

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25年 6月 7日現在

機関番号：14401  
研究種目：若手研究（B）  
研究期間：2011～2012  
課題番号：23760096  
研究課題名（和文） インプロセス制御による溶接残留応力分布の適正化と構造健全性向上  
研究課題名（英文） In-process Control of Distribution of Weld Residual Stress and Improvement of Structural Soundness  
研究代表者  
岡野 成威（OKANO SHIGETAKA）  
大阪大学・大学院工学研究科・特任助教  
研究者番号：00467531

## 研究成果の概要（和文）：

溶接残留応力のインプロセス制御法として後方冷却法を提案し、数値シミュレーションを用いて適正な施工条件を明らかにするとともに、実験計測により応力低減効果を定量的に確認した。また、き裂を残存させる補修溶接部における残留応力分布の適正化のための溶接入熱条件の選定指針について理論・数値解析により明らかにするとともに、破壊力学パラメータを用いて残留応力分布の適正化が構造健全性向上に対して有用であることを定量的に示した。

## 研究成果の概要（英文）：

In-process control welding with a trailing heat-sink for reducing welding-induced residual stress was developed. The effect of cooling conditions on the reduction of residual stress was investigated by numerical simulation. After that, the reduction of residual stress was verified quantitatively by measurement experiment. Furthermore, appropriate seal welding conditions for controlling weld residual stress at the remaining crack tip region was theoretically and analytically derived. In addition, using the fracture mechanics parameter, the usefulness of control of weld residual stress distribution for improving the structural soundness at repair weld was clarified.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：インプロセス制御、溶接残留応力、後方冷却法、非破壊応力計測、数値シミュレーション、封止溶接、破壊力学パラメータ、構造健全性評価

## 1. 研究開始当初の背景

機械・構造物は一般に、その製造工程においてさまざまな熱加工履歴を受けており、それに起因して部材には残留応力が生じている。残留応力は、何らかの欠陥を起点とした脆性破壊や疲労破壊をもたらす場合がある他、疲労き裂や応力腐食割れ（SCC）などの欠陥の発生に繋がる損傷を促進させる場合

がある。そのため、残留応力を適切に制御すること、もしくは、残留応力を考慮した適切な構造強度設計・評価を行うことが重要である。

また近年では、高経年化した機械・構造物においてさまざまな損傷が発見されており、補修・保全技術の確立がより一層求められている。その中で、補修部位においてはより一

層の構造安全性や構造強度信頼性を確保することが重要となってくる。そのための一つの方策として、補修部位の残留応力を積極的に低減・制御できるような補修技術が構築されれば、今後さらに高経年化していく機械・構造物に対して、高い信頼性を確保しつつ、より合理的な保守・保全が可能となる。以上の背景を踏まえて、今後解決すべき技術課題として、機械・構造物の製作時や損傷が発見された機械・構造物の補修時に生じる残留応力を適切に低減・制御できる技術を確立することが挙げられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、機械・構造物の製作や補修時に生じる溶接残留応力を、溶接前後の付加的な工程を必要とせずインプロセスに低減・制御できる技術を構築することを目的とする。具体的には、下記の取り組みを実施する。

(1) 後方冷却法を用いた温度場制御によるインプロセス残留応力軽減法の構築

溶接熱源の後方に冷却源を追従させて温度場を制御することで残留応力を低減させる方法を提案し、数値シミュレーションにより適正な冷却条件を探索するとともに、その結果に基づいて実際に冷却トーチを製作し、実験的に残留応力低減効果を検証する。

(2) 溶接施工条件に基づく残留応力分布の適正化による封止溶接部の構造健全性向上

き裂を残存させたまま欠陥部を肉盛溶接にて封止して補修する「封止溶接」を取り上げ、残留応力低減に有用な溶接施工条件範囲を明らかにするとともに、破壊力学パラメータを用いて残留応力低減の構造健全性向上に対する有用性を評価する。

