

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 2 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01290

研究課題名(和文) 歩行者事故における外傷性脳傷害の受傷メカニズム解明に関する研究

研究課題名(英文) Traumatic Brain Injury Mechanism in a Pedestrian Accident

研究代表者

田村 篤敬 (Tamura, Atsutaka)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：30394836

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：歩行者事故における外傷性脳傷害(以下、TBIと表記)は重要な社会的課題である。そこで我々は1)力学実験ならびに2)数値解析を通して歩行者TBIの受傷メカニズム解明に取り組んだ。

1) 脊髄神経根から単離した線維束を試料として単軸引張試験を行い、神経線維束の破断ひずみは15%であることを明らかにした。

2) 有限要素モデルを用いて様々な車両対歩行者の衝突シミュレーションを行い、25～40 km/h の速度域におけるSUVとの衝突はセダンとの衝突よりもTBIを受傷する危険性が有意に高く、特に車両との一次衝突よりも地面との二次衝突によってTBIを受傷する危険性が高いことを見出した。

研究成果の概要(英文)：In a pedestrian accident, a collision with a vehicle or a ground can cause traumatic brain injuries (TBIs), which resultantly lead to a fatal trauma or a long-term impairment with a high societal cost. However, it is difficult to properly assess the potential severity of TBI, because a TBI mechanism is still poorly understood. In the present study, therefore, we have developed a TBI prediction scheme through the combination of 1) experimental work and 2) numerical work. It was revealed that a structural failure strain limit of the neural fiber bundles is almost constant, 15%. Based on the strain limit, a series of pedestrian impact simulations were conducted and the TBI risk was assessed. We found that an SUV is more aggressive than a conventional car in terms of the risk sustaining TBI, and a secondary head strike against a ground can induce much more severe TBIs compared to a primary head strike against a vehicle even in a relatively "moderate" collision speed between 25 and 40 km/h.

研究分野：傷害バイオメカニクス

キーワード：バイオメカニクス 歩行者 外傷性脳傷害 SUV セダン 交通外傷 引張試験 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

近年、国内交通事故による死亡者の数は減少傾向にあるにも関わらず、歩行中の死者数は、ほぼ横ばい状態であり、現在では自動車に乗車中の死者数を抜いて死亡原因の第一位となっている。歩行者傷害の中で最も致命的なのは言うまでもなく頭部外傷（特に外傷性脳傷害）であり、直接的死因の約6割を占める。外傷性脳傷害に関しては、以前より頭部に作用する並進加速度と回転加速度の危険性が指摘されており、その結果、脳組織に生じるひずみや頭蓋内圧の急激な変化が脳損傷を引き起こす原因になると予想されているが、未だその受傷メカニズムは明らかでない。

既に外傷性脳傷害を判定するための傷害評価基準（耐性値）については幾つか提案されているものの、歩行者脳傷害はミクロ（細胞レベル）からマクロ（個体レベル）までを包括する研究テーマであり、脳損傷に関して統一された傷害評価基準を定めることは困難である。特に生体組織は、弾性係数が互いに数倍～数百倍も異なる要素から構成されており、伸びひずみを例にとると、細胞レベルで得られた耐性値（数%）は、組織レベルで得られた耐性値（20%～30%）とは必ずしも一致しない。このように、数値モデルで外傷性脳傷害を正確に予測する上では、脳組織の巨視的な力学特性だけでなく、脳組織を構成する神経線維や細胞外マトリックスなど微視的な構成要素も含めて考慮することが必要である。ただ、従来の研究では、車両対歩行者の1次衝突、とりわけ受傷頻度の高い下肢傷害のリスク軽減に重点が置かれ、人が地面と衝突する2次衝突や評価の難しい頭部外傷については、殆ど注意が払われてこなかった。

そこで本研究では、力学実験で傷害判定のひずみ閾値を求めるとともに、車両対歩行者の衝突現象を低速走行車との1次衝突のみならず、高速走行車ならびに地面との1次・2次衝突を含めて計算機上で再現し、脳組織のひずみ増加に寄与する具体的な加害要因の抽出を行うことを目指した。

