

コンピュータシミュレーション解析を利用した 難燃性マグネシウム合金の砂型鑄造への適用に関する研究

園田正樹*・吉松研一**・瀬戸一郎**

*生産技術部・**木本機器工業株式会社

Study of Computer Simulation of Non-combustible Magnesium alloy Sand Mold Castings

Masaki SONODA*・Kenichi YOSHIMATSU**・Ichiro SETO**

*Production Engineering Division・**Kimotokikikougyo LTD

要 旨

我々は平成 17 年度より、地域新生コンソーシアム研究開発事業「難燃性マグネシウム合金の高機能組織制御と鉄道車両用部材の開発」の分担課題である「凝固シミュレーション解析を援用した鑄造部材の低コスト製造技術」の中で、難燃性マグネシウム合金の鑄造技術を確立し、コンピュータシミュレーション解析を利用した低コスト化を進め、鉄道車両部材への事業展開を図ることを目標に研究を推進している。鑄造特性把握用試験片を対象としたシミュレーション解析とその実証実験を行うことにより、鑄造特性の把握とコンピュータシミュレーション解析の有効性を検討した。流動性については、溶融体の温度だけではなく、鑄型内に発生するガスによる背圧の影響も大であることを確認した。コンピュータシミュレーションについては、欠陥発生位置を予測でき有効性が確認された。反面、鑄造部品の強度を左右する鑄造体の冷却速度については、実際よりも速い値を示し、実際の設計に活用するには多くのデータ蓄積と解析が必要である。

1. はじめに

難燃性マグネシウム合金は鉄道技術協会から鉄道車両用材料として必須である不燃材の認定を受けた唯一のマグネシウム合金であり、エネルギー効率の観点から大幅な重量削減が課題とされている次期新幹線の内装用部品材料としての展開が期待されている。

難燃性マグネシウム合金は大気中でもシールドガスを使用せずに溶解が可能であり、扱い易い材料であるが、使用実績が少ないことによる信頼性不足とコスト高、従来のマグネシウム合金と比較して機械的強度が低いという課題があり、鉄やアルミニウムのような基幹材料にならないでいる。

この課題に取り組み、難燃性マグネシウム合金の鉄道車両部材への事業展開を目指して産業技術総合研究所や九州大学が中核となり九州及び関西の機関がコンソーシアムを構成し、機械的強度の向上と溶解鑄造、塑性加工、溶接技術、疲労強度評価等の総合的な生産技術の確立による大幅なコストダウンを目指している。

このプロジェクト「難燃性マグネシウム合金の高機能組織制御と鉄道車両用部材の開発」の分担課題「凝固シミュレーション解析を援用した鑄造部材の低コスト製造技術」として大分県産業科学技術センターは大分県地場企業である木本機器工業株式会社と共に難燃性マグネシ

ウム合金の砂型鑄造技術の確立とコンピュータシミュレーション解析を利用した低コスト化を目標に研究を推進している。

今回は、難燃性マグネシウム合金 AZX912 (AZX912 : Mg-9mass%Al-1mass%Zn-2mass%Ca) の砂型鑄造における鑄造特性の把握とコンピュータシミュレーション解析の有効性について検討したので報告する。

2. 実験方法

鑄造物性を把握する対象として、砂型鑄造の中で量産に適したスタックモールドによる鑄造を選択した。本研究においては、5 段に積上げたスタックモールドを用いて実験を行った。鑄造特性を把握する試験片を Fig.1, Fig.2, Fig.3 に示す。Fig.1 の階段型試験片は製品の板厚による性質の違いを、Fig.2 の渦巻型試験片は流動性を、Fig.3 の引張試験片は機械的強度を、それぞれ把握するための試験片である。

これらの中から階段型試験片に対して凝固シミュレーション解析を行った。解析対象物を分割する要素の 1 辺長は 2mm を基準として、製品厚さが 2.5mm の最薄肉部分には 1 辺長 0.5mm の要素を用い、1 辺長 2mm の要素との間には、一辺長を段階的に変化させた要素を配置した。熱的に対称な形状であるので 1/2 解析を行った。凝

