

# 冠動脈 OCT 画像からの石灰化領域抽出および可視化手法

及川 遼<sup>†</sup> 加藤 徹<sup>†</sup> 土井 章男<sup>†</sup> 石田 大<sup>‡</sup>

<sup>†</sup> 岩手県立大学ソフトウェア情報学部 〒020-0611 岩手県滝沢市菓子 152-52

<sup>‡</sup> 岩手医科大学 〒020-0023 岩手県盛岡市内丸 19-1

E-mail: <sup>†</sup> {g231t006, toru\_k, doia}@iwate-pu.ac.jp, <sup>‡</sup> maishida@iwate-med.ac.jp

**あらまし** ここ 10 年で冠動脈の石灰化部の診断には光干渉断層計 (OCT) が広く使われるようになり, 冠動脈ステントの自動抽出, 内腔の評価, 3D イメージの出力も可能であるが, 石灰化領域の自動抽出はごく近年まで研究が行われておらず, 抽出した領域の可視化手法には改良の余地がある. 経皮的冠動脈インターベンション (PCI) では石灰化領域が 180 度以上連続している場合, および厚さが 0.5mm 以上の場合に拡張障害が問題になるとされており, 既存の診断支援システムでは石灰化領域の連続性をリング形状で表現するものがあるが, 石灰化領域の厚み表示は最大値のみで, それ以外の厚み評価は得られない. 本論文では冠動脈 OCT 画像から石灰化領域の自動抽出を行い, その連続性をリング形状, 厚み情報を色情報として表現した.

**キーワード** OCT 画像, 可視化, セマンティックセグメンテーション, 深層学習

## 1. はじめに

冠動脈のカテーテル検査や治療では光干渉断層法 (Optical coherence tomography:OCT) が広く使用されるようになった. OCT は 10~20  $\mu\text{m}$  という高い解像度を持つ, 近赤外線レーザー光と光ファイバー技術を応用した血管内画像診断装置である. IVUS の 10 倍以上の空間分解能で評価することができ, 高解像度で石灰化を明瞭に抽出することが可能なため, 様々な施設で導入されている.

近年では OCT 画像から病変を検出・分類する機械学習モデルを作成した例が報告されている [1, 2, 3].

特に Chu らはプラークに対してピクセル単位で自動的に特徴づけを行うことが可能な新しい AI フレームワークを開発し, 商用診断支援システム (図 1) に統合することで, 血管断面の病変部の高精度な分類表示を実現している [3].

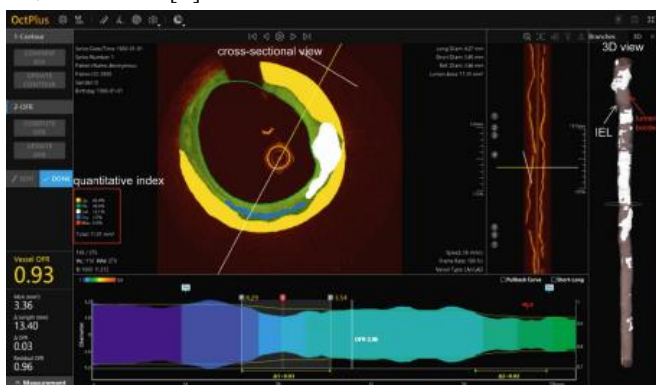


図 1 OctPlus software による病変部の可視化

また, 米国の Abbott 社は AI を搭載した循環器 OCT 画像診断装置用ソフトウェア Ultreon 1.0 を開発している. 図 2 はそのユーザインターフェースである. 血管断面図の周囲に弧を描くことで石灰化領域を表示している [4].

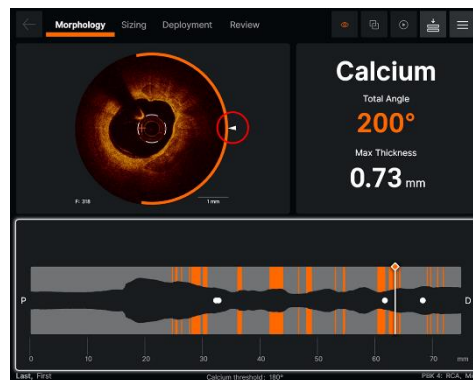


図 2 Ultreon 1.0 による石灰化領域の可視化

しかしながら, これらのインターフェースでは石灰化領域の連続性が重視されており, 石灰化領域の厚みは最大値のみ表示されるが, それ以外の厚み評価は得られない.

