

平成 2 7 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高熱伝導アルミヒートシンクの二色成形ダイカスト技術の開発」

成果報告書

平成 2 8 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 よこはまティーエルオー株式会社

「高熱伝導アルミヒートシンクの二色成形ダイカスト技術の開発」

目 次

第 1 章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1. 研究背景	3
(1) 自動車に関する事項	
(2) 家電に関する事項	
(3) アルミダイカスト工程に関する事項	
1) コストダウン	
2) 接合性	
2. 目的	4
3. 目標	4
(1) 二色成形ダイカスト装置の設計、製作	
(2) 高い放熱性	
(3) 冷却水の気密性	
1-2 研究体制	5
1. 研究組織	5
2. 管理体制	5
(1) 事業管理機関	
(2) 再委託先	
3. 研究者氏名	7
4. 協力者	7
1-3 成果概要	7
1. 二色成形アルミダイカスト装置の開発	7
2. P I G（ピンインジェクションゲートゲート）プロセスの開発	8
3. 二色成形アルミダイカスト用金型の開発	8
4. 純アルミとダイカストアルミの接合性の開発	8
5. ヒートシンク形状の伝熱設計の最適化	8
6. ヒートシンク試作品の作製と評価	9
1-4 当該研究機関の連絡窓口	9
1. 事業管理機関	9
2. 統括研究代表者	9

第2章	本 論	10
2-1	二色成形アルミダイカスト装置の開発	10
2-2	P I G（ピンインジェクションゲートゲート）プロセスの開発	13
2-3	二色成形アルミダイカスト用金型の開発	20
2-4	純アルミとダイカストアルミの接合性開発	25
2-5	ヒートシンク形状の伝熱設計の最適化	33
2-6	ヒートシンク試作品の作製と評価	44
第3章	複数年の研究開発成果	47
3-1	平成25年度の成果	47
3-2	平成26年度の成果	48
第4章	研究開発後の課題・事業化展開	50
4-1	研究開発後の課題	50
1.	高熱伝導アルミヒートシンク	50
2.	二色成形ダイカスト技術	50
4-2	事業化の展開	51
1.	高熱伝導アルミヒートシンク	51
2.	二色成形ダイカスト装置	51

第1章 研究開発の概要

自動車産業で課題となっているハイブリッド車や電気自動車用のパワー半導体モジュールの冷却、及び家電産業で課題となっている照明用LED素子の冷却のためには、放熱性に優れ、高強度なアルミヒートシンクが必要である。

本研究開発では、放熱性に優れ、高強度なアルミヒートシンクを高品質かつ安価に製造することを可能にするために、ヒートシンクの放熱部を高熱伝導率の純アルミで成形し、その周囲部（締結部）を構造用アルミ合金で成形する二色成形ダイカスト装置を設計した。ヒートシンクの放熱部を高熱伝導率の純アルミで成形して一色目とし、その周囲の締結部を構造用アルミ合金で成形して二色目とする、二色成形ダイカスト装置を設計した。

本年度は、一色目の純アルミを成形するパーティング射出方式のコールドチャンバーダイカスト装置を製作した。

また、上記装置を運用するにあたっての補足技術開発として、以下の研究を実施した。

- ・上記装置に搭載する、純アルミと構造用アルミを成形する固定金型と可動金型の設計。
- ・アルミ材料を直接、金型内のキャビティへ注入するピンインジェクションゲート（以下「PIG」という）プロセスの開発。
- ・熱の伝達を低下させる鑄造欠陥である鑄巣を作らない鑄造技術を開発するための鑄造条件、金型構造、離型剤の検討。
- ・自動車用パワーモジュールの純アルミと構造用アルミの接合界面にある異物の原因と考えられる離型剤の検討と離型剤を使わない鑄造方法の開発。
- ・熱通過率の目標値を達成し得るヒートシンク形状に対する設計指針の獲得。

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1. 研究背景

アルミ鑄造の係る技術に関して、以下の課題とニーズがある。

（1）自動車に関する事項

近年、ハイブリッド車や電気自動車の発達に伴い、パワー半導体の発熱がクローズアップされている。次世代自動車の駆動モーター用インバータにはパワー半導体モジュールが使用されており、半導体素子を冷却する必要がある。従来のヒートシンクでは熱対策に不十分なのが現状であり、次世代を見据え更なる高熱伝導ヒートシンクのニーズが高まっている。現在ダイカストで製造される放熱材料はダイカスト用アルミ（以下「ADC12」という）が主流であるが、熱伝導率を考慮すると純アルミのダイカストが最適である。しかし、純アルミは強度が弱くネジの取付け力で変形する欠点がある。放熱部を純アルミ（熱伝導率 237W/m・K）、強度が必要な締結フレーム部分をADC12（熱伝導率 92W/m・K）としたマルチマテリアル化が望まれている。

本研究開発の課題は、純アルミとADC12を成形する二色成形ダイカスト装置の設計・製作である。

(2) 家電に関する事項

家電産業では、LED 照明、ノートパソコン、プロジェクターなどの放熱が課題となっている。高熱伝導性の実現のため、微細加工化したヒートシンクが望まれている。微細加工化のため、本研究開発は純アルミを主体にした二色成形ダイカストによるヒートシンクを開発する。

(3) アルミダイカスト工程に関する事項

従来のダイカスト工程は、純アルミをダイカスト成形後にトリミングプレスをする第一工程と、この純アルミダイカスト品をADC12でインサート鑄造しトリミングプレスする第二工程に分かれている。この鑄造工程は、ダイカスト金型とトリミング金型はそれぞれ二型が必要である。

1) コストダウン

従来のダイカスト工程は、製造工数と金型のコストがかかるが、本研究開発の二色成形ダイカストは一台のダイカスト装置で純アルミと ADC12 を連続して成形するので、製造工数と金型のコストダウンが可能になる。

2) 接合性

従来のダイカスト工程は冷えている純アルミ品をインサート成形するために ADC12 との接合面に空隙ができることにより、接合面から冷却水が漏れる問題がある。本研究開発の二色成形ダイカストにより接合面から冷却水の漏れのないヒートシンクを開発する。

2. 目的

研究開発実施機関の東京高压工業はこれまで鑄造が困難とされていた純アルミのダイカスト成形によるヒートシンクの量産製造に成功している。本研究開発では、この技術をさらに発展させ、純アルミと ADC12 を連続でダイカスト成形する二色成形ダイカスト技術の確立を目的としている。

さらにヒートシンクの放熱性の向上、接合性の向上を目的としている。

3. 目標

(1) 二色成形ダイカスト装置の設計、製作

一色目にヒートシンクの放熱部を高熱伝導率の純アルミで成形し、二色目にその周囲の締結部を構造用アルミ合金で成形する二色成形ダイカスト装置を設計する。

本年度は、一色目の純アルミを成形するパーティング射出方式のコールドチャンバーダイカスト装置を設計、製作する。このダイカスト装置は二色目のダイカスト装置と連結できる装置とする。

(2) 高い熱放熱性

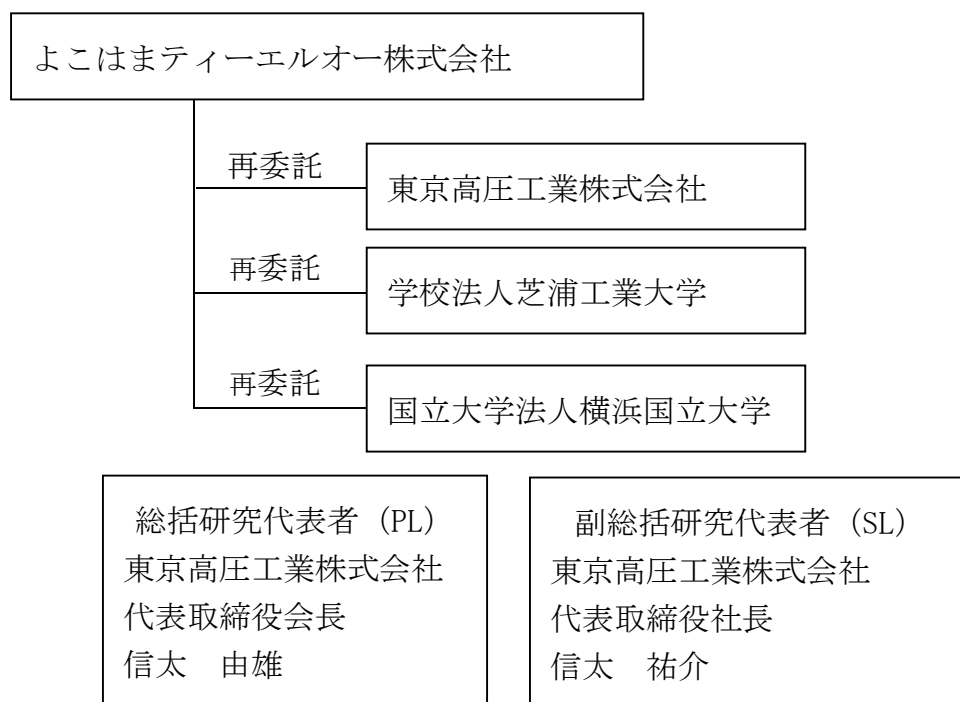
水冷における圧力損失の目標値の 10kPa を達成しつつ、放熱性の目標値を自動車用パワーモジュールにおける熱通過率 25,000W/m² K とする。

(3) 冷却水の気密性

自動車用パワーモジュールの気密性の目標は、冷却水の圧力を 100kPa かけた場合、締結フレーム部からの冷却水の漏れが無いこととする。

1-2 研究体制

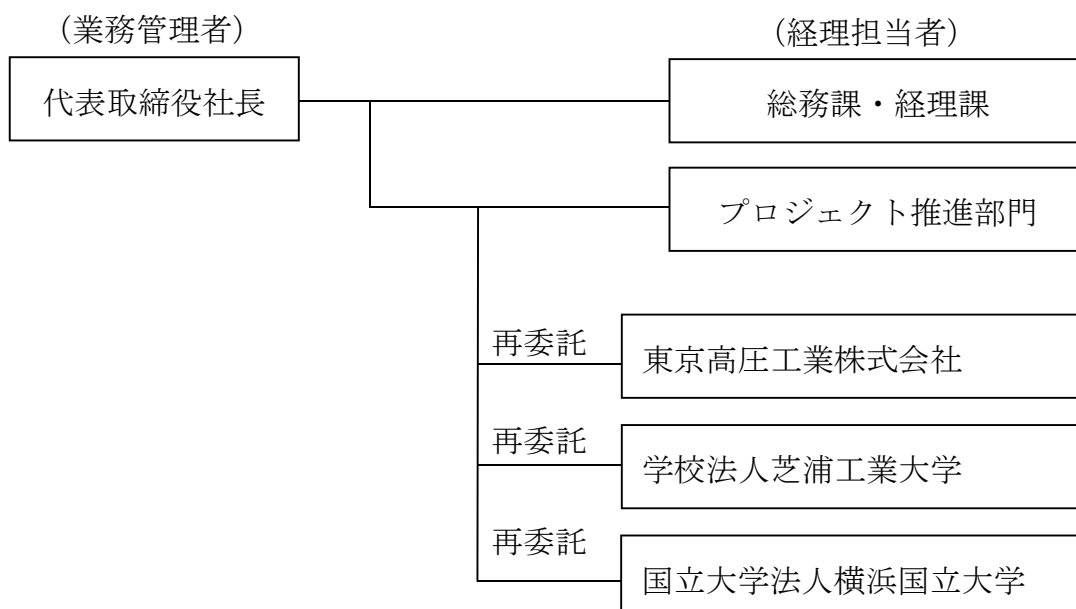
1. 研究組織



2. 管理体制

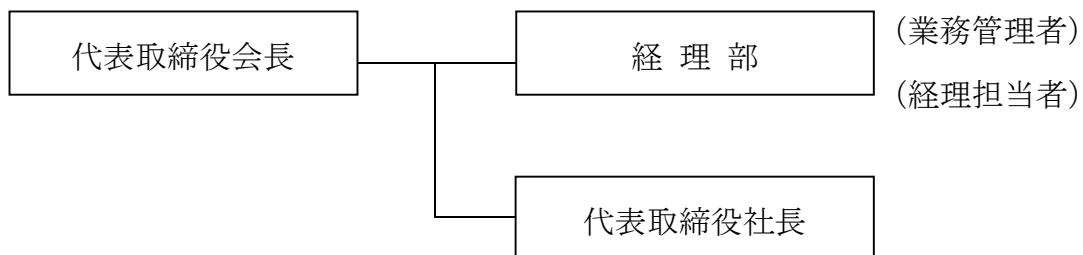
(1) 事業管理機関

【よこはまティールオー株式会社】

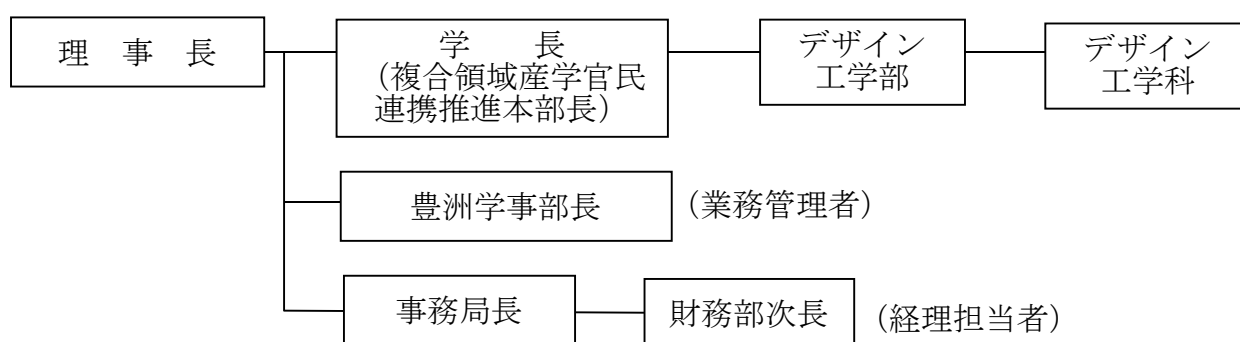


(2) 再委託先

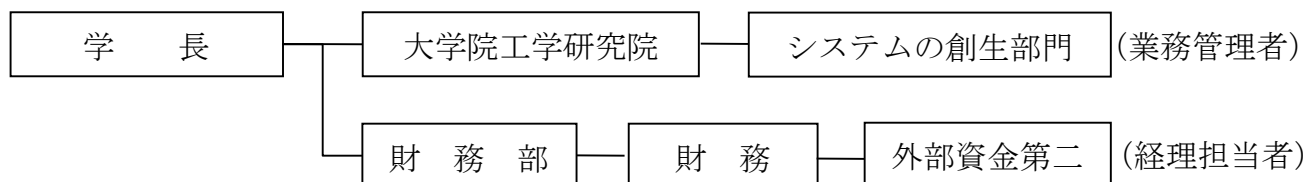
【東京高压工業株式会社】



【学校法人芝浦工業大学】



【国立大学法人横浜国立大学】



3. 研究者氏名

【東京高压工業株式会社】

- ・ 信太 由雄 代表取締役会長
- ・ 信太 祐介 代表取締役社長
- ・ 兼平 裕次 生産管理部

【学校法人芝浦工業大学】

- ・ 相澤 龍彦 デザイン工学部 デザイン工学科 教授

【国立大学法人横浜国立大学】

- ・ 西野 耕一 大学院工学研究院 システムの創生部門 教授
- ・ 廣谷 真 大学院工学研究院 システムの創生部門 大学院生

4. 協力者

【リンテック技術士事務所】

- ・ 鹿野 英男 所長

【みねぎし技術士事務所】

- ・ 嶺岸 輝彦 所長

【株式会社日立製作所】

- ・ 堀内 敬介 研究開発グループ テクノロジーイノベーション統括本部
機械イノベーションセンタ 高度シミュレーション研究部

1-3 成果概要

1. 二色成形アルミダイカスト装置の開発

世界初の二色成形アルミダイカスト装置を完成させた。この装置は溶解炉を2基備え、射出部を2箇所とした横型コールドチャンバーダイカスト装置である。完成した二色成形ダイカスト装置は使用する金型の仕様により、金型の取り付けが出来ない場合が明らかになった為、本年度は機械の改善・改修を行い、サイズ内であれば金型設計の自由度が増した。この改善・改修により本事業で求める、高強度で高熱伝導のマルチマテリアル化されたヒートシンクの製造を高効率で行った。ヒートシンクの製造にあたり、2つの溶解炉にそれぞれADC12と高純度アルミを配し、一色目にヒートシンクの放熱部を純アルミで成形し、二色目にその周囲の締結部を構造用アルミ合金で成形した。これによりマルチマテリアル化されたヒートシンクのみならず、異種金属の別体部品の同時鋳造も可能となり、コストダウンが可能な部品の種類も増えた。

2. P I G（ピンインジェクションゲートゲート）プロセスの開発

二色成形アルミ・ダイキャスト技術のコアとなるP I Gプロセスを完成させ、その要素技術としての特徴を明らかにした。

（1）P I Gゲート圧制御

CNC 制御により金型への熔融アルミの投入を、圧力を制御しつつ行うことができる。過熱水蒸気系との接続を円滑を行うように型構造の修正改良を進め、型温度をゲート温度と独立して制御できる。

（2）P I G過熱水蒸気変換装置

これまでのアルミ・ダイキャスト技術ではなかった、型の過熱、冷却を1つのチャンネルで行う加熱冷却系を完成させた。当該変換装置をONにすることで、冷却水は400℃以上に過熱され、Offすることで、冷却モードで動作する。

（3）P I G蒸気発生・凝縮装置

過熱水蒸気の取り扱いをより効率よく行うとともに、安全性を高めるため、変換装置には予備加熱した蒸気を導入し、型から排出された水蒸気は、凝縮装置で水にもどすようにした。

3. 二色成形アルミダイキャスト用金型の開発

本事業で求める二色成形ダイキャストによる高強度で高熱伝導のマルチマテリアル化されたヒートシンクを高効率で製造する為の金型を完成させ、ヒートシンクの製造が可能となった。金型開発にあっては、金型作動方式を2案発案し、製造したプラスチックモデルと二色成形ダイキャスト用流動解析ソフトを用い、鑄造条件検討用金型を作成し、二色成形ダイキャストを行い、二色成形ダイキャスト品を製造する事が出来た。

この結果を踏まえ、2種類のアルミが混合させずに、接合性や気密性、鑄造作業性等の項目について改善を行い、本事業で求める高強度で高熱伝導のマルチマテリアル化されたヒートシンクの製造に成功した。

4. 純アルミとダイキャストアルミの接合性の開発

作製した二色成形アルミダイキャスト装置用の鑄造条件検討用金型により得られた知見を元に金型改造を行い、鑄造条件を変更し、周辺設備を改善した。改善後に試作鑄造した純アルミとダイキャストアルミの二色成形ダイキャストによる製品の接合性について、外観観察、引張試験、気密性試験、金属顕微鏡による観察、電子顕微鏡による面分析、熱伝導率の測定などにより、評価を行い、アドバイザーが求めるマルチマテリアルなヒートシンクとしての条件を満たす事が出来た。

5. ヒートシンク形状の伝熱設計の最適化

高性能ヒートシンクの伝熱設計を行った。目標の伝熱設計として、熱通過率 25,000 [W/(m²・K)] 以上、水冷圧力損失 10 [kPa] 以下が掲げられている、数値解析を用いて、目標の熱通過率を達成するヒートシンク形状、各種物理量の検討を行った結果

ピン直径 1 mm、ピン長さ 3 mm、ピッチ 1.5 mm のヒートシンクが目標値を達成する事が分かった。

6. ヒートシンク試作品の作製と評価

伝熱設計を行った形状でヒートシンクを作製し、熱通過率の測定を行った。

測定の結果、川下企業のアドバイザーより提示された目標値 $25,000 \text{ W/m}^2\text{C}$ を超える結果を得る事が出来た。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

1. 事業管理機関

- (1) 所属 : よこはまティールエルオー株式会社
- (2) 氏名 : 藤本 郁夫
- (3) 電話 : 045-339-4441
- (4) FAX : 045-340-3541
- (5) E-mail : fujimoto-ikuo-sx@ynu.ac.jp

2. 統括研究代表者

- (1) 所属 : 東京高圧工業株式会社
- (2) 氏名 : 信太 由雄
- (3) 電話 : 03-3758-3814
- (4) FAX : 03-37580-8166
- (5) E-mail : y.nobuta@tokyo-kouatsu.jp

