

氏 名 じえーん ゆーふあい ふあん
JANE YUHHUEY HUANG

学位の種類 博士（医学）

報告番号 甲第 1579 号

学位授与の日付 平成 27 年 9 月 13 日

学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当（課程博士）

学位論文題目

Simulation of airbag impact on eyes with different axial lengths after transsclerally fixated posterior chamber intraocular lens by using finite element analysis

（エアバッグによる縫着レンズ術後眼の眼球衝撃解析）

論文審査委員（主査）	福岡大学	教授	内尾 英一
（副査）	福岡大学	教授	井上 隆司
	福岡大学	教授	立花 克郎
	福岡大学	講師	尾崎 弘明

エアバッグによる縫着レンズ術後眼の眼球衝撃解析

目的：自動車エアバッグは致死障害から身を守るために普及してきた。一方で作動時による眼外傷の報告も見られる。今回我々は今まで行ってきた眼外傷シミュレーションモデルをさらに拡大し、眼軸の異なった Intraocular lens (IOL)縫着模型眼に対しエアバッグを衝突させ、コンピューター上計算でエアバッグによる正視眼、近視眼、遠視眼の眼球損傷の程度を解析したので報告する。

対象および方法：標準的な眼球形態に準じた眼球密度および物性を考慮した有限要素眼球モデルを作成した。IOL 縫着糸の張力は既定値 0.16 N とした。異なった眼軸長：正視(23.85 mm)、遠視(21.85 mm)、近視(25.85 mm)のモデル眼に対して(20 m/s, 30 m/s, 40 m/s, 50 m/s, 60 m/s) エアバッグ作動速度で衝撃シミュレーションを行った。衝突シミュレーションソフトウェア PAM-CRASH™ (日本イーエスアイ)を用いエアバッグ衝撃による角膜と強膜の損傷範囲と程度および IOL 縫着糸の断裂の有無の解析を行った。

結果：衝突速度の増加により眼球の歪みは増大し、40 m/s では全ての眼軸長モデル眼において角膜と強膜損傷が見られた。全ての衝撃速度において近視モデル眼の角膜、前房、強膜の歪み程度が強かった。IOL 縫着糸は全てのモデル眼において 60 m/s の速度で断裂がみられた。近視眼においては早くも衝突後 0.1~0.2 ms で糸の断裂が見られた。本シミュレーション研究でエアバッグによる眼外傷発症のメカニズムを理解し、今後エアバッグの修正や眼科領域での予防対策などの知識を深めることができると思われた。

結論：エアバッグ眼外傷では近視眼で最も角膜と強膜の歪みが大きく、眼球破裂する可能性が高いとシミュレーションモデルが示唆された。生体の構成に近似した眼球モデルを用いて動物実験や生体組織研究などでは困難な眼外傷の受傷メカニズムを解析する上で有用なシミュレーションであることが示唆された。

本論文はコンピューターシミュレーションを用い、エアバッグによる眼外傷の眼球衝撃を解析し考察を行った

1. 斬新さ

本研究は、生体の構造に近似した眼球モデルを用い、三次元有限要素法による眼外傷シミュレーションを行った。異なる眼軸長の眼内レンズ術後眼のエアバッグ眼球衝突シミュレーションの初報告であった。スーパーコンピューターのパフォーマンス向上により、以前行われた研究よりも精密にかつ短時間に複雑な計算が可能になったことを示した。本研究方法で、今まで困難であった動物実験や生体組織研究による眼外傷の受傷メカニズムの理解を深めることが可能となった。

2. 重要性

自動車エアバッグは、致命的障害から身を守るために普及してきたが、一方で作動時の衝撃による重篤な眼外傷が報告されている。今回のエアバッグによる眼内レンズ縫着眼の眼球衝撃解析により、近視眼がより短時間で広範囲に損傷を受ける傾向にあったことが証明された。眼内レンズ縫着後眼は、10時方向の固定糸が衝撃を受けやすく、全てのモデル眼に断裂が認められた。研究の結果より、眼鏡装着や縫着方法の修正など眼科領域での予防対策など知識を深めることができ、重要なシミュレーションと思われる。近い将来、生体の情報を反映したより精密なヒト眼球シミュレーションモデルが作成できれば、実際の臨床において障害の過程を視覚的に追跡でき、新しい治療手段の開発に繋がるものと考えられる。更に手術方法の適応等、患者に精神的、肉体的な負担をかけることなくコンピューター上で計算することができる。

3. 研究方法の正確性（実験方法の正確性）

本研究は標準的な眼球形態に準じた眼球質量密度及び角膜、強膜の物性を考慮した有限要素眼球モデルを使用しているため、生体眼に近い反応を反映することができたと考える。既報の検体眼実験で得られた組織の圧力と張力からひずみの計算が行われ、これらの材料物性値を用いてスーパーコンピューターにより正確に処理が行われた。衝突による強膜の歪が 0.068 を超える時点で眼球破裂と設定し、眼内レンズ縫着糸の規定張力値 0.16N を超えた時点で断裂と設定した。異なった眼軸長:正視眼(23.85 mm)、遠視眼(21.85 mm)、近視眼(25.85 mm)の眼球モデルに対しシミュレーションソフト PAM-CRASH(日本 ESI)を用い、20 m/s ~ 60 m/s でエアバッグを衝突させ、衝撃による角膜と強膜の損傷範囲および眼内レンズ縫着糸断裂の解析を行った。すべての計算はシミュレーションソフトで計算され、予測した実験結果が得られた。

