

称号及び氏名	博士（工学） 宝 晃
学位授与の日付	平成18年3月31日
論文名	「Processing Design of Wrought Magnesium Alloys with Optimized Microstructure for Electronic Appliances (組織制御されたマグネシウム合金展伸材の電子機器への適用に向けたプロセス設計)」
論文審査委員	主査 東 健司 副査 高杉 隆幸 副査 間渕 博 副査 瀧川 順庸

論文要旨

ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて情報関連電子機器の携帯性が重視されている。携帯電話、ノートパソコン、デジタルカメラ、ビデオカメラ、音楽プレーヤなどの小型、軽量、薄型化が進む中で、強さと軽さを両立する素材が求められるようになった。また、地球環境との共存も重要な課題であり、家電製品のリサイクルにも力が注がれている。これまで電子機器の筐体や構造部品は、生産性やコストの面からプラスチック製が主流であった。しかし、強度、リサイクル性、電磁シールド性、放熱性、光沢感などの点で有利な軽金属材料が見直されるようになった。特に、マグネシウム合金は比強度や比剛性が高いためプラスチックを上回る軽量設計が可能であり、携帯電子機器の部品設計を大きく変えることとなった。

現在、マグネシウム合金部品の大半は、鋳造法のひとつであるダイキャストで作られている。また、近年開発されたチクソモールドは、同じく鋳造法だが、安全でクリーンな環境でニアネットシェイプを実現する方法として注目されている。しかし、マグネシウムは他の金属と比べて容積比熱が小さいため、電子機器の筐体のような薄肉成形品を鋳造すると、欠陥を生じやすく仕上げ加工や修正加工に大きな労力を要するという問題があった。成形品質を改善すべく、溶湯温度、金型温度、射出速度などの鋳造条件、湯口や湯溜りなどの金型方案、金型の材質や表面処理、離型剤の噴霧条件などを最適化する技術開発が行われてきた。しかし、さらなる薄肉化と大判化という設計要求に対して限界があり、塑性加工技術の開発が望まれている。

塑性加工品は鋳造品に比べて成形品質や機械的性質に勝るが、マグネシウム合金は室温における延性が乏

しく、塑性加工の実用化には高温域での成形性に関する研究が必要であった。塑性加工のひとつである絞り加工においては、素材の結晶粒径が小さいほど変形能が向上するため、加工速度の高速化や加工温度の低温化が可能である。これを利用して素材とプレス条件の最適化を図り、MDプレーヤやノートパソコンの筐体の量産工法が確立された。しかし、絞り加工を利用する限りボスやリブなどの立体構造を付与できないという設計上の制約から様々な製品に展開されるには至らなかった。また、プレスフォーミングと呼ばれる鍛造法でMDプレーヤやデジタルカメラなどの筐体が量産されたが、高温高荷重の条件下で行われており小型部品への適用にとどまっている。さらなる生産技術の展開のためには、低温低荷重で立体構造を持つ部品を製造することのできる新たな鍛造法が求められている。

一方、近年多くのマグネシウム合金に関する超塑性の研究がなされ、その低い変形応力と大きな延性を活かした工業的応用の可能性も報告されている。マグネシウムにおいてはアルミニウムなどと比べて積層欠陥エネルギーが低いため、容易に結晶粒を微細化できる。さらに粒界拡散速度が大きいことから、数 μm に微細化された組織を作り込むことにより、高速かつ低温での超塑性の発現も報告されている。

本研究では、低温低荷重で効率的に製造できる可能性を持つ超塑性を利用して、従来の成形方法では難しかったボスやリブなどの立体形状を有するマグネシウム合金部品を塑性加工で製造する技術の構築を目指した。そのために、超塑性構成式に基づき、高速超塑性を発現させるための素材の組織制御とその素材を用いた加工プロセスの設計方法を提案し、その有効性を検証することを目的とした。

本論文は5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1章では、先に述べたようにマグネシウム合金を用いて電子機器用部品を製造するための従来の成形技術の問題点を明らかにし、本研究の位置付けを明確にした。

