逐次精密切削加工による 試料内部 3 次元情報取得システムの開発*

古城直道^{**†} 横田秀夫[†] 藤崎和弘[†] 山形 豊[†]
小久保光典^{***} 姫野龍太郎^{††} 牧野内昭武[†] 樋口俊郎^{**†}

Development of Three-dimensional Internal Information Acquisition System based on Consecutive Precision Machining

Naomichi FURUSHIRO, Hideo YOKOTA, Kazuhiro FUJISAKI, Yutaka YAMAGATA,

Mitsunori KOKUBO, Ryutaro HIMENO, Akitake MAKINOCHI and Toshiro HIGUCHI

Recent advances in computer-aided engineering technologies need more accurate modeling techniques of three-dimensional shapes, internal structures of manufactures. In this paper, an automated system was newly developed to acquire the three-dimensional information. The system is based on consecutive precision machining and cross-sectional image recording. In the system, face milling by a single crystal diamond tool is used for high precision machining, and an optical microscope is used for cross-sectional image recording. By the system, following results were obtained: (1) Surface roughness of a resin embedded aluminum specimen was approximately 100nm p-v. (2) Two-dimensional color cross-sectional images of the specimen were consecutively recorded from top to bottom. (3) The aluminum was distinguishable from the surrounding resin in those images, and the resin was also distinguishable from air. (4) The aluminum and the resin were three-dimensionally reconstructed respectively from those images, and precise three-dimensional shapes and internal structures were acquired.

Key words: precision machining, single crystal diamond, cross-sectional image, three-dimensional information, computer-aided test, automated acquisition system, three-dimensional internal structure

1. 緒 言

近年、3 次元 CAD/CAM/CAE の普及にともない、製品の設計・試作・生産工程において、3 次元形状や内部構造を取得する CAT 技術への期待が大きい。試作品や製品の 3 次元情報を高分解能かつ正確に取得できれば、設計・製造工程において有力な知見となる。一般に、3 次元形状の取得は接触/非接触式 3 次元計測器が用いられ¹⁾、内部構造の取得には X 線 CT、または断面観察が用いられる。現在、内部構造の取得が困難な 3 次元計測器にかわり、産業用 X 線 CT による自動車部品の 3 次元モデル作成が実用化されている²⁾。しかし、その分解能はサブミリメートルと高くない。また、X 線 CT は X 線の減衰を元に内部構造を推定するため、対象内部の密度差が大きいと、正確な形状を取得できない問題がある。材料内部の微細な結晶組織や介在物の形態を知るためには、対象を直接観察・分析することが可能な断面観察法を用いることが多い。この 2 次元的な観察を複数断面について行うことで、内部情報を 3 次元的に取得することができる。現在、研磨・観察工程を自動化し、3 次元観察を高速化したシリアルセクションング法が報告されているが³⁾、1 断面の観察には 3 分以上を要する。

筆者らは、これまでに生体試料を対象に、破壊的に内部構造を観察する手法を開発してきた^{4)~7)}。この手法では、試料端面をカミソリ状の平刃にて一定厚ずつ精密にスライスし、被削面を観察する。このスライスと観察の工程を繰り返すことで得られた連続断面画像から試料内部の精密な 3 次元再構築が可能である。しかし、この手法では、カミソリ状の平刃を用いて試料を切断するため、硬度が高い試料の観察は困難であった。

そこで、筆者らは金属の鏡面切削加工技術^{8)~9)}を利用し、高精度に平坦化した試料断面を観察するシステムを提案し、生体硬組織内部構造の 3 次元再構築が可能であることを示した¹⁰⁾。

本研究では、精密切削と断面観察を繰り返すことで、物体内部の 3 次元情報を自動的に取得する専用の観察・記録システムの開発を行った。開発したシステムの加工精度および、繰り返し位置決め精度を測定し、本システムにおける連続断面観察の性能を評価した。また、実際に密度の異なる 2 種類の材料から作製した複合構造試験片を観察し、得られた連続断面画像から内部構造の 3 次元再構築を行った。この結果をマイクロ CT にて撮影した結果と比較し、本システムの有効性を検証したので報告する。

