

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420052

研究課題名(和文)ハイブリッド連続鋳造技術の開発による高強度・高延性軽金属材料の作製

研究課題名(英文)Development of hybrid new continuous casting technology for creation of high strength and high ductility light metals

研究代表者

岡安 光博(Okayasu, Mitsuhiro)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号：40433148

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高品質(高強度・高延性)軽金属鋳物を開発するための新しいハイブリッド連続鋳造技術を提案し、高速回転鋳造、超音波を利用した連続鋳造法、そして様々な添加元素を加えて高品質アルミニウム合金鋳物を開発した。格子歪の増加によるアルミニウム合金鋳物の高強度に成功した。ナノパウダーや様々な添加元素を混入し、熱処理を施すことにより固溶及び析出物により優れた機械的特性を得ることができた。添加元素を加えて開発した新合金の研究成果は、国際的な科学雑誌「Journal of Mechanical Science and Technology」で発表し、論文賞を受賞した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the new hybrid continuity casting technology for developing a high quality (high intensity and Takanobu nature) light metal casting was proposed. In this work, high velocity revolution casting, the continuity casting method with an ultrasonic wave, and various addition elements were added in conventional cast aluminum alloy. From the above casting technologies, the quality cast aluminum alloys are creatable with high strength and high ductility, in which high lattice strain, solid solution and high precipitation strength occurs. Nano powders were also valuable technique to make high mechanical properties. We have developed new cast aluminum alloys with additional elements, which has received the "2016 Second Best Paper Award" from Journal of Mechanical Science and Technology. The paper was selected for the award based on the expectation that the research result will contribute to future development of mechanical engineering.

研究分野：鋳造工学

キーワード：アルミニウム合金 鋳造 材料強度

### 1. 研究開始当初の背景

近年、鉄鋼系の材料は、機械的性質が優れていることや安価であるため、様々な機械部品や構造材料として使用されている。しかし排気ガスによる環境問題にともない重量部品の軽量化が求められていることやリサイクルを考慮した材料設計が必要とされている。このため軽金属材料を鉄系材料の代わりとして使用することが期待されている。ちなみにアルミニウムは鉄の比重の約 1/3、またマグネシウムはアルミニウムの比重の約 2/3 と低い。よって工業機械の高性能化・軽量化には、これら軽金属材料が適していると考えられる。実際、鉄系の工業用部品は年々軽金属合金に変化しつつある。素材の需要量は（経済の影響により）変動があるものの全体的に増加傾向を示している。マグネシウムの需要の変化はアルミニウムの 1/10 程度であるが増加傾向はほぼ同様であった。

しかし両軽金属材料を工業用部品に使用するには課題がある。アルミニウム合金とマグネシウム合金の強度は鉄系材料より低いことや地金価格が鉄よりも高いことが問題である。また、現在これら鋳物は様々な鋳造技術により製造されているが、様々な鋳造欠陥が混入しており、機械的性質を低減させている。実際、研究代表者は今までアルミニウム合金鋳物の欠陥について調査し、空気の巻き込み、ひげ巣、異常組織などの欠陥が存在することを確認した。さらにこれら欠陥と材料強度の関係について調査している。この調査の結果、引張強度は欠陥の混入量によってほぼ直線的に減少することが明らかとなった。

近年、マグネシウム合金はアルミニウムより軽量であるため、工業用部品として幅広く使用できると期待されている。しかしマグネシウムは、活性な金属であるため鋳造性の悪いことが問題とされている。更にマグネシウム合金は、脆性材料であるため、高延性化が求められている。マグネシウムは複雑な結晶構造をもっており、この結晶方位を自由に制御できる技術の確立が必要と考えられる。

### 2. 研究の目的

様々な特徴を持つ連続鋳造材の開発に取り組む。また鋳造性が難しいマグネシウム合金の連続鋳造材の開発にも取り組む。

連続鋳造用マグネシウム合金の開発

複雑形状をもつ鋳物の連続鋳造により作製する技術開発

超音波を用いた連続鋳造技術の確立

### 3. 研究の方法

本研究ではまず高強度アルミニウム合金を高い生産性で作製できる連続鋳造機を開発した。この連続鋳造機をすでに開発している装置を改良して、さらなる高強度化に取り組んだ。

