

9%Cr 鋼溶接継手の HAZ 細粒域におけるクリープボイドの発生挙動 に及ぼす応力状態の影響の評価 Evaluation of the Effect for Stress state on Nucleation Behavior of Creep Voids in the fine grained HAZ of 9% Cr Steel Welded Joints.

鶴田 秀樹^a, 吉田 公亮^a, 戸田 裕之^b
Hideki Tsuruta^a, Kimiaki Yoshida^a, Hiroyuki Toda^b

^a株式会社 IHI, ^b九州大学
^aIHI Co., Ltd., ^bKyushu University

高 Cr 鋼溶接継手の損傷は、主に溶接熱影響部 (HAZ: Heat Affected Zone) の細粒域において発生し、タイプ IV 損傷と呼ばれている。タイプ IV 損傷のメカニズムは、クリープボイド(微小な空孔欠陥)が結晶粒界上に発生した後、それらが成長・合体することでき裂状の欠陥となり、最終的な破断に至るものである。そこで、高 Cr 鋼溶接継手の HAZ 細粒域で発生するクリープボイドの発生・成長・連結を予測するシミュレーション手法を構築し、ボイラ配管のクリープ寿命評価を高精度化することで、適切な定期検査時期の設定などのボイラ配管の保守計画に貢献することが期待される。

2017A1547 課題では、高 Cr 鋼溶接部で生じるボイドの時間変化に伴う発生量や成長量を計測し、ボイド発生プロセスに及ぼす応力状態の影響について明らかにするため、ミニチュア試験片を用いたクリープ中断試験と、Spring-8 の BL20XU において放射光 X 線 CT による損傷過程の連続観察を実施した。寿命比 $t/t_r=0\%$, 17.7% , 40% については、前回のビームタイム(2016A1539) [1] で取得しており、それらの継続として、2017A1547 課題では寿命比 $t/t_r=60\%$, 70% の段階において 3 次元観察を実施した。さらに、試験片切欠き形状を模擬した FE 解析により応力状態を取得し、応力状態とボイド個数密度、成長速度の関係性を評価した。以下、得られた成果を記述する。

- (1) 1 本の試験片におけるクリープ損傷過程を連続的に観察し、時間に伴うボイドの個数密度の増加傾向や、個々のボイドの成長速度を定量的に明らかにした。
- (2) ボイド個数密度は、切欠き先端から 50~100 μm の領域で最大となり、ボイド発生分布と最大主応力の分布には相関性が高いことが確認された。

今後は、ボイドの成長挙動に着目し、観察によって得られた個々のボイドの成長速度を算出し、応力状態との関係性について評価していく予定である。さらに、寿命比 $t/t_r=80\%$ 以降では、ボイドの連結が支配的になると想定される。そこで、クリープ試験と観察を継続することで、発生/成長と連結が同時に起こる段階において、それぞれの相互作用を確認することで、タイプ IV 損傷メカニズムに関する知見を取得する予定である。

キーワード： クリープ、ボイド、X 線マイクロトモグラフィ、in-situ 観察

背景と研究目的：

超々臨界圧(USC)ボイラの蒸気配管には、クリープ強度と熱的特性に優れる高 Cr 鋼が使用されている。しかしながら、高 Cr 鋼の溶接継手は母材に比べてクリープ強度が大幅に低く、そのことが問題となっている。高 Cr 鋼溶接継手の損傷は、主に HAZ の細粒域において発生し、タイプ IV 損傷と呼ばれている。タイプ IV 損傷のメカニズムは、クリープボイドが結晶粒界上に発生した後、それらが成長・合体することでき裂状の欠陥となり、最終的な破断に至るものである。そのため、シミュレーションによって配管内部のボイドの発生・進展を予測することができれば、これまでの表面のボイド観察に基づく余寿命診断に比べて、ボイラ配管の余寿命評価の精度・信頼性を格段に向上させることができる。ボイドの発生・進展シミュレーション手法を構築するためには、ボイドの発生・進展メカニズムを詳細に把握することが不可欠である。そのためのツールとして、ボイドの発生状況を 3 次元的に把握することが可能な X 線 CT 観察技術は有効な技術である。な

