

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「成形金型の短納期化とデザイン高度化を実現する
低投資な超精密微細切削システムの研究」

研究開発成果等報告書

平成24年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人理工学振興会

目 次

1. 研究開発の概要	1
1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標	1
1-1-1. 研究開発の背景	1
1-1-2. 研究の目的および目標	3
1-2. 研究体制	6
1-2-1. 研究組織	6
1-2-2. 管理体制	7
1-2-3. 研究者氏名	8
1-2-4. 協力者	8
1-3. 成果概要	8
1-4. 当該研究開発の連絡窓口	9
2. 研究内容および成果	10
2-1. 離型性向上とデザインの高度化対応切削加工技術の研究	10
2-1-1. 高精度・微細切削加工技術の研究	10
2-1-2. シボ面の機能表面の設計と微細切削加工技術の研究	11
2-1-3. 簡易成形金型を用いた離型性制御作用の評価と検証	12
2-1-4. 樹脂製品のデザイン高度化を実現させる 3次元超精密微細切削技術の研究	15
2-1-5. 複雑な樹脂成形形状品の異方性収縮の低減に効果を発揮する 表面テクスチャと加工技術の研究	16
2-2. 熱変形を低減させる低投資超精密微細切削システム	19
3. 全体総括	20
3-1. 研究開発成果	20
3-2. 事業化展開	21
4. 専門用語等の解説	21
5. 参考文献・引用文献	22

1. 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的および目標

1-1-1. 研究開発の背景

(1) 研究開発の背景

国内製造業の海外展開とアジア圏の金型企業の技術力の急速な進歩により、国内の裾野産業を形成する金型設計製作企業は、これまでの金型技術の優位性により得られた付加価値が急速に減少するなか経営面を含めた見直しが求められている。現時点では世界のトップレベルにある研究開発型製造企業でも変革が必要になり、例えば、超精密複雑形状部品の生産技術を研究開発することで新たな分野への進出を図り、これまでの地位を保つ努力が成されつつある。本研究開発は樹脂成形用高精度金型のための超精密微細切削技術に着目し、デジカメ用 AF カメラレンズモジュールを事例として、樹脂成形金型の短納期・低コスト化を実現する低投資な超精密微細切削システムの研究を提案することとした。

(ア) 高精度化・微細化

高精度化や薄肉・軽量・コンパクト化が情報家電製品の重要なニーズであること、更に、外装部品のデザインの高品位化指向のニーズへの対応のため、金型の超精密化や微細化を実現する高度化技術が求められる。しかし、中小企業の経営面からの投資能力の限界や新たな加工技術の開発を担当する技術人材の制約などの理由により、川下製造業者が求める高精度で微細かつ、高品位デザインを表現できる成形部品用金型を設計・製作することが難しい状況にある。

(イ) 短納期化

デジカメ用 AF カメラ用レンズモジュールの主要な樹脂成形部品はコンパクト・薄肉化と高強度化を両立させるためリブなどの補強構造を持つ複雑な形状をしている。また、これらの成形材料はセットメーカー毎に樹脂材料（例：高剛性グレード、低変形グレード、高流動グレード）やフィラーの種類と含有率が異なる（例：ガラス繊維 10%+カーボン繊維 20%）ことから、成形プロセスにおいて機種毎に異なる複雑な収縮変形が回避できない。更に、レンズ周辺や CCD 素子周辺は光の反射光による悪影響を避けるためシボ加工（図 1-1）がなされているが、このシボ面^{*)}の表面粗さの影響で離型性^{*)}が悪くなる場合が多くあり、この離型性の問題は薄肉成形品に必要な高圧成形条件により一層難しさが増大する傾向にある。このような薄肉で高精度が求められる樹脂成形部品に付随する成形性の課題を解決するため、金型設計から金型製作の段階で色々な工夫が取られており、例えば、樹脂流動解析（図 1-2）の

活用や樹脂の収縮特性を考慮した金型形状の設計と金型加工などが挙げられる。しかし、前述の多くの課題を金型修正にフィードバックして対策を講じる現状(図 1-3)の解決法では、試行錯誤のロスを短縮するには限界に近く、川下製造業者の更なる短納期要請に対応できない状況にある。今後の一層の高精度化や薄肉・軽量・コンパクト化が求められる情報家電部品用金型の短納期設計・製作に対して革新的な解決手段の研究が必要である。

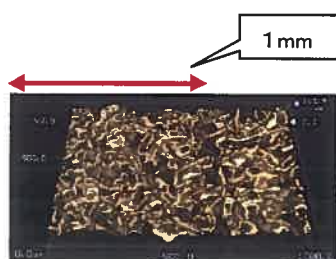


図 1-1 シボ面の 3D 拡大図 (x1000)



図 1-2 樹脂流動解析

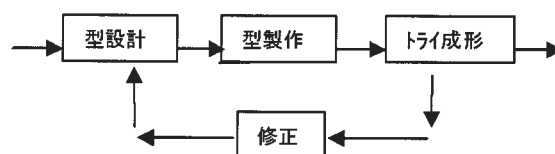


図 1-3 金型設計～製作～修正のプロセス

(ウ) 低コスト化

現状の金型設計～製作プロセスを前提とした場合、前述(イ)の理由等により金型の高精度部品に対して設計と加工の修正作業が回避できないことから、川下製造業者が求める更なる低コスト化にも十分に対処できる状況にないのが実状である。また、金型の高精度化への対応のために工作機械の高性能化と、熱変形等の影響を極力少なくする加工室の温度制御等が必要となりつつあるが、ともに初期投資とランニングコストが必要である。中小企業の経営規模に適した低投資で負担の少ないランニングコストで維持可能な室温制御システムが求められる。

(2) 現状技術水準と開発目標技術との比較

表面テクスチャを触覚特性や視覚特性を制御する狙いで商品化研究が進んできている。しかし、表面テクスチャ創製技術のレベルと低価格成形法などに課題がある状況である。一方、シボ面または梨地面は、カメラのレンズ鏡筒内面や液晶ディスプレイの導光板、光源拡散シートなどの製品分野で実用化されている。また、切削加工によるシボ面の成形技術も実用化に近い状況が察せられる(日刊工業新聞 2010 年 1 月 13 日版記事など)。しかし、シボ面ま

たは梨地面の接着・離型性などの表面特性に関する研究は電子図書を活用した特許調査からは見出せない。金型の離型性に関する技術は、電鍍型からの剥離技術やフラットパネルディスプレイ用レンズ金型の量産用転写型生産時の剥離問題などに典型的に現れるが、ほとんどがノウハウとしての扱いであり技術的に研究されたものは無いようである。本研究は平成 21 年度の成果として、擬似シボパターンの形状パラメータ（傾斜角）の制御により離型力を抑制できることを実験確認し特許出願しており、研究課題の設定は新規性があると判断できる。

更に、平成 21 年度の研究データから金型温度・成形品温度が離型力に非常に大きな影響を及ぼしていることを見極めており、この考えを応用して金型温度の制御による成形品の離型制御の可能性を新たな研究テーマとして設定した。金型温度の高速制御技術が流動樹脂の転写性向上や成形タクト短縮の狙い研究されているが、成形品の離型制御の発想はない。また、微細切削技術の応用研究として、ガラスフィラー等を含む流動性の悪い樹脂の流動性支援機能のための表面テクスチャの研究を追加課題として設定した。成形金型のゲート部からの流動樹脂の挙動を微細なテクスチャで向上させる可能性を研究し、結果として射出圧を低減させることで収縮応力の抑制を狙うもの。このような表面テクスチャの形状特性による成形性（離型性・収縮抑制）制御の研究は新規のテーマであると同時に実現の可能性が得られた場合には、従来技術が回避できなかった根本課題を軽減できる挑戦的な研究といえる。

（当該分野の特許化動向）

本研究は表面テクスチャの傾斜角制御による離型力抑制に関し、平成 21 年度の研究成果として特許出願を終えた。更に、金型または成形品の温度分布を精密に制御することで熱応力から離型作用を得る考案も出願を準備中である。表面テクスチャの形状効果による樹脂流動性の制御に関しても、我々の調査の範囲では特許化動向は見受けられなかった。

