

実機肉厚寸法の溶接部におけるクリープボイドの成長・合体挙動の評価 Evaluation of Creep Voids Behavior (Growth, Coalescence) with Thickness Size of Actual Equipment for High-temperature Environment

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

高クロム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、高クロム鋼溶接継手の HAZ 細粒域で発生するクリープボイドの成長・合体を予測するシミュレーション手法を構築し、ボイラ配管の適切な保守計画を立案することを目的とする。クリープ試験の中断材を用い、BL20XU において X 線マイクロトモグラフィを用いたクリープボイドの 3 次元観察を実施した。寿命消費率の上昇に伴い、ボイドおよび析出物の発生量は HAZ 細粒域の辺りで局在化する様子が確認された。ミニチュアクリープ試験片のクリープ変形過程の ex-situ 観察を実施し、同一試験片におけるボイドの発生・進展挙動を観察した。現状、ボイドと析出物が CT 画像上で検出されており、両者を区別できていないことが今後の課題として挙げられる。

キーワード： クリープ、ボイド、X 線マイクロトモグラフィ

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クロム鋼が使用されている。しかしながら、高クロム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。高クロム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[1]、SPring-8 の X 線 CT 装置を用いることで従来手法では 2 次元的にしか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。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できるシミュレーションを構築する。

実験：

供試材料およびクリープ試験条件

本研究に用いた供試材料は、SCMV28 鋼である。2 種類の試験片形状によるクリープ試験の中

断試験を実施し、タイプ IV 損傷材におけるクリープボイドの 3 次元観察を行った。図 1(a)は、実機のボイラ配管と同等の肉厚を有する平板継手試験片であり、より実機に近い損傷挙動を再現することが可能である。試験温度 650°C、応力 60 MPa でクリープ試験を実施し、所定の寿命消費率のクリープ中断材を製作した。図 1(b)で示すように板厚方向に沿って、微小サンプルを採取した。微小サンプルは、溶接金属、溶接熱影響部、母材の 3 種類の相を含んでいる。観察領域は HAZ 部を対象としているが、組織観察のみでは HAZ 部と母材部を明確に区別することができないため、ビッカース硬さ試験装置による硬さ計測を行い、硬さ分布を基にして観察領域を決定した。図 2 の硬さ計測結果に示すように、溶接線から硬さ最小となる位置までの範囲を観察領域とした。2015A1712 では、寿命消費率 0%、20%、80%の段階において CT 観察を行った。また、図 3 は試験評価部の直径が 1 mm 以下のミニチュアクリープ試験片であり、切断加工を伴わず CT 観察をすることが可能な形状をしている。したがって、クリープ中断試験と CT 観察を交互に繰り返すことが可能である。それを最終破断に至るまで複数回に亘って繰り返すことにより、一本の試験片におけるクリープ損傷の時間発展挙動を 3 次的に観察することが可能である。2015A1712 では、試験温度 650°C、応力 60 MPa でクリープ試験を実施し、試験時間 160hr と 320hr の段階において試験片評価部に含まれるボイドを観察した。



図 1. (a)平板継手試験片の外観図

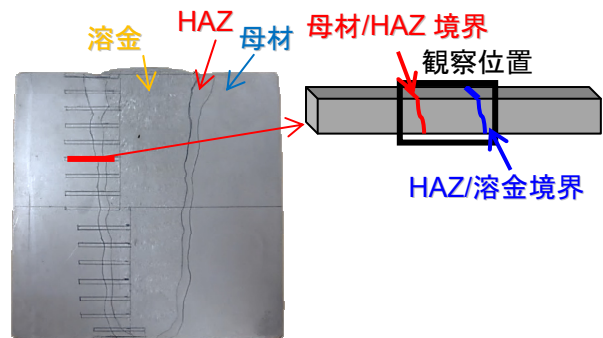


図 1. (b)クリープ中断材における微小サンプルの採取位置

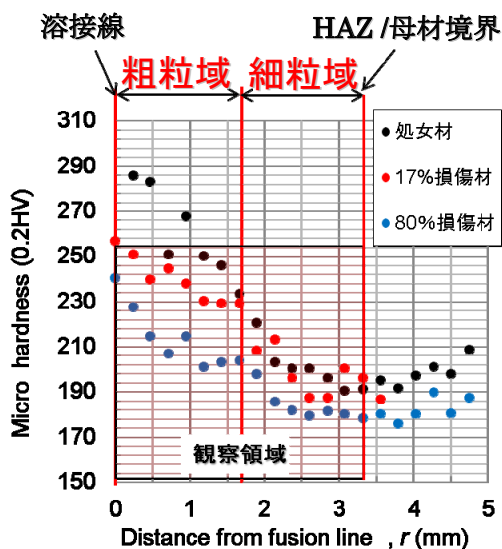


図 2. 各寿命消費率における硬さ計測結果



図 3. ミニチュアクリープ試験片の外観図

放射光 X 線マイクロトモグラフィの観察条件

高輝度放射光施設 SPring-8 の BL20XU において、単色光 X 線マイクロトモグラフィを実施した。X 線 CT 観察のセットアップを図 4 に示す。検出器は CMOS(ORICA FKASH)、20 倍の光学レンズ、 $\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{Ce}$ 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、800msec である。試料が 180°回転する間に 1500 枚の透過像を撮像した。時間分解能としては、1 スキャンあたり 25 分間の時間を要する。X 線イメージングによって得られた画像の画素あたりのサイズは 0.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ 程度である。

