

極低サイクル疲労領域における変動振幅 ひずみ下の低サイクル疲労寿命予測モデル

館石 和雄¹・判治 剛²・南 邦明³

¹正会員 工博 名古屋大学教授 エコトピア科学研究機構 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

²学生会員 工修 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 株式会社 サクラダ 技術開発室 (〒272-0002 千葉県市川市二俣新町21)

変動振幅ひずみ下での鋼材の低サイクル疲労強度については、従来より、Miner則を用いることにより比較的精度よく予測できるといわれている。しかし、これは疲労寿命が数百回以上の領域での検討結果に基づいており、極低サイクル疲労領域における寿命予測手法は確立されていないのが現状である。本研究では新たに開発した低サイクル疲労試験システムを用い、極低サイクル疲労領域における変動振幅ひずみによる低サイクル疲労試験を行った。その結果、極低サイクル疲労領域ではMiner則は危険側の予測結果を与えることが明らかとなった。そこで極低サイクル疲労領域における新たな疲労寿命予測モデルを提案し、試験結果と比較した結果、提案モデルにより精度よく疲労寿命を推定できることが明らかとなった。

Key Words : variable strain amplitude, extremely low cycle fatigue, Miner's rule, life prediction

1. はじめに

10回程度以下のひずみの繰り返しで破壊が生じるような極低サイクル疲労の領域において、負荷を変動させた場合の寿命予測を行うことは、大地震時の鋼構造物の安全性を確保する上で重要であると考えられる。しかしながら、そのような領域における寿命予測手法はいまだ確立されておらず、その構築は急務の課題であるといえる。

変動振幅ひずみ下の低サイクル疲労に関しては、これまで数多くの研究が行われており¹⁾、その疲労寿命を推定する手法について様々な検討がなされている。例えば、ヒステリシスエネルギー論に基づく予測手法があり²⁾、比較的よい精度で疲労寿命を推定できることが示されている。また、Miner則の適用性についての検討もされており、疲労寿命が数百回以上の領域ではMiner則が比較的よく成立することが示されている^{3)~5)}。しかしながら、本研究で対象とするような数回から数十回程度の疲労寿命となる極低サイクル疲労領域においてそれらの適用性を検証した例はほとんどなく、また、数少ない報告の中にはMiner則が成立しないというもの^{6), 7)}もある。したがって、極低サイクル疲労領域におけるMiner則等の有効性についてより詳細に検討する必要があると考えられる。

近年、極低サイクル疲労領域における疲労寿命を予測するための提案もみられるようになってきているが^{8), 9)}、試験結果と推定寿命の間には差がみられ、更なる検討が必要であると考えられる。

著者らは既報¹⁰⁾において、画像計測を用いた新たな低サイクル疲労試験システムを開発し、その有効性を示した。本研究では、その試験システムを用い、鋼素材に数パターンの変動振幅ひずみを負荷し、低サイクル疲労試験を行った。

2. 試験概要

(1) 試験体および試験システム

試験体にはSM490Aを用い、その形状および寸法を図-1に示す。また供試鋼材の引張試験結果を図-2に、機械的性質、化学成分(ミルシート値)を表-1に示す。試験体は板厚12mmの平板で、長手方向中央部で最大のひずみが生じるように、その部分の板厚を滑らかに削り込んだ形状とした。また、表面に傷がなくなるまで載荷軸方向に入念に研磨した。

本研究で用いた低サイクル疲労試験システムは、図-3に示すように、鋼板に板曲げ変形を与え、その際に生じるひずみを試験体の側面から撮影した画像より計測するものである。詳細は既報¹⁰⁾を参照され

表-1 供試鋼材の機械的性質と化学成分

鋼種	引張試験結果				化学成分 (%)				
	降伏点 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	破断延性 ϵ_f	C $\times 100$	Si $\times 100$	Mn $\times 100$	P $\times 1000$	S $\times 1000$
SM490A	371	536	29.1	1.13	16	30	135	20	4

たい。なお片振り試験としたため、試験体には圧縮のひずみのみが生じる側と引張のひずみのみが生じる側が存在する。以後、それぞれ圧縮側、引張側と呼ぶ（図-3参照）。

(2) ひずみの変動パターン

試験体に与えたひずみの変動パターンを図-4に示す。パターンAは、一定振幅ひずみ中のあるタイミング (n_L cycle) で大ひずみ ϵ_L を1サイクルのみ与えるというものである。これにより、大ひずみを導入するタイミングとその大きさが疲労寿命に与える影響を検討した。パターンBは、あるタイミングで一方に大きな平均ひずみ ϵ_{mL} を与えるというものである。従来より、平均ひずみは低サイクル疲労特性にほとんど影響しないとされており、特に平均ひずみが16%の場合でもその影響はごく僅かであるといわれている^{11), 12)}。しかし、平均ひずみが30%を超えるような場合、その影響は顕著に認められるとの報告もある¹³⁾。そこで本研究では、試験システムで与えることが可能なひずみの限界から、 $\epsilon_{mL} = 25\%$ と設定し、その影響を検証した。

設定したひずみ値および大ひずみを与えるタイミングと試験体の名称を表-2にまとめる。今回は、数回から数十回でき裂が発生するように想定してひずみ値を設定した。大ひずみを与えるタイミングは、 ϵ_s を単独に繰り返したときに予想される疲労寿命の約0, 30, 60%に相当する繰り返し数とした。

