

(論文内容の要旨)

本論文は、デジタル画像相関法 (DICM) を基礎とした超微細な接合部を有する電子デバイスのひずみ分布評価技術の構築を目的として、高倍率観察可能な顕微鏡画像のゆがみ評価及び補正手法を示し、かつ、その有効性を実証したものであり、7章から構成されている。

第1章は緒論であり、本研究実施の背景となった電子デバイス実装分野の現状について述べ、その機械的信頼性評価技術の開発状況について示すとともに、既存の技術の問題点を指摘し、本研究の位置付けと目的を示している。

第2章では、デジタル画像相関法による変位・ひずみ計測において、その数値解析誤差について述べている。特に、輝度値の内挿には双三次多項式、パターンマッチングに利用する画像小領域 (サブセット) の変形には一次変形モデルをそれぞれ適用することで、実計測時に外乱や画像の品質に対するロバスト性に優れたシステム構成としている。また、精度良くひずみ分布計測を実施するにはサブセット寸法の決定が重要であることを明らかにし、その決定指針を示している。

第3章では、デジタル画像相関法を用いた光学顕微鏡観察下での変位・ひずみ計測システムを構築し、計測精度に対する光学系の誤差の影響を排除する較正手法を示している。既知変位を与えた3枚の画像を利用して画像ゆがみの較正関数を生成し、これを用いて得られたゆがみの修正画像においては、平行移動前後の変位分布が全視野において $\pm 0.02\text{pixel}$ の変位の計測分解能を有することを確認している。次に、構築したDICM計測システムを用いて、積層基板の熱負荷過程において複合材部の構造を反映した複雑なひずみ分布を明らかにするとともに、そのマクロな反りをレーザ変位計による計測結果と比較検討することで、DICMによる計測の信頼性を確認している。同様に、部品内蔵基板中の熱ひずみ分布計測を行い、シリコンチップ端部周辺でのひずみ集中を観察し、定性的には有限要素解析による解析結果とひずみ分布の傾向が一致することを示している。

第4章では、アルミニウムとゴム変成エポキシ樹脂の三層接着継手およびバルク材の試験片について、破壊試験を行うとともに、第3章で構築したひずみ計測システムを適用してそのき裂先端近傍のひずみ場を計測することで、破壊靱性値の接着剤層厚さの影響について検討を行っている。実験的に得られた接着継手中のき裂先端近傍のひずみ分布を、Gursonモデルを用いた三次元有限要素法解析の結果と比較することにより、Gursonモデルを用いた三次元有限要素法解析の結果の妥当性を検証している。破壊試験結果から、界面でゴム粒子の肥大化を生じない固体状ゴム変

成エポキシ樹脂による接着継手の破壊靱性値は、接着剤層が薄くなるにつれて単調に減少することを明らかにしている。さらに、三次元有限要素解析結果により、接着剤層が薄くなるにつれて破壊靱性値が減少するのは、被着材の拘束によって、き裂先端近傍の応力が上昇し、低い  $J$  積分値で損傷が発達するためであると予測している。また、き裂先端付近の累積損傷が一定値に達した時に破壊すると仮定したモデルで、その傾向を定性的に再現できることを確認している。

第5章では、通常の光学顕微鏡よりも高倍率観察可能なレーザ走査型顕微鏡を用いて、より微細な領域を対象とした DICM による変位・ひずみ計測システムを構築している。第3章で提示したゆがみモデルを基礎として、レーザの走査に起因する時間依存型のゆがみも新たに考慮し、時間依存性の有無でレーザ走査型顕微鏡画像のゆがみをそれぞれモデル化し、実験的に平行移動及び回転前後での画像組を用いて各ゆがみを定量的に評価している。得られたゆがみ分布を用いて画像補正をおこなうことで複雑なゆがみ分布の影響が低減され、変位の計測精度が向上することを確認している。次に、構築した変位・ひずみ計測システムを用いて、多層基板フリップチップパッケージのはんだ接合部周辺に熱負荷時に生じるひずみ分布を実測し、粘弾塑性クリープ特性を考慮した有限要素解析による評価と比較している。両者でせん断ひずみの集中位置が異なるなど、接合信頼性評価で重要となる項目で定性的にも一致しないことを明らかにしている。さらに、解析においてパッケージ内部のアンダーフィル材のポアソン比を増加させることでその高温での粘性挙動を模した解析では、はんだ接合部でのせん断ひずみの集中位置等で実測結果と一致することを確認している。これによって、有限要素解析において封止材の粘弾性挙動を正しく再現することの重要性を示唆している。

第6章では、超高倍率観察下での変位・ひずみ計測を目的とし、AFM 画像の高さ情報を利用した表面三次元変位計測システムを提案している。特に、DICM における相関評価関数を改良することで、AFM 画像において、既存の DICM による計測よりも精度の良いパターンマッチングが可能となることを実験結果より確認している。また、AFM 画像の主たるゆがみの原因である三次元的な熱ドリフトについてモデル化し、定量的に評価することで、ドリフトに起因するゆがみのない AFM 画像を再構成することを可能としている。このドリフトによるゆがみのない画像を利用することで、AFM 画像を用いた DICM において 20nm の分解能で三次元表面変位を計測可能にしている。

なお、第7章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、デジタル画像相関法 (DICM) を用いた微細領域の変位・ひずみ分布計測手法開発、その精度向上を目的とした各種顕微鏡画像のゆがみ評価手法開発、及びその工学的応用に関する研究を行い、その成果をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

1. DICM を用いた光学顕微鏡及びレーザ走査型顕微鏡観察下での変位・ひずみ計測システムを構築し、平行移動及び回転前後での画像組を用いて各画像のゆがみを高精度に定量評価する手法を提案している。特にレーザ走査型顕微鏡では、走査に起因する時間依存型のゆがみも考慮し、定量的に評価している。いずれも DICM による変位計測に画像ゆがみの補正手法を組み合わせることで、計測精度が向上したことを実験的に確認している。
2. 1. の計測手法を微細構造物におけるひずみ計測に適用している。電子デバイスに適用した例では、熱負荷で生じる内部構造に応じたひずみ分布や接合部のひずみ集中位置を明らかにしている。積層基板においてはマクロな反り変形と、また部品内蔵基板及びチップ実装基板においては、有限要素解析結果と比較検討することで、計測システムの信頼性を確認するとともに、解析支援手法として構築したひずみ分布計測システムが有用であることを示している。また、ゴム変成エポキシ樹脂接着継手に適用した例では、熱残留応力及び機械荷重によるき裂先端ひずみ分布を実測し、樹脂の損傷を考慮した有限要素解析結果と比較することで、その損傷モデルの妥当性を検証している。
3. 原子間力顕微鏡画像に三次元的な画像の変形を考慮した DICM を適用することで、超微細な領域を対象とした三次元表面変位計測システムを構築している。さらに、レーザ顕微鏡に比べてより複雑な挙動を示す、走査に起因する時間依存型の画像ゆがみを定量的に評価及び補正することで、20nm の変位分解能で計測可能であることを実験的に確認している。

以上、本論文は、高倍率観察可能な顕微鏡における画像ゆがみを評価及び補正し、微細領域での変位・ひずみ分布を高精度に定量評価する手法を示している。さらに、工学的な応用例を含め、いくつかの重要な実験・評価結果、及び知見を提示し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成21年8月7日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。