

## 論文の内容の要旨

論文科目 Development and Evaluation of Creep-Fatigue Damage Models for  
2¼Cr-1Mo Steel in High Vacuum Environment  
(2¼Cr-1Mo 鋼の高真空中クリープ - 疲労損傷モデルの開発及び評価に関する研究)

論文提出者氏名 77058 カシヴィトアンヌイ ジラボン

現代の高温構造設計において、構造健全性の確保と正確な余寿命評価は重要な課題である。その為には様々な技術開発が必要であるが、損傷モデルの開発は最も重要な技術開発課題である。本研究では、2¼Cr-1Mo 鋼を用い、高温高真空中におけるクリープ疲労特性が実験的に詳細に調査された。これらの実験により、クリープ疲労相互作用の基本的特性の他、これまで十分な知見が得られていなかった、クリープと疲労の相互作用に対する負荷履歴や応力の影響が明らかになった。次に、実験で得られた破断面を走査型電子顕微鏡で観察することにより、その物理的メカニズムを明らかにした。さらに、線形および非線形の有効応力理論と連続体熱力学に基づく損傷理論について理論的に検討を進め、物理的により整合性のあるモデルへの拡張を試みた。これらの損傷理論は、上述の実験で得られた知見に基づき、比較、評価され、それらの特徴と妥当性、ならびに実用性について詳細に検討した。

本研究では、2¼Cr-1Mo 鋼を用い、550°Cの高温、高真空中における実験を行った。実験条件は、通常のクリープ疲労試験（表 1）の他、ひずみ波形変動（表 2）、ひずみ速度変動（表 3）、および、切り欠き試験片を用いた疲労試験であり、4 種類の異なる実験を通じてクリープ疲労相互作用の多様な側面を明らかにした。すなわち、真空中では、疲労寿命の周波数依存性が消失すること、低速引張り高速圧縮のようなクリープ疲労負荷の場合には著しい寿命の低下が生じること（図 1）、クリープ疲労損傷は後続の疲労損傷に大きく影響するが逆の場合の影響は大きくないという特徴的な履歴効果があること（図 2）、ならびに、応力が高いほどクリープと疲労の相互作用は強いこと（図 3）が明らかになった。さらに、以上の実験で得られた破断面を走査型電子顕微鏡で観察することにより、本材料のクリープ疲労相互作用のメカニズムは、クリープキャビティ（図 4）あるいは介在物（インクルージョン）から伝播したマイクロクラック（図 5）であることが明らかになった。

次に、クリープ疲労実験結果に基いて有効応力を解析した。本材料の有効応力については、他の研究者より従来の理論と整合しない可能性が指摘されていたが、本研究では精密な測定と解析を行うことにより有効応力と非弾性ひずみ速度の間に良好な対応関係を見出し、本材料においても理論との整合性は問題ないことを明らかにした。

本研究では、有効応力概念に基づく線形損傷理論、有効応力概念に基づく非線形損傷理論、および、連続体熱力学に基づく連続体損傷力学に基づくクリープ疲労損傷モデルをとりあげ、それぞれについて拡張を図ると共に、上述の実験結果に基づき、各理論の特徴と妥当性、実用

性について詳細に検討した。

まず、有効応力概念に基づく線形損傷理論では、クリープ疲労損傷の履歴効果を記述できないことを明らかにした。したがって、本理論を複雑な負荷履歴が生じる実機構造、特に余寿命評価に適用する時には注意を要する。次に、有効応力概念に基づく非線型損傷理論について、基本的仮定について詳細な検討を行い、損傷の大きさの分布を新たに導入することによって物理的により妥当性のあるモデルへの拡張を試みた。そして、この拡張されたモデルによってすべての実験結果がよい精度で予測されることを示した。最後に Lemaitre による熱力学的損傷理論に基づく連続体損傷力学について検討した。そして、クリープデータの取り扱い方法を改良することによって従来よりも精度の高いモデルを得る事に成功した。そして、この手法は非線型の有効応力モデルよりも精度は若干劣るものの、実用的には十分な予測精度であり、かつ、取り扱いも容易であることを示した。

以上、要するに、本論文は構造材料のクリープ疲労相互作用の現象とその機構の詳細を明らかにし、複数の損傷理論を拡張して高精度のモデルを開発するとともにそれらの理論の特徴を比較検討することによって設計応用への重要な知見を得たものである。

表 1 基本クリープ疲労試験のひずみ波形

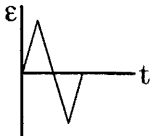
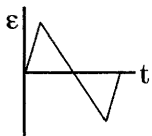
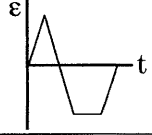
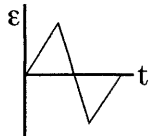
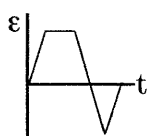
Code	Strain Rate Tens/Comp. (s <sup>-1</sup> )	Hold Time Tens/Comp. (s)	$\Delta\epsilon_t$ (%)	Waveform
FF	10 <sup>-3</sup> /10 <sup>-3</sup>	0/0	0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0	
SS	10 <sup>-4</sup> /10 <sup>-4</sup>	0/0	0.6, 1.0, 2.0	
FS	10 <sup>-3</sup> /10 <sup>-4</sup>	0/0	0.6, 1.0, 2.0	
FFH	10 <sup>-3</sup> /10 <sup>-3</sup>	0/600	1.0, 2.0	
SF	10 <sup>-4</sup> /10 <sup>-3</sup>	0/0	0.6, 1.0, 2.0	
S <sub>2</sub> F	10 <sup>-5</sup> /10 <sup>-3</sup>	0/0	0.6, 1.0, 2.0, 3.0	
FHF	10 <sup>-3</sup> /10 <sup>-3</sup>	600/0	0.6, 1.0, 2.0	
SHF	10 <sup>-4</sup> /10 <sup>-3</sup>	600/0	1.0	
S <sub>2</sub> HF	10 <sup>-5</sup> /10 <sup>-3</sup>	600/0	1.0	

表 2 ひずみ波形変動試験条件

Code	Prior Loading		Subsequence Loading		$\Delta\epsilon_t$ (%)	Prior Loading Life Fraction, $\Phi_1$
	Strain Rate Tens/Comp	Hold Time Tens/Comp	Strain Rate Tens/Comp	Hold Time Tens/Comp		
A-1	$10^{-4}/10^{-3}$	0/0	$10^{-3}/10^{-3}$	0/0	1.0, 2.0	0.3, 0.5, 0.7
A-2	$10^{-5}/10^{-3}$	0/0	$10^{-3}/10^{-3}$	0/0	1.0	0.3, 0.6
A-3	$10^{-3}/10^{-3}$	600/0	$10^{-3}/10^{-3}$	0/0	1.0	0.4
B-1	$10^{-3}/10^{-3}$	0/0	$10^{-4}/10^{-3}$	0/0	1.0	0.6

表 3 ひずみ速度変動試験条件

Code	$\Delta\epsilon_t$ (%)	Strain Rate			$\Delta\epsilon_{slow}$ (%)	Strain Waveform	
		Tens.		Comp.			
		First Part	Second Part				
C-1	1.00	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	0.25		
	1.00	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$			0.50
	1.00	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$			0.75
C-2	1.00	$10^{-4}$	$10^{-3}$	$10^{-3}$	0.75		
D-1	1.00	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	0.25		
	1.00	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$	0.50		

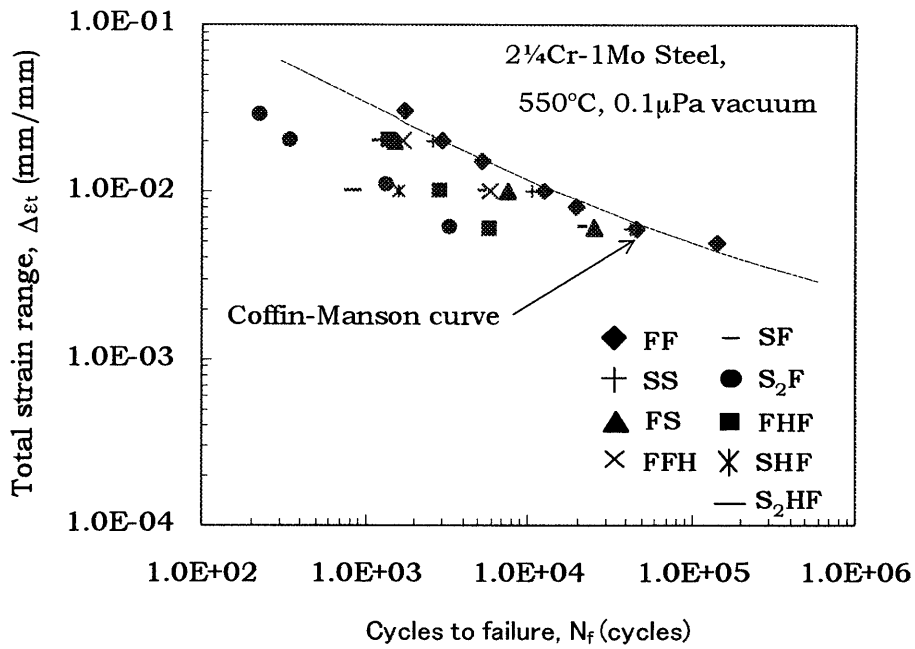


図 1 基本クリープ疲労試験結果 (全ひずみ範囲とクリープ疲労寿命の関係)

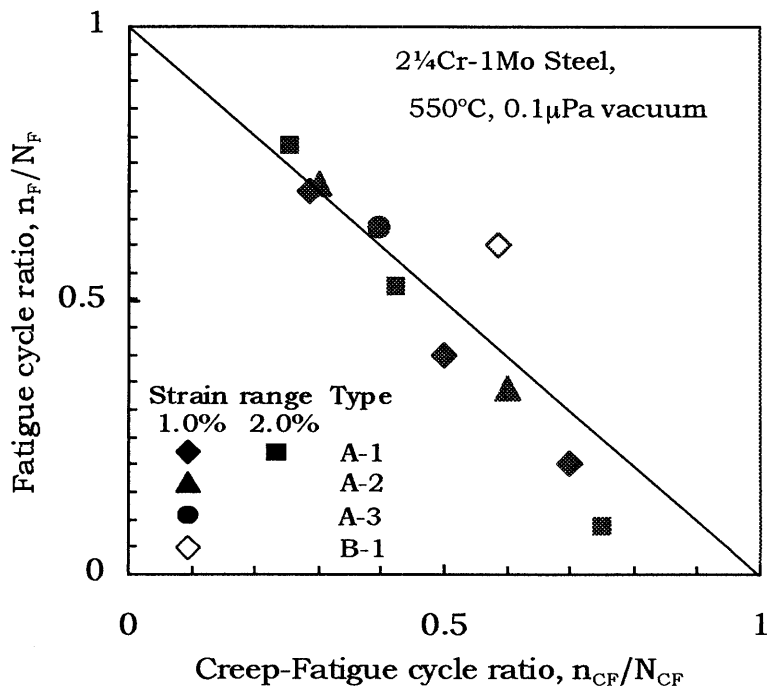


図 2 クリープ疲労損傷ダイアグラム

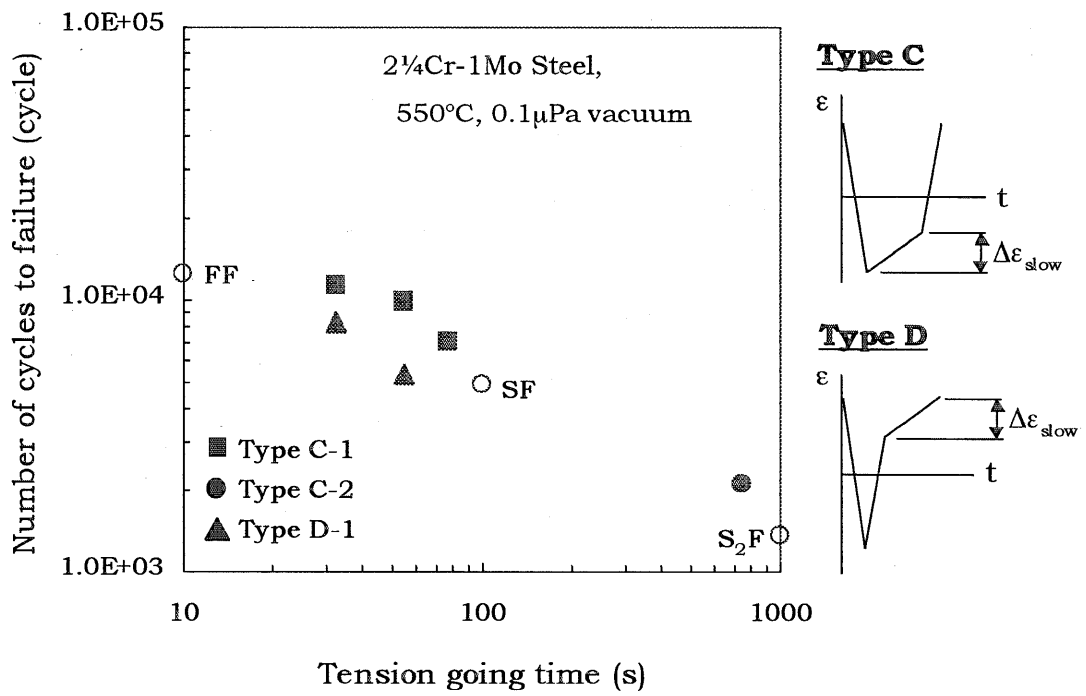
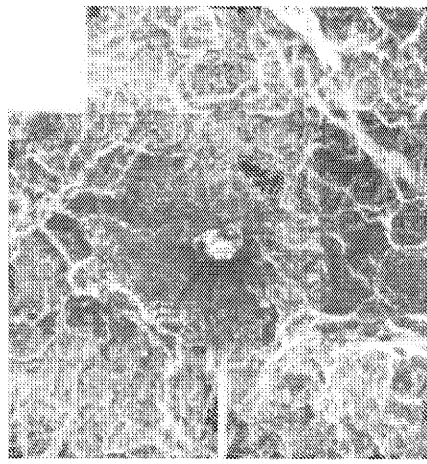


図 3 ひずみ速度変動試験結果



1000x | 30 μm |



500x | 60 μm |

図 4 クリープポイド (矢印, 試験条件 SF1%)    図 5 介在物から伝播したき裂 (試験条件 SF1%)