疲労過程における温度計測による疲労寿命推定法[†]

辻 上 哲 也^{*} 堀 川 武^{*} 東 田 英 信^{**}

The Prediction Method of Fatigue Life by Temperature Measurement in Fatigue Process

by

Tetsuya TSUJIKAMI^{*}, Takeshi HORIKAWA^{*} and Hidenobu TSUKADA^{**}

In order to investigate the relation between a stress cycle and a temperature change of metallic materials, a computer-aided platinum wire temperature measurement system was used for taking the data of temperature, stress and strain into the computer memory simultaneously. Fatigue tests have been conducted using the smooth round bar specimen made of carbon steels (S55C, SCM435) and stainless steels (SUS304). The temperature changes under an elastic stress range are agreed well with the value calculated by the thermo-elastic theory. On the other hand, the temperature changes under a plastic stress range are larger than the calculated values, because of the plastic stress-strain works. As the result, the crack initiation life is explained by the equations; S55C material: $\Delta q \cdot N_c = 1.5 \times 10^9 \text{ J/m}^3$, SCM435: $\Delta q \cdot N_c = 2.6 \times 10^8 \text{ J/m}^3$, SCM435 Material: $\Delta q \cdot N_c = 9.0 \times 10^8 \text{ J/m}^3$.

Key words: Fatigue life, Temperature measurement, Thermo-elastic theory

1 緒 言

疲労破壊の過程は、き裂発生、進展、そして最終破断に分類され、疲労き裂発生までは、塑性ひずみと深い関係がある。疲労過程において塑性ひずみの繰り返しによる内部組織の微視的变化が観察され、これらの微視的变化は累積的であり不可逆的に進行する。疲労過程における内部組織の変化が、直接的に材料の機械的性質、電気的性質、磁氣的性質などの変化として表れる。このような物理量の変化を基にして、疲労の程度を予測し寿命を求める技術を確認することは実用上有益なことである。そのため、疲労損傷検出に関する研究と寿命・余寿命予測技術に関しては、超音波による方法、硬さ測定法、X線法等を用いた幾多の基礎的研究が行われてきている。¹⁾

疲労過程において材料が示す応力-ひずみ履歴曲線はその計測が容易であり、しかも試験を中断せず連続的に測定できるという利点を持つことから、この方法によって疲労機構の解明、あるいは疲労強度の評価に関する研究が行われてきている。^{2), 3)}一方、疲労過程における材料の発熱挙動は、疲労の進行度と密接に関連していると考えられており、疲労に伴う発熱量に着目した取り組みも古くから行われてきている。^{4)~6)}疲労によって生じる温度変化は微視組織においても確認することができ、発熱は結晶内の転位線の運動に伴う広義の摩擦熱と考え、発熱量を材料内部の微視的塑性変形の量を測る尺度とすることができると考えられる。⁷⁾さらに、履歴エネルギーはほとんど熱エネルギーとみなすことができ、試験片の温度上昇に寄与しており、試験片全体にわたる応力とひずみの関係を示すものであるとの結論も得られている。⁸⁾また、材

料の変形に伴う発熱挙動は、弾塑性変形機構の解明にも利用されている。^{9), 10)}

しかしながら、疲労寿命において、定量的な評価に結びつけるまでには至っていない。また、材料の疲労寿命と発熱量に関して研究を行ったものはほとんどないのが現状である。そこで本研究では、繰り返し応力、1cycle中における温度変化を実時間測定し、その温度変化の中から熱弾性効果による温度変化分を除くことにより、疲労寿命と直接に関係している温度変化を求め、試験片内部に発生している熱量を計算することにより、疲労き裂発生の寿命則を明らかにすることを目的とする。本研究で用いた供試材料はS55Cとその調質材、SCM435とその調質材、SUS304で、塑性域、弾性域での繰り返し応力による疲労試験を行い、そのときの発熱挙動、特に1cycle当たりの発熱量と破断繰り返し数との関係に着目して研究を行った。

2 疲労と熱弾性効果

2・1 熱弾性効果

ある一定の気体を断熱状態の下で急速に圧縮するとその気体の温度は上昇し、急速に膨張させると温度は低下する。この現象は気体に限ったことではなく、固体においても言えることであり熱弾性効果として知られている。

熱弾性効果についての研究は多くなされており、体積変化と温度上昇の関係は、熱力学と弾性論から直接導くことができる。その関係はMaxwellの関係式を使うことにより表すことができる。等方均質な線形弾性体においては以下のように式(1)で表される。ただし、この関係は理論上、弾性域においてのみ成り立つものである。

