

論文・解説

09

人体研究に基づく傷害低減技術の開発

Technological Development to Reduce Injuries Based on Study of Human Skeleton

泉山 朋大 ^{*1}	西田 周泰 ^{*2}	朝日 龍介 ^{*3}	山縣 大樹 ^{*4}
Tomohiro Izumiyama	Norihiro Nishida	Ryusuke Asahi	Hiroki Yamagata
鈴木 崇 ^{*5}	澤井 亮 ^{*6}	杉本 繁 ^{*7}	福島 正信 ^{*8}
Tadashi Suzuki	Ryo Sawai	Shigeru Sugimoto	Masanobu Fukushima

要約

交通事故による死亡重傷者を低減するには、適切な着座姿勢保持と乗員拘束が重要である。重傷化リスクが高い腹部傷害には、この2要素が関係する。乗員の着座姿勢は個体差を有し、シートベルトによる乗員拘束に影響を与える。本研究は、実際の乗員姿勢の個体差を骨格視点から把握し、人体の骨格や内臓を模擬したFEシミュレーションモデル（以下、人体FEモデル）を用いて衝突時の乗員挙動を分析した結果を基に、傷害防止に必要な技術を構築・商品化することを目的とした。自動車シート着座時のX線撮像による脊椎形状と骨盤状態の個体差解析から、着座姿勢は脊椎S字と後弯の2タイプに大別されることが分かった。骨盤については、ラップベルトが掛かる上前腸骨棘（anterior superior iliac spine: ASIS）形状やそこから恥骨結節までの距離のばらつきを分析し、個体差を反映させた人体FEモデルを作成して、そのモデルによる乗員挙動解析から骨盤角度のコントロールが最も重要であることを導き出した。これらの結果から、MAZDA3ではシート着座時に骨盤を立て、その状態を保持できるシートを開発した。また、ベルトがたるみなく骨盤に掛かりシート位置に依らずその状態を維持できるシート内蔵式シートベルトラップアンカー構造とした。更にニーエアバッグの採用により、衝突時の乗員前進を抑制するシートベルトの乗員への入力を分散させ、人体耐性の高い部位での乗員にやさしい拘束を可能とした。これらの構造を設計し、安全安心な「人間中心」のクルマづくりを実現した。

Summary

In order to reduce fatalities or serious injuries in traffic accidents, retaining a safer seated posture and proper occupant restraint is important, and the lack of them tend to cause serious abdominal injuries. The individual differences of the seated posture affects the occupant restraint by a seatbelt. This study aims to construct and commercialize technologies required for abdominal injury prevention based on the individual differences of the skeletal alignment in a seated posture and occupants' kinematics in a collision which was analyzed using human body models (HBMs). According to the analysis of individually different skeletal alignments in a seated posture, the seated postures are classified into two types: S-shape and kyphosis. For pelvis, the individual differences of ASIS shapes and the distances between ASIS and pubic symphysis were analyzed and incorporated into the HBMs to study occupants' kinematics. The analysis results of the kinematics indicated that the controlling the pelvic angle is essential to prevent the abdominal injuries.

Based on the results, three new technologies were applied to Mazda3: a new seat design to achieve the S-shaped posture, a seat-integrated lap belt anchor to reduce pelvic rotation, and the knee airbag to sustain the occupant in position while limiting the force into the abdomen. The safer seated posture structure together with the newly designed restraint systems further improve the occupant protection performance, bringing Mazda's "human-centered design" philosophy into shape.

Key words : Passive Safety, Seated Posture, S-shaped, Seat Design, Seat-Integrated Lap Belt Anchor, Knee Airbag, Human-Centered Design

*1,3,7,8 衝突性能開発部
Crash Safety Development Dept.

*5,6 装備開発部
Interior & Exterior Components Development Dept.

