

平成 27 年度
革新的ものづくり産業創出連携促進事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「高効率なウェルドレス成形を実現するための
誘導加熱式ヒート&クールプロセスの開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成 28 年 3 月

委託者 中部経済産業局

委託先 公益財団法人三重県産業支援センター

目 次

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	・・・	3
1-2	研究体制	・・・	5
1-3	成果概要	・・・	8
1-4	当該研究開発の連絡窓口	・・・	9

第2章 本論

2-1	従来技術を凌ぐ高効率な急速誘導加熱システムの確立	・・・	10
2-1-1	誘導加熱用インバータ装置の導入と最適化	・・・	10
2-1-2	高耐熱性樹脂の成形に対応可能な加熱用コイルの開発	・・・	10
2-1-3	フレキシブル形状に対応可能なコイル設計技術の開発	・・・	11
2-1-4	高耐熱性樹脂の成形に対応可能なコイル保持体の開発	・・・	12
2-1-5	部分加熱制御に対応可能なコイル設計技術の開発	・・・	13
2-2	高効率な急速加熱・急速冷却実現のための金型設計	・・・	14
2-2-1	加熱冷却向上のための被加熱金属の最適化	・・・	14
2-2-2	冷却効率向上のための冷却回路設計の最適化	・・・	17
2-2-3	金型ライフ長期化のための金型耐久設計	・・・	18
2-3	システム設計及び金型設計加速のためのCAE技術の確立	・・・	18
2-3-1	CAE解析を活用した設計支援	・・・	18
2-4	誘導加熱式ヒート&クールプロセスの検証と高機能化の検証	・・・	20
2-4-1	プラスチック成形品の機能化技術の開発	・・・	20
2-4-2	部分加熱制御を利用した反り低減技術の開発	・・・	23

最終章	全体総括	・・・	26
-----	------	-----	----

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

プラスチック製品の外観不良に対し、塗装でカバーする方法は環境負荷が高く、歩留まりも良くないため、コストアップに繋がる懸念がある。これを抑えるためにはウェルドレス成形により塗装レスでも外観不良が少ない製品を製造する必要がある。そこで、図1に示すようなヒート&クールプロセスによるウェルドレス成形技術が開発されている。現在の主流方式である蒸気加熱方式では、ボイラーが必要であり、ボイラーを所有しない工場は別途購入し、制御装置と合わせると非常にコストが高くなる。また、蒸気を製造するランニングコストも影響し、生産性とのバランスに欠けやすく、製品の生産コスト高という大きな課題がある。

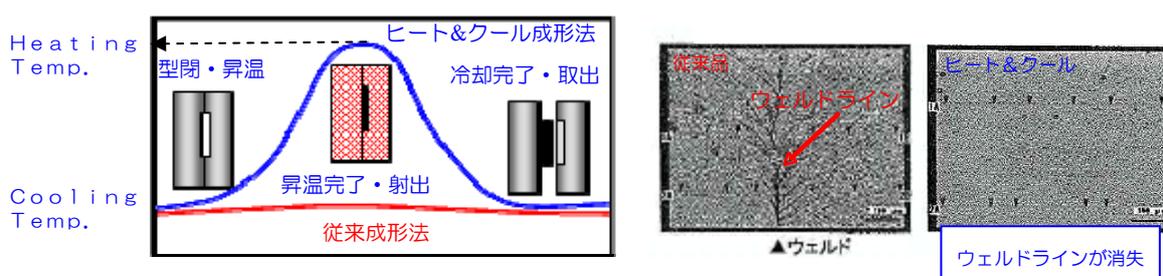


図1. 一般的なヒート&クールプロセスイメージ及びウェルドライン消失効果

2) 川下製造業者等の課題及びニーズ

従来の蒸気加熱方式によるヒート&クールプロセスは、制御装置コストやランニングコストが課題であった。設備投資を抑え、生産性向上が可能なヒート&クールプロセスが求められている。また、金型キャビティ全体を加熱する方法では熱容量が大きくなり、エネルギーロスも増えるため、ウェルドライン等の外観不良が発生する部分のみを効率的に加熱できる省エネルギーに優れた成形技術が求められている。加えて、家庭用電化製品や自動車内外装パネル等の部品で発生するウェルドラインなどの外観不良を塗装レスで解消し、VOC削減等の環境に配慮した技術が求められている。

3) 研究の目的

素材の良さを活かして人体や環境に優しい高機能プラスチック製品を高効率生産するため、初期導入に係る設備の低コスト化と、必要最小部を加熱冷却することによる省工

エネルギー性の向上及び製造に係る加工コストの削減を実現すると共に、プラスチック成形品への要求の高度化に伴うウェルドレス等の機能を付与することで付加価値を高めることができる誘導加熱式ヒート&クールプロセスを確立する。

4) 研究の目標及び実績

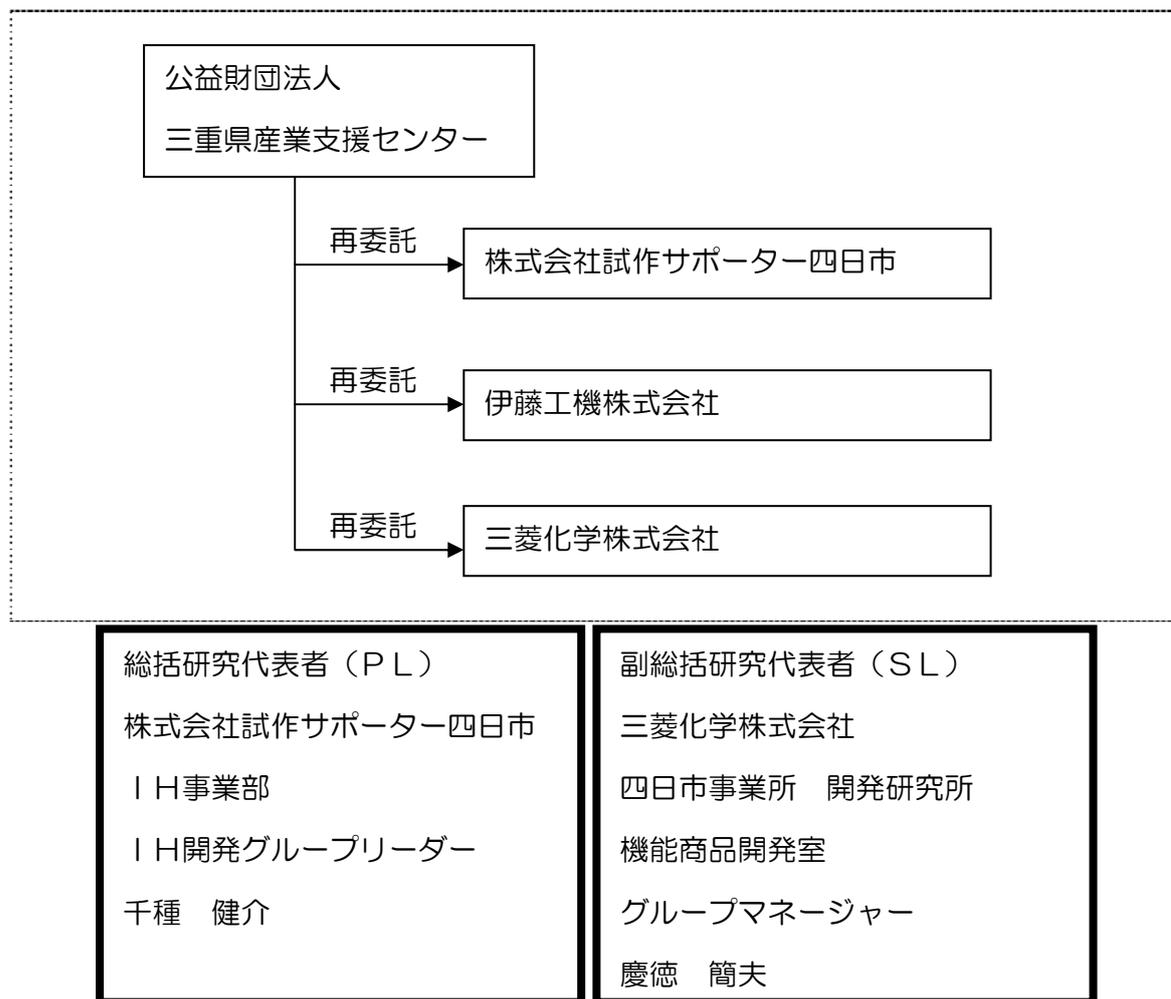
本研究では、安全かつ低コストである誘導加熱方式をプラスチックのヒート&クールプロセスに応用し、従来技術である蒸気加熱方式に比べて、設備導入コスト、ランニングコストで競争力があり、且つ温度制御範囲の拡張及びハイサイクル化を実現した金型を含むプラスチック成形加工システムを開発し、高機能、高付加価値プラスチック製品の低コスト製造技術に貢献する。表1に本研究における技術的目標及びそれに対する成果を示す。成果の詳細は、第2章で述べる。

