研究報告 研究報告 Wettability of Cu and Cu-Sn Intermetallic Compound by Sn-Pb Solder Alloy

Hisaaki Takao, Nobuyuki Yamamoto, Hideo Hasegawa

要 旨

CuおよびCu-Sn系金属間化合物のはんだ濡れ性に及ぼす表面酸化の影響について検討した。 Cuの場合,大気中にて150°Cで2hの熱処理により,表面に55nm程度のCu₂Oが形成される。しか しながら,この酸化物層が,Cuのはんだ濡れ性に及ぼす影響は小さい。一方,Cu-Sn系金属間 化合物では,わずか5nm程度の薄い非晶質酸化物層の形成により,そのはんだ濡れ性は著しく 低下する。Cu-Sn系金属間化合物表面の酸化物は,酸化銅や酸化錫よりも,電気化学的に卑な還 元電位を示すことから,CuあるいはSnのみからなる酸化物ではなく,より安定なCu-Sn系複合 酸化物として存在すると考えられる。

Abstract

Wettability of Cu and Cu-Sn intermetallic compound was investigated in terms of its surface oxidation. Cu₂O layer of about 55nm thick was formed on the surface of Cu during the heat treatment at 150°C for 2h in the air, which had a little influence on its wettability. On the other hand, the surface oxidation of Cu-Sn intermetallic compound caused an appreciable reduction in its wettability. The surface of the oxidized Cu-Sn intermetallic compound was covered with an amorphous layer of about 5nm thick. The galvanostatic coulometry analysis suggested that the amorphous layer was a Cu-Sn complex oxide, which was more difficult to reduce owing to its cathodic potential lower than Cu₂O or SnO.

キーワード

はんだ濡れ性, Cu, Cu-Sn系金属間化合物,酸化物,還元電位測定,メニスコグラフ試験

1.はじめに

部品を実装する前のプリント配線基板のCuラ ンド表面には,一般に,Cuの酸化防止とはんだ 濡れ性確保のため,Sn-Pb系はんだが薄くコーテ ィングされている。はんだコーティングは,多く の場合,HAL(Hot Air Levelling)法により行われ ているが,コーティング厚さには0.5~40µm程度 のばらつきがあると言われているい。

実装部品の小型化・高集積化に伴い, Cuランド 面積は小さく, ピッチ間隔は狭くなる傾向にあり, はんだコーティング厚さのばらつきは,品質問題 を起こす要因になる²⁾。例えば,はんだコーティ ングが厚すぎる場合にははんだブリッジが生じ, またコーティング厚さにばらつきがある場合には 部品搭載不良が生じる。こうした問題を改善する ためには,はんだコーティング層をより均一であ まり厚くならないようにすることが必要である。

一方,はんだ層が薄いと,はんだ / Cu界面に生 成するCu-Sn系金属間化合物(以下,Cu-Sn化合物 あるいは化合物)が,はんだ表面に露出すること がある。Cu-Sn化合物がはんだ表面に露出すると, 部品が実装されるまでにプリント基板がうける熱 履歴によって,化合物表面が酸化し,はんだ濡れ 不良が発生しやすくなると報告されている³⁻¹¹。

しかしながら,はんだ濡れ性阻害要因の一つで ある表面酸化膜の影響については未だ殆ど明らか にされていない。また,研究例の多くは,はんだ コーティング面にCu-Sn化合物が露出した状態, すなわち,はんだ相(Sn相,Pb相)と化合物相が 共存した状態で濡れ性を評価している⁵⁻¹¹⁾。こ のため,Cu-Sn化合物が,本来どの程度の濡れ性 を示すかに関しては全く明らかにされていない。

本研究では,Cu-Sn化合物単相のはんだ濡れ性を 明らかにすることを目的に,Cu-Sn化合物の表面状 態を走査型電子顕微鏡(SEM),X線回折(XRD), オージェ電子分光分析(AES),X線光電子分光分 析(XPS),透過電子顕微鏡(TEM),電気化学的 還元電位測定により詳細に解析し,表面酸化膜と はんだ濡れ性との関係についてCuと比較して検討 した。

