

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車車体駆動系&家電用、超大型中空 AI 合金LPD鋳物の開発」

研究開発成果等報告書

平成23年 3月

委託者 関東経済産業局

委託先 学校法人 早稲田大学

最終報告 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

1.1.1 研究の背景

自動車・二輪の大型強度部品であるタンクフレーム、サスペンションメンバー等の複雑な曲面形状を有した中空構造品を、プレスや溶接無く一体成形する技術のニーズがある。大型ディスプレイに代表される家電品にも同様のニーズがあるが、適切な加工技術がない。当該研究開発では（株）コイワイの有する独自の試作鋳造技術、カーメーカの要素技術と産総研、理研、早大の解析技術・特許を結集し、革新的金型低圧鋳造技術を確立する。

1.1.2 研究の目的

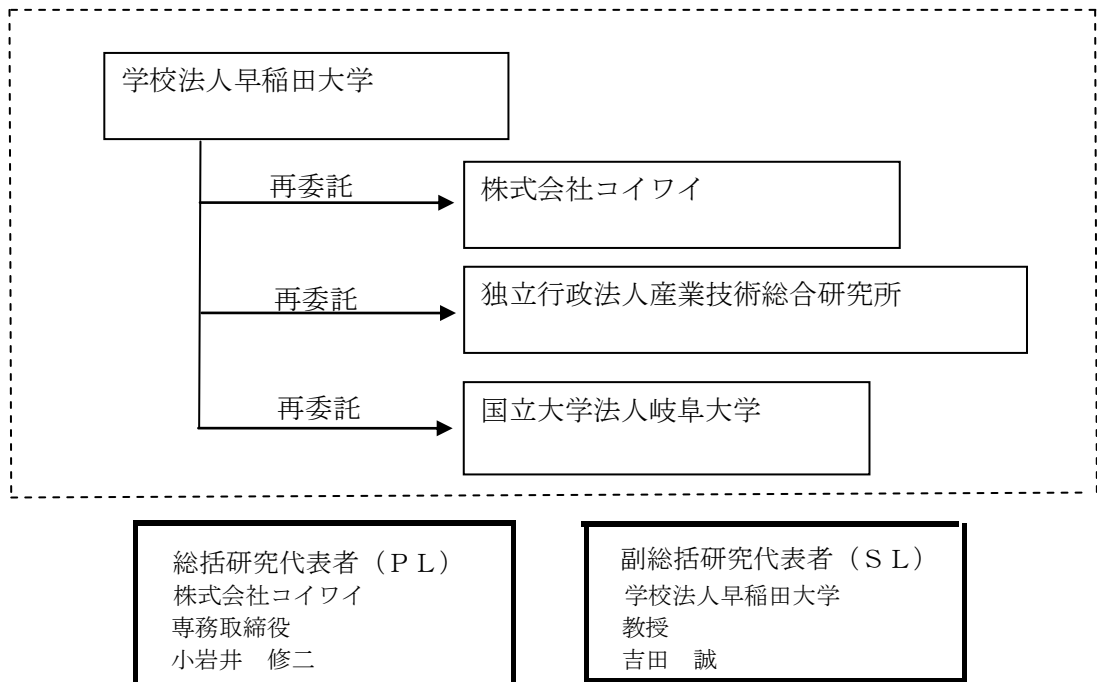
当該研究開発の目的は、メートル級・平均肉厚3ミリ以下のアルミニウム合金低圧鋳造鋳物の製造を実現することである。対象となる試作品は、二輪車の大型中空一体フレームと4輪車の大型中空フロントサスペンションメンバーとする。2年目までに鋳造CAEを用いて方案・鋳造条件を系統的に変量しキャビティの隅々まで溶湯が充填する条件を探索し、実鋳造においてもこれを実現することが出来た。しかし湯境・湯じわ・外引け・凝固割れ・巣等の内部欠陥が存在し、市場化のレベルには達していない。今年度は2年目までに完成した独自の低圧鋳造機とインクジェット方式RP中子製造技術を用い、量産ではなく試作品ではあるが、市場化可能な品質レベルの鋳造品を得ることを最終目標とする。このために溶湯の加圧圧力と加圧タイミング・総加圧時間、溶湯の吸引圧力と吸引タイミング・総吸引時間、金型温度を系統的に変量し、鋳造品の品質との相関をとる。各種の欠陥を最小化するためのランナ・ゲートなどの鋳造方案についても、RP中子の形状を系統的に変量することで検討を行う。ただしこの実験マトリクスは多数となるため、2年目までに導入したCAEによる計算能力を増強し、出来るだけ事前に条件の絞り出しを行う。適切な断熱特性と離型特性を有するCVD, PVD等の表面処理と、離型剤の検討が3年目も継続して必要である。表面処理については2輪車を模擬した金型の一部にこれを施し、焼き付き性と表面品位に関する検討を実験的に行う。断熱型の離型剤については早大が有するシーズ技術を活用する。具体的には候補となる成分系について離型特性、断熱特性について2輪車を模擬した金型を利用して検討する。

