

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289009

研究課題名(和文) 微視的内部観察に基づく接合材の疲労損傷機構解明による高強度先進接合技術の開発

研究課題名(英文) Development of high-strength advanced joining technology by fatigue damage mechanism elucidation of joints on the basis of the microscopic internal observation

研究代表者

菅田 淳 (Sugeta, Atsushi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60162913

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：スポット溶接継手，リモートレーザー溶接継手，摩擦攪拌点接合継手の3種類の接合継手を取り上げ，各接合材の疲労強度特性・疲労損傷機構を明らかにするとともに，実働荷重下の疲労寿命予測法について検討を行った．いずれの接合材においても疲労き裂はスリット先端から発生することが明らかとなった．疲労寿命はスリット先端に生じる特異応力場を支配する力学パラメータである応力拡大係数範囲によって一義的に評価できることを明らかとした．変動荷重下の疲労寿命評価法としては，修正マイナー則もしくはコーテンドーラン流の予測法が妥当であることを明らかとした．

研究成果の概要(英文)：It revealed the fatigue strength and fatigue damage mechanism of each bonding material, such as resistance spot welded joints, remote laser welding joints and the friction stir spot joint. And also, the fatigue life prediction method under variable amplitude loading was examined. The fatigue crack initiated at the slit between upper and lower plates in any of the joints. It was clear that the fatigue life was evaluated by stress intensity factor range which is a mechanical parameter governing the singular stress field at the slip tip. The fatigue life evaluation method under variable amplitude loading, was clear that the prediction method of modified Miner's law or Corten-Dolan method is reasonable.

研究分野：材料強度学

キーワード：接合材 疲労損傷機構 微視的観察 内部観察 疲労寿命評価 疲労き裂進展 溶接継手 摩擦攪拌継手

1. 研究開始当初の背景

日本のエネルギー事情は近年益々深刻なものとなっている。自動車産業においては車体重量半減の目標に対して、主要構造材である鉄鋼材料の高強度化による薄板殻構造への移行、Al合金を初めとする軽合金の大量採用とともに炭素繊維複合材料等の樹脂材料の積極的使用を積極的に進めようとしている。

しかしながら、多種多様な材料を車体構造材料として適用する場合には種々の問題点が散在している。鉄鋼材料に関しては、主要強度部材への高強度鋼の利用が拡大しているが、重量の大部分を占める薄板構造部材への適用は進んでいないのが現状である。その主要因は、鉄鋼材料の接合に使用されているスポット溶接接合材において高強度母材を用いても、その疲労強度は低強度母材を用いた場合に比較して全く改善しないためである。また、鉄鋼とアルミニウム合金のような異種接合材では電氣的腐食が生じやすい問題があり、絶縁を考慮した接合技術の確立が必要であるが、強度的に不利になる場合が多く、接合技術が十分確立されているとは言い難い。

2. 研究の目的

自動車等代表される輸送機器の省エネルギー化は、重量の大半を占める耐強度構造体の軽量化により最も有効に達成できる。軽量化のポイントは高強度材料の利用による薄板殻構造化である。しかしながら、母材を高強度化が全く疲労強度の向上に寄与しないスポット接合材の問題点や、高強度を確保した異種接合技術が必ずしも確立されていない現状では、高強度材や軽金属の適用範囲が限定されており、さらなる軽量化の壁となっている。この原因は種々の接合材の損傷機構が解明されておらず、根本的な解決策が見つからないことによる。本研究の目的は、スポット溶接、レーザー接合、高炭素高強度鋼摩擦攪拌接合の各種接合技術により作製された接合材の疲労損傷発達過程を時系列微視的内部観察することで疲労損傷機構を同定することを目的としている。

3. 研究の方法

接合材疲労損傷の微視的内部観察システムを構築する。原子間力顕微鏡を用いて接合材断面の微視的硬度測定ならびに局所機械的性質計測システムを構築するとともに、切断面保持試験片を用いた疲労試験により、疲労き裂発生ならびにき裂進展挙動のナノスケール損傷その場観察を行い、放射光を援用した内部観察結果と合わせることで、接合材の疲労損傷発達機構を明らかにする。次年度以降は、スポット溶接材に加えて、リモートレーザー接合材ならびに摩擦攪拌接合についての疲労試験ならびに内部損傷観察を行い、各種接合材の疲労損傷発達機構を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 抵抗スポット溶接接合材の疲労損傷機構

