長期使用改良 9Cr-1Mo 鋼溶接部のクリープ強度特性評価†

緒方 隆志* 渡邊 章人**

Evaluation of Creep Strength Property of Long-Term Used Mod.9Cr-1Mo Welded Joint

by

Takashi OGATA* and Akihito WATANABE**

It is an important subject to characterize creep strength property of long-term operated Mod.9Cr-1Mo welded joints which are widely used for pipes in USC power plants for accurate creep damage assessment. Miniature creep specimens with 1mm diameter were machined from base metal, weld metal and heat affected zone(HAZ) of an about 80,000 hours operated longitudinal welded pipe with X shape weld groove. Creep tests of these miniature specimens were performed in inert gas atmosphere by the specially developed creep testing machine. Creep strengths of the base metal and the HAZ in the long-term used welded pipe were similar to those in an undamaged welded joint. On the other hand, creep strain rate of the weld metal in used welded pipe is much faster than that in the undamaged welded joint indicating degradation of microstructure during operation. Standard size welded joint specimens were taken from near surface and X-shape regions of the welded pipe to understand creep rupture strength. Creep rupture time of the standard welded joint specimens taken from the used welded pipe was much shorter than that of the undamaged welded joint. The standard welded joint specimens taken from the X shape region ruptured at HAZ and those taken from the near surface region ruptured at weld metal. It was suggested by finite element creep analyses of the standard welded joint specimens that the highest axial stress occurred at HAZ in the specimen taken from X-region causing Type IV failure and that occurred at weld metal in the specimen taken from near surface region causing failure at the weld metal.

Key words:

Miniature specimen, Mod.9Cr-1Mo steel welded joint, Long term operation, Creep strength, Type IV damage, Finite element analysis

1 緒 言

改良 9Cr-1Mo 鋼は、高温強度および耐食性に優れることから、蒸気温度が 600℃程度の超々臨界圧火力発電ボイラ配管に使用されている。しかしながら、同鋼製ボイラ配管溶接部において熱影響部細粒域(以下では HAZ と称す)でのクリープ損傷、所謂 Type IV 損傷が他部位のクリープ損傷に比べて早期に進行することが問題となっている。これまでの改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手を対象とした研究^{1)~3)}において、母材に比べ溶接継手が短時間で Type IV 破断を呈すること、クリープ損傷過程では HAZ において、ボイドが発生・成長することにより損傷が進行し、これらの合体が破損を招くことなどが明らかにされている。著者ら^{4)~6)}は、これまでに長手および周溶接継手管を対象に内圧クリープ試験および有限要素解析を実施し、溶接継手内の応力分布やクリープひずみ分布と Type IV 損傷との関係を明らかにしてきた。このような現状において、使用中のボイラ配管の突然の破損によるプラント運用停止などを回避するためには、配管溶接部の適切な維持管理が必要不可欠である。

高温機器のクリープ損傷評価には、機器表面の組織観察や硬さ測定による非破壊評価が適用される場合が多

いが、ボイラ配管溶接部においては、必ずしも表面から損傷が進行するとは限らず内部から進行する場合もあるため、解析評価法の適用が必要となる。解析評価法は、有限要素法によるクリープ解析に基づいて実施されるが、精度の高い評価のためには溶接部各部位のクリープ特性を明らかにしなければならない。著者ら⁷⁾は、新材溶接継手の各部位から直径 1mm の引張型丸棒ミニチュア試験片を採取し、これらを用いたアルゴン雰囲気中のクリープ試験により、各部位のクリープ特性を取得した。その結果からは、同一応力下のクリープひずみ速度は、母材と溶接金属で同等であるが、これらに比べ HAZ は 10 倍程度速いことが明らかとなった。一方、実機で長期間使用されたボイラ配管溶接部では、析出物の粗大化や転位組織の回復などの組織変化を生じるが、このような長期使用による組織変化が溶接部各部位のクリープ特性や溶接継手の破断特性に及ぼす影響は、十分に明らかにする必要がある。

