

パワーデバイスの金属／セラミックス接合部における 内部応力分布の解析

Analysis of Internal Stress Distribution in Metal / Ceramics Layers of Power Devices

木村 英彦^a, 北條 浩^a, 山口 聡^a, 瀬戸山 大吾^a, 妹尾 与志木^a
Hidehiko Kimura^a, Hiroshi Hohjyo^a, Satoshi Yamaguchi^a, Daigo Setoyama^a, Yoshiki Seno^a

^a(株) 豊田中央研究所
^aToyota Central R&D Labs., Inc.

パワーデバイスの金属／セラミックス接合部の内部応力を計測するため、放射光によるセラミックス薄板の応力計測条件を検討した。X 線の弾性定数の計測には、引張負荷装置によるその場計測が有効であった。熱履歴によってセラミックス薄板が圧縮応力を有することが解った。

キーワード： 内部応力、X 線の弾性定数、パワーデバイス、セラミックス

背景と研究目的：

電気自動車（以下 EV）やハイブリッド車（以下 HV）に代表されるエコカーは、温室効果ガスの削減や省エネルギー化などの環境問題に取り組むための重要な産業技術である。EV や HV の普及の鍵を握る重要技術のひとつが、モーターを駆動するパワーデバイスである。パワーデバイスは電力機器の制御に用いられる基盤部品であり、EV や HV のモーター駆動用では高電圧化および大電流化が急速に進んでいる。パワーデバイスには高導電性に加え、高い熱伝導性および電気絶縁性が同時に要求されるため、一般的にセラミックスに Cu を接合した DBC (Direct Bonded Copper) や Al を接合した DBA (Direct Bonded Aluminum) などが使用されている。DBC や DBA は高温で金属とセラミックスを接合して製作されるため、室温ではこれらの線膨張係数の差により残留応力・ひずみが発生する。この応力・ひずみの分布を精密に定量評価できれば、高い強度と信頼性を有するパワーデバイスの開発が可能となり、高性能で低価格な EV や HV の普及を促進すると期待される。特に接合部や部品内部における応力・ひずみ測定が重要である。

内部応力の計測では、部品を分解・切断すると応力が開放されてしまうため、接合されたままの評価が重要である。しかし、従来の汎用的な X 線装置では表層近傍しか計測できない。また、逐次研磨法など表面を除去して内部を現出させる計測法では、除去により拘束条件が変わり内部応力が変化するため、実応力を得ることが難しい。特に電子デバイスでは複雑な形状や拘束条件のために、切断や研磨除去による応力変化を数値シミュレーションで正確に見積ることが難しく、内部応力の実測が望まれている。一方、SPring-8 の放射光は、高エネルギーかつ高輝度であるため、パワーデバイス程度の寸法を持つ部品の内部の応力計測に適している[1]。

パワーデバイスの信頼性は絶縁セラミックス薄板に大きく依存することが多い。放射光を利用すれば、薄板状セラミックスの応力測定[2]が可能である。セラミックスの応力測定の場合、気孔率等の影響により実際の X 線の弾性定数が理論値と異なることが多いため、実試料に既知の応力を負荷しながら X 線の弾性定数を実測する必要がある。試料の板厚が数 mm 以上の場合、一般的試料を 4 点曲げ負荷して表面で回折計測を行う。一方、パワーデバイスの絶縁セラミックスのような薄板の場合、4 点曲げでは回折ボリューム内に顕著な応力勾配が存在するため、正確な X 線の弾性定数の実測が難しい。この場合、引張り負荷による均一応力状態での実測が望ましいと考えられる。

本課題では、パワーデバイス内部の応力・ひずみ計測を行うため、まずセラミックス単体を用いて放射光応力測定の基本条件を検討した。専用装置を用いて引張り負荷による X 線の弾性定数の計測などを行った。また、パワーデバイスの基礎要素のひとつとなる DBC および DBA において、ひずみおよび応力の計測を行った (図 1)。

