

炭素鋼の衝撃疲労強度特性に関する実験

宮野 泰治・安藤 正昭・杉沢 久雄

A Study on the Impact Fatigue Strength of Carbon Steel

Taiji MIYANO, Masaaki ANDO, Hisao SUGISAWA

Comparative study of impact fatigue test and ordinary fatigue test was carried out under room temperature and low temperature (-55°C) on circumferential V-notched specimen(S35C). Strength of impact fatigue and ordinary fatigue have been discussed, and attempt have been made to arrange experimental data and results for evaluating impact fatigue strength. Results obtained are summarized as follows:

(1) Putting in order with stress amplitude (σ_a) on partly reversed stress, S-N curve was not affected by stress ratio (R). The method of arranging data was represented with σ_a on impact fatigue test. (2) It is estimated that this method is advantageous to be comparable with fatigue strength for σ_a and to consider data of ordinary fatigue test, independent on wave form of loading. (3) Impact fatigue life were reduced 25% (high stress side)~35% (low stress side) of ordinary fatigue life under room temperature. (4) Impact fatigue strength and ordinary fatigue strength ascended under low temperature. Ascending tendency of impact fatigue strength was lower than that of ordinary fatigue strength.

1. 緒 言

一般に、衝撃疲労試験では、使用される試験装置によって、衝撃速度や負荷される衝撃荷重波形は異なったものになる。また、結果の整理においても、普遍的な強度特性の評価法が定まっていないので、衝撃エネルギー¹⁾や最大応力²⁾、応力振幅³⁾、あるいは、荷重持続時間の要素⁴⁾などが用いられた研究結果の報告となっている。そして、このように研究者によって荷重波形等の試験条件や強度評価の整理方法がそれぞれ異なる報告となっていることが、各報告間の定量的な比較や、系統的な強度特性の把握を困難にしている要因の一つともなっている。

本実験はS35C材を供試材とした環状V溝切欠試験片を用いて、衝撃疲労試験と正弦波荷重下の疲労試験を、室温と低温 (-55°C)で実施し、これらの疲労強度特性の関係を比較検討すると同時に、衝撃荷重波形の最初の引張りと圧縮の一山を対象とした最大応力や応力振幅、応力比、引張・圧縮の持続時間等をパラメータにとり、衝撃疲労強度の評価に対する整理法の検討を試みたものである。

2. 供試材および試験片

供試材料は、直径22mmの機械構造用炭素鋼S35C材である。その化学成分を表1に供給状態および疲労試験片と同じ熱処理を施したJIS 4号試験片による引張試験での機械的性質を表2に示す。

各疲労試験に供した試験片は、図1に示す寸法、形状に機械加工された環状V溝切欠丸棒材である。これらを、 860°C 、1時間の真空焼なましを施してから実験に用いた。なお、切欠部の応力集中係数 α は、衝撃疲労試験片は2.82であり、正弦波荷重疲労試験片は3.09であった⁵⁾。

表1 化学成分 (%)

C	S _i	M _n	P	S
0.360	0.254	0.677	0.021	0.016

表2 機械的性質

熱処理	上昇伏点 MPa	下降伏点 MPa	引張強さ MPa	伸び %	成り %
—	399	381	615	31.0	54.9
860°C 1時間 真空焼鈍	342	326	551	34.5	52.2

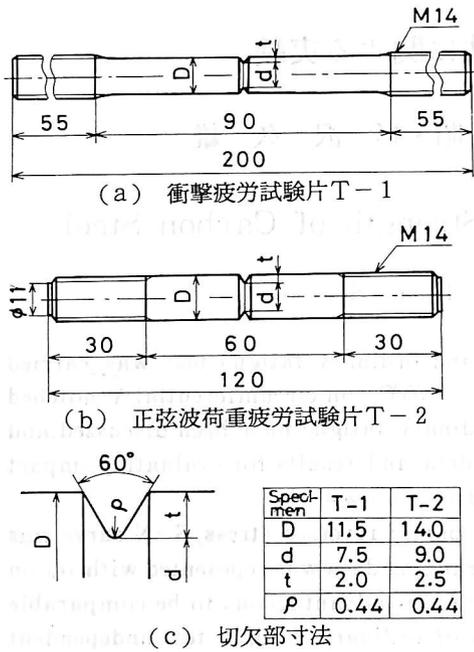


図1 試験片の形状寸法

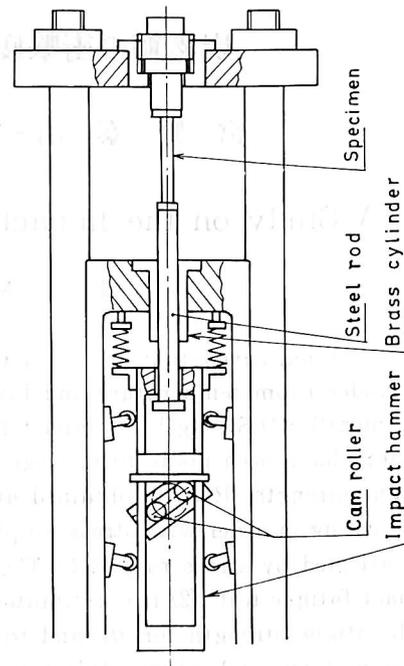


図2 衝撃引張疲労試験機

3. 試験装置および実験方法

衝撃疲労試験に使用した繰返し衝撃引張試験装置は、自家製の試験機で、図2の概略図で示すような重錘のカム・ローラ駆動を利用したものである⁶⁾。

カム・ローラ軸の回転数を260r.p.mとし、重錘重量Wは4.91kgfと3.41kgfの二種類、カム・ローラ回転半径を32.5, 30, 25, 20, 18mmの五種類に変換して衝撃荷重を発生させ、衝撃繰返し数520回/分(約8.67Hz)で行なった。

試験片に負荷された衝撃荷重は、すべての試験片に、ひずみゲージ(共和製:KFC-2-C1-11)を貼付して検出し、シグナルコンディショナを介してデジタルオシロスコープに記録して測定した。ひずみゲージの貼付位置は、図3に示す切欠部の上下10mmの位置で、それぞれの場所の表裏に2枚ずつ貼付されている。

正弦波荷重の疲労試験には、電気油圧サーボ式疲労試験機(島津製:EHF-UD-40L形)を使用した。応力比は $R = -1, -0.5, 0$ の三種類について、応力繰返し速度は、最大応力 σ_1 の大小により、1Hz($\sigma_1 = 35\text{kgf/mm}^2$ 以上), 5Hz($\sigma_1 = 22\text{kgf/mm}^2 \sim 30\text{kgf/mm}^2$), 10Hz($\sigma_1 = 20\text{kgf/mm}^2$ 以下)で行なった。

低温での疲労試験は、衝撃、正弦波の場合とも、試験片とチャック部を囲む恒温そうを試験機に設置

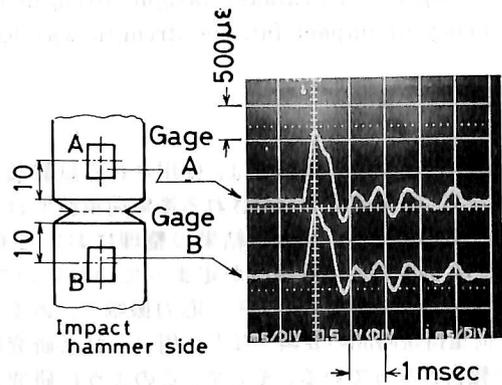


図3 ひずみゲージの貼付位置と荷重波形

し、その中に液体窒素を噴霧させ、試験片表面温度を -55°C に制御して行なった。温度の検出にはC-C熱電対を使用した。試験中に測定される試験片表面温度は、衝撃の場合は $-55 \pm 3^\circ\text{C}$ 、正弦波では $-55 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲内に保たれていた。なお、所定の温度に達してから10分間以上経過した後に実験を開始した。

4. 実験結果および考察

4・1 衝撃荷重波形について

炭素鋼の衝撃疲労強度特性に関する実験

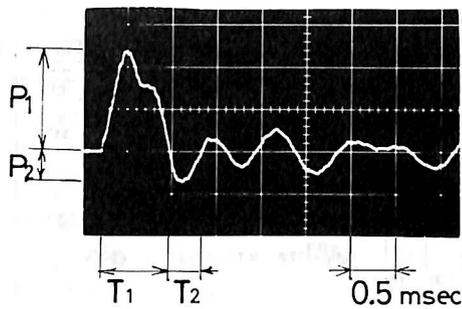


図4 衝撃荷重波形

試験片に負荷された衝撃荷重波形は、図4に示すように、衝撃直後に最大引張り荷重 P_1 、ついで、圧縮荷重 P_2 が発生し、その後、小さな引張と圧縮荷重が交互に続いて、およそ15msecで零に減衰するような様相を有する波形であった。このような波形の1サイクルは約115msecの間隔で繰返された。

図4は、図3に示した貼付位置のひずみゲージBにより観測されたものの一例であるが、ゲージBとゲージAで同時に観測された両者の波形を図3に示してある。両者には大差はみられず、ほとんど同一の形態を有していた。

このように、切欠部をはさんだ上下の対称位置で測定される荷重波形は、ほぼ同形状であったので、ゲージBで測定される P_1, P_2 が、そのまま切欠部にも作用しているものと仮定して、衝撃の際の公称応力 σ_1, σ_2 を算出することにした。

ところで、重錘重量、カム・ローラ回転半径を同一条件に設定しても、試験片の取付けや重錘落下高さなどの初期設定における微妙な差異にもより、(図4に示す) P_1, P_2 および引張・圧縮の持続時間 T_1, T_2 などの値は、試験時の試験片一本ごとに、多少変動した。したがって、本実験での衝撃荷重には、すべての試験片に貼付されたひずみゲージBで測定した値を用いた。

その際、一個の試験片で測定される P_1, P_2 の値は、試験片の破断寿命の80%程度までは、(P_1 が大きい場合は $\pm 5\%$ の場合もあるが) 大部分は $\pm 3\%$ 以内の範囲内で、ほぼ安定している。しかし、その後は減少傾向を呈し、破断寿命の90%以後は急減して行った。前者は、主として、試験片の剛性変化や試験機衝撃機構の構造的な特性に起因したものであり、後者は、主に、切欠部に発生・成長した疲労き裂面での応力波の伝ば機構の変化に対応した現象であると考えられた。したがって、試験片に作用した衝撃荷重としては、破断寿命の80%以内で測定された数回

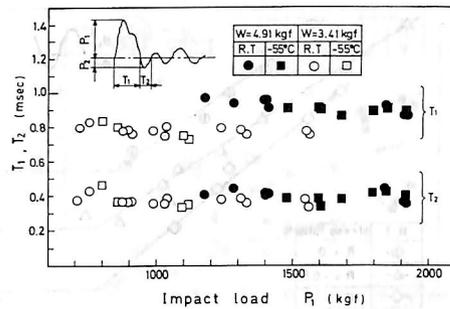


図5 引張、圧縮の持続時間の様相

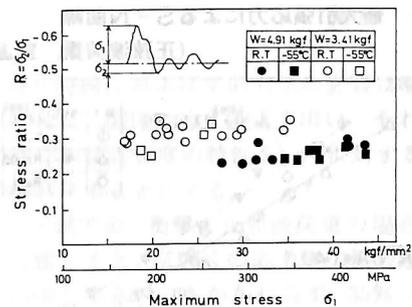


図6 荷重波形の応力比の様相

の P_1, P_2 の各平均値を採用することにした。

全試験片で測定された荷重波形の T_1 と T_2 の様相について、 P_1 で整理したものを図5に示した。多少ばらついてはいるが、 T_1 および T_2 の値は、 P_1 の大小や試験温度の条件に関係せず、ほぼ一定の値に収束している。そして、そのような一定値の T_1 には重錘重量 W の影響があらわれている。これらの結果は、 T_1, T_2 は、試験片を含む試験装置全体の系の構造によって支配されたことを示唆したものと考えられる。 T_1 に W の影響がみられたのは、 W に対応する重錘形状の違いに基づいた、応力波の伝ば機構の差異に起因した結果であり、 T_2 にも W の影響はある筈であるが、本実験の程度の W の差異では、それが確認されるほどに至らなかったものと考えられる。

さて、本実験での衝撃荷重波形では、最初の引張・圧縮の山に比べれば、それ以後のものはかなり小さい。そこで、 P_1, P_2 を切欠底原断面積で除した公称応力 σ_1, σ_2 と、その比 $R = \sigma_2 / \sigma_1$ を、それぞれ、試験片に与えられた衝撃引張応力と圧縮応力、および応力比として代表させ、試験結果の検討に用いることにした。

図6は、衝撃疲労試験が行われた全試験片での応力比 R の様相を、 σ_1 に対して整理したものである。ばらつきは大きい T_1 の場合と同様、 σ_1 の大小や、

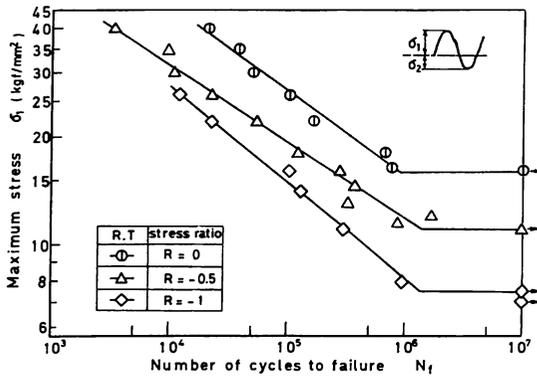


図7 最大引張応力によるS-N曲線
(正弦波荷重, 室温)

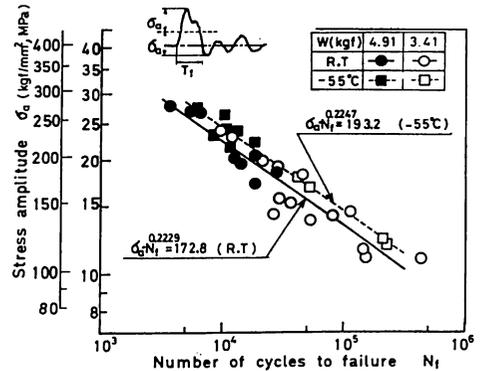


図9 応力振幅によるS-N曲線
(衝撃荷重, 室温, -55°C)

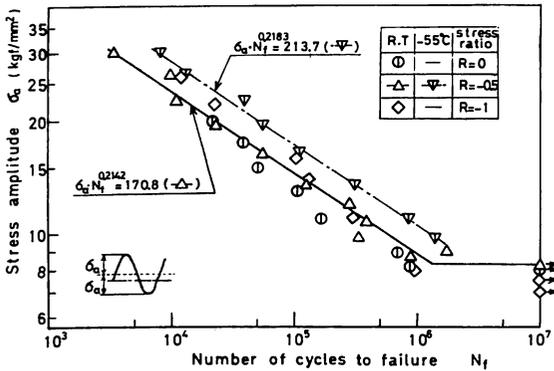


図8 応力振幅によるS-N曲線
(正弦波荷重, 室温, -55°C)

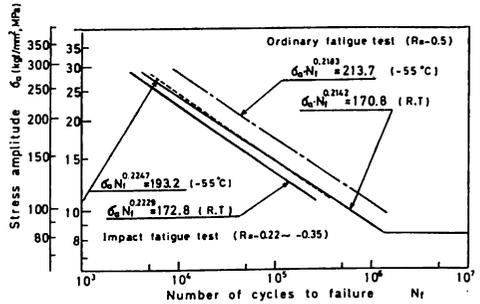


図10 衝撃および正弦波荷重下の疲労寿命
(室温, -55°C)

試験温度の条件には関係なく、重錘の条件、すなわち、試験装置全体の系の条件に支配された一定値にばらついているようである。

同時に、図6の結果はまた、本実験が、 $W=3.41$ kgfの場合には $R=-0.25\sim-0.35$ 、 $W=4.91$ kgfでは $R=-0.22\sim-0.33$ の範囲内に応力比が置かれた場合での衝撃疲労試験が行われたことを意味している。

4・2 正弦波荷重疲労試験について

後述する衝撃疲労試験結果は、4・1で述べたように、応力比 R が -0.22 から -0.35 の範囲内に置かれている場合の実験結果である。そのような場合の、衝撃疲労強度を検討する際の知見を得るために、正弦波荷重による、両振り、部分両振り、片振りの三種類の疲労試験を行った。繰返し速度は、供試材の下降伏点の値等を考慮して、3.の実験方法で述べた速度で行なっている。

図7は、試験結果を最大引張応力 σ_1 と破断回数

N_f を、両対数目盛にとり、応力比 R をパラメータにして示したS-N曲線である。図にみるように、両対数グラフで整理すると、各応力比のもとで高応力から低応力まで、寿命曲線は一本の直線で表された。そして、 R の絶対値が小さい程、見かけ上、疲労寿命が上昇するように表示された。

図8は、試験結果を応力振幅 σ_a と破断回数 N_f との関係で、両対数グラフに表したS-N曲線である。応力比 R によって、それぞれの場合の寿命曲線の傾きに若干の差異は認められるが、 R の影響は極めて小さくなっている。後述する衝撃疲労のS-N曲線のばらつきのレベルで考えれば、各 R での N_f は、一本の寿命曲線上に、収束されていると見なすこともできる。

