

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 5 月 17 日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2009

課題番号：19760521

研究課題名（和文） マルチモールド連鑄による異種材料から成る複合ロータス金属の創製

研究課題名（英文） Fabrication of Lotus Metals Consisting of Two Different Metals Using Continuous Casting Technique with Multiple Molds

研究代表者

鈴木 進補（SUZUKI SHINSUKE）

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：10437345

研究成果の概要（和文）：多数の一方に伸びた孔をもつロータス金属は、今後輸送機などの軽量材料として使用することが期待されている。本研究では、Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Mg 等のアルミニウム合金を用いて一方向凝固によりロータス金属を作製し、凝固組織と気孔形状の関係を調べた結果、気孔はデンドライト枝間の共晶相に生成し、気孔の形状や寸法が周囲のデンドライトの形状やデンドライト間隔と一致することを明らかにした。また、マグネシウムを水素雰囲気中で一つの側面の上部と底部に銅冷却盤を取り付けた鑄型に鑄込み、二方向からの冷却により凝固させ、ロータス型ポーラスマグネシウムを作製した。凝固方向に平行な断面には、それぞれの冷却面から垂直に伸びた気孔が途中で合流し、最終凝固部へ成長しているのが観察された。本研究では、気孔成長方向の実験値と有限差分法による二次元伝熱凝固解析で得られた温度分布との比較により、気孔は固液界面にほぼ垂直に、温度勾配にほぼ平行に成長することを明らかにした。また、固液界面同士の衝突部で観察される、気孔成長の停止、二つの界面から成長してきた気孔同士の合体、湾曲した成長、粗大気孔生成のメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Lotus-type porous metals with pores elongated in one direction are expected to be applied to light-weight structural materials of transport machineries. In this study, lotus aluminum alloys were fabricated using Al-Si, Al-Cu, Al-Si-Mg and so on by unidirectional solidification, and the morphologies of pores were investigated. The pores generated and grew in the eutectic region among several dendrite arms. The shape of pores reflected the morphologies of the surrounding dendrite arms. The size of pores was in the same order as the dendrite arm spacing. Furthermore, lotus-type porous magnesium ingots were fabricated in pressurized hydrogen atmosphere through a mold casting technique. The mold consisted of two cooling blocks placed at the bottom and one lateral side. It was found that the pores started to grow upwards and horizontally and the both directional pores merged and then shifted to the direction. Such anisotropic growth directions of pores were in good agreement with the directions of the temperature gradient predicted by two-dimensional finite differential analysis. The mechanisms were investigated for the interruption of pore growth, the collision of two pores grew from two solid-liquid interfaces, the formation of curved pores, and the pore coarsening at the bonding plane of two solid-liquid interfaces.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,000,000	0	1,000,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,500,000	450,000	2,950,000

研究分野： 鋳造・凝固プロセス，ポラス金属，金属の融体物性
科研費の分科・細目： 材料工学・金属生産工学
キーワード： 鋳造

1. 研究開始当初の背景

一方向に並んだ多数の微細気孔を有するロータス型ポラス金属[1, 2]は，気孔の成長方向には比強度を低下させることなく軽量化することができ，輸送機械などの軽量構造部材としての応用が期待されている。中でも，アルミニウムやマグネシウムを用いてロータス金属を作製することにより軽量化効果の高い材料を開発できると考えられる。

このような材料は，水素ガス雰囲気中などでアルミニウム合金を一方向凝固させる際，固液両相の水素原子の溶解度差により液相中の水素原子が固液界面に気泡となって生成し，界面が一方向に移動するのに伴って成長する原理を利用している。

(1) 合金元素が気孔形態に与える影響

しかしながら，アルミニウム合金においては鋳造欠陥の研究で既に知られているように，凝固条件や添加元素が気孔率や気孔形態に複雑に影響を与える。従って，種々のアルミニウム合金において作製条件がロータス金属の作製可否や特性に与える影響を物性値から予測することは困難である。そこで，ロータスアルミニウム合金作製における基礎的な気孔形成メカニズムを明らかにするために各種アルミニウム合金を用いてミクロ組織と気孔形態の関係を調べることで，気孔生成，成長メカニズムを系統的に明らかにする必要がある。

