

機関番号：32601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560085

研究課題名（和文）局所材料試験に基づいた接合部のマルチスケール評価

研究課題名（英文）Multi-scale evaluation of joint part based on local material testing

研究代表者

小川 武史（OGAWA TAKESHI）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：50167318

研究成果の概要（和文）：本研究では、各種溶接部に対するインデンテーション試験を試み、電子部品接合部の残留応力や微視組織構造が力学特性に及ぼす影響、薄膜材料の静的および疲労強度や力学特性の異方性などを評価できる手法を構築した。また、高分子材料の時間依存力学特性をインデンテーション法によって評価し、高分子材料の力学特性のマスター曲線を微小な材料から評価できる手法を構築した。

研究成果の概要（英文）：Indentation method is applied to materials testing for welding part, joint part of electronic components and thin film materials. These tests can reveal the residual stress and the effect of microstructures on mechanical properties of electronic joint part, and static strength, fatigue strength and anisotropic mechanical properties of thin films. Furthermore, the indentation method is applied to evaluate time-dependent characteristics of high-polymer materials. The results show that the indentation method can evaluate the master curve of viscoelastic characteristics.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009 年度	600,000	180,000	780,000
2010 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：マイクロ材料力学

1. 研究開始当初の背景

溶接・ろう接・接着等の接合技術は工業製品の製造過程に不可欠な技術であり、鉄鋼構造物から高密度半導体パッケージにいたるまで多くの製品で広く使用されている。しかし、接合部では異種材料が接合されることによる応力集中や、接合プロセスにおける力学的性質の変化などの問題がある。したがって、製品の安全性、健全性評価を行うには、接合部力学特性評価がきわめて重要である。

溶接による接合が用いられる鉄鋼構造物や輸送機器では、溶接部の熱影響により残留応力が発生する。これらは、金属疲労や応力腐食割れの原因となることから、溶接接合された製品の安全性を評価するためには、熱影響部の残留応力と局所力学的性質を詳細に調査し、製品の寿命を予測する必要がある。また、ろう接が用いられる電子機器では、電子パッケージ内部に生じる繰り返り熱変形やクリープ変形により、極細線や微細はんだ

接合部が破壊することが報告されている。電子パッケージに使用される小さな材料の力学特性は寸法効果のためにバルク材から得ることが不可能であり、サブマイクロスケールの材料から直接力学特性を取得する必要がある。一方、近年、輸送機械等では生産の効率化と軽量化のために、接着剤による接合が多く使用されており、接着剤自身の力学特性評価が重要になっている。しかし、接着剤が被着体間に挟まれている状態では、これまで行われてきた多くの方法では力学特性を評価できない。こうした背景から、各種接合部の力学特性評価には、局所材料試験にもとづいた評価が必要である。

2. 研究の目的

各種接合製品に関する信頼性評価を行うには、局所力学特性評価の試験技術として、インデンテーション法の適用が期待される。インデンテーション法では、試料表面に圧子を押し込む過程での、押し込み力と押し込み変位の取得データから、力学特性評価を評価することができる。得られた力学特性は数値シミュレーション等による信頼性評価に資するデータとなる。

本研究では、溶接、はんだ接合、接着といった接合技術が用いられる構造物、製品についてインデンテーション法を用いた接合部周辺の局所力学特性評価を行い、信頼性評価に資する試験技術の確立を目的とする。そのため、接合部周辺の局所弾塑性特性をインデンテーション法によって取得する。取得したデータは、接合部周辺で発生する疲労き裂進展シミュレーションに必要な力学特性として提供する。また、接合部周辺の微視構造の観察から力学特性に及ぼす微視組織の影響を明らかにする。接着接合に関しては、高分子材料の粘弾性特性に着目し、インデンテーション法で時間依存性力学特性を評価する方法を構築する。

3. 研究の方法

(1) 弾塑性力学特性の評価

インデンテーション試験による弾塑性力学特性の評価では、弾性特性と塑性特性をそれぞれ評価することによって行う。弾性特性であるヤング率を求めるには、図1に示す押し込み力と押し込み深さの関係（押し込み曲線）において除荷曲線の傾き S から Oliver らの方法を用いて算出する。

塑性特性は、圧子角度によって定まる塑性域上の代表ひずみとそれに対応する代表応力を求めることによって評価される。代表ひずみと代表応力は、材料の加工硬化指数、圧子角度、ヤング率に関する次元解析と有限要素法による数値計算とから得られる無次元関数に整理される。角度の異なる2種類の圧

