

機関番号：85502

研究種目：若手研究(B)

研究期間：&amp;\$\$- 年～&amp;\$\$%

課題番号：21760602

研究課題名（和文）高品位鑄造・接合を目的とした振動下における充填性向上に関する基礎的研究

研究課題名（英文）Fundamental study on filling efficiency improvement by vibration treatment for high quality casting technology

研究代表者 田村 賢 (TAMURA SATOSHI)

研究者番号：20367832

研究成果の概要（和文）：振動下において溶湯（固液共存状態）の充填性が向上する機構を明らかにし、効率的な応用技術を確立するため、油脂および水を用いて、二相界面における混合および浸透挙動を調べた。合金溶湯の凝固過程（複数の相が存在）における振動印加の影響について潜熱の放出挙動と形成組織の形態および湯流れ性の関係に着目し、共晶系 Al-Si 合金にて調査した。振動の印加が充填性（流動性）の向上と組織の微細化に有効であることが示された。

研究成果の概要（英文）：In order to elucidate the mechanism of the filling efficiency improvement by vibration treatment in a casting process, the physicochemical behavior of mixing and infiltration at the biphasic interface was estimated. Eutectic Al/Si alloys were used for the present study. Relationship between the crystallization behavior of primary Si particles and flowability of the molten alloy under the solidification process was investigated. The results of the present work conclude that applying vibration to a casting process is effective for improving the flowability and refining the metallic structure.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 21 年度	2,300,000	690,000	2,990,000
平成 22 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：

科研費の分科・細目：

キーワード：鑄造，振動，キャビテーション，相界面，充填性向上

### 1. 研究開始当初の背景

注湯過程で超音波振動を印加することにより、さらなる成形性の向上が期待できる。現段階では、この現象を利用したいいくつかの応用研究が試みられているものの、期待した効果が得られていない状況が散見される。したがって、まず、振動下における充填性向上現象の発現メカニズムを実験的、理論的に調査する必要がある。この現象の素過程を明らかにして、現象を自在にコントロールする技

術の確立に資することが本研究の主たる目標である。

溶湯（液相）中に固相が分散する系において、振動の印加により、どのようなメカニズムで流動性の向上がもたらされるかを明らかにする。共晶アルミ合金を用いて、凝固過程における振動印加による流動性向上の素過程を明らかにする。

### 2. 研究の目的

過共晶 Al-Si 合金は、鑄造性と耐摩耗性に優れており、上記機械類の耐摩耗部品への適用が検討されている。過共晶 Si 合金は Al-Si 共晶組織中に硬質な初晶 Si 粒子が晶出分散した組織を持つことにより、優れた耐摩耗性を獲得している。しかし、初晶 Si 粒が成長して粗大化すると材料の靱性低下を招くので、実用上、初晶 Si 粒径を  $\leq 50 \mu\text{m}$  程度まで微細化する必要がある。この微細化には、冷却速度を大きくすることが有効であるとされており、組成の異なる溶湯を混合して鑄造する方法なども考えられている。P などを添加して微細化を促進する方法や凝固プロセスで超音波振動を印加することによる微細化の試みも報告されている。しかしながら、 $10 \mu\text{m}$  未満の初晶 Si 粒子は耐摩耗性の向上に寄与しないと報告がある。したがって製品内部の初晶 Si 粒子のサイズと分布をコントロールすることが重要となってくる。

亜共晶 Al-Si 合金は、共晶中に  $\alpha\text{-Al}$  のデンドライトが張り巡らされた組織を持つことから、過共晶材と比較して耐摩耗性には劣るが靱性に富んでいる。耐摩耗性を持つ過共晶 Si 粒子と亜共晶のデンドライトによる粘り強さを両立させるため、溶湯混合による合金成分の濃度分布非平衡化処理を検討した。亜共晶組成の溶湯と過共晶組成の溶湯を混合させ、濃度むらを持たせた状態で速やかに鑄造して非平衡組織の形成を試みる。衝撃破壊試験を行い、破壊吸収エネルギーと破断状態から破壊靱性を評価した。

