
大阪東部地域連携による先進的な金型技術の高度化研究

平成24年度～平成26年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業
研 究 成 果 報 告 書

平成27年4月

学校法人名 近畿大学

大 学 名 近畿大学

研究組織名 総合理工学研究科

研究代表者 小坂 学

(近畿大学理工学部機械工学科)

**平成24年度～平成26年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要**

- 1 学校法人名 近畿大学 2 大学名 近畿大学
- 3 研究組織名 総合理工学研究科
- 4 プロジェクト所在地 大阪府東大阪市小若江3-4-1
- 5 研究プロジェクト名 大阪東部地域連携による先進的な金型技術の高度化研究
- 6 研究観点 地域に根差した研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
小坂 学	総合理工学研究科 メカニクス系工学専攻	教授

- 8 プロジェクト参加研究者数 13 名

- 9 該当審査区分 理工・情報 生物・医歯 人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
木口 昭二	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	鋳造型の流れ・伝熱解析	(A)型・材料 Gr 研究担当 (鋳造型の解析)
沖 幸男	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	溶射による金型の高機能化技術	(A)型・材料 Gr 研究担当 (金型の高機能化)
浅野 和典	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・准教授	金型材料の複合化による高性能化	(A)型・材料 Gr Gr長 (金型材料の高性能化)
富田 義弘	理工学部機械工学科・講師	鋳造用鋳型作製金型の耐久性向上	(A)型・材料 Gr 副 Gr長 (鋳造用金型の耐久性向上)
落合 芳博	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	金型の伝熱・破壊力学解析手法	(B)型・設計 Gr 研究担当 (金型設計解析手法の開発)
東崎 康嘉	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	金型振動付加による摩擦低減	(B)型・設計 Gr 研究担当 (金型の信頼性評価)
西藪 和明	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・准教授	プレス・射出成形での型利用技術	(B)型・設計 Gr 副 Gr長 (PL 補佐) (プレス射出成形への型利用技術)
梶原 伸治	理工学部機械工学科・講師	金型の熱衝撃の CAE 解析	(B)型・設計 Gr 研究担当 (金型設計 CAE 利用技術)
橋本 知久	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・講師	射出成形金型設計のための CAE 開発	(B)型・設計 Gr Gr長 (射出成形解析ソフトの開発)
五百井 清	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	金型磨き技能の特徴抽出・移植	(C)型・製造 Gr 研究担当 (金型磨き技能の伝承)
小坂 学	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	金型の先進制御	研究プロジェクトリーダー(PL) (C)型・製造 Gr 研究担当(金型制御)
原田 孝	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・教授	金型磨きの自動化	(C)型・製造 Gr Gr長 (金型磨きの自動化)
大坪 義一	総合理工学研究科メカニクス系工学専攻・准教授	金型磨き面性状の自動計測	(C)型・製造 Gr 副 Gr長 (金型の自動計測)

(共同研究機 関等)			

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

11 研究の概要(※ 項目全体を10枚以内で作成)

(1) 研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

近年、製造拠点のグローバル化とアジア諸国の台頭により、金型製造業はさらなる短納期化・複雑化・高精度化・高機能化・低コスト化が求められている。大阪は日本の金型産業の最大集積地であり、特に近畿大学は大阪東部の金型産業の集積地に位置し、近隣が金属プレスやプラスチック射出成形の金型製造企業に取り囲まれているとともに、地域に根差した実学を重んじる学風が特徴である。

本研究は、地域の金型製造業や川下企業の要請を元に、暗黙知の金型技術をデジタル化して地域の財産として継承し、これを研究者の専門分野と関連付け、金型の材料・設計・製造の先進的な研究と教育により地域で活躍できる金型人材を育て、大阪東部地域を金型産業の拠点として維持できるよう、地域と大学が共に発展する環境を提供することを目的とする。

1年目は、地域の金属プレス・プラスチック射出成形・鋳造の金型製造企業や川下企業のニーズを調査し、後述の「専門研究グループ」ごとに研究課題を精査する。それらを金型用途に適する新規材料の作製と組織解析、射出成形金型設計用CAEソフトの開発、金型磨きロボットおよび面性状計測システムの構想設計に反映させる。

2年目は、金型材料の製造条件、金型設計用CAEソフト開発、金型の摩擦低減、金型磨きロボット面性状計測システムの試作について研究する。

3年目は、1年目と2年目に開発した材料で金型を試作し、金型磨きロボットおよび面性状計測システムを連動させた実証実験を行い、完成した金型を用いて射出成形実験を行う。開発したCAEによる計算結果と比較し、試作機やCAEソフトの改良を行い、全研究課題を達成する。

研究成果は学術論文や学会発表に加え、『大阪東部地域金型デザインセンター(仮称)』の設置に向けた取り組みに反映させ、「地域の金型人材として活躍する」ための教育カリキュラムを構築し、これらを成果発表会で報告する。

3つの「専門研究グループ」の研究テーマおよび研究計画は、構想調書に示した通りグループ毎に3つテーマを初期課題とし、下記のように設定した。

(A)型・材料グループ

[研究テーマ]

(A1)溶射による金型の高機能化技術

(A2)金型材料の複合化による高性能化技術

(A3)鋳造用鋳型作製金型の耐久性向上化技術

[計画の概要]

(平成 24 年度)

大阪東部地域の金型の製造企業および川下企業が抱える課題を抽出し、それを解決しうる特性を持つ金型材料を作製する。特に、鋳造によるニアネットシェイプ成形、表面被覆、異種材料の複合化などのプロセスを単独あるいは併用して行う。また、得られた材料の組織解析を行い、その組織形成のメカニズムを明らかにする。

(平成 25 年度)

前年度の成果を受け、金型材料の伝熱特性、摩擦摩耗特性および成形加工性を評価する。また、金型材料として適正な特性を得るための材料の製造条件を明らかにする。

(平成 26 年度)

前年度までに開発した新材料で金型を試作し、金型材料としての特性を調査する。

(B)型・設計グループ

[研究テーマ]

(B1)射出成形金型設計のためのCAE技術

(B2)CFRTP のプレス・射出成形金型利用技術

(B3)金型振動付加による摩擦低減技術

[計画の概要]

(平成 24 年度)

大阪東部地域でのプラスチック射出成形CAEの利用を促進するため、複雑な成形品形状のメッシュ生成の難しさを軽減し、流体の運動と固体の熱伝導現象を一括して解析できるプログラムを開発する。また、射出成形金型利用技術研究のための実験環境を整備する。加えて、摩擦低減技術に関する基礎的な検討を行う。

(平成 25 年度)

前年に引き続き解析プログラム開発を行う。また、金属プレス・プラスチック射出成形・鋳物等の金型および成形品のデジタル画像計測を行い、その計測法の利用技術を確立する。加えて、金型設計において型と成形対象物の摩擦および金型接触面の摩擦や損傷を減らすため、表面テクスチャリングの最適摩擦条件を調査する。また、この結果を受け金型振動付加による摩擦低減の適否について検討を行う。

(平成 26 年度)

成形品の品質(収縮, そり変形, 面粗さ, 転写性など)の測定データとCAE解析結果とを比較検討し、計算精度の向上を図る。また、CFRTPシートを加熱プレス成形し、そのプレス成形品をインサート射出成形し、CFRTPの変形挙動に適合した金型の設計指針をまとめる。さらに、前年の結果を受け、金型の離形性向上を目指した摩擦低減技術の開発指針を策定する。

(C)型・製造グループ

[研究テーマ]

(C1)パラレルメカニズムを用いた金型磨きの自動化技術

(C2)金型磨き技能の特徴抽出・移植技術

(C3)金型磨き面性状の自動計測技術

[計画の概要]

(平成 24 年度)

金型磨き作業を観察・分析し、金型磨きロボットおよび面性状計測システムの構想設計を完成させる。先行開発しているパラレルメカニズムプロト機を熟練作業者が手添えできるよう改良し、磨き作業を行わせて力学的情報を抽出し、磨き時の速度、力、動作範囲などを分析して金型磨きロボットの詳細設計仕様に反映させる。

(平成 25 年度)

金型磨きロボットおよび面性状計測システムの試作調整と、制御用ソフトウェアの開発を行う。磨き作業スキルの抽出およびロボットへの移植に関する基本システムを開発し、金型磨きロボットと面性状計測システム単体の動作を検証する。動作検証結果から、試作機の課題を整理し、装置の改良とソフトウェアのレベルアップを行う。

(平成 26 年度)

金型磨きロボットおよび面性状計測システムを連動させて磨き実証試験を実施する。研削加工解析を金型の磨きに発展させて、動作解析と研削理論解析を併用し、磨き作業スキルの抽出およびロボットへの移植を高度化する。

以上が構想調書に記載した本プロジェクトの意義及び事前計画の概要である。本プロジェクトでは、上記に加え、各々の研究テーマの成果ならびに研究過程で得られた知見を有機的に連携させ、地域企業が有する課題により即した成果を挙げるため、さらに進んだテーマ横断型の取り組みを下記の通り行うこととした。

(D)テーマ横断的取り組みによる新たな産学連携

[研究目的と意義]

構想調書および上記に述べた通り、本プロジェクトは(a)材料面からの金型の改質、(b)CAE援用による金型設計プロセスの改善、(c)計測制御技術を利用した金型製造プロセスの改善を大テーマとし、金型企業が抱える問題の解決を通じて地域に根ざした研究を実施し、研究拠点を確立することを目指した。

本プロジェクトの特色として、多岐に亘る専門家が、金型という複合的な因子を有する対象物について、地域企業の抱える具体的な課題に対応すべく、より先進的な産学的取り組みを醸成することが挙げられる。

そこで、構想調書に記載した計画からさらに取り組みを進めた第4番目のテーマとして、構想調書にある上記(A)～(C)テーマの担当者全てが受け皿となり、地域貢献セミナー等の活動を通じて金型企業より抽出された課題に複合的な視点から取り組む「m:n マッチング」(m社の企業群とn人の大学側専門家群による、複数対複数の連携による産学連携)の枠組みを新たに創生し、課題解決を試みた。

[計画の概要]

本プロジェクト初年度の地域セミナー等を通じた産業界からの外部評価によって提起されたニーズのうち、特に大学を基盤とする研究組織による取り組みがふさわしいテーマを選定する。その後、企業側とプロジェクトの複数の専門家が打ち合わせを重ね、企業の得意技術と大学の専門分野群を融合した共同研究形式で課題解決を試みることにした。本取り組みはプロジェクト開始後に新たに設けた枠組みであるが、実際に遂行した課題の年次計画は次の通りである。

(平成 24 年度)

地域セミナー等を通じた現実的課題の抽出とプロジェクト側担当研究者の割り当ておよび研究遂行の計画調整を行う。具体的には、後述する金型企業の設計プロセスにおけるCAE利用に伴う問題点の解決を試みることにした。

(平成 25 年度)

企業による詳細な事例紹介、複数の研究者による面談を通じ、課題の絞り込みを行う。具体的には、課題とする問題の原因について予測を行い、事前検証を行うと共に、企業側による試験用金型の設計および研究者側のCAE結果検証について情報交換を行う。

(平成 26 年度)

上記金型設計案ならびにCAE検証結果に基づき、試験用金型の最終設計を確定し、企業側で高精度金型を作製頂くと共に、大学側で各種物理モデルを考慮したシミュレーションを実施する。さらに、成形中の成形物温度や成形完了後の成形物のひずみ分布等の測定結果とシミュレーション結果を多角的に比較することで、企業側が抱える金型設計経験とCAEの相違の原因について検討を行い、課題解決を行う。

(2) 研究組織

本プロジェクトは、近畿大学大学院 総合理工学研究科 メカニクス系工学専攻担当教員を中心に、大学院を担当していない若手教員も含めた研究体制で臨んだ。さらに、プロジェクト開始年度に本専攻に新規就任した和田義孝、坂田誠一郎を協力者として迎え入れ、メンバーと同等以上の役割を分担した。この2名の研究成果には「(協力者)」と明記して「13 研究発表の状況」に含めている。

メカニクス系工学専攻は、本プロジェクトの基盤技術である機械設計・解析、ロボティクス・メカトロニクス、金属材料を専門とする研究者を有し、これまでも私立大学ならではの「実学」を重視した研究に取り組んできた。

本プロジェクトでは、これら個々の研究成果や研究シーズを『金型』に集約し、各研究者のシナジー効果により新たな研究成果を創出するため、通称『型プロ』と名付けたプロジェクトチーム(PT)内に、研究者の専門性に基づき3つの「専門研究グループ」((A)型・材料グループ、(B)型・設計グループ、(C)型・製造グループ)を設置した。

プロジェクトリーダーは研究代表者・メカニクス系工学専攻長の小坂とし、上記3つの専門研究グループの研究統括、決裁責任およびRAや研究支援者の選定採用を役割とした。また、上記3つの専門研究グループの代表として、(A)型・材料グループリーダーは浅野、(B)型・設計グループリーダーは橋本、(C)型・製造グループリーダーは原田とし、各研究グループ内の研究進捗管理、成果統括ならびに予算等グループ内調整を役割とした。

研究組織は他にプロジェクトリーダー補佐を役割とするプロジェクトサブリーダー、予算管理を行う予算担当、地域連携窓口並びに統括を行う地域担当、研究成果統括を行う成果担当、設置機器および利用状況の管理を行う工場担当および外部評価担当の役割を設けた。各グループの構成員とその研究担当内容、プロジェクト内の役割担当は下記の通りである。

(A)型・材料グループ

浅野(材料複合化による金型材料の高性能化, **グループリーダー**)・木口(鋳造型の流れ・伝熱解析)・沖(溶射による金型高機能化)・富田(鋳造用金型の耐久性向上)

(B)型・設計グループ

橋本(射出成形金型設計用 CAE 開発, **グループリーダー**, **予算担当**)・落合(金型の伝熱・弾塑性解析)・東崎(金型の摩擦低減, **外部評価担当**)・西藪(プレス・射出成形での型利用技術, **プロジェクトサブリーダー**)・梶原(衝突 CAE 解析)・和田(協力者)(成形物の弾塑性解析, **成果担当**)・坂田(協力者)(金型の伝熱および成形品の熱弾性解析, **地域担当**)

(C)型・製造グループ

原田(金型磨きの自動化, **グループリーダー**)・五百井(金型磨き技能の特徴抽出・移植)・小坂学(金型の先進制御, **プロジェクトリーダー**)・大坪(金型自動計測, **工場担当**)

なお、(A)～(C)の研究グループ間の情報交換は1～2ヶ月に一度開催したプロジェクト会議で行い、運用上の連携を行った。また、前述の通り、各専門研究グループ(A)～(C)の研究成果およびプロジェクト遂行過程で得られた知見の有機的連携を実現するために、地域企業のニーズに応じたテーマを立ち上げ取り組む次のグループを新たに設けた。

(D)テーマ横断型研究グループ

和田(協力者)(成形物のひずみ計測と強度解析)・坂田(協力者)(射出成形および成形物の品質解析)・浅野(所望の特性を有する金型材料の開発)・橋本(射出成形における流動解析)・大坪(金型成形時の計測)

加えて、RAとして大学院生(博士後期課程)1名、研究支援者として地域の金型製造業の職人2名とアルバイト2名を雇用し、研究計画を円滑に達成できる研究支援体制を講じた。

(3) 研究施設・設備等

本研究で使用した研究施設およびその面積は下記の通りである。

施設番号	施設名称	使用面積	設備内容
B1	38号館 機械工学科実験室, 共同利用センター	1,333 m ²	既存施設
B2	31号館 機械工作実習工場(1)(2) 30号館 機械工作実習工場(3)	485 m ²	既存施設
3	34号館 溶解実験室, 材料加工実験室, 材料実験室	122 m ²	既存施設

本補助金で導入した主な研究設備およびその利用時間数は下記の通りである。

設備番号	整備年度	研設備名	平成 24 年度	平成 25 年度	平成 26 年度 (見込み)
F1	平成 24 年度	マシニングセンタ	98 hr.	122 hr.	350 hr.
F2	平成 24 年度	デジタル画像計測装置	452 hr.	718 hr.	737 hr.
F3	平成 25 年度	レーザー顕微鏡		55 hr.	06 hr.
F4	平成 25 年度	ワイヤ放電加工機		226 hr.	398 hr.
F5	平成 25 年度	射出成形機		247 hr.	483 hr.

(4) 研究成果の概要 ※下記、13及び14に対応する成果には下線及び*を付すこと。

<当初の目標およびその達成内容>

構想調書に記載した本プロジェクトの目標は、下記の通り達成されている。

①地域の金型製造業や川下企業の要請の把握

初年度に、地域の金属プレス・プラスチック射出成形・鋳造の金型製造企業や川下企業を対象に計4回セミナー^{*190,*194,*195,*196}を開催し、アンケートによりニーズを調査した。これにより、本プロジェクトの産業界における評価や実際の課題が再確認でき、新たなテーマ横断型取り組みにつながった。

②暗黙知の金型技術のデジタル化

型・製造グループにて、暗黙知である金型磨き技能のデジタル化を行った。磨き速度と力との関係を技能と定義し、新たに開発した速度・力センサを搭載したスマートツールを用いて技能のデジタル化を実現した^{*137}。磨き熟練度の判別方法を提案し、技能データの抽出を行った^{*49,*86,*90,*127}。これにより、磨き技術継承や習熟度評価などに利用可能な新たな指標が提案できた。

③地域金型製造業の要請と研究者の専門分野と関連付け

本プロジェクトメンバー15名が、専門分野に基づき(A)型・材料グループ、(B)型・設計グループ、(C)型・製造グループに分かれ、各テーマの研究を担当した。これにより、専門分野毎に金型産業におけるいくつかの課題について改善案を示した。また、地域からのニーズに基づく(D)テーマ横断型の課題を設定し、プロジェクト全体を受け皿として適切な専門分野の複数の研究者が対応を行う新たなテーマ横断型取り組みにつながった。

④金型産業の拠点として維持できる環境の提供

通常の地域セミナーに加え、さらに進んだ取り組みとして、東大阪市役所経済部および東大阪市産業創造勤労者支援機構の協力を得て、地域の金型関連企業の方々が勤務後に集い、金型に関連する諸問題や最新技術等を語り合う場として、平成25年6月～平成26年3月まで東大阪市立産業技術支援センターで金型サロン「型ろう会」開催できた^{*187}。平成26年度も東大阪市立産業技術支援センター主催で継続して「型ろう会」を行い、大阪府商工労働部の Mobio-Café にて本内容を広く公開する予定である。

また、本プロジェクトで導入した研究設備を活用するため、地域の金型職人2名に指導頂き、機械工作実習工場の一部を「金型寺子屋」とし、地域企業や研究者を対象に5回の見学会を開催した^{*181,*183,*186,*191,*192}。さらに、研究シーズ発表会や中間報告会を開催し、展示会への出展、講演を行った^{*182,*185,*188,*189,*193}。このような取り組みを通じ、企業との共同研究^{*204,*225,*226,*228-*236}、企業からの技術相談^{*203,*206-*218,*222,*223,*237-*240}、企業からの依頼研究^{*219,*220}、受託研究・補助事業^{*201,*227}を行った。

以上のように、設備、人材、交流の観点で金型産業の拠点とできる環境が新たに提供できた。

⑤学生金型グランプリの取組を通しての研究・教育基盤の形成

平成24年度は、学生金型グランプリ出場の準備として、技術支援者2名とアルバイト1名が学生に金型の設計・製造の基本的な指導を行い、第5回学生金型グランプリの課題を試行的に実施した。その学生の取組んだ成果を日本機械学会関西支部「MECHAVOCATION2014 学生と企業の交流会」の「第一部大学・高専研究発表の部」で発表した結果、優秀ポスター賞を受賞した^{*88}。

平成25年度は、研究設備の導入が完了し、第6回学生金型グランプリの課題に取り組んだ。

平成26年度には、第6回学生金型グランプリに関西の大学として初出場を果たした^{*82}。その結果は多数の来場者や審査員から好評であり、この実績を踏まえ、平成27年度の第7回学生金型グランプリの出場準備を開始した。

上記のように、学生金型グランプリへの出場を通じ、プラスチック射出成形の製品設計、金型設計・製造技術、成形品の品質・性能評価など一連のものづくりを一貫通貫で実施できる教育環境を新たに整備できた。また、金型教育研究に必要な設備、技術および人材が本プロジェクト内で整備され、本プロジェクトの目標に向けた研究・教育が推進できていることを実証した。

⑥金型の材料・設計・製造の先進的な研究と教育

上記の⑤に加え、さらに先進的な教育研究的取り組みとして、各グループが設定したテーマの研究を4年生の卒業研究や大学院の修士研究で実施、2年生の機械工学実験において「型彫り放電

加工実験」テーマを新設し^{*224}、基礎ゼミ1で「金型によるモノづくり」と題したテーマを新設し実施した。また、大学院メカニクス系工学専攻に、金型教育を行う新しい科目を開講することを決定した。さらに、金型人材を輩出する教育カリキュラムのためのテキストを執筆した^{*44~*47}。

以上④～⑥の成果を元に、さらに発展させ、金型産業からのより高度な要望に対応しつつ研究成果を地域に還元することを目標とし、本プロジェクトで新たに提案実施した複数企業と複数研究者の産学連携(m:n マッチング)の取り組みを進めるために、本学の実習工場と金型プロジェクトの組織を融合させ進化させた『金型デザインセンター(仮称)』の設置準備へとつながっている。

また、金型に興味を持った学生が大阪府内の自動車内外装部品製造企業に就職し、金型の製造の実務に携わっているなど、地域の金型関連製造業に有能な人材を輩出するため教育体制が構築でき、地域連携研究、教育体制の整備の両面で、本プロジェクトにより得られた成果は意義があると考えられる。

上記の①～⑥の達成内容及びそれによる意義に加え、それぞれの「専門研究グループ」において、下記の意義ある研究成果が得られた。

(A)型・材料グループ

金型関連企業が抱える材料面の課題や要望を抽出した結果(金型の長寿命化と生産性向上)に鑑み、長寿命化については特に溶射や異種材料の複合化プロセスによる金型材料の高機能化・高性能化(耐摩耗性や熱伝導性)、生産性向上に対しては冷却パイプの鑄ぐるみによる複雑形状金型の低コスト製造技術と鑄造用鑄型の多数個取り方案の確立に取り組み、下記の通り課題を達成できた。

(A1)溶射による金型の高機能化技術

高温での強度、耐摩耗性、耐食性に優れる Ni 基超々合金の溶射による表面被覆技術を確立し^{*66,*101}、特許出願を行った^{*205}。

(A2)金型材料の複合化による高性能化技術

アルミニウムとセラミックス繊維の複合材料を作製し、その組織解析や特性調査を行った。複合化によって アルミニウムの軽量性や耐酸化性といったアルミニウム本来が持つ特長を保持しながら、これと同等の熱伝導率、アルミニウムの低熱膨張化と高剛性化を達成する^{*102,*103,*136}とともに、耐摩耗性が向上した。低熱膨張化は金型の寸法精密化、高硬度化・高剛性化と耐摩耗性向上は金型の寿命向上に、また高い熱伝導率は金型の熱交換能力の向上(生産性の向上)につながると考える。

また、切削試験を行い、セラミックス繊維の複合化を行ってもその被削性を損なわない諸条件を明らかにした^{*6,*55,*64,*77,*89,*97,*128,*148,*154,*175}。これらの結果から、本複合材料は金型材料に求められる主な特性が従来のアルミニウム合金に比べて優れていることを明らかにした。

加えて、企業からの要望により、アルミニウム合金溶湯の低圧鑄造用金型の耐久性向上に関する研究を行い、溶射や複合化によってアルミニウム合金に対する耐溶損性が向上することを明らかにし、新たな低圧鑄造用金型材料開発の指針を得ることができた^{*204}。

(A3)鑄造用鑄型作製金型の耐久性向上化技術

鑄鉄によるステンレスパイプの鑄ぐるみを行うための鑄造条件について検討を行った。鑄ぐるみ法を用いて金型の中に冷却用パイプを複合化することにより、従来法よりも少工程・低コストが実現し、従来法では困難な蛇行状など複雑形状のパイプを設ける指針を得た^{*98,*227}。

自動車部品など鑄造品を想定した鑄造方案による鑄造実験とシミュレーションを行い、製品歩留まり向上と鑄造欠陥減少のための指針を得た。従来多用されてきた1個取り方案に比べて複数個の鑄造品を1回の鑄造で得られる 多数個取り方案を最適化でき、鑄造品の金型鑄造の生産性向上に応用が可能であり、技術シーズとして公開可能である^{*225}。

以上の通り、鑄ぐるみにより寿命(耐久性)向上のための冷却用パイプの低コスト設置が可能になった。また多数個取り方案の最適化により湯流れの不均質性を軽減し、寿命向上の指針を得た。

(B)型・設計グループ

地元企業の現状、技術ニーズの調査により研究課題を抽出し、企業と共同で下記の研究開発を実施した。また、金型設計のための CAE、射出成形および金型利用技術の高度化に関する新規技術を開発するとともに、離型性向上のための摩擦特性について調査を行った。

(B1)金型設計のための CAE 技術開発

汎用ソフトに対するユーザニーズとして、計算用データ作成の低減化およびそり変形の予測精度向上があることを踏まえ、さらに高機能化・付加価値などの拡張性を考慮し、最新の計算手法を導入した独自のソフトを開発した^{*11,*15,*16}。特に、メッシュ生成の難しさを軽減し、高精度で効率よく流体の運動と固体の熱伝導現象を一括して解析できるプログラムを開発した^{*104,*155,*173}。本プログラムは既存の CPU を用いたプログラムと比較し 10 倍程度の解析速度を実現できており、設計工程の短縮に非常に意義がある。

(B2)CFRTP のプレス・射出成形金型利用技術

従来困難であったカーボンコンポジットの量産・再生を目指した型製造技術として、熱可塑性カーボンコンポジットのプレス・射出同時成形用金型の設計と周辺技術を開発した。熱可塑性 CFRP を加熱し、金型内にインサートして型締めにより所望の形状へ成形後、再生材の短繊維 CFRP を射出成形するための 1)インサート成形用加熱搬送装置^{*236}および 2)V 型成形品のインサート金型の設計・試作^{*233,*234}、3)再生材の製造方法^{*235}、4)熱可塑性 CFRP の電気式融着技術^{*7,*8,*58,*59,*75,*76,*84,*92,*106,*109,*111,*112,*123,*124,*132,*138,*141,*144,*158,*166}について研究した。その結果、繊維強化熱可塑性樹脂部材の融着方法の特許を出願した^{*202}。加えて、CFRP およびその金型製造技術に関連する共同研究^{*229-*236}や技術相談^{*206-*218,*237-*240}、依頼研究や受託研究^{*219-221}を通じて、地域企業の要望に応じた。さらに、機械工業振興補助事業の研究補助金に採択された^{*201}。上記の製造技術による軽量で耐衝撃性の高い部材開発を目的に、アルミニウムと熱可塑性 CFRP をハイブリッド化した V 型成形品の金型を設計・製作し、その耐衝撃性能を評価した^{*87,*142}。これらの研究成果は従来の成果に比べて新規性が高く、カーボンコンポジットの量産・再生のための型製造技術としての工業的有用性は高く、そのいくつかは実用化に向けた取り組みをすでに実施している。

一方、金型の駆動用途として、従来の歯車装置と比較してコンパクト化できるハイブリッド減速機を提案・試作し、その成立性を実験により確認した^{*17,*18,*78,*99,*100}。

(B3)金型振動付加による摩擦低減技術

振動付加の適用が可能な金型に関する調査を大阪東部地域で実施した。その中で金型と成形品の離型抵抗が、複数個の金型(ピン)で製造される複雑形状の製品が薄肉化した場合に特に問題が大きくなることを産学連携の調査^{*228}で見出し、この解決策を見出すことが国際競争力確保に繋がることがわかった。その離型抵抗を低減する方法を把握するため、2個のピンを有する試験金型を製作し、金型の表面処理(表面粗さやコーティング)や樹脂の違いによる薄肉製品の離型力の基礎的關係を、実機を用いた実際の成形物の特殊計測により初めて定量化し、今まで不明であった離型力の時間的な変化なども明らかにした。その結果、適切な表面粗さがある方が好ましく、またコーティングの違いによっても離型抵抗に差異を生じる場合があることを確認した。外部評価委員会^{*184}で、この課題を報告した結果、外部評価委員から金型磨きとも関係することから興味深くかつ重要な研究テーマであると高い評価が得られた。

(C)型・製造グループ

型・製造グループでは、暗黙知である金型磨き技能のデジタル化とロボットを用いた自動化に取り組んだ。(C1)~(C3)の構想調書に挙げた個々の要素技術の開発はほぼ完了しており、さらにこれらを融合した磨き作業の完全自動化に発展させている。

(C1)パラレルメカニズムを用いた金型磨きの自動化技術

金型磨きは、棒状の砥石を 20~30N の力でワークに押し当てて、ワーク面上を約 10m/min の速度にて数百回往復送り運動させる。高度な熟練を要する重負荷作業であり、現在の多関節型ロボットやパラレルメカニズムでは実現できない。そこで、金型磨きに特化して高出力、高速(60m/min)、高出力

(40N), 高精度位置・力制御を可能とする力制御型パラレルメカニズムを新たに設計開発した^{*115}。低出力ではあるがコギングトルクが極めて小さいスロットレス DD モータを採用し, 出力不足を補う冗長駆動方式, 微妙な力制御を実現する低摺動抵抗メカニズムなどが特徴である^{*70}。磨き速度と力との関係をマス-ダンパーバネ(機械的インピーダンス)にてモデル化し, 機械的インピーダンスを任意に設定するインピーダンス制御を実装した。これらの構想調書に記載した内容をさらに進化させ, (C2)テーマにて抽出した熟練作業者の機械的インピーダンスをロボットにて再現し, 熟練作業者と同等レベルの磨き作業の実現へと発展させている。

また, 実用化のために, 傾斜面の磨きを行うために 6 自由度パラレルメカニズムと回転テーブルを用いたワーク位置決め装置と磨き力を計測する力センサとを統合した金型磨きシステムを開発した。並行して, 冗長駆動パラレルメカニズムの設計と制御^{*12,*13,*56,*71,*72,*80,*81,*83,*114,*129,*133,*177}, 力計測^{*28,*178}, 機械システムの安定化^{*29,*30,*57,*116-119,*145-147}など周辺技術の研究を実施した。

(C2)金型磨き技能の特徴抽出・移植技術

3軸力センサと3D モーションセンサを用いて, 磨き作業時の力と速度を同時に計測する専用ツール(スマートセンサ)を初めて開発した^{*137}。砥石と共に移動するセンサシステムから, 磨き面に直接関与するツール先端の速度・力情報を計測するアルゴリズムを開発して, 高精度な計測を実現した。スマートセンサは熟練者の技能を抽出するだけでなく, 熟練者と初心者の磨き技能の比較や習熟度の評価も行える事を示し^{*49,*86,*90,*127}, 磨き技能教育用ツールとしても実用化可能である。熟練者の磨き作業を磨き速度と力との関係としてマス-ダンパーバネ(機械的インピーダンス)にてモデル化した。さらに, 取得データを利用してその機械的インピーダンスを推定することにより, 磨き技能指標を抽出した。これらの構想調書に記載した内容に加え, 上述の通りこの磨き技能指標を(C1)金型磨きロボットにて再現することで, 熟練者と同じ力加減でロボットが金型磨きを行う磨き作業完全自動化へと取り組みを発展させている。また, 機械的インピーダンスに関する応用研究として, 機械システムの振動・衝撃のモデリングと制御に関する研究を実施した^{*27,*48,*53,*65,*126}。

(C3)金型磨き面性状の自動計測技術

熟練者は磨き面の目視計測にて磨き終了を判断している。これに対し, 画像計測を用いた作業中の磨き面計測システムの開発に取り組んだ。磨き作業中の(鏡面では無い)面性状を計測するために, 画像計測を用いた研削瑕疵計測を実施した^{*113}。

(D)各テーマの横断的取り組み(地域に根ざした研究例)

計画の概要欄に記載した通り, 本プロジェクトの特色として, 金型という複合的な因子を有する対象物について, 多岐に亘る専門家が協力して地域企業の抱える課題に具体的に対応することにより, 地域に根ざした研究課題を遂行し, より先進的な産学的取り組みを醸成することが挙げられる。そこで, 第4番目の研究テーマとして, 構想調書にある全ての研究者が受け皿となり, 地域貢献セミナー等を通じて金型企業より抽出された課題に対し, 複合的な視点から取り組む「m:n マッチング」の枠組みを新たに創生し, 解決を試みた。

具体的には, 地域企業より提起されたニーズ群のうち, 成形品の引け予測がCAEベースの発注者側の設計と金型製造業側の経験とで異なる原因の究明と改善の課題に注目した。企業へのヒアリングに基づき, 発注元企業の設計案作成プロセスに注目し, CAE, 計測および固体・流体力学の複数の研究者で対応した。射出成形で重要な熱流体—固体マルチフィジックス解析の固体部分について, 種々物理モデルを考慮できる汎用CAEを導入し, CAE設計および成形物評価をプロジェクトメンバーが担当した。一方高度な技術を要する精密金型の作製および成形は企業側が担当した。現在(平成26年9月時点)試験用金型作製中であり, 年内の成形およびCAEとの比較, 年度内の課題完了に向けて順調に進行している。

本プロジェクトは対象産業分野の抱える複合的な課題を一大学内に設けられたプロジェクトに属する複数の専門家が対応し, 解決に取り組むことが特徴であり, それを実際に遂行できている点が大きな成果である。このような取り組みはこれまで見当たらず, 細分化した大学研究者のテーマと複雑高度化する産業界の課題や技術とを結びつける取り組みとして, 今後の新たな産学連携の一つのあり方を提案するという点で非常に意義があると考えられる。

尚、本テーマは金型成形品のCAEによる品質評価に関する研究であることから、本テーマの推進に関係し、射出成形品の品質予測のための CAEによる樹脂製品の品質評価法 *33-39,41,*67,94,95,*122,*134,*149,*150,*164,*176,*180、均質等方性材料の破壊強度評価ならびに破壊挙動解析法 *1,*2,*14,*31,*32,*40,*68,*74,*96,*121,*131,*134,*152,*153,*163,*174 および成形品に生じる残留ひずみの全視野計測法 *73,*130,*151,*170,*179

について成果をあげた。

また、本テーマはプロジェクト開始後に新たに設定したテーマであり、実質的に2年目からの取り組みであるため、業績としての成果は上記の個別テーマを先行して行ったものにとどまっているが、14項に詳述する通り取り組みは順調に進んでいる。

<優れた成果があがった点>

上記の通り、本プロジェクトを実施した結果、構想調書に記載した研究課題はすべて達成された。特に優れた成果が上がった点は次の通りである。

まず、大阪東部地域との 計4回のセミナー *190,*194-196、見学会 *181,*183,*186,*191,*192、成果報告会 *182,*185,*188,*189,*193、型ろう会 *187など様々な連携を通じて地域の金型関連企業のニーズを把握し、金型の設計・製造が行える設備と人材を整え、学生金型グランプリに出場し、マスメディアに数多く取り上げられた。*別紙さらに、より進んだ産学連携、地域に根ざした研究の推進のために金型デザインセンター(仮称)設置に向けた準備に着手し、プロジェクト完了直後の平成27年4月発足に向け着実に手続きを進めている。

加えて、3つの専門グループのテーマ研究を通じて得られた特に優れた成果を下記に列挙する。

- ① 金型材料の高機能化・高性能化を達成しただけでなく、従来見落とされがちであった金型素材の材質改善の観点から射出成形の生産性向上を考える端緒を開くことができた。
- ② 射出成形に係わる熱流動現象の解析に適した計算手法を検討し、高精度で効率よく計算できる拡張性の高い数値シミュレーションプログラムを開発した。
- ③ 実用化可能な性能を持つ金型磨きロボットを開発するとともに、磨き技能抽出用に開発したスマートツールから得たデータから技能評価を行う方法を考案し、磨き技能教育用としての用途を拡大できることを示した。
- ④ 上記①～③の各テーマ担当者の専門分野を基礎とした横断的対応により実際の産業界の課題に取り組み、新たな産学連携である「m:n マッチング」による課題解決を遂行した。

<問題点>

上述の通り、構想調書段階で想定した各種テーマ、およびそれらをさらに進めたテーマ横断的取り組みによる実際の産業界の課題解決については着実な成果が得られた。しかしながら、調書にも記載した、最終的な目標である地域連携研究拠点(金型デザインセンター:仮称)の設立については、実際の産業界に対するヒアリングや上述の連携成果等を通じ、さらに多岐に亘る専門分野の研究者による有機的な連携、多種の加工装置等の設備、技能者の継続的雇用等、金型関連分野の裾野の広さや関連する学問分野の多さについてさらなる問題意識を得るに到った。今後本取り組みをより有意義な成果につなげるために、継続的な予算・人員の確保や各分野の横断的な協力体制の構築が必要となる。これは今後のデザインセンターの構築、運用に於いて検討を行う予定である。

<評価体制>

(自己評価の方法)

研究テーマ及びプロジェクト全体の取り組みの進捗状況については、地域セミナー等の実施に併せ、プロジェクト会議で報告し、他のグループ及びプロジェクトリーダーから質疑及び問題点の指摘を受ける形式で自己評価を行った。また、学部長も含む学内向けプレゼンテーションの機会を設け、内部評価を実施した。

(研究費の配分方法)

研究費の配分は、3つのグループと共通に必要な費用をグループリーダーが研究テーマに合わせて予算要求し、それらを全体会議で諮り、承認する方法で実施した。なお、予算不足等が生じた場合

は全体会議で予算調整を行い、円滑に研究が遂行するように配慮した。

これに加え、実際の予算執行時には各グループから独立して予算委員及びプロジェクトリーダーの承認を得る形でダブルチェックを行い、効率的な予算配分および透明な執行が可能な方法とした。
(費用対効果)

研究設備については使用記録簿を記入し、稼動時間を毎月調査し、地域での共同研究及び金型教育に利用した実績を記録した。この内容を1～2ヶ月に一度開催したプロジェクト会議において相互評価し、費用対効果を検証した。また、上記の稼働実績を外部評価委員会^{*184}において開示、評価を受け、費用対効果の適切性評価材料とした。11(3)で示した本プロジェクトで導入した主な機器はプロジェクトに関連する研究の遂行に幅広く利用しており効果が確認できるところである。主な研究設備の導入による成果としては、例えば、装置F3とF4の導入により難削材のなめらかな加工及び詳細な組織観察が可能となり研究成果^{*6}につながった。さらに、本プロジェクトの大きな目標の一つである金型人材輩出のための教育プログラム整備について、装置F1の導入による高精度金型加工教育の実施や、装置F2とF5の導入により本学の金型グランプリへの出場^{*82}が初めて可能となるなど、多大な効果が得られた。加えて、産学連携^{*218-221}にも活用されている。

(外部(第三者)による評価体制)

本プロジェクトが地域に根差した研究の観点であることに鑑み、1年目はセミナーを通じた地域企業からの評価とし、2年目と3年目は下記の外部委員で構成した外部評価委員会を設け、評価を受けることとした。2年目の外部評価委員会^{*184}は平成26年3月1日に開催し、3年目は平成26年11月に外部評価委員会を開催予定である^{*200}。

尚、外部評価委員は前川佳徳教授(大阪産業大学、元・型技術協会会長)、曾根匠所長(東大阪市立産業技術支援センター)、南久リーダー(大阪府産業技術総合研究所)の三名である。

<研究期間終了後の展望>

(今後の研究方針)

上述の通り地域に根ざした本プロジェクトで推進した研究活動を維持発展させるために、金型デザインセンター(仮称)を設立する。このセンターを地域連携および教育活動の中心拠点と位置づけ、本プロジェクトで新たに推進した「m:n マッチング」についてさらに取り組みを進め、シーズ・トゥ・シーズによる新たな産学連携研究へと発展させる。

(研究装置等の活用方針)

本プロジェクトで導入した研究設備を維持すると共に、地域に根ざした研究活動にさらに活用するために、11(3)で示した本プロジェクトで導入した主な設備機器は個人の占有とせず上記デザインセンターに帰属させ、公共機器として企業との共同研究や地域企業からの要望への対応に活用すると共に、金型人材を含む学生の教育にも利用する。

<研究成果の副次的効果>

(研究成果の活用状況)

上述の研究成果について、個々のテーマに関しては共同研究先による実業務への反映などが行われている。一方、本プロジェクトの特徴であるテーマ横断的取り組み(「m:n マッチング」)については、既に1社と複数名の研究者の共同取り組みを実施し、総合的な人的交流や14項で記述する新たな研究課題の発掘などに活用している。さらに、この成果を受け本学でも既存の実習工場とプロジェクト組織を融合させた金型デザインセンター(仮称)の設立準備を進めており、さらに進化した産学連携研究組織の構築につながっている。

(今後の活用計画(実用化・企業化の見通し))

型・材料グループでは、新しいコンセプトを導入した金型の開発等、企業からの要求に応じて実用化のための共同研究を実施する。

型・設計グループで開発した CAE ソフトについては受託解析により金型設計に活用する。また CFRP については、地域企業数社との共同研究を通じて実用化を検討している。

型・製造グループで開発した技能計測、自動磨き(金型磨きロボット)、磨き面の計測評価を行う「金型磨き自動化システム」を金型企業に提供し、企業は個々にこのシステムを用いて技能計測と自動化が行える体制を整える予定である。

(特許申請・取得状況)

2件の特許出願^{*202,*205}を行ったが、今後とも研究成果の特許出願を行う予定である。

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

- | | | |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| (1) <u>金型</u> | (2) <u>学生金型グラブ</u> | (3) <u>金型材料</u> |
| (4) <u>射出成形</u> | (5) <u>樹脂流動解析</u> | (6) <u>磨き技能抽出</u> |
| (7) <u>磨きロボット</u> | (8) <u>地域に根ざした研究</u> | |

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況. 印刷中も含む。)

上記, 11(4)に記載した研究成果に対応するものには*を付すこと。

<雑誌論文>

論文名, 著者名, 掲載誌名, 査読の有無, 巻, 最初と最後の頁, 発表年(西暦)について記入してください(左記の各項目が網羅されていれば, 項目の順序を入れ替えても可)。また, 現在から発表年次順に遡り, 通し番号を付してください。

- *1. 須賀一博, 新宅勇一, 小林慎治, 和田義孝(協力者), 菊池正紀, 重合メッシュ法を用いた複合材料におけるき裂進展解析, 日本材料学会誌, 2014 (査読有, 印刷中)
- *2. Yuichi Shintaku, Fuminori Iwamatsu, Kazuhiro Suga, Yoshitaka Wada(協力者), Masanori Kikuchi, Simulation of Stress Corrosion Cracking In ICM Housing of Nuclear Power Plant, Journal of Pressure Vessel Technology, 2014 (査読有, 印刷中)
- 3. Shinji Kajiwara, New Suspension Mechanism Using Camber Thrust for a Formula Car, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, Vol.8, No.2, pp.180-187, 2014 (査読有)
- 4. Shinji Kajiwara, Improvement of Car Performance Limits Through Camber Control, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol.3, No.5, pp.1221-1226, 2014 (査読有)
- 5. Shinji Kajiwara, Parameter Study of a Step-climbing Machine for Heavy Load Carrier, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.26, No.3, pp.341-348, 2014 (査読有)
- *6. Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda and Kenji Higashi, Machinability of Short Potassium Titanate Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites Fabricated by Squeeze Casting, Advanced Materials Research, Vol.856, pp.36-40, 2014 (査読有)
- *7. 田邊大貴, 西藪和明, 倉敷哲生, 通電による CF/PPS 積層材の溶融および酸化現象に及ぼす繊維強化形態の影響, 材料, Vol. 63, No. 5, pp.368-373, 2014 (査読有)
- *8. 田邊大貴, 西藪和明, 倉敷哲生, Ni-Cr ワイヤ抵抗発熱体を用いた CF/PPS 積層板の電気式融着挙動, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.80, No.815, p.SMM0189, 2014 (査読有)
- 9. Shinji Kajiwara, Automobile Collision Behavior Using Mechanism CAE Analysis, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol.3, No.5, pp.935-939, 2014 (査読有)
- 10. Shinji Kajiwara, Effect of the check ball and inlet position on hydraulic L-shaped chek ball behavior, Journal of Fluids and Structures, Vol.48, pp.497-506, 2014 (査読有)
- *11. Tomohisa Hashimoto, Itaru Tanno, Yoshihiro Tanaka, Koji Morinishi, and Nobuyuki Satofuka, Higher order numerical simulation of unsteady viscous incompressible flows using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, Computers and Fluids, in press2014 (査読有)
- *12. Takashi Harada, Design of a Redundantly Actuated Asymmetric Linear DELTA Parallel Mechanism for Singularity-Free Mode Changes, Applied Mechanics and Materials Journal, Vol. 575, pp. 711-715, 2014 (査読有)
- *13. Takashi Harada, Jorge Angeles, Kinematics and Singularity Analysis of a CRRHRRRC Parallel Schoenflies Motion Generator, Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, Vol. 38, Issue 2, pp. 185-197, 2014 (査読有)
- *14. Yoshitaka Wada(協力者), Masanori Kikuchi, Shinji Yamada, Ryosuke Serizawa, Yulong Li, Fatigue growth of internal flaw: Simulation of subsurface crack penetration to the surface of the structure, Engineering Fracture Mechanics, Vol.123, pp.100-115, 2014 (査読有)
- *15. Tomohisa Hashimoto, Itaru Tanno, Yoshihiro Tanaka, Koji Morinishi, and Nobuyuki Satofuka, Simulation of Doubly Periodic Shear Layers Using Kinetically Reduced Local Navier-Stokes Equations On a GPU, Computers and Fluids, Vol.88, pp.715-718, 2013 (査読有)
- *16. Tomohisa Hashimoto, Itaru Tanno, Yoshihiro Tanaka, Koji Morinishi, and Nobuyuki Satofuka, Computation of unsteady incompressible viscous flows using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, Procedia Engineering, Vol.61, pp.63-69, 2013 (査読有)

- *17. 東崎康嘉, 齋藤澄知, 稲増一剛, ハイブリッド増減速機に関する基礎的研究(軸方向予圧を用いた場合の解析と実験), 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79, No.804, pp.2899-2916, 2013 (査読有)
- *18. 東崎康嘉, 園部浩之, 吉見壮司, 諫山秀一, 円すいころ軸受を活用した予圧変更可能型無段変速装置の開発, トライボロジスト, Vol.58, No.3, pp.170-178, 2013 (査読有)
19. 西藪和明, 田邊大貴, 鹿子泰宏, 田中茂雄, マイクロおよびサブマイクロ銅粉末射出成形体の脱脂・焼結挙動, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.807, pp.1593-1603, 2013 (査読有)
20. 梶原伸治, 田中達也, 油圧 L 字配管チェックボール挙動の実験的解析, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol.44, No.1, pp.23-28, 2013 (査読有)
21. Shinji Kajiwara, Experimental Observations of the Fluid Flow Within the L-Shaped Check Valve Design, The International Journal of Fluid Power, Vol.14, No.1, pp.17-24, 2013 (査読有)
22. Shinji Kajiwara, Tatsuya Tanaka, Experimental Analysis of Check Ball Behaviors for L-shaped Pipe, International Journal of Fluid Power System, Vol.6, No.1, pp.1-7, 2013 (査読有)
23. Yoshihiro Ochiai, Vladimir Sladek, and Jan Sladek, Axial Symmetric Stationary Heat Conduction Analysis of Functional Gradient Materials by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.37, No.2, pp.336-347, 2013 (査読有)
24. Yoshihiro Ochiai, Vladimir Sladek, and Jan Sladek, Three-Dimensional Unsteady Thermal Stress Analysis by Triple-Reciprocity Boundary Element, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.37, No.2, pp.116-127, 2013 (査読有)
25. 落合芳博, 三重相反境界要素法による不均質材料の三次元定常熱伝導解析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.805, pp.1793-1804, 2013 (査読有)
26. 落合芳博, 早川雄太, 三重相反境界要素法による分布熱荷重を受ける薄板の熱変形解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.803, pp.976-988, 2013 (査読有)
- *27. 五百井清, 須田敦, 山本昌彦, 低衝撃低振動台車を実現する能動制振キャストの研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 79, No. 808, pp. 4854-4865, 2013 (査読有)
- *28. Takashi Harada, Podi LIU, Internal and External Forces Measurement of Planar 3-DOF Redundantly Actuated Parallel Mechanism by Axial Force Sensors, ISRN Robotics, Vol. 2013, Article ID 593606, 8 pages, 2013 (査読有)
- *29. Manabu Kosaka, Simple proof of Nyquist's Criterion for Stability, International Journal of Control Theory and Applications, Vol. 6, No.1, pp. 29-33, 2013 (査読有)
- *30. 小坂学, s が右半平面を囲うことを前提としないナイキストの安定判別法の証明, 計測自動制御学会論文集, Vol. 49, No. 4, pp. 497-498, 2013 (査読有)
- *31. 菊池正紀, 和田義孝(協力者), 須賀一博, 新宅勇一, 岩松史則, 重合メッシュ法を用いた ICM ハウジング溶接部におけるき裂進展解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.798, pp.119-129, 2013 (査読有)
- *32. Masanori Kikuchi, Yoshitaka Wada(協力者), Yuichi Shintaku, Kazuo Suga, Yulong Li, Fatigue crack growth simulation in heterogeneous material using s-version FEM, International Journal of Fatigue International Journal of Fatigue, Vol.58, pp.47-55, 2013 (査読有)
- *33. Sei-ichiro Sakata(協力者), Fumihiro Ashida, Ken-ichi Ohsumimoto, Stochastic Homogenization Analysis of a Porous Material with the Perturbation Method Considering a Microscopic Geometrical Random Variation, Journal of Mechanical Sciences, Vol.77, pp.145-154, 2013 (査読有)
- *34. Sei-ichiro Sakata(協力者), Fumihiro Ashida and Ken-ichi. Ohsumimoto, A Multiscale Stochastic Stress Analysis of a Heterogeneous Material considering Nonuniform Microscopic Random Variation, Journal of Computational Science and Technology, Vol.7, pp.134-147, 2013 (査読有)
- *35. Sei-ichiro Sakata(協力者), Fumihiro Ashida, Ken-ichi Ohsumimoto, Multiscale Stochastic Stress Analysis of a Porous Material with the Perturbation-based Stochastic Homogenization Method for a Microscopic Geometrical Random Variation, Journal of Computational Science and Technology, Vol.7, pp.99-112, 2013 (査読有)
- *36. 坂田誠一郎(協力者), 清水義隆, 摂動法を用いた粒子強化複合材料の確率均質化逆解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, pp.789-801, 2013 (査読有)
- *37. 坂田誠一郎(協力者), 塩谷公紀, 摂動法に基づくマルチスケール確率応力解析を用いた粒子強化複合材料の微視的材料定数変動に対する破壊確率解析, 日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, pp.395-406, 2013 (査読有)
- *38. Sei-ichiro Sakata(協力者), Fumihiro Ashida, Ken-ichi Fujiwara, Stochastic homogenization of Thermal Expansion Coefficient with the Homogenization Theory, Journal of Thermal Stresses, Vol.36, pp.405-425, 2013 (査読有)
- *39. Sei-ichiro Sakata(協力者), Fumihiro Ashida, Daiki Iwahashi, Stochastic Homogenization Analysis of a Particle Reinforced Composite Material using and Approximate Monte-Carlo Simulation with the Weighted Least Square Method, Journal of Computational Science and Technology, Vol.7, pp.1-11, 2013 (査読有)

*40. Masanori Kikuchi, Yoshitaka Wada(協力者), Chika Ohdama, Effect of KIII on Fatigue Crack Growth Behavior, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.134, No.4, pp.1-6, 2012 (査読有)

<図書>

図書名, 著者名, 出版社名, 総ページ数, 発行年(西暦)について記入してください(左記の項目が網羅されていれば, 項目の順序を入れ替えても可). また, 現在から発表年次順に遡り, 通し番号を付してください.

- *41. Sei-ichiro Sakata(協力者), Adaptive Strategy for Stochastic Homogenization and Multiscale Stochastic Stress Analysis, Multiscale Modeling and Uncertainty Quantification of Materials and Structures: Proceedings of the IUTAM Symposium held at Santorini (Ed: M. Papadarakakis, G. Stefanou) , Springer, 全 170 頁(執筆 pp.51-66), ISBN: 978-3319063300, 2014 年
- 42. Sei-ichiro Sakata(協力者), Optimization of Thermoelastic Structures, Encyclopedia of Thermal Stresses (Ed: R. B. Hetnarski), Springer, 全 6643 頁(pp.3520-3530) ISBN: 978-94-007-2738-0, 2014 年
- 43. 木口昭二, 浅野和典 他, 鉄鋼便覧第 5 版, 日本鉄鋼協会, 2014 年
- *44. 小坂学, 高校数学でマスターする現代制御とデジタル制御, コロナ社, 全 200 頁, 2014 年
- *45. 小坂学, 高校数学でマスターする電気回路, コロナ社, 全 170 頁, 2014 年
- *46. 小坂学, mbed マイコンによるモータ制御設計法, 科学技術出版, 全 190 頁, 2013 年
- *47. 小坂学, 高校数学でマスターする制御工学 - 本質の理解から Mat@Scilab による実践まで -, コロナ社, 全 240 頁, 2012 年

<学会発表>

学会名, 発表者名, 発表標題名, 開催地, 発表年月(西暦)について記入してください(左記の項目が網羅されていれば, 項目の順序を入れ替えても可). また, 現在から発表年次順に遡り, 通し番号を付してください.

- *48. Masaharu Tagami, Kiyoshi Ioi and Atsushi Suda, Feedback Controller Design of the Active Caster for Low-impact Carts Considering the Saturation of the Control Input, TSME_icome2014, タイ, 2014 年 12 月
- *49. 児玉謙介, 辻合真也, 渡邊将寛, 五百井清, スキル獲得ツールを使った金型磨きスキルの評価, 第 15 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 東京, 2014 年 12 月
- 50. 清水勇太, 野崎克也, 五百井清, 木村優孝, 小型移動ロボットの壁面走行と壁面間移動, 第 15 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 東京, 2014 年 12 月
- 51. 大西史朗, 後藤耕平, 五百井清, 山路恵司, 微小モータとタイミングベルトを用いた点字呈示セルの開発, 第 15 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 東京, 2014 年 12 月
- 52. 五百井清, 藤谷述幸, 濱路克洋, 荻本健二, バックステッピング法を用いた小型 VTOL の制御性能の向上, 第 15 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 東京, 2014 年 12 月
- *53. Yu Matsumoto, Seiki Nishikawa, Kiyoshi Ioi, Atsushi Suda and Masaharu Tagami, Experiments and Simulations on Shimmy Phenomena of Cart Casters, ICPT2014, 北九州, 2014 年 11 月
- 54. Takuhei Yamamoto, Kiyoshi Ioi and Kouta Suruki, Experiments and Simulations on State Transitions of a Parallel Typed Foot-Stepping Robot, ICPT2014, 北九州, 2014 年 11 月
- *55. 浅野和典, 米田博幸, アルミナ短繊維強化 AC8A アルミニウム合金複合材料の被削性, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京, 2014 年 9 月
- *56. 原田孝, 冗長駆動パレルロボット内力の数式計算方法, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京, 2014 年 9 月
- *57. 田邊雄, 小坂学, 安定余裕を指定する PID オートチューニング方法, 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京, 2014 年 9 月
- *58. 田邊大貴, 倉留京介, 西籘和明, 再生 CFRTP 射出成形体の作製と三次元デジタイザによる形状寸法の評価, 2014 年度 JCOM 若手シンポジウム, 高知, 2014 年 9 月
- *59. 倉留京介, 田邊大貴, 西籘和明, 再生 CFRTP 材を用いた射出成形体の作製と三次元デジタイザによる形状測定, 日本機械学会 2014 年度年次大会論文集, 東京, 2014 年 9 月
- 60. 田邊大貴, 西籘和明, 倉敷哲生, 高熱伝導粒子を添加した炭素繊維発熱体による熱可塑性 CFRP の電気式融着, 日本機械学会 2014 年度年次大会論文集, 東京, 2014 年 9 月
- 61. 桜井晋也, 田中茂雄, 西籘和明, グリーンマシニングと焼結接合による複雑形状 MIM 部品の寸法変化,

- 日本機械学会 2014 年度年次大会論文集, 東京, 2014 年 9 月
62. Daiki Tanabe, Kazuaki Nishiyabu, Tetsusei Kurashiki, Optimum Parameters on Electro Fusion Joining of CF/PPS Composites by Carbon Fiber Heating Elements, Proceedings of the American Society for Composites 29th Technical Conference, 16th US-Japan Conference on Composite Materials, and ASTM D30 meeting, 2014 CD-ROM, San Diego, 2014 年 9 月
 63. Shinya Sakurai, Kazuaki Nishiyabu, Shigeo Tanaka, Dimensional Change of Complex Shape MIM Parts Fabricated by Green Machining and Sintered Joining, EURO POWDER METALLURGY Congress & Exhibition (EuroPM 2014), Salzburg, 2014 年 9 月
 - *64. Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda, Machinability of Short Alumina Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites Fabricated by Squeeze Casting, International Conference on Mining, Material and Metallurgical Engineering, Prague, 2014 年 8 月
 - *65. Kiyoshi Ioi, Atsushi Suda, and Masahiko Yamamoto, Design of an Active Controlled Caster Aiming at Cast with Low Crashes Vibrations, ICDES2014, チェコ, 2014 年 8 月
 - *66. 沖幸男, 徳丸博紀, 黒柳尚隆, 金野泰幸, 高杉隆幸, ニッケル基金属間化合物溶射皮膜の作製と特性評価, 日本機械学会 M&M 2014 材料力学カンファレンス, 福島, 2014 年 7 月
 - *67. Sei-ichiro Sakata(協力者) and Itaru Torigoe, Multiscale Stochastic Stress Analysis for Randomness of Fiber Arrangement in Fiber Reinforced Composite Material, Barcelona, 11th World Congress on Computational Mechanics (Keynote Lecture), Spain, Barcelona, 2014 年 7 月
 - *68. Yoshitaka Wada(協力者), Crack propagation analysis using elastic-plastic FEM in torsional loading, 11th world congress on computational mechanics and 5th european conference on computational mechanics, Barcelona, 2014 年 7 月
 69. 大西史朗, 後藤耕平, 五百井清, 山路恵司, 平行ベルトを用いた点字セルの開発, 精密工学会 2014 年度関西地方定期学術講演会, 大阪, 2014 年 7 月
 - *70. 原田孝, 志賀裕之, パラレルメカニズムを用いた金型磨きロボットの開発, 精密工学会 2014 年度関西地方定期学術講演会, 大阪, 2014 年 7 月
 - *71. Takashi Harada, Thomas Friedlaender, Jorge Angeles, The Development of an Innovative Two-DOF Cylindrical Drive: Design, Analysis and Preliminary Tests, IEEE ICRA 2014, 香港, 2014 年 6 月
 - *72. Takashi Harada, Singularity-Free Mode Changes of Redundantly Actuated Asymmetric Parallel Mechanism, Parallel 2014, 天津, 2014 年 6 月
 - *73. 豊吉巧也, 和田義孝(協力者), 古川知成, ドット重心追跡法による全視野ひずみ分解能, 日本計算工学会講演会, 広島, 2014 年 6 月
 - *74. 和田義孝(協力者), 繰り返しねじり荷重下の弾塑性き裂進展解析, 日本計算工学会講演会, 広島, 2014 年 6 月
 - *75. Daiki Tanabe, Yusuke Moriwaki, Kazuaki Nishiyabu, Tetsusei Kurashiki, Electro-fusion Joining of CF/PPS Composites Using Carbon Fiber Heating Elements, JSME/ASME 2014 International Conference on Materials and Processing (ICMP2014), Detroit, 2014 年 6 月
 - *76. Daiki Tanabe, Kazuaki Nishiyabu, Tetsusei Kurashiki, Electro Fusion Joining of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites Using Carbon Fiber Heating Element, The sixteenth European Conference for Composite Materials (ECCM16), Seville,), Detroit, 2014 年 6 月
 - *77. Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda, Machinability of Short Alumina Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composite, 71th World Foundry Congress, Bilbao, 2014 年 5 月
 - *78. 東崎康嘉, 齋藤澄知, 松本繁成, 坂本泰士, 近藤良太, ハイブリッド減速機の高効率化に関する基礎研究, トライボロジー会議, 東京, 2014 年 5 月
 79. Yoshitaka Wada(協力者), Hiroshi Kawai, Masao Ogino, Kohei Murotani and Ryuji Shioya, Development of high resolution visualization library for very large scale analysis, Mechanical Engineering Congress, 2014 KOREA KSME-JSME joint symposium on computational mechanics & CAE 2014, 済州島, 2014 年 5 月
 - *80. 原田孝, 平面 3 自由度冗長駆動パラレルメカニズムの特異姿勢を回避するモード変化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門講演, 富山, 2014 年 5 月
 - *81. 原田孝, 冗長駆動パラレルロボット, 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会(基調講演), 長野, 2014 年 4 月
 - *82. 成松一馬, 倉留京介, 神原友, 山崎陽平, 金久正治, 穂満和馬, (指導教員:西藪和明), プラスチック金型 連結式三角スケール, 第 6 回学生金型グランプリ発表講演会, 大阪, 2014 年 4 月
 - *83. Takashi Harada, Design of a Redundantly Actuated Asymmetric Linear DELTA Parallel Mechanism for Singularity-Free Mode Changes, MIMT2014, マレーシア, 2014 年 3 月
 - *84. 田邊大貴, 森脇悠介, 西藪和明, 倉敷哲生, 熱可塑性 CFRP 積層板の電気式融着における炭素繊維発熱体の形態と融着条件の影響, 第 5 回日本複合材料合同会議(JCCM-5), 京都, 2014 年 3 月
 85. 田邊大貴, 石丸拓弥, 西藪和明, 倉敷哲生, 通電加熱による形状記憶合金ワイヤ/熱可塑性 CFRP ハ

- イブリッド積層板の変形挙動, 第 5 回日本複合材料合同会議(JCCM-5), 京都, 2014 年 3 月
- *86. Kiyoshi Ioi, Kiyonori Kanbashi and Yoshikazu Ohtsubo, Evaluation of Mold-Polishing Skills Using a New Skill Acquisition Tool, ICAST2014, タイ, 2014 年 2 月
 - *87. 成田航, 梶原伸治, カーボンを用いた自動車用クラッシュボックスに関する実験的研究, 2013 年度学生自動車技術研究会講演論文集, Vol.30, pp.90-91, 大阪, 2014 年 2 月
 - *88. 成松一馬, 金久正治, 倉留京介, 神原友, 山崎陽平, (指導教員: 西藪和明), デジタル計測ロボットによる金型および成形品の形状測定技術, 日本機械学会関西支部 MECHAVOCATION 2014 学生と企業の交流会, 第一部大学・高専研究発表の部, 大阪, 2013 年 12 月
 - *89. Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda, Machinability of Short Alumina Fiber Reinforced Al-Si-Cu-Ni-Mg Alloy Composite, 12th Asian Foundry Congress, Taipei, 2013 年 12 月
 - *90. 児玉謙介, 神橋清訓, 五百井清, 大坪義一, 金型磨きにおける技能者と初心者の作業特性, 第 14 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 神戸, 2013 年 12 月
 - 91. 大西史朗, 五百井清, 山路恵司, 2個の微小モータを用いたロールベルト型点字セルの開発, 第 14 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 神戸, 2013 年 12 月
 - *92. 田邊大貴, 森脇悠介, 西藪和明, 倉敷哲生, 炭素繊維を発熱体として用いた CF/PPS 積層板の融着接合に及ぼす影響因子, 日本機械学会第 21 回機械材料・材料加工技術講演会(M&P2013), 東京, 2013 年 11 月
 - 93. 落合芳博, 冷間鍛造用金型設計システムの開発, 第 63 回塑性加工連合講演会, 福岡, 2013 年 11 月
 - *94. 今奥亜希, 坂田誠一郎(協力者), 素材の材料定数変動に対する積層複合材料のマルチスケール確率熱弾性解析, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013 年 11 月
 - *95. 鳥越到, 坂田誠一郎(協力者), 繊維配置のばらつきを考慮した一方向繊維強化複合材料のマルチスケール確率応力解析, 日本機械学会第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013 年 11 月
 - *96. 和田義孝(協力者), 弾塑性き裂進展のための自動解析システムの実装と破壊力学パラメータの評価, 日本機械学会 第 26 回計算力学講演会, 佐賀, 2013 年 11 月
 - *97. 浅野和典, 米田博幸, アルミナ短繊維強化アルミニウム合金複合材料の旋削被削性, 日本鑄造工学会 第 163 回全国講演大会, 高岡, 2013 年 10 月
 - *98. 富田義弘, 鑄鉄による SUS304 パイプの鑄ぐるみ板の冷却能評価, 日本鑄造工学会第 163 回全国講演大会, 高岡, 2013 年 10 月
 - *99. 東崎康嘉, 松本繁成, 齋藤澄知, 坂本泰士, セラミックスを用いたハイブリッド減速機に関する基礎的研究, トライボロジー会議 2013 秋, 福岡, 2013 年 10 月
 - *100. 東崎康嘉, 齋藤澄知, 松本繁成, 河村瞭, ハイブリッド減速機能を有する自己予圧型軸受の基礎的研究, トライボロジー会議 2013 秋, 福岡, 2013 年 10 月
 - *101. 黒柳尚隆, 金野泰幸, 沼倉宏, 高杉隆幸, 沖幸男, 耐熱耐摩耗 Ni 基金属間化合物コーティングの作製と特性評価, 日本金属学会 2013 年度秋期講演(第 153 回)大会, 金沢, 2013 年 9 月
 - *102. 浅野和典, 米田博幸, 東健司, チタン酸カリウム短繊維強化アルミニウム合金複合材料の諸特性, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
 - *103. Ken Uchikura, Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda, Kenji Higashi, Properties of short potassium titanate fiber reinforced aluminum alloy composites, The 5th Japan-Korea Workshop for Young Foundry Engineers, Muroran, 2013 年 9 月
 - *104. 橋本知久, 丹野格, 安田孝宏, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行, 直交座標系格子を用いた任意形状に対する非定常熱伝導解析, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
 - 105. 森嶋哲也, 松倉拓也, 西藪和明, Al/熱可塑性 CFRP ハイブリッド積層板の熱変形挙動の評価, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
 - *106. 田邊大貴, 森脇悠介, 西藪和明, 倉敷哲生, 電気抵抗式融着法による熱可塑性 CFRP 積層板の融着接合, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
 - 107. 桜井晋也, 川上慈朗, 西藪和明, エレクトロスピンニングナノファイバによるマイクロインプリント樹脂型の作製, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
 - 108. 桜井晋也, 川上慈朗, 西藪和明, ES ナノファイバインプリント犠牲樹脂型ナノ粉末印刷によるマイクロ構造体の作製, 日本機械学会 2013 年度年次大会論文集, 岡山, 2013 年 9 月
 - *109. 中西啓太, 西藪和明, 熱可塑性 CFRP 積層板の打抜き加工挙動, 日本機械学会 2013 年度年次大会論文集, 岡山, 2013 年 9 月
 - 110. 石丸拓弥, 田邊大貴, 西藪和明, 形状記憶合金ワイヤ/熱可塑性 CFRP ハイブリッド材の熱変形挙動, 日本機械学会 2013 年度年次大会論文集, 岡山, 2013 年 9 月
 - *111. Kazuaki Nishiyabu, Junichi Yanagihara, Megumi Hamada, Development of Smart Heating System for Press-forming of Textile-based Thermoplastic Composites and LED Lamp Shade With Effective Material Recycling, TEXCOMP-11 Conference, Leuven, 2013 年 9 月

- *112. Daiki TANABE, Yusuke MORIWAKI, Kazuaki NISHIYABU, Tetsusei KURASHIKI, Fusion Bonding of Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites by Electrofusion Method, Composites Week Conference, Leuven, 2013 年 9 月
- *113. 神橋清訓, 五百井清, 大坪義一, 金型磨き専用ツールによる特徴量の推定, 第31回日本ロボット学会 学術講演会, 八王子, 2013 年 9 月
- *114. 原田孝, 木邨真人, 特異フリーにモード変化する非対称冗長駆動リニア DELTA ロボットの運動学解析, 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 八王子, 2013 年 9 月
- *115. 原田孝, 大坪義一, 藤井康夫, スロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型パラレルロボットの開発, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *116. 八木俊洋, 小坂学, 自動追尾台車のための姿勢制御, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *117. 高瀬捷太, 小坂学, オイラー近似による不安定化に関する研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *118. 梶雄登, 小坂学, 自動追尾制振台車のための VCM 制御, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *119. 前部聖介, 小坂学, H ブリッジによるブラシレス DC モータ用三相正弦波インバータ制御システム, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *120. 田邊雄, 小坂学, 筋電位の比を利用した新しい動作識別システム, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *121. 和田義孝(協力者), 弾塑性き裂進展有限要素解析システムの構築, 日本機械学会 2013 年度年次大会, 岡山, 2013 年 9 月
- *122. Sei-ichiro Sakata(協力者), An Adaptive Strategy for the Stochastic Homogenization and the Multiscale Stochastic Stress Analysis, IUTAM2013 Symposium on Multiscale Modeling and Uncertainty Quantification of Materials and Structures, Santorini, Greece (Invited only, Closed symposium), 2013 年 9 月
- *123. Daiki Tanabe, Shinji Tsutaya, Kazuaki Nishiyabu, Effects of Processing Parameters on Electro-Fusion Joining Behavior of Cf/PPS Composites, The 19th International Conference on Composite Materials, pp. 3722-3731, Montreal, 2013 年 8 月
- *124. 田邊大貴, 森脇悠介, 西藪和明, 倉敷哲生, 炭素繊維発熱体を用いた熱可塑性 CFRP 板の電気式融着接合, 2013 年度 JCOM 若手シンポジウム, 金沢, 2013 年 8 月
- 125. Kiyoshi Ioi, Hiroki Yokoi and Masataka Kimura, Development of a Compact and Rapid Wall-Climber, IEEE MMAR2013, Poland, 2013 年 8 月
- *126. 須田敦, 五百井清, 辻野 直人, 井口 祥一, 山本 昌彦, 低衝撃低振動台車を実現する能動制振キャスターの開発, 日本機械学会 D&D コンフェレンス, 福岡, 2013 年 8 月
- *127. 児玉謙介, 辻合真也, 渡邊将寛, 五百井清, プラスチック金型磨きに関する熟練者と素人の磨き動作の比較, 精密工学会 2013 年度関西地方定期学術講演会, 大阪, 2014 年 7 月
- *128. Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda, Kenji Higashi, Turning Machinability of Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites, 19th International Conference on Composite Materials, Montreal, 2013 年 7 月
- *129. Takashi Harada and Jorge Angeles, Kinematics and Singularity Analysis of a CRRHRRC Parallel Schoenflies Motion Generator, CCToMM M3 Symposium, 2013, Canada, 2013 年 6 月
- *130. 豊吉巧也, 和田義孝(協力者), 古川知成, ドット重心法の高精度化のための基礎的検討 -輝度むらによる測定誤差-, 東京, 2013 年 6 月
- *131. 和田義孝(協力者), 弾塑性き裂進展のための自動解析フレームワーク, 日本計算工学会講演会, 東京, 2013 年 6 月
- *132. 田邊大貴, 傳谷真司, 西藪和明, 倉敷哲生, 電気抵抗式融着による熱可塑性CFRP板の接合挙動, 日本繊維機械学会第 66 回年次大会, pp.116-117, 大阪, 2013 年 5 月
- *133. 木邨真人, 大坪義一, 原田孝, 平面 3 自由度冗長駆動パラレルメカニズムの姿勢遷移方法の提案, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, つくば, 2013 年 5 月
- *134. Masanori Kikuchi, Yoshitaka Wada(協力者), Shinji Kobayashi, Crack Propagation in Composite Materials using S-version FEM, The 9th Int. Conf. on Fracture & Solids Strength (FEOfS2013), 済州島, 2013 年 5 月
- 135. Kaoru Yodo, Ryuji Shioya, Yoshitaka Wada(協力者), Akio Miyoshi, Parallel CAE system based on HTML5, WebGL and offline visualization technology with domain decomposition method, The 9th Int. Conf. on Fracture & Solids Strength (FEOfS2013), 済州島, 2013 年 5 月
- *136. 淺野和典, 炭素繊維強化アルミニウム複合材料の作製とその諸特性, 日本機械学会関西支部第 88 期 定時総会講演会, 大阪, 2013 年 3 月
- *137. 神橋清訓, 城川直人, 五百井清, 大坪義一, 金型磨きスキル獲得を目指したスマートツールの開発, 日本機械学会北陸信越支部第50期講演会, 福井, 2013 年 3 月

- *138. 田邊大貴, 傳谷真司, 西藪和明, 倉敷哲生, 電気抵抗式融着による CF/PSP 積層板の接合挙動に及ぼす影響因子, 第 4 回日本複合材料合同会議(JCCM-4), Vol.4 2A-13, 東京, 2013 年 3 月
139. 田淵喜瑛, 田邊大貴, 西藪和明, 倉敷哲生, 形状記憶合金ワイヤを用いた熱可塑性 CFRP 板の作製とその形状回復挙動, 第 4 回日本複合材料合同会議(JCCM-4), Vol.4 1B-08, 東京, 2013 年 3 月
140. 桜井晋也, Mohd Ikhwan Helmi Jusoh, 西藪和明, ES ナノファイバインプリント樹脂型ナノ粉末印刷によるマイクロ構造体の作製, 第 4 回日本複合材料合同会議(JCCM-4), Vol.4 1B-19, 東京, 2013 年 3 月
- *141. 森相哲也, 服部佑紀, 西藪和明, Al シート/熱可塑性 CFRP ハイブリッド積層板の熱変形挙動, 第 4 回日本複合材料合同会議(JCCM-4), Vol.4 3B-08, 東京, 2013 年 3 月
- *142. 高田浩輝, 梶原伸治, カーボンを用いた自動車用クラッシュボックスに関する研究, 2013 年度学生自動車技術研究会講演論文集, Vol.29, pp.22-23, 寝屋川, 2013 年 2 月
143. Yoshiaki Tabuchi, Tetsuya Morisugi, Daiki Tanabe, Kazuaki Nishiyabu, Deformation Behavior of Shape-Memory Alloy Wire / Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites, 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials(ACCM-8), P-SMA-367, Kuala Lumpur, 2012 年 11 月
- *144. Daiki Tanabe, Shinji Tsutaya, Kazuaki Nishiyabu, Tetsusei Kurashiki, Fusion Behavior of Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic Composites in Electro-fusion Welding, 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials(ACCM-8), O-THE-264, Kuala Lumpur, 2012 年 11 月
- *145. 八木俊洋, 小坂学, 定数を近似した要素の発振条件に関する考察, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月
- *146. 木下和也, 小坂学, ゲイン余裕と代表根を保存する低次元化を用いた部分的モデルマッチング, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月
- *147. 高瀬捷太, 小坂学, 安全なフィードバック制御における限界振動の計測, 第 55 回自動制御連合講演会, 京都, 2012 年 11 月
- *148. 吉田翔, 浅野和典, 米田博幸, アルミナ短繊維強化アルミニウム合金複合材料の切削性, 日本鑄造工学会第 161 回全国講演大会, 盛岡, 2012 年 10 月
- *149. 藤原健一, 坂田誠一郎(協力者), 芦田文博, 微視的ランダム変動を考慮した一方向繊維複合材料の確率熱応力解析, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 神戸, 2012 年 10 月
- *150. Sei-ichiro Sakata(協力者), Fumihiko Ashida and Ken-ichi Ohrumimoto, A Multiscale Stochastic Stress Analysis of a Heterogeneous Material considering Non-uniform Microscopic Random Variation, JSME-CMD ICMS2012, 神戸, 2012 年 10 月
- *151. 豊吉巧也, 和田義孝(協力者), 古川知成, ドット重心法による高精度全視野ひずみ測定のためのカメラキャブレション法, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 神戸, 2012 年 10 月
- *152. 和田義孝(協力者), 菊池正紀, 精密なモデルによるファクトリールーフをもつ表面き裂のき裂進展速度の評価, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 神戸, 2012 年 10 月
- *153. 和田義孝(協力者), 菊池正紀, 精密なモデルによるファクトリールーフをもつ表面き裂のき裂進展速度の評価, 日本機械学会第 25 回計算力学講演会, 神戸, 2012 年 10 月
- *154. 浅野和典, 米田博幸, 東 健司, チタン酸カリウム短繊維強化アルミニウム合金複合材料の被削性, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
- *155. 橋本知久, 丹野格, 安田孝宏, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行, 非圧縮性局所ナビエ-ストークス方程式と仮想流束法を用いた流路内流れの数値計算, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
156. 西藪和明, 長井孝太郎, 大久保健児, 田中茂雄, デジタル画像計測による複雑形状を有する MIM 焼結部品の変形解析, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
157. 西藪和明, 大久保健児, 田中茂雄, Fe-45Ni パーマロイ粉末射出成形体の充填挙動とその焼結体の軟磁性特性, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
- *158. 田邊大貴, 傳谷真司, 西藪和明, 倉敷哲生, 電気式融着接合による熱可塑性 CFRP 板の融着挙動, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
159. 田淵喜瑛, 田邊大貴, 倉敷哲生, 西藪和明, 形状記憶合金ワイヤ/熱可塑性 CFRP ハイブリッド材の加熱プレス成形とその変形挙動, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
160. 西藪和明, Mohd Ikhwan, ES ナノファイバインプリント犠牲樹脂型インサート MIM によるマイクロ構造体の作製, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
161. Kazuaki Nishiyabu, Kenji Okubo, Shigeo Tanaka, Deformation Analysis of Complex Shaped Ti-MIM Parts by Digital Image Measurement, Euro Powder Metallurgy Congress & Exhibition (EuroPM2012), Basel, 2012 年 9 月
162. Kazuaki Nishiyabu, Kenji Okubo, Shigeo Tanaka, Filling Behavior and Magnetic Properties of Fe-45Ni Permalloy Micro-MIM Parts, Euro Powder Metallurgy Congress & Exhibition (EuroPM2012), Basel, 2012 年 9 月
- *163. 和田義孝(協力者), 菊池正紀, 精密なモデルによるファクトリールーフをもつ表面き裂の応力拡大係数の

- 評価, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
- *164. 坂田誠一郎(協力者), 光造形法により作製した二次元多孔質材料の確率均質化特性評価, 日本機械学会 2012 年度年次大会, 金沢, 2012 年 9 月
 - 165. 森相哲也, 服部佑紀, 西藪和明, Al/熱可塑性 CFRP ハイブリッド積層板の作製とその熱変形挙動の評価, 2012 年度 JCOM 若手シンポジウム, 岐阜, 2012 年 8 月
 - *166. 田邊大貴, 傳谷真司, 西藪和明, 倉敷哲生, ニクロム抵抗発熱体を用いた熱可塑性 CFRP 積層板の電気抵抗式融着接合, 2012 年度 JCOM 若手シンポジウム, 岐阜, 2012 年 8 月
 - 167. 田淵喜瑛, 田邊大貴, 倉敷哲生, 西藪和明, 形状記憶合金ワイヤを用いた熱可塑性 CFRP 板の作製とその変形挙動, 2012 年度 JCOM 若手シンポジウム, 岐阜, 2012 年 8 月
 - 168. Kiyoshi Ioi, Shinya Eto and Keiji Yamaji, Braille Display with Double resonant Mechanism and Recognition Experiments by Human Fingers, ISR2012, 台湾, 2012 年 8 月
 - 169. Kiyoshi Ioi, Hiroki Yokoi and Keisuke Tatemoto, Design of Wal-Climber with Coaxial Propeller's Thruster, ISR2012, 台湾, 2012 年 8 月
 - *170. Takuya Toyoshi, Yoshitaka Wada(協力者), Tomonari Furukawa, Camera Calibration Method for Accurate Full Field Strain Measurement by Dot Centroid Method, ASME 2012 Int.l Design Eng. Technical Conf. and Comp. and Info.in Eng. Conf., Chicago, 2012 年 8 月
 - 171. Tomonari Furukawa, Yoshitaka Wada(協力者), Jan Wei Pan, Jinquan Cheng, John G. Michopoulos, Multi-Linear Modeling for Characterization of Nonlinear Behavior of Anisotropic Materials, ASME 2012 Int.l Design Eng. Technical Conf. and Comp. and Info.in Eng. Conf., Chicago, 2012 年 8 月
 - 172. Tomonari Furukawa, Yoshitaka Wada(協力者), John G. Michopoulos, Athanasios Iliopoulos, Probabilistic Vision-Based Full-Field Displacement and Strain Measurement via Uncertainty Propagation, ASME 2012 Int.l Design Eng. Technical Conf. and Comp. and Info.in Eng. Conf., Chicago, 2012 年 8 月
 - *173. Tomohisa Hashimoto, Itaru Tanno, Yoshihiro Tanaka, Koji Morinishi, and Nobuyuki Satofuka, Simulation of decaying two-dimensional turbulence using kinetically reduced local Navier-Stokes equations, Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics, ICCFD7-1105, Hawaii, 2012 年 7 月
 - *174. Takuya Toyoshi, Yoshitaka Wada(協力者), Tomonari Furukawa, Simulation of Stress Corrosion Cracking in ICM Housing of Nuclear Power Plant, ASME 2012 Pressure Vessels and Piping Conference, Toronto, 2012 年 7 月
 - *175. Kazunori Asano, Hiroyuki Yoneda, Kenji Higashi, Turning Machinability of Short Potassium Titanate Fiber Reinforced Aluminum Alloy Composites, 15th European Conference on Composite Materials, Venice, 2012 年 6 月
 - *176. 坂田誠一郎(協力者), 逐次摂動法を用いた不均質材料の確率均質化・マルチスケール確率応力解析, 第 18 回計算工学講演会, 京都, 2012 年 6 月
 - *177. 木邨真人, 原田孝, 阿野優次郎, 平面 3 自由度冗長駆動逆折れパラレルメカニズムの開発, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 浜松, 2012 年 5 月
 - *178. 原田孝, 留伯迪, リンク軸力センサを用いた平面 3 自由度冗長駆動パラレルメカニズムの内力と外力の計測, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス部門講演会, 浜松, 2012 年 5 月
 - *179. 豊吉巧也, 和田義孝(協力者), 古川知成, ドット重心法による高精度全視野わずみ測定のためのカメラキャリブレーション法, 日本計算工学会講演会, 京都, 2012 年 5 月
 - *180. 和田義孝(協力者), 菊池正紀, 詳細な測定に基づくファクトリールーフ形状メッシュ生成と応力拡大係数の評価, 日本計算工学会講演会, 京都, 2012 年 5 月

<研究成果の公開状況>(上記以外)

- シンポジウム・学会等の実施状況, インターネットでの公開状況等
 ※ホームページで公開している場合には, URL を記載してください。
- <既に実施しているもの>
- *181. 精密工学会関西支部 2014 年度関西地方定期学術講演会・見学会, 大阪東部地域と連携した近大発・金型プロジェクト, 近畿大学, 2014 年 7 月 4 日
 - *182. 第 12 回創機記念講演会, 東大阪クリエーションコア, 2014 年 3 月 28 日
 - *183. 東大阪市商工会議所 異業種交流グループ連絡協議会講演会・見学会, 金型プロジェクト・設備と産学連携事例の紹介, 近畿大学, 2014 年 3 月 18 日
 - *184. 近畿大学金型プロジェクト第 1 回外部評価委員会, 近畿大学, 2014 年 3 月 1 日
 - *185. 近畿大学金型プロジェクト中間報告会, 近畿大学, 2013 年 11 月 19 日
 - *186. 大阪府立産業技術総合研究所 金型総合技術研究会講演会・見学会, 近畿大学の金型技術産学連携プロジェクトとその研究開発事例, 近畿大学, 2013 年 10 月 10 日

- *187. 金型サロン「型ろう会」, 東大阪市立産業技術支援センター, 2013年6月～2014年3月
- *188. 近畿大学研究シーズ発表会, 大田区産業プラザ PiO, 2013年6月24日
- *189. 東大阪商工会議所 近畿大学研究シーズ発表会, 近畿大学, 2013年3月27日
- *190. 金型技術の高度化研究プロジェクトセミナー, 堺市産業振興センター, 2013年3月11日
- *191. 大阪市次世代モノづくり研究会 近畿大学の金型産業支援の取り組み紹介・設備見学会, 近畿大学, 2013年2月26日
- *192. 東大阪市中心企業振興勤労者福祉機構 近畿大学の自動ロボット 3D 形状計測・検査システム見学会, 近畿大学, 2013年2月21日
- *193. 第6回 UM モールドフェア, 大阪東部地域と連携した【近畿大学発】・金型プロジェクト, インテックス大阪, 2013年1月18日
- *194. 金型技術高度化プロジェクトセミナー, 八尾市八尾商工会議所, 2012年9月6日
- *195. 金型技術高度化セミナー, 大阪市産創館, 2012年8月30日
- *196. MOBIO-Forum, 近畿大学における金型プロジェクトの概要説明会と交歓会, 東大阪市クリエーションコア, 2012年7月6日
- 197. 近畿大学 金型プロジェクトホームページ, <http://www.mec.kindai.ac.jp/kanagata/2012年～>

