン管上の磁気履歴曲線を測定する。この場合、測定の感度をあげるために、Fig. 2 に示すごとく、試験片のほかに繰返応力を受けない標準片の磁気履歴曲線を同時に描かしめ、これら両者の磁気履歴曲線の差（これを差動曲線、Differential Loop と呼ぶことにする）を、さらに増巾拡大してブラウン管上に直視し、これが疲労進行とともにいかに変化するか

を研究した。

4. 実験結果

Fig. 3 は各試験片の振り剪断応力対繰返数曲線 ($S-N$ 曲線) で破断しなかつた試験片については、繰返数

Fig. 3 $S-N$ Curves for 0.8% C Steel Wires shown in Table 2. (Arabic numerals in this figure show test-specimen number.)

は約 10^6 回であるが、この曲線より、これらの試験片の両振戻り疲労強さとして Fig. 3 に示すごとき値を得た。すなわち、引拔のまゝのものが最も強く、ツル

Table 3. Fatigue Limit of Test-specimens.

Test-Specimen	A	B	C	D	E
Torsional Fatigue Limit kg/mm^2	32	18	13	29	18.5
Tensile Strength kg/mm^2	185	100	65	145	105

ースタイト組織、ソルバイト組織、パーライト組織をもつ試験片の順に弱くなり、初期ツルースタイト組織をもつものが最も弱い結果が得られた。

Fig. 4 はこれら各試験片の繰返数の増加による、ブラウン管上に描く差動曲線の变化の模様の 1 例を示し

たものである。各試験片とも、疲労強さ以下および以上の 2 種の繰返応力を与えた場合について示した。繰返数 0、すなわち繰返応力を受ける前においては試験片、標準片の試料が同一状態にあり、測定線輪も両者同一なるゆえ、この差動曲線をとれば直線になる筈であるが、Fig. 4 においては 1 つのループを示している。これは測定線輪などにごくわずかの相違が存在し、これが測定感度を良くするために増巾度を大にした結果あらわれたものである。そこで本実験ではかゝる増巾度大なる測定感度のよい状態を基礎として、このループが繰返数の増加とともに、すなわち、疲労の進行とともにいかに変化するかを見ることとした。Fig. 4 の変化の有様を見ると、いずれの試験片においても、疲労強さ以下の繰返応力を受ける場合には、差動曲線の形状は繰返数が増大してもほとんど変化しない。しかし疲労強さ以上の繰返応力を受けて破断する場合には、差動曲線の形状は漸次、または急激に変化し、破断の直前にはその変化が非常に大きいのが見られる。しかし、この変化の有様をさらに詳細に観察した結果、著者らは試験片の金属組織によつて、疲労進行による差動曲線の変化の状況に相違のあることを見出したのである。

Fig. 5 は Fig. 4 の差動曲線の変化の有様を、わかりやすく数量的に示したもので、こゝでは実験で得られた結果全部についての変化を図示した。これはブラウン管上の差動曲線の包む面積の変化を試験片の磁気履歴曲線の面積を正、標準片のそれを負として求め、繰返数との関係を図示したものである。これを見ると、いずれの試験片においても、疲労強さ以下の繰返応力を受ける場合には、繰返数が増大しても差動曲線の包む面積はほとんど変化しないことが一そうよくわかる。しかし、疲労強さ以上の繰返応力を受けて疲労が進行する場合には、試験片の金属組織が異なるに従い、差動

Fig. 4 Changes of Differential Loops on the Braun Tube

曲線の包む面積はつきのごとく変化する。すなわち、引拔のまゝの繊維組織をもつA試験片では、ある繰返数まではほとんど変化せず、その後、急激に、大きく差動曲線の包む面積が変化して、間もなく破断するという傾向をたどる。

800°Cにて焼鈍したパーライト組織のB試験片においては、この差動曲線の変化の有様は、荷重が疲労強さ以上相当大なるか、疲労強さよりわずかなるかに従い、大体2つの群に分れて分布し、前者においては、差動曲線の包む面積の変化は最初から顕著で変化曲線の

傾斜は急であり、少い繰返数で破断しているが、後者においては破断までの繰返数が比較的大きく、変化曲線は割合に緩やかな傾斜をなして変化し、遂に破断している。800°C水焼入、250°C焼戻の初期ソルースタイト組織をもつC試験片においては、疲労強さ以上の荷重を受けると、変化曲線はいずれも最初から比較的急な傾斜をなして変化している。つぎに、800°C水焼入、400°C焼戻の完全ソルースタイト組織を持つD試験片の変化曲線を見ると、この場合もC試験片と同じく、疲労強さ以上の曲線は最初から比較的急な傾斜をなして

Fig. 5 (a)

Fig. 5 (b)

Fig. 5 (c)

Fig. 5 (d)

Fig. 5 (e)

Fig. 5 (a)~(e) Changes of Areas Enveloped in Differential Loops. (Arabic numerals in these figures show test-specimen number, See Fig. 3).

