

9Cr-1Mo 鋼溶接部の微視組織の内部拘束を考慮した 異方性クリープ解析

FEM Analyses of Creep in Welded Modified 9Cr-1Mo Steel
Considering Constraint Effects Induced by Anisotropic Microstructures

東京理科大学 中曽根 祐司 Yuji NAKASONE Member
東京理科大学 岡見 篤史 Atsushi OKAMI Student Member

Modified 9Cr-Mo steel is a candidate structural steel for demonstration fast breeder reactors (FBR's). Due to low thermal activation, the steel can maintain steady-state deformation during long-term creep. The creep strength of its weldment is lower than that of the base metal. Because of different creep strain rate in the solidified weld metal and heat-affected zone (HAZ), creep deformation in HAZ can be lowered but maximum principal stress augmented in fine-grained HAZ to cause detrimental Type IV cracks in this zone.

In this study, FEM analyses were made on long-term creep of over 60 years in double U groove welded modified 9Cr-Mo steel plates with typical microstructures in the welded region of the steel plates taken into consideration. The typical welded region of the plates consists of solidified weld, coarse grain HAZ, fine grain HAZ, interfacial HAZ and base metal. These microstructures were modeled as polycrystal structures having slip systems approximated by orthotropic deformation properties. The results obtained were compared with existing experimental results and those obtained by the authors and found to agree with the experimental results. The results were also compared with computational results obtained by a model having hexagonal crystal grains having the same size and a model having two isotropic materials. The results revealed that the equisized-grain model gives conservative creep life prediction whereas the isotropic model unconservative predictions.

Keywords: 9Cr-1Mo Steel, Welded Joint, Creep, Type IV Crack, FEM, Norton's Law, Polycrystal, Anisotropy

1. 緒言

CO₂ 排出量を削減するためには発電効率の向上が有効であり、そのためには発電タービン内の蒸気を高温高圧化する必要がある。

9Cr-1Mo 鋼は、V や Nb 量を最適化して、強度、耐食性、耐熱性を高めるとともに、熱膨張率を低く抑え、熱伝導率を高めて、熱応力の低減を図ったことにより、内外部の温度差に起因する熱応力によるクリープ疲労損傷が深刻となる大型構造物に用いられてきた[1, 2]。

以上のことから、この 9Cr-1Mo 鋼は、もんじゅやその後の実証炉の一体型蒸気発生器伝熱管の材料としての使用が検討されており[3]、低熱膨張率・高熱伝導率による配管総長短縮等の経済的利点が期待されている[4]。

しかし、高クロム鋼では、一般に、Cr 量を高め、組織を焼戻しマルテンサイトとして転位密度を高めることにより高いクリープ強度と耐食性を実現している[5]が、溶接継手の熱影響部(HAZ)の細粒域に Type IV と呼ばれる内部損傷が生じ、溶接部のクリープ強度が母材よりも低下する現象が報告されている[6]。

この現象に対して、HAZ 細粒域の粒界強化や粒

径を母材程度にまで大きくすることにより Type IV 損傷そのものを生じにくくする研究[7]や、様々なシミュレーションや実験により Type IV 損傷の発生・成長過程を明らかにし、クリープ損傷挙動や溶接継手の破断を推定しようと試みた研究[8, 9]がある。しかし、溶接部の微視組織を考慮してクリープ解析を行った研究は多くない。

そこで本研究では、前報の溶接部周辺組織を直交異方性で近似したすべり系を有する多結晶モデルを用いた 550°Cでのクリープ解析[10]に加え、600°C、650°Cにおける 60 年以上の長期使用を想定した有限要素法クリープ解析を行い、実験結果の再現性を検討するとともに、結晶粒の性状や形状を変化させて、クリープ強度に及ぼす結晶粒間の拘束の影響を調べることとした。

2. 溶接部近傍微視組織の 2D-FEM モデル

溶接部周辺は図 1(a)に示すように、様々な形状や粒径を持つ多数の結晶で構成されており、大きく分類すると領域①の凝固溶融金属の針状組織、領域②の HAZ、そして領域③の熱の影響を受けていない母材の 3 種類となっている[11]。さらに、領域①～領域②の中央付近に示した細粒域までの間には、クリープ損傷として図 1(b)に示すような Type I～Type IV の分類がなされている[12]。

