

6 自動車用耐熱 Mg 部品の casting 割れ予測技術の開発

藤井 敏男, 府山 伸行, 寺山 朗, 筒本 隆博, 小田 信行*, 篠崎 賢二**, 山本 元道**

Prediction of solidification cracking of heat-resistant Mg alloys for automotive parts

FUJII Toshio, FUYAMA Nobuyuki, TERAYAMA Akira, TSUTSUMOTO Takahiro,
ODA Nobuyuki*, SHINOZAKI Kenji** and YAMAMOTO Motomichi**

In order to manufacture automotive parts of heat-resistant magnesium alloy without solidification cracking, strain analysis of die-casting molding were performed by a casting simulation, "ProCAST". In the analysis, solidification cracking was predicted by comparing calculated strains with strain limits of real magnesium alloys in the range of semi-solid temperature. Test methods were proposed for obtaining the stress-strain curve and the strain limit of these alloys in the range of semi-solid temperature. In the case of simple shape die-casting, the result of real cracking showed a good agreement with the prediction. An automotive trial product, a bearing beam, using a heat-resistant magnesium alloy, was successfully manufactured with no solidification cracking.

キーワード：耐熱マグネシウム合金, 鑄造割れ, 鑄造シミュレーション

1 緒 言

地球環境保護のため自動車から排出される CO₂ の 20～30% の削減が求められ, 自動車の軽量化が重要な課題となっている。Mg は Al よりさらに軽い材料として自動車の軽量化に期待されており, Ca, Si, 希土類元素 RE, (以降 RE と記述), Sr が添加された耐熱 Mg 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部品への適用が試みられている。特に RE を添加した合金は耐熱性に優れているが, 金型への焼き付きや材料のコストが課題で自動車への適用が遅れている。自動車部品へ適用するには, RE の代わりに Ca を添加した安価な合金が有望である。しかし, 固液共存温度域における延性が小さいため, Ca 系耐熱 Mg 合金はダイカスト成形時に, 鑄造割れが発生しやすいという課題がある。

本研究では, 部品形状設計や金型方案設計の段階で, 鑄造割れ発生が防止でき, 試作金型の修正回数が大幅に削減されるとともに, 開発費の削減にもなる鑄造シミュレーションによる鑄造割れ予測技術の開発に取り組み, 安価な耐熱 Mg 合金部の自動車への適用を目指した。

2 実験方法

2.1 高温物性試験

供試材として, 耐熱 Mg 合金 3 種類と市販の Mg 合金 AZ91D を用い, 直径 6mm, 長さ 100mm の丸棒試験片中央

部を高周波誘導加熱装置により Ar 雰囲気中で加熱し, 所定の温度にてクロスヘッド速度 50mm/min で引張試験を実施した。図 1 に示すように, 高周波誘導加熱装置を制御するため, 試験片下部に熱電対を取り付けた。また, 試験片中央部の表面温度を放射温度計で測定し, 試験温度とした。あらかじめ試験片表面に加工したビッカース圧痕を標点とし, 均熱温度域においてこの圧痕を高速度カメラで撮影した。ひずみは撮影画像から標点間変位を測定して求めた。固液共存温度域を含む各試験温度での応力-ひずみ曲線¹⁾を求め, ヤング率, 0.2%耐力, 加工硬化係数を取得した。

固液共存温度域での凝固割れ発生限界ひずみ²⁾は図 2 に示すその場観察法³⁾で測定した。拘束梁を内側に曲げた状態で, 100mm×10mm×4.5mm の平板試験片を梁上端部に固定して引張荷重を負荷し, 試験片中央部に焦点を