表1. 本研究における技術目標に対する成果

テーマ/サブテーマ	技術目標(値)	成果	達成度(%)
従来技術を凌ぐ高効率な急速誘導加熱システムの確立			
誘導加熱用インバータ装置の導入と最適化 コイル設計技術の確立	設備コスト1/2	特に汎用のインバータを使用することで概ね達成。	100
	200°Cまでの加熱時間25秒以内	80°C~200°Cを加熱すると想定電力15kWのインバータにて、120°Cの範囲を25秒で加熱可能。	100
	耐熱300°Cのコイル設計	銅管+水冷の構成により達成。	100
高効率な急速加熱・急速冷却実現のための金型設計技術の確立			
加熱効率向上のための被加熱金属の最適化	サイクルタイム 60秒以内	冷却の最適化は必要だが、概ね達成。	90
冷却効率向上のための冷却回路設計の最適化	加工コスト1/7以下	蒸気方式との正確な比較ができず。	50
耐久長期化のための金型設計	耐用10万ショット (1万ショット×10年)	金型の耐久性の評価までは至らず。実成形は問題なくできた。	20
システム設計及び金型設計加速のためのCAE技術の確立			
CAE解析を活用した設計支援	シミュレーションと実測との誤差10%以内の実証	一部実測との乖離が見られたが、概ね達成。	90
誘導加熱式ヒート&クールプロセスの検証と高機能化の検証			
プラスチック成形品の機能化技術の開発	プロセスの有用性の実証とウェルドレス等の高機能化試作	プロセスの実証及びウェルドライン等への改良効果を確認。一部実施できず。	70
部分加熱制御を利用した反り低減技術の開発	高機能化のための部分加熱方式の開発と応用試作	部分加熱方式によるウェルドレスは確認。反り低減までは検証できず。	70

1-2 研究体制

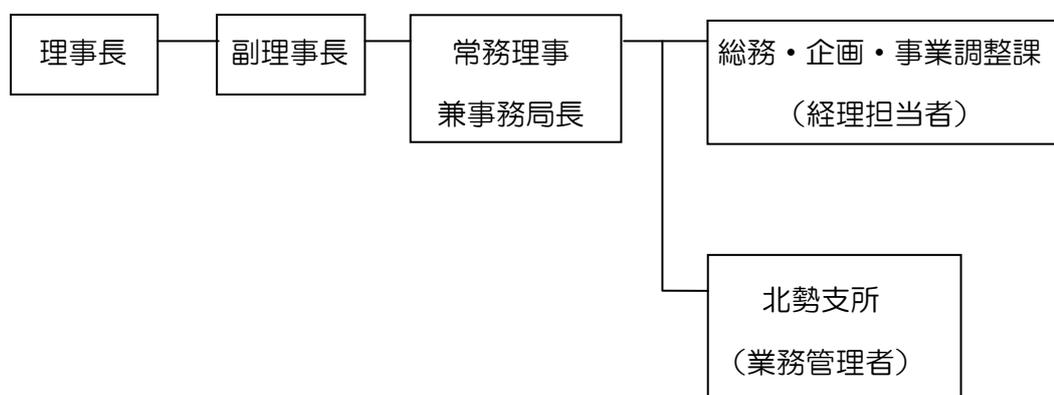
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

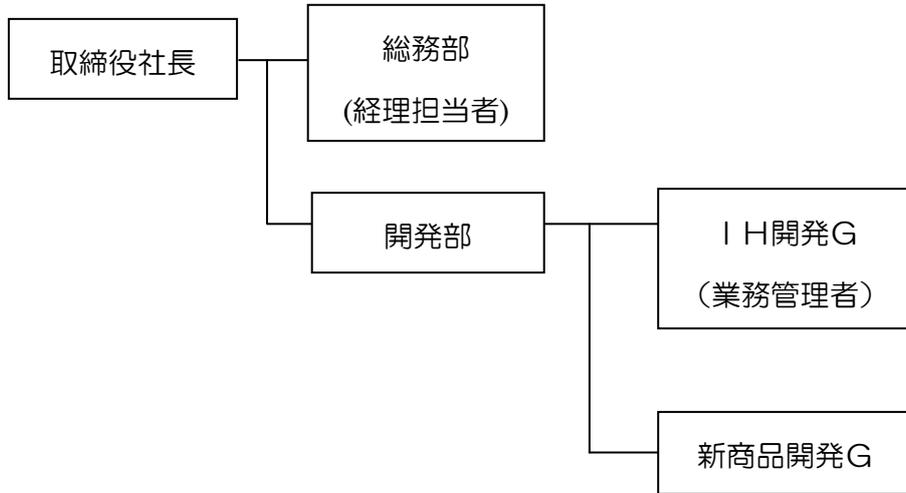
(1) 事業管理機関

公益財団法人三重県産業支援センター

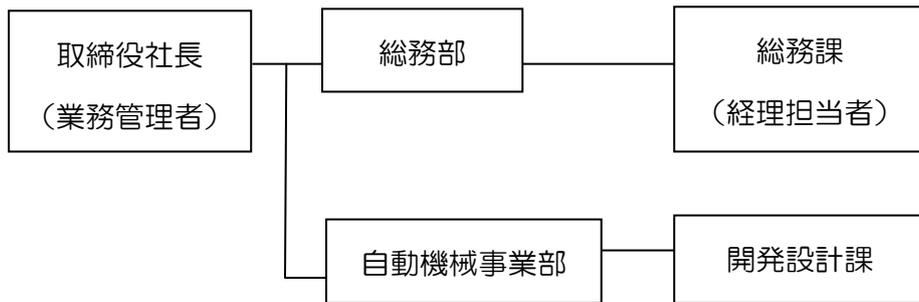


(2) 再委託先

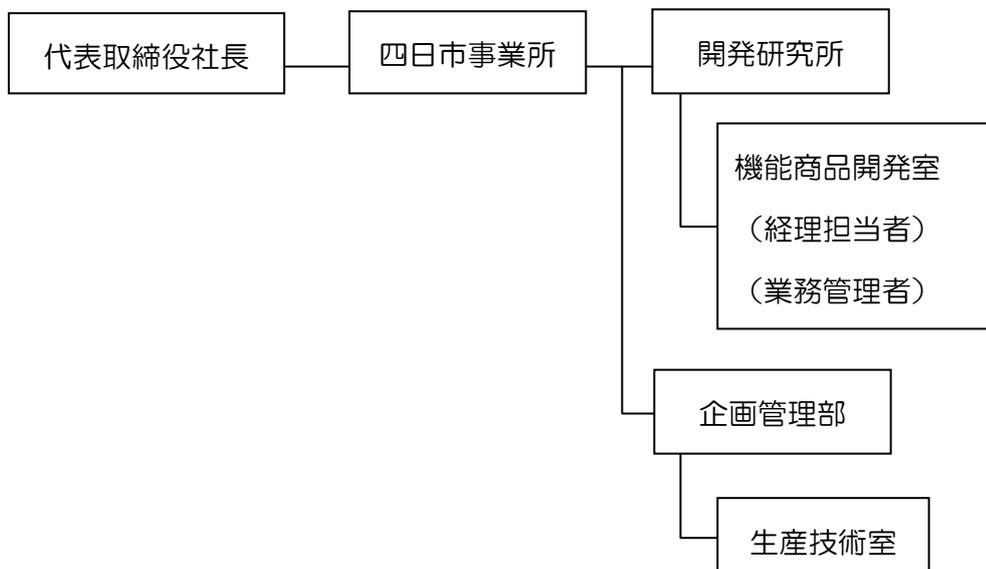
株式会社試作サポーター四日市



伊藤工機株式会社



三菱化学株式会社



3) 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人三重県産業支援センター

管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
田中 幹也 岩崎 美奈子 菊田 繁樹 渡部 吉之	北勢支所 センター事務局長 総務・企画・事業調整課 総務財務班 主事 北勢支所 主任技師 北勢支所 技術支援コーディネーター	2-5 (全員同じ)

【再委託先】

研究員

株式会社試作サポーター四日市

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
仲井 聖憲 千種 健介 加藤 剛 山本 佳孝	代表取締役社長 IH開発グループリーダー IH開発グループ, ものづくり部長 総務部長	2-2 2-4 (全員同じ)

伊藤工機株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
伊藤 台蔵 寺村 輝行 江崎 諭	代表取締役社長 自動機械事業部 事業部長 自動機械事業部 開発設計課 主任	2-2 2-4 (全員同じ)

三菱化学株式会社

氏名	所属・役職	実施内容 (番号)
慶徳 簡夫	四日市事業所 開発研究所 機能商品開発室 グループマネージャー	2-4
高橋 裕	四日市事業所 開発研究所 機能商品開発室 研究員	2-3 2-4
速水 弘樹	四日市事業所 企画管理部 生産技術室 研究員	2-3

4) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

公益財団法人三重県産業支援センター

(経理担当者) 総務・企画・事業調整課 総務財務班 主事
岩崎 美奈子

(業務管理者) 北勢支所 センター事務局長 田中 幹也

(再委託先)

株式会社試作サポーター四日市

(経理担当者) 総務部長 山本 佳孝

(業務管理者) I H開発グループリーダー 千種 健介

伊藤工機株式会社

(経理担当者) 総務部 平原 易代

(業務管理者) 代表取締役社長 伊藤 台藏

三菱化学株式会社

(経理担当者) 機能商品開発室 グループマネジャー 慶徳 簡夫

(業務管理者) 機能商品開発室 高橋 裕

1-3 成果概要 (【】は第2章該当部分)

