

116 超音波伝ば速度によるS35C材の疲労亀裂の検出について

秋田工業高等専門学校

長谷川 武司[○]

小笠原 淳

島田 平八

1. はじめに

部材の疲労強度を求めることは、設計のための重要なステップであり、最も一般的な手法は疲労試験を実施することである。しかし、これは多大なコストと時間を要する欠点を持ち、非破壊的かつ迅速に材料の降伏現象を検出する手法の開発が望まれている。ところで疲労強度に関する多くの研究によれば、負荷状態にある部材内部に発生もしくは初めから存在する微小な空孔や亀裂の周囲の応力集中が亀裂を進展させ最終破断にいたらしめること、疲労強度は負荷応力および疲労回数の関数であるが最終破断の予測はバラツキが大きく難しいことなどが明らかにされている。このため、亀裂の生成に伴うAE波測定のような受動的な方法、超音波を材料内部に照射し亀裂からのエコーを映像化する超音波顕微鏡のような能動的方法など各種の非破壊的検査法が試みられ一部は実用化されてきた。ところが多くの非破壊的検査法は測定環境の整備、すなわち外乱雑音の少ない場で行うことが必要とされ、部材の降伏現象を実時間で評価し対策を講じていく必要のある工場や現場の要求を必ずしも満たしていない。本研究は材料内に存在する微小な介在物が巨視的弾性定数を変化させ、その内部を伝播する弾性波速度を減少させること⁽¹⁾に着目しコンパクトな装置で降伏現象の実時間的評価を行う方法を目指す。今回の報告では環状切り欠きをつけた丸棒の試料に対し回転曲げ疲労試験を行い、棒に沿って伝播する縦波速度の変化と脆性破壊させた切り欠き付近の破断面観察結果との比較を行うことにした。

2. 実験方法

実験に用いた材料は、市販の機械構造用鋼S35Cの丸棒を長さ150mmに切断し、電気炉中で860°Cを1時間保持して焼鈍し、自然空冷ののち図1に示す形状、寸法に機械加工された。供試材料に関する回転曲げ疲労試験のS-N曲線は図2に示される通りであり、概ね150MPaで平坦部が出現する。そこで縦波速度変化の実験では応力値を157MPaに固定し、総回転数を1万回転から2倍ずつ増加させながら128万回転迄の8回測定するグループA(5本)、64万と128万回転の2回測定するグループB(12本)に分けて行った。速度測定装置は、送波器に固有振動数2MHzの厚み振動型PZTを用い、パルス発生器から立ち上り時

間 $0.5\mu s$ 、繰り返し周波数1kHz、波高値15Vの矩形波を出力した。また受波側でも送波器と同じセンサーを利用し、100kHzのハイパスフィルターで帯域制限したアンプを用いて40dBの増幅後シンクロスコープで縦波初動を読みとった。なお、この測定に当たっては各段階で供試材料を試験機から外したため、検出された速度変化は材料内部に存在する亀裂にのみ依存すると思われる。

