

題 目 その場観察法による耐熱マグネシウム合金のダイカスト成形および半凝固射出成形における凝固割れ感受性評価と凝固割れ発生予測に関する研究  
(Evaluation and prediction of solidification cracking susceptibilities of heat resistant magnesium alloys during die-casting and semi-solid injection process using in-situ observation method)

氏 名 藤 井 敏 男

マグネシウム合金は実用金属中で最も比重が小さく、比剛性、比強度が高いことから、特に剛性設計に適しており、軽量化材料として大変有望な材料である。しかしながら、自動車のパワートレインに採用するには、市販のマグネシウム合金はアルミニウム合金に比べ、耐熱性が低く、クリープ特性が劣る。そこで、Ca, Si, RE, Sr, Yなどを添加して耐熱性を向上させた合金が開発され、トランスミッションケース、シリンダブロック、オイルパン等のエンジン・駆動系部品への適用が試みられている。このような耐熱性を向上させたマグネシウム合金の多くはダイカスト成形時に、複雑なリブ形状部分に割れが発生しやすいため、铸造性に課題がある。その割れの多くは、ダイカスト成形の凝固過程で発生する凝固割れである。そのため、これら合金を用いた部品をダイカスト成形で製造する場合、凝固割れを抑制する技術の開発が必要である。

本論文では、まず、第2章で、凝固割れ発生のメカニズムや従来研究における凝固割れ発生ひずみの測定方法について整理した。凝固割れは、結晶粒界を形成する段階において発生すると考えられ、この段階では、液相は網目状に残留し、融液はお互いに自由移動できない状態になっている。この段階を臨界凝固領域(Critical solidification range)と呼び、この臨界凝固領域が大きい合金の方が、また、二平面角の小さい残留融液相をもつ合金ほど凝固割れが発生しやすいことが知られている。溶接や鑄造のような急冷凝固を伴う場合、平衡凝固とはならない。そのため、多成分系の合金では固相線温度が低温側に移行し、臨界凝固領域が大きくなることで凝固割れが発生しやすくなる。そこで、凝固割れを抑制するには、凝固収縮量を小さくすることが有効であり、これまでに半凝固または半溶融での成形プロセスが提案されている。この成形プロセスの金属組織は球状の初晶と微細な共晶組織から形成されるため、機械的特性が向上すると言われている。しかしながら、30%以上の高い固相率で成形が可能な実用的な成形装置の例は少ない。そのため、凝固割れを抑制する新しい半凝固成形プロセス装置の開発が望まれている。

本研究では耐熱マグネシウム合金を用いたダイカスト成形時の凝固割れ発生を防止するため、凝固割れの発生を予測する技術と新しい半凝固射出成形技術の確立を目指して研究を実施した。

第3章では、

1. 凝固割れ発生ひずみ測定方法の確立・提案
2. YAG レーザを用いて凝固割れが発生する局所的なひずみの測定
3. 固液共存温度域、凝固割れ発生限界ひずみおよび CST を用いた各種耐熱マグネシウム合金の凝固割れ感受性評価と組織との関係

について述べている。

凝固割れ発生を支配する材料的因子として、凝固割れ発生限界ひずみを実験的に求める方法を検討

した。ダイカスト成形時と同じ冷却速度を再現しながら冷却過程で凝固割れ発生ひずみを精度良く計測するのは非常に難しいため、ダイカスト試料を急速加熱して凝固割れ発生ひずみを精度良く計測する方法を提案した。この方法では、拘束緩和式 U 型高温割れ試験治具を用いてダイカスト成形した耐熱マグネシウム合金試験片の中央部を YAG レーザースポットで局部的に急速加熱して半熔融状態にし、その局所に引張ひずみを加えた。凝固割れが発生するまでのひずみをその場観察法によって取得できる新しい方法を開発した。この方法によって、5 種類の耐熱マグネシウム合金の延性曲線を求め、それら合金の凝固割れ感受性を CST などによって評価した。また、組織形態による凝固割れ感受性への影響を調べた。その結果、以下のことを明らかにした。

- (1) マグネシウム合金の凝固割れが発生する温度と限界ひずみを測定し、固液共存温度域での高温延性曲線を高精度で取得できた。
- (2) 得られた高温延性曲線より温度変化に対する限界負荷速度 CST により、耐熱マグネシウム合金の凝固割れ感受性を定量的に比較することができた。
- (3) RE を含まない Ca を添加した耐熱マグネシウム合金では、金属組織はラメラ状の共晶組織が細長く、ネットワーク状に連なっており、組織上、凝固割れが発生しやすいと考えられる。

第 4 章では、

1. 耐熱マグネシウム合金の固液共存温度域を含む応力ひずみ曲線の取得
2. 温度に依存した見かけのヤング率、0.2%耐力、加工硬化係数を導き、凝固中の金型内のひずみ変化を解析
3. 凝固割れ感受性評価金型を用いて各種耐熱マグネシウム合金の凝固割れ発生率を調査
4. 凝固割れ発生の予測方法を確立し、その有効性の考察