Type I は凝固溶融金属内に生じる損傷、Type II は凝固溶融金属から HAZ に進展した損傷、Type III は HAZ 粗粒域に生じる損傷で、粒界におけるキャビテーションや粒界き裂を伴い、基本的に外表面か

連絡先: 岡見篤史, 〒102-0073
東京都千代田区九段北 1-14-6, 東京理科大学,
TEL:03-3260-4272 内線 6507,
E-mail:j4512614@ed.tus.ac.jp

ら生じる損傷である。そして図2に例示したように[13]、Type IVはHAZ細粒域に生じ、基本的に板厚内部から生じる損傷である。

図3(a)には、図1(a)の溶接部組織を参照して両面U形開先で突合せ溶接をした改良9Cr-1Mo鋼溶接部周辺の微視組織を模擬して作製した有限要素モデルを示す。図3(a)中の Δ は底辺と垂直方向への変位拘束条件、矢印はx軸方向に負荷した一軸引張応力を示す。なお、荷重は、十分大きな弾性定数を有する疑似剛体性平板を介して試験片モデルに負荷し、変形が進むに従って試験片に曲げが生じないように配慮した。また、図3(a)中の領域①~③は、図1(a)のそれらと対応しており、領域①の凝固溶融金属の針状組織、領域②の粗粒HAZと細粒HAZ(f-HAZ)、および領域③の母材の微視組織をモデル化している。また、図3(b)には、結晶粒の寸法差および結晶粒間同志による変形拘束のクリープ寿命への影響を調べるために作製した等大同形結

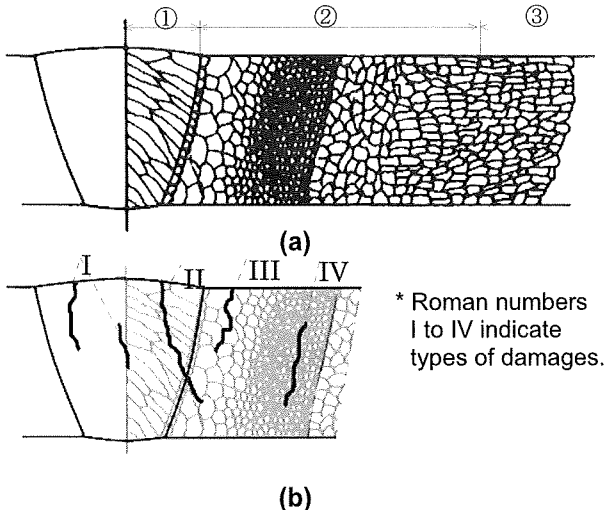


Fig. 1 Schematic illustrations of microstructures (a) and creep damage (b) around the weld joint [11].

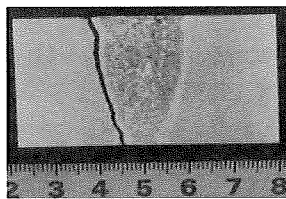


Fig. 2 Type IV crack in creep-ruptured specimen [13].

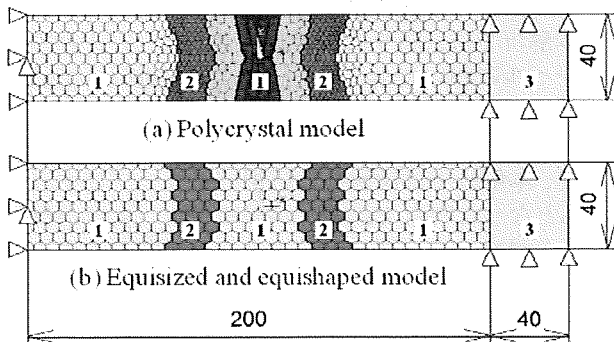


Fig. 3 Present FE Models of a welded plate specimen.

晶粒モデルを示す。

図4は、図3の領域①~領域③の一部を拡大して示したものであり、各結晶粒に直交異方性で近似的に与えたすべり系のイメージをいくつかの結晶粒に対して示したものである。領域①の針状組織では異方性の方位を結晶粒の長手方向に与え、他の領域の結晶粒はランダムに与えた。結晶方位の配向パターンは10種類用意し、クリープ寿命に与える結晶方位の影響を調べることにした。

表1に今回の解析で用いた550~650°C大気中における弾性定数とノートン則の各係数および異方性パラメータの値を示す。今回の解析で用いた材料定数は、細粒HAZ(f-HAZ)とその他の領域および剛体板の3種類とした。

以上の多結晶体近似モデルに加えて、各結晶粒の形状と大きさを同一にして、結晶粒の寸法の影響をなくし、直交異方性すべり系による結晶粒間の拘束のみを考慮した等大同形結晶粒モデルおよび各組織に等方性の材料定数を与えた等方性モデルの2種類のモデルを用いた解析を行い、クリープ寿命に及ぼす結晶粒間の拘束の影響を調べた。

3. 近似多結晶組織のクリープ解析

前章で述べたように、本解析では、各結晶粒にランダムに直交異方性を与えて近似的にすべり系を表現する。一方、直交異方性材料のクリープに対しては、Hillの異方性降伏条件[14]で定義される式の降伏応力比 r_{ij} ($i,j=1,2,3$)を適用する方法を採用する[15]。すなわち、まず、式(1)で表されるHillの降伏

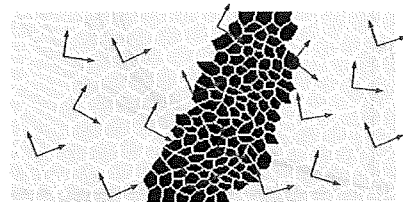


Fig. 4 Schematic illustrations of the present slip systems set up in crystalline models.

Table 1 Material properties used in the FE Models.

Temp	Area	Norton law coefficients		r value		
		A	n	r ₁₁	r ₂₂	r ₃₃
823 K	①	2.3×10^{-39}	14	1	0.5	0.5
	②	2.5×10^{-31}	11.3	1	0.5	0.5
	③	-	-	-	-	-
873 K	①	1.3×10^{-36}	14	1	0.5	0.5
	②	1.5×10^{-28}	11.3	1	0.5	0.5
	③	-	-	-	-	-
923 K	①	1.6×10^{-26}	10.3	1	0.5	0.5
	②	1.4×10^{-18}	7.6	1	0.5	0.5
	③	-	-	-	-	-

条件を考える。ただし、 r_{ij} 等の添字は、結晶粒ごとに全体デカルト座標に対してランダムに指定された角度に回転して設定された局所デカルト座標系軸を示す(図4参照)。

$$F(\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33}-\sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 2f \quad (1)$$

ここで、 F 、 G 、 H 、 L 、 M および N は異方性パラメータであり、

$$2F = \frac{1}{r_{22}^2} + \frac{1}{r_{33}^2} - \frac{1}{r_{11}^2}, 2G = \frac{1}{r_{33}^2} + \frac{1}{r_{11}^2} - \frac{1}{r_{22}^2}, 2H = \frac{1}{r_{11}^2} + \frac{1}{r_{22}^2} - \frac{1}{r_{33}^2}, 2L = \frac{1}{r_{23}^2}, 2M = \frac{1}{r_{31}^2}, 2N = \frac{1}{r_{12}^2} \quad (2)$$

式(2)の r_{ij} は降伏比であり、降伏応力を σ_{ij}^Y とすると、次式で表される。

$$r_{11} = \frac{\sigma_{11}^Y}{\sigma_{11}^Y}, r_{22} = \frac{\sigma_{22}^Y}{\sigma_{11}^Y}, r_{33} = \frac{\sigma_{33}^Y}{\sigma_{11}^Y}, r_{12} = \sqrt{3} \frac{\sigma_{12}^Y}{\sigma_{11}^Y}, r_{23} = \sqrt{3} \frac{\sigma_{23}^Y}{\sigma_{11}^Y}, r_{31} = \sqrt{3} \frac{\sigma_{31}^Y}{\sigma_{11}^Y} \quad (3)$$

ミーゼスの相当応力 σ_{eq} で表したノートン則から求められるひずみ速度を基準にして、式(3)の降伏比を用いて、各ひずみ成分の速度を次式(4)によって求める[14]。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{d\epsilon_{ij}}{dt} = r_{ij} A \sigma_{eq}^n \quad (4)$$

ただし、 A と n はそれぞれノートン則の係数と指数である。

本研究では、 $r_{11}=1.0$ 、その他の $r_{ij}=0.5$ として、各結晶のすべり系の変形挙動を表現することとした。

4. 解析結果とその考察

4.1 解析の概要

本解析に用いた図3に示す各組織の弾性係数とノートン則の係数および指数の値を表1に示す。

図3(a)に示した改良9Cr-1Mo鋼の溶接部周囲の微細組織を模擬した微細組織近似モデルでは、結晶粒ごとにランダムな方向に直交異方性を与え、一定の引張応力を負荷して、異方性クリープ解析を行った。まず、既報の実験結果[12]および著者らの実験結果と解析結果を比較し、実験結果と解析結果の一致度を確認しながら、試行錯誤的に微細HAZ部(図3(a)の②)およびそれ以外の組織(図3(a)の①)のノートン則の係数と指数を決定し、クリープひずみ-時間線図、クリープ破断線図等を求めた。次に、結晶粒の寸法差および結晶粒間同志による変形拘束のクリープ寿命への影響を調べるため、図3(b)に示す等大同形結晶粒モデルと、図3(a)および(b)の①の組織の機械的特性を用いた等方性モデルによる解析を行い、結晶粒間の変形拘束の異なるモデルを用いて得られた結果の比較を行った。

4.2 クリープ変形挙動

図5に、微細組織近似モデル(図3(a))の剛体部と接する右端面の伸びをモデルの初期長さで除して求めた巨視的なクリープひずみの時間変化の解析結果(823K、200MPa)を示す。図5に示したクリープ変形挙動では、第1期、第2期の期間が短く、断面積の現象によるひずみ速度の増加が第3期の変形が主となっていることが分かる。また、たとえ見掛けの条件が同一であっても、すべり系の方位の空間分布が異なれば、変形挙動にばらつきが生じることが分かる。図5より、図に示したいずれの場合にも巨視的クリープひずみが6%以上で曲線は急激な立ち上りを示している。

4.3 クリープ破壊線図

本解析では、図5に例示したように、いずれの応力レベルにおいても、クリープによる近似多結晶モデルの巨視的ひずみが6%に達した時点でクリープひずみ-時間曲線が急激な立ち上りを示した。そこで、本解析では試験片の巨視的クリープひずみが6%となった時点で試験片が破断した(変形が無限大)と見なして、図6に示すクリープ破断曲線を求めた。なお、図6中の×印は文献[12]に記載された実験データのプロット点を示す。

図6から、本解析で得られた近似多結晶モデルのクリープ破断線図は×印の実験結果とよい一致

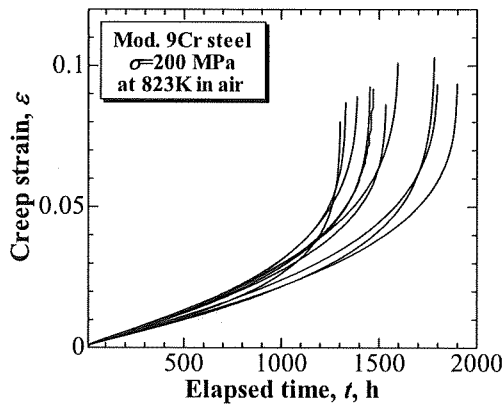


Fig. 5 Scattering of creep deformation curves obtained for the polycrystalline and the isotropic models for $\sigma=200\text{MPa}$ at 823 K.

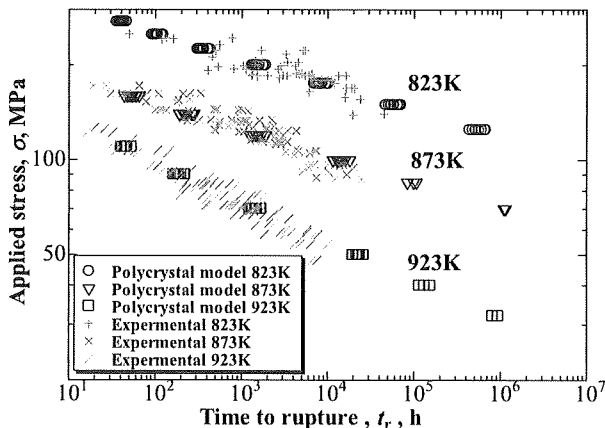


Fig. 6 Comparison of results obtained by the present FE analyses with those by experiments.

を示していることが分かる。また、図7は解析と実験で得られた寿命のばらつきを対数正規確率紙にプロットした一例である。実験値は同一応力におけるサンプル数が少なかったため194~204MPaの応力範囲の破断時間データからばらつきを求め、200MPaに対する解析値のばらつきと比較している。図7より、実験および解析ともに、クリープ寿命はほぼ対数正規分布に従っているとみなすことができる。また、各寿命分布の50%点はそれぞれ約750hと約710hとなり、ほぼ一致しているが、実験で得られた寿命のほうがばらつきは大きい。

図8は、823、873および923Kの3温度で得られた解析結果をラーソンミラー・パラメータ

$$LMP = T(C + \log_{10} t_r) \quad (5)$$

で整理した結果である。通常のラーソンミラー・パラメータの定数としては20が用いられることが多いが、本研究の場合38.5という大きな値が最適値として得られた。これは、高強度高クロム・フェライト耐熱鋼のラーソンミラー・パラメータ定数には30以上の比較的大きな値が用いられることが多い[16]という報告に符合する結果である。

また、図8には図6に示した実験結果も比較のた

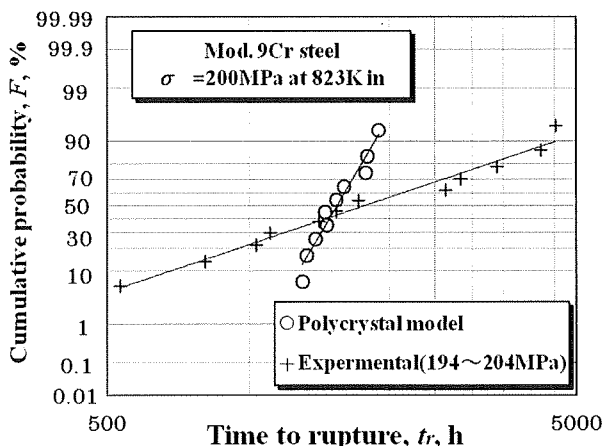


Fig. 7 Variations of creep lives predicted by the present analyses and experiments plotted on the log-normal probability paper ($\sigma=200$ MPa at 823 K).

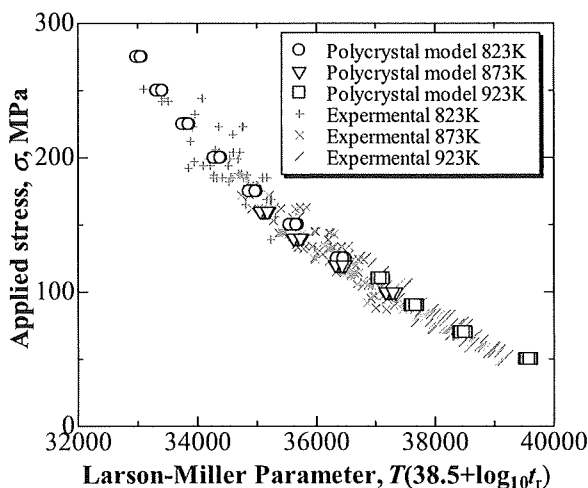


Fig. 8 Analytical and experimental creep life diagrams rearranged by the Larson-Miller parameter.

め再プロットしてある。図8から、解析結果、実験結果ともに 10^6 h(約114年)の長期にわたってラーソンミラー・パラメータによってほぼ1本の曲線で表わされることが分かる。

4.4 他モデルによる解析結果の比較

図9に微視組織近似モデル、等大同形モデルおよび等方性モデルによる3種類のモデルによる解析結果を比較して示す。図9より、等大同形結晶粒モデルは微視組織近似モデルより安全側の寿命予測となっていることが分かる。これは結晶粒の大きい等大同形結晶粒モデルは、結晶粒の小さい溶接部微視組織近似モデルと比べると、結晶粒同志の変形拘束による応力集中点の領域が拡大されたため寿命が短くなったものと推察される。また、結晶粒をすべて等方性としたモデルでは破断寿命が微視組織近似モデルより約2桁長く得られているが、これは結晶粒間の変形拘束がなくなり、応力集中軽減されたため、寿命が伸びたものと推察される。

5. 結言

9Cr-1Mo鋼の結晶粒形とその異方性を考慮したクリープ解析を実行した結果、以下の結論を得た。

- (1) 本解析で得られた近似多結晶モデルのクリープ寿命は既存および著者らの実験結果とよい一致を示した。また、クリープ寿命は、解析結果、実験結果ともに対数正規分布に従うとみなされたが、解析結果のばらつきは実験と比べて小さく得られた。
- (2) ラーソンミラー・パラメータで異なる温度の結果を整理した結果、解析結果、実験結果ともに 10^6 h(約114年)の長期にわたってほぼ1本の曲線で表わされることが分かった。
- (3) 等大同形モデルで予測されたクリープ寿命は、微視組織近似モデルに比べて1桁程度短寿命側、すなわち、安全側の予測を与える傾向がある。

