

超音波振動による CO₂ 型を用いたアルミニウム合金鋳物の機械的特性*長坂明彦^{*1}・深井郁夫^{*2}・中澤啓明^{*3}・上野貴裕^{*4}・中村麻人^{*5}Mechanical Properties of Aluminum Cast Alloy Using CO₂ Mold with Ultrasonic Vibration

NAGASAKA Akihiko, FUKAI Ikuo, NAKAZAWA Hiroaki, UENO Takahiro and NAKAMURA Asato

Ultrasonic vibration on solidifying metals have been carried out expecting grain refining effect, reduction of segregation, elimination of inclusions and so on.

In cast process, 1) vibration addition at solidification, 2) enhancement cooling speed and 3) grain refinement agent addition have been employed to improve mechanical properties of products. Ultrasonic vibration which frequency and amplitude are 19kHz and 12 μ m respectively, is used as a vibration. Horn material is a SIALON (shape: straight type, diameter: 20 mm, length: 280 mm) and it is inserted into AC4CH (7.1Si-0.4Mg-0.01Zn-0.1Fe-0.15Ti (mass%), Al-Si-Mg alloy) which is a material under test in this thesis to add ultrasonic vibration. Thereafter, the T6 treatment was given to the sample.

Mean grain diameter of primary α in the product with ultrasonic vibration made in CO₂ sand mold was smaller than without ultrasonic vibration one, tensile strength (*TS*), total elongation (*TEI*) and Vickers hardness (*HV*) of the product with ultrasonic vibration was higher than those without ultrasonic vibration. Compared to the product without ultrasonic vibration, the ultrasonic vibration contributed to the improvement of strength-ductility balance (*TS*×*TEI*).

キーワード：超音波振動, アルミニウム合金, 鋳物, 機械的特性

1. 緒言

アルミニウム (Al) 合金の複合材鋳物に代表されるように, 高強度鋳物が求められている. また, 近年プラスチック成型用の Al 合金金型への適用も期待されている.

これまでに鋳造プロセスにおいて, 溶融アルミニウム合金へ超音波振動 (US) を付加することで, 結晶粒を微細化させる実験が多く行われている¹⁻⁶⁾が, 振動付加した試験片の機械的特性に関する報告はほとんどない.

そこで本研究では, Al 合金鋳物の機械的特性の改善を目的として, 溶融 Al へ超音波振動を付加し, CO₂ 型を用いて試験片を作製し, 凝固組織への影響および機械的特性を調査した.

2. 実験方法

2-1 供試材

供試材には 7.1Si-0.4Mg-0.01Zn-0.1Fe-0.15Ti, mass% の化学組成を有する市販の Al-Si-Mg 系合金 (AC4CH) を用いた. AC4CH は Al-Si 系合金に少量の Mg を加えたもので, 機械的特性および被切削性を改善した合金で, 耐熱性が良い^{9, 10)}.

2-2 超音波振動装置

図 1 に超音波実験装置を示す. 超音波振動装置は周波数自動追尾型であり, 超音波発振器, 振動子, 2 段水冷ブースタ, ホーン, るつぼ, ホーン予熱用電気炉, Al 溶解用電気炉, 温度指示計で構成されている. 超音波発振器は出力 600W, 振動数 19kHz であり, ホーンはサイアロン製ストレートホーン, 直径 20mm, 全長 280mm を使用した. 本実験で付加した超音波振動の縦振幅は 12 μ m である.

2-3 超音波振動付加条件および CO₂ 型

図 2 に超音波振動付加条件を示す. 電気炉を用い, 質量 750g の AC4CH を 700℃で溶解させ, ホーンを挿入し, 600~700℃の温度および 0~360s の時間で US 付加を行った. その後 CO₂ 型へ注湯し, 凝固させた.

