

平成28年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「薄肉ヒートシンク成形用カーボン電極の
精密加工技術と放電加工技術の確立」

研究開発成果等報告書

平成29年3月

担当局 中部経済産業局
補助事業者 佐藤精密株式会社
国立大学法人岐阜大学

目 次

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	1
1-2 研究体制	2
1-3 成果概要	6
1-4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	9
2-1 金型形状について	9
2-1-1 鋳造方案（研究開発項目①-1）	9
2-1-2 フィンの伝熱および構造解析（研究開発項目①-2）	11
2-2 金型加工技術の確立について	15
2-2-1 工具形状（研究開発項目②-1）	15
2-2-2 切削加工技術（研究開発項目②-2）	16
2-2-3 放電加工技術（研究開発項目②-3）	18
2-3 金型等の評価	19
2-3-1 金型評価（研究開発項目③-1）	19
2-3-2 ダイカスト製品評価について（研究開発項目③-2）	21
第3章 全体総括	24
3-1 研究開発成果のまとめ	24
3-2 今後の進め方	24
3-3 事業化の方向性	25

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) 研究開発の背景

近年の高級車やハイブリッドカー等に用いられるヘッドランプや室内灯に、LED照明等の利用が拡大しているが、LEDは発熱量が多く 100℃を越す高温になることから、冷却用のヒートシンクに対する放熱性向上に対するニーズが増加している。ヒートシンクの性能は、熱抵抗によって表され、熱抵抗が小さいものほど性能が高いが、この熱抵抗は、ヒートシンクの材質、大きさ、形状などによって決まることから、放熱性を向上させるためには、ヒートシンクを構成するフィンの表面積を広くする対策が取られており、フィン厚さを 1mm 以下にするとともに、フィン間隔を狭くする等の工夫がされている。その結果、今後ヒートシンクに要求される形状は、放熱効果を高める目的からフィンのピッチが狭く、高さが高くなる傾向にある。

(2) 研究目的及び目標

佐藤精密（株）（以下、当社という）では、現在までに放熱性を高めるためのフィン形状について、フィン高さ 50mm、フィン厚さ 1mm、フィン間隔 9mm、勾配 1°を実現するグラファイト加工技術を確立しているが、川下企業からのニーズは、放熱性を維持・向上、一層の小型化である。そのために、直線形状を三次元形状化し、さらに薄肉化等する必要があるが、そのためには、高いトンク比を実現するための形彫放電加工技術の確立が喫緊の課題となっている。しかし、現状においては、次の課題がある。

課題1；グラファイト電極加工

グラファイトは、炭素の粉末焼結体より、微小な炭素粒子が超硬材料のバインダーを削除するため、チッピングなどによる工具寿命の低下が懸念されるとともに、深溝加工が困難である。当社では、首下 25mm、R0.5 のボールエンドミルにより、50mm の深溝加工技術は確立している。

課題2；放電加工

電極と工作物との間隔が非常に狭いために、加工粉、熱分解カーボン等が滞留しやすく二次放電等が生ずる可能性が高い。当社では、フィン間隔 9mm、フィン厚さ 1mm の放電加工においては、第 1 工程で厚さ 0.5mm の電極で荒加工を、次の工程で 0.7mm の電極を用いて通常加工を行い、最終仕上げ工程を 0.9mm の電極による揺動放電と粉

末パウダーを用いて加工しているが、電極消耗が激しく加工時間も長時間用している。

以上から、本研究開発では、川下企業のニーズである放熱性の高いヒートシンクの鋳造を可能とする、グラファイト電極に対する精密加工技術と放電加工技術の確立を図る。

自動車メーカーが求める次世代ヘッドランプの要件は次のとおりである。

- ①安全性の向上
- ② 環境対応
- ③ デザイン性の向上
- ④ コスト低減

自動車メーカーはLED光源に取り組んでいるが、LED光源をヘッドライトに使用する場合、光源ロスが赤外放射のない熱伝導が主体であることから、放熱構造の強化が求められている。特に、川下企業のニーズは、軽量化、小型化の中で、放熱性を現状の30%以上高める要請が来ていることから、トング比率を従来の5.6から7.5（フィン高さ60mm、フィン間隔8mm）を実現する金型技術が必要となる。

以上から、ヒートシンクを成形するグラファイト電極の試作開発を通じて川下企業のニーズに応えるとともに、この技術をベースとして現在直線のグラファイト電極を、三次元形状へと展開を図り放熱性の向上を可能とする金型技術を確立する計画である。