本研究では、実機で長期間使用された改良 9Cr-1Mo 鋼製ボイラ配管溶接部から採取した溶接継手素材を対象に、各部位から切出したミニチュア試験片を用いたクリープ試験により、各部位のクリープ特性を把握する。ま

† 原稿受理 平成29年 6月30日 Received June 30, 2017 ©2018 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 千葉工業大学 工学部 〒275-0016 習志野市津田沼
Faculty of Engineering, Chiba Inst. of Tech., Tsudanuma, Narashino 535-8585.

** 千葉工業大学 大学院 〒275-0016 習志野市津田沼
Faculty of Engineering, Chiba Inst. of Tech., Tsudanuma, Narashino 535-8585

た、同素材から採取した標準サイズの溶接継手試験片を用いて、クリープ破断試験および中断試験を実施し、長期使用材の応力状態とクリープ破断特性の関係ならびに破断までの損傷過程を明らかにする。

2 試験方法

2.1 供試材料および試験片

供試材料は、火力発電所において蒸気温度約 600℃で、約 8 万時間使用された改良 9Cr-1Mo 鋼製エルボー配管腹側溶接部より切出された溶接継手素材である。同配管は、長手方向にサブマージアーク溶接されたものであり、供試溶接継手の縦断面を Fig.1 に示す。開先形状は、配管外表面側で母材間の溶接金属が最も長く板厚方向に徐々に減少し、内表面近傍で最も狭くなる会合部を有する X 形状である。母材(B)、溶接金属(W)および HAZ(H)から、Fig.2(a)に示す平行部直径 1mm、平行部長さ 5mm の丸棒引張負荷型ミニチュアクリープ試験片用の直径 4mm 円柱状素材を放電加工によって切出した。HAZ では、円柱状素材の中心が HAZ 幅の中央になるよう採取位置を定めた。Fig.1(a)中にそれぞれの部位から切出したミニチュア試験片の位置および番号を示している。切出した素材は、試験片にかかる曲げ応力を最小限に抑えるため表裏旋盤を用いて、平行部仕上げ時には切り込み深さ 0.18mm 程度で加工を実施した。その後、加工層を除去するため研磨紙 800 番まで表面研磨を行った。

実機での長期間の使用が溶接継手クリープ破断強度に及ぼす影響を調べるため、外表面近傍と会合部からそれぞれから全長 116mm、平行部が配管板厚方向 10mm、板幅(長手)方向 8mm の矩形断面を有する標準サイズ試験片を採取した。Fig.1(a)に溶接継手断面でみた標準クリープ試験片採取位置および Fig.2(b)に会合部から採取した試験片を例に、標準クリープ試験片の形状寸法を示す。表面近傍から採取した試験片も溶接金属が試験片中央部に位置するように加工した。

2.2 試験装置および試験条件

ミニチュア試験片のクリープ試験に用いた試験機の概略を Fig2(c)に示す。同試験機は(株)神戸工業試験場によって開発されたものであり、最大荷重 1kN、最高使用温度 1000℃で、支点から負荷ロッドと荷重までのてこ比を 1:5 としたレバー式単軸クリープ試験機である。ロッドに挿入したミニチュア試験片を特製治具に固定して、試験片中央部に R タイプ熱電対を取り付けた後直径 20mm 程度の中空円筒チャンパーに通し、試験片に曲げ等の応力が生じないよう試験機へセッティングを行なう。試験温度はすべて 650℃であり、予備試験において中央部および中央部から上下 2mm の位置に熱電対を取り付け、中央部を 650℃とした場合に上下の熱電対が $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内となるように 3 ゾーンの電気炉出力を調整した。試験では、中央部のみに熱電対を取り付け、これが 650℃ $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 以内であることを確認して試験を開始した。試験中にチャンパー内に 99.99%純度のアルゴンガスを連続的

Fig.1 Specimen sampling location from used Mod.9Cr-1Mo welded joint.