1.2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

1.2.1 研究組織及び管理体制

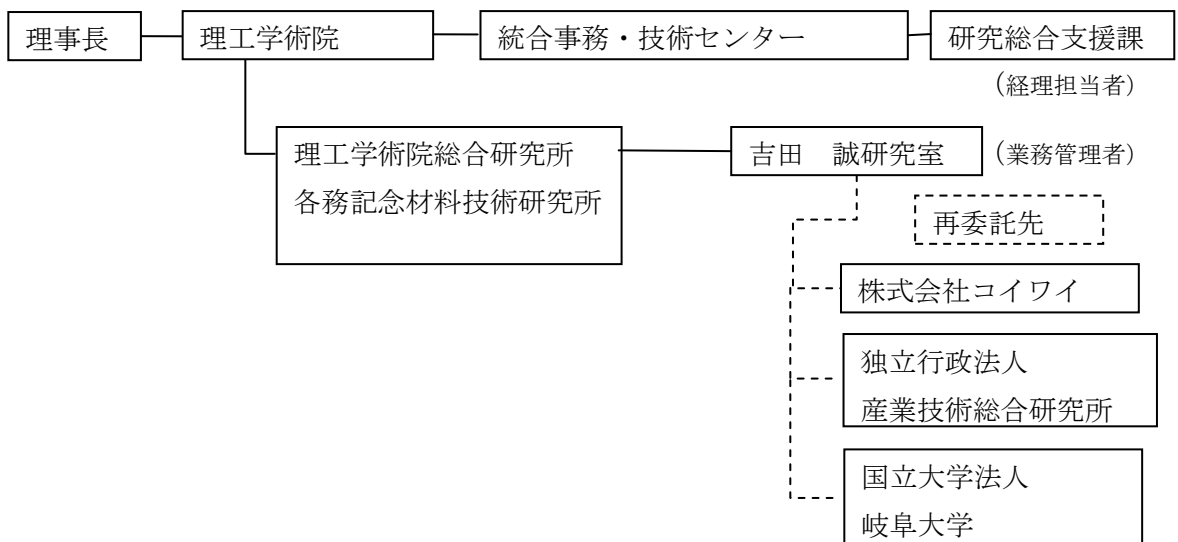
1) 研究組織 (全体)



