

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：12608

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2017～2019

課題番号：16KK0123

研究課題名（和文）頭蓋内脳挙動を評価可能な次世代頭部ダミーの世界標準の製品安全性評価法への展開（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Development of a novel surrogate head which incorporates detailed intracranial structure for the use of safety equipments standard tests (Fostering Joint International Research)

研究代表者

宮崎 祐介（Miyazaki, Yusuke）

東京工業大学・工学院・准教授

研究者番号：70432135

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,900,000円

渡航期間： 8ヶ月

研究成果の概要（和文）：スポーツ事故（ラフバラ大学）、人体コンピュータモデリング（チャルマース工科大学）に関する世界トップの研究機関と国際共同研究を展開することにより、これまでに申請者が開発した世界初かつ唯一の頭蓋内構造を有する次世代頭部ダミーを用いたスポーツ脳損傷に対する安全性評価試験法を共同開発し、その世界的普及の端緒とすることを目的とした。まず、ラフバラ大学スポーツ工学研究所の高速ボール衝突実験装置を用いて、野球ボール衝突実験を行い脳震とうメカニズムおよび評価試験法に関する研究を実施した。さらには、チャルマース工科大学においてそのシミュレーションモデルを開発し、野球ボール衝突再現シミュレーションを実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

申請者が世界で唯一開発している頭蓋内構造を再現した次世代頭部ダミーを、社会問題であるスポーツ脳震盪研究に応用すべく、スポーツ工学の世界的研究機関であるラフバラ大学と人体シミュレーションモデルの世界的拠点であるチャルマース工科大学と共同研究を行った。野球ボール衝突実験とシミュレーション結果により、硬球衝突の場合、圧力波の伝播により、繰り返し高い圧力が作用することがわかった。これは自動車事故や他のスポーツ事故では観測されない現象であり、新たな脳震盪メカニズムである可能性がある。なお、本研究は、第13回国際スポーツ工学国際会議にてMizuno Sports Awardを受賞した。

研究成果の概要（英文）：By conducting international joint research with world-leading sports technology institute in Loughborough University and human computer modeling researchers at Chalmers University of Technology, the objective of this research project was to develop a safety test method for sports brain injury using the world's first and only novel human head surrogate with intracranial structure developed by the applicant team to date. First, we conducted a baseball collision experiment using a high-speed ball collision apparatus at the Sport Technology Institute in Loughborough University, and conducted research on the mechanism and test method of sports brain injury with very short time duration of impact. In addition, a finite element model of human head, helmet, baseball ball were developed. From the results of both experimental and simulations, the mechanism of intracranial brain deformation in baseball impact cases might be different from head impact cases in other sports or traffic accidents.

研究分野：傷害バイオメカニクス

キーワード：人体実体モデル スポーツ傷害 脳震とう 人体有限要素モデル

## 様式 F-19-2

### 1. 研究開始当初の背景

外傷性脳損傷は小児から高齢者までのあらゆる事故形態において高頻度に発生しかつ重篤であり、世界的に超少子高齢化社会へと移行する未来へ向けて、その予防と再発防止が求められる。しかし、現状の製品安全性評価ツールである身体ダミーには、頭蓋内構造自体が含まれておらず、もっとも重要な「脳損傷」の直接評価そのものが不可能であった。これまでに申請者は医用画像より頭蓋内構造を再現した精密頭部実体モデルを世界で初めて構築し、頭蓋内脳挙動を実験的に可視化した。本ダミーは、交通事故、乳幼児虐待など様々な状況に対して、応用されつつあった。このような背景のもと、英国ラフバラ大とは、すでに本モデルを用いたスポーツにおける頭部外傷の新評価試験法に関する国際共同研究を開始しており、その連携の継続が必要であった。一方で、次世代頭部ダミーの生体忠実性の評価とそれを用いた傷害基準の精度向上と検証が課題としてあげられ、世界的に最先端の頭部モデリング技術を有する研究機関との共同研究が欠かせない状況にあった。