[†] 原稿受理 平成16年7月15日 Received July 15, 2004

^{*} 正 会 員 龍谷大学理工学部機械システム工学科 〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷, Dept. of Mechanical and Systems Eng., Ryukoku Univ., Seta, Otsu, 520-2194

^{**} 龍谷大学大学院(現在 日立建機株) 〒520-2194 大津市瀬田大江町横谷, Graduate Student, Ryukoku Univ., Seta, Otsu, 520-2194

$$\Delta T = \frac{T_0}{\rho C_\varepsilon} \sum_{ij} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T_0} \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

ここで、 ΔT ：温度変化、 T_0 ：大気中の温度、 ρ ：密度、 C_ε ：定ひずみでの比熱、 σ_{ij} ：応力テンソルの変化量、 ε_{ij} ：ひずみテンソルの変化量を示す。また、弾性理論の応力とひずみ関係から、式 (1) は以下になる。

$$\Delta T = -k T \sigma_{zz} \quad (2)$$

ここで、熱弾性定数 k は、

$$k = \frac{\alpha}{\rho C} \quad (3)$$

弾性応力 σ_{zz} は、

$$\sigma_{zz} = \left(\frac{E}{1-2\nu} \right) (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) \quad (4)$$

で求められる。ただし、 α ：線膨張係数、 C ：定圧比熱である。式 (2) にそれぞれを代入して整理すると

$$\Delta T = - \left(\frac{\alpha T_0}{\rho C} \right) \sigma_{zz} \quad (5)$$

となる。金属材料は、正の熱膨張係数をもっているのので上式から、断熱過程において引張応力は温度を低下させ、圧縮応力は温度を上昇させることがわかる。

ここで、軸荷重下での疲労試験で測定した温度の変化量を $\Delta \theta$ で表し、応力振幅が弾性範囲内である時の温度変化量を $\Delta \theta_e$ とする。完全両振り疲労試験を行った場合には、圧縮荷重と引張荷重を繰り返すため、熱弾性効果より 1cycle 当たりの温度変化幅 $\Delta \theta_e$ は、圧縮過程における温度変化と引張過程における温度変化の和からなる。即ち、応力振幅を σ_a とすると温度変化幅は次式で表すことができる。ここで、右辺の“-”記号は、引張応力振幅 σ_a では温度下降、圧縮応力 σ_a では温度上昇となり、その温度変化幅を表している。

$$\Delta \theta_e = 2 \left| - \left(\frac{\alpha T_0}{\rho C} \right) \sigma_a \right| \quad (6)$$

なお、本実験の範囲では、ひずみが小さくその変形に要する時間が短いので近似的に断熱過程と見なしている。

2・2 応力振幅と温度変化幅

疲労過程における試験片表面温度の変化幅は、応力振幅に依存し、応力振幅が小さいときは試験片全体の温度上昇はほとんどない。しかし、応力振幅が大きい時には繰り返し数と共に試験片温度は上昇する。両振り応力状態では熱弾性効果による温度変化のみが生じているならば、試験片全体の温度上昇は起きない。しかし、応力振幅がある程度以上大きい場合には引張変形時でも温度上昇がみられる。このようなことから、以下のような仮説を立て研究を進めた。

応力振幅が十分に小さく、弾性変形による両振り応力状態では、温度変化は可逆的であり、疲労損傷の累積はほとんど生じず、試験片全体の温度上昇も起こらない。それに対して塑性変形が伴う場合には、圧縮、引張変形にかかわらず温度は上昇する。また、塑性変形が大きいほど温度上昇も大きい。つまり、塑性変形の繰り返しにより疲労損傷が累積することから、温度変化の大小が 1cycle 中の疲労損傷の大小に関係する。このような仮定

Fig. 1. Pattern of temperature change.