4. 表現の明瞭性

本実験の眼球モデルとエアバッグ衝突子は三次元有限要素法で作成され、それぞれ図形で示した。衝突させた異なった眼軸長の眼球モデルの経時的な歪の程度は、カラーマップを用いて 0.1 秒単位刻みで示した。眼球モデルとエアバッグモデル作成の情報と過程、本研究の目的、シミュレーションの対象と方法、衝突の結果は明確に図表を用いて示した。本論文は既に 2015 の *Clinical Ophthalmology* に掲載されている。

5. 主な質疑応答

Q: 今まで動物モデルを使った水晶体眼外傷の報告はあったか？

A: 調べた限りでは動物や人眼によるエアバッグシミュレーションの海外報告はなかった。鈍的外傷ではなかったが、兎モデルを使ったアルカリ眼外傷とマウスモデルを使った角膜障害の報告はあった。国内では兎モデルの鈍的外傷の報告は 1 つあり、微弱な振動を眼球に与え続けることによって水晶体脱臼と白内障が発生することが認められた研究であった。

Q: 今回のコンピューターシミュレーションを使ったメリットは？

A: コンピューターシミュレーションを使用することで今まで倫理的に困難な動物実験や人体実験を回避することができた。有限要素法による解析のため、コンピューターの性能によってほぼ実物に近似したシミュレーションができ、将来各個人ごとの情報を反映したモデルを作成することが期待できるメリットがあると思われる。

Q: 正常水晶体をシミュレーションに使われなかった理由は？

A: 現時点では水晶体を支えているチン小体や水晶体嚢の物理学的な性質がまだ不明であるため、本シミュレーションを行う上で必要な数値がなく、行うことができなかった。

Q: モデルを作成する上で材料の物性でシミュレーションの結果が左右されるが、具体的にどのような物理学的データを使ってどのような力を加わったかを説明してください。

A: モデル眼の角膜と強膜の物性値は検体眼が以前の研究から得られた。眼球形状は模擬眼を使用した。シミュレーションに必要な組織のひずみの域値を算出するために組織の圧力と張力を先ず求めた。求めた数値で物理学的な要素を表すポワソン比、ヤング率、降伏応力が計算され、衝撃シミュレーションの方程式に値を入力した。今回は正面衝突によるシミュレーションだけが行われ、正面から加わった力による眼球の縦と横の歪程度を解析した。

Q: エアバッグ衝撃はエアバッグが膨らむ速度と運転手が前倒した距離で変わってくるが、今回は検討したでしょうか？

A: コンピューター計算を短縮するため、本研究はエアバッグを直接眼球の全面に位置させ、決められた速度で衝撃を行った。今後異なった距離や異なった方向からのエア

バッグシミュレーションを考慮し解析を行う必要があると思われる。

Q: エアバッグ衝撃は眼圧の変化で変わってくるので、これについてのコメントは？

A: 眼圧または硝子体圧で眼球の歪程度は大きく影響されると予測される。本研究は計算短縮のため、眼圧を正常値である 20mmHg に設定した。今後は眼圧や硝子体の構成を考慮しシミュレーションを行う必要があると思われる。

Q: You have probably made estimations on the results before you carried out the experiment. Were the results as expected or were you able to get new findings?

A: The results on how a myopic eye would deform the most and rupture at an earlier time interval upon airbag impact were expected results. A new finding on this study was that only the 10 o'clock suture broke in all eyes at the speed of 60 m/s impact and the 4 o'clock suture remained intact. Furthermore, upon a frontal airbag impact, the eye would rupture before the suture breaks.

Q: What would be the alternatives that you can think of to prevent the suture breakage?

A: We could consider new suture positions so that the sutures would be more horizontally fixed. Other methods are to not use the sutures but instead, biological glue or fixing the haptics directly by passing them through scleral tunnels. On the manufacture's side, making a suture with a higher tensile strength would allow more tolerance to impacts.

Q: Could you explain more precisely how you can apply your study in the future in the clinical settings?

A: If we could obtain physiological data on individual patients, such as the thickness of the parts of the eye, the ocular pressure, and the refractive components, these raw data could be directly integrated into the simulation software for calculations and we would be able to get knowledge of how the particular eye reacts.

Q: Would the results of your study be an influence for the automobile industry in making new airbag systems or reducing airbag deployment speeds?

A: This is a simulations limited to eyes only. Airbags are made primarily to save lives. Therefore, studies on other parts of the body would be necessary to make a conclusion on the safety and the speed of the airbag.

Q: 臨床の場合では白内障術後の切開創が最も衝撃に弱いことがわかるが、この研究はこの件についてどのような結果が得られたか？

A: 十二時方向の切開創が最初に破裂したことは一つ前の研究で証明されている。切開創の離開はエアバッグ速度 40 m/s で認められた。今回は別に切開創だけのデータは出していなかったが、同じ 40 m/s の速度ですべて眼球が破裂したことは認められた。

Q: 普通の水晶体眼の評価は今後可能でしょうか？

A: 水晶体を支えているチン小体および水晶体嚢の物性値がわかればシミュレーションは可能となる。

Q: 論文の一部に関する質問。近く座るとエアバッグ衝撃が大きいとのことでしょうか？

A: 近く座るとエアバッグ衝撃をより強く受けるため、できればエアバッグから30センチ程離れて座ることが推奨される。

以上より本論文は、エアバッグによる鈍的眼外傷の受傷メカニズムをコンピューター上で計算し、異なった眼軸長の眼球モデルと眼内レンズ縫着後における損傷程度を初めてシミュレーションしたため学位論文に値すると評価された。