

平成24年度戦略的基盤技術高度化支援事業

2磁軸攪拌溶湯による砂型鋳物品の
高強度化の研究開発

研究開発成果等報告書

平成25年3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 公益財団法人新産業創造研究機構

目 次

第 I 編 概要

第 1 章 研究開発の概要	・・・	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標（高度化目標、技術的目標）	・・・	1
1) 研究の目的	・・・	1
2) 研究の目標	・・・	1
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	・・・	6
1) 研究組織（全体）	・・・	6
2) 管理体制	・・・	6
3) 管理員及び研究員	・・・	7
4) アドバイザー委嘱委員の所属、氏名	・・・	7
1-3 成果概要	・・・	7
1-4 当該プロジェクト連絡窓口	・・・	10

第 II 編 本論

第 1 章 アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）の開発	・・・	11
1-1 熱伝導シミュレーションの実行	・・・	11
1-2 検証実験	・・・	12
第 2 章 半凝固スラリー生成条件の確立	・・・	14
2-1 電磁攪拌の最適化	・・・	14
2-2 アルミ合金材料の影響把握	・・・	14
第 3 章 CAE 解析・特殊鋳型設計技術・鋳造技術の確立	・・・	14
3-1 CAE を用いた湯流れ解析による特殊鋳型設計技術の確立	・・・	14

3-1-1	解析条件のためのデータ収集	・・・	14
3-1-2	湯流れシミュレーションによる金型方案の考察	・・・	15
3-1-3	最適金型形状の確定	・・・	16
3-2	CAEを用いた凝固解析による鑄造条件の確立	・・・	18
3-2-1	凝固シミュレーションによる最適条件の考察	・・・	18
3-2-2	砂型、金型を用いた半凝固鑄造実験と金型改良	・・・	19
第4章	鑄造機設備に関する開発	・・・	20
4-1	溶湯2磁軸電磁攪拌装置	・・・	20
4-2	溶湯2磁軸電磁攪拌カップ移送装置の開発	・・・	20
4-3	カップ内半凝固溶湯注湯装置	・・・	21
第5章	鑄造品評価	・・・	21
5-1	熱処理（T6）温度、時間の確認	・・・	21
5-2	熱処理（T6）による強度比較確認	・・・	21
5-3	合金別熱処理（T6）条件研究	・・・	22

最終章 全体総括

1.	3年間の研究開発成果	・・・	24
2.	研究開発後の課題・事業化展開	・・・	24

第 I 編 概要

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 (高度化目標、技術的目標)

1) 研究の目的

本研究開発は、ものづくり基盤技術の中の「鋳造に係わる技術」に関するものである。「半凝固」は、アルミ鋳造品の高強度化達成技術であるが、流動性が低く、複雑形状の金型への湯流れ性も悪く、肉厚も大きなものになる。そこで、「電磁攪拌」で流動性を良好な状態にする技術を用いるが、本技術開発では、従来の 2 次元的な 1 磁軸の攪拌技術を進化させた縦軸の攪拌も行えるような「2 磁軸攪拌技術」を特徴とする半凝固法により砂型鋳造への適用を実証開発することを目的とする。

自動車、工作機械（ロボット等）が、川下産業のニーズであり、以下のニーズを対象として、研究開発、及び事業化を進める。

1-1-1) 自動車に関する事項

自動車産業では、環境や安全問題への対応から車体の軽量化と高信頼性が求められている。その結果、鋳造部品に対しても、より「高強度化」して高耐圧性を持つ製品が求められている。また、従来の低圧鋳造法では生産性が悪く、通常のダイカストでは空気の巻き込み欠陥が発生し、強度、耐圧性が低い。このため、ダイカスト法と同様の生産性で T6 熱処理（JIS H 0001:1998. 450~550℃での溶体化処理後人工時効硬化処理（120℃ x 24 h r）したもの）可能な高強度製品、高耐圧（2.4 MPa 以上）製品が求められている。

また、シェル中子や置き中子を使用して「複雑形状化」に対応した製品が求められており、微細化組織で薄肉・「軽量化」も目標となる。

1-1-2) 工作機械に関する事項

ロボット産業では、軽量化は、駆動モーターの高効率化、コンパクト化が可能となる。軽量部品であれば、装置駆動部の効率が向上し、省エネ化が推進できる。また、「高剛性化」により、従来出来なかった「高機能化」という付加価値とコンパクト化につながる。その他、流動性の良好な半凝固状態の溶湯を用いることにより「複雑形状化」を得意とする砂型鋳造法への適用が可能となり、流動性改善から、インサート鋳造、鋳ぐるみ製品など「一体成型化」に対するニーズへの対応が期待できる。

本研究開発では、上記ニーズを背景として、従来の半凝固鋳造法の微細組織による高強度の特長を活かしつつ、従来より効果的な電磁攪拌技術を特徴として湯流れ性を向上し、砂型鋳造法を中心として技術開発してその性能、有効性を実証し、即効性の高い技術開発を遂行する。

2) 研究の目標

ロボット部品用鋳物や建設重機、船舶関係メーカーより、強度があつて、今より軽い鋳物が必要というニーズがある。高強度・極軽量鋳物化は、装置全般の軽量化につながり、省エネ・高効率化につながる重要な開発テーマである。半凝固研究から 2 磁軸で磁場をかけると合金の組織が変化し、液相状態で鋳型に流し込むと、部品強度が変わる事を発見した。今回、縦横 2 磁軸攪拌した軽合金溶湯による砂型鋳造技術を開発するため、下記の項目を実施する。

- ① アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）の開発
 - ①-1 熱伝導シミュレーションの実行
 - ①-2 検証実験
- ② 半凝固スラリー生成条件の確立
 - ②-1 電磁攪拌の最適化
 - ②-2 アルミ合金材料の影響把握

- ③ CAE(Computer Aided Engineering) 解析・特殊砂型、金型設計技術・鋳造技術の確立
 - ③-1 CAE を用いた湯流れ解析による特殊金型設計技術の確立
 - ③-1-1 解析条件のためのデータ収集
 - ③-1-2 湯流れシミュレーションによる金型方案の考察
 - ③-1-3 最適金型形状の確定
 - ③-2 CAE を用いた凝固解析による鋳造条件の確立
 - ③-2-1 凝固シミュレーションによる最適条件の考察
 - ③-2-2 砂型、金型を用いた半凝固鋳造実験と金型改良
- ④ 鋳造機設備に関する開発
 - ④-1 溶湯 2 磁軸電磁攪拌給湯装置
 - ④-2 溶湯 2 磁軸電磁攪拌カップ移送装置
 - ④-3 カップ内半凝固溶湯注湯装置
- ⑤ 鋳造品評価
 - ⑤-1 熱処理 (T 6) 温度、時間の確認
 - ⑤-2 熱処理 (T 6) による強度比較確認
 - ⑤-3 合金別熱処理 (T 6) 条件研究

< 鋳造製品としての具体的最終目標値 >

(1) ロボット部品

- ① 靱性向上： 引張強さ向上:従来砂型鋳造品の 50%以上(350MPa から 400MPa 程度)
- ② 軽量化： 従来砂型鋳造品の 30%以上(50g なら 35g に)
- ③ コスト： 従来砂型鋳造品と同等価格

(2) 鋳造設備の能力

- ① 給湯生産率： 従来鋳造法の生産効率現状より 30%アップ
(30sec/1 サイクル生産なら 20sec へ)
- ② 作業効率： 作業者作業効率汲み湯から注湯完了まで作業現状より 30%アップ
- ③ 溶解温度低下により、溶解エネルギー・エネルギー効率 30%アップ

以下、本年度の実施項目ごとに、内容を詳述する。

① アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）の開発

(国立大学法人東北大学、有限会社ティミス)

金属製のカップに溶解したアルミ合金を注ぎ、電磁攪拌をすることで半凝固スラリー（液相と固相が共存した状態）が製造できる。この半凝固スラリーの性質は、カップの形状や肉厚に大きく影響される。本開発では、半凝固スラリーの液相率分布などに及ぼす各種製造条件（時間、温度）の影響を明らかにするための簡便な熱伝導シミュレーション及びその検証実験などによって、カップ形状の最適化を可能とする設計法を開発する。

①-1 熱伝導シミュレーションの実行

凝固スラリーの中での平均液相率と金属カップの熱容量、アルミ合金溶湯の熱容量の関係などを数値解析する。金属カップの材質、形状（内径・肉厚・高さ）と半凝固スラリーの状態（平均液相率）の関係を類推できる設計技術を確立する。

最終目標としては、

- ・カップの形状、材料： 5 種類

の検討を行う。

本年度は、最終目標の 5 種類のカップ形状、材質の検討を完了する。初年度に作成した熱伝導シミュレーションプログラムを用いて、昨年度実施した 3 種類のカップ形状の計算結果を踏まえて、更にカップ形状及び材質をパラメータとし、今年度は 4 種類、3 年間の合計で 5 種類以上について計算を実施する。

①-2 検証実験

ステンレスなどを使用して形状は異なる数種の金属カップを試作し、半凝固スラリーの生成実験

を行い、適切な固相率分布の得られるカップ形状を確定し、以降の実験に活用する。

最終目標としては、

- ・ 5種類のカップについて選別、確認実験を行うこととする。

本年度は、上記の項目で実施した熱伝導シミュレーション計算に基づき製作した追加の1種類の形状・材質のカップについて実験検証を行い、シミュレーションの妥当性を本分野に詳しいアドバイザー委員の協力を得ながら、評価検討し、必要に応じて次年度以降の見直しに反映する。

② 半凝固スラリー生成条件の確立

(国立大学法人東北大学、有限会社ティミス)

高品質な半凝固スラリーの生成条件を確立することが要求される。この高品質な半凝固スラリーとは、スラリー全体において液相の分布が均一で、かつ組織が微細で初晶 α （初めに現れる結晶核）の粒径が $50\mu\text{m}$ 以下の事をさす。

この要求には、①のカップ形状の最適化をふまえ、アルミ合金の組成の影響、カップ内容湯の電磁攪拌条件などの高度化検討を行う事で高品質半凝固スラリー生成条件を確立する。

最終目標としては、

- ・ 2磁軸攪拌性能を確認すること
- ・ 半凝固溶湯は5kg以上製造出来る事を確認すること
- ・ 目標合金最適カップの製作

を完遂することとする。

②-1 電磁攪拌の最適化

従来の電磁攪拌方法では、半凝固スラリーの性状、マイクロ組織などと電磁攪拌の相関関係は、あまり定量化はなされていない。カップ内に注湯された溶湯に加える回転電磁攪拌で半凝固スラリーの均質化を図ってきている。しかし、対流による攪拌効果の低下、熱拡散の効果の低下、冷却速度の低下、などで半凝固スラリーのアルミ初晶の粗大化などで、均一なマイクロ組織が得られにくいなどの問題が多かった。

最終目標としては、

- ・ 合金に対して、パラメータを3条件変化

させて確認を行い、上記の問題を究明し、電磁攪拌の最適化を行う。

本年度は、事業化のためのユーザーへの説得力あるデータ蓄積を図るため、合金に対して、パラメータを2条件以上変化させ、半凝固スラリーの性状マイクロ組織への影響を実験評価する。