に基づいた温度変化のモデルを Fig. 1 に示す。ここで T' は疲労試験開始時を基準とした試験片の温度である。1cycle 間の温度変化幅 $\Delta \theta$ から熱弾性効果による温度変化幅 $\Delta \theta_e$ を引いた温度変化幅 $\Delta \theta_p$ が疲労損傷の尺度となると考えられる。 $\Delta \theta_p$ がゼロの場合、温度変化幅 $\Delta \theta$ は熱弾性効果によるものと一致し、疲労損傷の累積は生じない。つまり、 $\Delta \theta_p$ の存在によって疲労損傷が発生していることがわかり、繰り返し数に伴う $\Delta \theta_p$ の累積から試験片温度 T' も上昇することになる。

3 実験方法

3・1 温度計測システム

疲労過程における荷重、ひずみ挙動と試験片表面の温度変化を繰り返し数と対応させて測定するための同時計測システムを新しく構築した。疲労試験部には、荷重容量 50kN のロードセルを備えたインストロン社製の電気油圧サーボ式疲労試験機 (Model 8501) を用いた。試験片に発生するひずみは、ひずみゲージによって検出し、A/D ボードによりコンピュータに取り込んだ。

温度検出には、共和電業社製白金抵抗線式温度ゲージ (KTB-7-50-A1) を使用した。温度測定用アンプは定電流をゲージに流すことにより、ゲージの抵抗変化を電圧変化として取り出し、これを増幅する方式のものである。測定温度レンジは 10, 50, 100, 200℃の切換が可能で、各温度レンジの出力は 5V である。温度、荷重、ひずみは、A/D ボードによりデジタル変換してコンピュータに取り込んだ。なお、温度変化幅の小さな時に 12bit のものでは分解能が不足することから、16bit のものを使用した。このように、ノイズの大きい熱電対ではなく、温度に対して非常に感度がよく直線性の抵抗変化を示す温度ゲージを用いることで、従来の温度計測システムでは不可能であった繰り返し応力 1cycle 内での微小な温度変化 (1/100℃) を精度良く、実時間計測することを可能にした。

制御部としては、1 サイクル間の応力、ひずみ挙動と試験片発熱挙動を同時計測するために、実時間で試験機制御装置から繰り返し数を取込めるようにした。この繰り返し数が試験開始前に設定した値に達すると、ひずみ、荷重、試験片表面温度の計測を同時に開始する。なお、疲労試験部からの繰り返し数は常時カウントされており、すべてのデータの同期を取るようにした。

3・2 供試材料

本研究で用いた供試材は、機械部品によく用いられている材料で軟化—硬化の挙動を示す炭素鋼 S55C 材とその調質材、比較的強度の高い高強度鋼で加工軟化材である SCM435 材とその調質材および繰返し硬化材である SUS304 材である。疲労試験片の機械的性質、化学成分、熱物性値を Table I ~ Table III に示す。また、試験片形状を Fig. 3 に示す。すべての試験において、同じ形状の平滑丸棒試験片を使用した。

3・3 疲労試験周波数

疲労試験周波数を決定するに当たり、予備的な実験を行った結果、周波数が 0.5 ~ 2Hz の間では、応力振幅が一定であるなら、1cycle 当たりの温度変化幅は、繰返し周波数に影響しないことがわかった。本研究では、データ収録装置の特性と試験期間および温度ゲージの特性を勘案して、サンプリングタイムを 20m・sec とし、すべての試験片において、疲労試験周波数を 0.5Hz の正弦波形完全両振りとして温度計測疲労試験を行った。

4 実験結果と考察

4・1 応力繰返しに伴う温度変化

S55CH 材において、Fig. 3 (a) は応力振幅 400MPa、(b) は 550MPa で両振り試験を行ったときの応力繰返しに伴う温度変化の測定結果を示す。このグラフは時間経過

(a) $\sigma_a = 400$ MPa

(b) $\sigma_a = 550$ MPa

Fig. 3. Relationship between temperature and strain under stress cycles for S55CH.

Table I. Chemical composition. (mass%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
S55C	0.540	0.250	0.780	0.026	0.015	0.066	0.026	—	0.030
SCM435	0.360	0.180	0.790	0.019	0.007	1.010	0.040	0.160	0.010
SUS304	0.050	0.350	1.670	0.350	0.240	18.720	8.270	—	—

Table II. Mechanical properties.

	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
S55C	345.7	758.5	20.5	44.3
S55CH	574.7	820.7	19.9	30.0
SCM435	833.0	940.8	22.0	64.0
SCM435H	837.0	941.0	16.0	39.2
SUS304	389.0	624.0	60.0	73.0

Table III. Thermo physical properties.

	Coef. thermal exp. [$\text{k}^{-1} \times 10^{-6}$]	Specific heat [$\text{J/kg} \cdot \text{K}$]	Density [kg/m^3]
S55C	11.8	473.0	7850.0
SCM435	11.2	431.0	7830.0
SUS304	13.6	499.0	7920.0

Fig. 2. Round bar specimen.

