

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「トレーサビリティおよび超時短金型設計生産システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 財団法人 製造科学技術センター

目 次

第 1 章 研究開発の概要

1 - 1	研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1 - 2	研究体制	7
1 - 3	成果概要	8
1 - 4	当該研究開発の連絡窓口	8

第 2 章 本論

2 - 1	モデリングに関する調査・システム設計	9
2 - 1 - 1	エッジの創成方法、モデリング機能、必要精度の設定	9
2 - 1 - 2	金型適用システム	10
2 - 1 - 3	金型試作	12
2 - 2	モデリングに関するシステム開発	14
2 - 3	モデリング機能の検証	19
2 - 3 - 1	開発したシステムでの金型検証	19
2 - 3 - 2	C A E システムとの連携及び評価	23

第 3 章 全体総括

		25
--	--	----

第1章 研究開発の概要

1 - 1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1 - 1 - 1 日本の製品開発現場および製造現場が抱える課題・背景

昨今の製造業では、ますます商品サイクルが短い製品が増えているため、製品開発期間の短縮が求められている。また、製品の小型化、高機能化、曲面化が進んでおり、こういった製品の設計を行うには3次元CADが必須であり、製品メーカーの多くは海外製の3次元CADを導入している。そして、この海外製3次元CADの使用に、日本のものづくりには致命的となる欠点がある。

日本のものづくりが世界との競争において優位性を保っている理由として「高品質」と「精密化」が挙げられる。この2点においては、製品設計段階はもちろんであるが、それ以上に日本の金型製造技術の競争力が大きく貢献していると言える。超精密な金型や特殊な金型は、日本以外の金型企業で作ることは難しく、また、金型の品質という面から見ても日本の金型企業と肩を並べる海外企業は存在しない。しかしながら、海外で開発された3次元CADは、日本のものづくりを考慮して開発されたシステムではなく、その日本の競争力を発揮しにくくなっているのが現状である。このままでは、低価格・短納期という観点だけでなく、高品質・精密化という面でも海外企業に凌駕されてしまう。

では、なぜ海外製3次元CADが日本のものづくりに適していないのか。欧米では、部門ごとに完結した成果を後工程に引き渡していく仕事の進め方であり、それに適したITシステムの代表として3次元CADは位置づけられている。つまり、欧米の3次元CADは、部門間で試行錯誤を重ねる日本方式には適していない、というわけである。また、ほとんどの3次元CADは、製品設計にフォーカスを当てて開発されたものが多く、金型設計に適している製品は少ない。さらに、製品メーカーで設計に使用している3次元CADの多くは高価な製品で、規模の小さい企業では同じ製品を購入することが難しいというコスト問題も存在する。そこで問題になるのは、データ変換に関するトラブルである。部門間および企業間でのデータの授受が必須となっている日本では、異なる3次元CADデータを使用しているために要する変換作業で発生するエラーによるトラブルが多い。製品設計を行った企業と金型設計を行う企業が異なるケースが多いため、多くの場合は川下の金型企業がデータ修正に多くの時間を割いている。これらのエラー多発による損失は、完成車メーカーと1次サプライ間で70億/年（社団法人日本自動車工業会による）2次・3次も入れると1000億レベルと考えられる。また、高品質・高機能な製品を開発するにあたり、何度も繰り返し行う解析作業においてもIT化が進んでおり、そこで使用するCAEシステムに適するデータ変換・作成に膨大な時間が必要になっているのが現状である。

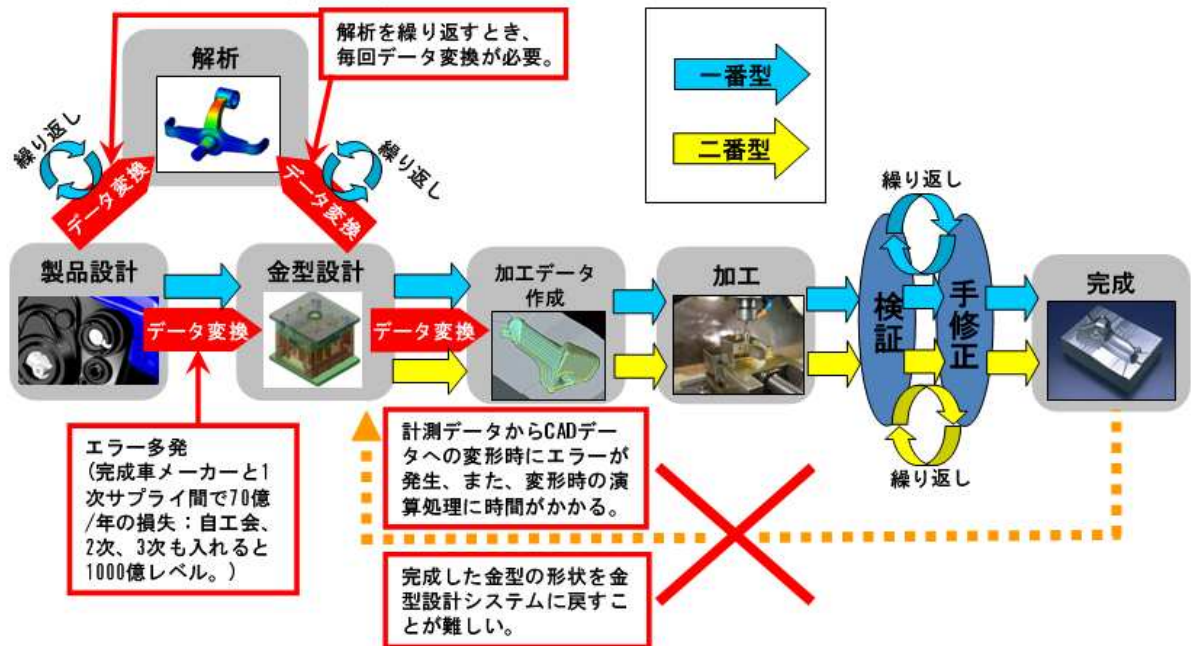
また、金型製造に関する課題としては、職人の手修正により完成させた金型形状を3次元CADデータとしてフィードバックすることができないという問題点も挙げられる。これは、大物金型では莫大な損失につながるケースもあり、また、2番型、3番型の製作にも1番型と同じ工程が必要となり、短納期化のさまたげにつながっている。

日本の製造業が海外企業に対する競争力を強くするためには、上記課題を改善し、製品開発工程における低コスト・短納期化を図り、高品質・高機能な金型を製造していかなければならない。

現状の問題点と本開発目標が達成した場合のイメージ図を次頁に示す。

現状

- ・データ変換におけるエラー多発
- ・完成型形状のデータ化が出来ていない
- ・計測データからの面張りトラブル



技術開発後

- ・データ変換におけるエラー回避・・・コスト削減、品質向上
- ・完成型形状のデータ化により、二番型の生産が容易・・・コスト削減、納期短縮
- ・計測データからの面張りがスムーズ

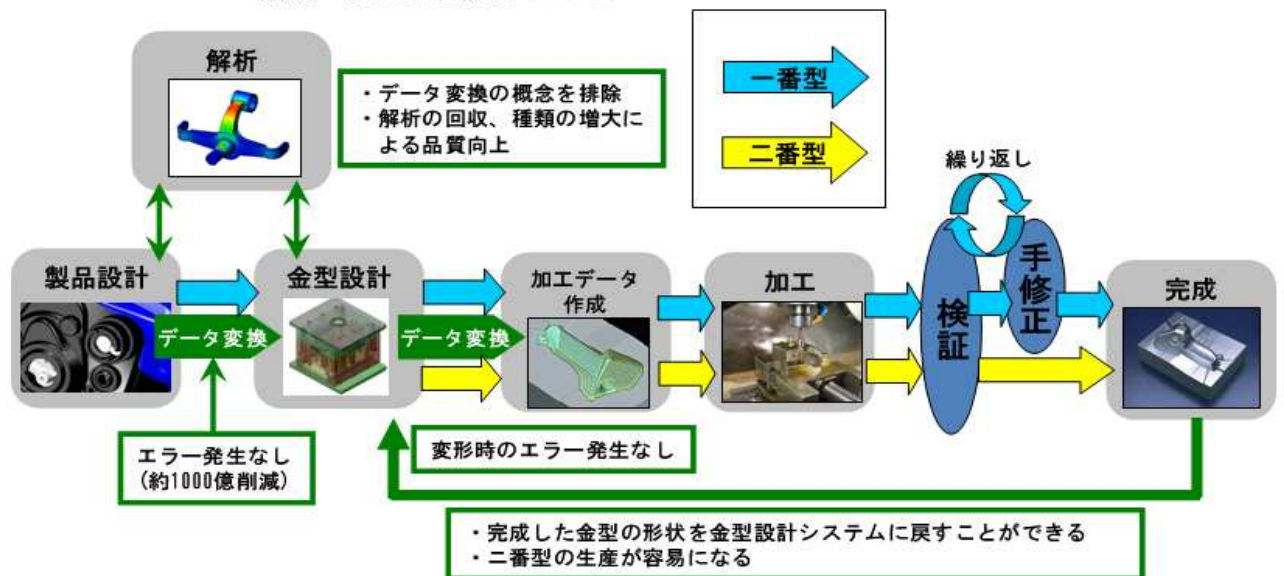


図 現状の課題と目標・解決作例

1 - 1 - 2 課題への対応方法

上記の課題に対応できるものづくり支援システムを開発し、金型企業にて試用する。

- 日本のものづくりに適したモデリング機能の実現

製品設計から製造業まで使用するのに適した機能を日本人が考え、日本人が開発を進める。実際に、日本の製造分野において、3次元CADを使用している技術者が、日本型ものづくりに適した機能を追及する。開発も日本国内のプログラマーが行い、現場感が強力に反映されたものづくり支援システムを開発する。