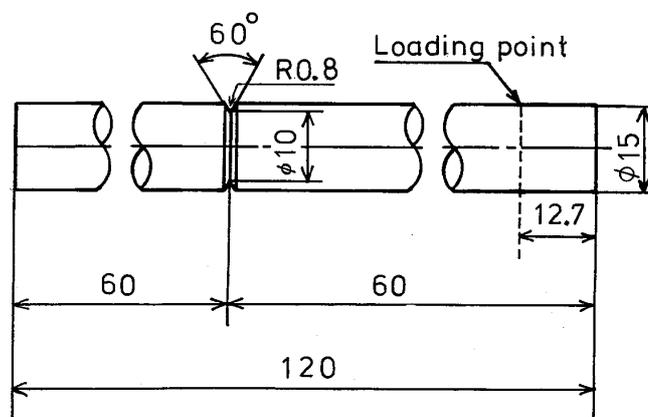


図 1. 試験片の形状

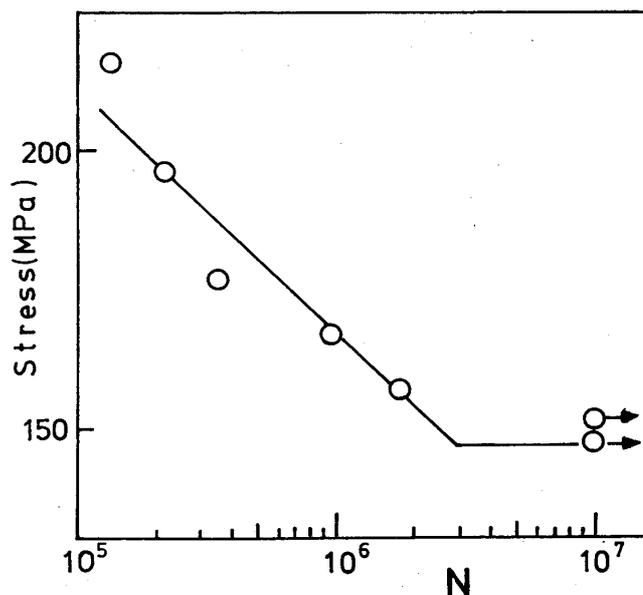


図 2. 供試材料のS-N曲線

3. 速度変化と亀裂について

疲労試験前及び試験後の縦波速度をそれぞれ V_0 、 V_N とし回転数の各段階で V_N/V_0 を測定した結果を図3に示す。図の白丸はグループAの平均値、黒丸はグループAとBをあわせた平均値である。また縦の線は標準誤差である。この結果は、疲労の進行に従って供試材料内を伝播する縦波速度が減少していくこと、減少率は回転数とセミログの関係にあることを示している。最小2乗法を用いて図3の結果を纏めると

$$V_N/V_0 = 1.12 - 0.034 \text{ LOG}_{10}(N)$$

が得られる。回転曲げ疲労試験では供試材料内に引張応力が生ずるので、切り欠き部付近から亀裂が進展していくことになる。そこで速度変化は亀裂の進展、すなわち亀裂密度の増加に対応すると考えられる。ところで亀裂密度と弾性波速度の関係については、第1節で述べた理論解⁽¹⁾の適用が可能と思われる。それによると、縦波速度は亀裂の形状をアスペクト比(短軸/長軸) 10^{-3} の回転楕円体で与え、亀裂面と主応力軸の傾きをパラメータとし、亀裂の体積比に対して求めたものが図4となる。この図には128万回転後の平均値0.90を点線で示してある。すなわち、今回の結果によれば亀裂の分布にも依存するが、その体積比は 10^{-4} から 10^{-3} 程度であり、供試材料の全体積約 $2 \times 10^4 \text{ mm}^2$ を考えると材料内の亀裂体積は合計で2乃至20 mm^2 、これを1個の亀裂としたとき長軸のサイズは1乃至2 mm程度と推定される。

4. 切り欠き部断面の観察

前節で推定された亀裂密度及び亀裂のサイズを検討するため、切り欠き部で脆性破壊した断面の観察を行ってみた。観察は破断面の上方 45° から光量の校正された可視光を照射し、CCDカメラをセットした光学顕微鏡を用いモニター画面に写す方法をとった。図5の1及び2に疲労試験を行わなかった供試材料と疲労試験を経た供試材料との破断面写真例を示す。モニター画面の目視観察によれば図5-2中央付近に示される1 mm程度の暗い筋のリニアメントが認められ、一方、疲労試験を行っていない供試材料(図5-1)については略々様な凹凸面が観察されるのみである。図5-2に認められる筋が亀裂に相当すると考えるならば、亀裂の形状やオリエンテーションは理論解で考えているものと違っている可能性がある。ところで破断面のモニター画面観察はリニアメントの詳細な検討に適するものであるが、もっと簡易な方法も考えるべきであろう。このため一つのテストケースとして凹凸面からの反射光強度分布を調べてみた。すなわち、疲労試験を行っていない供試材料の破断面には特定のリニアメントがなく凹凸は一様ランダム