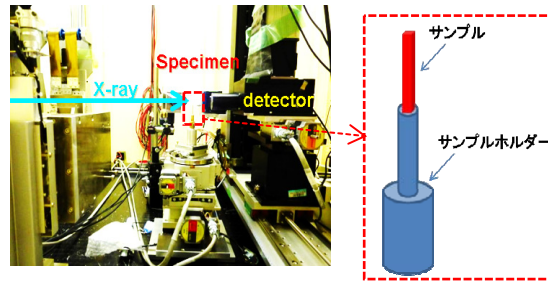


図 4. X 線 CT 観察のセットアップ

結果および考察：

2015A1712 では、クリープボイド以外にも材料中に含まれる介在物や析出物が X 線 CT 画像上で検出されていることが分かった。現状、両者は濃淡値から区別できていない。図 5 に平板継手試験片の各損傷率における X 線 CT 観察結果を示す。溶接線から硬さ最小位置の間を複数回に亘って撮像している。クリープボイドおよび介在物/析出物を赤色で示し、素材を灰色で示す。損傷率の上昇に伴い、ボイドおよび介在物の発生量が増加していることが分かる。損傷率 17.7%では、HAZ 部におけるボイドおよび析出物の分布はばらついているが、一方で、損傷率 80.0%では、HAZ 部の少し母材よりでボイドと析出物の分布が局在化していることが確認できる。その領域が HAZ 細粒域と一致していることからタイプ IV 損傷が再現できていると言える。図 6 にサンプル内に含まれるボイドおよび析出物の定量評価結果を示す。長手方向に 0.25 mm 刻みでグループを定義し、そのグループ毎に平均直径および体積率を計測し、硬さ分布との関係性について整理した。図 6(a) は平均直径と硬さ分布の関係を示す。処女材を除く 2 種類のクリープ中断材において、HAZ 細粒域で変形が拘束されることにより、HAZ 細粒域でボイドおよび析出物が優先的に成長していることが確認される。平均直径の最大値は、処女材で 3.02 μm 、損傷率 17%で 4.98 μm 、損傷率 80%で 5.44 μm であった。一方で、体積率の最大値は、処女材で 0.021%、損傷率 17%で 0.024%、損傷率 80%で 1.99%であった。参考文献[2]では、同鋼材の最終破断時(損傷率 100%)におけるボイド面積率は 0.8%と報告されている。このことから、析出物が CT 画像上で検出されており、ボイド発生量の過大評価の要因となっている。ボイドの発生・進展メカニズムを把握する上で、両者を区別することが今後の課題として挙げられる。図 7 にミニチュアクリープ試験片の切欠き部における X 線 CT 観察結果を示す。図 7(a)は切欠き部の CT 断層像を積層し、3 次元レンダリングをした結果である。一般的にクリープボイドの成長は応力多軸度の影響を受けるため、本試験片形状では切欠き底部において、優先的にボイドの発生および成長が促進される。図 7(b)および(c)に切欠きの最小断面において、高さ方向に 100 枚の断層像を重ねたものを示す。それぞれクリープ試験時間 160hr と 320hr における中断後の観察結果である。160hr から 320hr にかけてクリープ変形が進行することで、ボイド個数が増加していることがわかる。

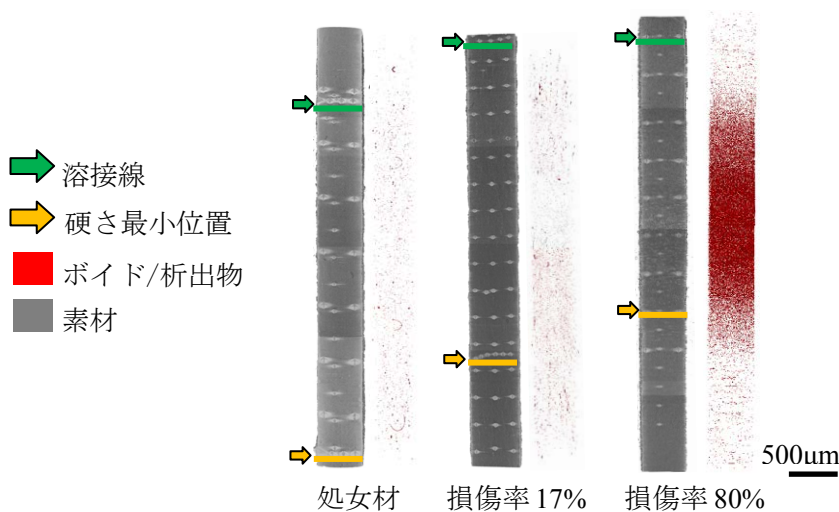


図 5. 各寿命消費率におけるクリープボイドおよび析出物の発生分布

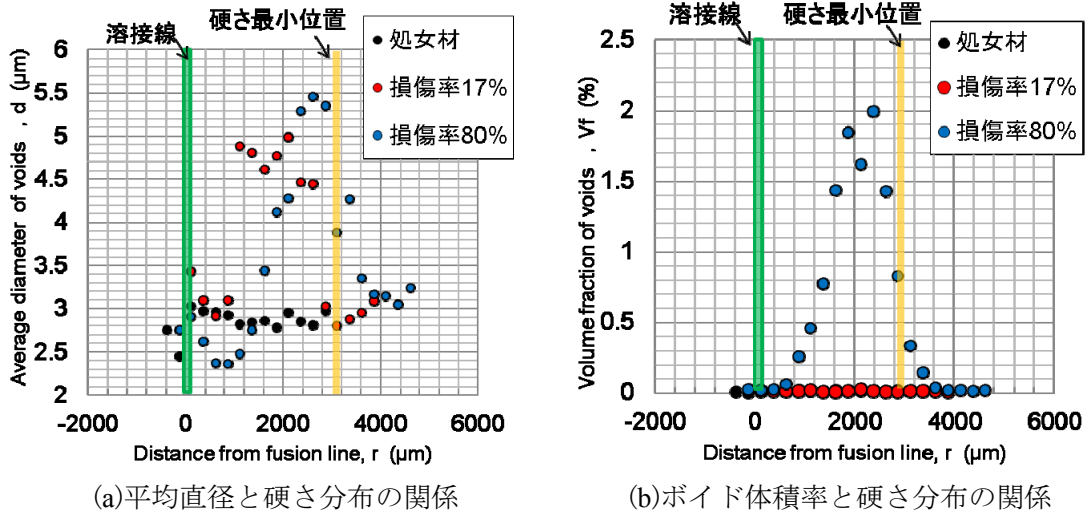


図 6. ボイドおよび析出物の定量解析結果

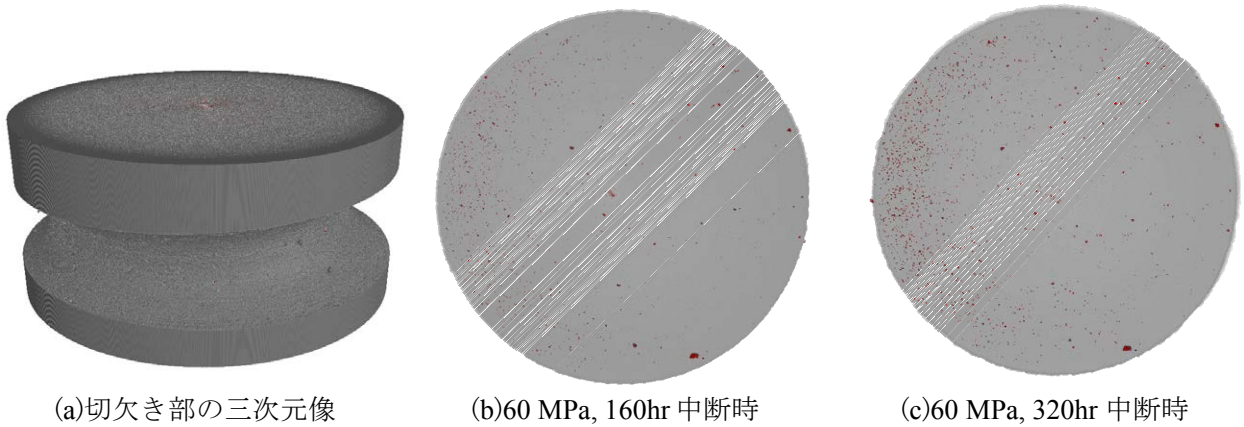


図 7. ミニチュアクリープ試験片の切欠き部の CT 観察結果

今後の課題：

X 線 CT 画像上に、クリープボイドと析出物が検出されており、両者を画像上で濃淡レベルから区別することができていない。この対策としては、ボイドと析出物の成長挙動の違いに着目して、両者を区別する。具体的には、荷重を負荷しない状態で高温環境下にサンプルがさらされる場合は、析出物のみが成長すると想定されるため、析出物成長挙動を把握することができる。一方で、ミニチュアクリープ試験片を用いたクリープ変形過程の *ex-situ* 観察を行うことにより、ボイドと析出物が重畳した成長挙動を観察することができる。後者から前者を差し引くことにより、ボイドのみの成長挙動を把握できると予想している。これらの予測から、実際に両者が区別できるかどうかを今後検討していきたい。

参考文献：

[1] C.Gupta et al., *Materials.Science & Engineering A*, **24**, 525-538 (2013).
 [2] 改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ損傷評価法の開発, 電力中央研究所(2006).