

## 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接部のクリープ損傷評価法の開発

吉田 公亮<sup>\*1</sup> 弥富 政享<sup>\*2</sup> 奥瀬 裕樹<sup>\*3</sup>  
 Yoshida Kimiaki Yatomi Masataka Okuse Hiroki

超々臨界圧ボイラの高 Cr 鋼製配管溶接部にて発生しているクリープ損傷に対して、損傷予測法の確立が喫緊の課題となっている。筆者らは応力多軸性とクリープ損傷の關係に着目し、環状切欠きクリープ試験によって応力多軸性がクリープ損傷に及ぼす影響を明らかにするとともに、数値計算によるクリープ損傷の予測方法を開発し、試験結果との比較を通してその妥当性を確認した。

キーワード：超々臨界圧ボイラ、高 Cr 鋼、クリープ、応力多軸性

## 1. 緒言

エネルギー資源の有効利用、CO<sub>2</sub> 排出量の削減等の観点から長年、石炭火力発電の高効率化への取り組みがなされている。わが国では、1990 年代前半からそれまでの超臨界圧ボイラに代わる高効率なボイラとして過熱器出口蒸気温度 600℃、蒸気圧力 25MPa 程度の超々臨界圧 (USC) ボイラが運転を開始し、現在までに 23 基の USC ボイラが稼動している。USC ボイラの高温部位には水蒸気中の耐酸化性や燃焼ガス中の耐腐食性に優れるとともにクリープ強度が従来の低合金鋼 (2.25Cr-1Mo 鋼、CrMoV 鋼など) に比べて格段に高い改良 9Cr-1Mo 鋼に代表される高 Cr 鋼が採用されている。しかし、近年、高 Cr 鋼製配管の溶接部に形成される溶接熱影響部 (HAZ) 細粒域において破損事例が発生している。このため、ボイラの健全性を確保するためには、HAZ 細粒域におけるクリープ損傷の評価技術を確立し、それに基づき適

切な保守計画を立案することが喫緊の課題となっている。

HAZ 細粒域におけるクリープ破壊は一般にタイプ IV 破壊と呼ばれ、結晶粒界に多数形成されたクリープポイドが成長、連結して破壊が生じる。HAZ 細粒域における応力は母材と溶接金属に拘束されて多軸状態になっており、この応力の多軸性がポイドの発生・成長に影響を及ぼすことが知られている<sup>(1)-(3)</sup>。しかし、HAZ 細粒域の力学的状態がポイドの発生・成長に及ぼす影響については未だ有効な評価手法が確立していないのが現状である。

本稿では、多軸応力が高 Cr 鋼溶接部のクリープ破断時間およびクリープ損傷に及ぼす影響を検討するために、HAZ 再現材の環状切欠きクリープ破断試験を実施した結果を紹介する。また、クリープ損傷の評価法として延性消耗則を用いた連続体損傷力学に基づくクリープ破断および損傷の予測法<sup>(4)</sup>について、試験結果との比較を通してその妥当性を検討した結果を紹介する。

\*1：株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 構造研究部 博士 (工学)  
 (執筆時：IIC 研究開発事業部 基盤技術部 博士 (工学))

\*2：株式会社 IHI 技術開発本部 基盤技術研究所 構造研究部 主任研究員 Ph.D

\*3：株式会社 IHI 技術開発本部 R&D テクノセンター 基盤技術部  
 (執筆時：IIC 研究開発事業部 基盤技術部)

## 2. 環状切欠きクリーブ試験

### 2.1 供試材料

供試材料は改良 9Cr-1Mo 鋼である。本材料の化学組成を表 1 に示す。HAZ 細粒域の組織を再現するために図 1 に示す熱処理を施した。その後、さらに溶接後熱処理として 720℃で 2 時間保持した。図 2 に熱処理によって得られた微視組織を示す。また、硬さは 202HV であり、溶接部における HAZ 細粒域の硬さと同等であることを確認した。

### 2.2 試験方法

多軸応力場におけるクリーブ損傷を検討するため、環状切欠き丸棒試験片を用いたクリーブ試験を実施した。図 3 に環状切欠き丸棒試験片の形状寸法を示す。試験片の標点長さは 34mm である。同一形状の切欠きが試験片中央から対称に 2 箇所加工されている。切欠き形状としては A、B お

