

令和元年度

戦略的基盤技術高度化・連携支援事業

戦略的基盤技術高度化支援事業

「金属３Ｄプリンターを用いた複雑形状ダイカスト金型における
加工技能データを活用した仕上げ工程及びその製造プロセスの構築」

研究開発成果等報告書

令和２年５月

担当局 中国経済産業局

補助事業者 地方独立行政法人 山口県産業技術センター

目 次

第 1 章	研究開発の概要	
1－1	研究開発の経緯	
Ⅰ.	研究開発の背景	… 3
Ⅱ.	研究目的及び目標	… 5
Ⅲ.	研究内容	… 9
1－2	研究体制	
Ⅰ.	研究組織・管理体制	… 12
Ⅱ.	管理員・研究員	… 13
Ⅲ.	協力者（アドバイザー）	… 14
Ⅳ.	当該研究開発の連絡窓口	… 14
1－3	研究開発の取り組み、評価	
Ⅰ.	複雑形状金型の金属積層造形技術の開発	… 15
Ⅱ.	金属造形物の高精度後加工技術	… 16
Ⅲ.	高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築	… 16
Ⅳ.	実モデルの試用検証	… 17
第 2 章	補助事業で実施した具体的内容	
2－1	複雑形状金型の金属積層造形技術の開発	… 18
2－2	金属造形物の高精度後加工技術	… 31
2－3	高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築	… 46
2－4	実モデルの試用検証	… 53
第 3 章	全体総括	
3－1	研究開発成果総括	… 59
3－2	研究開発後の課題・事業化展開	… 60

第 1 章 研究開発の概要

1-1 研究開発の経緯

I. 研究開発の背景

川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

○該当する特定ものづくり基盤技術高度化指針；

（三）精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

（3）川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ
カ．生産性・効率化の向上、低コスト化

（4）川下分野特有の事項

4）その他の川下分野に関する事項

a．自動車分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ
ウ．複雑形状化・一体加工化

自動車産業では、排出ガス規制などの逐次強化される環境規制への対応に伴う軽量化や、安全性、快適性の向上など要求性能が高度化している。その一方で、海外現地生産や東南アジア諸国を中心とした新興国の台頭によりグローバル化が進み、国際競争力を保つために性能向上に加えリードタイム短縮や、高効率化による徹底したコストダウンが要求されている。

これらの要求に対応するため、次世代自動車開発で高張力鋼からアルミへの材質変更による軽量化が進められている。特にダイカストは優れた寸法精度、高い生産性から、従来のエンジン、トランスミッション関連部品だけでなく足回りやボディ部品といった重要保安部品へも適用範囲が拡充されている。しかし、材質変更は剛性の低下を伴うため、リブ形状が必要となる。リブは高い程、剛性が高くなるため、大幅な軽量化には更なる深リブ形状の金型が求められる。深リブの増加によって形状が複雑化しても金型に要求される加工精度は高く、コスト削減のため不良率を抑え、安定して製造することも求められている。

このような複雑形状金型の例として、実際に高橋鉄工(株)に依頼のあった加工困難な金型（エンジン、ミッション関連）の事例を図1-1に示す。また、その中でも現状、実用レベルでの製造が困難な例を図1-2に示す。図1-1及び図1-2の金型は、長さに対して幅が極端に狭い形状（高L/D形状）や薄肉形状、また複数曲面が結合した複雑な曲面形状を有することから、従来の加工技術では、以下の問題点により、不良率が高く、高コスト、長納期となる傾向にある。

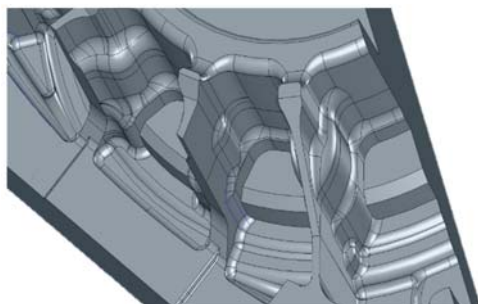


（a）高 L/D 形状

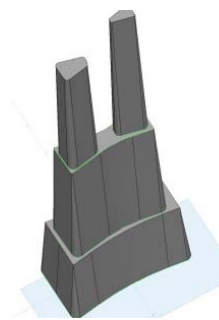


（b）除去量が 70%を超える形状

図 1-1 加工困難な複雑形状金型の事例



(a) ダイカスト金型部品 L/D15



(b) ダイカスト金型部品 L/D30

図 1-2 製造が困難な金型部品の事例

高 L/D 形状では、材料の固定箇所と工具による加工箇所が離れていることで、加工時の“ビビリ”振動の発生により、加工精度の悪化や、工具もしくは材料破損の危険性が高くなる（振動による振れは長さ L の三乗に比例し、幅 D の三乗に反比例するため、L/D が 2 倍では振れは 8 倍）。これにより、L/D が 5 を超える形状では不良率が 90%を超える場合もある。また、形状が複雑化することで、材料の切削による除去量が 70%を超えることもあり、作業者の技量差で完成までに大きな時間差が発生する。そのため、川下企業への安定供給を実現できていない課題がある。

高橋鉄工㈱では、これらの問題に対応するため、以下のような取組を行ってきた。

“ビビリ”への対策としては、工具の消耗を抑える独自の加工条件（カタログ値とは異なる加工時の工具の送り速度、回転数、切込み量）の確立、専用工具の開発や、高 L/D 形状の多段階加工で、工程毎のビビリを抑制する取組も行っている。

技量差の解消については、以下の 2 つの取組により熟練工のノウハウの共有化を図っている。

- ・工具使用状況の管理データベースの構築（2014 年度周南サポート事業における IC チップの有効活用事業、事業期間：2014 年 7 月 15 日～2015 年 3 月 15 日によって構築）。集約したデータを元に工場全体の加工品質を統一する工具使用条件を確立。
- ・工場内の主要な加工機に PC を併設、社内 LAN に接続することで、上記データベース及び過去の加工事例（材料固定方法など）を現場で閲覧できる環境を整備。

しかし、膨大なデータから必要な情報を的確に抽出する環境までは整備できていない。

これらの取組でも加工困難であった事例（金型用リンク部品）について、（地独）山口県産業技術センター（以下、山口産技）主催の「やまぐち 3D ものづくり研究会」（高橋鉄工㈱は 2014 年度から参画）における金属 3D プリンターの活用事例研究の 1 つとして加工にトライにした（図 1-3 参照）。研究会の事例研究では、造形物の造形限界サイズや造形物の諸特性（密度や硬さ、強度など）の分析など、金属 3D プリンターによる造形の基本的な性能把握を行うと共に、企業ニーズに基づく形状試作に取り組んでいる。金属 3D プリンターに用いられる金属積層造形法はレーザーや電子ビームなどの熱源で金属粉末を熔融させ、積層しながら形状を得る付加製造（Additive Manufacturing）技術で、高 L/D などの複雑形状でも容易に作製

することができ、造形形状に対する自由度が非常に高い特徴を持っている。その特徴から、加工が困難であった形状を造形し、高橋鉄工㈱の加工事例データベースを参考に加工姿勢を選定して放電加工による仕上げ加工で所望の精度（表面粗さ $Ra1.5\mu m$ ）の金型とすることができた。この事例では、従来に比べ材料の除去率が 80%から 5%以下となり、50%のコスト削減効果があった。

以上の取組によって、金属 3D プリンターの活用と高橋鉄工㈱の加工技術を組み合わせることにより、複雑形状金型の製造の可能性を見出すことができたが、図 1－2 の金型についてはこの事例よりも加工面の仕上がりに対する要求精度が高く（表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 以下）、未だ実用レベルでの製造が困難な状態にある。そのため、川下企業への安定供給を実現できていない課題がある。

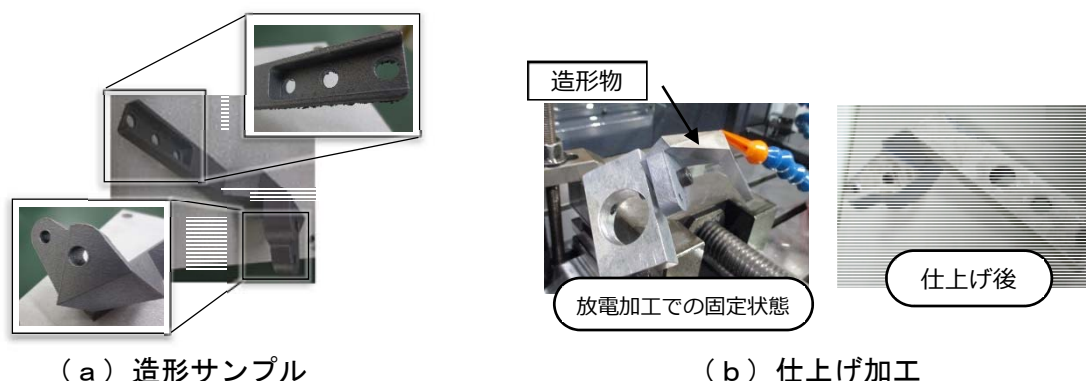


図 1－3 金属 3D プリンターによる試作をトライした事例（金型用のリンク部品）

Ⅱ．研究目的及び目標

Ⅱ－１．研究目的

本研究開発では、上記の課題ニーズに対応するため、「高度化指針」の

(三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

(3) 川下分野横断的な共通の事項

①川下製造業者等の共通の課題及びニーズ
カ．生産性・効率化の向上、低コスト化

(4) 川下分野特有の事項

4) その他の川下分野に関する事項

a. 自動車分野に関する事項

①川下製造業者等の特有の課題及びニーズ
ウ．複雑形状化・一体加工化

を高度化目標とし、金属積層造形技術と高橋鉄工㈱独自の金型の精密加工技術を組み合わせ、従来加工法では製造できない複雑形状金型の安定供給を実現する製造プロセスの構築を目指す。また、熟練作業者の加工ノウハウを共有可能なデータベースを組み込み、技術者の技量に依らないプロセスとする。

“形状・寸法精度 $\pm 0.01mm$ 及び表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 以下の光沢面を実現する”造形物の高精度な後加工技術を確立することで、加工不良による金型製造の手戻り工程を削減し、“従来比 30%のコスト低減及び 50%の不良率低減、技術の複合化による 30%の加工時間短縮”を実現

し、川下企業である自動車産業での車体やエンジン部品などのダイカスト製造工程での生産性・効率化の向上、低コスト化に寄与することを目的としている。（図 1－4 参照）

その実現にあたっては、以下の 3 つの解決すべき研究課題がある。

（１）複雑形状金型の金属積層造形技術の開発

国内ではダイカスト金型の材料として熱間工具鋼 SKD61 が広く利用されている。SKD61 は金型に必要となる高硬度、耐摩耗性を有しているが、凝固割れに敏感であり金属 3 D プリンターでの造形が難しい材料の 1 つである。そのため、金属 3 D プリンターでの金型の造形には、一般的にマルエージング鋼が用いられる。金型材料の諸特性はダイカストの製造に影響があるため、従来の製造条件の変更を伴う金型材料の変更は好ましくない。よって、SKD61 による造形が求められているが、その難しさゆえに造形条件については未だ確立されていない。

造形物は積層方向や材料、レーザー出力などの造形条件によって強度や伸びといった機械的特性が変化するいわゆる“異方性”が生じることが山口産技の基礎研究でも明らかとなっている。造形物を金型として使用するには等方的な物性が求められるため、異方性の存在は設計、造形の自由度を著しく低下させる。これら異方性や残留応力を制御する方法のひとつとして、熱処理の適用が考えられる。しかし、熱処理には硬さや靱性といった所要の機械的特性の制御も求められるため、これらの両立は非常に難しい。さらに、最終的な仕上げ加工に影響する熱処理後の硬度変化や寸法変化量の把握も本研究対象の複雑形状金型の要求精度実現に重要なファクターの一つである。

金属 3 D プリンターの造形では、熱履歴で生じる残留応力や造形物の自重による変形抑制のため、サポートと呼ばれる支持形状を合わせて造形する必要がある。サポート部分は後で除去するため、造形物を要求精度に仕上げる後加工の工程を想定した上で、確実に造形可能な姿勢及びサポート配置を決定する必要がある。造形で使用される金属粉末は高価であるため、これらを試行錯誤的に決定するのは望ましくない。この課題解決のため、近年、造形分野においてもシミュレーションの活用が進んでいるが、シミュレーションで実現象を正確に再現するには、実験データとの比較による解析条件の妥当性の検証が重要となる。これにより冒頭で述べた熱履歴による変形等を予め推定可能な解析技術を確立する必要がある。

（２）金属造形物の高精度後加工技術

現在、金属積層造形法の中で主流であるレーザー粉末床溶融結合方式では、数 $10\mu\text{m}$ の金属粉末を溶融凝固させるため、造形物の表面は凹凸のある仕上がり（表面粗さ $Ra10\mu\text{m}$ 前後）であり、金型に必要な光沢面を得るには仕上げ加工（ $Ra0.8\mu\text{m}$ 以下）が必要となる。表面の凹凸状態は均一ではなく、造形物の姿勢や形状によって異なる箇所もあるため、姿勢と形状に応じた適切な仕上げ加工が必要となる。

切削加工機能を有した金属 3 D プリンターも存在するが、金属粉末中の造形物を加工するため切削油が使用できないことや数 $10\mu\text{m}$ 積層毎にしか切削しないため、研究対象としている複雑形状金型に対する再現性は低い。さらに、造形後に用途に合わせて調質する熱処理を行うことも多いが、その際に生じる寸法変化の解消には追加工が必要となり、大幅なコスト削減やリードタイムの短縮を実現することは難しい。

そこで造形物全体を効率良く高精度に加工するにあたって、工具姿勢を変えて高精度な加工が行える5軸加工機の活用が不可欠となる。この加工機を用いて本研究開発の対象とする複雑形状の造形物の高精度仕上げ加工を行うには、加工時の工具動作制御に関する各種パラメータを造形物の仕上げに適した動作条件に調整する必要がある。

(3) 高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築

複雑形状金型の安定供給を実現するにあたって、作業者の技量に依らない製造プロセスを構築することが重要となる。そのためには、作業者毎に加工手順を考案するのではなく、作業者全員が共通認識の元、手順を決定するための環境が必要となる。

高橋鉄工㈱には従来の金型加工において蓄積した熟練作業者のノウハウ（独自の加工条件や材料の固定方法の写真など）データがあり、それを作業現場で閲覧可能とする社内 LAN 環境を整備しているが、膨大なノウハウデータから効率良くデータを抽出する環境構築には至っていない。

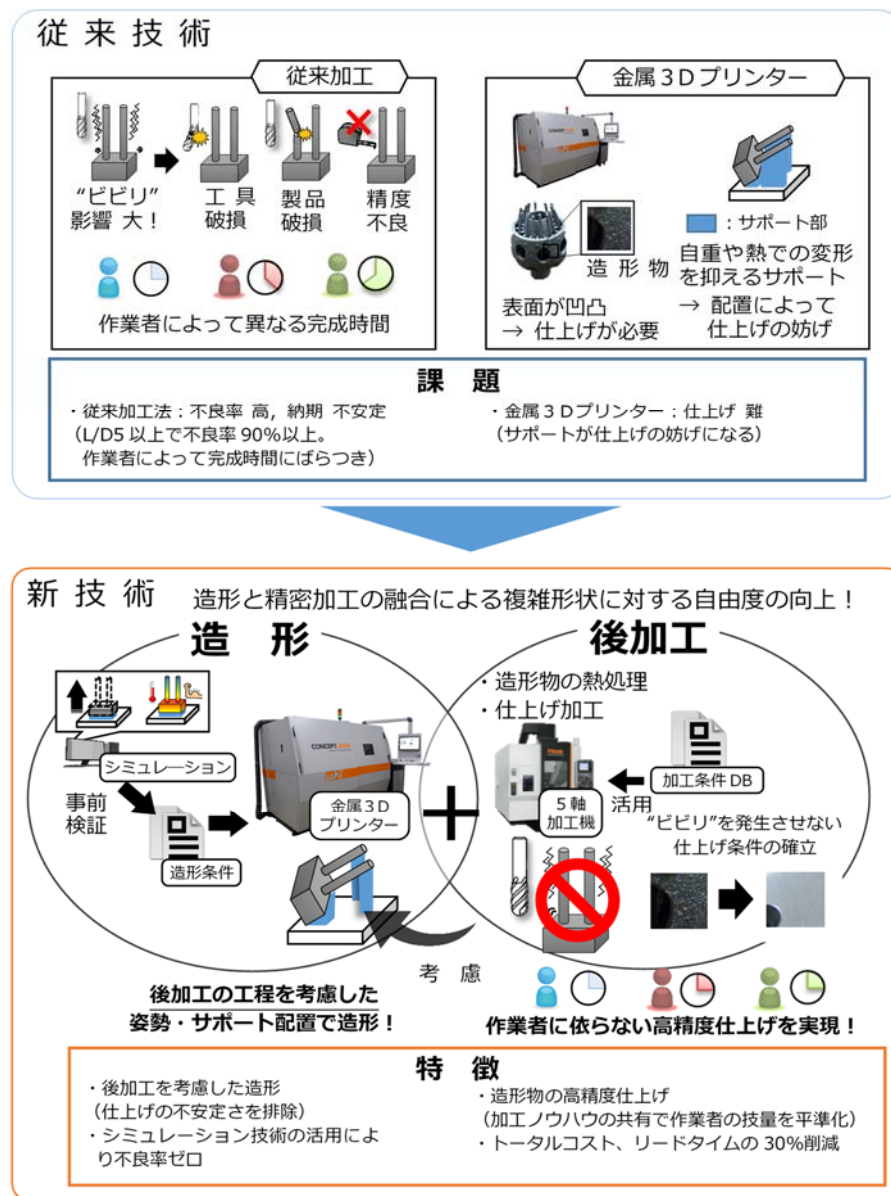


図 1－4 実現を目指す新技術

Ⅱ－２．研究目標

＜目標値＞本研究開発で得られる最終目標は次のとおりとする。

開発テーマ	目標値
1. 複雑形状金型の金属積層造形技術の開発	・「SKD61」の金属粉末を用いた造形で、緻密体（密度 99% 以上）が得られる造形条件を確立する。 ・「マルエージング鋼」及び「SKD61」の造形物について、硬度や靱性といった必要な特性の付与と、異方性や残留応力のような不要な特性の除去の両立が可能な熱処理条件を開発し、バルク材と同等以上の性能を実現する。 ・姿勢や形状といった幾何要素と、レーザー出力などの造形条件の関係を体系化し、高精度に実現象を再現可能なシミュレーション技術を開発する。
2. 金属造形物の高精度後加工技術	・5軸加工機による加工で L/D 30 までの基礎形状モデルの造形物を、目標精度（表面粗さ Ra0.8 μm 以下、形状精度 $\pm$0.01mm）で加工可能な条件及び工具を開発する。また、造形面及びサポート除去面に対して同様の精度を実現する仕上げ量の条件を確立する。 ・この加工実験データを 3 次元 CAD データ上に重ねて表示させるツールを開発する。
3. 高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築	汎用的な 3 次元 CAD データ（STEP、IGES 形式など）から、形状情報（L/D のサイズや最小 R など）を抽出するツールを開発する。また、その抽出データと既存の 3 次元 CAD データを比較し、関連する加工条件データを検索するデータベースを構築する。
4. 実モデルの試用検証	対象形状について、後加工への影響が最小限となる姿勢及びサポートを選定し、造形シミュレーションでの検証を行い、不良率ゼロかつサポート量の削減によるリードタイムの大幅な短縮を目指す。 対象形状への仕上げ加工を行い、目標精度を実現する。また、従来比 30% のコスト低減及び 50% の不良率低減、技術の複合化による 30% の加工時間短縮を実現する。 また、開発技術で作製したサンプルをダイカスト成形機で使用し、実用性を確認する。

Ⅲ. 研究内容

本研究開発の技術的課題である “効率良く後加工を行える金属造形の実現”、その造形物を “要求精度に仕上げる精密加工技術の確立” 及び “作業者の技量に依らない加工プロセスの構築” の解決のため、以下の開発を実施する。なお、金型材料は「マルエージング鋼」及び「SKD61」を対象とする。

【1. 複雑形状金型の金属積層造形技術の開発】

[担当実施機関：山口産技、高熱炉工業㈱、徳山高専*]

*独立行政法人国立高等専門学校機構徳山工業高等専門学校

【1-1】SKD61 の造形条件の開発

造形条件が既知のマルエージング鋼の造形に関する知見を活かして、SKD61 の緻密体を造形可能な条件（レーザー出力、走査速度など）の開発を行う。

【1-2】金型の必要特性に関する熱処理条件の開発

造形物に関して、所要の特性が得られ、かつ高効率で熱処理後のひずみを抑制する熱処理条件を開発する。また、熱処理条件の違いによる各特性の変化について、物性評価試験（「引張試験」、「硬さ試験」、「残留応力測定」など）を行い検討する。

【1-3】造形シミュレーション技術の開発

『造形シミュレーションソフトウェア』を導入し、造形での「サポート削減」、「造形不良の回避」、「造形後の変形（残留応力）の抑制」を可能とするシミュレーション技術の開発を目指す。造形シミュレーションに必要な造形時の熱履歴による固有ひずみと造形条件の関係を対比可能なデータマップを作成し、【1-2】で実施した造形物の物性評価の結果と比較し、データマップとの差異について分析することで要因となるパラメーター（形状、姿勢など）を抽出し、実現象を再現可能なシミュレーション技術を開発する。

【2. 金属造形物の高精度後加工技術】

[担当実施機関：高橋鉄工㈱、山口産技]

【2-1】基礎形状モデルを用いた“ビビリ”抑制技術の開発

『5軸加工機』及び『切削動力計』を導入し、造形物の仕上げ加工時の“ビビリ”発生を想定した加工実験を行う。L/D5～30 までの基礎形状モデルの造形物を対象に切削加工を行い、目標とする仕上げ精度を実現できる加工条件を確立する。また、造形面及びサポート除去後の面に対して目標精度を満たす仕上げ量（加工量）の条件を確立する。加工後の試料について、表面粗さ測定及び形状測定を行い、加工精度を評価する。

【2-2】姿勢及びサポート配置検討支援ツールの開発

姿勢及びサポート配置の考案にあたって、3次元 CAD データによる事前検討が行える支援ツールを開発する。3次元 CAD データのフェースに関する幾何形状情報から法線ベクトルを取得し、姿勢の変化によってサポートが必要となる箇所や、サポートを付加した場合に必要とされる加工量（【2-1】の加工実験データを利用）を3次元 CAD データ上に重ねて表示させる機能の開発を行う。

【3. 高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築】

[担当実施機関：山口産技]

【3-1】3次元CADデータの形状照合ツールの開発

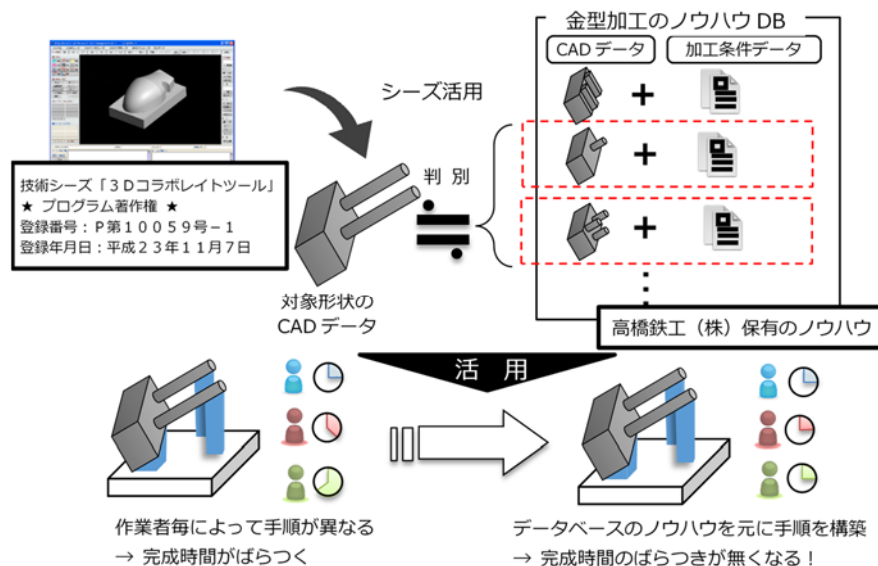


図1-5 構築するデータベースのイメージ

山口産技はデータベースの検索機能として、3次元CADデータからL/Dのサイズや最小Rなどの形状情報を抽出し、既存の加工事例の3次元CADデータと比較するツールを開発する。開発には【2-2】同様、山口産技が保有する技術シーズを用いる。

