炉水環境中における疲労亀裂の発生・成長挙動に及ぼす温度の影響

Influence of Temperature on the Fatigue Crack Initiation and Growth in Reactor Coolant Environment

大阪大学	三澤　樹	Tatsuru　MISAWA	Member
大阪大学	北田　孝典	Takanori　KITADA	Non-Member
大阪大学	中村　隆夫	Takao　NAKAMURA	Member
大阪大学	竹田　敏	Satoshi　TAKEDA	Non-Member
原子力安全システム研究所	釜谷　昌幸	Masayuki KAMAYA	Member

It has been clarified that the fatigue life is reduced in the fatigue test of high-temperature and high-pressure water that simulates PWR reactor coolant environment compared to that in the atmosphere, and temperature, strain rate, etc. affect the decrease of fatigue life. In this study, the influence of crack growth behavior on fatigue life of SUS316 in simulated PWR reactor coolant environment of different temperature was investigated. Fatigue tests were conducted under different temperatures (325℃ and 200℃) in simulated PWR reactor coolant environment with interrupting tests, and cracks generated on the specimen surface were observed with two step replica observation. From the results of observation, the influence of crack growth behavior in different temperature on the fatigue life was clarified. As a result, it was confirmed that the decrease of fatigue life due to high temperature is mainly caused by the increase in crack propagation rate and the acceleration of crack propagation rate by crack coalescence due to the increase of crack initiation number.

Keywords: Environment Assisted Fatigue, Temperature, Crack Initiation, Crack Propagation Rate, Crack Coalescence

1．はじめに

炉水環境中では大気中と比べて材料の疲労寿命が低下することが多くの研究で明らかとなっており，この現象は環境効果と呼ばれている．環境効果は，1980年代に日本で初めて発見され，その後ひずみ速度，温度，溶存酸素濃度等が疲労寿命低下に影響を与えることが明らかとなり，軽水炉の高経年化が進む中で，重要機器の寿命に大きな影響を与える可能性がある事象として着目されてきた．このため環境疲労に関する研究が長年にわたり国際的に行われ，多くの技術知見が得られてきた．これらの状況を受けて世界の多くの国において環境疲労評価の実施が行われている．

炉水環境中での環境疲労評価手法のメカニズムを明らかとするため，藤川ら[1]は炉水環境中での疲労亀裂の成長挙動を直接観察できる2段レプリカ法を新たに開発した．その後，能勢ら[2]は2段レプリカ法を用いて環境効果による疲労寿命低下の影響因子の一つであるひずみ速度が疲労亀裂の発生・進展に及ぼす影響について調査した．その結果，模擬炉水環境中では，ひずみ速度が遅いほど疲労亀裂の発生が促進されること，亀裂同士が合体することにより見かけ上亀裂の進展が加速され，疲労寿命が低下することが確認された．一方で，ひずみ速度と同じく環境効果の影響因子の一つである温度の影響については，温度が高いほど疲労寿命が低下することが確認されていたが，疲労亀裂の発生・進展にどのような影響を与え，疲労寿命が低下するかは明らかにされていなかった．著者ら[3][4]は，模擬炉水環境中において温度の違いが亀裂の発生・成長過程に及ぼす影響について検討してきた．

本研究では，亀裂の発生数と合体の関係について注目をして，模擬炉水環境中における温度の違いが疲労亀裂の発生・成長挙動に及ぼす影響を調査するとともに，疲労寿命に与える影響について考察した．

連絡先：三澤　樹
〒565-0871　大阪府吹田市山田丘2-1
大阪大学大学院工学研究科環境エネルギー工学専攻
E-mail: t-misawa@ne.see.eng.osaka-u.ac.jp

2. 環境中疲労試験と亀裂の観察方法

2.1 疲労試験

加圧水型原子炉（PWR） の一次冷却材模擬環境中で完全両振りの軸方向ひずみ制御試験を実施した．ひずみ範囲は 1.2%，試験温度は 200℃，または 325℃とした．ひずみは時間に対して一定割合で変化させ，増加時は 0.004%/sec，下降時は 0.4%/sec とした．水質条件を Table 1 に示す．

