

# レーザーを熱源としたはんだ付継手の接合界面挙動と耐衝撃性評価

大阪大学 接合科学研究所

教授 西川 宏

(平成 27 年度 一般研究開発助成 AF-2015222)

キーワード：レーザーはんだ付、金属間化合物形成、耐衝撃性

## 1. 研究の目的と背景

従来からはんだ付には Sn と Pb を主成分とする Sn-Pb 共晶系はんだが長く使われてきた。しかし Pb の有害性や環境意識の高まり、鉛フリーはんだが主流となり、現在では Sn-Ag-Cu 系はんだを中心に Pb を含まないはんだが使用されている。電子実装分野においては、高密度化が進行しており、従来法では対応できない微小領域を加熱でき、自動化も容易なレーザーを熱源としたはんだ付が近年、注目を集めている<sup>1)</sup>。具体的なレーザーを用いたはんだ付の利点として、以下のようなものが考えられる。(1)局所加熱により、基板や電子部品への熱影響が小さく小型高密度の実装に向く。(2)急速加熱・冷却により、はんだ付時にはんだと基板の接合界面に形成される金属間化合物層の形成及び成長を抑制され、はんだ組織が微細化する可能性がある。(3)製造現場では、はんだごてのコテ先損傷が問題となっており、非接触加熱のレーザー加熱は、はんだごての代替技術としても期待できる。しかし、レーザーを熱源としたはんだ付継手の学術的な検証は十分に進んでいない。

一方で、スマートフォンなどのポータブルデバイスから自動車、航空機に至るまではんだ付された電子基板等が組み込まれており、それらの使用環境が年々厳しくなっていることから、従来では必要とされなかった耐衝撃性などにも優れた信頼性の高いはんだ付継手が求められている。はんだ材料としては、Sn-Ag-Cu 系の鉛フリーはんだが主流であり、各種金属に対して高い溶解能を有するなどの問題点が指摘されている<sup>2,3)</sup>。鉛フリーはんだの高い溶解能は、通常の加熱炉を用いたプロセスでは、はんだ/母材界面での金属間化合物層の成長を助長し、継手信頼性の低下を招くとともに、補修用のはんだこてにおいては、こて先鉄めっきの損傷増大、寿命低下を招いており、従来の加熱方式に代わり、急速加熱・急速冷却が可能なレーザーの特徴を問題解決に十分に活かせる可能性がある。

そこで、本研究では、はんだ付の熱源としてレーザーを利用し、はんだ継手の微細組織を制御することで、鉛フリーはんだ継手の耐衝撃性向上を目指す。具体的には、レーザーを利用したはんだ継手に対して衝撃試験を実施し、鉛フリーはんだ継手の耐衝撃性を向上することが可能なレーザー照射条件を検討するとともに、レーザー照射条件がはんだ継手の接合界面やはんだ自身の凝固組織に与える影響を評価する。また、それらの結果からはんだ継手の耐衝撃性とはんだ及び接合界面微細組織の関係を検討すると共に、鉛フリーはんだ継手の耐衝撃性を維持または向上させる

ためのはんだ付プロセスの方策を検討することを目指す。

## 2. 実験方法

### 2・1 供試材料及び実験装置

供試材料として、はんだには Sn-3.0 mass%Ag-0.5 mass%Cu 合金で直径 1 mm のはんだボールを用い、また基板として、開口径 0.8 mm で厚さ 35  $\mu$ m の Cu パッドがそれぞれ 5 mm 間隔で 5×5 個並んだ FR-4 プリント基板を使用した。フラックスには固形分量 12 mass%、塩素含有量 0.014 mass% の RMA フラックスを使用した。

一方、はんだ付には、レーザーはんだ付装置 (UNIX-413L2, ジャパンユニックス(株)) を用いた。使用した半導体レーザーは、最大出力 50 W、波長 940 nm、ビーム直径 1.2 mm、焦点距離 120 mm であり、任意にレーザー出力及び照射時間の設定が可能である。本報告中においては、例えば 1 s 間、出力 40 W の条件で照射した場合、40 W・1 s と表すことにする。