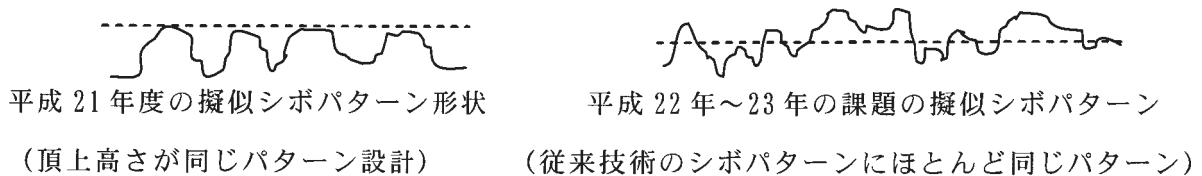
1-1-2. 研究の目的および目標

（1）高度化目標

（ア）高精度化・微細化に対応した金型及び成形技術の向上

平成 21 年度の研究では、微細金型を構成する形状要素でデザインしたテストパターンを用いて高精度・微細切削技術の短期向上を実施した。その結果、切削による擬似シボパターンの成形加工が可能となった。平成 22 年～23 年の課題として、切削技術レベルを超精密・微細領域にまで高度化させ、従来技術で製作したシボ（または梨地）パターンにほぼ同一の表面テクスチャを切削技術で完成させる。その結果、金型製作過程における試行錯誤的なロスを最少化でき、短納期・低コスト化と再現

性に優れるシボ面形成が可能となる。更に、金型の表面テクスチャに微細な工夫を凝らすことで離型力の低減作用と樹脂流動性の向上作用を狙い、その結果として低い射出圧力条件の選択が可能となれば、成形品の収縮変形を減らすことへも繋がる可能性がある。なお、短期間での研究効率を得るために、金型温度の解析と成形品への応力解析にシミュレーション手法を採用する。



(イ) モデリング技術の高度化

上図左に示すような完全にランダム性を持つ擬似シボパターンのデジタル設計技術の研究を行い、また、データ処理速度の実用性の面から単位面積のシボパターンの隣接張り合せ技術の実用研究を進める。従来の機械系 CAD システムはある程度大きな寸法の幾何形状を取り扱う設計ツールであるため微細な凹凸の設計には適していない。凹凸形状のモデリング技術を、シボ加工面を事例とし機能表面設計ツールとして使用可能となるモデリング技術を高度化する。ここでは、シボパターンの形状パラメータ（例えば離型方向の傾斜角）の高精度形成や溶融樹脂の金型表面での流れに影響を及ぼす様な表面テクスチャを実験研究するためのモデリング技術の高度化も必要となる。

(ウ) 環境配慮に対応した技術の開発

平成 21 年度の研究結果を受けて試験的に実践した環境安定化策（①外部の温度変動影響の抑制、②局所的気流制御による加工機周辺温度の変動幅の低減；項目②はシミュレーション解析のみ）に関して、実機データによる確認を行い、中小企業に適した低投資による加工機の熱変形最小化技術の実現を目指す。

(2) 技術的目標値

(ア) 樹脂成形品の離型性向上とデザインの高度化対応のための超精密微細切削加工技術の確立

(a) 高精度・微細切削加工技術の研究

・金型のデザイン高度化を実現する超精密・微細切削技術の高度化研究

現状の工具検知性能は $\Phi 100\mu\text{m}$ が測定限界のため微細工具の使用に制限があったので、 $\Phi 100\mu\text{m}$ 以下（目標 $50\mu\text{m}$ ）の工具径の位置検出が可能となるよう工具位置計測システムを改良開発する。そのうえで、微細工具を用いた超精密・微細切削加工のデータベースの蓄積

を進める。

(b) シボ面機能を発揮する新たな機能表面の設計と微細切削加工技術の研究

- ・シボ面置換テクスチャの設計技術・切削技術の高度化によるシボ面との互換性実現

従来工法で製作したシボ面とほぼ同一の形状特性が表現できる設計技術と切削技術（プラスチック成形材および金型材の2種）の開発により短納期目標 25%を達成する。

(c) 簡易成形金型を用いた離型性制御作用の評価と検証

- ・インプロセスで金型の離型力計測が可能なシステムの開発

射出成形機の成形プロセスで、インプロセスで計測が可能な離型力計測システムを開発する。

- ・金型表面温度と離型力・離型作用の研究

離型力評価用金型に金型温度を制御する冷却液循環路を形成し、金型表面温度が離型性に与える影響について研究し金型温度の制御による離型力制御の可能性を調査する。ここでは上智大学の熱伝導解析シミュレーション、構造解析シミュレーションを活用し、ミクロ温度分布の制御と熱応力作用のモデル解析を行い、実験研究と合わせて仮説検証を進める。

(d) 樹脂成形品のデザイン高度化を実現させる3次元超精密微細切削技術の研究

- ・超精密微細切削加工による感性価値を表現する3D面上微細パターンの創成

プラスチック材と金型で、従来技術で製作したシボパターン（または梨地面）を微細切削技術でほとんど同じ表面形状を実現させる。併せて、離型方向に対して傾斜角を制御した擬似シボパターンなどの加工面を実現させる。

（目標）例；100 μ m単位サイズの高度デザインパターン集合体

(e) 複雑な樹脂成形形状品の異方性収縮の低減に効果を発揮する表面テクスチャと加工技術の研究

- ・離型作用に効果を発揮する表面テクスチャパターンの研究

離型性支援テクスチャの形状寄与因子を研究し、離型性の制御パラメータの解明を進める。

微細エンドミルで加工した擬似シボパターンで表面テクスチャの離型作用を研究する。

- ・樹脂流動性に効果を発揮する表面テクスチャパターンの研究

交換レンズホルダ等の円筒形状を試験モデルとする評価金型を作成し、樹脂流動性に効果を発揮する表面テクスチャパターンを研究し異方性収縮の抑制作用を探索する。

- ・金型構造と離型性または樹脂流動性支援テクスチャの最適化と実用化研究

前述の研究成果を利用し、円筒形状のモデル成形品の離型性向上作用と異方性収縮の低減作用に寄与する表面テクスチャとその加工技術を研究する。効果発現の場合は特許出願する。

(イ) 室温変化による加工機の熱変形を低減させる低投資超精密微細切削システムの実用化

- ・設置環境に最適な低投資超精密微細切削システムの実用化

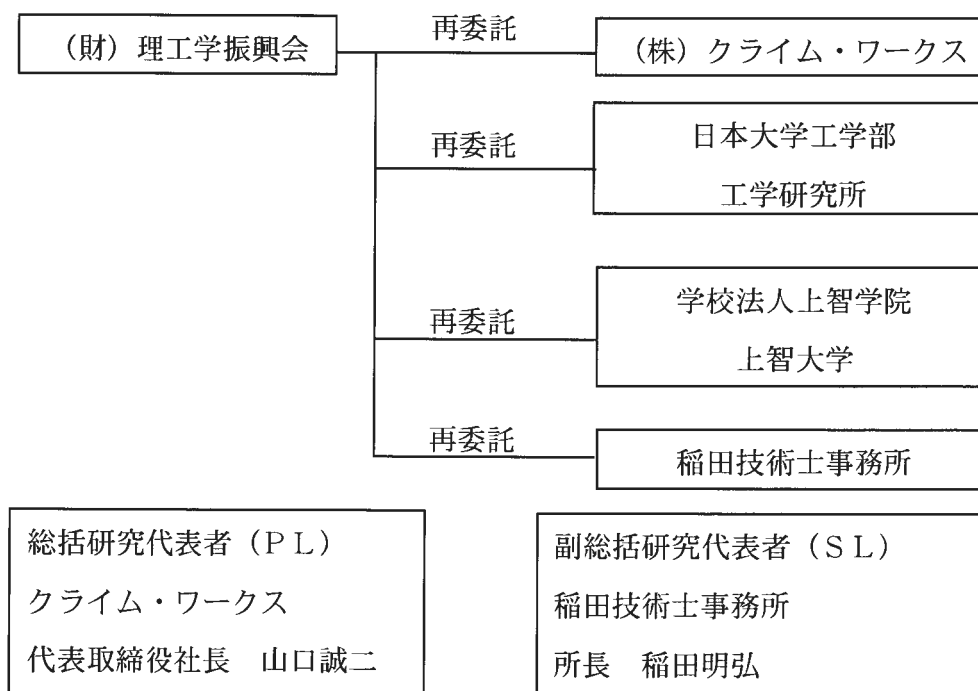
季節変動も含めた長期間での安定性を把握する。この時点での要求精度の度合いで実用化するかどうかの判断を行う。