2. 研究の目的

歩行者の外傷性脳傷害（Traumatic Brain Injury: 以下、TBIと表記）の受傷メカニズムを明らかにするとともに、TBIを低減するための方策を提示する。

3. 研究の方法

力学実験

脳組織には神経線維で構成される白質と細胞体で構成される灰白質が存在するが、白質から神経線維を単離するのは困難であるため、試料を神経線維の束で構成される脊髄神経根で代替することにした。具体的には食肉センターから新鮮なブタ脊髄を入手し、神経根を外科手術用のメスを用いて単離した。

その後、試作した単軸引張試験装置（Fig. 1）を用い、ひずみ速度 0.01～1.11/s の範囲で神経線維束の引張試験を実施した。

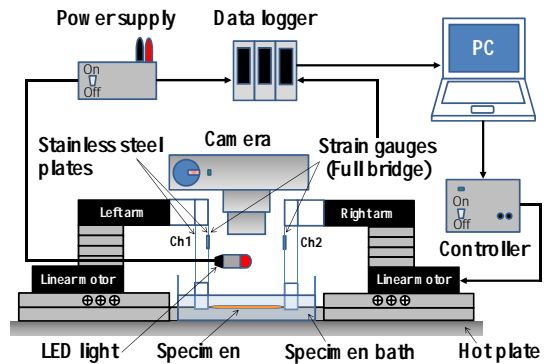
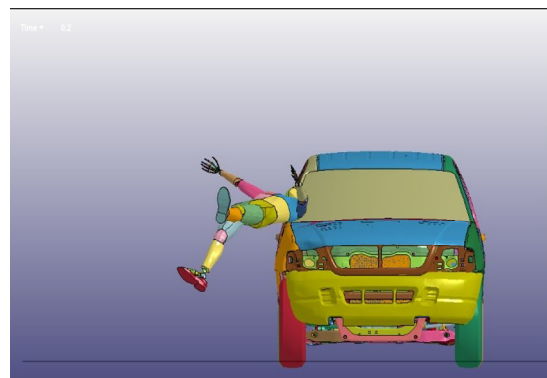


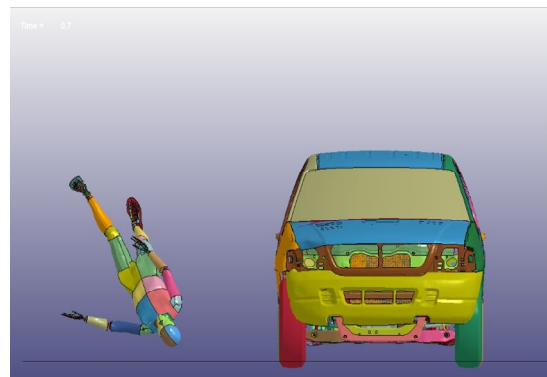
Fig. 1: 試作した単軸引張試験装置の概略

数値解析

成人男性の歩行者が低速～高速で走行する車（SUVまたはセダン）にはねられた状況を想定し、衝突車両の車種、速度、あるいは歩行者の体の向きや移動速度の違いが、代表的な頭部傷害指標である頭部重心の並進加速度（ $HIC_{15}$ ）や回転加速度、さらには脳組織のひずみ分布にどのような影響を与えるのかを車両との1次衝突のみならず、地面との2次衝突を含めて評価した（Fig. 2）。この際の力学実験で求めた傷害判定ひずみ閾値をもとに、TBIの受傷リスクに及ぼす影響について様々な衝突条件で調べた。



(a) 車両との一次衝突



(b) 地面との二次衝突

Fig. 2: 車両対歩行者の衝突解析の一例

#### 4. 研究成果

##### 力学実験

神経線維束の両端に引張変位を徐々に付加すると、試料の軸方向に沿ってひずみが不均質に分布していくことを見出した (Fig. 3). しかし、破断ひずみは試験条件によらず、ほぼ一定で約 15% であった。一方、神経線維束の力学的強度は解剖学的位置に強く依存し、胸部 T > 頸部 C > 腰部 L という傾向が見られた (Fig. 4).