<これから実施する予定のもの>

- 198. 近畿大学金型プロジェクト最終報告会, 近畿大学, 2015年5月予定
- 199. 近畿大学金型プロジェクト成果報告会, 近畿大学, 2014年11月予定
- *200. 近畿大学金型プロジェクト外部評価委員会, 近畿大学, 2014年11月予定

14 その他の研究成果等

「13 研究発表の状況」で記述した論文、学会発表等以外の研究成果、企業との連携実績があれば具体的に記入してください。また、上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには下線及び*を付してください。

※ 論文や学会発表等になじまない研究である場合は、本欄を充実させること

項目番号11で記述したとおり、本プロジェクトにおいて論文もしくは学会発表以外の成果として特筆すべき点として、地域に根ざした研究活動が挙げられる。特に、新たな産学連携の取り組みである1社もしくは複数の企業の課題および技術と大学側の複数の専門家の知識をミックスさせ課題解決に取り組んだ「m:n マッチング」の事例^{*226}について具体的に記述する。

本プロジェクトでは、図1に示すとおり、メンバーの専門分野に応じ3つの大テーマを設定し、研究課題に取り組み成果を得た。これに加え、地域企業のニーズに基づき、各成果を横断的に利用するテーマ横断型研究を行った。

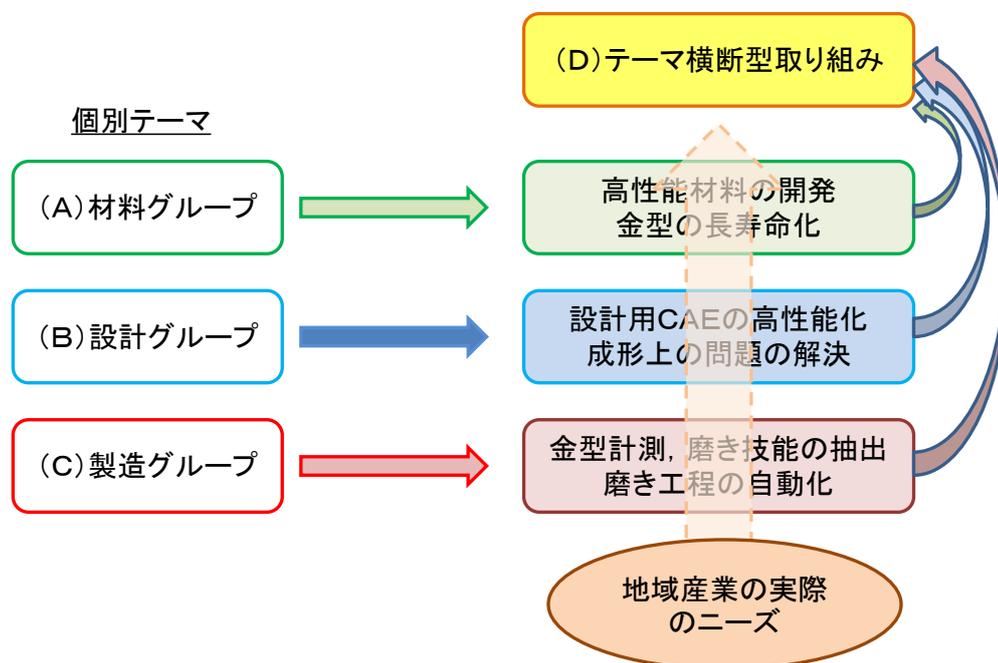
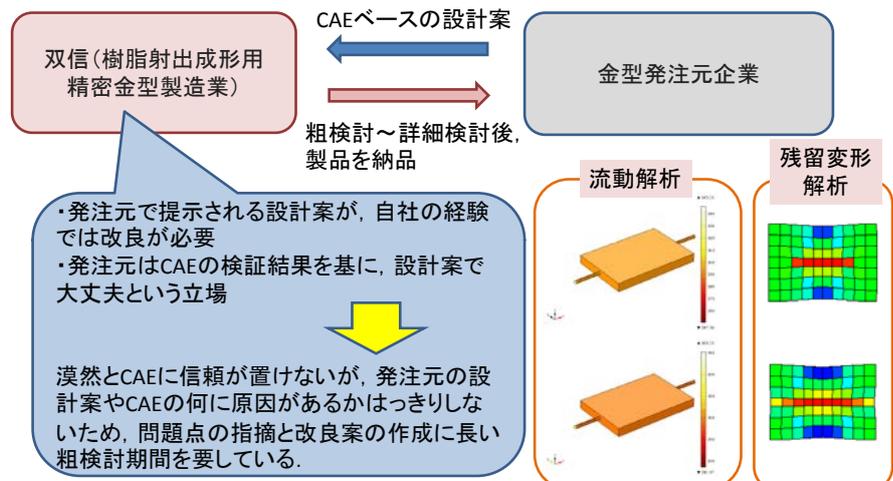


図1 本プロジェクトにおける個別テーマ及びその成果とテーマ横断的取り組みの概念図

本プロジェクトでは複数回の地域セミナーを通じた産業界からの評価とニーズの把握を行ったが、そのうちの一つの課題について、上記のテーマ横断型の取り組みを推進した。具体的な取り組みは、2013年3月に本学で開催した地域貢献セミナーに参加した企業(射出成形用金型製造業)からの質問に係る課題に対し、本学研究者が詳細なヒアリングを行い、課題の切り分けと各分野研究者による複合的な検討を行ったことに端を発する。取り組んだ課題の概要を図2に示す。即ち、当該企業は発注元企業の設計依頼案と金型製造業側のノウハウのギャップに課題を抱えており、その問題がどこにあるのか、改善可能かを把握することを期待していた。これに対し、本プロジェクトでは、特に成形品の引け予測がCAEベースの設計と金型製造業側の経験とで異なることに注目し、この相違の原因について調査することとした。発注元企業の設計案作成プロセスに注目し、CAE専門家、計測専門家、固体力学、流体力学専門家の複数分野の研究者を中心とし、対応を開始した。既に流体部分のCAE解析についてはテーマ(B)で取り組みが進んでいたため、射出成形で重要となる熱流体—固体マルチフィジクス解析のうち固体部分について、種々物理モデルを考慮できる汎用CAEを新たに導入し、CAE設計および成形物評価を大学側が担当することとした。一方、実際の金型製作には高度な技術と熟練の技能が必要なため、試験用金型及び成形品試作を当該企業にご担当頂く共同研究の形式とした。



- ・専門家に相談すべき内容を特定するだけでも大変
- ・射出成形は複合プロセスのため、全体を通してのあらゆる事象に精通した専門家は希有

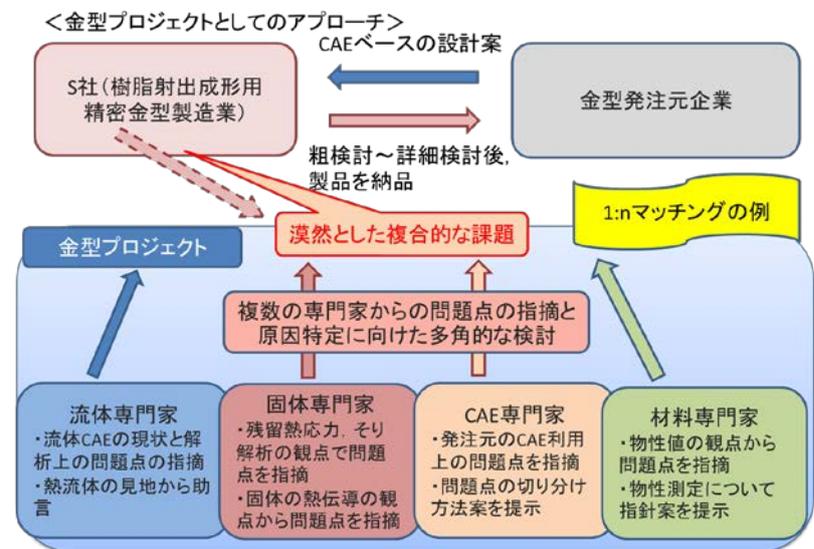


図2 本プロジェクト発の m:n マッチング産学連携の取り組みの概要

平成25年度中に、まず CAE 側で種々の条件による射出成形解析を行い、シミュレーション上の問題抽出を行い、複数回に亘り企業側と打ち合わせを行った。次に、それを受け、平成26年当初より試験用金型の設計を開始、4月に設計案の確定、6月にセンサ等測定方法の確定を行い7月より作製に取りかかっている。この際には、プロジェクト内の計測分野の専門家も加わっている。これと並行して CAE 側でモデルの修正及び再解析の実施、加えて成形品の測定法について検討を進めている。試験用成形品および解析結果の例を図3に示す。

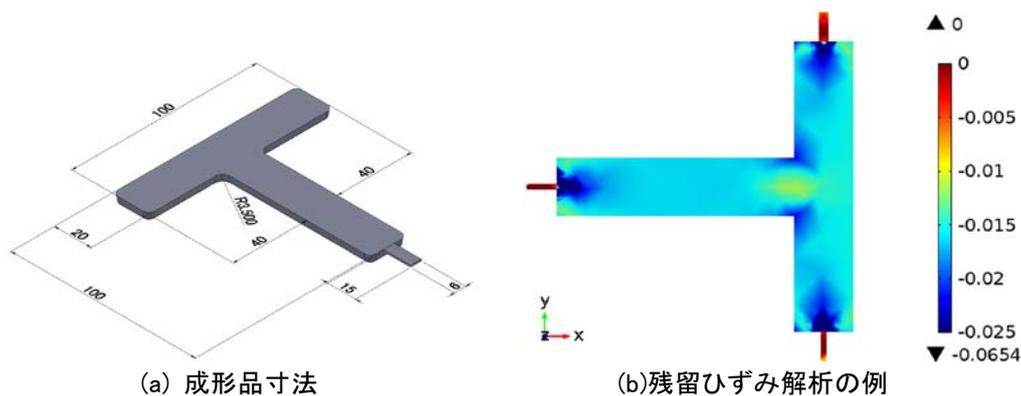


図3 試験用成形品およびシミュレーション結果の例

この後、9月半ばに金型が完成予定であり、9月下旬に成形品の試作、10月より成形品の引けの測定結果とCAE結果との比較検討を行い、当初課題の解決へとつなげる計画で取り組みを進めている。

ここで本成果の特筆すべき点は、専門分野の異なる複数名の研究者が、課題に応じてチームを組み、企業側の有する技術と併せて課題解決に取り組む点である。これは通常大規模なプロジェクトを通じて実施されるが、本取り組みでは1大学内で柔軟に取り組める点が長所であり、新たな産学連携の取り組み方法を提案するものでもある。

実際、この取り組みを通じ連携を深めることで、当初プロジェクト側で想定していなかったような、たとえば成形品の品質改質のための金型設計案について、図4に示すように、**上記の専門家に加えさらに材料の複合化および計測の専門家も加え**、さらに踏み込んだ改善案を本プロジェクトの成果を元に提案する取り組みも計画している。既に平成26年3月に材料複合化の専門家も加えた検討を行い、材料の試作を始めているところである。

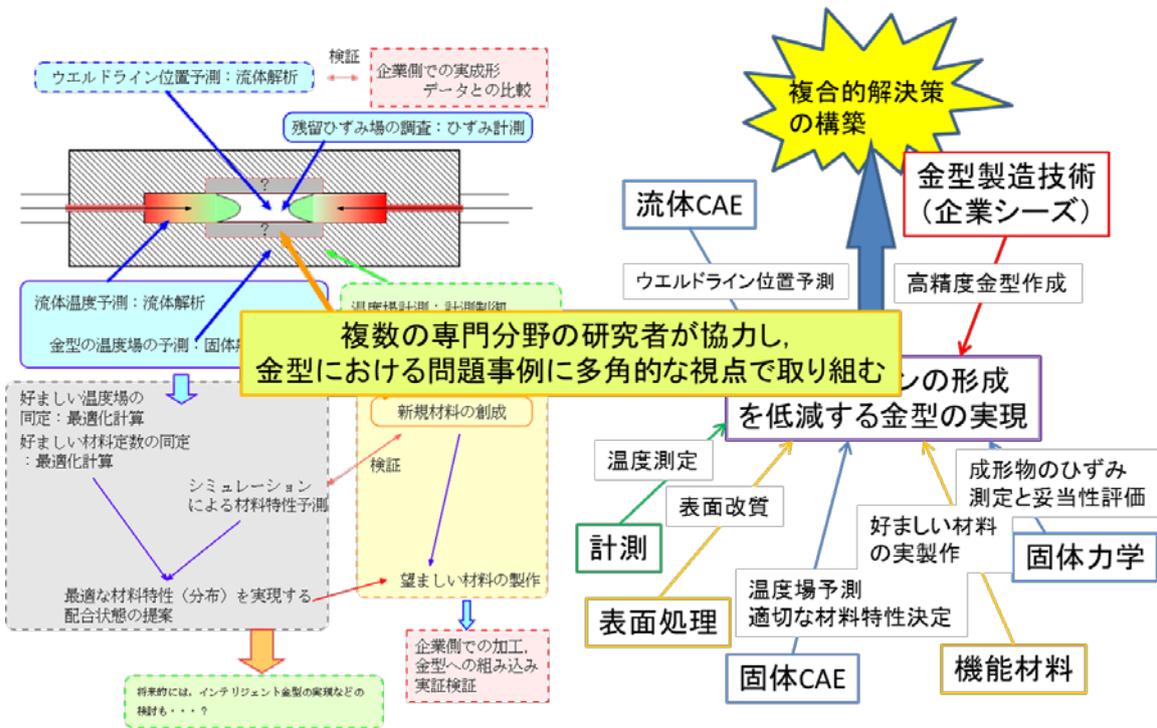


図4 固体—流体—熱及びCAE、計測、材料の専門家群による金型改質の取り組みの例

このように、本プロジェクトは単に各分野の専門家が独自に興味を持つ内容を研究したというのではなく、対象産業分野の抱える複合的な課題に対し、プロジェクト側からも複数の専門家に対応させ、解決に向け取り組むことが特徴であり、それを実際に遂行できている点が成果である。

尚、本取り組みは企業側とプロジェクト担当者グループの二人三脚で進めており、特定の課題のみにとどまるものではないことから、これまでの研究論文、学会発表、特許出願などに直接つながるような成果とはなりにくい。本テーマ関連の研究成果としては、CAEによる複合材料樹脂成形品の品質評価の観点から、近年注目されているマルチスケール確率解析について、プロジェクト開始後は特に樹脂製品や射出成形等加熱成形に着目した研究をプロジェクト課題の関連研究として行っている^{*33-^{*}39^{*}*41}。この内容は、今後上記試験金型による成形品の品質評価とCAEによる解析結果の比較検討に重要な位置を占めるため、大学側の研究が先行して成果を出した。尚、本成果は世界最高峰の応用力学研究者組織であるIUTAMの専門シンポジウムでの招待講演^{*122}や、計算力学分野での世界最大の会議であるWCCMでの基調講演^{*67}として招待されるなど、個別の研究成果としては国際的に評価されていると言える。また、均質材料の強度および破壊挙動の評価法^{*12-^{*}14^{*}*32^{*}*40}や全視野ひずみ測定法^{*31}に関する業績にも示されるとおり着実に成果を得ている。

しかしながら、産業界、特に大阪東部地域に点在する中小企業が抱えている問題は、むしろ本項目で例示したような**包括的な課題であり、これに個々の研究者が単なる研究論文執筆にとどまらず、これまで得た知見、プロジェクトの成果を元に実質的に貢献する取り組みとして、本内容はこれまでにない意義がある**と考える。また、このような取り組みが、地域企業のプロジェクトへの信頼感の醸成に繋がり、新たな産学連携を通じた地域に根ざした研究の柱となるとともに、構想調書に示した地域に根ざした研究拠点の構築の基盤となると確信す

る。

この活動を受け、本学でも本研究課題をより進化させた取り組みとして、地域連携研究教育拠点である金型デザインセンター(仮称)の設立を平成25年7月より検討し、本プロジェクト完了直後である平成27年4月の活動開始に向けて準備を進めているところである。

また、上記取り組みに限らず、本プロジェクトの趣旨に従い多数の産学連携、特許申請等を行っている。学術論文および学会発表以外の成果および取り組み事例を以下に示す。

- *201. 西籘和明, 熱可塑性CFRP製パイプ継手の開発と融着の高度化に関する補助事業, 機械工業振興補助事業, 研究補助金, 2014 年
- *202. 西籘和明, 田邊大貴, 繊維強化熱可塑性樹脂部材の融着方法, 特願 2014-044311, 2014 年
- *203. 五百井清, 熟練技能者の金型磨きデータの計測, 技術相談・測定分析, 2014 年
- *204. 浅野和典, アルミニウム合金溶湯の低圧鑄造用金型部品の寿命向上, 共同研究, 2013-2014 年
- *205. 沖幸男, Ni 基金属間化合物合金の溶射被膜および溶射被膜の製造方法, 特願 2013 - 175624, 2013 年
- *206. 西籘和明, 自動車用射出成形部材のデジタル画像計測, 技術相談, 2013 年
- *207. 西籘和明, 照明器具用射出成形品の成形欠陥対策, 技術相談, 2013 年
- *208. 西籘和明, インサート射出成形による炭素繊維とPA6樹脂との複合化, 技術相談, 2013 年
- *209. 西籘和明, 金型加工において付加価値と表面処理技術, 技術相談, 2013 年
- *210. 西籘和明, 炭素繊維強化プラスチックのプレス・射出成形, 技術相談, 2013 年
- *211. 西籘和明, 段ボールの加工の用途展開, 技術相談, 2013 年
- *212. 西籘和明, ベルトの締め金具の樹脂化, 技術相談, 2013 年
- *213. 西籘和明, 熱硬化性 CFRP 積層板の切削加工, 技術相談, 2013 年
- *214. 西籘和明, 熱可塑性 CFRP のプレス・射出成形技術, 技術相談, 2013 年
- *215. 西籘和明, 革新的な金型の製造装置・金型・成形品の検査システムの開発, 技術相談, 2013 年
- *216. 西籘和明, リチウムイオン電池用ガスケット用の射出成形品の離型性改善, 技術相談, 2013 年
- *217. 西籘和明, 金型製造業への 3 次元プリンタを活用したものづくり, 技術相談, 2013 年
- *218. 西籘和明, デジタル画像計測システムによる微細金型の形状測定, 技術相談, 2013 年
- *219. 西籘和明, デジタル画像計測による射出成形品の形状測定, 依頼研究, 2013 年
- *220. 西籘和明, デジタル画像計測による CFRP 製ホイール成形品の形状測定, 依頼研究, 2013 年
- *221. 西籘和明, デジタル画像計測による CFRP 成形品の設計・製造の高度化, 受託研究, 2013 年
- *222. 小坂学, 和田義孝(協力者), 坂田誠一郎(協力者), 射出成形金型における温度場解析, 技術相談, 2013 年
- *223. 原田孝, 車両洗浄ロボット, 技術相談, 2013 年
- *224. 西籘和明, 機械工学実験テキスト「E 型彫り放電加工実験」, 2013 年
- *225. 木口昭二, 自動車部品の多数個取り砂型鑄造実験と湯流れ・伝熱解析, 共同研究, 2012-2014 年
- *226. 和田義孝(協力者), 坂田誠一郎(協力者), 浅野和典, 橋本和久, 大坪義一, 射出成形用金型における CAE 解析結果と経験的設計の相違の原因解明に関する総合的検証および金型改質に関する研究, 共同研究 2012-2014 年
- *227. 富田義弘, 鑄ぐるみにより作製した金型内冷却パイプによる冷却能向上, 受託研究, 2012 年
- *228. 東崎康嘉, 橋本知久, 金型離型抵抗の低減技術に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *229. 西籘和明, プラスチック射出成形品の形状品質に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *230. 西籘和明, プラスチック射出成形金型の高機能化に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *231. 西籘和明, カーボンコンポジットの機械的締結に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *232. 西籘和明, 粉末成形によるマイクロ部品製造法に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *233. 西籘和明, デジタル画像計測による熱可塑性 CFRP プレス成形品の形状測定, 共同研究, 2012 年
- *234. 西籘和明, 熱可塑性 CFRP プレス成形金型に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *235. 西籘和明, 熱可塑性 CFRP 破砕片の射出成形に関する研究, 共同研究, 2012 年
- *236. 西籘和明, 射出成形用加熱搬送装置の開発, 共同研究, 2012 年
- *237. 西籘和明, 金属・樹脂ボルトの緩み防止対策, 技術相談, 2012 年
- *238. 西籘和明, 炭素繊維強化プラスチックの用途展開, 技術相談, 2012 年
- *239. 西籘和明, 高圧水噴射用ポンプ部品の樹脂化, 技術相談, 2012 年
- *240. 西籘和明, ロアパネルの材質・構造の最適化, 技術相談, 2012 年

15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項とそれへの対応

<「選定時」に付された留意事項>

留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

「外部評価を含む評価体制を整備されたい。」

<「選定時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

外部評価体制の整備に関する留意事項に対応するため、本プロジェクトの特色(地域に根ざした研究)に鑑み、他では余り見られない2段階外部評価の体制を構築した。即ち、プロジェクト初年度には地域セミナー等を通じて、プロジェクトの取り組みについて地域産業界からの評価を受けることとし、プロジェクト2、3年目には、1年目の地域産業界の評価を反映した取り組み状況について、金型関連分野の専門家に外部評価を依頼することとした。プロジェクト1年目の評価体制は項目13に示した地域セミナーでのアンケート、質疑応答によるものとし、プロジェクト2、3年目の外部評価体制としては、3名の学外有識者(大阪産業大学 前川教授(元型技術協会会長)、大阪府産業技術総合研究室経営戦略課 南様、東大阪市立産業技術支援センター 曾根所長)からなる外部評価委員会を組織し、プロジェクト2年目および3年目にそれぞれ外部評価委員会を実施することとした。(3年目は平成26年11月に実施予定)

上記の通り、本プロジェクトの狙いである地域に根ざした研究に鑑み、通常の有識者だけでなく、プロジェクト当初に地域産業界の評価を受け、プロジェクト遂行に採り入れている。加えて、大学(金型関連学協会)、地域独立法人、東大阪市等官学の有識者からの評価を受けることで、産官学の幅広い方面から評価を受けることとした。

まず、初年度の地域産業界からの評価を通じ、プロジェクトに対する期待と、例えば技術のデジタル化による技術流出の懸念及びそれに対する対応の甘さなど、産業界視点での厳しい評価を頂いた。それに基づき、以降プロジェクトを推進する上で、真に地域産業に貢献できる、地域に根ざした研究となるよう修正すべき項目を明らかにして課題を推進できた。

続いて、2年目の有識者による外部評価委員会においては、プロジェクトの概要や狙いおよび計画に対する進捗状況の評価に加え、予算執行状況、機器利用状況等の透明性や妥当性について報告を行い、評価を受けた。予算執行については装置購入、人員採用ともプロジェクト会議での協議および承認、プロジェクトリーダーの承認を順次行う透明性の高い手続きを採用している点、また機器利用についてはプロジェクト内に実験工場担当長と装置毎の管理担当を決め、プロジェクト全体での利用ルール等の策定および装置使用管理を行うなど、一部の担当者の私的判断による装置の囲い込みや私物化を避け、利用効率および共同性を高める形式としている点などについて報告を行った。

報告に対し、特に予算執行や課題推進、装置利用等についての問題点の指摘がなかったことに加え、プロジェクトの取り組みの意義などについて高い評価をいただいた。

以上の対応により、研究課題遂行において、プロジェクト内部の独りよがりな視点に偏ること無く、またプロジェクト遂行にかかる諸業務、特に予算執行並びに装置利用を含む課題推進について、より透明性が高く公共性の高い取り組みへの意識が高まり、結果として2年目以降の外部評価時の問題指摘点がゼロとなるようなプロジェクトの遂行へとつながった。

尚、平成26年3月1日に外部評価委員会で受けたコメントおよびそれに対する回答・対応の主なものを以下に示す。

コメント 国公立大学生に比べて私立大学生は学習姿勢が消極的なため、金型技術者育成は私大では難しいイメージがある。アジアの若い人をターゲットにして教育する必要があるのでは？タイやベトナムの学生を日本へ呼び、日系企業へ就職、日本の学生との人脈にもつながる。文科省へのアピールになる。

回答 タイの工業大学と近大が提携したので今後関わっていける可能性があります。参考 URL は、<http://www.kindai.ac.jp/topics/2013/05/510.html> です。

また、国際交流室では交換派遣留学の提携先を倍増させる計画を立案している最中です。

要 望 金属3Dプリンタは旧松下電工が進んで事業化していた。経産省が大型予算を充てるので、この関連企業(パナソニック、ダイハツ)を紹介できるので、可能性があればこの分野でも貢献してほしい。

回 答 経産省のH26年度「三次元造形技術を核としたものづくり革命プログラム」に工学部の京極先生ら30を超える研究機関や企業が共同で事業採択をされている。本学工学部の京極教授らを中心に研究開発を進めて行く方針です。一方、『型ろう会』に参加されている金型関連企業およびリエゾンセンターを通じて金属3Dプリンタに対する技術相談が数件ある。プロジェクトとして金属3Dプリンタに対する技術情報に注視し、粉末冶金やパラレル機構等の観点からの情報提供に加え、デジタル画像解析ロボットによる形状測定を通じて貢献させていただきます。

要 望 金型業界の方々を紹介することができるので是非声をかけてほしい。冷間鍛造用金型は関西企業数社が技術を持つだけ。この分野でも貢献してほしい。

回 答 冷間鍛造に関しては研究者がおらず近い将来も含めて対応が難しいと認識しております。しかし、重要な課題であるので情報収集は継続予定です。

コメント 学生金型グランプリに出場のため、企業人材を多く入れたほうがよい。

回 答 学生金型グランプリの出場に際し、金型の設計・製造を現場で経験した職人の協力は必須です。技術支援者(金型職人)2名をプロジェクトの研究予算で雇用し、本年度の第6回学生金型グランプリに初出場いたしました。金型プロジェクト終了後の翌年の第7回学生金型グランプリにも技術支援者の協力を得て出場予定する予定です。第8回目以降も技術支援者の協力が必要と考え、金型デザインセンター(仮称)の新設に伴い、センターの技官とは別に金型技術者の採用を要望しております。

コメント CAEはサポートとセットにならないと中小企業で使うのは困難。卒業生が金型企業へ就職することまで考慮した進め方をしてほしい。

回 答 現在はCAE解析部分のみ開発しています。本プログラムは受託解析を対象とします。学生へのCAE教育は学生金型グランプリを通じて実施する予定です。

<「中間評価時」に付された留意事項>

留意事項が付されていない場合は「該当なし」と記載してください。

「該当なし」

<「中間評価時」に付された留意事項への対応>

付された留意事項に対し、どのような対応策を講じ、また、それにより、どのような成果があがったか等について、詳細に記載してください。

「該当なし」

1. はじめに

本報告書は、平成24年度から平成26年度に実施した文部科学省 私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 地域に根差した研究「大阪東部地域連携による先進的な金型技術の高度化研究」の成果をまとめたものである。

2. 研究プロジェクトの目的・意義

大阪は日本の金型産業の最大集積地であるが、近年、製造拠点のグローバル化とアジア諸国の台頭により、金型製造業はさらなる短納期化・複雑化・高精度化・高機能化・低コスト化が求められている。一方、炭素繊維強化熱可塑性プラスチック(CFRTP)のプレス成形とリサイクル技術に対する東大阪市内企業5社と近畿大学の取組が新聞やテレビで取り上げられ、高い関心が寄せられている。近畿大学は大阪東部の金型産業の集積地に位置し、近隣には金属プレスやプラスチック射出成形の金型製造企業に取り囲まれ、地域に根差した実学を重んじる学風が特徴である。

本研究は、地域の金型製造業や川下企業の要請に、暗黙知の金型技術をデジタル化し地域の財産として継承し、これを研究者の専門分野と関連付け、金型の材料・設計・製造の先進的な研究と教育により地域で活躍できる金型人材を育て、大阪東部地域が金型産業の拠点として維持できるよう、地域と大学が共に発展する環境を提供する。

3. 研究プロジェクトの研究体制および計画

本研究は、近畿大学大学院 総合理工学研究科 メカニクス系工学専攻を中心に理工学部機械工学科も一体となった「オール理工・メカ」の研究体制で臨む。メカニクス系工学専攻には、本プロジェクトの基盤技術である機械設計・解析、ロボティクス・メカトロニクス、金属材料を専門とする研究者を有し、これまでも私立大学ならではの「実学」を重視した研究に取り組んできた。

本プロジェクトでは、これら個々の研究成果や研究シーズを『金型』に集約し、各研究者のシナジー効果により新たな研究成果を創出する。通称『型プロ』と名付けたプロジェクトチーム(PT)内に、研究者の専門性から分かれた3つの「専門研究グループ(Gr)」((A)型・材料Gr, (B)型・設計Gr, (C)型・製造Gr)を設置する。また、地域企業等の産学連携を進めるため、リエゾンセンターと協力した研究基盤を構築する。

初年度は地域の金属プレス・プラスチック射出成形・鋳造の金型製造企業や川下企業のニーズを調査し、「専門研究グループ(Gr)」ごとに研究課題を精査する。それらを、新素材の金型材料の作製と組織解析、射出成形金型設計用CAEソフトの開発、金型磨きロボットおよび面性状計測システムの構想設計に反映させる。2年目は、金型材料の製造条件、金型

の摩擦低減，金型磨きロボット面性状計測システムの試作について研究する．3年目は，1年目と2年目に開発した材料で金型を試作し，金型磨きロボットおよび面性状計測システムを連動させた実証実験を行い，完成した金型を用いて射出成形実験を行う．CAEによる計算結果と比較し，試作機やCAEソフトの改良を行い，全研究課題を達成する．研究成果は学会発表に加え、『大阪東部地域金型デザインセンター(仮称拠点)』の設置に向けた取組を行い，「地域の金型人材として活躍できる」教育カリキュラムを構築し，これらを成果発表会で報告する．

4. 研究成果の概要

本プロジェクト期間中に得られた論文，書籍，学会発表，特許出願，シンポジウム・学会等の開催，マスメディア・専門誌等での紹介，共同研究・受託研究，技術相談・依頼試験，助成金等外部資金獲得などの成果は下記の通りである．

論文(査読有)：	40編
書籍：	7編
学会発表：	133件
特許出願：	3件
シンポジウム・学会：	18件
マスメディア・専門誌：	13件
共同研究・受託研究	13件
技術相談・依頼試験：	22件
助成金等外部資金：	2件

5. 研究成果

鋳造型の流れ・伝熱解析

メカニクス系工学専攻 教授 木口 昭二

1. 緒言

近年、コンピュータ技術の発展はめざましく、パーソナルコンピュータをはじめとして、家電製品や自動車、携帯電話に至るまで、あらゆるところで利用されている。特にパソコンなどは、ここ十年ほどの間に生産性の向上や製品価格が下落したこともあり、誰でも買うことのできる時代となっている。更にその性能に至っては、飛躍的に進歩している。

このような高性能コンピュータは、当然ながら工場などの工業用にも広く用いられ、たとえばファクトリーオートメーションとして工場全体のコンピュータ管理による自動化が行われている。現在においてそれはもはや工場内だけにとどまらず、受注から生産、製造、在庫管理、出荷までをネットワークによって繋ぎ、パソコンで一元管理するようになっている。

そして、それは鋳造工場においても例外ではない。昨今のコスト削減、高品質化、高精度化といった厳しい要求を満たさなければならず、さらに、納期短縮も重要な点となっており、これらの条件を満たすにはコンピュータの利用以外には考えられないものとなっている。

そして、鋳造工場におけるコンピュータの利用は、主に次のようなものとなっている^[1]。

- ① 管理（生産管理、経理など）
- ② 制御（装置、機械の制御）
- ③ 設計（コンピュータ支援設計=CAD、コンピュータ支援加工=CAM）
- ④ 解析（コンピュータによる製品、行程の解析・設計（コンピュータ支援エンジニアリング）=CAE）

鋳物や鋳型、鋳込条件、鋳造の諸条件などを含めた設計作業を、鋳造方案と呼ぶが、欠陥のない高品質の鋳物を無駄なく経済的に作るには適切な鋳造設計が重要である。従来この作業はその道のベテランが各種のノウハウや類似品製作の経験によって初期設計し、試作によって確認、設計変更、設計決定という過程で行っていた。しかし、今日のように品質と経済性の要求水準が高くなり、加えて納期が短くなってくると、従来の方法では試作の費用、期間が大きくなりすぎる欠点がある。

従って鋳造における試作段階では主に③、④に代表されるコンピュータによる CAD、CAM や CAE を用いることで、試作段階における試行錯誤的な方案設計にかかる費用・時間の削減が図られているという現状がある。

そこで本研究では、試作段階における費用や期間の改善が可能なシミュレーションソフトを利用し、複雑形状鋳物の鋳造用金型の多数個取り方案における品質、欠陥、歩留りが最適な方案の考案および、計算結果の検証を目的とした。

2. 実験方法

本研究では複雑形状の鋳物について方案を考案し、それを元に立体モデルを作成、直交差分法による湯流れおよび、凝固シミュレーションを行う。この解析結果を元に、引け巣欠陥、湯回り

不良、焼着き欠陥について、欠陥の発生予測位置を分析する。

シミュレーションについては、大きく分けて 2 段階に分けて行う。第 1 段階は、鋳物を 1 個取りとした方案を作成し、良好な方案の作成を目指す。次に第 2 段階として、第 1 段階で最も良好な結果が得られた方案を元に 2 個取りの方案を作成し、特定の条件を変更した方案について、解析、比較を行う。

さらに第 1 段階、第 2 段階ともに、一部の方案については実際に鋳造を行い、シミュレーション結果との比較、検討を行う。

各欠陥の発生予測位置については、以下の条件を元に表示を行う。

2.1 引け巣欠陥の発生予測位置

引け巣欠陥は、鋳鉄溶湯が凝固する際に体積が収縮するために発生する欠陥である。そのため、この欠陥は凝固の遅れる位置において発生する可能性が極めて高い。従って参考文献^[2]より、以下を欠陥の発生予測位置の閾値と規定して表示し、それぞれの共通部位を引け巣欠陥の発生予測位置として扱う。

- (1) 最終凝固位置
- (2) 等凝固時間曲線の閉ループ
- (3) 温度勾配が $1.0^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ 以下の領域
- (4) G/\sqrt{R} が 0.5 以下の領域

2.2 湯回り不良の発生予測位置

湯回り不良は溶湯が鋳型全体に充填されるまでに凝固が開始することで発生する欠陥である。特に鋳物の先端や、薄肉の部位において、注湯口からの距離が離れていることや、冷却速度が速いことが原因で鋳鉄溶湯の凝固が早まり、この欠陥が発生する可能性が高い。湯回り不良の発生予測位置としては、鋳物表面の温度分布を表示し、液相線温度を下回る部位を表示する。または固相率を表示し、一定の固相率を越える部位を表示し、それらの共通部位を湯回り不良の発生予測位置として扱う。

2.3 焼着き欠陥の発生予測位置

焼着き欠陥は、高温の鋳鉄溶湯と、鋳型である鋳物砂が化学反応を起こすことで発生する欠陥である。この欠陥が発生すると、鋳鉄表面に非常に硬質な化合物が生成され、除去を行うには多大なコストを要する。そのため、あらかじめ方案設計によって焼着き欠陥の発生を抑制することが望ましい。

焼着き欠陥の発生予測位置としては、砂型と高温の溶湯が接する部位の中で、特に中子の体積が小さい部位において熱の放出が追い付かず、この欠陥の発生が予測される。そのため中子の体積が小さい部位と、温度分布を表示し、高温部が集中している部位とが重なる部位を、欠陥の発生予測位置として扱う。

3. 実験結果と考察

3.1 シミュレーション結果, 第 1 段階

第 1 段階では, 試作方案 1~試作方案 4 として, 1 個取りの方案を作成し, 比較を行った. 図 1 に解析結果における引け巣欠陥の発生予測位置を, 図 2 に実際の製品写真を示す.

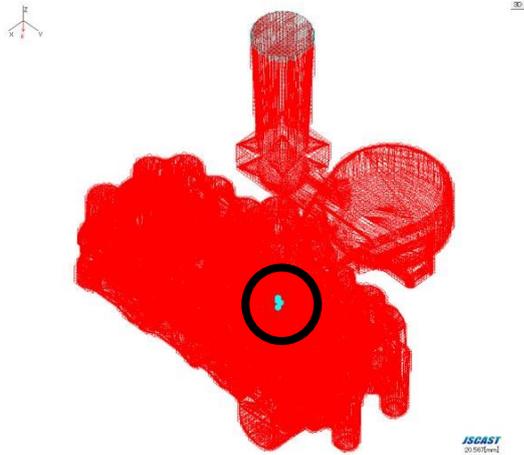


図 1 解析結果における引け巣欠陥予測位置

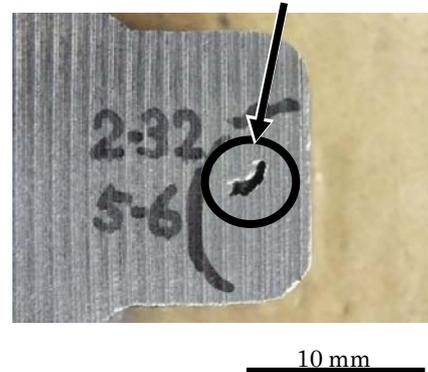


図 2 実製品の断面写真

図 1 および図 2 に示すように, 解析計算において引け巣欠陥の発生が予測された. さらに実製品について観察を行ったところ, 同様の位置に引け巣欠陥の発生が確認された.

また, 図 3 に解析結果における鋳物断面の温度分布を, 図 4 に実際の製品写真を示す.

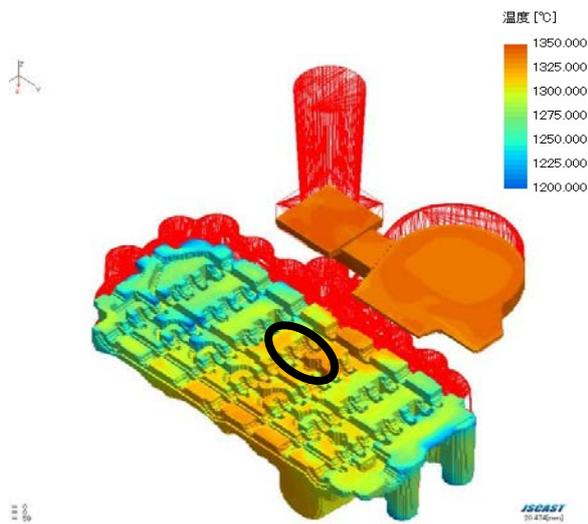


図 3 鋳物断面の温度分布

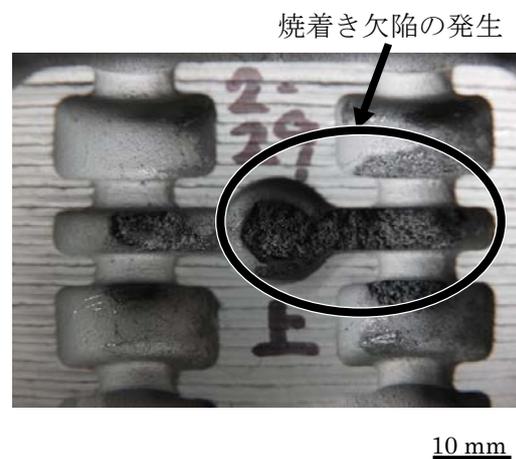


図 4 実製品の断面写真

図に示すように, 解析結果では, 鋳物中心部に高温の溶湯の集中が観察され, さらにこの部位における中子体積が小さいため, 焼着き欠陥の発生が予測される. そして実際の製品の観察を行ったところ, 同様の位置に焼着きの発生が確認された.

3.2 シミュレーション結果, 第 2 段階

第 2 段階では方案 2-60~方案 2-90 として, 第 1 段階の結果を元に, 2 個取りの方案を設計した。第 2 段階の解析結果について, 以下の表 1 に各方案の比較結果を示す。

表 1 2 個取り方案の解析結果における引け巣欠陥の体積比較

方案名	体積(cm^3)
方案 2-60*	1.686
方案 2-65	1.006
方案 2-70	1.081
方案 2-75	0.418
方案 2-80	0.304
方案 2-85	0.390
方案 2-90	0.115

*方案名における 60~90 は, 湯道と堰との角度を示す

表に示すように, 方案 2-90 において, 引け巣欠陥の予測体積が最も小さくなった。そしてこの結果および, 湯回り不良, 焼着き欠陥のいずれも発生していないことから, 方案 2-90 が最良の方案であると判断した。

また方案 2-90 について実際に鑄造を行ったところ, 同様の良好な結果が得られた。

4. 結論

- (1) 試作方案 1 において各欠陥の発生予測位置と実製品の欠陥が一致することが確認できた。またこのことから, シミュレーションソフトの信頼性を証明することができた。
- (2) 作成した試作方案において, 試作方案 4 が最も良好な解析結果となった。また実際に鑄造を行ったところ, 引け巣欠陥, 湯回り不良, 焼着き欠陥が発生しない最良の方案であった。
- (3) 方案 2-90 は, 方案 2-60~方案 2-90 において最も欠陥の予測体積が小さい解析結果となった。また試作方案 4 を 2 個取りとした場合の欠陥の予測よりも体積が小さくなり, より良好な方案として設計することができた。
- (4) 方案 2-90 を実製品として作製したところ, 試作方案において引け巣欠陥や湯回り不良, 焼着き欠陥が発生していた箇所には欠陥は発生せず, 良好な方案であると確認できた。

5. 参考文献

- [1] 新山 英輔: 金属の凝固を知る(丸善)(1998)94, 97
- [2] 永井 寛, 永瀬 重一, 大浦 賢一: CAE を利用した鑄造品の高品質化技術の開発『埼玉県産業技術総合センター研究報告』第 7 卷(2009)5

溶射による金型の高機能化技術

メカニクス系工学専攻 教授 沖 幸男

1. 緒言

金型の高機能化のためには、高温耐摩耗性に優れた材料の開発が望まれる。著者は、大阪府立大学大学院 高杉隆幸教授、金野泰幸准教授らとともに Ni 基金属間化合物溶射皮膜の開発を行っており、金型への耐熱耐摩耗皮膜としての適用が期待できる。

$L1_2$ 構造の Ni_3Al と $D0_{22}$ 構造の Ni_3V の二つの金属間化合物が微細かつ整合性よく配列した二重複相組織を有する Ni 基超々合金が、Takasugi, Kaneno 等によって開発された¹⁾。この合金の特徴である二重複相組織は、A1 (fcc) 単相域からの冷却過程において形成される。すなわち、最初に共析温度以上での上部熱処理時に、A1 相 (Ni 固溶体) から初析 $L1_2$ 相 (Ni_3Al) が析出して上部複相組織が形成される。その後、共析温度以下での下部熱処理時に残った A1 (fcc) 相が $L1_2$ 相 (Ni_3Al) と $D0_{22}$ 相 (Ni_3V) に共析変態することで下部複相組織が形成され、二重複相組織が得られる。この合金は高温において優れた組織安定性を示すと同時に、温度上昇に伴う硬さの低下が小さい。

二重複相組織を持つ超々合金は、このように優れた特性を持つ材料ではあるが、通常の金属間化合物で構成される合金同様、凝固収縮が大きく鑄造欠陥が入りやすい欠点をもっている。また、高温での硬さの低下も小さく、このことが逆に機械部品の作製に一般的に使用される 鑄造 - 鍛造 - 切削加工 の工程を適用しにくくしている。

そこで、溶射による耐熱耐摩耗皮膜としての適用、ならびに溶射成形法によるニアネットシェイプ部品の作製を試みる。そのためには、急冷凝固によって皮膜形成する溶射プロセスにおいて、二重複相組織が得られる条件を見出す必要がある。本研究では、減圧プラズマ溶射装置を用いて超々合金皮膜を作製し、溶射条件ならびに後熱処理条件と皮膜組織の関係を明らかにした。

2. 実験方法および条件

公称組成が Ni 75.0 Al 7.5 V 15.0 Nb 2.5 (at%) + 50 mass ppm B の合金粉末をガスアトマイズ法で作製し、 $63\ \mu\text{m}$ 以下に篩分けして溶射に供した。

溶射には減圧プラズマ溶射装置を用い、基材温度を種々変化させて溶射した。基材温度を変化させるために、溶射距離、チャンバー圧力、2次ガスとしての水素ガスの添加量を変化させた。

作製した溶射皮膜に、 $1280^\circ\text{C} \cdot 3\ \text{h}$ 、 $1050^\circ\text{C} \cdot 3\ \text{h}$ および $24\ \text{h}$ 、 $950^\circ\text{C} \cdot 3\ \text{h}$ および $24\ \text{h}$ の熱処理を施した。ここで、 1280°C は A1 (fcc) 単層領域、 1050°C は A1 (fcc) + $L1_2$ 共存領域、 950°C は $L1_2+D0_{22}$ 共存温度域であり、これらの温度の違いによる組織の違いを調べるために選択した。

溶射ならびに熱処理した皮膜は、SEM 組織観察、TEM 組織観察、X線回折、硬さ試験によってその特性を評価した。

3. 実験結果および考察

溶射皮膜の硬さは、溶射のままでは $384\ \text{Hv}$ であったが、熱処理によって $536\ \text{Hv}$ まで上昇し、溶製材と同等の硬さになった。熱処理前後の皮膜組織を Fig. 1 に示した。溶射のままでは、わずかに空孔の認められる層状の組織 (Fig. 1 b) であるが、熱処理によって空隙の無い緻密な組織に変化した (Fig. 1 e)。また、熱処理によって超々合金特有の二重複相組織が現れた (Fig. 1 c and f)。

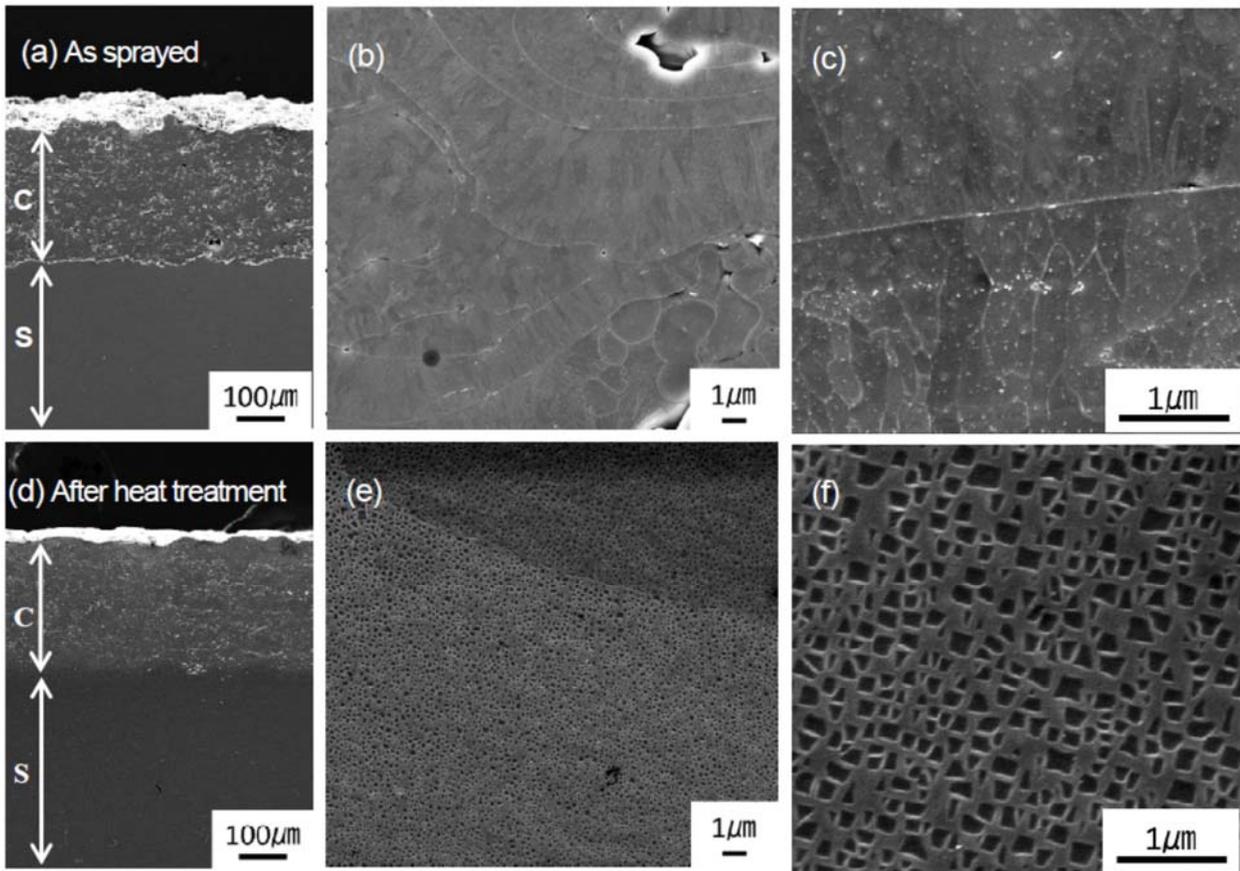


Fig. 1 SEM images of coating as sprayed (a-c) and after homogenization heat-treatment (d-e).
C: coating layer / S: substrate.

4. 結言

プラズマ溶射法を用いて二重複相組織を持つNi基超々合金皮膜を作製することを試みた。
得られた結果を要約すると次のとおりである；

- (1) 溶射のままでは基材温度にかかわらず組織は規則化せず、Ni固溶体のまま凍結された。
- (2) 溶射後に溶体化熱処理を施すことによって二重複相組織を持つ皮膜が得られた。

5. 参考文献

[1] Y. Nunomura, Y. Kaneno, H. Tsuda, T. Takasugi, *Acta Mater.* 54 (2006), 851-860.

6. 成果発表

- 1) 黒柳尚隆, 金野泰幸, 沼倉宏, 高杉隆幸, 沖幸男, 耐熱耐摩耗 Ni 基金属間化合物コーティングの作製と特性評価, 日本金属学会 2013 年度秋期講演 (第 153 回) 大会, 金沢, 2013 年 9 月
- 2) 沖幸男, 徳丸博紀, 黒柳尚隆, 金野泰幸, 高杉隆幸, ニッケル基金属間化合物溶射皮膜の作製と特性評価, 日本機械学会 M&M 2014 材料力学カンファレンス, 福島, 2014 年 7 月
- 3) 沖幸男, Ni 基金属間化合物合金の溶射被膜および溶射被膜の製造方法, 特願 2013 - 175624, 2013 年

金型材料の複合化による高性能化技術

メカニクス系工学専攻 准教授 浅野 和典

1. 緒言

アルミニウムは軽量で、耐食性、熱伝導性、加工性、審美性などに優れていること、また合金化・熱処理などによって強度や硬度の上昇も可能であることから、試作用金型やブロー成形用金型などに用いられている。しかし鉄鋼材料などに比べて高温強度や剛性・耐摩耗性に劣る、熱膨張係数が大きいなどの理由により、射出成形用金型などの高温・高圧下での使用は困難である。アルミニウム合金のこれら諸性質を改善する手法として注目されている手法の一つとして、セラミックス繊維などの複合化が挙げられる。強化材として用いられるセラミックスには種々の性質のものが存在し、求められる特性やアルミニウム合金との複合化の容易さ、コストなどにあわせて使い分けられる。射出成形用金型材料に求められる常温および高温強度、剛性、硬度、熱膨張および熱伝導特性、耐摩耗性といった性質もこの複合化によって可能になることが期待できるが、金型材料への適用を考慮し、その特性を系統的に調べた報告はきわめて少ない。

本研究では、金型の熱交換能力と耐摩耗性の向上を図るためにピッチ系炭素繊維を、また金型の寸法精密化、高強度化・高剛性化を図るためにチタン酸カリウム短繊維をそれぞれ強化材に用いたアルミニウム合金複合材料を作製し、これらの諸性質を明らかにすることで、従来見落とされがちであった、金型素材の材質改善の観点から射出成形の生産性向上を考えるための知見を得ることを目的とする。

2. 複合材料の作製とその諸特性

2.1 ピッチ系炭素繊維強化アルミニウム合金複合材料の諸特性

マトリックスには JIS-AC8A アルミニウム合金 (Al-Si-Cu-Ni-Mg 系合金) を用いた。強化材にはピッチ系炭素短繊維を使用した。炭素繊維の諸特性を Table 1 に示す。まずシリカバインダと繊維を蒸留水と混合・加圧成形し、大気中で 458 K で 2 時間乾燥させてプリフォーム (予備成形体) を作製した。このプリフォームに AC8A 溶湯を加圧含浸させて複合化を行った。複合材料の繊維体積率は 30 および 40 vol% とした。Fig. 1 に作製した複合材料 (30 vol%) の顕微鏡組織を示す。炭素繊維 (写真中の黒色相) はランダムに配向していることがわかる。

複合材料からピン試験片 ($\phi 5 \times 15$ mm) を切り出し、熱膨張計を用いて 310~780 K の範囲で膨張-収縮曲線を求め、平均線熱膨張係数を算出した。また複合材料からディスク試験片 ($\phi 10 \times 1.5$ mm) を切り出し、レーザフラッシュ法熱定数測定装置を用いて室温における熱拡散率を測定し、別に求めた密度と比熱の値を積

Table 1 Properties of carbon fiber

Density (Mg / m ³)	Diameter (μ m)	Length (μ m)	Thermal Conductivity (W/m · K)	Coefficient of Thermal Expansion ($\times 10^{-6}$ K ⁻¹)
2.2	10	193	629	-1.5

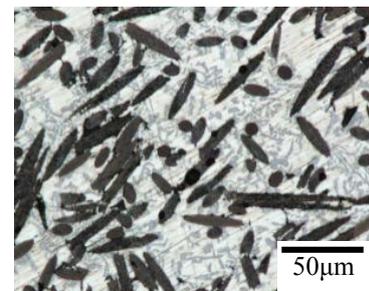


Fig. 1 Optical micrograph of a carbon fiber-reinforced composite (30 vol%).

算して熱伝導率を算出した. Fig. 2 に AC8A および複合材料の各温度間における平均線膨張係数を示す. いずれの温度においても, 炭素繊維の複合化により平均線膨張係数は低下することがわかる. これらの値は, Shi の式¹⁾を用いた計算によりおよそ予測できることがわかった. Fig. 3 に AC8A および複合材料の熱伝導率を示す. 炭素繊維の複合化により熱伝導率は上昇した. 複合化による熱伝導率の上昇量は加算則 (複合則) で得られる値に比べて小さいものの, 繊維体積率が 40 vol% の複合材料の熱伝導率は純アルミニウムのそれ (238 W/(m・K)²⁾に近い値が得られた.

複合材料からピン試験片(φ5×15 mm)を切り出し, SUJ-2 ディスク試験片を相手材として組み合わせ, 室温でピンオンディスク方式による摩耗試験を行った. 摩擦速度 (v) は 0.3 m/s および 3.0 m/s, 押付け荷重は 19.6 N として, 摩擦距離 1000 m までの試験片の摩耗量と摩耗試験中の摩擦係数を測定した. Fig. 4 に AC8A および複合材料 (30 vol%) の摩擦距離と摩耗量の関係を示す. 炭素繊維との複合化により, AC8A の摩耗量は大きく減少することがわかる. また Fig. 5 に AC8A および複合材料 (30 vol%) の摩耗試験中における摩擦係数を示す. 図中のエラーバーは摩擦係数値の変動幅を示している. いずれの摩擦速度においても摩擦係数の変動幅が炭素繊維の複合化によって小さくなることをわかる.

なお, 相手材の摩耗量も複合材料と組み合わせた場合の方が少なかった. 相手材の摩耗面を観察すると, AC8A と組み合わせた場合には AC8A の凝着や溶着が見られたが, 複合材料と組み合わせた場合はそれが少なかった. これらの結果から, 複合化により合金の摩耗量が減少したのは, 摩耗試験により破碎した炭素繊維が摩擦面に残留し, 固体潤滑剤の役割を果たしたためと考えた.

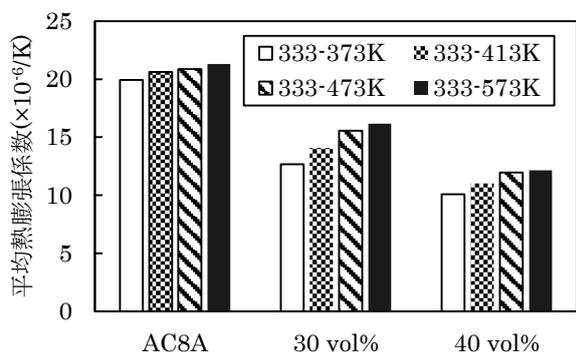


Fig. 2 Average coefficient of thermal expansion of AC8A alloy and composites.

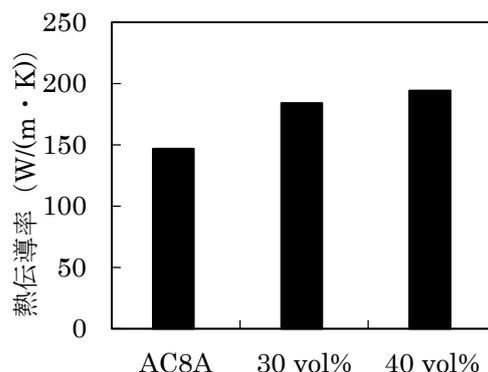


Fig. 3 Thermal conductivity of AC8A alloy and composites at room temperature.

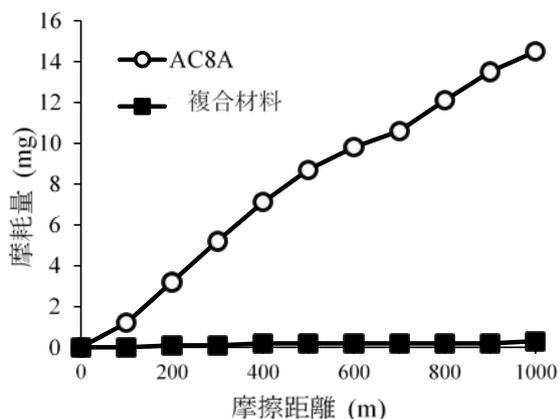


Fig. 4 Relationship between wear loss and sliding distance of AC8A alloy and composites(30 vol%) (v = 0.3 m/s).

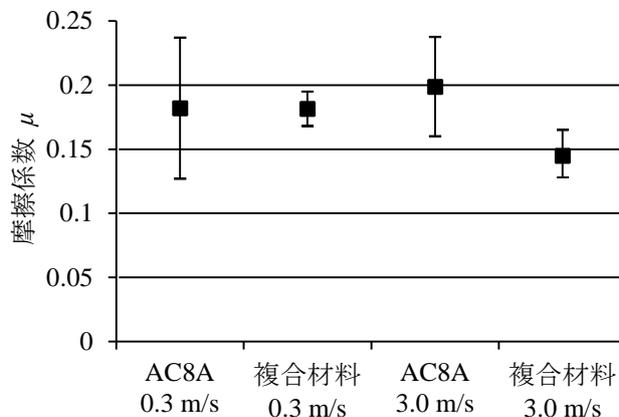


Fig. 5 Coefficient of friction of AC8A alloy and composite(30 vol%) under wear test.

また射出成形金型への適用を想定し、耐ヒートチェック性の評価を行った。試験片（ $\phi 13 \times 12$ mm）を赤外線イメージ加熱炉を用いて急速加熱させ、673K 保定後に急速冷却、の工程を 100 回繰り返した。試験前後の複合材料試験片（30 vol%）の外観を Fig. 6 に示す。試験片表面にはヒートチェックによるクラック等は観察されなかった。

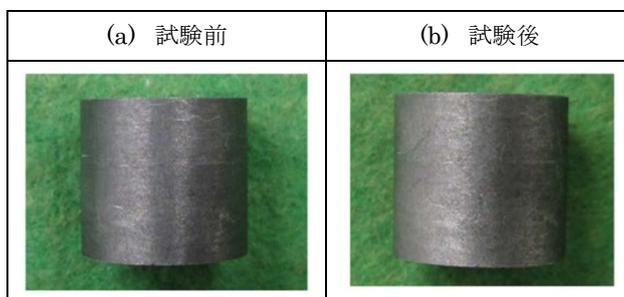


Fig. 6 Appearance of composite test piece (30 vol%) (a) before and (b) after heat-checking test.

2.2 チタン酸カリウム短繊維強化アルミニウム合金複合材料の諸特性

強化材にはチタン酸カリウム短繊維を用いた。短繊維の諸特性を Table 2 に示す。マトリックス、複合化方法・条件は炭素繊維を強化材とした場合（2-1）と同じとし、複合材料中の繊維体積率は 25 vol% および 45 vol% とした。Fig. 7 に作製した複合材料の顕微鏡組織（25 vol%）を示す。チタン酸カリウム短繊維（写真中の暗色相）はランダムに配向していることがわかる。

複合材料から切り出した円柱状試験片（ $\phi 8 \times 12$ mm）を用いて室温と 523 K で圧縮試験を行い、弾性係数と 0.2 %耐力を求めた。Fig. 8 に AC8A および複合材料の室温および 523K における縦弾性係数を示す。いずれの温度においても繊維の複合化により合金の縦弾性係数が上昇していることがわかる。

Fig. 9 に AC8A および複合材料の室温および 523K における 0.2 %耐力を示す。いずれの温度においても繊維の複合化により合金の耐力が上昇していることがわかる。

Fig. 10 に AC8A および複合材料の 333 K- 373 K 間における平均線膨張係数を示す。繊維の複合化により平均線膨張係数は低下することがわかる。また Fig. 11 に AC8A および複合材料の熱伝導率を示したが、繊維の複合化により熱伝導率は上昇することがわかった。

また 2-1 と同条件で耐ヒートチェック性の評価を行ったが、複合材料試験片表面にはヒートチェックによるクラック等は観察されなかった。

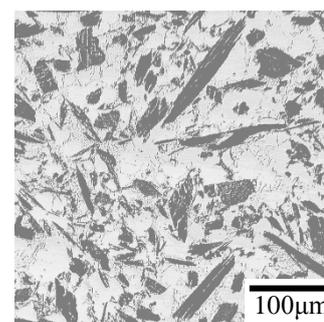


Fig. 7 Optical micrograph of a potassium titanate fiber-reinforced composite (25 vol%).

Table 2 Properties of potassium titanate fiber.

Density (Mg / m ³)	Diameter (μm)	Length (μm)	Vickers hardness	Thermal Conductivity (W/(m · K))	Coefficient of Thermal Expansion (×10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Elastic modulus (GPa)
3.5	13	65	250	1.7	6.8	280

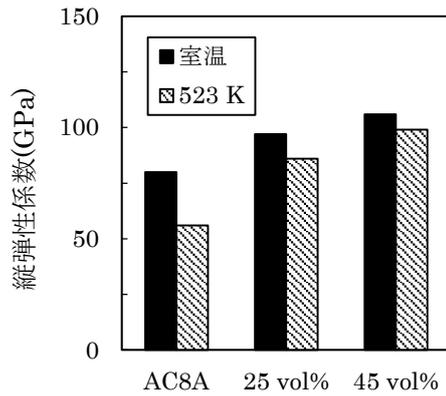


Fig. 8 Young's moduli of AC8A alloy and composites.

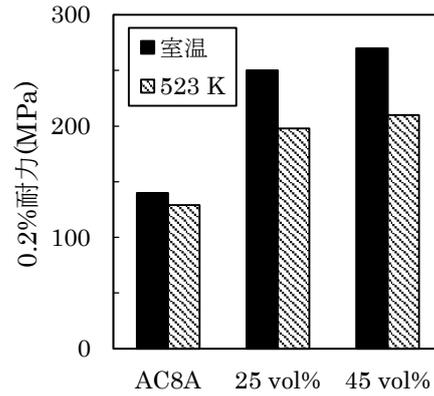


Fig. 9 0.2% proof stress of AC8A alloy and composites.

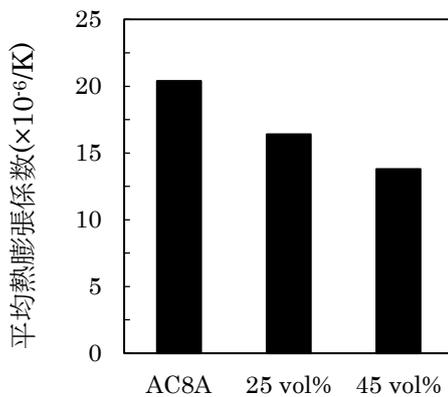


Fig. 10 Average coefficient of thermal expansion between 333K and 373K of AC8A alloy and composites.

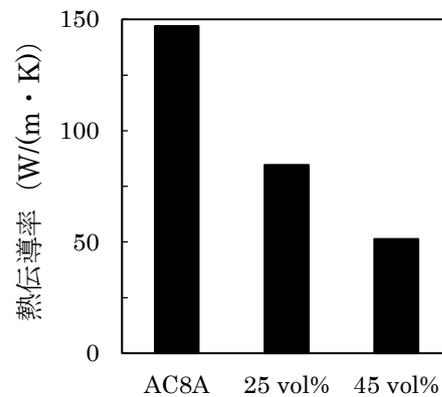


Fig. 11 Thermal conductivity of AC8A alloy and composites at room temperature.

3. 結言

アルミニウム合金とセラミックス繊維の複合材料を作製し、その組織解析や特性調査を行った。いずれの強化材を用いた場合も、アルミニウム合金が持つ軽量性を保持しながら、複合化によってアルミニウムの低熱膨張化が行われた。これに加え、ピッチ系炭素短繊維の複合化により、純アルミニウムに近い高い熱伝導率が得られるとともに、耐摩耗性が著しく向上した。チタン酸カリウム短繊維の複合化により、高強度化・高剛性化を達成するとともに、熱伝導率が小さくなった。

低熱膨張化は金型の寸法精密化、高硬度化・高剛性化と耐摩耗性向上は金型の寿命向上に寄与すると考える。また金型材料の高熱伝導化は熱交換能力の向上（生産性の向上）に、低熱伝導化はキャビティ内の保温効果の増大につながると考える。強化材の種類や体積率などを制御することで、求められる特性に応じた金型材料の作製が可能である。

4. 参考文献

- [1] H. Li, Z. Li, L. Qi and H. Oy, "Effect of extrusion on the thermal expansion behavior of Al₁₈B₄O₃₃ whisker-Mg composites", Scripta Materialia. Vol. 61, pp.512-515 (2009).
- [2] 日本金属学会編, 金属データブック, 丸善 (1974), p.12.

鑄造用鑄型作製金型の耐久性向上

理工学部機械工学科 講師 富田 義弘

1. 緒言

現在、鑄造用鑄型作製金型の耐熱性、耐久性向上が要求されており、この改善方法として複合化を検討している。複合化の1つとして鑄ぐるみ技術^[1]があり、ステンレスパイプを純アルミニウムで鑄ぐるんだ冷却装置がすでに実用化されている^[2]。しかしアルミニウムは高価であるため、本研究では純アルミニウムに代わり鑄鉄を用いることによって低コスト化を試みている。しかし、鑄ぐるむ際、溶湯から受ける熱によりパイプの温度が過度に上昇し、パイプが溶けて溶湯がパイプ内に流入することが問題となっている。そこで、鑄造 CAE による最適な堰形状及び充填方法を検討し、鑄型形状、方案を変更することで、溶湯によるパイプへの熱集中の改善を行い、鑄鉄製冷却装置の製造条件を検討する。これにより、冷却機能向上を図り、耐久性、耐熱性を向上させた鑄造用鑄型作製金型の製造に応用させることを目的とする。

2. 実験方法および条件

2.1 CAE 解析

まず鑄造 CAE システム(JSCAST Ver.10)による湯流れ解析を行う。形状を改善した砂型を作製するために、3次元 CAD 設計ソフト Solid Works を用いて複数の形状(従来、改善型)を作製し、鑄造 CAE システムを用いて砂型内部で鑄鉄溶湯がどのように充填されていくか、溶湯温度を可視化する。この解析結果により、パイプ内部に鑄鉄溶湯流入する原因を考察し、砂型形状を改善する。また、堰の位置を低くし形状を変更した。これを基に堰の数を1つ、2つ、3つとした改善案を作製した。

次に、蛇行状 SUS304 パイプ(外径 6mm, 厚さ 1mm, 長さ 6000mm)を鑄鉄で鑄ぐるむために、改善した型の砂型を作製する。砂型は CO₂鑄型を用い、上型と下型の間に中子のように SUS304 パイプが固定されるように挟み込んだ。なお、堰の形状により鑄込み重量は変化するが、鑄込み速度は一定とした。変更した鑄造モデル、湯道無、堰1つ、堰2つ、堰3つを図1に示す。解析条件を以下に示す。また、材料(FC200, SUS304, CO₂, Air)の初期温度および物性値を表1に示す。

<解析種類>湯流れ解析

<要素形状>直交要素

<総要素数>3,606,295

<計算条件>熱流れ

<終了条件>充填率 98.0[%]まで計算

<壁面条件>ノースリップ

<動粘性係数>線形 0.5000[cm²/s]

<重力加速度>980.00[cm²/s]

<湯回り不良(流動停止)>考慮しない

表1 材料の初期温度および物性値(K)

材料名	初期温度	固相線温度	液相線温度
FC200	1623	1413	1473
SUS304	293	-	-
CO ₂	293	-	-
Air	293	-	-

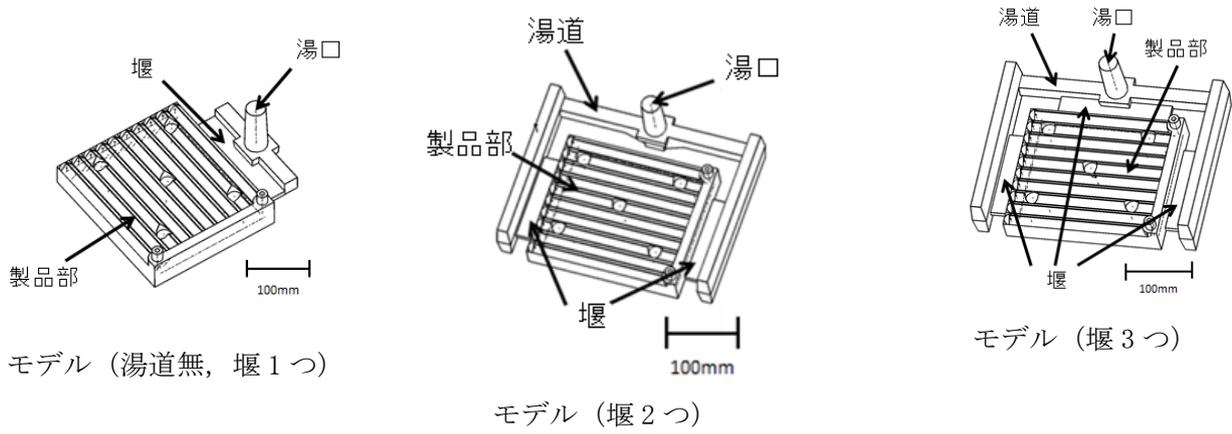
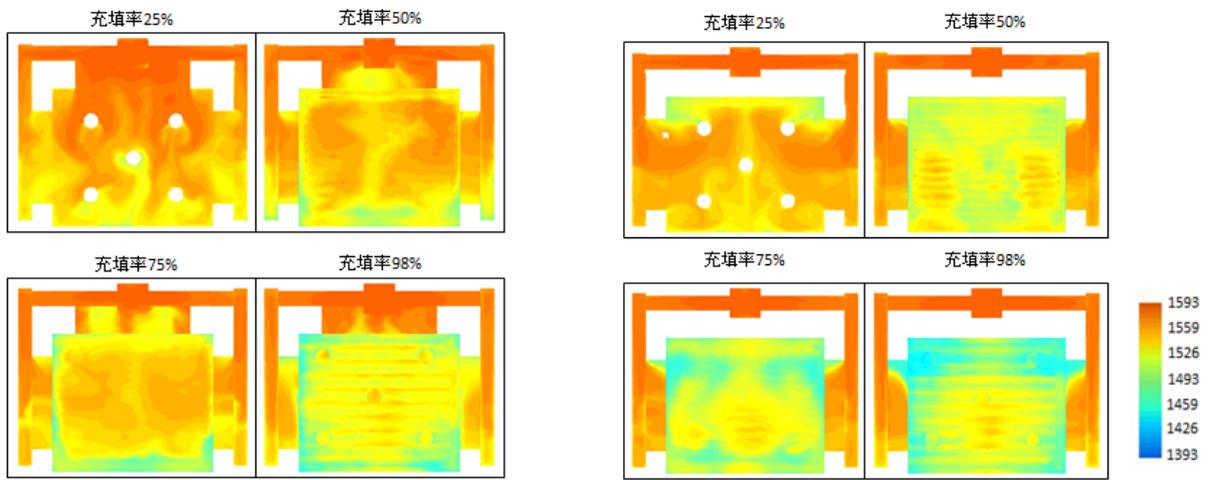
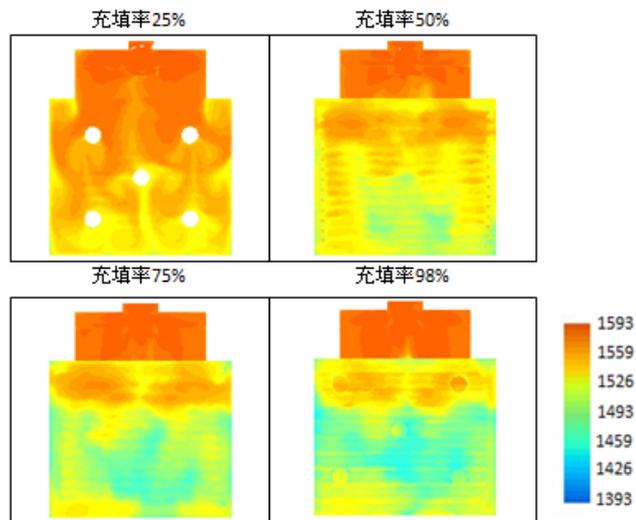


図1 鋳造モデル



(A) 堰3つ

(B) 堰2つ



(C) 堰1つ (湯道無し)

図2 改善後の湯流れ解析結果(上部)

溶湯充填率(0%~98%)において、砂型内部の鋳鉄溶湯の温度変化を製品上部、下部より観察した。溶湯充填率 25%、50%、75%、98%で観察を行い、それぞれの時点における鋳鉄溶湯の温度分布を図2に示す。解析結果は 1393K~1593K を 30 階調で分割し、凡例のとおり着色した。

堰3つの(A)では製品部の温度分布に注目すると、製品部内の温度差は目に見えて小さくなった。また、堰付近の熱の集中も過去の結果と比べると改善された。しかし、このモデルでは過去のモデルより鋳鉄を多く使用するのでコストの削減の面では改善されていない。

堰を1つ減らした堰2つの(B)では製品部の温度分布に注目すると、堰3つと同様に堰周辺の温度の集中は改善された。また製品部の温度の差も小さいままだった。しかし、鋳鉄の使用量は多く歩留まりが悪い。

そこで堰を1つとした(C)では製品部の温度分布に注目すると、製品部の堰付近と末端部の温度差は過去の結果と比較すると小さくなった。しかし、過去の鋳造モデルと比べると堰付近の熱の集中は改善されたが、やはり堰を1つにしたので堰付近と末端部では約 130K の差があり、まだ堰付近に熱が集中している。

以上の結果より堰の位置を低くすることは有功であり、席の幅を広くすることで鋳込み速度を上げることも有功に働いていることがわかる。また、堰数は1つでも可能である方案が導き出された。そこで実際に鋳ぐるみ実験を行い、シミュレーション結果との比較を行った。

2.2 蛇行状 SUS304 パイプの鋳ぐるみ実験

鋳ぐるみの際に用いる溶湯は片状黒鉛鋳鉄とし、目標組成を C : 3.5mass%、Si : 2.4mass%とし鋳鉄と鋼くず、Fe-Si 合金により成分調整を行った。溶解材料の化学組成を表1に示す。地金中の C, Si の歩留まりを 95%として溶解重量の設定を行う。高周波誘導溶解炉を用いて鋳鉄と鋼屑を 1773K まで昇温し、溶湯を安定させるため 0.6ks 間保持した後 Fe-Si 合金を加え成分調整を行い、目標温度 1623K で鋳込んだ。

表1 溶解材料の化学組成(mass%)

	C	Si	Mn	P	S
鋳鉄	4.32	2.01	0.20	0.083	0.013
鋼くず	0.21	0.064	0.75	0.029	0.004
Fe-Si合金	-	75	-	-	-

堰の位置を低く、数をそれぞれ3つ、2つ、1つとし注湯温度 1623K で鋳ぐるみ実験を行った結果、3つの場合すべてにおいてパイプ内への鋳鉄溶湯の流入は見られず良好に鋳ぐるめていた。

さらに、本研究で改善を行った鋳造モデル3つが、従来品より優れていることを確かめるため、過去の研究論文から鋳ぐるみの実験結果を参照し、本研究の実験結果と比較を行った。比較は注湯温度 1623K、A 側（従来では堰側）の切断面にて行った、比較の結果を図3に示す。鋳鉄、パイプの種類、実験方法は全て同じである。

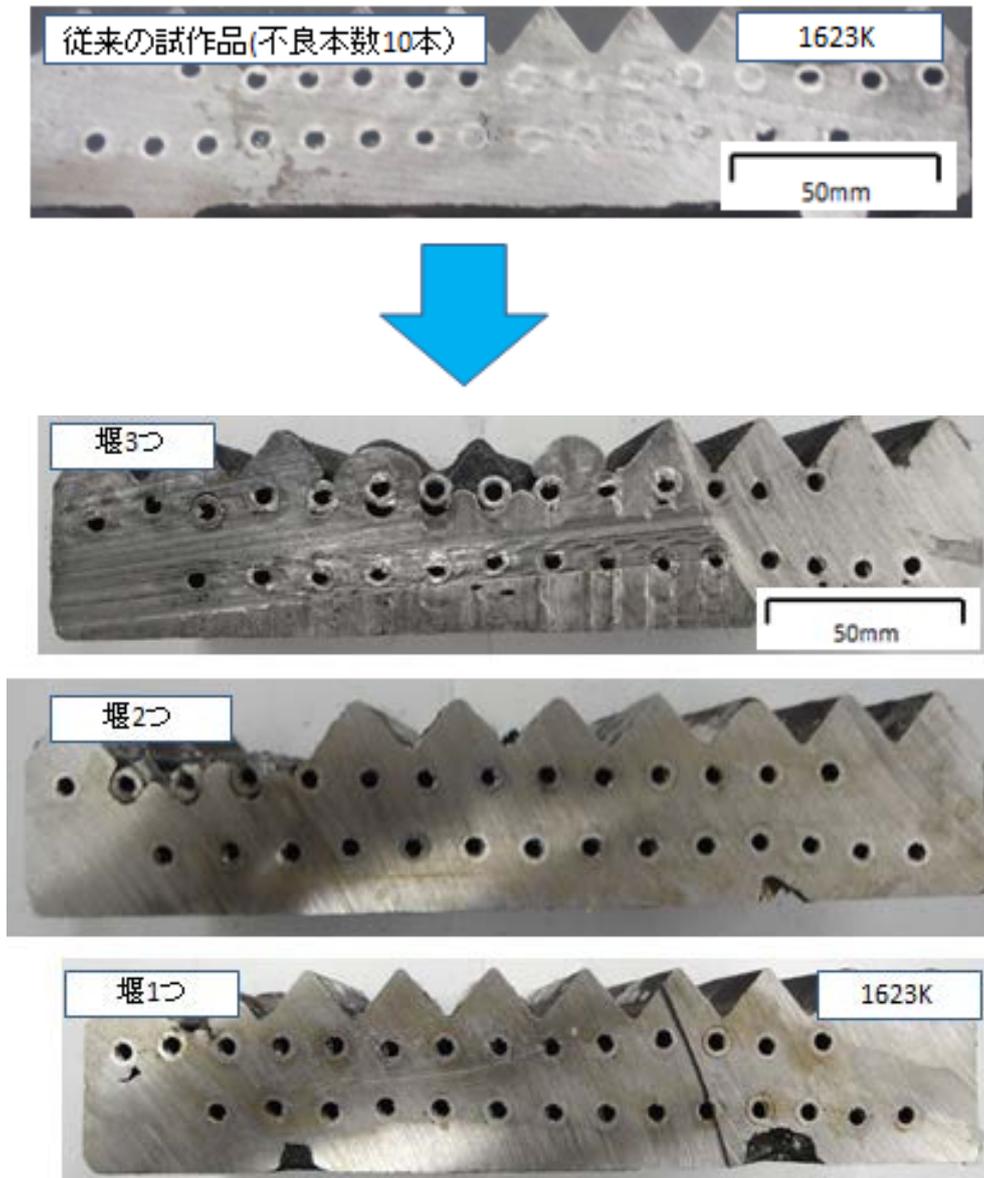


図3 従来との比較 A (堰) 側断面

比較結果を見ると、従来の試作品では28本のパイプのうち10本がパイプ内に鑄鉄溶湯が流入していたのに対し、改善を行った鑄造モデルを使用した冷却装置には3種類すべての場合で28本のパイプすべてに不良は見られなかった。この結果から、堰の位置を低くしたことで堰付近のパイプに溶湯が接する時間が短縮され、堰を3つにすることにより3方向から溶湯が製品部に入ることにより熱の分散が図れたと考えられる。また、堰2つの場合も同じことがいえる。堰1つの場合は使用する鑄鉄溶湯の量が減ったのでパイプが溶湯から受ける熱量を抑えることができたと考えられる。したがって、鑄造CAEにより鑄鉄溶湯の充填過程を観察し、その際溶湯の温度変化を可視化することによって、どこに熱が集中しているかを考察し、それをもとに鑄造モデルの改善を行ったことにより、製品部の内部の温度差、熱の集中が改善されたといえる。

このことにより、新たな鑄造モデルで注湯温度1623Kにおいて冷却装置の製造が可能である。しかし、堰が3つの場合が最も熱を分散する構造になっていたが重量が重く、使用する鑄鉄溶湯が多くなり、コスト削減の面では改善されたとはいえない。また、堰2つの場合も本実験で挙げた不良の原因となる2つの点は改善されたが、こちらもコスト削減の面では堰3つと同様のことがいえる。

したがって、3種類の鋳造モデル（堰1つ湯道無，2つ，3つ）の中では，使用する溶湯の量が少なく，コストの削減が期待できる堰1つ，湯道無の鋳造モデルが最も適している．

4. 結言

本研究では，従来の研究で問題となっていたパイプ内に溶湯が流入してしまう点に注目し，まず，鋳造 CAE を用いて従来形状の砂型内部での鋳鉄溶湯の可視化を行い，砂型形状の欠点を考察し，鋳造モデルの改善を行った．砂型形状を改善し，冷却装置の試作を行い，鋳ぐるみ結果の判定を行った．以上の実験を行った結果，次のことが得られた．

- (1) 鋳造 CAE 改善実験から，鋳造モデル改善後は，堰の位置を低くし断面積の拡大，堰の数を変更したことにより温度分布が均一化し，堰付近のパイプ部に発生していた熱集中の問題が解消された．
- (2) 改善後の砂型による鋳ぐるみ実験を行い，注湯温度 1623K ではすべての断面でパイプが元の形状を保ち，適切に鋳ぐるむことができた．
- (3) 3種類の鋳造モデルの中では溶湯の量が少なく，コストの削減が期待できる堰1つ，湯道無が最も適している．

以上のことより，注湯温度 1623K で鋳ぐるみ実験を行った際，改善した鋳造モデル（堰1つ，2つ，3つ）の全ての場合でパイプ内に溶湯が流入せず，良好に鋳ぐるむことができた．このことから蛇行状 SUS304 パイプを鋳鉄で鋳ぐるんだ冷却装置を開発するにあたり問題とされていた堰付近からパイプ内への鋳鉄溶湯の流入が改善されたといえる．よって鋳鉄溶湯を用いて蛇行状 SUS304 パイプを鋳ぐるむことで，純アルミニウムの製品に近づけ，低コスト化で工業用途にも使用できる冷却装置の製造を可能にし，ステンレス鋳ぐるみ部材の用途拡大を図れたと考えられる．これにより，冷却機能向上を図り，耐久性，耐熱性を向上させた鋳造用鋳型作製金型の製造に応用させることができると考えられる．

参考文献

- [1] 「鋳造を利用した複合化・接合技術」 鋳造を利用した接合技術—鋳ぐるみ—，野口徹，堀川紀孝，素形材，Vol.47 No.11 Page.11-16.
- [2] 新興マタイ株式会社ホームページ（2015年4月参照）<http://www.imono-otasuke110.com/>

冷間鍛造用金型設計システムの開発

メカニクス系工学専攻 教授 落合 芳博

1. 緒言

冷間鍛造用金型を設計するためのシステムを試作した。本システムでは、冷間鍛造用金型特有の“締めばめ”を考慮に入れた応力解析が行うことができる。また、冷間鍛造においても素材の変形により金型が数十度加熱され、製造される部品の精度に影響を及ぼす。そこで、金型の熱変形量を解析することも行うことができる。また、冷間鍛造用金型は、非常に過酷な内圧が加わるので、冷間鍛造用金型解析は、金型自体を弾塑性解析する必要がある場合がある。そこで、本システムでは冷間鍛造用金型を、有限要素を用いることなしに弾塑性解析を行うことができる。弾塑性解析を行う場合、内点を使用するが、決して通常の有限要素法のように内部を要素分割する必要がない。内点は、もちろん自動的に作成され、要素データが不要なためデータは非常に少ない。さらに、材料の流れ解析および金型に作用する内圧を計算する機能を入れた。本計算においても、内部を要素分割が不要になるようにした。本計算においても内点を使用する。なお、有限要素法では、変形が進んでいくと、有限要素の形状が“いびつ”になり、再要素分割が必要になる場合が多い。本システムでは、有限要素を用いないので再要素分割は必要でない。

約25年前に“パーソナルコンピュータを用いた境界要素法による冷鍛金型解析システムの開発”を発表しているが⁽¹⁻⁴⁾、その当時のパソコンの性能では、弾性計算においても一回の計算に20分ほどかかり、実用性に問題があった。また、計算時間を考慮に入れて計算精度を多少無視していた。しかし、現在のパソコンでは、軸対称弾性計算では1秒以下で精度良く解析が可能であり、実用化の可能性が高い。開発するシステムは、CAEの知識を必要としないものを目指しており、ユーザは有限要素法のように勉強会や講習会に参加する必要がないものを作成する。また、システムの内部の理論に関する知識を全く必要としないものを開発する。また、プリやポストのソフトを完全公開してユーザが、企業で使用する金型に合わせて改良できるものとする。プリやポストは、改良が容易に行えるよう Visual Basic を使用している。基本的に図や数値を指定するための矢印をクリックすることにより活用することができる。キーボードを不要にしており、タッチ式であり、パソコンよりタブレット端末を意識して作成している。

2. 理論

ユーザは内部の理論を知らなくても使用できるが、三重相反境界要素法を使用している[5-8]。本理論を使用することにより、塑性解析を含む場合でも内部を分割する必要がない。内部領域の情報は、内点に保存され、内点間の情報は補間により求める。弾塑性解析の基本式は、次式で与えられる。

$$c_{ij}\dot{u}_j = \int_{\Gamma} [u_{ij}^{[1]} \dot{p}_j - p_{ij} \dot{u}_j] d\Gamma - \sum_{f=1}^2 (-1)^f \int_{\Gamma} \left\{ \frac{\partial \sigma_{ijk}^{H[f+1]}}{\partial n} \dot{\epsilon}_{ijk}^{[f]S} - \sigma_{ijk}^{H[f+1]} \frac{\partial \dot{\epsilon}_{ijk}^{[f]S}}{\partial n} \right\} d\Gamma + \sum_{m=1}^M \sigma_{ijk}^{H[3]} \dot{\epsilon}_{ijk(m)}^{[3]P} \quad (1)$$

$$\sigma_{ijk}^{[f]} = \frac{-2r^{2f-3}}{(1-\nu)\{(2f)!!\}^2} \left\langle 2[-2f(f-1)(f-2)\{\ln(r) - (F_2 + C_q)\} - (3f^2 - 6f + 2)]r_i r_j r_k + [-2f(f-1)(1-2f\nu)\{\ln(r) - (F_2 + C_q)\} - \{-2f+1+2f(3f-2)\nu\}]\delta_{jk}r_i + \left\{ [2f(2f^2-3f+1) - 4f^2(f-1)\nu]\{\ln(r) - (F_2 + C_q)\} + (6f^2 - 6f + 1) - 2f(3f-2)\nu \right\} [\delta_{ij}r_k + \delta_{ki}r_j] \right\rangle \quad (2)$$

また、内部応力を求める式は次式となる。

$$\dot{\sigma}_{ij} = \int_{\Gamma} [-\sigma_{kij}^{[1]} \dot{p}_k - S_{kij} \dot{u}_k] d\Gamma - \sum_{f=1}^2 (-1)^f \int_{\Gamma} \left[\frac{\partial \sigma_{ijks}^{H[f+1]}}{\partial n} \dot{\epsilon}_{1ks}^{[f]S} - \sigma_{ijks}^{H[f+1]} \frac{\partial \dot{\epsilon}_{1ks}^{[f]S}}{\partial n} \right] d\Gamma + \sum_{m=1}^M \sigma_{ijks}^{H[3]}(p, q) \dot{\epsilon}_{1ks(m)}^{[3]P} - \dot{\sigma}_{ij}^{[1]} \quad (3)$$

3. 活用例

メイン画面を Fig.1 に、計算用の画面を Fig.2 に示す。ソフトウェアの内容の例を Table 1 に示す。Fig.1 の図または、説明をタップすると、次の画面に移動する。本システムには最適中間径を計算する簡易ソフトも含まれる。

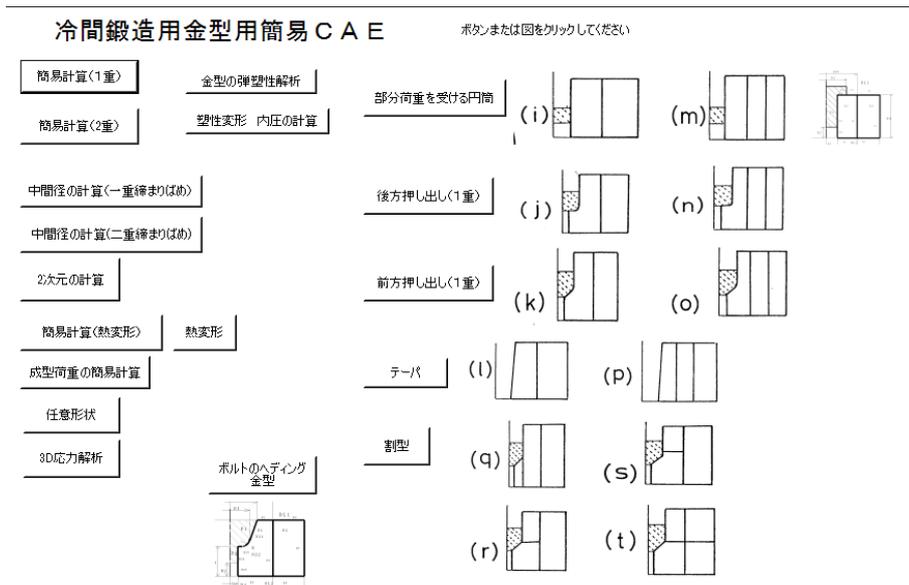


Fig.1 System for cold forging dies

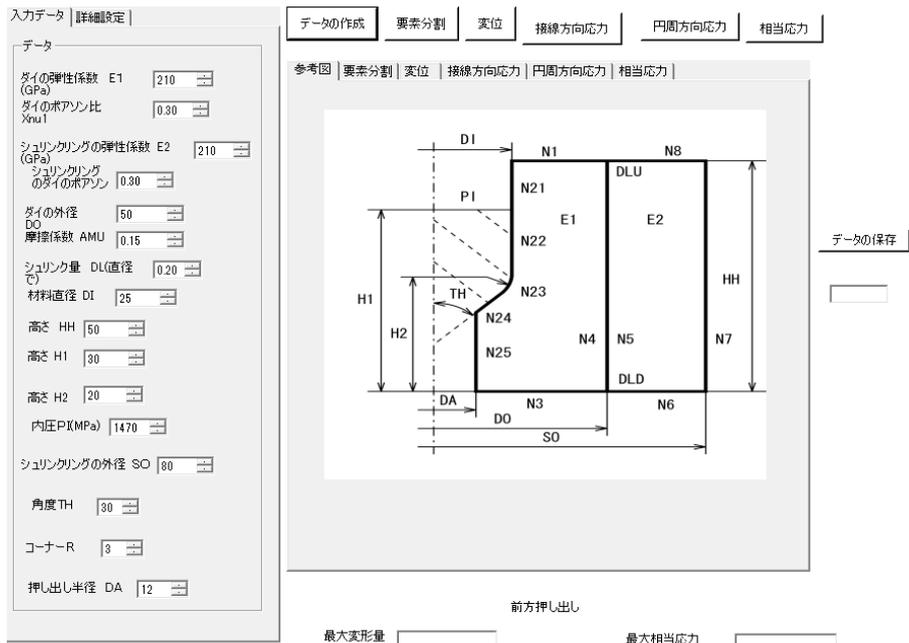


Fig.2 Example of pre-processor

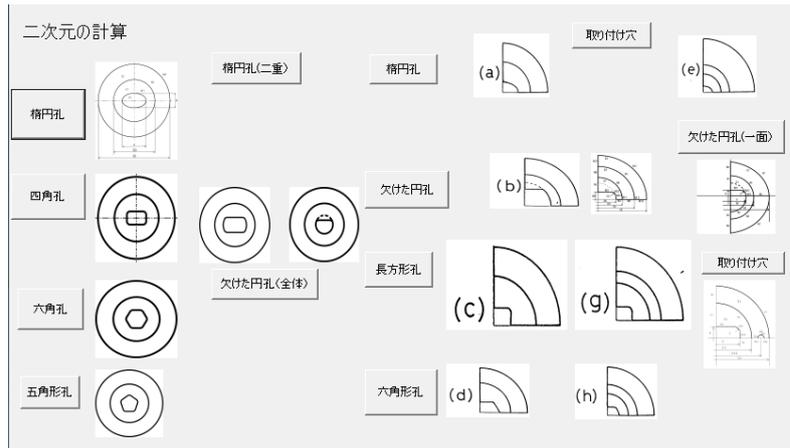


Fig. 3 Analysis of 2D

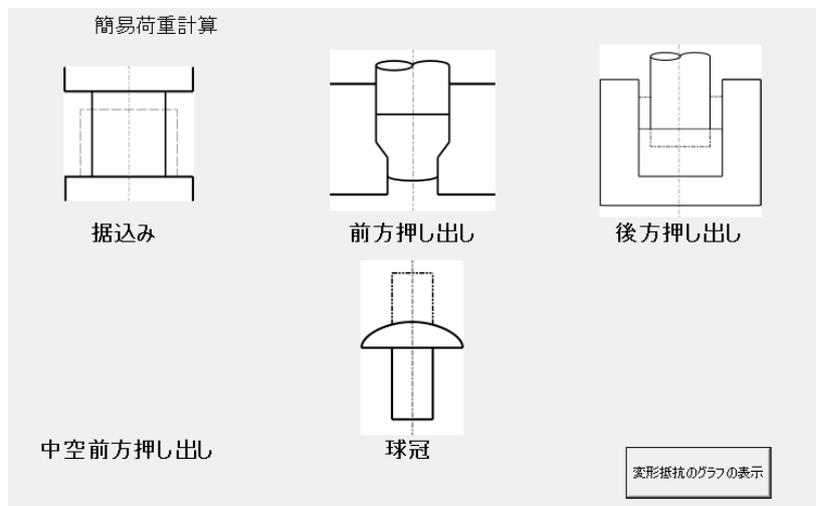


Fig. 4 Calculation of load

Fig.3 に2次元で簡易計算する場合、また Fig.4 に簡易荷重計算の画面を示す。Fig.5 に示すように金型の中に材料を入れ、上部から剛体パンチで圧縮し、形状を変形させる問題を解析した。この問題は前方押し出しを想定したものである。素材の高さ10mm、幅20mmとし、材料と金型との摩擦係数は $\mu=0$ とした。縦弾性係数 $E=210\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、硬化係数 $H=0$ とした。解析は対称性より2分の1の領域で解析を行った。Fig.5 に境界要素分割(180)と使用した内点(381)を示す。Fig.6 に変形状態を示す。変形途上で要素が長くなった場合は、自動的に要素を分割するので、要素分割数が増加していることがわかる。Fig.7, 8 に後方押し出しの例を示す。大変形解析は、計算時間を短くするために近似解法を採用している。本システムの検証には ANSYS および LS-DYNA を使用した[9]。なお、本システムに導入予定の基礎理論を発表したものを参考文献 [10-17]に示す。特に、傾斜機能材料や複合材料を使用した高度な型設計に今後活用できるものと思われる。なお、本「冷間鍛造用金型設計システムの開発」の研究はプログラム開発であり、本プロジェクトの予算は使用していない。

Table 1 Example of contents

金型の応力解析(弾性)	二次元、軸対称、三次元
金型の弾塑性解析	二次元、三次元
金型の熱変形解析	二次元、軸対称、三次元
材料の流れ解析(内圧の計算)	二次元、(三次元)
プリ・ポストプロセッサ	上記の解析用

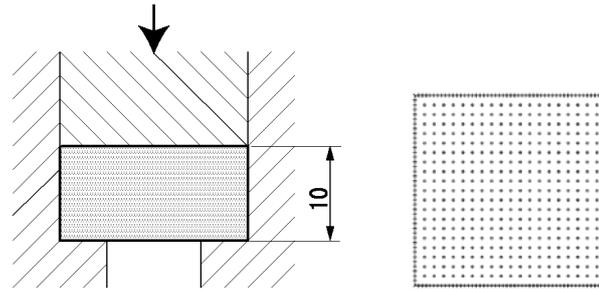


Fig.5 Forward extrusion

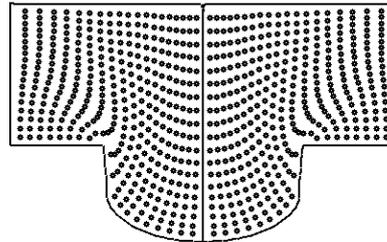


Fig.6 Deformation

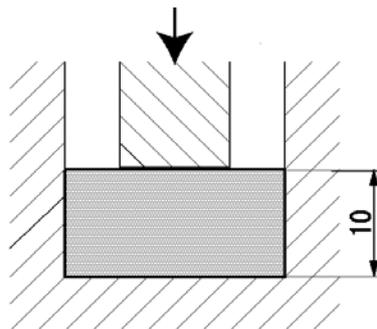


Fig.7 Backward extrusion

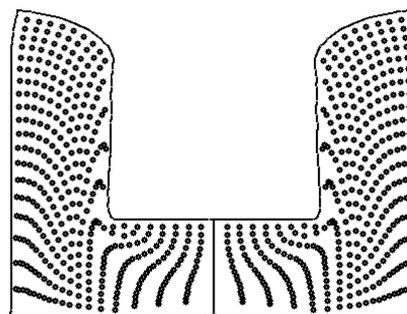


Fig.8 Backward extrusion

4. 結言

CAEに馴染みのない技術者でも、研修を必要としないで活用が可能な冷間鍛造用金型を設計するためのシステムを試作した。本システムでは三重相反境界要素法により内部を分割しないで塑性解析が可能なが示された。今後、三次元自由曲面の理論を入れ⁽¹¹⁾、東大阪市内の金型関連企業の御意見を伺いながら、本システムを完成させる予定である。

参考文献

- (1) 境界要素法による冷間鍛造用金型の摩擦係数を考慮した応力解析、塑性と加工、第26巻、第294号 760-765(1985)、落合、山本
- (2) パーソナルコンピュータを用いた境界要素法による冷鍛金型解析システムの開発、精密工学会誌、第55巻、第1号、87-92(1989)、落合、石田、井垣。
- (3) Ochiai, Y. and Kobayashi, T., “Initial Strain Formulation without Internal Cells for Elastoplastic Analysis by Triple-Reciprocity BEM”, *International Journal for Numerical Method in Engineering*, Vol. 50 (2001), pp. 1877-1892.
- (4) Ochiai, Y. and Kobayashi, T., “Initial Stress Formulation for Elastoplastic Analysis by Improved Multiple-Reciprocity Boundary Element Method”, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 23 (1999), pp. 167-173.
- (5) Ochiai, Y. and Sladek, V. , “Numerical Treatment of Domain Integrals without Internal Cells in Three-Dimensional BIEM Formulations”, *CMES (Computer Modeling in Engineering & Sciences)*, Vol. 6, No. 6 (2004), pp. 525-536.
- (6) LS-DYNA 説明書
- (7) 落合、金型用 CAD のための自由曲面作成法、精密工学会誌、Vol.61, No.8, pp.1091-1095(1995).
- (8) Ochiai, Y. and Yasutomi, Z., “Improved Method Generating a Free-Form Surface Using Integral Equations”, *Computer-Aided Geometric Design*, Vol. 17, No. 3 (2000), pp. 233-245.
- (9) 落合、冷間鍛造用金型設計システムの開発、第 63 回塑性加工連合講演会(2012)。
- (10) Deformation Analysis of Thin Plate with Distributed Load by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.36, No.5, pp.772-778, (2012) Yoshihiro OCHIAI and Tomohiro Shimizu, <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2011.10.0008>
- (11) Three-Dimensional Unsteady Thermal Stress Analysis by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Yoshihiro OCHIAI, Vladimir Sladek, Jan Sladek, Vol.37, No.2, pp.116-127, (2013-2) <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2012.09.002>
- (12) Axial Symmetric Stationary Heat Conduction Analysis of Functional Gradient Materials by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 落合芳博, V. Sladek, J. Sladek, Vol.37, No.2, pp.336-347, (2013-2) <http://dx.doi.org/10.1016/j.enganabound.2012.10.0006>
- (13) 三重相反境界要素法による分布する熱曲げ負荷を受ける薄板の変形解析、日本機械学会論文集 A 編, Vol.79, No.803, pp.976-988, (2013) 落合芳博, 早川雄太, <http://dx.doi.org/10.1299/kikaia.79.976>
- (14) 三重相反境界要素法による不均質材料の三次元定常熱伝導解析、日本機械学会論文集 B 編, Vol.79, No.805, pp.1793-1804 (2013), 落合芳博 <http://dx.doi.org/10.1299/kikaib.79.1793>
- (15) 三重相反境界要素法に不均質材の弾性解析、日本機械学会論文集, Vol.80, No.820, pp. 1-12 DOI:10.1299/transjsme.2014cm0386 (20014) 落合芳博
- (16) Three-Dimensional Heat Conduction Analysis of Inhomogeneous Materials by Triple-Reciprocity Boundary Element Method, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol.51, No.1, pp.101-108, (2015-2) DOI 10.1016/j.enganaboun.2014.10.014, 落合芳博
- (17) 多重調和関数を用いた補間法による画像の拡大と並列処理による高速化、画像電子学会誌 Vol.44, No.1, pp.18-pp27 (2015.1), 川島成平, 小林正, 多谷邦彦, 落合芳博

射出成形機用減速機小型化技術に関する研究

メカニクス系工学専攻 教授 東崎 康嘉

1. 緒言

現在、動力伝達に用いられる減速機の多くは、歯車減速機が用いられている。歯車はトルク容量が大きいのが長所である。しかし歯車減速は、射出成形機に用いようとした場合、搭載スペースの増加・歯の噛み合いによる騒音などの技術的課題もある。これらの課題の対応策の一つとして、軸受転用型トラクションドライブ¹⁾を歯車の支持軸受に搭載した、ハイブリッド減速機がある²⁾。軸受転用型トラクションドライブは、軸受の内輪と転動体の回転速度の差を利用して減速するものである。この回転速度差は、軸受の保持器と出力軸を一体化した「出力軸一体型保持器」で取り出す。現在、円すいころ軸受を用いた従来よりも大容量化可能なハイブリッド減速機の開発を行っている³⁾。Figure.1 に装置全体図を、Fig.2 に本機構の概略図を示す。本報告ではハイブリッド減速機の運転結果について報告する。

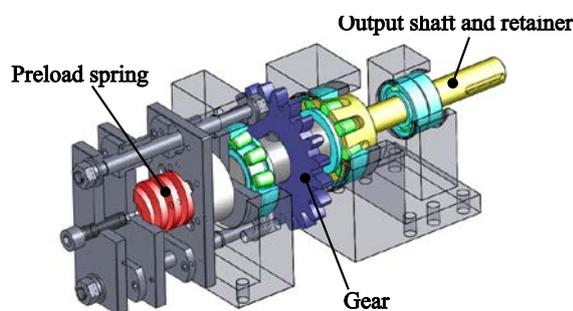


Fig.1 Model of the device

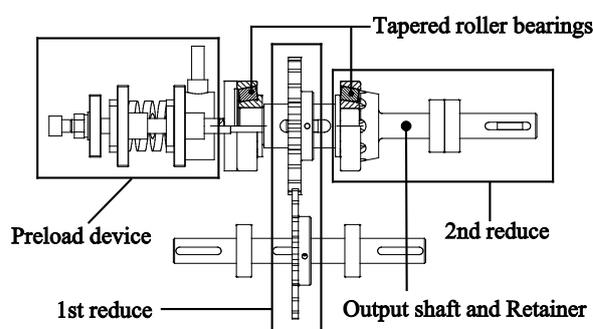


Fig.2 Schematic drawing of hybrid device

2. 大容量ハイブリッド減速機

2. 1 減速比と伝達可能トルク

本研究では、円すいころ軸受「4T-30306」にトラクションドライブとしての機能を付加させる。理論減速比は、プラネタリー型遊星歯車機構と同様の計算式を用いた。使用する軸受の寸法を入れて計算した結果、理論減速比は2.5となった。

軸受をトラクションドライブとして利用する際に、伝達可能トルクを計算により求める。軸受に作用する力は①歯車より受ける反力、②軸方向にかかる予圧の2種である。これらの力が作用するときの転動体荷重を Harris ら⁴⁾の手法で求めた。伝達可能トルクは式(1)で示される。得られた転動体荷重と式(1)より、伝達可能トルクを算出した。

$$T = \mu \times \sum \{ Q_o r_o + Q_i r_i + Q_f (r_i + e) \} \quad (1)$$

ここで、 Q_o, Q_i, Q_f は、外輪、内輪、大つば部に作用する転動体荷重、 r_o, r_i, e は外輪・内輪軌道半径、つば部接触位置である。また μ はトラクション係数であり、通常使用される値0.1を用いた。

計算結果を Fig.3 に示す。本研究では、使用するトルクメータの上限が20 [N・m]であることから、目標トルクを20 [N・m]とした。Figure.3 より予圧量が800 [N]以上で目標トルクを伝達できることが確認できた。なお、今回は軸受外径72mmであったが、大きな軸受を用いることでさらなる大トルクに対応することは可能である。

2. 2 高効率化手法の提案

軸受転用型トラクションドライブ部の保持器と転動体の間ではすべり接触となっているため、すべり摩擦による動力伝達効率の低下が考えられ、このすべり接触部の摩擦抵抗を減らすことで、動力伝達効率の向上が期待できる。そこで、このすべり触部に摩擦抵抗の少ない小片の PEEK を取り付けた保持器を試作し、動力伝達効率の向上を図った。Figure.4 に PEEK を使用した出力軸一体型保持器を示す。Table1 に今回使用した PEEK 材の強度に関する諸元を示す。

Table1 Specifications about strength of PEEK

Strength (MPa)			Elastic modulus (GPa)		PV value (MPa · m · min ⁻¹)		Poisson's ratio
Tensile	Bending	Compression	Tensile	Bending	20°C	200°C	
92	170	118	3.5	3.7	800	640	0.4

3. 実験方法

本研究では、出力軸一体型保持器の材料に、りん青銅（PBC）と SCM（転動体接触部のみ PEEK）の 2 種類を採用した。実際に試験装置を設計し、入力回転数を 50, 100, 150, 200 [rpm] ごとの出力トルク 5, 10, 15, 20 [N · m] における入力トルク, 出力回転数, 歯車歯面温度, 軸受外輪温度, 室内温度を計測した。トラクションドライブ側のグリースは合成ナフテン系油, その他の転がり軸受と歯車には, 一般グリースを使用した。予圧を 1200N と 1800N の 2 種類で試験を行った。

動力伝達効率を計測した入出力回転数 (N_{in}, N_{out}), 入出力トルク (T_{in}, T_{out}) より式(2)を用いて求めた。

$$\eta = \frac{N_{out} \times T_{out}}{N_{in} \times T_{in}} \times 100 \quad (2)$$

2 分毎に動力伝達効率の平均値をとり, 各負荷トルク時の平均効率をグラフに示し, 動力伝達効率の比較を行った。Figure5 に今回用いた試験装置の外観図を示す。

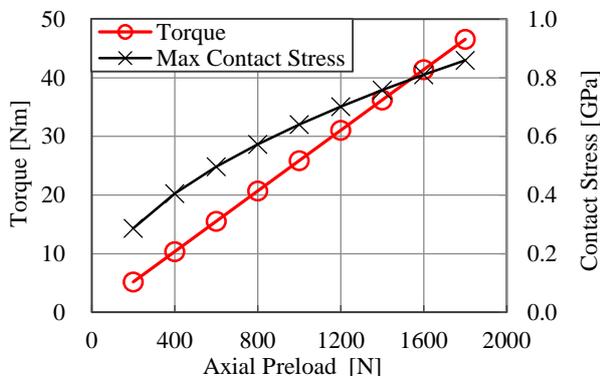


Fig.3 Calculated results of 4T-30306

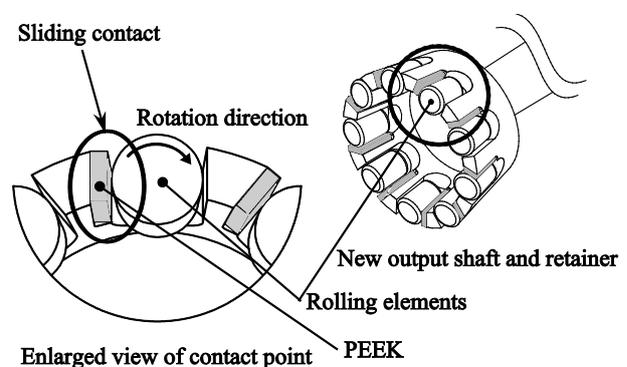


Fig.4 Improved output shaft and retainer



Fig.5 General view of test equipment

4. 実験結果

Figure6, Figure7 に予圧量 1200 [N]・入力回転数 100 [rpm], および予圧量 1800 [N]・入力回転数 100 [rpm] 時の, 出力トルクごとの動力伝達効率を示す.

Figure6, Figure7 に示したように, 接触部に PEEK を使用した場合, 動力伝達効率の向上が確認できた. PEEK を接触部に使用した場合, 最大で動力伝達効率が 5.0 [%] 向上している. これは接触部のすべり摩擦抵抗が減少したため, すべり摩擦損失が減少したためと考えられる. 実験より, 転動体・保持器間の摩擦抵抗軽減は, 動力伝達効率の向上に効果があるといえる.

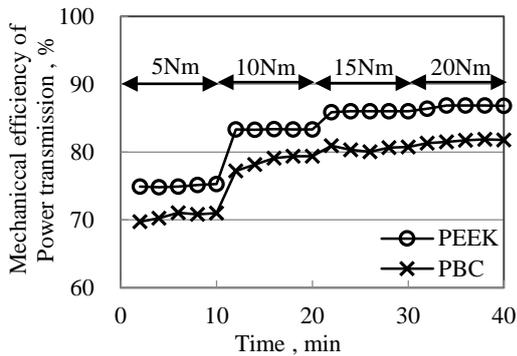


Fig.6 Efficiency measurement results at 1200N
100rpm

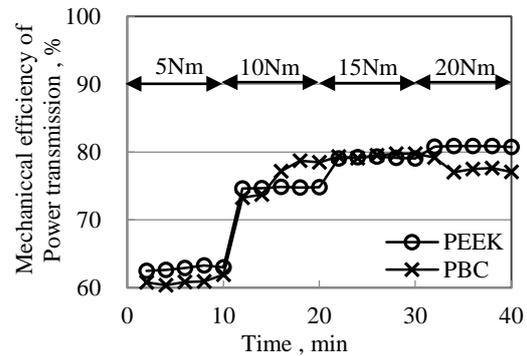


Fig.7 Efficiency measurement results at 1800N
100rpm

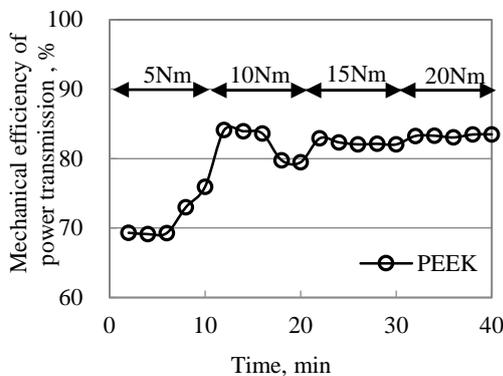


Fig.8 Efficiency measurement results at 1200N
200rpm

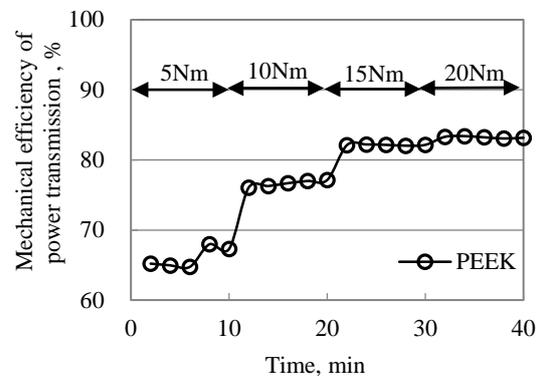


Fig.9 Efficiency measurement results at 1800N
200rpm

さらに,入力回転数を 200rpm まで上げて運転した場合の効率測定結果を Fig.8 および Fig.9 に示す. 入力回転数 100rpm 時より, 効率は若干低下しているが問題なく動力を伝達していることが分かる. また, 予圧量を 1200 [N]と 1800 [N]で比較したが, 予圧量自体の影響度合いは大きくなかった. Figure10 と Figure11 に試験後の保持器に貼りつけた PEEK と転動体の外観図を示す. 接触痕は認められるが, 焼付きや大きな摩耗は観察されなかった.



Fig.10 General view of retainer and PEEK



Fig.11 General view of rolling element

5. 結言

設計通りに減速できることが確認され, 予圧量 1200 [N] 以上では目標のトルク 20 [N・m] を伝達できることが確認できた. また動力伝達効率の最大値は, 入力回転数 100 [rpm]の条件下でりん青銅 (PBC) で 81.9 [%], SCM (接触部 PEEK) で 86.9 [%] であり, 接触部に PEEK を使用した場合, PBC と比較して最大で 5.0 [%] の動力伝達効率向上が確認できた.

今後の課題として, 安価なエンジニアリングプラスチックである POM や PA66 を接触部に採用することで, コストを抑え, PEEK と同様もしくはそれ以上の動力伝達効率を得られるかを検証する必要があると考える. また, 最終的な樹脂材や形状を絞り込むことができれば, 射出成形による大量生産でさらにコスト低減することが可能となる.

6. 謝辞

本研究は「文部科学省私立大学戦略的研究基盤形成支援事業 (平成 24 年~平成 26 年)」と「公益財団法人 NSK メカトロニクス技術高度化財団」の助成を受けたもので, ここに謝辞を表す.

7. 参考文献

- 1) 塩津, 東崎 “転がり軸受転用型高速マイクロトラクションドライブ” (第 1 報, マイクロトラクションドライブの試作と評価) “, 日本機械学会 C 編, Vol.72,No.716(2006) , pp.1337-1344.
- 2) 東崎, 齋藤, 稲増 “ハイブリッド増減速機に関する基礎的研究 (軸方向予圧を用いた場合の解析と実験)” 日本機械学会論文集 C 編, Vol.79,No.804(2013),pp2899-2916
- 3) 東崎, 豊口, 坂本 “軸方向予圧を用いたハイブリッド減速機の大容量化に関する研究”
トライボロジー会議 2015 春 姫路 予稿集
- 4) Trdric A.Harris and Michael N.Kotzalas , “Essential Concepts of Bearing Technology” , FIFTH EDITION , (2007), pp135-153 , Taylor&Francis.

金型の摩擦低減技術に関する研究

メカニクス系工学専攻 教授 東崎 康嘉
メカニクス系工学専攻 講師 橋本 知久

1. 緒言

樹脂製品の環境対応, 安全性への要求は, 近年益々高まっている. それにより, 樹脂製品の成形段階における, 成形サイクルの短縮, 材料費の低減, 燃費の改善, 廃棄物排出量の削減等を目的に製品の軽量化が進められている. また, 製品の薄肉化に伴う技術的対応として, 高流動性材料の開発, CAE 解析による金型ゲート点数の追加, 成形法として射出圧縮成形等採用されている. ¹⁾さらに, 樹脂製品の薄肉化に伴う弊害を金型キャビティや成形機内バレル, スクリュを構成する従来の金属材料に付着性を改善した表面改質処理を施す研究を行うために, 金属材料と樹脂材料の付着力の研究 ²⁾がモデル試験を用いてなされている. また, 金型の耐摩耗性向上のためにダイヤモンドライクカーボン (DLC) 被膜の研究も行われている. ²⁾

金型の摩擦低減技術の一つとして振動付加 ³⁾が知られているが, 振動付加の適用が可能な金型に関する調査を大阪東部地域で実施した. その中で金型成形品の離型抵抗が, 複数個の金型 (ピン) で構成製造される複雑形状の製品が薄肉化した場合に特に問題が大きくなることを産学連携の調査で見出し, この解決策を見出すことが国際競争力確保に繋がることが分かった. その離型抵抗を低減する方法を定量的に評価するため, 二個のピンを有する試験金型を製作し, 金型の表面処理 (表面粗さやコーティング) や樹脂の違いによる薄肉製品の離型力の基礎的関係を特殊計測により定量化し, 今まで不明であった離型力の時間的な変化なども明らかにすることに取組んだ.

2. 実験方法および条件

射出成形機は東洋機械金属 Si-50 (型締力 50tonf, 射出量 65cm³) を用いた. 射出成形機外観を図 1 に示す.



図 1. 射出成形機外観

次に図 2 に計測原理を示す. 突き出しピン背面のエジェクタ板の中にロードセルを装着し, 離型時の力を直接計測することを目的としたものである. 突き出しピンの頭がコアから出ないように, 寸法管理を行いエジェクタ板の加工を行った.

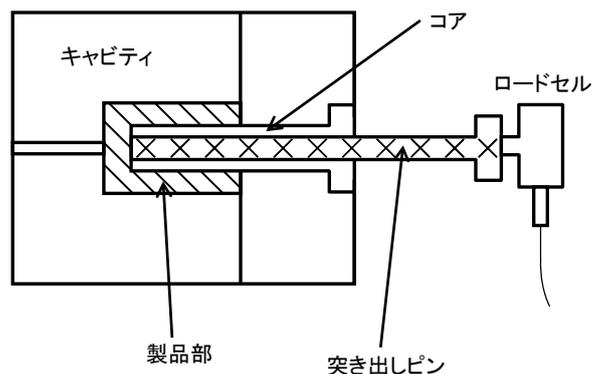


図 2.計測原理



図 3.コア装着状況

図 3 にコア装着状況を示す．今回キャビティの抜けテーパ角度は 1.3° である．コア先端に穴が開いており，そこから突き出しピンが離型時には頭を出す．エジェクタ板へロードセルの装着状況を図 4 に示す．なお，今回使用したロードセルの直径は 10mm で厚さは 3.5mm，1kN までの荷重計測が可能である．また，コアとして用いたピンは 2 本であるためロードセルも 2 個ある．

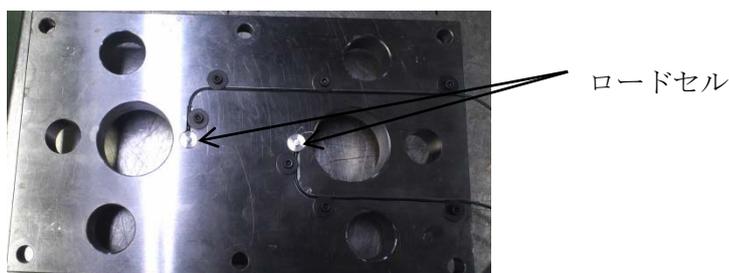


図 4.エジェクタ板への装着状況

今回の試験に用いた樹脂は PS (ポリスチレン)，PLA (ポリ乳酸)，ABS (ABS 樹脂) である．使用した材料のメーカーおよびそのグレードを表 1 に示す．

表 1.使用材料

	メーカー	グレード
PS (ポリスチレン)	東洋スチレン(株)	MWD4D
PLA (ポリ乳酸)	ユニチカ(株)	TE-2000C
ABS (ABS 樹脂)	旭化成ケミカルズ(株)	220

次に使用したコアの表面処理条件を表 2 にまとめた．コアの材質は大同特殊鋼の NAK80 を用いた．機械加工後のコアを基準にし，それに対して各種処理を施して離型抵抗の大きさの比較を行った．

表 2.コア表面処理条件

コア番号	処理条件
①	基準
②	磨き
③	磨き+特殊ブラスト処理
④	基準+特殊ブラスト処理
⑤	基準+特殊ブラスト処理+特殊フッ素コート
⑥	基準+特殊フッ素コート

特殊ブラスト処理の狙いは表面組織の緻密化・平滑化であり，特殊フッ素コートの狙いは樹脂との間の粘着性低下である．次に，各処理をしたコアの外観写真を図 5 に示す．

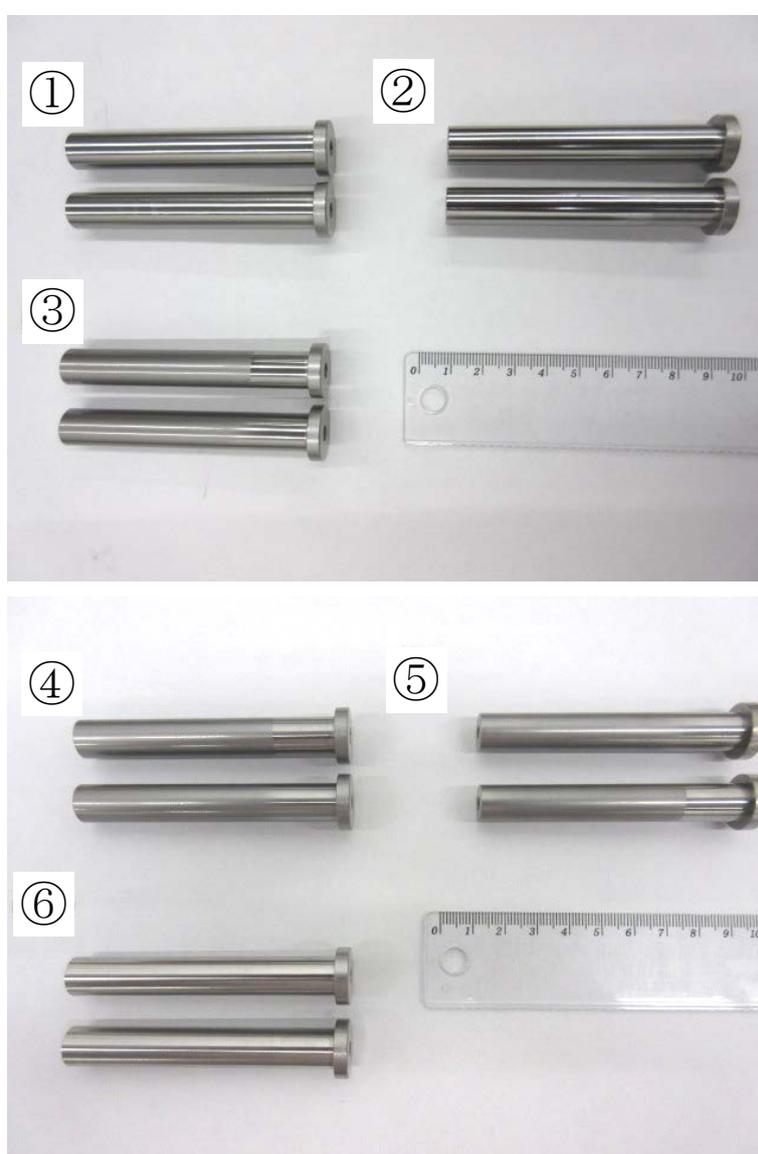


図 5.コアの外観写真

図 5 より，②の磨きが最も光沢があり，特殊ブラスト処理を施した②，③，④，⑤の表面が曇っていることが確認できる．

表 4.最大離型抵抗 PLA (ポリ乳酸)

離型時最大抵抗							単位 : [N]
条件		回数					平均
ピン	位置	1	2	3	4	5	
①	上	374.5	6.9	22.1	24.5	52.2	131.38
	下	428.1	167.3	86.2	71.4	80.6	
②	上	88.8	84.4	173.6	8.8	54.5	70.15
	下	230.2	25.6	2.3	6.7	26.6	
③	上	24.2	116.4	93.6	108	225.3	135.14
	下	339.8	137.7	92.1	124.7	89.6	
④	上	289.8	80.9	71.7	37.2	28.4	139.27
	下	344.2	111.8	158.6	138.5	131.6	
⑤	上	22.4	22.8	21.9	25.1	24.7	37.31
	下	136.4	17.6	22.5	35	44.7	
⑥	上	23.2	73.5	67.1	62.7	62.1	59.47
	下	40.9	61.9	68.6	68.8	65.9	
		: 金型開時、成形品がピンから抜けかけ					

表 5.最大離型抵抗 ABS (ABS 樹脂)

離型時最大抵抗							単位 : [N]
条件		回数					平均
ピン	位置	1	2	3	4	5	
①	上	/	/	/	/	/	/
	下	/	/	/	/	/	
②	上	/	/	/	/	/	/
	下	/	/	/	/	/	
③	上	/	/	/	/	/	/
	下	/	/	/	/	/	
④	上	/	/	/	/	/	/
	下	/	/	/	/	/	
⑤	上	411	474.5	/	/	/	452.175
	下	446.8	476.4	/	/	/	
⑥	上	420.6	/	/	/	/	451.4
	下	482.2	/	/	/	/	
		: イジェクトピン突き出し時、成形品突き破り					

ここで、金型開時、成形品ピンから抜けかけとあるのは、今回キャビティの抜けテーパ角度は 1.3° であったが、製品（成形品）がキャビティ側にもっていかれることを意味している。計測されたデータは具体的に次のような形で得られている。

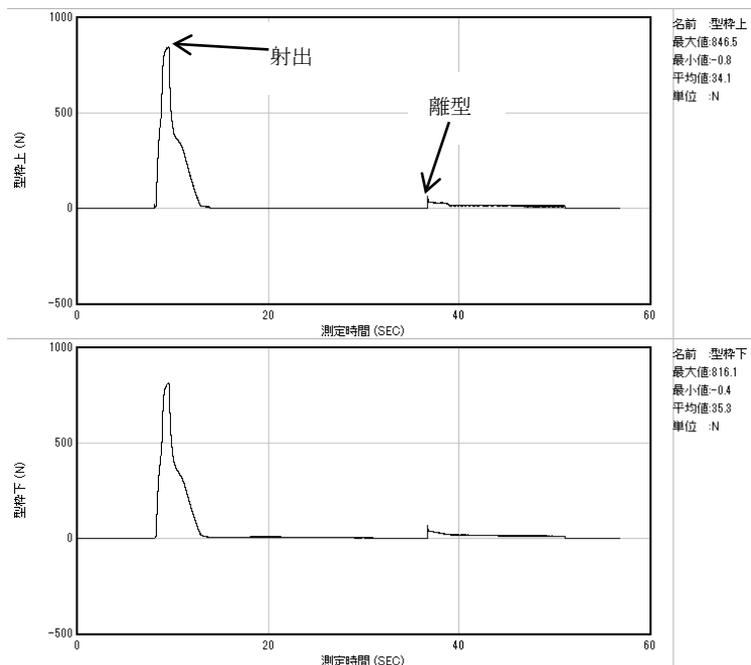


図 7.ロードセル計測データ（コア⑥，PLA（ポリ乳酸），4 回目条件）

図 7 のデータは、⑥のコアで PLA（ポリ乳酸），4 回目の条件である。最初の山が射出の時で，2 回目の山が離型であり，表 3～表 5 の値は離型時のデータを読み取ったものである。

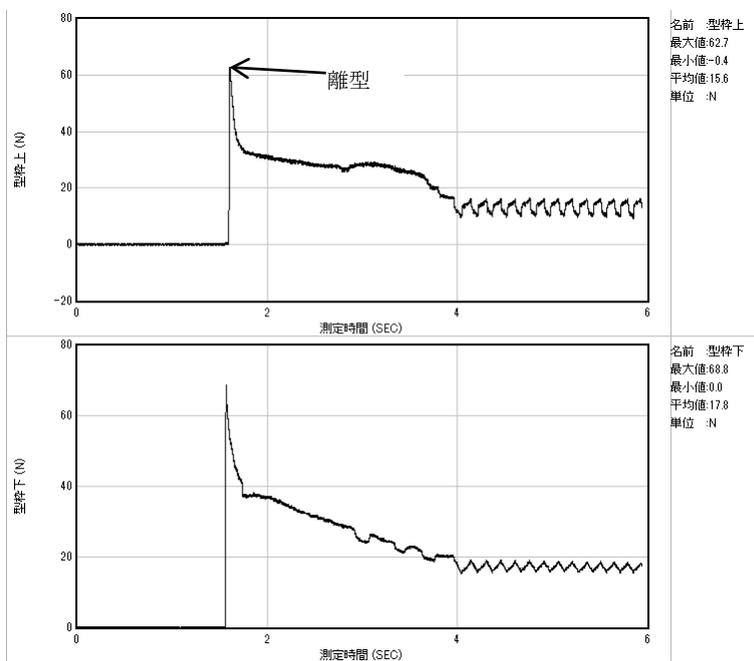


図 8.離型時計測データ（コア⑥，PLA（ポリ乳酸），4 回目条件）

実験の結果，PS（ポリスチレン）と ABS（ABS 樹脂）では、突き出しピンにより，製品（成形品）を突き破る事象が発生し満足なデータが得られなかったが，PLA（ポリ乳酸）では各表面処理間で差が生じた。良好な結果が得られたコアは⑤および⑥で，共通していることは特殊フッ素コートが施されていることである。ただし，今回コアおよびキャビティの抜けテーパ角度は 1.3° であったが，製品（成形品）がキャビティ側にもっていかれる事象が⑤のコアでは多く発生した。

4. 考察

今回の実験で使用したコアの表面粗さを計測しまとめたものを図9に示す。②の磨きをおこなったものの以外は大きな表面粗さの差は見られなかった。

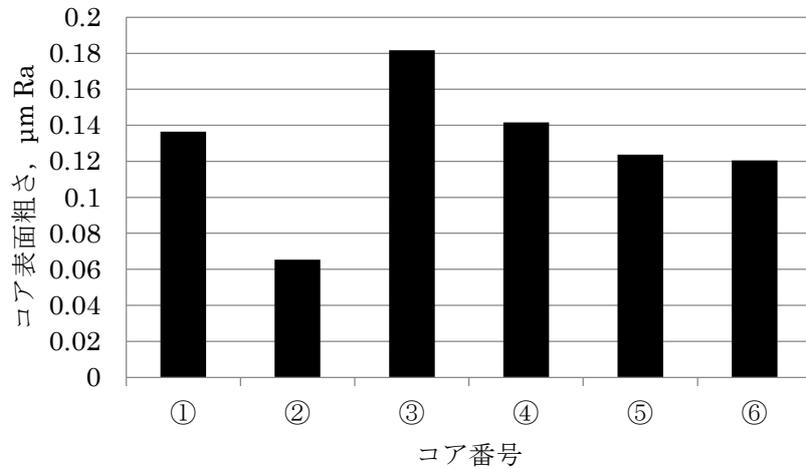


図9.各コア表面粗さの比較

次に、表面粗さと離型力の関係と比較した。図10には各データを元に直線の近似線を示したが、表面粗さとは相関のある関係とは言えない。むしろ、特殊フッ素コートが施されている⑤と⑥の離型力が小さいことが明らかとなった。

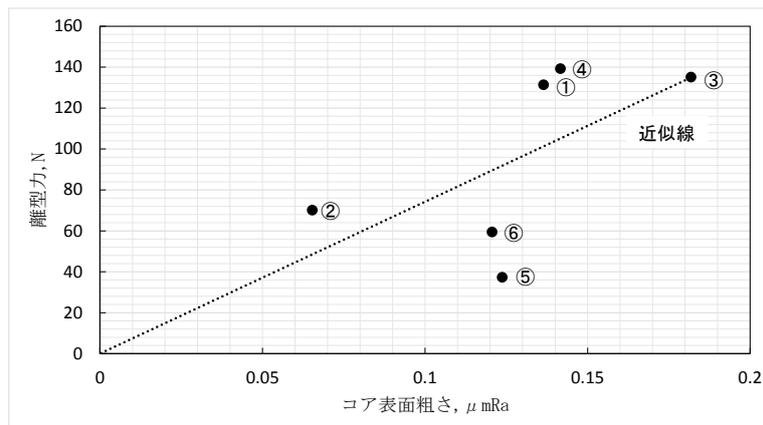


図10.表面粗さと離型力の関係

5. 結言

離型抵抗を低減する方法を定量的に評価するため、二個のピンを有する試験金型を製作し、金型の表面処理（表面粗さやコーティング）や樹脂の違いによる薄肉製品の離型力の基礎的關係を特殊計測により定量化し、今まで不明であった離型力の時間的な変化なども明らかにすることに取組んだ。その結果、下記の点を明らかにした。

- (1) 突き出しピン背面にロードセルを装着することで、射出から離型までの一連の力を直接計測することができた。
- (2) PLA（ポリ乳酸）樹脂成形時には特殊フッ素コート処理をしたコアの離型抵抗の減少が確認できた。
- (3) コアの表面粗さ自体は離型力に直接影響を与えることは無かった。

6. 謝辞

本実験の実施にあたりご支援を頂きました株式会社クニムネ殿に謝意を表します。

7. 参考文献

- [1]西田：金型の離型性に及ぼす表面改質の影響，日本機械学会茨城講演会講演論文集，2001-9（2001）271-272
- [2]西口：マイクロ金型・ツール開発における表面処理技術微細化のアプローチ，日本機械学会誌，1040，108（2005）558-560
- [3]前野・小坂田・森：荷重振動による板鍛造における摩擦低減，塑性と加工，585，50（2009）951-955

プレス・射出ハイブリッド成形による熱可塑性 CFRP 衝撃吸収部材の作製

メカニクス系工学専攻 准教授 西藪 和明
理工学部機械工学科 学生 山崎 陽平

1. 緒言

近年、環境・エネルギー問題の深刻化により、航空機をはじめ自動車などの輸送機器用の材料として炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP）が注目されている。CFRP は比強度や比弾性率が高く、耐食性に優れているため、自動車や航空機等の輸送機器の省エネルギー化を目的に構造材料の軽量化が進んでいる。ボーイング社製の大型旅客機 B-787 には、従来の二次構造部材から尾翼や床支持材のような一次構造部材に CFRP の使用が拡大し、尾翼、主翼および胴体等を含む構造重量の約 50%以上が CFRP で製造され、軽量化が行われている。また、プラグインハイブリッド車（PHEV）、電気自動車（EV）および燃料電池車（FCEV）などの需要が世界的に高まっている。基本的に動力が何であろうと車体の重量が小さいほど低燃費で、環境負荷を抑制できる。しかし、自動車の主要材料は加工性や再利用性に優れ、低価格な鋼板が用いられている。自動車分野への CFRP の使用は、材料および製造コストが非常に高く、生産性が低く、再利用も困難であるため、高級スポーツカーに限られてきた。しかし、EV 車のモーターや大型バッテリー等の電気機器部品の重量が大幅に増加するため、車体重量をより一層軽量化することが求められている。そのため、今後は CFRP の適用範囲を拡大する動向がある。すでに、2013 年に BMW 社製の EV 車に、アルミ合金製シャーシに RTM 成形により製造された CFRP 製のパッセンジャーセルが接合された量産車が市販されている^[1]。

CFRP はマトリックス樹脂の性質から、熱硬化性 CFRP と熱可塑性 CFRP に大別される。これまで、スポーツ用品や航空宇宙機器に用いられているのはエポキシ樹脂をマトリックスとする熱硬化性 CFRP であるが、生産性が低く、再利用性に乏しく、さらに耐衝撃性にも課題がある。一方、熱可塑性 CFRP は、生産性が高く、再利用が容易であり、さらに耐衝撃性も高いという点から、自動車等の構造部材に期待の高い材料である。すでに、2011 年に日産より、熱可塑性 CFRP を用いた EV 車のコンセプトカーが公表されている^[2]。また、2014 年 11 月 19 日にトヨタ自動車製の燃料電池車「MIRAI」に、東レ製の熱可塑性 CFRP 構造部材が燃料電池を保護するスタックフレーム（自動車のフロア部分に相当する大型部品）に採用されている^[3]。このような熱可塑性 CFRP は、従来のような短繊維や長繊維を強化材とする射出成形品や圧縮成形品ではなく、一方向繊維や織物などの連続繊維で強化した積層材などであり、それらに使用される熱可塑性樹脂はエンジニアリングプラスチックやスーパーエンジニアリングプラスチックなどの耐熱性および力学的特性が高い高性能な樹脂である。

熱可塑性プラスチックは、ガラス転移温度以上に加熱すると樹脂が軟化し、金属のようにプレス成形が可能であり、冷却すると固化して形状が保持される。さらに、融点以上に再加熱することにより熔融加工も可能であり、金属に比べて比較的低温で再成形・再加工が容易な材料である。また、熱可塑性プラスチックは一般的に衝撃性に優れている。しかし、熱可塑性樹脂は熱硬化性プラスチックに比べて熔融粘度が高いため、繊維への樹脂含有が非常に困難であることに加え、熱可塑性樹脂のガラス転移温度や融点は熱硬化性樹脂に比べて低いため、耐熱性に乏しいことなどが課題である。熱可塑性 CFRP を再利用するためには、加熱により樹脂を変形または熔融させて、繊維を元のシート状に戻すことが最も優れたマテリアルリサイクル法であるが、繊維の連続性から容易に元の形態に復元することは容易ではな

い。そのため、熱可塑性 CFRP を所望の形状に制御して破砕し、再利用しやすいサイズや形状に“加工”する必要がある。これは、不用品や廃棄物を減容化または燃焼・埋め立てする廃棄処理とは全く異なる。

本研究は、「金型プロジェクト」の一環として、機械機能設計研究室で行われる予定の衝撃試験で使用される試験片を熱可塑性 CFRP とアルミ材を用いて製造するプロセスの開発を目的とした。そこで、加熱プレス成形とインサート射出成形を融合したハイブリッド成形法を提案し、その製造装置として、専用の加熱装置および金型を設計・製作した。本研究では、織物 CFRP 積層板を加熱プレス成形し、その後短繊維 CF/樹脂ペレット材を射出成形して V 形の衝撃吸収部材の作製を試みた。この短繊維 CF/樹脂ペレット材の代わりに、熱可塑性 CFRP の破砕・粉砕した再生材を用いることも可能である。

2. 加熱プレス・射出ハイブリッド成形法

加熱プレス成形は、熱可塑性 CFRP シートや積層板を融点近傍に加熱・軟化させ、金型により腑形させて形状転写を行うため、連続した繊維への適用が可能である。そのため、高強度・高剛性な部材の作製が可能であるが、微細で複雑な形状および肉厚の変化の大きい形状の成形は困難である。一方、射出成形は材料を加熱溶融させてスクリュウや金型内の流動を伴うため複雑な形状に適しているが、短繊維を混合した樹脂材に制約されるため高い力学的特性を得ることは困難である。そこで、加熱プレス成形と射出成形を組み合わせることにより、加熱プレスでは成形が難しい複雑な形状の成形品の成形を可能にし、また射出成形では得られない高強度・高剛性および耐衝撃性に優れた成形品の製造が可能になる。

本研究で提案する加熱プレス・射出ハイブリッド成形プロセスの概念図を図 1 に示す。織物や一方向繊維で強化した熱可塑性 CFRP 積層板を赤外線ヒータ等で加熱し、金型に挿入して型締めを行い、プレス成形を行った直後に、短繊維で強化した熱可塑性 CFRP を溶融後に射出成形し、金型内で冷却固化後に離型すると、一工程で成形品が得られる。このプロセスは単純であるが、高性能な成形品を安定して量産するには様々な技術課題がある。例えば、素材のトリム方法や固定方法、および加熱方法、金型内への搬送・位置決め方法、プレス成形時のシワの発生抑制、金型設計、射出成形のタイミングなど、成形品に及ぼす影響因子は多々ある。

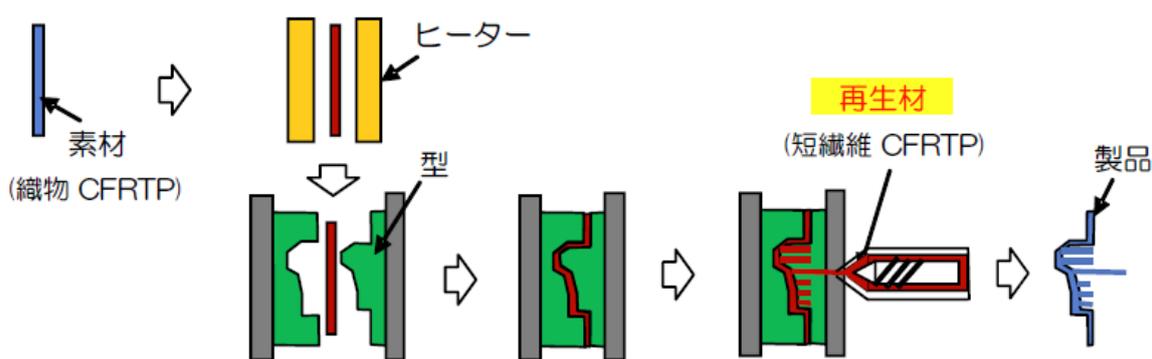


図 1 熱可塑性 CFRP の加熱プレス・射出ハイブリッド成形プロセス

3. 試験片および作製方法

本研究で作製対象とした衝撃吸収部材の図面を図 2 に示す。V 形状で、外側に織物 CFRP を配置して表面硬度と曲げ剛性を向上させ、さらに剛性を高めるために内部にリブ構造を設けた。V 部の角度は 90°とし、先端部にわずかな円弧を有し、両側には短繊維 CF/樹脂で囲まれるボックス構造で、衝撃吸収に必要なクラッシングゾーンを確保している。

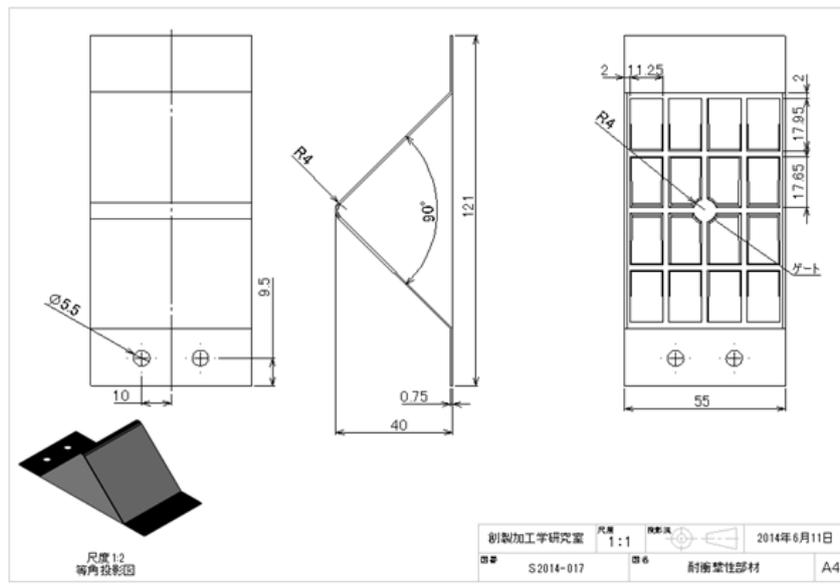


図2 衝撃吸収部材の図面

加熱プレス・射出ハイブリッド成形による衝撃吸収部材の製造プロセスを図3に示す。織物 CF/PA66 樹脂積層板 (3層, 厚さ 0.75mm) を後述の方法で切断および穴あけを行った後, (i)金型内に挿入し, (ii)型締め前にヒータを金型内に移動させて織物 CF/PA66 積層板の片面から加熱した。ヒータを金型外に移動させて, (iii)型締め動作により V 曲げ成形を行った。その直後に, (iv)溶融した短繊維 CF/PA66 樹脂を格子状に射出成形し, 金型内で冷却固化させた後, (v)型開き動作により離型し, (vi)製品を取り出し, スプルーを切断して衝撃吸収部材を得た。

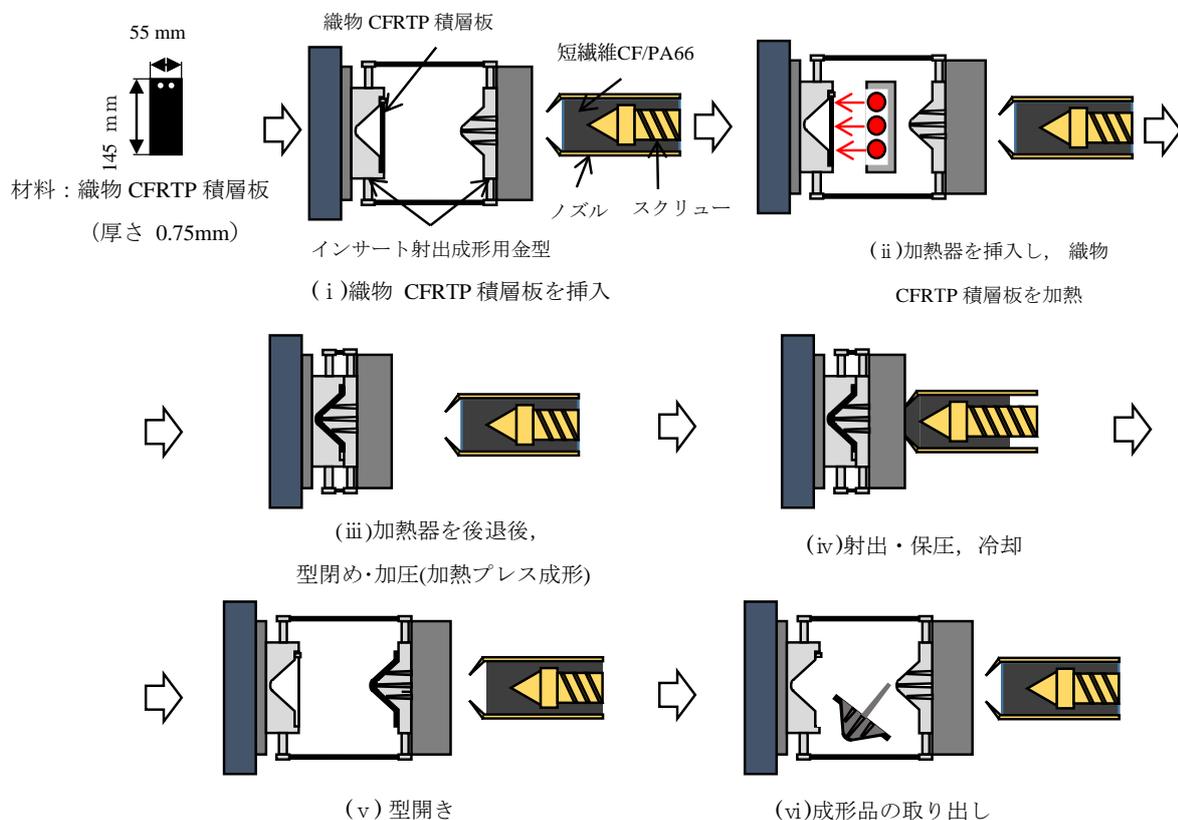


図3 加熱プレス・射出ハイブリッド成形による衝撃吸収部材の製造プロセス

図4に示すように、織物 CF/PA66 積層板を長さ 145mm、幅 55mm、厚さ 0.75mm にダイヤモンドカッターで切断した後、インサート射出成形金型の固定用のピンに通すため、図5に示すような手動プレス装置および打ち抜き型を用いて穴あけを行った。

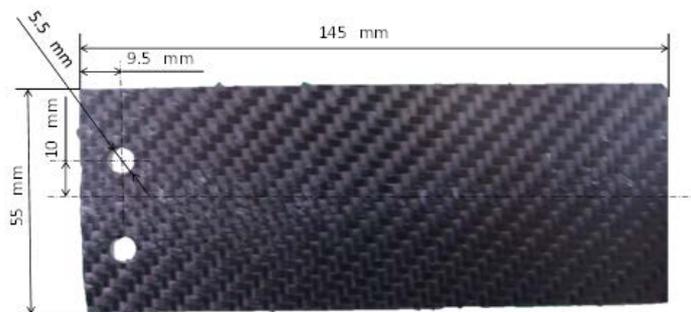


図4 織物 CF/PA66 積層板製の試験材料



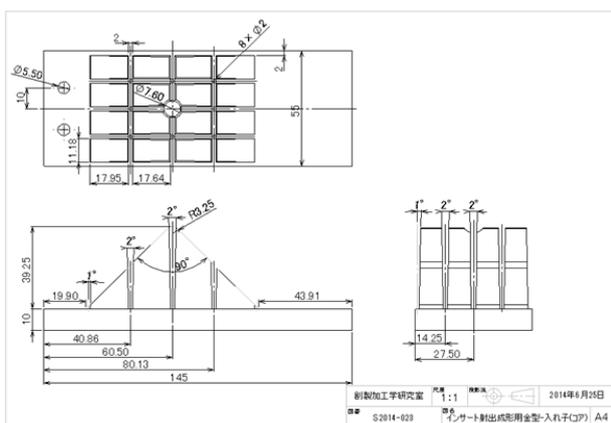
(a) 手動プレス装置



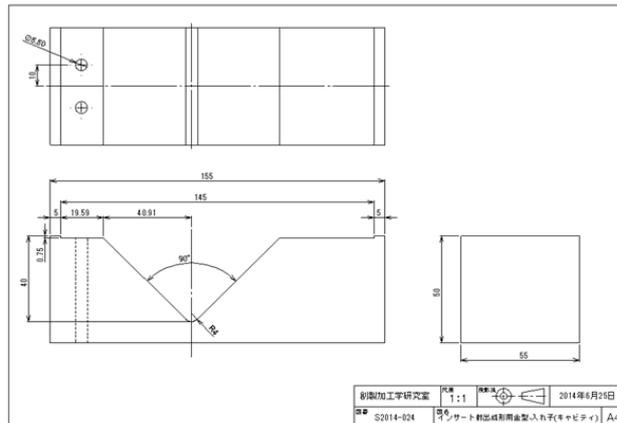
(b) 外形打ち抜き金型

図5 織物 CF/PA66 積層板の外形抜き装置

衝撃吸収部材を加熱プレス・射出ハイブリッド成形により製造するために用いたインサート射出成形金型を、三次元 CAD (SolidWorks2011) を用いて設計した。入れ子の図面を図6に示す。入れ子は主にワイヤ放電加工機と型彫り放電加工機を用いて製造した。



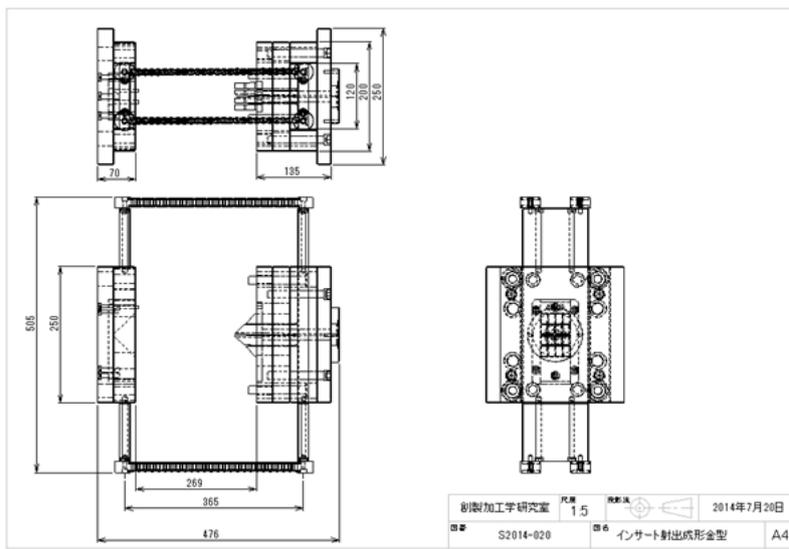
(a) コア側



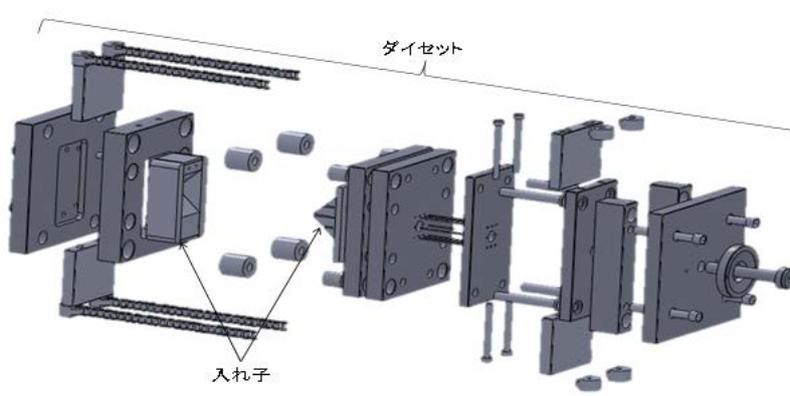
(b) キャビティ側

図6 インサート射出成形金型入れ子

これらの金型入れ子をダイセット（双葉電子工業㈱製，Sシリーズ2025）に固定した．その組立図および拡散分解図を図7に示す．成形品の形状やゲートの位置から，射出成形機のエジェクタ機構を使用することは困難であるため，チェーンを用いてダイセットのエジェクタプレートを引きることによりエジェクタピンを動かし，成形品を押し出す機構を採用した．また，チェーンの位置は加熱プレス成形時に挿入する加熱機の位置を考慮し，加熱機に接触しないような位置に取り付けた．さらに，ヒータを挿入した際にインサート射出成形金型に接触しないように，キャビおよびコア金型間の隙間を調整した．金型の開閉時の幅はチェーンの長さにより調整した．



(a) 組立図



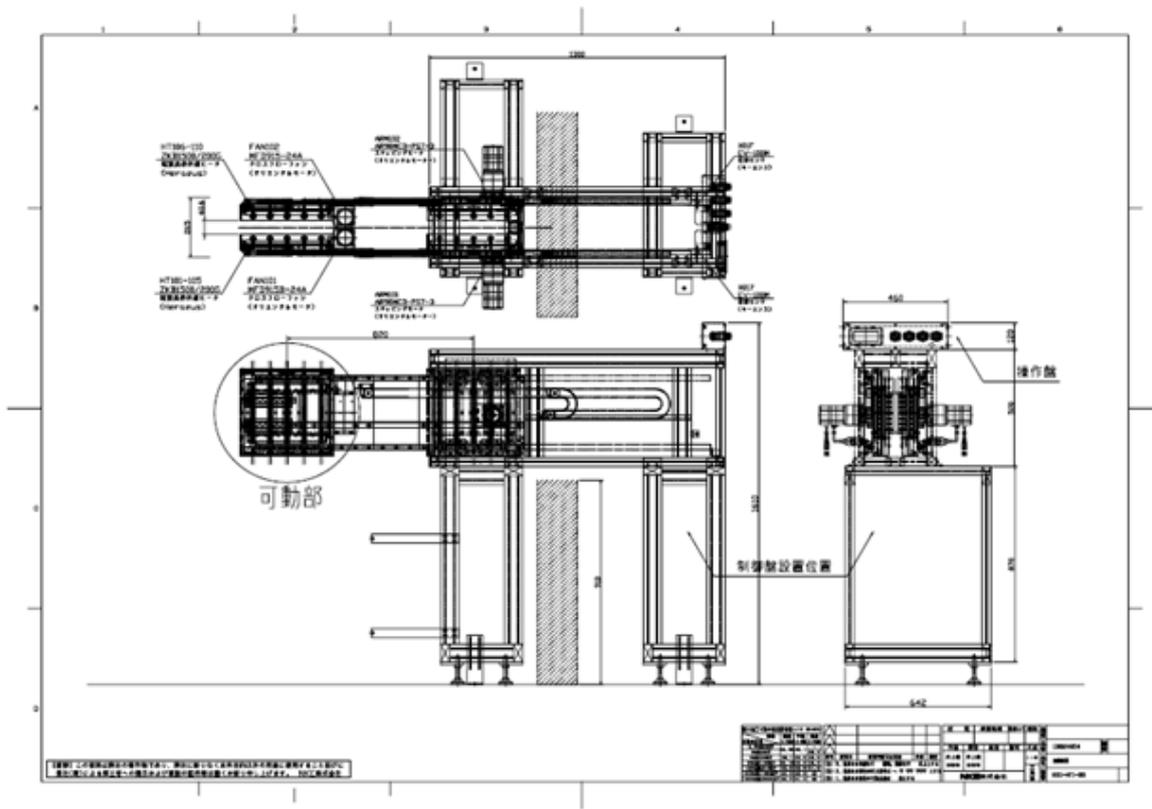
(b) 拡散分解図



(c) 外観写真

図7 インサート射出成形金型（全体図）

加熱プレス・射出ハイブリッド成形専用加熱装置を図8に示す。本加熱装置は、単相電力調整器（オムロン製，G3PW），クローズドループステッピングモーターユニット（オリエントルモーター製），加熱装置制御盤（三菱電機製，GOT1000）を用いて作製した。本加熱装置の特徴は、金型の背面で加熱装置を設け、搬送ロボットで金型上部より加熱された材料を掴み、金型にインサートする一般的な手法を採用せず、ヒータを金型内に挿入して予め材料を金型内にインサートされた状態で加熱する方式を採用した点にある。そのため、加熱された材料を搬送およびインサートする必要がないため、加熱直後に射出成形が可能である。しかし、本研究では安全性を優先させて、加熱プレス工程と射出成形工程の間に、作業者がその都度判断して手動で次の工程への始動を行うことにした。



(a) 組立図



(b) 外観写真

図8 加熱プレス・射出ハイブリッド成形専用加熱装置

本実験で用いた成形条件を表 1 に示す。この条件は、短繊維 CF/PA66 樹脂を射出成形した際に適した成形条件を用いた。加熱温度を 60s, 90s, 120s の三因子とした。試験片を加熱後に加圧するまでの時間は 10s, 金型にインサートした材料とヒータとの距離は約 50mm に設定した。シリンダ温度は、PA66 樹脂の一般的な成形温度である 270°C~300°C に設定した。なお、短繊維 CF/PA66 樹脂ペレットは使用前に加熱温風機にて 80°C で 17~20hr 間乾燥し、水分を除去した。CF/PA66 樹脂は PA66 樹脂と比較して温度低下による凝固が急激に生じるため、シリンダのノズル先端部の温度を 270°C に設定した場合は CF/PA66 樹脂がノズルの先端部で固化し、ノズルで詰まり、射出成形を行うことができなかった。そのため、ノズル先端部の温度を上げてノズル詰まりを解消した。しかし、300°C では CF/PA66 樹脂の粘度が低すぎ、ノズルからの樹脂漏れが著しかったため先端部以外の温度を 280~290°C に下げた。金型温度は金型温度調節機（松井製作所製，MCH-25）を用いて 70°C に設定した。

表 1 織物 CF/PA66 積層板の加熱および短繊維 CF/PA66 樹脂の射出成形条件

織物 CF/PA66 積層板の加熱時間	60s, 90s, 120s
加熱後型締めまでの時間	10s
射出速度	60mm/s
最大射出圧力	80MPa
保圧力および保圧時間	60Mpa, 3s
背圧力および回転数	3MPa, 100rpm
シリンダ内温度（ノズル先端からの温度）	280°C / 280°C / 290°C / 290°C / 80°C

4. 成形実験の結果および考察

4. 1 熱可塑性 CFRP のみを用いた場合

ハイブリッド成形により得られた衝撃吸収部材の外観写真を図 9 に示す。また、完全充填およびショートショットした成形品の例を図 10 に示す。織物 CF/PA66 積層板の温度は加熱後の時間経過とともに低下するため、短繊維 CF/PA66 樹脂との接着強度が低くなると考えられる。また、図 10(b) の V 先端部の温度は高い状態で短繊維 CF/PA66 樹脂が射出成形されるため接着は良好であるが、図 10(c) のように V 部の両端へ行くほど織物 CF/PA66 積層板の温度低下が著しいため、短繊維 CF/PA66 樹脂と織物 CF/PA66 積層板との接着強度は低くなると思われる。

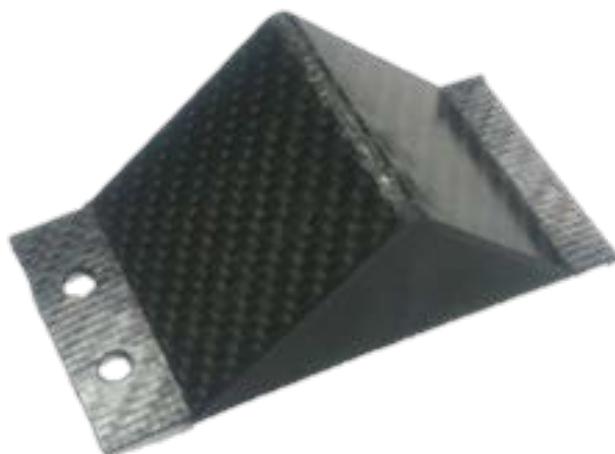


図 9 ハイブリッド成形により得られた衝撃吸収部材の外観



図 10 完全充填およびショートショットした成形品の例

加熱時間を種々変化させて得られた衝撃吸収部材の外観写真を図 11 に示す。加熱時間が 60s および 90s の場合、織物 CF/PA66 積層板の V 曲げ部分に微細な亀裂が見られた。また、織物 CF/PA66 積層板と射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂の間に隙間が見られ、接着が不十分であった。これは加熱時間が短かったため、織物 CF/PA66 積層板がガラス転移温度以上に到達していなかったか、または加圧時に温度低下が生じ、ガラス転移温度以下でプレス・射出成形を行ったためであると考えられる。

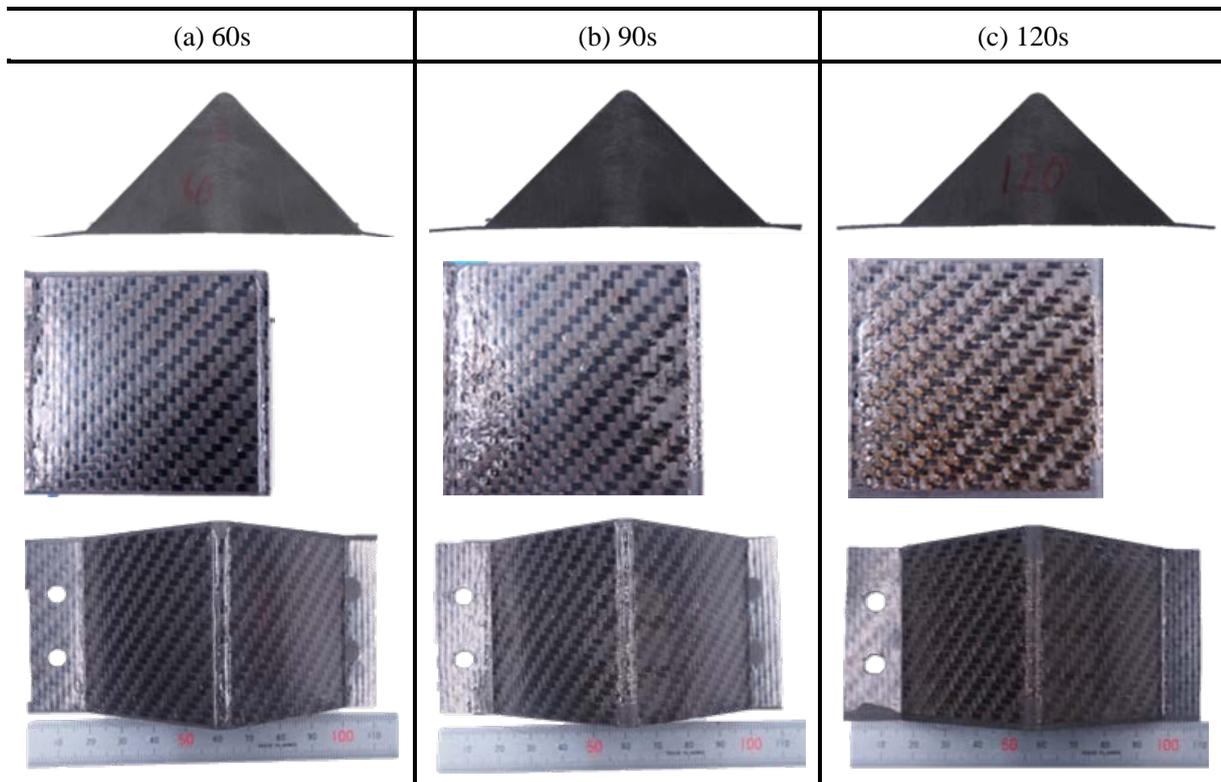


図 11 加熱時間を変化させて成形した衝撃吸収部材の外観写真

一方、加熱時間が 120s の場合、織物 CF/PA66 積層板の V 曲げ部分に亀裂は見られず良好に成形されているが、織物 CF/PA66 積層板の表面に金型が接触した跡や樹脂が焼けたような変色が見られた。

4. 2 アルミ板と熱可塑性 CFRP をハイブリッドした場合

より高い衝撃吸収性を得るために、織物 CF/PA66 積層板に加え、塑性変形に優れたアルミ板をハイブリッドした衝撃吸収部材の作製を試みた。表 2 に示すような射出成形条件で、(a)アルミ板（幅 55mm、長さ 145mm、厚さ 0.7mm）のみを用いた場合と、(b)織物 CF/PA66 積層板（幅 55mm、長さ 145mm、厚さ 0.5mm）とアルミ板（幅 55mm、長さ 145mm、厚さ 0.2mm）のハイブリッド材を用いた場合に対して、加熱プレス・射出ハイブリッド成形を行った。その際、V 形構造材の外層にアルミ板を配置した場合と、逆に内層にアルミ板を配置した場合について試作した。なお、ハイブリッド材は、予め接着剤が塗布されているアルミ板を用いて織物 CF/PA66 積層板に接着を行い、アルミ板のみの場合は加熱を行わずにプレス・射出ハイブリッド成形を行った。

表 2 ハイブリッド材の成形条件

	(a)アルミ板の場合	(b)ハイブリッド材の場合	
		(外層) アルミ板 (内層) 織物 CF/PA66 積層板	(外層) 織物 CF/PA66 積層板 (内層) アルミ板
V 形構造材	アルミ板	(外層) アルミ板 (内層) 織物 CF/PA66 積層板	(外層) 織物 CF/PA66 積層板 (内層) アルミ板
リブ構造材	短繊維 CF/PA66 樹脂	短繊維 CF/PA66 樹脂	短繊維 CF/PA66 樹脂
V 形構造材の加熱時間	0s (加熱無し)	90s	90s
加熱後型締めまでの時間	10s		
射出速度	60mm/s		
最大射出圧力	80MPa		
保圧力および保圧時間	60MPa, 3s		
背圧力および回転数	3MPa, 100rpm		
シリンダ内温度 (ノズル先端からの温度)	280°C / 280°C / 290°C / 290°C / 80°C		

アルミ板およびハイブリッド材で作製した衝撃吸収部材の外観写真を図 12 に示す。これらの衝撃吸収部材の目視観察では、射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂はアルミ板に対して概ね良好に融着接合されていた。一方、ハイブリッド材で衝撃吸収部材の成形は行えたが、インサートしたハイブリッド材と射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂との融着接合が不完全な個所が見られた。これは、織物 CF/PA66 積層板とアルミ板をハイブリッドしたことにより、温度低下が著しく、射出成形時のハイブリッド材が融着に必要な温度を保持できなかったことが原因の一つであると考えられる。アルミ板のみの場合は加熱しないでプレス成形を行ったため問題は生じなかったが、内層にアルミ板を用いたハイブリッド材の場合は織物 CF/PA66 積層板の V 曲げ部で破断が生じた。この原因は、ハイブリッド材の内層に配置したアルミ板を近赤外線ヒータで加熱した際、アルミ板の表面が光沢を持つため赤外光が反射し、織物 CF/PA66 積層板が十分に加熱されずにプレス成形されたためであると考えられる。

(a)アルミ板の場合	(b)ハイブリッド材の場合	
	(外層) アルミ板 (内層) 織物 CF/PA66 積層板	(外層) 織物 CF/PA66 積層板 (内層) アルミ板
		
		
		

