日本溶接協会 2025年度
「次世代を担う研究者助成事業」成果報告

非破壊・破壊結晶方位解析を駆使した大面積はんだ接合部の熱疲労挙動の評価

龔　裕章
大阪大学 接合科学研究所

1　はじめに

半導体デバイスのはんだ接合部は，製品寿命を左右する。デバイスの動作時の繰り返しの温度変化は，はんだ接合部に熱疲労破壊を引き起こす。したがって，はんだ接合部における熱疲労の挙動を理解することは重要である。

一般的なSn基はんだによる接合部はβ-Snを母相とする組織で構成される。ここでβ-Snは異方性が顕著な体心正方晶構造（c/a=0.5456）の結晶構造であるため，特異な物理的性質や変形挙動を示す。わずか数個の結晶粒から構成される微小はんだ接合部の場合，β-Snの結晶方位が熱疲労挙動に大きな影響を及ぼすことが報告されている[1,2]。一方，パワー半導体などの数十～数百個の結晶粒から構成される大面積はんだ接合部の場合，その特有の機械的拘束条件によって，網目状のクラックが生じる特徴的な破壊形態が報告されている[3-5]。しかしながら，その熱疲労過程における結晶方位の変化とそれが破壊挙動に与える影響については依然として詳細な調査が必要とされる。そこで本報では，非破壊・破壊的手法の両面から，大面積はんだ接合部の熱疲労過程における結晶方位の変化を調査した結果[6]について報告する。

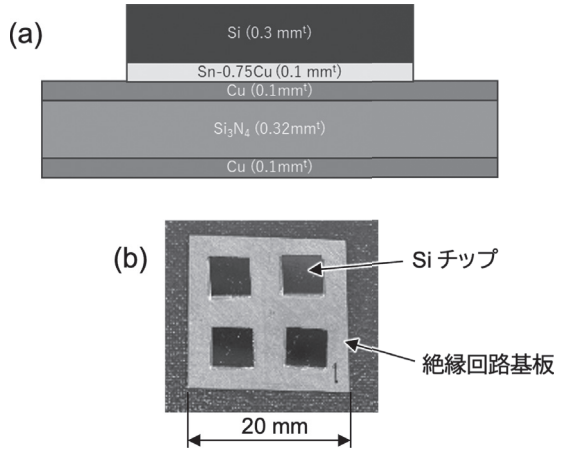

図1　大面積はんだ接合部を有するダイアタッチ試験片
（a）断面模式図，（b）試験片外観

2　研究方法

本研究では，大面積はんだ接合部の熱疲労挙動を評価した。供試体には，Siチップ（5×5×0.3mm）と絶縁回路基板[7]（株式会社FJコンポジット，Cu 0.1mm／Si_3N_4 0.32mm／Cu 0.1mm，20×20mm）をSn-0.7 mass%Cu（Sn-0.7Cu）はんだシート（約5×5mm，厚さ0.11mm）で接合したダイアタッチ試験片を用いた（**図1**）。接合はN_2雰囲気のリフロー炉により240℃，60sの条件で行った。作製した供試体に対して温度サイクル試験（TCT，−65℃/150℃，および−40℃/175℃）を最大2000サイクルまで実施した。熱疲労損傷の評価として，所定サイクルごとに超音波探傷観察（SAT）により非破壊観察した。

結晶方位解析には，はんだ接合部を平面方向に研磨して走査型電子顕微鏡（SEM）および電子線後方散乱回折法（EBSD）により観察する破壊的手法に加えて，大型放射光施設SPring-8（BL29XU）におけるラミノグラフィ型三次元X線回折顕微鏡（3DXRD）[8]による非破壊的手法を併用した。

3　主な研究成果

TCT中の熱疲労損傷の挙動を調査するため，SATによる非破壊観察を行った（**図2**）。−65℃ /150℃の条件で2000サイクル後においても大規模な剥離は認められなかったものの，1000サイクル以降，はんだ層内に微小な白色のスポット状の欠陥が増加する様子が見られた。これは，大面積はんだ接合部に特徴的な網目状のクラック進展[3-5]の予兆であると考えられた。

クラック進展の予兆が見られた1000サイクルにおける結晶方位を調査するため，平面EBSD観察により逆極点図（IPF-ND）マップを得た（**図3**）。その結果，広範

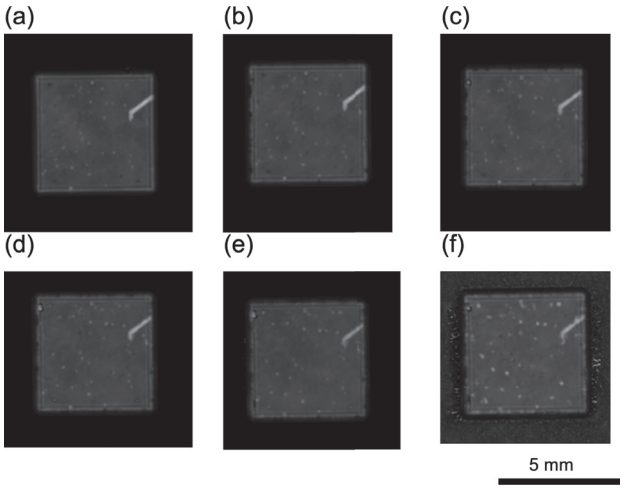

図2　TCT（−65℃ /150℃）後のSAT観察結果
(a) 0, (b) 250, (c) 500, (d) 750, (e) 1000, (f) 2000サイクル