かでも、高輝度放射光施設 SPring-8 の X 線 CT 観察装置は数 μm 程度のボイドを識別できる分解能を有していることから[2]、SPring-8 の X 線 CT 装置を用いることで従来手法では 2 次元的にし難く把握できなかったボイドの発生・進展挙動を 3 次元的に把握することが可能となり、タイプ IV 損傷のメカニズムの理解が一層深まることが期待できる[3]。そこで、本研究では、ボイドの発生・進展シミュレーション手法を構築することにより、ボイラ配管の余寿命評価を高精度化することを目的とする。そのために、SPring-8 の X 線 CT 装置を用いることで、結晶粒界上におけるボイドの優先的な発生位置を明らかにし、ボイド発生・進展メカニズムを詳細に把握する。それらの実測によって得られる情報を考慮したタイプ IV 損傷の発生と進展に関する物理モデルを構築し、粒界上に作用する応力や時間履歴に対するボイド発生量や成長量を予測するシミュレーションを構築する。

実験方法および解析方法：

供試材およびクリープ試験

供試材には、板厚 80mm の 9Cr-1Mo 鋼 (ASME Grade 91 steel) を用いた。熱処理として、1050°C で 95 分間の焼ならし後、780°C で 95 分間の焼もどしが施されている。供試材の化学組成を表 1 に示す。また、室温および試験温度である 650°C における機械的性質を表 2 に示す。溶接継手は供試材に 3° の V 字開先を加工し、初層 TIG 溶接、残層被覆アーク溶接にて製作した。その後、溶接後熱処理として 740 °C で 3.5h 保持した。図 1 に溶接継手材の溶接部のマクロ組織を示す。1 本の試験片の同じ領域を連続的に観察することにより、クリープ損傷過程におけるボイド個数の増加傾向や、ボイドの成長速度を把握できるように、図 2 に示すミニチュアクリープ試験片を製作した。X 線 CT 観察において、観察可能な視野が 1 mm 程度であるため、試験片切欠き底の最小断面部を 1 mm 以下とした。HAZ 細粒域におけるボイド進展挙動を把握するため、HAZ 細粒域と対応する位置を特定して試験片を採取した。クリープ試験は、温度 650 °C で、公称応力 70MPa (荷重を最小断面で除した値) の条件より、99.99%純度のアルゴンガスを連続的に送入することで、不活性雰囲気中で実施した。同形状の試験片を用いたクリープ破断試験により、破断寿命 t_r は 1705h であった。試験時間を破断時間で除して求められる寿命比 t/t_r が 17.7%, 40%, 60%, 70% の段階でクリープ試験を中断し、切欠き底に生じるクリープ損傷を X 線 CT により非破壊的に観察した。なお、寿命比 $t/t_r=0\%$, 17.7%, 40% については、前回のビームタイム (2016A1539) [1] で取得しており、それらの継続として、2017A1547 課題では寿命比 $t/t_r=60\%$, 70% の段階において 3 次元観察を実施した。

表 1 化学組成 (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.1	0.37	0.43	0.014	0.002
Cr	Ni	Mo	V	Nb
8.55	0.04	0.98	0.19	0.08

表 2 機械的特性 (室温, 650°C)

	0.2% proof stress MPa	Tensile strength MPa	Elongation %	Reduction of area %
RT	528	687	22.7	74.8
650°C	194	271	28.7	93.7