2) 管理体制

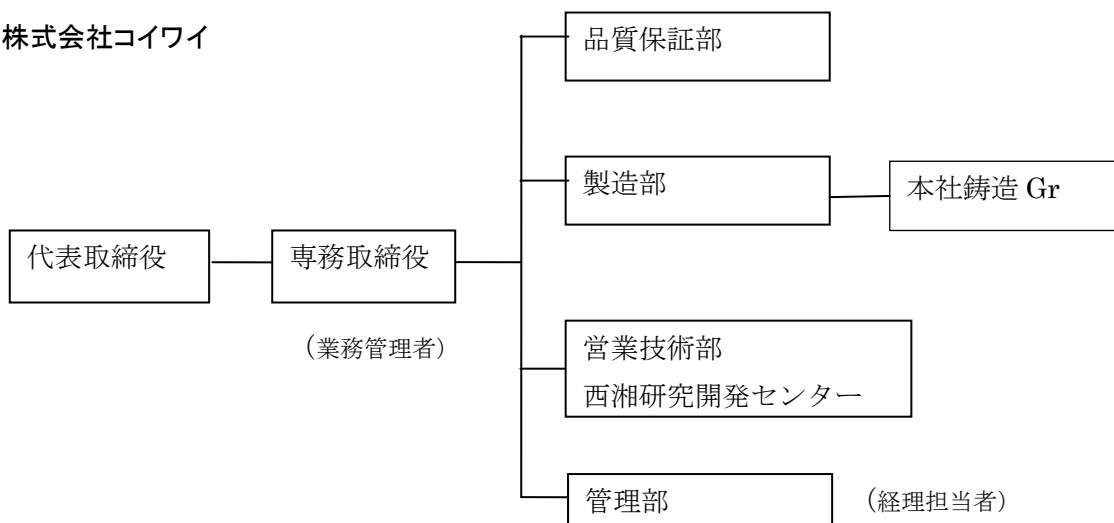
①事業管理者

[学校法人早稲田大学]

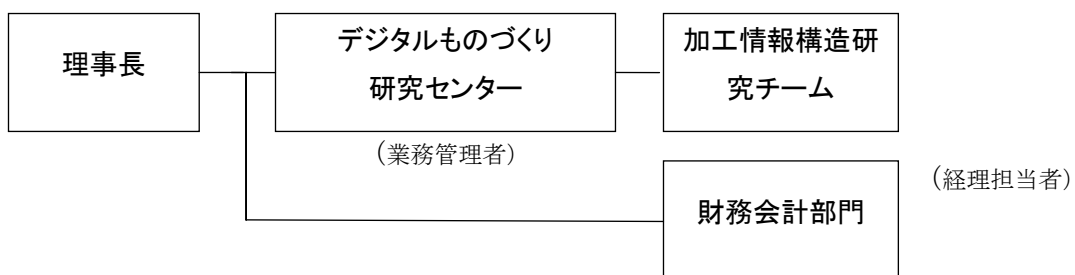


②(再委託先)

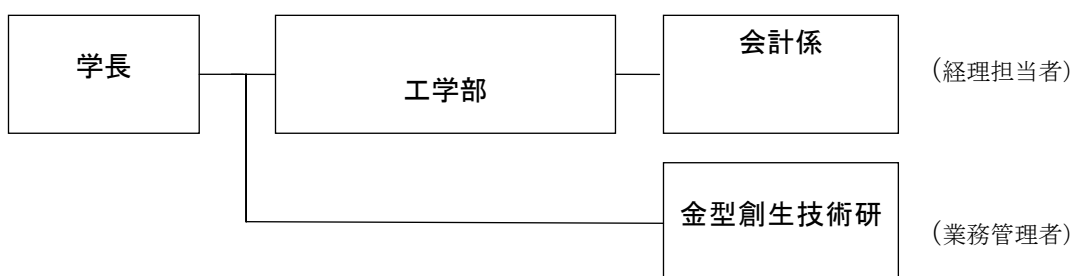
株式会社コイワイ



独立行政法人産業技術総合研究所



国立大学法人岐阜大学



1.2.2 管理員及び研究員

【事業管理者】 学校法人早稲田大学

①管理員

氏名	所属・役職
大榎 美紀子	理工学術院統合事務・技術センター 研究総合支援課 課長
柴田 康太郎	理工学術院統合事務・技術センター研究総合支援課 担当
吉田 誠	理工学術院総合研究所 教授 各務記念材料技術研究所 研究員