## 3. 研究の方法

(1) 後方冷却法を用いた温度場制御によるインプロセス残留応力軽減法の構築

図1に、本研究で提案する「後方冷却法」の概要を示す。後方冷却法とは、溶接熱源の後方に一定の距離を保って冷却源を追従させる方法である。制御パラメータとしては、冷却の強さと冷却位置（熱源間距離）が挙げられるが、本検討においては、冷却位置に注目して検討を進める。

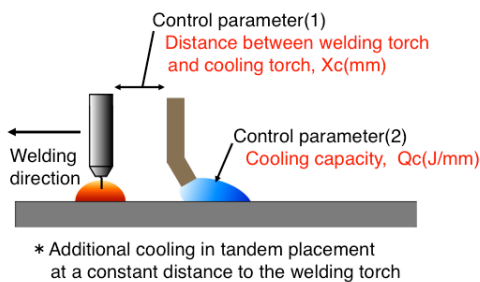


図1 後方冷却法の概要

検討に用いる試験体は、図2に示すように、長さ250mm、幅150mm、厚さ50mmのオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316LN である。図中に示すように、板中央部にTIG溶接にてビードオンプレート溶接を行う。溶接条件は、溶接電流120A、溶接速度2mm/sであり、流量20L/minの100%Arシールドガスを用いる。溶接条件は変化させずに、冷却の有無による違いについて検討する。水冷トーチの概略図と写真を図3に示す。製作した水冷トーチは、如雨露にスチールウールを巻き付けたものである。これに水道水を一定速度で供給し、水に浸したスチールウールを溶接試験体に擦り付けることで吸熱を行うものである。写真にあるように、水冷用トーチは溶接トーチのノズルに固定している。

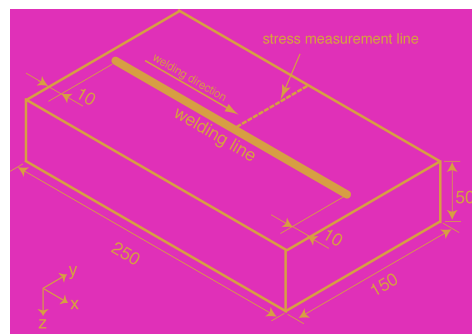
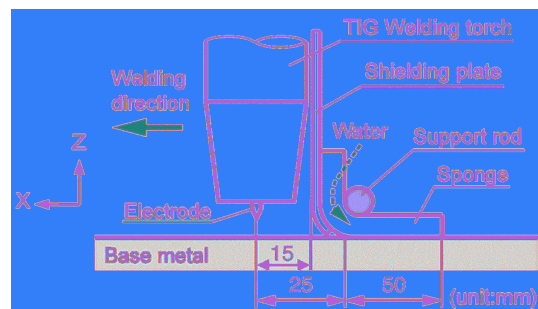
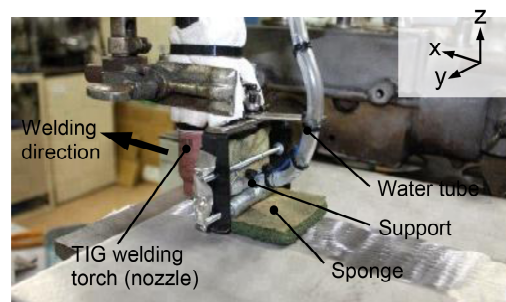


図2 試験体形状



(a) 概略図



(b) 写真

図3 水冷用トーチの外観

実験では、溶接後の試験体に対してX線応力測定による応力評価を行い、残留応力分布に対する冷却の有無の影響について検討する。

数値解析には図4に示す有限要素モデルを用いる。溶接現象の対称性を考慮して1/2モデルとしている。また、数値解析に用いた物性値は図5に示すものであり、これらの物性値を用いて熱伝導解析および熱弾塑性解析を実施する。

