氏　　　　　名	松井　和己（まつい　かずみ）
授　与　学　位	博士（工学）
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）土木工学専攻
学 位 論 文 題 目	マルチスケール解析とその設計問題への適用
指　導　教　官	東北大学教授　池田 清宏
論 文 審 査 委 員	主査　東北大学教授　池田 清宏　東北大学教授　岩熊 哲夫 東北大学教授　岸野 佑次　東北大学助教授 寺田 賢二郎

論 文 内 容 要 旨

本論文では，CAE の理想像の実現することを最終的な目標とし，非線形性を考慮した材料設計手法の確立を見据えて，数学的均質化法に基づくミクロ・マクロという複眼的な視点から以下に挙げる2つの非線形 CAE 構成技術を開発することを目的とした．

- 材料の微視領域における力学現象を考慮した巨視的力学挙動の評価法の確立
- トポロジー最適化手法の非線形問題への拡張

まずはじめに，数値シミュレーション技術の高精度化を実現するため，均質化法に基づくマルチスケールモデリングによって微視領域での力学現象を「ミクロ境界値問題」として評価し，その力学応答を反映した「マクロ境界値問題」によって全体構造の力学挙動を評価するという「two-scale 境界値問題」を導出する．このようなアプローチは，複雑な材料挙動を理論的あるいは現象論的なアプローチによって「材料モデル」として構築するという従来の力学現象のモデル化手法とは一線を画すものである．一方で，CAE を構成する技術のうち，他にくらべて特に立ち後れていたのが非線形トポロジー最適設計手法であり，均質化理論との整合性を重視したアプローチにより数値的な不安定現象を回避しながら有限変形問題へと拡張することが可能になった．

本論文は全6章で構成されており，まず前半の第2章から第4章で第1の目的である「微視領域における力学現象を考慮した非線形マルチスケール解析手法」を開発する．我々が通常用いる材料のほとんどが非均質体であるという認識のもと，均質化法に基づくマルチスケールモデリングによってミクロ・マクロが連成した two-scale 境界値問題を設定する．この境界値問題を解くためのマルチスケール有限要素解析アルゴリズムを提示し，実際の鉄鋼材料に適用した数値解析例を通してその有効性を検証する．また，後半の第5章では本研究の第2の目的である「有限変形を考慮したトポロジー最適設計手法」を開発する．

以下に各章の要旨をまとめる.

第1章は序論であり，非線形CAEの問題点とその構成技術に関する既往の研究成果をまとめ，CAEの持つ新たな材料設計技術としての可能性を踏まえて，本研究の位置づけ，目的について述べた.

第2章では，微視領域における異種材料界面の剥離やすべりなどの不連続変形を考慮した弾塑性マルチスケール有限要素解析アルゴリズムを開発した．数学的均質化法に基づく弾塑性体に対するマルチスケールモデリング手法を，界面の拘束条件を考慮した弾塑性two-scale境界値問題へ拡張し，弾塑性挙動，不連続変形が定義されるミクロ構造解析のためのアルゴリズムを提示した．不連続変形を考慮した弾塑性問題では，その急激な応力の変化によってミクロ自己つりあい問題の収束計算が不安定になることが多いが，このような不安定性を回避するために応力解放アルゴリズム採用した．また，巨視的な一様変形という非常に簡単な例題を通して，微視領域で生じた剥離などが巨視的な応力・ひずみ関係に大きな影響を及ぼすことを確認した.

第3章では，有限変形問題に対するマルチスケール解析手法を開発した．ここでは，従来行われてきた速度形の線形化方程式に漸近展開法に基づく均質化法を適用するのではなく，非線形のつりあい式に一般化収束論に基づく均質化法を適用してtwo-scale境界値問題を導出した．さらに，導出された非線形のつりあい式を線形化することによって，ミクロ，マクロ両スケールの関係が常に整合したtwo-scale線形化方程式を導出した．非線形のつりあい状態を厳密に評価し，関数の収束論という本来の均質化理論を適用することによって，はじめてミクロスケールとマクロスケールが整合した運動を記述することが可能になることから，ここで得られた2変数を用いた運動の記述を「two-scale運動学」と名付け，その詳細を解説した．さらに，この定式化にしたがう有限変形マルチスケール解析例を示し，有限変形問題であっても「微視領域の力学応答がマクロ構造に対して一種の構成関係を与える役割を果たしている」というマルチスケールモデリングの本質は変わらないことを確認した.

第4章では，非線形マルチスケールモデリングの有効性を示すため，微小変形・弾塑性マルチスケール解析により炭素鋼の微視領域を考慮した数値シミュレーションを行った．ミクロ構造モデルにおける材料特性として，等方硬化則のみを仮定したにもかかわらず巨視的な機械特性としてBauschinger効果が確認できた．また，炭素鋼のミクロ組織における炭化物形態やその含有量によって巨視的に観察される加工硬化特性やBauschinger効果の発現する程度が異なるという実験事実と定性的に一致する結果を得た．さらに，このときの微視領域における力学現象を詳細に観察することによって，炭化物の形態によって巨視的な加工硬化特性が変化するメカニズムを解明するとともに，巨視的な除荷の際にも同様

の観察を行い，Bauschinger 効果が発現するメカニズムを連続体力学の範疇から明らかにした．
第 5 章では，まず線形弾性体からなる構造物の剛性最大化を目的とした最適設計問題を例にあげて，新規のトポロジー最適設計手法を提案した．ここでは，本論文第 2 章から第 4 章で用いた数学的均質化法の数理構造と整合した「材料の連続的な分布」を考慮して，有限要素モデルの節点ごとに離散的な設計変数を定義し要素内の分布を形状関数によって近似した．数値例を通して，この手法によってチェッカーボードを完全に回避できるだけでなく，設計領域に対する有限要素分割にほとんど依存しない最適構造を得ることができることを示した．さらにこの手法を有限変形問題へと拡張し，簡単な例題によって本研究で開発した手法の妥当性・有効性を示した．また，ここで示したトポロジー最適化手法では，座屈など幾何学的非線形問題特有の力学現象を陽な形で評価していないにもかかわらず，大変形を正確に記述した結果として，スナップスルーを起こさないような構造が得られることを明らかにした．有限変形を考慮することによって，設計荷重により最適な構造が異なるという工学的な直感と一致する結果を得ることができ，より実用的な諸問題への適用の可能性を示した．
第 6 章は結論であり，本研究によって得られた成果および今後の展望を述べた．

論文審査結果の要旨

本論文では，ミクロ，マクロという複眼的な視点から，非線形問題を対象にしたマルチスケール解析手法，および幾何学的非線形性を考慮したトポロジー最適化手法を開発したものであり，全編 6 章からなる．

第 1 章は序論であり，本研究の背景および目的を述べている．

第 2 章では，微小変形・弾塑性問題を対象にして異種材料界面の剥離も考慮したマルチスケール解析手法を開発し，第 3 章では幾何学的非線形問題を対象に研究を行っている．一般に用いている材料のほとんど全てが非均質体であるという認識のもと，非均質性が定義される微視領域における力学現象と，解析対象である全体構造物の力学応答とを数学的に関連づけることを可能にする数学的均質化法を用いて，材料微視領域での非均質性を考慮した巨視的な力学挙動の評価手法を提案している．

この手法の有効性を示すため，第 4 章では炭素鋼を対象にして微小変形・弾塑性マルチスケール解析による数値シミュレーションについて述べている．材料特性に等方硬化則のみを仮定した弾塑性解析であっても，微視領域における非均質性を考慮することによって巨視的な機械特性としてバウシンガ効果が発現することを示している．さらに，この数値シミュレーションによって得られた微視領域における力学現象を詳細に観察することによって，炭化物の形態によって巨視的な加工硬化特性が変化するメカニズム，およびバウシンガ効果が発現するメカニズムを微視的な視点から解明した．

一方で，統合的な非線形 CAE システムを構築するためには，数値シミュレーション技術の高精度化だけではなく，基本的な設計案を提供するトポロジー最適化手法の非線形問題への拡張も欠かすことのできない技術である．そこで，第 5 章では均質化法に基づくトポロジー最適化手法を幾何学的非線形問題へと拡張した．これに先立って，まず線形弾性体からなる構造物の剛性最大化を目的とした最適設計問題を対象にして，数学的均質化法の数理構造と整合した「材料の連続的な分布」を仮定した新規のトポロジー最適化手法を提案した．この手法によって従来問題視されてきたチェッカーボードの発生を完全に回避できるだけでなく，設計領域に対する有限要素分割にほとんど依存しない最適構造を得ることができることを報告している．さらにこの手法を有限変形問題へと拡張し，設計荷重により最適な構造が異なるという工学的な直感と一致した最適設計を実現した．

第 6 章は結論であり，本研究を総括している．

以上のように，本論文は，統合的な非線形 CAE システムを構築するための構成技術となりうる「非線形マルチスケール解析手法」と「幾何学的非線形性を考慮したトポロジー最適化手法」に関する基本的な方法論を確立したものである．

よって，本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める．