Fig.1 に示す 316 ステンレス鋼の中空試験片を用いた．材料の化学成分を Table 2 に示す．試験片に開けた直径 6 mm の中空孔に PWR 一次冷却材模擬水を循環させて試験を行った．亀裂は試験片内側表面に複数発生・進展する．外側表面まで貫通するまでの繰返し数を疲労寿命と定義した．試験で得られた疲労寿命 N_f は 200℃と 325℃の条件に対してそれぞれ 1525 サイクルと 709 サイクルであった．試験片内側に発生する亀裂の成長過程を観察するために，試験を中断して亀裂の観察を行った．中断したサイクル数を Table 3 に示す．

本試験と同じ供試材を用いて 325℃の条件で中断なしに試験した場合の疲労寿命は 701 サイクル[5]で，本研究の結果とおおよそ一致していた．また，日本機械学会の環境疲労評価手法[6]に従った評価では，200℃での疲労寿命は 325℃の約 2.5 倍と予測され，本研究の試験結果の 2.2 倍（＝1525/709）に近い．

Table 1 Water environment during fatigue tests

Dissolved oxygen(ppb)	Less than 5
Dissolved hydrogen(ppm)	2.7±0.1
H_3BO_3(ppm)	500±13
LiOH(ppm)	2.00±0.07

Table 2 Chemical content of test material (wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
Bal.	0.06	0.5	1.3	0.031	0.027	10.18	16.94	2.02

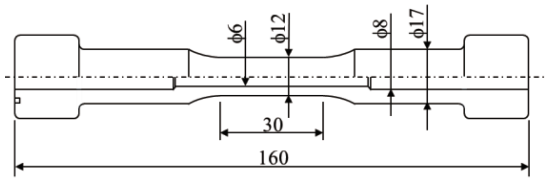

Fig. 1: Geometry of hollow specimen (unit : mm)

2.2 2 段レプリカ法による観察手順

筆者らのグループが開発した開発した 2 段レプリカ法を用いて中空試験片の内表面に発生する疲労亀裂の成長挙動の観察を行った．

2 段レプリカ法の手順は，まず，試験機から取り外した中空試験片の内部に液体状のシリコンゴムを充填することで立体レプリカを採取する（Fig.2 参照）．次に，立体レプリカ表面の凹凸情報（亀裂形状）をフィルムレプリカに転写する．そして，Fig.3 に示すように，フィルムを光学顕微鏡で観察することで亀裂の様子を観察できる．本研究では倍率 200 倍で，試験片を貫通した主亀裂の影響がないよう，主亀裂から離れた位置において，十分な数の亀裂が観察できるよう軸方向 3 mm，周方向 2 mm の領域を観察した．各繰返し数で同じ位置を観察することで，個々の亀裂が成長したり合体したりする様子も同定することができた．

Table 3: Interrupted cycles for crack observation

	200℃ (N_f = 1525 cycles)		325℃ (N_f = 709 cycles)	
Step	**Cycle *N***	***N*/*N*f**	**Cycle *N***	***N*/*N*f**
1	**50**	**0.033**	**25**	**0.035**
2	**100**	**0.066**	**50**	**0.071**
3	**200**	**0.13**	**100**	**0.14**
4	**300**	**0.20**	**150**	**0.21**
5	**500**	**0.33**	**200**	**0.28**
6	**700**	**0.46**	**300**	**0.42**
7	**1000**	**0.66**	**400**	**0.56**