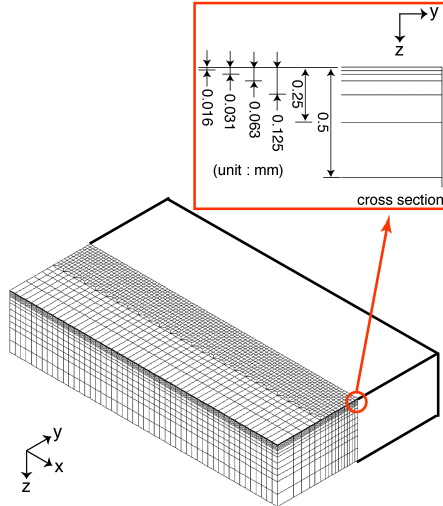
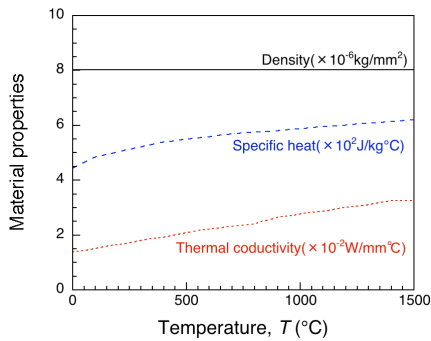
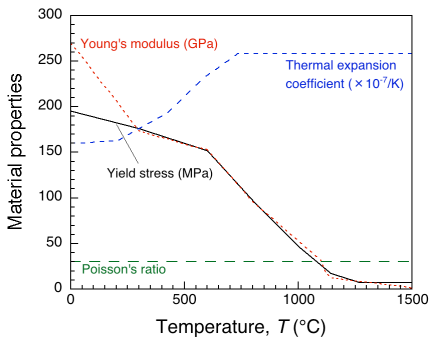


図4 数値解析モデル



(a) 熱伝導解析に用いる物性値



(b) 熱弾塑性解析に用いる物性値  
図5 数値解析に用いる材料物性

溶接を模擬した熱源モデルは、アークプラズマの数値解析モデルから求まる入熱分布特性に基づいて決定する。水冷に伴う冷却分布は、予備実験で計測した温度履歴に基づいて模擬する。数値解析においては、溶接トーチと水冷トーチの熱源間距離を種々に変化させて、残留応力低減のための適正な冷却位置についての検討も行う。

チと水冷トーチの熱源間距離を種々に変化させて、残留応力低減のための適正な冷却位置についての検討も行う。

(2) 溶接施工条件に基づく残留応力分布の適正化による封止溶接部の構造健全性向上

本検討では、図6に示すように、シュラウドサポートにおいて発見された応力腐食割れに対して封止溶接にて補修することを想定している。大口径であることを踏まえて、簡単のため、二次元平面ひずみモデルにて検討を行う。数値解析モデルは図7に示すものであり、板厚、き裂深さ、入熱をパラメータとした系統的な解析を行う。母材にはニッケル基 Alloy600、溶接材料にはニッケル基 Alloy690 を想定した物性値を与える。材料物性は、図5に示したものと同様に、温度依存性を考慮している。