疲労試験は自動車用冷間圧延高張力鋼板SAFC590Yを用いて、ラップシエア、ピール

試験により行った。疲労試験結果を図1に示す。図に見られるように荷重モードによって疲労挙度に顕著な差が生じることがわかる。

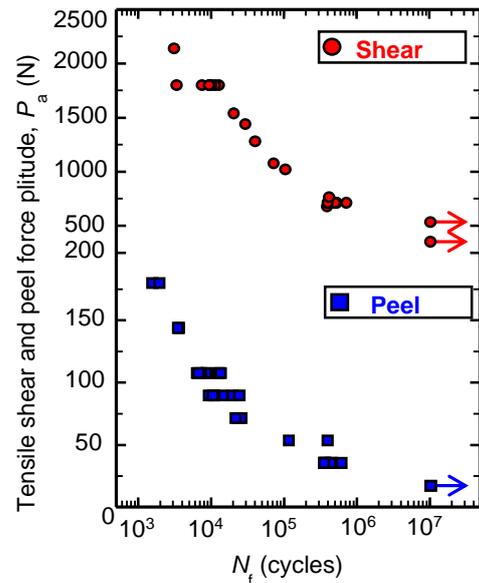


図1 疲労強度特性

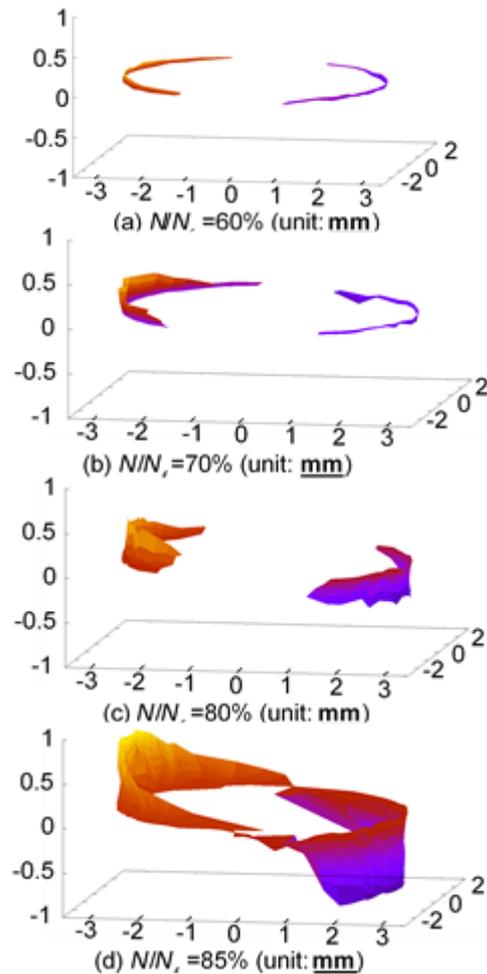


図2 疲労き裂の内部直接観察

図2はラップシエアタイプの試験の試験内部疲労き裂観察を行った例である。(a)に示す疲労寿命の60%時点の観察で、既にスリット部先端からの疲労き裂発生が確認される。50%

時点ではこの分解能では観察されておらず、疲労き裂発生寿命は全寿命の半分程度あることがわかった。また、疲労き裂はナゲット周囲方向に進展するとともに、板厚方向にも進展し、板厚を貫通した後に全体の破壊を生じることが明らかとなった。

スポット溶接接合材の疲労き裂発生は、鋭い先端を持つスリットから発生していることから、破壊力学的アプローチにより寿命評価を検討した。自動車用鋼板は0.8mm程度の薄板であるため、純粋せん断、引張荷重下でも偏心による曲げ変形が生じるため、スリット先端の特異応力場は混合モードとなる。図2で観察された板厚方向のき裂進展方向は、解析的検討の結果、モードI型応力拡大係数が最大となる面に沿うことが明らかとなった、この最大モードI応力拡大係数範囲で疲労寿命を整理した結果を図3に示す。若干の差異は認められるものの、主力学因子としての応力拡大係数の有効性が認められる。