②-2 アルミ合金材料の影響把握

最終目標としては、

- ・ 5種類の合金材料

にて確認を行い、上記の問題を究明し、電磁攪拌の最適化を行う。

本年度は、これまでの合金種類の影響をまとめ、事業化のためのユーザーへの説得力あるデータ蓄積を図るため、必要に応じて種類を追加して、3年間の通算で5種類以上の合金に対して、攪拌条件の半凝固スラリーの性状マイクロ組織への影響を実験評価する。

③ CAE解析・特殊鋳型設計技術・鋳造技術の確立

(国立大学法人東北大学、株式会社小林合金)

一般のアルミダイカスト鋳造やグラビティ鋳造では、鋳造CAEソフトを使用して高品質鋳造部品を得るための湯流れ解析が行われている。しかし、半凝固鋳造法の解析事例は少ない。本研究開発では、湯流れ解析および凝固解析を以下の項目で実行する。

③-1 CAEを用いた湯流れ解析による特殊鋳型設計技術の確立

③-1-1 解析条件のためのデータ収集

最終目標としては、型3種（形状を変える）についてデータ収集を行うこととする。

本年度は、温度条件を中心として、攪拌条件の半凝固スラリーの性状、マイクロ組織への影響を実験評価し、シミュレーションの精度向上、適用範囲の拡張に寄与し、ソフトの実用性を高めることにより、今後の事業化展開に有利となるようなデータ蓄積を図る。

③-1-2 湯流れシミュレーションによる金型方案の考察

各種の湯口方案、湯溜まり、ガス抜き位置・形状・大きさ等、CAEを用いて最適方案を考察

する。

最終目標としては、

- ・テスト試験片の金型

にて方案を検討することとする。

本年度は、昨年度に実施したテスト試験片用の金型の成果を参考に、更なる改良のための設計を実施し、1種以上の金型試作に実験評価し、試作サンプルを完成し、事業化PR活動のための展示品などを製作する。

③-1-3 最適金型形状の確定

上記の考察から、最適形状の金型を試作し、以降の研究に使用する。

最終目標として、代表的な製品で確認することとする。

本年度は、上記項目で設計したテスト試験片用の金型1種以上を試作し鑄造実験に用いて、鑄造試作により湯流れ性能等を評価し、シミュレーション技術にフィードバックして、ソフトの改善とともに、金型設計技術の向上に反映させる。

③-2 CAEを用いた凝固解析による鑄造条件の確立

上記シミュレーションを基に鑄造実験を行ない不良率0.1%以下を目標とする。半凝固鑄造法での最適な金型設計技術と鑄造条件などを確立し、鑄造欠陥が殆どなく、薄肉でも十分な強度を持った鑄造技術を提供する。

最終目標としては、

- ・砂型半凝固溶湯流体係数確認
- ・合金別湯流れ係数確認
- ・最適砂型方案確認

を行うこととする。

③-2-1 凝固シミュレーションによる最適条件の考察

最適砂型、金型に対する最適条件を考察し、鑄造実験につなげるため、2年度目において、現在製作品を対象として、前記の項目を確認する。

本年度は、昨年度に収集した砂型鑄造特有の伝熱係数などの物性データ、検討した境界条件を凝固シミュレーション用プログラムに適用し、砂型半凝固溶湯流体係数、合金別湯流れ係数、最適砂型方案について、確認し、シミュレーション技術にフィードバックして、ソフトの改善に反映させる。

③-2-2 砂型、金型を用いた半凝固鑄造実験と金型改良

同上の内容について、現在製作部品の不良対策品を対象として、前記の項目を確認する。

④ 鑄造機設備に関する開発

(有限会社ティミス、株式会社小林合金)

半凝固鑄造法で製造する砂型鑄造の鑄造自動化設備に関して、電磁攪拌された半凝固溶湯をスムーズに注湯出来る装置、及び溶湯を電磁攪拌装置に給湯など、電磁攪拌された溶湯の温度低下ロスのない鑄造設備を開発する。

最終目標としては、現在の作業時間、重量運搬、安全性の向上 効率・安全率の30%以上の向上を図る。

④-1 溶湯2磁軸電磁攪拌給湯装置の開発

溶解・保持炉から保温状態で汲み出した溶湯を、装置内スラリーカップで給湯する装置、給湯時間、スラリーカップコーティング材などの確認を行う。

本年度は、初年度に製作した「溶湯2磁軸電磁攪拌給湯装置」を安定的に実験に使用し、実用レベルの信頼性を実証する。

④-2 溶湯2磁軸電磁攪拌カップ移送装置の開発

溶解・保持炉から保温状態で汲み出し、移動を行う装置であり、柄杓温度、柄杓コーティング材、移動時間などの基本的条件と再現性が可能な装置を開発する。最大容量30kgの溶湯に対応した装置とする。

本年度は、初年度に製作した「手動式鑄込み注湯取出装置」を安定的に実験に使用し、実用レベルの信頼性を実証する。

④-3 カップ内半凝固溶湯注湯装置の開発

攪拌された半凝固溶湯を、最適な状態で砂型に注湯する装置であること。スラリーカップの保温性を維持し、溶湯が凝固しない状態を維持するための温度、注湯時間などの確認をする。最大容量 30kg の溶湯に対応した装置とする。

本年度は、「半凝固カップ冷却装置」を試作し、「カップ内半凝固溶湯注湯装置」の調整・運転をアルミ結晶組織のよりマイクロなレベルの調整が可能な装置システムに改造し、安定的に実験に使用できるようにし、実用レベルの信頼性を実証する。

⑤ 鑄造品評価

(国立大学法人東北大学、有限会社ティミス、株式会社小林合金)

鑄造品に熱処理をして、強度が更に向上するが、熱処理によっては強度以外の性能が変わる可能性があり、引張り試験などの評価も行い、熱処理技術の最適化、製品品質確保の条件検討を行う。鑄造製品としての具体的な最終目標は、下記の通りである。

a. ロボット部品

- ・ 靱性向上： 従来砂型鑄造品の 50%以上
- ・ 引張強さ向上： 従来砂型鑄造品の 50%以上 (350MPa から 400MPa 程度)
- ・ 軽量化： 従来砂型鑄造品の 30%以上 (50g なら 35g に)
- ・ コスト： 従来砂型鑄造品と同等価格

b. 鑄造設備の能力

- ・ 給湯生産率： 従来鑄造法の生産効率現状より 30%向上
(30sec/1 サイクル生産なら 20sec へ)
- ・ 作業効率： 作業者作業効率汲み湯から注湯完了まで作業現状より 30%向上
- ・ 溶解エネルギー・エネルギー効率： 30%向上。

⑤-1 熱処理 (T 6) 温度、時間

熱処理時間、焼き入れ時間は、T 6 処理では決まっているが、半凝固溶湯でのデータは調査されていない。時間、温度、焼き入れに対して研究開発する。

最終目標としては、3 合金にて確認することとする。

本年度は、昨年度に製作した「熱処理炉」装置を用いて、合金 2 種類について、実験確認する。

⑤-2 熱処理 (T 6) による強度比較確認

温度、時間、焼き入れ条件が確認できた後、製品別に強度の比較確認を行う。

本年度は、昨年度に引き続き、事業化ニーズとして具体化しているロボット用アームを模擬した中空棒状の部品を対象にして T 6 処理を行い、無処理、及び熱処理条件を 2 条件以上変更して、その強度を比較する、事業化の際にユーザーへのアピールのためのデータ蓄積を図る。

⑤-3 合金別熱処理 (T 6) 条件研究

上記の 2 項目を実施後、合金の種類別に最適な条件として整理して、まとめる。

本年度に実施した上記の 2 項目の実験結果を整理し、実施した実験条件の中で最適な条件を実験的に実証し、最終的な事業化を睨んだ最適化に向けた検討を行う。

⑥ プロジェクトの管理・運営 (公益財団法人新産業創造研究機構)

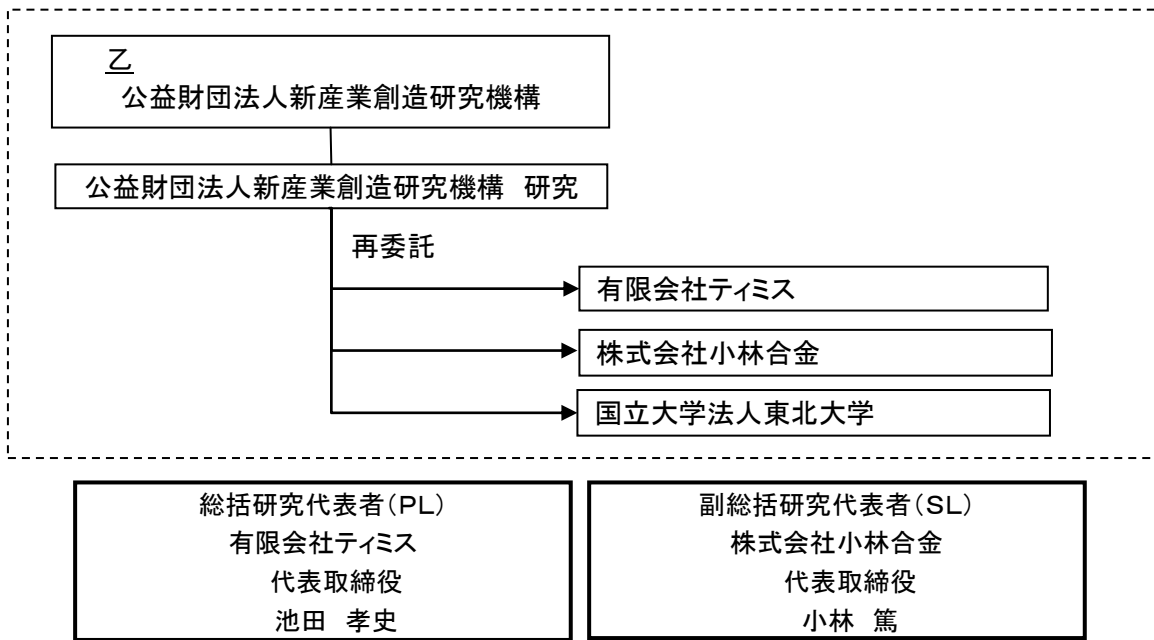
複数企業が参画するプロジェクトであり、分担と相互協力・連携、情報の共有により、短期間で充実した成果を得るような指導力が事業管理者には求められる。

本年度は、本格的な実験・検討を収斂させる年度であり、昨年度に引き続き、外部有識者の委員会を活用すると共に企業間の横連携を一層強化する。

また、年度末に成果報告書作成のとりまとめを行う。

1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

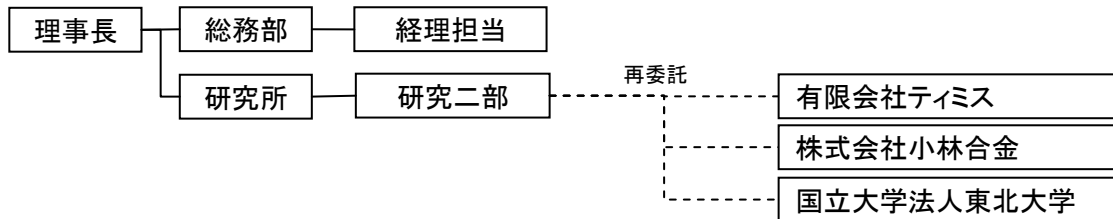
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

