

銅細線と銅板の直接接合における溶融挙動と接合強度

高橋 賢治* 渡部 武弘** 松坂 壮太**

Melting Behavior and Bond Strength in Direct Micro-joining of Fine Copper Wire to Thin Copper Plate.

TAKAHASHI Kenji, WATANABE Takahiro and MATSUSAKA Souta

*千葉大学 大学院 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

**千葉大学 工学部 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

takaken@graduate.chiba-u.jp

(原稿受付 2006年8月7日)

Direct micro-joining method of fine copper wire with thin copper plate by pulsed YAG (Yttrium-Aluminum-Garnet) laser beams was developed. The effects of some parameters on a peeling strength were investigated. The parameters are pulse peak power, pulse duration, contact angle between the wire and the plate and wire extension from laser irradiation axis. When the joining conditions were peak power of 1.0 kW, pulse duration of 4 ms, contact angles of 10 degrees and 15 degrees and wire extension of 300 μm , high average peeling strength of approximately 4 N was obtained. Appearance of the junction and joining area after peeling the wire were observed by an optical microscope. And melt behavior during the joining was observed by high-speed video camera. According to the observation results, the peeling strength of the junction increased as the joining area became large. When the melt volume of the wire was small and irradiation energy to the wire was high, a neck of the wire was generated. When the wire was broken at the melt interface or the neck, the peeling strength was low compared with that when the wire broke at HAZ.

Key words: YAG laser beam, micro-joining, peeling strength, contact angle, melt volume of the wire

1. 緒 言

電子部品の接合材料として長年にわたり、鉛入りはんだが使用されてきたが、環境対策の観点から EU 指令において 2006 年 7 月から鉛の使用禁止が宣言され、鉛フリーはんだの実用化が盛んに進められている¹⁾。しかしながら鉛フリーはんだは、鉛入りはんだに比べ融点が高い、濡れ性が悪いなどの欠点を有しており、詳細な温度管理や濡れ性改善のためのメッキ材の選定など、実用上の問題も多いのが現状である²⁾。また近年の電子基板の高集積化や、自動車のエンジンルームのように $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ といった過酷な温度環境³⁾ における用途も拡大していることから、接点サイズの微小化や耐熱性への要求が高まっている。このような観点から、はんだを使用せずに接点を接合する手法が模索されている⁴⁾。

そのような接合技術として、抵抗スポット溶接や拡散接合、超音波接合などがあるが、電極のサイズ限界や損耗の問題がある。それに対して、レーザー溶接では非接触熱源を使用するため、工具形状の制約を受けることなく空間を自由に伝送可能であり、かつ微小スポットに集光可能なため微細接点の接合技術として有望である。このような背景から、本研究では汎用性が高く高生産性が期待できる YAG レーザを使用し、電極材料である銅のマイクロ直接接合技術について検討した。銅の直接接合については、超音波接合や拡散接合による研究事例⁵⁻⁸⁾ が多く、レーザー溶接につ

いては線と線の接合^{9,10)}、板と板の接合¹¹⁾ 事例がわずかにあるが、線と板についてはあまり見られない。そこでコンデンサ、コイル、抵抗、ダイオード等のリード付き電子部品と基板の接合を想定し、銅線と銅板の接合実験を行った。

しかしながら、銅の YAG レーザ (波長 1064 nm) に対する吸収率は約 10 %¹²⁾ と非常に小さく、溶融が起き始めた瞬間に吸収率が急増して蒸発飛散が発生しやすいため、その接合を困難にしている。そこでまずレーザー照射条件、銅線と銅板の接触角度、銅線に対するレーザー照射位置をそれぞれ変化させ、高い接合強度を安定して可能とする条件を検討することにした。また光学顕微鏡による接合部の観察および高速度ビデオカメラによる銅線の溶融挙動の観察を行い、接合強度との関係についても検討した。

2. 実験方法

2.1 実験試料

試料は銅線、銅板ともに純度 99.96 % のタフピッチ銅であり、銅線の径は 140 μm 、銅板の板厚は 200 μm である。なお銅板は 15 mm \times 15 mm のサイズにカットして使用した。試料は、アセトン液中にて約 5 分間超音波洗浄を行い、油脂汚れを取り除いた後に実験を行った。

2.2 実験装置および実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に、試料設置部の詳細を Fig. 2 に示す。レーザー発振器には PSL 社製 YAG レーザ発振器

