

論文の内容の要旨

論文題目 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

氏 名 古城 直道

近年、ものづくり、医学および生物学の分野において、検査、診断のために 3 次元的な情報を取得することが不可欠となっている。現在は非破壊検査では X 線 CT が、破壊検査では切片および断面観察がおこなわれている。破壊検査は、観察対象が活着している場合には使用することができないが、非破壊検査よりも微細かつ正確な情報を取得することができる。しかし、切片観察や研磨面観察には熟練を要し、断面観察では、対象の硬度が高い場合の観察に困難があった。

そこで、本論文では、このような熟練が必要な作業および困難を軽減するため、高精度な断面の作製と、多様な情報取得を自動的におこなうことができるシステムの開発を目的として、研究をおこなった。

第 1 章は序論であり、近年の 3 次元情報取得技術への要求、従来の破壊、非破壊による 3 次元情報取得法について述べ、本論文の目的、構成について述べている。従来の熟練が必要な作業および困難を軽減するため、高精度な断面の作製と、多様な情報取得を自動的におこなうことができるシステムの開発を目的として、研究をおこなうことを述べる。

第 2 章では、本論文で研究、開発するシステムの開発指針について述べ、試作したシステムでおこなった予備実験について述べた。

開発するシステムでは断面の作製と、情報取得とを自動的、かつ迅速に実現することが重要である。そこで、高精度な断面を作製する方式として、既存の超精密切削加工法である、R バイトによる正面フライカット方式を選択した。試作したシステムでは、案内面に高精度、高剛性な V-V ころがり案内を有し、高精度、高速な精密空気静圧軸受主軸を有する超精密加工機を用いて予備実験をおこない、以下の結果を得た。

- a) フライカット方式による断面の作製は、生体軟組織と生体硬組織を含む樹脂包埋試料表面を、最大高さ $0.4\mu\text{m}$ 以下に仕上げることができる。
- b) 切削加工した生体硬組織表面を SEM 観察した結果、数 μm オーダの微細構造についても輪郭部が

明瞭であることから、表面に与える影響は小さく、安定した切削加工がおこなわれている。

第3章では、精密加工機をもとに、設計、開発した専用のシステムについて詳細を述べ、3次元情報取得システムとしての評価を述べた。

開発するシステムでは、以下の項目を満たすこととする。

- a) 標準的な金属材料試験片、および小動物の頭部が観察可能となるよう、100×100×100mm程度の切削空間を有する。
- b) 凍結試料を内部に設置し、保持可能な冷却空間を搭載した状態で、試料全体の観察を可能とする。
- c) 断面情報取得部を機上に定置し、制御装置との連繋によって、断面作製と情報取得の自動化を実現する。
- d) 記録する試料内部3次元情報の空間分解能として最小10 μ m以下を実現する。

開発したシステムの基本的な原理を図1に示す。(a)試料を固定する。(b)固定した試料をシステム上で精密切削し、(c)断面情報を取得する。(d)取得した断面情報を記録する。上記(b)~(d)工程を繰り返す、試料上端から下端までの情報を取得する。記録した断面情報をもとに(e)3次元再構築をおこなう。

