

平成21年 5月 8日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19560112

研究課題名（和文）アルミニウム合金への抵抗加熱半溶融鍛造応用展開のための高精度液相率制御技術の確立

研究課題名（英文）Establishment of Accurate Liquid Phase Fraction Control Method for Extensive Application of Aluminum Alloys to Semisolid Forging Using Resistance Heating

研究代表者 牧 清二郎（MAKI SEIJIRO）

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：20124315

研究成果の概要：

半溶融鍛造では、加工の成否と製品性状に液相率が大きく左右する。そのため、液相率の制御はきわめて重要である。本研究では、半溶融加熱に必要なデータを得る示差熱分析に工夫を行ない、溶融開始温度と完了温度のほか、半溶融温度域での液相率の温度変化の測定を可能とした。これにより、抵抗加熱での投入電力量と液相率の関係付けが温度を介して可能になり、実用アルミニウム合金の抵抗半溶融加熱における液相率の高精度な制御が可能になった。

交付額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2007年度 | 2,800,000 | 840,000 | 3,640,000 |
| 2008年度 | 700,000 | 210,000 | 910,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：塑性加工

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：半溶融鍛造、抵抗加熱、液相率制御、アルミニウム合金、示差熱分析

1. 研究開始当初の背景

(1) 半溶融鍛造は、液相の存在によって流動抵抗が著しく減少するので、通常の固体状態での鍛造に比べ加工力を大幅に低減できる利点がある。一方、鍛造に比べ液相の量が少ないので、凝固収縮が小さく、鍛造に比べ欠陥の少ない成形品が得られる。このように鍛造と鍛造の中間的な加工法である半溶融鍛造は、通常の鍛造より、より複雑形状で、鍛造よりより欠陥の少ない成形品が得られる加工法として注目されている。

(2) アルミニウム合金に対する半溶融鍛造

の適用に限って言及すれば、現状では、組成がJIS規格のAC4Cに近いA357のみである。これは、この材料の半溶融鍛造に適切な液相率が加熱温度によって比較的容易に得られるためであり、その組織も半溶融鍛造に適したものに調整されている。

(3) アルミニウム合金でも半溶融温度域の広い合金では、液相率を温度によって制御することも可能であるが、温度域の狭い合金では、温度による制御が難しい。純金属や共晶組成の2元共晶合金では半溶融温度域が存在しないので、温度による液相率の制御は理

論的に無理である。

(4) 直接通電による抵抗加熱では、温度による液相率の制御が困難な材料に対しても投入電力量による液相率の制御が可能であるため、抵抗加熱を素材加熱に利用する半熔融鍛造法の開発が行なわれている。この方法では、鍛造金型内で素材を所定の液相率に抵抗加熱し、加熱完了と同時に鍛造を行うので、現行法での半熔融素材の加熱炉から鍛造プレスへの搬送が不要という利点がある。

(5) アルミニウム合金に限られるわけではないが、半熔融鍛造では鍛造時の液相率が加工の成否を支配し、製品性状に大きく影響する。したがって、液相率の高精度な制御方法の確立は品質の安定確保に欠かせない。

(6) 現状のアルミニウム合金の半熔融鍛造は適用材料が A357 合金 (JIS 規格 AC4C にほぼ相当) に限られている。これは液相率を温度で制御しているためであり、逆共晶反応直上の温度に加熱することで、この材料の半熔融鍛造に適した液相率が得られることによる。しかし、このような温度制御に固執する限り、アルミニウム合金における半熔融鍛造の応用は限られる。これに対し、投入電力量で液相率が制御可能な抵抗加熱を利用する半熔融鍛造法は、適用材料に何ら制限を課さない。したがって、その応用展開は無限といえる。しかしながら、抵抗加熱において液相率を高い精度で制御する具体的方法が確立されていない。

2. 研究の目的

加熱時間の短い抵抗加熱では、投入電力量によって加熱温度の制御ができることは言うまでもなく、温度では液相率の制御が困難な半熔融温度域の狭い合金での液相率の制御も原理的に可能である。しかし、その具体的な方法については、現在のところ、確立されていない。そこで本研究では、抵抗加熱を利用するアルミニウム合金の半熔融鍛造での高精度な液相率制御方法の確立を最終目標に、以下に示す 2 方法について実験を行い、投入電力量と液相率の関係付けの方法を検討し、その確立を目指した。