図 3 に超音波振動付加時のホーンと溶融金属の位置関係を示す. るつぼは底内径 40mm, 深さ 145mm

* 2010 年 3 月 10 日 日本機械学会北陸信越支部, 第 47 期
総会・講演会講演にて一部発表

*1 機械工学科教授

*2 技術室

*3 有限会社 中澤鋳造所

*4 研究生 (平成 21 年度機械工学科卒業)

*5 生産環境システム専攻 学生

原稿受付 2010 年 5 月 20 日

である。ホーン浸漬深さは液面から約 10mm である。ホーンは予め約 500℃に加熱した。

また、Ar ガスを用いて図 4 のように 10 分間脱ガスを行った。

図 5 に使用した CO₂ 型の模式図、図 6 に実物の写真、図 7 に CO₂ 型による造型手順を示す。上型と下型を重ね（図 7(a)）、スリーブと重りを置いて湯口とした（図 7(b)）。注湯後の CO₂ 型（図 7(c)）を型ばらして、製品とした（図 7(d)）。

2-4 熱処理

超音波振動付加後、供試材に熱処理（T6 処理）を行った。熱処理条件は 520℃で 5 時間の溶体化処理を行った後、170℃で 5 時間、人工時効効果処理を施した。

2-5 引張試験および硬さ試験

引張試験には JIS4 号試験片を用い、インストロン型万能試験機（クロスヘッド速度 1mm/min）で行った。また、硬さ測定はビッカース硬さ試験機を用い、荷重 9.81N、保持時間 15sec で試験片断面に 10 点ずつ行い、最大値と最小値を除いたものを平均とした。

3. 実験結果および考察

図 8 に US の有無によるミクロ組織を示す。室温の 50%フッ化水素水溶液でエッチングを行い観察した。初晶 α と共晶 Si から成る AC4CH は US により、結晶粒が微細化していることがわかる（図 8 (b)）。

図 9 に共晶 Si 長さの分布を示す。縦軸は観察視野内（1.13mm²）での個数を示す。US なしでは共晶 Si の長さにばらつきが見られるが、US ありでは共晶 Si の長さが 70 μ m 以上のものがなくなり、長さの短い共晶 Si が増加した。US により初晶 α が微細化（球状化）したことで、共晶 Si が晶出する初晶 α 界面の直線的な部分が少なくなったことが要因と考えられる。

図 10 に US 付加あり、T6 処理後の試料の EPMA 分析結果を示す。分析条件は加速電圧 12kV、照射電流は 60nA である。それぞれ (a)反射電子組成像、(b)Al、(c)Mg、(d)Si を示している。(a)において、反射電子は原子番号が大きいほど明るいことにより、Mg（原子番号：12）、Al（原子番号：13）、Si（原子番号：14）、Fe（原子番号：26）の中で Fe が白いことがわかる。図 10(c)、(d)により Mg、Fe、Si が共存している領域、Mg、Si が共存している領域が存在していることがわかる。供試材 AC4CH の化学組成から示されるように、Al と Si の割合が非常に多く、Mg および Fe はほとんど存在しない。Al は母相に多く、Si は第二相に多く分布している。Mg と Fe は金属間化合物もしくは微細な Mg シリサイドと Fe シリサイドとの混合物とし

