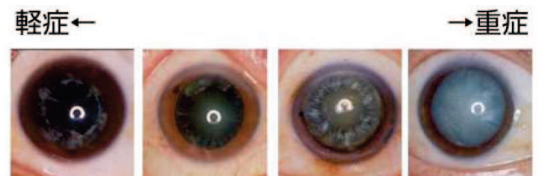
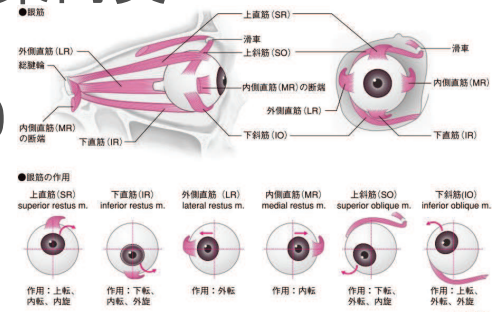
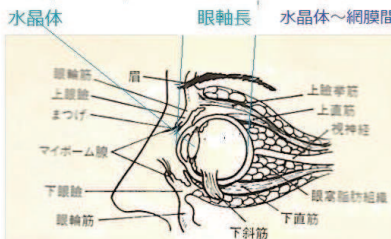


# ヒトの目の照準調節への外眼筋関与を明らかに

流域調整室技術事務所 安東尚美

[hovakigumo@gmail.com](mailto:hovakigumo@gmail.com)

視覚学会 2023.1.20



## 1. 研究を始めたきっかけ

- ・若い頃の、外眼筋調節関与を根拠とするベイツ法による視力回復改善体験
- ・昨年、高血糖により外傷起因白内障が悪化し手術を受ける際の眼内レンズ選び (水晶体、外眼筋半々?) 及び予後対策 (ベイツ法で飛蚊症ドライアイ等改善)
- ⇒ 仮性近視・偽近視説、正視者の矯正者より素早い視線移動 (サッケード)、正視者が核白内障にまで悪化しても強度近視になりにくいのが、水晶体変形のみで調節するヘルムホルツ説では説明できないのでは?
- ・自然塩の製造工程で常温海水濃縮を逆浸透膜以外の塩田時代の手法を改良して行う
  - 斜面等小さな地形単位での降雨流出土砂移動過程 の解析における
  - 表面物性、熱収支、風速の効果 同様、【現象が体系的に理解されていないことの難しさ】が、百年前に決着したはずの「人の目の調節機構」にもある?

## 2. 調節に関する既往研究一1

1611 J.Kepler 水晶体の眼球内での光軸方向への移動(10mm)により調節1)2)

1677 R.Descartes 水晶体の変形による 1)

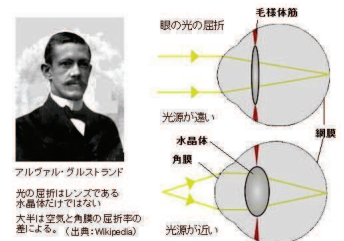
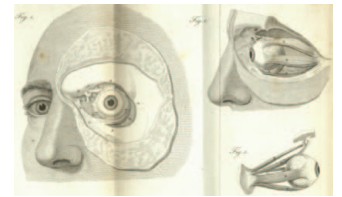
1697 J,C,Strum 1) 1794 D.Hosack 眼球そのものの変形 3)

1795 E.Home 角膜の変形による W.Porterfield 水晶体変形説を補強 1)

1801 T.Young 水晶体移動、眼球変形、角膜変形を否定(変形量が大きすぎるのを理由) 1)4)

1855 H.Helmholtz Purkinje-Samson像(以前に白内障の診断のために用いられた角膜や水晶体面による反射像。角膜の前面と水晶体の前面による像は正立した虚像であり、水晶体後面からの像は倒立の実像)を解析しmodel-eye構成(毛様体筋が水晶体前面曲率を変化させて調節)

