

高温クリープおよび高温疲労による破面のフラクタル特性 Fractal Characteristics of Fracture Surface due to Creep and Fatigue at Elevated Temperature

○古屋宏太郎*, 横田理**, 依田満夫**

○Kotaro Furuya*, Osamu Yokota**, Mitsuo Yoda**

*日本大学大学院, **日本大学

*Graduate School, Nihon University, ** Nihon University

キーワード: 高温クリープ(Creep at elevated temperature), 高温疲労(Fatigue at elevated temperature),
CT 試験片(CT specimen), フラクタル解析(Fractal analysis), ビッカース硬さ試験(Vickers
hardness test)

連絡先: 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地

日本大学 工学部 機械工学科 材料工学研究室 古屋宏太郎

Tel.: (024)956-8775, E-mail:g17312@cc.ce.nihon-u.ac.jp

1. 緒言

火力発電プラントでは効率向上, CO₂ 排出低減を目的とした運転温度の上昇が求められている。タービンや蒸気管の発電機器等は高温で使用され, かつ運転の開始や停止の運転条件の変動により損傷を受けるので, 疲労・クリープ時の損傷を考慮しなければならない。

そこで, 本研究では使用期待温度 650°C のタービンローター材 12Cr 鋼を試験片として用い, 疲労・クリープ重畳条件下において実験を行った。そして, き裂成長特性の検討および破面近傍の硬さ, 破面のフラクタル解析による 12Cr 鋼の損傷評価を試みた。

2. 実験方法

試験片に 12Cr 鋼を用い, その化学成分を表 1 に示す。試験片形状は, 図 1 に示す標準 CT 試験片を使用し, き裂のトンネル化を防ぐためサイドグループが付与されている。

試験機には, 容量 5t のレバーアーム型変動荷重式クリープ試験装置を用いた。試験片取り付け部周辺は電気抵抗加熱炉が設置されていて, これに

より試験片の加熱を行った。試験片の温度測定には熱電対を用い, 試験中の温度変動は $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 以内とした。き裂長さの計測は電気ポテンシャル法を用いた。試験片に 5A の一定直流電流を供給し, き裂発生により計測された電位差からき裂長さへの換算は式(1)の H.H.Johnson の式より求めた。

実験条件を表 2 に示す。それぞれの公称応力, 試験温度に対して, 疲労クリープ試験では応力保持時間を $t_H=2, 10, 60, 600\text{s}$ の 4 種類として実験を行った。

表1 化学成分 (wt. %)

12Cr-2.51W		C	Si	Mn	Ni	Mo
		0.10	0.10	0.50	0.30	0.10
Cr	W	V	Nb	Co	N	B
10.20	2.50	0.20	0.10	2.40	0.02	0.01

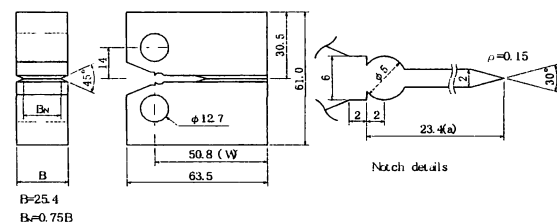


図1 試験片形状および寸法

$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \frac{\cosh(\pi y_0/2W)}{\cosh \frac{V}{V_0} \left[\cosh^{-1} \left\{ \frac{\cosh(\pi y_0/2W)}{\cos(\pi a_0/2W)} \right\} \right]} \dots \dots (1)$$

a : 試験開始後の任意時間でのき裂長さ(mm).
W : CT 試験片の幅(mm).
y₀ : 電位差出力端子間の距離の 1/2(mm).
V₀ : 初期き裂長さ a₀における初期電位差(V).
V : き裂長さ a における電位差(V).

