

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760081

研究課題名(和文) 高速連続鋳造機の開発による高強度アルミニウム合金の作製

研究課題名(英文) Development of high strength Al alloys produced by newly proposed high speed continuous casting

研究代表者

岡安 光博 (Okayasu, Mitsuhiro)

愛媛大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：40433148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円、(間接経費) 990,000円

研究成果の概要(和文)：新しいシステムを導入し、連続鋳造機の高速度化による高品質鋳物の開発に取り組んだ。このシステムにより、微細組織かつ結晶方位が制御できる鋳物を作製することができた。この鋳物の強度及び延性値は著しく増加した。この強度特性は、一般的な重力鋳造材より、2倍以上の高い値を示した。更に鋳造速度を加速及び減速した際の強度特性の影響について調査した。鋳造速度と強度特性は非線形的な関係を示した。これは相の大きさと共晶組の大きさが関係していた。低い鋳造速度で作製した鋳物の強度は共晶相と相の大きさに影響した。しかし鋳造速度の高速度化に伴い共晶相の影響は低くなり、強度は主に相の大きさに依存した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the high speed heated-mold continuous casting process was developed. With this casting process, high quality cast samples were produced, which exhibit excellent mechanical properties (high strength and high ductility) that are about twice as high as those for the same alloy produced by conventional gravity casting. The effects of casting speed on the mechanical properties were investigated, using the samples with different microstructural characteristics (SDAS and eutectic structures). There are linear correlations between SDAS and tensile properties. These linear correlations, however, break down, especially for UTS versus SDAS and strain versus SDAS, as the eutectic structures become more than 0.003mm in diameter, when the UTS and ductility decrease significantly. For eutectic structures larger than 0.003mm, failure is dominated by the brittle eutectic phases, for which SDAS is no longer strongly correlated with UTS and strain.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：材料設計 プロセス 物性・評価

### 1. 研究開始当初の背景

排気ガスによる環境問題や自動車等の高出力・高性能化にともない、鉄系合金の部品から軽量の非鉄合金化に変化している。アルミニウムは鉄の比重の約 1/3 と低く、また熱伝導率が鉄の 3 倍である為、高性能化・軽薄短小化にともなう軽量化・熱放出性の必要の自動車部品の要求は満たしている材料である。従って鉄系の自動車部品は年々アルミニウム合金化に変化しつつある。しかしアルミニウム合金の強度が低いことや地金自体の価格は鉄よりはるかに高いため、アルミニウム合金を鉄合金に代替える場合には問題が残っている。アルミニウム合金の高強度化には熱処理による方法が有効であるが、製造コストが高くなるため、課題とされている。その為、高強度アルミニウム合金をより完成品に近い形で製造する方法、すなわちニヤネットシェイプ化することが必要になる。ニヤネットシェイプ化技術としては鋳造法、鍛造法、射出成型法などがある。この中で特に鋳型内に金型を流し込み凝固させて製品化する鋳造法は、単純な加工法であるにもかかわらず比較的最終形状に近い形が得られる為、製造コストを大幅に引下げることが可能と考えられている。

鋳造法には重力鋳造法、ダイカスト法、連続鋳造法、ロストワックス鋳造法などがある。その中でも特にダイカスト法は高压高速で製品を生産する為、生産性は非常に高い。従って製造コスト低減には有力な鋳造法とされる。特にダイカストは溶けた金属を高速高压で注入する為、鋳肌がきれいな製品の製造が可能である。またこの鋳造技術は高精度かつ複雑化した金型を使用する為、多種多様な部品に使用されている。このようにダイカストは生産性に優れている為、多くのアルミダイカストは自動車部品の製造に取り入れられている。また生産量は年々増加している。ダイカスト法により大型の自動車部品（トランスミッションケースやシリンダブロックなど）が生産されている。しかしアルミダイカスト合金を高強度材としての使用には至っていない。