第2章 本 論

2-1 二色成形アルミダイカスト装置の開発

1. 二色成形ダイカスト装置の開発

本事業では世界初の二色成形アルミダイカスト装置を完成させた。図 2-1.1 に二色成形ダイカスト装置の概略図を、図 2-1.2 に作成した二色成形ダイカスト装置の写真を示す。この装置は溶解炉を2基備え、射出部を2箇所とした横型コールドチャンバーダイカスト装置である。完成した二色成形ダイカスト装置は使用する金型の仕様により、金型の取り付けが出来ない場合がある為、本年度は機械の改善・改修を行い、サイズ内であれば金型設計の自由度が増した。この改善・改修により本事業で求める、高強度で高熱伝導のマルチマテリアル化されたヒートシンクの製造を高効率で行った。ヒートシンクの製造にあたり、2つの溶解炉にそれぞれ ADC12 と高純度アルミを配し、一色目にヒートシンクの放熱部を純アルミで成形し、二色目にその周囲の締結部を構造用アルミ合金で成形した。これによりマルチマテリアル化されたヒートシンクのみならず、異種金属の別体部品の同時鋳造も可能となり、コストダウンが可能な部品の種類も増えた。

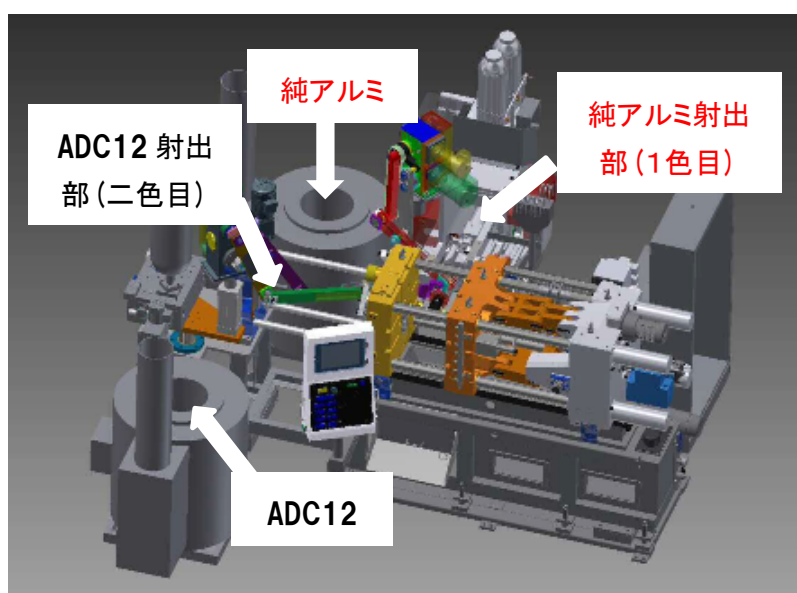


図 2-1.1 二色成形ダイカスト装置設計概要図

図 2-1.3 にパーティング射出部の写真を示す。二色成形アルミダイカスト装置において最も特徴的であるパーティング射出部は、金型を閉じた後にアルミ射出スリーブを装填し、アルミを射出する。射出は金型固定側と可動側との境目より行う。メリットとしては通常の射出スリーブに比べ溶湯注入部と製品部との距離が短い為、溶湯温度の低下を抑制することが出来、鋳造品質が向上する点である。デメリットとしては、パーティング射出部にスライド中子を設定する事が出来なくなるため、製品形状の自由度が一部損なわれる点にある。この点に関しては金型設計により解消するしかない。製品形状により金型の構造は変わるが、パーティング射出部は金型のパーティングの変化にも対応出来るように調整機能を付与した。

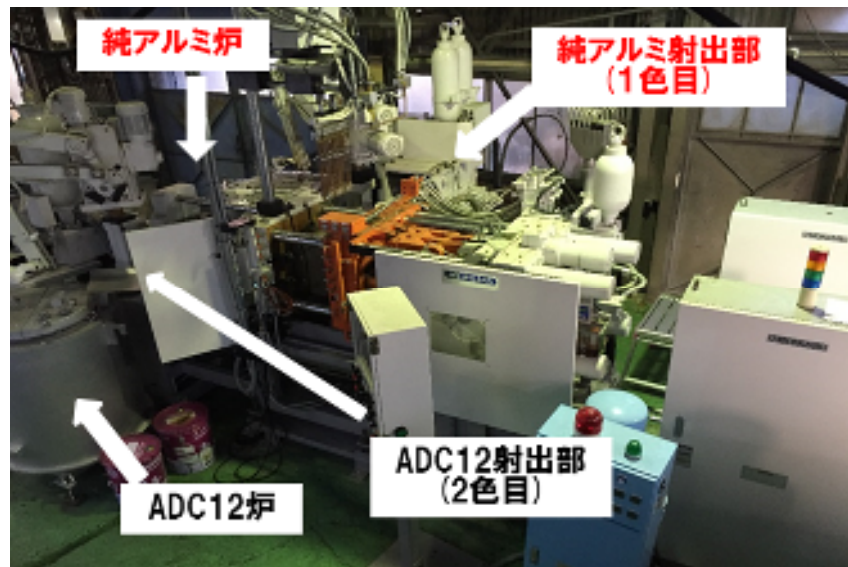


図 2-1.2 二色成形アルミダイカスト装置全体像

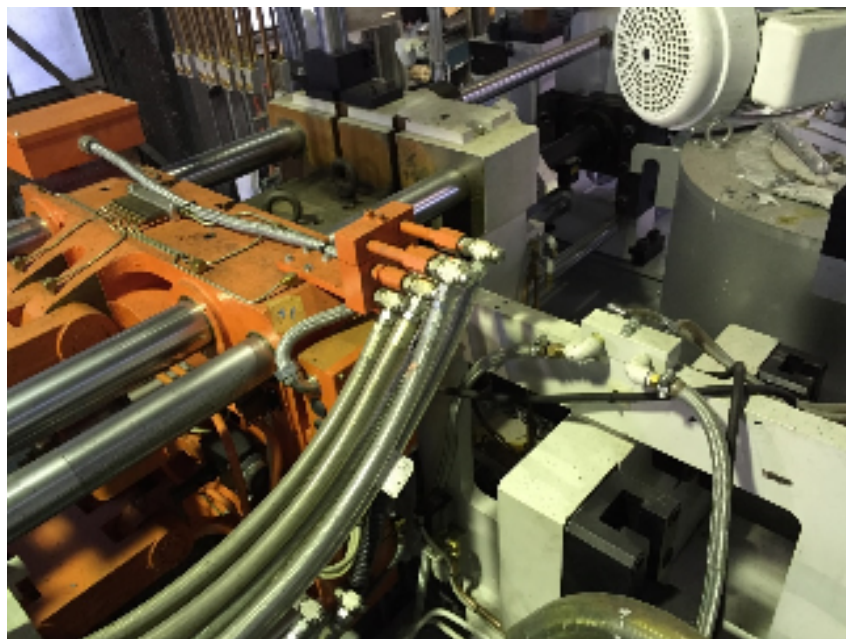


図 2-1.3 パーティング射出部

通常のダイカスト装置の場合、射出圧に対しトグル部にて金型が開いてしまうのを防ぎ、射出反力に対してはCフレームにて吸収しているが、パーティング射出の場合、金型開閉方向とは直角であるため、金型が開いてしまうことがない事や作業者スペースがある事よりトグルは設定していない。また射出反力に対しては、タイバー下部や射出部脇に剛性を保つフレームを設定し二色成形ダイカスト装置の剛性を確保している。



図 2-1.4 通常射出部

図 2-1.4 に通常射出部の写真を示す。射出部の構造は一般的なアルミダイカスト用コールドチャンバー方式と同様であるが、通常射出スリーブは1箇所のみで、位置を変えることは出来ない。開発した二色成形アルミダイカスト装置は、金型に対し、通常通り下部とセンター部の2箇所より選択的に射出可能とした。このことにより、複雑な形状によりアルミの充填不足が発生しやすい製品に対しても対応が可能となった。位置の設定は射出機構部下にあるジャッキにより調整する。

この装置により本事業で求める、高強度で高熱伝導のマルチマテリアル化されたヒートシンクの作成が高効率で可能となった。具体的には一色目にヒートシンクの放熱部を純アルミでパーティング射出により成形し、二色目にその周囲の締結部を構造用アルミ合金で通常射出により成形する。射出方式については、本事業ではパーティング射出→通常射出であるが、通常射出→パーティング射出も可能である。またそれぞれの射出のみ使用する事も可能である。

二色成形の場合、一色目と二色目の材料が混ざってしまうのを防止するため、油圧機構を利用したスライド中子（コアプーラ）により仕切りを設定する。この為の油圧ラインも設定した。また充填不足解消の為、真空装置も設定した。

2-2 P I G（ピンインジェクションゲートゲート）プロセスの開発

1. P I Gプロトタイプシステム

純アルミニウムのP I Gダイキャストイングに向けて、P I Gプロセスの改良ならびにプロセス条件の最適化を行い、モデル材料でのヒートシンクモデルのダイキャストイングを行った。

P I Gプロセスとは、溶湯アルミを金型コア内にダイレクトチャージする方法である。図2-2.1にその概要図を示す。最初に、チタン製チャージ容器（内面をプラズマ窒化後、CrNコーティングを施し、耐熱性を向上させた容器）内で、アルミを超高周波 IH にて、外部制御信号を受けて、瞬時にアルミを溶融させる。次に、溶湯アルミ上部（凝固状態のまま）を、外部信号を受けて、CNC 制御にて一定速度で加圧し、金型コア内へ、ピンゲートから溶湯アルミを注入する。注入に際しては、圧力をロードセルにて実測する。

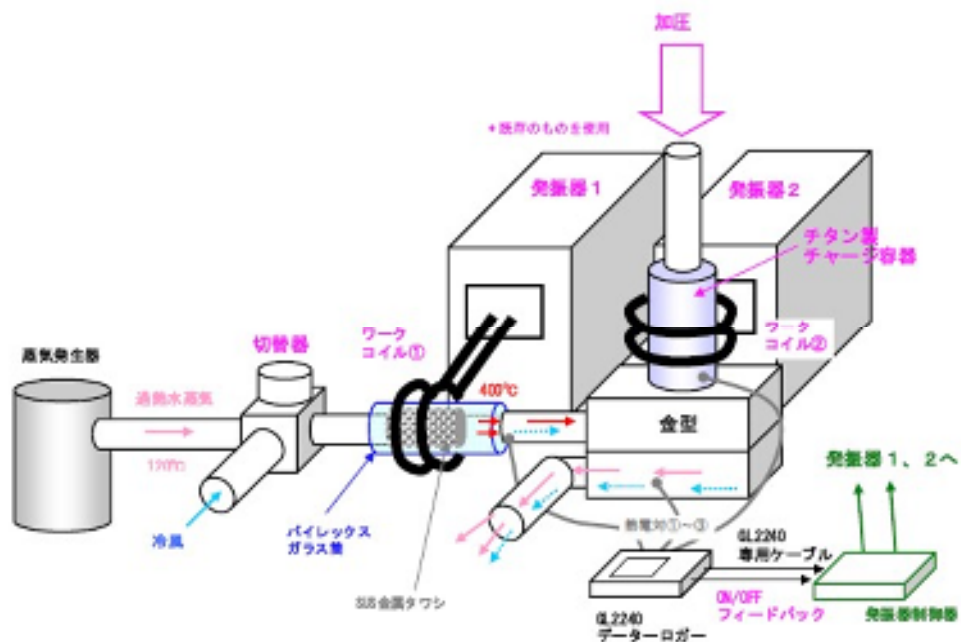


図 2-2.1 P I Gプロセスの概念図

2015年度の改造により、モデル材料のダイキャストイング実験を行うことができています。特に、2015 年度に改造を行い、安定してダイキャストイング実験を実施できるようにした点を示す。図2に示すように、改造は3点からなる。

- ① P I G加圧制御系+型温制御系： CNC 制御により、溶湯アルミを加圧成形できるように制御系を増強し、型温度の制御系との連関により、成形に十分な型温に達したタイミングでCNC ストローク制御を、圧力を調整しながら実施できるように改造した。
- ② 過熱水蒸気変換装置： 通常のダイキャストイング金型の温度制御では、加熱用のヒーターと冷却配管の2つを用意する。ヒートシンクなどのように形状が複雑な製品のダイキャストイングでは、金型内部での空間配置がきわめて困難になる。ここでは、2つの2つの配管とするため、加熱は過熱水蒸気で、冷却は水冷で行う。これにより、

後述するように簡易な配管構造で加熱・冷却が可能となる。

- ③ 蒸気発生＋凝縮装置： 使用済みの過熱水蒸気を安心安全に取り扱い、外に排出することなくクローズドシステムとする。使用済み水蒸気を水に凝縮することで、安全で安定したPIGプロセスとした。

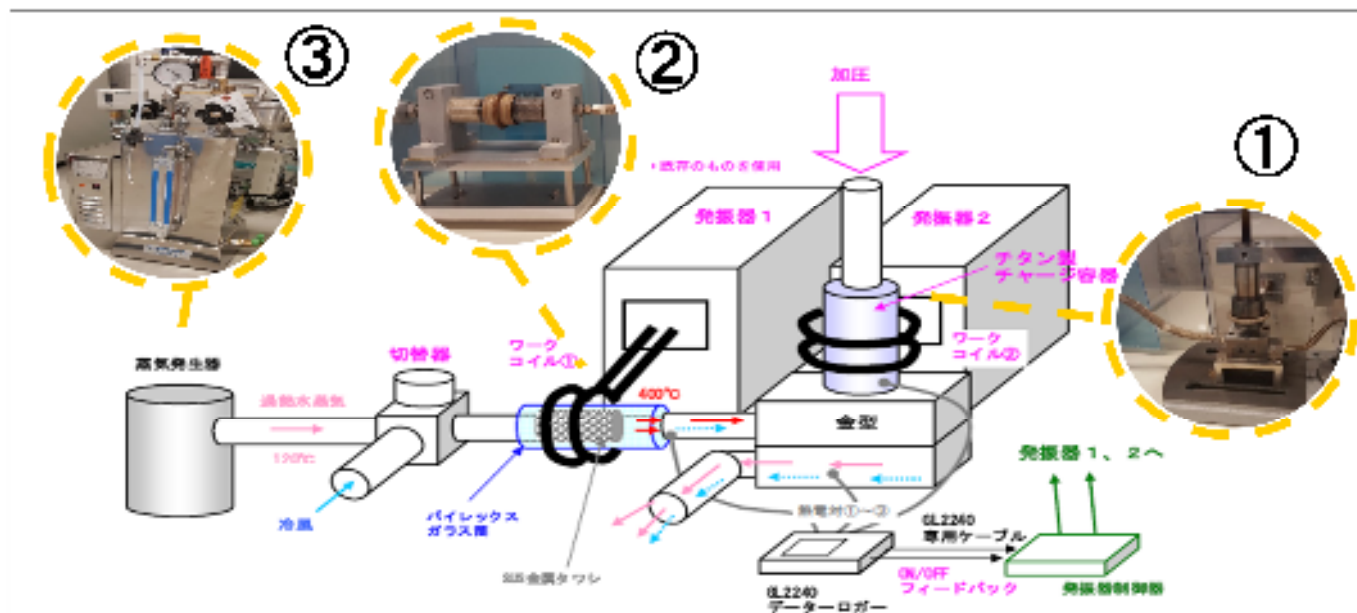


図 2-2.2 2015 年度の改造を行って完成した P I G プロセスのプロトタイプ装置

図 2-2.2 に対応する、芝浦工業大学に設置した装置の概要を図 2-2.3 に示す。ここでは、プロセス手順を明確にするように、順列として装置を配置しているが、より 3 次元的でコンパクトな配置での P I G プロセスも可能である。

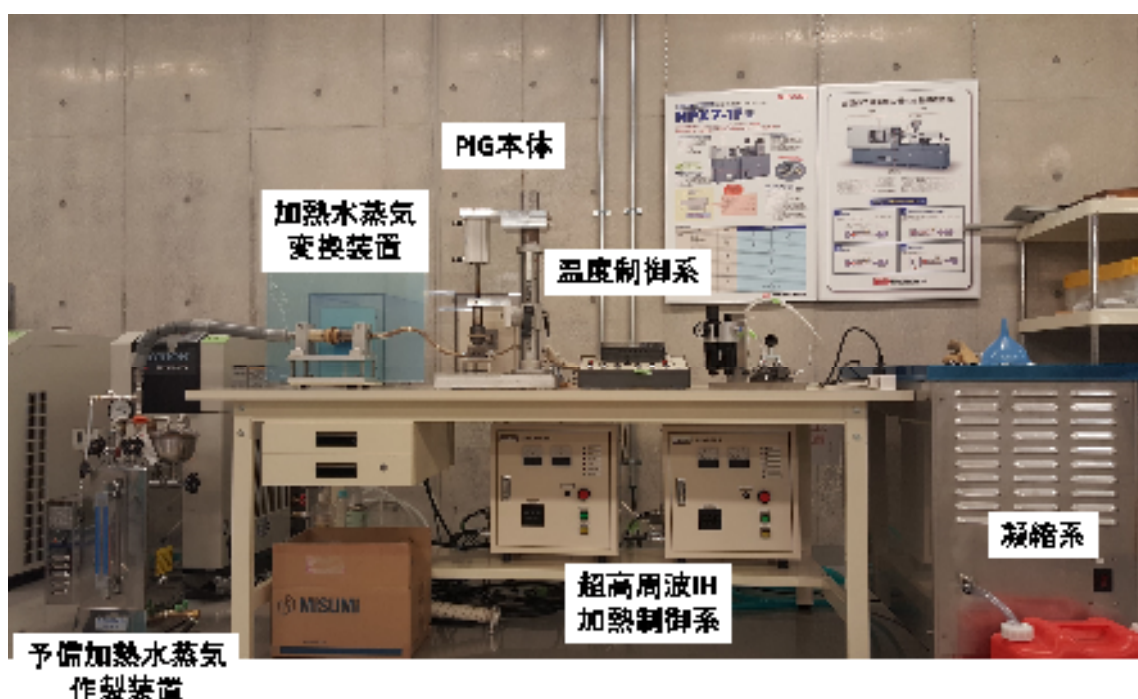


図 2-2.3 実際に開発した P I G プロトタイプシステムの全景。

2. P I Gプロセスの金型構造

P I Gプロセスの金型の全体構成を簡易に、図 2-2.4 に示す。冷却配管と加熱配管とを同一にするため、型構造は可能なかぎりシンプル化した。型締め力は上下のボルト構造で受け、中央ゲート部から熔融アルミを導入する。横板は、加熱配管ならびに冷却配管からの圧力を受ける。鋳込み部の加熱・冷却はすべて下型下部で行う。

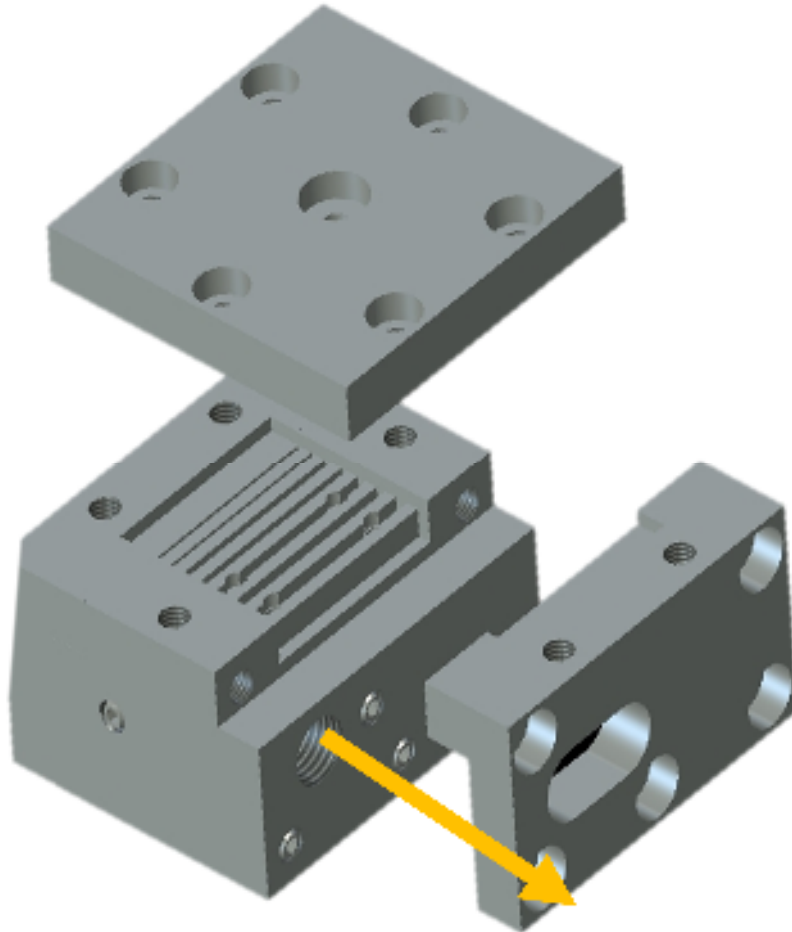


図 2-2.4 P I Gプロセス用の金型構造の概念図

上部がゲート部を含む金型、下部が加熱・冷却配管を含む金型となる。特に、金型下部は、過熱水蒸気と冷却水が通る配管を含むため、前述したように、できるかぎり簡易な配管構造とし、ダイキャスティング時の型温度の制御は、制御方法で均一温度を保持するようにした。図 2-2.5 に詳細な配管構造を示す。直線的な配管構造とし、直角部では締結ねじで封鎖する形で一方向の流路を形成している。