2.方法

2.1 試料作製

リン脱酸銅板(以後CuあるいはCu板)とCu-Sn 化合物を試料とした。Cuは,表面を電解研磨し た後,酸洗浄(1N HCl),水洗,冷風乾燥した。

Cu-Sn化合物は, Fig. 1に示した手順により作製 した。Fig. 2(a)は,熱処理(150°C,95h)後のはん だ/Cu界面の組織(光学顕微鏡像)である。はん だ/Cu界面には,はんだ側にCu₆Sn₅,Cu側に Cu₃Snが生成することが既に知られており¹²⁾,実 験試料においても,Cu₆Sn₅が約4 μ m,Cu₃Snが約 1 μ m生成していることが確認された。Fig. 2(b)は, はんだ除去後のCu-Sn化合物試料表面の組織(SEM 像)である。化合物試料表面は,粒径2~4 μ m程度 のCu₆Sn₅粒子で構成されていた。

このようにして作製したCuとCu-Sn化合物を,

大気中にて,150°Cで2hの熱処理を行って表面を 酸化し,酸化前後でのはんだ濡れ性評価と表面分 析の試料とした。

2.2 はんだ濡れ性評価

2.2.1 広がり試験

広がり試験は,広がり率からはんだ濡れ性を評価する方法であり,JIS Z 3197に規定されている。 広がり率(S)は,試験前後のはんだの高さを測定し,式(1)を用いて算出することができる。この際, 広がり率が大きいほど濡れ性は良いとされる。

$$S = \frac{(D - H)}{D} \times 100 \,(\%)$$
(1)

D:試験前のはんだを球と見なした場合 の高さ(直径)

H:試験後のはんだの高さ

なお,はんだには63Sn-37Pb(mass%),フラック スにはハロゲンフリータイプの市販品,基板(Cu またはCu-Sn化合物)には30×30×0.3(mm)のもの を用い,試験温度は230°C,保持時間は30sとした。

2.2.2 メニスコグラフ試験

メニスコグラフ試験は,JISC0053に規定されて いる。この試験は,溶融はんだ槽に被接合材(基 板)を浸漬する過程において,基板に作用する力 の時間変化(濡れ曲線)を測定し,濡れ性を評価



Fig. 1 Preparation of Cu-Sn intermetallic compound.

する。前述した広がり試験が,はんだが基板上に 広がる前後の状態,すなわち静的なはんだ濡れ性 を評価する方法であるのに対し,メニスコグラフ 試験は,はんだが基板に濡れていく過程,すなわ ち動的なはんだ濡れ性を評価する方法である。

Fig. 3に, メニスコグラフ試験において得られ る濡れ曲線の一例を示す。この濡れ曲線から,濡 れ時間および濡れ力を求めて,濡れ性を評価した。 この際,濡れ時間は短いほど,濡れ力は大きいほ ど,濡れ性は良いとされる。なお,本実験での濡 れ力は,試験中の最大値(最大濡れ力)とした。

また,はんだ,フラックスおよび試験温度は広 がり試験の場合と同一とし,基板寸法は10×30× 0.3 (mm),浸漬深さは2mm,浸漬速度は10mm/s, 浸漬時間は10sとした。



10µm



- 10µm
- Fig. 2 Microstructure of Cu-Sn intermetallic compound. (a) Optical micrograph of the cross-sectional view of 63Sn-37Pb/Cu interface after heat-treatment, (b) SEM micrograph of Cu-Sn intermetallic compound after removing the solder.

2.3 表面分析

試料表面の分析は,走査型電子顕微鏡(SEM),X 線回折(XRD),オージェ電子分光分析(AES),X 線光電子分光分析(XPS),透過電子顕微鏡(TEM) および電気化学的還元電位測定を用いて行った。

なお,還元電位測定は,Tench, D. M.ら¹³⁾によっ て,初めてはんだ材料に適用された方法で,試料 表面に形成された酸化物の還元されやすさや酸化 物層厚さを見積もることが可能である。本実験で は,電解液としてホウ酸-ホウ酸ナトリウム系緩衝 溶液(pH 8.4),対極にPtを用いて,定電流($20\mu A / cm^2$)を通電したときの試料と参照電極(飽和カロ メル電極,SCE)間の電位差の時間変化を測定した。 分析試料の寸法は, $5 \times 30 \times 0.3$ (mm)とした。また, 比較として,同一条件(150° C, 2h,大気中)で,表面 を酸化したSn(99.99%)板についての測定も行った。

3.結果および考察

3.1 はんだ濡れ性に及ぼす表面酸化の影響 Fig.4に,酸化前と酸化後(150°C,2h)のCuおよ びCu-Sn化合物上でのはんだ広がり率(S)を示す。

Cuの場合,酸化前の広がり率は88%であり,酸 化後のそれは85%であった。酸化により広がり率 がやや小さくなる傾向が見られるものの,表面酸 化がCuのはんだ広がりに及ぼす影響は小さいこ とがわかった。

一方,Cu-Sn化合物の場合,酸化前の広がり率



Fig. 3 Typical wetting curve in meniscograph test.

豊田中央研究所 R&D レビュー Vol. 31 No. 4 (1996. 12)

は92%であり, Cuの場合よりも数%程度大きな広がり率を示した。しかしながら,酸化後の広がり 率は71%と,酸化前に比べて非常に小さく,はん だ広がりに及ぼす表面酸化の影響が極めて大きい ことがわかった。

両者のはんだ濡れ挙動についてさらに詳細に検 討するため,メニスコグラフ試験による評価を行 った。

Fig. 5(a), (b)に,酸化前と酸化後(150°C,2h)のCuについて得られた濡れ曲線を示す。

Cuの場合,酸化により,濡れ時間は長くなるも のの,濡れ力には殆ど差異が見られなかった。酸 化により濡れ時間が長くなったのは,熱処理によ りCu表面に酸化皮膜が形成され,フラックスに よる酸化皮膜除去に時間を要したためと考えられ る。また,酸化前後で濡れ力に差異が見られない のは,フラックスによって,Cu酸化皮膜がほぼ 完全に除去され,最終的には良好な濡れが得られ るためと考えられる。

Fig. 6(a), (b)に, Cu-Sn化合物について得られ た濡れ曲線を示す。

Cu-Sn化合物の場合,酸化前においても,濡れ 時間が長く,はんだ濡れの進行が遅いことがわか った。これは,フローはんだ付けのようにはんだ



Fig. 4 Solder spreading on Cu and Cu-Sn intermetallic compound.

付け時間が数秒程度と短い場合には,Cu-Sn化合物表面が酸化していなくても,はんだ濡れ不良が 生じる可能性があることを示唆している。また, 化合物表面の酸化による影響も顕著に見られ,酸 化後では,酸化前に比べて,濡れ時間はさらに長く,濡れ力は小さくなった。

Fig. 7およびFig. 8に, CuおよびCu-Sn化合物の 濡れ時間および濡れ力(最大濡れ力)を比較して 示す。



Fig. 5 Wetting curves of Cu. (a) As fabricated, (b) Oxidized at 150°C for 2h in air.



Fig. 6 Wetting curves of Cu-Sn intermetallic compound. (a) As fabricated, (b) Oxidized at 150°C for 2h in air.

Cu-Sn化合物の濡れ時間および濡れ力は,酸化 の有無に関わらず,Cuに比べて劣っていた。特 に,酸化による濡れ力の低下は,Cuの場合に比 べて著しく大きかった。また,Cu-Sn化合物では, Cuの場合に比べて,濡れ時間及び濡れ力の測定 値のばらつきが大きく,濡れ性が安定していない ことがわかった。

以上のように,広がり試験およびメニスコグラ フ試験から,Cu-Sn化合物では,そのはんだ濡れ



Fig. 7 Wetting time of Cu and Cu-Sn intermetallic compound.



Fig. 8 Wetting force of Cu and Cu-Sn intermetallic compound.

性が表面酸化により著しく低下すること,また, はんだ濡れの進行がCuに比べて遅いことが明ら かになった。

両面実装工程では,多くの場合,表面にリフロ ーはんだ付けによる部品実装が行われた後,裏面 にフローはんだ付けによる部品実装が行われる。 この場合,フローはんだ付けが行われるまでに, プリント基板はプリヒート工程やリフローはんだ 付け工程などで,最高温度約250°Cで数十秒間の 熱履歴をうけることになる。そこで,本研究では, 150°Cで2hの熱処理条件の他に150°C,200°C, 230°Cで30sの熱処理を行い,これによるCu-Sn化 合物表面の酸化がはんだ濡れ性に及ぼす影響につ いて検討した。

Fig. 9に, Cu-Sn化合物上でのはんだ広がり率を 示す。

150°Cの熱処理では,酸化による影響は殆ど見 られなかった。しかしながら,200°Cでの広がり 率は77%,230°Cでは64%になり,熱処理温度の 上昇と共に,はんだ広がり率が急激に低下するこ とがわかった。

このことは,熱処理温度が150°C以下のはんだ付け工程(プリヒート工程等)では,プリント基板のはんだコーティング厚さが薄く,はんだ表面にCu-



Fig. 9 Solder spreading on Cu-Sn intermetallic compound.

Sn化合物が露出していても,はんだ濡れ性を損な う可能性は少ないが,リフロー工程のように,基 板が200°C以上で30s程度の熱履歴をうける場合に は,Cu-Sn化合物のはんだ濡れ性が損なわれ,次工 程のフローはんだ付けにおいて,はんだ濡れ不良 が発生しやすくなることを示唆している。

なお,恒温恒湿下(25℃,40~60%RH)での保 管期間の影響についても検討した。Cu-Sn化合物 上でのはんだ広がり率は,保管前の92%に対し, 6ヶ月保管後のそれは91%であり,保管による影 響は小さかった。このことから,Cu-Sn化合物の はんだ濡れ性に対しては,はんだ付け工程中の熱 処理の影響の方が大きいと考えられる。

3.2 表面分析

Fig. 10(a),(b)に,酸化前と酸化後(150°C,2h) のCu表面について,AESによる深さ方向分析を行 った結果を示す。

酸化前のCu表面酸化物層厚さは数nm程度と非 常に薄いのに対し(Fig. 10(a)),酸化後では,厚さ 50nm程度の酸化物層が生成していた(Fig. 10(b))。 この酸化物層は,XRDから,Cu₂Oであることが わかった。

Fig. 11(a), (b)に,酸化前後のCu-Sn化合物表面 について同様の分析を行った結果を示す。酸化条 件は,Cuの場合(Fig. 10)と同様である。

酸化前後ともに, Cu-Sn化合物表面にはSnが濃 化していることがわかるものの,酸化物層の厚さ は数nm程度と非常に薄く,酸化前後でほとんど 差異が見られなかった。このため,SEMおよび XRDによる分析を行ったが,酸化前後での組織 変化は見られず,また結晶質の酸化物も検出され なかった。Cu,Sn,あるいはその両者からなる 酸化物層がはんだ濡れ性を阻害していると予想さ れるが,酸化物層の違いをこれらの分析手法で明 らかにするのは困難である。

そこで,電気化学的還元電位測定を用い,Cu, SnおよびCu-Sn化合物表面に形成される酸化物層 について分析した。

Fig. 12に,酸化(150°C,2h)したCuおよびSn 表面について還元電位測定を行った結果を示す。 電位の時間経過に伴う変化は,基板表面に存在す る酸化物が還元される過程を示し,図中に見られ



Fig. 10 AES depth profiles of Cu. (a) As fabricated, (b) Oxidized at 150°C for 2h in air.



Fig. 11 AES depth profiles of Cu-Sn intermetallic compound. (a) As fabricated, (b) Oxidized at 150°C for 2h in air.

るプラトー領域(電位が平坦な部分)は,その電 位で還元される酸化物がある厚さで存在すること を意味している。言い換えれば,プラトー領域の 時間から,通電量を算出することにより,酸化物 層厚さを見積もることが可能である。また、プラ トー領域の電位(還元電位)は酸化物の安定度と 関係があり、還元電位が卑であるほど酸化物とし てより安定であることを示している。

Cuを酸化した場合 (Fig. 12(a)), 表面には2種類 の酸化物(還元電位:-0.35V,-0.48V)が存在す ることがわかった。XRDではCu₂Oの存在が確認 されることから,-0.48Vに還元電位を示す酸化物 (プラトー領域が長く,酸化物層厚さが厚い)は Cu₂Oであり, -0.35Vに還元電位を示す酸化物は, CuO(あるいはCu(OH)₂)と考えられる。また, 通電量から算出した酸化物層厚さは, Cu₂Oが 55nm, CuOが0.3nm程度であった。

同様に,Snを酸化した場合について測定した結 果 (Fig. 12(b)), 表面に形成されるSnOの還元電位 は-0.86Vで,酸化物層厚さは15nm程度であった。