Fig.2 Tested specimens and a miniature creep testing machine .

に送入し、不活性雰囲気中で試験を実施した。ミニチュア試験片では、平行部 5mm の伸びを直接計測することが困難なため、試験片を取り付けたロッドの変位を伸びとして計測した。なお、既に未使用材の母材から切出した同形状のミニチュア試験片を用いたクリープ試験によって、直径 10mm、標点間距離 50mm の標準のサイズ試験片と同等のクリープ試験結果が得られることを確認した⁷⁾。ミニチュア試験片の試験応力は、110MPa～60MPa とした。

標準サイズ溶接継手試験片のクリープ試験には、最大荷重 30kN、最高使用温度 800℃でてこ比 10 のレバー式単軸クリープ試験機を用いた。標準サイズ溶接継手試験片のクリープ破断試験は、温度 650℃、応力 90MPa～45MPa の範囲で実施した。また、破断までの損傷過程を明らかにするため、表面近傍から採取した試験片では応力 53MPa で、会合部から採取した試験片では 45MPa で、試験を途中で停止する中断試験を実施した。中断材の本試験に対するクリープ損傷率(%)は、(中断時間) x 100/(破断時間)と定義した。

3 試験結果

3.1 組織観察および硬さ測定

Fig.1 に示した配管溶接部断面の外表面近傍および会合部の HAZ における走査型電子顕微鏡で観察したマイクロ組織の代表例をそれぞれ Fig.3(a)および(b)に示す。会

Fig.3 Creep voids observed in HAZ at near surface and X-shape region.

Fig.4 Vickers hardness distribution at near surface and X-shape region.

合部においては明確なボイドが観察され使用中にクリープ損傷を受けたことが認められた。同部位でのボイド個数密度は、300~400 (個/mm²) 程度であり、既に被覆アーク溶接で製作された改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手の単軸クリープ試験で得られたボイド個数密度とクリープ損傷との関係⁸⁾を用いると、同部位のクリープ損傷は60%~70%と評価される。一方、Fig.3 に示す表面近傍や会合部以外の他の位置でもボイドは観察されたが、ボイド個数密度は 50 (個/mm²) 以下であり、使用中に受けたクリープ損傷は軽微であると判断される。

表面近傍および会合部の母材から溶接金属にかけてビッカース硬さを測定した結果を Fig.4 に示す。表面近傍部および会合部ともに、ビッカース硬さは溶接金属で最も高く、HAZ 内で溶接金属から母材に向かって徐々に低下しており、母材近傍の HAZ で最小値を示した。分布傾向は、新材改良 9Cr-1Mo 鋼長手溶接継手における分布傾向²⁾と類似であるが、新材の溶接金属の硬さが 280HV 程度、母材が 220HV 程度に比べると、使用材の溶接金属、母材ともに硬さが低下しており、溶接金属でより顕著な低下を生じていることがわかる。

3.2 溶接部各部位のクリープ特性

母材、溶接金属および HAZ の各部位から採取したミニチュアクリープ試験片を用いて得られたクリープ曲線の代表例として応力 90MPa の結果を Fig.5(a) に示す。図中には、Fig.1(a) に記した採取部位の試験片番号を併せて示している。母材の破断時間は、1039 時間であり、

Fig.5 Creep curve obtained by miniature specimens.

