

高温低サイクル疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性に対するパラメータ解析法

山口 弘二*・小林 一夫*・井島 清*・西島 敏*

Parameter Analysis for Temperature and Strain Rate Dependence of Low-Cycle Fatigue Life at High Temperatures

Koji YAMAGUCHI, Kazuo KOBAYASHI, Kiyoshi IJIMA and Satoshi NISHIJIMA

Synopsis : A modified Larson-Miller parameter has been proposed to evaluate temperature and strain rate dependence on low-cycle fatigue life ; it is written as $P = T(\log N_{25} - A \log \dot{\epsilon} + B)$, where T is temperature, N_{25} is fatigue life under symmetrical strain wave shapes, $\dot{\epsilon}$ is strain rate, and A and B are constants. Material used in the analysis is SCM4 steel. The method is based on consideration of thermally activated processes causing temperature and strain rate dependence. It can give a threshold strain at fatigue limit, as Strohmeyer type equation is adopted to express a relationship between total strain range and fatigue life.

Key words : modified Larson-Miller parameter ; temperature and strain rate dependence ; low-cycle fatigue life ; SCM4 steel.

1. 緒言

装置の起動・停止等による繰返し熱応力を受ける高温機器の重要部材においては、材料の高温低サイクル疲労寿命が設計基準の一つになっている。そのため、疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性を系統的に評価することが重要となる。

原子力機器に対する設計基準¹⁾では、Diercksの統計的解析による回帰式²⁾に安全率をかけた疲労設計曲線が与えられている。彼の回帰式は、設計適用を考慮して実験的検証が困難な低ひずみ範囲、低ひずみ速度への外挿に対し、控えめな評価となるよう配慮されているものと考えられる。実際Diercksの回帰式は、低ひずみ範囲で短寿命を予測するという指摘もある³⁾。

本報告は、低ひずみ速度、あるいは高サイクル域までの外挿性も考慮に入れた、低サイクル疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性を評価する新しいパラメータ解析法について著者らの提案を示すものである。

2. 新しいパラメータ解析法

低サイクル疲労寿命を支配する最も重要な因子は、繰返し塑性ひずみ範囲である。この塑性ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_p$ と破損繰返し数 N_{25} との関係は、Manson-Coffin式として

$$\Delta\epsilon_p N_{25}^a = C \quad (1)$$

で表される⁴⁾。 α と C は定数である。

しかし、疲労試験は全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ で制御されるため、 $\Delta\epsilon_p$ は試験中に変化すること、低ひずみレベルでは一般に疲労限が現れるため式(1)は必ずしも成り立たないこと、工学的には全ひずみ範囲と寿命の関係で疲労寿命を評価した方が好都合であること、などの理由から、本報告では $\Delta\epsilon_t$ と N_{25} の関係における温度、ひずみ速度依存性のパラメータ表示の可能性について検討した。

周知のように、クリープ破断強度に対する温度、時間効果に対して、熱活性化過程を考慮して表現したLarson-Millerパラメータ P_1 は、

$$P_1 = T(\log t_r + C_1) \quad (2)$$

で表され、クリープ破断強度評価に広く用いられている⁵⁾。ここで、 T は絶対温度、 t_r はクリープ破断時間、 C_1 は定数である。このパラメータを高温低サイクル疲労に初めて応用したのがKrempel⁶⁾で、式(2)のクリープ破断時間 t_r の代わりに破損繰返し数 N_{25} を用いて

$$P_2 = T(\log N_{25} + C_2) \quad (3)$$

なるパラメータを導入した。 C_2 は定数である。しかし、Krempelのパラメータでは、疲労寿命の温度依存性は評価されているが、ひずみ速度依存性は考慮されていない。

そこで著者らは、Larson-Millerパラメータを三角波の低サイクル疲労に適用する場合、式(2)のクリープ破断時間のところに疲労破断時間を代入することを考えた。すなわ