②研究員

氏名	所属・役職
吉田 誠（再）	教授 各務記念材料技術研究所 研究員

【再委託先】※研究員のみ

株式会社コイワイ

氏名	所属・役職
小岩井 修二	専務取締役（営業技術部部長兼務）
寺園 久男	本社鑄造Gr
古瀬 貴朗	本社鑄造Gr
田中 富士夫	本社鑄造Gr
石野 頼久	西湘研究開発センター

(独)産業技術総合研究所

氏名	所属・役職
岡根 利光	デジタルものづくり研究センター加工情報構造研究チーム チームリーダー

(国) 岐阜大学

氏名	所属・役職
山縣 裕	金型創成技術研究センター教授

1.2.3 他からの指導・協力者

1.3 成果概要

導入した独自設計の低圧鋳造機および金型を利用して、メートルサイズ級の二輪車の中空薄肉車体の鋳造試験を実施した。導入したソフトウェア群を利用し、大規模解析に相当する1億メッシュ近いFDM流動凝固解析を行い、具体的には減圧プロファイル、減圧ランナとチルベント配置、ゲートとランナの方案を、系統的に変量することで、いわゆる層流充填にちかい状態で、湯回り不良がなく湯境も回避出来る鋳造方案を、予定通り実験に先行して計算機上で得ることが出来た。

条件を絞り込んだ上で、実鋳造試験を行ったところ、ほぼ計算の通りの流動および充填挙動を示すことが確認できた。湯回り不良が発生する位置についても予測の通りとなった。2次排気系統を併用することで、湯回り不良のない試作品を得ることが出来、メートルサイズの大型薄肉中空品を低圧鋳造で製造することができた。導入した赤外線カメラ（サーモビュー）により、金型の温度分布の測定を行ったところ、概ね、CAEによる熱解析と一致することも確認された。開発した粉体離型剤の断熱性能についても、メートルサイズ級の中空薄肉鋳物を成立させるために必要な性能を満たすことが確認された。PCVDコーティングによる表面品位の向上、耐焼き付き性の向上については有意さが確認出来なかったが、量産ベースへ展開するための補完研究等で引き続き検討の余地がある。市場化のレベルに達するためには、外引け、凝固割れ、フローパターンなどの品質上の課題を解決する必要があるが、こうした問題は系統的な解析と実験によって解決した。以上総じて、当初予定の通りの設備導入を行い、当初予定の通りの研究課題にとりくみ、当初予定の通りの試作品を得ることが出来た。予定の通りとは雖も、1年間で独自の装置設計、装置製造、金型設計、金型製造を経て、計算機シミュレーションを平行して実施し、実鋳造試験において世界に先駆けてメートルサイズ級の2輪大型中空薄肉車体フレームについて充填不良のない試作品を世界に先駆けて得ることが出来たことは成果であると考えられる。各機関の目標達成に向けた意欲、円滑な各機関の連携、各機関が有するシーズ技術とノウハウがうまく融合したことによると考えられる。以上。

1.4 当該プロジェクト連絡窓口

学校法人早稲田大学 〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1

理工学術院 教授 吉田 誠

電話番号 TEL/FAX 03-5286-3329, makoto-yoshida@waseda.jp

最終報告書第 2 章

2章 本論

2.1 「真空排気方案の最適化のための計算機支援」及び「真空排気方案及びランナー法案の最適化」

本項目は実施計画のうち、項目①真空排気方案及び項目②の真空排気方案の最適化のための計算機支援に関する報告である。

2.1.1 目的

委託機関の早大の吉田、再委託機関の産総研の岡根、理研の大浦が中心となり初年度に導入した CAE 等を利用し、流動凝固解析を行う。これにより、あらかじめ複数の排気方案について計算機上で検討を行い、実際の鑄造条件を絞り込むと同時に、計算機による排気考慮の流動シミュレーションの有効性を鑄造実験との対比により行う。一部、非熱処理型合金を用いた場合を想定し、分割数無制限の大規模 FEM を新規に導入し、凝固割れと熱応力・変形の予測のための熱応力連成解析を行う。また計算に必要な力学特性の取得も行う