表 2 実験条件

Gross stress σ _r , MPa	Temperature T, °C	Rising time t _r , s	Descending time t _d , s	Holding time t _h , s	Frequency f, Hz	Wave form
311.8	600	30	30	2	0.016	
	10			0.014		
	60			0.0083		
341.4	700	30	30	600	0.0015	
	CREEP					

3. 実験結果及び考察

3.1 応力拡大係数によるき裂成長速度の評価

応力拡大係数を用いてき裂成長速度の評価を行った。図2に σ_g=311.8MPa, T=650°Cにおける応力拡大係数幅値 ΔK とき裂成長速度 da/dt の関係を示す。疲労クリープ重畳条件では、ΔK の低い領域から da/dt は高い値であり、ΔK の増加に対して、緩やかな加速を示している。一方、クリープ条件では、ΔK の低い領域での da/dt の値は低いが、急激に加速し破断に至っている。

3.2 破断寿命と繰返し速度の関係

繰返し速度を用いて破断寿命の評価を行った。図3に破断寿命の逆数 1/t_r と繰返し速度 f の関係を示す。図中の 45°の破線は、繰返し数のみに依存する場合の繰返し数依存型特性線である。また、横軸に平行な破線は時間のみに依存する場合の時間依存型特性線である。

図(a)の σ_g=311.8MPa, T=600°Cでは、破断寿命が繰返し数依存型の特性を示し、T=700°Cでは、時間依存型の特性を示している。T=650°Cでは、f により傾向が異なり、f が減少するにしたがって繰返し数依存型から時間依存型の特性に移行する傾向が見られる。

図(b)の σ_g=341.4MPa, T=600°Cでは、f の増加に対する 1/t_r の増加がわずかであり、やや時間依存型の特性を示していた。T=650°Cでは、時間依

存型の特性を示している。このことから、破断寿命は、試験温度が高くなるにつれ、繰返し数依存型特性から時間依存型特性への移行が見られる。また、公称応力が高い場合にも繰返し数依存型特性から時間依存型特性への移行が確認できる。

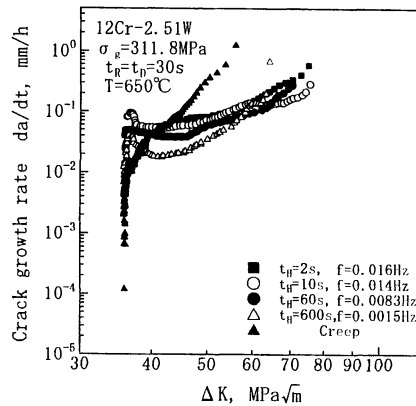
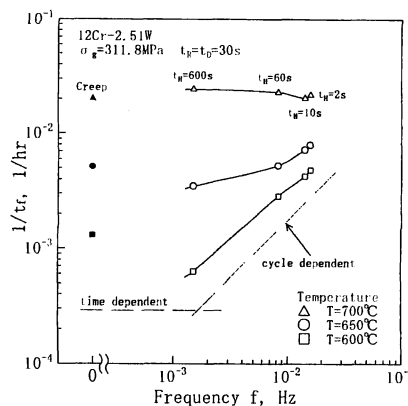
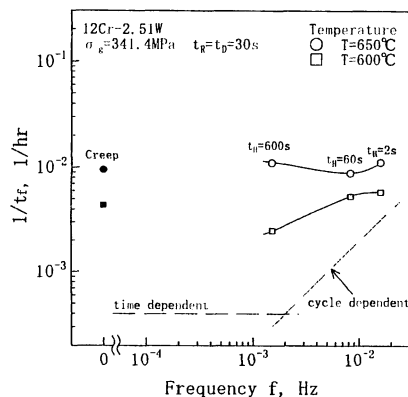


図2 応力拡大係数とき裂成長速度の関係 (σ_g=311.8MPa, T=650°C)



(a) σ_g=311.8MPa



(b) σ_g=341.4MPa

図3 破断寿命と繰返し速度の関係

3. 3 き裂進展経路の観察

疲労・クリープ重畳条件とクリープ条件の異なる試験条件により、き裂がどのように進展しているかを確認するため、き裂進展経路写真を用いて観察を行った。図4には、 $\sigma_g=311.8\text{MPa}$ 、 $T=650^\circ\text{C}$ の $t_H=2\text{s}$ およびクリープのき裂進展経路写真を示す。 $t_H=2\text{s}$ では、破面の凹凸が激しく、複数の二次き裂やポイドが確認できた。き裂前半では微小き裂が生成され、き裂の進展にともない、多くのポイドが発生し、破壊に至っていると考えられる。一方、クリープでは凹凸はあるものの比較的滑らかな破面形状であり、二次き裂はなく、ポイドもほとんど確認できなかった。