なお、有限要素解析¹⁰⁾を用いて、延性き裂の発生が予想される箇所の相当塑性ひずみと三軸応力度の関係を求め、延性き裂発生条件^{14), 15)}を適用した結果、本試験条件では延性き裂が発生しないことを確認している。

疲労試験中に記録したひずみ履歴の例を図-5に示す。引張側においてひずみが漸増しているが、これは次の理由による。予備試験において、引張ひずみを制御して繰り返し载荷を行なおうとしたが、引張ひずみを所定の値まで増加させ、反転後、もとの値まで戻そうとしたところ、繰り返しの初期の段階においては、完全にはもとのひずみに戻らないことが判明した。これは、偏心により板曲げを与えるという

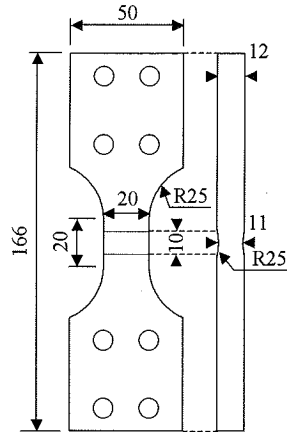


図-1 試験体の形状および寸法 (mm)

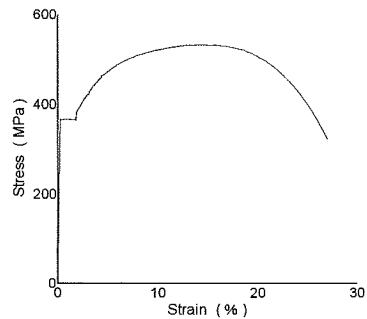


図-2 引張試験結果

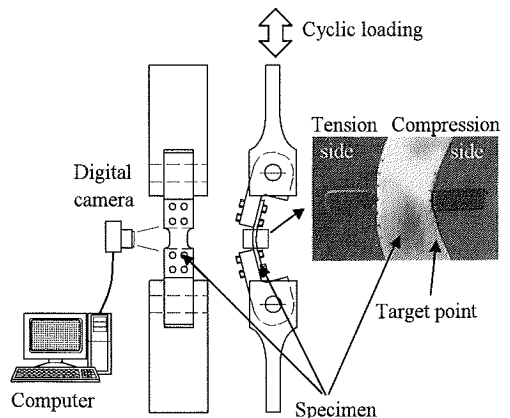
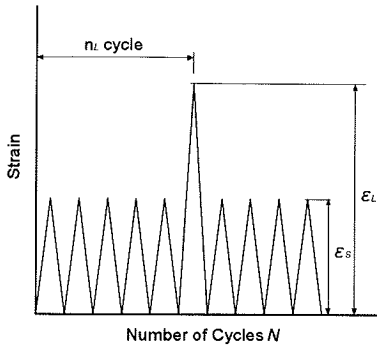
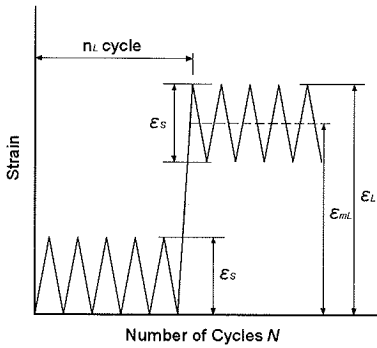


図-3 試験システムの概要



(a) Pattern-A



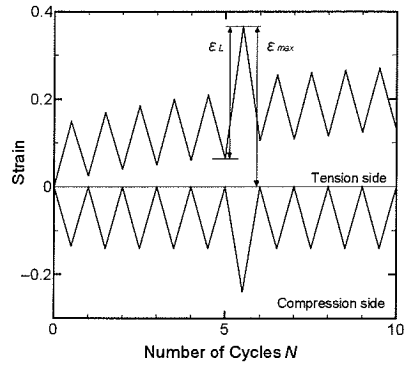
(b) Pattern-B

図-4 ひずみの変動パターン

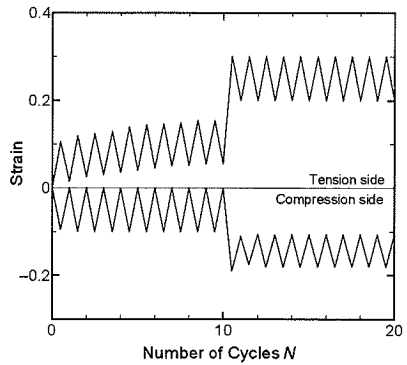
表-2 ひずみパターン

試験体名称	Pattern	ϵ_S (%)	ϵ_L (%)	n_L (cycle)
VA10-20-C1	A	10	20	1
VA10-20-C11				11
VA10-20-C21				21
VA15-30-C1		15	30	1
VA15-30-C6				6
VA15-30-C11				11
VA15-35-C1	15	35	1	
VB10-30-C1	B	10	30	1
VB10-30-C11				11

本試験の荷重方法固有の問題や、繰り返しによる鋼材の弾塑性挙動の変化などによるものと考えられる。そのため、引張側のひずみを減少させる過程においては、圧縮側のひずみが0に戻った時点で荷重方向を反転させることとした。その結果、圧縮側ではほぼ想定どおりのひずみ履歴を導入できたが、引張側では荷重の初期段階でひずみが漸増する結果となった。ただしVB10-30シリーズの試験体では、大ひず