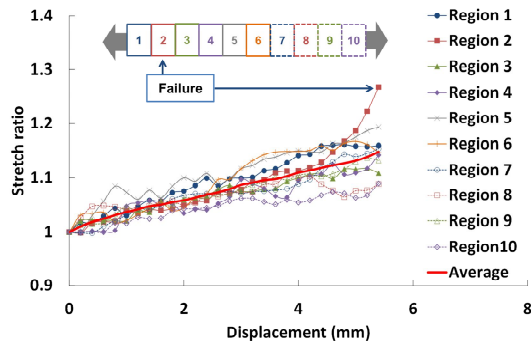
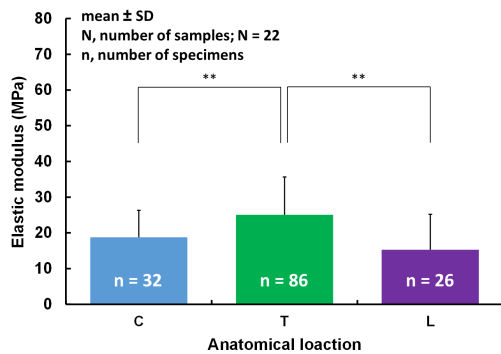
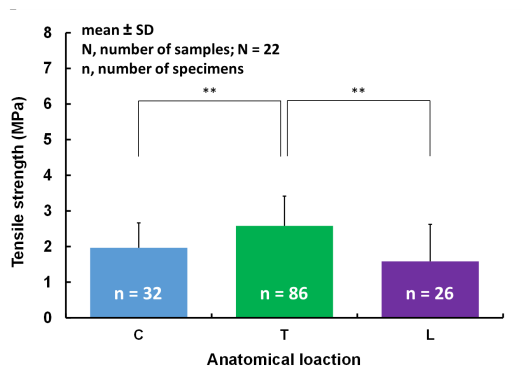


Fig. 3: 単軸引張を受けた神経線維束の軸方向に沿って観察されたひずみ分布



(a) ヤング率



(b) 引張強さ

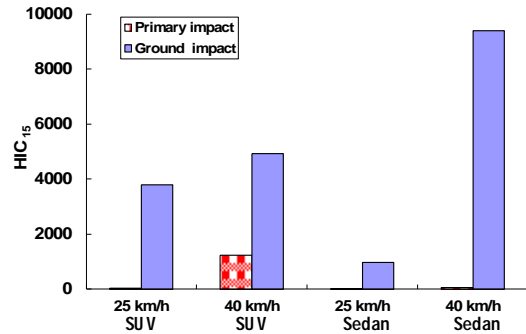
Fig. 4: 頸部 C, 胸部 T, 腰部 L で得られた代表的な力学特性の比較 (\*\*  $P < 0.01$ )

##### 数値解析

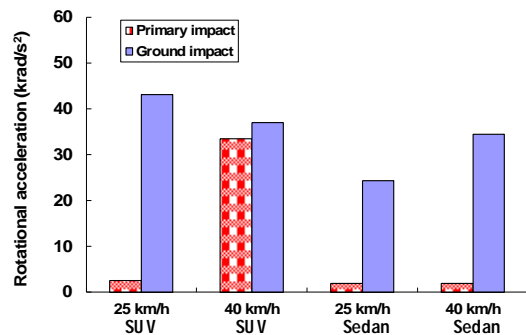
TBI の評価指標として頭部重心の並進加速度 ( $HIC_{15}$ ), 回転加速度, ならびに頭蓋内脳組織の変形, すなわち最大主ひずみが閾値を超過した要素数の累積率 (Cumulative Strain

Damage Measure, 以下, CSDM と表記) を採用した. ここで, CSDM の算出に必要な傷害判定のひずみ閾値は, 神経線維束の力学実験で求めた破断ひずみ 15% とした.