2. システム概要

図 1 は、開発するシステムの概略である。各工程は、(a) 試料の固定、(b) 試料の精密切削、(c) 試料断面の観察、(d) 試料断面画像の記録、(e) 連続断面画像からの 3 次元再構築、であり、(b) ~ (d) 工程を試料上端から下端まで繰り返す。

2.1 開発目標

開発するシステムでは、大きさ 10×10×10mm 以上の試験片に対し、1 断面の切削・観察・記録に要する時間を 1 分以内、断面の最大高さを 100nm 以下とする。また、観察分解能を 10μm 以下にするため、精密な切り込みと高分解能撮影可能な鏡面加工を実現する。このような精密切削を実現するためには、加工精度、試料位置決め精度、断面画像相互の位置ずれ量が少なくとも±1μm 以内であることが望ましい。

2.2 システム設計

開発するシステムでは、試料切削に回転工具を用いる。通常、回転工具を用いて試料表面を複数回に分けて切削すると、円弧状の条痕が重なり、鏡面加工に適さない。そこで、主軸には観察対象の試料サイズに合わせ、試料外形よりも大きな径の回転刃を取

* 原稿受付 平成 19 年 8 月 27 日

** 正 会 員 東京大学大学院 (東京都文京区本郷 7-3-1)

*** 正 会 員 東芝機械株式会社 (静岡県沼津市大岡 2068-3)

† 正 会 員 理化学研究所 (埼玉県和光市広沢 2-1)

†† 理化学研究所

り付け可能とし、切削終了時に工具を逃がすことで、条痕の重なりを防ぐ。また、切削後、直ちに試料断面観察・記録が可能となるように、切削はドライで行う。試料表面にはエアーを吹きつけて切りくず除去および試料冷却を行う。切りくずは、エアー吹出し口に対向する位置の吸気口で吸い取る。

試料断面観察には、光学顕微鏡を用いる。通常の対物レンズでは作動距離が短く、切りくず等の飛散物によって、レンズが汚れる可能性が高い。そこで、観察には長作動距離対物レンズを用い、試料切削空間との距離を大きくする。

本システムにて 1 断面の観察に要する時間は、切削時間、観察部への往復移動時間、撮影・記録時間である。1 断面あたりの切削時間 t min は、試料長辺 W mm、主軸回転速度 N min⁻¹、送り量 f μm/rev とすると、

$$t > \frac{W \times 1000}{N \times f} \text{ min} \quad (1)$$

となる。一方、加工面の理論粗さ Rth は、工具ノーズ半径 R mm、送り量 f μm/rev を用いて、 $Rth = f^2 / 8R$ mm で表される。後述する実験で用いる $R = 0.5$ mm では、 $f \leq 20$ μm/rev であれば $Rth \leq 100$ nm を満たす。ここで、工具ノーズ半径 R mm を一定としたとき、加工精度を一定に保つためには、送り量を一定にする必要がある。試料長辺は一定であるから、切削時間を短くするには、主軸回転速度を上げなければならない。式 (1) を $N > (W \times 1000) / (t \times f)$ と変形し、 $t \leq 1$ min を代入すると、

$$N > \frac{W \times 1000}{f} \text{ min}^{-1} \quad (2)$$

となる。式 (2) から、主軸回転速度は、試料長辺に比例し、送り量に反比例して増加させる必要がある。例えば、試料長辺 $W = 100$ mm、送り量 $f = 20$ μm/rev のとき、 $N > 5000$ min⁻¹ の回転速度が要求される。したがって、高速な連続断面観察システムの実現には、高速回転軸を有する加工装置を組み込む必要がある。試料観察装置下への往復移動時間、観察・記録時間を考慮に入れると、より高速な回転速度が必要である。