本研究で使用する供試材は Al-Si-Cu 系の ADC12、Al-Mg 系の ADC6、Al-Si-Mg 系の AC4CH、Mg-Al-Zn 系の AZ91 合金とした。本研究で使用する連続鋳造では、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( 5mm×500mm)とし、鋳造速度を一定とした。

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 20 $\mu$ m で行った。

#### 1) 連続鋳造によるマグネシウム合金鋳物の作製

マグネシウム合金を用いた連続鋳造には危険を伴う。これは活性な金属であるマグネシウム合金の溶湯に大気中で水を滴下させて凝固させるためである。発火の危険があることや大量の酸化物が溶湯表面層部に形成される為、鋳造が大変困難である。

さらにマグネシウム合金の溶湯を引抜く際、ダミー棒とマグネシウム合金の親和性は低い為、鋳造しにくいことも問題である。

本研究では、アルゴンガス雰囲気中で連続鋳造を行うため、鋳造機を改良した。またダミー棒をマグネシウムと反応しやすい材料で作製して実施した。

#### 2) 超音波を利用した高品質な連続鋳造材の開発

近年、高強度なアルミニウム合金を作製する一手段として、凝固過程に超音波振動を付加すると結晶粒が微細化され強度が改善されたと報告されている。超音波振動を付加した加熱鋳型式連続鋳造法の研究はない。そこで超音波振動機を連続鋳造機に取り付けて機械的特性の改善に取り組む。

超音波振動を付加した加熱鋳型式連続鋳造装置を開発する。そして、超音波振動の周波数や振幅など、様々な超音波振動の条件で鋳物を作製し最適な条件を検討する。

#### 3) 複雑形状をもつ鋳物の連続鋳造により作製する技術開発

単純な丸棒ではなく複雑な形状を持つ連続鋳造材を開発する。連続鋳造で鋳物を引抜く際、半凝固状態で外部からある形状をもつスライド型を半凝固鋳物に押し当てて、様々な形状に作製する。

例えばエアシリンダを用いてグラフィット型を半溶湯状態の鋳物に押し当てる。さらにプログラムでエアシリンダの動きを制御し、様々な形状を作製する。

#### 4. 研究成果

図1に示すように本研究では、超音波振動機と溶湯を完全にカバーで覆った連続铸造機を開発した。この铸造機により、マグネシウム合金の溶湯をアルゴンによる不活性ガス雰囲気中で铸造することができる。また超音波の振動を加えながら品質の向上に取り組むことができる。

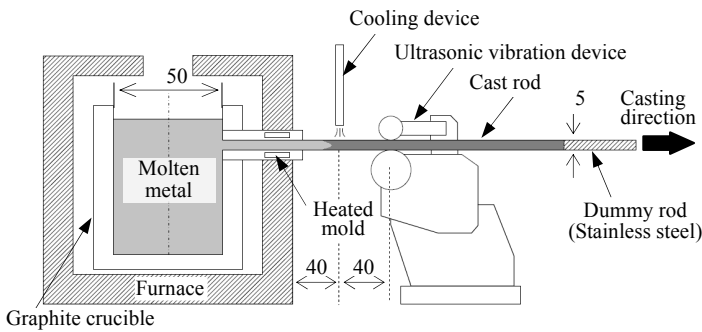


図1 開発した加熱铸造型式連続铸造機

1) 連続铸造方法で作製したマグネシウム合金铸造物の機械的特性に関する研究

まず本研究では一般的なマグネシウム合金AZ91を用いた。この理由は、AZ91は世界で最も使用されているマグネシウム合金であるためである。連続铸造機で作製したマグネシウム合金铸造物の機械的性質を調査した。まず図2に示すように連続铸造材HMC材の硬さは一般的な重力铸造材GCよりも約30%高い値を示した。