開発ツールを用いて加工対象と既存の3次元CADデータを比較することで、既存の3次元CADデータに関連付けされた加工事例から、形状特徴が近いデータを抽出し、過去の金型加工の材料の固定方法などを参照可能にする。また、L/Dサイズの条件を元に加工実験で蓄積した加工条件のデータの抽出も可能となる。これにより、作業者の技量に依らず、金型加工の条件選定が行える製造プロセスの構築を実現する。構築するデータベースのイメージを図1-5に示す。

高橋鉄工(株)が従来の金型加工で蓄積してきた工具使用履歴データベースや加工事例での材料固定方法などの情報に【2-1】での基礎的な加工実験での加工条件データを加え、開発ツールの技術と組み合わせることで、対象となる金型に適した加工条件や固定方法を検索できるデータベースを構築する。

【4. 実モデルの試用検証】

[担当実施機関：高橋鉄工(株)、高熱炉工業(株)、山口産技]

【4-1】実モデルによる後加工の検証

図1-6に開発技術による複雑形状金型の製造プロセスのイメージ図を示す。図に示すように高橋鉄工(株)は【3-1】で構築したデータベースからの抽出データ及び【2-2】の開発ツールを活用して、実モデルの姿勢及びサポート配置を考案する。山口産技は、【1-3】で開発したシミュレーション技術を用いてサポート条件を修正し、実モデルの造形を実施する

(SKD61 は【1－1】の造形条件を使用)。高熱炉工業㈱は【1－2】で得られた熱処理条件から実モデルに合わせた熱処理を実施する。高橋鉄工㈱は【3－1】で構築したデータベースから抽出した加工条件で、実モデルの後加工を実施する。

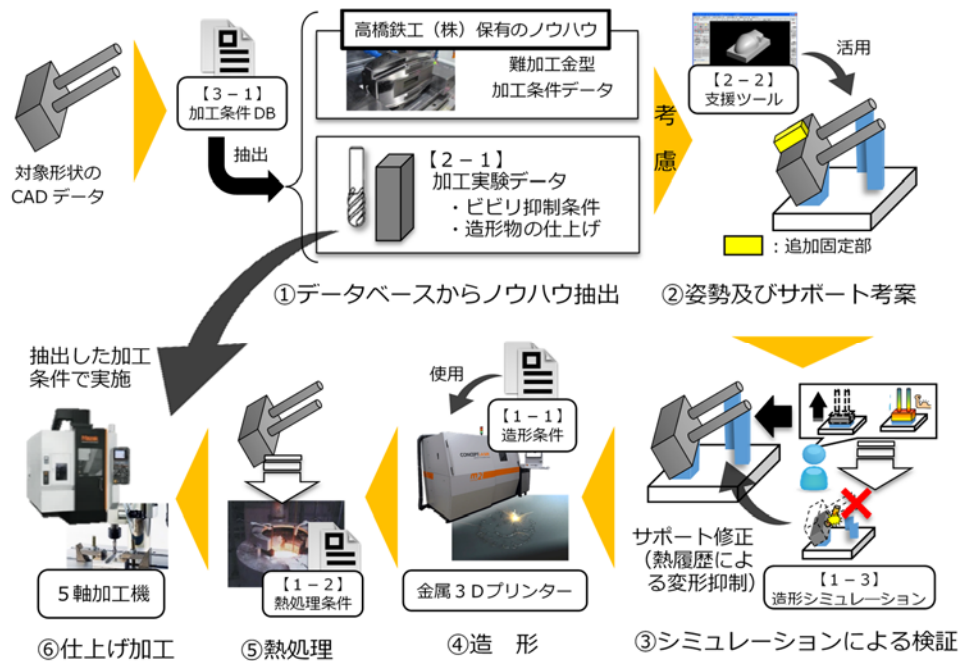


図 1－6 開発技術による複雑形状金型の製造プロセス

加工後の実モデルについて、高橋鉄工㈱は曲面形状の測定が可能な『金型形状精度測定器』を導入し、造形サンプルの形状測定を実施し、山口産技は 3D スキャナーによる後加工後の造形サンプルの形状測定を行い、それぞれ目標精度を満たしているかを確認する。目標精度を満たさない場合は、造形及び後加工の各条件を見直し、目標精度の実現を目指す。

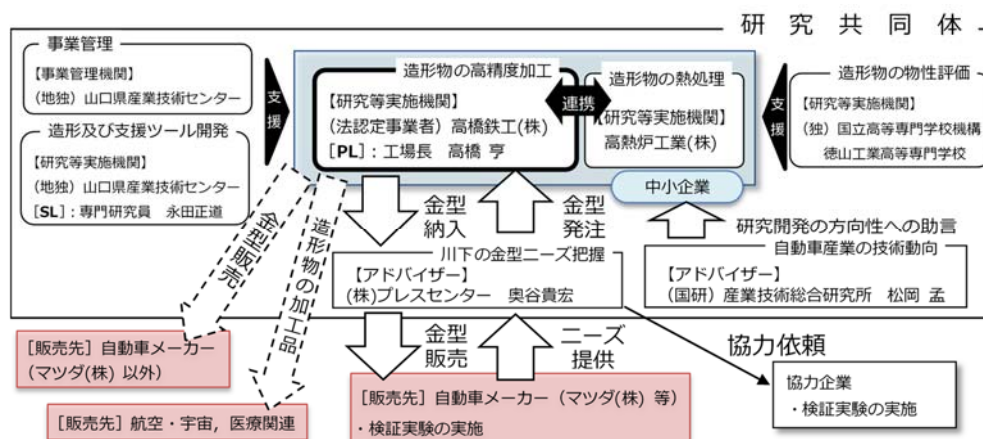
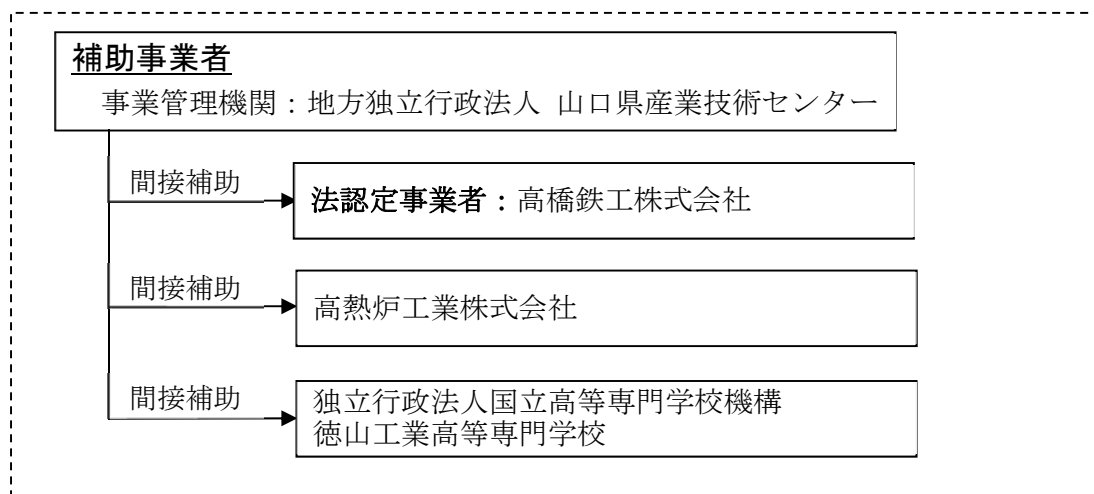
【4－2】実モデルによるダイカストマシンでの検証

開発技術で作製したサンプルについて、実際のダイカスト製造現場で試用し、その有用性について検証を行う。検証は川下企業の開発状況に合わせて実施し、タイミングが合えば実機での検証も検討する。

ダイカスト金型として実用化するためには、加工後に窒化などの表面処理を行う必要があるが、本研究開発の技術によって、これらの処理が可能な状態の金型を作製し、処理を施した上で検証実験を行う。検証の結果、十分な性能が得られない場合は、各条件を見直し、要求性能の実現を目指す。

1-2 研究体制

I. 研究組織・管理体制



事業管理機関

所属：地方独立行政法人 山口県産業技術センター

役職：理事長

氏名：木村 悦博

総括研究代表者(PL)

所属：高橋鉄工株式会社

役職：専務取締役

氏名：高橋 亨

副総括研究代表者(SL)

所属：地方独立行政法人 山口県産業技術センター

役職：専門研究員

氏名：永田 正道

Ⅱ. 管理員・研究員

【補助事業者】 地方独立行政法人 山口県産業技術センター

管理員

氏 名	所属・役職
磯部 佳成	産学公連携室・室長
江藤 秀哲	産学公連携室・主査

研究員

氏 名	所属・役職
永田 正道	加工技術グループ・専門研究員
村川 収	設計制御グループ・専門研究員
福田 匠	材料技術グループ・専門研究員
中邑 敦博	材料技術グループ・研究員

【間接補助事業者】

研究員

・高橋鉄工株式会社

氏 名	所属・役職
高橋 亨	専務取締役
重田 幸弘	
妹尾 啓三	
重安 典文	
海田 聡	

・高熱炉工業株式会社

氏 名	所属・役職
廣瀬 友行	代表取締役社長
横川 秀人	製造部 課長代理
石田 真吾	製造部 課長代理
長野 清孝	製造部
葛原 裕樹	製造部
田代 宏秋	製造部
井野 洋治	営業部

・独立行政法人国立高等専門学校機構 徳山工業高等専門学校

氏 名	所属・役職
西村 太志	機械電気工学科・教授

Ⅲ. 協力者(アドバイザー)

- ・株式会社プレスセンター

氏 名	所属・役職
奥谷 貴宏	営業技術部長

- ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 中国センター

氏 名	所属・役職
松岡 孟	イノベーション推進本部・研究参与

Ⅳ. 当該研究開発の連絡窓口

事業管理機関

所属：地方独立行政法人 山口県産業技術センター

役職：主査

氏名：江藤 秀哲

電話：0836-53-5052

Fax：0836-53-5071

メールアドレス：etoh@iti-yamaguchi.or.jp

1-3 研究開発の取り組み、評価

I. 複雑形状金型の金属積層造形技術の開発

【1-1】SKD61の造形条件の開発（山口産技）

川下製造業でダイカスト金型材料として使用されているSKD61について、金属3Dプリンターでの造形を実現する造形条件の開発を行った。造形時のレーザー出力及び走査速度などを変化させて立方体を造形し、アルキメデス法及び金属顕微鏡による造形物断面の画像処理を用いた密度測定を行い、目標密度が得られる造形条件を検討した。また、選定した造形条件で、造形可能な基礎形状（穴、軸、溝形状や傾斜角度など）の限界サイズの確認を行った。その結果を以下に示す。

- ・高密度（相対密度99%以上）な造形物が得られる造形条件を確立した。
- ・確立した造形条件で、基礎形状の造形を行い、金属3Dプリンターで使用される他材料と同等の造形性があることを確認した。

単純形状について、相対密度99%以上の造形が可能な条件を確立すると共に、確立した造形条件で造形可能な限界サイズを確認した。SKD61で任意形状の造形を可能とする造形条件を開発し、本事業で設定した目標は達成された。

【1-2】金型の必要特性に関する熱処理条件の開発（高熱炉工業㈱、徳山高専）

造形物について、処理温度を変化せた熱処理を行い、熱処理後の硬さをバルク材と比較した。また、開発した熱処理条件で硬さをHRC44及びHRC50±1とした後、常温及び高温下（300℃、400℃、500℃）での引張試験を行い、性能の比較を行った。これらの結果を以下に示す。

- ・造形物に対して、熱処理温度の違いに対する硬さの評価を行い、所望の硬さへ調質可能な熱処理条件を開発した。
- ・調質後の造形物は、常温及び高温下の引張強さがバルク材と比較して遜色のない性能であることを確認した。

造形物に対する熱処理条件を開発すると共に、熱処理後の硬さや、常温及び高温での引張強さについてはバルク材と遜色のない性能であることが確認し、本事業で設定した目標は達成された。

【1-3】造形シミュレーション技術の開発（山口産技）

固有ひずみを考慮したシミュレーション条件を開発し、造形時の熱履歴による変形状態を実際の造形物とシミュレーション結果で比較することで、実際の造形状態を推測可能なシミュレーション条件の確立を目指した。その結果を以下に示す。

- ・固有ひずみを評価するための基礎形状サンプル（楕形）を造形し、このサンプルをベースプレートから切り離した際の変形量の測定結果を用いて、固有ひずみを考慮できるシミュレーション条件の開発を行った。
- ・高温における引張試験のデータを用いて、熱構造連成解析による造形及び熱処理に関するシミュレーション条件の開発を行った。
- ・【4-1】で作製した金型の試作物について、開発したシミュレーション条件で造形時の変

形状の解析を行い、実際の試作物の形状測定結果と比較した。

固有ひずみ及び熱構造連成解析によるシミュレーション条件を確立した。また、試作物について実物の形状測定結果とシミュレーション結果の比較を行った。これにより、本事業で設定した目標は達成された。

Ⅱ．金属造形物の高精度後加工技術

【2－1】基礎形状モデルを用いた“ビビリ”抑制技術の開発（高橋鉄工㈱）

5軸加工機による加工でL/D 30以上の造形物に対して、加工時のビビリを抑制し、目標精度（表面粗さRa0.8 μ m以下、形状精度 $\pm$ 0.01mm）で加工が行える条件の開発を目指した。その結果を以下に示す。

- ・本事業で使用する工具及びホルダーについて工具動剛性の測定を行い、ビビリを抑制できる回転数が予測可能となった。
- ・5軸加工機のパラメーター調整を行い、目標精度を実現できるパラメーターを導出した。
- ・サポート面の角度を6パターン（0 $\sim$ 75 $^{\circ}$ 、15 $^{\circ}$ 刻み）変化させた30 $\sim$ 50mm程度の直方体の造形試料について仕上げ加工実験を行い、加工後の仕上げ面の粗さが、Ra0.8 μ m以下であることを確認した。
- ・L/D5 $\sim$ 40までの造形サンプルについてビビリ抑制実験を行い、目標精度である表面粗さRa0.8 μ m以下での加工が行えることを確認した。
- ・以上の結果を基に、造形物の仕上げ加工に適した工具（2種類）を開発し、造形物の加工に対して、既存工具よりも優れた性能を有することを確認した。

高L/Dの造形物に対してビビリ抑制技術の開発を行い、目標精度で加工が行える条件を確立し、本事業で設定した目標は達成された。

【2－2】姿勢及びサポート配置検討支援ツールの開発（山口産技）

造形前に事前に造形姿勢やサポート配置の検討が行えるように、造形姿勢の変化によってサポートが必要となる箇所や、サポートを付加した場合に必要な仕上げ加工量が3次元CADデータ上に重ねて表示させる機能を有したソフトウェアの開発を行った。その結果を以下に示す。

- ・3次元CADデータの面データから法線を抽出する機能及びベースプレートに対する指定角度量に応じて、面の着色を行う機能を有するソフトウェアを開発した。
- ・加工実験で得られた加工面のベースプレートに対する角度と各加工条件をCSV形式データとして入力することで、3次元CADデータの加工面角度に応じて、加工条件の違いを色分け表示させる機能を開発した。

所要の機能を有するソフトウェアを開発し、本事業で設定した目標は達成された。

Ⅲ．高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築

【3－1】3次元CADデータの形状照合ツールの開発（山口産技）

データベースの構築にあたって、その検索機能として3次元CADデータからL/Dのサイズや最小Rなどの形状情報を抽出し、既存の加工事例のCAMデータと照合するソフトウェアの開発を目指した。その結果を以下に示す。

- ・ 3次元 CAD データから抽出する形状特徴を「最小Rサイズ」とその箇所までの「工具の突出し長さ」とし、「最小Rサイズ」については、3次元 CAD データの曲面の幾何学情報から曲率を求め、そこから算出する機能を開発した。「工具突出し長さ」については、3次元 CAD データの表示サイズを示すバウンディングボックスを求め、このボックスの1面を基準面として「最小Rサイズ」を求めた曲面までの距離を算出する機能を開発した。
- ・ 3次元 CAD データの任意の箇所の L/D を計測する機能を開発した。
- ・ 3次元 CAD データの形状特徴（「最小Rサイズ」、その箇所までの「工具の突出し長さ」）抽出機能及び L/D 計測機能で得られた情報を、既存の CAM データの工具リストと照合し、類似する形状加工を行った事例の CAM データを検索する機能を開発した。

所要の機能を有するソフトウェアを開発し、加工対象の 3次元 CAD データの形状特徴から、過去の加工事例として、既存の CAM データを参照する環境を構築した。これにより、本事業で設定した目標は達成された。

IV. 実モデルの試用検証

【4－1】実モデルによる後加工の検証（高橋鉄工(株)，高熱炉工業(株)，山口産技）

本事業の開発技術を組み合わせて実際の金型部品を試作し、目標精度（表面粗さ Ra0.8 μ m 以下、形状精度 $\pm$ 0.01mm）の金型部品を作製することを目指した。その結果を以下に示す。

- ・ 開発技術を用いて、図 1－2 に示した 2 種類の金型部品及び川下企業の生産ラインで試用できるダイカスト金型を試作し、目標精度で作製可能であることを確認した。
- ・ 造形物に開発した熱処理条件を基に熱処理を施し、所望の金型仕様（硬度や変寸制限など）に調質できることを確認した。
- ・ 造形シミュレーションを行い、実際の変形状態と比較し、同様の傾向が確認できた。

目標精度を上回る精度で金型部品の試作ができ、本事業で設定した目標は達成された。

【4－2】実モデルによるダイカストマシンでの検証（高橋鉄工(株)，高熱炉工業(株)，山口産技）

試作した金型部品について、川下企業でダイカストマシンに組み込んだ成形テストを行い、試作した金型部品の実用性について検証した。その結果を以下に示す。

- ・ 試作した金型をダイカストマシンにてテスト成形を行い、従来金型と遜色ない成形が可能であることを確認した。
- ・ 金属 3D プリンターでの製造を活かし、内部に複雑な冷却水管を設けることで、冷却効率の改善によるサイクルタイムの短縮や成形品質の向上が確認できた。

本事業の開発技術で試作した金型部品を、実際のダイカストマシンで試用し、実用に耐え得る性能を有することを確認し、本事業で設定した目標は達成された。今後は、川下企業での検証を継続し、実用化に繋げたい。

第2章 補助事業で実施した具体的内容

2-1 複雑形状金型の金属積層造形技術の開発

【1-1】SKD61の造形条件の開発

I. 研究目的

ダイカスト金型は高温の溶湯による溶損や熱サイクルによるクラックの発生などを抑制するため、耐摩耗性や靱性が求められており、一般的には熱処理により高硬度が得られるSKD61が用いられている。しかし金属3Dプリンター分野では金型材料として、SKD61同様に熱処理によって高硬度が得られるマルエージング鋼が主に使われている。マルエージング鋼は溶接性の高さからダイカスト金型の補修などに使用されているが、バルク材は高価であるため、金型としての利用はあまりなされていない。一方SKD61は溶接性が悪く、造形の困難さから金属3Dプリンターの材料としての利用はされておらず、造形条件の確立については十分に検討がなされていない。そこでSKD61粉末を用いて、緻密体が得られる造形条件の確立を目指した。

II. 研究内容

金属積層造形の主要なパラメーターであるレーザーの「出力」、「走査速度」をそれぞれ変化させ、1辺15mmの立方体を造形し、プレートから切断後、アルキメデス法による密度測定で、各パラメーターが密度に及ぼす影響について検討を行った。

以上の検討で確立した造形条件で造形した造形物について、顕微鏡による断面観察を行い、内部欠陥（ボイドやクラック）の有無の確認や、造形可能な限界サイズなどを確認するための基礎形状の造形を行い、任意形状の造形へ適応可能な条件であるかを確認した。

III. 研究成果

造形条件の検討で一般的に用いられるエネルギー密度（式①参照）を横軸、相対密度を縦軸にとったものを図2-1-1に示す。高い相対密度が得られる範囲としては、60～160[J/mm³]程度であり、他のパラメーターの検討の際にも本範囲で検討を行った。

$$E = \frac{P}{vst} \dots \textcircled{1}$$

E：エネルギー密度[J/mm³]

P：レーザー出力[W]

v：走査速度[mm/sec]

s：ピッチ幅[mm]

t：積層厚[mm]

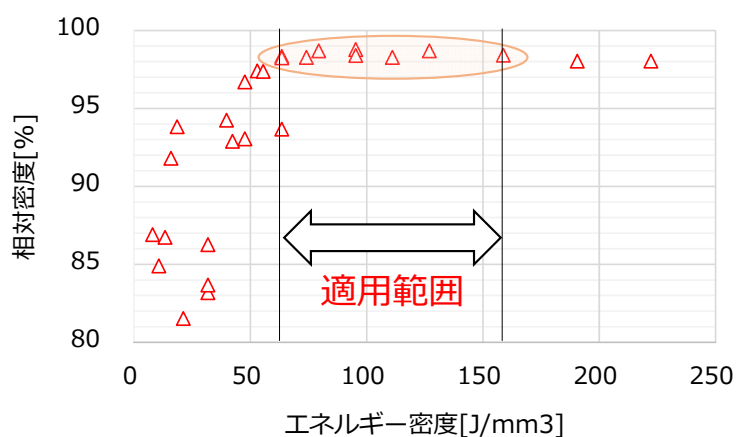


図2-1-1 エネルギー密度と相対密度の関係

検討により得られた最適条件で造形したサンプルの断面の顕微鏡写真を、図 2-1-2 に示す。確立した条件で造形したサンプルには、目立ったボイドやクラックなどの内部欠陥はなく、目標とする密度 99%以上の造形が行える条件となっていることが分かる。

図 2-1-3 に開発した造形条件で作製した基礎形状サンプルの写真を示す。このサンプル群で造形可能な寸法や穴、傾斜角度などの限界サイズを把握することができた。また、他の造形材料と比べても遜色のない造形性であることも確認できた。

SKD61 について、密度 99%以上で任意形状の造形に対応した造形条件を開発し、本事業の目標は達成された。開発した造形条件は、マルエージング鋼などの金属 3D プリンターで用いられる主要な造形材料に比べても遜色のない造形性があるため、複雑形状の金型の造形にも十分対応できると思われる。

