

デジタル画像相関法による
微細領域ひずみ場計測とその工学的応用

央戸 信之

目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 本論文の目的.....	4
1.3 本論文の内容.....	4
第 1 章の参考文献.....	6
第 2 章 デジタル画像相関法の原理.....	11
2.1 緒言.....	11
2.2 デジタル画像相関法の原理.....	11
2.3 変位の計測分解能.....	13
2.4 ひずみの計測分解能.....	15
2.5 移動最小二乗法.....	16
2.6 結言.....	18
第 2 章の参考文献.....	19
第 3 章 微細構造物のひずみ分布計測.....	21
3.1 緒言.....	21
3.2 光学顕微鏡観察へのデジタル画像相関法の適用.....	22
3.2.1 計測システムの特徴.....	22
3.2.2 画像のゆがみ評価.....	25
3.2.3 画像のゆがみ補正.....	29
3.3 微細構造物の熱ひずみ分布計測.....	30
3.3.1 実装用積層基板の熱ひずみ分布評価.....	30
3.3.2 シリコンチップ内蔵基板の接合部周辺ひずみ分布評価.....	35
3.4 結言.....	39
第 3 章の参考文献.....	40
第 4 章 ゴム強化エポキシ樹脂接着継手の破壊強度評価.....	43

4.1	緒言	43
4.2	破壊靱性値評価	44
4.2.1	ゴム変成エポキシ樹脂の構成式	44
4.2.2	ゴム変成エポキシ樹脂接着剤の作成	45
4.2.3	接着継手の破壊試験	46
4.2.4	破壊靱性値の算出	48
4.2.5	破壊靱性値の推定	50
4.3	接着剤層中のひずみ分布評価	51
4.3.1	デジタル画像関連法を用いたき裂先端ひずみ分布計測	51
4.3.2	有限要素法を用いたひずみ分布解析	55
4.3.3	計測結果と計測結果の比較.....	56
4.4	結言	59
	第4章の参考文献	60
第5章	実装基板内はんだ接合部周辺のひずみ分布評価	63
5.1	緒言	63
5.2	レーザ走査型顕微鏡による観察画像のゆがみ評価及びその補正効果	64
5.2.1	計測システムの構成とその観察画像の特性	64
5.2.2	時間依存型画像ゆがみの評価	68
5.2.3	時間非依存型画像ゆがみの評価	69
5.2.4	画像ゆがみ補正手法の検証.....	71
5.3	はんだ接合部ひずみ分布評価	76
5.3.1	試験片の構成	76
5.3.2	DICMによるひずみ分布計測.....	78
5.3.3	有限要素解析によるひずみ分布評価	81
5.3.4	ひずみ分布評価及び比較検討	83
5.4	結言	84
	第5章の参考文献	86
第6章	原子間力顕微鏡観察下での表面三次元変位分布計測	89
6.1	緒言	89
6.2	DICMによる表面三次元変位分布計測.....	90

6.2.1	サブセットの三次元変形への拡張.....	90
6.2.2	計測システムの特徴	91
6.3	AFM 画像のゆがみ評価及びその画像補正	94
6.3.1	AFM 画像のゆがみモデル及びその評価手法	94
6.3.2	画像ゆがみの評価及び補正手法の検証.....	96
6.3.3	3次元変位計測への拡張に関する考察	99
6.4	結言	100
	第6章の参考文献	101
	第7章 結論.....	103
	付録A 仮想き裂進展法を用いた接着継手の J_{Pmax} 算出.....	107
	関連発表論文.....	110
	謝辞	113

第1章

緒論

1.1 研究背景

近年、電子機器には高・多機能および小型化を要求され、かつそのライフサイクルも急速に短くなっている。それに伴い、製品の設計開発及び評価に費やすことのできるコストが極端に少なくなってきた。この状況は、半導体関連技術の研究開発に大きな変化をもたらしている。電子機器開発において主流であった、半導体設計やプロセス技術、回路設計技術だけでなく、実際に半導体素子や部品を基板や電子パッケージに実装する技術及びその評価技術も、製品の実用化という点で非常に重要となってきた[1,2]。すなわち、最先端の実装技術及びその評価技術を保有することでも、他社製品との差別化を図ることが可能となる。このような最先端の実装技術が半導体メーカー、ひいては日本の半導体関連産業の国際競争力を維持する上で重要となっている。

電子パッケージの小型化に伴って、接合部の微細化が進むだけでなく、複合材料や有機材料及び金属など多様な材料を複雑に組み合わせることで、その高機能多機能性が実現される[3]。その反面、特性の異なる材料を接合することによって、パッケージの機械的信頼性を損ない、製品の設計や信頼性評価を複雑にしてしまう。特に、構成材料間の大きな線膨張係数差に起因する実装時の残留応力は、電子パッケージ中の配線やはんだ接合部の接続不良等を引き起こす。また、それら残留応力によって誘起される電気的な特性の変動も、動作不良の一因として問題とされる[4-6]。

現在、このような電子パッケージの信頼性を確保するために、有限要素法による応力解析が多く利用される[7,8]。有限要素法による電子パッケージの残留応力や反りの評価は、パッケージに使用される樹脂が粘弾性特性を有することから、この粘弾性挙動をモデル化した解析も実施されている[9-11]。しかし、この粘弾性を考慮した解析には、樹脂の粘弾性材料特性を取得する実験に多大な労力を要し、また、樹脂のガラス転移点付近の挙動は複雑でそのモデル化に高度な技術を要することが多い。樹脂以外にも、はんだ材料には弾塑性クリープ挙動の考慮が必要である。さらに、製造プロセス等の複雑な熱履歴に起因する残留応力を評価することは重要であるが、そのプロセス全てを有限要素シミュレーションに

反映させることは困難である。したがって、多種多様な電子パッケージを扱う実際の設計・製造現場では、多大な評価コストを必要とせず、実用上十分な精度を有する実験的評価手法が必要とされている。

実装工程での半導体チップに生じる残留応力の測定法として、ピエゾ抵抗効果を利用した応力測定用チップの利用[12,13]や、光弾性効果を利用した透過型樹脂封止による評価も報告されている[14]。しかしながら、これらはチップや封止樹脂の選別に制限があるため、実装メーカーが個々に実施する多種多様のパッケージの評価において十分な設計・製造指標を提供できるものではない。

一方、表面観察に限定されるが、モアレ干渉法やデジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method: DICM) などによるひずみ分布評価も有効である。モアレ縞の観測によりひずみを計測するモアレ干渉法[15,16]は、高精度なひずみ分解能を有する画像処理法である。パッケージ断面観察により、チップ-はんだバンプ接合部での熱負荷によるひずみを評価報告している例がある[17-19]。デジタル画像相関法は画像の変形解析により観察対象の変形を計測する手法である[20,21]。DICM はモアレ干渉法と比較してひずみの分解能には劣るために、シリコンチップなどのひずみ評価には適さないが、熱等の外乱の影響を受けやすいモアレ干渉法と比べても汎用性は高く、高度なグレーティング処理等も要しない簡便な手法である。Yaofeng ら[22]は、接続信頼性で重要となる、DICM により熱サイクル中のはんだ断面の変位分布計測を実施した。比較的大きい $500\mu\text{m}$ 径のはんだ内部に着目し、計測変位分布と有限要素解析により得られた変位場が定性的に一致することを示したが、ひずみを計測するにはその精度が不十分であった。

ただし、上述の画像処理手法では観察倍率が制限される。ビデオ観察や光学顕微鏡観察は、その光の性質によって倍率 $1000\times$ 以上の観察において分解能の向上は期待できない[23]とされる。たとえば電子パッケージのはんだバンプ接合部では、従来はそのはんだ径が $500\mu\text{m}$ 程度であったが、 $100\mu\text{m}$ もしくはそれ以下の寸法にまで小型化が進んでいる。このような構造寸法を対象とした場合、光学観察では画像の分解能が不十分であるために、画像処理による変位及びひずみの算出が困難となる。ただし、DICM においてはその観察装置を変更することで対応できる。通常の光学顕微鏡より高倍率観察が可能な装置として、レーザー走査型顕微鏡 (Laser Scanning Microscope: LSM)、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM)や原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM)などがあり、SEM や AFM においては DICM の応用例も報告されている[23-30]。

このように観察系に対する汎用性を有する DICM であるが、その計測変位は画像の変形から算出したものであるために、観察画像が内包するゆがみの影響を強く受ける。光学顕微鏡の場合、観察画像は光路上のレンズ系の収差や計測対象表面との幾何学配置などの影

響を受けゆがむ。このようなゆがみの内在する画像での計測変位は、実際の物体表面での変位とは必ずしも一致せず、精度の良いひずみ計測が困難となるケースがある。デジタル観察画像のゆがみを評価及び補正する手法は、これまでも多く研究がなされ、様々な手法が提案されている[31-33]。米山ら[34]や Schreier ら[35]はこの画像ゆがみを画像処理によって評価し、DICM による計測変位精度の向上を可能とした。しかしながら、これら多くのゆがみ評価手法は、そのリファレンスとして線状やグリッド状に配置されたマーカを有するサンプルもしくは高精度な繰り返し精度を要求する移動ステージ等を必要とするため、特に顕微鏡観察下ではそれらの準備に労力を要する。

SEM 観察画像を DICM に適用したものでは、最大観察倍率 10000×まで変位計測を実施した例が報告されている [23-26]。ただし、光学顕微鏡のようなレンズ収差に起因するゆがみだけでなく、観察過程での熱ドリフトや走査挙動に起因する画像のゆがみが問題となり、Sutton ら[26]はその評価及び補正手法を提案している。

AFM 観察画像を DICM に適用したものでは、観察倍率 10000×以上で変位計測を実施した例が報告されている [27-30]。ただし、他の顕微鏡への DICM のアプリケーションでは画像に対して 0.01pixel オーダの変位分解能であるのに対して、AFM では最も高精度な例でも 0.1pixel オーダである。これはプローブの走査挙動に起因する複雑なゆがみを画像に内包するため、画像の再現性が著しく低いことが原因である。特に、他の顕微鏡と比べて観察時間が長いために、装置のウォームアップ後であっても、熱に起因するドリフトの影響が大きい。多くの商用 AFM では利用者がピエゾスキャナの非線形挙動を較正可能であるが、熱ドリフトなどの外乱に対しては効力を発揮しない。

通常表面観察を目的とした場合、このような AFM の熱ドリフトの補正に関して、画像のゆがみを包括的に一次近似で仮定し、観察後の画像をアフィン変換で補正できるとして取り扱うことが多い[36-38]。または、原子の周期配列等をマーカーとして参照することでゆがみを補正する手法もある[39]。Qinmin ら[40]は相対的なドリフト量をリアルタイムに予測し、ハードウェアからアクティブにその動きを打ち消している。一方で、DICM における変位及びひずみ計測に AFM 観察画像を適用する際には、より詳細なドリフトの評価及び補正を要するため、これら既存の手法では不十分であり、新規手法の開発を必要とする。

現状では、これら複雑な画像ゆがみのために、高倍率観察可能な顕微鏡システムを用いた DICM によるひずみ分布計測において、構造物のひずみ分布を精度良く実測した例は未だ少ない。他の光学手法では原理的に不可能である超微細領域を対象としたひずみ評価に、その応用が期待されている。

1.2 本論文の目的

本論文では、前節に述べたような研究背景から、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研究を実施した。したがって、本論文における研究は大別して以下の2項目を目的としている。

- (1) 各観察倍率に対応する顕微鏡観察画像に内在する画像ゆがみを評価し、実験的に簡便な画像補正手法を構築することで、安定した精度での変位ひずみ計測を実現する。
- (2) 開発した変位及びひずみ計測システムを用いて、微細な構造物に生じるひずみ分布計測を実施し、有限要素解析結果と比較することで、解析支援手法としてのDICMの有用性を検証する。

1.3 本論文の内容

本論文は、本章を含めて全7章から構成される。以下に、本論文の構成と各章の概要を示す。

第1章では、本論文の研究背景、目的及び概要について述べている。

第2章では、画像処理法としてのデジタル画像相関法の原理について述べ、その数値処理に伴う誤差や理想的な変位及びひずみの分解能について述べる。

第3章では、光学顕微鏡観察とDICMを組み合わせ、微細な領域を対象とした際の変位計測精度を評価する。その際、簡便な画像ゆがみの評価手法を開発し、観察画像をゆがみのない理想的な画像に変換することで、DICMによる構造物の変位及びひずみ計測の高精度化させる。開発した画像補正手法を用いて積層基板及びチップ内蔵基板の熱ひずみ分布計測を実施した結果を示す。また、チップ内蔵基板では接合部周辺でのひずみ分布を有限要素法の結果と比較し、解析支援手法としてのDICMの有効性を検証する。

第4章では、界面でゴム粒子の肥大化が生じない、固体状ゴムであるNitrile butadiene rubber (NBR)を用いたゴム変成エポキシ樹脂接着継手について、破壊靱性値に対する接着剤層厚さの影響を検討する。第3章と同様に光学顕微鏡とデジタル画像相関法を組み合わせたひずみ計測システムを用いて、薄い接着剤層中のき裂先端近傍のひずみ分布の直接計測を行う。さらに、有限要素法を用いてゴム粒子の損傷を考慮した弾塑性解析を行い、これを計測結果と比較して、き裂先端近傍のひずみ分布に対する接着剤層厚さの影響を検討する。

第5章では、レーザ走査型顕微鏡による観察画像にDICMを適用させ、第3章で構築した計測システムより、高倍率観察に対応した変位及びひずみ計測をおこなう。その際、レーザ走査型顕微鏡による観察画像に内在するゆがみをDICMによる変位計測結果から評価し、観察画像からその影響を取り除き、走査型顕微鏡におけるDICMによる変位分布計測

精度を向上させる方法を提案する。次に、構築した DICM システムを利用し、Flip-Chip 実装された模擬多層基板パッケージを用い、熱サイクル負荷時にはんだバンプ周辺に生じるひずみ分布を計測する。また、汎用有限要素法コード MSC.Marc を用いて粘弾塑性クリープ解析を行い、計測結果と比較検討する。

第6章では、高倍率観察可能な AFM を DICM による変位計測に適用することで、ナノ変位計測システムを構築する。また、AFM 画像の有する表面三次元形状データを活用し、ドリフト変位を3次的に定義することで、既存の取り扱いよりも詳細にドリフト量を評価する方法を示す。また、ドリフト評価手法を組み合わせた AFM/DICM 変位計測システムにおける、3次元変位計測の精度を評価する。

最後に、第7章では各章で得られた結果を総括する。

第 1 章の参考文献

- [1] エレクトロニクス実装学会信頼性解析技術委員会, “信頼性解析技術の現状と展望”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.10, No.1, pp.14-17, 2007.
- [2] エレクトロニクス実装学会信頼性解析技術委員会, “電子機器の高密度実装に対処した信頼性評価の現状と今後の課題”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.11, No.1, pp.19-23, 2008.
- [3] 嶋田勇三, “先端実装技術の動向と今後の展望”, 電子情報通信学会誌, (C), Vol.J88-C, No.11, pp.827-838, 2005.
- [4] A. Hamada, T. Furusawa, N. Saito and E. Takeda, “A New Aspect of Mechanical Stress Effects in Scaled MOS Devices”, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 38, No. 4, pp. 895-900, 1991.
- [5] H. Ali, “Stress-Induced Parametric Shift in Plastic Packaged Devices”, IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part B, Vol. 20, No. 4, pp. 458-462, 1997.
- [6] 小金丸正明, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, “実験とデバイスシミュレーションによる nMOSFET の応力に起因した DC 特性変動評価”, 電子情報通信学会誌, (C), Vol.J90-C, No.4, pp.351-362, 2007.
- [7] M. Amagai, “Characterization of chip scale packaging materials”, Microelectronics Reliability, Vol.39, pp.1365-1377, 1999.
- [8] Ming-Yi Tsai, C. H. Jeter Hsu and C. T. Otto Wang, “Investigation of Thermomechanical Behaviors of Flip Chip BGA Packages During Manufacturing Process and Thermal Cycling”, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol.27, No.3, pp.568-576, 2004.
- [9] L. J. Ernst, G. Q. Zhang, K. M. B. Jansen and H. J. L. Bressers, “Time- and Temperature-Dependent Thermo-Mechanical Modeling of a Packaging Molding Compound and its Effect on Packaging Process Stresses”, Journal of Electronic Packaging, Vol. 125, pp.539-548, 2003.
- [10] S. Nakamura, Y. Miyano, S. Sugimori, A. Kaneda, “Thermoviscoelastic Analysis of Residual Stresses in a Thermosetting Resin/Metal Laminated Beam Caused by Cooling”, JSME International Journal, Series I, Vol.31, No.1, pp.126-131, 1988.

-
- [11] 三宅清, “BGA パッケージの硬化収縮を考慮した反り粘弾性解析”, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.7, No.1, pp.54-61, 2004.
- [12] 三浦英生, 西村朝雄, 河合末男, 西邦彦, “IC プラスチックパッケージ内応力測定素子の開発とその応用”, 日本機械学会論文集 Vol.53, No.493, A, pp.1826-1832, 1987.
- [13] Richard C. Jaeger, Jeffrey C. Suhling, Ramanathan Ramani, Arthur T. Bradley and Jianping Xu, “CMOS Stress Sensors on (100) Silicon”, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.35, No.1, 2000.
- [14] 長谷川武敏, 渋谷義一, “光弾性による IC パッケージ内応力の計測”, 電気学会論文誌 A, Vol.112, No.10, pp.866-873, 1992.
- [15] Daniel Post, "Moire interferometry at VPI & SU", Experimental Mechanics, pp.203-210, 1983.
- [16] Matthew T. Kokaly, Jonghee Lee, Albert S. Kobayashi, "Moire interferometry for dynamic fracture study", Optics and Lasers in Engineering, Vol.40, pp. 231-247, 2003.
- [17] Woon-Seong Kwon, Suk-Jin Ham, Kyung-Wook Paik, "Deformation mechanism and its effect on electrical conductivity of ACF flip chip package under thermal cycling condition: An experimental study", Microelectronics Reliability, Vol.46, pp.589-599, 2006.
- [18] Thanate B. Ratanawilai, Ganesh Subbarayan, "An Assessment of Change in Stress Due to Cross-Sectioning in Moire Interferometric Characterization of Electronic Packages", IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol.26, No.4, pp.705-711, 2003.
- [19] Y. Guo, C. K. Lim, W. T. Chen, and C. G. Woychik, “Solder Ball Connect (SBC) Assemblies under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moiré Interferometry, and Its Interpretation”, IBM J. Res. Develop., Vol. 37, No. 5, pp. 635-647, 1993.
- [20] M. A. Sutton, W. J. Wolaters, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeill, “Determination of Displacements using an Improved Digital Image Correlation Method”, Computer Vision, pp.133-139, 1983.
- [21] Zili Sun, J. S. Lyons and Stephen R. McNeill, “Measuring Microscopic Deformation with Digital Image Correlation”, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 27, pp. 409-428, 1997.
- [22] Sun Yaofeng, John H. L. Pang, "Digital image correlation for solder joint fatigue reliability in microelectronics packages", Microelectronics Reliability, Vol.48, pp.310-318, 2008.

- [23] M. A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J. J. Orteu, S. R. McNeill, H. W. Schreier and X. Li, "Metrology in a Scanning Electron Microscope: Theoretical Developments and Experimental Validation", *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 2613-2622, 2006.
- [24] D. Vogel, A. Schubert, W. Faust, R. Dudek and B. Michel, "MicroDAC – A Novel Approach to Measure In Situ Deformation Fields of Microscopic Scale", *Microelectronics Reliability*, Vol.36, No.11, pp.1939-1942, 1996.
- [25] N. Sabate, D. Vogel, A. Gollhardt, J. Marcos, I. Gracia, C. Cane, B. Michel, "Digital image correlation of nanoscale deformation fields for local stress measurement in thin films", *Nanotechnology*, Vol.17, pp.5264-5270, 2006.
- [26] M. A. Sutton, N. Li, D. C. Joy, A. P. Reynolds and X. Li, "Scanning Electron Microscopy for Quantitative Small and Large Deformation Measurements Part I", *Experimental Mechanics*, Vol. 47, pp. 775-787, 2007.
- [27] Y. Sun, J. H. L. Pang, "AFM image reconstruction for deformation measurements by digital image correlation", *Nanotechnology*, vol.17, pp.933-939,2006.
- [28] X. Li, W. Xu, M. A. Sutton M. Mello "Nanoscale deformation and cracking studies of advanced metal evaporated magnetic tapes using atomic force microscopy and digital image correlation techniques", *Measurement Science and Technology*, vol.22, pp. 835-844, 2006.
- [29] S Chang, C S Wang, C Y Xiong, J Fang, "Nanoscale in-plane displacement evaluation by AFM scanning and digital image correlation processing", *Nanotechnology*, vol.16, pp.344-349, 2005.
- [30] S. W. Cho, I. Chasiotis, "Elastic Properties and Representative Volume Element of Polycrystalline Silicon for MEMS", *Experimental Mechanics*, Vol.47, pp.37-49, 2007.
- [31] D. C. Brown, "Close-Range Camera Calibration", *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866, 1971.
- [32] Richard I. Hartley, Peter Sturm, "Triangulation", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.68, No.2, pp.146-157, 1997.
- [33] Luca Lucchese, "Geometric calibration of digital cameras through multi-view rectification", *Image and Vision Computing*, Vol. 23, pp. 517-539, 2005.
- [34] Satoru Yoneyama, Akikazu Kitagawa, Koji Kitamura and Hisao Kikuta, "In-Plane Displacement Measurement Using Digital Image Correlation with Lens Distortion Correction",

-
- JSME International Journal, Series A, Vol. 49, No. 3, pp. 458-467, 2006.
- [35] H. W. Schreier, D. Garcia and M. A. Sutton, "Advances in Light Microscope Stereo Vision", *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 3, pp. 278-289, 2004.
- [36] K. Henriksen, S. L. S. Stipp, "Image distortion in scanning probe microscopy", *American Mineralogist*, Vol.87, pp.5-16, 2002.
- [37] R. Staub, D. Alliaata, C. Nicolini, "Drift elimination in the calibration of scanning probe microscopes", *Review of Scientific instruments*, Vol.66, No.3, pp.2513-2516, 1995.
- [38] J. F. Jorgensen, C. P. Jensen, J. Garnaes, "Lateral metrology using scanning probe microscopes, 2D pitch standards and image processing", *Applied Physics A*, Vol.66, pp.845-852, 1998.
- [39] Rostislav V Lapshin, "Automatic drift elimination in probe microscope images based on techniques of counter-scanning and topography feature recognition", *Measurement Science and Technology*, Vol.18, pp.907-927, 2007.
- [40] Qinmin Yang, S. Jagannathan, E. W. Bohannon, "Automatic drift compensation using phase correlation method for nanomanipulation", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol.7, No.2, pp.209-216, 2008.

第2章

デジタル画像相関法の原理

2.1 緒言

デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation Method: DICM) を正しく適用するには, 実験的に生じる誤差と画像処理における数値処理上の誤差を区別する必要がある. 本章では, DICM の原理, その数値処理に伴う誤差や理想的な変位及びひずみの分解能について述べる. ゆがみに代表される実験的な誤差等に関しては, 第3章以降に続く各章にて議論する.

2.2 デジタル画像相関法の原理

DICM は, デジタル画像上の任意の画素に着目し, その画素を中心とする部分画像領域 (サブセット) が別の画像ではどの領域にあたるかを相関の評価により探索する手法である. 変形前後の観察画像においてサブセット中心の位置を比較することで, 変形による着目点の変位を得る. このとき, 図 2.1 のように矩形サブセット自身も変形させる. この相関値の評価には相互相関式を基礎とした評価値式(2.1)や自乗ノルムの式(2.2)などがあるが[1-4], どちらの評価値による探索も DICM による計測結果に与える影響は小さい[5,6].

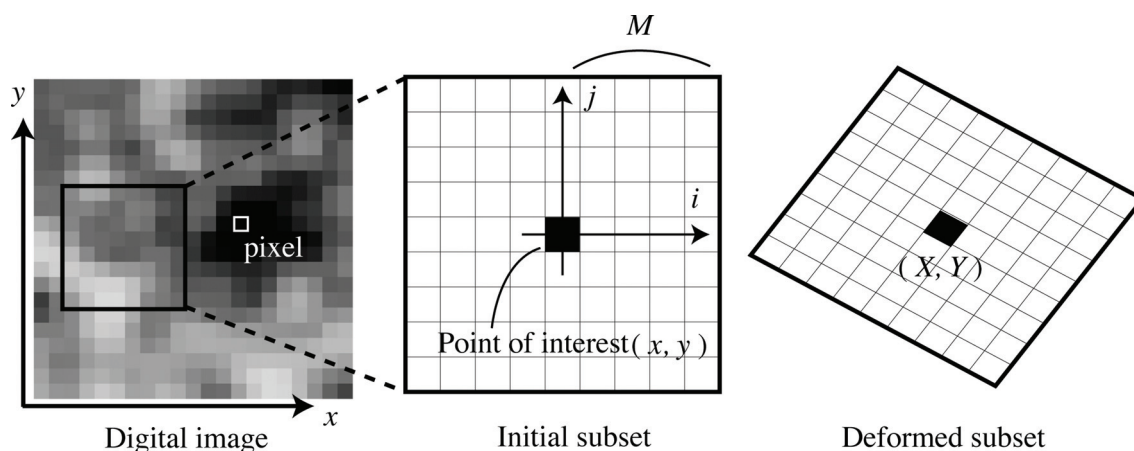


Fig. 2.1 The coordinate system on the digital image and the subset model.

$$C = 1 - \frac{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+i, Y+j) \times I_u(x+i, y+j)}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+i, Y+j)^2 \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(x+i, y+j)^2}} \quad (2.1)$$

$$C = \frac{\left(\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+i, Y+j) - I_u(x+i, y+j) \right)^2}{\sqrt{\sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_d(X+i, Y+j)^2 \times \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M I_u(x+i, y+j)^2}} \quad (2.2)$$

ここで、 (x, y) および (X, Y) はそれぞれ変形前後における着目点の座標、 i, j は着目点を原点とするサブセット内局所座標、 M はサブセット寸法であり、通常の光学手法による観察では I_u, I_d はそれぞれ変形前後のデジタル画像上の輝度値を表す。相関値は常に正の値を取り、値が小さいほど相関が良いため、これを最小とするサブセットを変形後の画像内で探索する。これら相関値は非線形関数であるため、最小値を取る未知変数 (X, Y) の決定には Newton-Raphson (NR) 法[7]を用いた。ただし、NR 法で正しい解を得るには適切な初期推定値が必要となる。そこで、まずサブセットの平行移動のみを考慮した、単純な評価関数を用いた粗探索をおこなうことで1画素単位の変位を概算した。

サブセットの粗探索過程では、残差最小化法[8]を用いて1画素単位の変位を得る。サブセットの相関を表す評価関数には式(2.3)の S 値を利用し、サブセットの変形には平行移動のみを考慮した式(2.4)を定義する。

$$S = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-M}^M |I_d(X+i, Y+j) - I_u(x+i, y+j)| \quad (2.3)$$

$$X = x + u_0, \quad Y = y + v_0 \quad (2.4)$$

この残差 S が最小となるサブセットを初期サブセットと同一のものとみなし、平行移動量 (u_0, v_0) を着目した点の変位とする。

詳細探索においては、サブセットの相関の評価関数には相互相関式をもとに定義した式(2.1)の C 値を利用する。このとき、サブセットの変形は剛体変形及び一様ひずみまで考慮した次式で定義する。

$$X = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j, \quad Y = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} i + \frac{\partial v}{\partial y} j \quad (2.5)$$

ここで、 (u, v) はサブセット中心点の変位を表し、 $(u, v, \partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)$ はいずれもサブセット内で一定かつ独立であるため、評価関数の未知数は全部で6つとなる。詳細探索過程では NR 法を用いて、相関値 C が最小値となるサブセットの変形パラメータ $\mathbf{p} = (u, v, \partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)^T$ を算出する。この NR 法は初期推定値を

起点として収束計算により正解を求める手法である。そこで、粗探索により得られた $\mathbf{p}_c = (u_0, v_0, 0, 0, 0, 0)^T$ が C を最小とする正解 \mathbf{p}_f の近傍に存在すると仮定し、この \mathbf{p}_c を初期推定値とした。相関値 C は極値をとる点において次式を満たす。

$$\frac{\partial C}{\partial p_i} = 0, \quad i = 1 \sim 6 \quad (2.6)$$

また $|\Delta \mathbf{p}^{(k)}| \ll 1$ において Taylor 展開により、次式のような一次近似式が得られる。ただしこの j は総和規約に準ずる。

$$\frac{\partial}{\partial p_i} C(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) \approx \frac{\partial}{\partial p_i} C(\mathbf{p}) + \frac{\partial^2}{\partial p_i \partial p_j} C(\mathbf{p}) \cdot \Delta p_j \quad (2.7)$$

このとき、評価点 $\mathbf{p}^{(k)}$ の近傍に極値をとる点 $\mathbf{p}^{(k+1)}$ が存在するなら、式(2.6)及び式(2.7)より

$$\Delta p_i^{(k)} \approx - \left[\frac{\partial^2}{\partial p_j^{(k)} \partial p_i^{(k)}} C(\mathbf{p}^{(k)}) \right]^{-1} \cdot \frac{\partial}{\partial p_j^{(k)}} C(\mathbf{p}^{(k)}) \quad (2.8)$$

$$p_i^{(k+1)} = p_i^{(k)} + \Delta p_i^{(k)} \quad (2.9)$$

を満たす $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$ が存在する。この $\Delta \mathbf{p}^{(k)}$ は解の修正項であり、 $\mathbf{p}^{(k+1)}$ は $\mathbf{p}^{(k)}$ に比べてより極値に近い点となる。修正項 $\Delta \mathbf{p}$ による解 \mathbf{p} の修正を繰り返すことにより C が極値となる評価点 \mathbf{p}_f が得られる。このとき、初期値 \mathbf{p}_c が適切であれば、 C はこのとき極小かつ最小となる。

2.3 変位の計測分解能

デジタル画像は各画素が有する離散データの集合である。粗探索は画像の有する画素輝度値のみを利用するが、詳細探査では連続的な輝度値分布が必要となるため、画素間での内挿をおこなう。しかしながら、1画素以下の高精度な変位を目的とした場合、画素間での輝度値内挿によるデータの劣化が問題となる[9]。輝度値の内挿により輝度値を表す分布関数の位相が空間的にシフトするため、最終的な DICM の計測変位に見かけの変位が現れる。実際に、図 2.2 に示す画像を基準画像として、変形後画像として数値計算により平行移動させた画像を生成し、変位計測を行った。内挿関数として双三次多項式(2.10)を用いた場合の、 x 軸に沿った平行移動に対する計測変位を図 2.3 中●印で誤差表示した。

$$I(x^*, y^*) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 a_{ij} (x^*)^i (y^*)^j \quad (0 \leq x^* < 1, \quad 0 \leq y^* < 1) \quad (2.10)$$

ここで、 (x^*, y^*) は画素内部の局所的な座標、 a_{ij} は近似関数の係数を表す。1画素以下での変位に対する輝度値分布の内挿によって、見かけの変位による誤差が最大 0.05 pixel 生じている。

Sutton ら[10]は、高次関数による内挿はデータ劣化に関して優れる一方で、コントラストの強い画像のような複雑な輝度値分布に適用した場合には、変位計測結果が低次のものに

比べて精度が低下するとしている。これは強コントラストな画像が有する輝度値分布の高周波成分が計測誤差の主要因であるとし、高次の内挿関数と高周波成分を意図的に減衰させるローパスフィルタを組み合わせた処理が最適な構成であると報告している。本研究では、式(2.8)に必要な輝度値の二階微分まで表現可能かつ最も低次である双三次多項式（式2.10）を用いて輝度値分布を生成し、ローパスフィルタ[11]と組み合わせた。図2.3にフィルタリング後の計測変位特性を○印で追記した。図2.2で対象とした画像では、上記構成で変位誤差が0.003 pixel以下となり、実計測誤差に比して無視できる。

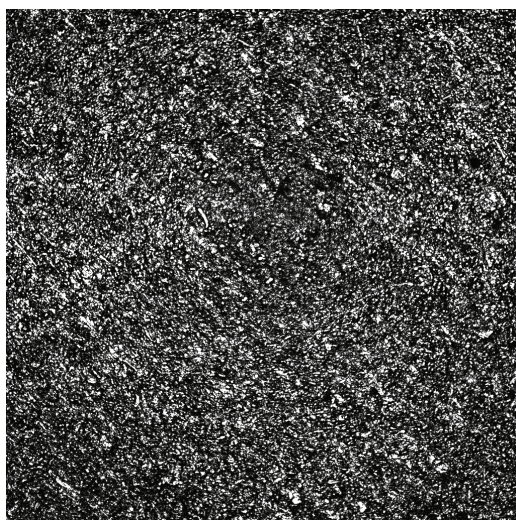


Fig. 2.2 An image applied to numerical simulation (1024 × 1024 pixel).

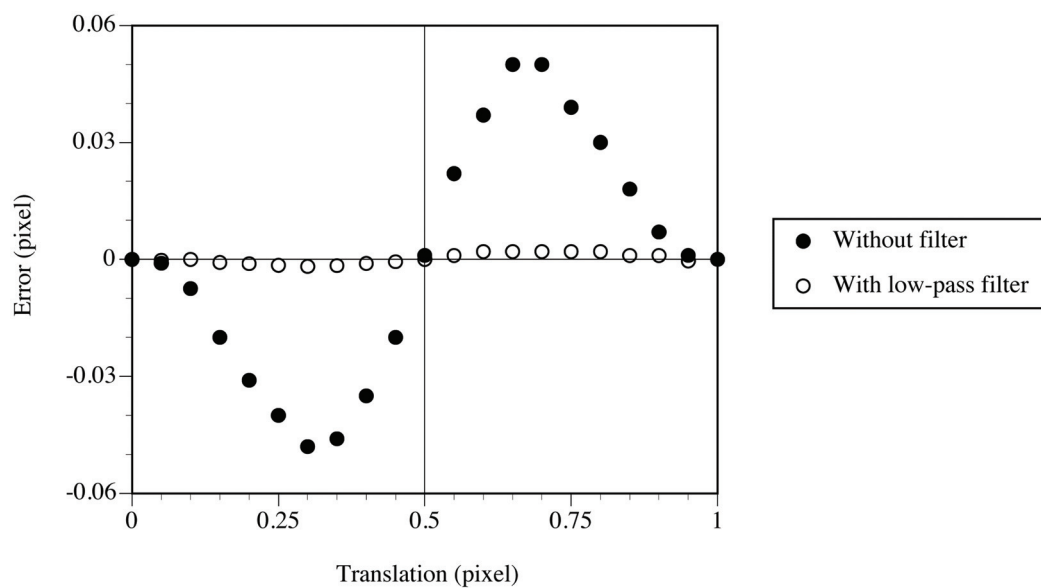


Fig. 2.3 Systematic error for a simulated translation test for bicubic interpolation function.

2.4 ひずみの計測分解能

サブセットの寸法が拡大するとともに外乱の影響は低減し計測精度は安定するが、剛体変形及び一様ひずみまでしか考慮していない1次変形モデルでは、サブセット寸法の拡大にともなって実変形との誤差が大きくなる。実際、1次変形モデルにおいてはサブセット内部の平均値が変位及びひずみの計測値となり、ひずみの分布が急峻な特異場等ではその誤差が問題となる。Suttonら[12]は高次の変形モデルも検討したが、その追従性は対応する次数の変形挙動までに留まり、複雑な変形には対応できない。加えて高次評価関数における未知数の増加による収束計算時のロバスト性の低下を懸念している。そこで、1次変形モデルにどのような平滑効果が現れているか検証した。仮想的な変位分布に対する計測変位分布の減衰挙動を図2.4に示す。図2.4の左図において破線部が仮想的な変位分布を、実線が計測された変位分布を表す。図2.4の右図には、入力値である仮想的な変位分布に対する計測変位の振幅比を感度として示す。変位及びひずみ分布が90%以上の再現性を有するには、サブセットの全長 $L=2M+1$ に対して4倍程度の波長もしくはそれ以上に相当するひずみ分布挙動である場合に限定される。逆に、目的とする構造物の変形における代表長さの約4分の1でサブセット長を定義すると数値誤差10%以下の計測が可能となる、ということになる。以降の各章では目的とする変形の強度に対して適正な M をそれぞれ定義し、全長 L に対して4倍の寸法をひずみの空間分解能とする。また、0.05 (pixel/pixel) 以上の大きなひずみや回転を含んだ変形に対して、ひずみを考慮しない残差最小化法が計測不能となる場合もある。これは変形過程での観察画像を追加し、増分的に変位及びひずみを評価

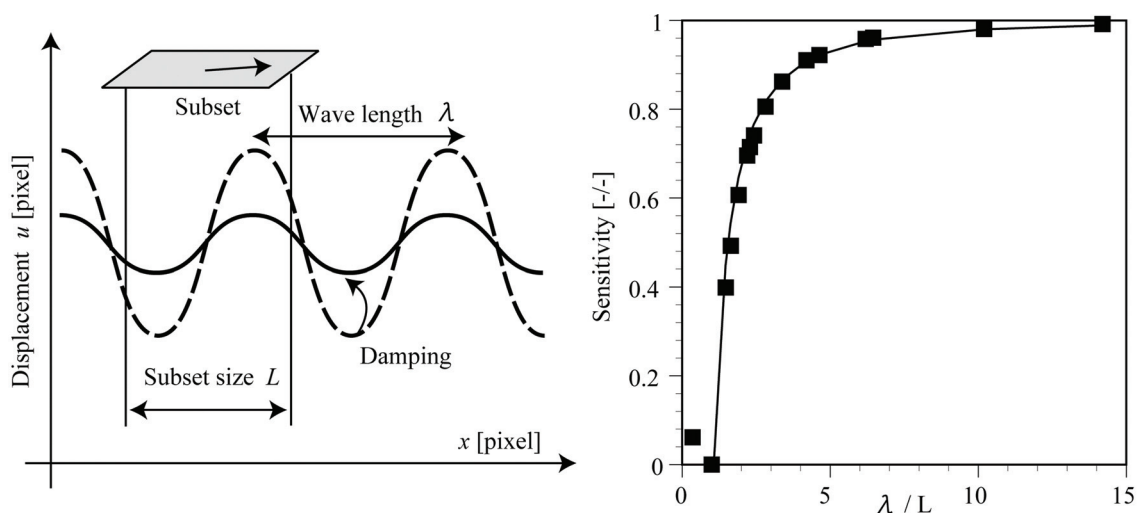


Fig. 2.4 Schematic of the effect of subset length (L) on the attenuation of a sinusoidal function, and the result of sensitivity for displacement and strain against the subset length obtained from the first-order deformation model.