よび C の 3 種類を用いた。各切欠き形状の応力集中係数はそれぞれ 1.60、2.36 および 3.59 である。

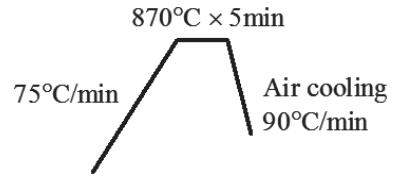


図 1 再現 HAZ 材作製のための熱処理条件

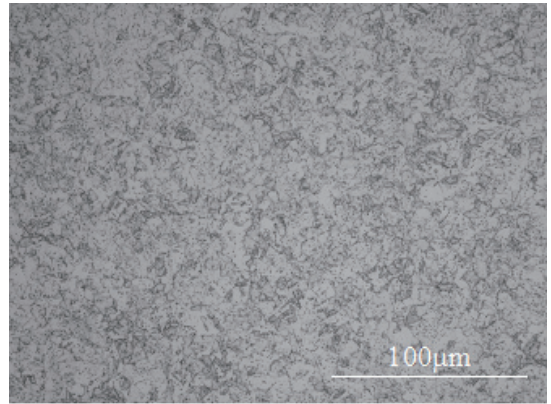


図 2 再現 HAZ 材の微視組織

表 1 改良 9Cr 鋼 -1Mo 鋼の化学組成 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Nb
0.1	0.38	0.42	0.011	0.001	8.43	0.04	0.98	0.2	0.08

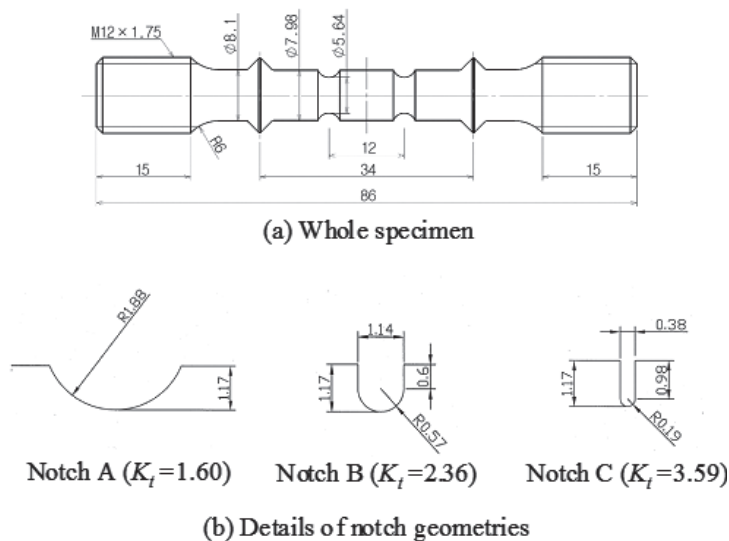


図 3 環状切欠き試験片の形状寸法

### 2.3 試験結果

クリープ試験は 650℃ で実施した。図 4 に切欠き底断面における公称応力および参照応力 (Reference Stress) を用いて破断寿命を整理した結果を示す。ここで、公称応力は負荷荷重を切欠き底断面積で割った応力、参照応力はクリープ定常状態における骨格点のミーゼス相当応力<sup>(5)</sup>である。図中には再現 HAZ 平滑試験片 (Plain Bar) のクリープ試験結果も併せて示す。公称応力を用いて破断寿命を整理した場合、切欠き試験片の破断時間は平滑試験片に比べて長くなっており、切欠き強化であることがわかる。また、強化の割合は切欠きの応力集中係数が大きくなるほど大きくなっている。一方、参照応力を用いた場合、切欠き試験片の結果は平滑試験片の結果の上にはほぼ整理されている。このことから、破断寿命の評価応力としてクリープ定常状態における骨格点のミーゼス相当応力を用いることが有効であることがわかる。