### 2・2 試験サンプル作製方法

はんだボールをフラックスに浸漬させた後、図 1 に示すようにそれぞれの Cu パッド中央にはんだボールを載せ、大気中ではんだボール上部より、各はんだボールにレーザーを連続的に照射することではんだ付を行った。また接合性の比較を行うために、一般的なはんだ付の加熱方法として用いられる近赤外加熱装置を用いて窒素雰囲気下でリフローはんだ付(ピーク温度 250  $^{\circ}$ C, はんだ熔融時間 120 s)を行った。加熱後、エタノール中で超音波洗浄し、継手周辺に残留するフラックスを除去した。レーザー及びリフローはんだ付された試験サンプルの一部については、継手の長期信頼性を評価するために高温時効処理を行った。高温時効処理は、150  $^{\circ}$ C に設定したオイルバス中にて 168 h、及び 504 h 保持した。

### 2・3 レーザ照射条件の検討方法

はんだ付結果に対するレーザー照射条件の影響を検討するために、レーザー出力を 10~50 W の範囲で、照射時間を 0.1 s~90 s の範囲で変化させ、はんだボールにレーザー照射を行い、はんだと Cu パッドが接合されている状態を目視により確認した。

接合良好と判断された継手に対して 2.4 で説明する衝撃試験を行い、高い接合強度を示したレーザー照射条件を選出し、より詳細な接合性評価を実施することにした。

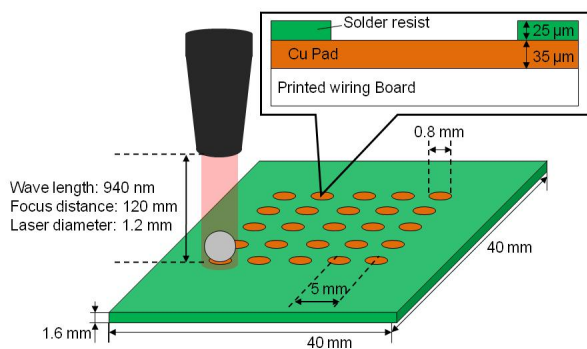


図1 レーザはんだ付実験の概要

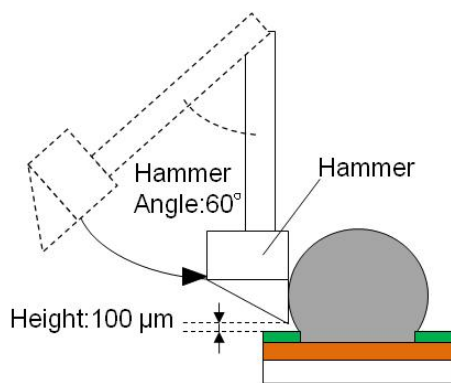


図2 衝撃試験の概要

## 2.4 はんだ付部の評価方法

はんだ付部の接合強度は衝撃試験により評価した。衝撃試験は高速せん断試験となっており、衝撃試験装置(MI-S, 米倉製作所(株))を使用し、試験条件は図2に示すようにハンマー衝突高さ 100 μm、ハンマー振上角度 60°にて行った。はんだ付部に衝突する直前のハンマー速度は 1 m/sであった。ハンマーがはんだ付部を破壊した際に、変位-荷重曲線が得られ、それにより求められる最大荷重及び全エネルギーで接合性の評価を行った。最大荷重は、はんだ/Cuパッド界面の強さに対応し<sup>4)</sup>、全エネルギーは、はんだ継手のじん性に対応するとされている<sup>5)</sup>。

衝撃試験後の試験サンプルに対しては、光学顕微鏡(OM)及び走査型電子顕微鏡(SEM)による破壊面の観察やEDXによる破壊界面の元素分析を行った。また、衝撃試験前の試験サンプルに対して、はんだ継手を樹脂埋め後、研磨により接合部断面を出し、OMやSEMによるはんだ/Cuパッド界面やはんだ組織の観察、EDXによる金属間化合物(IMC)の推定を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 レーザ照射条件の事前評価

レーザー出力と照射時間を変化させながら、はんだボールにレーザー照射を行い、適切なレーザー条件を選定するため、はんだ付結果に及ぼすレーザー照射条件の影響を評価した。

その結果、出力が 20 W 以上ではんだ付可能となり、高出力になると短時間ではんだ付が可能となるが、30W 以上の出力の場合、照射時間が長くなるとレジストが焦げてしまうことがあった。そこで、はんだ付可能と判断された照射条件のうち、20 W・20, 30, 40 s、30 W・0.5, 1, 5 s、40 W・0.2, 0.5, 1 s の 9 条件の継手に対して各条件 5 サンプルずつ衝撃試験を行った。20 W, 30 W, 40 W のいずれのレーザー出力でも、照射時間が長くなるほど高い最大荷重を示していた。そこで、各レーザー出力の中で、最大荷重が高かった 20 W・40 s、30 W・5 s、40 W・1 s の条件ではんだ付された継手は、ほぼ同様に最大荷重が 70 N 程度を示しており、接合可能な照射条件の中でも高強度な接合が可能であると考えられるため、以下ではこれら 3 つの条件で作製された継手に対して、さらに詳細にはんだ付継手の耐衝撃性の評価を進めることとした。

### 3.2 レーザはんだ付継手の耐衝撃性評価

3.1 で得られたレーザー照射条件(20 W・40 s、30 W・5 s、40 W・1 s)及びリフローはんだ付された継手に対して、はんだ付後及び時効処理後の試験サンプルに対して、耐衝撃性評価するために衝撃試験を行った。得られた最大荷重と全エネルギーの時効処理による変化の様子を図3に示す。