に伴うひずみおよび温度変化を表したもので、細実線がひずみ、太実線が温度変化を示す。Fig. 3 (a) からわかるように、ひずみの繰返しに伴い試験片表面温度も変化し、温度とひずみとの同期が取れていることがわかる。また、圧縮状態になると温度は上昇し、引張状態になると温度は低下していることが観察される。すなわち、圧縮過程が発熱過程、引張過程が冷却過程となっている。しかしながら Fig. 3 (b) のように、降伏応力を大きく越える応力振幅 550MPa で実験を行った場合には、引張過程であっても塑性変形による発熱が生じるために、温度が応力の繰返しに伴い上昇していることがわかる。

疲労試験中、周囲へ発散される熱量より繰返しによる発熱が大きい場合には試験片の温度は上昇する。そこで、S55C 材、S55CH 材、SCM435 材、SCM435H 材および SUS304 材について実験を行い、それぞれの応力振幅における温度上昇の挙動を測定した。Fig. 4 から Fig. 6 はそれぞれ、S55CH 材、SCM435H 材および SUS304 材について各種応力振幅レベルでの試験結果を示し、縦軸に疲労試験開始時の基準温度（室温）から上昇した試験温度、横軸に繰返し数比を取ったものである。

S55CH 材は、繰返し初期軟化後、硬化する材料であり、グラフからわかるように応力繰返しの開始とともに軟化過程と対応して表面温度が急上昇するが、やがて温度上昇率が小さくなり飽和する。その後、繰返しに伴う発熱量が少なくなり、全体の温度が少し低下した後、

Fig. 4. Behavior of specimen surface temperature for S55CH.

Fig. 5. Behavior of specimen surface temperature for SCM435H.

Fig. 6. Behavior of specimen surface temperature for SUS304.

破断前に再び上昇する傾向が見られる。これは破断直前における著しい局部的塑性変形によるものである。それに対し、SCM435H 材は、繰返し軟化材であるため、破断に至るまでに徐々に温度が上昇する結果が得られた。

SUS304 材は、繰返し硬化材であるため、S55CH と同様の傾向が見られるが、飽和温度に達する繰返し数比に差が見られる。

4・2 応力振幅と温度変化幅

Fig. 7 は、S55C 材とその調質材について、 $n/N_f \approx 0.1$ の時の繰返し応力振幅 σ_a と温度変化幅 $\Delta\theta$ の関係を示したものである。直線は、式 (6) で求めた σ_a と $\Delta\theta_e$ の関係である。本材料では、約 300MPa まで $\Delta\theta$ が理論値にほぼ一致しているが、それ以上の応力では引張過程でも発熱が起り、弾性範囲の関係式 (6) で表される値から大きくはずれる。調質材においても約 400MPa 以上になると同様の傾向が見られる。同一応力において調質材の方が温度変化幅が小さい傾向が見られるが、これは、降伏応力の違いによるものと考えられる。Fig. 8 は、SCM435 材とその調質材について、 $n/N_f \approx 0.2$ の時の σ_a と $\Delta\theta$ の関係を示した結果である。SCM435 材においては、約 500MPa 以上、調質材においても約 550MPa 以上

Fig. 7. Comparison of theoretical and experimental results of temperature variation in a cycle for S55C and S55CH.

Fig. 8. Comparison of theoretical and experimental results of temperature variation in a cycle for SCM435 and SCM435H.

Fig. 9. Relationship between energy in one stress cycle and crack initiation cycle for SUS304.

になると, 式 (6) から大きくはずれる. Fig. 9 は, SUS304 材について, $n/N_f \approx 0.1$ の時の σ_a と $\Delta\theta$ の関係を示した結果である. SUS304 材においては, 約 290MPa 以上になると式 (6) から大きくはずれる.

疲労過程における試験片表面温度の変化幅は, 応力振幅に依存し, 弾性範囲内では試験片全体の温度上昇はほとんどない. しかし, 応力振幅が塑性領域になると繰り返し数に伴い試験片温度は上昇する. すなわち, 応力振幅が十分に小さく, 弾性変形による両振り応力状態では温度変化は可逆的であり, 試験片全体の温度上昇も起こらない. しかし, 塑性変形が伴う場合には圧縮, 引張変形にかかわらず温度は上昇する. 塑性変形が大きいほど温度上昇も高い. したがって, 塑性変形の繰り返しにより疲労が累積することから, 温度変化の大小が 1cycle 中の疲労の大小と関係すると考えられる. すなわち, 1cycle 間の温度変化幅 $\Delta\theta$ から熱弾性効果による温度変化幅 $\Delta\theta_e$ を引いた温度変化幅 $\Delta\theta_p$ が疲労の尺度となると考えられる. $\Delta\theta_p$ がゼロの場合, 温度変化幅 $\Delta\theta$ は熱弾性効果によるものと一致し, 疲労の累積は生じない. つまり, $\Delta\theta_p$ の存在によって疲労が発生していることがわかり, 繰り返し数に伴う $\Delta\theta_p$ の累積から試験片の温度 T' も上昇することになる.