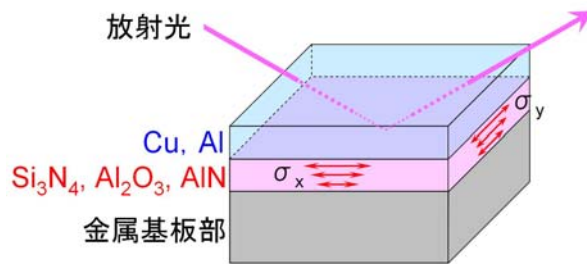


図 1. 金属/セラミックス接合体の内部応力計測

実験：

ビームラインは BL46XU を使用し、入射 X 線エネルギーは 20keV とした。試料は市販の金属/セラミックス接合体を使用し、まずセラミックス単体 (Si₃N₄、AlN や Al₂O₃) で回折計測条件を検討した。試料寸法は約 30×30×1 mm であり、接合体もほぼ同寸法である。

X 線の弾性定数の計測には小型の引張り負荷装置を使用した。 χ サークル上のサンプルステージ上に設置できる小サイズかつ軽量の装置であり、高トルクモータや高剛性フレームにより最大負荷容量を 1000 N とした。長時間の負荷中は、材料やジグによって変形により計測位置がビーム位置からずれることがあるため、本装置は片側引張ではなく両側引張方式とし、片側に設置したロードセルと同形状の部品を反対側にも配置して負荷機構部を対象構造とした。セラミックスの薄板でも引張り負荷時に曲げが発生しにくいジグを使用し、0~80 MPa を負荷しながら X 線の弾性定数を実測した。

金属/セラミックス接合部の近傍においてひずみ分布の計測を行った。また $\sin^2\phi$ 法で応力の評価を行った。

結果および考察：

回折プロファイルを計測した結果、十分な回折強度を得るための入射ビームを高さ 0.5×幅 1 mm 程度とした。本ビームサイズではセラミックスの板厚方向の応力分布を得るのは困難であり、応力計測は $\sin^2\phi$ 法 (側傾法) とし、面内の分布計測を行った。

図 2 に単軸引張りの負荷装置による X 線の弾性定数の計測セットアップを示す。本装置により均一の引張り応力を負荷したその場計測が可能となり、セラミックス薄板の応力を側傾法で計測しながら X 線の弾性定数の実測ができた。

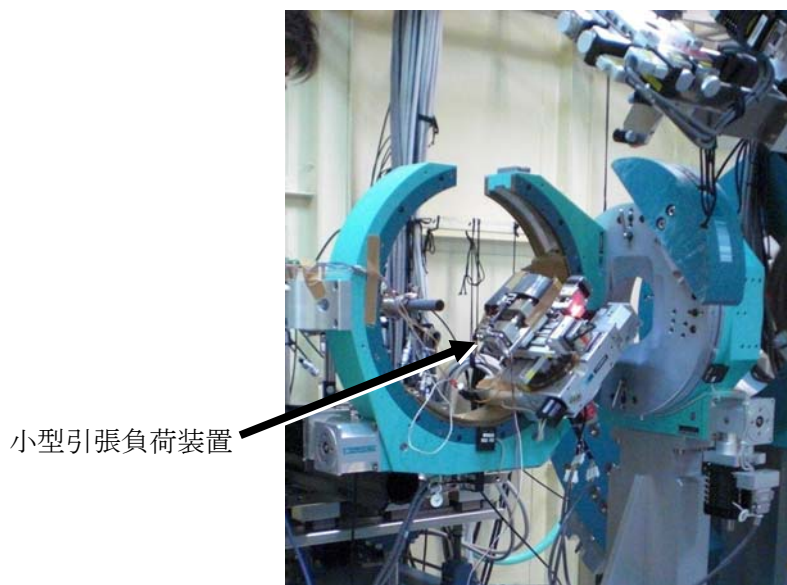


図 2. 単軸引張り負荷装置による X 線の弾性定数の計測

DBCにおいて、Cu 接合部と遠方で計測した Si_3N_4 の回折プロファイルを図 3 に示す。遠方（ほぼ無負荷状態）と比較すると、接合部近傍の回折角は低角であり板厚方向で引張りひずみが存在すると考えられる。これは主に金属とセラミックスの接合時の線膨張係数差により発生すると考えられ、今後局所ひずみの成分や分布を明らかにすれば接合信頼性向上につながると考えられる。