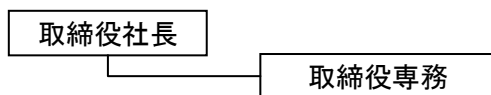
2-1) 事業管理機関

[公益財団法人新産業創造研究機構]

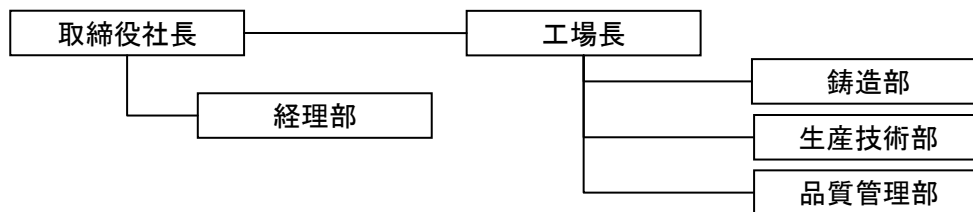


2-2) 再委託先

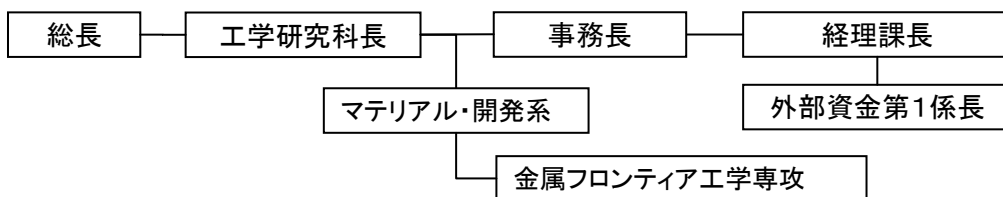
有限会社ティミス



株式会社小林合金



国立大学法人 東北大学



3) 管理員及び研究員

3-1) 事業管理者 公益財団法人新産業創造研究機構

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
高谷 芳明	研究所 研究二部 ・ 部長	⑥

②研究員 : なし

3-2) 再委託先

有限会社ティミス

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
池田 孝史	取締役社長	①、②、④、⑤
杉原 一江	取締役専務	①、②、④、⑤

株式会社小林合金

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小林 篤	取締役社長	③、④、⑤
平城 憲一	工場長、鋳造部長兼生産技術部長	③、④、⑤
高野 剛	品質管理部	③、④、⑤

国立大学法人 東北大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
安斎 浩一	東北大学大学院 工学研究科 マテリアル・開発系 系長	①、②、③、⑤
板村 正行	准教	①、②、③、⑤
平田 直哉	授	①、②、③、⑤
	助教	

4) 協力者

アドバイザー委嘱委員の所属、氏名

氏名	機関名・役職
香川 雅彦	有限会社香川ダイカスト工業所 取締役社長
柏井 茂雄	兵庫県立工業技術センター 材料技術部 部長
山喜 義則	ロボテック株式会社 代表取締役社長

1-3 成果概要

1) 進捗状況

① 当初計画の履行状況

本開発の「半凝固鋳造」技術は、組織の微細化、つまり高強度化に効果があり、プラスチックに代替された部品や鉄などの比重の大きな部品へ軽合金（アルミ、マグネシウム等）の代替が期待される。このように本開発は、衰退傾向にある我が国の鋳造業界の起死回生の技術として期待されている「半凝固鋳造」に関連する。

開発初年度 H22 年度には、新開発の「2磁軸電磁攪装置」を製作し、技術目標であった「軽量化」、「砂型鋳造」の試作に着手した。その結果、砂型設計の改良余地を残し、湯流れに起因する鋳込み不足などの問題はあったものの、それまでダイカスト法を中心に検討されてきた「半凝固

「鋳造技術」を世界に先駆け、砂型鋳造で実証することが出来た。

2年目のH23年度には、鋳造シミュレーション技術を導入し、砂型設計にこれを適用しつつ、湯流れの問題の解決にあたった。その結果、鋳造欠陥の無い薄肉の鋳造品の試作に成功した。

このように、着実に進歩と試行錯誤を重ねつつ、当初目標であった砂型鋳造への半凝固技術の適用性を実証する、というチャレンジについては、ロボットアーム部品を事業化の仮想ターゲットとしてきたが、これについては一区切りがついた。(下写真)



再度、経緯をまとめると、開発技術の柱となった技術は、

- ・既存の2次元的な電磁攪拌を3次元的な攪拌が行えるようにする技術
- ・半凝固では先例の無い砂型鋳造への適用

ということであった。

これの具体的実証には目途をつけたので、ユーザーの反応、ニーズを収集するため、最終年度H24年度の初めに、ロボットメーカーの老舗でもある川崎重工業株式会社の開発部門を訪問調査した。そこで質疑応答を重ねたところ、具体的サンプル試作に関するインパクトは大きく、好評価ではあったが、一方で彼ら・機械設計を担う立場から、引張強度、靱性等の機械設計のための基本物性の充実、という課題も明確になった。

そこで、最終年度となる今年度H24年度は、各要素技術の着実な実証を基本とし、初年度H22年度に製作した「2磁軸電磁攪拌装置」のカップ温度に着目して「半凝固カップ冷却装置」を製作し、AC4C、AC4CH、AC7A、ADC10、ADC12、7075、6063などのアルミ合金の電磁攪拌時のカップ温度管理を行い、機械的性質確認のための実験を効率的に進めた。

一方、将来の事業化時にも必要となるアルミ溶湯のハンドリングに関わる「手動式鋳込み注湯取出装置」を使用して、砂型鋳造の実験を進め、H23年度導入の「熱処理炉」を使用して試作鋳造品について熱処理の効果を確認した。

また、シミュレーションについては、砂型鋳造に対応したシミュレーションソフト「ADSTEFAN」を使用し、東北大学が保有する知見を基にして、砂型の設計のための湯流れ解析等に活用し、引張強度試験用のテストピースを試作して、砂型を用いた場合と金型を用いた場合の引張強度などの特性に与える影響について比較確認をした。

このように本技術開発にとって基礎データとなる評価技術を確認し、引張強度などの川下ユーザーが必要とする機械設計のための基本データを取得・蓄積した。これにより、将来の事業主体となる中小企業の基盤技術の高度化、事業化展開につながるような内容の充実に努めた。その結果、実施計画として、提案書、及び実施計画書に記載の通りの内容を完遂した。

② 進捗管理について

公益財団法人新産業創造研究機構の主催する2ヶ月に1回の頻度の委員会で、各社の進捗報告を受け、また、経理資料の毎月のフォローにより、当初実施計画との齟齬がないことを確認しながら、事業計画履行に努めた。

2) 目標達成度

今年度の目標通りの成果を上げている。以下、各テーマ項目毎に詳述する。

1) アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）の開発：

熱伝導を基礎としたシミュレーションを用い、凝固スラリーの中での平均液相率と金属カップの熱容量、アルミ合金溶湯の熱容量の関係などを数値解析し、金属カップの材質、形状（内径・肉厚・高さ）と半凝固スラリーの状態（平均液相率）の関係を推算できる設計技術

を活用し、カップの製作に反映した。

なお、材質については、半凝固用として多用される鋳造用アルミ合金として、

① AC4C ② AC4CH ③ AC7A

及び、ダイカスト用アルミ合金として、

④ ADC10 ⑤ ADC12

また、構造材用のアルミ合金として、

⑥ 6063 ⑦ 7075

等の適用可能性の確認も行った。

このように、本研究は、一般的に利用されてきている多種のアルミ合金について、電磁攪拌による効果、及び砂型鋳造への適用性の確認を行なった。

2) 半凝固スラリー生成条件の確立：

溶湯アルミを充填し、電磁攪拌を行うステンレス製のカップが本技術のノウハウである。そのカップ形状の最適化、カップ最適温度管理などのために机上・計算検討結果を踏まえ、各種形状のカップを試作した。これらのカップを用いて、アルミ合金の組成の影響、カップ内容湯の電磁攪拌条件などの最適化検討を行うため、実験条件パラメータの検討を行った。合金種類については、上記の7種類を確認した。

3) CAE解析・特殊鋳型設計技術・鋳造技術の確立：

初年度 H22 年度は、FANUC 社の市販ベースのロボット用アーム部品をターゲットとして、肉厚を従来の5 mmから3 mmへ低減することにより、約30%の軽量化を達成できた。

薄肉化により、溶湯の流路抵抗が大きくなるが、半凝固状態では、更に粘性が大きくなり、湯流れの難易度が上がるため、700℃程度の完全な液相状態の溶湯により、砂型設計の方針の検証をまず進めた。具体的には、砂型設計に際してシミュレーションを駆使して行った。実際の鋳造現象は、冷却・凝固という相変化を伴う流動・伝熱現象という複雑系であるため、改良した砂型の湯流れの効果は、試行錯誤実験により検証した。湯口の位置や形状、配置などの改良により、湯周り不良を起こさないレベルの試作品を製作できた。

また、620℃程度の固液混相域のいわゆる電磁攪拌された溶湯の温度条件について、開発した砂型を用いて実験し、高粘性のスラリー状の溶湯でも充填できる技術まで確立された。本年度は、電磁攪拌用カップの温度管理により、電磁攪拌溶湯での鋳造条件の確認、湯周り解析での不良を完全になくすような砂型設計確認ができた。また、アルミ組織や機械的性質を確認し、事業化のためのデータベースを確立した。

4) 鋳造機設備に関する開発

初年度 H22 年度には、本研究開発の中核的役割を担う「2磁軸電磁攪拌装置」を設計製作した。また、20kg 近くの高温に溶解したアルミ溶湯を柄杓に入れて移送するという、人にとっては重負荷のかかる作業を改善するため、「手動式鋳込み注湯取出装置」も併せて設計・製作した。

2年目 H23 年度には、試作鋳造品の熱処理の効果を確認するため、T6 処理が可能な「熱処理炉」を設計・製作した

最終年度の H24 年度は、カップの温度変化が湯流れに影響する点を確認するため、「半凝固カップ冷却装置」を設計・製作した。この装置は、冷却と加熱が出来る構造となっており、温度変化を確認して、7種のアルミ合金の試作鋳造に使用して、所期の目的を確認出来た。

5) 製品評価

a. ロボット部品

・靱性向上

従来砂型鋳造品の50%以上を目指して実施し、靱性を評価するため、引張強度試験を行い、ヤング率データを取得し、評価することにした。

・引張強さ向上

従来砂型鋳造品の50%以上を目指して実施した。その結果、以下の結果となった。

● 砂型鋳造で、アルミ合金原料種 ADC10 で完全な液相域で行った場合： 220MPa

● 同上条件で、電磁攪拌・固液混相域の場合： 300MPa

以上の実験結果より、約36% ($300/220 \div 1.364$) の強度向上が達成できた。

なお、結晶の微細効果がもたらす強度向上という機械特性がまず確認できたという点で、その成果は大いなるものがある。

つまり、結晶微細化を更に極めていけば数値の向上が図れる可能性があるという意味である。当初想定した通常の液相での casting に対して 50%以上の強度向上という目標数値については、今後、溶湯温度、カップ冷却・加熱温度の管理を詳細検討、最適化していくことにより、まだ改善出来る可能性がある。委託事業終了後に予定している補完研究の中でも鋭意確認していきたいと考えている。

