

ステンレス鋼の高温における疲労き裂成長特性—第1報—

—貫通き裂および表面き裂の疲労き裂成長挙動—

Fatigue Crack Growth of Stainless Steel at Elevated Temperature (First Report)

—Fatigue Crack Growth Behavior of Through Cracks and Surface Cracks—

結 城 良 治*・北 川 英 夫*・持 田 郁 夫*

Ryoji YUUKI, Hideo KITAGAWA and Ikuo MOCHIDA

1. ま え が き

最近高温機器の設計, 検査, 保守にも破壊力学的手法が導入されつつあり,¹⁾ それに伴い高温における疲労き裂成長挙動に関する研究が活発になりつつある。特に米国では, 高速増殖炉, ガス炉に関連した高温疲労き裂成長実験が組織的に行われている。^{2)~4)} 高温においては, 材料の強度低下とともに, 酸化, 時効, クリープなど複雑な影響が予想されるが,⁵⁾ 室温での膨大なデータの蓄積に比較して研究は十分でなく, 実際の高温機器で想定される表面き裂や微小分布き裂などの疲労き裂成長特性に関する研究はほとんど見当たらないのが現状である。

本研究は新たに開発した高温疲労試験装置を用いて, SUS 304 ステンレス鋼の高温 538°C における一連の疲労き裂成長試験を実施し, 貫通き裂についてその疲労き裂成長特性を把握するとともに, 各種表面き裂の成長実験を行い, 貫通き裂の場合と比較・検討し, 高温における表面き裂の疲労き裂成長挙動に破壊力学が拡張適用できるか否かを検討したものである。また高温機器に想定される表面欠陥の健全性評価や寿命予測のための基礎的研究でもある。

2. 実 験 方 法

供試材は, 高温機器に広く用いられているオーステナイト系ステンレス鋼 SUS 304 鋼の溶体化処理材であり, その化学成分と機械的性質を Table 1, Table 2 に示す。本研究に用いた試験片は, Fig. 1 (a) に示すコンパクト試験片(CT)と Fig. 1 (b) に示すように試験片中央に貫通切欠を有する試験片(CCP)および同じく表面切欠を有する試験片(SC)の 3 種類であり, これらの切欠はいずれも放電加工により入れ, その切欠形状の詳細を Fig. 1 (b) に示す。なおき裂が成長する方向はすべて材料の圧延方向と直角となるようにとった。

疲労試験は電気・油圧サーボ式疲労試験機 (MTS 社

製, 荷重容量 10 トン) を用い, これに管状電気炉 (ガデリウス社製, 2 kW, ~1000°C) を装着し, 高温疲労試験装置を構成した。その試験部概観を Fig. 2 に示す。電気

Table 1 Chemical composition of SUS 304 stainless steel

Material	Chemical composition, wt %							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A	0.05	0.56	0.98	0.025	0.007	—	9.30	18.25
B	0.05	0.59	0.99	0.027	0.013	—	8.65	18.36

Table 2 Mechanical properties of SUS 304 stainless steel

Material	Mechanical properties					
	Temp.	Yield strength (0.2% offset)	Tensile strength	Elongation	Reduction of area	Hardness
	°C	kg/mm ²	kg/mm ²	%	%	H _B
A	R.T.	22.4	65.0	81.8	80.5	
	550	11.7	38.1	53.0	77.5	
B	R.T.	26.0	63.0	62.0		157