DBA において側傾法による応力計測を行った結果を図 4 に示す。表層の Al を透過して十分な回折強度が得られ、内部セラミックスの応力計測が行えた。 $2\theta - \sin^2\psi$ 関係はおおよそ直線であり、本製品の熱履歴では内部のセラミックスが圧縮応力を有することが解った。

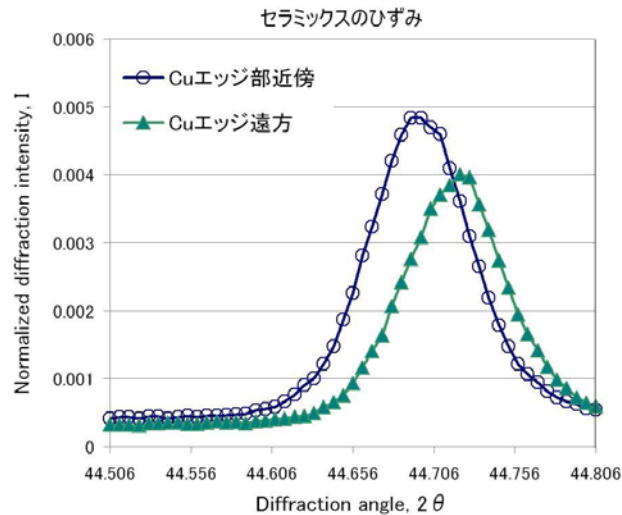


図 3. DBC におけるひずみ計測結果

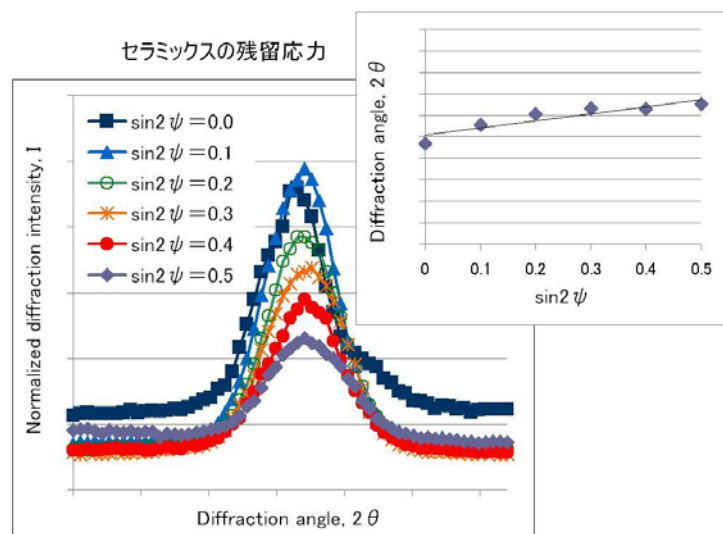


図 4. DBA における応力計測結果

今後の課題：

本試料は今回初めて計測したために基礎的計測条件の検討が多く、また引張り装置等の立上げもあったためビームタイムが不足した。このため、本課題内では高精度な応力の絶対値を得るには至らなかった。今後、計測条件を最適化して行く必要がある。

参考文献：

- [1] 秋庭義明, 鈴木賢治, 応力解析における回折法の相補性, 日本機械学会論文集 A 編, **74-739**, pp. 302-307 (2008).
- [2] 鷺見裕史, 水谷安伸, 土肥宜悠, 秋庭義明, 田中啓介, 放射光による固体酸化物形燃料電池の熱サイクル中における内部応力のその場測定, 材料, **54-4**, pp. 440-446 (2005).