### 2. 研究の目的

そこで、本申請においては、スポーツ事故（ラフバラ大学）、人体コンピュータモデリング（チャルマース工科大学）、に関する世界トップの研究機関と国際共同研究を展開することにより、これまでに開発された世界初かつ唯一の頭蓋内構造を有する次世代頭部ダミーを用いたスポーツ製品・環境における脳損傷に対する安全性評価試験法を共同開発し、その世界的普及の端緒とすることを目的とした。特に、本課題においては、英国ラフバラ大学スポーツ工学研究所の高速ボール衝突実験装置を用いて、野球ボール衝突実験を行い、硬球衝突における脳震とうメカニズムおよび評価試験法に関する研究を実施した。さらには、人体のシミュレーションモデル開発の世界的一大拠点であるチャルマース工科大学滞在中においてそのシミュレーションモデルを開発し、日本帰国後に野球ボール衝突を再現したシミュレーションを実施した。

### 3. 研究の方法

まず、英国ラフバラ大学スポーツ工学研究所に滞在し、次世代頭部ダミーを用いたスポーツ事故、特にこれまで未知のメカニズムである短い衝撃持続時間下における脳損傷発生メカニズムに着目し、硬球衝突である野球ボール衝突事故における脳震盪メカニズムとリスクの評価法を開発することとした。申請者はこれまでに頭蓋内構造を再現した次世代頭部ダミーの開発を行い、自動車衝突における頭蓋内脳変形挙動のメカニズムについて検討してきた。本研究ではこのモデルを改良し、スポーツにおける頭蓋内脳変形挙動を評価可能なモデルに改良した（図1.a）。脳モデルは、実人体の脳のうち左右大脳半球、小脳、脳幹をモデル化している。成人男性頭部のMR画像より、脳形状CADモデルを構築し、脳モデルの型を3Dプリンタ（FORTUS250mc：ストラタシス社）で製作し、それにシリコーンゲル（Sylgard527：Dow Corning Corp.）を注入、硬化させることで構築される。さらに、野球衝突時の脳内加速度応答を計測するために、3軸並進加速度と3軸まわりの角速度の計6自由度成分を計測可能な6軸センサ（DTS 6DX PRO：DTS社）が左右大脳に一つずつ埋め込まれている（図1.b）。頭蓋骨モデルは、脳モデル構築に用いた画像と同一人物の成人男性の頭部CT画像より構築された頭蓋骨三次元ポリゴンモデルに基づき、製作した。なお、厚さ2mmステンレスプレートを用いて2つのボルトによって前頭部と後頭部のパーツと締結させることにより、ヘルメット装着時の頭蓋骨部の干渉を防いだ。さらに、鼻骨パーツの内側に6軸センサを設置することで頭蓋骨部の加速度計測も行った。また、実人体の硬膜とヤング率が等価なポリウレタンシートにより大脳鎌・小脳テントモデルを頭蓋骨モデル内に固定した。さらに、皮膚モデルについては頭部ダミーの生体忠実性要件を満たすシリコーンゴムを用いた。頭蓋骨モデル内に脳モデルを挿入し、脳脊髄液と動粘度と密度が等価である水を、頭蓋腔に充填することで頭部モデルを構築した。本次世代頭部ダミーを、英国ラフバラ大学スポーツ工学研究所所有の野球ボール高速衝突実験装置に取り付け、野球ボールの頭部衝突を模擬した実験を行った図1(c)。ヘルメットを装着した次世代頭部ダミーを既存ダミーのHybrid III 頸部ダミーに取付け、逆さつりの状態で固定した。本実験で使用するボール射出機は、空気圧によりボールを射出することができる。衝突速度は、80 mph (129 km/h)とし、衝突箇所は、実際の試合において脳振とうが発生している側頭下部に設定した。