することで目的とするひずみ計測が可能となる。この分割により、各計測区間でのひずみの急峻な変化も低減するため、サブセット長決定の自由度も増す。

一方、詳細探索によって得られた式(2.5)に示すサブセットの変形量は、輝度値に含まれるノイズなどの外乱の影響で、着目点毎に不規則な誤差を含む[13,14]。特に変位の微分に相当する項は精度が悪く、ひずみの評価に直接利用することは適当でない。そこで、DICMにより求めた離散点変位から移動最小自乗法[15] (Moving Least Square Method: MLSM) を用いてひずみ分布を求めた。移動最小自乗法による近似では、有限要素法による内挿と異なり、標本点に拘束されることなく、全領域で平滑化されたひずみの2次元分布を得ることが出来る。この平滑化が適切であれば、誤差を含む計測変位を直接内挿する手法と比べて、より実用的な手法となる。

2.5 移動最小二乗法

DICM で計測される変位は、物体表面での2次元的な離散変位分布 d_i^l である。この計測変位をもとに、移動最小自乗法により滑らかな2次元分布 d_i を構成し、そこから任意の点のひずみを求める。変位 d_i を評価点 (x_0, y_0) において x - y 平面上で一次近似した場合、次式のように表現できる。ただし、 j は総和規約に準ずる。

$$d_i = a_{ij} p_j \quad (i=1 \sim 2, \quad j=1 \sim 3) \quad (2.12)$$

ここで、変位 d_i 、基底 p_j を次式で定義する。

$$\begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}, \quad \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ x \\ y \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

移動最小自乗法が通常 of 最小自乗法と異なる点は、近似の係数 a_{ij} が評価点の座標 (x_0, y_0) に依存している点である。このため、たとえある評価点での変位が一次近似された関数であっても実際の変位は滑らかな曲線となり、変位から導出したひずみも連続的な値が得られる。サンプリング点 (x^l, y^l) における計測変位 d_i^l と近似関数 d_i との自乗ノルム J を次式のように定義する。ただし、 i, n は総和規約に従う。

$$J = w_n \left\{ (d_i - d_i^l)^2 \right\}_n \quad (n=1 \sim N) \quad (2.14)$$

ここで、 w_n は重み関数を表し、 N は重み関数の影響領域内に存在する標本点の個数を表す。この重み関数には次式で定義した関数を採用した。

$$w_n = \frac{\exp\left[-\left(\frac{r_n}{2R}\right)^2\right] - \exp\left[-\left(\frac{1}{2}\right)^2\right]}{1 - \exp\left[-\left(\frac{1}{2}\right)^2\right]}, \quad r_n = \sqrt{(x^I - x_o)^2 + (y^I - y_o)^2} \quad (2.15)$$

この重み関数の影響領域は評価点を中心とする円で定義し、その寸法は影響半径 R に依存する。影響領域の形状を図 2.5 に、重み関数の概形を図 2.6 に示す。

式(2.14)の J を最小とする a_{ij} が、最も確からしい近似を示す係数である。つまり a_{ij} が次式を満足すれば変位の近似関数が求まる。

$$\frac{\partial J}{\partial a_{ij}} = 0 \quad (2.16)$$

式(2.16)を満たす a_{ij} は式(2.12), (2.14)より次式で与えられる。ただし, m, n は総和規約に従う。

$$a_{ij} = \left[w_n (p_m p_j)_n \right]^{-1} \left[w_n (p_m d_i^I)_n \right] \quad (2.17)$$

以上により標本データから連続的な変位分布が求まり、次式を用いることで任意点の微小ひずみが得られる。

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{2\partial y} & \frac{\partial}{2\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

ただし、前述のように広範囲での平滑化はひずみ分布計測の精度低下を招くため、サブセット長と同程度の影響半径を利用することで、過剰な平滑化を回避した。

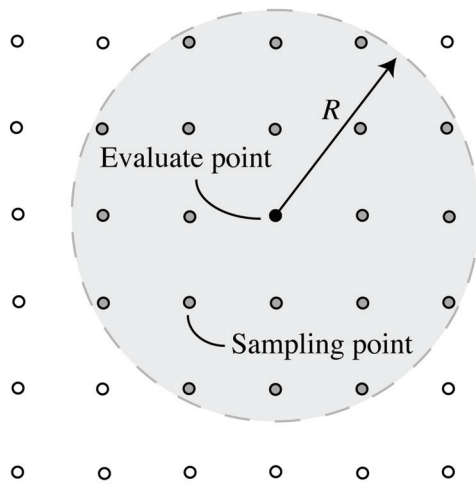


Fig. 2.5 A model of effective region.

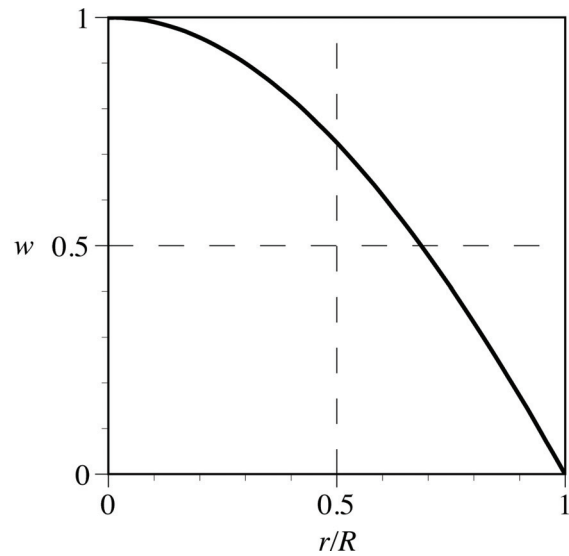


Fig. 2.6 Distribution of the weight function.

2.6 結言

本章では、デジタル画像相関法の原理、その数値処理に伴う誤差や理想的な変位及びひずみの分解能について述べた。残差最小化法と Newton-Raphson 法を組み合わせることで、1画素以下での変位を考慮したサブセット変形の評価が可能となる。このとき、輝度値の内挿には双三次多項式、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る構成とした。また、精度よ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た。

第 2 章の参考文献

- [1] M. A. Sutton, W. J. Wolaters, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeill, “Determination of Displacements using an Improved Digital Image Correlation Method”, *Computer Vision*, pp.133-139, 1983.
- [2] G. Vendroux, W. G. Knauss, “Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation”, *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.2, pp.86-92, 1998.
- [3] Samer Sadek, Magued G. Iskander and Jinyuan Liu, “Accuracy of digital image correlation for measuring deformations in transparent media”, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.17, pp.88-96, 2003.
- [4] C. J. Tay, C. Quan, Y. H. Huang, Y. Fu, “Digital image correlation for whole field out-of-plane displacement measurement using a single camera”, *Optics Communications*, Vol.251, pp.23-36, 2005.
- [5] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, *Numerical Recipes: the Art of Scientific Computing*, Cambridge University Press, pp. 484-485, 1986.
- [6] W. Tong, “An Evaluation of Digital Image Correlation Criteria for Strain Mapping Applications”, *Strain*, Vol.41, pp.167-175, 2005.
- [7] H. A. Bruck, S. R. McNeill, M. A. Sutton and W. H. Peters III, “Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correlation”, *Experimental Mechanics*, Vol.29, pp.261-267, 1989.
- [8] 西川出, 小倉敬二, M. A. Sutton, “デジタル画像相関法による微小変位計測システム — き裂開口変位計測への応用—”, *日本実験力学学会講演論文集*, pp.43-47, 2002.
- [9] B. Jahne, *Practical Handbook on Image processing for Scientific Applications*, CRC Press, pp. 269-281, 1997.
- [10] H. W. Schreier, J. R. Braasch, M. A. Sutton, Systematic errors in digital image correlation caused by intensity interpolation, *Optical Engineering*, Vol. 39, No. 11, pp. 2915-2912, 2000.
- [11] B. Jahne, *Practical Handbook on Image processing for Scientific Applications*, CRC Press, pp. 269-281, 1997.
- [12] H. W. Schreier and M. A. Sutton, “Systematic errors in Digital Image Correlation Due to Undermatched Subset Shape Functions”, *Experimental Mechanics*, Vol. 42, No. 3, pp. 303-310, 2002.
- [13] Zili Sun, J. S. Lyons and Stephen R. McNeill, “Measuring Microscopic Deformation with Digital Image Correlation”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 27, pp. 409-428, 1997.
- [14] Y. C. Chan, K. C. Hung and X. Dai, “Nondestructive defect detection in multilayer ceramic

capacitors using an improved digital speckle correlation method with wavelet packet noise reduction processing”, IEEE Transactions on Advanced Packaging, Vol.23, No.1, pp.80-87, 2000.

- [15] P. Lancaster and K. Salkauskas, Surfaces Generated by Moving Least Squares Methods, Mathematics of Computation, Vol. 37, No. 155, pp. 141-158, 1981.

第3章

微細構造物のひずみ分布計測

3.1 緒言

電子パッケージには金属やセラミックスだけでなく、ガラス繊維強化エポキシ樹脂をはじめ、種々の高分子材料が利用されている。このため、これら材料間での熱膨張ミスマッチに起因する実装時の基板の反り変形が問題となり、有限要素解析による評価が実施されている[1, 2]。しかしながら、高分子材料の材料挙動は温度や時間に依存した複雑なもので、その粘弾性特性のモデル化や物性値取得には未だ解決すべき問題が多く残っている。また、製造プロセスにおける複雑な熱履歴に起因する残留応力はデバイスの信頼性評価でも重要となる[3, 4]が、製造プロセスの全てをシミュレーションに反映させることは困難であるため、最終的な製品に近いデバイスの応力及びひずみを直接計測により評価することは非常に重要である。

上述の実装用積層基板など微細な構造物のひずみ分布評価を実施するため、本研究では光学顕微鏡観察画像にデジタル画像相関法を適用した。ただし、光学顕微鏡による観察画像は光路上のレンズ系の収差や観察窓による屈折、計測対象表面との幾何学配置などの影響を受けてゆがむ。DICMによる計測変位は画像の変形から算出したものであるために、このようなゆがみの内在する画像での計測変位は、実際の物体表面での変位とは必ずしも一致せず、精度の良いひずみ計測が困難となる。観察画像のゆがみを評価及び補正する手法は、画像処理やロボティクスの分野で多く研究がなされ、様々な手法が提案されている[5-8]。ただし、そのリファレンスとして線状やグリッド状に配置されたマーカを有する試料、高精度な繰り返し精度を要求する移動ステージ等を必要とするため、特に顕微鏡観察下ではそれらの準備に労力を要する。

本章では、実験的な簡便さを重視したゆがみの評価手法を開発し、観察画像をゆがみのない理想的な画像に変換することで、DICMによる構造物の変位及びひずみ計測の高精度化を実現した。さらに、開発した画像補正手法を用いて積層基板及び部品内蔵基板の熱ひずみ分布計測を実施した結果を示す。また、チップ内蔵基板では接合部周辺でのひずみ分布を有限要素法の結果と比較し、解析支援手法としてのDICMの有効性を検証する。

3.2 光学顕微鏡観察へのデジタル画像相関法の適用

3.2.1 計測システムの特性

微細な領域での表面像を取込むために図 3.1 に示す観察システムを構築した。ステージ上の試験片表面像はズームレンズを通して CMOS カメラによって撮影され、その画像は IO ボードを通じてパーソナルコンピュータに取込んだ。 CMOS センサのサイズは 2008×2046 pixel であり、撮影時のズームレンズの倍率は光学顕微鏡用スケールで計測したところ $0.625 \mu\text{m}/\text{pixel}$ であった。本節に示す実験では全て、DICM による変位計測の条件をサブセット寸法 $M = 35$ pixel, 評価領域 1600×1600 pixel (= $1\text{mm} \times 1\text{mm}$), 評価点間隔は x 方向 y 方向ともに 20 pixel とした。以上の条件により、まず無変形及び剛体変形前後での変位分布を計測し、構築したシステムの変位分解能を評価した。試料には大きさ $12\text{mm} \times 12\text{mm} \times 6\text{mm}$ のアルミニウム合金の小片を用いた。観察面に対してエメリー紙(#1200)を用いて流水中で研磨した後、インクを塗布して不規則な模様を付与した (図 3.2)。

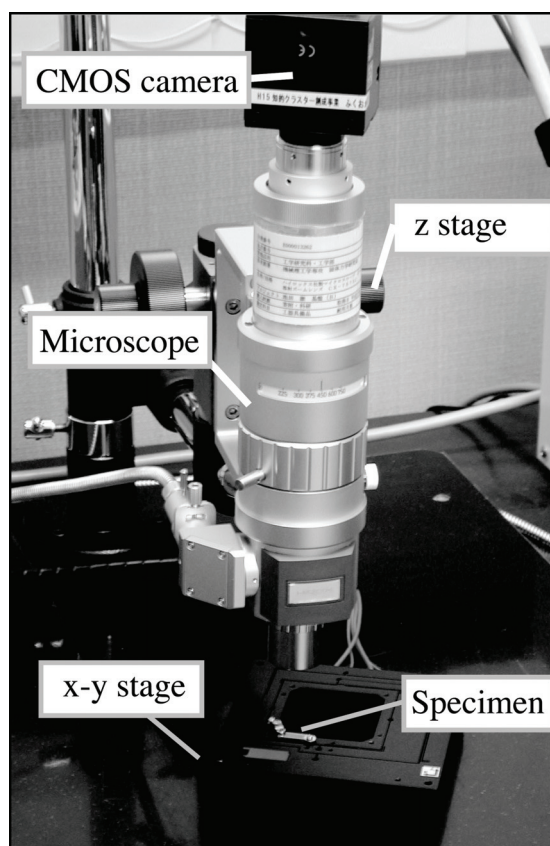


Fig. 3.1 Experimental apparatus for observing a micro-region.

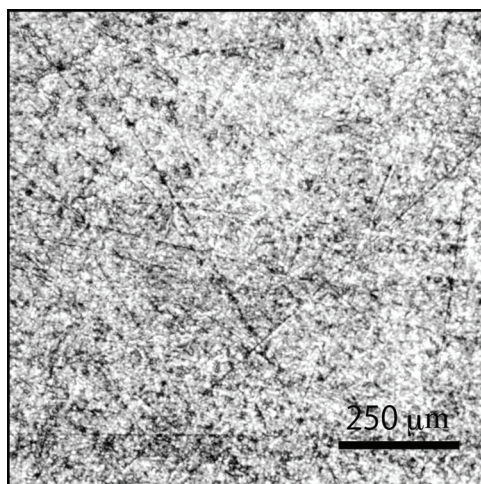


Fig. 3.2 Surface image of the aluminum sprayed with black ink.

まず静止画像を1秒間隔で時系列上連続に撮影し、それぞれ変形前後の画像としてDICMにより変位分布を得た。どの変位分布も第2章で述べた理想的な誤差0.003pixelより大きな、ただし全領域で一様に不規則な分布であった。計測領域内全評価点の変位を累積確率で整理した結果を図3.3に示す。計測変位は正規分布 $N(m_N, \sigma_N)$ が示す累積確率と同様の分布であった。 σ_N は正規分布の分散、 m_N は平均値を表し、ここでは $m_N = 0.053 \text{ pixel}$ 、 $\sigma_N = 0.0033 \text{ pixel}$ であった。CMOSセンサの輝度値サンプリングノイズも同じく正規分布に従うこと(図3.4)から、DICMによる計測変位の誤差の主因子はこの輝度値サンプリングノイズであると推察できる。ただしこの誤差はサブセットの拡大により低減でき、その関係式は経験的に次式で与えられる。

$$\sigma_u \propto \frac{1}{2M+1} \quad (3.1)$$

ここで M は第2章で定義したサブセット寸法、 σ_u は計測変位の標準偏差を表す。実測においては、第2章での述べたサブセット拡大に伴う変形追従性の低下と、式(3.1)でのサブセット拡大による分解能向上との間で最適なサブセット寸法を定義すべきである。また、正規分布に従う集団において、集団全体数の99.7%の標本点が $6\sigma_N$ の幅に含まれる。つまり0.3%を除いた集団での値のばらつきは $6\sigma_N$ である。図3.3の結果において $6\sigma_N$ 値は0.02pixelであり、このような評価値を以後、変位計測の分解能とする。他のDICMを適用した報告では $\pm 0.01 \text{ pixel}$ といった表記も使用されている[9-11]。一方、図3.3での中央値に相当する、変位の平均値は利用する画像組毎に異なる値を示すことから、機械振動及び熱ドリフトによる画像全体の平行移動量と考えられる。これらの外乱は一樣な変位を与えるのみで、ひずみ計測への影響は無視できるため、変位分解能の指標には $6\sigma_N$ のみ考慮する。

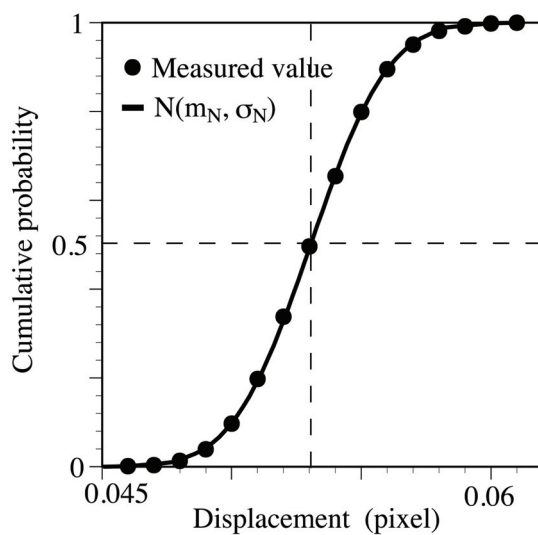


Fig. 3.3 Cumulative probability of the measured displacement by DICM using two consecutive images.

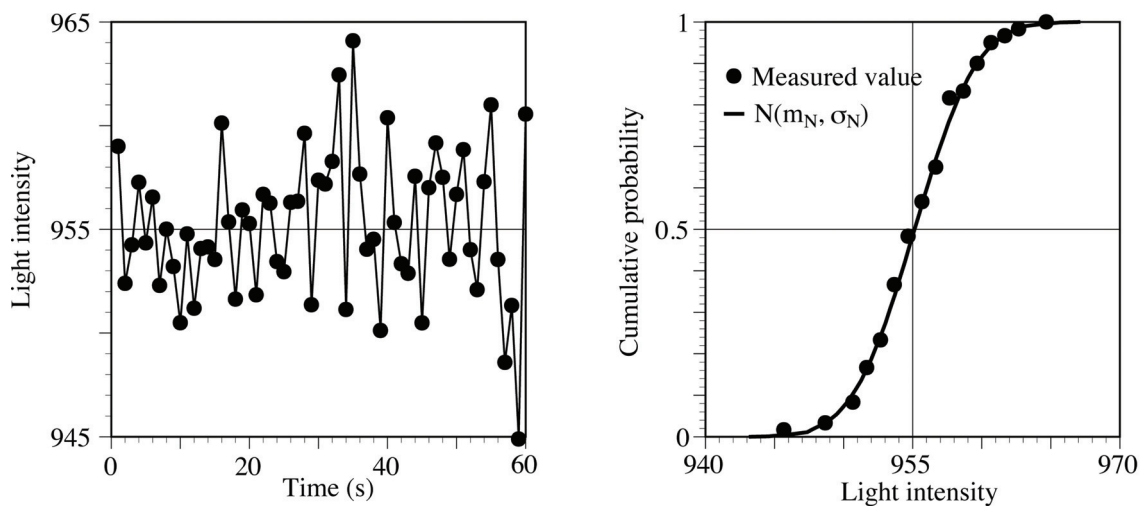


Fig. 3.4 Characteristics of the light intensity sampled on the pixel. Time-dependency (left), Cumulative probability (right). The data length of light intensity is 10 bits.

次に移動ステージによる試料の平行移動前後での変位分布を計測した。移動ステージには変位分解能 2 nm の X-Y ピエゾステージを使用した。移動量 $\mathbf{t} = (t_x, t_y)^T = (-20\mu\text{m}, 20\mu\text{m})^T$ を加える前後の計測変位分布を図 3.5 に示す。平行移動により生成された変位は理想的には全計測領域で一様となるはずだが、実際には一様な変位分布ではなく、画像外周部に近づくにつれて歪んでいる。図中の変位勾配は最大で 0.03% を示し、高精度なひずみ計測の実施を妨げるものである。また、この誤差は計測領域内で滑らかに分布しているため、画像の輝度値のノイズに起因するランダムな誤差とは異なり、目的とする構造物の変形を評価する際に誤差としての判別が困難である。これは画像に内在するゆがみに起因する誤差であり、次項 3.2.2 では全視野に渡って高精度な変位及びひずみ計測をするために開発した画像ゆがみ補正手法について述べる。

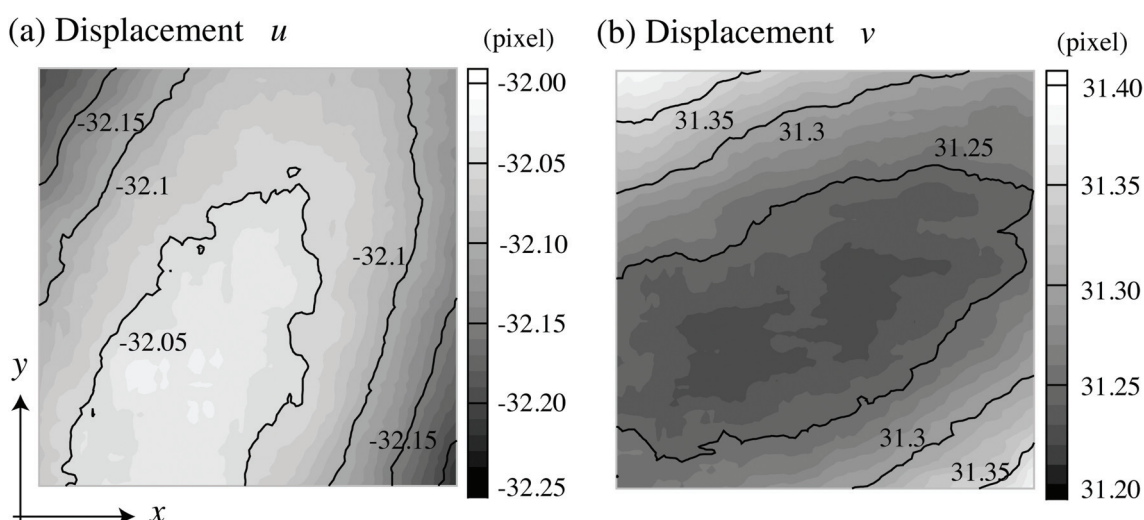


Fig. 3.5 Measured displacement field for the translation of $(-20\mu\text{m}, 20\mu\text{m})$.

3.2.2 画像のゆがみ評価

光学画像はレンズの収差やカメラセンサと対象との幾何学的配置などの影響を受けてゆがむ。レンズの収差によるゆがみ量 \mathbf{D} は図 3.6 中の左図に示す Radial distortion や図 3.6 中の右図に示す Decentering distortionなどを組み合わせて、レンズ毎にそれぞれ次式でモデル化される[5-8]。

$$D_x = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots)x \quad (3.2)$$

$$D_y = (K_1 r^2 + K_2 r^4 + \dots)y$$

$$D_x = (P_1(r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy)(1 + P_3 r^2 + \dots) \quad (3.3)$$

$$D_y = (P_2(r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy)(1 + P_3 r^2 + \dots)$$

ここで r は画像の中心からの距離、 K_i 及び P_i はレンズ固有のパラメータであり、その次数

は目的とする精度に応じて定義する．また，幾何学的な配置には式(3.4)のピンホールカメラモデルに従う射影を仮定し，式(3.5)の一般的な座標変換式を用いて，画像上の座標と物体表面上の座標を関係づける．ピンホールカメラモデルの概念図を図 3.7 に示す．

$$\frac{x_{pro}}{X} = \frac{y_{pro}}{Y} = \frac{z_{pro}}{f} \quad (3.4)$$

$$\begin{bmatrix} x_{pro} \\ y_{pro} \\ z_{pro} \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} x_{re} \\ y_{re} \\ z_{re} \end{bmatrix} + T \quad (3.5)$$

ここで f は焦点距離， X, Y はそれぞれ画像上での x, y 座標， x_{pro}, y_{pro} 及び z_{pro} はピンホール座標系に従う物体上の座標， x_{re}, y_{re} 及び z_{re} は物体座標系に従う物体上の座標である．また， $[R]$ 及び T はそれぞれ座標の回転行列，平行移動を表す．

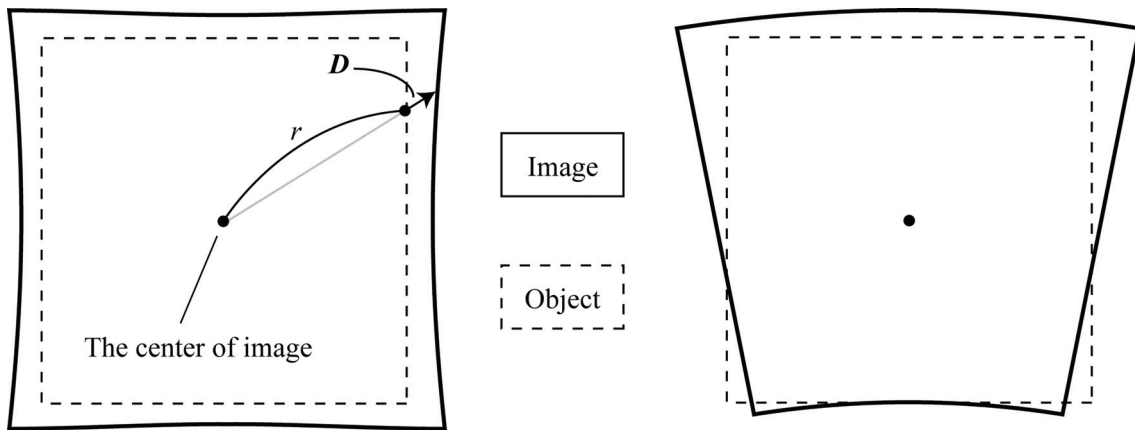


Fig. 3.6 Lens aberration model. Radial distortion (left), decentering distortion (right).

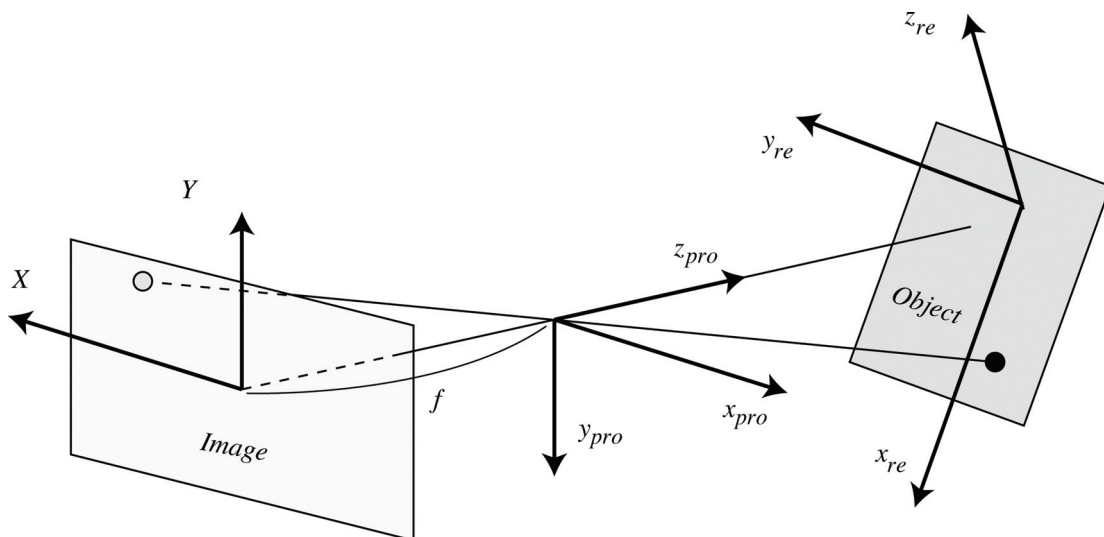


Fig. 3.7 Coordinate system for the pinhole-camera model.

これらを組み合わせることで達成されるゆがみのモデリングは、ズームレンズのような複雑にレンズを組み合わせた光学系では煩雑である。また、陽な形式でのモデリングは DICM においてひずみ計測を実施するには十分な精度ではない、とする報告もある[12].

そこで本研究では、収差を含め画像に加えられるゆがみの影響を包括的に1つの分布関数 D_S で定義し、これを用いた座標変換式を利用することで、画像のゆがみを補正した。ゆがみのない理想的な画像上での座標系と実際に観察される画像上での座標系との関係は次の2式で与えられる。

$$\mathbf{R}_{im} = \mathbf{R}_{id} + D_S \quad (3.6)$$

$$\mathbf{R}_{id} = \Lambda \mathbf{r} \quad (3.7)$$

ここで $\mathbf{R}_{im} = (X_{im}, Y_{im})^T$ はデジタル画像上の座標, $\mathbf{R}_{id} = (X_{id}, Y_{id})^T$ はゆがみのない理想的な画像上の座標, $D_S = (D_{Sx}, D_{Sy})^T$ はゆがみ量を示す. $\mathbf{r} = (x, y)^T$ は物体表面上の座標を表す. Λ は観察のスケーリング項であり次式で定義した。

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 \\ 0 & \lambda_y \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Λ は光学顕微鏡用スケールを観察することにより明らかとなるため、以下では \mathbf{R}_{im} 座標系から \mathbf{R}_{id} 座標系へのゆがみの較正、つまり式(3.6)についてのみ議論する。

式(3.2)においてゆがみのない画像座標系を得るには、観察画像とその画像上でのゆがみ量 D_S の分布が必要となる。本手法ではピエゾステージによる既知の変位量 $\mathbf{t} = (t_x, t_y)^T$ と DICM による計測値 $\mathbf{d} = (u, v)^T$ を比較することで、この値を得た。式(3.6)(3.7)より平行移動 \mathbf{t} の前後における観察画像上の変位 \mathbf{d} は次式で表される。

$$\mathbf{d}(\mathbf{R}_{im}) = \Lambda \mathbf{t} + D_S(\mathbf{R}_{im} + \Lambda \mathbf{t}) - D_S(\mathbf{R}_{im}) \quad (3.9)$$

ゆがみがない状態では、計測変位 \mathbf{d} とスケーリングされた入力変位 $\Lambda \mathbf{t}$ が一致する。このとき、計測された変位場 \mathbf{d} をもとに任意の1点の D_S の値を仮定することで、間隔 Δt 毎に D_S の値が再帰的に求まる。適当な変位場 \mathbf{d} を得るため、次のような手順で観察をおこなった。

図 3.8 の左がその概念図である。基準とする画像 Image-O とピエゾステージにより $(t_x, 0)$ だけ平行移動させた Image-X の2状態の画像を用いる。収差ゆがみの影響が小さいとされる画像中心 $\mathbf{R}_{im} = (X_{im0}, Y_{im0})^T$ で $D_S = (0, 0)$ を仮定し、この点に限り $\mathbf{R}_{im} = \mathbf{R}_{id}$ を満たす。図 3.8 中の点 O に着目すると、DICM による計測変位から移動後の画像における点 O の座標 O' $(X_{im0} + u, Y_{im0} + v)$ が得られる。ピエゾステージの変位は既知であり、実際の物体上における O' の座標 $(X_{im0} + \lambda_x t_x, Y_{im0})$ が求まる。その差が画像上の点 O' におけるゆがみ D_S に相当する。移動後の画像上の点 O' の座標値を基準画像での新たな着目点 A とすれば、同じ画像組における変位場で D_S の値が再帰的に求まる。これを繰り返し、さらに y 方向への変位を与えた画像 Image-Y も組み合わせることで、図 3.8 の右図のように格子点上のゆがみ量 D_S

が得られる。格子点上で得られたゆがみ量 D_S には、輝度値ノイズから生じた不規則な変位の計測誤差が含まれるため、その平滑化および画像全領域での補間を目的として移動最小二乗法 (MLSM) を適用した。図 3.9 にそれぞれ平行移動量を $t_x = 40\mu\text{m}$, $t_y = 40\mu\text{m}$ とした場合に得られたゆがみ分布を示す。このゆがみ分布図より、画像外周部が収縮していることが明らかとなった。

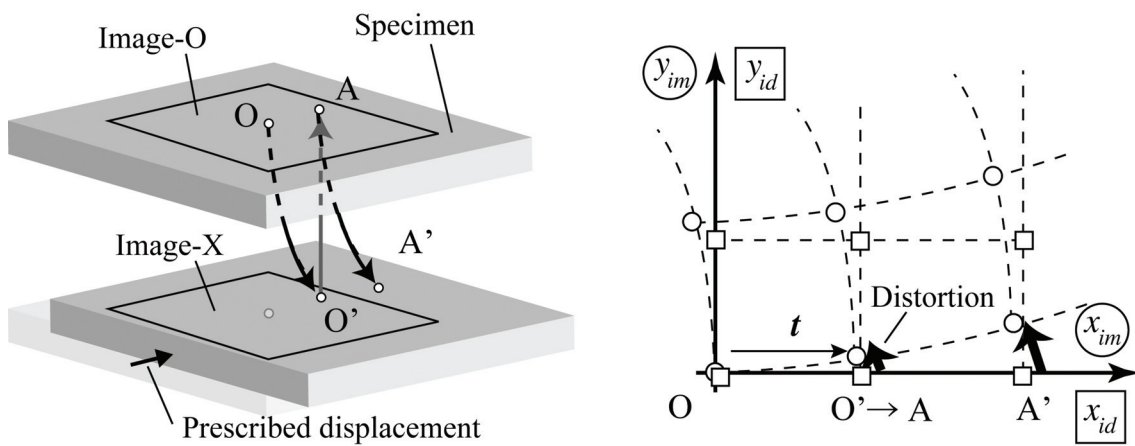
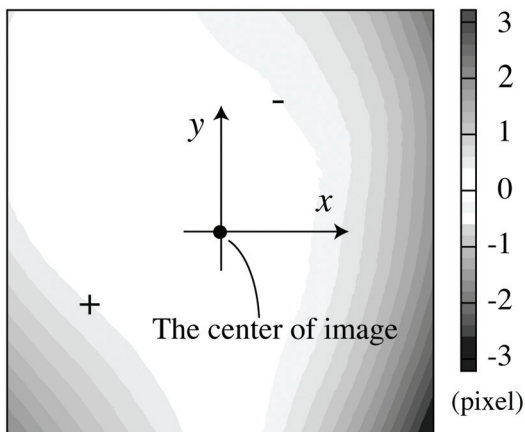


Fig. 3.8 Coordinate system for calibration method.

(a) Image distortion D_{Sx}



(b) Image distortion D_{Sy}

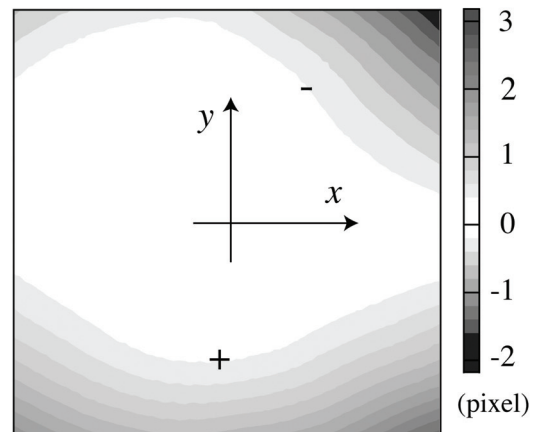


Fig. 3.9 Distributions of image distortion.

3.2.3 画像のゆがみ補正

画像のゆがみに起因する見かけの変位は、式(3.9)より変位量が十分小さな範囲ではその移動量に比例して増大し、外周で大きな見かけのひずみが生じることを表す。図 3.8 のゆがみ分布を用いて、式(3.6)に従いゆがみのない理想画像を生成した。このとき、内挿による画像の再構成が画像品質を劣化させることが懸念されるが、第 2 章で論じたように、ローパスフィルター処理後の画像においてはその影響は軽微である。格子状に分布するゆがみ値からゆがみ場を内挿するには第 2 章で定義した MLSM を、輝度値の内挿には 3 次多項式(2.10)を用いた。図 3.5 の計測変位分布で利用した画像を較正した DICM による変位計測の結果を図 3.10 に示す。画像のゆがみによる影響が排除され、計測領域内で一様な変位が得られていることが判る。また、このときの計測変位は、静止時の理想的な分解能に近い、0.04 pixel に収まる結果であった。

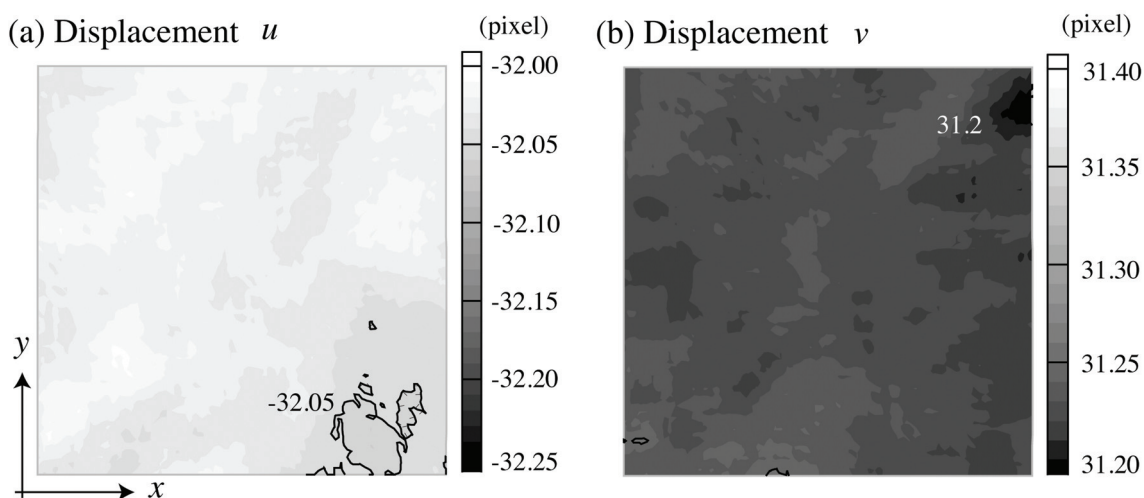


Fig. 3.10 Measured displacement field for the translation of $(-20 \mu\text{m}, 20 \mu\text{m})$ combining with the proposed image correction method.

3.3 微細構造物の熱ひずみ分布計測

3.3.1 実装用積層基板の熱ひずみ分布評価

熱負荷におけるひずみを測定するため、図 3.1 に示す観察システムにおけるピエゾステージに替えて、図 3.11 に示す加熱炉を使用した。試料の固定には弱いバネ押さえを使用し、熱負荷による変形を拘束しないように配慮している。一方で、その拘束が弱いために試料の反りによる大きな変位が生じる。光学顕微鏡下での大きな変位はゆがみによるみかけのひずみを引き起こすため、前節 3.2 で開発した画像補正手法と組み合わせた。試験用サンプルには図 3.12 に示す構造の積層回路基板(Print circuit board: PCB)を用い、熱負荷時の内部ひずみを評価した。

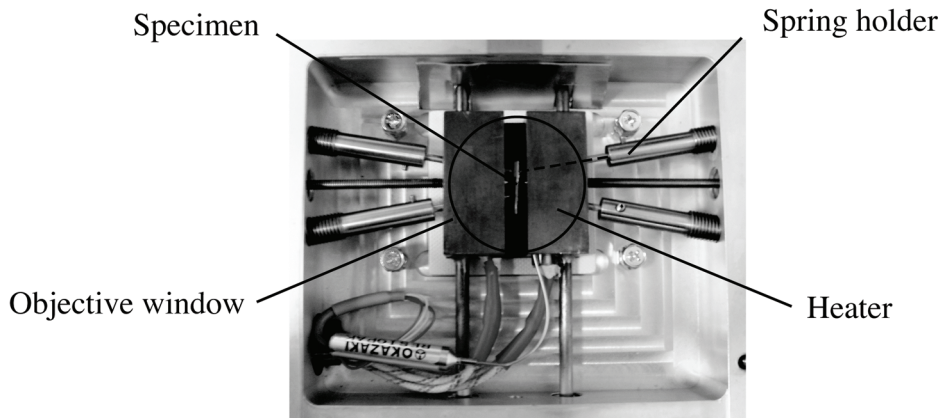


Fig. 3.11 Detailed configuration of the heating stage.

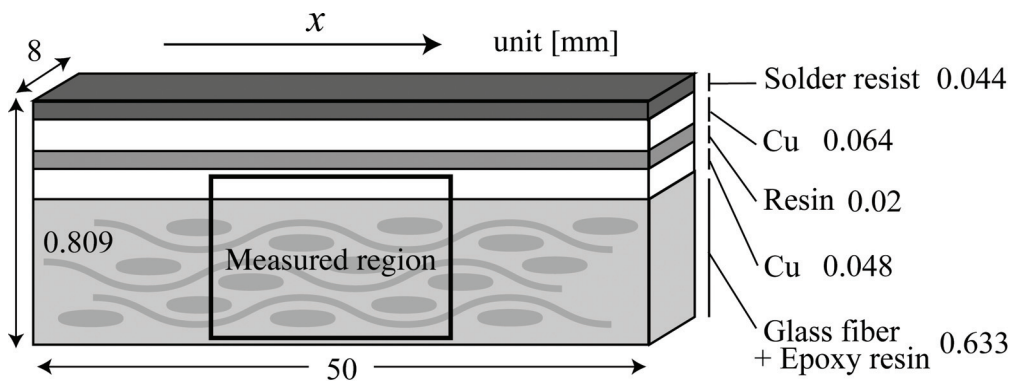


Fig 3.12 Configuration of a print circuit board.

まず、室温で反りを有する試験片に対して、レーザフォーカス変位計を用いて温度を変化させたときの反りを計測した。このとき曲率は、試験片長手方向 (x 軸) に沿って一定であった。曲率の温度変化を図 3.13 に示す。図に示すとおり、初期の温度サイクルとそれ以降のサイクルで、曲率が異なる履歴を示した。これは試験片作成時の残留応力による影響と考えられる。一旦樹脂のガラス転移点 T_G 以上に加熱すると、しばらくは温度に対してただ一つの曲率の履歴を辿る。以降では、簡単のために T_G 以上に一旦加熱した後の状態のみを取り扱った。

図 3.13 上で曲率が零となる温度を応力フリー温度 T_F と定義し、この T_F をひずみ計測の基準温度とした。本実験の場合、 $T_F = 73^\circ\text{C}$ とした。この基準温度から表 3.1 に示す 3 つの温度に加熱して、熱ひずみの測定をおこなった。表 3.1 の温度履歴 **B** において計測されたひずみ分布を図 3.14 に示す。垂直ひずみ ε_y は、繊維同士の接触部でひずみが抑えられているものの、繊維による y 方向の拘束がないために、樹脂部においては ε_x や ε_{xy} に比べてひずみの値が大きい。逆に ε_x や ε_{xy} はひずみが小さく、より複雑な分布を示した。

内部の熱ひずみの分布には、いずれもガラス繊維の配置と同様の周期性が見られた。そこで、ガラス繊維の織物構造がおよそ一周りに当る領域に着目し、位置 y における x 方向の垂直ひずみ ε_x を該当領域で平均した値を評価した。図 3.15 に示すように平均化したひずみ分布は直線性を有するため、一様梁の曲げモデル[13]と同様に変形すると仮定し、線形関数で近似することでマクロな基板の曲率を算出した。各温度履歴で計測されたひずみ分布をもとにして得られた曲率を図 3.16 に示す。ひずみから得られた曲率は、レーザフォーカス変位計によりマクロに計測された曲率と一致していた。一見複雑に分布している基板断面のひずみが、平均的にはマクロな反りと一致していることから、本システムで計測された微小試験片上のひずみ分布は、信頼のおけるものであると考えられる。

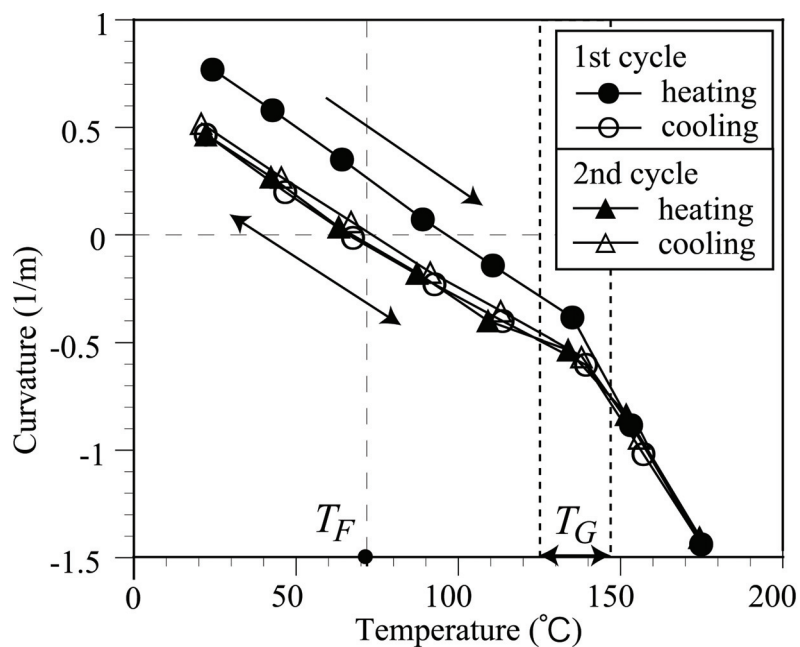


Fig. 3.13 Variation of the curvature of a PCB specimen during thermal cycle test.

Table 3.1 Temperature histories for the DICM measurements of a PCB specimen.

State A	74.3°C	→	19.7°C
	(From stress free temp.)		(To room temp.)
State B	73.4°C	→	138.3°C
	(From stress free temp.)		(To lower T_G .)
State C	73.4°C	→	168.5°C
	(From stress free temp.)		(To higher T_G .)

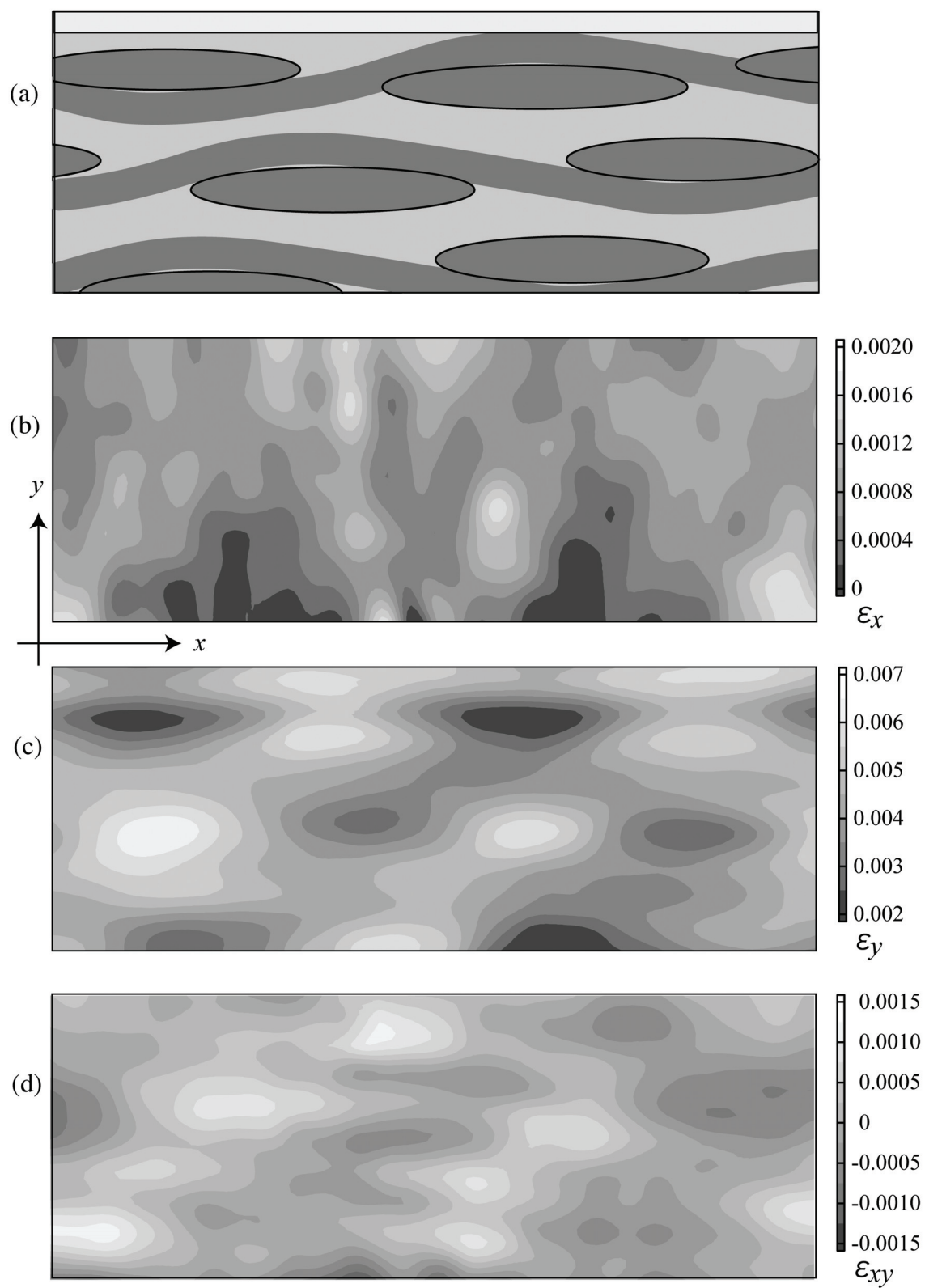


Fig. 3.14 Distributions of measured strain field for state B. (a): schematic of measured region. Figures (b), (c) and (d) represent ϵ_x , ϵ_y and ϵ_{xy} respectively.

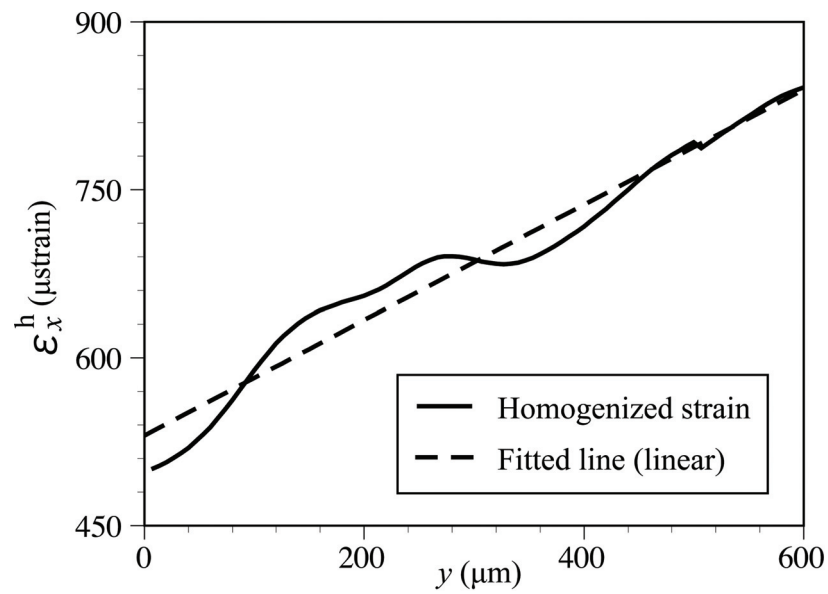


Fig. 3.15 Homogenized strain along y-direction.

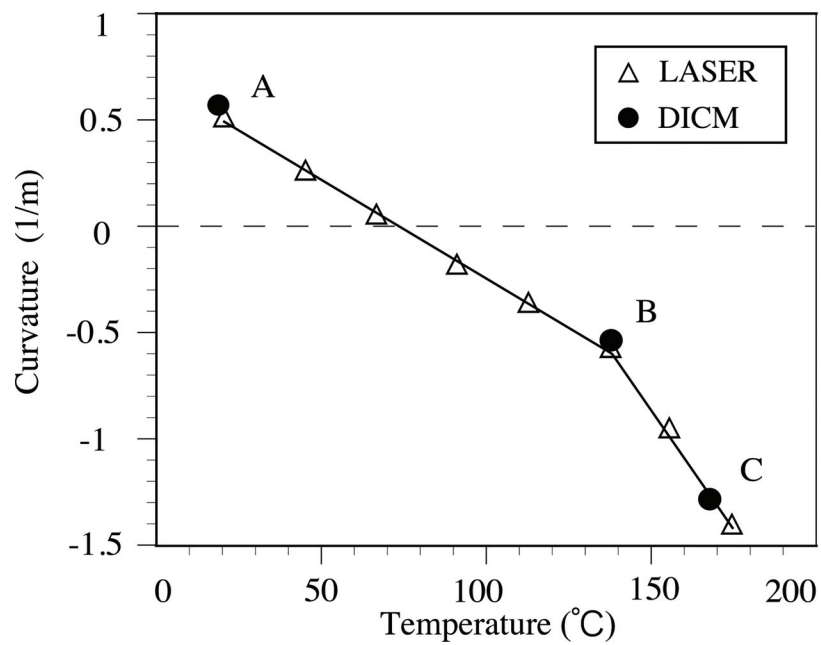


Fig. 3.16 Comparison between curvature measured using the DICM and that measured using a laser displacement meter.

3.3.2 シリコンチップ内蔵基板の接合部周辺ひずみ分布評価

シリコンチップ内蔵基板を対象として、チップ角部周辺における熱負荷時のひずみ分布を計測した。有限要素解析によるひずみ分布の評価も行い、両結果を比較した。試験片の内部構造を図 3.17 に、撮影画像及び計測領域を図 3.18 に示す。室温の 28.4°C を基準状態とし、95.4°C まで昇温した状態のひずみ分布を計測した。有限要素解析では、温度条件を計測時と同じものに設定し、汎用コード ANSYS を用いた線形熱応力解析を図 3.19 に示す 2 次元モデルでおこなった。試験片は観察面が無拘束であることから二次元解析では平面応力を仮定した。解析における物性値には表 3.2 に示すものを用いた。このとき、計測・解析ともにチップ周辺の樹脂 A に関してフィラー充填率の異なる 2 種の試験片を対象とし、その差が計測と解析の結果に与える影響に着目した。DICM の計測により得られたひずみ分布を図 3.20 に、解析によって得られたひずみ分布を図 3.21 に示す。

両図を比較すると、計測結果と解析結果のひずみ分布は定性的には一致していることがわかる。しかし、定量的なひずみの大きさについてみると、界面や端部などの接合部で DICM による計測結果の方が解析結果よりも一桁大きくなっている。前節の検証結果により実構造物に対する DICM 計測の信頼性は証明されている。これは、今回の解析が樹脂のヤング率と線膨張係数に室温のものを用いた線形熱弾性解析であるために、高温でのヤング率の低下や粘弾性効果が考慮されなかったことに起因すると考えられる。また、DICM による計測変位及びひずみがサブセット寸法に依存して平滑化される事実から、界面では計測値以上の更に大きなひずみの集中が現れていると推測できる。本計測手法により、解析が困難な非線形材料よりなる複雑な微小構造物中のひずみを、簡便に測定することが可能となる。

Table 3.2 Material properties of materials in a chip embedded board.

	Young' s Modulus [GPa]	Poisson' s ratio [-]	Coefficient of thermal expansion [1/K]
Cu	25.2	0.343	1.65×10^{-5}
Resin A			
much filler	8.48	0.3	34.8×10^{-6}
less filler	5.30	0.3	70.5×10^{-6}
Resin B	4.00	0.258	4.33×10^{-5}
Resin C	6.40	0.3	5.70×10^{-5}
Resist	3.31	0.3	3.73×10^{-5}
Si	1.12×10^2	0.28	2.49×10^{-6}

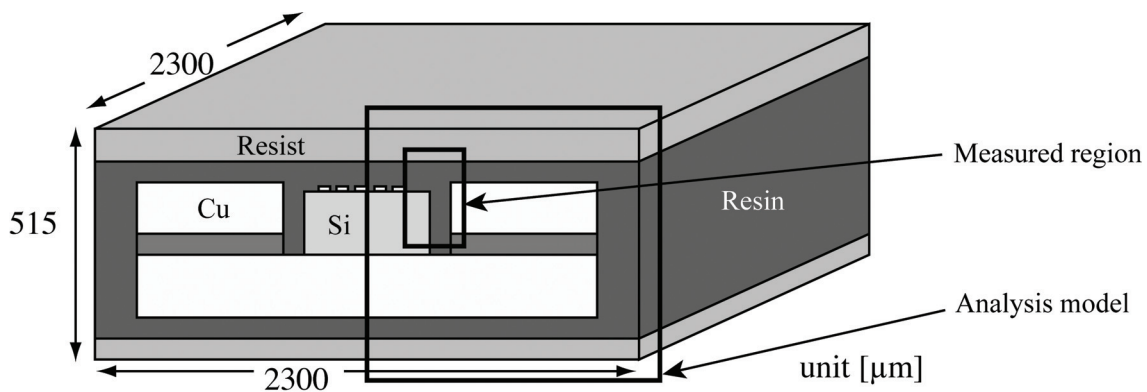


Fig.3.17 Schematic of a chip embedded board.

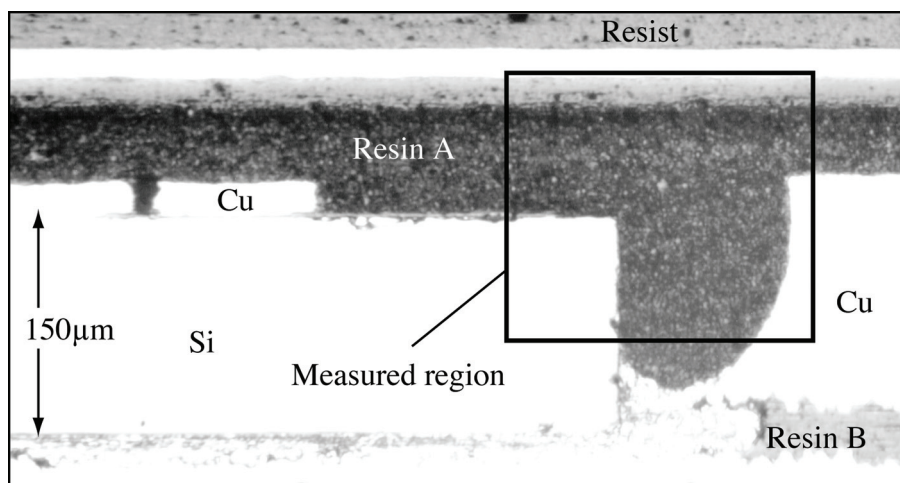


Fig. 3.18 Obtained image and a measured region for the DICM.

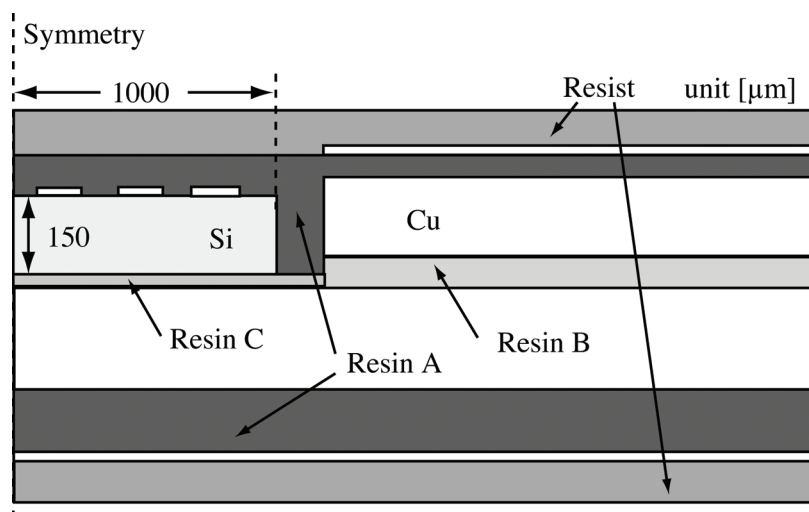


Fig. 3.19 Analysis model for the finite element method.

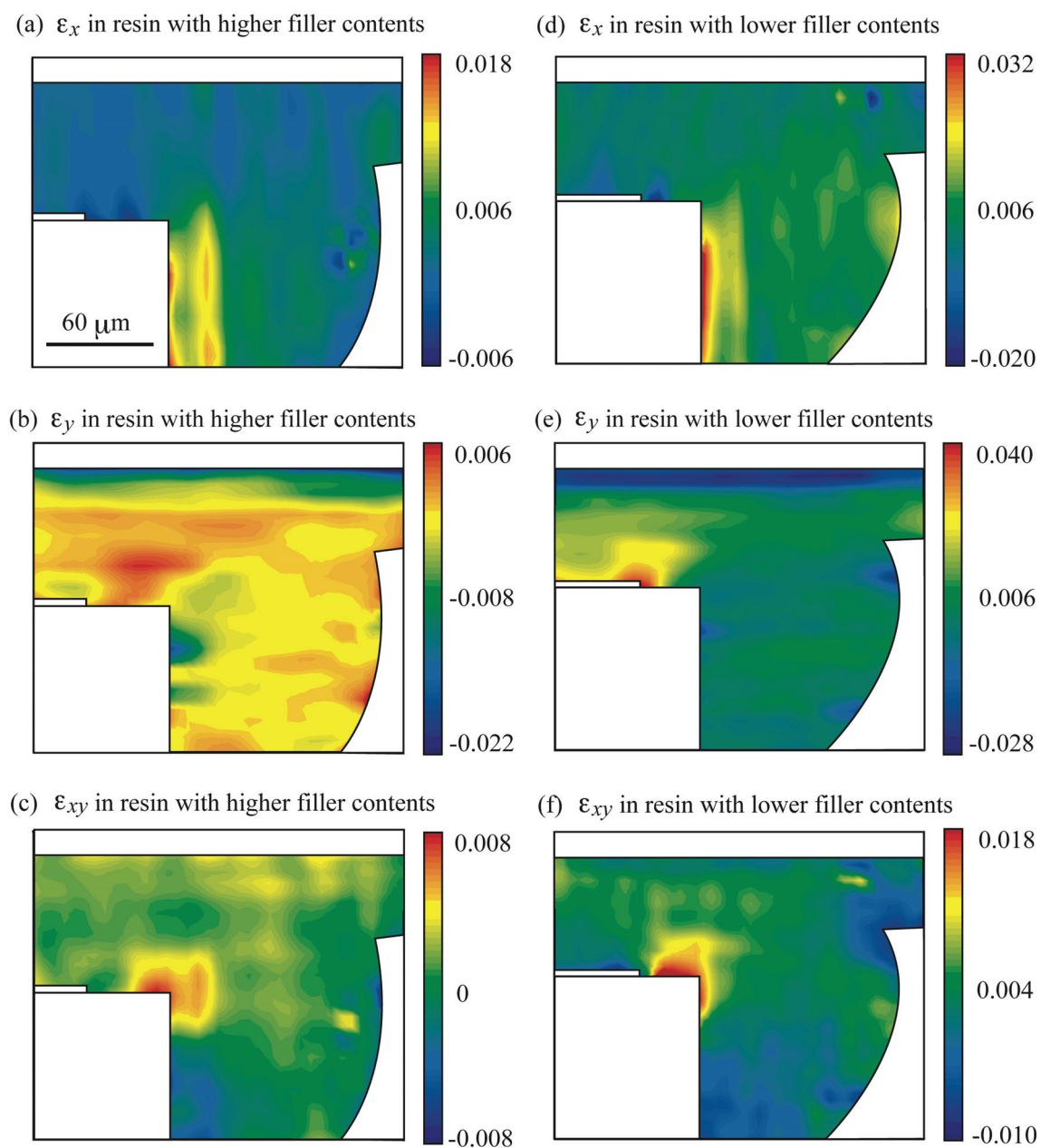


Fig. 3.20 Distributions of strain field around the corner of a Si chip measured by DICM.

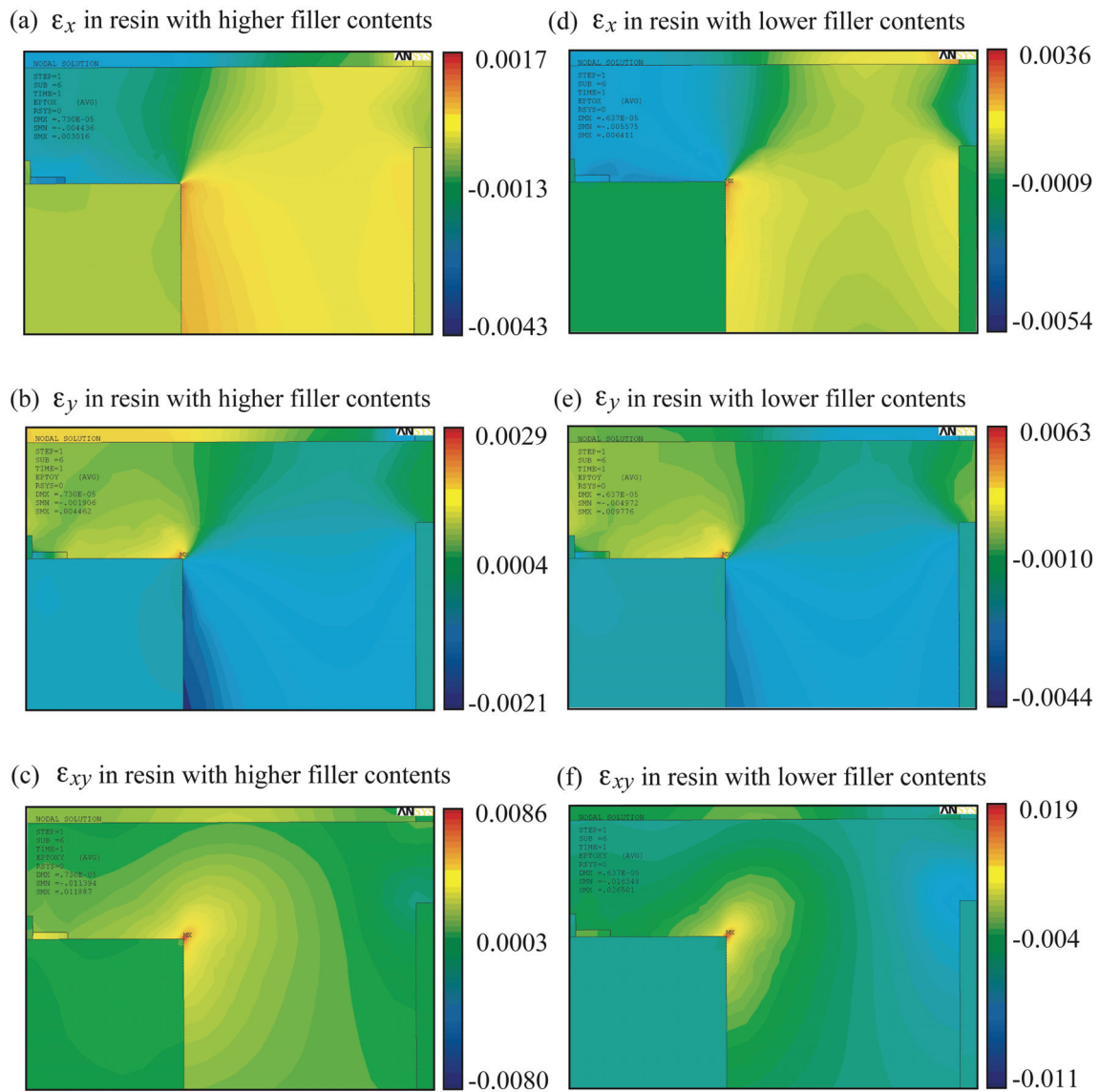


Fig. 3.21 Distributions of strain field around the corner of a Si chip calculated by finite element method under plane stress condition.

3.4 結言

デジタル画像相関法を用いた顕微鏡観察下での変位・ひずみ計測システムを開発し、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開発した。また、本計測システムを用いて、積層基板および部品内蔵基板の熱負荷時のひずみ分布計測をおこなった。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 光学顕微鏡による観察画像には各画素の輝度値に正規分布に従うランダムなノイズが含まれる。これに伴い、DICMによる計測変位も正規分布に従う分布を計測領域内で示した。変位分解能をこの標準偏差 σ_u を基礎とした $6\sigma_u$ で定義したところ、本システムでは $6\sigma_u = 0.02\text{pixel}$ であった。これは他のDICMの適用例と同程度の精度である。
- (2) 全視野における高精度な変位計測をおこなうために、光学系の誤差に起因する画像のゆがみに対する較正手法を開発した。ピエゾステージにより既知変位を与えた3枚の画像を利用してゆがみの較正関数を作成することで、画像のゆがみを修正した。検証のため、修正画像による平行移動前後の変位分布を計測し、その有効性を示した。本手法によって、全視野において $\pm 0.02\text{pixel}$ の変位の分解能が得られた。このときサブセットは $44 \times 44 \mu\text{m}^2$ であったため、ひずみの空間分解能は90%以上の再現性で $180 \mu\text{m}$ である。
- (3) 実構造物の計測では、実際に1 mm以下での領域で計測を行い、複雑な熱ひずみ分布の計測が可能であるか検証した。積層基板を対象とした計測では、複合材内部の構造を反映した複雑なひずみ分布が明らかとなった。また、そのマクロな反りがレーザ変位計による計測と一致していることから、DICMによる計測の信頼性が間接的に証明された。
- (4) 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た。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した。しかし今回の解析は2次元線形熱応力解析であるため、計測結果と定量的な一致は見られなかった。計測結果と定量的に一致する結果を得るためには、樹脂の粘弾性等の非線形材料挙動を考慮した解析を行う必要がある。

第3章の参考文献

- [1] S. Nakamura, Y. Miyano, S. Sugimori, A. Kaneda, "Thermoviscoelastic Analysis of Residual Stresses in a Thermosetting Resin/Metal Laminated Beam Caused by Cooling", *JSME International Journal, Series I*, Vol.31, No.1, pp.126-131, 1988.
- [2] M. Amagai, "Characterization of chip scale packaging materials", *Microelectronics Reliability*, Vol.39, pp.1365-1377, 1999.
- [3] Ming-Yi Tsai, C. H. Jeter Hsu and C. T. Otto Wang, "Investigation of Thermomechanical Behaviors of Flip Chip BGA Packages During Manufacturing Process and Thermal Cycling", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol.27, No.3, pp.568-576, 2004.
- [4] Tohru Nakanishi and Toshihiko Nishio, "Analysis of Optimal Structure by Finite Element Method for CSP/FCA/MCM Mounting on Build-up Board", *Journal of Japan Institute of Electronics Packaging*, Vol.5, No.7, pp.646-653, 2002.
- [5] Luca Lucchese, "Geometric calibration of digital cameras through multi-view rectification", *Image and Vision Computing*, Vol. 23, pp. 517-539, 2005.
- [6] Satoru Yoneyama, Akikazu Kitagawa, Koji Kitamura and Hisao Kikuta, "In-Plane Displacement Measurement Using Digital Image Correlation with Lens Distortion Correction", *JSME International Journal, Series A*, Vol. 49, No. 3, pp. 458-467, 2006.
- [7] Richard I. Hartley, Peter Sturm, "Triangulation", *Computer Vision and Image Understanding*, Vol.68, No.2, pp.146-157, 1997.
- [8] D. C. Brown, "Close-Range Camera Calibration", *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866, 1971.
- [9] M. A. Sutton, W. J. Wolaters, W. H. Peters, W. F. Ranson and S. R. McNeill, "Determination of Displacements using an Improved Digital Image Correlation Method", *Computer Vision*, pp.133-139, 1983.
- [10] Zili Sun, J. S. Lyons and Stephen R. McNeill, "Measuring Microscopic Deformation with Digital Image Correlation", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 27, pp. 409-428, 1997.
- [11] G. Vendroux, W. G. Knauss, "Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation", *Experimental Mechanics*, Vol.38, No.2, pp.86-92, 1998.

- [12] H. W. Schreier, D. Garcia and M. A. Sutton, "Advances in Light Microscope Stereo Vision", *Experimental Mechanics*, Vol. 44, No. 3, pp. 278-289, 2004.
- [13] 柴田俊忍, 大谷隆一, 駒井謙治郎, 井上達夫, "材料力学の基礎", 培風館, pp.61-74, 2002.

第4章

ゴム強化エポキシ樹脂接着継手の破壊強度評価

4.1 緒言

接着継手は航空機や工業用構造物に幅広く使われているが、接着剤層中に存在するき裂の破壊強度が接着構造物の信頼性に大きな影響を及ぼす。延性樹脂接着剤を用いた場合、接着剤層中のき裂の破壊靱性値そのものが、接着剤層厚さに依存することが知られている [1-7]。一般に、接着剤層が十分に厚い場合は、接着継手の破壊靱性値は、接着剤そのものの破壊靱性値に等しい。しかしながら、接着剤層がある程度より薄くなると、接着剤層厚さの減少により破壊靱性値は変化する。そのタイプとして、図 4.1 の破線で示すように、接着剤層厚さの減少とともに破壊靱性値が単調に減少するもの (Type A) と、一旦増加して最大値を示した後、急に破壊靱性値が減少するもの (Type B) の二種類がある。池田ら [7] は接着剤層が薄くなった場合の破壊靱性値の低下は、接着剤層の厚さが減少するとともにき裂先端近傍の応力が増加するためであることを数値解析によって示した。そして、光学顕微鏡を用いて、破壊靱性値が上昇する際には被着材と接着剤の界面において大規模な界面損傷域が発達することを発見した。さらに、この擬似界面損傷を考慮した解析を行うこと

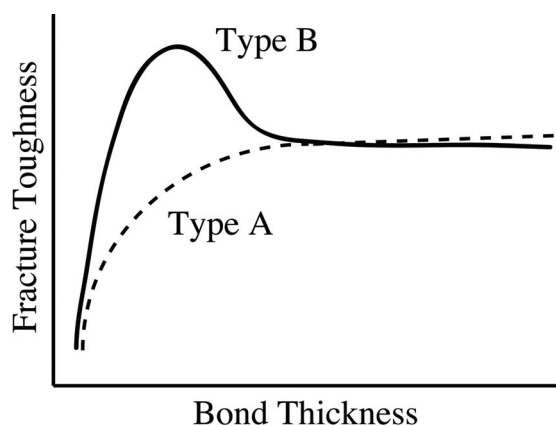


Fig. 4.1 Fracture toughness versus bond thickness curve.