ち、疲労破損時間 t_f は1サイクル当りの時間と破損繰返し数の積であるから、

$$t_f = (2\Delta\epsilon_t / \dot{\epsilon}) \times N_{25} \quad (4)$$

で表される。ただし、塑性ひずみ範囲が大きな低サイクル疲労領域では $\Delta\epsilon_t \approx \Delta\epsilon_p$ と考えることができるので

$$t_f = (2\Delta\epsilon_p / \dot{\epsilon}) \times N_{25} \quad (5)$$

と考えても良い。 $\dot{\epsilon}$ は三角波のひずみ速度である。また、 $\Delta\epsilon_p$ は低サイクル領域では式(1)から

$$\Delta\epsilon_p = C / N_{25}^a \quad (6)$$

で表されるから、式(5)と(6)から求まる t_f を式(2)の t_r に代入すれば、疲労寿命とひずみ速度、及び温度が同時に入った新しいパラメータ P を導入することができる。計算の便を考え、これを

$$P = T(\log N_{25} - A \log \dot{\epsilon} + B) \quad (7)$$

と表示しよう。ここで、 A 、 B は定数である。

さらに、このパラメータ P は全ひずみ範囲 $\Delta\epsilon_t$ の関数として

$$P = A_0 + A_1 \log(\Delta\epsilon_t - \Delta\epsilon_0) \quad (8)$$

で表すこととする。 A_0 、 A_1 、 $\Delta\epsilon_0$ は定数である。この式(8)は全ひずみ範囲と疲労寿命の関係を疲労限の存在を踏まえて、

$$\Delta\epsilon_t = A' N_{25}^{-a'} + \Delta\epsilon_0 \quad (9)$$

で表すStrohmeyer⁷⁾、あるいはLanger⁸⁾の式を応用したことを意味する。ここで、 A' 、 a' は定数であるが、 $\Delta\epsilon_0$ は疲労限度のひずみ範囲に相当する。

パラメータ解析で式(7)、(8)の定数を決定するには、式(7)と(8)を等しいと置き、 $\log N_{25}$ を目的変数として次式のように整理する。

$$\log N_{25} = (A_1/T) \log(\Delta\epsilon_t - \Delta\epsilon_0) + A \log \dot{\epsilon} + (A_0/T) - B \quad (10)$$

未知定数は A 、 B 、 A_1 、 A_0 、 $\Delta\epsilon_0$ の5つ、変数は T 、 $\dot{\epsilon}$ 、 $\Delta\epsilon_t$ 、 N_{25} の4つであるが、定数は最小2乗法により決定することができる。具体的には、最初に $\Delta\epsilon_0$ として適当な値を仮定し、試験結果の N_{25} データに対し、残差平方和が最小となるように定数 A 、 B 、 A_0 、 A_1 を決定する。そして逐次 $\Delta\epsilon_0$ の値を変化させつつ、残差平方和が最小となる最適値を探せばよい。なおこの場合、 $\Delta\epsilon_0$ は便宜的に温度、ひずみ速度によらないとしている。

本解析法は、低サイクル域のみに適用できる式(5)や式(6)を用いている。しかし、 $\Delta\epsilon_t$ - N_{25} 曲線は、高サイクル域で耐久限ひずみに漸近する式(8)を用いているので、本解析結果は、低サイクルから高サイクル域まで適用でき得るものと考えられる。

3. 解析結果及び考察

3・1 SCM 4 鋼の解析結果

解析には代表的な高温材料である2.25Cr-1Moフェライト系耐熱鋼SCMV 4の金材技研疲労データシートに公表されているデータ⁹⁾を用いた。

Fig. 1がその解析結果である。データは軸ひずみ制御、対称三角波でひずみ速度が $5 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ から 10^{-5} s^{-1} まで、温度は 300°C から 500°C までのものである。この図は、パラメータ解析によって $\Delta\epsilon_t$ と N_{25} の関係に現れる温度、ひずみ速度依存性が一本のマスター曲線でほぼ表示できることを示している。式(7)と式(8)の各定数の値も、図中に示した。解析データの単位は、 $\Delta\epsilon_t$: mm/mm, T : K, $\dot{\epsilon}$: s^{-1} , N_{25} : サイクル数、である。