実際の実験では、0.5mm の非常に薄いフィンのヒートシンクを成形するにあたって、材料が完全に充填される前に固まることを防ぐために、金型を加熱した状態で注入する。IH コイルヒーターに高圧のスチームを通し、さらに 400℃まで加熱する。スチーム加熱部から金型までの間で熱の損失が発生し、金型内には 300℃のスチームが走る。

注入後はバルブを切り替え、冷水を通すことで急速で冷却させる。

この手順によって、溶湯アルミ材の吐出圧力の最適化は必要となるが、繰り返しの再現性の高いダイキャスティング実験が可能となった。

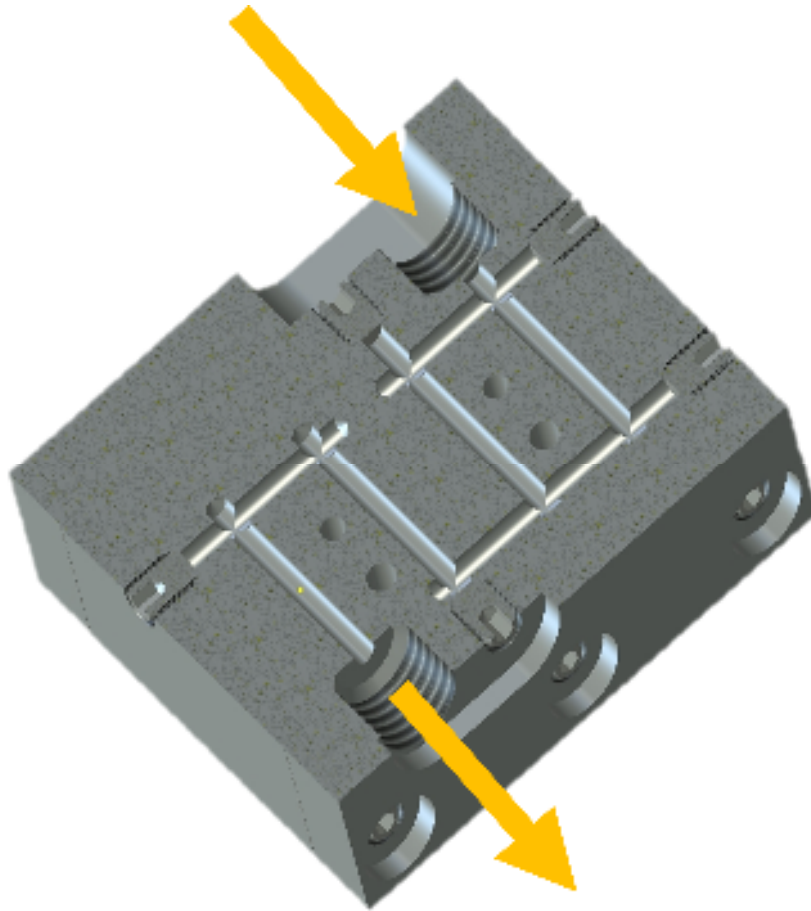


図 2-2.5 P I Gプロセス用金型の下部構造の詳細

3. P I Gプロセス条件の最適化

P I Gプロセスでの成形性に影響を及ぼすP I Gプロセス条件として、溶湯アルミ材の吐出圧力と型温度の最適値を探索した。最初に圧力の影響を調査した。

吐出圧力（以下、P I G圧力）は、ゲートからキャビティーへの噴出力であり、その場での制御が可能である。図 2-2.6 に、低P I G圧力での成形性の一例を示す。溶湯材料の吐出量が大きく低下し、型内のキャビティーを充満させることができず、わずかにヒートシンクのチャンネル形状が転写される程度である。

次に型温はそのままに、P I G圧力のみを 200 kPa から 600 kPa に変更した場合の成形結果を、図 2-2.7 に示す。ゲート部も形成され、チャンネル幅 1 mm 以上に関しては、ほぼ完全に充満するダイキャスティング成形が達成できている。しかし詳細を観察すると、0.5 mm 幅のヒートシンクチャンネルは未充満であるなど、成形性の不備な部分も見られた。このことが、P I G圧力 600 kPa 以上であれば、ピンゲートを形成しつつ、型内部のキャビティーをほぼ充満できる溶湯アルミを吐出できることを示している。加えて、きわめて細かいチャンネルへの充満など、キャビティー内部の流動性に関しては、このP I G圧力条件のもと

で、キャビティー内部の流動性を、型温度の上昇で促進する必要があることを示唆している。

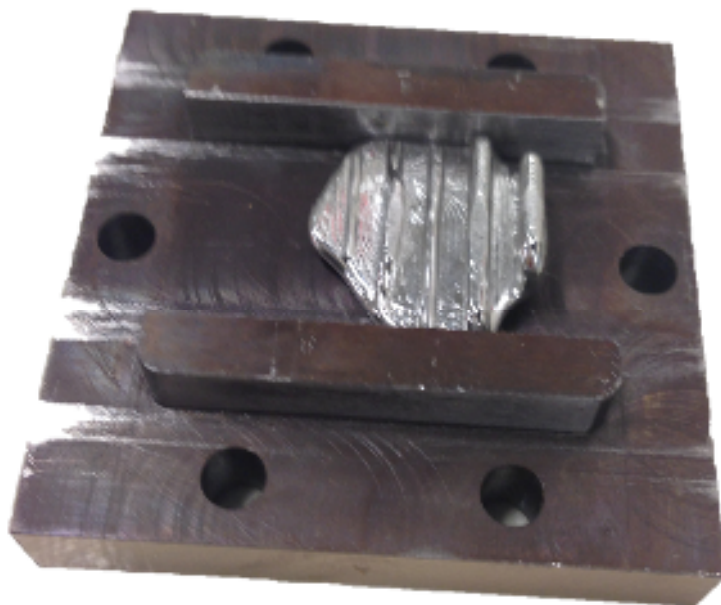


図 2-2.6 吐出圧力を 200 kPa、型温度を 190℃とした場合の P I Gプロセス成形性

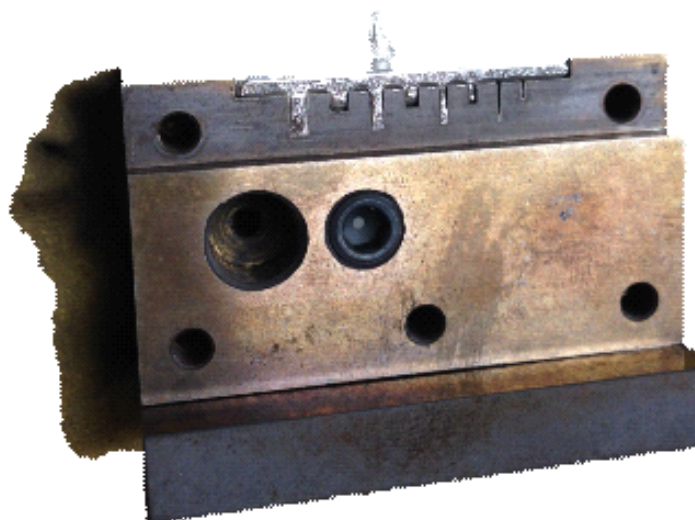


図 2-2.7 型温度 190℃、P I G圧力を 600 kPa とした場合の成形性

次に P I G 圧力は 600 kPa 一定として、徐々に型温度を上昇させ、P I G プロセスでの成形性の評価実験を進めた。図 2-2.8 に示すように、ヒートシンク設計で重要とされる、フィン高さとしフィン幅とのアスペクト比を変化させたモールドキャビティー形状を用いて、P I G プロセス条件の最適化を行い、P I G 圧 600 kPa 以上、型温 250℃以上で、完全充満した成形を実現した。

上記を含め、一連の成形実験の結果から、P I G プロセスの条件の中で、型温・P I G 圧力は、P I G においても、成形品の精度に大きな影響を与えることを明らかにした。特に、図 2-2.8 でも明らかになったように、P I G 圧 600 kPa 以上、型温 250℃以上で、0.5mm のヒートシンクフィンにも、完全に溶湯材料を充満できたことにより、本事業で課題となっ

ている微小厚フィン（理論的には直径・幅がうすいほどよい）、3.0 程度のアスペクトフィンでも、PIGプロセスであれば、完全に溶湯アルミを充満する最適プロセス条件を達成できることがわかった。

一方、通常のアルミ・ダイキャストプロセスと比較すると、PIGプロセスは、チャンバーを設けずダイレクトチャージであるため、型内部のキャビティーへの溶湯アルミを注入する際の摩擦による圧力の損失は無視できる点が興味深い。すなわち、通常のアルミ・ダイキャストで常に課題となる、型締め力における摩擦損失が無視できるため、PIG圧力を溶湯アルミの駆動力とするキャビティー内部の流動性制御を、型温度による溶湯アルミの粘性制御と型内部での圧力損失のみでできることを実証した。

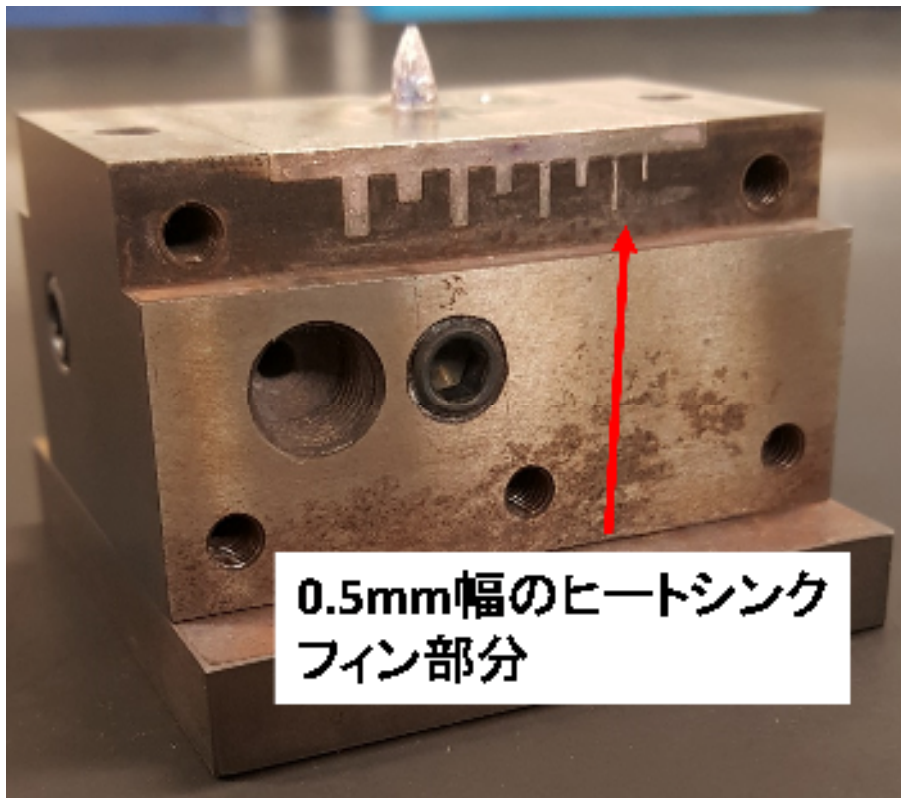


図 2-2.8 最適化探索で達成した溶湯材料の完全充満結果。ヒートシンクのフィン幅 0.5mm においても、アスペクト比に関係なく充満度あげることに成功した。

4. 型構造の最適化

PIGプロセスによる、二色アルミ・ダイキャストプロセスの確立という、本事業が最終的に目指す新技術に向けて、PIGプロセス型構造の最適化を行った。

本事業で開発した、二色アルミ・ダイキャストプロセスと比較して、溶湯アルミの溶解炉をもたずに、粒状・粉状アルミ固体を直接的に超高周波 IH で瞬時に溶解し、溶解状態（Mussy 状態）でゲートを介して鋳込むことで、二色を構成する純アルミ・アルミ合金のダイキャスト構造を簡易化できる。

前述したように、型締め力を軽減できるため、以下の述べるように型構造を最適化するこ

とで、溶湯材料の型内のキャビティー流動特性のみを最適化することで、微細で複雑形状のヒートシンク製品を成形できる。

図 2-2.9 に最適化した P I G プロセス用型構造を示す。基本的な簡易化構造は保持し、自動エジャクション機構を含め、多段構造とすることで、微小な改良も容易なように配慮している。

5. まとめ

最終年度で改良修正してほぼ完成した P I G ダイキャストは、以下の 4 つを特徴としている。

(1) センターゲートから溶融アルミ（超高周波 IH でその場加熱溶融）を注入するため、加圧制御により複雑な形状キャビティーへも完全充満させることができる。特にヒートシンクなどのように微小なフィン・高アスペクト比の製品には適している。

(2) 型温調整を過熱水蒸気系で行うため、型全体の均一加熱、加熱－冷却モードの切り替えなどにより、コンパクト型設計が可能となる。特に二色ヒートシンクのように融点の異なるアルミ合金の成形には適している。

(3) P I G ゲートは、低温プラズマ窒化＋耐熱コーティングしたチタン容器・ステンレス鋼容器としているため、700℃までは硬度・表面特性ともに十分な耐久性がある。このゲートを単一あるいは複数利用することで、複雑形状の鋳込み製品への展開も可能となる。

(4) P I G プロセス因子は、ゲート圧・型温であり、高圧力のゲート噴出力で型キャビティー内に溶融アルミを充填させ、型温を均一保持することで、一定の流動性を確保する。

型寿命に対しても、P I G 容器と同等の表面処理を行うことで、実用的な展開も視野に入れている。

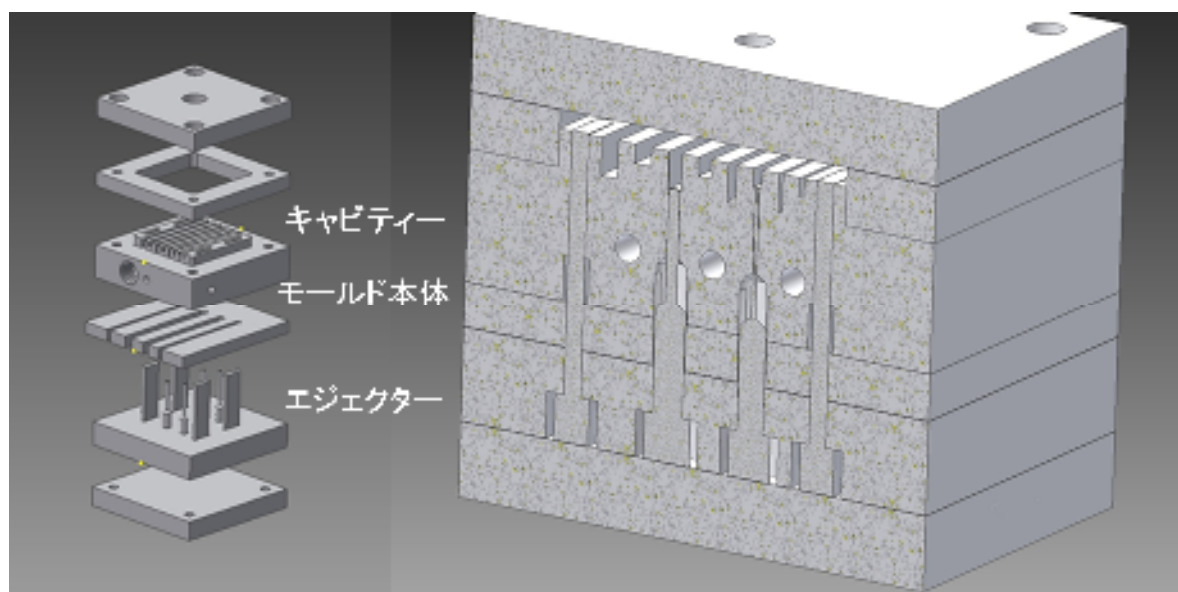


図 2-2.9 最適化した P I G プロセス用型構造

2-3 二色成形アルミダイカスト用金型の開発

1. 二色成形アルミダイカスト装置の鑄造条件検討用金型の開発

本事業で作成する複雑な形状のヒートシンクを鑄造する前に、単純なハート形状で二色鑄造する金型を開発・作成し、二色成形アルミダイカスト装置の鑄造条件の検討やダイカスト装置の動作確認、二種類のアルミ材の接合性の検討用に、簡易形状の二色成形アルミダイカスト金型を設計した。図 2-3.1 に設計した金型の図を示す。

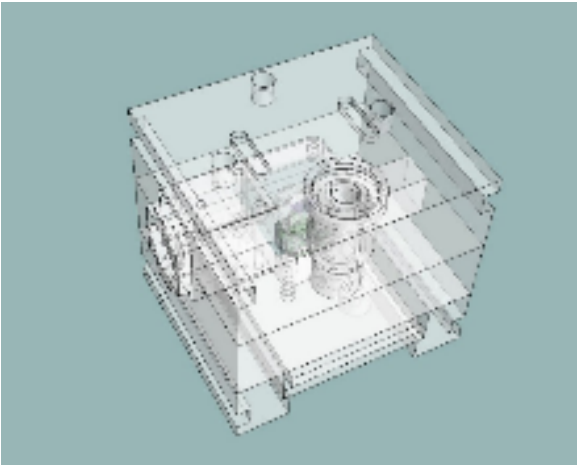
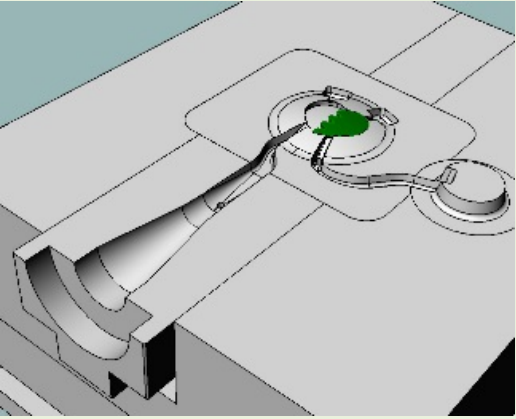
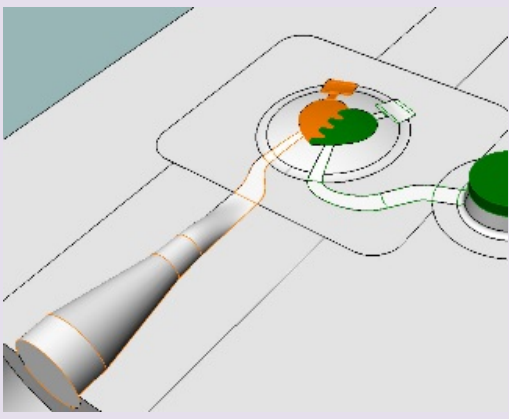


図 2-3.1 二色成形アルミダイカスト装置の鑄造条件検討用金型図

二種類の材料を別々に金型に注入するため、一色目の純アルミを充填時に二色目のアルミ用スペースに純アルミが入らないように仕切りを設定した。図 2-3.2 に二色成形ダイカスト時の工程を示す。

第 1 工程	第 2 工程
2 種類の材料を仕切る為、緑色部分を突出し、1 色目のアルミ充填に備える。	1 色目のアルミ材（オレンジ）を鑄造。
	
第 3 工程	第 4 工程

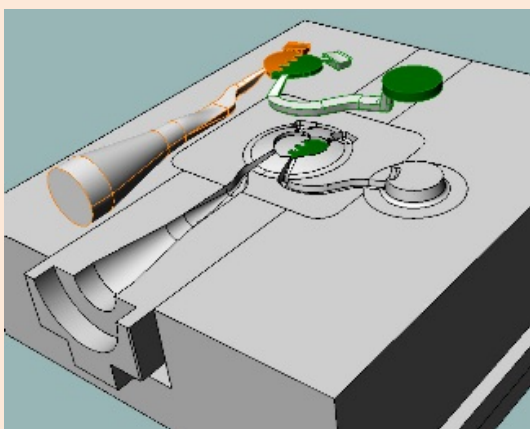
1 色目のアルミが充填凝固した後、緑色部分の仕切り部を凹ませ 2 色目の充填に備える。	2 色目のアルミ材（緑）を鋳造後、取出す。
	

