

# S 35 C 材の疲労寿命およびき裂進展挙動に およぼす低温-55℃の影響

宮野 泰治・安藤 正昭  
斎藤 政秋\*・古井 秀行\*\*

## Effect of Low Temperature (-55℃) on the Fatigue Strength and Fatigue Crack Growth Behavior of Medium Carbon Steel (S35C)

Taiji MIYANO, Masaaki ANDO  
Masaaki SAITO, Hideyuki FURUI

(平成元年10月31日受理)

Fatigue test (stress ratio  $R=0.1$ ) of plate specimen with one-sided notch was conducted under low temperature (-55℃) and room temperature.

Fatigue life and fatigue crack growth behavior were discussed under two temperature conditions. Results obtained are summarized as follows;

- (1) Under temperature of -55℃, fatigue life ( $N_f$ ) and fatigue crack propagation life ( $N_{0.8}$ ) were 2.1~2.9 times those under room temperature.
- (2)  $N_{0.8}$  was provided 0.65~0.70 times of  $N_f$ .
- (3) Crack propagation rate ( $dl/dN$ , -55℃) deteriorated about 50% that ( $dl/dN$ , room temperature) under same stress intensity factor range ( $\Delta K$ ).
- (4) SEM observation of fracture surfaces develop no distinct differences at propagating crack, still morphology of fracture end was the presentation of dimple under room temperature and cleavage under low temperature (-55℃).

### 1. 緒 言

一般に鋼の疲労試験においては、低温下での疲労寿命は室温での場合を上まわることが明らかにされている<sup>1)</sup>。しかし、このような低温の疲労強度上昇への寄与が、疲労過程の各段階でどのように影響したか等についての研究報告、あるいは、低温下での疲労強度と応力比・平均応力・応力繰返し速度等の荷重形態との関連に関するような研究報告は、極めて少ないようである。

筆者らは、まず予き裂を導入した S 35 C 材試験片により、き裂進展過程での疲労試験を行って、低温-55℃の影響を調べ報告した<sup>2)</sup>。本報告は、ひき続き、き裂発生・進展・破断までの疲労の全過程を、同一応力で疲労試験を行った場合について、疲労寿命、き裂進展挙動におよぼす低温-55℃の影響を調べたものである。ここで、-55℃の温度は、形状係数  $\alpha$  が 1.73 以上の切欠きを有する S 35 C 材が、単一衝撃引張において完全に低温ぜい性を示した温度である<sup>3)</sup>。以下に、本実験の範囲内で得られた結果に

\* アキタ電子株式会社

\*\* 北海道大学学生

ついて報告する。

### 2. 試験片および実験方法

本実験に用いた材料は、市販の機械構造用炭素鋼 S 35 C 材で、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 に示した。

疲労試験片は、納入のままの  $\phi$  22 丸棒から、図 1 に示すような形状寸法をもつ板状の試験片に機械加工し、その中央部片側にワイヤカットにより幅 0.4mm、深さ 1.5mm の切欠きを付したものである。これを、860℃、1 時間の真空焼なましを施してから

表 1 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S
0.360	0.254	0.677	0.021	0.016

表 2 機械的性質

熱処理	上降状点 MPa	下降状点 MPa	引張強さ MPa	伸び %	絞り %
—	399	381	615	31.0	54.9
860℃ 1 時間 真空焼なまし	342	326	551	34.5	52.2

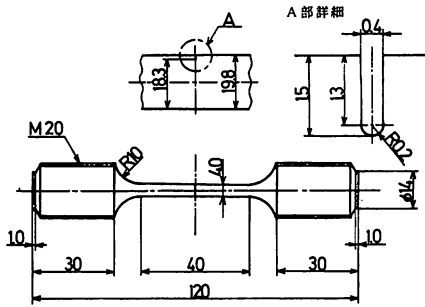


図1 試験片の形状寸法

実験に供した。

疲労試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機（島津サーボバルサ；EHF-UD5-40L形）を使用し、応力繰返し速度10Hz、応力比  $R=0.1$  の正弦波片振り引張負荷の荷重制御で行った。

低温での疲労試験は、試験片とチャック部を囲う恒温そう中に液体窒素を噴霧させ、試験片表面に取付けたC-C熱電対により試験片温度を検出し、 $-55 \pm 2^\circ\text{C}$  に保持させて行った。

切欠き底から発生した疲労き裂長さと同繰返し数の関係は、試験片の両表面にクラックゲージ（共和製；KV-5B）を貼り、その出力変化をペンレコーダに記録して算出した。使用したクラックゲージでは、0.2mmのピッチで5mmのき裂長さを、試験を中断することなく連続して測定し得る。

疲労破断後の破面の微視的様相は、走査型電子顕

表3 疲労試験片による静的引張試験結果

温度	上昇状点 (MPa)	下降状点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
R.T	355	330	542	10.2
-55℃	434	416	582	5.5

微鏡で観察した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 疲労寿命について

疲労試験に用いた試験片で、室温および $-55^\circ\text{C}$ で行った静的引張試験（ストローク制御0.6mm/min）結果を表3に示す。ここでの伸びは、切欠きをささむ標点距離30mm間の結果である。室温に比して、 $-55^\circ\text{C}$ では、引張強さの上昇は小さいが、降伏点で22%および26%の上昇を示し、伸びは50%減少していた。これらの機械的性質の変化は当然、疲労寿命やき裂進展速度に影響をおよぼすことが予想される。

表4に、切欠き底から発生した疲労き裂が0.8mmの長さまで進展した推定繰返し数 $N_{0.8}$ と破断寿命 $N_f$ についての実験結果を示した。ここで、 $N_{0.8}$ は、き裂長さ  $a=0.8\text{mm}$  前後付近のき裂進展速度  $da/dN$  により計算した値である。

図2に、 $S-N_{0.8}$  曲線および  $S-N_f$  曲線を示した。縦軸の応力  $\sigma_{\max}$  は切欠き底断面の公称繰返し最大応力で、図に示すように、 $\sigma_{\max}$  と  $N_{0.8}$  および  $N_f$  の関係は、両対数目盛で整理するほうが直線に近似され

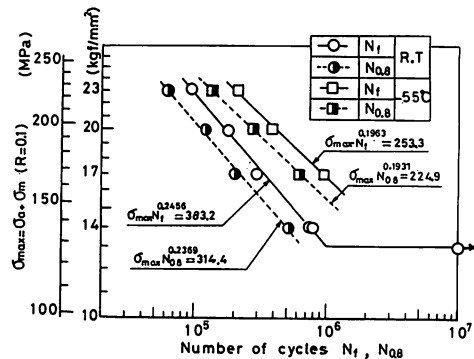


図2  $S-N_f$  曲線および  $S-N_{0.8}$  曲線

表4 実験結果

$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	$N_f$	$N_{0.8}$	$N_f - N_{0.8}$	温度
225.4	22.54	94005	61720	32285	R.T
196.0	19.60	179240	120815	58425	R.T
166.6	16.66	293560	202477	91083	R.T
137.2	13.72	736510	521274	215236	R.T
137.2	13.72	789260	—	—	R.T
127.4	12.74	$10^7$	非破断	—	R.T
225.4	22.54	212239	133326	78913	$-55^\circ\text{C}$
196.0	19.60	382544	279762	102782	$-55^\circ\text{C}$
166.6	16.60	972708	638056	334562	$-55^\circ\text{C}$

S 35 C 材の疲労寿命およびき裂進展挙動におよぼす低温-55℃の影響

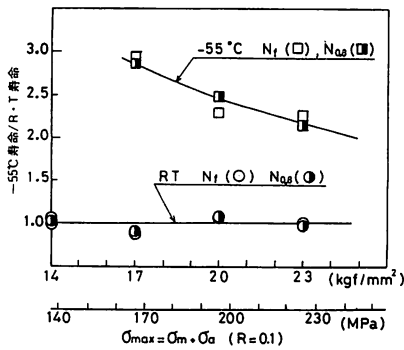


図3 疲労寿命上昇比

るようであった。図中の曲線は、いずれも最小二乗法で表示したものである。これらの曲線から $N_{0.8}$ と $N_f$ の関係を傾向的に考察すると、 $N_{0.8}$ は $N_f$ の65~70%であった。なお、-55℃での場合の疲労限度は求めていないが、 $N_f$ の傾向からみて、 $\sigma_{max}=166.6\text{MPa}$  (17kgf/mm) は疲労限度に近い値と考えられる。

図3に、室温のS- $N_{0.8}$  およびS- $N_f$  曲線に対する-55℃の各曲線の上昇比を示した。図中にプロットした点は実験値である。-55℃では、 $N_{0.8}$ も $N_f$ もほぼ同じような傾向で上昇しており、 $\sigma_{max}=225.4\text{MPa}$  (23kgf/mm) での2.1倍から166.6MPa (17kgf/mm) での2.9倍と $\sigma_{max}$ が小さくなるに伴い、上昇比が増大していく傾向を示した。本実験のように、一定応力 $\sigma_{max}$ のもとで、き裂発生過程から進展過程を経て破断に至るまで連続して行った疲労試験の場合と、室温で0.2~0.4mm程度の予き裂を導入した試験片を用いた場合<sup>2)</sup>との、それぞれのき裂進展寿命( $N_f-N_{0.8}$ )を比較すると、前者のほうが室温では短く、-55℃では逆に長くなるような傾向がみられた。

3・2 き裂進展挙動について

き裂進展中、試験片の表面き裂長さは、両表面において若干異なっていた。試験途中の試験片を数本液体窒素を用いて強制破断させ、き裂前線の形状を調べた結果の一例を図4に示す。程度の差はあるが、他の場合も同様な傾向であった。機械学会基準の定義によるき裂長さ<sup>4)</sup>とは異なるが、定性的な考察という観点から、以下に述べるき裂進展挙動は、試験片両表面に貼付した2枚のクラックゲージで観測された表面き裂のうち、長いほうのき裂で代表させ、検討した。

図5に、各 $\sigma_{max}$ での室温と-55℃の場合のき裂進

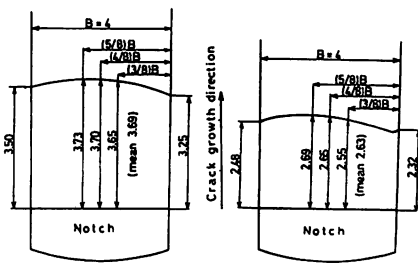


図4 き裂前縁形状とき裂長さ ( $\sigma_{max}=137.2\text{MPa}$ ,  $R=0.1$ ,  $R\cdot T$ )

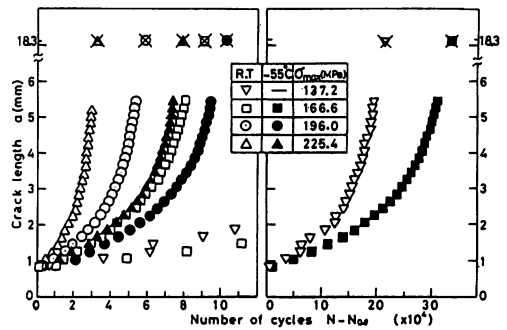


図5  $N_{0.8}$ からのき裂進展曲線

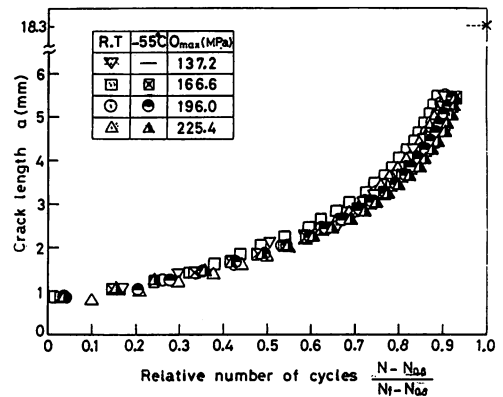


図6 相対繰返し数比に対するき裂進展曲線

展曲線を示した。横軸は、き裂長さ $a=0.8\text{mm}$ からの繰返し数( $N-N_{0.8}$ )である。図から明らかなように、-55℃では、き裂進展寿命( $N_f-N_{0.8}$ )の上昇に伴いき裂進展速度も遅くなっていた。

図6は、 $(N-N_{0.8})/(N_f-N_{0.8})$ の相対繰返し数比で考察したき裂進展曲線である。図より、 $(N_f-N_{0.8})$ を基準にした相対繰返し数比で考えれば、それぞれの温度では $\sigma_{max}$ の大小による差異は特にみられず、同じような割合でき裂被害が進んで行くが、温度条件の違いで比較すると、 $(N_f-N_{0.8})$ の50%を過ぎる付近から、-55℃の場合が若干き裂被害が遅れて行く

ような傾向がみられた。また、0.8mmから4mm程度の長さまでき裂が進展する期間は  $(N_f - N_{0.8})$  の85%、5.5mm程度まででは90%程度が費され、その後、残りの約13mmを急速にき裂が進展し破断に至っていた。

図7に、応力拡大係数範囲  $\Delta K$  とき裂進展速度  $d\ell/dN$

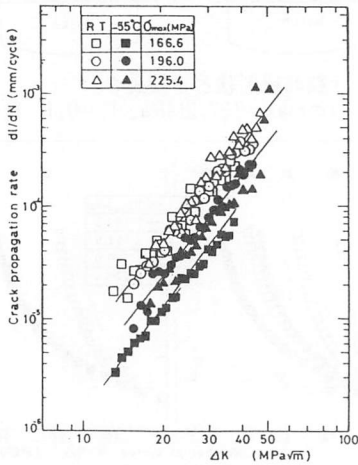


図7 き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係

の関係を示した。ここで、 $\Delta K$ はBrownの式<sup>5)</sup>で計算し、 $d\ell/dN$ はセカント法によって求めた。また、 $\ell$ は切欠きの深さ1.5mmに切欠き底からのき裂長さ  $a$  を加えた値である。図7から、ばらつきは大きいのが、平均的な傾向について推察すると、それぞれ次式で示される曲線上にばらついていとみなしてよいようであった。すなわち、

$$d\ell/dN = 6.0 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.0} \quad (\text{室温})$$

$$d\ell/dN = 3.0 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.0} \quad (-55^\circ\text{C}, \sigma_{\max} = 225.4 \text{ および } 196.0 \text{ MPa})$$

$$d\ell/dN = 1.5 \times 10^{-9} (\Delta K)^{3.0} \quad (-55^\circ\text{C}, \sigma_{\max} = 166.6 \text{ MPa})$$

したがって、 $\sigma_{\max} = 225.4 \text{ MPa}$  および  $196.0 \text{ MPa}$  の場合について考察すると、同一  $\Delta K$  のもとでは、 $-55^\circ\text{C}$  での  $d\ell/dN$  は、室温の  $d\ell/dN$  の50%程度に低下していた。このことから、 $(N_f - N_{0.8})$  の90%程度に相当する繰返し数は、 $-55^\circ\text{C}$  でのほうが室温より、およそ2倍程度多くなることになる。なお、 $-55^\circ\text{C}$ 、 $\sigma_{\max} = 166.6 \text{ MPa}$  での  $d\ell/dN$  が極めて遅くなっている傾向を示したのは、図2の  $S-N_f$  曲線にみるとおり、低温  $-55^\circ\text{C}$  での疲労限度に近い値の繰返し荷重下であること、引張の平均応力が小さいこと等に関連した現象とも思われ、今後検討する予定である。

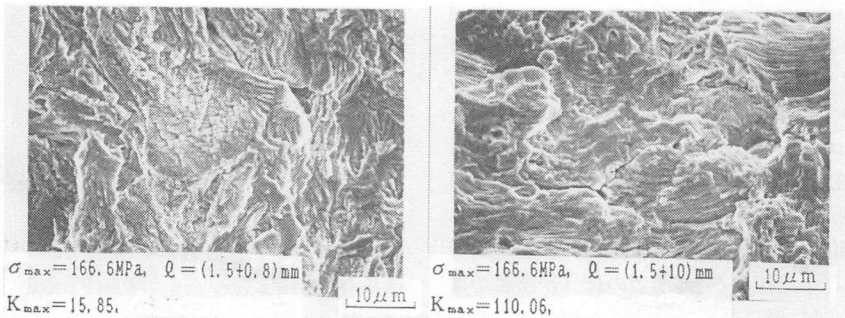


図8—(1) 疲労破面の微視的様相 (R・T, SEM)

