

眼球網膜剥離手術の FEM 数値シミュレーション  
- 2D 超弾性体と液体の連成解析プログラムの締結手術  
シミュレーションへの応用及び 3D プログラムの開発 -

孫 智剛\* , 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: zgsun@postman.riken.go.jp

\*\* 理化学研究所 もの作り V - CAD プログラム

埼玉県和光市広沢 2 - 1

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

## 1. はじめに

網膜剥離手術<sup>(1)</sup>は剥離した網膜を脈絡膜の上に復位させることによって視力を回復させる眼科手術である。締結手術はその内の一種で、つまり網膜の剥離した部位にバツクル材を押し付け強膜を内陥させて剥離した網膜を再び脈絡膜に接着させる術式であり、裂孔原性網膜剥離の臨床治療に頻繁に用いられている。しかし、臨床において手術に対して決定的な役割を果たす因子、たとえばバツクル材の形状、縫合幅などの決定、また術中の眼内圧のコントロールなどがほとんど術者のノウハウに頼っているのは現状である。そこでわれわれはこういった手術の数値シミュレーションによって手術に対する適正な条件を予測し臨床手術を支援することを目的としている。

生体眼球は強膜、角膜、脈絡膜、網膜などの十数種類の固体軟組織と房水、硝子体液といった液体により構成される複雑な構造になっている。したがって、こういった眼球のシミュレーションを行うために固体 - 液体の連成解析が必要である。これに応じて前回のシンポジウムに報告したように、われわれはすでに *Total Lagrange* 定式化に基づく混合型有限要素法<sup>(2)</sup>を用いた 2 次元の非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析プログラム<sup>(3)</sup> (4/1、8/1、9/3、MINI混合型要素、また変位、力、面圧の境界条件に対応)を独自開発した。しかしながら、締結手術はバツクル材を直接強膜の上に縫合するかシリコンバンドで眼球全体を締め付けてから縫合する術式なので、それをシミュレーションするプログラムとしてはさらに接触処理の機能と縫合を扱う機能が要求される。そこで、前回に引き続きこれらの機能をプログラムに新たに組み込んで実

際の締結手術のシミュレーションを試み、バックル材の形状、縫合幅、眼内圧が手術の効果に対する影響を定性的に調べた。さらに以上の2次元プログラムを踏まえて変位、力、面圧の境界条件、3次元 8/1 混合型要素に対応した3次元の連成解析プログラムを開発した。また複雑な3次元接触処理機能をも導入した。これによって目標としている網膜剥離手術の3次元シミュレーションが一層アプローチされたのである。

## 2. 2次元プログラムを用いた締結手術シミュレーション

実際に臨床において網膜剥離範囲の大きさなどに応じて締結手術にはさらに部分締結手術と輪状締結手術の二種類がある。部分締結手術は網膜剥離が発生した部位に直接バックル材を縫い付け強膜を内陥させて網膜剥離を治療する手術である。したがって、適正な内陥効果を得ることが非常に重要である。内陥効果を左右する因子としては主にバックル材の形状、縫合幅、眼圧があるので、ここで新たに接触処理の機能と縫合を扱う機能を組み込んだ2次元のプログラムを用いて部分締結手術のシミュレーションを行いこれらの因子の内陥効果に対する影響を調べてみた。

実際の縫合過程は強膜を通系したダクロン糸をバックル材の表面に沿って引っ張りながら結ぶ過程である。明らかにこのような縫合過程においてダクロン糸がつねに通系した点を通したバックル材表面の接線上に位置する。したがって、この過程を通系した点がバックル材の接線方向に引っ張りの力を受けていく過程として考えることができる。本プログラムではこういった縫合の過程を扱うために通系した点につねにバックル材の表面の接線方向と一致するような引っ張り節点力を与えていく手法を取った。テスト解析によってこのような手法が有効であることが確認されている。

### 2.1 解析条件

解析モデルは図1に示すようなものである。硝子体ゲルは非常に柔らかいゼリー状の組織なので、ここで近似的に液体として扱った。チン小帯は6本の太さ  $0.01\text{mm}$  の線形弾性のバー要素により表現し、それ以外は465個の4/1節点混合型要素に分割した。組織分割は同図の通りであり、材料モデルとしてはチン小帯以外のすべての軟組織に *neo-Hooke* 超弾性材を用いた。それぞれの材料定数は文献(4)の解析に用いられた各軟組織のヤング率から、小変形の場合に成り立つ *neo-Hooke* 超弾性体の材料定数と線形弾性体のヤング率の対応関係式<sup>(5)</sup>によって換算したものをを用いた。これを表1に示す。また、チン小帯のヤング率は  $100\text{MPa}$  とし、液体の体積弾性係数は水と同じ  $2083.3\text{MPa}$  とした。

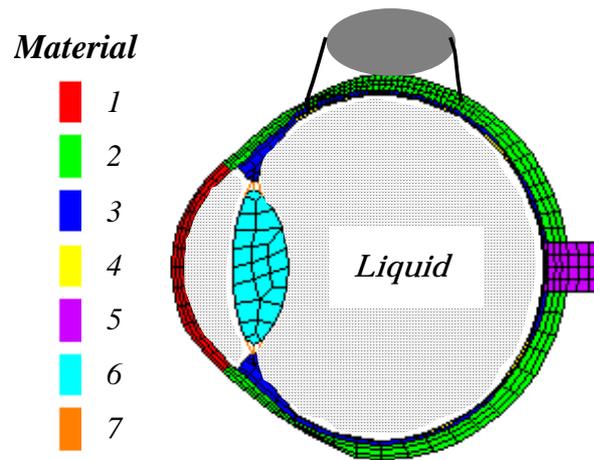


図1 眼球の解析モデル

表1 各組織の材料定数 (*neo-Hooke* 材料モデル:  $W = c_1(\bar{I}_1 - 3)$ )

	cornea-1	sclera-2	choroids-3	retina-4	optic nerve-5	llens-6
$c_1$	0.0333	0.0833	0.0083	0.0008	0.0083	16.67

