

# 眼球の網膜剥離手術過程の FEM シミュレーション

孫 智剛, 牧野内昭武 (理化学研究所)

## 1. はじめに

網膜剥離は重要な眼科疾患であり, これを治療するのに強膜内陥術 (強膜バックリング術) がよく用いられている。しかし臨床ではこういった手術の成否また手術の効果はほとんど術者の経験に頼っている。したがって, 前もって手術過程の数値シミュレーションができれば手術最適化が期待できる一方, 経験の少ない術者でも安定した結果が得られることも大いに期待できる。

図 1 には眼球の構造図を示す。これを見てわかるように, 眼球は強膜、角膜といった比較的硬い組織が脈絡膜と網膜、ゼリー状をしている硝子体という柔らかい組織, またチン小帯、水晶体, さらに房水という液体により構成される非常に複雑な構造体になっている。その中の一番内側の薄い層は網膜である。網膜は視覚情報を受け取る組織で, つまり外界からの視覚情報はまず網膜に受け取られ, そこから光刺激が神経刺激に変換され視中枢に伝達されてはじめて影像として知覚される。しかしながら, 図 2 のように, 何らかの原因で網膜が色素上皮層・脈絡膜からはがれてしまうとその部分の視野が欠損するようにな

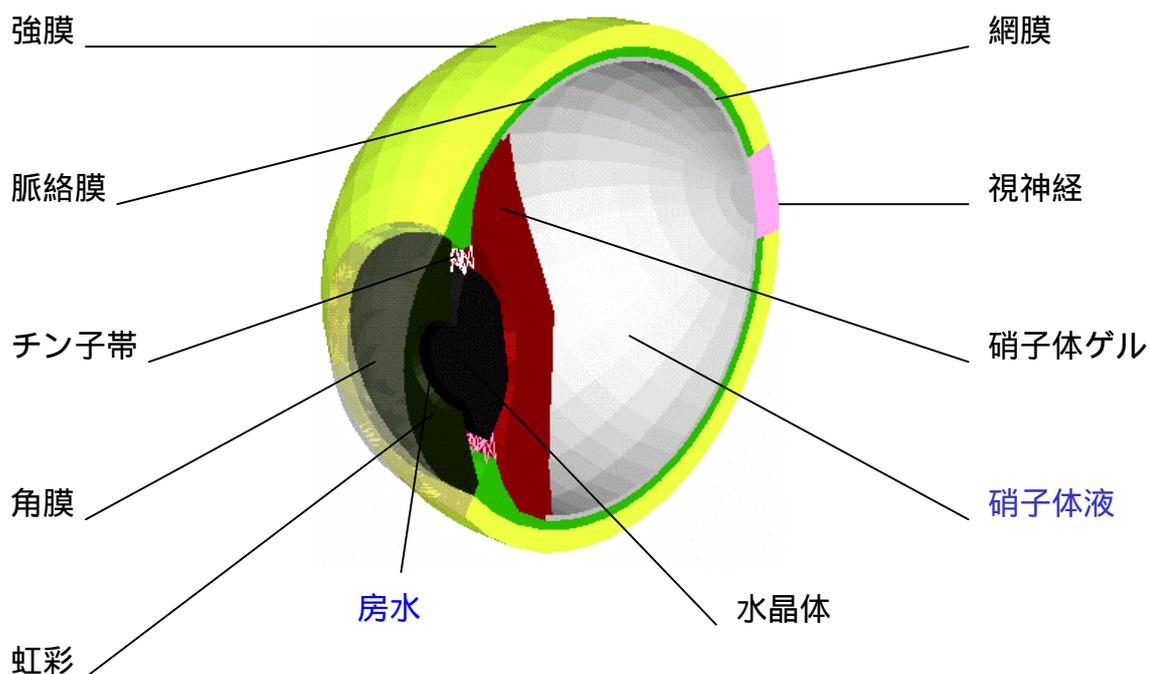


図 1 眼球の構造<sup>(1)</sup>

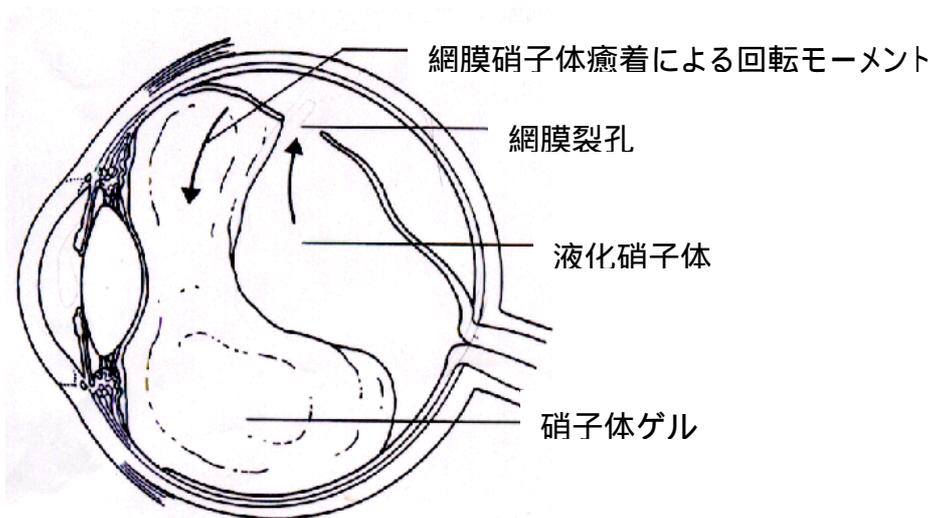


図 2 裂孔原生網膜剥離<sup>(1)</sup>