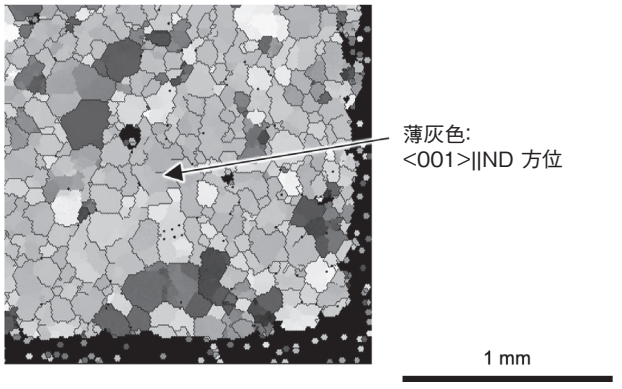

図3　平面EBSDによるTCT（−65℃ /150℃）1000サイクル後のIPF-NDマップ[6)]

囲にわたって薄灰色で示される<100>方向が基板法線方向（ND）に沿った結晶粒が多く分布していることがわかった。はんだ層全体に占める，<100>方向に配向した結晶粒の面積の割合は40%以上であり，集合組織の形成が認められた。

次に，こうした結晶方位が生じた過程を調査するため，TCT前後における同一サンプル・同一視野の3DXRD観察を行った。なお，ここでは限られたサイクル数で組織変化がより顕著となることを期待して，より高温となる条件（−40℃/175℃，376サイクル）でTCTを行い，その前後での結晶方位の違いを比較した。ND方向の方位マップを**図4**に示す。その結果，TCT前には濃灰色と薄灰色が見られたのに対し，TCT後には<100>を示す薄灰色の領域の割合が増加していることが認められた。具体的には，このことは前述の平面EBSDで見られた組織とも類似のものであった。すなわち，クラック進展の予兆が見られた熱疲労の初期過程の組織

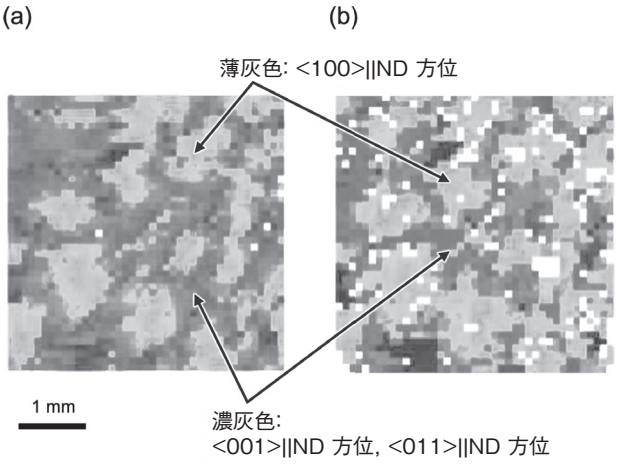

図4　3D-XRDによるTCT（−40℃ /175℃）376サイクル後のND方向方位マップ：(a) TCT前，(b) TCT後[6)]

は，TCT中の熱疲労の過程で形成されたものと考えられる。

4　おわりに

本研究では，熱疲労過程における大面積はんだ接合部の結晶方位について，非破壊・破壊的手法の両面から評価した。その結果，TCTでクラックの予兆が見られた熱疲労の初期段階において，ND方向に<100>方向に配向した結晶粒が多く見られることがわかった。従来，微小はんだ接合部では凝固直後の方位がその後の熱疲労寿命を支配すると考えられてきたのに対して，本研究の大面積はんだ接合部ではTCT中の方位の変化が無視できないことを強く示唆している。大面積はんだ接合部の熱疲労信頼性の向上のため，今後はTCT中の方位変化メカニズムの更なる解明が期待される。

最後に，このような機会をいただいた本助成事業とその関係者のお力添えに感謝したい。

参考文献

1）T. R. Bieler et al., IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 31(2008)370–381
2）J. W. Xian et al., Nature Communications, 15(2024)4258
3）H. Sugimoto et al., Journal of Smart Processing, 9（2020）224–231
4）K. Hosoya et al, Journal of Electronic Materials, 49（2020）6175– 6186
5）S. Liu et al., IEEE Transactions on Power Electronics, 39（2024)16695–16707
6）H. Tatsumi et al., Proceedings of the 25th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition（EMPC), Grenoble, France(2025)1–5
7）H. Tatsumi et al., Acta Materialia, 304(2026)121813
8）J. Kim et al., Journal of Synchrotron Radiation, 33（2026）617–631