

機関番号	13102
研究種目	若手研究(B)
研究期間	2009～2010
課題番号	21760070
研究課題名(和文)	力学とプロセスにより最適化を図るシミュレーション援用異種金属レーザー接合
研究課題名(英文)	Dissimilar Metals Laser Joining Optimized in Mechanics and Processing Approach with Simulation
研究代表者	宮下 幸雄 (MIYASHITA YUKIO) 長岡技術科学大学・技術経営研究科・准教授
研究者番号	00303181

研究成果の概要(和文)：

異材接合技術は、様々な産業分野で要求が大きい、材料・プロセス上の問題と力学的な問題の両者が存在するため、強度信頼性の高い接合体を作製することは困難である。本研究では、レーザーによる重ねスポット接合を対象とし、界面における金属間化合物の生成状態と溶込部形状に着目し、それらと接合体強度特性との関係について調べた。とくに、溶込部形状については、モデル材による実験や有限要素法解析を行い、その影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

Dissimilar materials joining is required in many industries. However, it is difficult to obtain the joint with higher reliability on its strength due to the problems on materials science, processing and mechanics. In this study, effects of formation of intermetallic phase at the interface and weld pool shape on strength of the joint were studied. In order to investigate particularly the effect of weld pool shape, experimental consideration by using the model joints and FEM analysis have been done.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	2,300,000	690,000	2,990,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：材料強度

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：機械材料・材料力学, 異材接合, レーザ, FEM, 界面

1. 研究開始当初の背景

異材接合は、これまでにない高付加価値製品を生み出す可能性を秘めており、さらなる軽量化が求められている自動車・輸送機器、高性能・高機能化と同時に小型・軽量化が進む電子機器など、あらゆる産業分野で要求が大きい。しかし、たとえば、鉄鋼とアルミニウム合金の接合を考えた場合、従来の溶融溶接では、溶融部および界面に弱い金属間

化合物が生成し、継手性能が著しく低下することが知られている。そのため、金属間化合物の生成状態のコントロールがしやすい、拡散接合や摩擦圧接、FSW (Friction Stir Welding, 摩擦攪拌接合) などの固相接合に関する研究例が多い。他方、入熱量の精密な制御が可能なレーザーを利用した異種金属接合に関しても、著者らを含め、いくつかの研究例が報告されている。著者らが開発した異

種金属接合法では、異種金属であるがゆえに生じる溶融温度の差を利用し、たとえば、重ね接合では、溶融温度の高い材料側にレーザーを照射し、熱伝導によりもう一方の材料の界面近傍のみを溶融させることで、界面において固相/液相拡散が生じ接合する。このプロセスの特徴として、両材料を溶融させる手法よりも金属間化合物の生成を抑えることができること、拡散（固相）接合よりも表面酸化皮膜の影響を受けにくく大気中でも接合可能であること、などがあげられる。さらに、熱伝導解析を援用し、材料組合せや部品形状が変わっても、シミュレーションにより適切な接合条件を導き出すことができる、応用性に優れた手法としている。他方、スポット接合のように接合部寸法に制限がある場合、その条件内でレーザー照射条件を変化させると、金属間化合物の生成状態だけではなく、同時に、溶込部形状も変化する。実際の機器・構造物には、様々な負荷が加わり、適切な溶込部形状は、負荷条件によっても異なると推察される。そこで、溶込部形状も考慮することで、より強度信頼性の高い異種金属接合体が得られるという着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、力学とプロセスの両者から適切な接合状態を明らかにし、高い強度信頼性を有する異材接合体を得るための接合法を開発することを目的とする。レーザーによる重ね接合を対象とし、溶込部形状と接合体強度の関係を調べる。ここでキーポイントとなるのは、溶込部形状を変化させると、界面における金属間化合物の生成状態も変化するということである。すなわち、たとえば、浅く広い溶込部形状と深く狭い溶込部形状を実現するためには、それぞれレーザー照射条件が異なり、その結果、界面での温度分布および温度履歴が変化する。接合プロセス中の界面における金属間化合物の生成挙動は、拡散にもとづいており、温度分布および温度履歴が異なれば、界面に生成される金属間化合物の厚さや組成などが変化することになる。金属間化合物の生成状態は、当然、接合体の強度特性に直結している。言い換えると、溶込部形状を変化させると、リンクして、接合体の強度特性において最も重要な界面の金属間化合物の生成状態も変化するため、両者が組合わされた結果として接合体の強度特性が決まることになる。そこで、金属間化合物の生成挙動にも着目し、その生成状態と強度特性との関係についても調べる。さらに、より応用性に優れた技術とするため、シミュレーションを援用する。すなわち、熱伝導解析により、温度分布および温度履歴を求め、溶込部形状を推測する。また、溶込部形状の違いによる接合部近傍の応力状態の変化についても検討し、溶込部形状と強度の関係につい

て明らかにする。また、本研究は、新しい異材接合法を開発するという工業的な価値も大きいですが、それだけではなく、材料力学という既存学術分野をプロセス技術と融合することで、新たな発展性・可能性を切り拓くことも目的としており、学術的な貢献も大きい。

3. 研究の方法

基本的な材料組合せは、工業上要求の大きいステンレス鋼とアルミニウム合金とし、微小部品の接合を想定して、パルスYAGレーザー装置を用いたスポット溶接を行い、重ね接合体を作製する。レーザー照射条件を様々に変化させた接合実験を行い、接合部の観察および分析から、接合状態に及ぼす各種溶接パラメータの影響を整理する。とくに、溶接条件の違いによる溶込部形状への影響、および金属間化合物の生成状態への影響について、調べる。また、接合体の強度試験を行い、溶込部形状や金属間化合物の生成状態との関係について検討する。さらに、より詳細に溶込部形状の影響について調べるため、モデル材として、プラスチックと金属の異材接合体も作製し、強度試験を行う。また、有限要素熱伝導解析により、材料物性の違いによる溶込部形状の変化を推測する。さらに、溶込部形状が接合部の応力分布に及ぼす影響についても、有限要素法解析により検討する。

4. 研究成果

SUS304とA5052を供試材として行った接合実験により得られた接合条件マップの例を表2および表3に示す。表中の波高値は励起ランプの電圧を示す。×印は接合不可と判断した条件、△印は入熱が過度な条件を示し、いずれも適切な接合条件ではない。他方、同表中、数字が記されている条件は、接合可能条件を示し、数値は、1パルス当たりの入熱量(J/P)を表している。表2および表3よ

表1 スポット径0.2mmにおける接合条件。

		パルス幅(msec)				
		1	2	3	4	5
波高値 (V)	120	×	×	2.0	2.8	3.5
	140	×	1.9	3.0	4.0	5.0
	160	×	2.4	3.9	5.1	6.4
	180	1.4	3.0	5.0	6.5	△
	200	1.9	4.1	6.0	△	-
	220	2.2	△	△	-	-
	240	2.7	△	-	-	-

表2 スポット径0.5mmにおける接合条件。

		パルス幅(msec)				
		1	2	3	4	5
波高値 (V)	160		×	×	5.3	6.6
	180	×	3.2	5.3	7	8.6
	200	×	4.1	6.2	7.9	10.8
	220	2.2	5.0	7.5	10.0	△
	240	2.7	6.0	9.0	△	-
	260	3.5	6.9	△	-	-
	280	4.1	△	-	-	-
	300	△	-	-	-	-

り、スポット径が大きくなるほど、大きい入熱量が必要となることが分かる。光学顕微鏡を用いて、界面を観察し、溶込深さや溶融幅と入熱量の関係を調べた。界面の観察例を図1に示す。同様の観察より、レーザー発振機の励起電圧の波高値やパルス幅、入熱量と、溶込深さ d 、溶融幅 w の関係を調べた。パルス幅や波高値が増加すると、溶込深さ d と溶融幅 w も増加することが分かった。また、入熱量の増加にともない、溶融幅および溶込深さも増加していた。例として、スポット径 0.2mm のときの入熱量と溶込深さおよび溶融幅の関係を図2に示す。ほかに、スポット径が大きくなると、接合するために大きな入熱量が必要となるので、溶込深さや溶融幅も大きくなる傾向が見られた。走査電子顕微鏡 (SEM) による接合部界面の観察例を図3に示す。EDXによる簡易定量分析の結果、この例では、Al が 65.51wt%、Fe が 34.49wt%であった。Fe-Al 二元状態図より、金属間化合物相として、 $FeAl_3$ の存在が推測される。つぎに、表2および表3の接合条件マップより、5J程度のおぼろしい入熱量により得られた接合体を選び出し、強度試験に供した。試験の結果、接合面積および溶込深さが増加すると、破断荷重が増加する傾向が認められた。図4に、接合面積および溶込深さと、見かけの引張せん断強度の関係を示す。同図より、接合面積が増加すると、見かけの引張せん断強度が増加する傾向が認められた。また同図に示す接合体の入熱量はいずれも 5J程度であるが、接合強度は異なっている。すなわち、接合強度は入熱量のみに依存せず、接合条件により異なる。ほかに、図4(b)より、溶込深さが小さい領域では、溶込深さ増加すると見かけの引張せん断強度が増加する傾向が認められる。すなわち、溶込深さは、接合強度に影響を与える要因の一つと考えられる。しかし、溶込深さが大きくなると引張せん断強度がやや減少している。これは、金属間化合物相が増加したためと考えられる。

未接合部をき裂と仮定し、溶込深さを変化させた二次元モデルを作成し、FEM解析を行った。厚さ 0.01mm の金属間化合物層を溶融部の界面に沿ってモデルに取り入れた。モデルに、単位長さ当たり一定の力 (10N/mm) を引張りせん断方向に加え、接合部端部の J 積分を求めた。表3に解析結果を示す。同表より、溶込深さの増加にともない、左側接合端部で

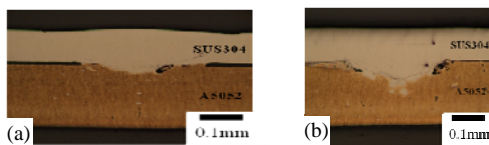


図1 接合部断面観察例。(a) 160V 2msec (スポット径 0.2mm)、(b) 200V 3msec (スポット径 0.2mm)。

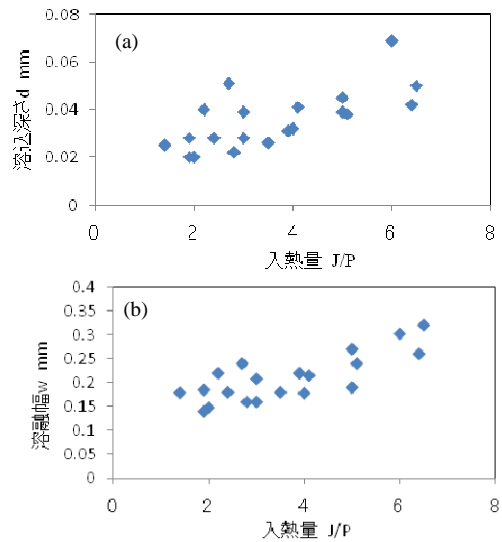


図2 入熱量と(a) 溶込深さの関係および(b) 溶融幅の関係 (スポット径 0.2mm)。

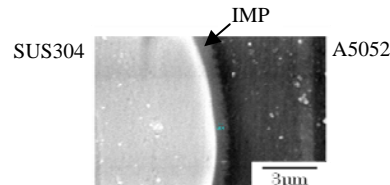


図3 SEMによる接合界面の観察例(スポット径:0.2mm, 波高値:160V, パルス幅:4ms)。

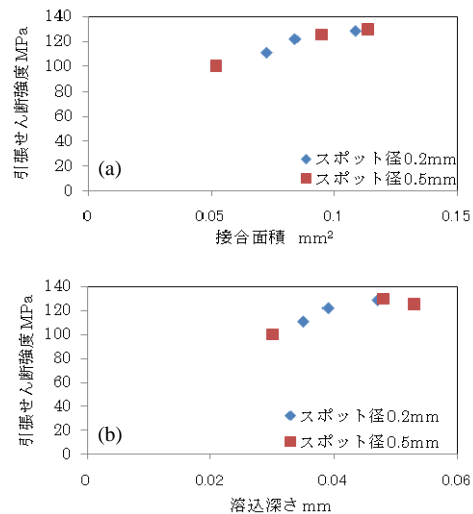


図4 引張せん断強度と(a) 接合面積の関係および(b) 溶け込み深さの関係 (入熱量; 約 5J/P)。

表3 溶込部形状による J 積分値の変化。

溶込深さ, D μm	J, $\text{MPa}\cdot\text{m}$	
	左側き裂	右側き裂
25	0.0142	0.0107
50	0.0127	0.0121
75	0.0104	0.0127
100	0.0102	0.0138
125	0.0088	0.0139

はJ積分の値が減少しているが、右側端部では増加している。左右接合端部のJ積分の値を比較すると、溶込深さによって破壊開始点に変化し、また、溶込深さの最適値が存在すると考えられる。

次に、溶込部形状の影響を詳細に検討するため、モデル材として、プラスチックと金属の異材接合体を作製した。供試材として、PET, A5052, SUS304 および C1220 を用いた。金属側の材料を変化させて行った接合実験の結果、PET/SUS304 接合体は、PET/A5052 および PET/C1220 と比べて低い入熱量で接合体を得ることができた。引張りせん断試験の結果得られた破断荷重を接合面積で除することにより見かけの接合強度を算出した。見かけの

