

乳幼児揺さぶられ症候群における眼底出血の有限要素法による解析

A finite element analysis of the fundus hemorrhages accompanied by shaken baby syndrome / abusive head trauma.

正 ○吉田 真 (首都大学東京) 非 山崎 純平 (首都大学東京)
非 園村 光弘 (首都大学東京) 正 水沼 博 (首都大学東京)

Makoto YOSHIDA, 1-1 Minamiosawa, Hachioji, Tokyo, Tokyo Metropolitan University
Junpei YAMAZAKI, Tokyo Metropolitan University
Mitsuhiro SONOMURA, Tokyo Metropolitan University
Hiroshi MIZUNUMA, Tokyo Metropolitan University

Key words : Shaken baby syndrome, Abusive head trauma, Fundus hemorrhage, Retinal hemorrhage, Finite element analysis

1. 結論

育児をする者がそのストレスから乳幼児の体を激しく揺さぶることで虐待してしまうことに起因する一連の傷害を乳幼児揺さぶられ症候群 (shaken baby syndrome or abusive head trauma, SBS/AHT) とよぶ。無抵抗で首の据わっていない乳幼児が被害者となることが多く、頭部が激しく揺れることにより重篤な傷害もたらされ、死に至ることもある。核家族化が進む都市部を中心に近年増加傾向にあるとみられ、その予防にむけたとりくみが急務である。我々は、SBS/AHTの多様な症状のなかでも眼底出血に注目し、その発生機構を力学的に解明することで個々の被疑事例の原因究明に資することをめざしている。

眼球とその周囲を模した有限要素力学モデルを構築し、激しい揺さぶりにともなって硝子体が眼底の組織を牽引することにより出血に至るといふ発生機構の妥当性を検証することを試みている。この現象については、これまでいくつかの研究グループによって有限要素力学解析がなされてきたが^{(1), (2)}、モデルを複雑化しすぎるあまり、再現された現象を分析的に解釈することが十分にできていなかった。我々は、まず、脆弱な硝子体と網膜と脈絡膜が丈夫な角膜と強膜に包まれているという独特の構成の本質的な部分のみを抽出したモデルを用いた解析をよく吟味する必要があると考えた。そこで、比較的規則的な幾何学形状のみで構成される、眼球とその周囲を模した有限要素力学モデルを自動生成するプログラムを開発し、硝子体が眼底の組織におよぼし得る力学的作用と眼底出血との関連についての解析をおこなった。

2. 解析方法

我々が開発したFortran95プログラムによって自動生成された眼球とその周囲を模した有限要素力学モデルの概観をFig. 1.に示す。ソルバーには、統合CAEソフトウェアパッケージであるHyperWorks v10.0 (Altair Engineering Inc.)に含まれる陽解法有限要素解析ソフトウェアであるRADIOSSを用いた。このモデルの詳細さは、プログラムコードの中の定数により容易に変更することができる。解析の段階に応じて詳細さを調節することができるため、解析を効率的に進めることができる。このモデルには、SBS/AHTにおける眼底出血の再現のために本質的であると考えられる、硝子体、角膜、強膜、脂肪組織、眼窩を再現した。網膜や脈絡膜は、力学的には硝子体と区別しがたいものと考えられたので、独立の部品としてはモデル化せず、硝子体の周縁部をそれとみなすこととした。角膜と強膜と眼窩は、厚みをもつ4節点の平面四

角形であるSHELL要素で、硝子体と脂肪組織は8節点の六面体であるBRICK要素で構成した。硝子体は立方体を核とした中実球として構築した。

寸法と物性値は文献⁽²⁾⁻⁽⁵⁾より引用した (Table 1)。硝子体の縦弾性率 (Young 率) は年齢や疾病などの条件により大きく変化することが知られている。上限には、乳幼児の硝子体は堅いゲル程度である (国立成育医療センター 眼科 Dr. Yuri Kobayashi, 私信) ことから、80 kPa を適用し⁽⁶⁾、下限にはこのモデルで安定した計算ができる下限に近い1 kPa を適用した。このようにして構築したモデルを用いて、300 mm

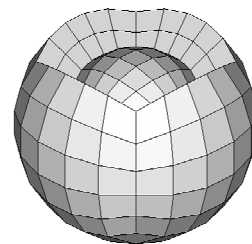


Fig. 1. The finite element mechanical model of an infant eye and its surroundings used in this study. The vitreous, the cornea, the sclera, the fatty tissue and the orbit of an infant eye were modeled. Other parts of the eye, considered to have only minor mechanical contribution to the fundus hemorrhages accompanied by SBS/AHT, were not modeled.

Table 1. Dimensions and Young's moduli of each parts of the finite element mechanical model of an infant eye and its surroundings.

Property	Value	Reference
Radius of the eyeball	10 mm	(2)
Thickness of the sclera	1 mm	(2)
Radius of the orbit	16 mm	(2)
Young's modulus of the sclera	310 MPa	(3)
Young's modulus of the cornea	10 MPa	(4)
Young's modulus of the fatty tissue	47 kPa	(2)
Young's modulus of the orbit	18.6 GPa	(5)