(a) VA15-30-C6



(b) VB10-30-C11

図-5 ひずみ履歴の例

み ϵ_L を導入後には引張側のひずみを完全に所定の値に戻すことができるようになったため、荷重時、除荷時ともに引張側のひずみを制御して試験を行った。

3. 疲労試験結果

いずれのひずみパターンにおいても、疲労き裂は大ひずみ ϵ_L を与えた後、小さなひずみ振幅 ϵ_S を数サイクル繰り返した後に発生した。き裂発生状況の例を図-6に示す。これはマイクロスコープ (KEYENCE VH-6300, 倍率: $\times 25$) で、図中に示す領域の様子を撮影したものであり、それぞれの画像は、荷重方向を反転させる直前に撮影されたものである。どの試験体も、き裂は引張側、圧縮側の両側から発生した。板幅方向についてのき裂発生位置は、引張側、圧縮側で異なっており、引張側では板の側面から、圧縮側では板幅中央部からき裂が生じた。図-7に破面の例を示す。引張側では板側面から、

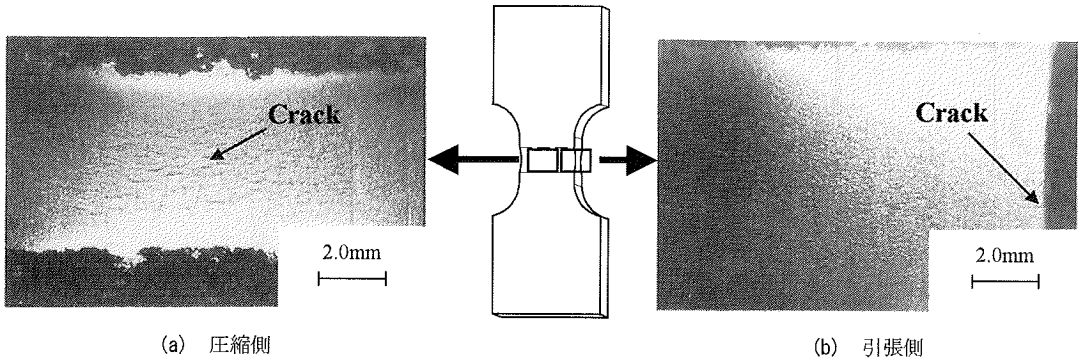


図-6 き裂発生状況 (VB10-30-C11)

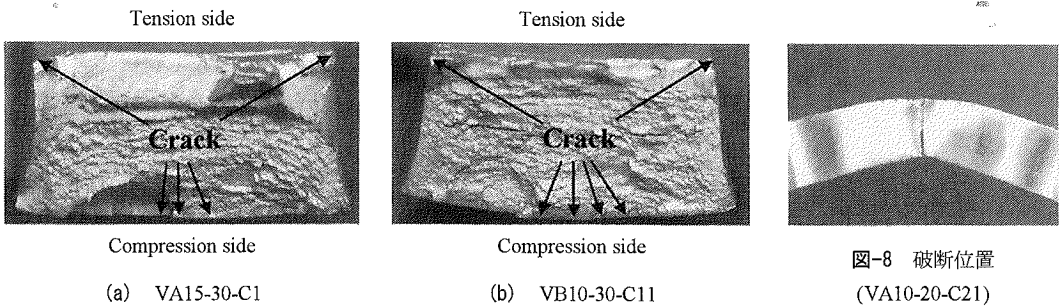


図-7 疲労破面

図-8 破断位置
(VA10-20-C21)

圧縮側では板幅中央部からき裂が発生し、複数の微小なき裂が結合しながら進展している。なお、破断位置は図-8に示すように長手方向中央部である。

4. Miner則の適用性の検討

本研究では、き裂発生位置は引張側と圧縮側で異なっており、圧縮側のき裂に関しては、発生位置（板幅の中央部）のひずみ振幅を計測できていない。そこで、有限要素解析によって試験体内のひずみ分布を確認した結果、引張側では板側面で、圧縮側では板幅中央部で最大のひずみ振幅となっており、き裂発生位置もこれと一致している。したがって本研究では、圧縮側から生じたき裂（板幅中央に生じたき裂）に関しては、解析により板側面のひずみに対する板幅中央部でのひずみの比を求め、それによりひずみ振幅を補正し、疲労試験結果を整理した¹⁰⁾。

(1) 一定振幅ひずみにおける試験結果

図-9に、既報¹⁰⁾で報告した一定振幅ひずみ下のき

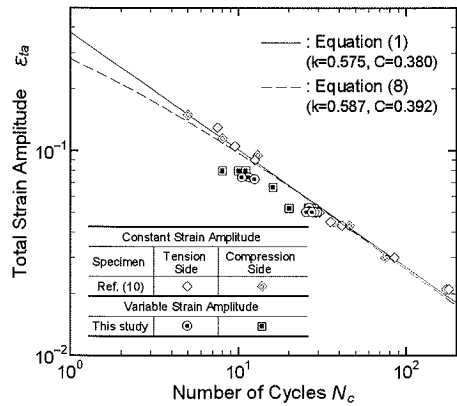


図-9 一定振幅ひずみ下の疲労試験結果¹⁰⁾

裂発生寿命とひずみ振幅の関係を示す。き裂発生寿命は、試験中、試験体表面をマイクロスコップで観察し、約0.5mmのき裂を確認したときの繰り返し数である。図中の実線は、試験結果から最小二乗法により求めた、次式に示すManson-Coffin型の関係式である。