先に実施した新材の母材ミニチュアクリープ試験片の破断時間(1026 時間)とほぼ同等であった。本試験結果では、長期使用による母材のクリープ強度の低下は認められなかった。一方、MAG 溶接継手新材の溶接金属から切出したミニチュア試験片のクリープ破断特性は、新材(ラボ材)の母材と同等であったが、本使用溶接継手配管の溶接金属は、母材の 1/10 以下の 59 時間で破断した。また、HAZ は新材 MAG 溶接継手 HAZ の約 1/3 で破断した。ただし、HAZ から採取したミニチュアクリープ試験片の試験結果は、採取位置によるばらつきがみられた。応力 74MPa において、溶接金属と HAZ の異なる位置から採取した試験片で得られたクリープ曲線を Fig.5(b) に示す。板厚上部の HAZ より採取した H1 試験片の破断時間は、1003 時間で新材 HAZ の破断時間 (1122 時間) より若干短い程度であったが、会合部 HAZ より採取した H5 試験片の破断時間は 159 時間と大幅な低下を示した。これは、会合部では使用中にボイドが発生しており、クリープ損傷が表面近傍に比べ大きかったことによる可能性も考えられる。溶接金属 W2 試験片は、H5 試験片より短時間の 106 時間で破断した。

ミニチュアクリープ試験片によって得られた応力と最小クリープひずみ速度の関係を Fig.6 に示す。図中に

Fig.6 Relationship between minimum creep rate and stress.

は比較のため、同一のミニチュア試験片でクリープ特性が得られている MAG 溶接継手新材の結果を黒塗りの記号で示している。後述するように同継手材の標準溶接継手試験片は、改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手の平均的なクリープ破断強度を有している。HAZ の試験結果には試験片番号を付記している。本使用配管母材のクリープ特性は、新材母材のクリープ特性と同等であることがわかる。一方、溶接金属は MAG 溶接継手の同一応力での最小クリープひずみ速度の 10 倍以上である。この結果より、溶接金属では、明確なボイドは観察されなかったが、著者の一人が先に観察した使用材の透過電子顕微鏡観察結果⁹⁾から、使用中に炭化物の粗大化や転位組織の回復などの組織変化が他の部位に比べ顕著に生じたことによりクリープ変形抵抗が低下したためと推察される。使用材の HAZ は、新材の HAZ から採取したミニチュア試験片同様にクリープ強度にばらつきがみられる。会合部から採取した H5 の最小クリープひずみ速度が速い要因として、クリープ損傷を受けていることが考えられるが、ばらつきの可能性もあり、現時点では明確でない。これは新材溶接継手の HAZ から切出したミニチュア試験片でみられたばらつき同様に、深さ方向への切出し過程で試験片平行部が HAZ 幅中央からずれた可能性や、溶接時の熱履歴が板厚方向の位置によって異なりミクロ組織に差異を生じている可能性などが考えられる。同図の応力 σ [MPa] と最小クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ [1/h] の関係から Norton 則 ($\dot{\epsilon}_c = B\sigma^n$) の係数 B 、指数 n を決定した。得られた値を Fig.6 中に示す。上述したように、使用材の母材は、新材と同等のクリープ特性を有しており、使用材の HAZ については、新材の HAZ のばらつきの範囲内にあり、H1 および H4 は新材と同等のクリープ特性を示した。このように、母材および HAZ は、溶接金属と比較して、新材との差異が明確ではないことから、ここでは使用材母材および HAZ の係数ならびに指数は、新材と同じ値とした。一方、溶接金属には使用材と新材で顕著な差異を生じたことから、使用材で得られたデータか

Fig.7 Relationship between stress and rupture time obtained by miniature specimens.

ら決定した。

Fig.7 に使用配管溶接部各部位から採取したミニチュアクリープ試験片で得られた応力と破断時間の関係を示す。HAZ の試験結果には試験片番号を付記している。母材の破断特性は、新材のそれと同等であるとみなせ、HAZ もばらつきがあるものの概ね新材のばらつきの範囲にある。これらに対し、溶接金属の破断時間は新材の 1/10 以下であり、クリープ変形特性同様に新材とは顕著な破断特性の差異が認められる。

