

## リバーエンジニアリングにおける3D CAD/CAMデータ作成支援ツールの開発

安田 星季, 万城目 聡, 神生 直敏, 櫻庭 洋平, 岩越 睦郎  
 浦田 昇尚\*, 伊達 宏昭\*, 金井 理\*, 後藤 孝行\*\*

## Development of 3D CAD/CAM Data Creation Support Tools for Reverse Engineering

Seiki YASUDA, Akira MANJOME, Naotoshi KAMIO  
 Yohei SAKURABA, Mutsuro IWAKOSHI  
 Akihisa URATA\*, Hiroaki DATE\*, Satoshi KANAI\*, Takayuki GOTOH\*\*

## 抄 録

製品開発を効率的に進めるためのプロセスの一つである「リバーエンジニアリング」(以下, RE)では各種のデータを作成する。これらのデータは, 現物の素材や形状に応じた作業方法を選択しながら作成するため, 多くの時間を要している。本研究では, このデータ作成時間を短縮するため, 4つのデータ作成支援ツール(マニュアル1種, ソフト3種)を開発した。また, データ作成に特に多くの時間を要する鋳造品を対象として, 開発ソフトの効果を検証する実験を行い, RE全体のデータ作成時間の短縮に有効であることを確認した。

**キーワード:** リバーエンジニアリング, 非接触3次元測定, 3D CAD/CAM, 鋳造品

## Abstract

“Reverse engineering” is one of the process that advance the product development efficiently. In reverse engineering process, a few kinds of data are created and most of these data creation works are performed manually, so it takes a lot of time.

In this study, we developed four data creation support tools (1manual, 3software), in order to shorten the data creation work time in the process. And we also performed a verification experiment to confirm the effect of the developed software, and we found that it is effective to shorten the time.

**KEY-WORDS :** Reverse Engineering, Non-Contact 3D Measurement, 3D CAD/CAM, Castings

## 1. はじめに

製品開発を効率的に進めるため, 3次元データを用いた「3Dものづくり」が普及してきている。

「3Dものづくり」を行うためには, 3次元CADデータが不可欠である。椅子などの手加工による試作品の3次元CADデータは, 現物やクレイモデルの形状を非接触3次元測定機などで測定し, それを基に3次元CADソフトで作成することが多い。椅子の試作品例を図1に示す。そのほかに, 図面がない古い部品や手作業で修正された部品も, 現物の形状を

参照して3次元CADデータを作成する場合がある。

このように, 現物の形状を参照して3次元CADデータを作成する製品開発プロセスを, 「リバーエンジニアリング」(以下, RE)と言う。

REでは, その工程の中で複数のデータを作成するが, これらのデータは, 現物の素材や形状



図1 椅子の試作品

\* 北海道大学, \* Hokkaido University

\*\* 旭川工業高等専門学校, \*\* Asahikawa National College of Technology

事業名: 重点研究

課題名: リバーエンジニアリングの迅速化を図る3次元CAD/CAMデータ作成支援システムの開発

に応じて、人が作業方法を選択しながら作成することが多いため、多くの時間を要している。製品開発期間を短縮するためには、REの迅速化が必要である。

本研究では、REにおけるデータ作成時間を短縮するため、4つのデータ作成支援ツール（マニュアル1種、ソフト3種）を開発した。また、開発した支援ツールの内の、3つのソフトの効果を検証した。

## 2. リバースエンジニアリングで作成するデータ

REの作業工程と各工程で作成されるデータを図2に示す。

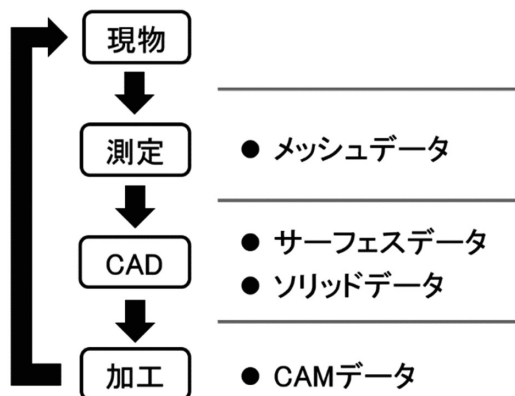


図2 REの作業工程と各工程で作成されるデータ

REは大まかに、「測定」、「CAD」、「加工」の3工程に分けられる。「測定」工程では、現物を測定し、形状データを取得する。「CAD」工程では、各種のCADソフトを用いて3次元CADデータを作成する。「加工」工程では、3次元CADデータを元に加工を行い、再度現物を製作する。

