

奨励金No.1625

光子計数型 CT 装置を用いた被写体の組成分析技術の 循環器領域利用に向けた研究

浅原 孝

岡山大学学術研究院保健学域 研究准教授

Application of Composition Analysis Technology Using Photon-Counting CT in the Field of Cardiovascular Medicine

Takashi Asahara

Faculty of Health Sciences, Okayama University, Research Associate Professor



本研究では、近年実用化された臨床用光子計数型コンピュータ断層撮影（PCCT）装置で得られた画像データから被写体の組成を定量評価する解析技術を開発し、循環器領域への応用可能性を検討した。具体的には、実効原子番号（ Z_{eff} ）画像を生成し、冠動脈プラーク解析に適用した。 Z_{eff} 画像から算出した新規指標「 Z_{eff} スコア」は、従来指標と高い相関を示しつつ、低密度プラークを含めた評価を可能とし、プラークの体積および組成を反映した定量評価法としての有用性を示した。

In this study, we developed an analytical method to quantitatively evaluate tissue composition from image data acquired using a clinically available photon-counting computed tomography (PCCT) system, and investigated its applicability in the cardiovascular field. Effective atomic number (Z_{eff}) images were generated and applied to the analysis of coronary artery plaques. A novel metric, the “ Z_{eff} score,” derived from Z_{eff} images, showed a strong correlation with conventional score while enabling evaluation including low-density plaques. These results demonstrate the potential of our method as a quantitative assessment approach that reflects plaque composition.

1. 研究内容

1. 研究背景と目的

冠動脈は心筋へ酸素を供給する重要な役割を担っている。動脈硬化に伴って冠動脈にプラークが形成されると血流が阻害され、虚血性心疾患の発症リスクが増加する。この冠動脈プラークの早期検出および定量的評価は臨床上極めて重要である。現在の臨床検査では、造影剤を用いない心臓コンピュータ断層（Computed Tomography: CT）検査で得られた CT 画像を用い、低侵襲的にリスク評価が行われている。一般的には、プラークの画素値（CT 値）と体積から算出される「ア

ガストンスコア」が広く用いられているが、CT 値は撮影条件や再構成条件に依存するため、厳密には物理量とは言えず、装置間差や条件依存性の影響を受ける。また、CT 値が 130 HU 未満のボクセルはプラーク領域外とみなされるため評価から除外され、低密度プラークの評価が困難であるという課題がある。

近年、光子計数型検出器（Energy-resolving photon-counting detector: ERPCD）を搭載した CT（Photon-counting CT: PCCT）が実用化され、従来のエネルギー積分型検出器とは異なり、X 線のエネルギーごとの情報を取得できるように

なった。これにより、従来の形態評価に加えて、物理量に基づく定量画像の生成が可能となった。特に実効原子番号 (Z_{eff}) は物質の組成を反映する指標であり、組織の構成元素を定量的に評価できる可能性を秘めている。

本研究の目的は、PCCT で生成した Z_{eff} 画像を用いて冠動脈プラークの解析手法を開発し、新たな定量指標「 Z_{eff} スコア」の循環器領域における臨床応用可能性を実証することである。

2. 方法

2.1. 冠動脈プラークのスコアリング手法

図 1 (a) に従来の冠動脈プラークのスコアリング手法である「アガストンスコア」の概念を示す。アガストンスコアは、動脈内のプラーク領域に体積関心領域 (Voxel of interest: VOI) を設定し、130 HU 以上の CT 値を有するボクセルをプラークとして抽出する。CT 値に応じて 1~4 の重み付けを行い、体積との積算によりスコアを算出する。この手法は簡便で臨床的に広く利用されているが、重みづけの段階が粗く、CT 値に依存するため撮影条件や再構成条件の影響を受けるという課題が