*2,4 山口大学医学部附属病院 整形外科
Department of Orthopedic Surgery and Radiological Technology, Yamaguchi Univ. Hospital

1. はじめに

市場での死亡重傷低減を目指し、医工連携による人間研究を推進しながら、得られた知見を基に万一の事故の際に人命を保護するための安全技術開発に取り組んでいる。市場事故において、腹部傷害は受傷割合こそ少ないものの一度受傷すると内臓や内膜の創傷により重傷化しやすく、死亡重傷低減の上で重要な傷害と位置付け、研究を進めている。傷害発生の一因として、シートベルトの骨盤からのずれ上がり現象が考えられ、着座姿勢や骨盤状態、ベルトの骨盤への掛かり方が重要となる。これまで、臨床医学の観点から座位での骨格アライメントを調べた研究⁽¹⁻³⁾や自動車乗員の特徴（年齢、身長、体型等）と骨盤状態、ベルトパス、衝突時の乗員挙動の関係を分析した研究⁽⁴⁻⁸⁾などが報告されている。更に、将来の高度自動運転環境における着座姿勢の多様化を想定した乗員拘束の研究報告⁽⁹⁻¹²⁾もあり、世界的に注目されている領域と言える。今回、マツダは日本の健康者ボランティアを対象に、自動車シート着座時の骨格アライメントと骨盤状態にどの程度の個体差が存在するか分析した⁽⁷⁾。また、それらの個体差が衝突時のシートベルトずれ上がりにもどのような影響を及ぼすかについて解析した。被験者データを基に個体差を反映した複数の人体FEモデルを用いて衝突時の挙動をシミュレーションし、シートベルトおよび乗員挙動を経時的に分析、シートベルトのずれ上がり現象に最も寄与する因子を特定した。このような研究から、乗員の安全性を確保する技術として、①常時、脊椎の自然なS字・骨盤前傾を維持するシート、②常に適切な角度で骨盤を拘束できるシート内蔵式シートベルトラップアンカー構造を確立した。更に、③衝突時の乗員前進を抑制し、シートベルトによる乗員への入力荷重を分散させ、より耐性の高い人体部位（下肢骨格部）を拘束するニーエアバッグを乗員の安全性確保に必要な技術として加え、MAZDA3に導入した。

本稿では、上記の人間研究により得られた知見を報告するとともに、①～③の技術について紹介する。なお記載の人間研究については、インパクトバイオメカニクス会議体 IRCOBI (International Research Council on Biomechanics of Injury) にて報告済みである⁽¹³⁻¹⁵⁾。

2. 人間研究

2.1 研究概要

研究概要のフローチャートを Fig. 1 に示す。シートベルトの掛かり方に影響を与える骨盤状態を決める因子として、(a) 骨格アライメント（脊椎形状と骨盤角度）、(b) 骨盤形状（ASIS 角度）、(c) 骨盤大きさ（ASIS-恥骨結節間距離）の3因子を設定した。各因子について、年齢・性別・体格による個体差の傾向を調べ、各被験者データ分布から代表値を選定し、その数値を再現する人

体FEモデルを作成した。それらの人体FEモデルを用いて衝突シミュレーションを行い、各モデルでのシートベルト及び乗員挙動を比較分析した。本研究の最終目的は、設定した上記3因子について腸骨上でのベルトずれ上がりへの寄与度を調べ、骨盤状態のコントロールに最も重要な因子を特定し、対応技術を構築することである。

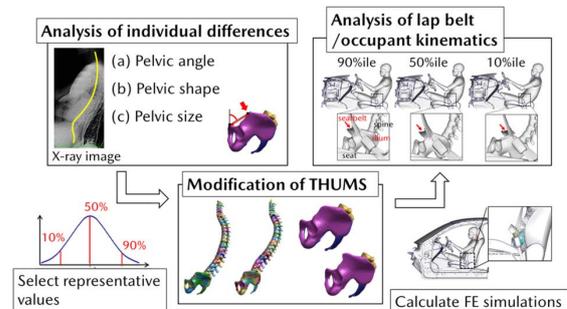


Fig. 1 Research Outline of Pelvic Orientation

2.2 研究方法

(1) X線撮影及び研究倫理

シート着座時の骨格状態をX線で撮影するため、アクセラシートを取り付けた撮影治具を作製した (Fig. 2)。着座姿勢は、シートバック 24° (設計標準)、シートクッション座面 21.5° に固定し、シートスライドは自由に調整できる構造とした。撮影時、被験者はフットレストに足を置き、普段の運転姿勢で着座した。また、画像上の脊椎部に上肢骨格が重ならないよう、長さ・高さ調節可能な手置き棒に手を乗せて撮影した。