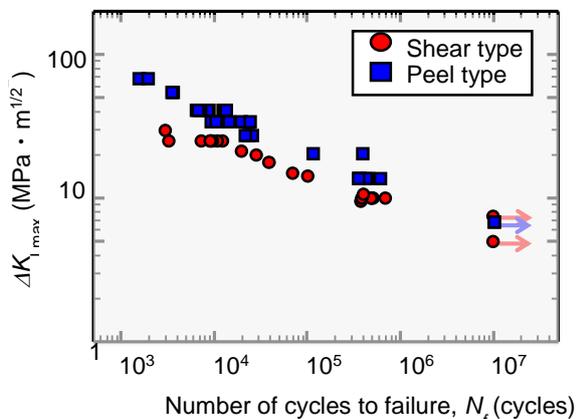


図3 疲労寿命の応力拡大係数による整理

(2) リモートレーザー接合材の疲労損傷機構

レーザー溶接剤の疲労試験は、ビード長さ25mm、ビード幅0.9mm、2.3mmとして、十字引張型(CT)、ラップシヤ型(TS)、純粋引張型(TP)の3種の試験片を用いて行った。

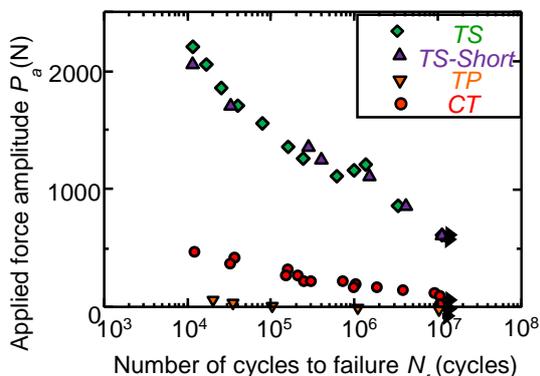


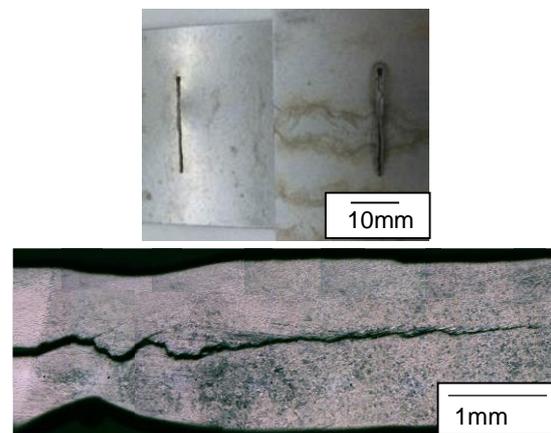
図4 レーザー接合材のP-N曲線

図4に疲労試験結果を示すが、荷重モード依存性が顕著に生じていることがわかる。図5にCT試験片の試験途中での内部き裂画像を示す。図中に明確で無いき裂は模式的に示し

ているが、き裂進展挙動に荷重レベル依存性が観察される。いずれの荷重振幅でも、疲労き裂はスリット先端から発生する。しかしながら、高荷重レベルでは発生直後から板厚方向に進展し、貫通した後、ビード直角方向に母材部を進展するが、低振幅荷重レベルでは(b)に示すようにビード部の板厚中央部を進展し、界面破壊様相を示す。このような破壊機構の遷移はTS試験片でも見られた。図6はTP試験片の破断様相の一例である。荷重レベ



(a) 高荷重振幅レベル



(b) 低荷重振幅レベル

図5 CT試験片のき裂進展経路観察結果



図6 TP試験片のき裂進展経路観察結果

ルによらず、溶接界面を疲労き裂が進展する様相を示したこのように、荷重モードによりき裂進展挙動が異なることが明らかとなった。

図7はスリット先端の特異応力場をFEM解析し透過応力拡大係数範囲を求め疲労寿命を整理したものである。バラツキは認められるもの主因子である判断できる。また、図2と比較するとほぼ同じ寿命曲線が得られており、接合方法の種類にかかわらず、疲労寿命は応力拡大係数で評価できるものと思われる。