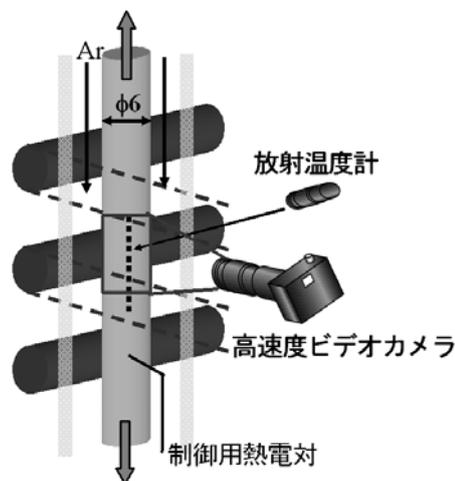


図 1 高温引張試験概略図

*マツダ(株), **広島大学

外した YAG レーザを照射した。局部的に固液共存温度領域まで急速加熱した部分が、梁による引張負荷で局部変形して凝固割れが発生する。その様子を高速ビデオカメラで撮影した。凝固割れが発生する瞬間のひずみは試験片表面にあらかじめ加工しておいたけがき線の間隔を撮影画像から測定して求めた。また、凝固割れ発生部の温度は放射温度計で測定した。

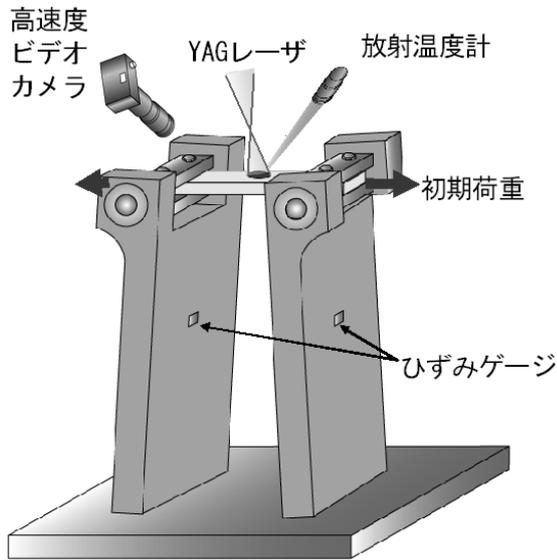


図2 その場観察法による凝固割れ発生限界ひずみの測定

2.2 簡易形状金型による評価方法

図3には凝固割れを試験するための簡易形状金型とシミュレーションモデルの様子を示す。これら形状で鋳造シミュレーション ProCAST を用いて鋳造割れ発生予測を行った。拘束端距離 L を 105mm, 65mm, 25mm と変化させて、凝固割れが発生しやすい拘束部コーナー半径 R でのひずみ履歴を鋳造シミュレーションによって詳細に求めた。

解析には、対称性を考慮して 1/2 モデルを用い、幅方

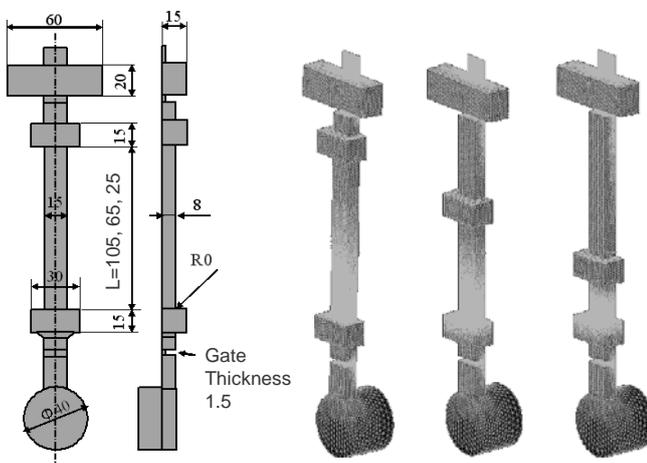


図3 簡易形状金型とシミュレーションモデル

向を対称モデルとして節点数 約 140,000, 要素数 約 720,000 で計算した。解析に必要な各供試材料のヤング率, 加工硬化係数, 0.2%耐力は, 高温引張試験により求めた温度の関数としての値を使い, その他のポアソン比, 密度, 熱伝導率, 比熱, 凝固潜熱, 熱膨張係数については, 材料設計支援ソフトウェア JMatPro による計算値を用いた。

また鋳造割れ発生限界条件には, その場観察法で求めた固液共存温度域での凝固割れ発生限界ひずみと温度との関係を使用した。

各 Mg 合金の鋳造割れ感受性を評価するために, 簡易形状金型を用いて, 実機 90ton ダイカストマシンによる成形試験を実施し, コーナーR 部の割れ発生状況を調査し, 解析による割れ発生予測結果の検証を行った。

2.3 ベ어링ビームによる鋳造割れ予測

ベ어링ビームを耐熱マグネシウム合金で試作するため, 高温物性試験によって得られた物性値を用いて, 鋳造割れ発生の予測を行った。試作品の大きさを解析する際, 要素分割数が大きくなるため, パソコンレベルでの解析では使用可能なメモリにより要素分割数が制約を受ける。そこで, フィレット形状などの細かい形状を省略したモデルで解析を行い, 鋳造割れが発生する部分の見当をつけた。その結果, ベ어링固定部分にあたる厚肉部分の両脇にあるリブにひずみが集中しやすいことがわかった。そこで, リブ部の形状を細かく分割するため, 試作品を左右対称モデルとして取り扱った。そのようにしても, リブ部分の拘束で発生するひずみ分布に大きな影響を及ぼさないと判断したからである。図4に節点数 279,641, 要素数 1,384,204 の解析モデルを示す。

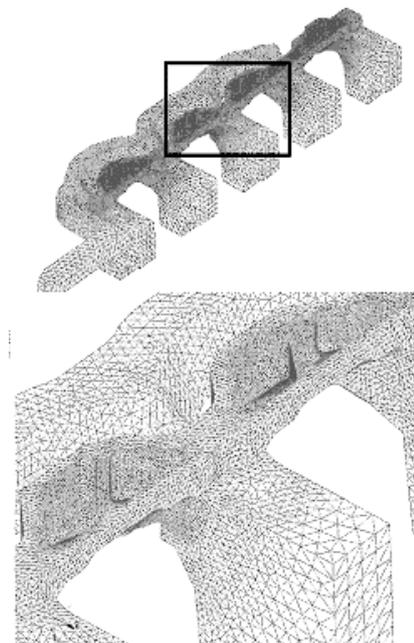


図4 対称モデルによるベ어링ビームの要素分割

3 結果および考察

3.1 簡易形状金型による鋳造割れ予測

図5に簡易形状金型での耐熱マグネシウム合金の鋳造割れ予測を行った結果を示す。割れの発生を予測した場所と同じ位置で実機ダイカスト試験でも鋳造割れが発生しており、予想が的確であることがわかる。

鋳造割れが発生しているコーナーの白丸部分の拘束端距離Lによる耐熱マグネシウム合金の温度と相当塑性ひずみの変化を図6に示す。●印はこの合金の固液共存温度域における割れ発生限界ひずみであり、この合金では

540℃で最小値が1.9%を示している。また、580℃付近から上昇する三本の実線は鋳造シミュレーションで求めた拘束端距離L=105mm, 65mm, 25mmの図5で○印した部分に発生するひずみである。発生したひずみが割れ発生限界ひずみを超えると鋳造割れが発生すると判定した。この合金では拘束端距離L=105mm, 65mmの場合に凝固割れが発生すると予測され、拘束端距離L=25mmになると、割れ発生限界ひずみ量よりも小さいので鋳造割れが発生しないと予測される。この手法で耐熱Mg合金3種類と市販のMg合金AZ91Dでそれぞれ予測し、実機ダイカスト試験で検証した結果を図7に示す。

