

令和 2 年 6 月 7 日現在

機関番号：12602
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2019
課題番号：17K17154
研究課題名(和文) 繊維強化熱可塑性樹脂および衝撃吸収構造を用いた軽量・薄型フェイスガードの開発

研究課題名(英文) The development of light-weight and thin face guard using fiber-reinforced thermoplastics and shock-absorption structure

研究代表者
和田 敬広 (Wada, Takahiro)
東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・助教

研究者番号：10632317
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)：フェイスガードは、スポーツ中の外傷としてあげられる顎顔面骨折を受傷した競技者が早期に競技復帰する時に安全のために装着する一時的な患部保護具である。本研究は、安全性を維持しつつ軽量かつ薄いフェイスガードの開発を目指した。フェイスガードに衝撃吸収構造及び繊維強化熱可塑性樹脂を用いることで軽量化、薄型化が可能になり、衝撃試験の結果、従来のフェイスガードと同等以上の安全性があった。また、3Dプリンタ用材料でも試し応用の可能性があることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義
フェイスガードに衝撃吸収構造及び繊維強化熱可塑性樹脂を用いることで安全性を保ちつつ、軽量化、薄型化が可能になった。繊維強化熱可塑性樹脂で可能になったということは従来の簡便な制作プロセスからの大きな変更なしに装着者の運動中のパフォーマンスを下げる要因であったズレや視野の制限への改善が期待できる。また、3Dプリンタ用材料がフェイスガード用のコア材として衝撃への安全性が高いことを確認できたことはフェイスガード製作の分業化、遠隔化など新しい制作プロセスにつながる結果である。

研究成果の概要(英文)：A face guard is a protector worn by an athlete that allows a speedy and safe return to play after sustaining maxillofacial traumatic injury. The purpose of this project is to develop a lightweight and thin face guard which has sufficient shock absorption ability. The use of a buffering space structure for shock absorption and fiber-reinforced thermoplastic resin makes it possible to reduce the weight and thickness of the face guard. As a result of the impact test, the FG that incorporated fiber-reinforced thermoplastic resin and a buffering space has good shock absorption ability. In addition, we considered materials for 3D printer could be used for face guard application. The results show that it could be used as face guard core materials.

研究分野：歯科理工学

キーワード：スポーツ用フェイスガード ノーズガード 防具 スポーツ歯学 歯科理工学 スポーツ 衝撃試験
繊維熱可塑性樹脂

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

フェイスガード(以下、**FG**)はスポーツ中の外傷として頻発するものの一つである顎顔面骨折を受傷した競技者の患部を保護し、早期の競技復帰を果たすために用いられる暫間患部保護具である(図1)。代表選手、プロスポーツ選手らが顔面を怪我した後、競技に復帰する際に**FG**をつけて練習や完全に治るまでの試合に参加する姿が注目を浴びることも多い。

FGに求められる要件は、安全性と競技者のパフォーマンスへの影響に大別される。安全性については、衝撃を十分に吸収・分散し患部に伝えないで再受傷を防止することや**FG**が装着者や相手競技者を傷害しない柔軟な表面を持つことが必要とされる。そのため、現状の**FG**は硬質な熱可塑性樹脂のコア材をクッション性の素材で覆う構造をしている。競技者のパフォーマンスへの影響としては、**FG**によって視野が妨げられること、ズレやムシなどへの配慮が上げられる。現状、再受傷報告がほとんどないことや安全性に対する不安はないという意見が多いことから安全性については問題とされることは少ない。一方、プロのアスリートからの意見としては、視野が妨げられることやズレ等のパフォーマンスへの影響で不満が多い。つまり、安全性は保ちつつ軽量かつ薄い**FG**が求められている。

コア材の材質に関しては、樹脂を繊維で強化する方法は従来から行われており、繊維強化熱硬化性樹脂の応用や**FG**に使用されている熱可塑性樹脂に繊維を入れて応用した報告がある。繊維強化熱可塑性樹脂(以下、**FRTP**)は軽量かつ高強度で加工性も良好なことから自動車業界等でも長年、研究開発が続けられており、価格面でも手の届く状況になっている。**FG**の構造としては、コア材とクッション材の間にスペースを設ける単純な構造でも衝撃吸収・分散に有効であると考えられる。また、これらの複雑な構造を加工、検討する方法として、**3D**プリンタや**CAD**の活用も重要であると考えた。