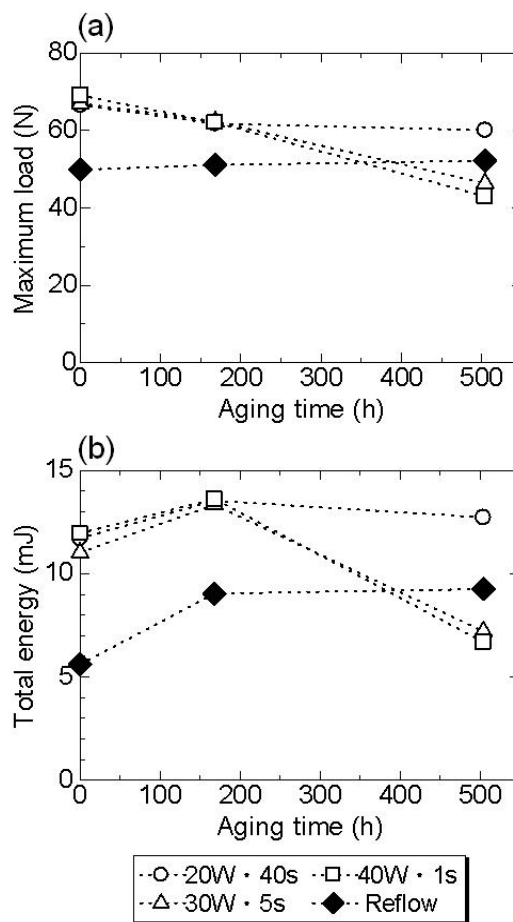


図3 衝撃試験の最大荷重と全エネルギーへの時効処理の影響評価 (a) 最大荷重、(b) 全エネルギー

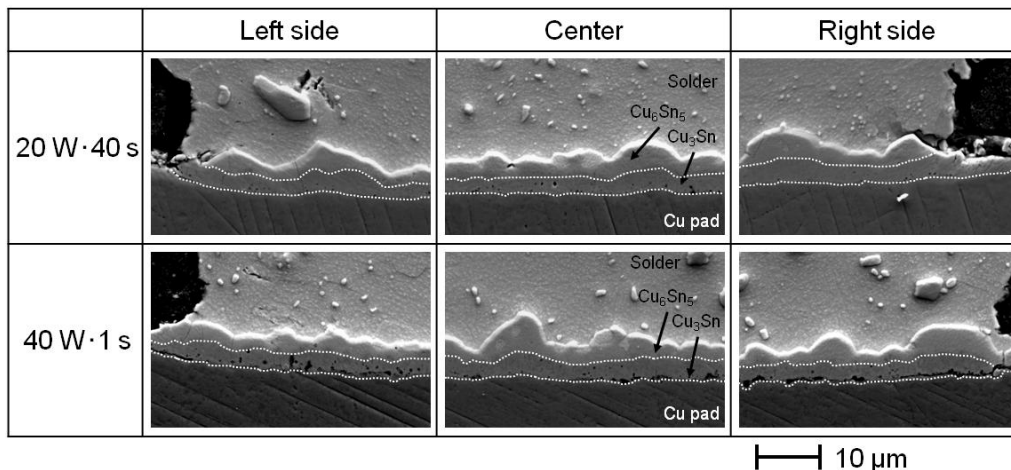


図4 はんだ/Cuパッド界面の詳細観察結果(504 h 時効処理後)

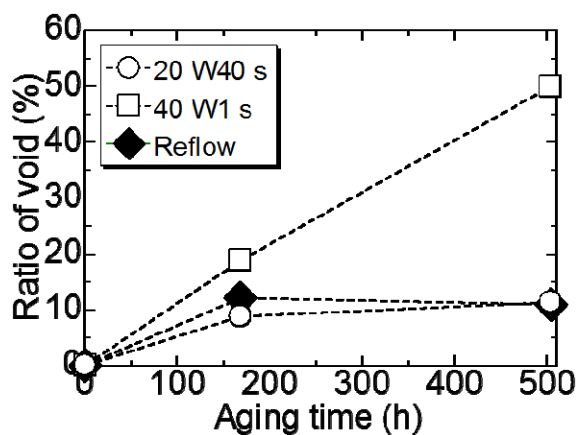


図5 界面に占めるボイド形成の割合

時効時間が0 hつまりはんだ付直後では、レーザはんだ付継手はいずれのレーザ照射条件でも、リフローはんだ付継手と比べて最大荷重、全エネルギーともに高い値を示した。一方、168 h 時効後においては、レーザはんだ付継手ははんだ付直後と比べて、最大荷重は少し低下したが、リフローはんだ付に比べると高い値を示した。一方、全エネルギーは、レーザ及びリフローはんだ付継手の両方で値が上昇した。一方、時効時間が504 hの場合には、レーザ照射条件による違いが明確に現れた。20 W・40 sでは、168 hの時とほとんど変化はなく同等の最大荷重及び全エネルギーを示した、30 W・5 sと40 W・1 sの場合には、最大荷重と全エネルギー共に急激に低下し、リフローはんだ付継手よりも低くなった。

衝撃試験により、レーザはんだ付継手は、はんだ付直後においては優れた接合強度を示した。また、長時間時効した場合には、初期のレーザ照射条件によって、耐衝撃性に大きな違いがみられ、低出力・長時間照射の条件で、リフローはんだ付よりも優れた衝撃試験結果を示し、レーザ照射条件を工夫することで、耐衝撃性に優れたレーザはんだ付継手を形成できることが明確になった。

### 3.3 はんだ/Cuパッド界面の評価

長期信頼性に優れたレーザはんだ付継手の形成が可能であることが明確になる一方で、時効時間が504 hの場合には、20 W・40 sの場合のみ良好な接合強度を維持したが、30 W・5 sと40 W・1 s場合は最大荷重と全エネルギーともに急激に低下した。これら3種類のはんだ付継手のIMC厚さやはんだ組織の硬さはほぼ同等であった。

そこで、20 W・40 sの場合と30 W・5 sと40 W・1 sの場合ではIMCとCuパッド界面の状態が異なるのではないかと考えられ、504h時効後の20 W・40 sと40 W・1 sの条件ではんだ付された継手について、SEMによるIMC層/Cuパッド界面の詳細な観察を行った。その結果を図4に示す。Cu<sub>3</sub>Snと推定される層とCuパッド界面に注目すると、20 W・40 s及び40 W・1 sどちらの場合も微小ボイドの存在が確認されたが、40 W・1 sの場合は20 W・40 sの場合と比べボイドが多量に存在しており、隣り合うボイドが連結したようなクラックへと成長しているものも見られた。ボイドは、継手の信頼性に大きな影響を及ぼすと言われているカーケンダル効果によるボイドと考えられる<sup>6)</sup>。