1911 A Gullstrand Helmholtz説に基づく模型眼と細隙灯でノーベル生理学賞



## 調節に関する既往研究等一2

1920 W.Bates Perfect Sight Without Glassesで水晶体変形は撮影できなくても角膜変形は撮影できた、アトロピン点眼後も調節機能から眼軸長変化を提唱5) 1960 ハロルドペパード:あなたのメガネは要らない(ベイツ法)初版

(1975 ペパード氏の眼がどんどんよくなる本 ベストセラーに、1995特訓版)

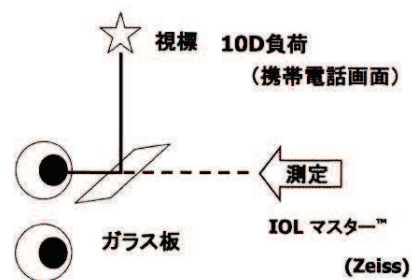
近見時は斜筋が眼球を締め付け伸ばし水晶体変形、遠見時は直筋が押付け扁平に

1989 植村佐知子:白内障手術後の1D程度の残余調節を縮瞳や指標の大きさによると説明 6) (水晶体撤去後の調節はベイツ氏によると19世紀後半から報告有)

1990 Sigeo Yomosa, Sadayoshi Kamiya:水晶体以外の調節は1/3~1/2と計算2)

1990 森本安夫:水晶体が0.64mm前方に移動して調節すると光学計算1)

# 調節に関する既往研究等—3



2005 山口・堀部・宮里・清水:近見作業後の眼軸長

が0.05mm延長し、前房深度が0.36mm浅くなった 7)

2006:A.H.Mallenら:6D負荷で眼軸長が正視0.037mm近視0.058mm延長、前房深度は正視0.19mm近視0.18mm浅くなった。 8)

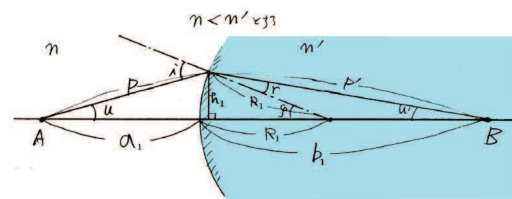
2014 中嶋康幸:近見時は水晶体が、遠見時は脈絡膜がバネとなっている。9)

2017 L.Davisら:3D、4,5D作業時眼軸長が43歳を境に変化しなくなる。10)

2019 原・小野:無調節時と33cm調節時の角膜～水晶体形状を撮影し、調節できている人の平均で水晶体厚4.19→4.31mm、水晶体前面曲率10.49→9.1mm、後面6.1→5.82mmの変化。縮瞳した人としらない人がいるが高齢者は大きく縮瞳。11)

⇒調節時の眼軸長計測・全眼球CT撮影は難しい。外眼筋関与は『車輪の再発見』?

## 3. 光学計算による検討



原ら13)の結果を用いて1・角膜(曲率半径7.85mm)から球面に入るとして、

$$n/a + n'/b = (n' - n)/R \quad \text{空気屈折率 } n = 1.0, 3\text{mm角膜前房 } n' = 1.335,$$

$$\text{無調節 } a = \infty \quad b = f_1 = 31.28\text{mm}, \quad a = 330\text{mm} \quad b_1 = 33.67\text{mm}$$

2・水晶体(屈折率  $n' = 1.4$ )単独 硝子体  $n = 1.335$

$$1/f = (n' - n)(1/R_1 - 1/R_2) + d(n' - n)^2 / (n' \cdot R_1 \cdot R_2)$$

f:焦点距離、n:屈折率、d:レンズ厚さ、R1:前面曲率、R2:後面曲率

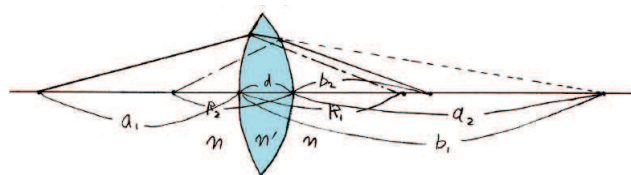
(水晶体の様な両凸レンズなら、R1は+。R2は一だそうです)無調節  $f_2 = 60.05$ 、調節  $55.35\text{mm}$