第2章では、マグネシウム合金素材の初期結晶粒径が高温変形特性に及ぼす影響とその変形機構の違いについて検討した。一般に、高温で高延性を得るための変形機構には超塑性変形と転位クリープがある。さらに超塑性には、予め結晶粒を微細化した材料を用いて超塑性が発現する条件で加工する方法(静的再結晶型)と比較的粗い粒径の材料を用いて変形中に粒の微細化(動的再結晶)が起こるような条件で加工する方法(動的再結晶型)がある。しかし、これら二種類の超塑性による加工方法の違いが、成形性にどの程度影響を及ぼすかについては明らかにされていない。そこで、平均結晶粒径2 μm と30 μm の材料を使って同一の温度と荷重の下で、板材に円柱状の立体を形成するような鍛造を施した際の成形速度を比較した。その結果、微細粒材は粗大粒材に比べ成形速度で4倍程度勝っていた。微細粒材の粒径は、ほとんど粗大化しておらず静的再結晶型超塑性であった。一方、結晶粒径30 μm の素材は動的再結晶により10 μm 程度まで微細化していた。成形時間の観点から、電子機器の筐体の成形には静的再結晶型超塑性の適用が不可欠であると判断した。

これまでに報告されたデータも含めて解析を行った結果、静的再結晶型超塑性を適用できる臨界の結晶粒

径は、変形速度と温度の関数である Zener-Hollomon パラメータ（Zパラメータ）を用いた経験式で予測できた。ここで提唱した経験式は、マグネシウム合金部品の製造方法を検討する際、工程から制限される加工温度や要求される加工時間などの条件と任意の粒径を持つ材料との最適な組み合わせを選択するための指針として非常に有用であることがわかった。

第3章では、超塑性を利用したマグネシウム合金部品の効率的な成形方法について検証した。工業的には、より低い温度でより速く成形できることが望まれるため、第2章で明らかにしたように、高速超塑性を利用した加工について検討した。

まず、求められる部品形状と目標とする成形条件（温度、時間）に対し、超塑性を利用するための素材の条件（結晶粒径）を求めた。ここでは、厚み0.8 mm程度の平板上に高さ5 mmのボスやリブがある携帯電話の部品を想定し、これを加工温度523 Kで10秒以内に成形することを目標とした。素材は、マグネシウム合金の中では比較的耐食性に富み、鋳造による量産実績のあるAZ91合金とした。超塑性変形における流動応力は、温度やひずみ速度に加えて結晶粒径の関数でもあるので、目標を実現し得る素材の粒径を超塑性も含めた三種類の異なる変形機構の構成式から求めた。その結果、本事例で必要な結晶粒径は3 μm以下であると導かれた。

次に、微細組織を持つ素材を得る方法について検討した。AZ91合金の加工条件と加工後に得られる結晶粒径の関係について検討した結果、Zパラメータを用いて記述できることが明らかになった。得られた関係に基づいて、結晶粒径が3 μm以下の素材を作るために $Z \geq 2 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$ となるような条件で押出しを行った。その結果、2 μmの結晶粒径を有する厚み1.4 mmのAZ91板材を製造することができた。

得られた素材を使ってボス成形を行った結果、523 Kという比較的低い温度でも超塑性変形により要求された形状が所定の10秒以内に加工できることが確認できた。これらの結果から、構成式に基づいた材料組織の制御と加工プロセスの設計を行うことによって超塑性を利用した効率的な成形が実現できることを明らかにした。

第4章では、マグネシウム合金の超塑性成形の実用化に向けて、成形中に素材と金型の界面に働く摩擦の影響について検討した。超塑性を発現させることによって材料そのものの流動応力を低くすることができるが、一般に材料の流動は、材料と金型の界面に働く摩擦力にも影響されることが知られている。例えば、板の片面にのみリブを形成するような加工を行った場合、潤滑条件によってはリブを成形した裏面からの材料の流れ込みによる表面欠陥が発生する可能性がある。このような欠陥を抑制するため、材料の流動を計算機シミュレーションで検討した。本研究では、シミュレーションに用いる材料そのものの流動応力を構成式から推測した。一方、摩擦力を決定する重要な因子である摩擦係数はリング圧縮試験により実験的に求めた。その結果、計算に用いるべき摩擦係数は、無潤滑の場合0.8、二硫化モリブデン粉末による潤滑の場合0.2で