【2-1-1】誘導加熱用インバータ装置の導入と最適化

部分加熱制御において電源の仕様である15kWを入力できる電源構成を見出した。

【2-1-2】高耐熱性樹脂の成形に対応可能な加熱用コイルの開発

コイルを銅管製で水冷できるタイプとすることで耐熱性に問題なきことを確認した。

【2-1-3】フレキシブル形状に対応可能なコイル設計技術の開発

複数個のコイルを並べ加熱したときに相互干渉なく加熱できることを確認した。

【2-1-4】高耐熱性樹脂の成形に対応可能なコイル保持体の開発

保持体として有用な素材を調査・利用し、誘導加熱時におけるその温度上昇が100℃以下であることを確認した。

【2-1-5】部分加熱制御に対応可能なコイル設計技術の開発

ウェルドラインが発生すると予想される範囲に合わせ、銅管製の小型コイルを設計し、フェライトコアを活用することで非常に優れた加熱効率が示されることを確認した。

【2-2-1】加熱冷却効率向上のための被加熱金属の最適化

鋼材を調査し、汎用性、熱伝導性等から最適な金型鋼材を選定した。

【2-2-2】冷却効率向上のための冷却回路設計

詳細設計はできなかったが、CAE解析により、冷却水温を下げるよりも流速を上げ、熱伝達係数を上げることが効果的であることが分かった。

【2-2-3】金型ライフ長期化のための金型耐久設計

長期的な耐久性評価までに至らなかったが、実際の成形は問題なきことを確認した。

【2-3-1】CAE解析を活用した設計支援

各種解析（誘導加熱解析等）による技術支援を行なった。

【2-4-1】プラスチック成形品の機能化技術の開発

部分加熱制御でウェルドレス成形が可能であることを実証した。また、一般的なヒート&クール成形において制御される温度範囲でサイクル60秒を概ね達成した。

【2-4-2】部分加熱制御を利用した反り低減技術の開発

繊維充填材を含むプラスチックの成形試作を行い、表面外観改良の効果を確認した。反り低減のための検討も一部執り進めたが、その実証にまでは至らなかった。

【2-5】プロジェクトの管理・運営

本実施計画書に沿って円滑に推進するため研究開発委員会開催等により、研究実施者間で進捗状況の共有を図ると共に成果報告書の作成等研究開発の管理運営を行った。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社試作サポーター四日市 IH事業部 IH開発グループリーダー 千種健介

電話：059-335-3553 FAX：059-351-9099

E-Mail：info@shisaku-y.jp

第2章 本論（【2-5】は省略）

2-1 従来技術を凌ぐ高効率な急速誘導加熱システムの確立

2-1-1 誘導加熱用インバータ装置の導入と最適化

本研究では、初めに誘導加熱用インバータ装置（以下、電源装置）の市場調査を行った。しかしながら、出力等可変タイプの電源装置は非常に高価であり、目標である設備コスト1/2の達成はとても難しいと考えた。そこで、15 kW仕様の汎用電源装置等を上手く使いこなし、部分加熱制御のためにコイルを小さくした場合においても、仕様が最大限発揮される電源構成を探索した。図2に示す構成B～Eのように、トランス及びコンデンサーによる整合部を電源構成に組み込み適正化することで、コントロールが難しかった被加熱物（金型）及びコイルとの整合（以下、マッチング）をとれるようになり、概ね15 kWの入力が得られるまでに至った。

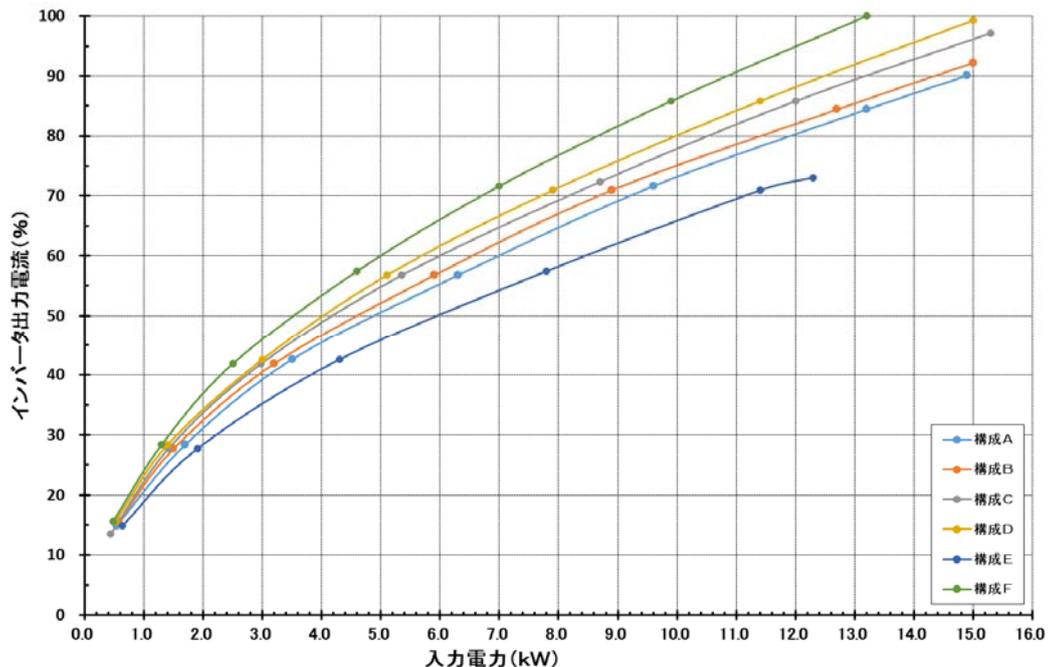


図2. 被加熱物（金型）及びコイルとのマッチング検証結果

2-1-2 高耐熱性樹脂の成形に対応可能な加熱用コイルの開発

誘導加熱を利用する大きな利点の一つとして、制御温度範囲の拡大が挙げられる。制御温度範囲が拡大することで、樹脂の適用幅も広がり、様々な樹脂の成形に対応できるようになる。しかし、成形する樹脂の成形温度が高くなるにつれて、金型も高温にする必要があり、それに耐えうる仕様のコイルが求められる。本研究では、コイルの種類を銅管とし、その内側に通水する方法を取り入れ、その効果について検討した。図3に示

すように、コイルの内側に水（温度20℃程度）を通すことでコイル温度の上昇は水温程度にまで抑制されることが分かった。つまり、通水方式を用いれば、温度上昇は緩和され、高耐熱性樹脂の成形にも対応できると考えられる。

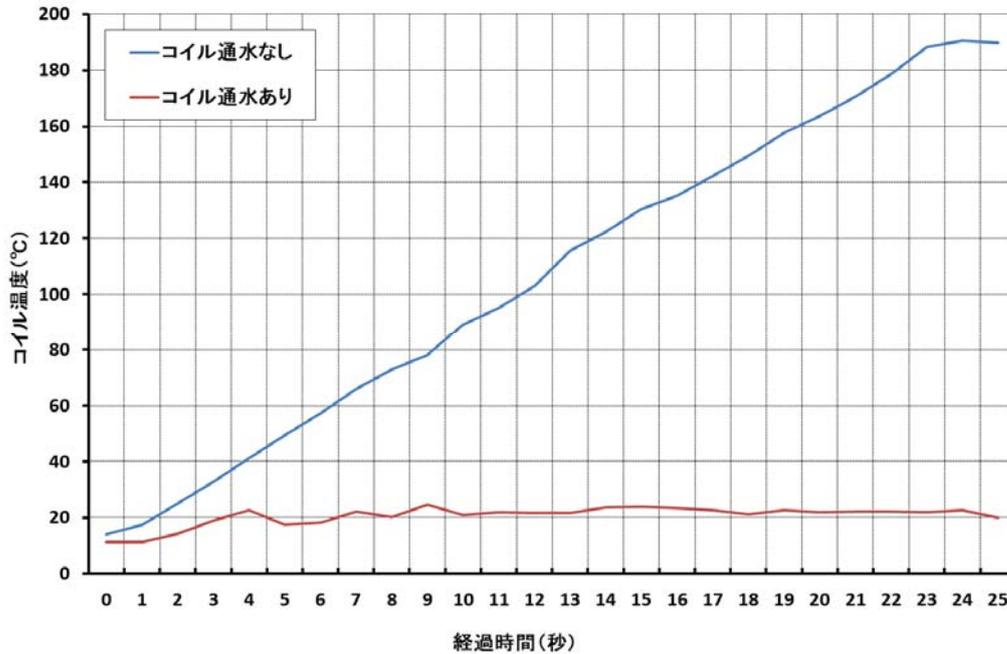


図3. 水冷タイプコイルの誘導加熱時の温度変化

2-1-3 フレキシブル形状に対応可能なコイル設計技術の開発

曲面のような三次元の製品形状を有する金型に対応するためには、コイルをその形状に合わせて曲げ加工及び固定化する必要がある。この方法は技術的に難しく、加工時間を非常に要する。コイルを分割して配置しコイル同士が相互干渉なく加熱できれば、三次元形状にも容易に対応できるのではないかと考えられる。そこで、複数個のコイルを並べて加熱するモデル実験を行い、電流の向きやコイル間距離の変化による加熱特性及び相互干渉への影響について検証した。コイルは、リッツワイヤータイプの外径150mmのコイルを用いた。図4にモデル実験の様子を示す。電源装置は、5kWのものを2台用いた。表2に検証結果を示す。いずれのケースにおいても相互干渉による加熱障害は観察されず、問題なく加熱することができた。しかしながら、電源装置同士の出力周波数のずれによる音が鳴る現象が発生した。この現象は、1台の電源装置で行なえば解消される。また、今回のようなコイル形状や配置であれば、銅管製のコイルを用いた場合においても相互干渉は概ね発生しないと推察した。

