

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560895

研究課題名(和文)半凝固スラリーによる casting 割れフリーアルミ合金の新しい連続 casting プロセスの開発

研究課題名(英文)Development of new continuous casting process of casting crack-free aluminum alloys by utilizing semi-solid slurries

研究代表者

上谷 保裕 (UETANI, Yasuhiro)

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：60099405

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：アルミ合金の連続 casting で発生する casting 割れを抑制するために、凝固時に微細均一組織となる半凝固スラリーを用いた半凝固連続 casting 法を開発しようとして、7075アルミ合金と過共晶 Al-Si 系合金を素材に、先に開発したロータ回転処理方式により半凝固スラリー製造を試みた。その結果、7075合金の半凝固スラリーは平均径0.049mmで微細粒状化した。また、過共晶合金では、部分的に平均径0.037mmで粒状化するとともに、初晶Siも平均径0.014mmと微細で均一分散し、いずれも目的とする半凝固スラリー製造の基本条件が見出せた。また、過共晶合金では、ロータを厚くすることで、半凝固 casting に必要な量が製造可能となった。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a new semi-solid continuous casting process of the aluminum alloys, which utilize the semi-solid slurries with homogeneous fine structures at the solidified states for controlling casting cracks generated often during the conventional continuous casting process, the semi-solid slurries with a fine structure of high strength 7075 and hypereutectic Al-Si type alloys were tried to manufacture by the rotational rotor treatment process previously developed. Semi-solid slurry with a considerably fine granular structure of 0.049mm in mean dia. was obtained in the high strength alloy. Semi-solid slurry of hypereutectic alloy had a fine structure with both homogeneously distributed primary Si particles of 0.014mm in mean size and partially existed granules of 0.037mm in mean dia., although the obtained volumes were small. By scaling up the rotor thickness, the required volume for continuous casting could be manufactured in the hypereutectic alloy.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学・金属生産工学

キーワード：半凝固スラリー 半凝固連続 casting 7075アルミ合金 過共晶 Al-Si-Cu-Mg合金

1. 研究開始当初の背景

(1)宇宙・航空用などの特殊用途に加えて、最近では、一般的な車両等の軽量化部材としての用途が拡大している7000系や2000系の高強度あるいは過共晶系のアルミ合金は連続鋳造時に鋳造割れが発生しやすい。そのために、熱間鍛造加工や近年注目されている半溶融加工を行う加工メーカーに素材を提供する側にとって、素材の連続鋳造ピレットの鋳造割れ防止と円滑表面ならびに内部組織が均一微細でミクロ的な偏析もフリーであるといった高品質化が解決すべき課題となっている。

一般に、アルミ合金では溶質元素の高濃度化やある種の添加元素によって固液共存温度範囲が広がられると、高温溶湯からの連続鋳造においては、ピレット位置毎の冷却速度の相違による凝固収縮の大きな差異に起因してピレット表面で場合によっては、内部にまで及ぶような鋳造割れが発生しやすくなると推察されている^{1), 2)}。一旦割れが発生すると、修復不可能であり、割れ発生抑制策が講じられねばならない。また、鋳造割れが発生しなくても表面の深い皺状起伏が生じて押し出し用あるいは、鍛造用素材とするには、一旦切削して平滑化が行われる。その点、半凝固連続鋳造では既に体積率で数パーセント以内と僅かであるが、一部凝固が進行しているので、申請者はピレット位置による凝固収縮に差異が小さくなり、鋳造割れ発生や皺状起伏が抑制されると予想している。さらに、凝固時に微細均一組織となる半凝固スラリーを用いれば、鋳型部およびピレットの既凝固部からの冷却による凝固がより均一となって上記の予想される効果が得られやすくなるとともに、ピレットの内部組織も微細均一で偏析も無くなる。

従って、鋳造割れ防止策の一つとして、半凝固スラリーによる半凝固連続鋳造が期待され、また、他の鋳造関係の専門家も異口同音に同様の予想をしている。しかし、残念ながら、現時点では実際に試みは行われていない。