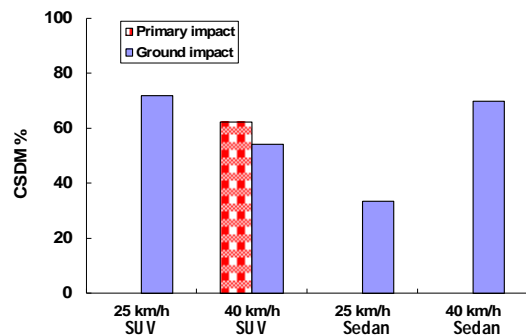
車両対歩行者の衝突シミュレーションを様々な形態で行い, 当初の予想通り, 車両との一次衝突よりも地面との二次衝突が致命的であることを定量的に示した (Fig. 5). また, 頭部重心に作用する並進ならびに回転加速度が TBI 受傷リスクの増加に対して有意に寄与していることを明らかにした.



(a) 頭部重心の並進加速度 ( $HIC_{15}$ )



(b) 頭部重心の回転加速度



(c) 頭蓋内脳組織の変形 (CSDM)

Fig. 5: Sideswipe impact シミュレーションで得られた TBI 評価指標の比較

本来, 歩行者安全に関わる試験方法は, 理想的な衝突形態を単純に模擬すればよいのではなく, 様々な不確定条件を加味して設定すべきである. たとえば, 衝突直前の歩行者が立っている位置, 初期姿勢, 移動速度などは衝突後の挙動に大きな影響を及ぼしうる.

また、衝突車両の前面形状や速度、ブレーキも重要な影響因子である。さらに歩行者事故においては下肢や胸腹部、頭部の受傷リスクをバランスよく低減させる必要もある。最近では予防安全技術の進化に伴い、緊急時に作動する自動ブレーキが車両へ導入されるようになり、それによる事故の抑止効果も期待されているが、歩行者保護の観点からは車両減速度の最大化が必ずしも最善の選択肢でないことにも留意すべきである。本研究成果は以下の3点にまとめられる。

神経線維束の構造的な損傷の発生有無を判定するための伸びひずみ閾値は15%である。

車両対歩行者の衝突事故にみられる外傷性脳傷害の受傷リスクに関しては車両との一次衝突よりも地面との二次衝突が致命的であり、一般的なセダンよりも車高の高いSUVの危険性が高い。

歩行者頭部に作用する並進加速度ならびに回転加速度の両方が、外傷性脳傷害の発生に対して有意な影響を及ぼしている。

今後、歩行者事故で地面との二次衝突による頭部へのダメージを最小化するため、車両前面形状の改良と衝突速度の更なる低減 (< 25 km/h) が必要である。

#### 5. 主な発表論文等 (研究代表者には下線)

[雑誌論文](計11件、すべて査読あり)

1. A. Tamura and M. Sakaya “Dynamic Tensile Behavior of Fiber Bundles Isolated from Spinal Nerve Roots: Effects of Anatomical Site and Loading Rate on Mechanical Strength” ASME Journal of Engineering and Science in Medical Diagnostics and Therapy (in press). doi: 10.1115/1.4039560
2. A. Tamura, J. Hasegawa and T. Koide “Comparative analysis on traumatic brain injury risk due to primary and secondary impacts in a pedestrian sideswipe accident” ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems Part B: Mechanical Engineering (in press). doi: 10.1115/1.4039464
3. A. Tamura, J. Hongu, T. Yamamoto and T. Koide “Dynamic tensile behavior of fiber bundles freshly isolated from nerve roots” In: Proc. of ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2017, Tampa, FL (USA). doi: 10.1115/IMECE2017-70796
4. A. Tamura, T. Koide and K.H. Yang “Effects of translational and rotational accelerations on traumatic brain injury in a sport utility vehicle-to-pedestrian crash”

Int J Vehicle Design, 2016, Vol. 72, pp. 208-229.