- データ変換トラブル削減

海外で開発されている3次元CADの多くはパラメトリック曲面形式が利用されているが、このパラメトリック曲面形式には様々な制約がある。それが原因で精密な部分に誤差が発生し、集合演算ができない、データ変換の際に正常な受け渡しが出来ないといった問題が起こっているのである。本研究開発では、既存のCADとは異なるSLIM (Sparse Low-degree Implicit : 以下、陰関数曲面と呼ぶ) を基盤技術に用いる。点群ベースの陰関数曲面は、パラメトリック曲面形式のような制約がないため、集合演算時においても例外的な表現を用いることがない。そのため、数値計算における頑健性が向上し、更にデータ変換時のエラーを限りなくゼロに近づけることができる。さらに、CAD/CAM/CAE/CATシステムの内部データ表現形式を、陰関数曲面により置き換えられることを考え、繰り返し行なう解析作業のためのデータ変換や、CAMシステムへのデータ受け渡しにおける変換作業にかかる工数を削減する。

- 実体からの3次元CADデータ作成

前にも述べたように、陰関数曲面は点群ベースの形式であるため、実際の金型や製品形状を3次元レーザースキャナー等の測定機により読み込んだ点群データをシステムの中で統合的に扱うことができる。これにより、実際に製造した型や製品形状のフィードバックを行い、製品開発工程および型製作の短納期化を図るとともに、開発および型製作にかかるコストを削減する。

1 - 1 - 3 研究の目的・目標

既存CADが採用しているB-repによる形状表現から、SLIM (Sparse Low-degree Implicit) という異なる形状表現方法に基盤技術を変更し、日本の製造に適したものづくり支援システムを開発することにより、製品開発工程における様々な問題を解決することを目指す。節目ごとに、金型を実際に試作して確認をする。最終的には当初は金型企業にての試用を目指す。

【1】日本のものづくりに適したモデリング機能の実現

(独)理化学研究所および国立大学法人東京大学にて研究されている陰関数曲面という技術を核に用いて、3次元形状のモデリング機能を開発する。陰関数曲面は優れた曲面表現形式として研究開発されてきているものの、製品設計および金型設計で実運用されるシステムの中での利用方法は確立されていない。本研究開発では、実際の設計現場での陰関数曲面の最適な利用方法を研究開発することにより、陰関数曲面の柔軟な曲面表現能力と、日本の設計担当者が理解しやすく操作が容易なユーザーインタフェースを合わせ持つモデリング機能を開発する。

【2】データ変換精度の改善

陰関数曲面形式は、集合演算時に例外的な表現を用いることがないため、パラメトリック曲面方式で発生するようなデータ変換時のエラーは発生しない。ただし、現状では、実運用されるシステムの中での利用方法は確立されていないため、【1】で開発するシステム機能として組み込む形で開発を行い、さらに、その精度に関して、過去の実績データで検証を行い、エラーゼロを目指し、改善を行なう。

【3】点群データからの 3DCAD データ生成機能の開発

陰関数曲面形式は、点群ベースの曲面形式であるため、昨今の 3 次元 CAD で使われているパラメトリック曲面と比べて、3 次元スキャナなどから読み込んだデータからの 3 次元 CAD データ生成能力が優れている。しかしながら、現状では、実運用されるシステムの中での品質の確保、及び利用方法は確立されていない。本研究開発では、外部から読み込んだ点群データから実用可能な品質の 3 次元モデルを生成する機能を開発する。また、【1】のモデリング機能で形状修正ができるデータであることを必要要件とする。

(1) 日本のものづくりに適したモデリング機能の実現

1-1 : SLIM をモデリングのベースとするための基本技術の開発

2 面が集まっているエッジの表現技術は提案されているので、この検証を実施し、さらに複数面の集まったエッジ表現方法を確立する。次に CAD として最低限具備すべき形状作成機能を開発する。開発したモデリング技術をベースに金型設計機能を開発し、金型設計に有効であることを検証する

(2) データ変換トラブル削減技術開発

2-1 : 現状の B-rep ベースの CAD とのデータ交換技術を STL などの技術を用いながら開発する

(3) 実体からの 3 次元 CAD データ作成技術の開発

3-1 点群データから 3 次元データを作成する技術は存在するが、満足いく精度が得られていない。精度を確保しながら、エラーなく 3 次元データを作成する技術を SLIM を用いて開発する

特定研究開発等の技術的目標値

- 日本のものづくりに適したモデリング機能の実現
金型設計にかかる期間を 30%削減する
- データ変換トラブル削減
データ交換に係わるエラーをほぼゼロにする
- 実体からの 3 次元 CAD データ作成
2 番型の製作時間を半減させる

1 - 1 - 4 研究開発の役割と本年度計画

【1】 日本のものづくりに適したモデリング機能の実現

ユーザインターフェースを含むシステム設計は、製品設計から金型設計までを 3 次元 CAD で実業務として行っている株式会社日本デザインエンジニアリングが担当する。システム開発

は、形状処理を含む専用アプリケーションシステム開発を主業務としている株式会社アルモニコスが担当する。システムの基盤となるフレームワークについては株式会社カタッチが担当する。また、モデリング機能の調査分析に関しては、財団法人製造科学技術センター及び東京大学が実施する。

【2】データ変換精度の改善

株式会社日本デザインエンジニアリングがシステム設計および検証作業、株式会社アルモニコスがシステム開発を担当する。また、変換精度の分析に関しては、財団法人製造科学技術センター及び東京大学が実施する。

【3】点群データからの 3DCAD データ生成機能の開発

株式会社日本デザインエンジニアリングがシステム設計および検証作業、株式会社アルモニコスがシステム開発を担当する。

既存 CAD が採用している B-rep による形状表現から、SLIM (Sparse Low-degree Implicit) という異なる形状表現方法に基盤技術を変更し、日本の製造に適したものづくり支援システムを開発するために以下の年次開発を行い、製品開発工程における様々な問題を解決することを目指し、節目ごとに、金型を実際に試作して確認を行う。最終年度 (平成 23 年度が目標) 終了後、金型企業にての試用を目指す。

- 平成 21 年度は、金型基本設計ツールの中核となる SLIM の機能開発を実施する。具体的には SLIM のベースとなるシステムの構築、SLIM で稜線を表現する手法の開発を進める。開発した機能が有効かどうかを確認するために開発全期間 (3 ヶ年) に渡って使用する基準金型を作成し、開発途上で逐次確認を行う。
- 平成 22 年度は、基本的なモデリング機能の開発とデータ交換に関する技術開発を実施する。
- 平成 23 年度は、金型設計用ツールの基本システムを完成させる。その後、金型用の専用機能を盛り込む。これによって、金型設計にかかる期間を 30% 削減、2 番型の製作時間の半減を目指す。

上記実現のため、平成 21 年度は、日本のものづくりに適したモデリング機能の実現を目指し、
具体的に以下の開発を行った。

モデリングに関する調査・システム設計 (実施：株式会社日本デザインエンジニアリング、株式会社アルモニコス、株式会社カタッチ、財団法人製造科学技術センター、国立大学法人東京大学)

エッジの創生方法、モデリング機能の選択、必要精度の設定など (株式会社アルモニコス、株式会社カタッチ) を行い、基本的なシステムの構成を調査・検討 (財団法人製造科学技術センター及び東京大学)。さらに金型に適用するためのシステム構成を検討 (株式会社日本デザインエンジニアリング) を行った。

平行して開発する機能が満足できるものとなっているかを確認するための基準金型を作っておく (日本デザインエンジニアリング、製造科学技術センター)。

モデリングに関するシステム開発（実施：株式会社アルモニコス、株式会社カタッチ）システムの設計に基づいて、実際のプログラムを開発する。具体的には以下の項目を実施した。

- 株式会社カタッチの製品であるプラットフォーム（HISUI）を本研究に適する形に改修する。（株式会社カタッチ）
- そのプラットフォーム上で SLIM に関する研究開発（本年度の研究テーマは「SLIM で稜線を創生する手法」とする）を行った。（株式会社アルモニコス、株式会社カタッチ）
- その研究成果を用いてモデリング機能、及び金型加工との連携のための以下の基本機能を開発を行った。（株式会社アルモニコス）

基本機能

- 点群、STL、NC データの読み込み
- SLIM の生成
- SLIM からポリゴンメッシュ（三角形または四辺形）への変換
- STL（三角形）の出力
- ファイル入出力によるシステム実行中の再現
- SLIM、点群、ポリゴンメッシュ、STL、金型形状等の表示

