

令和 5 年 5 月 14 日現在

機関番号：13201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05129

研究課題名(和文) 強靱性アルミニウム合金を用いたダイカスト法の研究

研究課題名(英文) study of the die-casting process used by high toughness aluminum alloy

研究代表者

才川 清二 (Saikawa, Seiji)

富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授

研究者番号：20642226

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：型締め力350トン以上の実工業レベルのダイカストマシンを用いたAl-3～4%Mg-1～2%Mg系合金のダイカスト部品の鑄造において、鑄造割れが減少して良好な品質が得られる鑄造条件を研究した。その結果、Srが0.02～0.06mass%程度および鑄造時の鑄物の冷却速度が100～200 /s程である時に、鑄造割れが低減して良好な引張試験での機械的性質が工業規模のダイカスト部品の共晶組織が改良されることにより得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Al-Mg-Si系合金へのSr添加による鑄造割れの抑止効果が、従来のラボスケールの小規模鑄造(概ね500g未満)のみならず、今回の研究により、初めて実工業レベルの大きな実部品形状(概ね1～2kg以上の機関系部品や箱型部品)においても有効であることを実証できた。このことは地球環境保全の一助である輸送車両の本系アルミニウム部材での軽量化が従来以上に適用できることをも意味しており、このことから本研究の成果は社会的意義を有すると言えよう。

一方で、金属組織中の共晶相がSr添加により微細化されることを、大きな実部品レベルで初めて冶金学的に明らかに出来た為、学術的意義もあったと判断される。

研究成果の概要(英文)：In the case of casting of Al-3～4%Mg-1～2%Mg system alloy used by die-casting machine over 350tons clamping force, we investigated the casting condition that hot-tearing decreased, and good quality parts obtained. As a result, when Sr addition in the alloy was about 0.02～0.06mass% and cooling rate was about 100-200 /s at casting, hot-tearing decreased and good mechanical property in tensile test was obtained due to modify eutectic structure in the die-casting parts on an industrial scale.

研究分野：鑄造工学

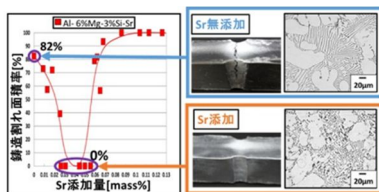
キーワード：ダイカスト アルミニウム 鑄造割れ 軽量化 Al-Mg-Si合金 Sr添加 共晶微細化

## 1. 研究開始当初の背景

地球環境保全の観点から、エネルギーの有効活用は不可避の課題であり、とくに航空機や鉄道、自動車は省エネルギーと低炭素化を両立させる材料での製造が望まれている。ダイカスト法により製造されたアルミニウム部品は、自動車を中心に輸送車両分野で構成部品および部材として広範に軽量化のために使用されている<sup>1)</sup>。現在の一般的な自動車の材料構成は、その約70%が重量のある鉄系合金であり、軽量化の為に使用比率の増加が望まれるアルミニウム等の軽金属材料の使用比率は約20%程度と未だ少ない。省エネルギーと低炭素化のさらなる進展の為に、リサイクル可能なアルミ材料の使用比率の増加が切望されており、この増加においては、現状のアルミ部品製造の約90%を占めているダイカスト法による比率増加が相応しいとされてきた。

このようなニーズに近年高品質な真空ダイカスト法が登場し、これに併せてこれまでのダイカスト材（Al-Si-Cu-Mg-Fe系合金ADC12等）よりも車体軽量化に大きく貢献できる高品質・高靱性材料の研究開発が2000年代に入り自動車分野を中心に本格化している<sup>2)</sup>。この中で近年、自動車への適用が最も大きく期待されつつも実用が進んでいない合金としてAl-Mg-Si系合金が挙げられる。この合金はダイカスト成形後、熱処理を行わずとも高強度と高延性が得られる唯一のアルミニウム系合金であり、その存在は古くから広く知られていたが、鑄造した鑄物部材に微細な割れが生じてしまい、これが欠陥となって実用できないという大きな工業的課題を持っていた<sup>3)</sup>。そこで、申請者らは数年前からこの課題に大手ダイカストメーカーとの共同研究という形で取り組み、近年、これを画期的に抑制する微量添加成分としてSr元素を見出して国際特許出願し、審査後登録（国際公開番号WO2015/052776、2017年9月5日に特許査定済み（登録番号は現状、未表示、出願人；富山大学、発明者；才川清二（申請者）ら））された。