doi.org/10.1504/IJVD.2016.080589

5. A. Tamura, S. Hayashi and T. Matsumoto “Effect of loading rate on viscoelastic properties and local mechanical heterogeneity of freshly isolated muscle fiber bundles subjected to uniaxial stretching” Journal of Mechanics in Medicine and Biology, 2016, Vol. 16, pp. 1650086-1-17. doi.org/10.1142/S021951941650086X
6. A. Tamura, J. Murakami, Y. Sone and T. Koide “Strain rate effects on the tensile behavior of fiber bundles isolated from nerve root” Journal of Sustainable Research in Engineering, 2016, Vol. 2, pp. 63-69. <http://hdl.handle.net/123456789/2284>
7. A. Tamura, J. Hasegawa and T. Koide “Comparative analysis on traumatic brain injury risk due to primary and secondary impacts in a vehicle-pedestrian sideswipe accident” In: Proc. of ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2016, Phoenix, AZ (USA). doi: 10.1115/IMECE2016-66021
8. A. Tamura, M. Sakaya and T. Koide “Effects of anatomical site and loading rate on tensile behavior of fiber bundles isolated from nerve roots” In: Proc. of ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, 2016, Phoenix, AZ (USA). doi: 10.1115/IMECE2016-66016
9. A. Tamura and T. Koide “Pedestrian accident reconstruction using a human body finite element model” In: Proc. of ASME 2015 International Design & Engineering Technical Conference and Computers & Information in Engineering Conference, 2015, Boston, MA (USA). doi: 10.1115/DETC2015-46969
10. A. Tamura, J. Murakami, Y. Sone and T. Koide “Strain rate effects on the tensile behavior of fiber bundles isolated from nerve root” In: Proc. Of 2015 Sustainable Research and Innovation Conference, 2015, Nairobi (Kenya). <http://sri.jkuat.ac.ke/ojs/index.php/proceedings/article/view/280>
11. A. Tamura, T. Koide and K.H. Yang “Effects of ground impact on traumatic brain injury in a fender vault pedestrian crash” Int J Vehicle Safety, 2015, Vol. 8, pp. 85-100. doi: 10.1115/DETC2015-46969

〔学会発表〕(計 9件)

1. 田村篤敬, 本宮潤一, 松本健郎「単軸引張を受けた筋線維束の動的引張挙動の予測」日本機械学会 第30回バイオエンジニアリング講演会, 京都, 2017.
2. 山本朋実, 田村篤敬, 本宮潤一, 小出隆夫「引張速度が神経線維束の力学特性に及ぼす影響」日本機械学会中国四国学生会 第47回学生会卒業研究発表講演会, 広島, 2017.
3. 田村篤敬, 濱田初幸, 河鱈一彦「柔道の後ろ受身動作における打ち手の効果」日本武道学会第49回大会, 伊勢, 2016.
4. 曾根悠太, 田村篤敬, 川口佑樹, 小出隆夫「脊髄硬膜の動的二軸引張試験方法の開発」日本機械学会中国四国支部 第54期総会・講演会, 松山, 2016.
5. 田村篤敬, 濱田初幸, 河鱈一彦「柔道の後ろ受身を模擬する頭頸部数値モデルの開発」日本武道学会第48回大会, 東京, 2015.
6. 曾根悠太, 村上潤治, 田村篤敬, 小出隆夫「神経根から単離した線維束の単軸引張試験」第54回生体医工学会大会, 名古屋, 2015.
7. A. Tamura, Y. Kawaguchi, Y. Sone and T. Koide “Biaxial mechanical response of porcine spinal dura mater,” XXVI Congress of International Society of Biomechanics, Brisbane (Australia) 2017.
8. A. Tamura, Y. Kawaguchi, Y. Sone and T. Koide “Development of a biaxial tensile tester for soft biological materials,” 6th Joint Symposium on Materials and Mechanical Engineering between Northeastern University and Tottori University, Tottori (Japan) 2016.
9. A. Tamura and T. Koide “Pedestrian kinematics and brain injury risk involved in a sideswipe accident,” 8th Asian-Pacific Conference on Biomechanics 2015, Sapporo (Japan) 2015.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)  
該当なし

取得状況(計 0件)  
該当なし

〔その他〕

ホームページ等

[http://researchers.adm.tottori-u.ac.jp/html/100001154\\_ja.html](http://researchers.adm.tottori-u.ac.jp/html/100001154_ja.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田村篤敬 (TAMURA, Atsutaka)  
鳥取大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 30394836

(2) 研究分担者

小出隆夫 (KOIDE, Takao)  
鳥取大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 60127446