モデリング機能の検証（実施：株式会社日本デザインエンジニアリング、財団法人製造科学技術センター、国立大学法人東京大学）

開発したプログラムが機能するかを検証し、開発したシステムで製作した金型（製造科学技術センターより外注）の基準金型を用いて検証を行った（日本デザインエンジニアリング）。

モデリング機能の実証としては、今後の金型設計が円滑に行えるような以下の機能が満たされる必要がある。これらを他の CAE システムなどと連携して行うことを、比較検討して実証を行った。また、必要な精度については、実証を行うとともにその論理的な検討を行い、今後の改良の方向について検討を行った（東京大学）。

- 1．トレランスに対する冗長性があり、データ交換時にエラーが発生しない
- 2．解析に必要なメッシュデータへの変換が用意などの CAE 機能との親和性が高い
- 3．現物を測定した点群データをそのまま取り込んで活用でき、現物融合が図れる

プロジェクトの管理・運営

- ・ 事業管理者・財団法人製造科学技術センターにおいて、本プロジェクトの管理を行い、プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書を作成を行った。
- ・ 研究開発推進委員会を委託契約期間内に 3 回程度開催し、研究進行状況の調整、研究課題の達成状況のチェックを行った。
- ・ 本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と調整を行った。

1 - 1 - 5 委員会メンバー及び開催内容は以下の通り

委員会名簿

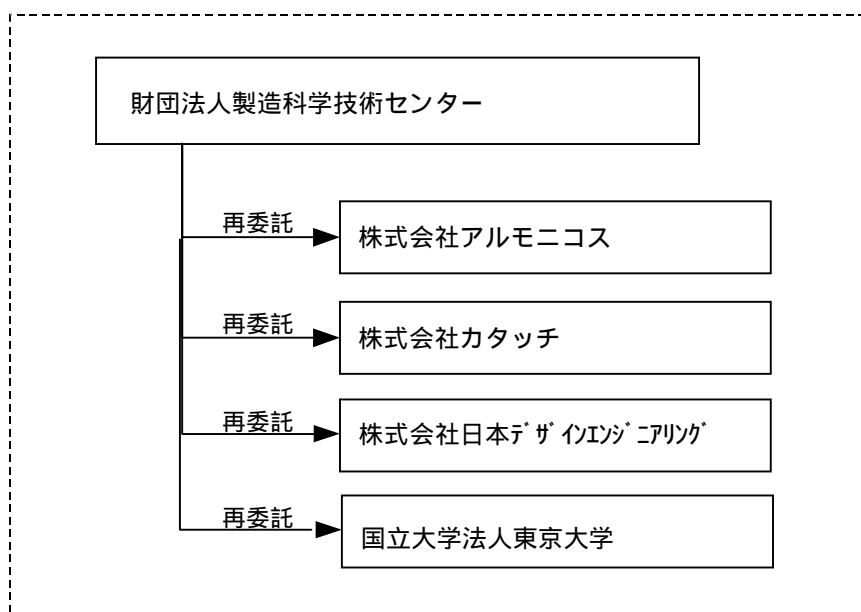
氏 名	所属・役職	備 考
大和 裕幸	東京大学新領域創成科学研究科科長・教授	PL
原口 英紀	(株)日本デザインエンジニアリング 専務取締役	SL
秋山 雅弘	(株)アルモニコス 代表取締役	
内田 幸雄	(株)カタッチ 代表取締役	
岩壁 清行	(株)日本デザインエンジニアリング 代表取締役	
山形 豊	(独)理化学研究所 加工応用チーム チーム長	アドバイザー
澤田 浩之	(独)産業技術総合研究所 デジタルものづくりセンター システム技術研究チーム チーム長	アドバイザー
増田 宏	東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授	アドバイザー
池上 正信	池上金型工業(株) 代表取締役社長	アドバイザー
松井 宏一	(株)モルテック 代表取締役社長	アドバイザー

1 - 1 - 6 委員会開催スケジュール

トレーサビリティおよび超時短金型設計システムの開発

	第1回	第2回	第3回	第4回
開発推進委員会	H21.11.5 15:00～17:00 MSTC第1	H21.12.18 10:00～12:00 MSTC第1	H22.1.21～1.22 開発金型の検証 委員会開催 浜松	H22.2.23 14:00～17:00 浜松

1 - 2 研究体制



統括研究代表者（P L）
国立学校法人東京大学大学院
新領域創成科学研究科
科長・教授 大和 裕幸

副統括研究代表者（S L）
株式会社日本デジタルエンジニアリング
専務取締役 原口 英紀

1 - 3 成果概要

本年度は上記の目的を達成するための足固めとして以下の3項目を推進した。

1.モデリングに関する調査・システム設計

金型に必要なシステム要件を取りまとめる。また、現在実用されているシステムで金型を作り、設計、製作間での問題を把握すると同時に、出来上がった金型を評価基準とする。

2.モデリングに関するシステム開発

ベースとするプラットフォーム（HISUI）を改修し、SLIMの機能拡張を実施した。具体的には稜線の創生、点群・STL・NCデータの読み込み、SLIMからポリゴンメッシュへの変換、STLの出力などである。

3.モデリング機能の検証

開発しているシステムが現状殿程度のパフォーマンスを持っているのかを検証し、目標としている3項目を3ヵ年で実現できるのかを見通した。

1 - 4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人 製造科学技術センター（管理法人）

調査研究部 部長代理 間野 隆久

〒105-0001 東京都港区虎ノ門三丁目11番15号 SVAX TTビル3階

TEL 03-5472-2561 FAX 03-5472-2567

e-mail:mano@mstc.or.jp

株式会社アルモニコス

代表取締役 秋山 雅弘

株式会社カタッチ

代表取締役 内田 幸雄

株式会社日本デジタルエンジニアリング

専務取締役 原口 英紀

国立大学法人東京大学

新領域創成科学研究科 研究科長・教授 大和 裕幸

2 - 1 モデリングに関する調査・システム設計

2 - 1 - 1 エッジの創生方法、モデリング機能の選択、必要精度の設定

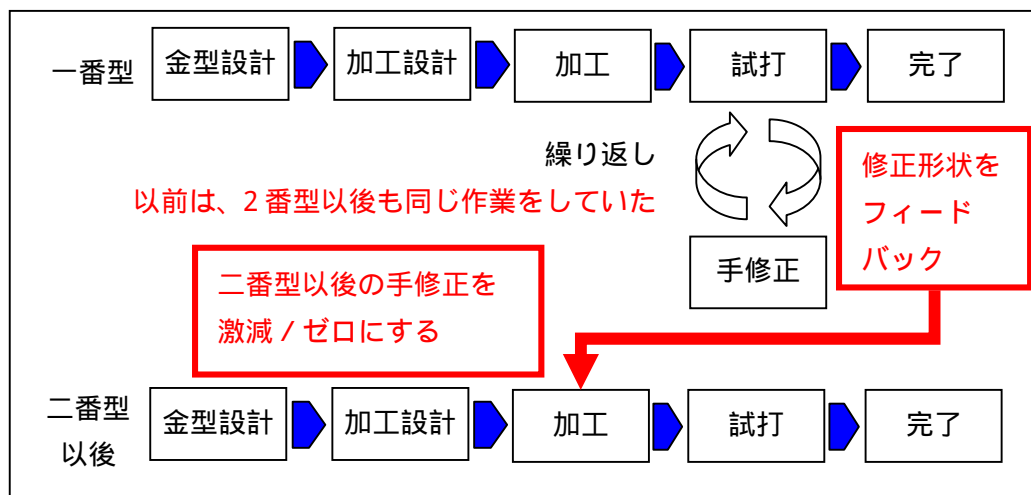
(1) エッジの創生方法

SLIM(Sparse Low-degree Implicit)関数を利用して、点群からポリゴンメッシュを生成することとした。ポリゴン化時には dual contouring の手法を利用して明確な稜線の創生を行うこととした。

(2) モデリング機能の選択

本プロジェクトの目的は、表題の通り“トレーサビリティ及び超時短金型設計生産システム”の構築により、金型の初期生産や2番型、3番型の生産の著しい効率化を達成することである。今年度のターゲットとしては、2番型、3番型の生産効率の向上の為に、手作業による修正を加えた金型形状をCAMにフィードバックすることを目標として設定した。

本プロジェクトによる工程の改善



上記目標を達成するためのシステムとして、以下の機能を開発した。

点群データの読み込み

加工後の金型形状の取得機器として、非接触式のレーザースキャナを想定している。この装置から取得できるデータは法線方向を持つ三次元の点群座標であるケースがほとんどであるため、本システムの入力データとして採用する。

点群データから SLIM 曲面を利用して、ポリゴンメッシュを作成する機能

一番型から取得した形状データを CAM などにフィードバックするためには、面として形状を保持する形式に戻す必要がある。市販の CAD/CAM が保持する面の形式としては、ポリゴンメッシュ、または B-reps と呼ばれる曲面形式が多いが、本プロジェクトにおける今年度のターゲットとしては、ポリゴンメッシュを採用した。

点群データからのポリゴンメッシュ構築の手段については、市販されているシステムも含め、多くの方法が存在するが、本プロジェクトでは SLIM 関数 (Sparse Low-Degree Implicit) を採用することとした。このアルゴリズムの利点は、局所的な形状演算を行

うために、分散処理に適しており大規模演算に対応可能であることや、関数の形式が低次であるために、データ形式や演算処理が簡素化できることが挙げられる。

参照データとして、NC プログラムを読み込む機能

参照データとして、目標となる部品形状を読み込む機能

また、以下の機能について、検証作業に必要となることから、並行して開発した。

創生されたポリゴンメッシュの編集機能

(3) 必要精度の設定

フィードバックするポリゴンデータの要求精度は通常の金型作成時と同様なものが求められる。そのためのパラメータとしては、点の数、点の精度、SLIM 化パラメータが挙げられるが、これらについては試験を繰り返しながら最適な値を精査している。一方、アプリケーション側では、点群から SLIM データ、及びポリゴンを生成するタイミングで、要求精度に関するパラメータを指定する仕様とした。

2 - 1 - 2 金型適用システム

3 次元金型設計では、実物を変形するように 3 次元的な製品形状に抜き勾配掛けやパーティング面作成などを行い、製品部周辺（入れ子）の設計を行っていく。また、モールドベース全体のバランスや金型機能構造を検討しながら部品の配置を行っていく。試行錯誤を繰り返しながら、大枠の構想設計から詳細設計に落とし込んでいく。

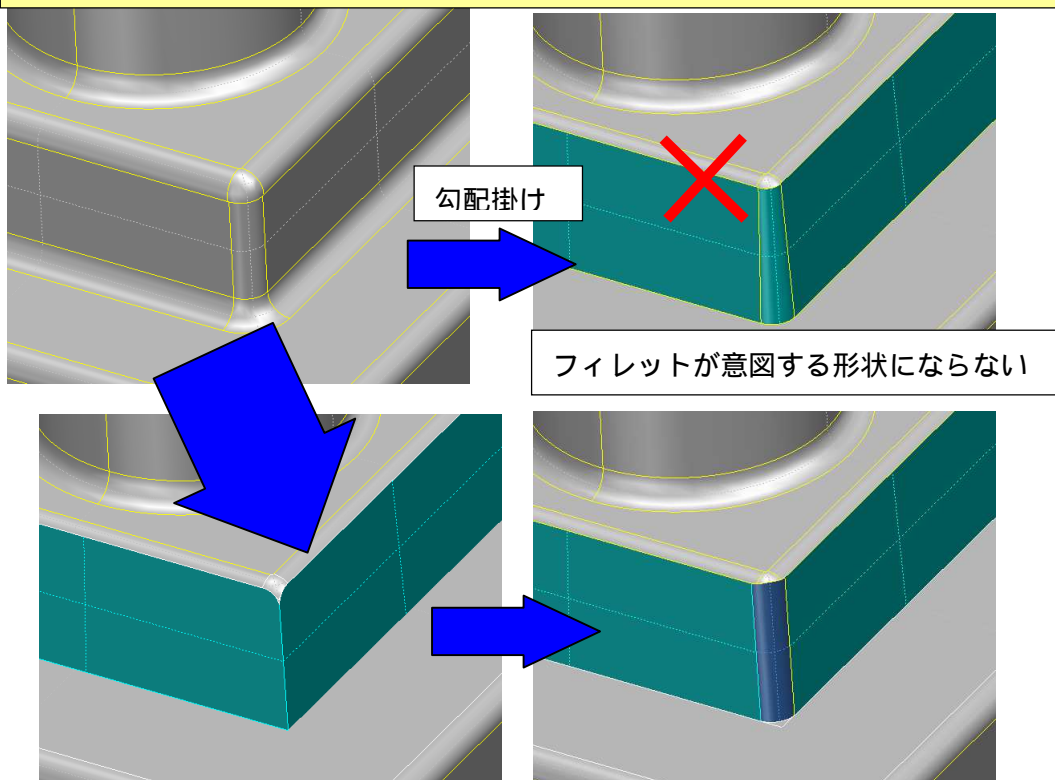
基本的なシステム機能以外に、SLIM を利用したシステムとして金型設計に適したシステム機能の検討を行った。SLIM を利用したシステムは、形状変形を阻害する拘束という概念を持たないため、B-rep のような自己矛盾などによる不具合が発生しない。B-rep のような幾何学を意識することなく変形が可能である。

金型設計に適したシステム機能

モデリング機能	コメント
収縮率機能	プラスチックが溶融状態から固化する際に体積収縮するため、収縮率を掛ける機能が必要である。樹脂の特性によっては、X、Y、Z 方向にそれぞれ異なる値を設定することが必要である。
パーティング面機能	金型設計者が考えたパーティング面をシステム上で具現化できる機能が必要。既存のシステムによってはパーティングを色分け表現するものもあるが、製品の仕様などにも影響する重要な項目であり、他の設計者ともイメージを共有する必要があるため、パーティング面として表現する必要性があると考えられる。

型割り機能	パーティング面を利用して、入れ子を CAVI・CORE に分割する機能が必要。
勾配掛け機能	金型設計において重要な機能の一つである。 既存のシステムでは、諸条件により勾配が掛け機能がエラーになるケースがある。また、設計者の意図する勾配形状にならない事がある。
補正面機能	製品として極めて精度が必要な箇所などは、成形トライを繰り返しながら、少しずつ精度を追い込んでいく事を行う。そのような箇所は、金型設計において、あらかじめ調整代を設ける。部位の調整代を変更できる機能が必要である。
ミスマッチ機能	アンダーカット対策やバリ対策のため、あらかじめ部品同士の上に段差などを作成する場合がある。ミスマッチを付加できる機能が必要である。
入れ子分割機能	入れ子の分割は製品の精度、金型の加工方法を考慮し試行錯誤が伴うものである。 分割位置(形状の変更)がすばやく簡単にできる機能が必要である。
ツバ・ザグリ形状機能	複数の入れ子部品になった場合、お互いを固定し合う必要がある。一方にツバ形状を付加した場合、もう一方にはザグリ形状が必要になる。

既存システムの金型設計における勾配掛け(形状変更)



フィレットを外して、再度フィレット掛けを行っている

上記のように、既存のシステム（B-rep）では、演算エラーを回避するためパラメトリック曲面形式を意識しながら形状変更を行わなければならない。その為、設計者の意図する形状変更を行うには多くの手間や工数が掛かっている。

2 - 1 - 3 金型試作

既存のシステムにおける金型設計の問題点、SLIM を利用したシステム（Matisse）の優位性を整理すると以下のような事柄があげられる。

（１）異なるシステム間におけるデータ品質問題

製品設計で作成した形状データを金型設計で受け取るときなど、異なるシステム間でデータ交換を行う際、頻繁にエラーが発生する。システムの違いによる形状表現の違いやトレランス（許容誤差）など、データ品質（PDQ）問題が発生する。

● SLIM を利用したシステム（Matisse）の優位性

Matisse は既存のシステムの様なパラメトリック曲面形式ではなく、また、トレランスに対する冗長性を持っているため、データ変換におけるトラブルが発生する確率は極めて低い。

（２）形状変形におけるエラー

B-rep の CAD は形状変形がしにくいいため、金型設計などで行われる抜き勾配やミスマッチ付加などの変換を行う際、モデルの位相が変わりエラーを発生させてしまう。設計者はエラーを回避するため、さまざまな方法でのモデリングを行いトライ＆エラーを繰り返して設計に時間を要している。

● SLIM を利用したシステム（Matisse）の優位性

Matisse は形状変形を阻害する拘束という概念を持たないため、B-rep のような自己矛盾などによる不具合が発生しない。B-rep のような幾何学を意識することなく変形が可能である。

（３）解析におけるデータ利用

昨今の金型設計・製作において、樹脂流動解析、構造解析、スプリングバック解析などの解析（CAE）がしばしば行われる。その際、解析用データへの変換が必要になる。既存の B-rep の CAD は解析との親和性が高いとは言えず、解析結果を受け、形状変更を行い再びデータ変換を行うという作業の繰り返しを行っている。

● SLIM を利用したシステム（Matisse）の優位性

Matisse は CAE との親和性が高い。CAE で使用するメッシュデータに容易に変換する事が可能である。

（４）二番型の対応

金型の仕上げや手修正を行うことがある。そのような手修正は、形状データに反映されない。設計データとしてフィードバックできないため、二番型製作時、先行して製作した金型を活かすことができず、金型製作時間に膨大な時間を要してしまう。

● SLIM を利用したシステム（Matisse）の優位性

Matisse は点群殻から曲面を発生させる事ができるため、計測データからのデータ受け取りが可能である。手仕上げなど設計データに残されていない情報を現物を計測することにより、設計データにフィードバックが可能であり、二番型製作の効率的に行うことができる。

金型試作の対象製品モデルの選定

金型試作の対象製品モデルをデジカメモデルと幾何形状トレーモデルを作成した。

デジカメモデル

実際に金型を用いて生産される製品を想定して、カメラのフロントカバーをイメージして設計を行いデジカメモデルとした。デジカメモデルはフィレット・自由曲面を含んでいる形状であり、SLIM による曲面の形状表現に着目する。一般的な形状の金型製作における SLIM システムの評価を行うことを目的とする。