$$\varepsilon_{ta} \cdot N_c^k = C \quad (1)$$

ここで、 ε_{ta} : 全ひずみ振幅、 N_c : き裂発生寿命、
 $k (=0.575)$ 、 $C (=0.380)$: 材料定数

従来、Manson-Coffin則は塑性ひずみ振幅と疲労寿命の関係式として与えられるが、100回以下の領域では全ひずみ振幅はほぼ塑性ひずみ振幅と等しいため¹⁶⁾、今回は全ひずみ振幅で結果を整理した。また、実構造物から得られる情報は一般に全ひずみ振幅であるため、実用的立場からみても、全ひずみ振幅に基づく疲労寿命則は有効であると考えられる。

今回行った変動振幅ひずみ試験により得られた疲労強度を、 ε_s (図-4参照) から求められるひずみ振幅 $\varepsilon_s / 2$ と疲労寿命との関係で整理し、図-9にも示した。これは図-4に示す ε_L の影響を無視したことに相当する。変動振幅ひずみにより得られた疲労試験結果は、一定振幅ひずみの試験結果のばらつきを越え、明らかに短寿命側に位置しており、大ひずみ ε_L の影響が無視できないことがわかる。そこで、以下において、大ひずみの影響を考慮することができる変動振幅ひずみ下での疲労寿命推定法について検討を行った。

(2) Miner則による寿命予測

変動振幅ひずみ波形を取り扱う場合、適切なカウント法を採用することがその疲労損傷を正しく評価する上で重要となる。従来より、ピーク法、レンジ法、レインフロー法など様々なカウント法が提案されている¹⁷⁾。本研究では、低サイクル疲労の分野での適用例¹⁸⁾を基にレンジペア法を採用した。なお、レンジペアがとれなかった波形に関しては、そのひずみ振幅を0.5サイクルとしてカウントした。

あるひずみレベル ε_i に対する疲労寿命を N_i 、そのひずみレベルを実際に与えた回数を n_i とすると、よく知られているように、Miner則は次式で表すことができる。

$$D_{Miner} = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1.0 \quad (2)$$

レンジペア法を用いてカウントしたそれぞれのひずみ振幅 ε_i から式(2)より算出したき裂発生時の損傷度 D_{Miner} と、大ひずみを与えるタイミングとの関係を図-10に示す。横軸は、 ε_s を単独に繰り返したとして式(1)から求められる疲労寿命 N と大ひずみを

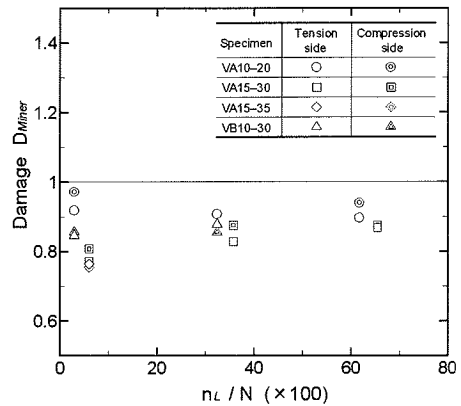


図-10 Miner則による損傷度と大ひずみのタイミングの関係

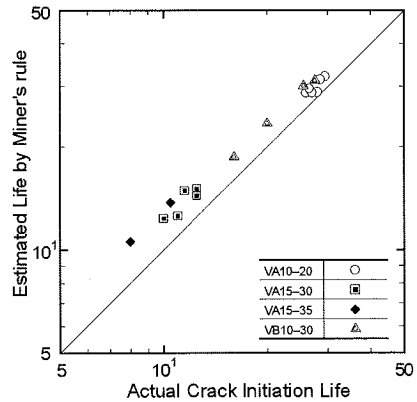


図-11 Miner則による推定寿命と試験結果の比較

入れたときの繰り返し数 n_L の比をとっている。それぞれのひずみパターンに着目すると、大ひずみのタイミングによらずほぼ同程度の損傷度に達したときにき裂が発生していることがわかる。よって低サイクル疲労強度は、大ひずみのタイミング、つまりひずみを与える順序にはあまり影響を受けないと考えられる。またどの試験体も、引張側と圧縮側で損傷度に大きな違いがみられない。これより、引張および圧縮ひずみは損傷に対して同等の影響を与えられられる。以上より、以後、大ひずみを与えるタイミング、およびき裂発生位置に関する引張側、圧縮側の区別はしないで結果を示すこととする。

全ての試験体において、損傷度は1.0を下回っている。これは、極低サイクル疲労領域においてMiner則により寿命を予測した場合、 $D_{Miner} < 1.0$ でき裂が発生する、すなわち危険側の寿命評価を与える