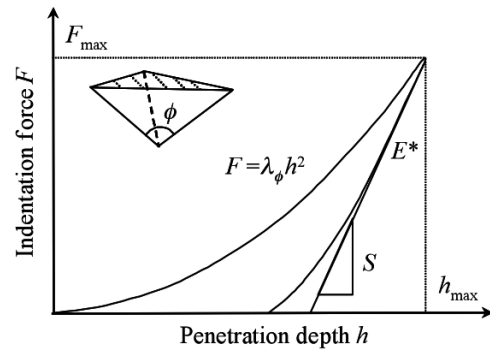


図1 押し込み曲線

子（稜間隔 100° , 115° ）を用いた試験の負荷曲線の係数 λ と無次元関数から、塑性域上の応力とひずみのプロット点を求めて応力-ひずみ曲線を描き、加工硬化指数や塑性係数などの塑性特性を算出する。

(2) 粘弾性特性の評価

粘弾性特性の評価では、試験に使用する三角錐圧子を押し込み深さと投影面積の関係が等しい円錐圧子に近似し、その円錐圧子を粘弾性平面に押し込んだ時の粘弾性理論解を評価式に用いて行う。この評価式は、円錐圧子を弾性平面に押し込んだ時の弾性理論解に弾性-粘弾性対応原理を適用して得る。

試験では、図1の押し込み曲線で最大試験力に到達した後、長い時間試験力を保持する。この時の押し込み変位の時間変動を計測する。また、試験終了後に十分長い時間を経過した後の圧痕最大深さを計測する。押し込み変位と圧痕深さから決まる押し込み変位の粘弾性成分を、前述の評価式に代入して粘弾性力学特性を評価する。一連の試験を異なる温度で実施し、各温度で得た粘弾性力学特性に時間温度換算則を適用して粘弾性特性のマスター曲線を評価する。

4. 研究成果

(1) 電子部品接合部

供試材には、直径 $400\mu\text{m}$ の超音波ボンディング用高純度アルミ材をアルミ材がメタライズされたシリコン基材上に超音波圧着法によって接合されたものを使用した。接合部のインデンテーション試験は、供試材を樹脂埋めした後、CBN ホイールで切断し表面をマイクロームおよびイオンミリング法で加工して作成した。

作成した試験片の微子組織写真を図2に示す。図2はEBSP (Electron Back-Scatter diffraction Pattern) によって観察したものであり、結晶方位差の2次的に表示してある。シリコン基材の近傍、ワイヤ中央部、ワイヤ上部でそれぞれ結晶粒サイズ、結晶方位に違いが生じている。これらはボンディング時の残留ひずみがワイヤ内部で不均一に

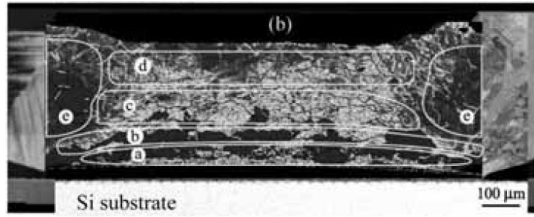


図2 アルミワイヤ断面の微子組織

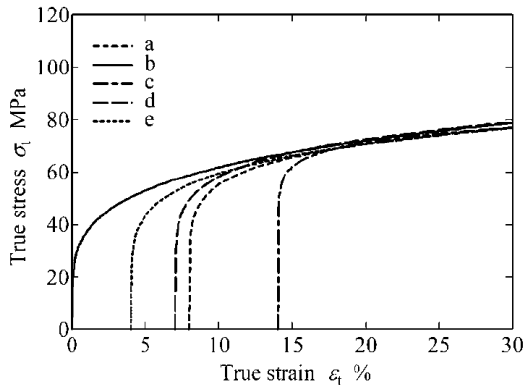


図3 アルミワイヤ断面の各領域における応力ひずみ線図

分布していることを示している。

アルミボンディングワイヤ断面の各領域に対して、マイクロインデンテーション試験より得られた真応力-真ひずみを図3に示す。図3では、各領域の真応力-真ひずみ線図が塑性域で重なり合うように平行移動したものであり、各領域の残留ひずみが評価できる。結果から粗大化組織は残留ひずみが小さく、微細組織は残留ひずみが大きいことが明らかになった。