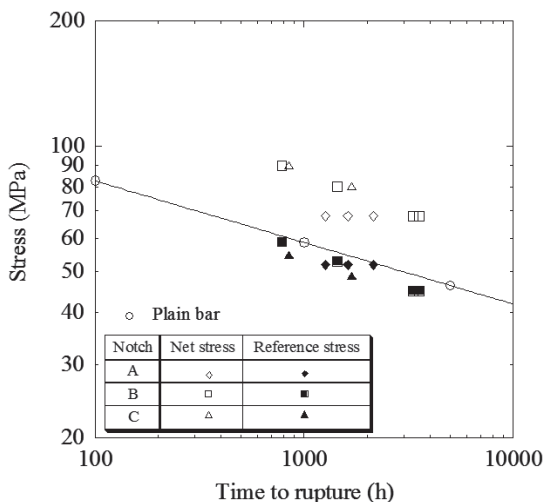


図 4 応力破断曲線

図 5 に破断絞りを破断時間に対して示す。比較のために図には再現 HAZ 平滑試験片の結果も併せて示す。図より、平滑試験片の破断絞りは破断時間によってほとんど変化していないのに対して、切欠き試験片の破断絞りは、破断時間が長くなるほど、また、切欠きの応力集中係数が大きくなるほど低下していることがわかる。このことから応力の多軸性が破断延性に大きく影響を及ぼしているといえる。

破断時間によってほとんど変化していないのに対して、切欠き試験片の破断絞りは、破断時間が長くなるほど、また、切欠きの応力集中係数が大きくなるほど低下していることがわかる。このことから応力の多軸性が破断延性に大きく影響を及ぼしているといえる。

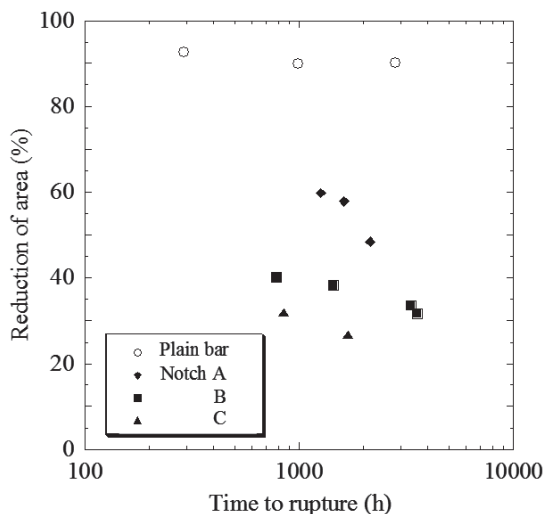


図 5 破断時間と破断絞りの関係

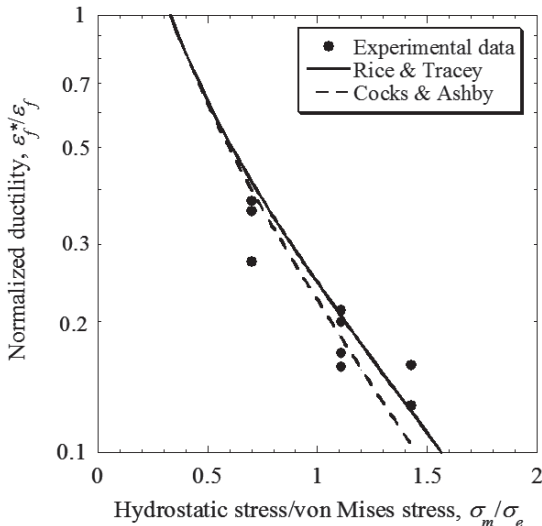
応力の多軸性と破断延性の関係についてはこれまでに多数のモデルが提案されており、なかでも、次にそれぞれ示す Rice と Tracy<sup>(6)</sup> および Cocks と Ashby<sup>(7)</sup> のモデルが代表的である。

$$\frac{\epsilon_f^*}{\epsilon_f} = \frac{0.521}{\sinh(3\sigma_m / 2\sigma_e)} \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_f^*}{\epsilon_f} = \sinh \left[ \frac{2 \left( \frac{n-1/2}{n+1/2} \right)}{3} \right] / \sinh \left[ 2 \left( \frac{n-1/2}{n+1/2} \right) \frac{\sigma_m}{\sigma_e} \right] \quad (2)$$

