



断層映像法の基礎 第37回 トモシンセシス (ラミノグラフィ)

篠原 広行¹⁾、陳 欣胤²⁾、中世古 和真³⁾、橘 篤志⁴⁾、橋本 雄幸⁵⁾

¹⁾ 首都大学東京

²⁾ 首都大学東京人間健康科学研究科

³⁾ 東邦大学医療センター大橋病院放射線部

⁴⁾ 東京慈恵会医科大学附属病院放射線部

⁵⁾ 横浜創英大学こども教育学部

はじめに

第36回では、ラドン空間とコーンビームを利用した再構成の条件について解説した。歯科を中心とした画像診断装置では、データを収集するためのX線源の走査軌道に制約があるため、完全な画像を再構築することが困難な場合がある。そのようなときにトモシンセシス(またはラミノグラフィとも呼ばれる)が生体イメージング技術として、あるいは物体の内部構造を画像化する技術として用いられてきた。現在ではフラットパネル検出器を搭載したトモシンセシスによって、自由な体位で高解像度の投影画像を得ることができる。本稿ではトモシンセシスについて解説する。

1. トモシンセシスとは
2. トモシンセシスの原理
3. 3次元数値ファントムシミュレーション

1. トモシンセシスとは

単純撮影のX線写真は、体内の線減弱係数を加えた分だけX線が指数関数で減弱した様子をとらえる。これを式で表すと、

$$I(x,y) = I_0 \exp\left[-\int_l f(x,y,z) dl\right] \quad (1)$$

となる。ここでは図1に示すように、X線源の強度

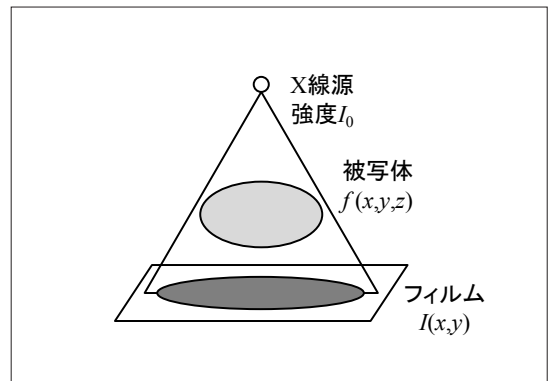


図1. X線を使った単純撮影

を I_0 、被写体の線減弱係数の分布を $f(x, y, z)$ 、感光面のフィルム上のX線強度を $I(x, y)$ とする。また、X線がフィルムに到達するまでの経路を l とする。

X線の単純撮影では、被写体によるX線の減弱をすべて加えたものが表現されているので、被写体内の細かい様子は見づらくなる。そこで、図2に示すように線源とフィルムを被写体に対して逆方向にずらして何枚か撮影し、撮影したフィルムを重ねて見ることで、ある断面だけに焦点を当てて断面の画像を作り出そうという試みがあった。考え方は良かったが、フィルムを重ねるために全体が暗くなってしまい、断面をきれいに描出することはできなかった。

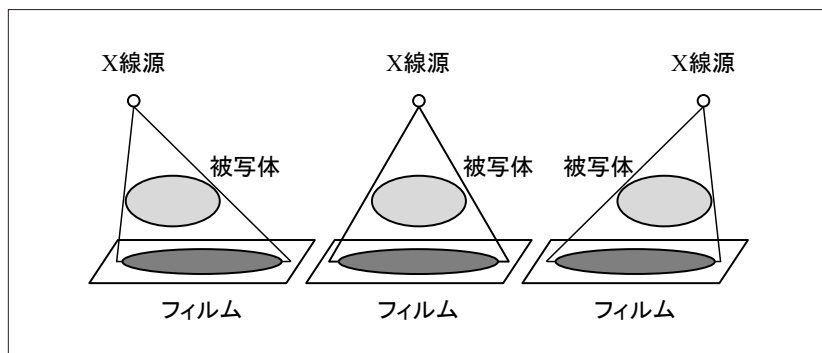


図2. 線源とフィルムをずらした撮影

その後、断面を描出する手法としてCT(コンピュータトモグラフィ)が出現した。CTでは、コンピュータでの演算を行って断面を再構成するため、X線の撮影はフィルムではなく検出器を用いてデジタルデータとして取得した。CTでは、図3に示すように線源と検出器を被写体に対して一周させながらデータを取得する。線源と検出器を含めて構成される断面を再構成するので、初期のCTでは、検出器は

