

臨床治療支援を目指した眼球網膜剥離手術シミュレータのための

3次元 FEM プログラムの開発

孫 智剛^{*1*2} 牧野内昭武^{*3} 矢部比呂夫^{*4}

*1 先端力学シミュレーション研究所(ASTOM) 研究開発部

*2 理化学研究所 生体力学シミュレーション特別研究ユニット

*3 理化学研究所 ものづくり情報技術統合化研究プログラム

*4 東邦大学医学部第2眼科

e-mail: sun@astom.co.jp, zgsun@postman.riken.go.jp

akitaki@postman.riken.go.jp

hiro075834@aol.com

1、緒言

近年、生体事象の解明および医療現場における疾病の予防、診断と治療、またリハビリテーションなどに対する有効な支援手段として、生体力学数値シミュレーション技術が注目されつつあり、その方面への応用を目指した研究が活発に行われている⁽¹⁾⁻⁽⁸⁾。しかしながら、現状としては、その多くは基礎的な研究段階にあり、臨床応用を実現するためにまだ多々の努力を必要としている。これは複雑な生体組織の力学的挙動、形態、構造などに関するデータの取得、材料構成式と形状モデル、解析モデルの構築などの難しさに加え、数値シミュレーション技術そのものも多種多様な生体现象の解析に対応するために多くの難点を克服しなければならないからである。

眼球は人体の中で外部からの視覚情報を獲得する唯一の感覚器官で、形状的には比較的単純な球状に近い形にしているが、角膜、強膜、網膜などの十数種類の軟組織と房水、硝子体液といった液体とにより構成された非常に複雑な3次元構造を持っている。眼球の内面を形成する網膜は視覚情報を受け取って光刺激を神経刺激に変換する役割を果たす眼内組織である。網膜は健全な場合、脈絡膜と接しており正常な視覚機能を維持しているが、何らかの原因によって、それと脈絡膜の間に液体が貯留し、そこから分離すると剥離の状態になる。網膜剥離が起こればほとんどの例で視覚障害が生じ、放置すると網膜全剥離の状態になり、やがて失明、眼球萎縮に陥るので手術による早期治療が必要となる。眼科臨床において、その発症機序から網膜剥離は主に硝子体の液化変性を契機に形成された網膜裂孔に起因した裂孔原生網膜剥離とそれ以外の原因による非裂孔原生網膜剥離(牽引性網膜剥離と滲出性網膜剥離)⁽⁹⁾とに大きく分類されており、その治療には異なる術式が用いられている。強膜の上にバックルを、直接にまたはその上を通したシリコ

ンバンドで眼球全体を締め付けてから縫い付けるような部分バックリングと輪状バックリングの二つの術式を持つ強膜バックリング手術は、強膜を内陥させ網膜裂孔を閉鎖させることによって裂孔原生網膜剥離を治療する手術であり、年間相当な件数で実施されている。しがしながら、バックルの形状と設置位置、締め付け強さ、縫合幅、縫合強さなどの選定を含めた手術計画および術中に変動する眼圧のコントロールなどは術者の永年の臨床経験と勘に頼るほかなく、とくに経験の浅い術者の場合、手術の成功率またその効果が満足的なものとはいえない実状にある。FEM数値シミュレーション技術を援用した手術シミュレータはこのような現状を打破するのに有力な選択肢を提供するものとして大いに期待できる。我々がこういった手術過程のシミュレータの実現を目指して研究を進めてきた⁽¹⁰⁾⁻⁽¹⁹⁾。この研究の最終的な目的は患者個人のデータをもとに、開発されたシミュレータを駆使して臨床手術過程を事前にシミュレートし、そこから得られた様々な力学情報に基づいて適正な手術条件をしばり出すことによって質の高い手術と高度医療を実現し、患者負担と医療費の低減、社会的な貢献につなげようとするものである。

このような目的を達成するために数値シミュレーションプログラムの開発はいうまでもなくそのカギを握っている。強膜バックリング手術の過程は一見力学的な現象としてとらえられやすいように見えるが、それを忠実に正確にシミュレートしようとするとなかなか困難である。なぜならば、この手術は糸状のチン小帯を含めた、大変形、非線形な力学特性を持つ十数種類の軟組織と液体との混合体である生体眼球を対象としている上、眼球を締め付けたり、縫合を施したりし、また術中に軟組織同士、バックル材同士、軟組織とバックル材、さらに縫合糸とバックル材の間に接触が頻繁に発生するなど、非常に複雑な過程になっている。したがって、このような過程をシミュレートするプログラムとしては、材料非線形、幾何学非線形また接触非線形の解析に加え、固体-液体連成解析、締め付け過程と縫合過程の解析などの機能をすべて備えなければならない。そこで、われわれが2次元からスタートして、すべての難点を克服しこのような複雑な手術過程のシミュレーションを可能にした3次元FEMプログラムを開発した。その機能は以下のようになっている。

1) 非圧縮性超弾性体の大変形、非線形力学応答の解析

要素タイプ：8 節点六面体混合型要素（1/8 要素：圧力 1、変位 8）

境界条件：節点変位、節点力、面圧

解析モデル：複合材料モデルに対応

材料モデル：
$$W = \sum_{r,s \geq 0} c_{rs} (I_1 - 3)^r (I_2 - 3)^s$$

2) 非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析

同時に扱える液体閉領域数：最大 90

3) 変形体同士接触解析

対応する接触状態：すべり、固着

同時に扱える接触面ペア数：最大 100

4) 変形体と剛体の接触解析

対応する接触状態： すべり

剛体表面の表現方法： 3 角形メッシュ

同時に利用できる剛体数： 最大 50

剛体移動方向： 方向ベクトルにより任意指定

5) 眼球を締め付ける過程の解析

バックル材の扱い方： 剛体、変形体

6) 縫合過程の解析

バックル材の扱い方： 剛体、変形体

縫合系の要素タイプ： 軸方向引っ張り剛性のみを持つ線形弾性バー要素

7) バックル材モデルの対話形式入力

8) 縫合幅、縫合角度の指定による縫合系の自動生成

縫合幅、縫合角度： 任意

縫合系の本数： 任意

縫合系を表現するバー要素数： 任意

2、主な解析方法

2.1 非圧縮性超弾性体の大変形、非線形力学特性の解析 非圧縮性超弾性体は以下のようなひずみエネルギー関数と非圧縮性条件によって特性づけられる。

$$\text{ひずみエネルギー関数： } W = W(\bar{I}_1, \bar{I}_2) \quad (1)$$

$$\text{非圧縮性条件： } J = 1 \quad (2)$$

ここで、 \bar{I}_1 、 \bar{I}_2 は右 *Cauchy-Green* 変形テンソルの第一と第二の低減不変量、 J は *Jacobian* マトリックスである。

こういった超弾性体を *Total Lagrangian* 定式に基づく混合型有限要素法^{(20) (21)} を用いて定式化する場合、その全ポテンシャルエネルギー汎関数は次のように定義される。

$$\Phi = \int_{V_0} (W(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + 2\lambda(J - 1)) dV - g(u) \quad (3)$$

λ は *Lagrange* 乗数でその 2 倍つまり 2λ は静水圧に一致する。さらに、 u は変位で、 $g(u)$ は外力による仕事である。このように Φ を停留させる u と λ は非圧縮性超弾性境界値問題の解を与えることになる。

そこで，(3)に停留条件を適用すると次式が得られる．

$$\begin{aligned} \delta\Phi = & \int_{V_0} (\partial W / \partial \varepsilon_{ij} + 2\lambda(\partial J / \partial \varepsilon_{ij})) \delta\varepsilon_{ij} dV \\ & + \int_{V_0} 2(J-1)\delta\lambda dV - (\partial g / \partial u)\delta u = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで， ε_{ij} は *Green-Lagrange* のひずみである．また，添字 i, j に関して総和規約が適用される(以下のすべての表式の中に現れた添字に関しては総和規約が適用される)．

次に離散化のために要素を考え，要素内で次の関係が成立するものとする．

$$u_i = \phi_N u_{Ni} \quad \lambda = \phi_L \lambda_L \quad (5)$$

ここで， N と L はそれぞれ要素内の変位節点数と *Lagrange* 乗数節点数で， ϕ_N と ϕ_L は形状関数である．

式(5)を式(4)に代入すると次のように要素に関する離散化方程式が得られる．

$$\begin{cases} \int_{V_0} (\partial W / \partial \varepsilon_{ij} + 2\lambda(\partial J / \partial \varepsilon_{ij})) \\ ((\partial \phi_N / \partial X_j) u_{Nk} + \delta_{jk})(\partial \phi_M / \partial X_i) dV = r_{Mk} \\ \int_{V_0} \phi_L 2(J-1) dV = 0 \end{cases} \quad (6)$$

X_i は基準配置における変位節点の座標を， r_{Mk} は外力の等価節点力を表す．

これを系全体に関して組み立てると以下のような全体離散化方程式が得られる．

$$\begin{cases} f_{ij}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{ij} \\ f_l(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$i = 1, \dots, n \quad j = 1, 2, 3 \quad l = 1, \dots, m$

n は節点総数を， m は *Lagrange* 乗数節点総数を表す．

これを *Newton-Raphson* 法を用いて解くために *Taylor* 展開を用いて線形化すれば全体剛性方程式が次のような形で求まる．

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_u^{i-1} & \mathbf{K}_\lambda^{i-1} \\ \mathbf{K}_\lambda^{i-1T} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}^i \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \mathbf{U}^{i-1} \\ \mathbf{F} \boldsymbol{\lambda}^{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (8)$$

そして、各繰り返しステップにおいて(8)を解き ΔU^i と $\Delta \lambda^i$ を得て解を次のように更新する。

$$\begin{aligned} U^i &= U^{i-1} + \Delta U^i \\ \lambda^i &= \lambda^{i-1} + \Delta \lambda^i \end{aligned} \tag{9}$$

このように、この過程を ΔU^i と $\Delta \lambda^i$ が十分小さくなるまで繰り返すことにより解を求める。

2.2 非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析 図 1 に示すような準静的な固体 - 液体連成変形モデルを考える。この場合は、棒を押し込むことにより容器の壁と内部に封入された液体が容器の内表面を介して互いに作用しながら変形するような連成解析の問題になる。本プログラムはこういった連成解析を行うために、液体部分に要素を用いず、変形中の全液体の体積のみを計算し、体積変化から生じた液体の圧力を面圧境界条件として固体部分解析のための離散化方程式に導入する方法、つまり、一種の強連成の解析方法を用いている。また、液体を理想静止液体として扱うのでその圧力を液体全体にわたって同一としている。

