

## 加齢による脳形状の変化が頭部外傷発生メカニズムに及ぼす影響に関する研究

代表研究者 長野工業高等専門学校 助教 穴田 賢二

### 【まとめ】

実人体の構造および形状に忠実に加齢による脳萎縮を再現した頭頸部実体モデルを構築した。また、回転運動時の頭蓋骨と脳の相對運動を可視化可能な実験環境を構築した。さらに、上述した頭頸部実体モデルを用いて実験を行うことにより、加齢による脳萎縮は頭蓋骨と脳の相對運動量に影響を及ぼすことを明らかにした。

### 1. 研究の目的

日本国内における交通事故死者数は、様々な安全対策などにより年々減少傾向にある。しかしながら、2014年の交通事故による死者数は今なお4000人以上も存在する<sup>(1)</sup>。このことから、さらなる交通事故死者数の削減が求められている。ここで、交通事故による死者の主な損傷部位は、頭部がおおよそ半数を占めていることから、交通事故死者数削減において頭部の保護対策は重要な課題の一つであるといえる。さらに日本国内では、昨今少子高齢化が加速的に進んでおり、今後もこの傾向は継続していくことが見込まれている。交通事故の死亡者においては、総死者数に占める65歳以上の高齢者の割合は全体のおよそ半数であることから、交通事故死者数を削減するためには、高齢者を対象とした対策および安全性評価を行うことが重要と考える。

交通事故において人間を保護する、ヘルメットやエアバックなどの防護用品の開発時の安全性評価ツールとして、人体有限要素モデルが用いられている。しかしそれらは主に成人を対象としたモデルとなっている。一方で、人間の頭部は加齢に伴い、頭蓋骨や脳組織などの材料特性および脳形状が変化することが知られている。材料特性については、過去の研究結果より機械的性質が低下する傾向にある。一方で脳形状は、脳全体の萎縮、脳室および脳溝の拡大が生じることが明らかになっている。しかし、このような脳形状の変化が頭部外傷発生メカニズムおよびリスクに与える影響は明らかにされていない。これら影響を明らかにすることは、高齢者を対象とした人体有限要素モデルの開発方針を策定する上

で重要であり、高齢者を対象とした保護対策の開発にも大きく寄与することが考えられる。

これまで本研究グループでは、人体の頭部形状および構造を忠実に再現した頭部実体モデルを構築し、脳の変形挙動計測を行ってきました。そこで本研究では、この技術を活用し、加齢による脳形状の変化が頭部外傷発生メカニズムおよびリスクに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。今年度は、脳全体の萎縮が急性硬膜下血腫の発生リスクに及ぼす影響に着目し、研究を実施した。

### 2. 研究方法

#### 2-1 頭頸部実体モデルの構築

本研究で構築した頭頸部実体モデルは、実人体形状・構造を再現した頭部実体モデルと前方衝突時の人体頸部特性を再現可能な頸部モデルにより構成される。頭部実体モデルは頭蓋骨、脳、膜構造および脳脊髄液を模擬したものである。

頭蓋骨モデルは、まず、成人男性の頭部CT画像から頭蓋骨の外形状を抽出し、その領域を重層することで、三次元頭蓋骨ポリゴンモデルの作成を行った。次に、そのモデルに対して表面のスミージングなどの処理を行い、CADデータへと変換を行い、三次元頭蓋骨CADモデルを作成した。そして、CADモデルの横断面にて、脳モデルを挿入できるように切断を行い、そのデータを用いてポリカーボネートに機械加工を施すことで、頭蓋骨モデルの製作を行った(図1)。

脳モデルは、頭蓋骨モデルと同一被験者の頭部MR画像から脳の形状を抽出し、その領域を重層し、スミージング処理を行い、三次元脳ポリゴンモデルの作成を行った。脳のポリゴンデータを、光造形装置(AGILISTA-3110:KEYENCE)に入力し、脳の型を製作した。この型に黒色に着色したシリコンゲル(Sylgard527:東レ・ダウコーニング株式会社)を注入し、硬化させることで脳モデルの製作を行った。本研究で製作した脳モデルは、左右大脳、小脳および脳幹が再現されたモデルとなっている。なお、本研究で用いたシリコンゲルは、実人体の脳と動的粘弾性特性およ

び密度がほぼ等しく、過去の研究<sup>(2)</sup>においても多く用いられている。以降、本脳モデルを用いた頭頸部実体モデルを成人頭頸部実体モデルと定義する。(図2)

