

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 12 現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560745

研究課題名（和文）

フェイズフィールドモデルを用いたステンレス鋼溶接部の 475°C 脆化予測

研究課題名（英文）

Prediction of 475°C Embrittlement in Stainless Steel Welds using Phase Field Model

研究代表者

才田 一幸 (SAIDA KAZUYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：30178470

研究成果の概要（和文）：ステンレス鋼溶接部の 475°C 脆化を予測するため、フェイズフィールドモデルを用いて Fe-Cr-Mo および Fe-Cr-Ni 三元合金のスピノーダル分解挙動を解析した。スピノーダル分解開始時間は、Cr、Mo 含有量の増加に伴い短時間となるが、Cr/Mo 比にはほとんど依存しなかった。スピノーダル分解は、Ni 含有量の増加に伴い大幅に遅滞した。使用温度 561K において、FA モード凝固では保持時間 5Gs 程度から、AF モード凝固では 150Gs 程度からフェライト相硬化が開始することが予測された。

研究成果の概要（英文）：In order to predict the 475°C embrittlement phenomena in a ferritic phase of stainless steel welds, computer simulation of spinodal decomposition behaviour in Fe-Cr-Mo and Fe-Cr-Ni ternary alloys was conducted based on the phase field model. A beginning time for spinodal decomposition was shortened with an increase in the Cr and Mo contents in Fe-Cr-Mo alloy, while it did not change so much with Cr/Mo ratio. Spinodal decomposition was drastically delayed with an increase in the Ni content in Fe-Cr-Ni alloy. The predicted hardness of a ferritic phase at service exposure temperature (561 K) with FA mode began to increase at the holding time approx. 5 Gs, while that with AF mode began to increase at the holding time as long as approx. 150 Gs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：溶接・接合工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：475°C 脆化、フェイズフィールド法、スピノーダル分解、ステンレス鋼、凝固モード

1. 研究開始当初の背景

(1)フェライト系ステンレス鋼や二相ステンレス鋼のフェライト相において生じるスピノーダル分解による α' 相の析出は 475°C 脆

化と呼ばれ、400～500°C 付近の比較的低温の使用環境下で生じる。

(2)オーステナイト系ステンレス鋼では、一般に 475°C 脆化は生じないが、その溶接部では、

高温割れ防止の観点から数%の δ フェライト相を含む溶接金属となるよう溶接材料設計が実施されることから、フェライト相がスピノーダル分解し、475°C脆化が生じることが危惧される。

(3)近年の地球環境問題に起因した製品の寿命延長や各種プラントの高経年化に伴い、オーステナイト系ステンレス鋼溶接部においても475°C脆化は無視できない問題点として浮上してきている。

2. 研究の目的

- (1)フェイズフィールドモデルを用いたステンレス鋼溶接部（熱サイクル過程およびその後の等温保持過程）のスピノーダル分解挙動の可視化シミュレーション
- (2)析出硬化モデルに基づくステンレス鋼溶接部の475°C脆化予測

3. 研究の方法

- (1)ステンレス鋼475°C脆化予測手法の確立
 - ①フェイズフィールドモデルによるステンレス鋼スピノーダル分解挙動の可視化手法の確立
 - ②析出硬化モデルによる475°C脆化挙動の予測手法の確立
- (2)オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の凝固モード解析および δ フェライト相の組成分析
 - ①凝固モードに及ぼすステンレス鋼組成および溶接条件の影響
 - ② δ フェライト相組成に及ぼす凝固モードの影響解明
- (3)ステンレス鋼フェライト相のスピノーダル分解に及ぼす合金元素の影響
 - ①スピノーダル分解に伴う濃度分布と分解速度
 - ②スピノーダル分解に及ぼすCr、MoおよびNiの影響解明
- (4)ステンレス鋼フェライト相の熱サイクル過程におけるスピノーダル分解の可視化
 - ①単一および多重熱サイクルによる溶接部のスピノーダル分解状況の可視化
 - ②溶接金属および溶接熱影響部の等温時効によるスピノーダル分解の可視化
 - ③溶接部におけるスピノーダル分解挙動の実験的検証
- (5)ステンレス鋼475°C脆化のコンピュータ・シミュレーション
 - ①スピノーダル分解に伴う硬さおよび靱性変化のシミュレーション
 - ②ステンレス鋼における475°C脆化挙動の実験的検証
- (6)ステンレス鋼溶接部の475°C脆化予測
 - ①フェライト系ステンレス鋼の単層および多層盛溶接過程における475°C脆化予測
 - ②オーステナイト系・二相ステンレス鋼溶接