Fig. 2: Photograph of a hollow specimen and 3-dimensional replica

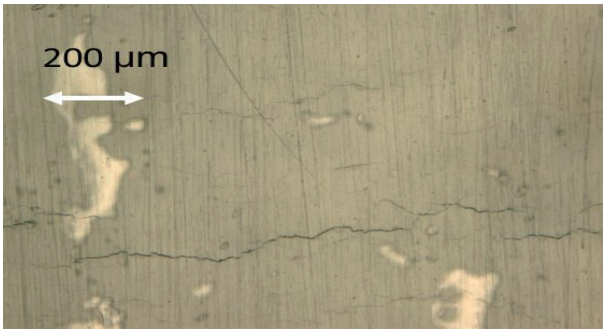

Fig. 3: Cracks on film replica observed by optical microscopy

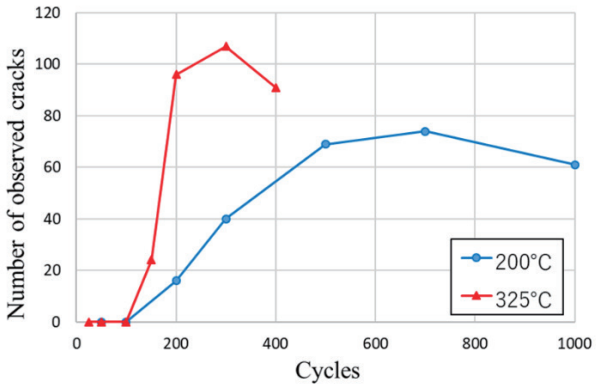

Fig. 5: Transition of number of observed cracks

3. 観察結果

3.1 亀裂数

観察において亀裂と判断できる限界であった 20 μm より長い亀裂を対象に，発生数や長さを調べた．

各サイクルで観察された観察亀裂数（Observed cracks），それまでの発生亀裂数（Initiated cracks）と亀裂の合体数（Coalesced cracks）を Table 4 に示す．合体数は 2 本以上の亀裂が合体した回数を表している．例えば，3 本の亀裂が合体をして 1 本になった場合の合体数は 2 となる．発生亀裂数は試験において発生した数を計数したもので，実際に観察された観察亀裂数は，（発生亀裂数－合体数）となる．観察亀裂数の推移を Fig. 5 に示す．

Table 4 (a): Number of observed cracks, initiated cracks, coalesced cracks (200°C)

Cycles	50	100	200	300	500	700	1000
Observed cracks	0	0	16	40	69	74	61
Initiated cracks	0	0	16	42	75	95	98
Coalesced cracks	0	0	0	2	6	21	37

Table 4(b): Number of observed cracks, initiated cracks, coalesced cracks (325°C)

Cycles	25	50	100	150	200	300	400
Observed cracks	0	0	0	24	96	107	91
Initiated cracks	0	0	0	24	100	133	154
Coalesced cracks	0	0	0	0	4	26	63

3.2 亀裂進展速度

低サイクル疲労の亀裂進展速度はひずみ拡大係数と良い相関を示すことが釜谷ら[7]により報告されている．ひずみ拡大係数は式（1）で示される．中空試験片の内面より発生する亀裂の形状係数 f は参考文献[8]の値を近似した式（2）で算出した．ここで，亀裂のアスペクト比（深さ／長さ）は文献[5]の観察結果より 0.5 と仮定している．

$\Delta\varepsilon$ と a はそれぞれひずみ範囲と亀裂深さで，本研究ではひずみ範囲 $\Delta\varepsilon$ は 1.2%であるのでひずみ拡大係数は亀裂深さのみに依存する．そして，亀裂のアスペクト比が一定であれば，進展速度とひずみ拡大係数の関係は，進展速度と亀裂長さの関係に置き換えることができる．亀裂の進展速度と亀裂長さの関係を Fig. 6 に示す．亀裂の長さの測定分解能の限界などにより測定の誤差が約 2.4 μm 生じると想定されたので，中断サイクル間で進展量が 5 μm 未満の測定結果は除外している．最小二乗法近似により式(3)，(4)が得られた．

$$\Delta K_{\varepsilon} = f\Delta\varepsilon\sqrt{\pi a} \tag{1}$$

$$f = 0.929\left(\frac{a}{t}\right)^4 - 0.836\left(\frac{a}{t}\right)^3 + 0.333\left(\frac{a}{t}\right)^2 + 0.0106\left(\frac{a}{t}\right) + 0.657 \tag{2}$$