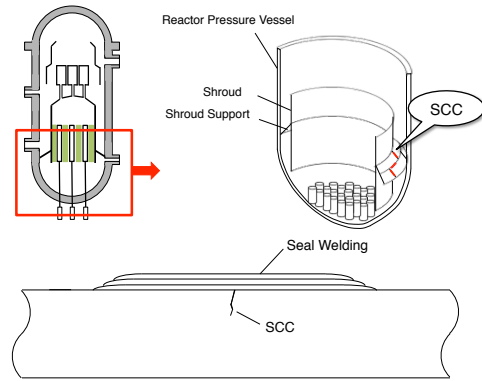


図6 シュラウドサポートと封止溶接

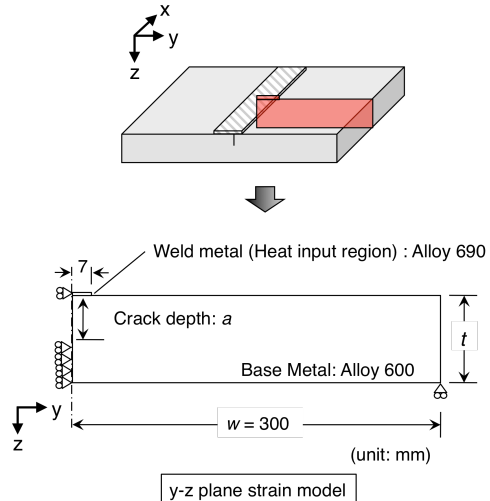


図7 二次元平面ひずみを想定した解析対象

以上の要領で熱弾塑性解析を実施し、き裂先端近傍の応力分布を評価し、板厚、き裂深さ、入熱の影響について検討する。また、得られた応力分布を基に、図8に示すように、重ね合わせの原理に基づいてき裂先端近傍の変位を求め、変位法によって応力拡大係数

を求める。応力拡大係数を用いて、残留応力低減によるき裂進展駆動力の軽減効果の評価し、構造健全性向上に対する有用性について検討する。

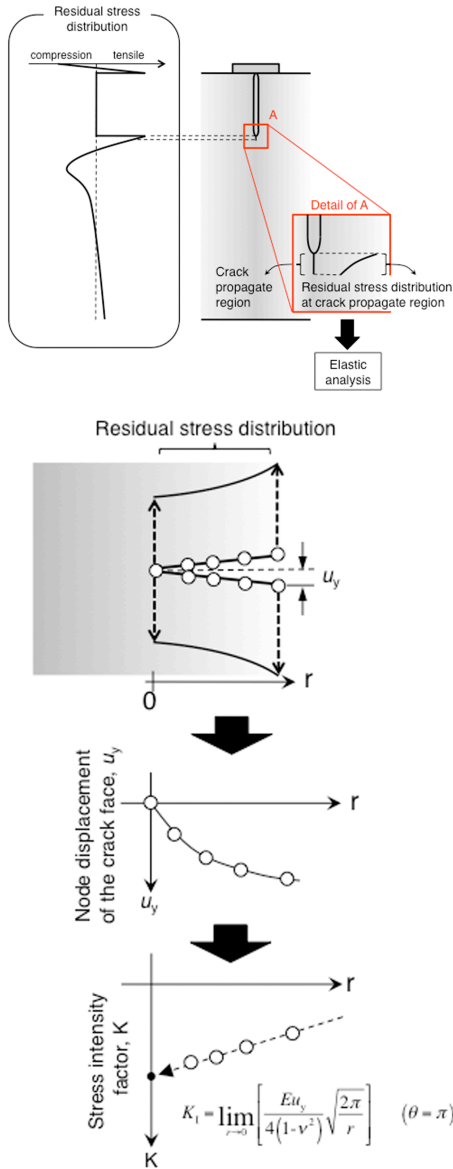


図8 応力拡大係数の算出方法

#### 4. 研究成果

(1) 後方冷却法を用いた温度場制御によるインプロセス残留応力軽減法の構築

数値シミュレーション結果から、冷却位置を変化させた際の残留応力の変化傾向を纏めたものを図9に示す。冷却位置を或る程度近づけなければ効果的な低減量は得られないことがわかる。そこで、本検討では熱源間距離を20mm程度として(a)水冷を行う場合と(b)水冷を行わない場合の2ケースについて実験を行った。その結果として得られた残留応力分布のX線応力測定結果を数値シミュレーション結果と併せてそれぞれ図10(a)と

(b)に示す。これらの図より、冷却の有無によって溶接中央部の応力分布は大きく異なっており、冷却を行うことで溶接線方向・溶接線直角方向いずれの応力値も200MPa程度低下していることがわかる。また、どちらの場合についても、数値シミュレーション結果とX線応力測定結果は比較的良い一致を示しており、いずれの評価方法も十分な精度を有していることが示唆された。