PCI で必要な情報は厚みの最大値ではなく 0.5mm 未満のくびれが存在するかどうかであるため, 本論文では石灰化領域の連続性と厚みの情報に応じて, より直観的に理解可能な可視化手法を提案する. 具体的には, 連続性をリング形状, 厚み情報を色情報として同時表現する.

## 2. 提案手法

本手法では深層学習を用いて石灰化領域の抽出を行う [5]. データセットは医師がラベル付けを行った冠動脈 OCT 画像 2, 149 枚を使用する.

ラベル付けは, 医師が内側の境界は赤色, 外側の境界は黄色でトレースし, 2 名の専門家による相互チェックを行う. 各線分は閉じた境界線を構成しており, この境界線から石灰化領域を自動で塗りつぶしている (図 3). 学習データは, 鏡映変換 (左右の鏡映変換 1 回) と, 回転 (45 度単位の回転 (8 種類)) を行い, 最終的に元データは 16 倍にデータ拡張される (図 4).

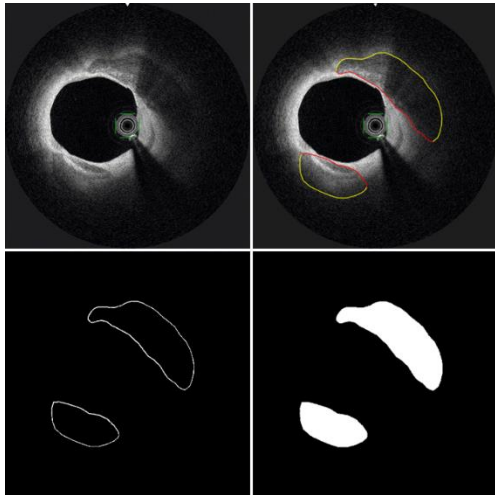


図 3 ラベル画像の作成

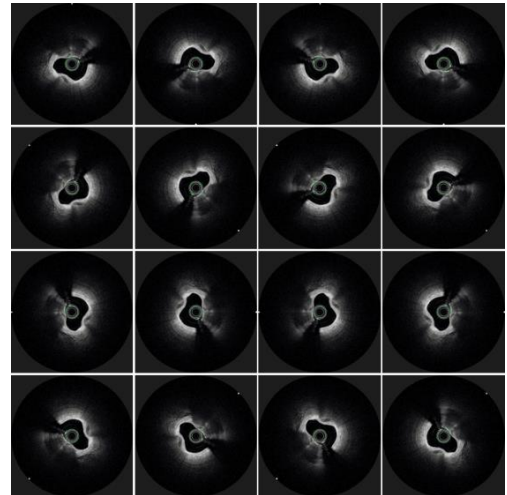


図 4 データ拡張

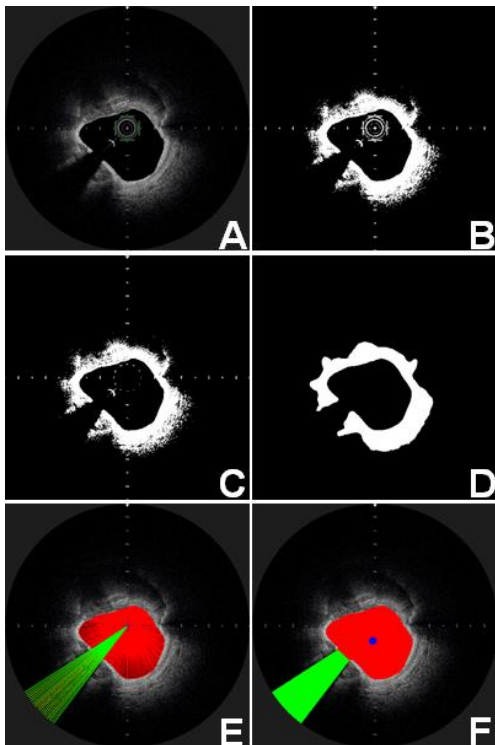


図 5 ガイドワイヤーの影と血管内腔中心の検出

学習はセマンティックセグメンテーション用のネットワークである DeepLabv3+を用いて行う。

抽出された石灰化領域を可視化するにあたって、カテーテルやガイドワイヤー、DICOM ビューワからの出力などアーチファクトが存在するため除去の必要がある。まず、OCT では血管に刺したガイドワイヤーに沿わせてカテーテルを移動させるため、OCT 画像中央にはカテーテルが表示される(図 5A)。大津の 2 値化(図 5B)を行ったのち、カテーテル部のピクセルを除去する(図 5C)。また、メディアンフィルタでガイドワイヤー(カテーテル側面に存在する三日月状の信号)および DICOM ビューワからの出力を除去する(図 5D)。

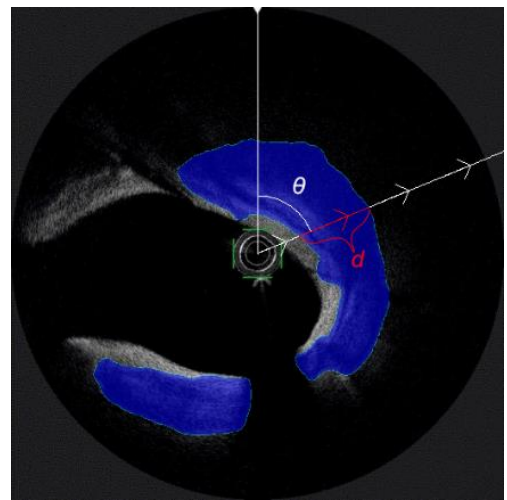


図 6 角度に応じた石灰化の厚みの計算

ガイドワイヤーは光を強く反射するため、その後方の領域には影が生まれる。この影は検出して計算から除外することが望ましいため、画像中心から外周に向かって放射状にピクセルを走査することで領域を検出する(図 5E)。

次に、石灰化の厚みを計算する際に画像中心ではなく血管内腔中心を用いる必要があるため求めておく。血管内腔中心は血管内腔領域の重心位置と等しいため、前述の走査で検出された非ゼロピクセルを接続することで血管内壁の閉じた境界線を構成し、その内側を塗りつぶした図形について重心位置を求める(図 5F)。

これらのデータを用いて、抽出された石灰化領域の可視化を行う。まず、血管内腔中心を原点として、一定角度ごとに放射状に石灰化の厚みを計算し、石灰化が連続する領域の角度と厚みの最大値を取得する(図 6)。また、図 5F の結果をもとにガイドワイヤーの影となる領域を計算から除外する。ここで厚み  $d(\theta)$  は角度  $\theta$  における血管内腔の中心からの石灰化領域の厚みであり、式 (1) で定義される。

$$d(\theta) = \alpha \sum_{r=0}^L S(P) \quad (1)$$

$$S(P) = \begin{cases} 1 & \text{if } P(rcos\theta, rsin\theta) \text{ is calcified} \\ 0 & \text{if } P(rcos\theta, rsin\theta) \text{ is not calcified} \end{cases} \quad (2)$$

ここでは、P は画素の位置、r は原点からの距離、 $\theta$  は図 6 に示す角度、S(P) は石灰化 (1) か非石灰化 (0) を返す関数である。また、 $\alpha$  は画像空間から距離への調整値でありピクセル長と画像サイズから計算される。

本手法では石灰化領域の厚みに応じて色がつけられた円を表示する。色空間は HSV 系 (図 7) を用いて計算し、最終的には RGB 系に変換する。H は色相 (Hue) を表し、

$$H = H_{max} * (1 - (d(\theta)/d_{max})), \quad (3)$$

$$0 \leq H$$

で計算する。H の最大値を表す定数  $H_{max}$  は青色の 240 と設定する。また、 $d_{max}$  は石灰化領域の厚みの最大値を表す定数であり、 $d(\theta) > d_{max}$  の場合、H は 0 (赤色) となる。

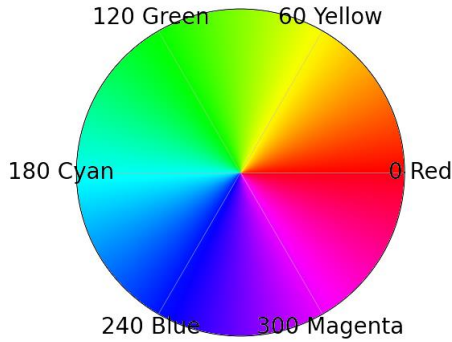


図 7 計算に用いる色相環

図 8 に全体のアルゴリズムを記載する。厚み  $d(\theta)$  における RGB 系の色は C で定義され、`hsv_to_rgb` は色空間を HSV 系から RGB 系へ変換する関数である。