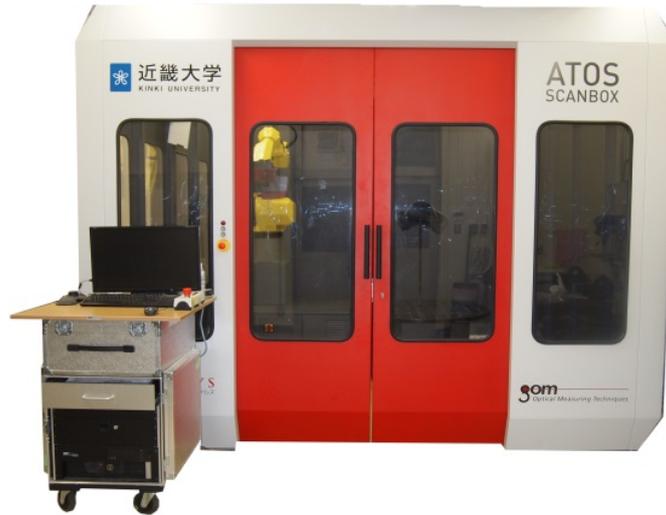
図 12 アルミ板およびハイブリッド材を用いて成形した衝撃吸収部材の外観写真

5. デジタル画像計測ロボットによる形状測定

5. 1 測定装置および方法

本章ではデジタル画像計測ロボットを用いて、第 4 章で作製した衝撃吸収部材の形状測定を行った。形状測定後、成形品の三次元 CAD モデルの設計値と実測値の比較を行い、成形品を評価した。図 13 に今回の評価で用いたデジタル画像計測ロボットシステム (GOM 社, ATOS™ SCANBOX) の外観図を示す。デジタル画像計測ロボットの測定原理は、三角測定の測定原理に基づき、測定対象物に投影されたフリンジパターンを 2 台の CCD カメラで計測し、各カメラのピクセル上の 3 種類の光学測定アルゴリズムを用いて、三次元座標を高精度に計算し、オブジェクト表面のポリゴンメッシュを生成するものである。

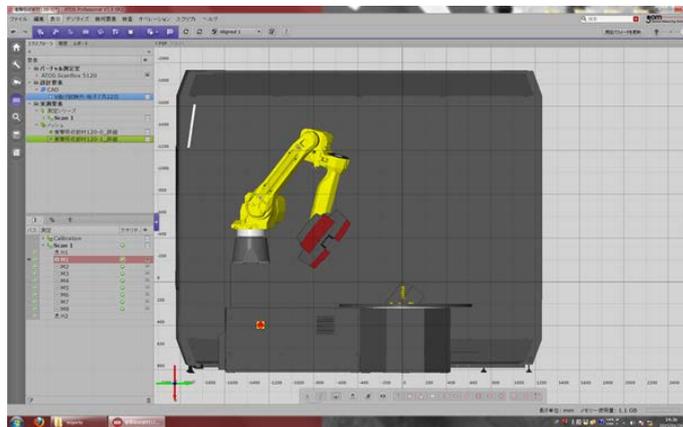
成形品の形状測定を行う際、デジタル画像計測の特性上、測定対象の表面によっては探傷剤(株)タイホーコーザイ、マイクロチェック現象液)などのスプレーを使用する。次にこの成形品などの測定対象をデジタル画像計測ロボット内の回転テーブル上に配置する。その後、実機動作を伴う測定のプログラミング作業 (ティーチング) を行う。図 14 にプログラミング作業画面を示す。プログラミングは測定対象の三次元 CAD モデルをデジタル画像計測ロボット専用の PC ソフト (GOM 社, ATOS™ Professional V7.5) に測定対象の三次元 CAD モデルをソフト上の仮想空間にインポートし、実機や回転テーブルのグラフィックモデルをマウスでドラッグするだけで行える。このソフトウェアは後の測定結果の評価にも用いる。このプログラムは同一形状の測定対象の測定に対して使い回しが可能である。プログラミング終了後は実機による形状測定を行い、測定終了後に測定対象の寸法計測および評価を行う。



(a) 装置の外観写真



(b) 撮像状況



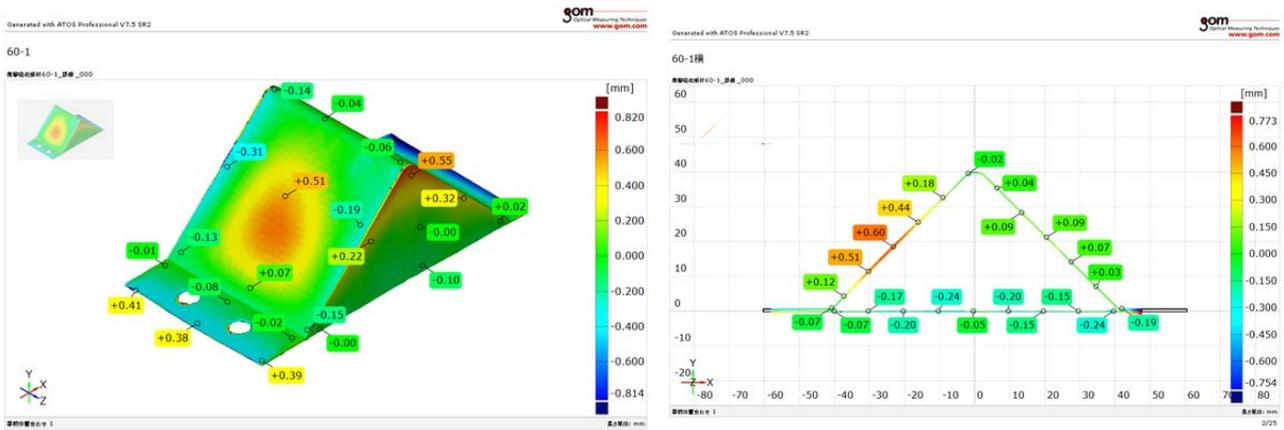
(c) プログラミング作業画面

図 13 デジタル画像計測ロボットシステム

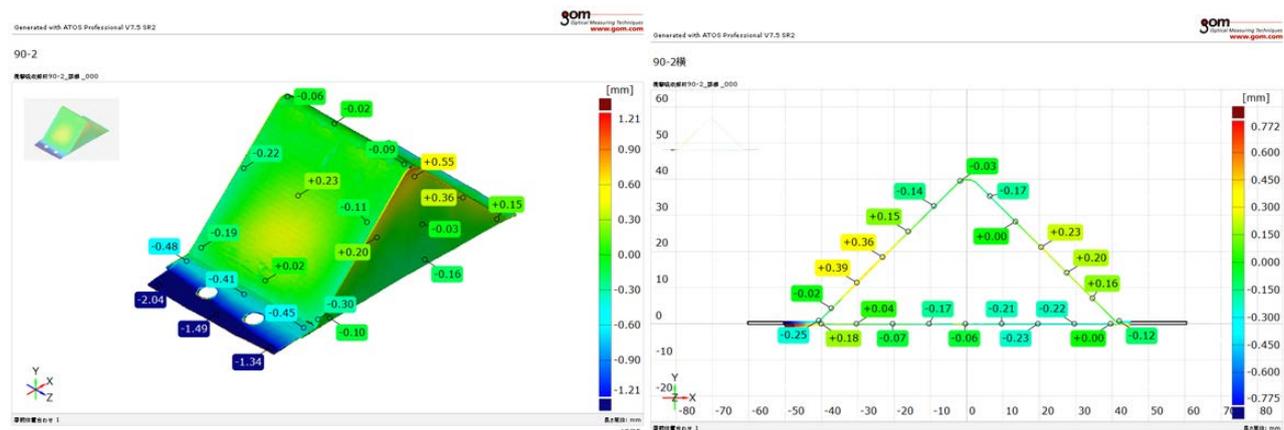
5. 2 熱可塑性 CFRP のみを用いた場合の測定結果

図 14 は、デジタル画像計測ロボットより出力された加熱時間毎の成形品の形状測定結果を示す。前述したように、成形品には探傷剤を吹き付けて測定を行った。測定結果画像から分かるように、探傷剤を使用したことにより概ね良好に形状の撮影ができています。探傷剤を使用しなかった場合は撮影が正確に行われなかったことがあり、その場合はメッシュの全体に欠損が広がり、寸法の計測は難しくなる。ただし、軽度の欠損であれば問題なく寸法の計測ができる。

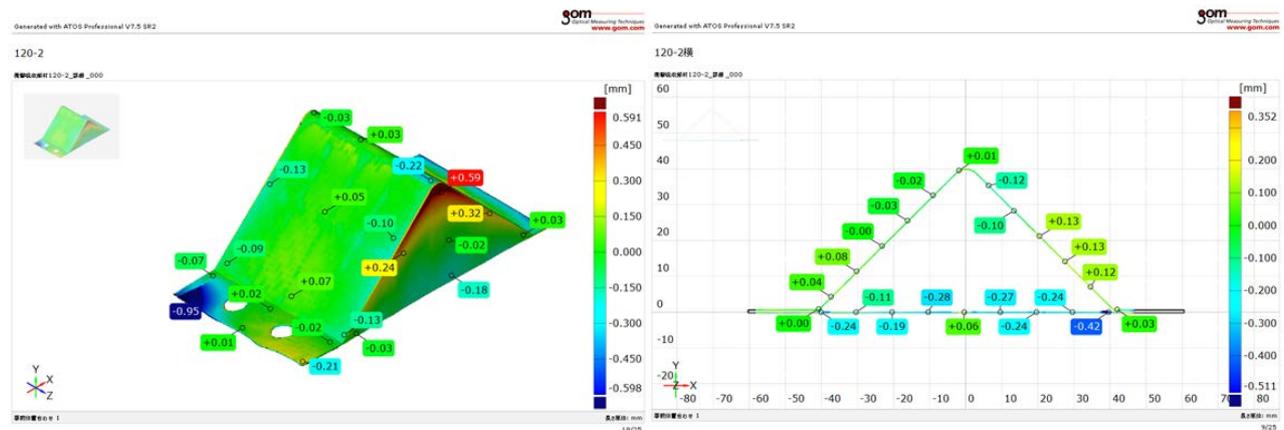
図 14 より、加熱時間が長い場合ほど表面の偏差が少ないことが分かる。このことから、織物 CF/PA66 積層板と短繊維 CF/PA66 樹脂を接着させるためには、織物 CF/PA66 積層板の温度が高い状態であることが望ましいと考えられる。しかし、前述したとおり加熱時間が長いと、織物 CF/PA66 積層板にシワや表面が変色するという成形不良が発生するため、織物 CF/PA66 積層板と短繊維 CF/PA66 樹脂の接着が行われ、織物 CF/PA66 積層板にシワや表面の変色などの成形不良が発生しない、適切な成形条件の調査が必要である。



(a) 加熱時間 60s の場合



(b) 加熱時間 90s の場合



(c) 加熱時間 120s の場合

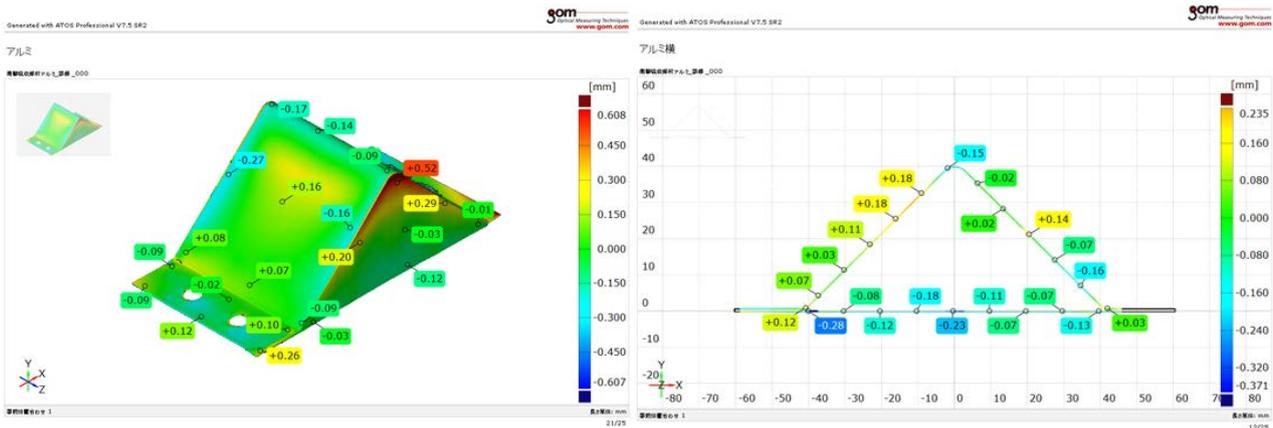
図 14 加熱時間毎の成形品の形状測定結果

5. 2 アルミ板と熱可塑性 CFRP をハイブリッドした場合の測定結果

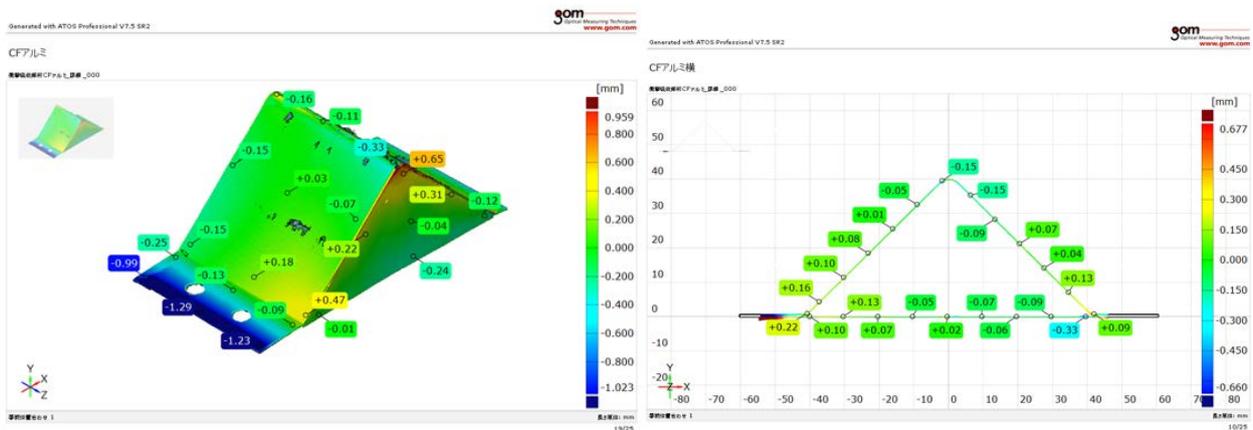
図 15 は、(a)アルミ板を用いた成形品、(b)表面が織物 CF/PA66 積層板のハイブリッド材料の成形品、および(c)表面がアルミ板のハイブリッド材料の成形品の形状測定結果を示す。アルミ板と短繊維 CF/PA66 樹脂による衝撃吸収部材の成形はできたが、表面にプラスの偏差が発生し、外側に開いていることが分かる。これは目視でも確認できたが、アルミ板と短繊維 CF/PA66 樹脂との接着が不完全な部分があることが分かる。アルミ板と CF/PA66 樹脂の接着は、アルミ板の表面に紙ヤスリなどを使い表面粗さを粗くすることや、短繊維 CF/PA66 樹脂の表面積を増大させることなどにより、接着強度を向上させることができると思われる。

図 15(b)の表面が織物 CF/PA66 積層板のハイブリッド材料の成形品の場合、表面は問題がないが、織物 CF/PA66 積層板が衝撃吸収部材の頂点部分で破断しているため、ハイブリッド材料にスプリングバックが発生しなかったと考えられる。また、アルミ板の表面を塗装したものはハイブリッド材料と短繊維 CF/PA66 樹脂の部分が剥がれてしまったため、形状評価を行わなかった。

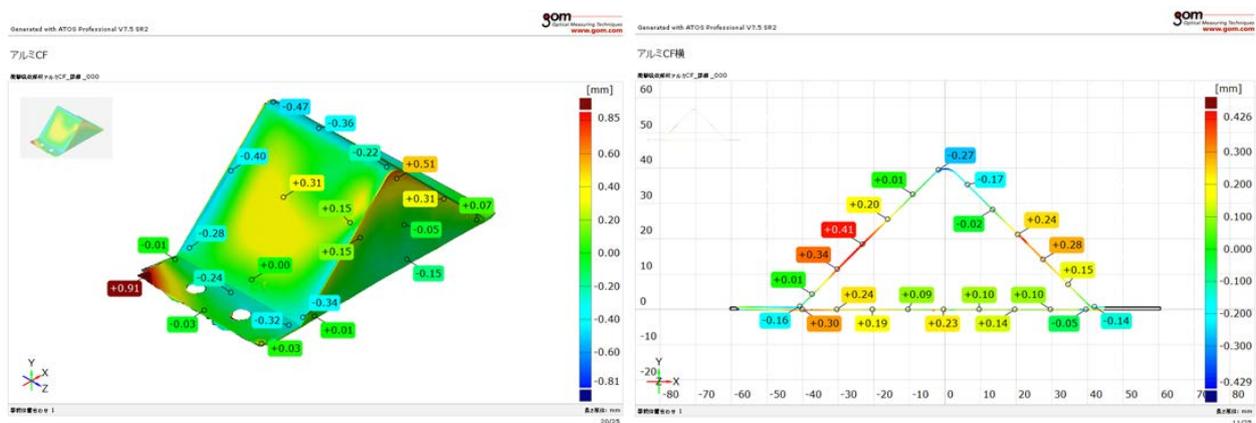
図 15(c)の表面がアルミ板のハイブリッド材料の成形品の場合、面の中心部に偏差が見られるが、断面図を見ると中心部が大きく膨らんでいることが分かる。中心部ではハイブリッド材料と短繊維 CF/PA66 樹脂の接着が行われていないことが分かる。この中心部が大きく膨らんでいる原因は明らかでないため、今後詳細に調査する必要がある。



(a) アルミ板を用いた成形品の場合



(b) ハイブリッド材料(織物 CF/PA66 積層板表面)を用いた成形品



(c) ハイブリッド材料(アルミ板表面)を用いた成形品

図 15 アルミ板と熱可塑性 CFRP をハイブリッドした場合の形状評価結果

6. まとめ

本研究は、機械機能設計研究室で使用される衝撃吸収部材の作製を目的に、加熱プレス成形とインサート射出成形を融合したハイブリッド成形法を提案し、その製造装置として専用の加熱装置および金型を設計・製作した。この装置を用いて、織物 CFRP 積層板を加熱プレス成形し、その後に短繊維 CF/樹脂ペレット材を射出成形して V 形の衝撃吸収部材の作製を試みた。

デジタル画像計測ロボットを用いて作製した衝撃吸収材の形状評価を行った結果、織物 CF/PA66 積層板、およびアルミ板とのハイブリッド材料と短繊維 CF/PA66 樹脂の接着状態によって、形状変化が生じることが分かった。

熱可塑性CFRP の加熱プレス・射出ハイブリッド成形における加熱時間の影響を調査し、加熱プレス成形した織物 CF/PA66 積層板と、射出成形した短繊維 CF/PA66 樹脂との接着が良好な成形品を得ることができた。しかし、織物CF/PA66 積層板のV 部の先端部に微細な亀裂が発生しており、この亀裂を減らすために加熱時間を延長すると表面に変色が見られたことなどから、高品質な成形品を得ることができたとはいえない。また、アルミ板と織物CF/PA66 積層板のハイブリッド材料による加熱プレス・射出成形により、衝撃吸収部材の作製を行うことはできたが、成形条件の適正化を行うには至っておらず、今後さらなる調査が必要である。

7. 参考文献

[1] BMW, <http://bmw-i.jp/BMW-i3/>

[2] 帝人, <http://www.teijin.co.jp/rd/technology/cfrp/>

[3] 東レ, <http://www.toray.co.jp/news/carbon/detail.html?key=9F400D6925A872E249257D94002BE6F8>

熱可塑性 CFRP の量産・再利用のための型技術

メカニクス系工学専攻 准教授	西藪 和明
濱田プレス工藝株式会社 取締役社長	濱田 恵
株式会社カツロン 代表取締役社長	石川 明一
株式会社ホーライ 代表取締役社長	鈴木 雅之
株式会社小西金型工学 専務取締役	小西 修史
株式会社マジックボックスJP 代表取締役社長	柳原 淳一
大阪大学大学院 博士後期課程学生	田邊 大貴
理工学部機械工学科 学生	倉留 京介

1. 緒言

近年注目されている熱可塑性 CFRP は、従来から多用されている短い炭素繊維を熱可塑性樹脂に添加して、プラスチック成形品の強化を目的とした材料とは異なり、連続した炭素繊維を高密度に配列させ、それを力学的および熱的特性に優れたスーパーエンブラの熱可塑性樹脂で繋ぎ止めた先進材料である。このような熱可塑性 FRP は、熱硬化性 CFRP では耐衝撃性に課題のあった大型旅客機の主翼前縁やジェットエンジンの吸気ダクトなどの部位に採用されており、アルミなどの金属材料の代替である。これはガラス繊維強化 PPS 樹脂積層板を加熱プレス成形し、誘電加熱による融着接合法の開発により実用化に至っている。近年では高い生産性を必要とされる航空機のブラケット等に熱可塑性 CFRP が採用され、水平尾翼の構造材への開発も進んでいる。電気自動車への車体全体を熱可塑性 CFRP で試作した事例も広報されているが、量産燃料電池車への熱可塑性 CFRP 部材の採用を除けば、現在のところ自動車部材への適用はガラス繊維強化熱可塑性樹脂積層板のインサート射出成形品が多い。

熱可塑性 CFRP と熱硬化性 CFRP に用いられる炭素繊維は、使用する母材樹脂に適合した表面処理が施されている点では異なるが、同材質の炭素繊維が用いられる。CFRP の成形プロセスにおいて、炭素繊維は何の材質上の変化はないが、母材樹脂は大きくその特性が変化する。熱可塑性 CFRP に用いられる樹脂は、加熱により軟化・熔融し、冷却により固化する可逆的な性質を持つため、汎用熱可塑性プラスチックと金属材料の両方の成形技術が適用可能である。それらは、射出成形や加熱プレス成形など、高い生産性と量産に富む「金型を用いた製造」技術である。近年、熱可塑性 CFRP を用いた自動テープ積層 (Auto Tape Layup, ATL) や自動繊維積層 (Auto Fiber Placement, AFP) による大型構造部材の製造法の開発が進んでいる。今後は押出や引抜き、ロール成形のような連続成形や真空成形など様々な成形技術が適用されるが、これらはすべて金型や工具を用いた製造法である。

一方、連続した炭素繊維の変形能は乏しく、金属材料のように常温での大きな塑性変形によるプレス成形は適用できない。そのため、加熱により軟化させてプレス成形が可能であるが、テキスタイル構造特有の大きな異方性により多くのシワが発生する。そのため、織物に切り目を入れたプリフォームや一方向繊維のプリプレグシートを適切に切断した複雑形状への成形性に優れたプリプレグシートも開発されている。さらに、複雑な形状を有する大型構造材を製造するには部材間の接合が必要である。一般に、熱硬化性 CFRP の接合には金属製のリベットやボルトによる機械的接合や、熱硬化性樹脂を用いた接着接合が用いられるが、金属締結具の重量増加や腐食、円孔部近傍での応力集中による強度低下が問題となる。そのため、熱硬化性樹脂による接着接合は有用であるが、熱可塑性樹脂との化学的結合が乏

しいため熱可塑性 CFRP の接合には適さない。そのため、熱可塑性 CFRP の接合は部材間の樹脂を加熱溶融・冷却固化による融着接合が望ましい。この融着接合にも何らかの加熱および加圧を行う際にツールが必要である。さらに、熱可塑性 CFRP の加熱プレス成形で行われる外形抜きにより排出された不用部材や成形不良品などを破碎粉碎して再生材として利用可能である。その際、粉碎破碎に用いられる打ち抜き金型や工具、さらに樹脂との混練のためのブレードなど、高度なツーリング技術が必要である。このように、熱可塑性 CFRP を量産・再利用を実現するためには単に素材の高性能化や安定供給のみならず、型技術が極めて重要である。本稿では、熱可塑性 CFRP の加熱プレス成形、押し出し成形、ハイブリッド射出成形、再利用のための破碎・混練および電気式融着接合などの開発事例を紹介する。

2. 加熱プレス成形⁽¹⁾

熱可塑性 CFRP の加熱プレス成形プロセスの一例を図 1 に示す。(a)プレス成形に適合する形状にトリミングした熱可塑性 CFRP 板を、(b)赤外線加熱して母材樹脂の融点近傍まで加熱する。その後、(c)プレス成形金型に搬送し、適切なプレス条件で加熱成形し、(d)樹脂のガラス転移温度以下に冷却し、離型して製品を得る製造プロセスである。熱可塑性 CFRP の赤外線加熱には、近赤外線ヒータ（短波長ヒータ）が用いられることが多い。近赤外線ヒータは中波長や遠赤外線ヒータ等と比較して昇温速度が大きく、炭素繊維のような黒体への吸収率が高いため、熱可塑性 CFRP の加熱に適している。

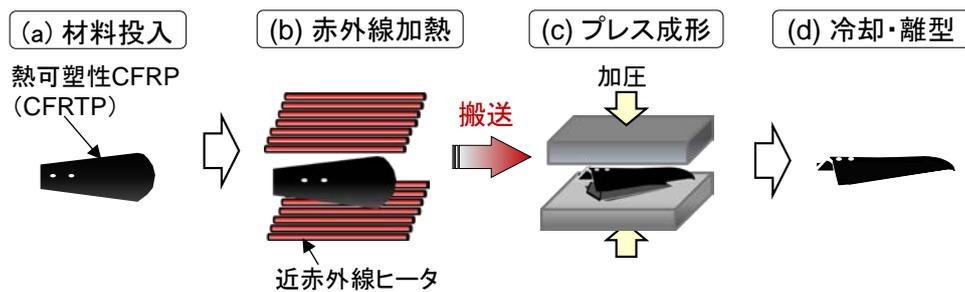


図 1 熱可塑 CFRP の加熱プレス成形プロセスの一例

熱可塑性 CFRP 用の加熱搬送装置を図 2 に示す。本装置は東大阪市内の金属プレス業やプラスチック成形業等の 5 社と近畿大学で構成される「e-コンポジット研究会」が、平成 23~25 年度の戦略的基盤技術高度化支援事業⁽²⁾で開発した“汎用金属プレス機で使用可能な”熱可塑性 CFRP 用加熱搬送装置である。適切な温度レシピで CFRP を加熱し、汎用金属プレス機の金型に自動搬送できることを特長とする。本装置を用いて成形した熱可塑性 CFRP の加熱プレス成形品例（LED ランプシェード）を図 3 に示す。多様な織物 CFRP のプレス成形品が高品質に製造可能である。

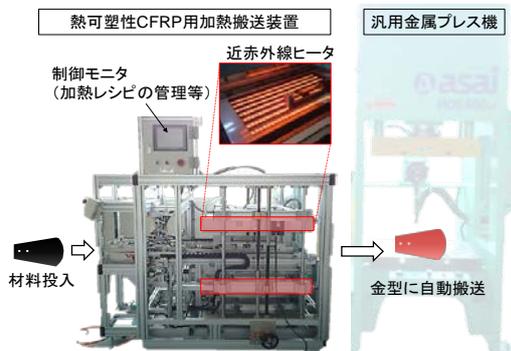


図 2 汎用金属プレス機で使用可能な加熱搬送装置

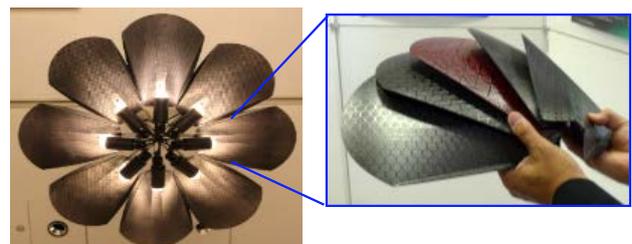


図 3 熱可塑性 CFRP の加熱プレス成形品例（LED ランプシェード）

著者らの研究室で開発した「熱可塑性CFRPの打抜き・プレス成形のミニライン」を図4に示す。熱可塑性CFRP板をプレス成形に適する形状に打抜き加工し、近赤外線ヒータで加熱した後、1トンサーボプレス機でプレス成形して、ペン立てを製造することが可能である。本装置はAC100Vで動作することが可能で、実験室や展示会等での実演により、熱可塑性CFRPの一連の成形工程を紹介することができる。

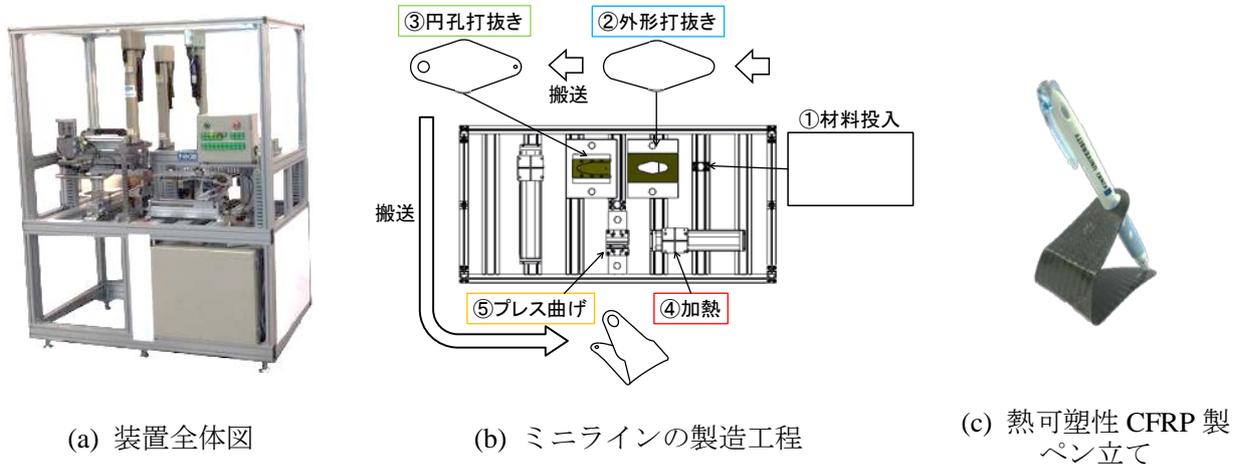


図4 熱可塑性CFRPの打抜き・プレス成形のミニライン

3. 押出成形^[1]

これまで汎用の押出し成形機を用いて金属ワイヤやシートなどの異材と熱可塑性樹脂を同時に複合押出し成形する技術が確立されてきたが、熱可塑性CFRPと熱可塑性樹脂の複合押出し成形を試みた例はあまり見られない。熱可塑性CFRPを複合押出し成形する際、熱可塑性樹脂は熔融粘度が高いために繊維束内に樹脂を含浸させることが困難である。しかし、高剛性で高い強度信頼性を有する複合押出し成形品を熱可塑性CFRPで得るには高い繊維体積割合で、高い繊維/樹脂界面特性を確保する必要がある。

炭素繊維束とPA66樹脂の複合押出し成形プロセスを図5に示す。押出し材料であるPA66樹脂ペレットを押し出し成形機に投入し、押し出しスクリーを用いて加熱溶融させ、押し出し金型から所望の形状で溶融材を吐出する。その際、押し出し金型の背面から2本の炭素繊維束をインサートさせ、溶融材と共にサイジング機に挿入し、冷却水槽内で固化冷却させて引取装置を用いて連続的に成形する。これにより得られた複合押出し成形品の外観像を図6に示す。炭素繊維束の周りのPA66樹脂を減らせる押し出し金型技術が求められる。

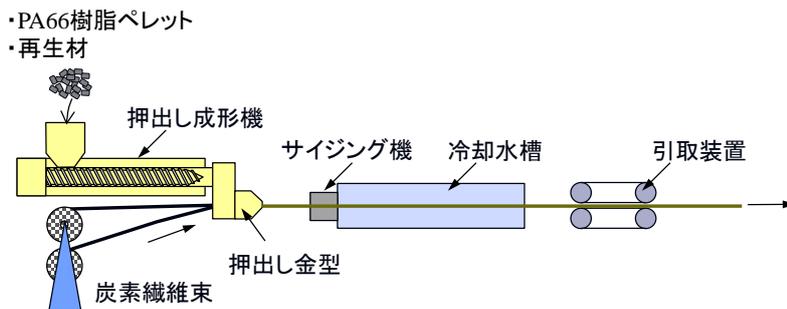


図5 複合押出し成形プロセス



図6 複合押出し成形品の例

4. 再利用のための破碎・混練¹⁾

プレス成形の前後に排出された熱可塑性 CFRP の不用品を再利用するためには、加熱により樹脂を変形または溶融させて、繊維を元のシート状に戻すことが最も優れたリサイクル法であるが、繊維の連続性から容易に元の形態に復元することは容易ではない。そのため、繊維強化熱可塑プラスチックを所望の形状に制御して破碎し、再利用しやすいサイズや形状に加工する必要がある。これは、不用品や廃棄物を単に破壊させ、減容化により搬送または燃焼・埋め立てしやすい形状にする廃棄処理とは全く異なる。破碎粉碎には、シートペレタイザー、二軸式破碎機、およびスクリーン付き一軸せん断式粉碎など様々な種類の破碎機が使用できる。破碎方法とメッシュサイズにより、図7に示すように織物 CFRP 積層の破碎片サイズを変化させることが可能である。織物 CFRP 積層の破碎片の繊維体積割合は 45vol.% であり、溶融押し出し成形や加熱プレス成形は可能である。また、織物 CFRP 積層の破碎片に母材樹脂を添加して混練押し出し成形により、図8(a)に示すような再生ペレットを作製し、これを用いて押し出し成形や射出成形により図8(b)や(c)のような再生成形品が得られる。図8(d)は織物 CFRP 積層板とその破碎片を用いて加熱プレス成形により作製したリブ構造板である。

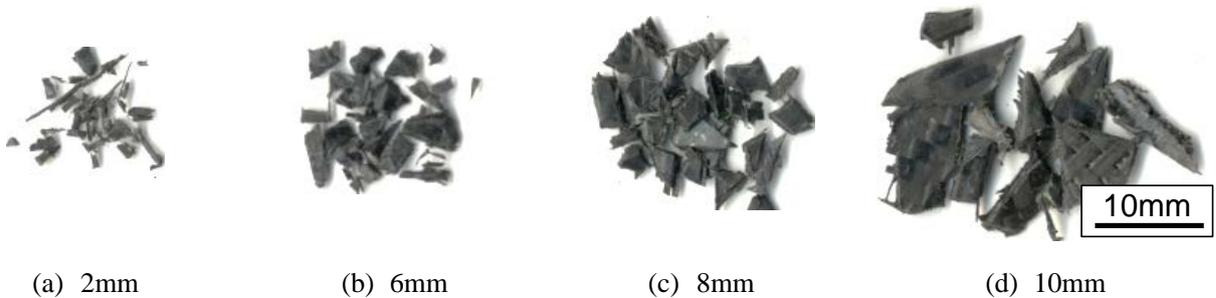


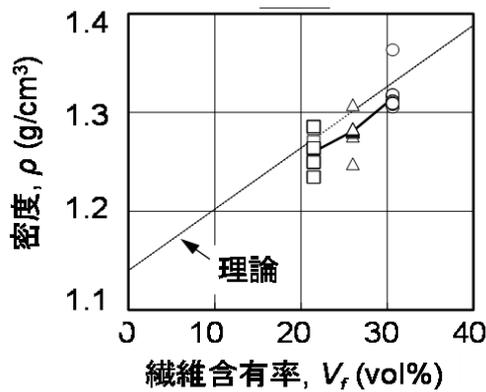
図7 織物 CFRP 積層板の破碎片



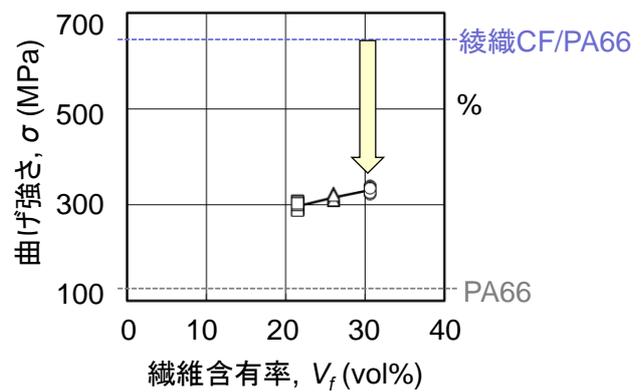
図8 再生ペレットおよび再生成形品の例

5. 射出成形

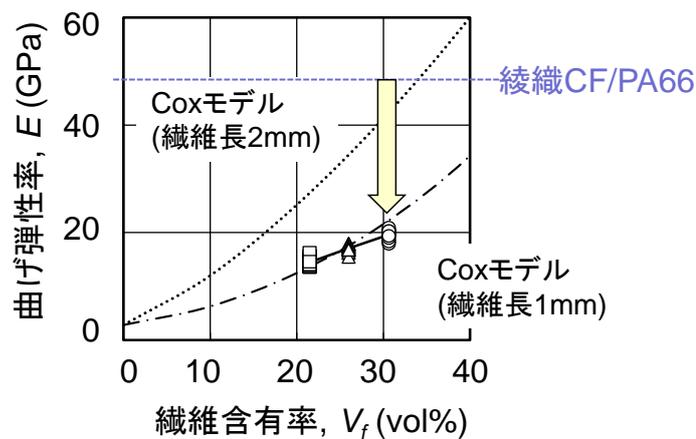
再生 CFRTP ペレット材を小型電動射出成形機（株住友重機械，SE18DUZ）で、長さ 80mm、幅 10mm、厚さ 4mm の形状の 3 点曲げ試験片を成形した。その後、卓上万能試験機（株島津製作所製，AG-50kN XDplus）を用いて 3 点曲げ試験を行い、再生材の曲げ特性を評価した。小型電動射出成形機を用いて射出成形した 3 点曲げ試験片の繊維含有率が密度、曲げ強さおよび曲げ弾性率に及ぼす影響を図9に示す。繊維含有率が増加するほど(a)密度はほぼ線形的に増加した。また、(b)曲げ強さおよび(c)曲げ弾性率も同様に繊維含有率が増加するほど線形的に向上した。 $V_f=30.6\text{vol}\%$ の再生材の場合では、未使用板と比較して曲げ強さは 52%、曲げ弾性率は 40%の強度特性が得られることが分かった。しかし、曲げ強度および曲げ弾性率においても偏差が見られる。これは、繊維含有率が一定でも試験片ごとに密度の偏差が大きいことが原因であると考えられる。短繊維複合材料の Cox モデルに繊維長 1mm として当てはめてみたところ、実験値と一致した。



(a)密度



(b)曲げ強さ



(c)曲げ弾性率

図9 再生CFRTP材を用いた射出成形品の三点曲げ試験結果

破砕片のサイズの異なる再生ペレットの繊維長を測定した。試験片の一部を切り出し、それを卓上マッフル炉（山田電機株，YF-120）で加熱して樹脂を除去し、炭素繊維のみを取り出す。デジタルマイクロスコープ（オリンパス株，DSX500）で炭素繊維を観察して測長した結果の100本の平均値を表1に示す。これらの繊維長は各破砕片サイズに比べてかなり小さい値であり、偏差も大きい。どの破砕片サイズにおいても、混練時に大きいせん断力により、繊維が短く切断され、その長さはほぼ一定であり、樹脂との混練が比較的均一に行われていると言える。

表1 破砕片のサイズの異なる再生ペレットの繊維長の測定結果

破砕片サイズ	平均繊維長
50wt%_φ2	119.34μm
50wt%_φ6	108.86μm
50wt%_φ8	103.55μm
50wt%_φ10	79.93μm
70wt%_φ2	159.23μm
70wt%_φ6	150.76μm
70wt%_φ8	110.52μm
70wt%_φ10	91.18μm

汎用射出成形機（ファナック株, α -S100iA）を用いて、表 2 に示す成形条件で図 10 に示すような連結式三角スケールを作製した。その際、破碎・粉砕片に PA66 樹脂を 50wt% 添加した再生 CFRTP 材ペレットを用いた。得られた成形品を非接触式三次元デジタル画像計測ロボット（GOM 社, ATOS® SCANBOX）を用いて形状測定し、図 10 に示す箇所について金型の設計値と比較した。

表 2 連結式三角スケールの作製のための射出成形条件

Injection speed, v	31 mm/s
Pressure keeping, P	30 MPa
Pressure keeping time, t_p	4 s
Maximum injection pressure, P_{max}	50 MPa
Back pressure, P_b	10 MPa
Cooling time, t_{cool}	20 s
Mold temperature, T_{mold}	80 °C

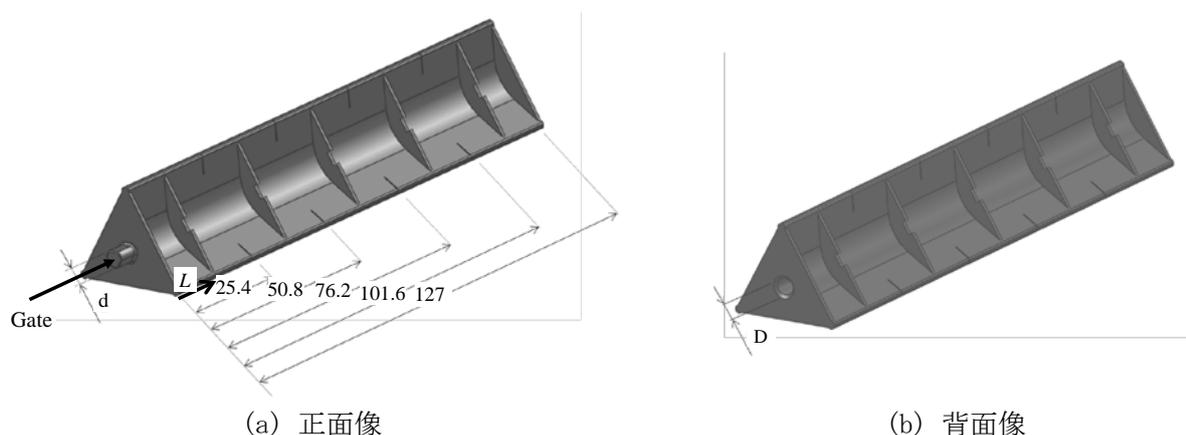


図 10 連結式三角スケールおよび形状測定箇所

破碎片サイズの異なる再生材を用いて作製した連結式三角スケール成形品の長手方向の寸法差率を図 11 に示す。破碎片サイズが $\phi=8\text{mm}$ より小さい場合はゲート部に近い $L=25\text{mm}$ で寸法差率が最大となり、ゲート部から離れるほど寸法差率は小さくなった。一方、破碎片サイズ $\phi=10\text{mm}$ の場合は $L=25\text{mm}$ で寸法差率が最小となり、ゲート部から離れるほど寸法差率が大きくなった。このように、破碎片サイズによってゲートからの距離に対する寸法差率の傾向が異なることが分かった。これは、破碎片が長くなるとゲート通過後の流動挙動に影響を及ぼし、成形品に繊維長の偏差が生じたためであると考えられる。

汎用射出成形機を用いて成形した三角スケール成形品の穴部および軸部の寸法差率を図 12 に示す。穴部の内径 D はゲート部付近の軸部の外径 d に比べて収縮が大きく生じ、結果として寸法差率が大きくなることが分かった。また、内径 D の場合は破碎片サイズが大きくなるほど寸法差率が小さくなることが分かった。これは繊維長が大きいほど、成形品の固化収縮率が小さく、成形品の寸法安定性が高くなったためであると考えられる。ただし、外径 d の場合は、破碎片サイズが $\phi=10\text{mm}$ の場合は繊維長が大きすぎて軸部に高密度に充填することが困難であったと考えられる。

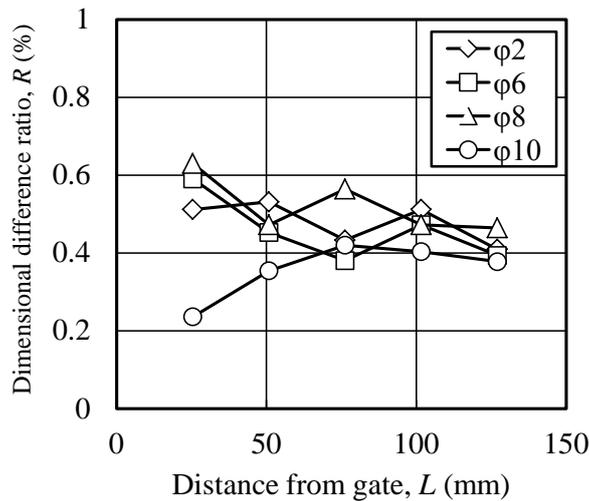


図 11 破砕片サイズの異なる再生材を用いて作製した三角スケール成形品の寸法差率の変化

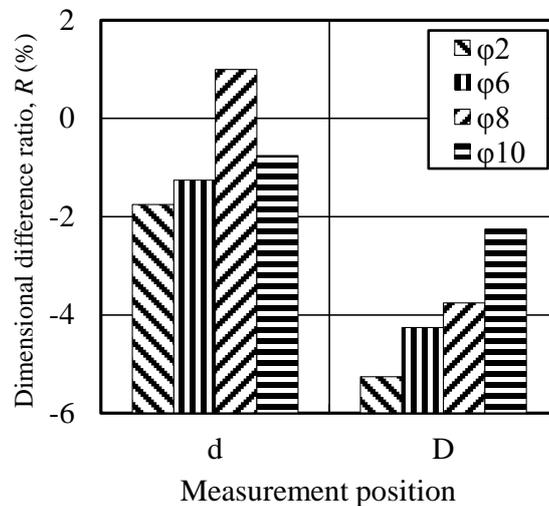


図 12 三角スケール成形品の穴部および軸部の寸法差率

6. 電気式融着接合 [2,3]

熱可塑性 CFRP の電気式融着の適用事例として、ステンレス鋼メッシュを抵抗発熱体に用いた研究があるが、著者らは Ni-Cr 線に用いて一方向および織物炭素繊維強化 PPS 樹脂積層板の電気式融着接合を行った [2]。PPS 樹脂は融点 290°C の高い熱的特性を有する結晶性樹脂であるが酸化が著しく、汎用樹脂に比べて融着は非常に困難である。金属線を抵抗発熱体に用いて熱可塑性 CFRP の融着接合は可能であるが、抵抗発熱体が融着層内部に残留するため強度低下や抵抗発熱体の腐食や廃棄処理の問題がある。そこで、図 13 に示すように高強度で耐食性に富む炭素繊維束および開織炭素繊維シートを抵抗発熱体として用いた電気式融着接合法を開発した [3]。炭素繊維束よりも開織炭素繊維シートを抵抗発熱体として用いた場合は、継手面全域が均一に樹脂溶解し、良好な融着接合が可能である。3 本の Ni-Cr 線と炭素繊維束、および開織炭素繊維シートを抵抗発熱体として用いた融着接合部材の引張せん断試験結果を図 14 に示す。エポキシおよびアクリル系接着剤で接着接合した試験片の引張せん断強度は極めて低いが、炭素繊維束を抵抗発熱体として用いた場合は Ni-Cr 線を用いた場合と比較して接合強度が向上した。特に、0° 試験片は融着層が繊維強化されたため、Ni-Cr 線を用いた場合と比べて約 3 倍の接合強度が得られた。炭素繊維を熱可塑性 CFRP の電気式融着時の抵抗発熱体として用いると接合強度を大幅に向上でき、軽量化、廃棄・再利用性にも優れている。

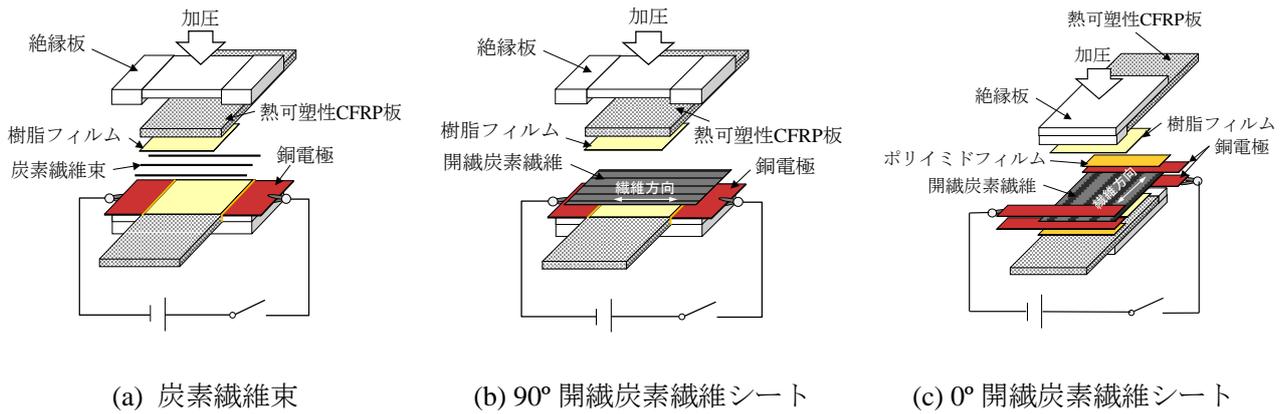


図 13 炭素繊維抵抗発熱体を用いた電気式融着方法

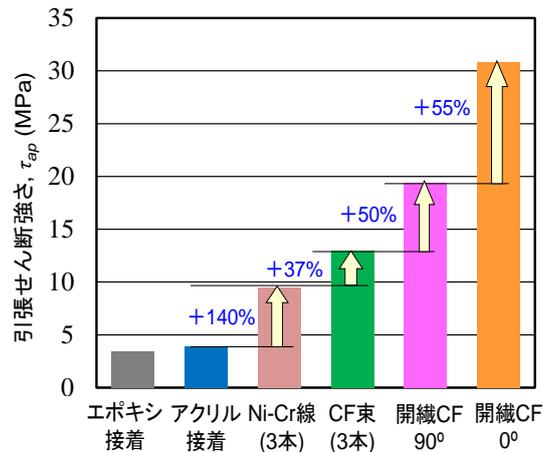


図 14 CF/PPS 積層板の接着接合と電気式融着接合の引張せん断強度の比較

7. まとめ

省エネ・環境適合性の観点から、主に輸送機器の軽量化を目的に熱可塑性 CFRP が大きく注目されているが、最大の課題は高い材料および製造コストに見合う用途探索である。熱可塑性 CFRP は従来の熱硬化性 CFRP の製造法とは全く異なり、金属加工業が参入しやすい先進材料であり、様々な技術シーズが提供可能である。その一つに、型技術がある。本稿で紹介した様々な成形や再利用・接合には何らかの形で型や工具など高度なツーリング技術が必要とされており、熱可塑性 CFRP の量産・再利用において型技術がその成功の鍵を握っていると言っても過言ではない。しかし、熱可塑性 CFRP はテキスタイルベースの材料であるため、金属材料のような使いやすい素材ではなく、また成形の前後において変化する母材樹脂であり、異分野の材料に対する理解が必要である。

8. 参考文献

- [1] 平成 25 年度戦略的基盤技術高度化支援事業「熱可塑性 CFRP プレス成形品の高度マテリアルリサイクルシステムの構築」研究開発成果等報告書(2014)
- [2] 田邊大貴, 西藪和明, 倉敷哲生, Ni-Cr ワイヤ抵抗発熱体を用いた CF/PPS 積層板の電気式融着挙動, 機論, Vol.80, No.815, DOI: 10.1299/transjsme.2014smm0189 (2014).
- [3] 田邊大貴, 西藪和明, 倉敷哲生, 炭素繊維を発熱体として用いた CF/PPS 積層板の電気式融着接合に及ぼす影響因子, 機論 (2015 印刷中).

金型の加工性状が射出成形時の型内圧力・金型温度に及ぼす影響

メカニクス系工学専攻 准教授 西 藪 和明
東大阪モノづくり専攻 修士学生 長井孝太郎
藤塚精密金型株式会社 専務取締役 藤塚 孝征

1. 緒言

プラスチック射出成形は、高温に加熱し溶融したプラスチックを金属の型に高速かつ高圧で射出し、金型内で冷却固化した後で型から取り出して、プラスチック成形品を得る製造方法であり、最も一般的な熱可塑性プラスチックの成形方法の一つである。高品質なプラスチック成形品を安定して製造するためには、射出成形金型の加工および組立の精度向上が不可欠である。近年、工作機械の加工精度の大幅な向上に加え、三次元 CAD による設計の自由度の向上や CAD/CAM による設計と加工の一元化により、射出成形金型部品の加工精度および製品設計から金型の設計・製造までの短納期が可能になり、結果としてプラスチック射出成形品の精度が向上し、その形状の複雑化が進んでいる。そのため、高品質なプラスチック成形品を得るためには、金型の部品および組立後の金型および、それにより製造されたプラスチック成形品の形状を正確に、かつ迅速に測定することが求められている。高精度な非接触三次元デジタイザやレーザ顕微鏡などの測定器具は、高い測定精度が要求され、かつ複雑な形状の成形品を生産するプラスチック射出成形の分野で、それらの需要が高まっている。しかしながら、射出成形金型製造業の大多数は中小零細企業で占められており、高価な測定機器は直接的な利益につながりにくいため、それらを自社で導入している企業は少なく、一部の企業に限られている。そのため、産学連携により大学等研究機関が保有する最新の測定機器を利用して、金型製造企業が製造した金型の形状測定を行うことは、大阪東部地域の地場産業の一つである金型産業を盛り立てる手段の一つになると思われる。

プラスチック射出成形において、成形不良は大きな問題である。これは、金型内でのプラスチックの流動および固化などの挙動を正確に把握することが困難であることが一因である。射出開始時のプラスチックは高温で、かつ高速で射出されたプラスチックはせん断発熱で昇温する。一方で、プラスチックの熱は型内を流動する過程で金型に熱伝達するため、金型内ではプラスチックの温度が常に変化し続ける。また、プラスチックは温度によって流動性が変化するため、その挙動を把握することは困難である。また、プラスチックの温度だけでなく、成形条件の組み合わせは無数に存在するため、金型内部のプラスチックの状態を把握することは不可能と言える。

射出成形金型は、ノギスやマイクロメータなどの接触式測定器具により、部品の寸法を測定することが多いが、キャビティの形状が複雑であることもあり、金型の形状や寸法を直接測定するよりも、その金型を用いて製造された成形品の形状や表面品位を測定することにより、金型の善悪を判断されることが大半である。しかし、成形品の形状や表面品位は材料や射出条件などの金型以外の因子による影響もあるため、金型の加工精度や組立精度が射出成形の挙動に及ぼす影響を直接評価できる手法が必要である。プラスチックの成形挙動を把握するための試みとして、これまで金型の一部に石英ガラスプリズムを取り付け、金型内部のプラスチックの流動挙動を直接観察する方法や、金型キャビティ表面に各種センサを設置し、金型内部のプラスチック挙動の一部を疑似的に把握する方法などが存在する。一方で、金型の肥大化は加工の難度および工数の増加、輸送する際の燃費の低下および成形機への取り付け性の低下など、悪い影響を及ぼす。スライド機構は、射出成形品のアンダーカットを処理する最も一般的な

方法の一つである。しかし、スライド機構は金型部品の中でも必要体積が大きく、本機構を複数設置した金型は、成形品の大きさに対して金型が肥大化する傾向にある。スライド機構を小型化させることにより、金型の小型化を推進することが可能であると考えられる。

本研究では、金型内に温度センサおよび圧力センサを挿入した金型を用いて射出成形を行い、金型入れ子の加工表面性状が射出成形されたプラスチック成形品の圧力および表面温度に及ぼす影響を調査し、金型内でのプラスチックの挙動を把握した。これらの結果より、プラスチック射出成形金型をオンラインで評価する手法の開発を目的とした。射出成形条件を変更することにより、金型内の圧力や温度は変化する。成形圧力を上げることで、成形時の型内圧力は上昇することが予想される。また、射出速度を上げることで、せん断発熱による発熱量が上がり、キャビティ表面に接する樹脂温度は上昇することが予想される。しかし、実際に型内圧力や型内温度を把握するには、金型内部にセンサなどの計測装置を設置する必要がある。そこで、金型内にセンサを設置し、樹脂射出成形の成形条件の変化による、金型内の圧力および温度の変化を調査した。

2. 実験方法および条件

本実験では、成形材料としてアクリロニトリルブタジエンスチレン(ABS)樹脂ペレット(東レ(株), トヨラック 920-555, 透明色, 収縮率 0.4~0.6%)を使用した。ペレットは、乾燥機にて 90°C で 2 時間以上の乾燥を行ってから成形に用いた。乾燥機は、ホッパー設置型(plas-aid HD2, (株)松井製作所)および据え置き型(MRN-111, (株)いすゞ製作所)を用いた。実験には、樹脂射出成形機(FANUC(株), ROBOSHOT α -100SiA, 最大型締め力 1000kN)を用いた。

本実験には、カートリッジ式の射出成形金型を用いた。カートリッジ金型の外観を Fig.1 に示す。カートリッジ式金型は、金型の交換が容易であるという利点がある。成形品の形状は、Fig.2 に示すような ISO 引張り試験片および ISO 曲げ試験片とした。内金型のモールドベースの材料は炭素鋼(S55C)を用い、入子の材料は析出硬化系鋼(大同特殊鋼(株), NAK80)を用いた。金型キャビティ表面は、#1000 砥石にて仕上げを行った。



Fig.1 カートリッジ式金型

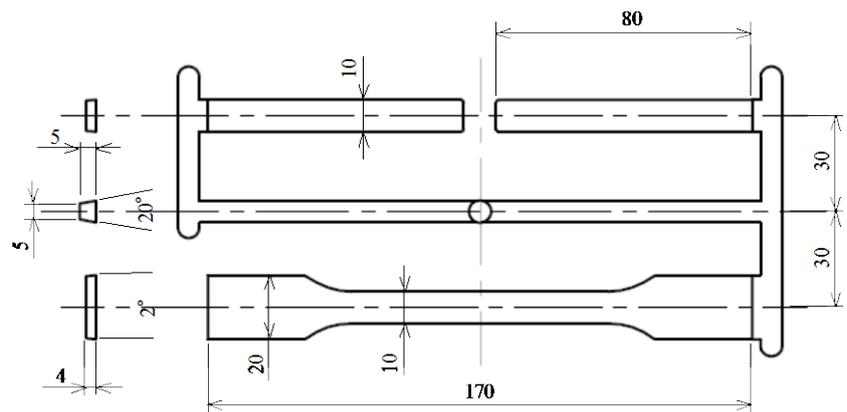
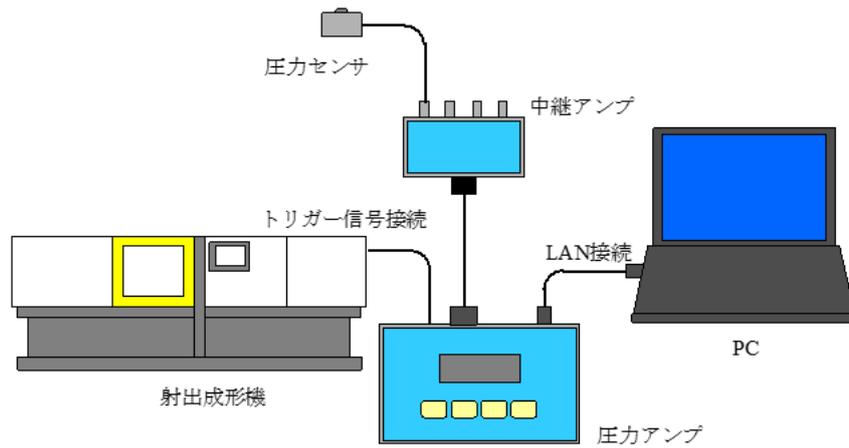
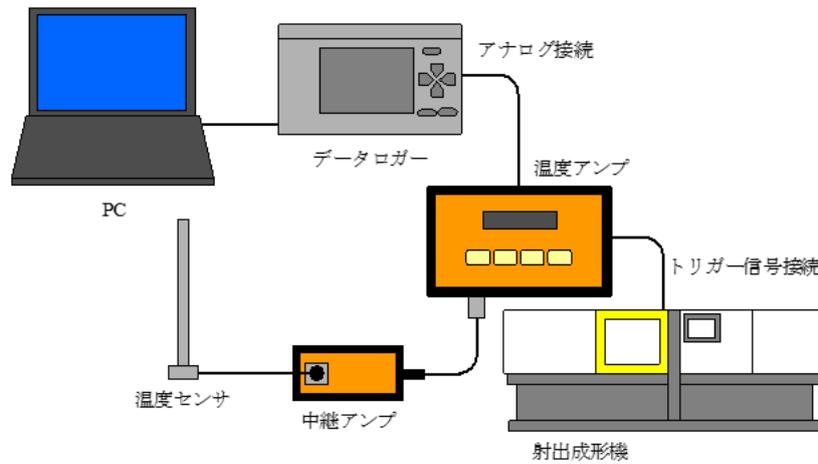


Fig.2 成形品の形状

樹脂射出成形金型に圧力センサ(双葉電子工業(株), 最大測定荷重 1kN, 耐荷重 1.5kN)および温度センサ(双葉電子工業(株), 最大測定温度 430°C, 耐荷重 150MPa)を設置した。各種センサおよびアンプと PC および射出成形機の接続図を Fig.3 に示す。アンプは、射出成形機とトリガー信号の接続を行い、成形機の型閉め開始と同時にモニターを開始するように設定を行った。また、センサの金型への設置位置および取り付け方法を Fig.4 に示す。

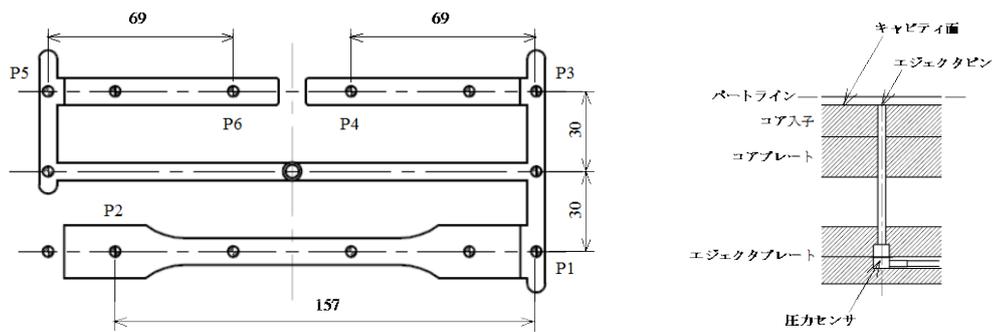


(a) 型内圧力測定

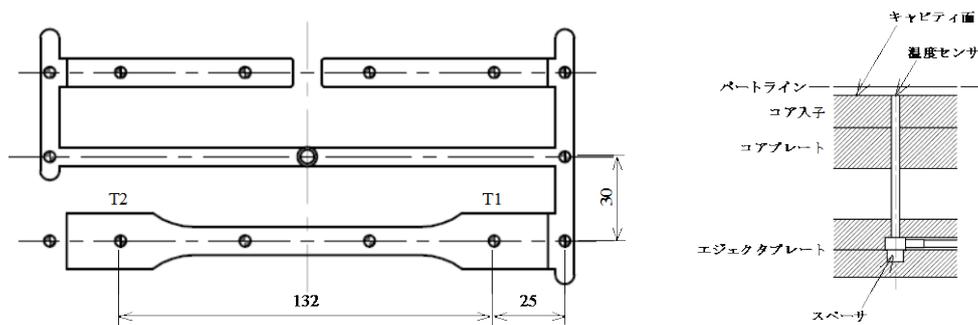


(b) 金型温度測定

Fig.3 型内圧力および金型温度計測のための装置図



(a) 圧力センサ



(b) 温度センサ

Fig.4 センサの設置位置および方法

成形条件を Table 1 に示す。成形圧力および射出速度を変化させた。成形パラメータを安定させるため、成形条件を設定後に、捨てショットとして 2 回成形を行った後、3 回めの成形のデータを取得した。また、充填完了後の樹脂の冷却は自然冷却とした。センサの測定間隔は 10ms とした。

Table 1 成形条件

成形圧力, P_i (MPa)	40, 50, 60, 70
最大射出時間, T_i (s)	4
シリンダー温度, T_c (°C)	240
射出速度, V_i (mm/s)	70, 80, 90, 100
保圧, P_s (MPa)	0
保圧時間, T_s (s)	0
冷却時間, T_c (s)	35
試行回数, N (times)	3
モニター開始	型締め開始時
サイクル時間, T_c (s)	50

3. 実験結果および考察

3. 1 時間経過による型内圧力および型内温度の変化

成形圧力 $P_i=50\text{MPa}$ および射出速度 $V_i=80\text{mm/s}$ で成形実験を行った場合の時間経過による型内測定圧力および金型測定温度の変化を Fig.5 に示す。型閉め開始から $T=2\text{s}$ 付近で急激に型内測定圧力および金型測定温度が上昇し、金型測定圧力は最大射出時間 $T_i=4\text{s}$ 間、低下しながら高圧力を保持した後、急激に低下している。金型計測温度は最大値を示した後、緩やかに低下していることが分かる。

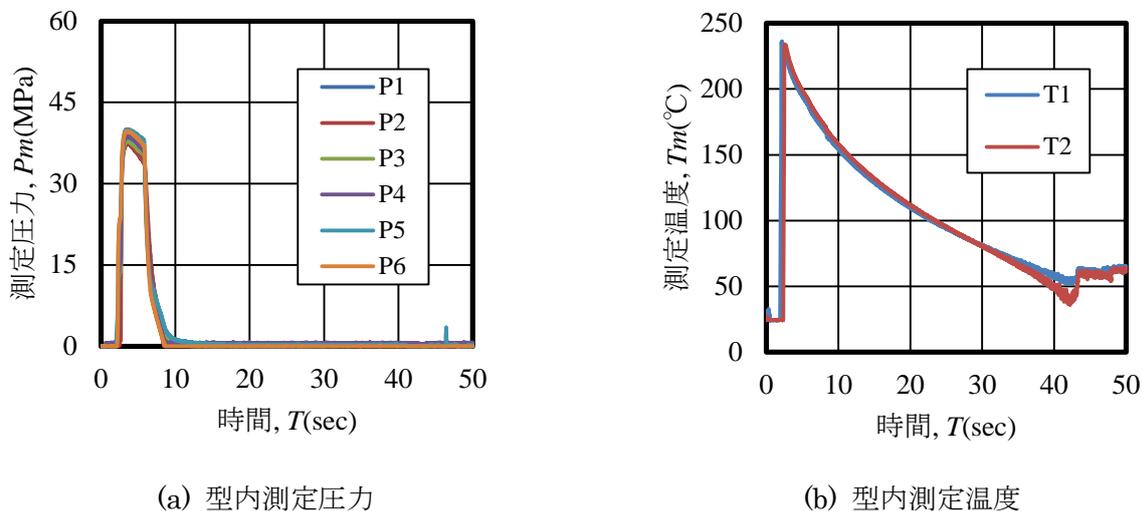


Fig.5 時間経過による型内測定圧力および金型測定温度の変化

3. 2 成形圧力を変化させた場合

成形圧力を $P_i=40, 50, 60, 70\text{MPa}$ に変化させ、射出速度を $V_i=80\text{mm/s}$ で一定で成形実験を行った場合の時間経過による金型測定圧力および金型測定温度の変化を Fig.6 および Fig.7 に示す。成形圧力が上昇すると最大型内測定圧力が上昇している。また、 $P_i=40\text{MPa}$ の場合は、他の圧力よりも型内測定圧力の上昇開始が遅れていることが分かる。 $P_i=40\text{MPa}$ の場合は、 T_2 の位置に到達する時間が他の圧

力で成形した場合よりも長く、最大金型測定温度も低くなっている。これは、成形圧力が低いため、T2の位置までの充填時間が長くなり、プラスチックの熱が金型に熱伝達したためであると考えられる。

成形圧力と最大型内測定圧力の関係を Fig.8 に示す。最大型内測定圧力は、3 回測定を行った中の圧力の最大値を用いた。最大圧力は、圧力が増加すると比例的に増加した。また、成形圧力が増加すると最大温度は増加した。T2 は、成形圧力 P_i が 60 および 70MPa のとき、T1 を上回っている。これは、せん断発熱により増加したと考えられる。

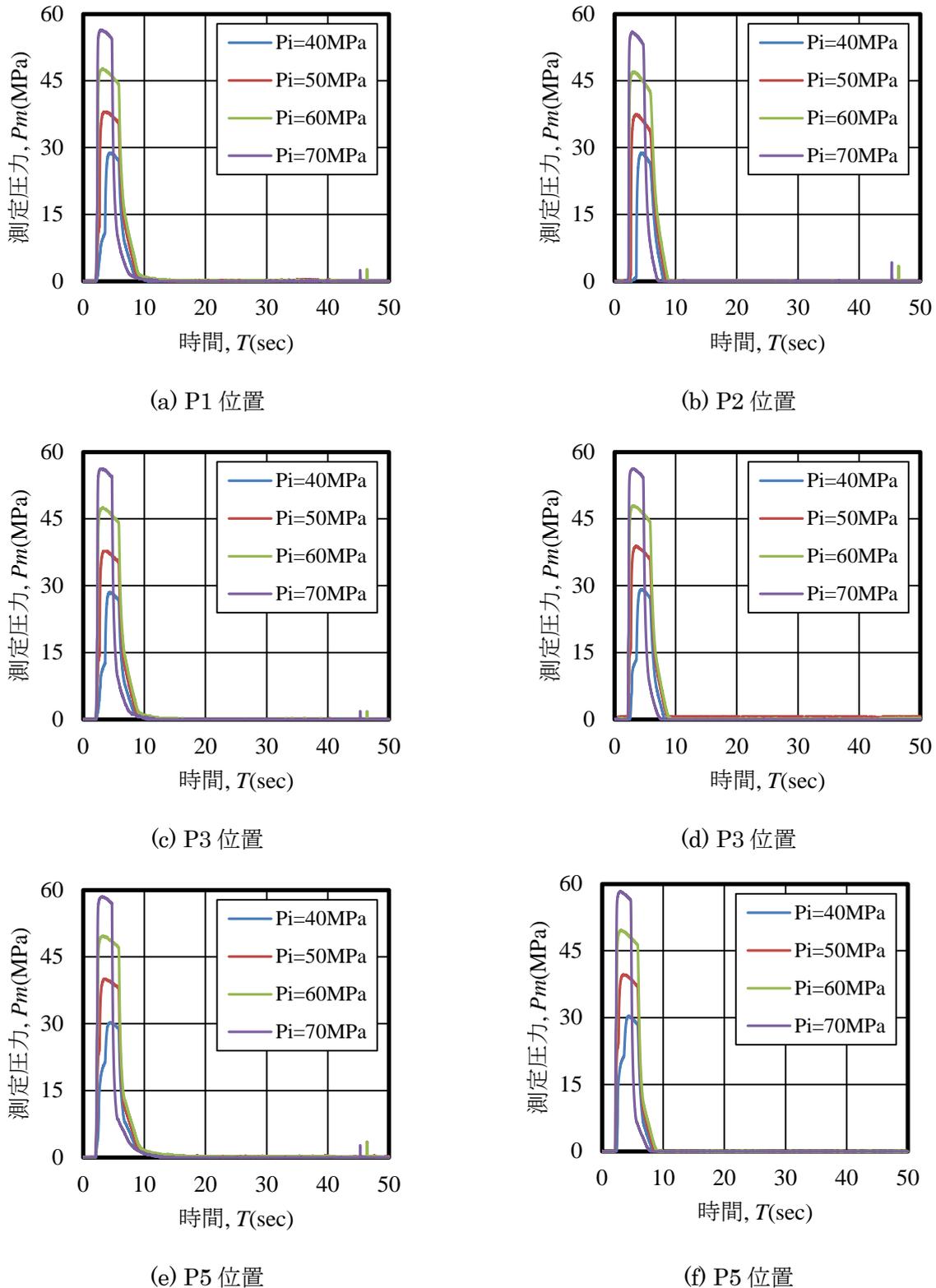
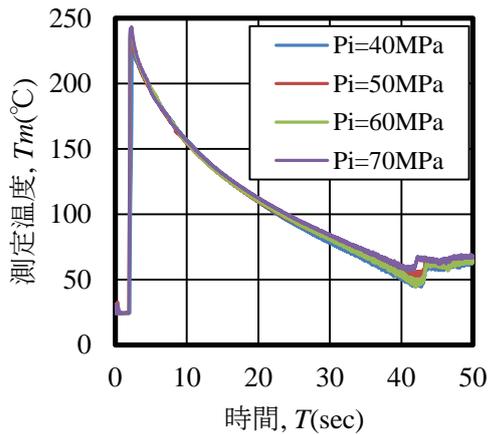
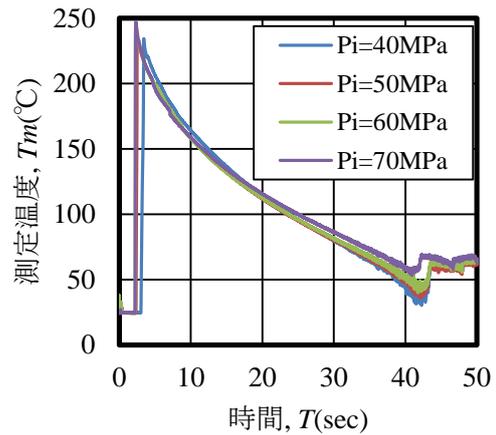


Fig.6 位置ごとの時間経過による測定圧力の変化

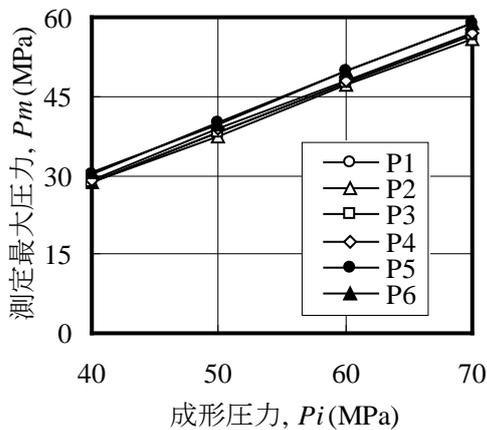


(a) T1 位置

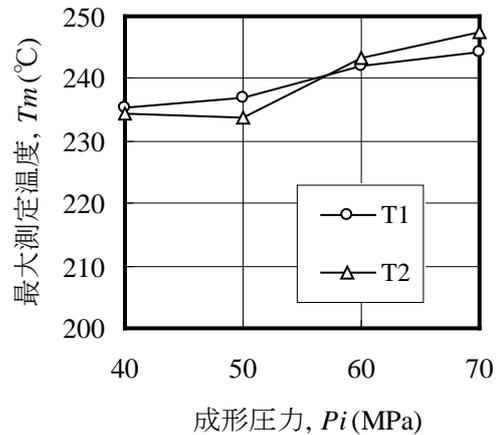


(b) T2 位置

Fig.7 位置ごとの時間経過による金型測定温度の変化



(a) 最大型内測定圧力



(b) 最大金型測定温度

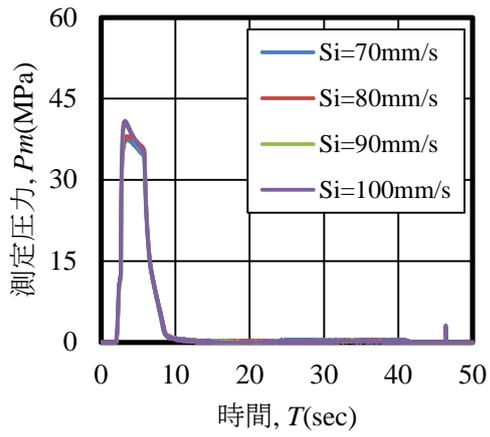
Fig.8 成形圧力と最大型内測定圧力および最大金型測定の関係

3. 3 射出速度を変化させた場合

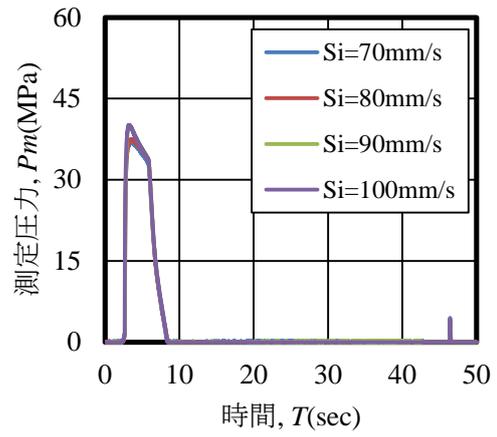
成形圧力を $P_i=50\text{MPa}$ 一定で、射出速度を $V_i=70, 80, 90, 100\text{mm/s}$ 変化させて成形実験を行った場合の時間経過による金型測定圧力および金型測定温度の変化を Fig.9 および Fig.10 に示す。

Fig.9 より、それぞれの射出速度で大きな変化は見られないが、 $V_i=100\text{mm/s}$ の場合は $T=3\text{s}$ 付近で他の射出速度よりも大きな値になった。また、射出速度が上がると最大型内温度が上がっていることが分かる。これは、せん断発熱により型内温度が上がったためと思われる。

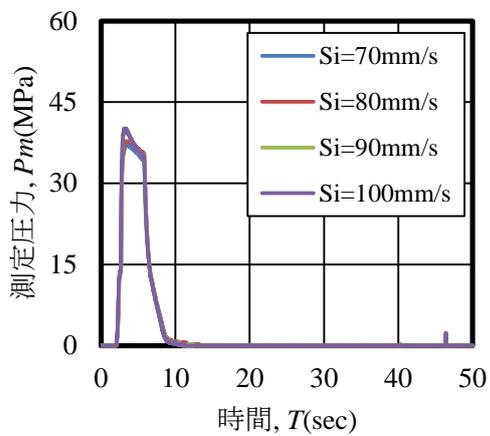
射出速度と最大型内測定圧力および最大金型測定温度の関係を Fig.11 に示す。Fig.11 より、それぞれの射出速度で大きな変化は見られない。Fig.10 より、射出速度が上がっても最大型内圧力の変化は見られなかった。



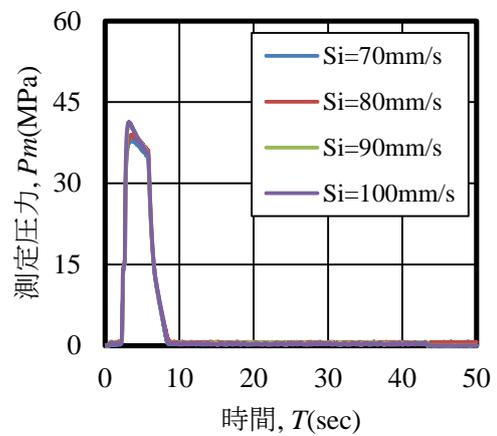
(a) P1 位置



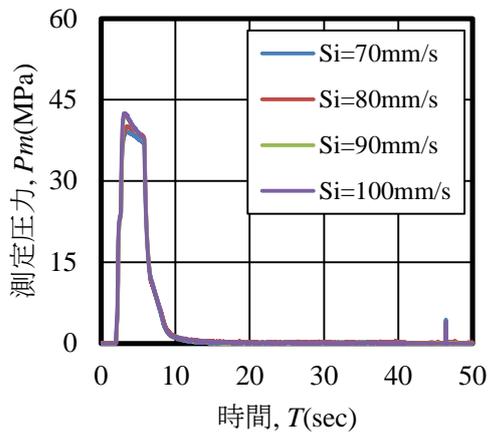
(b) P2 位置



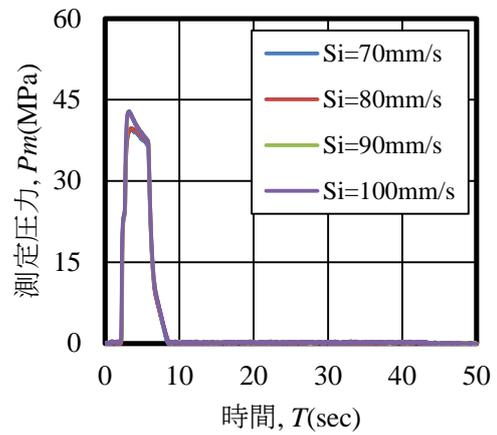
(c) P3 位置



(d) P4 位置

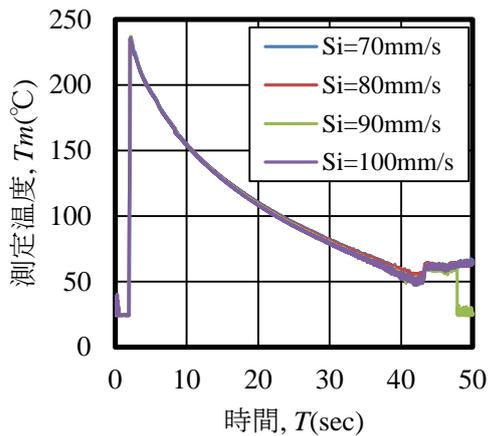


(e) P5 位置

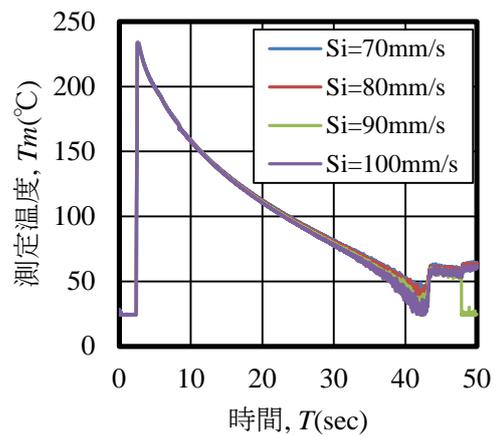


(f) P6 位置

Fig.9 位置ごとの時間経過による型内測定圧力の変化

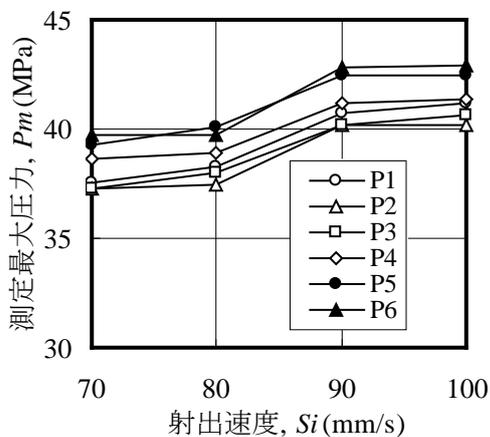


(a) T1 位置

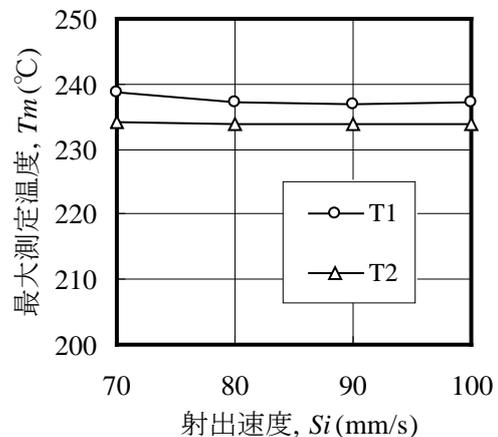


(b) T2 位置

Fig.10 位置ごとの時間経過による金型測定温度の変化



(a) 最大型内測定圧力



(b) 最大金型測定温度

Fig.11 射出速度と最大型内測定圧力および最大金型測定温度の関係

4. 金型入子の加工表面性状とゲート断面積が型内圧力と型内温度に及ぼす影響

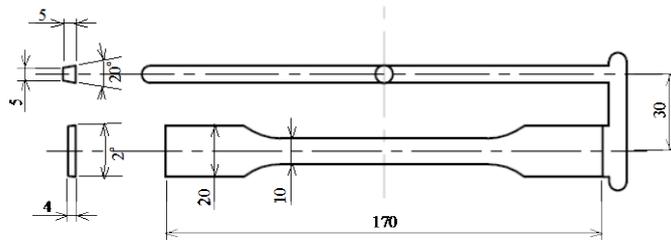
4. 1 緒言

樹脂射出成形は、最も一般的な樹脂の成形方法の1つであるが、成形中の樹脂の挙動は複雑で、把握することは困難である。樹脂の流動挙動は、ランナーおよびゲートの断面積や形状によって変化することは、成形性の変化や成形品の成形不良などによって知られている。

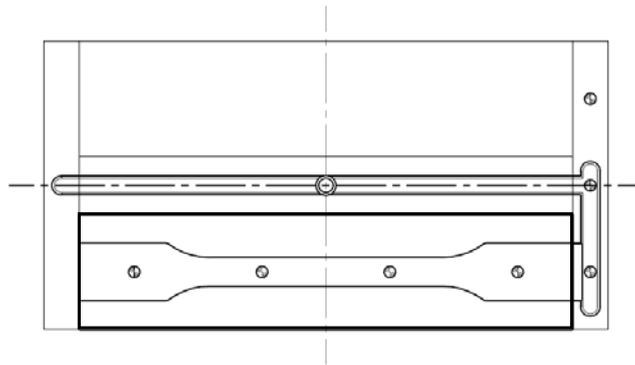
本研究では、金型のキャビティの加工表面性状およびゲートの断面積を変化させ、樹脂射出成形金型に圧力センサおよび温度センサを設置することで、金型のキャビティ加工表面性状およびゲートの断面積の変化による金型内部の測定圧力および測定温度の変化を調査した。

4. 2 実験方法および条件

第3章で用いた同様の材料および実験装置を用いて、キャビティの加工表面性状の違いによる成形時の金型キャビティ表面の圧力および温度の変化を調査した。成形品および交換入子の形状を Fig.12 に示す。また、入子の加工性状を Fig.13 に示し、それらの表面粗さを Table 3 に示す。さらに、それらの加工性状の異なる入れ子を用いて作製した成形品の表面粗さを Table 4 に示す。

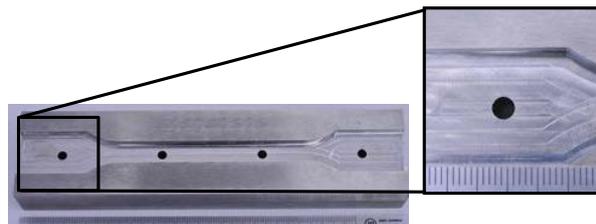


(a) 成形品の形状

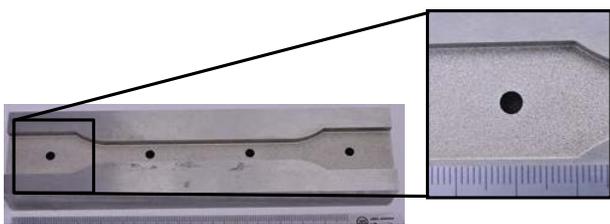


(b) 交換入子

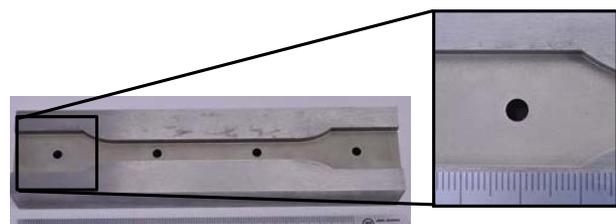
Fig.12 成形品および交換入子の形状



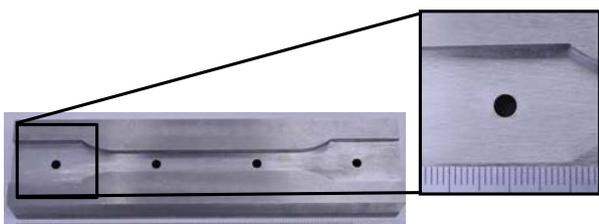
(a) 切削加工



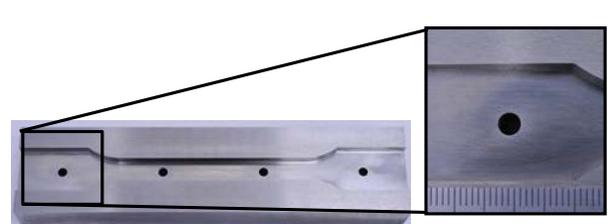
(b)粗放電面



(c)精密放電面



(d)粗磨き面



(e)精密磨き面

Fig.13 表面加工性状の異なる入子

Table 2 入子の加工性状と表面粗さ

		切削加工	放電加工	磨き加工
(a)	切削面	0.21 μ mRa	—————	—————
(b)	粗放電面	→	3.32 μ mRa	—————
(c)	精密放電面	→	1.43 μ mRa	—————
(d)	粗磨き面	→	→	0.10 μ mRa
(e)	精密放電面	→	→	0.03 μ mRa

Table 3 加工性状の異なる入れ子を用いて作製した成形品の表面粗さ

		切削加工	放電加工	磨き加工
(a)	切削面	0.20 μ mRa	—————	—————
(b)	粗放電面	→	3.62 μ mRa	—————
(c)	精密放電面	→	1.34 μ mRa	—————
(d)	粗磨き面	→	→	0.10 μ mRa
(e)	精密放電面	→	→	0.03 μ mRa

射出成形条件を Table 4 に示す。射出成形条件を変更する際に、データ収集しない成形を 2 回行った後、3 回の射出成形を行い、データを採取した。また、圧力センサおよび温度センサのサンプリング時間は 10ms とした。3 回計測した圧力データの最大値を最大射出圧力として評価した。

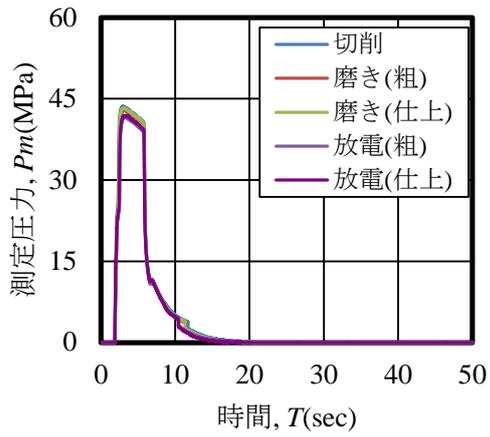
Table 4 射出成形条件

成形圧力, P_i (MPa)	50
射出速度, V_i (mm/s)	60
最大射出時間, T_i (s)	3
シリンダー温度, T (°C)	240
保圧, P_s (MPa)	0
保圧時間, T_s (s)	0
試行回数, N	3
データ採取時期	型閉め開始時
サイクル時間, t (s)	50

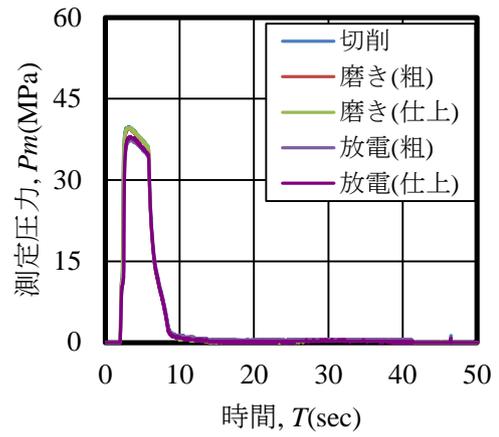
4. 3 実験結果および考察

(1) 金型入子の表面性状の影響

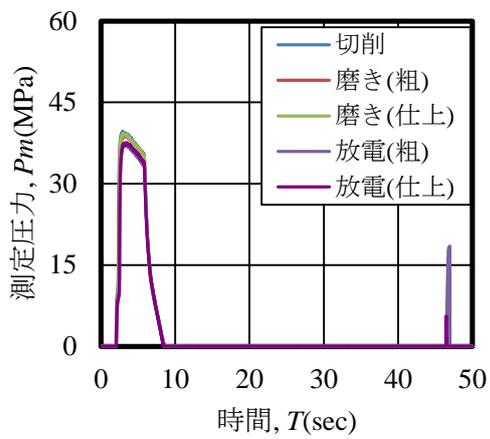
金型入子の表面性状の違いによる各測定位置での測定圧力の時間変化を Fig.14 に示す。Fig.14(a)より、スプルー直下の型内圧力は $T=2s$ 付近で急上昇し、最低成形時間 $T_i=3s$ 間、高い値を保持しつつ緩やかに降下したのちに $T=7s$ 付近まで急降下し、 $T=15s$ 付近までは緩やかに降下している。Fig.14(c)~(f)より、粗放電加工面のみ $T=46s$ 付近で大きく圧力が上昇している。これは、加工表面が非常に粗く、側面の離型抵抗が大きいためであると考えられる。



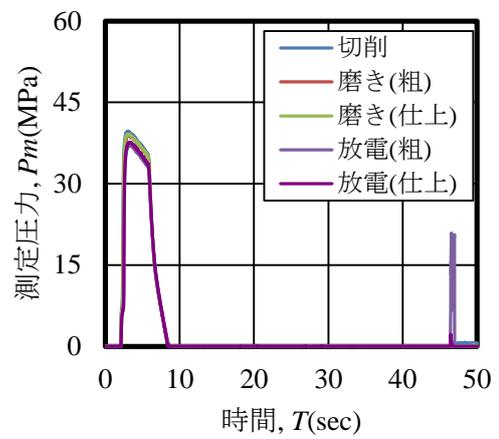
(a) P1 位置



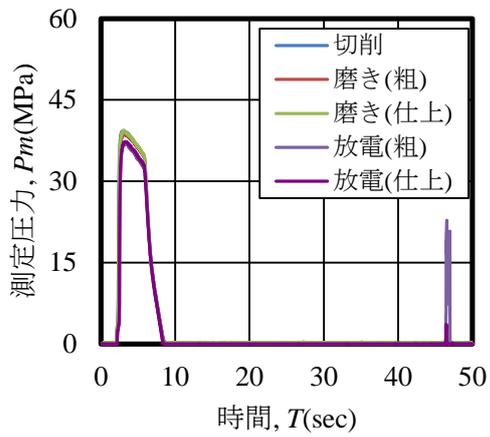
(b) P2 位置



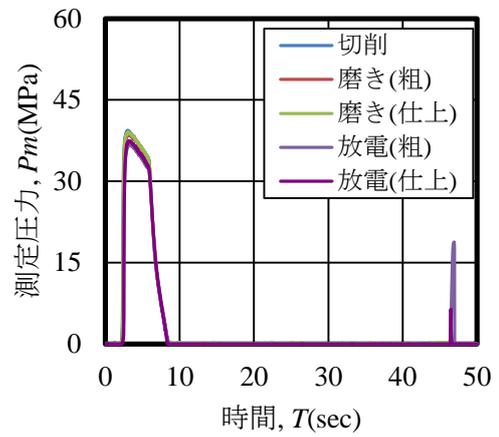
(a) P3 位置



(b) P4 位置



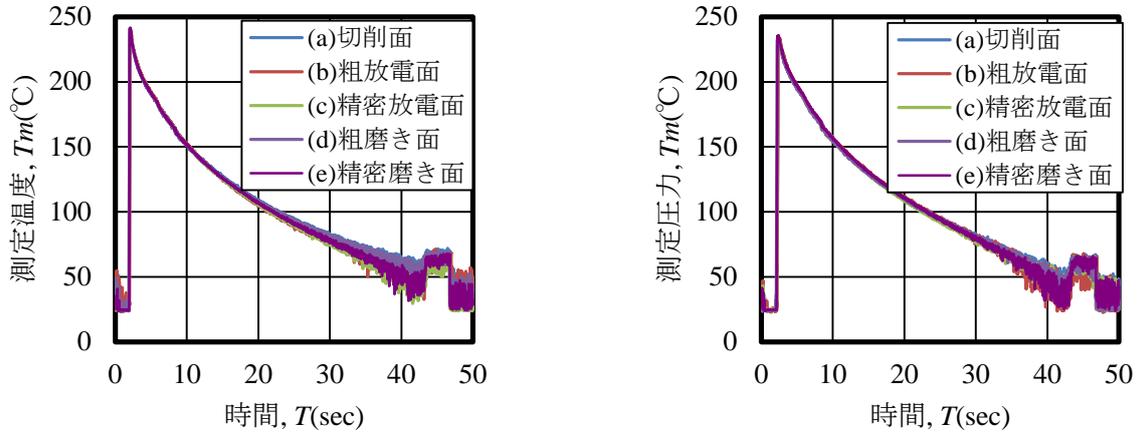
(a) P5 位置



(b) P6 位置

Fig.14 位置ごとの表面性状の違いによる測定圧力の変化

位置ごとの表面加工性状の違いによる測定温度の変化を Fig.15 に示す. 全ての表面加工性状において, 測定温度の大きな違いは見られなかった.