初年度に導入した鑄造 CAE である AnyCasting 等を用いて、2 年目に引き続き真空排気方案並びにランナー方案を幾つか変量し、最適化法案をシミュレーション上でまず見出す。そして再委託機関である（株）コイワイの主任研小岩井修二、研究員寺園久男、小瀬貴朗、小岩井貴文が中心となり、主たる研究開発の実施場所である（株）コイワイ西湘 R & D にて、2 年目に導入したの低压鑄造機と同じく導入予定の 2 輪車の大型フレームを模擬した金型をもちいて、排気方案とランナー方案をシミュレーション結果を参考に系統的に変量して鑄造を行い、湯流れ不良等の欠陥の発生状況と対比することで最適条件の検討を行うことを目的とする。実鑄造実験における型温分布のモニタリングは今年度導入予定の非接触式デジカメ型の赤外線温度計にて行った。

2.1.2 シミュレーションによるランナー方案と排気方案の最適化の結果

闇雲にランナー方案と排気方案を決定することは非効率的なので、初年度に購入した鑄造 CAE AnyCasting を利用してランナ（湯道）の切り方を 3 種類変量し、左右 2 分の 1 対称モデルで流動凝固解析を行ない方案の指針を得ることとした。計算条件は次の通りである。溶湯の温度は 720 °C、溶湯と金型の熱伝達係数は 2000W/m²K、溶湯と砂型の熱伝達係数は 100W/m²k、減圧は 1 秒 -50000N/m² で、加圧は何秒で 12 秒で 11000N/m² にておこなった。

シミュレーションの結果、計算結果からゲートの数を増やすと充填度が良く

なる事が示唆される。

排気方案も同様に流動凝固解析を行った。2次減圧併用の場合に、エンジン懸架部の充填不良が緩和されることがわかる。これらの計算結果は、いずれも、概ね溶湯が充填されることを示唆している。他にも種々の方案が考えられたが、委員会にて絞り込みを行い計算をおこなった結果、あきらかに NG と判断されるものではなく、相対的な優劣が示唆された。

さらに、流動解析の結果が実際の湯流れと一致するかどうかの検討を行った。湯流れセンサ（熱電対）を複数設置した様子、および、注湯からセンサに湯が到達した時間をみると、概ね解析で予想された時間に溶湯がセンサを通過しており、かつ解析の通り概ね1秒程度で充填完了していることが分かる。このことから、CAE による流動凝固解析の有効性が検証された。今後、当該プロセスで铸造する際には、あらかじめ上記のような流動解析を実施することが有用と考えられる。

2.1.3 実機試験によるランナー方案と排気方案の最適化の結果

独自設計により製造、導入した低圧铸造機は、4面にスライドコアの駆動装置を有しており、当該研究で試作を予定している2輪車体、4輪サスペンションメンバ等の製造を考慮している。また、独自設計により製造、導入した大型中空二輪車体フレーム用の金型は左右2個のスライドコアを有する金型をロストフォーム铸造にてダクタイル铸铁で素材を作製の後、機械加工をへて金型とした。スライド型は水冷、またはオイル温調が可能である。前節での CAE による流動凝固計算結果をふまえて、真空ランナ及びチルベントを配置した。また前方と後方の割面にスリットを設け、そこからキャビティ内を減圧できるようにした。

2.1.2 節でシミュレーション上でランナー方案と排気方案の最適条件が示唆されたので、金型を示唆された最適条件で作製した。計算の有効性を確認することが、将来、計算機援用による研究の遂行に有効と考え、実铸造試験では、2.1.2 で計算を行ったほぼ全ての条件をトライし、シミュレーション結果と比較することとした。外観品質としては、外引けと凝固割れがみられる。この試作トライでは溶湯を加圧しなかったため、こうした欠陥が発生したものと推察されるが、加圧が品質に与える影響を系統的に調査する必要があることが示唆された。

