

研究種目：基盤研究(c)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560748

研究課題名（和文） 軽合金の無欠陥・高生産性鋳造法に関する基礎的検討

研究課題名（英文）

Basic study on light-alloy-casting process with high productivity and non-defects

研究代表者

大中逸雄（OHNAKA ITSUO）

大阪産業大学・工学研究科・客員教授

研究者番号 00029092

研究成果の概要：

省エネルギーや地球温暖化問題と関連して輸送機器の軽量化に必要な A1 合金などの軽合金で、信頼性の高い高強度・複雑形状鋳造品を製造するため、欠陥発生の要因となるプランジャ・チップやスリーブを使用せず、鋳型およびストークの上端を減圧して溶湯を吸引する新しい思想の真空吸引鋳造法や水の代わりに相変化物質の変態熱を利用して鋳型の温度制御を行う新たな方法について研究し、その可能性を示している。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：金属生産工学

科研費の分科・細目：材料加工・処理

キーワード：軽合金の鋳造、高品質鋳造品、ガス巻き込み欠陥、潜熱利用金、数値シミュレーション 可視化実験

## 1. 研究開始当初の背景

省エネルギーや地球温暖化と関連して輸送機器の軽量化ニーズが高く、A1 や Mg 合金などの軽合金で、信頼性の高い高強度・高精度・複雑形状鋳造品の製造が強く望まれている。このためには合金開発も重要であるが、現状では主に鋳造時に生じる欠陥で設計強度が決

まっており、合金固有の性能を発揮できておらず製造法に関する研究が極めて重要となっている。

鋳造欠陥には種々あるが、強度に関連するものとしてガスの巻き込みやひげ巣欠陥などが従来主な研究対象になっている。しかし、A

lやMg合金のような酸化しやすい合金では溶湯表面に発生する酸化皮膜の巻き込み欠陥も今後問題になってくると考えられ、酸化皮膜の巻き込み欠陥がない鑄造法を追求する必要がある。なぜなら、酸化皮膜はひけ巣発生の核にもなるため、ひけ巣欠陥の制御とも大きく関係しているからである。現状ではガス巻き込みやひけ巣欠陥が多く、酸化皮膜の影響を隠蔽していると考えている。

このような観点から鑄造法を大別し、また本研究者らのこれまでの研究、経験、特に最近のX線による直接観察研究結果から、落とし込み方式や横注ぎ方式でガスや酸化皮膜の巻き込みを防ぐことは極めて困難であると考えている（湯口断面積をかなり小さくして低流速とすれば良いが生産性の良い金型では湯回り不良となる）。これは落下時に溶湯が加速され鑄型と衝突して溶湯表面（酸化皮膜が存在）が乱れ、湯面同士が衝突するからである。巻き込みをなくせる可能性があるのは押上方式であり、現在、重要保安部品が低圧鑄造や真空吸引法、縦型ダイカスト法などで製造されていることが良く理解できる。しかし、酸化皮膜の巻き込みは、キャビティへの注湯時だけでなく、取鍋への溶湯供給時にも発生する。低圧鑄造や真空吸引法以外のほとんどすべての方法は、この意味では落とし込み方式を併用しているプロセスであり、好ましくない。一方、低圧鑄造法や真空吸引法ではガス圧を制御してキャビティを充填している。このため、キャビティ内で流動中に生成する酸化皮膜の巻き込みがないように流動を制御することは容易ではない。実際にはガス巻き込みなどの欠陥が発生しており、その制御が望まれている。

## 2. 研究の目的

本申請者らの従来の研究を一層発展させ、上記の理想的鑄法を実現するための基本とな

る重要事項についてその可能性を明らかにして、将来の実用化に寄与すること、および、従来あまり重要視されていない酸化皮膜巻き込みの防止が重要なことを明らかにするため、以下を研究目的とした。

(1) 二つのプランジャ・チップを利用して電動サーボモータ駆動により溶湯を吸引し、キャビティに制御して射出する新たなダブル・チップ式ダイカスト法の可能性を明らかにする。

(2) 欠陥発生の原因となるプランジャ・スリーブをなくし、低圧鑄造と同様にストークから溶湯を鑄型空隙部に導入する新しい吸引鑄造の可能性を明らかにする。

(3) 上記の吸引鑄造法の直接観察と数値シミュレーションを行い、シミュレーションの可能性を明らかにする。

(4) 相変化を利用した新たな金型温度制御の可能性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

上記の目的のため、以下のような実験装置を製作し実験した。また、直接観察には大阪大学工学研究科の装置を借用した。

### (1) ダブル・チップ型ダイカスト装置

図1、図2に示すように、2個のプランジャ・チップを閉じた状態から開くことで、プランジャ・スリーブ中に減圧空間を作り出し、溶湯を吸引し、鑄型下部まで移動させ、一方のプランジャで鑄型中に射出する。プランジャ・スリーブは必ずしも溶湯で充填されないが、鑄型下部に移動させることで、最初、空気が射出された後溶湯が射出されるので、ガスの巻き込みは大幅に軽減されるはずである。また、ストーク中の湯面位置をスリーブになるべく近づけることで、スリーブ中の溶湯充填率を上げることができる。

本原理の装置をまともに製作するほどの予

算がないため、既存の可視化用装置を改造した。すなわち、既存の電動サーボモータに補助プランジヤを追加して二つのプランジヤ・チップを移動させることにした。

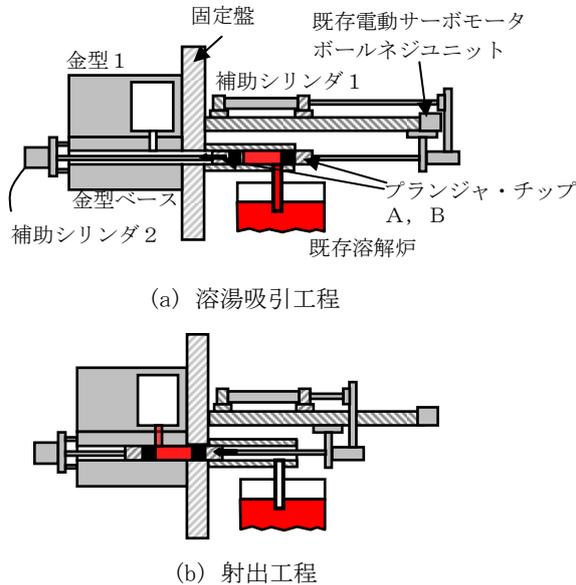


図1 ダブル・チップ方式ダイカスト装置の原理



図2 試作した装置の外観

(2) 真空吸引鋳造法

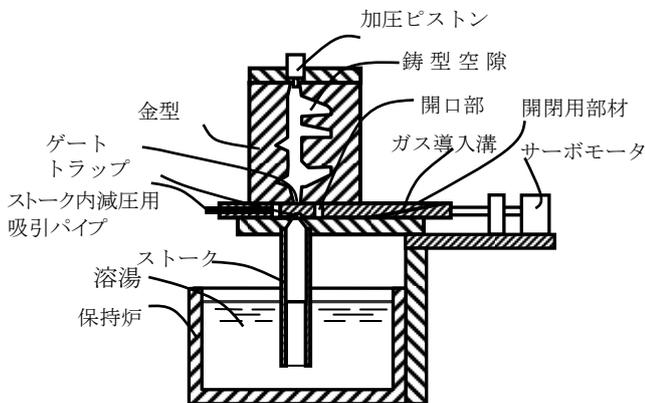


図3 吸引加圧鋳造の原理

図3に真空吸引法の原理を示す。本方法では、炉内に溶湯を鋳型に供給するストックが挿入されており、その上に鋳型が設置される。そして、鋳型とストックを開閉する開閉用部材が中間に挿入されている。開閉用部材には、ストック内を減圧するための吸引用溝、鋳型空隙部に溶湯を供給する開口部、ストック内の汚れた油面を除去するための空洞であるトラップが設けてある。

鋳造工程は、まずゲートを閉鎖し、ストック内減圧用吸引パイプからストック内を減圧し、溶湯を吸い上げる。この間に鋳型空隙部を高真空に減圧する。そして、トラップに溶湯が流入したら、開閉用部材を移動して開口部をストックの上部に位置させる。すると鋳型空隙部が高真空になっているので、溶湯が瞬時に鋳型を充填する。鋳型空隙部が溶湯で充填されたら、開閉用部材を再び移動してゲートを閉鎖し、加圧ピストンで加圧する。凝固が終了したら、鋳型を開き、鋳造品を取り出し、清掃、塗型等従来の工程にはいる。また、開口部やトラップで凝固したものを除去する。

このように、溶湯と固体との接触は最小限に抑えられ、高真空鋳造であるから、従来のダイカスト法で問題になる欠陥は生じないはずである。

a) 試作1号機

図4に試作した1号機を示す。本装置は開閉用部材を有しておらず、金型とストック



図4 吸引鋳造試作1号機の外観

の間に消耗式(アルミ箔)シールを挿入しており、金型を手動で移動できる。すなわち、ストーク上面から真空ポンプで吸引し、また、金型を真空にしておく。ストークを溶湯が充満し、消耗式シールに溶湯が接触するとシールが溶解し、高真空に減圧していた金型内に溶湯が吸引される。

b) 試作2号機

図5に吸引鑄造装置2号機を示す。本試作機は開閉用部材を有し、金型は真空ボックス内に保持されている。原理としては図3に示すものと同じである。



図5 試作2号機の外観

c) 試作3号機

図6に試作3号機を示す。本装置は、可視化用とシェル型等に利用するためのものである。湯流れの可視化実験では、黒鉛型をX



図6 試作3号機の外観

線の透過性に優れたポリイミド(商品名:カプトン)膜を窓の材料とした真空ボックス中に配置し、装置全体をX線ボックス中に入れ遠隔操作で鑄造し、Image Intensifier管で映像化したものを高速度カメラで記録した。

3) 直接観察と数値シミュレーション

直接観察は上述の通りである。数値シミュレーションは、本研究代表者らが開発し、市販されている JSCAST を使用した。

4) 相変化を利用した新たな金型温度制御

図7に原理を示す。すなわち、金型に亜鉛合金などの相変化物質を挿入し、潜熱を利用して急激な温度変化を防ぐものである。

具体的には、図8に示すような金属中に亜鉛合金を充填し、アルミ溶湯中に浸漬し、その温度変化を測定した。また、シミュレーション結果と比較した。

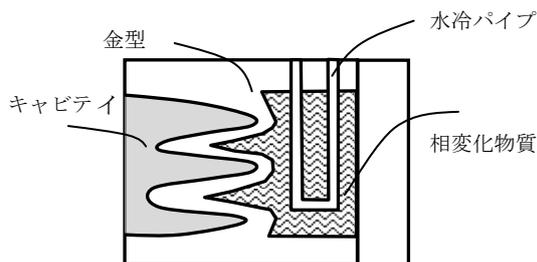


図7 相変化利用金型温度制御の原理

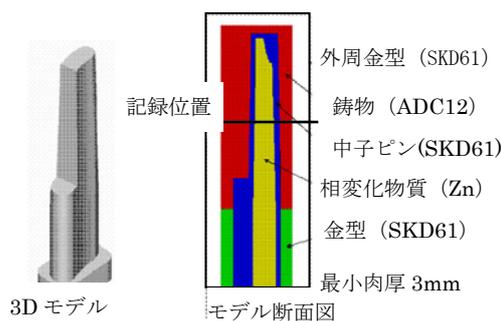


図8 解析した3Dモデルと断面図  
モデルサイズ: 50×65×180[mm]

#### 4. 研究成果

##### 4. 1 ダブルプ・チップ式ダイカスト法

1) プランジャ・チップの駆動が困難であった。これは、本装置が、既存装置を最小限の費用で改造したものであり、固定盤の両側からプランジャ・スリーブを装着し、両側からプランジャ・チップを挿入して駆動する構造としたことによる。すなわち、本装置では4つの軸合わせが必要であり、軸合わせが困難で、プランジャ・チップの駆動力が想定以上に大きくなり駆動できなかった。

2) スリーブに吸引する溶湯量が少な過ぎ、スリーブを溶湯で充填できない。これは保持炉内の湯面位置とスリーブまでの距離を短くするのが困難であり、また、2個のプランジャ・チップを閉じた状態から広げてできた減圧空間の体積が十分大きくないため、吸引される溶湯量が少なくなることが判明した。

3) これらの結果は、本方式の本質的な問題ではなく、あくまで本試作装置の問題点である。従って、解決可能ではあるが、大幅な装置改造と新たな溶湯供給装置の設計、製造が必要で、本研究予算では困難であることが判明した。一方、本科研費の申請後申請していた経済産業省の「中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する事業」が採択され、本装置の本格的開発が可能となった。また、本方法は、押し上げ方式ではあるが、プランジャ・スリーブは室温の金属であり、溶湯が流入すると凝固が発生し、あるいは潤滑油が溶湯と接触してガスを発生する。これらが、溶湯と共に鑄型空隙部に射出され欠陥となることが予想される。

そこで、本装置の開発は、上記の他の事業に任せ、上記の欠陥のない、より理想的な鑄造法の開発に取り組むことにした。

##### 4. 2 吸引鑄造法

図9に試作1号機で試作した試験片の一例を示す。図10にそのX線透過写真を示すが、ガ

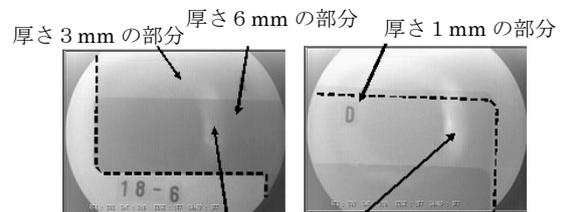
スの巻き込みなどは見られず、従来のダイカスト品などより高品質なものである。なお、実験により、金型を移動する時間の制御が重要であることが分かった。

図11は試作2号機による試験片例であり、常温の金型でも厚さ0.5mmという従来法では考えられない良いものが得られた。

図12は、試作3号機により、セラミックシェル型で鑄造したアルミ鑄物を示す。試作3号機は開閉用部材と真空ボックス間の気密性がよくなく、空気を吸引したため、内部品質は良くなかったが、複雑な羽車部品を製造することができた。



図9 試作1号機で試作した試験片の例  
材質：ADC12、金型温度：室温



白い部分は装置上の問題で欠陥ではない。  
図10 図9の試験片の内部欠陥



図11 試作2号機による試験片の例  
材質：ADC12、金型温度：室温



図 12 セラミック型により製作した鋳物

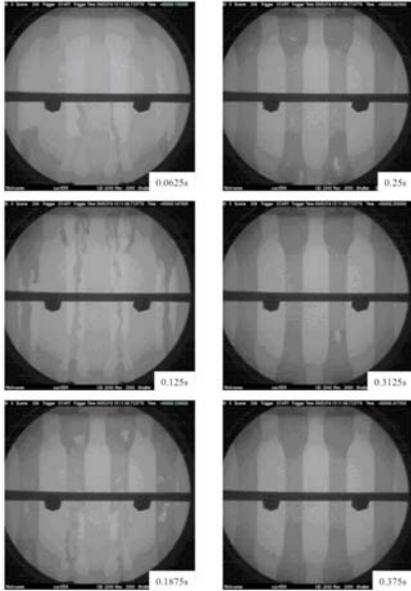


図 13 直接観察結果の例

#### 4.3 直接観察と数値シミュレーション

図13に直接観察結果の1例を示す。溶湯は、4本ある試験片キャビティにほぼ同時に流入した。しかしながら、端の2本への流入量が多く、中央の2本よりも先に充填が完了した。いずれのキャビティに於いても溶湯は勢いよく上面に到達し、キャビティ上部から下部方向へ充填が進行するような状態となった。また、キャビティ内部では激しく気泡を巻き込む様子が観察された。気泡は外部から流入すると言うよりも、キャビティ内部で巻き込まれているように見えた。しかしながら、ストークスの接続部分等にリークおよびガス発生（ガス発生しやすい充填物を使用している）の可能性があり、十分検討する必要がある。キャビティ内への溶湯の充填が完了した

後、巻き込まれた気泡は急速に上昇し、製品部から輩出された。このとき、溶湯はまだ凝固しておらず。鋳型上部のベントから流出しており、浮力と溶湯の流れに沿って気泡が輩出されたものと思われる。結果的に、非常に気泡欠陥の少ない鋳物を作成することができた。

図14に、図13に相当するシミュレーション例を示す。可視化結果と概略一致しているが詳細な流れは異なっている。これは、シミュレーションでは表面張力やガス移動等を考慮していないのが大きな理由と考えられる。

#### 4.4 相変化物質を利用した金型冷却

図15は、シミュレーションで相変化物質を挿入した場合と全て金型の場合を比較したもので、相変化物質を挿入したことで金型温度の上昇が抑えられることが予想される。

図16は、図8に示す中子ピンをアルミ溶湯にどぶ漬けした場合の温度変化曲線とシミュレーション結果を比較したもので、相変化物質を挿入することの効果があること、および数

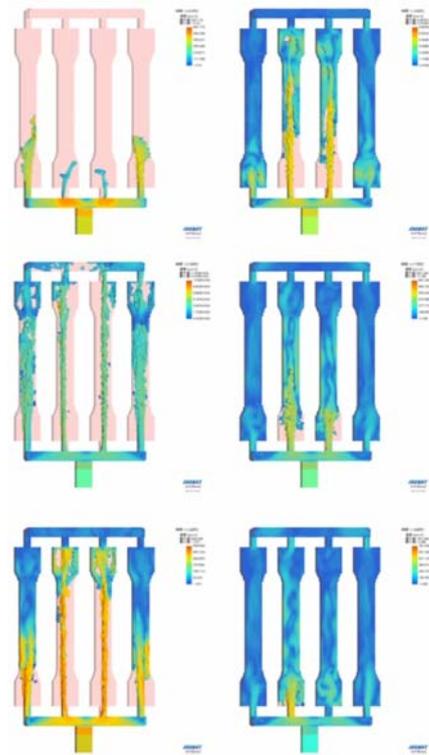


図14 数値シミュレーション結果例

値シミュレーションで予測可能なことが分かる。

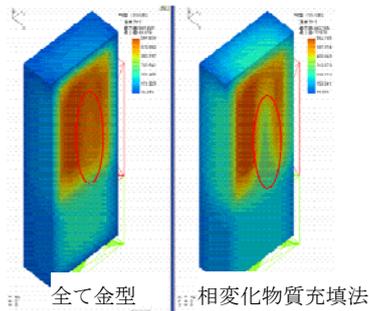


図15 中子ピンが全て金型の場合と相変化物質（亜鉛）を挿入した場合の主型の温度変化

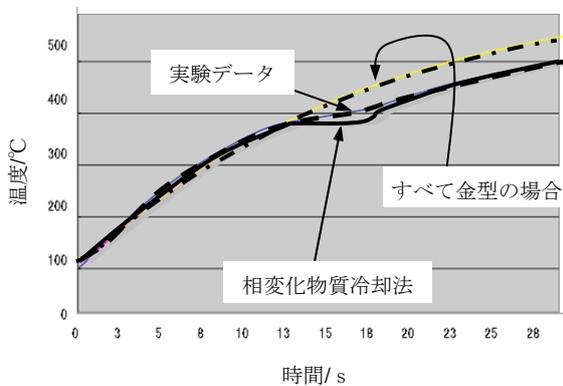


図 16 シミュレーションと実験データの比較

#### 4.5 まとめ

研究成果をまとめると以下の通りである；

- (1) 高真空で吸引することで、常温でも0.5mmという薄肉品の製造が可能である。
- (2) 気密性を確保できれば、コンパクトな設備かつ少ない使用エネルギーで熱処理可能な製品が得られる可能性がある。
- (3) 数値シミュレーションは溶湯の鑄型充填過程の x 線直接観察結果を概略一致し、有効であるが、気泡の巻き込み等については更なる検討が必要である。
- (4) 相変化を利用した金型で効果的に金型温度を制御できる可能性がある。
- (5) 汚れた湯面の溶湯をトラップにより除去できる可能性がある。

(6) シール板は正常な運転がなされれば、案外耐久性がありそうである。

(7) 装置はコンパクトで、真空ポンプの音が問題になる程度で、作業性は非常に良い。低圧鑄造のように保持炉が密閉されていないので、溶湯管理も容易である。

(8) 溶湯搬送等の熱損失が極めて少ないため、また、ダイカストのように大きな射出速度、圧力が不要なので大幅な省エネルギーが予想される。

(9) 常温程度の金型でも、従来ダイカスト法では製造が容易でないAC4CHで薄肉のものがより少ない欠陥で製造できる、また、気密性の向上や、鑄造条件の最適化で、かなり健全な試験片が得られる可能性がある。

(10) 鑄造条件が良ければT6熱処理でのふくれはほとんどなく、T6熱処理できる可能性は高い。

(11) 金型内部を吸引する方法ではなく、真空ボックスで鑄型全体を吸引する方法の方が鑄造は容易で、より健全な試片が得られる。X線による直接観察から、これは、ガスを巻き込んでもガスが逃げやすいためと考えられる。従って、金型でも方案を最適化するとより健全な鑄物が製作できる可能性がある。

以上のように新たな真空吸引法は、少なくとも、通常ダイカスト法より良い製品をより低コスト、省エネルギーで得られる可能性はあると思われる。また、真空ボックスで鑄型全体を吸引する方法により、多品種少量製品用の新しい鑄造法となる可能性は高いと考えられる。

今後の課題として、このような吸引鑄造法での鑄造方案がほとんど分かっておらず、可視化や数値シミュレーションと本スタディで開発した装置(不十分ではあるが、方案でどこまで改善可能かは興味ある所である)を使

用した実験がなされるべきである。また、アルミニウム合金用のホットチャンバダイカストマシンの開発が熱望されており、これまでに、いくつかのプロジェクトが実施されたが、従来の高速・高圧ダイカストに耐えられるスリーブやプランジャがなく、実用化例はほとんどない。本研究で提案する方法は、この長年の問題を解決できる可能性もある。

一方、高強度・高信頼性鋳造品の製造法という観点からは、その可能性について、確実な結論を得ることはできなかった。しかし、気密性の向上や、鋳造条件の最適化で、かなり健全な試験片が得られるようになったことから、さらなる改善で、より健全な鋳造品を製造できる可能性はあり、継続的に研究・開発することが望まれる。

本研究の遂行に当たり、大阪産業大学客員教授の小西邦彦氏、および(株)ヒカリの栗田順介氏に貴重なご助言とご協力を賜りました。ここに謝意を表します。また、大阪産業大学修士課程の芳浦良治君、佐田幸宏君、三田村良典君にご協力いただきました。併せて、謝意を表します。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

1) I.Ohnaka, A.Sugiyama, T.Ikeda and H.Yasuda, Mold Filling and Prevention of Gas Entrapment in High-Pressure Die-casting, *J.Mater.Sci., Technol.*, 査読有, 24(2008), 139-140

2) Itsuo Ohnaka, Akihiro Sato, Akira Sugiyama, and Fumiaki Kinoshita, Mechanism and Estimation of Porosity Defects in Ductile Cast Iron, 査読有, *Int.Cast Metals Re. J.*21(2008)に掲載決定

[学会発表] (計7件)

1) 大中逸雄、三田村良典、森勝、杉山明、新冷却方式金型の開発、日本ダイカスト会議論文集、(社)日本ダイカスト協会(2008.11), 49-52

2) 池田孝史、大中逸雄、香川雅彦、柏井茂雄、電動サーボ式小型ダイカスト装置の開発、日本ダイカスト会議論文集、(社)日本ダイカスト協会、(2008.11), 95-97

3) S.Kanou, K.Ogawa, A.Sato, I.Ohnaka, A.Sugiyama, and F.Kinoshita, Estimation and

reduction of deformation defects in steel castings by a CAE system, 査読有 *Proc. Modeling of Casting and Solidification Processes VII*, (2007), p.407-412, (2007.8.19, Dalian, China)

4) S.Kanou, K.Ogawa, I.Ohnaka, A.Sugiyama, and F.Kinoshita, Prediction and reduction of inclusion defects in steel castings by a CAE system, 査読有、*Proc. Modeling of Casting and Solidification Processes VII*, (2007), p.585-590, (2007.8.19, Dalian, China)

5) I.Ohnaka, H.Yasuda, and A.Sugiyama, Recent Development of Solidification Research, XI' AN INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SOLIDIFICATION, (Invited talk), 2007.5.29, Xi'an, China

6) I.Ohnaka, A.Sugiyama, J.Zhu, T.Murakami, Recent Development and Challenges of CAE in Casting, 査読有、*Proc. Modeling of Casting and Solidification Processes VII*, (2007), p.3-8 (Invited talk), 2007.8.19, Dalian, China

7) 杉山明、芳浦良治、小西邦彦、大中逸雄、新しい高真空ダイカスト法の基礎的検討、日本鋳造工学会第150回全国講演大会(2007.5)

[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]

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

大中逸雄 ( OHNAKA ITSUO)

大阪産業大学・工学研究科・客員教授

研究者番号 00029092

##### (2) 研究分担者

杉山 明 (SUGIYAMA AKIRA)

大阪産業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 10335375

##### (3) 連携研究者

安田 秀幸 (YASUDA HIDEYUKI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号 60239762

柏井 茂雄

兵庫県立工業技術センター・材料技術部・部長

兼吉 高宏

兵庫県立工業技術センター 技術企画部・主任研究員