

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月10日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560741

研究課題名（和文）パワー半導体素子用熱交換システムのハイブリッド化に関する研究

研究課題名（英文） Study on hybridization of thermal exchanging system for power semiconductor device

研究代表者

莊司 郁夫（SHOHJI IKUO）

群馬大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：00323329

研究成果の概要（和文）：各種輸送機器のモーター制御装置等に使用される「パワー半導体素子」の水冷システムの高効率・軽量化を目的として、放熱部材のAl合金にNi-P/Cuめっきを施し、Sn-Cu-Ni-Ge合金箔を用いて熱交換部材のCu合金とフラックスレス接合する技術を開発した。接合特性に及ぼす合金中のNiおよびGeの微量添加の影響を調査し、その効果を金属組織学的見地より明らかにした。更に、有機酸によるCuの表面改質を実施し、接合特性改善に有効となる可能性を見いだした。

研究成果の概要（英文）：New joining technology has been developed to achieve high efficiency and reducing the weight of a water cooling system for a power semiconductor device which is used as a controller for various transport vehicles. In the technology, a Ni-P/Cu plated Al alloy for a radiator is joined to a Cu alloy for a heat exchanger with Sn-Cu-Ni-Ge alloy foil. The effect of the addition of a small amount of Ni and Ge into the alloy on joining properties was investigated and it was clarified from the standpoint of metallography. Moreover, the feasibility study which investigates the effect of surface modification of Cu by organic acid on improvement of joining properties was also conducted.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,400,000	720,000	3,120,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・材料加工・処理

キーワード：電子デバイス・機器、微細接合、表面・界面物性

## 1. 研究開始当初の背景

自動車や新幹線等の輸送機器や産業用機器のモーターの制御装置（インバータ）等を使用されるエネルギー変換素子である「パワー半導体素子」においては、使用環境の高温化が要求されており、耐熱性の向上が重要課

題となる。例えば、自動車においては、ECU(Electronic Control Unit: 電子制御ユニット)と呼ばれる、パワー半導体といくつかの半導体部品を1枚の制御基板に混載したものが、50～100個程度搭載されている。パワー半導体素子は、発熱量が大きいので、そ

の冷却は、Cu や Al 製のヒートシンクを基板に接着させることにより行われている。パワー半導体の使用環境は、年々高温化する傾向にあり、ECU の上下両面にヒートシンクを取り付ける工夫等も検討されているが、将来的には、空冷ではなく、水冷による冷却方式も必要となるものと考えられる。また、新幹線等の輸送機器においては、車両の軽量化のため、パワー半導体素子の冷却システムの軽量化も大きな課題となっている。そのため、冷却効率の向上と、冷却システムの軽量化を同時に実現する冷却システムが求められている。

熱交換する流体に水を使用する一般的な熱交換器では、耐食性の問題より Al は使用されず、接水部分が Cu 部材となるため、Cu 製熱交換器が製作される。そのため、冷却システムの軽量化のためには、放熱部（ヒートシンク）に Cu よりも比重の小さい Al を使用し、水を媒体とするヒートパイプ部分に Cu を用いるハイブリッド冷却システムの開発が必要である。しかしながら、Al と Cu の接合は容易ではなく、板材同士の接合法としては、抵抗溶接、固相拡散、摩擦攪拌接合なども検討されているが、熱交換器に使用される管やフィンなどの複雑形状をした部材に対応する接合法はなく、熱交換機特有の複雑形状部品にも対応する新規接合方法の開発が渴望されていた。