金型の温度解析についても導入した CAE ソフトウェア を用い、繰り返し铸造サイクルによる型温度の上昇予測を行った。铸造サイクルと共に徐々に型が温度上昇することが示唆された。実铸造においては、サイクルタイム 90 秒での

鋳造ができなかったため、計算の妥当性について検討出来なかった。金型の温度分布についても計算を行った。その結果、局所的に高温になる部分が示唆された。金型の温度分布については導入した赤外線カメラにより測定を行った。その結果を局所的な高温部分の発現については今のところ明かではなく、引き続き測定が必要である。当該研究開発では、200℃以下の金型温度で鋳造することで微細な組織の実現をねらっているが、赤外線でとらえた温度分布から、概ねこの程度の型温度が実現されていることが示唆された。

以上を踏まえて、吸引条件と加圧条件、金型温度を系統的に変量し、湯回り不良、および凝固割れに及ぼす影響を検討した。上型の金型温度については、温度調節装置を用い、系統的に変量した。その結果、下型の温度が上昇し、下型が膨張変形することによって、上型の合わせ面が開き、溶湯が漏れる傾向が示唆された。そこで、新たに水冷回路を下型に設置し、安全のため吸引式で通水して冷却を行った。その結果、上型温度が低い場合は全体に渡って均等に凝固が進行せず、先に凝固した部分が後に凝固する部分の収縮を拘束することが示唆された。その為、金型温度はある一定温度以上にする必要があると考えられる。

4輪サスペンションメンバについては、2輪フレームで得られた知見に基づいて金型設計を行い施工完了した。低圧鋳造装置に据えつけ後、今年度末までに鋳造トライを実施する予定である。

2.1.4 「真空排気方案の最適化のための計算機支援」及び「真空排気方案及びランナー法案の最適化」の成果まとめ

実鋳造に先立って、変量すべきパラメータ群について、系統的に変量して計算を実施した。離型材には特許取得の独自技術で製造した断熱性粉体離型剤を用いており、それに対応するシミュレーションの物性値としてやはり独自に実験的に取得した熱伝達係数を使用した。計算機上における排気方案の最適化により、湯回り不良と湯境のない、健全な鋳造品を、2輪車の中空大型フレームという、1億メッシュ程度の大規模 FDM 解析で見いだすことが出来た点で、主たる目標を達成した。さらに、早大では、産総研の岡根らの実験手法をとりいれ、予定の通り、非熱処理系合金の高温力学特性の取得も実施し、なおかつ、熱応力連成解析による凝固割れ予測についても、簡易形状の鋳物で実験とつきあわせて成功を確認した。理研の VCAD シミュレーション技術の一部利用し、流動凝固シミュレーションにとどまらず鋳物の変形に関する検討までもおこない、大学と理研・産総研、の総力を挙げて目標を完全に達成した。

シミュレーションの支援の元、真空排気方案とランナーの条件を絞り込んだ

上で、実鑄造試験を行ったところ、ほぼ計算の通りの流動および充填挙動を示すことが確認できた。湯回り不良が発生する位置についてもシミュレーションによる予測の通りとなった。湯回り不良のない試作品を得ることが出来、メートルサイズの大型薄肉中空品を低圧鑄造で製造することが可能なことが示唆された。

計算機支援と実際の鑄造実験における系統的なパラメータの変量による湯回り、外観品質の最適化の結果、外観品質上特段の問題なく、平均肉厚3ミリ以下の大型中空、複雑形状鑄物を製造することができ当初の目的を達した。

2.2 中子形状最適化

本項目は実施計画のうち、項目③中子形状最適化に関する報告である。

2.2.1 目的

再委託機関である(株)コイワイの主任研小岩井修二、研究員寺園久男、小瀬貴朗、小岩井貴文が中心となり、主たる研究開発の実施場所である(株)コイワイ西湘R&Dにて、昨年度導入したRP装置を利用し、湯回り不良、ガス発生による不良を低減するために必要な形状の中子について検討する。具体的には、昨年度導入のRP装置を用いて中子の厚さやハバキの形状を変量し、今年度導入した低圧鑄造機と2輪車を模擬した大型中空フレーム鑄造用の金型を用い、作製した中子を設置し、実際に鑄造を行うことで、製品の欠陥の発生状況と比較することで最適な中子形状の検討を行う。