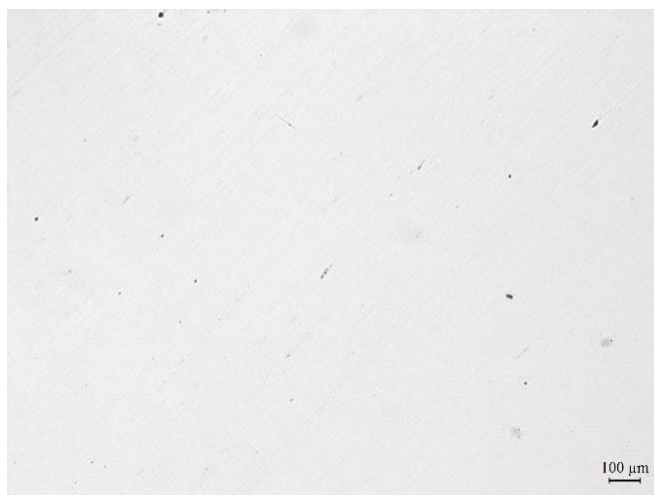


図 2-1-2 造形サンプル断面の顕微鏡写真

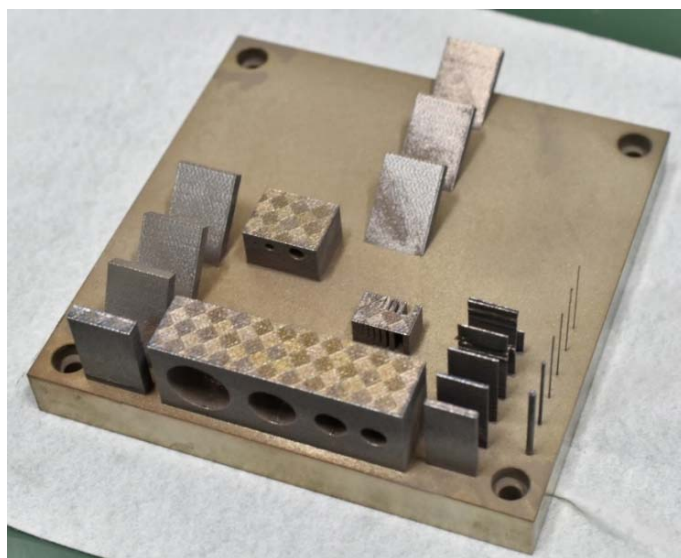


図 2-1-3 開発した造形条件で作製した造形サンプル

【１－２】金型の必要特性に関する熱処理条件の開発

I．研究目的

金属 3D プリンターの造形物を金型として使用するには、凝固過程で造形物に生じてしまう異方性や、残留応力などの影響を取り除く必要がある。これらの影響を制御する方法として、造形物に適用する熱処理条件の開発を行った。開発する熱処理条件で、造形物の硬さや強度など所要の機械的特性を金型に必要な性能とすることも目指した。

II．研究内容

II－１．造形物の熱処理条件の開発

熱処理条件の開発は、真空熱処理炉を用いて行った。使用した熱処理炉を図 2－１－４に示す。

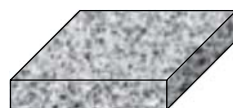


項 目	仕 様
型式	NVFC-180PT
メーカー	株式会社 IHI
炉内サイズ [mm]	420W × 325H × 650L

図 2－１－４ 熱処理炉（真空熱処理炉）

II－１－１．マルエージング鋼の熱処理条件の開発

先に述べた造形物の異方性や残留応力の発生状況は、造形物の形状が影響するが、まずは単純な形状にて、目標とする硬さ（HRC40 以上）を実現可能な熱処理条件の開発を行った。熱処理条件の検討用として造形した単純形状の試料を図 2－１－５に示す。



30×30×t3mm



試料外観

図 2－１－５ 熱処理条件 検討試料（マルエージング鋼）

マルエージング鋼は、米国 INCO 社によって開発された鋼種で、低炭素 18%Ni 鋼に時効硬化元素として Co、Mo、Ti、Al 等を添加した時効硬化型の特殊鋼である。炭素鋼を高温から急冷することで得られる硬いマルテンサイト組織を形成させた後、時効（aging：エージング）硬化処理によって、各種時効硬化元素の金属間化合物が組織中に析出分散することで高い強度と靱性を合わせ持った特徴となることから、マルテンサイトのエージング、すなわち“マルエージング鋼”と呼ばれている。その熱処理では、この特徴を活かすため、“固溶化処理”を行った後、“析出硬化処理”を行う、２段階の処理を行うのが一般的である。（各処理の役割は、以下を参照）

- ・ **固溶化処理**：適温に加熱・保持することで材料中の合金成分を固体の中に溶かし込み（固溶させる）、析出物を出さないように急冷する処理
- ・ **析出硬化処理**：固溶化熱処理の後、適温下での時間経過で材料特性を変化させ強度を向上させる時効硬化を人工的に行う処理

Ⅱ－１－２．SKD61 の熱処理条件の開発

目標とする硬さを実現可能な熱処理条件の開発を行った。熱処理条件の検討用として造形した単純形状の試料を図 2－1－6 に示す。SKD61 のバルク材については、JIS 規格に一般的な熱処理条件が規定されている（JIS G 4404 参照）。この熱処理条件をベースとし、熱処理後の硬さの変化を調べた。

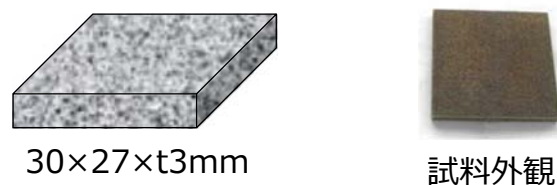


図 2－1－6 熱処理条件 検討試料（SKD61）

Ⅱ－２．物性評価試験

マルエージング鋼及び SKD61 の造形物に対する物性評価試験として、熱処理を施した試料に対して「硬さ試験」、「引張試験」（常温、高温：300℃、400℃、500℃）、「残留応力測定」を実施した。

Ⅱ－２－１．硬さ試験

熱処理条件の検討を行った試料について、処理前後の硬さ測定を行い、条件の違いによる硬度の変化を比較した。造形直後の試料は、造形材料の金属粉末の熔融凝固により梨地状の凹凸のある表面をしているため、試料表面に研磨を施し、凹凸を除去した平滑面として硬さ測定を行った。図 2－1－7 に硬さ測定に使用した硬度計を示す。

Ⅱ－２－２．高温引張試験

図 2－1－8 に示す試験片を造形及びバルク材で作製し、高温引張圧縮試験機にて常温、300℃、400℃、500℃の温度条件で引張試験を実施した。なお、試料の硬さは、開発した熱処理条件を用いて HRC44±1 及び HRC50±1 となるように調整した。図 2－1－9 に測定に使用した高温引張圧縮試験機を示す。



項 目	仕 様
型 式	ロックウェル式硬さ試験機（3 R 形）
製造番号	7165 号
製造年月	1977 年 12 月
メーカー	株式会社 仲井精機製作所

図 2－1－7 硬度計

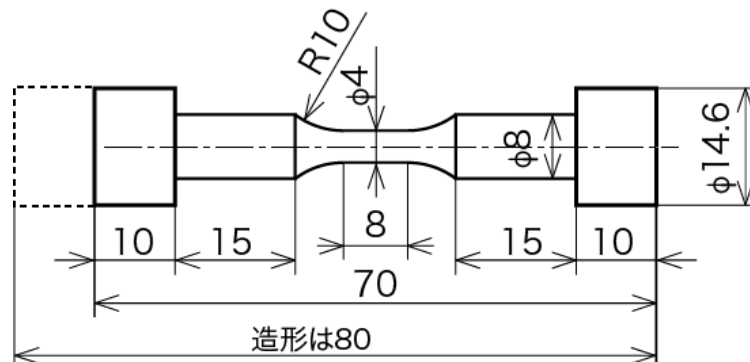


図 2－1－8 引張試験片



項 目	仕 様
型 式	サーボパルサ EHF-V050k1
メーカー	島津製作所
試験容量	50kN
高温試験装置	抵抗加熱式高温試験装置
対応試験	静的試験、耐久試験
試験温度	室温、高温（300～1000℃）

図 2－1－9 高温引張圧縮試験機

Ⅱ－2－3. 残留応力測定

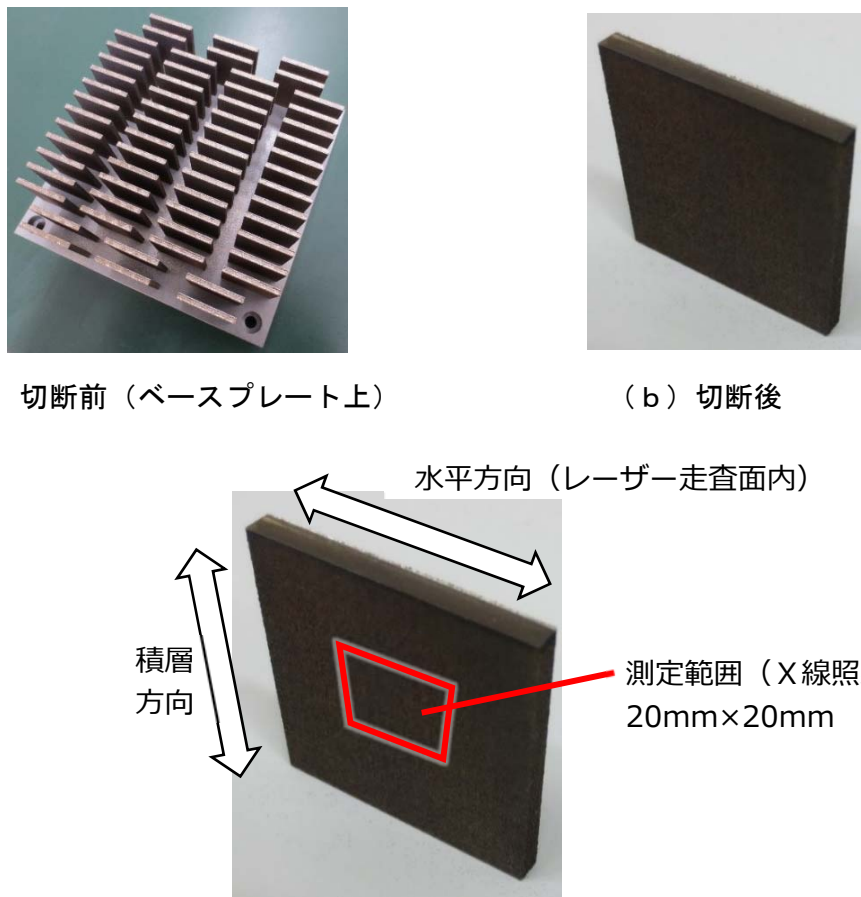
造形した熱処理前の試料（マルエージング鋼）について、造形直後のベースプレート上に配置された状態とベースプレートから切り離した状態について残留応力測定を行い、切り離し前後での残留応力の変化を比較した。図 2－1－10 に測定に使用した X 線応力測定装置を示す。

図 2－1－11 に残留応力測定を行った試料を示す。残留応力の測定は、試料の中央付近の 20mm×20mm の範囲に対して行った。測定範囲にのみ X 線が照射されるように、範囲外の箇所に

はビニールテープによるマスキングを施した。X線の照射範囲を電解研磨で $30\mu\text{m}$ ずつ研磨しながら残留応力を測定し、試料表面から $300\mu\text{m}$ の深さまで測定を行った。測定は、水平方向（レーザーが走査する面内方向）及び造形材料の積層方向について行い、残留応力の発生状況の異方性の有無についても確認を行った。

	項 目	仕 様
	型 式	MSF-3M
	メーカ	株式会社リガク
	X線管球	Cr、Cu、Co、Fe、V
	2θ 測角範囲	140° ~170°
	X線検出器	シンチレーションカウンタ
	残留応力測定法	並傾法、側傾法
	測定可能な物質	α -Fe、 γ -Fe、Al 及び Al 合金 Cu 及び Cu 合金、Ti、Ni 等

図 2－1－10 X線応力測定装置



(c) 測定範囲及び測定方向

図 2－1－11 残留応力測定 試料

Ⅲ．研究成果

Ⅲ－１．硬さ試験

マルエージング鋼及びSKD61の造形物に対して、熱処理方法を検討することにより、所望の硬度へ調質することが可能となった（熱処理方法の詳細は割愛）。これによりダイカスト金型で求められる種々の硬度に対してバルク材と同様に対応することができると考える。

Ⅲ－２．高温引張試験

図２－１－１２にマルエージング鋼の高温引張試験の結果を、図２－１－１３にSKD61の高温引張試験の結果を、バルク材と比較して示す。図中で黒塗りのプロットがバルク材の結果を、白塗りのプロットが造形物の結果を示している。

図より、マルエージング鋼及びSKD61の造形物の常温及び高温引張強さは、HRC51及びHRC45のどちらの硬さにおいても、バルク材と同程度の性能を示していることが分かる。

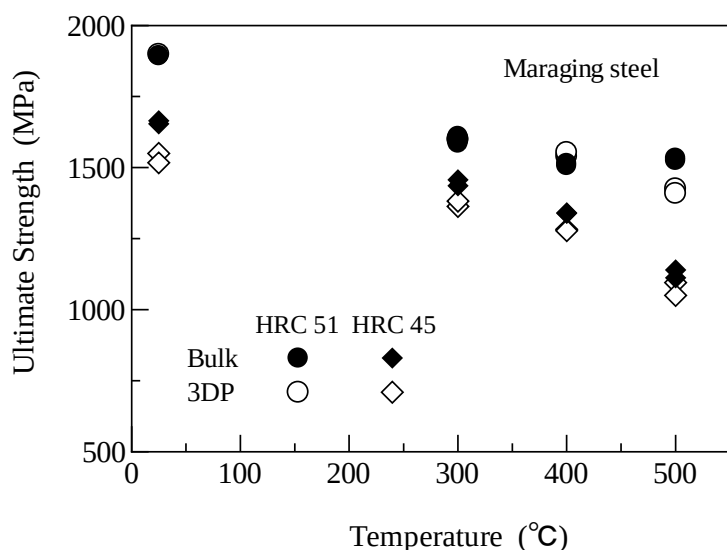


図２－１－１２ 高温引張試験の結果（マルエージング鋼）

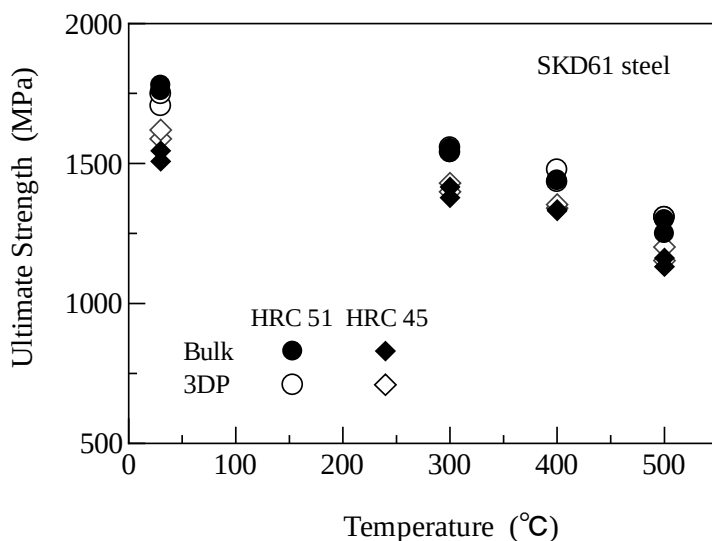
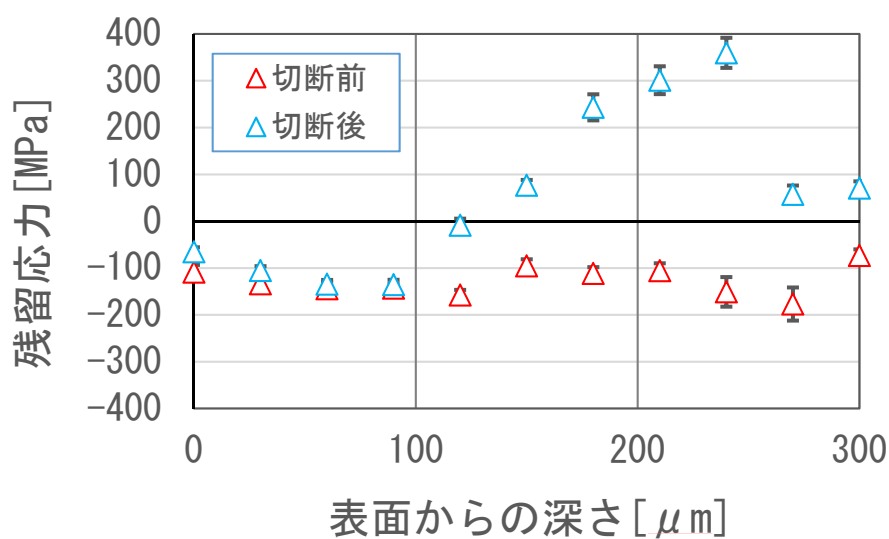


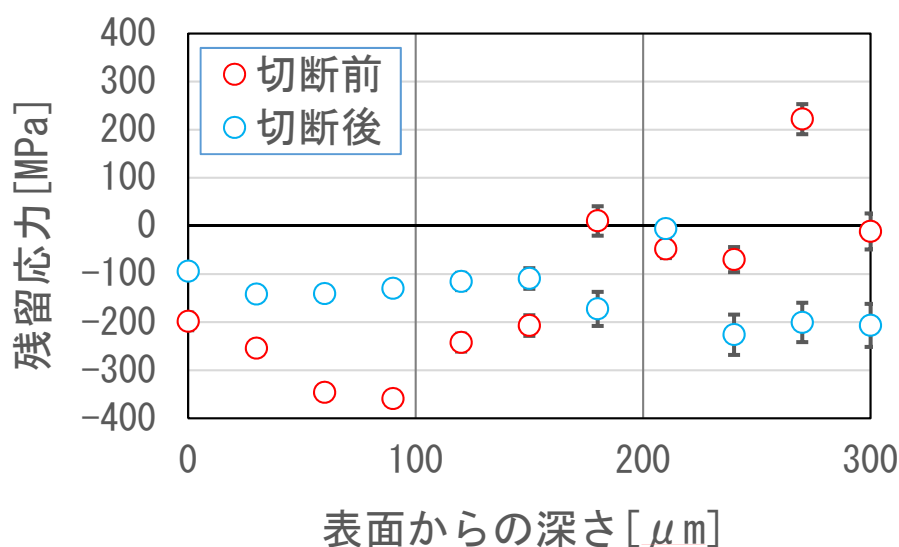
図２－１－１３ 高温引張試験の結果（SKD61）

Ⅲ－３． 残留応力測定

図 2－1－1 4 に試料表面からの深さと残留応力の関係を示す。＋側は引張、－側は圧縮の残留応力が生じていることを示している。図より、残留応力の発生状況は、水平方向及び積層方向で異なる傾向を示しており、異方性があることが確認できる。また、水平方向の残留応力について、表面から深さ $100\mu\text{m}$ を超えた辺りから、切断後に圧縮から引張側の高い応力へと変化していることが分かる。これは、造形直後の造形物は、ベースプレートから切り離すことで残留応力が解放され、変形が生じる可能性があることを示している。このような状態は最終的な金型部品の精度に影響を及ぼすため除去する必要がある、これまでの研究から熱処理により除去できることを確認している。



(a) 水平方向



(b) 積層方向

図 2－1－1 4 表面からの深さと残留応力の関係（マルエージング鋼 造形物）

マルエージング鋼及びSKD61の造形物について、所望の硬さを実現する熱処理条件を開発し、ダイカスト金型の材料として広く使われているSKD61のバルク材と同様に調質が可能となった。また、造形物に対する常温及び高温での引張試験においてバルク材と遜色のない性能であることを確認し、本事業の目標は達成された。

実施した試験では、どちらの材料もバルク材と比較して同等の性能となっていると考えられるため、いずれの材料もダイカスト金型部品への利用は可能と考える。しかし、熱処理を施していない試料の残留応力測定では、造形物に異方性を有する残留応力が生じていることが確認できたため、適切な熱処理により応力を除去する必要がある。これは、造形物の形状にも影響されるため、実際の金型部品の製造にあたっては、この影響を考慮した上で造形を行うことを検討したい。

【1－3】造形シミュレーション技術の開発

I. 研究目的

金属積層造形は付加製造技術と称され、形状自由度の高さからオーダーメイド品や設計変更の多い多品種少量生産に適している。そのため、材料や寸法、形状の複雑さなどが多様なモデルが造形の対象となる。造形時には造形の安定性、後加工の容易さ、コストなどを考慮しながら、モデルの造形姿勢や支持部となるサポートの配置等を検討する。造形現象は複雑で予測がしづらく、一部の造形不良によりモデル全体に影響を及ぼすため、作業者のノウハウや試行錯誤のための時間を要し、コスト高となってしまう。

その対策のひとつとして本分野でもシミュレーションを活用した事前検討が行われ始めている。しかしながら、シミュレーションで必要となる物性値や、解析条件の設定には各造形機に合わせた調整が必要となる。そこで、実際の造形物とシミュレーション結果を比較することで、適切な解析条件の設定や、各種パラメーターが解析結果に及ぼす影響について検討を行い、造形コスト低減のためのシミュレーション技術の高度化を目指した。

II. 研究内容

造形時の熱履歴による変形状態を実際の造形物とシミュレーション結果で比較し、造形現象を再現可能なシミュレーション技術確立する。本事業で導入した『造形シミュレーションソフトウェア』で、熱構造連成解析及び固有ひずみを考慮したシミュレーション条件の開発を行った。

マルエージング鋼を対象として熱構造連成解析を行い、造形不良や造形物の変形に起因する要因のひとつである残留応力の結果に着目し、【1－2】で実施した物性評価結果との比較検討を行った。また、各造形材料について、造形時の固有ひずみ評価用の楕円サンプルを造形し、ベースプレートから切り離した際の変形量を測定し、固有ひずみの推定を行った。得られた固有ひずみのデータを基にした逆解析を行い、シミュレーションに必要な物性データを算出した。

Ⅲ. 研究成果

Ⅲ－１．造形時の残留応力シミュレーション

シミュレーションでは溶融から凝固過程において、造形物に生じる変形や応力を推定している。そのため、応力に対する変形（ひずみ）の関係を表した応力-ひずみ線図が、材料物性データとして必要となる。そこで応力-ひずみ線図取得のため、マルエージング鋼にて直方体を造形し、プレートから切断後、機械加工にて14B 比例試験片形状とし引張試験を行った。図2－1－15に示す引張圧縮試験機を使用し、試験速度は5mm/minとした。

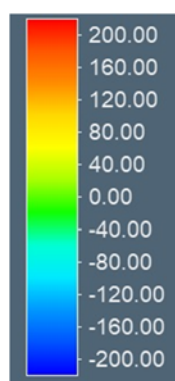
得られた材料物性データを元に、物性評価試験と同形状（幅30×高さ30×奥行3mm）のモデルにて、マルエージング鋼の造形条件による熱構造連成解析を行った。解析では「造形」及びプレートからの「切断」の過程をシミュレーションしている。解析結果を図2－1－16に示す。いずれの解析結果も正面からの結果を表しており、それぞれ切断前後における水平方向と積層方向の残留応力の結果を示している。この結果から積層方向には大きな圧縮の残留応力が生じており、切断することによって解放される傾向にあることがわかる。

物性評価試験の結果との比較を表2－1に示す。なお、ここでの測定値は造形物表面の残留応力、解析値は物性評価試験と同範囲における平均値を表している。測定結果と解析結果は概ね一致しているが、切断前における水平方向の残留応力について、引張圧縮で逆の傾向が見られた。その要因として評価箇所上部では圧縮の残留応力が生じているなど、評価箇所によって応力の傾向が異なっていることから、平均を求める際に評価箇所の僅かな違いが要因と考えられる。



項 目	仕 様
型式	試験機：5982，伸び計：AVE2
メーカー	INSTRON®（アメリカ）
荷重容量	100kN
伸び計	非接触ビデオ伸び計
最大速度	1000mm/min

図2－1－15 引張圧縮試験機



[MPa]

