

高精度 5 軸加工のためのCAD/CAM活用技術と関連技術

安田 星季, 戸羽 篤也, 櫻庭 洋平, 岩越 睦郎, 中村 勝男

CAD/CAM using Technique and Related Technology for High Precision 5-axis Machining

Seiki YASUDA, Atsuya TOBA, Yohei SAKURABA,
Muturo IWAKOSHI, Katsuo NAKAMURA

抄 録

5 軸加工は、複雑な形状を高精度かつ迅速に加工できるため、製造業において注目されている。5 軸加工を高精度に行うためには、5 軸加工やCAD/CAMソフトの特徴を理解し、適切な加工プログラムを作成する必要がある。また、実際の5 軸加工に関する技術や知識（ノウハウ）を蓄積・活用することが重要である。そこで本研究では、5 軸加工およびCAD/CAMソフトの重要な特長を抽出し、その特長について調査した。また、実際の5 軸加工に関するノウハウを蓄積し、活用するため、実際の5 軸加工に関するデータを収集・閲覧可能なシステムを開発した。

キーワード：5 軸加工, CAD/CAM

Abstract

5-axis machining is considered as an effective technology to form sophisticated shapes rapidly and accurately in Japanese industrial scenes. In order to perform high-precision 5-axis machining, it is necessary to understand the characteristics of 5-axis machining and CAD/CAM software, and to create an appropriate processing program.

The accumulation of knowledge and techniques for practical utilization in 5-axis machining is also required. We focused on distinctive features of 5-axis machining and CAD/CAM software and investigated them in detail.

A data collecting system is developed for recording a wide variety of data on 5-axis machining such as video or power consumption. We also developed data display software which shows a wide variety of recorded data on one display in PC.

KEY-WORDS : 5-axis machining, CAD/CAM

1. はじめに

周辺国の高度成長、顧客ニーズの多様化により、低コスト化、短納期化が進むなど、日本の機械加工業を取り巻く環境は非常に厳しくなっている。そうした中、日本の機械加工業において「5 軸加工」が注目されている。

5 軸加工は、複雑な形状を高精度かつ迅速に加工できるため、高付加価値の部品を迅速に加工できる方法とされている¹⁾。

また、5 軸加工機や5 軸加工用CAMソフトが高機能化する一方で、それらの低価格化が進むなど、5 軸加工を導入しやすい環境が整ってきている²⁾。

5 軸加工の加工精度や加工面品位には、加工時の工具の動きが大きく影響する。したがって、高精度な5 軸加工を行うためには、5 軸加工や5 軸加工に対応したCAD/CAMソフト（以下、CAD/CAMソフト）の特長を理解し、適切な5 軸加工プログラム（以下、5 軸加工パス）を作成する必要がある。

事業名：経常研究

課題名：高精度5軸加工のためのCAD/CAM活用の最適化技術（平成22～23年度）

一方で、実加工時の工具の動きや振動、加工面の表面粗さなどはシミュレーションで予測できない。したがって、高精度な5軸加工を行うためには、実加工に関する技術や知識(以下、ノウハウ)を蓄積し、活用する必要がある。

本研究では、5軸加工機のオペレーターが5軸加工およびCAD/CAMソフトの特長を理解し、適切な5軸加工パスを作成できるように、5軸加工およびCAD/CAMソフトの重要な特長を抽出し、調査した。また、5軸加工機のオペレーターが実加工のノウハウを蓄積・活用できるように、動画データなど実加工に関する数種類のデータを収集・閲覧可能なシステムを開発した。

2. 5軸加工およびCAD/CAMソフトの特長の調査

2.1 5軸加工の特長

2.1.1 同時5軸加工と固定5軸加工

5軸加工は同時5軸加工と固定5軸加工に大別される。同時5軸加工は、XYZの3軸同時移動に加え、工具軸を傾斜させながら加工する方法である。同時5軸加工による代表的な加工例であるインペラーを図1に示す。このような部品を3軸加工で加工すると多くの段取り替えが必要であり、非常に手間がかかるが、同時5軸加工で加工すると高精度かつ迅速に加工できる。