本研究目標を達成するための研究項目を以下に示す。

- ① 金型形状

試作開発するヒートシンクに係る鋳造方案及び伝熱状況の検討による最適設計技術の確立

- ② 金型加工技術

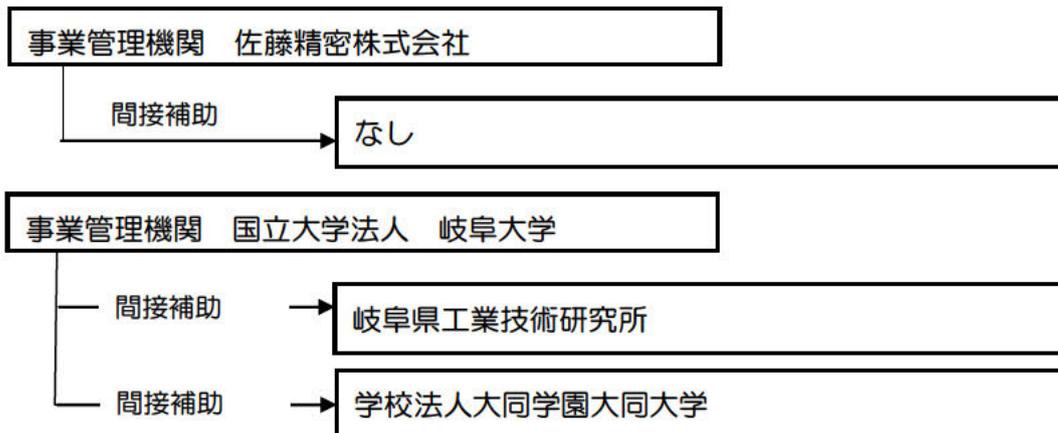
グラファイトに係る切削加工技術及びそれを電極とした放電技術の確立

- ③金型等の評価

金型及びダイカスト製品の検証・評価

1-2 研究体制

(1) 研究組織

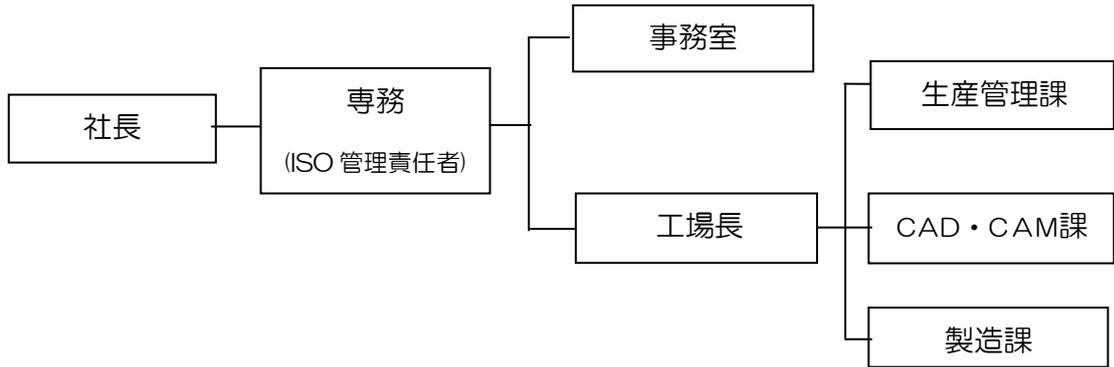


総括研究代表者（PL）
 佐藤精密(株)
 専務取締役 佐藤 厚史

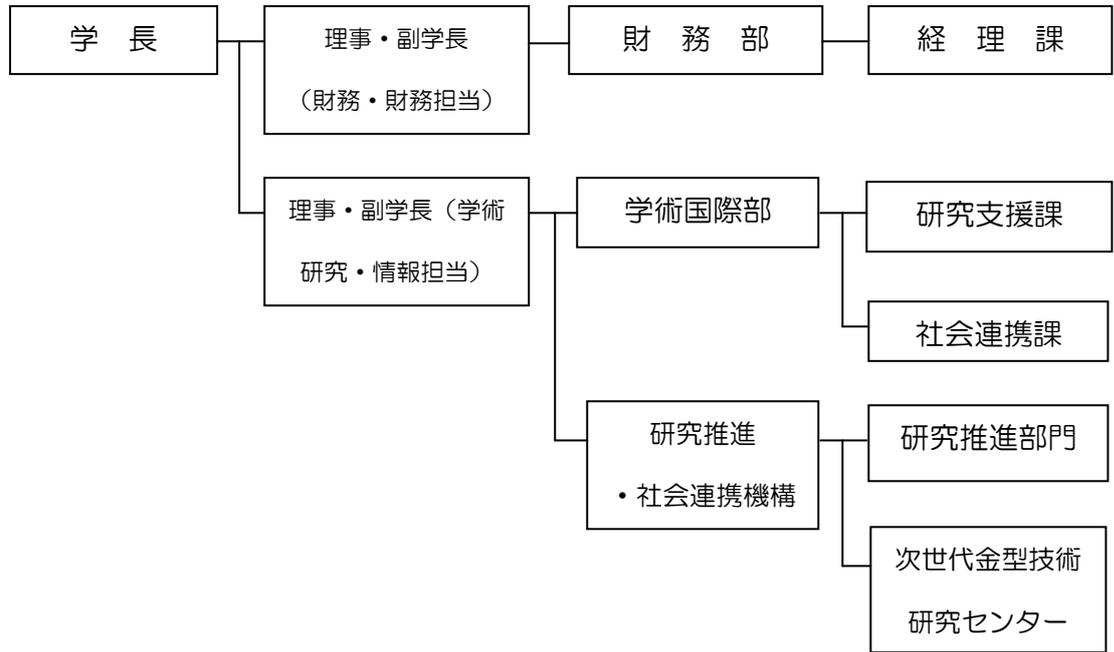
副総括研究代表者（SL）
 国立大学法人岐阜大学
 准教授 新川 真人

（2）管理体制

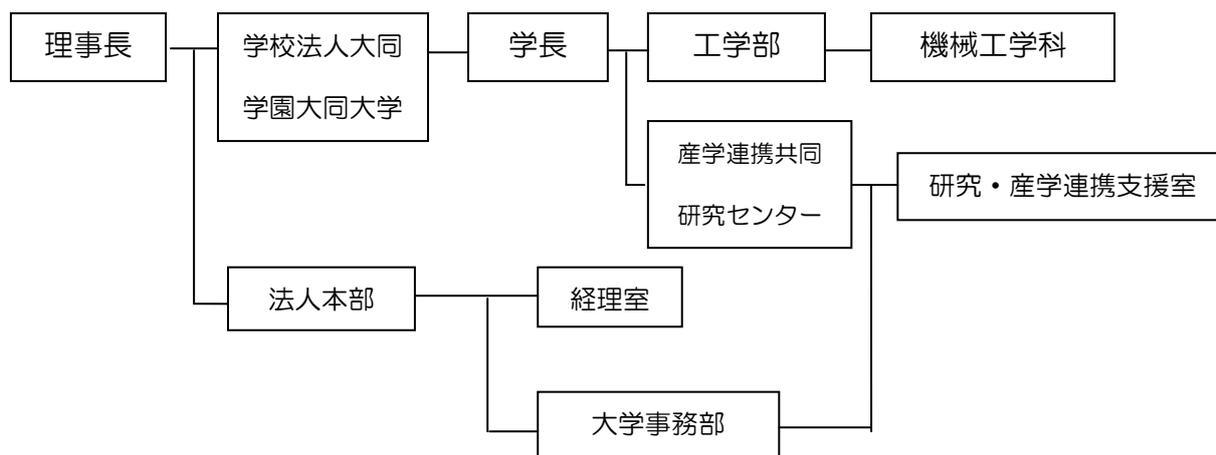
●佐藤精密株式会社



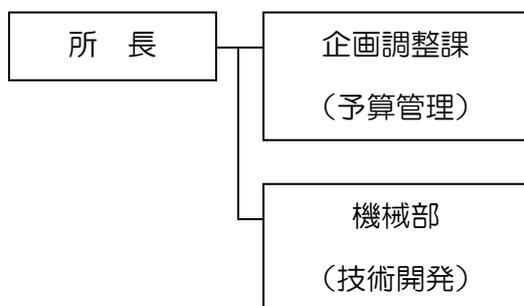
●国立大学法人岐阜大学



●学校法人大同学園大同大学



●岐阜県工業技術研究所



(3) 管理員氏名及び研究員氏名

【事業管理機関】佐藤精密株式会社

氏名	所属・役職	実施内容
佐藤 厚史	専務取締役	統括研究代表者 ①、②、③
伊藤 信雄	生産管理課	
藤村 雅	CAD・CAM課	
河合 努	CAD・CAM課	
池戸 尚仁	CAD・CAM課	
森 慎吾	CAD・CAM課	
長谷部 勝昭	製造課	
宮本 清史	製造課	
石原 一成	製造課	

【事業管理機関】 国立大学法人岐阜大学

管理員 / 研究員

氏名	所属・役職	実施内容
新川 真人	工学部 准教授	副統括研究代表者 ①、③

【間接補助事業者】

研究員

岐阜県工業技術研究所

氏名	所属・役職	実施内容
佐藤 丈士	機械部 部長	①-2、②-2、③
西村 太志	機械部	①-2、②-2、③

学校法人大同学園大同大学

氏名	所属・役職	実施内容
井上 孝司	機械工学科 教授	②-1、②-2

(4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

【事業管理機関】

佐藤精密株式会社

(経理担当者) 取締役 佐藤 芳子

(業務管理者) 専務取締役 佐藤 厚史

【事業管理機関】

国立大学法人岐阜大学

(経理担当者) 社会連携課 課長補佐 岡田 章宏

(業務管理者) 研究推進・社会連携機構 産官学連携推進本部 准教授 中川 勝吾

【間接補助事業者】

岐阜県工業技術研究所

(経理担当者) 企画調整課 管理調整係 主事 田中 友理

(業務管理者) 機械部 部長 佐藤 丈士

学校法人大同学園大同大学

(経理担当者) 経理課 室長 大脇 崇浩

(業務管理者) 研究・産学連携支援室 室長 冷水 孝夫

(5) プロジェクトの管理・運営

事業運営をスムーズに進めるために、補助事業者が主体となり間接補助事業者と共に研究開発委員会を開催し、研究共同体の意思決定・計画見直し等のサポート及び、各種事務処理を行った。

年度	委員会等名	日時	場所
平成 26 年度	第 1 回研究開発委員会	平成 26 年 12 月 5 日 (金) 10 時 00 分から 12 時 00 分	国立大学法人 岐阜大学
	第 2 回研究開発委員会	平成 27 年 3 月 4 日 (水) 10 時 00 分から 12 時 00 分	佐藤精密株式会社
平成 27 年度	第 1 回研究開発委員会	平成 27 年 10 月 16 日 (金) 13 時 30 分から 15 時 30 分	佐藤精密株式会社
	第 2 回研究開発委員会	平成 28 年 3 月 11 日 (金) 13 時 30 分から 15 時 30 分	佐藤精密株式会社
平成 28 年度	第 1 回研究開発委員会	平成 28 年 10 月 19 日 (水) 10 時 00 分から 12 時 00 分	佐藤精密株式会社
	第 2 回研究開発委員会	平成 29 年 2 月 7 日 (火) 10 時 00 分から 12 時 00 分	国立大学法人 岐阜大学

上記委員会の開催や定期的な進捗状況の報告の他に、プロジェクトメンバーと随時打ち合わせを行い、研究開発の進捗状況及び経費執行状況についての確認を行った。

1-3 成果概要

金型形状に関する研究開発（研究開発項目①）では、（1）鋳造方案（当該成果報告書 2-1-1）および（2）フィンの伝熱及び構造解析（当該成果報告書 2-1-2）を実施した。

鋳造方案に関する研究開発では、鋳造シミュレーションソフトを活用した湯流れ解析および金型温度解析手法の検討を実施した。その結果、離型時の型開き時およびスプレー・エアブロー時の金型表面温度の測定結果に対しておおよそ一致し、本手法の妥当性を明らかとした。また、本手法の成果を金型評価（研究開発項目③）に反映して改善をした。

フィンの伝熱および構造解析に関する研究開発では、ヒートシンクの形状による伝熱特性を評価するため、加熱体上部にヒートシンクを設置し、環境温度を変化させたときの発熱体の消費電力を計測した。その結果、表面積が大きな製品のほうが若干伝熱特性が高かったが大きな違いはなかった。さらに、フィン形状による冷却特性の違いをコンピュータシミュレーションにより評価することによって、製品形状設計援用手法の構築ができた。構造解析

では、ダイカスト品を離型させる際の離型力をひずみゲージにより計測するとともに、コンピュータシミュレーションにより離型力を推定する手法の開発を試みた。このとき、金型の温度および離型剤塗布条件による鋳物と金型間の摩擦係数を実験的に算出するとともに、離型力を増大させる要因を分析した。その結果、実測結果に対して精度の高い離型力シミュレーション手法を確立した。また、離型力が増大するとき、アルミ合金鋳物と金型間には反応層が多く形成されていることを明らかとした。

金型加工技術に関する研究開発（研究開発項目②）では、（１）工具形状（当該成果報告書 2-2-1）、切削加工技術（当該成果報告書 2-2-2）および放電加工技術（当該成果報告書 2-2-3）を実施した。

工具形状に関する研究開発では、FEMシミュレーションを活用した工具剛性解析データを構築し、解析結果をもとにした高リブ形状の加工を可能とする小径長軸型工具（刃数 3、シャンク径 6mm、軸テーパ角 1°、長さ 170mm）を開発した。

切削加工技術に関する研究開発では、グラファイトの切削抵抗および変動幅の把握を行い、加工技術データベースを構築するとともに、開発した工具を用いた高リブ加工に対する最適加工条件の算出を試みた。その結果、見出した加工条件ではびびり振動が抑制され、加工形状に問題はなく、あらさ（ Ra ）も安定した結果となった。

放電加工技術に関する研究開発では、加工速度、電極消耗率および面粗度の 3 要素を同時に満足する最適加工プログラムの検討を実施した。その結果、平均で $3.6Ra$ の良好な面を加工することができた。

金型等に関する研究開発（研究開発項目③）では、（１）金型評価（当該成果報告書 2-3-1）および（２）ダイカスト製品評価（当該成果報告書 2-3-2）を実施した。