(1) 丸棒試験片の抵抗加熱による直接的な投入電力量と液相率の関係付け

(2) 液相率と加熱温度の関係、加熱温度と投入電力量の関係から、温度を介しての間接的な投入電力量と液相率の関連付け

3. 研究の方法

半熔融鍛造素材の液相率と投入電力量の関係が明らかになれば、抵抗加熱による液相率の制御が可能になる。そこで丸棒試験片を用い、抵抗加熱によって試験片の加熱を行い、

試験片の電気抵抗率を測定し、電気抵抗率と液相率の関連付けから液相率と投入電力量の直接的関係付けが可能か、実験により検討した。しかし、この当初計画の方法では、試験片に流す大電流によってピンチ効果が現れ、それによって試験片に破断が生じ、およそ 10% までの低い液相率に対してしか、液相率と投入電力量の関係付けができなかった。

半熔融温度域の特定には、通常、示差熱分析が利用されるが、この示差熱分析において液相率の温度変化が測定できれば、抵抗加熱での加熱温度と投入電力量の関係を調べることは容易であるので、温度を介して、液相率と投入電力量の関係付けが可能になる。そこで、示差熱分析に、その原理に基づいた工夫を行い、示差熱分析から半熔融温度域での液相率の温度変化が測定できないか、典型的な実用アルミニウム合金に対して実験を行い、各合金について半熔融温度域と液相率の温度変化を調べた。また、工夫した示差熱分析で得られる液相率の温度変化が妥当なものであるか、示差熱分析実験に並行して電気抵抗率の温度変化を測定し、示差熱分析によって得られた液相率の温度変化から推定される電気抵抗率と比較した。以下に、示差熱分析による液相率の温度変化の測定と示差熱分析で得られた液相率の温度変化が妥当なものであるか検証するために行った電気抵抗率の温度変化の測定について、その方法を述べる。

(1) 示差熱分析による液相率の温度変化の測定

示差熱分析は、物質の変態に伴う熱の出入りを参照試料との温度差の変化として捉え、変態点の特定に用いられる一般的な熱分析法であり、半熔融温度域の決定に対しても有用な方法である。もし、この示差熱分析において、変態にともなう熱の移動量を定量的に捉えることができれば、半熔融温度域での液相率の温度変化の測定も可能になると考える。以下に、その根拠について説明する。

図 1 に、固体の金属材料が溶け始め、やがて完全に溶けて、液体になるあたりまでの示差熱分析での試料、参照試料、試料まわりの温度の時間変化 (図 (a))、試料と参照試料の温度差の時間変化 (図 (b))、温度差の試料温度に対する変化 (図 (c)) を模式的に示す。示差熱分析では図 (c) での特異点から試料の変態点を特定するが、熔融にともなう吸熱で生じる温度差とそのときの熱移動を考えると、図 (b) の固体および液体状態での温度差 ΔT は試料の固体および液体状態での比熱に關係するものであり、固体状態と液体状態を

結んだ図中の破線と温度差 ΔT との差 $\Delta T'$ は溶融潜熱に関係したものとイえる。もし、半溶融温度範囲において熱伝達率を一定とみなすことができれば、半溶融温度域内の温度 T における液相質量率 $f_L(T)$ は次式で与えられる。

$$f_L(T) = \frac{\int_{t_s}^t \Delta T'(t) dt}{\int_{t_s}^{t_L} \Delta T'(t) dt} \quad (1)$$