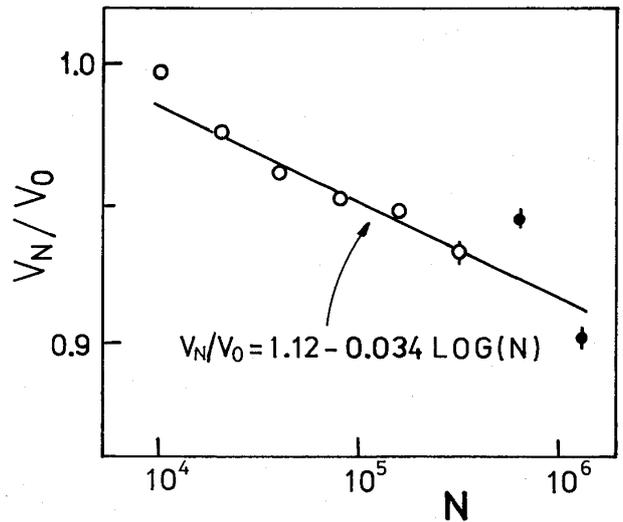


図 3. N 回転後の縦波速度 V_N の変化。縦軸は初期速度 V_0 で正規化してある。白丸はグループA、黒丸は全ての供試材料の平均値をそれぞれ表し、縦線は標準誤差値の範囲である。

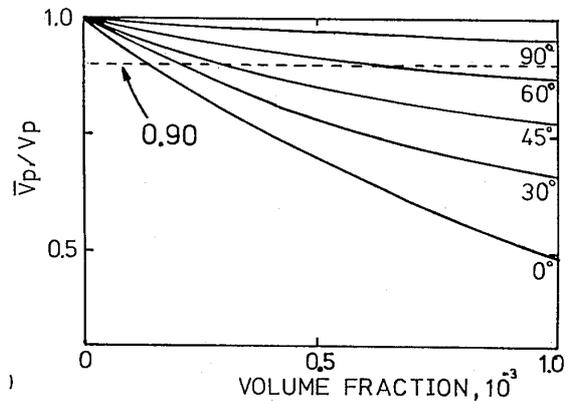


図 4. Yamamoto⁽¹⁾ による回転楕円体型の亀裂が存在する場合に期待される縦波速度変化の理論解。縦軸は図3と同じく正規化された速度、横軸は亀裂の材料内における体積比である。

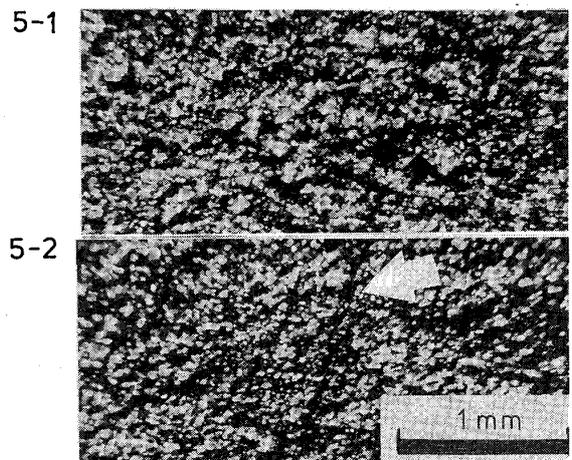


図 5. 脆性破壊された切り欠き部破断面。それぞれ-1. は疲労試験を行っていない供試材料、-2. は疲労試験後の試験片である。これには亀裂と見られるリニアメントが認められる。

に分布するが、疲労試験後の材料では一様ランダム性が保証されないとする。このため反射光強度の分布は前者の場合一様となり、後者では低強度の頻度が相対的に増加すると予想される事になる。事実、反射光の分布をとってみると前者に対して図6-1、後者に対して図6-2が得られ疲労試験後の供試材料では反射光強度の低下が認められた。統計量でこの特性を表すため、図6-2の分布から図6-1の分布を差し引くような操作を行うと図7の分布が得られる。低強度側における正の分布は前述の予想を裏付けるものであるが、その平均値と速度変化の関係を図8に示す。この結果ではやや正の相関が認められ、疲労の進行と共に材料内の縦波速度の低下が起り、それが亀裂の進展と関連しているものと考えられる。

