

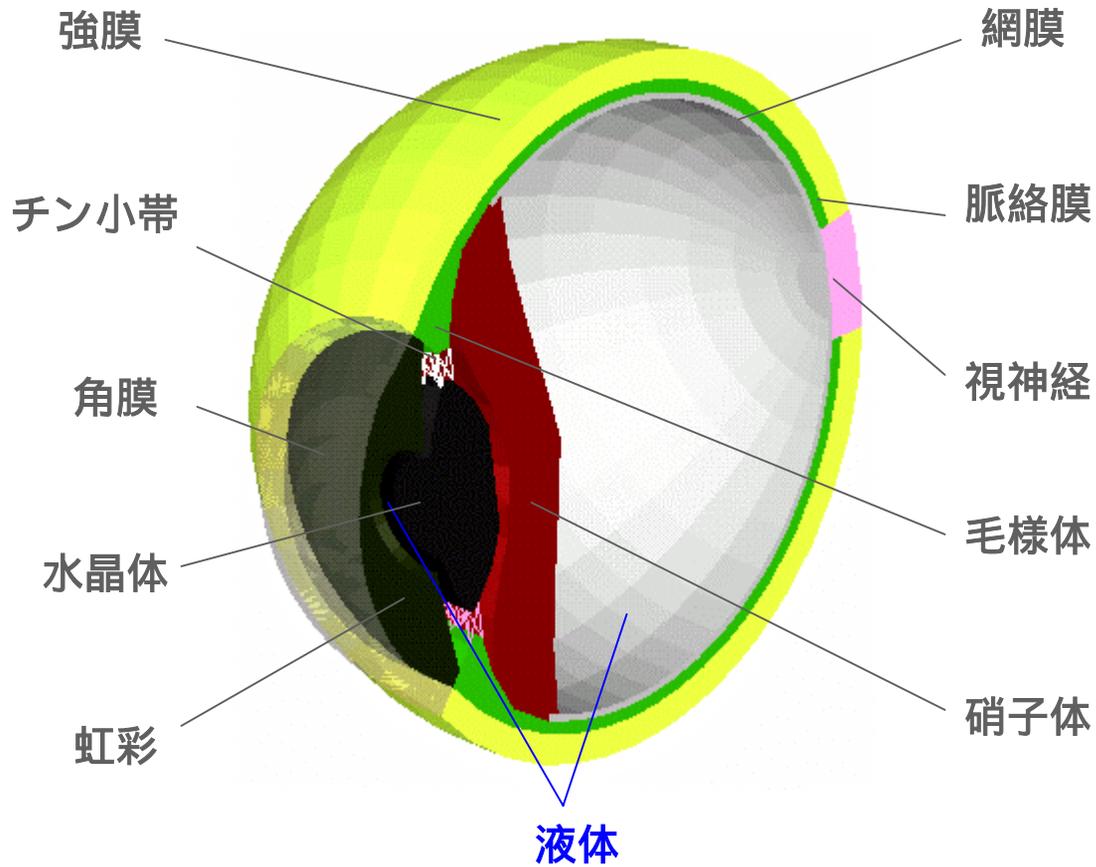
実用化にむけての眼球網膜剥離手術数値シミュレーションのための FEMプログラムの開発

孫智剛 (ASTOM・理研)

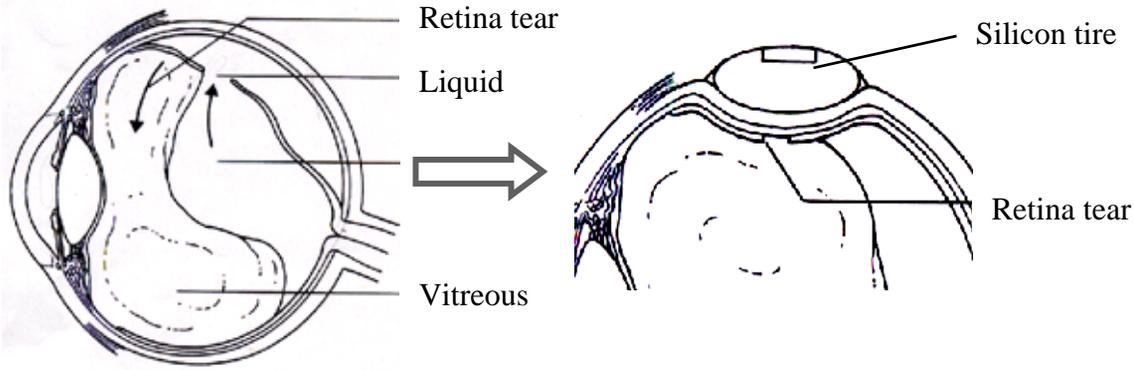
牧野内昭武 (理研)

矢部比呂夫 (東邦大)

眼球の構造



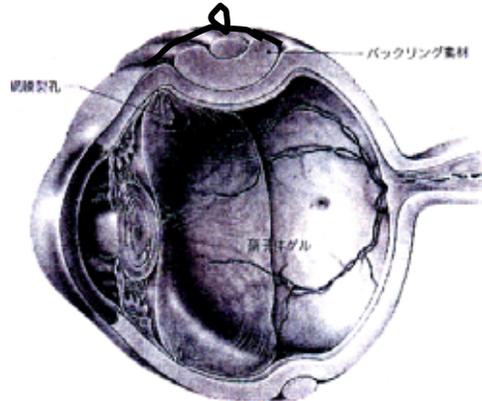
眼球バックリング手術



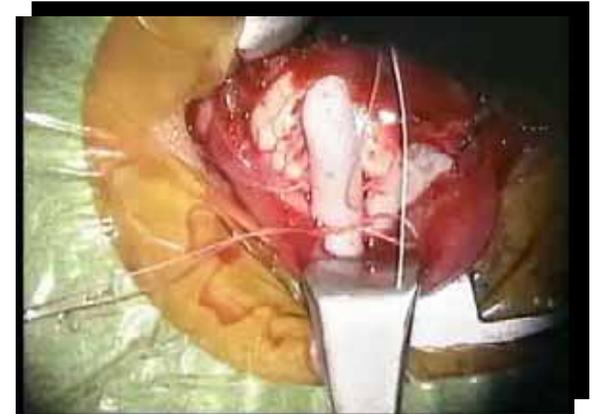
部分バックリング手術



輪状バックリング手術



手術の写真



眼球バックリング手術の数値シミュレーションの難点

- 固体軟組織の非線形弾性力学特性の解析
- 固体軟組織と液体組織の連成解析
- 固体軟組織同士の接触解析
- 眼球を締め付ける過程の解析(輪状バックリング手術の場合)
- 縫合過程の解析