以上の研究施策により、川下製造業者ニーズに対する研究成果目標を下記とする。

- * 低コスト化：現状のデジカメ用 AF レンズモジュール金型の製造原価を 25%削減
- * 短納期化：プラスチック切削～試作品金型設計～開発試作完了期間を 25%短縮
- * 高精度化・微細化：現状の平均的精度 $10\mu\text{m}$ →目標 $7\mu\text{m}$ 、高精度部分 $5\mu\text{m}$ → $3\mu\text{m}$
 工具検知性能を $\Phi 100\mu\text{m}$ 以下まで向上（目標： $\Phi 50\mu\text{m}$ ）
 $100\mu\text{m}$ サイズ程度の微細パターン集合体の高度デザイン表面の加工実現
- * 切削によるシボ置換面の実現：再現性あるシボ面を切削技術でプラスチック加工品と金型とに実現
- * 離型性または異方性収縮変形を抑制する表面テクスチャとその加工技術の創成（成果獲得の場合）

1－2．研究体制

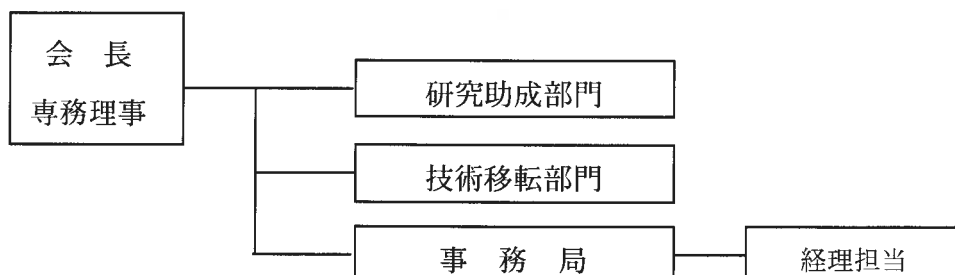
1－2－1．研究組織



1-2-2. 管理体制

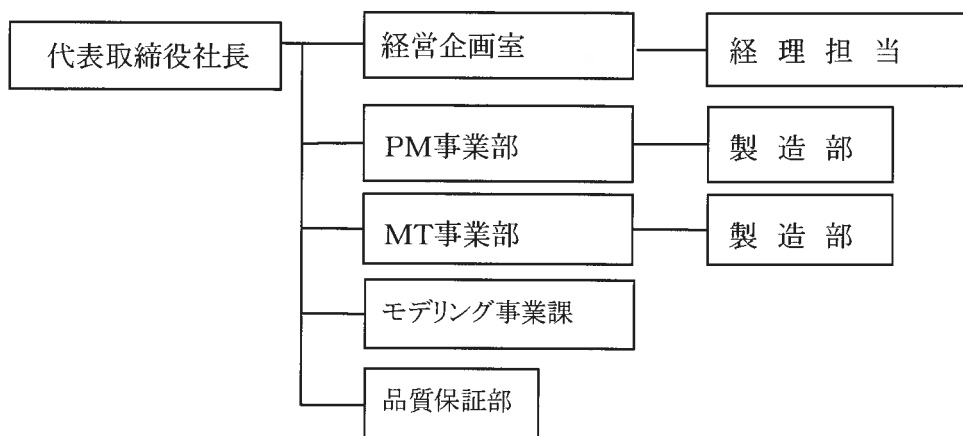
(1) 事業管理者

財団法人理工学振興会

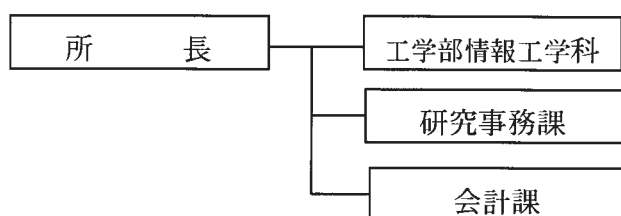


(2) 再委託先

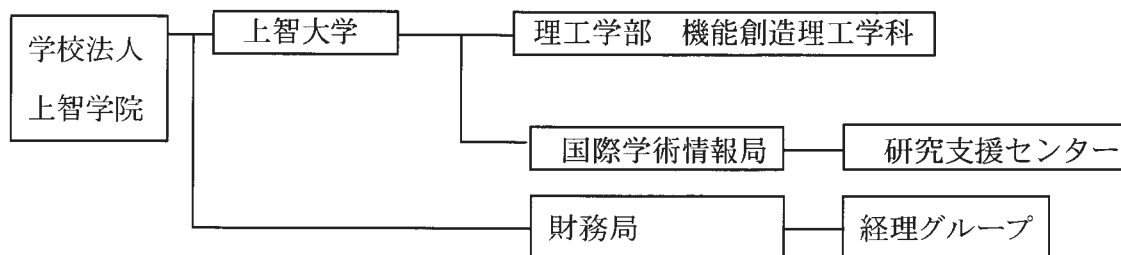
(ア) 株式会社クライム・ワークス



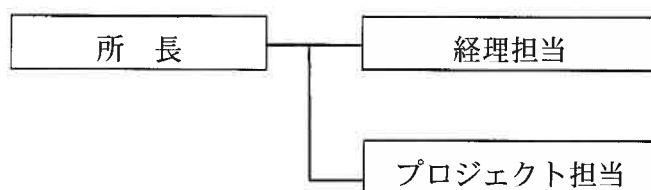
(イ) 日本大学工学部工学研究所



(ウ) 学校法人上智学院 上智大学



(エ) 稲田技術士事務所



1-2-3. 研究者氏名

氏 名	所属・役職	備考
山口 誠二	(株) クライム・ワークス・代表取締役社長	プロジェクトリーダー
稲田 明弘	稲田技術士事務所・所長	サブリーター
滑川 佳秀	(株) クライム・ワークス・品質保証部長	
石川 克也	(株) クライム・ワークスモデリング事業課製造課長	
白葉 虎俊	(株) クライム・ワークスPM事業部製造部製造課員	
山内 伸太郎	(株) クライム・ワークスPM事業部製造部製造課員	
河西 弘幸	(株) クライム・ワークスMT事業部製造部製造課員	
白井 健二	日本大学工学部・教授	
小林 義和	日本大学工学部・准教授	
清水 伸二	学校法人上智学院上智大学 理工学部・教授	

1-2-4. 協力者

氏 名	所属・役職	備考
後藤 隆司	日進工具 (株) ・専務取締役 開発センター長	アドバイザー
植松 卓彦	東京都立産業技術研究センター・事業化支援部 研究員	アドバイザー
佐藤 彰	ユニオンツール (株) 技術統括部長	アドバイザー

1-3. 成果概要

本研究は、樹脂成形用高精度金型のための超精密微細切削技術に着目し、短納期・低コスト化を実現する超精密微細切削システムの研究開発を提案した。その結果、超精密微細切削技術と微細パターンのデジタル設計技術を高度化させることで任意の微細シボ（梨地）面を切削加工で製作可能となり、これにより技能依存を要せず再現性あるシボ面を金型部品加工工程の中で、切削で製作することが可能となった（図1-4）。さらに、シボパターンの形状制御（例：傾斜角）・面分布配置・大面積化の設計アルゴリズムを開発したことで、色々な表

面機能を実現できる表面テクスチャの設計・製作が可能となった。同時に、切削による微細パターンの製作能力の高度化を狙い、 $\phi 50\mu\text{m}$ の極微小径工具の刃先位置の自動検知技術を実現した。以上の微細パターン設計・製作技術を応用し、シボパターンをアレンジした離型力制御パターンと溶融樹脂の流動性制御パターンを考案してデジタル設計を行い、超精密微細切削加工で試作検証用金型入れ子を作成し、2種の開発金型（インプロセス離型力計測金型、樹脂流動性可視化金型）を用いて表面テクスチャの機能を検証した。この開発過程で、接触熱抵抗^{*}の解析原理を応用して金型温度の制御による離型力低減の可能性を研究し、金型の冷却作用の制御により離型力低減作用が得られることを検証している。以上の個別開発成果と新規導入機器を連結統合させ、金型設計・製作プロセスの短納期化の狙いで統合システムの構築を進めた。即ち、計測強化のために3次元測定器を真円度測定器に置き換え、またCAE強化のため構造解析と樹脂流動解析を同一金型設計に反映できるようそれぞれ独自ソフト開発を実施して金型設計システムを高度化させ、5軸MC用CAMシステムと連結して統合化させた。更に、金型内樹脂圧力と射出圧力を計測し成形機制御にフィードバックさせる専用成形機を導入し、CAEシミュレーションの検証をインプロセスで可能として金型設計/金型加工/成形技術を統合化した“金型設計・成形技術統合システム”を構築した。なお、設定した研究成果目標は全て達成できている。

以上の結果として開発された開発技術スペックは次の内容である。この開発技術スペックにより、表面機能を持つシボ付き成形品の金型設計製作に短納期で対応できる。

- 1) 表面機能を有す高精度切削シボ付き金型の設計・製作技術
- 2) 金型設計・成形技術統合システム



図 1-4 切削シボの実現

1－4．当該研究開発の連絡窓口

財団法人理工学振興会 事務局長 泉洋一郎

TEL : 045-921-4391 FAX : 045-921-4395 E-mail : cpse@titech-tlo.or.jp

2. 研究内容および成果

2-1. 離型性向上とデザインの高度化対応切削加工技術の研究

2-1-1. 高精度・微細切削加工技術の研究

(1) 金型のデザイン高度化を実現する超精密・微細切削技術の高度化研究

超精密・微細切削技術の研究課題として、微小径工具の使用技術、微細パターンに対する工具軌跡と切削性、バリ等の影響と忠実な形状の関係や工具寿命と切削条件などを挙げ試作評価により高度技術の習得とデータベース蓄積を進めた。図 2-1 は平成 22 年度時点の微細パターンと鏡面切削加工の例、図 2-2 は $\phi 50\mu\text{m}$ の極微小径工具の刃先位置の検知精度の結果である。工具刃先の計測アルゴリズムの改良で、信頼度の高い極微細工具刃先検知技術を開発した。



図 2-1 微細・鏡面切削の事例

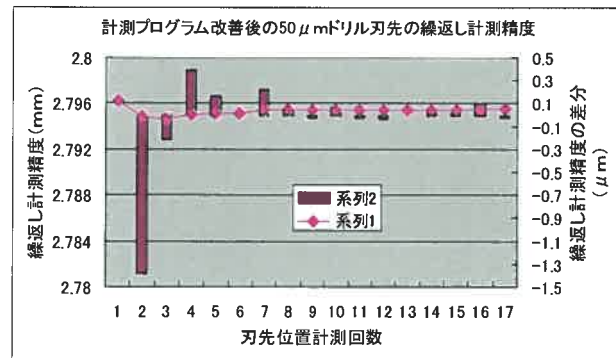


図 2-2 $\phi 50\mu\text{m}$ 極微小径工具の刃先検知技術

微細パターンに対する工具軌跡と切削性、バリ等の影響と忠実な形状の関係や工具寿命と切削条件などの研究は、微細円錐アレイ（図 2-3）を研究モデルとして実施した。長時間加工における超精密切削を実現する研究の結果が図 2-4 である。10 分の加工時間に 1 時間の待ち時間を持たせた条件で 6 個のポケット加工で、当初 $8.5\mu\text{m}$ の実力を $3.1\mu\text{m}$ まで高精度化できている。微小径工具の長寿命化技術の研究成果として、2 種の被削材と切削条件の関係を調査し、工具寿命劣化の大きな影響因子を明らかにしている。

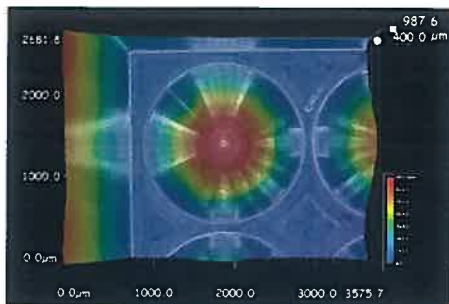


図 2-3 微細円錐アレイの切削研究例

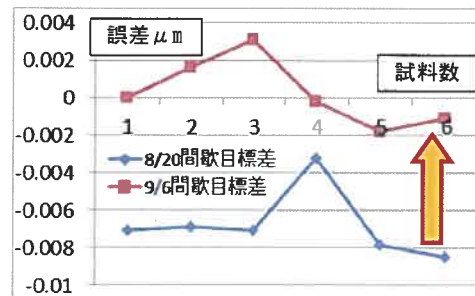


図 2-4 長時間安定加工の研究結果(間歇加工)

2-1-2. シボ面の機能表面の設計と微細切削加工技術の研究

(1) シボ面置換テクスチャの設計技術・切削技術の高度化によるシボ面との互換性実現
梨地シボ画像はランダムノイズを平面上に発生させて、これをグレースケール化して作成している。画像データから3次元凹凸データの作成は、図2-5のように梨地のグレースケール画像を、その諧調値と設計する凹凸高さを対応づけている。図2-6は、 200×200 ピクセル^{*}の梨地シボ画像に対してピクセル間隔を距離 $100 \mu\text{m}$ とし、諧調幅 255 を高さ (H) $100 \mu\text{m}$ とした。図より画像からなめらかな凹凸形状に変換されていることがわかる。

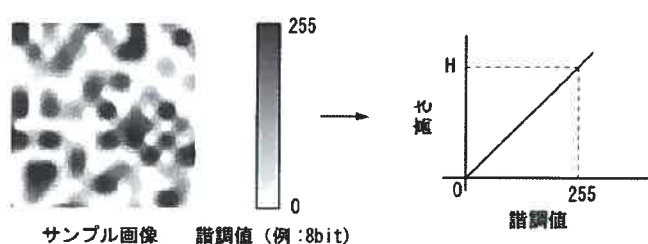


図 2-5 画像諧調値と高さの関係

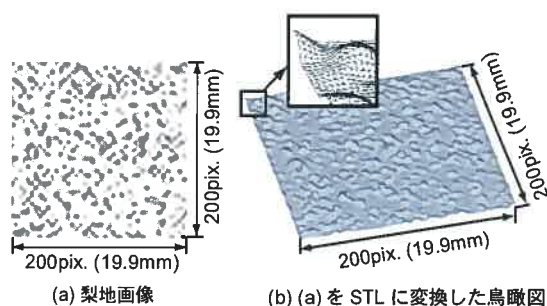


図 2-6 画像データを STL 変換した例

(2) 互換性梨地シボの切削技術

2-1-1 の研究成果を適用して、研究目標の $100 \mu\text{m}$ サイズ程度の微細パターン（シボ面）集合体の切削を行った。シボ深さを $10 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$ 、 $50 \mu\text{m}$ の 5 種類とし、 20mm 角の金型鋼に同時加工を実行した。図 2-7 に加工状態、加工ワークと拡大写真を示した。この成果により、技術的目標値の $100 \mu\text{m}$ 単位サイズの高度デザインパターン集合体を切削で創成できている。



