

ファーサイド側突における胸腹部傷害メカニズムの分析

楠原由人^{*1}, 井田 等^{*1}, 青木雅司^{*2}
浅岡道久^{*3}, Ning Zhang^{*4}, 大原史朗^{*5}

Analysis of the Mechanisms of Thoracoabdominal Injuries Caused by Far-side Impacts

Yoshito Kusahara^{*1}, Hitoshi Ida^{*1}, Masashi Aoki^{*2}
Michihisa Asaoka^{*3}, Ning Zhang^{*4}, Shiro Ohara^{*5}

要旨

側面衝突事故では、衝突側の乗員だけでなく、反対側の乗員（ファーサイド乗員）も重傷を負うことがある。北米の市場事故データを調査した結果、ファーサイド側突事故における死因部位は頭部・胸部に次いで腹部が多いことが分かった。本研究では腹部に着目し、人体モデル（THUMS）を活用してファーサイド側突事故を再現したところ、肝臓上面を損傷する可能性が高いことが示唆された。これに対する1つの解決策として、乗員の上体の動きを抑えることで肝臓の傷害が低減することを確認した。

Abstract

In side collisions, it is not only near-side occupants but also far-side occupants that may be seriously injured. We conducted an accident analysis using North American data, and the results showed that abdominal injury was the third most common type of injury, following head and thorax injury, as the cause of death in far-side impacts. We then reproduced far-side impact accidents in simulations using a human body model (THUMS). The results suggested that there is a high possibility of damage to the upper surface of the liver. It was confirmed that one way to reduce such liver injury is by suppressing the motion of the occupant's upper body.

1. 背景

側面衝突事故は乗員に近い側から衝突されるニアサイド衝突と、乗員に対して遠い側から衝突されるファーサイド側突の2種類があり、欧州のアセスメントでは2020年よりファーサイド側突に関する評価形態が追加されている。それはポール側突をスレッド試験で再現し、WorldSID (World Side Impact Dummy) を着座させてファーサイド事故による安全性の評価を実施している。この試験では頭部移動量に関して評価基準が設けられているため、頭部外傷による重傷の低減の指標として効果的である。

本研究では、ファーサイド乗員のさらなる安全性向上を狙い、ファーサイド側突の市場事故の実態把握から対策の方向性を検討した。

2. 目的

2-1. 事故調査データ概要

市場事故調査にはNHTSA (National Highway Traffic Safety Administration) の統計管理センターが公開している北米自動車事故データベース (NASS/CDS) を用いた。2002年～2015年の13年間における普通乗用車の側突事故のうち図-1に示す自車の右側から衝突された事故のデータに限定した。また、調査対象は運転席およびその後席の乗員に限定した。自車については乗用車に限定してトラック・バスは除いた。

*1 性能実験部 衝突安全第2技術室

*3 性能実験部

*5 TGR Technical Center, LLC

*2 性能実験部 予測技術室

*4 Toyota Gosei North America Corporation

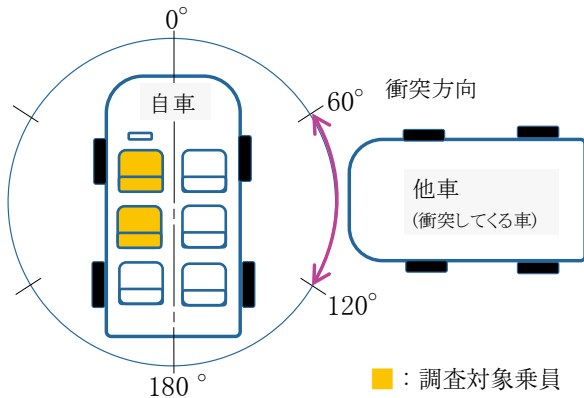


図-1 対象とした事故形態

2-2. 事故調査内容

まず、ファースイド側突における外傷重症度 AIS (Abbreviated Injury Scale) が4以上の重篤な傷害を負った受傷者数を調査した。図-2に受傷部位別に調査した結果を示す。頭部・胸部が多い結果となった。頭部・胸部に関しては、前述したファースイド側突に関するアセスメントの追加により良化していくことが見込まれる。一方衝突側のドアや乗員への直接接触が考えにくい腹部に関しては AIS4以上の重篤な傷害は発生しており受傷者全体の1割を占めていた。よって本研究ではこの腹部に着目して更なる分析を行った。