で、接着剤層が薄くなった場合に破壊靱性値が増加する現象を再現した[5]。この界面損傷域が発生する原因は、液状ゴムである Carboxyl terminated butadiene acrylonitrile (CTBN)がエポキシ中に析出する際に、被着材との界面付近では析出粒子が肥大化しているために損傷が発生しやすいためであるとした。

本章では、界面でゴム粒子の肥大化が生じない、固体状ゴムである Nitrile butadiene rubber (NBR) を用いたゴム変成エポキシ樹脂接着継手について、破壊靱性値に対する接着剤層厚さの影響を検討した。また第3章と同様にマイクロビデオスコープとデジタル画像相関法を組み合わせたひずみ計測システムを用いて、接着剤層中のき裂先端近傍のひずみ分布の直接計測を行った。さらに、有限要素法を用いてゴム粒子の損傷を考慮した弾塑性解析を行い、これを計測結果と比較して、き裂先端近傍のひずみ分布に対する接着剤層厚さの影響を検討した。

4.2 破壊靱性値評価

4.2.1 ゴム変成エポキシ樹脂の構成式

本研究で用いるゴム変成エポキシ樹脂では、三軸引張応力が負荷されることでゴム粒子中にキャビテーションが発生する。図4.2はNBR強化エポキシ樹脂のき裂先端近傍損傷域をTransmission Electron Microscopy (TEM)により観察した写真である。試料のゴム成分はOsO₄ (四酸化オスミウム)を用いて染色した。ゴム粒子の添加によりエポキシ樹脂が高靱化するのには、このキャビテーションの発生によるエネルギー散逸に起因することが知られている[8-10]。ゴムの弾性率は、エポキシ樹脂に比べ非常に小さいため、一旦キャビテーションが発生し、一気に膨張すると、その部分は単なる空孔として振る舞うと考えられる。そこで、ゴム変成エポキシ樹脂の降伏現象を再現するにあたって、Gursonモデルを用いた。Gursonモデル[11]はMisesの降伏条件を多孔質材料に対して適用するために、材料中のボイドの生成、成長、合体を考慮したモデルであり、降伏条件式は次式で示される。

$$F = \left(\frac{\sigma^*}{\sigma_0} \right)^2 + 2f \cosh \left(\frac{\sigma_{kk}}{2\sigma_0} \right) - (1 + f^2) = 0 \quad (4.1)$$

ここで、 f はボイド体積比、 σ^* はMisesの相当応力、 σ_0 は定数、 σ_{kk} は三軸応力である。ボイド体積比 f が0のときには、上式はMisesの降伏条件に一致し、 σ_0 は単軸の降伏応力となる。ボイド体積比の増加速度は、既に存在するボイドの成長と新しいボイドの発生の和で表される。

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{growth}} + \dot{f}_{\text{nucleation}} \quad (4.2)$$

ボイドの成長は、ボイドを囲む母材の非圧縮性をもとに次式で計算される。

$$\dot{f}_{\text{growth}} = (1-f)\dot{\epsilon}_{kk}^p \quad (4.3)$$

ゴム粒子内のキャビテーションを Gurson モデルにおけるボイドとして取り扱った。図 4.2 のように、キャビテーションはゴム粒子一個中に一つ発生し、それらの発生/合体は無いことから、解析においてはキャビテーションの成長のみを考えた。

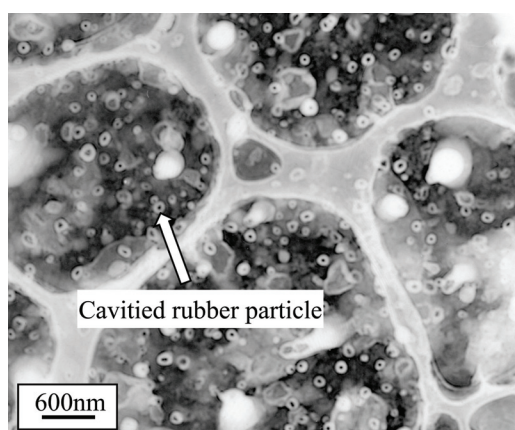


Fig. 4.2 Cavitations in damaged rubber modified epoxy resin observed by TEM.

4.2.2 ゴム変成エポキシ樹脂接着剤の作成

本研究に用いたゴム変成エポキシ樹脂の母材は、ビスフェノール A 型液状エポキシ樹脂（長瀬産業（株））である。添加物として固体状の NBR を用いたが、NBR 単体ではエポキシ樹脂中に一様に分散しないため、NBR の Methyl Ethyl Ketone (MEK) 溶液 (JSR (株)) を用いた。この溶液中の NBR と MEK の重量割合はそれぞれ 15wt%, 85wt%となっている。硬化剤としては変性脂肪族ポリアミン（長瀬産業（株））を使用した。ゴム変成エポキシ樹脂は、まずエポキシ樹脂に NBR の Methyl Ethyl Ketone (MEK) 溶液を同量混合、攪拌した。その後、温度を上昇させながら真空ポンプを用いて溶液中の MEK を脱泡した。MEK を除去した溶液に硬化剤をエポキシ樹脂 100 g に対して 5 g の割合で加え脱泡した。以上によりエポキシ樹脂 83.3 wt%, NBR 12.5 wt%, 硬化剤 4.2 wt%となるゴム変成エポキシ樹脂を作成した。

Gurson モデルを用いる上で、そのパラメータである初期ボイド体積比 f_0 を決定する必要がある。ゴム変成エポキシ樹脂は、圧縮応力下ではゴムの非圧縮性のため三軸応力の影響は小さく、Mises 材として振る舞うと考えられる。一方、引張応力下では三軸引張応力の影響を受け、ゴム粒子内部にボイドが発生し、降伏応力が低下する。そこで、ゴム変成エポキシ樹脂の引張試験を行い、その降伏応力 σ_y が、圧縮試験での降伏応力 σ_0 よりも低下することを確認し、解析においてその現象を再現できるように初期ボイド体積比 f_0 の値を決定した。解析には、三次元モデルおよび、二次元で平面ひずみ状態を仮定したモデルを用い

た. 直方体試験片の圧縮試験, 平滑板の引張試験および三次元 Gurson モデルでの応力-ひずみ線図を図 4.3 に示す. 求めた初期ボイド体積比およびゴム変成エポキシ樹脂の材料定数を表 4.1 に示す. ここで, $f_0 = 0.30, 0.35$ という値は, 実際のゴム粒子の体積含有率より大きい. ここでは, f_0 は現実のボイド体積比というよりも, 降伏関数のフィッティングパラメータとして取り扱った. 実際の解析には, 汎用有限要素法ソフトウェアの MSC MarcTM を用い, Updated Lagrange 法により弾塑性大変形解析を行った.

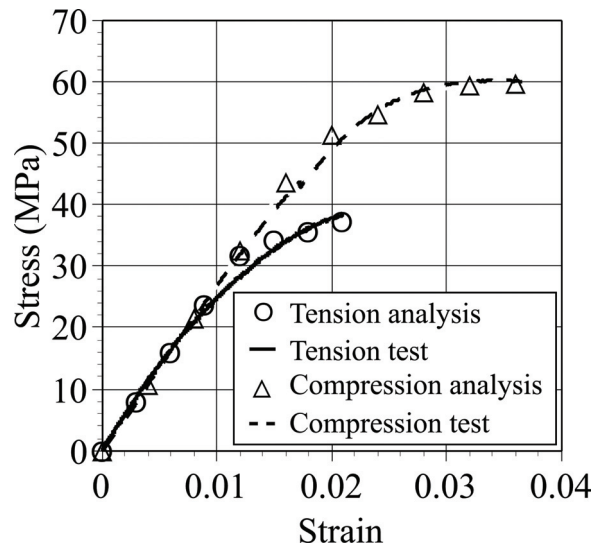


Fig. 4.3 Stress-strain curves for tensile and compression tests (Three-dimensional analyses).

Table 4.1 Material properties of the rubber modified epoxy resin.

E (GPa)	ν	σ_y (MPa)	σ_0 (MPa)	f_0	
				3D	2D
2.68	0.37	39.4	59.0	0.30	0.35

4.2.3 接着継手の破壊試験

本実験で用いた試験片は図 4.4 に示されるような, CT 型の三層接着継手である. 被着材であるアルミニウムについては, ゴム変成エポキシ樹脂との接着力を高めるためにあらかじめ表面処理[12, 13]を行った. その方法として, まず表面を耐水研磨紙 (#400) により流水中で研磨し, アセトンを用いて脱脂した後, 30 分間熱湯 (70~90°C) 中に浸け洗浄を行った. 次に硫酸鉄 ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) 62.5g, 硫酸 (H_2SO_4) 100ml を精製水 500ml 中に溶解させて, 60°C に加熱した溶液中に浸け (P2 エッチング), 10 分間保持した後, 取り出して洗浄, 乾燥させた. さらに 3-グリシジルオキシプロピルトリメトキシシラン ($\text{C}_9\text{H}_{20}\text{O}_5\text{Si}$) 5g を精製水 250ml 中に加水分解が完了するまで 60 分間攪拌させ溶解させた溶液 (シランカップリン

グ溶液) 中に浸け 10 分間保持した。最後に 100 度で 30 分間乾燥させた。

以上のように表面処理を行った 2 片のアルミニウムについて、厚さ 0.3mm のカミソリ刃とスペーサーを用いて隙間を任意の間隔に調整し、金型に固定した。その後、隙間に樹脂を流し込み 120°C で 16 時間硬化させ接着継手試験片を作成した。比較のため、図 4.5 に示すようなゴム変成エポキシ樹脂単体の CT 試験片も作成した。以後、これを Bulk 材と呼ぶ。

接着継手中のき裂については、硬化前に挿入しておいたカミソリ刃を硬化後にゆっくりと抜き取ることで導入した。一方 Bulk 材については、試験片の中央部分に厚さ 1mm のメタルソーでノッチを機械加工し、その先端にカッターナイフの刃を一回だけ滑らすことで導入した。樹脂材料の場合、金属のように疲労き裂進展させても十分に鋭いき裂が得られないため上記のような手法で初期き裂を導入した。各試験片について万能引張り試験機 (INSTRON 社製) を用い、モード I 荷重による破壊試験を行った。試験は、室温(20°C)下で、変位速度を 0.5mm/min として実施した。

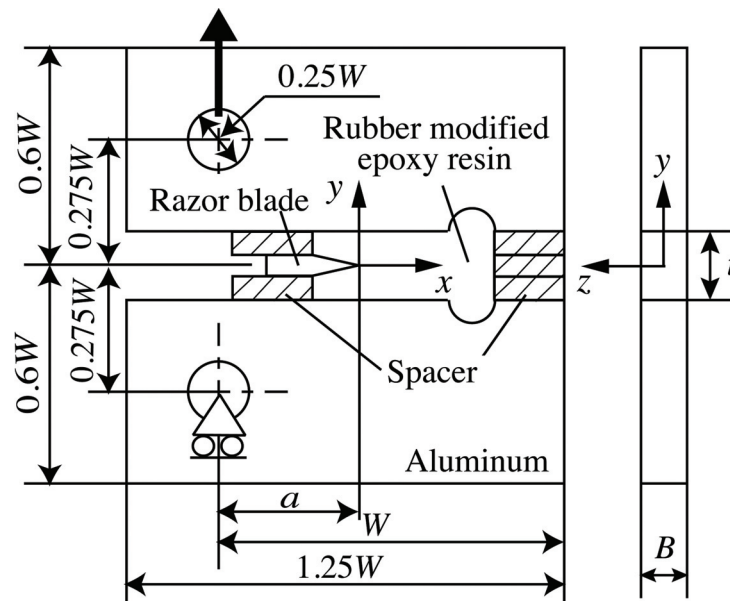


Fig. 4.4 A compact tension (CT) adhesive joint specimen ($W=48\text{mm}$, $B=8\text{mm}$, $a/W=0.5$).

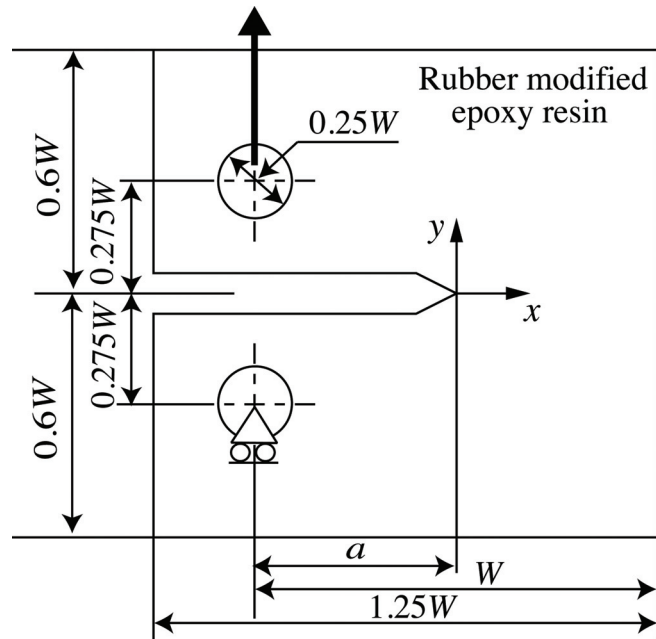


Fig. 4.5 A CT specimen of bulk epoxy resin ($W=48\text{mm}$, Thickness = 8mm , $a/W=0.5$).

4.2.4 破壊靱性値の算出

破壊試験により得られた、各試験片での荷重変位曲線の例を図 4.6 に示す。この図において、荷重変位曲線は最大値をとる少し前に直線から外れている。実際には、荷重が最大値をとる少し前に数百 μm の安定き裂進展を経て脆性破壊にいたった。したがって、厳密には J - R カーブを作成して、き裂進展開始の J_{IC} を評価するのが規格に即している。しかしながら、脆性破壊にいたる前の定常き裂進展距離が非常に短いことから、便宜的に最大荷重 (P_{\max}) 時の J 値をもって破壊靱性値とした。このため、厳密に求めた J_{IC} と区別するために $J_{P_{\max}}$ と記述した。実際には、有限要素法を用いた二次元平面ひずみ解析において、仮想き裂進展法により $J_{P_{\max}}$ を算出した (仮想き裂進展法及び有限要素解析についての詳細は付録 A で述べる)。表 4.2 に用いたアルミニウムの材料定数を示す。図 4.7 に各試験片での $J_{P_{\max}}$ を示す。図より、接着剤層が十分に厚い場合は、接着継手の破壊靱性値は Bulk 材の破壊靱性値に一致する。一方、接着剤層が薄くなるにつれ、破壊靱性値が Bulk 材の値から、次第に低下することがわかった。これは図 4.1 の Type A の傾向を示しており、Type B の傾向を示した CTBN の場合[4, 5]と明らかに異なっている。この結果は、液状ゴムである CTBN を用いたゴム変成エポキシ樹脂接着継手では、接着剤と被着材の界面で肥大化したゴム粒子によって大規模な界面損傷域が発生したのに対して、ゴム粒子の肥大化が起こらない、固体状ゴムである NBR を用いたゴム変成エポキシ樹脂による接着継手では、界面損傷域の発達が悪いために応力遮蔽効果が十分ではなく、接着剤層厚さによって破壊靱性値の極大化が発生しないことを示唆している。

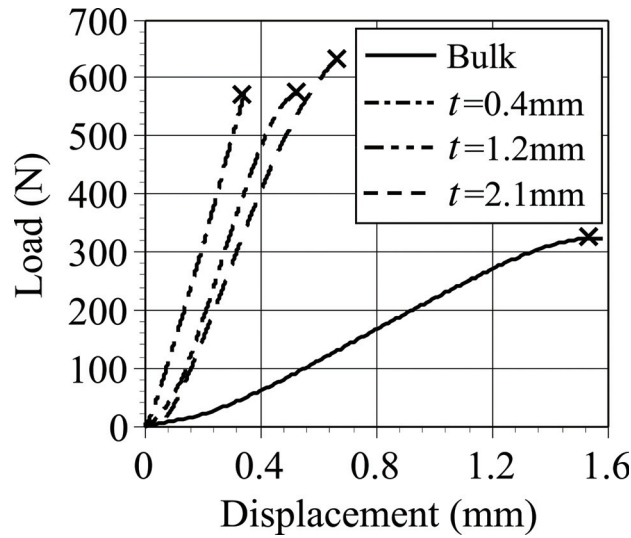


Fig. 4.6 Load-displacement curve for each specimen.

Table 4.2 Material properties of the aluminum.

E (GPa)	ν	σ_0 (MPa)
73.2	0.33	75.0

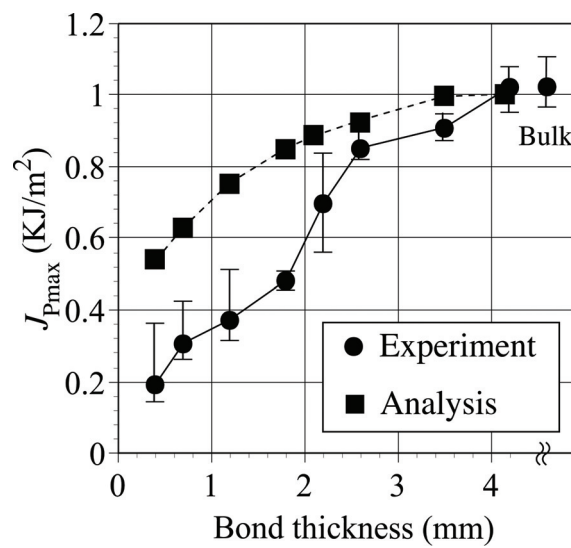


Fig. 4.7 Fracture toughness versus bond thickness curves obtained by the experiment and the analysis.

4.2.5 破壊靱性値の推定

Gurson モデルを用いた二次元平面ひずみ弾塑性大変形解析により Bulk 材および接着継手中のき裂近傍の損傷解析を行い，破壊靱性値を推定した．図 4.8 に，次式で示される累積損傷 S が，Bulk 材破壊時の値 ($=9.98 \times 10^{-2} \text{ mm}$ ，破壊の基準値) と等しくなったときの x 軸上のボイド体積比 f を示す．このときの J 積分値を破壊靱性値とした．

$$S = \int_0^{l_c} (f - f_0) dx \quad (4.4)$$

ここで， l_c は Bulk 材破壊時の損傷域長さ ($=0.75 \text{ mm}$) である．式(4.4)により推定した破壊靱性値を図 4.7 において ■ で示す．図より接着剤層が薄くなるにつれてより低い J 積分値でき裂先端の損傷が広がり，破壊靱性値が低下することが推定された．これは破壊試験結果と定性的に一致する．

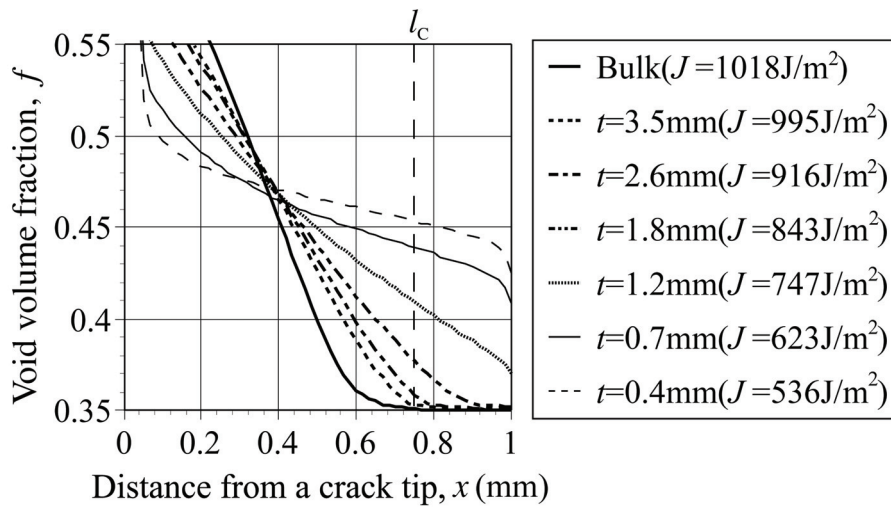


Fig. 4.8 Distribution of void volume fraction ahead of a crack tip.

4.3 接着剤層中のひずみ分布評価

4.3.1 デジタル画像相関法を用いたき裂先端ひずみ分布計測

本研究で用いた固体状ゴム粒子は直径が可視光の波長よりも短いため、光学顕微鏡を用いて直接損傷域の観察を行うことはできない。そこで、前章と同様にマイクロビデオスコープを用いたデジタル画像相関法 (DICM) システムを使用して、き裂先端近傍のひずみ場測定を実施し、間接的に損傷域の観察とした。図 4.9 にシステムの概要を示す。CT 型接着継手試験片および Bulk 材 CT 試験片について、そのき裂周りの表面領域を対象とし、マイクロビデオスコープを通して CMOS カメラ (2008 × 2046 画素) により撮影した。図 4.10 に撮影画像の例を示す。ここで、DICM のサブセット探索を行い易くするためにあらかじめ試験片表面に白と黒のスプレーを用いて模様をつけた。また、撮影画像全域でなく図中の白枠で囲まれる範囲に対して DICM を適用し、その領域内の離散点での変位を算出した。得られた離散点変位から移動最小自乗法 (MLSM) により任意の点のひずみを求めた。ここで、ゴム変成エポキシ樹脂の変形挙動は塑性、大変形を含むため、初期状態と破壊直前の画像とでは相関を取るのが困難である。そのため非線形変形領域で撮影画像間の変形が線形近似できるように、破壊直前まで段階的に撮影を行った。そして各区間でひずみを算出し、き裂先端を原点とした座標上で増分的にたし合わせることで、各撮影時のひずみ分布を得た。

図 4.11 に計測時の荷重変位曲線を示す。図 4.12~4.15 に Bulk 材 CT 試験片および各接着剤層厚さの CT 型接着継手試験片における、DICM を用いたひずみ計測結果 (ϵ_{yy}) を示す。各分布図の下に 4.2.4 項で述べた方法で算出した J 積分値を示している。また、図 4.11 中の (i) ~ (iii) でのひずみ分布が図 4.12~4.15 中の (i) ~ (iii) に対応している。図より、すべて試験片において荷重の増加に伴い、 x 軸に沿って大きな値が分布するようになる。一方、接着継手では被着材と接着剤の界面付近に大きなひずみ場が生じる。さらに図 4.13~4.15 より、接着剤層が薄くなるにつれ、より低い J 積分値でき裂先端近傍のひずみが増大することが分かる。これは、接着層が薄くなるにつれ、より低い J 積分値でき裂先端近傍のボイド体積比が増大して損傷が広がる結果 (図 4.8) と一致している。つまり、接着剤層を薄くするほど、被着材の拘束効果が強くなり、プロセスゾーン付近の応力が上昇し、損傷が発達し易くなる。そのため、図 4.7 で示したように接着剤層が薄くなるにつれ、破壊靱性値は低下したものと考えられる。

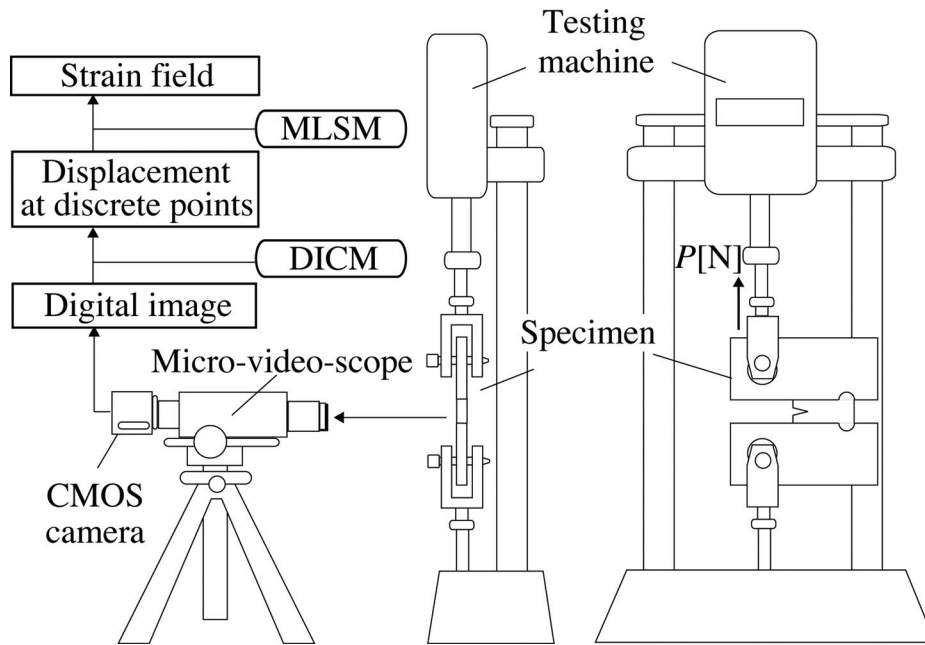


Fig. 4.9 Configuration of the measurement system.

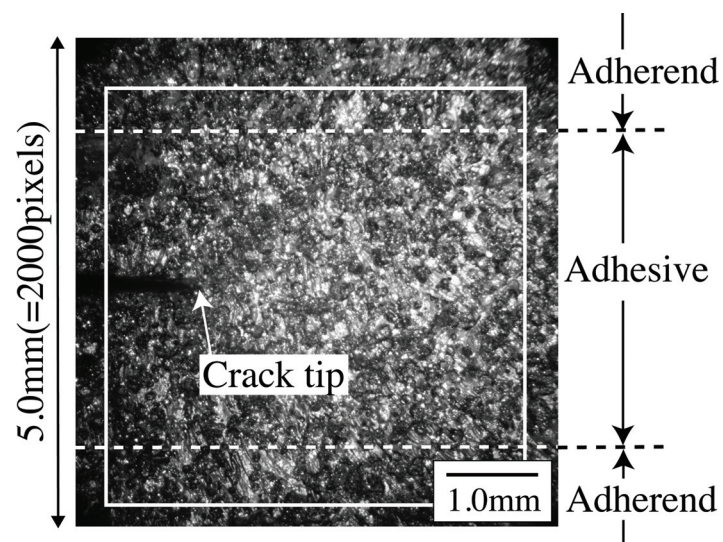


Fig. 4.10 Captured image example.

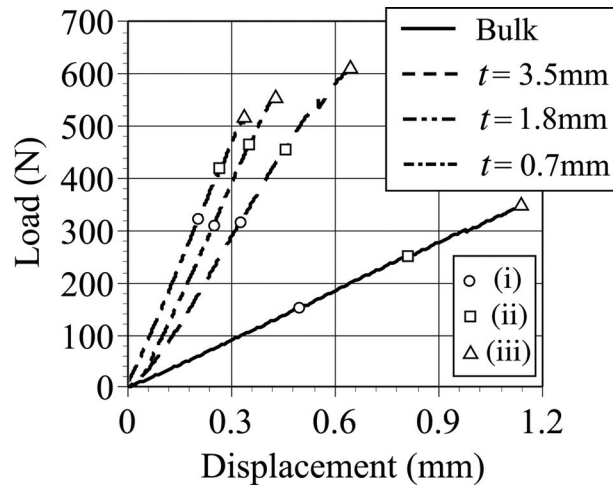


Fig. 4.11 Load-displacement curve for each specimen during the observation.

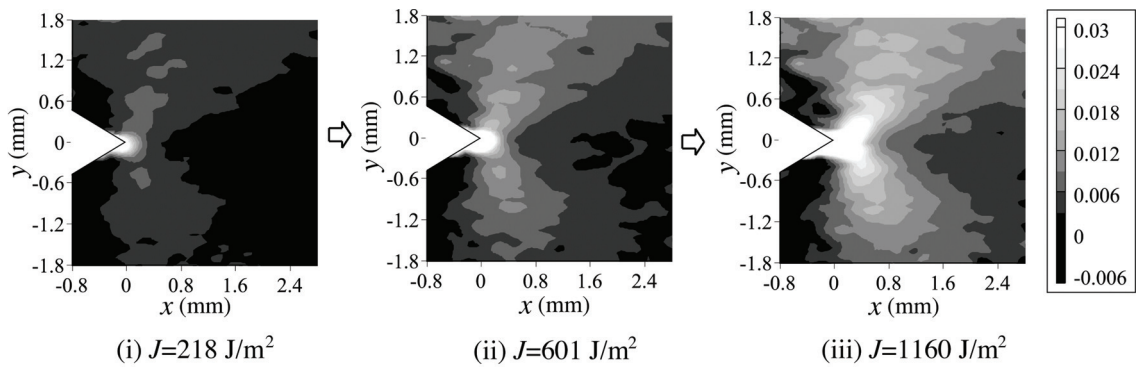


Fig. 4.12 Distributions of ϵ_{yy} around a crack tip for a bulk specimen (1 pixel = 2.5 μm).

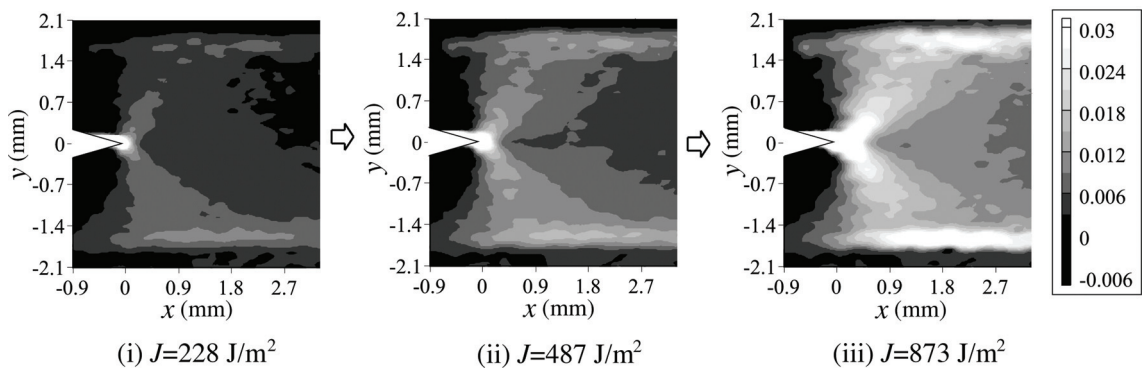


Fig. 4.13 Distributions of ϵ_{yy} around a crack tip for an adhesive joint with 3.5 mm bond thickness (1 pixel = 2.5 μm).

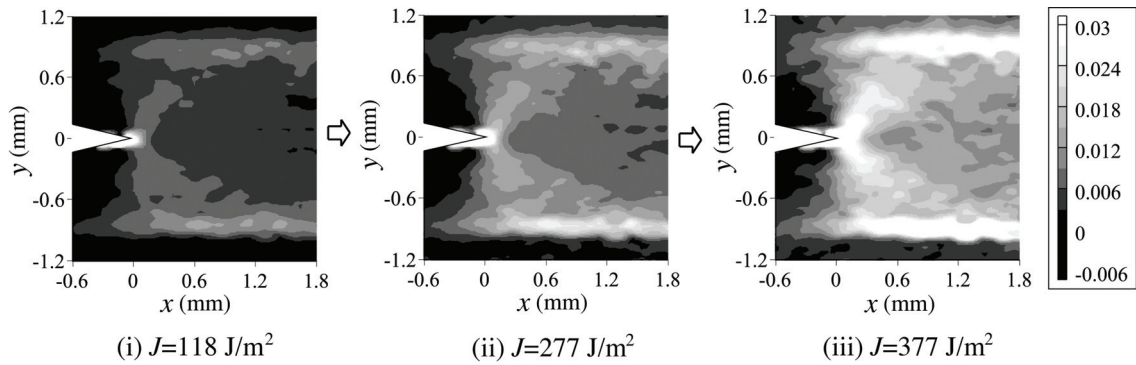


Fig. 4.14 Distributions of ϵ_{yy} around a crack tip for an adhesive joint with 1.8 mm bond thickness (1pixel= 1.5 μm).

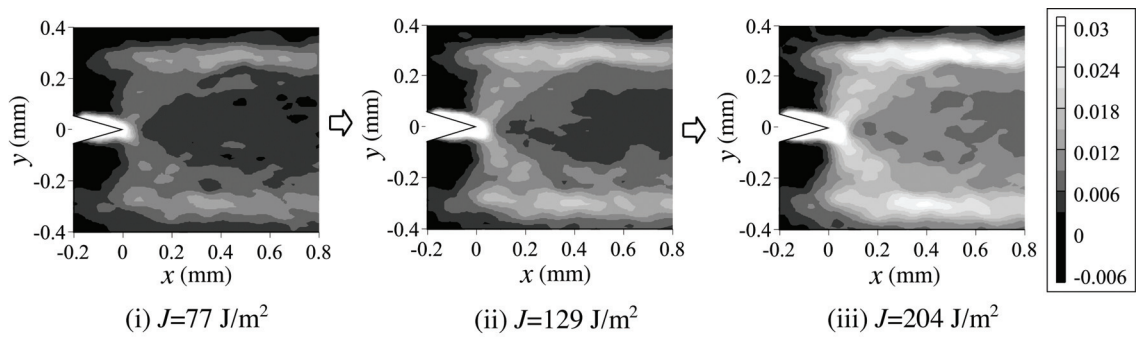


Fig. 4.15 Distributions of ϵ_{yy} around a crack tip for an adhesive joint with 0.7 mm bond thickness (1 pixel = 0.625 μm).

4.3.2 有限要素法を用いたひずみ分布解析

4.2.1 項に示した Gurson モデルを用いて CT 型接着継手試験片の三次元有限要素法解析を行った。解析には汎用有限要素法ソフトウェアの MSC Marc™ を用いた。対称性を考慮した 1/4 部分について、図 4.16 に示す 8 節点一次要素からなる解析モデルを使用した。ここで、Gurson モデルを用いた大変形解析を行う場合、鋭いき裂のモデルを使用すると、き裂先端付近のひずみ速度が無限大となり解が発散する。そこで、本解析ではき裂を鋭いノッチとして解析した。

実験では、120℃でゴム変成エポキシ樹脂を硬化させアルミニウムを接合し、室温（20℃）下まで降温させた後、破壊試験を行っている。そのため接着時は無応力状態であっても、材料間の線膨張係数の差によって、破壊試験をおこなう室温においては接着面付近に残留応力が生じていると考えられる。そこで、機械荷重のみを境界条件として与える以外に、上記の熱履歴を取り入れ、界面に生じる熱残留応力を考慮した解析によりひずみ分布を評価した。線膨張係数については Thermo Mechanical Analyzer (TMA) 試験により測定を行い、図 4.17 のような温度依存型のものを用いた。アルミニウムについては $\alpha_{\text{aluminum}} = 2.42 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ とした。

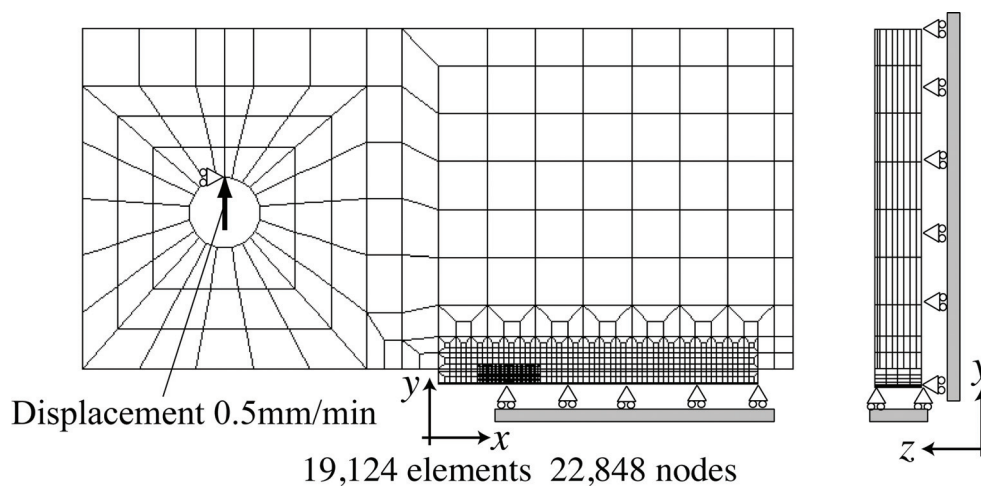


Fig. 4.16 FEM model of an adhesive joint with 3.5 mm bond thickness.

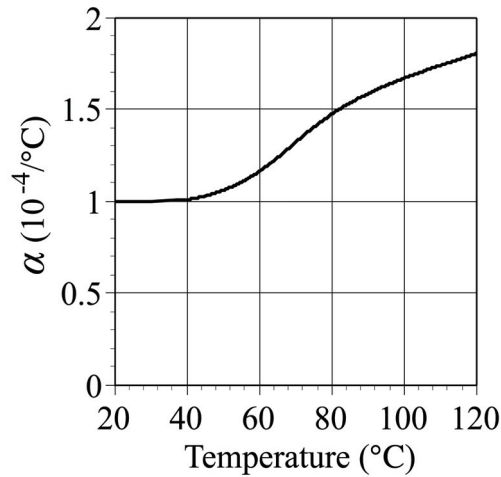
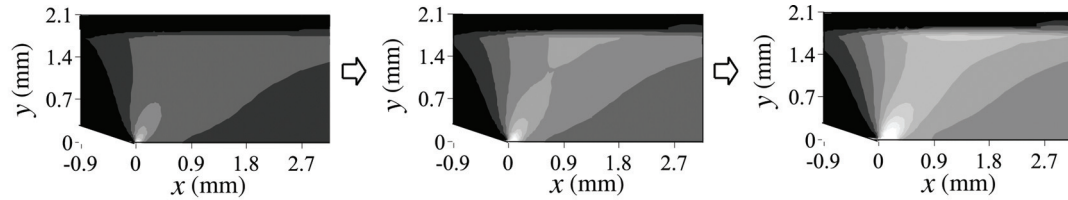


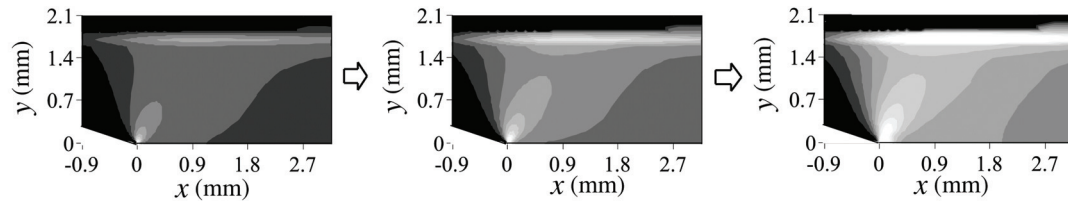
Fig. 4.17 Temperature variation of coefficient of thermal expansion for the rubber modified epoxy resin.