3・複合  $b_2 = (f_1 - d) \cdot f_2 / (f_1 + f_2 - d)$

d:レンズ間距離=角膜前房～水晶体中心間距離 無調節 18.95mm 調節 19.49mm

水晶体が変形しても0.5mm眼軸が長くなる計算結果になりました。

水中でも陸上でも良く見えるモーケン族の調節も眼軸が 30mmまで伸縮すると考えると説明可能。



## 4. 外眼筋で調節する模型作り

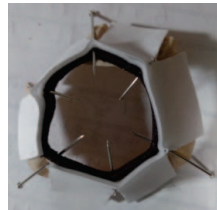


・ピンポン玉に水晶体＋虹彩を入れ角膜で蓋をし、外眼筋をつけ、斜筋部分に虫ピンを差して水晶体を変形変位できるか試みた。

・毛様体、チン小帯のモデルは、川守田 15)、孫・牧野内 16)同様の、棒状のものとして虫ピンで模したものと、金網状のものを想定した。



・ヒトの眼球の倍程度の大きさのボールに棒状の虫ピンで模したチン小帯に輪ゴムで模した毛様体とした水晶体を入れたものと、一部網状のとしたのを入れ、外眼筋はステンレス針金を入れたりモールを編んだり丈夫にしペットボトルで作った漏斗に入れた模型も作成した。



## 5. 力学(有限要素法)解析

矢部・川口・孫ら(2002)12)の網膜剥離手術後の眼球変形シュミレーションによると、眼圧

3.75mmHg=500Pa=5×10<sup>-4</sup>N/mm<sup>2</sup>に釣り合う球面に

垂直な圧力で強膜パッキングを行った(右上図より眼軸が2～3mm延伸)として、球殻にかかる応力は(眼球後部半径d=11.842mm、強膜等厚さt=1mm)

$$\sigma_p = P \cdot d / (4t) = 5 \times 10^{-4} \times 11.842 / (4 \times 1) = 1.48 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$$

上下眼筋の当る面積を5×10mmとすると、0.074Nとなり、川守田(2015)13)が調節型眼内レンズを変形させるのに全周にかけた0.07Nとほぼ一致する。

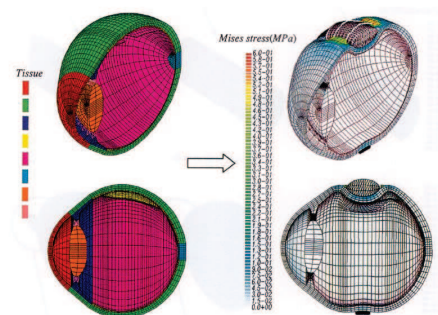


Fig. 8 Computer simulation for retinal detachment operation using 3-D FEM. Subretinal fluid shown in yellow area is moved by buckling operation.

# FreeCAD Caliculexによる解析試行

孫ら14)15)による液体で満たされたモデルを参考に  
川守田13)の水晶体皮質のヤング率3417N/m<sup>2</sup>を用い

FreeCAD Caliculexによる解析をFreeCADのYoutubeチューター堀尾和彦のモデル作成で試  
行した。ポアソン比はチン小帯のみ0.01、他は0.45で入力した。

⇒材料が、ゴムでも1MPa/m<sup>2</sup>なのに、強膜でも83300Pa/m<sup>2</sup>

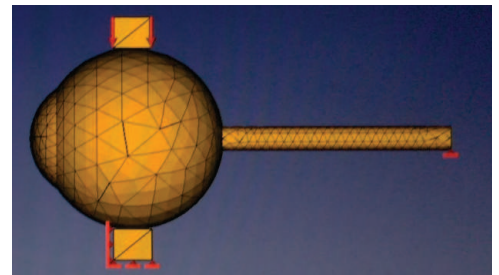
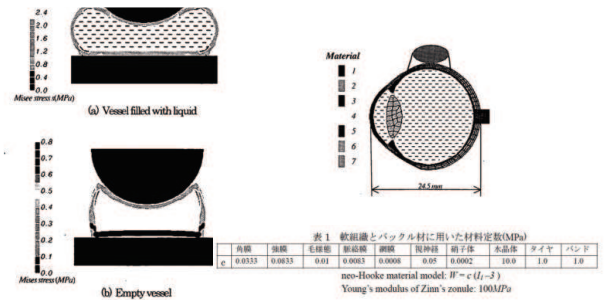
と柔らかいので、解析の対応外か？解析しよう