眼球バックリング手術シミュレーションのための 3次元FEMプログラム

- 非圧縮性超弾性体の非線形弾性解析
- 非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析
- 変形体同士との接触解析
- 変形体と剛体の接触解析
- 眼球を締め付ける過程の解析
- 縫合過程の解析
- バックル材の対話形式での入力
- 要素タイプ: 6面体8節点混合型3次元要素
- 境界条件: 節点変位、節点力、面圧
- 超弾性体の材料モデル

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

非圧縮性超弾性体の非線形弾性解析

Total Lagrange 定式化に基づく混合型有限要素法

全ポテンシャルエネルギー汎関数:

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

↓ 停留条件

$$\delta\Phi = \int_{V_0} [\partial W / \partial \varepsilon_{ij} + 2\lambda(\partial J / \partial \varepsilon_{ij})] \delta \varepsilon_{ij} dV + \int_{V_0} 2(J-1) \delta \lambda dV - (\partial g / \partial u) \delta u = 0$$

↓

離散化方程式

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{ij}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{ij}^O \\ f_{ij}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{ij}^O \\ f_{3n+l}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}) = 0 \end{array} \right.$$

↓ Taylor 展開

剛性方程式

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

I_1, I_2 : reduced invariants of the right Cauchy-Green deformation tensor

λ : Lagrange multiplier

J : determinant of Jacobian matrix

ε_{ij} : Green-Lagrange strain

u_{nk} : node displacement

V_0 : volume of deformed body in the reference configuration

$g(u)$: potential energy of external force

非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析

変形中の液体圧力

$$P^L = P_{ini}^L + \Delta P^L = P_{ini}^L - K \frac{V^L - V_{ini}^L}{V_{ini}^L}$$

液体圧力の等価節点力

$$\mathbf{r}_e^L = \int_{S_0} \boldsymbol{\Phi}^T P^L \mathbf{J} \mathbf{F}^{-T} \mathbf{n}_0 dS \quad J = \det |\mathbf{F}|$$

$$f_{ij}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{ij}^O$$

$$f_{ij}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = r_{ij}^O + \underline{r_{ij}^L(P^L)} \leftarrow$$

$$f_{3n+l}(u_{11}, u_{12}, u_{13}, \dots, u_{n1}, u_{n2}, u_{n3}) = 0$$

$$p^L - (p_{ini}^L + \Delta p^L(u_{11}^{SLI}, u_{12}^{SLI}, u_{13}^{SLI}, \dots, u_{k1}^{SLI}, u_{k2}^{SLI}, u_{k3}^{SLI})) = 0$$



連成解析のための剛性方程式

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_u^{i-1} & \mathbf{K}_\lambda^{i-1} & \mathbf{K}_{p1}^{i-1} \\ \mathbf{K}_\lambda^{i-1T} & \mathbf{0} & \\ \mathbf{K}_{p2}^{i-1} & & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}^i \\ \Delta \boldsymbol{\lambda}^i \\ \Delta P^{Li} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \mathbf{U}^{i-1} \\ \mathbf{F} \boldsymbol{\lambda}^{i-1} \\ \mathbf{F} P^{Li-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \\ 0 \end{bmatrix}$$

: 3×12 Matrix, \mathbf{F} : deformation gradient, \mathbf{n}_0 : inward normal, s_0 : element area, P^L : liquid pressure, P_{ini} : initial liquid pressure, V_{ini} : initial liquid volume.

変形体同士の接触解析

Penalty定数法

全ポテンシャルエネルギー汎関数:

$$\Phi_P = \Phi + \pi_P$$

$$\pi_P = \frac{1}{2} \alpha g^2$$

Hitting node のTarget segmentへの食い込み量:

$$g = (\mathbf{x}^h - \mathbf{x}^{t1}) \cdot \mathbf{n}$$



停留条件

$$\delta\Phi_P = \delta\Phi + \delta\pi_P = \delta\Phi + \delta\mathbf{u}_c^T \cdot (\alpha g \mathbf{D}) = \delta\Phi + \delta\mathbf{u}_c^T \cdot \mathbf{f}_c$$



Taylor 展開

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}^{i-1} + \mathbf{K}_c^{i-1} & \mathbf{K}_\lambda^{i-1} \\ \mathbf{K}_\lambda^{i-1T} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta\mathbf{U}^i \\ \delta\lambda^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}\mathbf{U}^{i-1} \\ \mathbf{F}\lambda^{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} + \mathbf{R}_c^{i-1} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

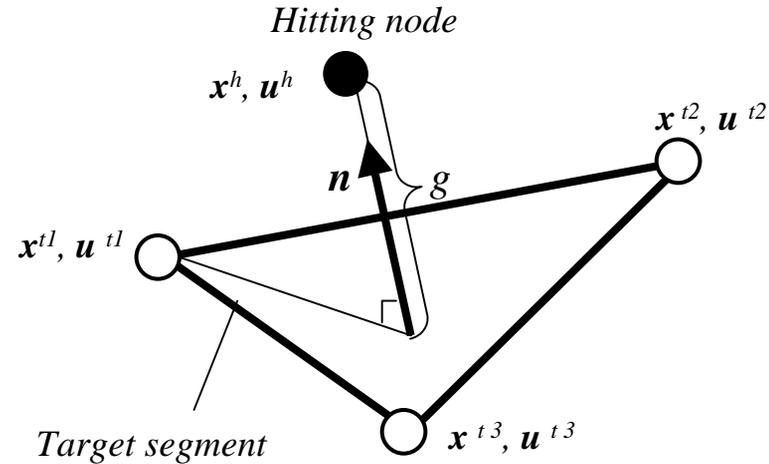
α : penalty constant

\mathbf{f}_c : contacting force vector

\mathbf{D} : 12×1 matrix

\mathbf{u} : virtual displacement vector:

$$\delta\mathbf{u}_c^T = (\delta u_x^h, \delta u_y^h, \delta u_z^h, \delta u_x^{t1}, \delta u_y^{t1}, \delta u_z^{t1}, \delta u_x^{t2}, \delta u_y^{t2}, \delta u_z^{t2}, \delta u_x^{t3}, \delta u_y^{t3}, \delta u_z^{t3})^T$$