この理由はダイカスト内にさまざまな欠陥が混入することが原因である。研究代表者は今までアルミダイカストの欠陥と強度の関係について調査してきた。その結果、ダイカストには空気の巻き込み、引け巣、破断チル層などの欠陥が混入しており、これらが強度を著しく低下させることを明らかになった。鋳造技術者にとって欠陥量を低減することは永遠のテーマですが、完全に無くすことは困難とされている。

一方、連続鋳造は高品質材の鋳造技術として開発されてきている。その中でも加熱鋳型式連続鋳造法は金属を一方向で連続的に製造できることや鋳造欠陥が少ないため高品質鋳物の製造が可能とされている。しかし、材料特性や強度特性の評価はほとんど行わ

れていない。またこの連続鋳造法では鋳造速度が 0.2m/min と遅い為、生産性が低く、今後の課題とされている。

### 2. 研究の目的

上記の鋳造技術の現状及び問題を考慮し、本研究では連続鋳造法技術の高速化に取り組む。そして結晶方位を自由にコントロールできる鋳造法を開発する。さらに得られた鋳物の品質や強度に関する調査を実施する。

### 3. 研究の方法

本研究では高強度アルミニウム合金を高い生産性で作製できる鋳造プロセスを開発する。この研究では高速連続鋳造法技術の開発を行います。この開発は 3 段階に分けて行う。1. 連続鋳造機の製作、2. 高速鋳造システムの開発、そして 3. 組織制御システムの開発である。

まず連続鋳造機を平成 22 年度中に作製する。これは大野式加熱鋳型式連続鋳造機を参考に行う。この連続鋳造機を製作し、機能上問題がなければ、平成 23 年度に高速化システムを開発した鋳造機に導入する。その後、組織制御システムを平成 24 年度に開発する。本装置の開発と平行して、鋳造したサンプルの品質及び強度評価を行なう。

### 4. 研究成果

本研究でまず連続鋳造機の開発に取り組んだ。高速モータを利用することにより高速で連続鋳造が可能になった。また冷却方法についても上部からの滴下ではなく、鋳造サンプルの外周から行なうことに成功した。さらに不活性雰囲気中で鋳造を行なうことにより、溶湯の酸化や介在物混入を防ぐことができた。開発した装置の模式図と写真を図 1 に示す。

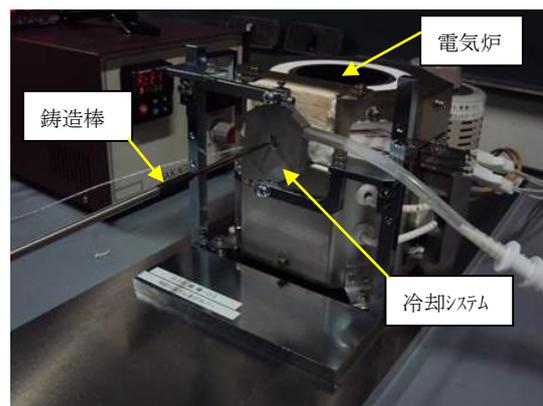
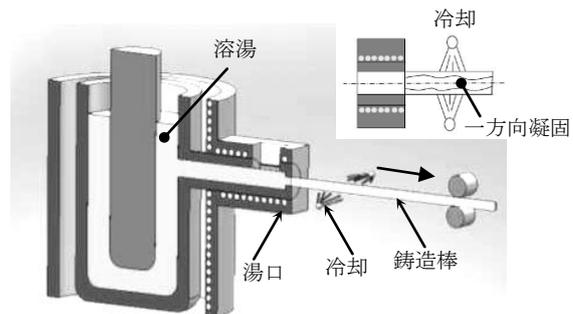