と何回も固定材料値入れてもFalseになってしまう。

⇒生体シュミレーションを行った理研等での対応

か医大等との共同研究を望みます。

⇒外眼筋調節が定説になれば、教育用3D模型にはFreeCADデータも使えるかも？



## 参考文献等

- 1)森本安夫:眼の遠近調節に関する新理論について,明治鍼灸大学 第9号,77-87,1990.
- 2)Sigeo Yomosa and Sadayoshi Kamiya: Geometric Optical Formula on Accommodation in Human Eye, J. Phys. 80c. Jpn. 59(10), 3765-3779, 1990.
- 3)D.Hosack: Phil. Trans.84,(1794) 196-216.
- 4)T.Young: Phil. Trans.91(1801) 23-88.
- 5)W.H.Bates,松田好子訳:ペイツ・メソッド:眼科学会が今も無視を続ける目の真実について Amazon Kindle 版,49-57,2021
- 6)植村佐知子:偽水晶体眼における偽調節に関する研究, 奈医誌, 40,650-656, 1989
- 7)山口華奈子・堀部円・魚里博・清水公也:近見作業に伴う眼軸長、前房深度の変化, 日本視能訓練士協会誌 第34巻,115-119,2005
- 8)Edward A. H. Mallen; Priti Kashyap; Karen M. Hampson.:Transient Axial Length Change during the Accommodation Response in Young Adults, Visual Psychophysics and Physiological Optics, March 2006
- 9)中嶋康幸:あたらしい調節の概念( Dynamic biomechanical model) <http://www.nakashima-eye.or.jp/acommo.html>, 2014
- 10)Leon N Davies and Deborah S Laughton\* and Amy L Sheppard and Edward A H Mallen† and Scott A Read:Does transient increase in axial length during accommodation attenuate with age?, Clinical and Experimental Optometry 100: 676-682,2017;.
- 11)原直人,小野里規子:老視の発症メカニズムと近見反応の変化, 第71回日本自律神経学会 56,,89-92,2019.
- 12)矢部比呂夫,川口龍平,孫智剛,横田秀夫,牧野内昭武:各種眼科疾患におけるシミュレーション, MEDICAL IMAGING TECHNOLOGY Vol.20 No.6,639-646
- 13)川守田拓志:新しい調節性眼内レンズ開発を目的としたヒト水晶体3次元力学シュミレーション解析, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 2015.
- 14)孫智剛,牧野内昭武,矢部比呂夫:実用化に向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, 理研,2002.
- 15)孫智剛,牧野内昭武:超弾性体と静止液体の連成解析 FEMプログラムの開発及び眼球網膜剥離手術シミュレーションへの応用, 日本機械学会論文集 (A編)68巻666号、357-363,2002

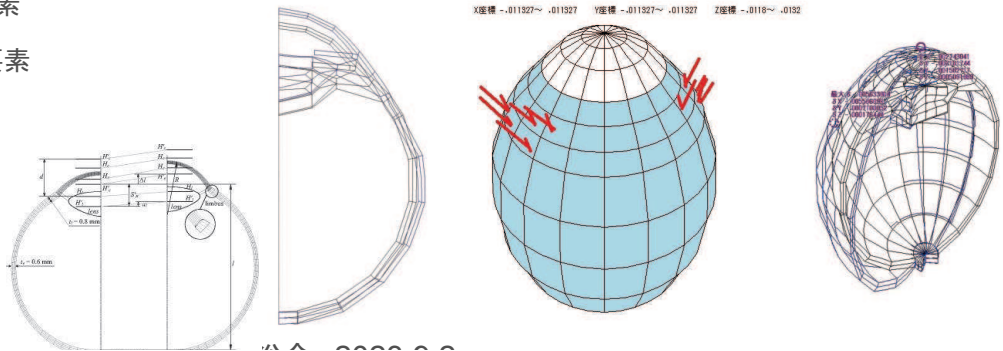
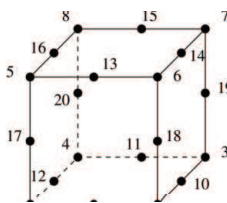
- 有限要素法解析によっても近見時は斜筋位置への外力による眼球変形

