

称号及び氏名	博士（工学） 江 立夫
学位授与の日付	2011年3月31日
論文名	「軽量金属材料の動的な相互摩擦係数に及ぼすマイクロ組織と成形条件因子の影響」
論文審査委員	主査 東 健司
	副査 森 茂生
	副査 沼倉 宏
	副査 瀧川 順庸

## 論文要旨

我が国のみならず世界的見地からも、「ものづくり」拠点を持続的に発展させるために、高品位・高強度・高機能な新素材と新加工技術の融合した新規成形加工技術の構築が強く望まれている。最近では、高信頼性や生産性向上の観点から、一体成形、複雑形状の成形部品の塑性加工技術に関する研究や開発が盛んに行われている。高強度材料はその高強度のために、冷間での塑性加工は非常に困難で、温間あるいは高温での加熱成形加工を必要とする。新素材の冷間での一般的な成形のみならず加熱成形加工を工業的に実用化する際に考慮すべき必須項目は、材料マイクロ組織（主に結晶粒径）と成形条件（温度と加工速度）との最適化である。さらに、加熱成形加工を新素材に適用する際に特に考慮すべき課題は、加熱成形加工中に作用する素材と金型との界面の相互摩擦の影響である。現在のところ、動的な相互摩擦係数をできるだけ工業的に簡便に精度よく評価するためにリング圧縮試験が提唱されているが、標準化には未だ至っていない。

従来から、リング圧縮試験による動的な相互摩擦係数の計測は、鉄鋼材料において実施されてきた。本研究では、近年構造物の軽量化に有望であると期待されているアルミニウムおよびマグネシウムなどの非鉄系軽量素材を対象とした。本質的に難加工材料である高強度アルミニウム合金やマグネシウム合金の加熱成形加工における金型との動的

な相互摩擦係数を広範囲な成形条件下でリング圧縮試験を行うことで調査した。さらに、動的な相互摩擦係数に影響を及ぼすと考えられる因子である材料学的因子（結晶粒径、集合組織、素材表面粗さなど）と環境因子（温度、ひずみ速度、金型素材、金型表面粗さ、潤滑剤の種類など）の影響を明らかにした。また、動的な相互摩擦係数に及ぼす材料学的因子と環境因子の影響を総括するため、材料組織と変形条件によって決定される変形機構の違いに注目し、その変形機構の違いに起因する影響因子と動的な相互摩擦係数の相関性を総合的・体系的観点から考察した。

本研究によって、動的な相互摩擦係数の標準的な計測法が確立されて、材料学的因子と環境因子の影響に関する系統的な知見を得ることができれば、シミュレーション技術を併用したデジタル鍛造によるニアネット成形条件の最適化が飛躍的に進展することが期待できる。その結果、金型の設計支援のみならず、材料の高速・低温超塑性特性を最大限に生かした効率の良いプロセス設計の実現や新規の組織最適化プロセスの構築が可能となり、摩耗により不可避免的に生じる経済的損失と環境負荷の低減に総合的な寄与をもたらすことができると考えられる。また、動的な相互摩擦係数の工業的利用の観点から、成形品素材と金型の両表面における潤滑条件とその潤滑性能を最適化することで、薄肉軽量部品における成形欠陥を抑制できる成形プロセスの構築の可能性を明らかにすることを目的とした。

本論文は五章で構成されるもので、各章の概要は以下の通りである。

第一章では、研究の背景として「ものづくり」の現状を展望し、将来のものづくり技術の高度化を具現化するために必要なシミュレーション技術を併用したデジタル鍛造の最適化に不可欠な動的な相互摩擦係数に関する課題を概説し、その有用性を具体的に示すことで、本研究の意義と目的を明確化した。

第二章では、動的な相互摩擦係数に関する歴史的ながれを検討することで、その基本的概念およびその計測に関わる課題を明らかにした。そして、本研究での目的に沿った動的な相互摩擦係数の計測に関する基本的な試験環境に関する情報を整理することで、試験環境に関する情報を総括した。その結果、本研究を進めるに当たっての基本的な試験環境に関する条件を次のように決定した。まず、動的な相互摩擦係数の算出法は、最も汎用的に用いられている Sofuoglu らにより提案されたリング圧縮試験法に準拠する。また、次世代の金属系軽量素材として注目されているアルミニウム合金およびマグネシウム合金の実用合金組成に近い合金組成を有する合金種を研究対象とする。さらに、温度、変形速度、雰囲気などの鍛造条件が動的な相互摩擦係数に及ぼす影響を明らかにするために、潤滑条件の標準化が必要であることを明らかにし、最終的には、可能な限り実験可能かつ最適化された潤滑条件を選択することにした。