#### Algorithm 1 Algorithm for Color

- 1:  $H = H_{max} * (1 - (d(\theta)/d_{max}))$
- 2: **if** ( $H < 0$ ) **then**
- 3:   H = 0
- 4: **end if**
- 5: C = `hsv_to_rgb(h, 255, 255)`

図 8 色計算のアルゴリズム

得られたデータからの最終的な可視化結果を図 9 に示す。閾値  $d_{max}$  は 1.0 と設定する。石灰化が見られない領域では青色がつけられ、顕著な領域では赤色をつけられる。ここで Max Angle は石灰化が連続する最大角度であり、Max Thickness は厚みの最大値である。

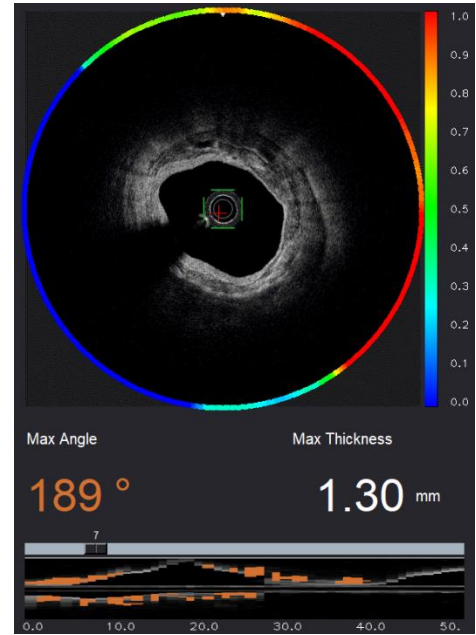
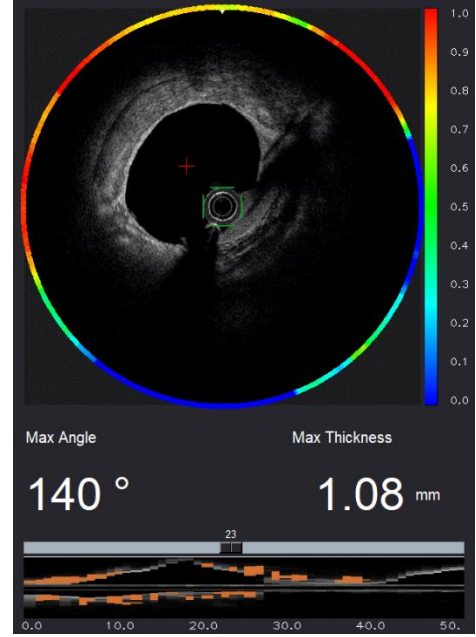


図 9 石灰化領域の可視化

### 3. 考察

既存の商用ソフトウェア Ultreon (図 2) と比較して、提案手法では、石灰化領域の厚みに応じて色がつけられた円を表示することで、診断に重要である石灰化領域の連続性と厚みについて、より直観的に理解可能な形で可視化を行っていると考えられる。