孫ら・川守田の眼球各部物性値(ヤング係数 水晶体核3417Pa、強膜83300Pa、水晶体囊・チン小帯1MPa、ポアソン比水晶体囊・チン小帯0.01、他0.45等)、Srodka1)の輪部から毛様体水晶体のモデルで算生会ソフトを用いた2次元(軸対称)3次元(バンドマトリックス法、スカイライン法)の有限要素法解析によっても近見時は斜筋位置への外力で同様の+0.5mm程度の眼軸長の変化(観察値より1桁大)と水晶体の変位変形(観察値の0.数mmより小)を見ることができた。

2次元 8測点四角形要素

3次元 20測点六面体要素

(1辺に3ガウス積分点)

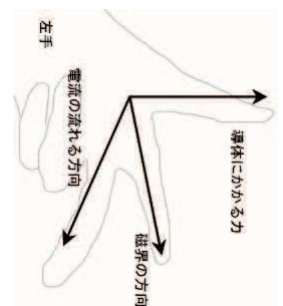


## ・毛様体による加力のみで水晶体を変形させられるか？

水晶体を変形させる力は、川守田の調節型人工水晶体(報告書では2Dまで)より、0.07Nとして、有限要素法解析においては斜筋が存在する部分に加力した。これは眼球形状を数ミリは変形させる力である。水晶体の模型を作って歪みなく変形するには磁力が必要とも言われている。心臓が生み出す生体磁力は10T(テスラ)で、脳に流れる血液はその1/5で、両眼に半分ずつ行きわたり、 $B=1T$ の磁力が眼軸方向にかかり、水晶体を小さく厚くする方向にかかると思えば周囲の輪になっている部分に

$$F=B \cdot I \cdot \ell$$

$\ell=0.06m$ として、 $I=1A$ 以上が輪に流れることになる。1Aとはバスポンプに流れる電流で、塩味が1.5倍濃くなる(イグノーベル賞)0.5mAより3桁大きい。

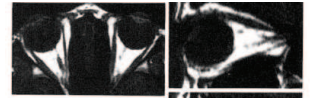


# 光学計算、有限要素法解析結果からの調節時に眼球変形の検証の手法

## ・全眼球の調節時の画像撮影

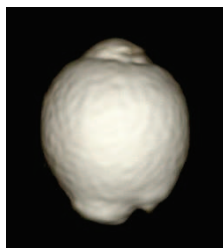
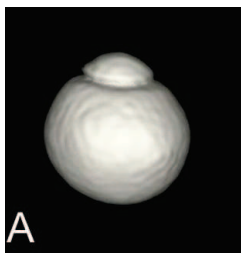
CTは角膜～水晶体と、眼底付近のみ

MRIによる全眼球の撮影実績、眼球運動(+外眼筋)2)、  
眼軸長比較 3)、後部ぶどう腫(+視神経)4)



⇒3)新潟大学脳科学センター(文科省中核拠点)には研究用ヒトMRIが3台あり、有機EL照明は磁気反応しないそうだが、調節時の全眼球形状を撮影するところは見つかっていない。

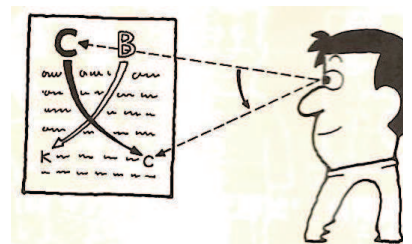
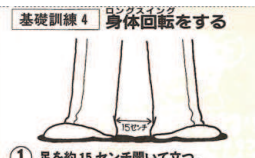
正視者 強度近視後部ぶどう腫患者(+視神経) 大野京子ら4)より