・軽量化

従来砂型 casting 品の 30%以上を目指して、開発に取り組んだ。

H22年度、H23年度に FANUC 社ロボットアーム部品を対象として、従来品の 5mm 厚を 3mm の肉厚に減量し、ロボットへの実装実験により実用強度も維持することを実証出来た。つまり、重量で表現すると、当初設計が 1.95kg となっていたものを 1.40kg まで減量化して実用性を維持できた。結論としては、約 39% ($1.40/1.95 \div 0.718$) の軽量化に成功した。

b. casting 設備能力

・給湯生産率： 従来 casting 法の生産効率現状より 30%向上

・作業効率： 溶解エネルギー効率 30%向上

という目標を設定して、生産プロセスの効率向上を目指した。

その結果を下表にまとめたように、大幅な改善効果が認められた。

表 1 作業環境調査

	現状	本開発の生産プロセス	差異、改善効果
溶解作業	ルツボ溶解	ルツボ溶解	変化なし
湯移動	作業員 2 名。人力で柄杓を手を持って移送。	自走給湯・移送装置	作業員 1 名に軽減。作業員の重荷重の負担無し。
注湯時間	同じ	同じ	変化なし
冷却時間	4 時間	1 時間	3 時間の短縮効果
溶解時間	700℃ 2 時間	640℃ 1 時間 40 分	20 分の短縮効果

1-4 当該プロジェクト連絡窓口

公益財団法人新産業創造研究機構（担当：高谷芳明）

連絡先 tel 078-306-6803

fax 078-306-6812

第Ⅱ編 研究開発成果 詳細

第1章 アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）開発

1-1 熱伝導シミュレーションの実行

まず、昨年度において提案したカップ設計のための計算方法を説明する。
用いる式は以下である。

$$c_m m_m (T_m - T_{eq}) = c_c m_c (T_{eq} - T_c) \quad (1)$$

c : 比熱 (J/kg・K) 下付文字は m:溶湯, c:カップを示す
 m : 質量 (kg)
 T_m : 溶湯初期温度(°C) (カップへ投入時の温度)
 T_{eq} : 溶湯平衡温度(°C) (カップから鑄型へ注湯する時の温度)
 T_c : カップ初期温度(°C) (カップへ溶湯を投入する時の温度)

式(1)を変形し $\gamma = \frac{c_c m_c}{c_m m_m}$ を代入すると、次式が得られる。

$$T_m = T_{eq} + \gamma(T_{eq} - T_c) \quad (2)$$

たとえば目標平衡温度を 620°C、溶湯初期温度を 710°C、カップ初期温度を 20°C とすると、

$$710 = 620 + \gamma(620 - 20) \quad (3)$$

$$\gamma = 0.15$$

となる。

溶湯を AC4C ($c_c=1100$)、カップを SUS304 ($c_m=550$) と仮定し、溶湯量を 5kg とすると、 $\gamma=0.15$ となるにはカップ重量は約 1500g、これはおおよその寸法でいうと内径 100mm、高さ 300mm、肉厚 2mm 程度とすればよいことになる。

これまでの経験から、カップを用いた電磁攪拌処理を行う場合の設計において、合金を変えた場合の支配的かつ重要な熱物性は潜熱量およびその放出パターンであり、比熱は合金種にかかわらずほぼ一定とみなせることがわかっている。

従って、今後液相線直上をターゲットとしたカップ処理では溶湯材料にかかわらず、同様の条件を用いることができると考えられる。

今年度は液相線が高い合金も扱うため、できるだけ肉厚の薄いカップを作成した。

検討対象とするアルミ合金種類については、

- ① AC4C(H) ② ADC12 ③ ADC10 ④ AC7A ⑤ 7075

の 5 種類の合金を用いた。

液相線直上において鑄型へ注湯できるよう、「カップ厚み」、「カップへの注湯温度」、「カップ予熱」などを設定するため、各合金における液相線温度を熱力学計算ソフト「Thermo-Calc」を用いて求めた。各合金の主な組成は以下の通りである。

表 1-1-1 検討対象としたアルミ合金の種類とその組成

構成元素 合金種類	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Pb	Ti	Ni	Sn
AC4C(H)	7.0	<0.2 (AC4CH)	0.2	0.1	0.35	0.05	0.1	0.05	0.2	0.05	0.05
ADC12	11.0	1.3	2.5	0.5	0.3		1.0			0.5	0.3
ADC10	8.5	1.3	4.0	0.5	0.3		1.0			0.5	0.3
AC7A	0.2	0.3	0.1	0.6	4.5	0.15	0.15	0.05	0.2	0.05	0.05
7075	0.4	0.5	1.6	0.3	2.5	0.23	6.6		0.2		

以下に、Thermo-Calc を用いて求めた各合金の温度-固相率曲線を示す。

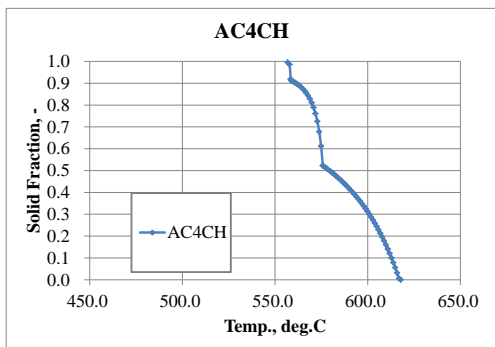


図 1-1-1 AC4C(含む AC4CH) 合金の温度-固相率曲線

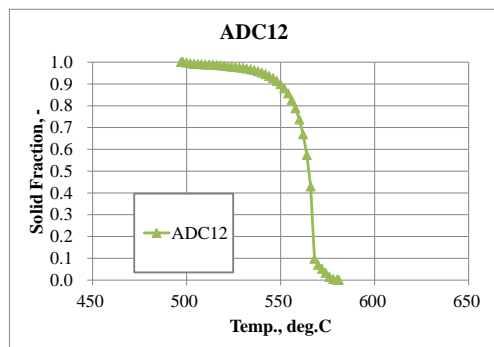


図 1-1-2 ADC12 合金の温度-固相率曲線

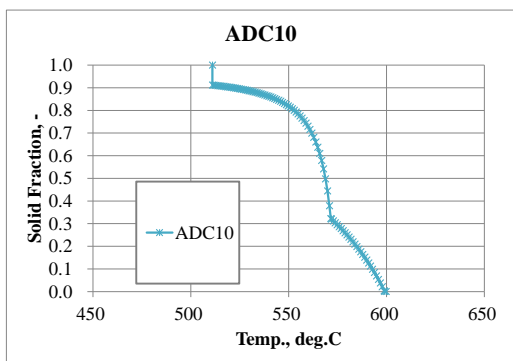


図 1-1-3 ADC10 合金の温度-固相率曲線

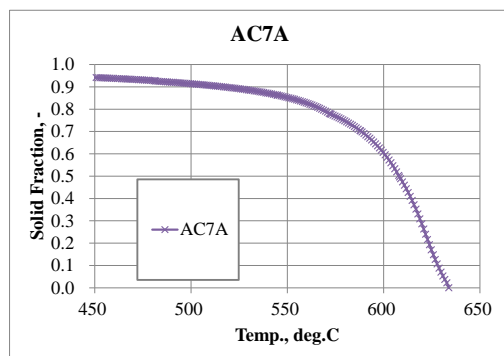


図 1-1-4 AC7A 合金の温度-固相率曲線

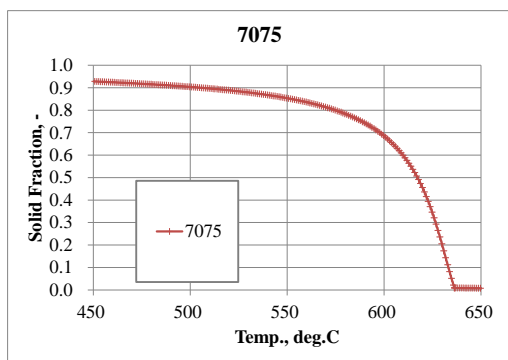


図 1-1-5 7075 合金の温度-固相率曲線

アルミ合金種類	液相線温度 [°C]
AC4CH	624
AC4C	//
ADC12	581
ADC10	598
AC7A	634
7075	635

液相線温度は固相率ゼロとなる温度である。式(2)を用い、液相線直上となるように各条件を調整し、鋳造を行った。

図 1-1-1～図 1-1-5 より、各合金の液相線温度を右の表の数値とした。

1-2 検証実験

前項にて算出した液相線温度を用い、鋳造シミュレーションソフトウェア ADSTEFAN による数値実験を行った。液相線より 90°C 高い温度 (過熱度 90°C) にて、内径 100mm、高さ 300mm、肉厚 2mm のカップに注湯した場合の温度履歴を求めた。

これは液相線のほぼ直上をターゲット温度とする設定である。また ADSTEFAN では電磁攪拌の影響を直接考慮できないため、見かけの熱伝導率増加(約 8 倍)という形で計算を行った。詳細な条件を図 1-2-1 に示す。解析は代表的な合金である AC4C と合金の違いを調べるため 7075 においても行った。

まずそれぞれの注湯開始から 10 秒間の温度分布を可視化した結果を図 1-2-2 および図 1-2-3 に示す。図 1-2-2 は AC4C の場合であるが、注湯完了直後の 5s においては中心部が高温であったが、10 秒経過

後はほとんど均一となっていた。

図 1-2-3 の 7075 の場合もほぼ同様であった。

また、詳細な温度履歴を表 1-2-1 および表 1-2-2 に示す。

いずれも高さ方向に 3 水準、半径方向に 2 水準の計 6 カ所の温度履歴を求めた。

表 1-2-1 は AC4CH の結果であり、10 秒後は液相線温度を中心に上下方向に 20℃強の温度差が生じている（赤丸部分）が、これは熱伝導率のみで攪拌効果を現そうとしたためで、実際はこの上下の温度差は 2 磁軸攪拌のうち垂直攪拌により解消される。