4.3.3 計測結果と計測結果の比較

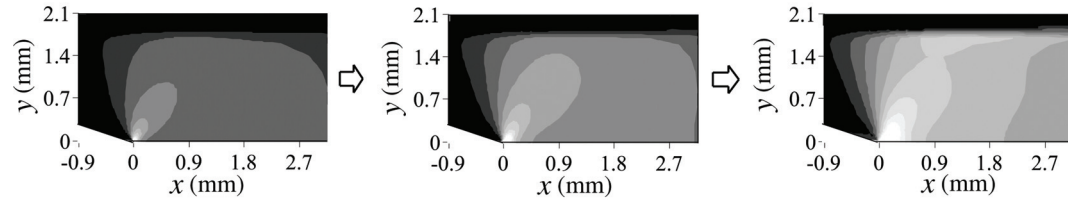
図 4.18, 4.19 に接着剤層厚さが 3.5, 0.7mm の場合の, 解析結果と計測結果を比較したものを示す. (a) に機械荷重のみを考慮した試験片表面でのひずみ分布, (b) ~ (d) が熱残留応力を考慮した解析結果であり, それぞれ試験片 (厚さ 8mm) の表面 ($z=4\text{mm}$), 内部, 中央部 ($z=0\text{mm}$) での y 方向の垂直ひずみ分布 ϵ_{yy} を示している. ここで, 本研究で用いたひずみ計測システムによって得られるひずみ分布は試験片表面上のものであり, 三次元解析の表面での分布に対応する. そこで, 試験片表面での結果について, 特に $y=0$ (x 軸上) での値を取り出し計測結果と定量的に比較した結果を (e) に示す. ただし, 計測結果との比較のため, ゴム変成エポキシ樹脂の硬化完了を基準として計算したひずみから, 降温過程終了後のひずみを差し引き, 荷重負荷によって生じたひずみ量を示してある. 図中の (e) より, 計測結果と解析結果は良く一致しており, 本研究で用いたひずみ計測手法による計測結果には信頼性があると言える. また分布図から, 計測された界面付近に生じるひずみ場は, 熱残留応力に起因すると考えられる. 一方で, 界面付近に強いひずみ場が現れるのは試験片表面だけであり, 内部では生じていないこともわかる. つまり, 試験片表面では三次元拘束や接着剤と被着材間の残留応力により界面付近でひずみが顕著に生じるが, 試験片の内部ではそれらの要因だけでは界面損傷域は発達しない. そのため, 以前の研究[6-8]で考えられた界面損傷域の発生による応力遮蔽効果は生じない, あるいは生じたとしてもその効果は小さく, 接着剤層が薄くなった場合においてもき裂先端付近の応力の低下は起こらない. 以上より, 固体状 NBR を用いたゴム変成エポキシ樹脂による接着継手において, 接着剤層が薄くなるにつれ破壊靱性値は単調に減少するメカニズムが明らかとなった.



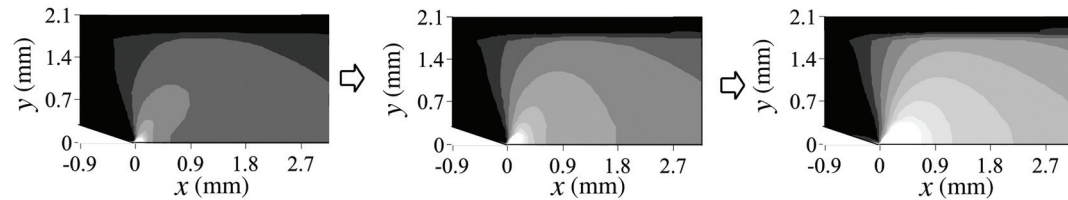
(a) Mechanical load, surface: $z=4\text{mm}$



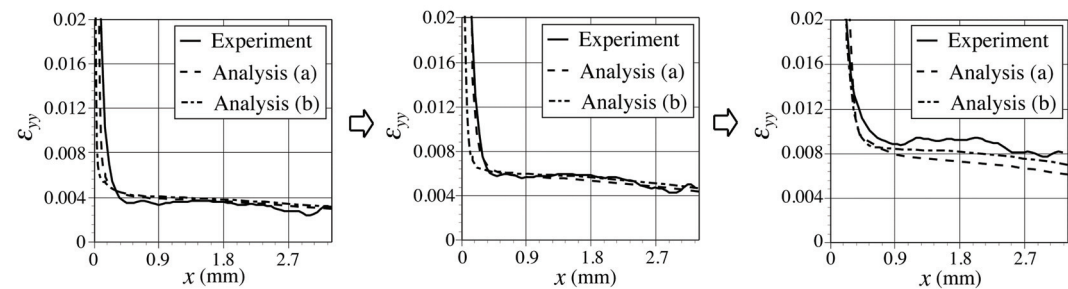
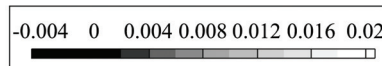
(b) Thermal + mechanical load, surface: $z=4\text{mm}$



(c) Thermal + mechanical load, section: $z=3\text{mm}$



(d) Thermal + mechanical load, center: $z=0\text{mm}$



(e) Distributions along x -axis

(i) $J = 228 \text{ J/m}^2$

(ii) $J = 487 \text{ J/m}^2$

(iii) $J = 876 \text{ J/m}^2$

Fig. 4.18 Distributions of ϵ_{yy} around a crack tip for an adhesive joint with 3.5 mm bond thickness.

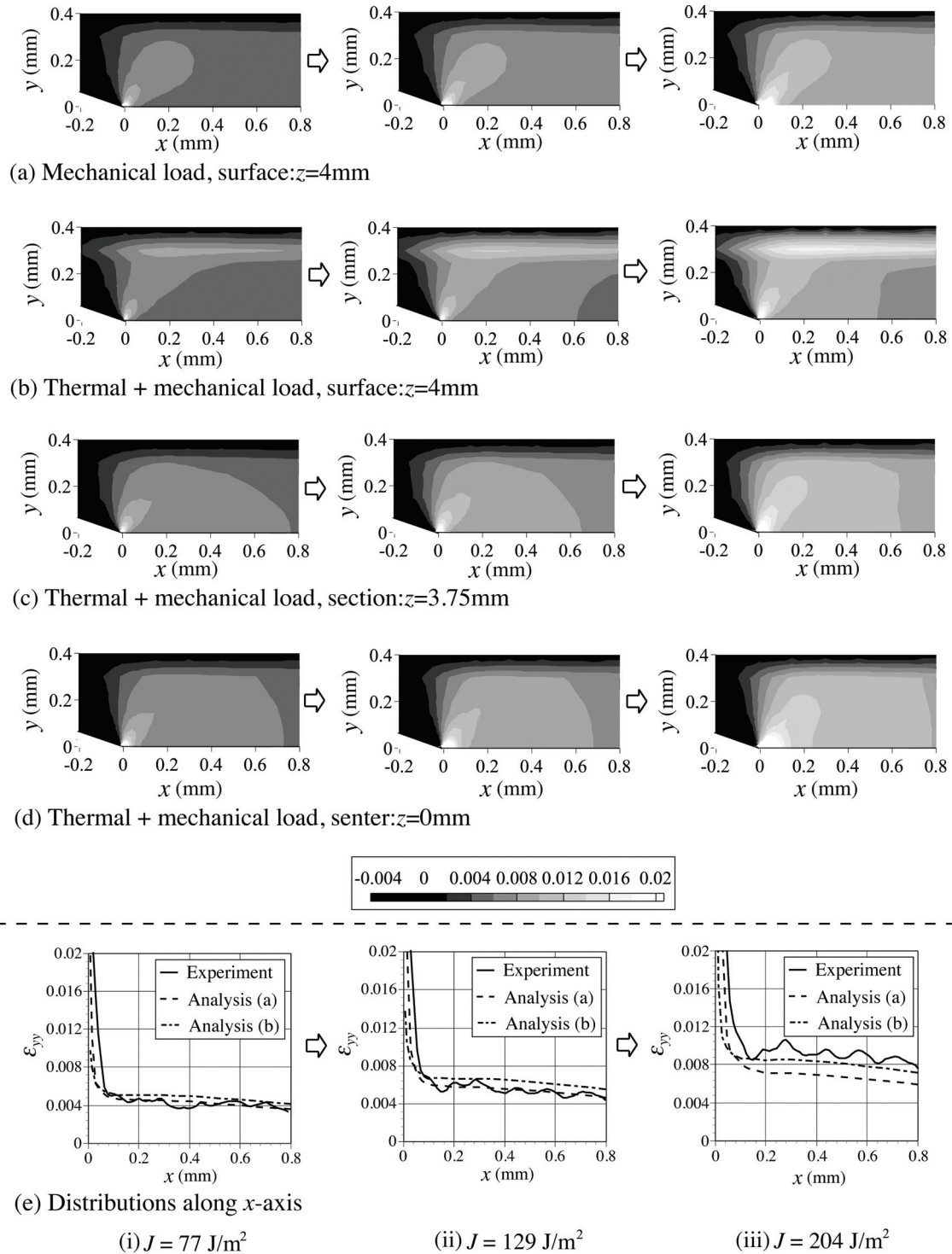


Fig. 4.19 Distributions of ϵ_{yy} around a crack tip for an adhesive joint with 0.7 mm bond thickness.

4.4 結言

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 Bulk 材の試験片について、破壊試験を行い、マイクロ스코ープ画像に DICM を用いて、そのき裂先端近傍のひずみ場を計測した。また、Gurson モデルを用いたき裂先端の損傷域の解析を行い、ゴム変成エポキシ樹脂中のき裂先端近傍のひずみを測定結果と比較した。本研究により得られた結論を以下に示す。

1. デジタル画像相関法を用いた接着継手中のき裂先端近傍のひずみ分布と Gurson モデルを用いた三次元有限要素法解析によって求めたひずみ分布は定量的に一致した。このことから、Gurson モデルを用いた三次元有限要素法解析の結果が正しいことが裏付けられた。
2. 三次元有限要素解析結果より、固体状ゴムを混合したゴム変成エポキシ樹脂を用いた接着継手の破壊靱性値が接着剤層が薄くなるにつれて減少するのは、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された。き裂先端付近の累積損傷が一定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た。
3. 界面での肥大化を生じない固体状 NBR を用いた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した。これは、液状ゴムを用いたゴム変成エポキシ樹脂による接着継手の破壊靱性値が接着剤層厚さの減少によって一旦上昇するのは、肥大化した界面付近のゴム粒子がキャビテーションを起こし、界面損傷域を形成したためであるとする池田らの理論を裏付けるものである。

第4章の参考文献

- [1] W. D. Bascom, R. L. Cottingham, R. L. Jones and P. Peyser, “The Fracture of Epoxy – and Elastomer - Modified Epoxy Polymers in Bulk and as Adhesives”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.19, pp.2545-2562, 1975.
- [2] W. D. Bascom and R. L. Cottingham, “Effect of Temperature on the Adhesive Fracture Behavior of an Elastomer - Epoxy Resin”, *Journal of Adhesion*, Vol.7, pp.333-346, 1976.
- [3] Cheng Yan, Yiu-Wing Mai and Lin Ye, “Effect of Bond Thickness on Fracture Behaviour in Adhesive Joints”, *Journal of Adhesion*, Vol.75, pp.27-44, 2001.
- [4] 李徳甫, 池田徹, 宮崎則幸, 崔洛三,, “接着継ぎ手の破壊に対する被着材の拘束効果 (第1報, き裂先端損傷域の顕微鏡観察)”, *日本機械学会論文集 A 編*, 68 巻 667 号, pp. 86-92, 2002.
- [5] 池田徹, 馬野順司, 池本大輔, 李徳甫, 宮崎則幸, “接着継手の破壊に対する被着材の拘束効果 (第2報, Gurson モデルによるき裂先端の損傷解析)”, *日本機械学会論文集 A 編*, 69 巻 678 号, pp. 210-217, 2003.
- [6] A. J. Kinloch and S. J. Shaw, “The Fracture Resistance of a Toughened Epoxy Adhesive”, *Journal of Adhesion*, Vol.13, pp.59-77, 1981.
- [7] 池田徹, 山下章, 宮崎則幸, “接着継手中のき裂の弾塑性解析 (接着剤厚みが破壊靱性値に及ぼす影響の評価)”, *日本機械学会論文集 A 編*, 62 巻 602 号, pp. 14-20, 1996.
- [8] 李徳甫, 池田徹, 東藤貢, 宮崎則幸, 高橋清, “ゴム強化エポキシ樹脂のき裂先端損傷機構”, *日本機械学会論文集 A 編*, 65 巻 631 号, pp. 439-446, 1999.
- [9] Kinloch, A. J., Shaw, S. J., Tod, D. A. and Hunston, D. L., Deformation and fracture behaviour of a rubber-toughened epoxy: 1. Microstructure and fracture studies, *Polymer*, 24, 1983, pp. 1341-1354.
- [10] Kinloch, A. J., Shaw, S. J., Tod, D. A. and Hunston, D. L., Deformation and fracture behaviour of a rubber-toughened epoxy: 2. Failure criteria, *Polymer*, 24, 1983, pp. 1355-1363.
- [11] A. L. Gurson, “Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth. I. Yield criterion and flow rules for porous ductile media”, *Transactions of ASME, Journal of Engineering Material and Technology*, Vol.99, pp.2-15, 1977.
- [12] Glyn Lawcock, Lin Ye, Yiu-Wing Mai and Chin-The Sun, “The effect of Adhesive Bonding

Between Aluminum and Composite Prepreg in the Mechanical Properties of Carbon-Fiber-Reinforced Metal Laminates”, *Composites Science and Technology*, Vol.57, pp.35-45, 1997

[13] B. Withy, M. Hyland and B. James, “Pretreatment Effects on the surface Chemistry and Morphology of aluminum”, *International Journal of Modern Physics*, Vol.20, pp.3611-3616, 2006.

[14] W. D. Bascom, R. L. Cottingham, R. L. Jones and P. Peyser, “The Fracture of Epoxy – and Elastomer - Modified Epoxy Polymers in Bulk and as Adhesives”, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.19, pp.2545-2562, 1975.

第5章

実装基板内はんだ接合部周辺の ひずみ分布評価

5.1 緒言

電子デバイスの小型化，高密度化にあたり Flip-Chip (FC) 実装などの高密度実装技術が普及してきている。FC 実装では，従来の Quad Flat Package (QFP) のようにリードによる接続ではなく，はんだバンプにより面で接続がされているため，それらの線膨張係数 (Coefficient of Thermal Expansion: CTE) ミスマッチによる熱応力を受け，熱疲労破壊等の点で接続信頼性に課題がある[1-3]。この熱応力の緩和のためにアンダーフィル材を用いて樹脂封止されるが，この特性により熱疲労強度信頼性が変わることも知られている[4]。

これら接合部の実装信頼性評価手法として，有限要素解析 (Finite Element Analysis: FEA) などによる数値シミュレーションがよく利用されるが，はんだバンプの弾塑性クリープ挙動やアンダーフィル材などの樹脂材の粘弾性挙動といった非線形挙動を考慮しなくてはならず，非線形解析の精度については不明な点も多い。一方，実験的評価手法としてデジタル画像相関法(Digital Image Correlation Method: DICM)やモアレ干渉法などが挙げられるが，FC 実装でのはんだ寸法は $100\mu\text{m}$ 程度まで小型化されているものもあり，観察に用いる光学系にも分解能の向上が要求される。第3章，第4章で利用した DICM システムでは光学顕微鏡を利用したが，これらの接合部周辺でのひずみ評価には，画像分解能が不十分である。レーザ走査型顕微鏡は通常の光学顕微鏡観察より分解能に優れるため，観察画像に DICM を適用することで，より微細な領域での変位及びひずみ計測が期待できる。その一方で，走査型顕微鏡では走査挙動に起因する誤差や，観察に時間を要するために観察過程で外乱等の影響を受け，画像がゆがむ[5-8]。DICM をレーザ走査型顕微鏡画像に適用して物体の変形を正しく評価するには，これら外乱に起因する画像のゆがみを評価し，必要ならばその影響を画像から取り除く必要がある。

本章では，レーザ走査型顕微鏡に内在するゆがみを DICM による変位計測結果から評価した。さらに観察画像からその影響を取り除き，走査型顕微鏡における DICM による変位

分布計測の適用性を検証した。次に、開発した DICM システムを利用し、FC 実装された模擬多層基板パッケージを用い、熱サイクル負荷時にはんだバンプ周辺に生じるひずみ分布を計測した。また、汎用有限要素法(Finite Element Method: FEM)コード MSC.Marc を用いて粘弾塑性クリープ解析を行い、計測結果と比較検討した。

5.2 レーザ走査型顕微鏡による観察画像のゆがみ評価及びその補正効果

5.2.1 計測システムの構成とその観察画像の特性

本章では、小型化された電子実装接合部の観察及び DICM によるひずみ分布計測を目的とし、共焦点レーザ走査型顕微鏡（オリンパス製 OLS3000）を観察装置として用いた。レーザ走査型顕微鏡は波長 405 nm の半導体ブルーレーザを走査して表面観察を行うため、通常の白色光等を用いる光学顕微鏡観察に比べて画像の分解能に優れる。また光学的に共焦点とすることで、光源のスポットサイズは収束され、画像のコントラストが向上する。走査速度は 4000 Hz であり、画像のサイズは 1024 × 256 ~ 1024 pixel である。撮影倍率は 100× から 1000× を使い、光学顕微鏡用スケールでの観察結果より各画素サイズは 2.5 μm/pixel から 0.25 μm/pixel であった。ステッピングモータ駆動の移動ステージ上に試料を配置し、その表面像を観察した。観察システムの概要を図 5.1 に示す。試料には大きさ 12 mm × 12 mm × 6 mm のアルミニウム合金の小片を用いた。表面を耐水研磨紙 (#2000) で流水研磨した後、P2 エッチング[9]によって化学的表面処理を施した。試料の観察表面像を図 5.2 に示す。

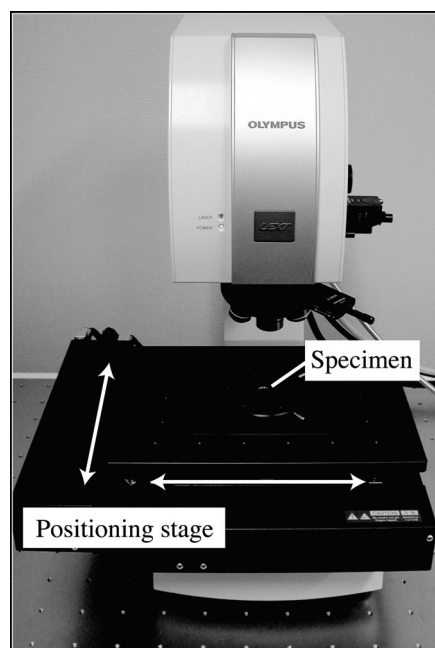
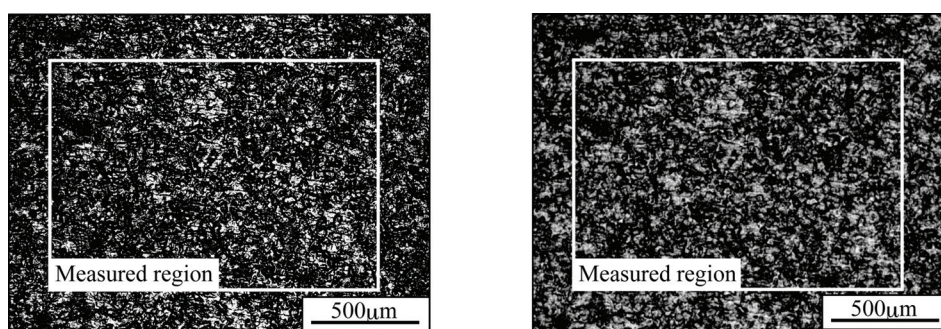


Fig. 5.1 Photograph of an experimental apparatus.



a) Image obtained by the LSM

b) Image obtained by the optical microscope

Fig. 5.2 Surface images of an aluminum specimen observed by microscopes (LSM = laser scanning microscope).

まず基本的な測定誤差を調べるために、変形も移動もしていない静止した試料表面を時系列上連続に撮影し、それぞれ変形前後の画像として DICM により変位分布を得た。計測結果を図 5.3 に示す。また、観察システムによる画像特性の違いを評価するため、レーザ顕微鏡に付属する光学顕微鏡システムで観察し、得られた画像を用いて同様に変位計測した結果を図 5.4 に示す。この光学顕微鏡システムでは、光源にハロゲンランプを利用し、 1024×768 pixel の CCD センサによって画像を取得した。光学顕微鏡画像の結果は第 3 章と同じく、全領域に輝度値ノイズに起因する不規則な変位誤差を含む。レーザ顕微鏡画像の場合、CCD による観察画像の輝度値データ長 8bit に対して 12bit と輝度値の階調に優れ、レーザ走査及び共焦点光学系によりコントラスト強度にも優れるために、 y 方向変位分布 v は光学顕微鏡画像に比べ安定した一様変位を示す。このとき、計測変位のばらつきは 1/4 に低減している。ただし、 x 方向変位分布 u は横縞状模様を示し、その勾配も最大 0.2% とひずみとして大きい。静止画像間での計測変位であることから、これは時間に依存したゆがみに起因する見かけの変位である。また、適用したサブセット長と同程度の波長に相当する変位分布を有するため、非常に短波長帯で分布するゆがみであると推察される。

次に、移動ステージ上で試料を平行移動させ、移動前後でのレーザ顕微鏡観察画像に対して変位分布を計測した。画像サイズは 1024×1024 pixel であり、画素寸法は $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$ であった。 $1 \mu\text{m}$ の再現性を有する電動ステージにより平行移動 $\mathbf{t}_{\text{pre}} = (u_{\text{pre}}, v_{\text{pre}})^T$ を加えた画像組を対象に、 x 方向に沿った $50 \mu\text{m}$ の平行移動と y 方向に沿った $50 \mu\text{m}$ の平行移動の結果をそれぞれ図 5.5、図 5.6 に示す。図中には平行移動量に対する計測変位誤差 $e_x = u - u_{\text{pre}}$ 及び $e_y = v - v_{\text{pre}}$ を示している。図 5.4 にある時間に依存した変位誤差だけでなく、平行移動によって新たに複雑な変位分布が現れている。その特徴は第 3 章で扱ったレンズ収差とも異なる傾向であった。高精度な変位分布計測を実現するには、これら変位誤差の原因と特定するとともに、必要に応じて補正する必要がある。

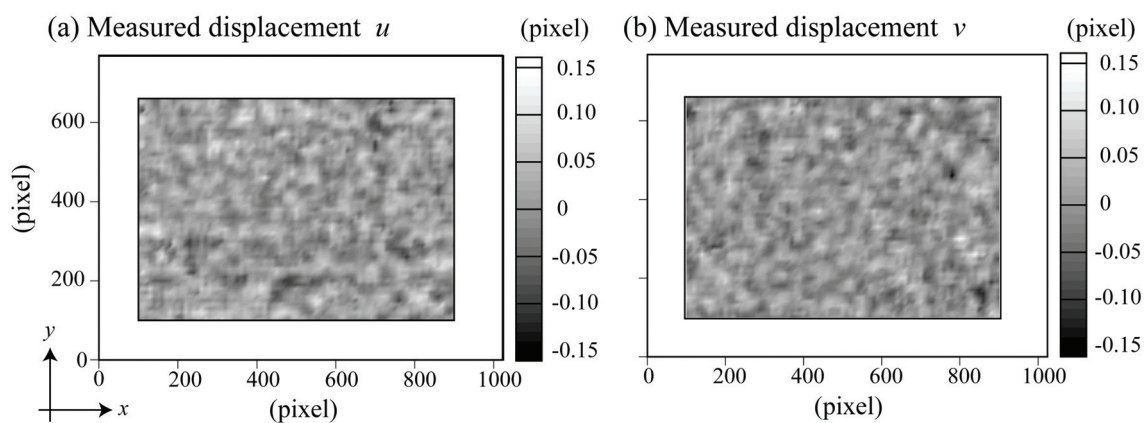


Fig. 5.3 Measured displacement field by DICM using the images of two stationary states taken by an optical microscope.

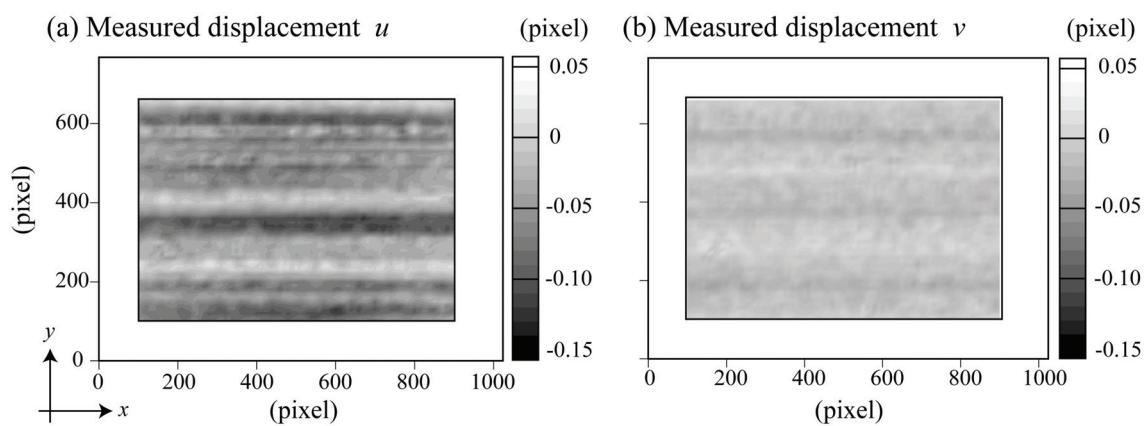


Fig. 5.4 Measured displacement field by DICM using the images of two stationary states taken by a laser scanning microscope.

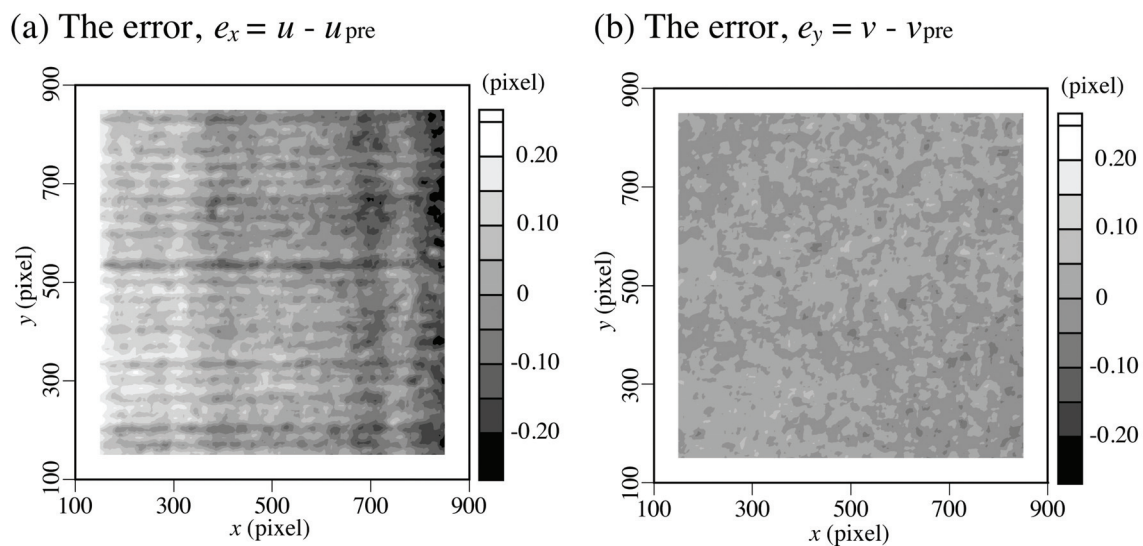


Fig. 5.5 The error of displacement field for $\mathbf{t}_{\text{pre}} = (50 \mu\text{m}, 0 \mu\text{m})^T$.

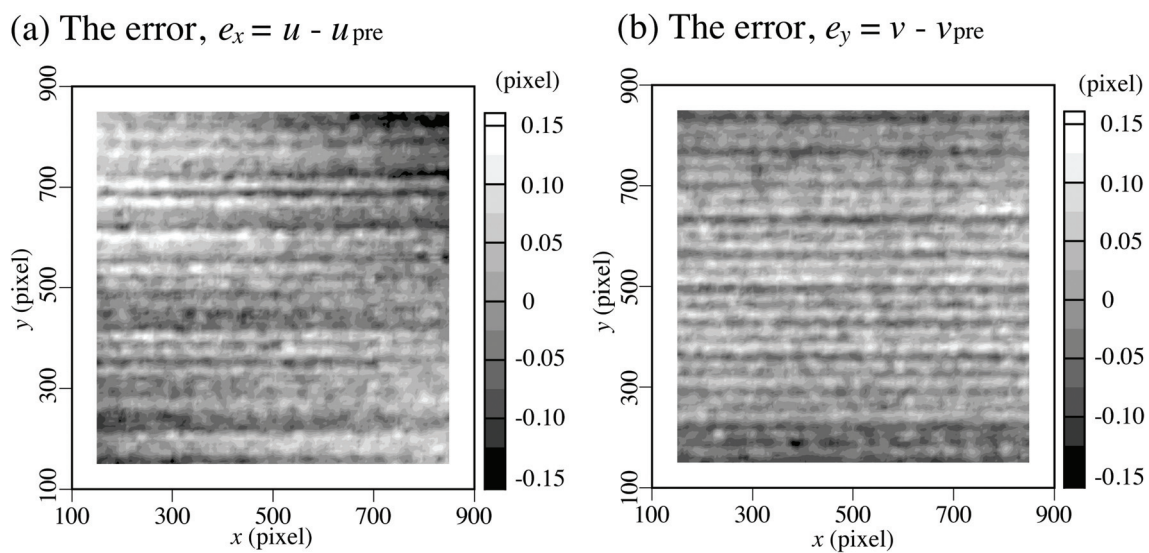


Fig. 5.6 The error of displacement field for $\mathbf{t}_{\text{pre}} = (0 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m})^T$. Left: e_x , right: e_y .

5.2.2 時間依存型画像ゆがみの評価

レーザー顕微鏡画像は収差に起因するゆがみだけでなく、時間に依存するゆがみを含んでいる。そこで、理想的なゆがみのない画像上の点を $\mathbf{r}_{id} = (x_{id}, y_{id})^T$ 、観察画像上の点を $\mathbf{r}_{im} = (x_{im}, y_{im})^T$ とするとそれらは次の関係式(5.1)で結びつけられる。

$$\mathbf{r}_{im} = \mathbf{r}_{id} + \mathbf{D}_T(\mathbf{r}_{im}) + \mathbf{D}_S(\mathbf{r}_{im}) \quad (5.1)$$

ここで、 \mathbf{D}_T 及び \mathbf{D}_S はそれぞれ時間に依存するゆがみ、時間に依存しないゆがみを表す。本項ではまず、時間依存型の画像ゆがみ \mathbf{D}_T について取り扱う。

時間依存型の画像ゆがみ \mathbf{D}_T は走査に起因するゆがみである。レーザー走査型顕微鏡は図5.7のように、各走査線上での連続的な輝度値サンプリングを繰り返すことで表面像を生成する。各走査線でのサンプリング開始時刻の繰り返し精度は共振回路によって数十ナノ秒で制御されるため、走査線毎にその開始点が微小ながらばらつく。本システムでは走査速度4000Hzに対して各走査線の水平方向位置が1/10 pixel オーダで変動すると予測できる。その一方で、走査型顕微鏡で問題とされる機械振動や熱ドリフトは、観察時間が約0.25秒と比較的短いために、画像ゆがみへの影響が無視できる。図5.4の計測結果でも、走査方向に沿った変位である u 分布にのみ大きな誤差が現れて、 v 分布に現れる誤差変位は比較的小さい。以上を踏まえ、時間依存型の画像ゆがみ \mathbf{D}_T を次式で定義した。

$$\mathbf{D}_T(\mathbf{r}_{im}) = [D_{Tx}(y_{im}), 0]^T \quad \text{at } y_{im} = 1, 2, \dots \quad (5.2)$$

ここで、 \mathbf{D}_T は走査線毎のゆがみであり走査線中では変動せず、 y 座標のみに依存すると仮定した。また、その値に再現性はなく各画像で異なるため、以後、変形前の画像では \mathbf{D}_T^u 、変形後の画像では \mathbf{D}_T^d と表示する。

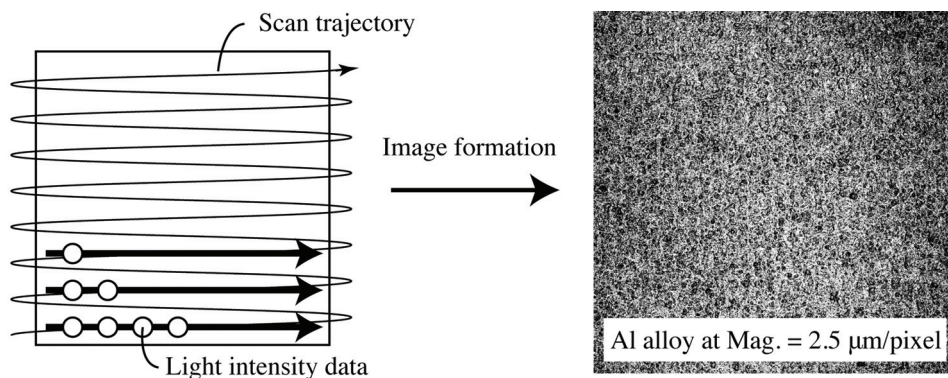


Fig. 5.7 Schematic of image formation process in a laser scanning microscope. Light intensity data are sampled in 12-bit lengths on the 1024 × 1024 grid array.

通常の走査方向と直交する走査方向で観察された画像において \mathbf{D}_T は次式で表される.

$$\mathbf{D}_T(\mathbf{r}_{im}) = [0, D_{Ty}(x_{im})]^T \quad \text{at } x_{im} = 1, 2, \dots \quad (5.3)$$

基準画像を通常の水平方向走査画像とし, 変形後の画像を垂直方向走査画像とすると, これらの画像間での変位 $\Delta \mathbf{r}_{im} = (U, V)^T$ は, 式(5.1)~式(5.3)より次式で求まる.

$$\Delta \mathbf{r}_{im} = [-D_{Tx}^u(y_{im}), D_{Ty}^d(x_{im})]^T \quad (5.4)$$

一方で, DICM による計測変位はサブセット内部の変位分布に応じて平滑化された値であるために, 式(5.4)の $\Delta \mathbf{r}_{im}$ とは一致しない. そこで, より詳細に \mathbf{D}_T を評価するために, サブセット変形に通常の一次変形だけでなく, 各 \mathbf{D}_T に対応して変形できるよう自由度を付与した. このとき, 相関評価関数(2.1)を次式(5.5)のように変更した評価関数を利用し, パターンマッチングにより最適解を求める.

$$C_M = 1 - \frac{\sum_{i,j=-M}^M I_d(X+i, Y+D_{Ty}+j) \times I_u(x+D_{Tx}+i, y+j)}{\sqrt{\sum_{i,j=-M}^M I_d(X+i, Y+D_{Ty}+j)^2 \sum_{i,j=-M}^M I_u(x+D_{Tx}+i, y+j)^2}} \quad (5.5)$$

式(5.5)中では, 変形前画像でのサブセットは水平方向の走査線に沿って走査線毎にシフト可能であり, 変形後画像では垂直方向の走査線に沿ってシフト可能である. ただし, 相関値内の未知変数が 6 から $4M+8$ まで増加するため, 比較的大きな M を用いてパターンマッチングに利用する標本数を増やすことで, 収束計算を安定化させる必要がある.