## ・外眼筋調節関与と視線移動

不同視の左右眼で分光感度の時間に差があること5)、固視微動により物が見えること6)も分かっている。

外眼筋調節関与を論拠とするベストセラー・ペパード博士の視力回復マニュアルには、中心固視、一行ずつまばだきをして本を読む、身体回転をすることで眼に入る光景が飛び込んでくる様にする、横8の字に視線移動をするのがある。



## アイトラッキング対応VRゴーグルで体得できるか？

一体で組み込める機種:PICO4Enterprise、PICO Neo3 pro eye(14万円前後)

VR-Lite等のソフトや、解析で用いた座標等の3DCADへの読込方法は判明。

外眼筋を低周波でほぐすCatch-iが小型のES波形を用いたものを年末に12万円で発売予定

眼底写真から球面屈折度等を推定するAI開発を進める三橋俊文(帝京大)によると正視者と近視者で眼底のフォーカス位置が異なる(眼科学会59回総会)

⇒MRIで調節時の全眼球(+外眼筋、視神経)形状変化の撮影を実現するため、

- ・アイトラッキングを体得
- ・有限要素法解析精度を病変等を再現できるよう高める

## Tobii アイトラッカー5 視線移動ゲームの体得



自然なターゲティングゲーム⇒Catch-i⇒自然なターゲティングゲーム

60代男(正視→老眼・免許更新時視力に不安) 瞳孔間2mm画面まで60cm 384⇒一瞬486? 後384

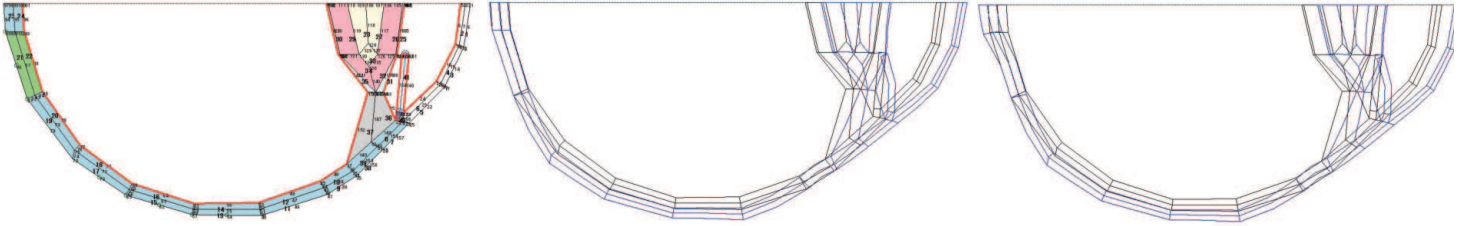
60代女(近視→白内障低加入レンズで正視) 瞳孔間63mm画面まで62cm 384⇒384

※目の周り、頭はCatch-i直後1時間(夜寝る前なら翌朝午前中)スッキリし、反応時間は早くなった様に感じられるが、ゲームに慣れていないためか、得点差は明確には出なかった。