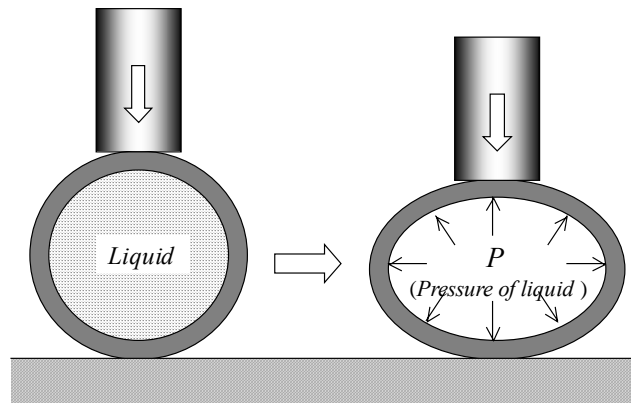


図 1 固体 液体混合モデル

解析において容器の壁は六面体の 8/1 混合型要素に分割されるので、その内表面はその六面体要素の側面に対応する四辺形要素により構成される表面として定義する。図 2 には容器の内表面上における任意の四辺形要素を示す。図のように要素の上に液体の圧力が作用しており、それに等価な節点力は現配置と基準(初期)配置の両方において求められるが、固体部分の解析は Total Lagrange 定式化、つまり基準配置に基づく定式化を用いているので、ここでは基準配置においてその等価節点力を求める方法を示す。

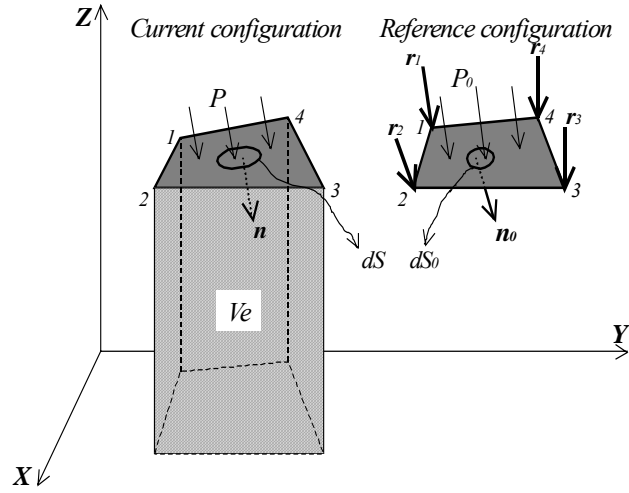


図2 容器内表面上の四辺形要素

現配置と基準配置における要素面上の同一微小面素の面積をそれぞれ dS と dS_0 、それらの壁の内部に向く単位法線ベクトルを n と n_0 とする．この時、Nansonの面積変換式⁽²²⁾は次のように表示される．

$$\begin{aligned} n dS &= J \mathbf{F}^{-T} n_0 dS_0 \\ J &= \det \mathbf{F} \end{aligned} \quad (10)$$

\mathbf{F} は変形勾配である．

これを用いると、基準配置と現配置における面圧 P_0 と P の対応関係が次のように得られる．

$$P_0 n_0 dS_0 = P J \mathbf{F}^{-T} n_0 dS_0 \quad (11)$$

こうして、現配置における面圧 P に等価な節点力は次の式(12)の形で求まる．

$$\mathbf{r}_e(P) = \int_{S_0} \mathbf{M}^T P J \mathbf{F}^{-T} n_0 dS_0 \quad (12)$$

ここで、 \mathbf{r}_e は対象にしている四辺形要素の等価節点力ベクトルを表す．また \mathbf{M} は要素の形状関数からなるテンソルであり、以下のような形を持つ．

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{vmatrix} \quad (13)$$

N_i は四辺形要素の形状関数である．

また、変形中において体積変化によって生じた任意配置(以下に現配置と呼ぶ)での液体の圧力は理想静止液体の場合における圧力変化と体積変化の関係式⁽²³⁾により

$$P = P_{ini} + \Delta P = P_{ini} - K \frac{V - V_{ini}}{V_{ini}} \quad (14)$$

として得られる。Kは液体の体積弾性係数、 P_{ini} と V_{ini} は液体の初期圧力と初期体積である。また、Vは現配置での液体の体積であり、以下のように液体を取り囲む容器の内表面上の四辺形要素から求められる。

$$V = \sum_{e=1}^{ne} V_e \quad (15)$$

$$V_e = \int_{S_e} z dS$$

ここで、 V_e は図2の影の部分に示されるような、それぞれの内表面上の要素から得られた体積で、 S_e は要素の面積である。ただし、図のように要素節点の結合順は容器の内側から見た場合に時計回りになるように定義する。また、 ne は要素総数を、 z は現配置での要素面上の任意点の z 座標を表す。以上の体積計算方法は図1に示す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。

そこで、式(7)に示した固体部分解析のための全体離散化方程式に対して、式(12)をその中の、容器内表面上の節点に対応する方程式の右辺の外力項に代入し、さらに式(14)を拘束条件として付け加えると以下のような全体離散化方程式が得られる。ただし、ここに液体の圧力 P は変数として扱われている。

$$\begin{cases} f_{i_1 j}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{i_1 j}^0 \\ f_{i_2 j}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{i_2 j}^0 + r_{i_2 j}(P) \\ f_l(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}) = 0 \\ p - (p_{ini} + \Delta p(u_{11}^{IS}, u_{12}^{IS}, u_{13}^{IS}, \dots, u_{k1}^{IS}, u_{k2}^{IS}, u_{k3}^{IS})) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$i_j = 1, \dots, n-k \quad i_2 = 1, \dots, k \quad j = 1, 2, 3 \quad l = 1, \dots, m$$

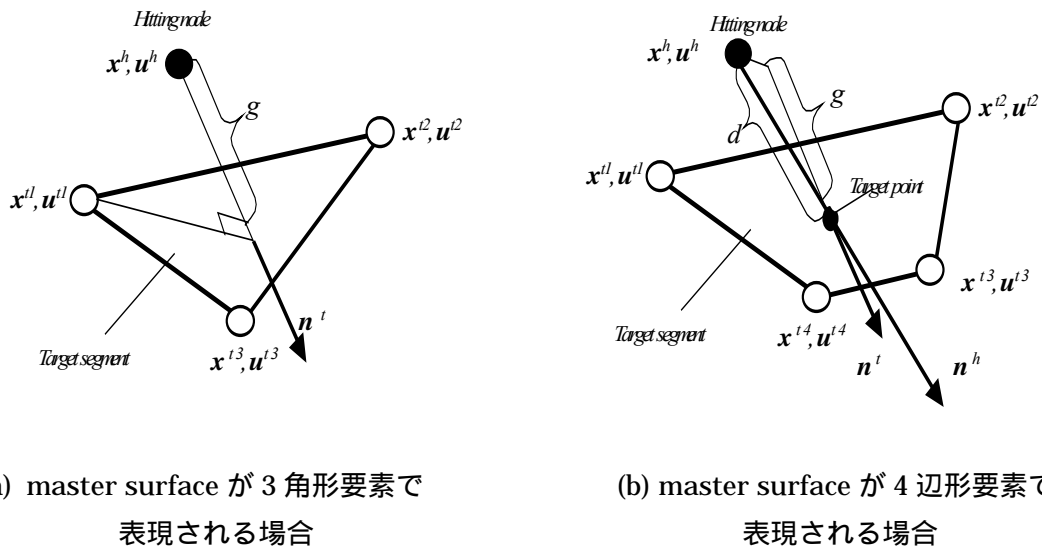
ISは容器の内表面を、 k はその上の節点総数を表す。

これを Taylor 展開を使って線形化すれば、固体 液体連成解析のための全体剛性方程式が次の式(17)のような形で得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_u^{i-1} & \mathbf{K}_\lambda^{i-1} & \mathbf{K}_{p \ 1}^{i-1} \\ \mathbf{K}_\lambda^{i-1 T} & \mathbf{0} & \\ \mathbf{K}_{p \ 2}^{i-1} & & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}^i \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}^i \\ \Delta P^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \mathbf{U}^{i-1} + \mathbf{F} P^{i-1} \\ \mathbf{F} \boldsymbol{\lambda}^{i-1} \\ \mathbf{F} P^{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

2.3 変形体同士の接触解析 変形体同士の接触を扱うために、まず接触が可能なサーフェスペアを指定する。そして、各ペアごとに Master サーフェスと Slave サーフェスを定義する。実際の接触処理においては Slave サーフェス上の節点が Master サーフェスに接触する場合のみを扱いその反対の接触を考慮しない手法、いわゆる One-pass approach 手法を用いている。六面体要素を用いる 3 次元 FEM 解析の接触処理において Master サーフェスを四辺形要素で表現するのは一般的であるが、本プログラムはそれを三角形要素と四辺形要素の両方で表現する二つの手法を保有している。ただし、計算効率の配慮上、前者は接触点(Target point)を一切求めない手法を、後者は Hitting node の法線ベクトルを用いて接触点の自然座標を直接に求める方法を用いている。また両者において一つの計算ステップにおける接触点の隣接要素への移行は無視されている(固着接触状態を除く)。一方、いずれの場合においても接触が発生した時の幾何学的拘束条件を Penalty 定数法により与えている。

図3に Slave サーフェス上のある節点(hitting node)が Master サーフェス上のある要素(target segment)と接触した状態を示す。



(a) master surface が 3 三角形要素で表現される場合

(b) master surface が 4 四辺形要素で表現される場合

図3 接触状態における Hitting node と Target segment

この時、hitting node の target segment に対する貫通量 (すべり状態) または hitting node と target point の距離 (固着状態, 四辺形要素のみ) は

$$\left. \begin{aligned}
 g &= (x^h - x^{t1}) \cdot n^t \quad (\text{for triangular element}) \\
 g &= (x^h - x^t) \cdot n^t \quad (\text{for quadrilateral element})
 \end{aligned} \right\} \rightarrow \text{Sliding contact state}$$

$$d = |x^h - x^t| \quad (\text{only for quadrilateral element}) \rightarrow \text{Sticking contact state}$$

(18)

として計算され、幾何学的拘束条件は次のように与えられる。

$$g = 0 \quad \text{または} \quad d = 0 \quad (19)$$

ここで、 x^h と x^{tl} 、 x^l はそれぞれhitting nodeとtarget segmentの任意の1つの節点、target pointの位置ベクトルを、 n^l はtarget segment (三角形)またはtarget point(四辺形)での外向きの法線ベクトルを表す。

これを Penalty 定数法によって与えると、接触を含めた系の全ポテンシャルエネルギー汎関数は以下のようになる。

$$\Phi_c = \Phi + \frac{1}{2}\alpha C^2 \quad (C = g \text{ for sliding state ; } C = d \text{ for sticking state}) \quad (20)$$