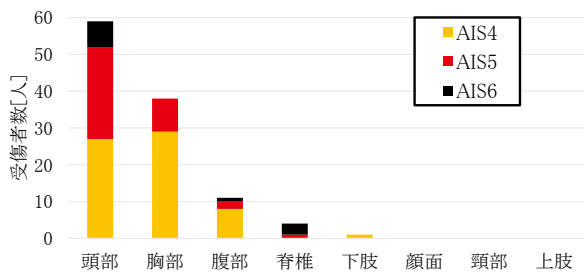
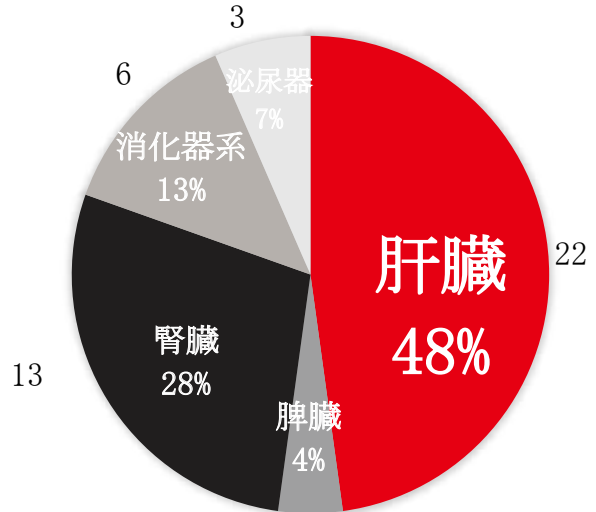


図-2 AIS4以上の部位毎の受傷者数

次に腹部受傷者における受傷臓器の内訳を図-3に示す。AIS2以上の腹部受傷者のうち48% (22件) が肝臓を受傷していることが分かった。また、肝臓を受傷した22件を受傷因子別に分類した結果を図-4に示す。フロアコンソールが6割となり最多であった。フロアコンソールによって頭部を含む乗員の移動量が減り頭部受傷リスクの低減が見込まれる一方でコンソールと腹部が接触することで腹部の受傷リスクがあることが示唆される。

本研究では代表的な腹部傷害である肝臓の受傷メカニズムを分析して対策を検討した。



2 グラフ外の数字は件数

図-3 腹部受傷臓器の分布 (46 ケース [AIS2以上])

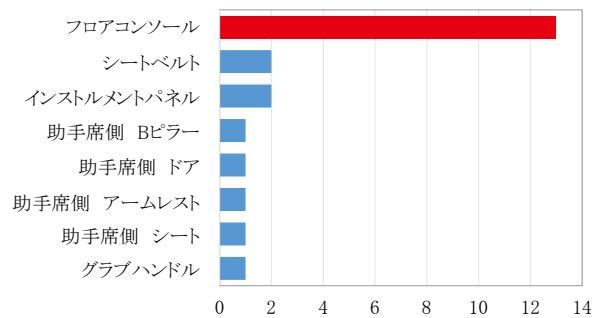


図-4 肝臓の受傷因子 (22 ケース [AIS2以上])

3. 手法

3-1. 試験用ダミーと人体モデルについて

乗員の傷害値評価をするうえで、法規・レイティング試験では図-5に示す衝突試験用ダミーを用いて胸腹部のたわみ量や脊椎の加速度・角速度を計測して傷害リスクを評価する。なお、本研究では骨や臓器がモデル化されていて、肝臓の受傷メカニズムの把握をするのに向いている人体シミュレーションモデルの THUMS (Total Human Model for Safty) を用いた (図-6)。

3-2. THUMS を活用した検討フロー

THUMS を活用した検討フローを図-7に示す。はじめに肝臓のテストピースレベルの引張・圧縮試験¹⁾をシミュレーションで再現して材料特性の同定を行った。その後、臓器レベルの圧縮試験と再現シミュレーションの結果を比較してシミュレーションモデルの肝臓の妥当性を検証した。次にファースイド側突スレッド試験²⁾を再