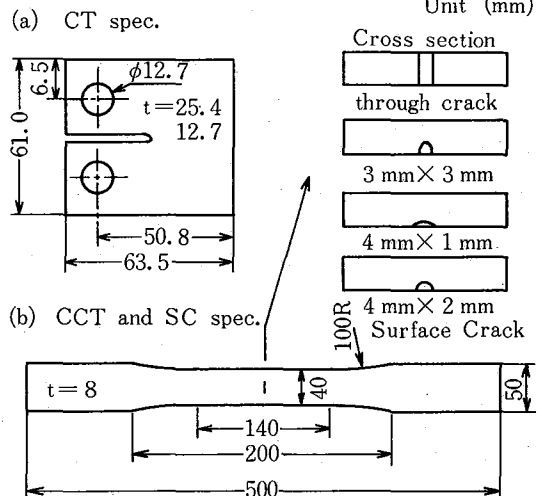


Fig. 1 Shape and size of test specimens

* 東京大学生産技術研究所 第1部

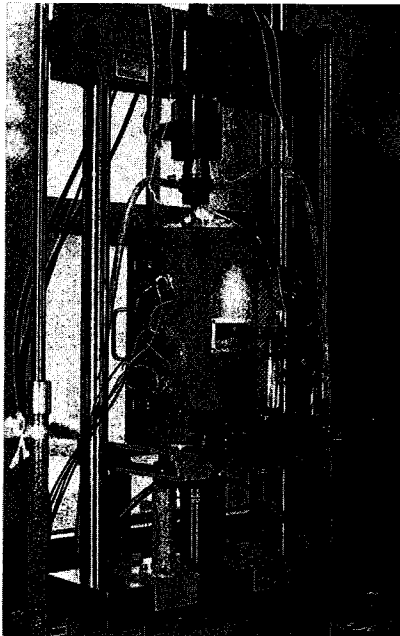


Fig. 2 View of specimen in furnace and fatigue testing machine

炉内の試験片は長時間高温一定温度 538°C (1000°F) に保持され、繰返し荷重を受ける。荷重波形は室温では 400 ないし 600 cpm の正弦波、高温では正の鋸歯状波(上昇/下降時間の比=7.78)を用い、周波数は 400 から 40 cpm まで変化させた。本試験は応力比 $R (= \sigma_{min}/\sigma_{max})=0.1$ のほぼ片振り引張りの定荷重制御疲労試験である。

成長するき裂長は電気炉の石英ガラス製の観察窓を介して移動式顕微鏡を用い測定した、表面き裂の深さ方向の成長はピーチマーク法により破面より読み取った。

3. 実験結果と考察

3.1 貫通き裂の疲労き裂成長特性

室温および高温における貫通き裂の疲労き裂成長特性を調べ、Fig. 3 に示す。縦軸にはき裂成長速度 da/dN 、横軸には応力拡大係数範囲 ΔK をとり、各種異なる試験片のデータを併記した。高温における疲労き裂成長特性は室温のそれよりかなり加速側となる。高温のデータに着目すると、応力レベルの異なる CCT (Fig. 1(b)) のデータおよび CT (Fig. 1(a)) のデータとがほぼ同一特性上に集まり、高温においても疲労き裂成長速度は ΔK により統一的に特性づけられることが分る。

Fig. 4 に高温疲労き裂成長特性に及ぼす周波数の影響を調べた結果を示す。図から分かるように 538°C でも周波数が小さいほどき裂成長速度は増加する傾向にあり、

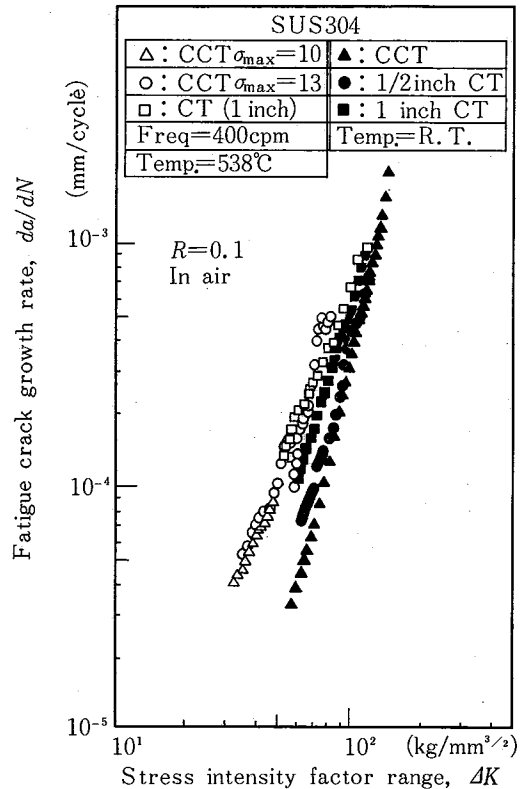


Fig. 3 Fatigue crack growth properties of through crack at room and elevated temperature

James らの実験結果^{2),3)}とも良く一致した。本温度域ではクリープの影響は認められず、この周波数依存性は大気中酸化の影響ないし動的ひずみ時効の影響によるものと考えられる。

3.2 表面き裂の疲労き裂成長特性

平板試験片中央に表面長さ(2a)と深さ(b)が、それぞれ 4×2, 4×1, 3×3 mm の 3 種類の表面切欠を入れ、表面き裂の二次元成長挙動をピーチマーク法により測定した。Fig. 5 に高温疲労破断面の一例を示す。高温でもピーチマークが鮮明に見え、このピーチマークからき裂面形状変化を測定し、結果を室温高温の場合を合わせ、Fig. 6 に示した。いずれも表面切欠形状の異なるデータがある一定値(この場合は $b/a \approx 0.84$)に収束する傾向にあり、室温と高温の場合について特に相違は認められない。