図3に疲労試験の結果(S-N)を示す。図より連続铸造材の方が疲労強度特性がGC材より高い値を示している。

図4に疲労試験後のサンプルの断面をEBSDで分析した結果を示す。図から明らかのように連続铸造材の組織が微細化されている。この微細組織が機械的特性を向上させたと考える。また内部ひずみ量(MO)を確認すると連続铸造材は、最終破断領域で強くひずんでいることが確認できる。これは高い延性による加工硬化が起こったためと考える。この結果より連続铸造法で作

製したAZ91は強度及び延性に優れたマグネシウム合金と考えられる。

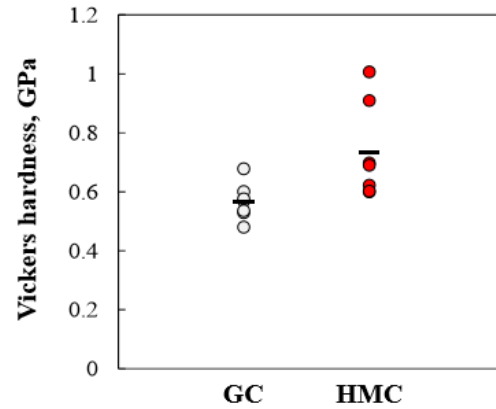


図2 硬さ試験結果

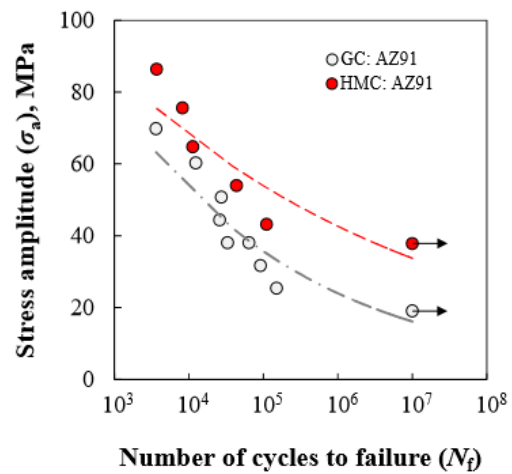


図3 疲労試験結果

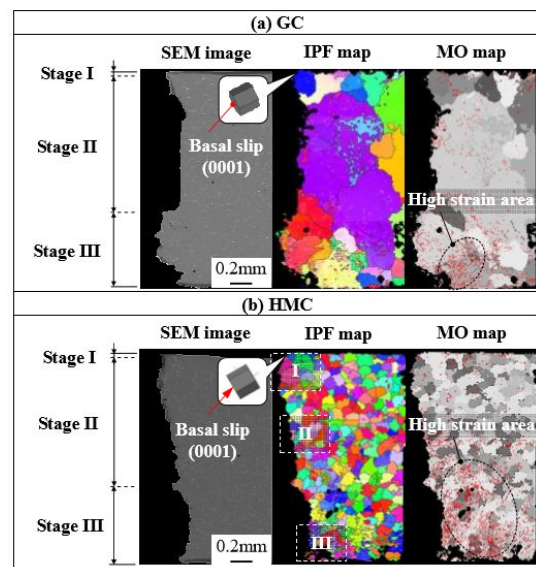


図4 疲労試験後の試験片断面

連続铸造材の破壊特性について調査した。図5に疲労試験後の破面写真を示す。連続铸造材は、脆性的なへき開破面で支配されているのに対し、連続铸造材は延性的なデンプル破壊が確認できる。

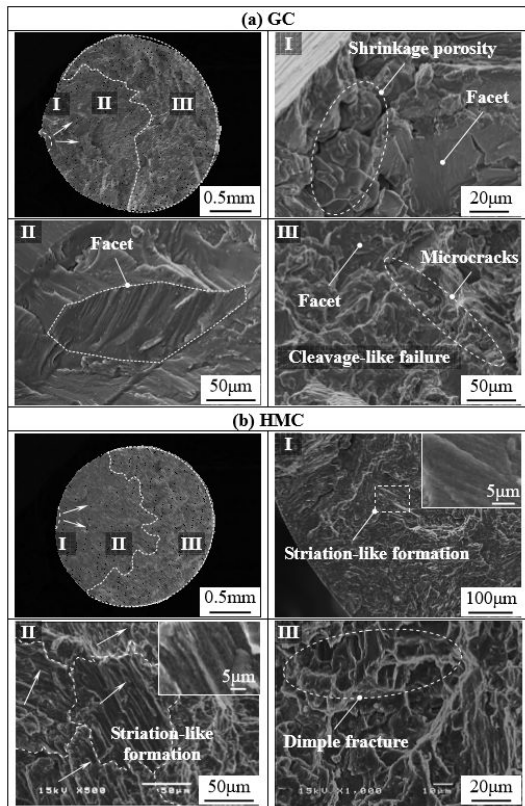


図5 疲労試験後の破面写真 (SEM像)

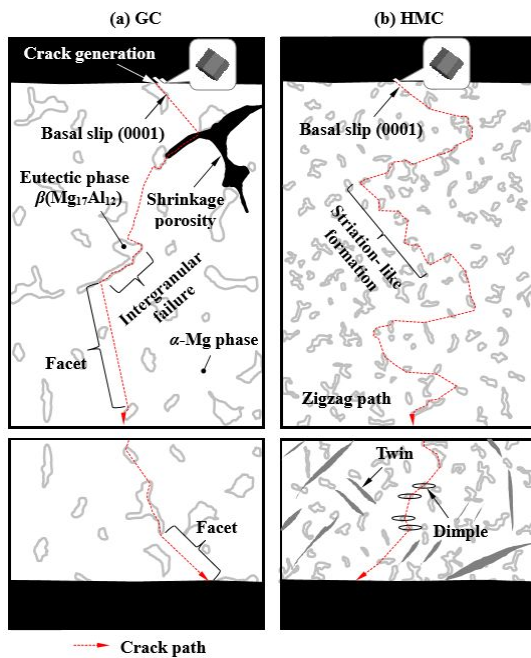


図6 破壊形態のモデル

これらを総合的に判断するとAZ91合金の重力鋳造材と連続鋳造材の破壊メカニズムについて検討することができる。

図6に破壊メカニズムを模式化した図を示す。脆性的破壊を示したGC材では、脆く大きく成長した共晶組織に沿って、き裂が伝播したと予想できる。一方、微細組織をもつ連続鋳造材では、微細な共晶相がデ

インプルの核となり延性を向上させたと思われる。

2) 超音波振動による連続鋳造材の作製  
連続鋳造に超音波振動を加えながらサンプルの作製に取り組んだ。供試材にはAC4CHとADC6材を用いた。図7に両サンプルのマイクロ組織を示す。AC4CHとADC6のマイクロ組織はそれぞれ  $\alpha$ -Al相とMg<sub>2</sub>Si, Si及び  $\beta$ -Al相とMg<sub>2</sub>Si, Al<sub>6</sub>(Mn, Fe)で構成されている。超音波振動を付加したことで、 $\beta$ -Al相が微細化及び球状化された。これは樹枝状晶に成長する  $\beta$ -Al相が超音波振動により分断され、微細・球状化されたと考える。

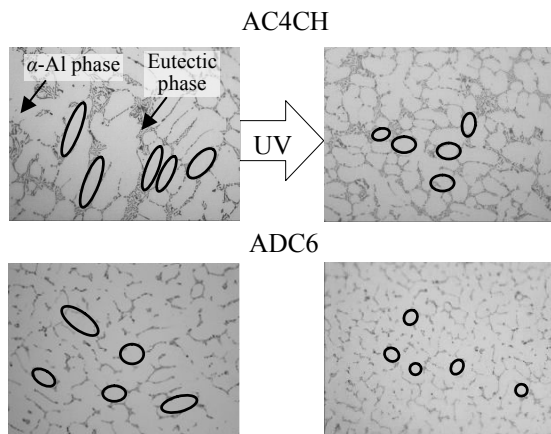


図7 AC4CHとADC6材のマイクロ組織写真

組織構造を確認するため透過型顕微鏡による転位密度について調査した。図8にTEM写真を示す。図から明らかのようにヘリカル転位が多数確認できた。これは超音波による振動が原因と考えられる。また得られたTEM像から転位密度を測定した。

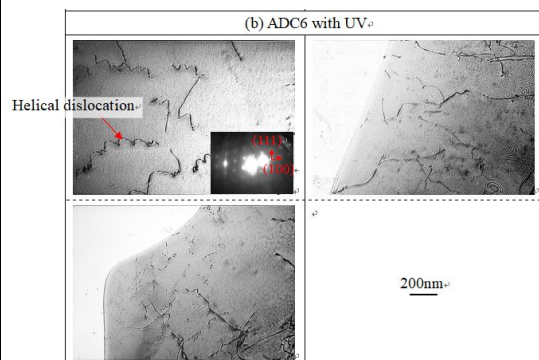


図8 TEM写真 (ADC6)

図9にAC4CHとADC6材の転位密度の結果を示す。図より両サンプルとも超音波による振動により転位密度が向上していることが確認できる。この結果、この高い転位密度が材料特性に影響すると考える。

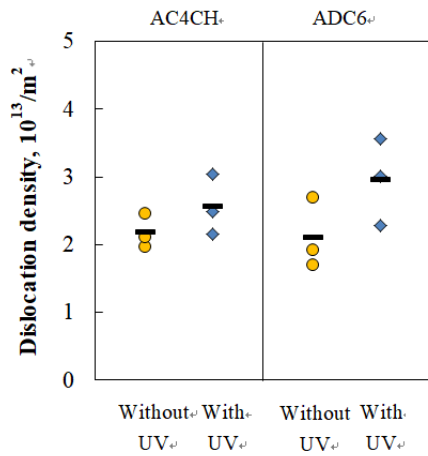


図9 AC4CHとADC6材の転位密度

図10に供試材の引張試験結果を示す。超音波振動を付加したAC4CHとADC6の引張強度はそれぞれ  $\sigma_{ts}=257\text{MPa}$ ,  $\sigma_{ts}=286\text{MPa}$ であり、超音波振動付加なしのAC4CHとADC6 ( $\sigma_{ts}=253\text{MPa}$ ,  $\sigma_{ts}=283\text{MPa}$ )より高い値を示した。これは結晶粒の微細・球状化及び内部応力と転位密度の増加が原因と考える。

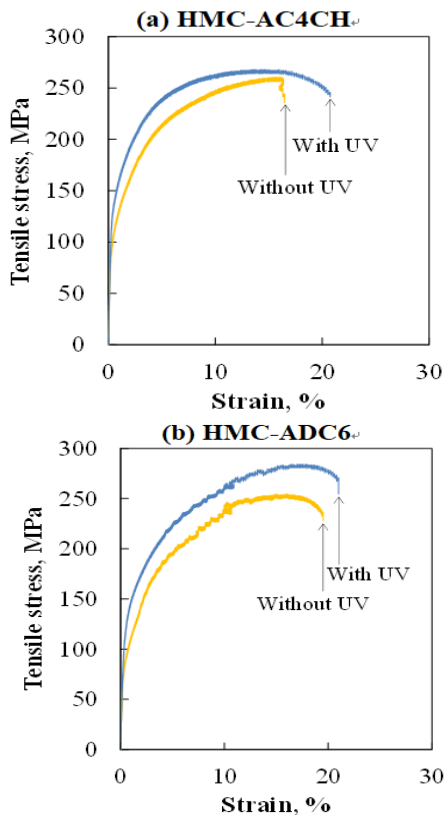


図10 AC4CHとADC6の引張試験結果

3) 複雑形状をもつ連続鋳造材の作製  
複雑な形状を持つ連続鋳造材を作製する為、連続鋳造の際、半凝固状態で外部からある形状の型を押し当てて様々な形状をもつ鋳物の作製に取り組んだ。ここでは、エアシリンダを用いてグラファイト型を半溶湯