3. 開発システム

3.1 概要

図 2 に開発した 3 次元内部構造観察システム RMSS-003 (Riken Micro Slicer System-003) の外観および軸構成を示す。本システムは、試料の精密切削を行う精密加工部、試料断面の観察を行う試料観察装置、試料断面画像の記録を行う画像記録装置、これらを制御する制御装置から構成され、試料内部の 3 次元構造を自動的に観察・記録することができる。

本システムの精密加工部は、数値制御精密立形加工機 (東芝機械製 UVM-350 (J)) を基に開発した。前記加工機は、直線軸として、水平面 (XY テーブル) を移動させる 2 軸 (X・Y 軸: 超精密 V-V 有限ころがり軸受案内)、XY テーブル面と直交する 1 軸 (Z 軸) および Z 軸を回転軸とする主軸 (スピンドル: 超精密空気静圧軸受、最高回転速度 30000min⁻¹) を有している。制御装置は NC (東芝機械製 TOSNUC 888) であり、直線軸のフィードバックスケールは 0.1μm である。

試料切削には単結晶ダイヤモンド R 刃工具を用い、所定の切り込み位置で回転させ、試料を送り込み、試料断面をドライ切削する。切削後、試料を直ちに試料観察装置下に移動し、断面を観察・記録する。

本システムでは、前記加工機および NC に次の変更を行った。

- ・ワーク有効範囲を広げるためのコラム位置持ち上げ

Fig. 1 Outline of the system

Fig. 2 Overview of RMSS-003 (Riken Micro Slicer System-003)

Fig. 3 Structural chart of the system

Fig. 4 Schematic diagram of the system

- ・Z 軸前面の定盤化
- ・Z 軸前面定盤への試料観察装置 (光学顕微鏡) の設置
- ・Z 軸前面重量増加に対応する Z 軸保持部強化
- ・大きな工具回転径に対応する主軸直径変更
- ・光学顕微鏡設置のための主軸取り付け位置移動
- ・画像記録装置および外部機器制御のための独立 4 系統出力
- ・直線軸リニアエンコーダパルス外部出力

Table 1 Cutting conditions

Work Material	Oxygen-free copper Dimensions: 25 × 25 × 20 mm
Tool Material	Single crystal diamond
Tool geometry	Rake angle: 0° Clearance angle: 7° Nose Radius: 0.5 mm
Cutting speed	942 m/min (=15.7 m/s) (Cutting diameter: 50 mm, Revolution speed 6000 min ⁻¹)
Feed rate f	1, 2, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 50 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Cutting depth d	2, 5, 10 μm (3 times)
Cutting fluid	Air

試料観察装置は、Z 軸前面定盤部に設置し、主軸とともに移動する。あらかじめレンズ焦点位置を刃先高さと同位置になるよう設置することで、切削進行時の焦点位置補正は不要である。

図 3、図 4 に本システムの動作概要および制御概略を示す。加工部では、工具を所定の切り込み位置で回転させ、試料を送り、切削を行う。指定厚さの切削終了後、試料を観察装置下まで移動させ断面を撮影する。加工・観察の工程は G コードで設定する。断面画像の取得には、撮影装置の外部トリガ入力機能を利用する。制御装置出力部から XYZ 位置情報を元に記録トリガ信号を出力することで、断面画像を取得し、画像記録装置（ハードディスク）にデジタルデータとして記録する。

3.2 加工精度

本システムの加工精度を確認するため、無酸素銅試験片を精密切削した。切削にはノーズ半径 0.5mm の単結晶ダイヤモンド工具を使用し、表 1 に示すように、切り込み $d = 2, 5, 10 \mu\text{m}$ 、送り量 $f = 1 \sim 50 \mu\text{m}/\text{rev}$ の加工条件で 3 回ずつ正面フライス加工した後、段差高さおよび表面粗さを測定した。図 5 (a) に切削の様子、図 5 (b) に切削後の試料、図 5 (c) に切削面の顕微鏡画像を示す。送り量を小さくすることで、切削面の光沢が変化することがわかる。