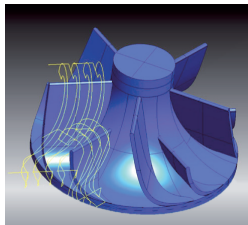


図1 インペラー

固定5軸加工は、位置決め動作のみに5軸動作を行い、切削時には2軸から3軸同時移動で加工する方法である。同時に移動する軸数が同時5軸加工よりも少ないため、加工精度や加工面品位が向上するとされている。また、同時5軸加工より5軸加工パスの計算時間が短くなる傾向がある。固定5軸加工のCAD/CAMソフト画面の例を図2に示す。

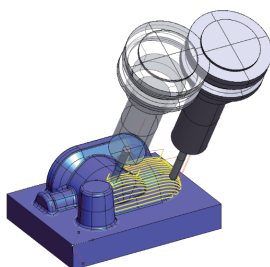


図2 固定5軸加工

2.1.2 回転工具先端の切削速度

回転工具の回転中心は切削速度がゼロになるため、工具の回転中心部で加工した加工面にはむしれ等が生じ、加工精度や加工面品位が低下する。5軸加工は加工面に対して工具を傾斜させることができるため、切削速度が遅い工具の回転中心部を避け、工具の切削速度が速い工具の外径部を使って加工することができる。加工面に対して工具を傾斜させた場合に工具の切削速度が速くなることを表す模式図を図3に示す。

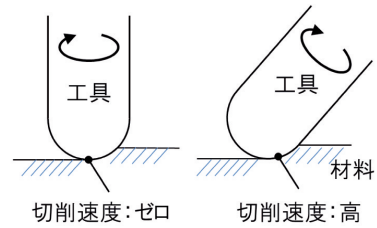


図3 加工面に対して傾斜した工具の切削速度

2.1.3 工具突き出し長さ

5軸加工は材料に対する工具の角度を変えることができるため、深い加工を行う場合などにおいて3軸加工よりも工具突き出し長さを短くすることができる。このため、工具系の剛性が向上し、加工精度や加工面品位が向上する。5軸加工と3軸加工との工具突き出し長さの違いを図4の模式図に示す。

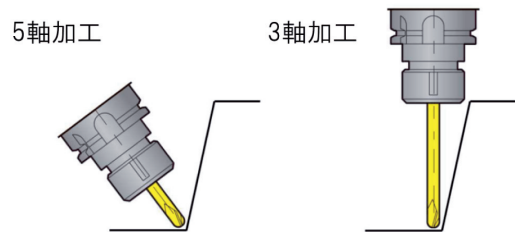


図4 工具突き出し長さの違い

2.2 5軸加工に対応したCAD/CAMソフトの特長

2.2.1 傾斜した座標系

5軸加工機で材料に対する工具の角度を変えて加工する場合、CAD/CAMソフトでは傾斜した座標系(以下、フレーム)を利用して5軸加工パスの加工プログラムを作成することが多い。

フレームは、加工プログラムの基準となる座標系(加工機のワーク座標系)から任意の角度傾斜した補助的な座標系のことです。大まかに加工方向を指定したり、加工範囲を制限したりする目的で使用します。CADデータの複数の加工面に対して複数のフレームを定義した例を図5に示す。

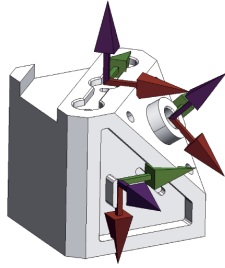


図5 フレーム
(矢印方向がXYZ+方向)

2.2.2 UVカーブ

UVカーブは、CADデータのサーフェス（以下、サーフェス）の形状を決定する複数の曲線のことで、サーフェスの四辺の曲線のうちの一辺に沿った曲線がUカーブであり、これと垂直な曲線がVカーブである。5軸加工パスの加工方向や工具姿勢はUVカーブを表す関数に基づいて計算される場合が多い。サーフェスのUVカーブの模式図を図6に示す。