ここで、 $\epsilon_f^* / \epsilon_f$  は単軸応力下の破断延性に対する多軸応力下の破断延性である。また、 $n$  はノートン則における応力指数、 $\sigma_m$  および  $\sigma_e$  はそれぞれ多軸応力下における静水圧応力およびミーゼス相当応力である。図 6 に、Rice と Tracy および Cocks と Ashby のモデルによる破断延性の予

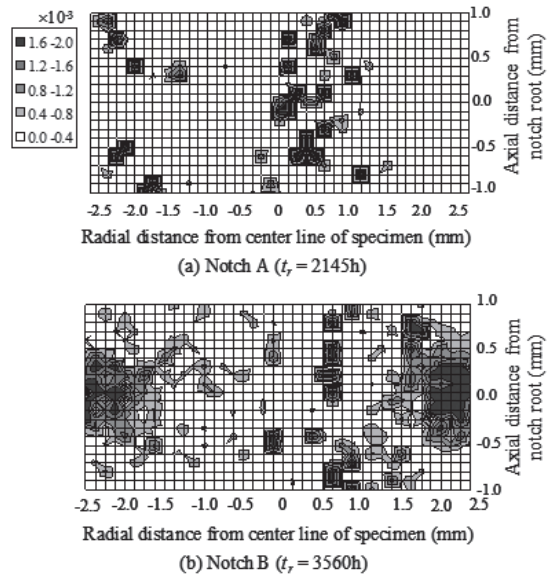
試験結果と試験結果を比較して示す。ここで、試験結果において、単軸応力下の破断延性に対する多軸応力下の破断延性は、平滑試験片および切欠き試験片それぞれの破断絞りから算出される真破断ひずみの比として求めた。その際、平滑試験片の真破断ひずみ  $\epsilon_f$  は一定とし、**図 5** に示した結果より  $\epsilon_f = 2.41$  とした。また、Rice と Tracy および Cocks と Ashby のモデルによる破断延性の予測に際しては、平滑試験片の結果より、ノートン則における応力指数を  $n = 6.88$  とし、また、応力多軸度  $\sigma_m / \sigma_e$  はクリープ定常状態における骨格点における値を用いた。**図 6** より、Rice と Tracy および Cocks と Ashby のモデルによる予測結果はいずれも試験結果と良く一致していることがわかる。



**図 6 破断延性の予測結果と試験結果の比較**

応力の多軸性がクリープ損傷に及ぼす影響を調査するために、破断試験終了後、各試験片の未破断側切欠き部を、中心線を含んだ縦断面で切断し、SEM 写真を撮影した。撮影領域は切欠き底頂点間を中心に軸方向に幅 2mm の帯状領域とした。撮影後、SEM 写真に基づき各点のポイド面積率を算出した。**図 7** に切欠き形状 A および B における

代表的なポイド面積率分布を示す。横軸は中心軸からの距離、縦軸は切欠き底断面からの距離である。図より、ポイドは切欠き底周辺と試験片中央部において優先的に存在しており、切欠きの応力集中が大きくなるにつれ、切欠き底周辺への集中がより顕著になることがわかる。



**図 7 切欠き底におけるポイド面積率の分布**

### 3. クリープ損傷評価

#### 3.1 クリープ構成則および損傷発展則

連続体損傷力学に基づき、多軸応力下におけるクリープ構成則および損傷発展則を定式化する。

ミーゼスの相当クリープひずみ速度が次式のように表されるものとする。

$$\dot{\epsilon}^c = B \frac{\sigma_e^n}{(1-D)^q} \quad (3)$$

ここで、 $B$ 、 $n$  および  $q$  は材料定数である。また、 $D$  は  $0 \leq D \leq 1$  の値を有するクリープ損傷を表す状態変数であり、 $D = 0$  のときに無損傷状態を、 $D = 1$  のときに破損していることを表す。ここでは延性消耗則の概念に基づき、状態変数  $D$  を次式