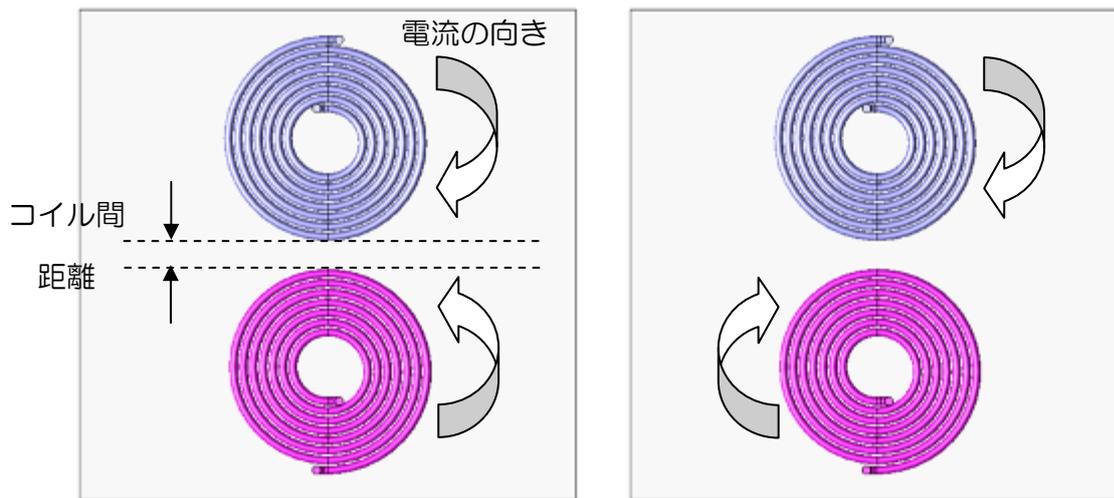


図4. コイル同士の相互干渉及び加熱特性確認のためのモデル実験図

表2. コイル同士の相互干渉及び加熱特性の検証結果

実験No.	コイル間距離 (mm)	電流の向き	上限加熱温度	相互干渉
1	0	同方向	200	無し
2	0	逆方向	200	無し
3	50	逆方向	200	無し

2-1-4 高耐熱性樹脂の成形に対応可能なコイル保持体の開発

高耐熱性の樹脂を成形する場合は金型温度を更に高温にする可能性があり、保持体の耐熱性が懸念される。表3に示す素材が候補として挙げられた。本研究では、特性や実績等よりガラス繊維／ケイ酸系バインダのものをを用いて、誘導加熱時における保持体の温度計測を実施した。保持体の温度は、15kWの電源装置、整合トランス及びコンデンサーを接続して運転しながら保持体にK熱電対を当て、60秒経過まで計測した。図5に示すように、温度は100℃以下であり、ガラス繊維／ケイ酸系バインダのものをを用いれば耐熱性は概ね問題ないと判断した。

表3. コイル保持体への適用候補材の特性

保持体候補	電気特性	連続使用温度 (°C)
布入りベークライト	絶縁	~50~+100
エポキシガラス	絶縁	常温~+155
フッ素樹脂	絶縁	-40~+250
ガラス繊維／ケイ酸系バインダ	絶縁	常温~+400
PEEK	絶縁	-50~+250

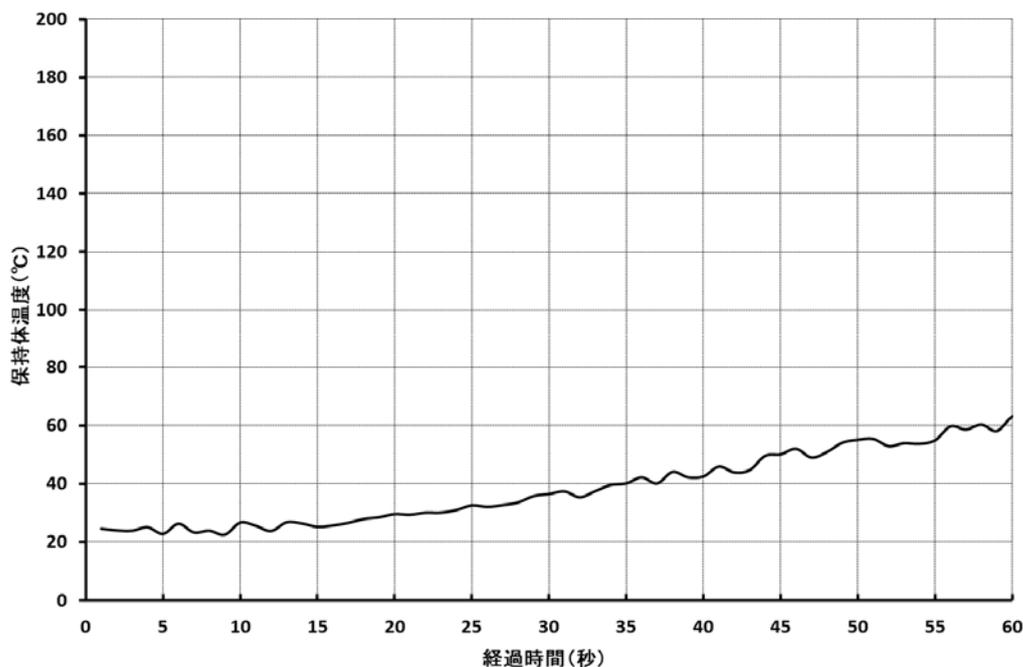


図5. コイル保持体の温度計測結果

2-1-5 部分加熱制御に対応可能なコイル設計技術の開発

これまで、ウェルドラインのような製品不良は、金型キャビティ全体を加熱することで解消されてきたが、本質的には不良部分のみ改良することができれば最もエネルギー効率が良いと考えられる。

外径50mm程度のコイルを複数個製作し、それを図6に示す模式図のように縦方向に並べて加熱試験を行った。試験は、15kWの電源装置、整合トランス及びコンデンサーに加え、フェライトコアを用いて行った。金型は、入力電力14.8kW、出力周波数25.8kHzの条件で加熱された。図7に示すように、ウェルドラインが発生すると思われる部分の温度ムラは小さく、20°Cから180°Cまでの温度範囲を約33秒で加熱することができ、その加熱速度は4.8°C/秒であった。

一般的に、ヒート&クールプロセスに用いられる耐熱性プラスチックとして、ポリカーボネート樹脂等が挙げられる。ポリカーボネート樹脂を例に挙げれば、通常成形での金型温度は一般的に70~100°Cの範囲であり、概ね80°C~90°Cの間で成形される。また、ヒート&クールプロセスを適用する場合、ガラス転移温度である145°C以上まで金型温度を高めればよい。

本研究では、200°Cまでの加熱時間25秒以内を技術的目標として掲げている。仮にポリカーボネート樹脂のような耐熱性樹脂を成形する時に金型を80°Cから200°C

まで25秒で加熱しなければならないと仮定した時、 $4.8^{\circ}\text{C}/\text{秒}$ の加熱速度が求められる。前述の温度範囲は少しレギュラーだが、本研究のシステムを用いれば可能となる。つまり、耐熱性の高い樹脂を成形するために必要となる温度制御範囲において、本技術の目標は概ね達成されることが示唆された。

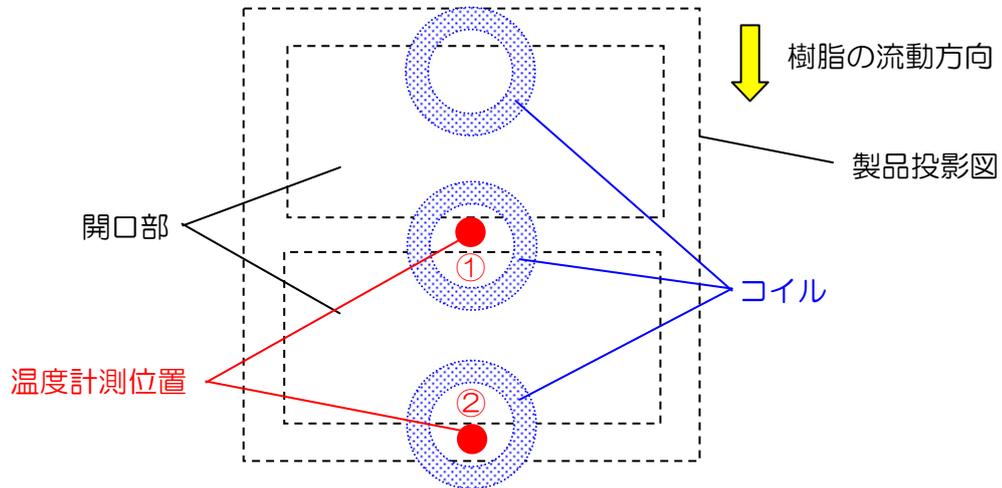


図6. 部分加熱方式検証実験の模式図

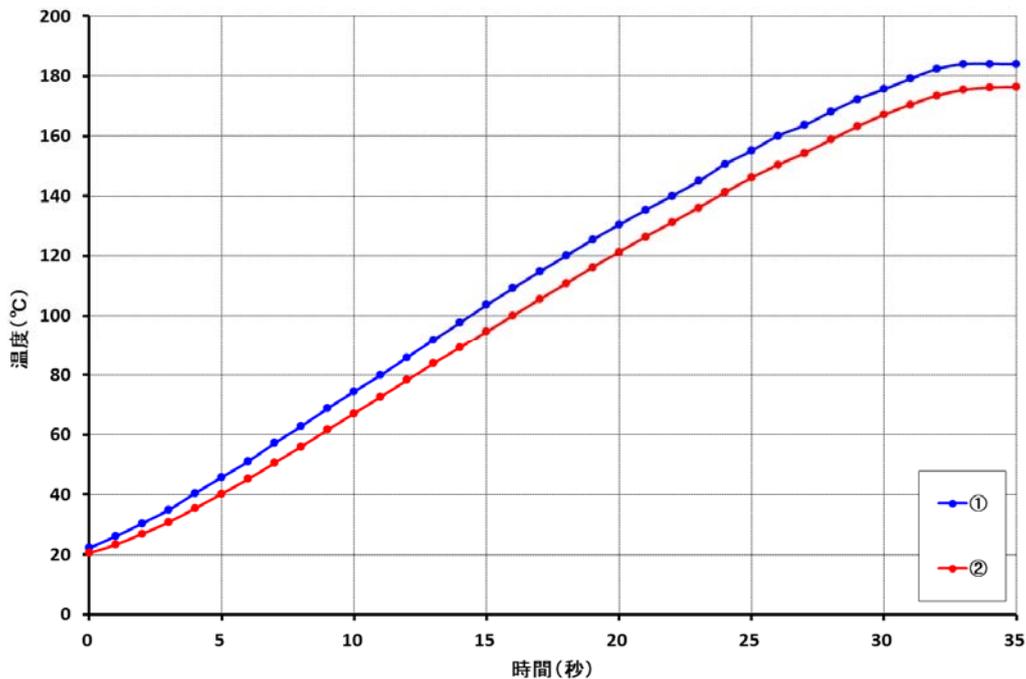


図7. ウェルドライン発生部位周辺の部分加熱による温度プロファイル

2-2 高効率な急速加熱・急速冷却実現のための金型設計

2-2-1 加熱冷却向上のための被加熱金属の最適化

様々な金型鋼材を調査し、鋼材の透磁率や熱伝導率が加熱効率に及ぼす影響を明らかにすることは高効率な加熱冷却を実現するための金型の設計に重要である。

検討する鋼材としては、表4に示す実績の多いプリハードン鋼材及びマルテンサイト系ステンレスを選択した。コイルは図8に示すように配置し、電源装置は5kWのものを1台用いた。温度計測は赤外カメラにより行った。表5に示すように、コイルA及びBのいずれの条件下においてもプリハードン鋼材の方が高い温度を示していた。

表4. 各金型鋼材の物性値

鋼材	熱伝導率	電気伝導率	比透磁率
	50℃	20℃	
	W/(m・℃)	×10 ⁵ S/m	
プリハードン鋼材	38.9	50 ^{*1}	380
マルテンサイト系ステンレス	16	50 ^{*1}	>800 ^{*2}

※1：13Cr鋼材の電気伝導率

※2：組成に近いSUS420J2の透磁率

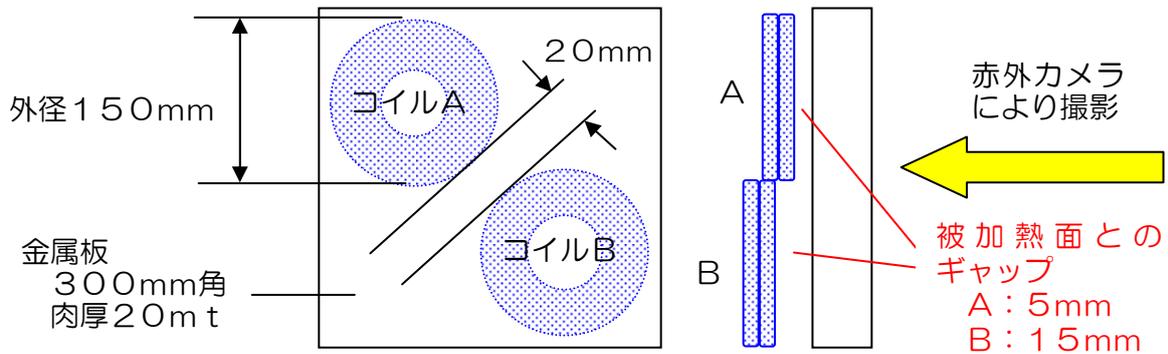


図8. 鋼材別による加熱効率検証実験の模式図

表5. プリハードン鋼材及びマルテンサイト系ステンレスの加熱効率比較結果

被加熱物	コイルA ギャップ (mm)	コイルA側 最高温度 (℃)	コイルB ギャップ (mm)	コイルB側 最高温度 (℃)	赤外カメラ画像
プリハードン 鋼材	5	127	15	122	
マルテンサイ ト系ステン レス	5	101	15	94	

この加熱効率の差異を考察するため、各鋼材の比透磁率（ μ_s ）及び電気伝導率を利用し、式（1）および（2）より電流浸透深さと表皮抵抗を算出した。比透磁率とは、真空の透磁率（ μ_0 ）との比で表される。電流浸透深さとは、被加熱物表面に渦電流が流れて発熱し、被加熱面から内部に向かい指数関数的に電流が減少して0.367倍まで減ずる距離であり、この距離が小さいほどエネルギーが集中して高温になりやすい。つまり、誘導加熱は金属自体の有する抵抗による発熱であるため、電流浸透深さが小さく表皮抵抗が高いほど加熱効率に優れる。図9に示すように、両鋼材共に電流浸透深さはほぼ同等であるが、マルテンサイト系ステンレスの方が表皮抵抗は高くなり、加熱効率に優れるはずである。しかしながら、温度計測の結果ではプリハードン鋼材の方が加熱効率に優れる結果であった。つまり、被加熱面側では高い透磁率を有するマルテンサイト系ステンレスの方が発熱しており、温度計側面側ではプリハードン鋼材の熱伝導率が支配的となり高い温度を示したと推察される。実際の成形では、金型キャビティの温度を速く加熱できる方が好ましいため、本システムによるヒート&クールプロセスに好適な金型鋼材としては、熱伝導率に優れる鋼材が好ましいと推察した。

$$\text{電流浸透深さ } p = 503 (\rho / \mu_s \cdot f)^{1/2} \times 10^3 \text{ (mm)} \quad \dots \text{式 (1)}$$

$$\text{表皮抵抗 } R_s = \rho / p \text{ (\Omega)} \quad \dots \text{式 (2)}$$

ρ : 電気抵抗 ($\Omega \cdot m$) μ_s : 比透磁率 f : 周波数 (Hz)

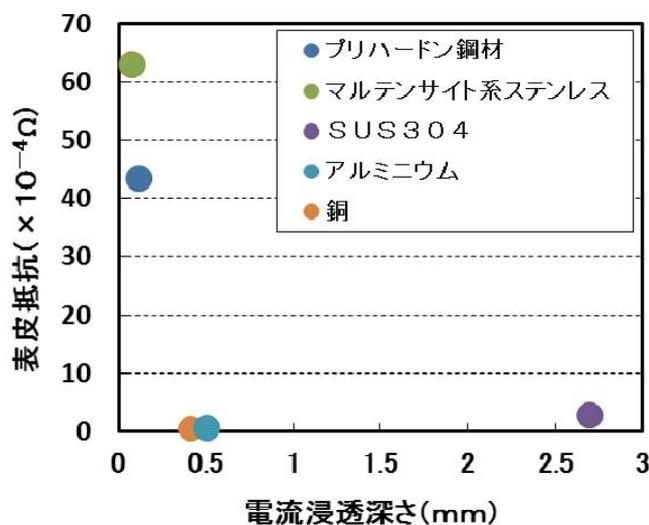


図9. 各金属材料の電流浸透深さと表皮抵抗の関係

2-2-2 冷却効率向上のための冷却回路設計の最適化

樹脂の成形において、冷却の仕様は非常に重要な要素であり、製品の物性や成形サイクルに大きく関わる部分である。CAE解析を活用し、冷却効率に対する冷却水温度および冷却孔径の影響を検討した。解析は、図10に示すように、300mm×300mm×20mm tの金属平板にΦ6mmまたはΦ8mmの冷却孔を50mmピッチで設けた簡易モデルを利用し、表6示す条件で実施した。図11に示すように、この解析条件の場合は、伝熱面積よりも流速UPにより熱伝達係数を上げる効果が大きく、チラー等により水温を下げるよりも熱伝達係数を上げる方が冷却時間短縮に繋がる結果であった。

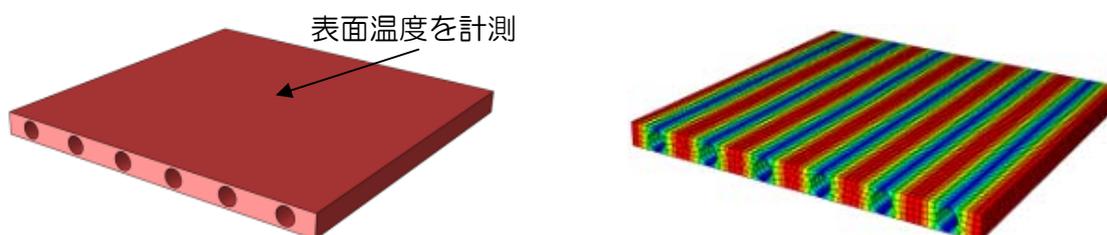


図10. 冷却解析の簡易モデル

表6. 冷却解析の解析条件 ※熱伝達係数：CAEによる算出値

Case	初期温度 (°C)	最終温度 (°C)	孔径 (mm)	貫通孔数	流量 (L/min)	水温 (°C)	熱伝達係数* (W/(m ² K))
1	200	50	8	6	50	30	32.8
2			8			15	27.7
3			6			30	55.2
4			6			15	46.4

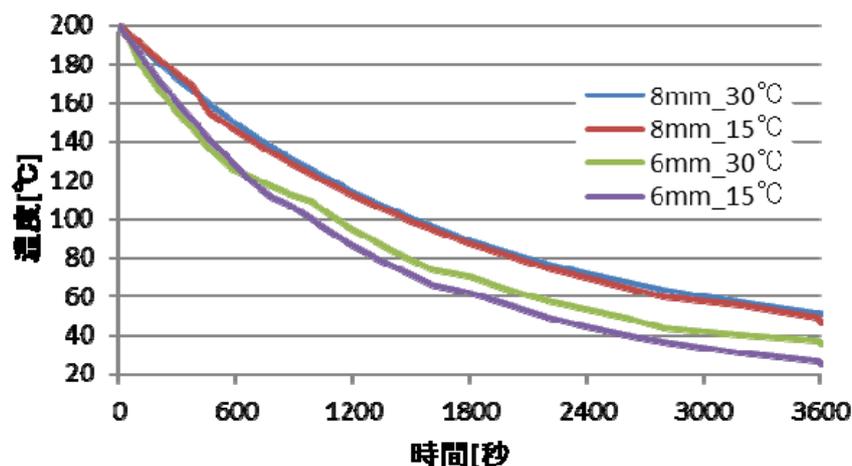


図11. 冷却解析の温度プロファイル

2-2-3 金型ライフ長期化のための金型耐久設計

ヒート&クールは、加熱と冷却の繰り返しになるため金型の負荷が大きく、高い耐久性が求められる。本研究では、CAEによる解析を一部執り進めたが、本研究のコア技術となる電源及びコイルの設計・最適化に注力したため、耐久性の評価にまで至らなかった。

2-3 システム設計及び金型設計加速のためのCAE技術の確立

2-3-1 CAE解析を活用した設計支援

システム設計及び金型設計における作業時間や負荷を低減するため、CAEを解析ツールとして活用し、設計から検証に至るまでのサポートを行なった。

CAEにより、部分加熱用コイルにフェライトコアを配置した時の熱解析を実施し、その加熱効率を解析した。解析は、出力電流500A、加熱時間60秒、共振周波数25kHzの条件で実施した。金属物性は、一般的な炭素鋼のものを利用した。

表7に解析結果の一覧を示す。表7より、Case1~3を比較すると、図示しないがフェライトコアの配置をAとすることで、渦電流密度、磁束密度、ジュール損失が最も高い値を示し、加熱効率が最も優れることが分かった。フェライトコアの配置を最適化することで、磁束が集中して磁束密度が高い部分が発生し、その結果、渦電流密度も高くなるため、被加熱物の発熱が高くなると思われる。その他の配置もフェライトなしに比べれば全く効果が無いわけではないが、その程度はCase1に比べれば非常に小さいことが分かった。

表7. 誘導加熱解析結果一覧

Case	フェライト配置	電気伝導率	渦電流密度	磁束密度	ジュール損失	最高温度
		S/m	$\times 10^7$ A/m ²	T	$\times 10^8$ W/m ³	°C
1	A	0.15	5.56	1.51	9.16	699
2	B	0.15	3.33	1.45	3.29	201
3	C	0.15	3.71	1.49	4.07	204
4	—	—	3.11	1.44	2.87	163

図12に示す被加熱面の熱解析画像より、温度分布が扇状の分布を示していた。また、図13に実際の金型の裏面側（被加熱面）を示す。実際の被加熱面の色が変わるほど非常に高温に加熱されている様子が観察され、色変化を起こした部分の形状が扇状であった。つまり、現実と同様な現象をCAEで表現できており、その解析精度の高さがかがえる結果であった。

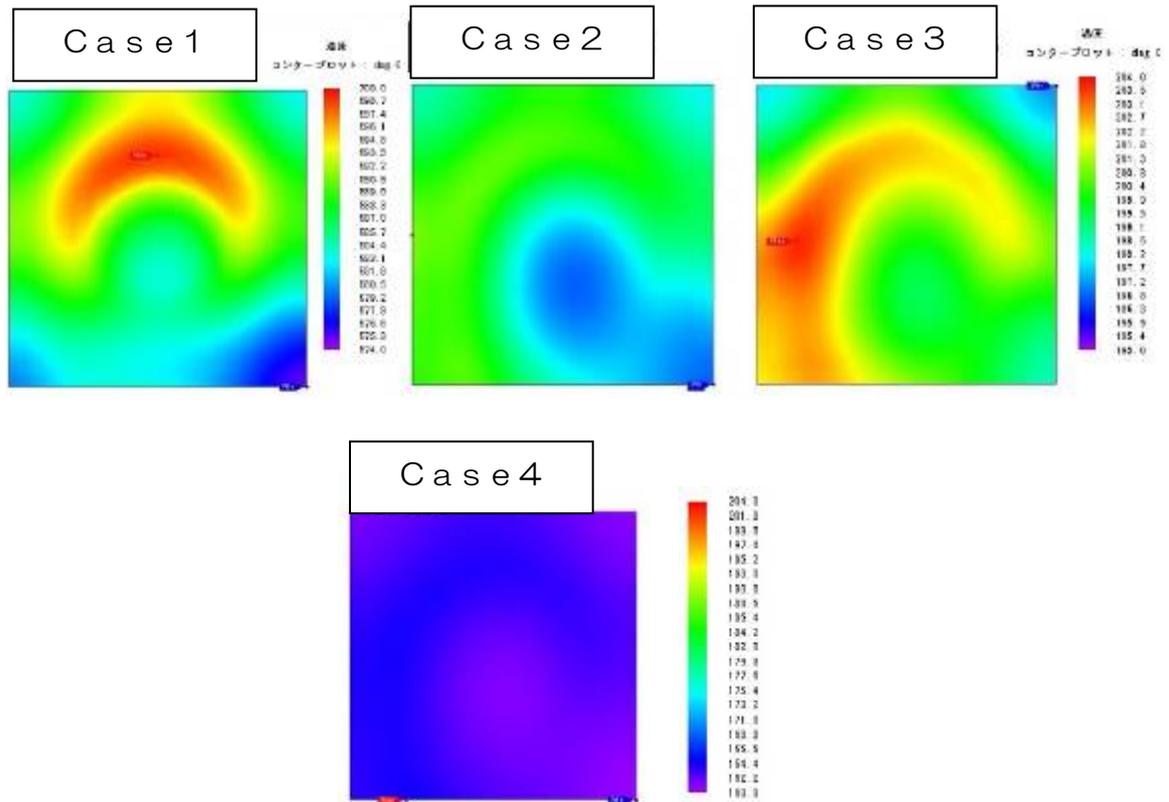


図12. フェライトコアを配置した場合の熱解析画像

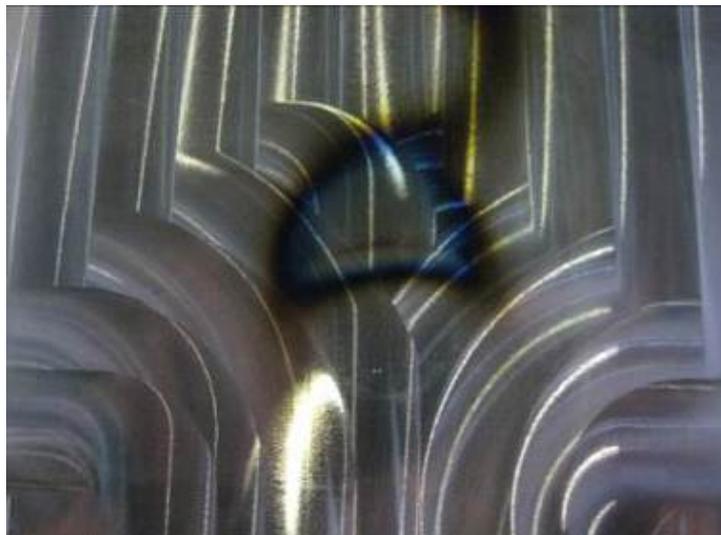


図13. 誘導加熱後の被加熱面画像

2-4 誘導加熱式ヒート&クールプロセスの検証と高機能化の検証

2-4-1 プラスチック成形品の機能化技術の開発

提案するヒート&クールプロセスがポリマーの高機能化に有効であることを検証するため、ウェルドレス等の検証を行った。また、成形サイクル及び消費電力量の計測を併せて実施した。金型は、図14に示す形状が得られるものを用いた。

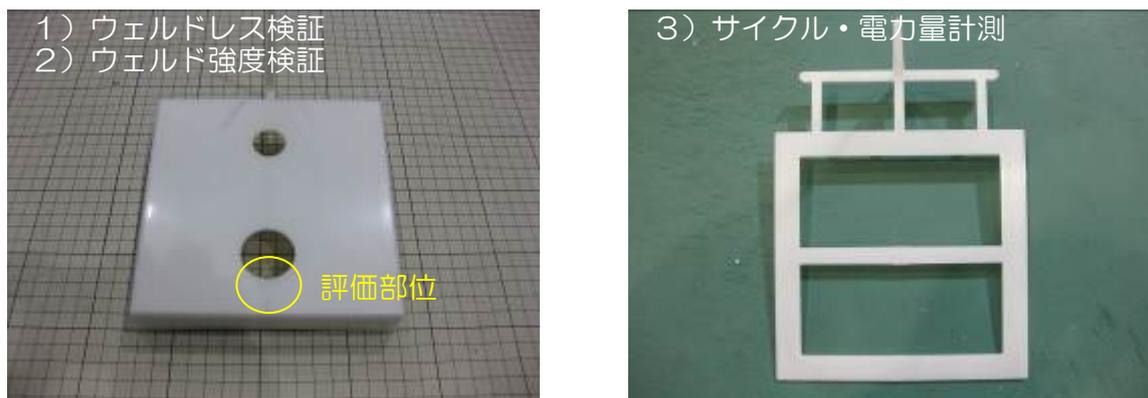


図14. 機能化及び成形サイクル検討のために用いた金型から得られる製品

1) ウェルドレスの検証

材料は、ポリカーボネート樹脂（以下、PC樹脂）を用いた。評価は、レーザー顕微鏡を用い、150倍率で行なった。成形試作の温度条件は以下に示すとおりである。

●PC樹脂

（シリンダ設定温度）270℃

（金型設定温度）

通常成形：70℃

ヒート&クールプロセス：107℃、132℃、163℃⇔80℃

図14、図15それぞれにPC樹脂のウェルドライン深さ（Rz）変化とレーザー顕微鏡による画像を示す。金型温度を高くしていくことでウェルドライン深さは小さくなり、150℃付近を境にウェルドラインが消失することを確認した。

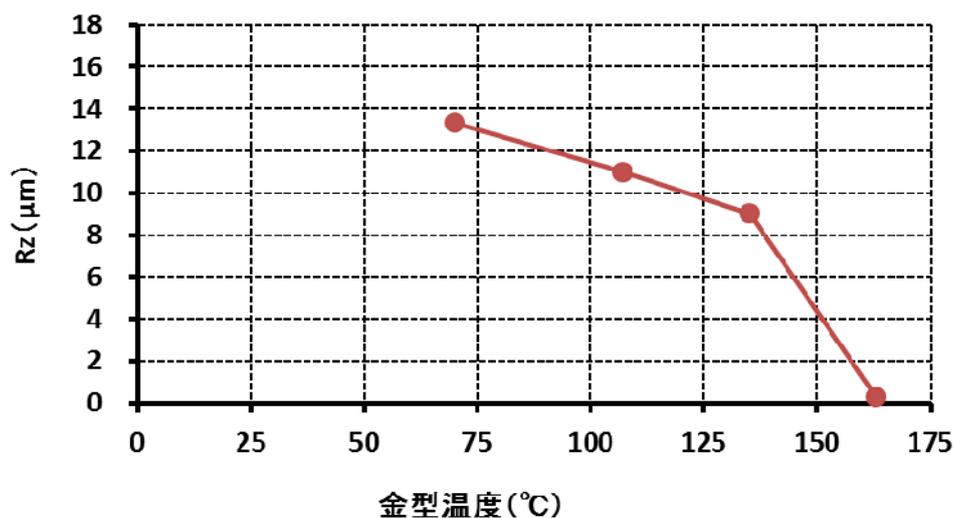


図14. PC樹脂の金型温度におけるウェルドライン深さの変化

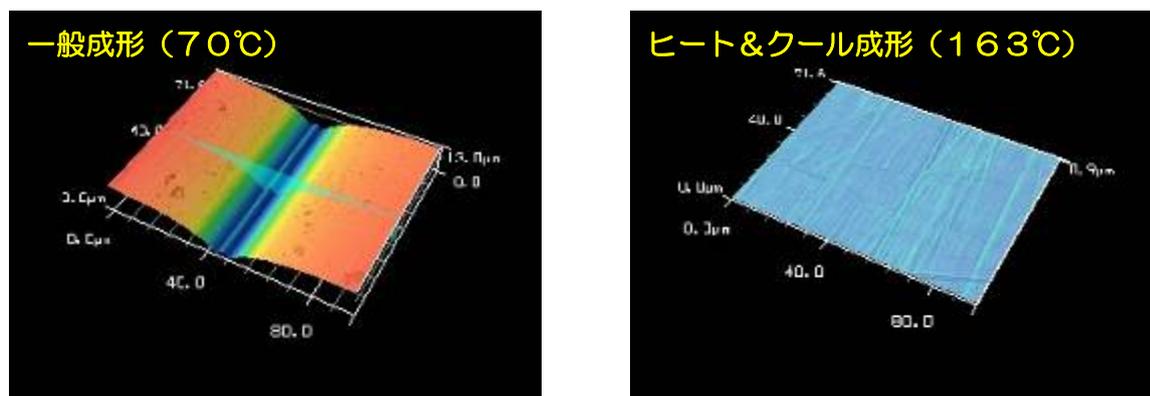


図15. PC樹脂のウェルドライン部のレーザー顕微鏡画像

2) ウェルド強度評価

材料は、PC樹脂を用いた。成形試作の条件は、2-4-1-1) に示す条件と同じとした。試験サンプルは、10mm幅の短冊を切り出して用意した。評価は、曲げ試験で行い、スパン間距離40mm、速度2mm/minの条件で行なった。

図16にウェルド強度結果を示す。金型温度を高めていくことで、ウェルド強度は向上することが確認された。ヒート&クールプロセスを適用することで、破壊の起点となりやすいウェルドラインが消失したためと考えられる。しかしながら、132°Cと163°Cとの差異は見られなかった。

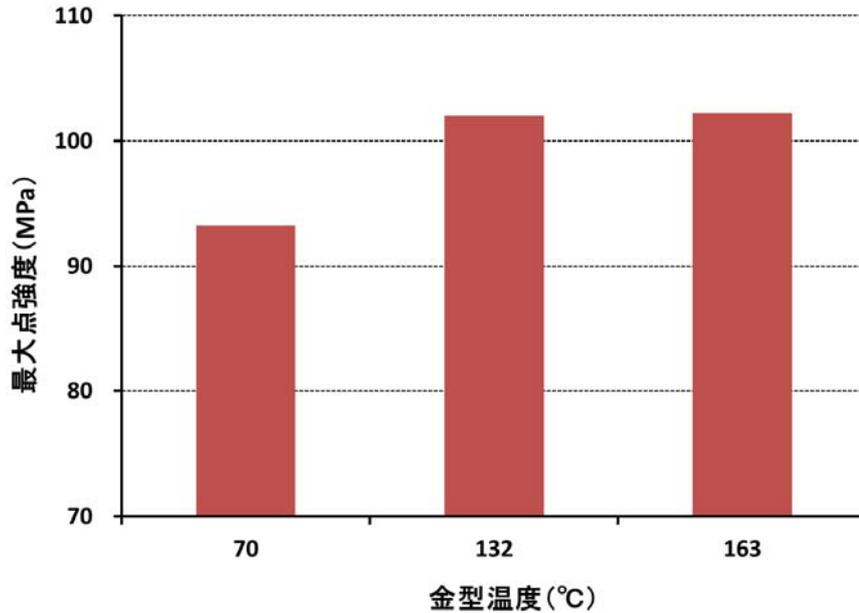


図16. PC樹脂の金型温度におけるウェルド強度の変化（曲げ試験）

3) 成形サイクル及び消費電力量計測

材料は、PC樹脂を用いた。金型開閉タイミング確認のための変位計と金型温度はデータロガーにて収録した。成形は、金型温度80°Cから金型の加熱を始め、160°C付近で樹脂を射出し、100°Cまで冷却後、製品を取り出して行った。

図17に成形のタイムチャートを示す。加熱は概ね25秒程度で出来ているものの、冷却が非常に遅い印象を受けた。サイクルタイムは概ね60秒程度であった。

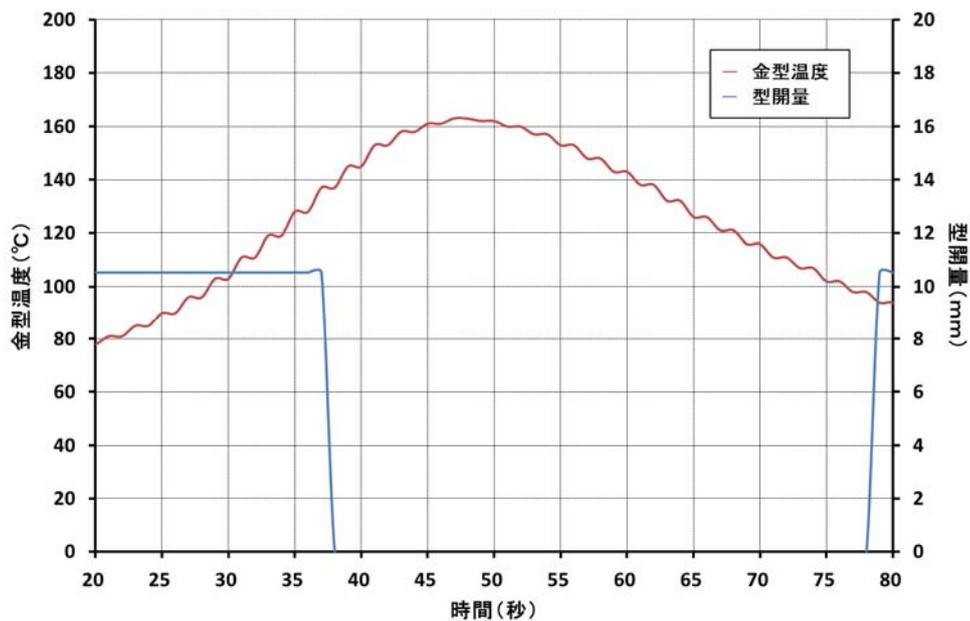


図17. ヒート&クールプロセスのタイムチャート

成形サイクルと同時に、電力量も併せて計測した。図18に、3回の成形サイクル中における電源装置の積算消費電力量を示す。3回とも積算消費電力量は90～95 Whを示していた。電気料金は定かではないが、仮に15円/kWhとすれば、1ショットあたり約1.5円のコストが発生する結果であった。本来であれば、蒸気方式との比較をしなければならないが、検討に利用できそうな設備はあるものの、蒸気換算量や流速等の情報が足りずできなかった。今後、差異・優位性を明確化し、対外へのアピール効果を高めるための検討を執り進めたいと考える。

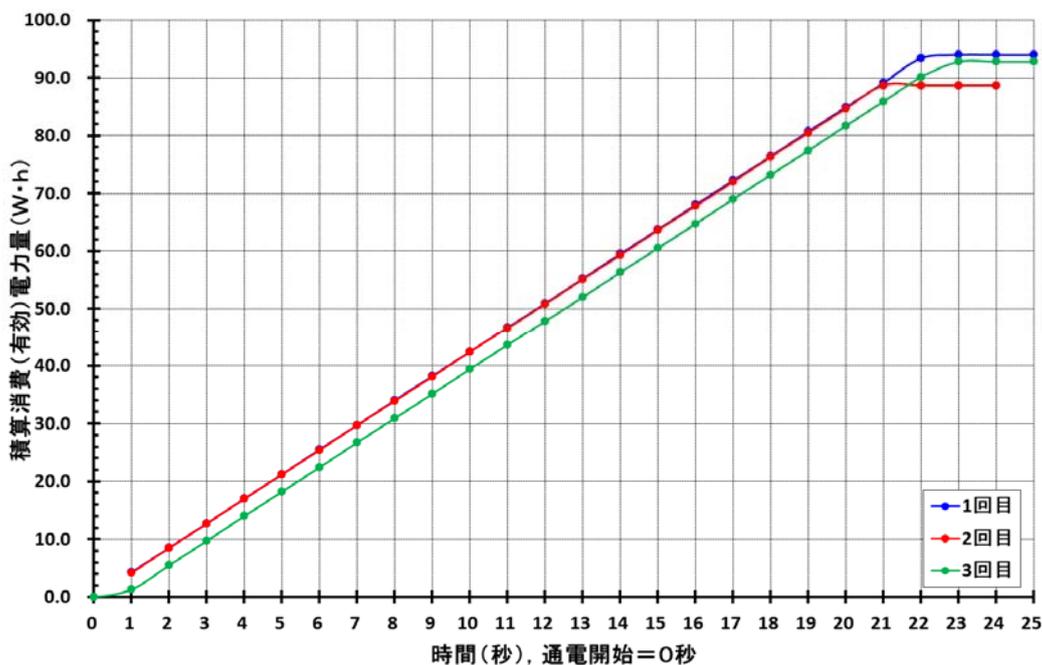


図18. ヒート&クールプロセスにおける金型加熱時の積算消費電力量

2-4-2 部分加熱制御を利用した反り低減技術の開発

炭素繊維やガラス繊維等の充填材を含むポリマー複合材は、充填材が製品表面に突出しやすく、充填材の形状に起因して複合材自体に異方性を生じやすくなる。その結果、得られる製品は、大きな表面凹凸と反り変形とを発生しやすい。本研究では、部分加熱ではないが、ヒート&クールプロセスによる表面外観改良への効果について検証した。また、部分加熱のメリットを活かし、温度分布と反り量との関係についても検討する予定であったが、本研究のコア技術となる電源及びコイルの設計・最適化に注力したため、本格的な検証には至らなかった。

表面外観検討に用いた材料は、ポリプロピレン/ガラス繊維複合材（以下、PP

／GF材)を使用した。金型は、図19に示す形状が得られるものを用いた。



図19. 繊維含有ポリマー複合材の表面外観改良検討のために用いた金型から得られる製品

成形試作の温度条件は以下に示すとおりである。

●PP／GF材

(シリンダ設定温度) 220℃

(金型設定温度)

通常成形：40℃

ヒート&クールプロセス：125℃または160℃⇔50℃

一般成形品において、ウェルドラインが明確には見えなかったが、目視で凹凸と色ムラのような現象が現れており、GFが製品表面に浮き出て、ウェルドライン部で樹脂とGFの分離が発生しているものと推察される。一方、ヒート&クールプロセスによる成形品においても、鮮鋭度は低く、外観不良を起こしているように見えたため、レーザー顕微鏡による観察を行った。観察は10倍率で行なった。図20に示すように、非常に表面の凹凸が多く、Rzは10~26 μ m程度であった。成形条件の影響を検証したところ、射出速度が速く、金型温度が高いほど表面の凹凸は小さくなる傾向であった。射出速度が速いほど、樹脂が固化する前に金型表面を転写することができ、金型温度が高いほど転写が促進されるためと考えられる。また、繊維の周りが凹部になっている様子が観察され、繊維周囲の樹脂が収縮して表面にGFが現れることで表面の粗度が上昇し、外観不良を起こしていると考えられる。

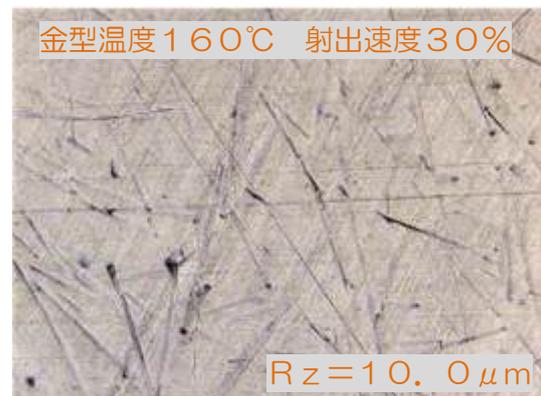
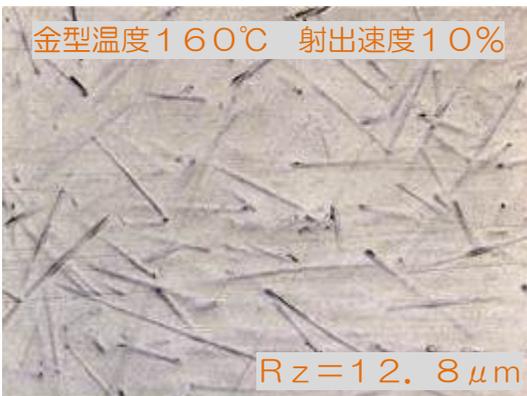
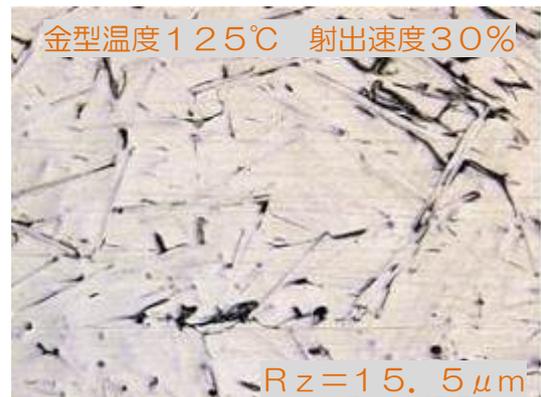
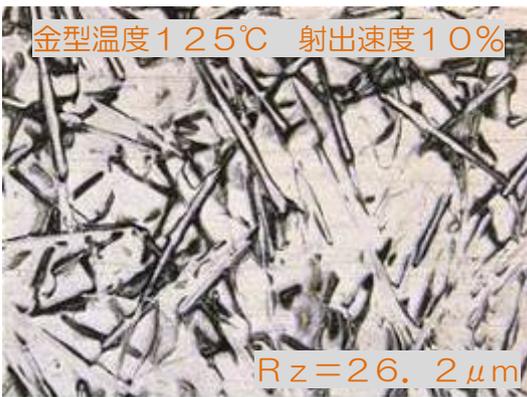
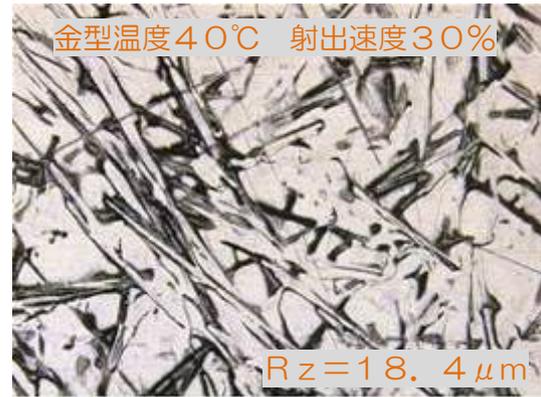
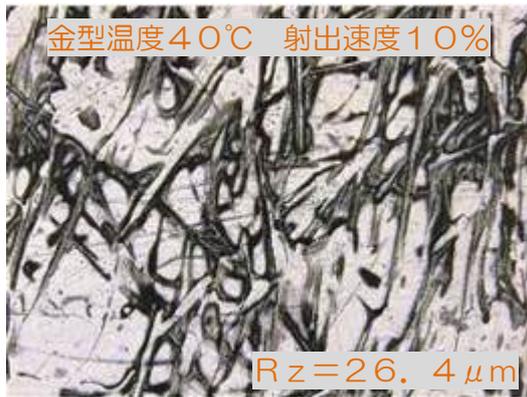


図20. PP/GF材の表面状態への成形条件の効果

最終章 全体総括

平成25年度から本年度までの3年間にわたり、必要最小部を加熱冷却し省エネルギー性に優れたシステムを具現化することを目的に研究開発を執り進めてきた中で、部分加熱のための電源構成の設計、製作は概ね終了し、技術目標の設備コスト1/2は概ね達成されたと考えられる。また、小型コイルとフェライトコアを上手く活用することで、良好な加熱効率と温度傾斜制御ができることを確認し、加熱時間及びサイクルの技術目標は概ね達成されたと考えられる。さらには、CAEによる支援、プラスチックの機能化などを行い、一部達成できなかった項目はあるものの、着実に目標達成に向けて執り進めてきたと考えられる。一方で、課題も残っており、金型の耐久性評価や冷却効率の向上、蒸気方式との消費エネルギーの比較が挙げられる。前記課題をクリアできれば、本プロセスの有効性及び優位性に説得力、納得感が増し、ユーザーの安心感に繋がるものと考えられる。

今後は事業展開に向けた活動が必要となってくる。特許権利化の推進を図ると共に、本プロセスのモニターとなってくれるユーザーや協業パートナーの探索が必要である。同時に、国内開催の展示会等を通じ、積極的にPR活動を行っていく必要がある。まずは、中部圏のメーカーをターゲットに一つ販売実績を作っていくことに注力したい。その後は、その実績を起点に他のメーカーへの販売展開を図っていきたいと考える。