「測定」工程で作成するメッシュデータは、非接触3次元測定などで得られた測定点群データをつなぎ合わせて作成される三角形メッシュの集合で、一般的に数十万～数百万個の三角形メッシュで構成される。

「CAD」工程で初めに作成するサーフェスデータは、メッシュデータに近似した曲面の集合で、メッシュデータに比べて軽量である。

次にサーフェスデータを参照して作成するソリッドデータは、体積を持った3次元CADデータで、円筒や直方体などの基本形状とそれ以外の自由曲面形状からなる。

「加工」工程で作成するCAMデータは、NC加工機を動かすNCプログラムを作成するデータで、CAMソフトで作成する。

上記の各データの例を図3に示す。本研究では、これら4つのデータ作成作業を対象とした。

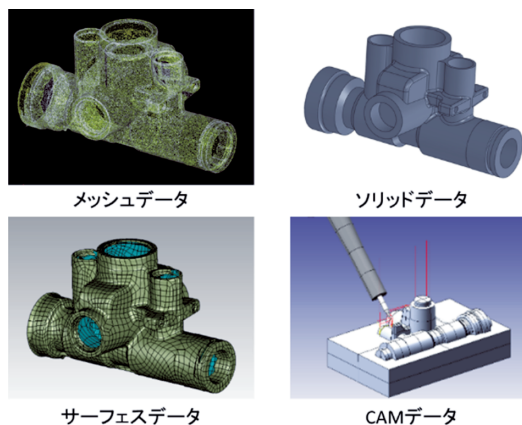


図3 REで作成するデータ例

## 3. 目的

### 3.1 REにおけるデータ作成作業の時間短縮に関する課題

REにおけるメッシュデータ作成からソリッドデータ作成までの工程では、作成するデータの「品質」と「容量」が後工程の作業時間に影響する。メッシュデータの品質が低いと、後工程のサーフェスデータ作成工程においてデータの補修作業が必要となるため、作業時間が増加する。サーフェスデータの容量が大きいと、後工程のソリッドデータ作成工程においてソフトの描画などの処理時間が増加するため、作業時間が増加する。このことから、データ作成時間を短縮するためには、高品質なメッシュデータと軽量のサーフェスデータを作成する必要がある。

また、加工で必要となるCAMデータの作成では、荒加工などの加工方法の選択や加工手順の決定など、人が試行錯誤しながらデータを作成するため、多くの時間を要する。このことから、CAMデータ作成時間を短縮するには、一度作成したデータを再利用するなどして、作業を効率化する必要がある。

以上のことから、REのデータ作成時間を短縮するには、これまでの経験で獲得した作業方法に関する多くの知見や、過去に作成した最適なデータなどを活用して、作業を効率化する必要がある。

### 3.2 鋳造品のデータ作成作業の時間短縮に関する課題

鋳造品は自由曲面形状の部分が多く、穴加工などの機械加工が行われるため、複雑な形状の部品が多い。このため、鋳造品のREにおけるデータ作成作業には特に多くの時間を要する。また、鋳造品はREのニーズの高い部品である。2010年4月～2014年3月に当試験場のRE関連設備を使用してサーフェスデータを作成した件数は146件であり、そのうち約30%が鋳造品だった。また、そのうち約7%が機械加工がある部品だった。