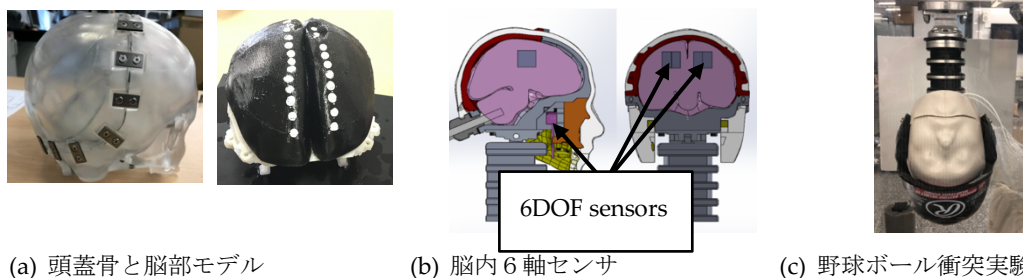


図1 次世代頭部ダミーを用いた野球ボール衝突実験

さらに、人体コンピュータモデリングに関する世界トップの研究機関であるチャルマース工科大学に滞在し、頭部有限要素モデルの改良を行った。頭部有限要素モデルは、次世代頭部ダミー構築で用いたものと同じの3次元形状を基に、人体頭部を再現し、人体の材料特性を入力したものである。本滞在中にはさらにヘルメット衝突を再現できるように皮膚構造および脳脊髄液モデルの向上と、頸部モデルの接続を行った。本モデルでは、構造要素として、3層構造の頭蓋骨、硬膜、大脳鎌、小脳テント、脳脊髄液、脳室、大脳、小脳、脳幹、皮膚を含んでいる。これらの要素のうち、硬膜、軟膜、脳室については次世代頭部ダミーにおいて未再現の構造要素である。モデル全体の要素数は約27万である。これに加えて、頸部の有限要素モデルとして実験で使用した既存ダミーであるHybrid IIIの頸部有限要素モデル(Simplified Hybrid III 50 percentile neck model, LSTC)を使用した。頭部有限要素モデルの頭蓋骨上のOC関節付近のノード群とHybrid III頸部モデルの頭部側の部分を拘束することで頭部と頸部を接続した。解析ソルバーはLS-DYNA ver9.1.0(LSTC)である。さらに、日本に帰国後において、野球ボールとヘルメットモデルの構築を行った。実際の野球ボールとヘルメットは内部に粘弾性体の高分子材料など複雑な構造および材料特性を有するが、本研究では脳損傷メカニズムの検討を目的としているため、頭部に作用する荷重波形を再現できれば良いと考え、ボール・ヘルメットともに材料特性を弾性体としてモデル化した。ヘルメットライナーの材料特性を決定するため、既存ダミーであるHybrid IIIにヘルメットを装着してボールを衝突させた実験の再現シミュレーションを行い、頭部重心加速度が実験と同程度となるようにヘルメットライナーの材料特性を決定した。ヘルメットモデル、頭部および頸部モデル、ボールモデルを用いて野球ボール衝突実験の再現シミュレーションを実施した(図2(a))。入力条件として、ボールモデルに実験と同じ初速度128 km/hを与え、実験と同様、側頭下部に衝突させた。また、頸部の体幹側の部分を完全拘束することで実験と同様に固定した。ボールとヘルメット、ヘルメットと皮膚の接触面にそれぞれ接触定義を与えた。解析後、図2(b)に示すように衝突点直下のa点から対側のe点までの脳内の5箇所について圧力変動を取得した。

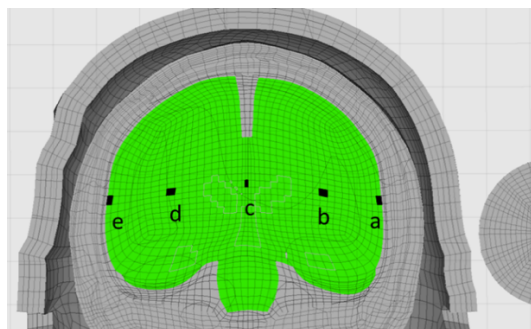


図2 野球ボール衝突再現シミュレーション

図3 脳内圧力計測位置

#### 4. 研究成果

野球ボール衝突実験において計測された頭蓋骨および左右大脳の合成加速度応答の一例を図4に、頭蓋骨における角速度応答を図5に示した。頭蓋骨および脳の加速度応答は、多峰性の振動波形を示し、その持続時間は4ms程度であった。また、左右大脳の合成加速度波形は、頭蓋骨における加速度波形よりも立ち上がり早く、かつ、その最大値は2倍以上大きかった。また、角速度変化幅はx, z軸周りにおいてほぼ同等であり、その大きさは、約13rad/s程度であった。