図 6 に、段差高さの測定結果を示す。測定には、非接触レーザープローブ三次元測定器（三鷹光器製 NH-3）を用い、切削痕と垂直方向に $20 \mu\text{m}$ 毎の高さを測定した。切り込み 1 回あたりの段差高さは、 $2.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 、 $4.9 \pm 0.2 \mu\text{m}$ 、 $9.8 \pm 0.4 \mu\text{m}$ であり、各切り込みで $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の加工精度を実現した。

なお、主軸回転中の変位は、ラジアル・アキシャル方向ともに最大 $0.05 \mu\text{m}$ 以下であり、加工精度への影響は小さい。

図 7 に、切り込み $2 \mu\text{m}$ および $10 \mu\text{m}$ で送り量を変化させて加工した試験片の表面粗さ PV の測定結果と理論粗さとの比較を示す。測定には、非接触三次元表面形状測定装置（ZYGO 製 NewView 5032）を用いた。送り量 $f < 20 \mu\text{m}/\text{rev}$ で、 100nm PV 以下の鏡面加工が可能であった。切り込み $2 \mu\text{m}$ 、送り量 $f = 25, 30 \mu\text{m}/\text{rev}$ では、理論粗さに対し誤差 5% 以内であった。送り量 $f \geq 5 \mu\text{m}/\text{rev}$ では、工具形状の転写が良好であったが、 $f = 5, 10 \mu\text{m}/\text{rev}$ では、PV の測定値に X 軸ボールネジの精度に起因すると思われる影響が現われていた。一方、 $f = 1, 2 \mu\text{m}/\text{rev}$ では、工具形状の転写が良好に行われず、PV は悪化した。以上から、良好な鏡面加工を実現する加工条件は、 $5 \leq f < 20 \mu\text{m}/\text{rev}$ である。

3.3 位置決め精度

試料全体を $10 \mu\text{m}$ 以下の分解能で観察・記録するためには、位置決め精度および繰り返し位置決め精度は $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下が望ましい。表 2 に、各直線軸の仕様と、位置決め精度および繰り返し位置決め精度を示す。測定には、レーザー測長器（HP 製 5528 A）を用い、測長器の読みの最大差の 1/2 に土をつけた値を測定値とした。

Fig. 5 Appearance of oxygen-free copper at cutting

Fig. 6 Step height of oxygen-free copper after cutting

Fig. 7 Maximum height roughness of oxygen-free copper

Fig. 8 Displacement of mark image

Table 2 Measurement result of straight axes

	X-axis	Y-axis	Z-axis
Motion range mm	0~400	0~220	0~150
Feed-back scale μm	0.1	0.1	0.1
Max velocity mm/min	10000	10000	2000
Pitch error of full scale μm at max velocity	± 0.383	± 0.283	± 0.408
Repeatability error of full scale μm at max velocity	± 0.176	± 0.091	± 0.078

各直線軸の位置決め精度は $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以下、繰り返し位置決め精度は $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以下であり、 $\pm 1\mu\text{m}$ 以下の位置決め精度を実現する。

3.4 断面画像相互の位置ずれ量

断面画像相互の位置ずれは、精密な 3 次元再構築の妨げとなる。試料全体を $10\mu\text{m}$ 以下の分解能で観察・記録するためには、断面画像相互の位置ずれ量 $\pm 1\mu\text{m}$ 以内が望ましい。

図 8 に、静的および動的条件下における断面画像相互の位置ずれ量を示す。測定には、図 8 右上に示す十字マークを用いた。光学顕微鏡で高倍率 ($\times 50$) 観察し、毎秒 30 枚の画像を記録した。記録した画像は、1 画素あたり $0.63\mu\text{m}$ で、同一条件で 3 回記録したマーク画像から、パターンマッチングを用いてマーク画像位置を検出した。測定には、マシンビジョンツール (HALCON6.1: MVTec Software GmbH) を用い、マーク画像の XY 移動量の最大値と最小値の差の 1/2 に土をつけた値を、マーク画像の位置ずれ量とした。