3.3 標準溶接継手のクリープ破断強度

使用材の外表面近傍 ($\square$ 記号) および会合部 ($\circ$ 記号) から採取した標準溶接継手試験片で得られた応力と破断時間の関係を、既に報告した被覆アーク溶接²⁾ および MAG 溶接⁷⁾ で作製した溶接継手試験片の単軸クリープ試験結果と比較して Fig.8 に示す。図中には改良 9Cr-1Mo 鋼溶接継手のクリープ破断平均線¹⁰⁾ を破線で示す。会合部から採取した標準継手試験片は、新材溶接継手同様にすべて HAZ で破断する Type IV 破壊を呈したが、新材に比べ短時間で破断している。クリー

Fig.8 Relationship between stress and rupture time obtained by standard size welded joint specimens.

Fig.9 Damage conditions observed at HAZ in interrupted test specimens.

ブ損傷(%)を、 $(\text{新材破断時間} - \text{使用材破断時間}) \times 100 / (\text{新材破断時間})$ と定義し、使用材が新材時に破線で示す平均的なクリープ破断強度を有していたと仮定すると、45MPaでの使用配管溶接継手会合部のクリープ損傷は、64%と評価される。この結果は、会合部のボイド個数密度から評価された損傷値と概ね一致する。表面近傍から採取した標準溶接継手試験片は、すべて溶接金属で破断したことが観察された。その結果、同一応力の会合部試験片の1.5倍程度の時間で破断しており、ボイド個数密度から評価された損傷割合に比べて両者の差異が小さいことがわかる。これは、表面近傍では使用中のHAZにおけるクリープ損傷が軽微であったのに対し、溶接金属で組織劣化が生じFig.6に示したようにクリープ変形抵抗が顕著に低下したことにより、HAZで破断に至る前に溶接金属での変形が進行し、破断に至ったためと考えられる。

会合部および表面近傍から採取した標準試験片でのクリープ損傷の進行を明らかにするため、会合部から採取した試験片では破断時間の50%および90%で、表面近傍から採取した試験片では破断時間の50%で中断した試験片の組織状態を観察した。Fig.9に会合部から採取した標準溶接継手試験片の会合部近傍のHAZで観察された損傷状態を示す。これらの試験片HAZでの使用後の損傷状態が一致していたかどうかは不明なため厳密な議論はできないが、50%においてはHAZを板厚方向に沿って多数のボイドが発生しており、90%ではボイドが合体成長し、微小き裂を形成して破断に至るようすが伺われる。なお、90%損傷溶接継手試験片の溶接金属ではボイドはほとんど観察されなかった。これらの観察結果からは、HAZで生じるType IV破断は、局所領域において初期から後期にかけてボイドが発生・成長した後、合体を生じて形成された微小き裂が、末期に急速に伝ばして破断に至ることが示唆された。一方、表面近傍から採取した標準継手試験片の50%中断試験片では、観察結果は割愛するがHAZにおいてボイドが観察されるもののボイド個数密度は、200(個/mm²)程度であり、会合部の損傷材に比べ明らかに少なく、顕著なクリープ

損傷を生じていなかった。また、溶接金属においてもボイドは観察されたが、ボイド個数密度は100(個/mm²)程度であった。これより、溶接金属においてクリープ変形抵抗が顕著に低下したことによるクリープ変形速度の増大に起因してHAZで破断する以前に溶接金属で破断したものと考えられる。これらの試験結果からは、実機の長期使用溶接継手配管では、HAZでのクリープ損傷の進行状態と溶接金属における組織劣化の進行によるクリープ変形の進行度合いとの関係において、き裂発生部位が決まるものと推察される。

4 標準溶接継手のクリープ破断に関する考察

4.1 溶接継手の有限要素解析

標準溶接継手内の応力・ひずみ状態を明らかにするため、表層部近傍および会合部から採取した溶接継手試験片の対称性を考慮した1/4有限要素モデルを用いたクリープ解析を実施した。HAZの幅は観察結果を踏まえて約2mmとし、10層に分割した。クリープ構成式は、Norton則とし、係数 B 、指数 n はFig.6に示す値を用い

(a) Center of surface specimen

(b) X-shape region

Fig.10 Stress component distribution in the standard size welded joint specimens.

