

審査の結果の要旨

氏名 姜 成 洙

近年、新素材開発の機運が高まる中で様々な機能を持つ材料が生まれつつあり、多孔質材料 (Porous materials) または発泡金属 (Porous metals) がその一つとして注目されている。一般の延性材料において、材料内部の微視的空孔が材料の巨視的力学特性に与える影響の把握は重要な課題であり、実験的にこれらの微視的情報を得ることも、現状では困難である。また、多孔固体における延性破壊過程では、まず荷重方向に伸びたボイドのリガメント部分における塑性変形の局所化が起こった後、ボイドが成長、合体する現象が見られる。特に、複数のボイドを有する固体のボイド結合を伴う破壊機構について、様々な実験的、解析的研究が行われているが、多数のボイドを含む固体の破壊機構を直接数値的にシミュレートした研究は見られない。これらの微視損傷を含む固体の巨視的力学特性に関する議論において、メソスケールにおける材料の変形過程や破壊挙動の解明は重要な課題である。

一方、ロボット用の電気駆動アクチュエータあるいは人工筋肉、MEMS への応用の観点から、イオン導電性高分子・金属複合材料 (Ionic conducting Polymer-Metal Composites ; IPMC) が注目を集めている。パーフルオロスルホン酸膜の両面に白金電極をめっきしたイオン導電性高分子ゲル膜アクチュエータの屈曲運動が、1992年に小黒により発見されており、その後デュポン社製の Nafion 膜の両面に白金板を装着した IPMC アクチュエータの動作に関する実験的、理論的研究が行なわれている。電場によるクーロン力によって水和した移動性陽イオンが陰極側に引き寄せられ、陰極側が膨潤、陽極側が収縮することにより、IPMC はりの曲げ変形が起こる。IPMC アクチュエータの動作に関する電気・化学・力学的モデリングについて幾つもの研究例が見られるが、IPMC アクチュエータの設計に有用な、一般的な計算モデリングは未だ存在しない現状である。

本論文は多孔固体およびイオン導電性高分子材料などの先端材料を用いたデバイスの設計に役立つ計算モデリングに関する研究の成果をまとめたものである。本論文は全7章で構成されており、その内容は以下のとおりである。第1章では、本論文の背景、目的、位置付けおよびその概要について述べている。第2章では、自然要素法による二次元メソスケール解析手法を、多数のインクルージョンやボイドを含む二次元固体における微視損傷

とマクロ弾性定数の関係、微視損傷分布形態とマクロ降伏応力の関係、弾塑性損傷破壊挙動などの解析に拡張適用するために、NEMの形状関数である Natural Neighbor Interpolationの構成や特性、平衡方程式などの数値計算過程について述べている。さらに、本論文で行なったメソスケール損傷解析手法について簡潔に述べている。第3章では、新しく提案された自然要素法による二次元メソスケール解析手法を、多数のマイクロインクルージョンやボイドを含む二次元固体の巨視的力学特性の解析に拡張適用し、マイクロインクルージョンあるいはボイドの面積率とマクロ弾性定数の関係を計算している。さらに、マイクロボイドを含む二次元固体モデルとして多数の円孔を格子状に規則配列した多孔平板を想定し、ボイドの配列構造と降伏関数における巨視的異方性との関係について数値的に検討している。第4章では、自然要素法による二次元メソスケール解析手法を、マイクロボイドからのクラック進展、ボイドの結合などを対象とした複雑な弾塑性損傷破壊解析に拡張適用する。マイクロボイドを含む二次元多孔固体モデルとして、多数の円孔を不規則的に配列した多孔平板を想定し、単軸引張りおよび二軸引張りの強制変位を与えた場合のボイド結合を含む計算結果を Geltmacher らによる実験結果と比較している。弾塑性変形とボイド結合を伴うメソスケール破壊解析例を通じ、この種の問題に対する提案手法の有用性を論じている。第5章では、有限要素法の立場から Popovic と Taya の研究を一般化することを目的に、まず、Popovic と Taya の一次元電気化学反応の支配方程式に対し、Galerkin 法に基づく有限要素定式化を行い、解析結果を差分法による計算結果と比較し、本定式化を検証している。すなわち、Nafion 膜・白金板に、単位ステップ電圧を加えると順次に現れる、「前方運動」と「後方運動」のプロセスを支配する方程式の有限要素定式化について述べている。さらに、その結果から得られる固有ひずみを三次元固体の有限要素解析に入力することにより、IPMC はりおよび平板の電界下における三次元変形応答を計算し、合理的な結果が得られることを確認している。第6章では、Tadokoro らの研究を一般化することを目的に、Tadokoro らの一次元電気化学反応の支配方程式に対し、Galerkin 法に基づく有限要素定式化を行い、同時に現れる「水和陽イオンの運動」および「自由水分子の運動」に関する解析結果を差分法による計算結果と比較し、本定式化を検証している。さらに、その結果から得られる固有ひずみを三次元固体の有限要素解析に入力することにより、Nafion ベース IPMC はりの電界下における三次元変形応答を計算し、合理的な結果が得られることを確認した。なお、拡散係数を調整することで、もう一つの IPMC 材として注目を集めている Flemion ベースモデルの応答解析を行なっている。第7章では、本論文全体のまとめであり、以上の成果を要約している。以上を要するに、本論文は多孔固体およびイオン導電性高分子材料などの先端材料に対する新しい計算モデリング手法を提案し、他の理論解および実験結果との比較により、その有用性を検証しており、高い工学的価値を有すると判断される。

よって、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。