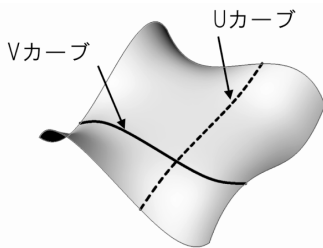


図6 サーフェスのUVカーブ

一つのサーフェスは一組のUVカーブで表せるが、一つのサーフェスを複数組のUVカーブで表せる場合がある。例えば、あるサーフェスがあるサーフェスより一回り大きいサーフェスを切り出した形状で表せる場合、そのサーフェスは一回り大きいサーフェスのUVカーブでも表せる。したがって、あるサーフェスを5軸加工する際に、オペレーターの意図と異なる5軸加工パスがCAD/CAMソフトで生成される場合、そのサーフェスが複数組のUVカーブで表せる場合は、そのサーフェスを編集し、UVカーブを変更することで、オペレーターが意図する5軸加工パスを生成できる場合がある。

3. 加工実験による5軸加工の特長の検証

5軸加工の重要な特長の一つは、3軸加工よりも工具突き出し長さを短くできるため、工具系の剛性が向上し、加工精度や加工面品位が向上する点である。

工具系の剛性の度合いはL/D値（工具突き出し長さ÷工具の直径）で表すことができる。例えば、シャンク径がφ4mmの工具で工具突き出し長さが32mmの場合、L/Dは8となる。

L/Dの違いが加工面の表面粗さに与える影響を、加工実験により検証した。

3.1 実験方法

加工実験ではL/D=8およびL/D=12の条件で単純な溝加工を行い、加工痕の表面粗さを測定し、加工痕を実体顕微鏡で観察した。L/Dの違いが加工面の表面粗さに与える影響と同時に、工具と材料との相対角度（以下、相対角度）の違いが加工面の表面粗さに与える影響を調べるため、試験片は図7の形状とした。本実験では、工業用樹脂材料として一般的に使用されている4種類の材料を選定し、5軸加工機（庄田鉄工製、NC7000U-1631X）で試験片を製作した。5軸加工機の外観を図8に示す。また、実験条件を表1に示す。切り込み深さおよび切削条件は使用工具のメーカーの推奨値とした。加工の様子を図9に示す。

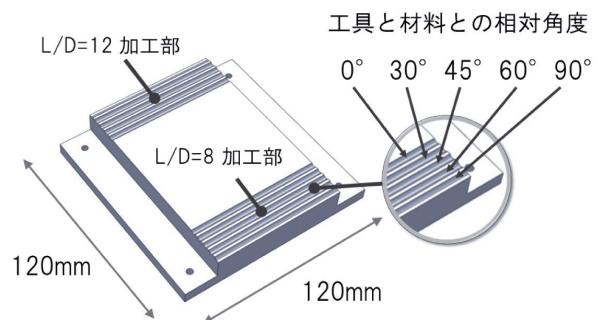


図7 試験片



図8 5軸加工機の外観

表1 実験条件

材料	ABS, MCナイロン, アクリル, ポリアセタール
工具と材料との相対角度	0°, 30°, 45°, 60°, 90°
工具	シャンク径φ4mm, 刃径φ4mm, 樹脂用ボールエンドミル, 全長100mm, 刃長16mm
L/D	8(工具突き出し長さ32mm), 12(工具突き出し長さ48mm)
切込み深さ	1mm
切削条件	送り速度: 180mm, 回転数: 3600min ⁻¹

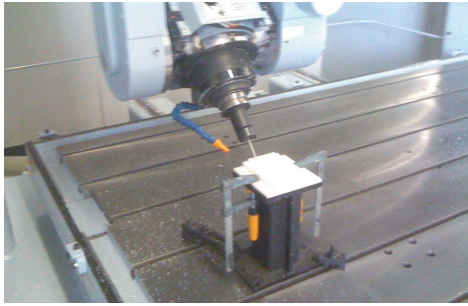


図9 加工の様子

加工痕の表面粗さを接触式表面粗さ計（ミットヨ製，SV-600）で測定した。全ての相対角度の加工痕において同じ切削速度で加工した箇所を測定するため，ボールエンドミル先端のRの中心点を中心にして，工具軸方向から45°回転した点で加工した箇所の表面粗さを加工方向に測定した。表面粗さを測定した箇所を図10に示す。また，表面粗さ測定の様子を図11に示す。また，加工面の状態を実体顕微鏡（オリンパス製，SZX16）で観察した。