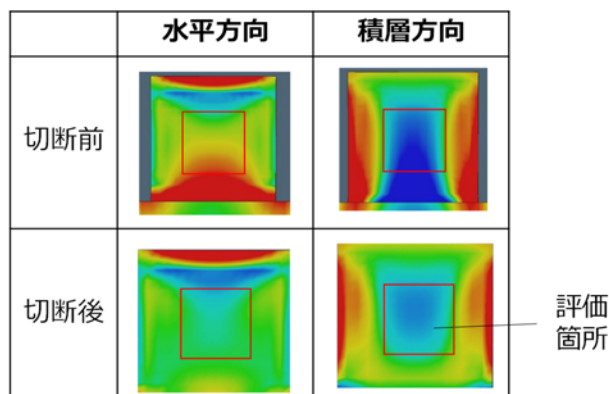


図2－1－16 解析結果（切断前後における水平及び積層方向の残留応力）

表 2－1 測定結果と解析結果の比較

単位：MPa	水平方向		積層方向	
	切断前	切断後	切断前	切断後
測定結果	-109	-66	-199	-94
解析結果	82	-49	-179	-110

Ⅲ－１．造形時の固有ひずみデータの逆解析

図 2－1－17 に固有ひずみ評価用サンプルを示す。固有ひずみの評価は、3 方向に配置された楕円部分のベースプレートからの高さを、切断前後で測定することで行った。楕円形状の高さ測定は、非接触タイプの三次元測定機を用いて行った。図 2－1－18 に測定に使用した三次元測定機を、図 2－1－19 に楕円サンプルの測定箇所のイメージ図を示す。各楕円のサンプルについて、両端から 1.5mm 内側の 2 か所と中央の 3 か所を測定し、その 3 点の平均値を各方向の変形量とした。

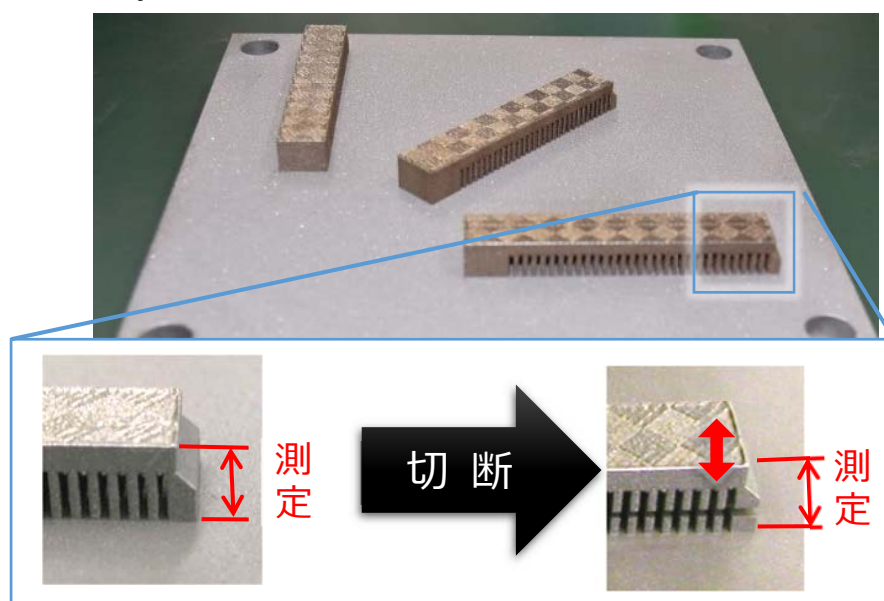


図 2－1－17 固有ひずみ評価用 楕円サンプル



項 目	仕 様
型式	Smart Scope ZIP300
メーカー	OGP® (アメリカ)
測定範囲	(X) 300 × (Y) 300 × (Z) 200mm
測定精度	XY 軸 : $U2 = (2.0 + 4L/1,000) \mu m$ Z 軸 : $U1 = (2.5 + 5L/1,000) \mu m$
スケール分解能	0.1 μm

図 2－1－18 非接触タイプの三次元測定機

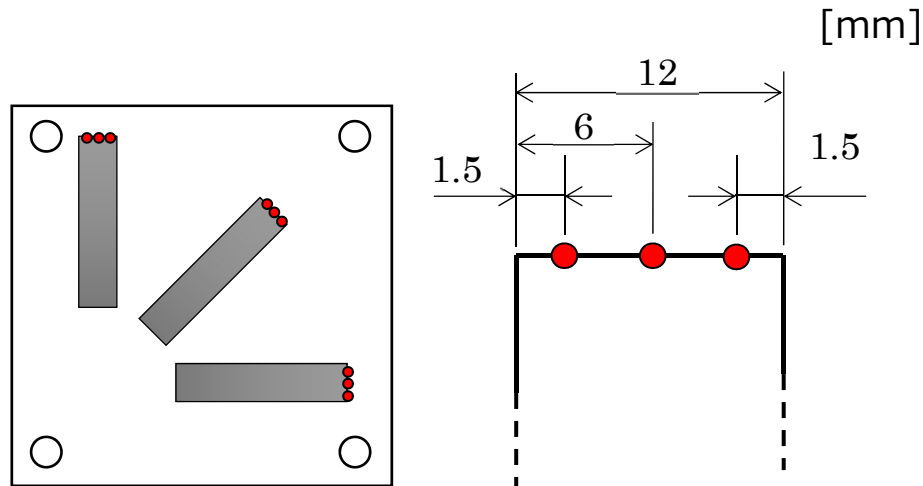


図 2-1-19 変形量の測定箇所イメージ

図 2-1-20 及び図 2-1-21 に、マルエージング鋼及び SKD61 の楕円サンプル変形量の測定結果を示す。図より、各造形材料の変形量は、マルエージング鋼が一方向で、SKD61 は十方向となっていることが分かる。また、変形量の大きさもマルエージング鋼と SKD61 では、約 10 倍程度の違いがあることが分かる。これらの結果から、マルエージング鋼については、造形時の熱履歴の影響で圧縮の残留応力が発生しており、楕円部分の切断時に解放され、サンプル表面が伸びることで、先端が沈み込むような変形になったと考えられる。また、SKD61 では、逆に引張の残留応力が発生し、サンプル表面が縮むことで、先端が浮き上がるような変形を示したと考えられる。これらの測定結果を“解”とした逆解析により、造形シミュレーションで使用する各造形材料の固有ひずみの物性データを算出した。

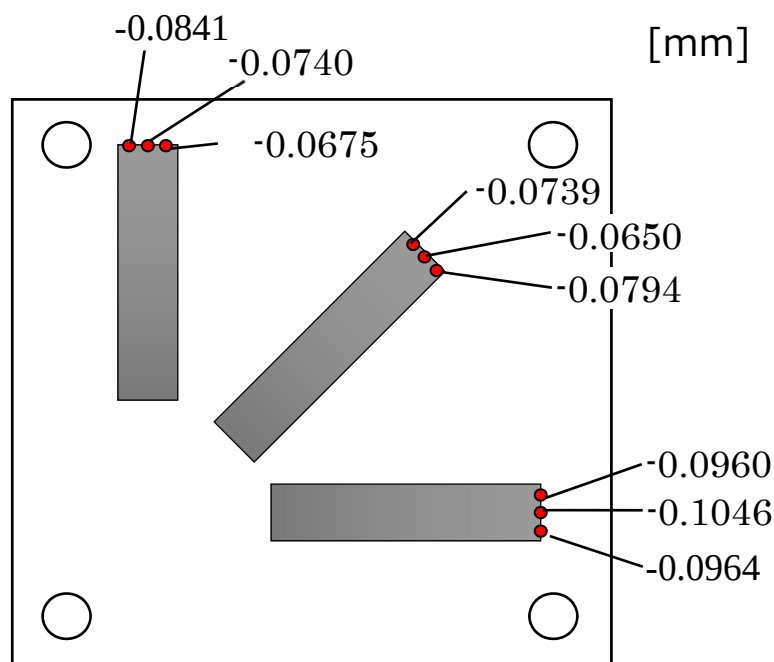


図 2-1-20 楕円サンプル変形量の測定結果（マルエージング鋼）

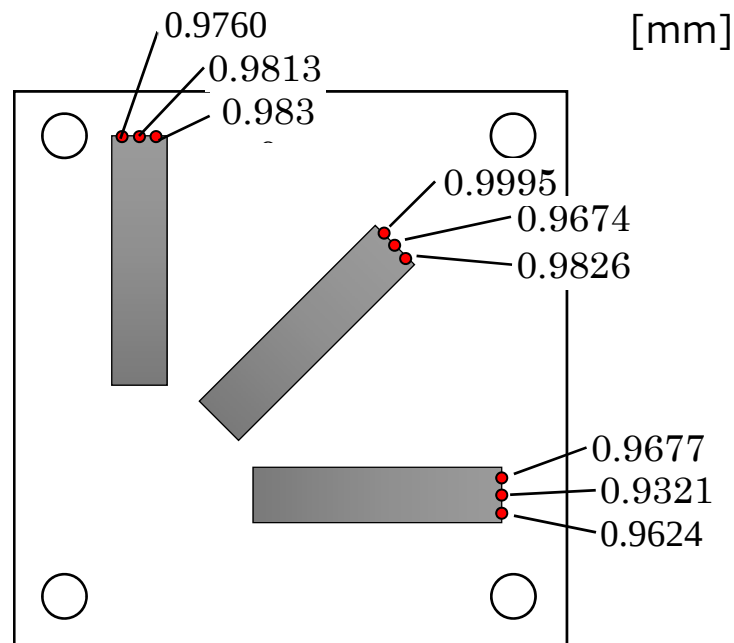


図 2-1-2-1 楕円サンプル変形量の測定結果 (SKD61)

図 2-1-2-2 に固有ひずみデータの逆解析の状況を示す。これにより、マルエージング鋼及び SKD61 の固有ひずみに関する物性データを取得することができ、各材料について、造形時の熱ひずみを考慮した造形シミュレーションを実施することが可能となった。

造形シミュレーション条件で用いる固有ひずみの物性データの取得や、応力-ひずみ線図による熱構造連成解析により、残留応力等に関する実際の造形現象を概ね再現できていることが確認でき、本事業の目標は達成された。このデータを使用し、実際に試作物の造形シミュレーションを実施したが、その詳細については、【2-4. 実モデルの試用検証】の項にて後述する。

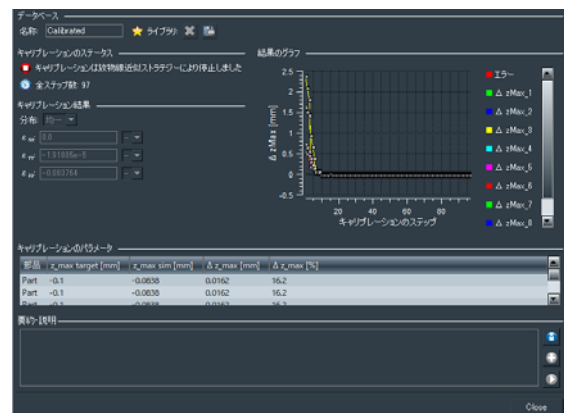
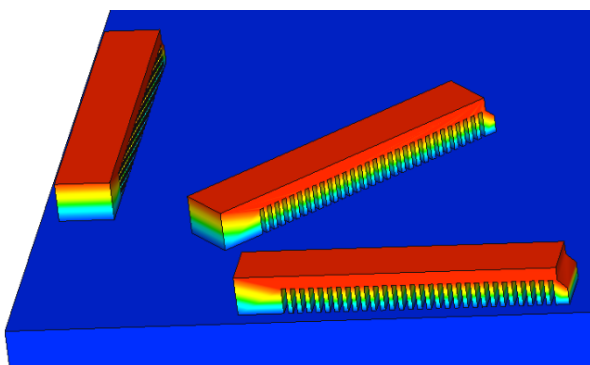


図 2-1-2-2 固有ひずみデータの逆解析

2-2 金属造形物の高精度後加工技術

【2-1】基礎形状モデルを用いた“ビビリ”抑制技術の開発

I. 研究目的

自動車製造において、アルミダイキャスト部品の拡充には、部品及びその製造に必要な金型に深リブ構造などの高 L/D 形状を加えた形状の変更による剛性アップが不可欠である。（図 2-2-1 参照）

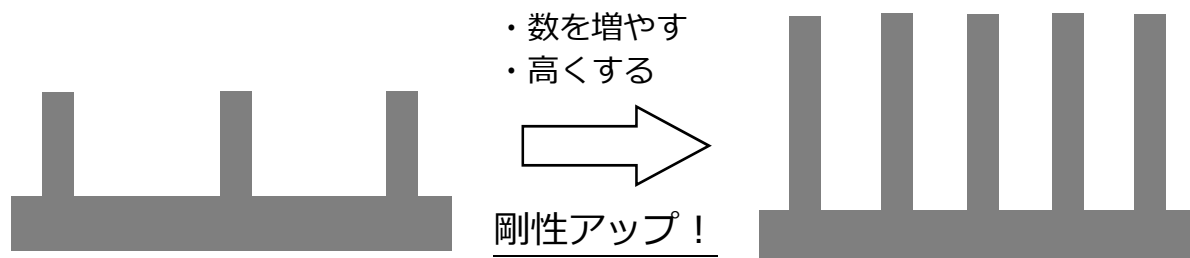


図 2-2-1 深リブ構造 イメージ図

しかし、このような形状変更を行った場合、加工中に“ビビリ”振動が発生し易くなり、加工精度の悪化や、工具もしくは材料破損の危険性が高くなる。金属 3D プリンターで造形した場合でも、その後加工の際に“ビビリ”振動の発生危険性があり、所望の精度に仕上げるには“ビビリ”抑制を実現することが重要となる。また、深リブ構造を有する形状を金属 3D プリンターで造形した場合、造形姿勢によっては、深リブ部分にサポートが配置される場合があり、後加工でのサポート部の除去も重要な課題となる。

前者については、導入した『5軸加工機』を用いて、L/D を変化させた造形物の試料を用いた加工実験を行い、表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 以下の仕上げ状態を実現する加工条件を開発した。後者については、サポート部を含む傾斜面角度を変化させた造形物の試料に対して、表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 以下の仕上げ状態を実現する加工条件を開発した。

II. 研究内容

II-1. サポート除去加工実験

加工実験用の試料として、傾斜面の角度を $0\sim75^\circ$ まで 15° 刻みで変化させた直方体の試料を造形した。図 2-2-2 で示す傾斜面角度が一般的に 45° 未満になると、造形時にサポートが付与される。

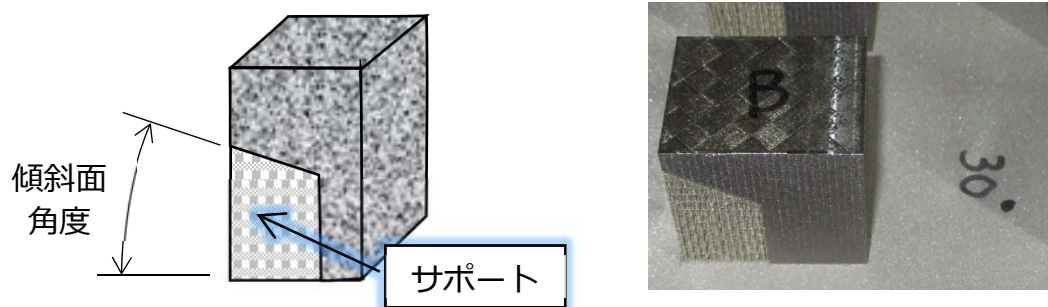


図 2-2-2 サポート除去加工実験の試料

実験に先立ち、ベースとなる加工条件を決定するため、試料の上面及び側面を加工するテスト加工を実施した。図 2-2-3 に加工条件の違いによる加工後の工具を比較したものを示す。加工条件の適正化により、図 (b) に示すように工具の高寿命化を実現できた。

テスト加工での加工条件を基に、造形物のサポート除去を含む傾斜面部の加工実験を行い、表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 以下の精度とする加工条件を検討した。実験では、傾斜面角度 0° 、 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 75° の各試料で、目標精度を実現するため以下 5 項目の条件を検討した。実験では、加工条件の違いによるビブリの発生状況についても併せて確認した。

- ・ 工具及びホルダー
- ・ 周速 (回転数)
- ・ 加工経路
- ・ 残し代
- ・ 仕上げ回数



(a) 60m/min



(b) 50m/min

図 2-2-3 周速の違いによる加工後の工具刃先

一般的に金型を加工する場合には、熱処理前に荒加工が必要となるが、金属 3D プリンターによる造形物の加工においては、造形物が最終形状に近いため荒加工は不要となる。そのため加工実験では、仕上げ加工の条件について検討を行った。導入した『切削動力計』を用いて加工時の負荷を計測すると共に、刃先の摩耗状態を確認し、造形物のサポート除去を含む傾斜面部の加工条件を検討した。

試料の加工後、傾斜面部の表面粗さを測定し、加工後の仕上がり精度の確認を行った。図 2-2-4 に使用した表面粗さ計を示す。使用した測定機は、試料表面に接触させた触針を水平方向に移動させて測定を行うため、 0° 以外の傾斜面については、図 2-2-5 に示す、傾斜面部を水平状態で設置できる治具を構成し、測定を行った。



項 目	仕 様
型式	SE-30K
メーカー	小坂研究所株式会社
縦倍率	50～100,000 倍
横倍率	1～1,000 倍
測定台	150×150mm 許容積載重量 5kg

図 2－2－4 表面粗さ計

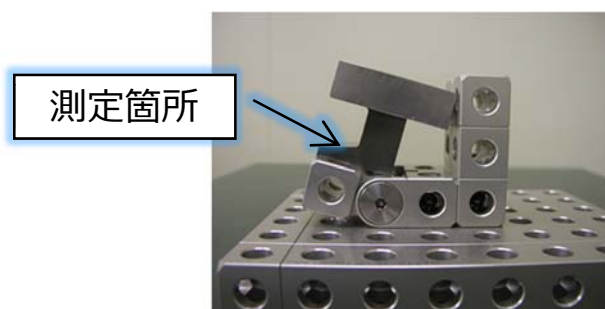


図 2－2－5 傾斜面部 表面粗さ測定用の治具

Ⅱ－2．工具動剛性の測定

造形物の仕上げ加工で使用する工具及びホルダーについて、『5軸加工機』に取り付けた際の動剛性測定を行った。『5軸加工機』の主軸に取り付けた工具に対して、インパルスハンマーによる加振を行い、レーザードップラー振動計を用いてその時に発生する振動状態を測定した。工具 17 本、8 種類のホルダーを組み合わせ測定し、測定データからビビリを回避できる回転数の予測を行った。測定は、広島県生産技術アカデミーの西川氏に協力して頂き実施した。図 2－2－6 に測定の実施状況を、図 2－2－7 に使用した『5軸加工機』の概要を示す。

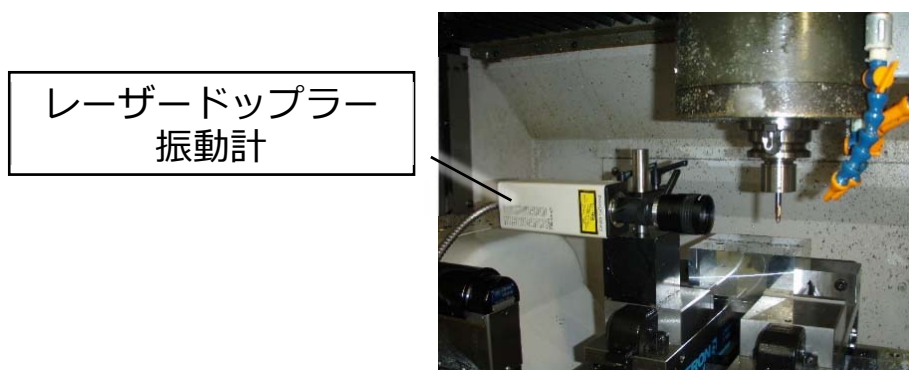


図 2－2－6 動剛性測定の実施状況



項 目	仕 様
型式	VARIAXIS i-600
メーカー	ヤマザキマザック株式会社
各軸移動範囲	X 軸 510mm Y 軸 910mm Z 軸 510mm A 軸 -120 度～+30 度 C 軸±360 度
主軸回転数	12,000rpm

図 2-2-7 5 軸加工機

Ⅱ-3. 加工機のパラメーター調整

出荷時の加工機は、設置状態や各軸の動作バランスなどの機械固有の挙動が考慮されていないため、高精度加工の実現には、実施する加工状況に合わせて、この挙動に関する動作パラメーターを調整する必要がある。そのため、導入した『5 軸加工機』についても、造形物の仕上げ加工に対する加工精度向上のため、パラメーターの調整を実施した（詳細は割愛）。

Ⅱ-4. 高 L/D サンプルのビブリ抑制実験

Ⅱ-2 及びⅡ-3 の開発内容の検証を行うため、造形した高 L/D サンプルを用いたビブリ抑制の加工実験を行った。高 L/D サンプルは L/D5~40 まで、L/D を 5 刻みで変化させた直方体とした。

図 2-2-8 にビブリ抑制実験の実施状況を示す。『5 軸加工機』上に『切削動力計』を介して高 L/D サンプルを固定し、各 L/D のサンプルに対して、ビブリを抑制した加工が実施可能か検証を行った。ビブリの発生状況は『切削動力計』による加工中の切削抵抗の測定や、加工後のサンプルの表面粗さを測定することで確認した。

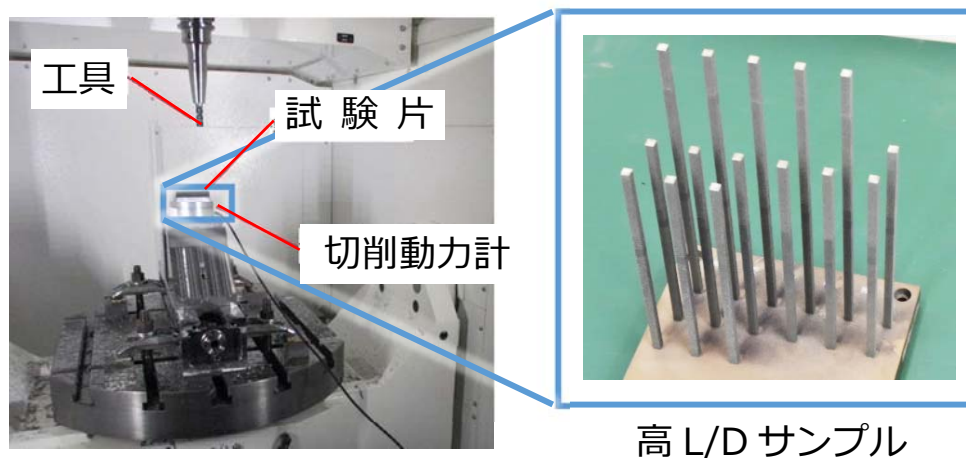


図 2-2-8 ビブリ抑制実験の実施状況

Ⅲ. 研究成果

Ⅲ－１. サポート除去加工実験

今回、造形した試料のサポートは、使用した金属 3D プリンターで用いられる標準的なサポートで、手作業での除去も可能なタイプとなっている（図 2－2－2 参照）。そのため、サポート除去加工の初期と最終段階において、図 2－2－9 に示すような 2 パターンのサポートの噛み込み現象が発生した。1 つは図（a）に示す、切り離されたサポート材がランダム形状に広がっていく挙動となることで、ばらけたサポート材の一部が工具と試料の間に噛み込まれる状態である。もう一方は、図（b）に示す、輪郭部の箔状のサポートが噛み込む状態である。

これらの対策として、前者については、最終的な仕上げ面から工具を離す量を増加させ、サポートの大部分を取り除く加工を行い、噛み込みを回避した。後者については、最終的な仕上げ面からある程度離れた位置から複数回に分けて加工することで、噛み込みの発生を回避することができた。