ある。

本研究では、 Z_{eff} 画像に基づく新たな指標として図 1 (b) に示す「 Z_{eff} スコア」を提案する。 Z_{eff} スコアは、被写体の組成情報 (Z_{eff}) に基づいてプラークを評価する。血液の Z_{eff} 値である 7.42 を閾値とし、それ以上のボクセルを積算することで算出した。これにより、血液成分を除外しつつ、プラーク全体の組成情報を反映した定量評価が可能となる。

PCCT 装置には Z_{eff} 画像を生成するアプリケーションが搭載されていないため、独自のアルゴリズムによって画像を生成した。まず、低および高エネルギーの仮想単色画像 (Virtual monoenergetic image: VMI) を用いた。VMI の CT 値を線減弱係数 (μ) に変換し、異なるエネルギーにおける μ の比を求めた。 μ の比と原子番号には一意の関係が知られているため、これを利用して Z_{eff} 画像を生成した。画像解析は Mathematica (Wolfram Research, Champaign, IL) を用いた自作プログラムにより実施した。

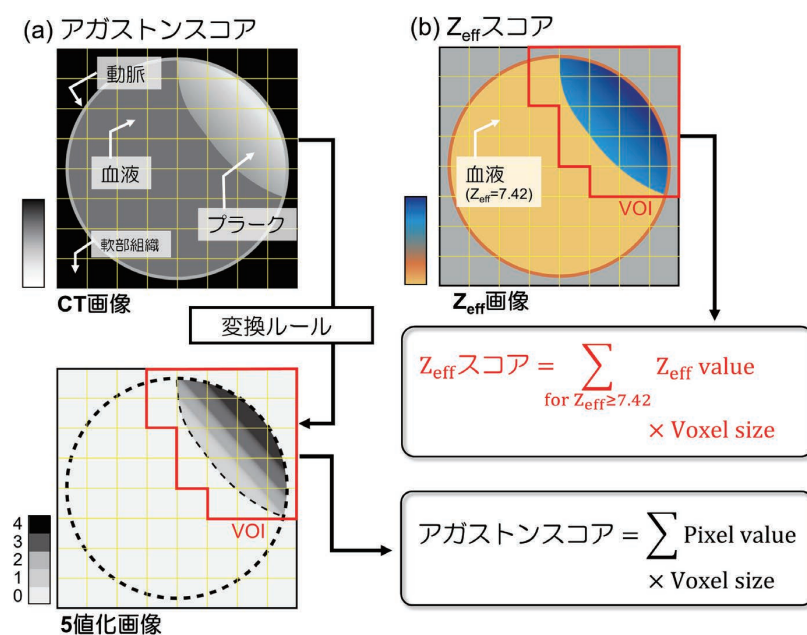


図 1 Z_{eff} 画像による冠動脈プラークの評価

2.2. 臨床画像の解析

非造影心臓 CT 検査を受けた患者 10 名における 64 個の冠動脈プラークを対象に解析を行った。本研究は岡山大学倫理審査委員会の承認を得て実施された（承認番号：研 2409-017）。対象患者は男性 8 名、女性 2 名で、年齢は 46～93 歳（平均 72.1 ± 11.9 歳）であった。撮影条件は、管電圧 120 kVp、回転時間 0.25 秒、検出器コリメーション 144×0.4 mm であり、心電図同期によるノンヘリカル撮影で取得された。40 keV、70 keV、および 190 keV の VMI を再構成した。40 および 190 keV の VMI は Z_{eff} スコア算出に、70 keV の画像はアガストンスコアの算出に用いた。石灰化プラークを有する冠動脈に対して臨床用画像解析ソフトウェア（ZioCube; Ziosoft Inc., Tokyo）を用いて VOI を手動で設定し、アガストンスコアおよび Z_{eff} スコアを算出した。

3. 結果と考察

3.1. 典型症例における解析結果

図 2 に代表的な臨床画像を示す。右下のイラスト

トに示すように、大動脈から分岐する左冠動脈が描出されている。70 keV の VMI では大小 2 つのプラークが認められ、大きいプラークではアガストンスコア（AS）は 369、小さいプラークでは 45 と評価されている。一方、 Z_{eff} 画像ではこれらのプラークに対する Z_{eff} スコアはそれぞれ 2178 および 422 と算出された。

