

軽量金属のセミソリッド成形加工技術の研究

—固相粒子の形態制御による成形性向上—

村上雄一郎

論文要約

近年のエネルギー問題・環境問題においては石油エネルギー使用の削減が急務になっており、石油エネルギーの利用用の多い輸送部門、特に自動車に対してはエネルギー利用効率の向上が求められている。自動車の燃費向上には車体の軽量化が有効であり、そのためには軽量金属であるアルミニウム合金・マグネシウム合金の適用拡大が求められている。

セミソリッド成形法は高品質なアルミニウム合金・マグネシウム合金部材を高精度で成形する方法として期待されているが、従来の鋳造法に比べ材料の流動性が低く成形性が劣るという欠点がある。セミソリッド状態の金属は、含まれる固相が微細球状であるほど粘性が低下し、流動性が向上することが知られている。このため、流動性の高いセミソリッドスラリーを作製する方法が研究されており、様々な手法が開発されている。しかしながら、これまでに開発された手法では装置が複雑・高価である、精密な温度コントロールが必要であるなど、工業利用における弱点があった。

本研究では、成形プロセス中にセミソリッド状態の金属にせん断応力を付与して、固相組織を微細球状に変形させることによって流動性を向上させる方法を検討した。また、簡便な装置で迅速にセミソリッドスラリーを作製する手法として、機械振動を印加する手法の開発を試みた。

第一章は序論であり，現在のアルミニウム合金・マグネシウム合金の鋳造における問題点，その解決手法として期待されるセミソリッドプロセスの現状と課題，研究動向について整理して，本論文の目的を明らかにした．

第二章では，マグネシウム合金に対する半溶融射出成形を対象に，せん断応力を加えることにより成形性を向上させる手法について検討を行った．マグネシウム合金は高温での燃焼性が高いことから，固体状態から温度を上げる半溶融法が適しており，本章では防燃ガス等を使用しない手法を開発した．また，半溶融法では，固液共存状態への加熱時に微細な固相が液相中に分散する特殊なビレットを用いる方法が一般的であるが，本成形法では汎用のビレットを用いて，せん断応力を加えることによって固相組織が破碎する方法を検討した．その結果，射出前にネットワーク状に拮がった固相組織がノズル部分でせん断応力を受けることによって破断され，微細球状の固相粒子が分散したスラリーとなり成形性が向上した．セミソリッドスラリー中の固相粒子形状は，射出速度の増加により微細化，球状化しており，高固相率ほど粒径は大きいものの球状となる傾向が見られた．これは，高固相率・高射出速度ほどノズル部分におけるせん断応力が大きくなるためと考えられる．そして，固相率が同じ場合は，ノズル部分におけるせん断応力の増加に伴い固相粒子の粒径は低下する傾向があった．一方，固相率の違いにかかわらずせん断速度の増加に伴い固相粒子の円形度は低下し，粒子が球状化していることを示していた．これらの結果から，ノズル部分で適切にせん断応力を加えることによって，固相組織を微細化し流動性を向上させることが可能である事を確認した．また，セミソリッド成形を行った試料は液相状態で成形した場合に比べ鋳造欠陥が減少し，特に高固相

率・低射出速度で鑄造欠陥が大きく減少した。一方、高射出速度ほど鑄造欠陥が多いにもかかわらず、引張強度は向上する傾向が見られた。これは、射出速度の増加に伴い金型内におけるスラリーの冷却速度が上昇するため、成形時に液相であったマトリックス部分の組織が微細化したためとみられる。このことは、高射出速度で鑄造欠陥が少ない製品ができるよう鑄造方案や射出手法を改良することによって強度がより向上する可能性を示唆している。本成形法は、マグネシウム合金の鑄造プロセスで必要となるカバーガスが不要であり、かつ一般的な半熔融セミソリッド成形で用いられる特殊ビレットではなく汎用のビレットを使用できることが大きな特徴である。したがって、従来の鑄造法に比べ成形時の取り扱い性がより安全であり、従来の半熔融セミソリッドに比べ材料コストの低減が可能な手法として期待できる。