金型評価に関する研究開発では、加工時の金型補正および量産時の金型補修を想定し、レーザ溶接機による金型材の溶接特性を評価した。金型材表面にヒートチェック等の金型のダメージを模擬した傷を意図的に投入し、溶接後の形状誤差および熱変質による硬度変化を検討した。その結果、形状誤差は平均で $4.5\mu\text{m}$ と極めて小さく、硬度も溶接前が 51.5（HRC）に対して溶接後が 51.1（HRC）と極めて小さいことを明らかとした。また、ダイカスト実験により湯まわり性、離型性の観点から金型温度を評価した結果、ダイカスト品は巻き込みガスが少ない良好な方案であった。さらに、フィン部に相当する箇所の冷却の重要性が明らかとなり、その対策として金型冷却方式およびダイカスト時のフィン部の冷却方法が重要であることを明らかとした。

ダイカスト製品評価に関する研究開発では、ヒートシンクを構成するフィンの伝熱状況を把握するため、ダイカスト製品から取り出した供試体から熱伝導率を計測した。その結果、同じ素材であっても、取り出した部位により、熱伝導率に差異があることが判明した。また、ヒートシンクの強度を評価するため、振動試験機および加速度センサにより振動特性を計測した。さらにその結果を用いてヒートシンクの強度解析を実施した。その結果、フィン高さが大きくなるほど固有振動数が小さくなり、先端の変位が大きくなった。さらに強度解析を実施した結果、破壊判定はされない良好な製品であることが分かった。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

●佐藤精密株式会社

専務取締役 佐藤 厚史

住所：岐阜県関市下有知5488-2

連絡先 Tel：0575-24-1357 Fax：0575-24-2579

連絡先 E-mail；office@satou-seimitsu.co.jp

●国立大学法人岐阜大学

工学部／次世代金型技術研究センター 准教授 新川 真人

住所；岐阜県岐阜市柳戸1-1

連絡先 Tel&Fax；058-293-2517

連絡先 E-mail；mniikawa@gifu-u.ac.jp

●学校法人大同学園大同大学

副学長 工学部 教授 井上 孝司

住所；愛知県名古屋市南区滝春町10-3

連絡先 Tel；052-612-6111 Fax；052-612-5623

連絡先 E-mail；takinoue@daido-it.ac.jp

●岐阜県工業技術研究所

機械部 部長 佐藤 丈士

住所；岐阜県関市小瀬1288

連絡先 Tel；0575-22-0147 Fax；0575-24-6976

連絡先 E-mail；sato-joji@rd.pref.gifu.jp

第2章 本論

2-1 金型形状について

2-1-1 鋳造方案（研究開発項目①-1）

（佐藤精密株式会社、国立大学法人岐阜大学）

鋳造シミュレーションを実施するにあたり、鋳造材（ADC12）の物性値を金属組成から推定した。図1に今回使用した物性値のひとつである固相率と温度の関係を示す。

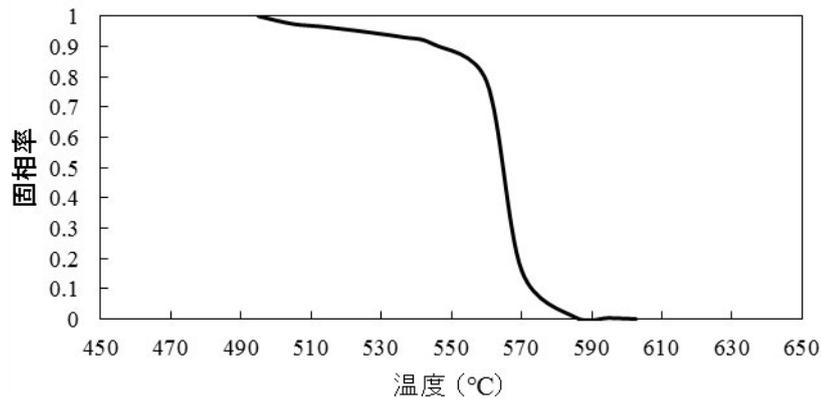


図1 シミュレーションに用いた物性値例

図2に鋳造シミュレーションによる型内充填挙動を示す。型内に射出された溶湯は型上部に向かって流入し、その後フィン内部を巻き込むように湯が流れていることがわかる。このことは、内部にガスを巻き込んで鋳物が製造される危険があることを示唆しており、金型にはガスが適切に排出されるように十分配慮した方案が求められる。

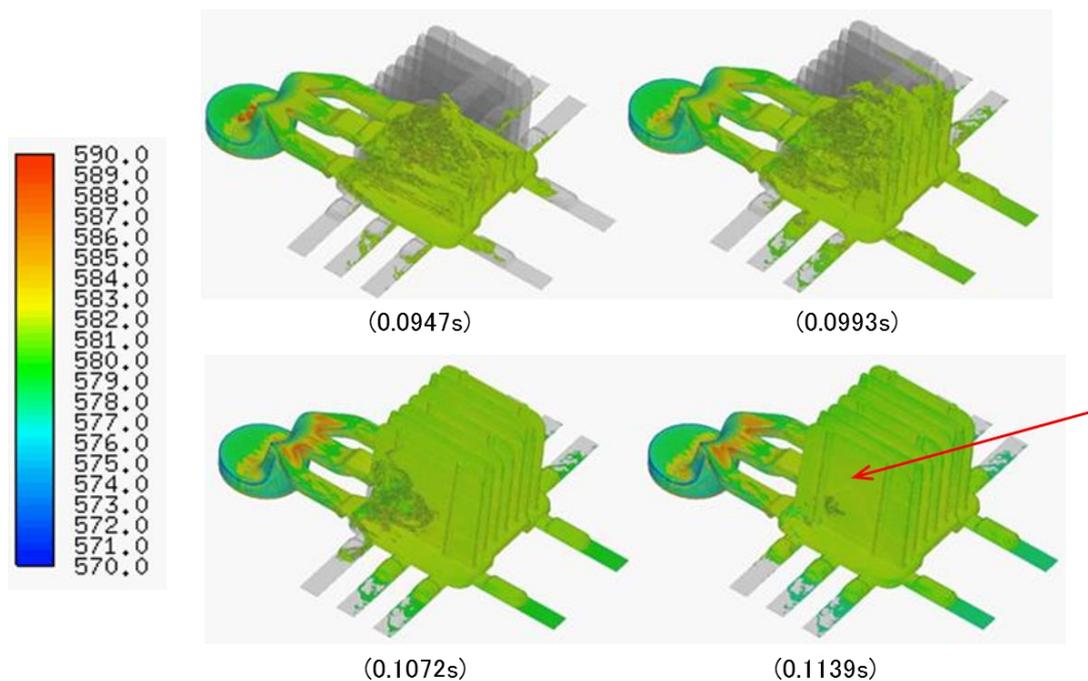


図2 湯流れ解析結果

鑄造方案の検討のためには、鑄造中の金型温度の変化を精度よく推定することは極めて重要である。そこで、ダイカストの工程をそれぞれシミュレーションにてモデル化し、一連の流れを連続的に解析することによって金型温度の推定を行った。また、その妥当性を赤外線放射温度計により取得した鑄物取出し時とスプレー・エアブロー後の金型温度から評価した。図3に金型温度解析の結果と実測結果との比較を示す。17s 付近の複数の点が、鑄造実験ごとに測定した離型時の金型温度を示している。図より実測結果にはばらつきがあるが、その平均値はシミュレーション結果とほぼ一致していた。これらより、金型方案を検討する環境を整備できた。

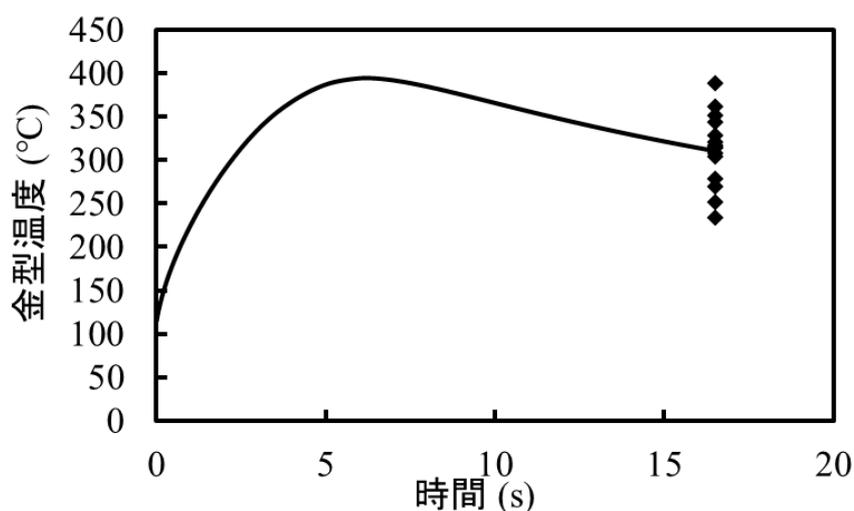
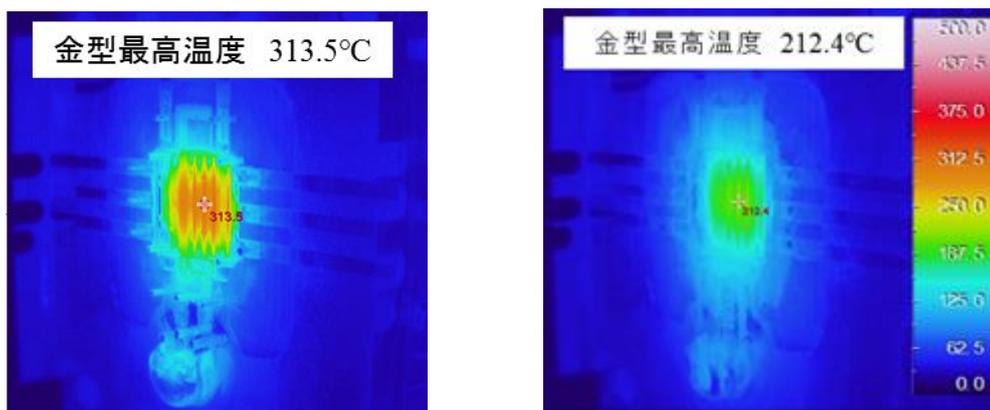
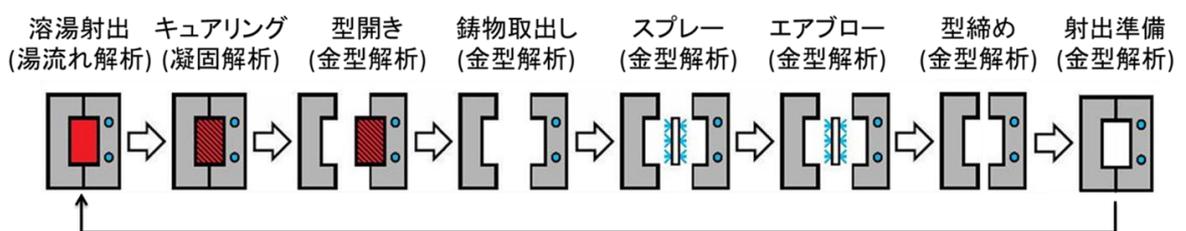


