

京都大学	博士（工学）	氏名	闫 亚 宾
論文題目	Numerical and Experimental Investigation on Interface Cracking due to Nanoscale Stress Concentration (ナノスケール応力集中による界面き裂挙動の数値解析および実験による研究)		
(論文内容の要旨)			
本論文は、異材界面を有する微小構造体に生じるナノメートル・スケールの応力集中に起因するき裂挙動の力学特性を解明することを目的として、複数の材料で構成される微小試験体に対する負荷試験を行い、界面におけるき裂発生・成長の詳細な観察を実施している。さらに、有限要素法による応力場の解析および cohesive zone model を用いたき裂発生・成長クライテリオンに関する解析による検討を加えたものであって、6 章からなっている。 第 1 章は緒論であり、微小デバイスや微小機械の信頼性確保における微小領域の界面強度評価の必要性を述べるとともに、界面や表面が会合する界面端近傍等の微小領域における応力場の特徴、界面破壊に対する cohesive zone model の適用可能性、負荷モードの相違によるクライテリオンの相違や疲労等の負荷条件や環境条件による界面強度の相違等の界面破壊特性の複雑性を示し、本研究の目的と位置づけを明らかにしている。 第 2 章では、ナノスケールの応力集中領域を有する 2 次元試験片における界面端き裂発生・成長クライテリオンを統一する方法について、銅/シリコン界面を対象とした実験結果に基づいて解析的検討を行っている。界面端近傍の応力場は、材料の組合せのみならず界面端形状によって異なることが知られている。まず、平坦な界面端形状を有する片持ちはり試験片と鋭い界面端形状を有する 4 点曲げ試験片を用いて、異なる応力集中場における界面き裂挙動を実験的に同定している。また、銅の厚さが異なる（200nm と 20nm）片持ちはり試験片に対しても実験を行っている。つぎに、単一の実験から指数型 cohesive zone model における界面強度特性（結合応力：1060MPa、特性寸法：1nm）を決定し、この特性値を用い他の実験に対する詳細解析より、界面端形状に依らず cohesive zone model が界面き裂挙動を統一的に再現することを示している。また、銅の厚さが異なる場合には、残留応力に相違を生じるほか、降伏応力や硬化の塑性変形特性が大きく異なる。上述の実験に対する解析より、銅の厚さに依らず界面き裂挙動が cohesive zone model によって記述でき、界面の強度を示すクライテリオンとして汎用性があることを示している。また、試験片全体寸法が大きく異なる場合（本実験では mm スケールと 100nm スケール）にも、cohesive zone model を統一的に使用できることを明らかにしている。すなわち、界面端き裂挙動を記述する界面強度クライテリオンとして、cohesive zone model は統一性および汎用性があり、工学的有効性が高いことを示している。			

第3章では、シリコン基板上にクロムの直径1ミクロン程度の円柱形マイクロ・ドットを形成し、基板表面に沿った2次元負荷を可能とした原子間力顕微鏡を用いて負荷試験装置を構成し、横荷重による異材界面はく離実験を行っている。両材とも高強度であり、界面はく離まで塑性変形は発生しない。また、界面端は曲率を有しているため、界面き裂発生の検討には3次元解析が必要である。指数型 cohesive zone model を用いて解析を行い、同モデルの3次元ナノ構造中の界面端き裂発生クライテリアとしての有効性を実証している。第2章の結果と合わせて、cohesive zone model の有用性を明らかにしている。