PYS-2003 を使用した。まず保持部からの銅線の長さ (Lead length) を 2 mm に固定し、水平面に対して角度 30 度の片持ち状態で銅板に接触させる。つぎに銅線と銅板の接触角 (Contact angle: α) およびレーザ照射軸に対する銅線の突き出し長さ (Wire extension: L) を調整したのち、上方よりレーザ光を照射する。なお狭隘部分での微細接合を想定しているため、銅線押し付け用治具を使用しなかった。接触角と突き出し長さの確認は上面と側面からの CCD カメラにより行った。レーザ光の焦点位置におけるビーム径は 90 μm と銅線径 140 μm に対して小さく、Fig. 3 の接合部上面写真に示したように、銅線の飛散が起こりやすくなるため、本実験においては銅板表面を基準に -0.75 mm の焦点はずしを行った。また接合後にピーリング試験を行い、破断強度を評価した。Fig. 4 にピーリング試験装置の概略を示す。試験の再現性を向上させるため、銅線の長さは 10 cm 程度を取り、銅線をクランプする際に接合部へ外力が掛からないように工夫している。また測定分解能は 0.1N 以下であり、本実験の強度評価 (~約 4N) に対しては十分な精度を有している。なお同一条件でのサンプル数は 10 とし、Z 軸ステージの移動速度は 1.0 mm/min とした。また接合部外観および接合面について光学顕微鏡による観察を行い、銅線の溶解挙動について高速度ビデオカメラによる観察を行った。高速度ビデオカメラは Photron 社製 ultima1024 を使用し、フレームレートは 8000 frame/s とした。

3. 実験結果と考察

3.1 接合部の破断強度と写真観察

3.1.1 レーザ入熱量の影響

レーザ入熱条件による破断強度への影響を調べるため、まず接触角 (α) を 0 度、突き出し長さ (L) を 200 μm とし、レーザ光のピーク出力 (P) とパルス幅 (τ) を変化させて接合を行った。その際の平均破断強度を Fig. 5 に示す。同図によると、破断強度はピーク出力 1.0 kW で大きく、またパルス幅 4 ms 以上で大きくなる傾向が確認できる。パルス幅とピーク出力をそれぞれ変化させたときの接合部の上面写真と接合面の上面写真を、各々 Fig. 6 と Fig. 7 に示す。写真によると、1.0 kW・3 ms (パルスエネルギー 3 J) および

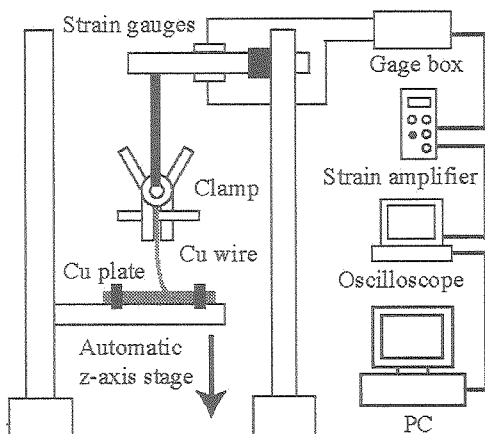


Fig. 4 Schematic illustration of a peeling test setup.

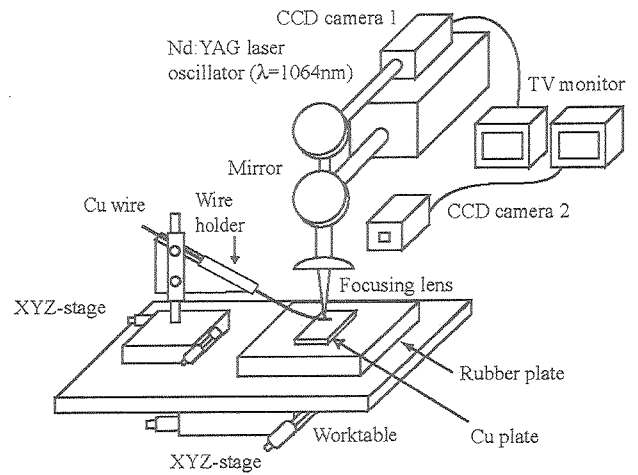


Fig. 1 Schematic illustration of experimental setup.

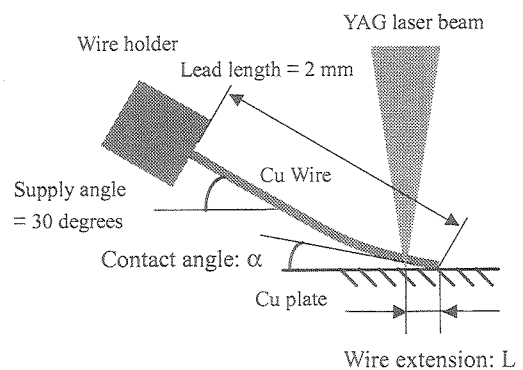


Fig. 2 Detail of contact condition between wire and plate.