一方、表 1-2-2 に示す 7075 においてもほぼ同様の結果であった。

以上の結果考察より、適切なカップ設計および電磁攪拌条件となっていると考えられる。

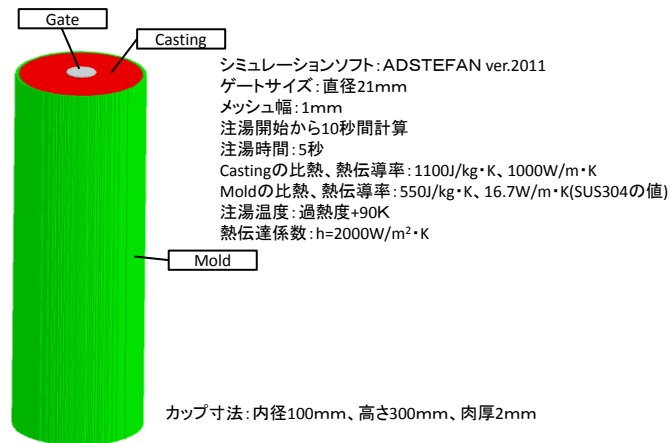


図 1-2-1 数値実験条件

表 1-2-1 AC4C 注湯開始 10 秒後までの温度分布

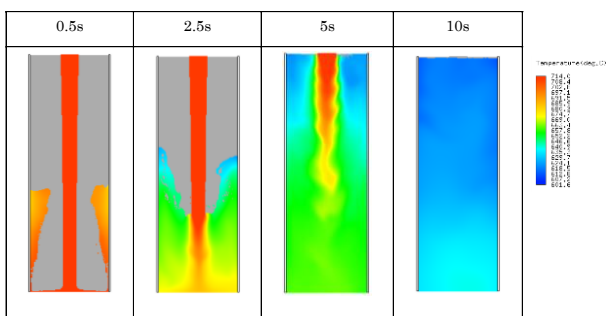


表 1-2-2 7075 注湯開始 10 秒後までの温度分布

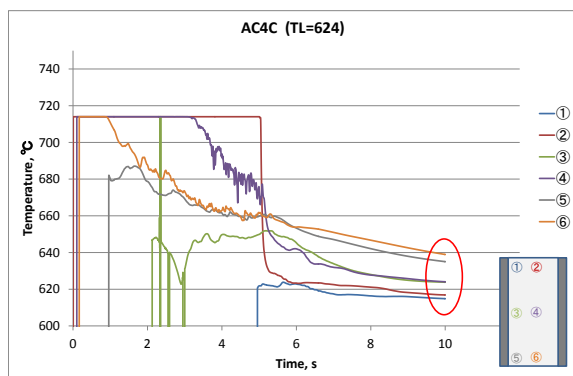
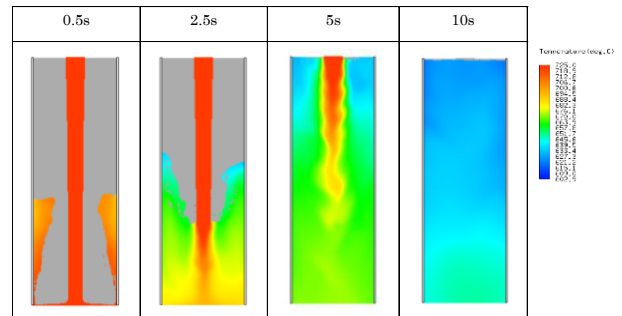


図 1-2-2 AC4CH の注湯から 10 秒間の温度履歴

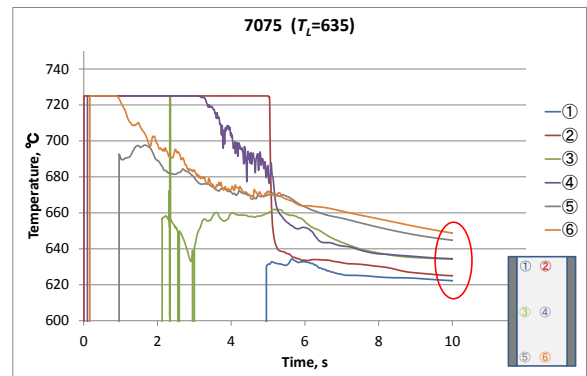


図 1-2-3 7075 の注湯から 10 秒間の温度履歴

第2章 半凝固スラリー生成条件の確立

2-1 電磁攪拌の最適化

本研究開発で呼称する「2 磁軸電磁攪拌」という名称は、学術的な用語ではないが、その意味するところは、注湯時の「回転攪拌」、そして注湯後の「垂直攪拌」を印加するアルミ溶湯の電磁攪拌技術である。

まず、「回転攪拌」は、カップとの伝熱を効率化するために行うが、長すぎる場合は溶湯が遠心力により、カップ容器から横溢してしまう可能性がある。そこで、ここでは最適な条件として、回転攪拌は1秒とした。一方、「垂直攪拌」は溶湯の内外温度差を解消する目的で行われる。今回は、溶湯がターゲット温度に達するまで、できるだけ印加できる時間として10秒を最適とした。

通常、半凝固スラリーを作製する場合は、凝固の進行に伴う見かけの粘性の増加の影響などを加味する必要があるが、今回はいずれの合金においても液相線近傍の状態でも固相率としては大きくなく粘性も比較的低いため、特に問題は生じなかった。

2-2 アルミ合金材料の影響把握

「第1章 アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）開発」について詳述した結果、データを用い、テストピースを作製した。

その結果、各合金とも問題なく、砂型に充填可能であることが確認できた（図2-2-1 および2-2-2）。



図 2-2-1 注湯直後の様子



図 2-2-2 作製した引張強度試験用の試験片

第3章 CAE解析・特殊鋳型設計技術・鋳造技術の確立

一般のアルミダイカスト鋳造、グラビティ鋳造では、鋳造CAEソフトを使用して高品質な鋳造品を製造するための湯流れ解析が行われている。しかし、半凝固鋳造法で砂型鋳造に対して、鋳造CAEソフトを使用した解析事例は少ない。

そこで、本研究開発では、従来は経験的な職人芸の領域で留まっていた砂型鋳造に対して、湯流れ解析及び凝固解析を実施し、基盤技術の高度化、論理的な技術開発のためのノウハウ蓄積を図った。

以下、その実施内容の詳細を説明する。

3-1 CAEを用いた湯流れ解析による特殊鋳型設計技術の確立

3-1-1 解析条件のためのデータ収集

引張試験等の材料特性実験用の金型、及び砂型の製作について、以下説明する。

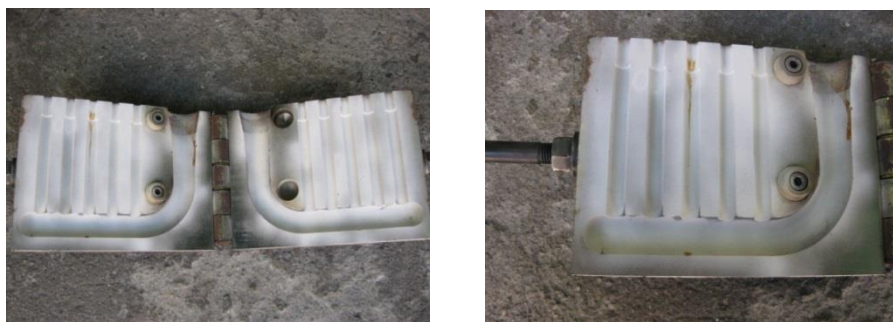


写真 3-1-1-1 テストピース用金型

写真 3-1-1-1 は、アルミ合金材料の種類別に引張強度などの機械的特性を確認するために試作した金型である。分析のために試作したサンプルは、写真 3-1-1-2 に示したように、1 ロットで 3 本の分岐した円柱状の物を切り取り、引張試験用の原料とするものである。

ヘッダー部から分岐して、3 本のサンプルが、円柱状に成型されたものである。外径は約

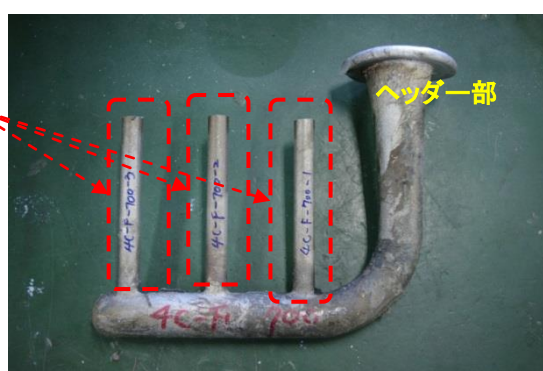


写真 3-1-1-2 テストピースの試作例



写真 3-1-1-3 テストピース用砂型及び試作作業の状況

砂型についても前記の金型と同じ形状のテストピースを写真 3-1-1-3 に示すように試作した。

なお、本研究開発で実施した半凝固法によるテストピースは、アルミ合金の種類としては、AC7A、7075、ADC10、ADC12、AC4C、AC4C とした。

3-1-2 湯流れシミュレーションによる金型方案の考察

湯流れシミュレーションについては、砂型鋳造に対応したシミュレーションソフト「ADSTEFAN」を使用した。また、東北大学が保有する知見を基にして、種々アドバイスを受けながら、ソフトの活用方法を修得した。

そして、シミュレーションの実施に当たっては、小林合金が長年の砂型鋳造で培ってきた経験値、ノウハウを判断基準の軸として、シミュレーションの定量的パラメータ数値を種々検討した。つまり、シミュレーション上で表示される結果と経験・ノウハウでイメージトレーニング的に導き出される湯流れの想定状況を照合しながら検討を進めた。

各種のシミュレーション条件についての計算結果を以下に示す。

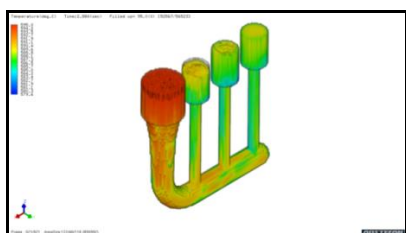


図 3-1-2-1 ADC10 595°C 流動解析

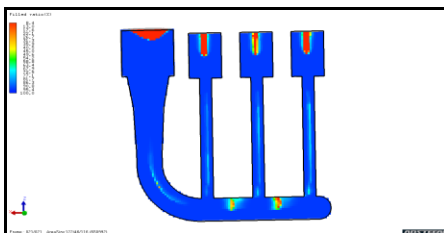


図 3-1-2-2 ADC10 595°C 凝固解析

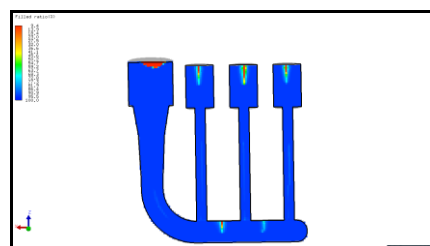


図 3-1-2-3 AC4C 700°C 流動解析

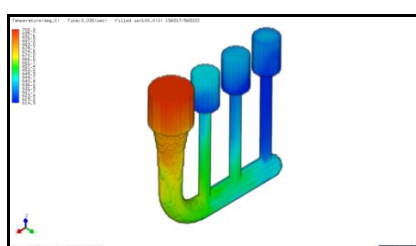


図 3-1-2-4 AC4C 700°C 凝固解析

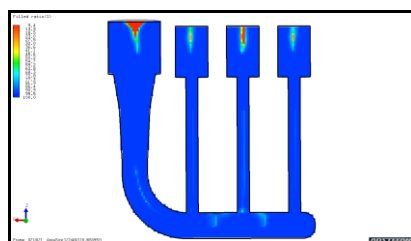


図 3-1-2-5 AC4C 625°C 流動解析

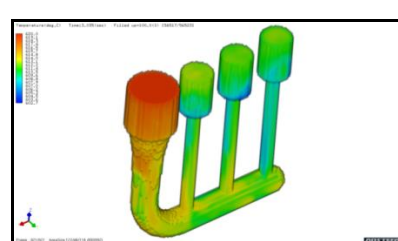


図 3-1-2-6 AC4C 625°C 凝固解析

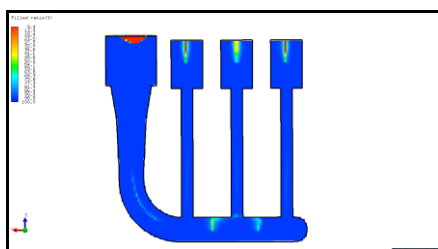


図 3-1-2-7 AC4C 625°C 金型流動解析

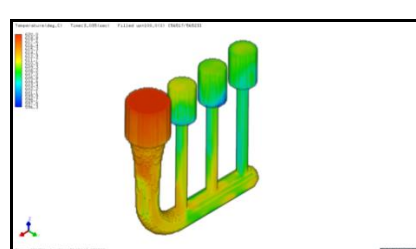


図 3-1-2-8 AC4C 625°C 金型凝固解析

3-1-3 最適金型形状の確定

引張試験用のサンプル試作を鑄放し状態で、下表 3-1-3 に示す材料、鑄込み条件温度にて実施した。なお、組織観察については、AC4CH 材料について実施した。試作サンプルの形状は、図 3-1-3-1 に示す。引張試験の結果、及び試験後のサンプル外観、組織観察結果などを図 3-1-3-2～8 に示す。