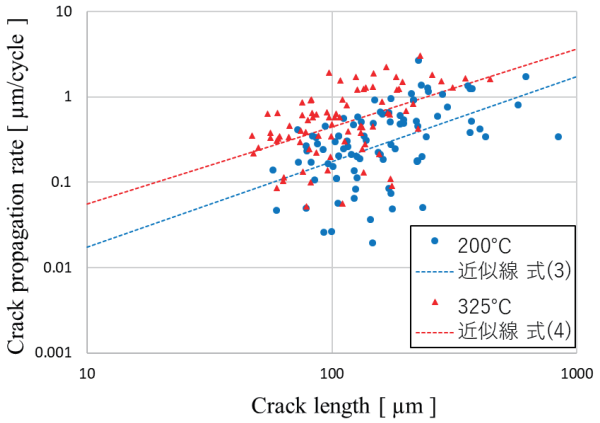

Fig. 6: Crack propagation rate

(200 °C)

$$\frac{dl}{dN} = 1.73 \times 10^{-3}(l)^{1.00} \quad (3)$$

(325 °C)

$$\frac{dl}{dN} = 6.98 \times 10^{-3}(l)^{0.90} \quad (4)$$

3.3 貫通亀裂の進展挙動

Fig. 7 に寿命到達時に試験片を貫通した主亀裂の長さ変化を示す．最終的に貫通した時点では 200℃では 5 本，325℃では 15 本の亀裂が合体していた．300 サイクルにおける主亀裂の亀裂長さに大きな違いはなかった．一方，それ以降の繰返し数では多くの亀裂が合体し，200℃では，700-1000 サイクルで 3 本の亀裂が，325℃では 300-400 サイクルで 10 本の亀裂が合体した．それにより，亀裂が長さも急激に増加した．

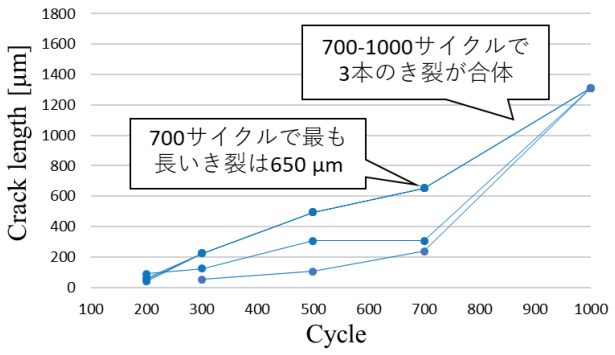

Fig. 7(a): Crack growth behavior of penetration crack (200℃)

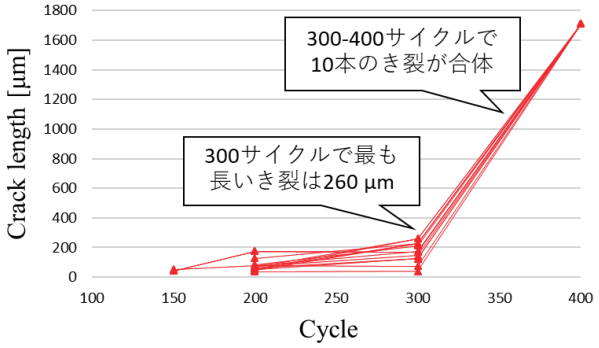

Fig. 7(b): Crack growth behavior of penetration crack (325℃)

4. 考察

4.1 温度の違いが亀裂の発生に及ぼす影響

Fig.5 に示すように，亀裂発生までの潜伏期間に温度による違いは見られなかった．また，疲労寿命全体における潜伏期間（亀裂が発生するまでに要するサイクル数 / 疲労寿命）が占める割合は，いずれの温度でも 10~20%程度であり，疲労寿命は 20 μm の亀裂が貫通するまでの繰返し数にほぼ相当する．そのため，潜伏期間の違いが疲労寿命違いに与える影響は小さく，本試験で得られた温度による疲労寿命の違いは亀裂成長過程の違いに起因すると考えられる．一方で，Fig.4 に示すように，発生亀裂数には温度による差があり，高温ほど亀裂の発生が促進された．

新たに発生した亀裂数の違いが特に大きかったのは 100-200 サイクルであり，観察亀裂数は，200 サイクル時点で 325℃の方が 200℃より 5 倍以上多かった．亀裂数が多いほど亀裂の合体は起こりやすくなると考えられる．実際に，200 サイクル以降の合体数を比較すると，325℃の方が 200℃より合体数が多かった．