応力振幅と温度変化幅の関係について実験結果と式 (6) から計算される値と比較した結果, 応力振幅が小さい領域では理論値と実験値は良く一致している. しかし, 応力振幅が増加するにつれて, 熱弾性効果から求まる温度変化幅 $\Delta\theta_e$ よりも大きくなるのがわかる. その領域における σ_a と $\Delta\theta$ の関係を求めた実験式は次のようになる.

- S55C 材 : $\Delta\theta = 0.09 \times e^{6.23 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 300\text{MPa}$)
 S55CH 材 : $\Delta\theta = 0.15 \times e^{4.20 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 400\text{MPa}$)
 SCM435 材 : $\Delta\theta = 0.21 \times e^{3.11 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 500\text{MPa}$)
 SCM435H 材 : $\Delta\theta = 0.19 \times e^{4.92 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 550\text{MPa}$)
 SUS304 材 : $\Delta\theta = 0.12 \times e^{6.90 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 290\text{MPa}$)

4・3 発熱量とき裂発生繰り返し数

Fig. 10 ~ Fig. 12 はそれぞれ, S55C 材とその調質材, SCM435 とその調質材および SUS304 材において, 1

Fig. 10. Relationship between energy in one stress cycle and crack initiation cycle for S55C and S55CH.

Fig. 11. Relationship between energy in one stress cycle and crack initiation cycle for SCM435 and SCM435H.

Fig. 12. Relationship between energy in one stress cycle and crack initiation cycle for SUS304.

cycle における $\Delta\theta_p$ から求めた試験片内部の単位体積当たりのエネルギー Δq ととき裂発生繰り返し数の関係を示す. Δq は次式によって求めたものである.

$$\Delta q = \rho \times C \times \Delta\theta_p \quad (7)$$

それぞれの材料で Δq と N_c の関係が得られ、ほぼ傾き-1の直線に一致することがわかる。つまり、この結果は、 $\Delta q \cdot N_c = Q$ (一定) の関係が成り立つことを意味している。各材料の値を求めると

S55C, S55CH 材 : $\Delta q \cdot N_c = 1.5 \times 10^9$ [J/m³]

SCM435, SCM435H 材 : $\Delta q \cdot N_c = 2.6 \times 10^8$ [J/m³]

SUS304 材 : $\Delta q \cdot N_c = 9.0 \times 10^8$ [J/m³]

となる。このことは、材料中に加えらるエネルギーが一定の値に達したときに、き裂が発生することを意味している。S55C 材と SCM435 材では、その調質材においても実験を行った結果、調質の有無において引張強さ、応力振幅と温度変化幅の関係は違った傾向を示している。しかし、1cycle 間のエネルギーとき裂発生繰返し数の関係は等しいといえる。この結果から同材料において、1cycle 間のエネルギーとき裂発生繰返し数の関係は引張強さなどの影響を受けないことがわかる。

次に、 Q 値について検討する。金属材料の結晶には、転位が数多く存在し、塑性変形はこうした転位が動くことにより生じるものと考えられている。応力の繰返しに伴い、この転位が移動し、すべり変形が起こる時のエネルギーに温度変化が関係すると考えられる。転位の量は単位体積当たりの転位の長さ、つまり転位密度で表される。ここでは、材料が等方的な結晶と見なし、転位に働く力が転位線に常に垂直で、その点での応力成分のうち、転位の運動に有効なもの b 倍であるとする。転位が移動するために必要なエネルギー F は式 (8) で与えられる。

$$F = \tau \times b^2 \times t \quad (8)$$

ここで、 τ : 臨界せん断応力、 b : バーガース・ベクトル、 t : 転位長さである。材料の結晶粒一つを転位が直線状に進むと仮定した場合に、必要なエネルギーは、式 (8) と結晶粒径から求めることができる。ここで、熱損失などがないものと考え、 t を単位長さとする。そこで、転位が結晶粒一つを進むために必要なエネルギーを求めると、S55C 材において 6.82×10^{-14} [J]、SCM435 材において 1.25×10^{-14} [J]、SUS304 材において 4.26×10^{-14} [J] となる。この値で Q を割ると、S55C 材において 2.20×10^{22} [個/m³]、SCM435 材において 2.05×10^{22} [個/m³]、SUS304 材において 2.11×10^{22} [個/m³] となり、これらは、非常に近い値となっている。つまり、 Q の値は結晶粒の大きさに依存していることがわかり、単位体積当たりに転位が起こった結晶粒がこの数になったときにき裂が発生すると言える。

