

高温環境下におけるクリープボイドの発生・成長・合体挙動の評価 Evaluation of Creep Voids Behavior (Nucleation, Growth, Coalescence) under 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 Cr 鋼溶接継手の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三次元観察を実施した。応力多軸度が高い切欠き底において、クリープボイドの発生が多数発生している様子が確認された。

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(Super Photon ring-8 GeV)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：

高輝度放射光施設 SPring-8 の BL20XU において、単色光 X 線イメージングを行い、タイプ IV 損傷材のクリープボイドの 3 次元観察を行った。供試材料は SCM V28 鋼である。図 1 に試験に用いた平板溶接継手試験片を示す。試験温度 650°C、応力 60 MPa のクリープ中断試験を実施した。経産省通達における SCM V28 鋼継手のクリープ寿命曲線[2]より、本試験条件における破断時間は 2400 h と予測される。予想破断時間の 20%(480 h)で試験を中断し、図 2 のように、X 線 CT 観察用のサンプルを採取した。また、図 3 に示すように、クリープ試験の破断材(試験温度 675°C、応力 60 MPa)からも観察用サンプルを採取した。クリープ損傷の時間発展挙動を 3 次元的に把握するた

め、ex-situ 観察を検討している。これは、クリープ試験のある段階で試験を中断した後に CT 観察を行い、それを最終破断に至るまで複数回繰返す手法である。試験評価部が $\phi 1$ mm 以下のミニチュアクリープ試験片を採用した。応力の多軸性と損傷量の関係性を把握するため、評価部に切欠きを導入し、切欠き底の応力多軸度を高めた。X 線 CT 観察のセットアップを図 4 に示す。X 線エネルギーは 37.7 keV、試料と検出器間距離を 50 mm に設定した。一画素あたりのサイズは $0.434 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 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 5 分間の時間を要する。検出装置は CMOS カメラ、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。



図 1. 平板継手試験片の外観

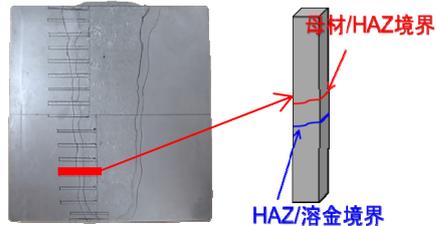


図 2. クリープ中断材における SPring-8 用試料の採取位置

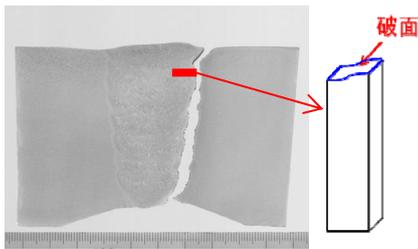


図 3. クリープ破断材における SPring-8 用試料の採取位置

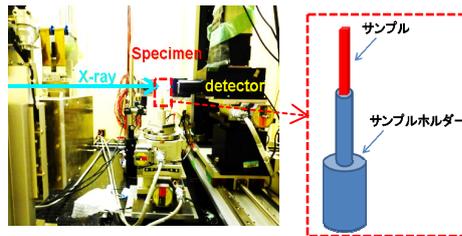


図 4. X 線 CT 観察のセットアップ

結果および考察：

図 5 に平板継手試験片のクリープ寿命比 20%材における X 線 CT 観察結果を示す。紙面奥行き方向に厚さ $43.4 \mu\text{m}$ の断層像(100 枚分)を重ねて 3 次的に描写している。クリープポイドを赤色で示し、素材を灰色で示す。溶接金属と粗粒 HAZ の境界面から細粒 HAZ と母材の境界面の間を複数回に亘って観察した。クリープ寿命比 20%の段階において、既に球状のポイドが発生していることがわかる。しかしながら、HAZ の細粒域でポイドの発生が局在化する様子は確認できなかった。クリープ損傷の初期段階では、材料組織に関係なくクリープポイドが発生し、さらにクリープ損傷が進むと変形拘束によって細粒域で最終的に破断するような破壊様式が観察されるのではないかと考えられる。図 6(a)と(b)に、同試料の紙面奥行き方向において異なる領域の 3 次元観察結果をそれぞれ示す。ポイド計測範囲をいかに設定するかによって、ポイド体積率や個数密度の計測結果が異なることが示された。また、図 7 に平板継手試験片のクリープ破断材における 3 次元観察結果を示す。20%中断材と同様に、紙面奥行き方向に厚さ $43.4 \mu\text{m}$ の断層像(100 枚分)を重ねて 3 次的に描写している。破面近傍で高密度なクリープポイドが確認される。ポイド発生分布が破面近傍では多く、破面から遠ざかるのに伴って減少していく様子が観察される。図 8 に切欠き入りミニチュアクリープ試験片における 3 次元観察結果を示す。平板継手試験片の観察結果と同様に、紙面奥行き方向に厚さ $43.4 \mu\text{m}$ の断層像(100 枚分)を重ねて 3 次的に描写している。青の点線で示している位置が、試験片の中央位置を示しており、切欠き底により近い領域でクリープポイドが多数発生している様子が確認できる。クリープポイドの発生量と応力多軸度の相関について、今後明らかにしていく。