図1 フェイスシールド

2. 研究の目的

本研究では、安全性を保ちつつ軽量・薄型の**FG**作成を目的として、**FG**のコア材およびその構造を検討し、衝撃試験等を用いて衝撃吸収・分散能を評価し、新しい**FG**を開発した。具体的には、コア材として従来用いられてきた熱可塑性樹脂から比強度の大きく軽量化、薄型化が期待できるガラス繊維や炭素繊維による強化をした**FRTP**の検討を行った。コア材の構造はより衝撃を吸収・分散するように患部とコア材間にスペースを作る衝撃吸収構造を試した。それらの試料を用いて、衝撃試験により衝撃吸収・分散能を評価した。また、**3D**プリンタ用の応用可能性も検討した。

3. 研究の方法

(1) 繊維強化熱可塑性樹脂及び衝撃吸収構造を応用したフェイスガード開発

FGのコア材として使用されている熱可塑性樹脂(ポリカプロラクタン(**AP**, アクアプラスト, 酒井医療))にガラス繊維を埋め込むことで**FRTP**を作成した。**FG**を模した試験片をコア材(100 mm × 100 mm)の両面にネオプレンクッション材(ネオプレン, 酒井医療)を接着し作製した。コア材は下記の4種を作成した。

- ・ポリカプロラクタン(**AP**, アクアプラスト, 酒井医療)の厚み**1.6 mm (AP16)**, **3.2 mm (AP32)**
- ・**AP16**の中心に直径**3.0 mm**の穴を空けて空間を作り、**AP16** (50 mm × 50 mm)で覆った試料(**AP-APS**)
- ・**AP16**の中心に直径**3.0 mm**の穴を空けて空間を作り、ガラス繊維で強化した**AP**で覆った試料(**FRP-APS**)

衝撃試験は図2に示すデュポン衝撃機を用いて、試験片に先を鈍端に加工した棒を介して落下用ウエイト(**500 g**)をレールに沿って**240 mm**上方から自由落下させた。試験片下部に配置した3つのロードセルセンサ(**LMB-A-2KN**, 共和電業)で荷重を測定し、3つの合計荷重値を最大荷重とした。(n = 5)