そこで、はんだ/Cuパッド界面におけるボイド形成を定量的に評価することにした。SEM画像からIMC層/Cu界面の長さに占めるボイドの長さの割合を測定した。測定は、接合界面の左端、中心付近、右端の3箇所のSEM画像より行い、その平均を求めた。界面に占めるボイドの割合測定の結果を図5に示す。はんだ付後は、全てのはんだ付条件でボイドの形成は認められなかった。レーザ照射条件20 W・40 sでは、時効時間が168 hから504 hになってもボイドの割合は10%前後であった。一方で40 W・1 sの場合には、時効時間168 hで約20%、504 hになると界面の50%程度をボイドが占めていた。リフローはんだ付の場合は、20 W・40 sの場合とほぼ同じボイド割合となった。従って40 W・1 s及び30 W・5 sの504 h時効における急激な接合強度の低下は、多量のボイド形成が影響していると推察された。

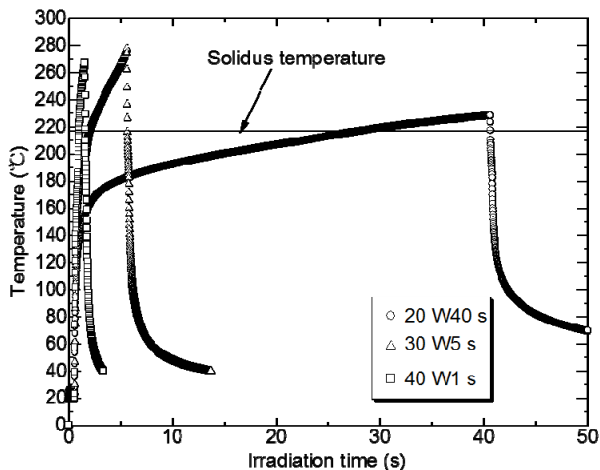


図6 レーザはんだ付した際のはんだ温度測定結果

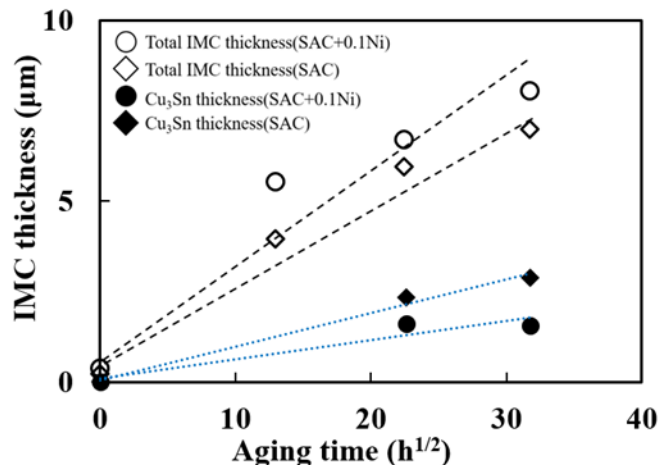


図7 金属間化合物層の成長への Ni 添加の影響

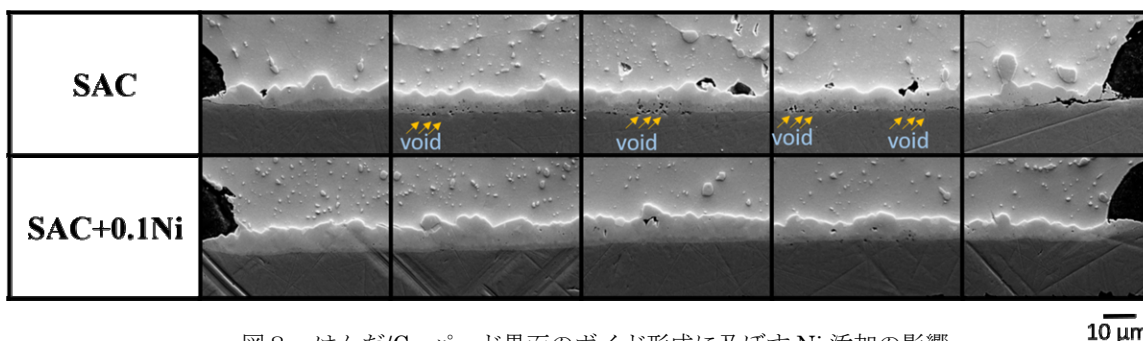


図8 はんだ/Cu パッド界面のボイド形成に及ぼす Ni 添加の影響

### 3.4 ボイドの形成メカニズム

レーザー照射条件が 40 W・1 s の場合、20 W・40 s やリフローの場合より IMC の成長や接合界面のボイド形成が速くなった理由について考察する。Cu<sub>3</sub>Sn/Cu パッド界面のボイドは、Cu パッドから IMC 層及びはんだ中への Cu の拡散が、はんだから Cu パッドへの Sn の拡散より速い為起こると言われている。つまり、はんだ付条件により界面及びはんだ内における拡散現象が異なっていると考えられる。一般に拡散速度は、はんだ継手の組織に影響を受けると言われている。はんだ継手の組織は、熔融時間や冷却速度の影響を受ける。各種レーザー照射条件ではんだ付した際の温度プロファイルの測定結果を図6に示す。40 W・1 s は他のはんだ付条件と比較して、はんだの熔融時間が極端に短く、冷却速度がかなり速くなっていった。従って、はんだ組織や界面の IMC 組織など全てが微細になっていると推察される。そこで、はんだ付後にはんだを溶解し、IMC 層を上から観察した結果について述べる。20 W・40 s の場合には、粒径は 0.5 μm 程度で球状の IMC 粒子となっていた。一方、40 W・1 s は粒径 0.25 μm 程度の微細な多角形状 IMC 粒子であった。リフローの場合は、粒径 2.4~3.8 μm 程度の六角形状 IMC 粒子であった。レーザー照射はリフロー加熱より IMC 粒子が微細であり、IMC 層で粒界拡散が起こりやすかったのではないかと推察される。つまり、はんだ熔融時間が短く、冷却速度の速い 40 W・

1 s は、はんだ付界面の IMC 層が微細であり粒界を多く持つために粒界拡散が活発に起こり、ボイドの形成が多くなったと考えられる。

### 3.5 ボイド形成抑制策の検討

はんだの特性改善の手法に元素微量添加による改善方法が多く提案されており、例えば、Ni は界面におけるボイド形成に関係する IMC 層である Cu<sub>3</sub>Sn 層の形成を抑制する効果があるとされている<sup>7)</sup>。そこで、Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだに 0.1 mass% の Ni を添加したはんだを試作し、はんだへの Ni 微量添加がはんだ/Cu パッド界面に形成するボイドに与える影響と IMC 層の成長に与える影響を評価することとした。