り、いわゆる網膜剥離の疾患になる。網膜剥離はその形成原因と過程の異なりによってさらに裂孔原生網膜剥離、牽引性網膜剥離と滲出性網膜剥離の三種類に分けられている。たとえば、硝子体はもともとゼリ - 状をしている組織であるが、年をとるにつれだんだん液化、収縮して網膜から離れていく。その際、網膜との間に癒着があると網膜を引っ張って網膜に裂孔を形成させ、そこから硝子体液（液化した硝子体）が網膜の下に流れ込んで網膜剥離を起こしてしまう。このように硝子体の液化が契機となって形成された網膜剥離を裂孔原生網膜剥離という。図 2 に示した図例がこの種の網膜剥離である。

裂孔原生網膜剥離の治療には強膜内陥術がもっとも頻度の高く使われている手術である。その手術の基本は確実な裂孔閉鎖である。つまり、網膜が剥離した部位にバックル材料（シリコンスポンジ、シリコンタイヤ）を押し付け、強膜を内陥させて剥離した網膜を強制的に強膜に押し付けることにより網膜への硝子体牽引を消去し裂孔を閉鎖させて網膜剥離を治療する。強膜内陥術には、図 3 のようにさらに網膜剥離の程度により部分締結術と輪状締結手術とがある。部分締結術はバックル材料を直接強膜上に縫い付けて強膜を内陥させる方法であり、剥離範囲が大きい場合に対応しにくい上に時間の経過につれてその効果は徐々に薄れてゆく弱点がある。これに対して、網膜剥離範囲が大きい、また恒久的な効果を得ようとする場合にはバックル材料を剥離した部位に設置しシリコンバンドで眼球を締め付けてさらにマットレス縫合によってそれを縫合固定する方法つまり輪状締結