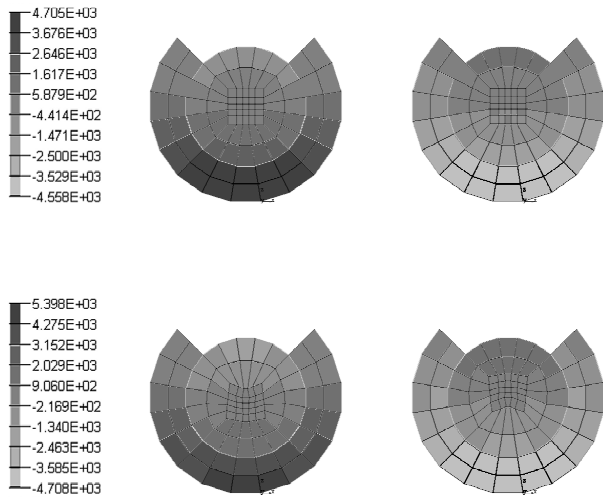


Fig. 2. Pressure change distributions of the model of the infant eye and its surroundings subjected to vigorous shaking at a cross section orthogonal to the equatorial cross section. The models were sinusoidally shaken for a distance of 300 mm with a frequency of 4 Hz along the geometrical axis. Upper and lower cross sections are from the model with the vitreous with Young's moduli of 80 kPa and 1 kPa, respectively. Left and right cross sections are from the posterior and the anterior ends of a typical cycle of the shake. Gray scales are in pascals.

の距離を 4 Hz で眼軸に沿って正弦波で激しく揺さぶった場合を再現した。この際の最大加速度は 189 m/s^2 である。

3. 結果と考察

眼球を激しく揺さぶった際の、赤道面に垂直な正中断面における圧力変化の分布を Fig. 2 に示す。また、同条件における硝子体の後極部における圧力変化の時間変化を Fig. 3 に

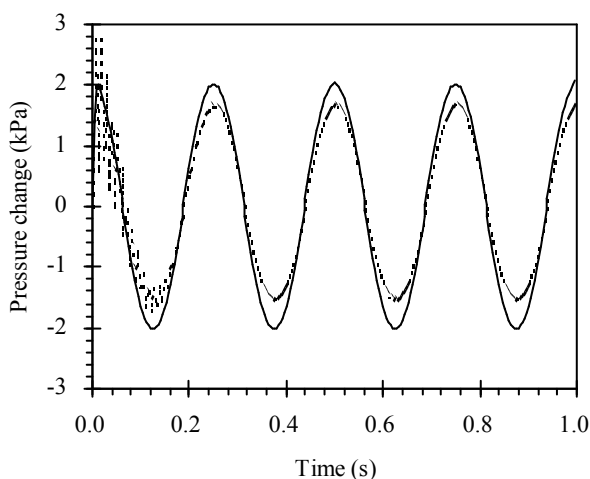


Fig. 3. Time course of the pressure change of the vitreous at the posterior pole due to vigorous shaking. Conditions of the shake is as the same as that in Fig. 2. Solid and dotted curves are from the model with the vitreous with Young's moduli of 80 kPa and 1 kPa, respectively.

示す。激しい揺さぶりを加えることによって、後極部の硝子体外縁において 2 kPa 程度の正負の圧力変化が認められた。ウサギを用いた実験では 1 kPa 程度の負の圧力によって網膜剥離が起こることが観察されている⁽⁷⁾ので、今回の条件で眼底出血を含む何らかの損傷が誘起される可能性は十分にあると考えられる。また、硝子体が堅い場合に圧力変動が大きくなっている (Fig. 3) ことは、乳幼児における SBS/AHT によってもたらされる傷害を増悪させる要因となっているのかもしれない。

5. 謝辞

本研究は、社会技術研究開発センターの研究開発プロジェクト「虐待など意図的傷害予防のための情報収集技術及び活用技術」の一環としておこなわれた。本研究で使用した HyperWorks v10.0は、Altair Engineering Inc.によるアカデミックオープンプログラムによって無償で貸し出されたものである。

6. 参考文献

- (1) Steven Alex Hans, Sebastian Y. Bawab and Michael L. Woodhouse (2009) A finite element infant eye model to investigate retinal forces in shaken baby syndrome. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology* 247(4), 561-571. doi:10.1007/s00417-008-0994-1
- (2) Nagarajan Rangarajan, Sarath B. Kamalakkannan, Vikas Hasija, Tariq Shams, Carole Jenny, Irina Serbanescu, Jamie Ho, Matthew Rusinek and Alex V. Levin (2009) Finite element model of ocular injury in abusive head trauma. *Journal of American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus* 13(4), 364-369. doi:10.1016/j.jaapos.2008.11.006
- (3) Eiichi Uchio, Shigeaki Ohno, Joju Kudoh, Koki Aoki and Lech Tomasz Kisielewicz (1999) Simulation model of an eyeball based on finite element analysis on a supercomputer. *British Journal of Ophthalmology* 83(10), 1106-1111. doi:10.1136/bjo.83.10.1106
- (4) Hsichun Wang, Paul L. Prendiville, Peter J. McDonnell and Wenji V. Chang (1996) An ultrasonic technique for the measurement of the elastic moduli of human cornea. *Journal of Biomechanics* 29(12), 1633-1636. doi:10.1016/S0021-9290(96)80017-0
- (5) Jae Young Rho, Richard B. Ashman and Charles H. Turner (1993) Young's modulus of trabecular and cortical bone material: ultrasonic and microtensile measurements. *Journal of Biomechanics* 26(2), 111-119. doi:10.1016/0021-9290(93)90042-D
- (6) Hisashi Haga, Shigeo Sasaki, Mayumi Morimoto, Kazushige Kawabata, Etsuro Ito, Kazuhiro Abe and Takashi Sambongi (1998) Imaging elastic properties of soft materials immersed in water using force modulation mode in atomic force microscopy. *Japanese Journal of Applied Physics* 37, 3860-3863. doi:10.1143/JJAP.37.3860
- (7) Frank R. Owczarek, George E. Marak and A. Raymond Pilkerton (1975) Retinal adhesion in light-and dark-adapted rabbits. *Investigative Ophthalmology & Visual Science* 14(5), 353-358.