(2)本研究では、数パーセント以内に凝固した固相率をコントロールされた半凝固スラリーを、独自にかつ、迅速に製造する必要がある。この方法として、以前に科学研究費補助金を受けて行った、青銅の半凝固鋳造の研究において、低温溶湯を正八角形ロータで強制的に排出して送り出す簡便な方式を考案し、固相粒子の平均径が50 μm 以下の微細な固相粒子の半凝固スラリー製造を可能にした³⁾。従って、このロータ回転処理方式がアルミ合金の半凝固スラリー製造に応用可能であると推察され、本研究における課題解決の基本的なアイデアに繋がった。

2. 研究の目的

(1)高強度7075アルミ合金と過共晶Al-Si系アルミ合金を素材として、上記のロータ回転処理方式を用いて、迅速かつ安定的に、溶湯を半凝固連続鋳造に適した比較的的高温で数パーセントの低固相率状態かつ、凝固時に前者の合金では平均粒径が50 μm 以下、また後者では初晶Si粒子も微細均一分散した半凝固スラリーを製造可能にし、その最適基本条件を明確にする。

(2)この連続的に製造した微細固相粒スラリーを用いて50mm程度と小径ではあるが、半凝固連続鋳造を行い、鋳造割れが防止できて表面が円滑かつ、内部組織も均一微細となる新しい連続鋳造プロセスを開発する。

3. 研究の方法

(1)半凝固スラリー製造

表1に示す分析組成の7075アルミ合金DCピレットから450g切り出して、780で再溶解し、Arガスで脱ガス処理した後、タンディッシュに注ぎこみ、所定の温度に下がったところで(このときの温度を注湯温度とする)、図1の装置模式図に示すように、溶湯を断熱材の湯道(内径8mm、出口径6mm)に通して、回転させた正八角形または円形のロータとチルブロックの間隙(以下、クリアランスとする)に流し込んだ。ロータによって排出された半凝固スラリーは560に保持された鋳型に導入し、2分後に鋳型ごと水冷した。本実験では外接円直径200mm、厚さ20mmの銅製のロータとチルブロック、外接円直径160mm、厚さ20mm、または直径200mmのSUS304製のロータとチルブロックを使用した。

表1 使用した7075アルミ合金DCピレットと過共晶Al-Si-Cu-Mg合金インゴットの参考分析組成(mass%)

	Si	Fe	Cu	Ti	Mn	Mg	Cr	Zn
7075合金	0.08	0.21	1.8	0.02	0.05	2.3	0.19	5.6
過共晶合金	20.5	0.58	5.5	0.03	0.22	1.3	0.02	0.01

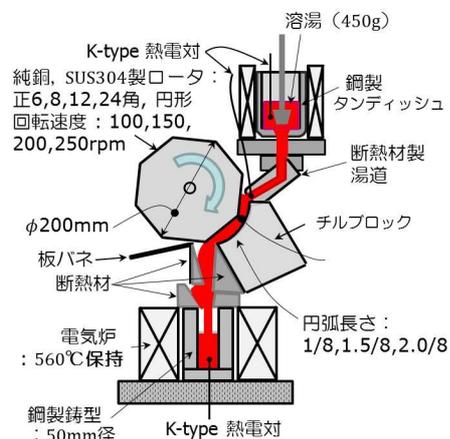


図1 ロータ回転処理装置の模式図。

チルブロックの形状はロータ回転の外接円弧面形状で、その円弧面長さの1/8を基準（以下1/8とする）長さとした。ロータ材質が銅の場合では、注湯温度 640~700℃、クリアランス 5mm~11mm、チルブロックの円弧面長さ 1/8×0.8~1/8×2.0、回転数は 150rpm、250rpm で変化させた。ロータ材質が SUS304 製の場合では、注湯温度は 640~680℃、チルブロックの円弧面長さは 1/8×1.0~1/8×2.0、クリアランスは 5~9mm で変化させ、回転数は 150rpm で固定とした。