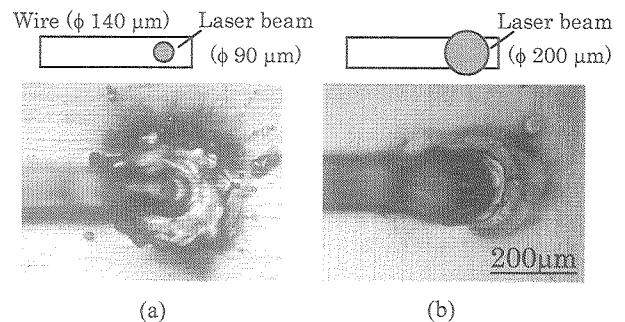


Fig. 3 Upper view of the junction in each beam diameter. (a) Def. = 0 mm, (b) Def. = -0.75 mm.

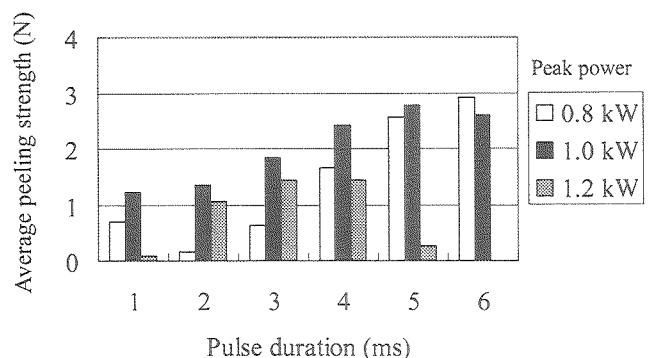


Fig. 5 Relationship between pulse duration and average peeling strength with various peak power at $\alpha = 0$ degree and $L = 200 \mu\text{m}$.

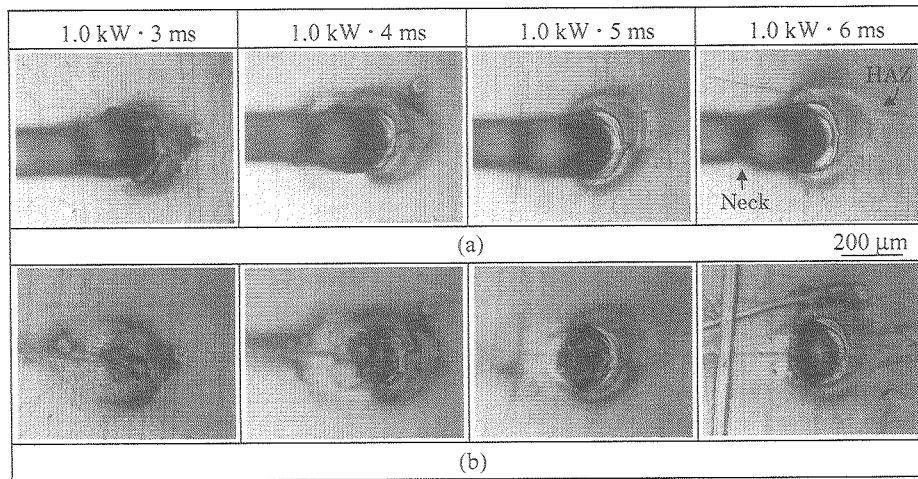


Fig. 6 Photographic images of the junction with various pulse duration at $\alpha = 0$ degree and $L = 200 \mu\text{m}$. (a) Upper view before peeling the wire, (b) Upper view after peeling the wire.

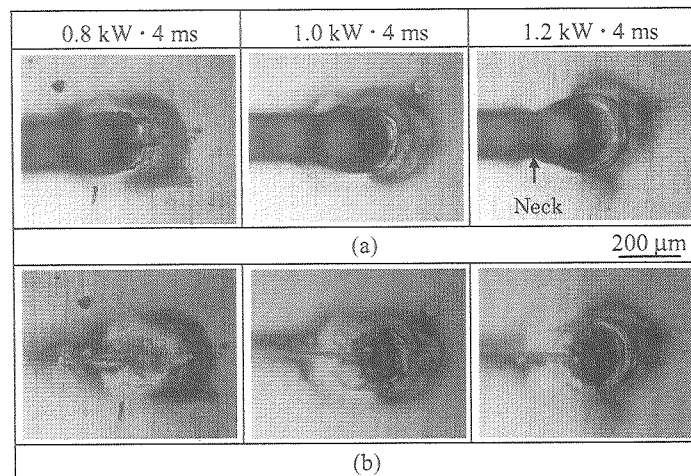


Fig. 7 Photographic images of the junction with various peak power at $\alpha = 0$ degree and $L = 200 \mu\text{m}$. (a) Upper view before peeling the wire, (b) Upper view after peeling the wire.