下図Aには、特許技術の効果の一例として、金型鑄造したSr添加によるAl-Mg-Si系合金の鑄造割れの抑止効果を示す。0.04mass%Sr添加により組織中のMg<sub>2</sub>Si共晶層（灰色）が微細化され、これにより鑄造割れがほぼ完全に生じなくなることが小規模のラポレベルの金型鑄造では明らかである<sup>4,5)</sup>。



図A I ビーム状金型鑄物における鑄造割れとマイクロ組織

## 2. 研究の目的

本研究においては、上述のラポレベルでの成果（特許）を工業的に実使用出来る知見を得ることを目的とした。すなわち350ton型締め力程度以上の大型のダイカスト機による実鑄造部材において、上述の特許成分による効果が最大限に発揮される最適な鑄造条件およびAl-Mg-Si系合金の最適な成分配合(Sr添加量)と凝固組織を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

結果として、初年度においては、コロナ禍の影響を多大に受けたこともあり、上記の研究に向けた必要設備の選定と手配および富山大学のダイカストマシン（350ton型締め）への取付やアルミ合金材料や評価補助剤の入手までとなり、大幅に遅延した。しかしながら、初年度途中から対策として、学外の800ton型締めダイカストマシンによる評価結果<sup>6)</sup>も織り込むことで、コロナ禍による遅れを2年目末頃にほぼ挽回し、上述の目的と基礎的知見を3年目の最終年度までで、ほぼ得ることが出来た。具体的な実験方法を以下に記述する。

### (1)350ton型締め・ダイカストマシンによる鑄造試験と評価方法

富山大学に既設の表記ダイカストマシンにおいて通常の鋼鉄製射出部（スリーブとプランジヤチップ）による場合に加えて、今回の科研費にて購入・装着した断熱性に優れた特殊鑄鋼製射出部による鑄造試験をも行い、鑄物品質との比較を行った。評価時のダイカスト鑄物の外観を下図Bに示す。評価に用いたダイカスト鑄物は、実車にも使用されていた機関係の部品である。これらの結果を下記(2)の800ton型締めの場合と相互比較・参考とし、研究効率の向上に努めた。



図B 350tonダイカストマシン（富山大学所有）で鑄造した鑄物部品外観

注）鑄込み重量約1.2kgで鑄造圧力約60MPa（射出速度は種々可変）

### (2)800ton型締め・ダイカストマシンによる鑄造試験と評価方法

下記の表1に示す各合金材料を溶解及び精錬後、700にて溶湯保持した。次いで型締め力が800tonのコールドチャンバダイカストマシンを用いて、箱型鑄物（縦×横×高さが約200-300mmで一般肉厚2.5mm）に鑄造した。鑄造後、鑄物の外観をカラーチェックにより検査した後、平坦部から引張試験片と観察用の小片を採取して、それぞれ引張試験と光学および走査型電子顕微鏡によるマイクロ組織観察に供した。組織観察用の試料は鑄物から切り出した小片を樹脂埋め後、

耐水ペーパーおよびバフ研磨を行い鏡面に仕上げた後、0.3%HFにて腐食して観察に供した。

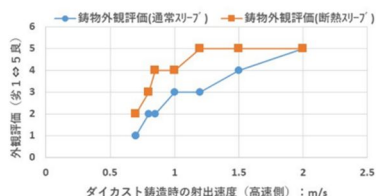
表1 ダイカスト合金の目標組成 (mass%)

合金記号	目標組成
3.5Mg	Al-3.5%Mg-1.5%Si-1.4%Mn-0.15%Ti-0.45%Fe
3.5Mg-SrL	Al-3.5%Mg-1.5%Si-1.4%Mn-0.15%Ti-0.45%Fe-0.025%Sr
3.5Mg-SrH	Al-3.5%Mg-1.5%Si-1.4%Mn-0.15%Ti-0.45%Fe-0.05%Sr

#### 4. 研究成果

##### (1)350ton 型締め・ダイカストマシンによる鑄造試験と評価結果

前述の図Bに示した鑄物を鑄造できる金型を富山大学の350tonダイカストマシンに取り付け、ダイカスト用アルミ合金を約210kg、近傍のガス炉で溶解して自動給湯機を用いてダイカスト鑄造した。この際に射出速度の高速側を種々変化させると共に、通常の射出部(断熱性が低い)と断熱スリーブおよびチップを装着した射出部(断熱性が高い射出部であるため、アルミ溶湯の温度低下が比較的遅い)による試験も実施した。これらの結果を下図Cに示す。