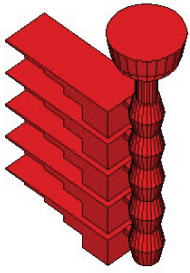


Fig.1 階段型試験片

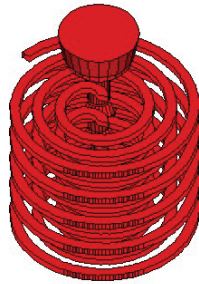


Fig.2 渦巻型試験片

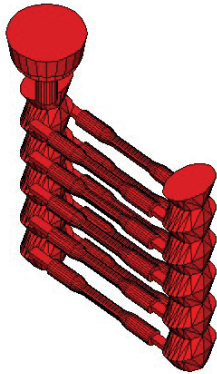


Fig.3 引張試験片

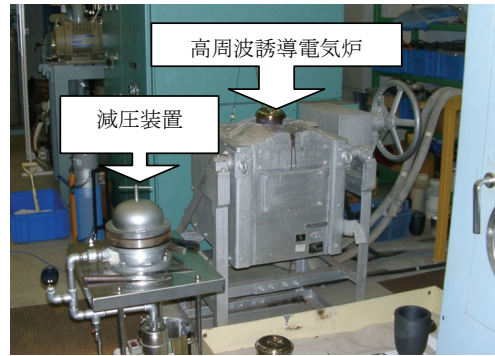


Fig.4 高周波誘導電気炉と減圧装置

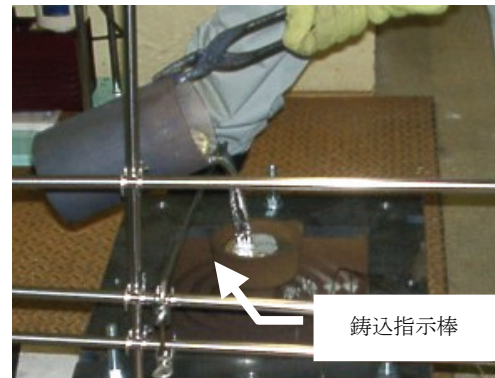


Fig.5 鑄型への注湯と鑄込指示棒

固シミュレーション解析に必要な熱物性値は示差走査熱量 (DSC) 分析装置による測定値を用いた。凝固シミュレーション解析における鑄造条件は Table 1 の鑄造条件 A : 注湯温度 650℃, 注湯高さ 100mm とした。

凝固シミュレーション解析により、鑄型内へ充填した溶融状態の AZX912 合金が凝固していく過程を図示して、鑄造欠陥の発生が予測される位置として凝固収縮時に押し湯からの溶湯供給が絶たれる箇所を確認した。

凝固シミュレーション解析の結果を実証するため、解析に用いた鑄造条件 A により階段型試験片に対して難燃性マグネシウム合金 AZX912 の鑄造実験を行った。

約 2200g の難燃性マグネシウム合金 AZX912 インゴットをるつぼに入れ、高周波誘導電気炉により溶融した。溶湯温度を 680℃まで上昇させた後、るつぼごと減圧装置内に移し、装置内を 60mmHg まで減圧し 2 分間保持することによって溶湯中の非金属介在物を溶湯表面まで浮上させ除去した。Fig.4 に高周波誘導電気炉と減圧装置を示す。減圧処理による溶湯清浄後、るつぼを炉へ戻し、溶湯を注湯温度まで加熱させて鑄造を行った。凝固シミュレーション解析において鑄型内へ溶湯を注ぎ込む注湯高さも、湯口を通過する溶融金属の圧力に関する重要なパラメータであるため、Fig.5 のように鑄造条件 A の位置に鑄込指示棒を設置し、るつぼの注ぎ口が鑄込

指示棒に接する高さから注湯した。

鑄造条件 A の他に、鑄造特性として注湯温度の影響を調べるため Table 1 に示すように、鑄造条件 B : 注湯温度 670℃, 鑄造条件 C : 注湯温度 730℃の 3 通りで鑄造実験を行った。