図 2-7 $100 \mu\text{m}$ 相当サイズの切削シボの事例

2-1-3. 簡易成形金型を用いた離型性制御作用の評価と検証

(1) インプロセス金型離型力計測システムの開発

成形品の金型からの離型挙動が単純なT型成形品をインプロセス離型力計測金型に採用し技術開発を進めた(図2-8)。金型設計時に、成形品の離型力を安定して計測できるよう2個のセンサーを成形品エジェクターピン^{*)}の両端に配置させる金型構造上の工夫を盛り込んでいる。

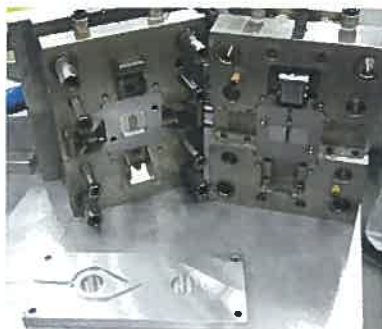


図 2-8 インプロセス離型力評価金型システム

(2) 金型表面温度と離型力・離型作用の研究

平成21年度の研究成果で、成形直後の金型温度が離型力に与える影響が非常に大きいことがわかった。そこで、金型温度または成形品温度を制御することにより、成形品に対する収縮(または膨張)応力作用を活用した離型性制御の可能性について検討することとした。

(ア) 接触熱抵抗^{*)}の基本概念

図2-9は、接触している2個の固体の結合面を通して熱が流れるときの結合面付近の温度分布である。接触面においてそれぞれの固体の表面温度はみかけ上等しくなく、図中の破線で示すように不連続となっている。

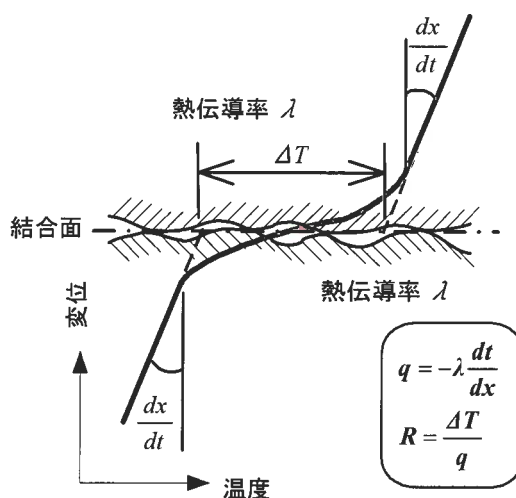


図 2-9 結合面付近の温度分布

これは物体表面が粗さやうねり等によって凸凹しており、これらの表面同士が接触する結合面には、接触部と非接触部が存在するからである。この接触部および非接触部によって、熱の流れが妨げられる。その結果、結合部付近において急激な温度勾配が生じ、2つの接触している物体間に巨視的な温度差 ΔT が生じる。この温度差 ΔT を生じさせる要因が接触熱抵抗 R である。接触熱抵抗は接触部と非接触部の割合だけではなく、接触部と非接触部の分布状態、つまり粗さやうねり等の凹凸、片当たり等の不均一な結合状態も結合部の接触熱抵抗に影響する¹⁾。図2-10は大気圧雰囲気においての均一な接触状態でのS45C同士の接触における接触率 Er^* と接触熱抵抗 R の関係である。

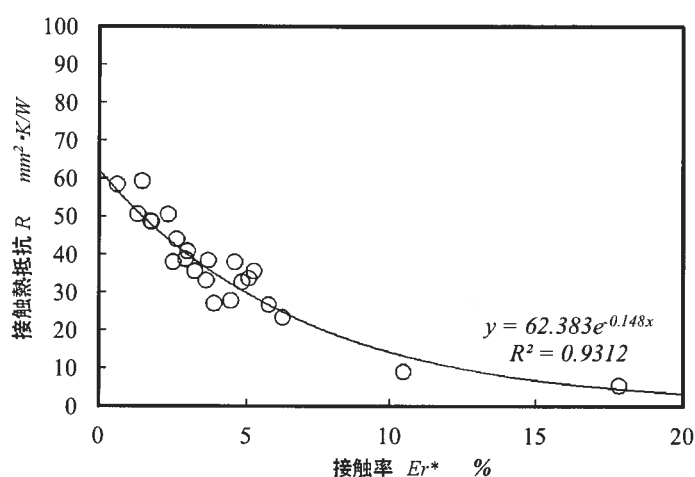


図2-10 接触率 Er^* と接触熱抵抗 R の関係

(イ) 結合面接触熱特性のFEM解析への導入法

図2-11(a)は、実際の凹凸が存在する結合面の熱伝導の様子を示している。同図(a)を見ると、結合面における接触熱抵抗の影響で、結合面付近で急激な温度降下が起きていることがわかる。熱伝導率が異なる要素の結合部における熱伝導の場合は、それぞれの要素で、結合面付近の温度降下量が異なる。これをFEM解析へ導入するために、同図(b)の接触熱伝導モデルを考える。結合面付近にそれぞれの要素で、接触熱伝導率 λ_{e1} 、 λ_{e2} で厚さ dc_1 、 dc_2 を持つ境界要素により、接触熱抵抗を表現している。そして、これらにより求められる接触熱伝導率 λ_m と接触領域厚さ dc により決まる接触熱抵抗による非線形な温度分布を、線形的な温度分布の組み合わせとして表現することで接触熱抵抗を考慮したFEM解析が可能になる¹⁾。

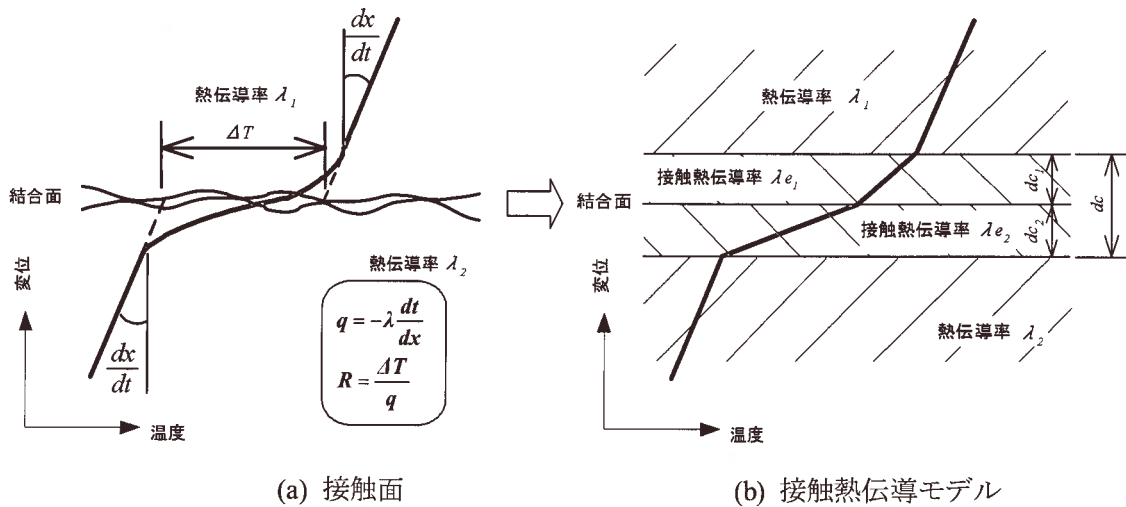


図 2-11 結合面の接触熱伝導のモデリング

(ウ) 金型構造のモデル化と FEM モデル

図 2-12 左は、金型の 3D の 1/2 モデルである。ねじやエジェクターピン等の細かい部品は省略している。境界条件の適正化と射出成形プロセスの定量条件の設定を踏まえて金型モデルの 3D 熱変形解析を行った。図 2-12 右は 3D 熱変形解析の FEM モデルの座標である。