図 2-3.2 二色成形ダイカスト金型の鋳造時の動き

金型を閉じ、パーティングのスリーブが装填されると、第一工程として、二種類の材料を仕切る為、緑色部分を突出し、1 色目のアルミ充填に備える。第二工程として純アルミがパーティング射出部より射出される。純アルミ凝固後、第三工程として仕切り部を凹ませ 2 色目の充填に備える。その後、第 4 工程として通常射出部より一般アルミが射出され、凝固と共に金型より製品を排出する。設計に基づき作製した金型の写真を図 2-3.3 に、試作時の様子を図 2-3.4 に示す。

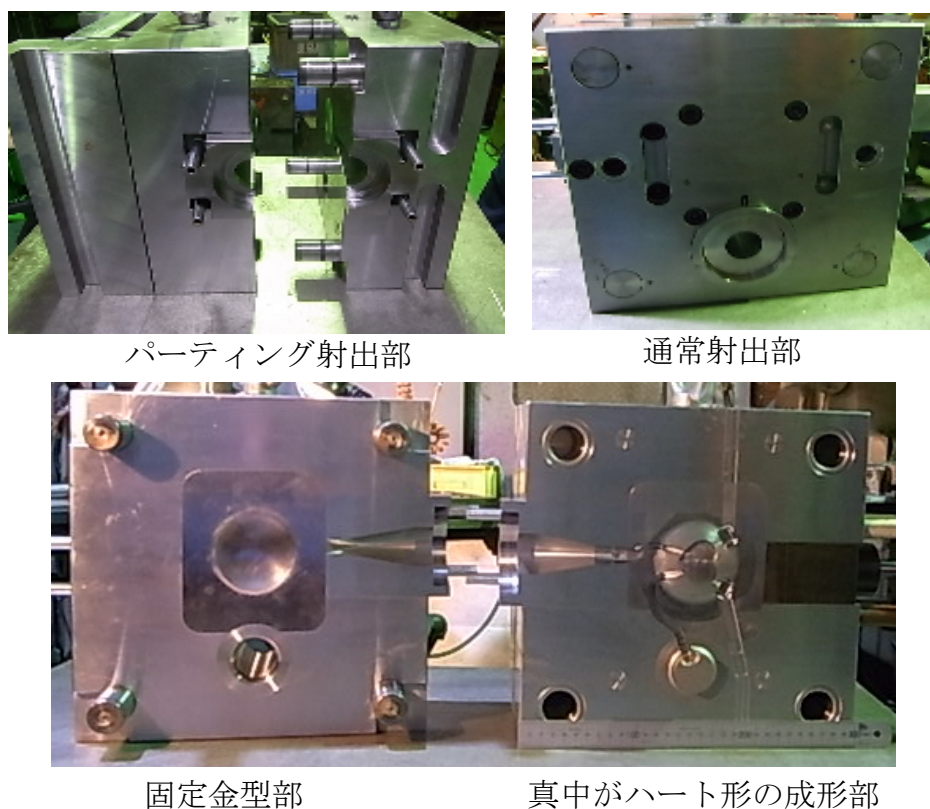


図 2-3.3 二色成形アルミダイカスト装置の鋳造条件検討用金型



図 2-3.4 試作時の模様

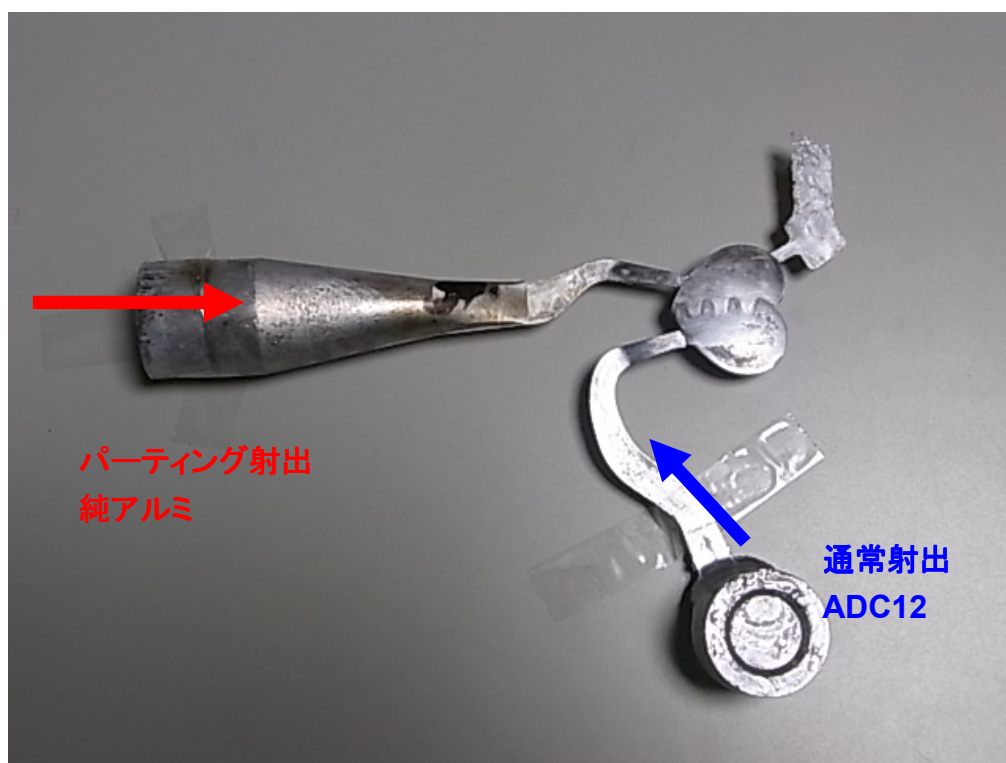


図 2-3.5 二色成形アルミダイキャスト鑄造条件検討用金型による成形品

図 2-3.5 に示すのは二色成形アルミダイキャスト鑄造条件検討用金型によりダイキャストした成形品である。写真左側より一色目として純アルミがパーティングより射出され、二色目として一般ダイキャストアルミを通常射出部より射出される。二色成形ダイキャスト品の形状を写真のように二色間の境界面を波型にすることで、機械的な接合は良好にな

る一方で、一色目の純アルミに発生する酸化物を二色目のアルミで押し流すには不利な形状であると考え、その真意を確認するためにこの形状とした。この金型を用いて二色成形ダイカスト装置に搭載し、ハート型の二色成形ダイカスト品が出来たが、本事業の本丸であるヒートシンクに要求される二つの材料間の接合性、気密性については不十分であった為、改良を行い、知見を得た。得られた知見については「2-4 純アルミとダイカストアルミの接合性の開発」の項で記述する。

2. 二色成形アルミダイカスト製ヒートシンク金型の開発

熱解析した最適形状のヒートシンクの金型を鑄造条件検討用金型で得られた知見及び流動解析結果を元に金型設計を行い作成した。図 2-3.6 にヒートシンクの図面を示す。

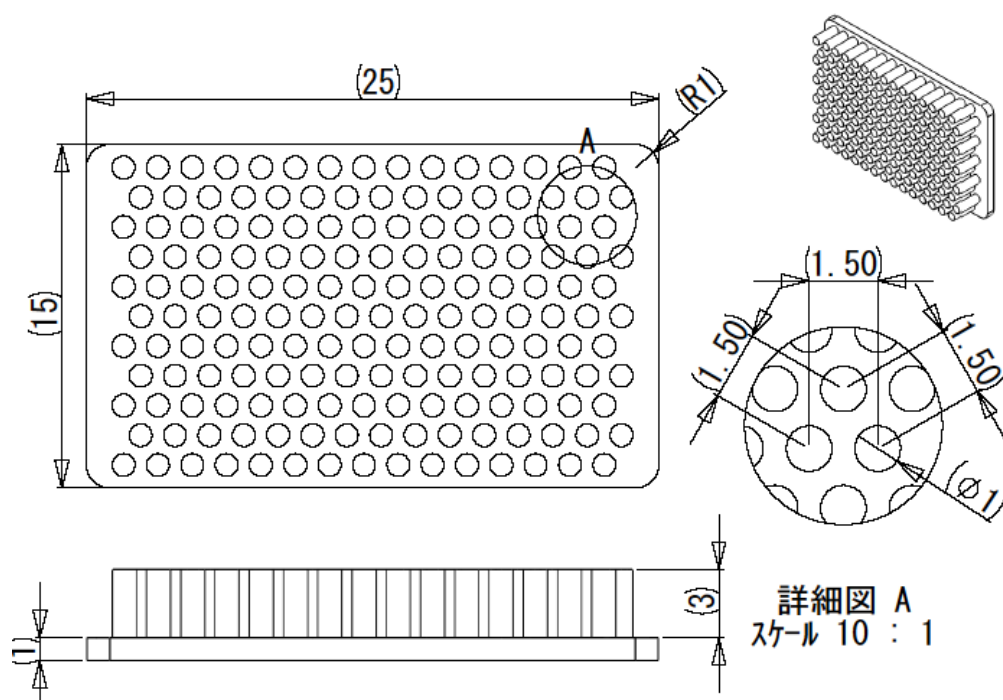


図 2-3.6 ヒートシンク的设计図面

図 2-3. 7 に二色成形ダイカスト金型の模式図を示す。

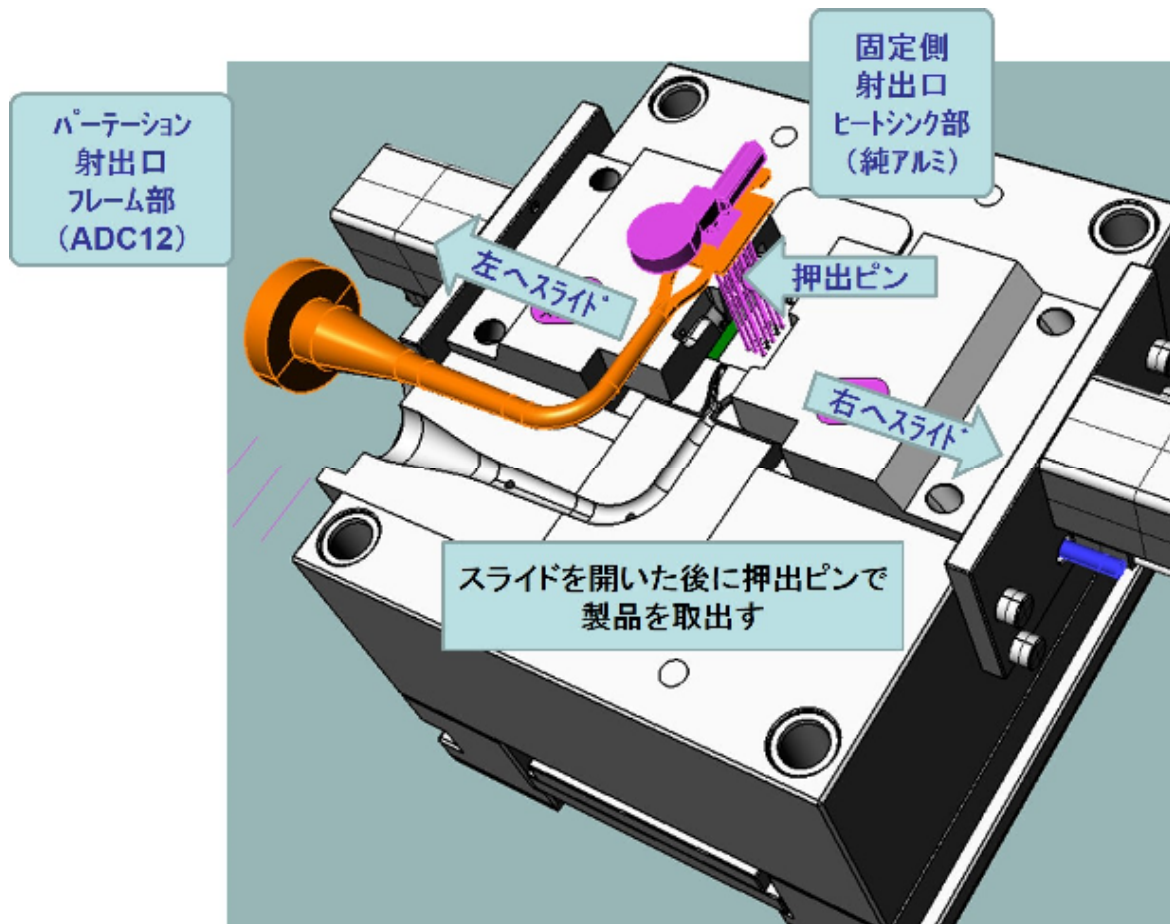


図 2-3. 7 二色成形ダイカスト金型の模式図

開発した二色成形ダイカスト金型は、一色目の純アルミを金型パーティング部より射出し、中心部のヒートシンクを成形した直後に（図 2-3. 8）、二色目のADC 1 2を金型の背面から射出し、締結部を成形する（図 2-3. 9）。

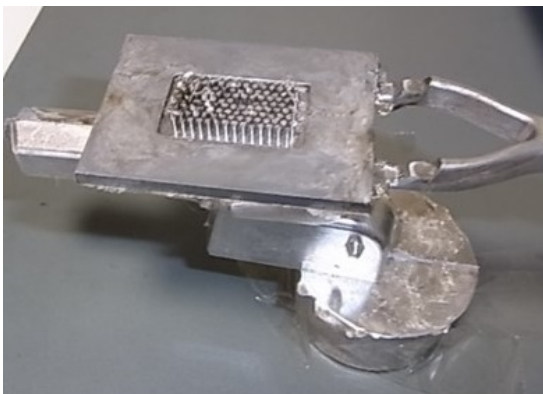


図 2-3. 8 ヒートシンク部



図 2-3. 9 締結部

二種類のアルミ材料の混合を避けるために、油圧駆動の仕切り中子を作動する機構にした。成形した二色成形ダイカストのヒートシンクを図 2-3. 10 に、その金型を図 2-3. 11 に示す。



図 2-3. 10 二色成形ダイカストヒートシンク

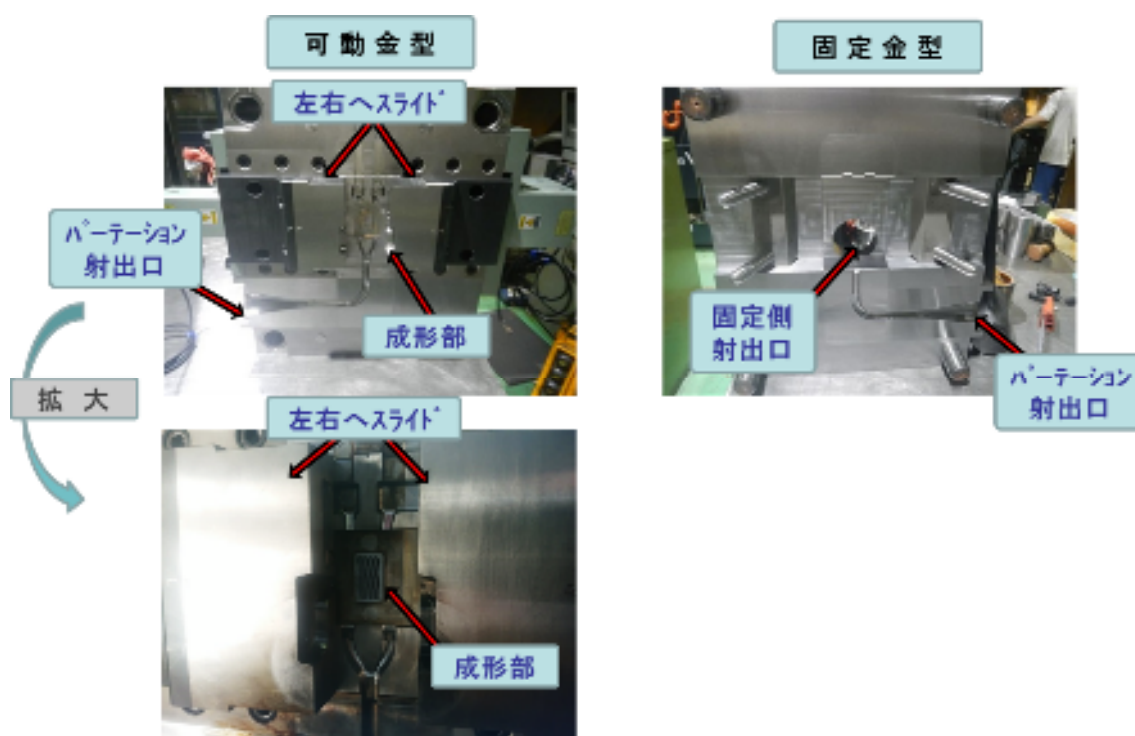


図 2-3. 11 二色成形ダイカストヒートシンク金型

以上 2 つの二色成形ダイカスト金型にて二色成形ダイカストが可能となり、二色成形ダイカスト金型の開発は完了した。

2-4 純アルミとダイカストアルミの接合性の開発

開発・作製した二色成形ダイカスト装置と鑄造条件検討用金型を用い、純アルミとダイカストアルミの 2 種類のアルミ材料の接合性について検討した。図 2-4. 1 に二色成形アルミダイカスト鑄造条件検討用金型による成形品を示す。



未接合



接合（溶湯かぶり）



図 2-4. 1 二色成形アルミダイキャスト鑄造条件検討用金型による成形品

平成 26 年度、接合度合については十分な結果を得る事が出来なかった。原因として一色目のアルミが充填された後、二色目が充填されるまでのタイムラグや、射出圧力・溶解アルミの温度、金型温度に影響され接合性が悪化することが解った。一色目の材料が固相線温度を大幅に下回り、その状態で二色目が充填されても、2 種類の材料を密着させる為の熔融温度に達していないためと考える。これを解決するために、2 つの射出間のタイムラグを短縮し、二色目の溶湯温度を高めた。また酸化物の影響についても接合性を悪化させるものと考え、溶解炉にて酸化物の生成を抑制する為、不活性ガスであるアルゴンガスを充満させる事とした。合わせて 2 ヶ所の溶湯射出口にもアルゴンガスを充満させた。
(図 2-4. 2)

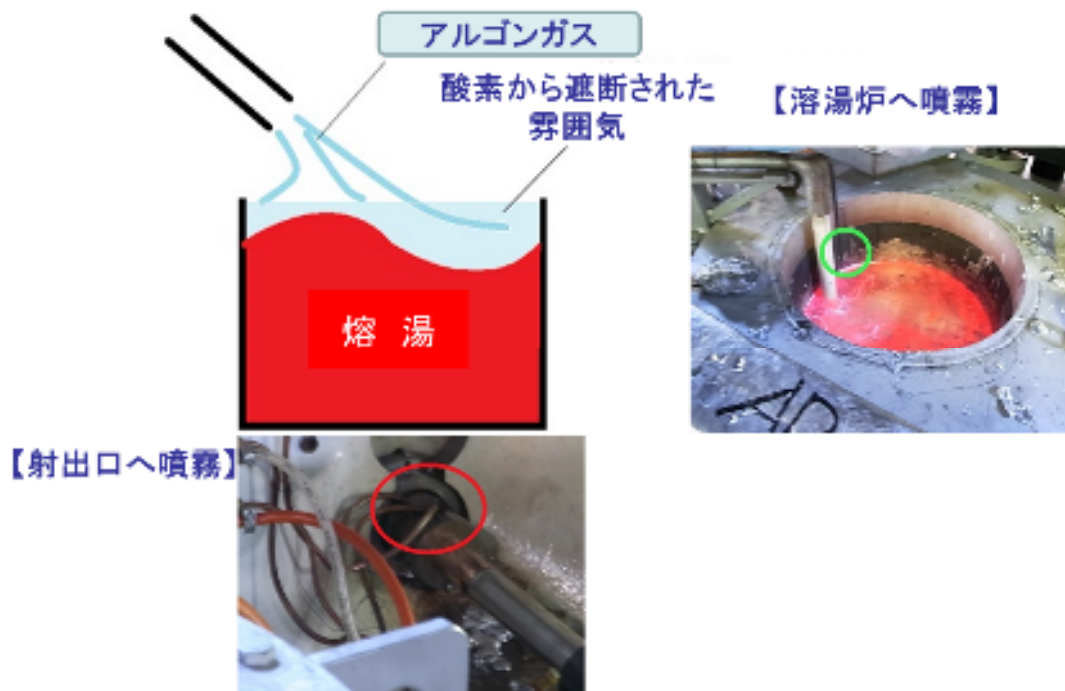


図 2-4.2 不活性ガス（アルゴンガス）を溶解炉及び射出口に充満させた。

一色目のアルミ充填後に生成する酸化物を二色目のアルミ溶湯で押し流す効果が有るか検討を行った。検討に際し、鑄造条件検討用金型の仕切り部を波状から直線となるように金型改造を行い、二色間の境目に対し平行に溶湯を流した場合と直角に流した場合で接合性の評価を行った。改造内容について図 2-4.3 に示す。合わせて融点の異なるアルミ材の射出順を替え、その影響についても検討を行った。（図 2-4.4）