ことを意味する。したがって、疲労寿命が数回から数十回となる領域にMiner則を適用することは難しいといえる。

図-11に試験中に記録したひずみ履歴から次式により等価ひずみ振幅 ε_{eq} を算出し、それと式(1)より推定した疲労寿命と、実験により得られた疲労寿命との比較を示す。

$$\varepsilon_{eq} = \left(\frac{\sum \varepsilon_i^{1/k} \cdot N_i}{N} \right)^k \quad (3a)$$

$$N = \sum N_i \quad (3b)$$

図より、疲労寿命が短くなるほど、つまり与えるひずみレベルが大きくなるほど、両者のずれが大きくなることわかる。そこで、ひずみの絶対値の最大値 $|\varepsilon|_{max}$ ととき裂発生時の損傷度 D_{Miner} との関係を調べた。図-12に両者の関係を示す。横軸に示したひずみの最大絶対値は、全ての試験体において、大ひずみ ε_L を導入したときのひずみの絶対値であるが、その値と ε_L とは必ずしも一致していない。これは図-5(a)に示すように、今回の制御方法では、ひずみ履歴の初期の段階で引張側のひずみが漸増する結果となったためである。図より、若干のばらつきはみられるが、ひずみの最大絶対値が大きくなるととき裂発生時の損傷度は小さくなる傾向にあり、両者の相関は高いものと考えられる。

以上の検討より、本研究ではひずみの最大絶対値の影響を考慮した新たな疲労寿命予測モデルの提案を試みた。

5. 低サイクル寿命予測モデルの提案

近年、連続体損傷力学を用いて低サイクル疲労寿命を推定する試み^{19), 20)}がなされている。それによると、構成方程式を同定するための数多くの材料定数が必要となるが、損傷力学により精度よく疲労寿命を推定できる可能性が示されている。そこで本研究では、損傷力学の概念を取り入れて新たな寿命予測モデルを提案した。その詳細を以下に述べる。

(1) 寿命予測モデル

a) 塑性損傷

損傷力学では一軸引張載荷時の材料の損傷度が次式で与えられる²¹⁾。

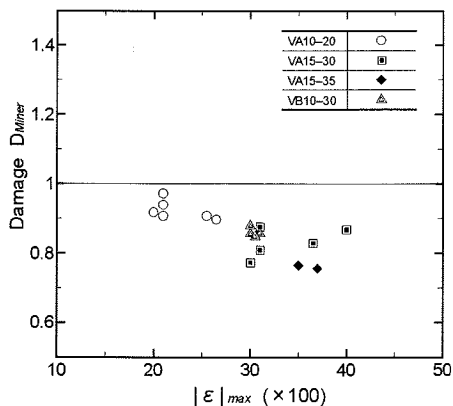


図-12 Miner 則による損傷度とひずみの最大絶対値の関係

$$D_{ductile} = \frac{|\varepsilon|_{max} - \varepsilon_{pD}}{\varepsilon_{pR} - \varepsilon_{pD}} \quad (4)$$

ここで、 $|\varepsilon|_{max}$ ：ひずみの絶対値の最大値、
 ε_{pR} ：破断ひずみ、
 ε_{pD} ：損傷発生限界ひずみ

ただし左辺の $D_{ductile}$ は、損傷力学でいうところの損傷度 D を、き裂発生限界損傷度 D_c で除したものである。上式は、ひずみが損傷発生限界ひずみを超えると損傷が生じ、それ以後はひずみと共に損傷が線形に増加するという実験結果²²⁾に基づいている。ここで、破断ひずみは破断延性 ε_f とする。また損傷発生限界ひずみ ε_{pD} は、引張試験におけるくびれ開始時のひずみ、つまり最大荷重時のひずみとする²³⁾。引張試験の結果より、 ε_f 、 ε_{pD} はそれぞれ 1.13、0.127 となり、これは都井・広瀬²⁰⁾が同定計算により決定した材料定数とほぼ同程度である。なお ε_{max} を絶対値としたのは、Ohji らの仮説⁴⁾ および今回の試験結果から、引張ひずみと圧縮ひずみが同等の損傷を与えると考えたためである。

b) ひずみの繰返しによる損傷

繰返しひずみによる損傷度は次式で表される²¹⁾。

$$D_{cyclic} = \sum_i \frac{n_i - N_o}{N_i - N_o} \quad (5a)$$

$$N_o = \frac{P_D}{2\Delta\varepsilon} \quad (5b)$$

$$p_D = \varepsilon_{pD} \frac{\sigma_u - \sigma_f}{\sigma_M - \sigma_f} \quad (5c)$$

ここで、 N_o : ミクロレベルの損傷発生寿命、
 $\Delta \varepsilon$: ひずみ範囲、 σ_u : 引張強さ、
 σ_f : 疲労限、 σ_M : 等価応力

繰り返し数が数回から数十回の領域では、等価応力は引張強さとほぼ等しく ($\sigma_u \doteq \sigma_M$)、 $p_D \doteq \varepsilon_{pD}$ ($= 0.127$) となり、このとき N_o は非常に小さくなるため、 N_o は無視した。よって式(5a)は、

$$D_{cyclic} \approx \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

とすることができ、これはMiner則と等しくなる。

c) 提案する損傷モデル

本研究では、塑性損傷とひずみの繰り返しによる損傷が線形結合されると仮定し、以下の損傷評価モデルを提案する。

$$D = D_{cyclic} + D_{ductile} = \begin{cases} \sum_i \frac{n_i}{N_i} + \frac{|\varepsilon|_{\max} - \varepsilon_{pD}}{\varepsilon_f - \varepsilon_{pD}} & \text{if } |\varepsilon|_{\max} > \varepsilon_{pD} \\ \sum_i \frac{n_i}{N_i} & \text{if } |\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{pD} \end{cases} \quad (7)$$