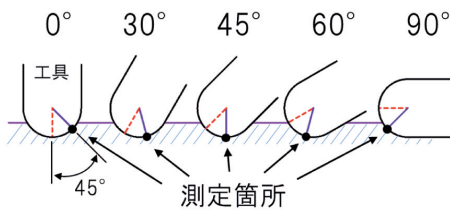


図10 表面粗さ測定箇所

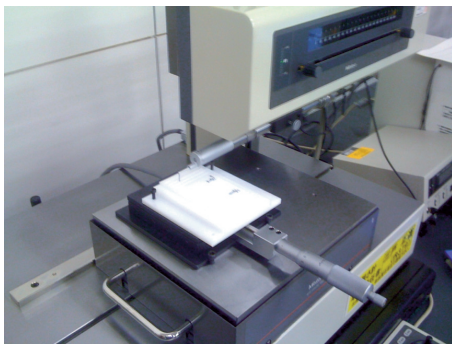


図11 表面粗さ測定の様子

3.2 実験結果

加工痕の表面粗さを測定した測定曲線の例を図12に示す。この例では， $L/D=8$ の表面粗さ（ Ra ）は $0.6\mu m$ であり， $L/D=12$ の表面粗さは $3.7\mu m$ だった。したがって，この例の条件においては $L/D=12$ で加工した場合は $L/D=8$ で加工した場合よりも表面粗さが6倍程度大きくなることが分かった。同様に他の相対角度，他の材料における加工痕の表面粗さを測定した結果を図13～16に示す。

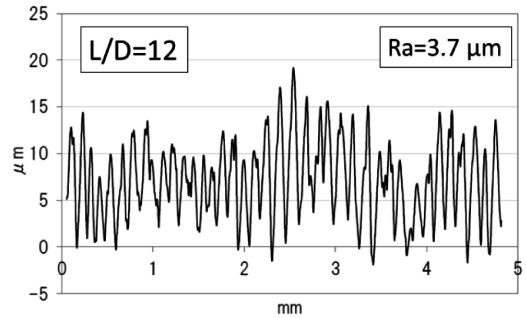
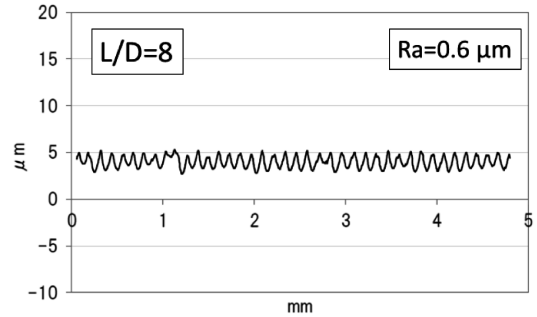


図12 表面粗さの測定曲線

(相対角度：60° 材料：ABS)

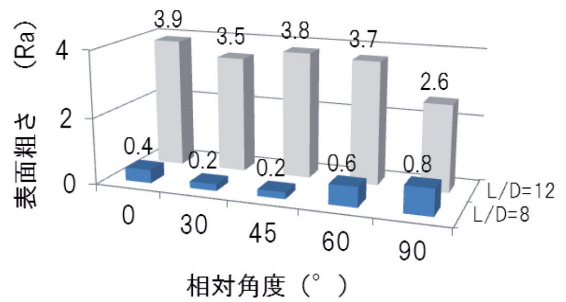


図13 L/D, 相対角度, 表面粗さの関係 (材料：ABS)