現したシミュレーションモデルを構築して THUMS を着座させた。その後、乗員の脊椎に設置した加速度計の応答やフロアコンソールからの荷重を試験とシミュレーションで比較して車両レベルのモデル妥当性を確認して肝臓傷害指標の検討を行った。傷害指標に関しては、実際の事故の傷害傾向を確認しながらその傾向を捉えている指標を選定した。

最後に肝臓受傷の受傷因子で特に件数の多かったフロアコンソールの高さを変えて肝臓傷害への影響を調査してメカニズムを分析した後、対策の方向性を検討した。

なお、各フローで用いた試験結果についてはアメリカの研究機関が実施した結果を引用している^{1) 2)}。

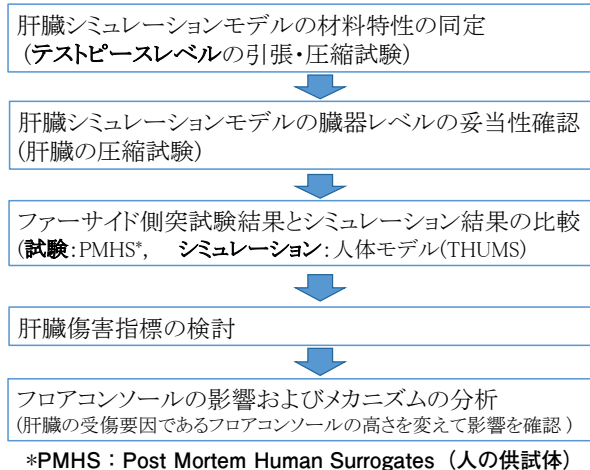
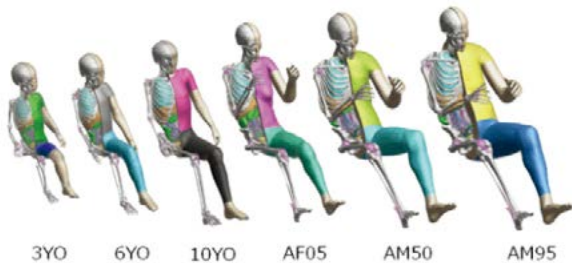


図-7 検討フロー



出典：https://www.humaneticsgroup.com/sites/default/files/2020-11/um-w50m_rev_k.pdf

図-5 試験用ダミー (WorldSID)



出典：<https://www.toyota.co.jp/thums/about>

図-6 人体モデル (THUMS)

4. 結果

4-1. 肝臓モデルの材料特性の同定

まず、図-8に示す肝臓のテストピースの引張試験をシミュレーションで再現した。その結果の比較を図-9に示す。複数の試験結果の中央値となるように THUMS の肝臓の引張特性を変更した。圧縮特性に関しても引張特性同様に図-10に示す圧縮試験をシミュレーションで再現し、THUMS の肝臓の圧縮特性を変更した(図-11)。

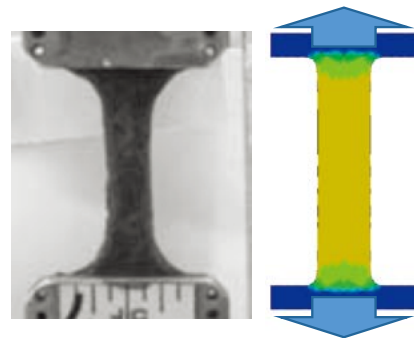


図-8 肝臓テストピース引張試験¹⁾と再現シミュレーション

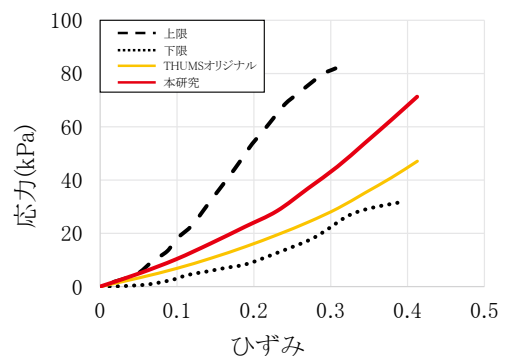


図-9 応力-ひずみ特性比較 (引張)