(2) 温度変化が気孔形態に与える影響

また，実際にロータス金属を複雑形状鋳物として作製することにより，構造材料の応用範囲が拡大すると期待できる。

ロータス金属の複雑形状構造部材をニアネットシェイプキャスティングにより作製する場合，荷重負荷方向に平行に気孔を配列することにより，ポラス化による強度低下を抑えながら軽量化を実現することが可能になると考えられる。しかしながらニアネットシェイプキャスティングは，固液界面の形状や移動方向が複雑で，固液界面同士の衝突や合流が生じるという点で一方向凝固とは異なる。従って，このような条件が気孔形態に与える影響も明らかにする必要がある。

2. 研究の目的

(1) 合金元素が気孔形態に与える影響

本研究ではロータスアルミニウム合金作製における基礎的な気孔形成メカニズムを明らかにすることを目的として，加圧水素ガ

ス雰囲気中で連続鋳造法によりアルミニウム合金の一方向凝固を行った。

(2) 温度変化が気孔形態に与える影響

本研究ではロータス金属のニアネットシェイプキャスティングにおける気孔成長方向と固液界面の変化との関係を明らかにすることを目的として，2箇所の冷却部を有する鋳型を用いてロータスマグネシウム鋳塊を作製し，その気孔形態を観察した。同時に，二次元の伝熱凝固解析を用いた凝固時における温度変化の計算により，各時間における固液界面の位置を算出し，界面の形状や移動方向と気孔形成の関係について調べ，実験結果との比較検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 合金元素が気孔形態に与える影響

図1に本研究で用いた連続鋳造法の実験装置概略図を示す。ろつばにアルミニウム合金試料を入れて，水素0.1 MPaのガス雰囲気中で高周波溶解した。アルミニウム合金試料として Al-Cu (4.5, 10, および 33wt%)， Al-Si (4, 8, 12, 14, および 18wt.%)， Al-5wt.%Ti を用いた。

溶解後，溶湯に水素原子が十分溶け込むように10分間保持した。ろつば底部には矩形孔が設けられ，そこに耐熱材で作製された鋳型(30 x 10mm²)を連結した。溶解，保持時には底部の孔はダミーバーで閉じ，ダミーバーを下方へ移動させることで鋳造材を下方へ引き出した。本研究では1~50 mm/minの範囲の一定速度で引出しながら一方向凝固させ600mm程度の長さのスラブを作製した。一定速度で100から200mm程度引出した後一時停止し，引出速度を変化させることにより1回の溶解実験で，引出速度を変化させた実験を行った。

作製した鋳塊はワイヤーカット放電加工機で切り出し，光学顕微鏡にて断面を観察した。気孔率は質量と寸法から求めた相対密度と理論密度の比から求めた。

また，実用 Al-Mg-Si 系合金である A6061 (0.4-0.8wt.%Si, 0.8-1.2wt.%Mg) を用い，図1(b)に示す鋳型鋳造法により試料作製を行った。チャンバー内を真空雰囲気とし，高周波溶解したろつばの試料を，下部のみに冷却部を持つ鋳型に注湯することにより一方向凝固を行った。このとき，注湯前に鋳型内に Ca(OH)₂ 粉末を入れ，注湯時に溶湯の熱が粉末を分解する際に発生するガスで気孔を

生成させた。また、A6061 を純アルミニウムで4倍に希釈した試料も用いた。連続鋳造の場合と同様に断面の観察を行った。

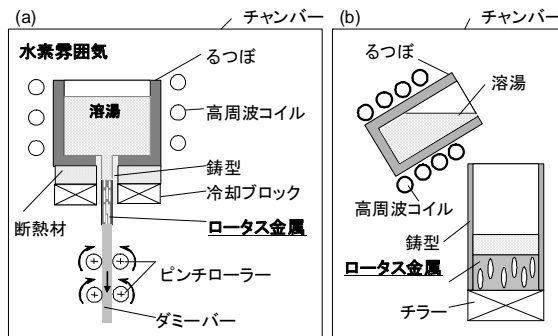


図1 実験装置概略図, (a)連続鋳造法 (b)鋳型鋳造法。

(2) 温度変化が気孔形態に与える影響 鋳造実験

図2 (a)に本研究で用いた実験装置の概略図を示した。純マグネシウムインゴット75-90 gを入れたるつぼと鋳型を加圧ガスチャンパーにセットした。H₂ 0.4 MPaとAr 0.1 MPaとの混合ガス雰囲気中でインゴットを高周波加熱により溶解し、約10 min経過後、溶湯温度700°Cでるつぼ底部のストッパーを開放して下部に設置した鋳型に注湯した。

図2 (b)に鋳型および水冷銅盤の概略図を示した。厚さ0.3 mmのステンレス鋼の薄板を角柱状に折り曲げて鋳型を作製し、側壁の一部を切り取って銅ブロックを接続した。鋳型を水冷銅盤上に接触させることにより、下部および側壁上部の2箇所のみから冷却される構造とした。側壁上部の銅ブロックは、別の銅ブロックを介して水冷銅盤に接続させることにより冷却した。

作製した試料を放電加工機によりz方向(図2 (b))の中心面で切断し、断面を研磨して光学顕微鏡による観察を行った。

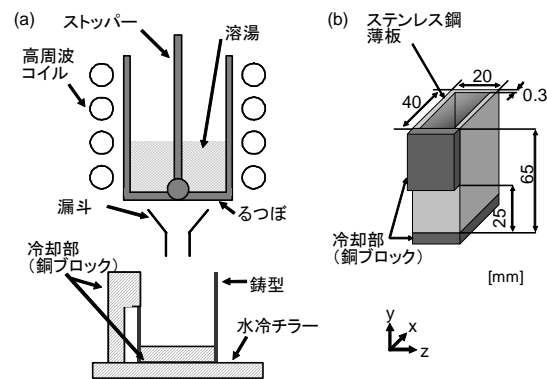


図2 実験装置概略図, (a)鋳型鋳造法実験装置, (b)鋳型詳細

伝熱凝固解析

図2 (b)に示した鋳型においては試料厚さ方向(z方向)の熱の移動および溶湯流動の影響は無視できるものとして、図3の解析モデルを用いた有限差分法による二次元の伝熱凝固解析を行った[3]。熱伝導の基礎式として式(1)を用いた。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 t は注湯からの経過時間、 T 、 λ 、 ρ および C_p はそれぞれ試料の温度、熱伝導率、密度および比熱である。

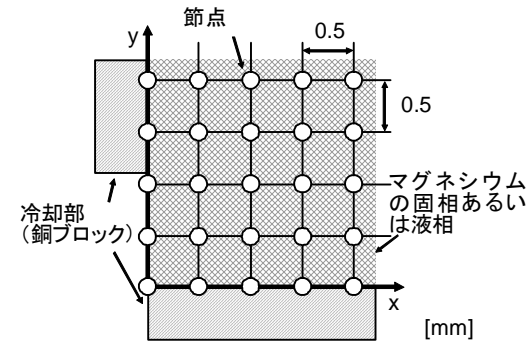


図3 凝固過程のマグネシウムインゴット内における二次元有限差分モデル概略図

凝固潜熱の補正には式(2)の温度回復法[3]を用いた。熱伝導方程式から求めた温度が融点を下回った場合、融点からの降下温度 ΔT を試料の比熱 C_p と凝固潜熱 L を用いて固相率の増加分として換算し、温度を融点に戻すという計算を行い、固相率が1になるまで繰り返した。

$$\Delta g = C_p \Delta T / L \quad (2)$$

ここで、液相に対しては $\lambda: 80 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、 $\rho: 1580 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_p: 1.26 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ を、固相に対しては $\lambda: 110 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 、 $\rho: 1270 \text{ kg/m}^3$ 、 $C_p: 1.03 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ を用い、計算を簡素化するため物性値は温度によらず一定とした。固相の熱伝導率と密度は、ノンポーラスマグネシウムの物性値から気孔率の27%分を減少させた値となっている。凝固潜熱は $L: 230 \text{ kJ/kg}$ とした。

冷却部以外の鋳型面および自由表面には断熱条件を用い、冷却面は常に20°C、冷却面と溶湯の間の熱伝達係数を $2000 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ とした。溶湯温度は注湯した瞬間において700°Cで均一であるものと仮定した。節点の間隔($\Delta x = \Delta y$)、タイムステップをそれぞれ0.5 mm、1.555 msとして計算した。

各節点の温度を求めた後、各経過時間においてマグネシウムの融点である650°Cの節点を結ぶことにより、固液界面を求め、さらに固液界面での温度勾配の方向を算出した。

4. 研究成果

(1) 合金元素が気孔形態に与える影響

図4に引出速度 1 mm/min で作製した Al-Cu 試料の引出方向に垂直および平行な断面を示す。引出方向に伸びた気孔が観察されることから、加圧ガス雰囲気中での連続鋳造によりロータス型ポーラス Al-Cu 合金の作製が可能であるといえる。

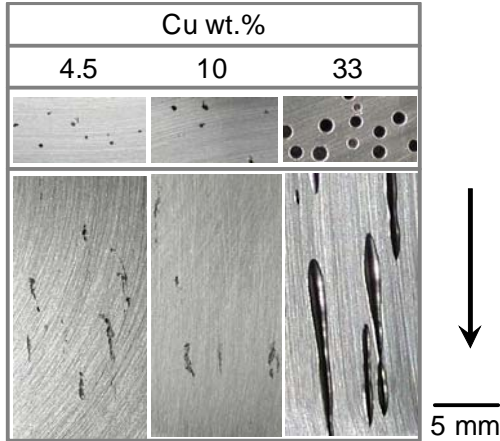


図4 引出速度 1 mm/min で作製したロータス Al-Cu 合金の引出方向 (矢印) に垂直 (上) および平行な断面 (下)。

図5には、各引出で作製したロータス Al-4.5wt%Cu の垂直な断面における気孔周辺のマイクロ組織を示す。直径数百 μm の気孔は、共晶相付近に存在し、周囲の α 相のデンドライト形状を反映したいびつな形状となっている。引出速度の増加に従い、気孔の寸法はデンドライト同士の間隔の減少と共に小さくなった。これに対して、図4に示すように、共晶組成である Al-33wt.%Cu における気孔は、断面が真円に近く、直線的に成長している。

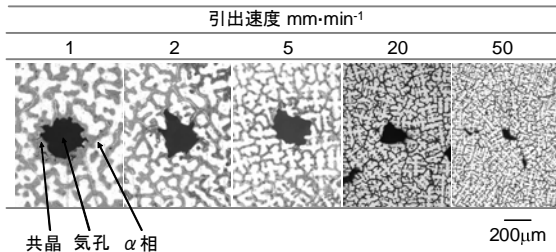


図5 各引出速度で作製したロータス Al-4.5wt%Cu の垂直な断面における気孔周辺のマイクロ組織。

亜共晶合金における気孔のいびつな形状は、固液界面に生成した気孔が凝固界面の移動と共に一方向に成長する際に、先行相である周囲の初晶 α デンドライトにより成長が阻害されたことにより形成したと考えられる。また、共晶相付近に気孔が存在すること

から、気孔は共晶相の凝固と同時に生成したものと考えられる。

金属マトリックス部全体が共晶相である Al-33wt%Cu の場合は、気孔成長の際に前方に阻害する先行相が存在しないため直線的に成長したものと考えられる。

このような傾向は共晶系 Al-Si や Al-Si-Mg でも観察され、Al-Si-Mg 合金ではさらに、周囲の α 相が等軸晶の場合に気孔は等方的な形態となり、周囲が柱状晶の場合に気孔は方向性のあるものになることが明らかとなった。

(2) 温度変化が気孔形態に与える影響

図6に二箇所の冷却部を有する鋳型を用いて作製したロータスマグネシウム鋳塊の断面写真と伝熱凝固解析により求めた注湯からの各経過時間における固液界面の位置および固液界面での温度勾配を示した。2つの冷却部付近から垂直に気孔が成長し、中央部付近で合流した後、最終凝固部 (写真右上) へ成長したことが観察された。気孔の成長方向は、数値解析により得られた固液界面にほぼ垂直に、温度勾配にほぼ平行であることが確認された。

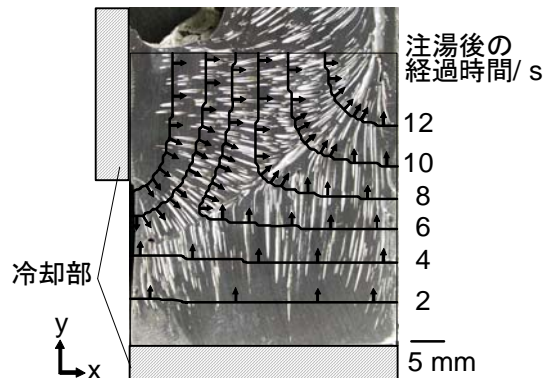


図6 二箇所の冷却部を持つ鋳型を用いて作製したロータスマグネシウムの断面および伝熱凝固解析により得られた各経過時間での固液界面の位置および温度勾配 (矢印)。

また、それぞれの冷却盤から成長した2つの固液界面の衝突位置と気孔同士の衝突位置はほぼ一致した。この近傍では図7に示すとおり、一方向凝固により作製したロータス金属には見られないような気孔形態が観察された。

図7(a)には、成長過程で成長方向と反対側から別の固液界面が衝突し、成長が途中で阻害されたと考えられる気孔が観察された。また図7(b)に示す気孔は、衝突した反対側の界面にも気孔が存在したために気孔同士が合体したものと考えられる。

また、図7(c)の気孔は、界面前方の液相部分に生成した水素の濃化層同士が衝突し、気

孔に多くの水素が供給されたために粗大化したものであると考えられる。数値解析で得られた固液界面の軌跡から、気孔が生成した固液界面が曲線的に移動する場所において湾曲した気孔(図7(c))が成長することが明らかになった。

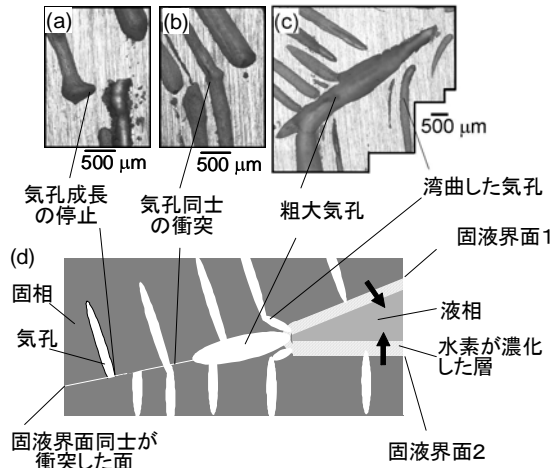


図7 固液界面の衝突部付近で観察される気孔の写真(a-c)と模式図(d)

参考文献

- [1] H. Nakajima, Prog. Mater. Sci., 52 (2007) 1093.
 [2] V. Shapovalov, Proc. Mater. Res. Soc. Symp. 521(1998)281.
 [3] 大中逸推, コンピューター伝熱凝固解析, 丸善(1985).