ここで、 t 、 t_s 、 t_L は試料が温度 T 、固相線温度（溶融開始温度） T_s 、液相線温度（溶融完了温度） T_L にそれぞれ達した時刻である。

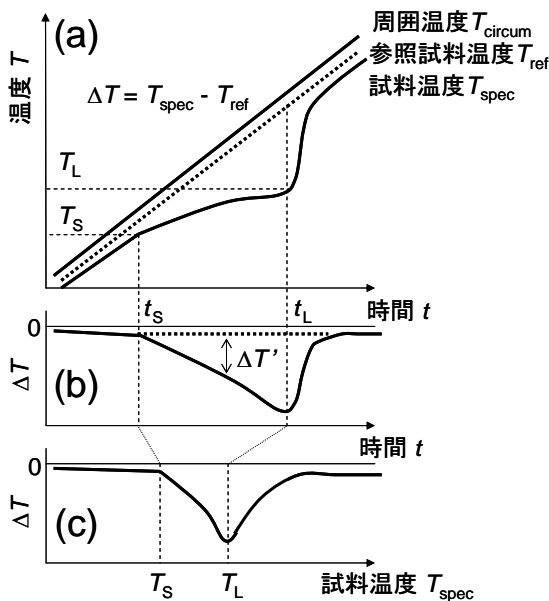


図1 示差熱分析における(a)試料、参照試料、周囲の温度の時間変化、(b)試料と参照試料の温度差の時間変化、(c)温度差の試料温度に対するプロット

以下に、示差熱分析実験に用いた装置と方法について述べる。

図2に、実験に用いた装置の試料まわりの様子を示す。純銅の円柱ブロック（直径30、高さ35）にSUS304製の試料ホルダー（外径10、内径9.4、長さ20、底厚1）が納まるポケット（直径10.3、深さ25）を2つ設け、1つの試料ホルダーには測定試料であるアルミニウム合金（直径9、長さ12）、もう1つには参照試料として純銅（直径9、長さ12）を入れた。なお測定試料と参照試料の上端面には、中心に直径0.7のドリル穴を深さ3mmあけ、そこに線径0.1のK種熱電対を差し込んだ。このようにして試料をセットし、ポケットを純銅の蓋（直径30、厚さ8）で塞いだ後、円柱ブロック本体を一端封じの石英管に

入れ、真空に引いた後、外から電気炉にて一定速度で昇温し、試料温度、参照試料温度、試料と参照試料の温度差を、一定の時間間隔で測定し、データをパソコンに取り込んだ。

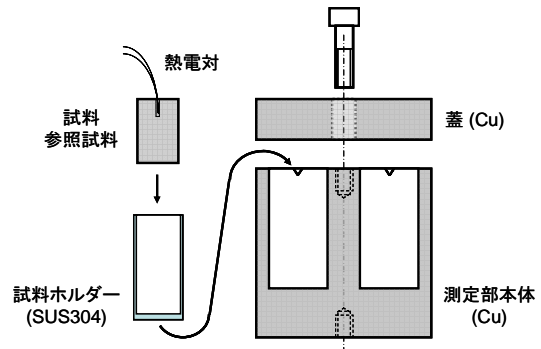


図2 示差熱分析実験装置の試料まわりの模式図

(2) 半溶融状態における電気抵抗率の温度変化の測定

金属の電気抵抗率は固体状態と液体状態では2倍ほどの違いがあるため、半溶融温度域で液相率が変化すれば、それは電気抵抗率の変化として現れる。つまり電気抵抗率の温度変化は液相率の温度変化を反映しているといえる。しかし半溶融状態の電気抵抗率は、同じ液相率でも、固体と液体の分布形態により異なる。ここで、固相と液相が層状に分布していると仮定して、電流が層に対して垂直に流れる場合（直列）と平行に流れる場合（並列）の電気抵抗率 ρ_{SS} について考えると、それは、液相体積率 f_L に対して、つぎのように与えられる。

$$\text{直列の場合} \quad \rho_{SS} = f_L \rho_L + (1 - f_L) \rho_S$$

$$\text{並列の場合} \quad \rho_{SS} = \frac{\rho_L \rho_S}{(1 - f_L) \rho_L + f_L \rho_S}$$

ここで、 ρ_S 、 ρ_L はそれぞれ固相と液相の電気抵抗率である。

図3に、液相の電気抵抗率が固相のその2倍であると仮定して求めた半溶融状態での電気抵抗率の液相体積率による変化を示す。固相と液相が層状に分布していると仮定しても、それに流れる電流の方向（直列と並列）によって、液相率による電気抵抗率の変化が異なる。直列と並列のモデルは両極端であり、実際の電気抵抗率は両者の中間にあると考えられる。そこで、両者の相加平均と相乗平均での変化も示した。相加平均と相乗平均での変化は、相対誤差1%以下で、ほとんど同じであり、大差がない。固相が液相中に分散していると仮定した場合も、図には示していないが、その変化はほぼ相加平均あるい