Hitting node and target segment in contact state

変形体と剛体の接触解析

Penalty定数法

全ポテンシャルエネルギー汎関数:

$$\Phi_P = \Phi + \pi_P$$

$$\pi_P = \frac{1}{2} \alpha g^2$$

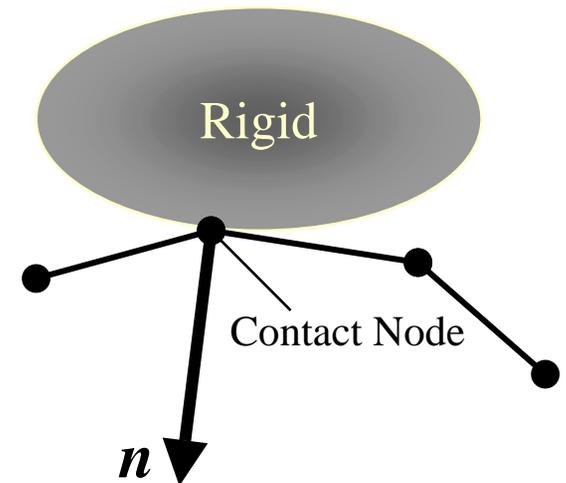
食い込み量:

$$g = u_{node}^n - u_{Rigid}^n$$

α : Penalty定数

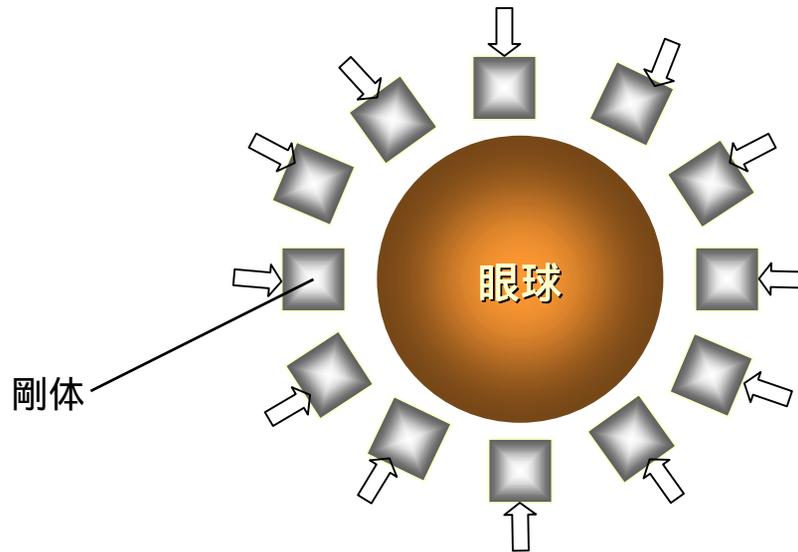
u_{node}^n : 剛体表面の法線方向における接触節点の変位

u_{Rigid}^n : 剛体表面の法線方向における剛体の変位

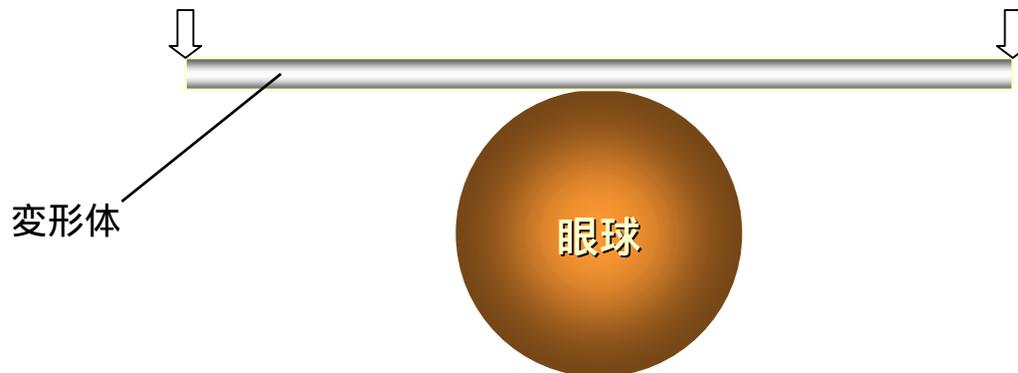


眼球を締め付ける過程の解析

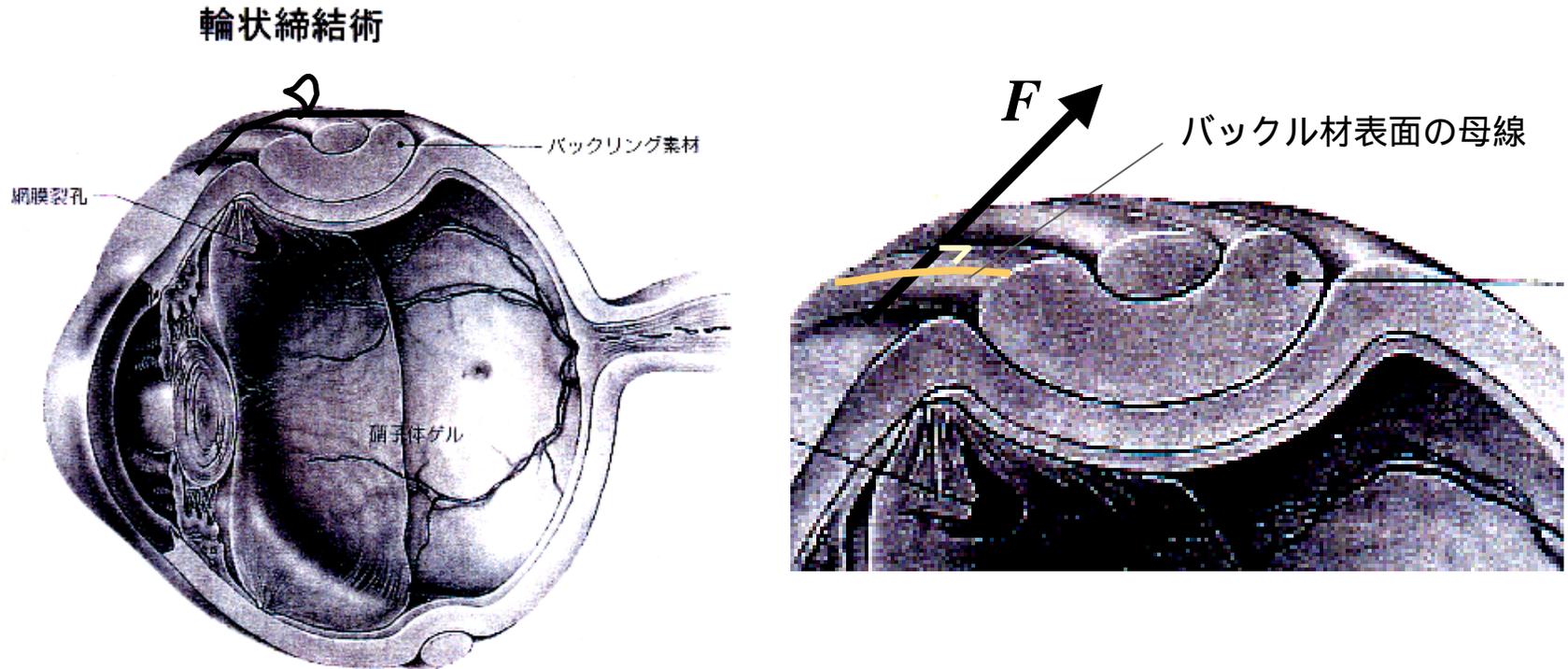
シリコンバンドとシリコンタイヤを数多くの剛体の集合体とし、
それぞれの剛体を眼球の半径方向に移動させる手法