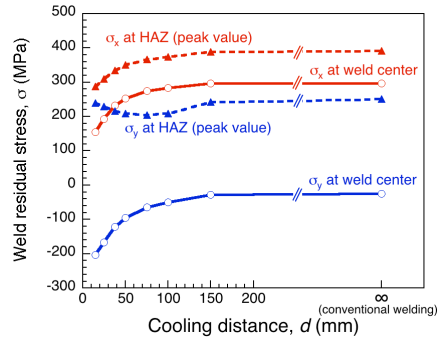
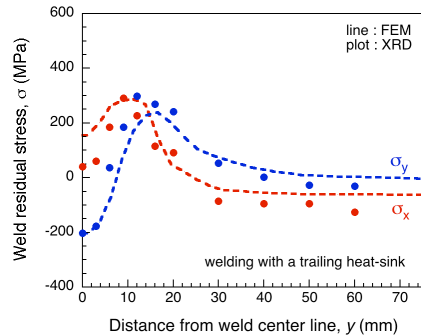
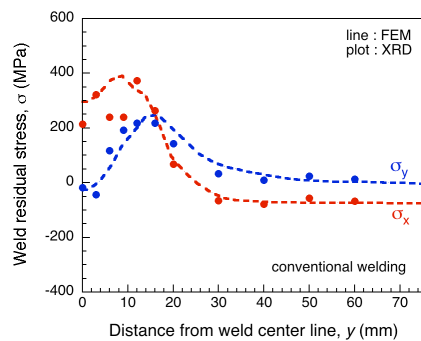


図9 残留応力への冷却位置の影響



(a) 水冷を行った場合



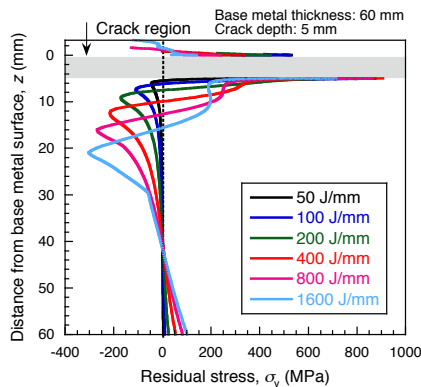
(b) 水冷を行わなかった場合

図10 残留応力分布への後方冷却の影響

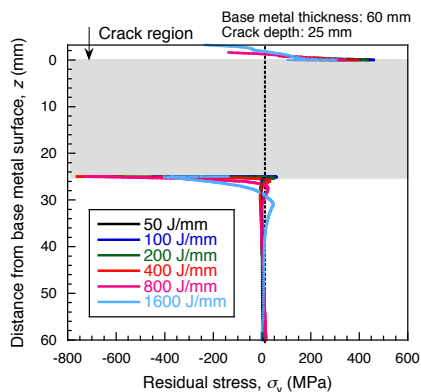
以上のように、適切な条件で後方冷却を行うことで、残留応力が効果的に低減できることが示された。引張応力の軽減や圧縮応力の導入は、応力腐食割れや疲労き裂の発生を抑制する上で有用となり得ることから、残留応力低減を可能とする本手法は、機械・構造物の構造安全性・構造強度信頼性の向上に対して有用となることが期待される。

(2) 溶接施工条件に基づく残留応力分布の適正化による封止溶接部の構造健全性向上

板厚 60mm に対してき裂深さが 5mm と 25mm の場合に入熱を様々に変化させて肉盛溶接した場合のき裂線上板厚方向に沿った溶接残留応力の分布を図 11 (a) および (b) に示す。応力はき裂を開口しようとする板幅方向の成分である。これらの図を比較すると、いずれも入熱によって分布が大きく変化しているが、き裂深さが異なることによってその変化傾向は異なっている。例えば、(b) においてはき裂下端の応力はほとんどの場合に圧縮応力になっているが、(a) ではそうっていない。すなわち、き裂深さに対して入熱の影響の仕方が異なることがわかる。



