

# 博士学位論文審査要旨

2014年2月17日

論文題目： 微細複合組織金属の変形機構および塑性加工性に関する研究

学位申請者： 名取 恵子

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 田中 達也

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 宮本 博之

副査： 大阪大学大学院工学研究科 教授 宇都宮 裕

要 旨：

合金化に頼らないリサイクル性に優れた材質制御法として、数十  $\mu\text{m}$  レベルで特性の異なる相を分布させるヘテロ構造組織化技術に着目した。この手法は多様な材質の設計を可能とする一方で、複雑な温度コントロールによる組織制御技術が必要なために成形性は必ずしも安定しているとは言えない。さらにこのような組織を持つ金属の変形特性については、構成相ごとの変形特性の加成則によって単純に決まるわけではないということが報告されている。従来の塑性加工シミュレーションでは、準静的引張試験等の一般的な巨視的材料試験のみによって求めたパラメータを用いて材料を特徴づけている。しかしながら、今後より内部構造が複雑化するヘテロ構造組織金属材料の予測の高精度化のためには、どのようなモデリングをするかという点が重要である。そこで本論文では、ヘテロ構造組織の違いが変形特性ひいては成形性に与える影響や、微視的構造やその挙動が巨視的現象として発現するメカニズムを解明することを目的とした。二種類の複合組織型金属を取り上げ、それぞれ自動車用部材に関する成形技術の塑性加工性を検討した。

本論文は全8章で構成され、第1章では前述の通りの研究目的について述べた。第2章では、鉄系複合組織金属としてDual Phase型高張力鋼を取り上げ、研究課題を提言した。この材料に対して、第3章では板材成形において重大な形状不良であるスプリングバックを引き起こす残留応力に関連するBauschinger効果のひずみ速度依存性についての実験的・解析的検討を、第4章では得られた知見を用いて曲げ-曲げ戻し変形を伴うハット曲げ加工性についての解析的検討結果を報告した。第5章では、非鉄系複合組織金属として半凝固鋳造アルミニウム合金を取り上げ、研究課題を提言した。この材料に対して、第6章では種々の鋳造法と強ひずみ加工法を組み合わせ創生した様々な初晶・共晶構造による材質改善の複合効果についての実験的・解析的検討を、第7章では創生した試料の難加工への応用を検討するため衝撃後方押し出し成形性についての実験的検討結果を報告した。最後に第8章において、これらを総括して全体の結論とした。

本研究の成果は多様化の進む金属材料設計およびその難加工成形の分野において工学的有用性を発揮するものである。よって本論文は、博士(工学)(同志社大学)の学位論文として十分な価値を有するものと認められる。

## 総合試験結果の要旨

2014年2月17日

論文題目： 微細複合組織金属の変形機構および塑性加工性に関する研究

学位申請者： 名取 恵子

審査委員：

主査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 田中 達也

副査： 同志社大学大学院理工学研究科 教授 宮本 博之

副査： 大阪大学大学院工学研究科 教授 宇都宮 裕

要 旨：

本論文の提出者は、本大学院工学研究科機械工学専攻博士課程（前期課程）を2011年3月に修了し、2011年4月に同博士課程（後期課程）に入学し現在在籍中である。

本論文の主たる内容は、『塑性と加工』, 51巻594号, pp.674-679 (2010), ‘WIT Transaction on the Built Environment’, Vol.124, pp.107-117 (2012), ‘Conference Proceedings of 7th Australasian Congress on Applied Mechanics’, Vol.7, pp.409-418 (2012)に掲載され、さらに‘WIT Transaction on the Built Environment’, Vol.137 (2014)に掲載予定であり、すでに十分な評価を受けている。

2014年1月11日午後1時半より約2時間にわたり、提出論文に関する博士論文公聴会が開かれ、種々の質疑検討が行われたが、提出者の説明により十分な理解が得られた。さらに公聴会終了後、審査委員により、論文に関する諸問題につき口頭試問を実施した結果、本人の十分な学力を確認することができた。なお、英語に関しては本学工学研究科博士課程（後期課程）在籍中に語学試験に合格しており、十分な語学力を有しているものと認められる。以上より、本論文提出者の専門分野に関する学力並びに語学力は十分であることが確認できた。よって総合試験の結果は合格であると認める。