図 1 高速連続鋳造装置

【1】高速連続鋳造装置で作製した鋳物の品質調査

・ 供試材および実験方法

本研究で使用する供試材は Al-Si-Mg 系の AC4CH アルミニウム合金とした。鋳造サンプルは、連続鋳造法で作製した。連続鋳造法については図 1 に示す。この方法は、まず、炉内で AC4CH 合金を約 920K に加熱し、溶融させた。そして、鋳型からステンレス棒を介し、溶融した AC4CH 合金を引き抜き、冷却水で急冷凝固させつつ、連続的に鋳造した。鋳造した AC4CH 合金サンプルは  $\phi 4\text{mm}$  の丸棒である(図 1)。

連続鋳造材の機械的特性について調査するため、引張試験と疲労試験を行った。これらの試験には油圧式サーボ試験機(50kN)を用いた。引張試験は負荷速度を 1mm/min とした。疲労試験は R 比 0.1 で、繰り返し負荷周波数は 30Hz とした。さらに連続鋳造材のマイクロ組織構造について明らかにするため EBSD(電子線後方散乱解析)法による結晶方位分析を行った。本研究では、連続鋳造材の材料特性について明確にするため、同アルミニウム合金(AC4CH)を重力鋳造法で作製し、比較調査した。

・ 実験結果

・ ミクロ組織

図 2(a)(b)に AC4CH 合金の連続鋳造材と重力鋳造材のマイクロ組織写真を示す。連続鋳造サンプルの  $\alpha\text{-Al}$  相は重力鋳造材より細かく、二次デンドライトアームスペーシング(SDAS)は  $15.7\mu\text{m}$  であった。また連続鋳造材の共晶相は微細で  $\alpha$  相の粒界に晶出していた。

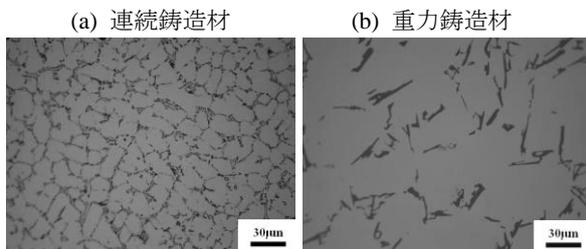


図 2 組織写真

材料特性をさらに調査するために、EBSD 法による結晶方位分析を行った。図 3 に EBSD 分析結果を示す。結晶方位はオイラー角で評価し、異なる角度をカラーマップで表示して

いる。重力鋳造材は、観察面に主に大きな 4 つの組織が確認できる。各組織は、4 つの異なる結晶方位で構成されている。一方、連続鋳造材は多数の細かい組織が同色のカラーマップで表示されている。このため、結晶方位がほぼ一方向で構成されている。これは、組織が凝固過程で一方向に成長したためと考えられる。この連続鋳造材の組織形態や結晶方位により、機械的性質を向上させると考えられる。

(a) 連続鋳造材 (b) 重力鋳造材

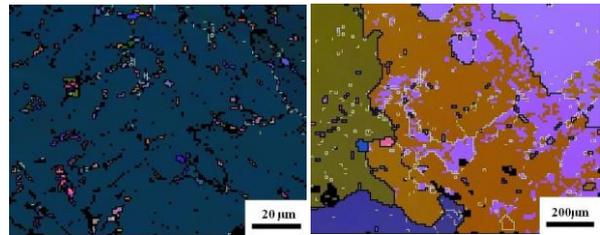


図 3 結晶方位分析

・ 引張特性

図 4 に連続鋳造材と重力鋳造材の引張試験結果を示す。連続鋳造材の引張強度は約 260MPa、破断伸びは約 23%であり、重力鋳造材より引張強度は 30%、破断伸びは 77% 高い値を示した。連続鋳造材の高い引張強度は、先に述べた微細組織が原因と考えられ、一方、高い破断伸びは、一方向で構成された結晶方位が影響していると考えられる。