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計8件)

- (1) T. B. Kim, S. Suzuki, H. Nakajima, Fabrication of Lotus-type Porous Al-Ti Alloys using the Continuous Casting Technique, Materials Science Forum, 査読有, (掲載決定).
 (2) K. Sugihara, S. Suzuki, H. Nakajima, Anisotropic Growth of Pores in Lotus-type Porous Magnesium, Materials Science Forum, 査読有, (掲載決定).
 (3) S. Suzuki, T. B. Kim, H. Nakajima, Fabrication of Al-Cu alloys with directional pores by continuous casting technique, Proceedings of the 6th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, 査読有, (掲載決定).
 (4) T. B. Kim, S. Suzuki, H. Nakajima, Effect of Conditions of Unidirectional Solidification on Microstructure and Pore Morphology of Al-Mg-Si Alloys, Materials Transactions, Vol. 51, No. 3, 査読有, 2010, pp. 496-502.

- (5) 金 泰範, 鈴木進補, 中嶋英雄, 一方向凝固した Al-Mg-Si 合金の気孔形態に及ぼすマイクロ組織の影響, 軽金属, 査読有, Vol. 59, No. 12, 2009, pp. 678-684.
 (6) S. Suzuki, T. B. Kim, H. Nakajima, Fabrication of Al-Cu Alloy with Elongated Pores by Continuous Casting Technique, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 165, No. 012068, 2009, pp. 1-4.
 (7) T. B. Kim, S. Suzuki, H. Nakajima, Fabrication of a Lotus-type Porous Al-Si Alloy by Continuous Casting with a Thermal Decomposition Method, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, Vol. 165, No. 012067, 2009, pp. 1-4.
 (8) J. S. Park, S. K. Hyun, S. Suzuki, H. Nakajima, Fabrication of Lotus-Type Porous Al-Si Alloys Using the Continuous Casting Technique, Metallurgical and Materials Transactions A, 査読有り, Vol. 40, No. 2, 2009, pp. 406-414.

[学会発表] (計22件)

- (1) 杉原 孝平, 鈴木進補, 中嶋英雄, 二方向性凝固によるロータス型ポーラスマグネシウムの気孔方向制御, 日本金属学会 2010年春期大会, 2010年3月30日, 筑波大学.
 (2) S. Suzuki, J. S. Park, K. Sugihara, H. Nakajima, Pore Growth Direction of Lotus-type Porous Copper Fabricated by Continuous Casting Technique, The 11th the International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), 2010年1月10日, 大阪府立大学.
 (3) K. Sugihara, S. Suzuki, H. Nakajima, Anisotropic Growth of Pores in Lotus-type Porous Magnesium, The 11th the International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), 2010年1月10日, 大阪府立大学.
 (4) T. B. Kim, S. Suzuki, H. Nakajima, Fabrication of Lotus-type Porous Al-Ti Alloys using the Continuous Casting Technique, The 11th the International Symposium on Eco-materials Processing and Design (ISEPD2010), 2010年1月10日, 大阪府立大学.
 (5) 杉原孝平, 鈴木進補, 中嶋英雄, ロータス型ポーラスマグネシウム鑄塊の気孔成長方向の制御, 軽金属学会 第117回秋期大会, 2009年11月14日, 電気通信大学.
 (6) 杉原 孝平, 鈴木進補, 中嶋英雄, ロータス型ポーラス金属の気孔成長方向と冷