図 8 (a) ~ (c) に、(a) 全電源未投入、(b) 加工機電源投入・冷媒循環、(c) 加工機電源投入・冷媒循環・主軸回転 (3000min^{-1}) 時の測定結果を示す。マーク画像位置ずれ量は $\pm 0.3\mu\text{m}$ 程度であった。

図 8 (d) ~ (i) に、加工機電源投入・冷媒循環・主軸回転状態で、ステージ往復運動 ($X=0 \rightarrow 100\text{mm}$, $100 \rightarrow 0\text{mm}$, 1000mm/min) した後 20 秒間を記録した画像群から、(d) 直後から 20 秒間、(e) 1 秒後から 19 秒間、(f) 2 秒後から 18 秒間、(g) 3 秒後から 17 秒間、(h) 4 秒後から 16 秒間、および (i) 15 秒後から 5 秒間の位置ずれ量を測定した結果を示す。往復運動直後の 1 秒間を含む (d) を除く図 8 (e) ~ (h) では、位置ずれ量は $\pm 0.6\mu\text{m}$ 程度であった。上記結果から、ステージ運動終了 1 秒後以降の記録によって、断面画像相互の位置ずれ量を $\pm 1\mu\text{m}$ 以内とすることができる。

4. 実 験

4.1 試験片

密度の異なる 2 種類の材料から複合構造試験片を作製した。図 9 (a) に包埋したアルミニウム片、図 9 (b) にアルミニウム片を樹脂包埋し、作製した試験片を示す。アルミニウム片は、 $8.0 \times 8.0 \times 7.5\text{mm}$ の A7075 ブロックであり、上面中央部に幅 1.5mm 、深さ 1.5mm の溝加工、溝中心部付近から $\phi 1.5\text{mm}$ の貫通穴加工を施した。包埋樹脂には、固定樹脂 (Technovit 3040: Kulzer) を用いた。試験片の寸法は、 $11.5 \times 10.5 \times 8.6\text{mm}$ であった。試験片はマイクロ CT による測定後、治具に接着し、XY テーブルに取り付けた。治具上面は、あらかじめ精密加工部の XY テーブル上で切削加工し、試料切削面と治具上面との間に生じる傾きを抑えた。

4.2 切削・観察条件

表 3、表 4 に切削条件および観察・記録条件を示す。切削にはノーズ半径 0.5mm の単結晶ダイヤモンド工具を使用し、回転径 50mm 、回転速度 6000min^{-1} 、切り込み $10\mu\text{m}$ 、送り量 $5\mu\text{m/rev}$ とした。断面観察には落射光学顕微鏡を使用し、C マウントに取り付けた CCD カメラ (キーエンス製 VHX-200) によって画像を記録した。

Table 3 Cutting conditions

Work Material	Resin embedded A7075 block Dimensions: $11.5 \times 10.5 \times 8.6\text{mm}$ (A7075: $8.04 \times 8.04 \times 7.54\text{mm}$)
Tool Material	Single crystal diamond
Tool geometry	Rake angle: 0° Clearance angle: 7° Nose Radius: 0.5mm
Cutting parameters	Cutting speed: 942m/min (15.7m/s) (Cutting diameter: 50mm , Revolution speed 6000min^{-1}) Feed rate: $5\mu\text{m/rev}$ Cutting depth: $10.0\mu\text{m}$ Cutting fluids: Air

Table 4 Observation and recording conditions

Object lens	M Plan Apo 1 $\times$ (MITUTOYO)
Illumination	Incident light
Light source	Mercury-arc lamp
Imaging device	VHX-200 (KEYENCE) Effective pixels: 4800×3600 Image format: 24 bit color TIFF
Field of view	$20.0 \times 15.0\text{mm}$
Image resolution	$4.17 \times 4.17\mu\text{m}$
Recording media	Hard disk drive
Recording time	2 s per 1 recording
Number of slices	862
File size	50 MB (total 42 GB)
Time required	47 s per 1 slice (total 11.2 h)