図3 金型温度シミュレーション結果と実測結果の比較

2-1-2 フィンの伝熱および構造解析（研究開発項目①-2）

（佐藤精密株式会社、国立大学法人岐阜大学）

フィンの伝熱解析を実施するため、まず実験的にフィンの伝熱特性を評価した。発熱体の上部にヒートシンクを設置し、環境温度を変化させたときの発熱体の電力量から伝熱特性を評価した。図4に実験風景を示す。

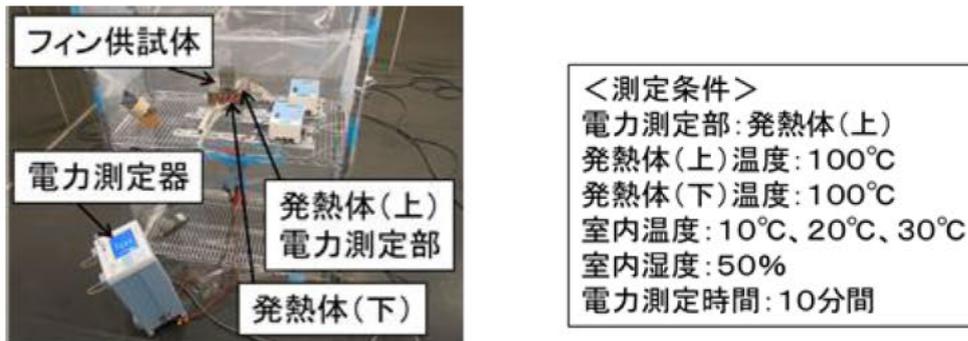


図4 伝熱特性の評価実験の様子

図5に測定されたフィンの消費電力の変化を示す。環境温度が 10°Cのときにフィン形状による消費電力に違いが確認できたが、20、30°Cでは違いはなかった。



□直線フィン ○曲線フィン

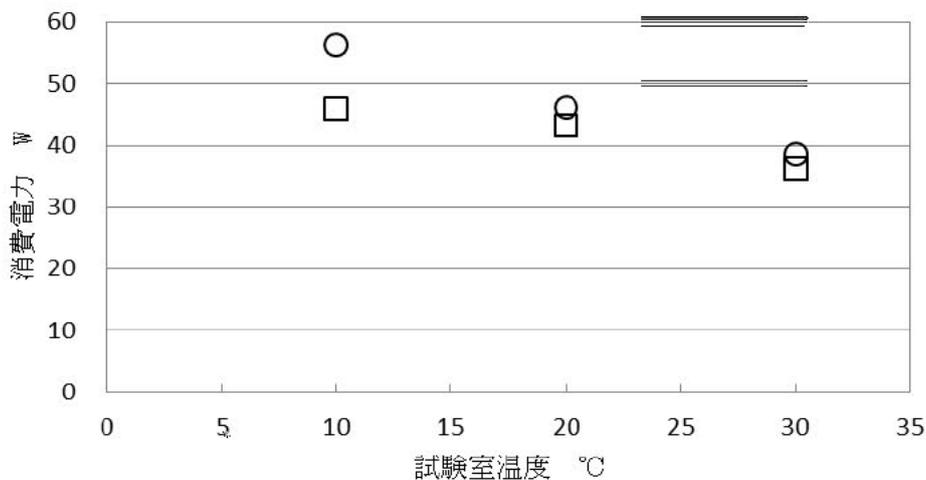


図5 フィンの伝熱特性の評価結果

図6に非定常熱伝導解析によるヒートシンクの伝熱特性を評価した結果を示す。製品底部に100°Cの熱荷重を加え、各時間における製品の最高温度箇所および最低温度箇所の変化を計算した。ここで、製品と空気間の熱伝達係数は250W/m²Kとした。図中の最高温度は、熱荷重を加えた製品底部の温度である。冷却過程において、フィンの形状の違いによる冷却速度に若干の違いはあるが、フィン形状による影響はほとんどなかった。

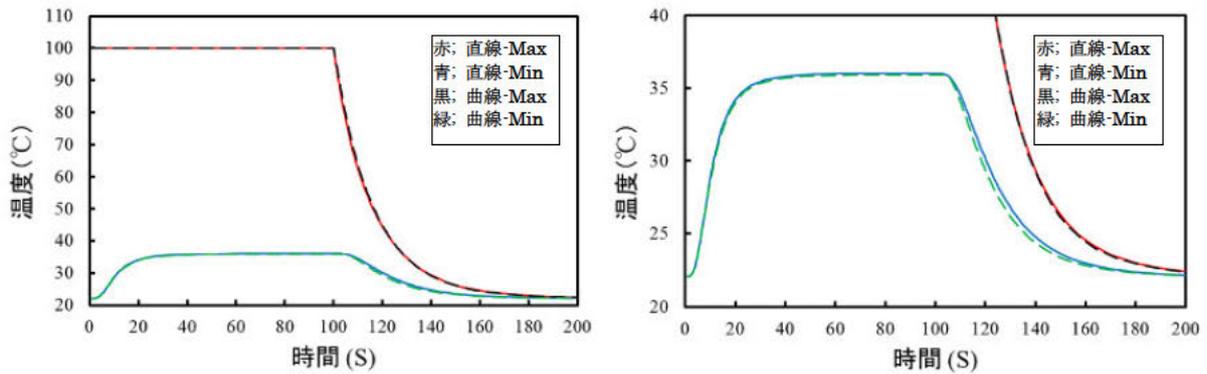


図6 シミュレーションによる伝熱特性の比較

金型離型時の離型力をコンピュータシミュレーションにより推定する方法を確立することを目的とし、金型の押しピンにひずみゲージを設置し、鋳造時に押しピンに発生するひずみを連続的に取得した。また、シミュレーションに必要な金型温度の測定も併せて実施した。図7に実験風景を示す。ひずみゲージはダイカスト品のフィン部中央部、上部、下部に合計4か所貼り付けた。

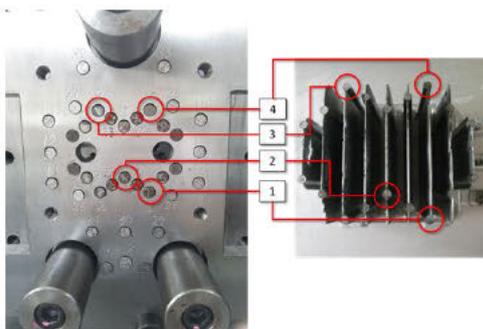
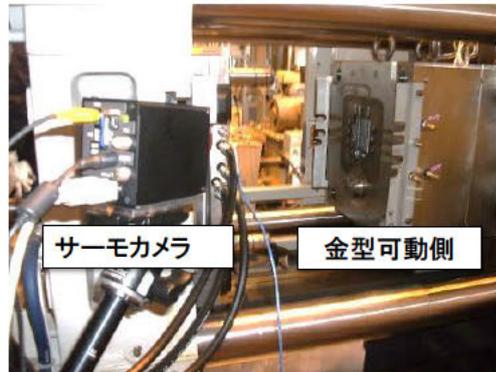


図7 離型力評価実験の様子

(左上；ひずみゲージの貼り付け状況)

(右上；金型温度測定の様子)

(左下；ひずみゲージを貼り付けた押しピンとダイカスト品位置との関係)

図8に離型時の押しピンに作用するひずみの測定結果を示す。離型時にほぼ同じタイミングで圧縮ひずみが計測されたが、その値は押しピン位置により異なっていた。また、上図のように最大圧縮ひずみが計測されたのちに急激にひずみがゼロに変化するケースや、下図のように同じ値で推移したのちにひずみがゼロになるケースがあった。これらは金型と鋳物の熱による変形のほかに金型と鋳物間の摩擦状態に違いが生じていることを示している。