このようなパラメータ解析により決定された各定数を使えば、任意の温度、ひずみ速度での $\Delta\epsilon_t$ - N_{25} 線図を描くことができる。Fig. 2は、ひずみ速度 10^{-3} s^{-1} における低サイクル疲労寿命曲線の温度依存性、Fig. 3は、試験温度 500°C における低サイクル疲労寿命曲線のひずみ速度依存性をそれぞれ示したものである。図中のプロットは試験データを表しているが、本提案の解析曲線と良く一致していると考えられる。

なお、全ひずみ範囲と疲労寿命の関係式として、耐久限ひずみを考えない、例えば全ひずみ範囲を塑性ひずみと弾性ひずみ範囲に分ける方法や、2次、3次回帰なども用いて解析したが、これらの解析結果は、データの全領域にわたっての適合性は劣っていた。

3・2 パラメータ解析の適用温度範囲

パラメータ解析を適用する際、高温下の繰返し変形に対してある一つの熱活性化過程が支配的に作用する温度範囲は、限定されると考えるのが普通である。例えば、SUS316やSUH310鋼などオーステナイトステンレス鋼の繰返し変形組織は、 300°C から 600°C までは転位の繰返し運動と炭化物

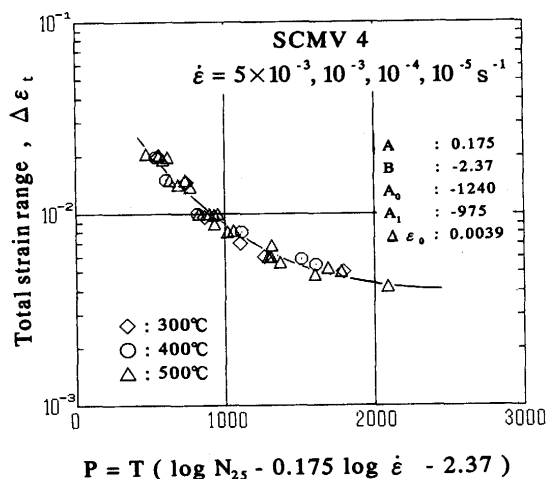


Fig. 1. Master curve for SCM 4 steel by parameter analysis.

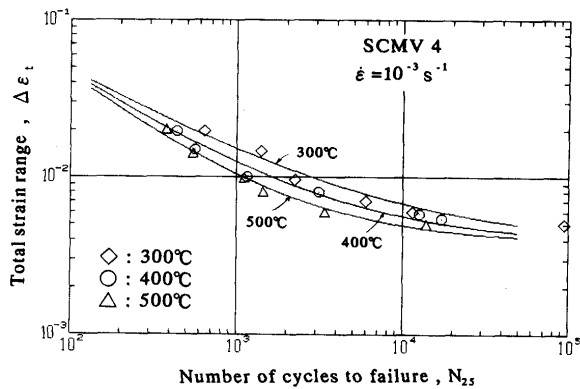


Fig. 2. Temperature dependence of fatigue life for SCMV 4 steel at 10^{-3}s^{-1} .

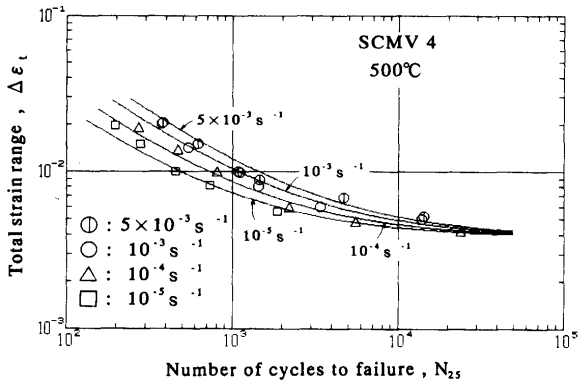


Fig. 3. Strain rate dependence of fatigue life for SCMV 4 steel at 500°C .

の析出によるひずみ時効によって、繰返し加工硬化し、緻密な転位のセル組織構造となるが、 700°C 以上で、かつひずみ速度が遅い場合回復現象によって転位の再配列が起り、サブバウンダリー構造になる¹⁰⁾¹¹⁾。そのため、破壊モードや疲労寿命の温度依存性等に変化が生じる¹⁰⁾¹¹⁾。例えば、オーステナイトステンレス鋼の疲労寿命の温度依存性を模式的に描くとFig. 4のようになる。すなわち、オーステナイトステンレス鋼では一般にひずみ速度が早い場合約 200°C から 800°C の間では疲労寿命は単調に減少する。しかし、 700°C 以上でひずみ速度が遅い場合、及びひずみ速度が早くても室温から 200°C の間では疲労寿命は逆に増加する挙動が認められる。一方、SCMV 4鋼などの低合金鋼では、同様な現象がオーステナイトステンレス鋼に比べ、約 100°C 低く現れる¹²⁾。

以上のことから、パラメータ解析は、オーステナイトステンレス鋼では $200\sim 300^\circ\text{C}$ から 600°C あるいは 650°C まで、低合金鋼では 200°C から 500°C あるいは 550°C までの範囲に限定した方が妥当と考えられる。

3・3 パラメータ定数の物理的意味

SCMV 4鋼に対する5つのパラメータ定数 $\Delta\epsilon_0$, A, B, A_1 , A_0 はFig. 1に示したが、これら定数の物理的意味について検討してみよう。

$\Delta\epsilon_0$ は、式(9)から耐久限ひずみを意味している。しかし、高温疲労においても $\Delta\epsilon_0$ が存在するかどうかを吟味しておく必要がある。同一ヒートのSCMV 4鋼について、荷重制御

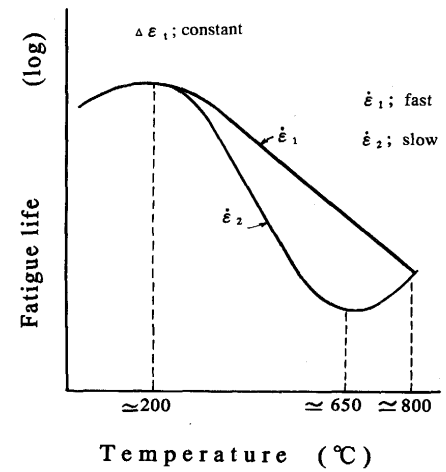


Fig. 4. Schematic diagram showing temperature and strain rate dependence of fatigue life for austenitic stainless steel.

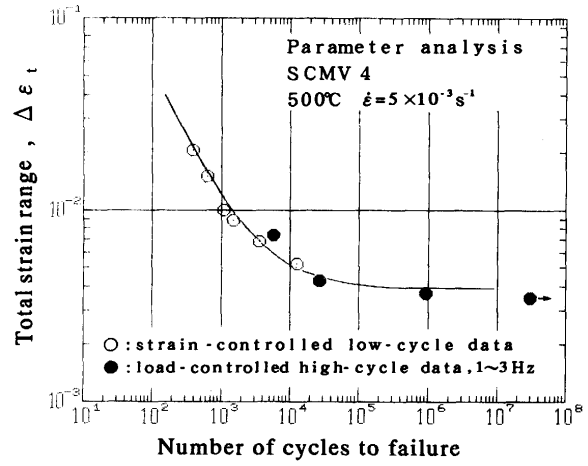


Fig. 5. Evaluation of strain range at fatigue limit by testing data of axial, high-cycle fatigue for SCMV 4 steel.

高サイクル疲労データが得られている¹³⁾。低サイクル疲労試験で得られている繰返し応力-ひずみ曲線を使って、高サイクル疲労の応力をひずみに換算し、低サイクル疲労データと一緒にプロットした結果がFig. 5である。曲線は低サイクル疲労データのみを用いたパラメータ法による解析結果であり、高サイクル域まで外挿している。高サイクル疲労のデータは疲労限の存在を示唆しているようであり、またこの外挿線とはほぼ一致していると考えて良いであろう。

次に、 $\Delta\epsilon_0$ の温度依存性について吟味してみる。同一ヒートのSCMV 4鋼の125Hz回転曲げ高サイクル疲労強度は、金材技研疲労データシートに公表されている¹⁴⁾。Table 1に

Table 1. Comparison of strain range at fatigue limit for SCMV 4.

Fatigue limit			
Temperature (°C)	Rotating bending tests ⁽¹⁴⁾		Parameter analysis $\Delta \epsilon_0 (\times 10^{-2})$
	stress amplitude σ_{wb} (MPa)	strain range $\Delta \epsilon_{wb} (\times 10^{-2})$	
300	329	0.37	0.39
400	306	0.35	
500	280	0.32	

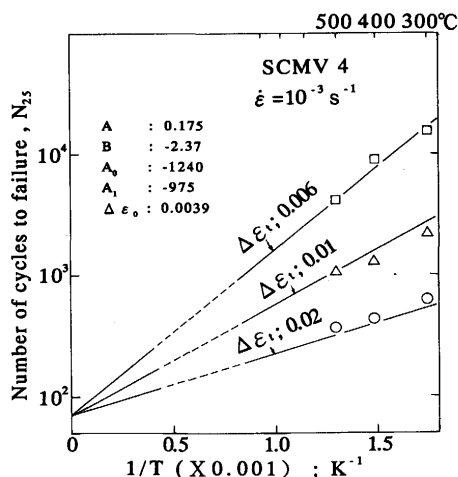


Fig. 6. Temperature dependence of fatigue life represented by Arrhenius plots in equation (10).

各温度の 10^8 サイクルの疲労強度 σ_{wb} を示しているが、この応力を先に考えた繰返し応力-ひずみ曲線を用いてひずみに変換し、耐久限のひずみ範囲 $\Delta\epsilon_{wb}$ と考えると、 $\Delta\epsilon_{wb}$ の温度依存性はわずかであり、またパラメータ解析から求まる $\Delta\epsilon_0$ と大差ない。したがって、限られた温度範囲内でのパラメータ解析で、耐久限ひずみに温度依存性を無視しても、それほど不合理ではないと思われる。

$\Delta\epsilon_0$ のひずみ速度依存性に関しては、データがほとんど無く検証することはできない。しかし、低サイクル疲労寿命に及ぼす温度とひずみ速度の一般的な等価性を考えれば、 $\Delta\epsilon_0$ のひずみ速度依存性も同様に無視できると想像されるが、この点については今後検証していく必要がある重要な問題である。

なお、高サイクル疲労限度は、酸化など環境因子の影響を受けるため、 $\Delta\epsilon_0$ と必ずしも一致しない場合も考えられる。その値が高サイクル疲労などで予めわかっている場合には、逆にその値を $\Delta\epsilon_0$ の値に利用して式(10)の解析を容易にすることも考慮すべきであろう。

その他の定数は、式(10)から物理的意味が明らかとなる。すなわち、式(10)から、横軸 $1/T$ に対する $\log N_{25}$ の関係を図示したとすれば、傾きが $A_0 + A_1 \log(\Delta\epsilon_t - \Delta\epsilon_0)$ 、切片が $A \log \dot{\epsilon} - B$ の直線になる。その一例がFig. 6で、 $\dot{\epsilon}$ が 10^{-3} s^{-1} 、 $\Delta\epsilon_t$ が0.02, 0.01及び0.006の場合である。図中のプロットは各実験データを示すが、解析結果の各定数を代入して描いた直線とはほぼ一致している。この図は、いわゆるアレニウスプロットである。 $1/T=0$ で直線群が一点に集中することは、クリープ破断に対するLarson-Millerパラメータが疲労にも適用できる根拠になると思われる⁵⁾⁶⁾。なお、傾きは活性化エネルギーを示すものであるが、疲労寿命を支配する律速過程の内容まで検討することは現時点ではできない。