5.2.3 時間非依存型画像ゆがみの評価

レーザ走査型顕微鏡の観察画像に内在する, 時間に依存しないゆがみ \mathbf{D}_S はレンズの収差や幾何学配置の影響によるものだけではない. 波状のレーザの走査軌道上でサンプリングされたデータをもとに, 格子状に画素を配列するデジタル画像を生成するために, 走査軌道とデジタル画像の画素配置との偏差によって生じるゆがみも問題となる. そこで, 第3章で定義した光学的なゆがみに, 走査系特有のゆがみも加えた次式(5.6)で時間非依存型の画像ゆがみを定義した.

$$\mathbf{D}_S(\mathbf{r}_{im}) = \mathbf{D}_S^0(\mathbf{r}_{im}) + \mathbf{D}_S^1(\mathbf{r}_{im}) \quad (5.6)$$

ここで, \mathbf{D}_S^0 は光学系依存のゆがみ, \mathbf{D}_S^1 は走査軌道の誤差によるゆがみに相当し, それぞれ時間非依存型ゆがみの長波長成分と短波長成分として扱う. \mathbf{D}_S^0 は滑らかに画像全域で分布し, 次式で表される.

$$\mathbf{D}_S^0(\mathbf{r}_{im}) = [D_{Sx}^0(x_{im}, y_{im}), D_{Sy}^0(x_{im}, y_{im})]^T \quad (5.7)$$

x 軸に沿った平行移動時の変位分布では, 図 5.5(a)にあるように, x 方向変位分布 u には時間依存型ゆがみに起因する変位の他に, 新たな縦縞模様状の分布が生じている. y 軸に沿っ

た平行移動では，図 5.6(b)のように， y 方向変位分布 v に複雑な横縞模様が生じている．以上より，時間非依存型画像ゆがみの短波長成分 D_S^l を次式で表す．

$$D_S^l(\mathbf{r}_{im}) = [D_{Sx}^l(x_{im}), D_{Sy}^l(y_{im})]^T \quad (5.8)$$

それぞれ D_{Sx}^l および D_{Sy}^l は特定の方向にのみ依存すると仮定した．

任意の既知平行移動 \mathbf{t}_{pre} に対して画像上の変位 $\Delta\mathbf{r}_{im}$ を次式で定義すると，

$$\Delta\mathbf{r}_{im} = \mathbf{r}_{im}^d - \mathbf{r}_{im}^u \quad (5.9)$$

式(5.1), (5.2), (5.6)～(5.8)より次式(5.10)が得られる．

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{r}_{im} \\ = \mathbf{t}_{pre} + D_I^d(\mathbf{r}_{im} + \Delta\mathbf{r}_{im}) - D_I^u(\mathbf{r}_{im}) + D_S^0(\mathbf{r}_{im} + \Delta\mathbf{r}_{im}) - D_S^0(\mathbf{r}_{im}) + D_S^l(\mathbf{r}_{im} + \Delta\mathbf{r}_{im}) - D_S^l(\mathbf{r}_{im}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

ただし，物体の平行移動は次式で表す．

$$\mathbf{r}_{id} \rightarrow \mathbf{r}_{id} + \mathbf{t}_{pre}, \quad \mathbf{t}_{pre} = (u_{pre}, v_{pre})^T \quad (5.11)$$

ここで， u_{pre} と v_{pre} はそれぞれ既知変位量である．非常に大きなサブセット寸法 M_{large} を DICM 計測に適用した場合，その平滑化作用により変位分布の短波長成分は減衰する．この短波長成分の減衰により，大きなサブセット寸法 M_{large} での DICM による計測離散点変位 $\Delta\mathbf{r}_{LM}$ は式(5.10)から次式のように簡略化できると考えられる．

$$\Delta\mathbf{r}_{LM} = \mathbf{t}_{pre} + D_S^0(\mathbf{r}_{im} + \Delta\mathbf{r}_{LM}) - D_S^0(\mathbf{r}_{im}) \quad (5.12)$$

DICM により得られた離散変位データより移動最小二乗法 (Moving Least Square Method: MLSM) を用いて変位場 $\Delta\mathbf{r}_{LM}$ を生成し，既知変位量 \mathbf{t}_{pre} を代入することで，式(5.12)より D_S^0 が次のように再帰的に求まる．

$$D_S^0(\mathbf{r}_{im}^{n+1}) = D_S^0(\mathbf{r}_{im}^n) + \Delta\mathbf{r}_{LM}(\mathbf{r}_{im}^n) - \mathbf{t}_{pre} \quad (5.13)$$

ここで，

$$\mathbf{r}_{im}^{n+1} = \mathbf{r}_{im}^n + \Delta\mathbf{r}_{LM}(\mathbf{r}_{im}^n), \quad \mathbf{r}_{im}^n = [x_{im}^n, y_{im}^n]^T \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.14)$$

である．第3章でのゆがみ導出と同様に，平行移動方向が直交する2つの変位場を組み合わせて， D_S^0 の画像全域での分布が得られる．

続いて，非常に小さなサブセット寸法 M_{small} を DICM に適用した場合の，平行移動前後における計測変位 $\Delta\mathbf{r}_{SM} = (u_{SM}, v_{SM})^T$ は式(5.10)より

$$u_{SM} = u_{pre} + D_{Sx}^0(\mathbf{r}_{im} + \Delta\mathbf{r}_{SM}) - D_{Sx}^0(\mathbf{r}_{im}) + D_{Ix}^d(y_{im} + v_{SM}) - D_{Ix}^u(y_{im}) + D_{Sx}^l(x_{im} + u_{SM}) - D_{Sx}^l(x_{im}) \quad (5.15)$$

$$v_{SM} = v_{pre} + D_{Sy}^0(\mathbf{r}_{im} + \Delta\mathbf{r}_{SM}) - D_{Sy}^0(\mathbf{r}_{im}) + D_{Sy}^l(y_{im} + v_{SM}) - D_{Sy}^l(y_{im}) \quad (5.16)$$

となる．式(5.16)は，既に得られている D_S^0 を除いて式(5.12)と同じ形式であり，同様の手順で D_{Sy}^l が再帰的に得られる．また， D_I はランダムに各走査線に生じるため，画像全域での平均値を零と見なす．この仮定のもとで，式(5.15)を y 方向に沿って各評価点で平均化すると，時間依存型ゆがみの項が消え，次式(5.17)が得られる．

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N u_{SM}(x_{im}, y_{im}^l) \\ &= u_{pre} + \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N D_{Sx}^0(x_{im} + u_{SM}, y_{im}^l + v_{SM}) - \frac{1}{N} \sum_{l=1}^N D_{Sx}^0(x_{im}, y_{im}^l) + D_{Sx}^1(x_{im} + u_{SM}) - D_{Sx}^1(x_{im}) \end{aligned} \quad (5.17)$$

ここで N は y 軸に沿った評価点の個数である. 式(5.12)及び式(5.16)と同様に, 計測変位分布 u_{SM} , 既知変位 u_{pre} , 既に得られた D_S^0 を代入することで, D_{Sx}^1 が再帰的に求まる.

5.2.4 画像ゆがみ補正手法の検証

5.2.2 項及び 5.2.3 項で定義したすべての画像ゆがみを以下の手順に従い決定した. まず, x 軸及び y 軸に沿った平行移動前後の画像を観察し, それぞれの平行移動に対応する変位場を大きなサブセット寸法 M_{large} を使用した DICM により計測する. 得られた変位場を式(5.13)に代入することで時間非依存型画像ゆがみの長波長成分 D_S^0 を得る. 次に, 同じ画像を用いて小さなサブセット寸法 M_{small} で計測された変位場及び D_S^0 を式(5.16)(5.17)に代入し, D_S^1 を得る. 以上によって装置固有のゆがみである, 時間非依存型の画像ゆがみ D_S が与えられる. この D_S は観察システムの固有のゆがみであるため, 目的とするひずみ計測にさきだって決定し, 以後その値を利用する.

次に, 目的とする変形前後の状態それぞれにおいて D_T を決定する. 本章で利用するレーザ顕微鏡の走査方向が固定されているため, 基準となる画像を取得後, 試料を回転ステージ上で 90 度回転させ. 同じ領域を観察することで走査方向の異なる画像として利用した. 回転後の画像をデジタル画像上で -90 度回転させることで, 同じ領域を走査方向のみ変更して観察した画像が得られる. このときの観察画像の状態は図 5.8 のようになる. これらの画像間での変位を式(5.5)で定義された相関式を用いて評価することで D_T を得る. これらすべてのゆがみ分布を用いて式(5.1)に従い, ゆがみのない理想的な画像を再構成し, DICM による変位及びひずみ計測に利用する.

一例として, x 軸及び y 軸に沿って $16\mu\text{m}$ 平行移動した際に得られた時間非依存型の画像ゆがみ分布を図 5.9 及び図 5.10 に示す. D_S^0 は画像全域を渡って大きくゆがめている一方, D_S^1 は局所的にゆがんでいる. また, 基準画像とそれに対応する回転画像を取得し, 時間依存型の画像ゆがみを得た. その一例を図 5.11 に示す. これは走査の制御誤差に起因すると仮定して推定した値 $1/10\text{pixel}$ と同じオーダで分布していた.

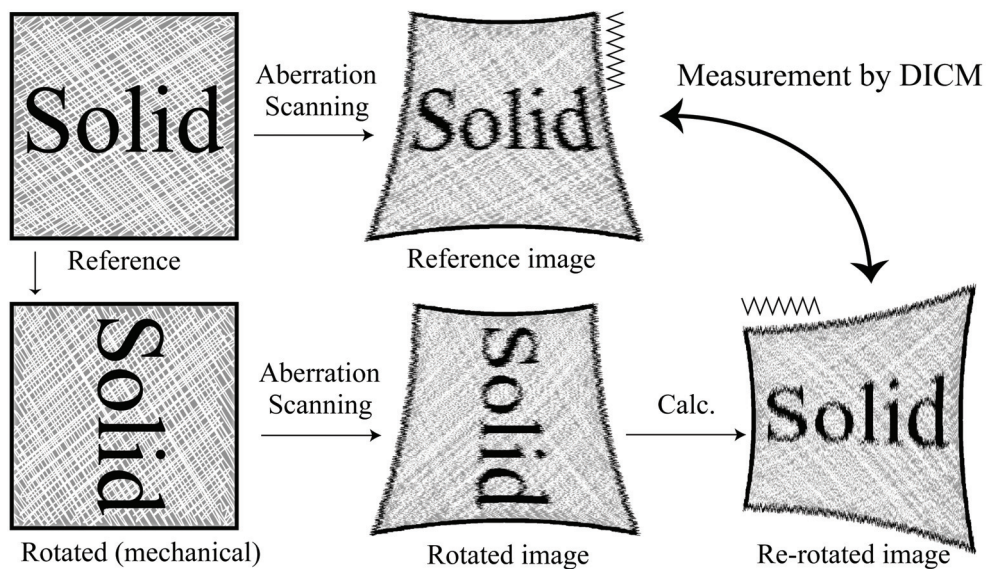
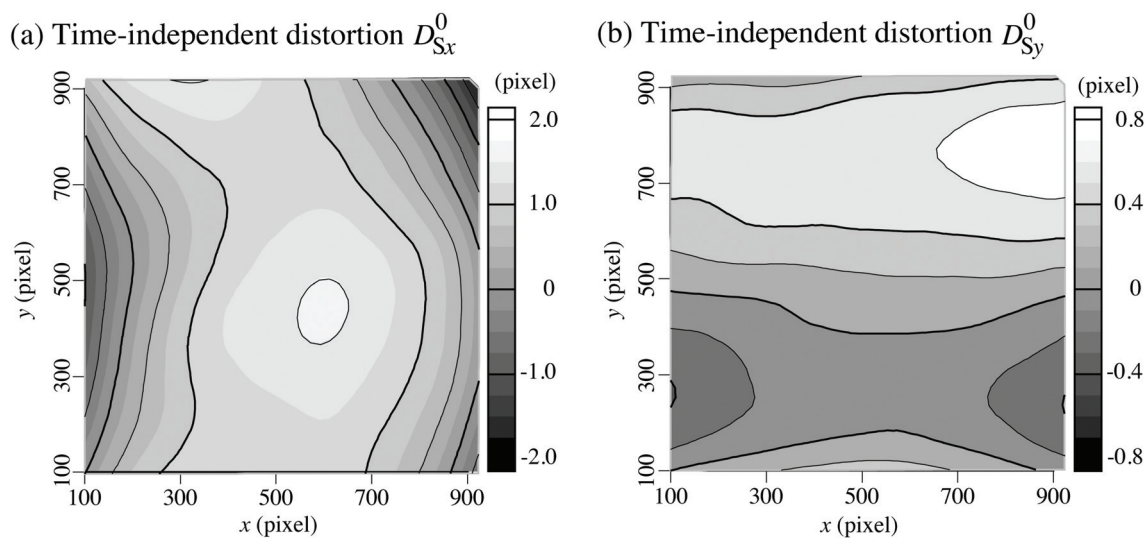


Fig. 5.8 Schematic diagram of the rotation process.

Fig. 5.9 Distortion maps of D_S^0 . The subset size M is 75 pixels, and the magnification is 2.5 $\mu\text{m}/\text{pixel}$.

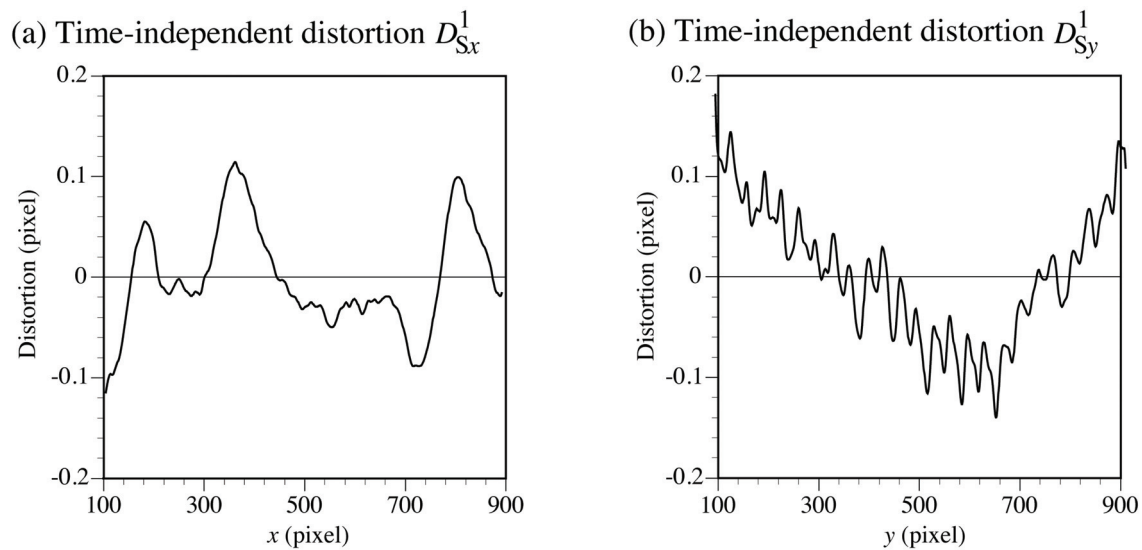


Fig. 5.10 Distortion functions of D_S^1 . The subset size M is 2 pixels and the magnification is $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

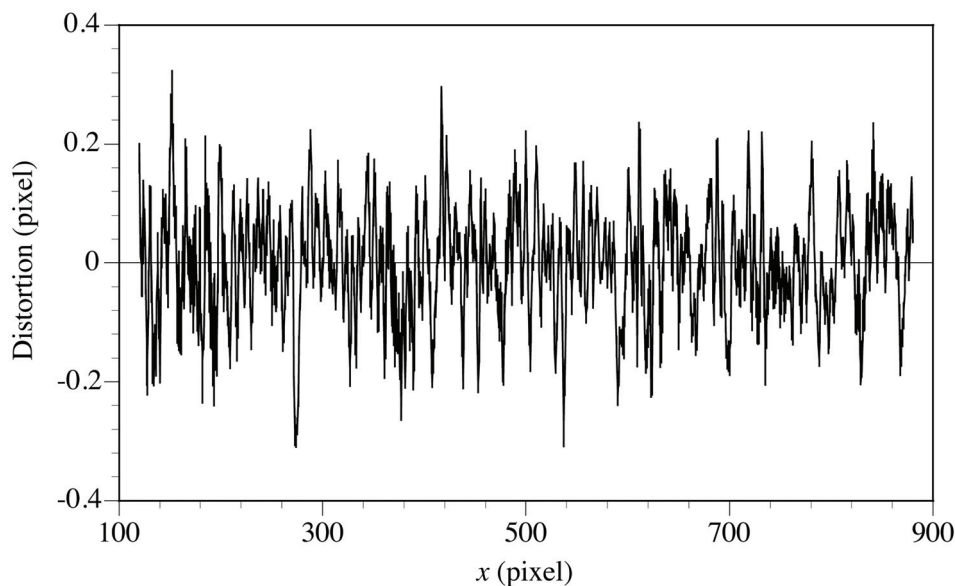


Fig. 5.11 Distortion function of D_{Tx} estimated for the condition in a stationary state. The subset size M is 75 pixels, and the magnification is $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

それぞれに対応する D_T と D_S を用いて画像を補正した結果の一例を図 5.12 に示す。これは、平行移動変位 $t_{pre} = (50 \mu\text{m}, 0 \mu\text{m})^T$ を加えた前後での計測変位結果である、図 5.5 に使用した画像組をゆがみのない画像に変換して変位計測した結果である。特徴的であった u 分布の縦縞模様が取り除かれて、複雑な横縞も軽減している。また、時間依存型のゆがみ D_T の影響である u 分布の横縞も低減できているが、画像外周部では完全に取り除かれてはいない。これは、走査線毎の開始点のばらつきにより生じるとして、走査線中で一定と仮定した D_T が、実際には、微小ながら走査線中で走査線方向に伸縮しているため、と推察される。現状では、画像中心部での計測結果を利用することで、この問題を回避するのが望ましい。

以上より、補正前後における計測変位分解能の比較を表 5.1 に示す。すべての画像ゆがみ補正によって計測変位の標準偏差が $M = 10$ pixel において 0.04 pixel 以下となった。変位に応じた精度の変動はなく、一定の精度が保証されている。また、手動による回転のために、画像上で -90° 戻した際の基準画像との回転量の誤差は、計測変位から得られた回転角が次式で定義された値で常に 1° 以下であった。

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] \quad (5.18)$$

また、図 5.13 に回転角を 90° 以下での D_T の決定及び補正をおこない、静止画像間で変位計測を実施した結果を示す。図中では、回転量が 17° 程度でも、ほぼ見かけの変位が修正され、静止状態での理想的な変位分布である一様な値を示した。このことから、 D_T の決定に与える回転角の影響は小さく、高精度な回転ステージは必要としないことが明らかとなった。

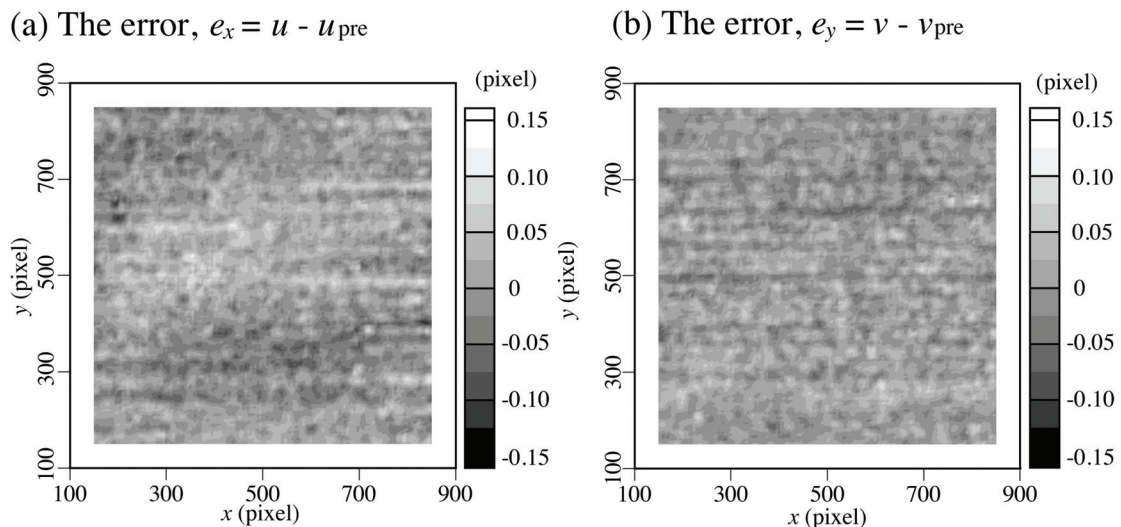


Fig. 5.12 The error of displacement field with image correction for $t_{pre} = (50 \mu\text{m}, 0 \mu\text{m})^T$.

Table 5.1 Standard deviation of deformation components in the measured region. The subset size M is 10 pixels and the magnification is $2.5 \mu\text{m}/\text{pixel}$.

	u (pixel)	$\partial u/\partial x$ (-)	$\partial u/\partial y$ (-)	v (pixel)	$\partial v/\partial x$ (-)	$\partial v/\partial y$ (-)
Stationary state, $t_{\text{pre}} = (0 \mu\text{m}, 0 \mu\text{m})^T$.						
None	0.033	0.0021	0.0048	0.012	0.0016	0.0018
+ D_S correct.	0.033	0.0021	0.0048	0.012	0.0016	0.0018
+ $D_S + D_T$ correct.	0.018	0.0019	0.0025	0.012	0.0016	0.0017
Translation, $t_{\text{pre}} = (50 \mu\text{m}, 0 \mu\text{m})^T = (20 \text{ pixel}, 0 \text{ pixel})^T$.						
None	0.088	0.0042	0.0069	0.0024	0.0035	0.0036
+ D_S correct.	0.045	0.0042	0.0069	0.0023	0.0036	0.0037
+ $D_S + D_T$ correct.	0.038	0.0042	0.0055	0.0023	0.0036	0.0037
Translation, $t_{\text{pre}} = (0 \mu\text{m}, 50 \mu\text{m})^T = (0 \text{ pixel}, 20 \text{ pixel})^T$.						
None	0.051	0.0034	0.0062	0.044	0.0032	0.0065
+ D_S correct.	0.044	0.0034	0.0061	0.024	0.0031	0.0038
+ $D_S + D_T$ correct.	0.031	0.0033	0.0040	0.024	0.0031	0.0038

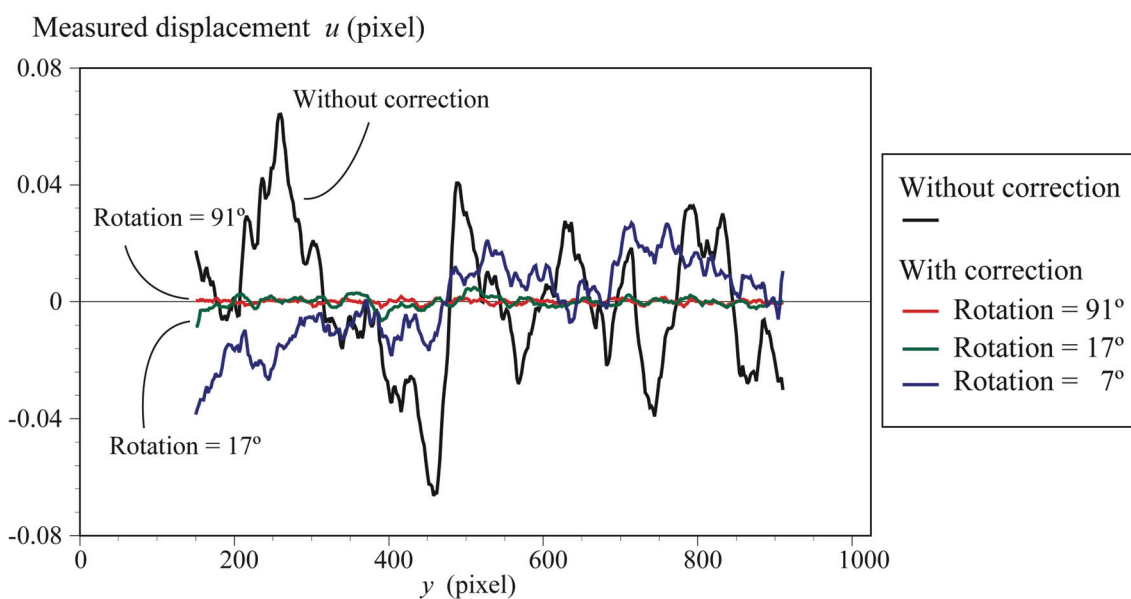


Fig. 5.13 Effect of the degree of mechanical rotation on the accuracy of D_T detection.

5.3 はんだ接合部ひずみ分布評価

5.3.1 試験片の構成

本節では熱サイクル中での模擬 FC パッケージのはんだ接合部周辺のひずみ分布を、開発したひずみ計測システム及び有限要素解析により評価した。実装接合部の構造を図 5.14 に示す。模擬パッケージ構成材であるアンダーフィル材、ビルドアップ材の物性値を図 5.15, 図 5.16 に示す。各線膨張係数 (CTE) は Thermo-Mechanical Analysis (TMA) 試験により昇温速度 10 °C/min で求め、弾性率は Dynamic Mechanical Analysis (DMA) 試験により、昇温 5 °C/min, 10Hz で計測した。はんだ材料には, Sn-3.0Ag-0.5Cu の組成の鉛フリーはんだを用いた。

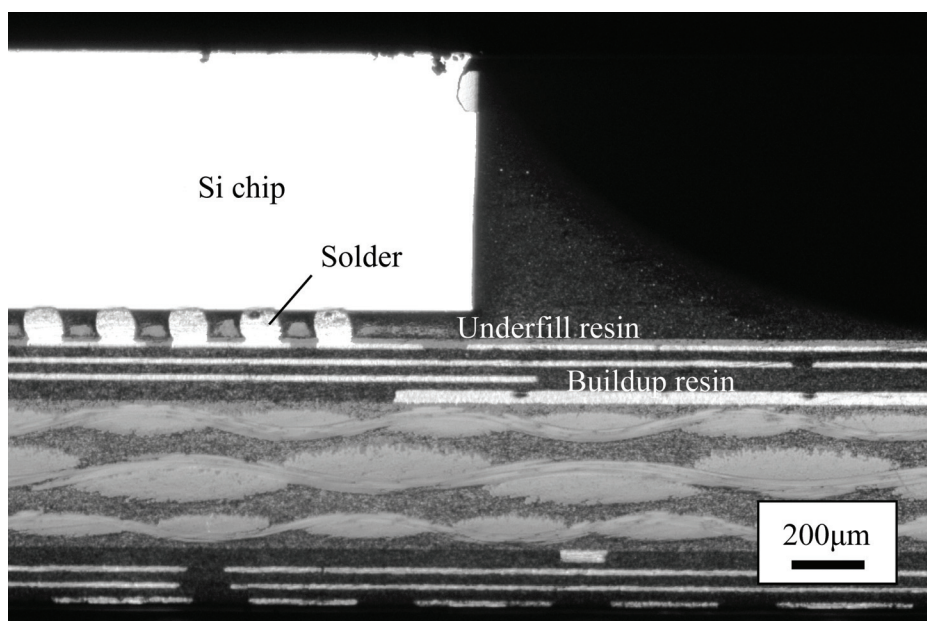


Fig. 5.14 Cross-section image of a FC packaged specimen.

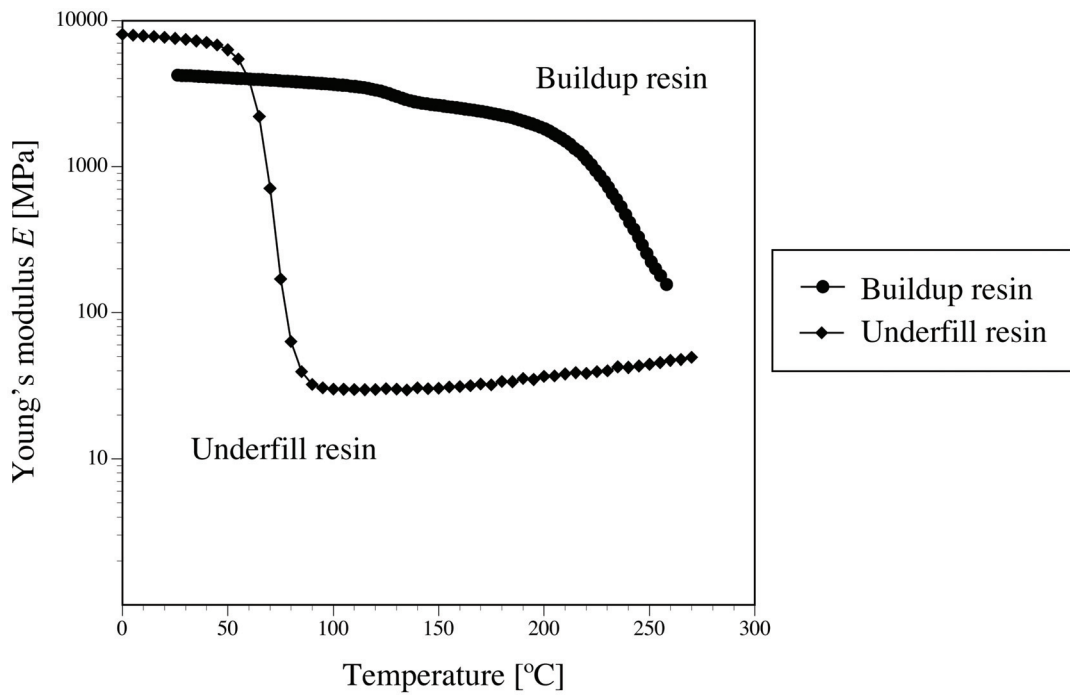


Fig. 5.15 Young's modulus of buildup resin and underfill resin.

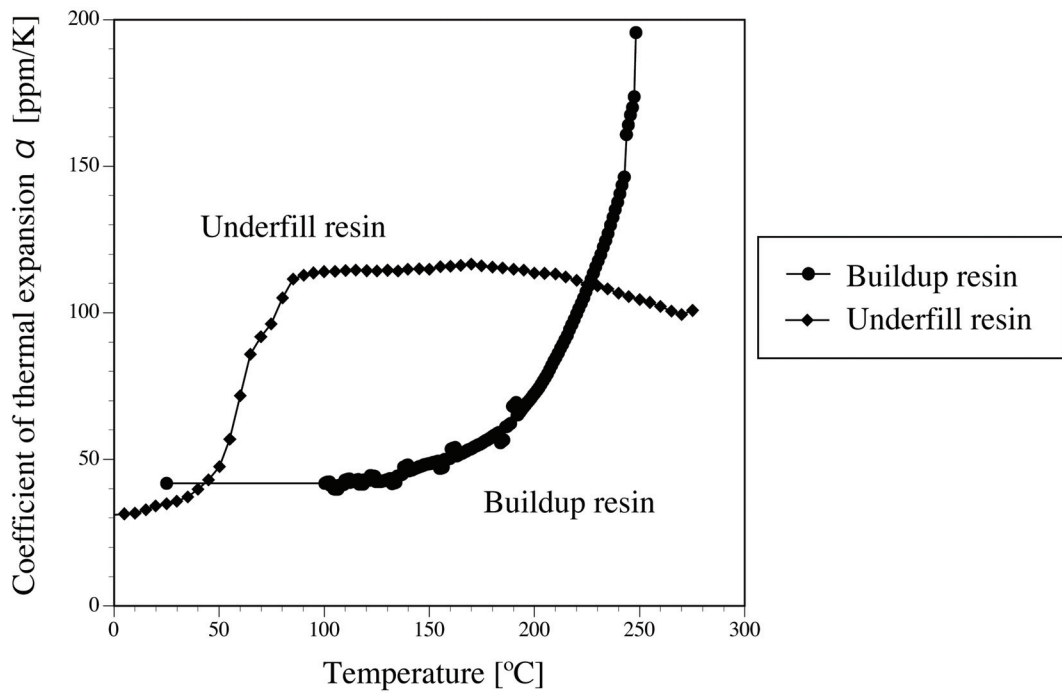


Fig. 5.16 Coefficients of thermal expansion of the buildup resin and the underfill resin.

5.3.2 DICM によるひずみ分布計測

50mm 角の模擬パッケージから図 5.17 に示すような 25mm×6mm の断片を切り出し、中央側断面を鏡面研磨した。その後、DICM を適用するために断面にインクスプレーで模様付けを行った。熱サイクル下におけるひずみ計測には、図 5.18 のように加熱冷却チャンバーに設置したサンプルの断面画像をレーザ走査型共焦点顕微鏡により取得し、DICM を適用した。撮影倍率は 1000×を用い、画素サイズは 0.25 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ であった。インク塗布後のはんだ周辺の撮影画像を図 5.19 に示す。また、計測温度履歴については、一例を図 5.20 で示す。温度が十分安定するまで保持時間を確保したため、計測ごとに履歴が多少異なる。サブセット寸法 $M = 25 \text{ pixel}$ で保持温度区間ごとに変位を計測し、移動最小二乗法により滑らかなひずみ分布を算出した。Si チップと基板間の線膨張ミスマッチの影響が強く生じるチップ端部のはんだバンプ内部について、25 $^{\circ}\text{C}$ ～125 $^{\circ}\text{C}$ の加熱時におけるひずみ分布計測結果を Fig. 5.21 に示す。これは 25 $^{\circ}\text{C}$ ～125 $^{\circ}\text{C}$ の各保持温度区間でひずみを足し合わせた結果である。 ϵ_{xy} はチップ接合部で大きく、基板中央側(-x 側)角部に集中している。また、 ϵ_y では、はんだ内部に 1%以上の引張ひずみが生じており、予想されるはんだ自身の熱膨張量よりも大きいことから引張りの負荷が生じていることがわかる。チップとアンダーフィル材の界面で大きな圧縮ひずみが生じるのは、表面の 3 元形状によるものと考えられる。

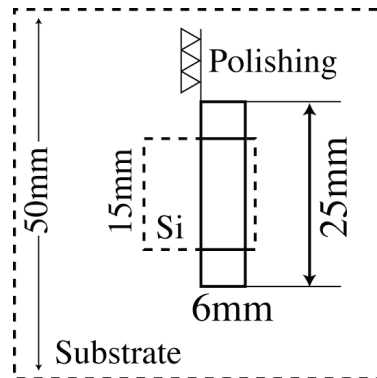


Fig. 5.17 Cutting condition of the specimen

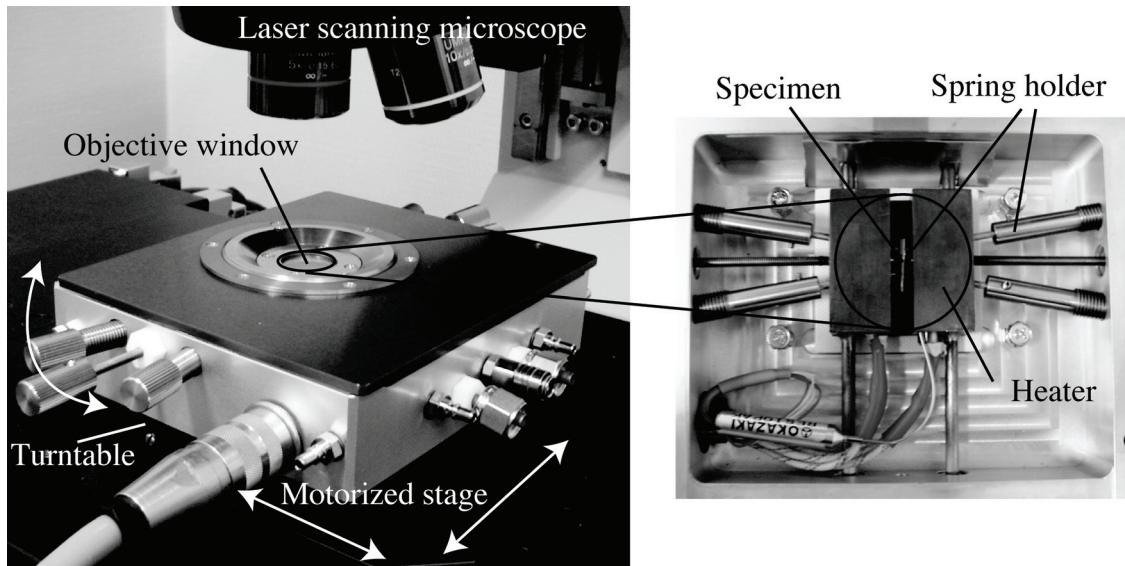


Fig. 5.18 Photographs of an experimental apparatus with a heating chamber.

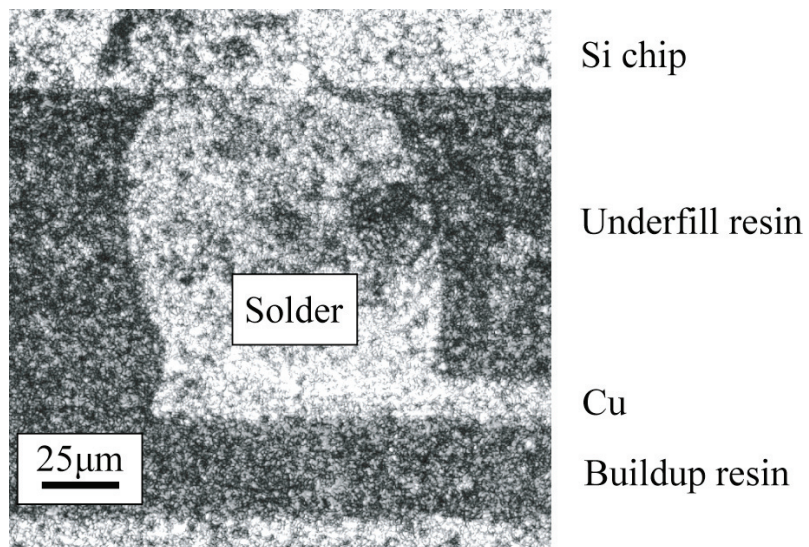


Fig. 5.19 An image of painted surface applied to DICM measurement.

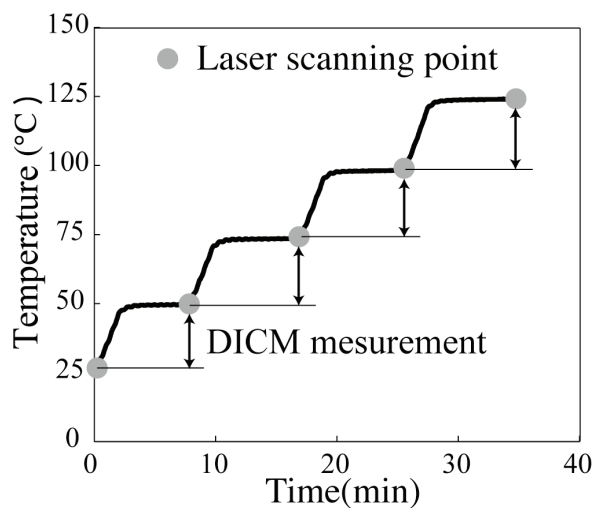


Fig. 5.20 A temperature profile during DICM measurements.

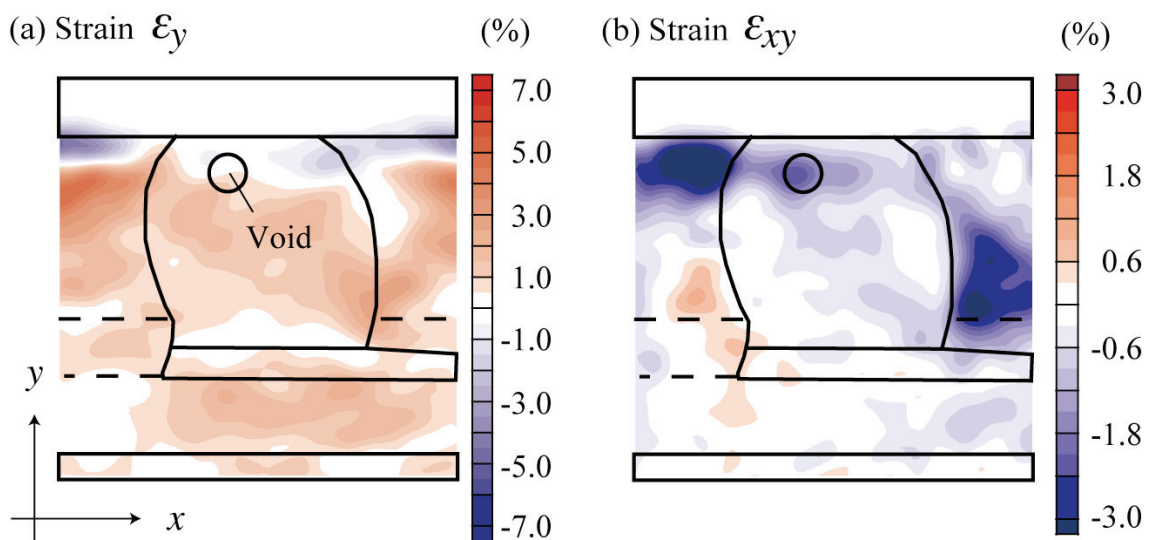


Fig. 5.21 Distributions of measured strain after heating from 25°C to 125°C.