1次元で十分であった。現在では高速に撮影するため2次元の検出器が用いられるようになっている。

2次元検出器の出現により、単純撮影をデジタルデータとして撮ることが可能となった。そこで再び脚光を浴びたのが、デジタルデータを用いた単純撮影の重ね合わせであるトモシンセシスまたはラミノグラフィと呼ばれる手法である。基本原理は図2で示したものと同じであるが、コンピュータによる計算ができるので、フィルムを重ねるよりもきれいに断面を表現することが可能となった。

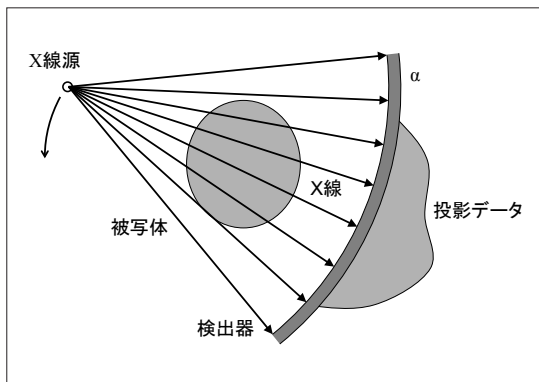


図3. X線CTにおける投影の取得

2. トモシンセシスの原理

トモシンセシスは、多方向から撮影した投影画像をもとに再構成する手法である。投影から断面を再構成する方法としてはトモグラフィがあるが、描出する断面が異なる。図4に示すように単純に3次元で考えると、CTでは線源と検出器を回転させた回転面が再構成の断面となり、トモシンセシスは線源と検出器を逆向きにずらした方向に平行な面が再構成の断面となる。

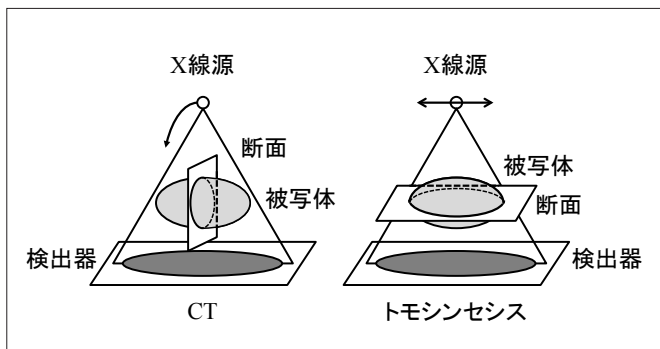


図4. CTとトモシンセシスでの再構成する断面の違い

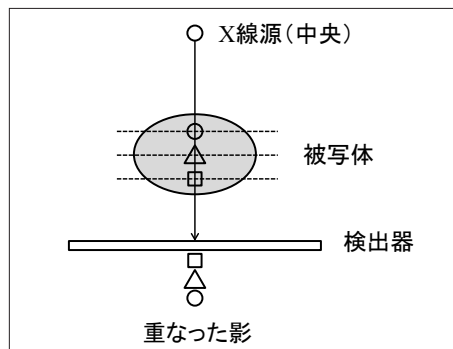


図5. トモシンセシスの原理(重なった影)

では、トモシンセシスの原理をもう少し細かく解説する。簡単のため、X線源をずらす面内で2次元として見ていくことにする。図5に示すように被写体の3つの断面上に上から円、三角、四角の印を付けておく。X線源を真上に持ってきたとき、その印は検出器上でちょうど重なる位置に配置している。よって、検出される影は3つが重なったものとなる。図6に示すようにX線源を左右にずらして撮影すると、円、三角、四角はずれて撮影される。さらに影の並びは左右のずらし方によって逆向きになる。

検出された3つの影を並べると図7のようにになる。また、加算した影の様子も図7に示す。円、三角、四角の影はばらばらに加算される。次にX線源を左右にずらして撮影したデータを図8のように少しずらしてみる。影を加算すると、四角の影がちょうど重なるようになる。この場合、四角の影の濃度は3

倍となり、他の影よりくっきり表示される。図9のようにさらにずらすと、三角が重なる。図10のようにもっとずらすと、円が重なる。このようにずらし方によって重なる図形が異なってくるため、ずらし方を変えて加算することによって特定の図形の影をくっきりと描き出すことができる。