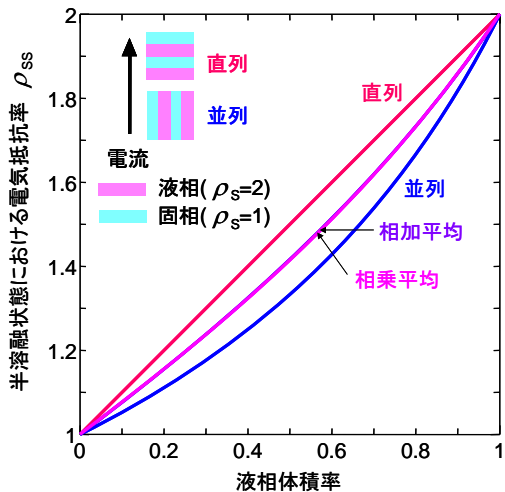


図3 半溶融状態における電気抵抗率の液相体積率による変化

は相乗平均と同じである。

示差熱分析から得られる液相率の温度変化が妥当なものであるか検証するために行った半溶融状態での電気抵抗率の実測値と液相率からの推定値の比較においては、液相率からの電気抵抗率の推定を、以下の仮定のもとで行った。①半溶融状態の電気抵抗率は、固相と液相は層状構造をとり、それらが電気的に直列回路と並列回路を構成してとしたそれぞれの電気抵抗率の相加平均で与えられる。②固相と液相の密度は同じ、すなわち液相質量率は液相体積率に等しい。③半溶融状態での固相と液相の電気抵抗率は、それぞれ、半溶融温度域前後の固体および液体状態の電気抵抗率の半溶融温度域への直線外挿で与えられる。

以下に、半溶融状態での電気抵抗率の測定実験に用いた装置と方法について述べる。図4に、電気抵抗測定部の模式図を示す。溶融しても試験片の形状を保つべく、透明石英管（内径3.6、長さ45）に丸棒試験片（直径3.50~3.53、長さ40）を入れる構造とした。電圧検出端子間距離は30mmとし、石英管に直径0.7の穴をあけ、そこから試験片にもあけた直径0.7の穴に線径0.2のK種熱電対を差し込み、試験片の温度と電気抵抗測定のための電圧を測定した。電気抵抗測定用の電流は試料の両端に直径3.5mmの純ニッケルの丸棒をばねで押し付け、そこから2.0Aの直流電流を流した。このように準備した測定部を一端封じの石英管に入れ、真空に引き、電気炉にて一定の昇温速度で加熱しながら、2箇所熱電対で試験片の温度と、熱電対の同種の線材間に生じる電圧を一定の時間間隔で測定し、データをパソコンに取り込んだ。

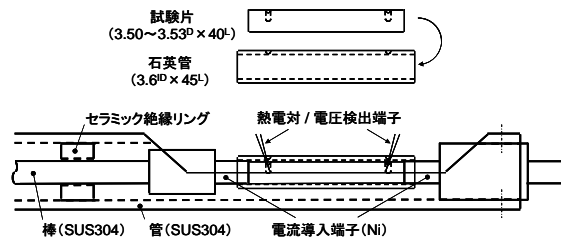


図4 電気抵抗測定部の模式図

4. 研究成果

(1) 工夫した示差熱分析による液相質量率の温度変化の測定例

図5に、半溶融鍛造用アルミニウム合金A357（組成はAl-Si 亜共晶合金をベースとするJIS規格のAC4Cに近い）に対する測定結果を示す。試料と参照試料の温度差の試料温度に対するプロット（図(a)）からは、固相線温度（溶融開始温度） T_s を560°C、液相線温度（溶融完了温度） T_L を615°Cと特定できるが、577°Cも特異点として捉えられる。図5(b)は温度差を経過時間に対してプロットしたものである。これに式(1)を適用すると、図(a)に示す液相率の温度変化が得られる。2元合金ではないので逆共晶反応は、一定の温度でなく、特異点として捉えられた577°Cまでの温度範囲で起っている。液相率は、約45%までは温度に対して急激な増加を、その後は緩やかな増加を示している。