シリコンバンドとシリコンタイヤを実際の変形体とし、
シリコンバンドの先端に変位の境界条件を与える手法



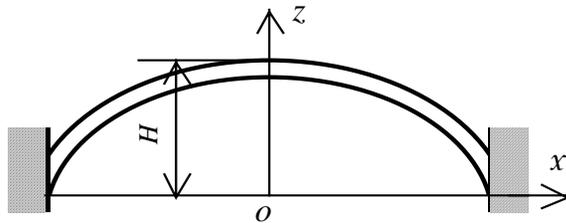
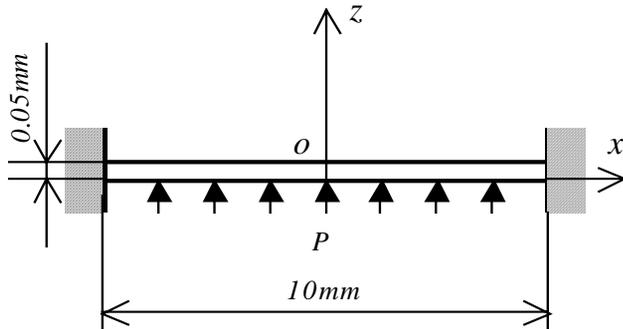
縫合過程の解析



処理方法：

- 1) 各計算ステップの計算が終わったら強制節点力の方向を探し出す．
- 2) 次の計算ステップにおいて各縫合点にその方向の強制節点力を与える．

プログラムの検証



面圧境界条件における薄い円板

理論解

変形状態における面圧：

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

変形状態における頂点での半径方向の真応力：

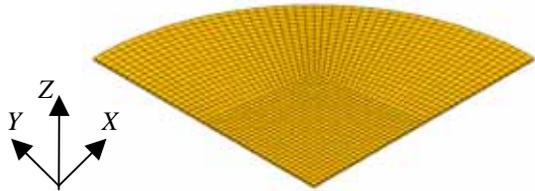
$$\sigma_{theory} = \frac{P_{theory} r \lambda^2}{2h}$$

h : 円板の初期厚さ

r : 頂点での曲率半径

：半径方向の伸長比

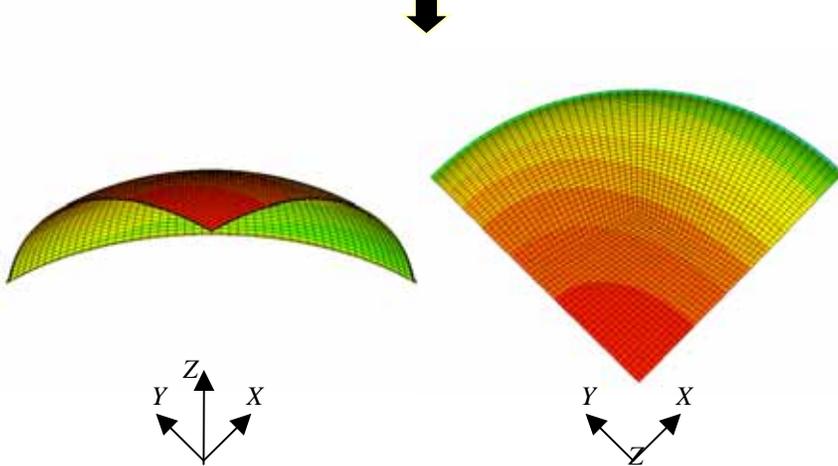
プログラムの検証



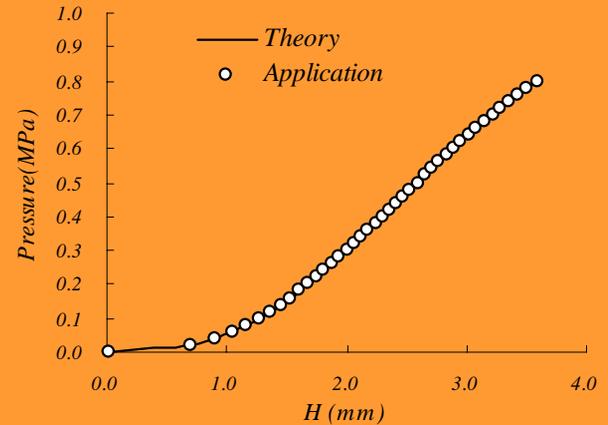
検証解析モデル

(実際の円板の1/4の解析領域, 3250個六面体要素,

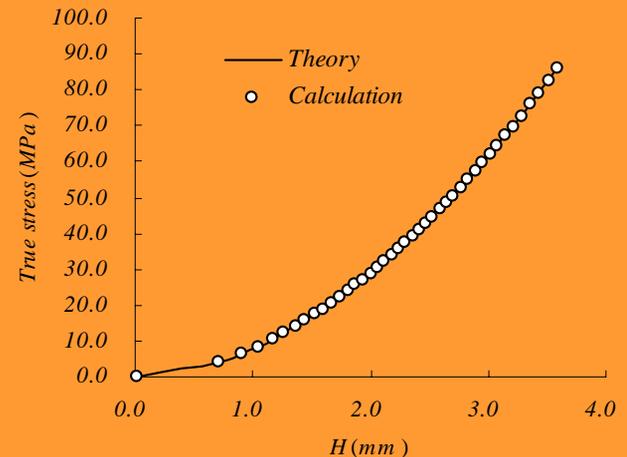
Moony - Livlingの超弾性材料モデル: $W=25(I_1-3)+5(I_2-3)$)