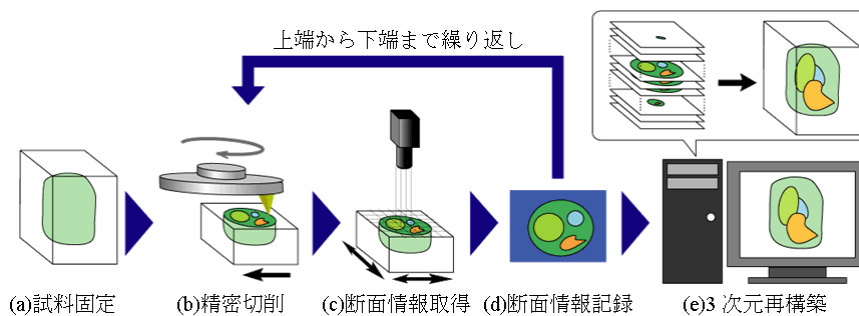


図1 システム概略

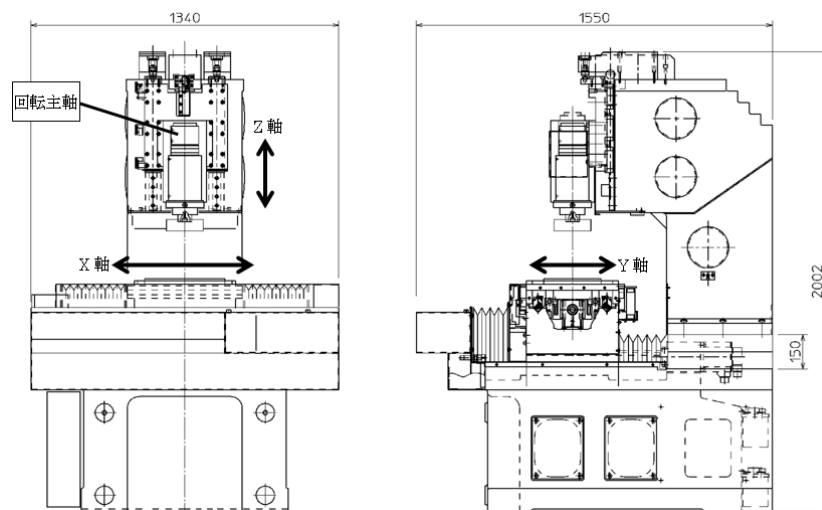


図2 逐次精密切削加工による試料内部3次元情報取得システム（直進軸，回転主軸）

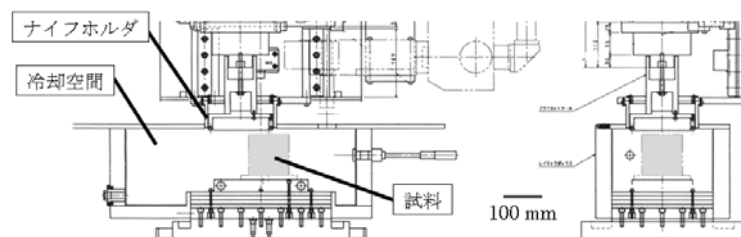


図3 逐次精密切削加工による試料内部3次元情報取得システム（試料，冷却空間，ナイフホルダ）

開発したシステムを図 2, 3 に示す. 試料を移動させる X 軸および Y 軸は, 有限形 V-V ころがり案内, Z 軸はリニアガイドを用い, NC によって $0.1\mu\text{m}$ 単位でスケールフィードバック制御する. 回転主軸には, 空気静圧軸受を用い, 最高 30000min^{-1} で高速・高精度回転する. Z 軸テーブルは, 顕微鏡等の情報取得部設置のため定盤化し, 回転主軸と断面情報取得部を設置する. 試料は, XY テーブル上に設置する. 最大 $100 \times 100\text{mm}$ の試料を, 切削痕の重なり無く切削加工するため, 最大 150mm のナイフホルダを使用する. 情報記録部等の外部機器制御のため, NC からは X, Y, Z 軸の位置をパルスにて出力する. また, NC からは, 外部機器制御のためのトリガ信号を出力する. このことにより, 切削加工, 断面情報取得および断面情報記録の各工程を, NC を介し自動実行可能となる.

開発したシステムは, 静的精度検査, 動的精度検査, 冷却試験, および無酸素銅, 樹脂包埋アルミニウム試験片による検証をおこない, 以下の結果を得ている.

- a) R バイトを用いたフライカット方式により, 無酸素銅に対し, 最大高さ 100nm 以下の断面作製が可能である.
- b) 機械精度の検証の結果, 切削加工, 断面情報取得ともに, $\pm 1\mu\text{m}$ の精度を有する.
- c) 冷媒循環式の冷却機構により, 冷却空間内は 80 分程度で凍結試料を保持可能な温度となる.
- d) アルミニウムと樹脂を良好に切削加工可能で, 取得した断面情報からアルミニウムと樹脂とを個別に 3 次元再構築可能である.
- e) X 線マイクロ CT による観察結果と比較し, 開発したシステムは断面情報における歪みやアーチファクトの影響が小さく, また, 高い空間分解能を有している.

第 4 章では, 開発したシステムによる铸造製品内部欠陥である鑄巣の観察および解析結果について述べた.

