OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Cracking Mode and Toughening Mechanism of Nacre-like Biomaterials Based on Stability Analysis
Author(s)	燕, 翌
Citation	大阪大学, 2019, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/73556
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　燕　翌　）	
論文題名	Cracking Mode and Toughening Mechanism of Nacre-like Biomaterials Based on Stability Analysis (安定性理論に基づく真珠層生体材料のき裂進展と高靭性発現メカニズムの解析)

論文内容の要旨

Nacre-like biomaterials have a decent balance of stiffness, strength and toughness while the major component is hard and brittle. Its toughening mechanisms originate from a micro-structure of staggered ‘brick and mortar’ manner, but the structure-property relationships still remain unclear. Understanding the toughening mechanisms of nacre-like biomaterials is significant for artificial production of similar composite materials. Recent studies have shown that the cracking phenomena of nacre-like biomaterials, such as nucleation of micro-cracks, crack bifurcation and formation of crack hindering zone, are highly related with the toughening mechanisms. In this study, we analyzed the cracking phenomena of nacre-like biomaterials based on a stability theory, and discuss the fundamental relations between the parameters of the micro-structure and the characteristic of cracking process to clarify the effect of the cracking process on the toughening mechanisms. The thesis is organized as follows.

In Chapter 1, the structural characteristics and mechanical properties of nacre-like biomaterials are introduced. After a review of previous studies about the structure-property relationship of nacre-like biomaterials, we highlight the advantage of using a stability theory to understand the cracking behavior.

In Chapter 2, theoretical basis and the methodologies of this study are described. First, cohesive zone model (CZM) is utilized to depict the interfacial fracture. The mechanisms of crack initiation and propagation are explained from the evolution of convexity of the strain energy functional which specifies different instability conditions such as positive definiteness of elastic operator and ellipticity. Based on the stability theory, we have proposed a theory predicting the loss of local and global instabilities.

In Chapter 3, a finite element analysis (FEA) is conducted to simulate the crack initiation and propagation patterns of nacre-like biomaterials. We propose a criterion named localization factor to classify various cracking behaviors into ‘localized mode’ and ‘unlocalized mode’. The strain concentration process, stress-strain behavior are discussed from a viewpoint of inner mechanisms of different cracking modes.

In Chapters 4 and 5, the crack initiation and propagation mechanisms are analyzed using Monte-Carlo (MC) simulation based on stability analysis and CZM. The results are compared to conventional solutions such as FEA to show the validity of computation. The crack initiation occurs when the homogenized modulus of the model turns into negative value, and it can be well explained using the stability theory. The result of MC simulation shows good agreement with theoretical predictions. The modified MC method reproduces various types of cracking modes including crack branching mode by changing the aspect ratio, unlocalized crack mode by changing the modulus of soft phase, crack insensitivity mode by changing the adhesion energy. Finally preexisting crack is introduced in the model to analyze the sensitivity of a structural imperfection. The results show that the variety of cracking modes show different degrees of sensitivity to the pre-crack.

In Chapter 6, conclusions are presented.

In this thesis the cracking behavior of nacre-like biomaterials is analyzed based on a stability theory. The fundamental knowledge on relationships of the micro-structure and overall properties give us novel insights in understanding the toughening mechanisms to design new artificial materials.

様式７

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　燕　翌　）	
論文審査担当者	（職）　氏　名 主査　教授　中谷　彰宏 副査　教授　澁谷　陽二 副査　准教授　萩原　幸司 副査　准教授　土井　祐介 副査　教授　平田　勝弘 副査　教授　菅沼　克昭　（産業科学研究所）

論文審査の結果の要旨

本論文は、階層構造を有する固体の微視的な変形機構の安定性とその巨視的力学特性の関係を解明した研究成果についてまとめている。具体的に真珠層生体材料を対象とし、この材料の高強度、高靭性という優れた巨視的性質が、硬質相と軟質相が交互に積層された特定の複合材料構造と層間の結合力と相対変位の関係によって特徴づけられるとする数理モデルを提案し、計算機シミュレーションおよび理論解析を行い微視的構造を規定するパラメーターや要素及び要素間の微視的力学特性の違いによる安定性の違いが、巨視的力学特性に与えるメカニズムを解明している。特に、微視的なき裂発生・進展機構、あるいはその抑制機構が、全体的な変形の局所化やその抑制と関連しており、巨視的な高靭化に関連することを見出している。このような不安定現象を伴うマルチスケール特性は、古典的な線形破壊力学では理解することができない微視的安定性と状態遷移と密接に関わっている。本論文では、へき開・せん断型の凝集域モデルを組み込んだ数理モデルと、モンテカルロ法による変形解析法を提案し、局所的な不安定化を伴う解析困難な現象について、エネルギー曲面の安定性からの理解を深めることに成功している。本論文は、このような安定性理論に基づく真珠層生体材料のき裂進展と高靭性発現メカニズムの解析についてまとめたものであり、以下の６章から構成されている。

第１章では、真珠層生体材料の性質、き裂パターン、高靭性メカニズム、数値解析の方法論等の視点から、実験、理論、計算によるこれまでの研究が整理されており、その中で本論文の位置付けと目的が明らかにされている。

第２章では、理論の定式化と計算力学手法を導入し、真珠層生体材料の微視的な要素の軟化性質とモデル全体のひずみ集中から、局所不安定性と大域不安定性という二つ異なる不安定性の概念とその理論条件を与えている。さらに具体的にその理論予測、そしてその解の分岐と巨視的変形挙動への影響を議論している。

第３章では、有限要素法によるシミュレーションを実施し、真珠層生体材料のき裂発生と進展は、モデルのパラメータにより、局所化モードと、非局所化モードの違いが現れることを明らかにした。さらに、二つのモードの定量的な区別条件、モード分岐のメカニズム、パラメータの影響について明らかにしている。

第４章、第５章では、安定性理論に基づいて、凝集域モデルとモンテカルロ法を用いて、真珠層生体材料の材料高靭性のメカニズムを検討している。改良モンテカルロ法では精度を向上させるとともに、有限要素法により見い出したき裂パターンを再現できることを示している。また、予き裂の影響について論じている。

第６章では、得られた知見を総括している。

以上のように、本論文は新たな視点から、真珠層生体材料のき裂挙動を解析し、材料の微視的な構造と巨視的な性質との関係から、高靭性のメカニズムについて新しい知見を獲得している。また、微視的に不安定現象を伴う複雑な現象から巨視的な力学特性を評価するための方法論を確立しており、機械工学・材料科学における固体力学への寄与が大きい。博士論文として価値あるものと認める。