図 3 に低および高密度プラークの 2 例に関する詳細な解析結果を示す。低密度プラーク（図 3、(A)）では、多くのボクセルが 130 HU 未満であり、アガストンスコア算出に寄与しない領域が多いことがわかる。一方、 Z_{eff} 値のヒストグラムではほとんどのボクセルが閾値（ $Z_{\text{eff}} \geq 7.42$ ）以上に分布しており、ほとんどのボクセルがスコアの算出に寄与していた。このことから、従来指標は低密度プラークを過小評価する可能性が示された。

高密度プラーク（図 3 (B)）では、CT 値に基づいた評価では 130 HU 未満および 400 HU 以上に分布するボクセルに対してそれぞれ重み係数 0 および 4 が適用されるため、一部のボクセルが過大に評価される傾向がある。 Z_{eff} 画像ではほぼ全

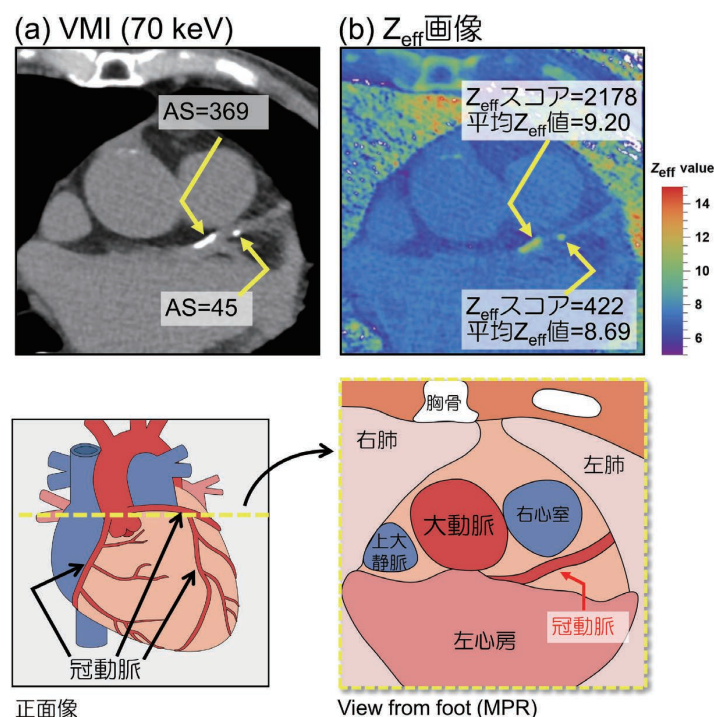


図 2 冠動脈プラークの CT 画像と生成した Z_{eff} 画像

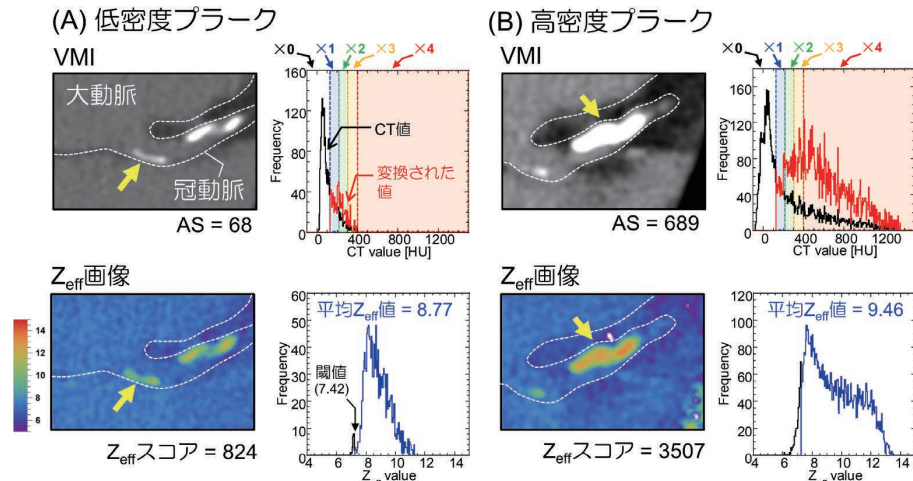


図 3 低密度および高密度プラークの詳細な解析

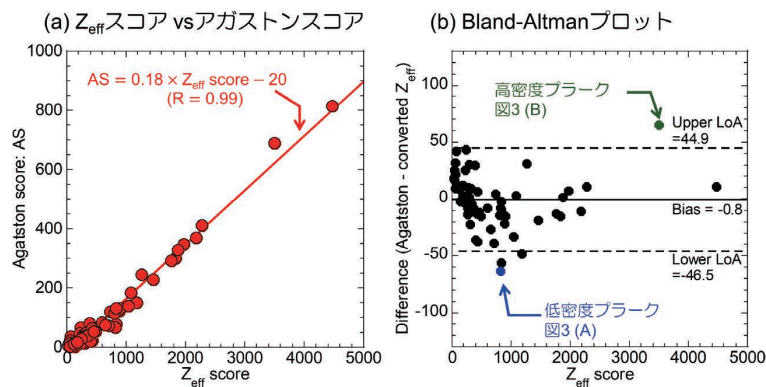


図 4 アガストンスコアと Z_{eff} スコアの比較

でのボクセルが閾値以上に分布し、プラーク領域の全画素が連続的にスコアに反映される。このため、従来指標が過大評価していた高密度プラークを適切に評価できる可能性が示された。

3.2. 全症例における統計解析

