

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：53301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14849

研究課題名（和文）頸部の筋緊張状態が回転運動における頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響の解明

研究課題名（英文）Clarification of the effect of the state of muscle tone in the neck on the risk of head injury in rotational motion

研究代表者

穴田 賢二（Anata, Kenji）

石川工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号：30756531

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究ではまず、剛体運動シミュレーション解析を実施することにより、頸部の筋緊張状態が影響する衝撃条件について、検討を行った。その結果、低衝撃条件において、頸部の筋緊張状態が頭部回転運動に影響を及ぼすことを明らかにした。次に、シミュレーション解析手法を用いて、頸部の筋緊張状態を変化可能な頸部実体モデルの開発を行った。さらに、これまでに開発した頭部実体モデルを組み合わせることにより、頸部の筋緊張状態を変化可能な頭頸部一体型実体モデルの開発に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

頭部外傷に関する工学的研究は多く行われてきた。しかし、多くは頭部のみをモデル化したものであった。本研究では、頸部の筋緊張状態を変化可能な機能を有する頸部モデルを開発し、衝撃時の頭蓋内挙動を可視化可能な頭部モデルと組み合わせることで、頭頸部一体型実体モデルを開発したことに学術的な意義がある。さらに、同モデルを用いることで、頭部外傷発生リスクをより精度良くを評価することが可能となり、頭部外傷による死傷者削減に繋がることが社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：First, this study clarified the impact conditions that affect the state of muscle tone in the neck by conducting a rigid-body motion simulation analysis. Next, the simulation analysis method was used to develop the neck entity model that can change the state of muscle tone in the neck. Furthermore, in combination with a head entity model developed by the applicant in the past, we succeeded in developing an integrated head and neck entity model that can change the state of muscle tension in the neck.

研究分野：生体力学

キーワード：頭部外傷 実体モデル

1. 研究開始当初の背景

交通事故、スポーツ事故、転倒・転落事故など様々な外力条件において頭部外傷が発生している。これら頭部外傷を防ぐためには、外傷の発生メカニズムを明らかにし、それに基づいた防護策の検討を推進する必要がある。衝撃を受けた頭部には、並進運動や回転運動が生じ、これら頭部の運動によって、頭部外傷が惹起される。このうち回転運動は、びまん性軸索損傷や急性硬膜下血腫といった重篤な頭部外傷の発生要因であることから、近年は特に回転運動における頭部外傷の発生メカニズムに関連した研究が多く行われてきた。しかし、これまでの研究に用いられてきた頭部モデルは、いずれも頭部のみをモデル化したものであった。

実人体においては、頭部は頸部と繋がっており、衝撃を受けた際の頭部の回転中心は頭部と頸部の連結位置となり、頭部単体の場合とは異なる。申請者のこれまでの研究成果より、「頭部の回転中心位置は、頭部外傷発生リスクに影響を及ぼす」ことを明らかにしており、回転運動における頭部外傷発生メカニズムの解明において、頸部の存在は重要である。さらに、生体実験によって、低衝撃において、筋が緊張または非緊張によって、身体挙動が異なることが明らかにされた。申請者はこれまでに、「頭部に加わる角速度変化幅（最大角速度と最小角速度の差）とびまん性軸索損傷の発生要因である脳深部でのひずみおよび急性硬膜下血腫の発生要因である頭蓋・脳間の相対運動には、強い正の相関関係にある」ことを明らかにしている。従って、頸部の筋緊張状態が回転運動時の頭部外傷の発生リスクに影響を及ぼすことが示唆されるが、解明には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、頸部の筋緊張状態が回転運動時の頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、以下の2つの課題を設定する。

- (1) 様々な衝撃レベルにおける頸部の筋緊張状態と頭部の回転運動の関係の明確化
- (2) 頸部の筋緊張状態が回転運動における頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響の解明