鋳造品のREにおけるデータ作成時間を短縮するためには、

サーフェスデータの容量が増大する原因となる部位のデータを分離するなどして、作業を効率化する必要がある。

本研究では、上記の課題を解決するためのツール開発を目的とした。

#### 4. 開発したデータ作成支援ツール

本章では、4種類のデータ作成作業を支援するために開発した4つのデータ作成支援ツールについて述べる。

##### 4.1 非接触3次元測定実践マニュアル

###### 4.1.1 高品質なメッシュデータ作成の課題

サーフェスデータ作成の作業時間を短縮するためには、高品質なメッシュデータを作成する必要がある。

メッシュデータの品質に大きく影響する要素は2つあり、その一つは測定データの欠損・ノイズである。非接触3次元測定では、測定方式の特性により、測定物に光沢があるとハレーションが起り、測定データに欠損やノイズが生じる場合が多い。この欠損・ノイズが多いとメッシュデータの品質が低くなる。二つめは、測定データのつなぎ合わせ誤差である。メッシュデータ作成工程では、複数の測定データをつなぎ合わせて測定物全体のメッシュデータを作成するため、その誤差が大きいとメッシュデータの品質が低くなる。特に、測定データに位置合わせの手掛かりがない場合は大きな誤差が生じやすい。

これらのことから、高品質なメッシュデータを作成するためには、非接触3次元測定において欠損・ノイズが少ない測定点群データを取得し、測定データのつなぎ合わせ誤差を最小化する必要がある。

上記の課題を解決するための作業方法を示した「非接触3次元測定実践マニュアル」を作成した。作成したマニュアルを図4に示す。



図4 非接触3次元測定実践マニュアル

###### 4.1.2 マニュアルの内容例 一反射防止塗装見本一

測定物の光沢による測定データの欠損・ノイズを削減するため、測定物に反射防止剤を塗布することが多い。しかし、反射防止塗装の膜厚が薄く、下地を透過する部分があるとそこに欠損・ノイズが残る。そこで、反射防止剤を適切に塗布するための反射防止塗装見本を作成した。

光沢素材（鏡面仕上げのステンレス板、厚さ1mm）と透明素材（透明アクリル板、厚さ2mm）に反射防止剤を膜厚約5μm、約10μm、約15μm、約20μm、約30μmで塗布して、それぞれのデータ取得率を調べた。なお、膜厚は1回塗り、2回塗りなど塗装回数を変えて作成した見本の塗装部と無塗装部の境界を、実体顕微鏡（オリンパス製、SZX16）で断面観察して確認した。これにより、光沢素材に膜厚10μmの反射防止塗装をした場合のデータ取得率は、膜厚30μmに比べて約80%であることなどがわかった。作成した塗装見本と各塗装見本のデータ取得率をまとめたものを図5に示す。

これらの資料を参考にして、薄過ぎず、厚過ぎないように適切に反射防止塗装することで、非接触3次元測定で欠損・ノイズが少ない測定データを取得できるようになった。

透明素材			光沢素材		
無塗装	塗装見本	測定データ取得割合(平均)	無塗装	塗装見本	測定データ取得割合(平均)
		約5% (最大12%)			約50% (最大95%)
		約60% (最大90%)			約80% (最大100%)
		約95% (最大100%)			約95% (最大100%)
		約100%			約100%
		100%			約80% (最大100%)

図5 塗装見本とデータ取得率

上記内容のほか、本マニュアルには下記のような情報を掲載した。

- 測定データが欠損しやすい素材と対策方法
- 測定方法選択チャート
- 位置合わせ補助器具の使用方法

本マニュアルを参考にすることで、欠損・ノイズが少ない測定データを取得し、測定データのつなぎ合わせ誤差を最小化できるようになり、非接触3次元測定の経験が浅い作業者でも高品質なメッシュデータを作成できるようになった。

##### 4.2 コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト

###### 4.2.1 軽量のサーフェスデータ作成の課題

ソリッドデータ作成の作業時間を短縮するためには、軽量のサーフェスデータを作成する必要がある。

サーフェスデータは、メッシュデータに近似した曲面の集

合であるため、メッシュデータとの間に差が生じるが、データを軽量にしようとするとその差が大きくなる。メッシュデータとの差が小さく、軽量のサーフェスデータを作成するためには、サーフェスデータ作成ソフトにおいて適切な手順でコマンドを実行し、各コマンドのパラメータを適切に設定する必要がある。しかし、一般的なサーフェスデータ作成ソフトには、作業中に実行したコマンドや各コマンドで設定したパラメータを表示し、確認できる機能がない。