図 4 (a) に 64 個のプラークで計測したアガストンスコアと Z_{eff} スコアの関係を示す。両スコアとの間には強い線形相関が認められ、 Z_{eff} スコアは従来指標と同等の傾向を示すことを意味している。図 4 (b) に、 Z_{eff} スコアとアガストンスコアとの Bland-Altman 解析の結果を示す。平均差（バイアス）は -0.8 であり、大部分のデータは 95% 一致限界（LoA）の範囲内に分布した。一方で、低密度および高密度プラークは一致限界外に

位置しており、従来のアガストンスコアでは評価が困難な症例であることが明らかとなった。これらの結果より、 Z_{eff} スコアは従来のスコアリング法と良好に一致しつつ、従来法では評価が不十分であったプラークに対しても有用な評価指標となる可能性が示唆された。

さらに、図 5 にアガストンスコアと Z_{eff} スコアで解析されたプラーク体積の比較を示す。アガストンスコアでは 130 HU 未満のボクセルは除外されるため、 Z_{eff} スコアと比較して 39% 小さく評価されていることが明らかとなった。

4. まとめ

本研究では、臨床用光子計数型 CT (PCCT) で実効原子番号 (Z_{eff}) 画像を生成し、冠動脈プラーク

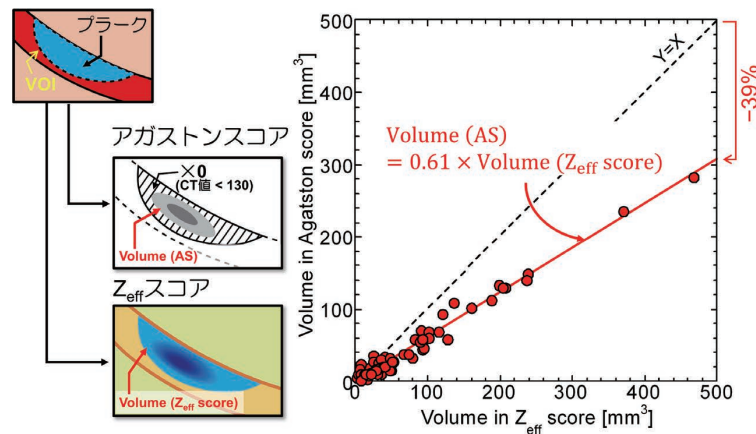


図 5 解析されたプラーク体積の比較

クの定量評価に応用した。 Z_{eff} 画像に基づいた Z_{eff} スコアを提案し、従来のスコアとの比較を行った結果、強い相関を示した。さらに、 Z_{eff} スコアはプラーク領域の全ボクセル情報を反映するため、低密度および高密度プラークを含めた評価が可能であることが示された。従来指標では約 39% の体積が評価から除外されていたが、本手法ではより包括的なプラーク評価が可能となることが示唆された。 Z_{eff} 画像に基づいたスコア手法は冠動脈プラークの新たな定量指標として有用である可能性が示された。