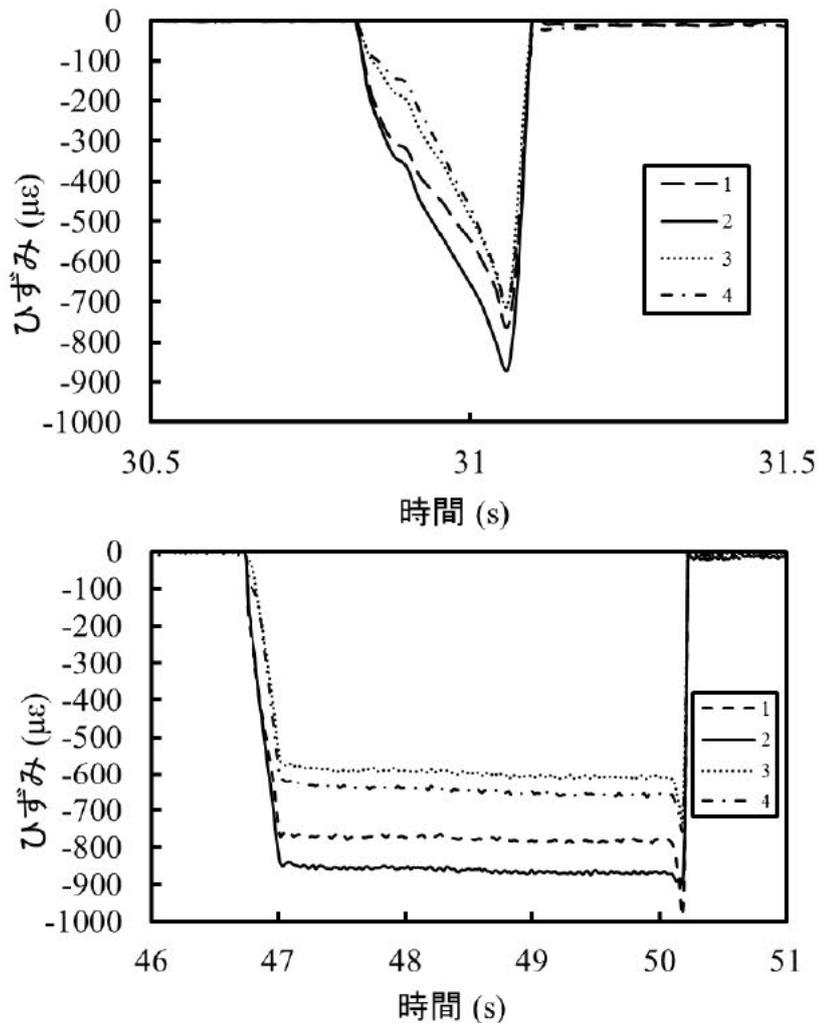


図8 押しピンに作用するひずみの測定結果

図9に、金型材と鋳物間の摩擦状態を定量的に評価した実験方法の概念図を示す。まず、金型に見立てた試験片を 200℃に加熱し、離型剤を塗布する。その後、試験片を試験温度に設定したのちに TP 上面にリング状の型を設置し、溶解させたダイカスト合金を注湯する。凝固後にリング状金型を引っ張り、そのときの引張荷重をロードセルにて連続的に計測することによって金型材と鋳物間の摩擦係数を算出した。

図10に測定結果を示す。適切に離型剤の膜が形成された場合は摩擦係数が低く、 $\mu=0.3 \sim 0.5$ であった。一方、不適当な場合は $\mu=1.0$ を超える値となった。

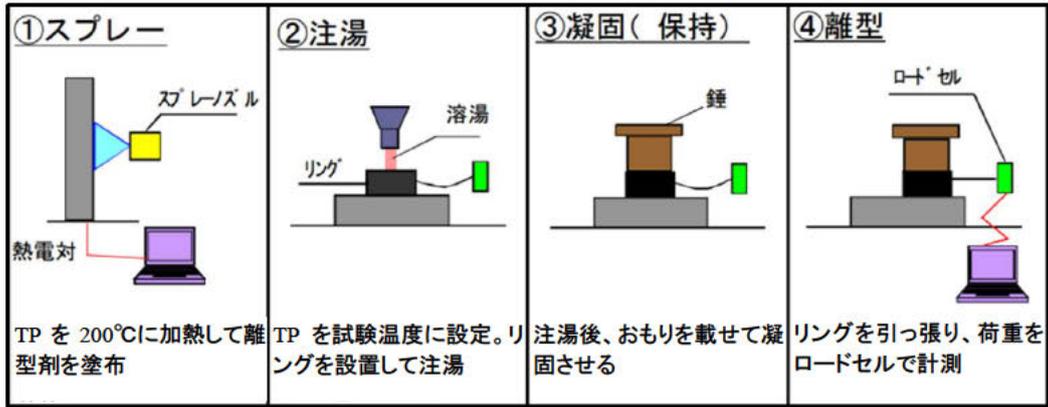


図9 金型-鋳物間の摩擦係数の算出方法

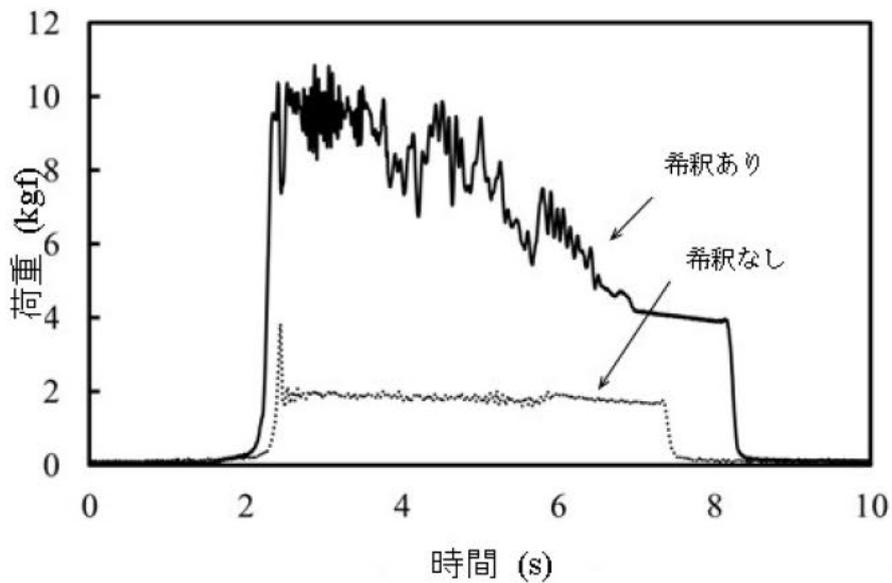


図10 金型-鋳物の摩擦状態の測定結果

図11に良好な摩擦状態ではなかった鋳物表面をSEM-EDXにて観察した結果を示す。高い摩擦係数を示した鋳物ほどFeが多く検出され、金型とアルミ合金鋳物の相互拡散による反応層が影響したと推察された。

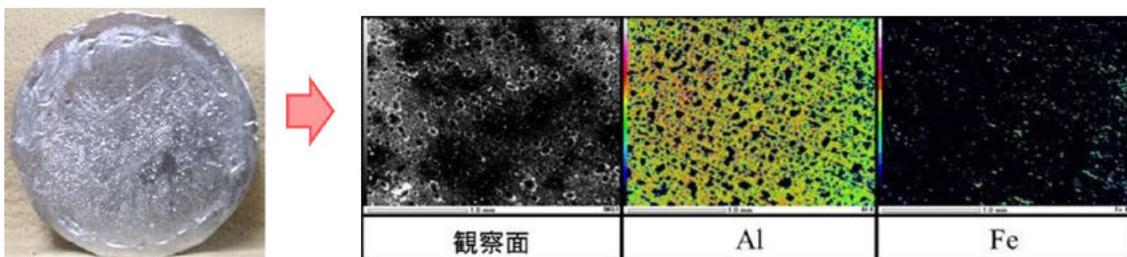


図11 SEM-EDXによる元素分析結果

これら結果をもとに、金型および鋳物の変形を考慮した離型力推定シミュレーション手法を考案した。離型時の鋳物は金型内にあるため温度を実測することはできない。そこで、金

型温度（図3）の結果を活用して推定した。また、押しピン摺動時の金型の変形による抵抗を考慮するため、金型の変形解析を行ったうえでピンに所定の変位を与えて離型時の状況を再現した。図12に考案したシミュレーション手法による離型時の押しピンのひずみの算出結果を示す。最大ひずみは実測値（図8）とほぼ同じであり、考案した本手法の妥当性を示唆している。

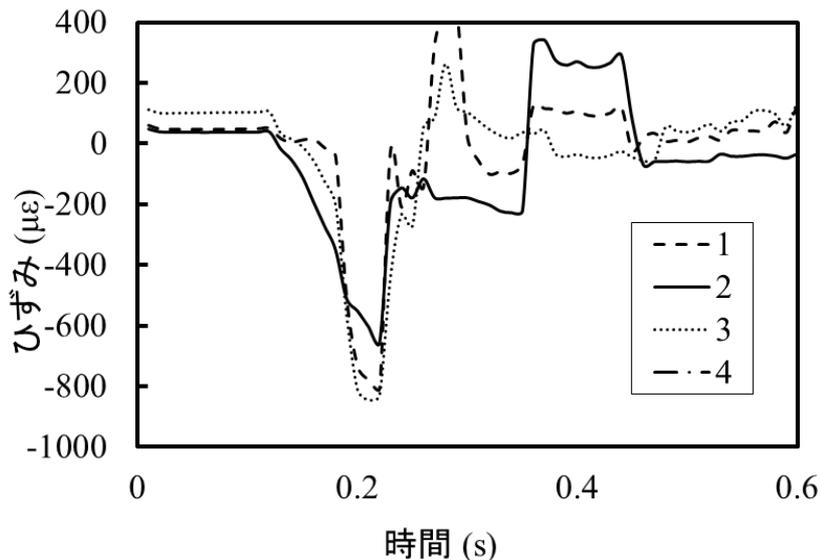


図12 考案した離型力推定シミュレーションによる計算結果

2-2 金型加工技術の確立について

2-2-1 工具形状（研究開発項目②-1）

（佐藤精密株式会社、学校法人大同学園大同大学）

最適な小径長軸工具形状を検討するため、まず市販の長軸工具（70mm）による切削試験を実施するとともにFEM剛塑性解析を実施した。図13にネック部が破損した工具の外観を、またそのときの応力解析結果を示す。計算上では、ネック部に3.6MPaの応力と1.85mmのたわみが発生していた。そこで、チャッキング部とテーパ部の形状に着目し、種々形状を変化させて応力解析を実施した結果、170mmの長軸工具において応力およびたわみが0.17MPa、0.86mmと大きく減少する形状を見出した。図14にこれら検討結果から試作した小径長軸エンドミル（刃数3、シャンク径6mm、軸テーパ角1°、長さ170mm）の外観写真を示す。