Fig. 7 に室温および高温における各種表面き裂の最深点の成長速度 db/dN を、最深点の ΔK で整理した結果を示す。ただし K の計算には最近提案された Raju-Newman の式を用いた。⁹⁾ 図から分かるように室温、高温ともに表面切欠形状の異なるデータがそれぞれ狭い分

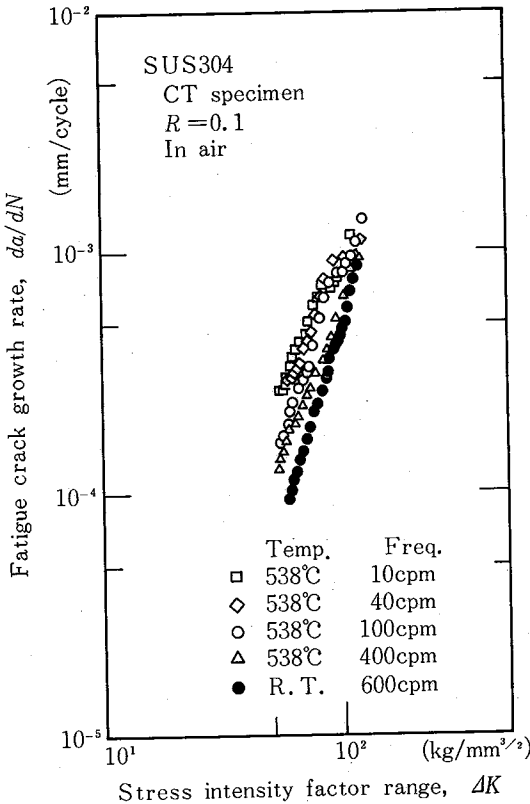


Fig. 4 Frequency effects on fatigue crack growth at elevated temperature



Fig. 5 Fracture surface and beach mark (538°C, 400 cpm, 3×3 mm)

散帯内に集まり、しかも前述の貫通き裂の特性とも良く対応している。Fig. 7には高温40 cpmのデータも示したが、このデータは400 cpmのデータよりやや加速側となり、表面き裂の場合もFig. 4で示した貫通き裂の場合と同様な疲労き裂成長特性の周波数依存性が成立するものと考えられる。

これらの結果は高温機器に見られる表面き裂の成長挙動をCT試験片などの単純な試験により得られたデータから推定できることを意味し、実用上重要な知見である。

なお本実験で得られた破面をSEMにより観察したが、538°Cの破面はすべて粒内破壊であり、ストライエーションが見られ、高温クリープ特有の粒界破壊は観察されなかった。また破面は酸化皮膜におおわれ、青色に着

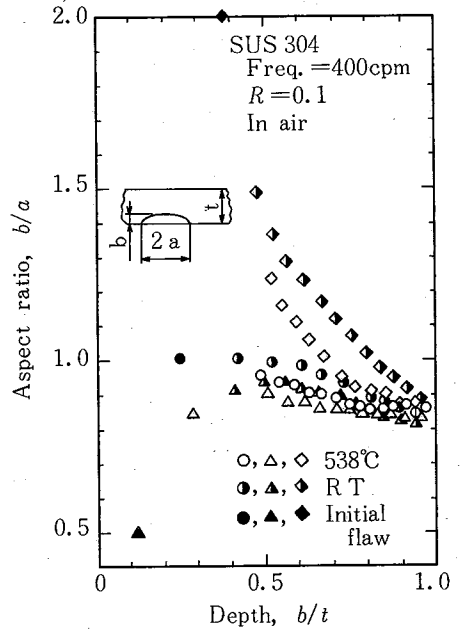


Fig. 6 Change of aspect ratio for surface crack

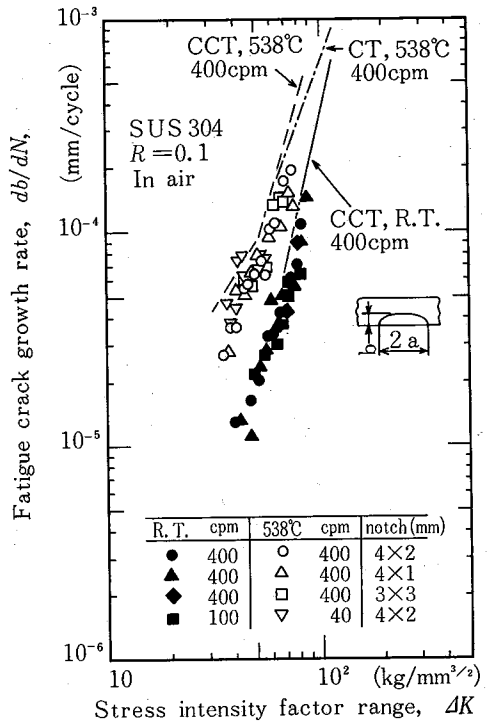


Fig. 7 Fatigue crack growth properties of surface crack at room and elevated temperature