Abscissa : Square Root Scale.

変化しているが、C試験片よりは、やや広い範囲の傾斜にわたって曲線が分布している。さらに焼戻温度が高くなつて600°Cに焼戻してソルバイト組織にした試験片では、この変化曲線の分布の有様は、傾斜の急なもの（荷重大）より比較的緩かなもの（荷重小）にまで及び、次第に焼鈍組織のB試験片の分布に近づく傾向にある。

以上は金属組織の異なる各試験片の疲労による差動曲線の変化の有様を測定した結果であるが、かくのごとき磁気的性質の変化より疲労の進行過程を推察するならば、大体つぎのごとく要約される。すなわち800°Cから水焼入し250°Cで焼戻してツルースタイト組織のあらわれ始めた組織のものより、順次焼戻温度を高くして、400°Cに焼戻して完全ツルースタイト組織にし、さらに温度をあげてソルバイト組織、焼鈍したパーライト組織となるに従い、最初から急激な疲労進行を示すものより、順次漸進的な進行を示すものを含むようになり、焼鈍した組織のものにおいては遂に荷重の大小（疲労強さ以上）により、疲労が急緩2つの群に分れて進行する。引抜加工をして繊維組織を有し、内部歪を著しく受けているものにおいては、ある繰返数より急激に疲労が進行する。

以上のごとく、金属組織によつて疲労進行の有様が異なるので、その進行過程の機構の究明には試験片の金属組織に大いに留意しなければならぬ。このように金属組織により疲労進行過程の異なる詳細なる考察については、目下研究中であるが、これは各試験片の塑性変形能、こり抵抗、内部歪の存在などの大小に原因するためであると考えられる。

5. 総 括

0.8% Cの鋼線について引抜加工あるいはこれに熱処理を施して、種々異なつた金属組織を与え、これに繰

返戻り応力を作用させた場合の疲労進行過程を、試験片の磁気的性質の変化より求めた。その方法は試験片と標準片との磁気履歴曲線の差、すなわち差動曲線を陰極線オシログラフ装置のブラウン管上に描かしめて、疲労進行とともにこの曲線がいかに変化するかを測定したのである。その結果、疲労強さ以下の繰返応力を受ける時は、いずれの試験片においても、繰返数が増大しても差動曲線はほとんど変化しないが、疲労強さ以上の繰返応力を受けて疲労が進行する場合には、金属組織により疲労進行過程は差動曲線の面積変化より推察して、つぎのごとき相違のあることを見出した。

(a) 引抜加工して繊維組織を有する鋼では、ある繰返数までは疲労はほとんど進行せず、その後急激に進行して間もなく破断する。

(b) 焼鈍組織を有する鋼においては、大きい繰返応力に対しては、最初から急激な疲労進行を示し、疲労強さ以上の小さい繰返応力の時は、漸進的な疲労進行を示す。

(c) 800°C水焼入、250°C焼戻の初期ツルースタイト組織をもつ鋼では、いずれも、最初から急激な疲労進行を示す。

(d) ツルースタイト組織をもつ鋼も、最初から急激な疲労進行を示すが、初期ツルースタイト組織のものにくらべると、やや漸進的な進行を示すものも含む。

(e) ソルバイト組織を有する鋼では、荷重大なるものは最初から急激に、小なるものはやや漸進的な進行をなし、焼鈍組織のものの変化に近づく傾向にある。

注：一

- 1) 津田, 金属学会誌, 11巻, 9號, 6頁 (昭22)
- 2) P. E. Cavanagh, ASTM, Vol. 47, 639 (1947)
- 3) 榎本, 機械学会論文集, 13巻, 43號, 21頁 (昭22)
- 4) 里, 金属学会誌, 11巻, 10號, 1頁 (昭23)
- 5) 深井, 金属学会誌, 6巻, 297頁 (昭17)
- 6) 詳細は 上田, 田中, 金属学会誌, 16巻, 325頁 (昭27)