幾何形状トレーモデル

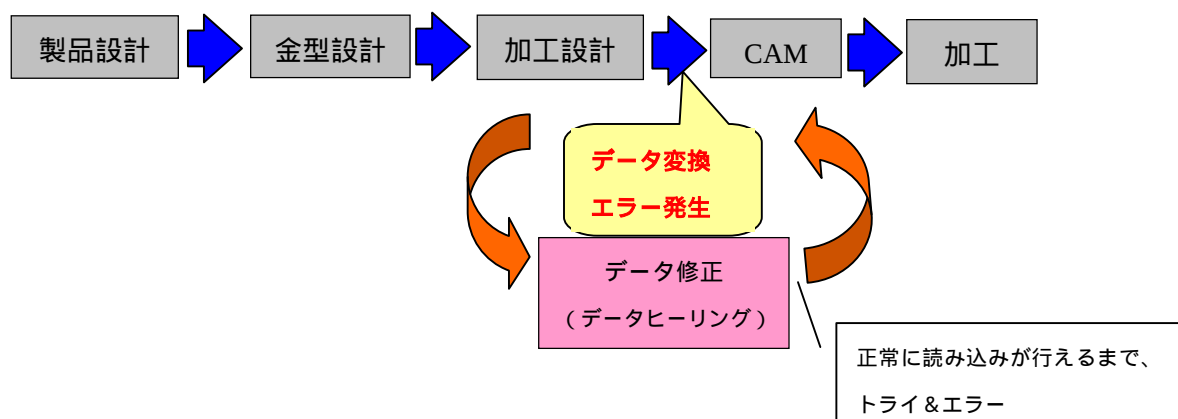
SLIM で不得意する角部を盛り込んだ形状、また B-rep として表現される幾何形状を含んだモデルを設計し、幾何形状トレーモデルとした。

角部の形状表現の評価を行うため、2 面構成による角部、また複数面構成による角部を持つ形状となっている。また、B-rep で表現される球面定義や円柱面定義される形状を持つ形状である。B-rep で表現される幾何形状、および角部の形状を持つ、金型製作における SLIM システムの評価を行うことを目的とする。

デジカメモデル・幾何形状トレーモデル共に、3D モデル形状を直接反映できるマシニングセンター加工に着目し、放電加工(EDM)になってしまうような形状がない様に設計を行った。また、マシニングセンター加工後、磨きなどの手仕上げは行わない事とする。3D モデル形状と加工形状を比較評価できるようにする。

基準金型製作におけるフロー

従来の金型製作と新システムでの金型製作を比較検証する為に金型の試作を行った。基準金型製作時におけるフローは以下である。



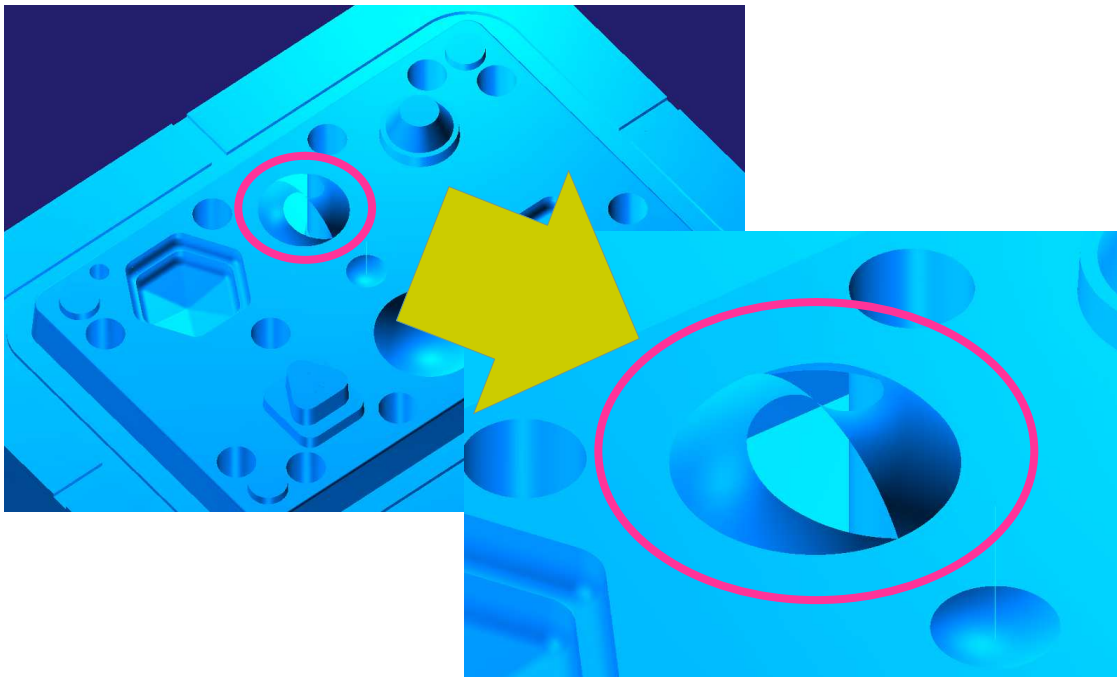
基準金型製作において、金型設計・加工設計の後 CAM へデータ移行を行った際、正常な形状データが渡らないトラブルが発生した。面はがれ・面同士の間隙が開いた状態になっている事が確認できた。このような状態では正常な NC データを作成することができないため、

CAD 側で問題が発生した箇所の修正を行い出力、再び CAM でのデータの読み込みを行い、正常な形状を読み込む事が出来るまで、この作業を繰り返した。

金型製作の現場において、このような異なるシステム間におけるデータ変換トラブルは、たびたび発生する。システムそれぞれの形状定義の違いや入出力の相性などが問題であり、B-rep 形状表現の問題と考えられる。短納期化が迫れている日本の金型製作現場において、このようなデータ変換に置けるトラブル・手戻りは、加工遅れ・納期遅れの原因なり、解決しなければならない問題である。

データ変換トラブル回避後、CAM での NC データ作成、金型加工は問題なく行うことが出来た。

幾何形状トレーモデル データ変換エラー 球面定義部分



2 - 2 モデリングに関するシステム開発

2 - 2 - 1 Hisui の改善

本プロジェクトを遂行する上で必要となる、または今後必要となりそうな機能を実装するために、フレームワークの改良を行った。対象とした項目は以下の通りである。

(1) Hisui の 64bit 対応

本プロジェクトでは、大量の点群を扱う必要があり、32BitOS で扱うことのできるメモリ空間では、扱えるデータ量の上限が課題となることが予想される。

そこで 64bit コンピューティングの時代に備えて、Hisui を 64bit に対応させた。

なお、アプリケーション側での対応については、変更の必要な箇所や 64Bit に特化したコーディングにすることにより性能の向上が期待できる部分の抽出を含め、次年度の課題とする。

(2)WPF への対応

昨今のアプリケーションソフトにおいては、3D ビューとメニューアイコンやツリービューが統合されているなど、非常に洗練された GUI (Graphic User Interface) を持つ物が増えてきている。これらの実装には、Microsoft 社が公開している WPF (Windows Platform Foundation) という GUI 用のフレームワークが利用されており、今後の Windows アプリケーションにおいては、このフレームワーク上での開発が実質上必須となっていくと思われる。そこで、Hisui を WPF に対応させるべく、開発を進めた。

(3) GPU による演算処理規格への対応

近年、GPU の性能向上とともに、これまで CPU (Central Processing Unit) で計算していた様々な数値演算に GPU を利用する、という研究が進められている。こうした GPU は GPGPU (General Purpose Graphics Processing Unit) とも言われ、現在市販されている殆どの GPU がこの機能を有している。

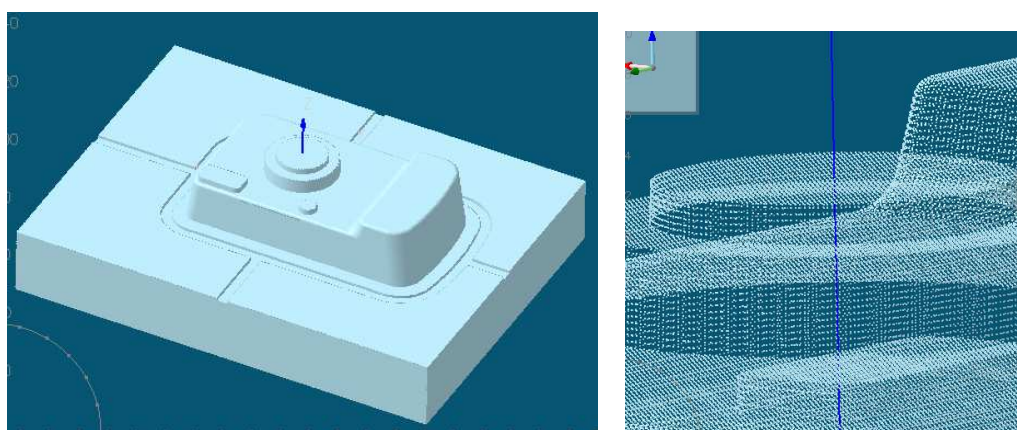
金型の加工やフィードバックの為に点群処理においては、その要求精度の高さに由来する高負荷な計算処理が多く、かつ局所的な処理が中心となるために GPU による形状計算に適正が高いと考え、開発を推進した。また、適用分野の将来的な拡大を目指し、GPU に関する演算処理の研究開発を進めた。