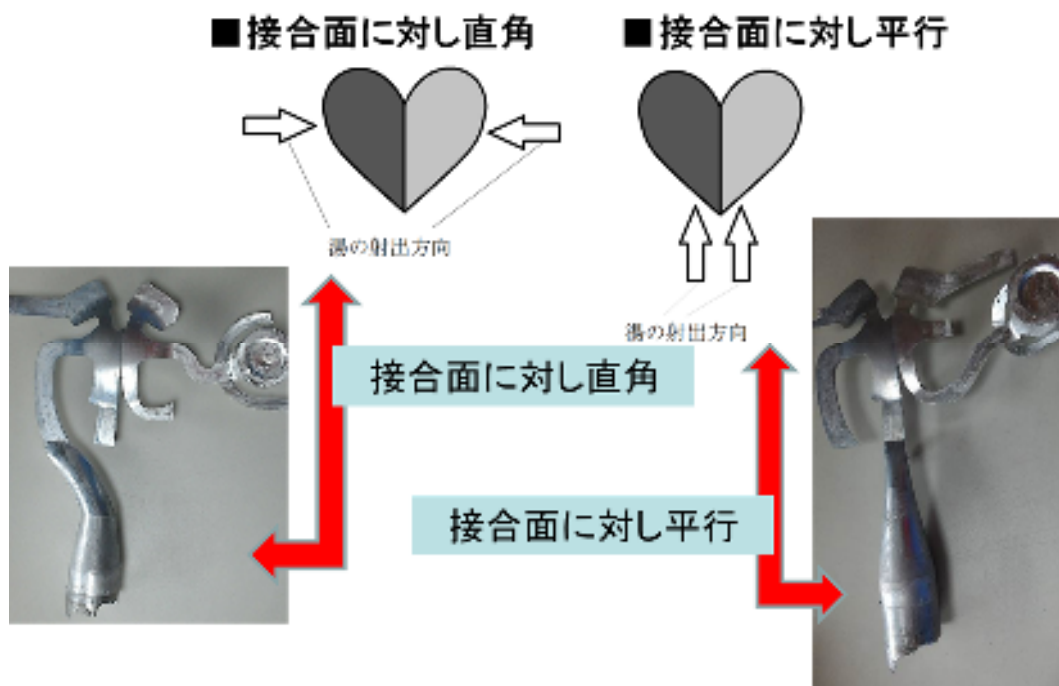


図 2-4.3 仕切り形状変更金型改造品

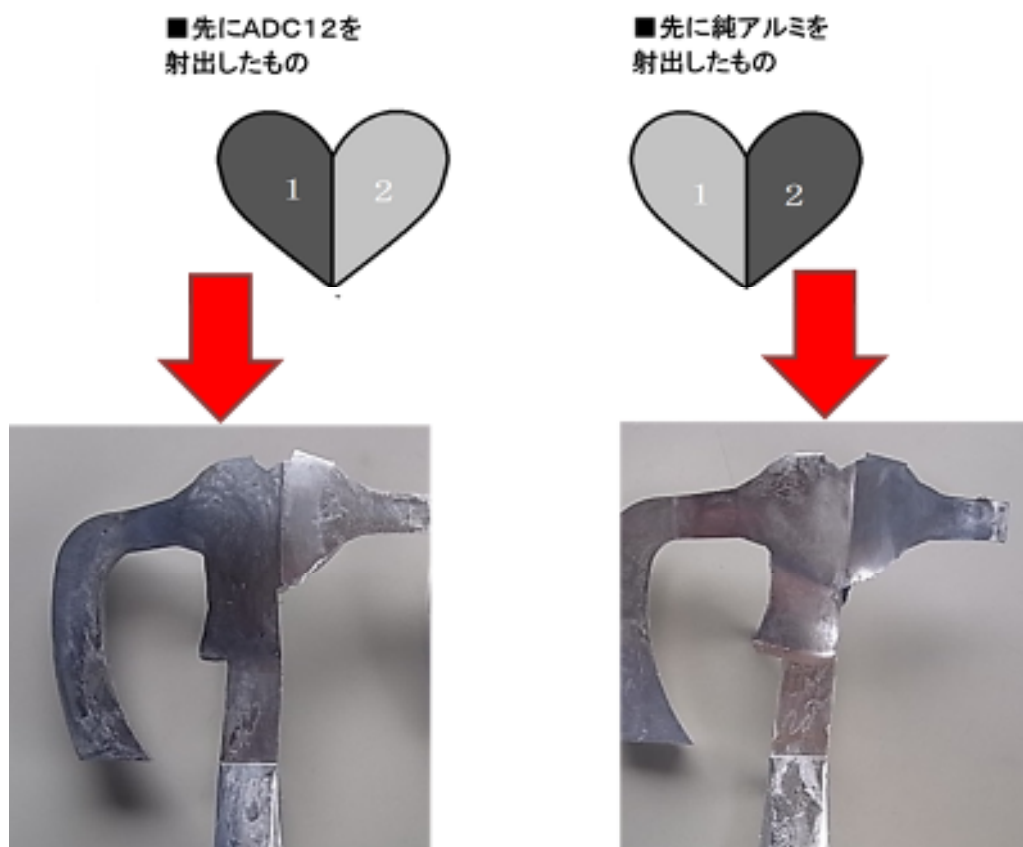
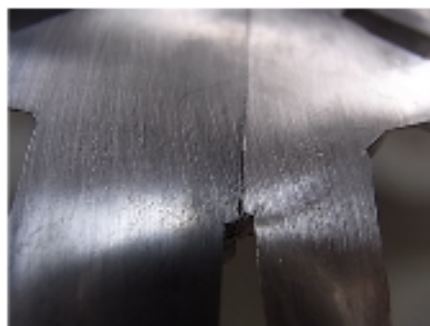


図 2-4. 4 溶湯の射出順の影響

表 2-4. 1 に検討条件と外観性状の結果を示す。外観性状の評価としては、湯じわやクラックの有無、手で捻げる等の簡易的な評価である。最も良好な結果は射出方向が二色間の境界面に対し平行に溶湯が注入され、ADC12⇒純アルミの射出順で不活性ガスを充填した場合であった。

表 2-4. 1 射出順序・アルゴンガスの有無・射出方向の違いによる外観性状

射出順序 \ 射出方向		界面に対し平行方向		界面に対し直角方向	
		アルゴンガスあり	アルゴンガス無し	アルゴンガスあり	アルゴンガス無し
純アルミ →ADC12	湯じわ (発生件数/試料数)	5/10 △	8/10 ×	5/10 △	6/10 △
	クラック/割れ (発生件数/試料数)	8/10 ×	9/10 ×	10/10 ×	10/10 ×
ADC12 →純アルミ	湯じわ (発生件数/試料数)	2/10 ○	4/10 △	6/10 △	5/10 △
	クラック/割れ (発生件数/試料数)	2/10 ○	4/10 △	10/10 ×	10/10 ×



接合面に対し平行に射出した場合、溶湯が接合面の酸化物を押し流し、接合性を高めたと考えられる。(図 2-4.5) また ADC12⇒純アルミの射出順で铸造すると接合性が外観性状上良いのは、融点が高い純アルミを後に充填することで、ADC12 表層を溶解し接合性を高めたと考える。

不活性ガス（アルゴンガス）の有無は接合に射出方向及び順序ほどの影響は認められなかったが、効果は確実に有ると考えている。

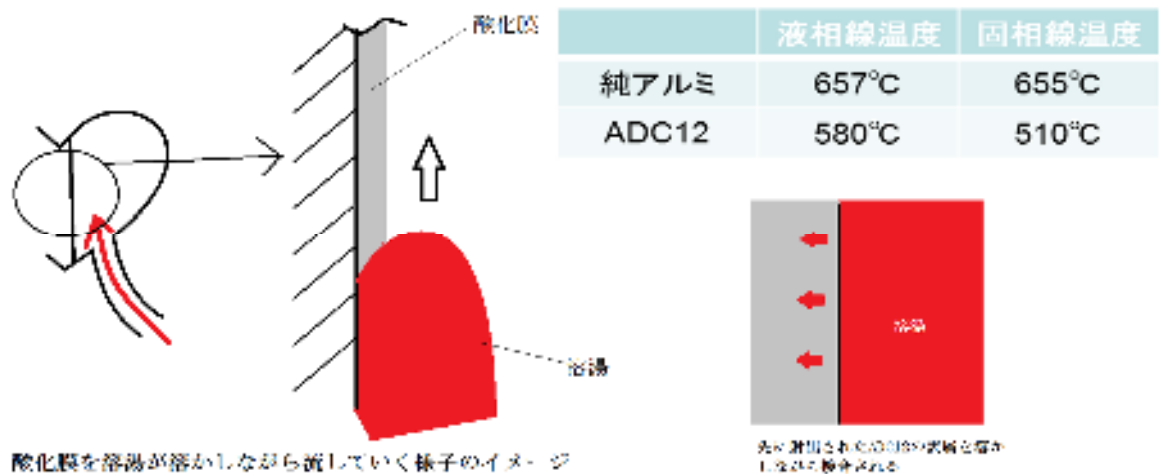


図 2-4.5 接合性の外観性状評価の検証結果

さらに二色成形品について引張試験、金属顕微鏡観察、SEM による元素の面分析、気密性試験、熱物性顕微鏡による評価を行った。境界面に対し直角な方向に射出した場合、接合性は悪いので、評価から外した。

図 2-4.6 に示すのは射出方向が平行、不活性ガスありの条件で射出順序を ADC12⇒純アルミと純アルミ⇒ADC12 とした場合の引張試験結果である。ADC12⇒純アルミの場合、破断は素材部分で破断する凝集破壊となり、引張強さも素材と同等となり、接合が良好である結果となった。一方射出順が純アルミ⇒ADC12 の場合、界面破壊となり接合が十分でない結果となった。これは融点が高い純アルミが、ADC12 が低い為、先に融点の低い ADC12 で铸造し、直後に融点の高い純アルミを铸造すると ADC12 の表層部分を融点の高い純アルミで溶かす為、境界部近傍で金属間化合物が生成され接合が良好となったと考える。

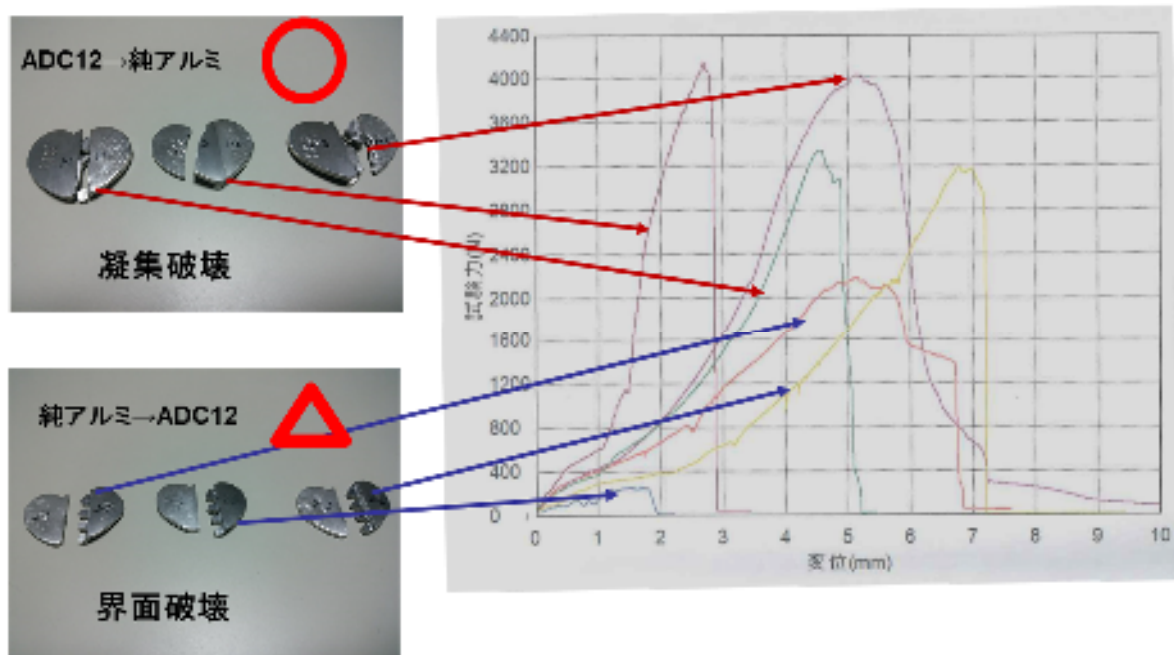


図 2-4.6 引張試験結果

図 2-4.7 に示すのは射出順を ADC12→純アルミ、純アルミ→ADC12 の条件の物を金属顕微鏡にて観察したものである。

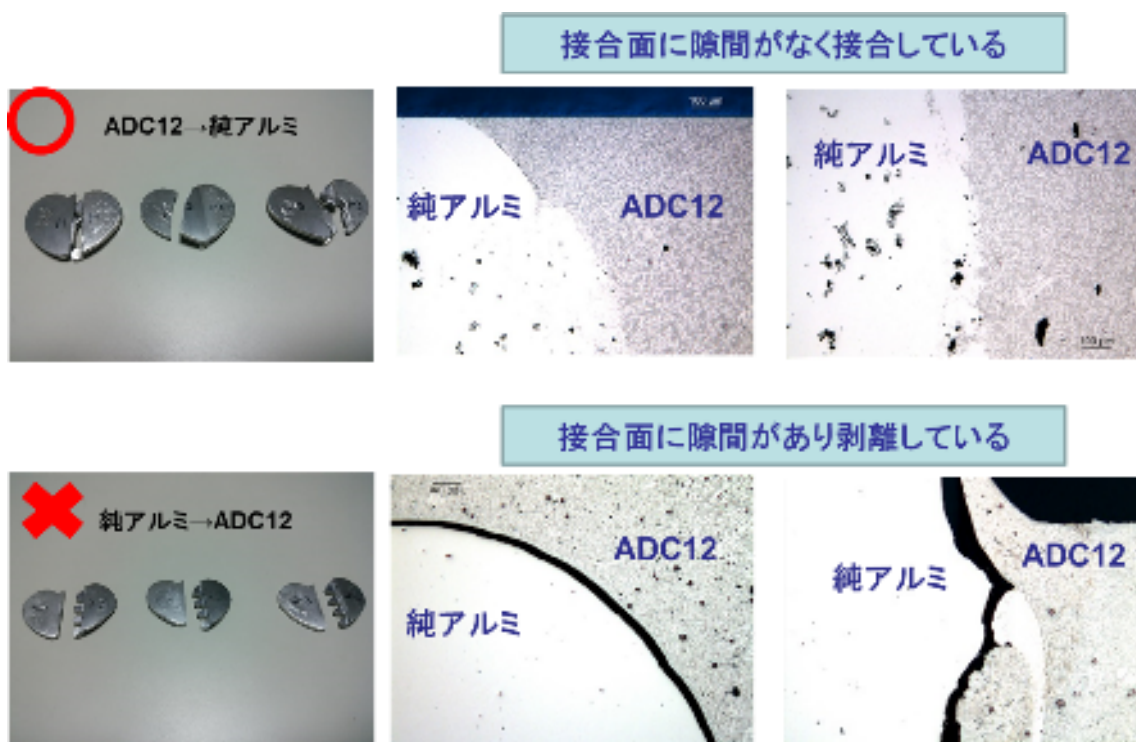


図 2-4.7 界面の金属顕微鏡による観察

引張試験結果の良好な ADC12→純アルミの射出順の試験片は界面に隙間が無く、密着しているが、射出順が純アルミ→ADC12 の場合、部分的に隙間があるものが観察された。

引張試験及び金属顕微鏡観察で良好な条件の射出順 ADC12→純アルミの試験片の界面を SEM にて元素の面分析観察した結果を図 2-4.8 に示す。

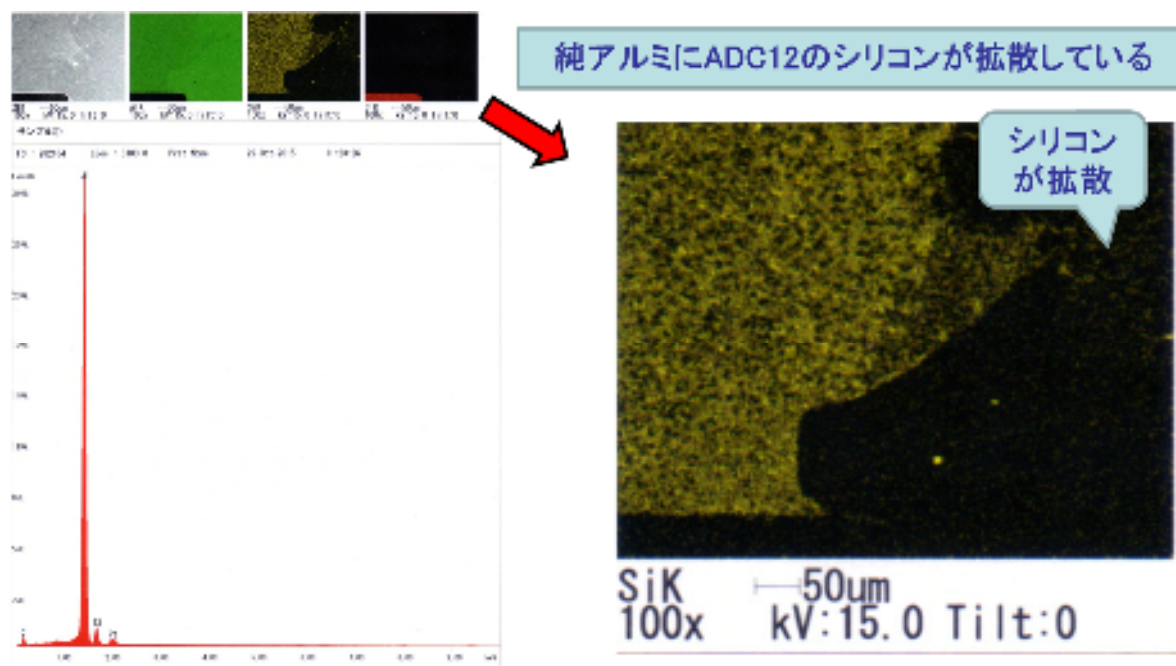


図 2-4.8 元素の面分析

接合が良好な試験片は純アルミ側に本来含有されないシリコンが拡散し金属間化合物が生成され接合が良好になった物と考える。本事業では接合気密性の目標は、冷却水の圧力を 100kPa かけた場合、接合部からの冷却水の漏れが無いこととしている。接合性の評価の 1 つとして気密性試験の結果を図 2-4.9 に示す。試験片に負圧 100kPa をかけ、その状態で圧力を測定した結果、20 分経過しても漏れがない事より、気密性を有した状態で接合している事が確認出来た。



図 2-4.9 気密性試験結果

図 2-4. 10 に示すのは熱的接合性の評価として熱物性顕微鏡にて測定を行った結果である。試験片の各部位にて熱伝導率を測定し、ADC12～純アルミまでの熱伝導率を測定しプロットした物である。ADC12 の熱伝導率は $92\text{W/m} \cdot \text{K}$ 、純アルミの熱伝導率は $200\text{W/m} \cdot \text{K}$ である。接合性が悪い場合、熱伝導率の推移は界面で急激に変化するが、測定結果は両アルミ材の界面に熱伝導率の段差は無く、滑らかに推移しており熱的接合性の面でも接合は良好である事が確認できた。

以上の評価により、純アルミとダイカストアルミの接合性は良好な条件が整えば二色成形ダイカスト法により接合は可能である事がわかった。

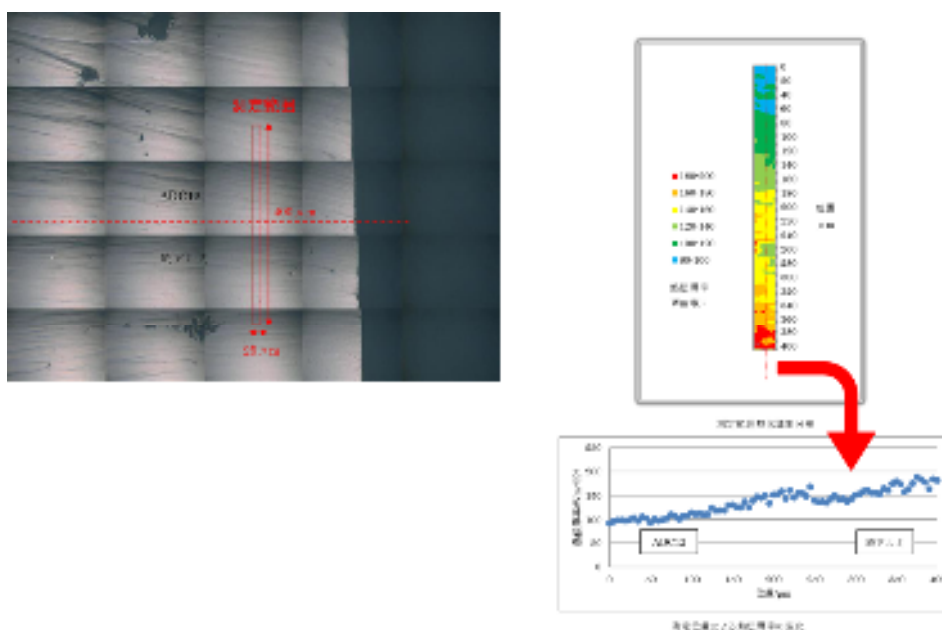


図 2-4. 10 熱物性顕微鏡による評価

2-5 ヒートシンク形状の伝熱設計の最適化

1. 研究概要

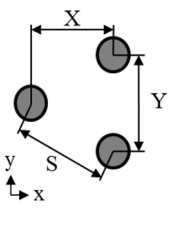
本研究では、高性能ヒートシンクの伝熱設計を行う。目標の伝熱設計として、熱通過率 $25,000 \text{ [W/(m}^2\cdot\text{K)]}$ 以上、水冷圧力損失 10 [kPa] 以下が掲げられている。ここでは数値解析を用いて、目標の熱通過率を達成するヒートシンク形状、各種物理量の検討を行った。更に、得られた解析結果から j 因子（伝熱促進を与える無次元数）と f 因子（圧力損失を与える無次元数）を算出し、便覧に記載の実験整理式との比較を行った。数値解析には、CD-adapco 社製の市販熱流体解析ソフト STAR-CCM+を使用した。