そこで本研究では、代表的なサーフェスデータ作成ソフトの一つであるStudio 2012 (Geomagic製)を対象に、ソフトのコマンド履歴や設定パラメータ、サーフェスデータとメッシュデータの差を可視化する「コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト」を開発した。

#### 4.2.2 「コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト」の機能

本ソフトは、サーフェスデータ作成ソフトが出力する操作ログファイルから、作業者が選択したコマンドや設定したパラメータ、サーフェスデータとメッシュデータの差の計算結果を抽出して画面に表示する。ソフトの画面例と機能の概要を図6に示す。そのほかに以下の特徴がある。

- 作業中のリアルタイムの情報を表示するモードと、過去に行った作業の情報を表示するモードがある。
- 過去に行った作業の情報に対し、メッシュデータとの差などに大きく影響する重要なコマンドのハイライト表示、不要なコマンドの非表示などができる。
- 抽出した情報および上記の表示状態を保存できる。

本ソフトにより、熟練者などが一度行った作業のコマンド履歴を作業の見本として参照できるほか、作成中のサーフェスデータとメッシュデータとの差をリアルタイムに把握できる。これらの機能により、メッシュデータとの差が小さく、軽量のサーフェスデータを効率的に作成できるようになった。



図6 ソフトの画面例と機能の概要

### 4.3 CAMデータ作成支援ソフト

#### 4.3.1 CAMデータ作成作業の効率化の課題

CAMデータ作成工程では、荒加工などの加工方法の選択や加工手順の決定、工具回転数などの加工パラメータの入力、

加工範囲などを規定する補助図形の作成作業などに多くの時間を要している。多くのCAMソフトにはこれを解決する方法として、一度選択した加工方法と決定した加工手順、入力した加工パラメータを保存し、これらを必要な際にCAMソフトに読み込み、再利用できる機能が用意されているが、加工パラメータを一覧表示できない、一度作成した補助図形を読み込めないなど、一部に使いつらい点があった。

そこで本研究では、加工方法などの設定を再利用できるCAMソフトの一つであるhyperMILL 2012 (OPEN MIND Technologies製)を対象に、これらの点を改善した「CAMデータ作成支援ソフト」を開発した。

#### 4.3.2 「CAMデータ作成支援ソフト」の機能

本ソフトは、CAMソフトで選択した加工方法や決定した加工手順、入力した加工パラメータ、作成した補助図形などを保存したテキストファイルから、加工方法、加工手順、加工パラメータを読み出して画面に一覧表示する。また、補助図形を保存するファイルのパスを読み出し、補助図形をソフト内に保持する。そして、必要な際にこれらのデータをCAMソフトに一括入力できる。ソフトの画面例と機能の概要を図7に示す。その他に以下の特徴がある。

- ソフト上で上記のテキストファイルのコピー、削除などができる。
- 一覧表上で加工パラメータを変更できる。

本ソフトにより、一度選択した加工方法と決定した加工手順、入力した加工パラメータを一覧表示したり、変更したりできるほか、一度作成した補助図形をCAMソフトに容易に読み込めるようになったことにより、CAMデータを効率的に作成できるようになった。



図7 ソフトの画面例と機能の概要

### 4.4 鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト

#### 4.4.1 鋳造品の軽量のサーフェスデータ作成の課題

複雑形状が多いため、REのデータ作成に特に多くの時間を要する鋳造品は、サーフェスデータの容量が増大する原因となる部位のデータを分離するなどして、作業を効率化する必要がある。

サーフェスデータの容量が大きくなる主な要因は、非接触

3次元測定で測定不可能な、穴の内側などに多く発生する「メッシュの欠損」である。こうした部分に曲面を作成すると、大きく歪んだ曲面が数多く生成されるが、大きく歪んだ曲面は歪みの小さい曲面に比べて曲面を定義するデータ量が大きい。このため、曲面の集合であるサーフェスデータの容量が大きくなる。図8に大きく歪んだ曲面の例を示す。