(2) 薄膜材料

供試材は、SUS304、SUS410、SKD11の基材上に高速フレーム溶射によってWC-12%Coを成膜した材料である。インデンテーション試験は、この溶射膜の表面および溶射材を切断した断面をダイヤモンドペーストで研磨したものである。インデンテーション試験機は自作の試験機を使用した。試験機は負荷制御試験により、静的試験および繰返し試験による局所疲労試験が可能である。

図4は各基材上のWC-Co膜に対する応力ひずみ曲線の推定結果である。膜の表面と断面では異なるヤング率を示すことが明らかになった。同じ組成の焼結材に比べて溶射膜のヤング率は低い、これは溶射膜中の気孔による影響である。

図5は、球面圧子を使用した試験におけるS-N線図を示している。応力は押し込み試験で生じる表面最大応力を有限要素法によって計算したものである。結果に示されるように、溶射膜は繰返しにより明確な強度の低下

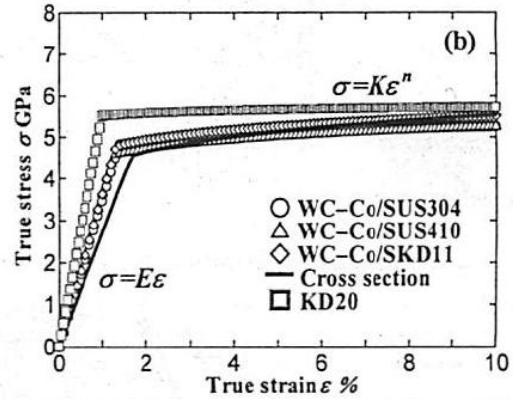


図4 WC-Co膜の応力ひずみ線図

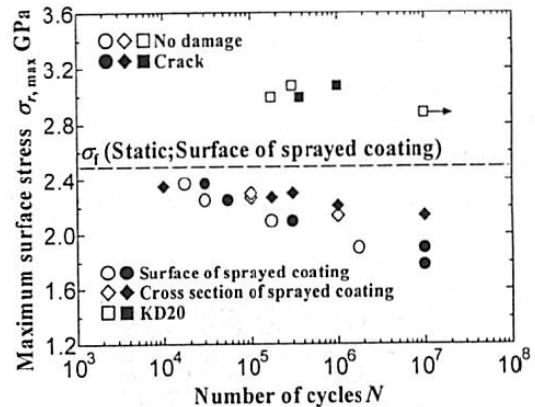


図5 WC-Coの静的および疲労強度

がみられ、疲労挙動の存在が確認できた。図5に示したような疲労挙動の存在はダイヤモンドライクカーボン膜における実験でも同様に確認された。

(3) 粘弾性力学特性評価

供試材は、市販のポリプロピレン樹脂を、成型時の残留ひずみを除去するため、353Kで12時間した後室温まで炉冷したものを使用した。インデンテーション試験機は島津製作所製の高温超微小硬度計を使用した。試験温度は298Kから333Kまでであり、温度制御は試験片表面の熱電対により行った。

図6は各温度条件における押し込み深さの時間変動を示している。最大試験力保持過程では、時間とともに押し込み変位が増加している。また、除荷後の微小試験力の保持過程では、時間とともに押し込み変位が回復している。これらは粘弾性に起因する。最大試験力の保持過程における押し込み変位を粘弾性成分と塑性成分に分離するには、試験後の圧痕深さを計測から塑性成分を求めることにより行った。