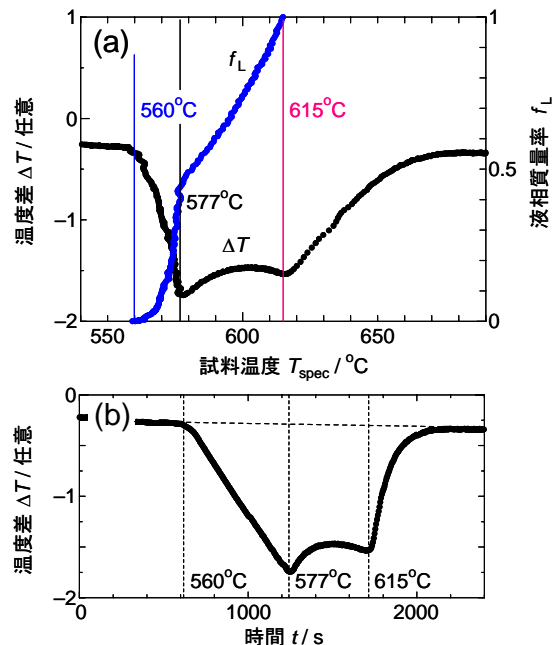


図5 A357合金の示差熱分析結果

図6に、A5056での測定結果を示す。共晶反応は関与しないので、試料と参照試料の温

度差の試料温度に対するプロットも比較的単調で、固相線温度 T_S は 573°C 、液相線温度 T_L は 633°C と特定できる。この合金の液相率の温度変化は、溶融初期の段階では緩やかで、完了に向かって急になっている。この挙動は、A5056 がベースとする Al-Mg 2 元状態図から予想される挙動とも定性的に一致する。

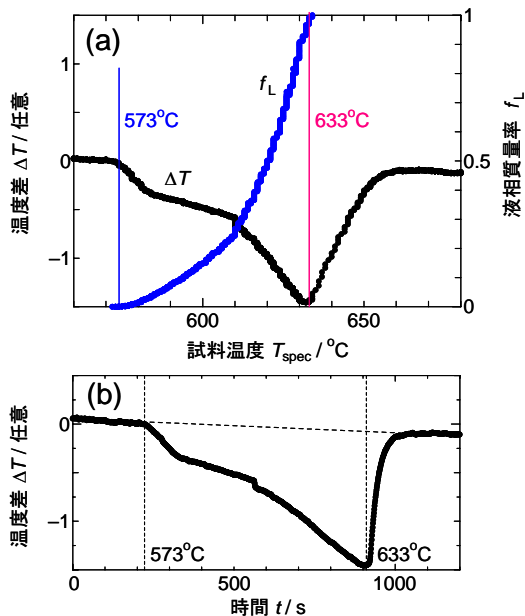


図6 A5056 合金の示差熱分析結果

表 1 に、示差熱分析によって測定された幾つかの実用アルミニウム合金に対する半溶融温度域を示す。JIS 規格の実用合金といえども組成に許容幅があるので、半溶融温度域は文献値と完全には一致していないが、ほぼ文献値と同じである。

表1 示差熱分析によって測定されたアルミニウム合金の半溶融温度域

| アルミニウム合金 | 半溶融温度域(°C) | |
|----------|------------|---------|
| | 実測値 | 文献値*) |
| A1070 | 643-656 | 646-657 |
| A2017 | 513-642 | 513-640 |
| A5056 | 573-633 | 568-638 |
| A6061 | 585-650 | 582-652 |
| A7075 | 535-632 | 532-635 |