# 博士學位論文要旨

論文題目： 微細複合組織金属の変形機構および塑性加工性に関する研究  
氏名： 名取 恵子

## 要 旨：

近年、強度や機能性向上を目的に多様な合金化による金属材料開発が進められている。一方、評価技術の向上からその変形機構が解明され、さらなる新規材料の開発に寄与している。本論文では、合金化に頼らないリサイクル性に優れた材質制御法として、数十  $\mu\text{m}$  レベルで特性の異なる相を分布させるヘテロ構造組織化技術に着目した。この手法は多様な材質の設計を可能としている一方で、複雑な温度コントロールによる組織制御技術が必要なために成形性は必ずしも安定しているとは言えない。さらにこのような組織を持つ金属の変形特性については、構成相ごとの変形特性の加成則によって単純に決まるわけではないということが報告されている。従来の塑性加工シミュレーションでは、準静的引張試験等の一般的な巨視的材料試験のみによって求めたパラメータを用いて材料を特徴づけるが、さらなる予測の高精度化のためには今後より内部構造が複雑化するヘテロ構造組織金属材料をいかにモデリングするかどうかという点が重要である。そこで、ヘテロ構造組織の違いが変形特性ひいては成形性に与える影響について、実材料の観察を通して体系的に検討することで微視的構造やその挙動が巨視的現象として発現するメカニズムを解明することを目的とし、詳細な材料試験や微視的なキャラクタリゼーションを行った。二種類の複合組織型金属を取り上げ、それぞれ自動車用部材に関する成形技術の塑性加工性を検討した。以下に各章の概要を記す。

第1章では、広義の複合材料としての複合組織型金属の位置づけと、成形性の把握の必要性から掲げた研究目的について述べた。

第2章では、鉄系複合組織金属の代表として Dual Phase 型高張力鋼を取り上げ、研究背景および先行研究についてまとめ、研究課題を提言した。この材料は熱処理プロセスにより、硬質マルテンサイト相と軟質フェライト相の体積率および硬度差を調整することが可能であり、同一化学組成を保ちながら成形性を設計することができる。この高張力鋼板は軽量化の可能性と高いエネルギー吸収性を兼ね備えており、自動車車体の衝撃吸収部材へ積極的に適用されている。そこで板材成形において重大な形状不良を引き起こす原因となりうるスプリングバック現象に注目し、以降の第3~4章にて Dual Phase 型高張力鋼のヘテロ構造組織との関連性を検証した。

第3章では、曲げ曲げ戻し変形においてスプリングバックを引き起こす残留応力に関連する反転負荷における流動応力の変形履歴依存性、つまり Bauschinger 効果に対するひずみ速度依存性についての実験的・解析的検討を報告した。Dual Phase 型高張力鋼板における Bauschinger 効果に対するひずみ速度の関係と、その関係性について材料のハイテン化に伴う傾向を明らかにし、変形強度を定式化することを目的とし、公称ひずみ速度が 0.007/s から 100/s の範囲での変形における Bauschinger 効果の発現スケールを、予ひずみ 1~9% の範囲で圧縮 - 引張実験により評価した。また二相組織を有する金属に対して Bauschinger 効果のひずみ速度依存性が発現するメカニズムを、数値解析を用いて検証した。複合組織構造に起因する影響と母相の変形特性を分離して考えるために、 $\alpha$ -Fe 単相鋼についても同様の試験を行った。その結果、Bauschinger 効果は母相の変形特性が独立的に寄与するのではなく、むしろ複合組織構造が支配的となって発現すると推測した。また変形時のひずみ速度が増すと、Bauschinger 効果の影響は減少するという背応力のひずみ速度

依存性について明らかにしたが、この要因の一つにはヘテロ構造を構成する各相の応力のひずみ速度依存性により母相と硬質第二相の初期降伏点の差が変化したことによって予変形時の局所的な応力分布の違いが顕著に表れたためであることが挙げられた。マルテンサイト含有率や炭素含有率によって材料が高強度化すると、Bauschinger 効果の影響は増大し、Bauschinger 効果のひずみ速度依存性および予ひずみ量依存性は減少した。一方で、同一金属組織を有する材料で比較したとき、強度異方性による引張強さの高い方向に沿って現れる Bauschinger 効果の傾向は逆であった。そのため Bauschinger 効果をはじめとする履歴依存のある変形特性は一般的な材料試験による評価値では整理できず、さらに偶発的に生じるヘテロ構造組織の製造誤差は、静的引張特性に影響を及ぼさなくても、高速変形下では変形特性に影響を与えやすいことが明らかになった。