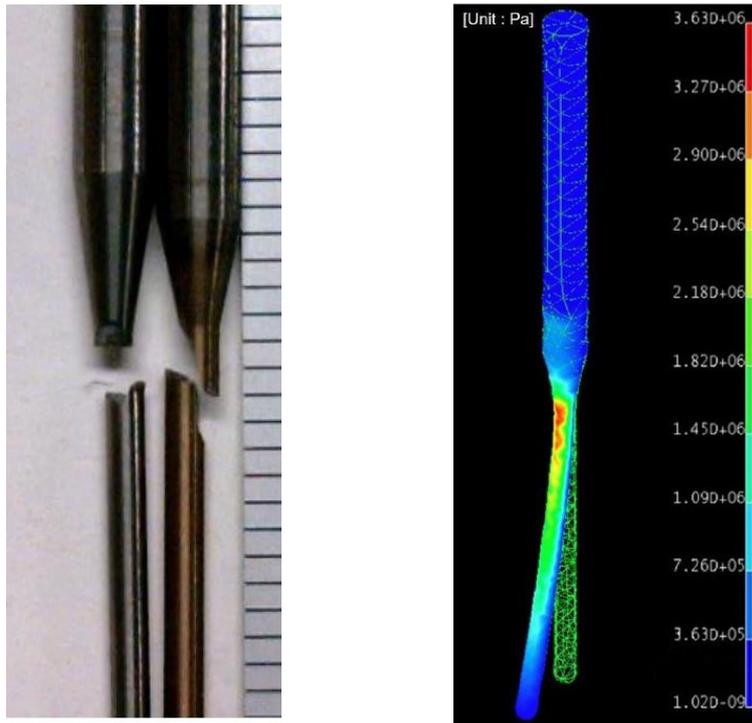


図 1 3 市販工具の破損状態と F E M解析結果



図 1 4 試作した小径長軸エンドミル

2-2-2 切削加工技術（研究開発項目②-2）

（佐藤精密株式会社、学校法人大同学園大同大学、岐阜県工業技術研究所）

図 1 5 に試作した工具による平面切削後の仕上げ面粗さ (R_a) の測定結果を示す。図中、C3 は市販工具を表し、D1~D9 はいずれも試作工具を表す。また、試作工具のうち D1~D6 はボールエンドミルであり、D7~D9 はラジアスエンドミルである。図より、ラジアスエンドミルによる仕上げ面粗さは市販工具と比較してより粗さの値が低いことが分かる。また、ボールエンドミルのうち D3 の工具はいずれの切削条件においても良好な結果となった。

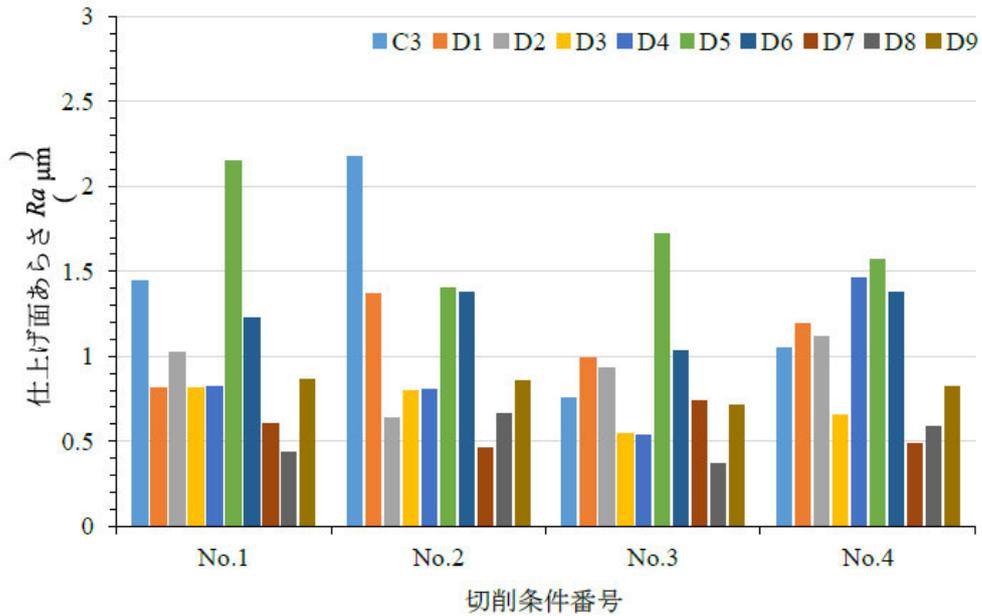


図15 試作した工具による切削実験後の加工面粗さの比較

図16に試作工具による加工面の工具転写率 (R_0) を示す。図中の縦軸は、測定結果を理論値で除した無次元量であり、この値が1に近いほど理想的な工具転写状態であることを意味する。図より、D3とD4工具が良好な結果を示した。

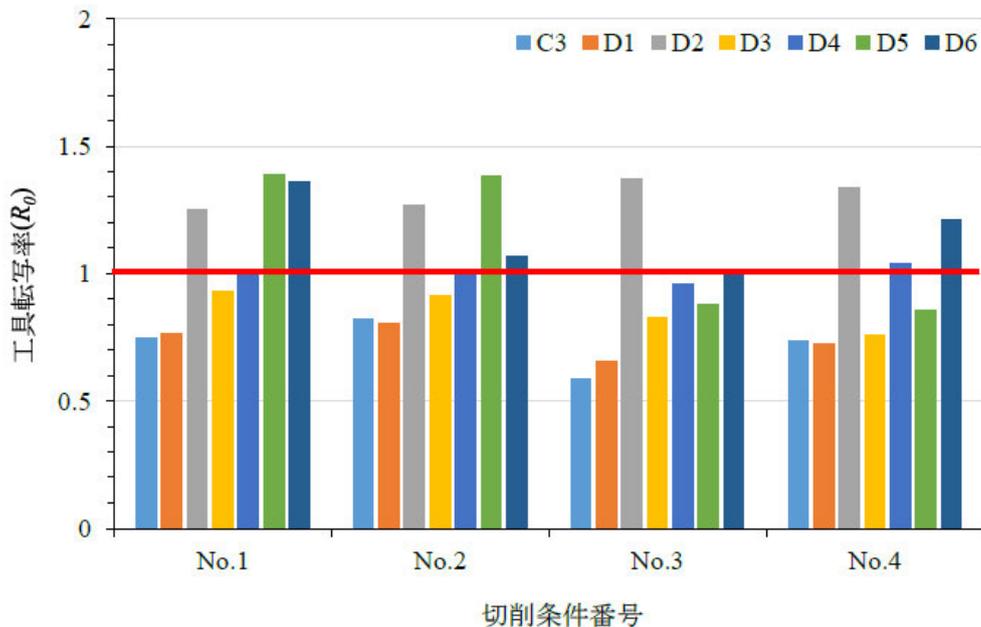


図16 試作した工具による切削実験後の工具転写率の比較

図17に試作した工具により加工されたグラファイトの外観を示す。このときのフィン1枚ごとに形状精度を評価した結果、 $4\mu\text{m}$ から $10\mu\text{m}$ と数値に差が出たが、径が太く短い方が良好な結果を示した。また、ボール工具よりラジラス工具の方が良い結果となった。



図17 試作した工具により加工されたグラファイト電極

2-2-3 放電加工技術（研究開発項目②-3）

（佐藤精密株式会社）

加工速度、電極消耗率、面粗度の3要素を満足する最適な加工プログラムを検討するため、その要素に見合った加工速度 F（4mm/分と7mm/分）と側面残し量補正比率 D（100%と110%）の数値を用意し、それぞれの組み合わせで放電加工を行った。その後、グラファイト電極による放電加工後の金型材の加工面粗さ（Ra）測定した。図18に用いたグラファイト電極と加工後の試料を示す。加工後に試料を分割し、放電加工された面の粗さを粗さ計により測定した。その結果、 $3.61\mu\text{m}$ であった。電極精度が悪くても、電極加工面が綺麗に仕上がっていれば、面粗さとしては、良い結果となった。また、面粗さを重視し、放電時間を短縮するには、側面補正比率を上げた方が綺麗な良い面となった。