(エ) 解析結果および考察

結合面接触熱抵抗を金型の熱変形解析に導入し、金型の離型性に及ぼす影響について検討した。その結果、以下のことが明らかになった。

- (a) 接触熱抵抗の状態は、金型の冷却能力に影響を及ぼし、離型性に影響を与える。接触熱抵抗が無い場合は、樹脂周りのキャビティ温度が低くなるため樹脂充填初期時の冷却効果が高くなる。一方、接触熱抵抗により充填後の時間的冷却効果が鈍くなる。今回は、両方の効果によって、接触熱抵抗ありとなしではあまり違いが見られなかった
- (b) 冷却水管の位置と温度も離型性に大きな影響を与える。冷却水管の位置をプラスチック成形樹脂が熱を持つ部分に近くなるように配置をすると、冷却能力が向上し、離型性が良くなる。また、冷却水管の温度を低くすると冷却能力が向上し、離型性が良くなる
- (c) この金型において、プラスチック成形樹脂の温度が高く、熱変形が大きい中央部および上部で温度や熱変位を抑えることができれば、さらに離型性が良くなる。

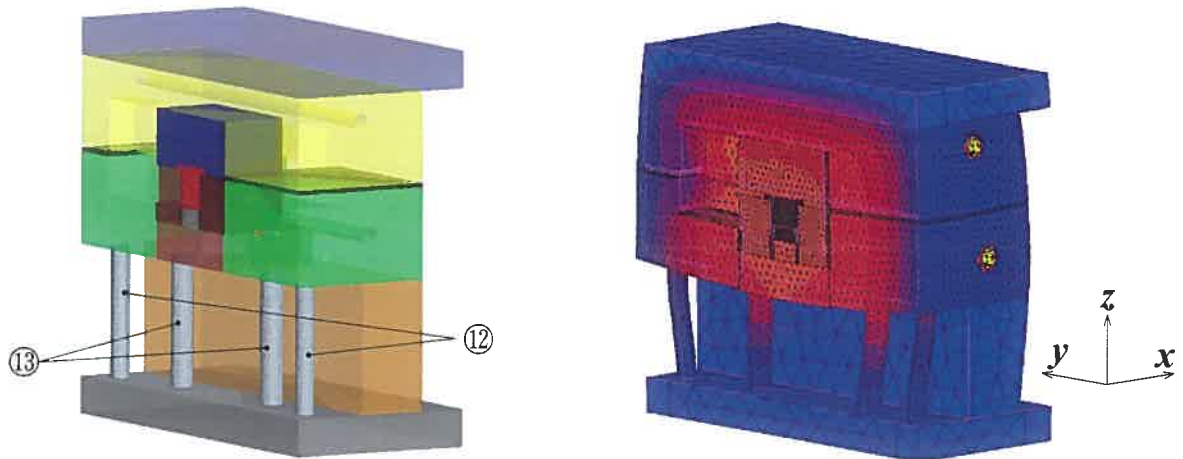


図 2-12 金型モデル（3 次元）と熱変形解析のための FEM モデル

2 - 1 - 4. 樹脂製品のデザイン高度化を実現させる 3 次元超精密微細切削技術の研究

（1）3 次元面に対する梨地シボのテクスチャマッピング

デザイン高度化対応微細切削技術の研究

梨地シボの設計は画像ベースで可能で、傾斜アルゴリズムを考案したことにより機械特性や光学特性等の物理的な特性の表面テクスチャ設計も可能となる。ここでは梨地シボを任意形状にマッピングさせる方法を研究している。テクスチャマッピングの方法は CG 分野で盛んに研究されており、様々な方法が存在する。しかし、それは画像上のテクスチャマッピングが主であり、3 次元形状を処理するものは少ない。本研究では図 2-13a) のような梨地シボの任意形状へのマッピング方法を考案した。

（2）3 次元超精密微細切削技術の研究

同図 a) で示したマッピング形状の 3 軸加工を行った。穴形状へのマッピング例の加工品と 3 D 形状上にマッピングしたシボ形状を、走査型白色干渉計を用いて測定した結果を同図 b) に示した。その結果、高さ $70\mu\text{m}$ 程度の梨地形状が加工されていることがわかる。写真の目視でも精度よく加工されていることが確認できる。

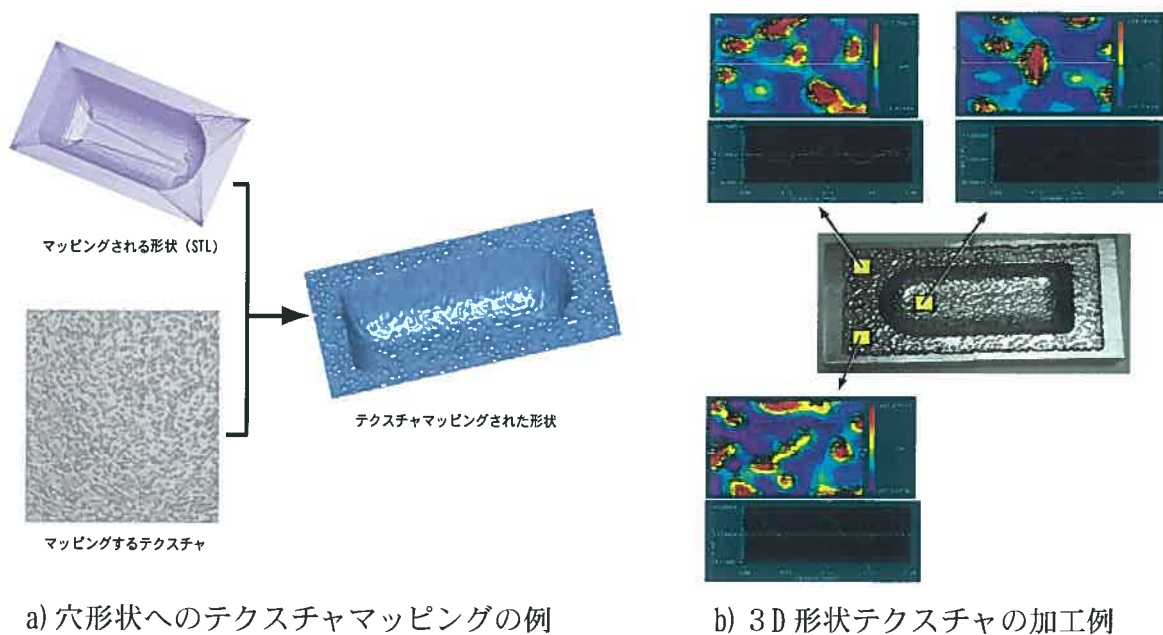


図 2-13 穴形状への 3D テクスチャマッピングと加工例

2-1-5. 複雑な樹脂成形形状品の異方性収縮の低減に効果を発揮する表面テクスチャと加工技術の研究

(1) 離型作用に効果を発揮する表面テクスチャパターンの研究

切削シボパターンの傾斜角パラメータを制御したパターン（方向を逆にして 2 種）と樹脂注入方向に対し直角方向に深さ $30\mu\text{m}$ の溝を形成した微細溝パターンの合計 3 種の微細パターンを T 型成形品の 1 面に形成し表面テクスチャと離型力の関係を実験検証した（図 2-14）。実験結果では、保圧 40MPa 条件以下の領域で表面テクスチャによる離型力低減作用が確認できた。