第4章では、銅/シリコン界面を有するナノスケール片持ちはり試験片の加工法に工夫を加え、屈曲したはりを作製することに成功している。これによって、ねじりモードによる界面き裂発生（せん断応力によるき裂発生）実験が可能となった。なお、第2章で用いた真直ぐはりでは引張りモードのみの界面き裂発生に関する実験が可能である。両者を勘案して、屈曲片持ちはり試験片に対する負荷位置を制御することによって引張りモードとねじりモードを任意に制御できるナノメートル・スケール界面端き裂発生実験法を開発している。さらに、この実験を透過型電子顕微鏡中で行うことに成功し、界面き裂発生挙動のナノレベルその場観察を行っている。一般的には垂直応力とせん断応力による界面破壊のクライテリアは異なっていることが知られている。また、両者が混合したモードでは複雑なクライテリアとなる。開発した実験法を複数のナノ試験片に適用して、異なるモードにおける界面き裂発生挙動をその場観察するとともに、それらに対する有限要素法解析からナノスケールの応力集中場の引張り（せん断）とせん断（ねじり）のモード比を算出している。これらの実験・解析より、引張り（せん断）の混合モード下では、界面端き裂発生はその近傍の垂直応力とせん断応力の円形則によって支配されていることを解明している。

第5章では、ナノメートル・スケールの金属材料の疲労による界面端からのき裂発生について検討し、高湿度雰囲気（湿度）が界面強度に及ぼす影響について明らかにしている。まず、片持ちはり試験片を用いた疲労負荷実験法および電子顕微鏡その場観察法を確立している。つぎに、銅/シリコン界面端からの疲労き裂発生実験を行い、その疲労が強い応力幅依存性を有することを解明している。すなわち、ナノスケール応力集中によっても界面に疲労破壊現象が存在することを示している。一方、負荷前に高湿度雰囲気中に暴露した試験片を準備し、一方向負荷条件においても暴露のない試験片と比べて界面強度が大きく低下することを実証し、界面強度に及ぼす環境効果の重要性を示している。さらに、高湿度雰囲気中に暴露した試験片の疲労実験を実施し、界面破壊の応力依存性（S-N 曲線）を明らかにするとともに、暴露のない試験片の疲労結果と比較することにより、ナノメートル・スケール試験片において疲労と環境の重畳によって、界面強度がさらに低下することを明らかにしている。

第6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。

氏 名	岡 亜 実
-----	-------

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、ナノメートル・スケール構造体における異材界面端からのき裂挙動に関する研究の結果をまとめたものであり、得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 微小な応力集中領域を有する2次元試験片における界面端き裂発生クライテリアを統一する方法について解析的検討を行っている。界面端近傍の応力場は、材料の組合せのみならず界面端形状によって異なることが知られている。界面端形状等が異なる数種類のナノメートル・スケール試験片に対する実験・解析結果から材料・試験片形状によって界面端近傍の応力場が異なることを示すとともに、界面に指数型 Cohesive Zone Model (CZM) を用いることによってそれらの界面端き裂発生クライテリアを統一的に表すことができることを明らかにしている。
- 2) シリコン基板上に形成したクロムの円柱形マイクロ・ドット（直径1ミクロン）の横荷重による界面剥離試験結果に基いて CZM 解析を行い、CZM の3次元ナノ構造中の界面端き裂発生クライテリアとしての有効性を実証している。
- 3) ナノ片持ちはり試験片およびその負荷方法に工夫を加え、引張りモードとねじりモードを任意に制御できるナノメートル・スケール界面端き裂発生実験法を開発している。その場観察実験によってき裂発生臨界荷重を特定し、それより引張りとせん断（ねじり）の混合モード下では、界面端き裂発生はその近傍の垂直応力とせん断応力の円形則によって支配されていることを明らかにしている。
- 4) ナノメートル・スケールの金属材料の疲労による界面端からのき裂発生に関する実験法および電子顕微鏡その場観察法を確立している。また、それに基づく実験を行い、き裂発生寿命は応力幅依存性が強いことを明らかにしている。さらに、高湿度雰囲気中に暴露した試験片の疲労における界面端き裂発生実験結果と比較することにより、ナノメートル・スケール試験片における界面疲労破壊に対する環境因子の影響が大きいことを解明している。

以上、要するに本論文は、ナノメートル・スケールの応力集中による界面き裂の発生に関する力学特性を明らかにしたものであり、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24年8月9日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。