について述べている。

5 種類の耐熱マグネシウム合金の固液共存温度域における材料物性値を取得し、鋳造シミュレーションソフト ProCAST の材料データベースに入力した。線形硬化弾塑性体モデルによる熱応力連成解析によって、実測することが困難な耐熱マグネシウム合金の金型内で凝固中に発生するひずみを求めた。第 3 章で得た各種耐熱マグネシウム合金の高温延性曲線と解析で求めた金型内で凝固中に発生するひずみの大小関係により、凝固割れ発生予測を行った。また、その凝固割れ発生予測の精度の検証を行うため、凝固割れ感受性評価金型を用いた実機ダイカスト成形を行った。それらの結果、

- (1) 凝固割れ感受性評価金型において、凝固割れの発生の有無を予測結果と実機ダイカスト成形で求めた凝固割れ率の結果と一致しており、ダイカスト成形時における凝固割れの発生を高精度に予測できることがわかった。
- (2) Al-Ca-Sn 系耐熱マグネシウム合金、AZ91D、Al-Ca-Mn 系耐熱マグネシウム合金、Al-Ca-RE 系耐熱マグネシウム合金、AE44 の順に凝固割れが発生しにくいことがわかった。

第 5 章では、

1. 半凝固射出成形機を試作
2. 固相率の異なる半凝固成形品の応力ひずみ曲線
3. 固相率の異なる半凝固成形品の高温延性曲線
4. 固相率の異なる半凝固成形品の凝固割れ感受性の評価
5. 凝固割れ感受性評価金型を用いて半凝固射出成形材の凝固割れ発生率の調査
6. 半凝固成形品の組織と凝固割れ感受性との関係

について述べている。

高い固相率で成形できる新たな半凝固射出成形プロセスを考案し、半凝固射出成形装置を開発した。

その半凝固射出成形プロセスにより、凝固割れ感受性が低下するかどうかについて調べるため、第3章で提案した拘束緩和式U型高温割れ試験機を用いて半凝固射出成形材、ダイカスト成形材およびスライズキャスト材の高温延性曲線を求めた。また、半凝固組織が凝固割れ感受性に及ぼす影響について考察を行った結果、

- (1) 凝固割れ感受性は固相率の増加とともに低下することがわかった。
- (2) 半凝固射出成形法によって凝固割れ感受性が低下することがわかった。
- (3) 半凝固組織によって凝固割れが発生しにくいことがわかった。

第6章では、

1. 耐熱マグネシウム合金を用いた自動車部品をダイカスト成形ならびに半凝固射出成形機で試作
2. 実部品での凝固割れ発生予測の精度検証
3. 半凝固射出成形品の特性評価

について述べ、以下の結果を明らかにした。

- (1) 実部品「ベアリングビーム」を Al-Ca-Sn 系の耐熱マグネシウム合金および汎用のダイカスト用 AZ91D を用いて試作した。第5章の手法によりベアリングビーム形状での凝固割れの発生予測を行った結果、凝固割れをすることが予測された。しかし、実機による試作では、凝固割れが発生せず、予測結果と一致しなかった。肉厚に応じた要素の大きさ、温度変化に応じた時間分割を細かさが解析精度を向上させると考えられる。コンピュータの能力によるところがあるが、実用的な解析を行う上で今後の課題とした。
- (2) 半凝固射出成形装置を用いて、Al-Ca-Mn 系耐熱マグネシウム合金製の「クラッチピストン」を試作した。品質工学を用いて、半凝固射出成形品の凝固割れの発生に影響を与える因子を導き、凝固割れの少ない成形条件を確立した。凝固割れが無い良好な試作品を用いて油圧の繰り返し負荷による耐久試験を実施した。アルミニウム合金に比べ弾性率が低いマグネシウム合金をアルミニウム合金と同じ肉厚、形状の部品で評価したため、アルミダイカスト製と同じ負荷を加えると、耐熱マグネシウム合金の半凝固射出成形品は変形が大きくなる。その結果、肉厚の薄い部分での破壊が多くなり、耐熱マグネシウム合金製クラッチピストンの耐久性はアルミダイカスト製に比べ、低くなったと考えられる。

最後の第7章では、本研究の成果を以下のとおり総括した。

- (1) 拘束緩和式U型高温割れ試験治具を用いたその場観察法による新しい試験方法を提案した。
- (2) この手法により、これまで明らかにされていなかった、ダイカスト成形時と同じ冷却速度を再現しながら、耐熱マグネシウム合金の固液共存温度域における延性曲線を求めることができた。
- (3) 耐熱マグネシウム合金の固液共存温度域における応力ひずみ曲線を取得し、鋳造シミュレーション解析によって凝固中に発生するひずみを精度よく求めることができるようになったことで、凝固割れの発生を予測し、抑制することができるようになった。
- (4) 実部品への適用について、その精度を実証するには至らなかったが、計算能力の高い装置を利用することにより、より短時間で誤差の少ない計算ができると考えている。実部品での予測精度の向上は今後の課題となるが、金型設計段階において、凝固割れ発生予測技術が実用的レベルで利用できる技術にしたいと考えている。