## 2. 研究の目的

研究代表者らは、Al 合金の表面に、無電解 Ni-P めっきと電解 Cu めっきを順次施すことにより、Sn-Cu 系合金箔により Cu 合金と真空接合する技術の開発に成功した。本研究では、その技術を利用して、放熱部に Al 合金を使用し、熱交換部に Cu 合金を用いる「パワー半導体素子」用の水冷ハイブリッド軽量熱交換システムの開発を目的として、Al 合金と Cu 合金のハイブリッド化を実現する接合技術の開発を目的とした。具体的には、Ni-P/Cu めっき Al 合金と Cu 合金のフラックスレス真空接合における接合特性の向上を目指して、最適接合条件を確立し、Sn-Cu 系合金箔に添加される微量 Ni（界面反応抑制材）および Ge（はんだ箔の酸化防止材）の接合特性への影響を明らかにすることを目的とした。また、更なる接合特性の改善の可能性を調査するために、有機酸による金属表面の改質が接合特性に及ぼす改善効果についても調査することを目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) フラックスレス真空接合における最適接合条件を調査するために、Sn-0.7Cu (mass%) はんだ箔を用いて、無電解 Ni-P (5  $\mu$ m 厚)/電解 Cu (13  $\mu$ m 厚) めっきを施した Al 合

金 (A5052P) と Cu 合金 (C1220) を真空中にて、種接合条件にて接合した。同時に、接合部の組織観察および接合強度測定を行い、フラックスレス接合するための最適接合条件範囲（接合温度、接合時間、負荷応力）を調査した。次に、微量添加により、Cu との接合界面に生成される金属間化合物が粒状になり接合信頼性の向上が期待される Ni と合金箔の表面酸化防止が期待される Ge について、Sn-Cu 系合金箔に添加した際の接合強度及び接合部組織に及ぼす微量添加の影響を調査した。

(2) Cu と Sn-Cu 系合金のフラックスレス接合部の接合特性の更なる向上を図るため、Cu の表面を有機酸により前処理して表面改質を行い、真空拡散接合法による接合温度の低温化を試みた。

## 4. 研究成果

### (1) 接合条件の最適化

Sn-Cu 系合金箔による Ni-P/Cu めっき済み Al 合金と Cu 合金の真空フラックスレス接合における最適接合条件を調査するために、接合温度 (250、300、350 $^{\circ}$ C)、接合時間 (10、20、30min)、負荷応力 (0.1、0.2、0.3MPa) のパラメーターにて接合体を作製し、接合強度 (室温におけるせん断強度) および接合部の組織を調査した。はんだ箔は Sn-0.7Cu-0.05Ni (mass%) の成分を有する市販のものを使用した。

接合温度 250 $^{\circ}$ C においては、0.1MPa の負荷応力では、接合時間によらず 8MPa 程度の低い接合強度しか得られず、接合強度評価後の破面からは未接合部も確認された。接合強度は、接合時間および負荷応力の増加に伴い 20MPa 程度まで上昇する傾向を示したが、未接合部の残存は改善されなかった。よって、接合温度 250 $^{\circ}$ C では、界面反応が十分に進行せず、接合温度が低いことが明らかとなった。

接合温度 300 $^{\circ}$ C における接合強度に及ぼす接合時間と負荷応力の関係を図 1 に示す。本

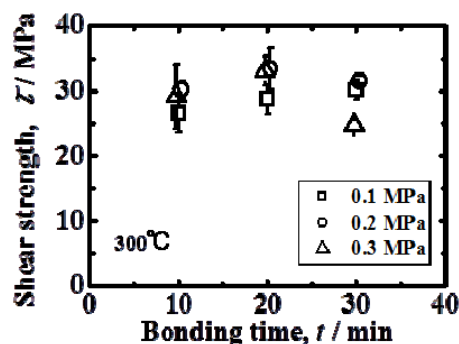


図 1 接合強度に及ぼす接合時間と負荷荷重の関係 (接合温度: 300 $^{\circ}$ C)