図C 前述の図Bの鑄物外観とダイカスト時の射出速度の関係

##### (2)800ton 型締め・ダイカストマシンによる鑄造試験と評価結果

###### 機械的性質

前述の表1に示した各合金鑄物の引張試験結果を図1に示す。Sr無添加の3.5Mg合金鑄物およびSrを0.025~0.05%含有した3.5Mg-SrL並びに3.5Mg-SrHの3種類の合金鑄物とも、引張強さおよび0.2%耐力の値は、ゲート側よりもむしろ反ゲート側で幾分高い値を示した。なお、Sr添加によるこれらの値への影響は、ほとんど見られなかった。一方、破断伸びの値では、前述とは異なる傾向が測定されており、ゲート側ではあまり変化はないものの、反ゲート側ではSrの含有量が増加するにともない、その値が減少する傾向が観られた。

そこで、この原因を検討するために各試験への欠陥面積率を求め、伸びの値との関係を調べた。結果を図2に示す。Sr無添加の3.5MgおよびSrを含有した3.5Mg-SrL並びに3.5Mg-SrHの3種類の合金鑄物とも、引張試験の欠陥面積率と伸びの値には相関が認められ、欠陥が多くなるほど伸びの値が減少する傾向が明らかであった。この事が、前述した反ゲート側における伸びの値の変動の要因と考えられた。

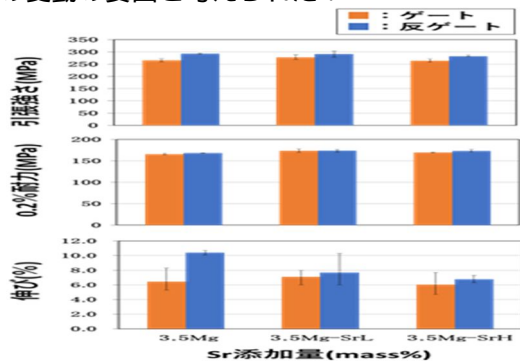


図1 各合金の引張試験結果

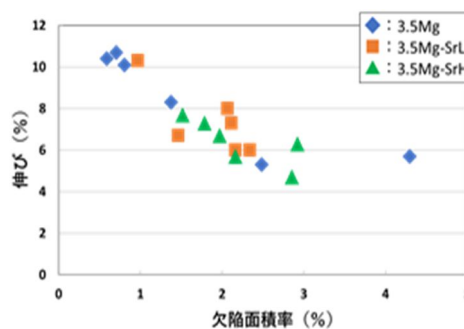


図2 破断伸びと欠陥面積率の関係

###### ミクロ組織観察

図3には各合金のOM(光学顕微鏡)およびSEM(走査型電子顕微鏡)による組織観察結果を示す。OM像における白色のセル状晶出物は初晶-Al相であり、それらの間に暗灰色で直径5μm程度で板状のAl-Mn系化合物相および凝固末期に共晶反応により晶出したMg<sub>2</sub>Si相(明灰色)が散在した凝固組織がいずれの場合も観察された。共晶部分を高倍率で観察したSEM像においては、Sr添加した合金においてMg<sub>2</sub>Si共晶相の微細化が顕著に認められた。

一般に、共晶型アルミニウム合金の延性には、凝固末期の共晶相の微細化が大きく影響することが知られており、A356等の亜共晶型Al-Si系合金においても、Srを微量添加することにより共晶Si相が微細化し、その結果として延性や伸びが向上する。しかしながら本研究の3合金の比較では、前述したように引張試験における伸びの値へは、そのような影響は認められず、むしろ伸びの値が低下する傾向が測定された。前述の図2において試験片の欠陥量と伸びの値には相関が認められたことから、本研究においては、Sr添加による共晶の微細化よりも、各合金や各



部位(ゲートおよび反ゲート)での欠陥量の方が伸び値への影響が大きかったと考えられる。

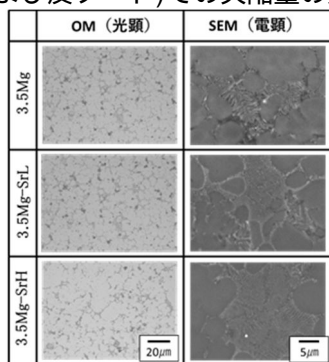


図3 各合金鋳物のミクロ組織観察結果  
 鋳造割れへの影響

図4には各合金鋳物のカラーチェック後の外観を示す。Sr 無添加の 3.5Mg および Sr を含有した 3.5Mg-SrL 並びに 3.5Mg-SrH の 3 種類の合金によるいずれの箱型鋳物とも割れなどがほぼ等しく散在しており、ほとんど差異が無いと思われた。外観上では Sr 含有量の際に伴う変化が確認されなかったことから、次いで内部組織の観察を鋳物の各部において実施した。