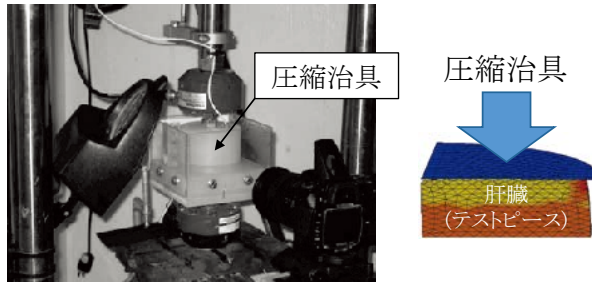


図-10 肝臓テストピース圧縮試験¹⁾と再現シミュレーション

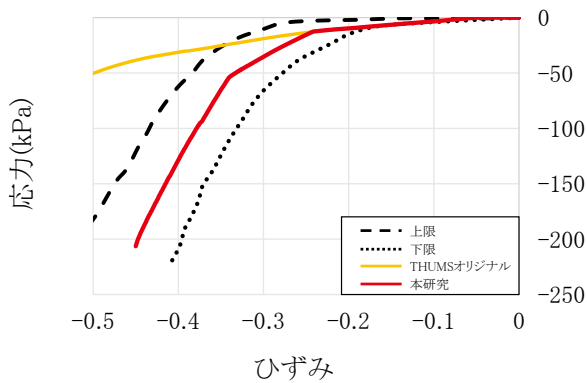


図-11 応力-ひずみ特性比較 (圧縮)

4-2. 肝臓モデルの物性検証

肝臓の静圧縮試験のレイアウトと再現シミュレーションを図-12に示す。この肝臓の静圧縮試験をシミュレーションで再現して圧縮特性(応力-ひずみ線図)を比較した。比較結果を図-13に示す。

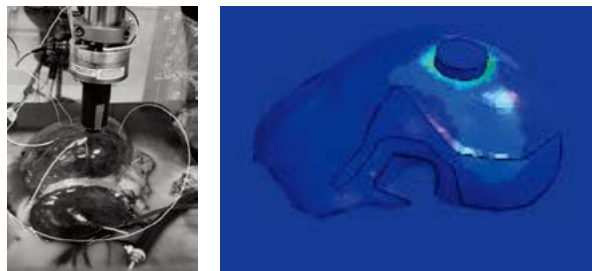


図-12 肝臓の静圧縮試験と再現シミュレーション

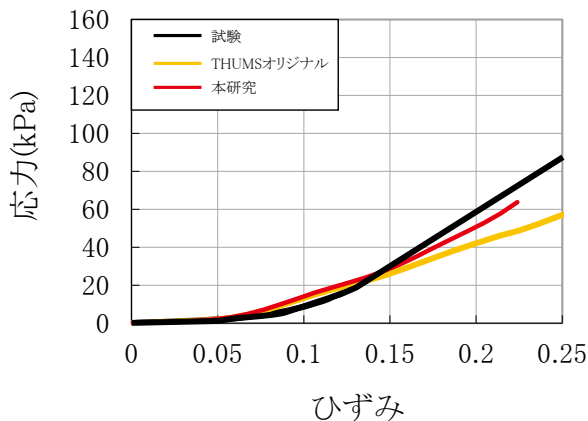


図-13 応力-ひずみ特性比較 (肝臓静圧縮)

材料試験で同定した物性を肝臓モデルに反映した結果、高ひずみ域の圧縮特性が試験結果に近づくことを確認した。

4-3. ファーサイド側突モデルの妥当性確認

次にファーサイド側突スレッド試験の再現モデルを構築して、乗員挙動とコンソールからの荷重を比較した。乗員挙動については、図-14に示す乗員の脊椎に配置したA点、B点、C点の加速度計の応答を比較した。比較結果を図-15~図-18に示す。シミュレーションモデルのTHUMSの各脊椎の加速度の応答とコンソールからの荷重が試験を概ね再現していることを確認した。