したがって、軽量のサーフェスデータを作成するためには、データの容量を増大する原因となるメッシュの欠損部を分離し、曲面を作成しないようにする必要がある。

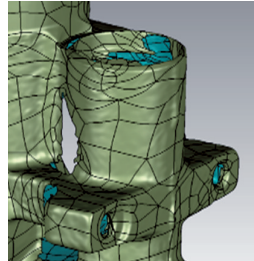


図8 大きく歪んだ曲面

そこで本研究では、メッシュの欠損が生じやすい機械加工領域と鋳肌領域に分離できる「鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト」を開発した。

#### 4.4.2 鋳肌領域・機械加工領域分離手法<sup>1)</sup>

鋳肌領域・機械加工領域分離手法の流れを図9に示す。本手法は、メッシュの粗さ値（メッシュごとの面粗さを表す指標）の推定と機械加工領域抽出と面分類からなる。

メッシュの粗さ値推定では、入力メッシュの法線と平滑化処理したメッシュの法線の差を評価し、すべてのメッシュの粗さ値を推定する。法線の差の概念図を図10に示す。

機械加工領域抽出では、前工程で推定した粗さ値が比較的小さいメッシュに対し、機械加工による代表的な形状の一つである円筒を近似し、近似した円筒のパラメータ（軸方向、半径、中心座標）を求めると同時に、入力メッシュから機械加工領域のメッシュを抽出する。

面分類では、前工程で近似した円筒の半径が、部品を取り囲む最小の直方体の、2つの異なる頂点と直方体の重心を通る対角線よりも大きい領域を平面に分類する。また、前工程で誤って機械加工領域に分類された鋳肌領域を、領域内に点在する空白領域の数を評価することにより、再度正しく鋳肌領域に分類する。

上記の流れにより、入力メッシュを平面、円筒面、鋳肌面メッシュに分離し、そのうち平面と円筒面メッシュが機械加工領域と判断され、鋳肌面メッシュが鋳肌領域と判断される。分離結果の例を図11に示す。

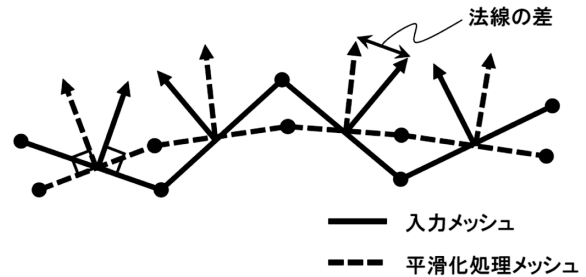


図10 法線の差

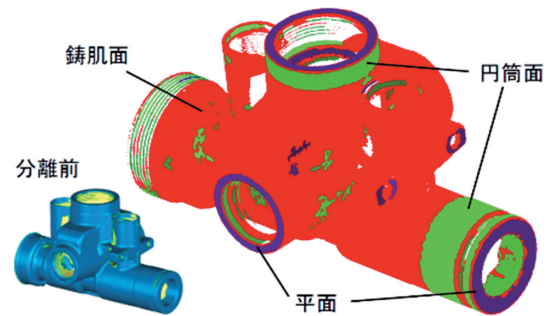


図11 分離結果の例

本ソフトにより、鋳造品のメッシュデータを機械加工領域と鋳肌領域に分離し、サーフェスデータ作成ソフトにおいて鋳肌領域のみに曲面を作成することで、REのデータ作成作業に多くの時間を要する鋳造品のサーフェスデータを軽量化できるようになった。

## 5. 検証実験

REのデータ作成作業に多くの時間を要する鋳造品を対象に、本研究で開発した3つのソフトの効果を検証する実験を行った。

### 5.1 実験で使用したRE関連機器およびデータ作成ソフト

実験で使用したRE関連機器を図12に示す。

実験では、現物を測定する機器として非接触3次元測定システム（Steinbichler製、COMET5）、現物を製作する機器として5軸NC加工システム（庄田鉄工製、NC7000U-1631X）を使用した。

また、メッシュデータを作成するソフトとしてCOMET Plus 9.6（Steinbichler製）、サーフェスデータを作成するソフトとしてStudio 2012（Geomagic製）、ソリッドデータを作成するソフトとしてSolidWorks Professional 2012（SolidWorks製）、CAMデータを作成するソフトとしてhyperMILL 2012（OPEN MIND Technologies製）を使用した。