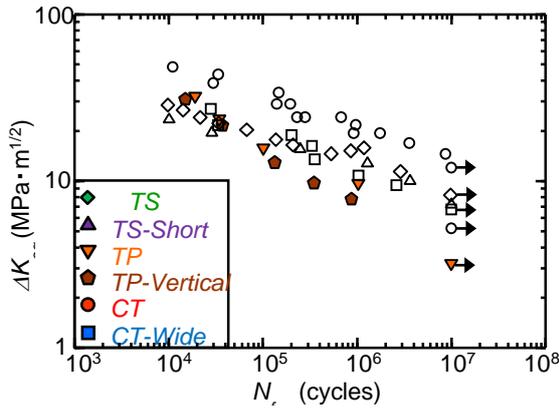


図7 疲労寿命の応力拡大係数による整理

(3)摩擦攪拌点接合材の疲労損傷機構

図8に薄板鋼板の摩擦攪拌点継手の中央部断面写真を示す。いわゆる固相攪拌領域(ST)は極限られた領域に限定されており、摩擦攪拌により発生する熱と加圧力による拡散接合に近い状態と考えられる。

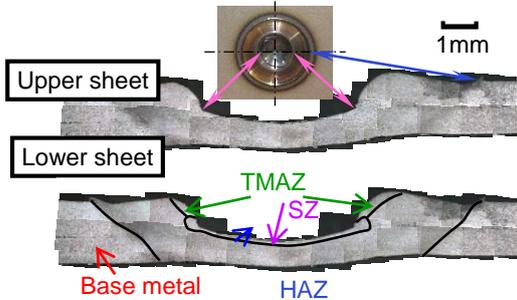


図8 摩擦攪拌点継手の断面観察

図9に十字引張型疲労試験の結果を示す。静的引張強度は0.8kNであり、疲労限度0.11kNは極端に低い値となっている。巨視的破壊形態はいわゆるボタン破壊様相を示していた。図10に破断後の試験片の断面写真を示す。疲労き裂は2枚の板の接合部先端(スリット先端)から発生し、板厚方向に進展していることがわかる。図11, 12は試験内部疲労き裂観察を時系列的に行った例である。低試験力の場合を示した図11の場合、寿命比が55.9%時点での観察では疲労き裂は観察されず、61.5%の時点で(a)に示すき裂が観察された。スリット先端で発生した疲労き裂は、接合部周囲に沿って進展しながら、板厚方向にも成長していることが

わかる。上板と下板に別々に発生・進展したき裂は67%程度で合体し、その後上板の母材部にき裂進展が生じた後、最終破断していることがわかる。一方、高試験力レベルの観察結果を示した図12では、寿命比23.4%で既に疲労き裂の発生が確認されており、疲労き裂発生寿命比が試験荷重レベルに依存することが明らかとなった。その後の進展挙動には試験力レベルの依存性は認められなかった。