に示すように破断延性に対するミーゼスの相当クリープひずみと定義する。

$$\dot{D} = \frac{\dot{\epsilon}^c}{\epsilon_f^*} \quad (4)$$

ここで、 $\epsilon_f^*$  は多軸応力下における破断延性である。

任意の位置において、状態変数  $D$  が 1 に達したときにその位置が荷重を負担しなくなるように、各位置における縦弾性係数  $E$  を次式のように定義する。

$$E = E_0(1-D) \quad (5)$$

ここで、 $E_0$  は無損傷状態における縦弾性係数である。

### 3.2 計算結果および考察

前節で定式化したクリープ構成則および損傷発展則を汎用 FEM 解析コード ABAQUS<sup>(8)</sup> に組み込み、切欠き試験片のクリープ破断時間および損傷を予測した。なお、塑性変形および大変形の影響は考慮しないものとした。

FEM 解析においては、幾何学および力学的対称性を考慮して、試験片の軸方向に 1/2 の領域のみを対象として 1 次の軸対称要素を用いてモデル化した。縦弾性係数およびポアソン比はそれぞれ 100.2GPa および 0.3 とした。また、式 (3) に示したクリープ構成則の材料定数は平滑試験片のクリープ試験結果より決定した。表 2 に各材料定数を示す。多軸応力下の破断延性に関しては、式 (2) に示した Cocks と Ashby のモデルを用いて単軸下の応力破断延性より算出した。

表 2 改良 9Cr 鋼再現 HAZ 材の 650°C における材料定数

$B$	$n$	$q$	$\epsilon_f$
$6.70 \times 10^{-17}$	6.88	2.40	0.310

(応力および時間の単位はそれぞれ MPa および h)

図 8 に、任意の要素における状態変数  $D$  が 1 に達したときに試験片が破断したとみなした場合の、破断時間の予測結果を試験結果に対して示す。切欠きが鋭くなるにつれ、すなわち、応力多軸性が増加するとともにクリープ破断の予測結果は試験結果に対して保守的な結果となっている。このことより、Cocks と Ashby のモデルを用いた場合、応力多軸性が増加するとともに応力多軸性による破断延性の低下を大きく見積もってしまうことがわかる。

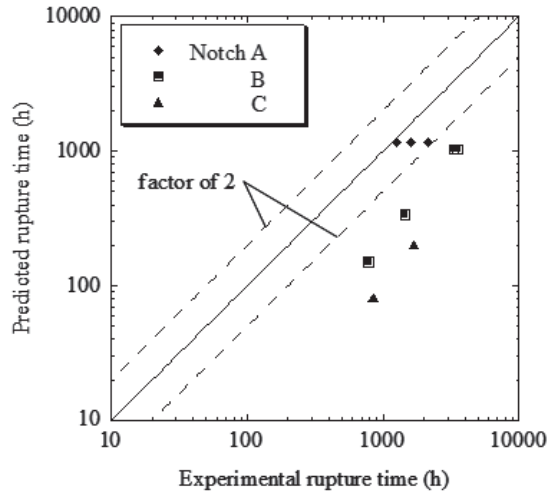


図 8 クリープ破断時間の予測結果と試験結果の比較

図 9 に、破断判定された時点での状態変数  $D$  の分布を示す。切欠きが鋭くなるにつれ、クリープ損傷は切欠き底に集中していく結果となっており、解析結果は試験結果と同じ傾向を示していることがわかる。ただし、試験結果では試験片中央部でもボイドの発生が確認されており、この傾向は解析結果で再現されていない。



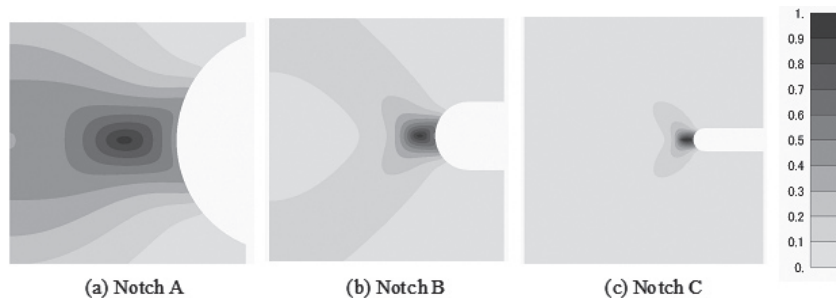


図9 切欠き底における損傷予測結果

#### 4. 結言

本稿では、改良 9Cr-1Mo 鋼再現 HAZ 材の環状切欠きクリープ破断試験を実施し、応力多軸性がクリープ破断時間およびクリープ損傷に及ぼす影響について検討した結果を紹介した。また、クリープ損傷の評価法として延性消耗則を用いた連続体損傷力学に基づく予測方法を用いて、切欠き試験片のクリープ破断時間および損傷を予測した結果を紹介した。得られた結論は以下の通りである。