本研究では溶湯中での初晶 Si の晶出、溶損過程を調べ、過共晶 Al-Si 合金の初晶 Si 粒の制御（粒径、分散状態、形体安定）と溶湯の流動性に関する基礎的な知見を得ることを主たる目的とした。振動印加による初晶 Si 粒子の微細化促進の機構を探るために振動下の凝固過程における溶湯の温度履歴を調べ、初晶 Si 粒子の形体変化について検討した。また、2 種以上の溶湯を混合したときの凝固あるいは再熔融過程を調査するために、構成分子の極性が大きく異なる液体を複数用いたモデル実験を行ない溶湯混合の素過程についての知見を得た。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 アルミ合金溶湯の非平衡化処理による初晶 Si 粒子の分散挙動と靱性向上

##### 3.1.1 溶湯

過共晶 Al-20%Si 合金と亜共晶 Al-7%Si 合金を共試した。溶解は大気中にて抵抗加熱炉とアルミナ坩堝を用いて行った。本研究では、最高過熱温度を  $750^\circ\text{C}$  とし、アルミナ製攪拌棒で攪拌後 15 min 間保持した後、目的温度に調節した。溶存水素の脱ガスは行っていない。

溶湯表面の酸化皮膜は溶湯使用前に取り除いた。

##### 3.1.2 鑄込み

$\phi 70 \text{ mm}$ 、長さ 180 mm の A5056 製円柱形ヒートシンク（金型）に  $\phi 14$  の円柱状キャビティを設け、底部は  $\phi 70 \text{ mm}$ 、厚さ 36 mm の A5056 製円柱形ヒートシンクで塞ぐ。このキャビティへ溶湯を流し込んで凝固させる。注湯は厚さ 0.1 mm の SUS 板から成形した注ぎ口（漏斗）を装着して行う。本研究で 1 回の注湯に供する溶湯は 70 g 程度である。注湯前の金型温度は表面の結露防止のため室温よりも数  $^\circ\text{C}$  高く調整した。

##### 3.1.3 衝撃破壊試験

シャルピー試験機を用いて衝撃破壊試験を行った。試験片については、外径 11 mm で直径 8.8 mm のくびれ部を持たせたものを考案し、各鑄造条件に対して 3 本以上用意した。試験片に熱処理は施していない。各アルミ合金試料の表面観察と、破断面の観察は走査型電子顕微鏡 (SEM) および光学顕微鏡 (OM) を用いて行った。

#### 3.2 振動下における Al-Si 合金溶湯の Si 粒晶出・分布挙動と流動性

##### 3.2.1 合金試料

過共晶 Al-20%Si 合金を共試した。溶解は抵抗加熱炉を用いてアルミナ坩堝中にて大気中で行った。本研究では、最高過熱温度を  $750^\circ\text{C}$  とし、アルミナ製攪拌棒で攪拌後 15 min 間保持した後、目的温度に調節した。溶存水素の脱ガスは行っていない。溶湯表面の酸化皮膜は溶湯使用前に取り除いた。

溶湯内における Si 粒の溶損あるいは成長について調べるために厚さ 0.525 mm、{ 1 1 1 } の高純度シリコンウエハーを供試した。

##### 3.2.2 振動印加

凝固過程における振動の印加は  $\sim 1 \text{ Hz}$  にて行った。加振中の溶湯温度は溶湯に直接挿入した  $\phi 1 \text{ mm}$  の K 型サーモ電対にて測定した。

##### 3.2.3 流動性の比較評価

溶湯の流動性について比較評価を行うために、本研究では、図 1 に示す金型を作製した。 $\phi 155 \text{ mm}$ 、厚さ 34 mm の平滑面を対向配置した二組の A5056 製円柱形ヒートシンク（金型）にスライドガラス（スペーサー: 1.285 mm）を挟み込んでヒートシンク平滑面間に隙間（キャビティ）を確保する。このキャビティへ溶湯を流し込んで凝固させ、その広がり面積で流動性を比較評価するものである。本研究では広がり面積の等価円半径  $R$  にて評

価する。

注湯は上金型中心軸上に設けた貫通穴に厚さ0.1 mmのSUS板から成形した注ぎ口(テーパー部)とインターパイプを装着して行う。注ぎ口側面に設けた排出口から溶湯が溢れ出るまで迅速かつ一気に注湯する。本研究で1回の注湯に必要な溶湯は注ぎ口排出分も含めて70 g未満であった。注湯時の上金型には浮力が働くので、上下金型は機械的に固定しておく必要がある。注湯前の上下金型の温度は30°Cに調整した。

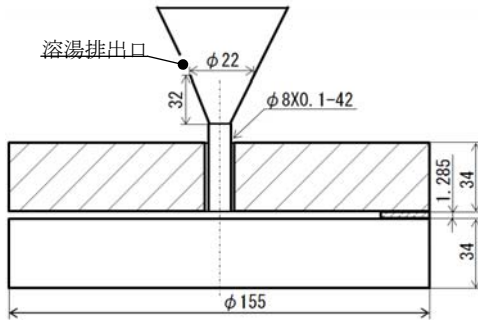


図1 流動性の比較評価に用いる金型

## 4. 研究成果

### 4.1 アルミ合金溶湯の非平衡化処理による初晶 Si 粒子の分散挙動と靱性向上

構成分子の極性が大きく異なる水と油脂を用いて溶湯混合の素過程の調査のためのモデル実験を行なった。その結果、2相(この場合2液)の接触界面積の制御が重要であることが確認できた。

凝固過程における初晶 Si の形態安定性と微細化挙動を調べるために Al-20%Si 過共晶溶湯に純 Al チップを 1 wt.% 混入させる実験を行なった。この結果を図 2 に示す。(a)、(b)

はそれぞれ液相線温度以上 (700 °C)、液相

線温度以下 (680 °C) にて純 Al チップの投

入を行なったものである。共晶温度までの冷却速度はともに 1.1 deg/s であった。液相線温度以下にて純 Al チップを混入させた場合、(b)で示すように初晶 Si 粒 (図中の黒色部分) の著しい微細化がみられた。純 Al チップの投入・混合による溶湯中での局所的な Al 濃度の上昇が、晶出・成長過程にある Si 粒子を部分的に再溶融させて分裂・分散させたと考えられる。

非平衡組織材 (以下 M 材とする) は 2 種類の溶湯 (Al-7%Si と Al-20%Si) を共に約 680 °C にて Al-12.6%Si の共晶組成となるよう混合し、5 秒以内に注湯を完了させた。一方、Al-12.6%Si の共晶組成溶湯に十分な溶解保持時間を与え、すなわち溶湯が熱的に平衡状態に近づくよう保持してから注湯したものを共晶組織材とした。M 材では過共晶材よりも微細な Si 粒子の分散が確認された。試料断面における Si 粒子の数密度は M 材が  $540 \pm 84$  n/mm<sup>2</sup> (平均粒径 13 μm)、過共晶材が  $340 \pm 82$  n/mm<sup>2</sup> (粒径 9~130 μm) であった。M 材には粒径 10 μm 以上 50 μm 以下の Si 粒子が高密度に分散していることから、優れた耐摩耗性を持つことが期待される。

図 3 に衝撃破壊試験による吸収エネルギー値を示す。M 材は共晶組織材よりも吸収エネルギーが大きく、靱性が改善されていることが分かる。比較のため、実用アルミニウム合金ダイカストで作られたエンジン部品から加工した試験片の吸収エネルギー値を図中に破線で示す。過共晶材、共晶組織材の吸収エネルギーはダイカスト試験片のそれとほぼ同程度であったが、M 材の吸収エネルギーはそれらの 1.7 倍ほど高く、靱性が向上していると言える。

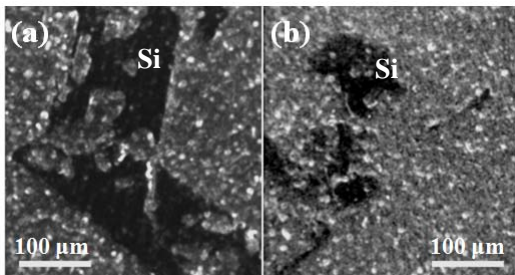


図2 (a)液相線温度以上、(b)液相線温度以下にて純 Al チップを Al-20%Si 過共晶溶湯に 1 wt.% 混入させた場合の初晶 Si の形態。

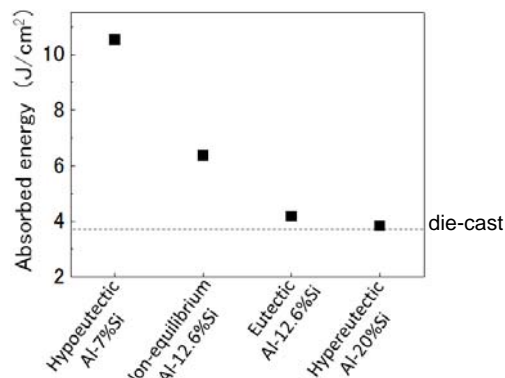


図 3 破断部断面積で規格化した破壊吸収エネルギー。各 3 回ずつ試験した平均値。各点の標準偏差はグラフ左側から 0.04, 0.07, 0.06, 0.01 J/cm<sup>2</sup>。

#### 4.2 振動下における Al-Si 合金溶湯の Si 粒晶出・分布挙動と流動性

振動下の溶湯冷却過程において、印加振動に起因するとみられる溶湯温度の上昇と低下が計測された。冷却過程において 700°C 超から 685°C 付近までは、振動周波数 1 Hz に対応する僅かな温度変動を計測したものの、685°C 付近から 620°C 付近までにおいては、温度変動の周波数が印加振動周波数を上回るものであった。620°C から共晶温度域にかけては再び振動周期に対応した温度変動周期となった。700°C 超からの冷却過程で振動を印加し、630°C にて前述の金型に注湯した場合の等価円半径  $R$  は 26.3 mm となり、無加振溶湯での  $R = 21.7$  と比較して、広がり面積の等価円半径は 1.2 倍となり、振動印加処理した溶湯に流動性の向上が見られた。

共晶温度域のみで振動印加処理し凝固させた試料の熱電対近傍における初晶 Si 粒子の断面数密度は  $22 \pm 1.4 \text{ n/mm}^2$  であり、無加振凝固させたその断面数密度  $10.8 \pm 3.8 \text{ n/mm}^2$  と比較すると、振動により微細化されて分散していることが分かる。シリコンウエハーを共晶温度域の溶湯に浸漬保持させた結果からも Si 板の溶損と小片となつての脱落が確認された。共晶温度付近においても、初晶 Si 粒子の微細化処理が可能であることが示唆される。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

S.Tamura, S.Ezoe, C.Sasaki, Bioassay technique using seed shrimps for comparative studies regarding the aquatic acute lethality of biodegradable lubricants, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 74 (2011) 1578-1585.

[学会発表] (計 2 件)

(1) 田村 賢, 江副 寛, 畠山賢彦 「振動下における Al-Si 合金の Si 粒晶出分布挙動と流動性」日本鑄造工学会 第159回全国講演大会講演概要集 (2011) 109.

(2) 田村 賢, 畠山賢彦, 竹中隆晃 「アルミ合金溶湯の非平衡化処理による初晶 Si 粒子の分散挙動と靱性向上」日本鑄造工学会 第160回全国講演大会講演概要集 (2012) 58.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者 田村 賢  
研究者番号: 20367832