図5には、箱型鋳物のリブ付け根部近傍の断面組織の観察結果を示す。3 種類の合金による箱型鋳物とも、凝固途中に生じたと思われる鋳造割れと凝固後の固体収縮時に生じたと思われる熱間割れの 2 種類の割れが生じていた。ここで、後者の熱間割れにおいては、Sr 含有の有無による影響はほとんど認められない。しかしながら鋳造割れの場合には、それによる効果が観察されており、無添加の 3.5Mg 合金鋳物では共晶部分に粗大な引け割れが生じているのに対して、Sr を 0.025~0.05%含有した 3.5Mg-SrL 並びに 3.5Mg-SrH 合金鋳物では、引け巣が分散することにより粗大な引け割れの生成が抑止されていた。前述のカラーチェックによるマクロ的な外観検査では明らかでなかったものの、本研究における合金系においては、ダイカスト時の鋳物内部での鋳造割れの低減には一定の効果があると考えられる。

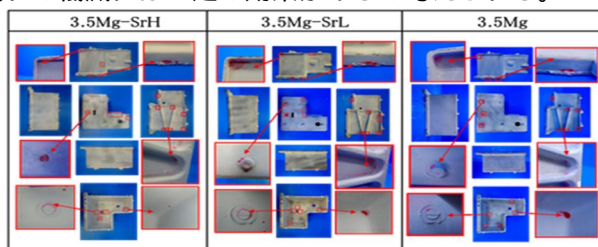


図4 各合金鋳物のカラーチェック結果

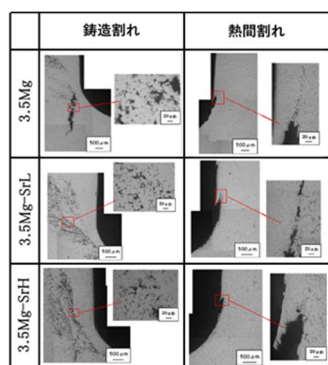


図5 リブ付け根部に観られた鋳造および熱間割れの比較

#### ダイカスト鋳物の機械的性質に及ぼす Sr 含有量と鋳造条件の影響

前述までの結果から、実工業レベルのダイカストマシンで鋳造した箱型鋳物等の部品形状に対しても、特許登録技術である「Al-Mg-Si 系合金への Sr 添加による鋳造割れの低減」が、ある一定の有効な効果を持つことが示された。そこで、ここでは、そのような効果が Sr 添加により発揮された鋳物において、実部品としての機械的性質に及ぼす影響を検証する事とした。

下表2には、前述した Al-Mg-Si 系合金による箱型ダイカスト鋳物の Sr 実質含有量(分析値)と DAS、冷却速度と引張試験時の破断伸びの関係をそれぞれ示す。ここで、各合金のゲートおよび反ゲート部位のダイカスト成形時の凝固における冷却速度は、各部位の光学顕微鏡を用いた金属組織観察等から以下の式により求めた。

$$(DAS) = 59.7CR(\text{冷却速度}) - 0.48 \quad ( : \mu\text{m} , CR: K/\text{sec} )$$

表2 表1に示したAl-Mg-Si系各合金の800tダイカスト鋳物(箱型)におけるSr実質含有量(分析値)とDAS,冷却速度と引張試験時の破断伸びの関係

Sr含有量(mass%)	評価部位	観察視野	DAS II( $\mu\text{m}$ )	冷却速度(K/s)	伸び(%)
0	ゲート	1	6.2	123.9	5.3
		2	5.7	141.4	5.7
1		6.7	107.8	6.0	
2		6.2	118.3	7.3	
0.026	ゲート	1	4.9	165.1	4.7
		2	5.3	154.7	7.7
3		6.4	115.6	10.4	
4		5.8	132.3	10.1	
0.061	反ゲート	3	5.8	130.9	6.0
		4	6.3	112.1	10.3
3		6.0	120.8	6.7	
4		5.1	165.2	7.3	

図6には表2の結果を,鋳物部品のゲート側と反ゲート側に分けてそれぞれグラフ化して示す。Al-Mg-Si系合金を部品化する際に最も重要となる機械特性の一つである破断伸び(グラフの縦軸)と,鋳造条件の結果系として生じた各部の冷却速度の間には,ばらつきが大きいものの,ある程度の傾向が生じていることが示される。すなわちゲートおよび反ゲート側とも,ダイカストされた箱型鋳物の鋳造条件が変更され凝固が早まり,その結果として冷却速度が速まると,機械的性質における伸びは低下することが明らかとなった。このような傾向は,ゲート側でより顕著であり,従ってSr添加により鋳造割れを抑制したダイカスト部品においては,部品のゲート近傍での機械的性質の低下が生じやすいことを考慮すべきであることが分かった。