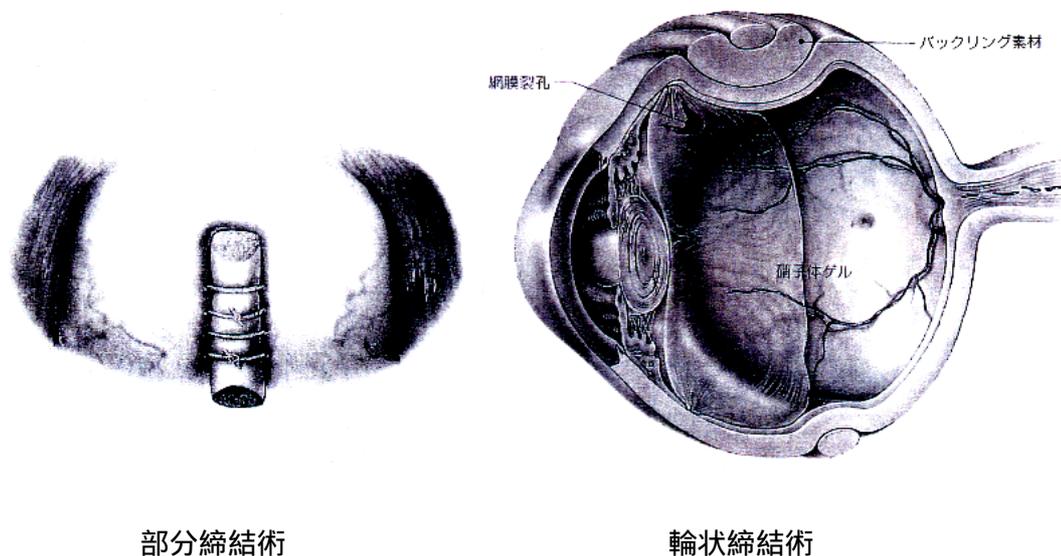


図3 強膜内陥手術(強膜バックリング手術)<sup>(1)</sup>

手術が用いられる。したがってこういった手術の場合ではバックル材料の形状とサイズ、バックル材料の設置位置、マットレス縫合の縫合幅、眼圧、また輪状締結手術であれば締結の強さ、などの決定は手術の効果を大きく左右している。しかし、現在これらのものの決定は臨床ではほとんど術者の経験的な感に依存しているということである。こういう背景から、前もってコンピューターの上で数値シミュレーションによって仮想手術を試行して手術に対する最適な条件が予測できれば大きな意味のあることである。そこで、われわれは構造解析用の有限要素法 (FEM) プログラム ITAS3D<sup>(2)</sup> をベースにし眼球モデルの計算に適した定式化をして輪状締結手術の数値シミュレーションを試みた。これはまた研究の端緒となるものである。

## 2. 解析方法

前述のように、眼球の前後房は房水という液体で充満しており、また硝子体という組織が加齢に伴って液化していくので硝子体腔に硝子体液がだんだんたまっていく。つまり眼球は固体と液体からなる複雑な構造体になっている。したがって、眼球の解析をしようとするならば固体 液体連成解析をしなければならない。ただし、輪状締結手術は基本的に準静

的な過程であるので、房水、硝子体液部分を全領域にわたり静水圧力が均一である理想静止液体として扱い定式化した。また、眼球内部にひものようなチン小帯という組織があり、これに適する要素としてひも要素の定式化をしそれをベースの ITAS3D に導入して、ソリッド要素とひも要素の混合解析をできるようにした。

## 2.1 固体 液体連成解析のための定式化

2.1.1 ITAS3D の定式 ITAS3D はもともと金属の成形加工のシミュレーションのために開発してきた静的弾塑性陽解法有限要素法プログラムであり、大変形問題を正確に扱うことができる。その基礎式は次の式(1)と式(2)である。

Updated Lagrange 速度形仮想仕事の原理式：

$$\int_V \dot{\Pi}_{ji} \frac{\partial \delta v_i}{\partial X_j} dV = \int_{S_t} \bar{t}_i \delta v_i dS + \int_V \rho \bar{b}_i \delta v_i dV \quad (1)$$

速度形弾塑性構成式：

$$\begin{aligned} \dot{\tau}_{ij} &= C_{ijkl}^{ep} D_{kl} \\ C_{ijkl}^{ep} &= 2G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \frac{\gamma}{1-2\gamma}\delta_{ij}\delta_{kl}) - \alpha \frac{9G\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}}{2\sigma'^2(H'+3G)} \end{aligned} \quad (2)$$

$\dot{\Pi}$  は公称応力速度， $\bar{t}$  は Cauchy 応力， $\tau$  は Kirchhoff 応力の Jaumam 速度， $\dot{v}$  は変位速度， $D$  はひずみ速度テンソルである。そして  $G$  はせん断弾性係数， $\gamma$  は Poisson 比である。また， $\alpha$  は塑性の時 1，弾性の時 0 を取る。

そこで式(2)を式(1)に代入し整理して、そして有限要素離散化すると、次式のような要素剛性方程式が得られる。

$$K^e \Delta u^e = \Delta f^e \quad (3)$$

さらにこれを系全体について組み立てると最終的に次のような全体剛性方程式が得られる。

$$K \Delta u = \Delta f \quad (4)$$

ITAS3D はこの全体剛性方程式を増分ステップごとに解いて節点変位増分  $u$  とそれから求まるひずみ増分、応力増分などを加え合わせて節点変位、ひずみ、応力などを更新していくことによって問題を解いていく。しかし、ここでの全体剛性マトリックス  $K$  には式(2)の弾塑性係数と幾何学非線型項が含まれており、式(4)の全体剛性方程式は非線型方程式

になっている。そこで、ITAS3D では  $r_{min}$ 法と呼ばれる方法を用い1増分ステップにおいて近似的に線形関係が成立するようにステップの増分量をコントロールすることによって  $u$  を陽に求めている。陽解法というのはこのように解がつねに陽に得られるからである。

2.1.2 固体 液体連成解析の定式化 図4のような液体で充満されているボールにある金属棒を押し込む場合を考える。この場合にはボールが押し込まれると同時に液体に生じる圧力がボールの内表面に作用する。静止の液体と仮定しているので圧力は液体の全体にわたって一定である。

いま圧力  $p$  が作用するボールの内表面上の一つの四辺形要素（ボールの壁は八節点六面体ソリッド要素に分割されるとする）を考えると、等価的な節点力は以下のように求められる。



$$f^e = \int_{S^e} -\Phi^T p n dS \quad (5) \quad \text{図4 固体 液体構造体の变形モデル}$$

ここで、 $f^e$  は等価な節点力ベクトル、 $\Phi$  は形状関数からなるマトリックス、 $n$  は外向きの法線ベクトルである。そして  $S^e$  は要素面積を表わす。

したがって、節点力増分は

$$\begin{aligned} \Delta f^e &= \int_{S^e} -\Phi^T \Delta(pn) dS \\ &= -\Delta p \int_{S^e} \Phi^T n dS - p \int_{S^e} \Phi^T \Delta n dS \end{aligned} \quad (6)$$

となる。さらに、上式の右辺にある  $p$  と  $n$  はそれぞれ液体表面上のすべての四辺形要素節点の変位増分と、対象としている要素の節点のみの変位増分で表示することができる。その導出過程は以下のである。

静止液体の場合、圧力の変化と体積の変化は以下の関係式を満足する<sup>(4)</sup>。

$$\Delta p = -K \frac{\Delta V}{V} \quad (7)$$

ここには  $\Delta p$  は液体圧力の変化、 $\Delta V$  は液体体積の変化、 $V$  は液体の体積、 $K$  は液体の体積弾性係数である。そして液体の体積は図4のようにそれを取り囲む表面上の四辺形要素から次のように求めることができる。

$$V^e = \int_{S^e} z dx dy = \int_{-1}^1 z(\xi, \eta) |J| d\xi d\eta$$

$$V = \sum_{e=1}^n V^e \quad (8)$$

ただし， $V^e$ は四辺形要素面の外向き法線方向が上向きであるなら負値を，逆の場合では正值を取る。ここで， $z$ は要素面上の点の $z$ 座標を表示する。また $\xi, \eta$ は要素面上の自然座標， $J$ はJacobianマトリックスである。さらに $n$ は圧力表面上の要素総数である。以上の体積計算式は図4のような簡単な場合に限らず，任意の複雑な場合に対しても有効である。

計算ステップ増分量が十分小さいため，高次の微小項を省略すると体積変化 $\Delta V$ は式(8)の右辺のすべての要素の節点座標に関する偏微分を取ることによって節点の変位増分により表示することができる。

$$\Delta V = F^T \Delta u^{Sp} \quad (9)$$

$F$ は節点座標に関する偏微分からなる $3m \times 1$ のマトリックスで， $\Delta u^{Sp}$ は圧力表面上節点の変位増分ベクトルである。また， $m$ は圧力表面上の節点総数である。こうしてこれを式(8)に代入すると圧力の変化は次のように書ける。

$$\Delta p = -\frac{K}{V} F^T \Delta u^{Sp} \quad (10)$$

一方，四辺形要素内の任意点の法線ベクトル $n = (n_x, n_y, n_z)^T$ の成分は

$$\begin{aligned} n_x &= \left( \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial z}{\partial \xi} \right) / H & n_y &= \left( \frac{\partial z}{\partial \xi} \frac{\partial x}{\partial \eta} - \frac{\partial z}{\partial \eta} \frac{\partial x}{\partial \xi} \right) / H \\ n_z &= \left( \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \xi} \right) / H \end{aligned} \quad (11)$$

ここで，

$$\begin{aligned} H &= \sqrt{EG - F^2} \\ E &= (\partial x / \partial \xi)^2 + (\partial y / \partial \xi)^2 + (\partial z / \partial \xi)^2 \\ F &= (\partial x / \partial \xi)(\partial x / \partial \eta) + (\partial y / \partial \xi)(\partial y / \partial \eta) + (\partial z / \partial \xi)(\partial z / \partial \eta) \\ G &= (\partial x / \partial \eta)^2 + (\partial y / \partial \eta)^2 + (\partial z / \partial \eta)^2 \end{aligned} \quad (12)$$

によって与えられる。そこで、式(11)を要素の節点座標に関して偏微分して増分形に整理すると  $\Delta n$  は、

$$\Delta n = (\Delta n_x, \Delta n_y, \Delta n_z)^T = M \Delta u^e \quad (13)$$

のような形になる。ここで、 $M$  は  $3 \times 12$  のマトリックスであり、 $\Delta u^e$  は要素節点の変位増分ベクトルである。