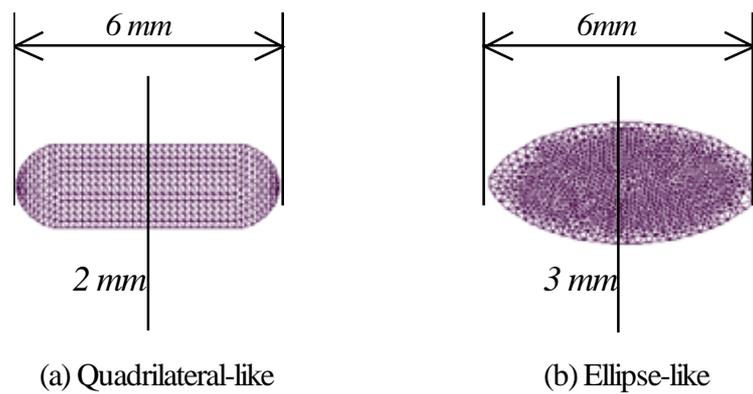


図2 解析に用いたバックル材

臨床手術において用いられているバックル材の形状がいろいろあるが、ここでは図 2 に示す 2 種類を用いた。そして、縫合幅と眼圧の影響を調べるにはそれぞれ 2 種類の 6.4mm、8.8mm の縫合幅と 1.50mmHg、3.75mmHg の初期眼圧を用いた。このように、それらの組み合わせによって表 1 に示す四つの場合の解析を実行した。また、すべての場合に対して縫合過程を扱うためにダクロン糸を通糸した点に最大 0.05N の引っ張り節点力を与えた。

表 1 各解析に用いた締結条件

	Buckle shape	Suture width	Internal pressure
case 1	<i>quadrilateral-like</i>	8.8 mm	3.75 mmHg
case 2	<i>ellipse-like</i>	8.8 mm	3.75 mmHg
case 3	<i>quasrilateral-like</i>	8.8 mm	1.50 mmHg
case 4	<i>ellipse-like</i>	6.4 mm	3.75 mmHg

## 2.2 解析結果

解析は 2 ステップに分けて行った。つまり、まず初期眼圧を獲得するために眼内部に初期眼圧とする圧力をかけ、そこから固体 - 液体連成解析に切り替えて縫合のシミュレーションを行うような解析過程を取った。ここで、その一例として *case 1* の計算過程を図 3 に示す。

内陥効果を検討するために、図 4 にそれぞれの解析の場合における縫合部の拡大図を示す。

まず、バックル形状の異なる *case1* と *case2* の結果を比較してわかるように解析によってバックル材形状の内陥効果に対する影響が明白に捕らえられている。*case2* の場合に高い隆起が得られており、高い内陥効果を得ようとする場合は眼球面に対して凸となるバックル材を用いることが必要であることがわかる。一方、実際の臨床手術において内陥効果を過度に高く取れば網脈絡膜の循環障害を生じたり、高度の術後乱視や術後高眼圧を誘起したりする恐れがあるということで、たとえば初心者の術者で逆に予想外の高い内陥効果を避けたい場合は眼球面に対して平たくなっている *case1* のようなタイプのバックル材を用いたほうがかなり締め込んでも予想外の高さになることは少なく、安全であることもわかる。ただし、図のように、この場合においてバックル材と強膜の間に隙間が形成される可能性が示されたので要注意である。

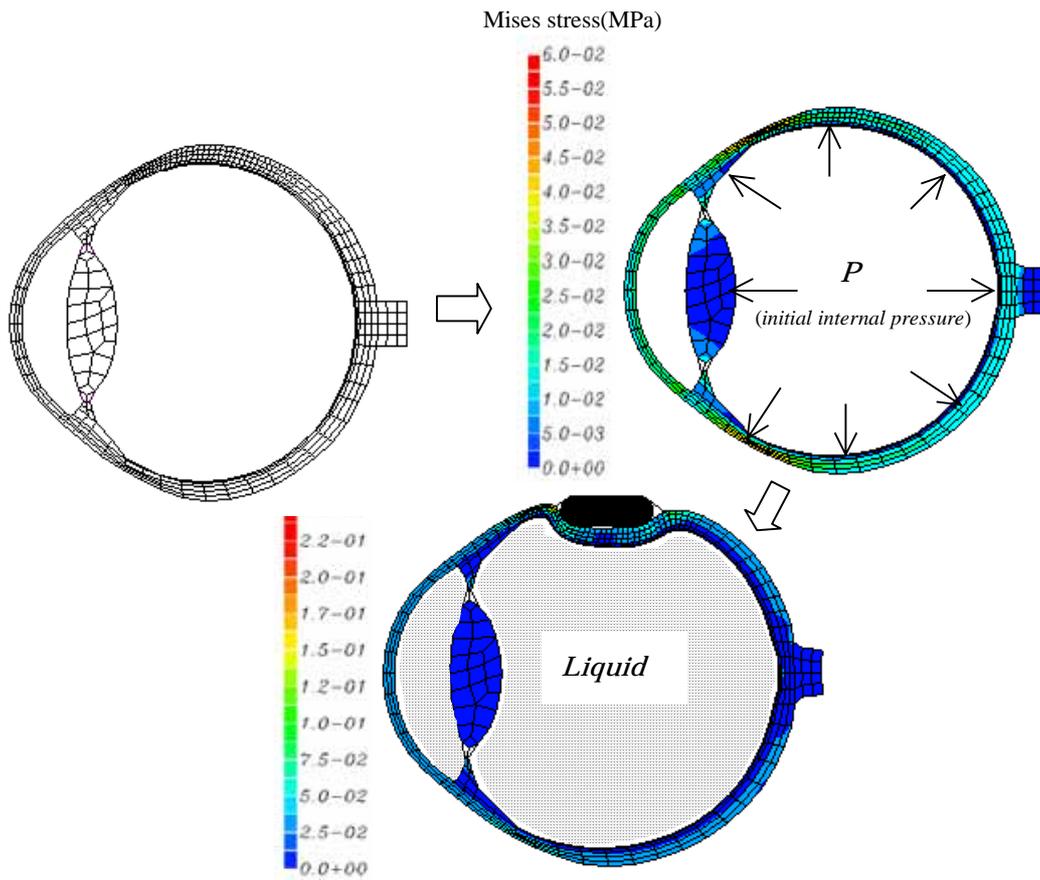


図3 部分締結手術シミュレーションの解析過程 (Case 1)