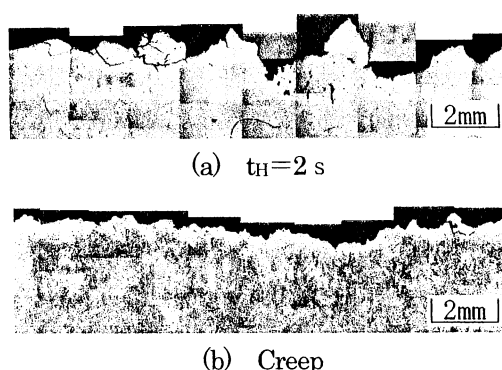


図4 き裂進展経路写真
($\sigma_g=311.8\text{MPa}$, $T=650^\circ\text{C}$)

3. 4 破面のフラクタル解析

破面形状の定量的評価を行うためにフラクタル解析を用いた。フラクタルは、自己相似な図形を意味しており、本研究では破面を自己相似な図形と仮定し、ボックスカウンティング法を用いて破面の定量化を行った。

ボックスカウンティング法とは、試験片の破面に対し、大きさ η の正方形のボックスで覆い、破面が通過するボックスの数 $N(\eta)$ を数える方法である¹²⁾。 $N(\eta)$ と η には式(2)のような関係があり、フラクタル次元 D が算出され、 D の値が大きいほど破面形状が複雑であるといえる。

$$N(\eta) = C\eta^{-D} \quad \dots \dots (2)$$

図5に $\sigma_g=311.8\text{MPa}$ 、 $T=650^\circ\text{C}$ のフラクタル解析結果、表3にそれぞれの直線関係から得られた D を示す。 D の値は、どの条件でもクリープと比べ $t_H=2\text{s}$ の方が高い傾向にあり、破面形状が複雑であることを示している。また、 T が低いほど、 σ_g が高いほど破面形状が複雑になる傾向がみられる。

次に、き裂進展経路をき裂長さ半分で前半と後半に分け、フラクタル解析を行った結果を表4に示す。き裂前半と後半の D を比較すると、疲労・クリープ重畳条件ではどの条件でもき裂前半の D の値が大きく、破面形状が複雑であった。これは、き裂進展経路の観察より複数の二次き裂がき裂前半に発生していることによるものと考えられる。

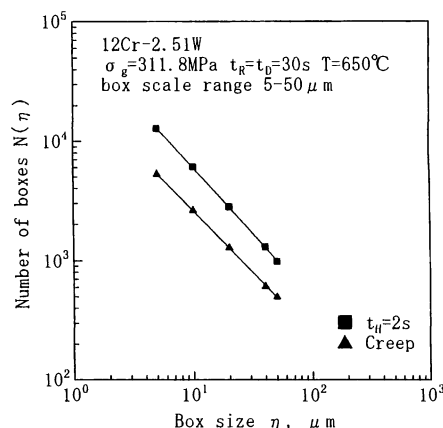


図5 フラクタル解析結果
($\sigma_g=311.8\text{MPa}$, $T=650^\circ\text{C}$)

表3 フラクタル次元

Gross stress σ_g , MPa	Temperature T , $^\circ\text{C}$	Holding time t_H , s	Fractal dimension D
311.8	600	2	1.1358
		Creep	1.0670
	650	2	1.1102
		Creep	1.0332
700	2	1.0789	
	Creep	1.0539	
341.4	600	2	1.1705
		Creep	1.1197
650	2	1.1321	
	Creep	1.0616	

表4 き裂前後半のフラクタル次元

Gross stress σ_g , MPa	Temperature T , $^\circ\text{C}$	Holding time t_H , s	Fractal dimension D	
			The first half	The latter half
311.8	600	2	1.1436	1.1289
		Creep	1.0795	1.0543
	650	2	1.1307	1.0688
		Creep	1.0339	1.0427
	700	2	1.0932	1.0636
		Creep	1.0634	1.0460
341.4	600	2	1.2082	1.1034
		Creep	1.1649	1.0708
650	2	1.1415	1.0990	
	Creep	1.0723	1.0508	