Fig.11 Comparison of stress component distribution along the center of HAZ in the standard size welded joint specimens.

た。クリープ解析には、汎用解析コードとの比較により妥当性が確認されている電力中央研究所が開発した3次元有限要素解析プログラム¹¹⁾を用いた。

4.2 応力・ひずみ状態と破断の関係

代表例として試験応力 53MPa の会合部および表面近傍から採取した試験片（それぞれ会合部試験片および表面試験片と称す）の板厚中央断面で、会合部試験片は会合部の、表面試験片は板厚中央位置の母材から溶接金属にかけての応力成分分布を Fig.10 に示す。なお、これらの位置において HAZ および溶接金属での板幅方向の応力値は、概ね Fig.10 と同等であることを確認した。会合部試験片では、開先が X 形状となっている影響により母材近傍の HAZ において軸方向応力が最大となり、板厚および板幅方向応力も引張となる 3 軸引張応力状態を呈している。一方、表面試験片の板厚中央位置の母材から溶接金属の応力分布では、HAZ と溶接金属の境界部で板厚および板幅方向応力が若干引張応力となるものの、全体にわたってほぼ単軸応力状態となっていることがわかる。母材と HAZ、溶接金属とのクリープ特性の差により、HAZ 近傍の母材で応力が低下している。Fig.11 に、両試験片の HAZ 中央位置での試験片上面からの板厚方向の応力成分分布を示す。表面試験片では、各応力は上面から緩やかに低下しているが、会合部試験片では、上面から約 7mm の会合部において各応力が最大値を示すことがわかる。これらの解析結果から、使用中にクリープ損傷を受けた同部位において、クリープ試験中にも軸方向応力が最大で多軸応力となることから Fig.9 に示したボイドの発生・成長・合体を生じることにより、Type IV 破断を生じたものと推測される。表面試験片では HAZ と溶接金属での応力状態がほぼ等しいことから、クリープ変形抵抗の小さい溶接金属での破断が予想される。

代表例として応力 53MPa での破断時間（会合部試験片：1072 時間、表面試験片：1432 時間）までの軸方向クリープひずみの分布を Fig.12 に示す。HAZ のクリー

Fig.12 Comparison of axial creep strain distribution in the standard size welded joint specimens.

プひずみは、両試験片でほぼ同等であるが、表面試験片の溶接金属では会合部試験片のそれに比べ 2 倍近いクリープひずみ生じている。このことによって表面試験片では、溶接金属のひずみが限界値に達し、破断したものと推測される。

本試験結果の範囲内では、対象エルボー配管を継続して使用した場合には、会合部の HAZ でボイドの発生・成長・合体により Type IV 破断を生じるものと考えられる。一方で、HAZ でのクリープ損傷が顕著に進行していない場合には、溶接金属の組織劣化によるクリープ変形抵抗の低下により、溶接金属部で早期に破断することも否定できない。

5 結 言

実機において約 8 万時間使用された配管溶接部を対象に、溶接部各部位から採取した直径 1mm、平行部 5mm の丸棒引張型ミニチュア試験片を採取し、クリープ試験を実施した。また、表面近傍および会合部から採取した標準溶接継手試験片を用いてクリープ試験ならびに有限要素解析を実施した。得られた主な結果を以下に要約する。