(a) き裂深さが 5mm の場合



(b) き裂深さが 25mm の場合

図 11 き裂線上応力分布への諸因子の影響

ここで、き裂下端から 0.025mm の位置における応力値とき裂深さ、入熱の関係を整理したものを図 12 に示す。この図より、いずれのき裂深さにおいても、はじめは入熱の増加につれて圧縮応力が大きくなり、その後極小値をとった後に一転して引張応力に変化していき、最終的には一定の引張応力値となる傾向がうかがえる。また、入熱に対するその変化傾向はき裂深さに応じてずれていることもわかる。そこで、この応力値が、き裂深さに対して板厚方向の温度分布の拡がりに依存すると考え、溶接熱伝導論に基づいて、その影響支配因子として  $Q/\sqrt{a}$  ( $Q$ : 入熱、 $a$ :

き裂深さ) を導出した。このパラメータを用いて、き裂下端の応力を整理した結果を図 13 に示す。この図より、本パラメータによってき裂下端の応力の傾向を统一的に整理し得ることがわかった。また同様に、き裂下端において応力拡大係数を算出し、本パラメータで整理した。その結果を図 14 に示す。こちらも同様に本パラメータにより统一的に整理できていることがわかる。

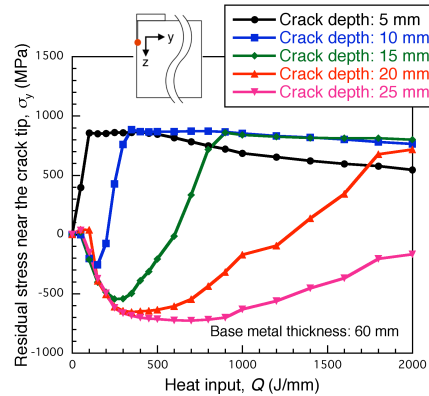


図 12 き裂下端応力値への諸因子の影響

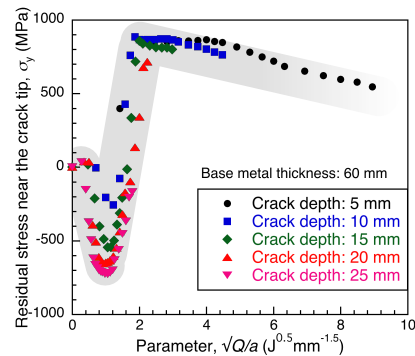


図 13  $Q/\sqrt{a}$  による応力値の整理

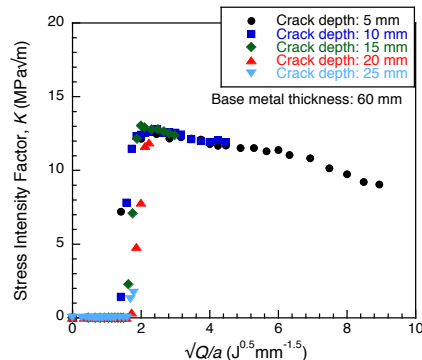


図 14  $Q/\sqrt{a}$  による応力拡大係数の整理

また、本結果によれば、パラメータ  $Q/\sqrt{a}$  の値が 1.5 程度よりも小さい条件であれば、き裂下端の応力値はマイナスであり、応力拡大係数は 0 となる。すなわち、残留応力に起因するき裂進展駆動力は 0 と見なせる。また、実際には圧縮応力となっていることから、供用下の負荷条件に対して、き裂進展駆動力を

軽減させることも期待される。このように、溶接条件の選定によって残留応力分布を適正化することで、補修部位の構造健全性の向上を図れることが示唆された。

実際の封止溶接は多層盛溶接であるが、その場合には、各パスでの入熱条件を適切に選定することに加えて、積層パスに伴う応力再分布を考慮することで、同様に、き裂進展駆動力を軽減あるいは0とできることがわかった。さらに、補修溶接中にき裂を起点として破壊に至ることが懸念されるが、補修溶接中のき裂開口量であるCTODを評価し、ニッケル基Alloy600の限界CTODと比較することで、施行中の破壊に対しても十分に安全裕度を有していることを確認した。