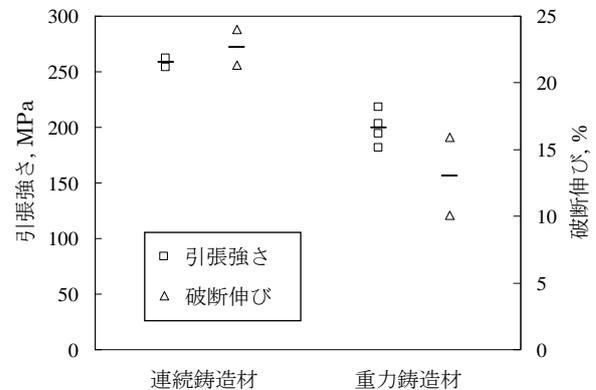


図 4 引張試験結果

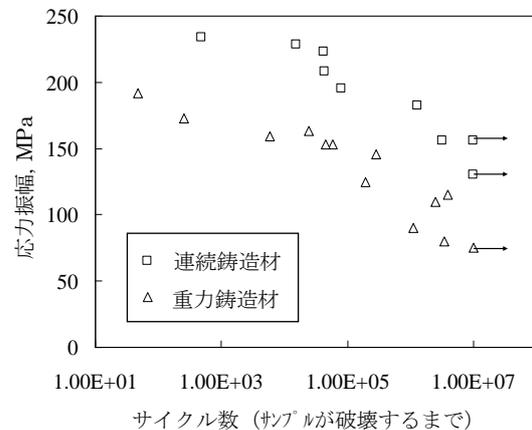


図 5 疲労試験結果

・疲労特性

図5に連続鋳造材と重力鋳造材の疲労試験結果を示す。重力鋳造材と比べ連続鋳造材の方が疲労強度は高い値を示している。疲労限は連続鋳造材が約160MPaであり、重力鋳造材より113%高い値を示した。この高い疲労強度についても連続鋳造材の組織構造が影響していると考えられる。

・まとめ

- (1) 連続鋳造材は微細な組織で構成されていた。また、結晶方位はほぼ一方方向を示した。
- (2) 連続鋳造材の引張強度、破断伸び、疲労強度は重力鋳造材より、高い値を示した。これは、連続鋳造材の微細な組織や一方方向に成長した組織が影響したためと考えられる。

[2] 連続鋳造の速度変化における機械的特性の変化

・供試材および実験方法

本研究で使用する供試材は Al-Si-Cu 系の ADC12 アルミニウム合金とした。ADC12 合金の化学組成は、10.6 Si, 2.5 Cu, 0.3 Mg, 0.5 Zn, 1.1 Fe, 0.3 Mn, 0.1 Ni, Al bal. (mass%) である。ADC12 アルミ合金の鋳造サンプルは、加熱鋳型連続鋳造法を用いて作製した。図1に本研究で使用した連続鋳造装置の概略図を示す。鋳造サンプルに、介在物等の鋳造欠陥の混入を防ぐため、鋳造する前にフラックスによる溶湯処理を施した。鋳造サンプルは丸棒形状(φ5mm×500mm)とした。鋳造速度(V)を0.1~7.5mm/s間で変化させた。詳細の鋳造速度条件を表1に示す。

表1 鋳造速度条件

鋳造速度 (mm/s)										
0.1	0.4	0.8	1.9	2.7	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	

機械的特性は、引張試験で評価した。試験片は、鋳造サンプルから丸棒ダンベル形状の試験片(平行部:直径2mm,長さ4mm)を作製した。引張試験では静的負荷を速度0.1mm/sで試験片が完全に破壊するまで加えた。材料特性は、EDX及びEBSD分析により調査した。両分析は、加速電圧15kVで行った。EBSD分析では、電流5nA,ステップサイズ20μmで行った。

・実験結果

・ミクロ組織

図6にミクロ組織写真を示す。ここでは鋳造速度が低速(0.4mm/s)、中速(3.5mm/s)、高速(7.5mm/s)の3条件で作製したサンプルの組織写真を示している。鋳造組織は全てのサンプルで、α-Al相と共晶相(Si系及びFe系)で構成されていた。しかし組織の大きさは鋳造速度の変化により異なり、鋳造速度の高速化に伴い、微細化した。また、比較的高速で作製したサンプル(例:V=3.5mm/s以上)ではα-Alデンドライト組

織が鋳造方向に成長しているのが確認できる。各サンプルの組織の大きさは二次デンドライトアームスペーシング(SDAS)を測定し評価した(図6参照)。

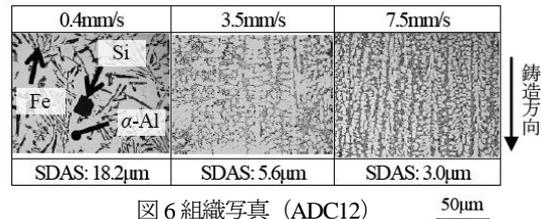


図6 組織写真 (ADC12)

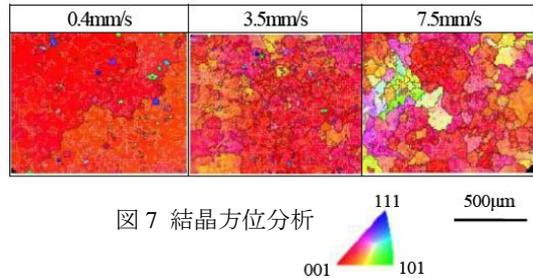


図7 結晶方位分析

図7にEBSDによる結晶方位マッピングを示す。図から明らかのようにほぼ全てのサンプルにおいて結晶方位が一方方向に揃っていることが確認できる。ただし速度の高速化に伴い方位が少し乱れる事も判明した。結晶方位は鋳造方向に{100}面で構成することが確認できた。

・機械的性質

鋳造速度(V)と引張強さ及び破断ひずみの関係を図8(a)(b)に示す。引張強さは鋳造速度の高速化に伴い非線形的に増加している。特にV=2mm/sまでは急激に増加することが判明した。

一方、破断ひずみは鋳造速度の高速化に伴い増加し、約V=3.5mm/sで最大値を示した。しかし、その後、破断ひずみは低下傾向を示した。

連続鋳造法で作製したサンプルの機械的特性は優れていた。これは組織の微細化と結晶方位の一方方向性が影響していると考えられる。また図4より、引張強さと破断ひずみが非線形的な関係を示すことも明らかになった。これは内部の複雑な組織構造が原因であると考えられる。基本的に、本アルミニウム合金の機械的性質はα-Al相と共晶相の大きさに影響される。特に共晶相は針状で構成された硬い組織のため、外部負荷が加えられた際、高い応力集中が生じる。一方、α相は粗大化に伴い転位が結晶粒界に強く集中するため、強度は低下する。この2つの要因を考慮すると両組織が大きい場合、引張強度は急激に低下すると予測できる。ただしσ<sub>UTS</sub>とVの関係が非線形的であり、鋳造速度が2mm/s以上では引張強度の増加率がゆるやかに低下している。一般的にα相の大きさ(d)と強度はHall-Petchの式で整理できる。微細化とともにσ<sub>UTS</sub>は組織サイズのdの-1/2乗で増加する。これより図4(a)で示すV=2mm/s付近の傾きの変化は、組織(共晶相)が影響していると考えられる。また、これよりVが2mm/s以上では共晶相の影響は低いと考えられる。以上より本供試材の破断・損傷モデルを図9に示す。低鋳造速度では粗大化