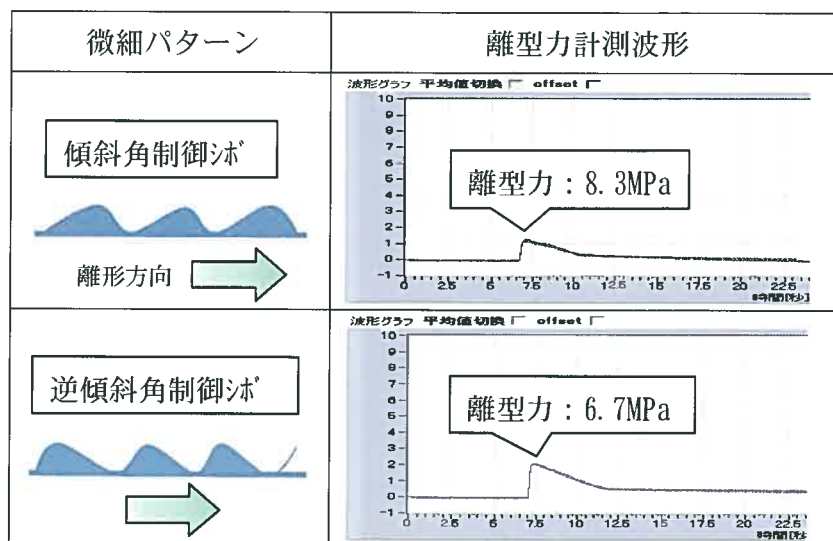


図 2-14 表面テクスチャによる離型力比較図

（２）樹脂流動性に効果を発揮する表面テクスチャパターンの研究

樹脂流動性に効果を発揮する表面テクスチャパターンの研究のため、熔融樹脂の流動状態をインプロセスで観察する可視化金型を開発した^{2,3)}。モールドベース内に可動側と固定側のコマを作製し、可動側コマには梨地シボ表面の金型が設置され、固定側コマには梨地シボ表面と向き合うように設置されたプリズムを含む可視化用のコマが設置されている。このプリズムを介して高速度カメラで観察を行うことができる。図 2-15 にモールドベースに設置された可動側及び固定側コマの写真を示す。

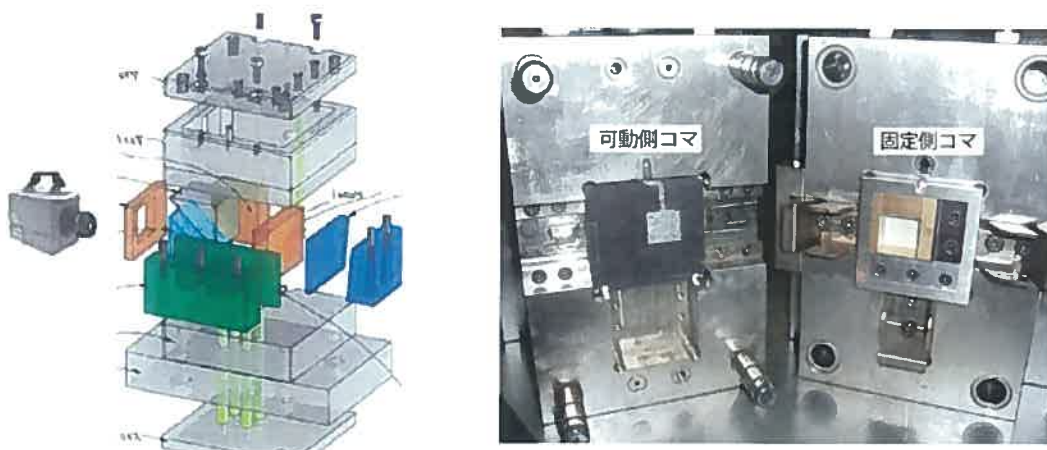


図 2-15 可視化金型構造（左）と可動側及び固定側コマの設置写真（右）

（３）金型構造と離型性または樹脂流動性支援テクスチャの最適化と実用化研究

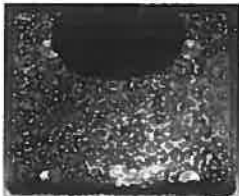
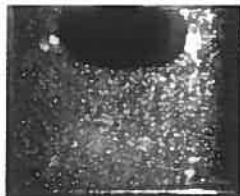
樹脂の流動挙動をインプロセス観察により効果検証するため熔融樹脂の流動挙動の可視化金型を製作して研究を行った^{2,3)}。観察用成形品の写真を図 2-16 に示した。今回の実験は切削加工で製作した標準梨地シボ（No. 1）と流動性制御シボ（No. 4）の２種類の試料を対象とし、射出速度を 80、100、150mm/s の３種類に変化させて実施した。一例として射出速度 150mm/s での樹脂の流れを撮影した連続写真を表 2-1 に示す。

全ての射出速度において標準梨地シボより流動性制御シボが完全充填まで時間がかかっていることから、山の傾斜とパターン配置が充填時間に影響していることがわかる。したがって、梨地シボパターンの様な微細形状により射出成形における樹脂流動を制御できると考えられる。



図 2-16 成形品写真

表 2-1 インプロセス溶融樹脂の流動状態比較表（射出速度 150mm/s の場合）

経過時間	Data No.1	Data No.4
5ms		
10ms		
15ms		

（４）金型設計・成形技術統合システムの構築

平成 22 年から技術開発を進めてきた個別の開発成果と新規に導入した機器類や解析システムを、金型設計・製作プロセスの短納期化の狙いで有機的に連結統合させた統合システムを構築した。即ち、計測強化のために 3 次元測定器を真円度測定器に置き換え、また CAE 強化のため構造解析と樹脂流動解析を同一金型設計に反映できるようそれぞれ独自ソフト開発を実施して金型設計システムを高度化させ、5 軸 MC 用 CAM システムと連結して統合化させた。更に、金型内樹脂圧力と射出圧力を計測し成形機制御にフィードバックさせる専用成形機を導入し、CAE シミュレーションの検証をインプロセスで可能として金型設計/金型加工/成形技術を統合化した“金型設計・成形技術統合システム”を構築した（図 2-17）。この成果として、金型設計から成形品試作までの短納期化 25%とデジカメ用 AF レンズモジュール金型の製造原価の 25%削減の目標を達成している。

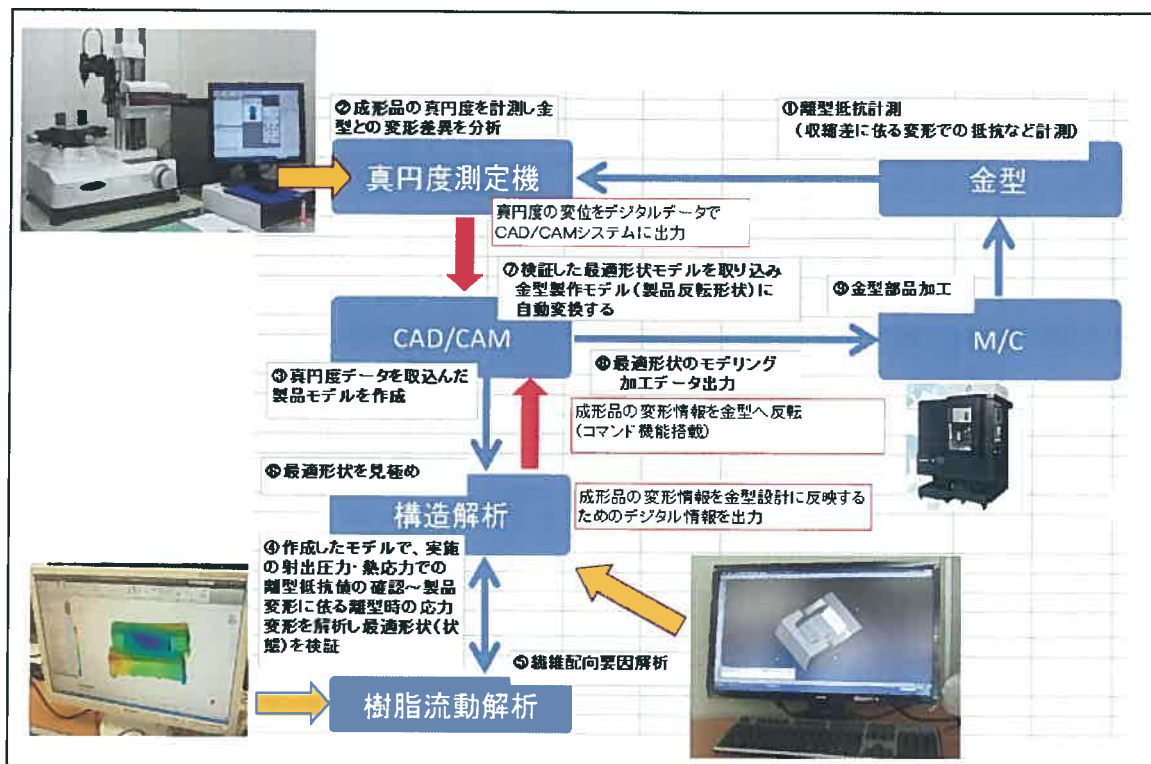


図 2-17 金型設計・成形技術統合システム

2-2. 熱変形を低減させる低投資超精密微細切削システム

図 2-18 は、加工室の熱流体解析シミュレーションのデータである。加工室右側に設置されている 2 台の空調器から加工室温度を制御している空気流の状態が理解できる。同図左側は、研究用加工装置 UVM450C を設置している場所における空気流の詳細シミュレーションデータである。このデータより、左回転の空気流が循環している解析結果である。この解析結果は実測値と良い一致が確認できたことから、3 種類の加工機周辺の空気流の制御方式を考案し、この内の対策モデル S が、研究用加工装置周辺の温度を最も安定させる解析結果が得られた。