#### 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6件)

- ① A. Sugahara, S. Okano, T. Hashimoto and M. Mochizuki: Comparison of Weld Residual Stress Measurement Results in Low Alloy Welds between X-ray Diffraction Method and Stress Relief Method, Journal of Physics: Conference Series, vol. 379(2012), No. 012053. (査読有)
- ② S. Okano, M. Mochizuki, M. Toyoda and T. Ueyama: Effect of Welding Conditions on Reduction in Angular Distortion by Welding with a trailing Heat-Sink, Science and technology of Welding & Joining, vol. 17(2012), No. 4, pp. 264-268. (査読有)
- ③ M. Mochizuki, S. Okano and K. Torigata: Effect of Seal Welding Conditions on Residual Stress Field and Fracture Mechanics Parameter around Remaining Crack, Proceedings of the 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers, PVP2013-98069(2013). (査読有) [印刷中]
- ④ S. Okano and M. Mochizuki: Mitigation of Welding-induced Tensile Residual Stress at Surface of Heavy Section Plate by In-Process Control Welding with Trailing-Heat Sink, Proceedings of the 2013 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, American Society of Mechanical Engineers, PVP2013-98071(2013). (査読有) [印刷中]
- ⑤ 辻明宏、橋本匡史、岡野成威、望月正人: 溶接残留応力場における主応力の変化に

関する考察, 材料(2013). (査読有) [印刷中]

- ⑥ M. Miyabe, M. Iyota, S. Okano and M. Mochizuki: Semi-Destructive Method for Evaluation of Local Mechanical Properties in Notch-Tip Region using Indentation Technique, Quarterly Journal of the Japan Welding Society(2013). (査読有) [印刷中]

[学会発表] (計8件)

- ① 菅原旭、岡野成威、橋本匡史、望月正人: X線残留応力測定法の低合金鋼溶接部への適用に関する検討、溶接学会秋季全国大会、皇學館大学、2011.9.9.
- ② 辻明宏、菅原旭、橋本匡史、岡野成威、望月正人: アルミニウム合金A5083溶接部のX線回折を用いたザ流応力測定、溶接学会秋季全国大会、皇學館大学、2011.9.9.
- ③ 川口明敬、伊藤真介、岡野成威、橋本匡史、望月正人: 厚板配管補修溶接部の残留応力の実験計測と数値解析、溶接構造シンポジウム2011、大阪大学、2011.11.15.
- ④ A. Sugahara, S. Okano, T. Hashimoto and M. Mochizuki: Comparison of Weld Residual Stress Measurement Results in Low Alloy Welds between X-ray Diffraction Method and Stress Relief Method, ECO-Mates 2011, Hankyu Expo Park Hotel, 2011.11.29.
- ⑤ 鳥形啓輔、岡野成威、望月正人: 封止溶接部の残存き裂先端近傍の残留応力場および破壊力学パラメータに及ぼす溶接条件の影響、溶接学会秋季全国大会、奈良文化会館、2012.9.27.
- ⑥ 辻明宏、橋本匡史、岡野成威、望月正人: 相変態が生じた溶接部のX線回折を用いた残留応力測定、溶接学会秋季全国大会、奈良文化会館、2012.9.27.
- ⑦ R. Ihara, S. Okano, T. Hashimoto, M. Mikami and M. Mochizuki: Visualization of Machining and Welding Residual Stress Variation by Numerical Simulation in Austenitic Stainless Steel, Visual-JW2012, Hankyu Expo Park Hotel, 2012.11.29.
- ⑧ 辻明宏、岡野成威、望月正人: 相変態挙動の異なる溶接部におけるX線残留応力測定: 応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム、機械振興会館、2013.1.22.

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

岡野 成威 (OKANO SHIGETAKA)  
大阪大学・工学研究科・特任助教  
研究者番号: 00467531