

氏名	NGUYEN NGOC TAM (ぐえん ごく たむ)
本籍地	ベトナム社会主義共和国
学位	博士 (工学)
学位記番号	工博第11号
報告番号	甲第21号
学位授与年月日	平成20年3月19日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻名	工学研究科生産システム工学専攻博士後期課程
学位論文題目	マルチスケール有限要素法によるアルミニウム合金板材の成形性の評価と改善 (Evaluation and Improvement of Aluminum Alloy Sheet Metal Formability by Multi-Scale Finite Element Method)
論文審査委員	主査 教授 中村 康範 教授 中村 友道 教授 辻 文三

## 論文内容の要旨

本研究は、地球規模での温暖化問題および省エネルギー化への対策が求められているなか、自動車の燃費の向上に不可欠な車体の軽量化のための高強度かつ高成形能を持つアルミニウム板材料の開発に利用できる結晶構造を含む集合組織の状態を取り扱うことができる実験的、解析的手法の開発に主眼が置かれている。開発された手法を利用して、異周速圧延プロセスによるアルミニウム板材の製造過程での集合組織発展制御による成形性の改善について検討している。この手法を用いて最適な圧延プロセス条件を求めることが可能で、実験の結果と比較しこの手法の有効性を確認している。

本論文は7章からなっている。

第1章では、研究の背景および目的について述べ、自動車用アルミニウム合金板材の期待される高成形性板材の開発の目的とする解決方法について述べている。

第2章では、対象とする立方晶結晶の集合組織の表現方法、測定方法についての基礎的な理論について述べ、材料の結晶方位および結晶粒をEBSD装置を用いて測定し、得られた結晶方位のデータから、厳密かつ定量的に分析できる三次元方位解析法について述べている。

第3章では、動的陽解法結晶均質化弾／結晶粘塑性有限要素法についての理論を詳しく

述べている。微視結晶体の周期性を満たすための変位速度支配の境界条件および均質化応力の導出法を提案し、巨視連続体と微視結晶体の両スケールにおける挙動をより正確に記述するためのマルチスケール解析プロセスを開発している。具体的には、巨視連続体および微視結晶体の座標系の定義を述べ、つぎに、微視結晶体のスケールで適用する弾／結晶塑性構成式の導出過程、微視結晶体の境界条件および仮想仕事率の原理式、均質化応力の導出法、巨視連続体の仮想仕事率について述べている。さらに、2スケールの動的陽解法有限要素法を述べ、開発した解析プロセスについて詳しく説明している。

第4章では、4種の自動車用板材（鋼板3種DQSK, HSLA, DP600およびアルミニウム合金板材A6022-T43）の結晶方位分布特性の検討および巨視塑性特性の評価を行っている。具体的には、SEM-EBSD実計測によって4種の板材の3次元微視結晶体計測モデルを作成し、方位集積度の分析を行い、各集合組織分布が成形性に及ぼす影響を明らかにしている。具体的には、低炭素鋼は、23.5%の $\gamma$ ファイバーがあり、 $\alpha$ ファイバーがほとんど存在せず、等方性のような成形性に優れる材料であることを明らかにしている。また、高張力鋼と2相鋼の結晶方位は $\gamma$ ファイバーおよび $\alpha$ ファイバーが共に集積していることを確認し、FCC結晶体のアルミニウム合金はCube方位の集積が顕著であり、その方位以外にもBrass方位および $\{120\} \langle uvw \rangle$ 方位も存在することを明らかにしている。

本研究は、地球規模での温暖化問題および省エネルギー化への対策が求められているなか、自動車の燃費の向上に不可欠な車体の軽量化のための高強度かつ高成形能を持つアルミニウム板材料の開発に利用できる結晶構造を含む集合組織の状態を取り扱うことができる実験的、解析的手法の開発に主眼が置かれている。開発された手法を利用して、異周速圧延プロセスによるアルミニウム板材の製造過程での集合組織発展制御による成形性の改善について検討している。この手法を用いて最適な圧延プロセス条件を求めることが可能で、実験の結果と比較しこの手法の有効性を確認している。