2 - 2 - 2 SLIM に関する研究開発

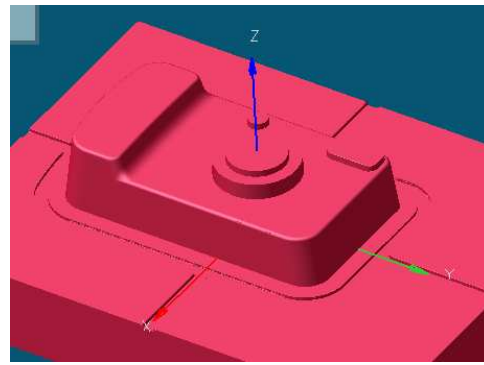
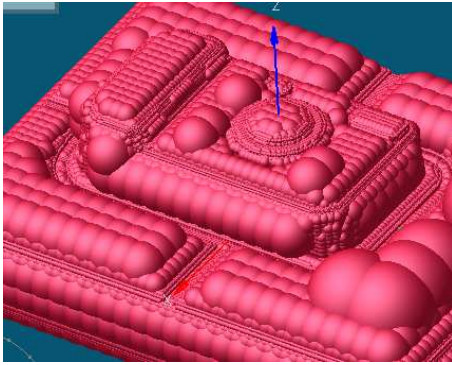
(1) 単一 SLIM 球内に複数の陰関数を保持する機能の開発

2-1 で調査した SLIM に関する文献を参考に、SLIM データで稜線や頂点を表現するデータ保持機能を開発した。

以下に入力の点群データ、SLIM 球を生成した入力の点群データ、および SLIM 曲面の表面形状を表示する。



入力点群。実運用においては、完成した金型をレーザースキャナなどで測定して点群を取得することになるが、現時点のプロジェクトにおいては、STL データから等間隔の点群を発生して入力データとした。

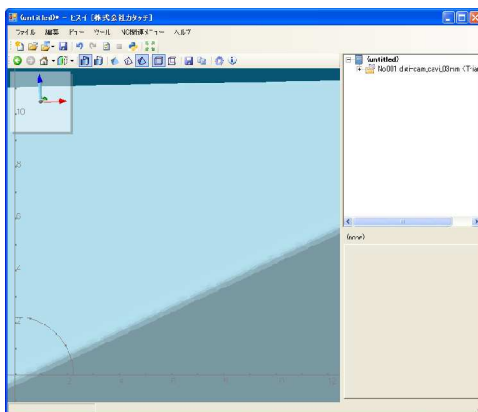


左：作成された SLIM 球。SLIM データでは、このように指定の空間を互いに交差する球体で被覆し、それらの中に二次関数などの低次の関数を持たせることで形状の表現を行う。

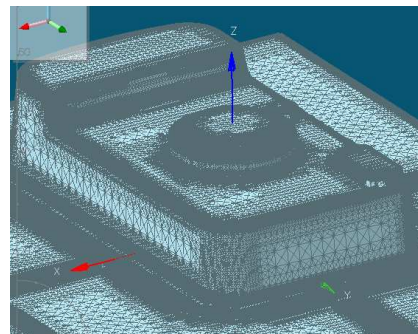
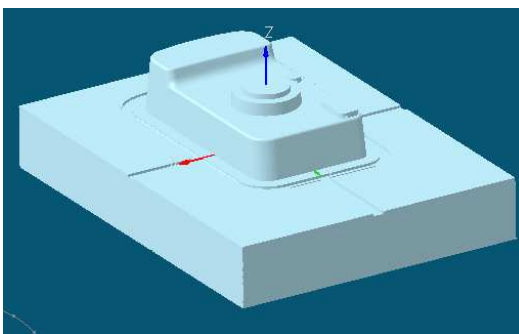
右：SLIM 球内部の陰関数曲面を表示したもの。前述の図で SLIM 球がお互いに重なっている部分では、個々の球に含まれる陰関数の値をそれぞれの球の中心からの距離に応じた重み関数を利用して値を混ぜ合わせ、隣接する SLIM 球の間での形状の連続性を確保している。

(2) 稜線部の SLIM 球からポリゴンメッシュを構築する機能の開発

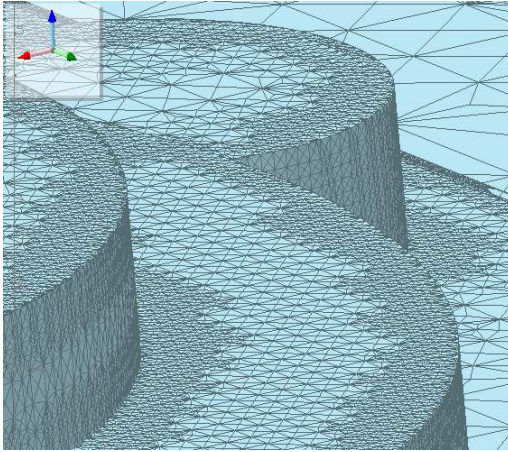
SLIM データからポリゴンメッシュを作成する処理において、SLIM データ上での稜線情報を利用しない場合、下図の様に稜線部分は「面取り」された形状となる。



これを避けるために、Dual Contouring の手法によりメッシュを再構築する。以下に SLIM データから作成したポリゴン形状を表示する。



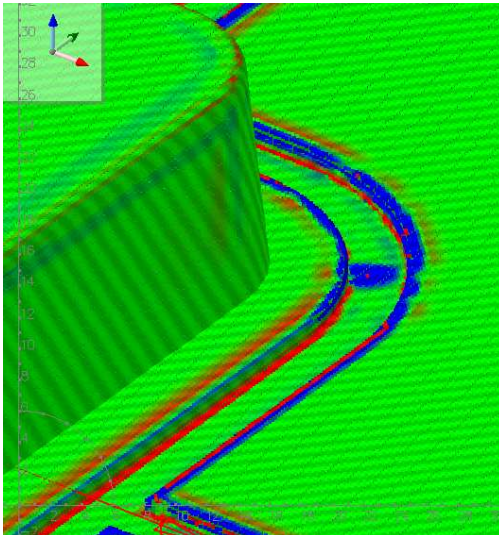
SLIM 作成時の八分木構造により、作成されるポリゴンも複雑な形状部分ほど、細かい三角形で構成され、精度を確保している。



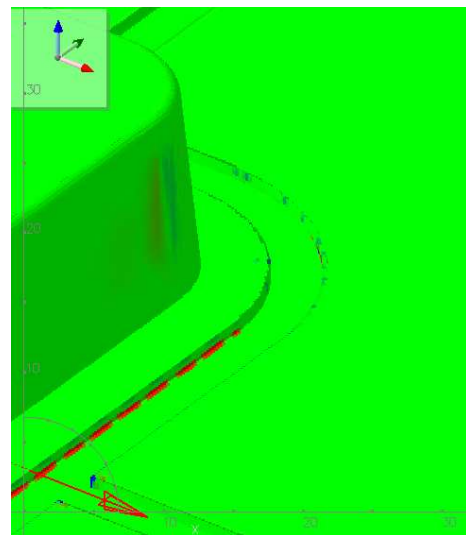
詳細部分の拡大図。稜線が創生されていることが分かる

これらのテスト結果の形状を見ると、稜線の創生は精度良く出来るようになったと言える。但し、段差部分の形状再現性や、全体の大きさに対して微細な形状の再現精度については、現時点では課題がある。しかしながら、本プロジェクトで目標とする超時短金型設計生産においては、現物から CAD/CAM への形状のフィードバックが必須であり、そのためには大量の点群をそれぞれ局所的に取り扱うことが必要となる。そのような用途においては SLIM のアルゴリズムは有益であり、次年度の課題として研究を進めたい。

また、生成した SLIM データに関する精度検証のため、SLIM 曲面と入力点群の誤差を計算する機能を開発した。演算結果を下図の様にカラー表示できるようになっており、誤差の量も定量的かつ直感的に把握できる。