第4章では、第3章で得られた知見を用いて曲げ曲げ戻し変形を伴うハット曲げ加工性についての解析的検討結果を報告した。ひずみ速度の影響がスプリングバック量解析の予測精度に与える影響を見積もることを目的とし、Bauschinger 効果のひずみ速度依存性を考慮する場合と考慮しない場合を比較することで、圧縮 - 引張実験で確認された Dual Phase 型高張力鋼に対する、ひずみ速度 0.007/s から 100/s の Bauschinger 効果による流動応力の低下率の差異は、スプリングバック現象として発生する場合に容認できる誤差であるかどうかを数値解析上で検討した。その結果、このような鋼板の生産時に生じる金属組織のばらつきや、変形のひずみ速度の違いが Bauschinger 効果の発現スケールに及ぼす影響は、曲げ曲げ戻し変形を伴うハット曲げ成形によって引き起こされるスプリングバック量に影響するものであり、許容できない誤差を生じることが予測された。

第5章では、非鉄系複合組織金属の代表として半凝固鋳造アルミニウム合金を取り上げ、研究背景および先行研究についてまとめ、研究課題を提言した。この材料は共晶の組織形態によって変形特性に影響を与えることが知られているため、これを制御することにより同一化学組成を保ちながら材料の機械的性質ならびに成形性を設計できる可能性がある。そこで種々の鋳造法と強ひずみ加工法を組み合わせることで創生した様々な初晶・共晶構造を評価し、以降の第6~7章にて半凝固鋳造アルミニウム合金のヘテロ構造組織との関連性を検証した。

第6章では、種々の鋳造法と強ひずみ加工法による材質改善の複合効果についての実験的・解析的検討を報告した。鋳造用アルミニウム合金に対して、半凝固鋳造と強ひずみ加工を施すことで、材質改善の複合効果を確認することを目的とし、鋳造法の異なる鋳造用アルミニウム合金 AC4CH (Al-Si7-Mg0.3) に対して、加工温度 200° C および 300° C で強ひずみ加工の一種である ECAP 加工を 8 パスまで施し、巨視的な材料試験および微視的なキャラクタリゼーション実験・観察を行った。また連続加工が可能な ECAP 加工法を開発し、その熱履歴の違いが微細結晶粒組織に及ぼす影響を、数値解析を用いて検証した。その結果、従来の非連続 ECAP 法や連続 ECAP 法を用いた 8 パスの加工を経て、粒径 100 $\mu$ m の結晶粒を約 2 $\mu$ m に微細化させ、材料を4倍に高靱化させることが可能であった。ECAP 加工による結晶粒微細化の効果よりも、三次元的なせん断変形の繰り返しによる Si 粒子の形態および配置の変化が、変形特性に支配的に作用したと推測した。半凝固鋳造組織は全溶解鋳造組織に比べ、析出した硬質な Si 相の微細球状化により靱性に優れている。また ECAP 加工は、全溶解鋳造組織に対しては粗大な Si 相を微細化する働きがあり、半凝固鋳造組織に対しては球状の軟質な初晶 Al を細かくし Si 粒子を分散させる傾向にあった。一方で、加熱と冷却を繰り返す非連続温間 ECAP 法の温度履歴は初晶を粗大化させるため、連続温間 ECAP 法の方が材質改善に適した手法であることが明らかになった。全溶解鋳造から半凝固鋳造に変更することは、強度 - 延性のトレードオフ関係からの解放に最も効果的であるが、強ひずみ加工による材質改善は、共晶組織の変化の違いにより全溶解鋳造材の方が効果は大きい。また、ECAP 加工で導入できる相当ひずみ量に関する幾何学的パラメータを変更するよりもむしろ、強ひずみ加工温度やその熱履歴を制御すれば材料設計がしやすいことがわかった。

第7章では、第6章で創生して評価した試料の難加工への応用を検討するため衝撃後方押し出し成形性についての実験的検討結果を報告した。衝撃後方押し出し成形によって薄肉筐体を成形し、種々の金属組織をもつアルミニウム合金の成形性を評価することを目的とし、室温にて厚み0.5mmの薄肉円筒カップを1工程で作製し、特にECAP加工による強ひずみ加工材に対する塑性加工後の変化を観察した。その結果、このようにECAP加工を施した半凝固鑄造アルミニウム合金は強度と延性のバランスが良く、すでに微細な共晶組織を有しているために局所的な塑性流動を伴う薄肉成形に適しており、展伸材A3003-O相当の成形性を有していた。高強度の割に低い加工力で衝撃後方押し出し成形が可能であり、さらなる強塑性加工に耐えうることが示唆された。

第8章では、鉄系複合組織金属を検討した第3～4章および非鉄系複合組織金属を検討した第6～7章の各章で得られた成果を要約して全体の結論とした。いずれの試料においても、結晶粒界や転位下部組織よりもスケールの大きいヘテロ構造に由来した変形機構が支配的であることが明らかになった。