図7は粘弾性力学特性の評価式に押し込み変位の粘弾性成分を代入して求めたクリープコンプライアンスに時間温度換算則を適用して求めたマスター曲線である。引張試験に

よって評価されたマスター曲線と本研究の

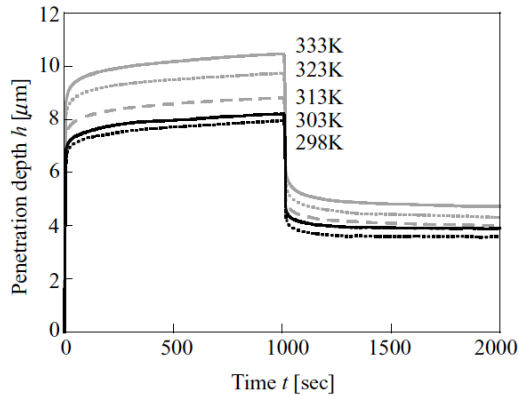


図 6 押し込み深さの時間変動

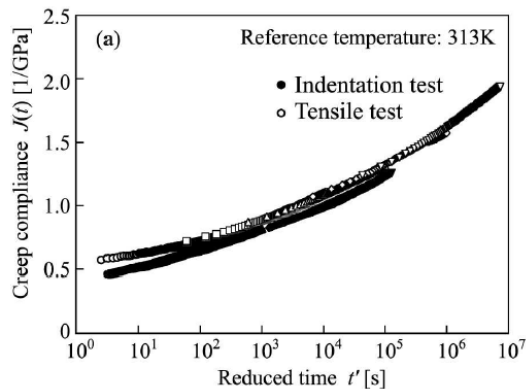


図 7 粘弾性特性のマスター曲線

方法で評価されたマスター曲線はほぼ同じ値を示しており、本手法によって高分子材料の力学特性が評価可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 中村崇諒, 坂上賢一, 小川武史, 林富美男, インデンテーション法による電子部品接合部の力学特性評価および微視組織解析, 材料試験技術, 査読有, 54 巻, 2009, pp. 254-258.
2. 中山朝之, 坂上賢一, 小川武史, インデンテーション法による DLC 膜の静的および疲労強度評価, 材料試験技術, 査読有, 54 巻, 2009, pp. 239-244.
3. 中山朝之, 坂上賢一, 小川武史, 小林圭史, 寺谷武馬, インデンテーション法による DLC 膜の力学特性の評価および基材の影響, 材料, 査読有, 58 巻, 2009, pp. 833-840.
4. 坂上賢一, 岡崎信平, 小川武史, インデンテーション法による粘弾性特性の評価と時間-温度換算則の適用, 日本機械学会論文集 (A) 編, 査読有, 75 巻, 2008, pp. 1045-1050

5. 岡崎信平, 坂上賢一, 小川武史, 坂本博夫, ポリプロピレンのインデンテーション法によるクリープ特性評価, 材料試験技術, 査読有, 53 巻, 2008, pp. 273-279.

[学会発表] (計 10 件)

1. 坂上賢一, 小川武史, インデンテーション法による粘弾性特性のマスター曲線評価, 日本実験力学会 2010 年度年次講演会, 2010 年 8 月 19 日.
 2. 井澤友朗, 坂上賢一, 小川武史, 吉本崇広, 局所材料試験に基づく複合材料の力学モデルの構築, 日本実験力学会 2010 年度年次講演会, 2010 年 8 月 19 日.
 3. 矢野一成, 坂上賢一, 小川武史, 高純度 Al ボンディングワイヤの力学特性評価, M&M2009 材料力学カンファレンス, 2009 年 7 月 25 日
 4. 中西公紀, 坂上賢一, 小川武史, 小林圭史, 繰返しインデンテーション法によるサーメット溶射材の疲労強度特性評価, M&M2009 材料力学カンファレンス, 2009 年 7 月 25 日
 5. 坂上賢一, 岡崎信平, 小川武史, インデンテーション法による高分子材料の粘弾性特性評価, M&M2009 材料力学カンファレンス, 2009 年 7 月 24 日
 6. 中山朝之, 坂上賢一, 小川武史, インデンテーション法による DLC 薄膜の力学特性評価, 日本材料学会第 58 期学術講演会, 2009 年 5 月 24 日
 7. 中村五大, 小川武史, 坂上賢一, スポットおよびレーザ溶接部の局所力学特性評価と変形シミュレーション, 自動車技術会 2008 年秋季大会学術講演会, 2008 年 10 月 24 日
 8. 坂上賢一, 岡崎信平, 伊藤史, 小川武史, インデンテーション法による粘弾性特性の評価と時間-温度換算則の適用, M&M2008 材料力学カンファレンス, 2008 年 9 月 17 日
 9. 小川武史, 坂上賢一, インデンテーション法による局所力学特性評価および微視組織解析, 日本学術振興会将来加工技術第 136 委員会, 2008 年 8 月 22 日
 10. 岡崎信平, 坂上賢一, 伊藤史, 小川武史, インデンテーション法による高分子材料のクリープコンプライアンスの測定, 日本機械学会 2008 年度年次大会, 2008 年 8 月 4 日
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
小川 武史 (OGAWA TAKESHI)
青山学院大学・理工学部・教授
研究者番号: 50167318
 - (2) 研究分担者
坂上 賢一 (SAKAUE KENICHI)

芝浦工業大学・工学部・助教
研究者番号：40383509