研究では、接合温度 300°Cにおいて、30MPa程度の接合強度が得られた。また、接合強度は接合時間及び負荷応力によらず比較的安定しており、生産上の安定性も十分確保できる接合条件が確認された。接合部の組織観察結果より、ほとんどの領域はCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>に変化するが、接合界面には数μm厚程度のCu<sub>3</sub>Snが層状に生成することが明らかとなった。また、接合部の中心部には、Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>に変態しないSn-Cu合金箔成分の残存も認められた。接合時間の増加に伴い、接合界面のCu<sub>3</sub>Sn層の厚みおよび接合部中のCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>領域の増加が認められたが、Sn-Cu合金箔成分の残存が消失することはなかった。また、接合温度 250°Cで見られたような未接合部は認められなかった。以上のような接合部組織を形成したため、強度試験時の破壊は、主として接合部中心部のSn-Cu合金箔成分の残存部にて起こり、安定した強度が得られたものと判断された。Sn-Cu合金は、一般的にはんだ材として使用されており、Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>やCu<sub>3</sub>Snなどの金属間化合物よりも低強度であるため、接合界面に未接合部がなく十分な界面強度が確保できれば、Sn-Cu合金領域部での破壊が生じることがわかった。

一方、接合温度が 350°Cの場合、接合部界面には 10μm厚程度のCu<sub>3</sub>Sn層が生成し、接合部もほぼ全体にわたってCu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>が生成することが確認された。接合温度 300°Cの場合とは異なり、接合部中にSn-Cu合金箔成分の残存は認められなかった。これは、接合温度の上昇に伴い構成元素の拡散速度が上昇し、接合部におけるCu-Snの反応速度が速くなったためと判断された。このような接合部組織では、接合強度は 20~25MPa程度となり、接合温度 300°Cの場合よりも低下することが明らかとなった。この原因として、強度試験による破壊が、高硬度な金属間化合物相ではなく、Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>/Cu<sub>3</sub>Sn界面で生じやすくなることを明らかとした。

以上の結果より、供試した試験片における最適接合条件は、接合温度 300°C、接合時間 20min、負荷応力 0.2MPa であり、その際の接合強度として、せん断強度が 33.4MPa となることを示した。

## (2) 接合強度及び接合部組織に及ぼす微量 Ni, Ge 添加の影響

Sn-Cu系合金箔に微量添加されるNiおよびGeの接合強度及び接合部組織に及ぼす影響を調査するために、Sn-0.7Cu(SC)、Sn-0.7Cu-0.07Ni(SC7N)、Sn-0.7Cu-0.15Ni(SC15N)、Sn-0.7Cu-0.03Ge(SC3G)、Sn-0.7Cu-0.07Ni-0.03Ge(SC7N3G) (すべてmass%)の5種類の合金箔を準備した。各合金箔を2つのCu合金(C1220、15x15x15mmサイズ)で挟み込んで接合体を作製し、接合面積が3×3mm<sup>2</sup>となる

ように切り出したものを試験片とし、室温での引張試験及び組織観察を行った。なお、接合条件は、接合温度 300°C、接合時間 20 min、負荷応力 0.01 MPa、真空度 0.04 Pa以下とし、フラックスレスで接合した。

図2に接合強度の比較結果を示す。Niを添加することで、引張強度の上昇が確認された。また、Sn-0.7Cu-0.07NiよりSn-0.7Cu-0.15Niの方が高い強度を示しており、Niの添加量を増やすことで強度が上昇することがわかった。接合部組織および引張試験後の破面観察結果より、Ni添加は、熔融Sn-Cu合金のCu表面への濡れ性を向上させる効果および接合部中での(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>相の生成を促進する効果があることが明らかとなった。よって、Ni添加により濡れ性が向上して接合界面における未接合領域が消滅し、接合部中心部において高硬度な(Cu,Ni)<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub>相が生成することにより、強度が上昇することが明らかとなった。

Ge 単独添加の場合も、Sn-0.7Cu に比べ引張強度の上昇が確認された。接合部組織にはほとんど差異が認められなかったが、Sn-0.7Cu と比較して未接合部が減少することが確認された。これは、供給したはんだ箔表面の酸化抑制に Ge 添加が有効であったものと推測され、表面の酸化が抑制された合金箔の使用により、溶融合金箔の Cu への濡れ性が向上したため未接合部が減少し、高い強度を示したものと考えられる。

Ni と Ge を複合添加した Sn-0.7Cu-0.07Ni-0.03Ge では、Sn-0.7Cu より高い引張強度を示すものの、Ni および Ge を単独添加した場合と比較すると、やや低い強度を示した。接合部の組織観察結果より、複合添加の場合、接合部中に Sn-Cu 系合金箔の成分が比較的多く残存することが確認された。そのような接合部組織の場合、低強度な Sn-Cu 系合金での破壊が主たる破壊モードとなるために強度が低下することが明らかとなった。

以上の結果より、真空接合の場合、接合強度の向上には Ni の微量添加が有効であり、

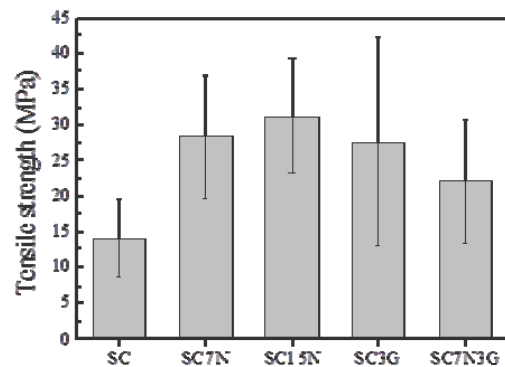


図2 各合金箔による接合強度比較

Ge の微量添加は合金箔の酸化防止には有効であるが、接合部の組織形成にはほとんど影響を及ぼさないことがわかった。

### (3) 金属表面の有機酸処理による接合特性改善効果

Cu と Sn-Cu 系合金のフラックスレス接合部の接合特性の更なる向上を図るため、表面を有機酸処理した Cu と電解研磨により仕上げた Sn を真空中にて固相接合し、接合温度の低温化の可能性を調査した。有機酸として、ギ酸とクエン酸を評価した。比較のために、4000 番のエメリー紙で機械研磨を施した試料についても供試材とした。なお、接合時間は 30min とし、接合時の負荷圧力は 7MPa とした。

図 3 に、接合効率と接合温度との関係を示す。接合効率は、引張強度を用いて評価し、接合部の引張強度を Sn の引張強度で除した値とした。表面に酸化被膜が存在する機械的研磨による試料では、接合温度 200°C にて接合効率が 100% となったが、ギ酸およびクエン酸で表面改質を行った試料では、それぞれ接合温度 160°C および 130°C にて接合効率を 100% にできることが明らかとなった。X 線回折分析により、ギ酸による表面処理では、Cu の表面に  $\text{Cu}(\text{HCOO})_2$  が生成することが確認された。 $\text{Cu}(\text{HCOO})_2$  は、140°C 以上の温度において金属 Cu と  $\text{H}_2$  と  $\text{CO}_2$  に分解するため、接合中に酸化されていない Cu の金属面が露出することにより、接合特性が向上することが確認された。クエン酸による処理についても同様の効果が得られたものと考えられる。