0.8 kW · 4 ms (パルスエネルギー3.2 J) では, 入熱量不足により銅板への溶け込みは小さいことがわかる. 入熱量が多くなるにつれて溶け込みは大きくなる傾向が見られるが, 1.0 kW · 6 ms (パルスエネルギー6 J) および 1.2 kW · 4 ms (パルスエネルギー4.8 J) など入熱量が過剰な条件では, 銅線にくびれ (Neck) が生じやすくなっていた. このことから, 銅板への溶け込みを確保しつつ, 銅線にくびれを生じさせない入熱条件としては, 1.0 kW · 4 ms, 1.0 kW · 5 ms (パルスエネルギー4 J, 5 J) 程度が適切であることが考えられる. また, パルスエネルギーが大きくなるにつれて表面の熱影響による変色域も大きくなっており, 品質の観点からもあまり大きなエネルギーの投入は適切ではない.

3.1.2 接触角と突き出し長さの影響

銅線と銅板の接触角度により, その初期接触面積は異なる. また突き出し長さは, 溶融した銅線先端部が表面張力によりレーザー照射部の溶融池に吸収される際の, 銅線の溶融量に関係すると考えられる. そこで両者の破断強度への影響を調べるため, レーザー照射条件を 1.0 kW, 4 ms とし, 接触角と突き出し長さを変化させて接合を行った. その際

の破断強度を Fig. 8 に, 接合部上面, 接合面, 接合部側面の写真を Fig. 9, Fig. 10 に示す. まず接触角を変化させた場合, 平均破断強度は 0 度において小さく, 15 度までは接触角と共に増加するが, 20 度で再び減少する傾向が見られた. 接合面の写真によると, 0 度と 5 度に比べて 10 度以上では接合面積が大きくなっており, このことが破断強度を増大させた原因と考えられる. 20 度で強度が減少するのは, 銅板との接触面積が小さくその熱伝導も小さいため, 銅線が過剰に溶融して根元方向に溶け上がり, 銅板との接合が不十分になることが理由の一つとして挙げられる. 銅線の溶け上がりによる接合不良の例を Fig. 11 に示す. また側面写真によると, 接触角が大きくなるにつれて銅線の根元方向への溶融量が多くなり, 接合部が広がることが確認できる. 接触角 0 度では銅線の狭い領域しか溶けておらず, 銅線にくびれが発生していた. これは銅線の根元方向へ溶融が進行せず同方向に銅線先端の溶融物が移動しないことにより, レーザー照射終了後, 銅線の溶融物が銅板に対して濡れる際に銅線が細るためと考えられる. 接触角 0 度と 5 度では接合部上面に溶融物の残留 (Dross) が確認でき, 接合

品質の面からも良い結果とは言えなかった。以上より、接触角は10度または15度が適していることがわかった。

つぎに突き出し長さについてであるが、接触角0度と20度の場合を除いて100 μmで破断強度が小さく、300 μmまでは突き出し長さと共に増加し、400 μmで再び減少する傾向が見られた。銅板との接合面積も300 μmで最も大きく、破断強度結果と対応していた。また側面写真より、突き出し長さの増加と共に銅線の溶融量も増加し、接合部が大きくなっていることが確認できる。200 μmの場合は接合部上面に溶融物の残留が発生していた。突き出し長さは溶融池に吸収される銅線の溶融量を変化させることから、この溶融量が接合面積の大小、溶融物残留の有無に関係していると考えられる。それについては後節の現象観察で考察する。

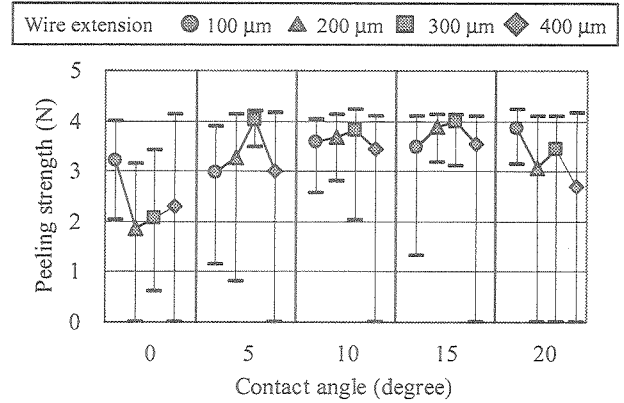


Fig. 8 Relationship between contact angle and peeling strength with various wire extension at P = 1.0 kW and τ = 4 ms.