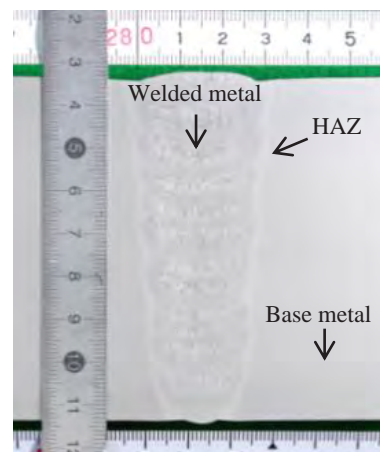


図 1. 改良 9Cr-1Mo 鋼の溶接継手材

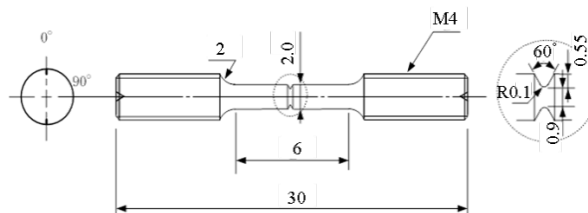


図 2. ミニチュアクリープ試験片

放射光 X 線 CT によるボイド観察方法

高輝度放射光施設 SPring-8 の BL20XU において、ミニチュアクリープ試験片の切欠き底に生じるボイドの3次観察を行った。X 線 CT 観察のセットアップを図 3 に示す。検出器は CMOS (ORICA FKASH), 20 倍の光学レンズ, Lu₂SiO₅:Ce シンチレータで構成される。X 線エネルギーは 37.7 keV, 試料と検出間距離は 65 mm に設定した。露光時間は 300 msec である。試料が 180°回転する間に 1800 枚の透過像を撮像した。1 スキャンあたりに必要とされる時間は、15 分間であった。1 辺が 1 mm 程度のサンプルを用いた場合、得られた X 線 CT 画像の 1 画素あたりのサイズは 0.5 μm 程度となった。

有限要素法による弾クリープ解析方法

X 線 CT 観察によって得られたクリープ損傷分布と応力状態の関係性を把握することを目的として、シミュレーションにより試験片切欠き部に生じる応力分布を計算した。シミュレーションには汎用有限要素 (FE) 解析コード ABAQUS 2016 を用いた[4]。図 4 に示すように、軸対称要素により FE 解析モデルを作成した。材料物性として、縦弾性係数 E は 125 GPa とし、ポアソン比 ν は 0.3 とした。クリープ構成式には、クリープひずみ速度と応力の関係をべき乗で近似している式(1)に示す Norton 則を用いた。ここで、クリープ係数 B とクリープ指数 n は、標準的な丸棒試験片を用いたクリープ試験から取得し、それぞれ $4.53 \times 10^{-15} (\text{MPa}^{-n} \text{h}^{-1})$, 5.97 とした。

$$\dot{\epsilon}_{\min} = B\sigma^n \quad (1)$$



図 3. 放射光 X 線 CT 装置の外観図

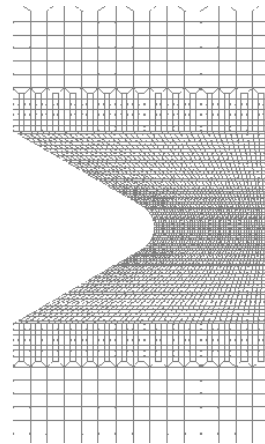


図 4. 有限要素解析モデル

実験結果および解析結果：

クリープ損傷の連続観察および定量評価結果

図 5 にミニチュアクリープ試験片の切欠き部周辺におけるボイド観察結果 (X 線 CT 断層像) を示す。各寿命比において同じ領域を表示している。寿命比 $t/t_r = 0\%$ の段階では、数個の介在物が確認される。寿命比 $t/t_r = 17.7\%$ の段階で、微小なボイドが検出される。さらに、寿命比 t/t_r の増加に伴って、ボイド個数の増加やサイズの増大が見られる。寿命比 $t/t_r = 60\%$ の段階では、介在物を起点として発生したボイドが観察されており、ボイド発生に及ぼす介在物の影響が確認される。さらに、寿命比 $t/t_r = 70\%$ の段階では、介在物を起点としたボイドが、その他のボイドよりも粗大に成長している様子が確認される。これは、介在物周囲において、局所的に応力多軸度が高められることにより成長が促進されたことが原因として想定できる。

画像解析により、X 線 CT 画像からボイドの個数、表面積、体積、重心座標、球形度を定量的に計測した。さらに、切欠き先端から 50 μm 毎に空間領域を設定し、ボイドの個数密度、体積率、平均直径を算出した。ボイド個数密度を切欠き先端からの距離で整理した結果を図 6 に示す。ボイド個数密度の最大値は切欠き先端から 50 μm ~ 100 μm の範囲であることが示された。ただし、寿命比 $t/t_r = 60\%$ と $t/t_r = 70\%$ の比較では、 $t/t_r = 70\%$ の方がボイド個数密度は少ない。50 ~ 100 μm の範囲でボイド連結が顕著に生じており、連結により個数が減少したことが要因として考えられる。