表 3-1-3-1 引張試験用サンプルの試作条件一覧

材料 (型)	鑄込み温度 (過熱度)
AC4CH (金型)	700°C (+83K)
AC4CH (金型)	620°C (+3K)
AC 4 CH (砂型)	610°C (-7K)
AC7A (砂型)	660°C (+25K)
6063 (砂型)	700°C (+45K)
7075 (砂型)	650°C (+15K)
ADC10 (砂型)	620°C (+30K)

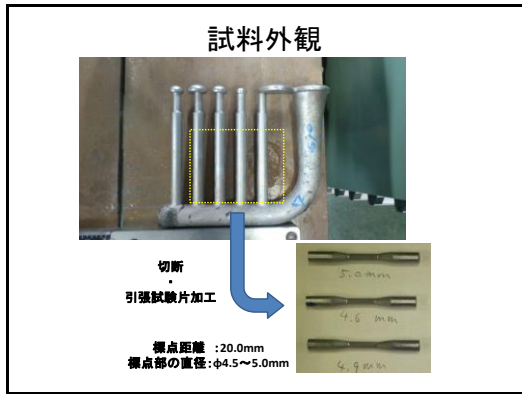


図 3-1-3-1 サンプルの外観

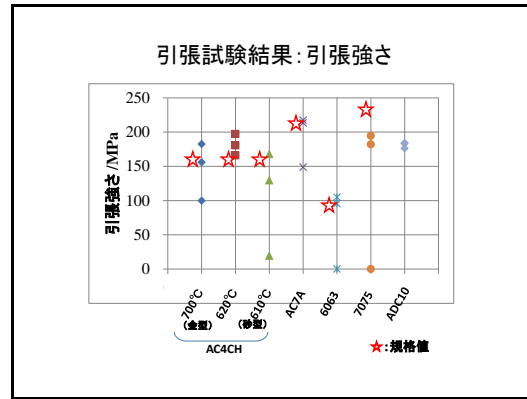


図 3-1-3-2 AC4CH 材の引張強度

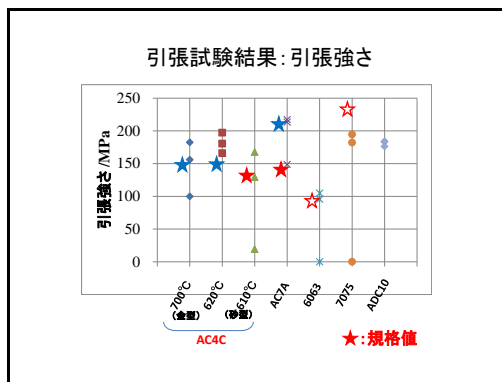


図 3-1-3-3 AC4C 材サンプルの引張強度

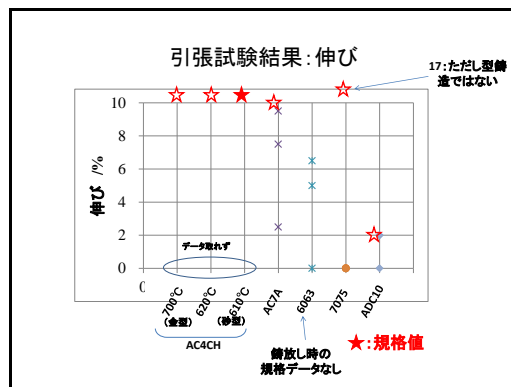


図 3-1-3-4 AC4CH 材サンプルの伸び

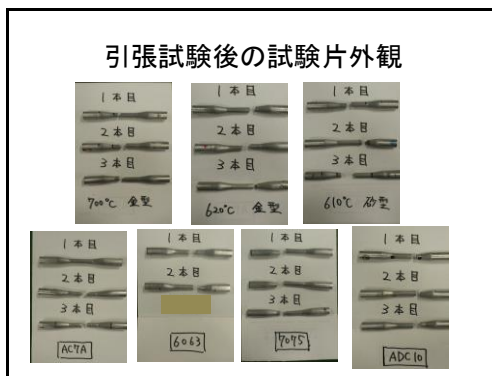


図 3-1-3-5 AC4C 材サンプルの引張強度

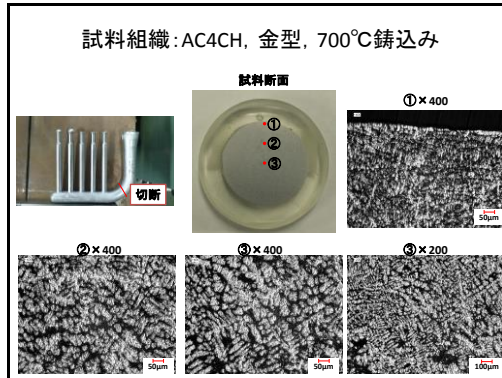


図 3-1-3-6 AC4CH 材サンプルの伸び

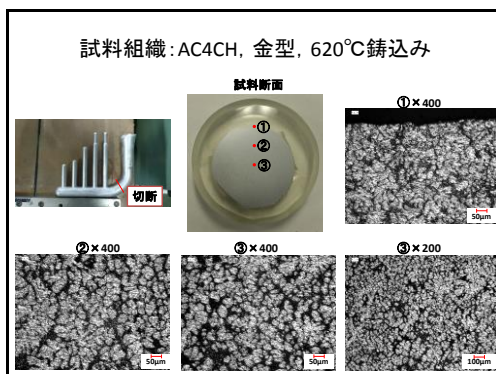


図 3-1-3-7 AC4C 材サンプルの引張強度

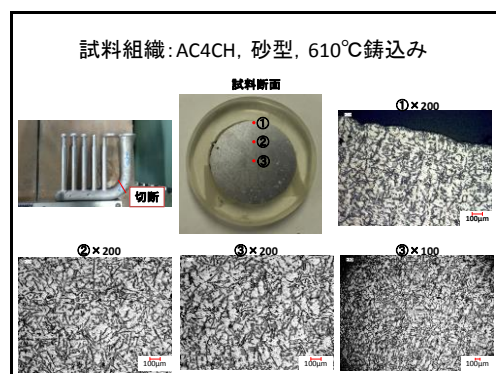


図 3-1-3-8 AC4CH 材サンプルの伸び

3-2 CAE を用いた凝固解析による鑄造条件の確立

上記シミュレーションを基に鑄造実験を行ない不良率0.1%以下を目標とする。

半凝固鑄造法での最適な金型設計技術と鑄造条件などを確立し、鑄造欠陥が殆どなく、薄肉でも十分な強度を持った鑄造技術を提供する。

最終目標としては、

- ・砂型半凝固溶湯流体係数確認
- ・合金別湯流れ係数確認
- ・最適砂型方案確認を行う

これらの設定目標に対して、以下に計算検討、考察した結果とその要点を記す。

3-2-1 凝固シミュレーションによる最適条件の考察

(1) 金型シミュレーション

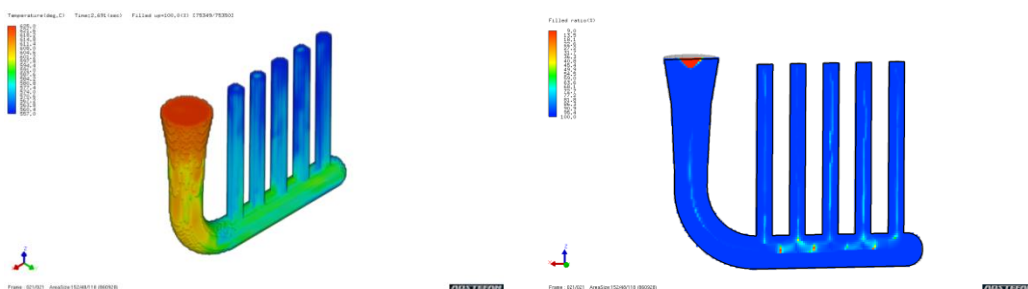


図 3-2-1-1 引張試験用テストピース（金型）の湯流れ解析結果（左：立体図、右：断面図）

図 3-2-1-1 に引張試験用テストピースの製作を“金型”で行った場合の湯流れ解析結果の立体図を示す。相平衡の液相線上の低温で鑄込んだ場合、溶湯の投入口は茶色から黄色で示すように高温を維持するが、テストピースを切り取るための5本の分岐管の部分（TP部）が、青く示されているように固相線付近の温度まで下がってしまい、金型内部では結晶化・凝固が進み、閉塞状態となり、湯流れが困難と予測された。また、図 3-2-1-1（右図）に示す断面については、TP中心がやや粗い組織になると予測される。（引け巣予測）

(2) 砂型シミュレーション

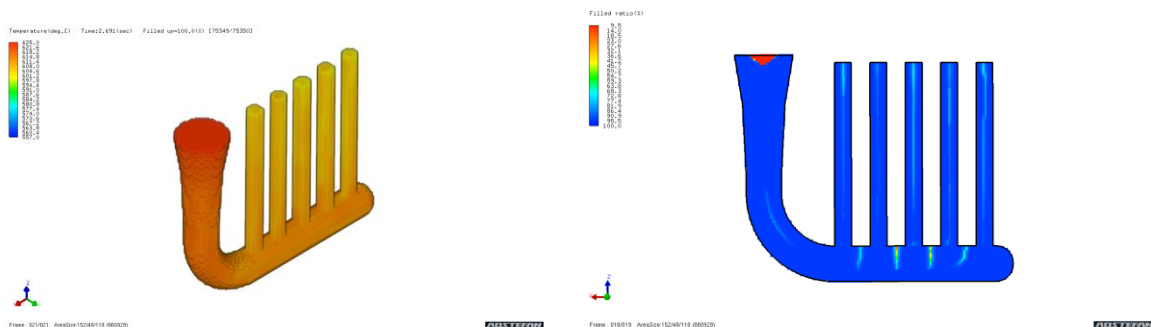


図 3-2-1-2 引張試験用テストピース（金型）の湯流れ解析結果（左：立体図、右：断面図）

図 3-2-1-2 に引張試験用テストピースの製作を“砂型”で行った場合の湯流れ解析結果の立体図を示す。金型とは温度分布が大きく異なっていることが一目瞭然である。金型の場合は、TP部については閉塞状態であったが、これに反して、砂型の場合は、TP先端までも大きく熱を奪われないと考えられる。引け巣については、金型鑄造との比較ではやや粗く見える。