2.2.2 「中子形状最適化」に関する結果及び成果まとめ

平均肉厚2ミリ程度の為、中子の設置精度として1ミリのずれは許容されない。そこで、中子に突起部をつけ、金型と当てることによって位置出しが出来るように工夫した。実鑄造試験の結果、突起がうまく機能してずれは1ミリ以内に収まることが確認出来た。0.5ミリ以内が望ましいが、金型の熱変形によるバリ吹きがみられ、これによる肉厚増加があったことから、中子の設置精度として0.5ミリ以下のずれを保証出来たかどうかは今後、さらに追究する必要がある。また、湯道部は中子内となるが、湯あたりによる衝撃で中子が破損する可能性があらかじめ危惧された。実際に鑄造試験を行ってみると、フロント側の中子が湯あたりで移動する現象が確認出来た。その為、位置を固定するための巾木を増設することで、この問題を回避した。

破損しない形状については、(株)コイワイが有する知見を用いてあらかじめ検討を行い絞り込みを行った。実鑄造試験にて破損は見られずこの点においては目的を達した。昨年度の研究から中空部からの減圧の有効性が示唆されたが、

この有効性の確認についてはひきつづき追究が必要である。中子を鋳造品から除去する作業性においても、中空の方が優位と考えられる。ただし、中空部に溶湯が進入する事例が多発したため、中子の合わせ部や、巾木の開口部から溶湯が進入しにくいような工夫を設ける必要があることも分かった。

2.3 CVD/PVD 適用技術の模擬製品への適用

本項目は実施計画のうち、項目④CVD/PVD 適用技術の模擬製品への適用に関する報告である。

2.3.1 目的

再委託先の岐阜大学の山縣と早大の吉田を中心に、2輪車の車体を模擬した金型の一部を修正加工し PVD,CVD あるいは PCVD を施し、実際に鋳造を行って耐溶損性と表面品位の検討を行う。表面処理の種類を選択においては山縣が有する知見を活用する。

2.3.2 結果

耐溶損、溶着にすぐれるとされる PCVD 皮膜 (TiAlSiCN₀ 膜) のコーティングを行ったが、この部位におけるコーティングの目的はむしろ表面品位に与える影響を明らかにすることである。今回、実鋳造品において優位性を確認できなかった。溶湯の加圧を行い外引けを抑制した上で、優位性の有無の検討が必要である。加圧と減圧のプロファイルを最適化し、外引けの問題を解決した上で、PCVD が表面の光輝性に及ぼす影響を検討した。PCVD を行った入れ子の設置位置が、丁度、湯模様を発生しやすい位置であったため、明確な判断が出来たわけではないが、PCVD コーティングを行った部分について離型剤を塗布しない状態での表面品位は、離型剤を塗布した部分と明確な差が見られなかった。

2.3.3 「CVD/PVD 適用技術の模擬製品への適用」に関する成果まとめ

本年度は PCVD による表面品位と焼き付き防止効果について、目視を重視した評価を行った。焼き付きについては、量産ベースの鋳造数での確認が望まれるが、離型剤を塗布しなくても焼き付きは生じなかった。表面品位については、離型剤を塗布した部分との有意さは認められなかった。このことが判明したので、当初の目的は達成した。

2.4 断熱離型剤適用技術における成分最適化

本項目は実施計画のうち、項目⑤断熱離型剤適用技術における成分最適化に関

する報告である。

2.4.1 目的

早大の吉田、アドバイザーの日産の神戸が中心となり、セラミックスやグラファイト、有機物の粉体からなる断熱性の離型剤について、吉田が有する知見をもとに成分候補を選定し、実際に大型の二輪車のフレームを模擬した金型に塗布して鋳造を行うことで、必要な流動長が得られる成分系について検討を行う