第三章では、アルミニウム合金の半凝固ダイカスト成形プロセスを対象に、金型の入り口部分でスラリーにせん断力を加えることによって成形性を向上させる方法について検討を行った。金型入り口部分のゲート厚さと射出速度を変化させ、スパイラル状のキャビティの中にスラリーを射出して、キャビティ内を流れた距離の長さを流動長として流動性を評価した。その結果、金型入り口部分のゲート速度およびせん断速度が高いほど流動長は増加して、成形性が改善できることを解明した。また、試料中に含まれる初晶 α -Al相粒子はせん断速度の増加に伴い粒径・円形度共に低下し、微細化、球状化する結果となった。すなわち、ゲート部分におけるせん断速度を増加させ、スラリーにせん断応力を加えることによって固相粒子が変形し、微細球状となることが分かった。そして、この初晶 α -Al相粒子の粒径および円形度ともに小さいほど流動長は増大する傾向を示した。このことから、せん断応力の付与による固相粒子の微細球

状化によって流動性の向上が可能であることを確認できた。また、初晶 α -Al 相の分散状態は金型キャビティ内の流速によって変化し、流速が高い場合では金型壁面付近で初晶 α -Al 相粒子が少ない領域が生じた。このことは、流速をコントロールすることによって製品中に含まれる初晶 α -Al 相の分散状態を制御できる可能性を示しており、製品の特性を向上ができる可能性がある。本成形手法は汎用のダイカストマシンを使用しており、金型方案の改良によって工業利用が可能である。したがって、ダイカスト工場などで従来型のダイカスト法と併用して利用することができ、比較的 low コストで導入が可能な手法といえる。

第四章では、アルミニウム合金の半凝固セミソリッドスラリーを作製する方法として、機械的振動法を用いる方法について検討を行った。水平方向に振動しているステンレス鋼製容器中に熔融したアルミニウム合金を注湯し、溶湯が急冷される過程で壁面から生成する固相粒子を液相中に分散させてセミソリッドスラリーを作製する方法である。振動の制御因子としては振動周波数、振動加速度振幅、振動速度振幅、振動変位振幅があり、各因子がスラリー中の固相粒子の形状に与える影響を検討した。その結果、スラリー中に含まれる固相粒子は振動速度振幅が大きいほど微細球状になる傾向にあるが、振動速度振幅が同じ場合でも振動変位振幅が小さい場合や、周波数が 12.5 Hz 程度と低い場合には固相粒子が粗大化する傾向があった。振動速度振幅が大きいほど微細な固相粒子が得られるのは、振動のエネルギーは振動速度振幅に依存することから説明できる。また、壁面から生じた固相粒子が遊離するまでの時間は振動周波数が高いほど短くなり、生じた固相粒子が容器の中心部に移動するためには振動変位振幅が大きい必要があることが分かった。これらの結果から、振動周波数、振動速度振幅、振動変位振幅が共に大きいほど微細な固相粒子を有するス

ラリーが得られることが明らかになった。しかし、そのためには振動装置の出力を大きくする必要があり、装置が大型化、高コスト化することになるため、50 Hz 程度の周波数で速度振幅を向上させることが最も効果的であると考えられる。この機械振動法によるスラリーを第三章に示した成形プロセスに適用した結果、低せん断速度では液相状態の 40%程度の流動性であるが、せん断速度を増加させることによって流動長を大きく向上させることが可能であった。さらに、第三章で用いた電磁攪拌法によるスラリーと比較したところ、低せん断速度では流動性が劣るものの、せん断速度を向上させ鑄造圧力を上げることにより電磁攪拌法によるスラリーとほぼ同等の流動性が得られた。電磁攪拌法は微細球状な固相を有するスラリーを作製する最も優れた手法の一つであり、機械振動法によるスラリーもこれに準じる品質を持つことが確認された。一方で、本章で開発したスラリー作製手法は、電磁攪拌法に比べ装置の簡便化が可能であり導入コストの低減が見込まれることから、工業利用の点で高品質スラリーを作製する新規手法として期待できるものである。

第五章は総括であり、本研究で得られた成果をまとめた。各章で得られた結論から、成形プロセス中においてせん断応力をスラリーに加えることによって流動性を向上させることを可能とし、流動性の良いスラリーを簡便な方法で作製することが可能となった。これにより、セミソリッド成形法の大きな欠点である低い成形性、スラリー作製のための高コスト化という問題を解決することが可能となった。本成形プロセスを利用することにより高精度、高品質の複雑形状製品を低コストで成形することが可能であり、今後複雑形状製品への適用や特性評価を行う予定である。