頸部は、自動車の安全性評価に用いられるダミー人形(Hybrid-III 50th Percentile Male: Humanetics)の頸部を用いた(図3)。

加えて、脳の変形挙動を拘束する大脳鎌と小脳テントモデルをシリコン系接着剤を用いて頭蓋骨モデルに貼付した。大脳鎌および小脳テントモデルには、実人体の硬膜とヤング率および厚さが等価なポリウレタンシートを用いた。また、形状はMR画像および解剖学書を参考に再現した。

次に、脳モデルを頭蓋骨モデル内に挿入し、接合を行った。その後、後頭部に取り付けたコックより水を注入し、頭蓋骨モデル内を水で満たした。これにより、頭部実体モデルを構築した。また、図4に示すように、頭蓋骨モデルの後頭部底面形状を有する頭頸部接合部を製作した。なお、頭頸部接合部はジュラルミンブロックに加工を行うことで製作した。この頭頸部接合部を用いて、頭部実体モデルおよび頸部をボルトで締結することで、頭頸部実体モデルを構築した。(図5)

さらに、本研究では、加齢による脳萎縮が頭部外傷発生メカニズムを明らかにするため、脳萎縮を考慮した脳モデルを製作した。上述した脳ポリゴンモデルをもとに、スケーリング変換を行うことで体積が10%減少した脳ポリゴンモデルを作成した。なお、過去の研究によれば、脳体積の10%減少は25歳程度加齢が進んだことに相当する<sup>(3)</sup>。作成した脳モ

ポリゴンモデルは上述した脳モデルと同様な製作手順を踏んで、頭頸部実体モデルを構築する。以降、同脳モデルを用いた頭頸部実体モデルを加齢頭頸部実体モデルと定義する。

## 2-2 実験装置

急性硬膜下血腫は頭部の並進運動よりも回転運動に伴い、発生することが明らかにされている<sup>(4)</sup>。そこで本研究では、頭頸部実体モデルに回転運動を付与可能な実験装置を構築した。図6に本研究で構築した実験装置を示す。頭頸部実体モデルをスライダ部に取り付け、スライダ部を引張ることでバネを圧縮させる。バネの弾性エネルギーによりスライダ部を射出し、スライダ部がショックアブソーバに衝突することで、頭頸部実体モデルには矢状面上の回転運動が付与される。なお、バネの圧縮量、ショックアブソーバの位置およびエネルギー吸収特性を変更することで、様々なレベルの回転運動を頭頸部実体モデルに付与可能とした。

## 2-3 計測方法

急性硬膜下血腫は架橋静脈の破断により発生するため、そのリスクを評価するためには、頭蓋骨と脳の相対運動を計測する必要がある。そこで本研究では、頭頸部実体モデルに回転運動を付与した際の頭蓋骨および脳の相対運動の計測および頭部実体モデルに生じる回転運動の計測を行った。



図1 頭蓋骨モデル



図2 脳モデル



図3 頸部モデル

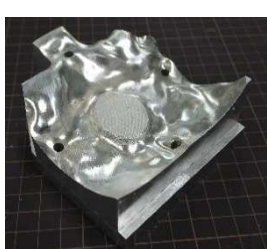


図4 頭頸部接合部



図5 頭頸部実体モデル

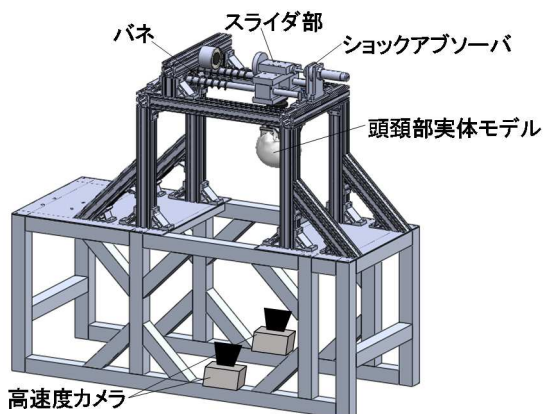


図6 実験装置

### 2-3-1 頭蓋骨と脳の相対運動

頭蓋骨と脳の相対運動を計測するため、頭蓋骨および脳にマーカを塗布し、その三次元挙動計測を行った。図7に頭蓋骨および脳表面に塗布したマーカを示す。

2台の高速カメラ（Miro-ex2：Vision RESEARCH）を頭蓋骨と脳の相対運動を撮影可能な位置に配置し、1000fpsの条件で頭頸部実体モデルの挙動を撮影した（図6）。撮影した映像を元に、Direct Linear Transformation（DLT）法により、マーカ位置を三次元座標系に変換し、三次元変位履歴を算出した。なお、算出した三次元変位は、5点の単純移動平均により平滑化を行った。また、三次元変位から、頭蓋骨と脳の相対運動の評価パラメータとして二点間伸長比 $\lambda$ を算出した。

$$\lambda = \frac{l}{l_0} \quad (1)$$

ここで、 $l$ はマーカ部位間距離、 $l_0$ はマーカ部位間初期距離である。

### 2-3-2 頭部回転運動

頭部実体モデルに生じる矢状面上の頭部回転運動は、頭部実体モデルに取り付けた角速度計（ARS-12K：DTS）により計測を行った。サンプリング周波数は1kHzとした。なお、スライダ部とショックアブソーバの衝突面にタッチスイッチを設け、電気計測系と高速カメラの時間的同期を行った。

## 3. 研究結果

### 3-1 頭部回転運動と頭蓋骨と脳の相対運動の時刻歴

一例として、図8に成人頭頸部実体モデルの矢状面上に生じた角速度および頭蓋骨と脳の二点間伸長比の時刻歴波形を示す。図9には、同一条件で加齢頭頸部実体モデルを対象とした結果を示す。なお、図8および図9に示した時刻歴波形は同一条件で5回

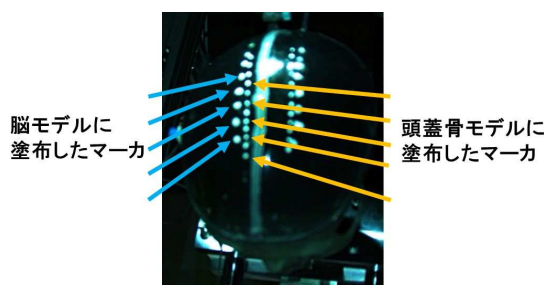


図7 マーカ塗布位置

の実験を行い、ばらつきの少ない3回を平均化した値である。また、頭頂部に塗布したマーカの結果を示す。

両モデルともにスライダが射出されたことにより、頸部が伸展し、頭頸部実体モデルにはおよそ-10rad/sの角速度が生じている。その後、スライダ部がショックアブソーバに衝突することで、頸部が屈曲し、頭頸部実体モデルにはおよそ10rad/sの角速度が生じている。また、頭頸部実体モデルに生じた回転運動により、頭蓋骨と脳に相対運動が生じ、二点間伸長比にも変化が生じている。頸部が伸展時には伸長比が負の値となり、屈曲時には正の値が生じている。ここで、頸部が伸展および屈曲時において、頭頸部実体モデルにはどちらも10rad/sの角速度生じている。しかしながら、頭蓋骨と脳の二点間伸長比は屈曲時の方が大きいことがわかる。このことから、頭蓋骨と脳の二点間伸長比には角速度の変化量が強く影響を及ぼすと考えられる。

### 3-2 加齢による脳萎縮が頭蓋骨と脳の相対運動に及ぼす影響

図10には、頭頸部実体モデルに様々な回

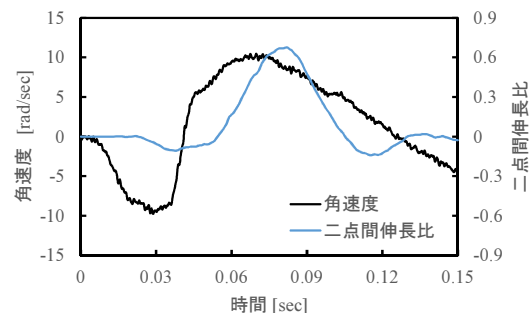


図8 成人頭頸部実体モデルにおける角速度および頭蓋骨と脳の二点間伸長比の時刻歴

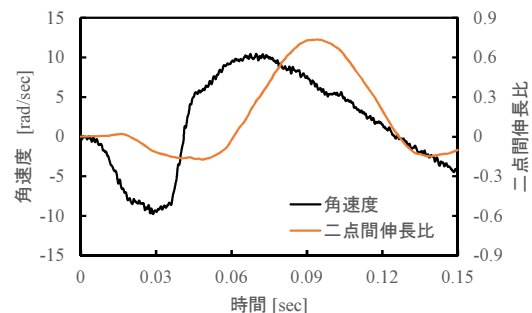


図9 加齢頭頸部実体モデルにおける角速度および頭蓋骨と脳の二点間伸長比の時刻歴

転運動を与えた際の成人頭頸部実体モデルおよび加齢頭頸部実体モデルに生じる頭蓋骨と脳の二点間伸長比の最大値を示す。なお、本結果も頭頂部に塗布したマーカの結果を示した。また、本研究および過去の研究により、頭蓋骨と脳の二点間伸長比には、頭部に生じる角速度変化幅が強く影響を及ぼすことが明らかとなっているため、同図の横軸は角速度変化幅とした。ここで、角速度変化幅とは、衝撃により頭部に生じる最大角速度と最小角速度の差と定義する。

図 10 より、いずれの角速度変化幅においても加齢頭頸部実体モデルで生じる頭蓋骨と脳の二点間伸長比の方が大きいことがわかる。頭蓋骨と脳の二点間伸長比が増加したということは、架橋静脈の破断リスクが上昇することに繋がる。これは、脳の体積が減少したことにより頭蓋骨の脳の間隙が広がり、頭部に回転運動が付与された際の脳の運動範囲が大きくなったことが影響したと考えられる。一方で、角速度変化幅の二点間伸長比の最大値に対して一次の回帰分析を行った結果、両モデルともに高い正の相関関係であることがわかった。さらに、両モデルともにおおよそ同じ傾きを示すことがわかった。このことから、単に脳萎縮の影響を考慮することに着目すれば、成人モデルの結果を補正することでその影響を補える可能性があると考えられる。しかしながら、本結果は、頭部に加わる回転運動の時刻歴波形および脳萎縮の進行具合などにも影響することが考えられ、今後さらなる検討が必要である。

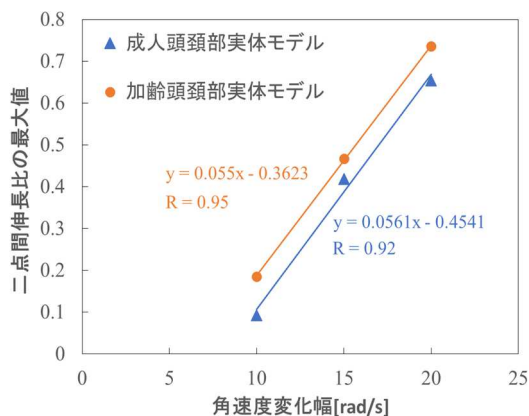


図 10 成人および加齢頭頸部実体モデルにおける角速度変化幅と頭蓋骨と脳の二点間伸長比の最大値の関係

以上の結果より、加齢による脳萎縮は急性硬膜下血腫の発生リスクに影響を及ぼすことが示唆される。このことから、高齢者を対象とした安全性を評価するためには、加齢による脳萎縮の影響を考慮する必要があると考える。

#### 4. 今後の課題

今後の課題として以下のことが挙げられる。

- 1) 本研究結果について、さらなる分析を進めると共に、脳萎縮がびまん性軸索損傷など他の頭部外傷に及ぼす影響について検討する必要があると考える。
- 2) 今年度は対象としなかった加齢による脳形状の変化である、脳室の拡大および脳溝の拡大が頭部外傷発生メカニズムおよびリスクに及ぼす影響を明らかにする必要があると考える。

#### 5. 研究成果の公表方法

本研究の成果は、自動車の衝突安全分野およびバイオメカニクス分野に関する学会で発表し、学術論文として投稿することを予定している。

#### 6. 参考文献

- 1) 公益財団法人交通事故総合分析センター、交通事故統計年報 平成 26 年版, (2016)
- 2) 例えば, Ivarsson J, Viano C, Lövsund P and Aldman B, “Strain relief from the cerebral ventricles during head impact: experimental studies on natural protection on the brain”, *Journal of Biomechanics*, Vol.33, (2000), pp.181-189
- 3) Yasuyuki Taki, et al., “Voxel-based morphometry of human brain with age and cerebrovascular risk factors”, *Neurobiology of aging*, Vol.25, (2004), pp.455-463
- 4) Gennarelli TA, Thibault LE, “Biomechanics of acute subdural hematoma”, *Journal of Trauma*, Vol.22, (1982), pp.680-686

以上