- 1) 配管断面溶接部は X 開先形状を呈しており、表面近傍の熱影響部細粒域(HAZ)で観察されたボイド個数密度は 50 (個/mm²) 程度以下であったが、会合部では 300 (個/mm²) 程度であり、使用中に受けたクリープ損傷は 60%程度であると評価された。
- 2) 長期使用された母材のクリープ強度（変形抵抗および破断寿命）は、新材(ラボ材)のそれと同等であったが、溶接金属では顕著な低下を生じていることが明らかとなった。使用材 HAZ のクリープ強度にはばらつきがみられたが、新材 HAZ のばらつきの範囲内であった。
- 3) 会合部から採取した標準溶接継手試験片は、すべて HAZ で破断する Type IV 破断を呈しており、中断試験結果から HAZ でボイドが成長・合体し、寿命末

期に急速な微小き裂の伝ばを生じて破断に至ることが示唆された。表面近傍から採取した溶接継手試験片は、会合部より若干破断時間が長い、すべて溶接金属で破断した。

- 4) 標準溶接継手試験片の有限要素解析結果より、会合部から採取した継手試験片では、HAZで軸方向応力が最も大きく、多軸引張応力状態となることからType IV破断し、表面近傍から採取した試験片では溶接金属で軸方向応力が最大となり、クリープひずみが増大することにより、溶接金属で破断に至ったものと推察された。

試験片作製および試験実施にあたっては、(株)神戸工業試験場にご協力いただいた。また、本研究の遂行にあたり私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 S1511002の助成を受けた。これらを記して感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) T. Watanabe, M. Tabuchi, M. Yamazaki, H. Hongo and T. Tanabe, "Creep damage evaluation of 9Cr-1Mo-V-Nb steel welded joints showing Type IV fracture, International Journal of. Pressure Vessels and Piping 83, pp.63-71(2006).
- 2) T. Ogata, T. Sakai and M. Yaguchi, "Uniaxial creep rupture property of Mod.9Cr-1Mo steel weld joint and proposal of creep damage evaluation method", Zairyou, Vol.58, No.2, pp.94-100(2009).
- 3) H. Hongo, M. Tabuchi, L. Yongkui and Y. Takahashi, "Creep damage behavior of Mod.9Cr-1Mo steel welded joint", Zairyou, Vol.58, No.2, pp.101-107(2009).
- 4) T. Ogata, T. Sakai and M. Yaguchi, "Damage characterization of a P91 steel weldment under uniaxial and multiaxial creep", Materials Science and Engineering A 510-511 pp.238-243(2009).
- 5) T. Ogata, T. Sakai and M. Yaguchi, "Damage evolution and life prediction of a P91 longitudinal welded tube under internal pressure creep", ASME, Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.132, No.5, pp.051204-1 - 051204-9(2010).
- 6) T. Ogata, T. Mitsueda and H. Sakai, "Influence of axial load on internal pressure creep of Mod.9Cr-1Mo circumferential welded pipe", Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.81, No.827, 15-00021 (2015).
- 7) T. Ogata and K. Chiwaki, "Evaluation of creep strength property of Mod.9Cr-1Mo welded joint by using a miniature specimen", Zairyou, Vol.66, No.2, pp.93-100(2017).
- 8) T. Ogata, T. Sakai and M. Yaguchi, "Development of damage assessment methods for Mod.9Cr-1Mo steel weld joints Uniaxial creep rupture property of Mod.9Cr-1Mo steel weld joint and proposal of creep damage evaluation method", Denryokuchoukenkyujo hokoku, Q06002(2006).
- 9) S. Yamada and T. Ogata, "Elucidation of microstructures and dislocation behavior under high-temperature straining in 9%Cr steel pipe used for actual plant service by transmission electron microscopy", Denryokuchoukenkyujo hokoku, Q10028(2011).
- 10) M. Yaguchi, K. Kimura and S. Nakahashi, "Re-evaluation of long-term creep strength of welded joint of ASME Grade 91 type steel", proceeding of the ASME PVP2016, PVP2016-63316(2016).
- 11) T. Sakai, M. Yaguchi and T. Ogata, "Development of damage assessment system for weld joints based on stress analysis for boiler tube", Denryokuchoukenkyujo hokoku Q09005(2010).