

学位論文内容の要旨

申請者氏名 見山 克己

異種材料接合機構における界面反応と残留応力並びに

歪みに関する研究

現在我々の身の回りに存在するほとんどすべてのものは、構造部材、機能部材を問わず、単一素材で形成される部材がそれ単独で使用されることは稀であり、異種材料の組み合わせで部材が成り立っていることが多い。日常雑貨や一般工業製品、あるいはエレクトロニクスや宇宙航空など先端技術分野、それぞれにおいて材料に要求される特性は種々多様であり、材料の機械的特性、耐食性、電気的特性、生体適合性等様々な観点から適切な材料が選択される。従って、これら異種材料を一体化した部材として形作るためには接合技術が重要な鍵を握ることとなる。

接合技術の役割または目的には次の三つがあると言える。一つ目には「短小物の長大化および要素の組立」であり、古代より粘土による接着やろう付け、鍛接が用いられている。これらは日常生活用品や武具・農機具の製造に重要な役割を果たした。さらに 19 世紀末に電気アークが発見されて溶接に応用されるに至り、接合技術は飛躍的な発展を迎えることになる。二つ目に、広義の接合技術として「物体の欠点や弱点を補い材質改善を図るための表面被覆」であり、鋼など金属の耐食性や摺動性改善のために行うめっき処理、耐熱性・耐食性改善のための溶射処理、あるいは潤滑性付与のためのテフロン被覆等が挙げられる。さらに近年では三つ目の目的として、「新機能の付与および複機能化」が重要な位置づけとなっている。これは従来用いられてきた一般金属材料に比べ、ある特性において著しく優れた新材料が続々と開発・実用化されたことに伴って必要になってきた考え方である。例えば、耐熱性や耐食性、電気的特性に優れたセラミックス、軽量かつ比強度に優れたカーボンファイバーやエンジニアリングプラスチック、また Si や SiC, GaN をはじめとする半導体等である。これらに応用したセラミックス応用自動車部品やエレクトロニクス部品などは、まさしく新機能付加の接合技術が応用された事例と言える。

接合は、異種材料を組み合わせることにより新機能の付与および複機能化が得られ、生活必需品から先端技術分野まで幅広く活用されている重要な技術である。特に、構造部材や機能部材へ適用が拡大しているセラミックスや、日々進化しつつあるエレクトロニクス分野においては、物性が大きく異なる材料を複合化して構成する必要がある。しかしながら、接合はともすればものの形を作るための技術的手段としての位置付けにとどまり、接合部で起こっている現象や、それが部材全体に及ぼす影響について知見を得ることがなござりになっている点も否めない。本研究はこれらの背景に基づき、異種材料間に生成される反応生成物の挙動や、加熱・冷却に伴う熱残留応力や歪みの影響を総括的・俯瞰的に考察し、これらを明らかにすることを目的とするもの

であり、全 6 章から成る。

第 1 章は緒論であり、接合技術が発展してきた経緯と共に技術を分類し、接合に際して熱を必要とする接合方法において、反応生成物や異種材料間の物性差が与える影響について述べた。本研究でセラミックスと金属の接合における課題およびエレクトロニクス分野の三次元実装やはんだ反応層に着目した理由と共に、研究課題及び研究目的について述べた。

第 2 章では、異種材料界面における化学的反応について、Ni-Cu-Ti ろうを用いた窒化珪素セラミックスと金属の接合において、ろう付け昇温速度を変化させた際の、反応生成物の違いと接合強度の関連について明らかにした。また、Sn 系無鉛はんだと Cu 板との反応層について、高温放置による反応層成長を観察し、その活性化エネルギーを求めた。

昇温速度を速くすることでセラミックス/金属接合体の曲げ強度が向上することを見出し、これは接合界面に形成される反応層が昇温速度に依存して変化するためであると考えられた。反応層は TiN と Si-Al-Y 複酸化物アモルファス相の 2 相から成ることが推定され、酸化物アモルファス相の量と接合強度に良い相関が認められた。

また Sn-Ag 系および Sn-Ag-Cu 系無鉛はんだと Cu 板の接合界面に形成される反応生成物を調査したところ、 Cu_3Sn と Cu_5Sn_6 の 2 層から成る反応生成物が確認された。これらの反応層は高温放置することにより厚さ成長が認められた。この成長速度は反応時間に対して放物線則に従うことから、拡散律速であることがわかった。