以上の結果より、接合部の表面を有機酸処理することにより、接合温度を低温化し、接合特性を改善できる可能性があることが示された。

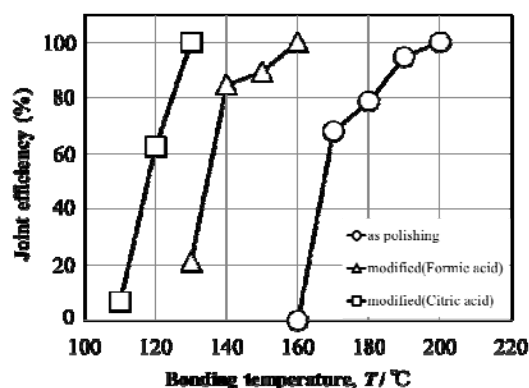


図 3 接合温度と接合効率との関係

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① I. Shohji, S. Koyama, I. Oshiro, H. Nara, Y. Iwata, Fluxless Bonding of Ni-P/Cu Plated Al Alloy and Cu Alloy with Lead-free Sn-Cu Foil, Materials Transactions, 査読有, Vol. 51, No. 10, 2010, pp. 1753-1758
- ② S. Koyama, Y. Aoki, I. Shohji, Effect of Formic Acid Surface Modification on Bond Strength of Solid-State Bonded Interface of Tin and Copper, Materials Transactions, 査読有, Vol. 51, No. 10, 2010, pp. 1759-1763

[学会発表] (計 10 件)

- ① M. Hayakawa, I. Shohji, S. Koyama, H. Nara, N. Otomo, M. Uenishi, Microstructures and Joint Strength of Vacuum Jointed Cu with Sn-Cu Alloys, ICEP-IAAC 2012, 2012. 4. 19, 東京ビッグサイト (東京都)
- ② 早川真生、荘司郁夫、小山真司、奈良英明、大友昇、上西正久、Sn-Cu系鉛フリーはんだによるCuの真空接合部の接合部組織と接合強度、Mate 2012, 2012. 1. 31、パシフィコ横浜 (神奈川県)
- ③ 早川真生、荘司郁夫、小山真司、奈良英明、大友昇、上西正久、Sn-Cu系鉛フリーはんだによるCuの真空接合に及ぼすNiおよびGeの影響、第 149 回日本金属学会、2011. 11. 7、沖縄コンベンションセンター (沖縄県)
- ④ 青木由希也、小山真司、荘司郁夫、金属塩生成法を用いたSn/Cu固相接合の低温化、第 52 回溶接学会マイクロ接合研究委員会ソルダーリング分科会、2011. 10. 28、自動車会館 (東京都)
- ⑤ S. Koyama, Y. Aoki, I. Shohji, Effect of the Organic Acid Surface Modification on Bond Strength of Tin and Copper, InterPACK2011, 2011. 7. 6, Marriott Portland Waterfront Hotel (Portland, USA)
- ⑥ 青木由希也、小山真司、Sn/Cu固相接合界面強度に及ぼすクエン酸による表面改質効果、Mate 2011, 2011. 2. 3、パシフィコ横浜 (神奈川県)
- ⑦ S. Koyama, Y. Aoki, I. Shohji, Examination of Improvement Effect of Surface Modification of Cu with Organic Acid on Solder Paste Wettability using a Laser Displacement Meter, Visual-JW 2010, 2010. 11. 11, ホテル阪急エキスポパーク (大阪府)
- ⑧ 青木由希也、小山真司、電子実装における錫と銅の環境調和型低温固相接合法の検討、第 147 回日本金属学会、2010. 9. 27、

北海道大学（北海道）

- ⑨ 大城格、荘司郁夫、小山真司、奈良英明、大友昇、上西正久、Sn-Cu系鉛フリーはんだによるめっき処理Al合金とCu合金フラックスレス接合、第145回日本金属学会、2009.9.17、京都大学（京都府）
- ⑩ 小山真司、川元聡、塩酸蒸気処理による錫/錫の低温固相圧接、第145回日本金属学会、2009.9.17、京都大学（京都府）

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

①名称：金属部材の接合方法  
発明者：小山真司、荘司郁夫  
権利者：群馬大学  
種類：特許  
番号：特願 2010-073005  
出願年月日：2010.3.26  
国内外の別：国内

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.me.gunma-u.ac.jp/zai2/shohji/shohji-top.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

荘司 郁夫 (SHOHJI IKUO)  
群馬大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：00323329

### (2) 研究分担者

小山 真司 (KOYAMA SHINJI)  
群馬大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：70414109

### (3) 連携研究者

上西 啓介 (UENISHI KEISUKE)  
大阪大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：80223478