以下の実験では、Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだと Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.1Ni はんだの2種類のはんだボールを Cu パッド上にはんだ付した。レーザーはんだ付の最大のメリットは、短時間プロセスであると考え、以下の Ni 添加の影響評価では短時間照射の条件で実験をおこなうこととし、30 W・0.5 s を採用した。またはんだ/Cu パッド界面に形成されるボイドを評価するため、Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだボールと Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.1Ni はんだボールを用いて継手を作製し、150 °C で 1008 h まで高温時効処理した。

はじめに高温時効処理時における IMC 層厚さの測定結果を図7に示す。レーザーはんだ付直後の Sn-3.0Ag-0.5Cu



はんだと Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.1Ni はんだにおける界面での IMC 層の厚さはそれぞれ 0.22  $\mu\text{m}$  と 0.38  $\mu\text{m}$  であった。時効処理後は、固相/固相反応により IMC 層が厚く成長していることが分かる。Sn-3.0Ag-0.5Cu /Cu 界面では、2 種類の反応層が形成されており、EDX を用いた元素分析の結果、はんだ側の反応層が  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ 、Cu パッド側が  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  であることが確認できた。一方、Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.1Ni /Cu 界面でも、2 種類の反応層が形成されており、それぞれ  $(\text{Cu},\text{Ni})_6\text{Sn}_5$  と  $\text{Cu}_3\text{Sn}$  であることが確認でき、界面に形成される IMC 中にはんだに微量添加された Ni が濃化していることが確認できた。1008 h 時効処理後の Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだと Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.1Ni はんだにおける IMC 層全体の厚さは 7.09  $\mu\text{m}$ 、8.05  $\mu\text{m}$  であり、 $\text{Cu}_3\text{Sn}$  の厚さは 2.88  $\mu\text{m}$ 、1.55  $\mu\text{m}$  であった。Ni をはんだに微量添加することで、IMC 中に Ni が濃化するだけでなく、 $\text{Cu}_3\text{Sn}$  の成長を抑制できることが分かった。