弾クリープ解析結果

有限要素解析により求めた切欠き部周辺に働く最大主応力分布(MPa)を図7に示す。図6の観察結果と図7の計算結果の比較より、それぞれの最大値が切欠きからの距離で50~100 μm の範囲に位置していることから、ボイド個数密度と最大主応力に高い相関性が示された。最大主応力をベースとしたボイド発生モデルが有効的であることが示唆された。

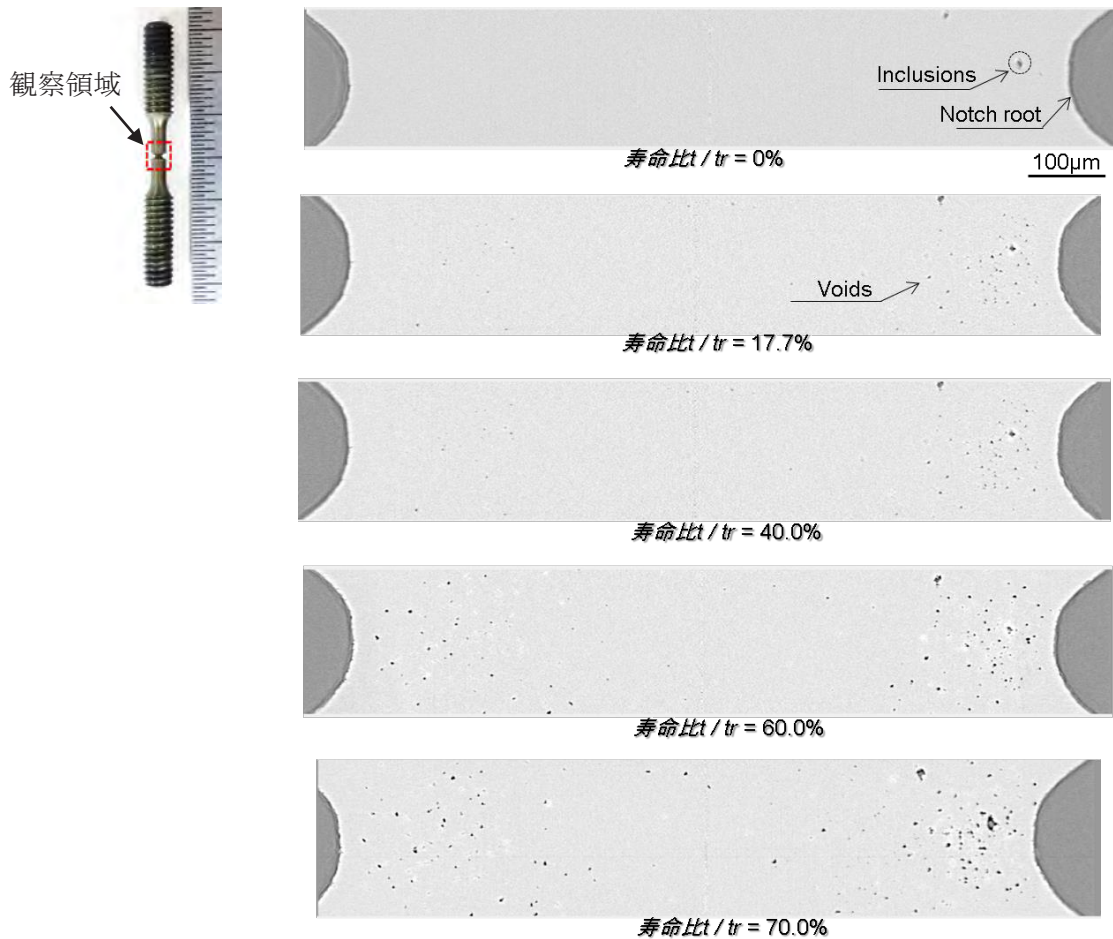


図5. 試験片切欠き部におけるボイド発生・進展挙動の連続観察

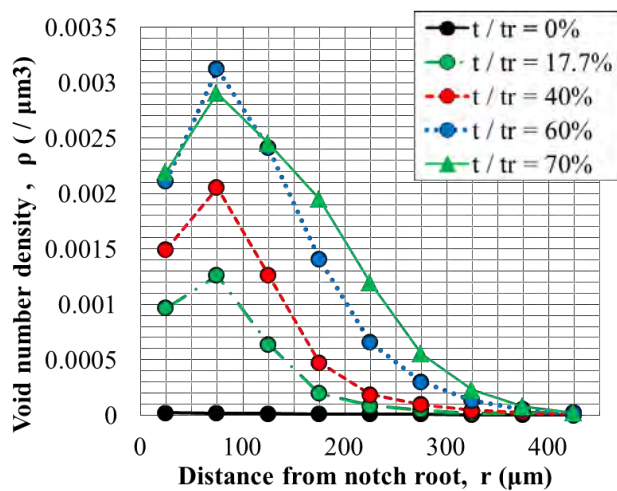


図6. ボイド個数密度分布

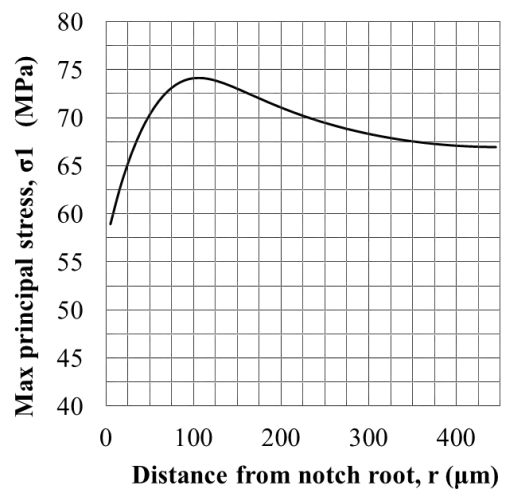


図7. 最大主応力分布

結論：

2017A1547 課題では、高 Cr 鋼溶接部で生じるボイドの時間変化に伴う発生量や成長量を計測し、ボイド発生プロセスに及ぼす応力状態の影響について明らかにするため、ミニチュア試験片を用いたクリープ中断試験と、SPring-8 の BL20XU において放射光 X 線 CT による損傷過程の連続観察を実施した。寿命比 $t/t_r=0\%$, 17.7% , 40% については、前回のビームタイム(2016A1539)[1]で取得しており、それらの継続として、2017A1547 課題では寿命比 $t/t_r=60\%$, 70% の段階において 3 次元観察を実施した。さらに、試験片切欠き形状を模擬した FE 解析により応力状態を取得し、応力状態とボイド個数密度、成長速度の関係性を評価した。以下、得られた成果を記述する。