2. 解析方法

(1) 解析モデル

図 2-5.1～2-5.4 に解析モデル略図を示す。また、記号の定義を表 2-5.1 にまとめる。発熱部・外枠部・流路の寸法は以下の通りである。また、発熱部（CPU）の発熱量は 100 W である。計算格子は基盤部分・発熱部は直方体メッシュ（Hex）、ピンフィン・流路・外枠部はテトラメッシュ（Tet/Hybrid）で構成されている。ピンフィンの寸法（直径 D 、長さ L ）と配置（ X 、 Y 、 S ）を考慮した計 24 条件を実施し目標値を達成できる条件を探索した。

表 2-5.1 記号一覧

D : ピンフィン直径	
L : ピンフィン長さ	
X : ピンフィン軸間距離（流路流れ方向）	
Y : ピンフィン軸間距離（流路幅方向）	
S : ピンフィン軸間距離	

[mm]

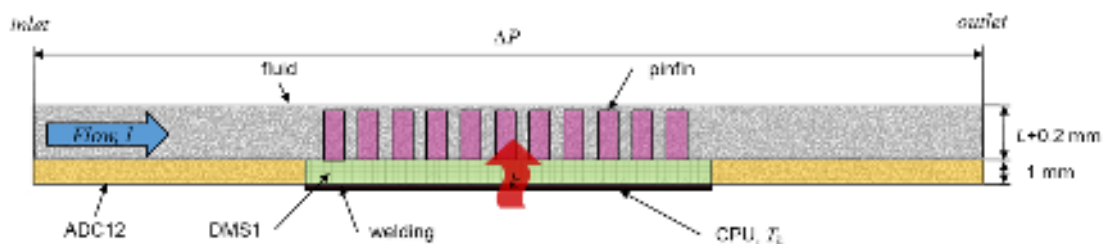
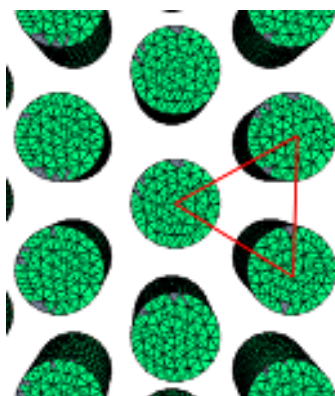
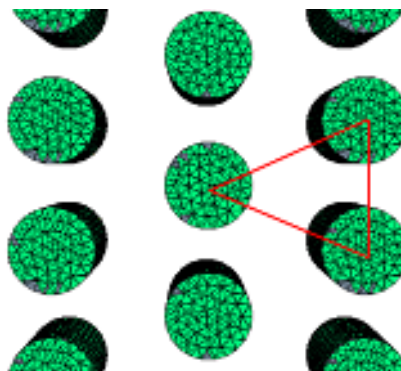


図 2-5.1 解析モデル（断面図）



$X/Y=0.9$ (正三角形)



$X/Y=1.2$ (二等辺三角形)

図 2-5.2 ピンフィン配置

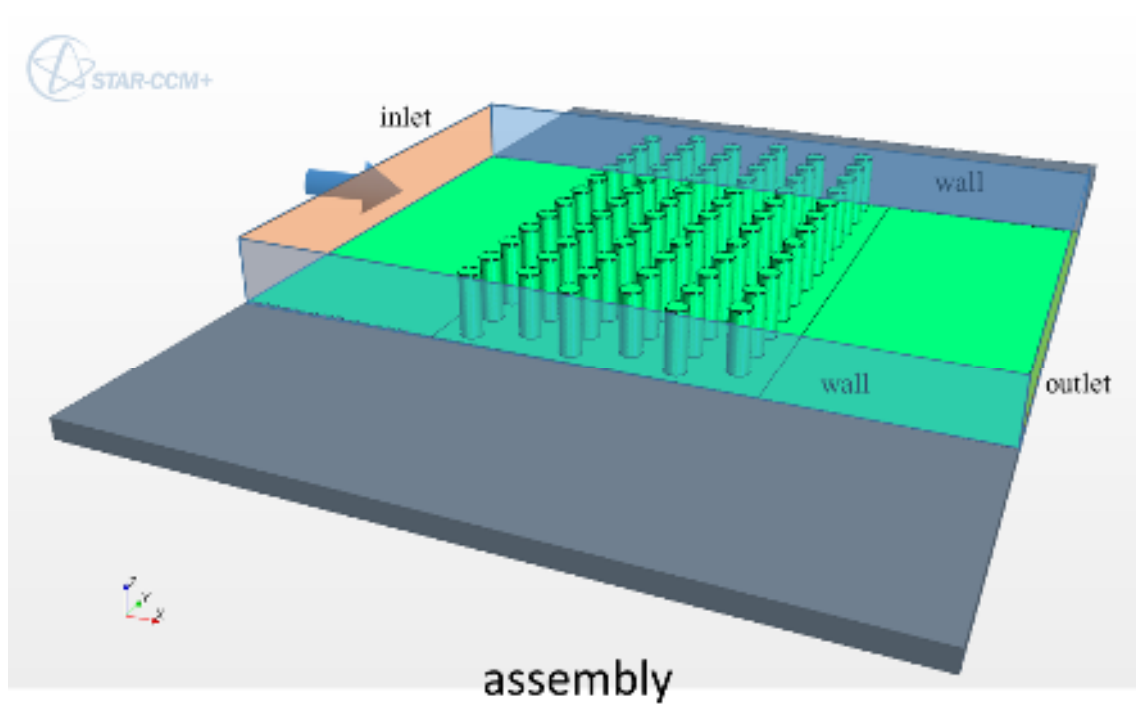


図 2-5.3 解析モデル (組立図)

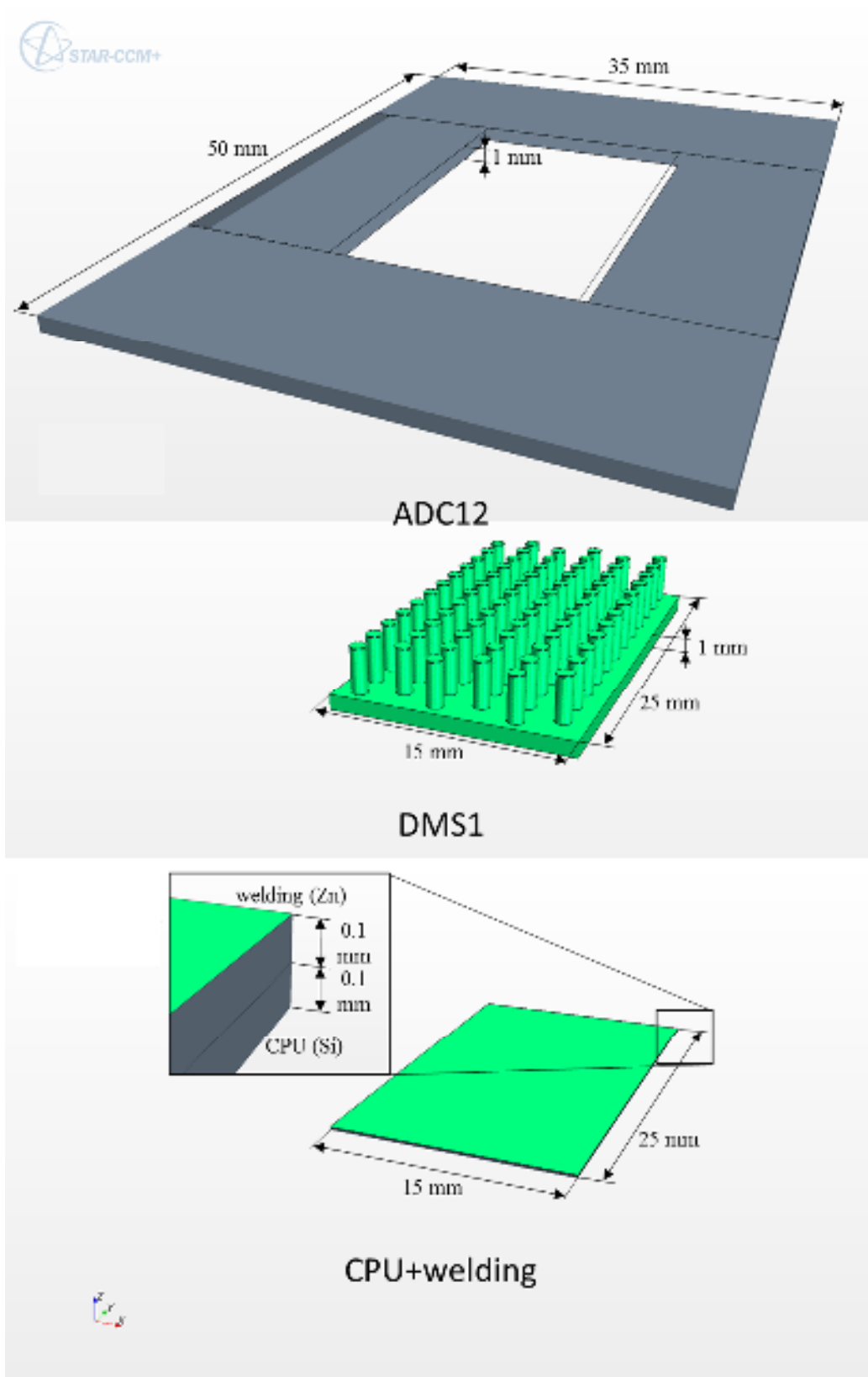


図 2-5.4 解析モデル（分解図）

(2) 解析条件

解析に用いた物性値を表 2-5.2 に示す。はんだ部の熱伝導率は発熱部のそれと同一にした（厳密には Zn の熱伝導率がより妥当であるが、はんだ部が薄いことから簡単化した）。連続体モデルの指定では、すべての条件で定常解析とした。詳細は以下の通りである。

表 2-5.2 各部の物性値

	密度 [kg/m ³]	比熱 [J/(kg・K)]	熱伝導率 [W/(m・K)]
伝熱部 (DMS1)	2720	963	185
外枠部 (ADC12)	2700	963	92
発熱部 (Si)	2329	712	149
はんだ部 (Si)	2329	712	149
冷却水 (H ₂ O)	997.6	4180	0.620

個体部 (DMS1、ADC12、Si) の解析における連続体モデル

- ・ 3 次元
- ・ 分離型個体エネルギー
- ・ 勾配
- ・ 固体
- ・ 定常解析
- ・ 密度一定

液体部 (H₂O) の解析における連続体モデル

- ・ 2 層 All y+壁面近傍の取り扱い
- ・ 3 次元
- ・ k-ε 乱流
- ・ Realizable k-ε 2 層
- ・ レイノルズ平均ナビエ・ストークス方程式
- ・ 乱流
- ・ 分離型流れ
- ・ 分離型流体温度
- ・ 勾配
- ・ 定常解析
- ・ 密度一定
- ・ 液体

3. 解析結果

(1) 検 証

数値解析結果の妥当性について、実験結果及び便覧値¹との比較を行う。伝熱促進と圧力損失について、それぞれ以下に示す無次元数によって検討する。レイノルズ数 Re に対する j 因子、 f 因子をそれぞれ図 2-5.5 と 2-5.6 に示す。グラフ中の “data”、“cfcd no. #”、“exp” はそれぞれ、便覧値、数値計算結果、実験結果を示す。数値計算結果についてはピンフィン直径の異なる 3 条件（3-2。数値計算結果を参照された）を比較対象とした。

j 因子、 f 因子について

管群の熱伝達では結果の整理に以下のコルバーンの式が用いられる。

$$j = \frac{Nu}{Re} Pr^{1/3}$$

また、管群の圧力損失は以下の式となる。

$$\Delta P = 2f\rho u_{\max}^2 N$$

ここで、

ρ : 流体密度 [kg/m³]

$u_{\max}$: 流体最高速度

[m/s]

N : ピンフィン本数

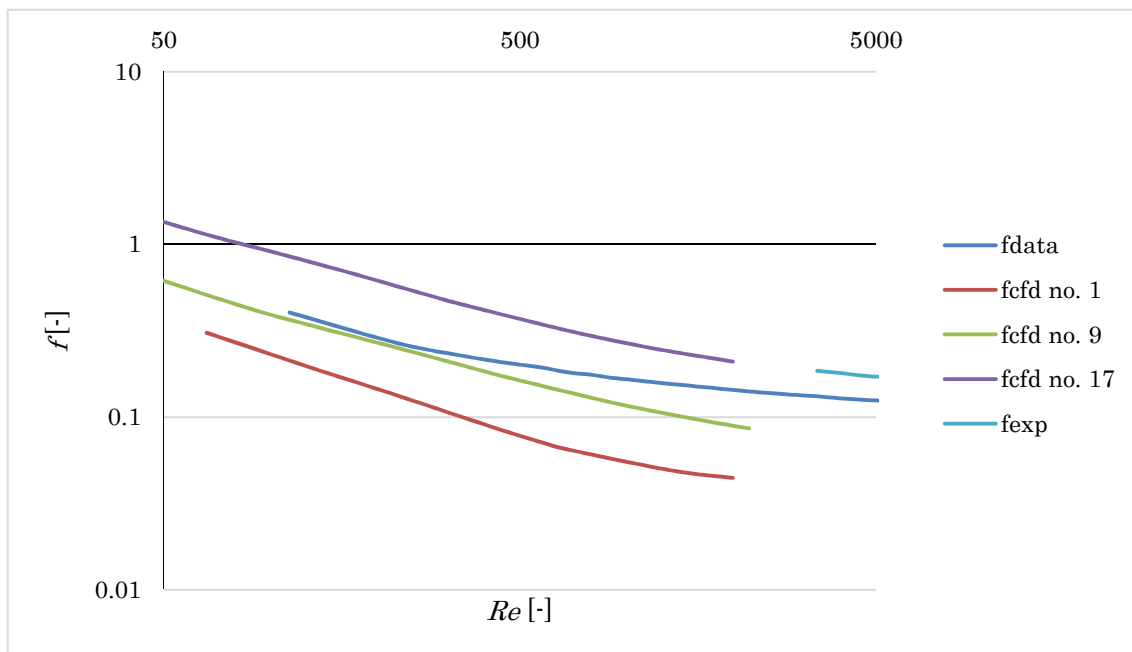


図 2-5.5 f 因子

¹ 日本機械学会「伝熱工学資料 改訂第 5 版」, pp. 35-36, 2009.

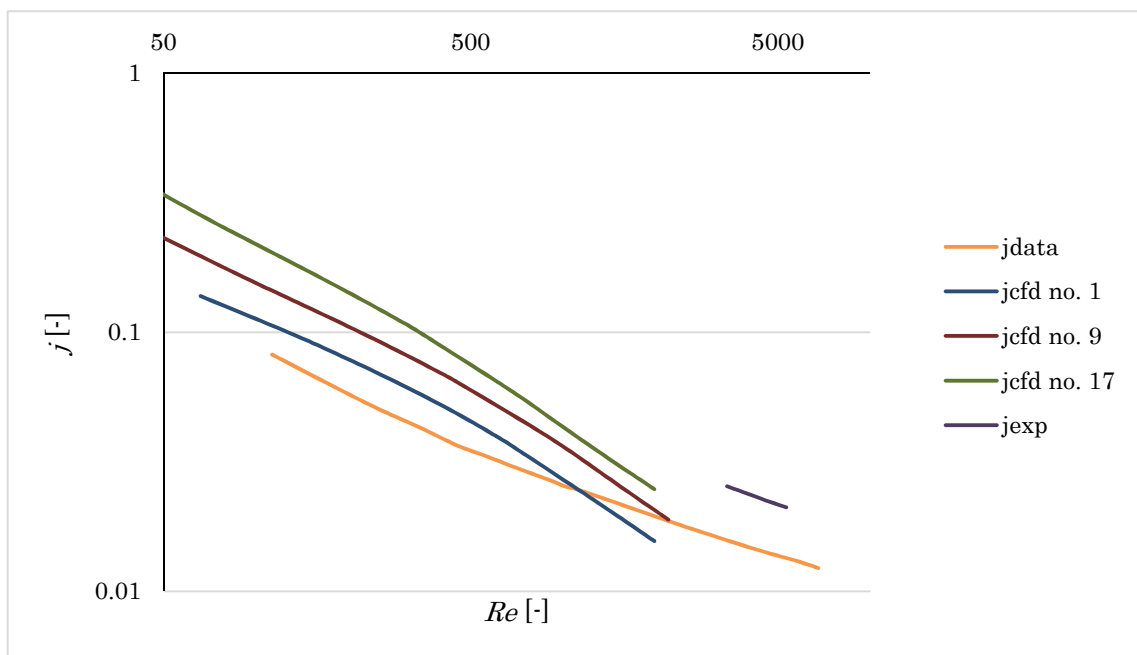


图 2-5.6 j 因子

(2) 数値計算結果

数値計算結果を表 2-5.3 にまとめる。図 2-5.7 には、目標値を達成する流量の上限値、下限値、流量範囲（上限値と下限値の差）をまとめた。図 2-5.8～2-5.11 は、条件 No. 1、No. 5、No. 9、No. 17 に対する数値解析結果をまとめたものである。

表 2-5.3 解析モデル形状一覧

No	base plate	D	L	X	Y	S	L/D	X/Y	S/D	目標達成流量, l [l/s]			
	[mm ²]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[-]	下限	～	上限	範囲
1	15×25	1.0	2.0	1.3	1.5	1.5	2.0	0.9	1.5	0.007	～	0.050	0.043
2	15×25	1.0	2.0	1.8	1.5	2.0	2.0	1.2	2.0	0.020	～	0.060	0.040
3	15×25	1.0	2.0	1.7	2.0	2.0	2.0	0.9	2.0	0.030	～	0.090	0.060
4	15×25	1.0	2.0	2.4	2.0	2.6	2.0	1.2	2.6	0.040	～	0.100	0.060
5	15×25	1.0	3.0	1.3	1.5	1.5	3.0	0.9	1.5	0.008	～	0.070	0.062
6	15×25	1.0	3.0	1.8	1.5	2.0	3.0	1.2	2.0	0.020	～	0.090	0.070
7	15×25	1.0	3.0	1.7	2.0	2.0	3.0	0.9	2.0	0.030	～	0.100	0.070
8	15×25	1.0	3.0	2.4	2.0	2.6	3.0	1.2	2.6	0.080	～	0.120	0.040
9	15×25	1.5	3.0	2.0	2.3	2.3	2.0	0.9	1.5	0.020	～	0.100	0.080
10	15×25	1.5	3.0	2.7	2.3	2.9	2.0	1.2	2.0	0.050	～	0.110	0.060
11	15×25	1.5	3.0	2.6	3.0	3.0	2.0	0.9	2.0	0.060	～	0.150	0.090
12	15×25	1.5	3.0	3.6	3.0	3.9	2.0	1.2	2.6	0.100	～	0.200	0.100
13	15×25	1.5	4.5	2.0	2.3	2.3	3.0	0.9	1.5	0.030	～	0.120	0.090
14	15×25	1.5	4.5	2.7	2.3	2.9	3.0	1.2	2.0	0.060	～	0.190	0.130
15	15×25	1.5	4.5	2.6	3.0	3.0	3.0	0.9	2.0	0.080	～	0.220	0.140
16	15×25	1.5	4.5	3.6	3.0	3.9	3.0	1.2	2.6	0.120	～	0.300	0.180
17	15×25	2.0	4.0	2.6	3.0	3.0	2.0	0.9	1.5	0.040	～	0.120	0.080
18	15×25	2.0	4.0	3.6	3.0	3.9	2.0	1.2	2.0	0.060	～	0.150	0.090
19	15×25	2.0	4.0	3.5	4.0	4.0	2.0	0.9	2.0	0.100	～	0.250	0.150
20	15×25	2.0	4.0	4.8	4.0	5.2	2.0	1.2	2.6	0.150	～	0.300	0.150
21	15×25	2.0	6.0	2.6	3.0	3.0	3.0	0.9	1.5	0.040	～	0.200	0.160
22	15×25	2.0	6.0	3.6	3.0	3.9	3.0	1.2	2.0	0.080	～	0.220	0.140
23	15×25	2.0	6.0	3.5	4.0	4.0	3.0	0.9	2.0	0.120	～	0.400	0.280
24	15×25	2.0	6.0	4.8	4.0	5.2	3.0	1.2	2.6	0.220	～	0.500	0.280