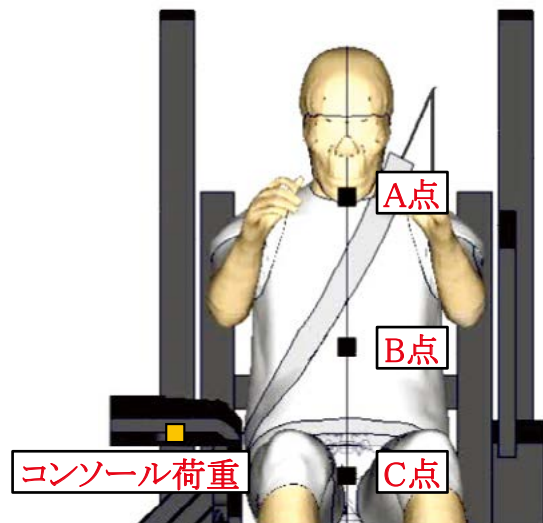


図-14 ファーサイド側突スレッドのレイアウト

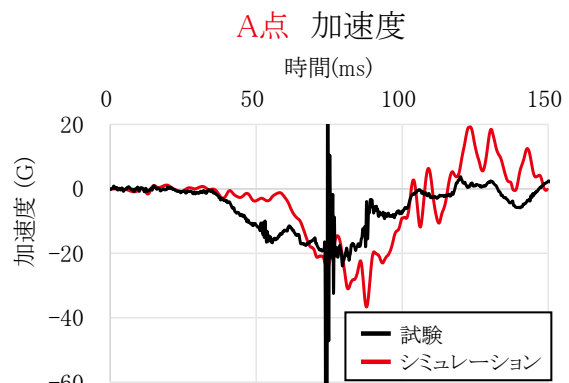


図-15 A点の加速度比較 (試験×シミュレーション)

4-4. 肝臓傷害指標の検討

ファーサイド側突スレッド試験を再現したシミュレーションモデルを用いてTHUMSの肝臓の最大ひずみを確認した。最大ひずみは図-19に示すようにコンソールとオーバーラップしている肝臓下面ではなく、肝臓上面で発生していることが分かった。

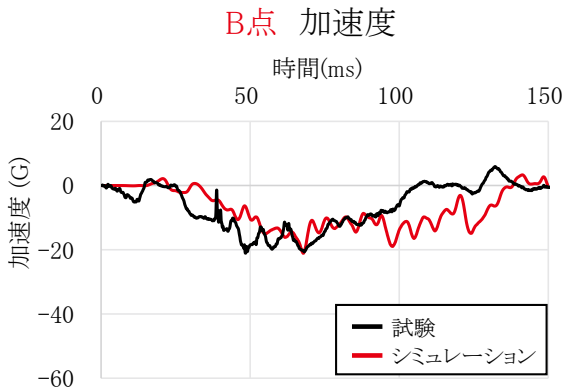


図-16 B点の加速度比較
(試験×シミュレーション)

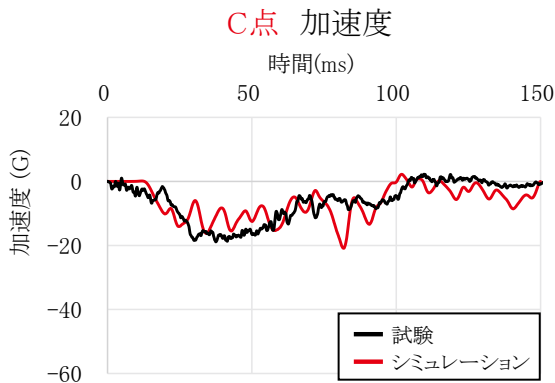


図-17 C点の加速度比較
(試験×シミュレーション)

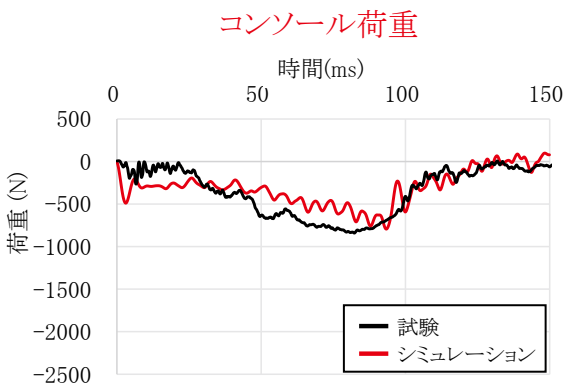


図-18 コンソールの荷重比較
(試験×シミュレーション)