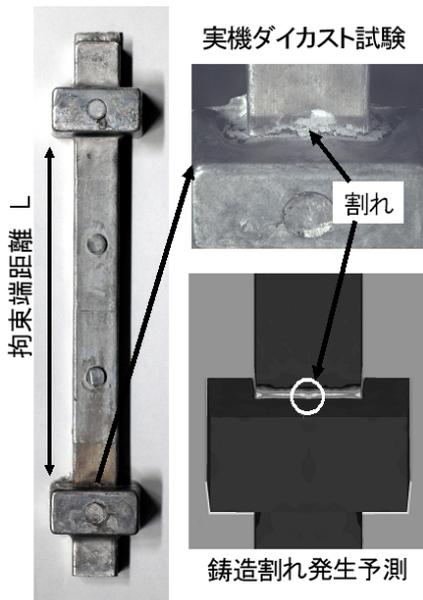


図5 簡易形状金型でのコーナー部の鋳造割れ発生状況とシミュレーションによる予測

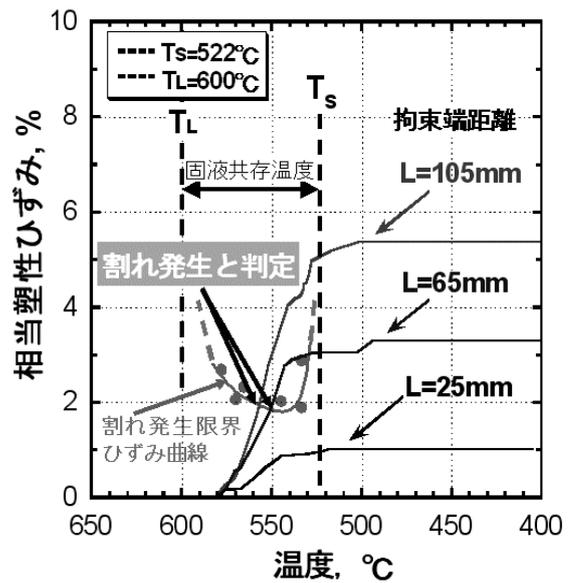


図6 簡易形状金型でのコーナー部の拘束端距離Lによる温度と相当塑性ひずみの変化

L	Crack rate, %	A-alloy		AZ91D		B-alloy		C-alloy	
		Crack	Crack	Crack	Crack	No crack	No crack	No crack	No crack
L=105mm	100	Crack	Crack	Crack	Crack	No crack	No crack	No crack	No crack
L=65mm	100	Crack	Crack	Crack	Crack	No crack	No crack	No crack	No crack
L=25mm	50	No crack							

図7 各種マグネシウム合金の簡易形状金型での実機ダイカスト試験での鋳造割れ発生状況と鋳造割れ予測結果

拘束端距離 L によって casting シミュレーションで casting 割れが発生すると予測したものを灰色の領域で示し、 casting 割れが発生しないと予測したものを白色の領域で示した。実機ダイカスト試験で casting 割れ発生率を調査した結果が棒グラフで示されている。この結果から割れが発生すると予測した条件では casting 割れが発生し、割れないと予測したものは、数%の例外を除きほぼ割れは発生しないという結果が得られ、予測結果は妥当であった。本研究では高温引張試験を行い、得られた高温物性値を用いて金型内で铸件に発生するひずみ量を計算した。このひずみ量と、その場観察試験より得られた高温延性曲線とを比較する手法は casting 割れ発生を予測する上で極めて効果的であると言える。

3.2 ベ어링ビームの casting 割れ予測とその試作

図8は耐熱マグネシウム合金でダイカスト成形したベ어링ビームの写真である。このベ어링ビームを casting シミュレーションで casting 割れを予測した結果を図9に示す。図9は図8に破線で示した断面での相当ひずみ分布である。700°Cのマグネシウム合金溶湯が200°Cの金型に充填したものと熱応力と凝固を連成させて解析した。解析に要した時間は約13.5時間であった。図9のようにベ어링が固定される肉厚部の両脇にあるリブ部で拘束され、ひずみが集中していることがわかる。リブ部分には $R=2\text{mm}$ のフィレットが付けられているが、リブ部2と3(図8の四角)部分を拡大すると、リブ部2は特にひずみが大きく、割れの発生が予測された。