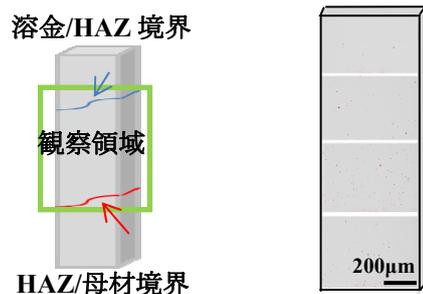
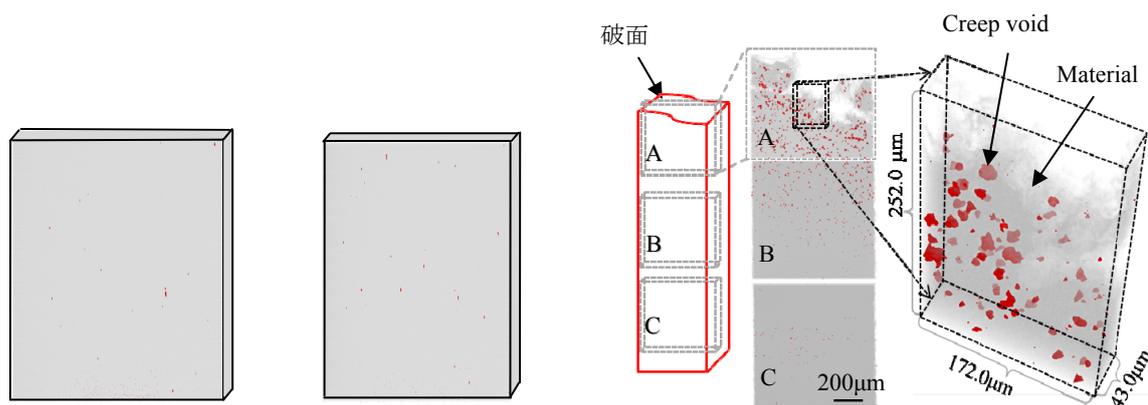


図 5. 寿命比 20%材におけるクリープボイドの 3 次元観察結果
(赤色：クリープボイド、灰色：素材)



(a)1000 枚目から 1100 枚目 (b)1100 枚目から 1200 枚目
図 6. 寿命比 20%材の任意領域の 3 次元観察結果

図 7. 破断材におけるクリープボイドの 3 次元観察結果

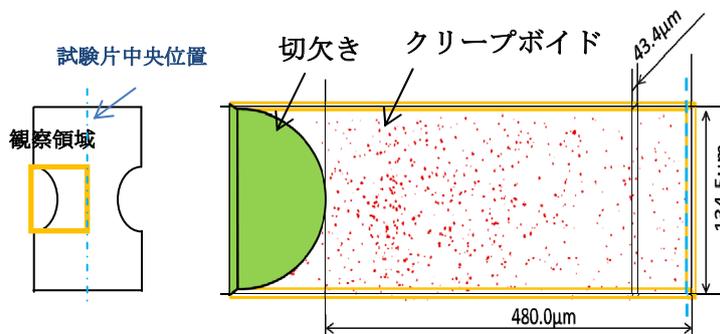


図 8. ミニチュアクリープ試験片の切欠き底で発生しているクリープボイドの 3 次元観察結果

今後の課題：

X 線 CT 画像からクリープボイドの大きさや個数密度を定量的に計測し、応力解析によって計算される切欠き底の応力状態とクリープボイドの発生量との関係性について検討を行う。観察結果より、ボイドの発生および成長モデルを構築し、ボイド進展シミュレーションへ実装する。ミニチュアクリープ試験片においては、切断を伴わない CT 観察が可能である。クリープ中断試験と X 線 CT 観察を繰り返すことにより、クリープボイドが成長や合体する様子を観察し、クリープボイドの進展メカニズムを明らかにする。

参考文献：

- [1] C.Gupta et al. *Materials.Science & Engineering A*, **24**, 525-538 (2013).
- [2] 発電用火力設備における高クロム鋼に対する寿命評価式について，経済産業省通達(2014).