は Penalty 定数である。

これに停留条件を適用すれば

$$\begin{aligned} \delta\Phi_c &= \delta\Phi + \delta\left(\frac{1}{2}\alpha C^2\right) = \delta\Phi + \delta u_c^T \cdot (\alpha CD) \\ &= \delta\Phi + \delta u_c^T \cdot f_c \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 f_c は等価節点接触力ベクトル、 D は 12×1 階(三角形)または 15×1 階(四辺形)のマトリックスである。また、 u_c は以下のように節点変位ベクトルを表す。

$$\delta u_c^T = (\delta u_x^h, \delta u_y^h, \delta u_z^h, \delta u_x^{t1}, \delta u_y^{t1}, \delta u_z^{t1}, \delta u_x^{t2}, \delta u_y^{t2}, \delta u_z^{t2}, \delta u_x^{t3}, \delta u_y^{t3}, \delta u_z^{t3})^T \quad (\text{for triangular element})$$

$$\delta u_c^T = (\delta u_x^h, \delta u_y^h, \delta u_z^h, \delta u_x^{t1}, \delta u_y^{t1}, \delta u_z^{t1}, \delta u_x^{t2}, \delta u_y^{t2}, \delta u_z^{t2}, \delta u_x^{t3}, \delta u_y^{t3}, \delta u_z^{t3}, \delta u_x^{t4}, \delta u_y^{t4}, \delta u_z^{t4})^T \quad (\text{for quadrilateral element}) \quad (22)$$

このように、式(21)から得られた全体離散化方程式を Taylor 展開を用いて線形化すると、変形体同士接触解析の場合の全体剛性方程式は最終的に以下の形で得られる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_u^{i-1} + \mathbf{K}_{u_c}^{i-1} & \mathbf{K}_\lambda^{i-1} \\ \mathbf{K}_\lambda^{i-1T} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \mathbf{U}^i \\ \delta \boldsymbol{\lambda}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}\mathbf{U}^{i-1} + (\mathbf{F}\mathbf{U})_c^{i-1} \\ \mathbf{F}\boldsymbol{\lambda}^{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ここで、 \mathbf{K}_{u_c} と $\mathbf{F}\mathbf{U}_c$ は接触による部分を表す。

2.4 変形体と剛体の接触解析 変形体同士接触解析と同様に，接触が発生した時の幾何学的拘束条件を Penalty 定数法により与えている．ただし，この場合では系の全ポテンシャルエネルギー汎関数は以下のようになる(便宜上，一つの接触節点のみの場合を示す)．

$$\begin{aligned}\Phi_c &= \Phi + \frac{1}{2}\alpha(u_{ni}^N - u^{cd_i})^2 \\ u^{cd_i} &= u_{ni-1}^N + \Delta u_{ni}^R\end{aligned}\tag{24}$$

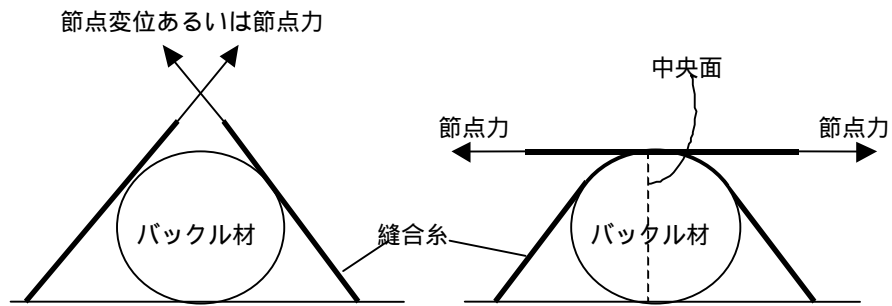
ここで， i は現計算ステップ数、 N は接触節点、 R は剛体、 n は接触位置での剛体表面の法線方向を表す．

また， u_{ni}^N と u_{ni-1}^N はそれぞれ接触節点の現ステップと前ステップでの n 方向におけるトータル節点変位を， Δu_{ni}^R は n 方向における剛体のステップ変位増分を表す．

2.5 眼球を締め付ける過程の解析 バックル材を剛体または変形体として扱う二つの解法を保有している．剛体として扱う場合は，バックル材を数多くの剛体として表現した上，それぞれの剛体を眼球の半径方向に移動させる手法を用いている．ただし，このような扱いは計算時間の節約に効果的であるが，正確で定量的な解析に限度がある．一方，変形体として扱う場合は，剛体を用いて眼球の剛体移動を拘束した上，シリコンバンドの先端に強制変位を与えて引っ張っていく手法を用いている．この手法ではバックル材の変形が解析されるが，顕著なすべり変形に伴う変形体同士接触の解析が行われるので剛体の場合に比べて計算時間が長くなる．

2.6 縫合過程の解析 締め付け過程の解析と同様に，計算効率の配慮上，バックル材を剛体または変形体として扱う二つの解法を保有している．ただし，比較的硬いシリコンタイヤとシリコンバンドを用いる輪状バックリング手術の場合は，それらのバックル材は締め付け過程の解析に変形体として扱われる時でも変形によってさらに硬くなる上に締め付けられた眼球からの働きもあるので，剛体として扱われても大した誤差がないが，部分バックリング手術の場合では柔らかいシリコンスポンジをバックルとして使っているため，バックル材の変形は無視できない．したがって，部分バックリング手術の解析には基本的にバックル材を変形体として扱う手法を用いる．

解法としては，剛体の場合は縫合系とバックル材の接触を考慮する必要がないため，各縫合系を一つのバー要素のみで表現し，縫合系の方向をバックル材表面の母線に垂直でかつバックル材表面に接するように保ちながら縫合系の先端に強制節点変位あるいは節点力を与える方法を用いている．一方，変形体の場合はバックル材の変形が眼球面と縫合系の両方の作用により左右されるので，それを解析するために縫合系とバックル材の間の接触解析が不可欠である．そのため，縫合系を十分な数のバー要素で表現した上，その先端にバックル材の中央面に垂直するような強制節点力を与えて解析を行う(図 4 を参照)．また，いずれの場合も強制変位また強制節点力の方向は計算ステップ毎に自動的に探索し更新される



(a) バックル材を剛体として扱う場合 (b) バックル材を変形体として扱う場合

図4 縫合過程の解析方法

2.7 縫合幅、縫合角の指定による縫合系の自動生成 縫合過程解析の前処理として以下のような手順で縫合系を生成する(図5を参照)。

- 1) 指定された縫合系の本数、縫合幅、縫合角により定義したベクトルと眼球表面(四辺形要素で表現)との交点(縫合点)を求める。このように得られた縫合点は解析要素の節点に限らない。
- 2) 求められた各縫合点を通しバックル材表面の母線に垂直でかつバックル材表面に接するようなベクトルを求める。
- 3) 縫合系の長さを自動的に決め、1)2)に基づいて各縫合系を表現するバー要素を生成する。

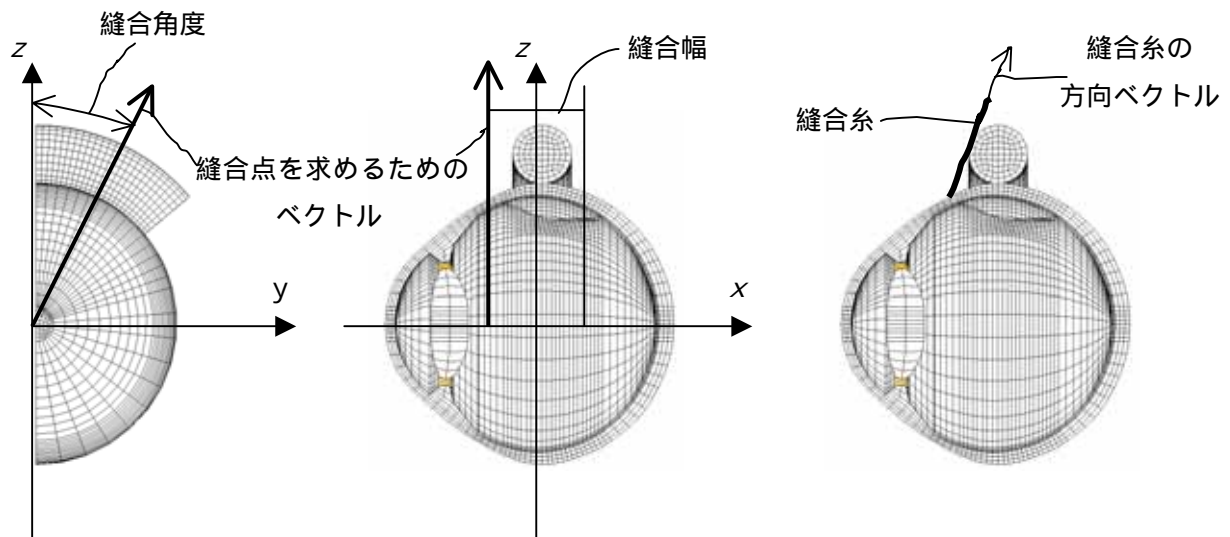


図5 縫合系の生成方法

3、検証解析およびそれ以外の解析例

3.1 プログラム検証のための解析 ここで図6と図7に示した2軸引っ張りを受ける四辺形薄板と面圧を受ける薄い円板の解析を示す。この二つの場合において理論解はそれぞれ式(25)と(26)のように導出できるので計算解をそれらと比較することによってプログラムの計算精度を検証する。2.2からわかるように、本プログラムは固体-液体連成解析には基本的に変形中に変化しつつある液体の圧力を面圧の境界条件として固体部分に導入する手法を用いているので、後者は超弾性解析のみではなく、連成解析の精度の検証としても有効である。二つの解析には同じ超弾性材モデル $W=25(I_1-3)+5(I_2-3)$ を用いた。

2軸引っ張りを受ける四辺形薄板の場合：

$$\text{引っ張り力 } F_{theory} = 2A\left(\lambda - \frac{1}{\lambda^5}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \quad (25)$$

：伸長比 A：板の断面積

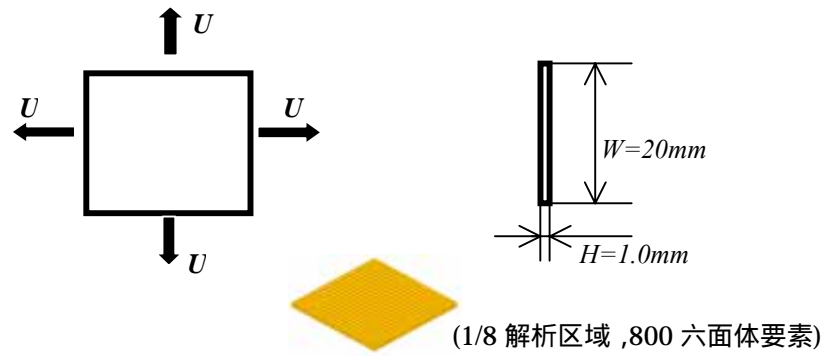
面圧を受ける薄い円板の場合：

$$\text{面圧 } P_{theory} = \frac{4h}{r}\left(1 - \frac{1}{\lambda^6}\right)\left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda^2 \frac{\partial W}{\partial I_2}\right) \quad (26)$$

$$\text{頂点での半径方向の応力 } \sigma_{theory} = \frac{P_{theory} r \lambda^2}{2h}$$

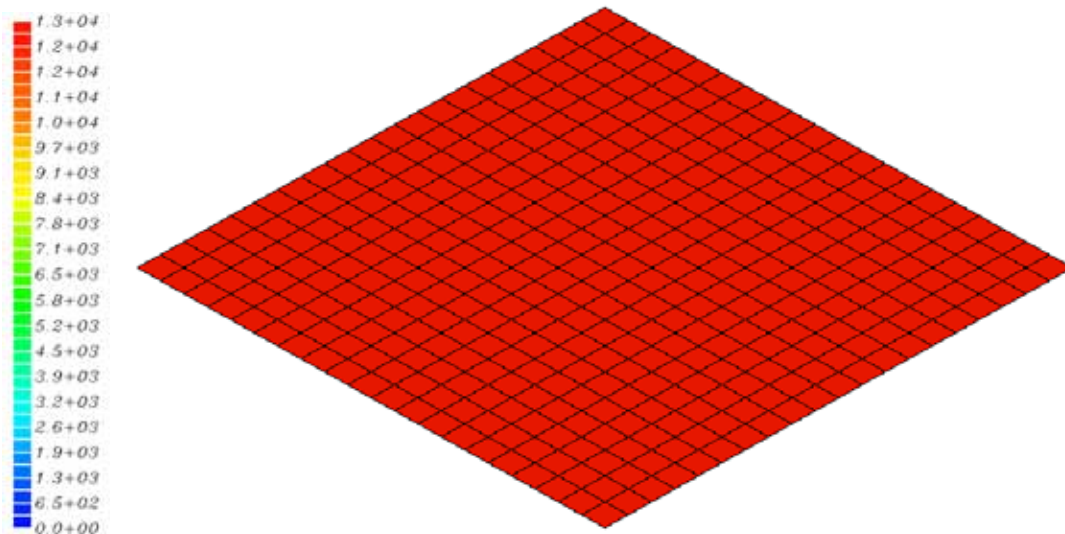
h：円板の初期厚さ r：頂点での曲率半径 ：頂点での半径方向の伸長比

計算結果と理論解の比較から確認できるように、いずれの場合も両者がよく一致し、開発したプログラムは十分な精度を持っている。

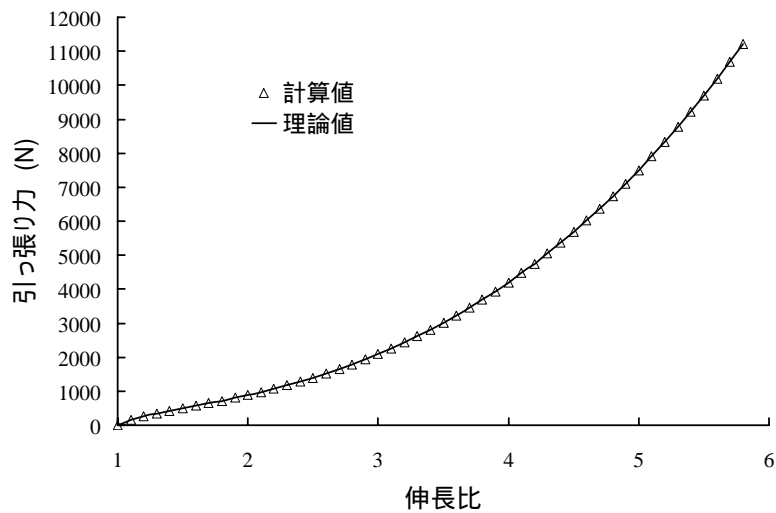


(a) 解析モデル

引っ張り方向の真応力(MPa)

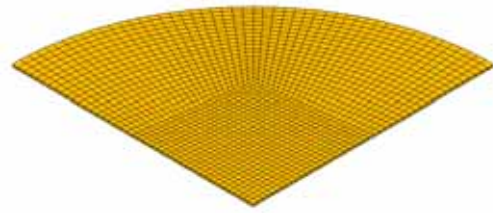
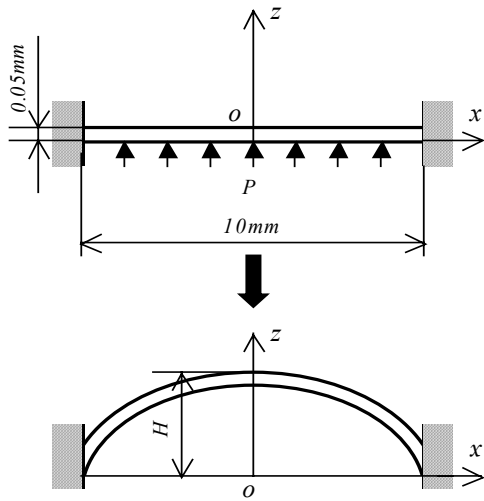


(b) 伸長比が 5.8 の時の引っ張り方向真応力分布の計算結果



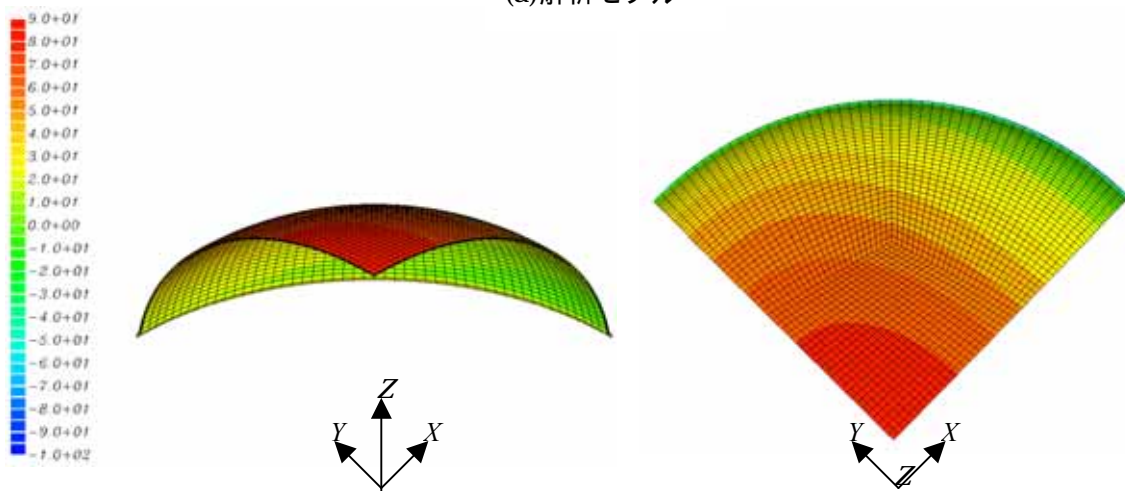
(c) 引っ張り力の計算値と理論解の比較

図 6 検証解析 1 (2 軸引っ張りを受ける四辺形薄板の解析)

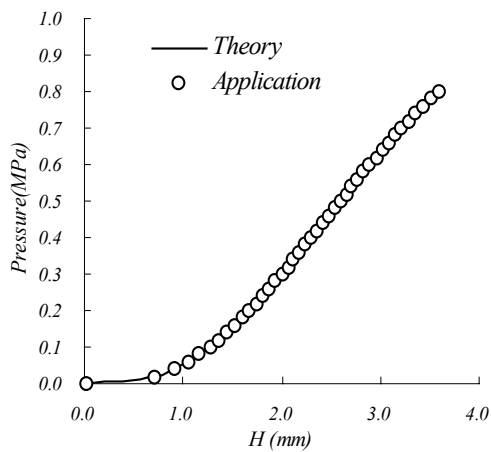


(1/4 の解析区域, 3250 六面体要素)

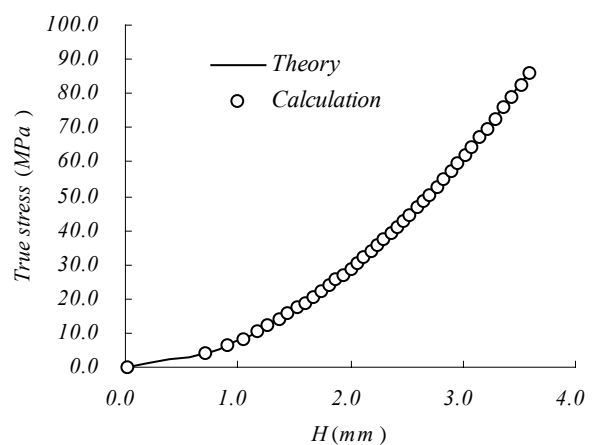
(a)解析モデル



(b)作用させた面圧が 0.8Mpa に達した時の x 方向真応力分布の計算結果



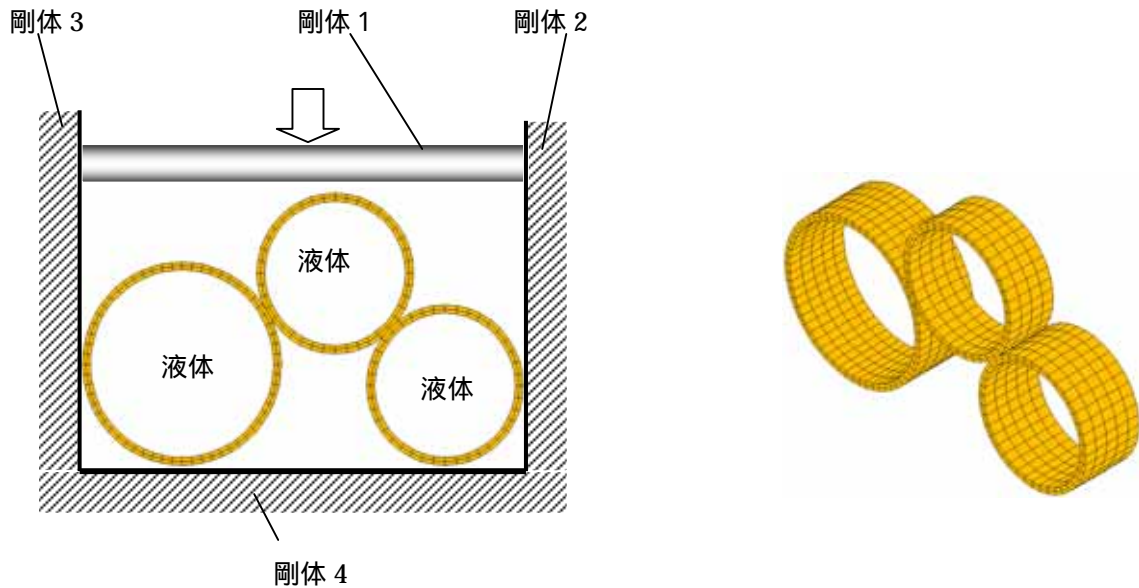
(c)実際に作用させた面圧と面圧理論解との比較



(d)円板の頂点での半径方向真応力の計算解と理論解との比較

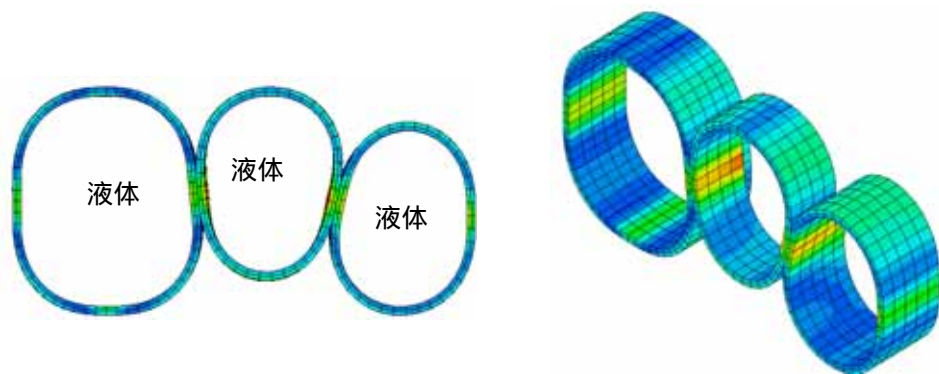
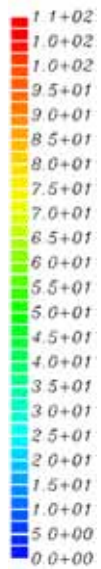
図 7 検証解析 2 (面圧を受ける薄い円板の解析)

3.2 それ以外の解析例 本プログラムは複数の剛体、液体閉領域と変形体同士接触ペアが同時に存在する場合の解析を行う能力を持っている．ここで紙面の制限上，二つの解析例のみを示す．



(a)解析モデル

Mises stress(MPa)



(b)解析結果

図 8 解析例 1 (液体を充満した複数のパイプを圧縮する解析)

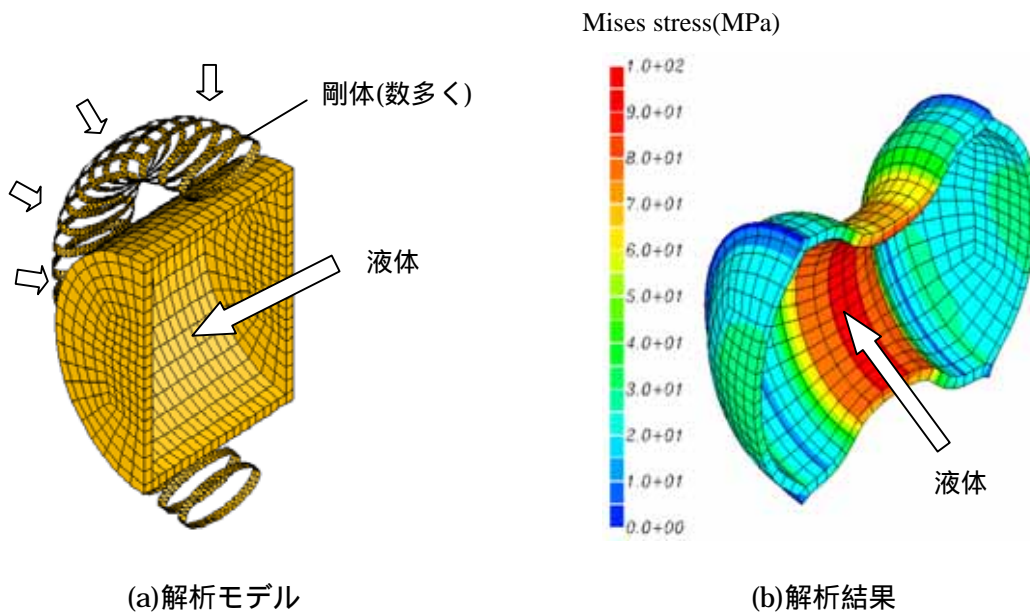


図9 解析例2 (液体を充満した円筒容器を締め付ける解析)

4、眼球バックリング手術過程のシミュレーション

強膜バックリング手術による裂孔原生網膜剥離治療の基本的な目標は最小の侵襲で適正な強膜内陥を作り出し、網膜裂孔を確実に閉鎖させることである。したがって、数値シミュレーションの目的は様々な条件の下で実行した手術過程のシミュレーションにより得られた変形、応力、眼圧などの情報に基づいて分析判断し、そういった目標を達成するための条件を予測することになっている。いうまでもなく、その前提は様々な条件の下での複雑な手術過程のシミュレーションを可能にすることである。前述したように、この手術には実際の網膜剥離状況などに応じて部分バックリングと輪状バックリングの2種類があり、眼科臨床において使い分けられている。ここで、それぞれをシミュレータした例を示す。

4.1 輪状バックリング手術のシミュレーション⁽¹⁸⁾

4.1.1 解析モデルと解析条件 解析では眼球をZ-X座標面に関して対称と見なし、その半分を解析領域とした。図10に解析に用いた眼球およびシリコンタイヤとシリコンバンドのモデルを合わせて示す。ここで、網膜が眼球の上部で剥離しており、網膜裂孔はその上の赤道部に発生しているような網膜剥離パターンを取り上げた眼球のモデル、また眼球面に対して平たくなっている平坦型と、凸となっている突起型の2種類のシリコンタイヤのモデルを用いた。これらのモデルにおいて、チン小帯とそれ以外の眼球軟組織、シリコンタイヤ、シリコンバンドに、それぞれバー要素と8/1節点六面体混合型要素、および線形弾性モデルとneo-Hooke超弾性材料モデルを用いた。それらの材料定数を表1に示す。一方、眼球内部の房水と硝子体液の体積弾性係数を室温の水と同じ 2083.3MPa とした。

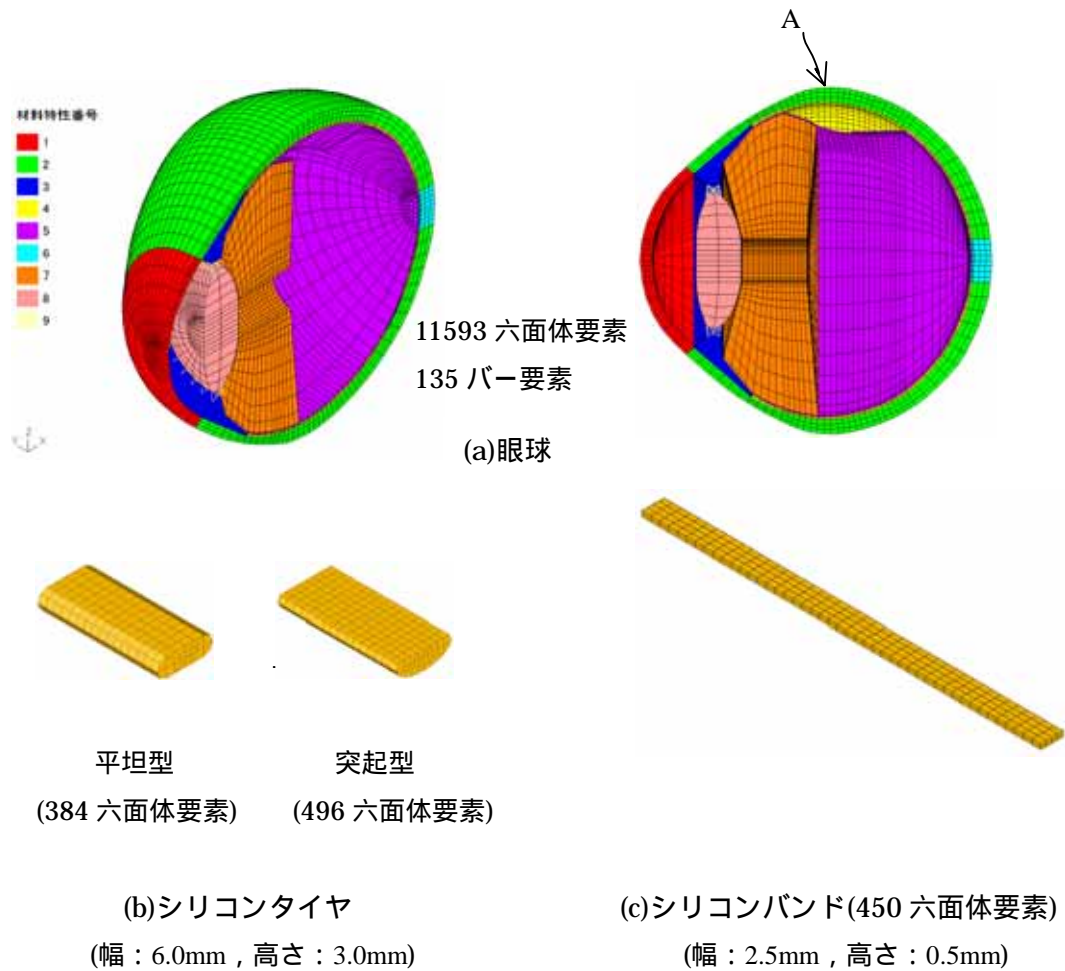


図10 輪状バックリング手術シミュレーションモデル

表1 輪状バックリング手術シミュレーションに用いた軟組織とバックル材の材料定数(MPa)

	角膜	強膜	毛様体	脈絡膜	網膜	視神経	硝子体	水晶体	タイヤとバンド
c	0.0333	0.0833	0.01	0.0083	0.0008	0.05	0.0002	10.0	1.0

neo-Hookean material model: $W = c(I_1 - 3)$

Young's modulus of Zinn's zonule: 100MPa

実施した解析は表2に示したような、異なるシリコンタイヤの形状、縫合幅と締め付け強さを
用いた四つのケースである。すべての場合の解析手順は以下のものである。

- 1)標準初期眼圧(15mmHg)を生成するための、眼球内部に面圧の境界条件をかける解析。
- 2)シリコンバンドで眼球を締め付ける過程の固体 - 液体連成解析(シリコンバンドとシリコンタイヤは変形体として扱った)。
- 3)シリコンバンドとシリコンタイヤを眼球表面に縫合する過程の固体 - 液体連成解析(計算時間節約のため、シリコンバンドとシリコンタイヤを剛体とした)。

表2 輪状バックリング手術シミュレーションの各ケースの計算条件

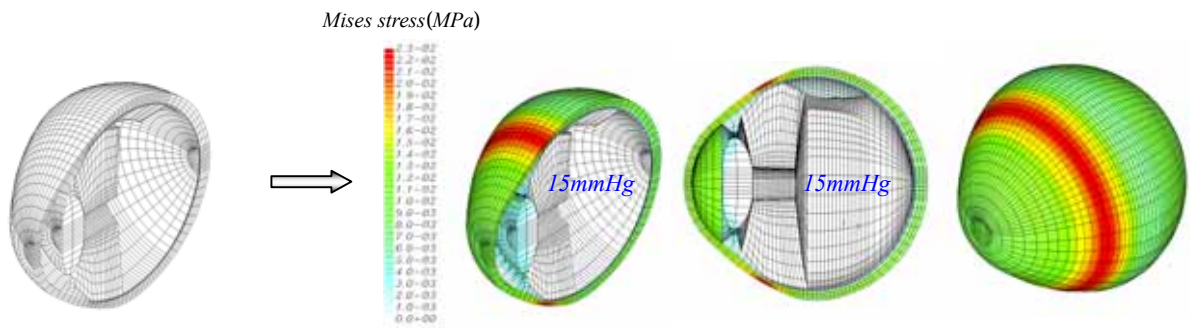
	タイヤ形状	縫合幅	締め付け強さ	タイヤ設置位置	縫合強さ
Case1	平坦型	9.00mm	弱	A	同
Case2	突起型	9.00mm	弱	A	同
Case3	突起型	7.80mm	弱	A	同
Case4	突起型	9.00mm	強	A	同

4.1.2 解析結果 紙面の制限上，case1 の各ステップにおける詳細な解析結果のみを図 11 に示す．第 1 ステップは標準眼圧に相当する面圧を眼球内部にかけることによって術前の眼球の自然状態を生成するための解析であり，図から見て取れるようにそれによって眼球の初期眼圧および各組織にかかる初期応力が生成された．ただし，ここで眼球形状の変化はごく僅かであり，無視できるものになっている．これはこのような眼球初期状態の生成方法は実用上，有効であることを示している．その次の第 2 ステップはシリコンタイヤを強膜上に設置した後，その上を通したシリコンバンドで眼球を締め付ける過程の解析である．この段階では，締め付けにより顕著な強膜内陥効果は出現しなかったが，眼球直径の減少と眼軸長の伸長に伴って網膜下液体積が減少し，剥離した網膜が脈絡膜に接近した．一方，硝子体は眼球の半径方向に圧縮されたと同時に，それと水晶体との間の液体が排出され，水晶体と接触し始めた．そして，最後の縫合過程の第 3 ステップにおいて，縫合を施すことにより強膜が強く内陥されて，網膜下液の大部分が網膜下から排出され，同時に剥離した網膜の大部分が復位され網膜裂孔が閉鎖された．なお，剥離した網膜と接している部位の硝子体はさらに圧縮され，網膜を内部から支持するようになった．しかし，この場合は締結部，とくに通糸の位置に高い応力集中が生じた．

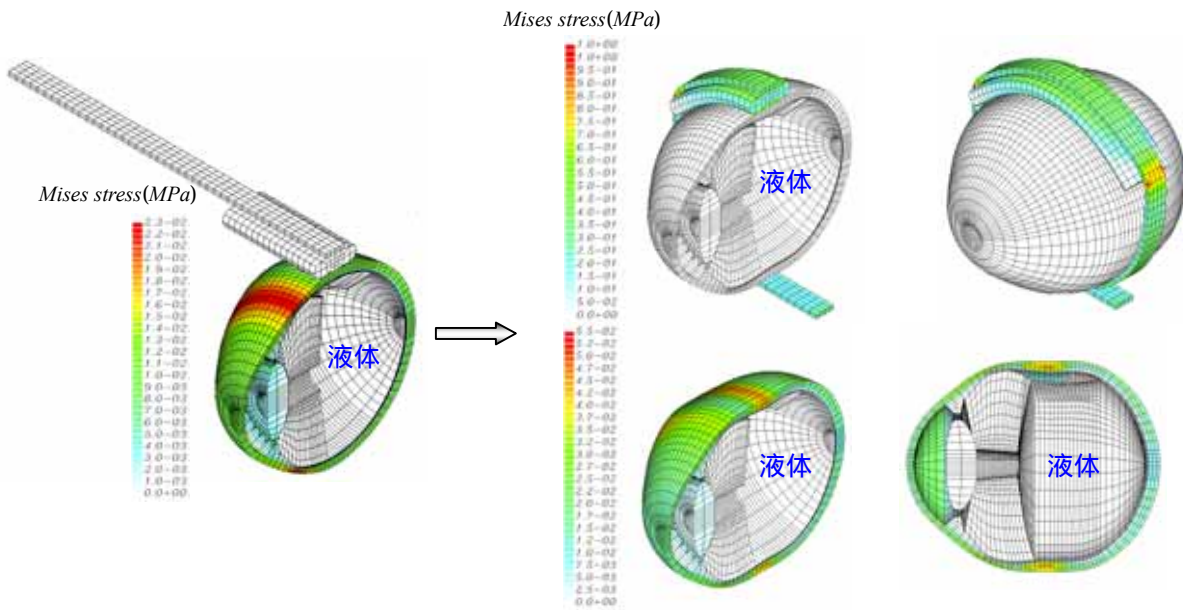
一方，解析によって術中の眼圧の変動が得られている．手術の進行につれて眼圧が上昇し，とくに縫合を施した時点で眼圧が相当高い数値まで上がった．

以上のように，輪状バックリング手術の複雑な過程がそのまま通してシミュレートされた．また，シミュレーションによって，臨床手術計画に有用な，強膜内陥効果、眼軸長などを含めた眼球形状の変化，網膜下液体積の変化、網膜復位と網膜裂孔閉鎖の状況および網膜に対する硝子体の働き状況、さらに応力分布、眼圧変動などの情報が合理的にとらえられた．

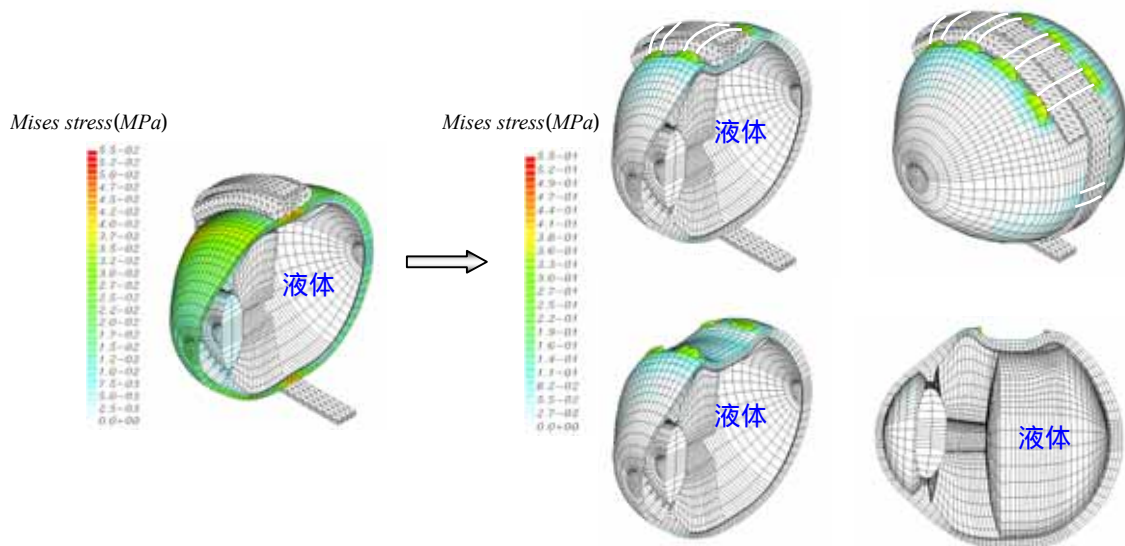
ここでの各解析において得られた，以上のような手術過程および各種の情報に関する予測結果が定性的に一致した．しかし，図 12 を見て取れるように，広い縫合幅また突起型のシリコンタイヤを用いた場合に強い強膜内陥効果が出ている．また，強い締め付けを施した case4 において，硝子体は他の場合に比べて静水圧応力の絶対値が全体的に高く，復位された網膜に対する支持が強くなっている．なお，ここでのすべての場合において共に網膜裂孔が閉鎖されたが，平坦型のシリコンタイヤを用いた case1 には内陥効果はともかく，復位された網膜の範囲がやや広くなっている．一方，図 13 のように，手術条件によって眼圧上昇の程度が異なり，締め付けの強い case4 は一番高い眼圧を示した．



(a)第1ステップ



(b)第2ステップ



(c)第3ステップ

図 11 case1 のシミュレーション結果(輪状バックリング手術)

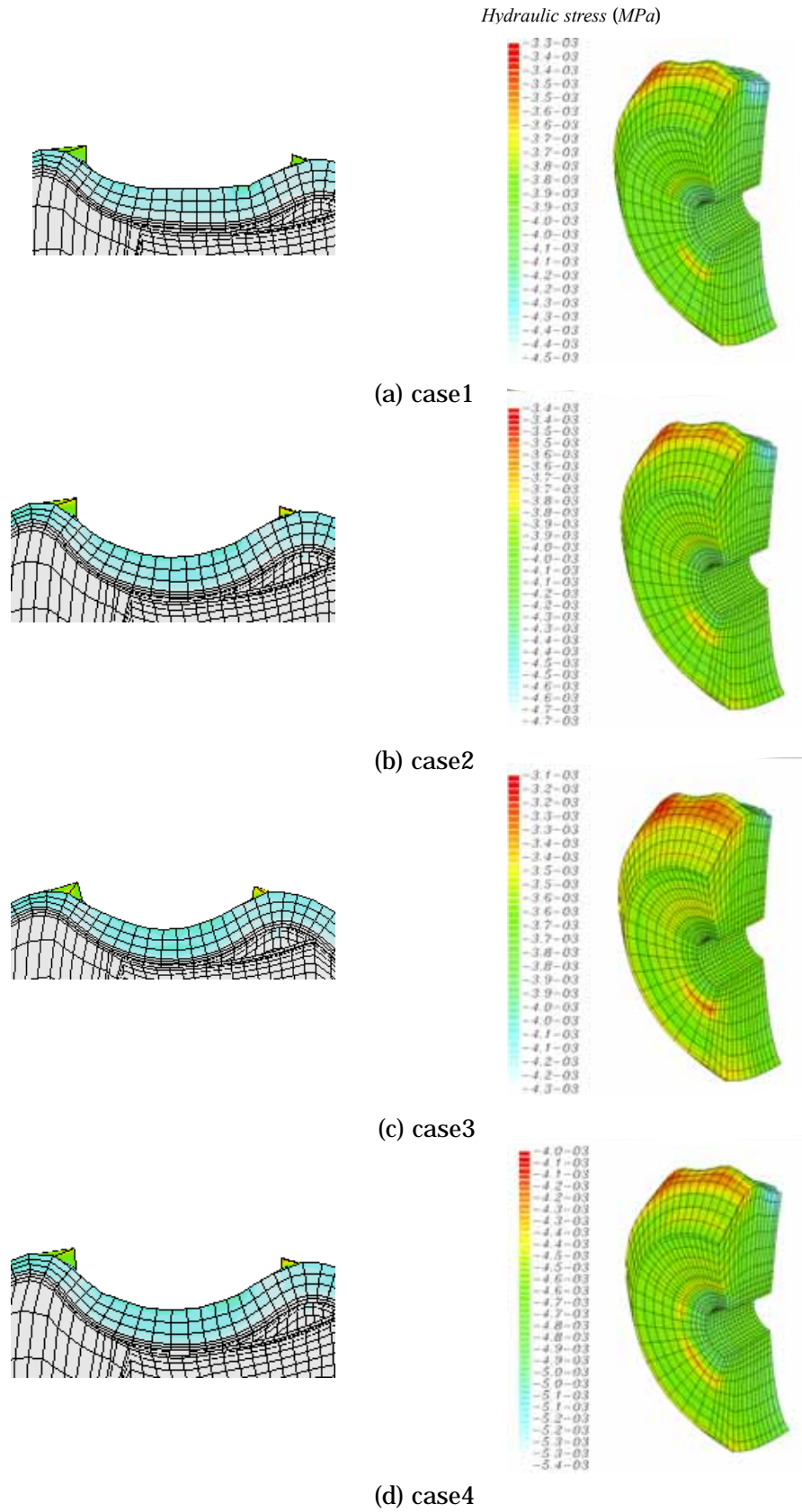


図 12 縫合を施した時点での内陥効果および硝子体静水応力分布の比較
(輪状バックリング手術)

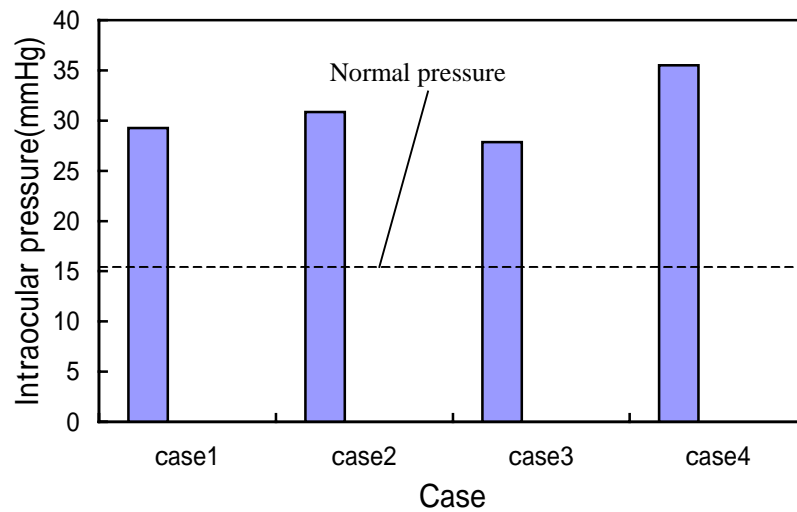


図 13 各ケースの縫合を施した時点での眼圧
(輪状バックリング手術)

4.2 部分バックリング手術のシミュレーション

4.2.1 解析モデルと解析条件 基本的には輪状縮結手術の場合と同じような眼球モデルを用いた。ただし、図 14 に示したように、ここでは計算時間を節約するために硝子体を外した。解析に用いた材料定数を表 3 に示す。また、表 4 に示したように、ここで異なるバックル材設置位置を用いた二つのケースの解析を実行した。

部分バックリング手術は眼球を締め付けずにバックル材を眼球面に直接に縫い付ける術式であるので、解析は以下の二つのステップのみで実行された。

- 1)標準初期眼圧(15mmHg)を生成するための、眼球内部に面圧の境界条件をかける解析。
- 2)シリコンスポンジを眼球表面に直接に縫合する過程の固体-液体連成解析。ただし、ここでは輪状バックリング手術の場合と違ってシリコンスポンジを変形体と扱った。

4.2.2 解析結果 図 15 と図 16 に各ケースの解析結果を示す。輪状バックリング手術の場合と同様に、縫合につれて強膜が内陥されていくと同時に、網膜下液が徐々に排出され、最終的に網膜裂孔が閉鎖したという手術過程が再現され、また、通糸点での応力集中などの情報および図 17 のような眼圧上昇がとらえられた。ただし、輪状バックリング手術のそれらのケースより、二つのケースにおいて共にかなり強い強膜内陥効果が出たが、眼圧の上昇はそれほどなかった。一方、ここではバックル設置位置の異なりによる手術効果の違いがはっきりととらえられた。バックル材を網膜裂孔のほぼ中心に設置した case5 に対して、裂孔の後方端に設置した case6 は裂孔の閉鎖状態が非常に良く、また剥離した網膜がほぼ全面的に復位された。

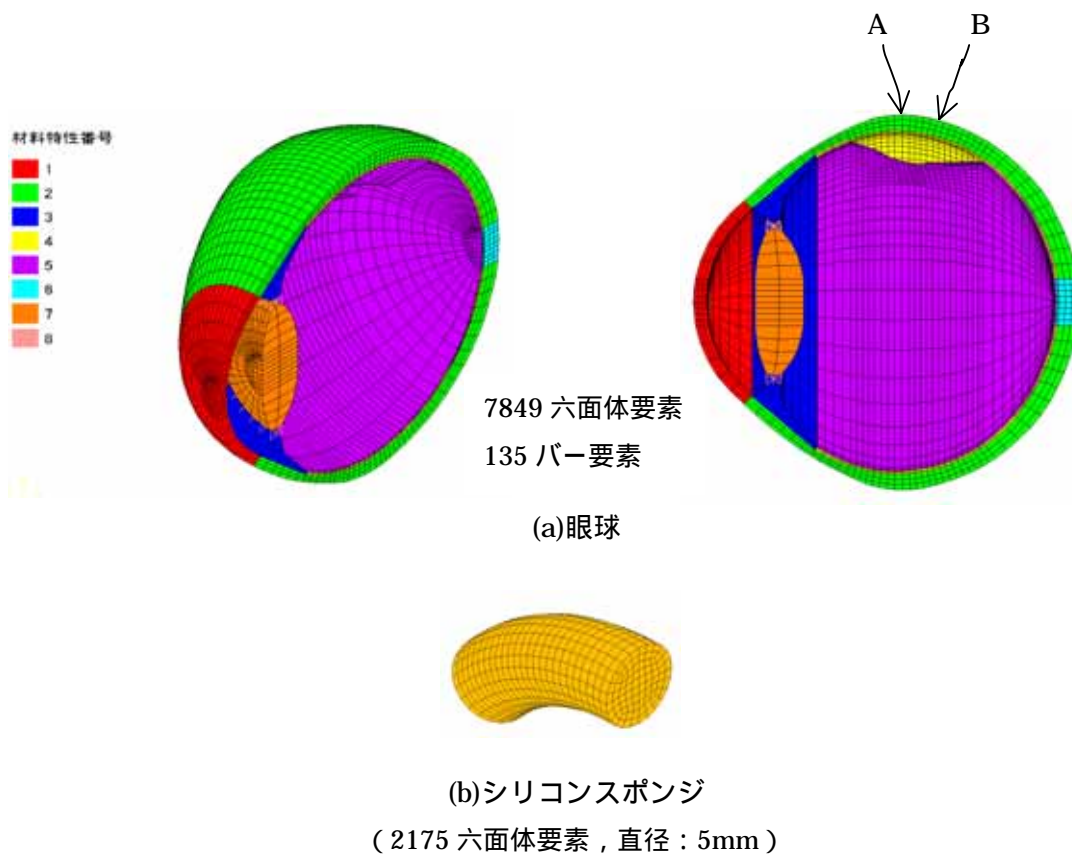


図 14 部分バックリング手術シミュレーションモデル

表 3 部分バックリング手術シミュレーションに用いた軟組織とバックル材の材料定数(MPa)

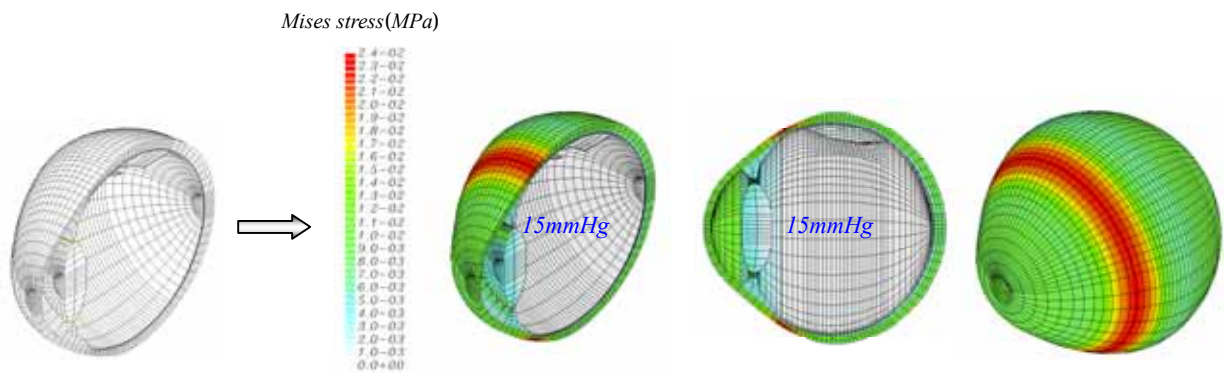
	角膜	強膜	毛様体	脈絡膜	網膜	視神経	水晶体	スポンジ
c	0.0333	0.0833	0.01	0.0083	0.0008	0.05	10.0	0.1

neo-Hookean material model: $W = c(I_1 - 3)$

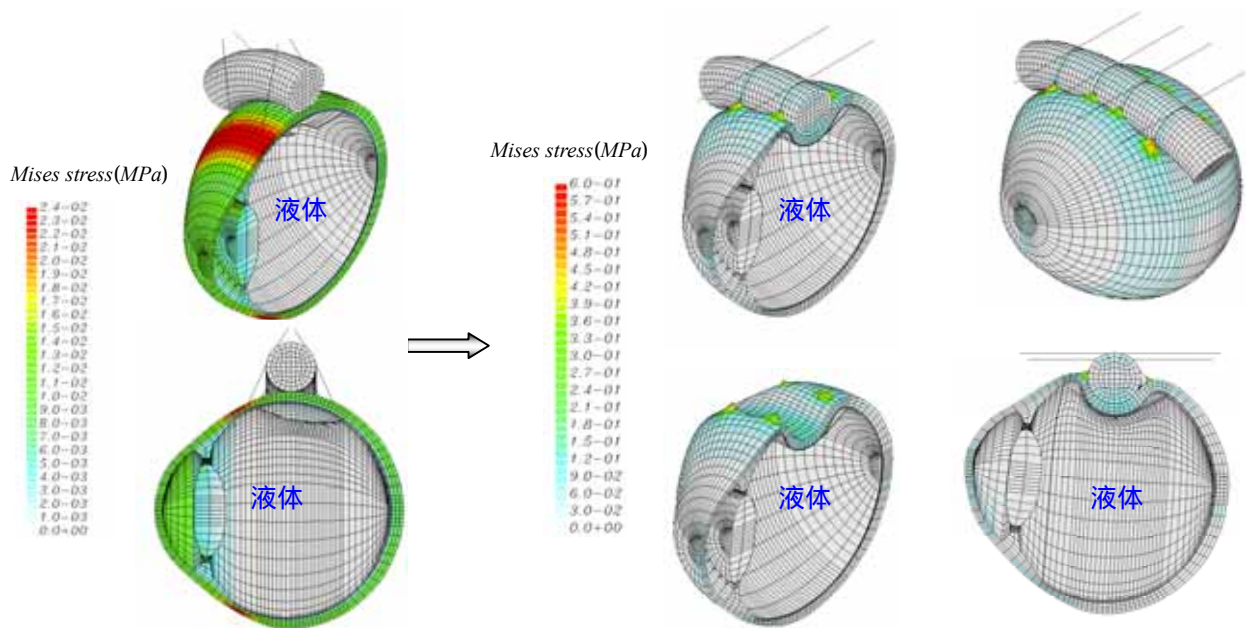
Young's modulus of Zinn's zonule: 100MPa

表 4 部分バックリング手術シミュレーションの各ケースの計算条件

	スポンジ形状	縫合幅	スポンジ設置位置	縫合強さ
Case5	同	8.5mm	A	同
Case6	同	8.5mm	B	同

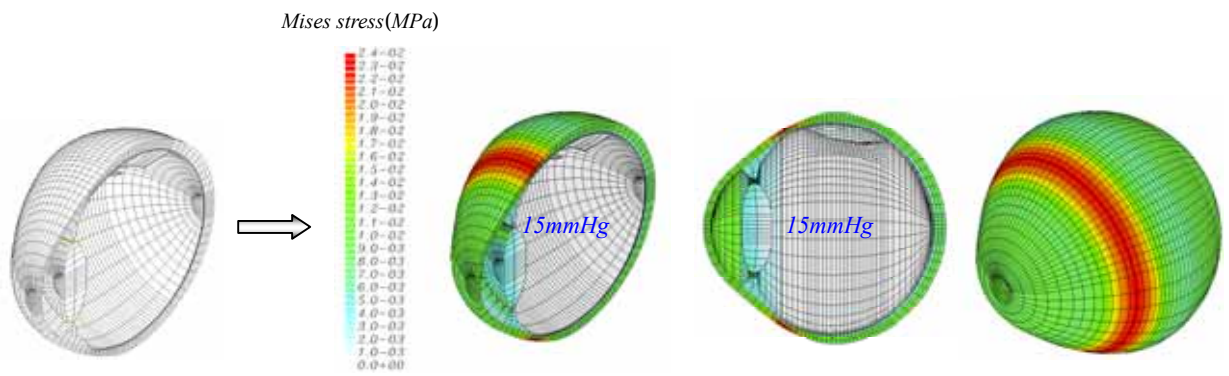


(a)第 1 ステップ

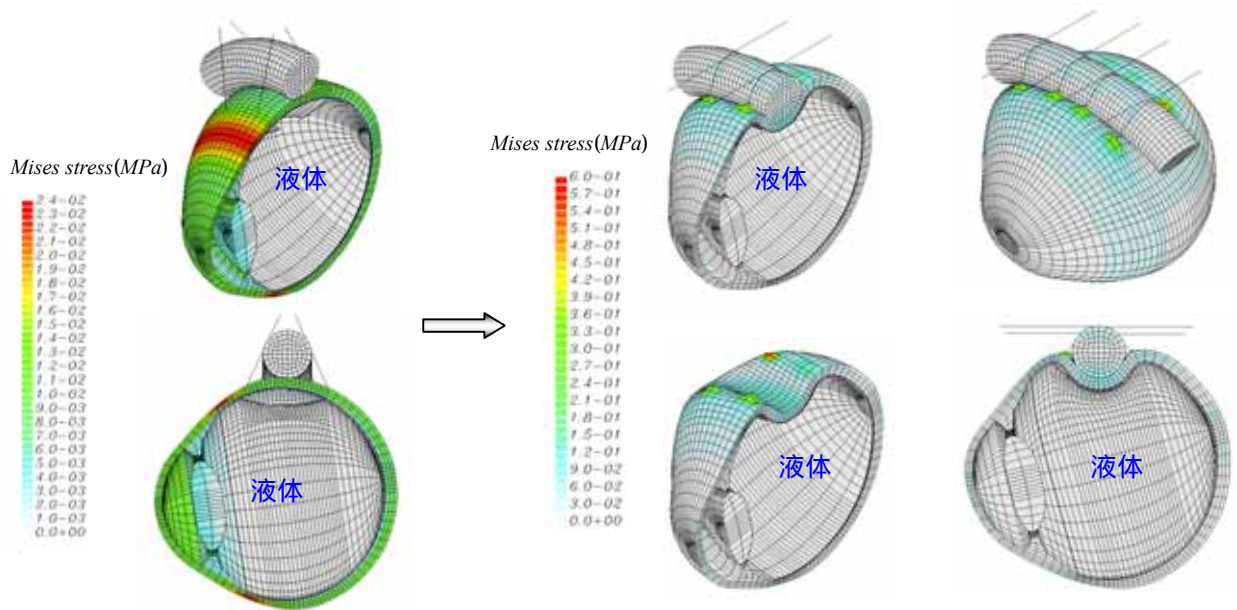


(b)第 2 ステップ

図 15 case5 のシミュレーション結果(部分バックリング手術)



(a)第 1 ステップ



(b)第 2 ステップ

図 16 case6 のシミュレーション結果(部分バックリング手術)

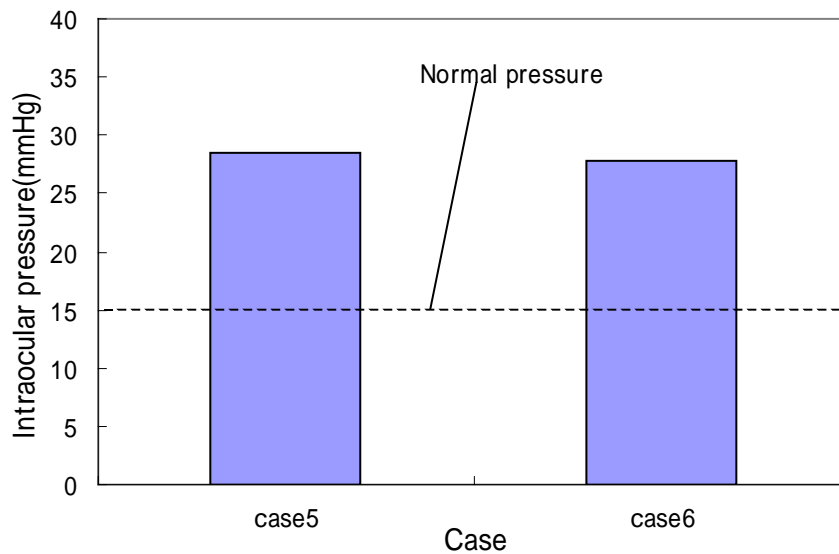


図 17 各ケースの縫合を施した時点での眼圧
(部分バックリング手術)

5、結 言

本研究では従来存在しなかった、裂孔原生網膜剥離を治療する眼球強膜バックリング手術をシミュレートするための 3 次元 FEM プログラムを開発した。このプログラムは軟組織の大変形と非線形的力学特性の解析，軟組織と液体の連成解析，軟組織同士、軟組織とバックル材また縫合糸とバックル材の接触解析，眼球を締め付ける過程の解析と縫合過程の解析，さらに縫合糸の自動生成を含めた便利な前処理など，こういった手術過程のシミュレーションのためのすべての機能を備えており，様々な手術条件の下での手術過程をそのまま通してシミュレートすることができ，また強膜内陥効果、眼軸長などを含めた眼球形状の変化，網膜下液体積の変化、網膜復位と網膜裂孔閉鎖の状況、網膜に対する硝子体の働き状況および応力分布、眼圧変動など，臨床手術計画に有用な各種の情報を獲得する能力を持っている。したがって，患者個人のデータをもとに様々な手術条件を想定して手術過程を事前にシミュレートすることによって臨床手術支援が大いに期待できる。とくに，生体計測技術、形状モデリング技術、数値計算技術またコンピューター技術などのさらなる進歩によってこういった目的を達成するための環境は益々整っていくだろう。一方，本プログラムは様々な機能を持っており，また汎用性を念頭に置いて開発されたので，眼球以外への応用も期待されている。

参考文献

- (1) Hayashi, K and Ishikawa, H., Computational Biomechanics, (1996), Springer.
- (2) Godest, A. C. et al., J. Biomechanics, 35- 2(2002), 267-275
- (3) Delfino, A. et al., J. Biomechanics, 30-8 (1997), 777-786.
- (4) Hirokawa, S. and Tsuruno, R., Med. Eng. Phys., 19-7 (1997), 637-651.
- (5) Natali, A. N., J..Biomed. Eng., 13 (1991), 163-167.
- (6) Miller, K. et al., J. Biomechanics, 33-11 (2000), 1369-1376.
- (7) Bischoff, J. E. et al., J. Biomechanics, 33-6 (2000), 645.-652.
- (8) Stitzel, J. D. et al., IV World Congress of Biomechanics(2002).
- (9) 山口 監修, 病気の地図帳(1997), 28, 講談社 .
- (10) Sun.Z.G. and Makinouchi, A., RIKEN SYMPOSIUM (2000), 80-93 .
- (11) 孫・牧野内・矢部, 第 13 回計算力学講演会講演論文集(2000), 217-218 .
- (12) 孫・牧野内・矢部, 第 14 回計算力学講演会講演論文集(2001), 301-302 .
- (13) 孫・牧野内・矢部, 理研シンポジウム(2001), 18-33 .
- (14) 孫・牧野内, 日本機会論文集 A 編, 68 - 666(2002), 357-363 .
- (15) Sun.Z.G., Makinouchi, A. and Yabe, H., IV World Congress of Biomechanics (2002) .
- (16) 孫・牧野内・矢部, 第 15 回計算力学講演会講演論文集(2002), 29-30.
- (17) Sun.Z.G. and Makinouchi, A., RIKEN SYMPOSIUM (2002), 45-55 .
- (18) 孫・牧野内・矢部, 理研シンポジウム(2003), 123-135 .
- (19) 孫・牧野内・矢部, 日本機会論文集 A 編, 69-688(2003), 1775-1781 .
- (20) 久田・野口, 非線形有限要素法の基礎と応用(1995), 191, 丸善株式会社 .
- (21) Bathe, K.J, Finite Element Procedures(1996), 261, Prentice Hall.
- (22) 日本塑性加工学会, 非線形有限要素法(1994), 159 .
- (23) 富田, 流体力学序説(1985), 30, 養賢堂 .