した  $\alpha$  相と共晶相が強度を低下させる。 鋳造速度が中・高レベルでの材料強度は  $\alpha$  相の大きさに強く影響される。

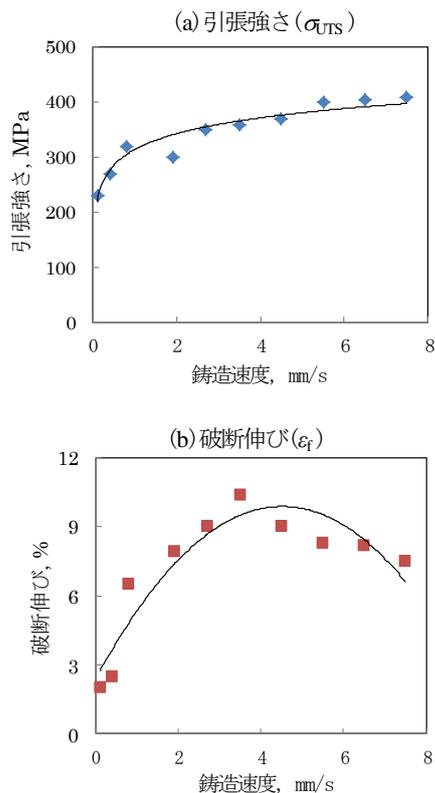


図8 引張試験結果

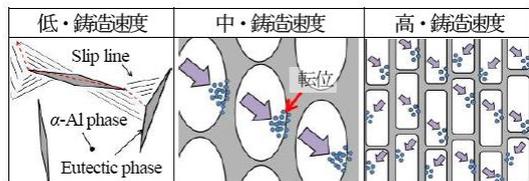


図9 材料損傷モデル

・まとめ

- (1) 連続鋳造法で作製した ADC12 のアルミニウム合金鋳物は鋳造速度の増加に伴い、結晶が微細化され強度は増加した。また結晶方位が一方向に揃っているため延性も高い傾向を示した。
- (2) 鋳造速度と材料強度は非線形的な関係を示した。これは2種類の組織構造が影響した。低い鋳造速度 ( $V < 2\text{mm/s}$ ) で作製した鋳物の強度は共晶相と  $\alpha$  相の大きさに影響されていた。しかし鋳造速度の高速度化に伴い共晶相の影響は低くなり、主に強度は  $\alpha$  相の大きさに影響された。

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 10 件)

① M. Okayasu, S. Takeuchi, Mechanical Strength and Failure Characteristics of Cast Mg-9%Al-1%Zn Alloys Produced by a

Heated-Mold Continuous Casting Process, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol. 600, April, 2014, 211-220

② M. Okayasu, K. Ota, S. Takeuchi, H. Ohfuji, T. Shiraishi, Influence of microstructural characteristics on mechanical properties of ADC12 aluminum alloy, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol.592, Jan., 2014, 189-200

③ M. Okayasu, S. Takeuchi, T. Shiraishi, Corrosion and mechanical properties of cast aluminum alloys, International Journal of Cast Metals Research, 査読有, Vol. 26, No. 6, 2013, 319-329

④ M. Okayasu, S. Takeuchi, Y. Ohkura, T. Shiraishi, Mechanical properties of AC4CH alloys produced by heated mould continuous casting process, International Journal of Cast Metals Research, 査読有, Vol. 26, No. 3, 2013, 160-167

⑤ M. Okayasu, K. Ota, S. Takeuchi, T. Shiraishi, Material Properties of Cast Aluminum Alloys Produced by Various Casting Processes, Materials Science Forum, 査読有, Vol. 765, 2013, 241-244

⑥ M. Okayasu, S. Takeuchi, T. Shiraishi, Crystallization characteristics of primary silicon particles in cast hypereutectic Al-Si alloy, International Journal of Cast Metals Research, 査読有, Vol. 26, No. 2, 2013, 105-113

⑦ M. Okayasu, Y. Ohkura, S. Takeuchi, S. Takasu, H. Ohfuji, T. Shiraishi, A study of the mechanical properties of an Al-Si-Cu Alloy (ADC12) produced by various casting processes, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol. 543, No. 1, 2012, 185-192

⑧ M. Okayasu, R. Sato, S. Takasu, A. Niikura, T. Shiraishi, Mechanical properties of Al-Si-Cu alloys produced by the twin rolled continuous casting process, Materials Science and Engineering A, 査読有, Vol. 534, No. 1, 2012, 614-623