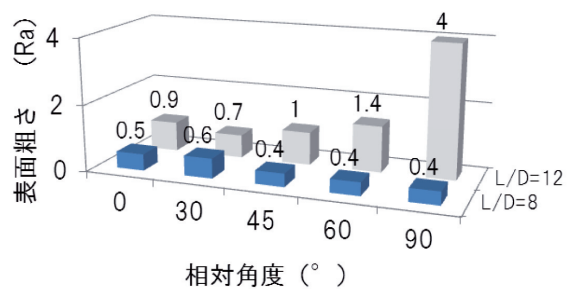


図14 L/D, 相対角度, 表面粗さの関係 (材料：ポリアセタール)

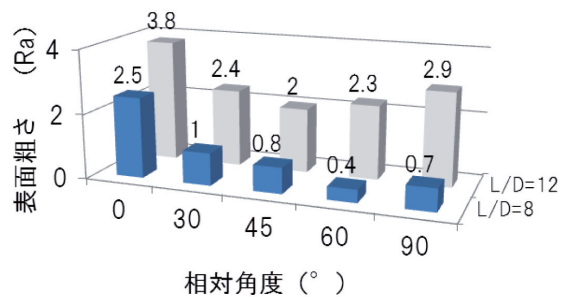


図15 L/D, 相対角度, 表面粗さの関係 (材料：MCナイロン)

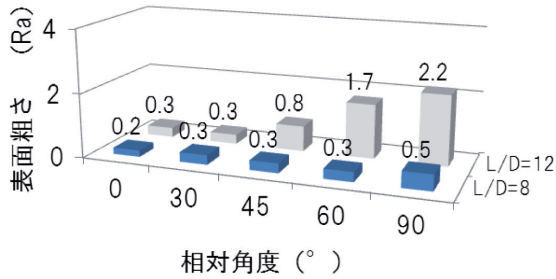


図16 L/D, 相対角度, 表面粗さの関係 (材料: アクリル)

測定の結果, ABSでは, L/D=12の表面粗さの方がL/D=8の表面粗さより, 最大で20倍程度大きいことが分かった。また, ポリアセタールでは最大で10倍程度, MCナイロンおよびアクリルでは最大で5倍程度大きいことが分かった。したがって, ある特定の条件においてはL/D=12で加工した場合はL/D=8で加工した場合よりも表面粗さが最大で20倍程度大きくなるということが分かった。

顕微鏡観察から, 全ての条件においてL/D=12の方がL/D=8よりも加工面のカッターマークが大きいことを確認した。また, ABS及びポリアセタールではL/D=12の場合, 全ての相対角度で加工面に毛羽立ちを確認した。

加工痕の顕微鏡画像の例を図17に示す。

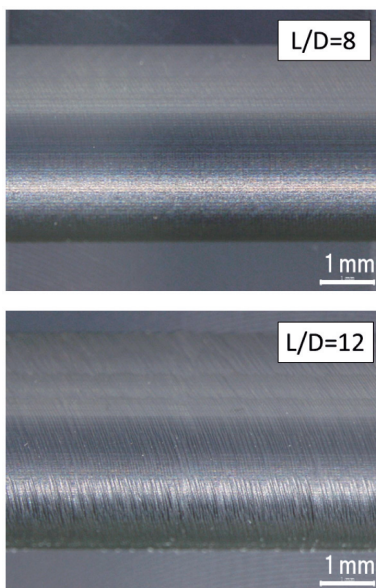


図17 加工痕の顕微鏡画像 (対角度: 60° 材料: アクリル)

3.3 考察

3.3.1 L/Dと表面粗さ

工具突き出し長ささと工具のたわみ量 (工具の剛性) との間には, 次のような関係が知られている³⁾。

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

- δ: 工具のたわみ量
- P: 切削抵抗
- L: 工具突き出し長さ
- E: 工具の縦弾性係数
- I: 断面2次モーメント

したがって, L/D=12の工具の剛性はL/D=8の工具の剛性の1/3程度である。本実験ではL/D=12の表面粗さの方がL/D=8の表面粗さよりも最大で20倍程度大きかった。この要因は, L/D=12の工具系の剛性が低いことにより, 工具の振動の振幅が増大し, ビビリや加工面の毛羽立ち等が発生したことなどが考えられる。