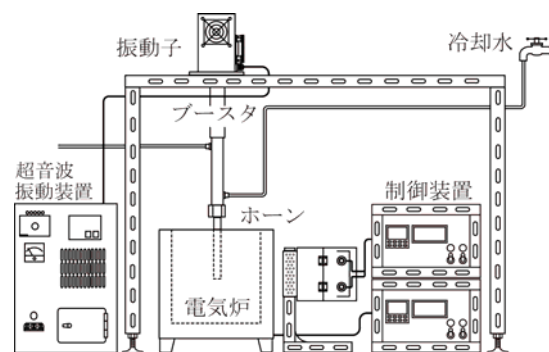


図 1 超音波実験装置

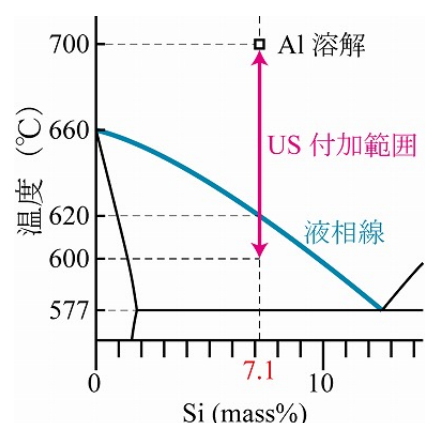


図 2 超音波振動付加条件

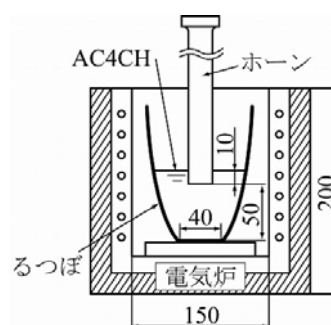


図 3 振動付加時のホーンと熔融金属の位置関係

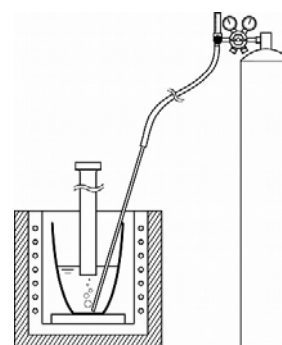


図 4 Ar ガスによる脱ガス

て存在しているため、同じ位置で反応したと考えられる。

図 11 に US 付加と引張強さ TS 、降伏応力 YS 、全伸び TEI およびビッカース硬さ HV の関係を示す。引張強さ TS において、US の効果により TS は高くなる (図 11 (a))。全伸び TEI は、US により大きくなる (図 11 (c))。また、ビッカース硬さ HV は増加する (図 11 (d))。

図 12 に T6 処理後の US 付加と引張強さ TS 、降伏応力 YS 、全伸び TEI およびビッカース硬さ HV の関係を示す。引張強さ TS において、US の効果により TS は高くなる (図 12 (a))。全伸び TEI は、T6 処理により同等になる (図 12 (c))。また、ビッカース硬さ HV は増加する (図 12 (d))。

図 13 に強度－延性バランス $TS \times TEI$ を示す。US 付加により TS が増加し、 TEI が大きくなることで強度－延性バランス $TS \times TEI$ が 551 から 670MPa%と改善された (図 13 (a))。T6 処理後も同様に、872 から 912MPa%となり、改善される傾向を示した (図 13 (b))。

図 14 に、Ar ガスによる脱ガス処理の効果を判定した、ミクロポロテック後の試料を示す。US 付加なしでは鋳肌が荒く、試料上部が大きく膨らんでいる (図 14 (a))。一方 US 付加ありでは鋳肌に光沢があり、試料上部の膨らみも少ない (図 14 (b))。このことから、Ar ガスによる脱ガスが有効だと考えられる。

4. 結言

超音波振動装置を用いて、熔融状態の AC4CH に超音波振動を付加し、CO₂ 型を用いて JIS4 引張試験片を作製し、凝固組織、熱処理への影響および機械的特性を調査した結果は以下の通りである。

- (1) 熔融 Al 合金へ超音波振動付加することで結晶粒の微細化効果が得られた。
- (2) 超音波振動付加により初晶 α 界面に存在する共晶 Si が微細化した。
- (3) 熱処理前後の超音波振動付加において、強度－延性バランス $TS \times TEI$ が改善された。

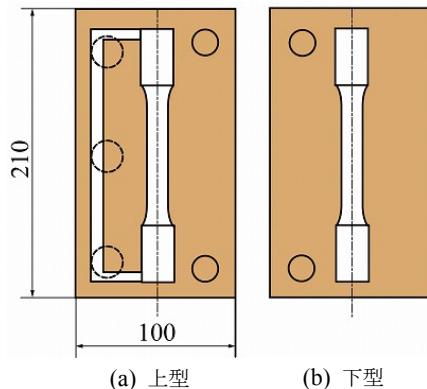


図 5 CO₂ 型 (模式図)