初期の実装



今年度の研究成果による改良

赤：SLIM 曲面が入力点群より膨らんでいる部分

青：SLIM 曲面が入力点群よりへこんでいる部分

ダイナミックレンジ： $\pm 0.1\text{mm}$

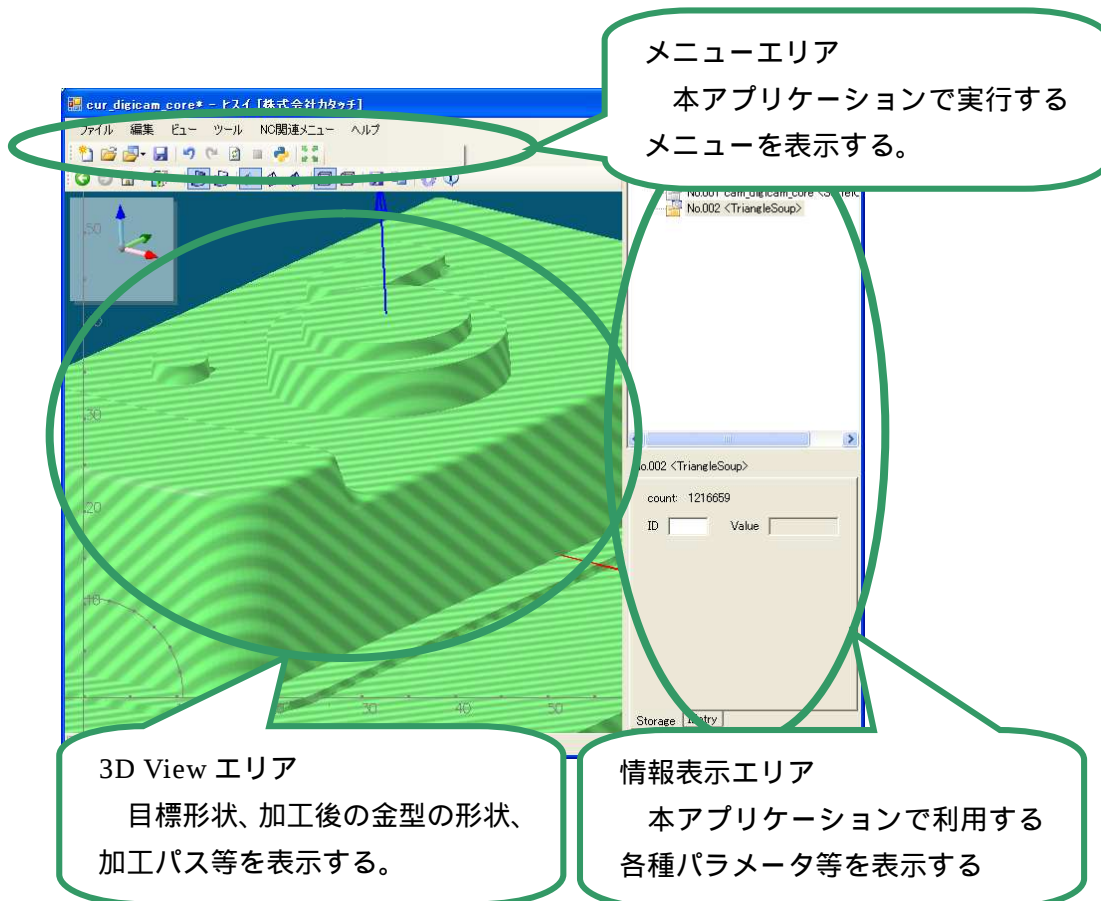
この図からも、今年度の研究成果により、SLIM による点群からポリゴンへのフィード

バックの技術が向上していることが分かり、今後の更なる研究による実用化・事業化への発展が望まれる。

2 - 2 - 3 モデリング機能、連携のための基本機能

(1) 画面レイアウト、操作メニューの設定

本年度の開発においては、要素技術のフィジビリティスタディが主眼とし、インターフェース周りは開発の利便性を優先した。今後、開発を進めていく段階で、必要に応じたインターフェースの設計・開発を行う予定である。



(2) NC プログラム読み込み機能の開発・改良

各加工機メーカーの NC プログラムフォーマットに対応できるように、工具の動きとそれに対応するコードの対応を外部ファイルに記述する仕様とした。

(3) カッターパスデータ構造の改良

カッターパスのデータ構造の改良を行い、カッターパスのブロック（行）毎にステータスを設定できる仕様とした。これにより、本システムにおいて読み込んだ NC プログラムと金型形状との位置関係を表現することが可能になる。

2 - 3 モデリング機能の検証

2 - 3 - 1 開発したシステムでの金型検証

デジカメモデル CAVI 入れ子



●デジカメモデル CAVI 入れ子 基準金型・検証金型の比較

上面と掘り込みとなる位置（淵）には、正確にエッジ（角部）形状が現れている。また、掘り込み内の円形部分もエッジが加工されている。2 面構成による角部は問題なく表現されている事が確認できた。

掘り込み内底面（平面部）に関しても、マシニングセンターでの走査線加工（X,Y 方向）削った跡が均一ピッチに並んでおり、歪みなどは確認できない。

ただし、曲面・フィレット部分に若干の面の粗さがあるが、精度設定が荒かったと考えられる。角部・平面部に関して、基準金型と比較しても金型精度として問題なしと確認できた。

デジカメモデル CAVI 入れ子

●デジカメモデル CORE 入れ子 基準金型・検証金型の比較

上面部分の平面部に関しても、マシニングセンターでの走査線加工（X,Y 方向）削った跡が均一ピッチに並んでおり、歪みなどは確認できない。

外周のガス抜き溝部分に角の崩れが確認できる。また、CAVI 側と押し切りになる四角い凸部

分（凸 2.01mm）の側面がダレたような形状になってしまっている。

ガス抜き溝部分に角の崩れや四角い凸部分の側面ダレは、狭小部・小段差問題であると考えられる。その他には特に問題は見られなかった。

幾何形状トレーモデル CAVI 入れ子

基準金型： 幾何形状トレーモデル CAVI 入れ子



検証金型： 幾何形状トレーモデル CAVI 入れ子



●幾何形状トレーモデル CAVI 入れ子 基準金型・検証金型の比較

掘り込み部分（淵）のエッジ（角）形状は、正確に表現されている。2 面構成による角部は問題なく表現されている。しかし、複数面構成による角部に歪みを確認することができる。3 面以上が交わる角（複数面構成による角部）の表現は、次期開発項目であるためである。

掘り込み部の底面（平面部）に関しては、デジカメモデル CAVI 入れ子同様に、歪みなどではなく、均一ピッチに加工ができている。

幾何形状トレーモデル CORE 入れ子

●幾何形状トレーモデル CORE 入れ子 基準金型・検証金型の比較

検証金型：デジカメモデル CORE 同様に、外周のガス抜き溝部分に角の崩れが確認できる。また、キャビナンバーの箇所では、上面（キャビナンバーの面）のエッジは得られているが、2 段

目部分の面が歪んでしまっている。

円形状部分も同様に歪みが確認できる。狭小部・小段差問題であると考えられる。円形状部分は CAVI 側との押し切り部であり、金型において押し切り面がこの様な状態の場合、成形を行った際に、バリを発生させてしまうことが懸念される。

SLIM を利用した金型製作（検証金型）

加工形状部位	金型評価	備考
平面部		デジカメモデル CAVI/CORE、幾何形状モデル CAVI/CORE 共に金型精度として問題なし。
円・円柱部	○	若干、面が粗いが問題なし。 一部、精度設定により面が粗くなってしまって箇所がある。 精度設定に関して検討する。
フィレット・曲面部	○	若干、面が粗いが問題なし。 一部、精度設定により面が粗くなってしまって箇所がある。 精度設定に関して検討する。
2 面構成による角部		デジカメモデル CAVI/CORE、幾何形状モデル CAVI/CORE 共に金型精度として問題なし。
複数面構成による角部	×	来期対応項目の為、今期末対応。 面の歪み・凹凸形状が確認できる。
狭小部・小段差		来期対応項目の為、今期末対応。 面の歪み・凹凸形状が確認できる。
・・・ 金型精度を満たしている。 ○・・・ おおよそ問題はないが、条件により面精度が落ちる。 ・・・ 条件により、金型精度を満たすことができない。引き続き研究開発が必要。 ×・・・ 金型精度を満たしていない。次期開発項目。		

評価金型デジカメモデル・評価金型幾何形状トレー共に、SLIM で不得意とされる 2 面構成角部が表現できており、通常金型と同様の精度が得られる事が確認できた。また、平面部分に関しても、従来の金型同様の表現・精度が得られた。

評価金型 幾何形状トレーから分かるように、複数面構成による角部の表現は、まだ金型精度を満たす事できていない。また、ガス抜き溝などの狭い範囲での段差などは、正確な形状表現に至っていない。（狭小部・小段差問題）

しかし、デジカメモデルに関しては、狭小部・小段差問題を除けば、ほぼ従来と同様の金型表現が出来ている事が確認できた。

基準金型と検証金型製作フロー

下図は、基準金型と試験金型製作における、金型設計から加工開始までのおおよその実稼動日数を示した。

加工設計において、幾何学を意識することなく柔軟な形状変形（抜き勾配やミスマッチ etc）が可能であり、金型設計・加工設計の大幅な時間短縮が見込める。

さらに CAE との親和性の利点から、金型設計において樹脂流動解析や構造解析などを行う場合は、従来金型制作期間に比べてさらなる時間短縮が可能である。

2 - 3 - 2 CAE システムとの連携及び評価

1. 研究目的

本研究では、レーザスキャナにより得られた実際に工作された曲がり外板の 3 次元点群データと NURBS で規定される曲面形状を有する設計データを比較し、その誤差を可視化することで曲面全体の工作精度を評価するシステムの開発を目指す。

2. 提案システム

本研究で開発したシステムの概要を図 1 に示す。また 2.1 から 2.5 で各プロセスを説明する。

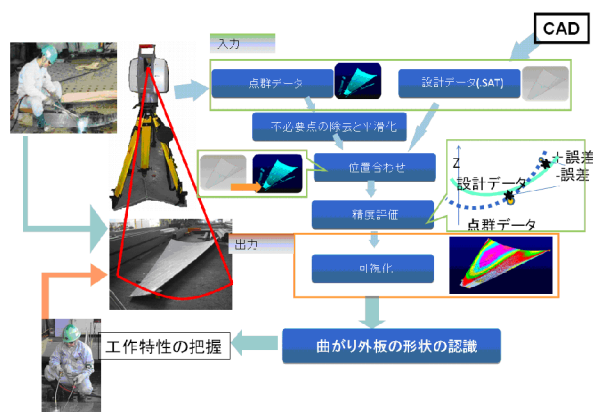


図 1. システム概要図

2.1 入力データ形式

入力するデータとして点群データと設計データを用いる。点群データはレーザスキャナにより計測される 3 次元座標値と色の輝度を保持するテキストデータを用い、設計データは ACIS をカーネルとした CAD の標準ファイル形式である SAT ファイルを用いる。SAT 形式では曲線及び曲面が NURBS¹⁾で描かれる。

