

平成 22 年 6 月 25 日現在

研究種目：若手研究 B  
 研究期間：2008 ～ 2009  
 課題番号：20760443  
 研究課題名（和文） 耐熱材料の動的組織変化に対する多軸応力効果  
 研究課題名（英文） Effect of stress multiaxiality on dynamic microstructural change in heat resistant material  
 研究代表者  
 澤田 浩太 (SAWADA KOTA)  
 独立行政法人物質・材料研究機構 材料信頼性センター 主任研究員  
 研究者番号：00354225

研究成果の概要（和文）：現在最も高効率な石炭火力発電プラントを構成する構造部材である高 Cr フェライト鋼の溶接部では、その高温強度が長時間使用の間に低下し、配管破損等の事例が報告されており、問題となっている。本研究では、大型構造物の溶接部で問題となる多軸応力状態（一方向ではなく、様々な方向に力が負荷される状態）の金属組織への影響を検討し、材料を強化している析出物の高温での成長が多軸応力状態で加速され、破壊が促進されることを見出した。

研究成果の概要（英文）：In welded joint of high Cr ferritic steel that is a structural material for thermal power plant with highest efficiency, the high temperature strength degrades during long-term service, leading to a fracture of pipe. In this study, stress multiaxiality effect on microstructural changes was investigated in the welded joint. It is clarified that the stress multiaxiality promotes precipitates coarsening at a high temperature, indicating acceleration of fracture.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属物性

キーワード：高 Cr 耐熱鋼、溶接部、クリープ、金属組織変化、多軸応力場

## 1. 研究開始当初の背景

## (1) 社会的背景

溶接は社会インフラを構成する大型構造物の製作に欠かせない技術である。したがって、優れた強度特性を有する材料であ

っても、溶接性が良く、かつ溶接部の強度特性が良好でなければ実用化されない。しかし最近、最新鋭の火力発電プラントの蒸気配管溶接部から蒸気が漏れる事故が発生した。事故原因の究明と使用された材料

のクリープ特性の再評価が実施され、火力発電設備の技術基準の見直しが行われた。同プラント配管で使用された材料はクロム量が約 12mass%のマルテンサイト組織をもつ高強度フェライト系耐熱鋼で、同種の材料は世界中の火力発電プラントの高効率運転を支えている。(使用温度：550°C～600°C) この材料を溶接した際に形成される溶接熱影響部において、ボイドが生成し、それらが成長・合体してき裂となり、破壊に到る。この破壊機構の解明とその防止対策が緊急の課題である。

## (2) 学術的背景

高強度フェライト系耐熱鋼を溶接すると、溶接熱影響部と呼ばれる狭い軟化領域(1～2ミリ幅)が不可避免的に形成される。高温下でこの溶接構造体に一方向に負荷(単軸引張試験)すると、クリープ変形が生じるが、上記軟化領域には特異な応力状態が発生する。図1に示すように、溶接熱影響部(iii部)は溶接材料(i部)と母材(ii部)に挟まれ、溶接構造体は言わば3つの材料からなる複合材料に類似したものと見ることが出来る。溶接熱影響部は他の二者より軟らかく、応力下では変形しにくい二者からの変形拘束を受ける。したがって、同部は変形拘束により多方向から引張応力を受けた状態、すなわち多軸応力状態にさらされる。(図2)クリープ変形中には、特異な応力状態が発生する溶接熱影響部に優先的にボイドが生成し、それらが成長・合体し、き裂となりやがて破壊に到る。

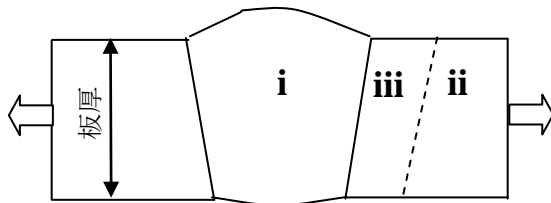


図1 溶接構造体の断面の模式図(矢印:応力)

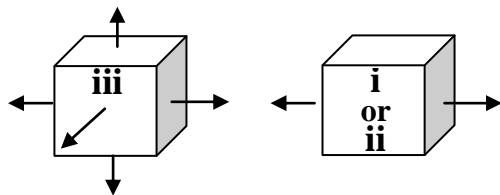


図2 各部の応力状態(矢印:応力)

## 2. 研究の目的

溶接熱影響部で生成する多軸応力場は、空孔の凝集を促進するとの報告があり、これが同部でボイドを生成する原因の一つと考えられている。このことは空孔機構で生じる格子拡散が多軸応力場で促進される可能性を示唆している。本鋼はマルテン

サイト組織に加えて各種析出物を分散させることで強化されているが、これらの組織因子の高温における変化も多軸応力場の影響を受ける可能性がある。そこで、溶接熱影響部に発生する多軸応力状態と呼ばれる特異な応力状態がクリープ中の金属組織変化(転位回復、析出物成長)に及ぼす効果に着目し、同部での優先的なボイド生成との関連を検討し、破壊の根本原因を金属組織学的観点から明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### (1) 材料

試験に用いた材料はASME規格 Gr. 92である。共金系の溶接材料を用いて、GTAWにて溶接継手鋼板(板厚：27～30mm)を作製した。溶接後熱処理条件は、740°C・260-280mmとした。

### (2) クリープ試験

650°Cにおいて、大気中・一定荷重で応力60～110MPaの範囲でクリープ試験を実施した。試験片寸法は厚さ18mm、幅5mm、平行部100mmである。

### (3) 組織観察

溶接継手試験材において有限要素解析を行い、溶接熱影響部における多軸応力分布を算出し、最も多軸度の高い領域と低い領域を選定した。光学顕微鏡観察により、計算で求めた多軸度の高い領域とクリープボイド生成領域が一致しているか確認した上で、組織観察位置を特定した。特定した多軸度の高い領域と低い領域および母材部から組織観察用試料(レプリカ膜および薄膜)を作製した。光学顕微鏡、透過型電子顕微鏡(STEM-EDX付)を用いてクリープボイド、転位組織、析出物の観察を実施した。

### (4) 調査項目

溶接継手試験片の溶接熱影響部の多軸応力の高い部位と低い部位において、各析出物の分布、サイズ、転位密度、サブグレインサイズを測定した。これらの組織因子のクリープ中変化を両部位において比較することで、組織変化に及ぼす多軸応力の大小の影響を検討した。

## 4. 研究成果

### (1) クリープ試験結果

各応力における破断時間は下記のとおりであった。110MPa：1372.4h、90MPa：2162.9h、70MPa：7480.5h、60MPa：10559.2h

### (2) 組織解析位置の特定

有限要素解析により、溶接熱影響部の板表面に比べて、板厚内部の多軸応力が高いこと

を確認した。実際、図3に示すように、板厚内部において、クリープ試験後に多くのクリープポイドが認められた。この観察結果に基づいて、組織観察試料を採取した。

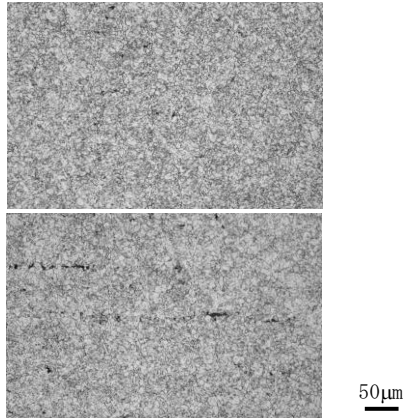


図3 クリープ後の溶接熱影響部細粒域の光学顕微鏡組織(上: 表面近傍、下: 板厚内部)

### (3) 転位組織観察

図4にクリープ試験前およびクリープ試験後の透過電顕組織を示す。クリープ試験前において、母材部は典型的なマルテンサイト組織であるのに対して、溶接熱影響部細粒域(FGHAZ)では、等軸化したサブグレイン組織が認められる。これは、溶接後熱処理により、初期のマルテンサイト組織の回復が生じたことによるものと考えられる。クリープ試験後では、母材部、FGHAZ部ともにやや、サブグレインサイズが増加していることが分かる。

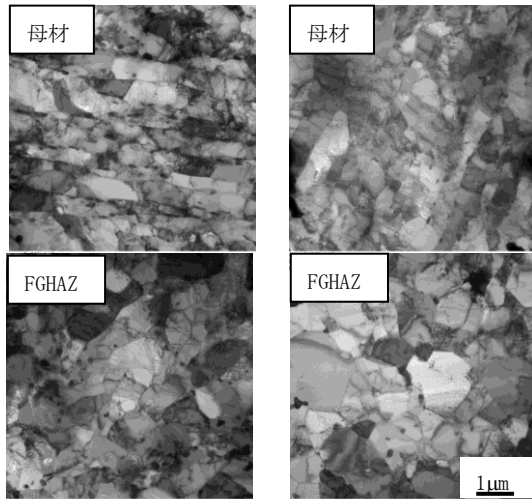


図4 クリープ試験前後の透過電顕組織  
左: 試験前、右: クリープ試験後(60MPa, tr=10559.2h)

平均サブグレインサイズとクリープ破断時間の関係を図5に示す。母材部、FGHAZ部ともに、破断時間の増加に伴い、サブグレインサイズは増加する。試験前における母材部のサブグレインサイズはFGHAZ部に比べて小さいが、試験中の増加幅は両部位で大差ない。

また、FGHAZ部の板表面近傍と板厚内部の間に大きな差は認められない。つまり、多軸応力の大小の違いは、サブグレイン組織の変化に影響しないことが分かった。図6に、図4で示したサブグレイン内の転位組織の典型的なものを示す。図7に、サブグレイン内の転位密度とクリープ破断時間の関係を示す。クリープ破断時間の増加に伴い、転位密度は減少する。試験前における母材部の転位密度は、FGHAZ部に比べて高い。しかし、試験中の変化傾向は、両者で違いがない。また、FGHAZ部の板表面近傍と板厚内部の間にも大きな違いは認められず、多軸応力の大小の違いは、転位密度に影響しない。

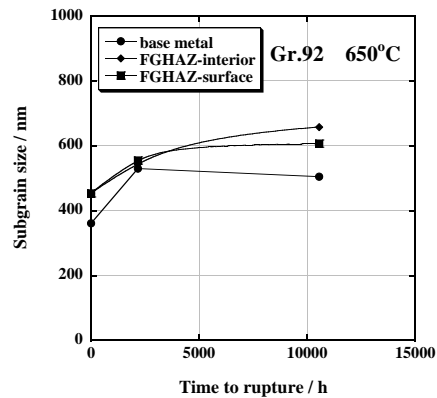


図5 平均サブグレインサイズとクリープ破断時間の関係

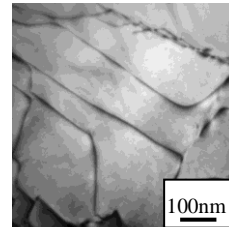


図6 サブグレイン内の転位組織 クリープ破断後の母材部(90MPa, tr=2162.9h)

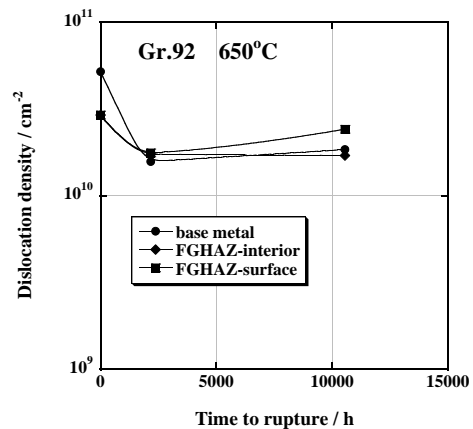


図7 サブグレイン内の転位密度とクリープ破断時間の関係

#### (4) 析出物観察

図 8 に、クリープ試験前および試験後のカーボン抽出レプリカ膜の透過型電子顕微鏡による明視野像を示す。試験前では、母材・FGHAZ ともに微細な析出物が多量に分散していることが分かる。一方、クリープ試験後では、母材・FGHAZ ともに析出物のサイズが試験前に比べて増加している傾向が認められる。本鋼では、 $M_{23}C_6$ 、MX、Laves 相が析出していると考えられるため、析出物の種類ごとの分布を見るために、STEM-EDX による元素マッピングを行い、析出物を識別した。図 9 に、元素マッピングの結果を示す。赤色、青色、緑色で示した粒子がそれぞれ、 $M_{23}C_6$ 、MX、Laves 相である。母材・FGHAZ 部ともに、クリープ試験に伴い、Laves 相が析出していることが

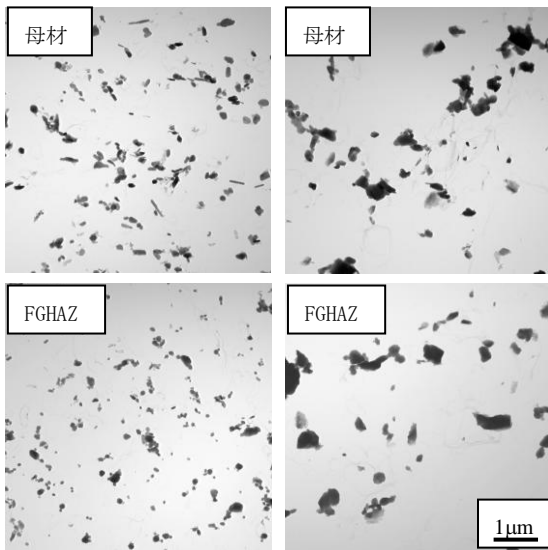


図 8 クリープ試験前後のレプリカ像  
左：試験前 右：試験後 (60MPa,  $t_r=10559.2h$ )

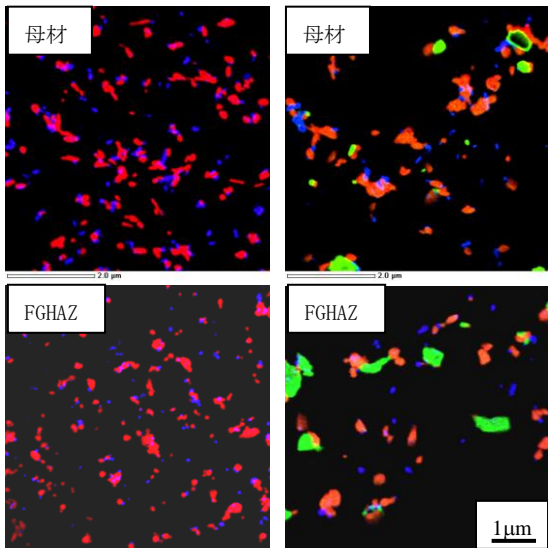


図 9 クリープ試験前後の元素マッピング像  
左：試験前 右：試験後 (60MPa,  $t_r=10559.2h$ )  
赤： $M_{23}C_6$ 、青：MX、緑：Laves 相