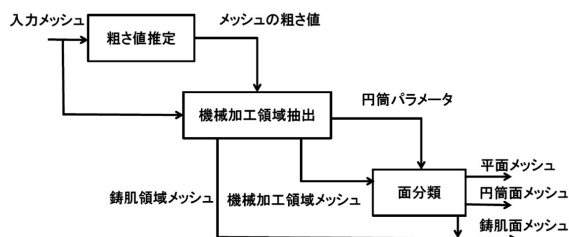


図9 分離手法の流れ

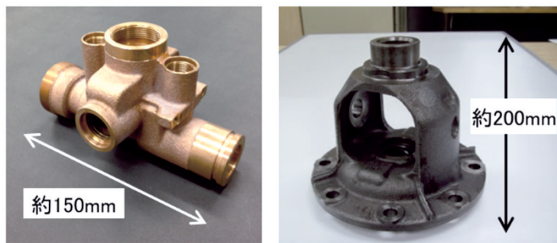


非接触3次元測定システム 5軸NC加工システム

図12 実験で使用したRE関連機器

## 5.2 実験方法

実験は、現物を元にバルブ部品の木型を製作する例と、現物を元にデフケースの発泡模型を製作する例の2例を行った。実験に用いたバルブ部品とデフケースを図13に示す。



バルブ部品 デフケース

図13 バルブ部品とデフケース

各例について、開発ソフトを使用しない場合と使用した場合のデータ作成時間を計測した。開発ソフトを使用しない場

合は、前記の4つのデータ作成ソフトのみを用いてデータ作成を行い、開発ソフトを使用する場合は、開発ソフトを使用しない場合のデータ処理の流れに開発ソフトを組み込んでデータ作成を行った。検証実験におけるデータ処理の流れを図14に示す。

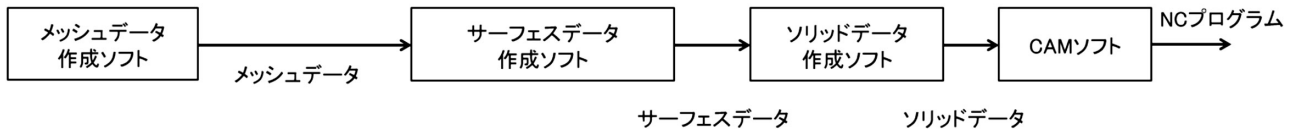
開発ソフトの効果は、開発ソフトを使用しない場合と使用した場合のRE全体のデータ作成作業時間を比較して検証した。

なお、被験者は熟練者2名（CAMデータ作成作業は1名）とし、被験者に下記の作業を、開発ソフトありの場合となしの場合で各1回行わせ、その平均作業時間を求めた。各データ作成作業の内容を以下に示す。