以上に導出された式(10)と式(13)を式(6)に代入することにより、最終的に等価節点力増分ベクトル  $\Delta f^e$  を液体表面上の要素の節点増分ベクトルにより表示する形が得られる。

$$\Delta f^e = Q \Delta u^{Sp} \quad (14)$$

$Q$  は  $12 \times 3m$  のマトリックスであり、 $m$  は圧力表面上の要素節点の総数である。

このように、全体節点番号との対応関係を考慮しながら、式(14)を式(4)の全体剛性方程式の右辺に加え合わせて、さらに左辺に移して整理すると、固体 - 液体連成解析のための全体剛性方程式にたどり着く。

$$(K + K^L) \Delta u = \Delta f \quad (15)$$

ここで、 $K$  はもとの固体に関連した剛性マトリックスで、 $K^L$  は液体に関連した剛性マトリックスである。この方程式を式(4)と同じように解いて、節点変位増分、ひずみ増分、応力増分など、さらに液体の圧力増分も得られる。したがって、固体に関連した情報のみではなく液体の圧力も計算できる。

## 2.2 ひも要素の導入

ここで、以下のように一様弾性引っ張りを受けるひも要素として簡単に導入する。

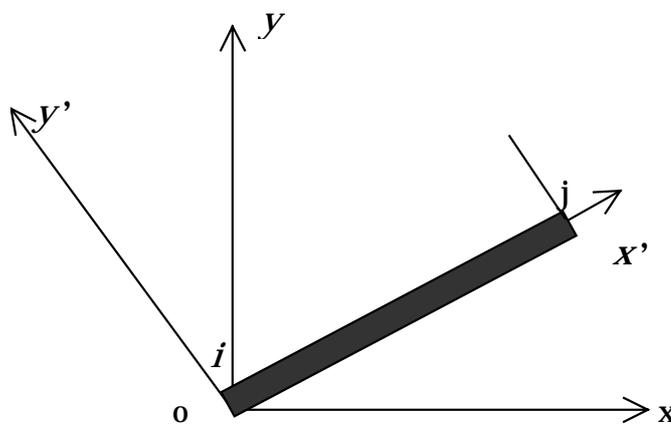


図5 ひも要素

上の2次元の 図5のように、局所座標系  $x'o'y'$  における一つのひも要素を考える。その長さを  $L$  とすればこの座標系における要素の変位速度場は次のように計算される。

$$v(x') = a_1 + a_2 x' = [1 - x'/L \quad 1 + x'/L] [v_i \quad v_j]^T = \mathbf{A} v_x, \quad (16)$$

したがって、速度勾配テンソルは

$$L_{x'x'} = \frac{\partial v}{\partial x'} = [-1/L \quad 1/L] [v_i \quad v_j]^T = \mathbf{B} v_x, \quad (17)$$

一方、この場合では弾性応力速度は次のように求める。

$$\dot{\sigma}_{x'x'} = E L_{x'x'} \quad (18)$$

$E$  はヤング率である。

このように、式(17)と式(18)を式(1)の速度形仮想仕事原理に代入して増分形に整理すると、ひも要素の局所座標系における剛性方程式が得られる。

$$\mathbf{K}_{string}^* \Delta u^e_{x'} = \Delta f^* \quad (19)$$

さらに、局部座標系から全体座標系に変換すると全体座標系における要素の剛性方程式が次式のようにになる。

$$\mathbf{T}^T \mathbf{K}_{string}^* \mathbf{T} \Delta u^e = \mathbf{K}_{string} \Delta u^e = \Delta f^* \quad (20)$$

ここで、 $\mathbf{T}$  はひも要素の方向余弦からなる変換マトリックスで、 $\Delta u^e$  はひも要素の節点変位増分ベクトルである。

しかし、以上の定式化は圧縮変形を受ける場合に対しても有効であるが、実際のひもの場合、引っ張りを受ける時には応力が生じるが、圧縮を受ける時には無応力の状態になる。そこで、各計算増分ステップにおいて、ひも要素の長さ  $L$  をその初期長さ  $L_0$  と比較して、 $L \leq L_0$  であるならば次の計算ステップにそれを無応力の状態にする。一計算増分ステップにおいてこういった状態の変化を押さえ線形関係を保つためには  $r_{\min}$  法を用いる。 $r_{\min}$  は以下の方程式を解いてその最小の正根を取る。

$$\begin{aligned} & [(x_1 + r\Delta x_1) - (x_2 + r\Delta x_2)]^2 + [(y_1 + r\Delta y_1) - (y_2 + r\Delta y_2)]^2 \\ & + [(z_1 + r\Delta z_1) - (z_2 + r\Delta z_2)]^2 = L_0 \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  はひも要素の節点の座標であり、 $\Delta x$ 、 $\Delta y$ 、 $\Delta z$  は節点の変位増分である。

### 3. 輪状締結手術の数値シミュレーション

#### 3.1 解析条件

今回の輪状締結手術のシミュレーションには計算の便宜上、なんの損傷もなく対称弾性体とした健全な眼球のモデルを用いた。また、マットレス縫合なしとし、眼球の全周にシリコンタイヤを設置するように仮定した。シリコンタイヤの形状、サイズもただの一種類のみを採用した。その目的はこういったシミュレーションの可能性、有効性を確認することにある。