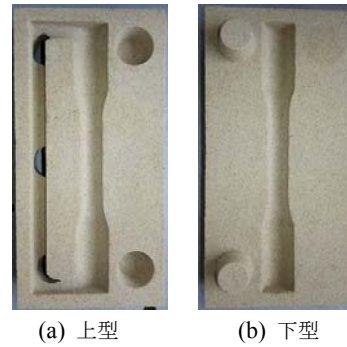


図 6 CO₂ 型 (実物)

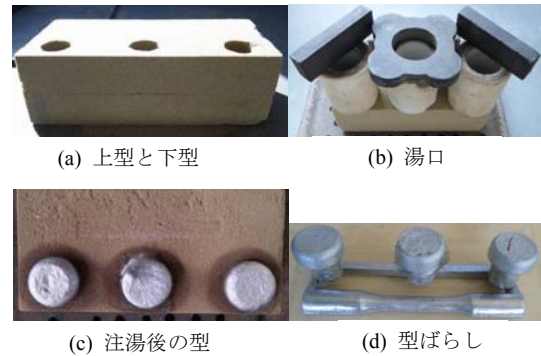


図 7 CO₂ 型による造型手順

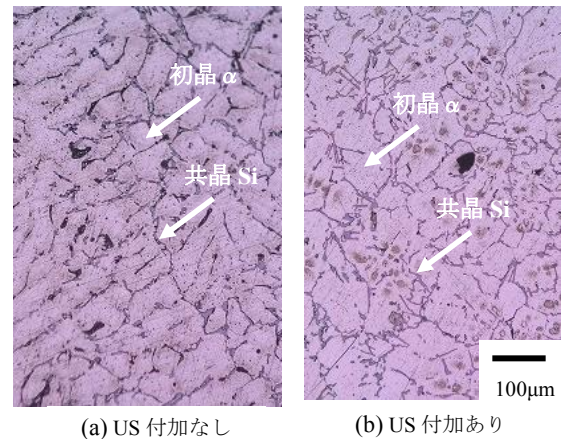


図 8 ミクロ組織 (50%フッ化水素水溶液)

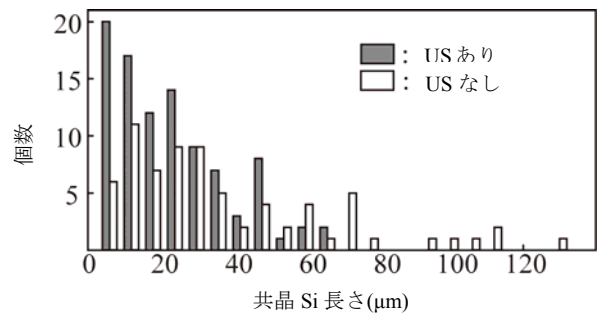


図 9 共晶 Si 長さ分布図

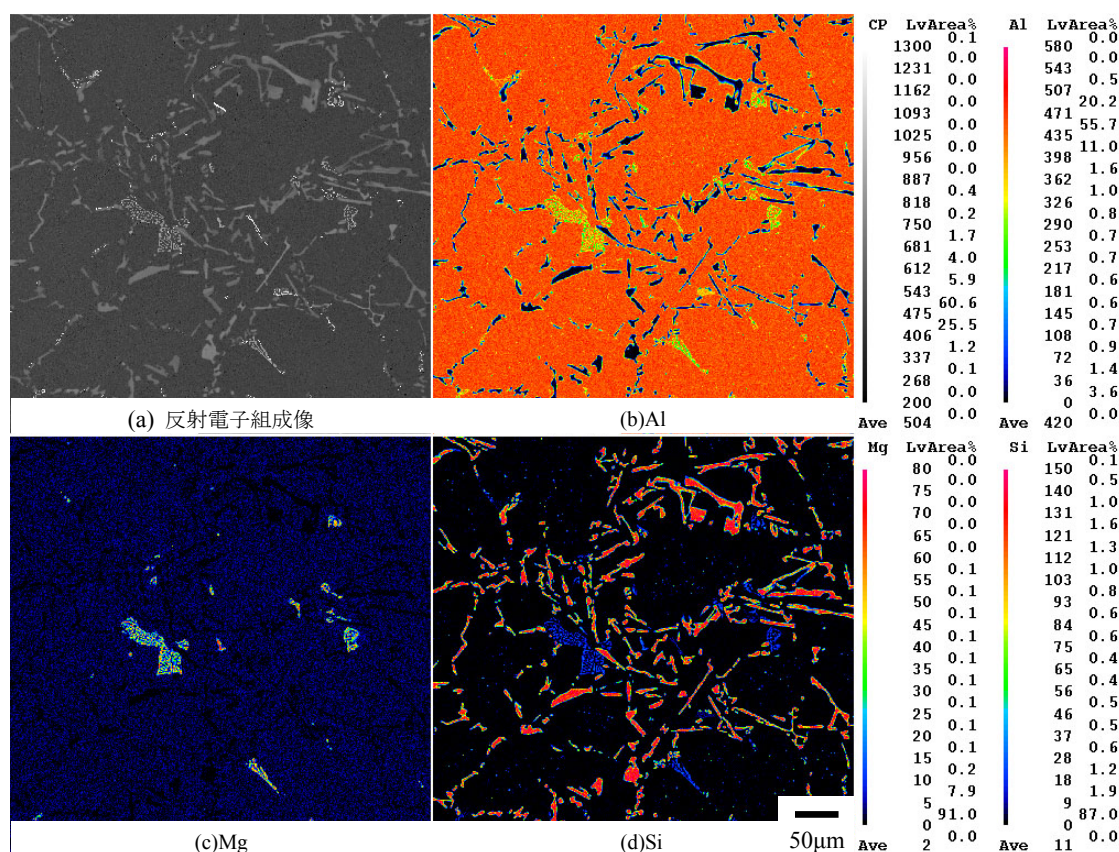


図 10 EPMA 分析結果 (US あり, T6 処理)

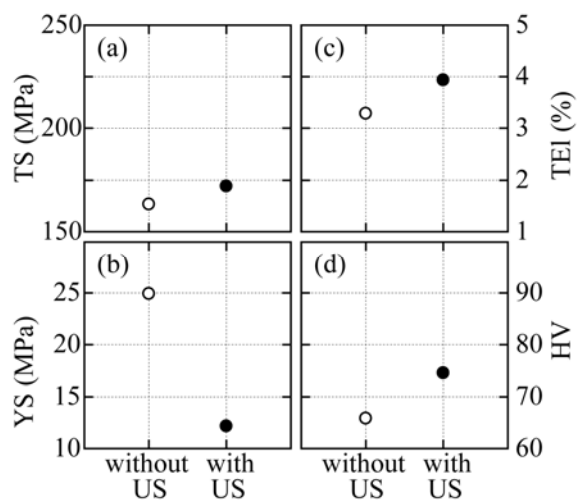


図 11 機械的特性と超音波振動の関係

(a)引張強さ TS , (b)降伏応力 YS , (c)全伸び TEI ,
(d)ビッカース硬さ HV)

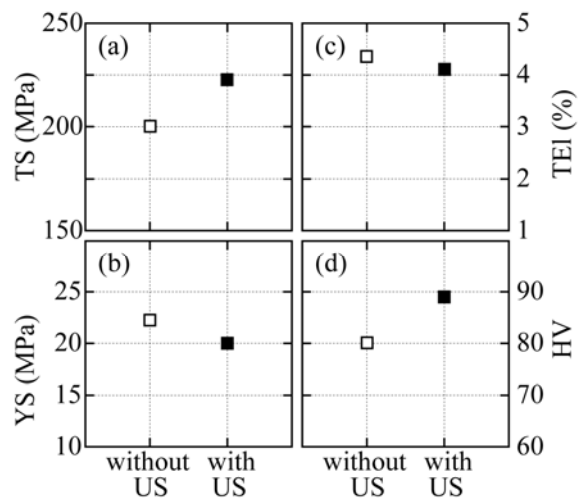


図 12 機械的特性と超音波振動の関係 (T6 処理)

(a)引張強さ TS , (b)降伏応力 YS , (c)全伸び TEI ,
(d)ビッカース硬さ HV)

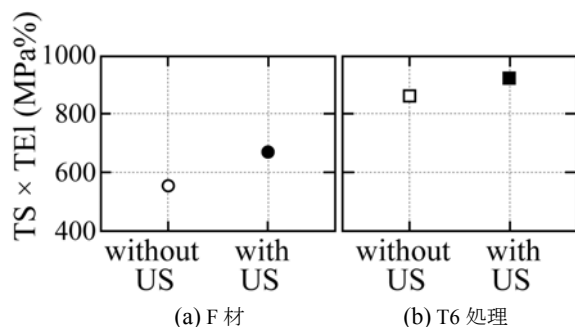


図 13 強度－延性バランス $TS \times TEI$



図 14 ミクロボロテック後の試料

(a) US 付加なし (b) US 付加あり

参考文献

- 大澤嘉昭, 荒金吾郎, 高森 晋, 佐藤 彰, 大橋 修: 鋳造工学, **71**, (1999), p. 98.
- 大澤嘉昭, 高森 晋, 荒金吾郎, 梅澤 修, 佐藤 彰, 大橋 修: 鋳造工学, **72**, (2000), p. 187.
- 大澤嘉昭, 佐藤 彰: 鋳造工学, **72**, (2000), p. 733.
- 大澤嘉昭, 高森 晋, 木村 隆, 皆川和己, 垣澤 英樹: 鋳造工学, **78**, (2006), p. 65.
- Yoshiaki Osawa, Goro Arakane, Susumu Takamori, Akira Sato: Processing and Fabrication of Advanced Materials VI, Edited by K.A Khor, T.S. Srivatsan and J.J. Moo, (1998), p. 15.
- 田賀佳奈子, 恒川好樹, 奥宮正洋: 日本鋳造工学会, 第 151 回全国講演大会講演論文集, (2007), p. 47.
- 川尻將洋, 深井郁夫, 中澤啓明, 高橋好身, 岡田 学, 長坂明彦: 日本機械学会北陸信越学生会, 第 37 回学生員卒業研究発表講演論文集, (2008), p. 83.
- 川尻將洋, 中村麻人, 中澤啓明, 鎌土重晴, 長坂 明彦: 日本金属学会北陸信越支部・日本鉄鋼協会北陸信越支部 平成 20 年度総会・連合講演会, 平成 20 年度連合後援会概要集, (2008), p. 96.
- 小林俊郎: アルミニウム合金の強度, 内田老鶴圃, (2001), p. 324.
- 矢島悦次郎, 市川理衛, 古沢浩一: 若い技術者のための機械・金属材料, 丸善株式会社, (1999), p. 75.
- Akihiko Nagasaka, Masahiro Kawajiri, Ikuro Hukai, Shuichi Yamamoto and Nakamura Kazuhiro: 68th WFC – World Foundry Congress 7th – 10th February 2008, (2008), p. 543.
- 長坂明彦, 川尻將洋, 深井郁夫, 山本周一, 中村和弘: 日本鋳造工学会 第 151 回全国講演大会, (2007), p.113.
- 長坂明彦, 深井郁夫, 山本周一, 中村和弘, 竹田 充, 川尻將洋, 小島 敦: 長野高専紀要, **41**, (2007), p. 7.
- 長坂明彦, 深井郁夫, 中澤啓明, 高橋好身, 岡田 学, 川尻將洋: 長野高専紀要, **42**, (2008), p. 1.
- 長坂明彦, 深井郁夫, 中澤啓明, 鎌土重晴, 岡田 学, 川尻將洋, 中村麻人: 長野高専紀要, **43**, (2009), p. 1.
- 田賀佳奈子, 福井雄太, 恒川好樹, 奥宮正洋: 鋳造工学, **81** (2009), 469.