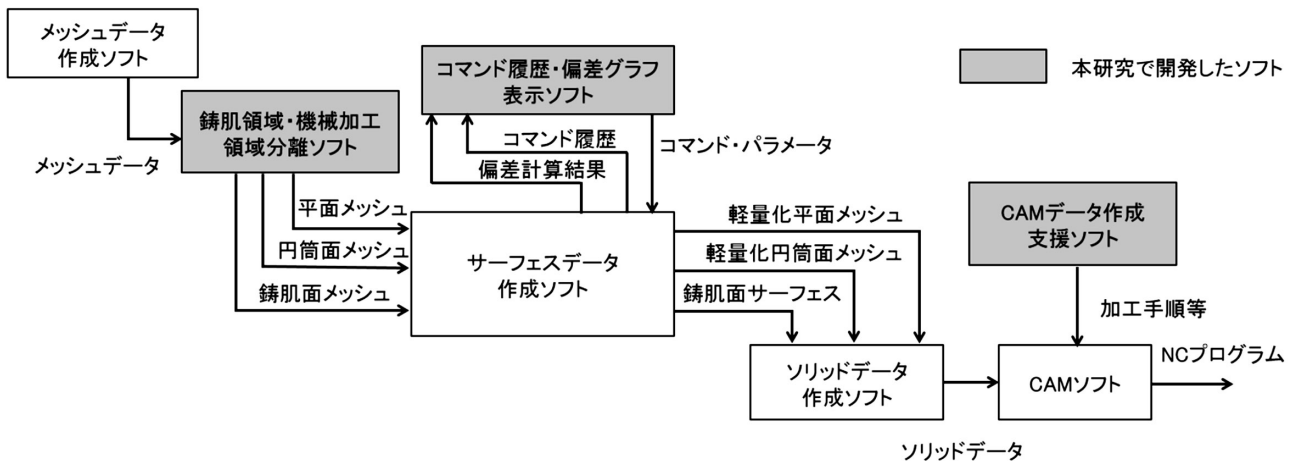
### 5.2.1 メッシュデータ作成作業

非接触3次元測定システムを用いて対象物を測定し、メッシュデータ作成ソフトによりメッシュデータを作成した。非接触3次元測定の主な測定条件を表1に、デフケースの測定の様子を図15に示す。

開発ソフト使用の場合は、メッシュデータを「鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト」に読み込み、メッシュデータを平面、円筒面、鋳肌面メッシュに分離し、メッシュごとに計3つのデータファイルを作成した。



### 開発ソフトなし



### 開発ソフトあり

図14 検証実験におけるデータ処理の流れ

表 1 非接触 3 次元測定のための測定条件

反射防止スプレー	マークテック製, スーパーチェック現像液 UD-ST
反射防止塗装膜厚	約 30 μm
1ショットの測定精度	±20 μm
測定ショット数	16
測定データのつなぎ合わせ誤差	約 ±3 μm

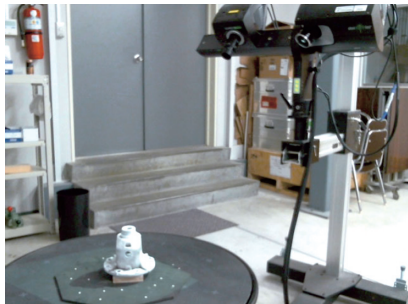


図15 デフケースの測定の様子

### 5.2.2 サーフェスデータ作成作業

サーフェスデータ作成ソフトにメッシュデータを読み込み、サーフェスデータを作成した。データ作成にあたっては被験者に下記の条件を提示した。

- 曲面とメッシュデータとの差が、おおむね±0.5mm以下であるデータを作成する。
- サーフェスデータ作成ソフトにおいて補修が困難なメッシュデータの欠損部は対象外とする。

開発ソフト使用の場合は、鋳肌領域（鋳肌面メッシュ）のみのサーフェスデータを作成し、機械加工領域（平面、円筒面メッシュ）はメッシュ数を削減して軽量化したメッシュデータを作成した。また、開発ソフト使用の場合は、「コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト」で作業の見本となるコマンド履歴情報を参照しながら作業を行った。

### 5.2.3 ソリッドデータ作成作業

ソリッドデータ作成ソフトにサーフェスデータを読み込み、ソリッドデータを作成した。データ作成にあたっては被験者に下記の条件を提示した。

- ソリッドデータとサーフェスデータとの差が、おおむね±0.5mm以内であるデータを作成する。
- 自由曲面形状は含まず、基本形状のみで構成する。
- 鋳物の縮み代の補正、機械加工の加工代の追加を行う。
- バルブ部品は木型製作用のデータを作成する。

開発ソフト使用の場合は、ソリッドデータ作成ソフトに機械加工領域の軽量のメッシュデータと鋳肌領域のサーフェスデータを読み込み、ソリッドデータを作成した。

### 5.2.4 CAMデータ作成作業

CAMソフトにソリッドデータを読み込み、CAMデータを作成した。データ作成にあたっては被験者に下記の条件を提示した。

- 素材：ケミカルウッド（バルブ部品の木型）、発泡スチレン（デフケースの発泡模型）
- 理論仕上げ面粗さ（カスプハイト）：0.05mm（バルブ部品の木型）、0.1mm（デフケースの発泡模型）
- 凹部の最終仕上げはR0.5mmのボールエンドミルを使用する。