図6は用いた計算モデルである。対称体と仮定したので眼球の四分の一を計算区域とした。チン小帯は64本の棒要素によって表現し、それ以外は1000個の六面体八節点ソリッド要素に分割した。材料分割は同図の通りであり、それぞれの材料定数は文献(4)より引用した。その値を表1に示す。また、房水と硝子体液との体積弾性係数は水と同じ $2083.3MPa$ とした。

表1 各組織の材料定数

	角膜	虹彩	強膜	脈絡膜	硝子体	網膜	視神経	水晶体	チン小帯
ヤング率(MPa)	0.2	0.05	0.5	0.05	0.00001	0.05	0.05	100	100
ポアソン比	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49	0.49

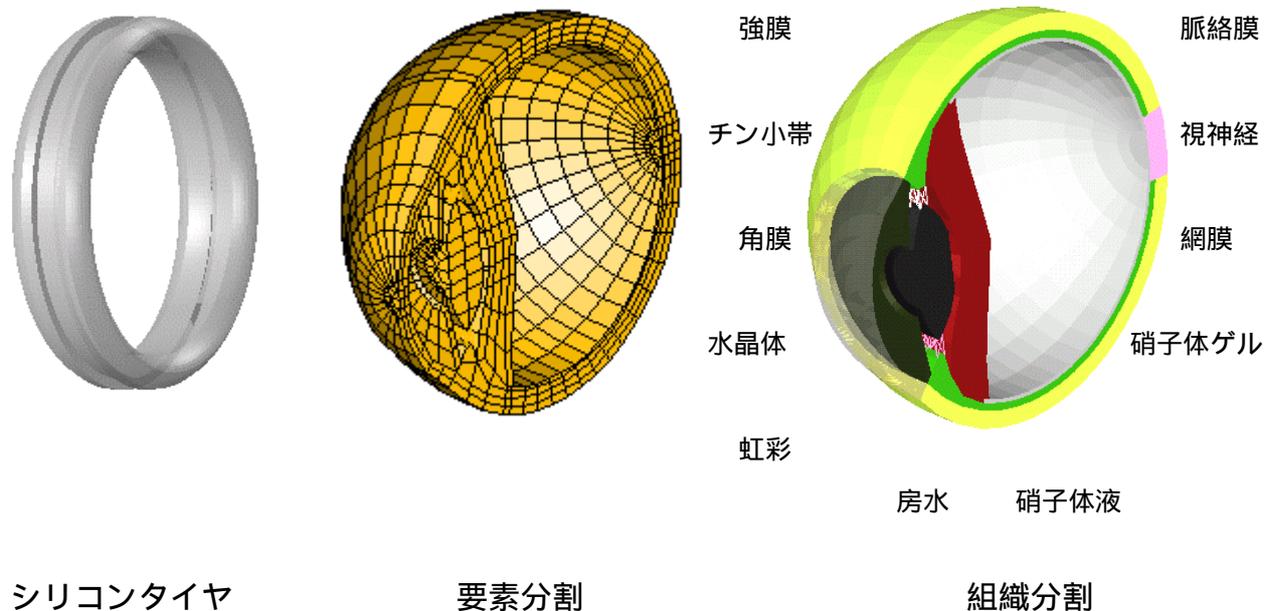


図6 解析モデル

### 3.2 シミュレーション結果

図7は締結過程中における眼球の変形パターンである。締込み量の増加に伴ってシリコンタイヤを設置したところに強膜がだんだん内陥されていき、実際にここに網膜剥離が発生しているならば復位されることが期待できる。しかし、これを見てわかるように強膜内陥の程度が予想ほど大きくなり、締込みだけでは十分な内陥効果が得られにくいこと、したがって十分な内陥効果を得るにはマットレス縫合が必要不可欠であることが示されたと言える。なお、締め込み量の増加につれて、眼球が眼軸方向に長くなっていった手術によって近視が生じることもはっきり見られ、締め込みすぎを防止することが大事であることがわかる。

一方、図8は締結後の眼球のミ-ゼス応力、せん断応力の分布である。例えばミ-ゼス応力に注目すると、応力が主に締結部位に集中していることが見て取れる。このようにこれらの応力分布が精度よく予測できれば、手術中に新たに眼球に損傷を与えることを避けるなどのために応用することが期待できる。

図9は締結過程中的硝子体腔の圧力の変化である。締結によって圧力が上昇することが再現されており、シミュレーションによって眼圧の予測もできることを示している。眼圧は内陥効果に影響を与えるだけではなく、種々の手術中の合併症を引き起こす原因ともなるのでこの眼圧の予測は手術中の適正な眼圧調整に応用できると思われる。