Al-20.5%Si-5.5%Cu-1.3%Mg 合金(表1の組成分析を参照)のインゴットから 450g を切り出し、780℃ で再溶解して Ar ガスで脱ガス後、図1のように、溶湯をタンディッシュ内に注入した。溶湯を所定の温度まで約 30~40 秒の短時間で冷却した後ロータを回転させ、外接円径が 200mm の銅製ロータとその外接円弧面形状のチルブロック(銅製)との間に溶湯を流し込み、ロータ下部に設置した 520℃ で保持した鋼製鋳型内に排出された半凝固スラリーを導入し、約 2 分後に鋳型ごと水冷した。タンディッシュ注湯温度を 620~700℃ で変化させた。チルブロックの円弧面長さは外接円周の 1/8 を基準として、その 1.0、1.5、2.0 倍、ロータ/チルブロックのクリアランスは 5、7、9mm、ロータ回転数を 100、150、200、250rpm で適宜、組合せを変えた。また、ロータ形状は、これまでの正 8 角形に加えて、正 6、正 12、正 24 角形さらに角数が無限の円形を用いた。

両合金ともに、K-type 熱電対を用いてタンディッシュ内部、ロータ/チルブロック入口および、鋳型内の各温度変化を測定、記録した。組織観察用試料は鋳塊を縦断面スライスして採取し、縦断面をエメリー研磨とバフ研磨で鏡面仕上げ後に、7075 合金ではパーカー氏液で、過共晶合金では 5%NaOH 溶液でエッチングして、顕微鏡観察を行った。

(2)半凝固連続鋳造

先の研究より鋳型構造として断熱黒鉛鋳型^{4)~7)}を用いることがビレット表面の平滑化に効果があることが判明している。そこで、本研究では、内径が 51mm の黒鉛鋳型を組み込んだ引き抜き行程が 700mm の型半連続鋳造装置を試作した。図1の装置下部に、電気炉を取り除いて同装置を設置して、引き抜き速度や冷却水量を種々変えて半凝固連続鋳造を行う。

4. 研究成果

(1)7075 合金の半凝固スラリー製造

本合金の冷却曲線から得られた液相線温度が 634℃であったので、まず、銅製正 8 角形ロータとチルブロックを用い、チルブロックの円弧面長さ 1/8×1.5、クリアランス 7mm、ロータ回転数 150rpm で固定して、注湯温度の影響を調べた。その結果、いずれの条件に

おいても、クリアランス部にて凝固が進行し、固相率の高い半凝固スラリーが得られた。注湯温度が低くなるにつれ溶湯は排出されにくくなったが、得られた鋳塊の組織はかなり細かく均一に粒状化しており、ロータ回転処理の効果が認められた。画像処理により粒径を算出したところ、注湯温度 680℃では 55μm、660℃と 640℃では 50μm 弱であった。

注湯温度 660℃一定として、クリアランスを 5 と 9mm で変えたところ、クリアランスが広いほど比較的溶湯は排出されやすくなったが、若干固相粒が粗大化した。溶湯を排出しやすくするため、チルブロックの円弧面長さを 1/8×0.8 まで短くして、各条件の組み合わせを変えてみたが、どの場合においても得られた半凝固スラリーの固相率は高かく