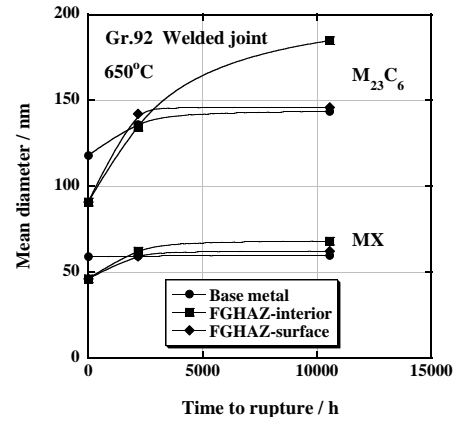


図 10 析出物の平均径とクリープ破断時間の関係

分かる。また、 $M_{23}C_6$  は、クリープ試験によりそのサイズが増加する傾向にある。一方、MX のサイズ変化は小さい。図 10 に、各析出物の平均粒子径とクリープ破断時間の関係を示す。母材部では MX のサイズ変化はないが、FGHAZ 部では、MX が短時間域で顕著な成長をした後、サイズ変化は小さくなる。一方、 $M_{23}C_6$  は、母材・FGHAZ 部ともに成長が顕著である。しかし、母材・FGHAZ 部の板表面近傍では、短時間域での成長後は、サイズ変化は小さい。それに対して、FGHAZ 部の板厚内部では、 $M_{23}C_6$  の成長が著しく、長時間域では板表面に比べて 3 割程度サイズが大きくなる。板厚内部では、板表面に比べて応力の多軸度が高いことから、多軸応力場が  $M_{23}C_6$  の成長を促進したものと考えられる。FGHAZ で生じる TypeIV 破壊では、板厚内部で優先的にクリープポイドが生成する傾向がある。また、クリープポイドは粗大な析出物と母相の界面で生成する傾向がある。図 10 に示すように、板厚内部の  $M_{23}C_6$  は板表面近傍に比べて著しく大きいため、板厚内部では、クリープポイド生成起点が多いと考えられる。これまでは、板厚内部の高い多軸応力が、空孔凝集を促進させることで、優先的にクリープポイドが生成したものと考えられてきたが、高い多軸応力は、析出物の粗大化を促進することで、クリープポイド生成起点の増加をも引き起こしていることが分かった。

現在稼働中の高効率火力プラントでは、TypeIV 破壊の予兆を的確に把握し、プラントの安全運転を担保する必要がある。FGHAZ 部の板厚内部で生じるクリープポイドは、クリープ中に微小き裂になり、破壊に到る。部材の余寿命評価のためには、き裂を如何に非破壊的に検出するかが重要であり、非破壊評価法の研究が活発に行われている。最近の研究から、材種によっては、寿命の極後期段階でき裂が生じる例が報告されている。その場合、より確実な部材の余寿命評価のためには、き裂が生じる前の段階において、部材の劣化・

損傷の程度を把握しておくことが重要である。劣化を把握するにはクリープ中に生じる組織変化に着目する必要がある。一般に、高温における組織変化は、温度・時間がその支配因子である。したがって、部材の全部位が一定温度であれば、一定時間後の組織形態に部位依存性はないはずである。本研究成果は、力学状態(単軸応力と多軸応力の違い)が組織変化に大きな影響を及ぼすことを示しているため、一定温度・一定時間経過後でも、組織形態は部位に依存することになる。したがって、今後部材の劣化評価をより精緻に行うためには、部材の力学状態の把握が重要になる。

欧米では、TypeIV破壊の原因について、力学的観点からの研究が多く、同破壊は不可避のものとして認識されている。一方、国内では、TypeIV破壊の原因について、力学的観点のみならず組織学的な観点からの研究も盛んであり、合金設計や組織制御により TypeIV破壊を回避する研究も行われている。本研究の成果は、力学状態の違いが組織変化に影響することを示しており、力学状態を扱う機械工学と材料組織を扱う材料工学の両者をつなぐ上で恰好の材料を提供していると言える。

今後も構造材料研究の一つの方法論として、力学状態を考慮した材料組織変化・劣化に関する研究を各種環境下で使用される材料について展開していくべきと考える。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ①澤田浩太、木村一弘、田淵正明他、高 Cr 鋼におけるクリープ中の多軸応力場と微細組織変化の関係、日本材料学会第 47 回高温強度シンポジウム、2009年12月4日、別府国際コンベンションセンター
- ②澤田浩太、木村一弘、田淵正明他、高 Cr 鋼溶接熱影響部のクリープ中組織変化と多軸応力、第 53 回日本学術会議材料工学連合講演会、2009年10月20日、京大会館
- ③澤田浩太、田淵正明、木村一弘他、9-12%Cr 鋼溶接熱影響部のクリープに伴う組織変化、日本学術振興会耐熱金属材料第 123 委員会、2009年7月14日、東京工業大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

澤田 浩太 (SAWADA KOTA)  
独立行政法人物質・材料研究機構・材料信頼性センター・主任研究員  
研究者番号：00354225

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし