

# 表面被覆を用いた摩擦攪拌接合における塑性流動の制御

近畿大学 工学部 機械工学科  
教授 生田 明彦  
(2020 年度 一般研究開発助成 AF-2020021-B3)

キーワード：摩擦攪拌接合，表面被覆，めっき，接合温度，塑性流動

## 1. 研究の目的と背景

摩擦攪拌接合（以下，FSW）は，ツールを用いて材料を摩擦し，その摩擦熱により軟化した材料を攪拌することで練り混ぜ，一体化させる接合法である．そのため，FSWには材料を練り混ぜるための塑性流動が重要となるが，これには摩擦熱に起因する接合温度が大きな影響をおよぼす．しかしながら，他の接合法と比べ，FSWにおいては接合温度に関係する接合条件の制約が大きい．具体的な例としては，接合温度を高くするには基本的に回転速度を上昇させるしかなく，入熱として考える場合であっても回転速度と接合速度程度しか条件変更はできない．また，FSWはツール回転方向と接合方向との関係により，必ず前進側（AS）と後退側（RS）が存在し，接合部に温度分布が発生する．このようなFSW時の接合温度に関する特徴を踏まえ，様々な温度制御の検討がなされている．例えば接合部を急速に冷却するために，水中でFSWを行う方法<sup>1)</sup>，外部から液体CO<sub>2</sub>を供給して接合部を冷却する方法<sup>2)</sup>，ツールの温度上昇を抑制するため，ツール内部に冷却水を供給する方法<sup>3)</sup>，逆に接合温度を上昇させるため，レーザを使用して材料を余熱する方法<sup>4)</sup>が提案されている．それでも，これらの手法は比較的大掛かりな装置を必要とするなど，FSW時の接合温度制御方法として困難な点を有する．また，FSW特有の温度分布の制御は困難で，その中でも加熱は比較的容易なもの，冷却は困難な状況である．

このような背景をもとに，FSWの接合部について考えると，接合温度はFSW時の塑性流動挙動に直接的な影響をおよぼすことから，接合温度が接合部の特性を決定づけているとも言える．この時，FSWにおける接合温度の特徴から，接合部における温度分布を制御することが重要であると考えられる．しかしながら，前述したように困難を伴うのが現状である．それでも，FSWにおける接合部温度を制御できる手法があれば，継手特性改善，ツールへの負荷低減および接合条件範囲の拡大などが期待できると考えられる．そのためには，特別な機器を必要とせず，比較的簡便に行える接合温度制御法の開発が望まれる．

そこで，本研究では，FSWの熱源である摩擦熱の発生場所に注目した．すなわち，摩擦面である接合材料およびツールショルダ表面であるが，同種材にも異種材接合にも対応できるよう接合材料表面を対象とし，表面被覆により接合材料表面の摩擦熱を制御することを試みた．このように，接合材料表面に予め表面被覆を行うことで，一般的なFSW装置を使用することができる接合温度制御方法の基礎的

知見を得ることを本研究の目的とした．そのため，接合材料よりも低融点および高融点の材料の表面被覆にめっきを用い，接合材料を様々な配置した場合のFSW時における温度測定を行うことにより，本手法の特徴を明らかにした．

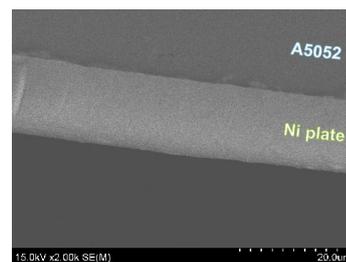
## 2. 実験方法

### 2・1 供試材料

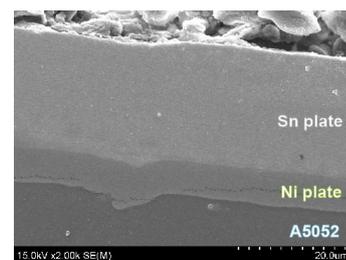
本研究において，接合材料として使用したアルミニウム合金は，幅 25 または 50mm×長さ 75mm×厚さ 3mm のA5052-H34（以下，A5052）である．アルミニウム合金に行った表面被覆は，高融点材料としてNiめっき，低融点材料としてSnめっきを行った．この時の各めっきは，Niの場合，膜厚約10 $\mu$ mの無電解Niめっきを行い，Snの場合，下地処理として膜厚約1 $\mu$ mの無電解Niめっき後，膜厚約10 $\mu$ mのSn電気めっきを行った．めっきを行ったアルミニウム合金の断面観察結果を図1に示す．

### 2・2 摩擦攪拌接合方法

FSWは，図2に示すようにショルダ径12mm，プローブ径4mmおよびプローブ長さ1.9mmのツールを使用した．なお，ツール材質は熱処理したSDK61である．接合部の温度測定を行ったFSW条件は，ツール回転速度1500rpm，ツール圧入量1.9mm，接合長さ50mmおよび前進角3°で一定とし，接合速度を100~500mm/minで変化させた．



a) Niめっき



b) Snめっき

図1 めっきを行った材料の断面観察結果

### 2・3 温度測定方法

接合部の温度測定は、図3に示すように、接合材料裏面から直径1.6mmのシース型K種熱電対を接触させて行った。この時の温度測定位置は、接合方向と直角方向にはツールの回転中心直下、ツールの回転中心直下からAS方向およびRS方向に3mm離れた位置とした。接合方向にはツール回転中心直下の場合、接合長さの midpoint、ツールの回転中心からASおよびRS方向に離れた場合、接合長さの midpointからそれぞれ5mm離れた位置とした。なお、温度計測時のサンプリングレートは100Hzとし、5回測定した平均値で評価を行った。

ツールの温度測定は、図4に示すように、接合方向後方約600mmに設置した赤外線サーモグラフィにより、FSW中のツール表面温度を計測した。このときのサンプリングレートは1Hzで、ツール表面における最高温度を記録し、ここでも5回測定した平均値で評価を行った。

温度測定時の接合材料は、図3に概略を示したように、A5052、NiめっきしたA5052 (Ni-A5052) およびSnめっきしたA5052 (Sn-A5052) 単独の場合、それぞれのアルミニウム合金板にスターインプレートでFSWを行うように設置した。また、A5052とめっきした接合材料を組み合わせる場合は、ASにめっきした接合材料、RSにA5052を配置し、突合せFSWを行った。

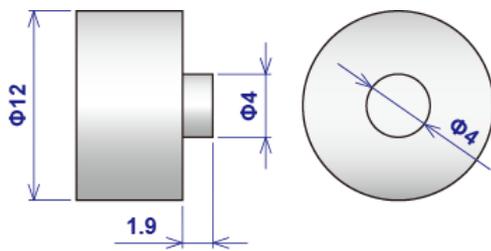


図2 使用した接合ツール

### 2・4 組織観察および元素分析

接合部の温度計測を行って得られたFSW継手は、塑性流動状態を検討するため、断面組織観察およびめっき材料の元素分析を行った。断面組織観察は接合長さの midpoint部分に対して行い、切断面の鏡面研磨後、ケラー試薬（フッ酸2ml、塩酸3ml、硝酸5mlおよび蒸留水190ml）で腐食し、光学顕微鏡を用いて観察した。また、FSW後のめっき材の残留状態を調査するため、最もめっき材の残存量が多いと考えられる、めっき材を単独使用した場合の継手表面および断面における元素分析を行った。分析元素はAlおよびNiまたはSnで、エネルギー分散型元素分析器 (EDX) を用いて、加速電圧20kV、倍率500倍で面分析を行った。分析場所は継手表面の場合、接合長さの midpoint部分においてツールの回転中心、ツールの回転中心からAS方向およびRS方向に3mm離れた位置とした。また、継手断面の場合、接合長さの midpoint部分においてツールの回転中心表層近傍、表面から約1mm内部および2mm内部の位置とした。

## 3. 実験結果

### 3・1 接合後の外観

図5は、アルミニウム合金板を様々に配置してFSWを行った場合の外観を示したものである。ここでは接合速度100mm/minの場合について示したが、全く同じFSW条件で、

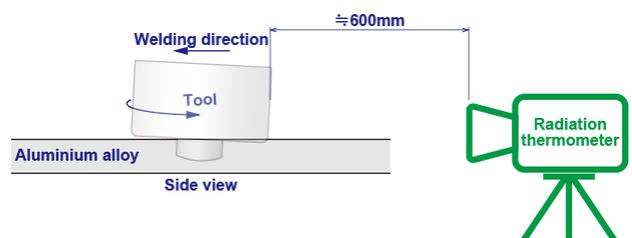


図4 ツール表面温度測定方法

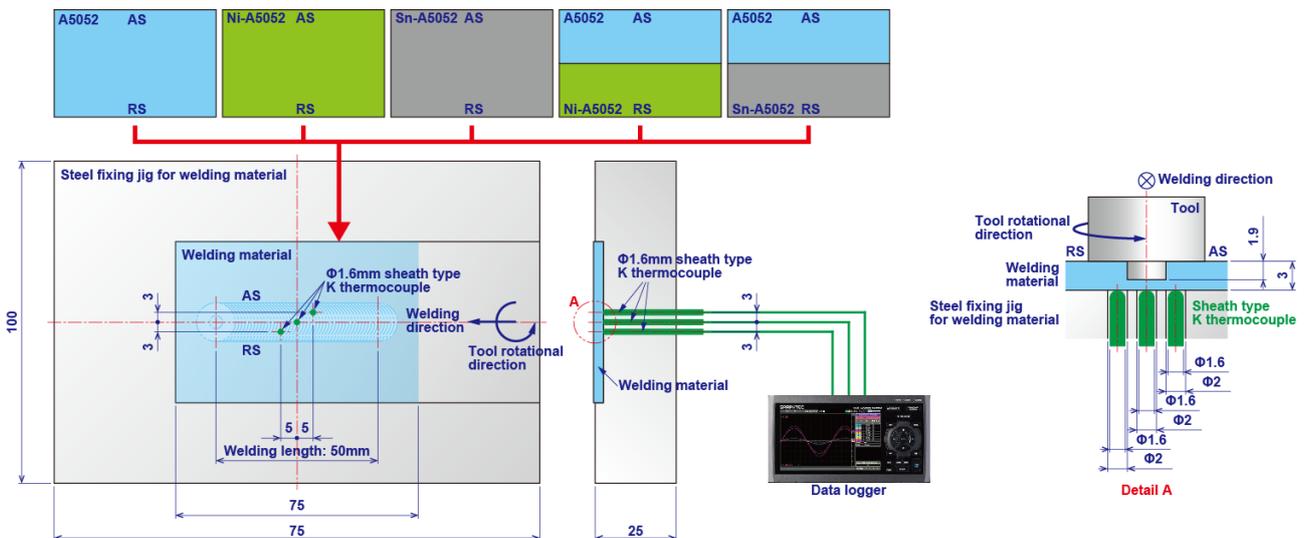


図3 接合温度測定方法

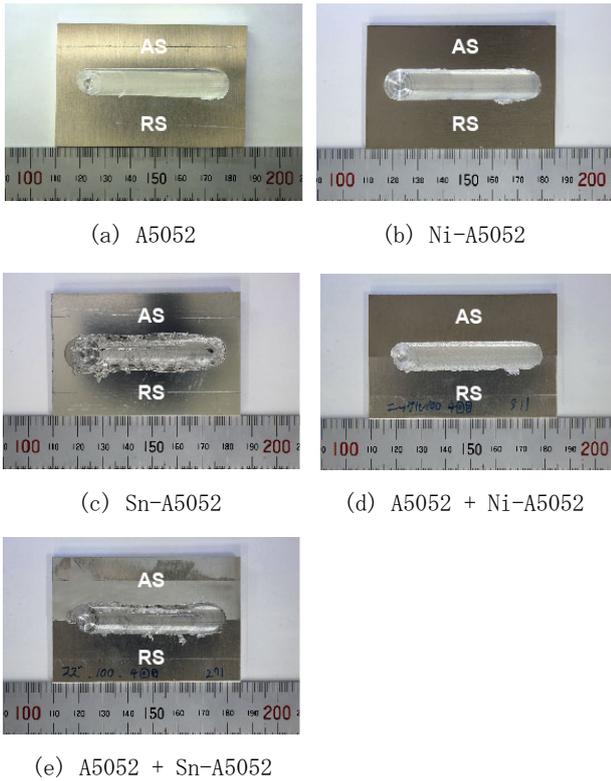


図5 FSW後の外観

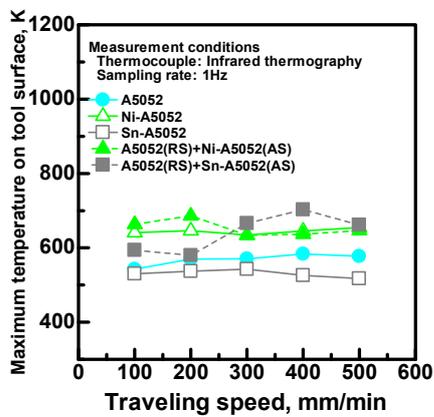
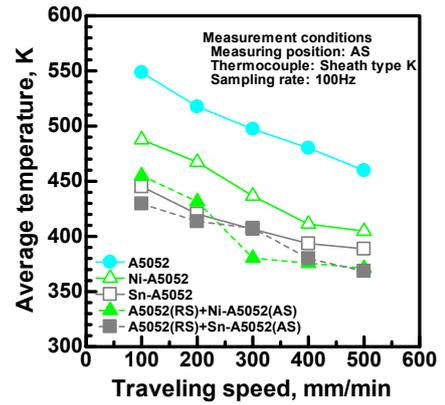


図7 ツール表面温度測定結果

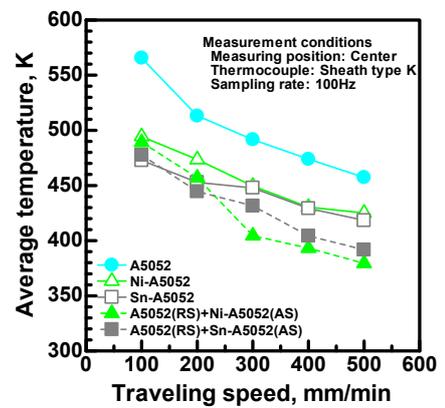
母材はA5052であるにもかかわらず、めっき材の種類および配置によってビード外観が大きく異なった。特に、めっき材がある場合、入熱不足に起因すると考えられる欠陥の発生が観察され、同じFSW条件にも関わらず入熱量に差異が生じたことが推察される。

### 3・2 接合温度測定結果

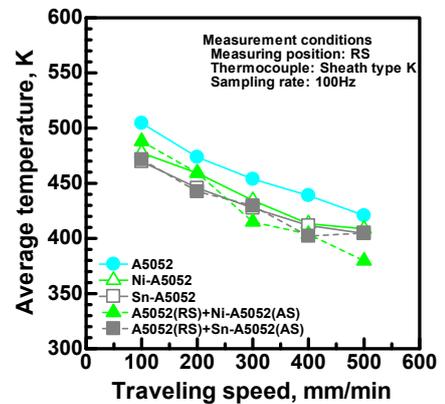
図6は、アルミニウム合金を様々に配置してFSWを行った場合の接合温度を測定した結果を示したものである。結果から、いずれの測定位置においてもA5052単独の場合が最も高温になっており、ツール回転中心からAS方向にかけて高温になっていた。一方、一部にでもめっき材を用いた場合、いずれの位置および接合速度においても温度は低



(a) AS



(b) 中央



(c) RS

図6 接合温度測定結果

下した。特に、ASにめっき材を配置した場合、ツール回転中心およびASにおいて、A5052と比較して100K以上低下し、部分的なめっき材の使用であっても十分な冷却効果のあることが示された。また、ASにめっき材を配置した場合、SnめっきよりNiめっきがより温度低減効果が大きくなっていった。

### 3・3 ツール温度測定結果

図7は、アルミニウム合金を様々に配置してFSWを行っ

た場合のツール表面温度を測定した結果を示したものである。接合温度測定結果とは異なり、ツール表面温度は、A5052 単独の場合や Sn めっき材を用いた場合に低下し、一部にでも Ni めっき材を用いた場合がこれらと比較として高くなっており、場合によっては 200K 程度の差があった。また、一部に Sn めっき材を用いた場合を除いて、ツール表面温度はいずれの配置においても接合速度によらずほぼ一定となった。これらのことから、概ねツール表面温度が高くなると接合温度は低下し、逆にツール表面温度が低くなると接合温度は上昇するような傾向を示した。

### 3・4 継手断面観察結果

図 8 は、アルミニウム合金を様々に配置して FSW を行つて得られた継手の断面組織観察結果を示したものである。ここでは接合速度 100m/min の場合について示したが、A5052 単独の場合を除いて、めっき材を用いた場合はいずれも溝状およびトンネル状の欠陥が観察された。このような欠陥の大小は、概ね接合温度測定結果と一致し、低温傾向にあるものの欠陥が増大した。このことから、欠陥の主

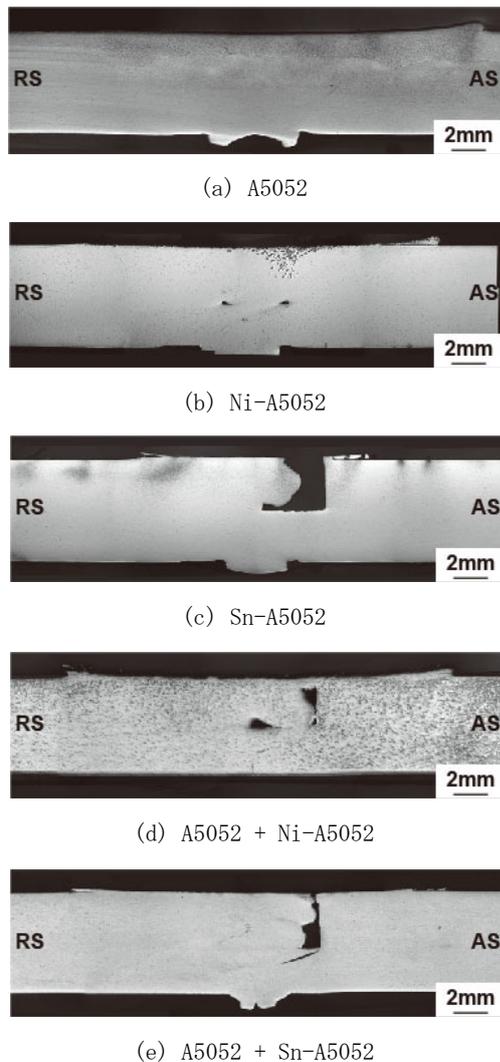


図 8 FSW 継手の断面観察結果

要因は入熱不足であり、めっき材の使用が十分な冷却効果をもたらしていることが示唆される。なお、ここでは省略したが、接合速度が増加すると、いずれの材料を用いた場合も欠陥の数や大きさが増大した。

### 3・5 めっき材の元素分析結果

図 9 は、めっきしたアルミニウム合金板に、FSW を行つた場合の継手ビード表面における元素分析結果を示したものである。なお、ここでは接合速度 100mm/min の場合におけるツールの回転中心について示した。分析面の観察結果より、Ni-A5052 および Sn-A5052 ともに観察上ではめっきの残留はほとんどなかった。しかしながら、Ni および Sn の面分析結果から、ところどころに Ni および Sn が検出された。これらのことから、めっき材はほぼ剥離し、バリとしてツールショルダ直下から排出されたと考えられる。また、わずかに残存しためっき材は、アルミニウム合金表面に擦り付けられたようになっており、継手特性に影響を与えるとは考えられない。

図 10 は、めっきしたアルミニウム合金板に、FSW を行つた場合の継手断面における元素分析結果を示したものである。なお、ここでも接合速度 100mm/min の場合における、ツール回転中心の表面から約 1mm 内部について示した。結果から、Ni-A5052 および Sn-A5052 ともに Ni および Sn のピークは検出されなかった。このことから、めっき材の継手内部への混入はなかったものと考えられる。

### 3・6 表面被覆による温度制御

これまでめっき材を用いることで、FSW 中の接合温度が低下することが明らかとなった。それでも、めっき材の違いにより、接合温度にも違いがあった。そのため、めっき材を用いた際の接合温度低下機構について考察する。

まず、Ni と Sn めっきの違いは、母材のアルミニウム合金と比較して高融点材料であるか低融点材料であるかの

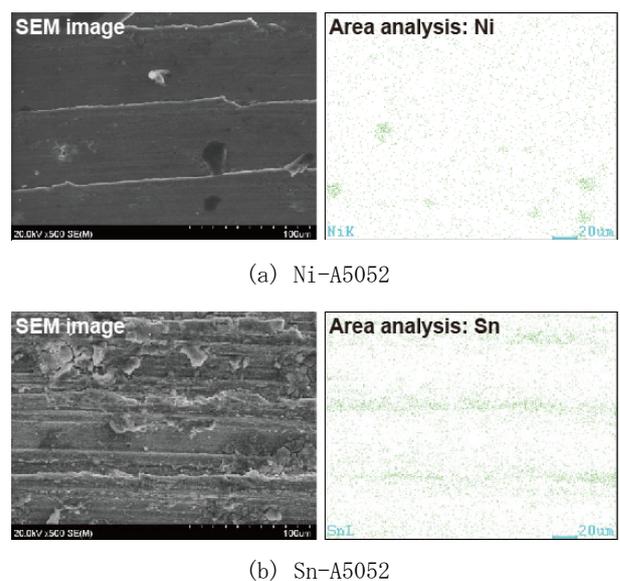
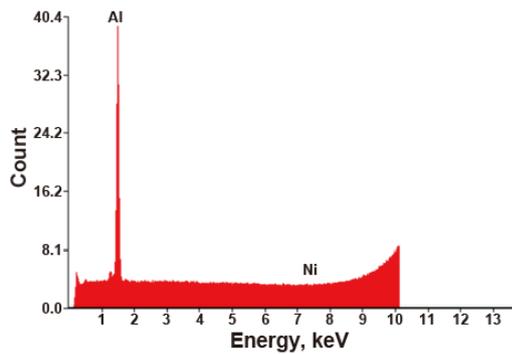
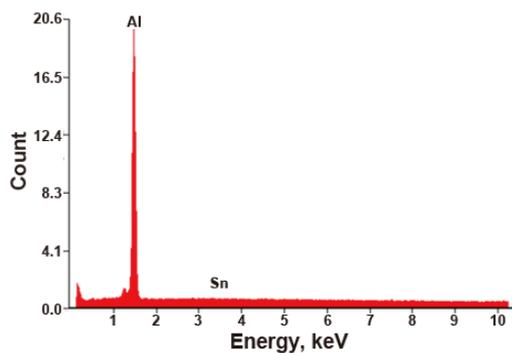


