

氏 名	ディン 丁	ベイ 沛	ラン 然
学位(専攻分野)	博 士 (エネルギー科学)		
学位記番号	エネ博第35号		
学位授与の日付	平成13年3月23日		
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当		
研究科・専攻	エネルギー科学研究科 エネルギー変換科学専攻		
学位論文題目	Research on Metallo-thermo-mechanical Simulation of Forging Processes (鍛造加工過程の変態・熱・力学的シミュレーションの研究)		
論文調査委員	(主査) 教授 井上達雄	教授 松本英治	助教授 今谷勝次

論文内容の要旨

本論文は、相変態を伴う熱・力学的挙動について、有限体積法を用いて鍛造過程におけるひずみ誘起変態による温度変化、成形中の変形および相変態の挙動を連成解析した結果をまとめたもので、8章から成っている。

第1章は緒論であり、鍛造過程の解析に関する研究の歴史的経緯と現状について述べ、相変態に伴う組織変化と熱・力学場の連成解析の必要性について論じ、本研究の目的と背景を示している。

第2章と第3章は、本論文で用いた基礎理論をまとめたものである。第2章では、相変態を伴う熱・力学の理論について述べ、本研究で開発した解析手法で用いる基礎式を Euler 座標系に基づいて誘導している。さらに第3章では、有限体積法に関する基礎理論および解析手法について述べ、空間での離散化法と陽解法に基づく時間積分法について検討している。

第4章では、上述の基礎理論に基づいた温度、変形および組織を連成して解析するための有限体積法の定式化過程を述べている。特に本章では、ひずみ誘起変態を伴う鍛造過程に適用することを目標として、数値解析の安定性および計算効率の向上に関する手法を提案している。すなわち、素材変形領域を Euler 座標系で定義することによって、リメッシングに伴う誤差の蓄積を回避し、素材の表面の変化を要素から得られた材料の流れ情報に基づいて追跡することによって、素材の変形過程を正しく表現できる手法を構築している。さらに、従来の有限体積法ではなされていない保存則の対流項と拡散項の分離計算手法を提案している。これは、材料を隣接する要素へ伝送するときに、最初のステップでは要素内の物理量（エネルギー、ひずみ速度および応力）の変化を計算しないで、材料のみを他要素へ伝送するものである。一方、次のステップでは、要素体積内部の運動量およびエネルギーの変化を計算し、このときに材料は伝送しないとする。このように2段階に分けて解析することによって、対流項による非線性を回避し、数値解の安定性を得ることができることを示している。

第5章では、提案した解析手法の妥当性を検証している。解析例として、SUS304材の円柱ピレットの鍛造をモデルとして取り上げてシミュレーションを行い、解析結果と他の研究者らの研究で得られた実験結果との比較検討を行っている。最終的な組織解析の結果は、実験で得られたマルテンサイトの分布とほぼ一致している。また、モデル断面内の相当応力の分布と応力の集中部もまた解析結果とよく一致しており、解析手法の妥当性が示されている。

第6章では、3次元の鍛造解析への応用として、かさ歯車の鍛造解析を行っている。ここでは、鍛造過程におけるひずみ速度と摩擦係数の成形後の金属組織への影響について調べている。シミュレーションの結果によると、鍛造による歯形の成形に伴って歯面近傍にひずみ誘起型のマルテンサイト組織が生じており、局所的に材料が硬化していることが予測されている。このように、提案した解析手法によって製品の成形時における材質の変化を予測することが可能となった。

第7章では、鍛造の後に焼入れを行うプロセスに対して、鍛造—焼入れを一連の過程と見なして連続シミュレーションを行い、数値解析によって最終製品の組織と残留応力の分布を予測することを試みている。これによって、鍛造時のひずみと応力分布の焼入れに及ぼす影響を予測することができるだけでなく、一連の加工を経た最終製品の機械的性質を直接評価することができる。

第8章は、得られた一連の成果をまとめて結論とするとともに、今後の課題と開発した手法の応用について言及している。

論文審査の結果の要旨

本論文は、変態・熱・力学の理論と有限体積法を用いて、鍛造過程におけるひずみ誘起変態、温度変化、成形中の変形および組織変化を連成的に解析する手法を提案し、解析例として SUS304 材の鍛造シミュレーションに適用して解析結果を実験結果と比較することによって、提案した手法の妥当性を検証するとともに、いくつかの実際の鍛造過程を解析・検討したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 変態・熱・力学の理論を有限体積法に適用し、温度、応力・変形および組織変化を連成させて解析する手法を提案した。特に本論文では、ひずみ誘起変態を伴う鍛造過程における変態・熱・力学挙動を合理的に解析する手法を構築した。
2. 大変形を解析するために、Euler 座標系に基づく有限体積法による連成解析法を構築した。素材変形領域を Euler 要素で定義したため、有限要素法でのリメッシングによる精度低下の問題を回避でき、複雑な 3 次元モデルでも精度のよいシミュレーションを可能としている。
3. 保存則における対流項と拡散項を分離して解析する手法を提案し、対流項による非線性を回避することによって、数値解の安定性および計算効率が飛躍的に向上することがわかった。
4. 解析結果を実験結果と比較することによって、解析手法の妥当性を検証した。特に、本論文で示した解析結果は、実測によって得られたマルテンサイトの分布とほぼ一致しており、またモデル断面内の種々のひずみ速度に対する応力集中の挙動も妥当な結果を与えていることがわかった。
5. 実際の 3 次元鍛造解析への適用として、かさ歯車の鍛造解析を行い、その過程におけるひずみ速度と摩擦係数の影響について検討した。鍛造過程において、歯形の成形とともに歯の表面におけるひずみ誘起マルテンサイトの生成を予測することができた。とくに、ここで生じたマルテンサイト組織によって、局所的に材料が硬化していることを明らかにした。このように、本解析手法によって最終製品の諸性質を予測する可能性を示唆している。
6. 鍛造—焼入れの一連の過程を数値解析し、鍛造時に誘起されるひずみと応力が更にその後の焼入れ過程での挙動に及ぼす影響を明らかにした。

以上のように、本研究は変態・熱・力学の理論を有限体積法に導入して、ひずみ誘起変態を伴う鍛造過程における温度変化、成形中の応力・変形および相変態の挙動を解析する手法を確立したものであり、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（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成13年2月2日、論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。