図18 面粗度測定用試料

2-3 金型等の評価

2-3-1 金型評価（研究開発項目③-1）

（佐藤精密株式会社、国立大学法人岐阜大学、岐阜県工業技術研究所）

湯流れ解析（図2）において、ガスの巻き込みが懸念された。そこで、実際にダイカストされた製品のブリスタ試験を実施するとともに、X線CTによる内部欠陥の有無を評価した。図19にブリスタ試験後のダイカスト品の外観を示す。図中の矢印は、試験後にダイカスト品に含まれるガスが膨張して表面に発生した凸部を表している。図より、一部に表面の凸部が観察されるが数は少なく、その大きさも小さい。試験前後の密度比を測定した結果は0.990であり、内部にはほとんど巣がない状態であると考えられる。

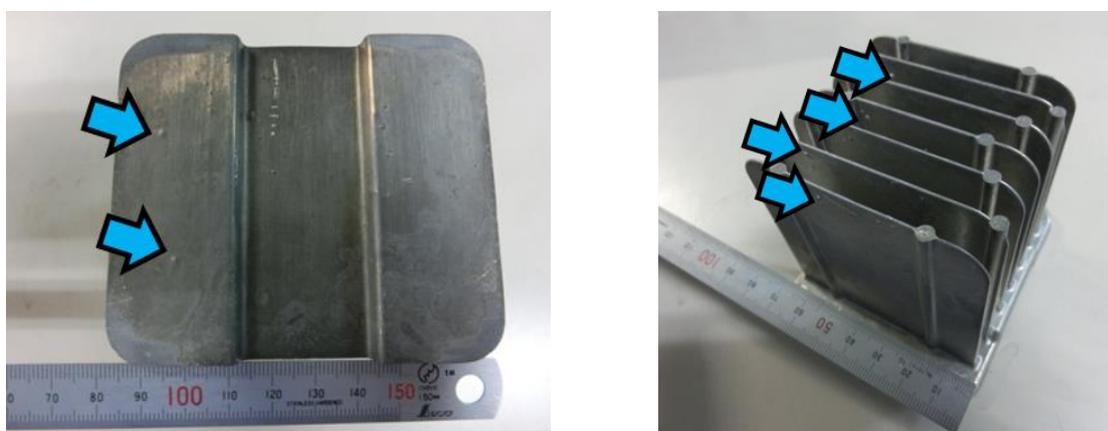


図19 ブリスタ試験後のダイカスト品の外観

図20にX線CTによる撮像結果を示す。ポロシティは確認されるが、ボイド率を算出するとおよそ1%以下であった。これらより、ガスの巻き込みが極めて少なく、また良好な湯まわり性を確認できた。

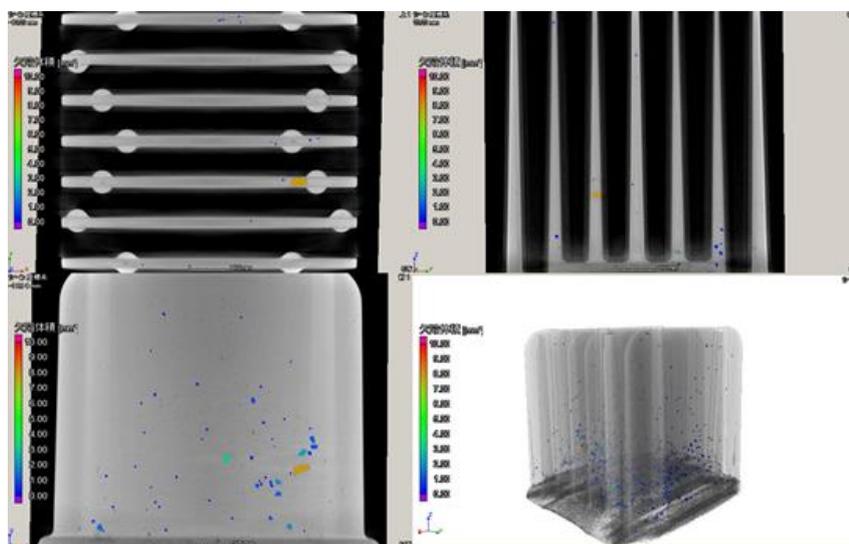


図20 X線CTによる内部欠陥測定結果

金型表面温度測定実験（図3）の結果より、特にリブ形成部において金型温度が高くなった。ダイカスト実験において離型直後の金型表面温度を測定した結果、最も高い温度で388℃であった。ダイカストにおいて高い金型温度は、焼き付きやかじり等のトラブルの要因となる。そこで、金型の冷却方式を再検討するとともに、ダイカスト時のリブ部をより冷却できるように離型剤による冷却方法を再検討した。後者については、リブの内部にまで離型剤を塗布できるような専用の工具を用意することによって対応した。その結果、改良後は繰り返しダイカストを実施しても300℃を下回った。図21に改良後の離型直後の金型表面温度の測定結果を示す。

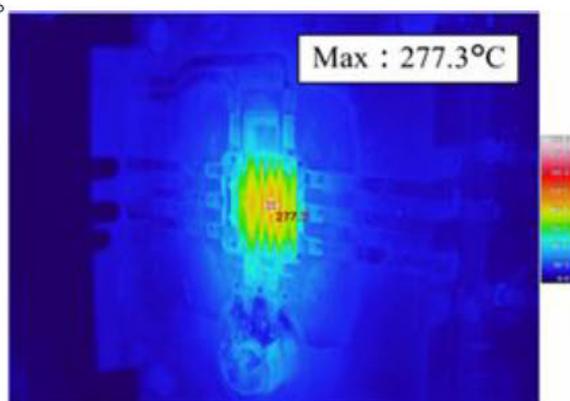


図21 改良後の金型表面温度測定結果

金型の実製造および実鋳造中の金型の補修作業を考えたとき、肉盛りによる金型の熱変形および熱軟化は大きな問題となる。そこで、金型材にヒートチェック等のダイカストに伴う金型損傷を模擬した傷を意図的に複数付与し、レーザ溶接とアルゴンガス溶接によりその傷を肉盛りしたときの形状誤差と硬さを比較した。その結果、レーザ溶接による肉盛り箇所の溶接前後の形状誤差は、平均で4.5μmと小さく、また硬さは、肉盛り前が51.5（HRC）に対して51.1（HRC）と軟化の程度も小さかった。図22に補修前後の外観を示す。

また、アルゴン溶接とレーザ溶接（図23）の比較において、ヒケ具合を測定したが、アルゴン溶接は10μmから15μmに対し、レーザ溶接は5μmであったことから、レーザ溶接の方が良好であった。



図22 肉盛り補修前後の試料外観写真



図23 レーザ溶接（左）とアルゴン溶接（右）のヒケ比較写真

2-3-2 ダイカスト製品評価について（研究開発項目③-2）

（佐藤精密株式会社、国立大学法人岐阜大学、岐阜県工業技術研究所）

ヒートシンクを構成するフィン特性を把握するため、ダイカスト製品の厚肉部と薄肉部から試料を切り出し、それぞれの熱的特性（熱伝導率、比熱）を計測した。図23にその結果を示す。同じ鋳造材であっても、取り出した部位により熱伝導率に差異があることが判明した。

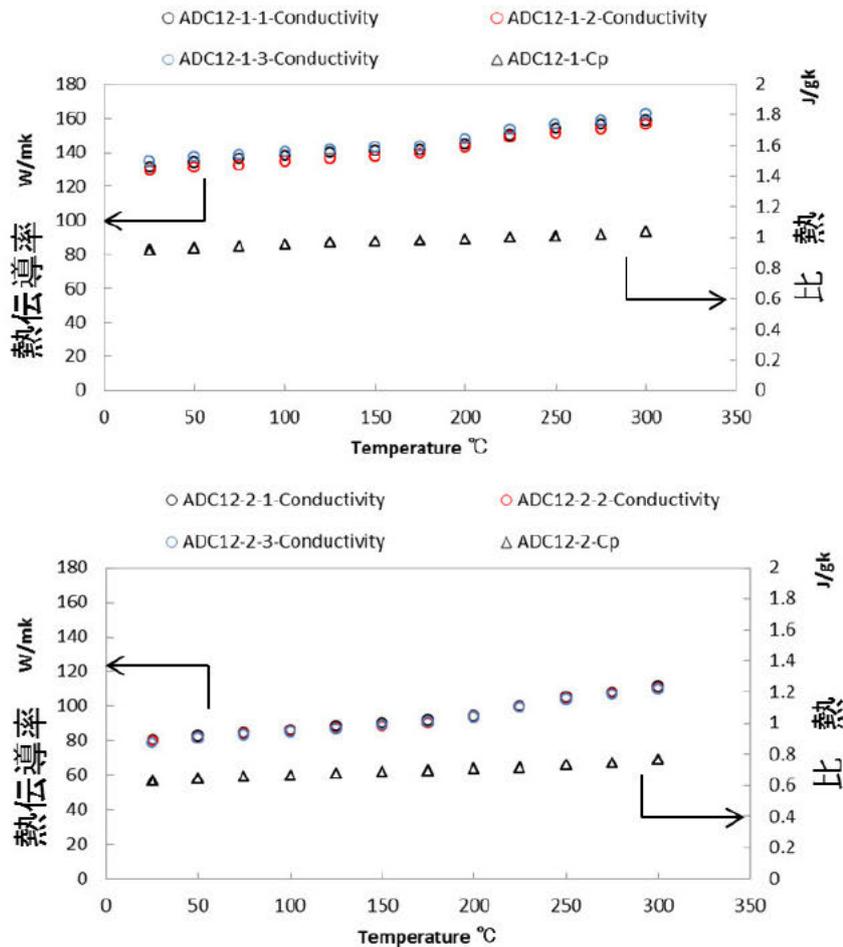


図24 ダイカスト品の熱伝導率と比熱の測定結果（上；厚肉部、下；薄肉部）

ヒートシンクの強度を評価するため、振動試験機および加速度センサにより振動特性を計測した。さらにその結果を用いてヒートシンクの強度解析を実施した。図25に実験の様子を示す。鋳造材から今回のヒートシンクを模擬した形状を削り出して試料とした。試験により得られた振幅と周波数の関係を図26に示す。その結果、共振周波数および共振振幅が測定できた。フィン高さが大きくなるほど固有振動数が小さくなり、先端の変位が大きくなった。