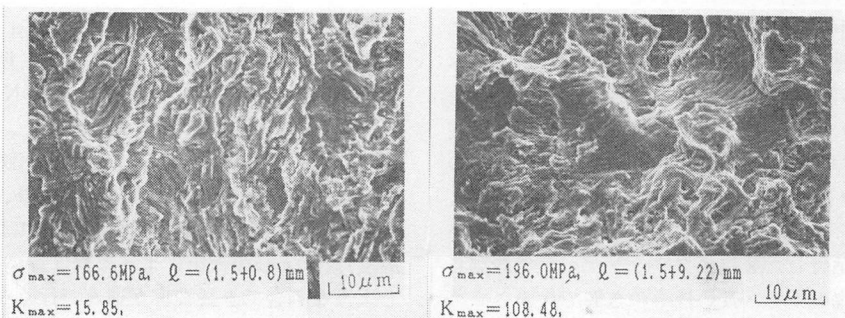


図8—(2) 疲労破面の微視的様相 ( $-55^\circ\text{C}$ , SEM)

S35C材の疲労寿命およびき裂進展挙動におよぼす低温-55℃の影響

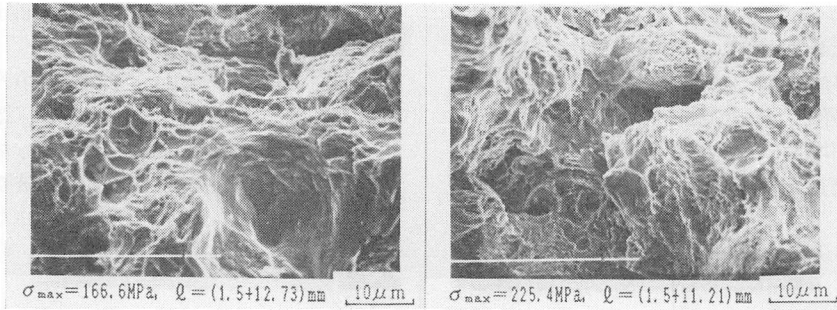


図9-(1) 遷移領域の破面の微視的様相 (SEM, R・T)

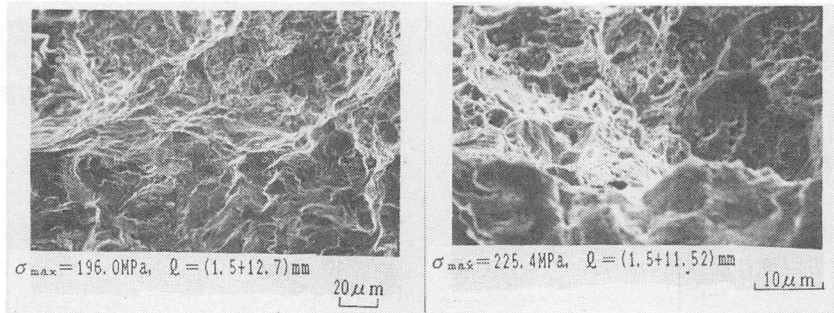


図9-(2) 遷移領域破面の微視的様相 (SEM, -55℃)

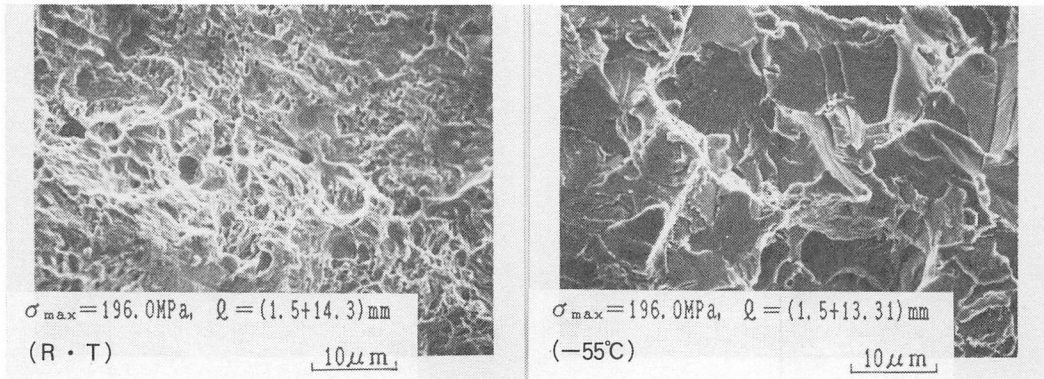


図10 最終破断部破面の微視的様相 (SEM)