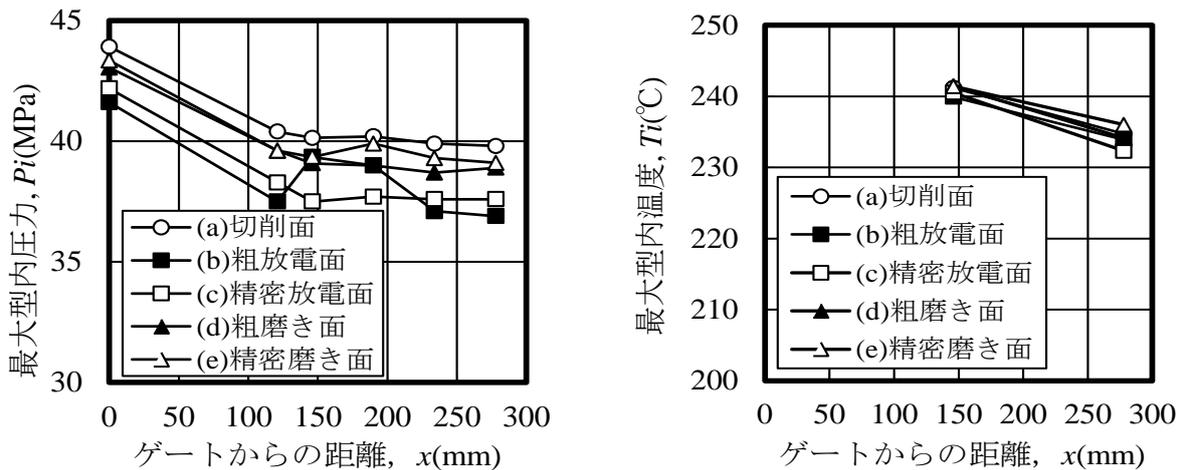


(a) T1 位置

(b) T2 位置

Fig.15 位置ごとの表面性状の違いによる測定温度の変化

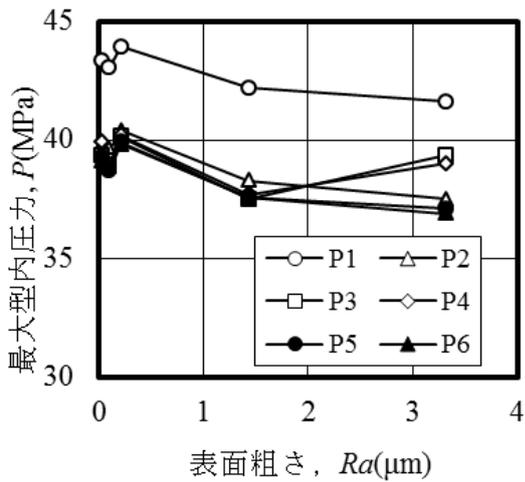
金型入子の表面加工性状の違いによる最大型内圧力および最大型内温度の測定位置の変化を Fig.16 および Fig.17 に示す. Fig.16 より, 最大型内圧力はゲートから離れるほど低下傾向を示すが, (a)切削面 > (e)精密磨き面 > (d)粗磨き面 > (b)精密放電面 > (c)粗放電面の順に大きいことが分かった. (b)粗放電面のみ, P₃と P₄位置で最大型内圧力が急増したが, これは金型表面が粗く, 流動抵抗が大きくなったためであると考えられるが, (e)精密磨き面は表面粗さが小さいが型内圧力は大きく, 複雑な成形挙動であると言える. 一方, Fig.17より, 引張試験片の両端部で最大型内温度差は金型入子の加工表面性状の差異よりも大きくなった.



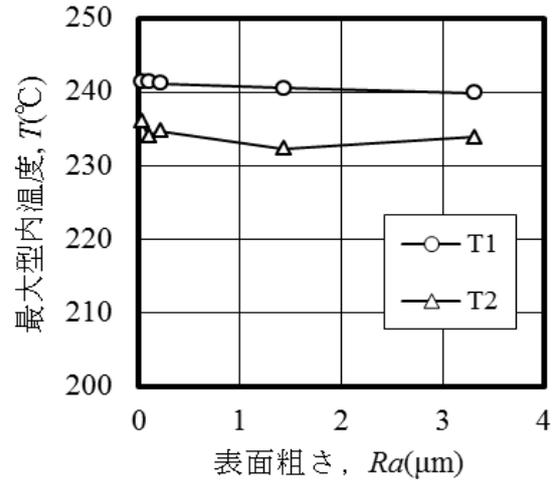
(a) 最大型内圧力

(b)最大型内温度

Fig.16 金型入子の加工方法が型内圧力・金型温度に及ぼす影響



(a) 最大型内圧力



(b) 最大型内温度

Fig.17 金型入子の表面粗さが型内圧力・金型温度に及ぼす影響

(2) ゲート断面積の影響

ゲート幅およびゲート厚さとゲート断面積の関係を Table 6 に示す. ゲート断面積の違いによる型内最大測定圧力および型内最大測定温度の変化を Fig.19 に示す. Fig.19 (a)より, P1 および P2 ではゲート断面積が減少すると最大測定圧力が増加していることが分かる. 一方, P3 から P6 ではそれぞれの位置による変化は見られないが, ゲート断面積が減少すると最大測定圧力も減少していることが分かる. ゲート断面積 A が 30mm より大きい場合は, P1 以外はほぼ同様の値を示すが, 30mm より小さい場合は P1 および P2 が上昇し, P3~P6 は降下していることが分かった. これは, ゲート断面積が小さくなることにより圧力が上昇したためと考えられる. また, Fig.19(b)より, 断面積が小さくなると最大型内温度は上昇する傾向にあるが, T2 では大きくばらついており, 複雑な温度変化をしていると言える.

Table 6 ゲート幅およびゲート厚さとゲート断面積の関係

ゲート幅 W(mm)	ゲート厚さ T(mm)	ゲート断面積 A(mm ²)
1	1	0.91
10	1	9.91
20	1	19.91
10	3	29.21
20	3	59.21

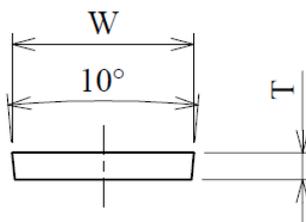
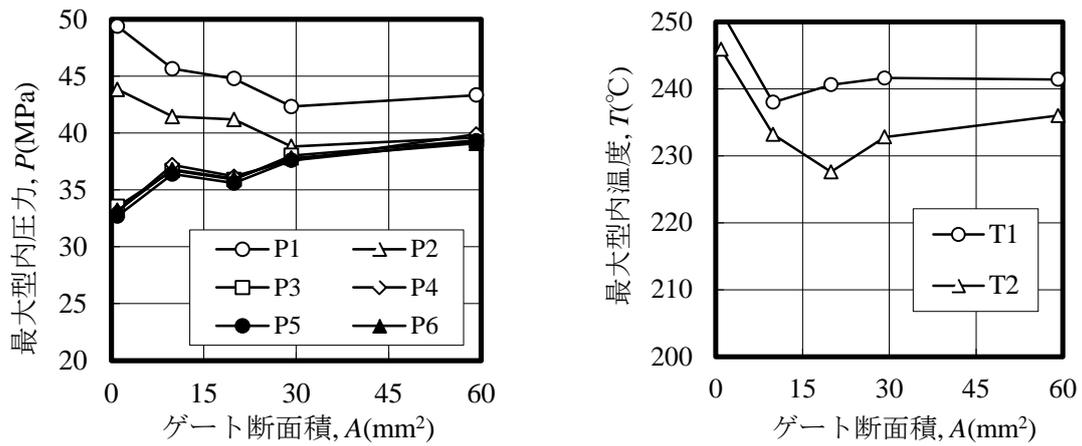


Fig.18 ゲートの断面形状



(a)最大型内圧力 (b)最大型内温度
 Fig.19 ゲートの断面積が型内圧力と金型温度に及ぼす影響

5. まとめ

本研究は、金型内に温度センサおよび圧力センサを挿入した金型を用いて射出成形を行い、金型入れ子の加工表面性状が射出成形されたプラスチック成形品の圧力および表面温度に及ぼす影響を調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 同一の成形条件下では、センサ位置による型内圧力の変化は見られず、型内圧力の分布はゲートからの距離やランナーの長さに関係なく、ある程度均一に分布した。
- (2) 型内温度については、流動末端に近づくほど低下する傾向を示した。これは、プラスチックの熱が金型に熱伝達しているためである。
- (3) 成形圧力が変化すると型内圧力は著しく変化し、型内温度は緩やかな変化を示した。成形圧力の変化により型内温度が変化することは、樹脂のせん断発熱によるものである。また、射出速度が変化すると型内圧力は緩やかな変化を示し、型内温度は変化を示さなかった。
- (4) 金型入れ子の加工性状を種々変化させて、射出成型中の型内圧力および温度計測を実施した結果、加工法の違いにより型内圧力に影響が見られたが、金型の表面粗さとの関係は一義的ではなく、複雑な成形挙動を示すことが分かった。
- (5) 加工性状の変化による型内温度の変化は小さく、型内温度による金型の加工性状を評価することは困難であることが分かった。
- (6) ゲート断面積がある一定値より大きくなると、圧力はほぼ一定の値となり、差異が見られないため評価対象とすることが適していないことが分かった。また、断面積の変化による温度変化は複雑で評価することは困難であることが分かった。

金属粉末射出成形品の試作迅速化のための製造技術

メカニクス系工学専攻 准教授 西 藪 和明
東大阪モノづくり専攻 修士学生 桜井 晋也
太盛工業株式会社 代表取締役社長 田中 茂雄

1. 緒言

金属粉末射出成形 (Metal injection molding, MIM) は、金属粉末とバインダの混練材を金型内に射出成形することにより比較的複雑な形状を持つ金属部品を製造可能な複合技術である。微粉末の使用による緻密化と合金化、さらに製品の小型化と一体化が可能で、小型精密部品を安定して量産できるため普及拡大してきている(1)。しかし、MIM は金型内に MIM 原料を射出して成形体を得るため、離型困難な形状の部品の製造は不適であり、金型製造コストも高く、さらに焼結収縮による寸法予測が困難であるなど、迅速な試作や少量生産には課題がある。

本研究では、切削加工により MIM の成形体 (Green compact) に形状を付与し、複数の切削加工後の成形体を組み合わせて焼結接合を行う金属部品も試作法を提案する。従来はスリップキャスト法により得た成形体の切削による迅速試作法(2)や MIM 部品の焼結接合法(3)などが検討されてきたが、複雑形状の MIM 部品の試作から、迅速に量産移管を行うことを目的に、MIM 成形体の切削加工と焼結接合を組み合わせた評価法の検討は見られない。そこで、切削加工後の成形体およびその焼結体の三次元形状を、非接触三次元デジタイザを用いて測定し、CAD データとの比較から焼結接合体の形状変化について調査した。

2. 製造方法および実験条件

2. 1 製造方法および特長

本研究で提案する加工プロセスを図 1 に示す。本プロセスでは、MIM の射出成形工程により作製した単純な形状の成形体を切削加工により所定の形状付与を行い、その成形体を脱脂および焼結工程を経て複雑形状の金属部品を得るため、多種の部品を製造するのに個々に金型が必要でなく低コストで試作可能である。また、形状付与した成形体どうしを焼結接合することにより、金型では製造不可能な複雑焼結部品の作製も可能である。

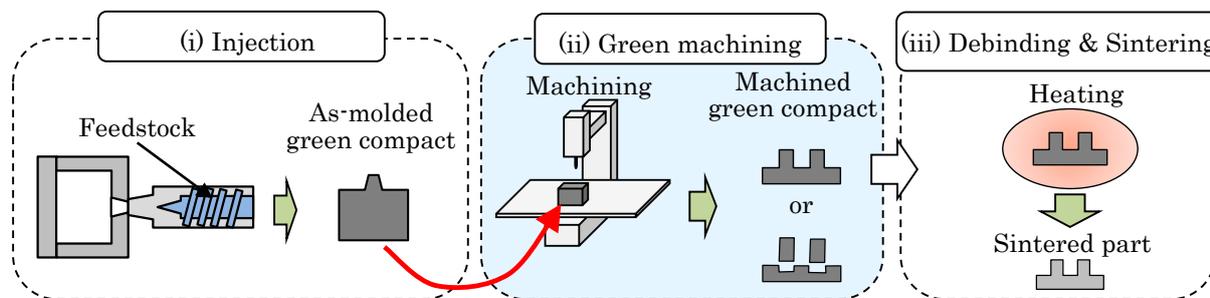


Fig.1 Green machining and sintering joining in MIM process.

2. 2 使用材料および成形体の作製

ステンレス鋼粉末 SUS410L (エプソンアトミックス(株)製) とポリアセタール系バインダをそれぞれ 66 : 34 の体積割合で混練および造粒したペレットを用いて, 図 2 に示すような成形体ブロック (縦 22.75mm×横 22.75mm×高さ 14.15mm) を超小型射出成形 (Babyplast, 6/10) で成形した.

2. 3 成形体の切削加工

立型マシニングセンタ (ファナック(株), α -D21MiA5) を用いて成形体ブロックに切削加工を行った. 通常マシニングセンタで切削加工を行う場合, 材料をバイスで挟んで固定するが, 成形体は非常に脆いためバイスで固定することが困難である. そのため, 本研究では簡易な方法で成形体ブロックをセッターに固定した.

2. 4 脱脂・焼結方法

成形体の脱脂および焼結には, 脱脂焼結炉 (島津メクテム(株), VHSgr40/40/100) を用いた. 窒素雰囲気中 873K で 7.2ks 間保持し, 脱脂処理を行った. その後, アルゴン雰囲気中 1573K で 7.2ks 間保持で焼結処理を行い, 焼結体を得た.

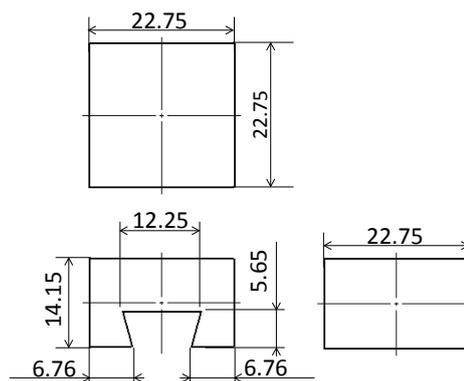


Fig.2 Shape of as-moulded green compact

3. 切削加工による L/S パターンの形状付与

3. 1 L/S パターンの形状

図 3 に示すように, 高さ $h=1.0\text{mm}$, 幅 $w=0.8\text{mm}$ および 1.0mm の L/S パターンを成形体ブロックに切削加工を行った. 図 3 に示す寸法は焼結体の設計値である.

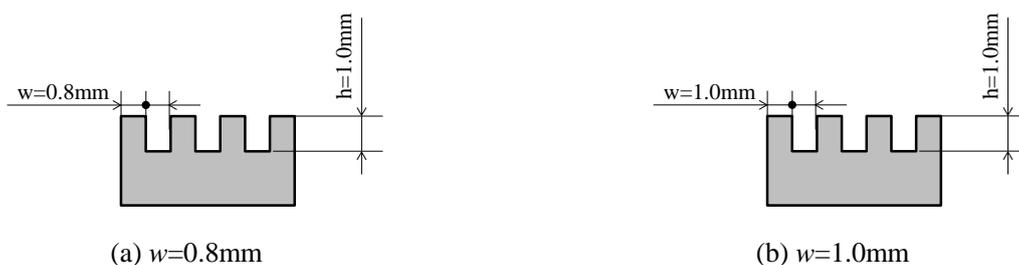


Fig.3 Geometry of L/S patterns.

3. 2 実験結果および考察

切削加工を行った成形体および焼結体をレーザー顕微鏡（オリンパス株，OLS4000）で構造体の形状測定を行い，それぞれ CAD データと形状比較を行った．レーザー顕微鏡は垂直方向に測定するのに不向きなため，本研究では Z 値が $500\ \mu\text{m}$ の地点で構造体の幅の値を読み取った．

図 4 に幅 $w=0.8\text{mm}$ ，図 5 に幅 $w=1.0\text{mm}$ の切削加工を行った成形体および焼結体の形状を示す．CAD データと切削加工後の成形体の形状を比較すると，高さ，幅ともに所望する寸法に近いことが分かった．同様に焼結体も高さ，幅ともに所望する寸法に近いことが分かった．また，図 5 に示すように，幅 $w=1.0\text{mm}$ の切削加工を行った成形体および焼結体も高さ，幅ともに所望する寸法に近いことが分かった．このことから，焼結前に成形体に切削加工を行っても，焼結後に大きな寸法誤差が生じないことが考えられる．

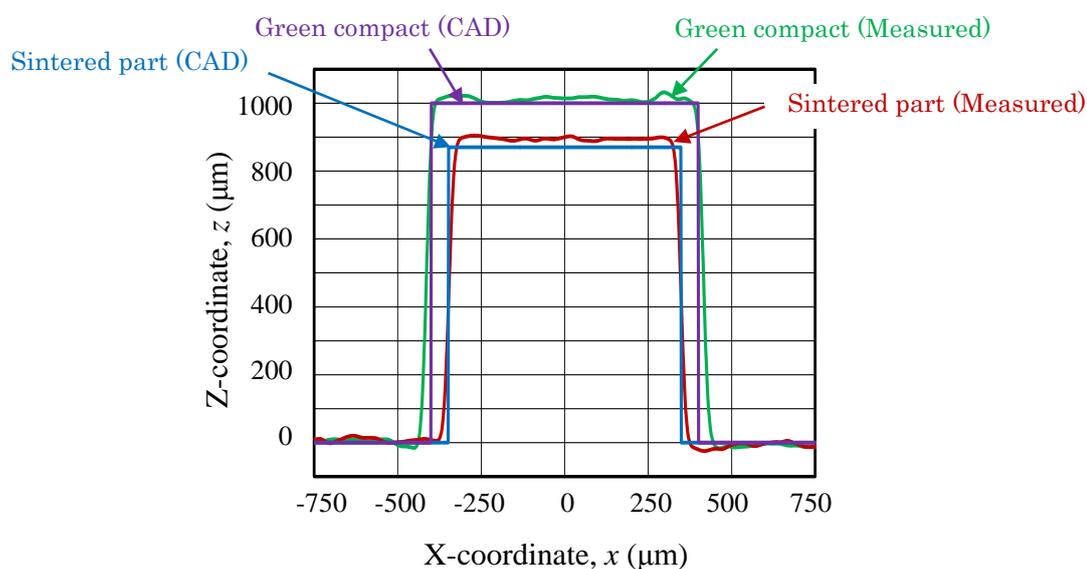


Fig.4 L/S パターンの成形体および焼結体の断面形状 ($w=0.8\text{mm}$ の場合)

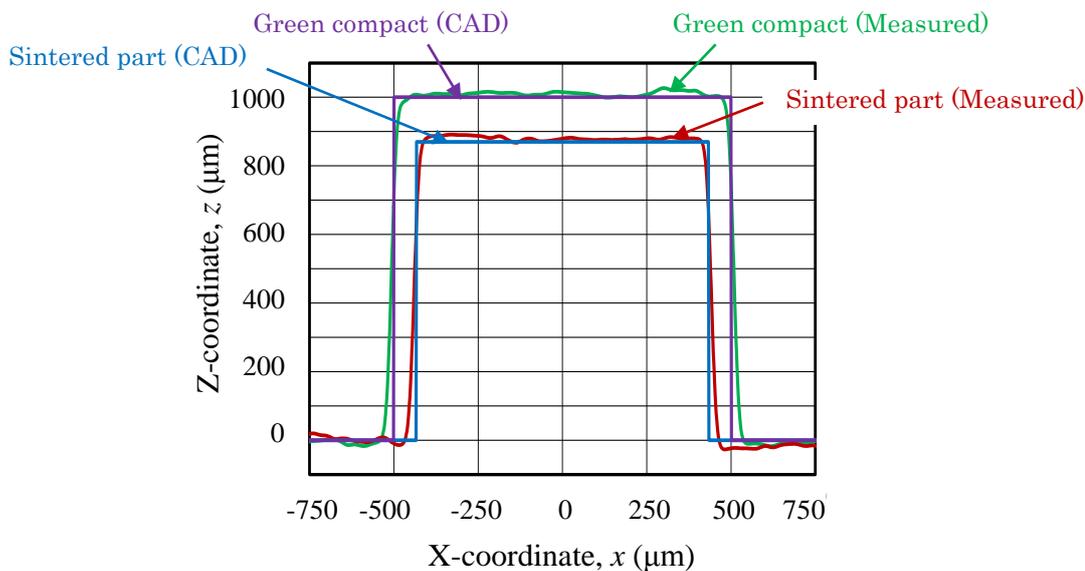


Fig.5 L/S パターンの成形体および焼結体の断面形状 ($w=1.0\text{mm}$ の場合)

Table 1 L/S パターンの成形体および焼結体の CAD との寸法比較 ($w=0.8\text{mm}$ の場合)

	Green compact		Sintered part	
	CAD	Measured	CAD	Measured
Width, w (mm)	0.80	0.83	0.69	0.69
Height, h (mm)	1.00	1.03	0.87	0.90

Table 2 L/S パターンの成形体および焼結体の CAD との寸法比較 ($w=1.0\text{mm}$ の場合)

	Green compact		Sintered part	
	CAD	Measured	CAD	Measured
Width, w (mm)	1.00	1.01	0.87	0.88
Height, h (mm)	1.00	1.03	0.87	0.88

4. L/S パターン形状成形体の焼結接合

4. 1 L/S パターン形状付与および組立て

図 6 に示すように、(a)は幅 $w=0.8\text{mm}$ 、(b)は幅 $w=0.9\text{mm}$ 、(c)は幅 $w=0.98\text{mm}$ の L/S パターンの成形体を切削加工により作製し、それぞれ幅 $w=1.0\text{mm}$ の L/S パターンに切削加工を行った成形体と組み合わせ焼結接合を行った。

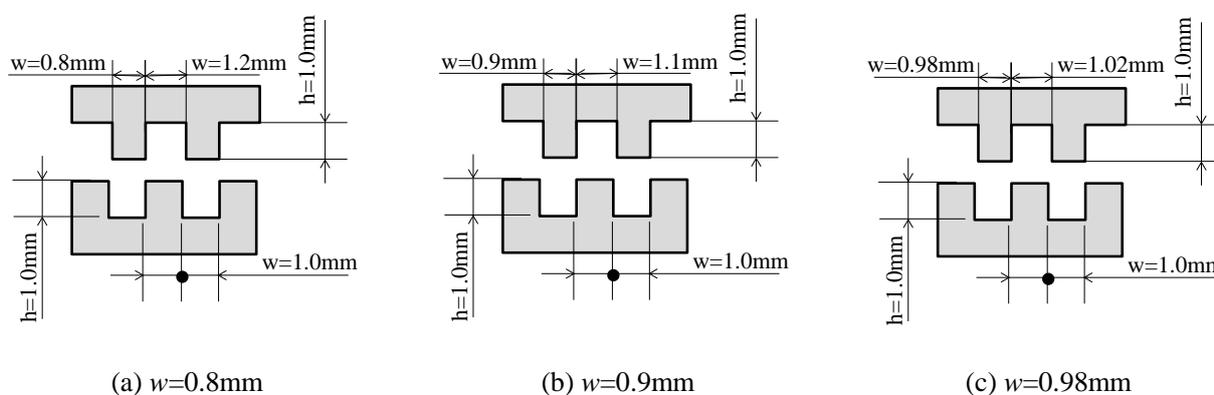


Fig.6 L/S パターン成形体の焼結接合の組み合わせ

4. 2 実験結果および考察

焼結接合体の接合断面部を研磨し、デジタルマイクロスコープ（オリンパス株、DSX500）で接合面の観察を行った。焼結接合体の接合断面図を図 7 に示す。(a)が示すように、 $w=0.8\text{mm}$ と $w=1.0\text{mm}$ の焼結接合体では接合部分に隙間が生じており、片側 $100\mu\text{m}$ 程の隙間が生じていた。しかしながら、(b)の $w=0.9\text{mm}$ と $w=1.0\text{mm}$ 、(c)の $w=0.98\text{mm}$ と $w=1.0\text{mm}$ の焼結接合体では、接合部に大きな隙間が生じていないのが分かった。成形体の組立て時に、片側 0.05mm ほどの隙間があれば焼結接合をおこなっても、大きな隙間が生じないと考えられる。

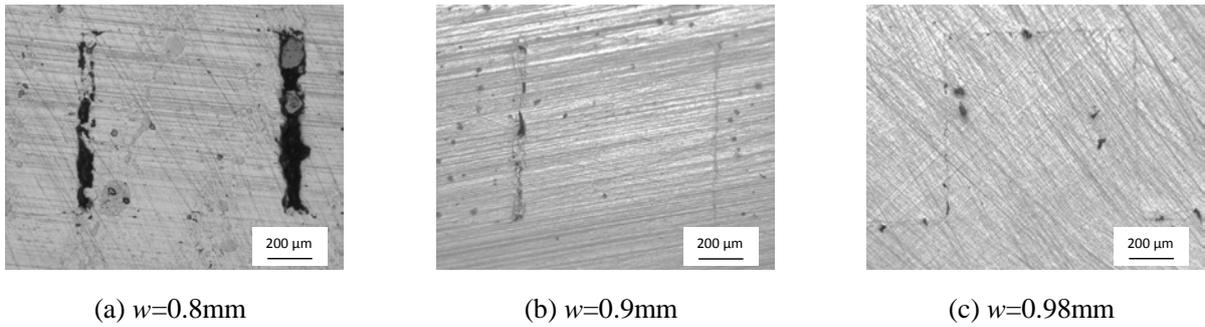


Fig.7 L/S パターンの焼結接合部の断面写真

5. 一体焼結部品と焼結接合部品の形状比較

5. 1 一体焼結部品と焼結接合部品の作製および評価

切削加工後の成形体とその焼結体の形状および寸法を図 8(a)および表 3 に示す. (a)のように一体で切削加工した一体焼結部品と, (b)のように平板と角柱を分けて切削加工した成形体を組み合わせた焼結接合部の形状比較を行った. その際, 間隙を 0.01, 0.05 および 0.1mm に変化させた.

切削加工後の成形体とその焼結体を, 非接触三次元デジタイザ (GOM 社, ATOS™) を用いて三次元形状測定を行った. CAD データと切削加工後の成形体とその焼結体の形状の比較により, 各工程で形状変化を評価した. 本研究で使用した非接触三次元デジタイザは, 1mm 程度の超小型の製品から数 m の構造物をレンズと較正板を視野のサイズに応じて変更するだけで同一の測定装置を用いて高精度に形状測定が可能である. その測定精度は測定サイズや測定環境に依存するが, ほぼ数 μm に達する. また, 焼結接合体は研磨を行い, デジタルマイクロスコープ (オリンパス株, DSX500) で接合部の断面観察を行った.

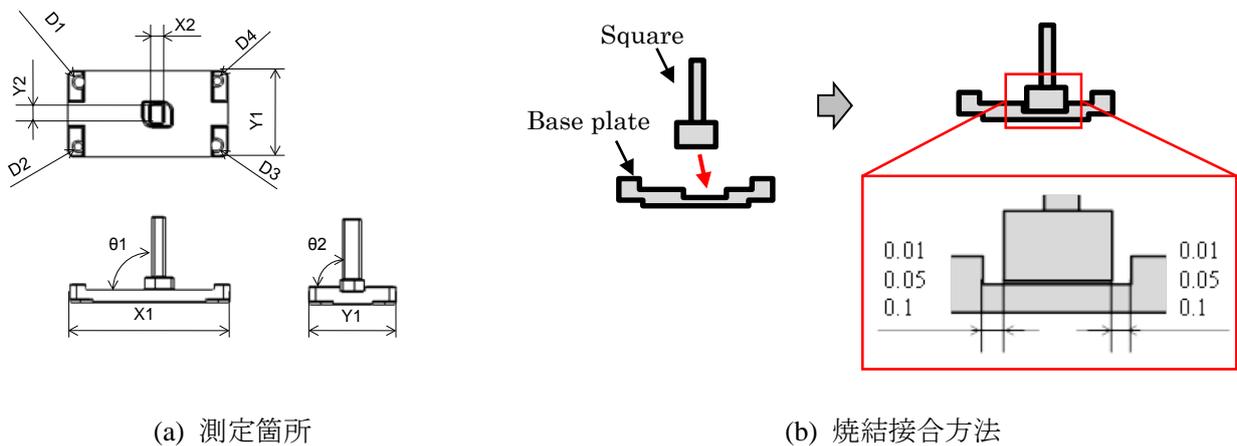


Fig.8 一体焼結部品と焼結接合部品の形状

Table 3 Dimensions of machined green compacts and sintered part (CAD data)

	Tolerance	D1	D2	D3	D4	X1	X2	Y1	Y2	θ_1	θ_2
(a) Machined green compact	± 0.02	0.99	0.76	0.99	0.76	14.89	1.26	8.02	1.78	90°	90°
(b) Sintered part	± 0.02	0.86	0.66	0.86	0.66	13.00	1.10	7.00	1.55	90°	90°

5. 2 実験結果および考察

切削加工後の成形体とその焼結体の微細構造を図9に示す。切削加工後の成形体の表面にはエンドミルの切削加工跡が見られるが、焼結体には見られない。また、焼結体の表面粗さは切削加工後の成形体よりも大きくなっていることが分かる。これは、焼結による収縮が原因であると思われる。

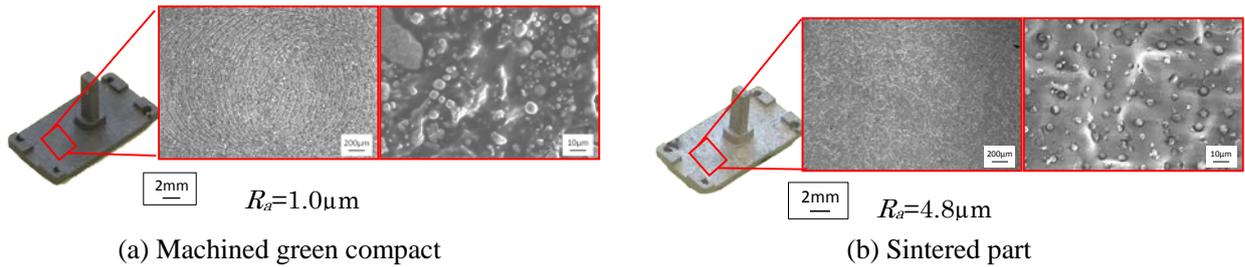


Fig.9 Microstructures of machined green compact and sintered part.

切削加工後の成形体と焼結体の寸法測定を行い、CADデータと形状比較した結果を表4、表5および図11に示す。表4(a)に示すように、切削加工後の成形体は各測定箇所寸法偏差が±0.02以内に加工されていることが分かった。また、図11(a)に示すように表面偏差も差異が5μm以内であり、高精度に切削加工されていることが分かった。しかしながら、表4(b)に示すように焼結体Y1の偏差が+0.13mmであり、また表面偏差も50μm程度の差異がある箇所があり、より詳細な調査および改善が必要であることが分かった。

Table 4 Differences in dimensions of machined green compacts and sintered parts

(a) Machined green compacts				(b) Sintered parts			
	CAD data	Measured data	Difference		CAD data	Measured data	Difference
X1	14.89	14.90	+0.01	X1	13.00	13.00	±0.00
X2	1.26	1.26	±0.00	X2	1.10	1.08	-0.02
Y1	8.02	8.01	-0.01	Y1	7.00	7.13	+0.13
Y2	1.78	1.78	±0.00	Y2	1.55	1.54	-0.01
D1	0.99	0.97	-0.02	D1	0.86	0.85	-0.01
D2	0.76	0.75	-0.01	D2	0.66	0.66	±0.00
D3	0.99	0.97	-0.02	D3	0.86	0.85	-0.01
D4	0.76	0.74	-0.02	D4	0.66	0.66	±0.00

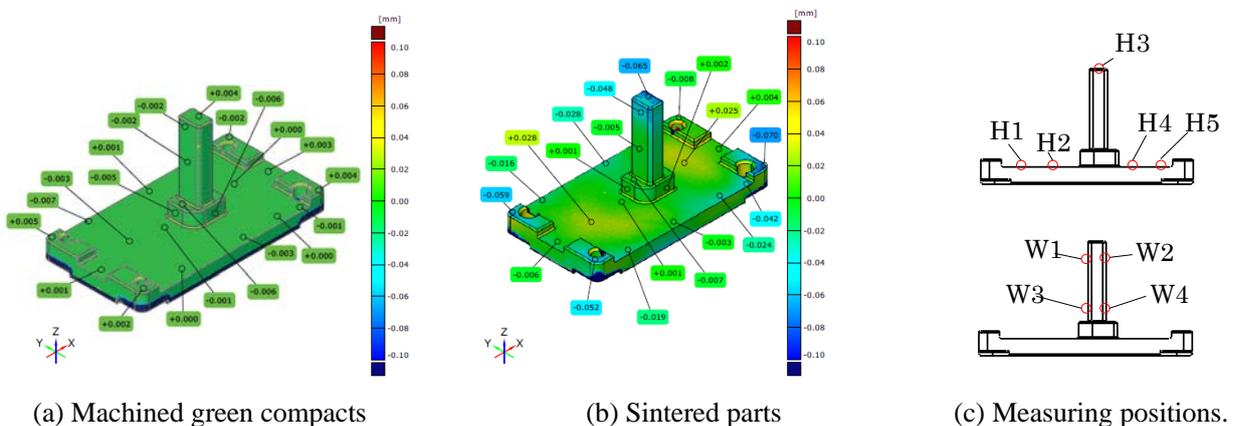


Fig.10 Differences in shape of machined green compact and sintered part to CAD data.

Table 5 Differences in position of machined green compact and sintered part to CAD data

	H1	H2	H3	H4	H5	W1	W2	W3	W4	θ_1	θ_2
(a)Machined green compact	-0.001	-0.001	+0.004	± 0.000	± 0.000	+0.004	-0.006	-	-0.004	90.0°	90.0°
(b) Sintered part	+0.021	+0.029	-0.064	+0.014	+0.030	-0.048	+0.023	-	+0.005	90.4°	90.4°

図 10 のように一体で切削加工した場合と，図 11 に示すように(a)平板と(b)角柱に分けて切削加工した成形体を図 8(b)のように組み合わせて脱脂・焼結を行った．一体焼結部品と焼結接合部品の CAD データの形状比較した結果を図 12(a)および(b)に示す．表 6 に示すように，一体焼結部品の角柱の角度は 90.4°と垂直に近いのに対して，焼結接合部品は 89.4°と 88.2°と傾いている．これは成形体の組立て時に角柱が傾いて焼結したためであると思われる．

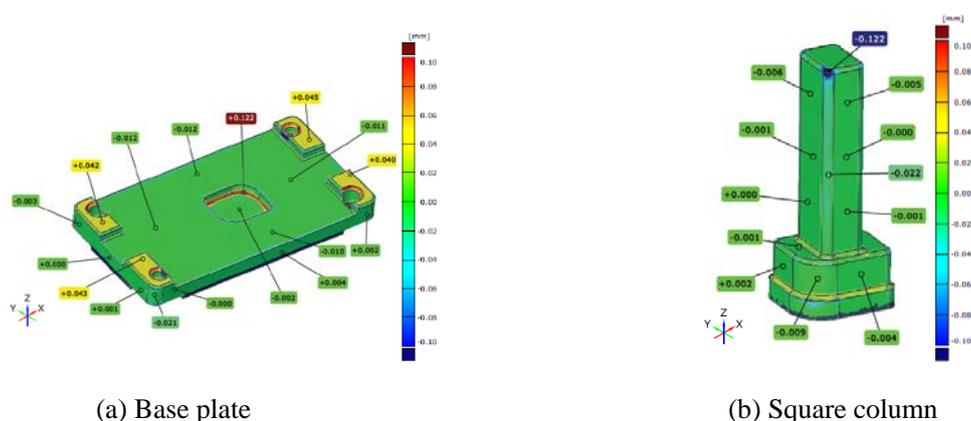


Fig.11 Differences in shape of two separate machined green compacts to CAD data and assemble.

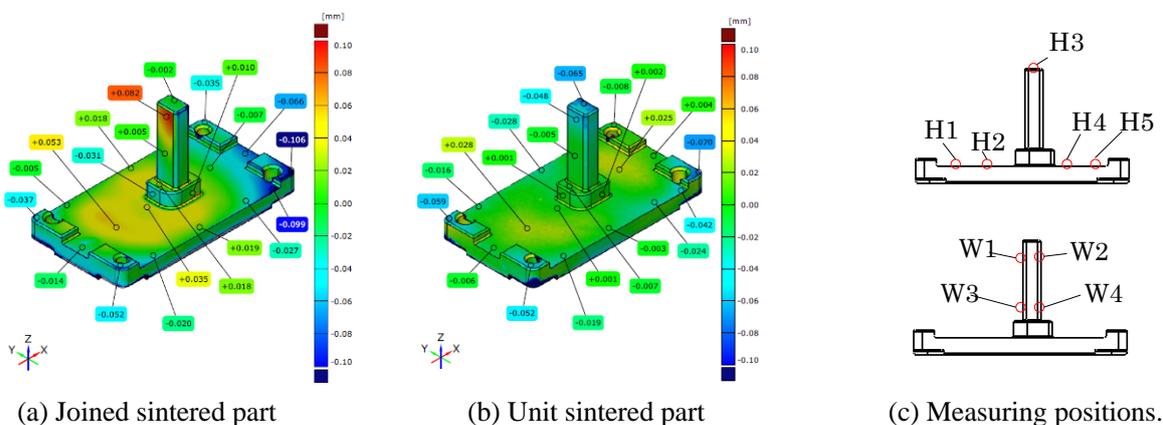


Fig.12 Differences in shape of joined and unit sintered parts and measuring positions.

Table 6 Differences in position of joined and unit sintered parts to CAD data

	H1	H2	H3	H4	H5	W1	W2	W3	W4	θ_1	θ_2
(a)Joined sintered parts	+0.029	+0.055	+0.003	+0.025	-0.014	+0.088	-0.097	-0.017	+0.016	88.2°	89.4°
(b)Unit sintered parts	+0.021	+0.029	-0.064	+0.014	+0.030	-0.048	+0.023	-0.004	+0.005	90.4°	90.4°

焼結接合体の接合部の断面写真を図 13 に示す．間隙が 0.1mm の場合，角柱の底面は平板と接合されている部分もあるが，17 μm 程度の隙間が生じている部分も見られ，側面は 80 μm 程度の大きな隙間が生じていることが分かった．一方，間隙が 0.05mm の場合，角柱の底面と平板の隙間は約 11 μm ，側面は 45 μm 程度の隙

間が生じており、完全に焼結接合されていないことが分かった。なお、間隙が 0.01mm の場合は、角柱が平板の溝に挿入することができず、焼結接合を行うことができなかった。

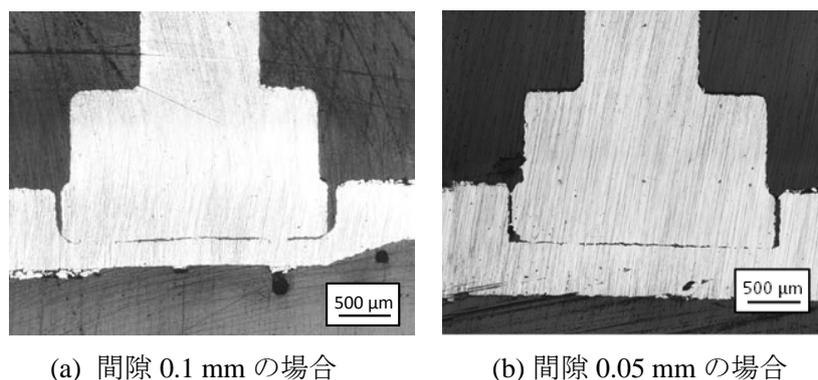


Fig.13 焼結接合部の断面写真

6. 結言

本研究は、金属粉末射出成形品製造における金型製造コストの削減、量産検討のため試作品の短納期化、および少量生産の実現を目的に、射出成形により製造された成形体ブロックを切削加工するグリーンマシニングによる形状付与を試みた。また、複雑の切削加工した成形体を組み合わせて焼結接合を行うことにより、射出成形では製造困難な複雑形状の金属部品を、金型を用いないで低コストかつ迅速に試作可能な製造法を提案した。さらに、非接触三次元デジタイザを用い、切削加工後の成形体とその焼結体および焼結接合後の部品の形状測定を行い、CAD データとの形状の比較から、提案した製造法の実用可能性とその課題について調査した結果、以下の知見が得られた。

- (1)単純形状のライン&スペースパターンを成形体に高精度に切削加工が可能であり、焼結体もほぼ CAD データ通りの寸法が得られた。
- (2)切削加工を行ったライン&スペースパターンの成形体どうしを組み合わせ焼結した場合、凹部と凸部の接合部には大きな間隙も見られず、健全な焼結接合体が得られた。
- (3)実際の製品形状に近い複雑な形状に成形体を切削加工した成形体は CAD データに近いことが分かったが、その焼結体は数十 μm 程度の変形が生じた部分も見られた。
- (4)複数の切削加工した成形体を組み合わせた焼結接合体では一体焼結体に比べて、傾きが大きい部分や焼結接合部に隙間が生じることが分かった。

上記の実験結果から、グリーンマシニングを用いた金属粉末焼結部品の試作・少量生産は実用上有用な製造法であるが、焼結接合による接合部の品質と形状精度は実用上満足できる水準に未到達であるため、焼結接合法の組合せや焼結時の固定方法など、さらなる改善が必要であることが示唆された。

7. 参考文献

- [1] K.Nishiyabu, “Micro Metal Powder Injection Molding”, InTech Published, Some critical issues for injection molding edited by J.Wang, ISBN978-953-51-0297-7 (2012).
- [2] T.Shimizu, K.Matsuzaki and T.Sano, “Rapid Prototype of Metallic Parts Using Green Machining”, Advances of Powder Metallurgy & Particulate Materials Vol.3 pp.156-161 (2003).
- [3] A.Ruh, K.Klimscha, V.Piotter, K.Plewa, H-J.Ritzhaupt-Kleissl, J.Fleischer, “The development of two-component micro powder injection moulding and sinter joining”, Microsystem Technologies. Vol.17, No.10, pp.1547-1556 (2011).

ハイブリッドクラッシュボックスの CAE 解析手法開発

総合理工学研究科 准教授 梶原 伸治

1. はじめに

自動車には衝突安全性の向上が求められており衝撃吸収部材には、軽量化と優れた衝撃エネルギー吸収性能の両立が必要とされている。そこで本研究では衝撃 CAE 解析ツールを用いて、カーボン短繊維を混練した PA66 射出プラスチックを射出成形によって作成した単体モデルとアルミ板およびカーボン長繊維を貼付けたハイブリッドモデルの荷重・総エネルギーを比較し、高衝撃吸収性能を有する衝撃吸収部材を明らかにすることを目的とした。

2. 衝撃吸収部材および解析方法

供試体については、一般的な自動車生産のタクトタイムの 1 分で作成できる形状・手法を検討した。衝撃吸収部材を図 1 に示す。主要素材は、熱可塑性樹脂にカーボン短繊維を混練したもの（以下、Short Fibers CFRP と略す）を用いた。比較材として PA66 の単体モデルと平面部に A5052, CFRP(long fibers), それ以外に PA66, CFRP(short fibers)を使用したハイブリッドモデルを用いた。

衝撃 CAE 解析は、MSC 社製 Dytran 2008r1 を使用した。なお、三次元シェル要素を用い、要素数は約 1000、解析時間は Dell 製 T5500(CPU:Xeon5360)メモリ 4GB で約 10 時間であった。また、衝突速度は垂直落下式試験と対応させ 4.5 m/s と設定し、それぞれの吸収エネルギーを比較するため、変位を 30mm とした。

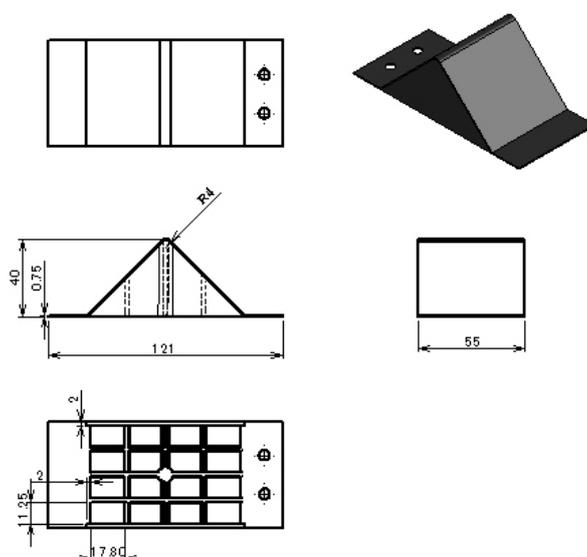


図 1 衝撃吸収部材

3. 衝撃吸収部材の作製方法および作製条件

3.1. 衝撃吸収部材の作製手法

衝撃吸収部材の成形プロセスを図2に示す。成形プロセスは、まず、熱可塑性長繊維 CFRP またはアルミ板 (A5052) を金型にセットし (i), Long Fibers CFRP を加熱する。ただし、アルミ板 (A5052) は加熱なし。次に、型締め (iii), Short Fibers CFRP または PA66 を射出成型 (iv) し、型開き (v), 製品の取出し (vi), である。

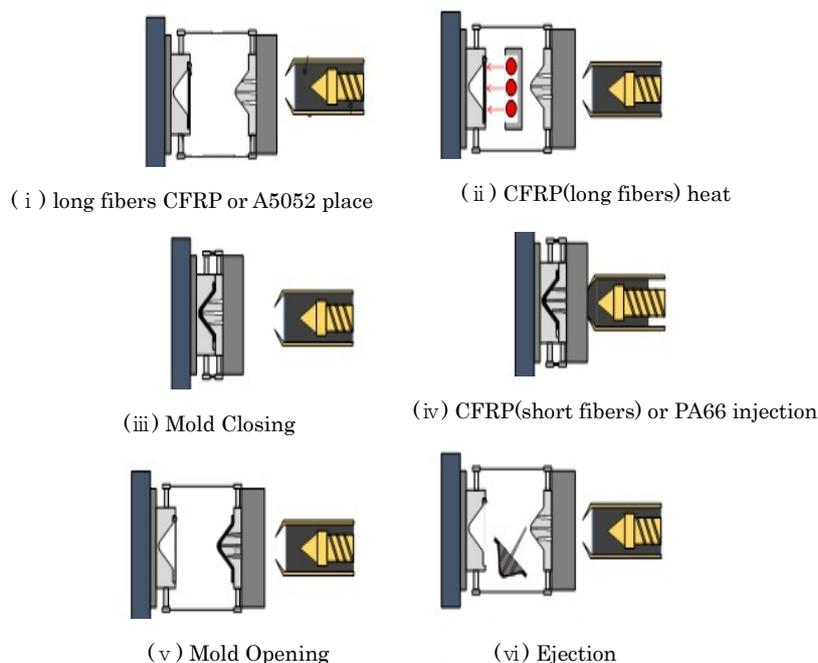


図2 成形プロセス

3.2 作製条件

衝撃吸収部材の作製条件を図2に示す。基本材料である short fibers CFRP および PA66 モデルの作成条件を表1に示す。PA66-A5052 モデルの作成時には PA66 モデルに比べて冷却時間が 10 秒余分にかかる。すなわち、CFRP(short fibers)-CFRP(long fibers)モデルの作成時には CFRP(long fibers)の加熱時間が発生するため CFRP(short fibers)モデルに比べて 90 秒かかることがわかる。

Table 1 Making Condition

	Short Fibers CFRP	PA66
Injection Speed, mm/s	60	40
Max. Injection Pressure, MPa	80	60
Pressure Keeping, MPa, sec	60MPa 3sec	40MPa 3sec
Cycle Time, s	25	25

4. CAE 解析結果および考察

4.1 衝撃吸収時の形状

CAE 解析により得られた衝撃吸収の形状例として, Short Fibers CFRP と Long Fibers CFRP のハイブリッドモデルの変形図を Fig. 3 に示す. この図より変位が 20 mm, 30 mm と大きくなると上部の Long Fibers CFRP の影響でペントルーフの斜面部分が外側に変形していることがわかる.

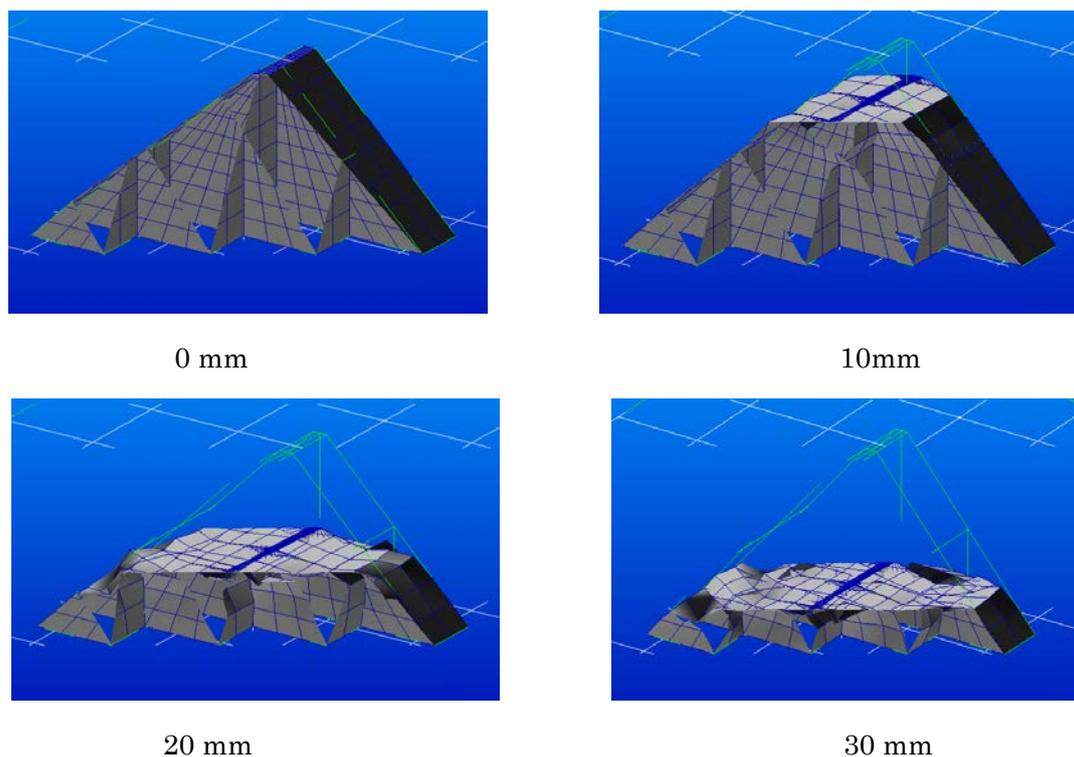


図3 CAE 解析結果(Short Fibers CFRP–Long Fibers CFRP)

4.2 衝撃吸収荷重と総エネルギー

4 つのモデルの荷重と距離の関係を図 4 および総エネルギーを Fig. 5 にそれぞれ示す. Fig. 4 より, PA66 モデルと PA66–A5052 モデルを比較すると, 荷重は PA66–A5052 モデルが PA66 モデルよりも荷重が大きいことがわかる. さらに, ①–②間では, 短いリブに衝突しているが, その際の荷重は PA66 が 28.5kN から 53.0kN に約 86.2%の上昇に対し, PA66–A5052 では 31.9kN から 50.5kN へと約 58.3%の上昇と変化は小さくなった. これはアルミの延性がカーボンの脆性破壊の衝撃を吸収することであると考える. さらに Fig. 5 より, Total Energy は PA66 に対して PA66–A5052 は約 13.2%吸収エネルギーが大きいことがわかった. すなわち, PA66–A5052 の方がエネルギーを安定に吸収でき, エネルギー合計も大きいので PA66 より優れていることがわかった.

さらに, CFRP における荷重を比較すると, Short Fibers CFRP–Long Fibers CFRP モデルが荷重が大きい. ①–②間で短いリブへの衝突時に発生する荷重上昇率は Short Fibers

CFRP-Long Fibers CFRP が 82.0kN から 113kN への約 37.7%であった。一方, Short Fibers CFRP モデルでは, 77.8kN から 106kN へと約 36.3%変化へと小さくなった。また, 図 5 の Total Energy を比較すると Short Fibers CFRP-Long Fibers CFRP モデルが約 18.7%大きいことがわかる。

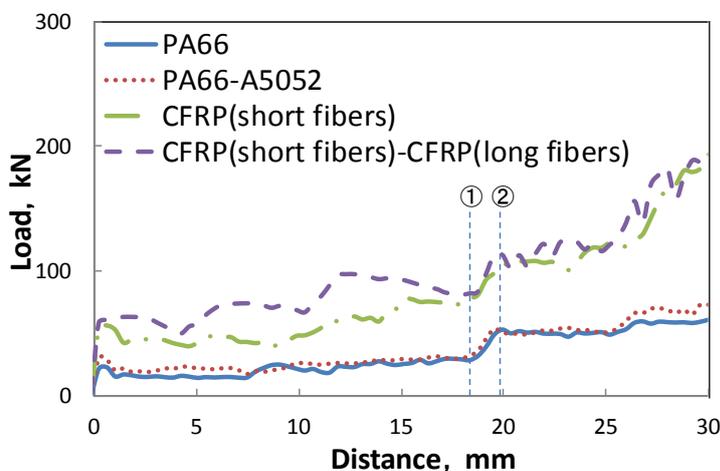


図 4 PA66, PA66-A5052, CFRP(short fibers) and CFRP(short fibers)-CFRP(long fibers)

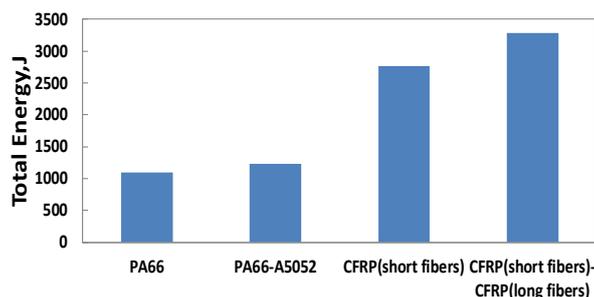


図 5 Comparison of The Total Energy

5. おわりに

衝撃 CAE 解析ツールを用いて, カーボン短繊維を混練した PA66 射出プラスチックを射出成形によって作成した単体モデルとアルミ板およびカーボン長繊維を貼付けたハイブリッドモデルの荷重・総エネルギーを比較した。得られた知見を以下にまとめて記す。

- (1) 衝撃 CAE 解析によって自動車用ハイブリッドクラッシュボックスの解析が可能となった。
- (2) 単体モデルに比べてハイブリッドモデルの方が優れていることがわかった。
- (3) 今後, クラッシュボックスの設計では傾斜角を検討し, 短いリブに衝突した際により安定した衝撃吸収が可能になるような素材・形状を検討する必要がある。

6. 参考文献

1. 中井智彦, 梶原伸治, カーボン/アルミを用いた衝撃吸収性能の実験的解析, 2014年度学生自動車技術研究会講演論文集, Vol. 31, pp. 58-59, 大阪, 2015年2月
2. 川原福次郎, 梶原伸治, 自動車用ハイブリッドクラッシュボックスのCAE解析手法開発, 2014年度学生自動車技術研究会講演論文集, Vol. 31, pp. 58-59, 大阪, 2015年2月
3. 成田航, 梶原伸治, カーボンを用いた自動車用クラッシュボックスに関する実験的研究, 2013年度学生自動車技術研究会講演論文集, Vol. 30, pp. 90-91, 大阪, 2014年2月
4. 高田浩輝, 梶原伸治, カーボンを用いた自動車用クラッシュボックスに関する研究, 2013年度学生自動車技術研究会講演論文集, Vol. 29, pp. 22-23, 寝屋川, 2013年2月
5. Shinji Kajiwara, New Suspension Mechanism Using Camber Thrust for a Formula Car, International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering, Vol. 8, No. 2, pp. 180-187, 2014
6. Shinji Kajiwara, Improvement of Car Performance Limits Through Camber Control, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3, No. 5, pp. 1221-1226, 2014
7. Shinji Kajiwara, Parameter Study of a Step-climbing Machine for Heavy Load Carrier, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 26, No. 3, pp. 341-348, 2014
8. Shinji Kajiwara, Automobile Collision Behavior Using Mechanism CAE Analysis, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol. 3, No. 5, pp. 935-939, 2014
9. Shinji Kajiwara, Effect of the check ball and inlet position on hydraulic L-shaped check ball behavior, Journal of Fluids and Structures, Vol. 48, pp. 497-506, 2014
10. 梶原伸治, 田中達也, 油圧L字配管チェックボール挙動の実験的解析, 日本フルードパワーシステム学会論文集, Vol. 44, No. 1, pp. 23-28, 2013
11. Shinji Kajiwara, Experimental Observations of the Fluid Flow Within the L-Shaped Check Valve Design, The International Journal of Fluid Power, Vol. 14, No. 1, pp. 17-24, 2013
12. Shinji Kajiwara, Tatsuya Tanaka, Experimental Analysis of Check Ball Behaviors for L-shaped Pipe, International Journal of Fluid Power System, Vol. 6, No. 1, pp. 1-7, 201

金型設計のための CAE 技術開発

メカニクス系工学専攻 講師 橋本 知久

1. 緒言

現在、プラスチック射出成形金型の設計において、CAE 解析が利用されている。主に、金型キャビティへの樹脂充填時の流れ、金型冷却による成形品の温度分布や離型後の成形品のそり変形予測等の解析が行われている。本研究では、最新の計算手法を導入して単一の直交格子上で流体の運動と固体の熱伝導を同時に解く、熱流動の一括シミュレーション手法の開発を行った。

格子生成については、成形品の形状および冷却管の配置は多岐にわたるため、簡便な直交格子上で任意の三次元物体形状を比較的容易に取り扱うことができる仮想流束法⁽¹⁾を採用した。この方法は物体内部と外部の領域を分離してそれぞれの流れ場を計算できるため、管路などの内部流れと物体周りの外部流れを同時に取り扱えるという利点がある。ここでは特に、CAD により作成された三次元形状を直交格子上にマッピングする方法を構築した。流体の運動の数値計算については、非圧縮性粘性流の非定常流れの問題に対して、非圧縮性局所ナビエ・ストークス方程式 (KRLNS)⁽²⁾を用いて反復計算することなく時間精度良く解を求められることを検証してきた⁽³⁻⁵⁾。また、その優位性について従来から用いられている擬似圧縮性解法 (ACM)、格子ボルツマン法、および擬スペクトル法により得られた解と比較検討している。固体の熱伝導の数値計算については、射出成形金型を対象とした場合、その温度境界条件として、金型温度調節器の制御による温度一定の条件や、樹脂から金型への熱伝達に対しては熱伝達係数を設定して熱流束を評価する条件を与え、時々刻々と変化する金型内部の温度分布を時間精度よく求められることを検証した⁽⁶⁾。これらの方法を統合して、熱流動の一括シミュレーション手法を確立した。その際、流体の運動方程式は固体内部の速度を零に与えることで熱伝導方程式と同形に帰着することを利用している。

この熱流動の一括シミュレーション手法は射出成形を対象に開発を進めてきたが、一般的な熱流動現象の問題に適用可能である。

2. 円管内流れの数値シミュレーション

図 1 に計算領域中に配置された円管および流れの条件を示す。直交格子を用いた円管内流れの計算は、図 2 に示すように、円管の表面を微小な三角形要素で分割した後、直交格子の格子線と交差する要素面上の交点を求めることで表面形状を直交格子上にマッピングし、それらの交点で流れの物体面境界条件を満足させている。流れの条件として、円管の直径を代表長さ、流入部における一様流速度を代表速度としてレイノルズ数 $Re=100$ を与えた。直交格子は等間隔格子として円の直径を 33 分割として格子点数 $321 \times 65 \times 65$ とした。得られた計算結果として、KRLNS でマッハ数 $Ma=0.02$ とした場合の等圧力線図を図 3 に示す。また、管長方向の圧力勾配および流出部での速度分布をそれぞれ図 4 および図 5 に示す。従来法である ACM により得られた解および理論解と定量的に比較した結果、良好に一致することが確認できた。さらに、図 6 に示すような流路の分岐合流や管径が異なる冷却管に適用した結果、図 6 に示す速度ベクトルからわかるように、本手法は複雑形状流路内の流れを計算できることが確認できた。

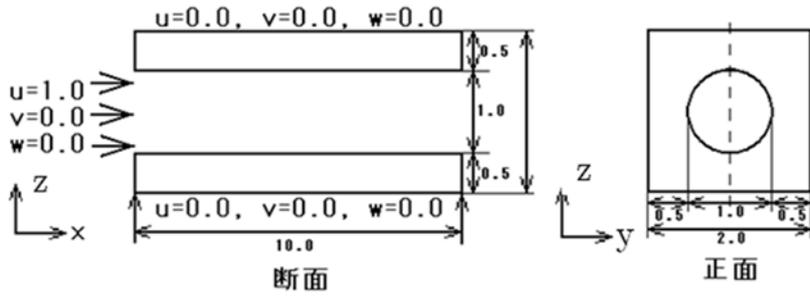


図 1 計算領域中に配置された円管および流れの条件

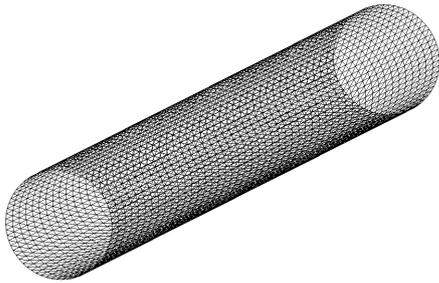


図 2 三角形要素で表現された円管形状

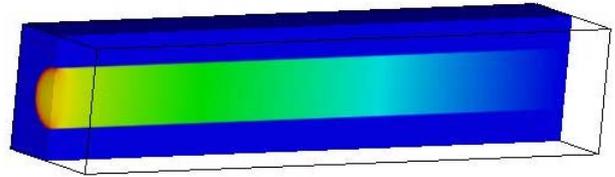


図 3 圧力分布

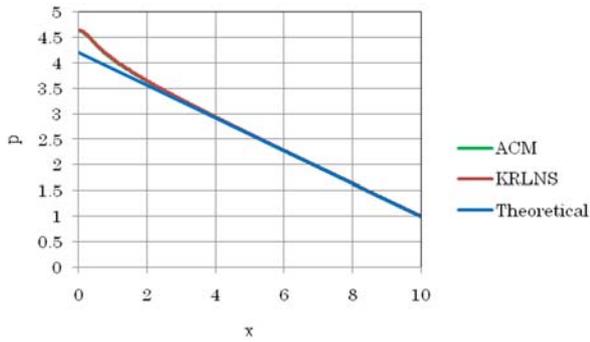


図 4 圧力勾配の比較

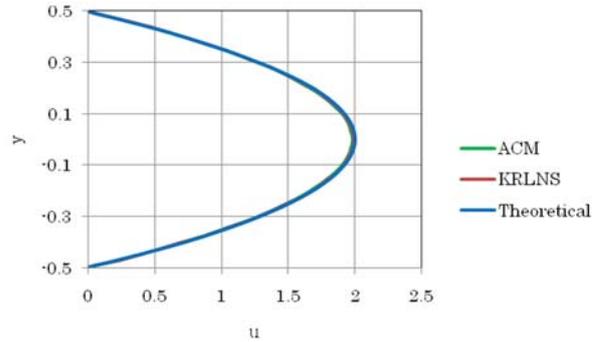


図 5 速度分布の比較

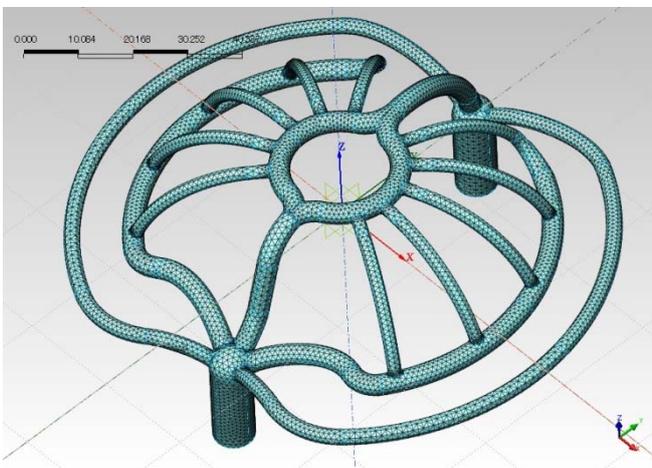


図 6 三角形要素で表現された冷却管形状

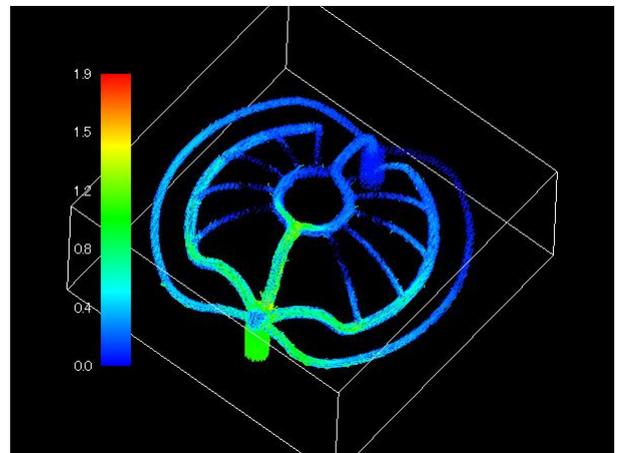


図 7 速度ベクトル

3. 円および球体の非定常熱伝導シミュレーション

非定常熱伝導解析に対しても直交格子上で物体表面を表現し無次元化した熱伝導方程式を用いて計算を行った。円および球体はそれぞれ正方形および立方体の計算領域内の中心位置に配置した。まず、円の場合に用いた直交格子は円の半径 1 の長さを 30 分割して格子点数 91×91 とした。計算は初期における円内部（計算領域全体）の温度を $T=0$ とし、円周上に温度 $T=1$ の流体から設定した熱伝達係数に応じた熱流束を求め、時間経過後の温度分布について理論解と比較検証した。得られた計算結果として、無次元時間 $t=1$ と $t=8$ における温度分布のコンター図を図 8、そのときの円の半径方向の温度分布を理論解と重ねてプロットしたグラフを図 9 に示す。これらよりそれぞれの時間において両者の解がよく一致していることが確認できる。次に、球体の場合についても同様の方法により計算を行った。初期における球体内部（計算領域全体）の温度を $T=1$ 、球面上に温度一定 $T=0$ の境界条件を与え、時間経過後の温度分布について理論解と比較検証した。円の場合の結果と同様に、温度分布のコンター図および無次元時間 $t=0.016$ と $t=0.16$ における球の半径方向の温度分布を理論解と重ねてプロットしたグラフをそれぞれ図 10 および図 11 に示す。これらより球体の内部の温度変化をよく捉えられていることがわかる。

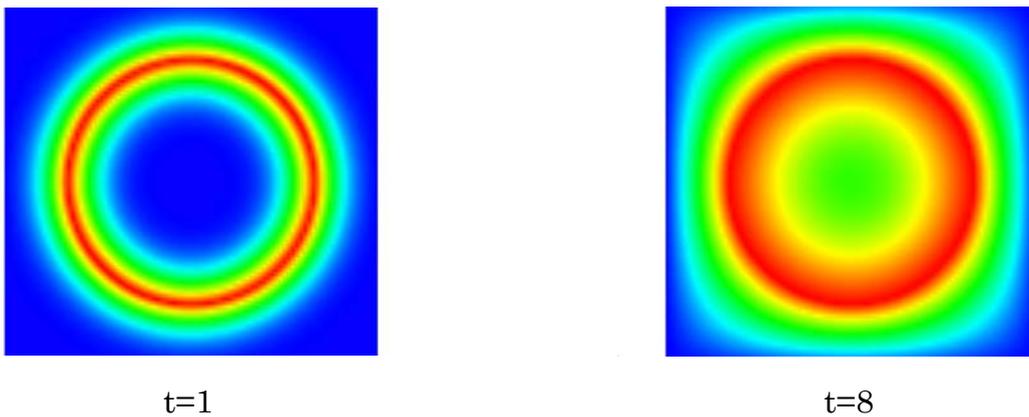


図 8 円の内部の温度分布（円の外部も同時に計算）

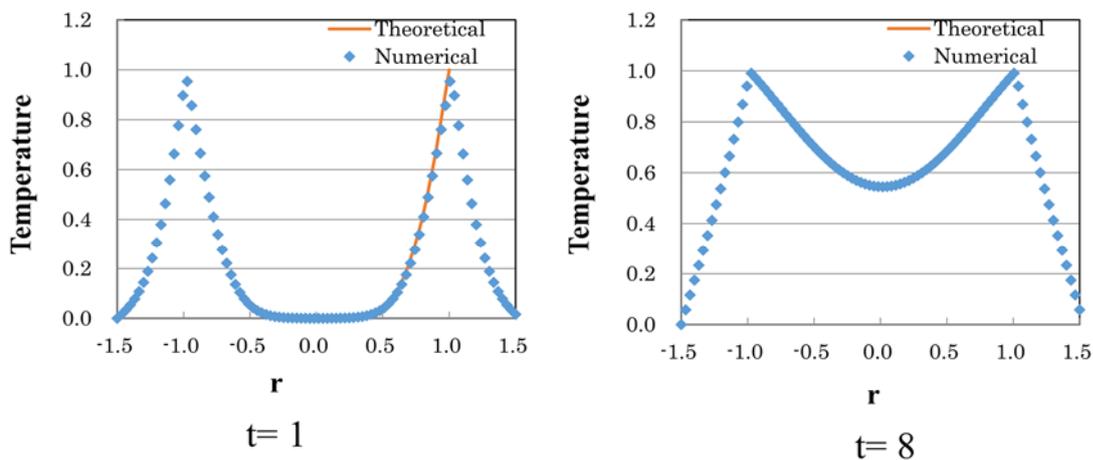


図 9 温度分布の理論解との比較

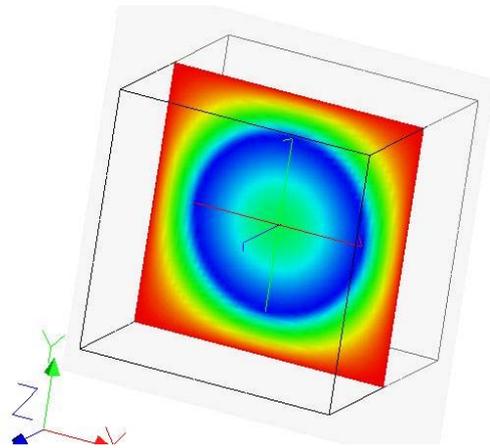


図 10 球体の内部の温度分布（球体の外部も同時に計算）

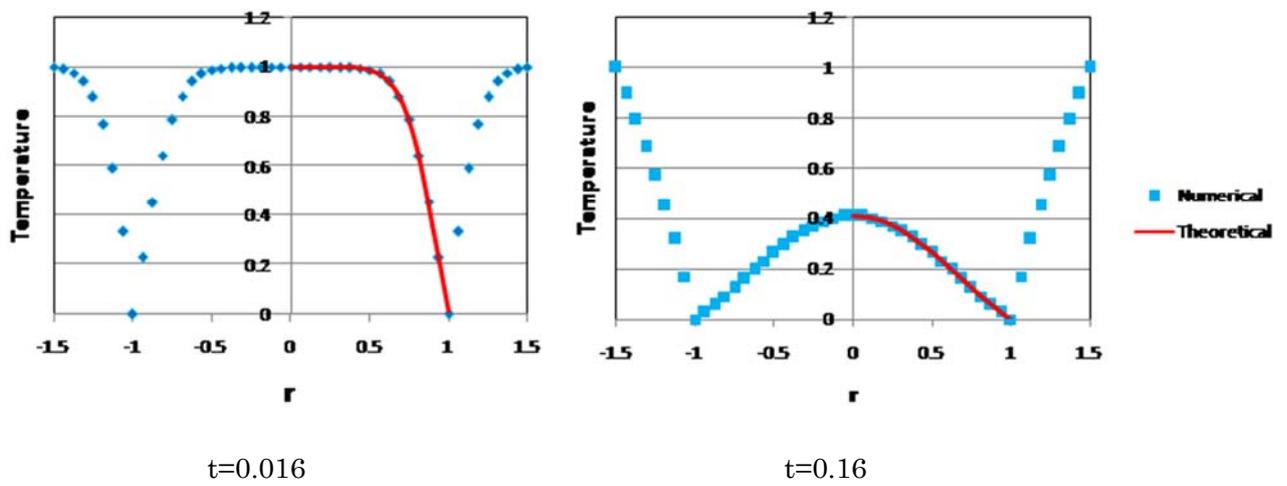


図 11 温度分布の理論解との比較

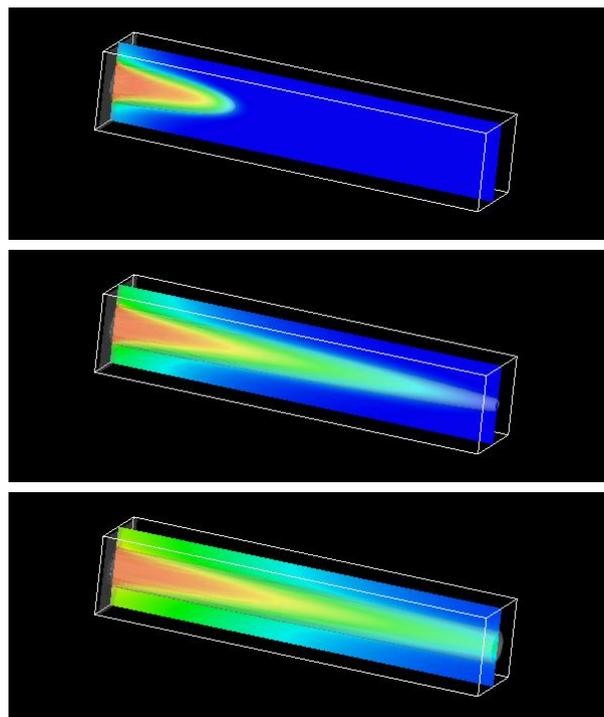


図 12 界面進展による温度分布の変化

4. 熱流動の一括シミュレーション

ここでは2章と3章において、流体の運動および固体の熱伝導の数値計算に対してそれぞれ計算結果の信頼性を確かめられたので、それらを統合して熱流動の一括シミュレーション手法を確立した。その際に界面の進展を捕獲できる手法を組み込んでいる。計算の一例として、円管内への流体充填の結果を図12示す。この図から流れの界面が進展するのに伴い流体の熱が固体に伝わっていく様子が確認できる。

5. 結言

本研究で開発した熱流動の一括シミュレーション手法は、三次元物体形状のCADデータに基づいて格子生成が簡便な直交格子へその形状をマッピングして管路などの内部流れや物体周りの外部流れを同時に計算できる。また、流体の運動と固体の熱伝導を組み合わせることも可能である。さらに界面捕獲法を導入しているため、表面張力を入れた二相流の数値計算を行うことができる。今後は熱流動現象の様々な問題へ適用が期待できる。

6. 参考文献

- (1) 丹野格, 森西晃嗣, 松野謙一, 西田秀利, 仮想的な流束を用いた直交格子系での任意形状物体周りの計算, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 70, No. 699 (2004), pp. 2689–2696.
- (2) Borok, S., Ansumali, S and Karlin, I. V., Kinetically reduced local Navier-Stokes equations for simulation of incompressible viscous flows, *Physical review E* 76, 066704 (2007).
- (3) 橋本知久, 丹野格, 安田孝宏, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行, 非圧縮性局所ナビエ・ストークス方程式と仮想流束法を用いた流路内流れの数値計算, 日本機械学会 2012 年次大会, G010021 (2012), pp. 1–4.
- (4) T. Hashimoto, I. Tanno, Y. Tanaka, K. Morinishi, and N. Satofuka, Simulation of doubly periodic shear layers using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, *Computers and Fluids*, 88, (2013) pp. 715–718.
- (5) T. Hashimoto, I. Tanno, T. Yasuda, Y. Tanaka, K. Morinishi, and N. Satofuka, Higher order numerical simulation of unsteady viscous incompressible flows using kinetically reduced local Navier-Stokes equations on a GPU, *Computers and Fluids*, 110, (2015), pp. 108–113.
- (6) 橋本知久, 丹野格, 安田孝宏, 田中嘉宏, 森西晃嗣, 里深信行, 直交座標系格子を用いた任意形状に対する非定常熱伝導解析, 日本機械学会 2013 年次大会, G011052 (2013), pp. 1–4.

金型磨きの技能獲得と作業評価に関する研究

メカニクス系工学専攻 教授 五百井 清
メカニクス系工学専攻 准教授 大坪 義一

1. 緒言

技能の獲得や保存に関する研究は今までも数多く実施されているが、その背景には熟練技能者の後継者不足の問題がある。金型磨き作業もその一つであり、金型を使用して作る製品の外観や品質を決定する大切な要素である。このため、金型磨き熟練者の作業技能を抽出して、後継者に伝承できる形でアーカイブすることやロボット等の自動機械で実現できる形にトランスレートすることが強く望まれてきた。

ところが、今まで金型磨きの作業データそのものを獲得する有効なツールがなかったため、金型磨きの技能抽出の研究はあまり進展していなかった。そこで、今回新たに、金型磨き専用の作業データ獲得ツールを開発した。さらに、本ツールを用いて金型磨き作業における押付力や姿勢角度等を計測し、熟練者と初心者のデータ特性の比較を行った。

2. 金型磨き作業データ獲得ツールの開発

砥石を用いて金型磨き作業を行う際、作業者は砥石の先端を人差し指で押さえ、砥石の後方をその他の指と手のひらで固定するようにして砥石を持つ。この状況を模擬して金型磨き作業中のデータ取得を行うために、金型に対する押付力、加速度、姿勢角度、角速度の4項目を計測可能なツールを製作した。設計したデータ獲得ツールの全体像を図1に示す。作業者の握りやすさを考慮して側面を円弧状とし、全長180[mm]、幅20[mm]の大きさで設計している。

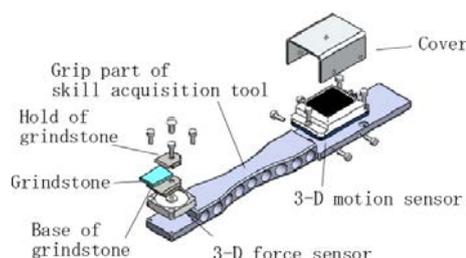


図1 作業データ獲得ツールの外観

金型磨き作業のデータ取得では、力覚センサや慣性センサを砥石先端と金型面の接触点に設置することが望ましいが、両センサをツールの磨き作用点に取り付けることが困難なため、力覚センサと慣性センサはそれぞれ図1のように、ツールの前方と後方に分けて取り付けられた。

なお、砥石の磨き作用点の速度と作用力は、力覚センサと慣性センサの取付け位置を考慮して推定計算を行っている。この推定計算の精度はフォースプレートからの計測結果と比較して確認されている。

3. 磨き作業データを利用した熟練者と初心者の技能比較

プラスチック金型磨きの熟練者3名(A~C)とその初心者である学生6名(D~I)の9名を対象に、磨き作業のデータ計測を行った。学生6名には予め熟練者の動きを観察し、それを模倣するよう指示した。試験用金型はプラスチック金型材としてよく使用されるNAK55であり、放電加工機で55[mm]×55[mm]×0.5[mm]のくぼみを作って使用した。磨き作業はそのくぼみ内で、作業データ獲得ツールを用いて行った。その計測結果の数例を以下に示す。

3.1 姿勢角度の比較

図2に熟練者A,B,C,初心者G,H,Iの5秒間でのツール角度の推移を示す。初心者も熟練者と同様に、ツール角度の変化が±2.5[deg.]の範囲に保たれている。一方で、熟練者では8~12[Hz]の振動成分が観察され、素人では3~4[Hz]の低周波成分が観察される。これは、ツールを掌で握る際の把持剛性の違いが原因と考えられ、熟練者のほうがツールを強く把持していると推測される。

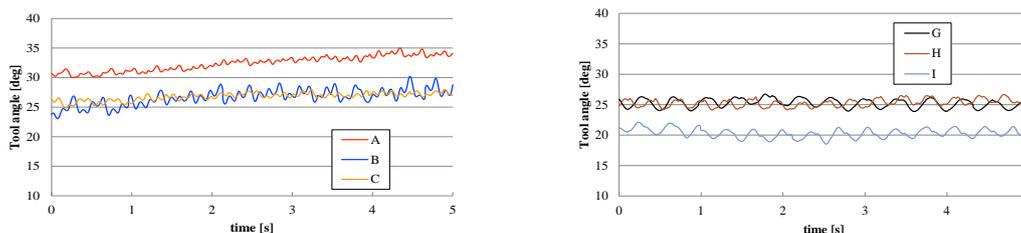


図2 熟練者と初心者のツール把持姿勢角度の比較 (左: 熟練者, 右: 初心者)

3.2 磨き力の比較

図3に熟練者A,B,C, 初心者D,E,Fの1.2秒間での磨き力（金型面に沿った方向の力）の推移を示す。熟練者は磨き力に関して、押し引き動作で3[N]~5[N]程度を保持しているが、初心者はそれに比較して小さい。また共に、押し動作が引き動作より強いことが確認できる。これはツールを把持する人の掌形状に起因している。さらに、初心者は砥石を押し瞬間にのみ急激な力が加わり、引き動作時の磨き力が小さくなる傾向がある。熟練者は、押し引き力を大きな一定値に保っていることが見て取れる。

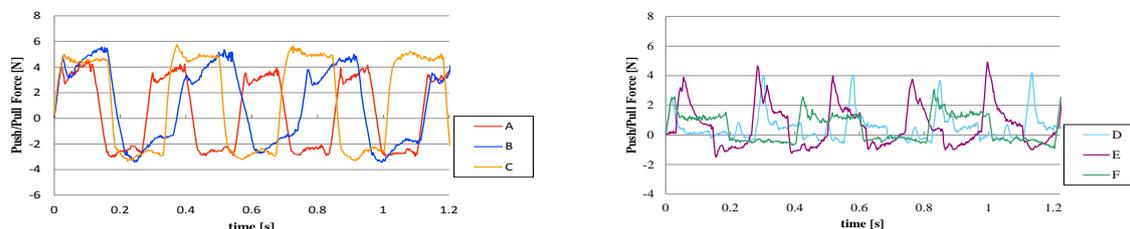


図3 熟練者と初心者の磨き力の比較（左：熟練者，右：初心者）

3.3 磨き速度の比較

磨きの速度に関して、熟練者も初心者も共に前後往復の周期運動を繰り返している。初心者の速度波形は押し引きの差異が少ない単振動に近かった。一方、熟練者の速度波形には押し引き動作中に停止に近い動作が入ることが確認された。その熟練者A,B,Cの速度波形を図4に示す。熟練者は押し動作と引き動作の途中で緩急をつけて磨いていると推測される。

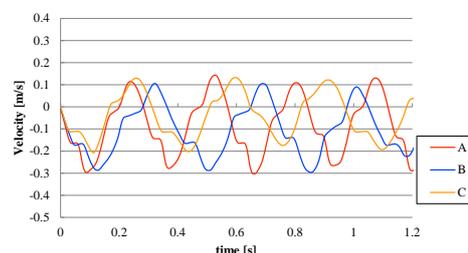


図4 熟練者の磨き速度波形

3.4 平均仕事率の比較

磨き作業の1周期が各人により異なるため、仕事率（磨き速度と磨き力の内積）の時間積分を周期で除した平均仕事率を求める。平均仕事率の結果を表1に示す。熟練者の平均仕事率はいずれも0.40[J]より大きく、初心者はこれらに比べて小さい。初心者の1周期にかかる時間は熟練者と大差ないため、熟練者の磨き力が平均仕事率に寄与していると考えられる。一般に、大きな力の持続は人間に強い疲労を与えるが、熟練者は疲労しにくい磨き作業スキルを身に付けていると推測される。

表1 平均仕事率の比較

	Work[J]	Period[sec]	Mean power[J/s]
A	0.133	0.302	0.44
B	0.151	0.374	0.40
C	0.134	0.336	0.40
D	0.021	0.268	0.08
E	0.082	0.236	0.35
F	0.037	0.400	0.09
G	0.084	0.362	0.23
H	0.044	0.388	0.11
I	0.08	0.316	0.25

4. 結言

金型磨き作業に適したデータ獲得ツールを開発した。複数の熟練者と初心者とそのツールを使用して磨き作業を行ってもらい、得られたデータから磨き動作の差異に着目した評価を行った。その結果から、熟練者の把持特性や磨き動作の特徴などを推測した。今後は、定量的・科学的考察を進める予定である。また、熟練磨き動作の特性を抽出してロボット等に移植できる形とすることも課題である。

5. 参考文献

- [1] 児玉謙介, 神橋清訓, 五百井清, 大坪義一: 金型磨きにおける技能者と初心者の作業特性, 第14回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会概要集, 2I1-5 (2013)
- [2] 神橋清訓, 五百井清, 大坪義一: 金型磨き専用ツールによる特徴量の推定, 第31回日本ロボット学会学術講演会概要集, 2F1-03 (2013)
- [3] K.Ioi, K.Kanbashi, Y.Ohtsubo: Evaluation of Mold-Polishing Skills Using a New Skill Acquisition Tool, Proc. of International Conference on Advances in Science and Technology, pp.236-242 (2014)
- [4] 児玉謙介, 辻合真也, 渡邊将寛, 五百井清, 大坪義一: スキル獲得ツールを使った金型磨きスキルの評価, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会概要集, pp.797-801 (2014)

表面の磨きや検査に応用できるロボットに関する研究

メカニクス系工学専攻 教授 五百井 清

1. 緒言

磨き作業は、生産現場での金型磨きはもちろんのこと、床面や建造物の外壁・窓磨きなど至る所で必要とされる作業である。磨き作業に適用できるロボットとして腕型の産業用ロボットがあげられるが、対象面が広範囲の磨きには移動型ロボットが適している。ここでは、壁面の磨きや検査に適用できる移動型ロボットについて報告する。

2. 双輪型壁面移動ロボットの開発

開発した壁面移動ロボットを図1に示す。本ロボットは壁面を押し付けて落下を防ぎ、壁面上を2つの車輪の速度差で走行する。壁面への押し付け力は機体に搭載した同軸反転プロペラの推力により発生する。軽量化のために機体の大部分はCFRP部材により構成され、支配的な重量部材はモータ（2個のACモータと2個のDCモータ）とバッテリーである。また、制御用マイコンに加え、機体の位置・姿勢検出のために3D-モーションセンサを、障害物距離検知のために超音波センサを搭載している。

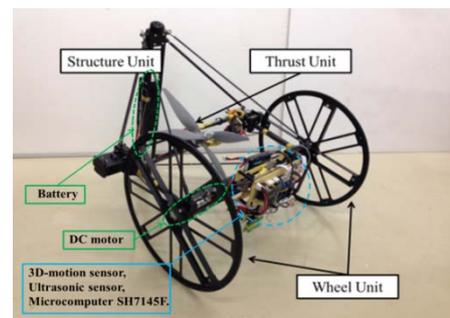


図1 双輪型壁面移動ロボットの外観

3. システムの基本仕様と壁面走行試験

本機体は、質量1.7kg、大きさ500×430×400mmであり、直進走行速度450mm/sの仕様となっている。なお、同軸反転プロペラの最大推力は19Nである。本システムは自律制御と遠隔操作を併用した遠隔・自律融合システムを導入しているため、予めプログラミングした経路を自動で走行できる。操作はPCあるいはタブレットを用いて行う。垂直壁面上で走行実験を行った結果の一部（車輪中心の移動軌跡）を図2に示す。実験とシミュレーションにはよい一致が見られる。さらに、壁面間を乗り移る実験や乗り移り時に柔らかに着地する実験等を行い、良好な結果を得ている。

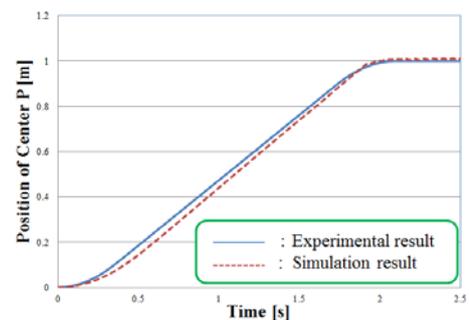


図2 車輪中心の軌跡（垂直壁面走行）

4. 結言

壁面を自由に走行できるロボットについて報告を行った。用途としては、人に代わり壁面を磨いたり、検査したりすることを目的としている。今後、機体の推力部の回転を2自由度に拡張して、壁面を自在に走行できるように改良を行う予定である。

5. 参考文献

- [1] K.Ioi, H.Yokoi, M.Kimura: Development of a Compact and Rapid Wall-Climber, Proc. of IEEE the 18-th International Conference of MMAR, pp.344-349 (2013)
- [2] 清水勇太, 木村優孝, 五百井清: 小型で高速な壁面移動ロボットの研究, 第31回日本ロボット学会学術講演会予稿集, AC3H3-01 (2013)
- [3] 清水勇太, 井田勇気, 野崎克也, 五百井清: 小型移動ロボットの壁面走行と壁面間移動, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会概要集, pp.1370-1374 (2014)

接触走査体の衝撃と振動抑制に関する研究

メカニクス系工学専攻 教授 五百井 清

1. 緒言

人による金型磨き作業では、磨きツールを把持して金型面を押し付けながら往復運動を行っている。このような作業をロボットのような自動機械で実施する場合、そのツールである接触走査体の衝撃と振動を極力抑えることが重要となる。例えば、金型面に鉄粉等が付着した状態でそのまま磨き走査を行うと表面に致命的な瑕疵を与えることとなる。ここでは、接触体が走査する面上に小さな突起物がある場合に接触走査体に作用する衝撃と振動を抑制する手法に関して、キャスター付き台車を例に報告を行う。

2. 接触走査体としてのキャスター付き台車

接触走査体としてのキャスター台車の構造を図1に示す。通常の台車用緩衝キャスターは車台への衝撃や振動を抑えるために、ばね・ダンパで構成されることが多い。図1のキャスターは、ばね・ダンパの代わりに直進型アクチュエータ（ボイスコイルモータ）が取り付けられており、この直進移動量を制御することにより、ばね・ダンパ以上の制振効果を発揮する。さらに、走行面突起物からの衝撃力を低減するために、キャスターの回転中心がキャスターの撃心に対応するように設計されている。車台の制振制御を実現するために、車台部とキャスター回転中心部に加速度センサが取り付けられており、これらの量をフィードバックしてアクチュエータを駆動する。その制御ブロック線図を図2に示す。

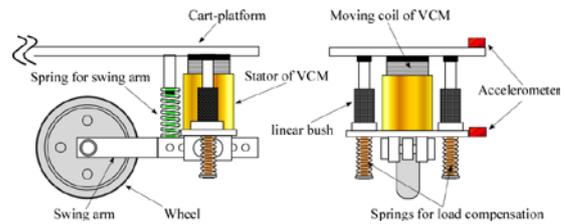


図1 キャスター付き台車の外観

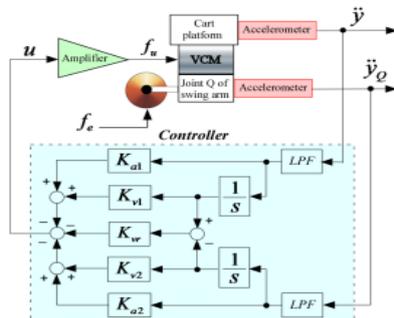
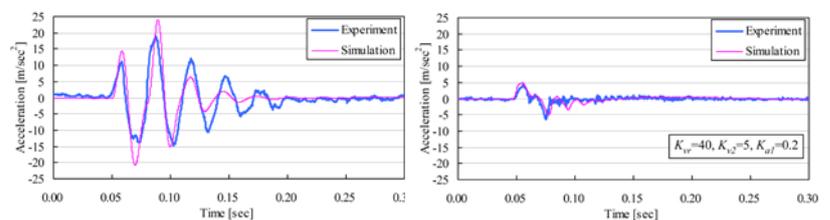


図2 制振制御のブロック線図



a) 制振制御なし

b) 制振制御あり

図3 突起乗り上げ時の車台の加速度応答

3. 突起物乗り越え走行試験

図3にキャスター台車が突起に乗り上げた場合の車台の加速度応答の実験結果とシミュレーション結果を示す。実験とシミュレーションにはよい一致が見られる。図3のa)の制振制御なしでは、突起乗り越え時に大きな衝撃加速度が発生しているが、図3のb)の制振制御ありでは、その加速度が5分の1程度に激減している。また、衝撃後の残留振動も格段に速く収まっているのが見てとれる。

4. 結言

接触体が走査する面上に小さな突起物がある場合に、接触走査体に作用する衝撃と振動を抑制する手法に関して、キャスター付き台車の試験結果を報告した。今後、これらの知見を基に、金型面を接触走査するツールの振動抑制や衝撃緩和に応用していく予定である。

5. 参考文献

- [1] 五百井清, 須田敦, 山本昌彦: 低衝撃低振動台車を実現する能動制振キャスターの研究, 日本機械学会論文集 C編, Vol.79, No.808, pp329-340 (2013)
- [2] K.Ioi, A.Suda, M.Yamamoto: Design of an Active Controlled Caster Aiming at Cart with Low Crashes/Vibrations, Proc. of ICDES2014, pp.63-68 (2014)

金型磨きの自動化に応用する制御に関する研究

メカニクス系工学専攻 教授 小坂 学

1. はじめに

金型磨きロボットには位置と力の繊細な制御が必要である。そのためには、制御系の安定性を判別しておく必要がある。そのための有力な方法としてナイキストの安定判別法がある。

ナイキストの安定判別法の証明は、当初は複素関数論の Cauchy の定理に基づいてなされた 1)。その後、整理され、よりシンプルになった 2)。これらの証明では、ラプラス変換の複素変数 s が右半平面を囲む閉曲線に沿って時計回りに動くことを前提としている。しかし、ナイキスト軌跡は s の大きさが ∞ のときに一定値になるので、 s が左半平面を囲む閉曲線に沿ったとしても同じ軌跡になる。つまり、 s が右半平面を囲む閉曲線に沿ったことを、ナイキスト軌跡から見出すことができない。証明としてはそれで問題ないが、この右半平面に限定した前提を省くことができれば、この不自然さを回避できる。そこで、この前提が不要な新しい証明を行う。

2. 提案する簡単なナイキストの安定判別の証明

線形時不変な 1 入出力系のプロパーな開ループ伝達関数 $L(s)$ の分子分母多項式をそれぞれ $L_n(s)$; $L_d(s)$ とおく。 $L(\infty) \neq -1$ とする。 $1 + L(s)$ と閉ループ伝達関数 $G_{cl}(s)$ はそれぞれ次式で与えられる。

$$1 + L(s) = 1 + L_n(s)/L_d(s) = (L_d(s) + L_n(s))/L_d(s) \quad (1)$$

$$G_{cl}(s) = L(s)/(1 + L(s)) = L_n(s)/(L_d(s) + L_n(s)) \quad (2)$$

(1), (2) 式より、 $G_{cl}(s)$ の不安定な極の数 n_{cl} は $1 + L(s)$ の不安定な零点の数に等しく、 $L(s)$ の不安定な極の数 n_{op} は $1 + L(s)$ の不安定な極の数に等しい。ナイキストの安定判別法では $1 + L(s)$ が原点を時計回りに回る回数 n が、

$$n = n_{cl} - n_{op} \quad (3)$$

の関係をもつことを利用して、 $L(s)$ の不安定な極の数 n_{op} と安定限界な極とその重複度が既知のときに $G_{cl}(s)$ が安定かどうかを判別する。

$L(s)$ がプロパーで $L(\infty) \neq -1$ なので、(1) 式より、 $1 + L(s)$ の分子分母の多項式の次数はどちらも $L_d(s)$ の次数 N と等しい。 $1 + L(s)$ の分子分母を因数分解する。

$$1 + L(s) = k (s - p_{cl1})(s - p_{cl2}) \cdots (s - p_{clN}) / ((s - p_{op1})(s - p_{op2}) \cdots (s - p_{opN})) \quad (4)$$

ここで k は実数定数、 p_{cl1}, p_{cl2}, \dots は $G_{cl}(s)$ の極、 p_{op1}, p_{op2}, \dots は $L(s)$ の極である。

i) $1 + L(s)$ が虚軸上に極と零点をもたないとき

まず、 s が虚軸上のみを動く場合にも $1 + L(s)$ のナイキスト軌跡が閉曲線になることを示す。(4) 式より、 s の大きさが ∞ のとき、 $1 + L(s)$ は定数 k となる。ゆえに、 s が右半平面を囲む閉曲線に沿って動く場合と、 s が虚軸上のみを動く場合の軌跡は一致する。 $1 + L(s)$ の s による微分を考える。 $L_d(s)$ と $L_n(s)$ は s の多項式なので、 s の大きさが ∞ でなければ微分値が ∞ になるのは $L_d(s) = 0$ のときだけである。よって、 $1 + L(s)$ が虚軸上に極をもたないとき、ナイキスト軌跡 $1 + L(s)$ は不連続にならないので閉曲線になる。 $1 + L(s)$ が虚軸上に零点をもたないとき、軌跡はゼロにならない。このとき軌跡が原点を通らないので閉曲線の原点回りの回転数を定義できる。

つぎに(3) 式を証明する。複素数 z_1, z_2 について $\angle(z_1 z_2) = \angle z_1 + \angle z_2$, $\angle(z_1^{-1}) = -\angle z_1$ が成り立

つので、(4) 式に $s = j\omega$ を代入すると、

$$\begin{aligned} \angle(1 + L(j\omega)) = & \angle k + \angle(j\omega - p_{cl1}) + \cdots + \angle(j\omega - p_{clN}) \\ & - \angle(j\omega - p_{op1}) - \cdots - \angle(j\omega - p_{opN}) \end{aligned} \quad (5)$$

が成り立つ。 $\angle k = \tan^{-1} \text{Im}[k] / \text{Re}[k]$ は一定値であり、

$$\angle(j\omega - p) = \tan^{-1} \text{Im}[j\omega - p] / \text{Re}[j\omega - p] = \tan^{-1} (\omega - \text{Im}[p]) / (-\text{Re}[p]) \quad (6)$$

である。 $p (= p_{cl1})$ が安定な極 ($\text{Re}[p_{cl1}] < 0$) のとき、 $(j\omega - p_{cl1})$ の ω が $-\infty$ から ∞ まで変化したときのベクトル軌跡の位相を考える。 $\text{Re}[p_{cl1}] < 0$ なので、(6) 式の分母はプラスの定数になる。まず、 $\omega = -\infty$ のとき、(6) 式より位相は -90° である。 ω が大きくなって $\omega = \text{Im}[p_{cl1}]$ になったとき、位相は 0° となる。 ω がさらに大きくなって $\omega = +\infty$ になったとき、位相は $+90^\circ$ となる。つまり、位相は $-90 \rightarrow 0 \rightarrow +90^\circ$ と反時計回りに 0.5 回転する。 $p (= p_{cl2})$ が不安定な極 ($\text{Re}[p_{cl2}] > 0$) のとき、同じようにして、位相は $-90 \rightarrow -180 \rightarrow -270^\circ$ と時計回りに 0.5 回転する。まとめると

1) 安定 ($\text{Re}[p_{cl1}] < 0$) のとき、 $(s - p_{cl1})$ の位相 $\angle(j\omega - p_{cl1})$ は、反時計回りに 0.5 回転する。

2) 不安定 ($\text{Re}[p_{cl2}] > 0$) のとき、 $(s - p_{cl2})$ の位相 $\angle(j\omega - p_{cl2})$ は、時計回りに 0.5 回転する。

閉ループの極 $p_{cl1}; p_{cl2} \cdots$ は N 個あり、そのうち n_{cl} 個が不安定なので、 $N - n_{cl}$ 個は安定である。よって次の関係が導かれる。

R1) $(s - p_{cl1})(s - p_{cl2}) \cdots (s - p_{clN})$ の位相は、反時計回りに $0.5(N - n_{cl})$ 回転し、時計回りに $0.5n_{cl}$ 回転する。つまり時計回りに $-0.5(N - n_{cl}) + 0.5n_{cl} = -0.5N + n_{cl}$ 回転する。

次に $(s - p_{op1})(s - p_{op2}) \cdots (s - p_{opN})$ の位相を考える。(5) 式より、位相にマイナスの符号が付いているので軌跡が原点を回る方向が逆になる。これを R1) に当てはめて回転する数にマイナスを付けると、次の関係が導かれる。

R2) $(s - p_{op1})(s - p_{op2}) \cdots (s - p_{opN})$ の位相は、反時計回りに $-0.5(N - n_{op})$ 回転し、時計回りに $-0.5n_{op}$ 回転する。つまり時計回りに $0.5(N - n_{op}) - 0.5n_{op} = 0.5N - n_{op}$ 回転する。R1) と R2) より、(5) 式から、 ω を $-\infty$ から ∞ まで変化させたとき、

$$n = (-0.5N + n_{cl}) + (0.5N - n_{op}) = n_{cl} - n_{op} \quad (7)$$

が成り立ち、(3) 式が証明される。

3. まとめ

s が右半平面を囲う前提を用いない、新しいナイキストの安定判別法の証明を示した。本証明法は、金型磨きロボットの制御設計の一助となる。

参考文献

- [1] Hendrik W. Bode, Network Analysis and Feedback Amplifier Design, Van Nostrand, pp. 137-169 (1945)
- [2] 杉江俊治, 藤田政之, フィードバック制御入門, コロナ社(1999)
- [3] Manabu Kosaka, Simple proof of Nyquist's Criterion for Stability, International Journal of Control Theory and Applications, Vol.6, No.1, pp. 29-33 (2013)
- [4] 小坂 学, s が右半平面を囲うことを前提としないナイキストの安定判別法の証明, 計測自動制御学会論文集, Vol.49, No.4, pp. 497-498 (2013)

金型人材育成のための制御工学の教科書執筆

メカニクス系工学専攻 教授 小坂 学

1. はじめに

金型産業では機械工学に関するさまざまな技術が必要である。そのため、金型人材を育成するためには、理解しやすく現場で役立つ事例を豊富にそろえた教科書が望ましい。そこで、高校数学でマスターできる教科書を執筆する。

2. 内容

制御工学でなにができるのか？ そのためになにをすればよいのか？ その手順・方法は？ 制約は？ その答えは本書の【わかる編】にある。つまり、制御工学の使い方がわかるマニュアルである。このマニュアルがあれば、とりあえず制御工学を使うことはできる。しかし、しっかり納得するためには理論的裏付けが必要である。理論的裏付けは【ナットク編】でしっかり説明している。この説明は高校の数学で理解できる。さらに、実際の制御工学の応用例が【役立つ編】にある。そこでは現場の泥臭い制御設計をシミュレーションで実感できる。つまり、本書はつぎの3編に分かれてる。

- (1) わかる編：制御でできること・やりたいこと・解析設計手順と方法のマニュアル
- (2) ナットク編：高校の数学で理解できる、マニュアルの理論的裏付け
- (3) 役立つ編：マニュアルに沿った設計例 (MATLAB を利用)

これら3編を通して、制御工学をしっかりと自分のものにできる。筆者は、企業の制御技術者として10年間、大学の制御工学の教員として10年以上の間、制御工学の研究と教育を続けている。この経験を生かして、わかりやすく、納得でき、そして企業の現場で役立つことを目指して本書を執筆した。高校の数学の知識で制御工学を理解できるように工夫し、懇切丁寧な説明を心がけた。式番号や図番号を参照するときは、その式や図が載っているページ番号も並記している。企業の現場で役立っている事例を示しながら、実際のモノのイメージが頭に浮かび、物理的な意味を把握できるようにしっかり制御工学を説明している。

実際の制御系設計では多くの場合、MATLAB (マトラブと読む) という制御系 CAD ソフトが使われている。本書でも MATLAB の使い方を紹介する。MATLAB に似たフリーソフトとして、SCILAB (サイラブと読む) がある。これに Mat@Scilab (マト・アト・サイラブと読む) というフリーソフトを組み合わせると、MATLAB の多くの関数を無料で実行できる。本書では、これも活用して実際にシミュレーションを行い、制御を実感できるようにしている。

3. まとめ

高校数学でマスターできる教科書を執筆した。本書は、理解しやすく現場で役立つ事例を豊富にそろえているため、金型人材を育成する教育に適する。

参考文献

- [1] 小坂 学, 高校数学でマスターする制御工学 - 本質の理解から Mat@Scilab による実践まで -, コロナ社, 全 240 頁 (2012 年)

金型人材育成のための電気回路の教科書執筆

メカニクス系工学専攻 教授 小坂 学

1. はじめに

金型産業では機械工学に関するさまざまな技術が必要である。そのため、金型人材を育成するためには、理解しやすく現場で役立つ事例を豊富にそろえた教科書が望ましい。そこで、高校数学でマスターできる教科書を執筆する。

2. 内容

電気回路は、照明や冷蔵庫などの家電製品だけでなく、携帯電話などの通信機器、パソコンなどの情報機器、体温計などの計測器、さらにはロボットや自動車など、多くのところで使われている。ここで、もしも停電が続いたらどうなるか想像してみてください。電灯が点かないので、夜は暗くなり、エアコンはもちろん、食べ物も冷蔵保存ができなくなる。これでは途方に暮れてしまう。私たちの現在の快適な生活は、電気回路によって支えられているとさえいえる。そんな電気回路は一体どのような仕組みになっているのか。本書は電気回路の仕組みがしっかりと理解できるよう、つぎの3編に分かれている。

- (1) 【わかる編】
- (2) 【ナットク編】
- (3) 【役立つ編】

【わかる編】では、電気回路の解析方法と設計方法を説明する。電気は機械と違い、目に見えないのでイメージしづらいのが欠点である。そこで、電気を水の流れてイメージして、その物理法則をしっかりと実感できるようにしている。

【ナットク編】では、わかる編でわかったことをしっかり納得するために、その理論的裏づけを行う。高校数学の知識で理解できるように丁寧に解説している。

【役立つ編】では、電気回路の実例と応用例を紹介する。身の回りで電気回路が実際に役立っていることを実感できるように説明している。

筆者は、企業のメカトロニクス技術者として10年間、大学の電気回路の教員として10年以上の間、電気回路に関係する研究と教育を続けている。この経験に基づいて、高校数学の知識で電気回路をマスターできるようにしている。

3. まとめ

高校数学でマスターできる教科書を執筆した。本書は、理解しやすく現場で役立つ事例を豊富にそろえているため、金型人材を育成する教育に適する。

参考文献

[1] 小坂 学, 高校数学でマスターする電気回路 - 水の流れて電気を実感 -, コロナ社, 全192頁 (2015年)

金型人材育成のためのモータの教科書執筆

メカニクス系工学専攻 教授 小坂 学

1. はじめに

金型産業では機械工学に関するさまざまな技術が必要である。そのため、金型人材を育成するためには、理解しやすく現場で役立つ事例を豊富にそろえた教科書が望ましい。そこで、安価で便利な mbed マイコンでモータ制御の実験ができるための教科書を執筆する。

2. 内容

本書では、各種モータを制御するためのマイコンの設計法およびそのプログラム例について詳細に説明する。取り扱うモータは、ブラシ付き DC モータ、ステッピングモータ、ブラシレス同期モータ、誘導モータである。ブラシレス同期モータ (SPM モータ, IPM モータ, シンクロナスリラクタンスモータ) は、近年の省エネ化と高効率化の要求にマッチしていることからその用途をエアコンや電気自動車などに広げているので、とくに詳しく説明する。本書が対象とする読者は開発設計のエンジニアであり、大学を卒業して企業の現場に配属された人や、異動により新しい現場に赴任された人が早急に現場技術について学べるように、現場で実際に活用できる基礎から応用・事例などを盛り込んだ。本書は次の三編に分かれている。

1. 「理論編」(各種モータの動作原理と制御理論を理解)
2. 「シミュレーション編」(MATLAB シミュレーションによるモータ制御の実感)
3. 「マイコン設計編」(mbed マイコンによる実際の設計の実例の把握)

これら三編を通して、モータ制御のマイコン設計法をしっかりと自分のものにできる。筆者は、企業のモータ制御技術者として 10 年間、大学のモータ制御の教員として 10 年以上の間、モータ制御の研究と教育を続けている。この経験を生かして、わかりやすく、納得でき、そして企業の現場で役立つことを目指して本書を執筆した。内容は、企業の現場で役だっているものに厳選し、実例を示しながら実際のモノのイメージが頭に浮かび、物理的な意味を把握できるようにしっかりとモータ制御を説明している。

実際の制御系設計では多くの場合、MATLAB (マトラブと読む) という制御系 CAD ソフトが使われている。本書でも MATLAB の使い方を紹介する。MATLAB に似たフリーソフトとして SCILAB (サイラブと読む) がある。これに “Mat@Scilab” (マトアトサイラブと読む) というフリーソフトを組み合わせると、MATLAB の多くの関数を無料で実行して学ぶことができる。本書ではこれも活用してシミュレーションを実際に行い、モータ制御を実感できるようにしている。

さらに mbed マイコンによる実際の設計の実例を示し、しっかりとマイコンによるモータ制御設計をマスターできるようにしている。

3. まとめ

安価で便利な mbed マイコンでモータ制御の実験ができるための教科書を執筆した。本書は、理解しやすく現場で役立つ事例を豊富にそろえているため、金型人材を育成する教育に適する。

参考文献

- [1] 小坂 学, mbed マイコンによるモータ制御設計法, 科学技術出版, 全 190 頁 (2013)

金型磨きロボットの開発

メカニクス系工学専攻 教授 原田 孝

1. 緒言

金型磨き作業は、棒状の砥石を 20~30N の力でワークに押し当てて、ワーク面上を 10m/min 程度の速度で往復送り運動させる。高度な熟練を要するだけでなく、最大 50N の大きな押し付け力で高速に数百回の往復送り運動を人間の手によって行う重負荷作業であり、自動化に対するニーズは高い^[1]。これまでに、多関節ロボット先端に磨き用工具を装着し、力制御を実装して磨き作業を自動化する研究が行われてきた^[2]。これらの研究では、回転砥石を用いた低速送り運動による磨きの自動化が試みられているのみであり、棒状砥石の高速往復運動による金型磨きロボットの研究事例は殆んどない。近年、位置制御を行う DELTA 型ロボットが、高速なピック-アンド-プレース用として数多く開発されている。最近では、ダイレクトドライブモータ(以下、DD モータと略す)を搭載して DD モータのトルク制御によりロボットの力制御を行う DELTA(HEXA)型ロボットの研究事例が報告されている^[3]。DD モータはバックドライブバビリティを有するのでダイレクトティーチングに適する一方で、減速機付きモータに比較して推力が小さいだけでなく、モータに存在するコギングトルクが直接ロボット手先の力リップルに反映される。磨き作業のように数十 N の大きな押し付け力で精密に力制御を行う DD モータ駆動パラレルロボットの研究事例はない。

本研究では、数十 N の押し付け力で安定して精密に力制御を実現し、10m/min を超える高速往復送り運動にて金型磨きを行うパラレルロボットの開発を目的とする。コギングトルクが極めて小さいスロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型ロボットを試作し、金型磨き動作を実現した。

2. 金型磨きロボットの設計

2.1 冗長駆動 DELTA 型ロボット

DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型ロボットに関する研究事例が報告されているが、これらは冗長駆動による高推力を利用して高加速度性能を実現することを目指したものである^[4]。本研究では、新たに高推力で精密な力制御を対象として冗長駆動 DELTA 型ロボットを提案する。冗長駆動はメカニズムや制御が複雑となるが、推力が小さいコアレスモータの推力不足を補うとともに、特異姿勢回避、機構剛性の向上や対偶部に存在するガタ除去のための内力制御が可能などの優位性を有する。

2.2 アクチュエータ

スロットレス DD モータの中で、トルクが大きい新明和工業社製 BCL09-25 を採用した。BCL09-25 はビルトインタイプのモータであり、図 1 に示すように、ハウジング、回転軸を独自に設計し、RENISHAW 社製ロータリエンコーダと共にハウジングに組み込んだ。1 組 2 個の深溝玉軸受にて回転軸を低摺動抵抗で支え、ベアリングに適度な与圧を与えてク

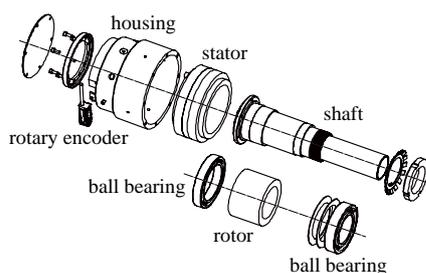


Fig.1 Exploded diagram of the actuator Fig.2 Prototype of the actuator

リアランスを除去する設計とした。試作したアクチュエータを図2に示す。

2.3 ロボット推力の向上

スロットレス DD モータは発生トルクが小さいために、空間3自由度を4組のモータリンク機構にて冗長駆動しムービングプレート上の推力不足を補った。ロボットは局所的に100mm²程度の領域を磨き、これ以上のサイズの磨き面はワーク本体を移動させる機構を併用することとし、動作領域を140mm程度のXY平面(Z方向40mm)と限定し、アームを短く設計してロボットの推力向上を図った^[5]。試作したロボットの外観写真と仕様を図5および表1に示す。

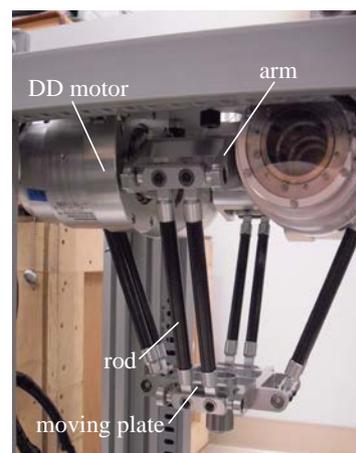


Fig.3 Prototype of the mold polishing robot

3. 設計検証

冗長駆動 DELTA 型ロボットの運動学およびヤコビ行列などの計算式^[6]を用いて、表2に示す試作機の定格速度と定格推力の計算根拠を示す。試作機の動作範囲を $x=y=\pm 70\text{mm}$, $z=160\text{mm}\sim 200\text{mm}$ と設定し, $x=y=0\text{mm}$, $z=180\text{mm}$ を試作機の基準位置とした。この基準位置において表1に示すモータの定格速度範囲内で x 方向に発生できる最大速度を試作機の定格速度として計算した。

Table 1 Specifications of the robot

length of arm	50 mm
length of rod	200 mm
rated force (Z)	20N
rated speed (XY)	60 m/min
work space (X×Y×Z)	140×140×40mm

基準姿勢において手先速度を $\dot{x}=[60,0,0]^T$ (m/min) とすると, 各関節速度は $\dot{\theta}=[-87.8,0,-87.8,0]^T$ (min^{-1}) となり定格速度範囲内で手先を x 方向に 60m/min の速度で移動できる。

基準位置において, 全てのアクチュエータに定格トルク値を $\tau=[0.53,0.53,0.53,0.53]^T$ (Nm) と与えると, 手先発生力は $f_x=[0,0,43.1]^T$ (N) となる。基準位置においては定格トルクの範囲内で z 方向に 43.1N の押し付け力を与えることができる。実際の磨き作業では, xy 方向に研磨抵抗が加わるため研磨作業として与えられる押し付け力はこれよりも小さな値になる, x 方向の研磨抵抗を z 方向の押し付け力の 25% 程度とした時に, $f_x=[5,0,20]^T$ (N) を与えるモータのトルクは $\tau=[0.03,0.24,0.52,0.24]^T$ (Nm) となり定格トルクの範囲内である。この時の z 方向の発生力 20N を表1に定格力として表記した。 z 方向の押し付け力にはロボット機構の自重も加わるので, 金型磨きの研究で報告されている 20~30N の押し付け力を与えることができる。さらにムービングプレートに錘を付加することで押し付け力を補い, 最大 50N の押し付け力を与えることも可能である。また, 本ロボットは手磨き(10m/min)よりも高速な往復運動(60m/min)を実現しうるので, 研磨工具の往復送り運動速度を大きくして相対的に小さな押し付け力で効率と品質が良い研磨加工を行わせることも可能である。

4. 周辺装置

金型磨きを行うために力センサを搭載したスティック砥石把持機構と, ワークの姿勢を変化させるためのスチュワートプラットフォーム型パラレルメカニズム, およびワークを回転させるためのロータリーテーブルを整備した。周辺装置を整備した金型磨きロボットシステムを図4に示す。

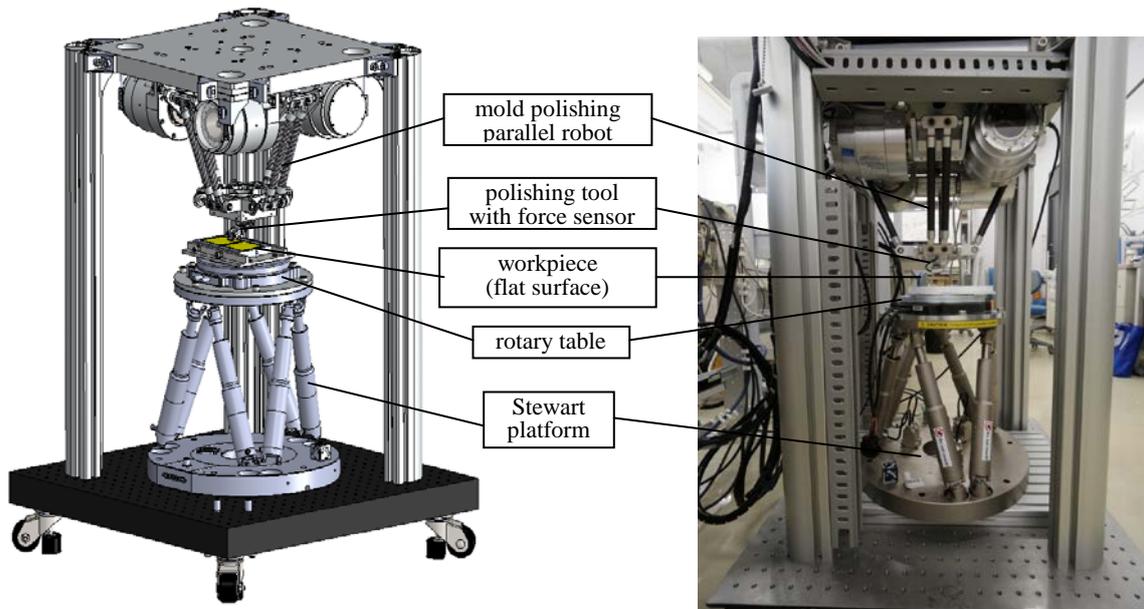


Fig.4 Mold polishing robot system

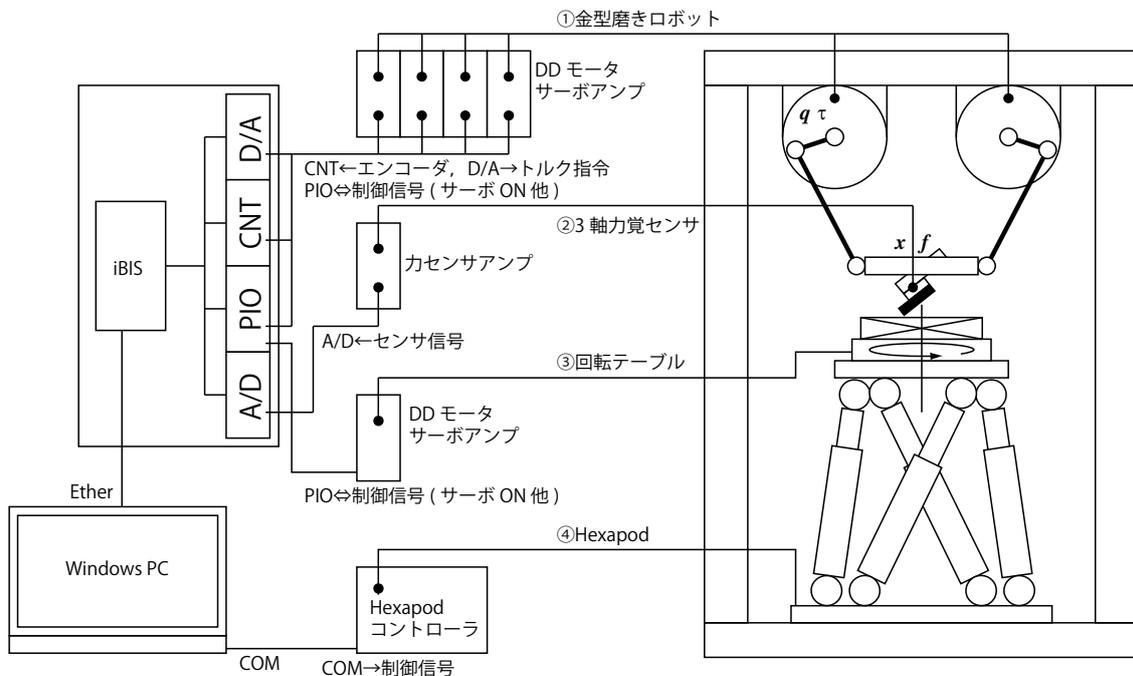


Fig.5 Control system of the mold polishing robot

5. 制御装置と制御則

制御装置には D/A コンバータ, A/D コンバータ, PIO, エンコーダカウンタを搭載した MTT 社製 iBIS を用いた. iBIS 用のソフトウェアは Simulink を用いたモデルベース設計を行った. iBIS はリアルタイムで上位のホストコンピュータとデータ通信が可能であり, 金型磨きロボットの制御パラメータの変更や, ロボットの位置・速度・加速度と磨き力をリアルタイム表示・保存を可能とした. 制御装置全体の模式図を図 5 に示す. 制御則は力指令型のインピーダンス制御を実装し, 手先のインピーダンスを設定し安定した磨き作業を行わせる事が出来るようにした. 手先のインピーダンスはホストコンピュータからリアルタイムに設定変更を可能とした.

6. 金型磨き実験

平面のワークに対して、磨き速度 10m/min, 20m/min で金型磨き実験を行った。様子を図 6 に示す。なお、金型磨きロボットによる磨き作業の動画は、<https://www.youtube.com/watch?v=3AcZ6QRy3RI> にアップロードしている。

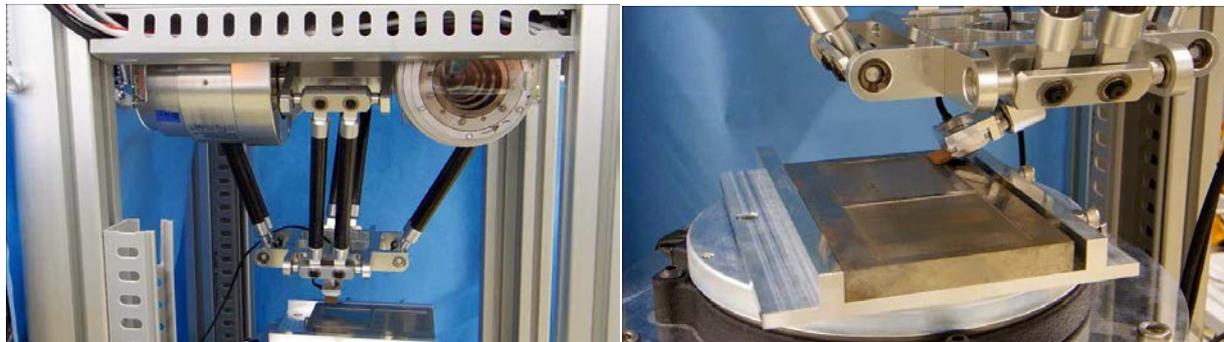


Fig 6 Mold polishing by the developed robot system

7. 結 言

金型磨き作業を自動化する目的で、スロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型ロボットを試作し、高精度な力制御と高速化のための機械設計の考え方を示した。

ロボットの運動学式よりモータとロボット手先部の速度・力関係を計算し、金型磨きに必要とされる押し付け力と往復運動速度を発生しうることを数値計算にて示した。

インピーダンス制御を実装し、熟練作業者と同等磨き速度である 10m/min およびその倍の 20m/min にて安定した金型磨き動作を実現できることを検証した。

参 考 文 献

- [1] 三好隆志, “熟練技能の技術化・コンピュータ化—金型自動磨き作業を例に—”, 計測と制御, 37-7 (1998), pp. 459-464.
- [2] 永田寅臣ほか, “ボールエンド砥石のためのハイブリッド・モーション/力制御法の開発とペットボトル金型の磨きロボットへの適用実験”, 精密工学会誌, 70-1 (2004), pp. 59-64.
- [3] 藤原茂喜, 高野健, 末藤伸幸, “パラレルリンクロボットによる生産革新”, パナソニック技報, 58-4, (2013), pp. 39-44.
- [4] Corbel, D., Gouttefarde, M., Company, O., and Pierrot, F., “Towards 100G with PKM. Is actuation redundancy a good solution for pick-and-place?”, *Proc. IEEE ICRA*, (2010), pp. 4675 - 4682.
- [5] 原田 孝, 志賀裕之, “パラレルメカニズムを用いた金型磨きロボットの開発”, 精密工学会 2014 年度関西地方定期学術講演会論文集, (2014), pp. 72-73.
- [6] 原田 孝ほか, “スロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型パラレルロボットの開発”, 日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集(CD-R), (2013), S115011, 5 pages.

金型磨きロボットに応用する冗長駆動パラレルロボットの機構特性

メカニクス系工学専攻 教授 原田 孝

1. 緒言

冗長駆動パラレルロボットでは、転置ヤコビ行列の零空間を用いて出力節で発生する力に影響を及ぼさないアクチュエータ力を内力として加えることが出来る。この内力を利用して機構全体の剛性を大きくしたり、対偶に与圧を加えてガタを取り除くなどの研究が行われている^{[1][2]}。内力を計算するためには転置ヤコビ行列の零空間を求める必要がある。転置ヤコビ行列の零空間は特異値分解を用いた数値計算が一般的であるが、数値計算では機構の特性を構造的にとらえることができない。本報では冗長駆動パラレルロボットにおいて、転置ヤコビ行列の零空間の基底行列をクラメル公式を用いて数式的に解く方法を提案する。これにより、冗長駆動パラレルロボットの機構特性を数式的に解析することが可能である。出力節が空間3自由度を有する冗長駆動 DELTA ロボットの転置ヤコビ行列の特徴を利用して、零空間の基底行列を用いた内力の数式計算例を示す。

2. 冗長駆動パラレルロボットの転置ヤコビ行列と内力

パラレルロボットの出力節が動作する空間の自由度を n 、アクチュエータの数を m とする。冗長駆動パラレルロボットでは $m > n$ である。 $\rho = (m - n)$ を冗長度として定義する。出力節の変位と力を $n \times 1$ 列ベクトルである \mathbf{x} および \mathbf{f}_x 、アクチュエータの変位と力を $m \times 1$ 列ベクトルである \mathbf{q} および \mathbf{f}_q とする。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x_1 \ \cdots \ x_n]^T, \mathbf{f}_x = [f_{x1} \ \cdots \ f_{xn}]^T \\ \mathbf{q} &= [q_1 \ \cdots \ q_m]^T, \mathbf{f}_q = [f_{q1} \ \cdots \ f_{qm}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

速度および力のキネトスタティックな関係式^[3]は、

$$\mathbf{J}_x \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_q \dot{\mathbf{q}} \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = (\mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_x) \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J} \dot{\mathbf{x}} \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_x = \mathbf{J}^T \mathbf{f}_q \quad (4)$$

となる。 \mathbf{J}_x は $n \times m$ 、 \mathbf{J}_q は $m \times m$ 、 \mathbf{J}^T は $n \times m$ の転置ヤコビ行列である。式(4)を \mathbf{f}_q について解くと、

$$\mathbf{f}_q = (\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{f}_x + \mathbf{H} \boldsymbol{\sigma} \quad (5)$$

となる。 $(\mathbf{J}^T)^+$ は \mathbf{J}^T の擬似逆行列、 \mathbf{H} は \mathbf{J}^T の零空間を与える $m \times \rho$ の射影行列であり、

$$\mathbf{J}^T \mathbf{H} = \mathbf{0} \quad (6)$$

の関係を満たす。 $\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1, \dots, \sigma_\rho]^T$ は $\rho \times 1$ の任意の列ベクトルである。式(5)の右辺第2項 $\mathbf{H} \boldsymbol{\sigma}$ が冗長駆動パラレルロボットの内力となり、式(5)を式(4)に代入すると、式(7)のように内力成分は出力節の外力に影響を及ぼさない。

$$\mathbf{f}_x = \mathbf{J}^T ((\mathbf{J}^T)^+ \mathbf{f}_x + \mathbf{H} \boldsymbol{\sigma}) = \mathbf{f}_x + \mathbf{J}^T \mathbf{H} \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{f}_x \quad (7)$$

3. 冗長駆動パラレルロボット内力の数式計算

出力節が空間3自由度を並進運動し($n=3$)、 m 個のアクチュエータで冗長駆動される冗長駆動 DELTA

ロボットを事例として内力の数式計算方法を示す。冗長駆動 DELTA ロボットのヤコビ行列は、

$$\mathbf{J}_x = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \\ \vdots \\ \mathbf{v}_m^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{1x} & v_{1y} & v_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{mx} & v_{my} & v_{mz} \end{bmatrix}, \mathbf{J}_q = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^T \mathbf{a}_1 & & \mathbf{0} \\ & \ddots & \\ \mathbf{0} & & \mathbf{v}_m^T \mathbf{a}_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

で与えられる。\$\mathbf{v}_i\$ はロッドの単位方向ベクトル、\$\mathbf{a}_i\$ はアーム方向に直交する単位方向ベクトルである。式(8)は図1に示すようなアクチュエータとして回転するモータを用いた DELTA ロボットのヤコビ行列である。転置ヤコビ行列 \$\mathbf{J}^T\$ は、

$$\mathbf{J}^T = (\mathbf{J}_q^{-1} \mathbf{J}_x)^T = \mathbf{J}_x^T (\mathbf{J}_q^{-1})^T = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1 & \dots & \mathbf{v}_m \\ \mathbf{v}_1^T \mathbf{a}_1 & \dots & \mathbf{v}_m^T \mathbf{a}_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

となる。クラメルの公式を用いて冗長駆動 DELTA ロボットの転置ヤコビ行列の零空間を与える基底行列 \$\mathbf{H}\$ は、

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{v}_1^T \mathbf{a}_1}{\mathbf{v}_4^T \mathbf{a}_4} \det([\mathbf{v}_4 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3]) & \dots & \frac{\mathbf{v}_1^T \mathbf{a}_1}{\mathbf{v}_m^T \mathbf{a}_m} \det([\mathbf{v}_m \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3]) \\ \frac{\mathbf{v}_2^T \mathbf{a}_2}{\mathbf{v}_4^T \mathbf{a}_4} \det([\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_4 \ \mathbf{v}_3]) & \dots & \frac{\mathbf{v}_2^T \mathbf{a}_2}{\mathbf{v}_m^T \mathbf{a}_m} \det([\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_m \ \mathbf{v}_3]) \\ \frac{\mathbf{v}_3^T \mathbf{a}_3}{\mathbf{v}_4^T \mathbf{a}_4} \det([\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_4]) & \dots & \frac{\mathbf{v}_3^T \mathbf{a}_3}{\mathbf{v}_m^T \mathbf{a}_m} \det([\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_m]) \\ -\det([\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3]) & \dots & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -\det([\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3]) \end{bmatrix} \quad (10)$$

となる^[4]。式(5)の右辺第二項の \$\mathbf{H}\boldsymbol{\sigma}\$ はアクチュエータ力の内力成分である。この力を出力節の対偶に加わるロッド方向の内力 \$f_{vi}\$ へ変換する。ロッドとアームの接点の力のつり合い式は以下ようになる。

$$f_{qi} \mathbf{a}_i + f_{mi} \mathbf{m}_i + f_{ni} \mathbf{n}_i + f_{vi} \mathbf{v}_i = \mathbf{0} \quad (11)$$

\$\mathbf{m}_i, \mathbf{n}_i\$ は \$\mathbf{a}_i\$ と直交する接点の拘束力方向ベクトルである。\$\mathbf{a}_i\$ との内積を計算し、ロッド方向内力を得る。

$$f_{ci} \mathbf{a}_i^T \mathbf{a}_i + f_{mi} \mathbf{a}_i^T \mathbf{m}_i + f_{ni} \mathbf{a}_i^T \mathbf{n}_i + f_{vi} \mathbf{a}_i^T \mathbf{v}_i = f_{ci} + f_{vi} \mathbf{a}_i^T \mathbf{v}_i = 0$$

$$f_{vi} = \frac{-1}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{v}_i} f_{ci} \quad (12)$$

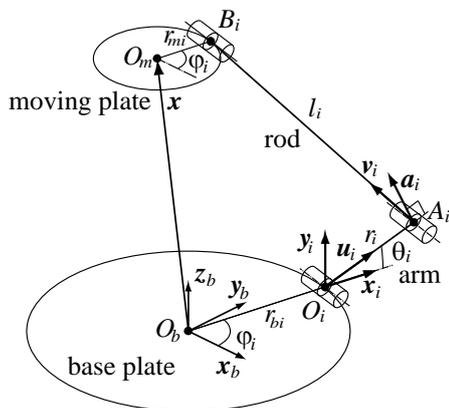


Fig.1 Kinematic model of DELAT robot

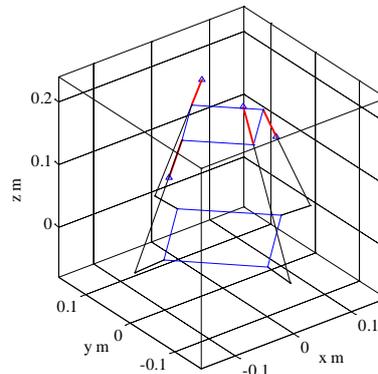


Fig.2 Internal axial forces

以上より，出力節に加わる内力の数式解法として，

$$\begin{bmatrix} f_{v1} \\ f_{v2} \\ f_{v3} \\ f_{v4} \\ \vdots \\ \vdots \\ f_{vm} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \det(\mathbf{v}_4 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3) & \cdots & \det(\mathbf{v}_m \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3) \\ \det(\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_4 \ \mathbf{v}_3) & \cdots & \det(\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_m \ \mathbf{v}_3) \\ \det(\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_4) & \cdots & \det(\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_m) \\ -\det(\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3) & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & -\det(\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \mathbf{v}_3) \end{bmatrix} \boldsymbol{\sigma} \quad (13)$$

を導出した． $\boldsymbol{\sigma}$ は内力を与える $\rho \times 1$ の任意の列ベクトルである．式(13)に示すように，出力節の内力に関する転置ヤコビ行列の零空間の基底行列 \mathbf{H} は，3本のロッドの方向ベクトルを列ベクトルとする行列の行列式を要素する簡単な形式で表現されることがわかる．

4. 数値計算

$\sigma=10\text{N}$ と設定した時のロボットの内力を計算した結果を図 2 に示す^[3]．内力をロッド軸力に換算し，ロッドとムービングプレートとの対偶点 B_i を起点として図示している．軸力の総和はゼロとなり，外力に影響を及ぼさない．数値計算により正しく内力を計算していることを確認した．

5. 結 言

冗長駆動パラレルロボットにおいて，転置ヤコビ行列の零空間の基底行列を数式的に解いて出力節に加わる内力を導出する方法を提案した．提案した内力の計算方法は金型磨きロボットの制御に実装している．

参 考 文 献

- [1] Adli, M. A., Nagai, K., Miyataka, K., and Hanafusa, H., "Internal force analysis and its applications in parallel manipulators", *Proceedings of 1990 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*, vol. 1, (1990), pp. 69-72.
- [2] 三谷 篤史, 秋下 貞夫, "4 関節型平面パラレルメカニズムの冗長駆動による内力を利用した速度/加速度", *機論 C*, 69(683), (2003), pp.1843-1850
- [3] 原田 孝ほか, "スロットレス DD モータを用いた冗長駆動 DELTA 型パラレルロボットの開発", *日本機械学会 2013 年度年次大会講演論文集(CD-R)*, (2013), S115011, 5 pages.
- [4] 原田 孝, "冗長駆動パラレルロボット内力の数式計算方法", *日本機械学会 2014 年度年次大会講演論文集(CD-R)*, (2014), S1120103, 5 pages.

5 軸加工機を用いた立体カム面の形状創成

メカニクス系工学専攻 教授 原田 孝
理工学部機械工学科 学生 牧野 達

1. 緒言

射出成形製品のアンダーカット対応として直線すべり対偶であるスライド機構を応用したスライドコアが用いられることが多い。本研究では射出成形金型に曲線やネジなどの非直線すべり対偶を加工し、従来にないスライド動作により複雑なアンダーカットに対応することを目的とする。代表的な非直線すべり対偶として立体カム面に着目し、カム面の設計と5軸加工機を用いた形状創成を行った。

2. 曲面の加工方法

摺動面を切削加工する場合、ボールエンドミル先端の加工では切削面にカスプが発生し、後の磨き工程において問題が生じる。一方、エンドミル側刃を用いた加工では、加工面が限定されるという欠点が存在するが、エンドミル先端加工時に生じるカスプの問題を軽減できる^[1]。立体カム面は立体カムとカムフォロアの摺動面であると同時にエンドミル側刃で加工を行うことが可能な面である。本研究ではスワープ加工を用いて包絡面である摺動面を高精度高効率に加工することを目的とし、まずはローラーギアカムのカム面を形状創成理論を用いて設計し、5軸加工機で通常加工(ボールエンドミル先端の加工)まで実施した内容を報告する。

3. Mathematica と SolidWorks を用いた立体カム面の設計

カム面とは、カムフォロアがカム曲線に基づき移動した際に描かれるフォロア側面による包絡面と見なすことができる。そこでカムフォロアを工具と見なし形状創成理論^[2]を用いてカムフォロアの包絡面を示す座標群データを導出するソフトウェアを作成し、カム面を構成する曲線群上の点列データを導出した。包絡面を計算するソフトウェアは数値計算ソフト Mathematica を用いて作成した。今回導出したカム面は1回転で60°の割り出しを行う角度関係を有し、カムフォロア径が10mmであるローラーギアカム機構のカム面である。

導出した点列データを用いて3次元CAD SolidWorksでカム面のモデリングを行った。まず導出データよりカムフォロアの長軸方向に等分割したそれぞれの断面円によって描かれる包絡線の曲線束を作成した。その後、SolidWorks内の機能である「境界サーフェス」を用いて隣り合う曲線から曲面を作成し、その分割曲面をカム面とした。作成した曲線束を図1に、カム面を図2に示す

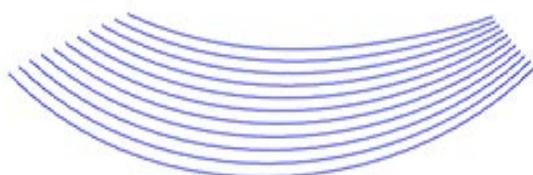


Fig.1 Curves on the cum surface



Fig.2 3D model

4. 5 軸加工機を用いた立体カム面の形状創成

C&G システムズの CAM TOOL を用いて設計したカム面モデルを加工する NC プログラムを作成した。加工工程を 6 つに分割し、第 1 工程から第 3 工程までは荒加工を行い、第 4 工程から第 6 工程までは仕上げ加工とした。荒加工工程では正面、背面、右側面から加工し、仕上げ加工工程では CAM TOOL の等高線仕上げを使用した。工具初期位置と工具逃げ量はそれぞれ一律(0, 0, 50), 50mm とした。加工方法の指定後に切削シミュレーションで工具経路の確認を行った。

CAM で作成された G コードに対して、第 1 工程と第 5 工程の最初に工具長測定(G65 P9602)を、第 4 工程と第 6 工程の最後に工具破損チェック(G65 P7015)をそれぞれ挿入した。また、1 工程ごとに一時停止プログラムを記入したサブプログラムを実施するメインプログラム(O1000)を作成した。

作成した G コードを用いて、加工工程ごとにワークの状態を確認しつつ、5 軸加工機で加工を行った。加工には安田工業の MICRO CENTER YMC-430 を用いた。加工面を確認するとボールエンドミル先端による切削加工特有のカスが確認できた。指の腹で触れて確かめてみるが、特に凹凸を感じなかった。しかし爪絵で引っかくように確認することで確かな凹凸を感じた。加工したカムを図 3 に、5 軸加工機による加工の様子を図 4 に示す。



Fig.3 Spatial cam

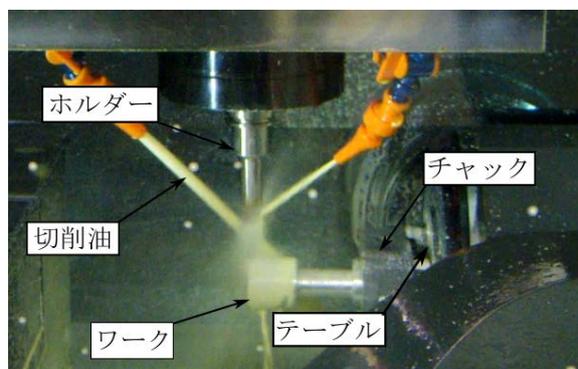


Fig.4 5 axes machine tools

4. 結 言

形状創成理論を用いて立体カム面の設計を行い、5 軸加工機で実加工を行った。複雑な曲面を設計加工する一連の手順が確立できた。今回はボールエンドミル先端を用いた加工を行ったためにカスが観察された。面精度の向上と加工時間短縮のために工具側面を用いた加工が有効である。最近の CAM の機能として、単純なルールド面を工具側刃で加工するスワープ加工が搭載されているが、立体カム面は単純なルールド面では無い。立体カム面を工具側刃で加工するために独自に CAM プログラムが今後の課題である。

参 考 文 献

- [1] 竹内芳美ほか, "側面切れ刃工具による 5 軸加工", 精密工学会誌, Vol. 60, No. 8 (1997), pp. 1164-1168
- [2] 稲崎一郎ほか, "工作機械の形状創成理論", 養賢堂, (1997), pp. 1-22
- [3] 牧野 達, 原田 孝, "スワープ加工を用いた立体カム面の形状創成", 日本機械学会関西学生会平成 26 年度学生員卒業研究発表講演会前刷集, (2015), 18-16.

型彫り放電加工実験を通じた金型人材育成事例

メカニクス系工学専攻 准教授 西藪 和明
研究支援者 蒲生 眞敏
研究支援者 平尾 幸雄

1. はじめに

近畿大学の「金型プロジェクト」で行われている研究開発の成果はプロジェクト終了後に、大阪東部地域の金属プレス・射出成形・鋳造の金型製造業や川下企業に還元し、地域に貢献することを目指しているが、加えて本学学生の人材教育に反映させる必要がある。本プロジェクトの終了後に金型の設計および製造に関する教育的な取り組みを行うことを予定していたが、導入した設備をより早く多くの学生に有効に活用するため本プロジェクトの2年目から教育に取り入れることにした。しかしながら、金型の設計や製造の実務を学部学生の講義や実習に取り入れることは技術的にも時間的にも困難であるため、金型の製造法の基礎を学生に理解してもらうことを目的にした。

現カリキュラムの中で実施できるように、機械工学科2年次の機械工学実験（週1回2コマ、約12名／班）の授業で、「型彫り放電加工実験」を新規テーマとして取り上げ、2年間実施してきた。本稿では、本実験テーマの内容についてまとめ、型彫り放電加工実験を通じた金型人材育成の事例を紹介する。

2. 型彫り放電加工実験の目的・内容

金型や工具などの高硬度・耐熱性の高い難削材の加工には、型彫り放電加工が多用されている。本実験では、型彫り放電加工により、2013年度は「学生個々の印鑑」、2014年度は「近大学園章のスタンプ」の作製を行い、金型の製造法において重要な加工法である型彫り放電加工の基礎的な加工原理や特徴等について理解することを目的とした。また、異なる条件で型彫り放電加工を行った際の加工面の表面粗さに及ぼす影響について調査させた。

本実験は、短時間（約3時間）で、「学生個々の印鑑」または加工条件の異なる「近大学章のスタンプ」を作製できるよう、下記の順に実施した。

- (1) CADソフトによる「印鑑の文字データ」「スタンプ」の形状データの作成（説明）
- (2) CAMソフトによる型彫り放電加工用電極の切削加工データの作成（説明）
- (3) 5軸マシニングセンタによる型彫り放電加工用電極の切削加工（説明）
- (4) 型彫り放電加工による「印鑑」「スタンプ」の作製（異なる加工条件での加工実験）
- (5) 作製した「印鑑」の試用、「スタンプ」の放電加工面の表面粗さ測定（放電加工条件の影響の調査）

3. CADソフトによる「印鑑の文字データ」「スタンプ」の形状データの作成

3. 1 「印鑑」の文字データの作成

図1に示すように、市販のCAD/CAMソフト（アンドール製、CAMCORE handy）を用いて、印鑑の外周・内周および文字入力を行い、文字データを作成した。外径10.5mm、内径9.2mmとし、円の外周部に学生の姓をテキストで入力し、内円の内側に入るサイズになるように調節して、印影を作成し、放電加工用電極の切削加工データに利用した。

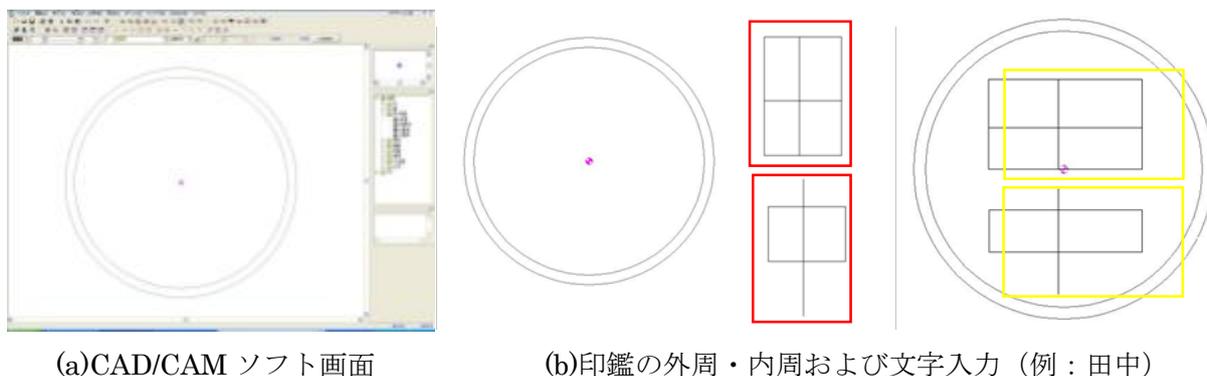


図1 CAD/CAMソフトによる文字データの作成

3. 2 「スタンプ」の形状データの作成

図2に示すように、三次元モデリングソフト（Rhino[®]）を用いて、近畿大学の学園章を作成した。予め用意した近畿大学の学園章の画像ファイル（ビットマップ形式）（図2(a)）を三次元モデリングソフト（Rhino[®]）にインポートした（図2(b)）。曲線ツールを用いて近畿大学の学園章をトレースし、二次元平面上に曲線を描いた（図2(c)）。作成した近畿大学の学園章をCAMソフトにインポートするためDXF形式で保存し、放電加工用電極の切削加工データに利用した。

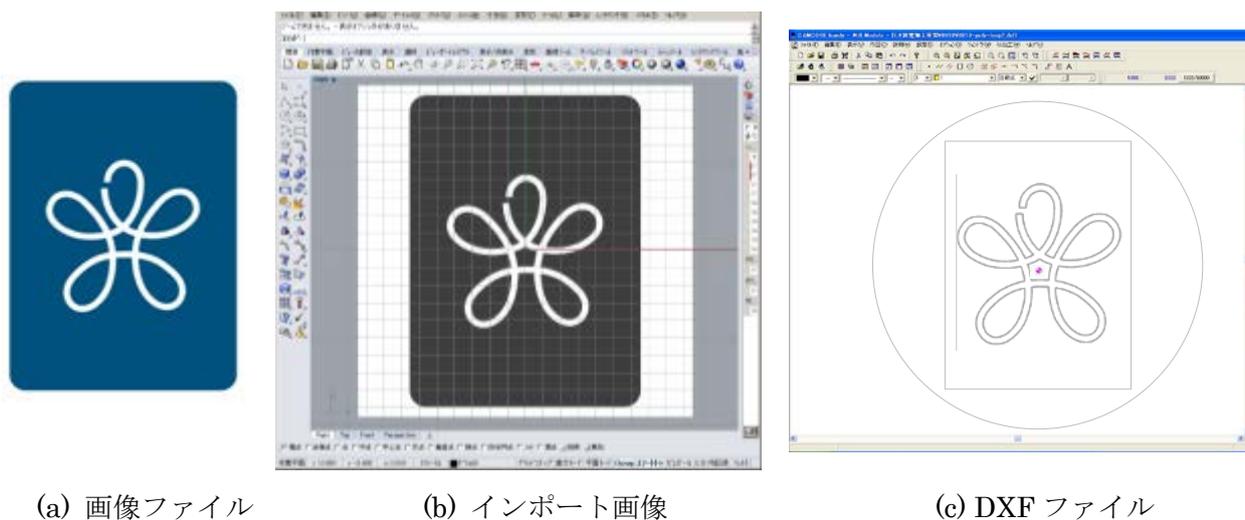


図2 画像ファイルから線画作成の方法

3. CAMソフトによる型彫り放電加工用電極の切削加工データの作成

前章で作成した文字データまたは近畿大学の学園章のデータを市販のCAD/CAMソフト（アンドール製，CAMCORE handy）を用いて、型彫り放電加工用電極の切削加工データを作成した。使用した工作機械は5軸マシニングセンタ（安田製，YMC430）で回転数の上限は40,000rpm，表1に示すような切削条件とした。使用する切削工具は図3に示すような先端が三角形の彫刻用ビットを用いた。得られたツールパスを図4に示す。

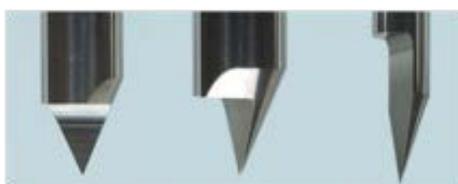


図3 使用した工具

表 1 切削条件

送り速度	500 mm/min
回転数	14000 r.p.m
加工 Z	0.600 mm
Z 分割	10 段
残り代	0 mm
切り込み量	0.06 mm

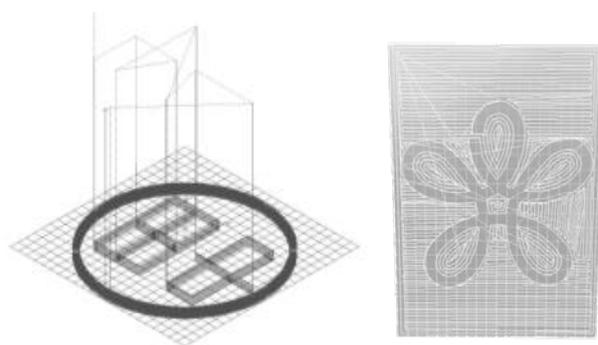


図 4 ツールパス

4. 5 軸マシニングセンタによる型彫り放電加工用電極の切削加工

5 軸マシニングセンタ (図 5) は、3 軸マシニングセンタの X,Y,Z 軸に加え、テーブルに傾斜軸(A 軸)と回転軸(C 軸)が加わった工作機械である。テーブルを傾けることにより、工程数や工程時間の削減、仕上げ面性状の向上など 3 軸マシニングセンタでは困難であった形状の精密加工が可能である。5 軸マシニングセンタの最大のメリットは、加工軸を同時に動かすことにより、従来は加工が困難とされていたため専用機で加工していた部品を汎用機で製造可能になることである。5 軸マシニングセンタは、複雑な形状の部品の加工に対してのみ適していると思われているが、テーブルが回転および傾斜することにより、一度に多面の加工が可能であるため、加工精度や治具の製造上でもメリットがある。

本実験を円滑にまた継続的に行えるように、5 軸マシニングセンタによる一連の作業手順を図説したマニュアル (全 25 頁) を作成した。

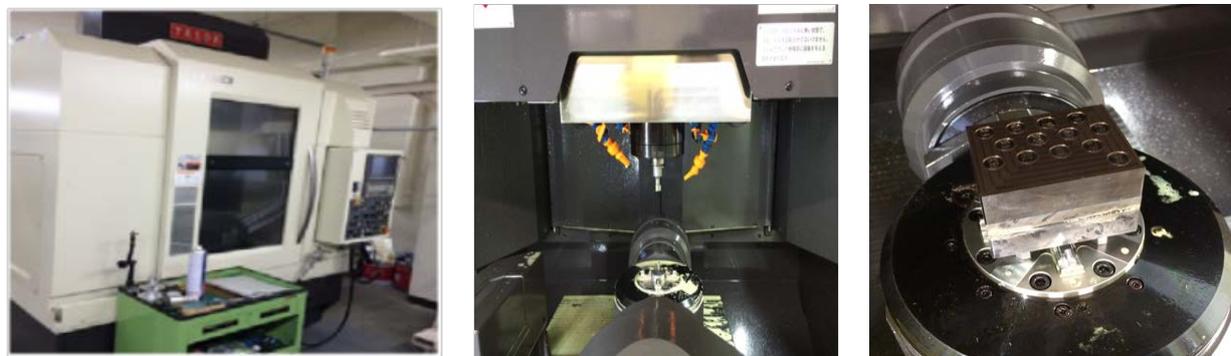


図 5 放電加工用電極の作製に使用した工作機械および切削状況

図 6 に示すように、型彫り放電加工用の電極材料 (銅タンゲステン, Cu-W, 略称: 銅タン) の角材に、一度に複数個 (最大 16 個) の同じ形状の電極を切削加工した。そのため、CAM で作成した加工データをサブルーチンとして、図 7 に示すように 1 つのメインプログラムに連結する NC データに編集して 5 軸マシニングセンタに読み込み、複数個の印鑑の電極を 1 つの銅タンの角材に自動で切削加工することにした。その際、銅タンゲステン角材を固定用治具とロウ付し、図 8 に示すようなセンタリングプレート・チャック (EROWA 製) に締結し、5 軸マシニングセンタの回転テーブルに固定されたテーブル側のエアオペレート・チャック (EROWA 製) に取り付けて切削加工した。切削加工された銅タンゲステン電極をセンタリングプレート・チャックに取り付けた状態で、型彫り放電加工機のクイック・チャック (EROWA 製) に取り付けて放電加工が行える。これにより、高精度な軸位置決めが繰り返し精度 $2\mu\text{m}$ で可能である。

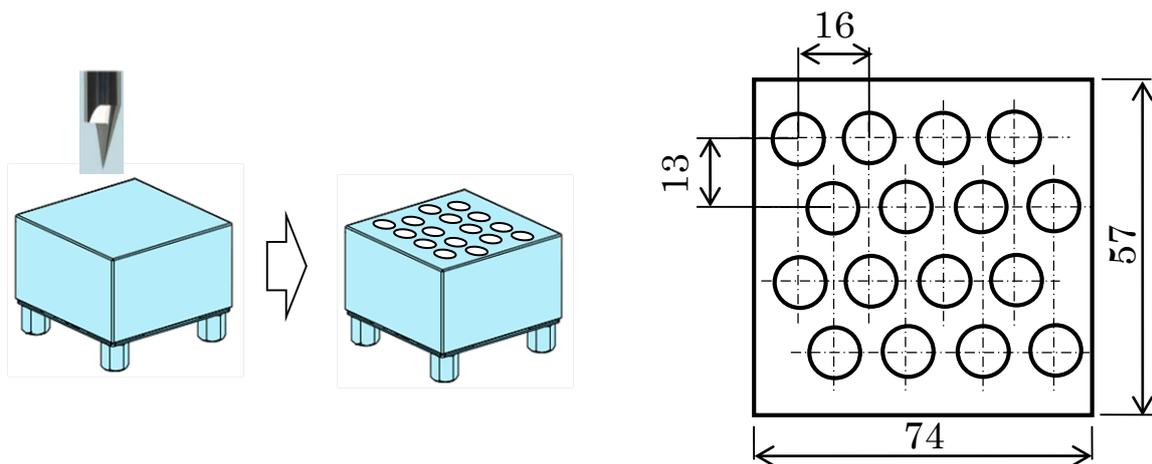


図6 放電加工用電極の切削方法

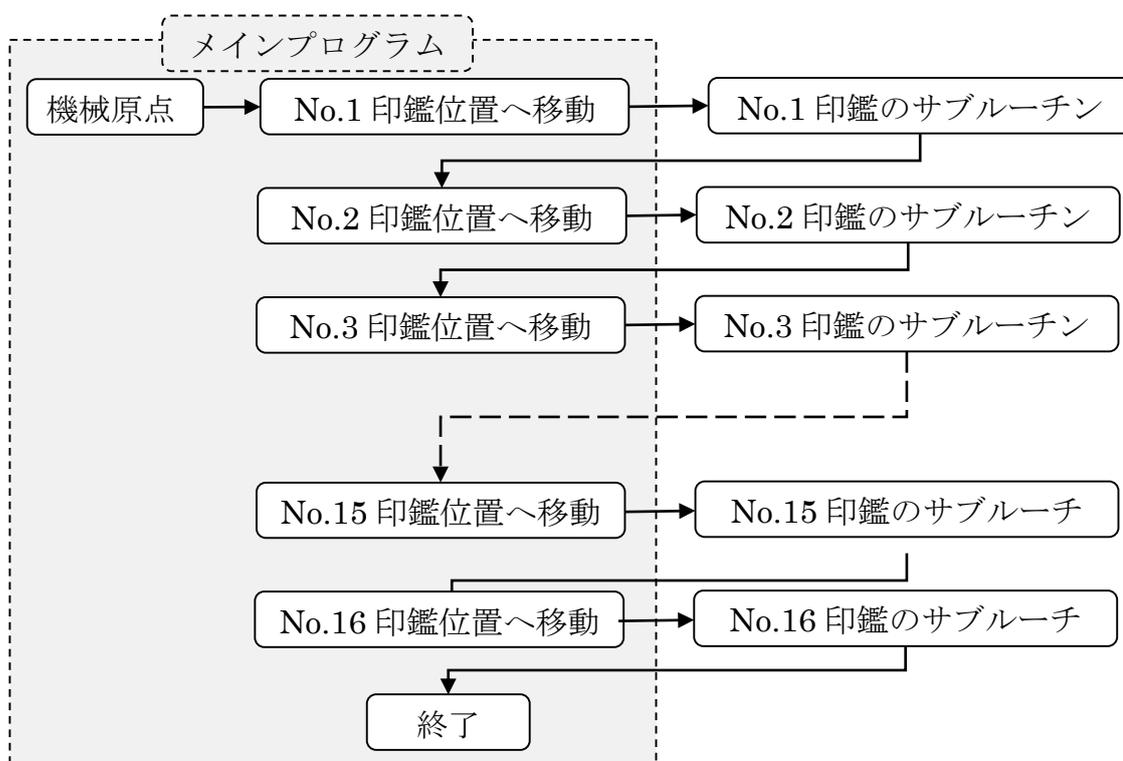


図7 NCデータの構成 (印鑑の場合)