Fig. 2 X-Ray Facility and Situations of X-Raying

撮影は、山口大学医学部附属病院放射線部が所有する装置 (SONIALVISION Safire17 SHIMADZU) を使用し、座位・立位について頸椎から骨盤までの範囲を撮影した。本研究の手順は全て、山口大学及びマツダ (株) により決定され、双方の研究倫理委員会にて承認を得た上で実施した。被験者には十分な説明を行い、本人の参加同意を書面にて取得した。

(2) 被験者

2.1 節で述べた骨格アライメント及び骨盤形状、大きさの計測では計 113 名の被験者データを取得した。内訳は、男性 56 名、女性 57 名、であった。それぞれの年齢・身長・BMI 平均は、男性が 43 歳、171.3cm、25.5kg/m²、女性は 47 歳、154.8cm、22.2kg/m² であった。

(3) X線データ計測及び分析

2.1節で述べた各項目の計測部位を Fig. 3 に示す。得られた全被験者の X 線撮像データについて、骨格アライメント、骨盤形状、骨盤大きさの計測を行い、個体間ばらつきや年齢・身長・BMI との相関性について調べた。計測方法の詳細を、以下に記載する。

a. 骨格アライメント (脊椎形状と骨盤角度)

脊椎及び骨盤に関して、6 項目：頸椎角度 (CC)、胸椎後弯角 (TK)、胸腰椎後弯角 (TLK)、腰椎前弯角 (LL)、仙骨角度 (SS)、骨盤角度 (PA) の角度計測を行った (Fig. 3a)。

b. 骨盤形状

ラップベルトが掛かる位置に当たる ASIS の形状は、角度で表現した。ASIS 頂点よりその形状に沿ってラップベルト幅 40mm の半分に相当する 20mm 幅ずつ斜線を引き、その 2 斜線の成す角を計測した (Fig. 3b)。ASIS の正確な位置は、山口大学の整形外科医に X 線撮像から判断していただいた。

c. 骨盤大きさ

計測部位としてはさまざま考えられるが、本研究ではラップベルトの骨盤への掛かり方を調べるという目的から、ASIS-恥骨結節間の距離を骨盤大きさと定義し、その距離を計測した (Fig. 3c)。

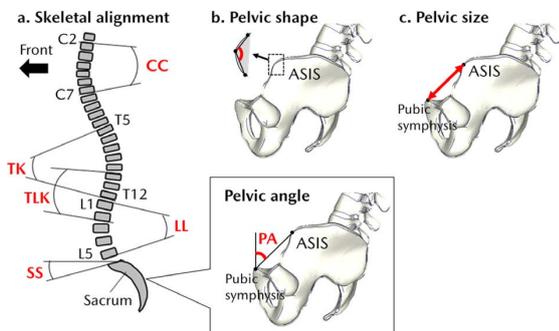


Fig. 3 Measurement of Pelvic and Lap Belt Factors

(4) 人体 FE モデル作成

a-c の各因子について、個体差分布から 90 パーセントایل、50 パーセントایل、10 パーセントایلを代表値として選定し、それぞれに相当する数値データを人体 FE モデルに反映させた (Fig. 4)。モデルは、THUMS ver.4 (Copyright 2015 © TOYOTA MOTOR CORPORATION) の AM50 体型モデルをベースとして用い、被験者の着座状態を再現するよう修正を加えた。修正は、Oasys PRIMER ソフトウェア (ARUP, UK) 上で強制変位や部分的なモーフィング手法を組み合わせることで実施した。

(5) 衝突シミュレーション解析

作成した人体 FE モデルを用いて、JNCAP フルラップ前面衝突 (衝突速度 56km/h) のシミュレーションを行った。車両内装モデル及び人体 FE モデルは、挙動の妥

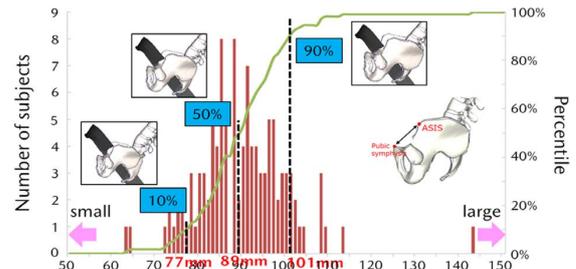


Fig. 4 Image of Modification for THUMS Pelvic Size

当性検証を行った上で用いた。シミュレーションは、運転席に着座させた人体 FE モデルをプリテンショナー & ロードリミッター機構付シートベルトで拘束し、手はステアリング、足はアクセルペダル及びフットレストに配置し行った。また、インパネ下部にニーエアバッグを取り付けた内装モデルとした。