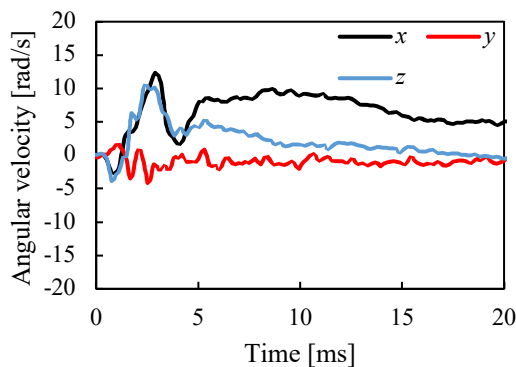
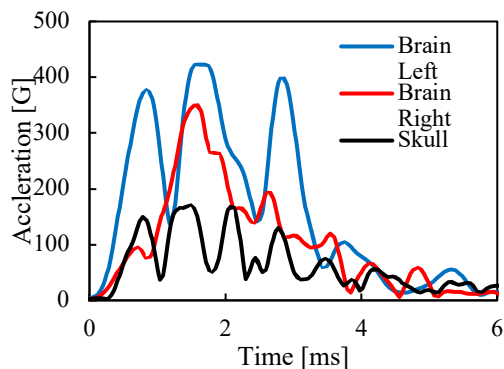


図4 実験における頭蓋骨および左右大脳の合成加速度応答

図5 実験における頭部の角速度応答

有限要素解析によって得られた頭蓋骨および脳センサ配置位置における合成加速度応答を図 6 に示した。加速度波形は多峰性で、その立ち上がりの早さは、左脳、右脳、頭蓋骨の順、最大値の大きさは左脳、右脳、頭蓋骨の順であり、図 4 で示した実験結果と、定量的なピーク値の大きさは異なるもののその波形の特徴は同様であった。さらに図 5 で示した脳内の 5 つの要素における圧力の時間変動を図 7 に示した。まず、衝突箇所にもっとも近い位置 a において高い正圧が発生し、その後 b, c, d, e の順で正圧の立ち上がりが見られた。また、衝突箇所から一番遠い e では、圧力が最大となった後、符号が反転し負圧が最大となり、正圧と負圧を繰り返しながら減衰している。負圧の大きさに注目すると、2 番目に負圧が大きい値をとるのは衝突箇所に最も近い a である。2 ms 以降を見ると、a も e と同様に正圧と負圧を繰り返しながら減衰していることがわかる。

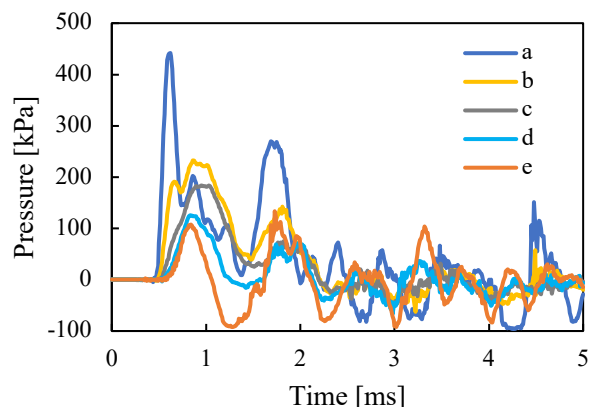
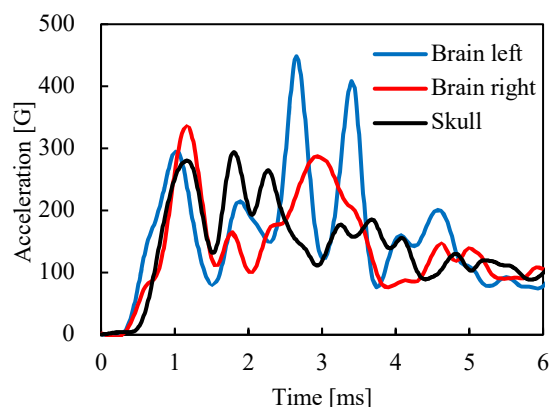