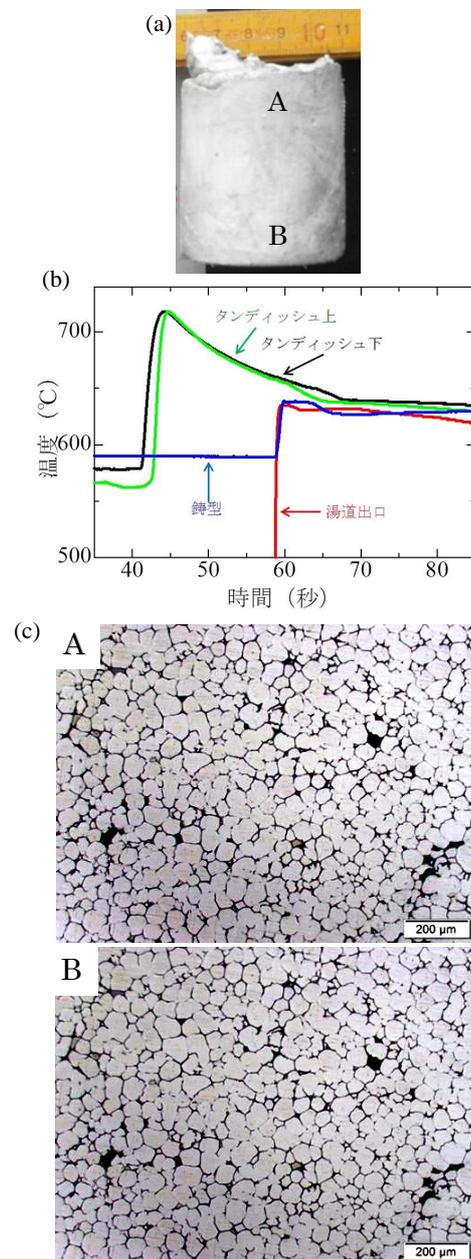


図2 SUS304 製正 8 角形ロータによる 7075 合金で得られた成果。(a)半凝固スラリーの鋳塊外観、(b)温度曲線、(c)凝固組織(A、Bは鋳塊に記した位置に対応)。

て粘度が高く、連続鑄造には不適であった。

凝固の進行を抑制するために、熱伝導度が銅に比べてかなり低い SUS304 製のロータ（外接円径 160mm）とチルブロックを用いて、注湯温度 660 で半凝固スラリー製造を行ったところ、流動性が高く、固相率の低い半凝固スラリーを製造でき、また凝固組織も固相粒が 55 μm 程度に細かく粒状化していた。同じ注湯温度でチルブロックの円弧面長さと同じクリアランスを变化させたところ、固相粒にほとんど変化はみられなかったが、チルブロックの円弧面長さ 1/8 \times 2.0 とクリアランス 5mm の場合では、クリアランス部で一部の溶湯が凝固し、溶湯が全て排出されなかった。

一方、ロータ形状を円形にすると、得られた固相粒の大きさは正 8 角形ロータと同程度のものであったが、途中からクリアランス部で凝固が進行して、溶湯が排出されなくなった。

また、正 8 角形ロータを銅製と同じ外接円径 200mm と大きくすると、160mm と類似した結果が得られ、さらに 10% 程度微細化した。ロータ形状が円形では、クリアランス部で凝固が進行し、溶湯はほとんど排出されなかった。クリアランスを 7mm から 9mm に広げると、正 8 角形より少し微細化した、溶湯は完全に排出されなかった。

以上の結果から、7075 アルミ合金においては、外接円径 200mm の SUS 304 製正 8 角形ロータと 1/8 円弧面長さのチルブロックのそれぞれ厚さ 20mm とした組合せで、クリアランス 7mm、ロータ回転数 150rpm、また注湯温度 640 が最適条件であった。図 2 に示すように、450g とまだ少量であるが、鑄塊全体に平均径で 49 μm の均一粒状組織を有し、かつ鑄型導入温度も 635 と液相線温度直下で極低固相率・極低粘度の目的とする半凝固スラリーが約 2 秒で迅速に製造可能となった。

(2) 過共晶合金の半凝固スラリー製造

先ず、正 8 角形ロータを用い、チルブロック円弧面長さ：1/8 \times 1.5、ロータ/チルブロックのクリアランス：7mm、ロータ回転数：150rpm の基準条件で固定した。本合金の冷却曲線より得られた液相線温度と相晶出温度はそれぞれ、669 と 558 であったので、タンディッシュ注湯温度を 700 から 20 ずつ下げて 640 までの範囲では、溶湯の全量に近い半凝固スラリーが鑄型に導入された。得られた鑄塊の縦断面の光顕組織は、注湯温度が最も高い 700 では、 α 相が樹枝状であるのに対して、それ以下では温度低下に伴って、部分的に粒状化し、注湯温度が低いほど粒状化の度合いが増加する傾向が見られた。また、最低温の 620 を除いて、初晶 Si は金型鑄造材のそれと比較しても、平均サイズ 30~40 μm でかなり微細化して分散していた。