こうしたリング圧縮試験法の試験環境に関する成形条件の標準的設定を適切に行うことで、動的な相互摩擦係数の適切な計測手法とその工業的利用の可能性の有無を検討した。その結果、特に「ものづくり」の観点から、成形品素材と金型の両表面における潤滑条件とその潤滑性能を最適化することで、薄肉軽量部品における成形欠陥を抑制できる可能性を明らかにした。さらに、動的な相互摩擦係数の計測法の標準化が工業的にも学術的にも必要かつ重要な研究課題であることを明らかにした。

第三章では、標準化されたリング圧縮試験法を用いて、4種類の実用アルミニウム合金の動的な相互摩擦係数を広範囲な成形条件において調査した。その結果、以下の成果を得た。Al-Cu系合金の動的な相互摩擦係数は、試験温度723 Kまでは低いが、それ以上の温度では急激に増加した。Al-Mg-Si系合金の動的な相互摩擦係数は、Al-Cu系合金よりも高い値を示しているものの、温度753 Kまで著しい変動はなかった。さらに、リング圧縮試験における応力はすべての条件で連続的かつ定常状態を示した。また、温度の低下およびひずみ速度の増加とともに応力は減少する傾向を示し、高温変形における典型的な力学的挙動を示した。他方、同じAl-Cu系合金であるが、異なる結晶粒径を有する合金の動的な相互摩擦係数の値を比較すると、両合金ともに主たる変形機構が転位クリープである試験条件においては、同程度の動的な相互摩擦係数の値を示した。一方、主変形機構が超塑性である合金の動的な相互摩擦係数は、主たる変形機構が転位クリープである合金と比べ、より小さな値を示した。これらの結果より、摩擦に起因したエネルギー損失という観点から判断した場合、超塑性材料の利用が高温成形において有効であることを初めて明らかにすることができた。

第四章では、マグネシウム合金押出材について、潤滑剤、金型表面材質、素材の表面粗さおよび材料マイクロ組織などを変数として、その動的な相互摩擦係数を調査した結果、下記に示すような成果を得た。MoS<sub>2</sub>潤滑剤の場合、すべての試験条件で0.3以下の動的な相互摩擦係数が得られた。一方、油系潤滑材の場合には、高温側において高い動的な相互摩擦係数を示した。また、材料の機械加工表面と研磨表面の違いによる動的な相互摩擦係数の値には、明確な差を見出すことはできなかった。また、MoS<sub>2</sub>潤滑剤を使用した場合、超硬工具およびDLC被覆超硬工具による動的な相互摩擦係数の値には明確な違いは見られなかった。他方、油系潤滑剤を使用した場合、超硬工具を用いた場合の動的な相互摩擦係数の値は、DLC被覆超硬工具を使用した場合よりも高い値を示した。その理由として、高温変形間中における結晶方位の(0001)面への集積に起因した結晶粒内の材料流動にたいする変形抵抗の増大が考えられた。さらに、試料採取方向、即ち、結晶方位に着目すると、試料採取方向90°においては、すべての温度においてもアスペクト比は1.05程度で低い値を示した。結晶方位の異方性を有する試料採取方向0°および

45°において、523 Kでのアスペクト比は低く、548 Kにおけるアスペクト比が最も高かった。この特異なアスペクト比の温度依存性は、523 Kのリング圧縮試験において得られた微細な動的再結晶粒径によって発現した超塑性挙動に起因するものであると考えられた。

以上の成果から、マグネシウム合金における動的な相互摩擦係数の算出においては、潤滑剤、金型表面材質などの環境因子（外的因子）と、材料の結晶粒径のみならず、結晶方位、変形間中のマイクロ組織の変化などのマイクロ組織に関する材料学的因子（内的因子）、およびそれに伴う変形機構の変化なども考慮する必要性が示唆された。最終的には、マグネシウム合金の今後の成形加工技術の発展のためには、それらを包括した動的な相互摩擦係数の影響因子に関する体系化が必要であると結論された。