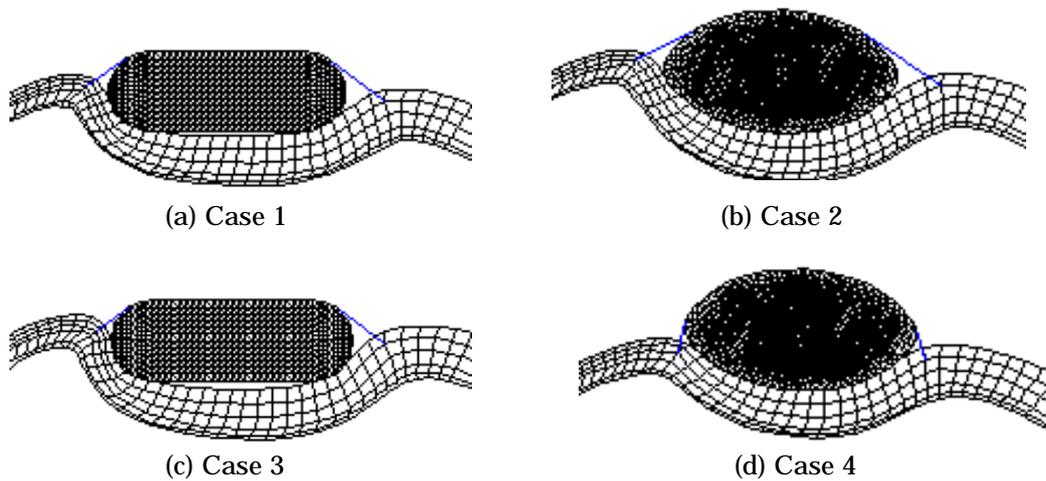


図4 各場合における締結部の拡大図

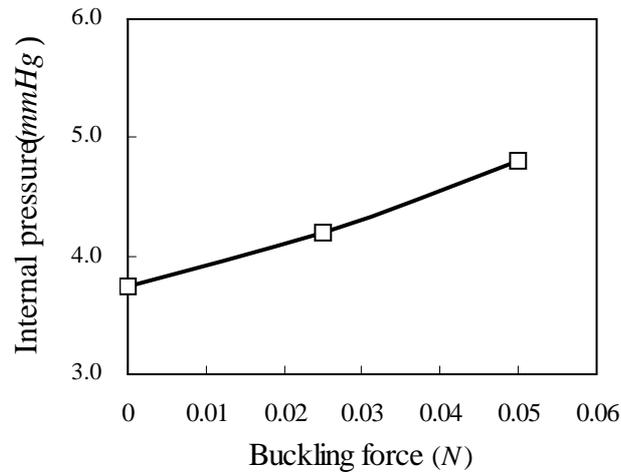


図5 締結中における眼内圧の変化 (Case 1)

つぎに異なる縫合幅を持つ *case2* と *case4* の結果を比較して見れば、広い縫合幅を取る *case2* の場合には高い内陥効果が出ており、縫合幅が内陥効果に大きな影響を与えることがわかる。このような結果から、縫合幅が広すぎると過剰な内陥効果が出、逆にせますぎると締め込んで内陥効果が出にくく、適正な縫合幅を取ることが非常に重要であることがわかる。

さらに眼圧の異なる *case1* と *case3* の結果から見て取れるように、低い初期眼圧では内陥効果が出やすく、眼圧も内陥効果を左右する重要な因子になっている。また、図5のように手術中には締結により眼圧が変動する。したがって適度な内陥効果を得るために初期眼圧を注意しながら、場合によって手術中において何らかの方法で手術中の眼圧を調整することが必要であることもわかる。

### 3. 3次元プログラムの開発

以上の解析によって用いた手法の締結手術シミュレーションに対する可能性、有効性が十分に示され、また臨床手術に対していくつかの有用な情報が得られた。しかし、2次元の解析なのでその結果はまだ定性的で傾向的なものに止まっている。実際の生体眼球は複雑な3次元構造になっているのでより正確な、有用な情報を得るために3次元の解析が必要不可欠であることが言うまでもない。そこで、以上の2次元プログラムを踏まえて変位、力、面圧の境界条件、また複雑な剛体との接触問題が扱える3次元連成解析プログラムを開発した。

混合型有限要素法の解析における要素タイプに関する検討<sup>(6)(7)</sup>がずいぶん行われ、混合型要素タイプ<sup>(2)</sup>が数多く提案された。例えば、2次元の場合では4/1、8/1、9/3要素、3次元の場合では8/1、20/1、27/4などが挙げられる。前回のシンポジウムに報告したように、われわれはいくつかの解析モデルを用い2次元解析を行って4/1、8/1、9/3要素による計算結果と計算時間を比較した。計算精度と計算効率の両方から評価することによって4/1要素が望ましい要素である結論を得た。したがって、ここで開発した3次元のプログラムにおいては2次元の場合の4/1要素に対応する8/1要素をのみ用いた。

### 3.1 解析方法

#### 3.1.1 非圧縮性超弾性体の定式化

*Total Lagrange* 定式に基づく混合型FEMを用いる非圧縮性超弾性FEM定式化に関してすでに前回の報告の中に詳しく述べたので、ここで3次元連成解析の定式化を説明するために以下のように簡単に示す。