⑨ M. Okayasu, R. Sato, S. Takasu, Effects of anisotropic microstructure of continuous cast Al-Cu eutectic alloys on their fatigue and tensile properties, International Journal of Fatigue, 査読有, Vol. 42, Sept., 2012, 45-56

⑩ M. Okayasu, S. Takasu, S. Yoshie, Microstructure and material properties of an Al-Cu alloy provided by the Ohno continuous casting technique, Journal of Materials

Processing Technology, 査読有, Vol. 210, No. 11, 2010, 1529-1535

〔学会発表〕(計 10 件)

①吉田祥, 岡安光博, 白石哲郎, アルミニウム合金鋳物の材料特性に及ぼす凝固速度の影響, 日本機械学会中国四国支部学生会第 44 回学生員卒業発表講演会, 2014, CD-ROM, (3pp), 2014 年 3 月 6 日, 鳥取大学

②竹内修平, 岡安光博, 大倉優樹, 白石哲郎, 様々な鋳造法で作製した Al-Si-Cu 系アルミニウム合金の機械的特性に関する基礎的研究, 日本金属学会 2013 年秋期講演大会, (第 152 回), 2013, p.162, 2013 年 9 月 17 日, 金沢大学

③竹内修平, 岡安光博, 白石哲郎, 過共晶 Al-Si 合金の凝固プロセスに関する研究, 日本材料学会四国支部第 11 回講演会, 2013, pp.19-20, 2013 年 4 月 20 日, 愛媛大学

④竹内修平, 岡安光博, 大倉優樹, 白石哲郎, 加熱鋳型式連続鋳造法で作製した Al-Mg 系アルミニウム合金鋳物の材料特性に関する研究, 日本機械学会 M&M2012 材料力学カンファレンス, 2012, CD-ROM, 2013 年 9 月 22 日, 愛媛大学

⑤竹内修平, 岡安光博, 大倉優樹, 白石哲郎, 加熱鋳型式連続鋳造法で作製された AC4CH アルミニウム合金鋳物の材料特性に関する基礎研究, 日本機械学会中国四国支部第 50 期総会・講演会, 2012, CD-ROM, 2012 年 3 月 8 日, 広島大学

⑥鷹巣哲, 岡安光博, 佐藤遼, 水野衛, 大野式連続鋳造法で作製したアルミニウム合金鋳物の機械的性質, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 2010, CD-ROM, 2010 年 10 月 10 日, 長岡技術科学大学

⑦ M. Okayasu, K. Ota, S. Takeuchi, T. Shiraishi, Material Properties of Cast Aluminum Alloys Produced by Various Casting Processes, 6<sup>th</sup> International Light Metals Technology Conference 2013, 2013, Old Windsor, UK, 2013 年 7 月 24 日, Beaumont Estale

⑧ M. Okayasu, S. Takeuchi, T. Shiraishi, Effect of crystal orientation on mechanical properties of Aluminum alloys produced by various casting processes, Annual meeting on American Crystallographic Association, 2012, Boston, USA, CD-ROM, 2012 年 7 月 31 日, Boston Westin Waterfront Hotel

⑨ M. Okayasu, S. Takasu Y. Okura, T. Shiraishi, The Mechanical Properties of the Aluminum Alloys Produced by Continuous Casting Processes, 7<sup>th</sup> IUPAC International Conference

on Novel Materials and their Synthesis, 2011, Shanghai, China, p.G1, 2011 年 10 月 18 日, Fudan University

⑩ M. Okayasu, S. Takasu K. Sato, M. Mizuno, High Mechanical and Fatigue Properties of Cast Aluminum Alloys Produced by Ohno Continuous Casting Technology, International Conference on Fatigue Damage of Structural Materials VIII, 2010, Massachusetts, USA, on CD-ROM, 2010 年 9 月 23 日, Resort and Conference Center at Hyannis

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岡安 光博 (OKAYASU Mitsuhiro)

愛媛大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号: 4 0 4 3 3 1 4 8