2.2 外れ値除去と平滑化及び不必要点群の除去

計測点群は真の値を中心としてばらつきを含み、そのばらつきを小さくするため移動最小二乗法²⁾による平滑化処理を行う。また想定外のばらつきを持つものに対しては平面基準の外れ値処理³⁾を行う。加えて、計測点群には外板以外の部材や定盤が含まれ、これらの除去に領域成長法⁴⁾を用いる。

2.3 位置合わせ

位置合わせのための基準となる特徴として端部(シームとバット)を利用する。まず、計測点群から端点を抽出し、隣接 2 点間の中点を位置、距離を重みとし、外板全体の重心と慣性主軸を計算する。最後にそれらが重なるような平行移動と座標変換を行う。

2.4 誤差計算

重なり合った点群と設計曲面までの距離を誤差とする。点と NURBS 曲面の距離は非線形最適化問題であり、本システムではニュートン法を用いて解を求める。

2.5 誤算の可視化

計算された誤差に対しては、以下の方法で可視化する。1)誤差平均を真緑とし、負の最大誤差から正の最大誤差まで、青緑赤の順に配色を行うグラデーション表示、2)誤差を階級に分け、隣接階級毎にコ

コントラストの強い色を用いるコンタ表示、)横軸を誤差階級、縦軸を度数としたヒストグラム表示、)見通し上の誤差の断面表示の 4 種類の方法を用いる。

3. ケーススタディ

ケーススタディでは、実際の曲がり外板の評価を行う。今回計測を行うのは、図 2 左に示す曲がり外板である。計測された点群を上から見た図が図 2 右である。

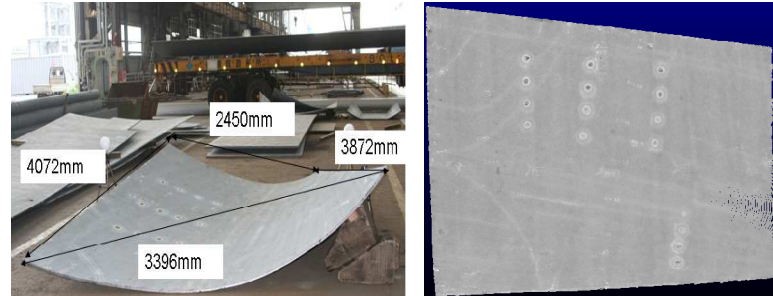


図 2. 曲がり外板の概観

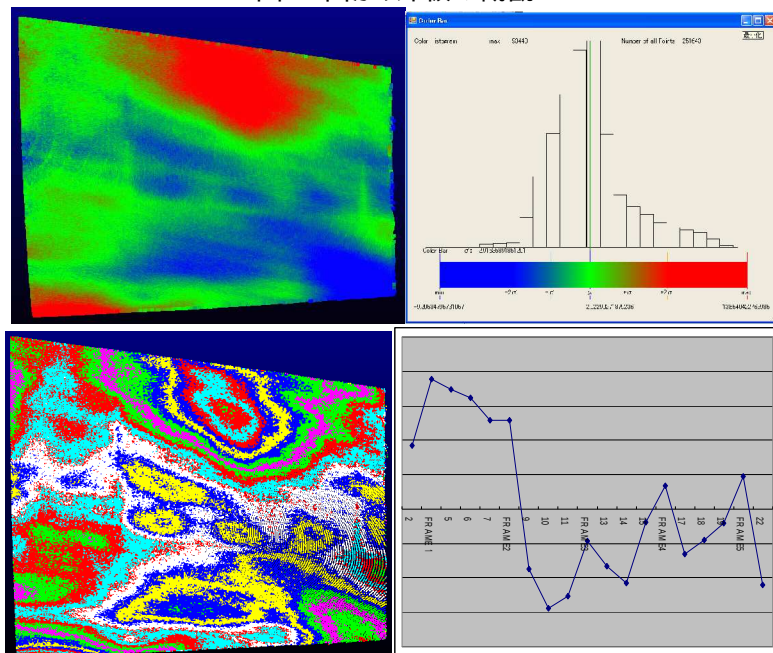


図 3. 評価結果(右下の縦軸目盛は 0.5mm、横軸は見通し上の位置)

本システムを用いて評価した結果を図 3 に示す。左上にグラデーション表示、左下にコンタ表示、右上に誤差ヒストグラム、右下に見通し上の誤差の断面表示を示す。図 3 左下の図の中央に横長の楕円が横に並ぶ様子が見えるが、これはそれぞれ木型間に対応する。この部分について見通し線上の部分のみを定量的に示したのが右下のグラフであり、木型の位置で局所的に凸である傾向が見て取れ、木型と木型の間の位置における最大落差は 2mm に及ぶ。

4. 結論

レーザスキャナにより計測された点群と設計データを比較することで、現状では計測不可能な自由曲面形状を有する曲がり外板表面全体の工作精度評価システムを開発した。また、実際の曲がり外板を計測することにより、曲げ型位置では局所的に 1mm 前後の凸形状になるという知見を得た。

今後の展望としては、設計システムに取り込むために、実際の点群データに曲面パッチをはり、設計データを形成することを考える。

参考文献

- 1) Les Piegl and Wayne Tiller: The NURBS Book 2nd Edition, Springer, 1996

- 2) Levin: Mesh-independent surface interpolation, Geometric modeling for Scientific Visualization, 2003, pp37-49
- 3) Markus Gross, Hanspeter Pfister: Point-based Graphics, Morgan Kaufmann pub,2007
- 4) David A. Forsyth, Jean Ponce: コンピュータビジョン ,共立出版株式会社 ,2007 ,pp539-540

第3章 全体総括

本研究は次の3項目を目標に実施している。

- 日本のものづくりに適したモデリング機能の実現
金型製作にかかる期間を30%削減する
- データ変換トラブル削減
エラーをほぼゼロにする
- 実体から3次元CADデータを作成
2番型の製作時間を半減させる

本年度は上記の目的を達成するための足固めとして以下の3項目を推進した。

1.モデリングに関する調査・システム設計

金型に必要なシステム要件を取りまとめる。また、現在実用されているシステムで金型を作り、設計、製作間での問題を把握すると同時に、出来上がった金型を評価基準とする。

2.モデリングに関するシステム開発

ベースとするプラットフォーム(HISUI)を改修し、SLIMの機能拡張を実施した。具体的には稜線の創生、点群・STL・NCデータの読み込み、SLIMからポリゴンメッシュへの変換、STLの出力などである。

3.モデリング機能の検証

開発しているシステムが現状殿程度のパフォーマンスを持っているのかを検証し、目標としている3項目を3ヵ年で実現できるのかを見通した。

1.に関しては金型システムに必要な要件をまとめ、それに対応する機能をまとめた。その結果、エッジの創生を最重要項目として開発することにした。これは当初の計画として考えていたことであり、想定範囲内であった。

2.に関しては処理速度と今後のコンピュータの進歩を考えた64ビット対応、WPF、GLSL、OpenGLなどへの対応、データ構造の再構築などを実施した。その上でエッジの創生を中心に開発を進めた。

3.では2.の結果を現段階で評価した。評価に当たっては1.で製作した基準金型と同じものを設計、製作した。その結果、ポイントとなっているエッジ創生に関して2面構成角部は十分な成果が得られた。しかし、複数面構成による角部は十分な機能を達成できなかった。しかし、解決する手法はほぼ見てきたので、次年度には完了すると考えられる。

その他の形状に関しては狭小部、小段差部位に関して若干の問題が発生している。この点に関しても、形状作成に用いる点の数を増やすことなどで対応可能と考えられる。また、点を増やすことで増大する演算量は64ビット化で大きな問題にならないと推察できる。

データ交換の問題に関しては今回試した限りでは、エラーはまったくなかった。データ交換時

のエラーは様々な条件が重なって引き起こされることが多いため、もっと多くの検証作業が必要と思われるが、当初の思惑通りの冗長性を具備していると考えてよいと判断している。

これらの成果から基準金型で 13 日かかった設計、生産まで（実加工時間は除く）の期間が、現段階で 10 日程度まで短縮できた。今年度の成果をさらに発展させ、簡単に活用できる 3 次元モデルの変形機能を作りこみ、CAE などの周辺ツールとの連携技術を確立すれば、7.5 日程度まで短縮できると考えられる。

今回の開発の大目的の一つである実体から 3 次元モデルを創生するという点に関しては、可能性の検証にとどまっている。

しかし、ほぼ今期の目標は達成できたと考えている。

この結果を受けて、次年度以降は今期開発した事項を発展、安定させ、基本的なモデル変形機能を開発していく計画である。