5.3.3 有限要素解析によるひずみ分布評価

有限要素解析には、図 5.22 のような、計測に使用した試料を模した 1/4 対称モデルを用いた。図 5.22(a)にあるようにチップ端部から 3 つ分、奥行き方向 2 つ分の計 6 つのはんだバンプのみ形状をモデル化した。その他のはんだ及び銅配線の配置については、体積率が実際のサンプルとほぼ同じになるようにした。図 5.22(b)にはんだ周辺の詳細な構造を示す。また、解析モデルはバンプ形状を模したメッシュ分割の細かなローカル部分とその周辺のグローバル部分があり、汎用 FEM コード MSC.Marc の Glue 接触オプションによりメッシュサイズの異なるモデルを結合した。要素タイプには三次元 8 節点アイソパラメトリック要素を用いた。

樹脂材料は粘弾性の特性を持つため、数値解析には粘弾性挙動を考慮する必要がある。本研究では文献[10]を参考にし、アンダーフィル材の DMA 試験により計測した緩和弾性率を式(5.19)で示すプロニー級数の和($N = 15$)で記述した。またシフトファクター a_T が式(5.20)で示す Williams Landel Ferry(WLF)則に従うと仮定した。

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{k=1}^N G_k \exp\left(-\frac{t}{\tau_k}\right) \quad (5.19)$$

$$\log a_T = -\frac{8.86(T - T_g)}{101.6 + (T - T_g)} \quad \text{at } T_s = T_g + 50 \quad (5.20)$$

一方、ビルドアップ材については T_g が比較的高いことから弾性体として扱った。はんだは弾塑性クリープ特性を考慮し、文献[11]の値を用いた。このときの応力-ひずみ関係は表 5.2 に、クリープ則を式(5.21)に示す。その他の材料の物性値については、表 5.3 に示す。その他の構成材については弾性体として取り扱った。アンダーフィル材とビルドアップ材については、ポアソン比を 0.3 とし、図 5.15, 5.16 で示した線膨張係数とヤング率を用いた。

$$\dot{\varepsilon}_c = \sigma^{-0.03217 + 11.889} \exp(0.1595T - 50.841) \quad (5.21)$$

解析温度履歴は初期温度を 150°C とし、120 分で 25°C まで冷却後 10 分間保持した。その後、昇温速度 12.5°C/min で保持時間 5 分、保持温度はひずみ計測実験と一致させ、解析中のモデル内の温度は一様と仮定した。

25°C ~ 125°C への昇温時に得られる最端部に位置するはんだバンプ表面でのひずみ分布を図 5.23 に示す。はんだ内部のせん断ひずみ ε_{xy} は、チップ接合部角部の基板外側に集中した。また、はんだ内部の垂直ひずみ ε_y は、上下の接合部にひずみが集中した。

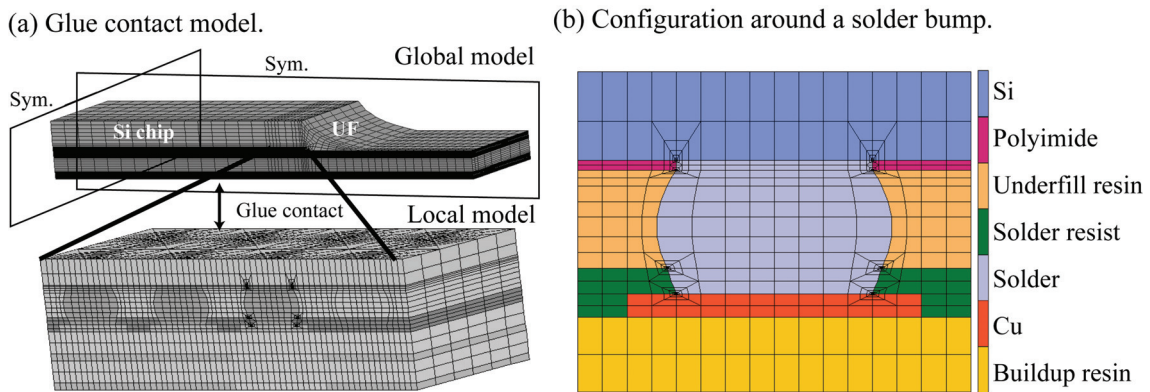


Fig. 5.22 Analysis model for FEM.

Table 5.2 Stress-strain relationship of Sn-Ag-Cu solder.

Temperature (°C)	-40	-25	0	20	25	40	50
Plastic strain	Stress (MPa)						
0	29	27.5	25	36	22.5	21	19.9
0.004	36.7	34.8	31.6	29	28.4	26.5	25.2
0.021	48.4	45.9	41.7	38.3	37.5	35	33.3
Temperature (°C)	60	75	80	85	100	120	125
Plastic strain	Stress (MPa)						
0	18.9	17.4	17	16.5	15.2	13.4	12.9
0.004	23.9	22	21.5	20.9	19.2	16.9	16.4
0.021	31.6	29.1	28.3	27.6	25.3	22.4	21.6

Table 5.3 Material properties of the components of a FC package.

	Elastic modulus (Gpa)	CTE (ppm/K)	Poisson's ratio	Tg (°C)
Si	131	3	0.28	—
Copper	65	17	0.343	—
Solder resist	2.6/0.067	55/140	0.31	107
Polyimide	2.9	50	0.3	—
Substrate core	10.6/4.8	14/25	0.2	170
Solder bump : Ref. (11)	40	23	0.3	

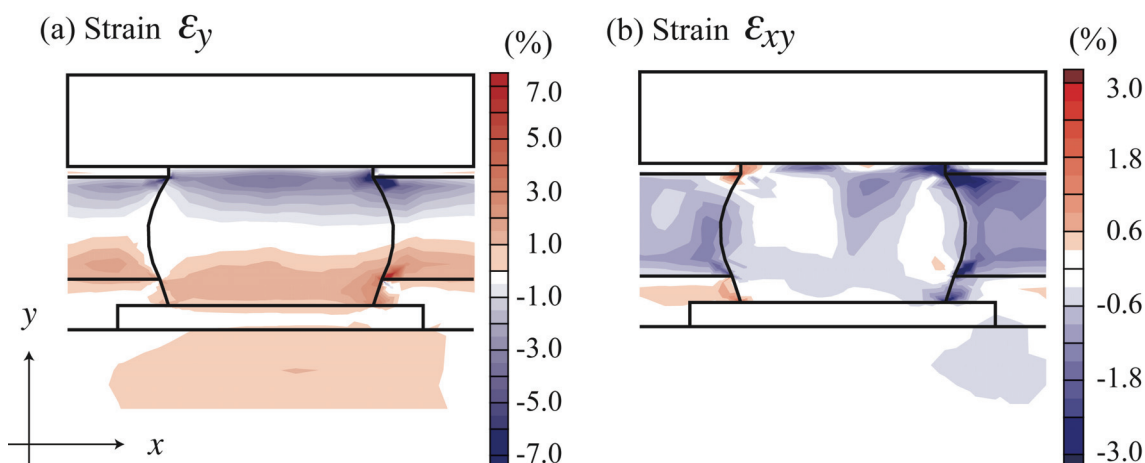


Fig. 5.23 Distributions of strain calculated by the FEA after heating from 25°C to 125°C.

5.3.4 ひずみ分布評価及び比較検討

計測結果でははんだ内部に垂直ひずみ ϵ_y の1%以上伸びが観察されたが、解析結果では接合界面以外で明らかな伸びは確認できなかった。また、せん断ひずみ ϵ_{xy} の集中位置も計測結果ではチップとの界面で基板中央側である一方、解析結果ではチップとの界面で基板外側であった。DICMによるひずみ計測においては、サブセット寸法に依存した平滑化によって過小評価してしまうが、ひずみ分布の定性的な傾向への影響は軽微である。したがって有限要素法に使用した解析モデルについて以下で検討する。

はんだバンプの変形を拘束する構成材には、シリコンチップ、ビルドアップ材、アンダーフィル材がある。低温でのガラス転移点を有するアンダーフィル材は、熱サイクル中の高温域で粘性支配となるが、その粘弾性挙動は弾性率にのみ考慮し、ポアソン比は測定の困難さから便宜的に0.3として時間温度依存性を考慮していない。Ernstらは封止樹脂材のポアソン比の温度時間依存性も考慮すべきであるとし、実験的にその変動を評価し、パッケージに与える影響を検討している[12]。またWangらは、はんだ内部に生じるひずみがアンダーフィル材の材料物性に左右されることを数値解析によって明らかにしている[4]。そこで、有限要素解析においてアンダーフィル材のポアソン比を従来の0.3から0.48に変更して解析した結果を図5.24に示す。せん断ひずみ ϵ_{xy} の集中位置が、従来の基板外側から中央側に移っている。また、垂直ひずみ ϵ_y も膨張が支配的となって実験結果と定性的に一致する。ただしこの仮定は、高温では粘性が支配的となるためにある程度妥当であるが、ガラス転移点以下においてポアソン比を過大に評価している可能性がある。

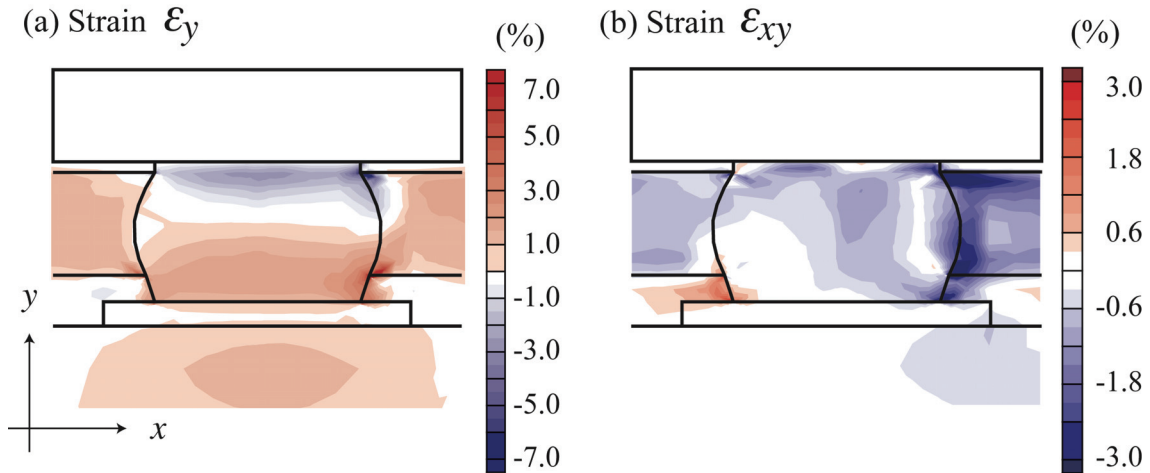


Fig. 5.24 Modified results for FEA using the higher Poisson's ratio 0.48 of the underfill resin.

5.4 結言

電子実装接合部のひずみ評価を目的とし、通常の光学顕微鏡よりも高倍率観察可能なレーザ顕微鏡を用いて DICM による変位及びひずみ計測システムを構築した。構築したシステムの計測精度を検証するため、レーザ顕微鏡画像に内在するゆがみをモデル化し、それらの影響を定量的に評価した。また、このシステムを用いて熱サイクル中での模擬 FC パッケージのはんだ接合部周辺のひずみ分布を評価し、有限要素解析結果と比較検討した。本章で得られた結論を以下に示す。

- 1) レーザ顕微鏡画像は通常の光学顕微鏡画像に比べ画像コントラストに優れる。その一方で、レーザ顕微鏡観察では走査に起因する画像ゆがみの影響を受け、静止画像間においても複雑な変位分布が生じ、変位の計測精度を低下させるものであった。
- 2) 時間依存性の有無でレーザ顕微鏡画像のゆがみをそれぞれモデル化し、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た。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、変位の計測精度は標準偏差で $0.04 \text{ pixel} (= 0.1 \mu\text{m})$ となった。このとき観察倍率は $100\times$ で、サブセットは $53 \times 53 \mu\text{m}^2$ であったため、ひずみの空間分解能は 90% 以上の再現性で $200 \mu\text{m}$ である。また、 $1000\times$ においては $20 \mu\text{m}$ となる。
- 3) 開発した変位及びひずみ計測システムを用いて、多層基板 FC 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た。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たところ、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も、定性的にも一致はみられなかった。
- 4) 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、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ものとなった. 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で, 実装基板中のはんだの変形挙動評価の更なる信頼性向上が期待できる.

第5章の参考文献

- [1] Guo, Y.; Lim, C. K.; Chen, W. T.; Woychik, C. G. (1993): Solder Ball Connect (SBC) Assemblies under Thermal Loading: I. Deformation Measurement via Moiré Interferometry, and Its Interpretation, *IBM J. Res. Develop.*, vol. 37, no. 5, pp. 635-647.
- [2] P. S. Ho, G. Wang, Min Ding, Jie-Hua Zhao, Xiang Dai, "Reliability issue for flip-chip packages", *Microelectronics Reliability*, Vol.44, pp.719-737, 2004.
- [3] Tay, A. A. O.; Goh, K. Y. (2003): A Study of Delamination Growth in the Die-Attach Layer of Plastic IC Packages under Hygrothermal Loading During Solder Reflow, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, vol. 3, no. 4, pp. 144-151.
- [4] Tong Hong Wang, "Effect of Underfill Thermomechanical Properties on Thermal Cycling Fatigue Reliability of Flip-Chip Ball Grid Array", *Journal of Electronic Packaging*, Vol.126, pp.560-564, 2004.
- [5] Sutton, M. A.; Li, N.; Garcia, D.; Cornille, N.; Orteu, J. J.; McNeill, S. R.; Schreier, H. W.; Li, X. (2006): Metrology in a Scanning Electron Microscope: Theoretical Developments and Experimental Validation, *Measurement Science and Technology*, vol. 17, pp. 2613-2622.
- [6] Sutton, M. A.; Li, N.; Joy, D. C.; Reynolds, A. P.; Li, X. (2007): Scanning Electron Microscopy for Quantitative Small and Large Deformation Measurements Part I, *Experimental Mechanics*, vol. 47, pp. 775-787.
- [7] K. Henriksen, S. L. S. Stipp, "Image distortion in scanning probe microscopy", *American Mineralogist*, Vol.87, pp.5-16, 2002.
- [8] M. Pluska, A. Czerwinski, J. Ratajczak, J. Katcki, R. Rak, "Elimination of scanning electron microscopy image periodic distortions with digital signal-processing methods", *Journal of Microscopy (Oxford)*, Vol.224, pp.89-92, 2006.
- [9] B. Withy, M. Hyland, B. James, "Pretreatment effects on the surface chemistry and morphology of aluminum", *International Journal of Modern Physics B*, Vol.20, pp.3611-3616, 2006.
- [10] 三宅清, "BGA パッケージの硬化収縮を考慮した反り粘弾性解析", *エレクトロニクス実装学会誌*, Vol.7, No.1, pp.54-61, 2004.
- [11] 于強ら, "電子機器のはんだ接合部の寿命のバラツキ評価手法の確立", *日本機械学会 RC227 成果報告書*, pp.285-304, 2008.

- [12] L. J. Ernst, G. Q. Zhang, K. M. B. Jansen and H. J. L. Bressers, "Time- and Temperature-Dependent Thermo-Mechanical Modeling of a Packaging Molding Compound and its Effect on Packaging Process Stresses", *Journal of Electronic Packaging*, Vol. 125, pp.539-548, 2003.

第6章

原子間力顕微鏡観察下での 表面三次元変位分布計測

6.1 緒言

電子実装においては更なる小型化が期待されているが、これまでの光学観察によるデジタル画像相関法 (DICM) システムではその要求に答えることができない。光学顕微鏡では光の性質により倍率 1000×以上の観察において分解能の向上は期待できない[1]とされ、それ以上での倍率での使用は画像コントラストの低下が避けられない。より高解像度であるとされる前章のレーザ走査型共焦点顕微鏡システムの場合であっても、空間分解能は 120 nm が保証されている限界性能である。つまり 1 画素が 120nm に相当する観察がコントラスト低下を伴わない最大の観察倍率であり、これは約 2000×に相当する。このとき、DICM によるひずみ分布計測はサブセット寸法に応じて平滑化の影響を受けるため、その検出率を 90% 以上とした場合、サブセット 51×51 pixel (= $6.12 \times 6.12 \mu\text{m}^2$) に対して 4 倍以上、つまり $25 \mu\text{m}$ 程度のひずみ分布の広がりが必要であることを意味する。したがって $10 \mu\text{m}$ オーダの構造物寸法のひずみ分布評価を実施するには、原理的に異なる観察手法を適用する必要がある。

超高倍率観察が可能な装置として、電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) や原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope: AFM) などがある。SEM においては最大 10000×まで DICM の適用例が報告されている [1-4]。原理は比較的レーザ走査型顕微鏡に近く、装置自身のコストが高い点を除けば今後の発展も期待される。AFM 観察画像を DICM に適用したものでは、観察倍率 10000×以上で変位計測を実施した例が報告されているが、その特性を十分に発揮できているものは少ない[5-9]。これはプローブの走査挙動に起因する複雑なゆがみを画像に内包するため、画像の再現性が著しく低いことが原因である。特に、10min 前後という観察時間の長さから、熱に起因するドリフトの影響が大きい。多くの商用 AFM で利用者がピエゾスキャナの挙動を較正可能であるが、熱ドリフトなどの外乱に対しては効力を発揮しない。このような熱ドリフトの補正に関して、ドリフトによる画像のゆがみ

を一次近似で仮定し、観察後の画像をアフィン変換で補正できるとして取り扱うことが多い[10-12]。原子の周期配列等をマーカーとして参照することでゆがみを補正する手法もある[13]が、不規則な模様を利用する DICM においては、この様な手法は利用できない。Qinminら[14]は相対的なドリフト量をリアルタイムに予測し、ハードウェアからアクティブにその動きを打ち消している。一方で、DICM における変位及びひずみ計測では、より詳細なドリフトの評価及び補正を要するため、この走査特有のゆがみを取り扱うには、これら既存の手法では不十分であり、新規手法の開発を必要とする。

本章では、高倍率観察可能な AFM を DICM による変位計測に適用することで、ナノ変位計測システムを構築した。また、AFM 画像の有する表面三次元形状データを活用し、ドリフト変位を3次元的に定義することで、既存の取り扱いよりも詳細にドリフト量を評価した。得られたドリフトによるゆがみ量を用いて AFM 画像を補正することで、面外変位も含めた3次元変位計測を可能とした。

6.2 DICM による表面三次元変位分布計測

6.2.1 サブセットの三次元変形への拡張

AFM による観察画像は各画素に対応する点での高さ情報を有する。この高さ分布を相関の評価に利用するため、光学顕微鏡画像を対象とした相関式(2.1)を次式のように変更した。

$$C = 1 - \frac{\sum_{i,j=-M}^M (H_d(X+i, Y+j) - w^*) \times H_u(x+i, y+j)}{\sqrt{\sum_{i,j=-M}^M (H_d(X+i, Y+j) - w^*)^2 \sum_{i,j=-M}^M H_u^2(x+i, y+j)}} \quad (6.1)$$

ここで、 $H_u(x, y)$ および $H_d(X, Y)$ はそれぞれ変形前画像上の (x, y) 、変形後画像上の (X, Y) における高さであり、 i, j は着目点を原点とするサブセット内局所座標である。また、 (x, y) と (X, Y) の関係式は、式(2.3)と同様に面内のサブセット変形を用いて次式で定義する。

$$X = x + u + \frac{\partial u}{\partial x} i + \frac{\partial u}{\partial y} j, \quad Y = y + v + \frac{\partial v}{\partial x} i + \frac{\partial v}{\partial y} j \quad (6.2)$$

通常の光学的な観察画像では、変形後の画像においてサブセットの面内変形のみ考慮した。AFM による観察画像では図 6.1 のようにサブセットの面外変形まで考慮し、式(6.1)中の w^* を次式で定義した。

$$w^* = w + \frac{\partial w}{\partial x} i + \frac{\partial w}{\partial y} j \quad (6.3)$$

ここで、 w はサブセット中心における z 方向への変位であり、 $\partial w / \partial x$ 及び $\partial w / \partial y$ はサブセット内での z 方向変位の勾配を表す。このとき、正しくパターンマッチングをおこなうには、

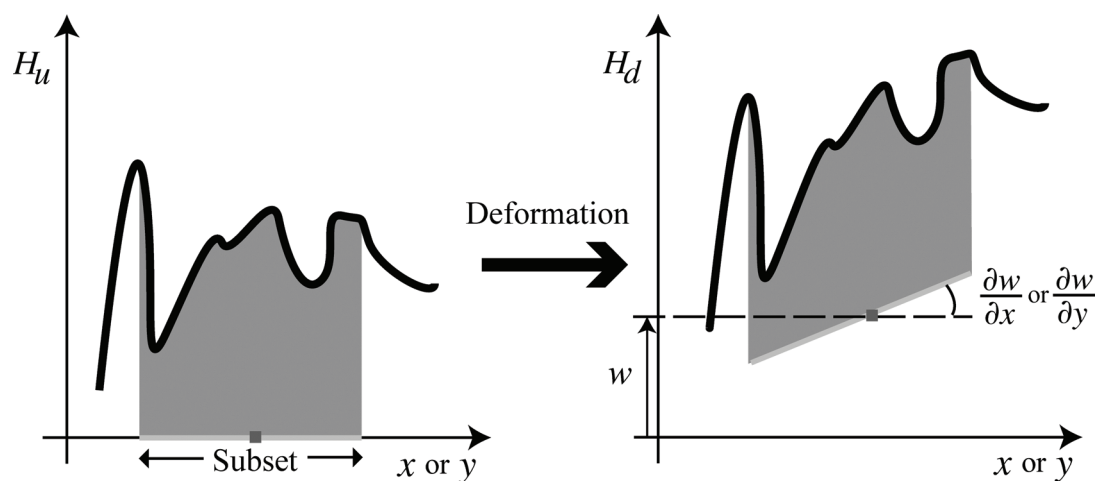


Fig. 6.1 Out-of-plane deformation model of the subset.

図 6.1 のように、表面形状の大域的な 3 次元変形の前後で、サブセット内の局所的な表面形状が保存される必要がある。

6.2.2 計測システムの特徴

前項の評価関数を用いて、AFM 観察画像での変位分布の計測精度を評価した。図 6.2 のように AFM(Agilent 製 Agilent5400SPM)をアクティブ防振台上(HERZproduct 製 TS-140)に設置し、その外周を吸音スポンジで覆うことにより、外乱の影響を低減した。観察に先立って 1 時間程度の十分なウォームアップ[10]を経て、試料表面観察を行った。走査条件は、データ点数 512×512 、走査速度 2 line/sec (往復で 1 line/sec) で $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ 領域を対象とした。このとき 1 画素が 19.53 nm に相当する。DICM の条件として、サブセット寸法を $M = 25$ pixel、評価点間隔を 5 pixel とした。試料には表面を耐水研磨紙 (#2000) で流水研磨した後、P2 エッチング[15]によって化学的表面処理を施したアルミニウム片を用いた。試料の表面観察像を図 6.3 に、ある走査線中の高さ分布を図 6.4 に示す。また、平坦な面を有するシリコン製のリファレンス試料 (Veeco 社製 NGR-11010) の形状測定結果を、比較のために図 6.4 に示す。リファレンス試料上で測定された表面粗さは、ノイズや表面の汚染による高さ情報の誤差に相当する。図 6.4 のように、試料の粗さはリファレンス試料のノイズに比して大きな値であり、相関によるパターンマッチングは可能であることがわかる。このアルミ片を対象に、AFM 観察画像間での変位分布を計測した。基本的な測定誤差を調べるために、変形も移動もしていない静止した試料表面を時系列上連続に撮影し、それぞれ変形前後の画像として DICM により変位分布を得た。画像間での時間間隔は 1024 sec であった。得られた変位分布を図 6.5 に示す。すべての変位成分で同様の横縞模様状の分布であった。ひずみ

換算で最大2%に相当するため、直接ひずみ評価に利用するには誤差が大きすぎる。次節で、この誤差の原因である熱ドリフト起因の画像ゆがみをモデル化し、その評価及び補正手法について述べる。

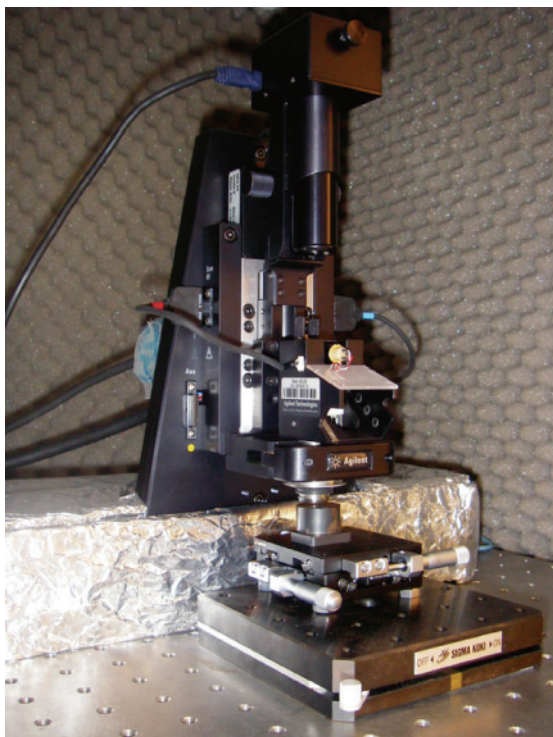


Fig. 6.2 AFM apparatus employed in this study.

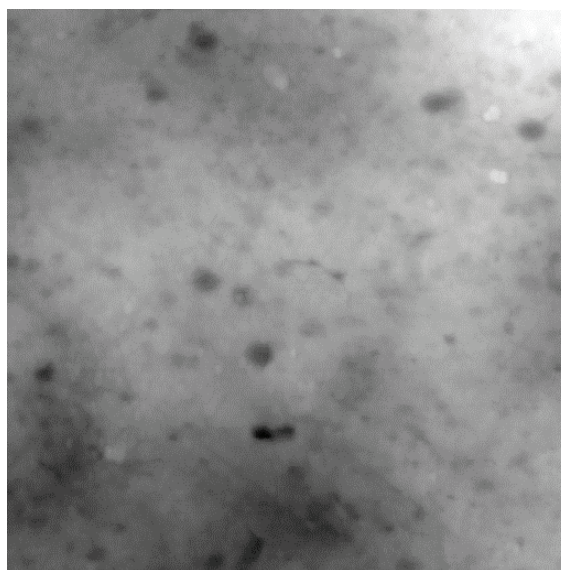


Fig. 6.3 Surface image of etched aluminum specimen observed by an AFM ($10 \times 10 \mu\text{m}^2$).

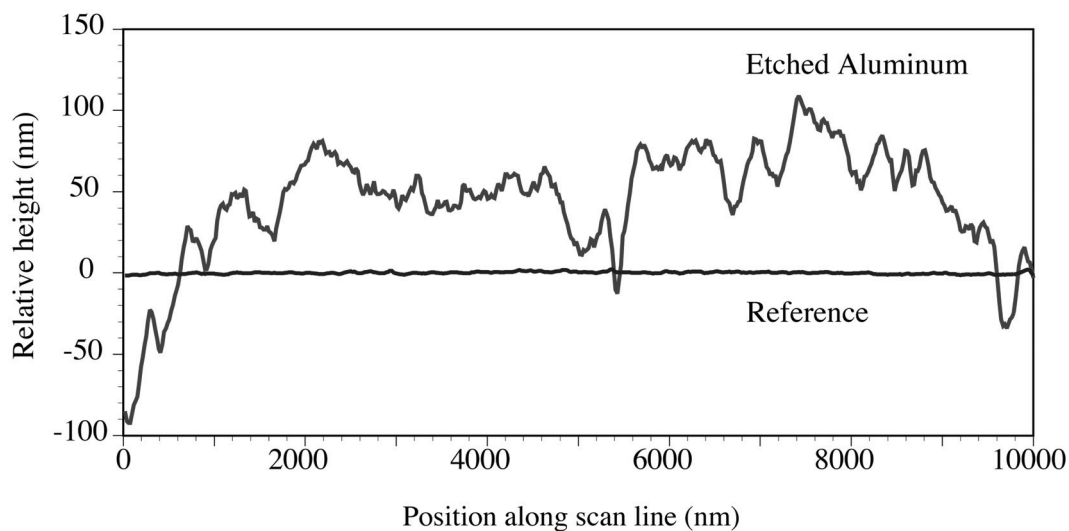


Fig. 6.4 Surface topologies within a single scanned line.

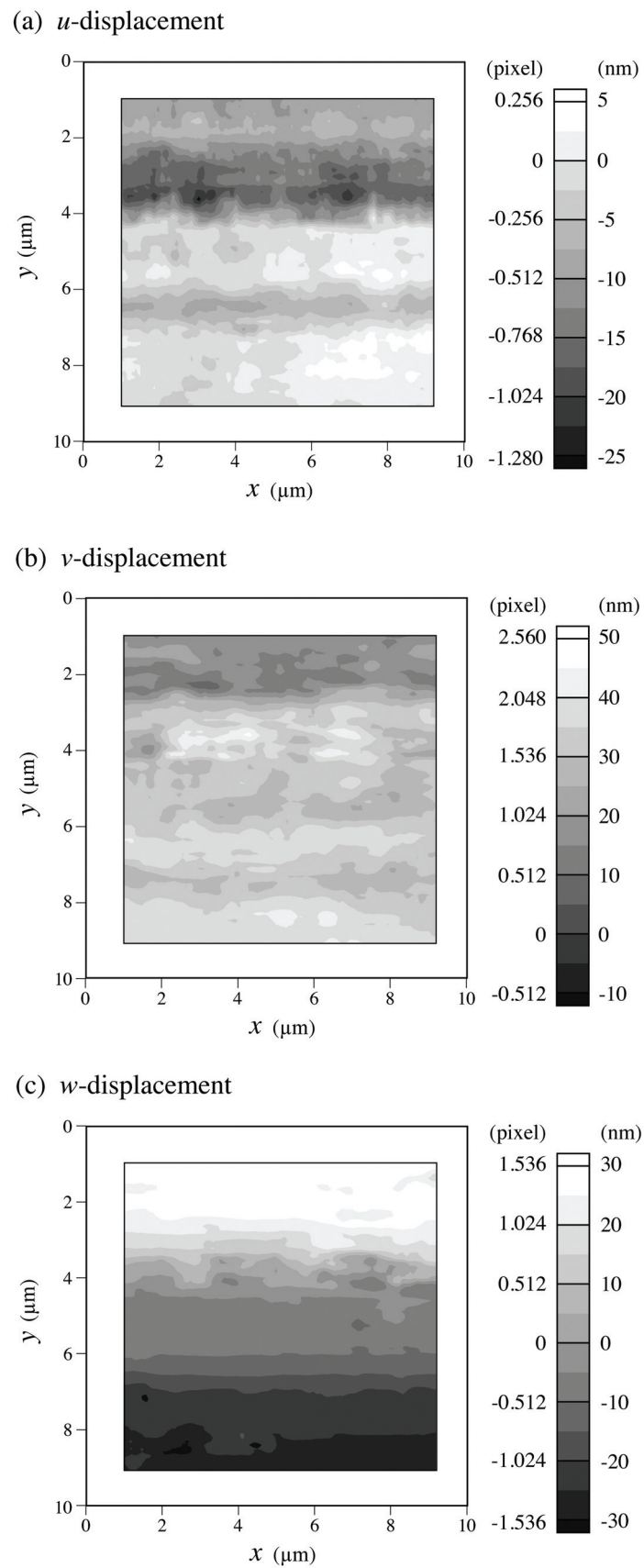


Fig. 6.5 Distributions of displacement field measured by DICM using two consecutive images.

6.3 AFM 画像のゆがみ評価及びその画像補正

6.3.1 AFM 画像のゆがみモデル及びその評価手法

AFM は piezo 駆動素子を用いて図 6.6 のようにそのプローブを左右に走査することで、物体表面の形状を計測する。AFM による観察像は、この piezo 駆動素子の応答非線形性やヒステリシスの影響だけでなく、機械振動や熱に起因したドリフトの影響を受けゆがむ。本システムではスキャナのクローズドループ制御を組み合わせることで、piezo 駆動素子の非線形性やヒステリシスの影響を低減した。一方で、プローブと試料表面の相対的な位置関係が変動する外乱、特に熱に起因するドリフトの影響は画像に残る。このとき、理想的な画像と観察画像との関係を次式で定義した。

$$\mathbf{R} = \Lambda(\mathbf{r} + \mathbf{D}) \quad (6.4)$$

ここで、 \mathbf{R} および \mathbf{r} はそれぞれ実際の観察画像および理想的な画像の座標を表す。 Λ はスケールリングファクターであり、その表記は次のようになる。

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_x & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_z \end{bmatrix} \quad (6.5)$$

ここで、 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ は各方向に対応するスケールリングパラメータである。例えば、理想の値に対して 10% だけ伸長した画像ではその値が 1.1 となる。また、 \mathbf{D} はドリフトによる画像のゆがみであり、

$$\mathbf{D} = (D_x(y) \quad D_y(y) \quad D_z(y))^T \quad (6.6)$$

である。熱ドリフトは時間に依存して変動するため、図 6.5 の結果のように、走査速度 0.5 line/sec の条件では高速走査方向 (図 6.6 中の x 方向) にドリフト量の変動は非常に小さく、低速走査方向 (図 6.6 中の y 方向) に沿って大きなドリフトの変動による変位誤差が生じた。従って走査線内ではドリフト量一定と仮定した。このとき式(6.6)は x 方向高速走査 (0 度走査) において y のみに依存する。また走査開始時の $y=0$ で $\mathbf{D}=\mathbf{0}$ として、この走査線をド

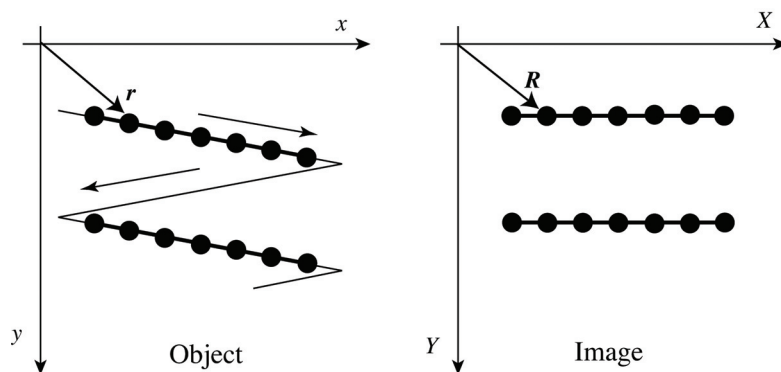


Fig. 6.6 Diagram of AFM image formation.

リフトのない基準線とした。

通常、AFM による観察はキャリブレーション用試料を用いてスケーリングを較正する。従って、キャリブレーションを施した走査条件において Λ は

$$\Lambda^0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

とみなせる。一方で、走査条件を変更した場合、例えば y 方向高速走査（90 度走査）での観察には x 方向 y 方向それぞれピエゾ駆動素子の走査スピードが変わるために、観察画像の Λ が異なる値を持つ。

$$\Lambda^{90} = \begin{bmatrix} \lambda_x^{90} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_y^{90} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

z 方向のスケーリングファクターは、z 方向のピエゾ素子は x-y 走査方向には依存しないため、常に一定であるとした。同様にドリフトゆがみ \mathbf{D} は高速走査方向に沿って一定であるから 90 度走査では、

$$\mathbf{D}^{90} = (D_x(x) \ D_y(x) \ D_z(x))^T \quad (6.9)$$

となる。式(6.6)～式(6.9)を式(6.4)に代入すると、基準画像を 90 度走査画像、変形後画像を 0 度走査画像とした同領域での画像上変位場 $\Delta\mathbf{R} = \mathbf{R}^{90} - \mathbf{R}^0$ は

$$\Delta\mathbf{R} = (\Lambda^{90} - \Lambda^0)\mathbf{r} + \Lambda^{90}\mathbf{D}^{90} - \Lambda^0\mathbf{D}^0 \quad (6.10)$$

となる。このような計測条件での変位分布を図 6.7 に示す。面内の変位 u, v は、ドリフトの変動よりもスケーリングの変更による伸縮が大きな変位分布として現れている。一方、面外変位である w はスケーリングの変更がないために、ドリフト量の差分が変位分布に現れているのみである。式(6.10)の両辺を微分して得られるひずみ場は、

$$\varepsilon_x = \lambda_x^{90} - 1 + \lambda_x^{90} \left(\frac{\partial D_x^{90}}{\partial x} \right) \quad (6.11)$$

$$\varepsilon_y = \lambda_y^{90} - 1 + \frac{\partial D_y^0}{\partial y} \quad (6.12)$$

である。図 6.7 の結果より求まるひずみは全領域で $\varepsilon_x = -0.044 \pm 0.002$, $\varepsilon_y = 0.046 \pm 0.003$ であった。式(6.11), (6.12)より、ひずみのばらつきは変動する不規則なドリフト量に相当する。このひずみの平均値をそれぞれ Λ が関わる項に相当する値とみなすと、 Λ が求まる。

$$\lambda_x^{90} = 0.956, \quad \lambda_y^{90} = 1.046$$

対象とする画像組を変更しても、 Λ の変動は 5%未満であったことから、各走査条件固有の値として以後は Λ にこの値を用いる。スケーリングファクター Λ によるゆがみを修正した画

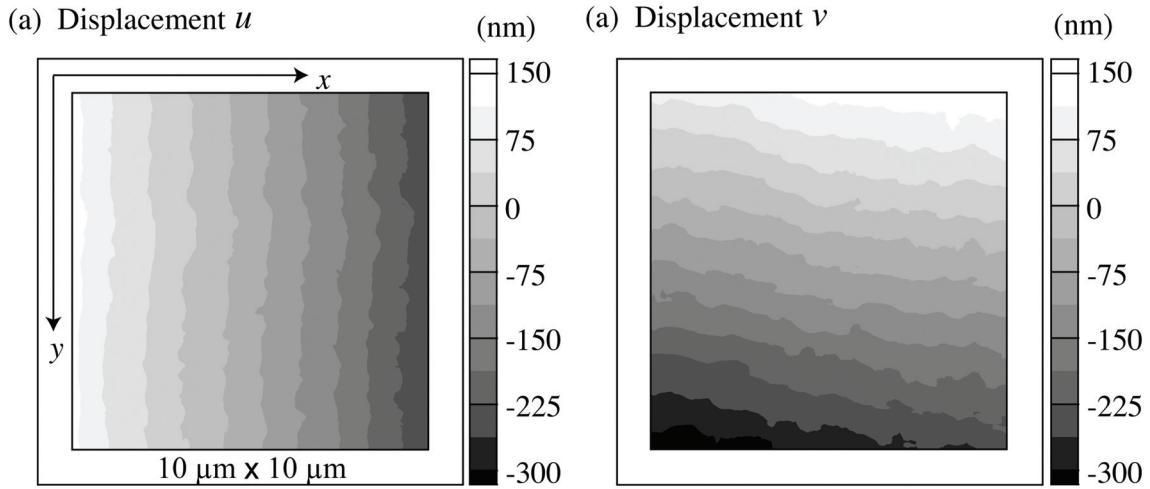


Fig. 6.7 Distributions of displacement field measured by DICM using 0°-scanned image and 90°-scanned image.