実機ダイカストによる成形ではこの予測に反して、リブのどの部分も casting 割れはなかった。これはメモリーの制限で最小の要素分割長さを0.5mmと大きくしたことで、ひずみが大きくなったことが原因であると考えられる。実際の製品形状は複雑であるため、形状を精度良く再現するには要素分割長さをより小さくする必要がある。

製品形状での精度にまだ課題が残ったが、 casting 割れ発

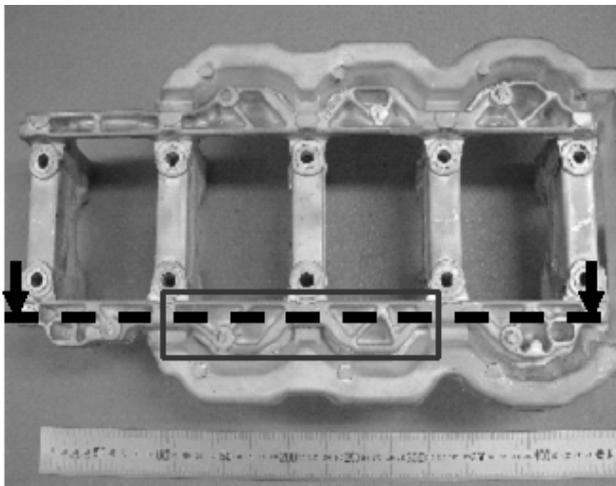


図8 試作品 耐熱Mg合金製ベ어링ビーム

生の危険場所を推測することは可能であった。

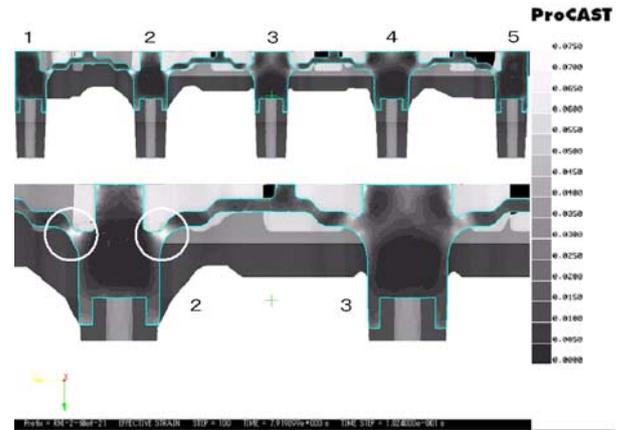


図9 試作品ベ어링ビームでの casting 割れ予測

4 結 言

高温物性試験で得られた耐力、加工硬化係数、凝固割れ発生限界ひずみを casting シミュレーション ProCAST のデータベースに組み込み、耐熱マグネシウム合金および汎用のダイカスト合金 AZ91D の casting 割れ発生の予測を行い、実機ダイカスト試験の結果と比較検証した。また、ベ어링ビームを試作し、試作品の大きさと予測可能かどうかを検証した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 簡易形状金型による実際の casting 割れ結果は、高温引張試験で、得られた機械的特性を用いたひずみ解析結果と、その場観察法による延性曲線の比較により、各種マグネシウム合金の casting 割れ発生の予測と良く一致し、本解析法は極めて効果的であることがわかった。
- (2) ベ어링ビームの大きさと解析した結果、 $R=2\text{mm}$ のフィレット形状では casting 割れが発生すると予測された。しかし、実機による試作では、どのマグネシウム合金も casting 割れが認められなかった。これは、要素分割長さが大きく、フィレット形状を正確に表現できていないため、ひずみ集中を大きく評価したことが原因と考えられる。

謝 辞

本研究を行うにあたり、試作に協力して戴いたリョービ(株)に感謝いたします。

文 献

- 1) 藤井 他4名 溶接学会全国大会講演概要集 No. 81(2007), 22
- 2) 仙田 他5名 溶接学会誌, 41(1972), 709
- 3) 篠崎 他5名 溶接学会全国大会講演概要集 No. 79(2006), 5