3.5 破面近傍の硬さとフラクタル次元の関係

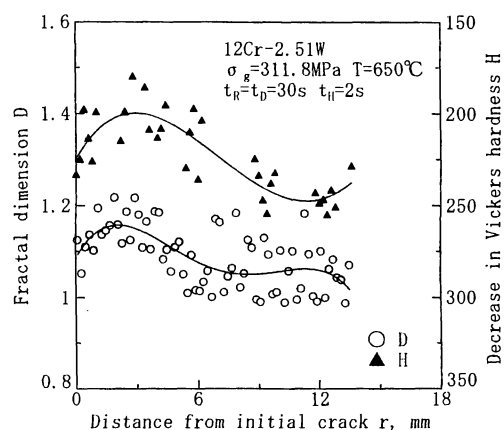
初期き裂からき裂進展方向 r に 0.2mm 間隔で区切り, 局所的フラクタル次元と破面近傍の硬さ低下の関係を調べた. $\sigma_g=311.8\text{MPa}$, $T=650^\circ\text{C}$ における硬さ低下 H と D の関係を図 6 に示す.

$t_H=2\text{s}$ では, 硬さが低下している領域において, D が高い値を示す複雑な破面形状となっており, これはき裂進展経路の観察より確認された二次き裂などによるものであると考えられる. クリープでは, H および D はほぼ一定になっていた. このような破面が複雑である領域においては, 硬さの低下が見られ, 硬さ低下とフラクタル次元に対応関係が見られた.

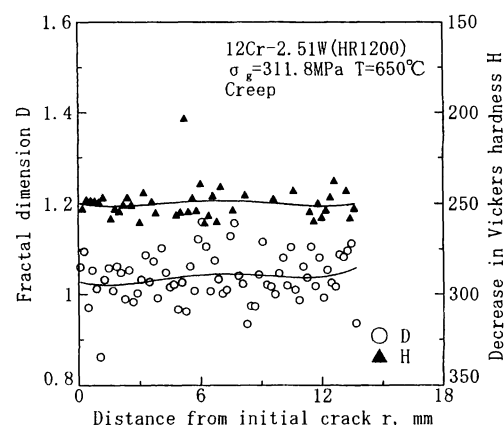
4. 結言

高温クリープ・疲労重畳条件下においてき裂成長特性およびフラクタル解析を行った結果, 以下のような結論が得られた.

1. 疲労クリープ重畳条件では, ΔK の低い領域から da/dt は高い値であり, ΔK の増加に対して, 緩やかな加速を示している. クリープ条件では, ΔK の低い領域での da/dt の値は低いが, 急激に加速し破断に至っている.
2. 破断寿命は, 試験温度および公称応力が高くなるにつれ, 繰返し数依存型特性から時間依存型特性への移行が確認できる.
3. $t_H=2\text{s}$ では多数の二次き裂が発生している. 特にき裂前半に二次き裂を含む複雑な破面形状が多く見られ, D の値からもき裂前半の方が複雑であるといえる. 一方, クリープでは, 二次き裂などが見られず, D の値からも比較的滑らかな破面形状といえる.
4. H と D の関係から, 硬さが低下している領域において, D は高い値を示し, 硬さの低下が見られなかった領域では, D は低い値を示す傾向が確認できた. このことから破面近傍の硬さ低下と局所的なフラクタル次元に対応関係があると考えられる.



(a) $t_H=2\text{s}$



(b) Creep

図 6 硬さとフラクタル次元の関係
($\sigma_g=311.8\text{MPa}$, $T=650^\circ\text{C}$)

参考文献

- 1) 山際謙太, 酒井信介, 横堀壽光: 日本材料強度学会誌 (2001) 第 35 卷 第 3 号 pp.53-60
- 2) A. Toshimitsu Yokobori, Jr. Shinsuke Sakai, Kenta Yamagiwa and Nobori Yoshida: Strength, Fracture and Complexity 1 (2003) pp.19-29