3.3.2 相対角度と表面粗さ

本実験では, 材料がABSでL/D=8の場合, ポリアセタールでL/D=12の場合, MCナイロンでL/D=12の場合, アクリルでL/D=8およびL/D=12の場合において, 相対角度が45°から90°に大きくなるに従い, 表面粗さが大きくなる傾向が認められた。これは, 相対角度が45°から大きくなるに従い, 工具に掛かる曲げモーメントが増大し, 工具の振動の振幅などが大きくなることによると考えられる。また, 材料がABSでL/D=8の場合, MCナイロンでL/D=8およびL/D=12の場合において, 相対角度が0°から45°に大きくなるに従い, 表面粗さが小さくなる傾向が認められた。これは, 相対角度が0°から大きくなるに従い, 材料と工具が接触する面全体における工具の切削速度が速くなり, 切削性能が向上することによると考えられる。しかし, 材料がアクリルおよびポリアセタールではこの傾向が認められなかった。これは, 次項に示す樹脂の耐熱性などの材料の性質によると考えられる。

3.3.3 材料の性質と表面粗さ

ABSはポリアセタールおよびアクリルと比べて荷重たわみ温度が低く, 加工時に発生する熱により軟化しやすい。荷重たわみ温度は, 試験片に規格で規定された荷重を与えた状態で, 試験片の温度を上げていき, 試験片のたわみが規定された量になる温度のことであり, 樹脂の耐熱性を評価する指標の一つである。また, MCナイロンはポリアセタールおよびアクリルと比べて荷重たわみ温度が高いが, 切削加工すると特有の粘りがある。したがって, ABSおよびMCナイロンはポリアセタールおよびアクリルよりも加工面にカッターマークや毛羽立ちが発生しやすいと考えられる。また, 相対角度が0°から45°の間は, 相対角度が45°から90°の間よりも材料と工具が接触する面全体における工具の切削速度が遅いため, 相対角度が0°から45°の間は, 相対角度が45°から90°の間よりも加工面にカッターマークや毛羽立ちが発生しやすいと考えられる。このため, 相対角度が0°から45°の間においてABSおよびMCナイロンの方がポリアセタールおよびアクリルよ

りも表面粗さが大きくなり、相対角度による表面粗さへの影響が強く現れたと考えられる。

4. 5軸加工支援ツールの開発

高精度な5軸加工を行うためには、5軸加工およびCAD/CAMソフトの特長を理解し、適切な5軸加工パスを作成する必要がある。そこで、5軸加工の初心者のためのガイドブックを作成した。さらに、5軸加工機のオペレーターが実加工に関するノウハウを蓄積・活用することを支援するシステムを開発した。

4.1 5軸加工ビギナーズガイド

5軸加工機のオペレーターが5軸加工およびCAD/CAMソフトの特長を理解し、適切な5軸加工パスを作成できるように、5軸加工およびCAD/CAMソフトの特長などをまとめたガイドブック（「5軸加工ビギナーズガイド」）を作成した。本ガイドブックの内容は、2章で示した5軸加工およびCAD/CAMソフトの重要な特長や高精度な5軸加工を行うためのポイントなどである。本ガイドブックの主な内容は下記の通りであり、その抜粋を図18に示す。

- ① 同時5軸加工と固定5軸加工の特長
- ② 5軸加工機の特長と操作上の留意点
- ③ フレームの説明とフレーム利用時の加工パスの特長
- ④ UVカーブと5軸加工パスとの関係
- ⑤ 工具突き出し長さと加工面の表面粗さの関係
- ⑥ 5軸加工における切削速度



図18 5軸加工ビギナーズガイド

4.2 加工データ収集・閲覧システム

5軸加工機のオペレーターが実加工のノウハウを蓄積・活用するための支援ツールとして、実加工に関するデータを収集・閲覧できるシステムを開発した。

4.2.1 加工データ収集システム

加工データ収集システムは、カメラなどの映像・測定機器

とパソコンから成る。本システムの構成を図19に示す。

本システムは、加工中の動画などのデータを加工機の周辺に設置した映像・測定機器で取得し、取得したデータを逐次パソコンに保存する。本システムを構成する映像・測定機器を表2に示す。