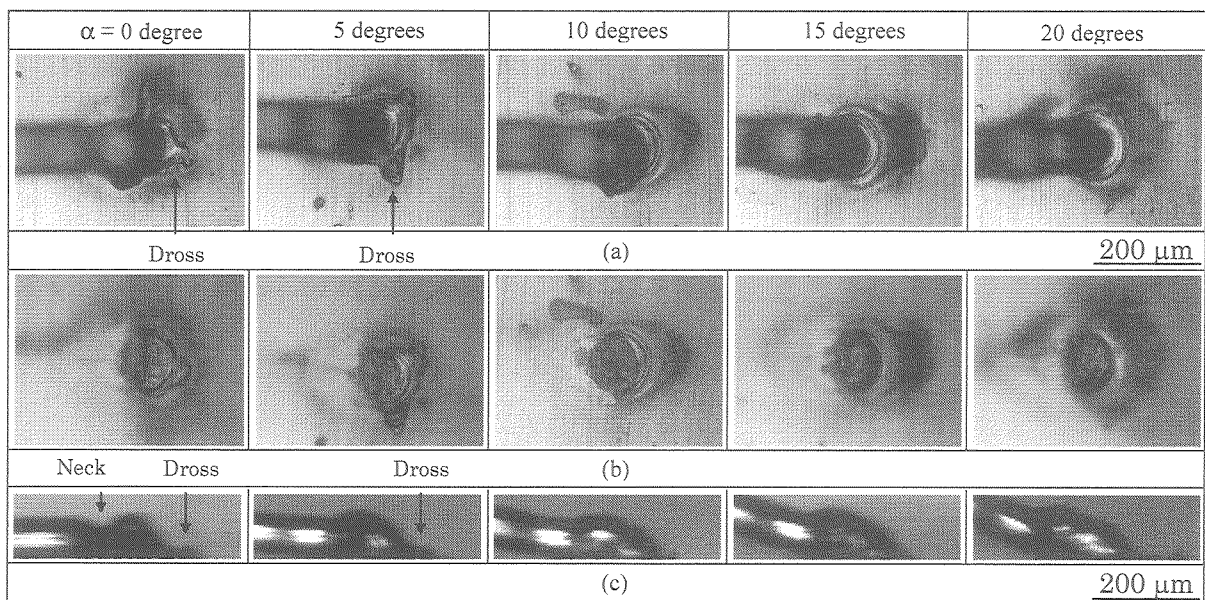


Fig. 9 Photographic images of the junction with various contact angle at P = 1.0 kW, τ = 4 ms and L = 200 μm. (a) Upper view before peeling the wire, (b) Upper view after peeling the wire, (c) Side view.

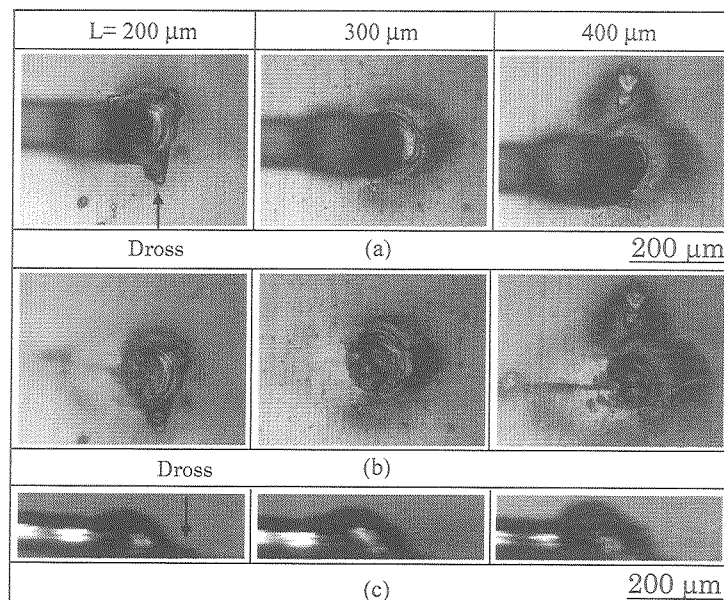


Fig. 10 Photographic images of the junction with various wire extension at P = 1.0 kW, τ = 4 ms and α = 5 degrees. (a) Upper view before peeling the wire, (b) Upper view after peeling the wire, (c) Side view.

3.1.3 接合面積, 破断モードと破断強度の関係

破断モードは Fig. 12 に示したような三つのパターンに大別することができた. すなわち, (a)銅線と銅板の接合界面, (b)銅線のくびれ部, (c)銅線の熱影響部の三つである. また接合面積, 破断モードと破断強度の関係を Fig. 13 に示した. 接合条件はピーク出力 1.0 kW, パルス幅 4 ms, 突き出し長さ 200 μm とし, 接触角を変化させた. 同図によると, 界面での破断は接合面積が小さい場合に多く, 一方, 熱影響部での破断は接合面積が大きい場合に多く, また三つのモードの中で最も強い強度を示した. くびれ部による破断は, 界面破断強度よりも低い場合に発生し, 接合面積が小さいときと大きいときの双方において確認された. このことからくびれは接合面積の大小によらず, 銅線の根元方向の溶融が少ない場合や, 銅線の過熱による銅板への過剰な濡れが生じた場合に発生すると考えられる.