5 結 言

本研究は、疲労寿命推定法の基礎的研究の一つとして、疲労き裂発生までの疲労寿命則と応力繰返しと共に発生する温度変化を計測することにより、寿命評価法を確立することを目的にして実施した。特に、応力繰返しの 1cycle 間に発生する温度変化を測定し、その温度変化から疲労き裂発生までの寿命評価技術確立する基礎的研究として、軟化-硬化材である S55C 材とその調質材、加

工軟化材である SCM435 材とその調質材および応力繰返しと共に加工硬化する材料である SUS304 材を用いた軸荷重平滑丸棒試験片を用いて実験的研究を行った。

温度測定には温度ゲージを使用し、温度、応力、ひずみの同時計測するシステムを構築し実験を行った。このシステムにより、応力 1cycle 間での温度変化を 1/100°C の精度で測定した。特に、繰返し応力 1cycle 内での温度変化の中から熱弾性効果による温度変化分を除去して、疲労寿命に直接関与している温度変化分を分離して取り扱うことにより、試験片に加えらるエネルギーを調査した。その結果、以下に示す結論が得られた。

(1) 完全両振り一定応力繰返し疲労試験の下では、応力振幅が弾性範囲内において 1cycle 間の温度変化幅が、熱弾性効果から求まる理論値と一致することがわかった。

(2) 温度変化幅は、応力振幅が塑性範囲になると、応力振幅の増加に伴い大きく増加し、塑性変形領域における温度と応力の関係が次式で近似できることを示した。

S55C 材 : $\Delta \theta = 0.09 \times e^{6.23 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 300$ MPa)

S55CH 材 : $\Delta \theta = 0.15 \times e^{4.20 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 400$ MPa)

SCM435 材 : $\Delta \theta = 0.21 \times e^{3.11 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 500$ MPa)

SCM435H 材 : $\Delta \theta = 0.19 \times e^{4.92 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 550$ MPa)

SUS304 材 : $\Delta \theta = 0.12 \times e^{6.90 \times 10^{-3} \sigma_a}$ ($\sigma_a > 290$ MPa)

(3) 5 種類の材料 (S55C 材, S55CH 材, SCM435 材, SCM435H 材, SUS316 材) の疲労き裂発生寿命は次式で与えられた。

S55C, S55CH 材 : $\Delta q \cdot N_c = 1.5 \times 10^9$ [J/m³]

SCM435, SCM435H 材 : $\Delta q \cdot N_c = 2.6 \times 10^8$ [J/m³]

SUS304 材 : $\Delta q \cdot N_c = 9.0 \times 10^8$ [J/m³]

また、 $\Delta q \cdot N_c$ の値は、結晶粒の大きさに依存していることがわかった。

参 考 文 献

- 1) 例えば、研究代表者堀川武、平成 4 年度研究奨励金研究成果報告書「機械・構造物の安全性評価の為に寿命、余寿命予測法に関する研究」(1994)。
- 2) 田中道七、服部修次、日本機械学会論文集、**40**, 635 (1974)。
- 3) 田中道七、中山英明、日本機械学会論文集、**41**, 1062 (1975)。
- 4) 中村 宏、鉄道業務研究資料、**13**, 2 (1956)。
- 5) 遠藤吉郎、吉川成美、山田 淳、日本機械学会論文集、**24**, 767 (1958)。
- 6) 岡崎章三、山崎嘉啓、岡田 満、中村 宏、鈴木 恵、材料、**29**, 1194 (1980)。
- 7) 樋口正一、今井康文、竹中 稔、日本機械学会論文集、**40**, 644 (1974)。
- 8) 田中道七、服部修次、材料、**26**, 319 (1977)。
- 9) 伊達秀文、材料、**31**, 1073 (1982)。
- 10) 伊達秀文、鈴木利夫、長谷川篤志、材料、**43**, 388 (1994)。