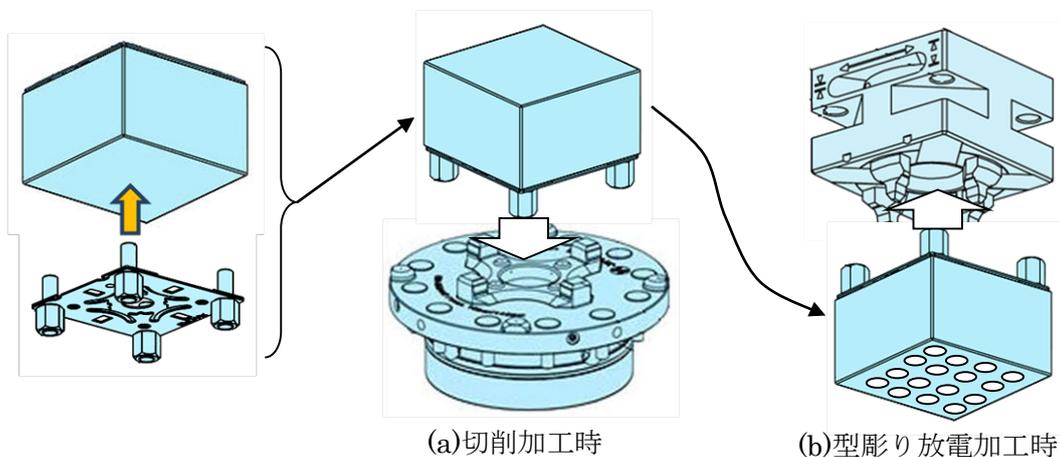


図8 切削加工時および型彫り放電加工時のチャック方法

5. 型彫り放電加工による「印鑑」「スタンプ」の作製

放電加工（Electrical Discharge Machining, EDM）は、電極と被加工物との間に短い周期で繰り返されるアーク放電によって被加工物表面の一部を除去する機械加工法の一つである。主に、切削では加工困難な硬い金属に適用される。放電加工には大別して、型彫り放電加工とワイヤ放電加工の2種類がある。型彫り放電加工は、被加工物に形成したい形状に予め作られた黒鉛（グラファイト）や銅製の電極を油中で被加工物に接近させて、所定の方向に移動することにより徐々に加工する。一方、ワイヤ放電加工は、金属製（主に真鍮（しんちゅう、銅 - 亜鉛合金））の細いワイヤを被加工物に液中（主に水中）で接近させて所定の方向に移動することにより、板状の被加工物を切断およびテーパ加工が行われる。どちらの放電加工でも、放電加工は電極と被加工物間の放電現象を利用した除去加工であり、火花を断続的に飛ばし、金属の溶解・冷却・飛散を繰り返すことにより、金属を彫る加工法であるため、被加工物が電気を通す材質（導体）である必要がある。また、放電加工面は溶解および再凝固を繰り返すため熱影響（脆化）が生じることや、加工時間が長いという欠点もある。

本実験では、5軸マシニングセンタで加工された電極を図9に示すような型彫り放電加工機（Sodick製、AD25L）のクイック・チャック（EROWA製）に固定し、上下の位置を調整し、所定の放電加工条件で放電加工を行った。

本実験を円滑にまた継続的に行えるように、型彫り放電加工機による一連の作業手順を図説したマニュアル（全13頁）を作成した。

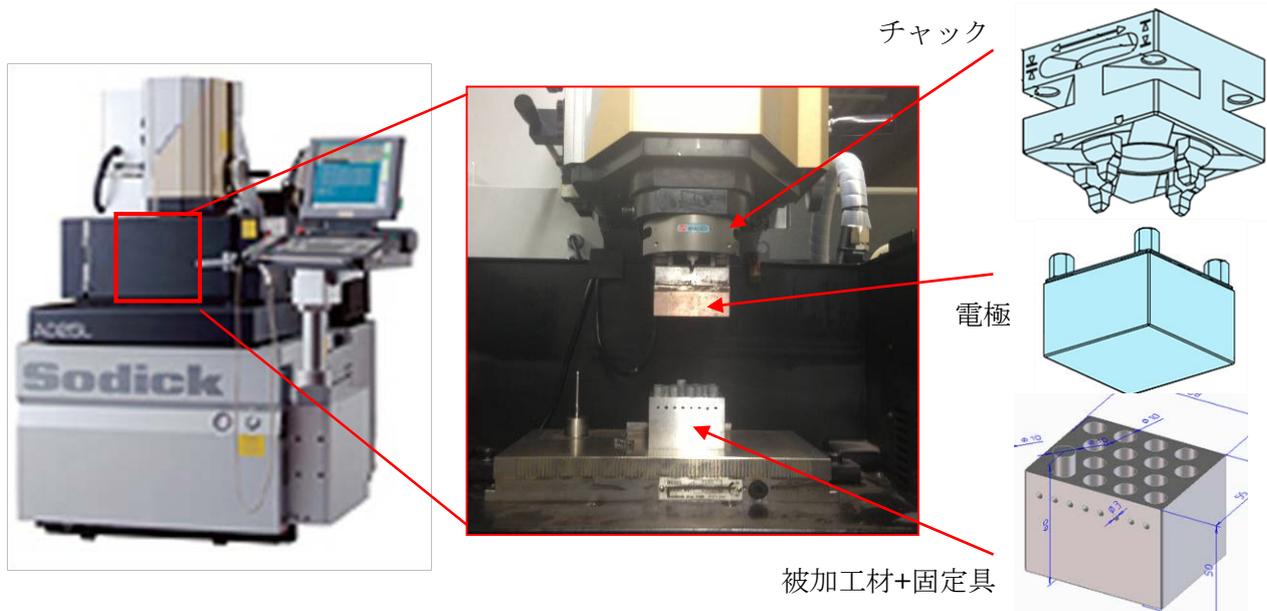


図9 型彫り放電加工の方法

放電加工条件の違いが放電加工後の表面粗さに及ぼす影響を調査するため、図10に示すように電極を移動させて、表2のように放電加工条件を変化させて加工した形跡が残るように工夫した。すべての加工後に、学生が加工表面を目視観察および手で触り、また表面粗さ測定を行い、放電加工条件の違いによる表面粗さの影響をグラフ化して結果を整理させ、レポート指導の差異に考察を行い、理解を深めさせた。放電加工条件は、第1工程から第4工程まで、サーボ基準電圧は74V一定とし、放電電流ピーク値、1パルスの放電時間および放電休止時間を電極位置が下降するにつれて徐々に低下させて、粗彫りから仕上げ面が得られるように設定した。すべての工程に必要な放電加工時間は約30~50分程度であり、授業時間内に十分に完了するような条件を選択した。

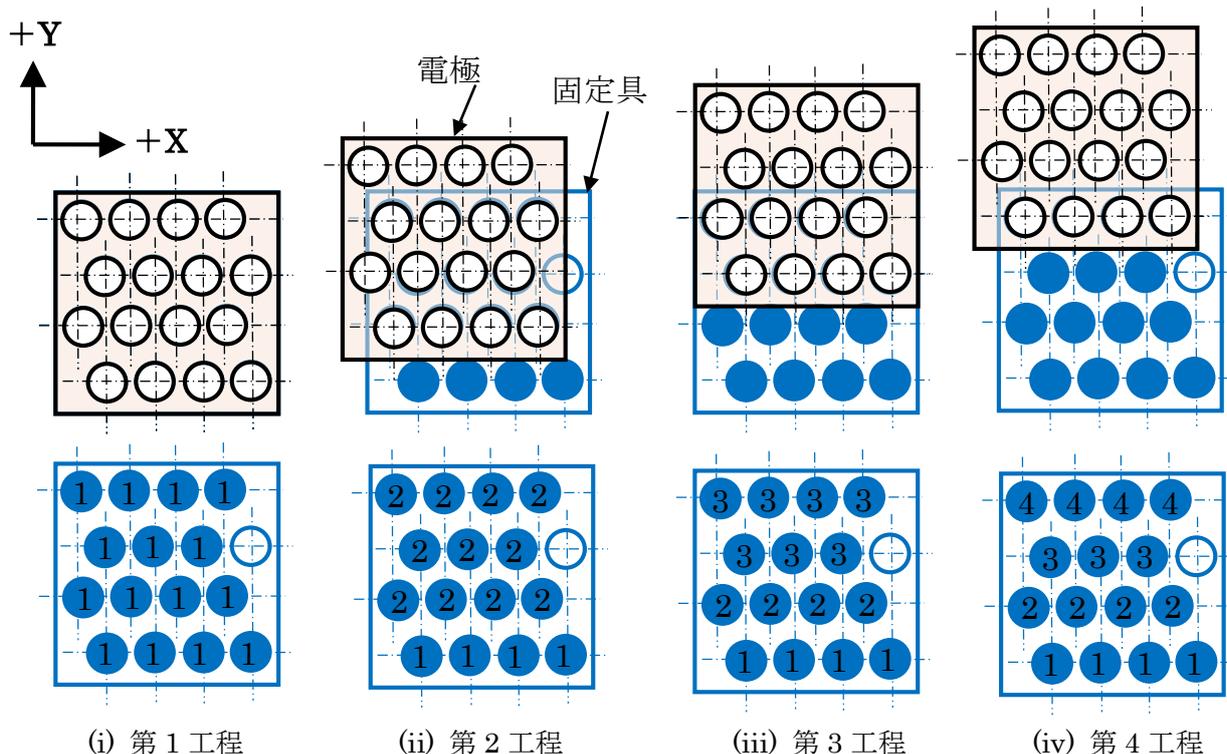


図 10 型彫り放電加工時の電極の移動

表 2 各工程の型彫り放電加工条件

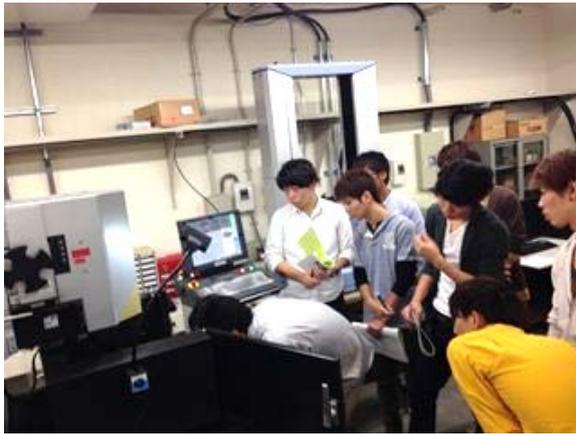
	(i) 第 1 工程	(ii) 第 2 工程	(iii) 第 3 工程	(iv) 第 4 工程
放電電流ピーク値 (A)	13.8	7.7	5.2	2.5
放電時間 (μs)	115	55	23	9
放電休止時間 (μs)	33	23	15	10
サーボ基準電圧 (V)	72	72	72	72
電極位置 (mm)	0.1246	0.0765	0.0385	0.0000

6. 作製した「印鑑」の試用, 「スタンプ」の放電加工面の表面粗さ測定

図 11 に実験風景および作製した「印鑑」および放電加工後の電極を示す。学生が自分の印鑑を用いて試用させて、モノづくりの達成感を実感させたところ、大半の学生が自分自身の姓を刻んだ世界でたった 1 つのオリジナル印鑑を持ち帰れる喜びを感じていた。

一方、型彫り放電加工により作製された「スタンプ」と未放電面、および型彫り放電加工に使用した電極の切削面の表面粗さを現場型の表面粗さ測定機（ミットヨ機製 SJ-201P）を用いて行い、切削加工面と放電加工面の表面粗さの差異、さらに型彫り放電加工条件が加工面の表面粗さに及ぼす影響を調査させ、加工時間と仕上げ面粗さの関係を理解させた。近大の学園章を刻んだオリジナル「スタンプ」も学生に提供したところ、印鑑の場合ほどは感激する度合いはやや低いものの、その使用方法を模索しながら全員持ち帰り、レポート作成を行ったようである。

本型彫り放電加工を体験することにより、金型の製造すべてを理解させることは到底できたとはいえないが、金型部品を切削加工以外の製造法で製作することができることを理解したように思われる。軟らかい銅で硬い鋼を精密に時間をかけて削れることの利点と欠点を体験により感じたようである。



(a) 実験風景



(b) 学生金型グランプリ出場学生による実演



(c) 型彫り放電加工後の印鑑



(d) 型彫り放電加工後の電極



(e) 作製した印鑑による試用



(f) 自作した印鑑を持った学生

図 11 実験風景および放電加工後の印鑑と電極

7. まとめ

金型製造にとって重要な型彫り放電加工を週1回2コマの機械工学科実験のテーマとして実施できるように、学生自身の姓の印鑑製作および近大学園章のスタンプ製作を選択して、教材およびテキストを準備した。長い加工時間を要する型彫り放電加工を授業で実施するため、また1台の工作機械を多人数の学生に活用するためには、授業準備の負担が非常に大きい、実現可能であることを示せた。

8. 参考文献

- [1] 西籾和明, 型彫り放電加工, 2013年度機械工学実験テキスト (2013)
- [2] 西籾和明, 型彫り放電加工, 2014年度機械工学実験テキスト (2014)

学生金型グランプリ出場を通じた金型人材育成事例

メカニクス系工学専攻 准教授	西藪 和明
メカニクス系工学専攻 准教授	浅野 和典
メカニクス系工学専攻 講師	橋本 知久
研究支援者	平尾 幸雄
研究支援者	蒲生 眞敏

1. はじめに

近畿大学の本部キャンパスがある東大阪市を含めた大阪東部地域は元来、射出成形やプレス成形等に用いられる金型の製造に特化した中小企業が多数存在した。しかし、これらの中小企業は度重なる不況や人件費の安いアジアを中心とした発展途上国への仕事の流出によって廃業を余儀なくされてきた会社も時代の流れと共に増えてきているというのが現状である。この現状を打開すべく、「元気のある近畿大学で何かできることはないか」という考えから生まれたのが“近大発金型プロジェクト”である。近畿大学の「金型プロジェクト」は、大阪東部地域の金属プレス・射出成形・鋳造の金型製造業や川下企業の要請に応じて各企業が持つ金型技術をデジタル化し、これらを地域の財産として継承するために、材料・設計・製造の先進的な研究と教育により地域で活躍できる金型人材を育て、今後も大阪東部地域が金型産業の拠点として維持できるよう、地域と大学がともに発展する環境を提供するというプロジェクトである。金型プロジェクトの内容は、本学理工学部の機械工学科の教員が3つの研究グループ(材料関連、解析・設計関連、計測・ロボット関連)に分かれて大阪東部地域と連携し、金型の高度化研究を行うというものである。

一方、学生金型グランプリは社団法人日本金型工業会が主催するインターモールド(金型加工技術展)で行われる“学生による金型製造技術の披露”を目的とした金型の展示会である。この学生金型グランプリは、日本・中国・韓国の大学で「金型」を学ぶ学生が、同じテーマ(課題)の金型製作を行い、その成果である金型と成形品を展示し、また学生金型グランプリ・プレゼンテーションセミナーとして学生が金型製作の設計から金型加工、成形に至る実施内容を説明するイベントである。これにより、実際の現場において生じた問題点やその解決方法、今後の改善点など専門教育を受ける学生ならではの視点で解説し、モノづくりの現場で課題となる『人材確保』『技術継承』などの人づくりに有効であると認知されている。

本学は、2014年度の第6回学生金型グランプリに関西圏からの初出場を目指し、2013年度よりその出場に向けた準備を進めてきた。具体的な内容としては、金型製造に特化した工作機械(マシニングセンター、型彫放電加工機やワイヤーカット)や射出成形機などを本学の実習工場に導入し、金型製造および射出成形の環境整備を行い、それらの設備を使用して金型製造および射出成形に取り組んだ。学生金型グランプリの出場に向けて、研究支援者として金型製造に50年以上の熟練者である職人と金型部品の精密放電加工の専門技術者を招聘し、金型の設計および製造に関する実地指導を受け、金型の設計および製造の基礎技術の理解を深めてきた。その結果、2014年度の第6回学生金型グランプリ課題の“連結式三角スケール”のプラスチック成形金型を設計・製造し、その金型を用いた射出成形品を作製し、初出場を果たした。また、2015年度の第7回学生金型グランプリ課題の“ティーカッププレスト”のプラスチック成形金型を設計・製造し、2回目の出場を果たした。

本稿では、金型プロジェクトの研究成果を学生教育にすぐに反映することにより、地域の金型関連の製造業への貢献を目的に、学生金型グランプリへの出場を通じた金型人材育成の事例を紹介する。

2. 2013 年度第 5 回学生金型グランプリ課題作製による出場準備

2014 年度の第 6 回学生金型グランプリ出場を目指して、学部 3 年の成松一馬君が卒業研究セミナーで、研究支援者の金型職人 2 名の指導の下、金型の設計・製造の基礎を理解することから開始した。作製対象は、図 1 に示すような 2013 年度第 5 回学生金型グランプリの課題 “手をつなぐ動物” とした。機械工作実習工場ですでに所有していた CAD/CAM ソフトと立形マシニングセンタに加え、金型プロジェクトの初年度に導入した 5 軸マシニングセンタや型彫放電加工機を用いて金型を製造し、デジタル画像計測装置を用いて金型部品の加工精度を検証した。さらに、これら大型の研究設備に加え、定盤、エジェクタピンの長さ調整に用いるピンカッターや手動研磨のためのルーターなど、金型の製造・組立に必要な様々な機器を新規導入して使用した。しかし、研削盤、溶接機や熱処理炉などは所有していないため外注する必要があった。このように、金型の製造には多くの加工機や工具が必要であり、これらの取り扱い技術を習得する必要があった。このような習得を経て金型の製造が可能になったが、2013 年度第 5 回学生金型グランプリへの出場を見送った。その理由は射出成形機を所有していなかったため、作製した金型を用いてプラスチック成形品を作製できず、金型の評価ができないためであった。

図 1 は、社団法人日本金型工業会から提供された 2013 年度第 5 回学生金型グランプリの課題の二次元図面である。この課題は“手をつなぐ動物”で、クマのような動物の形状を模した成形品が複数個にわたり連結できるというものである。図面には寸法公差の指定はなく、顔面の形状もそれぞれの出場校で特色を出すことができる設定である。成形品の形状を把握するために、図 2 に示すような三次元モデルを作成し、金型の設計および製造のために二次元 CAD データを作成した。

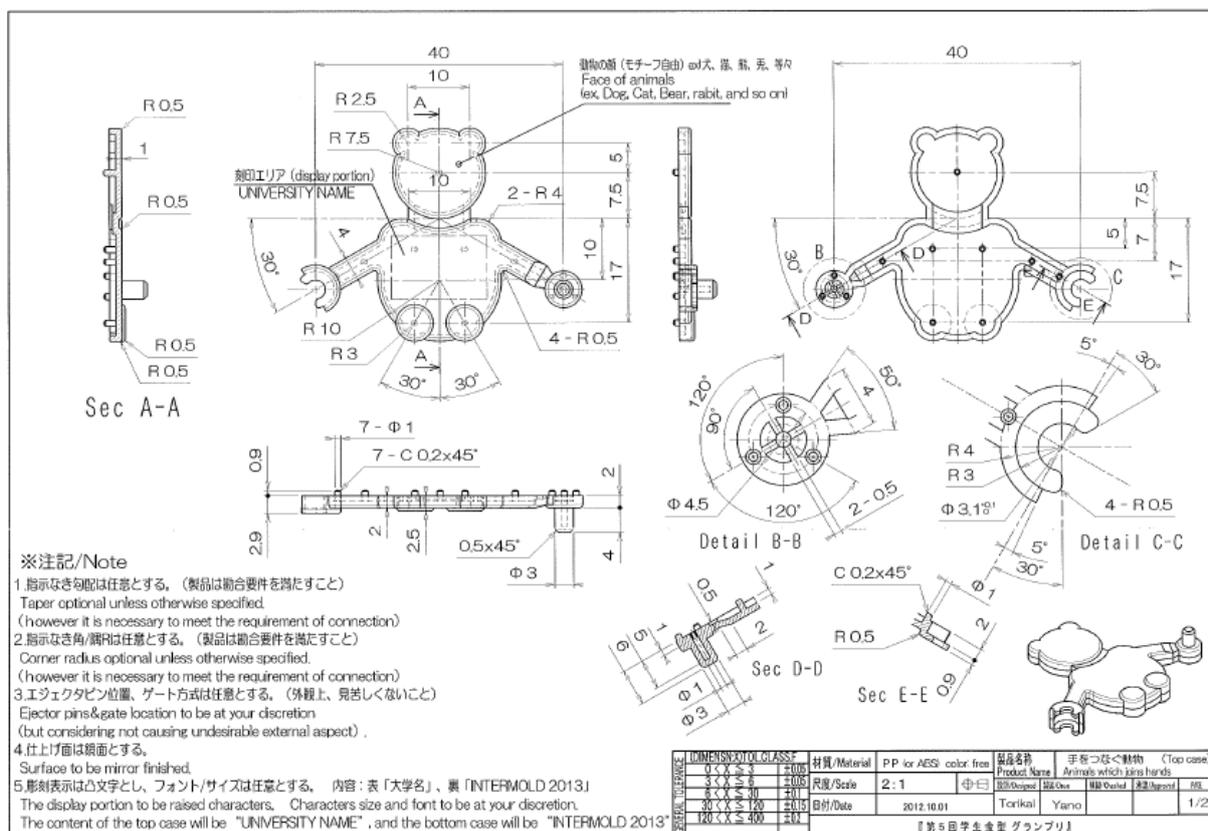
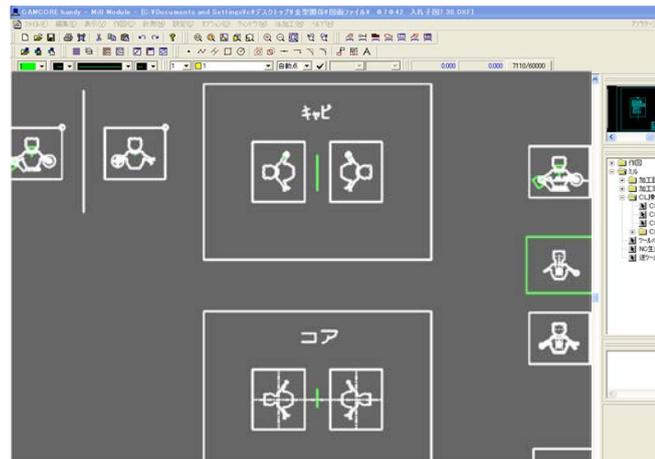


図 1 第 5 回学生金型グランプリの課題 (手をつなぐ動物) の二次元図面



(a) 三次元モデル



(b) 二次元 CAD

図2 第5回学生金型グラプリの課題（手をつなぐ動物）成形品の形状

図3に示すような成形品の形状やサイズから推定して、ダイセット（双葉電子工業㈱, Sシリーズ2025）を選定し、溶融した樹脂を射出成形するための入れ子、および入れ子を固定するダイセットの形状を設計した。図4は、ダイセットおよび入れ子の構造を示す。

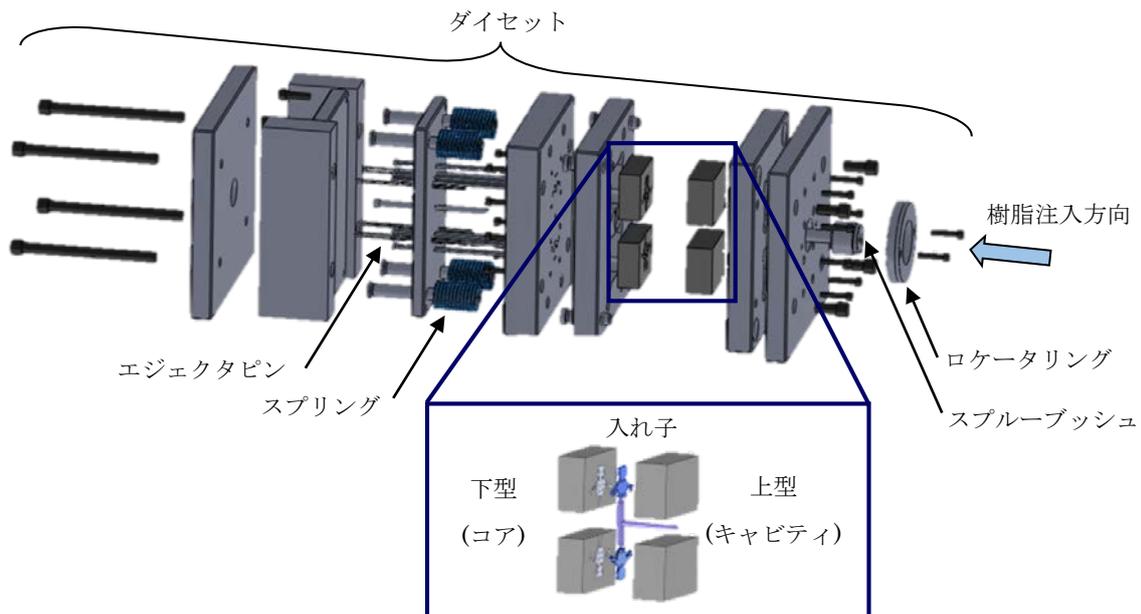


図3 ダイセットおよび入れ子の構造

ダイセットの加工は、エジェクタピンが通る穴や入れ子を取るポケット、スプルーやランナーの穴、入れ子を保持するためのボルトを通す穴やネジ切りなどである。設計製図および加工データの作成には、二次元の簡易 CAD/CAM ソフト（アンドール㈱, CAMCORE handy）を使用した。ダイセット全体を描画せず、穴加工やポケット加工など工程ごとに図面を細分化して行った。これはマシニングセンタを用いて切削加工する場合、工程によってそれぞれ工具が異なり、全体を一度に切削すると加工時間が膨大に掛かるためや、一度に全体を切削して大きなミスが生じるとその損害の規模が大きくなり修正が難しくなるという金型職人の助言に依り判断した。また、マシニングセンタで切削しながら、その傍らで CAD/CAM ソフトを用いて設計製図および加工データを作成して、作業時間の短縮は図った。

図2に示す成形品の二次元図面を、三次元CADソフト（SolidWorks2010）を用いて図3(a)に示すような三次元モデル化し、樹脂を流し込むゲートの位置、スプルーとランナーの種類、金型内で発生するガスの抜き方、エジェクタピンによる成形品の取り出し方法など、入れ子の形状を検討した。図3(b)に示すような2次元CADソフト上で、ダイセットと同様に一度に入れ子全体を作図することはせず、手をつなぐ動物の頭、胴体、腕および手など各部分に分割した図面の作成は、マシニングセンタによる切削加工と同時進行で行った。入れ子には、立形マシニングセンタ（日立精機㈱、VM40II）の刃物径では加工困難な微細な形状が見られたため、型彫放電加工機（㈱ソディック、AD25L）を用いた。型彫放電加工で用いる銅電極はマシニングセンタで加工した。切削加工時で重要な段取り作業として、ワークの位置出しや工具の取り付けなどは手動で行う必要がある。ワークの位置出しはダイヤルゲージで水平、垂直および平行の各方向の傾きを確認した。その際、銅製またはプラスチック製ハンマーや棒で軽く叩くことで微調整を行った。この傾きの許容範囲は荒加工の場合は50 μ m以下10 μ m程度、仕上げ加工の場合は10 μ m以下である。入れ子の材質は析出硬化硬系プリハードン鋼（大同特殊鋼㈱、NAK80）で、硬さがHRC40と非常に硬いため、角部や微細な形状など切削加工が困難な箇所を型彫放電加工した。

図4に示すように、切削加工や型彫放電加工後の表面を手磨きによる仕上げ加工を行った。粗い加工面では、射出成形時の流動抵抗が大きく、また成形品の表面粗さや性状が悪化するためである。目の細かい研磨紙をへら状の棒の先端に巻きつけて手研磨した。図5は、ダイセットの組立の様子を示す。プラスチックハンマーを用いて、入れ子をダイセットに叩き込み、ルーターを用いてバリの切除を行った。製造した金型の入れ子を図6に示す。マシニングセンタによる切削加工のミス（NCプログラムミス）や型彫り放電加工時のミスがあり、ブッシングやTIG溶接による肉盛りの痕跡が残っている。



図4 手磨きによる仕上げ加工



図5 手作業による組立



図6 完成した入れ子

作製した金型を用いて射出成形した成形品を図7に示す。この中には、完全に樹脂が充填していないショートショットの成形品が見られたが、バリは見られなかった。成形圧力や材料温度などを種々変化させることにより、適正な成形品を得るように調整した。

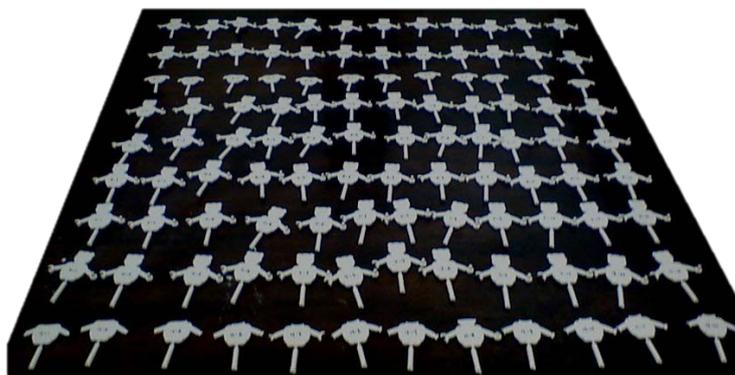
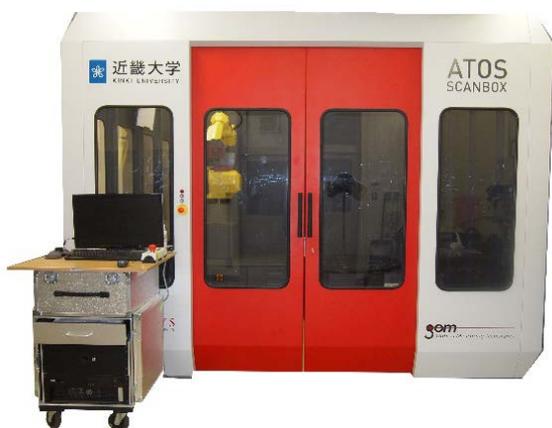
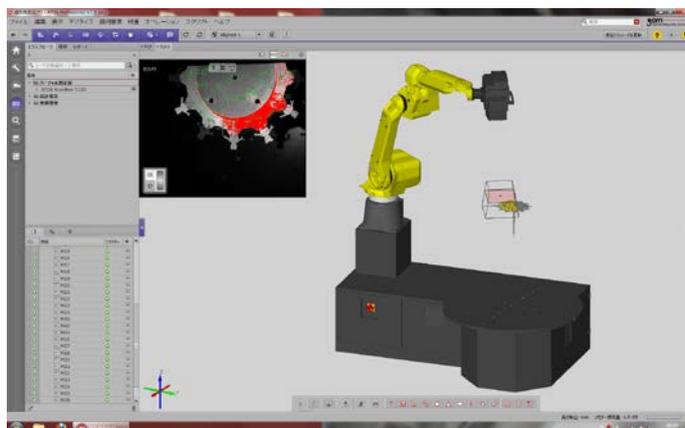


図7 射出成形した成形品例

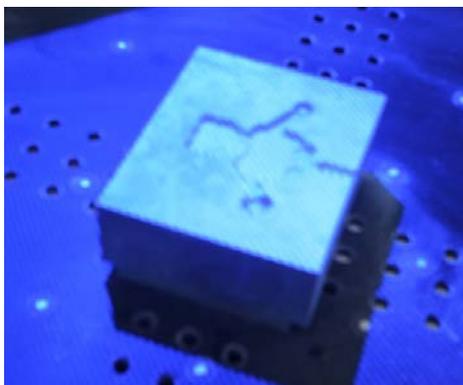
図8に示すようなデジタル画像計測ロボットシステム（GOM社、ATOS™ SCANBOX）を用いて、製造した金型（入れ子）および成形品の形状測定を行った。この測定原理は、三角測定の測定原理に基づき、測定対象物に投影されたフリンジパターンを2台のCCDカメラで計測し、各カメラのピクセル上の3種類の光学測定アルゴリズムを用いて、三次元座標を高精度に計算し、オブジェクト表面のポリゴンメッシュを生成するものである。



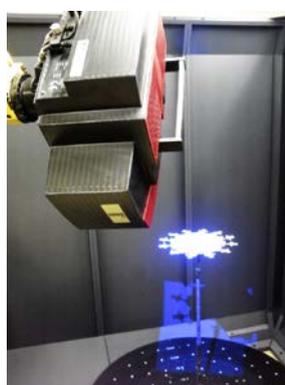
(a) 外観写真



(b) プログラミング作業画面



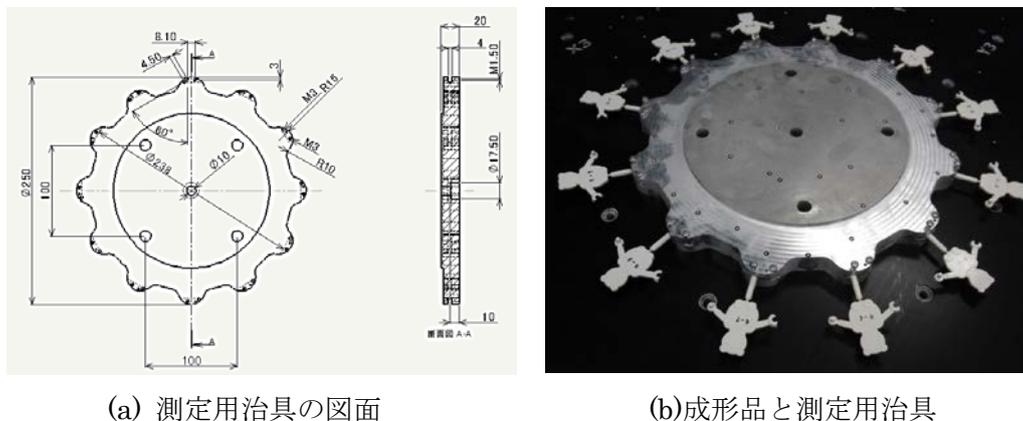
(c) 金型の撮像



(d) 成形品の撮像

図8 デジタル画像計測ロボットによる撮像状況

三次元 CAD モデルの設計値と実測値の比較を行い、製造した金型および成形品の寸法精度を評価した。図 8(c)に示すように金型は測定テーブル上に直接設置すれば測定可能であったが、成形品は数量が多いため図 9 に示すような測定用治具を用いて一度に 12 個の成形品の測定を可能にした。成形品はスプルーとランナーの境界で切断し、図 8(b)に示すように測定用治具に取り付けて撮像した。



(a) 測定用治具の図面

(b) 成形品と測定用治具

図 9 成形品の測定用治具

その際、デジタル画像計測は図 10 に示すような 2 つの方法で行った。これらを比較し、短時間で測定できるプログラムを作成し、正確かつ効率の高い測定方法を見出すことを目的とした。

(a) 個別測定法

1 つの測定対象物ごとに計測し、テーブルを回転させて円盤状に配置した個数の測定を繰り返す。カメラの移動量を減らし、テーブルの回転を重視する測定方法である。

(b) 一括測定法

多数の成形品と円盤治具を一体で計測し、測定した円盤治具を評価時に取り除き、個々の成形品を評価する。個別測定法よりもテーブルの回転を抑え、カメラの移動量を多くする測定方法である。

2 つのデジタル画像計測法の測定時間を表 1 に示す。一括測定法が個別測定法に比べて圧倒的にプログラミング時間と測定時間が短いことが分かった。一方、測定精度には差がみられなかった。個別測定法の場合はテーブルと撮像装置を同程度の運動で操作するため、一回の測定物の撮影時間が長くなる。そのため、一括測定法の方が効率の高いと判断し、一括測定法で評価することにした。



(a) 個別測定法

(b) 一括測定法

図 10 2 つのデジタル画像計測法

表 1 測定法の違いによる測定時間の比較

	プログラミング時間	撮像時間
(a) 個別測定法	40min 23s	18min 45s
(b) 一括測定法	27min 26s	3min 14s

図 11 にデジタル画像計測の手順を示す。反射防止のため、測定対象物の表面に探傷剤（㈱タイホーコーザイ、マイクロチェック現象液）などの粉末状の白いスプレーを使用した。専用ソフト（GOM 社、ATOS™ Professional V7.5）に測定対象の三次元 CAD モデルをインポートし、カメラや測定対象物、および回転テーブルを画面上で選択することによりロボットティーチングを行う。同ソフトを測定結果の評価にも用い、撮像終了後に測定対象の寸法計測を行う。

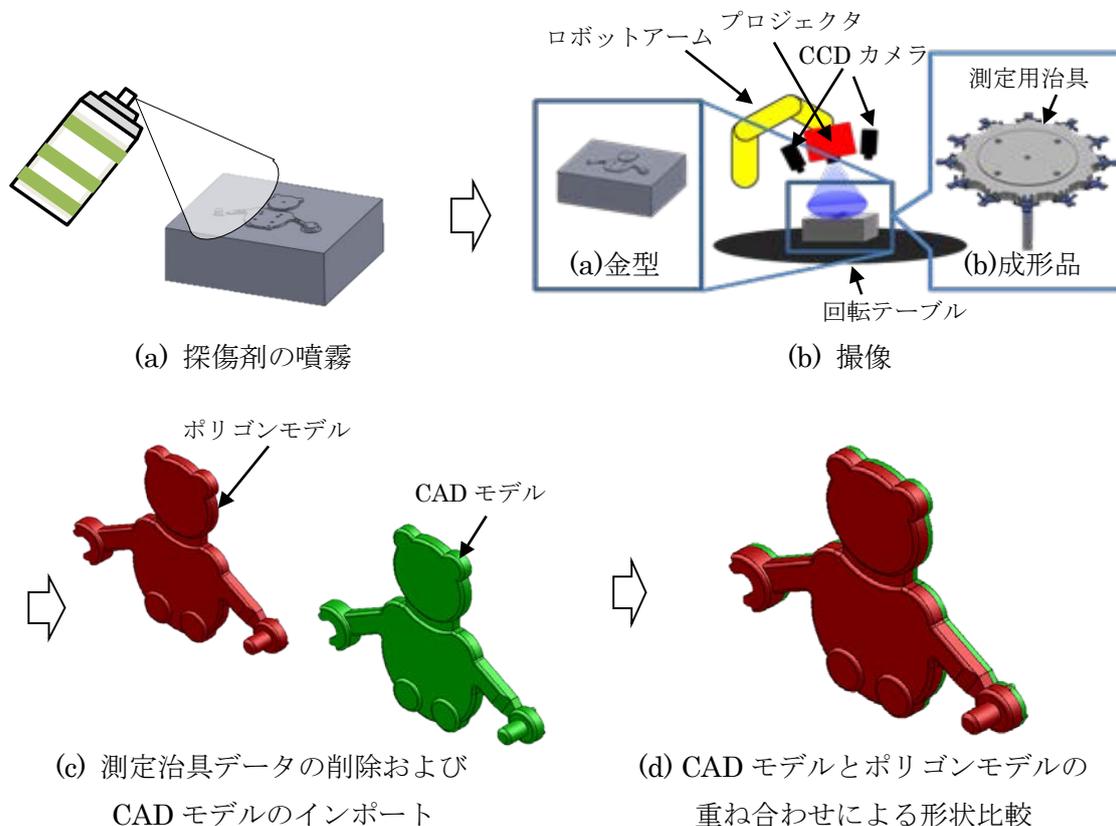


図 11 デジタル画像計測の手順

金型（入れ子）のキャビティとコアの寸法測定箇所を図 12 に示す。また、成形品の寸法測定箇所を図 13 に示す。第 5 回学生金型グランプリに出場した他大学の成形品と、本学の成形品を比較し、本学の金型および成形品の加工精度を評価することにした。それぞれの寸法測定箇所の設計値を表 1 に示す。

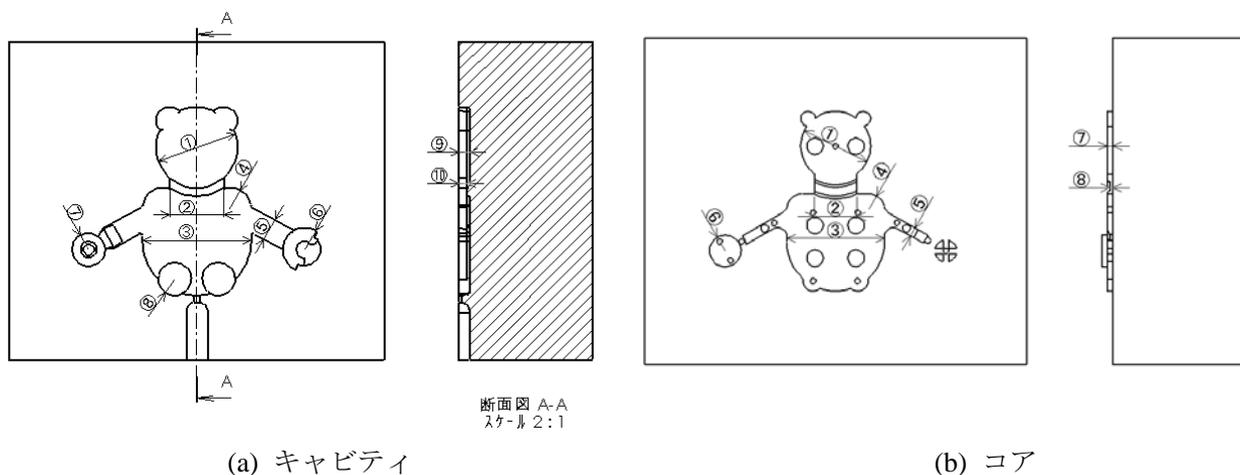


図 12 金型（入れ子）の寸法測定箇所

表 1 成形品の設計値

測定箇所	①	②	③	④	⑤
設計値 [mm]	1 Φ 5	10	20	R4	4
測定箇所	⑥	⑦	⑧	⑨	
設計値 [mm]	R4	Φ 6	2	1.5	

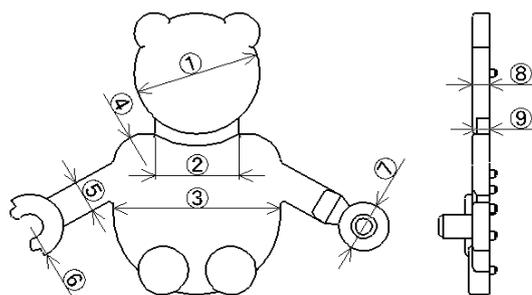


図 13 成形品の寸法測定箇所

図 14 および図 15 に、金型のコアおよびキャビティの形状測定結果を示す。指定した個所の座標値や長さ、直径などの寸法がミクロナスケールで自動的に表示される。このような測定値を用いて、図 12 で指定した各測定箇所の寸法を算出した。

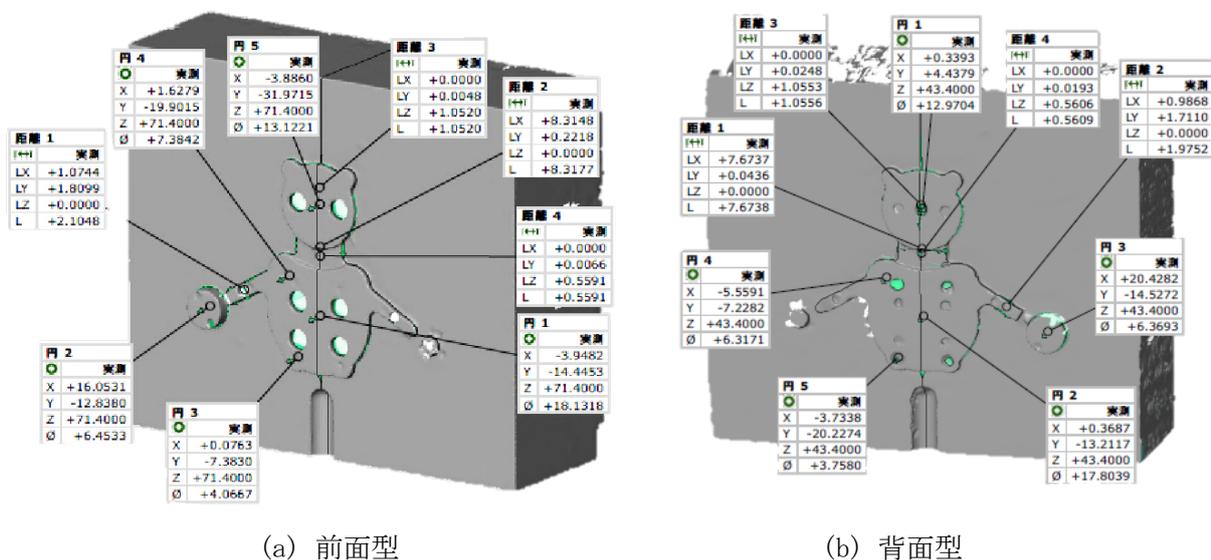


図 14 金型（コア）の形状測定結果

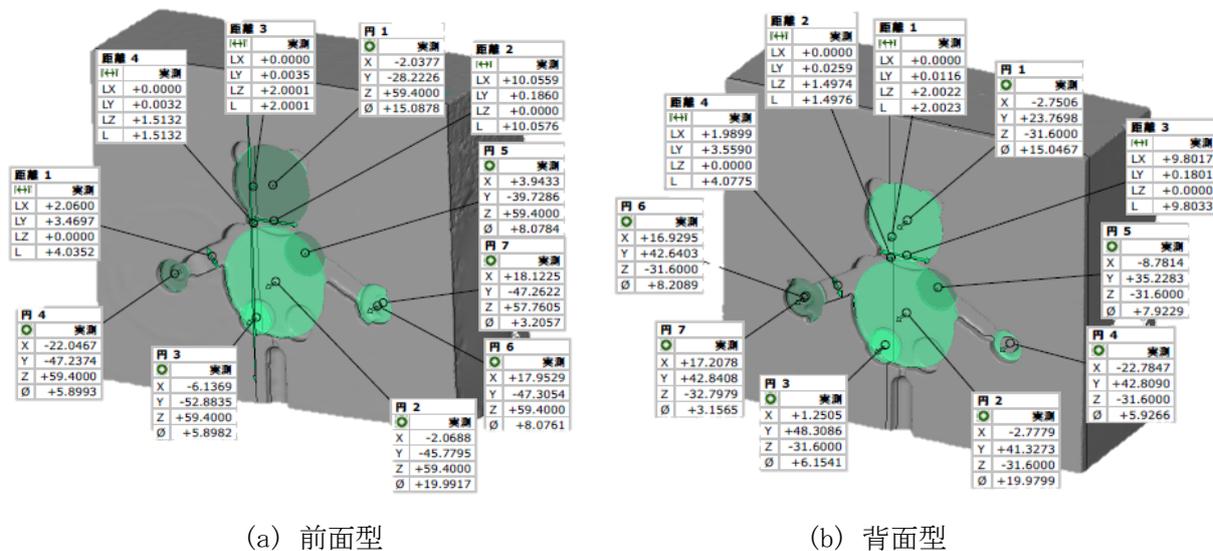


図 15 金型（キャビティ）の形状測定結果

各設計寸法に対する測定値との差を設計値で除した割合を寸法差率とし、キャビティとコアの設計寸法に対する関係を図 16 に示す。コアがキャビティに比べて加工精度が非常に低いことが分かった。コアは凸型であるためその形状を浮き出させる輪郭加工を行ったが、キャビティは凹型であるため工作物を彫り込むポケット加工を行った。ポケット加工に比べて輪郭加工は加工精度が低いことが分かった。

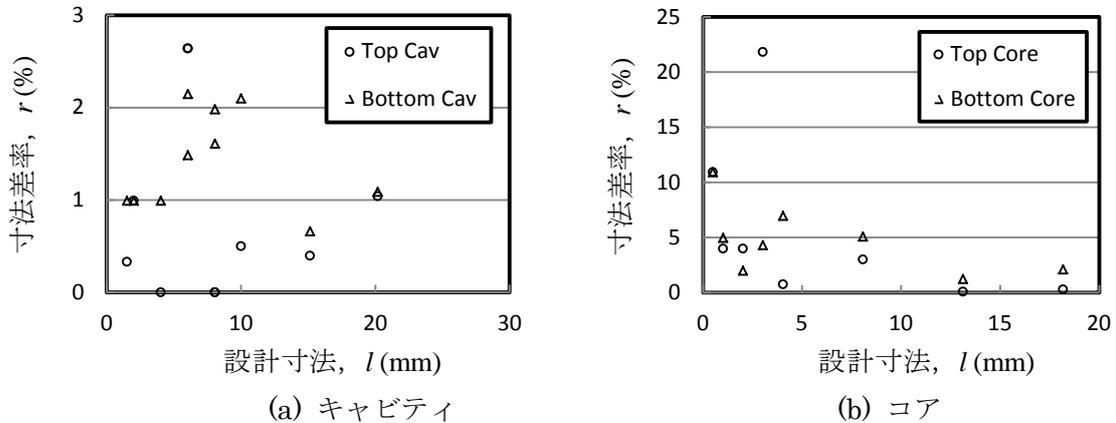


図 16 金型（入れ子）の形状評価結果

図 17 は成形品の形状測定結果例を示す。また、図 18 は第 5 回学生金型グランプリに参加した他大学（日本 A 校、韓国 B 校、中国 C 校）と本学の成形品の寸法差率の比較を示す。中国の C 校が最も寸法差率の変動が小さく、最も大きな寸法差率は B 校の測定箇所位置④(4mm)で 18.25%であった。本学の成形品は他校と比べて比較的良好に成形できている。ただし、成形品の形状のばらつきは大きく、設計値が小さい箇所ほど寸法差率の変動は大きいことが分かった。

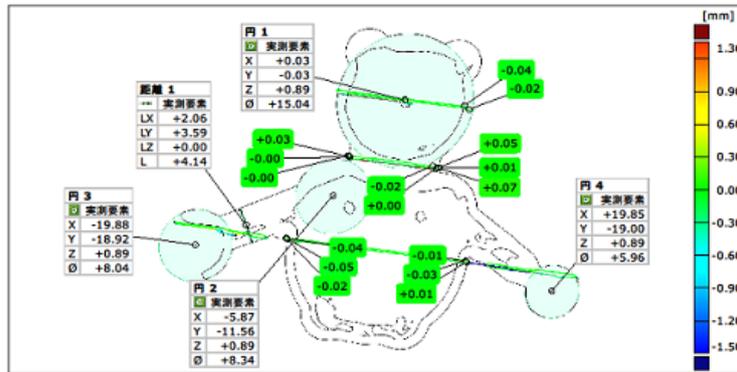


図 17 成形品の形状測定結果例

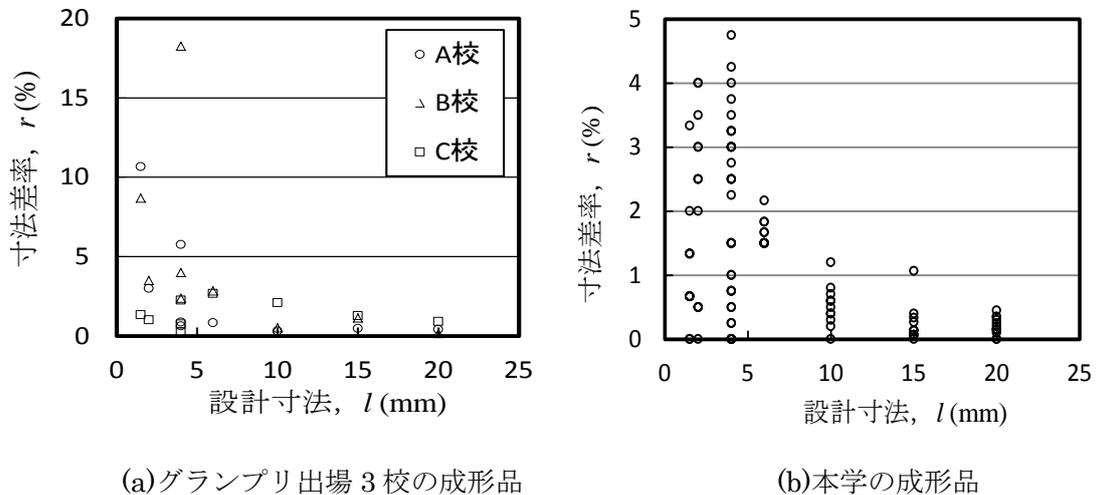


図 18 成形品の寸法差率の比較

プラスチック射出成形品の流動解析を行い、キャビティ部の充填状態、キャビティ部および冷却管の温度分布、プラスチック射出成形品の収縮量を予測した（詳細な説明は他の報告に譲り、割愛する）。

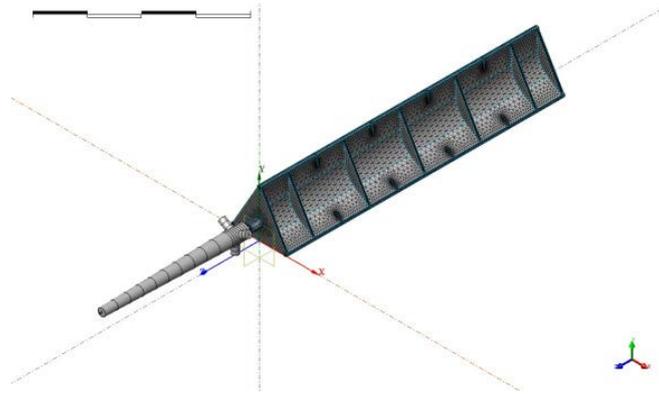


図 21 三次元有限要素解析モデル.

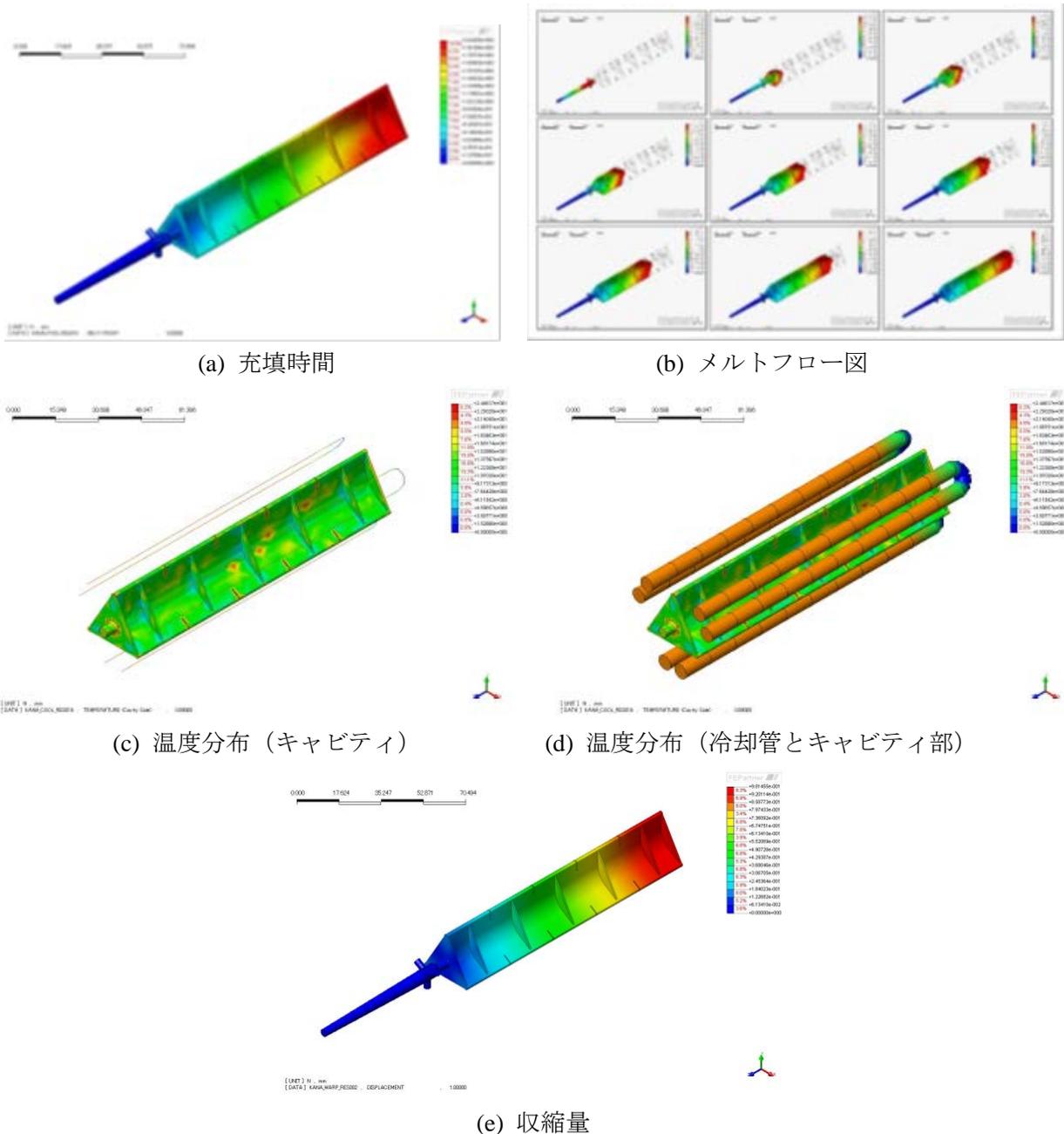
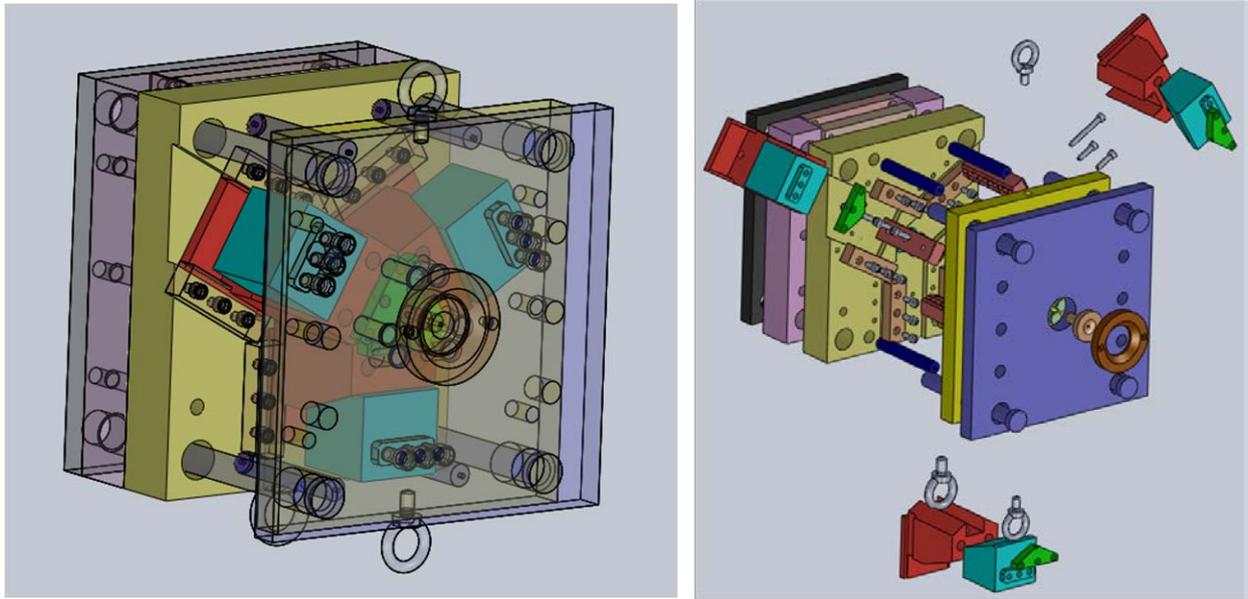


図 22 流動解析の結果.

設計した金型の組立図および拡散分解図を図 23 に、また主な金型の部品図を図 24 に示す。成形品の断面は三角形であるため、三方向にスライドさせて離型する単純な金型構造とした。金型サイズは大型になるが、外側から見てスライドの動作が分かりやすいのが特徴である。3つの入れ子の加工精度が最も重要であり、厚板鋼材をワイヤーカット放電加工機で外形を切断した後、型彫り放電加工機で微細な加工を行った。



(a) 組立図

(b) 拡散分解図

図 23 設計した金型の外観図

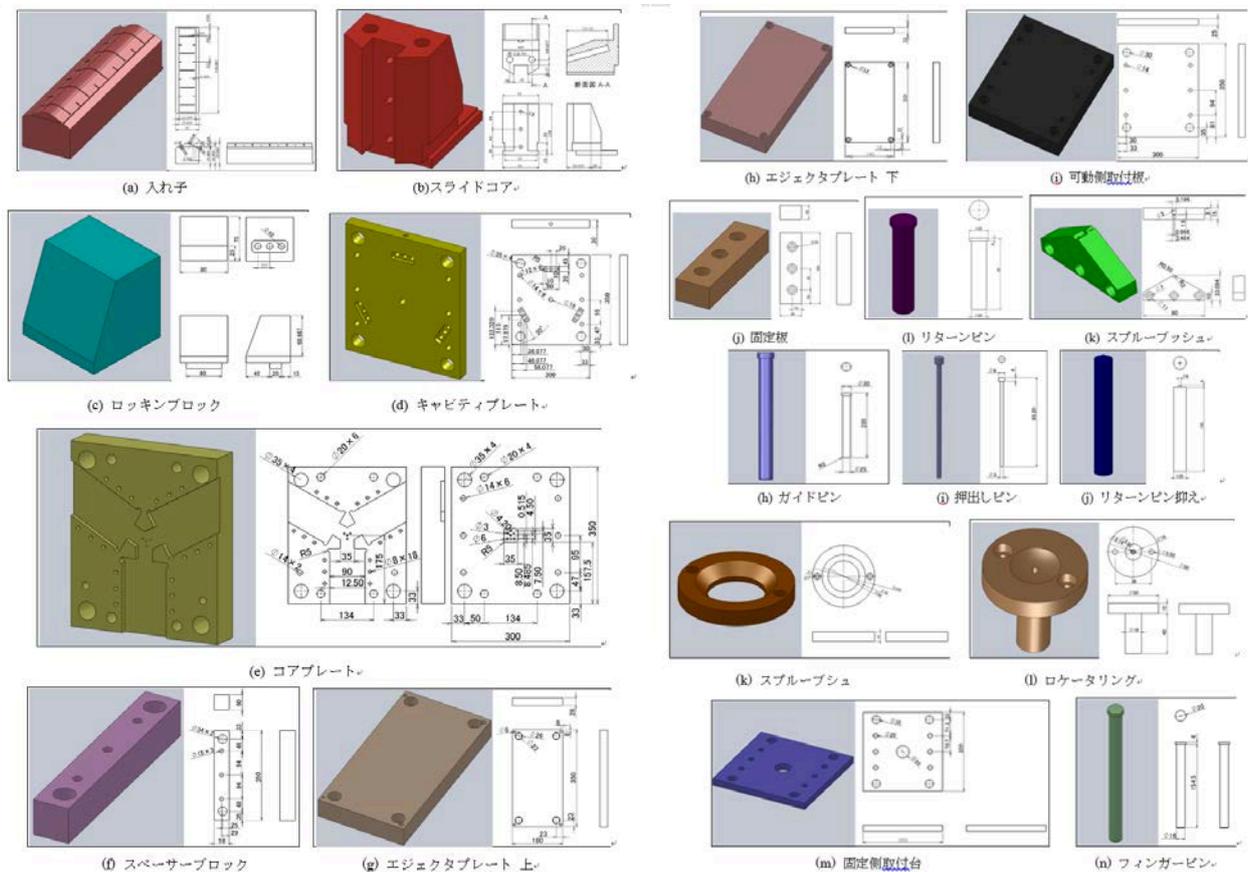


図 24 金型の部品図

組み立てて射出成形機に固定した金型の外観写真を図 25 に示す。また、この金型を用いて射出成形した試作品の外観写真を図 26 に示す。射出成形には、ABS 樹脂（白色と青色）に加え、短い炭素繊維で強化した熱可塑性樹脂（CF/PA66）を用いて成形品を作製した。汎用樹脂である ABS は熱膨張が大きく、耐摩耗性が乏しいため、課題であるスケールには不向きな材料であると考え、比強度および比弾性率が高く、熱膨張が低く、耐摩耗性に優れる CF/PA66 を用いることにした。



図 25 金型の外観写真

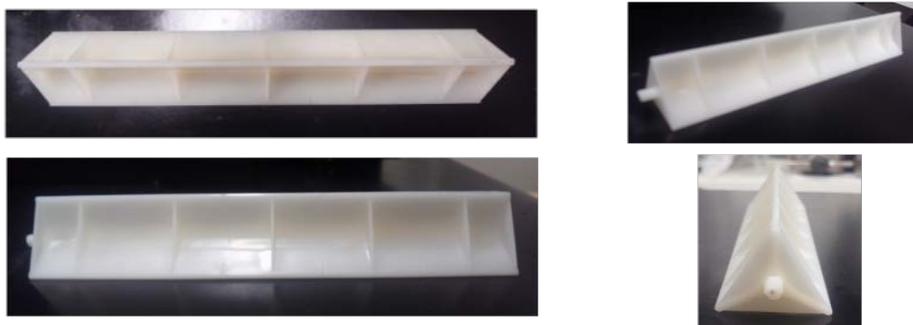
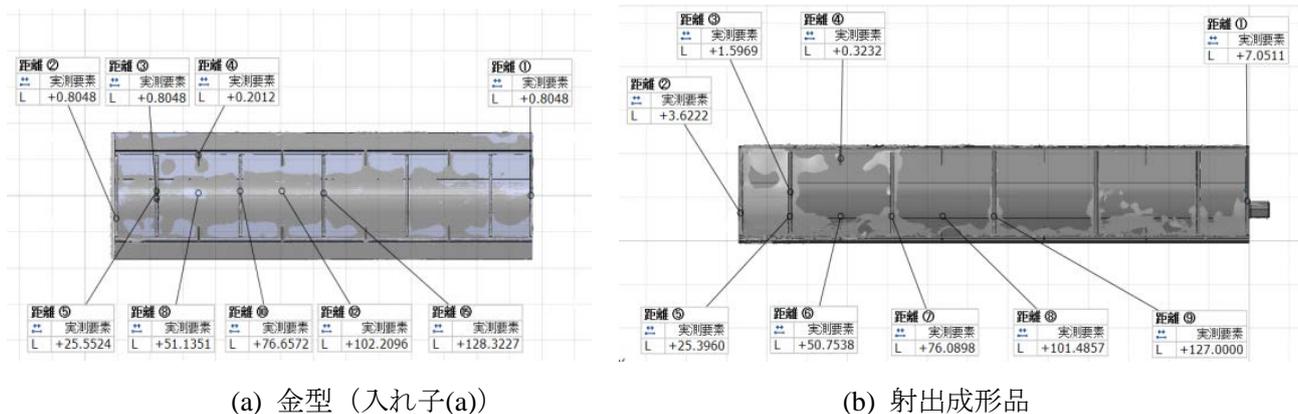


図 26 射出成形品の外観写真

製造した金型が図面通りに加工・組立されているかを確認するため、また製造した金型を用いて作製した成形品の形状が図面通りに検証するため、デジタル計測ロボットを用いて金型および成形品の形状測定を行った。金型の入れ子(a)および射出成形品の計測結果例を図 27 に示す。各寸法に加え、CAD データに対する表面の凹凸の状態が可視化できるため、磨き仕上げを行うのに有効である。

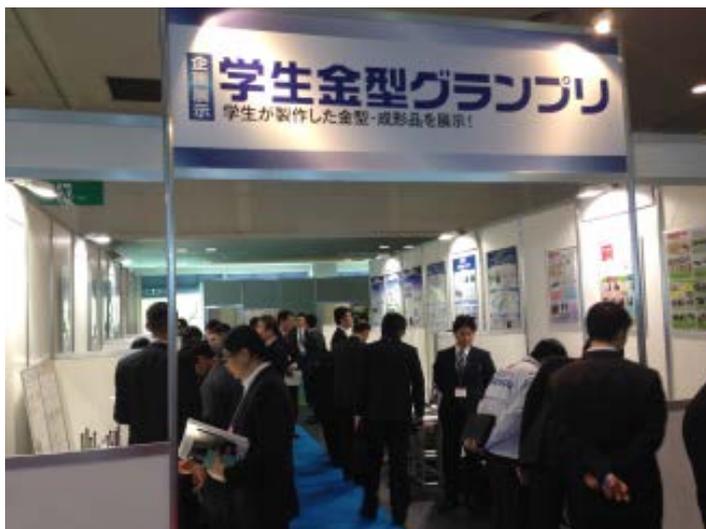


(a) 金型（入れ子(a)）

(b) 射出成形品

図 27 形状測定の結果例

2014年4月16～19日の4日間、インテックス大阪6号館AでINTERMOLD 2014/金型展 2014 /金属プレス加工技術展 2014 が開催され、同会場にて2014年度第6回学生金型グランプリの展示および、4月17日にオープンセミナー第2会場にてプレゼンテーションが開催された。その展示および発表風景を図28に示す。出場校は、プレス型部門に岩手大学・岐阜大学・大連工業大学の3校、プラスチック型部門に岩手大学・岐阜大学・近畿大学・大分県立工科短期大学校・九州工業大学・大連工業大学の6校であった。どのブースにも多数の金型関連企業の方々が参加され、技術的にも厳しい質問が行われ、また採用担当者も積極的に質問され、どの出場校の学生も懸命な姿勢で応えていた。今回は日本金型工業会ブースより出展された50社の会員企業の方々が審査員として、プロの目線で厳正なる審査が行われた。本学は受賞に漏れたが初出場の目標は果たせ、次回への課題も明らかになった。



(a) 展示会場



(b) 修了証書



(c) 展示物 (金型, 成形品等)



(c) 展示物 (金型入れ子, 成形品)



(e) プレゼンテーション会場

図28 2014年度第6回学生金型グランプリの展示・発表風景

4. 2015 年度第 7 回学生金型グランプリへの出場

2015 年度第 7 回学生金型グランプリの課題が 9 月初旬に社団法人日本金型工業会から図 29 に示すような課題（プラスチック課題：ティーパックレスト（図 30））図面が提供された。別に金属プレス成形の課題図面も提供されたが、昨年度と同様、本学では金属プレス成形機を導入していないため、プラスチック射出成形の課題で出場することにした。昨年度に出場経験のある学部 4 年の倉留京介君に加え、学部 3 年の岡本直樹君、西向孝史君、嶋田翔太君が卒研ゼミナールとして参加希望し、さらに大学院東大阪モノづくり専攻の修士 2 年の長井孝太郎君および修士 1 年の山本恵司君が加わった。東大阪モノづくり専攻生の両名は、近隣の金型製造業またはプラスチック射出成形企業に勤務しながら修士研究を企業で行い、週末に大学で講義を受けるという社会人と学生の両面の生活を過ごしており、金型の設計・製造およびプラスチック射出成形の現場で働き学ぶ学生が本グランプリへの出場に参加することは、「実学教育」を教育方針とする本学にとって望ましい体制が整った。今回は研究支援者の金型職人が主導で金型の設計・製造から射出成形まで行ってきたという反省を踏まえ、今回は東大阪モノづくり専攻生に金型の基本設計を自らが担当し、他の学部生を指導する基本方針とした。

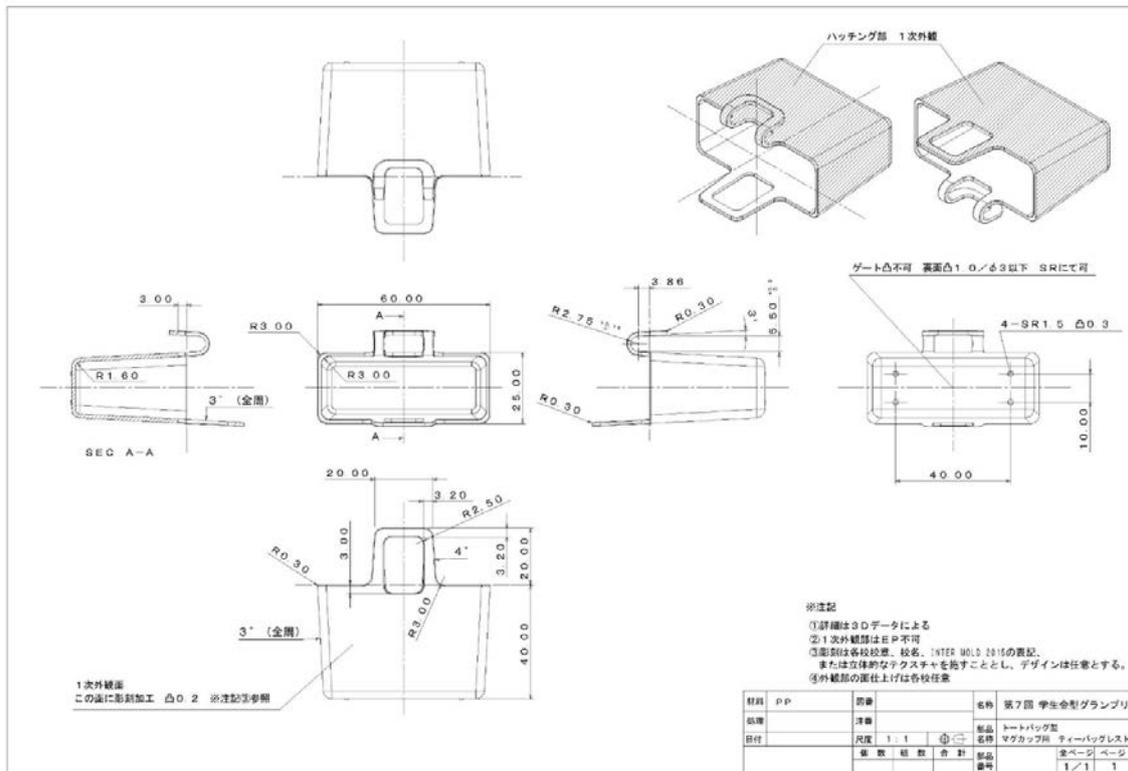


図 29 2015 年度第 7 回学生金型グランプリ課題（プラスチック課題）の二次元図面



図 30 成形品の 3 次元 CAD モデル，および成形品の利用例（原田孝教授撮影）

金型設計では、現場の技術者の実践経験と最新のコンピュータシミュレーション技術とを駆使して最適な条件を見出し、確固たる設計指針を定める必要がある。本学においても、熟練の金型技術者の助言の下、射出成形解析により得られた計算結果を十分に検討して金型を設計した。射出成形金型の設計において、キャビティ内に流動する熔融樹脂の流動挙動を把握することは極めて重要であるが、オンラインで樹脂流動挙動を把握することは多大な労力や費用が必要である。そのため、金型設計を行うにあたり、市販の射出成形 CAE ソフト（サイバネットシステム(株)製、PLANETS）を用いて、金型キャビティ内の流動解析を行った。図 31 に示すような解析モデルを作成し、樹脂流動解析、金型冷却解析および反り解析を実施した。

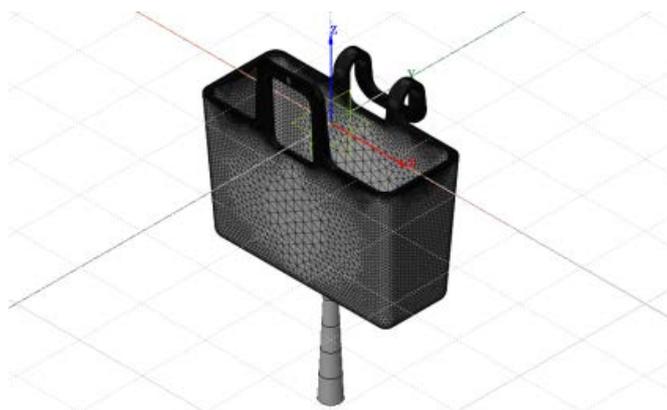


図 31 三次元有限要素解析モデル

ゲートは 1 点ピンゲートとし、ゲート位置を製品の底面部またはフック部に設けた 2 つの場合について、表 2 に示すような解析条件で樹脂流動解析を行い、樹脂の充填性を検討した。解析結果より得られたゲート位置の違いによる最大射出圧力と最大型締力の比較を表 3 に示す。充填時の最大射出圧は、底面部のゲート位置の場合ではフック部に配置した場合と比べて 46% 小さくなることが分かった。ゲート位置を底面部に設置した場合の樹脂流動の時間変化を図 32 に示す。ガス溜まりが製品側面部の 2 か所と、取手部およびフック部の合計 4 か所に生じることが確認できる。

成形品を適正に冷却するために、冷却管の配置位置および冷却管径について検討した。離型時において成形品の外面と内面で温度差が小さくなるように、冷却管を設置した。金型冷却解析で得られた成形品の温度分布を図 33 に示す。製品内での温度差は最大で約 20°C で、均一な成形品の表面温度が得られていることが分かった。

表 2 射出成形解析条件

樹脂温度, T_R	220 °C
金型温度, T_m	50 °C
射出流量, Q	40 cm ³ /s

表 3 ゲート位置の違いによる最大射出圧力と最大型締力の比較

ゲート位置	最大射出圧力 [MPa]	最大型締力 [t]
底面部	31.5	3.2
フック部	58.6	3.3

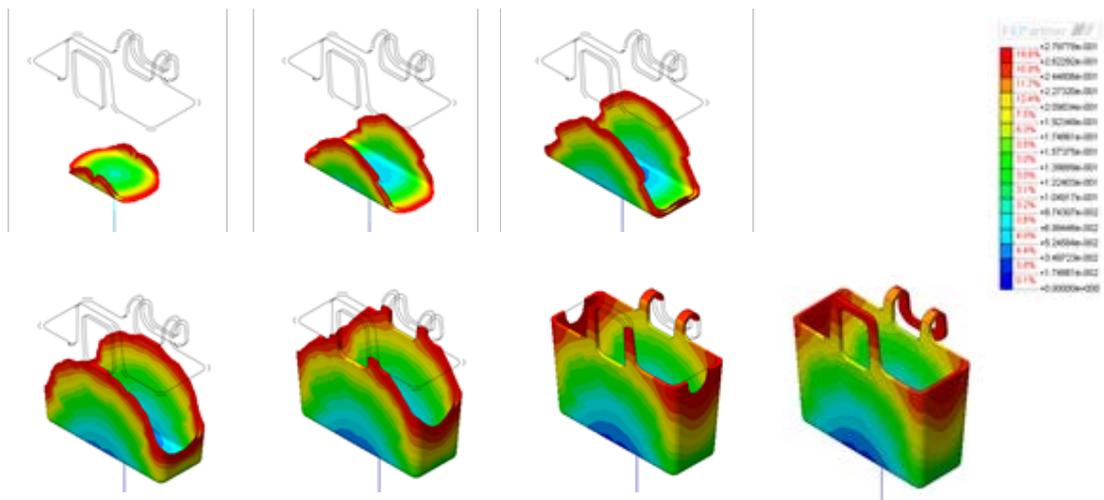


図 32 メルトフロントの時間変化

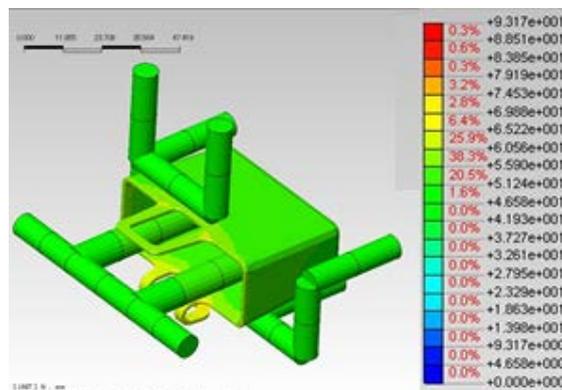
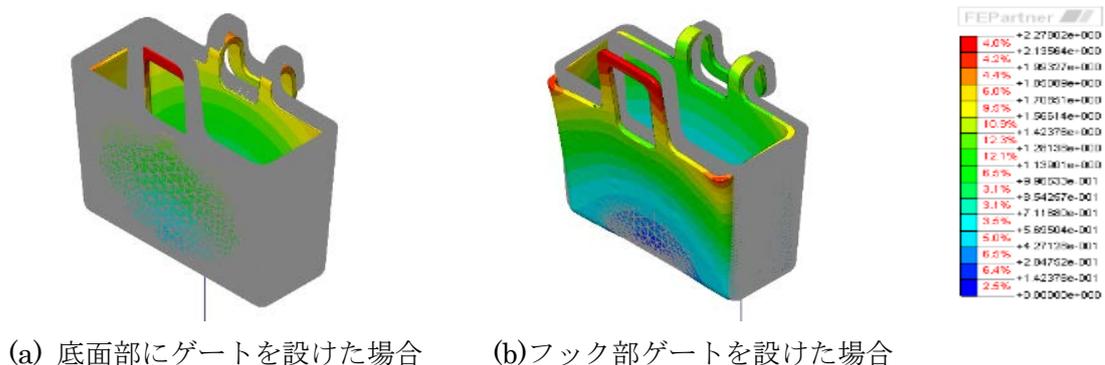


図 33 冷却管と成形品の温度分布

流動解析の場合において検討した 2 種類のゲート位置に対してそり変形量を評価した。ゲート位置の違いによる成形品の収縮量の比較および収縮方向をそれぞれ図 34 に示す。収縮量はゲート位置が底面部にある方がフック部に比べて、90%程度小さくなっている。また、収縮方向はゲート位置が底面部の場合、成形品がコア側に抱きつくように生じていることが確認できる。



(a) 底面部にゲートを設けた場合 (b)フック部ゲートを設けた場合

図 34 ゲート位置の違いによる収縮量の比較

金型の設計を行う際、前節で示した樹脂流動解析結果を考慮しながら、金型の冷却管、エアベントの位置等を決定した。その理由は、本課題は製品厚さが小さいため、連続した成形時に突き出し不良が生じることが予想されたためである。また、成形品に残るパーティングラインを目立たないようにすることに配慮した。その結果、金型加工が困難になるが、図 35 に示すような部位を割り型の位置にした。

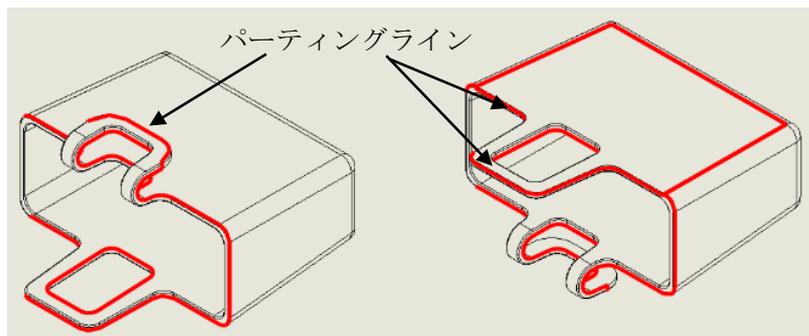


図 35 パーティングラインの発生箇所

設計した射出成形金型の組立図およびその拡散分解図を図 36 および図 37 に示す. 金型のサイズを小型化するとともに, 金型部品数を最小限に留め, 所望の成形品を安定して成形できる構造とした.