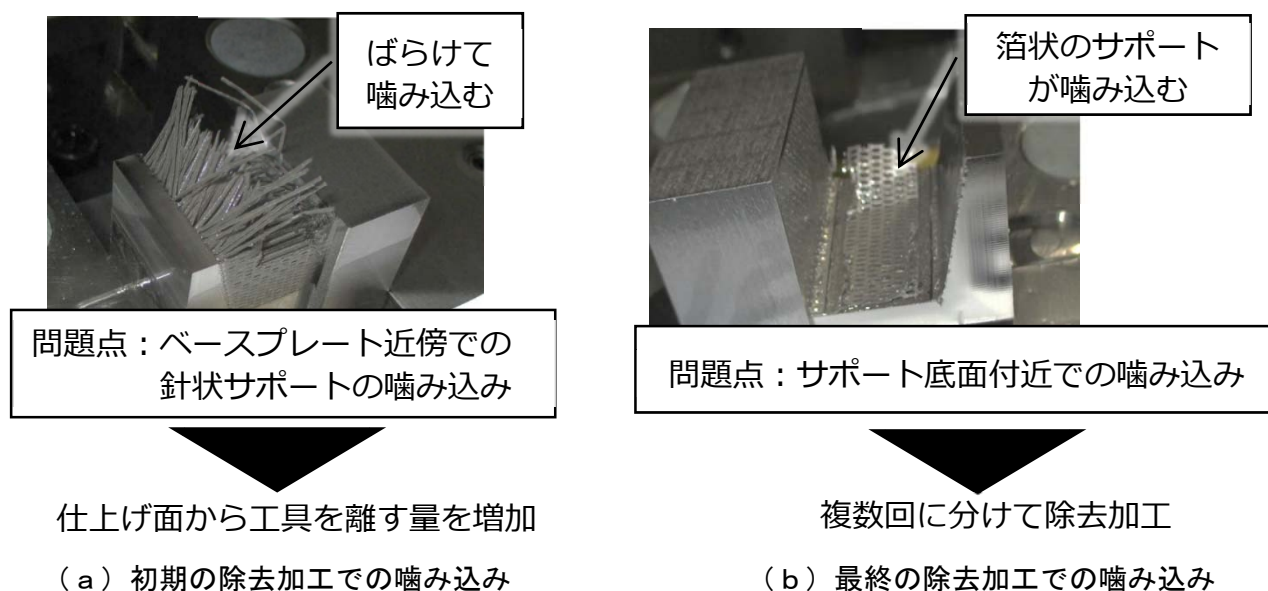


図 2－2－9 除去加工時のサポートの“噛み込み”と対策

以上のサポート除去加工を行った後、テスト加工で求めた加工条件を基に傾斜面部の仕上げ加工の検討を行った。図 2－2－10 にサポート除去を含む傾斜面加工後の試料を示す。これらの内、 0° 、 15° 、 30° はサポート除去を含む仕上げ加工を行った試料で、 45° 、 60° 、 75° は傾斜面の仕上げ加工のみを行った試料となる。各傾斜面角度で加工条件を 6 パターン変化させて、仕上げ加工を実施した。

まず、 15° の試料で加工条件の絞り込みを行い、残りの角度は絞り込んだ条件を基準に実施した。各試料に関する加工後の表面粗さ R_a の測定結果を図 2－2－11 に示す。図中の●は、6 パターンの加工条件での R_a の平均値を示しており、エラーバーは平均値に対する最大及び最小誤差を示している。条件出しを行った傾斜面角度 15° の一部の条件で $R_a 0.8 \mu m$ を超える試料があったものの、加工条件の最適化により、目標精度での仕上げ加工を実現可能であることが確認できた。

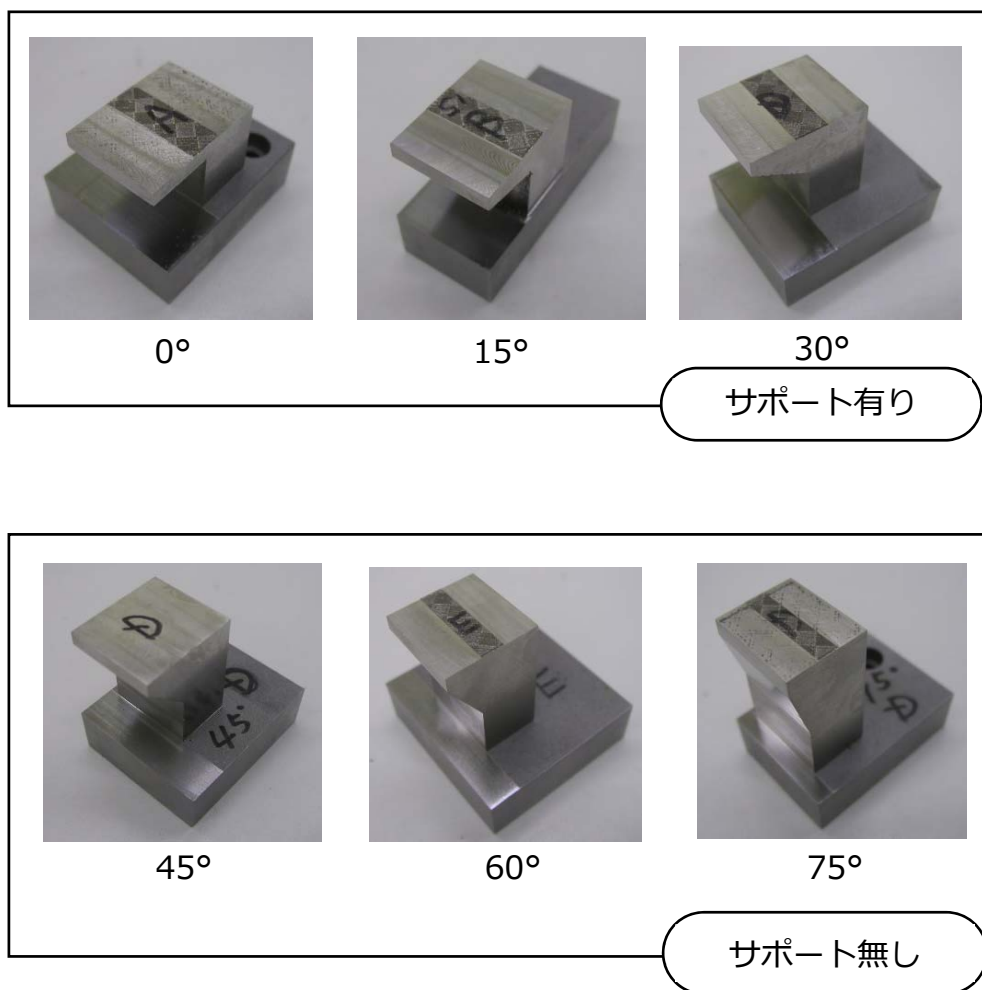


図 2 - 2 - 1 0 傾斜面加工後の試料

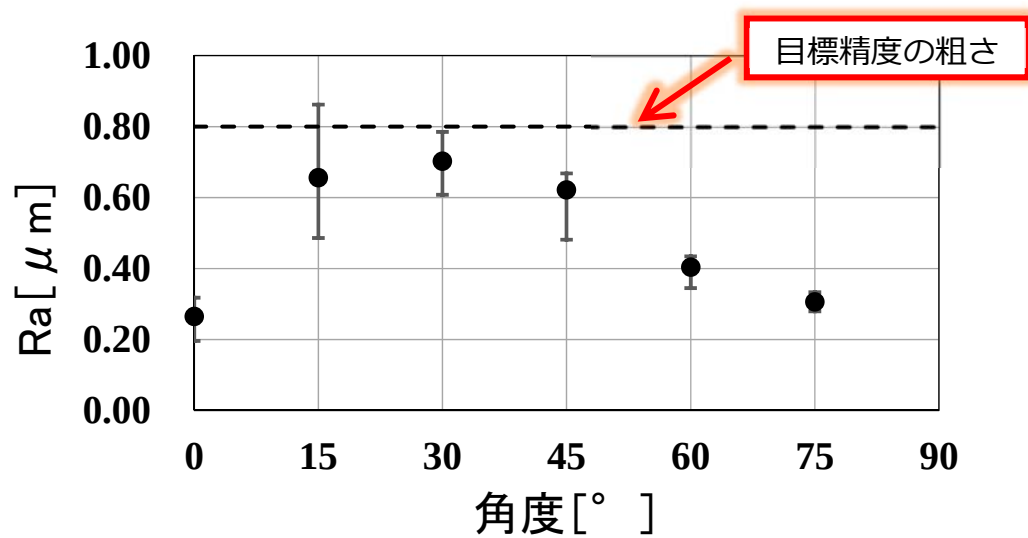


図 2 - 2 - 1 1 仕上げ加工後の表面粗さ

Ⅲ－２．工具動剛性の測定結果

図２－２－１２に工具動剛性の測定結果の一例を示す。図はレーザードップラー振動計で測定した振動データから得られたコンプライアンス曲線である。横軸が周波数を、縦軸がコンプライアンス（振動による変位量を加えた力で割ったもの）の大きさを示している。コンプライアンス曲線からは、測定時の工具とホルダーの組合せで加工を行った際の最小共振周波数と共振点での最大振幅を推定することができる。図の例では、最小共振周波数は、およそ 718Hz であることが分かる。

加工時に工具のビビリ振動が発生した際に、加工面の仕上がり精度が低下するのは、工具の振動と被削材の振動状態が異なることで、均一な切削が行えなくなるためであると考えられている。そのため、この共振周波数から推定される回転数で加工を行えば、工具と被削材の振動差が無くなり、均一な加工になると推察される。以上のことから、各工具の動剛性の測定結果を用いて、ビビリ抑制が可能となる回転数の条件を導出した。

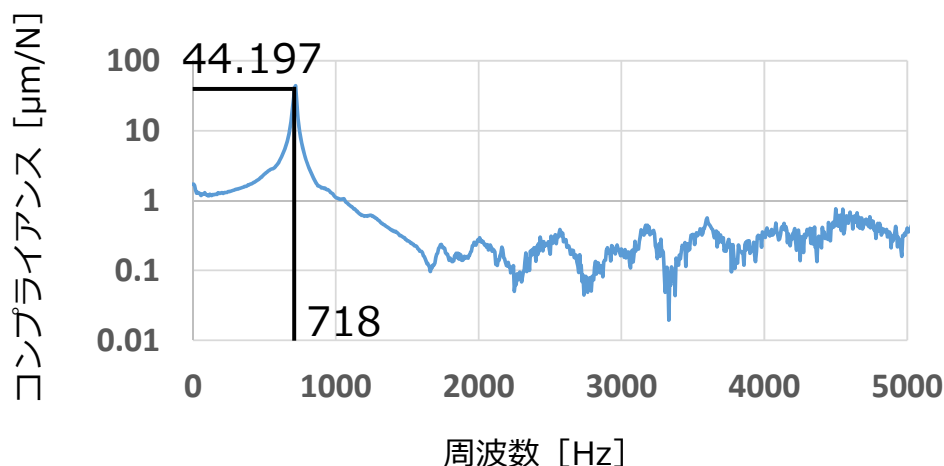
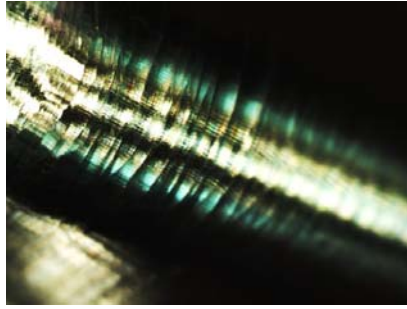


図２－２－１２ 工具動剛性の測定結果 例

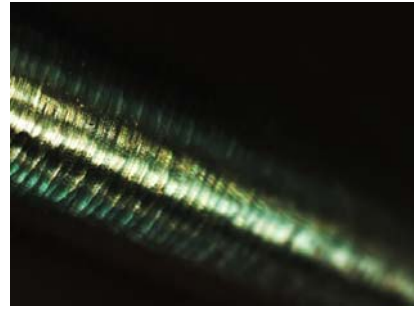
Ⅲ－３．加工機のパラメーター調整結果

パラメーターの調整は、３種類の送り速度（300、1000、2000mm/min）に対して実施した。各送り速度について、パラメーターを変更し形状偏差を確認した。これらの内、形状偏差±0.01mmを満たすパラメーターを使用することで、所望の精度での加工を実現できると考えられる。

図２－２－１３にパラメーター調整前後での円筒の加工面の比較例を示す。調整したパラメーターによる加工面は凹凸がなく、なめらかな円筒形状が表現できていることが確認できる。この円筒面の形状偏差について、導入した『金型形状精度測定器』で測定した結果を表２－２－１に示す。表より、調整したパラメーターを用いた加工面の測定結果（表中の赤枠）は形状偏差が±0.01mmとなっており、本事業での目標精度を達成できていることが確認できる。



(a) パラメーター調整前の加工



(b) パラメーター調整後の加工

図 2-2-13 パラメーター調整前後での加工面の比較

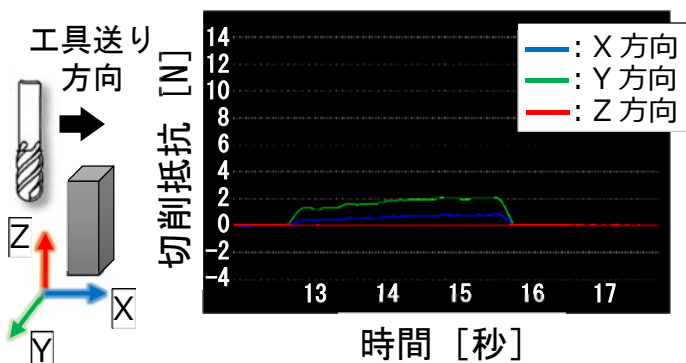
表 2-2-1 円筒加工面の形状偏差 [mm]

Rサイズ [mm]	2.0	3.0	4.0
調整前	0.052	0.044	0.031
調整後	0.0082	0.0072	0.0071

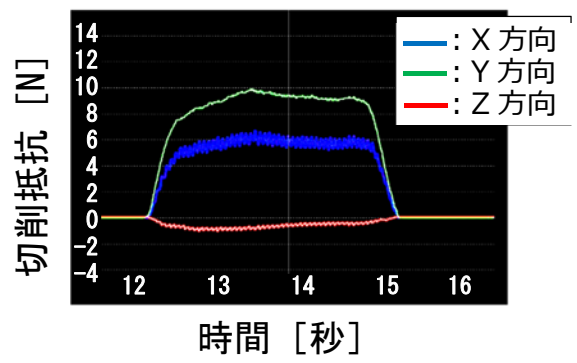
Ⅲ-4. 高 L/D サンプルのビビリ抑制実験の結果

高 L/D サンプルを用いて、「工具動剛性」や「加工機のパラメーター」の結果から選定した加工条件に加え、ビビリ抑制が可能な加工条件を検討した。図 2-2-14 に L/D5 のサンプル加工時に「切削動力計」で加工中の切削抵抗の変動を測定したデータの一例を示す。左図が選定した加工条件による加工時で、右図がそれとは異なる条件で加工した際のデータである。図より、ビビリが発生している状態では、切削抵抗の変動が大きく、発生する力自体も大きくなっていることが分かる。しかし、L/D が 10 以上となると、発生する切削抵抗も小さくなり、切削抵抗の変動からビビリを確認することは困難となった。そのため、ビビリ発生の有無は切削中の切削音の変化の状況や、切削後の表面粗さ Ra にて評価した。

L/D20 を超えるサンプルでは、通常の工具を使用した場合、選定した加工条件でもビビリ抑制が困難となった。そこで、2 種類の工具改良を実施し、既存工具との比較を行った。



(a) ビビリ無



(b) ビビリ有

図 2-2-14 ビビリの有無による切削力の違い (L/D5)

改良した工具（A及びB：改良の詳細は割愛）を用いてL/D20以上の高L/Dサンプルを加工した際の表面粗さを表2-2-2に示す。改良工具A、Bともに既存工具と比較して表面粗さが向上した。この結果を基に造形物の仕上げ加工用工具を開発した。

表2-2-2 既存工具と改良工具による表面粗さの違い

工具種類	表面粗さ Ra [μm]
既存工具	0.92
改良工具 A	0.73
改良工具 B	0.52

図2-2-15に開発工具と既存工具の性能を比較した結果を示す。性能比較は、高L/Dサンプルに対する加工後の表面粗さを測定して行った。また、加工時間に対する加工後の表面粗さの変化も合わせて評価し、既存工具との工具寿命の比較も行った。図より、開発工具は高L/D形状に対する加工性や、造形物に対する工具寿命で、既存工具よりも優れた性能を有することが確認できた。

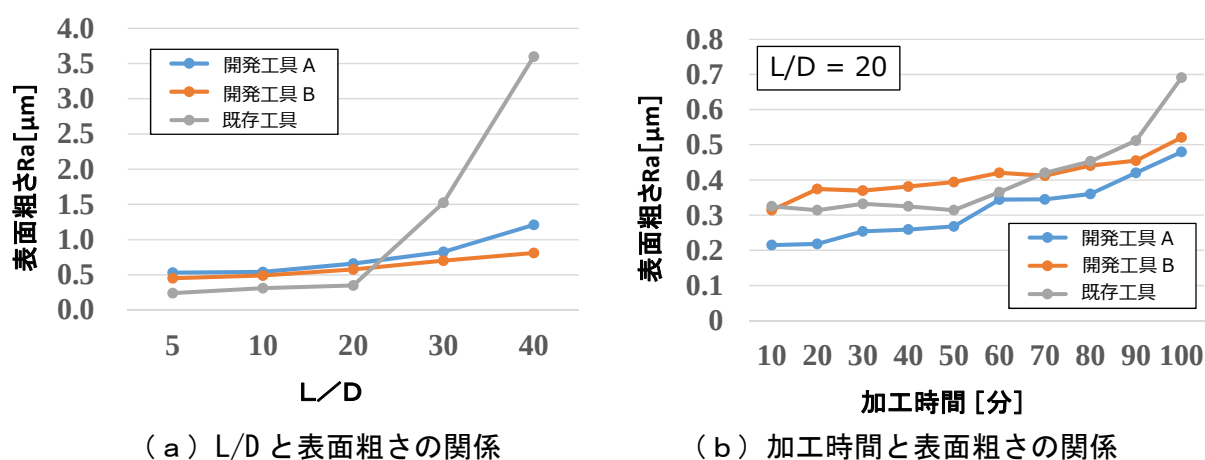


図2-2-15 開発工具と既存工具の性能比較

サポート部を含む傾斜面の仕上げ加工実験、高L/Dサンプルに対するビバリ抑制加工実験で、表面粗さRa0.8 μm 以下の仕上がりを実現し、本事業の目標は達成された。また、実験結果を踏まえて、造形物の仕上げ加工専用工具を開発し、既存工具と比べて加工精度や寿命が優れていることを確認した。

【2-2】姿勢及びサポート配置検討支援ツールの開発

I. 研究目的

金属3Dプリンターの造形物を要求精度で仕上げる後加工の実現には、対象形状の造形時の姿勢やサポート付与の状態が大きく影響する。これらの決定には、姿勢変化によってサポート付与が必要となる箇所やその加工条件を予め想定しておくことが重要となるため、その事前検討を可能とするツールの開発を行った。具体的には、3次元CADデータ上にサポート付与が必要となる箇所やその加工条件の違いを着色表示することで、造形姿勢に対するこれら条件の変化を予め把握可能なソフトウェアを開発した。

II. 研究内容

II-1. 開発ソフトウェアの概要

金属3Dプリンターの造形物でサポート付与の対象となる箇所は、一般的にベースプレートと造形形状の角度差が 45° を下回る箇所になる（図2-2-16参照）。今回開発したソフトウェアでは、3次元CADデータの形状データとベースプレートとの角度差を算出し、サポートの要不要の判別を行う機能を開発した。なお、ソフトウェアの開発には山口産技で開発済みのソフトウェア「3Dコラボレイトツール（プログラム著作権：登録番号P第10059号-1）」が有する3次元CADデータの読込・表示機能を拡張することで行った。開発言語にはJavaを使用し、3次元表示ライブラリとしてJava3Dを使用した。

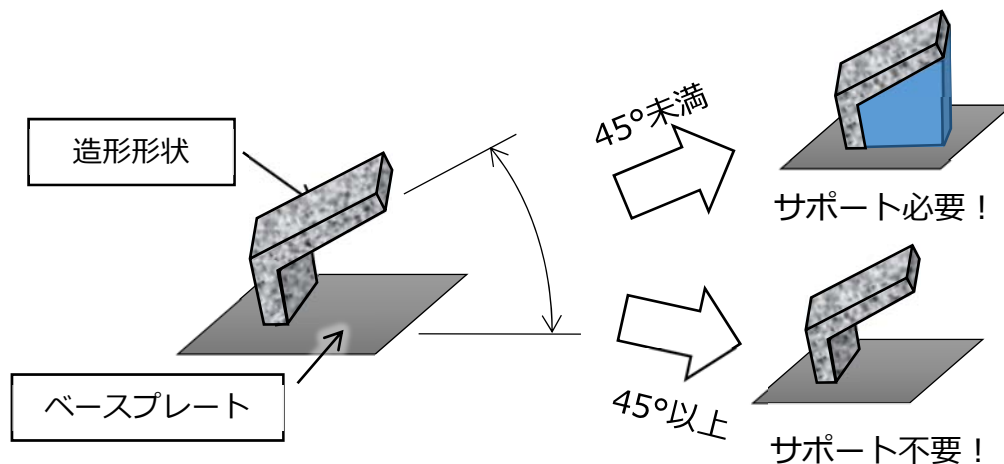


図2-2-16 造形物に対するサポート付与条件

II-2. 3次元形状データのデータ構造

開発機能の概要説明に先立ち、一般的な3次元形状データの構造を以下に示す。

3次元CAD等で作成される3次元形状データの多くは、B-rep (Boundary Representation) と呼ばれる境界表現手法を用いて、形状表現が行われている。この手法では、製品の立体形状は、「3次元空間上の然るべき位置に配置された複数の曲面が、隙間無く縫い合わされたもの」として定義される。データは任意の形で切り抜かれた曲面を貼り合わせる構造となっており、「曲面」とそれを切り抜くための“曲線”自体を示す「幾何要素」と、任意の形をした曲面同士の空間的な位置関係を示す「位相要素」の2種類の情報で構成されている。

このように B-rep 形式によるデータは、「位相要素」「幾何要素」を用いた位相－幾何関係によって、設計形状を定義する構造となっている。図 2－2－17 に一般的な位相－幾何関係を示す。「幾何要素」の“SURFACE”や“CURVE”は、各 3 次元 CAD によって、形状表現に適したものが選択されることになる。例えば、図に示す 6 面体の場合、“SURFACE”：「平面」、
“CURVE”：「直線」などが選択され、位相要素でその位置関係が定義されることになる。「3D コラボレイトツール」では、3 次元 CAD データの「位相要素」の情報に関連付けられた「幾何要素」の情報を読み取り、3 次元形状の表示に必要な 3 次元空間上に配置される“曲面”、“曲線”データの算出を行っている。