以上の結果より、本実験のように R に多少の範囲がある衝撃疲労試験が行われたような場合には、S-N曲線は σ_1 よりも σ_a で整理するほうが良いと考えられた。すなわち、 R の影響は極めて小さいと考え、 R の差異を無視して、 σ_a に基づいた疲労強度特性の検討が可能になると考えられた。

さらにまた、試験装置が異なり荷重波形等の試験

炭素鋼の衝撃疲労強度特性に関する実験

条件が違う他の衝撃疲労試験の場合や、あるいは、衝撃でない通常の疲労試験結果とも、部分両振り応力状態であれば、 σ_a に対する疲労強度という観点からの比較検討が、ある程度可能になるのではないかと考えられた。

なお、図8には、 $R = -0.5$ で行なった -55°C 低温下での試験結果も示してあり、この応力比での室温と -55°C での寿命曲線について、最小二乗法で求めた結果の式も記してある。

4・3 衝撃疲労試験について

4・2で考察したように、試験結果を応力振幅 σ_a で整理し、そのS-N曲線を両対数グラフで表したものが図9である。正弦波荷重の場合より、ばらつきはかなり大きいものとなっているが、重錘の影響、すなわち、引張の持続時間 T_1 の影響は、疲労寿命に明瞭にあらわれていない。また、 -55°C では、室温の場合に比して、寿命上昇の傾向が認められる。ばらつきは大きい、それぞれの寿命曲線を、両対数グラフで最小二乗法により直線近似した式を図中に記した。

図10は、図8および図9で示した寿命曲線の各式を、まとめて表したものである。

応力比 R は、衝撃と正弦波荷重の場合で異なるが、4・2において考察したように、 σ_a で整理す

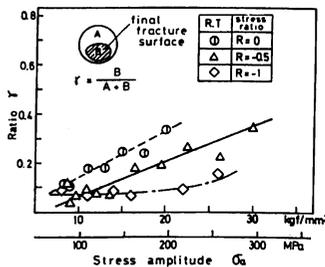


図11 最終破断面面積率と応力振幅の関係 (正弦波荷重, 室温)

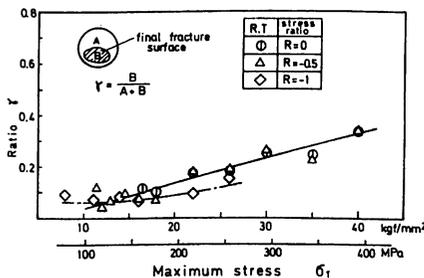


図12 最終破断面面積率と最大引張応力の関係 (正弦波荷重, 室温)

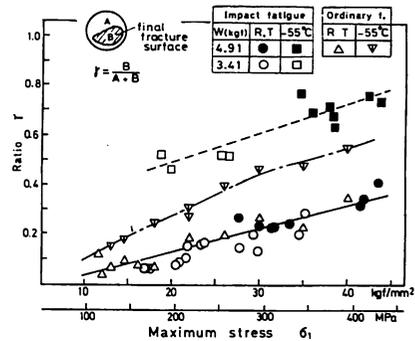


図13 衝撃疲労と正弦波荷重疲労における $\gamma - \sigma_1$ 関係の比較 (室温, -55°C)

れば、寿命曲線におよぼす応力比の影響は極めて小さいと考えて、図10に示す各式を用い、それぞれの試験条件での疲労強度の特性を、 σ_a に対する観点から比較検討することにする。

まず、室温での、衝撃と正弦波荷重の場合の疲労強度を比較すると、試験片の応力集中係数が、衝撃のほうが少し小さいにもかかわらず、35% (低応力側) から25% (高応力側) 程度の寿命低下を呈している。また、 -55°C では、両者とも室温の場合より高強度にはなるが、寿命上昇の程度は、正弦波荷重では2.2~2.3倍であるのに対し、衝撃の場合は1.5倍であって、衝撃疲労での低温による疲労強度の上昇傾向は正弦波の場合よりかなり下回っていた。