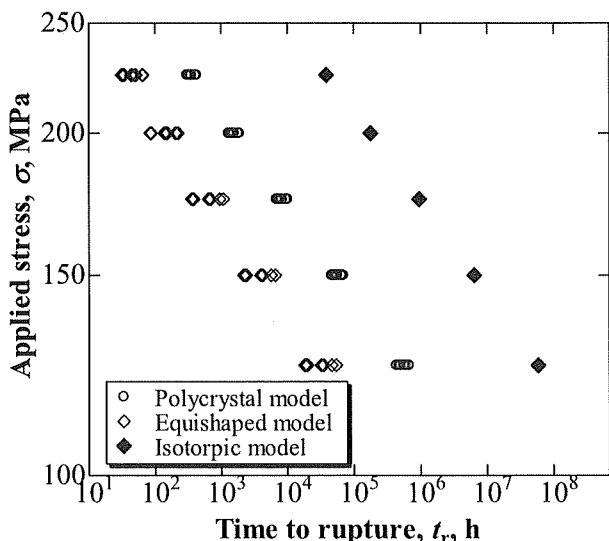


Fig. 9 Comparison of results obtained by the present FE analyses at three levels of ambient temperatures.

これに対して、等方性モデルで予測されたクリープ寿命は2桁程度長寿命側、すなわち、危険側の予測を与える傾向があることが分かった。

謝 辞

本研究は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として、福井大学が実施した平成23年度「もんじゅ」における高速増殖炉の実用化のための中核的研究開発において、東京理科大学が再委託を受けて実施した成果を含みます。

参考文献

- [1] 山下賢、後藤明信、火力発電ボイラ用高クロムフェライト鋼溶接材料、神戸製鋼技報、Vol. 53、No. 2 (2003).
- [2] 阿部富士雄、7(1)発電用鉄鋼材料の高温化、第3部第5章、2006年度物質材料研究アウトブック.
- [3] (財)高度情報科学技術研究機構(RIST)、高速増殖炉の構造材料、03-01-02-15 (2007).
- [4] 核燃料サイクル開発機構研究開発課題評価委員会、高速増殖炉の機器構造材料研究開発、JNC TN1440 2002-009 (2003).
- [5] 緒方隆志ほか2名、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、Vol. 58、No. 2 (2009).
- [6] 田淵正明ほか5名、W強化高フェライト鋼溶接継手の組織とクリープ強度、材料、Vol.50、No.2 (2001).
- [7] 田淵正明ほか5名、ボロン添加による高Cr耐熱鋼溶接継手のクリープ特性の改善、材料、Vol. 54、No. 2 (2005).
- [8] 本郷宏通ほか3名、Mod. 9Cr-1Mo鋼溶接継手のクリープ損傷挙動、材料、Vol. 58、No. 2 (2009).
- [9] 川島扶美子ほか2名、21/4Cr-1Mo鋼溶接部 Type IIIおよび TypeIVクリープ損傷のマイクロ・マクロシミュレーション、材料、Vol. 56、No. 2 (2007).
- [10] 中曽根祐司、鈴木拓雄、日本保全学会第7回学術講演会要旨集 (2010).
- [11] 高温強度の基礎・考え方・応用、材料学会 (2008).
- [12] M. Tabuchi *et al.*, Evaluation of Microstructures and Creep Damages in the HAZ of P91 Steel Weldment, J. of Pressure Vessel Tech., Vol. 131 (2009).
- [13] N. Komai and F. Masuyama, Microstructural Degradation of the HAZ in 11Cr-0.4Mo-2W-V-Nb-Cu steel (P122) during Creep, ISIJ Int., Vol. 42, No. 12 (2002).
- [14] R. Hill, the Mathematical Theory of Plasticity, Oxford Univ. Press (1950).
- [15] ANSYS 14.0 のヘルプ文章.
- [16] 木村一弘ほか2名、応力-破断曲線の領域分割法による高Crフェライト耐熱鋼のクリープ寿命予測の高度化、材料、Vol. 52、No. 1 (2003).