注湯温度を 640 とし、チルブロックの円

弧面長さを除いた他の因子も固定して、円弧面長さを外接円周の 1/8 (1/8 \times 1.0) と短くしても、得られる半凝固スラリー量や光顕組織には相違が見られなかった。しかし、円弧面長さを 1/8 \times 2.0 と長くすると、初晶 Si の粗大化が生じた。一方、クリアランスやロータ回転数の各因子は、本実験で変化させた範囲内では、いずれも、半凝固スラリー量や光顕組織に顕著な影響を及ぼしておらず、正 8 角形ロータでは固相の粒状化が困難であった。

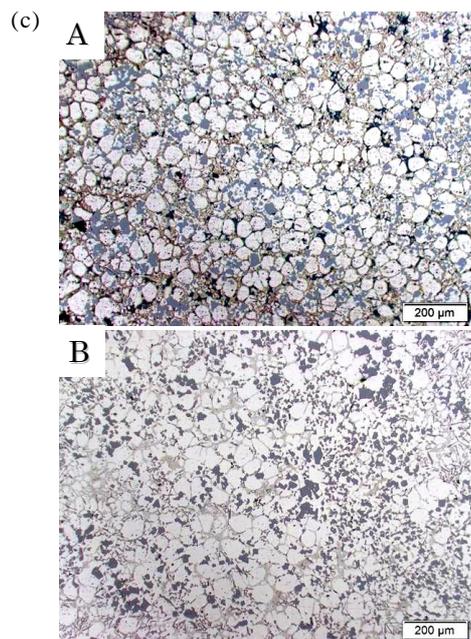
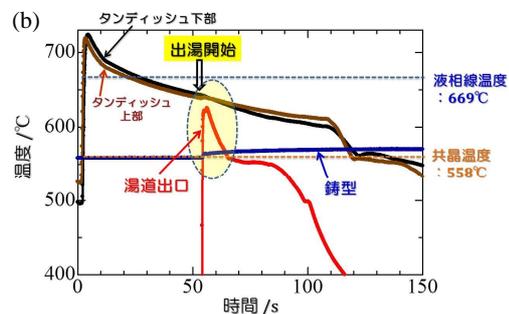
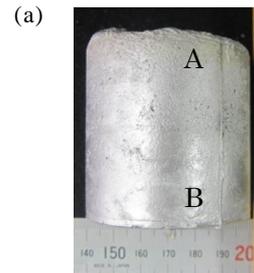


図 3 純銅製円形ロータによる過共晶合金で得られた成果。(a)半凝固スラリーの鑄塊外観、(b)温度曲線、(c)凝固組織(A、Bは鑄塊に記した位置に対応)。

最終的に、ロータの角数の影響を、ロータを除いた当初の基準条件で固定し、また注湯温度も 640 一定として粒状化に及ぼす影響を調べた。その結果、角数を 6 や 12 及び 24 で変化させても、得られる半凝固スラリー量

や光顕組織にほとんど相違が見られなかった。これに対して、角数が無限の円形ロータの場合には、図 3(c)に示すように、鑄塊の上部と下部で、粒状化の程度が少し異なるが、平均径 40~50 μm で粒状化していた。また、初晶 Si も粒子径 5~30 μm でかなり均一に分散していた。一方、円形ロータでは、正八角形ロータの場合と異なり、チルブロックの円弧面長さが 1/8 \times 2.0 と長くなると、固粗粒の粗大化が生じ、適正な間隙範囲があることが分かった。