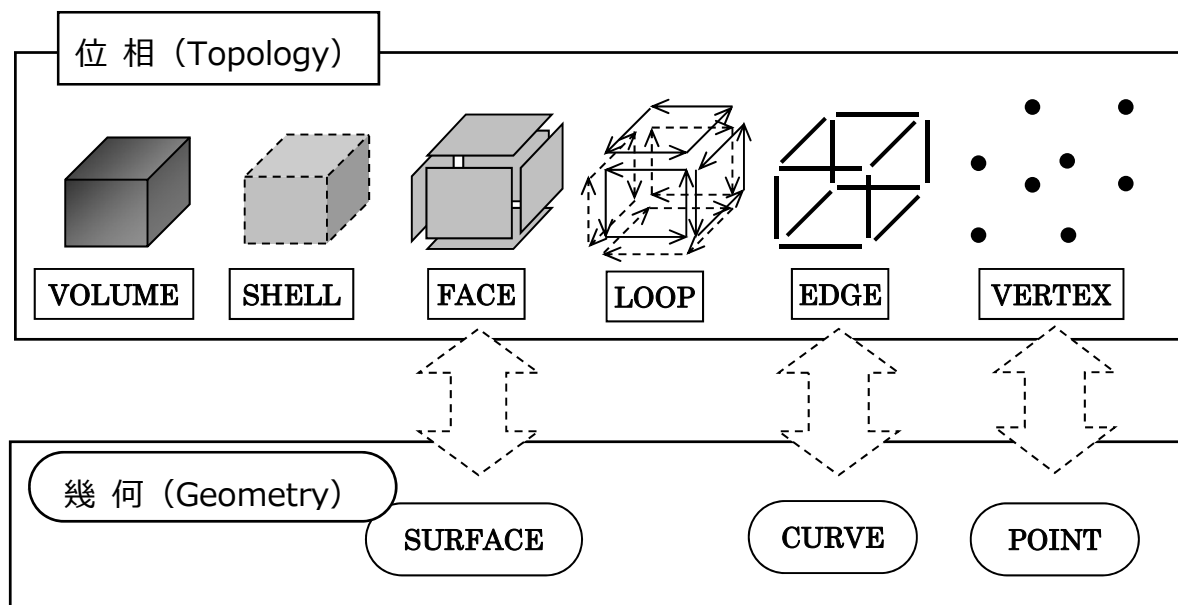


図 2－2－17 位相－幾何関係

Ⅱ－3．ベースプレートとの角度差算出

3 次元 CAD データに含まれる曲面情報からは、その曲面の垂直方向を示す法線ベクトルを算出することができる。また、法線ベクトルの方向は、図 2－2－18 に示すように、その曲面の表面の方向指示に用いられる。

「3D コラボレイトツール」では、3 次元 CAD データから読み取った情報から“曲面”上の複数点群を算出し、それらを用いたポリゴンデータを生成して形状表示を行っている。その際、ポリゴンの法線方向は、曲面の法線方向と一致させて表示データを生成している。このことから、ベースプレートと、3 次元形状の各曲面の角度差の算出は、表示用のポリゴンデータに含まれる法線データを用いて行った。ベースプレートとの角度差算出のイメージを図 2－2－19 に示す。ベースプレートは 3 次元形状を表示している空間の XY 平面とし、その法線である Z 軸と各ポリゴンの法線ベクトルとの角度差を算出した。算出した角度差が図 2－2－16 に示した 45° 未満に該当するポリゴンをサポート付与箇所として、ポリゴンの表示色を通常と異なる色に設定した。また、【2－1】で行った傾斜面加工実験で得られた角度の違いによる仕上げ条件の違いを確認できるように、角度毎で表示色を切り替えられるようにした。

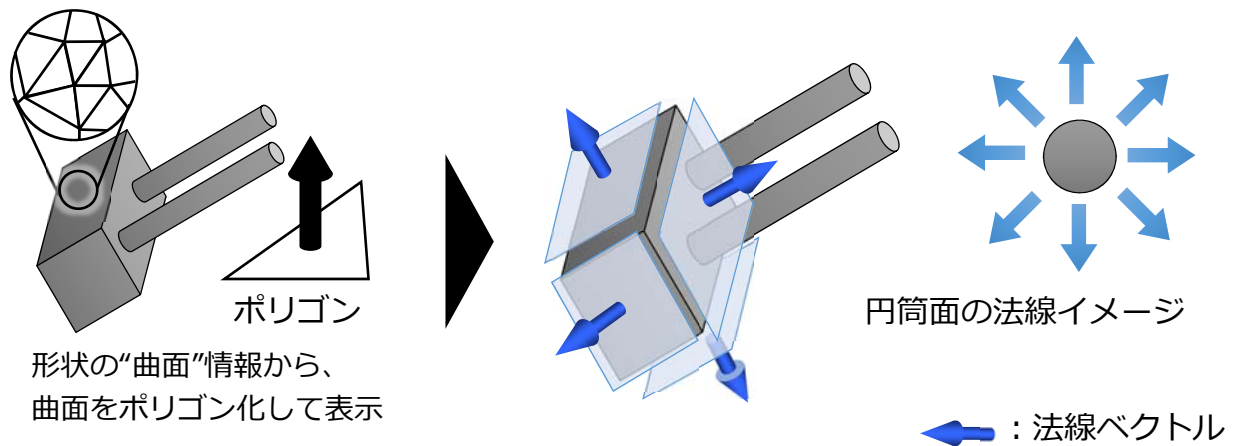


図 2-2-18 3次元 CAD データの法線ベクトル

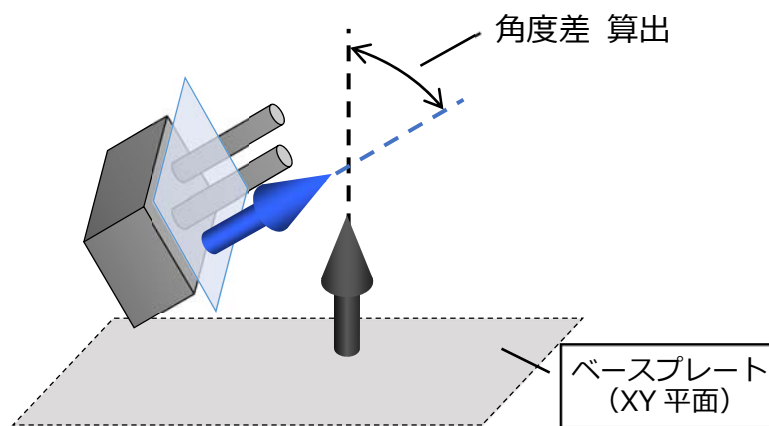


図 2-2-19 ベースプレートとの角度差算出

Ⅲ. 研究成果

図 2-2-20 に、開発したソフトウェアのイメージ図を示す。図に示すように、サポート付与が必要な箇所を着色した状態で、読込んだ 3 次元 CAD データを 3 次元空間中で自由に回転・拡大・縮小表示させながら、確認することができる。図 2-2-21 に開発機能のイメージ図を示す。図に示すように、

- (a) 造形の際に使用するベースプレートと 3 次元 CAD データとの位置関係を表示する機能
- (b) 算出した角度に応じて、サポートが必要となる面の着色機能
- (c) 算出した角度に応じて、加工条件の違いを着色する機能

の 3 種類の機能を開発した。これら機能を用いて、造形後のサポート除去の必要箇所や、形状の部分毎の仕上げ加工の条件をイメージしながら、造形姿勢の事前検討を行うことが可能になる。

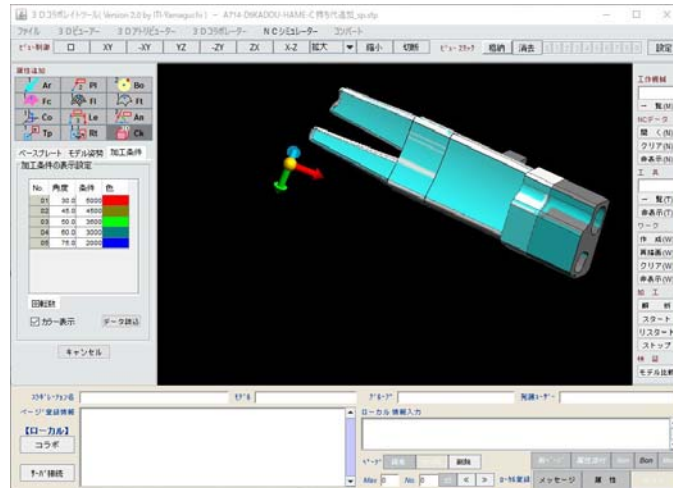
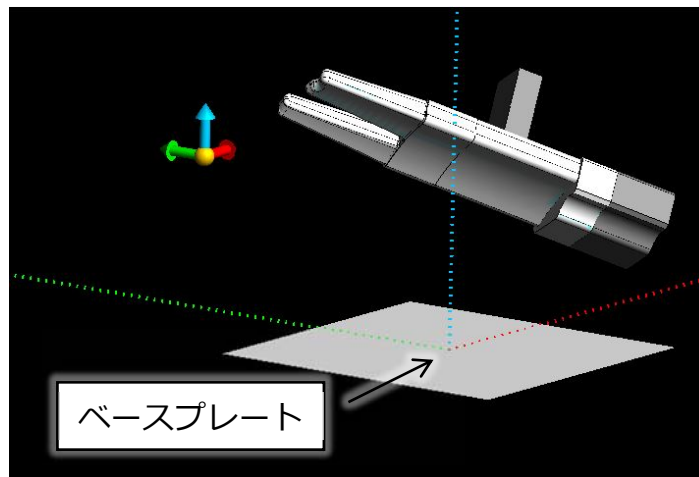
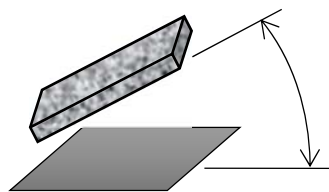


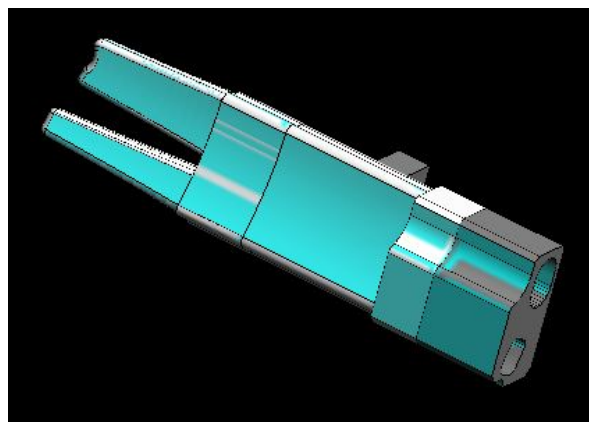
図 2-2-20 開発ソフトウェア



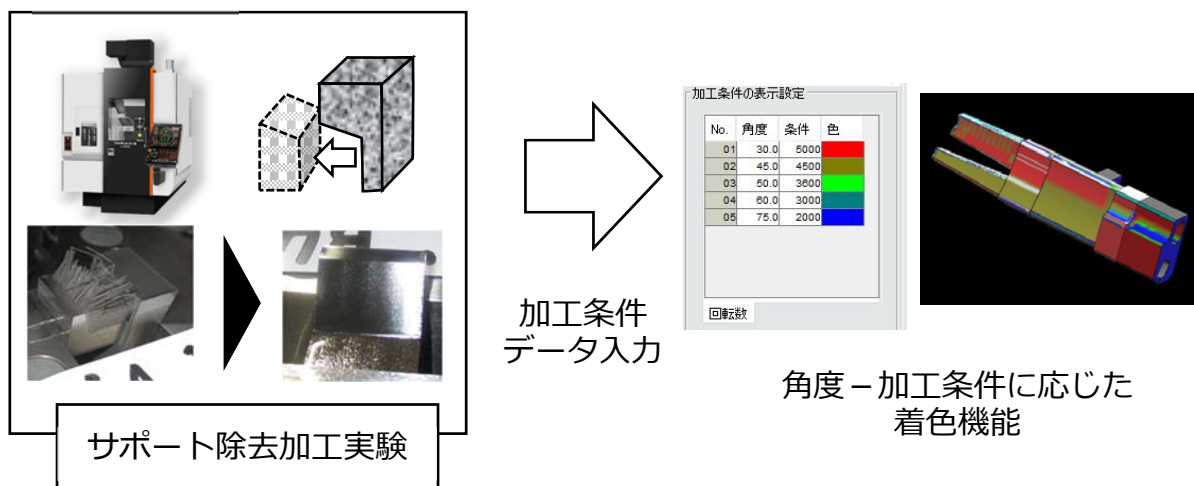
(a) ベースプレートと 3 次元 CAD データの位置関係表示



ベースプレートとの
角度に応じて着色



(b) サポート必要箇所の着色機能



(c) 角度－加工条件に応じた着色機能

図 2－2－2 1 開発機能

【2－1】で実施した加工実験で、図 2－2－1 1 に示したように、加工条件によって表面粗さは変化することが分かる。図 2－2－2 1 (c) の開発機能では、これらの実験データをツール上で確認するため、予め整理した使用工具毎の傾斜面角度－加工条件の加工実験データファイルを読み込み、そのデータ内容を 3 次元 CAD データ上に着色表示させることとした。

入力する加工条件データの書式は、CSV 形式で入力することとした。入力データの記載例を図 2－2－2 2 に示す。データファイルには、記載される加工条件の項目名とデータ数を併記し、それらに続ける形で角度－加工条件のデータのリストをカンマ区切りで記載するようにした。

図 2－2－2 3 に開発機能で加工条件データの読み込み・表示させた一例を示す。図より、3 次元 CAD データの姿勢の変化に応じて、3 次元 CAD データの各面が着色表示されており、その色の違いから、対応する加工条件を確認できることが分かる。

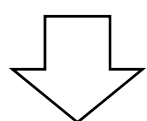
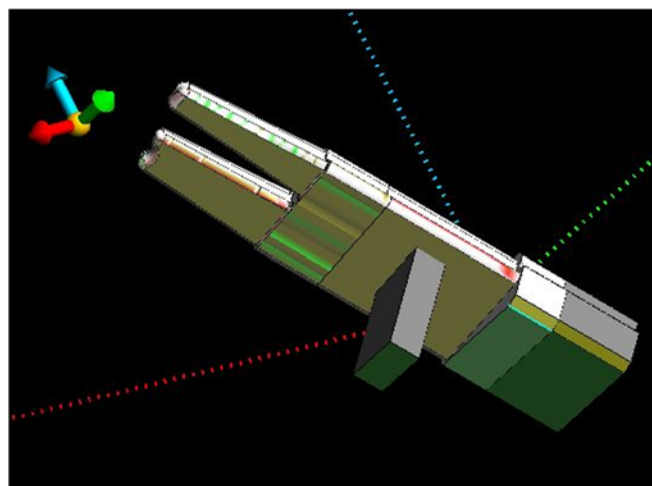
1		回転数↓		1		送り速度↓	
2		6↓		2		6↓	
3		0,1900↓		3		0,380↓	
4		15,1900↓		4		15,380↓	
5		30,7800↓		5		30,800↓	
6		45,5600↓		6		45,800↓	
7		60,5600↓		7		60,800↓	
8		75,5600↓		8		75,800↓	
9		[EOF]		9		[EOF]	

: 角度
 : 加工条件

図 2－2－2 2 加工条件入力データ

No.	角度	条件	色
01	0.0	380	赤
02	15.0	380	茶
03	30.0	800	緑
04	45.0	800	黄緑
05	60.0	800	青
06	75.0	800	紫

送り速度



姿勢変更

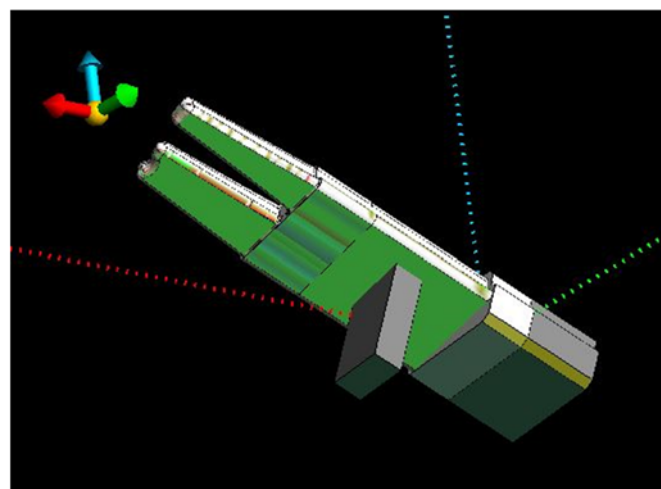


図 2 - 2 - 2 3 加工条件データの読込・表示例

3次元CADデータを用いて、造形時のサポート付与箇所やその仕上げ条件などを事前に確認することが可能なソフトウェアを開発し、本事業の目標は達成された。金属3Dプリンターの造形データが作成できる環境であれば、サポート付与箇所の確認などを行うことは可能であるが、仕上げ加工を行う現場が、必ずしも金属3Dプリンターの傍にあるとは限らない。そのような場合に、この開発ソフトウェアを活用することで、金属3Dプリンターから離れた場所にある生産現場においても、造形姿勢の事前検討などが行い易くなると考えられる。

2-3 高度な機械加工技術の共通化のためのデータベースの構築

【3-1】3次元CADデータの形状照合ツールの開発

I. 研究目的

複雑形状金型の安定供給の実現には、その加工手順や納期に関して作業者の技量に依らない製造プロセスを構築することが重要となる。それには、作業者毎に加工手順を考案するのではなく、作業者全員が共通認識の元、手順を決定するための環境が必要となる。このような環境を確立する方法のひとつとして、従来の金型加工における熟練作業者のノウハウデータを蓄積するためのデータベースを構築する方法がある。このデータベースから活用できるデータを効率良く抽出するための検索機能となるツールの開発を行った。具体的には、金型の3次元CADデータから、その加工で着目する形状特徴を抽出するソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いて、過去に加工した金型の3次元CADデータの形状特徴と照合することで、それに付随するノウハウデータを抽出することを目指した。

II. 研究内容

II-1. 開発ソフトウェアの概要

金型には多種多様な形状が存在するため、形状全体での照合を行うことは、現実的ではない。そこで、金型加工において重要となる形状特徴に絞り込んで抽出を行うこととした。今回開発したソフトウェアで3次元CADデータから抽出すべき形状をまとめたものを、図2-3-1に示す。高L/Dの形状を含む金型加工では凹みとなる“最小Rサイズ”とその部分に届かせるのに必要となる“工具の突出し長さ”が重要となるため、これらの形状抽出機能を開発した。なお、ソフトウェアの開発には【2-2】と同様に「3Dコラボレートツール」の機能を拡張することで行った。開発言語にはJavaを使用し、3次元表示ライブラリとしてJava3Dを使用した。

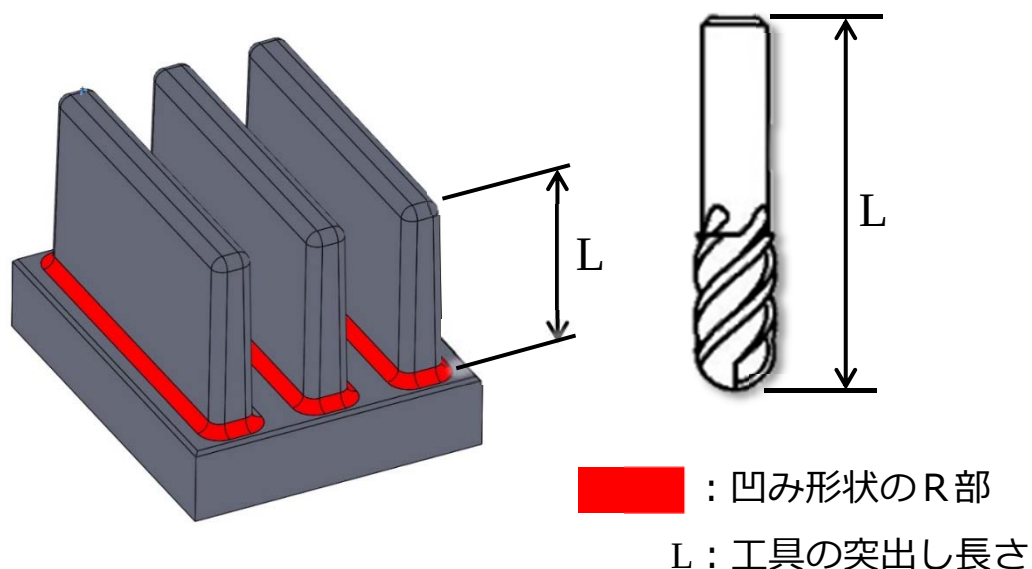


図2-3-1 抽出すべき形状特徴

Ⅱ－２．最小Rサイズの抽出

3次元CADデータにおけるR形状は、様々な曲面形体の一部を使って表現される。図2－3－2に3次元CADデータで使用される代表的な曲面形体を示す。曲面のRサイズを求めるには、曲面形体の曲がり具合を表す“曲率”を把握することが重要となる。曲面上の任意の点での曲率は、その点を通過する切断面上に描かれる曲線の曲率として求めることができる（図2－3－3参照）。これは曲面の切断方向によって異なる値となり、最大値と最小値が存在する。一般的な曲面の曲がり具合の特徴を示す曲率として、この最大曲率と最小曲率を用いた「平均曲率」及び「ガウス曲率」が用いられる。最小Rサイズの抽出には、これら2種類の曲率を算出することで行った。

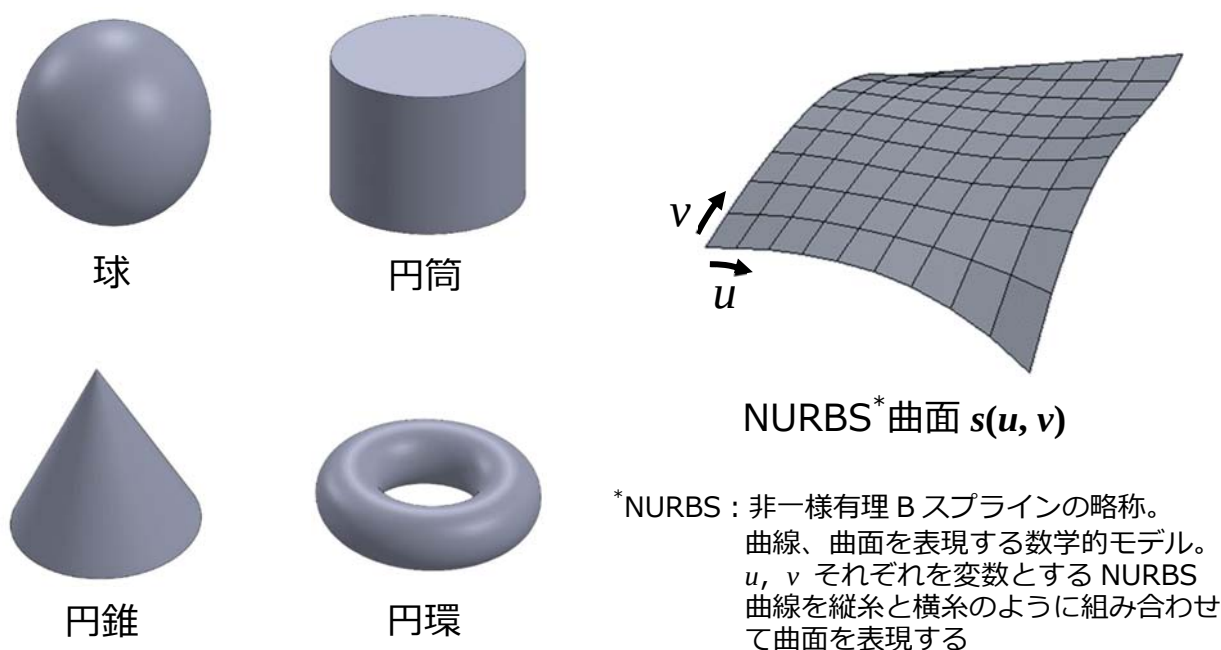


図2－3－2 代表的な曲面形状

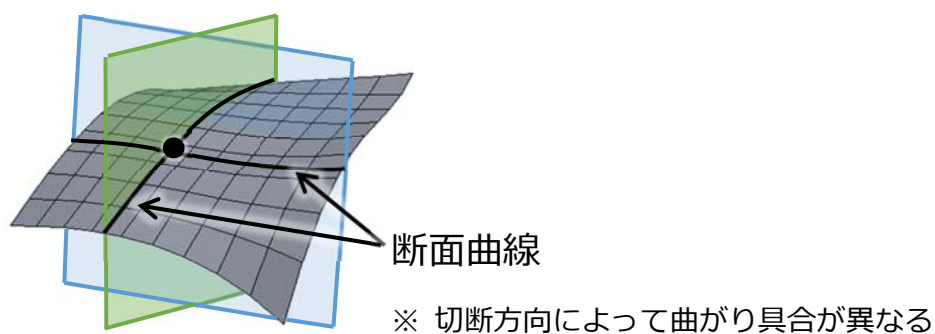
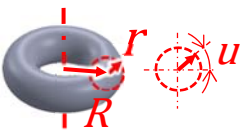
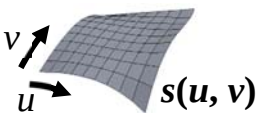