また、Jin らが行った市場事故調査³⁾によると交通事故による肝臓受傷者 53 ケースのうち、67.9% が肝臓上面に損傷を負っていることが報告されており、今回のシミュレーション結果の肝臓の傷害傾向と一致していることが分かった。

よって、最大ひずみを肝臓傷害指標として選定した。

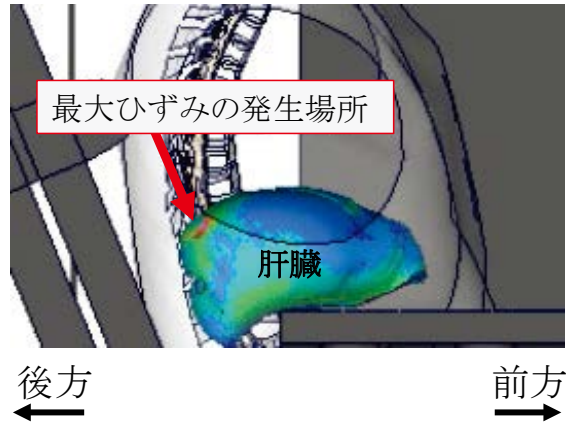


図-19 最大ひずみ発生場所(右側面視)

4-5. コンソール高さの肝臓傷害の影響

次に肝臓の受傷因子で特に件数の多かったフロアコンソールについて、コンソール高さによる肝臓上面のひずみへの影響を調査した。図-20 に示すコンソールと肝臓のオーバーラップ率を変化させ最大ひずみを確認した。その結果を図-21 に示す。約 60% のオーバーラップ率で肝臓上面に発生するひずみが最大となることが分かった。

$$\text{Overlap ratio} = Hc/Hl \times 100\%$$

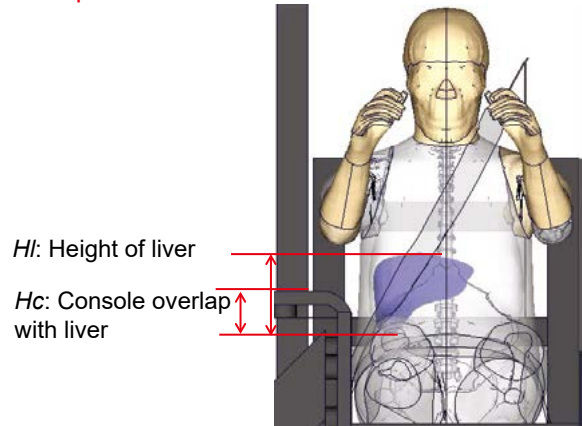


図-20 コンソールと肝臓のオーバーラップ率

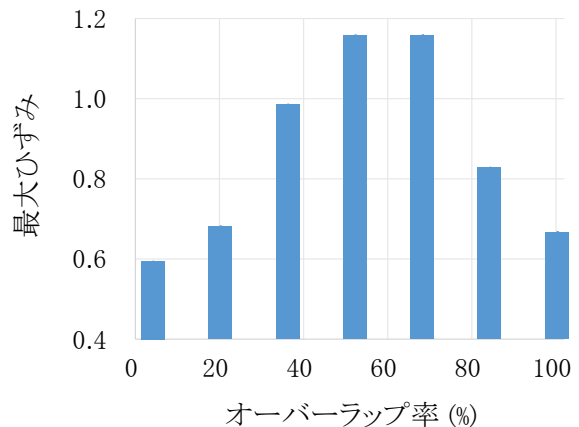


図-21 最大ひずみとオーバーラップ率の関係

5. 考察

5-1. 肝臓傷害発生メカニズム

肝臓上面にひずみが発生するまでの流れを整理した。まず、ファーサイド側突により乗員は慣性力で車内側へ移動しようとする(図-22)。上体は、シートベルトで拘束されているが、コンソールで胸から上側の動きは完全に止められず、シートベルトから肩がずれながら車内側へ移動する。また、肝臓上面は図-23で示すように胸部と腹部を隔てる間膜で結合しているため、上体の動きに追従する。

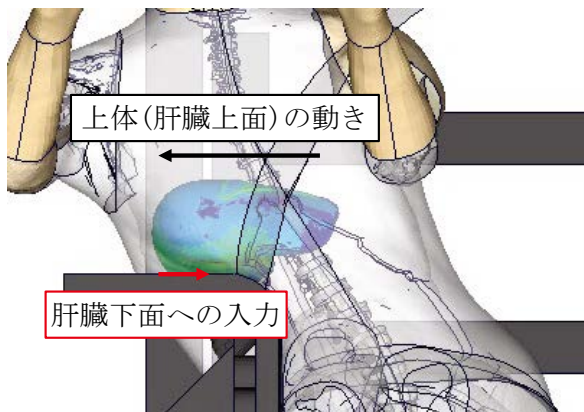
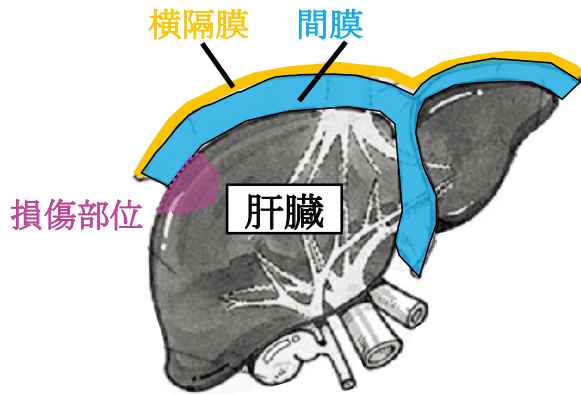


図-22 肝臓上面の傷害発生メカニズム



出典：https://www2.kuh.kumamoto-u.ac.jp/transplant/patient/liver_transplant/02.html

図-23 肝臓付近の拡大図

一方、腰部や肝臓下面は、コンソールにより横移動が規制されている。この状態で間膜と結合した肝臓上面の端部でせん断力が生じてひずみが増加し、肝臓上面を損傷したと推察される。

対策の方向性として、肝臓上面にせん断力を発生させないように上体の移動を抑制することが有効と考えた。

5-2. 対策効果の確認

対策として、肝臓のひずみが最大になるオーバーラップ率の条件において、仮定の反力板と反力を調整するバネを用いて上体の移動を抑制する対策を考えた。

図-24に対策前の上体挙動を、図-25に対策後の上体挙動を示す。この時の肝臓のひずみを図-26と図-27に示す。対策前後で最大ひずみを比較したところ上体の移動を抑制することで肝臓上面に発生していた最大ひずみは1/3程度まで減少することを確認した(図-28)。

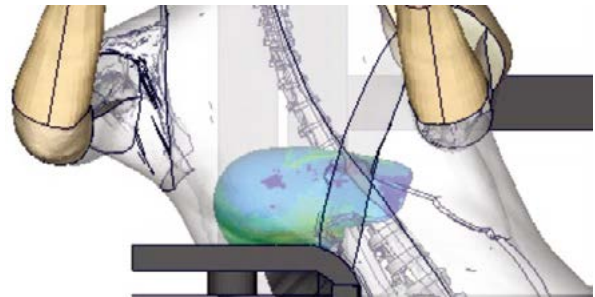


図-24 対策前 上体挙動(正面視)

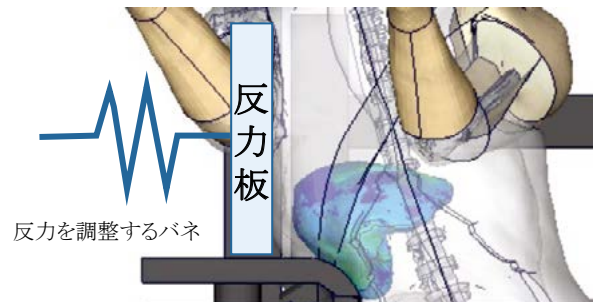


図-25 対策後 上体挙動(正面視)