非圧縮性超弾性体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。

$$\Phi = \int_{V_0} (W + 2\lambda(J - 1))dV - g(u) \quad (1)$$

ここで、 $W$ はひずみエネルギー関数、 $J$ はJacobianマトリックスである。また、 $\lambda$ はLagrange乗数でその2倍つまり $2\lambda$ 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。

これに停留条件を適用して、それぞれ変位節点と圧力節点の値から内挿した要素内の変位と圧力(Lagrange乗数)を代入すると要素に関する離散化方程式が得られる。

$$\left[ \begin{array}{l} \int_{V_0} (\partial W / \partial \varepsilon_{ij} + 2\lambda(\partial J / \partial \varepsilon_{ij})) \\ ((\partial \phi_M / \partial X_j)u_{MN} + \delta_{jn})(\partial \phi_N / \partial X_i) dV = r_{Nn} \\ \int_{V_0} \phi_L 2(J - 1) dV = 0 \end{array} \right. \quad (2)$$

ここに、 $N$ は要素の変位節点数、 $L$ は圧力節点数、 $n$ は節点変位の自由度である。そして $\phi$ は要素内の変位の内挿関数、 $\phi$ は圧力の内挿関数である。また $V_0$ は要素の基準配置における体積を、 $r_{Nn}$ は外部仕事の等価節点力を表す。

そこで、Taylor展開を用いて(2)を線形化すれば要素の剛性方程式が得られて、さらに、それを系全体に関して組み立てると全体剛性方程式が次のような形で得られ、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_1^{i-1} & \mathbf{K}_2^{i-1} \\ \mathbf{K}_3^{i-1} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}^i \\ \Delta \lambda^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \mathbf{U}^{i-1} \\ \mathbf{F} \lambda^{i-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

これを各繰り返しステップにおいて解き  $\Delta \mathbf{U}^i$  と  $\Delta \lambda^i$  を得て解を次のように更新する．

$$\begin{aligned} \mathbf{U}^i &= \mathbf{U}^{i-1} + \Delta \mathbf{U}^i \\ \lambda^i &= \lambda^{i-1} + \Delta \lambda^i \end{aligned} \quad (4)$$

このように，これを  $\Delta \mathbf{U}^i$  と  $\Delta \lambda^i$  が十分小さくなるまで繰り返すことにより非圧縮性超弾性問題の解を求める．

### 3.1.2 固体 - 液体連成解析の定式化

以上の超弾性体の定式に基づく連成解析の定式化を行うために，図 6 に示すようなある準静的な固体 - 液体変形モデルを考える．この場合には棒を押し込まれると，それにより内部に封入された液体に生じる圧力が容器の内表面に作用する．静止液体として扱うのでその圧力は液体全体にわたって同一である．したがって，変形中における液体の圧力を固体部分の面圧境界条件として扱えばこういった連成解析の問題が解決できる．

変形の進行につれて液体の圧力は変化し未知であるが．ここではまず変形中のある配置(時点)において，液体の圧力  $P$  を既知とし面圧境界条件として固体部分に導入する定式化を行う．

解析において容器の壁が六面体の 8/1 混合型要素に分割されるので容器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より構成される表面として定義する．図 7 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  $P$  が作用しておりそれに等価な節点力が現配置と基準(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，ここで基準配置においてその等価節点力を求める．

まず，現配置と基準配置における要素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  $\mathbf{n}$  と  $\mathbf{n}_0$  とする．この時 Nanson の面積変換式<sup>(8)</sup>は次のように表示される．

$$\begin{aligned} \mathbf{n} dS &= J \mathbf{F}^{-T} \mathbf{n}_0 dS_0 \\ J &= \det | \mathbf{F} | \end{aligned} \quad (5)$$

ここで  $\mathbf{F}$  は変形勾配である．

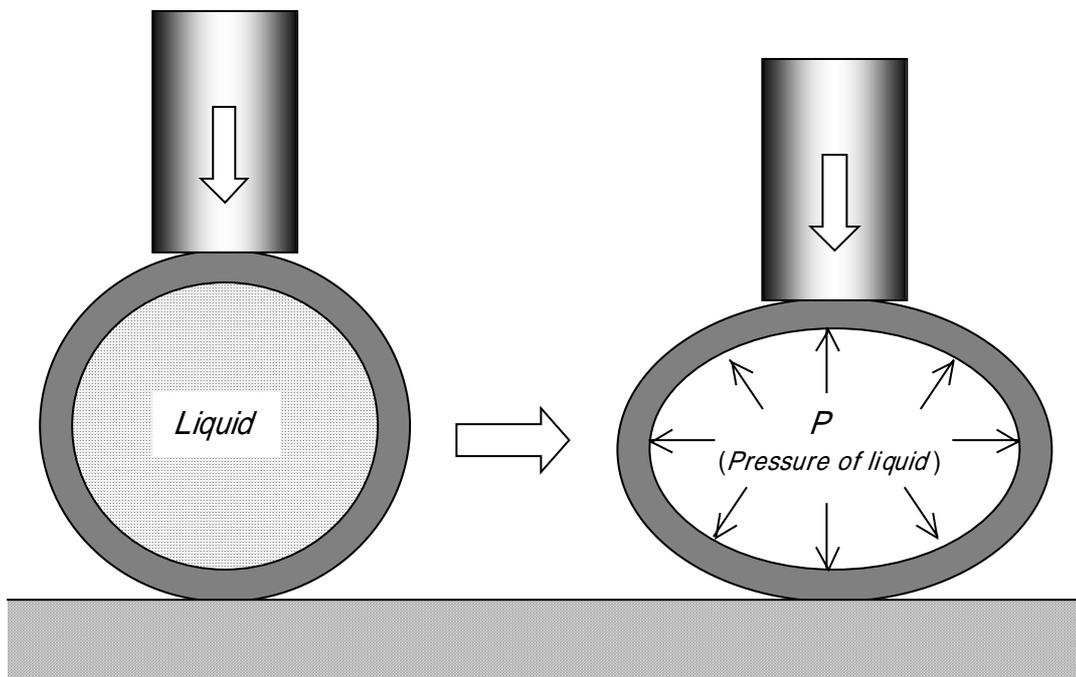


図6 固体 - 液体変形モデル

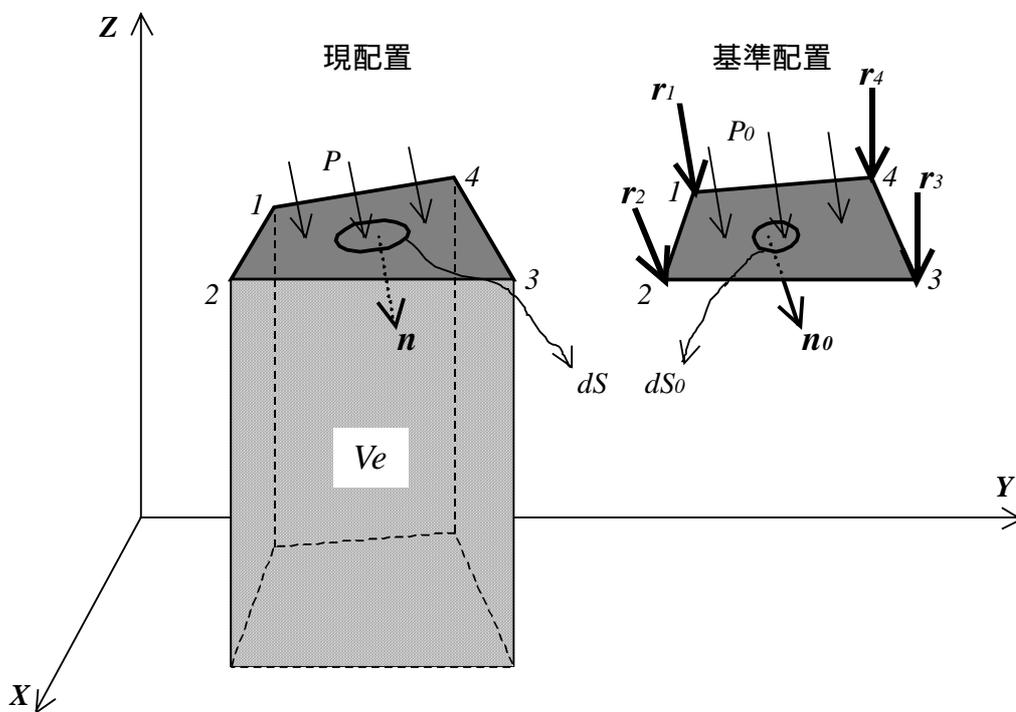


図7 容器の内表面上における四辺形要素

一方，基準配置と現配置においてこの微小面素に作用する力は同じであることから，基準配置における面圧を $P_0$  とすると次の式が成立する．

$$P_0 \mathbf{n}_0 dS_0 = P \mathbf{n} dS \quad (6)$$

したがって，式(5)を式(6)に代入し二つの配置における面圧の対応関係が得られ，

$$P_0 \mathbf{n}_0 dS_0 = P \mathbf{J} \mathbf{F}^{-T} \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (7)$$

そして，これを用いると現配置における面圧 $P$ に等価な節点力は次の形で求まる．

$$\mathbf{r}_e = \int_{S_0} \boldsymbol{\Phi}^T P_0 \mathbf{n}_0 dS_0 = \int_{S_0} \boldsymbol{\Phi}^T P \mathbf{J} \mathbf{F}^{-T} \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (8)$$

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である．また $\boldsymbol{\Phi}$ 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．

$$\boldsymbol{\Phi} = \begin{vmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & 0 & 0 & N_2 & 0 & 0 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \end{vmatrix}$$

$N_i$ は四辺形要素の形状関数である．

このように，節点の対応関係を考慮しながら式(8)を式(2)の外力項に代入し線形化すれば面圧の境界条件を導入した剛性方程式が得られる．

以上は面圧境界条件を扱うための定式化である．明らかに変形中において変化しつつある液体圧力を求めることができれば，これに基づいて固体 - 液体連成解析のための定式化が達成できる．

静止液体の場合，その圧力の変化と体積の変化は以下の関係式<sup>(9)</sup>を満足する．

$$\Delta P = -K \frac{\Delta V}{V_{ini}} \quad (9)$$

こうして，変形中における任意配置（以下に現配置と言う）の液体圧力は

$$P = P_{ini} - K \frac{V - V_{ini}}{V_{ini}} \quad (10)$$

として得られる． $K$  は液体の体積弾性係数である．そして， $P_{ini}$  と  $V_{ini}$  は液体の初期圧力と初期体積である．

一方， $V$  は現配置の液体体積であり，液体を取り囲む容器の内表面上の四辺形要素から以下のように求められる．

$$V = \sum_{i=1}^{ne} V_e \quad (11)$$

$$V_e = \int_{S_e} z dS \quad (12)$$

ここで， $V_e$  は図7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 から得られる体積で， $S_e$  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， $z$  は現配置の要素面上の点の  $z$  座標を表す．以上の体積計算方法は図6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．

以上に得られる液体体積を式(10)に代入して現配置の液体圧力が求まり，さらにそれを式(8)に代入すると等価節点力が以下の形になる．

$$\mathbf{r}_e^l = \int_{S_0} \Phi^T P_0 \mathbf{n}_0 dS_0 = \int_{S_0} \Phi^T (P_{ini} - K \frac{V - V_{ini}}{V_{ini}}) \mathbf{J} \mathbf{F}^{-T} \mathbf{n}_0 dS_0 \quad (13)$$

このように，式(13)を式(2)の外力項（一番式の右辺）に代入すると

$$\left[ \begin{array}{l} \int_{V_0} (\partial W / \partial \varepsilon_{ij} + 2\lambda (\partial J / \partial \varepsilon_{ij})) \\ ((\partial \phi_M / \partial X_j) u_{MN} + \delta_{jn}) (\partial \phi_N / \partial X_i) dV = r_{Nn} + r_{Nn}^l \\ \int_{V_0} \phi_L 2(J-1) dV = 0 \end{array} \right. \quad (14)$$

これを式(2) 同じのように線形化して，最終的に以下の形の固体 - 液体連成解析のための全体剛性方程式が得られる．

$$\left[ \begin{array}{cc} \mathbf{K}_1^{i-1} + \mathbf{K}_{1L}^{i-1} & \mathbf{K}_2^{i-1} \\ \mathbf{K}_3^{i-1} & \mathbf{0} \end{array} \right] \left[ \begin{array}{c} \Delta \mathbf{U}^i \\ \Delta \lambda^i \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \mathbf{F} \mathbf{U}^{i-1} \\ \mathbf{F} \lambda^{i-1} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \mathbf{R} + \mathbf{R}_L^{i-1} \\ \mathbf{0} \end{array} \right] \quad (15)$$

ここで、 $K_L^{i-1}$  と  $R_L^{i-1}$  は液体に関係するものであり、式(2)に関してこの部分が追加された形となっている。

### 3.1.3 剛体との接触処理方法

FEM 解析における剛体との接触処理は通常、以下のように行われる。つまり、各解析ステップの計算が終わったら、自由節点に関しては接触探索を行って接触状態にあると判断されたら、その節点に接触している剛体表面の法線方向において同一方向の剛体の変位増分を強制変位増分として与え剛体に食い込まないように次のステップの解析を行う。一方、すでに剛体に接触している節点に関してはその剛体表面の法線方向の接触力を判断し、引っ張りの接触力であれば次のステップにおいてそれを自由節点として扱う。本プログラムにおいても基本的にこれと同じような方法を採用している。ただし、*Total Lagrange* 定式を用いており、各節点の変位は増分変位ではなく基準配置に関するトータル変位であるので、接触節点に対して次のようにトータル強制変位を与える。

$$u_{i+1}^n = u_i^n + \Delta u_T^n \quad (16)$$

ここで、 $i$  は現解析ステップ数を、 $n$  は剛体表面の法線方向を表す。また、 $u_i^n$  は現解析ステップまでの  $n$  方向における節点トータル変位で、 $\Delta u_T^n$  は剛体の  $n$  方向のステップ変位増分である。

一方、3次元FEM解析において自由度、積分点が増加するなどのため計算量が多いので解析効率の向上は大きな課題となる。したがって、効率的な接触探索方法が要求される。これを実現するために3次元解析において接触探索は通常、*Global*探索と*Local*探索に分けて行われ、その方法はいくつか提案されている<sup>(10)(11)(12)</sup>。本プログラムでは*Global*探索にはOldenburgらが提案した*Position code*アルゴリズム<sup>(10)</sup>を、*Local*探索にはWangらが提案した*Inside-Outside*アルゴリズム<sup>(12)</sup>を採用した。*Inside-Outside*アルゴリズムは変形体節点の法線方向を用いて接触探索を行うため面倒な剛体表面要素との接触点の座標を求めるための繰り返し計算は不要なのでその分探索時間が節約される。しかしながら、この方法では一つの方向においてのみ探索するため、特にステップ変位増分が大きい場合は探索ミスになりがち弱点がある。そこで、本プログラムにおいて探索効率を考慮したうえ、できる限り3次元空間をカバーできる多方向にわたって探索するように改善してこういった弱点を回避した。この方法は探索方向が増えたため探索時間が本来の方法よりやや長くなるが繰り返し計算を用いる方法に比べてロバストで効率的である。

また、本プログラムは複雑な接触問題に対応するために、接触対象である剛体が無数に使用でき、さらに剛体の移動方向が任意に指定できるようにしている。

### 3.2 テスト解析

テスト解析には、まず中空の立方体容器の上部と下部の両方から剛体角柱を押し込む変形モデルを用いた。図 8 に見やすいためにその半分を示す。結果の合理性を検討するために、このモデルに関してその内部に液体の入っている場合と液体の入っていない場合の両方について解析を行った。

対称性を考慮して解析区域を図 8 に示されるものの  $1/4$  とし、容器の壁(固体部分)を 271 個の  $8/1$  混合型要素に分割した。また、固体部分の材料モデルとしてはそのエネルギー関数が

$$W = c_1(\bar{I}_1 - 3) + c_2(\bar{I}_2 - 3) \quad (17)$$

として表現される *Mooney-Rivlin* 超弾性材を用いた。材料定数は  $c_1 = 24.0 \text{ MPa}$ 、 $c_2 = 1.5 \text{ MPa}$  とした。そして、連成解析の場合における液体の体積弾性係数を水と同じ  $K = 2083.3 \text{ MPa}$  と設定した。

図9に液体がある場合とない場合について角柱を  $10\text{mm}$  を押し込んだ時点での変形形状とミゼース応力分布の計算結果を示す。このように二つの場合の結果はずいぶん違っている。液体がある場合では液体の抵抗で容器の外表面が角柱の頭部にぴったり接触しており、ずいぶん膨らんだ形になっている。そして応力が高くなっている。一方、液体がない場合では変形が小さく、また内部になんの抵抗もないため容器の外表面が角柱の頭部から離脱した。以上のように連成解析機能、接触処理機能がうまく機能しており、合理的で納得できる結果が得られている。これによって開発した 3 次元プログラムは有効であることが確認された。

次に液体で充満している円筒容器を締め付ける解析を試みた。この変形モデルの半分を図 10 に示す。図のように締め付ける効果を実現するために、数多くの楕円型断面形状を持つ剛体を円筒の半径方向に移動させる方法を用いた。解析には対称性のため図 10 に示されたものの  $1/4$  の解析区域を用いた。そして容器の壁を 165 個の  $8/1$  混合型要素に分割した。また、固体部分の材料モデル、材料定数、さらに液体の体積弾性係数はモデル 1 の解析に用いたものと同じようにした。

図 11 にすべての剛体を  $4.5\text{mm}$  移動させた時点の計算結果を示す。これを見てわかるように容器が瓢箪のような形になっており締め付ける効果がうまくシミュレーションされている。また、締め付けることによって内部に封入されている液体の圧力が上昇したことが捕

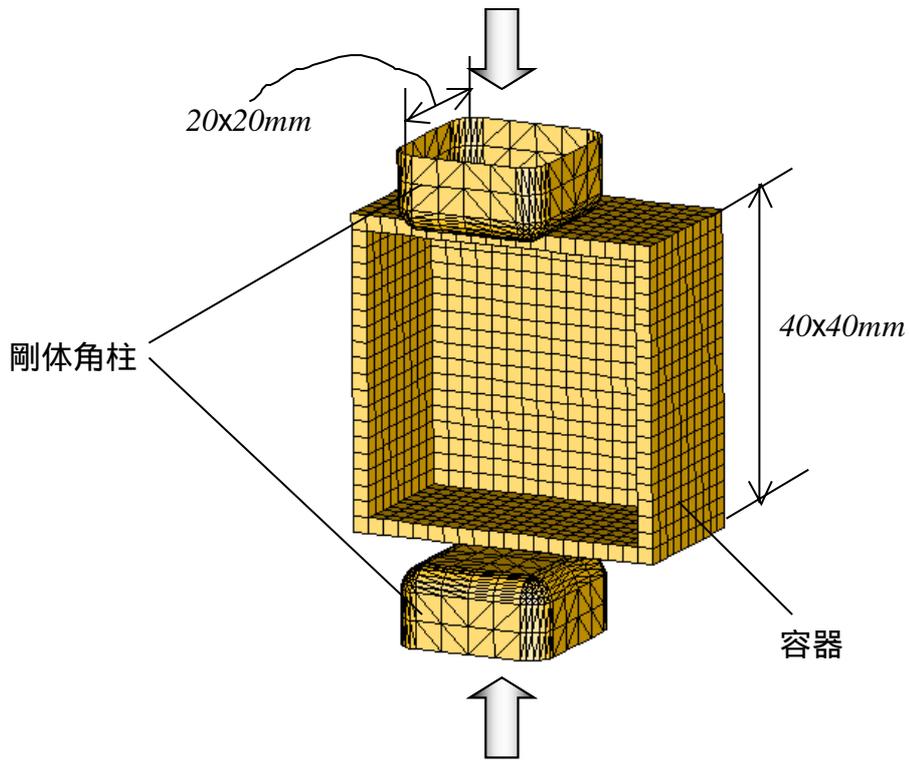


図8 テスト解析モデル1

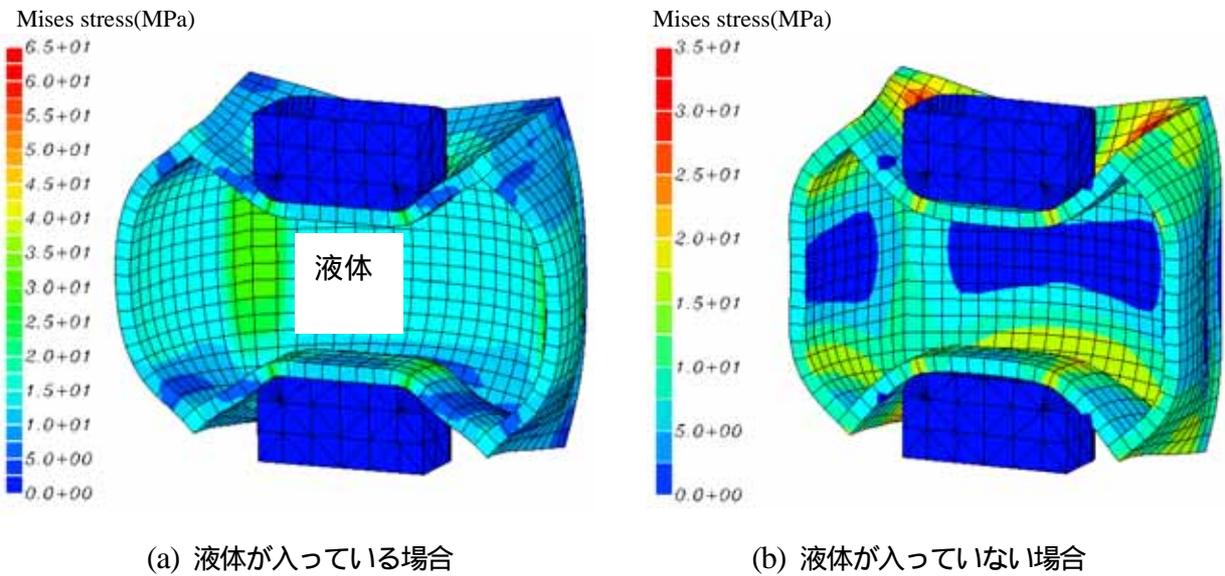


図9 モデル1を用いた解析結果

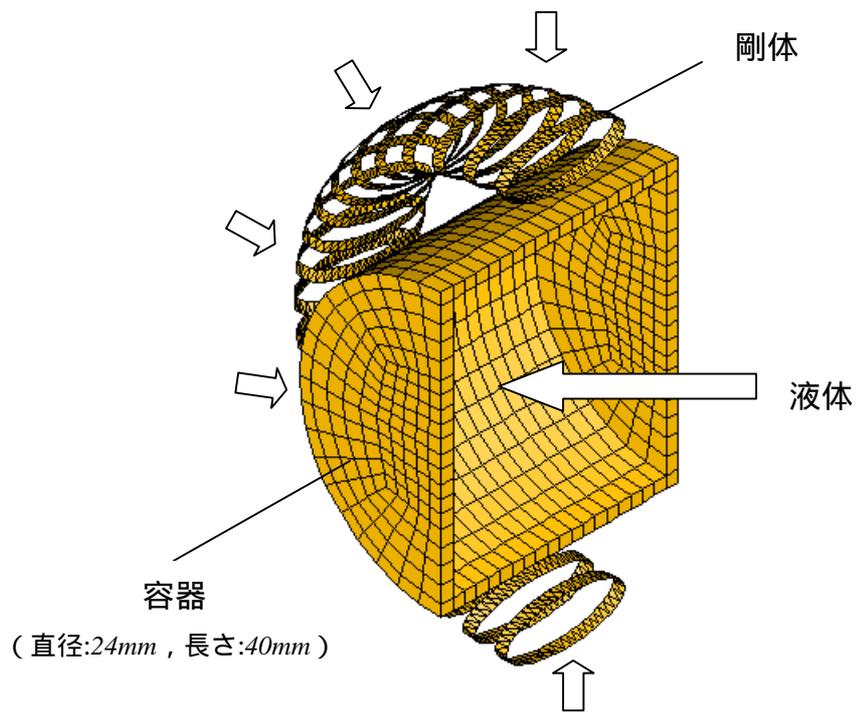


図10 テスト解析モデル2

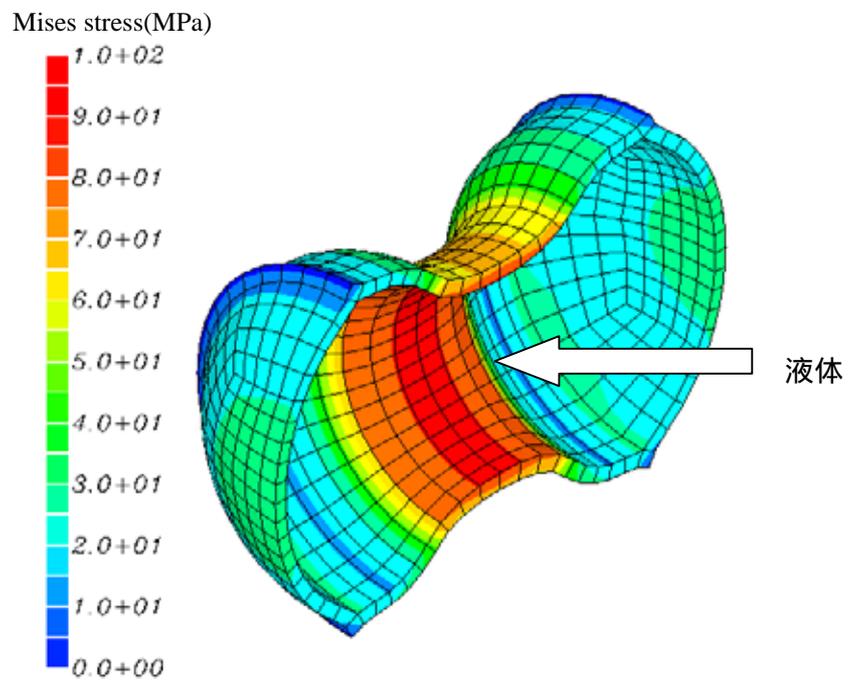


図11 モデル2を用いた解析結果

らえられている．以上の解析は同じ手法を用いる眼球輪状締結手術のシミュレーションの可能性を示唆した．

#### 4. 最後に

本研究において、まず前回に報告した 2 次元の非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析プログラムに、網膜剥離手術のシミュレーションに必要な接触処理機能、縫合を扱う機能を新たに導入して部分締結手術のシミュレーションを行いバックル材の形状、縫合幅、眼圧が手術の内陥効果に対する影響を定性的に調べた．その結果によって強膜面に対して凸となっているバックル材の形状、広い縫合幅、低眼圧の場合は高い内陥効果が得られることがわかった．これは臨床手術に対して適当な内陥効果を得るための指針を与えるだけではなく、こういった手法の手術シミュレーションに対する有効性をも十分に示した．そして、2次元のプログラムを踏まえて接触処理機能を備えた3次元の連成解析プログラムを開発した．さらにそれをテストするために二つの解析を実行してその有効性を確認した．また、それらのテスト解析からこのプログラムは部分締結手術と輪状締結手術を共に可能にすることが示された．今後は縫合を扱う機能と組織同士接触処理の機能をそれに導入して網膜手術過程の3次元シミュレーションを実現することを目指したい．

#### 参考文献

- (1) 清水弘一 監修，標準眼科学(第7版)，(1998)，140，医学書院．
- (2) Bathe, K.J, Finite Element Procedures , (1996), Prentice Hall .
- (3) Sun, Z.G. and Makinouchi, A. , REKIN SYMPOSIUM(2000), 80.
- (4) 矢部呂比夫・川口龍平，計算生体力学研究計画調査報告書(理研)，(1998)，103
- (5) 久田俊明・野口裕久：非線形有限法の基礎と応用，(1995)，191，丸善株式会社．
- (6) 渡辺浩志・久田俊明，日本機会学会論文集(A編)，61-583(1995)，660．
- (7) 山田貴博・菊地文雄，構造工学における数値解析法シンポジウム(1995)，347．
- (8) 日本塑性加工学会 編，非線形有限要素法，(1994)，159，コロナ社．
- (9) 富田幸雄，流体力学序説，(1985)，養賢堂．
- (10) Oldenburg, M. and Nilsson, L. , *Int. J. Numer. Mech. Engng.* , **37** , 359-386(1994).
- (11) Zhong, Z.H. and Nilsson, L. , *Comp. Struct.* , **33** , 197-209(1989).
- (12) Wang, S.P. and Nakamachi, E. , *Int. J. Numer. Mech. Engng.* , **40** , 3665-3685(1997).