



Title	Modeling and Numerical Analysis of Dislocations and Disclinations Based on Differential Geometry
Author(s)	Sigiet, Haryo Pranoto
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/96106
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

Abstract of Thesis

Name (Sigiet Haryo Pranoto)	
Title	Modeling and Numerical Analysis of Dislocations and Disclinations Based on Differential Geometry (微分幾何学に基づく転位と回位のモデリングと数値解析)
<p>Abstract of Thesis</p> <p>This study focuses on modeling and numerical analysis of dislocation microstructures using the nonlinear continuum mechanics and differential geometry. The kinematics of the continuum is represented by three states: the reference, intermediate, and current states, formulated on a Riemann-Cartan manifold. The Cartan first structure equation determines the intermediate state, while the stress equilibrium equation determines the current state. Dislocations are modeled as a continuous distribution of dislocation density, and numerical analysis is performed using the finite element method.</p> <p>The first part of the study examines the mechanism of material strengthening through kink deformation. We first conducted quantitative validation for the present dislocation model using grain boundary theory. We then conducted the modeling of growth process of ortho-type kink deformation using a planar array of edge dislocations. The analysis reveals a significant stress concentration at the growth front of the kink interface, attributed to the formation of disclinations. The kink-strengthening mechanism is further elucidated based on strain energy, stress field distribution, and elastic interaction between disclinations.</p> <p>The second problem addressed is to prove the existence of disclinations in the kink microstructure. The kinked deformation microstructure has long been believed to contain disclinations, but a mathematical proof of this problem has not yet been provided. In this study, we introduced the holonomy method to demonstrate the presence of disclinations by measuring the Frank vector. The accuracy of this method is verified using ortho kink models with various dislocation configurations. Subsequently, the holonomy method is applied to ridge-type kink deformation models, showing quantitative agreement between the holonomy analysis and theoretical predictions. This method provides a quantitative measure of the Frank vector for arbitrary configuration of dislocations.</p> <p>Finally, the study investigates the size dependence of elasto-plastic deformation in nanoscale materials using the Eshelby twist and twist boundary models. Despite having distinct dislocation configurations, both models exhibit identical twisting deformations. The objective is to understand the underlying mechanism responsible for the twisting deformation in both models through the distribution of plastic deformation fields. The analysis reveals that the Eshelby twist involves two components of plastic deformation contributing to the twisting effect, while the twist boundary model involves four components. Additionally, it is found that only Burgers vectors with the same sign can induce twisting deformation in the twist boundary model. The twist angle, representing the magnitude of twisting deformation, is particularly significant at small scales.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名		(Sigiet Haryo Pranoto)	
論文審査担当者		(職)	氏 名
	主 査	教 授	垂 水 竜 一
	副 査	教 授	尾 方 成 信
	副 査	教 授	中 村 篤 智

論文審査の結果の要旨

本論文は、微分幾何学を用いて格子欠陥の一種である転位と回位を数理的な立場から解析したものである。連続体の運動学はリーマン-カルタン多様体上の微分同相写像として記述され、ここへリーマン計量とアフィン接続を導入し、弱形式で表されたカルタンの第一構造方程式と応力の平衡方程式を有限要素解析へ実装することによって、任意の格子欠陥配置に対する力学解析が実現されている。論文の前半では、この理論を用いたキンク変形による材料強化機構の解析が行われている。キンク構造は直線状の刃状転位列を用いて表現されており、その成長過程における内部応力分布とひずみエネルギーの評価から、キンク成長時の変形抵抗という視点でキンク強化機構が議論されている。また、キンク構造の解析に刃状転位列終端の接続場を利用したホロノミー解析を行うことで、くさび型キンクの先端には回位が形成されること、および回位の強度を表すフランクベクトルを定量的に評価できることを明らかにしている。くさび型キンク先端における回位の形成は、これまで現象論的に予測されてきたものの、数理解析による検証は十分に行われておらず、材料科学分野における未解決の研究課題となっていた。この問題に対して、本論文では肯定的な立場から証明が与えられている。一方、論文の後半では、ナノ結晶材料中の格子欠陥力学解析が進められている。弾性的な拘束力の低いナノスケールの材料中では、格子欠陥の近傍に形成される力学場が材料自身の形状を自発的に変化させ多様な幾何形態が現れる。ナノワイヤー中のらせん転位によるEshelby Twistは、その代表的な形態変化として知られているが、この現象の発現機構については十分な解析が行われていなかった。この問題に対して、本論文では中央にらせん転位を配置した力学モデルを用いてEshelby Twist現象を再現するとともに、これをねじれ粒界モデルと比較することで、Eshelby Twist現象の形成機構とそのサイズ依存性について、系統的な数値解析が行われている。これらの研究成果を総合的に判断し、本論文は博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。