図 9 継手ビード表面における元素分析結果



(a) Ni-A5052



(b) Sn-A5052

図 1 0 継手断面における元素分析結果

違いであると思われる。これは大きな融点差があることにより、軟化温度にも大きな差が生じるためであると考えられる。また、熱伝導性の差も影響をおよぼしていると考えられる (Al: 239W/m・K, Ni: 88W/m・K, Sn: 65W/m・K)<sup>5)</sup>。すなわち、高融点材料である Ni めっきがアルミニウム合金の表面にあることで、表面被覆の無いアルミニウム合金の場合と比較して、発生した摩擦熱はアルミニウム合金側へ伝わり難くなり、ツール側により伝わる。さらに摩擦熱がアルミニウム合金側に伝わると、アルミニウム合金より高融点である Ni めっきはあまり軟化せず、めっき層直下のアルミニウム合金が先に軟化し、バリとして排出され、これにより Ni めっきも排出される。バリ排出時には高温のバリが排出されることによって、接合温度上昇が抑制されると考えられる。一方、低融点材料である Sn めっきがアルミニウム合金の表面にあることで、発生した摩擦熱は早々に Sn めっきを軟化させ、バリとして排出させる。バリの排出により接合温度上昇が抑制され、ツール温度およびアルミニウム合金の接合温度が低く抑えられると考え

られる。バリの流出挙動が明確ではないなど、現状では未解明の部分もあるが、このような機構により、接合材料と大きな融点差がある表面被覆材料があることで、接合温度低減効果があると考えられる。また、このような機構は、通常、接合温度分布が存在するFSWの高温側となるASに、表面被覆された材料を配置するだけでも、十分に接合温度低減効果があると考えられる。

#### 4. 結論

FSW 中の接合温度制御方法の可能性を検討するため、接合材料よりも低融点および高融点の材料の表面被覆した接合材料を用い、接合材料を様々な配置した場合の FSW 時における温度測定を行うことにより、本温度制御方法の特徴を明らかにした結果、以下の結論を得た。

(1) Ni および Sn めっきを施したアルミニウム合金の FSW において、めっきのない材料と比較して、接合温度は場合により 100K 以上低下する。

(2) Ni および Sn めっきを施したアルミニウム合金を、AS 部分にだけに選択配置した FSW において、接合温度低減効果がより大きくなった。

(3) Sn めっきと Ni めっきとでは、Ni めっきの接合温度低減効果がより大きくなっていった。

(4) FSW 後、めっき材はビード表面においてはわずかに残留するだけであり、継手内部への混入はなく、継手性能に影響をおよぼすことはほぼないものと考えられる。

#### 謝 辞

本研究は、公益財団法人天田財団からの一般研究助成 (AF-2020021-B3) により実施した研究に基づいていることを付記するとともに、同財団に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 岡村 久宣, 青田 欣也, 坂本 征彦, 舟生 征夫: 溶接学会全国大会講演概要, 66(2000), 204.
- 2) 三浦 拓也, 上路 林太郎, 藤井 英俊: 溶接学会論文集, 33-4(2015), 358.
- 3) 三浦 拓也, 森貞 好昭, 潮田 浩作, 藤井 英俊: 溶接学会全国大会講演概要, 112(2023), 80.
- 4) 藤井 英俊, 中田 一博: レーザ加工学会誌, 16-3(2009), 171.
- 5) 日本金属学会: 金属データブック, (1974), 12, 丸善.