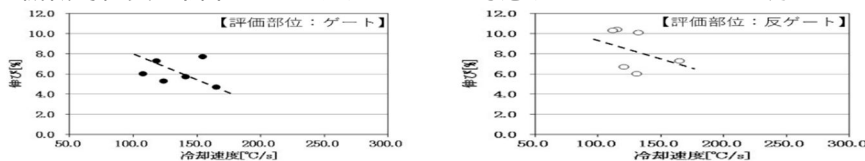


図6 鋳造時のダイカスト品の冷却速度と引張試験における伸びの関係  
注)鋳物品の射出ゲート近傍部が(左図),反ゲート近傍が(右図)

### (3)まとめ

- 1)ダイカスト鋳造時に射出部に断熱スリーブとプランジャチップを適用することにより,鋳造可能な射出速度がより低速化され,本系合金へのSr添加においても実量産時において有効であると判断出来た。
- 2)ダイカストしたAl-3~4%Mg-1~2%Mg系合金の箱型鋳物において,引張特性はほとんど変化がなく,むしろ延性は反ゲート側で幾分低下した。Sr添加により擬二元共晶であるMg<sub>2</sub>Si相が微細化されていたことから,半ゲート側での延性低下は金属組織以外の影響,すなわち鋳造欠陥等の差異等が要因として推測された。
- 3)Srの微量添加による実工業レベルでのダイカスト成形性への影響は少なく,外観検査(カラーチェック検査)においては箱型鋳物の出来栄は,Sr添加の有無により変化しなかった。
- 4)ダイカスト鋳造した実部品レベルの箱型鋳物の内部組織においては,リップ付根の隅R部近傍での粗大な引け割れが生じたものの,Srの微量添加により分散して割れが抑止される現象が観察された。これによりSr添加が実工業レベルでも有効であることが確認できた。
- 5)過去に検討されたAl-6%Mg-3%Si系合金とは異なり,今回,本研究で検討した溶質濃度の低いAl-3~4%Mg-1~2%Mg系合金の鋳物では,鋳造割れの発生を完全に無くすほどの顕著な効果は認められなかった。この要因として,溶質濃度の低下に伴う擬二元Mg<sub>2</sub>Si共晶の晶出货量減少に伴う,Sr微細効果の減少が考えられた。
- 6)実工業レベルでのAl-3~4%Mg-1~2%Mg系合金ダイカスト部品の鋳造において,割れの少ない良好な鋳物部品を得るための鋳造条件および成分範囲は,概ね以下であると推測される。  
鋳造条件:実鋳物の冷却速度を100~200 /K程の凝固速度範囲となるよう各種条件(射出溶湯の温度調整,金型温度制御,鋳造圧力,速度,離型剤の種類や塗布時間等)調整する。  
成分範囲: Sr含有量が0.02~0.06mass%の範囲は鋳造割れ低減に有効である。

### <引用文献>

- 1)山縣裕:J.JFS 76(2011),967-971.
- 2)柳原恵美,武田秀,才川清二,松田健二,寺山清志:日本ダイカスト会議論文集,JD12-23(2012),145-151.
- 3)才川清二,前田裕樹,池野進,太田宗貴,折井晋:鋳造工学 87(2015)39.
- 4)才川清二,青島剛士,岡澤玄,池野進:鋳造工学 87(2015)538.
- 5)才川清二,青島剛士,服部成孝,池野進,柳原恵美:鋳造工学 87(2015)561.
- 6)才川清二,大杉有沙,堀川宏,泉芳範,井川弘尊,小林竜之:日本ダイカスト会議論文集,JD20-113(2020),59-62.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 福原 輝, 大杉 有沙, 數田 久生, 梶田 拳史, 才川 清二	4. 巻 92
2. 論文標題 Al-6%Mg-3%Si 系合金の晶出相に及ぼすSr添加の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 鑄造工学	6. 最初と最後の頁 59-66
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11279/jfes.93.59	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 廣村 悌士, 中田 卓哉, 王 一迪, 青島 洸太郎, 才川 清二
2. 発表標題 Al-6%Mg-3%Si 合金の鑄造割れ性に及ぼすSrおよびTi-B添加の影響
3. 学会等名 公益社団法人 日本鑄造工学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------