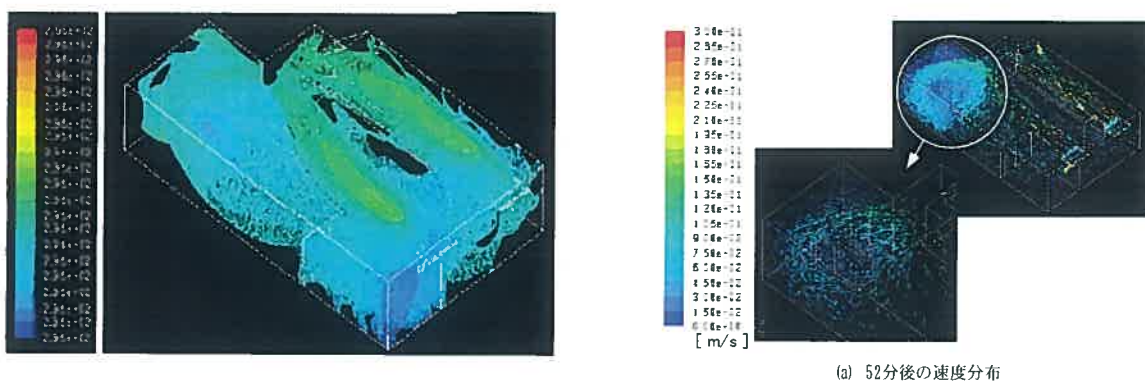


図 2-18 加工室の空気流解析シミュレーション結果

図 2-19 は 6 日間にわたり研究用加工装置の周辺温度の実測結果である。現状の 2 台の空調器の温度感知センサー位置が、研究用加工装置の周辺温度の安定制御の目的には不適切であることと空調器の温度制御性能が不十分であることを示している。モデル S タイプの空気流制御方式は、床上 2000mm 位置での温度均一化性能 (②、④) が非常に良い。5 日目の外気温度の大きな変動日を除外すれば床上 2000mm 位置での加工装置前後の室温変動差は 0.1~0.3℃程度と均一化できている。

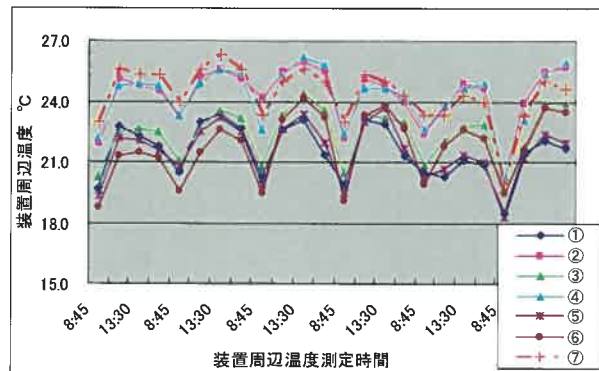


図 2-19 モデル S タイプの加工装置周辺温度変動データ

床上 500mm 位置での加工装置周辺の室温変動データ (①、③、⑤、⑥) は、床上 2000mm の温度変動データに比べて 4 個の温度センサーの差が大きい。この結果の特徴は、空調器が作動して加工室温度が高くなった稼働時間中に 4 個のデータ差が大きくなることである。このことから、外気温度の影響を抑制する対策が効果的と考えられる。今回実施した対策以外に、加工室左側のシャッター構造や窓などの断熱性の乏しい構造物側の断熱特性を向上させること等で大きな改善が期待できる。詳細の改造仕様の記載は省略した。

3. 全体総括

3-1. 研究開発成果

光学素子用樹脂成形部品に多用されるシボパターンを例として、微細パターンのデジタル設計技術と超精密微細切削技術とにより、形状制御 (例：傾斜角)・面分布配置・大面積化などを任意に設計した微細シボ (梨地) 面を切削で加工する技術を開発した。その結果、技能依存を要せず再現性あるシボ面を一連の金型部品加工工程の中で製作することが可能となった。この成果は、金型からの離型力低減や射出成形プロセスにおける熔融樹脂の流動性制御を可能とする表面テクスチャの実用化のための基盤技術となるもので、従来技術では実現できない革新的な樹脂成形金型の短納期・低コスト化を可能とするための要素技術である。さ

らに、測定器、CAD/CAM、工作機械および試作成形機を独自に開発したソフトウェアで連結し、金型設計/金型加工/成形技術を統合化した、金型設計から成形品試作までの短納期化できるシステムを構築した。即ち、真円度測定器とCAD/CAM、構造解析、樹脂流動解析とCAD/CAMを同一金型設計に反映できるように独自ソフトを開発して、5軸MC用CAMシステムと連結させ、さらに、金型内樹脂圧力と射出圧力を計測し成形機制御にフィードバックできる専用成形機を導入し、CAEシミュレーションの検証をインプロセスで可能とした“金型設計・成形技術統合システム”である。

3-2. 事業化展開

株式会社クライム・ワークスが事業化する。

当初計画のとおり「切削シボ加工のAFレンズモジュールへの展開」には、さらに幅20 μ 以下の傾斜シボ加工技術が必要であり、引き続き2年間程度の追加研究を行ない、サンプル出荷を目指す。

別途、シボ加工の活用ビジネスとして次の事業展開を計画する。

- a) シボ/梨地面を持つ光学成形部品、自動車内装成形部品の皮シボ等の外観高級化製品市場
- b) デスポーザブル医療機器の成形品市場
- c) 超精密刻印等の認証マーク金型部品市場

なお、“金型設計・成形技術統合システム”の確立により、金型の一層の短納期化が可能になり、新規ユーザーからの引き合いが増大している。来年度からの売上向上に期待が持てる。

4. 専門用語等の解説

シボ面（シボ加工）：シボ面とはすりガラス状のように表面粗さをランダムな凹凸状に仕上げられた面のことで、シボ加工は硬い微粒粉を噴射させて表面を変形させたり（ブラスト工法）、エッチングによる化学的に表面を除去する加工法などがある。

離型力（性）：樹脂成形金型から成形品が離れるときの抵抗力。

テクスチャ：語源は布地のテキスタイルから出たとされる技術用語で、見栄え（視覚）や肌ざわり（触覚）の状態を表面の形状で表現した面をテクスチャ面と呼ぶ。

ピクセル：画素のことで、コンピュータで画像を扱うときの色情報（色調や諧調）を持つ最小単位。

エジェクターピン：突出しピンとも呼ばれるもので、プラスチック成形品などを金型から抜き出すために使用されるピンのこと。

接触熱抵抗：固体どうしの接触面が完全に密着しないことにより生じる熱抵抗のこと。

プリハードン鋼：納入時に焼入れ焼戻しが終了しており、熱処理による変形変寸を避け、工期短縮を図ることができる素材。

5. 参考文献・引用文献

- 1) 平成 22 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「成形金型の短納期化とデザイン高度化を実現する低投資な超精密微細切削システムの研究」
- 2) 長谷川茂、村田泰彦、横井秀俊、“超高速射出成形における矩形薄肉キャビティ充填過程の可視化”、生産研究、 55 巻 6 号、pp. 52-55、 2003.
- 3) 横井秀俊、“射出成形現象の可視化と基礎計測技術”、精密工学会誌、66 巻 10 号、pp. 1518-1523、2000.

以上