* : アルミニウムの組織と性質, 軽金属学会

(2) 液相率から推定した電気抵抗率と実測値との比較

図 7 に、A357 での液相率の温度変化から推定された電気抵抗率の温度変化(実線)と実測値(破線)との比較を示す。両者は良い一致を示している。

図 8 に、A5056 での比較を示す。この場合

も、両者の一致はかなり良い。

これらの結果は、示差熱分析で得られる液相率の温度変化が妥当なものであることを示しているといえる。

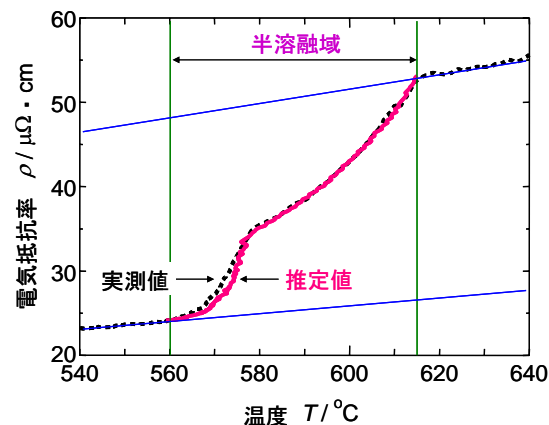


図7 A357 での電気抵抗率の推定値と実測値の比較

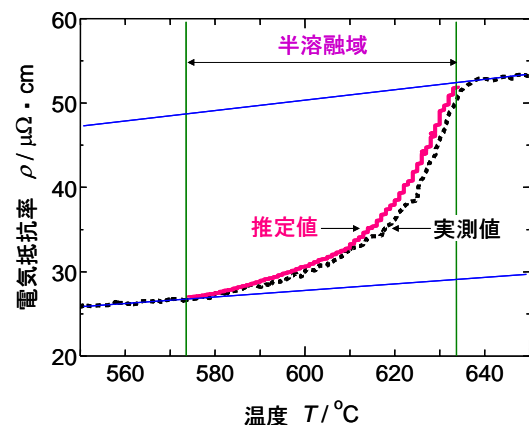


図8 A5056 での電気抵抗率の推定値と実測値の比較

(3) まとめ

以上に述べた実験的研究を通して、アルミニウム合金素材の抵抗半溶融加熱における液相率制御の高精度化に対してきわめて有用な、下記の知見を得ることができた。

① 物質の変態点の特定に一般的に用いられている示差熱分析での収録データの整理を工夫することにより、被試験体の溶融開始温度および溶融完了温度に加えて、半溶融温度域での液相率の温度変化の測定も可能である。

② ①の知見により、示差熱分析によって半溶融鍛造素材に対する液相率の温度依存性がわかるので、具体的な素材の抵抗加熱における投入電力量の利用効率を予め調べておき、これを考慮した投入電力量の設定を行うことで、所望の液相率の半溶融素材を抵抗加熱で得ることができる。具体的には、つぎのよ

うに投入電力量を設定する。半熔融温度域が広い素材に対しては、液相率と加熱温度の関係が既知であるので、所望の液相率の加熱温度が得られる値に設定する。また、半熔融温度域が狭い素材に対しては、前記の方法では、加熱温度が少し変化しても液相率が大きく変化するので、この場合には、素材を熔融開始温度（液相率 $f_L = 0$ ）と熔融完了温度（ $f_L = 1$ ）にそれぞれ加熱するのに必要な投入電力量を予め調べておき、半熔融温度域が狭い場合には、比熱に比べ熔融潜熱が支配的になるので、液相の生成量は入熱量に比例するとして、所望の液相率が得られる値に設定する。

本研究によって得られた①の知見は、アルミニウム合金の半熔融加熱に不可欠な半熔融温度域と液相率の温度変化が1回の示差熱分析で容易に求まることを示しており、きわめて簡便な方法が開発されたといえる。これにより液相率の把握がきわめて容易になることから、半熔融加工における製品性状への液相率の影響も調査し易くなり、実用アルミニウム合金への半熔融加工の拡張的応用が期待される。

なお、これらの成果は、平成 20 年度および平成 21 年度塑性加工春季講演会の講演論文としてまとめて公表するとともに、半熔融・半凝固のセッションにて口頭発表した。

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 2 件）

- ① 牧清二郎，アルミニウム合金半熔融鍛造のための液相率と温度の関係の簡易測定，平成 21 年度塑性加工春季講演会講演論文集，pp. 163-164，2009，査読無．
- ② 牧清二郎，江口健太，中西栄徳，アルミニウム合金の抵抗加熱半熔融鍛造における液相率の制御，平成 20 年度塑性加工春季講演会講演論文集，pp. 9-10，2008，査読無．

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 牧清二郎，アルミニウム合金半熔融鍛造のための液相率と温度の関係の簡易測定，平成 21 年度塑性加工春季講演会，京都大学，平成 21 年 5 月 29 日～31 日．
- ② 牧清二郎，江口健太，中西栄徳，アルミニウム合金の抵抗加熱半熔融鍛造における液相率の制御，平成 20 年度塑性加工春季講演会，日本大学生産工学部（津田沼キャンパス），平成 20 年 5 月 23 日～25 日．

6. 研究組織

(1) 研究代表者

牧 清二郎 (MAKI SEIJIRO)
三重大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：20124315

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし