

## 接合のスケールダウン

大阪大学大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻

生産科学コース システムインテグレーション講座 教授

福本 信次

### 1. はじめに

2020年4月、現在所属している工学研究科マテリアル生産科学専攻の電子システムインテグレーション領域の教授に昇任されました。私は、1986年本学の溶接工学科に入学し、大学院博士後期課程を経て学位を取得いたしました。学位取得後は姫路工業大学（現 兵庫県立大学）で研究を続け、2009年に縁あって現在の専攻で採用され現在に至っております。溶接工学科で生まれ育ちましたので、材料やスケールは変われども一貫してモノをくっつけることを中心に研究活動をしてまいりました。人類創世から現在に至るまでおおくの構造物や製品が作られてきましたが、その多くは複数の素材、部品の組み合わせでできています。同種、異種を問わず接合、結合、接着というプロセスはモノづくりには必要不可欠な分野であり、研究者にとっても飯のタネに困りません。現在所属しているコース名称は溶接工学から生産科学へ改名されましたが、現在もまだ溶接・接合の分野で研究を続けております。以下に、これまでの研究経緯と現在取り組んでいることを紹介いたします。

### 2. 軽金属から重金属、ラージスケールから スモールスケールへ

1980年代はスペースシャトルが航空宇宙産業の花形だったこともあり、研究のスタートはSiC長繊維強化チタン合金の接合でした。軽量かつ高強度な金属基複合材料は最先端の構造物材料であり、その接合技術の確立が求められていました。接合プロセスとしてレーザー溶接と拡散接合に取り組み、強化相（長繊維）を損傷せず母相（金属）のみの接合を実現しました。姫路工業大学（兵庫県立大学）では、チタンよりもさらに軽量のアルミニウムおよびマグネシウムの摩擦圧接および摩擦攪拌接合について材料組織学の観点から取り組み、界面組織の形成プロセスを明らかにしました。またこれらの材料を扱ううちに、アルミニウムのリサイクル過程で発生するアルミドロスの処理問題、マグネシウムの耐食性改善のためのレトル

ト法などにも関わりました。これらの研究においては軽金属関連の学協会の諸先輩方に大変お世話になりました。

2002年5月、カナダ・オンタリオ州のウォータールー大学（UW）での在外研究の機会を得ました。受け入れてくださったのはNorman Y. Zhou教授。清華大学からトロント大学、エジソン溶接研究所（EWI）を経て、UWで溶接・接合の新分野を切り開こうとされていた時期でした。UWでの最初の研究はやはりアルミニウム合金。自動車産業のプロジェクトの一環でアルミ合金の抵抗スポット溶接における銅合金電極の損傷挙動の解明に従事しました。さらに抵抗スポット溶接のスケールダウンの研究に取り組むこととなります。このころから溶接・接合の対象サイズは小さく、対象材料はステンレス鋼、銅、ニッケル、すず合金などと重くなりました。カナダの気候とUWでの研究室の居心地がよく、結局約2年間お世話になりました。

UWでの研究以降、研究領域の中でマイクロ接合の分野が占める割合が大きくなり、2009年、エレクトロニクス実装分野においてアクティブな研究をされている本学に着任することとなりました。

### 3. エレクトロニクス実装における接合技術

ご存じの通りこの10年はスマートフォン、パソコン、カメラ等の電子機器は多機能、小型化が進み、さらにIoT時代となつてからはすべてのモノに通信機器やセンサーが組み込まれようとしています。電子機器には様々な部品や素子が組み込まれ、また個々の部品や素子は多くの材料で構成されたマルチマテリアル構造体です。狭い空間に複数の材料が詰め込まれているため、異材界面密度が非常に大きな構造体という点がこれら電子デバイスの特徴です。近年、自動車産業において「マルチマテリアル化」が声高に叫ばれていますが、電子デバイスは従来よりマルチマテリアル化の技術の粋をあつめて作製されています。自動車におけるマルチマテリアル化の最大の目的は軽量化であるため、材料の中心は鉄鋼材料であり、接

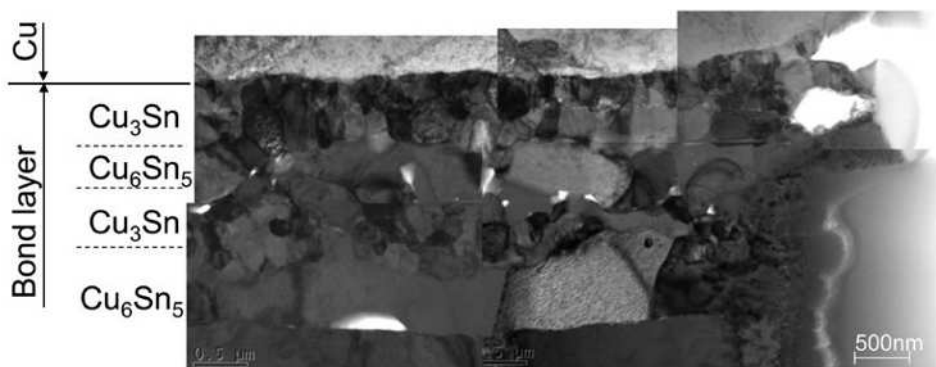


図 すず/銅インサートを用いた銅の液相拡散接合層の透過型電子顕微鏡明視野像<sup>1)</sup>

合相手材としては有機材料，アルミニウムおよびマグネシウムなどの軽量材料が選ばれています。これに対して電子デバイスにおけるマルチマテリアル化の主な目的は機能化であり，材料は非鉄金属，有機材料，無機材料と多岐にわたり，異材界面の種類もAl/Cu，Ni/Al，Si/Al，Cu/Sn，Al/樹脂，Cu/樹脂，Sn/ガラスなどと必然的に多くなってきます。それにともなう接合技術は冶金的なプロセスとしてはソルダーリング，拡散接合，焼結接合，超音波接合など，また機械的接続方法としてプレスフィット接続，そして化学結合・分子間力結合による樹脂/金属の接着技術など多岐にわたります。上述の通り，非常に小さい空間で小さい対象物を接合するため，従来の「ラージスケール」接合法を単純にスケールダウンするだけでは対応できない問題が生じます。また素子は耐熱性や強度が低いため，接合プロセスにおける温度や荷重に対する制約条件が厳しくなります。ここでエレクトロニクス実装技術のひとつであるマイクロ接合に関して筆者の研究例を以下にいくつか紹介します。

いかに電気を効率よく使うか，自動車の電化においてパワーデバイスはますます注目を集めています。その心臓部であるパワー半導体のダイボンドは300℃以下で接合し，接合部にはおおよそ200℃の耐熱性が求められます。その接合にすずと銅の薄膜拡散接合を適用しました。すずの融点は232℃であるのでその温度以上に加熱することで液相が生じます。その状態では銅は溶融しないため，液相（すず）/固相（銅）の界面において反応拡散が生じCu-Sn系の金属間化合物が短時間で生成し，等温凝固が完了します。Cu<sub>3</sub>Sn相は676℃まで安定であるため非常に耐熱性にすぐれた接合層を形成することになります（図<sup>1)</sup>）。一方で銅/すず間の相互拡散の際に生じるカーケンダルボイドが信頼性の上で問題となりましたが，これに対しては接合界面に微量の亜鉛を添加することで解決できまし

た。亜鉛が接合界面および金属間化合物相の粒界に偏析することで物質移動が平衡となり，カーケンダルボイドの形成を大幅に低減できることが示されました。ダイボンドに関してはこのほかにも複数の方法でアプローチしており，現在は多孔質体をインサート材とし，金属液相や樹脂を浸透させる液相浸透接合の開発に取り組んでいます。

電子デバイスは金属だけでなく有機材料の役割を無視することができません。熱硬化性樹脂は接合部の補強，外環境からの回路保護，接合材料としてあらゆる場所に使われています。熱硬化性樹脂は硬化前では粘度調整が重要であり，硬化後では相手材との接着力，線膨張係数や弾性率などの調整が必要となります。そこでエポキシ樹脂をポリエステルで変性した樹脂の開発を行いました。ポリエステル変性エポキシ樹脂は室温では粘性が高く，加熱過程でエポキシ相が低粘化のあと硬化する。硬化後もポリエステル相の機能が残留しているため，高温でヤング率が低下する特性を有する。この特性を生かしてパワーデバイスの封止樹脂への適応を試みました。デバイス内部の熱応力を低減するためには封止材料である熱硬化性樹脂の線膨張係数および弾性率を下げるのが有効な手段ではありますが，線膨張係数および弾性率をどちらも減少すれば，チップ下のはんだ接合部の負荷が大きくなってしまいます。はんだ接合部およびチップに生じる熱応力を同時に低減するためには，封止材料の線膨張係数および弾性率を適切に制御する必要があります。しかしながら，現在おもに使われている熱硬化性樹脂は，上述のようにエポキシ樹脂にシリカフィラーなどを混合することで低線膨張係数を実現しているため，そのトレードオフとして弾性率は高くなっており，線膨張係数と弾性率を独立制御できません。開発したポリエステル変性エポキシ樹脂を封止樹脂/チップ間の中間層として応用する

ことで内部の熱応力を低減できることを示しました。

今後、電子デバイスにとって有機材料の存在価値はますます高まると考えられます。上記のほかにも導電性ペーストおよび接着剤の低電気・抵抗化や界面抵抗の評価方法など樹脂/金属のマルチマテリアル化技術にも取り組んでいます。

#### 4. おわりに

本稿を書くにあたり改めて自身の経歴を見つめなおしてみると、「接合」というキーワードでかなり雑多なことを研究してきたようにも思えます。一方、多くの材料、多くのプロセスを扱ってきたおかげで、電子デバイスのようなマルチマテリアル構造体の面白さも理解できました。ラージスケール接合からスモールスケール接合へと

サイズダウンしてきましたが、最近ではプロセス温度の低温化を視野に入れて取り組んでおります。また逆にスモールスケール接合の技術をスケールアップすることにも挑もうと考えております。微小領域で生まれた技術が大領域でも通用できるようにすることで、社会に貢献したいと考えております。

#### 参考文献

- 1) S. Fukumoto, T. Miyazaki, M. Matsushima and K. Fujimoto, Materials Transactions, 57(6), 2016, 846-852.

(溶接 平成2年卒 生産加工 4年前期 7年後期)