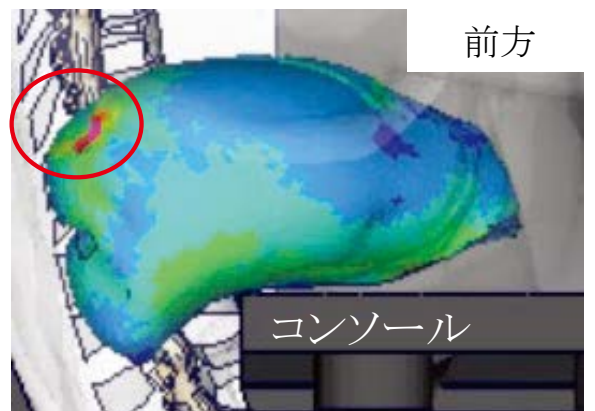


図-26 対策前 肝臓の右側面視

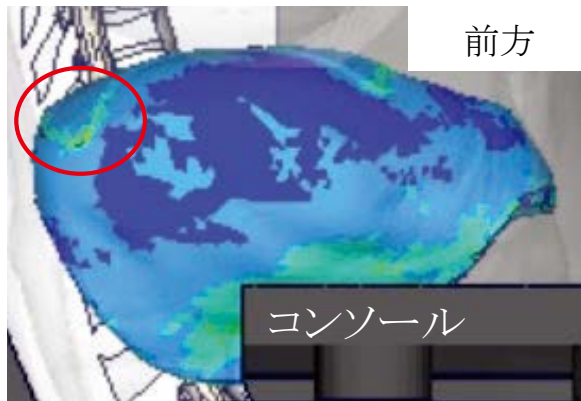


図-27 対策後 肝臓の右側面視

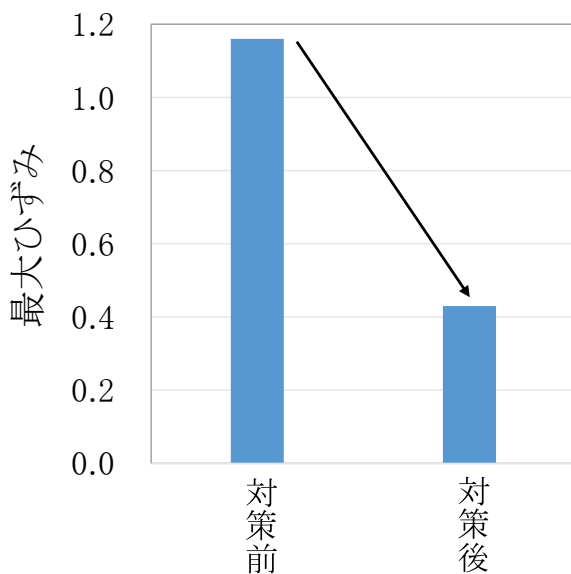


図-28 肝臓の最大ひずみの比較

6. まとめ

- (1) NASS/CDS を用いた市場事故調査でファーサイド側突事故の AIS2 以上の腹部受傷者では、肝臓の受傷が最も多いことが分かった。
- (2) THUMS を用いたファーサイド側突シミュレーション結果と事故調査の肝臓傷害の傾向が一致する最大ひずみを肝臓傷害を表す指標として選定した。
- (3) ファーサイド側突において、上体の横方向への移動量を低減させることで、肝臓上面の受傷リスクを低減できることを確認した。

参考文献

- 1) Kemper et al, Multi-Scale Biomechanical Characterization of Human Liver and Spleen, 22nd Enhanced Safety Vehicle Conference ,11-0195 (2011)
- 2) Pinter et al, Comparison of PMHS, WorldSID, and THOR-NT Responses in Simulated Far Side Impact, STAPP CAR CRASH JOURNAL, Vol.51 p.313-360 (2007)
- 3) Jin et al, Mechanisms of blunt liver trauma patterns : An analysis of 53 cases, EXPERIMENTAL AND THERAPEUTIC MEDICINE, Vol.5 p.395-398 (2013)

著者



楠原由人



井田 等



青木雅司



浅岡道久



Ning Zhang



大原史朗