4・4 破面最終破断部の様相

疲労破面にみられる、巨視的な特徴的模様最終破断部を万能投影機により観察し、その面積率 γ を調べた。

図11および図12に、正弦波荷重の、室温での疲労試験結果の $\gamma - \sigma_a$ および $\gamma - \sigma_1$ の関係を示す。いずれも、 σ_a , σ_1 が大きくなるにしたがい γ も増大して破断していることがわかる。しかし、図11の $\gamma - \sigma_a$ の関係では、応力比 R がパラメータとなり、同一の σ_a でも、 R の絶対値が小さくなる順に γ が増大している。これに対し、 $\gamma - \sigma_1$ の関係では ($R = -1$ の両振り応力の場合に、多少 R の影響はみられるが)、全体的には、 R の影響は極めて小さくなり、 γ は σ_1 のみに対応する関係を持っていることが認められる。これらの結果から、 γ の傾向に関しては、S-N曲線の場合とは異なり、 σ_1 で検討するほうが良いことがわかった。

室温と -55°C での、衝撃疲労試験結果の $\gamma - \sigma_1$ 関係を図13に示す。比較のため、同図には $R = -0.5$ の

正弦波荷重の場合の結果もあわせて示してある。室温での疲労では、衝撃および正弦波荷重の両者の γ - σ_1 の関係は、ほぼ同じようになっていることがわかる。 -55°C の低温では、両者の場合とも、室温の時より γ は増大するが、しかし、その上昇の程度は異なり、正弦波荷重の場合の約20%増に対し、衝撃のほうでは約40%増になっていた。

低温の場合、疲労寿命が上昇しているにもかかわらず γ は大きい。このことは、寿命は上昇しても、破面のき裂進展領域は、小さい状態で疲労破断していることを意味する。これらの結果は、疲労過程でのき裂発生時期、き裂進展速度、破壊じん性値等の各挙動や傾向が、衝撃と正弦波の荷重形態の違いや試験温度条件などによって、異なるものであることを示唆した現象であると考えられる。

4. 結 言

S 35C材を供試材とした環状V溝切欠試験片を用いて、衝撃疲労試験と正弦波荷重下の疲労試験を、室温と低温(-55°C)で行ない。これらの疲労強度特性を比較検討した。同時に、衝撃荷重波形の最初の引張と圧縮の一山を対象とした最大引張応力 σ_1 、や応力振幅 σ_a 、応力比R、引張・圧縮の持続時間、 T_1 、 T_2 をパラメータにとり衝撃疲労強度を評価する際の整理法の検討を試みた。

得られた結果を要約すると

(1) Rや T_1 、 T_2 は衝撃荷重の大小(すなわち、重錘の衝突速度)や試験温度には関係なく、試験装置全体の系によって定まる一定値をとる。

(2) しかし、試験開始時の初期設定条件(試験片取付けや重錘落下高さ等)の微妙な差異や試験機の衝撃機溝構造の特性等により、 T_1 、 T_2 やRを、常に同じ値に設定することは困難で、個々の試験片ごと

に少し変動するものとなっていた。本実験でのRの変動範囲は $-0.22 \sim -0.35$ であった。

(3) 正弦波荷重下の疲労試験結果より、部分両張り形の衝撃荷重波形では、疲労強度の評価に対して、 σ_a が優れており、S-N曲線を σ_a で整理すれば、Rに多少差異がある場合の結果でも、また、荷重波形のタイプが異なる衝撃疲労の場合とも、あるいは、衝撃でない通常の疲労試験結果の場合とも、 σ_a に基づいた強度特性の比較検討は可能になると考えられた。

(4) 本実験結果を、 σ_a で整理したS-N曲線に基づいて比較すると、室温では、衝撃のほうが正弦波より低強度になり、35% (低応力側) から25% (高応力側) の寿命低下がみられた。

また、低温(-55°C)による寿命上昇傾向では、正弦波が2.2~2.3倍上昇するのに対し、衝撃では1.5倍で上昇率が小さかった。

(5) 巨視的な破面最終破断部の面積率 γ は、最大応力 σ_1 に対応していた。室温では、 γ と σ_1 の関係は、衝撃と正弦波の両者で同じような傾向を呈した。低温(-55°C)では、室温のときより、各 σ_1 での γ は増大するが、その程度は衝撃のほうが大きく、正弦波の約20%増に対し、約40%増であった。

参 考 文 献

- 1) 例えば、藤村・斎藤、材料試験, 8,71,53 (1959)
- 2) 例えば、平ほか2名, 材料, 27,301,942 (1978)
- 3) 例えば、近藤ほか2名, 材料, 25,268,106 (1976)
- 4) 例えば、茶谷ほか2名, 機械学会誌, 73,622,1508 (1970)
- 5) 西田, 応力集中, 森北出版, 105 (1971)
- 6) 宮野, 秋田高専紀要, 22,1 (1987)