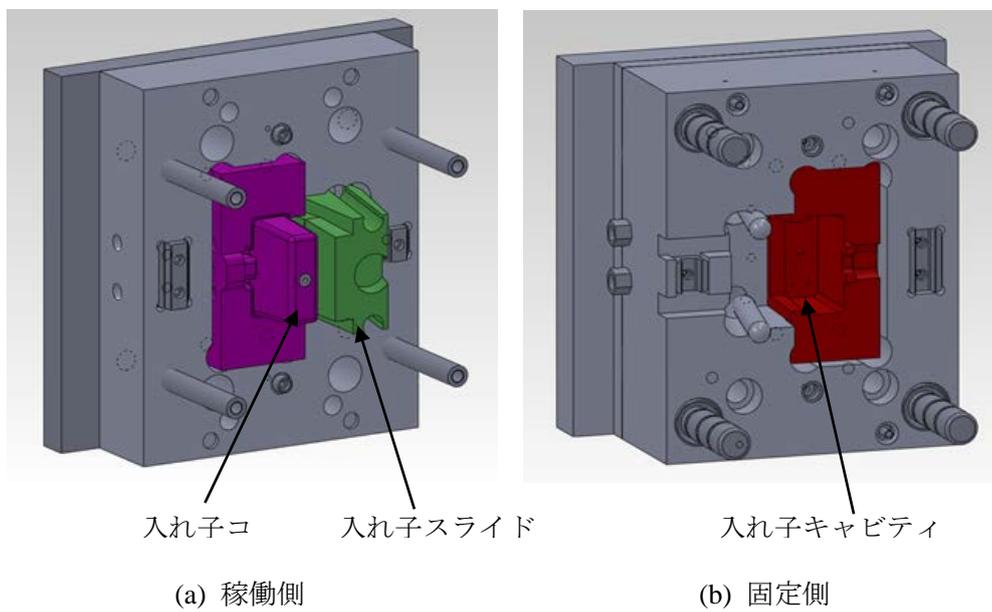


図 36 射出成形金型の組立図

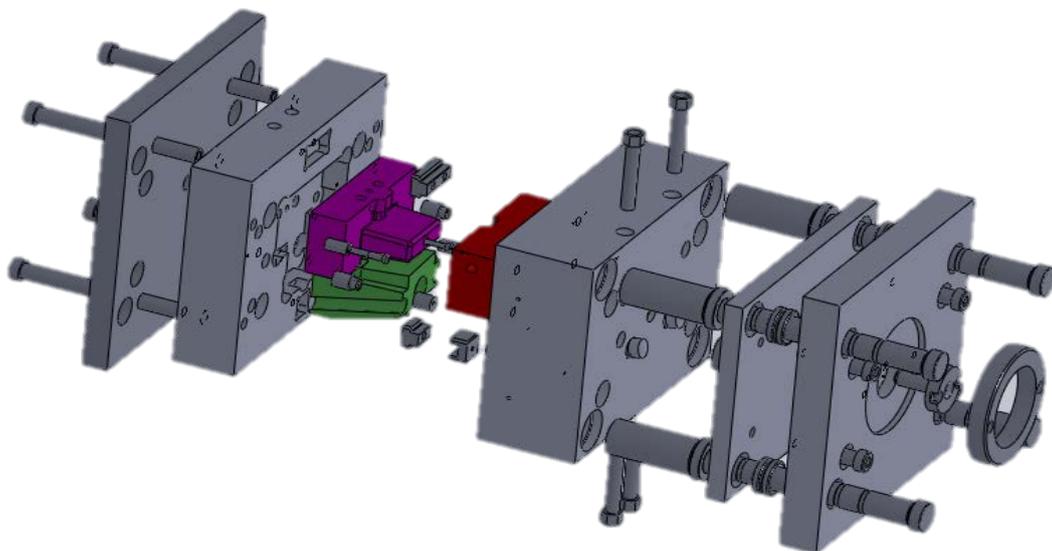


図 37 金型の拡散分解図

金型の小型化に着目し、金型の設計を行った。本課題の形状からアンダーカット部分は 2 ヶ所ある。1 つのスライドでアンダーカット処理を行う機構を選択した。しかし、一般的なスライド機構は必要な部品点数が多く、アンダーカット処理にスライド機構を用いると図 38 に示すように金型のサイズや重量は大きくなる。そのため、スライド機構を小さくすることにより、金型全体の小型化と軽量化を図ることにした。その結果、表 4 に示すように一般的なスライド機構と比較して部品点数を 4 点減らし、また表 5 に示すように一般的なスライド機構と小型スライド機構の 3 次元モデルから算出した体積比較から分かるように、小型のスライド機構が設計できた。

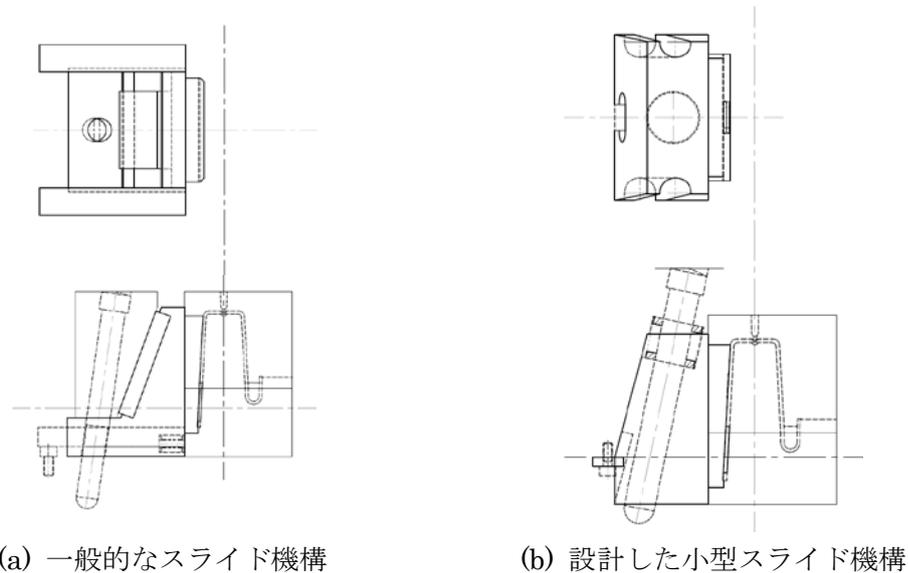


図 38 スライド機構の比較

表 4 スライドに使用する部品点数の比較

	一般的なスライド機構	小型スライド機構
アンギュラピン	1	2
スライド押え板	2	0
ロッキングブロック	1	0
ライナー板	1	0
スライドストッパ	1	1
引張りピン	0	1
引張りピン固定板	0	1
ボルト	7	4
合計部品点数	13	9

表 5 一般的なスライド機構と小型スライド機構の体積比較

	一般的なスライド機構	小型スライド機	体積割合(%)
部品体積 V_p (m ²)	0.257	0.188	- 26.8
加工体積 V_m (m ²)	0.426	0.198	- 53.5

使用材料のポリプロピレンは硬度が低いため、薄肉形状ではエジェクタピンで押すと破損の恐れがある。そのため、エア式のエジェクタを採用した。また、成形品の形状よりピンゲートとし、ダイセットは3プレートタイプを選定した。小型スライド機構の動作順序を図39に示す。小型スライド機構はアンギュラピンに沿って動作し、コアプレートに取り付けられた鉤状の部品が型開きによりスライド内部のピンと小型スライドのキャビティプレート間に設置されたスプリングにより動作する構造とした。しかし、スプリング方式は射出成形を多数行うにつれて、その弾性回復が安定しないため、確実に動作しないという問題も生じた。さらに、鉤状の部品が損耗し、スライドが動作しないという問題も生じた。金型の機構が複雑になれば使用頻度に応じてトラブルが多発することが理解できた。今回は、改修することはせず、グリースによる潤滑や手磨きなどによる調整で動作できるように対処した。

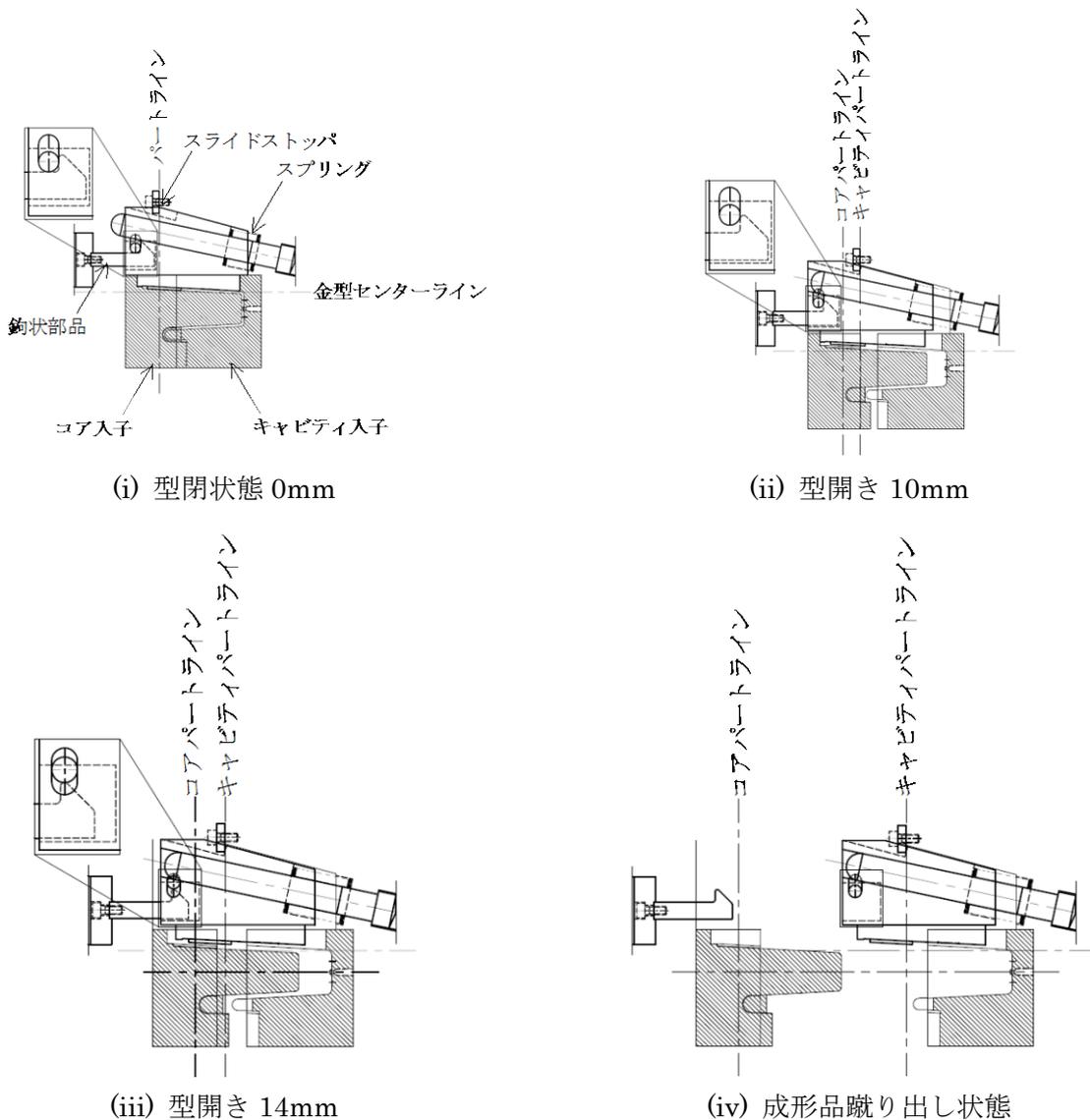


図 39 小型スライド機構の動作順序

成形時の金型の動作順序を図40に示す。3プレート金型の動作順序の調整は、パーティングブロックおよびプラーボルトを用いた。

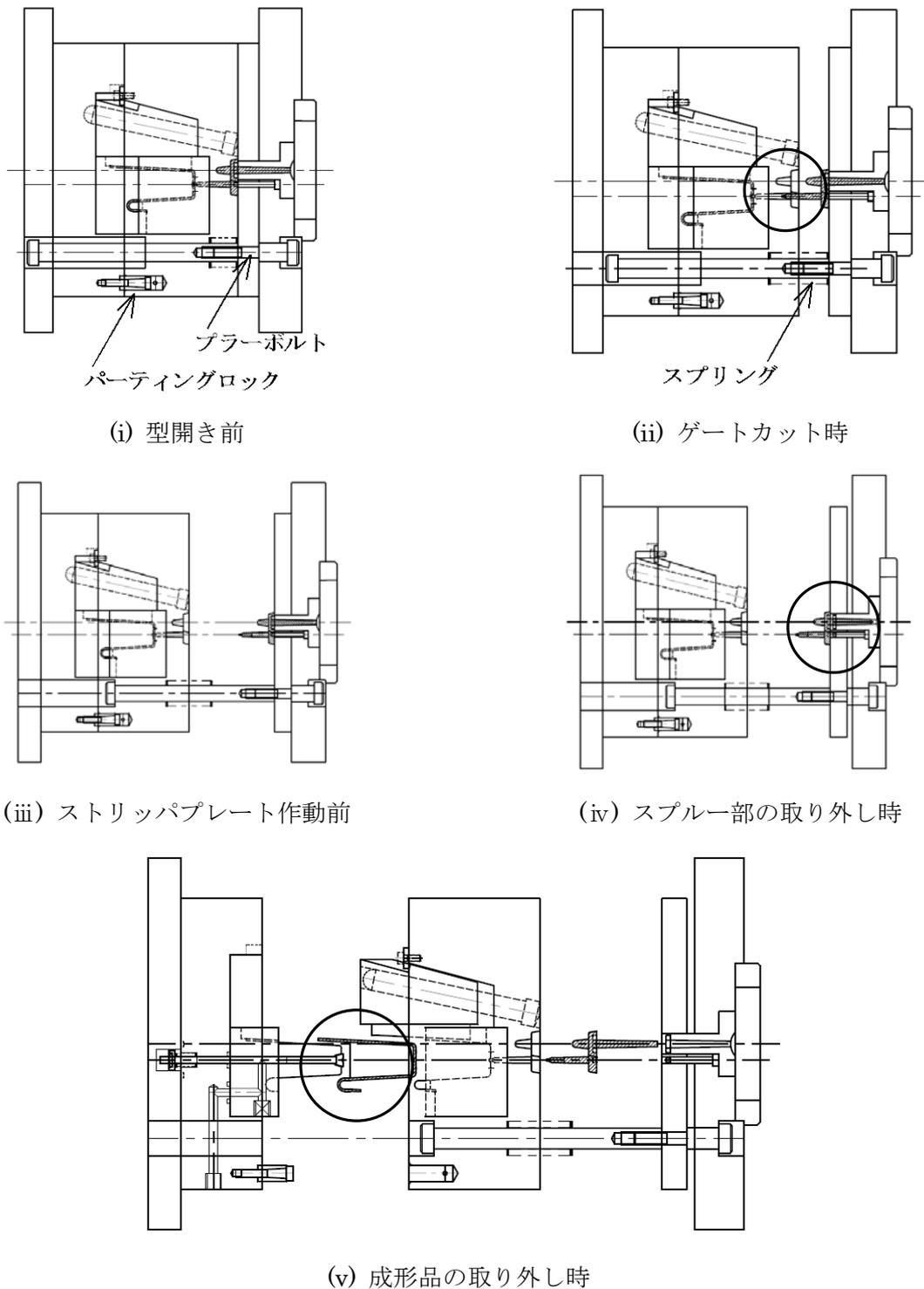


図 40 3 プレート金型の動作順序

金型の小型化やパーティングラインを目立たない箇所につけるよう設計したため、加工難易度が高くなった。そのため、マシニングセンタによる切削後に放電加工を行った。放電加工は主に角部が円弧を付けたくない箇所や切削困難な深溝部に用いた。その理由は、マシニングセンタで切削加工を行った場合、刃先にノーズ半径があるため角部に円弧が生じ、また深い溝部の切削を行うと逃げが生じてしまう可能性が考えられ、切削加工後に手仕上げ加工が必要であるためである。製作した射出成形金型の外観写真を図 41 に示す。本金型は固定側型板、可動側型板およびランナーstripperプレートから構成される市販の 3 プレートのダイセットに、コア、スライド、キャビティの 3 つの入れ子を取り付けた。

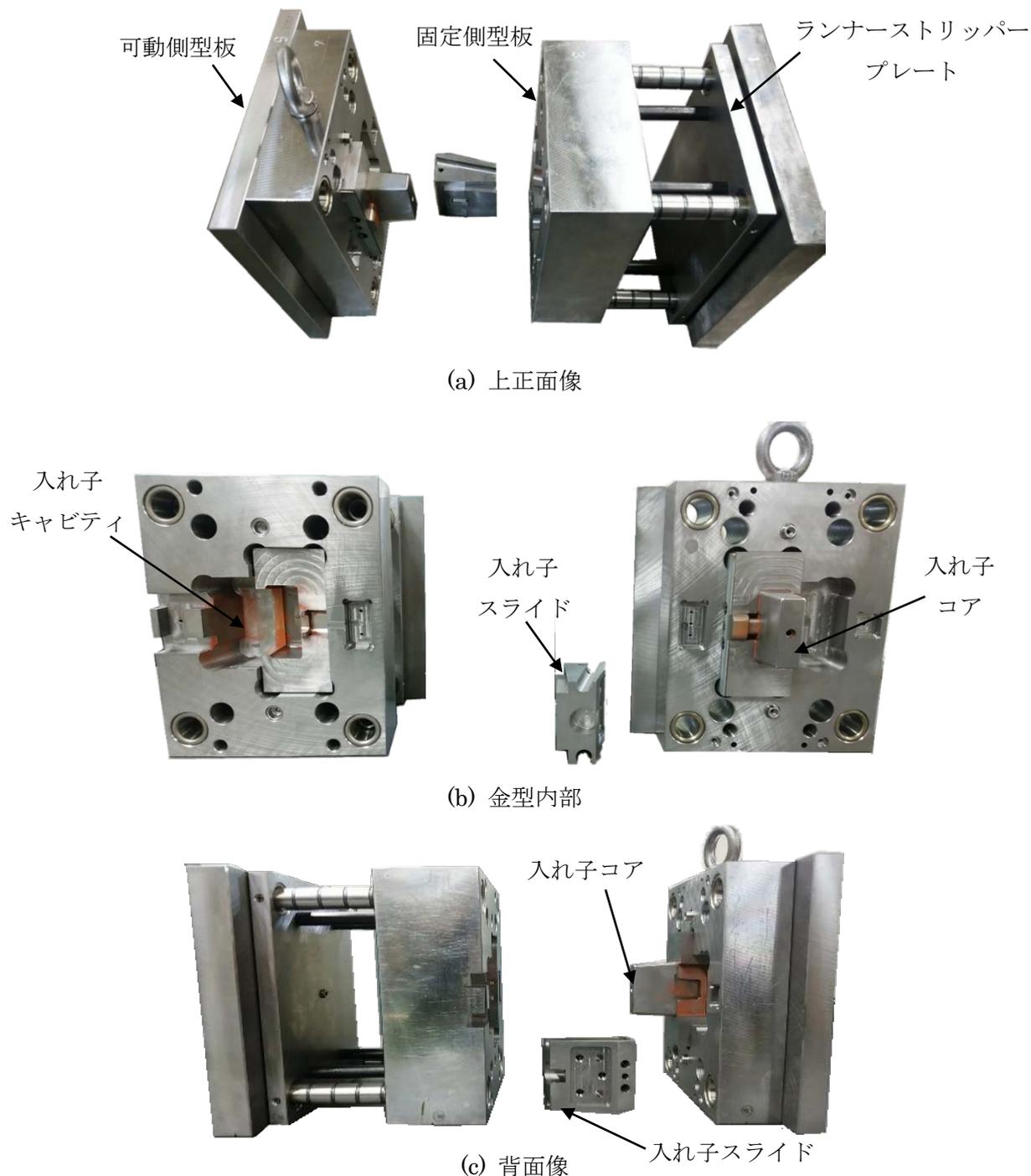


図 41 製作した射出成形金型の外観写真

本課題に対する作業工程を図 42 に示す。課題の成形品の 2 次元図面を 3 次元モデル化し、成形品の流動解析と同時に、金型の設計を 3 次元 CAD で実施した。設計した金型の部品の 3 次元モデルおよび 2 次元図面を用いて、金型部品の加工を行った。その際、加工した主要な電極や金型部品をデジタル画像計測ロボットにより形状測定を行い、CAD 通りに加工できているか形状・寸法を評価した。次に、金型部品を組み立てて、同様に組み立てた金型をデジタル画像計測ロボットにより形状測定を行い、CAD と比較した。金型部品および組立時の形状・寸法の誤差を改善し得られた金型を用いて射出成形を行い、射出条件を種々変化させて成形品を得た。この成形品を上記と同様のデジタル画像計測ロボットにより形状測定を行い、成形品の CAD と比較し、射出成形条件の適正化または金型の修正を繰り返し、課題

の成形品の2次元図面に指定された形状・寸法の成形品を量産できるようにした。このように、金型部品の加工または組立の精度の影響と、射出成形条件の選定の影響を分けて、問題点の把握およびその改善を図るという作業指針をデジタル計測の一元化により実現することを目指した。

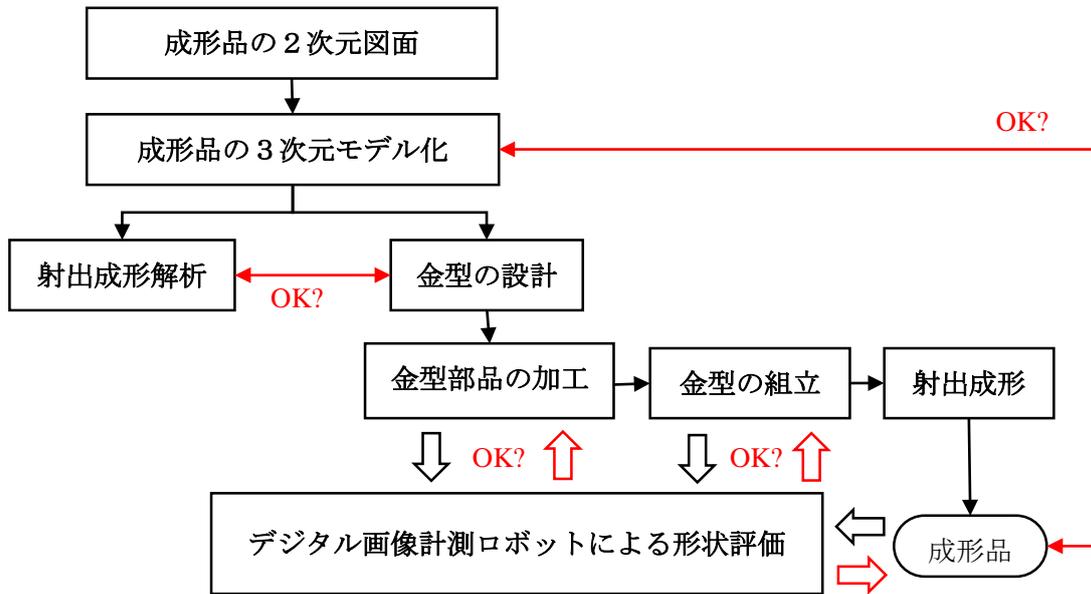


図 42 作業工程（計測の一元化）

金型のキャビティ入れ子と CAD 寸法の計測結果の比較を図 43 に示す。幅、深さおよび角度とも加工誤差は 1% 以下であり、高い加工精度が得られていることが分かった。

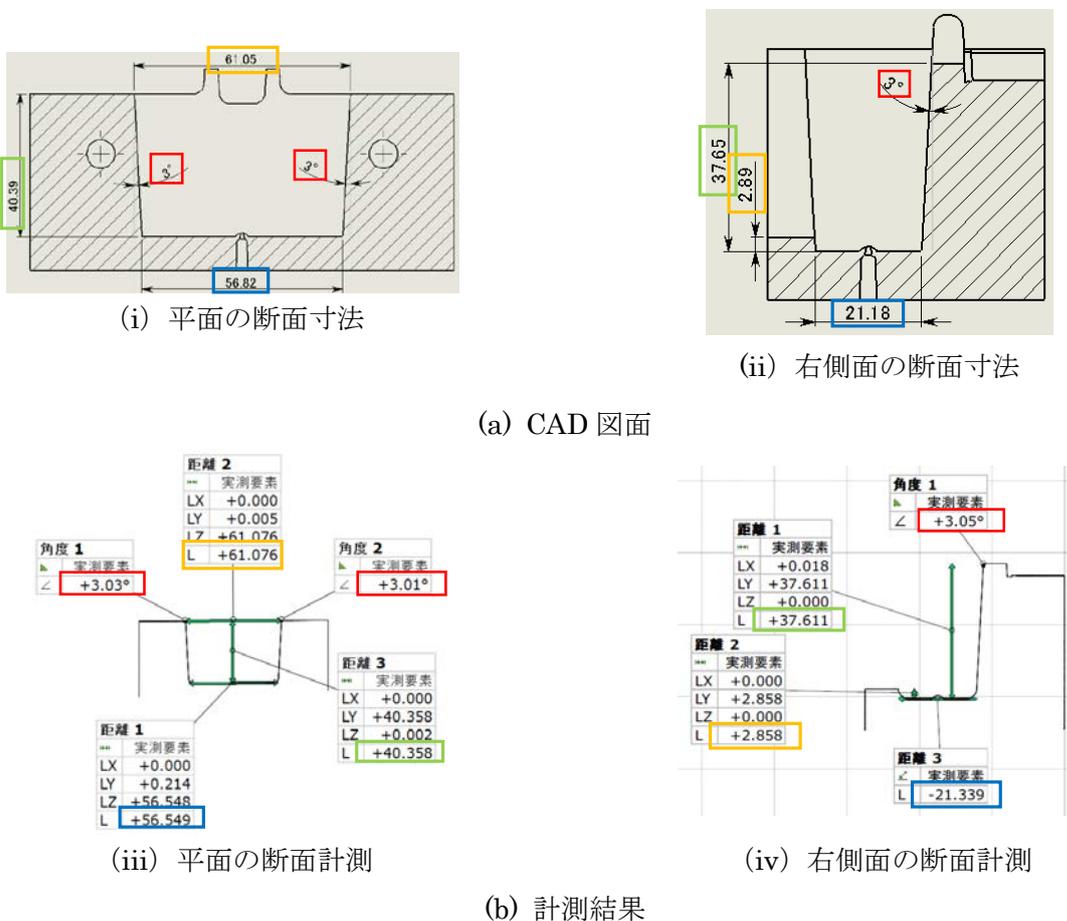
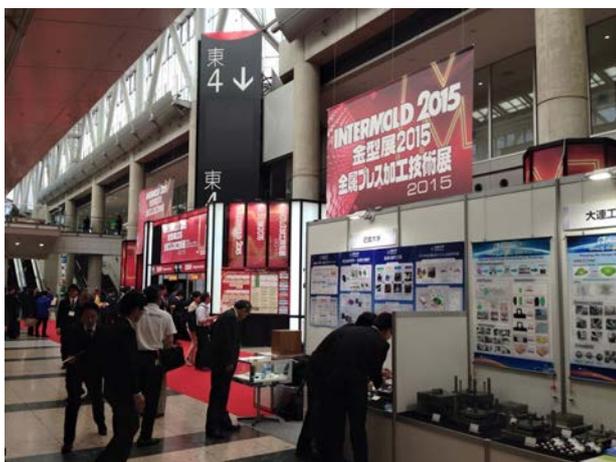


図 43 キャビティ入れ子の CAD 寸法と計測結果の比較

2015年4月15～19日の4日間、東京ビッグサイト東4ホールでINTERMOLD 2015／金型展 2015／金属プレス加工技術展 2015 が開催され、東4ホール入口にて2015年度第7回学生金型グランプリの展示および、4月16日にオープンセミナー第2会場にてプレゼンテーションが開催された。その展示および発表風景を図44に示す。出場校は、プレス型部門に岩手大学・岐阜大学・大連工業大学の3校、プラスチック型部門に岩手大学・岐阜大学・近畿大学・大分県立工科短期大学校・九州工業大学・大連工業大学の6校であった。今回は出展企業が非常に多く、学生金型グランプリの展示ブースは会場内ではなく、一般来場者が往来する東4ホール入口に設けられたこともあり、他の展示会の来場者が多く、金型や射出成形などをご存知のない技術系以外の一般の方々も非常に多く、基礎的な質問と、金型関連企業やメーカーの方々からの技術的な厳しい質問も混じり、学生は開門前の時刻から閉門を過ぎた時刻まで長時間にわたりその対応に追われていた。近畿大学の卒業生の方々も多く、本学が金型展示会に出展していることを驚かされている面や、母校を懐かしく話す方々が多かった。



(a) 展示会場



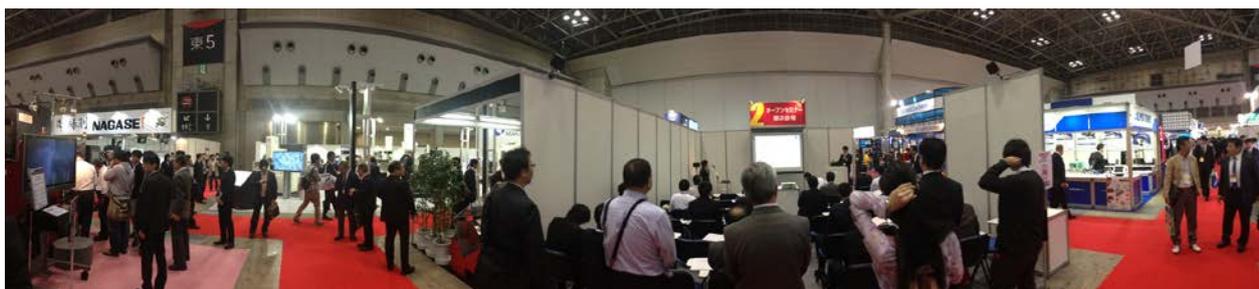
(b) 修了証書



(c) 展示ブース (審査投票箱あり)



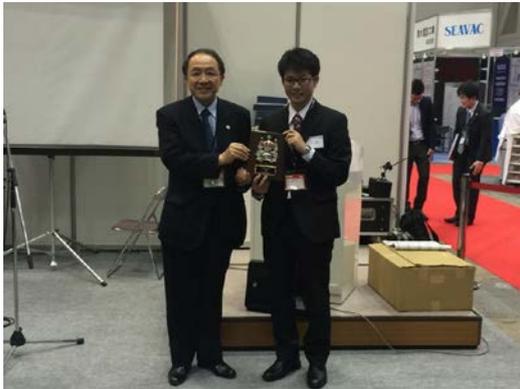
(c) 展示物 (金型, 成形品等)



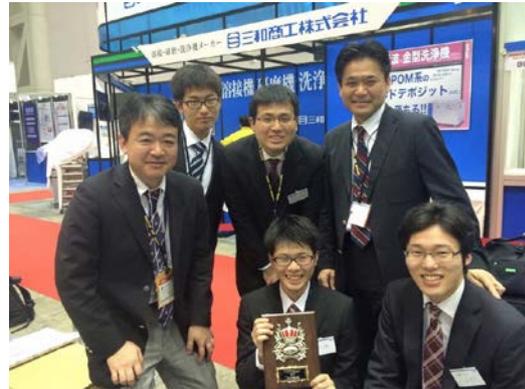
(e) プレゼンテーション会場

図44 2015年度第7回学生金型グランプリの展示・発表風景

今回は一般来場者の投票形式の審査も加わり、激戦であった。本学は金賞を逃したが、図 45 に示すように銀賞を頂いた。本受賞よりも 2 回目の出場を果たせ、首都東京での本学の活動を紹介できたことが指導者および学生の一歩の成果であったと満足している。



(a) 銀賞受賞



(b) グランプリ表彰式参加者

図 45 2015 年度第 7 回学生金型グランプリ表彰式

5. まとめ

金型プロジェクトを通じて、学生金型グランプリへの出場を目標に取り組んできた結果、学生金型グランプリ出場に求められる要件は下記の通りであることが分かった。本学が本グランプリに 2 年連続して出場できた実績から、これらの要件が備わっていることを大学内外に周知できた。

1. 金型の設計・製造・成形の 技術・安全指導力
2. 金型および成形品の製造できる 設備・予算
3. 自主的・積極的な 学生の取り組み
4. 工業会主催の展示会での学生の 発表能力

①予稿作成、②実物（金型・成形品）展示、③ポスター展示、④口頭発表、⑤来場者への対応

また、学生金型グランプリに出場した学生から、下記のような感想と要望があった。

1. 金型の製造は学生自身で行うことは非常に珍しく、座学や実験では得ることのできない二つの貴重な経験（“失敗の経験”と“問題と向き合う経験”）を同時に積めたことは、今後企業等で働く技術者となった際に貴重な財産になると思う。
2. 作業の過程で多くの問題に直面したが、研究支援者の金型職人の方に丁寧に指導・助言頂き、仲間と協力することにより問題解決ができることを知った。
3. 現在の設備以外に研削盤や研磨機、大型の部材を加工できるマシニングセンタ、金属プレス成形機、さらに金型専用の設備をもつ工場を新設し、我々のようなモノづくり学生が活躍できる場が欲しい。
4. 本出場の経験から、金型の設計・製造がいかに難しいかということが改めて分かった。しかし、先進的な工作機械や CAD/CAM ソフトの活用、さらにデジタル画像計測ロボットなどの可視化装置の利用により、金型職人のような熟練者の技術を埋めるのに役立つことを実感した。
5. 金型職人は二次元 CAD のみで金型製造の実務を行われており、本課題も二次元 CAD で行うべきと思われたが、学生は授業で三次元 CAD を習得し三次元 CAD 上で金型設計が可能であった。しかし、実際は金型の製造が複雑でコストと時間が掛かりすぎ、組立て調整が困難で、射出成形が不安定などの欠点も多く、単に動く金型を設計・製造すればよいわけではなく、金型の奥深さを知った。

6. テーマ横断型研究例

概要でも記載した通り、テーマ横断型研究については、個々の研究テーマを掘り下げることは無く、実際に地域企業が有している問題点に対し、プロジェクトに属する複数の専門分野の研究者が対策を検討し、企業が有している技術シーズと大学側の複数の研究シーズとを融合させ新たな取り組みへとつなげることが目標である。

本目標に対する取り組みの例として、①金型設計用射出成形シミュレーションの解析可能性調査並びに高精度化の検討や②成形品質向上のための多角的検討を行った。以下にその内容について記述する。まず、①の経緯について下記に示す。

1. 大阪東部地域所在の金型企業（株式会社双信様）が、H24年度に本学で開催した金型プロジェクトセミナーに参加。
2. 材料グループのプレゼンテーション（鋳造シミュレーション）に対して質問。具体的には、熱流体のシミュレーションについて射出成形への適用可能性に関する内容。これに対し、他のグループの研究者らの視点から、複合的な取り組みが必要であると判断。
3. 設計グループメンバーがセミナー終了後に詳細な聞き取りを実施、企業側のニーズを確認。射出成形シミュレーションに関する漠然とした問題意識を有していた。
4. 後日複数名のメンバーが企業訪問を行い、企業側のニーズ掘り下げおよび問題点や検討内容の具体化を実施。
5. 大学および企業各々が問題を持ち帰り、大学側は複数の専門家により予想される原因及び検討可能な内容の整理、企業側は具体事例についての資料収集を実施→プロジェクトメンバーは他のセミナー・展示会等にも参加し、当該問題が固有のものか、一般的なものかも含め、様々な角度から検討
6. 後日再度会合を持ち、大学側の検討内容と企業側の事例について情報交換、具体的な検討を進めることで合意、研究を進める。

これらを受け、図1に示すように金型作製及び成形に関する企業側の技術シーズと物性や変形状態などの最新計測技術及びシミュレーション技術に関する大学側の研究シーズの融合、ならびに本プロジェクトの援助により導入した最新計測装置の有効利用により、企業が有していた問題点の解決に向け多角的な検証が行え、回答の糸口を見いだした。

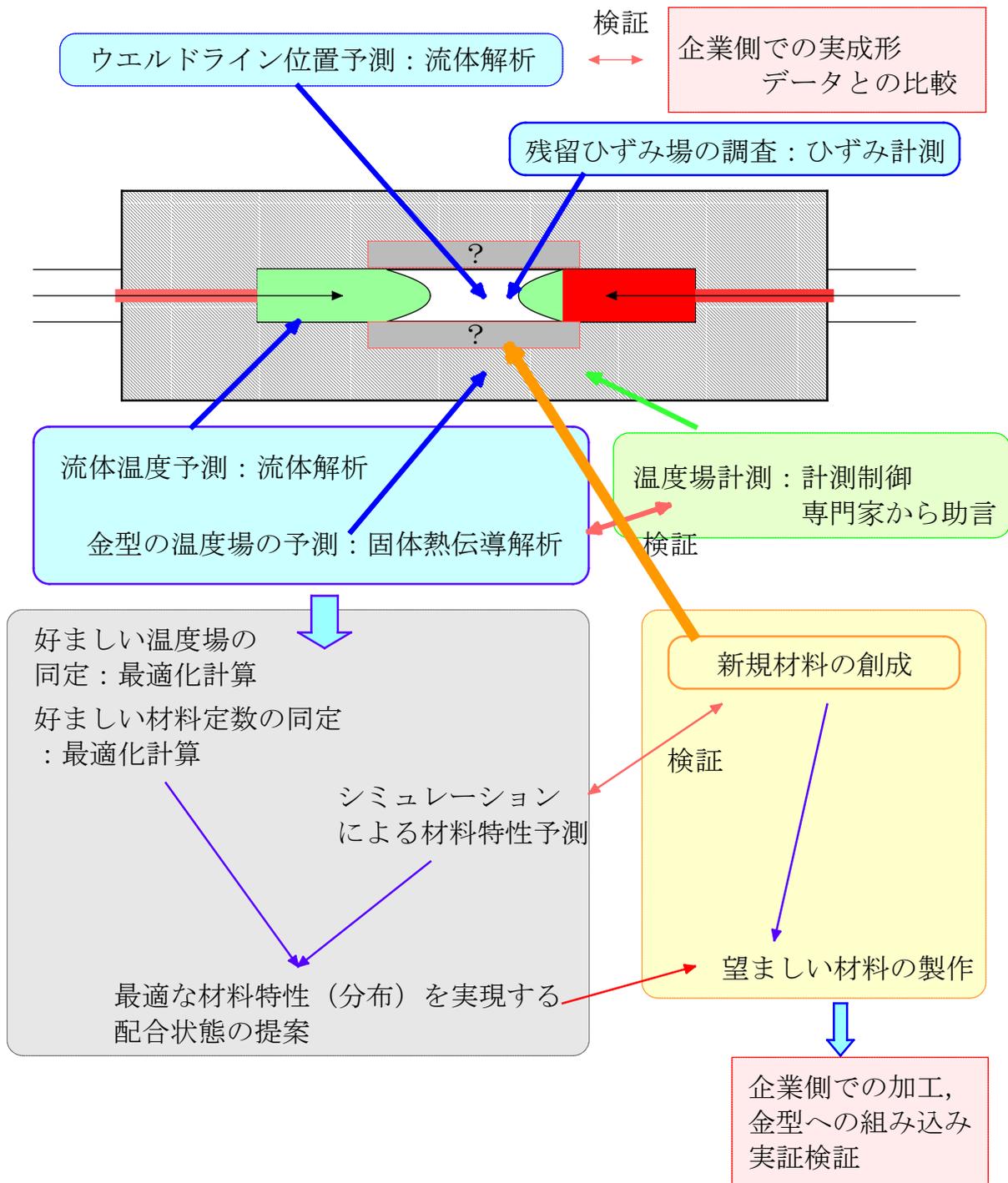


図2 材料—設計—製造グループの研究シーズと企業シーズを融合させた異分野横断型取り組みによるウエルドライン軽減対策の概念図

以上のように、分野横断型研究課題では、個々の研究者が学術論文等につながる研究成果を求めるのではなく、あくまで本プロジェクトの趣旨に鑑み、地域連携を主とした新たな取り組みの枠組みを確立することを目標とし、それを具体的に実施できている点が成果である。当然ながら、成果概要にも示したとおり、研究者側のシーズには個別の研究者の学術的研究成果が大いに貢献していることは言うまでも無い。

本取り組みでは企業側1に対し研究者側複数人で行う1:nマッチングの事例にとどま
 ったが、今後この成果を元に、複数の技術シーズと研究シーズを融合させるm:nマッ
 チングの取り組みへと拡張する予定である。この取り組みの概念を図3に示す。即ち、より革
 新的かつ効果的な成果を目指し、地域の産業界の技術シーズ群と、大学における機械分野
 の研究者を中心とする複数の専門分野の研究シーズ群を組み合わせ、協奏させながら取
 り組みを進めることが期待される。この概念を実現すべく、H27年4月より通称近大ものづ
 くり工房が設立された。

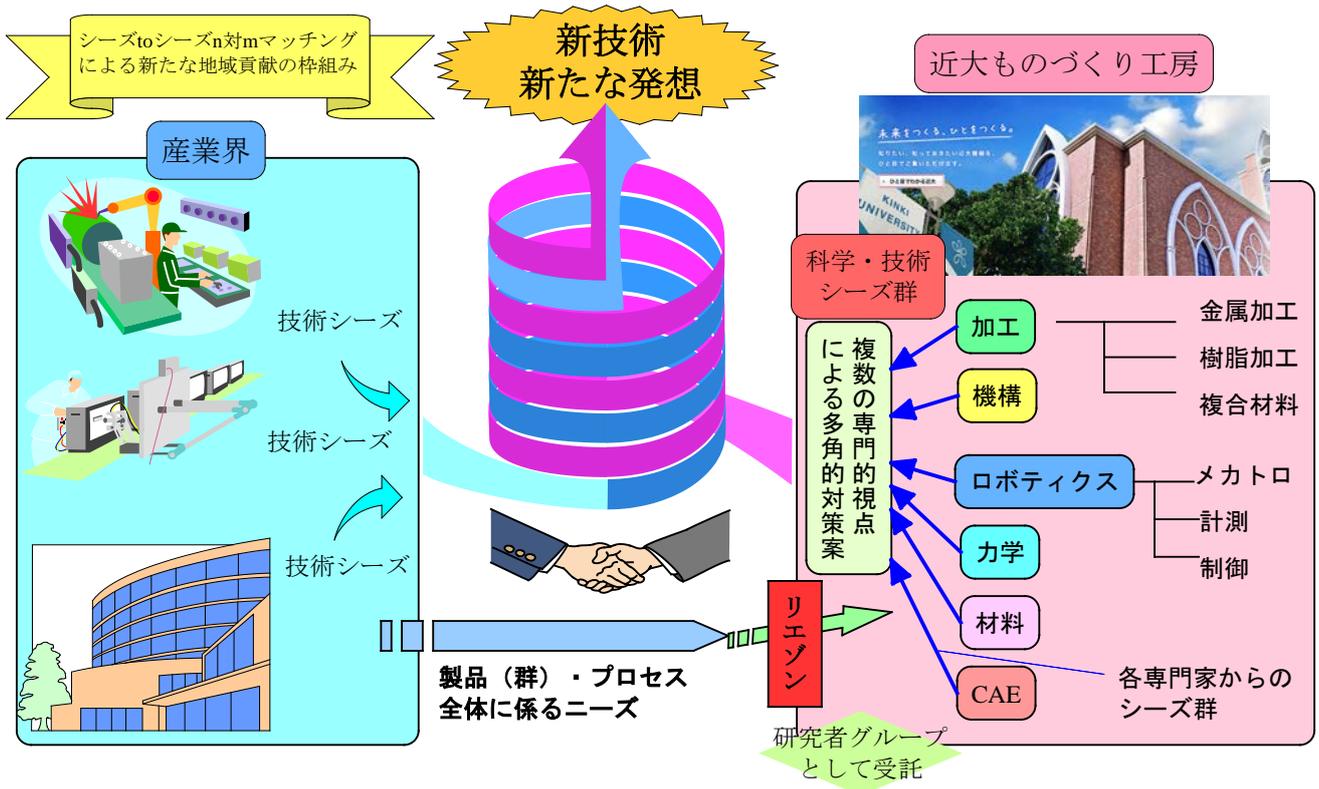


図3 本取り組みを発展させた技術シーズ群・研究シーズ群融合のn:mマッチング型地域連携の取り組み概念図

7. 付 録

(新聞、雑誌、TV ニュース等で取り上げられた内容一覧)

平成24年度～平成26年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」

新聞、雑誌、TV ニュース等で取り上げられた内容一覧

(1) 2012年 7月 19日 日刊工業新聞 「金型技術の高度化の促進へ」掲載

金型技術の高度化促進

近畿大 大阪東部の企業調査

【東大阪】近畿大学は大阪東部地域の金型製造業を対象に調査を行って課題を抽出、企業と連携して材料、設計、製造の高度化を進める。金型製造技術のデジタル化や技術人材の育成にも取り組む。2012年度中に3次元デジタル画像計測システムなどの設備を近畿大本部キャンパスに導入する。3年後をめどに関西初となる金型産業の研究拠点「大阪東部地域金型産業デザインセンター（仮称）」の開設を目指す。

近畿大理工学部は15人の研究者を材料、設計、製造の3グループに分け、金型企業とともに技

術の高度化に取り組み、研究テーマは照射による金型表面の皮膜形成、硬化材を使った製造による

3年後めどに拠点

【東大阪】近畿大学は大阪東部地域の金型製造業を対象に調査を行って課題を抽出、企業と連携して材料、設計、製造の高度化を進める。金型製造技術のデジタル化や技術人材の育成にも取り組む。2012年度中に3次元デジタル画像計測システムなどの設備を近畿大本部キャンパスに導入する。3年後をめどに関西初となる金型産業の研究拠点「大阪東部地域金型産業デザインセンター（仮称）」の開設を目指す。

8次元デジタル画像計測システム、5軸加工機などの設備を導入。13年度も射出成形機やワイヤカット放電加工機などを順次導入する計画だ。設備は企業との共同利用も行う予定。

大阪府はプラスチック成形用金型などをほじめとする金型生産額が愛知、静岡に次いで国内で3番目に多い。中でも近畿大が立地する東大阪市や八尾市などの大阪東部地域は府内の関連事業所の半数以上が集中する。

中小の技術力 大学が伸ばす

関西の大学が中小製造業の技術支援を強化している。近畿大学は金型、兵庫県立大学は金属材料分野でそれぞれ研究体制を手厚くするほか、大阪府立大学は国の中小向け支援事業を受けやすくなる取組みを始めた。地域貢献を通じて存在感を高め、学生の就職先の拡大にもつなげる。

まで一貫生産できる体制を整える。年内にも一部設備を暫定的に理工学部

の施設内に入れる。既に材料やロボットなど

が15人の教員で金型プロジェクトが発足した。

金型の表面磨きを自動化できるロボットの開発など

の研究を計画しており、センター開設まで

一定の成果を出す。西蔵和明准教授は「東部大敷地域は金型メーカ―集積地だが、アジア勢の台頭で苦戦を強いられ



近大などが開いた金型プロジェクトの説明会には地元の中小が参加した（7月6日、大阪府東大敷市）

近大 金型の研究拠点

近畿大学は3年後をメドに金型の研究拠点「大阪東部地域金型デザインセンター」（仮称）を設置する。大阪府東大敷市の理工学部のキャンパス内などを検討中だ。金型に特化した大学の拠点は珍しい。

●製造から成型まで
文部科学省の助成金を活用して約2億円をかけ、工作機械や射出成型機などを導入し、製造から成型

関西の大学の主な中小企業支援の動き

大学名	主な内容
近畿大学	金型研究に着手。3年後をメドに研究センターを設置
大阪府立大	経済産業省の手掛ける技術開発事業への申請支援
兵庫県立大	姫路市と周辺の中小から学生卒論のテーマを募集、技術課題解決を支援
関西大学	大阪府八尾市内の中小と連携し、金型加工などの際出るバリの発生抑制を研究
大阪市立大	中小企業向けに無料法律相談を実施
京都学園大	中小との連携強化を図り、2015年に京都市内に新キャンパス開設

兵庫県立大

金属材料を共同開発

(3) 2012年10月1日 日本金型工業会 機関誌「金型」 インタービュー記事掲載

KANAGATA
金型
Die & Mold

社団法人日本**金型**工業会機関誌

No.150 [秋号]
2012年10月1日発行

$z=a(x^2-y^2)$

巻頭インタビュー 「いまこそ金型加工技術を活かすとき」
野田金型(有) 取締役社長 堀口展男 氏

特集 経済産業省「元気なモノ作り中小企業300社」〈金型関連企業編〉
'06～'09年選定の金型企業32社の現況を追う

主要記事 ○高精細金型が織りなす加飾技術
○型内圧を計る—そのメリットと手法
○大学が伸ばす中小企業の技術力
—近畿大学が関西初の金型研究拠点に

連載 「金型人列伝」② 榎丸順 今川順夫 氏
「戦後の金型産業史」〈第2回〉

◆工業会だより
◆統計 機械統計 輸出入統計

$z=acos\sqrt{x^2+y^2}$

社団法人 **日本金型工業会**
Japan Die & Mold Industry Association.



大阪産業創造館におけるプロジェクトのセミナー

うになっているのか。

A. 現在、高精度5軸マシニングセンターを導入済みで、年内には型彫り放電加工機、ワイヤー放電加工機、射出成形機等の工作機械を順次導入していく計画である。

また今後、アジアで初の計測データを3次元画像へ変換出来る、デジタル画像計測システムやレーザー計測機等の導入も行っていく予定だ。そして、諸外国で行われていることが近畿大学でも出来るようにしていく。

Q 7. 材料グループの取り組みについて、もう少し詳しく教えて欲しい。

A. 溶射、鋳造技術の最適化による型材の高機能化を図ることが目標である。

- 1) 減圧プラズマによる溶射で、型材表面に皮膜を形成し、耐食性や耐磨耗性の向上を図る。
- 2) 短繊維セラミックス等の強化材(成形体)を金型内にセットし、合金を流し込むことで、高熱伝導率かつ高耐磨耗性の鋳造方式

の新たな局部複合材を作り出す。

- 3) 冷却パイプを铸ぐるみで製作することで、金型冷却性能の向上をはかる。このことで、熱間金型の熱疲労亀裂、割れ、変形、へたり等の問題を解決し、金型の高寿命化を図る。
- 4) 特に多数個取り鋳造金型における、成形時の温度差や寸法のバラつきをなくし、最適化を測った金型設計方式を考案する。

平成24、25年度に研究を行って、26年度には試作金型を製作する計画である。

Q 8. 設計グループの取り組みについて、もう少し詳しく教えて欲しい。

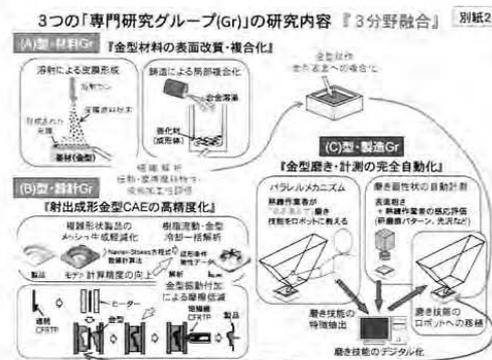
A. 設計グループの取り組みは以下の3点である。

- 1) 型構造や樹脂の流動解析を金型設計へ反映させるために、設計、評価のためのCAE技術の開発を行う。特に、冷却効率向上を目指して金属光造形複合加工を応用した水管の最適化を図る。

また、CAE解析の効率化のためにメッシュの大型化を図っていく。

- 2) アルミ、カーボンコンポジット成形品の耐衝撃特性の評価等、CFRTP(炭素繊維強化熱可塑性樹脂)の射出圧縮成形利用技術開発を行う。
- 3) コアの温度や樹脂圧力分布を計測すると共に、振動付加による超仕上げ加工によって、コア材の表面粗さの改善を図り、成形品突き出し時の離型摩擦抵抗を軽減させる技術開発を行う。

Q 9. 製造グループの取り組みについて、もう少し詳しく教えて欲しい。



Q 3. 地域との連携がテーマ推進の大きなキーですが、どのようにして連携していこうとお考えでしょうか。

A. これまでもやって来ましたが、今後更に多くの東大阪地域の金型メーカーや成形先を一社一社訪問して、現場の要望や課題を聴いていくつもりです。

Q 4. 他の大学の金型研究との違いは何でしょうか。

A. それは、本プロジェクトには金型経験者が一人もいないということです。ニーズ志向だと要望や課題が多すぎてテーマの絞込みが難しくなりますが、今回のプロジェクトの特徴は、近畿大学の理工学部が現在保有している得意技術を集約して、高度化を目指していくものです。

Q 5. それでは、地域企業との連携のやり方がキーとなりますね。

A. そうです。セミナーについて、当面はアンケートやヒアリングで現場の声を聴いていきますが、今後は研究成果等について順次発信していこうと考えています。

Q 6. 最後に近畿大学の強みは何でしょうか。

A. 実学を重視する近畿大学として、ただ単に金型製作技術の高度化研究ではなく、プロジェクト

を通して金型技術を十分に理解し使いこなせる人材を、製品開発設計者をはじめ広くものづくり人材としても育成することで、総合的な産業人材育成が出来ることです。

★

今回のプロジェクトは金型技術の高度化と合わせて地域企業との連携や地域貢献をうたっている。貢献の切り口は2つである。一つは、誰もが欲しくなるような高度で貴重なものを提供すること（シーズ志向）。2つ目は、大半が望んでいるが出来なかったことを実現してあげることである（ニーズ志向）。

今回のプロジェクト推進に当たって、シーズ志向の研究を目指す一方で、地域の企業の声も集め、研究がものづくりの現場から遊離しないようにという工夫、配慮も行っており、非常にユニークな試みである。なんと言っても、関西で初めて近畿大学が発信した意義は極めて大きく、決して『先進的』とか『高度化』技術の追求に留まることなく、本当に地域の企業（経営者～若手）と思いをひとつにして取組んでいくことで、大きな花が咲き、実もなるであろう。今後の活動に注目し、期待したい。（取材 河野 泰久）

(50ページより)

3. 日本金型工業会の設立意義

日本金型工業会はその設立趣意書で、「・・・金型業者は従来孤立した企業の乱立で業界相互の連絡もなく、従ってその意見をまとめて政府に具申したり、関連業界と意見を交流することもできなかったが、この点にも留意し、工業会設立が企図されたが、今回の動きは全国的な要請となり、行政当局の支援のもとに日本金型工業会設立の機運に立ち至った。」と述べている。これらからもわかるように、当時、技術的未成熟で乱立してきた企業群を1つにまとめ、企業相互の技術交流の素地をつくり、日本金型産業の技術発展の素地を形成したという意味で工業会設立の意義はあったといえる。

これ以降、日本の金型工業は金型外販業者を中心として発展していく。今日的には、専業という形態は付加価値を生み出しにくい業態として経営上のネックの1つとなっているが、少なくともバブルが崩壊する1990年代前半までは、金型が独立した産業として専業の形態で事業を發展させてきたことが、その技術を高度化させ、高い技術力を需要産業に供給してきた根拠であったといえる。

いずれにしても、1956年の機振法を画期とした日本金型産業の近代化の過程は日本の量産型機械工業の発展にとっての1つの技術的基盤、産業的基盤となったことは間違いない。（以下、次号へつづく）

【主な参考文献】

拙著「産業技術競争力と金型産業」ミネルヴァ書房、2011年。

A. 磨きロボットの高度化を目指し、匠技能のロボット化を行う。

熟練技能者の動きをカメラに撮り、手・指の動作や力をセンサーで計測、かつ磨き面の性状を自動計測し、それらのデータをデジタル化して人間と全く同じ動きをするロボットによる完全自動磨きを実現する。

従来の単純往復動作ではなく、金型磨き面の形状や硬度を推定して磨きを行う『指先ロボット』の開発を行う。現在、既に『バック転パラレルメカニズム』による、5軸加工機テーブルメカニズムを開発しており、微小力座標計測ならいグループと協力していく。

2. セミナー参加企業からの質疑応答

Q10. ロボット開発での実用化実績はあるのか。

A. どれもまだ実験室レベルである。

Q11. 溶射技術の方向性は。

A. 大気圧から減圧、プラズマ溶射の方向へシフトしていく。

Q12. 大学で金型人材を育成すると言うが、研究と現場の差を埋めていく方法は。

A. 企業から大学で受講して戴いてニーズを取込む等、色々なやり方を考えていきたい。

Q13. 現場の機械の実態を知らずに大学で高性能機械を使う研究者との間のギャップをどう埋めていくのか。

A. 出来るだけ地域の企業を訪問し、要望を聞きながら産学協同でプロジェクトを進めていきたい。

Q14. 現在どこかの企業と連携してやっていることはあるのか。

A. あるが、マル秘扱いである。

Q15. 溶射以外の表面改質技術はやらないのか

A. 今は考えていない。溶射が最適と考えている。

Q16. エンプラ製品関連事業を営んでいるが、地域企業の一員として、何が相談出来るのかわからない。また、今回の研究取組みは平成26年度までとなっているが、時間軸が民間企業と合っていないのではと感じるが。

A. これまで民間企業と大学との間で会話がなかった。それを今からやりましょう。きっと何かが生まれると思う。それこそがこのプロジェクトの



近畿大学理工学部・小坂教授（右）と西藪准教授（左）

目的でもある。

Q17. 近畿大学と交流するにはどのようにすればいいのか。

A. 『リエゾンセンター』があり、ここを窓口にして戴くと最も適当と思われる先生に相談出来るようになっている。因みに昨年度の相談受付件数は160件で、具体的に民間から受託した研究件数・金額ともに全国の大学中で2位の多さである。

3. プロジェクト推進リーダーへのインタビュー

大阪産業創造館で行われたセミナーの3日後、今回のプロジェクトリーダーである近畿大学理工学部の小坂教授と、推進事務局担当の西藪准教授を東大阪市の大学へ訪問し、お二人のこのプロジェクトに賭ける思いを伺った。

Q1. 金型プロジェクトの3テーマ（材料、設計、製造）選定の背景について教えて下さい。

A. 近畿大学理工学部は金属工学、経営工学、機械工学からなっており、それらの中から得意（強み）とする保有技術を総合的に共通で活かせる分野を模索した結果、金型にたどりついたわけです。そして、大学発の高度化技術を大阪の中小企業を中心とするものづくり産業の発展に生かしていきたいと思っています。

Q2. このプロジェクトの構想、起案はいつ頃から開始したのですか。

A. 理工学部の先生を中心に、昨年の中ばから構想を練り、秋に文部科学省の私立大学戦略的研究基盤形成支援事業に応募し、今年6月に認可がおりりました。

(4) 2012年12月11日 日本経済新聞 Web版 「近大で「金型学」始動」掲載
http://www.nikkei.com/article/DGXNASDD07056_Q2A211C1000000/

20148/3

日本経済新聞 印刷画面

日本経済新聞

近大で「金型学」始動 先端技術持ちより、地元中小を支援

2012/12/11 7:00 | 日本経済新聞 電子版

近畿大学が金型技術の研究に乗り出した。3年後には専門の研究拠点も設置する計画だ。同大学が立地する大阪府東大阪市など東部大阪地域は、中小金型業者の集積地。国内の産業空洞化などで金型業者を取り巻く環境が厳しさを増すなか、新材料などの研究成果をフィードバックし、地元中小の技術の高度化を支援する。

通称「金型プロジェクト」と名付け、同大理工学部の教員15人が参加する。専門分野は材料やロボットなど金型は専門でない研究者ばかりなのが特徴。他大学で、既に金型研究を手掛けるところはあるが、「1研究室だけで担当することが多く、今回のように門外漢の複数の研究者が組織横断的に進めるのは珍しい。それぞれが専門分野の知識を持ち寄ることで、金型の高度化を目指す」とプロジェクトリーダーでロボット制御が専門の小坂学教授は同プロジェクトの意義を強調する。



金型プロジェクトのプロジェクトリーダーを務める近畿大理工学部の小坂学教授

これまでに東大阪市など大阪府内3カ所でセミナーを開き、金型関連業者、計150人の参加者にアンケート調査を実施。個別企業からもヒアリングし、現場の技術課題や今後のニーズなどを吸い上げる作業を進める。その結果、「金型の設計・製造方法の改善策や技術伝承など人材確保への悩みが多いことがわかった」（プロジェクトリーダー補佐で材料加工の研究が専門の西藪和明准教授）。

現場の声も反映させながら、同プロジェクトでは複数のテーマが同時並行的に進行する。例えば、金型の耐摩耗性や冷却性能の向上のため、金型表面への被膜処理技術や金型材料の複合化の研究に着手。金型から作られるプラスチック製品の変形などを抑制するため、シミュレーションソフトの開発も始める。

後継者不足やコスト削減に苦しむ中小メーカー支援のために「熟練職人の匠（たくみ）の技をロボットに移植し、金型研磨ロボットの開発を進める」（ロボット開発を担当する大坪義一准教授）予定だ。

教員や学生が実習や実験するため、装置類も新たに整備する。文部科学省からの補助金も含め、総額約2億円をかけた、工作機などの必要な装置の導入を進めている。

「中小は試したい装置があっても設備投資に限度がある。研究がメインの大学なら入れられる装置もある」（西藪准教授）との考えから、例えば、中小ではまだ導入事例が少ない最新のモニタリングセンターを設置。さらに金型や金型でつくった製品の精度を測定する目的で、ドイツ

製の最新式の非接触式3次元形状測定・検査システムも国内初導入した。

来年度には、ワイヤカット放電加工機や射出成型機などを導入し、学内で金型製作から製品成形まで一貫生産できる体制を整備する。

技術支援者として金型職人も2人確保した。週2回、大学に来てもらい、金型の仕組みや製造法などのアドバイスを受ける。



新規導入した最新式のマシニングセンターを操作する近畿大学理工学部の大坪義一准教授(左)と作業を見守る西藪和明准教授(右)

今後3年間で一定の研究成果を挙げた後、「大阪東部地域金型デザインセンター」(仮称)を立ち上げる予定だ。開設地は未定だが、同センターを拠点に金型技術の高度化研究を進めるとともに地元中小の技術課題に応える「駆け込み寺を目指す」(西藪准教授)。



近畿大学が国内初導入した最新式の高性能3次元形状測定・検査システム

2010年の工業統計によると、大阪府は愛知県に次ぎ、全国2位の金型生産額を誇る。特に東大阪市や八尾市など東部大阪地域には約700社が集積しているともいわれる。

しかし、生産拠点の海外シフトに合わせ、日本が得意とした金型技術も中国などに流出を続け、国内の金型業者を取り巻く環境は厳しさを増す。東大阪市内のある業者は「実は受注量は増加傾向で忙しいのだが、素直に喜べない。廃業した同業者の代わりに仕事が回ってくるだけで、国内市場の縮小傾向には歯止

めがかかっていない」とため息をつく。

金型製造はものづくりの肝となる重要な技術。にもかかわらず「個々の職人の経験に頼っている」(西藪准教授)のが実情だという。空洞化が進展するなか、同プロジェクトを通じて科学的なアプローチを進め、「今後の世界スタンダードとなるような革新的技術を開発し、地元の主要産業である金型産業の活性化を目指す」と小坂教授は意気込む。

(東大阪支局長 中村厚史)

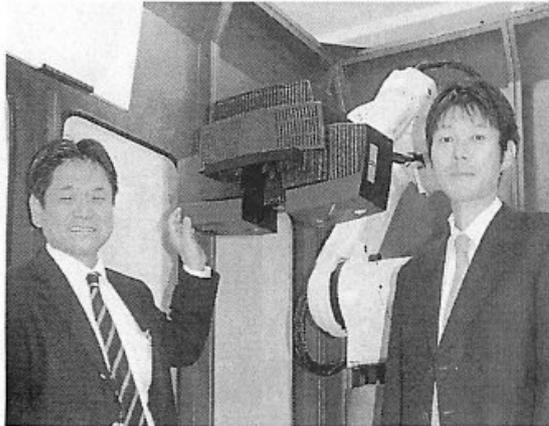
NIKKEI Copyright © 2014 Nikkei Inc. All rights reserved.

本サービスに関する知的財産権その他一切の権利は、日本経済新聞社またはその情報提供者に帰属します。また、本サービスに掲載の記事・写真等の無断複製・転載を禁じます。

町工場のまちものづくりの土台

近大、金型研究に力

町工場が多い東大阪市にある近畿大が、金属や樹脂の製品づくりに使われる金型を研究する「金型プロジェクト」に取り組んでいる。金型づくりは職人の腕頼りだが、後継者が不足しているのが現状だ。プロジェクトでは、技術をデータ化し、地域の企業に活用してもらおうのが狙いだ。



アジアで初めて導入された3D形状計測・検査システムの前に立つ小坂学教授(右)と西郷和明准教授。東大阪市小若江3丁目の近畿大

匠の技をデータ化、地域に還元

金型は、工業製品の形を金属でかたどったもので、金属板をプレス加工したり、プラスチックを流し込んだりして使われる。プロジェクトリーダーの小坂学教授(45)は「ものづくりの土台となる産業」と説明する。東大阪市、八尾市、門真市など大阪東部地域に、金型業者は約700社あるという。

技術伝承に悩み

昨年7、9月、東大阪、八尾、大阪の3市でセミナーを開き、業者約150人に対してアンケートをしたところ、金型の設計・製造方法の改善や、技術伝承、人材確保についての悩みが多かった。小坂教授は、「中国や韓国に仕事が流れている。参加者からは危機感と熱意を感じた」と話す。プロジェクトには、理工学部の精密機械学などが専門の教員15人が参加。材

料、設計、製造の3グループに分かれ、摩耗しにくい素材やコンピューターによる設計、金型を磨き上げる技術のロボット化などを研究している。東大阪、八尾両市の金型職人2人も参加し、週に2回、技術指導をしている。

アジアで初導入となる3D形状計測・検査システムを使い、短時間で金型や金型でつくった製品の正確な計測、解析をする。「製品が設計通りにできているか正確に確認できる。大学だからこそ設備がそろう」とサプリーターの西郷和明准教授(49)は話す。

拠点開設目指す

プロジェクトが始まった昨年からの3年間で一定の研究成果を出し、2年後には、専門の研究拠点となる「金型デザインセンター(仮称)」の立ち上げを目指している。成果は地域の企業に提供し、活用してもらおうという。小坂教授は「匠の技を地域の財産として残したい。研究だけでなく、企業の技術相談も受け、セミナーなどを開いて応えていきたい」と話している。(西村圭史)

ものづくり心伝授

地域の金型職人が技を学生に伝承する「金型寺子屋」の取り組みが近畿大で進んでいる。近畿大の本部がある東大阪市周辺の大阪府東部は日本のもので、後継者不足や外国との競争などから廃業に追い込まれる中小工場が少なくなく、「産業の復興につなげるため、ものづくりの現場を理解する人材を育てたい」と大学が職人に呼びかけた。職人は「日本が誇る技術の基礎を伝えたい」、学生も「メイド・イン・ジャパンとは何か、しっかり学びたい」と意気込んでいる。

【須田桃子】

近大理工学部

2月下旬、理工学部機械工学科の研究室。作業台の小型プレス機に、同科4年、長井孝太郎さん(23)と3年の成松一馬さん(21)が慎重な手つきで金型を取り付けた。指導するのは、東大阪市に隣接する同府八尾市に工場を持つ平尾幸雄さん(65)と、東大阪市に事業所がある蒲生真敏さん(50)。昨年9月から週2回、「研究支援者」として学生45人の指導を始めた。設

地元職人講師に「金型寺子屋」

そんな中、「金型が無くなれば日本のものづくりは消えてしまう」と危機感を抱いた同科の西敷和明准教授(49)らが「将来、金型製造に直接携わらなくても、ものづくりの基礎がわかる人材を育て、産業を守ろう」と考え、2人に指導を依頼。「経験が役に立つなら」と、快諾を得た。2人は時に厳しく指導

そんな中、「金型が無くなるのは消えてしまう」と危機感を抱いた同科の西敷和明准教授(49)らが「将来、金型製造に直接携わらなくても、ものづくりの基礎がわかる人材を育て、産業を守ろう」と考え、2人に指導を依頼。「経験が役に立つなら」と、快諾を得た。2人は時に厳しく指導



平尾幸雄さん(後ろ右)と蒲生真敏さん(同左)から金型技術の指導を受ける長井孝太郎さん(右端)と成松一馬さん(東大阪市の近畿大で、川平愛撮影)

がよいメイド・イン・ジャパンの技術を身につけ、社会人での経験に「なげたい」と話す。

近畿大は「寺子屋」を含め、地元と協力して金型産業を維持、継承させるための「金型プロジェクト」を昨年6月から始めた。2年後をめどに、研究拠点「金型デザインセンター」の開設も目指す。西敷准教授は「学生は町工場の考え方や技術を学び、職人も大学で最新の知識を得る。成果を地域に還元し、金型職人と共に発展したい」と話した。

軽量・静音性アップへ

変わる自動車向け部品や金型

金型でCFRP 部品量産へ

金型事業者は産官学の連

携で飛躍を目指す。7月3日に大阪市内で開催された金型総合技術研究会(山本進二会長)の第51回総会の記念講演。この中で近畿大学理工学部の西籾和明准教授が紹介した「近大発・金型プロジェクト」(通称・型プロ)では、同大学機械工学科15名の研究者が金型の材料・設計・製造の3分野で新技術開発を行いつつ、金型人材の育成、製造技術のデジタル化に、行政や地場モノづくり事業者・金型生産者との地域連携で取り組んでいるという。「近い将来、大阪東部地域金型デザインセンター(仮称)を立ち上げ、研究成果を地域企業に広く還元する」(西籾准教授)のが目的だ。

地場金型産業の飛躍に期待が大きいのは、「型プロ」で西籾准教授が進める研究テーマ「熱可塑性CFRPのプレス・射出成形金型利用技術」だ。最新型航空機や自動車の軽量化素材として開発・実用化が進むCFRPの中でも、この研究で取り上げる「熱可塑性CFRP」は熱を加えると柔らかくなり冷えると固まる樹脂。リサイクル性や生産性、耐衝撃性に優れ、「金型生産者が持つプレス、射出成形の技術や加工設備を生かし、自動車向け部品として量産できる可能性が大きい」(同)という。

近畿大学がアジアで初めて導入した超高精度3次元スキャナ「ATOS」などを活用して量産に耐える金型・成形技術の検証を進めつつ、東大阪の事業者5社と創設した「e-コンポジット研究会」で、熱可塑性CFRPの加工に必要な加熱装置やリサイクル技術を開発中。「液晶産業のとももし火が消えた大阪に、熱可塑性CFRPの加工で今度(同)と、意気盛んだ。」



金型関連の日本最大イベント「インターモールド」の目玉企画となっている学生金型グランプリに近畿大学が関西圏で初めて来年参加することが決まった。実現すれば関西圏からは初出場となる。

同グランプリは、人材育成・後継者育成・技術研究開発を目的に、次世代の金型産業を担う学生たちが金型の設計から材料調達、金型製造、成形加工にいたるまで一連のモノづくりに挑み、製作した金型および成形品とその過程を発表するもの。来年で6回目。前回には日本から5校、中国、韓国からそれぞれ3校の計11校が参加。「金型が大事とよくいわれるが、日本全国

で金型に特化した教育

・研究拠点は、グランプリ参加校を含めた7校。しかも、金型産業が集積しているはずの大阪はゼロ。これでいいのか。ならば、ものづくりの町、東大阪市のご真ん中にある近大がやる」と熱く語るのは同大学理工学部機械工学科の西敏和明准教授。

同氏は、近大が立ち上げた大阪東部地域の産官学による金型プロ

近大が関西初参加へ

インターモールド 学生金型グランプリ



学生ら特訓中

ジェクトの一員。近大には金型自体の専門家はいないが、機械工学科15名の教員がそれぞれの専門分野の知識を活かし、A材料VH設計VH製造Vの3方面からニーズを汲み取りながら金型にアプローチ

チ。その成果を地域の金型メーカーや製品設計メーカーに還元する。将来的には関西初の「大阪東部地域金型デザイナーセンター（仮）」の開設をめざしている。文部科学省の平成24年度支援採択

事業。「やれるかやれないかは別だが、守らなければならぬものがあるのならば守ろうよ、この地元で」との思いからプロジェクトがスタートしたという。学生金型グランプリ

への挑戦もプロジェクト活動の一環で、金型人材育成につながる。「金型職人を育てるのではなく、むしろ自動車や家電メーカーなど発注側で金型が分かる人材を育て、その結果、大阪東部地域が金型の設計・製造の拠点として維持されるというストーリーを描いている。近大にとっても、建学の精神の一つ「実学」をより深化させることができる（同氏）。

目下、プロジェクトに参加する金型職人OBが、前回のグランプリの課題で学生たちを特訓中。製作に必要な刃物の発注など、金型のイロハから始めているという。

このほか近大では、機械工学実験「形彫り放電加工」のテーマを新設。金型学部の授業本格導入に向け、着々と準備を進めている。

近畿大学 西籾 和明准教授に聞く

「型ろう会」発足の目的



1963年生まれ、奈良県出身。99年大阪大学大学院工学研究科卒、と99年立高専で教鞭をとる。母校・近畿大学に。

近畿大学や東大阪市はこのほど、金型メーカーや金型に関連する企業、研究者が金型技術や金型産業の発展について話し合う懇話会「型ろう会」を立ち上げた。発起人の近畿大学・西籾和明准教授（理工学部機械工学科）は、意見交換をするなかで金型産業が抱える課題を抽出、解決策を見いだし産業の競争力底上げにつなげたいという。西籾准教授に会発足の狙いを聞いた。

—どのようなテーマに ついて意見交換をするの でしょうか。

「テーマは金型業界の 概況や先向き、新たな加 工技術、受注元・発注元

ける会社など金型づくり に携わる方々が参加して います。立場の違う人達 がそれぞれの目線で意見 を出し論議し解決策を導 き出していきます」。

「もっとも意見交換の 狙いは解決策を見いだす ことにありますが、参加 者には会話のなかから課 題を解決するヒントを見 つけて欲しい。その一方 で参加者同士の新たな交 流が生まれることにも期 待しています」。

—東大阪市なども連 携しているのですか。

「型ろう会は近畿大学 が実施する『金型プロジ ェクト』の一環としてス タートしました。金型プ ロジェクトは大阪東部地

域の金型など製造業の地 域連携や技術開発、競争 力向上を目的に近畿大学 が独自に行っている事業 ですが、型ろう会につい ては東大阪市役所や東大 阪市産業創造勤労支援機 構、東大阪市立産業技術 支援センターにも呼び掛 けました。今年6月に第 1回、7月に2回目を開 き東大阪や八尾、大阪市 の会社約10社に参加して 頂きました」。

—発足のきっかけは。

「金型プロジェクトは 金型の材料や設計、計測 などの技術研究を主な事 業としています。我々研 究者自身が金型業界の動 向や産業構造を深く知る ためプロジェクト開始か ら東大阪、大阪、八尾、 堺市でセミナーを開き参 加者にアンケートをお願 いし、また大阪の金型メ ーカー約30社を訪ね、経 営者や技術者の方々から お話しをお伺いしてきま した」。

「そうした会話のなか から▽後継者がおらず経 営の先行きが見通せない

金型企業が交流 課題解決策探る 競争力底上げへ

「金型プロ」折り返し

未来を築く
地域発イノベーション



近畿大学が金型プロのサブリーダーとして、各先生の関連技術をつなぐ、私の役割は串刺しの串、先生方からも思われぬ意見がいろいろ出て、苦

近畿大学理工学部准教授 西籾 和明氏

「情報交換していくつかアイデアをもらった。平作業をFA化したら今の労働を楽にさせてあげ

近畿大学が金型プロのサブリーダーとして、各先生の関連技術をつなぐ、私の役割は串刺しの串、先生方からも思われぬ意見がいろいろ出て、苦

近畿大学理工学部准教授 西籾 和明氏

「情報交換していくつかアイデアをもらった。平作業をFA化したら今の労働を楽にさせてあげ

近畿大学理工学部准教授 西籾 和明氏

近畿大学理工学部の研究室内では、金型プロプロジェクトの目玉の一つ、磨きロボットが姿を現してき

近畿大学理工学部の研究室内では、金型プロプロジェクトの目玉の一つ、磨きロボットが姿を現してき

近畿大学理工学部の研究室内では、金型プロプロジェクトの目玉の一つ、磨きロボットが姿を現してき

近畿大学理工学部の研究室内では、金型プロプロジェクトの目玉の一つ、磨きロボットが姿を現してき

近畿大学理工学部の研究室内では、金型プロプロジェクトの目玉の一つ、磨きロボットが姿を現してき

近畿大学が文部科学省支援事業として大阪府東大阪市の本部を拠点に進める通称「金型プロジェクト」が、3年計画の折り返し点を迎えた。金型は、枯れた技術と活めた見方もある中で、熟練技能の数値化などで技術を高度化し、地域産業活性化につなげる取り組みだ。その道筋はまだ定かではないが、縁の下の力持ちという存在だった東大阪エリアの金型企業に光が当たる契機となっている。息の長い取り組みが期待される。

近畿大学が文部科学省支援事業として大阪府東大阪市の本部を拠点に進める通称「金型プロジェクト」が、3年計画の折り返し点を迎えた。金型は、枯れた技術と活めた見方もある中で、熟練技能の数値化などで技術を高度化し、地域産業活性化につなげる取り組みだ。その道筋はまだ定かではないが、縁の下の力持ちという存在だった東大阪エリアの金型企業に光が当たる契機となっている。息の長い取り組みが期待される。

近畿大学が文部科学省支援事業として大阪府東大阪市の本部を拠点に進める通称「金型プロジェクト」が、3年計画の折り返し点を迎えた。金型は、枯れた技術と活めた見方もある中で、熟練技能の数値化などで技術を高度化し、地域産業活性化につなげる取り組みだ。その道筋はまだ定かではないが、縁の下の力持ちという存在だった東大阪エリアの金型企業に光が当たる契機となっている。息の長い取り組みが期待される。

近畿大学が文部科学省支援事業として大阪府東大阪市の本部を拠点に進める通称「金型プロジェクト」が、3年計画の折り返し点を迎えた。金型は、枯れた技術と活めた見方もある中で、熟練技能の数値化などで技術を高度化し、地域産業活性化につなげる取り組みだ。その道筋はまだ定かではないが、縁の下の力持ちという存在だった東大阪エリアの金型企業に光が当たる契機となっている。息の長い取り組みが期待される。

近畿大学が文部科学省支援事業として大阪府東大阪市の本部を拠点に進める通称「金型プロジェクト」が、3年計画の折り返し点を迎えた。金型は、枯れた技術と活めた見方もある中で、熟練技能の数値化などで技術を高度化し、地域産業活性化につなげる取り組みだ。その道筋はまだ定かではないが、縁の下の力持ちという存在だった東大阪エリアの金型企業に光が当たる契機となっている。息の長い取り組みが期待される。



「金型磨きロボット」の試作機

「型ろろ会」は、近畿大の担元である東大阪府が、外郭の東大阪産業創造労働者支援機構と共同運営し、毎月1回、東大阪府産業技術支援センターの談話ルームに10人程度が集まって来る。金型プロジェクトサブリーダーの西籾和明准教授が講師兼司会となり、参加者がざっくばらんに近況を語る。金型は同業者の横の連携が少ない中で、実験的な試みだ。

中小・ベンチャー・中小政策

近畿大 熟練技能を数値化

近畿大が金型プロのサブリーダーとして、各先生の関連技術をつなぐ、私の役割は串刺しの串、先生方からも思われぬ意見がいろいろ出て、苦

■ 大学地域貢献度調査から

大学地域貢献度調査から ③

研究成果生かし、地場産業や街づくりの支援強化 近畿大、金型技術伝承の拠点整備へ

日本経済新聞社産業地域研究所が全国の国公私立大学を対象に実施した「地域貢献度調査」を基にした連載3回目は、地元企業などとの共同研究や商品開発を通じた地域振興の取り組みを取り上げる。研究成果が地場産業支援など地域振興に役立っているかどうかは、大学の存在意義を計る大きな目安だ。成果が芽生えた取り組みには、大学が特徴と理念を再検証し、地域課題に向き合う姿勢が共通している。(研究員 山本 公啓)

表1 学生1000人当たりの地元企業などとの共同・委託研究数ランキング

順位	大学種別	都道府県	大学名	1000人当たりの数値	地元研究数
1	私立	愛知県	豊田工業大学	65.7	32
2	国立	東京都	東京医科歯科大学	58.0	165
3	国立	東京都	東京工業大学	55.4	548
4	国立	北海道	帯広畜産大学	49.7	64
5	公立	岩手県	岩手県立大学	32.5	70
6	国立	愛知県	豊橋技術科学大学	32.0	70
7	私立	福岡県	産業医科大学	30.6	33
8	国立	長野県	信州大学	28.9	328
9	公立	石川県	金沢美術工芸大学	27.6	20
10	私立	長野県	松本大学	26.4	40
11	公立	兵庫県	神戸市看護大学	25.0	11
12	国立	愛知県	名古屋工業大学	24.6	142
13	国立	東京都	電気通信大学	23.5	125
14	公立	富山県	富山県立大学	23.0	27
15	国立	東京都	東京農工大学	22.5	131

表2 学生1000人当たりの開発した商品・サービス数ランキング

順位	大学種別	都道府県	大学名	1000人当たりの開発商品数	開発商品・サービスの数
1	公立	石川県	金沢美術工芸大学	29.0	21
2	私立	千葉県	和洋女子大学	23.0	60
3	私立	長野県	長野大学	12.0	13
4	公立	岩手県	岩手県立大学	9.3	20
5	私立	兵庫県	神戸芸術工科大学	9.2	16
6	私立	山形県	東北公益文科大学	9.2	6
7	国立	栃木県	宇都宮大学	8.7	45
8	私立	長野県	松本大学	8.6	13
9	国立	奈良県	奈良女子大学	8.4	6
10	私立	千葉県	東京情報大学	8.4	16
11	国立	新潟県	長岡技術科学大学	7.5	18
12	公立	群馬県	前橋工科大学	6.4	8
13	公立	福岡県	福岡女子大学	6.4	6
14	私立	大阪府	相愛大学	5.5	7
15	国立	愛知県	豊橋技術科学大学	5.0	11

文部科学省が2012年に策定した「大学改革実行プラン」の柱に、大規模な補助金で取り組みを支援する「地域再生の核となる大学づくり(COC=Center of Community)構想」を掲げたのは、具体的な地域課題の解決まで踏み込んだ大学の役割強化を求めたからだ。製造拠点の統廃合や海外移転など空洞化に直面する地方で、研究成果を地場産業強化や新産業の集積に生かすことは、大学にとって責務といえるだろう。

こうした地域貢献度をみる目安として設定した間が地元の民間企業や自治体などとの共同・委託研究数。学生1000人当たりの研究数では、1位が豊田工業大学、2位と3位が東京の2校となった(表1)。豊田工業大はトヨタグループ企業との研究が多く、上位となった。

一方、文科省の全国大学調査によると、民間企業からの受託研究件数で、11年度に国内最多、12年度に3位となったのが近畿大学だった。

近畿大、先端技術で職人の技を伝承

完全養殖した近大マグロを扱う「近畿大学水産研究所」の東京・銀座への出店など、大学発ベンチャーの取り組みで注目が集まる近畿大学。本部キャンパスがある大阪府東大阪市でも地元

ものづくり業界と連携を強める活動も展開する。

同市など大阪府東部は中小小型業者の集積地だが、生産拠点の海外移転などで減少が続き、技術の流出も懸念されている。そこで12年6月、理工学部の研究者15人が参加して高い技術を伝承する「金型プロジェクト」が始まった。文科省の補助金も得て最新式の3次元形状測定・検査システムを導入し、繊細な技術を数値化して記録する。

職人の生の声を聞こうと、13年夏から月に1回、大学と地元業者が自由に議論する「型ろう会」も始めた。同大学は研究成果を踏まえ、15年度に金型の研究拠点「金型デザインセンター」（仮称）の設立を目指す。プロジェクト補佐の西藪和明准教授は「地域で大学のキャンパスだけがにぎわうようでは駄目だ。地域の人が気軽に相談できるような信頼を得る研究活動を展開したい」と話す。

岩手県立大、研究成果で復興や街づくり支援

共同研究と商品開発でともに上位となったのは岩手県立大学だ。東日本大震災直後の11年4月に組織的に地域ニーズに応える窓口として「地域政策研究センター」を開設し、復興支援を柱に地元自治体や企業などと研究開発を進めてきた。

社会福祉学部は県内5市町村の仮設住宅などで、地元の社会福祉協議会などと連携してICT（情報通信技術）を活用した高齢者らの支援システムを構築した。住民が毎日、電話の音声案内に応じて健康状態のボタンを押して見守りセンターに発信し、孤独死などを防ぐ。高齢者の多い他地域でも活用し、安否確認に加えて、買い物や雪かきなど



3次元測定機（写真後方）で繊細な職人の技術をデータ化する

ニーズに応じて地域団体や学生ボランティアらが手助けするネットワークも生み出した。

総合政策学部は日本ジオパークに認定された三陸地域の自治体などと連携して、観光振興の研究も始めた。地域連携本部の上野山英克氏は「具体的にものづくりを支援できる学部がある岩手大学とは違った立場で、事業化やマネジメントの支援面で役割を果たしたい」と話す。

地域に密着した商品開発の展開が活発に

学生1000人当たりの地元企業や自治体などと連携した商品・サービスの開発数をランキングすると、1位が金沢美術工芸大学、2位が和洋女子大学となった（表2）。商品開発で目立つのは、「地域振興」を旗印にした地元食材を使った名物の開発だ。長野大学は存続の危機にあった上田市の伝統野菜山口大根を生かした名物を作ろうと、地元菓子店と協力しておやきを開発。イベント開催をきっかけに継続販売することになり、1 t分の新たな大根の需要を生み出した。

金沢市が設置主体の金沢美術工芸大は、15年春の北陸新幹線開業に向け、同市と連携して観光地のイメージ戦略を進めている。市の観光用キャッチフレーズとロゴマークを作成し、市の水道水を「金沢の水」として発売する事業では伝統工芸「加賀手まり」をモチーフにした丸型ペットボトルを開発し、人気商品に育った。ほかにも地元名物をデザインに生かした禁煙店の店頭表示ステッカーや車のご当地ナンバー、マンホールのふたなどを生み出した。同市担当者は「今後も大学と連携して街の魅力づくりを進めたい」と期待する。

和洋女子大は地元の企業や店舗とのコラボ商品を生み出し、地域の盛り上げに一役買う。東武百貨店船橋店とは07年から連携。学生が栄養価を計算した健康メニューをレストラン街の店舗に提案し、毎年フェア限定で新メニューが登場する。「地域には高齢者が多く、健康メニューは好評」（同店広報担当）という。同大学の担当者は「実際の商品開発に関わることによる教育効果は高い」と、学生は無償で活動に参加している。 G

(12) 2014年7月11日 毎日放送「ちちんぷいぷい」放映

「地元・東大阪の中小企業と金型技術の研究などで連携」



「生き残りをかけて 関西の大学が東京進出」



http://jcc.jp/news/w_v/4301261/