き裂は損傷度 D が 1.0 に達したときに発生するものとする。このモデルは、 $|\varepsilon|_{\max} > \varepsilon_{pD}$ となるような大ひずみが与えられたときには、損傷度 D_{cyclic} に加えて $D_{ductile}$ の分の損傷度が加算されることを意味している。逆に $|\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{pD}$ 、つまり与えられるひずみが小さいときには、 $D_{cyclic} = 1.0$ で破壊が起きるとするMiner則と一致する。よって、疲労寿命が数百回から数千回となる、比較的小さいひずみ振幅の繰返しで破壊が生じる領域ではMiner則が成立するという過去の研究との整合性は失われていない。

実際の適用においては、等価ひずみにより寿命予測を行うのが便利である。そこで式(1)と、式(3)より求めた等価ひずみを用いて式(7)を書き直すと、

$$\varepsilon_{eq} \cdot N^k = C \cdot C_m$$

$$C_m = \begin{cases} \left(\frac{\varepsilon_f - |\varepsilon|_{\max}}{\varepsilon_f - \varepsilon_{pD}} \right)^k & \text{if } |\varepsilon|_{\max} > \varepsilon_{pD} \\ 1.0 & \text{if } |\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{pD} \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 C_m : ひずみの最大絶対値の影響を考慮する補正係数

ただし、材料定数 k 、 C は式(1)に由来するものであるから、その決定の際には、式(1)が成り立つ領域の実験結果のみを用いる必要がある。本提案モデルに従って具体的にいえば、 k 、 C は $C_m = 1.0$ となる領域、つまりひずみの最大絶対値が損傷発生限界ひずみ以下 ($|\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{pD}$) の試験データを基に定める必要がある。そこで、図-9に示した一定振幅ひずみの試験結果のうち $|\varepsilon|_{\max} \leq \varepsilon_{pD}$ を満足する試験データと、西村・三木の試験結果¹²⁾から材料定数を求めた結果、 $k = 0.587$ 、 $C = 0.392$ となった。

図-9中に提案式(8)による疲労強度曲線を点線で示す。図の縦軸はひずみ振幅(ひずみ範囲の半分)であり、また、本試験は片振り载荷にて行ったため、 ε_{pD} に相当する値は0.127の半分の0.0635になるが、そのひずみ振幅を越えた領域では、ひずみの最大絶対値の影響により強度曲線は直線より下方へずれていく。試験結果は直線とのずれがまだわずかな領域のみにしか存在しておらず、この曲線を用いてもこれらの試験結果とほぼ一致する結果となっている。逆にいえば、直線とのずれが大きくなる領域(例えばひずみ振幅で20%以上、すなわちひずみ範囲で40%以上)の一定振幅ひずみによる試験結果がなく、このモデルの妥当性を直接的に裏付けるデータは得られていないともいえる。しかしひずみ範囲40%を越えるような試験は困難であること、過去に行われた数少ない研究^{6), 7)}において、鋼種は異なるものの、ここで示す曲線とほぼ一致する実験結果が得られていることから、ここでは式(8)に示すモデルで疲労寿命が予測できるものと仮定し、次節以降に示す変動振幅ひずみによる試験結果によってその妥当性を検証する。

(2) 本モデルの適用性の検討

図-13に式(8)により予測される疲労強度と試験結果との比較を示す。例として式(8)において $|\varepsilon|_{\max} = \varepsilon_{pD}$ (すなわち $C_m = 1.0$) および20%、35%としたときの疲労強度の予測結果を示している。今回の試験ではそれぞれのひずみパターンで $|\varepsilon|_{\max}$ が異なる

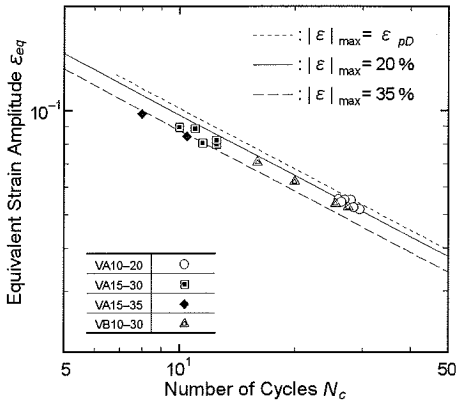


図-13 提案モデルと変動ひずみ振幅下の試験結果の比較

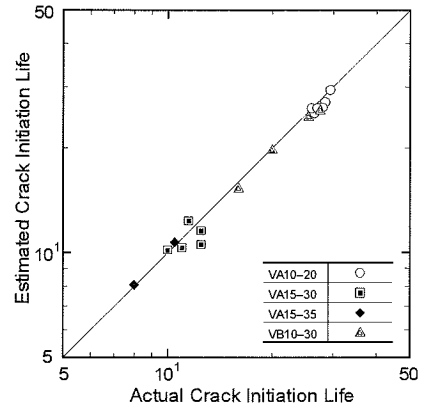
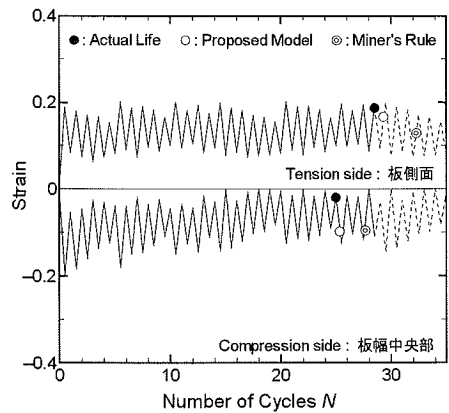