Table 1 鑄造条件

	注湯温度 [℃]	注湯高さ [mm]
鑄造条件 A	650	100
鑄造条件 B	670	100
鑄造条件 C	730	100

鑄造実験後、型ばらしの後、鑄造試験体の鑄造欠陥の発生が予測される位置を観察することにより、凝固シミュレーション解析の有効性を評価した。

鑄造体の板厚の差異と冷却速度の関係を調べるため、Fig.6 に示すように、階段型試験片の 5 段目製品の板厚 10mm, 20mm, 40mm それぞれの部分の中心となる位置 T1, T2, T3 に熱電対を取り付け、溶湯が型内に充填し凝固、冷却する間、1 秒毎に温度を測定した。

凝固シミュレーションの解析精度を把握するため、この測定値と同位置の温度変化の計算値とを比較した。

鑄造条件 B, C で実験した渦巻型試験片それぞれの各段の流動距離を測定することにより, 溶湯温度による流動性の違いを評価した.

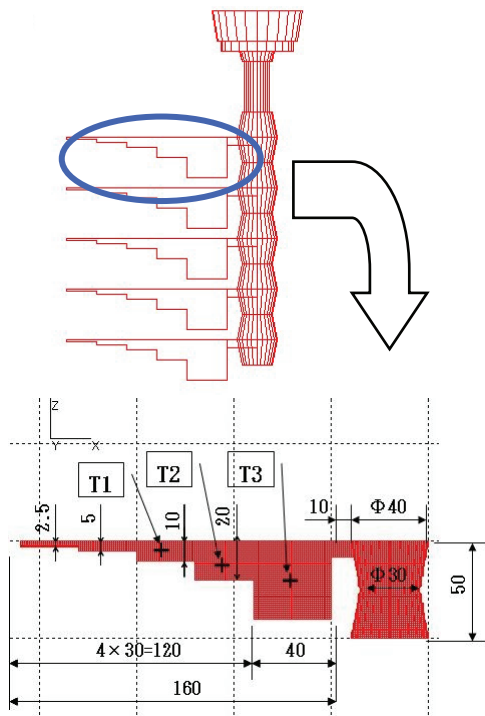


Fig. 6 階段型試験片 (5 段目製品) の温度測定位置 (十字線の箇所)

3. 実験結果及び考察

凝固シミュレーションによる階段型試験片の凝固過程を Fig. 7 に示す. 赤褐色の部分流動可能な液体状態, 白色の部分凝固後の固体状態を示している. この解析結果から, 1 段目製品と 5 段目製品の堰付近が押し湯より先に凝固するので, 溶湯供給が絶たれ, この付近に欠陥が発生することが予測された.

階段型試験片の鑄造実験の結果, 凝固シミュレーションで予測したとおり, 1 段目製品と 5 段目製品の堰に割れが確認された. Fig. 8 に堰に生じていた割れのため, 型ばらし中に方案から外れた 5 段目製品を, Fig. 9 に 1 段目製品と押し湯との間の堰に在る割れを示す. 1 段目製品は堰に存在する割れのため, 軽い力で押し湯部分から外れた.

鑄造条件 A における階段型試験片の温度測定点 T1, T2, T3 各位置の冷却曲線を Fig. 10 に示す.

この冷却曲線から冷却速度を, 充填後 400°C まで降下するまでの 4 つの温度領域に区切り, 直線近似によって算出した. Table 2 にその結果を示す. 液相線温度から固相線温度への冷却に該当すると考えられる 550°C ~ 500°C 領域において, T1 の冷却速度は T3 のそれに対し

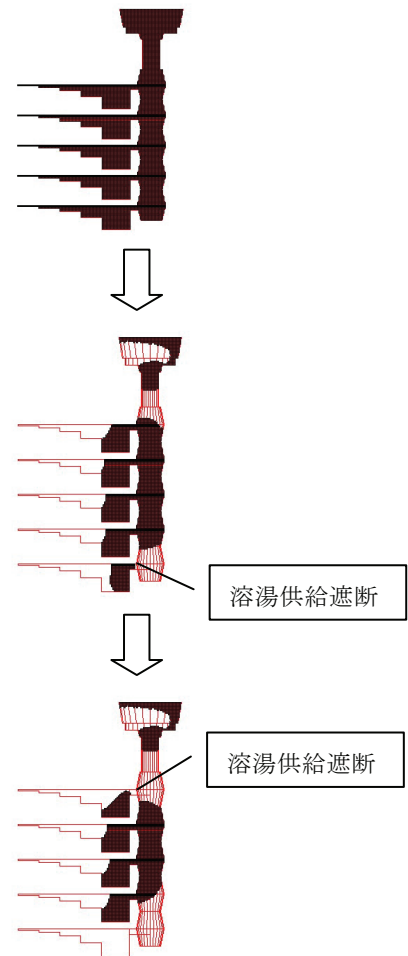


Fig. 7 階段型試験片の凝固過程

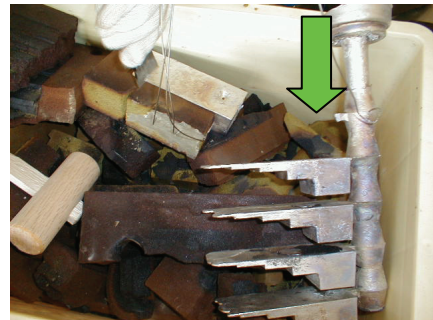


Fig. 8 方案から外れた 5 段目製品

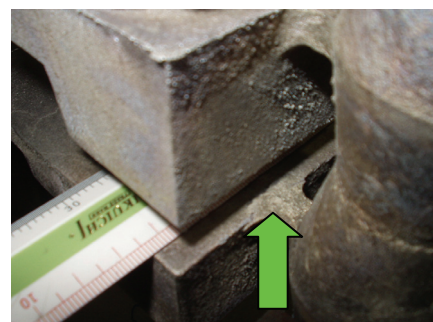


Fig. 9 1 段目製品の堰に存在する割れ

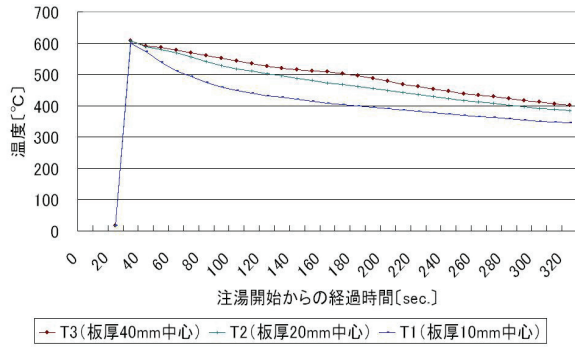


Fig.10 階段型試験片各位置の充填後の温度変化

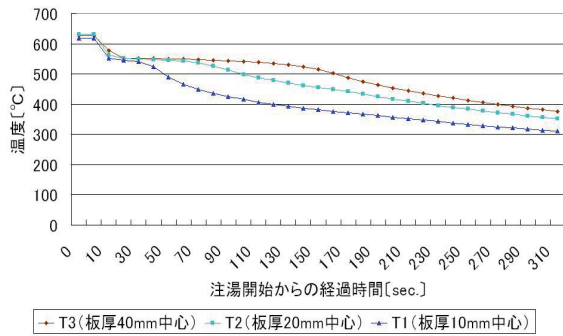


Fig.11 凝固シミュレーションにより計算した階段型試験片各位置の充填後の温度変化



Fig.12 湯流れ比較 casting conditions B (left) , C (right)

て板厚差と同じ約4倍の速さを示した。しかしT2の冷却速度はT3のそれより約1.7倍の速さを示し、板厚差程の差異はないことが判る。板厚20mmと板厚10mmとの間を境に結晶粒径の大幅な差異が推測される。

階段型試験片各位置の凝固シミュレーションにより算出した冷却曲線を Fig.11 に示す。この冷却曲線から冷却速度を、充填後400°Cまで降下するまでの4つの温度領域に区切り、直線近似によって算出した。Table 3 にその結果を示す。

Table 2 に示す実証試験において casting products の凝固過程の温度を測定した冷却速度と、Table 3 に示す凝固シミュレーションにより計算した同位置の冷却速度を比較す

Table 2 各温度領域における冷却速度 (casting conditions A)

温度領域	冷却速度 (°C/S)		
	T1	T2	T3
~550°C	-2.7	-1.1	-0.9
550°C~500°C	-2.5	-1.0	-0.6
500°C~450°C	-1.6	-0.7	-0.8
450°C~400°C	-0.6	-0.6	-0.5

Table 3 凝固シミュレーションにより計算した各温度領域における冷却速度 (casting conditions A)

温度領域	冷却速度 (°C/S)		
	T1	T2	T3
~550°C	-6.7	-2.6	-1.3
550°C~500°C	-1.1	-0.7	-0.4
500°C~450°C	-2.0	-0.9	-1.1
450°C~400°C	-1.0	-0.8	-0.8

Table 4 注湯温度による難燃性マグネシウム合金 AZX912 の流動距離

	溶湯の流動距離 [mm]	
	casting conditions B	casting conditions C
5段目製品	602	309
4段目製品	485	320
3段目製品	597	389
2段目製品	483	465
1段目製品	378	459

ると、550°C~500°C領域を除き、シミュレーションによる冷却速度は実際のそれより速いことが判る。

casting conditions B, C それぞれの条件にて casting experiments を行った渦巻型試験片の写真を Fig.12 に示す。左側が casting conditions B の試験片、右側が casting conditions C の試験体である。各段の流動距離測定値を Table 4 に示す。

1段目製品の流動長さのみ casting conditions C の方が長く、2段目では同程度、3段目より上の試験片は casting conditions B の方が長いことが判る。同じく casting conditions C で引張試験片に casting を行った場合、Fig.13 に示すように良好な充填を示した。これは引張試験片の casting 型は Fig.14 に示すように湯口と対の位置にある押湯部分が casting 型内のガスを逃がすベントの働きをしているのに対し、渦巻型試験片の casting 型は、Fig.15 のように型内部のガスを逃がすベントがないことに起因すると考える。 casting において溶湯温度を上昇させれば一般的に流動性は上昇するが、温度上昇によるガスの膨張が casting 型内部の背圧を高めることになる。マグネシウム合金は比重が軽いので、この背圧に抗して型内に充填することができなかつたと考えられる。 casting conditions C の1段目製品、2段目製品の流動性が casting conditions B より優れていたあるいは同程度だったのは、低い位置にあるので押湯効果が強いとためと考えられる。



Fig.13 引張試験片

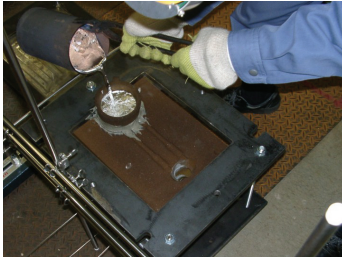


Fig. 14 引張試験片鑄型

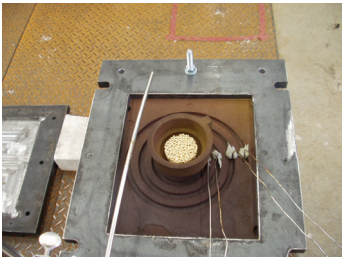


Fig.15 渦巻試験片鑄型

4. まとめ

- 難燃性マグネシウム合金 AZX912 の砂型鑄造に対して凝固シミュレーション解析が有効であることと現在の解析精度を確認した。
- 鑄造製品の板厚が冷却速度に及ぼす影響について、その傾向を掴むことができた。
- 難燃性マグネシウム合金の鑄造流動性には注湯温度だけでなく鑄型内に発生するガスによる背圧も主要な影響因子であることを確認した。

謝 辞

本研究の遂行にあたり、貴重なご助言を頂きました難燃性 Mg コンソーシアムプロジェクト研究推進委員会の皆様に心より感謝の意を表します。また、実験にご協力頂きました木本機器工業(株)宮本忠次氏に心より御礼申し上げます。