図 6 シミュレーションにおける頭蓋骨および左右大脳の合成加速度応答

図 7 脳内圧力応答

実験およびシミュレーションいずれの場合においても、ボールからの衝撃力が先に作用する頭蓋骨よりも、脳内加速度応答の立ち上がりの方が早かった理由として、応力波、特に圧力波伝播の影響が挙げられる。つまり、衝撃位置と左右大脳のセンサ距離が、頭蓋骨の鼻部に取り付けられたセンサより近いためである。図 7 に示したように、脳内の圧力はまず衝突側から正圧が立ち上がり、その後衝突点から近い順に正圧が立ち上がり、対側の頭蓋骨に到達した際に、負圧に転換し、その後負圧が逆向きに伝播することがわかる。興味深いことに、圧力波が再度反対側の頭蓋骨境界まで到達すると符号を反転し、また逆向きに伝播する。この圧力波は徐々に減衰するものの、脳の頭蓋骨境界に近い領域において、約-100kPa 程度の負圧が繰り返し作用することになる。従来、脳しんとうを始めとするびまん性脳損傷に関する研究は、交通事故、アメリカンフットボールなど比較的持続時間の長い衝撃力が作用した場合のメカニズムに注目してきた。このような場合、頭部の回転運動による脳のせん断変形がその発生メカニズムとして提案され、脳のせん断変形と相関の高い頭部角速度に基づく傷害基準が提案されてきた。例えば、著者らが、次世代頭部ダミーを用いて行った交通事故条件でのスレッド実験では、頭部の角速度変化幅は 40rad/s 以上であり、頭蓋骨および脳の合成加速度は単峰性で持続時間は数十 ms で、かつ頭蓋骨と脳の加速度応答の最大値に顕著な差は見られず、圧力波伝播の影響は小さかった。しかし、野球ボール衝突の場合、角速度変化幅はその 25%程度と頭部の回転運動は小さく、かつ、上述のように持続時間の短い衝撃により発生した圧力波による脳内加速度の増加が見られた。すなわち、野球ボール衝突における頭蓋内脳変形挙動は自動車事故条件のようなより持続時間が長く回転運動を主要因とする頭蓋内脳変形挙動と本質的なメカニズムが異なり、圧力波伝播の影響を考慮した新たな傷害指標および頭部の防護策を提案することが求められると考えられた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yusuke Miyazaki, Jon Farmer, Miki Morimatsu, Shota Ito, Sean Mitchell, Paul Sherratt
2. 発表標題 Brain pressure wave propagation during baseball impact
3. 学会等名 The 13th conference of the International Sports Engineering Association (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 宮崎 祐介, 森松 美樹, 伊藤 翔大, Jonathan Farmer, Paul Sherratt, Sean Mitchell
2. 発表標題 次世代頭部ダミーと有限要素モデルを用いた 野球ボール衝突時の頭蓋内脳挙動の検討
3. 学会等名 日本機械学会 シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2019講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮崎祐介, Jonathan Farmer, Sean Mitchell, Andy Harland
2. 発表標題 次世代頭部ダミーを用いた野球ボール衝突時の頭部加速度応答計測
3. 学会等名 日本機械学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Miyazaki, K. Ishiwa, M. Kitagawa, M. Ueno, S. Sugimoto, R. Asahi, H. Matsumura,
2. 発表標題 Development of a Rotational Brain Injury Criterion with Consideration of the Direction and Duration of Head Rotational Motion
3. 学会等名 IRCOBI conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宮崎 祐介, 北川 雅隆, 石和 健太郎, 上野 正樹, 杉本 繁, 朝日 龍介, 松村 広隆
2. 発表標題 頭部回転運動の方向と持続時間を考慮した軽度外傷性脳損傷評価指標の提案
3. 学会等名 自動車技術会2018 年春季大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ミチエル ショーン  (Mitchell Sean)	ラフバラ大学・スポーツ工学研究所・Lecturer	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	ダビッドソン ヨハン  (Daviddson Johan)	チャルマース工科大学・SAFER・Associate Professor	