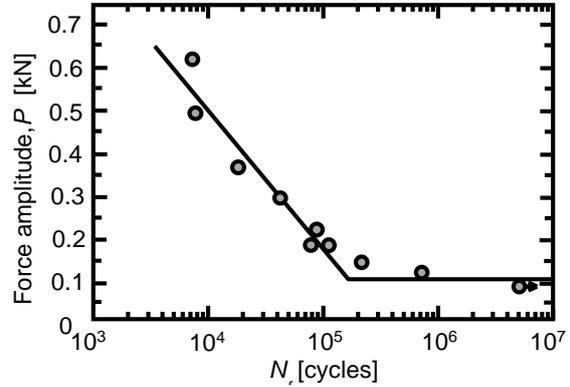


図9 摩擦攪拌点継手の疲労強度特性

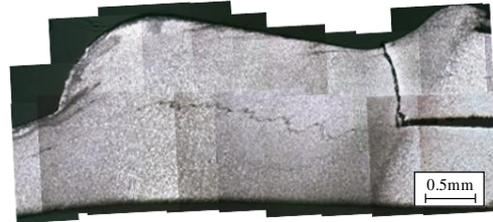


図10 試験片の断面写真

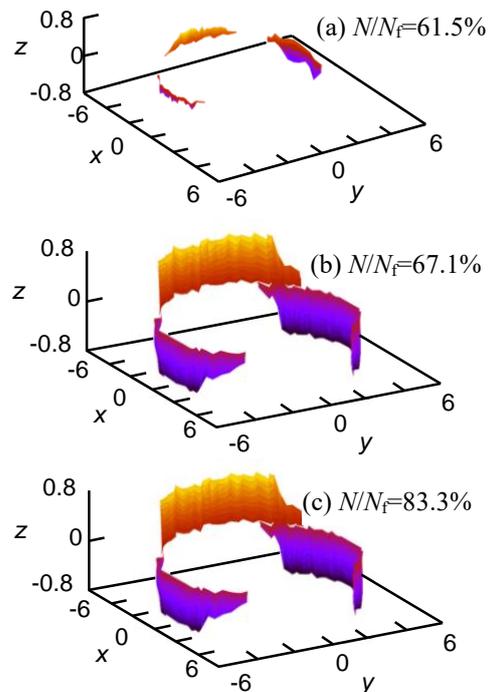


図11 低試験力振幅レベルでの疲労き裂時系列内部観察例

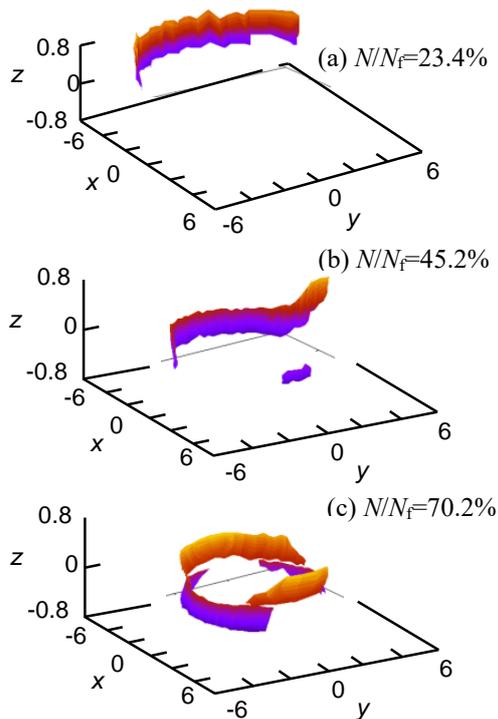


図 12 高試験力振幅レベルでの疲労き裂時系列内部観察例

変動荷重下の寿命予測法の確立のため、2 段階繰り返し変動荷重試験を行った。高レベル荷重を 0.2kN に固定して、低レベル荷重振幅を 2 種類に変化させるとともに、頻度比を図 13 中に示すように高レベル荷重の繰り返し数を 200 に固定して、低レベル荷重の繰り返し数を 4 種類に変化させた。

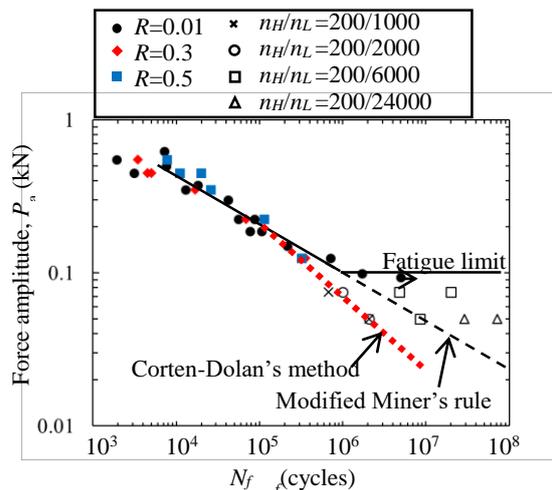


図 13 2 段階繰り返し荷重下の疲労寿命評価

低レベル荷重の繰り返し数が 2000 サイクルの場合には黒点線で示す修正マイナー則によって評価可能であるが、繰り返し数が増加すると疲労寿命が長くなり Haibach 流の考え方が必要となる。一方、繰り返し数が 1000 サイクルと最も少ない条件では修正マイナー則による予

測値より短寿命側となっている。このように、摩擦攪拌点継手の変動荷重下の疲労寿命は頻度比の影響を顕著に受けることがわかった。荷重変動が頻繁に生じると考えられるランダム荷重下の疲労寿命予測には、図中に赤点線で示す Corten-Dolan 流の寿命予測式を用いる必要がある。実験結果は省略するが、この修正疲労寿命曲線を用いると広帯域ならびに狭帯域のランダム荷重下の疲労寿命を精度良く予測することができた。

