

「インスタンスセグメンテーションに基づく歯科用セラミックスの 結晶領域抽出法の開発」

山口 哲（歯学研究科），松下 康之（IDS）

1. 研究の背景

歯の修復に用いられる歯科用セラミックスは、ガラスマトリックス内に熱処理条件に応じて様々な結晶が析出することで材料強度を発現するため、結晶粒の形状や分散状態の観察は新規の歯科用セラミックスを開発するうえで重要である。しかし、従来の試料表面の電子顕微鏡像を画像処理する手法では、隣接する結晶粒が1つの塊として抽出されてしまうため、個々の結晶粒の領域を正確に抽出し、定量的に評価することが困難であった。

これまでに、画像処理技術（二値化、ノイズ除去、膨張・収縮など）を駆使して電子顕微鏡像から結晶領域を抽出する試みは報告されている[a]が、歯科用セラミックスの結晶領域を抽出する目的で開発されたAIは存在しない。

2. 研究の目的

本研究では、歯科用セラミックスの電子顕微鏡像から結晶領域を自動で抽出するAIを開発することを目的とした。

3. 研究の方法

3.1 被験材料と試料作製

歯科用セラミックスとして、市販の IPS e.max CAD (EX; Ivoclar)、Celtra Duo (CD; Dentsply Sirona)、Vita Sprinity(VS; VITA Zahnfabrik)を用いた。各ブロックから厚み1 mmの試料をダイヤモンドブレードで切り出した後、切断面を耐水研磨紙（P4000番）

で研磨し、5分間のイオンミリング処理を施した。

3.2 AIの訓練用画像の準備

走査型電子顕微鏡（SU-70、HITACHI）で試料の表面を15,000倍で観察し、20の観察像を得た。1つの画像から1024×1024ピクセルの領域をランダムに2枚切り出し、得られた40枚の画像のうち、20枚をAIの訓練用画像、残りの20枚をテスト用画像とした。

3.3 アノテーション

20枚の訓練用画像について、アノテーション用のソフトウェア (LabelMe) を用いて、結晶粒の領域を手動で抽出し、これらを正解領域とした。ただし、画像の境界にまたぐ結晶は抽出の対象から除外した。

3.4 AIの学習と抽出精度の評価

Bolya らによって提案された YOLACT[b] に基づき、訓練用画像を用いてAIの学習を行った。テスト用画像を用いて結晶領域の抽出を行い、学習済みのAIが抽出した結晶の数をSEM像で実際に確認できる結晶の数で除算することで、抽出精度を求めた。

4. 研究成果

学習済みのAIを用いて、EX、CD、VSの走査型電子顕微鏡像から結晶領域を抽出した結果の例を図1に示す。抽出された結晶領域は、元の走査型電子顕微鏡像上に色付きの半透明マスクとして重ね合わせて表

示した。また、識別された各結晶を長方形で囲み、それぞれの重心位置に直径 10 ピクセルの円を描画した。抽出精度は、EX で $95.3\pm7.1\%$ 、CD で $94.0\pm8.0\%$ 、VS で $94.7\pm7.6\%$ であった。

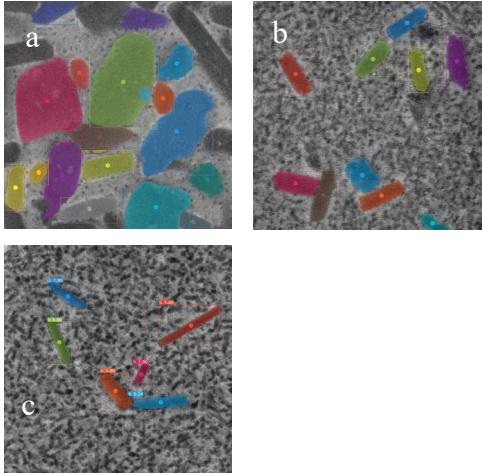


図 1. 抽出結果の例 (a) EX, (b) CD, (c) VS

結晶の形状特性が異なる EX、CD、VS いずれの群においても、構築した AI はテスト用画像から結晶領域を自動的かつ高精度に抽出することに成功した。抽出された領域の重心位置を記録することで、結晶の分散状態を定量的に比較することが可能となった。

そこで、得られた結晶の重心分布に対してトポロジカルデータ解析[c]を適用し、まず各群の Persistence Diagram (PD) を作成して birth-death 空間上の特徴点分布を可視化した (図 2)。