## 4. 最後に

本報告を通じて、数値シミュレーションによって変形、応力、眼圧などの有用な情報が獲得でき、FEMが眼球の網膜剥離手術のシミュレーションに対して有効な手段であることがまず確認できた。しかしこれはこの研究の端緒となるものにすぎなく、これからの研究課題は山積みである。例えば、個体差を表現できる眼球の三次元形状モデリング、八節点六面体メッシュの自動生成、各組織の材料特性の測定、さらに可視化などの問題がある。そして単に数値計算そのものにおいても以下のような課題の解決が必要とされている。

1) マットレス縫合のシミュレーション：今回のシミュレーションの結果によって、マットレス縫合はバックル材料を固定することだけではなく十分な強膜内陥効果を得るための手段でもあった。したがってマットレス縫合のシミュレーションが必要不可欠である。これは今回導入したチン小帯を扱うためのひも要素を縫合糸に応用することによって実現できると思われる。

2) 各組織の材料構成式の定式と導入：今回のシミュレーションにおいてすべての組織を線形弾性材料としたが、実際には生体の組織のほとんどは非線型弾性の特性を示している<sup>(5)</sup>。したがって、材料実験による測定データをもとにそれをうまく表現できる非線型弾性材料構成式を構築、定式して、さらにそれをプログラムに導入しなければならない。

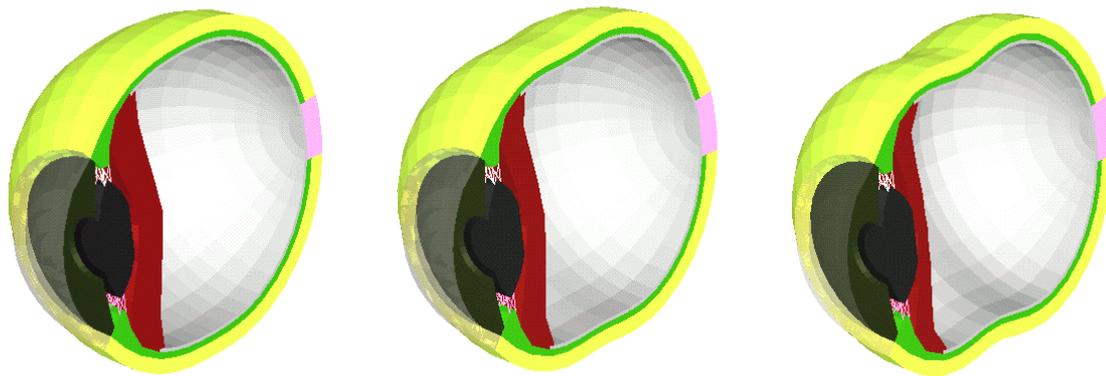
3) 変形体同士接触処理のアルゴリズムの導入：網膜剥離手術の基本は剥離した網膜を復位させることである。これはいわば組織同士の接触問題である。また，バックル材料はシリコン制のもので変形しやすく実際の手術において組織と共に変形するので，変形体として扱わなければならない。したがってこういったアルゴリズムの導入が必須である。

4) 計算の効率化：シミュレーションの目的は手術の最適化である。すなわち，いろんな条件の下で試行計算してその中から手術に対する最適なもしくは適正な条件を見つける。さらに，実際の臨床手術に応用する場合，何万あるいは十万個以上の要素が必要とされるのでコンピューターのさらなる進歩を期待する一方，解析ソルバの改良、計算の並列化がこれからの重要な課題の一つとなっている。

今後は以上の課題の解決を目指して研究を進めていきたい。

#### 参考文献

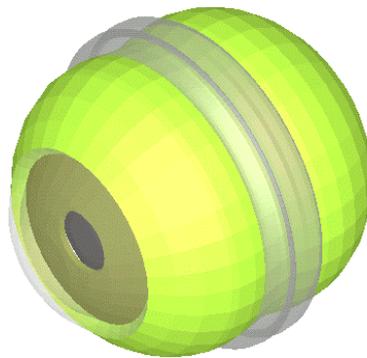
- 1) 樋田哲夫ほか，裂孔原生網膜剥離，(1997)，メジカルビュー - 社．
- 2) 牧野内昭武，塑性加工過程シミュレーションのための弾塑性有限要素法プログラム ITAS の概要および使用方法，理研報告 66(1990)，30．
- 3) 富田 幸雄，流体力学序説，(1971)，養賢堂．
- 4) 矢部比呂夫・川口 龍平，眼球の外力による損傷過程のシミュレーション，計算生体力学研究計画化調査報告書，(1998)，103．
- 5) B.JUE，The mechanical properties of the rabbit and human cornea，J. Biomechanics，19-10(1986)，847．