2.4.2 結果

離型性を発揮する成分として黒鉛、タルク、金属石けん、保温性を確保するために珪藻土などを配合した粉体の離型剤をもちいた。これらの混合比率と熱伝達率の関係を系統的に測定しており、特定の配合比率で金型と溶湯の熱伝達係数は 2kW/m^2 前後になっている。通常ダイカストでは 8kW/m^2 前後とされており、ダイカストに比べて断熱性の高い離型剤となっている。この粉体離型剤の熱伝達係数を用いて流動凝固解析をおこなった結果示唆された充填不良部と実鋳造による充填不良部が一致したことから、熱伝達係数は実鋳造においても 2kW/m^2 前後の性能を発揮したものと考えられる。また方案によってはほぼ完全に溶湯を充填することが出来たことから、用いた離型剤のすぐれた断熱性能と方案の最適化の両面によって充填不良をなくすに足る条件が満たされたものと考えられる。

2.4.3 「断熱離型剤適用技術における成分最適化」に関する成果まとめ

断熱性離型剤の効果は、すでに初年度で確認されているが、メートルサイズの薄肉中空鋳物について、これを実現するだけの断熱性を確認することができた。

2.5 プロジェクトの管理・運営

本項目は、実施計画のうち、項目⑥プロジェクトの管理・運営に関する報告である。

2.5.1

事業管理者である早大の吉田が中心となり研究委員会を定期的を開催する。また最終年度以後のスムーズな鋳造トライに向けて四輪車の大型中空サブフレームについて設計・製造上必要な情報を得る。

最終章 3章 全体総括

申請時のプロジェクトの計画に対して変更を行う必要がなかった。

コンピューターシミュレーションについて UES Software Asia の木島氏、新井氏の支援が必要となり、アドバイザーの追加を行った。効果として、計算機シミュレーションに関する研究項目の実行速度が高まった。

ヤマハ発動機参与の山縣氏が岐阜大学に移動したことを受けて、改めて、ヤマハ発動機のK氏についてアドバイザーの追加を行った。二輪メーカー内にアドバイザーがいることが、成果の見極めに必要であり、この点効果があった。

日産自動車のY氏は低圧鋳造法のスペシャリストであり、アドバイザーの追加を行った。独自の低圧鋳造機的设计において、Y氏の参画により実行速度が高まった。

(株)コイワイを筆頭に、再委託機関、アドバイザー全て、自社の仕事の一環の如く精力的に取り組んできた。かつ全体の方向性を理解して、指示を待つことなく自主的に取り組んでいる。これまで、PMが実施してきた複数の地域コンソーシアム等の産学官連携R&Dに比べても、やる気があふれている。従って、PMとしては、次はどうせよという指示を逐一出す必要がなく、適宜、すりあわせを行うことで、当初目標がぶれることなく研究開発が進行している。この原因は、各機関、とくに民間企業の参画者が部長クラスの社内決裁権を有しているため、意志決定の速度が格段に速いことが挙げられる。

P J 3年間を通じて、全く新しい工法を実現するための鋳造機的设计、製造、試運転、全く新しい発想の2輪大型フレームの金型的设计、試作鋳造、技術の実証、4輪サスペンションメンバの金型的设计、製造、2月以後の試作、という少なからぬ工数を要する研究開発を実行し、新工法の実証に至り、1月現在特許出願手続き、そして、社費での商用化補完研究の決定までに至ったという事実を鑑み、円滑に、精力的にR&Dが進められたものと判断する。

結果として、3年間のP J全体として、従来にない全く新しい工法を可能にするための独自の低圧鋳造機的设计から製造までを行うことが出来た。かつまた、2輪大型フレームについて、機械的特性を含めて、技術の立証が完了した。この技術を利用し、4輪サスペンションメンバの金型が2月初旬に完成次第、試作を行う。基本的な技術を確立出来たので、社費にて、来年度以後、商用化を目指した補完研究を行うことになっている。以上。