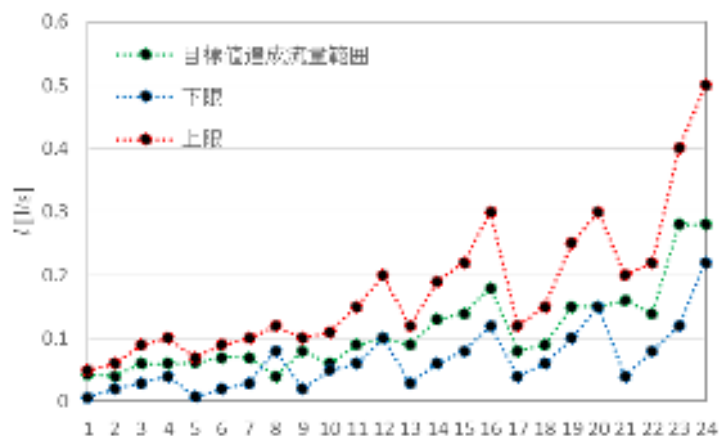


図 2-5.7 目標値達成流量範囲

No	base part [mm ²]	D [mm]	L [mm]	V [mm]	Y [mm]	S [mm]	L/D [-]	X/Y [-]	S/D [-]
1	15~25	1.0	2.0	1.3	1.5	1.5	2.0	0.9	1.5

計算結果			
I [W]	ρ_q [K]	K [W/m ² K]	ΔP [Pa]
0.001	319	10188.7	28.4663
0.002	311	14922.8	73.1732
0.003	308	18021.8	125.819
0.004	306	20447.4	184.109
0.005	305	22424.6	246.712
0.006	304	24064.3	313.588
0.007	304	25428.3	385.101
0.008	303	26569.4	461.621
0.009	303	27532.3	543.476
0.01	303	28355.2	630.929
0.02	301	32979.6	1887.06
0.03	301	35634.8	3821.19
0.04	300	38071.3	6293.2
0.05	300	40264.8	9179.8
0.06	299	42406.8	12563.3
0.07	299	44544.7	16620.9
0.08	299	46672	21023
0.09	299	48444.3	25834.3
0.1	298	50191.4	31244.4
0.2	297	62733.3	106970
0.3	297	71632.6	231600
0.4	297	78593.2	406867
0.5	296	84047.7	629038

(※単位は標準値)

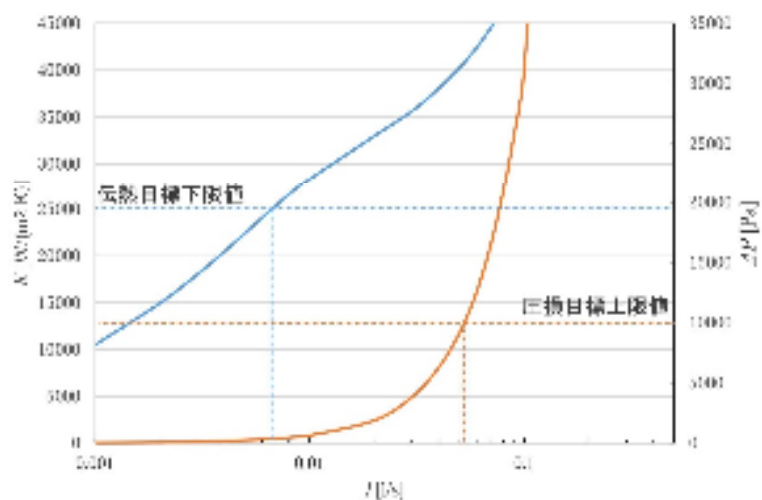
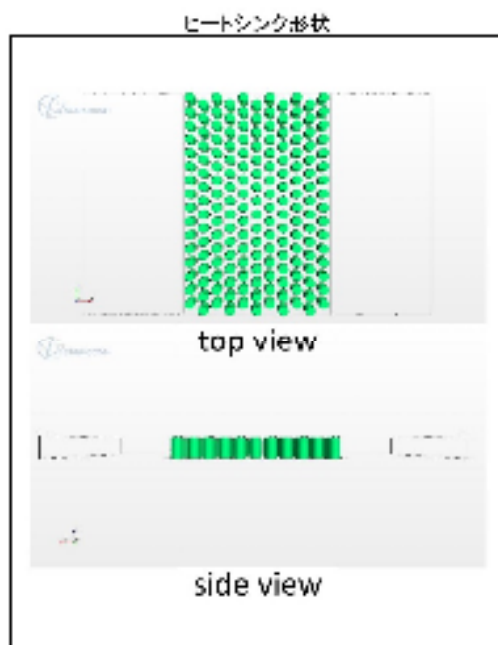


図 2-5. 8 条件 No. 1 の数値解析結果

No	base part [mm ²]	D [mm]	L [mm]	V [mm]	$\bar{V}$ [mm]	S [mm]	L/D [-]	$X/\bar{V}$ [-]	S/D [-]
5	15~25	1.0	3.0	1.3	1.5	1.5	3.0	0.9	1.5

計算結果			
I [kA]	J_q [K]	K [W/m ² K]	ΔP [Pa]
0.001	318	10819.2	17.7673
0.002	311	14982.8	42.882
0.003	308	17823.5	74.1396
0.004	306	19989.9	109.563
0.005	305	21763.4	147.866
0.006	305	23257.4	188.383
0.007	304	24542.3	230.844
0.008	304	25661.5	275.283
0.009	303	26641.1	321.87
0.01	303	27501	370.743
0.02	301	32453.4	1610.06
0.03	301	34792	2613.61
0.04	300	36494.7	3364.28
0.05	300	38093.6	4885.39
0.06	300	39546	6828.76
0.07	300	40897.3	8890.88
0.08	299	42210.8	11188
0.09	299	43513.3	13781.7
0.1	299	44837.5	16680.9
0.2	298	55083.9	56796.1
0.3	297	63610.2	126631
0.4	297	69996.8	220006
0.5	297	75327.4	343141

(※単位は標準値)

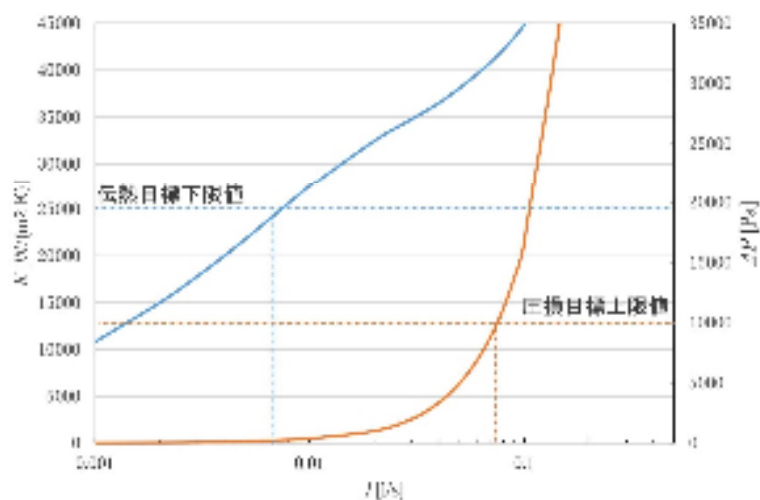
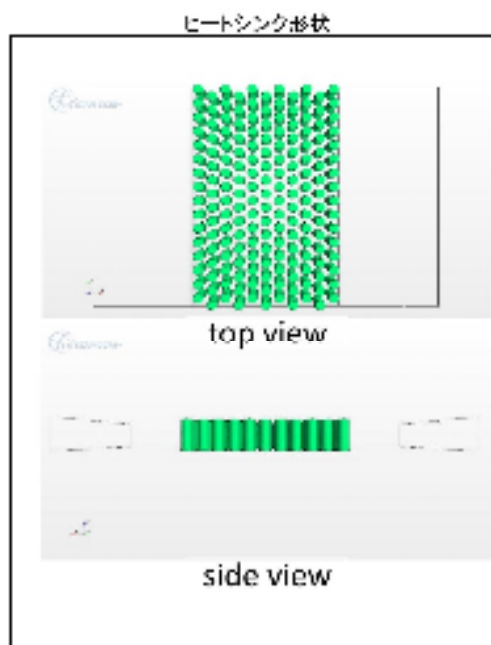


図 2-5.9 条件 No. 5 の数値解析結果

No	base part [mm ²]	D [mm]	L [mm]	V [mm]	Y [mm]	S [mm]	L/D [-]	X/Y [-]	S/D [-]
9	15~25	1.9	3.0	2.9	2.3	2.3	2.0	0.9	1.9

計算結果			
I [W]	ρ_q [K]	K [W/m ² K]	ΔP [Pa]
0.001	325	8434.33	8.06883
0.002	317	11240.5	20.3546
0.003	313	13457.8	36.4223
0.004	311	15278	55.5093
0.005	309	16819.6	76.9408
0.006	308	18151.1	100.287
0.007	307	19315.1	125.277
0.008	306	20347.2	151.809
0.009	306	21268.2	179.847
0.01	305	22092.6	209.387
0.02	303	26991.1	582.949
0.03	302	29188.7	1124.49
0.04	302	30640.4	1788.14
0.05	301	31972.5	2589.8
0.06	301	33245.6	3527.59
0.07	301	34446.8	4671.8
0.08	301	35597.8	5919.84
0.09	300	36712.2	6873.27
0.1	300	37811.7	8349.25
0.2	299	47540.9	28011.1
0.3	298	54768.3	58036.6
0.4	298	60661.2	100270
0.5	297	65600.7	155717

(※単位は標準値)

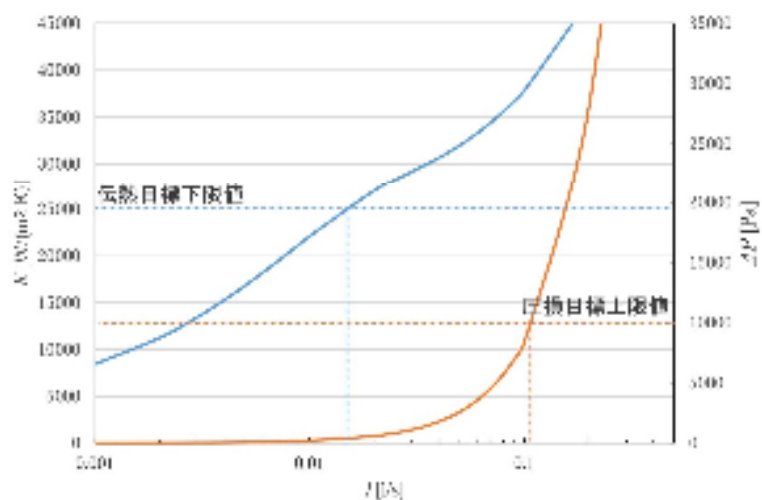
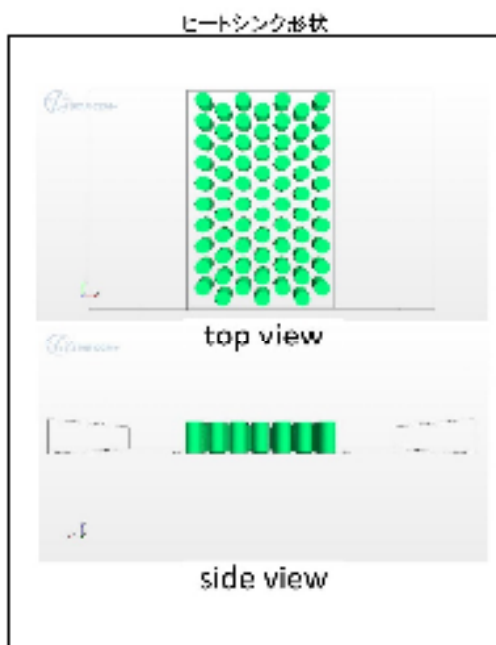


図 2-5.10 条件 No. 9 の数値解析結果

No.	base part [mm]	D [mm]	L [mm]	V [mm]	Y [mm]	S [mm]	L/D [-]	X/Y [-]	S/D [-]
17	15-25	2.0	4.0	2.5	3.0	3.0	2.0	0.9	1.5

計算結果			
I [W]	ρ_q [K]	K [W/m ² K]	ΔP [Pa]
0.001	324	8517.39	4.74221
0.002	318	10785.4	12.4079
0.003	314	12551.9	22.4089
0.004	312	14029.6	34.0188
0.005	311	15275	46.8284
0.006	309	16342.1	60.638
0.007	309	17275.3	75.3301
0.008	308	18096.1	90.9434
0.009	307	18818.7	107.427
0.01	307	19456.5	124.831
0.02	305	23054.9	330.173
0.03	304	24747.4	637.683
0.04	303	26041.2	1045.34
0.05	303	27223.1	1517.89
0.06	303	28289	2051.73
0.07	302	29308.2	2645.17
0.08	302	30306.8	3306.28
0.09	302	31297.8	4038.89
0.1	301	32287.6	4852.2
0.2	300	40634.9	16141
0.3	299	46790.2	32904
0.4	298	52000.1	56283.7
0.5	298	56623.1	86729.9

(※単位は標準単位)

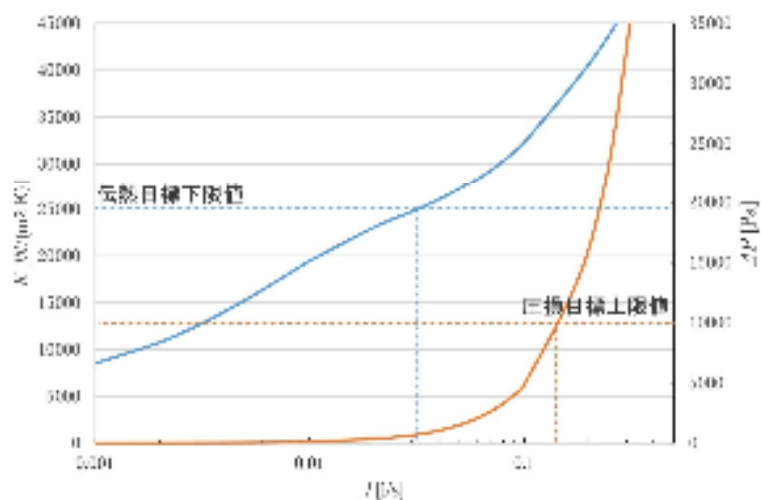
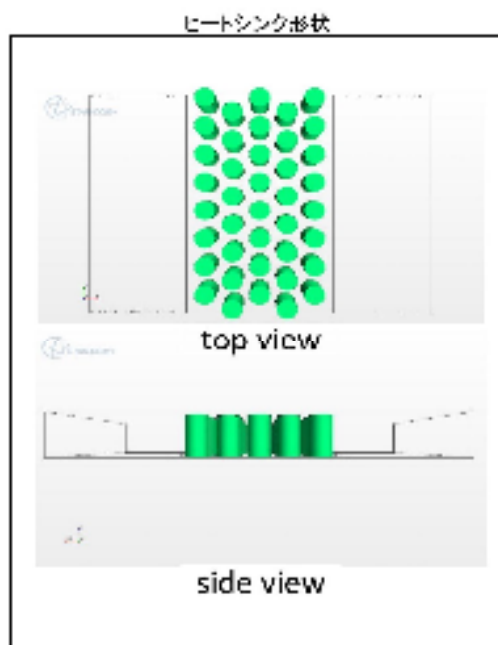


図 2-5. 11 条件 No. 17 の数値解析結果

2-6 ヒートシンク試作品の作製と評価

二色成形ダイカスト法によるマルチマテリアル化されたヒートシンクの製造にあたり、装置及び金型については解決した。鋳造品に関しても ADC12 と純アルミの接合性についても接合する事が確認出来た。しかしながら確認は単純形状での接合確認であり、ヒートシンクとした場合の接合性について検証が必要である。すなわち射出順序が単純形状の場合操作する事が可能であるが、ヒートシンクの場合製品構造上及び金型構造上、中心部にある放熱部を先に鋳造しなければならず、この部分は熱伝導率が高く、融点の高い純アルミである。鋳造条件検討用金型の接合性の評価に際し、融点の低い方から鋳造する事、界面に平行に溶湯を流す事が良好な接合性を確保する条件である事が解っている。

これまで得られた知見からすると、二色成形ダイカストによるヒートシンク製造に当たってはこれら 2 つの問題を解決する必要がある。融点の違いに対しては、二色目として鋳造する ADC12 材の溶解温度を高くする等で実験を進めた。溶湯の流れに関しては長辺に平行に溶湯を流し、短辺に対しては渦流が発生しないように流動解析によりケアする事とした。

ヒートシンクについては図 2-3.6 から図 2-3.10 にヒートシンク及びその金型について図示した。本事業で製造するマルチマテリアル化されたヒートシンクの目標値は、水冷ヒートシンクである為、冷却水の洩れ防止の為、気密性の目標値をアドバイザーの知見により冷却水の圧力を 100kPa かけた場合、締結フレーム部からの冷却水の漏れが無いこととした。ヒートシンクの冷却性能についてはアドバイザーの知見により、水冷における圧力損失の目標値の 10kPa を達成しつつ、放熱性の目標値を自動車用パワーモジュールにおける熱通過率 $25,000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ とした。気密性の評価方法はダイカストアルミと純アルミの接合性について評価した方法と同様に金属顕微鏡による観察、SEM による元素の面分析、気密性試験で評価を行った。放熱性の評価に関しては、熱透過率の測定を行いその評価を行った。

図 2-6.1 に示すのは純アルミと ADC12 の界面を金属顕微鏡により観察した写真である。

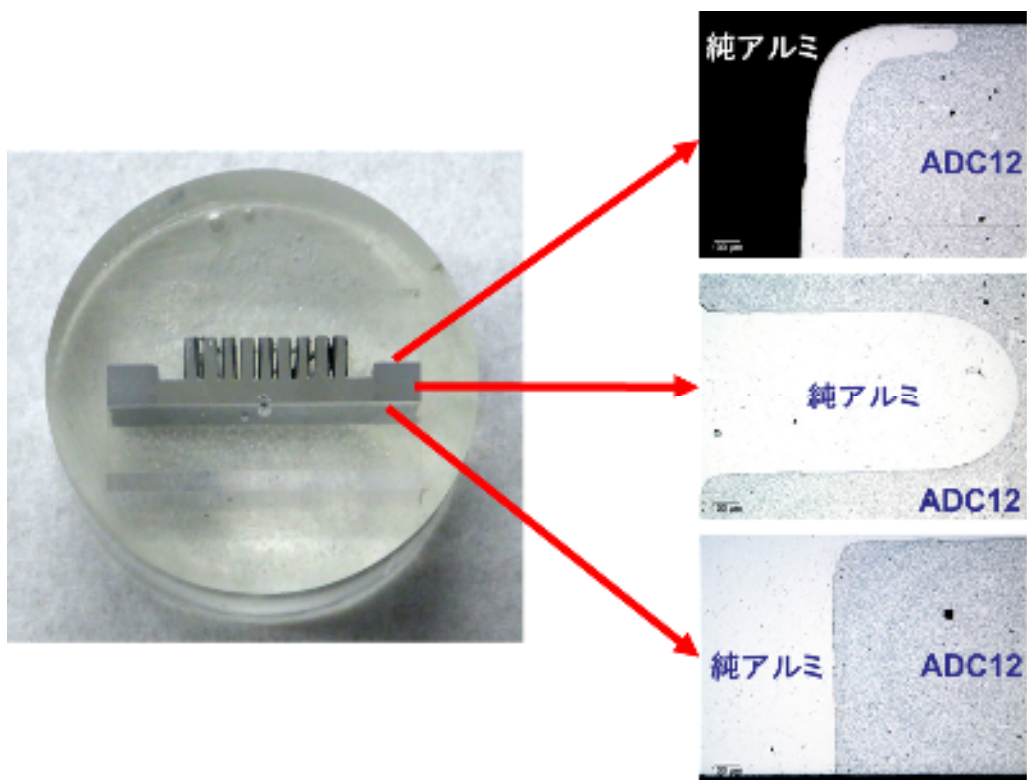


図 2-6.1 金属顕微鏡による界面観察

ヒートシンク部の純アルミと締結部の ADC12 の界面に剥離は無く、接合している状態が確認出来た。図 2-6.2 に示すのは純アルミと ADC12 の界面を SEM にて元素の面分析観察した結果である。純アルミ側に ADC12 に含有するシリコンの拡散は認められないが、接合面に隙間が無く接合している。