状態の鋳物に押し当てる。実際提案したコンセプトを図11に示す。また得られた丸棒も示している。本研究では、複雑形状をもつ鋳物の作製まではできなかったが、特許の申請を行うことができた。すでにこの技術は公開されている。

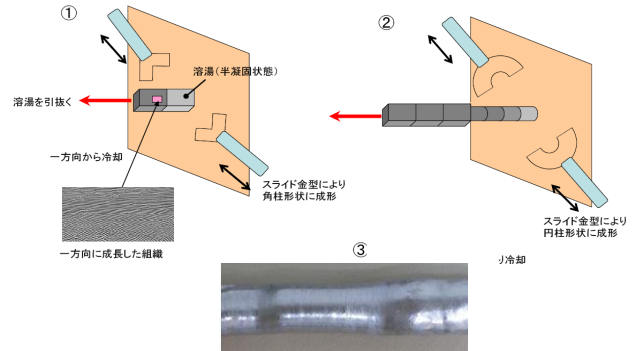


図11 複雑形状の連続鋳造材作製プロセス

## 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)

Muhammad Syahid, Mitsuhiro Okayasu, Shoka Wu  
Material properties of Al-Si-Cu aluminium alloy produced by the rotational cast technology  
*International Journal on Smart Material and Mechatronics*  
Vol. 3, 1 (2016) pp.136-139  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Shuhei Takeuchi, Shaohua Wu, Toshihiro Ochi  
Effects of Sb, Sr and Bi on the material properties of cast Al-Si-Cu alloys produced by the heated mold continuous casting  
*Journal of Mechanical Science and Technology*,  
Vol. 30, 3 (2016) pp.1139-1147  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Shuhei Takeuchi, Masaki Yamamoto, Hiroaki Ohfuji  
Precise analysis of mechanical properties of cast ADC12 aluminum alloy  
*Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 46, April (2015) pp. 1597-1609  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Shuhei Takeuchi  
Crystallization characteristics of cast aluminum alloys during a unidirectional solidification process  
*Materials Science and Engineering A*, Vol. 633, May (2015) pp. 112-120  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Shoka Go  
Precise analysis of effects of aging on mechanical properties of cast ADC12 aluminum alloy  
*Materials Science and Engineering A* Vol. 638, 25 (2015) pp. 208-218  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Yuta Miyamoto, Kazuma Morinaka  
Material properties of various cast aluminum alloys made using a heated mold continuous casting technique with and without ultrasonic vibration  
*Metals* Vol. 5, 3 (2015) pp. 1440-1453  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Hikonobui Sakai  
The effects of defects on tensile properties of cast ADC12 aluminum alloy  
*Metallurgical and Materials Transactions A* 46, 11 (2015) pp. 5418-5430  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Shuhei 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*, Vol. 600, April (2014) pp. 211-220  
査読あり

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*, Vol. 592, Jan. (2014) pp. 189-200  
査読あり

Mitsuhiro Okayasu, Shuhei Takeuchi, Hiroaki Ohfuji  
Mechanical strength and failure characteristics of cast Mg-9%Al-1%Zn alloys produced by a heated-mold continuous casting process: tensile properties  
*Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 15, No. 12 (2014) pp. 5767-5776  
査読あり

〔学会発表〕(計 11 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

・名称：アルミニウム合金の鋳造方法（高強度・高延性材の開発）  
発明者：岡安光博，竹内修平  
権利者：愛媛大学

種類：特許  
番号：特願 2014-164280  
出願年月日：公開日：平成 28 年 3 月 24 日  
国内外の別：国内

・名称：連続鋳造装置（鋳造と塑性加工技術）  
発明者：岡安光博，越智稔浩  
権利者：愛媛大学  
種類：特許  
番号：特願 2014-164279  
出願年月日：公開日：平成 28 年 3 月 24 日  
国内外の別：国内

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 (Mitsuhiro Okayasu)  
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授  
研究者番号：40433148