像 R_Λ を再構成する.

$$R_\Lambda = \Lambda^{-1}R \quad (6.13)$$

このとき、輝度値の場合と同様に双三次多項式(2.10)による高さ情報の内挿をおこない、 R_Λ 座標系における画像を生成した. この R_Λ を用いて式(6.10)は

$$\Delta R_\Lambda = D^{90}(x) - D^0(y) \quad (6.14)$$

となる. ここで、 $D^0(0) = 0$ かつ $D^{90}(0) = 0$ であるが、この点での変位 ΔR_Λ は零でない. これは画像間でのドリフト変位による相対的な平行移動量 t であり、平行移動時の変位 $\Delta R_\Lambda = R_\Lambda^{90} + t - R_\Lambda^0$ は次式で与えられる.

$$\Delta R_\Lambda - t = D^{90}(x) - D^0(y) \quad (6.15)$$

計測変位を移動最小二乗法で内挿することで各画素点での変位 ΔR_Λ を求め、 t とともに式(6.15)によりそれぞれの D が得られる. 以上、得られた Λ , D を用いて、式(6.4)に従い r 座標系での画像を再構成することで、ゆがみのない AFM 画像を生成することができる. このとき、画素情報の内挿には双三次多項式(2.10)を用いた.

6.3.2 画像ゆがみの評価及び補正手法の検証

ドリフトゆがみを評価するため、図 6.8 のように、図中 1 から 6 までは 0 度走査画像であり、それ以降が 90 度走査画像である観察を用いて変位計測を実施した. 基準画像を 0 度走査画像である図中 No. 1, 変形後画像に 90 度走査画像である No. II を用いて変位計測をおこない、式(6.14)から得られた画像 No.1 のドリフトゆがみ分布を図 6.9 に示す. 面内のドリフト量は画像内での平均速度が最大で 0.04nm/sec であり、十分なウォームアップ後の AFM シ

システムとして一般的な量である[10]. ただし, 局所的な値に関しては変動も大きく, 画像内で一定とする仮定は正しくない. また, 面外へのドリフト量は面内ドリフトよりも大きく, 計測された高さ情報に大きな誤差として含まれていることが明らかとなった.

次に, ドリフトによるゆがみを補正した画像組での計測変位を評価した. 図 6.5 の結果は画像 No.1 と画像 No.2 を用いた時系列上連続な画像間での変位であった. 画像 No.1 には No.II を, No.2 には No.III を組み合わせてそれぞれのドリフトゆがみを評価した. 得られたドリフトゆがみを用いてそれぞれ No.1 と No.2 をゆがみのない画像を変換し, 変換後の画像組にて変位計測をおこなった. 変換前後の変位分布を図 6.10 に示す. ゆがみの補正によって, ほぼ一様な変位が得られた. この一様変位は画像観察間でのドリフトによる平行移動量であり, ひずみ計測には影響はない. ゆがみ補正後の画像では, 平行移動による変位を除き, DICM による表面 3 次元変位計測が 20nm の変位分解能を有する.

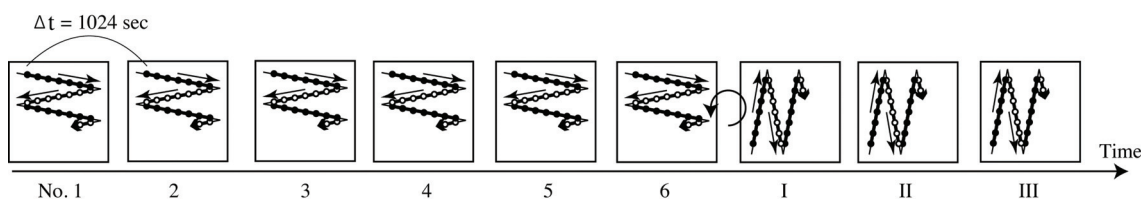


Fig. 6.8 A sequence for obtained AFM images.

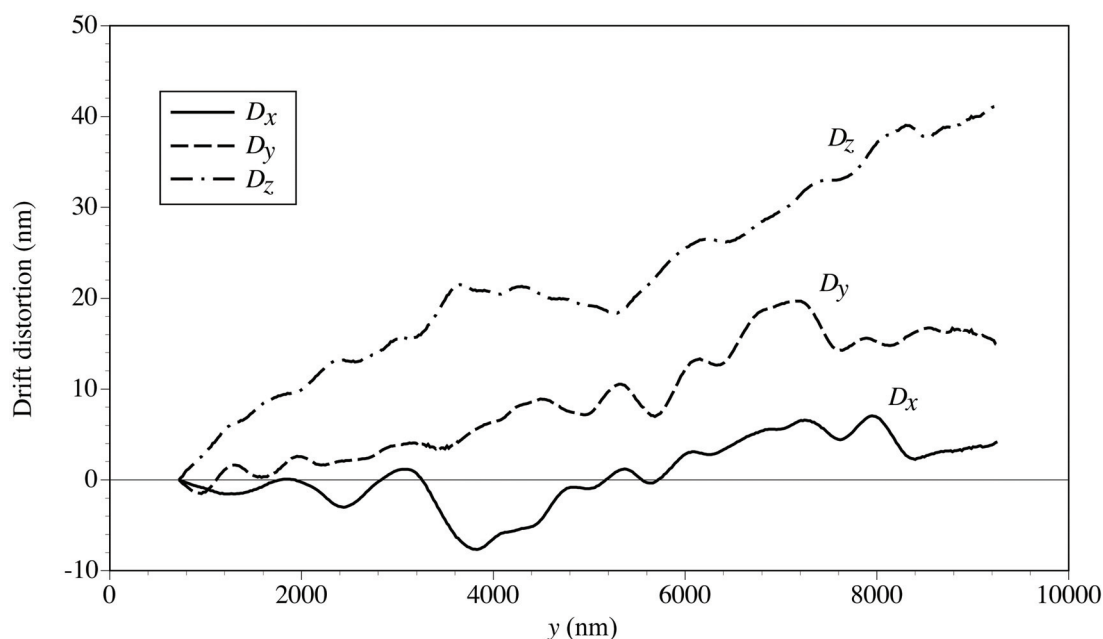


Fig. 6.9 Distributions of drift distortion at 0°-scanned image.

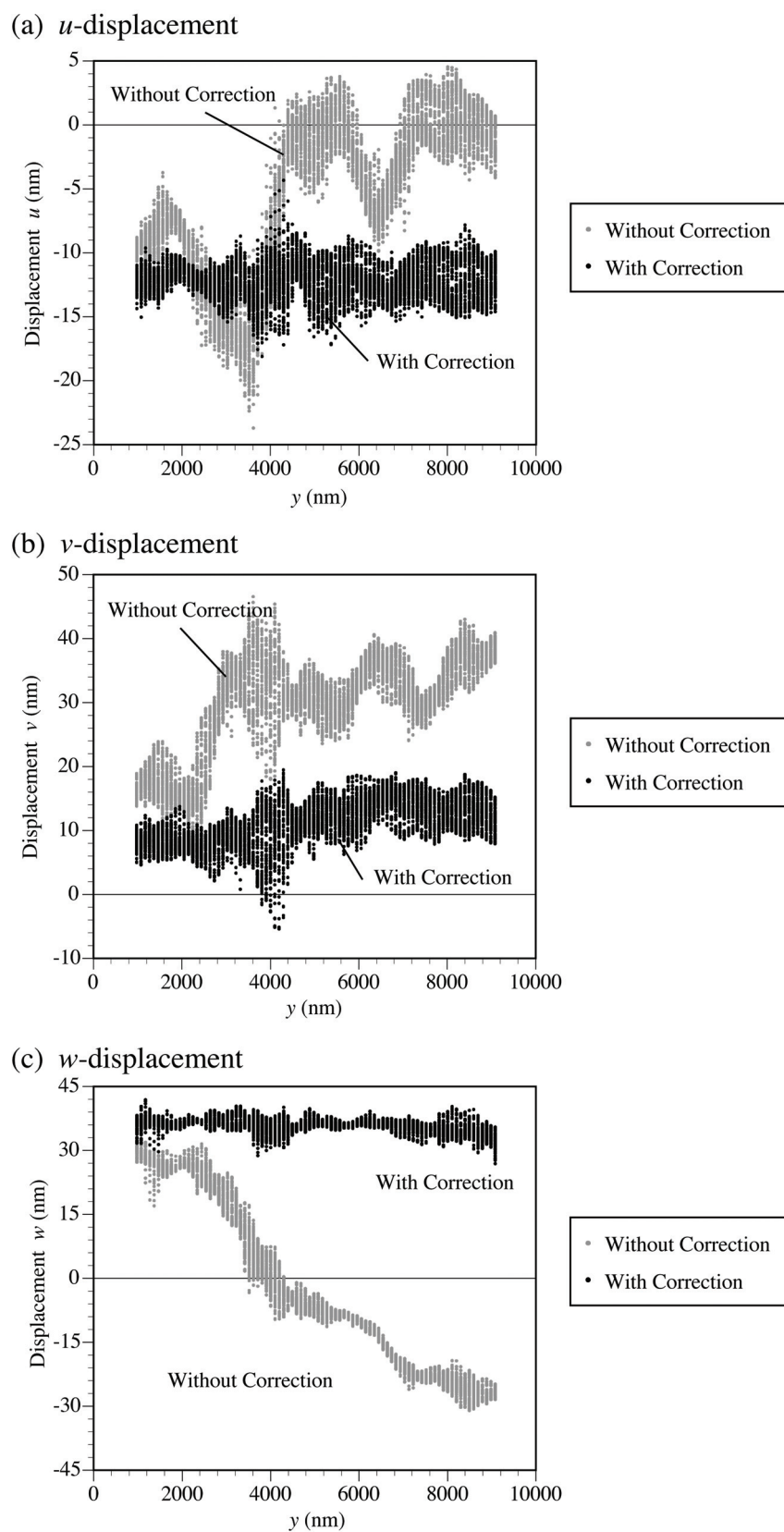


Fig. 6.10 Distributions of displacement field along the y -direction measured with and without image correction.

6.3.3 3次元変位計測への拡張に関する考察

Knauss ら[5]は相関値の収束性向上を目的として、評価関数に z 方向変位 w を考慮している。その一方で、画像の高さ情報は精度が低いとして、変位として利用していない。確かに図 6.9 のように z 方向へのドリフト量は他の方向に比べて大きく、観察画像の高さ情報の信頼性は低い。しかしながら、我々の提案したドリフト評価及び補正手法により z 方向へのドリフトも補正した画像においては、変位は全ての成分において同程度の精度が得られた。従って、適切なドリフト補正手法と AFM/DICM システムを組み合わせることで、精度良い表面 3次元変形計測が実現できることが明らかとなった。

また、本手法で新たに導入した w の勾配、 $\partial w/\partial x$ 及び $\partial w/\partial y$ をサブセットの変形として考慮することで、図 6.11 のように、ドリフトによるゆがみが大きく変動する領域（図中 $y = 4000$ nm 近傍）で変位計測の安定性が向上した。本システムのように試験環境が大気中である場合には、何らかの外乱によるこのような急峻なドリフト変動は避けられない。汎用的な変位及びひずみ計測手法として、任意の試験環境で AFM による観察をおこない、DICM に適用する場合には、本章で提案した手法が優れている。

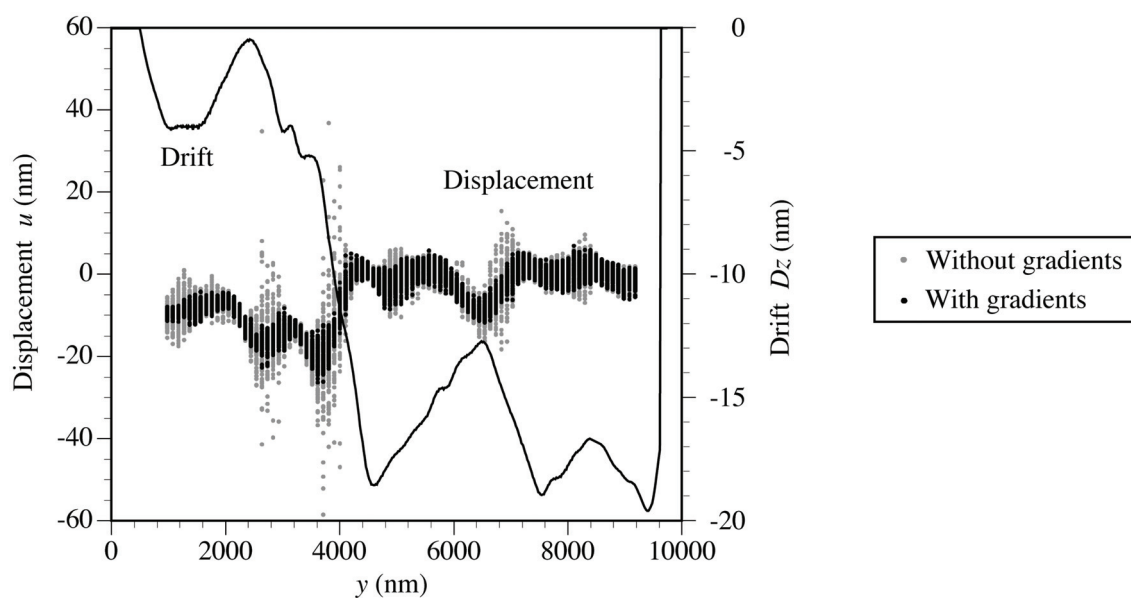


Fig. 6.11 The effect of the gradients of w in the correlation function on the accuracy of measured displacement.

6.4 結言

DICM における相関評価関数を改良することで、AFM 画像の高さ情報を利用する DICM 変位計測システムを開発した。また、AFM 画像の主たるゆがみの原因である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、ゆがみのない AFM 画像の再構成を試みた。得られた画像を用いて静止時の画像組における変位計測結果をもとに、AFM-DICM システムの特性を評価した。本章で得られた結論を以下に示す。

- (1) DICM における相関評価関数においてサブセットの変形モデルを3次元変形にまで拡張し、 z 方向変位 w の勾配 $\partial w/\partial x$ 及び $\partial w/\partial y$ を考慮した解析では、そうでない場合よりも精度の良い変位計測が可能となった。特に、後述の熱ドリフトに対して計測のロバスト性を向上させるものであった。
- (2) AFM 画像の主たるゆがみの原因である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、熱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が可能となった。このドリフト補正を組み合わせた AFM-DICM システムによって、表面3次元変位計測が変位3成分全てにおいて 20nm の分解能となった。このときサブセットは $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ であったため、ひずみの空間分解能は 90%以上の再現性で $4 \mu\text{m}$ である。

第6章の参考文献

- [1] M. A. Sutton, N. Li, D. Garcia, N. Cornille, J. J. Orteu, S. R. McNeill, H. W. Schreier and X. Li, "Metrology in a Scanning Electron Microscope: Theoretical Developments and Experimental Validation", *Measurement Science and Technology*, Vol. 17, pp. 2613-2622, 2006.
- [2] D. Vogel, A. Schubert, W. Faust, R. Dudek and B. Michel, "MicroDAC – A Novel Approach to Measure In Situ Deformation Fields of Microscopic Scale", *Microelectronics Reliability*, Vol.36, No.11, pp.1939-1942, 1996.
- [3] N. Sabate, D. Vogel, A. Gollhardt, J. Marcos, I. Gracia, C. Cane, B. Michel, "Digital image correlation of nanoscale deformation fields for local stress measurement in thin films", *Nanotechnology*, Vol.17, pp.5264-5270, 2006.
- [4] M. A. Sutton, N. Li, D. C. Joy, A. P. Reynolds and X. Li, "Scanning Electron Microscopy for Quantitative Small and Large Deformation Measurements Part I", *Experimental Mechanics*, Vol. 47, pp. 775-787, 2007.
- [5] W. G. Knauss, I. Chasiotis, Y. Huang, "Mechanical measurements at the micron and nanometer scales", *Mechanics of Materials*, vol.35, pp.217-231, 2003.
- [6] Sun Yaofeng, J. H. L. Pang, "AFM image reconstruction for deformation measurements by digital image correlation", *Nanotechnology*, vol.17, pp.933-939, 2006.
- [7] X. Li, W. Xu, M. A. Sutton M. Mello "Nanoscale deformation and cracking studies of advanced metal evaporated magnetic tapes using atomic force microscopy and digital image correlation techniques", *Measurement Science and Technology*, vol.22, pp. 835-844, 2006.
- [8] S Chang, C S Wang, C Y Xiong, J Fang, "Nanoscale in-plane displacement evaluation by AFM scanning and digital image correlation processing", *Nanotechnology*, vol.16, pp.344-349, 2005.
- [9] S. W. Cho, I. Chasiotis, "Elastic Properties and Representative Volume Element of Polycrystalline Silicon for MEMS", *Experimental Mechanics*, Vol.47, pp.37-49, 2007.
- [10] K. Henriksen, S. L. S. Stipp, "Image distortion in scanning probe microscopy", *American Mineralogist*, Vol.87, pp.5-16, 2002.
- [11] R. Staub, D. Alliata, C. Nicolini, "Drift elimination in the calibration of scanning probe microscopes", *Review of Scientific instruments*, Vol.66, No.3, pp.2513-2516, 1995.
- [12] J. F. Jorgensen, C. P. Jensen, J. Garnaes, "Lateral metrology using scanning probe microscopes,

- 2D pitch standards and image processing", *Applied Physics A*, Vol.66, pp.845-852, 1998.
- [13] Rostislav V Lapshin, "Automatic drift elimination in probe microscope images based on techniques of counter-scanning and topography feature recognition", *Measurement Science and Technology*, Vol.18, pp.907-927, 2007.
- [14] Qinmin Yang, S. Jagannathan, E. W. Bohannon, "Automatic drift compensation using phase correlation method for nanomanipulation", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol.7, No.2, pp.209-216, 2008.
- [15] B. Withy, M. Hyland, B. James, "Pretreatment effects on the surface chemistry and morphology of aluminum", *International Journal of Modern Physics B*, Vol.20, pp.3611-3616, 2006.

第7章

結論

本論文では、デジタル画像相関法を基礎とした、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、観察画像が内包する画像ゆがみの計測変位への影響を評価し、画像補正法を提案することで、低倍率観察から高倍率観察まで実施可能な変位ひずみ計測手法を確立した。また、それぞれ構築したシステムを用いた工学的応用例を示した。以下に、本研究で得られた結果、知見を示し、本論文の結論とする。

第2章では、デジタル画像相関法において、その数値解析上の誤差について検討した。輝度値の内挿には双三次多項式、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ることを示した。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た。対象とするひずみ分布形状の波長に対して1/4倍のサブセット長であれば、その計測値の減衰に関わる相対誤差は10%以下であった。

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た。光学顕微鏡による観察画像には各画素の輝度値に正規分布に従うランダムなノイズが含まれた。これに伴い、DICMによる計測変位も正規分布に従う分布を計測領域内で示した。変位分解能をこの標準偏差 σ_u を基礎とした $6\sigma_u$ で定義したところ、本システムでは $6\sigma_u = 0.02 \text{ pixel}$ であった。また、ピエゾステージにより既知変位を与えた3枚の画像を利用して画像ゆがみの較正関数を作成することで、画像のゆがみを修正した。修正画像による平行移動前後の変位分布を計測したところ、本手法によって、全視野において $\pm 0.02 \text{ pixel}$ の変位の分解能が得られた。このとき、ひずみの空間分解能は $180 \mu\text{m}$ である。次に、構築したDICM計測システムを用いた、積層基板を対象とした計測では、複合材内部の構造を反映した複雑なひずみ分布が明らかとなった。また、そのマクロな反りがレーザ変位計による計測と一致していることから、DICMによる計測の信頼性が間接的に証明された。また、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た。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した。しかし今回の解析は2次元線形熱応力解析であるため、計測結果と定量的な一致は見られなかった。計測結果と定量的に一致する結果を得るためには、樹脂の粘弾性等の非線形材料挙動を考慮した解析を行う必要があることがわかった。

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、破壊試験を行い、光学顕微鏡画像に DICM を適用することで、そのき裂先端近傍のひずみ場を計測した。また、Gurson モデルを用いたき裂先端の損傷域の解析を行い、ゴム変成エポキシ樹脂中のき裂先端近傍のひずみを測定結果と比較した。デジタル画像相関法を用いた接着継手中のき裂先端近傍のひずみ分布と Gurson モデルを用いた三次元有限要素法解析によって求めたひずみ分布は定量的に一致した。このことから、Gurson モデルを用いた三次元有限要素法解析の結果が正しいことが裏付けられた。三次元有限要素解析結果より、固体状ゴムを混合したゴム変成エポキシ樹脂を用いた接着継手の破壊靱性値が、接着剤層が薄くなるにつれて減少するのは、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された。き裂先端付近の累積損傷が一定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た。界面でゴム粒子の肥大化が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した。これは、液状ゴムを用いたゴム変成エポキシ樹脂による接着継手の破壊靱性値が接着剤層厚さの減少によって一旦上昇するのは、肥大化した界面付近のゴム粒子がキャビテーションを起こし、界面損傷域を形成したためであるとする池田らの理論を裏付けるものであった。

第5章では、電子実装接合部のひずみ評価を目的とし、通常の光学顕微鏡よりも高倍率観察可能なレーザ顕微鏡を用いて DICM による変位及びひずみ計測システムを構築した。レーザ顕微鏡画像は通常の光学顕微鏡画像に比べ画像コントラストに優れていたが、その一方で、レーザ顕微鏡観察では新たに走査に起因する画像ゆがみの影響を受け、静止画像間においても複雑な変位分布が生じ、変位の計測精度を低下させるものであった。時間依存性の有無でレーザ顕微鏡画像のゆがみをそれぞれモデル化し、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た。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、変位の計測精度は標準偏差で 0.04 pixel となった。ひずみの空間分解能は観察倍率 1000 × において 20 μm である。次に、開発した変位及びひずみ計測システムを用いて、多層基板 FC 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た。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たところ、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も、定性的にも一致はみられなかった。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、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ものとなった。

このように、有限要素法解析の結果をデジタル画像相関法を用いたひずみ計測によって検証することにより、非線形有限要素法解析の問題点を抽出でき、適切なモデル化を実現することができる。これによって、電子実装基板中の微細はんだとその周辺の応力分布の確かな信頼性評価が可能となった。本手法を用いることで、他の微細構造物の解析精度についても検証と改良が行えると期待できる。

第6章では、DICMにおける相関評価関数を改良することで、AFM画像の高さ情報を利用するDICM変位計測システムを開発した。DICMにおける評価関数内でサブセット変形を3次元的に考慮した場合、考慮しない場合よりも精度の良いパターンマッチングが可能となり計測精度は向上した。特に、後述の熱ドリフトに対して計測のロバスト性を向上させるものであった。また、AFM画像の主たるゆがみの原因である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が可能となった。また、通常モデル化される、画像内で速度一定とするドリフト運動に比べ、本システムで得られたドリフト分布は非常に複雑なものであった。このドリフトによるゆがみを面外方向にも考慮し補正することで、AFM画像にて3次元表面変位計測がどの方向にも20nmの分解能となった。このとき、ひずみの空間分解能は4 μm である。ただし、主たる画像ゆがみであったドリフト補正後であっても、その変位分解能が画像に対して1 pixel程度と、他の観察系より低い精度であった。これは次の2点が原因であると推察される。まず、クローズドループ制御によって較正が充分であると仮定した、走査の非線形性である。特に、この非線形性は時間依存して変動するため、微量ながらも、画像間での計測変位にうねりとして現れることが観察されている。次に、非常に急峻なドリフトの変動である。この大きな外乱によって画像中の精彩な模様が乱れ、その再現性が低下する。このために、該当する領域で変位計測時の精度が低下する。いずれも、将来的に製造メーカーによる観察装置の性能向上によって解決されることが期待される。

本論文で示した微小領域ひずみ分布計測手法は応用範囲が広く、工学的にも有用である。特に、各種観察系において提案した画像ゆがみの評価手法及びその補正手法は、デジタル画像相関法利用時に問題とされる計測精度を保証する指標としても利用可能であり、今後、デジタル画像相関法が実用的なひずみ計測技術として普及することが期待できる。

付録 A

仮想き裂進展法を用いた接着継手の J_{Pmax} 算出

仮想き裂進展法では、例えば、図 A.1 のようにき裂先端に接する有限要素は変形させずに微小距離だけ剛体移動させ、その周囲の薄墨色の有限要素だけを変形させ、それらの要素のポテンシャルエネルギー π の変化量をき裂解放面積で除することで J 積分として計算する。単位厚さで、き裂長さを a とすると次式のようになる。

$$J = -\frac{\partial \pi}{\partial a} \quad (\text{A.1})$$

図 A.2 のような外力が一定で除荷の無い弾塑性材料中の二次元き裂について、その J 積分は次式で計算される。

$$J = \int_A \left(\sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_1} - W \delta_{1i} \right) \frac{\delta q_i}{\delta x_i} dA \quad (\text{A.2})$$

これは、き裂表面に熱ひずみ、物体力、圧力などが存在しない場合を示している。ここで、 A は Γ 内部の面積である。 q_i は Γ 内部の全節点で一定値 1 になり、 A 内で一番外の要素リング上でゼロに減少するような関数形式となっている。これにより Γ 内部の節点は剛体移動させ、一方 Γ 上の節点は固定したままになり、上式はき裂先端から離れたリング内の要素（図 A.1 で薄墨色で示した領域）のみが寄与する。

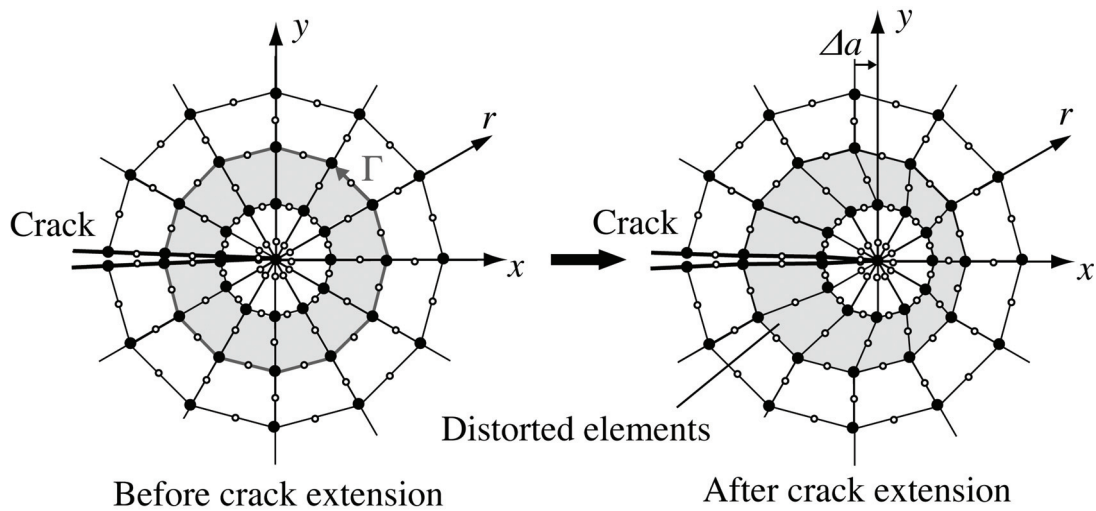


Fig. A.1 Distorted finite elements around a crack tip for crack extension.

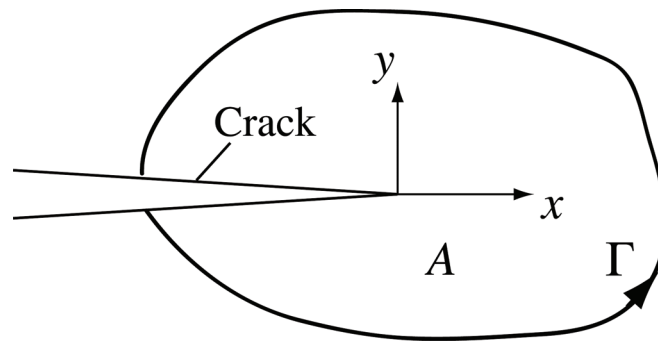


Fig. A.2 Domain A surrounding a crack tip.

実際の解析では、積分経路 Γ （剛体移動させる範囲）の半径（ $=r$ ）、仮想き裂進展量（ $=\Delta a$ ）およびその方向を入力とし、強制変位を与える節点での反力が実験での負荷荷重と一致する STEP で J 積分値を算出した。また、解析には汎用有限要素法ソフトウェアである MSC.Marc を用いた。

4.2.4 項では、仮想き裂進展法に基づいた有限要素解析プログラムにより、接着継手破壊試験の破壊荷重から、破壊靱性値 J_{Pmax} を算出した。解析には図 A.3 のような二次元 1/2 モデル（8 節点アイソパラメトリック要素、他の試験片の要素数・節点数は表 A.1 参照）を用い平面ひずみを仮定した。仮想き裂進展量 Δa は 0.0001 mm とした。それぞれの物性値については第 4 章で述べた通りである。

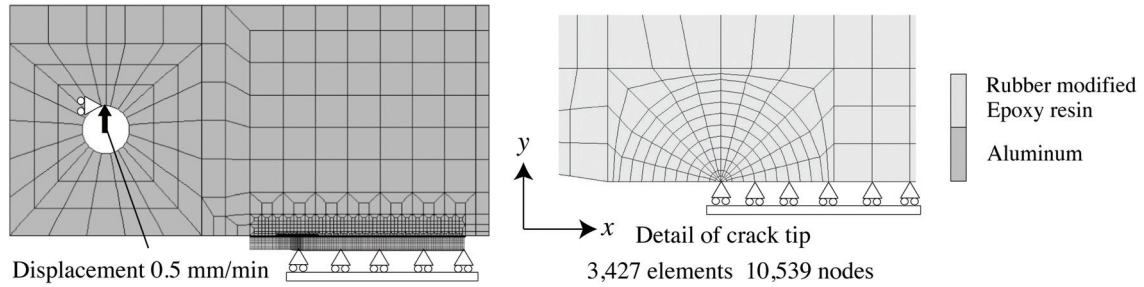


Fig. A.3 FEM model of an adhesive joint with 3.5mm bond thickness (for J -integral analysis).

Table A.1 Number of total nodes and finite elements of each model for J -integral analyses.

Bond thickness t [mm]	0.4	0.7	1.2	1.8	2.1	2.6	3.5	4.2	Bulk
Total nodes	4,673	5,511	5,930	6,349	5,930	7,606	10,539	8,863	3,822
Finite elements	1,481	1,759	1,898	2,037	1,898	2,454	3,427	2,871	1,198

関連発表論文

投稿論文

1. 宍戸信之, 池田徹, 宮崎則幸, 中村健太郎, 宮崎政志, 猿渡達郎, 「デジタル画像相関法を用いた電子実装部の熱ひずみ分布計測」, 『材料』, 日本材料学会 Vol.57, No.1, pp.83-89, 2008. (第3章)
2. N. Shishido, T. Ikeda, and N. Miyazaki, “Strain Measurement in a Microstructure Using Digital Image Correlation for a Laser-Scanning Microscopic Image”, Computer Modeling in Engineering & Science, Vol.35, No1, pp.1-20, 2008. (第5章)
3. 上田真広, 宍戸信之, 池田徹, 宮崎則幸, “固体状ゴム粒子強化エポキシ樹脂のき裂先端ひずみ場の測定と解析” 日本計算工学会論文集, Paper No.20090007. (第4章)

国際会議

1. Nobuyuki Shishido, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki, “Strain Measurement in The Microstructure of Advanced Electronic Packages Using Digital Image Correlation”, 2005 International Symposium on Electronics Materials and Packaging, Tokyo, Japan, (December, 2005).
2. Nobuyuki Shishido, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki, “Accuracy improvement of full-field displacement measurement using digital image correlation for images obtained with a laser scanning confocal microscope”, International Symposium on Electronics Materials and Packaging 2007, Daejeon, Korea, (November, 2007).
3. Nobuyuki Shishido, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki, “Full-field displacement measurement using digital image correlation for a laser scanning confocal microscopic image”, International Conference on Computational & Experimental Engineering and Sciences 2008, Hawaii, USA, (March, 2008).
4. N. Shishido, T. Kuwahara, R. Matsumoto, T. Ikeda, N. Miyazaki, “Measurement of Three-dimensional Surface Displacement Using the Digital Image Correlation with AFM Images”, International Conference on Electronics Packaging, Kyoto, Japan, (April, 2009).

国内学術講演会

1. 宍戸信之, 池田徹, 宮崎則幸, “デジタル画像相関法による電子デバイス中の熱ひずみ計

- 測”，日本機械学会 平成 16 年度関西学生会学生員 卒業研究発表講演会，No.208，京都，2005 年 3 月．
2. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“デジタル画像相関法を用いた微細実装構造部のひずみ分布評価”，日本機械学会 第 18 回計算力学講演会，No.205，筑波，2005 年 11 月．
 3. 池田徹，宍戸信之，宮崎則幸，“デジタルイメージ相関法を用いた微細実装接合部のひずみ計測”，溶接学会 第 12 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム(Mate2006)，No.72，大阪，2006 年 2 月．
 4. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“デジタル画像相関法によるひずみ計測とその誤差補正”，日本材料学会 第 35 回 FRP シンポジウム(JCOM)，II-9，京都，2006 年 3 月．
 5. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“画像相関法による電子デバイス中のひずみ計測”，日本機械学会 2006 年度年次大会，No.4331，熊本，2006 年 9 月．
 6. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“顕微鏡画像を用いたデジタル画像相関法による微細領域でのひずみ分布計測手法の開発”，日本機械学会 第 19 回計算力学講演会，名古屋，2006 年 11 月．
 7. 池田徹，宍戸信之，宮崎則幸，“デジタル画像相関法を用いた電子部品中の微細領域のひずみ測定”，日本化学会第 87 春季年会，1B4-26，大阪，2007 年 3 月．
 8. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“レーザ走査型顕微鏡画像を用いたデジタル画像相関法によるひずみ計測の高精度化”，日本機械学会 第 20 回計算力学講演会，京都，2007 年 11 月．
 9. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“レーザ走査型共焦点顕微鏡画像を用いたデジタル画像相関法によるひずみ分布計測”，溶接学会 第 14 回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム(Mate2008)，横浜，2008 年 2 月．
 10. 宍戸信之，池田徹，宮崎則幸，“デジタル画像相関法を用いたレーザ顕微鏡観察による回路基板内部のひずみ分布計測手法”，第 18 回マイクロエレクトロニクスシンポジウム(MES2008)，2008 年 9 月．
 11. 桑原達彦，宍戸信之，松本龍介，池田 徹，宮崎則幸，“AFM 画像へのデジタル画像相関法の適用 — 面外変形の考慮と精度向上に関する検討 —”，日本機械学会 (M&M2008 材料力学カンファレンス講演論文集)，(2008-10)．
 12. 桑原達彦，宍戸信之，松本龍介，池田 徹，宮崎則幸，“AFM 画像へのデジタル画像相

関法の適用 — 面外変形を考慮した変位分布計測手法の検討—”, 日本電気学会 (第 25 回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム・機械学会セッション), (2008-10), (Proceedings of the 25th Sensor Symposium on Sensors, Micromachines, and Applied Systems, pp.791-792, 講演概要集 p. 142).

謝辞

本論文は、著者が京都大学大学院工学研究科に在籍してまとめたものです。同大学院での指導教員でありました宮崎 則幸 教授には、終始熱心な御指導を賜りました。また、同 池田 徹 准教授には、一貫して献身的かつ懇切丁寧なる御指導を賜りました。両先生の御指導のもとで研究活動を行えたことは、著者の幸せであります。心より敬意と謝意を表します。

本論文を完成するにあたり、京都大学大学院工学研究科 北村 隆行 教授ならびに 北條 正樹 教授には、多くの的確な御助言を賜りました。深く感謝の意を表します。

福岡県工業技術センター 小金丸 正明 氏ならびに同 内野 正和 氏には、本研究を遂行するにあたって多くの有益な御助言、御助力を賜りました。心からの謝意を表します。

京都大学大学院工学研究科 松本 龍介 助教ならびに 同 武富 紳也 産学官連携助教には、多くのご助言とご助力を賜り、常に励まして頂きました。厚く謝意を表します。

太陽誘電株式会社 中村 健太郎 氏には、試験片の提供および御協力頂きました。また、住友ベークライト株式会社 田中 宏之 氏には、試験片及び試験装置の提供をはじめ、多くの御協力頂きました。株式会社村田製作所 藤井 高志 氏ならびに同 斉藤 彰 氏には試験片及び実験装置の提供、多くの御支援御協力頂きました。心より御礼申し上げます。

本論文の研究を実施するにあたっては、京都大学大学院工学研究科の宮崎研究室諸氏には多大な御協力を頂きました。特に、多くの優れた先輩、後輩に囲まれながら研究を遂行できた5年間は、著者の幸せでありました。厚く御礼申し上げます。

最後に、著者を支え続けてくれた家族に感謝致します。