図27に、ダイカスト製品が実装されたときを想定した強度解析を実施した。市販FEMコードを利用し、振動試験の結果から得られた振幅(0.146mm)に相当する変位をヒートシンクのフィン先端部に与え、疲労限度を 10^7 回とし、修正 Goodman 線図により疲労破壊判定をした。その結果、破壊判定はされなかった。

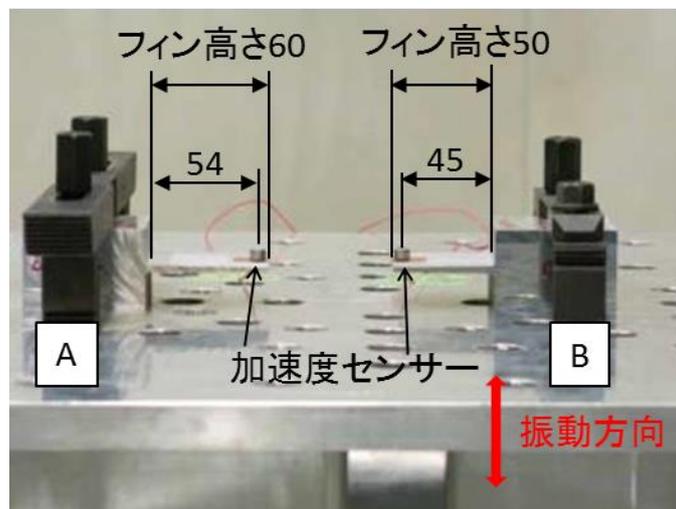


図25 振動試験機による振動特性の評価試験の様子

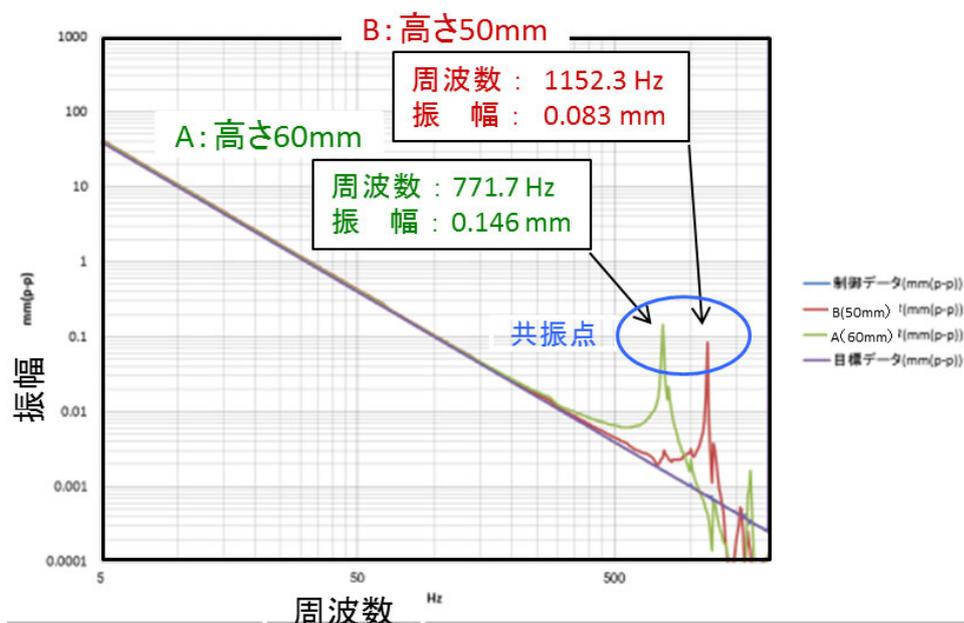


図26 振動試験の結果

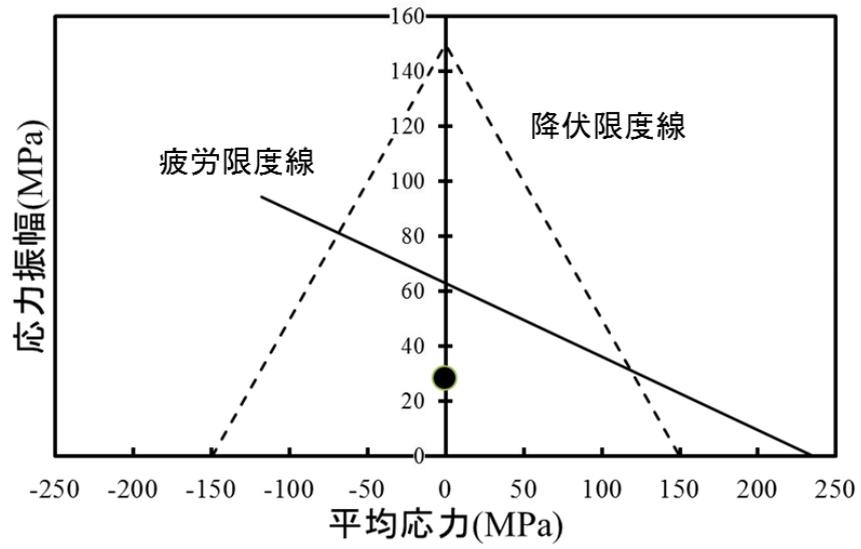


図27 修正 Goodman 線図によるヒートシンクの疲労破壊判定結果

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果のまとめ

3年間の研究開発成果として、表1の結果を得ることができた。また、本研究開発により得られた解析手法、評価手法については佐藤精密株式会社の基盤技術として蓄積することができた。

表1 研究開発成果のまとめ

技術課題	実施内容	成果
金型形状	① 鋳造方案	・高トング率ヒートシンクのダイカスト金型の方案検討に必要なシミュレーション手法および金型温度を高精度に推定するシミュレーション手法を確立した。
	② 伝熱、構造解析	・FEMを活用したヒートシンクの伝熱特性を推定する手法を確立した。 ・ダイカスト実験により離型力、金型温度情報を取得し、これら現象をシミュレーションにより評価できることを明らかとした。
金型加工技術	① 工具形状	・従来工具と比べて長軸でありながら破損しにくい工具形状を考案できた。
	② 切削加工技術	・小径長軸工具による加工面の粗さおよび工具転写性が良好な加工条件を見出すことができた。
	③ 放電加工技術	・加工速度、電極消耗率、面粗度の3要素を満足する加工方法、加工プログラムを確立した。
金型等の評価	① 金型評価	・ガスの巻き込みが少ない金型を製作できた。 ・冷却方式を再検討することによって、金型温度を下げる事ができた。 ・レーザー溶接による金型肉盛り技術を蓄積できた。
	② ダイカスト品評価	・ダイカスト品を実装したときの疲労破壊推定手法を確立した。

3-2 今後の進め方

本研究課題において、高トング率ヒートシンクの金型技術および製造技術について前節のような成果を得たが、この知見をもとにしてより最適なヒートシンク形状およびその金型製造技術を検討する。具体的には、ヒートシンクとしての良好な伝熱特性と長期間の実装に耐える強度を有する製品形状を考案するとともに、シミュレーションを活用した金型設計・加工の補正回数の削減を実現する金型製造技術の確立を目指す。また、ユーザーの製品機能

への要求に迅速に対応するだけでなく、金型メーカー側から製品形状を積極的に提案をすることが今後の重要な課題である。

3-3 事業化の方向性

現在は高級車中心に使用されているLEDランプであるが、今後は低コスト車用にも使用される傾向にあり、本事業で確立するヒートシンク用金型の需要もこれに合わせて拡大することが想定される。

また、薄くて深溝の金型技術を活用して、EV/HV向けインバータ用ヒートシンク等への展開も実施の予定であるが、本研究の成果を知った川下企業から開発等に係る打診が既に来ている状況である。

さらに、確立したグラフィット微細加工技術や放電加工技術を活用して、電気自動車やハイブリッド自動車に使用されるインバータ用ヒートシンク金型及び重電機用ヒートシンク金型、大電力用ヒートシンク金型等にも活用の予定であり、今後あらゆる産業分野への展開が期待できる。また近年、完成車メーカーは、自動運転技術に力を入れており、いくつかの技術を制御する上で多くの基盤が搭載される予定である。基盤は熱を帯びため、放熱が必須であり、カバーの背中にヒートシンク形状が用いられ、そこに需要が見込まれる。

なお、次世代自動車用ヒートシンク市場は、2010年の世界市場は前年比 20.7%増の70億円で、その理由は、放熱部品を多用するHVの増加が要因である。

ヒートシンクはHVのPCU（パワーコントロールユニット）に標準装備されており、駆動用モータ、LEDヘッドライト、バッテリーでも用いられる。また、メタル基板はLED照明やECU内の配線基板に、放熱シートは高熱を発生する部品や高集積化された電装機器に利用されている。

今後、EV/HVの性能向上とともに発熱量は増加の一途をたどっていることから、放熱部品に対する要求が厳しさを増すが、2020年予測は、367億円（10年比16倍）と想定されている状況である。（出所：㈱富士キメラ総研）