部における長時間時効に伴う475°C脆化予測
③475°C脆化軽減のための指針提案

4. 研究成果

- (1)ステンレス鋼475°C脆化予測手法の開発
 - ①ステンレス鋼フェライト相を対象にフェイズフィールドモデルによるスピノーダル分解挙動の理論的取り扱いと可視化手法を調査した。
 - ②スピノーダル分解による α' 相析出に伴う硬さおよび靱性変化を予測する手法を析出硬化モデルに基づき構築した。
- (2)オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属の凝固モード解析および δ フェライト相の組成分析
 - ①オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の凝固形態を観察し、凝固モードに及ぼすステンレス鋼組成および溶接条件の影響を明らかにした（図1）。

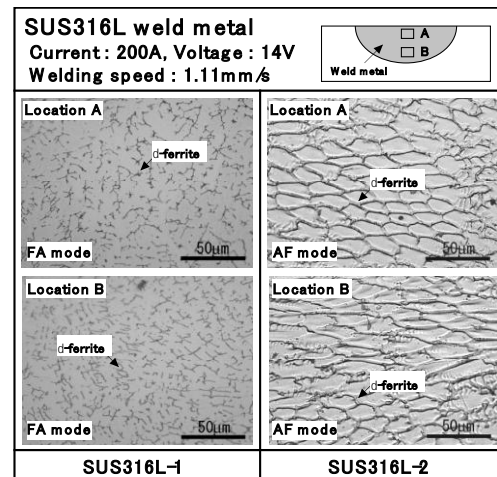


図1 オーステナイト系ステンレス鋼溶接部の凝固形態

②溶接条件に伴う δ フェライト相組成を分

表1 フェライト相の組成分析結果

δ -ferrite	Fe	Cr	Mo	Ni
FA mode	64.3	28.1	2.5	5.1
AF mode	57.2	29.4	6.2	7.2

析した（表1）。

- (3)ステンレス鋼フェライト相のスピノーダル分解に及ぼす合金元素の影響
 - ①構築したフェイズフィールドモデルを用いて、等温過程におけるスピノーダル分解に伴う溶質濃度分布の変化を可視化でき、時間経過に伴う濃度分布変化を計算できた（図2）。
 - ②CrおよびMo含有量が増加するに伴いスピノーダル分解速度が大きくなるが、Niはスピノーダル分解を遅滞させる効果があり、フェライト相を構成する主要元素であるCr、

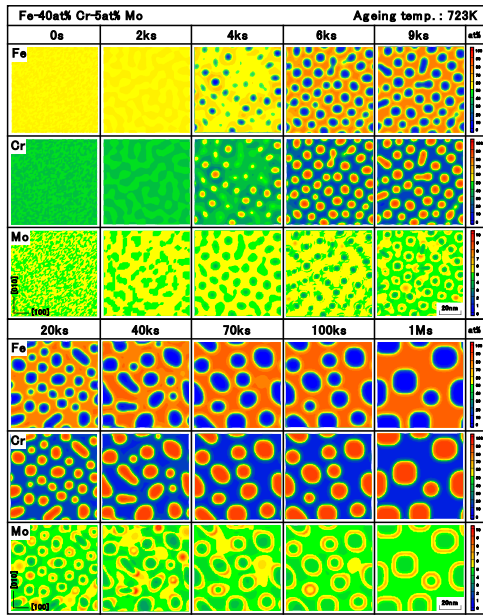


図2 スピノーダル分解に伴う溶質濃度分布の変化

MoおよびNiがスピノーダル分解に及ぼす役割について基礎的知見を得た。

(4)単一および多重熱サイクルによる溶接部のスピノーダル分解状況の可視化

①構築したシミュレーションモデルを用いて、フェライト系ステンレス鋼の単層溶接および多層盛溶接部を模擬した熱サイクル過程におけるスピノーダル分解状況を可視化した(図3)。