次に、SEM により IMC 層/Cu パッド界面の詳細な観察を行った結果を図 8 に示す。上段は Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだ/Cu 界面であり、はんだ/Cu パッド界面付近に矢印で示したように多くのボイド形成を確認することができ、右端には隣り合うボイドが連結したようなクラックへと成長しているものも見られた。一方、下段は Sn-3.0Ag-0.5Cu-0.1Ni はんだ/Cu 界面である。Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだ/Cu 界面に比べ、明らかに界面でのボイド形成が抑制されており、一般的なリフロー炉を使用したはんだ付プロセスにおいてだけではなく、レーザー用いた短時間プロセスの場合にも、はんだへの Ni 添加により界面近傍のボイド形成を抑制することができることが分かった。

以上より、短時間加熱のレーザーはんだ付プロセスにおいても Sn-3.0Ag-0.5Cu はんだへの Ni 添加は効果的であり、界面でのボイドの形成が抑制できることが明確になり、耐衝撃性の向上も期待できることが分かった。

#### 4. おわりに

本研究では、レーザーをはんだ付の熱源として使用し、鉛フリーはんだ継手を形成し、時効処理することで、レーザー照射条件がはんだ付性や接合強度へ与える影響を検討するとともに、時効処理の影響などを評価し、レーザーはんだ付継手の接合界面挙動と耐衝撃性を検討した。得られた主な結果を以下に示す。

- (1) レーザによるはんだ付は、レーザーを高い出力で照射した場合、非常に短時間ではんだ/Cu パッドをはんだ付することが可能であるが、照射時間は接合強度に影響を及ぼすため、適正なレーザー照射条件の検討が重要である。
- (2) レーザはんだ付を用いた場合には、はんだ付直後では、接合界面の IMC 層が非常に薄いため、リフローはんだ付に比べて、より優れた接合強度を示した。
- (3) 一方、時効処理により、接合界面の IMC 層が急激に成長したが、168 h までは、はんだの軟化により接合強度は維持された。時効時間が 504 h では、レーザー照射条件に

よる違いが現れ、30 W $\cdot$ 5 s、40 W $\cdot$ 1 s の場合には、IMC 層と Cu パッド界面に多量のボイドが形成されたため、接合強度が急激に低下した。20 W $\cdot$ 40 s の場合には、リフローはんだ付よりも高い接合強度を維持し、レーザーはんだ付された継手の優れた接合性が示された。

(4) レーザはんだ付に対してもはんだへの Ni の微量添加は効果的であり、はんだ/Cu パッド界面に形成される IMC 層中に濃化しており、界面でのボイドの形成抑制に効果的であることが分かり、耐衝撃性の向上も期待できることが分かった。

#### 謝 辞

本研究は、主に公益財団法人天田財団の平成 27 年度一般研究開発助成 AF-2015222 の支援を受けて遂行された研究であり、ここに記して、心より深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) C. Chaminade, E. Fogarassy, D. Boisselier, Applied Surface Science, 252 (2006), pp. 4406-4410.
- 2) 竹本, 溶接学会誌, 75, No. 7 (2006), pp. 583-588.
- 3) 竹本, 高温学会誌, 32, No. 4 (2006), pp. 192-198.
- 4) Y.-S. Lai, H.-C. Chang and C.-L. Yeh, Microelectron. Reliab., 47 (2007), pp. 2179-2187.
- 5) Y.-S. Lai, J.-M. Song, H.-C. Chang and Y.-T. Chiu, J. Electron. Mater., 37, No. 7 (2007), pp. 201-209.
- 6) C. Yu, Y. Yang, H. Lu, J. M. Chen, J. Electron. Mater., 39, No. 8 (2010), pp. 1309-1314.
- 7) Y. W. Wang, C. C. Chan, C. R. Kao, Journal of alloys and compound, vol. 478 (2009), pp. L1-4.