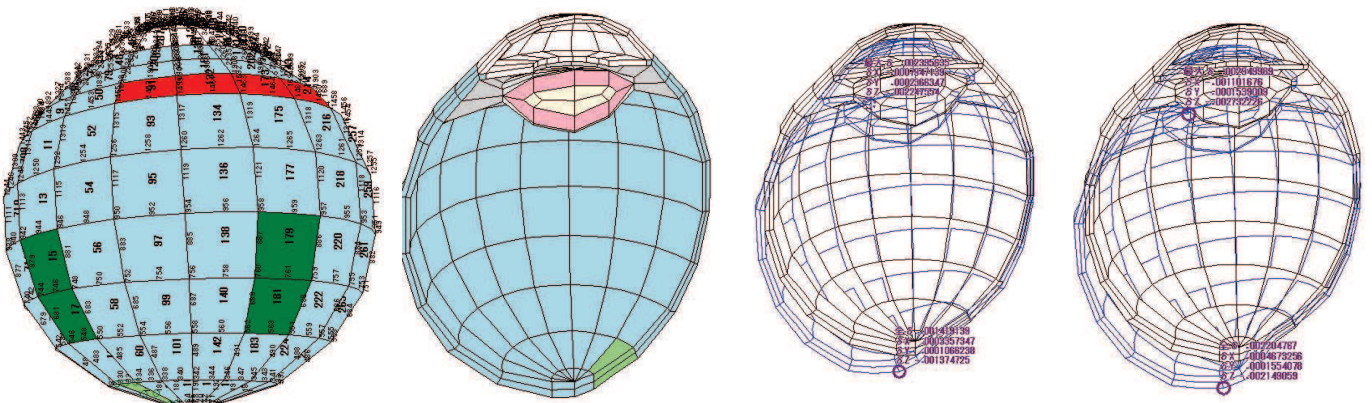
## 有限要素法解析の精度向上

- ・視神経の位置が直下でないことを、材質と拘束に反映した。
- ・副毛様体神経節によることが判明している(口岩、鹿児島大学)虹彩を位置拘束でなく、前房全体に房水圧と、バネ支持にした(虹彩が曲がらず伸長は未実現)。
- ・近見時には眼球に加力しないと考えられる直筋(外眼筋)と視神経の位置で位置拘束(変動限界は加減)とし、視神経拘束の弱い場合も比較した。



2次元軸対称では、0.5mm程度角膜や水晶体が前に出るのが、視神経拘束が弱いと、後方へも延伸変形することが判明した。最大応力はチン小帯水晶体接触部。

## 3次元解析でみられたのは後部ぶどう腫の再現??



3次元解析では同じ外力でも非拘束の部分が後方に変形するが、角膜頂部から底の黄斑と考えられる箇所までの距離は、視神経拘束の弱い場合0.68mm、強い場合0.30mm延伸となった。3次元解析で最大応力となるのは、拘束された視神経の部分であった。

## 結論

- ・ヒトの眼の調節は、光学計算、有限要素法解析、毛様体や虹彩周囲の輪状筋肉の原動力を磁力とした場合の考察から、外眼筋も関与していると考えられる。
- ・有限要素法解析では、外眼筋である斜筋の箇所で見調節時に力がかかっているとすると、眼球形状が0.数ミリ変形し、視神経等の拘束条件によってはより眼軸長が後方に伸びたり、後部ぶどう腫に類似した歪な変形もみられたりする。
- ・外眼筋の加力による眼球変形による視線方向・移動速度が変わるかどうかは、視線ゲームの得点でもある程度判明すると考えられるが、  
調節時の眼球形状変形が全眼球及び外眼筋のMRI撮影により確認できるなら、視線移動数値化、VR機器への組込効果へ進めることができる。

ご清聴ありがとうございました。

## <参考文献> 冬季大会発表以降

・算生会:黒田英夫(プラスチック成形関係の設計・研究に従事後、パソコン技術計算ソフトの開発・販売を実施)による

1)Wiesław S ´ródka, Barbara K. Pierscionek:Effect of material properties of the eyeball coat on optical image stability,Journal of Biomedical Optics 135, 054013 September/October 2008

2)稲富昭太(滋賀医科大学)ら:磁気共鳴画像(MRI)による眼球運動の研究とその応用(第96回日本眼科学会総会 特別講演)、日眼会誌96巻12号、1532~1556、1992

3)渡辺将樹・木竜徹(新潟大学):3次元MRIによる人眼軸長自動測定、生体医工学9(1)、11-16、2011

4)東京医科歯科大学・大日本印刷:日本人に多い「病的近視」の原因が眼球の変形や異常にあることを3D MRI画像解析により解明、TMDUプレスリリース、2012.10.11

5)佐藤雅之・内川恵二(東京工業大学):不同視の左右眼におけるサッケード時の分光感度の時間変化の違い、講演要旨(VISIONVol. 5, 1993)

6)金子寛彦(東京工業大学):知っておきたいキーワード固視微動、第46回