②スピノーダル分解に及ぼす溶接条件(溶接入熱、溶接速度)の影響を計算機シミュレーションにより解析できることを示した。

③最高到達温度が500~600℃程度の熱サイクルを受ける多層盛溶接部位において、スピノーダル分解が助長されることが予測された。

(5)溶接金属および溶接熱影響部の等温時効によるスピノーダル分解の可視化

①二相ステンレス鋼ステンレス鋼溶接部の等温時効に伴うスピノーダル分解挙動に関して計算機シミュレーションを行った結果、拡散定数を見かけ上2.5倍とすることにより、溶接熱影響部におけるスピノーダル分解が表現できる可能性を示し、溶接部におけるスピノーダル分解の特異性(加速効果)に関する基礎的知見を得た。

②オーステナイト系ステンレス鋼溶接金属中のδフェライト相におけるスピノーダル分解挙動に及ぼすCr、NiおよびMo含有量の影響を評価した。その結果、(Cr+Mo)量が一定であれば、CrとMo量によらずスピノーダル分解開始時間はほとんど変化しないことがわかった(図4)。さらに、Cr量が30at%付近では、Ni量が1at%変化してもス

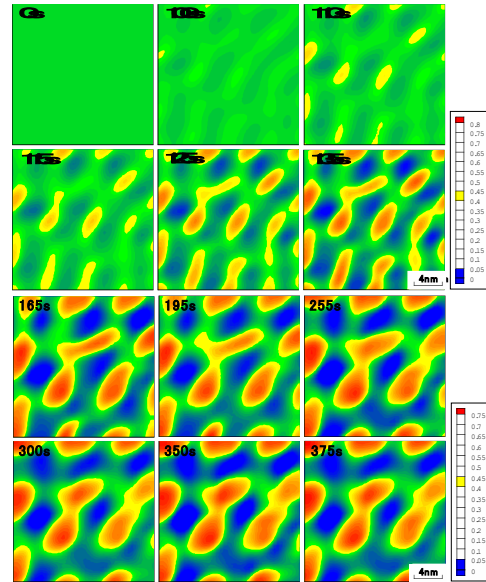
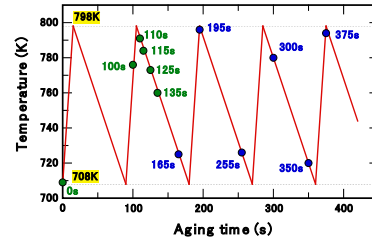


図3 熱サイクル過程のスピノーダル分解挙動

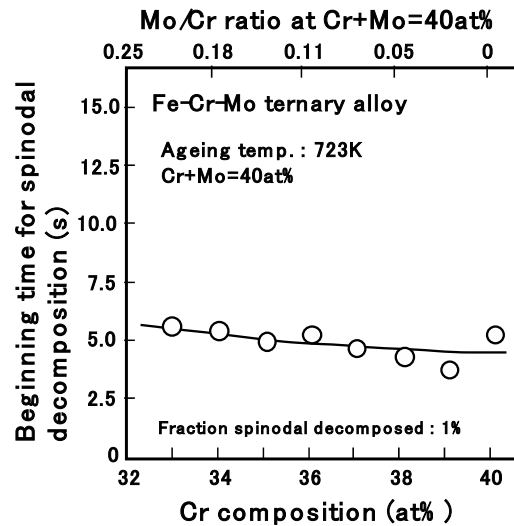


図4 スピノーダル分解開始時間に及ぼすCr、Mo量の影響

ピノーダル分解開始時間は10倍程度も変化することも明らかとなった(図5)。

③ステンレス鋼溶接部の475℃脆化予測が可能であることが示唆された。

(6)スピノーダル分解に伴う硬さおよび靱性

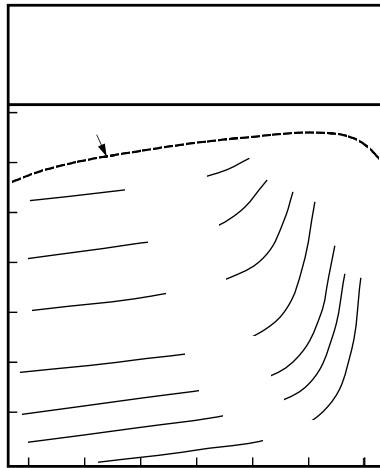


図5 スピノーダル分解開始時間に及ぼすCr、Ni量の影響

変化のシミュレーション

①析出硬化モデルに基づき、スピノーダル分解 (α' 相析出) に伴う硬さおよび靱性変化についてコンピュータ・シミュレーションを実施した。

②使用温度 561K において、FA モード凝固では保持時間 5Gs 程度から、AF モード凝固では 150Gs 程度からフェライト相硬化が開始することが予測された (図 6)。

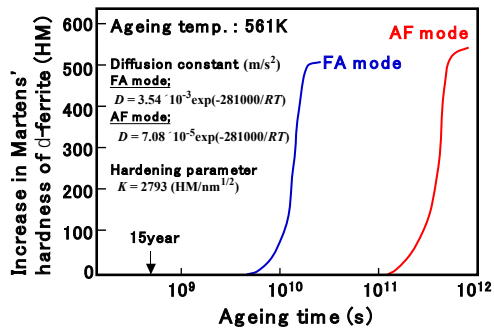


図6 フェライト相の 475°C 脆化予測結果

③フェライト系ステンレス鋼多層盛溶接部における 475°C 脆化を予測した結果、最高到達温度が 500~600°C 程度の熱サイクルを多重に受ける多層盛溶接熱影響部において、475°C 脆化が顕著となることが予測された (図 7)。

(7) ステンレス鋼における 475°C 脆化挙動の実験的検証

①ステンレス鋼を時効したときのフェライト相の硬さ変化および靱性変化を測定した。

②時効に伴う硬さおよび靱性の変化の予測結果は、おおむね実験結果と一致し、475°C

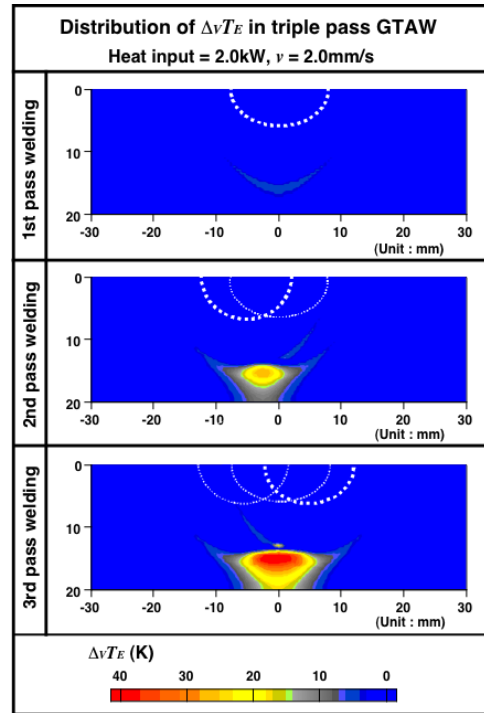


図7 フェライト系ステンレス鋼多層盛溶接部における 475°C 脆化予測結果

脆化シミュレーション結果の妥当性を検証できた (図 8)。

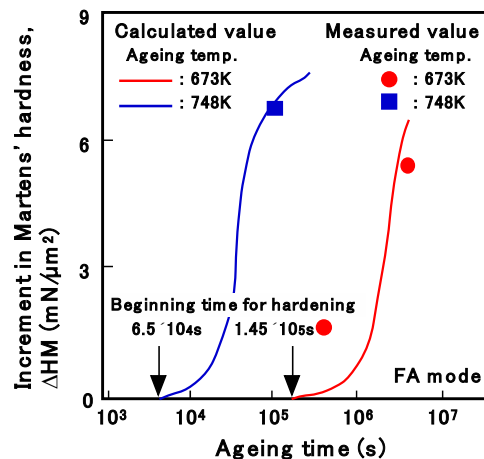


図8 475°C 脆化予測の実験的検証

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

1) 才田一幸, 西本和俊: 溶接冶金分野におけるシミュレーション・モデリング技術, 溶

接学会誌, 第 81 卷第 2 号 (2012), p. 76-84

[学会発表] (計 1 件)

1) Kazuyoshi Saida and Kazutoshi Nishimoto :
Prediction of 475°C Embrittlement in Stainless
Steel Welds using Phase Field Model,
Visual-JW2010, 2010 年 11 月 11~12 日, 大阪府
吹田市

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.mapse.eng.osaka-u.ac.jp/w3/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

才田 一幸 (SAIDA KAZUYOSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30178470

(2) 研究分担者

西本 和俊 (NISHIMOTO KAZUTOSHI)
大阪大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60112017

森 裕章 (MORI HIROAKI)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 10294026

荻原 寛之 (OGIWARA HIROYUKI)
大阪大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 80455279

(3) 連携研究者

なし