

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：82659

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17945

研究課題名(和文)自動車乗員姿勢における頸椎の配置・彎曲状態が追突事故時の頸部傷害発生に与える影響

研究課題名(英文)Whole spinal alignment in an automotive seated posture and its effects on neck injury caused by rear impacts

研究代表者

佐藤 房子(Sato, Fusako)

一般財団法人日本自動車研究所・安全研究部・研究員

研究者番号：10728281

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：脊柱アライメントが頸部傷害を惹き起こす頸部挙動に影響を及ぼすことが示唆されていることから、脊柱アライメントの差異が追突事故時の脊柱挙動に及ぼす影響を調査した。

縦型オープンMRI装置により乗車姿勢での脊柱を撮影し、脊柱アライメントのパターンを多次元尺度法により分析した。頸椎では女性は後弯、男性は前弯、胸椎は女性より男性において顕著な後弯を示した。次に人体有限要素モデルに様々な脊柱アライメントを導入し、追突再現シミュレーションを実施した。女性平均脊柱アライメントを導入したモデルは、男性平均脊柱アライメントを導入したモデルと比較して胸椎、腰椎よりも頸椎に動きが集中し、頸椎間相対変位が大きくなった。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study was to investigate the spine alignment in automotive seated postures and its effects on vertebral motion. Image data of a seated posture acquired by an upright open MRI system were utilized. Patterns of the spinal alignment were investigated by Multi Dimensional Scaling. An occupant FE model of average female size with the average female spinal alignment was developed. Then, the average male and representative spinal alignments were implemented in the model. FE simulations of rear impact sled tests were conducted with those occupant models, respectively.

The average spinal alignment was kyphotic cervical and less-kyphotic thoracic spine for females, and lordotic cervical and more pronounced kyphotic thoracic spine for males. The occupant model with the female average spinal alignment exhibited spine straightening from upper thoracic vertebra level and showed larger intervertebral angular displacements in the cervical spine than the male average spinal alignment.

研究分野：インパクトバイオメカニクス、交通外傷

キーワード：脊柱アライメント 頸部傷害 交通外傷 乗車姿勢 MRI 有限要素解析

## 1. 研究開始当初の背景

交通事故により発生する頸部傷害は、男性よりも女性に発症しやすく、女性の頸部傷害受傷リスクは男性の約3倍と報告されている(文献①)。頸部傷害は追突事故時に最も多く発生し、その被害軽減対策として頸部傷害低減シートが搭載された乗用車が1990年代末より普及し始めている。しかし、最新の事故分析から、頸部傷害低減シートの効果についても男女間に差異があり、男性に対しては効果的であるが、女性に対しては効果が限定的であることが明らかになった(文献②)。現在、頸部傷害受傷メカニズムは十分に明らかになっておらず、女性にも効果的な対策を提案するためにも、その原因解明が求められている。

過去に実施された供試体やブタを用いた実験から、追突事故による頸部傷害は、衝撃時の頸部の動きに伴う急激な頸椎間の相対変位により、頸部周辺の筋肉や椎体間の椎間板、靭帯などの軟組織が局所的に過度な変形を呈し、受傷することで発生すると考えられている(文献③)。そこで研究代表者らのこれまでの研究では、追突事故時の頸部の挙動を、被験者による追突模擬スレッド試験にて調査し、男女の違いを分析してきた。これにより、シネラディオグラフィで撮影した頸椎のX線連続画像解析では、頸椎間の相対変位は女性の方が大きくなることを明らかにしている(文献④、⑤)。この結果は男女間の頸部傷害発生リスクの差に大きく関与するものと考えられる。

この頸椎間の相対変位における男女間の違いに関係する主な要因のひとつとして、衝撃時の初期位置となる乗車姿勢の頸椎の配列・彎曲状態(以下、アライメント)が考えられる(文献⑥)。特に、頸椎のアライメントの傾向は男女間で異なり、また、ラグビー等のスポーツ分野においては、頸椎のアライメントが衝撃時の頸椎の挙動に影響を及ぼすことが報告されている(文献⑦)。しかしながら、追突事故時の頸椎の挙動と頸椎アライメントの関係は明らかになっていない。

また、骨格等を詳細にモデル化した人体有限要素(FE)モデルを用いた追突事故再現シミュレーションからは、頸椎挙動はシートから直接衝撃を受ける腰椎や胸椎の初期位置からも影響を受けることがわかってきている(文献⑧)。よって、追突事故時の頸椎の挙動と頸椎アライメントの関係を検査するには、頸椎のアライメントだけではなく、乗車姿勢における脊柱全体のアライメントの情報が必要である。しかしながら、これまで特に女性に対し乗車姿勢における脊柱アライメントの調査は殆ど行われてこなかった。

## 2. 研究の目的

女性に対しても有効な頸部傷害低減シートを構築するには、頸部傷害を引き起こすとされる追突時の頸椎間相対変位が男女間で異なることについて、その原因を明らかにする必

要がある。よって本研究では、その原因の一つと考えられている乗車姿勢における脊柱アライメントを明らかにし、その脊柱アライメントが追突時の頸椎間相対変位に及ぼす影響を調査することを目的とした。

## 3. 研究の方法

脊柱アライメントが追突時の脊柱の挙動に及ぼす影響は、追突事故模擬スレッド志願者実験(文献④、⑤)のFE解析による再現シミュレーションによって調査した。なお、本研究ではLS-DYNA R6.1.2.(LSTC)を用いた。

### (1) 乗車姿勢における脊柱アライメント

着座したまま撮影可能である縦型オープンMRI装置(Fonar Inc.)により、女性3名、男性4名の被験者に対し、頭部から仙椎までの撮影を実施した。着座姿勢は、追突事故模擬スレッド志願者実験(文献④、⑤)と同様の着座姿勢を定義した。なお、本撮影は、撮影を実施したHospital Universitario HM Montepíncipeと一般財団法人日本自動車研究所の倫理委員会の承認を得て実施した。

本撮影で取得したMRI画像データ、並びに研究代表者らが先行研究にて同様の条件で取得したMRI画像データを合わせ、合計女性8名(平均身長161cm、平均体重52kg、平均年齢27歳)、男性7名(平均身長172cm、平均体重70kg、平均年齢27歳)のMRI画像データを用いて、乗車姿勢における脊柱アライメントを多次元尺度法により分析した。

MRI画像データからは、各椎体の中心座標を抽出した(図1)。その後、仙椎上面における中点が原点、第2頸椎が縦軸上で1となるよう、座標変換と正規化を行った(図2)。この脊柱アライメントに対し、全ての被験者間における各椎体中心座標の差の総和で構成された距離行列を求め、多次元尺度法を適用することにより、脊柱アライメントの2次元分布図を取得した。また、取得した脊柱アライメントの2次元分布図において、50%確率楕円上の脊柱アライメント、および男女それぞれの平均脊柱アライメントとして男女の平均軸得点上の脊柱アライメントを推定した。

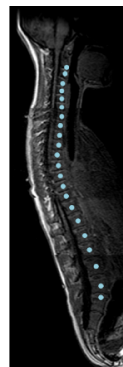


図1 着座姿勢における脊柱アライメント

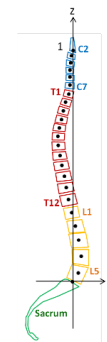


図2 脊柱アライメントの座標変換と正規化

(2) 女性平均体型人体有限要素モデル構築  
本研究で用いた女性平均体型(AF 50. 162cm, 62kg)(文献⑨)乗員 FE モデルは, THUMS (Total Human Model for Safety) version 4 AF 05 乗員モデル(トヨタ自動車株式会社)をスケーリングし, 前節 3(1)で得た女性平均脊柱アライメントを適用することで構築した.

本モデルに対し, 追突事故模擬スレッド志願者実験(文献④, ⑤)再現シミュレーションを実施した. 本モデルの挙動と実験における女性被験者の挙動を比較し, AF 50 乗員 FE モデルの挙動の再現性を確認した.

実験では 2 枚の平板で構成された剛体シートが用いられていたことから, 同仕様のシート FE モデル(シートバック角度: 20°)を構築した. このシート FE モデルに実験で計測されたスレッド加速度を付与することで, シミュレーションを実施した.

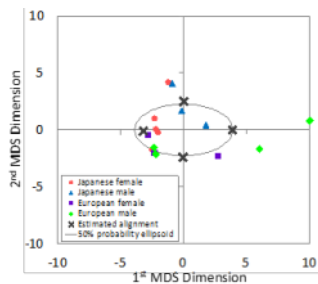
### (3) 脊柱アライメントと追突時における頸椎挙動との関係

前節 3(2)で構築した AF 50 乗員 FE モデルに, 前々節 3(1)で得た 50%確率楕円上の脊柱アライメントと男性平均脊柱アライメントをそれぞれ導入した. これらのモデルに対し, 追突事故模擬スレッド志願者実験再現シミュレーションを実施した. シミュレーションより得られた挙動を比較し, 脊柱アライメントと追突時における頸椎挙動との関係を調査した.

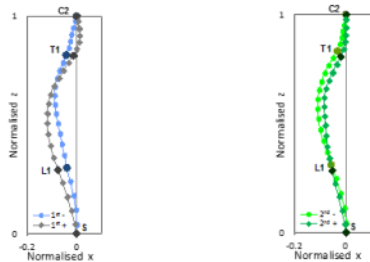
## 4. 研究成果

### (1) 乗車姿勢における脊柱アライメント

図 3(a)に脊柱アライメントの 2 次元分布図を示す. この分布図において推定した 50%



(a) 脊柱アライメントの 2 次元分布図と 50%確率楕円

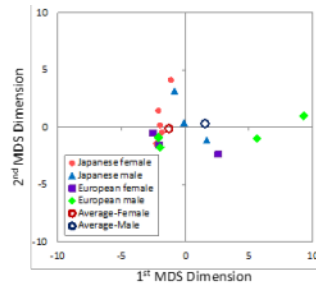


(b) 第 1 軸上の脊柱アライメント (c) 第 2 軸上の脊柱アライメント  
図 3 50%確率楕円上の脊柱アライメント

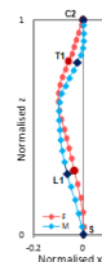
確率楕円と第 1 軸並びに第 2 軸との交点上の脊柱アライメントを図 3 (b)(c)に示す. 第 1 軸に着目すると, 頸椎が後弯を示す脊柱アライメントに対し, 頸椎が前弯である脊柱アライメントは, 胸椎でより顕著な後弯を示すことが明らかになった. この傾向は男女平均脊柱アライメントの差異においても確認された. 図 4 に, 男女の平均軸得点を含んだ脊柱アライメントの 2 次元分布図と, 男女平均得点上の脊柱アライメントを示す. 頸椎では, 女性は後弯またはストレート, 男性は前弯の傾向を示し, 胸椎は女性よりも男性においてより顕著な後弯を示す傾向にあることが明らかになった.

### (2) 脊柱アライメントと追突時における頸椎挙動との関係

図 5 に, 脊柱アライメントと追突時における頸椎挙動との関係を調査するために構築した AF 50 乗員 FE モデルの一例として, 女性平均脊柱アライメントおよび男性平均脊柱アライメントを導入した AF 50 乗員 FE モデルを示す. また, 図 6 に頸椎の最大 S 字変形時における椎体間回転角を示す. 頸椎の最大 S 字変形は, Stemper らの文献⑩より, C2/C3 が最大屈曲角(図 6, 負値)を示す時刻での頸椎の状態と定義した. 頸椎回転角は, 第 1 軸負領域における 50%確率楕円と第 1 軸の交点上の脊柱アライメント (1<sup>st</sup>.) ならびに女性平均脊柱アライメント (F) で大きくなった. 追突事故模擬スレッド志願者実験(文献④, ⑤)においても, 女性の方が頸椎間回転角は大きい傾向にあると報告されている. また, 比較的直線的な第 1 軸負領域における 50%確率楕円と第 1 軸の交点上の脊柱アライメント (1<sup>st</sup>.)



(a) 脊柱アライメントの 2 次元分布図と 男女平均軸得点



(b) 男女平均得点上の脊柱アライメント  
図 4 男女の平均脊柱アライメント

ならびに女性平均脊柱アライメント(F)では、胸椎、腰椎よりも頸椎に動きが集中する傾向を示した。

### (3) まとめ

脊柱全体のアライメントの違いにより、後突時の頸椎の挙動が異なることがわかった。今後、交通事故による頸部傷害を詳細に調査するには、乗車姿勢における脊柱アライメントの情報が必要であると言える。また、本研究で対象としたシートは実験用剛体シートであり、より実際の事故に近い状況を考慮するためには、乗用車に搭載されているシートを対象とし、調査を進める必要がある。



(a) 女性平均脊柱アライメント



(b) 男性平均脊柱アライメント

図 5 AF05 乗員モデル

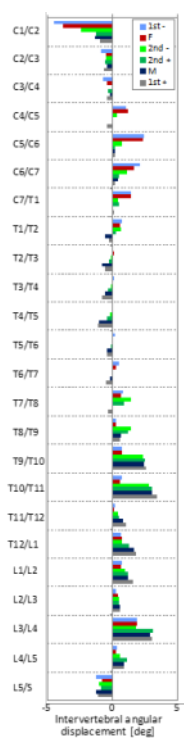


図 6 頸椎の最大 S 字変形時における椎体間回転角

### <引用文献>

- ① Carlsson et al., IRCOBI Conference, (2010), pp. 29-40.
- ② Kullgren A et al., IRCOBI Conference, IRC-13-14 (2013), pp. 51-62.
- ③ Deng B. et al., Stapp Car Crash Conference, 2000-01-SC13 (2000).
- ④ Ono K. et al. IRCOBI Conference, (2006), pp. 103-114.
- ⑤ Sato. et al. IRCOBI Conference, (2014), pp. 227-249.
- ⑥ Stemper B. et al., J Biomech, Vol. 38, No. 6 (2005), pp. 1313-1323.
- ⑦ 佐藤ら, 自動車研究, 第 32 巻第 9 号 (2010), pp.541-546.

- ⑧ Sato F. et al., IRCOBI Conference, (2010), pp. 41-58.
- ⑨ Schneider et al., University of Michigan Transportation Research Institute, Final Report UMTRI-83-53-1(1983).
- ⑩ Stemper B. et al., J Biomech, Vo. 36 (2003), pp. 1281-1289.

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① Sato F, Odani M, Endo Y, Tada M, Miyazaki Y, Nakajima T, Ono K, Morikawa S, Svensson M. Analysis of the alignment of whole spine in automotive seated and supine postures using an upright open MRI system. International Journal of Automotive Engineering. 2016;7:29-25. (査読有り)
- ② Sato F, Odani M, Miyazaki Y, Yamazaki K, Östh J, Svensson M. Effects of whole spine alignment patterns on neck responses in rear end impact. Traffic Injury Prevention. 2017;18:199-206. (査読有り)
- ③ Östh J, Mendoza-Vazquez M, Sato F, Svensson M, Linder A, Brolin K. A female head neck model for rear impact simulations. Journal of Biomechanics. 2017;51:49-56. (査読有り)
- ④ Sato F, Odani M, Miyazaki Y, Yamazaki K, Östh J, Svensson M. A 50<sup>th</sup> percentile female occupant FE model with the average spinal alignment pattern for females. Traffic Injury Prevention. 2016;17:187-189. (査読有り)

[学会発表] (計 8 件)

- ① Sato F, Odani M, Endo Y, Tada M, Miyazaki Y, Nakajima T, Ono K, Morikawa S, Svensson M. Analysis of the alignment of whole spine in automotive seated and supine postures using an upright open MRI system. 自動車技術会 2015 年春季大会, 2015 年 5 月 20-22 日, パシフィコ横浜(神奈川県).
- ② Sato F, Odani M, Endo Y, Tada M, Miyazaki Y, Nakajima T, Ono K, Morikawa S, Svensson M. Whole spine alignment in automotive seated and supine postures by using an upright open MRI system. XXV Congress of the International Society of Biomechanics. 2015 年 7 月 12-16 日, Glasgow (UK).
- ③ Sato F, Nakajima T, Ono K, Svensson M, Kaneoka K. Characteristics of dynamic cervical kinematics for female and male volunteers in low speed rear impact, based on quasi-static neck kinematics. International Research Council on the Biomechanics of injury (IRCOBI) 2015. 2015 年 9 月 9-11 日, Lyon (France).
- ④ Odani M, Sato F, Miyazaki Y. Analysis of spinal

alignment of car occupants using an upright open MRI system. The 8<sup>th</sup> Asian-Pacific Conference on Biomechanics. 2015年9月16-19日, 北海道大学 (北海道).

- ⑤ 小谷麻美子, 佐藤房子, 宮崎祐介. 縦型オープン MRI データに基づく着座時の代表脊椎アライメントの推定. 日本機械学会第28回バイオエンジニアリング講演会. 2016年1月9-10日, 東京工業大学 (東京都).
- ⑥ Sato F, Odani M, Miyazaki Y, Nakajima T, Antona-Makoshi J, Yamazaki K, Ono K, Svensson M, Östh J, Morikawa S. Investigation of whole spine alignment patterns in automotive seated posture using upright open MRI system. International Research Council on the Biomechanics of injury (IRCOBI) 2016. 2016年9月14-16日, Malaga (Spain).
- ⑦ Sato F, Odani M, Miyazaki Y, Yamazaki K, Östh J, Svensson M. A 50<sup>th</sup> percentile female occupant FE model with the average spinal alignment pattern for females. Association for the Advancement of Automotive Medicine (AAAM) 2016. 2016年9月17-21日, Hawaii (US).
- ⑧ 佐藤房子, 宮崎祐介, 山崎邦夫, Östh J, Svensson M. 乗車姿勢における脊柱アライメントの男女差が後突事故時の脊柱挙動に及ぼす影響. 日本機械学会第29回バイオエンジニアリング講演会. 2017年1月19-20日, ウィンクあいち (愛知県).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐藤 房子 (SATO Fusako)

一般財団法人日本自動車研究所,  
安全研究部, 研究員

研究者番号: 10728281