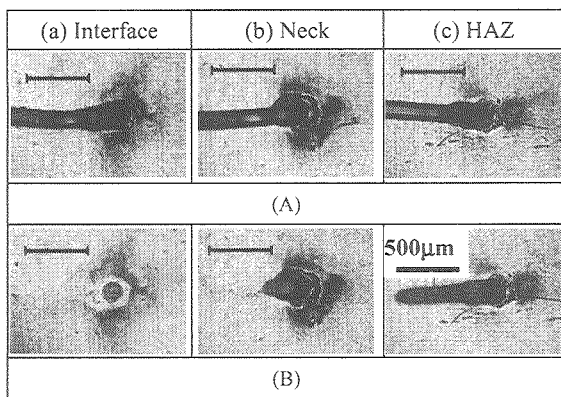


Fig. 12 Fracture mode of the junction. (A) Upper view before peeling test, (B) Upper view after peeling test.

3.2 銅線の熱伝導と溶融挙動

接合中の銅線の溶融挙動について, 高速度ビデオカメラにより観察した. ピーク出力を 1.0 kW, パルス幅を 4 ms とし, 突き出し長さや接触角を変化させた. 観察結果を Fig. 14 に示す. 接触角および突き出し長さが小さい条件(a), (b)においては, 銅線のレーザー照射による発光部が広い傾向があることが確認できる. 一方, 接触角, 突き出し長さが大きい条件(c), (d)では発光部が狭くなる傾向がある. 発光部

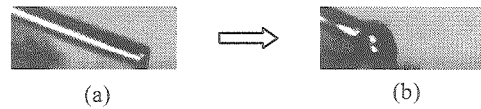


Fig. 11 Side views of the junction when the wire melted up at $\alpha = 20$ degrees. (a) Before irradiation, (b) End of irradiation.

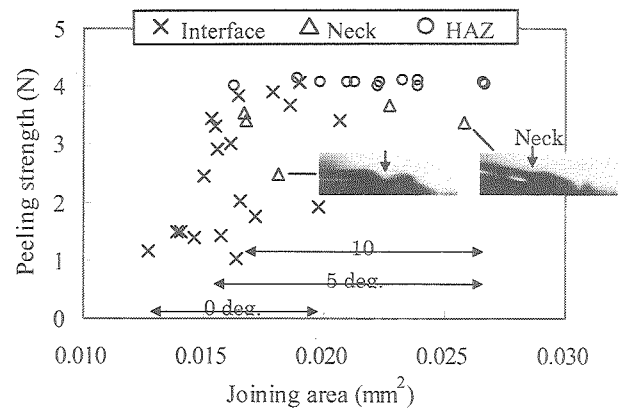


Fig. 13 Relationship between joining area and peeling strength at $P = 1.0 \text{ kW}$, $\tau = 4 \text{ ms}$ and $L = 200 \mu\text{m}$.