第 3 章では、異種材料接合体の界面反応生成物と機械的特性について、窒化珪素セラミックスと金属の接合体を用いた回転曲げ疲労試験と破面観察により、動疲労挙動と疲労破壊に及ぼす反応層の影響を明らかにした。

疲労破壊のメカニズムは、まず回転曲げの引張・圧縮の繰り返し応力によるろう材層の疲労によりセラミック界面に存在する Ti 濃化層(TiN)/ろう材層界面での界面強度が低下して初期クラックが発生(第 1 段階)、さらにクラックは疲労したろう材層に進展しストライエーションを形成(第 2 段階)し、最終的にはセラミック/ろう材層界面の Ti 濃化層(TiN)で破断したものと考えられた。また、回転曲げ疲労試験で得られた S-N 曲線より、疲労パラメータ n は 17 と計算された。

第 4 章では、異種材料間の熱膨張挙動の差を利用した接合信頼性の確保について、それぞれの熱膨張挙動が接合信頼性に及ぼす影響に関し、プリント配線板とセラミックス/金属接合体の 2 つの観点から考察を行った。まず部品内蔵プリント配線板における部品接着樹脂(NCP)の物性値を変動要因として、応力解析により適性物性値を予測すると共に、実験にて検証を行い、物性値適正化により接合信頼性を確保できることを明らかにした。部品内蔵プリント配線板におけるベアチップの Au スタッドバンプと配線板 Cu 電極間の接合について、接合部周囲を充填する NCP 樹脂の物性値を最適化することにより耐熱サイクル性を高めることが可能であることを見出した。内蔵するベアチップ下の NCP 物性値を最適化する指針として FEM 解析を実施した。この結果、NCP の弾性率と線膨張係数を最適化することにより、Au スタッドバンプと Cu 電極接合界面に圧縮応力を確保できることが示された。またベアチップ内蔵プリント配線板を製作して冷熱サイクルを実施し、予測した NCP 物性値の有効性を確認した。

次に、セラミックス/金属接合体において、接合金属の熱膨張挙動が接合強度に与える影響を明らかにした。セラミックスと金属は熱膨張係数が大きく異なるため、直接接合した場合は膨張差に伴う熱残留応力によりセラミックスにクラックが生じる。両者の中間に応力緩衝層を介在させることでセラミックスに発生する残留応力を低減で

きることを明らかにした。また、ろう付け後の空冷でマルテンサイト変態が生じる鋼種を接合相手金属として選択することにより、マルテンサイト変態に伴う体積膨張を利用して、セラミックスに発生する残留応力を低減可能であることを明らかにした。

第5章では、異種材料を組み合わせた場合に発生する、材料物性の差に起因する熱変形が完成部材としての信頼性に与える影響について、電子デバイス分野で注目されている部品内蔵プリント配線板を通して考察した。

内蔵する電子部品はベアチップとし、アンダーフィル樹脂を介して内層配線層に実装した部品内蔵プリント配線板を用いて、リフローはんだ付け時の加熱による熱変形について、熱変形解析により予測すると共にモアレシャドウ法による変形実測を行い、その挙動を明らかにした。

0.1mm厚のコア材を用いて作製した配線板に10mm角、0.1mm厚のベアチップを内蔵した構造ではリフロー後に基板膨れが発生したが、配線板の内層パターン調整、およびコア厚を増す構造で同様にリフローを実施したところ、剥離の発生を抑制できた。熱変形解析の結果、膨れが発生した構造では最も大きい変形量が算出され、内層パターンの調整もしくは基板の板厚の調整により、変形量を低減できることがわかった。解析により得られた熱変形量と上記実験による剥離発生状況の傾向が一致することから、熱変形解析を用いて膨れの発生を予測できる可能性が示唆された。またモアレシャドウ法による基板変形量実測の結果、基板変形量は、0.3mm厚コアの構造では解析で予測した値とよい一致をみた。ただし0.1mm厚コアについては解析値と実測値に一部乖離がみられた。

第6章は本論文の結論であり、異種材料接合における界面反応とそれに伴う反応生成物が接合体の強度に与える影響、および材料の物性差に伴う残留応力や歪みが接合体の強度や変形に及ぼす影響について総括した。