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. M. Inohara, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Effects of Loading Mode on the Fatigue Behavior of Laser Welds in Automobile Mild Steel Sheet Welding in the World, 査読有, 2016,掲載予定
2. T. Abe, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Fatigue properties and fracture mechanism of load carrying type fillet joints with one-sided welding, Fracture and Structural Integrity, 査読有, 35, 2016, pp.424-433.
3. R. Tanegashima, I. Ohara, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Cumulative Fatigue Damage Evaluations on Spot-Welded Joints Using 590 MPa-class Automobile Steel, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 査読有, 38, 2015, pp.870-879, DOI: 10.1111/ffe.12258
4. Sutep Joy-A-Ka, Y. Ogawa, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Y. Sun, H. Fujii, Fatigue Damage Evaluation of Friction Stir Spot Welded Cross-Tension Joints Under Repeated Two-Step Force Amplitudes, Journal of materials engineering and performance, 査読有, 24, 2015, pp.2494-2502.
5. 大原一郎, 種子島亮太, 曙 紘之, 加藤昌彦, 菅田 淳, 300MPa 級 SPCC を母材とする十字引張型スポット溶接継手の三次元的内部疲労損傷挙動および疲労特性に及ぼす模擬溶接欠陥の影響,自動車技術会論文集, 査読有, 45-5, 2014, pp.903-908.
6. R. Tanegashima, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, 3-Dimensional Observation of the Interior Fracture Mechanism and establishment of Cumulative Fatigue Damage Evaluation on Spot Welded Joints Using 590 MPa-class Steel, International Journal of Fatigue, 査読有, 51, 2013, pp.121-131. DOI:10.1016/j.ijfatigue. 2012. 12.014

[学会発表] (計 16 件)

1. T. Abe, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Fatigue Properties and Fracture Mechanism of Load Carrying Type Fillet Joints with One-sided Welding, The 5th International Conference on Crack Paths, 15-18 Sep. 2015, Ferrara, Italy
2. Sutep Joy-A-Ka, Y. Ogawa, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Y. Sun, H. Fujii, 3-Dimensional Observation of the Interior Fatigue Fracture

Mechanism on Friction Stir Spot Welded AISI 1012 Cold Rolled-steel, Thailand Welding and Inspection Technology 2015, 5-6 Sec. 2015, Pattaya, Thailand

3. 小川裕樹, 曙紘之, 加藤昌彦, 田中耕二郎, 菅田淳, 摩擦攪拌点接合によるアルミニウム合金/CFRP 異材接合継手の疲労強度評価, 日本材料学会第 64 期学術講演会, 22-23 May, 2015, 山形

4. 魚谷智之, Sutep Joy-A-Ka, 曙紘之, 加藤昌彦, 菅田淳, 孫玉峰, 藤井英俊, 300MPa 級冷間圧延鋼板を母材とした十字引張型摩擦攪拌点接合継手の変動荷重下における疲労特性, 第 14 回機械, 構造物の強度設計・安全性評価に関するシンポジウム, 15 Oct. 2015, 京都

5. Sutep joy-A-Ka, Y. Ogawa, H. Akeborlo, M. Kato, A. Sugeta, Y. Sun, H. Fujii, Fatigue Fracture Mechanism on Friction Stir Spot Welded Joints Using 300 MPa-Class Automobile Steel Sheets under Constant and Variable Force Amplitude, 20th European Conference on Fracture, 30 June-4 July, 2015, Trondheim, Norway

6. Sutep Joy-A-Ka, Y. Ogawa, H. Akebono, M. Kato, A. Sugeta, Y. Sun, H. Fujii, Fatigue Properties and Crack Growth Behavior of Friction Stir Spot Welded 300 MPa-Class Automobile Steel Sheets, The 9th International Conference on Fracture and Strength of Solids, 9-13 June, 2015, Cheju Island, Korea
外 10 件

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菅田 淳 (SUGETA ATSUSHI)

広島大学. 大学院工学研究院・教授

研究者番号: 60162913

(2) 研究分担者

加藤 昌彦 (KATO MASAHIKO)

広島大学. 大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 70274115

曙 紘之 (AKEBONO HIROYUKI)

広島大学. 大学院工学研究院・助教

研究者番号: 50447215