5. 謝辞

本研究の遂行にあたり、公益財団法人日立財団より多大なご支援をいただき、心よりお礼申し上げます。また、本研究は林裕晃教授（金沢大学融合研究域）および紀本夏実講師（純真学園大学保健医療学部）の研究協力を得て行いました。実験は岡山大学病院に附置されている CT 装置を用いて行い、同院医療技術部放射線部門の皆様には実験にご協力いただきました。ここに深く感謝申し上げます。

2. 発表（研究成果の発表）

【論文】

1. T. Asahara, M. Mitani, N. Kimoto, R. Nishigami, K. Takegami, Y. Morimitsu, N.

Akagi, T. Miyoshi, Y. Kanazawa, T. Iguchi, H. Hayashi. Applicability of effective atomic number (Z_{eff}) image analysis of coronary plaques measured with photon counting computed tomography, *Investigative Radiology*, in press, 2026.

2. N. Kimoto, R. Nishigami, T. Asahara, Y. Kanazawa, A. Katsumata, S. Yamamoto, H. Hayashi. Counting loss correction algorithm for an energy-resolving photon-counting detector for X-ray imaging of biological objects with effective atomic numbers between 3 and 20. *Radiation Physics and Chemistry*, 243, 113723, 2026.
3. T. Asahara, R. Nishigami, D. Kobayashi, N. Kimoto, S. Goto, K. Takegami, R. Ishii, M. Mitani, M. Honda, T. Iguchi, H. Hayashi. A novel wearable dosimeter system that can analyze the incident direction of X-rays for medical dosimetry – Improvements to the detector arrangements and analysis algorithm –. *Radiation Measurements*, 191, 107592, 2026.
4. S. Nishii, T. Asahara, Y. Morimitsu, S. Kajisaki, N. Akagi, M. Honda, H. Hayashi, A. Sugaya, K. Munetomo, F. Higaki, T. Hiraki, T. Iguchi. Optimization of the

reconstruction kernel for temporal bone imaging using photon-counting detector CT: a combined physical and visual evaluation. Radiography, 32(2), 103274, 2026.

【発表】

1. T. Asahara, M. Mitani, N. Kimoto, R. Nishigami, Y. Morimitsu, N. Akagi, T. Miyoshi, T. Iguchi, H. Hayashi. Quantitative CT Imaging of Coronary Plaque based on Effective Atomic Number Image using Photon-Counting CT, Radiological Society of North America (RSNA), Chicago, November, 2025.
2. T. Asahara, M. Ikegami, N. Kimoto, R. Nishigami, Y. Morimitsu, N. Akagi, M. Honda, T. Miyoshi, H. Hayashi, T. Iguchi. Effective Atomic Number Score in Calcified Plaque Evaluation: Approach Using Photon-Counting CT, The 4th International Conference on Radiological Physics and Technology (ICRPT), Yokohama, Apr., 2025.

他、国際学会発表 1 件、国内学会発表 2 件

【受賞】

1. Certificate of Merit Award, Japan Radiology Congress 2025. The 4th International Conference on Radiological Physics and Technology (ICRPT). Effective Atomic Number Score in Calcified Plaque Evaluation: Approach Using Photon-Counting CT, T. Asahara, M. Ikegami, N. Kimoto, R. Nishigami, Y. Morimitsu, N. Akagi, M. Honda, T. Miyoshi, H. Hayashi, T. Iguchi. 2025 年 4 月