あった。次に、薄板の上にリブを形成する鍛造シミュレーションを行った。表裏両面で摩擦係数を0.2に設定した計算では裏面からリブへの材料の流れ込みが見られた。これに対し、リブ側の摩擦係数は0.2のまま、裏面の摩擦係数のみを0.8に変えた場合は、裏面からの材料流入が見られなくなった。AZ31合金板材を用いて表裏の潤滑状態を変えたリブ成形加工を再現すると、裏面に発生していた窪み欠陥は発生しなくなった。

以上のように、潤滑条件の違いによる材料流動の変化をシミュレーションで解析できるようになった。このシミュレーション解析を用いることで、材料の流れ込みによる表面欠陥を抑制できることが明らかとなった。

第5章では、本研究で得られた主要な成果と今後の展開をまとめた。

本研究では、超塑性構成式に基づき、超塑性発現のための素材の組織制御とその素材を用いた加工プロセスの設計方法を確立した。これを用いて従来の成形方法では難しかったボスやリブなどの立体形状を有する電子機器部品の製造技術の構築に目途を立てることができた。本研究で得られた成果により、設計からのマグネシウム合金部品に対する要求仕様に基づいた素材の選択と加工プロセスの設計が可能となり、今後、様々な電子機器部品へ展開されることが期待される。

審査結果の要旨

マグネシウム合金が携帯機器などの部品に使われるようになった。しかし、鋳造法では薄肉化や鋳造欠陥抑制に限界があり、絞り加工法ではボス・リブなどの立体形状が成形できない、また鍛造法では高温高荷重での加工が必要などの問題点があり、新たな生産技術の開発が求められている。本論文では、マグネシウム合金の超塑性に着目し、超塑性を工業的に応用するために、まず構成式に基づいた高速超塑性発現のための素材の粒径制御とそれを用いた加工プロセスの設計フローを提案している。さらに従来の方法では難しかった立体形状部品を低温低荷重で製造する超塑性成形加工技術の構築を目的としている。

本論文では、以下に述べるような具体的研究成果を得ている。

- ① 素材結晶粒径がボスの成形能に及ぼす影響について検討し、 $2\mu\text{m}$ 程度の微細組織を持つ素材がその成形性に優れること、およびその優れた成形能が超塑性変形機構における再結晶挙動の違いに起因していることを明らかにした。また、加工前後の結晶粒径の変化から、超塑性が利用できる臨界の結晶粒径を求める経験式を提案している。
- ② 高速超塑性を利用したマグネシウム合金部品の効率的な成形プロセスの最適化を検討している。ま

ず構成式に基づいて高速超塑性を利用するために必要な素材結晶粒径を求め、その粒径を持つ素材を動的再結晶によって得るための製造条件を予測し、次に微細組織を持つ板材を作製した後、さらに実際にボス成形で実験的に実証し、提案したプロセスの優位性を証明している。

- ③ マグネシウム素材の鍛造プロセスにおける摩擦の影響をリング圧縮試験と構成式に基づくシミュレーションによって検討しており、潤滑の違いによって材料の流動状態が変わることを利用して鍛造時の表面欠陥を抑制できることを明らかにしている。

以上の研究成果は、大学での理論をベースに、超塑性を利用した加工プロセス設計、およびそれを実現するための素材の組織制御法の提案とその有効性を実証している。ここで提案された設計フローは、製品設計、工程設計、材料設計の三者を結び付け、工業的に最適な製造方法を実現するもので、今後、様々なマグネシウム合金部品の生産技術への展開が期待される。この成果は、工業的にも大いに期待できる有益なものであり、材料技術の一層の高度化に貢献するところ大である。また、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。