5. おわりに

本報告では、

- (1) 環状切り欠きを付けたS35C材に対し回転曲げ疲労試験を行い、疲労の進行とともに材料内を伝播する縦波速度が回転数の対数に反比例すること、
- (2) 縦波速度の減少を材料内部に発生した亀裂によるものと解釈し、アスペクト比 10^{-3} の回転楕円体型を仮定すると材料に対する亀裂の体積比は 10^{-4} 乃至 10^{-3} であること、
- (3) 亀裂の存在が切り欠き部の脆性破壊面から確認されること、
- (4) 脆性破壊面の可視光反射強度は疲労の進行と関連づけられる可能性のあること

等を明らかにした。今後、これらの結果を降伏現象の実時間的評価へ結び付けるためには、センサーを含む測定系の開発が必要であろう。

最後に、本研究の供試材料製作及び実験に対し協力戴いた機械工学科 杉沢久雄技官、機械工学科卒業生 五十嵐敬喜、~~平~~谷悟志の両君に深く感謝の意を表します。

本研究費用の一部としてリケン工業株式会社による奨学寄付金（代表者：小笠原 淳）を使用した。記して感謝の意を表します。

参考文献

- (1) Yamamoto, K., 東北大学理学部学位論文, pp1-199, 1981

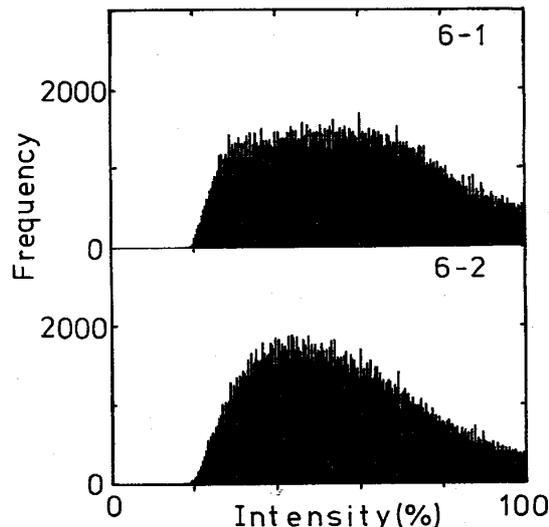


図 6. 図5の画像における光強度分布。横軸はCCDカメラの飽和値で正規化した相対強度、縦軸は強度の頻度を表す。6-1および6-2はそれぞれ図5と同じ定義である。

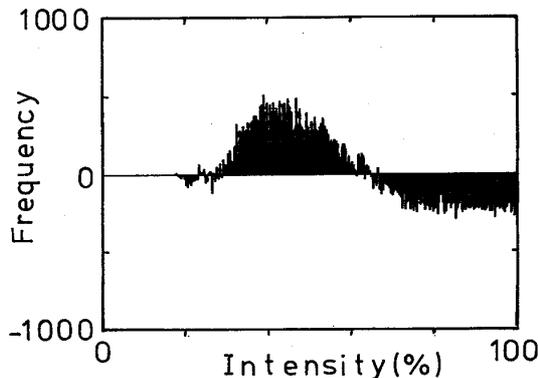


図 7. 図6-2の頻度から図6-1のそれを差し引いて得られた頻度分布。これによって疲労試験後の反射光が低強度側にずれる様子が分る。

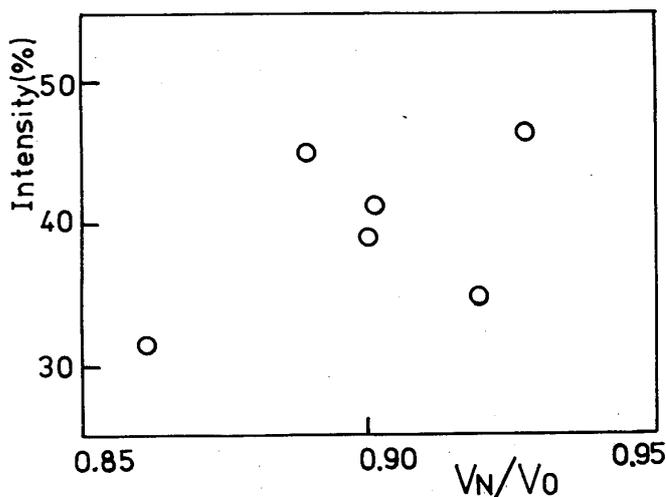


図 8. 図7の低強度側の分布に関し、その平均値と変化した縦波速度の関係。