第5章では、アルミニウム合金板材A6022の成形性を改善するために、異周速圧延の解析および実験を行い、最適圧延条件の探索および高成形性アルミニウム合金板材開発の可能性の検証を行っている。A6022の異周速圧延の巨視的変形解析および微視的結晶集合組織発展解析を行い、せん断集合組織発展過程におけるひずみ経路依存の検討を行った結果、“圧縮後せん断変形を生じる”ひずみ経路がせん断集合組織発展に最も効果があることを明らかにしている。この結果に基づいて、圧下率および異周速比を設計変数とする異周速圧延プロセスの最適条件探索を行い、最もせん断集合組織が発展する圧延条件として、圧下率 $v=58.0\%$ 、異周速比 $\eta=2.2$ を見出している。また、同時に圧延プロセスにおける巨視変形挙動と集合組織発展との関係を明らかにしている。

異周速圧延を用いて実験的に板材を作製し、従来の圧延プロセスと異なる集合組織発展の特性を明らかにし、材料の巨視塑性特性の検討により異周速圧延の効果を確認し、異周速圧延板材の $r$ 値を向上させ、塑性異方性を抑えることが可能であることを明らかにしている。

第6章では、このプロセスで作られたアルミニウム合金異周速圧延板材の成形性を定量評価するため、LDH試験による成形限界の算出、および4種類のひずみ経路における集合組織発展の検討をしている。等周速圧延板材（A6022-T43）との比較を行い、ひずみ比方向 $75^\circ$ 近傍から異周速圧延板材の成形限界がA6022-T43の成形限界を越え、 $60^\circ$ 方向を最大値に大きく張り出す結果を示し、全体的に異周速圧延板材の高い成形能を明らかにしている。また、LDH試験後の異周速圧延板材のSEM-EBSD集合組織観察よれば、ひずみ比の異なるひずみ経路ごとの集合組織はそれぞれ異なり、平面ひずみ方向から等2軸引張り状態に近づくにつれて $\{111\}$ 方位板面内へ集積する傾向が確認された。さらに、LDHテストの数値解析において集合組織発展の予測に基づき単純な成形限界の予測法でFLCの予測を試みており、LDHの数値解析により得られたひずみ比の範囲内で、予測されたFLCの値は実験の結果と同じ傾向を示すことを明らかにし、全体的に異周速圧延板材の高い成形能を確認している。

上記に示すように、本研究で開発された手法は結晶集合組織構造を持つ材料の開発にとって、加工・成形による結晶集合組織の発展、およびその成形特性の予測に十分な精度を持つことを明らかにしている。さらに実際に成形性を評価関数として最適な異周速圧延プロセスパラメータを探索し、それに基づき実験的に板材を作製し、結晶集合組織および成形性の検討を行い、得られた板材が十分高い成形性を有することを明らかにしている。これらを通して本論文で提案された結晶塑性マルチスケール有限要素法、SEM-EBSDを用いた集合組織計測を基にした3次元結晶構造のモデル化、およびマルチスケール有限要素法への実装手法、などの工学的な有効性を検証している。

## 論文審査結果の要旨

本研究は、地球規模での温暖化問題および省エネルギー化への対策が求められているなか、自動車の燃費の向上に不可欠な車体の軽量化のための高強度かつ高成形能を持つアルミニウム板材料の開発に利用できる結晶構造を含む集合組織の状態を取り扱うことができる実験的、解析的手法の開発に主眼が置かれている。開発された手法を利用して、異周速圧延プロセスによるアルミニウム板材の製造過程での集合組織発展制御による成形性の改

善について検討している。この手法を用いて最適な圧延プロセス条件を求めることが可能で、実験の結果と比較しこの手法の有効性を検討した結果についてまとめており、得られた成果は次のとおりである。

第2章では、対象とする立方晶結晶の集合組織の表現方法、測定方法についての基礎的な理論について述べ、材料の結晶方位および結晶粒をEBSD装置を用いて測定し、得られた結晶方位のデータから、厳密かつ定量的に分析できる三次元方位解析法について述べ、結晶集合組織構造を有する金属を3次元的にモデル化することが可能となった。

第3章では、動的陽解法結晶均質化弾／結晶粘塑性有限要素法についての理論を詳しく述べ、微視結晶体の周期性を満たすための変位速度支配の境界条件および均質化応力の導出法を提案し、巨視連続体と微視結晶体の両スケールにおける挙動をより正確に記述するためのマルチスケール解析プロセスを開発している。微視結晶体のスケールで適用する弾／結晶塑性構成式の導出過程、微視結晶体の境界条件および仮想仕事率の原理式、均質化応力の導出法、巨視連続体の仮想仕事率を述べており、巨視・微視両スケールを連成して解析することを可能としている。

第4章では、4種の自動車用板材（鋼板3種DQSK, HSLA, DP600およびアルミニウム合金板材A6022-T43）の結晶方位分布特性の検討および巨視塑性特性の評価を行っている。具体的には、SEM-EBSD実計測によって4種の板材の3次元微視結晶体計測モデルを作成し、方位集積度の分析を行い、各集合組織分布が成形性に及ぼす影響を明らかにしている。

第5章では、アルミニウム合金板材A6022の成形性を改善するために、異周速圧延の解析および実験を行い、最適圧延条件の探索および高成形性アルミニウム合金板材開発の可能性の検証を行っている。A6022の異周速圧延の巨視的変形解析および微視的結晶集合組織発展解析を行い、せん断集合組織発展過程におけるひずみ経路依存の検討を行った結果、“圧縮後せん断変形を生じる”ひずみ経路がせん断集合組織発展に最も効果があることを明らかにしている。この結果に基づいて、圧下率および異周速比を設計変数とする異周速圧延プロセスの最適条件探索を行い、最もせん断集合組織が発展する圧延条件として、圧下率  $v = 58.0\%$ 、異周速比  $\eta = 2.2$  を見出している。また、同時に圧延プロセスにおける巨視変形挙動と集合組織発展との関係を明らかにしている。

異周速圧延を用いて実験的に板材を作製し、従来の圧延プロセスと異なる集合組織発展の特性を明らかにし、材料の巨視塑性特性の検討により異周速圧延の効果を確認し、異周速圧延板材のr値を向上させ、塑性異方性を抑えることが可能であることを明らかにし、実際の材料の成形性の向上が実現したことは工学的に重要なことであると思われる。

第6章では、このプロセスで作られたアルミニウム合金異周速圧延板材の成形性を定量評価するため、LDH試験による成形限界の算出、および4種類のひずみ経路における集合組織発展の検討をし、全体的に異周速圧延板材の高い成形性を明らかにしている。

上記に示すように、本研究で開発された手法は結晶集合組織構造を持つ材料の開発にとって、加工・成形による結晶集合組織の発展、およびその成形特性の予測に十分な精度を持つことを明らかにしている。さらに実際に成形性を評価関数として最適な異周速圧延プロセスパラメータを探索し、それに基づき実験的に板材を作製し、結晶集合組織および成形性の検討を行い、得られた板材が十分高い成形性を有することを明らかにしている。これらを通して本論文で提案された結晶塑性マルチスケール有限要素法、SEM-EBSDを用いた集合組織計測を基にした3次元結晶構造のモデル化、およびマルチスケール有限要素法への実装手法、などの工学的な有効性を検証している。

#### **(審査委員会の所見)**

審査委員会は慎重に審査を行った結果、学術的および工業的にも寄与するところが大きく、本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認める。