Fig. 9 Appearance of embedded aluminum specimen

Fig. 10 Appearance of cutting and cutting surface

Fig. 11 Recorded 2-D images of the specimen

4.3 実験結果

試験片全体に対して、切削面の逐次観察・記録を行った。図 10 (a) に切削中の様子、図 10 (b) に切削後の様子を示す。アルミニウム、樹脂ともに良好な切削が可能であった。試験片全体に対し、連続 862 断面の切削・観察・記録を行った。図 11 に、断面画像が連続的に変化する様子を示す。図 11 から、アルミニウム片に施した溝加工部、穴加工部の形状が切削時に保たれていることがわかる。図 11 (d) からは、溝加工時に生じた切削痕を観察することができる。画像記録時間は 1 枚あたり約 2 秒で、1 断面あたりの切削・観察・記録の所要時間は、約 47 秒（毎時約 77 断面）、試験片全体での総所要時間は、約 11.2 時間であった。なお、実験中のシステム近傍雰囲気温度は $23 \pm 1^\circ\text{C}$ であった。また、断面画像ファイルは 1 枚あたり約 50MB で、総ファイル容量は約 42GB であった。

図 12 に図 11 (b) A-A' 線上の輝度値を示す。バックグラウンドは輝度値 10 以下、樹脂領域は輝度値 20~40 程度、アルミニウム領域は輝度値 150~200 程度であり、アルミニウムと樹脂の同時観察が可能であった。

4.4 3 次元再構築

記録した連続断面画像からの 3 次元再構築には、VGStudio MAX 1.2.1 Build 330 (Volume Graphics GmbH) および V-Cat 1.4.1 (RIKEN) を用いた。樹脂領域およびアルミニウム領域の抽出には画像の輝度値を利用した二値化を用いた。

図 13 に樹脂領域の 3 次元再構築像を示す。図 13 (a) から、樹脂領域の外形、図 13 (b) から、アルミニウム片の溝加工部および穴加工部に充填された樹脂が 3 次元的に再現されていることがわかる。図 14 にアルミニウム領域の 3 次元再構築像を示す。図 14 (a) から、アルミニウム片の外形および面取り等の表面形状を詳細に観察することができる。また、図 14 (b) に示す、アルミニウム領域の縦断面像から、溝加工部および穴加工部が、変形や位置ずれなく再現されていることがわかる。

アルミニウム領域の 3 次元再構築像の外形は $8.07 \times 8.07 \times 7.56\text{mm}$ 、溝幅 1.60mm 、溝深さ 1.56mm 、および穴径 1.59mm であった。外形については 0.3% の誤差と高い精度であった。溝深さについては 3%、溝幅および穴径については 0.1mm (7%) の誤差であったが、溝加工および穴加工は、通常の加工機で行ったため、工具ぶれによる溝幅、溝深さ、穴径の広がりが生じていたと考えられる。

3 次元再構築像では、表面形状だけでなく、任意の断面での内部構造観察および計測が可能である。また、シミュレーション等で利用するために、試験片全体または任意の領域について、内部構造を含む 3 次元ボリュームデータおよび表面形状データを生成した。

5. 考 察

5.1 開発目標との比較

表 5 に、2.1 に述べた本システムの開発目標と達成値との比較を示す。所要時間、記録分解能、表面粗さ、加工精度、位置決め精度、断面画像相互の位置ずれ量のすべての項目について目標値を達成した。

5.2 既存手法との比較

図 15 に、同一試験片を本システムとマイクロ CT で観察した結果の比較を示す。マイクロ CT は、マイクロフォーカス X 線コンビーム CT 装置（日立製 MCT-CB100MF）を用い、最大管電流 $100\mu\text{A}$ 、最大管電圧 100kV と、樹脂が観察可能であった条件（管電流 $100\mu\text{A}$ 、管電圧 80kV ）で観察した。