研 究 速 報
 色していた。このような破面からも本実験条件下ではクリープの影響は少なく、高温に伴う疲労き裂成長速度の加速や周波数依存性は主として酸化の影響によるものと推察される。

3.3 C と m の相関

以上の実験結果より高温 538°C における SUS 304 鋼の疲労き裂成長特性は、CT, CCT の試験片形状、応力レベル、貫通き裂と表面き裂、表面切欠形状のいかんによらず、同一周波数ではほぼ同一の特性が得られ、室温の場合と同様線形破壊力学が適用でき、次に示す Paris 則が成立することが明らかとなった。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

ここで C, m は材料定数である。室温においては、この C と m にある相関関係が成立することが知られている。⁷⁾ 本実験で得られた室温および高温における貫通き裂および表面き裂の疲労き裂成長特性から最小自乗法により、C, m を求め、片対数図上で整理したのが、Fig. 8 である。ただし高温のデータは両対数図上で折れ曲がる場合も多く、この場合はそれぞれの ΔK の範囲で直線近似し、C, m を別々に求めた。Fig. 8 には同一材の James らの実験結果も併記した。図から分かるように室温、高温それぞれにおいて良い相関が認められ、次式が成立することが明らかとなった。

$$\log C = -4.73 - 1.8m \quad (\text{室温}) \quad (2)$$

$$\log C = -3.51 - 1.9m \quad (\text{高温 } 538^\circ\text{C}) \quad (3)$$

4. あとがき

SUS 304 ステンレス鋼の 538°C における貫通き裂および表面き裂の疲労き裂成長特性を調べ以下の諸結果を得た。

- 1) 538°C においても貫通き裂の疲労き裂成長特性は応力レベル、試験片形状によらず応力拡大係数範囲 ΔK で統一的に特性づけられ、その成長特性は周波数に依存する。
- 2) 表面き裂の成長挙動の測定に高温でもピーチマーク法が有効に利用できた。
- 3) 高温における表面き裂の成長速度も、室温の場合と同様に ΔK で特性づけられ、その特性は貫通き裂の特性と一致した。
- 4) 高温における表面き裂の疲労き裂成長特性にも、周波数の影響が認められた。

終わりに本研究の疲労試験機には文部省設備費申請研

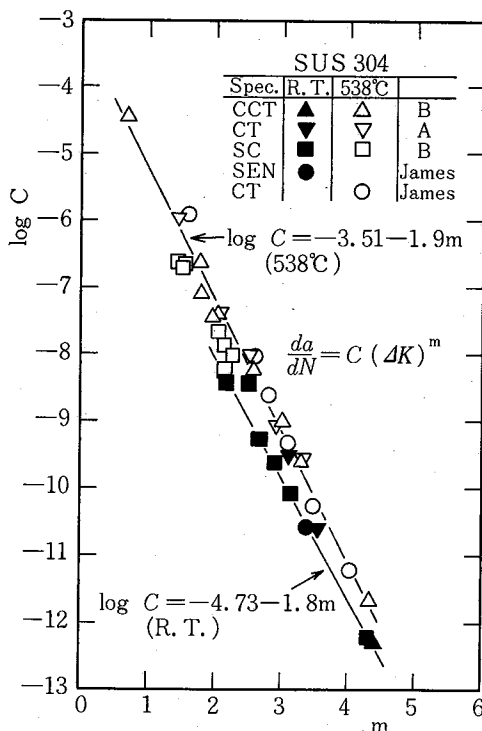


Fig. 8 Relations between C and m of Paris law in SUS 304 stainless steel

究B(54年度)、加熱装置には同科研費一般研究B(55年度)の補助を受けた。記して関係各位に謝意を表する次第である。
 (1982年3月12日受理)

参 考 文 献

- 1) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI
- 2) James, L.A.: International Journal of Fracture, 8, 347 (1972)
- 3) James, L.A. and Knecht, R.L.: Metallurgical Transaction A, 6A (1975)
- 4) Shahinian, P., Smith, H.H. and Watson, H.E.: ASTM STP 520, 387 (1973)
- 5) McEvily, A.J. and Wells, C.H.: Proceedings of Int. Conf. on Creep and Fatigue in Elevated Temp., 9, 7 (1973)
- 6) Raju, I.S. and Newman, J.C.: Engineering Fracture Mechanics, 11, 817 (1979)
- 7) 北川英夫: 日本機械学会誌, 75, 1068 (1972)