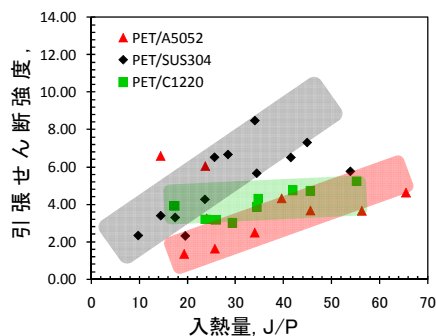


図 5 モデル材 (PET/金属接合体) における入熱量と引張りせん断強度の関係。

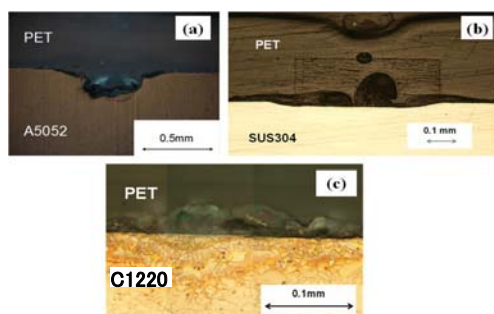


図 6 モデル材 (PET/金属) 接合体の断面観察例 (a)PET/A5052, (b)PET/SUS304, (c)PET/C1220.

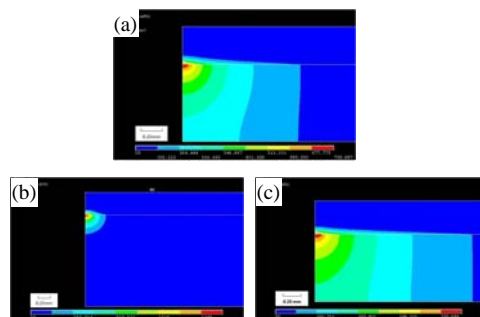


図 7 モデル材 (PET/金属) 接合体のレーザー照射による温度分布解析例 (レーザー照射後 0.02s). (a)PET/A5052, (b)PET/SUS304, (c)PET/C1220.

接合強度と入熱量の関係を図 5 に示す。同図より、PET/C1220 接合体は、入熱量によらず、ほぼ一定の接合強度を示しているが、PET/A5052 および PET/SUS304 接合体は、入熱量の増加とともに接合強度が増加する傾向を示した。接合部の断面観察例を図 6 に示す。同図より、PET/A5052 および PET/SUS304 接合体は金属材料側に溶込部の形成が認められるが、PET/C1220 接合体は、溶込部が認められない。有限要素熱伝導解析の結果より得られた、レーザー照射から 0.02s 後の界面近傍の温度分布解析例を図 7 に示す。同解析では、入熱量を 55J/P とし、金属材料のレーザー吸収率は文献値を参考にした。図 7 より、PET/C1220 接合体および PET/A5052 接合体と比較して、PET/SUS304 接合体は、急峻な温度分布を示している。C1220 は、レーザーの吸収率が低く、熱伝導率が高く、また、熔融温度も比較的高いため、溶込部が形成されなかったと考えられる。A5052 もレーザー吸収率は低いが、熔融温度も低いため、溶込部が形成される。他方、SUS304 は、レーザーの吸収率が高いため、界面の最高温度が高く、金属側に溶込部が形成される。これら金属材料の違いによる溶込部形状の違いが、接合体の強度特性に影響を及ぼしていると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 1 件)

- ① Y. Farazila, Y. Miyashita, Wang Hua, Y. Mutoh, Y. Otsuka YAG Laser Spot Welding of PET and Metallic Materials, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, Vol.6, No.1, (2011) pp.69-74.

〔学会発表〕 (計 4 件)

- ① 宮下幸雄, 王華, 武藤睦治, 小山幸生, 竹見雅史, 田中裕規, パルス YAG レーザによる異材接合体の溶込部形状と強度, 溶接学会平成 21 年度秋季全国大会 (2009).
- ② 宮下幸雄, Farazila Yusof, 武藤睦治, PET と金属の異材レーザースポット接合, 日本機械学会 2010 年度年次大会 (2010).
- ③ 宮下幸雄, Farazila Yusof, 武藤睦治, PET と各種金属の YAG レーザによる異材スポット接合, 溶接学会平成 22 年度秋季全国大会 (2010).
- ④ 宮下幸雄, Farazila Yusof, 武藤睦治, 大塚雄市, パルス YAG レーザによる PET と銅の異材スポット接合における酸化膜の影響, 日本機械学会 第 18 回機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2010) (2010).

6. 研究組織

研究代表者

宮下 幸雄 (MIYASHITA YUKIO)

長岡技術科学大学・技術経営研究科・准教授

研究者番号: 00303181