開発したシステムは, アルミニウム合金等の超精密切削加工に使用される, 単結晶ダイヤモンドバイトによるフライカット方式を用いているため, 観察対象として, アルミニウム合金等が適していると考えられる. しかし, 通常の鏡面加工では, 求められる表面粗さが非常に小さい場合にはバニッシングによって表面粗さを向上させている. 本システムでは, 試料断面からの情報取得, 特に形状情報取得のためにも, バニッシングによる試料表面形状の変形を避けるべきである.

そこで, 情報取得に適した切削条件を調査し, 選定した切削条件で, アルミニウム合金ダイカスト試験片の切削加工および断面情報取得をおこない, 以下の結果を得た.

- a) 切込み $5\mu\text{m}$, 送り $5\mu\text{m}/\text{rev}$ で切削加工した表面を SEM 観察した結果, 表面に変形はみられず, 微細構造についても輪郭部が明瞭であることから, 安定した切削加工がおこなわれている.
- b) $20 \times 14 \times 20\text{mm}$ のアルミニウム合金ダイカスト試験片内部 3 次元情報を, $4 \times 4 \times 5\mu\text{m}$ の空間分解能で取得可能である.
- c) 試料断面のレプリカの形状測定から, 断面画像において巣の領域を抽出可能であることを確認した.
- d) アルミニウム合金ダイカスト試験片内部に多数存在する巣を, 断面画像から抽出し, 3 次元再構築をおこなうことで, 形状, 体積分布の調査が可能となった.
- e) X 線 CT と比較し, 本システムは微細な巣を検出可能であり, 巣の微細な形状を明らかにした.

第 5 章では, 開発したシステムを用いた生体硬組織試料である骨, および凍結マウス頭部の観察結果について述べた.

骨は生体の構造を支えているが, 従来の生体試料観察方法では, 軟組織は骨から取り外してから観察されることが多かった. しかし, 骨から取り外すことで軟組織は容易に変形する. 生きている状態に近い形状を観察するために, 骨から取り外さずに観察する方法が求められている.

第 2 章で述べた予備実験では, 生体硬組織に対しても, 高精度な断面を作製可能であった. 生体硬組織に対し, 連続的に高精度な断面を作製するために, 詳細な調査をおこない, 以下の結果を得た.

- a) 骨は切削加工に対し、構造に起因する異方性を有する。
- b) 切込み $10\mu\text{m}$ 、送り $10\mu\text{m}/\text{rev}$ で切削加工した表面を SEM 観察した結果、表面に変形はみられず、微細構造についても輪郭部が明瞭であることから、安定した切削加工がおこなわれている。
- c) 骨内部の血管を断面画像から抽出し、3次元再構築可能であった。
- d) タイリング観察を用いることで、高分解能での試料断面全面からの情報取得が可能である。

続いて、生きている状態に近い形状で観察するため、軟組織と硬組織を含む生体試料を凍結包埋し、切削および観察をおこない、以下の結果を得た。

- a) 切込み $10\mu\text{m}$ 、送り $10\mu\text{m}$ で切削加工した表面を顕微鏡観察した結果、表面に変形は見られず、微細形状についても輪郭部が明瞭であったことから、安定した切削加工がおこなわれていたと考えられる。
- b) $40\times 20\times 20\text{mm}$ の凍結包埋マウス頭部試料の内部3次元情報を、最小 $5\times 5\times 10\mu\text{m}$ の空間分解能で取得可能である。
- c) 断面画像から血管領域を抽出し、3次元再構築することで、生きている状態に近い形状の脳内部血管の観察が可能となった。

第6章では、開発したシステムの応用および展望について述べた。

断面情報取得方法として、光学顕微鏡だけではなく各種の表面分析法が導入可能である。また、切削時の切削抵抗は断面情報として利用可能な知見となりうることを示した。

第7章では、本論文の総括を述べ、今後の課題について述べた。

本システムを用いることで、開発当初の目的どおり、熟練者でなくとも、高精度な試料断面作製を容易におこなうことができる。また、1断面あたり1分以内の切削加工が可能である。本システムにより、生きている状態に近い形状の生体試料内部構造情報の取得や、工業製品の内部欠陥情報の取得を実現した。

本システムは、金属材料、生体試料分野以外に、植物、食品等の内部構造観察、複合材料、樹脂等を含む工業製品、および多くの人工物の検査等の幅広い分野に応用可能であると考えられる。また、本システムにより取得した試料内部3次元情報は、ラピッドプロトタイピング等の3次元造形で利用可能な設計図となり得る。