Fig. 13に,酸化前後のCu-Sn化合物について還 元電位測定を行った結果を示す。酸化条件は, CuおよびSnの場合(Fig. 12)と同様である。

酸化前は,プラトー領域は明確ではなく,化合 物表面の酸化物の存在を確認できない。しかし、 酸化後では,-0.71Vと-0.95Vにプラトー領域が存 在し,表面に2種類の酸化物が生成していること が示唆された。

Fig. 12とFig. 13を比較すると, Cu-Sn化合物表面 に形成される酸化物の還元電位は,酸化銅(-0.35V, -0.48V) あるいは酸化錫(-0.86V) のいずれとも-致していない。このことから, 化合物表面の酸化 物は,CuあるいはSnのみからなる酸化物ではなく, Cu-Sn系複合酸化物として存在していると考えられ る。

また, Cu-Sn化合物の表面酸化物は, 酸化銅お よび酸化錫よりも卑な還元電位(-0.95V)を示す ことから,より安定な酸化物として存在する,す なわち,フラックスでより除去しにくい状態にあ ることがわかった。これは, Cu (Fig. 4~7)およ びSn(酸化したSn板上での広がり率:92%,試験温 度: 200°C)のはんだ濡れ性に及ぼす表面酸化の影 響が小さいのに対し, Cu-Sn化合物では,酸化によ るはんだ濡れ性の低下が著しいことに対応する。

Fig. 14(a), (b)は,酸化前後のCu-Sn化合物表面の TEM像である。酸化条件は,大気中にて,150°Cで



Fig. 12 Galvanostatic coulometry curves. (a) Oxidized Cu, (b) Oxidized Sn, at 150°C for 2h in air.



Fig. 13 Galvanostatic coulometry curves for Cu-Sn intermetallic compound. (a) As fabricated, (b) Oxidized at 150°C for 2h in air.

2hである。

酸化前の化合物表面(Fig. 14(a))では,表面酸 化物層を識別することはできない。しかし,酸化 後(Fig. 14(b))では,酸化物とCu-Sn化合物の境 界は明瞭であり,3~5nm程度の非常に薄い非晶 質層が生成していることがわかった。

以上のことから, Cu-Sn化合物の表面酸化によ るはんだ濡れ性低下は,わずか数nmの薄い酸化 物層が表面に形成されるためと考えられる。した がって, Cu-Sn化合物のはんだ濡れ性を確保する ためには,表面に形成されるこの安定な酸化膜を



Fig. 14 TEM images of the surface of Cu-Sn intermetallic compound. (a) As fabricated, (b) Oxidized at 150°C for 2h in air.

除去する必要がある。実際,活性力のあるハロゲ ン含有フラックスを使用すると,酸化後でも,酸 化前と同程度のはんだ濡れ性が得られることを確 認している。

Cu-Sn化合物表面酸化物のフラックス処理によ る除去作用を明確にするため,XPSを用いて化合 物表面の定量分析を行った。Table 1に,その結 果を示す。分析試料は,酸化前後の化合物表面お よび酸化後にフラックス処理を行ったCu-Sn化合 物表面である。酸化条件は,大気中にて,150°C で2hとした。フラックス処理は,フラックスのみ を基板上に塗布し,広がり試験と同じ条件で熱処 理した後,フラックスを除去して分析に供した。 なお,Cuの場合,金属と酸化物の識別が困難で あるため,表中では,両者の和として示した。ま た,試料表面から検出されたCはコンタミネーシ ョンと考えられる。

酸化前後の化合物表面は,ともに,Cu,Snお よびOで構成されており,酸化によって,Cu量が 減少し,Sn量が増加していることがわかった。

フラックスの効果を見ると,酸化後のCu-Sn化 合物においてもはんだ濡れ性が確保できるハロゲ ン含有フラックスでは,フラックス処理後の表面 は,酸化前の化合物表面の状態に近くなっており, 酸化物が除去されていることがわかった。一方, 十分なはんだ濡れ性が得られなかったハロゲンフ リータイプのフラックスでは,フラックス処理後 の表面は,酸化後の状態とほとんど変わっておら ず,化合物表面の酸化物に対する除去能力が低い ことがわかった。

Table 1	Surface analysis of Cu-Sn intermetallic
	compound.