4.2 温度の違いが亀裂の進展速度に及ぼす影響

本研究で得られた亀裂進展速度は，合体による見かけの進展加速を含む．常時亀裂を観察しているわけではないので，合体による成長を分離して整理はしていない．Fig. 6 に示すように，いずれの温度でも進展速度のばらつきは大きかったが，325℃の方が 200℃より進展速度が速かった．進展速度の定量的な比較のために，疲労寿命時において予測された亀裂長さが実験と同じになるような進展速度式を逆算で求めた．速度式の指数係数は，式(3)，(4)の指数係数 1.00 と 0.9 の平

均である 0.95 とした．観察結果から 200℃は 200 サイクル，325℃は 150 サイクルで，長さ 50 μm の亀裂が発生すると仮定した[5]．そして，貫通時の亀裂長さ (6 mm) に成長するまでに要する繰返し数が疲労寿命と一致するように，速度式の定数項を決定した．得られた進展速度式を式 (5)， (6) に示す．また，主亀裂の進展速度と他の亀裂の進展速度の比較を Fig.8 に示す．

先に述べたように，疲労寿命は亀裂の成長に要する繰返し数とほぼ等価になる．したがって，疲労寿命は亀裂の進展予測により推定できる．予測に用いる進展速度としては式(3)，(4)によって代表される平均的な進展速度ではなく，主亀裂の進展速度となる．そこで，発生した亀裂が試験片を貫通するまでの進展速度を推定した．

主亀裂の進展速度は他の亀裂と比べて速い傾向にあることが分かった．これは，主亀裂は他の亀裂と比べて最も多く合体をした亀裂であることが原因として考えられる．合体による影響を含んだ進展速度は高温ほど速いことによって，疲労寿命の違いが生じたと考えられる．

(200 ℃)

$$\frac{dl}{dN} = 4.89 \times 10^{-3}(l)^{0.95} \qquad (5)$$

(325 ℃)

$$\frac{dl}{dN} = 1.15 \times 10^{-2}(l)^{0.95} \qquad (6)$$

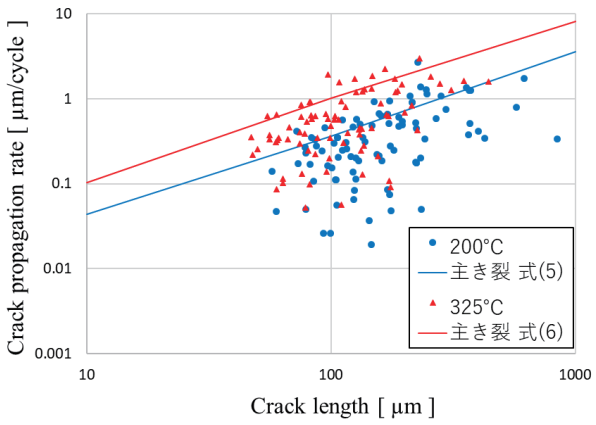

Fig.8 Crack propagation rate of penetration cracks

4.3 合体の寄与による進展速度の加速

温度の変化により亀裂の発生が促進され，発生亀裂数が増加した．しかし，亀裂発生までの潜伏期間の疲労寿命に対する割合は10～20%程度と小さく，潜伏期間の違いが疲労寿命に及ぼす影響も限定的であった．一方，亀裂数が増加することで，亀裂の合体が促進された．その結果，亀裂が貫通するまでの主亀裂の合体数は，200℃の 4 回に対して 325℃では 14 回にまで増加した．ただし，合体数の増加がどの程度疲労寿命の変化に寄与しているかは明確ではなかった．そこで破壊力学試験片を用いて得られた進展速度（CT 試験）の結果を参照することで，亀裂の合体による進展加速の寄与を調べた．

