604 眼球バックリング手術数値シミュレーションのための

3次元 FEM プログラムの開発

3-D FEM Program for Numerical Simulation of Eyeball Buckling Operation

正 ○孫 智剛(理研) 正 牧野内昭武(理研) 矢部呂比夫(東邦大)

Zhi-Gang SUN, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako-shi, Saitama 351-0198

Akitake MAKINOCHI, RIKEN

Hiroo YABE, Toho University, 2-17-6, Ohashi, Meguro-Ku, Tokyo 153-8518

Key Words: FEM Simulation, Hyperelastic Solid, Static Liquid, Coupling Analysis, Eyeball, Buckling Operation

1、緒言

日常臨床において多発する眼科疾患の一つに網膜剥離が挙げられる。網膜剥離はその形成原因の違いによって裂孔原性網膜剥離と非裂孔原性網膜剥離の2種類に大きく分けられており、その治療に異なる術式が実施されている。バックリング手術は裂孔原性網膜剥離を治療するための主要な術式であり、シリコン製のバックルを眼球表面に縫着することによって強膜を内陥させ網膜裂孔を閉鎖させる治療方法である。その場合、バックルの形状と設置位置、縫合幅、縫合強さ及び術中で変動する眼圧などは手術の成否と効果を大きく左右するが、実際の臨床では術者の長年の経験と勘で決定されている。このような経験と勘に依存する現状を打破し手術の成功率と効果を高め、また経験の浅い術者でも安定した手術効果が得られることを実現するためにFEM数値シミュレーション技術を援用した手術計画が有力な手段として期待されている。しかしながら、この手術は十数種類の非線形弾性力学特性を持つ固体軟組織と液体から構成された眼球を対象とする複雑な過程であるため、それをシミュレーションするFEMプログラムは以下のような難点を解決しなければならない。

- 1) 固体軟組織の非線形弾性力学特性の解析
- 2) 固体軟組織と液体組織の連成解析
- 3) 固体軟組織同士の接触解析
- 4) 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)
- 5) 縫合過程の解析

そこで著者らはこれらのすべての難点を克服しこの種の複雑な臨床手術の3次元シミュレーションを可能にしたFEMプログラムを開発した。

2、プログラム概要

開発したプログラムは以下に示すような、バックリング手術のシミュレーションに必要なすべての機能を備えている。

- 1) 非圧縮性超弾性体の非線形弾性解析 非線形弾性力学特性を表現するために眼球固体軟組織を非圧縮性超弾性体として扱っており、その解析にTotal Lagrange 定式化に基づく混合型有限要素法を用いている。この解法の基本となって

いるのは次のように定義した全ポテンシャルエネルギー汎関数である。

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

ここで、 W はひずみエネルギー関数、 I_1, I_2 は右Cauchy-Green変形テンソルの第一と第二の低減不変量、 λ はLagrange乗数、 J はJacobianマトリックス、 $g(u)$ は外力仕事、 u は変位、 V_0 は基準配置における体積である。

なお、本プログラムは8(変位)/1(圧力)節点の六面体混合型要素を用いており、節点変位、節点力、面圧の3種類の境界条件に対応している。

2) 非圧縮性超弾性体と静止液体の連成解析 バックリング手術は基本的に準静的な過程であるので、眼球内部の房水、硝子体液を全領域にわたり圧力が均一な理想静止液体として扱っている。そして、連成解析を行うために次式のように求められた変形中の液体圧力を面圧の境界条件として固体解析のための離散化方程式に組み込む、いわゆる強連成解法を用いている。

$$P = P_{ini} + \Delta P = P_{ini} - K \frac{V - V_{ini}}{V_{ini}} \quad (2)$$

ここで、 P_{ini} と V_{ini} はそれぞれ液体の初期圧力と初期体積、 V は変形中の液体体積、 K は液体の体積弾性係数を表す。

3) 変形体同士接触解析 バックリング手術の目的は強膜を内陥させることによって剥離した網膜を脈絡膜の上に復位し網膜裂孔を閉鎖することである。したがって、解析において剥離した網膜と脈絡膜との接触を正確に扱うことが必須である。FEM解析において変形体同士接触解析には主にLagrange乗数法とPenalty定数法が使われているが、本プログラムでは後者を用いることにしている。つまり、接触ポテンシャルエネルギーを導入した全ポテンシャルエネルギー汎関数を以下のように定義することによって変形体同士の接触問題の解析を行う。

$$\begin{aligned} \Phi_p &= \Phi + \pi_p \\ \pi_p &= \frac{1}{2} \alpha G^2 \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 α はPenalty定数である。また、 G は接触節点の変

形体への食い込み量を表す。

4)締め付ける過程の解析 本プログラムは変形体同士の接触のみではなく、変形体と剛体との接触解析をも扱うことができる。さらに、輪状バックリング手術の場合、眼球を締め付ける過程の解析を可能にするために接触対象の剛体を無数に使用でき、またその移動方向を任意に指定できるようにしている。実際の解析においてシリコンバンドとバックル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ことによって締め付ける過程を解析する。

5)縫合過程の解析 実際の縫合過程は縫合糸を強膜に通糸してからバックルの表面に沿って引っ張っていく過程である。本プログラムはこれと同等な過程を想定し、通糸点に常にバックル表面の母線に垂直しかつバックルの表面に接するような節点力を与えていく手法を用いて縫合過程を解析する。節点力方向の探索には *Global* 探索と *Local* 探索に分けた、効率的な探索方法を用いている。

3、輪状バックリング手術のシミュレーション実例

輪状バックリング手術はシリコンバンドで眼球を締め付けてから縫合を施す術式である。ここで、一例として開発したプログラムを用いたこの種の手術のシミュレーション実例を示す。

3.1 解析モデルと解析条件 本解析では眼球が Z-X 座標面に関して対称と見なしその半分を解析区域とした。解析モデルを図 1 に示す。網膜は眼球の上部に剥離しており網膜裂孔は上耳側の赤道部に位置している。また、硝子体ゲルはその前の部分だけが残っている。このモデルにおいてチン小帯とそれ以外の軟組織にそれぞれ 135 個のバー要素と 11593 個の 8/1 節点の六面体 3 次元混合型要素を用いた。そして、チン小帯は線形弾性材としそれ以外の軟組織は *neo-Hooke* 超弾性材とした。各軟組織の材料定数を表 1 に示す。また、眼球内部の液体は静止液体として扱いその体積弾性係数を 2083.3MPa とした。

Table 1 Material constants for the soft tissues

	Cornea	Sclera	Ciliary body	Choroids	Retina	Optic nerve	Vitreous body	Lens
c	0.0333	0.0833	0.01	0.0083	0.0008	0.05	0.0002	10.0

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

Zinn's zonule Young's modulus: 100MPa

Fig. 1 Analysis model

1st step

2nd step

3rd step

Fig. 2 Simulation results in each analysis step

3.2 解析結果 解析は以下のような三つのステップに分けて行った。1)標準初期眼圧を生成するための、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;3)バックルを眼球表面に縫合する過程の固体-液体連成解析。

図 2 は各計算ステップの計算結果である。眼球を締め付ける第 2 ステップにおいて、顕著な強膜内陷効果が出現しなかったが、眼球直径の減少と眼軸の伸長に伴って網膜下液の体積が減少し剥離した網膜が脈絡膜に接近した。その次の第 3 ステップにおいて、縫合を施すことによって強膜が強く内陷され網膜下液の大部が網膜下から排出された。その結果、剥離した網膜の大部が復位し、また網膜裂孔が完全に閉鎖した。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見られた。

一方、計算によって術中の眼圧の変動も予測されている。手術の進行につれて眼圧が増加し、とくに縫合を施した後、眼圧が初期標準眼圧(15mmHg)の 2 倍以上(31.1mmHg)に達した。

4、結言

眼球バックリング手術の数値シミュレーションのために 3 次元 FEM プログラムを開発した。このプログラムを用いることによって複雑な輪状バックリング手術の手術過程がうまくシミュレーションされ、また臨床手術計画に有用な、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応力分布、眼圧変動などの情報が合理的にとらえられた。

謝辞

本プログラムに用いているスパースソルバーは先端力学シミュレーション研究所より提供されたものであり、ここに記し謝意を表す。

参考文献

1)Sun,Z.G. and Makinouchi,A., RIKEN SYMPOSIUM (2002), 45-55