図-14 提案モデルによる推定寿命と試験結果の比較

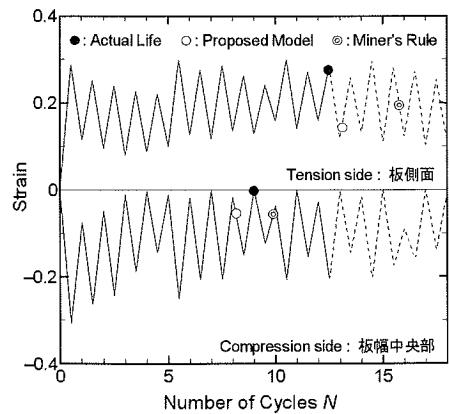
ため、一つの線で整理することはできないが、試験結果は $|\epsilon|_{\max} = 20\%$ 、 35% の二つの線の間分布しており、合理的な予測結果となっていることがわかる。また、VA10-20シリーズの試験結果は $|\epsilon|_{\max} = 20\%$ の線の近傍に分布しており、VA15-30、15-35シリーズに関しては $|\epsilon|_{\max} = 35\%$ の線とよく一致している。図-14に実際の疲労寿命と式(8)より推定した疲労寿命の比較を示す。図-11に比べ両者は非常によく一致しており、本モデルによって極低サイクル疲労領域における変動振幅ひずみ下での疲労寿命が高精度に予測できることがわかる。

6. ランダムひずみ波形による検証

前章において、単純な変動振幅ひずみパターンを用いて得られた試験結果を基に、新たな寿命予測手法を提案した。そこで次のステップとして、ランダムなひずみパターンを試験体に与えたときの本モデルの有効性について検証した。ここでは $|\epsilon|_{\max} = 20\%$ 、 30% と設定し、2種類のひずみの変動パターンを与えた。試験結果を図-15に示す。実線は試験中の試験体表面のひずみ履歴であり、引張側は画像計測により測定した板側面のもの、圧縮側は解析結果から補正した板幅中央部のものである。なお、試験体の両面にき裂を確認した段階で試験を終了したため、それ以後に与える予定であったひずみ履歴は点線で示した。前章で提案したモデルによるき裂発生サイクルの予測結果、Miner則による予測結果、および実験により得られたき裂発生サイクルをそれぞれ



(a) $|\epsilon|_{\max} = 20\%$



(b) $|\epsilon|_{\max} = 30\%$

図-15 ランダム振幅ひずみ下の試験結果

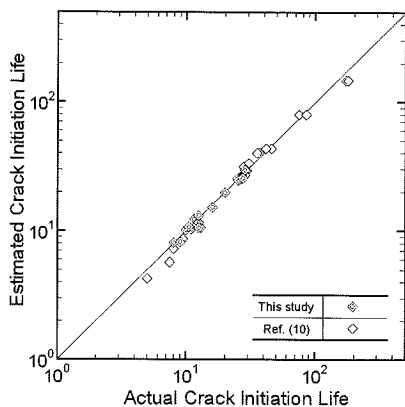


図-16 提案モデルの適用性の検討

れ○, ◎, ●で示した。Miner則による予測結果は実際の寿命より3サイクル以上も長寿命となっている場合があるのに対し、本提案による予測結果はひずみの最大絶対値の違いによらず1サイクル以内の差におさまっており、本モデルで推定した寿命は試験結果とよく一致していることがわかる。よって、ランダムにひずみが変動する場合においても本モデルは有効であることが示された。

図-16 にこれまでに行ったすべての一定振幅ひずみ、変動振幅ひずみ（ランダム波形も含む）低サイクル疲労試験結果と、提案モデルによる寿命予測結果との比較を示す。疲労寿命が数十回以下となるような極低サイクル疲労領域においても、式(8)に示したモデルにより高精度に寿命が予測できていることがわかる。また式の上から当然のことであるが、図に示すとおり、従来研究されてきた数百回以上の領域の疲労寿命も精度よく予測できるモデルとなっており、その意味で汎用性の高い寿命予測モデルであるといえる。

7. 結論

本研究では、疲労寿命が数回から数十回程度の極低サイクル疲労領域において、ひずみ振幅が変動する場合の寿命予測モデルの構築を目的とし、大きなひずみを含んだ数パターンの変動振幅ひずみを試験体に与え、低サイクル疲労試験を行った。以下に本研究の結果をまとめる。

- ・ 9パターンの変動振幅ひずみを試験体に与え、それぞれのき裂発生時の損傷度をMiner則により

求めると、全て1.0より小さくなった。よって極低サイクル疲労領域においては、Miner則により寿命を予測することは困難であるといえる。

- ・ 与えるひずみの順序の違いによる損傷度の変化はあまりみられなかったが、負荷したひずみの最大絶対値が大きくなると、き裂発生時の損傷度が小さくなる傾向となった。またき裂発生時の損傷度に対するひずみの正負の影響はみられなかった。
- ・ 極低サイクル疲労領域における疲労寿命予測モデルとして、ひずみの繰り返しによる損傷のほか、塑性損傷を考慮したモデルを提案した。
- ・ 提案したモデルにより、極低サイクル疲労領域における疲労寿命を精度よく推定することが可能である。また、このモデルは、従来研究されてきた数百回以上の疲労寿命となる範囲にもそのまま適用可能である。
- ・ ランダムなひずみ振幅を試験体に与え、提案したモデルの適用性を検討した。その結果、本モデルにより推定した寿命はMiner則によるものに比べ試験結果とよく一致し、その有効性を確認することができた。

参考文献

- 1) 例えば、大路清嗣：低繰返し数疲れにおける累積損傷の仮説の検討，日本機械学会誌，Vol.70，No.576，pp.36-47，1967。
- 2) 飯田国広，井上肇，小林佑規：歪制御低サイクル疲労における累積損傷（第2報），日本造船学会論文集，No.123，pp.287-296，1968。
- 3) Manson, S.S.: Fatigue: a complex subject-some simple approximations, *Experimental Mechanics*, pp.193-226, 1965.
- 4) Ohji, K., Miller, W. R. and Martin, J.: Cumulative damage and effect of mean strain in low-cycle fatigue of a 2024-T351 aluminum alloy, *Trans. of ASME, Ser. D*, Vol.88, pp.801-810, 1966.
- 5) 飯田国広，井上肇，小林佑規：歪制御低サイクル疲労における累積損傷（第1報），造船協会論文集，No.121，pp.249-261，1967。
- 6) 嶋田勝紀，小茂鳥潤，清水真佐男：極低サイクル疲労におけるManson-Coffin則の適用性と累積損傷，日本機械学会論文集（A編），Vol.53，No.491，pp.1178-1185，1987。
- 7) 小茂鳥潤，清水真佐男：極低サイクル疲労における破壊モード遷移とマイナー則の関係，日本機械学会論文集（A編），Vol.54，No.505，pp.1731-1734，1988。

- 8) Du, M. L., Li, G. C., Zhang, Y. Z. and Fang, W. D.: Fracture behaviour of axisymmetric bars under high triaxial stress and large strain cyclic loading, *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol.15, No.10, pp.1009-1024, 1992.
- 9) Kuroda, M.: Extremely low cycle fatigue life prediction based on a new cumulative fatigue damage model, *Int.J. Fatigue*, Vol.24, pp.699-703, 2001.
- 10) 館石和雄, 判治剛: 画像計測を用いた試験システムによる突合わせ溶接継手の低サイクル疲労強度の検討, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.277-287, 2004.
- 11) 飯田国広, 井上肇, 小林佑規, 宮本武: 歪制御低サイクル疲労における平均歪の影響, 日本造船学会論文集, Vol.127, pp.215-225, 1970.
- 12) 西村俊夫, 三木千寿: 構造用鋼材のひずみ制御低サイクル疲れ特性, 土木学会論文報告集, No.279, pp.29-44, 1978.
- 13) 小茂鳥潤, 清水真佐男: 平均ひずみのもとでの鋼の低サイクル疲労における結晶粒寸法の効果, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.55, No.511, pp.401-408, 1989.
- 14) 平松秀基, 豊田政男: 各種構造用材料のボイド発生・成長挙動に注目した延性き裂発生特性に関する考察, 日本造船学会論文集, No.190, pp.591-598, 2001.
- 15) 平松秀基, 道場康二, 豊田政男: 応力三軸度が小さい力学状態における構造用材料の延性き裂発生特性, 日本造船学会論文集, No.192, pp.563-571, 2002.
- 16) 金澤武, 飯田國廣: 溶接継手の強度, 産報出版, 1979.
- 17) 日本材料学会: 疲労設計便覧, 養賢堂, 1995.
- 18) 菊川真, 大路清嗣, 鎌田敬雄, 城野政弘: 変動ひずみ条件下の低繰返し数疲れ, 日本機械学会誌, Vol.70, No.585, pp.1495-1509, 1967.
- 19) 都井裕, 広瀬智史: 損傷力学モデルによる金属材料の低サイクル疲労寿命予測, 生産研究, Vol.54, No.5, pp.335-338, 2002.
- 20) 都井裕, 広瀬智史: 損傷力学モデルによる金属材料の力学特性の同定と予測, 日本機械学会論文集 (A編), Vol.69, No.679, pp.530-537, 2003.
- 21) Lemaitre, J.: *A Course on Damage Mechanics*, 2nd ed., Springer, 1996.
- 22) Lemaitre, J. and Dufailly, J.: Damage measurements, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.28, No.5/6, pp.643-661, 1987.
- 23) Lemaitre, J. and Doghri, I.: Damage 90: a post processor for crack initiation, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 115, pp.197-232, 1994.

(2004. 4. 12 受付)

A PREDICTION MODEL FOR EXTREMELY LOW CYCLE FATIGUE LIFE UNDER VARIABLE STRAIN AMPLITUDE

Kazuo TATEISHI, Takeshi HANJI and Kuniaki MINAMI

For predicting the low cycle fatigue life under variable strain amplitude, Miner's rule has been accepted as a simple and effective idea. In extreme large strain field corresponding to the fatigue life of less than ten cycles, however, the accuracy of Miner's rule has not been verified yet. In this study, by means of a newly developed testing system, low cycle fatigue tests under variable strain amplitude in extreme large strain field was conducted. The test results showed Miner's rule always predicted longer fatigue life than actual life. As another idea for predicting low cycle fatigue life, we proposed a simple model introducing the damage mechanics concept and examined its validity.