- (1) 1 本の試験片におけるクリープ損傷過程を連続的に観察し、時間に伴うボイドの個数密度の増加傾向や、個々のボイドの成長速度を定量的に明らかにした。
- (2) ボイド個数密度は、切欠き先端から $50\sim 100\ \mu\text{m}$ の領域で最大となり、ボイド発生分布と最大主応力の分布には相関性が高いことが確認された。

今後は、ボイドの成長挙動に着目し、観察によって得られた個々のボイドの成長速度を算出し、応力状態との関係性について評価していく予定である。さらに、寿命比 $t/t_r=80\%$ 以降では、ボイドの連結が支配的になると想定される。そこで、クリープ試験と観察を継続することで、発生/成長と連結が同時に起こる段階において、それぞれの相互作用を確認することで、タイプ IV 損傷メカニズムに関する知見を取得する予定である。

参考文献：

- [1] 鶴田秀樹:平成 28 年度 SPring-8 産業新分野支援課題・一般課題(産業分野)実施報告書 2016A、2016A1539.
- [2] C.Gupta et al. *Materials.Science & Engineering A*, **24**, 525-538 (2013).
- [3] H.Tsuruta et al. *APCFS2016*, 286-287 (2016).
- [4] Abaqus version 2016, *Analysis user's manual*, Simulia, 2016