なお、今回のシミュレーションによる“金型”、“砂型”の湯流れへの影響については、概念的には、熱容量の差、伝熱性の差が予想され、定性的には推測されるところであったが、湯流れシミュレーショ

ン、及びCAE技術の適用により、鑄造業者としての長年の勘やノウハウとは別に、定量的に比較・検討できた点は今後のその他の検討においても有益な知見であった。

3-2-2 砂型、金型を用いた半凝固鑄造実験と金型改良

(1) 金型実験



図 3-2-2-1 引張試験用テストピース（左：取り出したサンプル、右：金型に鑄込んだ状態、）

図 3-2-2-1 に示すように、前記のシミュレーション、CAE で予測した湯流れと同じ実験結果となった。但し、金型においても 600℃以下の重力鑄造で流れて行くことが確認された。

(2) 砂型実験

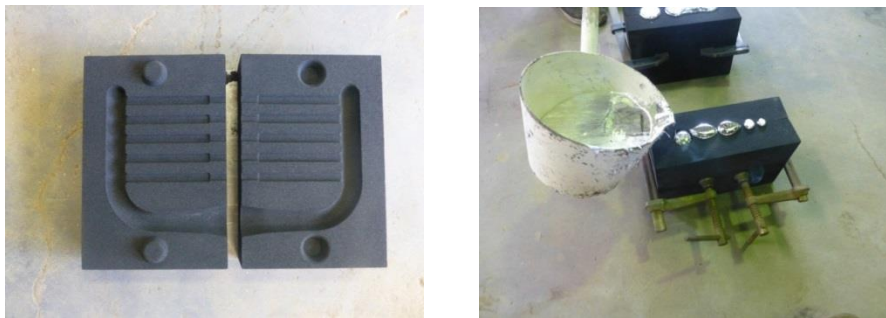


図 3-2-2-2 テストピース砂型と鑄込み作業（左：砂型を開いた状態、 右：鑄込み作業の状況）



図 3-2-2-3 引張試験用テストピース（砂型）

このように金型、砂型の比較検討をシミュレーション、CAE 手法を用いた事前検討により行い、実際の鑄造実験も行って、シミュレーションとの比較検証を行った。

この分岐 5 本の形式の TP 鑄造方案により、引張強度試験を東北大学が行ったが、データのバラツキが大きすぎ、その現認を破断面の観察などから、鑄造欠陥によるものと判断した。

そこで、鑄造方案の比較検討という主旨では、仕上がり品の問題は除外して考えることも可能ではあるが、鑄造品の引張強度を評価するという別の側面の主旨に対しては、迅速に結果が求められる。そこで、良品鑄造のための更なる鑄造方案の見直しを行った。

結果として、5 本分岐方式では流路抵抗の総和が大きくなりすぎるため、3 本分岐の方式に改良した。

そのサンプルの写真については、前出の別項「3-1 C A Eを用いた湯流れ解析による特殊鋳型設計技術の確立」に掲載した、写真 3-1-1-2 がそれである。

以上、若干の試行錯誤を経たものの、小物製品の凝固解析の方向性は、実体験を伴い、身につく経験、単なる経験ノウハウ、職人芸ではなく、理論的裏付けを伴うノウハウ、応用範囲の広い技術として蓄積することが出来た。

今後の事業化展開等において、大型の鋳物に対しても今回得られた知見を活用し、半凝固鋳物の鋳造方案開発に活かしていきたい。

第4章 鋳造機設備に関する開発

いわゆる半凝固鋳造法で製造する砂型鋳造の鋳造自動化設備に関しては、電磁攪拌された半凝固（固液混相域）の「溶湯をスムーズに注湯出来る装置」、及び「溶湯を電磁攪拌装置に給湯する装置」などの要素機械・設備が必要となる。

特に、半凝固の固液混相域は温度条件支配となるため、溶湯の温度制御、維持管理の精度が重要となる。そこで、本年度は、これまでに設計製作してきた各種装置に加え、電磁攪拌された溶湯の温度低下ロスのない鋳造設備を開発することを目的として、「半凝固カップ冷却装置」を新たに設計製作し、研究開発を実施した。また、最終年度に当たり、これまでに製作、使用してきた装置を総括の意味で、以下にまとめて示した。

4-1 溶湯 2 磁軸電磁攪拌装置

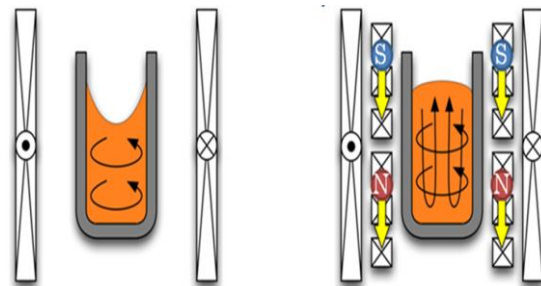


写真 4-1-1 電磁攪拌装置外観及び既存の 1 軸攪拌と 2 軸攪拌の原理比較

写真 4-1-1 は、初年度 H22 年度に設計製作した「2 磁軸電磁攪拌装置」である。

従来の電磁攪拌は、2 次元的な攪拌効果であったが、より均一、強攪拌を可能とするために東北大学が開発した垂直方向にも磁界が移動して 3 次元的な攪拌が行えるという特徴を持った装置である。

この装置は、稼働以来、特にトラブルもなく、今年度も引き続き、鋳造実験に使用した。実用的な面での実証も初期通りの成果を収めたものと評価している。

4-2 溶湯 2 磁軸電磁攪拌カップ移送装置の開発

写真 4-2-1 は、初年度 H22 年度に設計製作した「手動式鋳込み注湯取出装置」である。

この装置は、電動アシスト式のハンドリング装置である。アルミ溶湯を溶解炉から電磁攪拌装置へ移し替える際には、柄杓に溶湯を汲み取り、重量にして 10～20kg にもなる荷重を人力で搬送することになる。この作業工程は、

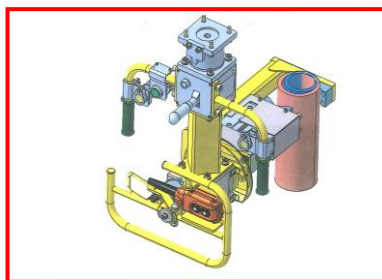


図 4-2-2 装置のクランプ模式図

写真 4-2-1 装置外観

「3K 職場（「きつい (Kitsui)」「汚い (Kitanai)」「危険 (Kiken)）」の代表

のように言われる鑄造工場の現場でも代表的な重労働作業の一つである。

そこで、この作業負荷を低減するために、開発した装置である。

本装置を用いることにより、電磁攪拌された溶湯カップを、砂型に速やかに注湯する事が出来た。

図 4-2-2 は、本装置は、カップのチャックから注湯動作までの移送を負荷なく動作をサポートする装置でありカップをクランプした状態を示す。本年度も活用しており、特に問題なく 3 年間稼働した。

4-3 カップ内半凝固溶湯注湯装置

「2 磁軸電磁攪拌装置」を使用して、アルミ溶湯を電磁攪拌するという技術が、本研究開発のコアとなる工程である。また、「第 1 章 アルミ合金に適した電磁攪拌装置（スラリーカップ）開発」で詳述したように、相平衡の温度が、固相率、つまり鑄造品の性状を決定する要因となる。このように電磁攪拌を行う際の「カップ温度」に着目して、これの制御精度向上を目指して、「半凝固カップ冷却装置」を製作した。

また、AC4C、AC4CH、AC7A、ADC10、ADC12、7075、6063 などのアルミ合金という多種合金の材料別に制御温度変化にも対応できるように、冷却と加熱が出来る装置の開発を目指した。

写真 4-3-1～4-3-2 に実際の装置を示す。

装置製作に際しては、ヒーターの設置方法など、伝熱性能向上のための若干の試行錯誤、改良を伴ったが、所期の目的通り、精度の高い温度制御が可能となった。

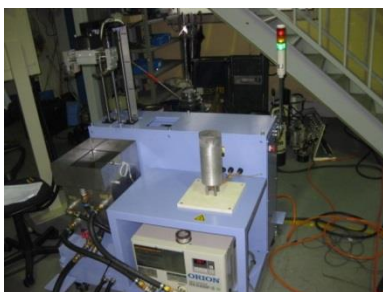


写真 4-3-1 半凝固カップ冷却装置外観



写真 4-3-2 装置制御盤部

第 5 章 鑄造品評価

5-1 熱処理（T6）温度、時間の確認

昨年度 H23 年度に製作した「熱処理炉」を写真 5-1-1 に示す。この装置を使った「T6 熱処理」の作業準備状況を写真 5-1-2 に示す。



写真 5-1-1 T6 熱処理炉の外観



写真 5-1-2 T6 熱処理炉の使用状況

今回行った熱処理の詳細を以下に記す。

AC4C を JIS 規格に準拠した方法、手順により、

●溶体化処理： 525℃ × 8H

●時効硬化処理： 160℃ × 6H

の工程で実施した。

その結果、硬度については、約 75HB という規定値相当の数値を確保できた。

また、ADC10 と 7075（鋳造でのデータが無い）は、同じ条件、

●溶体化処理： 500℃ × 10H

●時効硬化処理： 160℃ × 5H

にて熱処理を行った。

5-2 熱処理（T6）による強度比較確認

5-3 合金別熱処理（T6）条件研究

先ず、当初実施計画で区分した 5-2 項、及び 5-3 項については、技術内容としては、相互に関連するものであるので、便宜上、総合、合体したまとめ方とする。

以下、その内容を詳述する。

(1) 各種アルミ合金のテストピースについて

通常注湯（完全な液相状態）、および 2 磁軸攪拌溶湯を用いて注湯し、テストピースを作製した。

これを機械加工により切削・成型し、引っ張り試験用のテストピースとした。

鋳造したテストピースの評価項目としては、基本的には、引張強度を評価軸としたが、必要に応じて更にその特性を追及する場合、伸びという特性の軸を評価軸とした。

写真 5-3-1 に引っ張り試験後の試験片の例を示す。

ほぼ中央部で切断されており、鋳造欠陥等の外乱要素はなかったものと考えられる。



写真 5-3-1 引張り試験片（試験後）
（写真の上から： AC4C, AC4CH, AC7A, ADC12, ADC10, 7075）

(2) 各種アルミ合金の鋳放し品（非熱処理）の評価

図 5-3-1～5-3-4 に T6 熱処理前の引張り試験結果を示す。

図 5-3-1 は鋳放し材（熱処理を行っていないもの）における引張り強さである。

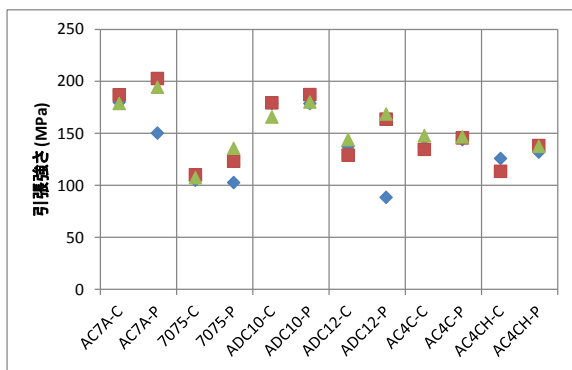


図 5-3-1 鋳放し材の引張強さ
(C：通常注湯，P：2 磁軸攪拌)

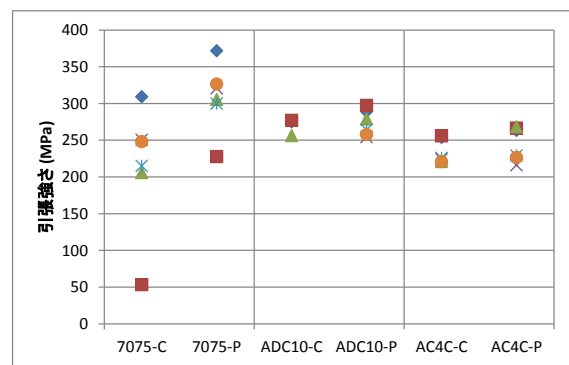


図 5-3-2 T6 処理後の各種アルミ合金の引張強さ
(C：通常注湯，P：2 磁軸攪拌)

いずれの合金も通常の注湯に比べ、2 磁軸攪拌溶湯を用いた場合には、引張り強さが向上することが確認できた。図 5-3-2 は、T6 処理後の結果である。

原料種は、AC4C、ADC10 および 7075 について評価した。

いずれの場合も 2 磁軸攪拌溶湯による効果があった。特に 7075 においては顕著であった。

これは、本来 7075 合金は、アルミサッシ等の構造用部品の原料であり、鋳造用のアルミ合金ではないため湯流れ云々を考慮した合金ではない。鋳造すると鋳造欠陥が多くなる傾向にあることが知られているが、今回の実験結果から、2 磁軸攪拌の効果によって、鋳造に使用した場合に湯流れ性など、鋳造に適合した性質に改善されたためと考えられる。

一方、図 5-3-3 および図 5-3-4 に伸びを示すが、顕著な効果は見られなかった。

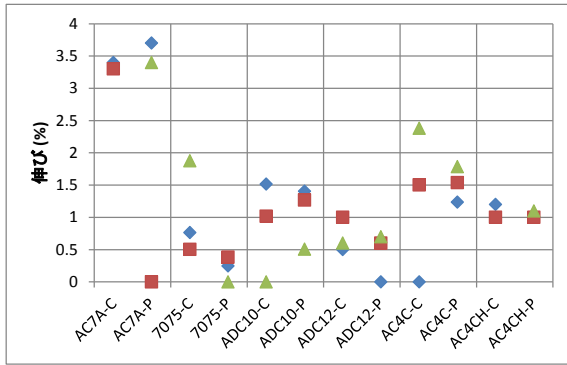


図 5-3-3 鋳放し材の伸び
(C：通常注湯，P：2 磁軸攪拌)

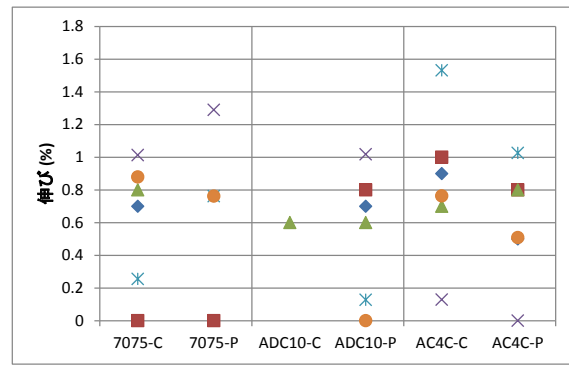


図 5-3-4 T6 処理材の伸び
(C：通常注湯，P：2 磁軸攪拌)

(3) 各種アルミ合金の鋳放し品（非熱処理）と T6 処理の比較

最後に熱処理を行った AC4C、ADC10 および 7075 において、熱処理前後に注目して整理した結果を図 5-3-5 に示す。

先に示したように、鋳造用合金の系統の材料においても 2 磁軸攪拌溶湯による改善効果が認められるが、非鋳造材である 7075 においてはその効果が顕著である。

その絶対値としては、鋳造時の履歴と考えられる若干のばらつきはあるものの、平均値として評価すれば、鋳造用合金の最大値を上回るなど、その潜在能力は非常に高く、今後さらに条件を詰めていくことで、有用な材料・製造法となっていくことが期待できる。

今回の研究開発で得た副次的な成果の一つである。

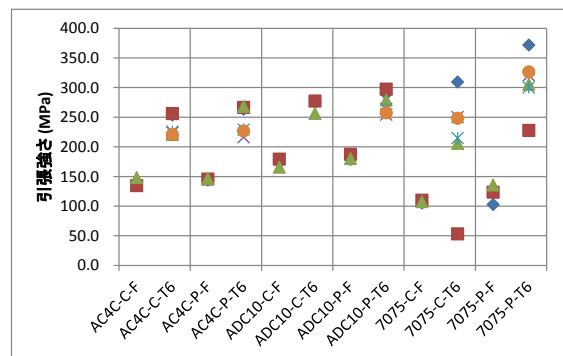


図 5-3-5 熱処理前後の引張強さ
(F：鋳放し材，T6：熱処理材，
C：通常注湯，P：2 磁軸攪拌)

(4) 引張試験の検証

上記の引張試験は、鋳造サンプルを基にテストピースへの成型加工は、機械加工の専門業者に依頼して実施した。引張試験は、東北大学保有の設備を借用して、東北大学の安齋研究室所属の学生の協力により実施した。その評価手法については、基準に則ったものではあるが、分析の専門業者への外注により、結果数値の信頼性を検証・担保することとした。以下、“第三者評価”として行った、試験報告に基づき、結果を掲載する。結論としては、懸念された引張試験データの齟齬は認められず、前記の特性データの信頼性は担保された。

・分析外注依頼先：川重テクノロジー株式会社／調査サンプル：試作鋳造品 2 サンプル(AC4CH、ADC10)
<調査結果>

(1) 材料試験(引張試験およびヤング率の測定)

前述の東北大学で実施した引張試験の数値(鋳放し材)との比較において、ほぼ同等の数値となっており、信頼性、信ぴょう性は十分に担保された。なお、引張試験後の破断したサンプルの写真 B は貼付したように、同一材料で 3 点行い、2 種類の合金について行ったので、計 5 点あるが、何れも特に異常な部位での破断は認められなかったので供試したサンプル自体の問題はなかったものと思われる。

(2) 残留水素ガスの分析

鋳造品に置いては、水素ガスの含有量が鋳造状態の良否判定の指標となる。その分析の結果、2 種の合金共に水素含有量 1.3 (cc/100g) であった。なお、昨年度 H23 年度においても同様のガス分析を行った。その際の結果は、6.0 (cc/100g) であったので、鋳造技術事態も大きな進展があったことが確認できた。因みに、昨年度の分析外注を行ったサンプルは FANUC ロボットアーム部品の模擬品を試行錯誤段階で、型や鋳造方案を検討中であつた段階のものであつた。外観上も欠陥があるような試作品を対象とした、という鋳造条件・技術レベル差が顕著な含有ガス分析で確認された結果となつた。

最終章 全体総括

1. 3年間の研究開発成果

本研究の目的は、ロボット部品用鋳物や建設重機、船舶関係メーカーより、強度があつて、今より軽い鋳物が必要というニーズに着眼したものであつた。また、高強度・極軽量鋳物化は、装置全般の軽量化につながり、省エネ・高効率化につながる重要な開発テーマである。半凝固研究から2磁軸で磁場をかけると合金の組織が変化し、液相状態で鋳型に流し込むと、部品強度が変わる事を発見し、今回はその電磁攪拌効果をより高めた縦横2磁軸攪拌した軽合金溶湯による砂型鋳造技術を開発した。

研究開発当時、市場で販売している多関節ロボットの使用部品と同一形状で、木型製作、湯流れ解析を実施後、2磁軸攪拌溶湯にて鋳造した試作品を実ロボットに組み込み、実装試験を行った。実際のロボットアーム実装では、当初の目論見通り、軽量化の効果が十分に発揮され、可搬重量が増加することを確認出来た。

本研究開発の主要な成果を総括として、以下に列記する。

1. ダイカスト鋳造品（研究用ロボットアーム）より、軽量品の砂型鋳造品が鋳造できた。
2. ダイカスト品と同様な強度が確認出来た。
3. T6処理などの熱処理が可能であることが確認出来た。
4. 従来の砂型鋳造法より、低い温度での鋳込みが可能であることが確認出来た。
5. 従来の砂型鋳造法より、低温鋳込みのため、作業時間、冷却時間が短縮される。
6. 従来は鋳造に供されてこなかった合金種を用いて、その鋳込みを実証確認出来た。
7. 砂型鋳造法で問題となっている軽劣化などの自動化設備の確認が出来た。

2. 研究開発後の課題・事業化展開

1) 事業化展開

目標とした2磁軸攪拌溶湯による砂型鋳造法での成型品形状、品質は確認出来た。

今後、川下企業から期待されている実装可能な砂型鋳造品を提供し、目標のロボット部品をはじめ、軽量化が期待される自動車部品の試作研究品、或いは、生産供給部品として、客先の評価を期待したい。

今後、補完研究により、企業との共同研究開発チームを提案し、実製品を提供出来る体制づくりを検討する。また、自動化設備を充実し、多くの製品試作に対応できるように改良する。

現在、ダイカスト部品の代替品としての複雑形状製品、低コスト少量部品、高級車用特別部品など、新しい需要の成型試作依頼の話もあり、品質、コストなどの面から引き続きダイカスト鋳造法に変わる新工法として、試作確認、試作成型品のデータベース化を図る。

今回開発した2磁軸攪拌溶湯による砂型鋳造法製品は、当初ロボット軽量化部品をターゲットに進めて来たが、これ以外のニーズ分野、例えば、医療、光学機器などの生産設備部品としての高精密品、高強度品として、他の成形法では製作できない形状を差別化要素として、これらの少生産部品でも、より付加価値の高い部品開発、受注に努める。

2) 今後の課題

製品開発の具体的な市場、製品、受注活動と市場の声など、2年に一度のダイカスト会議・展示会会場で2回意見を聞くことが出来た。展示会で来訪していただいた企業等の開発者からは、製品の規格・基準など早急にまとめて、設計時の数値を明確にして欲しいとの意見が多く、他鋳造法の関係企業とも連帯を図り、早急に規格・基準化対応を検討していく。

また、砂型鋳造での自動化など、生産時の条件安定化とこれに伴う製品品質の安定化、信頼性向上も今後の課題と認識しており、随時、自動化対応を進めていく。

以上、事業化に向けた課題も残っているが、今後、補完研究を通じて、一層の解決努力をおこなっていきたい。