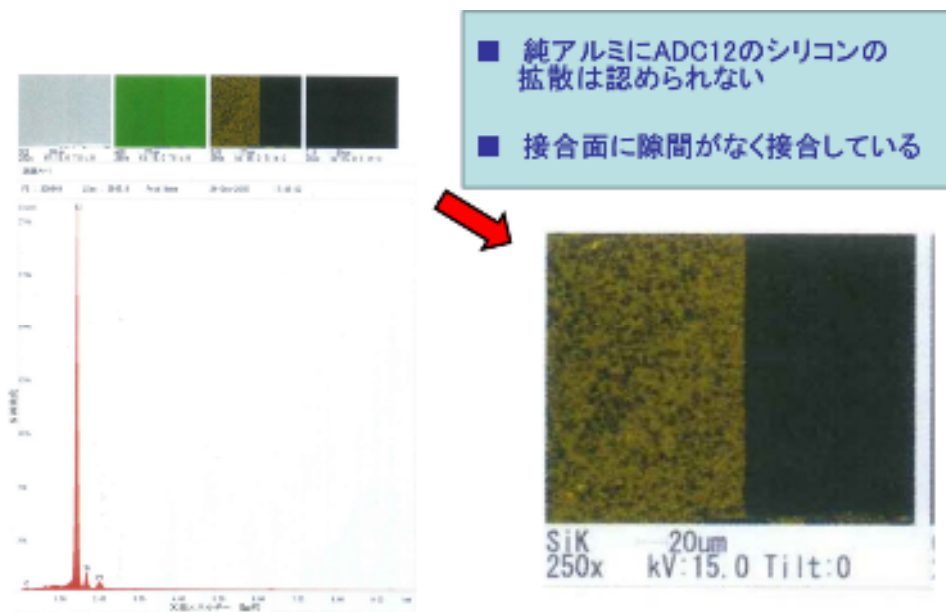


図 2-6.2 元素の面分析

これらの結果、接合は確認できたが、鋳造条件検討用金型ほどの接合状態はない。今後 PIG プロセスの確立によりさらに改善できる余地は残っている。

図 2-6.3 にヒートシンクの気密性試験の結果を、図 2-6.4 にヒートシンクの熱透過率の結果を示す。

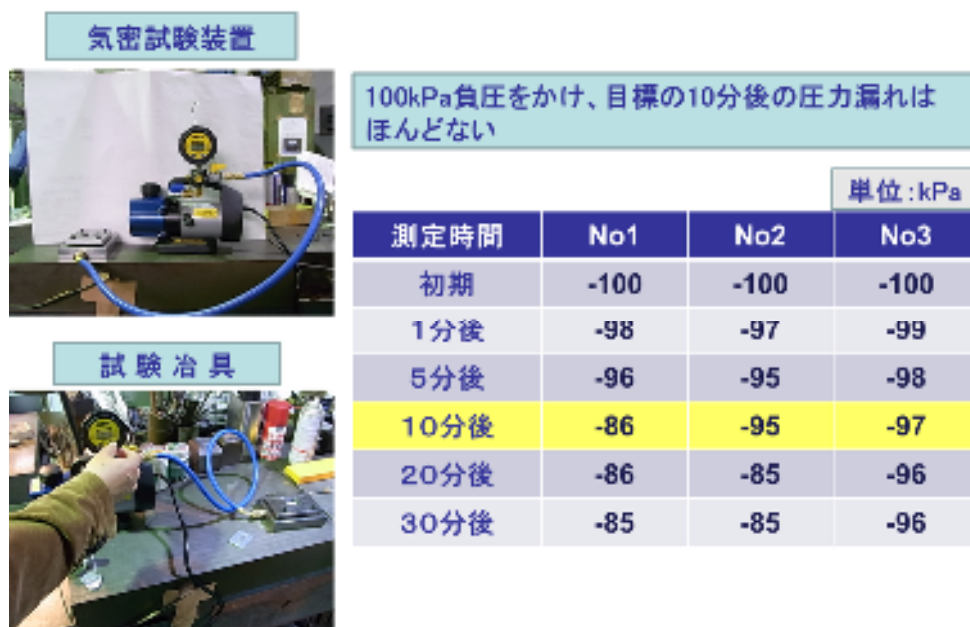


図 2-6.3 ヒートシンクの気密性試験結果

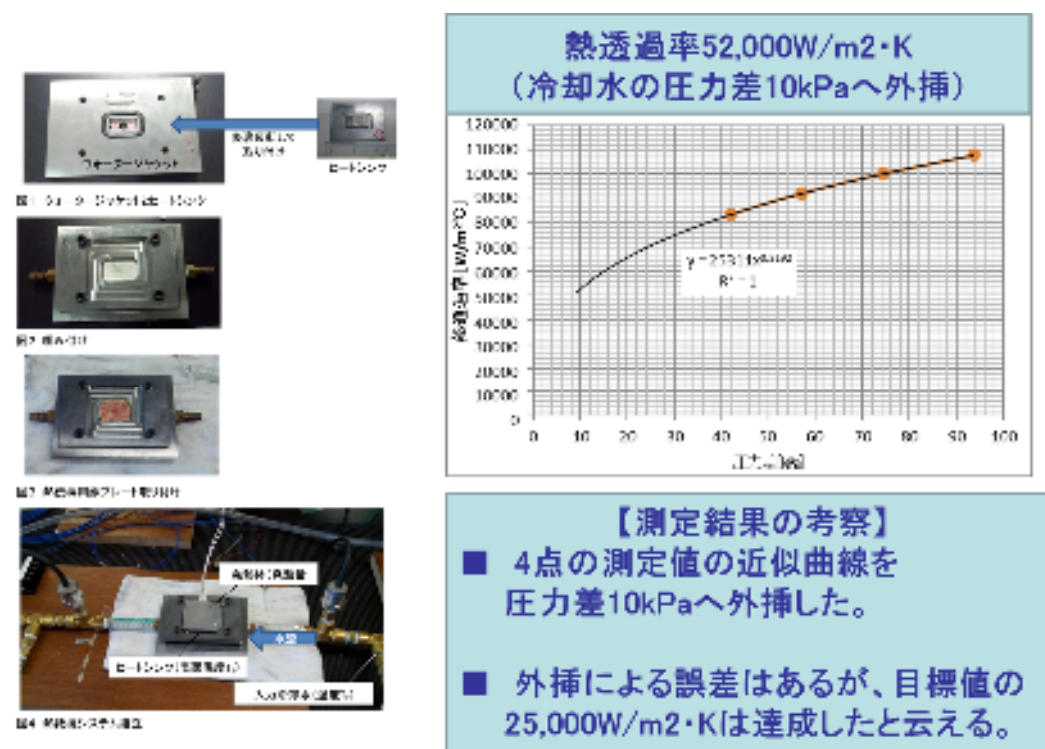


図 2-6.4 ヒートシンクの熱透過率の結果

ヒートシンクの気密性は 100kPa の負圧をかけた場合、目標の 10 分後の圧力漏れはほとんど認められず、良好な結果を得た。しかしながら鑄造条件検討用金型による二色成形品の方がより気密性が確保出来ているので、改善の余地はあり PIG プロセスの確立が望まれる。

熱透過率の目標値は 25、000W/m・k であったが、作製したヒートシンクは 52、000W/m・k となり目標値を大きく上回る結果となった。これはシュミュレーション伝熱設計により最適とした形状の鑄造が充填良く鑄造出来、シュミュレーションでは鑄造品の鑄巣による熱伝導率低下により熱伝導率を低く設定したが、充填が良好であった為、熱伝導率が高く熱透過率の結果が良くなったものと考ええる。

以上の事より本事業で目標とする二色成形ダイカストによるマルチマテリアル化されたヒートシンクは各目標値を達成した状態で製造出来る事が確認された。

第 3 章 複数年の研究開発成果

3-1 平成 25 年度の研究開発成果

1. 二色成形アルミダイカスト装置の開発

一色目にヒートシンクの放熱部を純アルミで成形し、二色目にその周囲の締結部を構造用アルミ合金で成形する二色成形ダイカスト装置を設計した。この装置は射出部を 2 箇所、溶解炉を ADC12 用と高純度アルミ用の 2 基を備えた設計とした。一色目の純アルミを成形するパーティング射出方式のコールドチャンバーダイカスト装置を製作した。一色目のダイカスト装置は二色目の横型コールドチャンバーダイカスト装置と連結できる構造にした。

2. PIG（ピンインジェクションゲートゲート）プロセスの開発

マルテンサイト系ステンレス鋼である SUS420 材を素材として、内面・外面を、高密度プラズマ窒化プロセスにより、固溶窒化した後に、PVD 装置にて CrN コーティングを施し耐熱コーティングしたインジェクターを作製した。この耐熱コーティングしたインジェクターは、溶湯アルミと素材との反応を防止でき、連続的使用に耐えられると判断した。金型温度の制御に、超高周波 IH を利用した過熱水蒸気による型加熱モードを検討した結果、17 秒で目標の 400℃に達し急速加熱で過熱水蒸気を得られることが分かった。

3. 二色成形アルミダイカスト用金型の開発

二色成形アルミダイカスト用金型の開発のため、製品となるアルミダイカスト製ヒートシンクの設計を行った。設計したヒートシンクは、放熱を担う部分を純アルミ、強度を担う締結部を一般アルミダイカスト材とした。

ダイカスト成形は一つの金型で行うものとする。二種類のアルミ異種材料を二色成形ダイカスト装置で鑄造する際に、純アルミが締結部に入らない金型を設計した。

4. 鑄造欠陥のない鑄造法の開発

ダイカスト時に発生するヒートシンク内部の鑄巣は熱の伝達を低下させる。ヒートシンクに内包される鑄巣の削減のためにダイカスト条件を検討し、X線CTスキャンで鑄巣の観察を東京都産業技術センタにて行った。ダイカスト条件により鑄巣が観察された。

5. 純アルミとダイカストアルミの接合性の開発

中央部分を第一工程成形で行い、第一工程成形で鑄造したヒートシンクを締結部用ダイカスト金型にインサートし鑄包み鑄造を第二工程成形して行った。X線CTスキャンで観察すると、接合面が密着しておらず、空洞が認められた。溶湯温度が低く、充填が悪い位置では、端面を溶解するには至っておらず、密着していないものとする。またインサート品は鑄造後時間経過しており、表面が酸化しているため、酸化物の影響により密着を悪くしているものとする。

6. ヒートシンク形状の設計

数値解析を用いて、目標の熱通過率を達成するヒートシンク形状、各種物理量の検討を行った。数値解析には、CD-adapco JAPAN 社製の市販熱流体解析ソフト STAR-CCM+を使用した。ピンフィンの性能比較を行うため、千鳥配列のピンフィンを、ピンフィン直径、流体熱伝達率等の条件を変更して伝熱解析を行った。ピンフィン直径 1mm、基板厚さ 1mm、発熱体温度 31℃、発熱体厚さ 1mm が目標の熱通過率 25,000W/m² K を達成できることが確認できた。

3-2 平成26年度の研究開発成果

1. 二色成形アルミダイカスト装置の開発

平成25年度に設計・製作した一色目のパーティング射出方式のコールドチャンバーダイカスト装置に二色目の一般的射出方式のダイカスト装置を結合し、二色成形ダイカスト装置を作成した。この装置は溶解炉を ADC12 用と高純度アルミ用の2基備え、射出部を2箇所とした横型コールドチャンバーダイカスト装置である。この装置により本事業で求める、高強度で高熱伝導のマルチマテリアル化されたヒートシンクの作成が高効率で可能となった。具体的には一色目にヒートシンクの放熱部を純アルミで成形し、二色目にその周囲の締結部を構造用アルミ合金で成形する。

2. P I G（ピンインジェクションゲートゲート）プロセスの開発

(1) P I Gプロセスの改良

プラズマ窒化+CrNベースコーティングにより耐久性が向上した。

P I G制御コントローラーの調整による温度の最適化によりプロセスの改良を行った。

(2) P I Gプロセス金型の最適化

内面のプラズマ窒化により、耐久性が向上した。ヒートシンクフィン 1mm 幅、高さ

比4以上のアスペクト比のヒートシンク形状を作製出来た。

(3) P I Gプロセスを用いたダイキャスト実験

フィン幅 0.5mm 以上のフィンでは、充填率の高い成形品を作成できることがわかった。またフィンの先端部、根本部における収縮率が、4%未満でほぼ収縮なしで casting できることがわかった。

3. 二色成形アルミダイキャスト用金型の開発

ヒートシンクを試作するための二色成形ダイキャスト装置用金型を設計・開発するにあたり、金型の動作確認を行った。具体的には CAV スライド方式金型と COR スライド方式の2案の金型を設計した。設計した2案の金型について、それぞれプラスチックモデルを作成し、金型作動状況について不具合検出等、最終確認を行い、本金型の作成に不備が無いことを確認した。

また目標を達成する最適なヒートシンクを casting する金型設計のために、「流動解析ソフト」を使い、金型内の溶湯アルミの流れを解析し、アルミ充填不十分による casting 不良の発生と casting による熱伝導率低下を抑制する解析を行い、本金型にフィードバック出来た。

4. 二色成形アルミダイキャスト装置の casting 条件検討用金型の開発

開発する二色成形アルミダイキャスト装置の casting 条件を検討するために、簡易形状の二色成形アルミダイキャスト金型を作成した。本事業で作成する複雑な形状のヒートシンクを casting する前に、単純なハート形状を二色 casting する金型を開発・作成し、最適な casting 条件と二色成形ダイキャストについての様々な知見を得た。

7. casting 欠陥のない casting 法の開発

ダイキャスト時に発生するヒートシンク内部の casting 不良は熱伝達率を低下させる。このため、平成25年度行ったX線CTスキャンでの casting 不良の観察結果を元に、 casting 不良が熱伝導率や熱伝達率に及ぼす影響について株式会社ベテルハドソン研究所の協力の下、調査しヒートシンク形状の伝熱設計をする上での基礎データを取得した。また熱伝導性を低下させる casting 不良を削減する為、流動解析ソフトを用い、 casting 不良の発生を抑制できる casting 条件のシミュレーションを既存の金型を用いて解析を行った。

これらで得られた知見をヒートシンクの設計と金型方案に反映させた。

8. 純アルミとダイキャストアルミの接合性開発

接合強度は一色目のアルミが充填された後、二色目が充填されるまでのタイムラグや、射出圧力・溶解アルミの温度、金型の温度に影響されることが解った。

7. ヒートシンク形状の設計と金型の開発

自動車用パワーモジュールの水冷による圧力損失の目標値 10kPa を達成しつつ、熱通過率の目標値 $25,000\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ を実現するヒートシンク形状を伝熱計算により設計した。ヒートシンクのピンフィン配置を千鳥配置とし本数 100 本、ピンフィン長さ 3mm、ピンフィン直径 1mm、ピッチ 1.5mm の形状は、冷却水流量 $0.04\sim 0.1\text{ l/s}$ の広範囲にわたり目標値を達成することが解った。

第4章 研究開発後の課題・事業化展開

4-1 研究開発後の課題

1. 高熱伝導アルミヒートシンク

本事業で目標とする二色成形ダイカストによるマルチマテリアル化されたヒートシンクは各目標値を達成した状態で製造出来る事が確認された。放熱部分である純アルミと強度が必要とされる筐体部のダイカストアルミとの接合は確認できたが、鑄造条件検討用金型ほどの接合状態ではない。二色目の溶湯が境界面を流れ酸化物を除去する効果が、直行する

部分にはその恩恵が受けられない為である。この問題は PIG プロセスを金型に盛り込む事でより接合性が良好な物になると考える。PIG プロセスの確立が今後の課題となる。

2. 二色成形ダイカスト技術

本事業では世界初の二色成形アルミダイカスト装置を完成させた。また二色成形ダイカスト用金型の開発も行い、二色成形アルミダイカスト装置での二色成形品の製造も可能となった。しかしながら二色成形ダイカスト装置の販売を考えた場合、いくつかの解決すべき問題が介在する。以下に問題点を列挙する。

(1) 通常射出部の切り替えが油圧ジャック式で切り替えに時間がかかる為、改善が必要である。

(2) 溶解保持炉が 2 つある為、電気代が嵩む為、改善が必要である。

(3) 射出機構が 2 つあるので設置スペースが必要である。

(1) の射出部切り替えについては自動化が必須である。(2)(3) については電気溶解保持炉を小型化する取り組みを本事業とは別に行っている。具体的には電磁誘導加熱を利用した 1 回の鑄造で必要なアルミを 1 サイクル内の時間で溶解する小型電磁誘導過熱溶解炉を開発している。この開発が進展し二色成形ダイカスト装置に組み込む事が出来れば、溶解保持炉 2 ヶ所分のスペースが空き、電気使用料の 40% 以上の削減が見込める。これらの改善を今後 1~2 年かけて開発し、組み込む予定である。

4-2 事業化の展開

1. 高熱伝導アルミヒートシンク

高熱伝導アルミヒートシンクを新規販売先としてアドバイザー企業である日立製作所へのサンプル出荷から始め、現在営業活動を行っている各社からの受注に結び付けていく。また各種展示会（ビックサイト、大田区など）で営業を行い、販売増につなげていく。既存の顧客に対しても新製品として販売を行う。具体的には当社のメインの納入先である気化器メーカーであるミクニが HEV・EV 車など環境重視自動車へのシフトを進めており、本事業の成果をリンクさせ販促につなげていく。既にミクニで現在設計中ではあるが、環境ディーゼルエンジン向け放熱部品の引き合いがあり当社としても現在よりも高性能のヒートシンクの開発は必要である。また既存の納入先である昭光通商を通じ彼らが持つ広い顧客から新規販売先を獲得できる。また昭光通商のグループ会社である昭和電工より現行ハイブリッド車のヒートシンクについての引き合いがあり、サンプル提供し、性能評価を受けた結果、本事業の成果が必要との見解を得た。本事業の成果があれば受注につながる。

また先だって開催された展示会においても、小糸製作所向けに車載 LED 放熱筐体について本事業の技術について検討が行われる予定である。また寒冷地仕様の燃料系の加熱装置にも東京濾器にて検討が行われている。

現在 LED 照明用として熱伝達の悪い ADC12 材での製品納入をしているが、本事業の成果によりより高放熱性能の LED 筐体を提供出来るので販売増につながると考える。

昭和電工には他工法で製造している既存の LED 照明についてのダイカスト化要求があり、本事業の成果は販促につながる。また既存顧客である日東商事は純アルミ材のヒートシンク販促に積極的に行動しており、本事業の成果は販促に繋がる。彼らが営業活動を行っているメーカーは自動車関連でアイシン精機（ヒートシンク）、弱電関連で東芝ライテック（新 LED 照明検討中）、フジクラ（コピー機用冷却部品コストダウン検討中）などである。既存の工法からのダイカスト化でのコストダウンや放熱性能の高効率化で新規販売先は多岐にわたる。

2. 二色成形ダイカスト装置

二色成形ダイカスト装置は既存のダイカスト装置と異なり異種材の接合品の製造が可能となったが、より一般的な使用方法として、異種材料の同時射出が可能となり、装置の販売としてはこちらがメインとなると考える。具体例で言うと、アルミ部品と亜鉛部品をセットで使う品物が当社でもあるが、今までのダイカスト装置であると、アルミ部品用金型、亜鉛部品用金型をそれぞれ作り、鑄造作業も別の機械で鑄造を行わなければならなかった。これを二色成形ダイカスト装置に展開すると、二色成形ダイカスト装置用金型を 1 つ用意するだけで良く金型コストも 25%減となる。（ベース部共用の為、部品形状により異なる。）

鑄造作業コストも今まで 2 つの鑄造機で別々に行っていた作業が 1 箇所と同時に鑄造出来るため、鑄造コストは 50%減となる。これらのメリットを武器にダイカストメ

ーカーやダイカストマシンを多数保有する自動車メーカーに販売して行く。販売方法については基本特許を保持し、二色成形ダイカスト装置を製造したヒシヌママシナリーからの特許（特願 2016-027748）のロイヤリティで事業化を検討している。尚、研究開発後の課題でも述べたが、いくつかの改善を付与する事で販売の機会が増えると考えている。

以上

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱において非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成 11 年法律第 42 号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。

リサイクル適性 

この印刷物は、印刷用の紙へ
リサイクルできます。