3. 研究の方法

- (1) 様々な衝撃レベルにおける頸部の筋緊張状態と頭部の回転運動の関係の明確化

様々な衝撃レベルにおける頸部の筋活性度と頭部の回転運動の関係を明らかにするため、頭頸部剛体解析モデルを用いたコンピュータシミュレーション解析を実施した。頭頸部剛体解析モデルには、TASS社のActiveHumanモデルを用いた(図1)。同モデルは、頸部周りの筋がモデル化されており、筋の活性度を変更することが可能である。さらに、多くの実験データとの比較を行い生体忠実性が検証されている。なお、解析ソフトウェアには、MADYMOを用いた。

本研究は、頸部の筋緊張状態と頭部の回転運動の関係を明確にすることを目的としている。そこで、T1より下肢側のジョイントについては完全固定した条件で解析を行った。頸部の筋緊張状態については、筋緊張度を表すパラメータを0~1の間で0.1ごとに設定した。なお、頸部の筋肉を表現するモデルは複数存在するが、本研究では、全て同一の筋緊張度とした。また、衝撃条件は、初速度、減速度の持続時間、衝撃方向(前方、後方、側方)をパラメータとした(表1)。

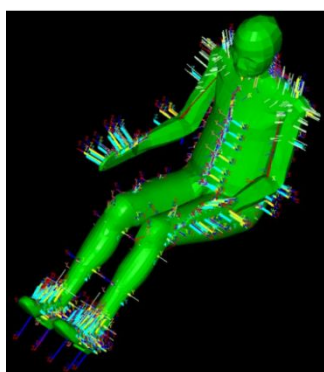


図1 ActiveHumanモデル

表1 解析条件

初期速度[m/s]	衝撃方向	減速時間[s]	筋緊張度
1~10	前方	0.03	0~1
		0.05	
		0.07	
1~10	後方	0.03	0~1
		0.05	
		0.07	
1~10	側方	0.03	0~1
		0.05	
		0.07	

- (2) 頸部の筋緊張状態が回転運動における頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響の解明

申請者はこれまで、回転運動に起因する頭部外傷の発生メカニズムを解明するために、頭部医用画像と機械加工・光造形技術を組み合わせることで、頭蓋内の構造、複雑な脳形状および頭蓋骨と脳の相対運動を再現した頭部実体モデルの構築手法を開発した。同モデルは、コンピュータ

シミュレーション解析と比較して、頭蓋骨と脳の相対運動を正確に再現可能である。しかしながら、申請者がこれまで開発した頭部実体モデルも、他の研究と同様に頭部のみをモデル化したものであった。

そこで本研究では、頸部の筋緊張状態を変化可能な頸部実体モデルを開発し、これまでに開発した頭部実体モデルと組み合わせることで、頭頸部一体型実体モデルを開発することとした。さらに、同モデルを用いることで、頸部の筋緊張状態が回転運動における頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響の解明を目指す。

頸部実体モデルの開発プロセスを図 2 に示す。本研究では、効率的に頸部実体モデルを開発するために、剛体運動シミュレーション解析手法を用いる。はじめに生体実験から得られた衝撃時の挙動と一致するような頭頸部一体型シミュレーションモデルを作成する。同モデルの頸部は、複数のバネ要素から構成されており、バネ要素の取り付け位置・角度、バネ定特性をパラメータとして、生体実験の挙動と一致するように、パラメータスタディを行った。なお、解析ソルバーには、MotionView (Altair 社) を用いた。次に、頭頸部一体型シミュレーションモデルを基に、頭頸部一体型実体モデルの製作を行った。ここでは、シミュレーションモデルから得られた知見を基に、具現化可能な頭頸部一体型 CAD モデルを作成し、同モデルを基に頭頸部一体型実体モデルの製作を行った。最後に、同モデルに生体実験と同様の衝撃を付与し、生体忠実性の検証を行った。

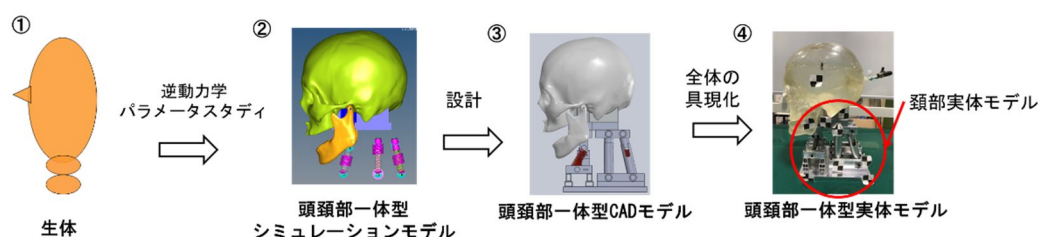
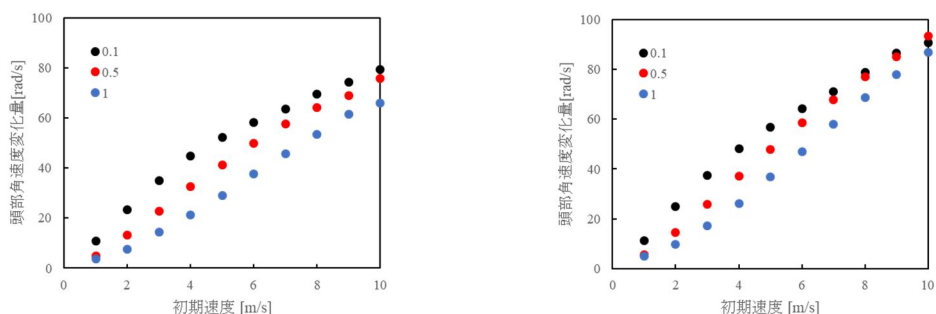


図 2 頸部実体モデルの開発プロセス

4. 研究成果

(1) 様々な衝撃レベルにおける頸部の筋緊張状態と頭部の回転運動の関係の明確化

図 3 にシミュレーション解析結果の一例を示す。同図は衝撃方向を前方として、初期速度および頸部の筋緊張度を示すパラメータを 0.1, 0.5, 1 と変化させた際に頭部で生じた最大角速度変化量を示している。ここで、頭部で生じる最大角速度変化量は、脳で生じるひずみと相関関係があることから頭部の外傷発生リスクの評価パラメータと成りうる。また、頸部の筋緊張は 0 が非緊張状態、1 が筋緊張状態である。同図より、頸部の筋緊張状態によって、頭部の最大角速度変化量が異なることがわかった。一方で、初期速度が早いほどその差は小さくなり、初期速度が遅いほどその差は大きくなることがわかった。なお、減速度の持続時間が長い場合 (図 3(b)) も同様の結果であり、その他条件においても同様の傾向を示すことがわかった。このことから、頸部の筋緊張状態は頭部の回転運動に影響を及ぼすことが明らかとなり、特に衝撃速度が比較的低速においてはその傾向は顕著であることがわかった。なお、柔道の投げ技によって生じる衝撃速度は本シミュレーション条件の範囲内であることから、柔道における頭部外傷を評価する際には、頸部の筋緊張状態が評価に影響を及ぼすことが示唆される。



(a) 減速度の持続時間 0.03sec

(b) 減速度の持続時間 0.07sec

図 3 頸部の筋緊張状態と頭部の回転運動の関係 (シミュレーション解析結果)

(2) 頸部の筋緊張状態が回転運動における頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響の解明

開発した頭頸部一体型実体モデルを図 4 に示す。同モデルの頭部は、頭蓋骨モデルと脳モデルから構成されている。頭蓋骨モデルは、シミュレーションモデルと同様の形状を有しており、成人男性の頭部 CT 画像から抽出した形状を基に、ポリカーボネートを用いて製作されている。

脳モデルも頭蓋骨モデルと同一人物の MR 画像から抽出した脳形状を基に脳モデルの型を製作し，その型にシリコンゲル (Sylgard527:Diw Cirning Corp.) を注入・硬化させることで構築されている．さらに，頭蓋骨モデル内に脳モデルを挿入し，頭蓋骨モデル内を脳脊髄液を模擬した水で満たすことで，頭部実体モデルを構築した．なお，同モデルは透明であり，頭蓋内挙動を観察可能である．

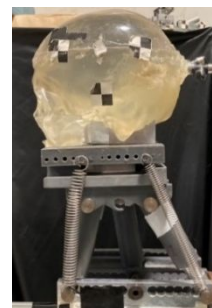
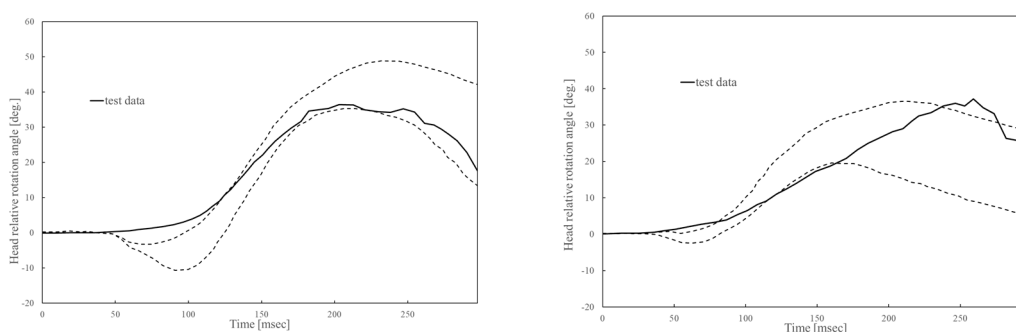


図4 頭頸部一体型
実体モデル

頸部実体モデルは，リニアガイド，引張ばね，ピストン・シリンダから構成される．リニアガイドは，頸部のせん断変形を再現するために用いられる．引張ばねおよびピストン・シリンダは，頸部の伸展・屈曲運動を再現するために用いられる．頸部の筋緊張状態は，引張ばねの種類ならびに取り付け位置・角度を変化させることで，変化させることを可能とした．頸部実体モデルと頭部実体モデルの組み立ては，CT 画像から抽出した頭蓋底の形状を基に製作した，頭頸部接合部を用いて取り付けられた．

図5に開発した頭頸部一体型実体モデルの生体忠実性の検証結果を示す．同検証では，生体実験と同様の衝撃を頭頸部一体型実体モデルに付与し，その際の頭部回転角度を比較した．なお，頭部回転角度は，頭部モデルに貼付したマーカを高速カメラで撮影・トラッキングした座標値より算出した．また，コリドーは生体実験より得られた結果である．同図より，緊張状態・非緊張状態ともに，概ねコリドーに収まっていることがわかる．



(a) 非緊張状態

(b) 緊張状態

図5 頭頸部一体型実体モデルの生体忠実検証結果

以上のことより，定性的ではあるが，頸部の筋緊張状態を変化可能な頭頸部一体型実体モデルを開発することができた．今後は，同モデルに衝撃を付与し，頭蓋内挙動を観察することで，頸部の筋緊張状態が回転運動における頭部外傷の発生リスクに及ぼす影響の解明に取り組む．

<引用文献>

例えば Erik G. et al., “Development of Brain Injury Criteria (BrIC)”, Stapp Car Crash Journal ,(2013)

穴田賢二他，“脳の変形挙動に対する頭部の回転運動の影響”，日本機械学会北信越支部第54期講演会，(2017)

例えば Ejima S et al., “A study on occupant kinematic behavior and muscle activities during pre Impact braking based on volunteer tests”, IRCOBI.(2007)

例えば 穴田賢二他，“頭部回転挙動と脳せん断ひずみの関係”，日本機械学会論文集 A 編，Vol.76，No.772，pp.1816-1822，(2010)

例えば 穴田賢二他，“脳外傷発生メカニズム解明のための実形状頭部物理モデルの構築と脳部変形計測”，日本機械学会論文集 A 編，Vol.76，No.762，pp.233-240，(2010)

Ono K et al., “Prediction of neck injury risk based on the analysis of localized cervical vertebral motion of human volunteers during low speed rear impacts”, IRCOBI, (2006)

例えば Ishikawa Y et al., “Influence of the weight difference in the throwing technique of judo to the head of uke”, Proceedings of the 2017 Internatinnal Budo Conference by the Japanese Academy of Budo, (2017)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshihisa Ishikawa , Kenji Anata , Hironori Hayashi , Naoya Uchimura , Shuichi Okada	4. 巻 16
2. 論文標題 Influence of fatigue on head angular acceleration in judo high-intensity exercise	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Archives of Budo	6. 最初と最後の頁 99-106
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------