	C.	Sn			
	Cu	Matal	Oxide	0	
As fabricated	7.5	3.6	15	45	28
After oxidized	2.9	3.0	22	50	23
Halogen flux treated after oxidized	9.7	2.7	12	41	34
Halogen free flux treated after oxidized	0.9	2.2	23	54	20
					(at%)

4.おわりに

プリント基板のCuランド表面に施されたはん だコーティング面のはんだ付け不良の原因究明の 一環として,はんだ/Cu界面に生成するCu-Sn系 金属間化合物のはんだ表面への露出の影響を明ら かにするため,CuおよびCu-Sn系金属間化合物単 相の表面酸化膜とはんだ濡れ性について検討し た。本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) Cuの場合,大気中で150°C,2hの熱処理を行うことにより,表面に厚さが55nm程度のCu₂Oが 形成される。しかし,本実験条件では,この酸化 膜がCuのはんだ濡れ性に及ぼす影響は少ない。

(2) Cu-Sn化合物の場合,表面での非常に薄い
 (3~5nm)非晶質酸化物の生成により,はんだ
 濡れ性が低下する。

(3) Cu-Sn化合物表面の酸化物は, Cuあるいは Snのみからなる酸化物ではなく, Cu-Sn系複合酸 化物であると考えられる。また, Cu-Sn化合物表 面の酸化膜は,酸化銅や酸化錫に比べて,電気化 学的により卑な還元電位を示すことから,酸化物 として安定であり,フラックスでより除去しにく い状態にある。

謝 辞

本研究を行うにあたり,当所材料1部鈴木憲一 氏,分析・計測部佐藤敏一氏ならびに所真紀氏に 御助言,御協力を頂きました。

参考文献

- 小田幸雄, 嶋貴誠, 山崎遼一, 小原雅信, 鶴瀬英紀: 三菱 電機技報, 67(1993), 459~466
- 2) 藤田実: Uyemura Tech. Rep., No.30(1994), 12~17
- Billot, M. and Clement, S. : Tin and its Uses, 131(1982), 1
 ~ 3
- Yenawine, D. L., Dunnigan, J. S. and Howarth, R. A. : 7th Soldering Technol. Seminar Proc., (1983), 207 ~ 219
- Davis, P. E., Warwick, M. E. and Kay, P. J. : Plat. and Surf. Finish., 69(1982), 72 ~ 76

- Davis, P. E., Warwick, P. E. and Muckett, S. J. : Plat. and Surf. Finish., 70(1983), 49 ~ 53
- Sunwoo, A. J., Hayashigatani, H., Morris, J. W., Jr. and Lucey, G. K., Jr. : JOM, June, (1991), 21 ~ 24
- Sunwoo, A. J., Morris, J. W., Jr. and Lucey, G. K., Jr. : Metall. Trans. A, 23(1992), 1323 ~ 1332
- Sunwoo, A. J., Morris, J. W., Jr. and Lucey, G. K., Jr. : Circuit World, 18(1992), 26 ~ 32
- Sunwoo, A. J., Morris, J. W., Jr. and Lucey, G. K., Jr. : J. Electro. Mat., 21(1992), 549 ~ 557
- 11) 渡部勲,作山誠樹:第35回マイクロ接合研究委員会資料,(1992),23~32
- 竹本正, 佐藤了平:高信頼度マイクロソルダリング技術, 工業調査会, (1991), 319
- Tench, D. M. and Anderson, D. A. : Plat. Surf. Finish., 77(1990), 44 ~ 46

著者紹介



高尾尚史 Hisaaki Takao
 生年:1967年。
 所属:物性解析研究室。
 分野:電子用接合に関する研究。
 学会等:日本金属学会,回路実装学会会
 員。
 平成7年度溶接学会マイクロ接合優



山本修之 Nobuyuki Yamamoto
 生年:1940年。
 所属:物性解析研究室。
 分野:金属材料に関する研究。
 学会等:日本金属学会会員。



長谷川英雄 Hideo Hasegawa 生年:1942年。

- 所属:物性解析研究室。
- 分野:電子用接合材料の研究・開発,材 料物性解析。
- 学会等:日本金属学会,日本セラミック ス協会,溶接学会,エレクトロニ クス実装技術協会会員。 1987年日本金属学会論文賞受賞。 平成7年度溶接学会マイクロ接合優 秀研究賞受賞。 工学博士。