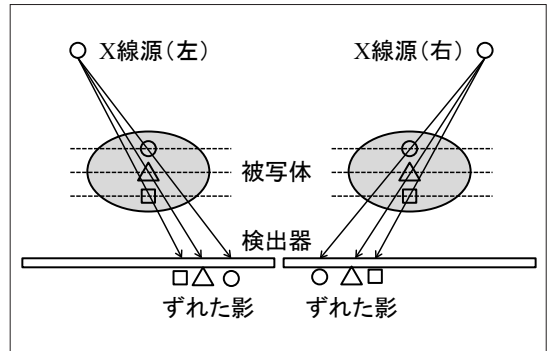


図6. トモシンセシスの原理 (左右にずれた影)

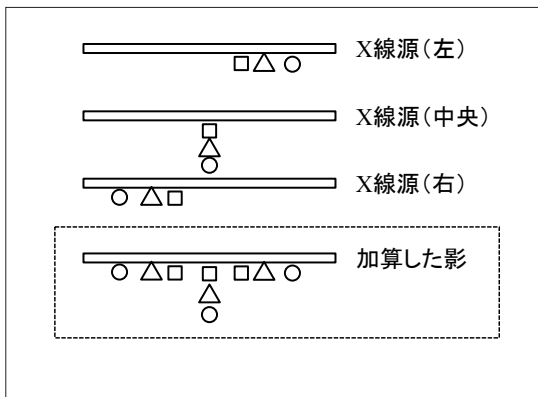


図7. 3つの検出された影をそのまま並べて加えた様子

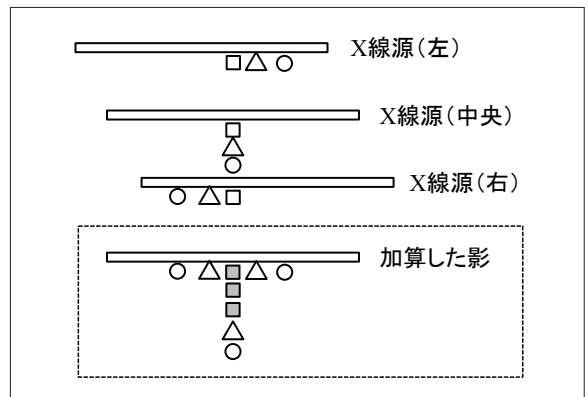


図8. X線源を左右にずらして撮影したデータを少しずらして加算した様子 (四角の影が重なっている)

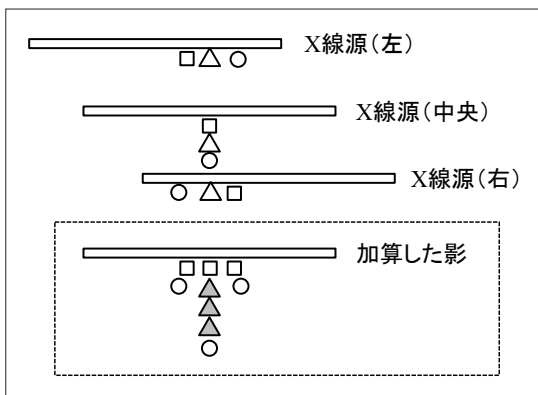


図9. さらにずらして加算した様子 (三角の影が重なっている)

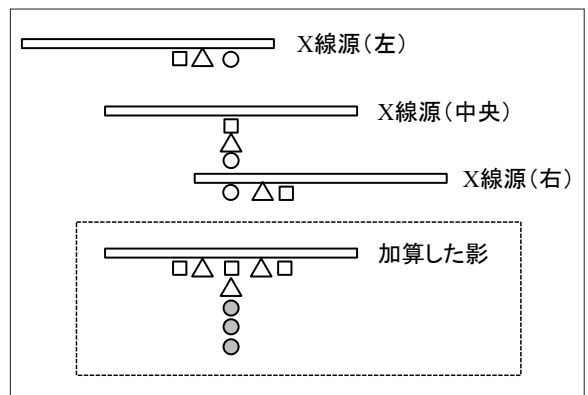


図10. さらにずらして加算した様子 (円の影が重なっている)

この原理を面に広げて考える。図11に示すように被写体の3つの断面上に円、三角、四角の印を3つずつ並べる。その印が検出器にどのように投影されるかを検出器の下に表記する。コーンビームの投影を想定しているため、線源に近い円の印は拡大

率が高くなり、検出器上では広がって投影される。逆に検出器に近い四角の印は拡大率が低くなり、検出器上ではそれほど広がらない。図12では、図6と同様にX線源を左右にずらしたときに、それぞれの図形がどの位置に投影されるかを示している。

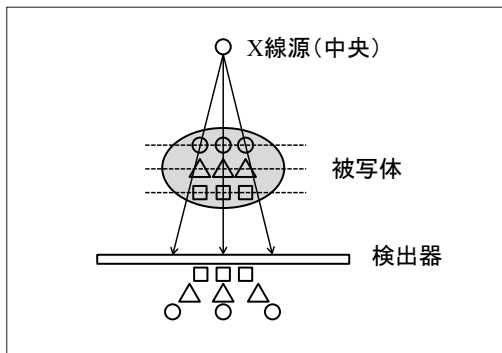


図11. トモシンセシスの原理(面に広げて考えた場合)

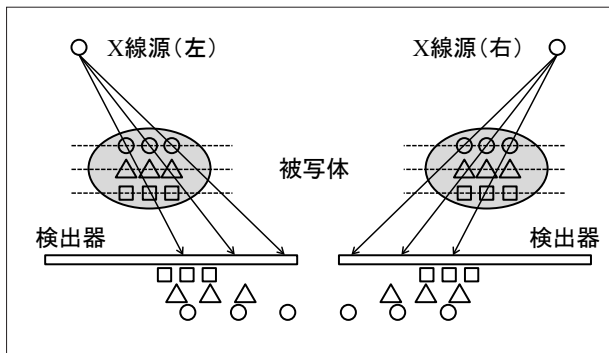


図12. トモシンセシスの原理(面に広げて左右にずれた影)

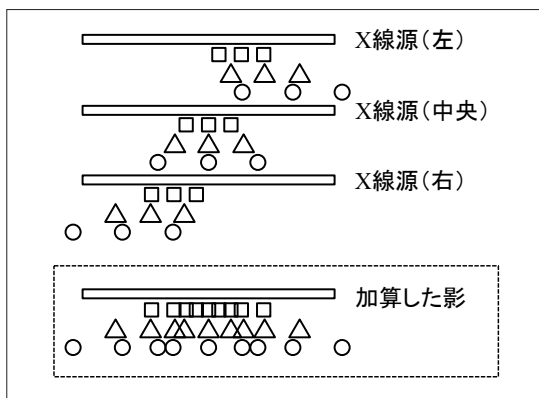


図13. 3つの検出された影をそのまま並べて加えた様子

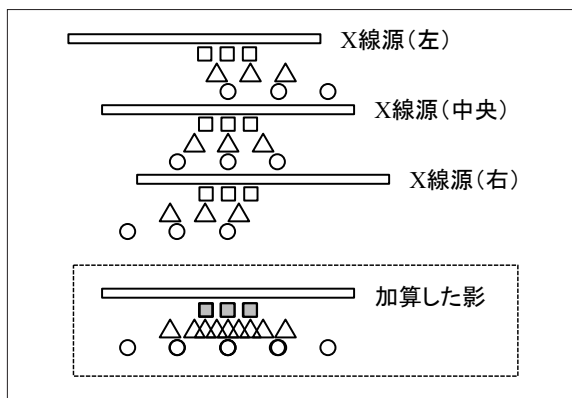


図14. X線源を左右にずらして撮影したデータを少しずらして加算した様子(四角の影が3つとも重なる)

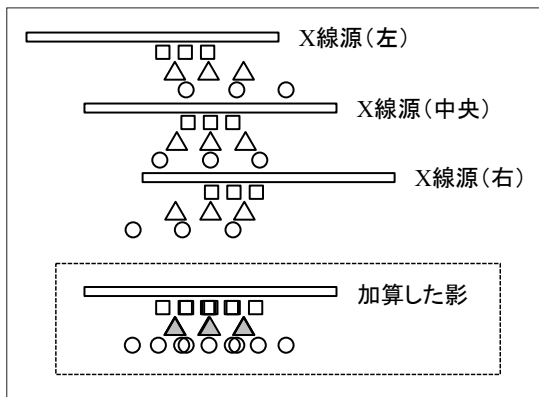


図15. さらにずらして加算した様子(三角の影が3つとも重なる)

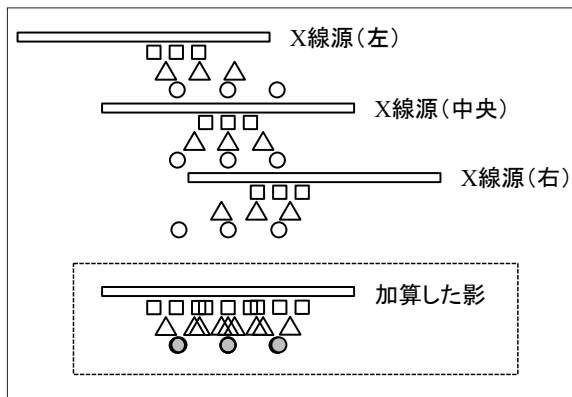


図16. さらにずらして加算した様子(円の影が3つとも重なる)

線源の位置の異なる3つのデータをそのまま並べると図13に示したとおりになる。それを加算すると、どの図形もずれて合成される。検出器の位置を図14のように少しずらすと、3つの四角の印がいずれも重なる。よって、四角の印がついた面内のデータはすべて重なることになる。図15のようにずらすと3つの三角の印がいずれも重なる。図16のようにさらにずらすと3つの円の印がいずれも重なる。このように、X線源を左右にずらして撮影したデータをうまくずらして重ね合わせることで特定の断面をくっきりさせ、他の断面はぼかすことができる。これがトモシンセシスの原理である。

特定の面に焦点を当てるにはどのくらいずらせばよいかは、三角形の相似を用いて求めることができる。図17に示すように、基準となる中央のX線源から焦点を当てたい断面までの距離をa、その面から検出器までの距離をbとする。X線源をある方向にdだけずらしたとすると、検出器上でどのずれxは、相似となる2つの三角形の比から

$$a:d=b:x \tag{2}$$

となり、X線源をずらした方向とは逆方向に

$$x = \frac{b}{a} d \tag{3}$$

だけずれることになる。よって、X線源をずらした方向に(3)式で計算したxの距離だけ戻せば、中央でとったデータに重ねることができる。また、b/aの値を変えることで、焦点を当てたい面を決定することができる。

3. 3次元数値ファントムシミュレーション

3次元の楕円体を組み合わせた数値ファントムの形状を図18に示す。X線源に近い上の断面は、縦に2本細長い線が入っていて、中央の断面は×印になっている。検出器に近い下の断面は横に細長い線

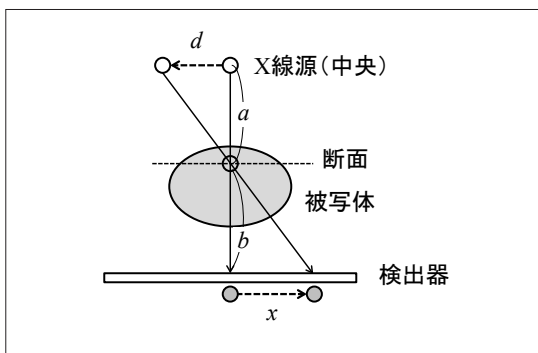


図17. 特定の面内のデータがX線源をずらすことにより、検出器上でどのようにずれるか

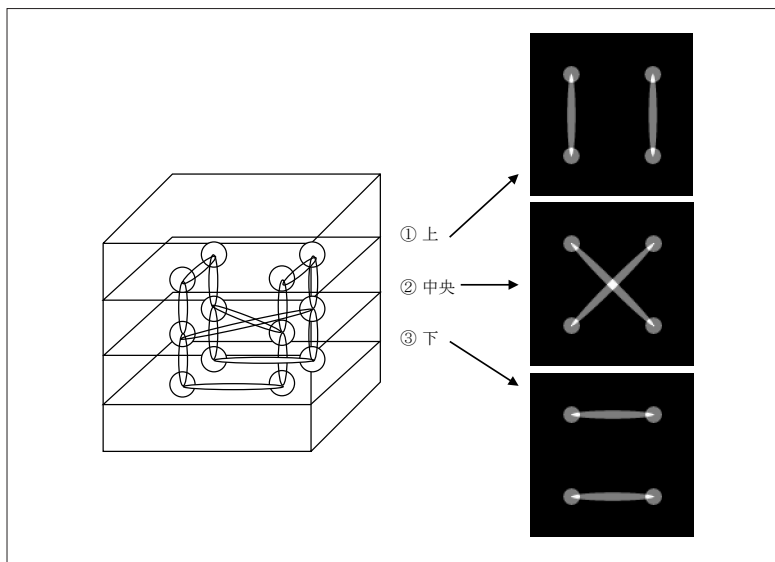


図18. 3次元数値ファントムの形状

が入っている。この数値ファントムを使って図19に示した幾何学的配置に基づき投影を128個作成した。その投影の中で、最も左側の投影128と中央の投影064と最も右側の投影001の3つの画像を図20に示す。左右にずらした投影128と投影001の画像では、奥行きに向かってずれているのが見て

取れる。これを上、中央、下の断面に焦点が当たるように、投影データをずらしながら加算した画像を図21に示す。もともと横にずらしているので、横方向の線はいずれの場合も残ってしまう。それ以外のところでは、上の断面で縦方向の線がくっきり見られ、中央の断面では×印がくっきり見られる。

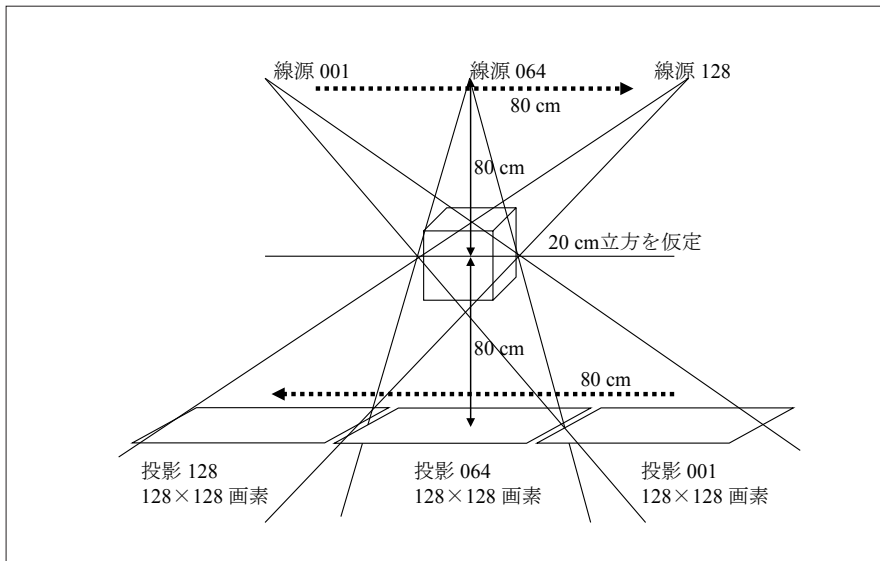


図19. シミュレーションの幾何学的配置

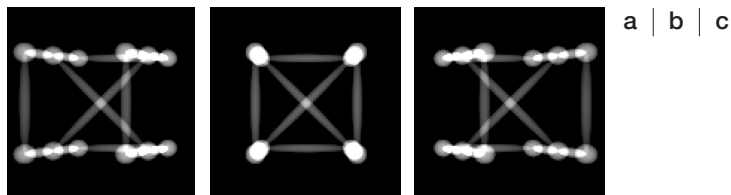


図20. 投影データ
最も左側(投影128)、中央(投影064)、最も右側(投影001)の3つのデータを示す。

(a) 投影128 (b) 投影064 (c) 投影001

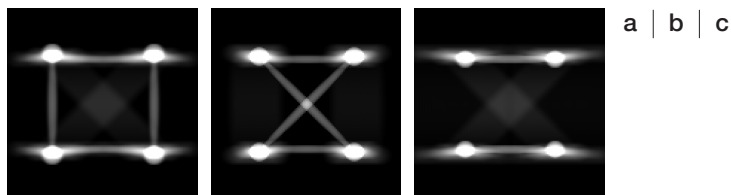


図21. 3つの断面に合わせて再構成した画像

(a) 上の断面 (b) 中央の断面 (c) 下の断面