図2－3－3 曲面上の任意点の断面曲線

表 2－3 各曲面の「平均曲率」及び「ガウス曲率」の算出法

曲面形状	平均曲率	ガウス曲率
	$1/R$	$1/R^2$
	$1/2R$	0
	$1/2\sqrt{2 \cdot l}$	0
	$\frac{R + 2r \cdot \cos u}{2r(R + r \cdot \cos u)}$	$\frac{\cos u}{r(R + r \cdot \cos u)}$
	$\frac{1}{2} \frac{(EN + LG - 2MF)}{(EG - F^2)}$	$\frac{(LN - M^2)}{(EG - F^2)}$

$$E = s_u^2, \quad F = s_u \cdot s_v, \quad G = s_v^2, \quad L = n \cdot s_{uu}, \quad M = n \cdot s_{uv}, \quad N = n \cdot s_{vv}$$

※ n は法線を、下付きの添字は u, v 各パラメーター方向の微分を示す

表 2－3 に、図 2－3－2 の各曲面形状の「平均曲率」及び「ガウス曲率」の算出方法を示す。表より、球、円筒、円錐、円環の各曲面については、「平均曲率」及び「ガウス曲率」は一意に算出することができるが、NURBS 曲面については NURBS 曲面に関する第 1 次規格量「 E 、 F 、 G 」及び第 2 次規格量「 L 、 M 、 N 」を求める必要がある。これらの値は NURBS 曲面の 2 階微分によって算出されるため、その演算プログラムも合わせて作成した。得られた各曲率の値から曲率半径を算出し、最小 R サイズの抽出を行った。

Ⅱ－3．工具の突出し長さの抽出

金属 3D プリンターで造形された金型の仕上げ加工を『5 軸加工機』で行う場合、工具は様々な方向から金型にアプローチされる。そのため、加工箇所到達するまでに必要となる工具の長さも、加工機上の金型の姿勢によって変化することになる（図 2－3－4 参照）。したがって、開発するソフトウェアでは、3 次元 CAD データの姿勢の変化に応じて、工具の突出し長さの抽出が行える機能とした。

具体的にはソフトウェア上で、常に +Z 軸方向を工具のアプローチ方向と仮定し、その際の 3 次元 CAD データ表示状態で Z 座標の最大値から加工箇所までの距離を算出することとした。Z 座標の最大値については、3 次元 CAD データの表示サイズを把握できる“バウンディングボックス”を求めて、その +Z 面の座標値から取得した。図 2－3－5 にそのイメージを示す。

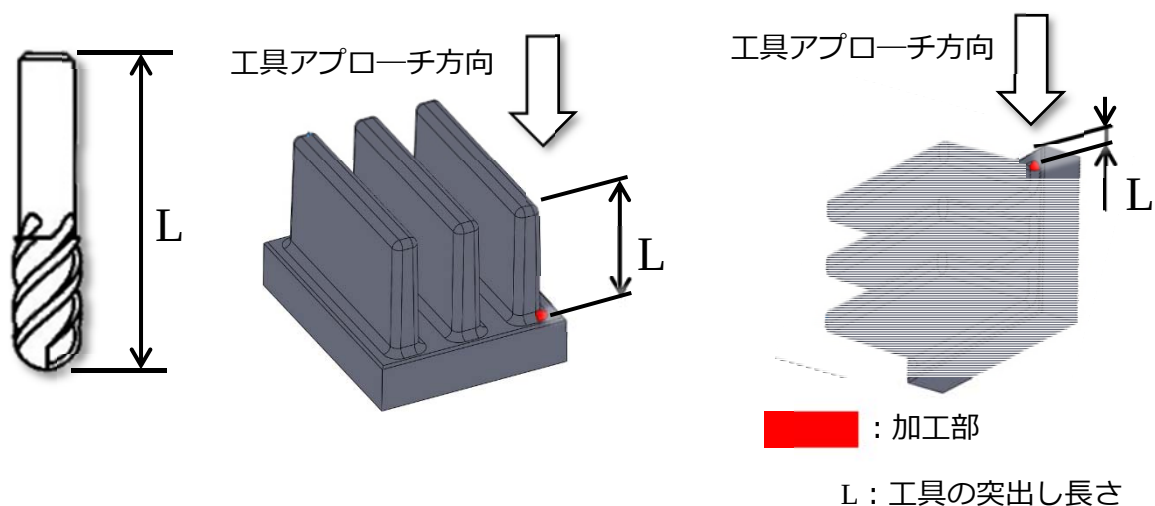


図 2-3-4 加工対象物の姿勢による工具突出し長さの変化

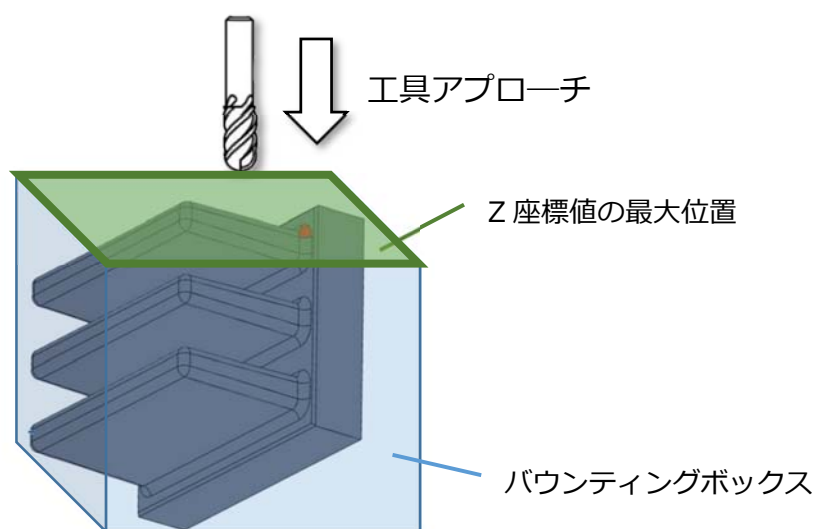


図 2-3-5 工具突出し長さの抽出のイメージ

Ⅱ-4. ノウハウデータの抽出

Ⅱ-2 及びⅡ-3 の開発機能により、新たに加工する金型の 3 次元 CAD データから加工に必要と予測される工具情報を抽出することができる。これらの情報や加工形状の L/D サイズを過去の金型加工で使用された工具情報を照合することで、その加工事例の加工条件や、加工時の材料の固定方法などを参照することが可能になると考えられる。したがって、開発機能によって得られた工具情報及び加工形状の L/D サイズと、過去の金型加工で作成した CAM データの工具リストを照合する機能を開発した。

CAM データには、その工具を使用した加工条件（回転数、送り速度など）や、加工時の材料に対する工具のアプローチ状態が含まれており、加工手順構築の参考データとすることができる。また、特殊な材料固定方法を行った事例については、CAM データと合わせて、内製した治具や加工状況の動画データも合わせて保存しておけば、CAM データと合わせてこれらの情報も参照することが可能になる。図 2-3-6 にノウハウデータ抽出のイメージを示す。

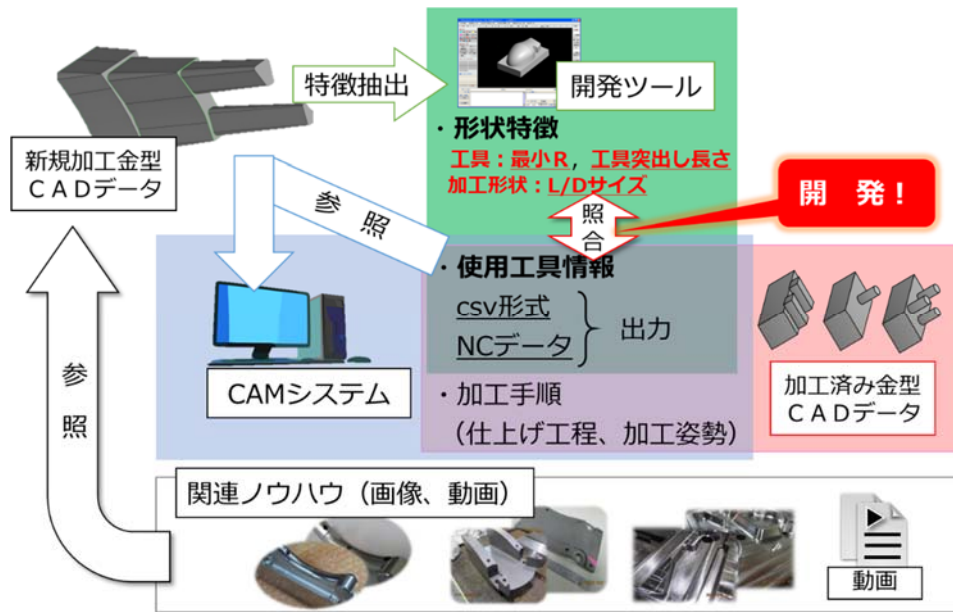


図 2-3-6 ノウハウデータ抽出（CAM データ照合）のイメージ

III. 研究成果

図 2-3-7 に開発した最小 R サイズの抽出機能の一例を示す。3 次元 CAD データの R 形状を曲率に応じて着色すると共に、色による違いを把握し易くするため、曲率量のカラーバーを合わせて表示するようにした。曲率表示は、平均曲率、ガウス曲率を任意に切り替えて表示可能とした。また、この曲率から推定される最小 R サイズの算出も画面上に表示するようにした。

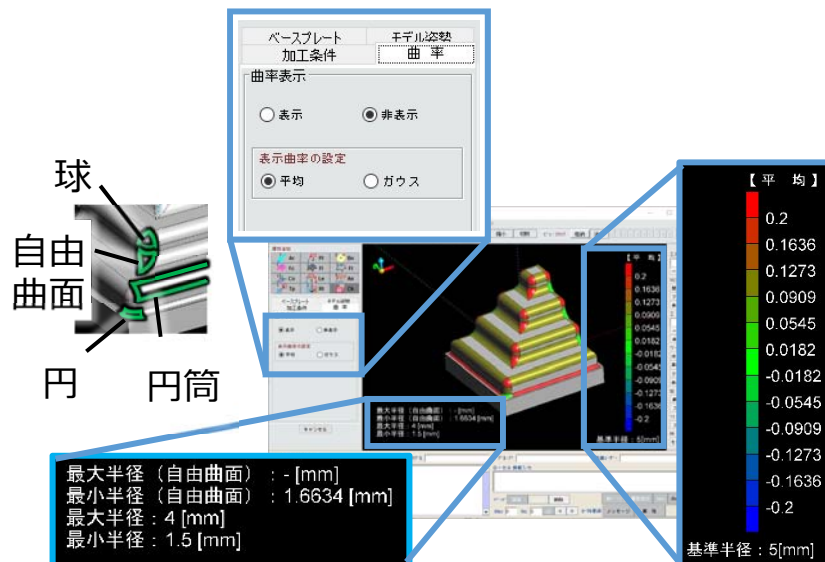


図 2-3-7 最小 R サイズ抽出機能のイメージ

図 2-3-8 にバウディングボックス表示機能のイメージ図を示す。図中の緑で示した面の側を工具のアプローチ方向とし、この“緑面”から前述の最小 R サイズ抽出機能で抽出された各 R 形状までの距離を演算し、必要となる工具突出し長さを推定可能とした。

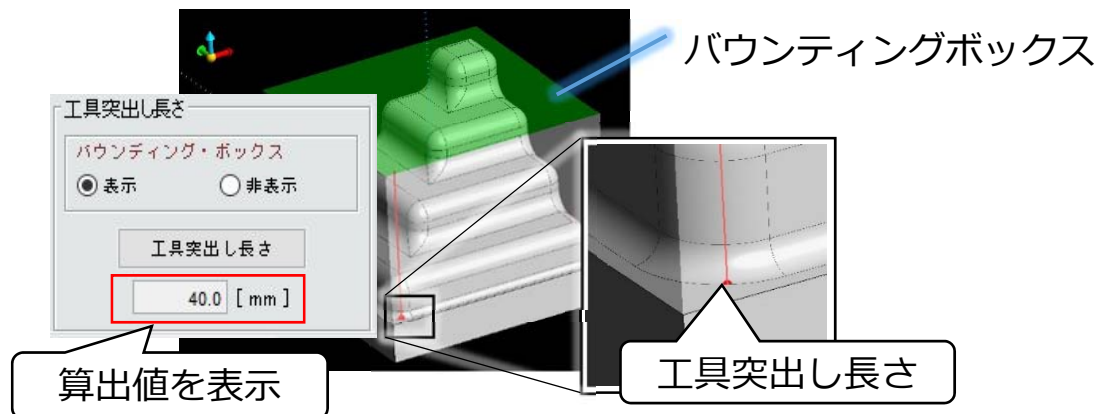


図 2-3-8 バウンディング・ボックス表示機能のイメージ

図 2-3-9 にノウハウデータ抽出 (CAM データ照合) 機能のイメージを示す。開発機能により抽出した「最小 R サイズ」、「突出し長さ」と、「加工形状 L/D」の設定値を用いて、既存の CAM データの工具リストと照合を行い、条件に合う工具リストの一覧表示が可能となっている。また、一覧表から、工具リストの保存先フォルダーが展開表示されるようになっており、参照したい CAM データに素早くアクセスすることを可能としている。なお、加工形状 L/D サイズについては、「3D コラボレイトツール」にて開発済みのモデルサイズ計測機能を用いて実測し、入力することとした (図 2-3-10 参照)。

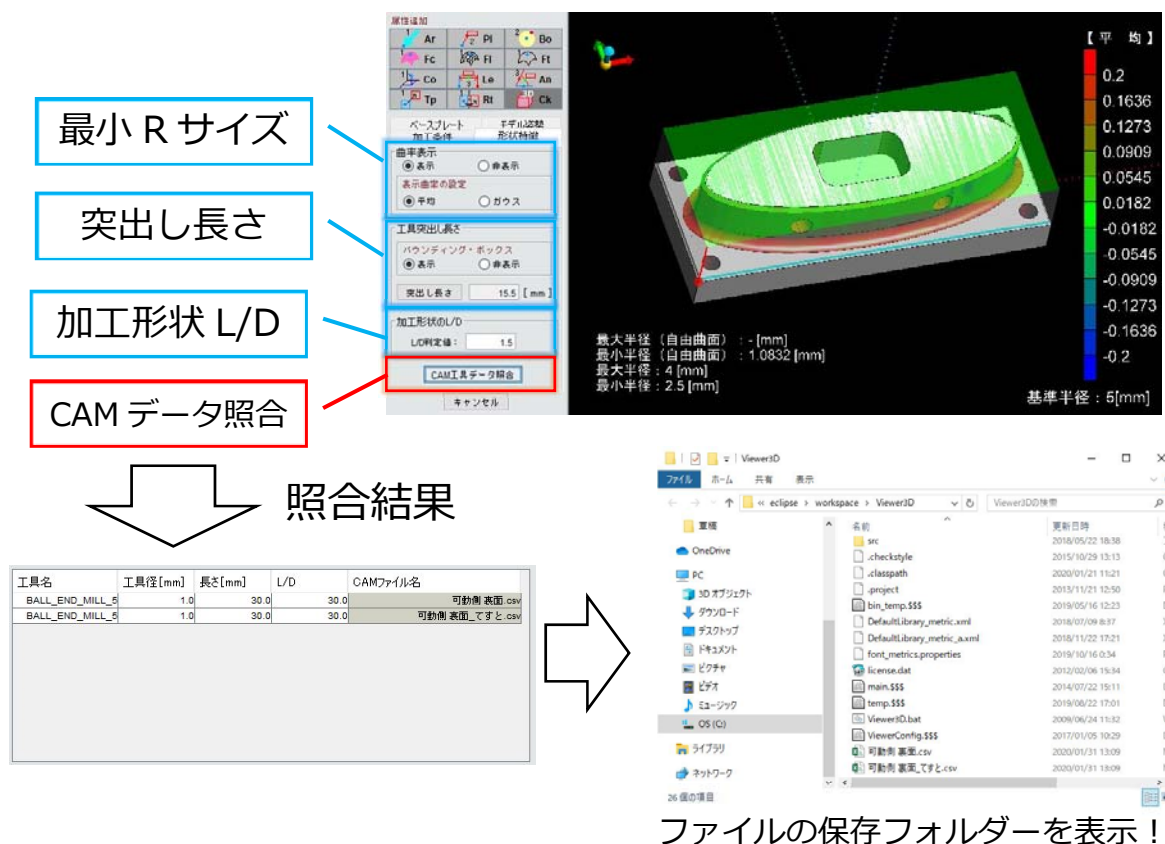


図 2-3-9 ノウハウデータ抽出 (CAM データ照合) 機能のイメージ

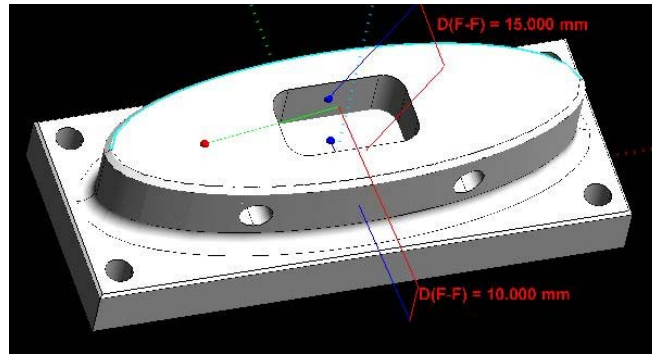


図 2-3-10 L/D サイズ計測のイメージ

3次元 CAD データから、“最小 R サイズ” やその箇所加工に必要な“工具の突き出し長さ”の抽出が可能なソフトウェアを開発すると共に、これらの情報と 3 次元 CAD データから実測した L/D サイズの情報を用いて、過去の金型加工で使用した CAM データを照合することで、その加工条件などを参照可能な環境を構築し、本事業の目標は達成された。今後は、金型加工の際に、使用工具にその加工箇所の L/D サイズの情報を付加した工具リストを作成することで、その加工事例のノウハウを別の金型加工で参照することが可能となり、仕上げ加工工程の構築が行い易くなると考えられる。

2-4 実モデルの試用検証

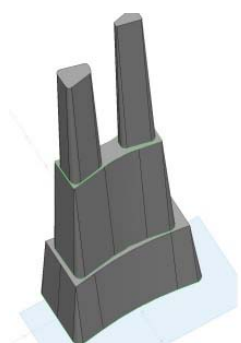
【4-1】実モデルによる後加工の検証

I. 研究目的

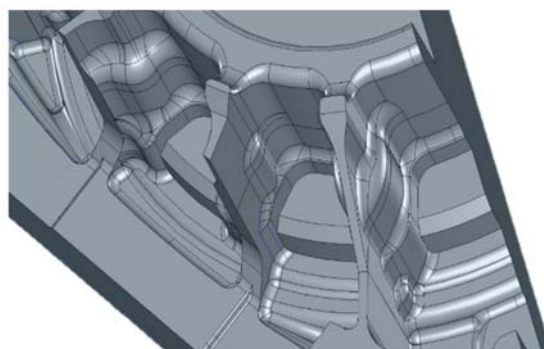
本事業の開発技術を用いて、実際に金属3Dプリンターで造形した金型部品に対する後加工の検証を行った。具体的には、造形材料としてマルエージング鋼及びSKD61を使用し、造形シミュレーションによる造形の事前検証、開発した熱処理条件での熱処理、開発した加工条件を用いた仕上げ加工などを実施し、実際の金型部品において目標精度を実現することを目指した。

II. 研究内容

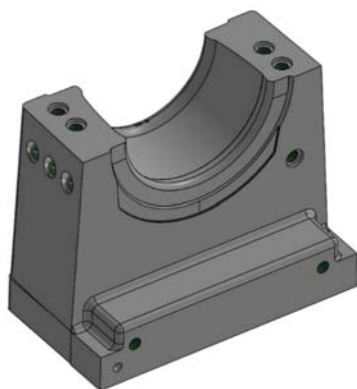
図2-4-1に今回の試作の対象とした金型部品の形状を示す。(a)、(b)は、事業計画でも挙げた従来加工法では製造が困難であったダイカスト金型部品で、(c)、(d)は実際に川下企業の生産ラインで使用されるダイカスト金型である。(c)、(d)の試作物については、試作完了後、川下企業においてダイカストマシン実機での試用を行った。



(a) 型①：ダイカスト金型部品 L/D30



(b) 型②：ダイカスト金型部品 L/D15



(c) 型A：ダイカスト金型部品 L/D12

モデルの画像は
割愛

(d) 型B：ダイカスト金型部品 L/D17

図2-4-1 検証用の金型部品

Ⅲ. 研究成果

図 2-4-1 の各試作物に対して、開発技術による試作を行った。一例として型①の試作物に関して、マルエージング鋼による試作工程のイメージを図 2-4-2 に示す。この図に示した各工程の実施内容を以降に示す。

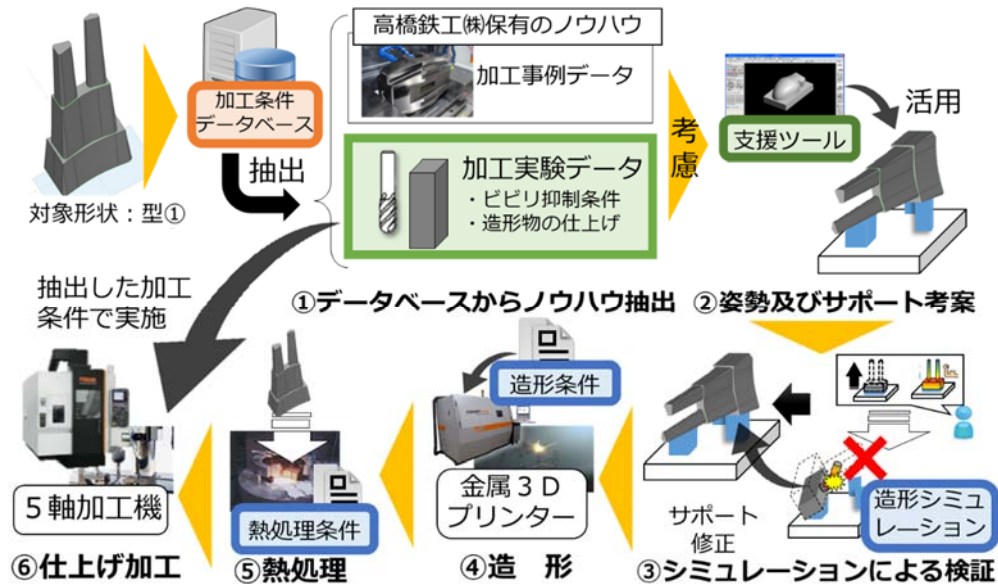
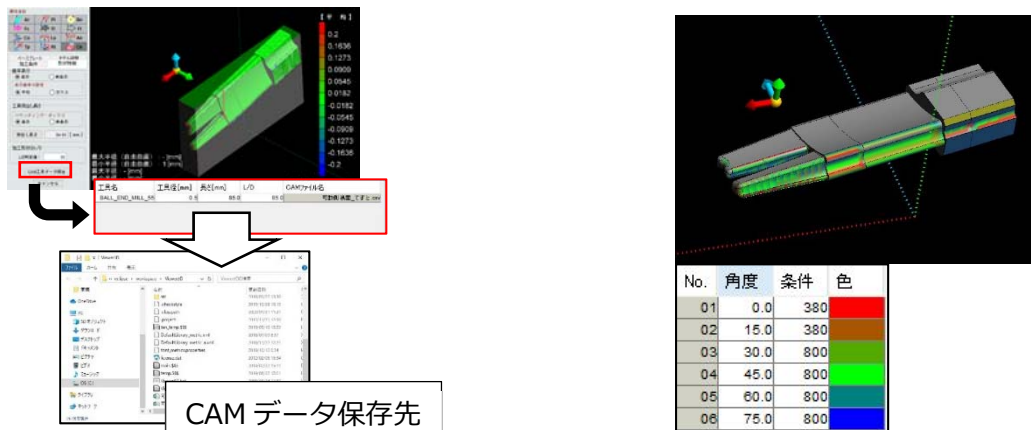