- 却方法の関係，日本金属学会 2009 年秋期大会，2009 年 9 月 16 日，京都大学。
- (7) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，連続鋳造法によるロータス型ポーラス Al-Ti の作製，日本金属学会 2009 年秋期大会，2009 年 9 月 16 日，京都大学。
- (8) S.Suzuki, T.B.Kim, H.Nakajima, Fabrication of Al-Cu alloys with directional pores by continuous casting technique, The 6th International Conference on Porous Metals and Metallic Foams, 2009 年 9 月 2 日，Park Inn Hotel Dnaube (ブラチスラバ，スロバキア)。
- (9) 鈴木進補，金 泰範，中嶋英雄，ロータス型ポーラス Al-Cu 合金の気孔形成に及ぼす凝固組織の影響，軽金属学会 第 116 回春期大会，2009 年 5 月 22 日，登別グランドホテル。
- (10) 杉原 孝平，鈴木進補，中嶋英雄，ガス化合物の熱分解を用いて一方向凝固した Al-Si 合金の気孔形態，日本金属学会 2009 年春期大会，2009 年 3 月 29 日，東京工業大学。
- (11) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，Ca(OH)₂ の熱分解反応を利用した連続鋳造法によるロータス型ポーラス Al-Si 合金の作製，日本金属学会 2009 年春期大会，2009 年 3 月 29 日，東京工業大学。
- (12) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，熱分解反応を利用した連続鋳造法によるロータス型ポーラス Al-Si の製および作製因子の影響，高温学会秋季総合学術講演会，2008 年 12 月 5 日，大阪大学。
- (13) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，熱分解反応を利用したロータス型ポーラス Al-Si 合金の連続鋳造における作製因子の影響，軽金属学会第 115 回秋期大会，2008 年 11 月 15 日，工学院大学。
- (14) 鈴木進補，金 泰範，中嶋英雄，連続鋳造によるロータス型ポーラス Al-Cu 合金の作製，軽金属学会 2008 年秋期大会，2008 年 11 月 15 日，工学院大学。
- (15) S.Suzuki, T.B.Kim, H.Nakajima, Fabrication of lotus-type porous Al-Cu alloys by continuous casting technique, International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008, 2008 年 11 月 11 日，Hotel Hankyu Expo Park, 大阪。
- (16) T.B.Kim, S.Suzuki, H.Nakajima, Fabrication of lotus-type porous Al-Si alloy by continuous casting with using thermal decomposition method, International Conference on Advanced Structural and Functional Materials Design 2008, 2008 年 11 月 11 日，Hotel Hankyu Expo Park, 大阪。
- (17) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，熱分解法を利用した連続鋳造法によるロータス型ポーラス Al-Si 合金の作製，日本金属学会 2008 年秋期大会，2008 年 9 月 23 日，熊本大学。
- (18) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，ロータス型ポーラス Al-Mg-Si 合金の組織および気孔形態の制御，日本金属学会 2008 年春期大会，2008 年 3 月 27 日，武蔵工業大学。
- (19) 鈴木進補，朴 宰成，金 泰範，中嶋英雄，連続鋳造法によるロータス型ポーラスアルミニウム合金の作製と合金元素の影響，軽金属学会第 113 回秋期大会，2007 年 11 月 10 日，千葉大学。
- (20) 金 泰範，鈴木進補，中嶋英雄，ロータス型ポーラス Al-Mg-Si 合金作製に及ぼす合金元素添加量の影響，日本金属学会 2007 年秋期大会，2007 年 9 月 19 日，岐阜大学。
- (21) 朴 宰成，玄 丞均，鈴木進補，中嶋英雄，ロータス型ポーラス Al-Si 合金に及ぼす微細組織の影響，日本金属学会 2007 年秋期大会，2007 年 9 月 19 日，岐阜大学。
- (22) J.S.Park, S.K.Hyun, S.Suzuki, H.Nakajima, Fabrication of Lotus-type Porous Al-Si Alloys using Continuous Casting, Proc. 5th Int. Conf. on Porous Metals and Metallic Foams, 2007 年 9 月 5 日，Hotel Delta Centre-Ville, Montreal, Canada。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 進補 (SUZUKI SHINSUKE)

大阪大学・産業科学研究所・准教授

研究者番号：10437345

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし