

フルカラー生体断面画像を用いた六面体有限要素作成手法の検討

平田 忍^{*}, 横田 秀夫^{*}, 牧野内 昭武[#]

^{*} 理化学研究所 情報環境室

埼玉県和光市広沢 2 - 1

e-mail: {shirata, hyokota}@atlus.riken.go.jp

[#] 理化学研究所 ものつくり V - C A D プログラム

埼玉県和光市広沢 2 - 1

e-mail: akitake@postman.riken.go.jp

要旨 我々は、有限要素法(FEM)を用いた網膜剥離手術シミュレーションの開発を行っている。ここでは、シミュレーションにおいて FEM 解析を行うための眼球モデルの六面体 FEM 要素メッシュ作成方法について検討を行った。まず、眼球を 3 次元内部構造顕微鏡を用いて撮影観察した連続断面画像について、セグメンテーションを行ったイメージデータ^{1),2)}を形状モデルに変換する方法について検討した。このモデルをマップドメッシュ法により、6 面体のテンプレートボックスを形状データに投影してメッシュを作成した。また、撮影観察した連続断面画像を元に等間隔直交(ボクセル)メッシュを作成し、FEM 解析に用いるシミュレーションモデルとしてどちらが適しているか比較検討を行った。その結果、我々が求めるより少ないメッシュ数で連続断面画像を再現するには、マップドメッシュ法による 6 面体メッシュ作成が有効であることが確認出来た。そこで、この方法を用いて眼球の各組織間が連続なメッシュ作成を行った。

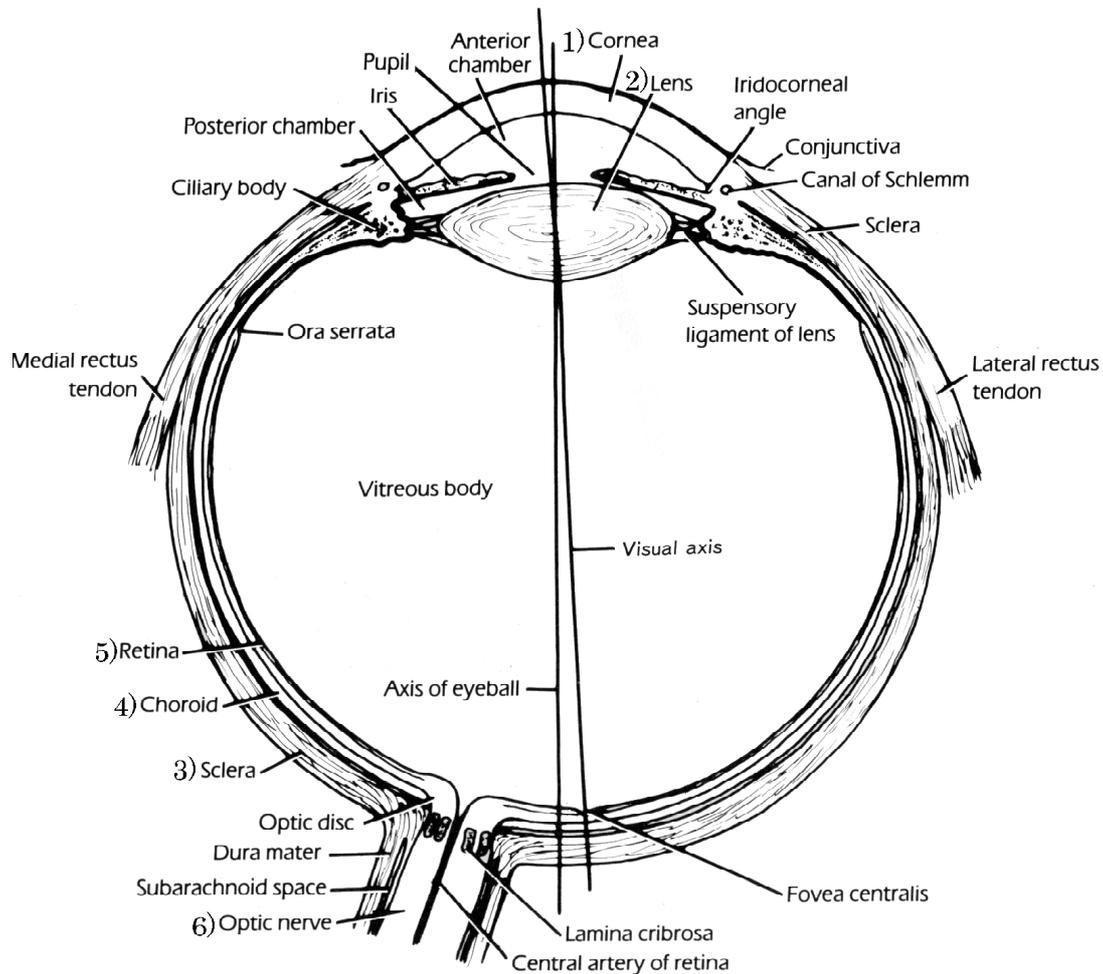
1. 緒言

我々は、眼球の詳細な立体構造とその力学的特性を収集して力学的なモデルを構築し、FEM を用いて眼球の損傷の様子を再現し、治療や手術のシミュレーション等を行うための研究を進めている。ここで、我々が研究対象としている眼球の図を示す。この図が示すように、眼球は複数の組織から構成されている。このうち、網膜などは厚さ 100 μ m 程度と非常に薄い膜状の構造をしている。また、眼球の視神経の位置、筋肉の付着部等は左右により異なり、全体を見ても単純な形状をしていない。その上、後方部の強膜と前方部の角膜の曲率が異なり完全な球形ではないことも分かる。この

ような複雑な形状を有する眼球の FEM シミュレーションを行うためには、球形に CAD モデルで近似をしたものを用いるのではなく、実際の形状に即した精度が良い FEM メッシュを作成してシミュレーションを行うことが必要となってくると考える。

そこで、眼球の詳細な 3 次元構造を取得するために、我々は 3 次元内部構造顕微鏡を用いて眼球のディジタイジングを試み、さらに眼球を構成している各部位を判別し、表面データを構築してきた^{1)~4)}。

本研究では、これまでに検討してきた手法より得られた生体の実形状をもとに、我々が用いている FEM プログラムに必要な、6 面体メッシュを構築することを試みた。しかし、3 次元内部構造顕微鏡から得た画像はイメージデータであり、FEM に必要な座標値や接点番号などのデータは持っていない。そこで、イメージデータを座標値のある形状データに渡す方法もあわせて検討を行った。



- 1.角膜(Cornea) 2.水晶体(Lens) 3.強膜(Sclera) 4.網膜(Ratina)
5.脈絡膜(Choroid) 6.視神経(Opric Nerve)

Fig. 1 Eyeball

2．眼球 3 次元画像取得および画像処理

まず，眼球の三次元構造を取得するために，3 次元内部構造顕微鏡を用いてデジタル化を行い，フルカラーの眼球連続断面画像を入手した．3 次元内部構造顕微鏡とは，観察対象物である試料と観察器を固定し切断，断面観察を繰り返し，試料内部の断層画像を観察して，試料内部の 3 次元構造を再構築する装置である．このとき，試料と観察器を固定していることにより，断面間の位置のずれを補正する必要が無く再構築することが出来る．この装置で観察した豚眼球のデータをメッシュ作成方法の検討において使用し，各組織ごとのメッシュ作成には人眼を観察したデータを使用した．

豚眼球データについては，試料である豚眼球を，3 次元内部構造顕微鏡を用いて，断面画像内分解能 $127\ \mu\text{m}$ で 800 枚撮影観察した．レーザーディスクに記録した画像を PC に取り込み，連続断面画像に変換した．この画像を，解剖学的知識を持った人間が手作業で各組織についてのセグメンテーションを行った²⁾．

また，人眼については，試料である人眼球を 3 次元内部構造顕微鏡にて，断面画像内分解能 $25\ \mu\text{m}$ で 2,812 枚撮影観察を行った．ハイビジョンレーザーディスクに記録した画像を PC に取り込み，連続断面画像に変換した．この際，画像サイズが大きいため不要部分を除去した後，解像度補間方式ニアレストネイバー法を使用し分解能 $54.5\ \mu\text{m}$ に編集した．また，セグメンテーションは解剖学的知識を持った人間が手作業で行うため，2,000 枚もの画像を扱うのは大変である．そのため，撮影した 2,812 枚の中で眼球の存在する領域の 12 枚ごと計 235 枚の画像について眼球の組織ごとにセグメンテーションを行った⁴⁾．

図 2 にセグメンテーションからメッシュ生成までのフローチャートを示す．3 次元内部構造顕微鏡より得られた試料画断面画像を角膜，水晶体等に判別し，それぞれの部位を抜き出すセグメンテーションを行った．得られた試料の連続断面の画像はフルカラーの情報を持っている．そこで，この色情報を用いて複数の部位を分別して，それぞれに属性値を設定した(図 2 a)．この時，各連続断面画像において同一部位は同じ属性値を用いるように設定した．その後，設定した属性を検証するために可視化を行った．可視化には AVS5.3 (AVS Inc.) に自作のモジュールを組み合わせ，ボリュームレンダリング法のレイキャスティングを用いて，先に設定した属性情報を透明度に設定して行った．不必要な部位を透明化することにより，抽出部位の外観や，試料内部の実際に切断していない断面画像を作成して，その抽出範囲を確認した^{5),6)}．

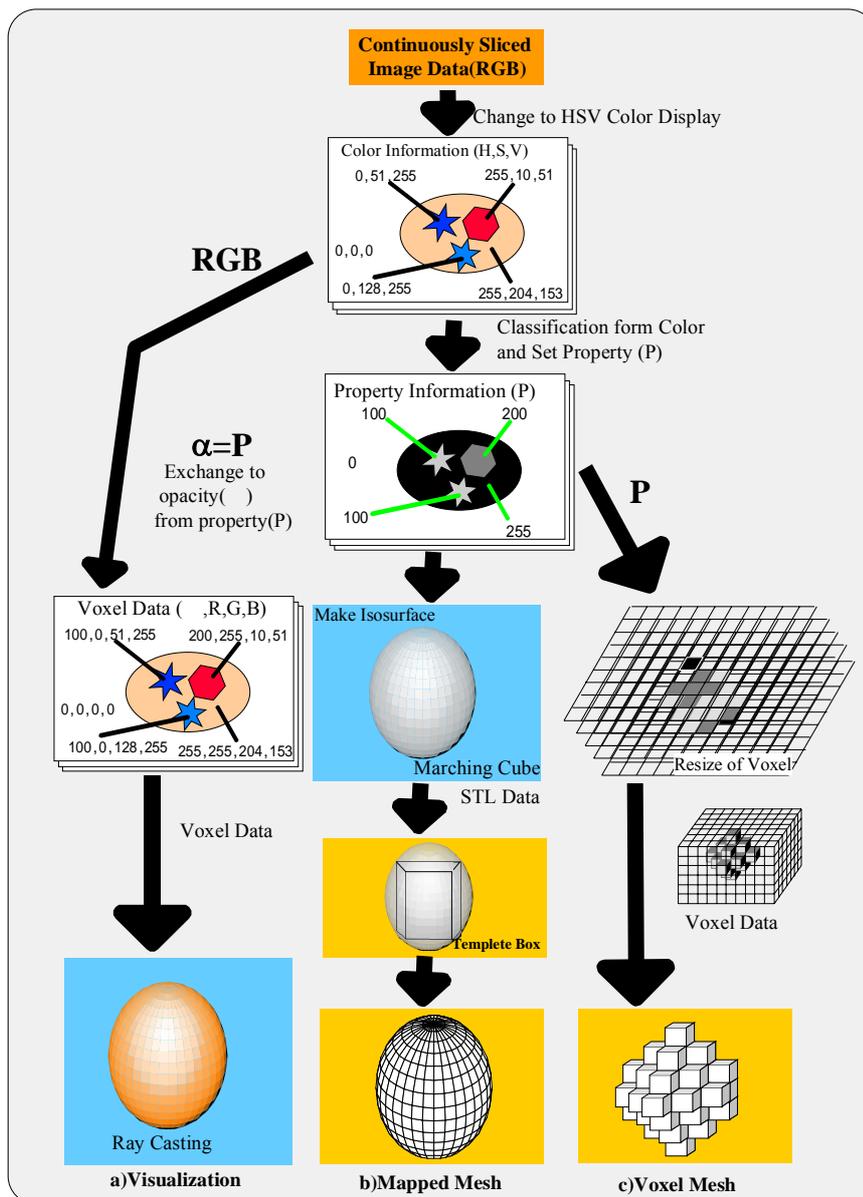


Fig. 2 Flow Chart from Segmentation to Mesh Generation

3. 形状データへの変換

観察した試料断面から，眼球各部位のセグメンテーションを行った後のデータを元に6面体 FEM メッシュ生成を行った．しかし，前章までの方法で得た立体画像はイメージデータであり，FEM 解析に必要な座標値や接点番号などの数値データを持っていない．これらのイメージデータを，メッシュ作成に必要なデータ形状に変換する必要がある．この変換方法を以下のようにした．まず，AVS5.3 上で可視化により設定した属性情報を元に，Marching Cube 法により同じ属性値，すなわち，等値面をも

つサーフェスデータであるポリゴンを作成する。Marching Cube 法とは、ボリウムデータから等値面を含む立方体を取り出し、その立方体に含まれる等値面を三角形面で近似する。その生成パターンは、8 頂点と等値面の定数との大小関係により、あらかじめ決められている。8 頂点の立方体から生成される 3 角形面のパターンは、256 通りあるが、位相的に同じものを整理すると 14 通りとなる。その場合わけをしたものが図 3 であり、これらのパターンから 3 角形面を生成する。その際、設定する等値面の値を変えることにより、セグメンテーション時に設定した、異なる属性である各組織ごとのサーフェスデータを作ることが出来る⁷⁾。

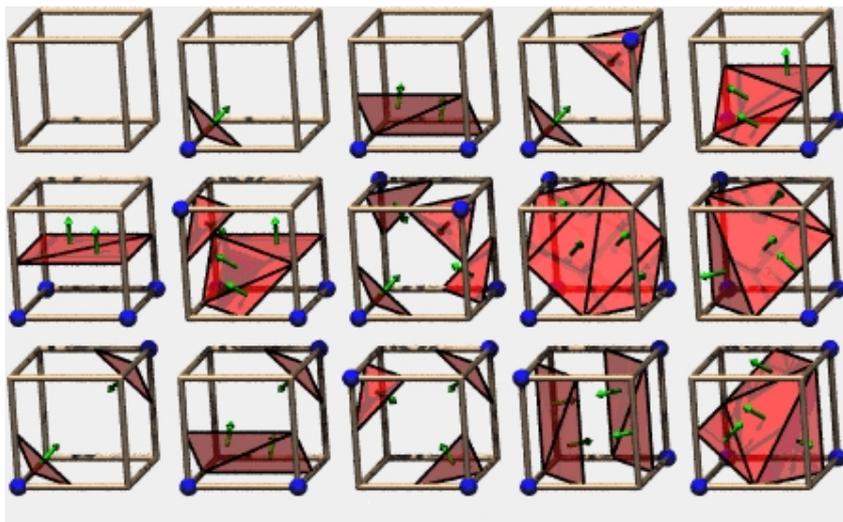


Fig.3 Marching Cube Pattern

またこのとき、ボクセルからサーフェスデータに変換することにより、ボクセルのエッジを平滑化することが出来る。次に、得られたサーフェスデータを元にポリゴンリダクションを行い、ノイズを除去し、ポリゴンの形状を揃えた。このポリゴンの頂点の座標や結合情報をメッシュジェネレータに読み込めるように形式で書き出す。このデータを用いてメッシュ作成を行った。

4. メッシュ作成方法の比較⁸⁾⁻¹⁰⁾

FEM で数値計算を行う場合、解析空間を多数の格子点で離散化する。格子形成、すなわちメッシュ生成はこの解析空間の離散化手法のことを指し、計算の前処理のうち最も重要な部分を占める。

現在、FEM 計算に用いられる格子は、大きく分けて格子点が規則正しく並んだ構造格子と、規則性を要求しない非構造格子とに分けられる。本研究においては、構造格子としてボクセルメッシュ法を、非構造格子としてマップドメッシュ法を採用した。

各手法においてメッシュ作成を行い，どちらが我々の FEM プログラムに適しているかの検討を行った¹¹⁾。

マップドメッシュには前章の方法で得たポリゴンデータを，ICEM CFD/HEXA(ICEM Inc.)を用いて，眼球の形状に合わせた6面体のテンプレートボックス(図4)を作成し，それを表面データに投影してメッシュを作成した。また，得られたイメージデータを元に VOXCELCON (クイント)を用いてボクセルメッシュ法によりメッシュを作成し比較検討を行った。図5に，マップドメッシュとボクセルメッシュで作成したメッシュを比較した図を示す。また，表1にそれぞれメッシュの要素数を各組織ごとに示す。

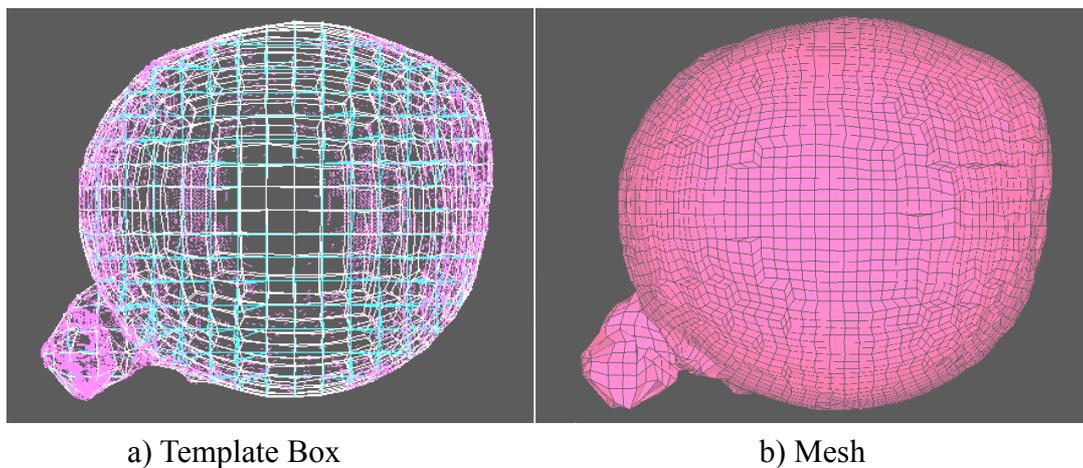
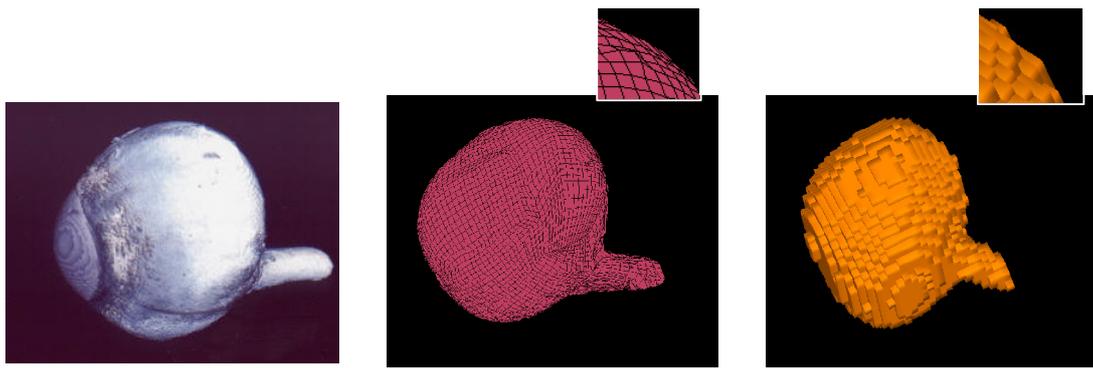


Fig.4 Template Box

まず，メッシュ作成に要した時間をそれぞれ比較した。マップドメッシュ法においては，属性データから STL データまでの変換は2分程度，その後 FEM メッシュへの変換は30分程度で処理出来た。一方，ボクセルメッシュ法においては，全行程を行うのに8分程度と非常に短い時間でメッシュを生成することが出来た。両者を比較するために前処理段階を除き，メッシュ作成ソフトへのデータ読み込み時間から比較すると，マップドメッシュ法は30分，ボクセルメッシュ法は，6分とボクセルメッシュの方が短時間で作成できることが分かる。

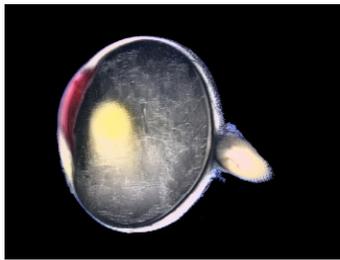
次に，メッシュ形状を比較してみる。表1より分かるように，両者のメッシュ数はほぼ同数である。マップドメッシュにおいては，各組織において，左に示したイメージ立体画像とほぼ同じ外観形状を示した。また，その内部も6面体でメッシングされている(図5b2)。しかしながら，ボクセルメッシュは各組織共左のイメージ立体画像と比較すると，特に連続断面間でボクセルの外表面の凸凹が目立つことが分かる。このように，形状を比較してみると，マップドメッシュの方がより少ないメッシュ数において，実際の形状を表現できている。



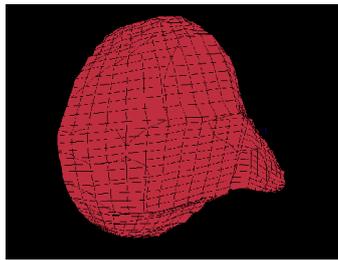
a1) Whole eye image

a2) Mapped mesh

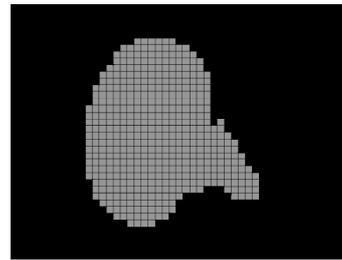
a3) Voxel mesh



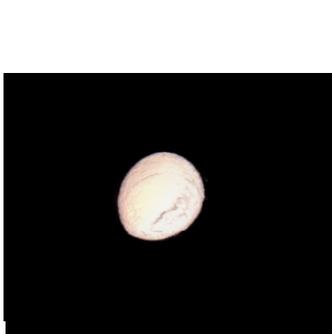
b1) Cross-sectional image



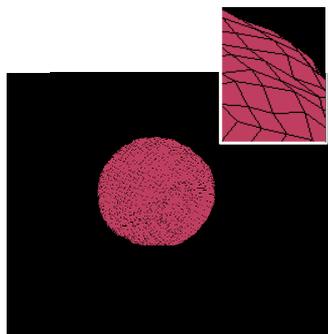
b2) Cross-sectional mapped mesh



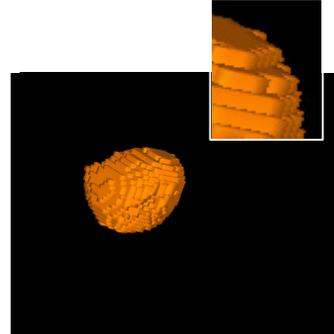
b3) Cross-sectional voxel mesh



c1) Lens image



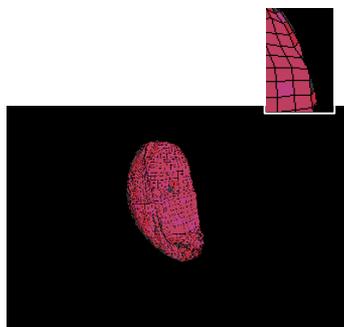
c2) Mapped mesh



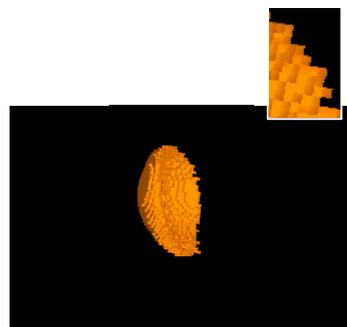
c3) Voxel mesh



d1) Cornea image



d2) Mapped mesh



d3) Voxel mesh

Fig. 5 Mesh Images of the Eye Parts

Table 1 Number of Elements for of Each Part

	Number of Triangles (Polygon)	Number of Elements (Mapped)	Number of Elements (Voxel)
Whole eye	1,912,512	14,700	14,296
Lens	198,522	4,782	5,196
Cornea	53,184	4,682	5,012

このように両者には、長所と短所があり、FEM 解析の方法によって使い分けをする事が有効であると分かった。ボクセルメッシュを用いる方法においては、十分に細かい要素サイズにすることで良好なメッシュを構築することが可能である。しかしながら、眼球のように膜状の組織や入り組んだ形状を有する試料では、その要素数は莫大な数となり FEM 解析に莫大な時間を要する。ボクセルメッシュの場合、眼球の直径 3 cm を考慮して 3 cm 四方の立方体を考える。この立方体を、一辺 50 μ m のボクセルでメッシュを作成すると、メッシュ数は 80 億要素になる。一方、マップドメッシュ法による FEM メッシュ作成法は、ボクセルメッシュに比較して少ない要素数でより良い形状を得ることが出来た。マップドメッシュの場合、眼球全体で約 14,700 要素のメッシュを作成しているが、実際の眼球形状を近似することが出来ている。今後、実際の計算に用いるために各組織全てを分けてメッシュを作成すると考えると、総要素数は約 10 万要素になると予想される。このように考えた場合、FEM の計算時間を考慮すると、少ないメッシュ数で眼球の形状を表現できる、マップドメッシュを使用するのが適当であると考えられる。さらに、異なる眼球についてもそのトポロジーが大きく変わらない限り、テンプレートボックスを違う眼球にも当てはめることが出来る。将来的に、治療に用いることを考慮して、個人個人の眼球メッシュの作成を考えた場合、マップドメッシュを用いた方が、利用範囲が広いと考えられる。

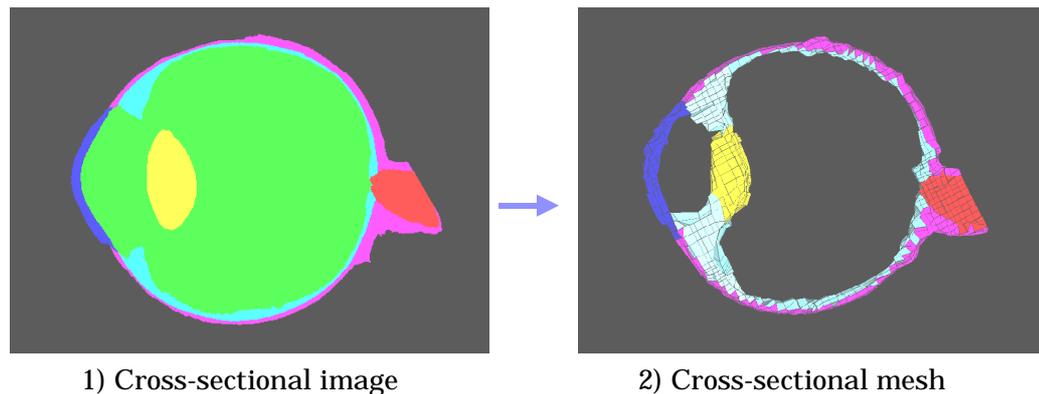
以上のようなことから、連続断層画像を基にマーチングキューブ法を用いて代数的に表現されるサーフェスデータに変換し、マップドメッシュ法により 6 面体メッシュを作成する方法が、イメージデータを再現するのに有効なメッシュ構築方法であることを確認出来た。よって本研究においては、マップドメッシュ方を用いたメッシュ作成法が適していることが判明した。

5. 眼球各組織のメッシュ作成

前章において、我々の研究に適したメッシュ作成方法を決定した。よって今後は、マップドメッシュを用いてメッシュ作成を行うこととした。今回は、メッシュ自体を眼球全体の各組織ごとに分けて作成した(図 6)。今回、作成した組織は、角膜、水晶

体，強膜，視神経，および，角膜と脈絡膜を一つの膜としたものを前方と後方に分けたもの6組織である．この時，前房，硝子体等の水分で構成される部分は除去してメッシュを作成した．メッシュ作成時間はおよそ2日であった．6組織全てをあわせた総メッシュ数は18,513要素である．

図4に示すように，各組織の境界面を見ると，お互いが連続かつ，接点を共有している．また，薄い膜の層をメッシュでうまく再現することが出来た．このように，マップドメッシュ法を用いて各組織を組み合わせたメッシュを作成することが出来た．



 Sclera	23,590 Elements
 Lens	953 Elements
 Cornea	2,526 Elements
 Optic Nerve	608 Elements
 Front Parts of Retina and Choroid	6,824 Elements
 Back Parts of Retina and Choroid	10,389 Elements

Fig. 6 Mesh Images of the Eyeball

6. まとめ

眼球のフルカラーの連続断面画像から，眼球各組織のセグメンテーションを行い，各組織に値を与える．それらの画像を重ね合わせ立体にし，組織ごとの値を参考に各組織ごとにポリゴンを作成し，メッシュ作成可能な形状に変換する．この形状データからマップドメッシュ法を用いて，FEM メッシュを作成した．しかし，現在作成しているメッシュは精度が悪く，実際の FEM 解析には，まだ用いることが出来ない．今後は，実際の解析に使用可能なメッシュになるよう精度を上げていきたい．

参考文献

1. H.YOKOTA, et al., “3 Dimensional Digitizing for the Biological Sample Using a 3-Dimensional Internal Structure Microscope”, *Computational Biomechanics*, 69-79, (2000)
2. 横田秀夫 他, “フルカラーボリュームデータからの FEM メッシュ作成法の検討”, *生体力学シミュレーション*, 7-11, (2001)
3. 横田秀夫 他, “眼球を対象とした超高精細デジタイザの開発と人眼球のデジタイジング”, *生体力学シミュレーション*, 1-6, (2001)
4. 横田秀夫 他, “スライスによるデジタイジング装置の開発と眼球組織のデジタイジング”, *生体力学シミュレーション*, 92-99, (2003)
5. 周藤安造, “医用 3 次元可視化技術”, *可視化技術* 12,45,13, (1992)
6. 中嶋正之 他, “コンピュータビジュアライゼーション”, 共立出版, (2000)
7. 千葉則茂 他, “3 次元 CG の基礎と応用”, サイエンス社, (1997)
8. S.HIRATA, et al, “REALISTIC METHOD FOR GENERATING A HEXAHEDRAL FEM MESH FROM BIOLOGICAL SOFT TISSUE”, *Computational Biomechanics*, , (2002)
9. 横田秀夫 他, “生体軟組織の実形状を反映した精密 FEM メッシュ作成法”, 第 15 回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 419-420, (2003)
10. 平田忍 他, “フルカラー生体断面画像を用いた六面体有限要素作成手法の検討”, *生体力学シミュレーション*, 115-122, (2003)
11. 数値流体力学編集委員会編, “格子形成法とコンピュータグラフィックス”, 東京大学出版会, (1995)