

氏 名	たか はし よし まさ 高 橋 可 昌
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2858 号
学位授与の日付	平 成 19 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 機 械 物 理 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	マイクロ要素の界面端はく離き裂発生強度に関する力学的研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 北 村 隆 行 教 授 宮 崎 則 幸 教 授 北 條 正 樹

論 文 内 容 の 要 旨

本研究は、ミクロン～ナノメートルオーダーの寸法を有する微小な構造要素（以下、マイクロ要素と称する）の界面端からのはく離き裂発生強度特性を明らかにすることを目的として、マイクロ要素への負荷試験法を考案するとともに、詳細な力学解析を行ったものであって、5章からなっている。

第1章は緒論であり、マイクロ要素の界面端におけるき裂発生に対する研究の重要性を指摘するとともに、特異応力場に基づく界面端き裂発生強度の考え方（破壊力学クライテリオン）について整理し、本研究の目的と位置付けについて述べている。

第2章では、基板上に形成した直径1 μm 程度の島状要素（マイクロドット）に対して、原子間力顕微鏡（AFM）を改造した試験機により横方向からはく離負荷を与え、界面端からのき裂発生の破壊力学的臨界条件について検討している。この試験より、クロムドットと酸化シリコン界面に沿ったはく離き裂発生荷重を精密に測定することに成功し、それを基に界面端近傍の特異応力場を有限要素法（FEM）によって詳細に解析している。その結果、寸法の異なる試験片において、はく離き裂発生時の界面端弾性特異応力場の強さが良い一致を示すことが判明した。これより、界面端からのはく離き裂発生に関する特異応力場の強さを表す界面端応力拡大係数に基づく破壊力学概念の有効性を示すとともに、特異場領域が100nm程度のマイクロ要素における界面き裂発生に対しても連続体近似に基づく力学の有効性を明らかにしている。

第3章では、イオンビームにより高精度で加工したナノメートルスケールのカンチレバー試験片を作製し、ナノインデンターを応用した負荷試験装置による界面端き裂発生試験を行っている。さらに、同試験機を透過型電子顕微鏡（TEM）に組み込み、異材界面（銅／シリコン）端部からのはく離き裂発生過程のその場観察を行っている。本手法により、界面端からのはく離き裂発生場所および時点等をその場観察によって確定するとともに、き裂発生臨界荷重を精密に求めている。さらに、界面上応力を詳細に解析することを目的に、カンチレバー先端のたわみのその場観察による実測値から銅ナノ要素の塑性特性を逆解析によって同定している。また、本塑性特性を考慮し、はく離き裂発生時の銅／シリコン界面上の特異応力場をFEMにより詳細に解析した。その結果、界面上の垂直応力は、界面端近傍の約40nmの領域で弾塑性特異応力場を形成している。すなわち、本マイクロ要素の界面端からのはく離き裂発生に対して、破壊力学に基づくクライテリオンが依然として有効であることを示している。

第4章では、時間依存変形（クリープ）を示すマイクロ要素を含む微小カンチレバーに対してAFMの走査探針により一定負荷を与え、界面端からのはく離き裂発生強度を評価する手法を提案している。本手法により、常温でクリープを示す錫要素と弾性シリコン基板の界面に負荷を与え、時間依存型のクリープはく離き裂発生試験に成功している。また、試験における負荷点の変位速度を再現する錫要素の常温クリープ特性を逆解析により求めることに成功している。本特性値を用いて、界面上の力学場（応力場・ひずみ速度場）をFEMにより詳細に解析している。その結果、界面端近傍の約100nmの領域において特異応力・ひずみ速度場が現れ、特異場の強さは負荷開始後すみやかに定常状態に達する。さらに、定常状態にお

る特異応力・ひずみ速度場の強さとはく離き裂発生時間の間には良い相関があることを明らかにしている。

第5章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

論文審査の結果の要旨

本研究は、微小な寸法を有する要素の界面端からのき裂発生強度特性を明らかにすることを目的に、詳細な実験解析を行っている。得られた主な結果は、以下のとおりである。

1) 基板上に形成した直径1 μm 程度の微小ドット要素に対して、原子間力顕微鏡を改造した試験機により横方向からはく離負荷を与え、界面端からのき裂発生の破壊力学的臨界条件について検討している。この試験より、基板とドット界面に沿ったはく離き裂発生荷重を精密に測定することに成功し、それを基に界面端近傍の特異応力場を詳細に解析している。界面端からのはく離き裂発生に関して、特異応力場の強さを表す界面端応力拡大係数に基づく破壊力学概念の有効性を示すとともに、特異場領域が100nm程度のマイクロ要素における界面端き裂発生に対しても連続体近似に基づく力学の有効性を明らかにしている。

2) ナノメートルスケールの寸法を有するカンチレバー試験片に対して、高分解能の透過型電子顕微鏡によりその場観察しながら異材界面に負荷を与えるはく離試験方法を考案している。本手法により、界面端からのはく離き裂発生挙動をその場で観察し、はく離き裂発生時の荷重を測定することに成功している。さらに、ナノ要素の塑性特性を逆解析的に求め、それを用いてはく離き裂発生時の界面上の応力分布を詳細に解析している。その結果、界面端からのはく離き裂発生強度に関して、破壊力学に基づくクライテリオンの有効性を示すとともに、き裂発生の支配領域寸法を明らかにしている。

3) 時間依存変形（クリープ）を示すマイクロ要素に対して一定負荷を与え、界面端からのはく離き裂発生強度を評価する手法を提案している。本手法により、常温でクリープを示す微小材料と弾性基板の界面に負荷を与え、クリープによるはく離き裂発生試験に成功している。また、マイクロ要素の常温クリープ特性を逆解析的に求め、それを用いて、界面上の応力場・ひずみ速度場を詳細に解析している。その結果、定常状態における界面端近傍の特異応力・ひずみ速度場の強さとはく離き裂発生時間の間に良い相関があることを明らかにしている。

以上、要するに本論文は、負荷装置および観察装置に工夫することで、マイクロ～ナノスケールの微小要素の界面強度を評価する手法を考案し、それを用いた実験観察と特異応力場解析により微小要素の界面端き裂発生強度特性について検討したものであり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成19年8月3日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。