特に、Ultreon では石灰化領域がバルーンなどで割れやすいとされる石灰化の薄い箇所の評価が困難であったため、本システムが拡張予測に役立つと考えられる。

実験に使用したモデルでの検証結果を図 10 に示す。検証環境を表 1 に示す。画像濃青色部は石灰化領域を、淡青色部は非石灰化領域を表している。



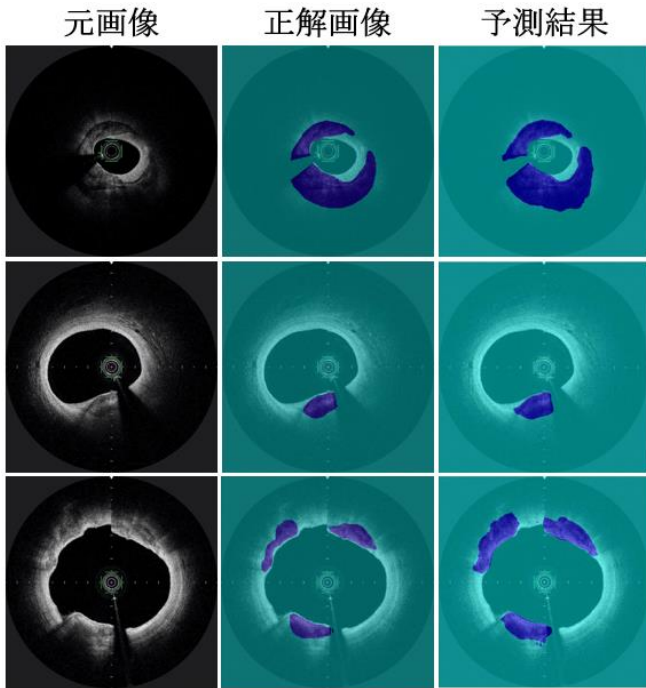


図 10 外部検証結果

表 1 検証環境

CPU	Intel® Core™ i9-9940X
RAM	128GB (16GB×8)
GPU	NVIDIA QUADRO RTX 8000 ×4
OS	Ubuntu 18.04 LTS
被験者数	44 名
画像サイズ	512×512pixels
学習データ	31,184 枚
テストデータ	200 枚
学習回数	500 epochs
ミニバッチサイズ	32
初期学習率	0.0001
最適化手法	Adam

## おわりに

本論文では冠動脈 OCT 画像から抽出された石灰化画像について、より直観的に理解可能な形で可視化する手法を提案した。石灰化領域の連続性をリング形状、厚み情報を色情報として同時表現することで、医師は直感的に理解することが可能となった。

現状では、ガイドワイヤーの影により不連続となった石灰化領域が実際は連続していた場合に、それを検出できないことが課題と言える。画像の欠落を補完す

る方法としては GAN (Generative Adversarial Network) を用いたアプローチが存在しており、検討の余地がある[6].

## 謝辞

本研究は JSPS 科研費（基盤研究 (C) JP20K08142）の助成を受けたものです。また、公益財団法人 JKA の「令和 2 年度研究開発補助事業」、岩手県の「令和 2 年度いわて戦略的研究開発推進事業」より研究助成を得ました。ここに謝意を表します。

## 文 献

- [1] S. He, J. Zheng, A. Maehara, G. Mintz, D. Tang, M. Anastasio, H. Li "Convolutional neural network based automatic plaque characterization from intracoronary optical coherence tomography images" arXiv:1807.03613 10 Jul 2018.
- [2] H.-S. Min, J. H. Yoo, S.-J. Kang, J.-G. Lee, H. Cho, P. H. Lee, J.-M. Ahn, D.-W. Park, S.-W. Lee, Y.-H. Kim, C. W. Lee "Detection of optical coherence tomography-defined thin-cap fibroatheroma in the coronary artery using deep learning" EuroIntervention: journal of EuroPCR in collaboration with the Working Group on Interventional Cardiology of the European Society of Cardiology, 16.5: 404-412 Aug 2020.
- [3] M. Chu, H. Jia, J. L. G.-Chico, A. Maehara, Z. A. Ali, X. Zeng, L. He, C. Zhao, M. Matsumura, P. Wu<sup>1</sup>, M. Zeng, T. Kubo, B. Xu, L. Chen, B. Yu, G. S. Mintz, W. Wijns, MD, N. R. Holm, S. Tu "Artificial intelligence and optical coherence tomography for the automatic characterisation of human atherosclerotic plaques." EuroIntervention: journal of EuroPCR in collaboration with the Working Group on Interventional Cardiology of the European Society of Cardiology 17.1: 41-50 May 2021.
- [4] Abbott, "ULTREON™ 1.0 SOFTWARE", <https://www.cardiovascular.abbott/int/en/hcp/products/percutaneous-coronary-intervention/intravascular-imaging/ultreon-software/about.html>, (2021-10-14).
- [5] R. Oikawa, T. Kato, A. Doi, B. Chakraborty, M. Ishida "Extraction of Calcified Regions from OCT Images Using Deep Learning" IEICE-MI2021-12, pp.15-19 July 2021.
- [6] S. Iizuka, E. Simo-serra, H. Ishikawa, "Globally and Locally Consistent Image Completion" ACM Trans. Graph., 36(4):107:1–107:14, 2017.