シミュレーション結果から、衝突時のラップベルト及び乗員挙動を解析した。ラップベルト挙動は、ASIS に対するベルト初期位置からの腸骨上での最大ずれ上がり量を調べた。また、初期位置からの最大腰前進量及び最大腰回転角度も計測し、3 モデル間での挙動を比較した。

2.3 結果及び考察

(1) 個体差分析

① 骨格アライメント

取得した 113 名分の X 線撮像から、自動車シートに着座した際の骨格アライメントは腰椎前弯を伴った骨格全体が緩やかな S 字を描くタイプ (以下、S 字タイプ) と腰椎後弯・骨盤後傾による骨格全体が後弯したタイプ (以下、後弯タイプ) の 2 つに大別されることが明らかとなった (Fig. 5a)。各タイプの割合は、S 字タイプ n=55、後弯タイプ n=58 でほぼ 1 : 1 を占めることが分かった。また骨格各部の角度ばらつきを調べると、胸椎後弯角は個体差が小さく、一方で骨格の上下部、特に腰椎前弯角及び骨盤角度の個体差が多少大きいことも分かった (Fig. 5b)。

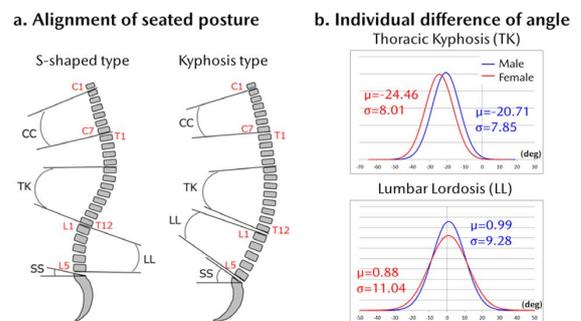


Fig. 5 Analysis of Individual Differences in Pelvic Angle

年齢・身長・BMI と各角度との相関は見られなかったが、BMI30 以上では骨盤角度は小さくなる (骨盤前傾) ことが確認された (Fig. 6 赤枠部分)。これらの分析結果

から、人体における姿勢変化は胸椎を中心に頸椎・腰椎・仙骨・骨盤の各アライメントを変形させることで実現していることが示唆される。その変形量に差が生じることで、骨格アライメントの個体差が引き起こされると考えられる。

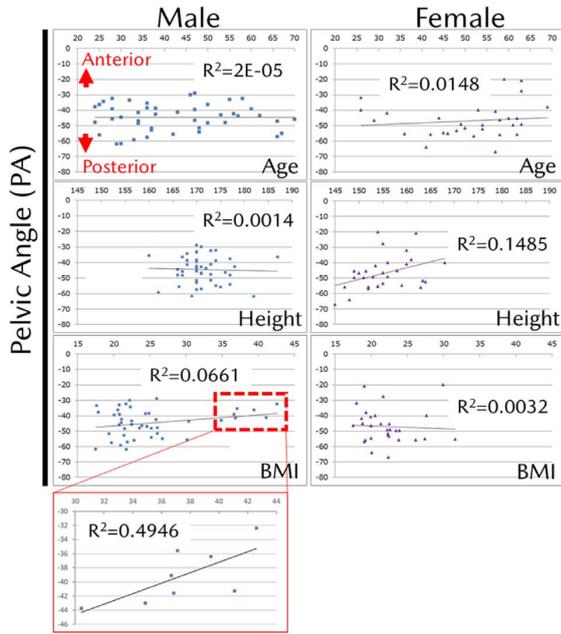


Fig. 6 Regression Analysis on Correlation of PA

② 骨盤形状及び大きさ

被験者データを基に計測した ASIS 角度及び ASIS-恥骨結節間距離について、男女別に分析を行った。それぞれの平均値は、ASIS 角度：男性 107.36°，女性 105.43°，ASIS-恥骨結節間距離：男性 89.98mm，女性 90.47mm であった。また、各因子のパラツキを調べると、ASIS 角度は男性と女性の間には差はほぼ無かったが (Fig. 7a)，ASIS-恥骨結節間距離では男性より女性の個体差が大きい結果となった (Fig. 7b)。いずれの因子も、年齢・身長・BMI との相関は見られなかった。

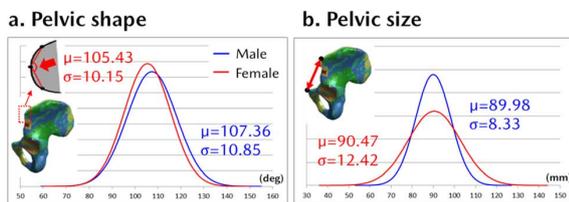


Fig. 7 Analysis of Individual Differences in Pelvic Shape and Size

(2) 人体 FE モデルを用いた衝突時の挙動解析

2.2 節で定義した a-c 各因子について、前面衝突時のラップベルト及び乗員挙動への影響を、2.2 節第 4 項の手法で作成した人体 FE モデルを用いて解析し、次の結果を得た。

骨盤角度違いによる比較では、角度が大きくなる (骨

盤後傾) 程ラップベルトの骨盤上でのずれ上がり量も増加した (Fig. 8)。更に、最大腰前進量及び最大腰回転角度の増加 (より後傾) も確認された。

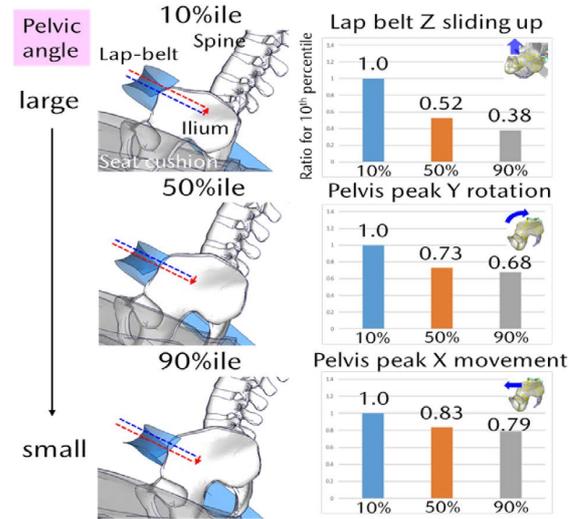


Fig. 8 Analysis of Lap Belt and Pelvic Kinematics Using Three HBMs with Different Pelvic Angle

骨盤形状を比較した解析では、ASIS 角度が大きい (形状が平坦になる) 程ベルトずれ上がり量も増えた (Fig. 9)。一方で、腰前進量及び回転角度に差は見られなかった。

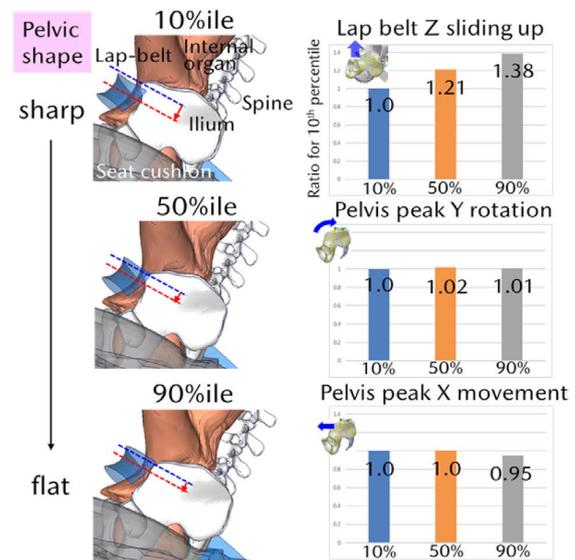


Fig. 9 Analysis of Lap Belt and Pelvic Kinematics Using Three HBMs with Different Pelvic Shape

骨盤大きさの比較では、定義した部位の距離が小さい程ベルトずれ上がり量も増加した (Fig. 10)。また、腰前進量には差は見られなかったが、腰回転角度は距離が小さい程後傾しやすいことが分かった。

いずれの因子も、ベルトずれ上がりへに寄与することが確認された。これら 3 因子のベルトずれ上がりへの寄与度は、骨盤角度が最も大きかった (Fig. 11)。つまり、骨

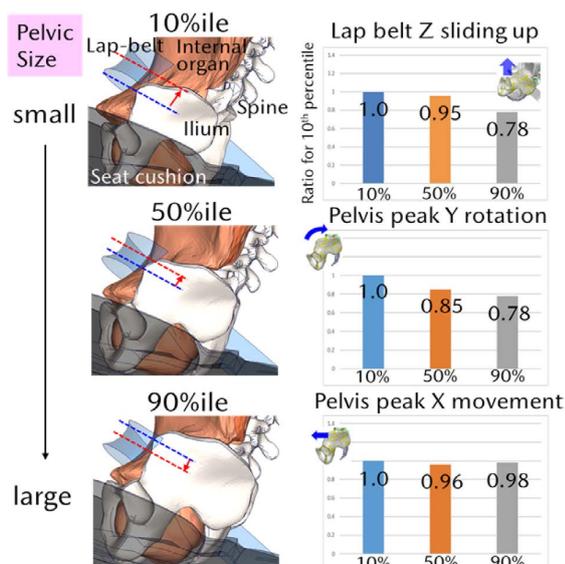


Fig. 10 Analysis of Lap Belt and Pelvic Kinematics Using Three HBMs with Different Pelvic Size

盤状態をコントロールし、シートベルトの骨盤からのずれ上がり現象への対応技術を構築する上で、骨盤角度が最も重要であると言える。

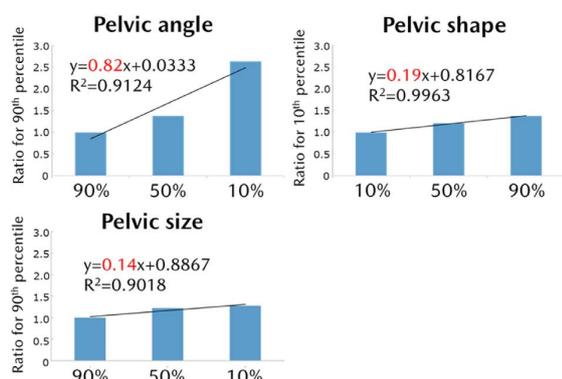


Fig. 11 Comparison with Contribution Level for Each Factor Involved in Pelvic Orientation

3. 安全技術開発

3.1 腹部傷害低減を目的とした乗員保護シナリオ

マツダが考える乗員保護の姿は、以下2点である。

- ① 拘束装置の効果を最大限引き出すため、乗員の適切な姿勢（骨盤前傾、脊椎の自然なS字）を維持する (Fig. 12a)。
- ② 衝突時の乗員の前方移動を抑制し、入力に対して脆弱な部位での損傷を最小にするため、人体耐性の高い部位へ荷重を分散させ入力バランスを最適化する (Fig. 12b)。

この基本的なシナリオに、第2章の人間研究による知見を組み入れ、腹部傷害低減の対応技術として下記3つの安全技術をMAZDA3へ導入した。

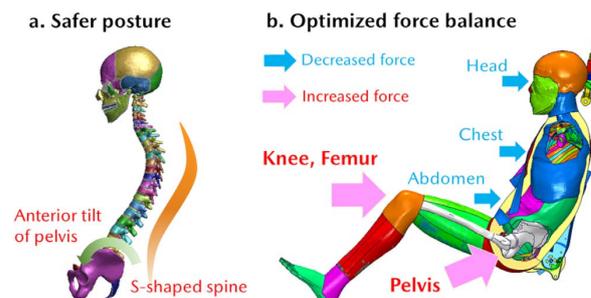


Fig. 12 Constraint Scenario of Vehicle Occupants

(1) 骨盤前傾・脊椎S字を作り出すサブマリン防止シート

被験者データに基づく衝突シミュレーションでも、骨盤が後傾する程ラップベルトのずれ上がり量は大きくなることが確認された。加えて腰前進量や腰回転角度の増加（より後傾）も見られ、傷害低減には骨盤前傾及び脊椎の自然なS字を作りその状態を維持するシート構造が必要となる。マツダは、シートクッションとシートバックの工夫により、それを実現するシートを設計した。16名の被験者に対するX線での骨格アライメント分析では、旧来と比較してPA平均5°前傾の効果が確認され (Fig. 13), より適切な運転姿勢を作り出せるだけでなく、直立歩行時に近い骨盤状態を創出し、ダイナミック性能の向上も実現させ「人馬一体」を感じられるクルマとなっている。

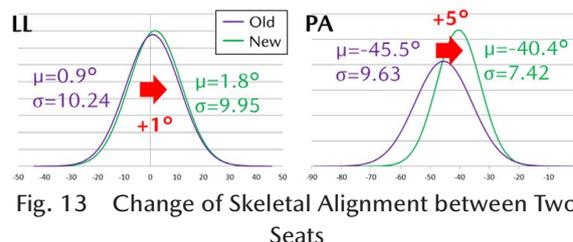
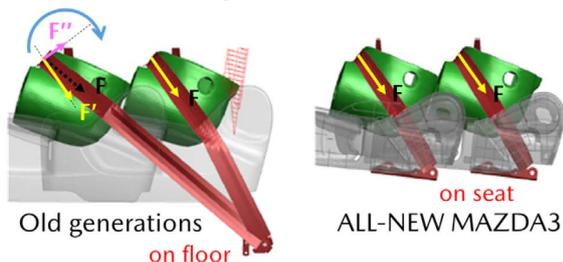


Fig. 13 Change of Skeletal Alignment between Two Seats

(2) シート内蔵式シートベルトラップアンカー構造

研究結果から、人体骨盤は角度だけでなく形状や大きさにも個体差があり、多様な骨盤状態が考えられる。骨盤向きにばらつきが生じると、ラップベルトの掛かり方にも個体差が生まれる。掛かりが浅くなると、拘束時のベルト荷重は骨盤に対して垂直方向と水平方向に分散され、ベルトのずれ上がり成分を生じさせ、また骨盤後傾をより促進する結果となり、衝突時の傷害発生リスクを高めることになる (Fig. 14a)。このずれ上がり成分を減らし、どのシートスライド位置でもベルトがずれにくくするため、前席シートベルトのラップアンカー部をシート上に取り付ける構造とした。衝突ダミーを用いた実機での効果検証により、腰の後方への回転が抑制されていることを確認した (Fig. 14b)。

a. Structure of lap belt anchor



b. Assessment of pelvic rotation

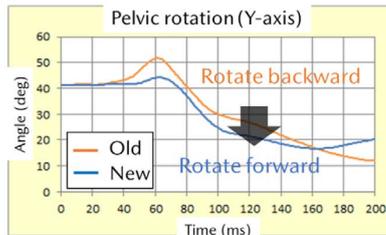


Fig. 14 Effect of Lap Belt Anchor in Seat

(3) 腰前進量を抑止するニーエアバッグ

骨盤後傾により、ラップベルトのずれ上がりとともに腰前進量も増えることを前述した。衝突時のこの乗員移動を抑制する安全装置の一つとして、ニーエアバッグを導入した。この装置により、人体耐性の高い下肢骨格部（主に、膝部）を拘束し、腰移動を抑えることができる。衝突ダミーを用いた検証でも、腰前進の大幅な改善が見られた（Fig. 15）。更に、大腿部荷重も傷害閾値以下であることも確認済みである。下肢骨格部の拘束を加えることでラップベルト拘束時に生じる骨盤への荷重を分散させ、入力バランスの最適化を可能にする効果も得られる。

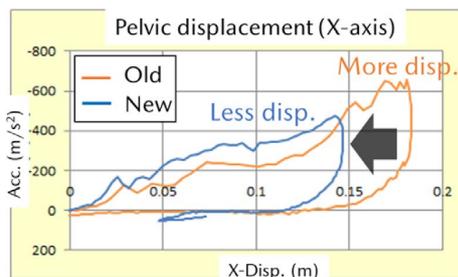


Fig. 15 Effect of Knee Airbag

以上の安全技術を組み合わせ、乗員が接する車両パーツとなるシートと安全装置による統合的な乗員保護を実現した。

4. まとめ

本稿では、人間研究から明らかになった自動車乗員の骨盤状態について報告するとともに、その知見に基づき MAZDA3 に装備された腹部傷害低減を実現する安全技術の概要を紹介した。人間研究の章では、シートベルトによる拘束で重要となる骨盤状態について、骨盤角度（と脊椎アライメント）、骨盤形状、骨盤大きさ、各因子の個

体差を分析し、人体 FE モデルを用いた衝突シミュレーションによるラップベルト及び乗員挙動の解析結果を述べた。シート着座時の乗員の骨格状態と腹部傷害発生の一因であるシートベルトずれ上がりの寄与因子を明らかにした。また安全技術開発の章では、傷害低減の対応技術として（1）サブマリン防止シート、（2）シート内蔵式シートベルトラップアンカー構造、（3）ニーエアバッグの3つについて目的や実際の効果を含めて解説した。死亡重傷低減の実現に向け、市場事故の分析と人間研究から万一の際にもお客様を保護するために必要な安全技術を開発するプロセスに沿って、今後も傷害低減技術を織り込んだクルマづくりを進めていく。

最後に、本研究は多くのボランティアの方に X 線被験のご協力を頂いた。また、撮影・データ分析・モデル作成は、山口大学医学部附属病院整形外科の先生方や放射線部診療放射線技師の皆様、工学部機械工学科の先生方にご協力頂いた。

参考文献

- (1) H.W.D. Hey et al.: Differences in erect sitting and natural sitting spinal alignment—insights into a new paradigm and implications in deformity correction, *The Spine Journal*, Vol.17, pp.183-189 (2017)
- (2) H.W.D. Hey et al.: How the spine differs in standing and in sitting—important considerations for correction of spinal deformity, *The Spine Journal*, Vol.17, pp.799-806 (2017)
- (3) N. Nishida et al.: Changes in the global spine alignment in the sitting position in an automobile, *The Spine Journal*, Vol.20, pp.614-620 (2020)
- (4) M.P. Reed et al.: Effects of Obesity on Seat Belt Fit, *Traffic Injury Prevention*, Vol.13, pp.364-372 (2012)
- (5) M.P. Reed et al.: Effects of Driver Characteristics on Seat Belt Fit, *Stapp Car Crash Journal*, Vol.57, pp.43-57 (2013)
- (6) J. Park et al.: Statistical Models for Predicting Automobile Driving Postures for Men and Women Including Effects of Age, *Human Factors*, Vol.58, No. 2, pp.261-278 (2016)
- (7) M.L.H. Jones et al.: Effects of High Levels of Obesity on Lap and Shoulder Belt Paths, *IRCOBI conference*, pp.317-326 (2017)
- (8) J. Hu et al.: Stature and Body Shape Effects on Driver Injury Risks in Frontal Crashes: A Parametric Human Modelling Study, *IRCOBI conference*, pp.656-667 (2017)
- (9) K. Boyle et al.: A Human Modelling Study on Occupant Kinematics in Highly Reclined Seats

- during Frontal Crashes, IRCOBI conference, pp.282-292 (2019)
- (10) B.D. Gepner et al.: Comparison of Human Body Models in Frontal Crashes with Reclined Seatback, IRCOBI conference, pp.293-307 (2019)
- (11) K. Rawska et al.: Submarining Sensitivity across Varied Anthropometry in an Autonomous Driving System Environment, Traffic Injury Prevention, Vol.20, sup2, pp.S123-S127 (2019)
- (12) R. Richardson et al.: Test Methodology for Evaluating the Reclined Seating Environment with Human Surrogates, ESV paper no. 19-0243 (2019)
- (13) T. Izumiyama et al.: The Analysis of an Individual Difference in Human Skeletal Alignment in Seated Posture and Occupant Behavior Using HBMs, IRCOBI conference, pp.549-560 (2018)
- (14) T. Izumiyama et al.: Analysis of Individual Differences in Pelvic Shape and its Impact on the Seatbelt Kinematics in a Collision, IRCOBI conference, pp.44-46 (2019)
- (15) T. Izumiyama et al.: Identification of Influential Factors for Seatbelt Kinematics in a Collision and Analysis of their Influence Degree to the Kinematics, IRCOBI conference, pp.456-469 (2020)

■著者■



泉山 朋大



西田 周泰



朝日 龍介



山縣 大樹



鈴木 崇



澤井 亮



杉本 繁



福島 正信