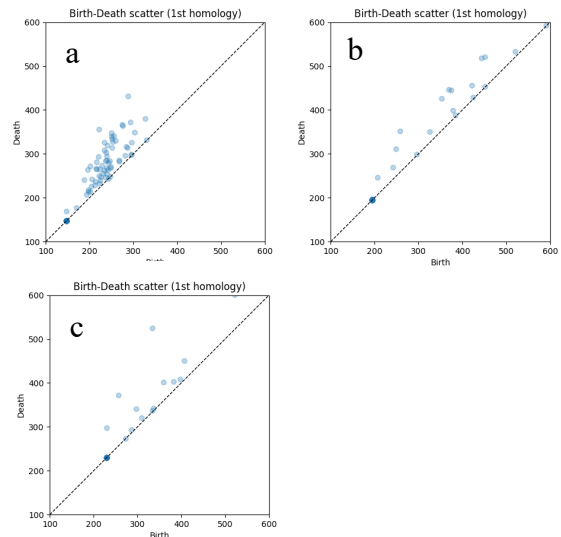


図 2. PD(a) EX, (b) CD, (c) VS

続いて、各群の空間的特徴を 20 個の重心分布から平均 Persistence Image (PI) として可視化・定量化した (図 3)。表 1 に、各群の平均 PI における最大値と対応する birth/death 値を示す。

表 1. PI 解析による結晶分布特徴量

	最大値	birth 値	death 値
EX	0.00320	232.5	337.3
CD	0.00113	247.5	194.8
VS	0.00151	327.2	588.0

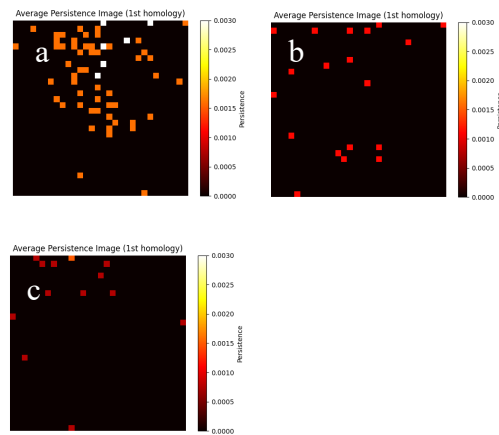


図 3. PI (a) EX, (b) CD, (c) VS

各群の PI による結晶分布のトポロジー的特徴と、これまでの実験[d]で測定した二軸

曲げ強度を比較した結果、EX は適度なスケールかつ寿命の長い空隙・サイクル構造が多く、高い曲げ強度 (495 ± 67 MPa) を示した。一方、CD は小さく短寿命な特徴が主体であり、最も低い強度 (298 ± 93 MPa) であった。VS は粗大・長寿命なサイクルが卓越し、中間的な強度 (354 ± 46 MPa) となった。これらの結果より、「材料内部の結晶分布において、適度なスケールと持続時間を持つ空隙ネットワークが強度の発現に最も寄与する」ことが示唆された。

今後、図 4 に示すようにテスト用画像が相互に重複するように切り出すことで、画像の境界をまたぐ結晶領域の抽出も可能となり、より広い範囲での抽出に発展できると期待される。

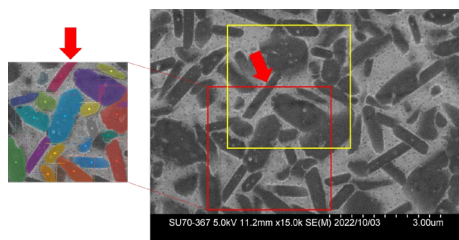


図 4. 境界をまたぐ結晶領域の例

以上のように、本研究では歯科用セラミックスの走査型電子顕微鏡像から AI を用いて結晶領域を自動的かつ高精度に抽出する方法を開発し、さらにトポロジカルデータ解析により結晶分布の位相幾何学的特徴と機械的強度との関係を明らかにした。

謝辞

本研究の遂行にあたり、令和 5 年度大阪大学未来基金「学部学生による自主研究奨励事業（歯学部）」の代表者である鎌田陽氏、および共同研究者の田中淳貴氏に深く感謝いたします。

また、各種歯科用セラミックスの試料提供および走査型電子顕微鏡像の撮影に際し、株式会社ジーシー R&D 研究所の保木井悠

介氏、秋山茂範氏には多大なるご支援を賜りました。ここに心より感謝申し上げます。

引用文献

- [a]. Ferraz DC, *et al.*, A novel simplified method for assessing crystal length and crystalline content in dental ceramics, *Microsc Res Tech* 88(1):224-233, 2025.
- [b]. Bolya D, *et al.*, YOLACT: Real-time instance segmentation, arXiv: 1904.02689, 2019.
- [c]. Adams H, *et al.*, Persistence images: A stable vector representation of persistent homology, *Journal of Machine Learning Research* 18(8):1-35, 2017.
- [d]. Yamaguchi S, *et al.*, Inverse Analysis of Topological Features of Glass-Ceramics by Materials Informatics, The 102nd IADR General Session and Exhibition, New Orleans, March 15, 2024.