また、横軸 $\log \dot{\epsilon}$ に対する $\log N_{25}$ の関係を考えると、同様に式(10)から傾きが A 、切片が $(1/T) \cdot \{A_0 + A_1 \log(\Delta\epsilon_t - \Delta\epsilon_0)\} - B$ の直線になる。その一例がFig. 7で、温度が773K、

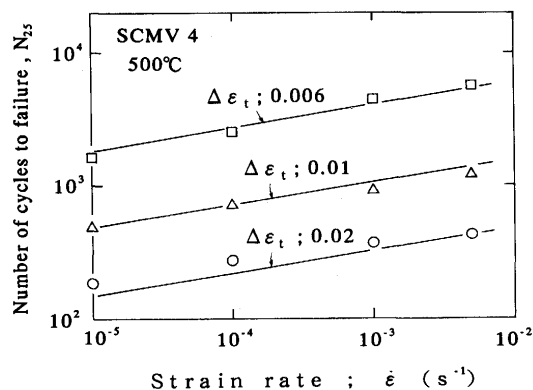


Fig. 7. Strain rate dependence of fatigue life.

$\Delta\epsilon_t$ が0.02, 0.01及び0.006の場合である。この場合も実験データとはほぼ一致していると言えるだろう。

本パラメータ法の有用性を確立するには、他鋼種へ適用性の検討を拡大するとともに、高サイクル域への外挿性について更に検討する必要がある。

4. まとめ

対称三角波の低サイクル疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性を、熱活性化過程に立脚した新しいパラメータで統一的に評価する解析法を提案した。このパラメータ P は、 $P = T(\log N_{25} - A \log \dot{\epsilon} + B)$ で表された。代表的な高温材料SCMV 4鋼のデータについて解析した結果、疲労寿命の温度、ひずみ速度依存性を統一的に評価することができた。また、この方法は同一ヒートの高サイクル疲労試験データから、高サイクル域への外挿性にも優れている可能性が示された。今後は、他鋼種への適用、高サイクル域への外挿性の検証などが課題と考えられた。

文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Case N-47-23, ASME, (1986)
- 2) D. R. Diercks and D. T. Raske: ASME Annual Winter Meeting, (1976), p.1
- 3) 田下品紀, 高鍋清志, 植田正弘: 私信
- 4) L. F. Coffin, Jr.: Fatigue at High Temperatures, STP 520, ed. by A. E. Carden, A. J. McEvily and C. H. Wells, (1973), p.5 [ASTM]
- 5) 横井 信, 門馬義雄: 鉄と鋼, **65** (1979), p.831
- 6) E. Krempl: Thermal Stresses and Thermal Fatigue, ed. by D. J. Littler, (1971), p.36 [Butterworths, London]
- 7) J. E. Spindel and E. Haibach: Statistical Analysis of Fatigue Data, ASTM STP744, ed. by R. E. Little and J. C. Ekvall, (1981), p.89 [ASTM]
- 8) B. F. Langer: Trans. ASME, J. Basic Eng., Series C, **84** (1962), p.389
- 9) NRIM High Temperature Low-cycle Fatigue Data Sheets, No.62, NRIM, (1989)
- 10) 山口弘二, 金澤健二: 日本金属学会誌, **40** (1976), p.315
- 11) 金澤健二, 山口弘二, 西島 敏: 鉄と鋼, **74** (1988), p.1097
- 12) 金属材料技術研究所: 金材技研疲労データシート資料 4, (1986)
- 13) 小林一夫, 山口弘二: 私信
- 14) NRIM High Temperature High-cycle Fatigue Data Sheets, No.48, NRIM, (1985)