3・3 破面形態の微視的様相について

疲労破断した試験片の破面を走査型電子顕微鏡で観察した。疲労き裂進展中の領域の大部分にストライエーションが観察され、温度による明瞭な差異は特に認められなかった。その一例を図8-(1)、(2)に示す。しかし、最終急速破断に遷移する領域では、図9-(1)、(2)にみるように、室温の場合、ストレッチゾーンに似た白い段状の帯が形成されており、 $\sigma_{max}$ の大きいほうほど、それが大きくなっていった。そして、このような段状の帯の領域は、-55℃になると、かなり小さいものになっていた。最終破断部は、温度の影響が明瞭にあらわれ、図10の例に示す

ように、室温ではディンプル、-55℃ではへき開破面を形成していた。

4. 結 言

炭素鋼S35C材の、片側に切欠きを有す板状試験片について、室温大気中と-55℃液体窒素ふん囲気中で、疲労試験(応力比R=0.1)を行い、破断寿命およびき裂長さ0.8mm以後のき裂進展挙動におよぼす低温の影響を調べた。本実験の範囲内で得られた結果は、次のとおりである。

(1) 破断寿命 $N_f$ およびき裂が0.8mm進展した推定線

返し数 $N_{0.8}$ の $S-N_f$ 曲線および $S-N_{0.8}$ 曲線を最小二乗法で表示して比較した。 $-55^{\circ}\text{C}$ における $N_f$ および $N_{0.8}$ の上昇傾向は、ほぼ同様で、室温の場合の2.1～2.9倍に上昇し、繰返し応力 $\sigma_{\max}$ が小さくなるに伴い上昇比が増大していた。

(2)  $N_{0.8}$ は室温でも $-55^{\circ}\text{C}$ でも、 $N_f$ の65～75%程度であった。

(3) き裂長さ0.8mmからのき裂進展寿命( $N_f-N_{0.8}$ )を基準にして、 $(N-N_{0.8})/(N_f-N_{0.8})$ の相対繰返し数比で、き裂被害を検討すると、各温度では、 $\sigma_{\max}$ の大小による差異は特に認められず、同じ割合でき裂被害が進んでいたが、温度の違いで比較すると( $N_f-N_{0.8}$ )の50%以後から、 $-55^{\circ}\text{C}$ のほうが若干遅れて行くような傾向がみられた。

(4) ばらつきは大きかったが、き裂進展速度 $d\ell/dN$ と応力拡大係数範囲 $\Delta K$ を、 $d\ell/dN=C\cdot\Delta K^m$ の関係で考察すると、 $d\ell/dN$ は同一 $\Delta K$ レベルで、 $-55^{\circ}\text{C}$ では室温の約50%程度に低下していた。ただし、 $-55^{\circ}\text{C}$ での疲労限度に近い値の応力と考えられる

$\sigma_{\max}=166.6\text{MPa}$  (17kgf/mm<sup>2</sup>)での $d\ell/dN$ は、さらに低下して25%程度になっていた。

(5) 破面の微視的様相は、き裂進展中の領域では大部分にストライションが観察され、温度の影響による明瞭な差異は特に認められなかった。しかし、最終急速破断に遷移する領域と最終破断部の破面は温度によって異なった様相を呈していた。

#### 参 考 文 献

- 1) 例えば、田中・中山、日本機械学会論文集、42、356、1001 (1976)
- 2) 古井・斎藤・宮野、第19回卒業研究発表会講演前刷集、27 (1989)
- 3) 斎藤・宮野・ほか2名、秋田高専研究紀要、19、1 (1984)
- 4) 国尾・ほか3名、破壊力学実験法、朝倉書店 132 (1984)
- 5) 国尾・ほか3名、破壊力学実験法、朝倉書店 240 (1984)