従って、過共晶合金の場合には、直径 200 mm の 7075 合金とは異なる純銅製円形ロータと円弧面長さが 1/8 \times 1.5 のチルブロックの組合せで、クリアランス 7mm、ロータ回転数 150rpm、また注湯温度 640 が最適条件であった。図 3 に示すように、7075 合金と同様に 450g とまだ少量であるが、鑄塊全体に平均径 39 μm で粒状化し、初晶 Si 粒子も平均サイズ 14 μm でかなり微細均一に分散し、かつ鑄型導入温度も共晶温度 558 +5~10 の低固相率・低粘度の目的とする半凝固スラリーが、急速溶湯冷却時間を含めて約 1 分で製造可能となった。

以上のような 4.(1)を含めて得られた成果について、最終年度を中心に、関連内容で国内外において学会発表を行い、関係の研究者からは、本ロータ回転処理方式が他の半凝固スラリー製造法と比べて独自の方法として興味を持ってもらった。特に、過共晶合金では初晶 Si の微細均一分散効果が高い溶湯処理法として注目度が高いと思われた。

また、本研究の素材 DC ビレットやインゴットを提供頂いた共同研究先の企業からは、過共晶合金の半凝固連続鑄造の成功を期待されている。

(3)過共晶合金半凝固スラリーの安定製造量的には少ないが、半凝固スラリー製造の基本条件が得られたので、半凝固連続鑄造を目ざして、より多量の 4kg 程度の半凝固スラリーを過共晶合金で得ようとした。しかし、1kg 程度が鑄型内に導入された辺りで、ロータとチルブロックとのクリアランスに流入する溶湯の熱供給と冷却のバランスが崩れたためと推察しているが、クリアランスで凝固が急激に進行してロータ回転が停止して、これ以上、製造できないことが判明した。

この問題を解決するために、ロータ厚さを従来の 20mm から 80mm に厚くしたところ、図 4 に示すように、鑄塊上部に花卉状が歪な口ゼット形状の α 相が存在するものの、少量の場合(図 3)と類似したかなり微細な凝固組織となっていた。また、溶湯量を増したためにディッシュ内での冷却時間が 1 分半弱に増加し、回転処理時間も約 20 秒に伸びたが、溶湯全量に近い約 3.8kg の半凝固スラリーがほぼ安定して製造可能となった。

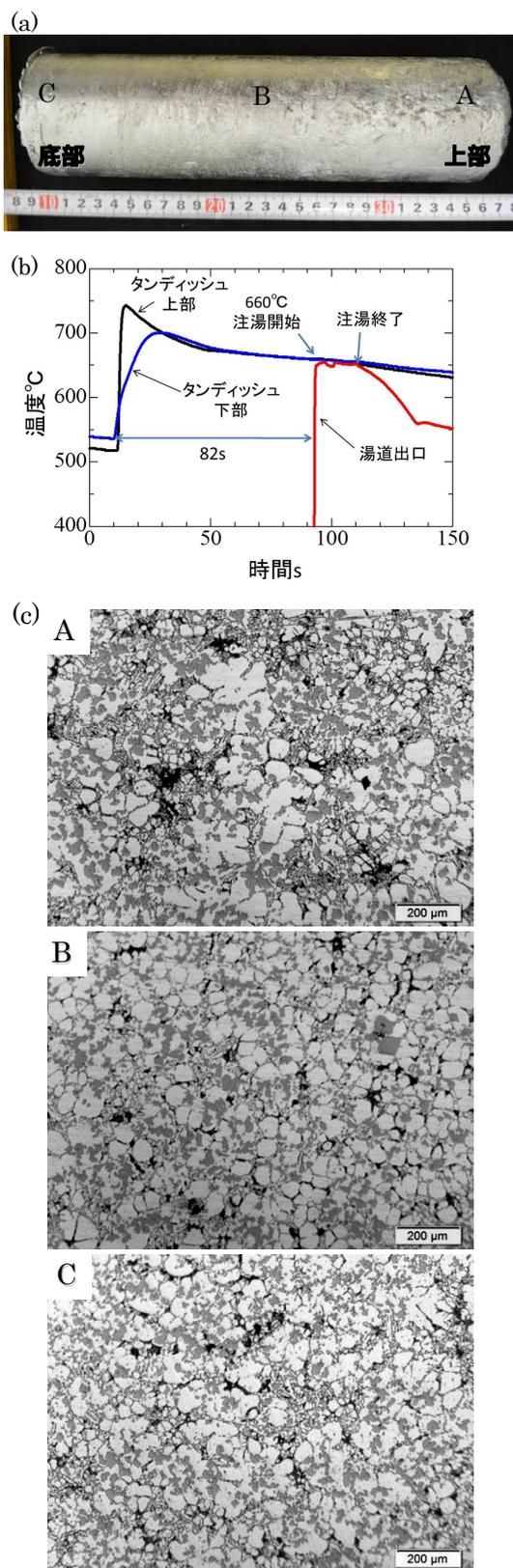


図 4 4 倍に厚くした純銅製円形ロータによる 4kg の過共晶合金で得られた成果。(a)半凝固スラリーの鑄塊外観、(b)温度曲線、(c)凝固組織(A, B, Cは鑄塊に記した位置に対応)。

以上のように、過共晶合金では、直径 51 mm で長さが 500mm 程度の小径棒の半凝固連続鑄造が可能な半凝固スラリーが製造できるようになったので、同合金が鑄造割れや

表面の深いしわ発生などの問題が深刻なこともあり、今後は残された課題として、半凝固連続鑄造に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 渡部他：軽金属，**58**，395，2008。
- 2) 森下他：神戸製鋼技報，**58**，23，2008。
- 3) Y. Uetani et al., Solid State Phenomena, vol.116-117, pp.746-749, 2006.
- 4) 上谷他：軽金属，**50**，203，2000。
- 5) Y. Uetani et al. : Light Metals 2001 Metaux Legers, COM 2001, 509, 2001.
- 6) M. Dohi et al: Proc. of the PRICM-4, pp. 2367-2370, 2001.
- 7) 上谷他：鑄造工学：**77**，246，2005。

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)

- (1) Y.Uetani, N.Mori, M.Dohi, K. Matsuda, S. Ikeno, Manufacturing slurry and rheocasting of hypereutectic Al-Si-Cu-Mg alloy, Materials Science Forum, (査読無し), Vols.706-709 (2012), pp. 420-425.

〔学会発表〕(計 5 件)

- (1) Y.Uetani, N.Mori, M.Dohi, K. Matsuda, S. Ikeno, Rheo-extrusion of Hypereutectic Al-Si-Mg-Fe Alloy, 13th International Conference of Aluminum Alloys, (June 3-7, 2012), Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, USA.
- (2) 杉村祐介, 上谷保裕, 渡辺亨, 池野進, 松田健二, 多角形ロータ回転処理した過共晶 Al-Si-Cu-Mg 合金の凝固組織, 軽金属学会第 124 回春期大会, 2013 年 5 月 13-14 日, 富山大学五福キャンパス。
- (3) 辻原智成, 上谷保裕, 土肥正芳, 池野進, 松田健二, 7075 アルミニウム合金の半凝固スラリーの凝固組織に及ぼす多角形ロータ回転処理の影響, 軽金属学会第 124 回春期大会, 2013 年 5 月 13-14 日, 富山大学五福キャンパス。
- (4) 杉村祐介, 上谷保裕, 渡辺亨, 池野進, 松田健二, 過共晶 Al-Si-Cu-Mg 合金の凝固組織に及ぼすロータ回転処理の影響, 日本鑄造工学会第 162 回全国講演大会, 2013 年 5 月 25-26 日, 山梨大学甲府キャンパス。
- (5) 辻原智成, 上谷保裕, 土肥正芳, 池野進, 松田健二, ロータ回転処理した 7075 アルミの凝固組織に及ぼすロータ材質と形状の影響, 日本鑄造工学会第 162 回全国講演大会, 2013 年 5 月 25-26 日, 山梨大学甲府キャンパス。

6. 研究組織

(1)研究代表者

上谷 保裕 (UETANI, Yasuhiro)
富山県立大学・工学部・准教授
研究者番号：60099405

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：