

## 内視鏡を用いた食道病変部の面積計測法の検討

### Examination of Area Measurement Method of Esophageal Lesion Using Endoscope

○成田凌\*, 眞部紀明\*\*, 春間 賢\*\*, 長縄明大\*

○Ryo Narita\*, Noriaki Manabe\*\*, Ken Haruma\*\*, Akihiro Naganawa\*

\*秋田大学, \*\*川崎医科大学

\*Akita University, \*\*Kawasaki Medical School

**キーワード** : 内視鏡 (endoscope), バレット食道 (Barrett's esophagus), ピンホールカメラモデル (pinhole camera model), 面積計測 (area measurement), 画像処理 (image processing)

**連絡先** : 〒 010-8502 秋田市手形学園町 1-1 秋田大学大学院理工学研究科  
長縄明大, Tel.: 018-889-2726, E-mail: naganawa@gipc.akita-u.ac.jp

## 1. はじめに

食道の粘膜は扁平上皮という粘膜に覆われているが、バレット食道は、胃食道逆流症によって胃酸が食道へ逆流して炎症を起こし、傷害された扁平上皮が胃から連続して胃と同じ円柱上皮で置き換えられたバレット粘膜が存在する食道である。なお、バレット食道は食道がんを発症するリスクが高まることが知られており、早期に治療する必要がある<sup>1)</sup>。通常、バレット食道は内視鏡で診断され、その大きさによって分類されるが、内視鏡下で患部の面積を求める技術は確立されておらず、医師の経験に頼るか、あるいはシャフトに刻まれたスケールにより長さを測定しているのが現状である。

本研究では、内視鏡で撮影した画像よりバレット食道の面積を求めるため、幾何学的なピンホールカメラモデルによる検討を行い、その有効性を3Dプリンタで製作したファントムに対して検証を行ったので、その結果を報告する。

## 2. バレット食道

バレット食道は、その大きさによってLSBE (Long segment Barrett's esophagus) とSSBE (Short segment Barrett's esophagus) に分類される。LSBEは、バレット食道が全周性かつ最長3 cm以上、SSBEが非全周性もしくは最長3 cm未満のものとなっている。この他にもプラハ分類という評価方法がある<sup>2)</sup>。Fig. 1に模式図として、円筒の食道を開いた様子で示す。この分類では、胃食道接合部を胃のひだの最口側とし、そこから全周性の部分までの長さをC (circumferential extent)、最大長までの部分の長さをM (maximum extent)としている。

バレット食道の危険因子として、胃食道逆流症の他に、高齢であること、男性であること、白人であることなどが挙げられる。日本ではほとんどがSSBEであり、発癌リスクが高くなるLSBEは欧米に多いが、食の欧米化が進んだ日本でもLSBEは増加すると考えられる<sup>3)</sup>。

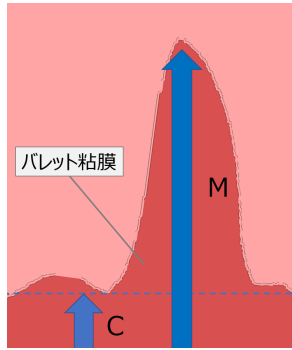


Fig. 1: プラハ分類の概要. Overview of Prague C & M classification.

### 3. 提案手法

#### 3.1 概要

Fig. 2 にピンホールカメラモデルを示す. ピンホールカメラとは, 箱に小さな穴を開けることでスクリーンに結像させる単純なカメラのことであり, 本手法では, 内視鏡で撮影する際の様子をピンホールカメラモデルで近似し, 食道の形状を円筒形と仮定することでその側面積を画像上のエッジから計算する. なお, Fig. 2 は円筒に見立てた食道の中心軸とカメラの光軸が一致するようにして表したものである.