第五章では、本研究で得られた主要な研究成果を総括し、本研究の今後の展望を示した。研究成果の主要なものは以下のとおりである。実用アルミニウム合金およびマグネシウム合金を対象として、種々の試験条件下でリング圧縮試験を行うことで動的な相互摩擦係数を計測した結果、その有用性を確認した。動的な相互摩擦係数は潤滑状態に大きく依存することを明らかにしたが、潤滑が十分な範囲内では、動的な相互摩擦係数は合金種に強く依存せず、材料のマイクロ組織と試験条件によって決まる変形機構に強く依存した。同一変形機構の条件範囲内であれば、動的な相互摩擦係数はその合金成分やマイクロ組織、成形条件に影響されなかった。動的な相互摩擦係数の変形機構依存性を調査した結果、超塑性状態での動的な相互摩擦係数の値は転位クリープ変形状態の場合より小さくなった。同様に、変形中に動的再結晶が起こる変形条件では、初期の粗大粒からの結晶粒径微細化による超塑性状態への遷移により、動的な相互摩擦係数は低下する傾向を示した。それ故、動的な相互摩擦係数の大小の観点から判断すれば、超塑性を利用した成形技術の有利性を実証することができた。

今後の環境問題やエネルギー、資源問題に関連して、構造物の軽量化がますます重要になってくると予想される。こうした構造物を製造するためのアルミニウム合金やマグネシウム合金などの軽量金属素材を用いた「ものづくり」の現場における生産技術の高度化に、本研究の主たる成果のひとつである動的な相互摩擦係数のデータベースが大きく貢献できるものと期待される。

## 審査結果の要旨

従来からリング圧縮試験による動的な相互摩擦係数の計測は、鉄鋼材料において実施

されてきたが、近年では構造物の軽量化に有望であると期待されているアルミニウムおよびマグネシウムなどの軽量金属材料においても必要とされている。動的な相互摩擦係数の標準試験法が確立されて、材料学的因子（結晶粒径、集合組織、素材表面粗さなど）と環境因子（温度、ひずみ速度、金型素材、金型表面粗さ、潤滑剤の種類など）の影響に関する系統的な知見を得ることができれば、シミュレーション技術を併用したデジタル鍛造によるニアネット成形条件の最適化が飛躍的に進展させることができる。その結果、金型の設計支援のみならず、材料の高速・低温超塑性特性を最大限に活かした高効率プロセス設計の実現や新規組織最適化プロセスの構築が可能となり、摩擦により不可避免的に生じる経済的損失と環境負荷の低減に総合的な寄与をもたらすことができる。本研究では、軽量金属材料の動的な相互摩擦係数に関する基礎研究を実施し、以下に述べるような研究成果を得ている。

- ① リング圧縮試験を用いて、実用アルミニウム合金およびマグネシウム合金における種々の成形条件下での動的な相互摩擦係数を計測した結果、動的な相互摩擦係数は、潤滑状態に大きく依存すること、潤滑が十分な範囲内では動的な相互摩擦係数は合金種の違いに大きく依存しないが、その変形機構に強く依存すること、などを明らかにした。
- ② 同一変形機構の条件範囲内であれば、動的な相互摩擦係数はその合金成分やマイクロ組織、成形条件に大きく依存せず、基本的にその変形機構に強く依存することを明らかにした。また、超塑性状態での動的な相互摩擦係数は、転位クリープ状態の場合より小さいことを明らかにした。
- ③ 成形中に動的再結晶が起こる成形条件下では、結晶粒径微細化による超塑性状態への遷移により動的な相互摩擦係数は低下した。これらの成果より、動的な相互摩擦係数の大小の観点から判断すれば、超塑性を利用した成形技術の有利性を実証することができた。

今後の環境問題やエネルギー、資源問題に関連して、構造物の軽量化がますます重要になってくると予想されるが、本研究の主たる成果である動的な相互摩擦係数のデータベースの構築は、こうした構造物を製造するためのアルミニウムやマグネシウムなどの軽量金属材料を用いた「ものづくり」の現場における生産技術の高度化に大きく貢献できるものと期待される。また、本研究成果は、工業的にも大いに期待できる有益な知見であり、材料技術の一層の高度化に貢献するところ大である。さらに、申請者が自立して研究を行うに十分な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。