図 2-4-2 型①の試作工程イメージ

Ⅲ-1. 型①の試作

Ⅲ-1-1. データベースからのノウハウ抽出

造形に先立ち【3-1】で開発したデータベースの照合技術を用いて、型①の3次元CADデータと過去の金型加工で使用したCAMデータの照合を行った。また、対象形状の姿勢変化による加工条件の違いを、【2-2】の開発ツールを用いて【2-1】で得られた加工実験データを確認することで行った。そのイメージを図 2-4-3 に示す。



(a) CAM データ照合

(b) 加工条件の確認 (加工実験データ)

図 2-4-3 データベースからのノウハウ抽出イメージ

Ⅲ－１－２．姿勢及びサポート考案

次に【２－２】で開発したツールを用いて、造形姿勢の事前検討を行った。図２－４－４に、開発ツールによるサポート箇所の検討により、考案したサポート配置の状態を示す。ベースプレートに対して垂直に造形する姿勢（オレンジ線 指示）はサポートが要らず、プレートと密着しているため、プレート上での加工が可能だが、造形時間が長くなるといったデメリットがある。一方、ベースプレートに対して傾角させた姿勢（緑線 指示）は、後加工を考慮した際に、サポートの除去や基準・掴み形状の追加が必要となる。

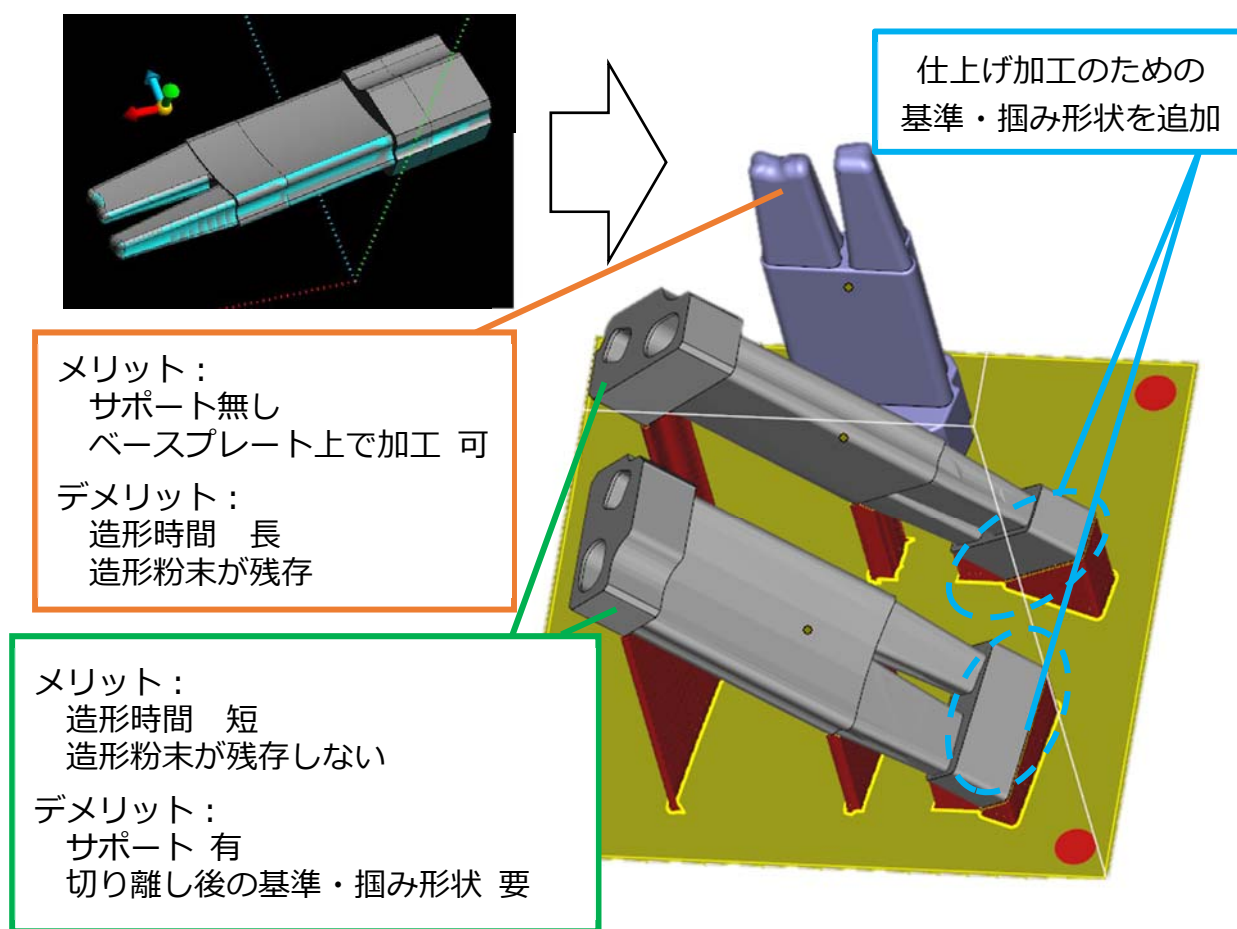


図２－４－４ 考案したサポート配置

Ⅲ－１－３．シミュレーションによる検証

検討した姿勢に対して、造形前に固有ひずみ法によるシミュレーションで変形状態などの推定を行った。図２－４－５に、そのシミュレーション結果を示す。図より相当応力は、マルエージング鋼の引張強さを超えておらず（図２－１－１ 2 参照）、造形物（サポートは除く）の変形量も、数 $100\mu\text{m}$ 程度に抑えられており、考案したいずれの姿勢においても、造形時の破壊の危険性がないことが確認できた。

以上の結果より、考案したいずれの姿勢も造形中に崩れる危険性は低いと判断した。

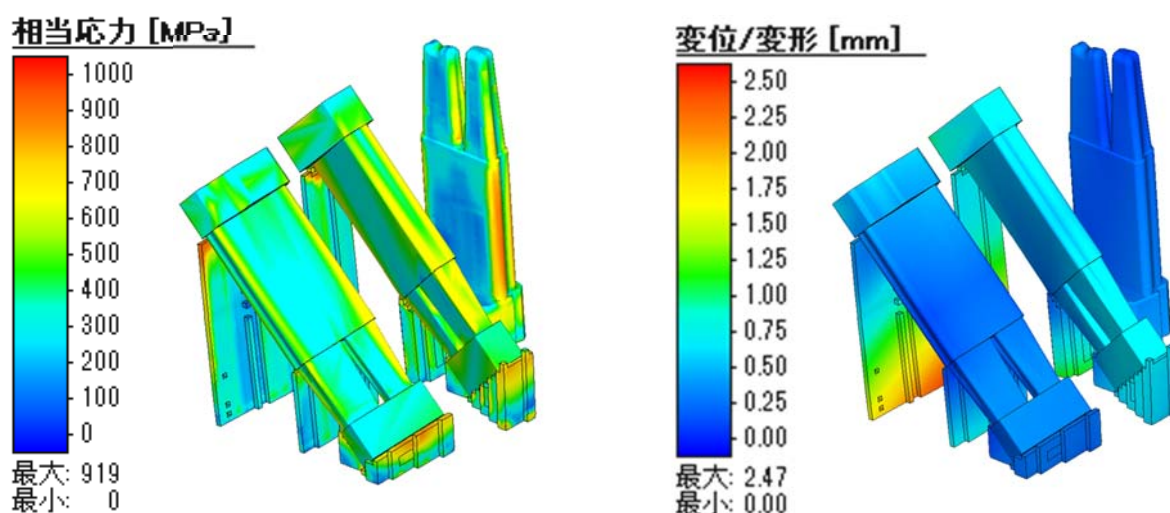


図 2-4-5 造形シミュレーションの結果

Ⅲ-1-4. 造形及び熱処理

シミュレーションで問題がないことが確認された造形姿勢で、造形を実施した。造形した試作物の状況を図 2-4-6 に示す。また、【1-2】で開発した熱処理条件を用いて、造形後の試作物を目標硬度である HRC45 とした。

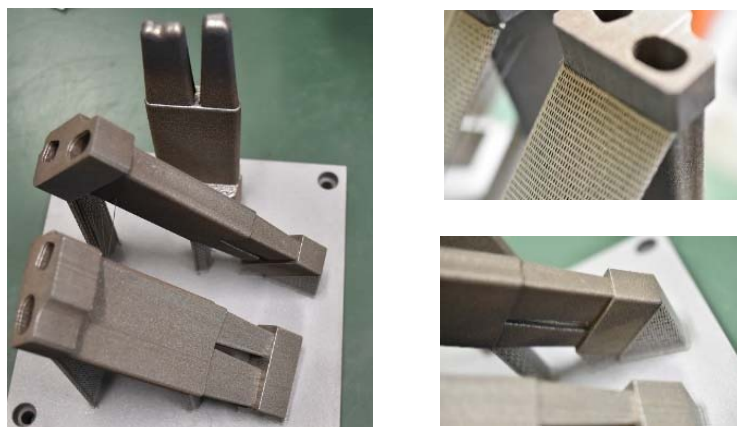


図 2-4-6 型①の造形結果

Ⅲ-1-5. 仕上げ加工

熱処理後の試作物に対して、Ⅲ-1-1 で確認した加工実験データなどを基に、加工条件を選定し、【2-1】で示した開発工具を用いて、仕上げ加工を実施した。図 2-4-7 にその様子を示す。

仕上げ加工後、加工精度の確認のため、試作物の表面粗さと形状精度の測定を行った。表面粗さについては、ポータブル型の粗さ計 (SJ-210, (株)ミットヨ製) を、形状精度については

『金型形状精度測定器』を用いて、測定を実施した。加工後の表面粗さは $Ra0.231\mu m$ で、形状精度は $\pm 0.0075mm$ となっており、本事業で構築した製造プロセスにより、金属 3D プリントによる金型部品の製造で目標精度（表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 、形状精度 $\pm 0.01mm$ ）を上回る精度を実現できることが確認できた。



仕上げ加工後

図 2-4-7 型①の仕上げ加工

Ⅲ-2. 型 A 及び型 B の試作

川下企業から提案された型 A 及び型 B については、金型などの造形で用いられる「ハイブリッド造形」も活用しながら試作した。ハイブリッド造形とは、土台部分をバルク材を用いた機械加工で作製し、必要な部分のみを土台上に造形する手法で、造形のみで作製するのに比べ、造形時間やコストを短縮できる場合がある。ハイブリッド造形のイメージとして型 A の造形イメージを図 2-4-8 に示す。

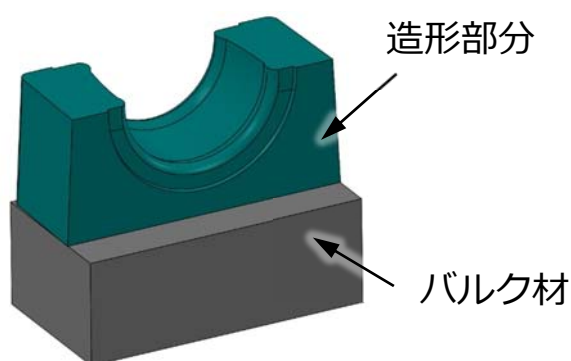


図 2-4-8 ハイブリッド造形イメージ

型 A 及び型 B については、造形姿勢の検討の必要がないため、シミュレーションで造形時の破壊の危険性が無いことを確認した後、造形→熱処理→仕上げ加工の工程で、金型の試作を行った。図 2-4-9 に、型 A の仕上げ加工後の状態を示す。型①と同様の測定を行い、いずれの型においても、目標精度（表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 、形状精度 $\pm 0.01mm$ ）を上回る精度を実現できていることが確認できた



図 2－4－9 型 A の仕上げ加工後

造形材料にマルエージング鋼及び SKD61 を用いた金型部品の試作において、目標精度を上回る精度の金型部品の作製を実現し、本事業の目標は達成された。この試作で得られた知見を基に、より複雑な形状の金型の製造も可能であると考ええる。

【4－2】実モデルによるダイカストマシンでの検証

I. 研究目的

本事業の開発技術を用いて、試作した金型部品について、ダイカストマシン実機での検証を実施する。具体的には、【4－1】で試作した型 A 及び型 B について、提案のあった川下企業のダイカストラインで試用を行い、開発技術によって試作した金型の実用性を確認することを目指した。

II. 研究内容

型 A 及び型 B、どちらの型についても、実際にダイカスト部品を製造しているラインの一部に組み込んで検証を実施した。検証では従来の金型と同程度での成形が可能か、また、その耐久性について確認を行った。なお、型 A 及び型 B は金属 3D プリンターによる製造を活かし、内部は複雑な冷却水管が配置されている。従来金型と比較し、冷却効率の改善によるサイクルタイムの短縮や成形品質の向上効果についても確認した。

III. 研究成果

型 A による数 1000 回のテスト成形を行い、従来加工による金型と遜色ない製品が成形可能であることが確認できている。現在、量産を想定した試用検証を継続しており、既定の成形回数を実施した後、金型の摩耗状態などから耐久性について詳細な検証を行うこととしている。

また、金属 3D プリンターの特徴を活かした冷却水管の効果については、従来の金型で問題となっていた焼き付きが防止できるなど、製品の成形品質の向上が見込める結果となった。今後はこれらの効果を総合的に判断し、トータルコスト、リードタイムの低減に対する改善効果などについても検証を進める予定である。

第3章 全体総括

3-1 研究開発成果総括

自動車の製造工程において生産性・効率化の向上、低コスト化の一環で、ダイカスト金型に関して、高張力鋼プレス部品のアルミダイカストへの置き換えや、複数部品の一体化による工程集約のため、深リブなどの高 L/D（長さに対して幅が極端に狭い）形状を多数含むような複雑形状金型が求められている。このような金型は、従来の加工方法では不良率が 90%を越える

（L/D5 以上）ことや、作業者の技量による完成時間のばらつきが大きいなど、実用レベルでの製造が困難な状態にある。本研究開発では、マルエージング鋼と SKD61 の金属積層造形技術とその造形物を金型の要求精度に仕上げるための精密加工技術を高度化すると共に、熟練作業者の加工ノウハウを共有可能なデータベースを活用することで、従来加工法では製造できない複雑形状金型を、作業者の技量に依らず安定供給する製造プロセスの構築を行った。最終目標として、L/D30 の形状を含む金型部品に対して、ダイカスト金型の要求精度（表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 以下、形状精度 $\pm 0.01mm$ ）を満たす仕上げ加工を行い、従来比のコスト低減：30%、不良率低減：50%、加工時間短縮：30%を実現することを目指した。

金属積層造形技術の高度化については、ダイカスト金型の材料に広く利用される SKD61 について、密度 99%以上の緻密体を造形する条件を確立し、その条件で基礎形状の造形を行い、金属 3Dプリンターで使用される他材料と同等の造形性であることを確認した。マルエージング鋼及び SKD61 の造形物について、所望の硬さを実現する熱処理条件を開発し、熱処理後の物性評価として各造形材料の引張試験を行い、常温及び高温（300℃、400℃、500℃）で市販材と遜色のない性能であることを確認した。また、造形後の仕上げ加工に影響を及ぼすと考えられる対象形状の造形姿勢やサポート（造形時の熱履歴で生じる残留応力や造形物の自重による変形を抑制する支持形状）配置を効率化するための造形シミュレーション技術として、熱構造連成解析及び固有ひずみを考慮したシミュレーション条件を確立した。

精密加工技術の高度化については、金属 3Dプリンターの後加工で必要となるサポート除去について、機械加工による除去技術を確立した。また、高 L/D 造形サンプルに対してビビリ抑制加工実験を行い、工具動剛性の測定や加工機のパラメーター調整を行うことで、表面粗さ $Ra0.8\mu m$ で仕上げる加工条件を確立した。また、実験結果を基に、造形物の仕上げ加工用工具を開発し、既存工具との性能比較を行い、加工精度や工具寿命において、既存工具を上回る性能であることを確認した。

熟練作業者の加工ノウハウを共有可能なデータベース構築については、3次元 CAD データに対する L/D 計測機能と、3次元 CAD データの形状特徴（「最小 R サイズ」、その箇所までの「工具の突き出し長さ」）抽出機能で得られた情報を、既存の CAM データの工具リストと照合し、類似する形状加工を行った事例の CAM データを検索する機能を開発し、過去の加工事例を参照する環境を構築した。

そして、これら開発技術を活用し、L/D30 の金型部品や川下企業のニーズに基づいたダイカスト金型を試作し、目標精度（表面粗さ $Ra0.8\mu m$ 、形状精度 $\pm 0.01mm$ ）を上回る精度が実現できることを確認すると共に、当該企業のダイカストラインで、試作金型の試用検証を行い、テス

ト成形では問題なく使用できることを確認した。

以上のことから、本研究開発で構築した製造プロセスにより、従来加工法では不良率 90%を超え、製造困難であった L/D30 の形状を含む金型部品を、従来比のコスト低減：40%、加工時間短縮：50%で製造することが可能となった。これに加えて、川下企業のニーズに基づいて試作したダイカスト金型については、川下企業のダイカストラインで試用検証が継続されており、耐久性等に問題がなければ、本格的な導入の可能性が見込める結果となった。

I. 成果(試作品)の無償譲渡や無償貸与

本研究開発では、川下企業（以下、A社）に作製した試作品のダイカスト金型 2 種の無償貸与を行った。貸与した金型は、提供先の A 社にて、ダイカストマシン実機を用いたダイカスト部品の生産現場で耐久性等の確認のための試用・検証を実施中である。

II. 知的財産権

本研究開発における造形物の精密加工に係る技術は製造に関するノウハウの部分が多く、特許化しても他社が抵触しているか証明が困難であるため、特許申請は適切ではないと考えている。ただし、造形物の仕上げ加工用に開発した専用工具については、特許化の有用性もあると考えている。これについては、出願の可能性も含めて、事業完了後も調査を行いたい。

3-2 研究開発後の課題・事業化展開

I. 研究開発後の課題

本研究開発の期間中に A 社で実施したダイカストマシン実機による試作金型の検証では、テスト成形では従来金型と同様に使用できることが確認できている。しかし、実際のダイカスト生産現場では、10 万ショットを超えるような、より多くのショット数での使用が必要となる。そのため、事業完了後も A 社での検証を継続し、従来金型と同等以上の耐久性を有しているかを確認する予定である。また、金属 3D プリンター特有の冷却水管設計による従来金型に対する性能の向上についても検証を重ね、本研究開発の優位性を確認していきたいと考えている。

II. 事業化展開

II-1. 研究成果に係る製品等

開発成果の事業化は、“複雑形状ダイカスト金型部品”と“ダイカスト金型以外の金型部品”の 2 つの方向性で進めていく予定である。

II-1-1. 複雑形状ダイカスト金型部品

本研究開発の成果として、従来加工法では実用レベルでの加工が困難であった複雑形状ダイカスト金型を製造・販売する。金属 3D プリンターの特徴を活かして成形品の大幅な軽量化や自由度の高い設計を可能とし、ダイカスト技術の高品質化やハイサイクル化といった高度化に寄与する金型製品を提供する。

当面は試作物の検証を進めている A 社での本格導入を目標に進める予定である。A 社への導入は、まずは本研究開発でも試作を行った 2 種類の金型について実用化を目指す。A 社からはこれら以外にも、数種類の金型について、金属 3D プリンターを適用したい金型の提案がされており、2 種類の金型での検証が順調に進めば、これら金型の製造にも着手する予定である。

さらに、事業計画で挙げていた通り、主要なダイカストユーザーである自動車産業に対しても、本研究開発の開発技術を活用した製品の提供を進めていきたい。

また、金属3Dプリンター自体の技術開発の方向性は、“造形スピードの向上”、“高精度化”、“低コスト化”、“造形エリアの拡大”等に注力されているが、高精度タイプの方式としては金属粉末を溶融凝固させる造形方式（金属粉末床溶融結合方式）が現在の主流であることに変わりない。そのため、本研究開発で構築するプロセスは、今後の金属3Dプリンターの工業製品への活用において、引き続き重要な役割を果たすものと考えられる。

Ⅱ－１－２．ダイカスト金型以外の金型部品

金属3Dプリンターを利用した金型製造技術の普及は急速に進むと見られているものの、実用化のためには造形後の後加工が必ず課題となり、必要不可欠な技術である。後加工技術をいち早く確立することで、ダイカスト以外の金型や他の工業製品に対する造形物の実利用についても大きく寄与することが期待できる。

本研究開発では様々な金型への事業展開を想定して、精度や耐久性の観点から製造のハードルが比較的高いダイカストを対象として研究開発を進めてきた。得られた研究開発成果はダイカストだけでなく、射出成形やプレス金型への適用が可能な技術である。射出成形については、ダイカストと同様に成形工程を集約するため複数パーツを一体化した複雑形状金型や、成形品への冷却効率を高めるため、金型内部の冷却水の流路を成形品に沿って立体的に配置する3次元冷水管を含んだ金型の造形物の最終仕上げを行うことが可能となる。プレスについては、自動車の生産現場で適用が拡大している熱間プレスでの成形時に加熱時間の短縮のため、3次元冷水管と同様に成形形状に沿って加熱用ヒーター埋め込み用の穴を立体構造として配置させた金型を実現することが可能となる。このようなダイカスト金型以外の金型需要の一例として、押し出し成形金型に関して、3Dプリンターを活用した金型作製の相談があり、これについても導入に向けて開発を進める予定である。

また、積極的に金属3Dプリンターを利用した技術開発を行っている航空・宇宙（燃料噴射ノズルや人工衛星関連部品など）や医療分野（オーダーメイドの人工関節など）での高付加価値製品への適用も期待できる。これらの分野は厳しい使用環境に耐えるため、シビアな精度や性能を要求され、対象となる材料は難加工品が多いことから、本研究開発技術の利用に適していると考えており、利用分野の拡大が見込まれる。

Ⅱ－２．事業化による経済効果

2017年度における工業統計調査によると、鋳造型・ダイカスト金型の金型生産額は1,174億円である。（一社）日本ダイカスト協会のまとめる生産統計データから、これらの内約8割が自動車関連であることを想定すると、国内自動車産業における鋳造型・ダイカスト金型の生産額は約900億円となる。また、プレス用、プラスチック用金型の生産額もそれぞれ、5,110億円、4,606億円と波及効果として期待されるダイカスト金型以外の市場規模はさらに大きい。

地域経済への効果としても、ダイカストの国内生産額の内、約20%は広島が占めており、中国地域には複雑形状のダイカスト金型を導入・活用するための環境が整っている。そのため、開発技術は地域経済の発展に寄与できる技術と考えられる。