

氏 名	ヘセガワ ジュンジ 長谷川 純 爾
所 属	システムデザイン研究科 システムデザイン専攻
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	シス博 第 152 号
学位授与の日付	令和 3 年 9 月 30 日
課程・論文の別	学位規則第 4 条第 2 項該当
学位論文題名	後突初期のむち打ち傷害発生メカニズムの解明に関する研究
論文審査委員	主査 教 授 久保田 直行 委員 教 授 藤江 裕道 委員 准教授 坂元 尚哉 委員 准教授 中楯 浩康（信州大学）

### 【論文の内容の要旨】

交通事故におけるむち打ち傷害は長年に亘る世界的な課題である。当初，後突時の頭部過伸展が原因と判断され，ヘッドレストが義務付けとなった。しかし，その後もむち打ち傷害者数の大幅な低減には結びついていない。そのため，頭部がヘッドレスト接触前の後突初期に何らかの問題が頭頸部に発生すると考えられた。むち打ち症状は多岐に亘り，他覚的所見に乏しく，その部位の特定が困難である。その中でも，慢性的なむち打ち症状は受傷者本人にとっても，社会的コストの面からも世界的に大きな課題である。神経因性疼痛は代表的な慢性的症状と言われており，頸部・神経損傷の可能性がある。本研究では，損傷部位として，脊髄から椎間孔を経由して末梢神経に至る神経組織の主要通路である頸部・神経根に着目した。

後突時の神経損傷研究として，ブタを使って計測した脳脊髄液圧変化と神経損傷を関連付けた傷害発生メカニズム説がある。この傷害評価基準（NIC）は後突初期の傷害評価基準で，頭部と第一胸椎の相対的速度と加速度値から導出される。

しかし，①NIC 適合後の車両でも傷害者数の大幅低減は見られない。また，②被験者車両後突実験で NIC 評価が被験者症状と対応していないとの指摘がある。そして③ブタの圧力測定と実験後の頸部神経組織検査との間に時間差があることから，その対応関係の妥当性を疑問視する声もある。一方，動物を使った神経根・圧迫実験例は多数報告されており，神経損傷の閾値も提案されてきた。しかし，準静的評価が主体であり，後突時との関連性は不明である。また，死体を使った頭部伸展時の椎間孔スペース検討が実施され，頭部伸展時の神経根通路の椎間孔狭小化が指摘された。しかし，神経根組織はないため，損傷評価されていない。

従って、NIC に代わる後突初期の神経損傷発生メカニズムがあると考えた。後突時の生体の神経損傷を実測するのは現状では不可能に近い。後突時の頭頸部挙動を再現し、その事象中の神経損傷評価は計算バイオメカニクスの手法が最適と考えられる。頭頸部筋骨格 FEM モデル（以下、筋骨格モデル）による頭頸部挙動解析は多数検討されてきたが、筋骨格モデルに神経根 FEM モデルを組み込んだ神経筋骨格モデルを使って、神経根損傷を検討した例はこれまでない。

日常的な頭部伸展挙動では見られない特有の頭頸部挙動（S-字変形モード）が後突初期に発生することが確認されている。そのため、まずは重力条件下の標準的姿勢条件で（１）頭頸部 S-字変形挙動の再現に関する要因を明らかにする。また、むち打ち傷害発生頻度の高い女性の頭頸部挙動は男性挙動と異なると言われており、むち打ち傷害者の対象を幅広く検討するために、（２）むち打ち傷害発生に関する男女差を明らかにし、その要因について検討する。次に、（３）計算環境の制約上、神経筋骨格モデルの一部 C4-C5 脊椎ユニット・モデルに後突再現挙動データを適用、その時の神経根への直接的な負荷レベルを解析、損傷の可能性を評価する。

本論文は、６章で構成されている。

第１章では、研究背景の詳細と本研究の目的を述べる。

第２章では、本研究に関係する頭頸部・神経組織に関する研究について述べ、本研究の問題点と課題を明確にする。

第３章では、男性の平均サイズの筋骨格モデルを使って男性被験者の後突時の頭頸部挙動の再現技術について述べる。後突初期の頭頸部 S-字変形挙動の精度良い再現には後突前の頭部姿勢保持時の頸部の筋力バランスが重要である事を示した。

また、後突前の頭部姿勢保持筋力バランスで、S-字変形モードは、ほぼ決定されることを確認した。従って、後突後の筋反射タイミングによる筋力アップでは同モード低減効果は殆どない。

第４章では、男性サイズの筋骨格モデルをベースに女性の平均サイズのモデルを構築し、３章に準じた手法に基づき、女性被験者の頭頸部挙動の再現技術について述べる。むち打ち傷害頻度の男女差の主原因は筋力であり、男女の傷害頻度差が筋力である事を定量的に明らかにした。男女の頸部の幾何学的寸法効果も加わり、男女の頭部質量比以上に女性の筋力が小さくなる事も示した。

第５章では、後突初期の頭頸部 S-字変形時の椎体変位が神経根損傷に与える可能性について述べる。まず動物の軸索、神経根特性を使ったモデルを用いて、神経根圧迫負荷時の負荷速度と変形量との間に双曲線的な関係が成立する事を示した。粘弾性特性により、圧迫負荷速度が高まるほど、圧迫部位での局所性が強まり、変形量が小さくても損傷の可能性は大きくなることが判った。

次に計算環境の制約から、神経根モデルを組み込んだ脊椎ユニット・モデルでの損傷評価手法を提案した。まず日常的な頭部伸展挙動では神経根損傷の可能性がない事を示した。

そして後突初期の頸部挙動データを使って解析し、椎体の圧迫速度が高まると神経根損傷の可能性あることを確認した。

第6章では、本論文の結論および考察について述べ、今後の課題についても触れる。