Fig. 12 Intensity profile of line A-A' in Fig. 11 (b)

Fig. 13 3-D reconstructed image of the resin

Fig. 14 3-D reconstructed image of the aluminum

Table 5 Goal and achievement of the system

Item	Goal	Achievement
Time required	<1 min per 1 slice	0.78 min per 1 slice
Recorded resolution	< $10 \times 10 \times 10 \mu\text{m}$	$4.2 \times 4.2 \times 10 \mu\text{m}$
Surface roughness	Mirror-like finishing	30 nmPV
Step height accuracy	< $\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 0.4 \mu\text{m}$
Positioning accuracy	< $\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 0.7 \mu\text{m}$
Displacement between images	< $\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 0.6 \mu\text{m}$

Fig. 15 Comparison between proposed method and micro-CT

図 15 から、本システムでは樹脂とアルミニウムの同時観察を実現し、直線部・エッジ部・円の輪郭が歪みなく再現されているが、マイクロ CT では、樹脂とアルミニウムの同時観察が難しく、直線部・円の輪郭が歪み、エッジ部にアーチファクトが生じていた。なお、記録分解能についても、マイクロ CT の $51 \times 51 \times 51 \mu\text{m}$ に対し、本システムは $4.2 \times 4.2 \times 10 \mu\text{m}$ と、約 750 倍の空間分解能であった。

また、本システムは、研磨・観察工程の自動化によって 3 次元観察を行うシリアルセクションニング法³⁾に比べ、毎時あたり約 4 倍の記録断面数を実現した。

図 16 に、本システムとシリアルセクションニング法、各種 X 線 CT における試料寸法と空間分解能の比較を示す。ただし、X 線 CT における試料寸法は本報での実験に合わせてアルミニウム合金とした。本システムは、図 16 点線枠で示した能力を有しており、シリアルセクションニング法に対して、より大きな試料をほぼ同等の分解能で観察・記録可能である。各種 X 線 CT に対しては、ほぼ同等またはより大きな試料を、ほぼ同等またはより高い空間分解能空間で観察・記録可能である。なお、本システムは、アルミニウム合金や無酸素銅に限らず、単結晶ダイヤモンド工具で鏡面加工が可能な非鉄金属や樹脂¹¹⁾であれば、密度にかかわらず適用が可能である。しかし、単結晶ダイヤモンド工具は鉄系材料に対しては工具摩耗が著しく、精密切削用途での使用は困難である。単結晶ダイヤモンド工具を用いた鉄系材料の鏡面生成には楕円振動切削法¹²⁾があるが、切削に時間を要するため、本システムで求められる高速な連続断面観察には適しておらず、今後の課題である。

5.3 工具摩耗

切削後、工具刃先には切削に伴う摩耗が見られた。本システムでは、切り込みが $10 \mu\text{m}$ 以下であり、常に加工硬化領域の切削を行う¹³⁾ため、工具の摩耗が進みやすいと考えられる。また、ドライ切削であるため、構成刃先が生じやすい。図 11 (d) のアルミニウム断面では良好な鏡面加工が実現されているが、図 11 (b) の断面では、工具摩耗または構成刃先が原因と見られる擦過痕が残っている。図 14 (b) のアルミニウム領域縦断面図からも、上から約 6mm 付近を境界にして、擦過痕が生じていることがわかる。境界付近までの切削距離は約 17km であり、総切削距離は約 20km であった。

6. 結 言

精密加工機上で、単結晶ダイヤモンド R 刃工具を所定の切り込み位置で回転させ、試料を送り込み、ドライ切削の後、残った断面を記録する工程を繰り返す、専用の自動観察・記録システムを開発した。本論文で得られた結論は以下のとおりである。

自動観察・記録システムの開発

- (1) 精密加工装置をベースとし、自動断面加工・観察・データ収集機能を有する 3 次元情報取得システムを構築した。
- (2) 単結晶ダイヤモンド工具による正面フライカット法により、およそ 1 分以内で表面粗さ $R_z 100\text{nm}$ 程度以下の断面形成が可能であった。
- (3) 機械精度の検証の結果、断面加工・観察ともに、 $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の精度を確保できることが判明した。

3 次元情報構築実験

- (4) 樹脂固定されたアルミニウムサンプル (約 8mm 立方) の 3 次元情報取得を行い、約 11.2 時間で連続 862 断面を空間分解能 $10 \mu\text{m}$ (Z 方向)、 $4.2 \mu\text{m}$ (XY 方向) で取得できた。

Fig. 16 Relationship of specimen size and spatial resolution

- (5) 得られた 3 次元情報を再構築し、アルミニウムと樹脂部分を分離・同定することが可能であった。また、形状精度は約 0.3% が得られた。
- (6) X 線マイクロ CT により取得された 3 次元情報との比較を行い、分解能、密度の異なる物質の同定、アーチファクトの有無などの観点から、開発されたシステムは優れた性能を有していると考えられる。

謝 辞

本研究は、(独)理化学研究所「生体力学シミュレーション研究プロジェクト」の一環として進められた。関係者の研究支援に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木浩文, 三浦勝弘: 超精密加工における複雑形状計測, 機械の研究, **59**, 2 (2007) 233.
- 2) 石井博行, 岡田貴弘, 三和田靖彦: X 線 CT を活用した 3 次元形状計測, 精密工学会誌, **69**, 4 (2003) 473.
- 3) J. E. Spowart, H. M. Mullens, and B. T. Puchala: Collecting and Analyzing Microstructures in Three Dimensions: A Fully Automated Approach, JOM, **55**, 10 (2003) 35.
- 4) 小林賢知, 樋口俊郎, 青木勇, 工藤謙一: 三次元内部構造顕微鏡の開発, 精密工学会誌, **61**, 1 (1995) 100.
- 5) 横田秀夫, 工藤謙一, 樋口俊郎, 佐藤嘉平: 発現遺伝子観察用 3 次元内部構造顕微鏡の開発, 医用電子と生体工学, **36**, 3 (1998) 244.
- 6) S. Ueno, G. S. Do, Y. Sagara, K. Kudoh, and T. Higuchi: Three-dimensional Measurement of Ice crystals in Frozen Dilute Solution, International Journal of Refrigeration, **27**, 3 (2004) 302.
- 7) 工藤謙一, 木下泰希, 都甲洙, 内ヶ崎万蔵, 佐藤嘉兵, 樋口俊郎: リニアマイクロスライサを用いた生体内部観察システムの開発, 生体医学工学, **43**, 1 (2005) 103.
- 8) 吉田嘉太郎, 菅野健, 竹内喜代松: 超精密金属鏡の加工技術の研究 (R 刃ダイヤモンド工具による鏡面加工), 日本機械学会論文集 C 編, **51**, 471 (1985) 3121.
- 9) 浅井昭一: 超精密ダイヤモンド切削における切りくず観察と鏡面生成機構に関する考察, 精密工学会誌, **55**, 10 (1989) 1851.
- 10) 横田秀夫, 中村佐紀子, 山形豊, 牧野内昭武, 大森整, 樋口俊郎: 超精密切削加工を用いた生体試料の内部構造観察, 日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集, 1 (2002) 241.
- 11) 中川番苗, 水越正孝: ダイヤモンドバイト切削平たん化法を用いた多層配線形成方法, 電子情報通信学会論文集, **88-C**, 11 (2005) 907.
- 12) 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法 (第 1 報) —加工原理と基本特性—, 精密工学会誌, **62**, 8 (1996) 1127.
- 13) 近藤英二, 岩本竜一, 田中一平, 皮籠石紀雄: 超精密切削加工された Al 合金の仕上げ面性状に及ぼす工具摩耗の影響 (第 1 報) —単結晶ダイヤモンド R 刃バイトの切れ刃の摩耗が加工硬化と残留応力に及ぼす影響—, 精密工学会誌, **72**, 6 (2006) 766.