- ・クリープ破断時間推定のための評価応力として、クリープ定常状態における骨格点のミーゼス相当応力が有効であることがわかった。
- ・応力多軸性がボイドの発生・成長に影響を及ぼすことが確認された。
- ・クリープ破断時間の予測結果は応力多軸性が増加するとともに試験結果に対して保守的な結果となった。この原因としては、多軸応力下における破断延性を算出するために用いた Cocks と Ashby モデルでは、応力多軸性が大きい場合に破断延性の低下を大きく見積もってしまうためと考えられる。そのため、クリープ破断時間の予測精度向上のためには、応力多軸性による破断延性の低下をより高精度に予測することができる方法の構築が必要である。
- ・クリープ損傷の予測結果については、応力多

軸性が高い切欠き底周辺について試験結果と同様の傾向が得られた。ただし、応力多軸性が比較的低い試験片中央部については、試験片ではボイドが確認されたが、予測結果ではそれほど損傷が進展しておらず、異なる傾向となった。

今後、多軸応力下における破断延性の低下モデルについて改良を加え、溶接部 HAZ 細粒域のクリープ損傷に対するより高精度な予測方法の構築を目指していく予定である。

## 参考文献

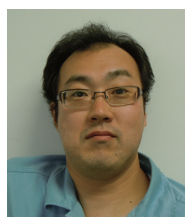
- (1) 緒方隆志、酒井高行、屋口正次：改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手の単軸クリープ破断特性と損傷評価法の提案 材料 第 58 巻 2009 年 pp.94-100
- (2) 本郷宏通、田淵正明、李永奎、高橋由紀夫：Mod.9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷挙動 材料 第 58 巻 2009 年 pp.101-107
- (3) Besson J, Leclercq S, Gaffard V, Gourgues-Lorenzon AF : Analysis of creep lifetime of AMSE Grade 91 welded pipe *Engineering Fracture Mechanics* Vol.44 2009 pp.5075-5100
- (4) Yatomi M, Bettinson AD, O'Dowd NP, Nikbin KM : Modeling of damage development and failure in notched-bar multiaxial creep tests *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure* Vol.27 2004 pp.283-295
- (5) Webster GA, Holdsworth SR, Loveday MS, Nikbin K, Perrin IJ, Purper H, Skelton RP, Spindler MW : A Code of practice for conducting notched bar creep tests and for interpreting the data *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structure* Vol.27 2004 pp.319-342
- (6) Rice JR, Tracey DM : On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields *Jornal of Mechanics and Physics of Solids* Vol.17 1969 pp.201-217
- (7) Cocks ACF, Ashby MF : Intergranular fracture in power law creep under multi-axial stress *Metal Science* Vol.14 1980 pp.395-402
- (8) ABAQUS version 6.10 Analysis user's manual Simulia 2010



株式会社 IHI  
技術開発本部 基盤技術研究所  
構造研究部 博士 (工学)  
(執筆時：IIC 研究開発事業部  
基盤技術部 博士 (工学))

吉田 公亮

TEL. 045-759-2864

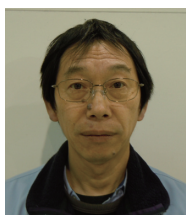


株式会社 IHI  
技術開発本部 基盤技術研究所  
構造研究部 主任研究員 Ph.D

弥富 政享

TEL. 045-759-2864

FAX. 045-759-2210



株式会社 IHI  
技術開発本部 R&D テクノセンター  
基盤技術部  
(執筆時：IIC 研究開発事業部  
基盤技術部)

奥瀬 裕樹