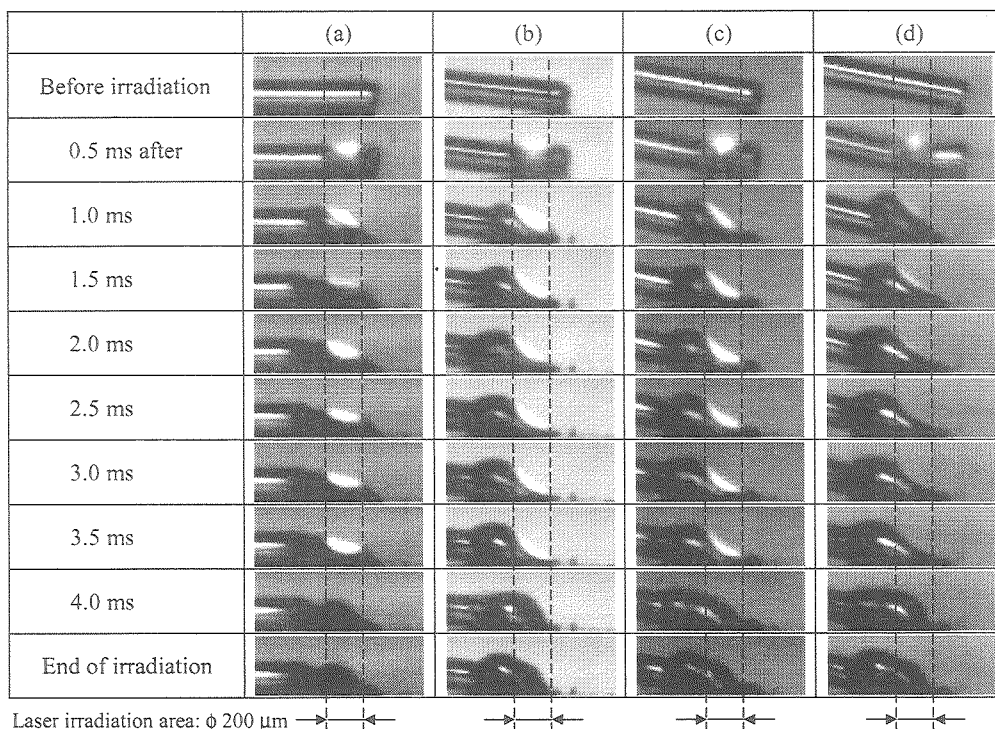


Fig. 14 Observation results by high-speed video camera during the joining at $P = 1.0 \text{ kW}$ and $\tau = 4 \text{ ms}$. (a) $\alpha = 0$ degree and $L = 200 \mu\text{m}$, (b) $\alpha = 5$ degrees and $L = 200 \mu\text{m}$, (c) $\alpha = 10$ degrees and $L = 200 \mu\text{m}$, (d) $\alpha = 10$ degrees and $L = 300 \mu\text{m}$.

はレーザー光の吸収により、ある温度以上になった溶融池であると考えられるため、条件(a), (b)は発光部の銅線が局部的に過熱され、より高温になっていることがいえる。そのため銅線の過剰な濡れや、それに起因するくびれが発生しやすくなると考えられる。

銅線が局部的に過熱される理由について考察する。Fig. 15は銅線の初期条件と溶融条件のそれぞれの接触状態による熱伝導の違いを図示したものである。代表的な値として接触角0度と10度について示した。まず初期状態において、接触角0度の場合は接触面積が大きいため、レーザー吸収による発生熱は銅線、銅板の多方面に伝導していく。そのため銅線は加熱されにくく、銅線の根元方向への溶融はさほど進行しない。一方、接触角10度の場合は接触面積が小さいため銅線への熱伝導が多くなり、その結果銅線の根元方向への溶融が進行して、銅板との溶融接触面積が大きくなる。溶融状態における接触面積は、固体接触のときと比較して非常に大きいことが考えられ、そのため溶融接触面積の大きい方が、より銅板への熱伝導が多くなると考えられる。したがって接触角10度など適度に大きい方が、その接合面積は大きくなる。一方、溶融接触面積が小さい場合は、銅板への熱伝導が少なくなるため銅板との接合面積は小さくなり、かつ銅線が過熱しやすい状態になると考えられる。

突き出し長さは溶融池に吸収される銅線の量に影響するため、300 μm程度にすることで銅線の過熱やくびれを防止し、破断強度が高い接合が可能になると考えられる。突き出し長さを400 μm以上にした場合は、銅板への溶融接触面積が過度に大きくなるため、熱伝導による損失も多くなり、その結果接合面積が小さくなると考えられる。

4. 結 論

YAG レーザによる銅細線 (径 140 μm) と銅板 (板厚 200 μm) の直接接合を行い、接合強度に対するレーザー入熱条件、銅線と銅板の接触角、突き出し長さの影響について調べた。また接合面の各種観察を行い、銅線の溶融挙動と接合強度との関係について考察し、得られた結果を以下に示す。

- (1) レーザ照射による入熱量が小さいと銅板との接合面積は小さくなり、多すぎると銅線にくびれを生じるため、破断強度が小さくなる。適切な入熱条件として、1.0 kW・4 ms, 1.0 kW・5 ms 程度が有効であることがわかった。
- (2) 接触角は10度, 15度, 突き出し長さは300 μm程度で接合面積が大きく、接合強度も大きくなっていった。
- (3) 接合部の破断モードには(a)銅線と銅板の接合界面、(b)銅線のくびれ部、(c)銅線の熱影響部の3つが確認された。(a)は接合面積が小さい場合、(c)は接合面積が大きい場合に多く確認でき、最も破断強度の高いモードは(c)であった。また(b)の銅線くびれ部は、接合面積が小さい場合と大きい場合の双方で確認された。くびれは接合面積の大小によらず、銅線の根元方向の溶融が少ない場合や、銅線の過熱による銅板への過剰な濡れ