縮込み量 0.5mm

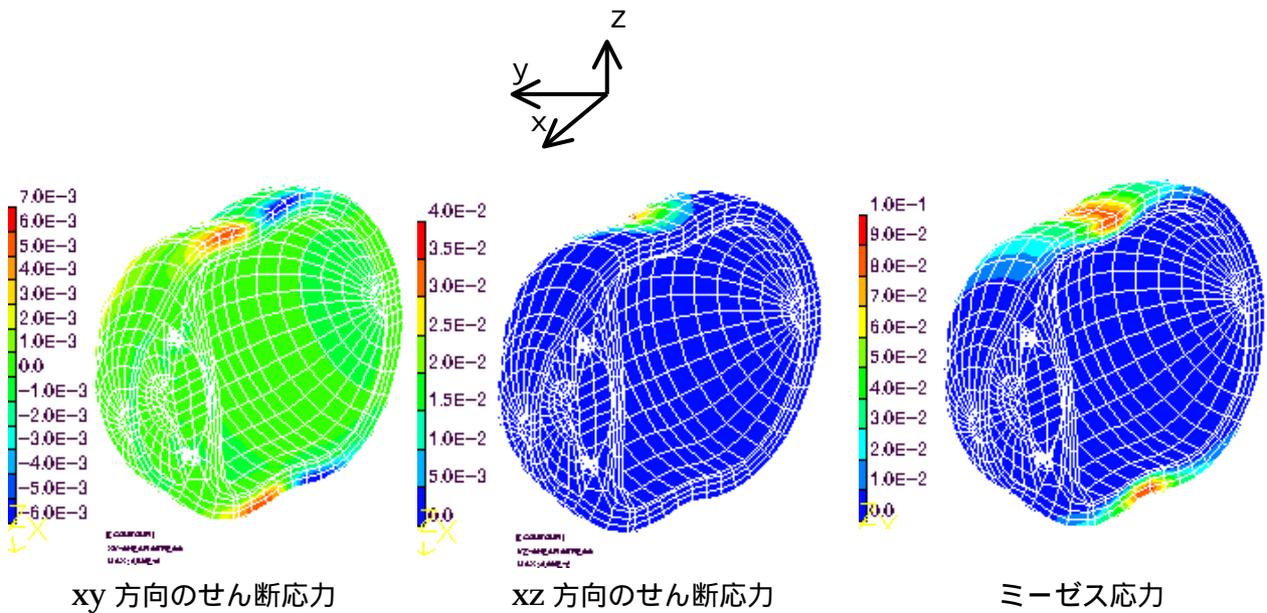
縮込み量 1.5mm

縮込み量 2.5mm



縮結後(縮込み量 2.5mm)の眼球の外観

図7 縮結過程中における眼球の変形パターン



xy 方向のせん断応力

xz 方向のせん断応力

ミーゼス応力

図8 縮結後(縮込み量 2.5mm)の眼球の応力分布

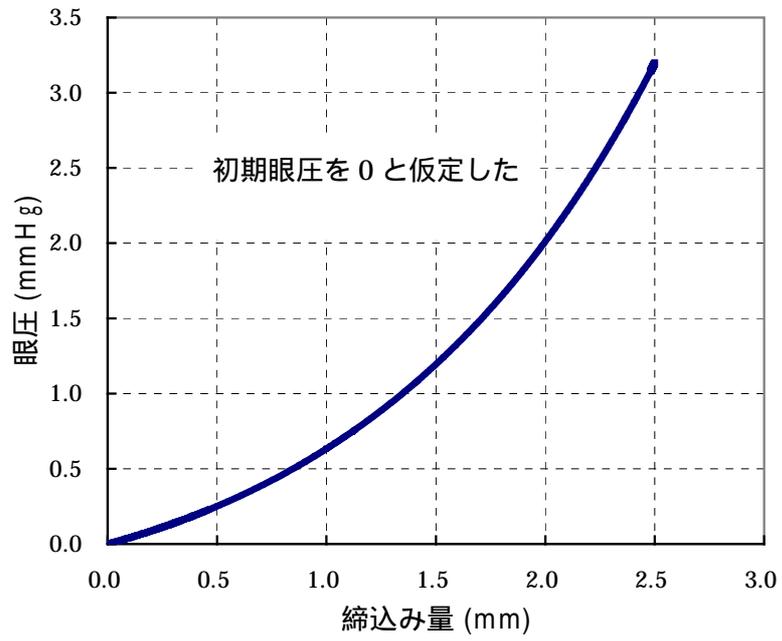


図9 縮結過程中における眼圧の変化