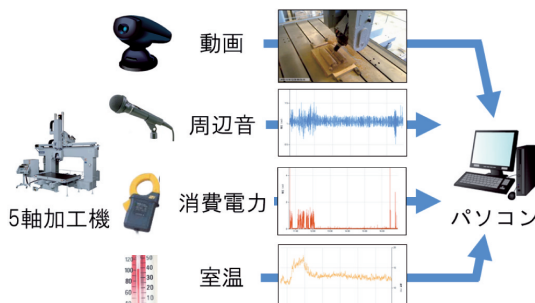


図19 加工データ収集システムの構成

表2 システムを構成する映像・測定機器

機器名	メーカー・型番
カメラ	ロジクール・QCAM-200RX
マイク	AKG・D2200S
電流クランプオンプローブ	横河メータ&インスツルメンツ・751550
熱電対	八光・Kタイプ
データロガー	グラフテック・GL200A

4.2.2 加工データ統合閲覧ソフト

加工データ統合閲覧ソフトは、ハードディスク上などに散在する加工データをパソコンの一つのウィンドウ上で閲覧できる。本ソフトのウィンドウ画面を図20に示す。本ソフトはVisualBasic 2008 Express Edition (Microsoft製)で作成した。本ソフトの主な機能は下記の通りである。

- ① 動画データの再生
- ② NCプログラムの表示 (一部)
- ③ 消費電力、周辺音、室温データのグラフ表示
- ④ ③を利用した実加工時間の推定

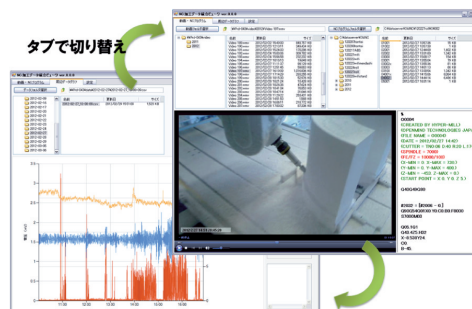


図20 加工データ統合閲覧ソフト

4.2.3 加工データ収集・閲覧システムの効果と今後の課題

本システムの使用により下記の効果が得られた。

- ① 材料の固定方法や加工状況などに応じて，加工機で調整した送り速度（オーバーライド）などの推定が可能になった。
- ② 材料の固定方法や段取りなどの5軸加工機周辺のノウハウの蓄積・活用が可能になった。
- ③ 加工機が異常動作をした場合や工具干渉などの事故が発生した場合の現象を記録し，原因特定の資料としての活用が可能になった。

本システムは，実加工に関する複数のデータを簡便に収集できる点で有用と考える。しかし，現在のところオペレーターが加工データを検索する際に，データファイルの作成日時や動画データの一部のサムネイル画像から所望の加工データが含まれるデータファイルを推定し，さらにそのデータファイルの中から該当する加工に関する加工データ部分を特定する必要がある。加工データへのタグ付け等の検索機能の強化が今後の課題である。

5. まとめ

本研究では，高精度な5軸加工を行うための技術蓄積および技術開発を行い，下記の成果を得た。

- ① 5軸加工およびCAD/CAMソフトの重要な特長を抽出し，その特長を調査した。
- ② ①の内容を基に，ガイドブック「5軸加工ビギナーズガイド」を作成した。
- ③ 5軸加工機による実加工に関するデータを収集・閲覧可能な加工データ収集・閲覧システムを開発した。
- ④ ③により，5軸加工機による実加工のノウハウを蓄積・活用できるようになった。

今後は，本研究成果の普及，加工事例およびノウハウの蓄積，本研究で開発したシステムの改良などに取り組んでいく予定である。

謝辞

本研究で使用した「5軸NC加工システム」は，財団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 四国イノベーション創出協議会：高精度5軸加工技術マニュアル（2010）
- 2) 乾正和：加工命令の自動生成における加工シミュレーションの利用と今後への期待，型技術，Vol.26 No.9，pp.18-22（2011）
- 3) ツールエンジニア編集部：エンドミルのすべて，pp.62-63（2007）