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



実際に作用させた面圧と面圧の理論解との比較

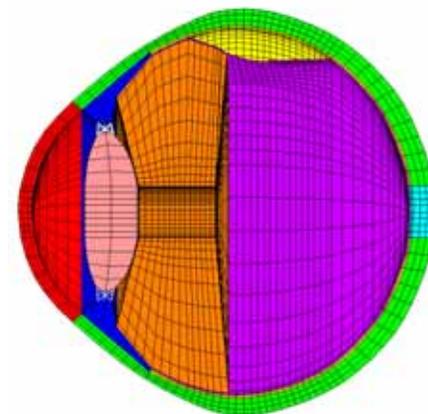
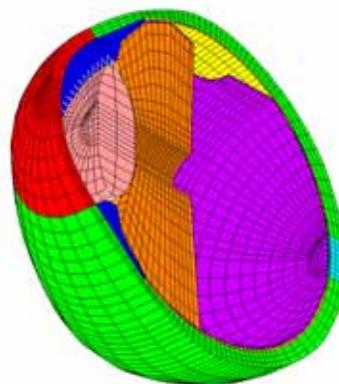
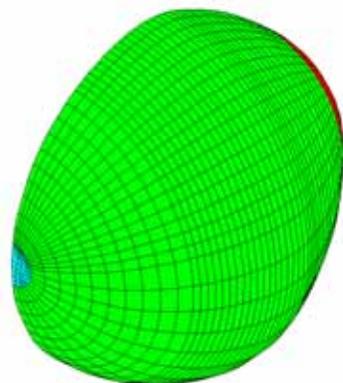
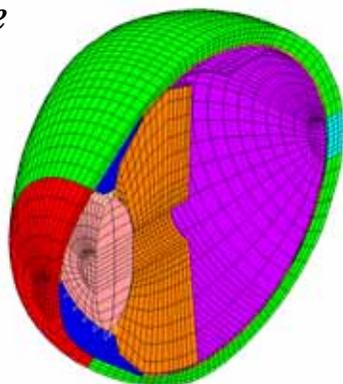


円板頂点での半径方向真応力の計算解と理論解の比較

輪状バックリング手術のシミュレーション実例

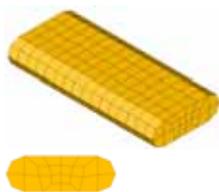
解析モデル

Tissue



眼球

(11593六面体要素、135バー要素)

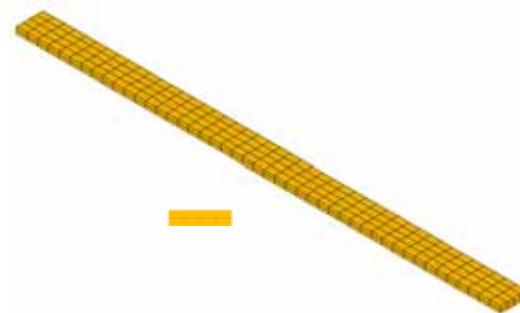


平坦型
(384六面体要素)



突起型
(496六面体要素)

シリコンタイヤ



シリコンバンド(450六面体要素)

輪状バックリング手術のシミュレーション実例

解析条件

表1 軟組織とバックル材に用いた材料定数(MPa)

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

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

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

Liquid buck modulus: 2083.3MPa

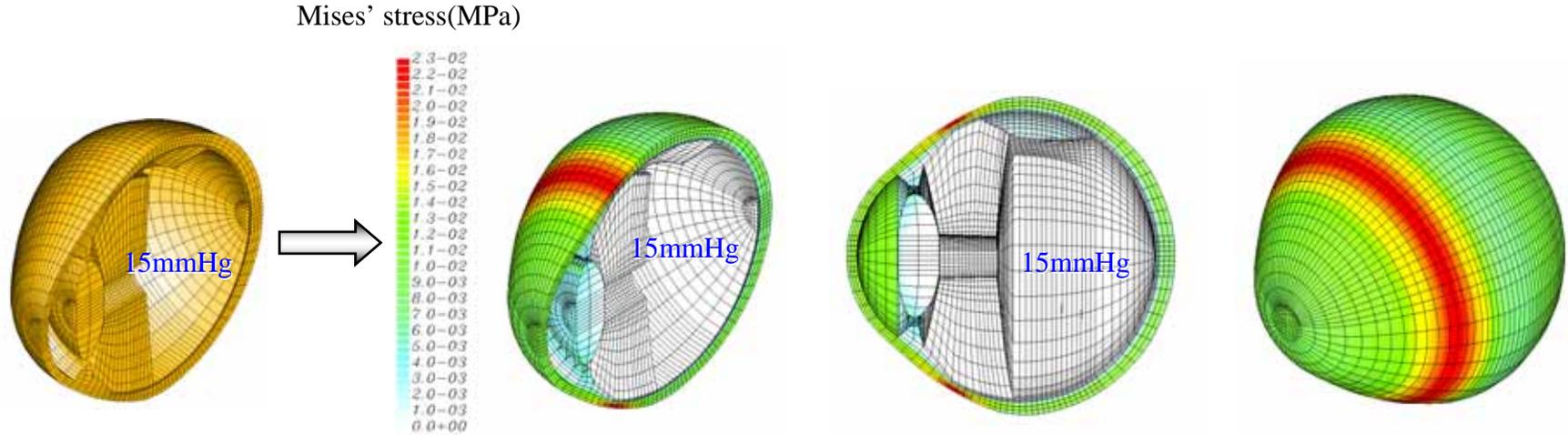
表2 各解析に用いたシリコンタイヤ形状、縫合幅と締め付け強さ

	タイヤ形状	縫合幅	締め付け強さ
Case1	平坦型	9.00mm	弱
Case2	突起型	9.00mm	弱
Case3	突起型	7.80mm	弱
Case4	突起型	9.00mm	強

輪状バックリング手術のシミュレーション実例

解析結果

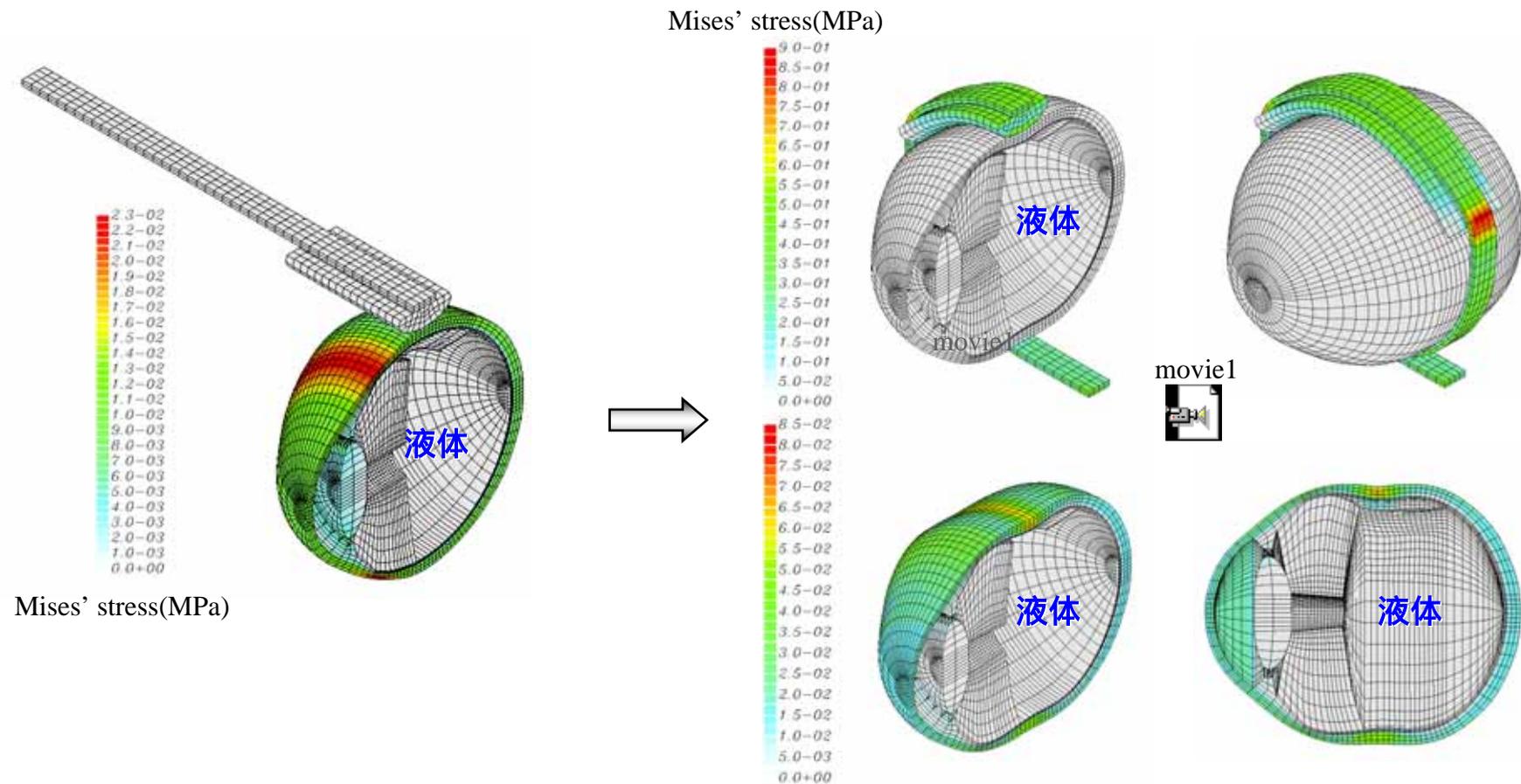
(case4 , 第1ステップ)



輪状バックリング手術のシミュレーション実例

解析結果

(case4, 第2ステップ)

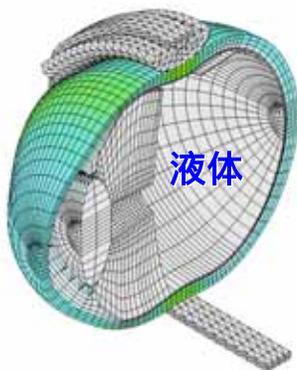
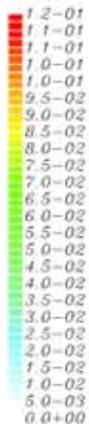


輪状バックリング手術のシミュレーション実例

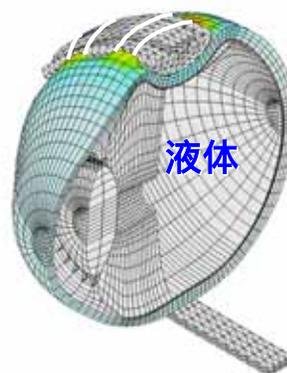
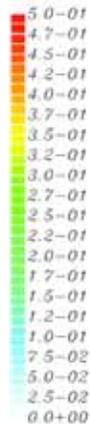
解析結果

(case4, 第3ステップ)

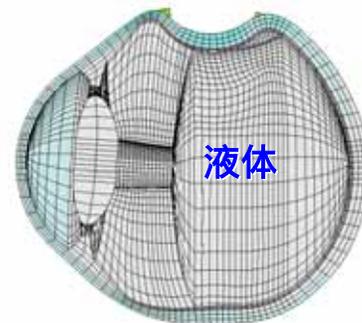
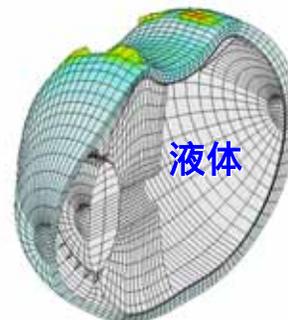
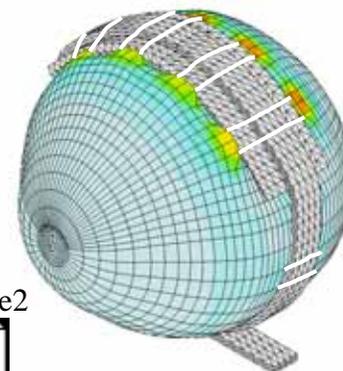
Mises' stress(MPa)



Mises' stress(MPa)



movie2

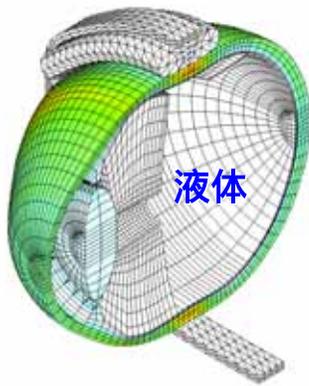
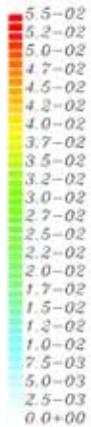


輪状バックリング手術のシミュレーション実例

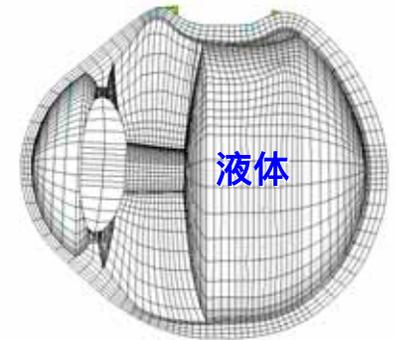
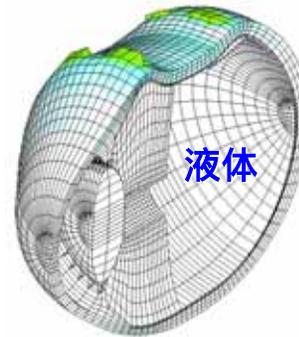
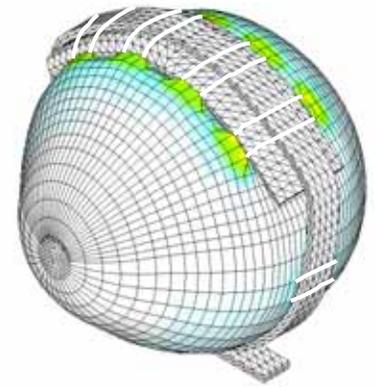
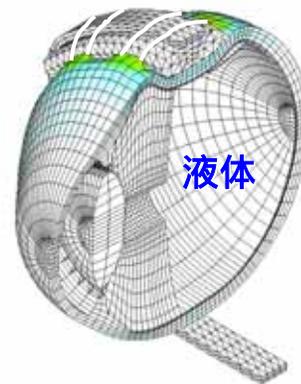
解析結果

(case1, 第3ステップ)

Mises' stress(MPa)



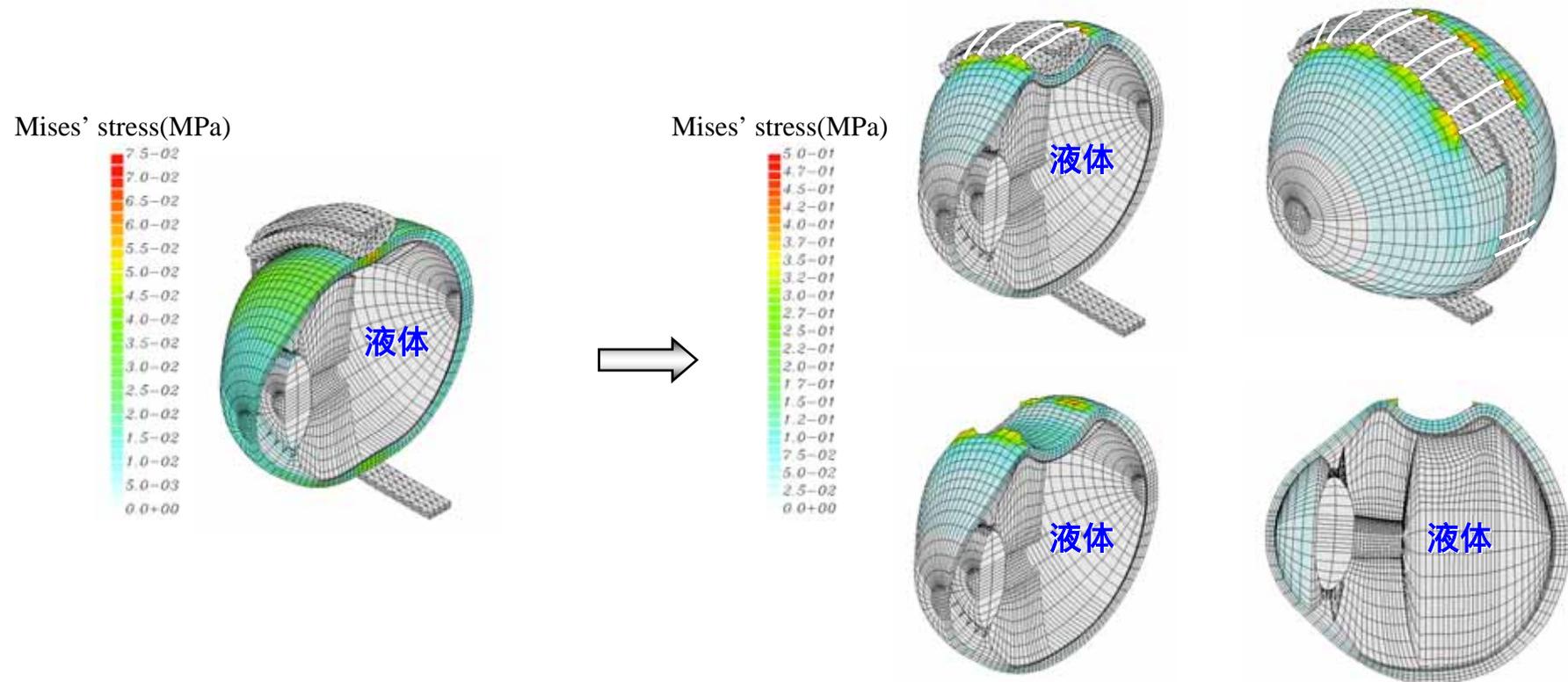
Mises' stress(MPa)



輪状バックリング手術のシミュレーション実例

解析結果

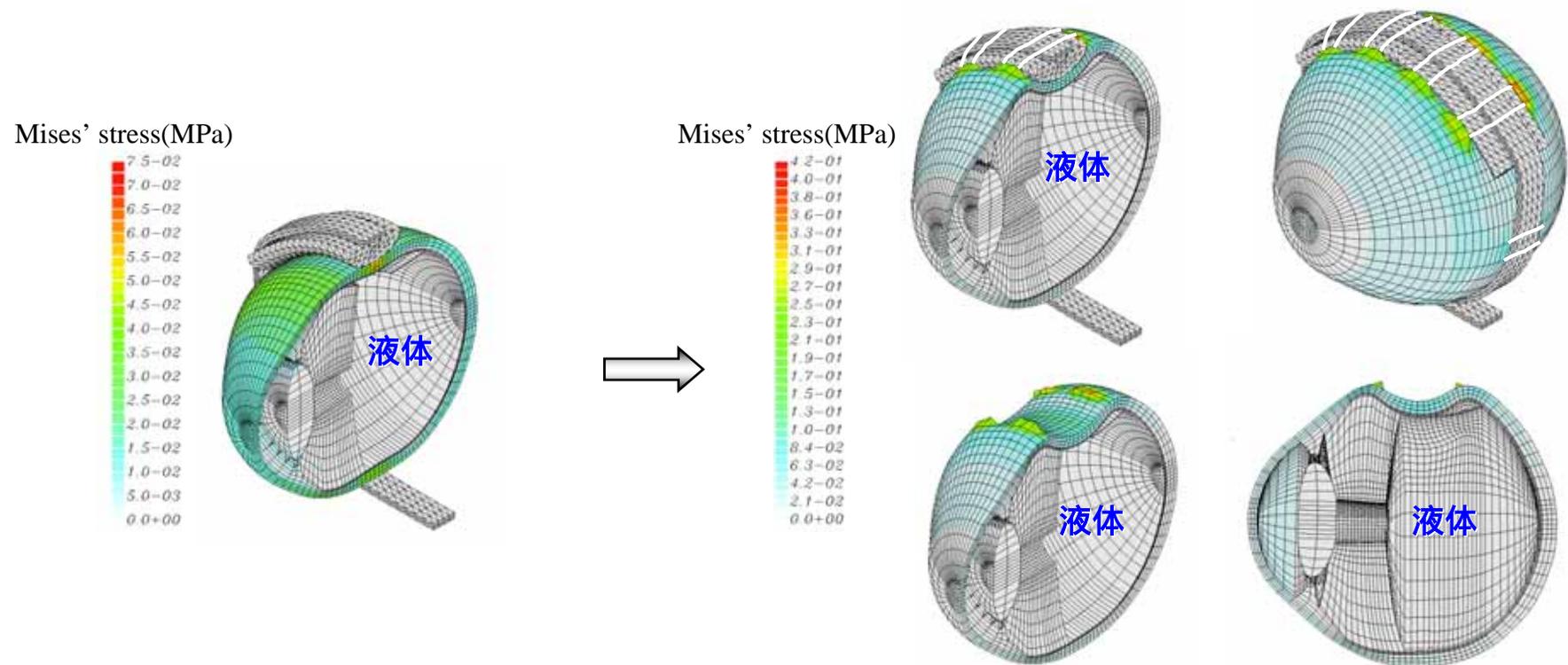
(case2, 第3ステップ)



輪状バックリング手術のシミュレーション実例

解析結果

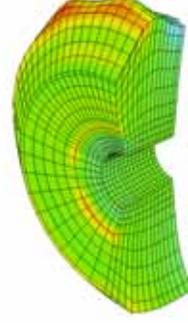
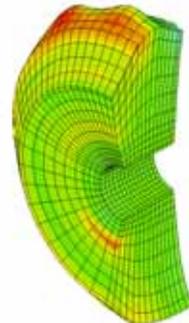
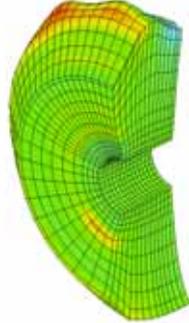
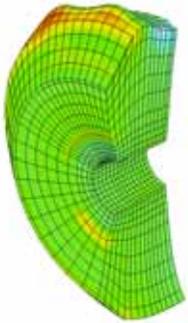
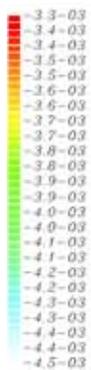
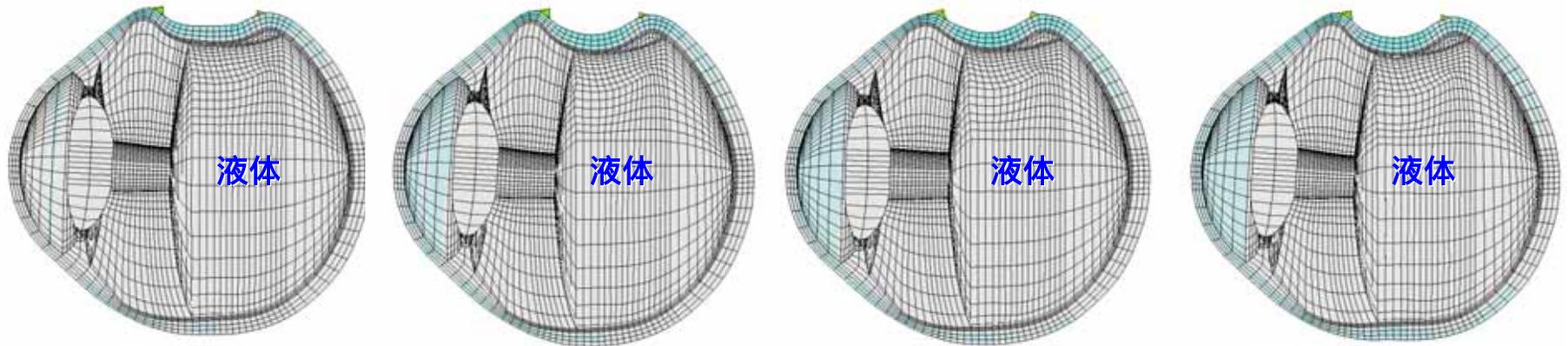
(case3 , 第3ステップ)



輪状バックリング手術のシミュレーション事例

解析結果

(縫合を施した時点での眼球形状および硝子体静水圧応力分布の比較)



case1

(平坦型、9.0mm、弱)

case2

(突起型、9.0mm、弱)

case3

(突起型、7.8mm、弱)

case4

(突起型、9.0mm、強)

結 言

- 開発したプログラムは強膜バックリング手術の数値シミュレーションに必要なすべての機能を備えており、実際の臨床応用に対処可能になっている。
- 検証解析により本プログラムは高い解析精度を持つことが確認された。
- シミュレーション実例によって、本プログラムは複雑なバックリング手術の過程をそのまま通してシミュレーションできること、また臨床手術計画に有用な情報を獲得できることが示された。
- 本プログラムを用いた数値シミュレーションを援用した臨床手術計画が期待できる。