#### 3.2 高さ $h$ の導出

バレット食道の面積は, このピンホールカメラモデルにおいて, 点  $P$  が食道に相当する円筒壁面上に描く軌跡との間が面積となるため, まずは円筒底面から円筒壁面上の任意の点  $P$  までの距離  $h$  を求める必要がある. そこで, レンズからイメージセンサまでの距離を  $f$  mm, レンズから円筒底面までの距離を  $H$  mm, 円筒の半径を  $R$  mm, 光軸から  $P$  がイメージセンサ上で結ぶ像までの距離を  $l$  mm とする. このとき, 三角形の相似則より, これらのパラメータを用いて以下の関係が導かれる.

$$\frac{f}{l} = \frac{H - h}{R} \quad (1)$$

イメージセンサを構成する撮像素子が正方形であると, その模式図を Fig. 3 に示す. 図において, 点  $P$  の画像上での中心からの距離を  $p$  px (ピクセル), 撮像素子 1 辺あたりの長さを  $k$  mm/px とおくと, 次式が得られる.

$$l = kp \quad (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入し,  $h$  について解くと次式が得られる.

$$h = H - \frac{f R}{k p} \quad (3)$$

式 (3) において,  $f$  は Zhang の手法<sup>4)</sup> から求めることができるが, 内視鏡に使われているイメージセンサについては非公表な情報であったため, 別の手段を用いた.

まず, 式 (3) において,  $h=0$  のときと  $h \neq 0$  のときで, それぞれ  $p = p_1$ ,  $p = p_2$  とすると,

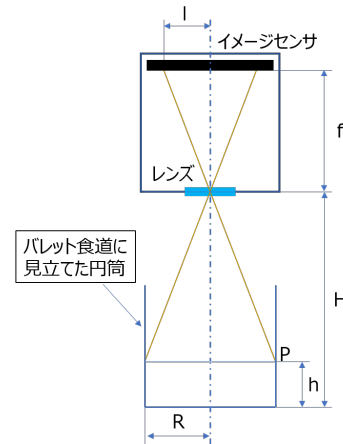


Fig. 2: ピンホールカメラモデル. The pinhole camera model.

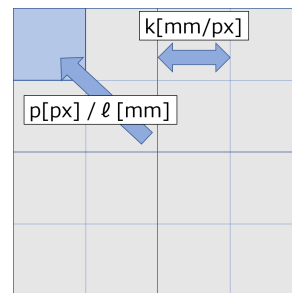


Fig. 3: イメージセンサ模式図. Pattern diagram of image sensor.

以下の2つの式を得る.

$$0 = H - \frac{f R}{k p_1} \quad (4)$$

$$h = H - \frac{f R}{k p_2} \quad (5)$$

式(4)を $R$ について解くと、以下のようになる.

$$R = \frac{k}{f} H p_1 \quad (6)$$

この得られた式(6)を式(5)に代入することで、最終的に式(7)が得られる.

$$\therefore h = H \left( 1 - \frac{p_1}{p_2} \right) \quad (7)$$

式(7)より、円筒壁面上の任意の点Pの底面からの距離 $h$ を求めるために必要なパラメータは、カメラから底面までの距離 $H$  mm, Pの画像中心からの距離 $p_2$  px, 底面エッジの画像中心からの距離 $p_1$  pxの3つのみであることがわかる.

### 3.3 面積の求め方

#### 3.3.1 式の導出

式(7)で求めた $h$ を用いて、まずは円筒の側面積の計算を行う. Fig.4に、厚みが無い中空円筒を上から見たときの様子を示す. 外側の円が円筒上端, 内側の円が底面である. ここで、図中の $n$ は外側のエッジ, すなわち点Pの描く軌跡を構成するピクセルの総数である. また、 $w$ は底面の周長 $C$ を $n$ で割った値であり、本研

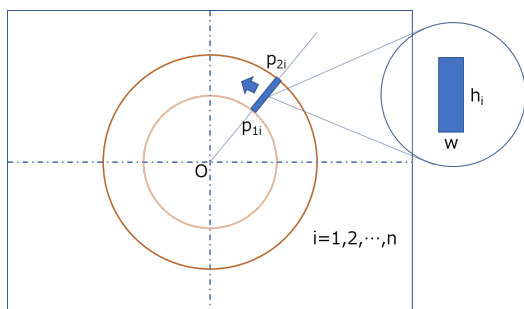


Fig. 4: 側面積計算の概要. Overview of lateral area calculation.

究では、円筒の側面積を $h_i$ に微小長さ $w$ をかけた面積を足し合わせることで求める. なお、Fig. 4において、内側のエッジと外側のエッジのピクセル数が異なるため、 $p_{1i}$ を内側のエッジを構成するピクセルのうち直線 $O-p_{2i}$ に最も近いものと定義する.

以上のことから、円筒の側面積 $S$ は次式で求めることができる.

$$S = \sum_{i=1}^n w h_i \quad (8)$$

#### 3.3.2 底面の周長の求め方

内視鏡を用いて対象物を観察する場合、対象物との距離が変わると画像におけるピクセル数が変わるが、側面積の計算には底面の周長 $C$ を正確に求める必要がある.

そこで、底面の周長 $C$ は、Fig. 5に示すように定規の目盛に赤い点をマーカとして付け、距離を変えながら撮影し、1 mmあたり何pxあるかを求め、内側のピクセル数にかけることで周長 $C$ を求めることとした. なお、撮影時はプログラムでガイドラインを引き、できるだけ定規が画像の中心を通り、かつ水平になるようにした. また、今回の実験では、主な撮影距離は60~90 mmとするため、撮影距離を5 mm刻みとして定規を接近させ撮影した.

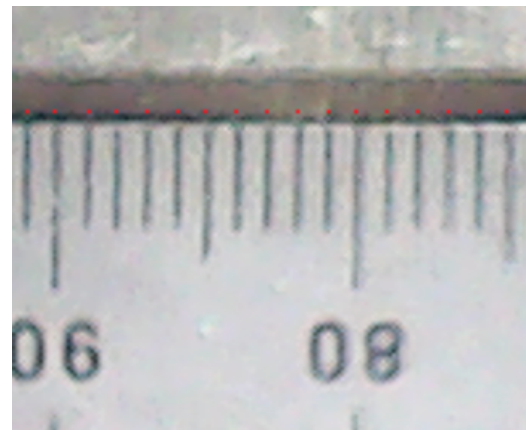


Fig. 5: 目盛ごとに打点した定規の例. Example of ruler dotted per scale.

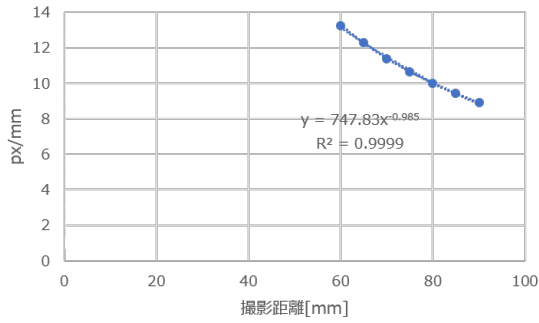


Fig. 6: 1mm あたりのピクセル数の推移. Changes in the number of pixels per millimeter.

Fig. 6 に測定結果を示す. このグラフは, 撮影距離  $H$  mm と画像上での目盛間隔  $k$  px/mm の関係をプロットしたものであり, 近似曲線を求めると次式を得たため, この補正式を用いて底面の周長を計算した.

$$k = 747.83H^{-0.985} \quad (9)$$

なお, 今回使用したカメラではレンズの歪みによるずれは見られなかった.

## 4. 実験

### 4.1 実験概要

本研究では, 実際の内視鏡下での検証を行う前段階として, 3D プリンタで作成したファントムを距離を変えて撮影し, ペイントソフトで底面と上端のエッジを手描きした. その後, 計測して求めた側面積の値と CAD で設計した際の真値を比較し, その精度の検証を行った.

### 4.2 実験装置等

1) 内視鏡: 内視鏡カメラは, 工業用途で 사용되는 UC-01 (株式会社ミヨシ) を選定し, 実験時にずれたりしないよう, また上下方向に移動させるためステージに固定した (Fig. 7). なお, Table 1 に実験で使用した内視鏡カメラのスペックを示す.

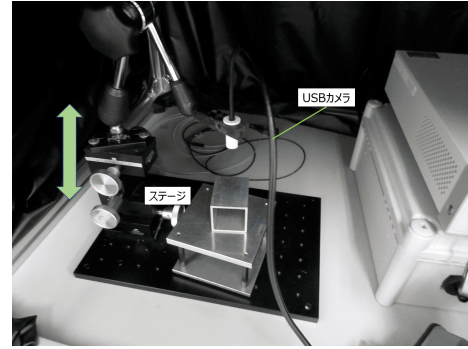


Fig. 7: ステージと USB カメラ. Stage and USB camera.

Table 1: USB カメラのスペック. Spec of USB camera.

カメラ先端径	直径 5.5mm
映像素子	CMOS 30 万画素
画角	約 60°
フォーカス距離	約 3 cm - 10 cm
解像度	VGA 640x480
明るさ/露出制御	オート
光源	白色 LED6 灯 (無段階調光ダイヤル付)

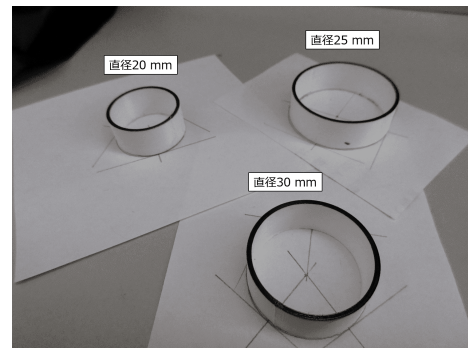


Fig. 8: 円筒形状のファントム (直径 30mm, 25mm, 20mm). Cylindrical Phantoms(their diameter is 30 mm, 25 mm, and 20 mm respectively).

2) ファントム: 本研究では, 3次元 CAD でファントムを設計し, 3D プリンタで造形した.

Fig. 8 に円筒形状のファントムを示す. 食道の直径は 20~30 mm であるため, ファントムとして用いる円筒も, 直径を 30, 25, 20 mm とし, 高さは全て 10 mm とした. なお, 造形したファントムにおけるエッジを明確化するた



Fig. 9: 複雑な形状のファントム（トゲトゲ，楕円，多角形）. Complex-shaped phantom(spiny, ellipse, and polygon).

め，円筒を黒く着色した。

Fig. 9に複雑な形状のファントムを示す。本研究では，バレット粘膜を想定した円筒部に凸凹があるもの（以下，トゲトゲと記載）を設計し，底面は直径 30 mm の円とし，底面からモデリングソフトを用いて上方向に任意に伸ばし，最大高さを約 30 mm とした。なお，このファントムは，円筒部に凸凹があっても本手法で計測できることを確かめるために製作した。

また，楕円のファントムは，短径が 20 mm，長径が 30 mm で，高さは 10 mm であり，食道の断面形状は真円ではないため，楕円形状でも計測が可能であることを確かめるために製作した。さらに，多角形は，高さ 10 mm，直径 30 mm の円筒の内部を任意にくり抜くように設計した。このファントムでは，実際に計測する際には，対象の中心がはっきりと特定できないこともあり，目測で合わせても計測できることを確かめる。

なお，これらのファントムの側面積の値は，全て CAD 上で求めることができるため既知である。

### 4.3 実験手順

実験の手順について，ファントムをステージ上に置き，側面が全て映る最短距離から，ステージが動く限りで 10 mm ずつカメラを離し

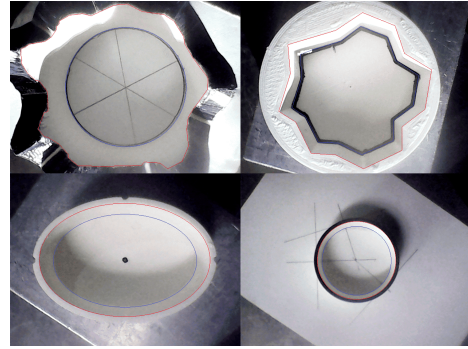


Fig. 10: エッジを描画したファントムの例. Example of phantoms drawn their edges.

ながら撮影した。その後，ファントムの底面と上端のエッジを，ペイントソフトで手描きして，その画像を元に側面積を計算した。最後に，真値と計測値を比較して，誤差の要因を検討した。

ファントムの設置位置について，多角形状ファントム以外は中心が分かるので，カメラの光軸とファントムの中心が合うように配置した。一方，多角形状ファントムは，実際の内視鏡下と同じようにおおよその位置で中心と光軸を合わせたが，撮影距離を画面に大きく映る 60 mm で固定して，複数回撮影した。

## 5. 実験結果

Table 2 に Fig. 8 の円筒形状ファントムに対する計測結果を示す。この表から，誤差は最大約 14% から 1% の範囲に分布していることがわかり，また，ファントムの直径が大きくなるほど誤差のばらつきが小さくなり，誤差そのものも小さくなっている。撮影距離に関しては，

Table 2: 円筒形状ファントムの計測結果. Measurement result of cylindrical phantom's lateral area

距離 [mm]	相対誤差 [%]		
	$\phi 20$ mm	$\phi 25$ mm	$\phi 30$ mm
80	7.0	1.3	1.2
90	2.8	1.5	2.9
100	13.7	0.9	3.5
110	11.0	5.6	2.5

Table 3: トゲトゲ, 楕円形状ファントムの側面積の計測結果. Measurement result of spiny or ellipse-shaped phantom's lateral area.

距離 [mm]	トゲトゲ の誤差 [%]	楕円 の誤差 [%]
60		12.5
70	9.1	11.7
80	8.4	9.5
90	8.1	10.1
100	6.8	3.8
110	5.8	

Table 4: 多角形状ファントムの側面積の計測結果. Measurement result of polygonal shaped phantom's lateral area.

※撮影距離は 60 mm で固定

	誤差 [%]
1 回目	11.9
2 回目	14.4
3 回目	10.6
4 回目	14.6
5 回目	14.9

ファントムまでの距離が短いほど誤差が小さくなる傾向にあった。

Table 3 に Fig. 3 のトゲトゲと楕円の計測結果を示す。トゲトゲと楕円の誤差はおおよそ 10% 付近にまとまっているが、撮影距離が長いほど誤差が小さくなる傾向にあった。

Table 4 に多角形状ファントムの計測結果を示す。これまでの結果と比較すると誤差はおおよそ 10% から 14% であり大きくなった。

## 6. 考察

まず、Table 2 より、ファントムがリング状の時はその直径が小さいほど誤差のばらつきが大きくなっていることがわかる。これは、リングの直径が小さくなるほど画像に壁面が映らなくなってしまうため、描画の際の少しのずれの影響が大きくなってしまいうためと考えられる。

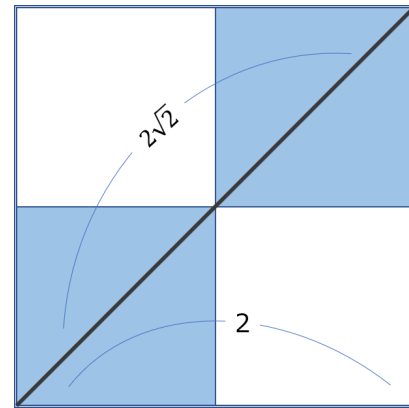


Fig. 11: 底面周長計測における誤差の発生要因の概要. Overview of error factors in bottom circumference measurement.

しかし、Table 3 を見ると、トゲトゲと楕円では撮影距離が遠いほど誤差が小さくなっている。これは、撮影距離を離すことで外側のエッジの細かいブレがなくなり、描画の際のずれが小さくなるためと考えられる。

この他の誤差の要因としては、底面の周長を求める際にピクセル数をカウントして計算しているが、この方法では実際の値と比べて誤差が生じる。例えば、Fig. 11 のような場合、実際の黒線の長さは  $2\sqrt{2}$  であるが、画素に合わせてマス目を数えると 2 になり、このような要因で誤差が生じることが考えられる。

Table 4 では、誤差の値が十数パーセントとなっており、おおよそ同じ距離から測った楕円と同じくらいの誤差といえる。このことから、この方法で円形以外のものの側面積も計測できることが分かる。

## 7. おわりに

本研究では、ピンホールカメラモデルに基づいて幾何学的に面積を計測する方法を提案した。カメラの光軸と壁面が垂直に近ければ、対象の形状にかかわらず 90% 程度の精度で計測できることがわかった。実験では側面積のみを計算したが、この応用で底面積も容易に計測できる。なお、実験では工業用途で使われる内視

鏡型の USB カメラを用いたが、実際の内視鏡は画角が 120° と広く、レンズの歪みの影響も考えられるので、今後は画角の広いカメラを使用して検証する予定である。

## 参考文献

- 1) 幕内博康: Barrett 食道と Barrett 食道癌, 日消誌, **97-10**, 1233/1242(2000)
- 2) 川田研郎, 河野辰幸, 中島康晃: 日本消化器内視鏡学会雑誌, **59-1**, 70/80(2017)
- 3) 天野裕二, 安積貴年, 坪井優, 本告成淳, 石村典久: 本邦における Barrett 食道癌の疫学—現況と展望—, 日消誌, **112-2**, 219/231 (2015)
- 4) Zhengyou Zhang: A Flexible New Technique for Camera Calibration, Technical Report MSR-TR-98-71 (1998)