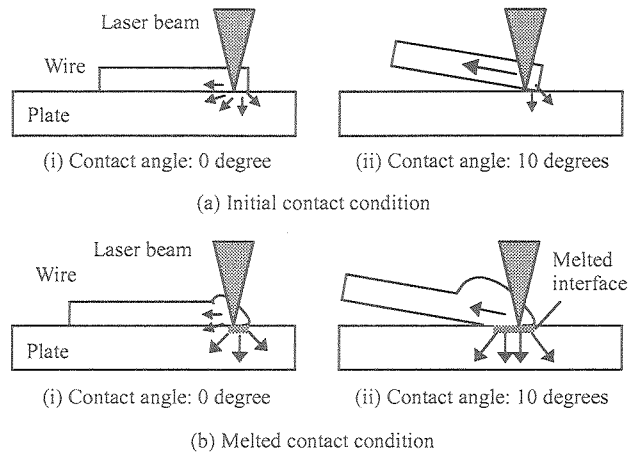


Fig. 15 Schematic illustration of the contact conditions and heat spread direction.

が生じた場合に発生すると考えられる。

- (4) 高速度ビデオカメラによる接合中の銅線を観察したところ、接触角や突き出し長さが小さい条件では、レーザー照射部の銅線の発光が広範囲で確認された。発光領域はある温度以上に到達した溶融池であると考えられ、その範囲が広いことは、銅板への熱伝導が少なく銅線がより加熱されている状態であると考えられる。
- (5) 銅線と銅板の初期接触状態は銅線への熱伝導に、銅線溶融後の接触状態は銅板への熱伝導に大きく影響する。接触角、突き出し長さを適度に大きく設定することにより、銅線を過熱させず、銅板との接合面積を確保する接合が可能になることがわかった。

謝 辞

銅細線をご提供いただきました(株)フジクラ理事・生産技術統括部長 吉沼幹夫氏に心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Takemoto T.: The Recent Situation of Lead-containing Solder Regulation and Replacement to Environmentally Compatible Lead-free Solder, J. Jpn Weld. Soc., 69-2, (2000), 6-13. (in Japanese)
- 2) JEITA : Lead Free Soldering Technologies -From basic matters to measures for solder joining lift-off-, コロナ社 (2003), 12-19. (in Japanese)
- 3) Suganuma K.: 鉛フリーはんだ付け技術, 工業調査会 (2003), 147-160.
- 4) Urusizaki M., Oumi Y., Kawamoto Y., Sirai H.: 自動車電装部品に適用される微細・精密接合の現状, Welding Technology, 51-4, (2003), 80.
- 5) Fukaya Y., Higashi Y., Higo T., Hamaoka M., Sueda M., Kobayashi T., Ogawa M., Sinozaki K.: Diffusion Bonding of Copper Machined Ultra Finely -Study on Diffusion Bonding of Copper (Report 1)-, Quart. J. Jpn Weld. Soc., 15-3, (1997), 467. (in Japanese)
- 6) Ohashi O., Yoshioka T., Nitta I., Furuta N.: Effect of Misorientation Angle at Bonded Interface on Diffusion Bonding Joints Using Oxygen Free High Conductor Copper, Quart. J. Jpn Weld. Soc., 18-2, (2000), 324. (in Japanese)
- 7) Yamada T., Ajimura S., Saitoh T., Maruo H., Kitada S.: Study of Au-Au, Cu-Cu Bonding Technique for Interconnecting of Printed Circuit Board, 10th Symposium on "Microjoining and Assembly

- Technology in Electronics” (2004), 237. (in Japanese)
- 8) Ho M. H., Lam W., Stoukatch S., Ratchev P., Vath III J. C., Beyne E.: Direct Gold and Copper Wires Bonding on Copper, *Microelectronics Reliability*, **43**, (2003), 913.
 - 9) Sasaki S., Okudera T., Oguma M., Kiyozuka Y., Komatsuzaki H., Tagashira K.: Effects of Laser Pulse Energy, Defocus and Twisted Pitch of Bundle on Melting Behavior -Study on Uniform Melting of the Bundle of Cu Wires by YAG Laser (1st Report)-, *Quart. J. Jpn Weld. Soc.*, **21-1**, (2003), 19. (in Japanese)
 - 10) Sasaki S., Oguma M., Tagashira K., Orikiwa M.: Melting and Cutting Behavior of the Bundle of Fine Cu Wires -Study on Uniform Melting of the Bundle of Cu Wires by YAG Laser (2nd Report)-, *Quart. J. Jpn Weld. Soc.*, **22-2**, (2004), 248. (in Japanese)
 - 11) Kawahito Y., Funami K., Okada T., Katayama S.: In-Process Monitoring and Adaptive Control in Laser Micro-Spot Welding of Copper, *Review of Laser Engineering*, **31-3**, (2003), 231. (in Japanese)
 - 12) Kobayashi A.: レーザ加工技術実用マニュアル, 新技術開発センター, (1987), 9