予亀裂からの進展を模擬する CT 試験では，亀裂の合体が起こらないと考えられる．CT 試験片から得られた PWR 一次系模擬水環境での進展速度式を式(7)に示す[9]．

$$\frac{da}{dN} = 1.61 \times 10^{-13} \times {T_C}^{0.63} \times {t_r}^{0.33} \times \frac{(\Delta K)^3}{(1-R)^{1.56}} \qquad (7)$$

ここで，T_c は温度（単位：℃）である．この式に試験条件である 200℃と 325℃を代入することで，進展速度の比を求めた．その結果，325℃の方が 200℃より約 1.4 倍進展速度が速くなった．一方，式(5)と式(6)の比は，おおよそ 2.4 であった．1.4 から 2.4 への増加分は，合体の寄与によると仮定すると，合体による進展加速は 325℃の方が 200℃より約 1.7 （=2.4/1.4）倍大きいことになる．このことから，200℃と 325℃に対する疲労寿命の変化に対する進展速度の増加と合体の寄与がおおよそ 1.4 対 1.7 であると推測された．

5. まとめ

本研究では，炉水環境中における温度の亀裂発生・成長挙動への影響を調べるために，炉水環境を模擬した試験環境で，異なる温度のひずみ制御の疲労試験を実施した．温度の違いが亀裂の発生・成長挙動に及ぼす影響と高温ほど疲労寿命が低下する原因について以下にまとめる．

・亀裂発生までの潜伏期間は，温度の違いによってほとんど変わらないことから，温度の違いによる疲労寿命の違いは，亀裂の成長過程の違いにより生じる．

・温度の違いによる疲労寿命の違いは，単独進展の場合の進展速度の違いだけでは説明がつかず，合体による進展加速の違いが疲労寿命の違いを引き起こすと考えられる．
・高温ほど亀裂密度が高いため合体数が多くなり，合体による進展加速の寄与が大きくなると考えられる．
・環境中で高温ほど疲労寿命が低下するのは，高温ほど亀裂進展速度が速いことに加えて，合体による進展加速の寄与が大きいことによると考えられる．

謝辞

本研究で実施された疲労試験は，神戸工業試験場の協力によって実施された．ここに記して謝意を表する．

参考文献

[1] 藤川亮祐，北田孝典，中村隆夫，釜谷昌幸「316 ステンレス鋼の低サイクル疲労き裂成長における環境効果」，保全学 Vol.15, No2, 2016.
[2] Nose Takahisa, Takanori Kitada, Takao Nakamura, Study on the influence of strain rate on crack initiation and growth in simulated reactor coolant environment of type 316 stainless steel, Pressure Vessels & Piping Conference PVP2018, 2018.
[3] Tatsuru Misawa, Takanori Kitada, Takao Nakamura, Study on the Influence of Crack Growth Behavior on Fatigue Life in Simulated Reactor Coolant Environment of Different Temperature, Pressure Vessels & Piping Virtual Conference PVP2020, 2020.
[4] Terushi Ishizawa, Satoshi Takeda, Takanori Kitada, Takao Nakamura, Masayuki Kamaya, Development of Fatigue Crack Growth Prediction Model in Reactor Coolant Environment, Journal of Pressure Vessel Technology 2018, Vol.140.
[5] M. Kamaya, Environmental effect on fatigue strength of stainless steel in PWR primary water – Role of crack growth acceleration in fatigue life reduction, International Journal of Fatigue, Vol. 55 (2013), pp.102-111.
[6] 日本機械学会，発電用原子力設備規格 環境疲労評価手法（2009 年版）, JSME S NF1-2009.
[7] M. Kamaya, M. Kawakubo, Strain-based modeling of fatigue crack growth – An experimental approach for stainless steel, International Journal of Fatigue, Vol. 44 (2012), pp.131-140.
[8] Committee on Fracture Mechanics, The Society of Material Science, Japan, Stress Intensity Factors Handbook Volume 2 pp.659-662, Pergamon Press, 1987.
[9] Yuichiro Nomura, Kazuya Tsutsumi, FATIGUE CRACK GROWTH CURVE FOR AUSTENITIC STAINL, Vol. 480, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards, 2004.

（2021 年 3 月 9 日受理、2021 年 11 月 17 日採択）