開発ソフト使用の場合は、一度作成した補助図形などを「CAMデータ作成支援ソフト」からCAMソフトに一括入力して作業を行った。

### 5.3 実験結果

実験結果を図16に示す。

開発ソフトを使用しない場合と使用した場合のRE全体のデータ作成時間を比較した結果、バルブ部品の例では開発ソフトを使用した場合は、平均作業時間が22%短くなった。また、デフケースの例では、平均作業時間が25%短くなった。

このことから、開発ソフトはREのデータ作成時間の短縮に有効であることを確認した。

なお、参考までに実際に5軸NC加工システムを用いて現物を製作した。製作した木型と発泡模型を図17に示す。

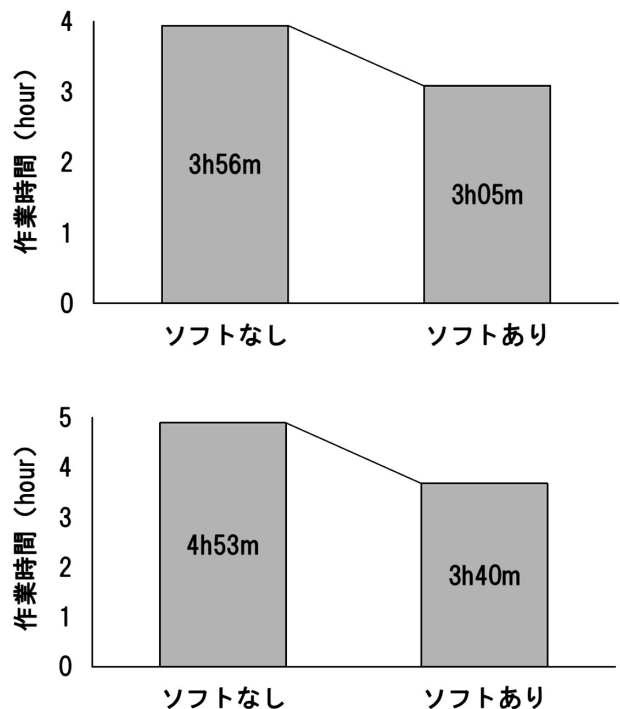
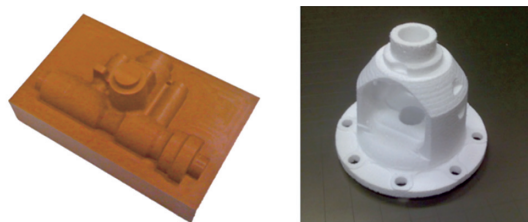


図16 実験結果

(上：バルブ部品, 下：デフケース)



バルブ部品の木型

デフケースの発泡模型

図17 製作した木型と発泡模型

## 6. まとめ

本研究では、REにおけるデータ作成時間を短縮するため、REのデータ作成作業を支援する下記の4つのツールを開発した。

- ① 非接触3次元測定実践マニュアル
- ② コマンド履歴・偏差グラフ表示ソフト
- ③ CAMデータ作成支援ソフト
- ④ 鋳肌領域・機械加工領域分離ソフト

また、REのデータ作成作業に比較的多くの時間を要する鋳造品を対象として、RE全体のデータ作成時間に対する開発ソフトの効果を検証する実験を行った結果、開発ソフトを使用した場合は使用しない場合に比べて平均作業時間が約25%短くなった。このことから、開発ソフトはRE全体のデータ作成時間の短縮に有効であることを確認した。

今後は、REに取り組む道内の企業や技術支援機関に対し、得られた成果の普及を図っていく予定である。

## 謝辞

本研究で使用した5軸NC加工システムは公益財団法人JK Aの機械工業振興補助事業により整備されました。記して感謝いたします。

## 引用文献

- 1) 浦田昇尚・伊達宏昭・金井理・後藤孝行・安田星季：鋳造品の迅速リバースエンジニアリングに関する研究一面粗さ推定法と鋳肌面分離性能の改善一，2015年度精密工学会春季大会講演論文集，(2015)