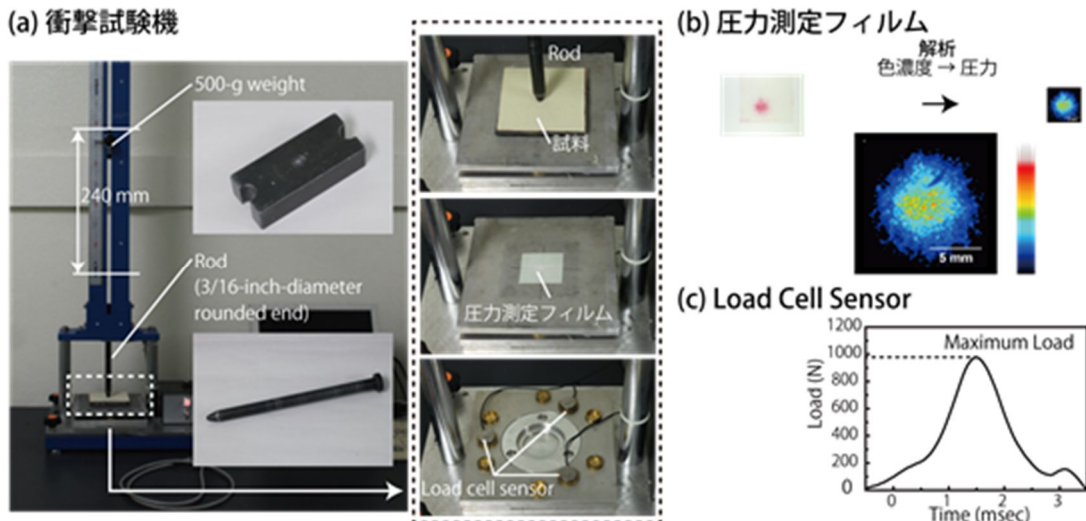


図 2 衝撃試験セットアップ (a) 衝撃試験機と試験片周辺部、(b) 圧力測定フィルムの結果例、(c) Load Cell Sensor の結果例

(2) カーボン繊維熱可塑性樹脂を用いたフェイスガード開発

(1)では、FRTPを自作したが、自作するためには研究室で設備、労力が必要となる。FRTPは自動車業界やスポーツ業界等で需要があり開発が進められており、現在では比較的用意に入手可能である。そこで、販売されているガラス繊維及びカーボン繊維強化熱可塑性樹脂のコア材への応用を検討した。コア材として用いたのは下記の2種である。

- ・ガラス繊維強化熱可塑性樹脂 (GF RTP, サンワトレーディング, **Teplex dynalite108**, 樹脂: 熱可塑性ポリウレタン (TPU), 繊維: フィラメントガラス **45 vol.%, 厚み: 1.0 mm**)
- ・CF RTP (サンワトレーディング, **Teplex 208-C200**, 樹脂: TPU, 繊維: カーボン繊維 **45 vol.%, 厚み: 1.0 mm**)

衝撃試験に関しては、上記を同じ方法を用いて行った。

(3) 高速度カメラを用いた衝撃試験観察

衝撃が加わった時にどのようにFGが変形するかという情報は材料を検討する上で非常に重要である。しかしながら、衝撃試験の速度及び試験片の変形速度は早いいため通常のカメラでは観察することができない。そこで、高速度カメラを用いて衝撃試験中のFG様試験片の変形を観察した。FGコア材(100 mm×100 mm)の下面にネオプレンクッション材を接着し、FGを模した試験片を作製した。コア材は、

- ・CF RTP (**Teplex 208-C200**, サンワトレーディング, 樹脂: TPU、繊維: カーボン繊維 **45 vol.%, 厚み: 1.0 mm**)
- ・ポリカプロラクタン (**AP32**、アクアブラスト、酒井医療、厚み: **3.2 mm**)

の2種類を使用し、スプレーでコア材側表面に解析用のランダムパターンを作成した(図3)。

衝撃試験は上記の方法に加え、衝撃試験の観察するための高速度カメラ2台(FASTCAM MiniAX200, フォトロン)を設置し、**10,000 fps**で観察した。観察データは、解析ソフトウェア(VIC-3D, レーザ計測)を用いてデジタル画像相関(DIC)法で解析した。

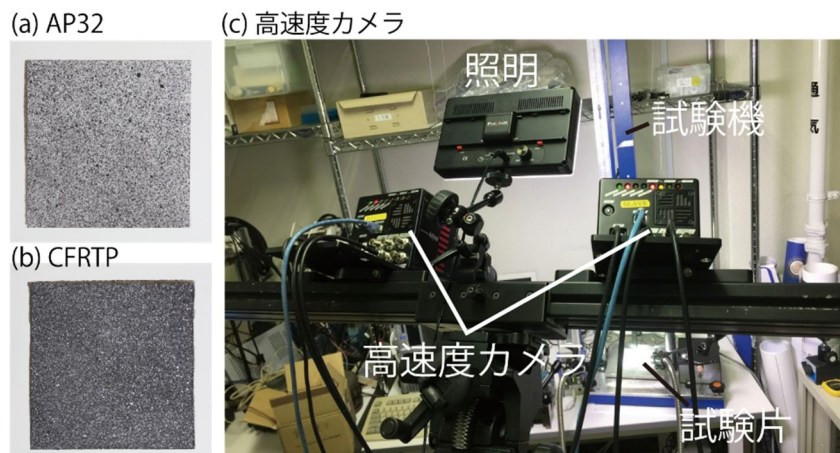


図 3 (a), (b) 表面にランダムパターンを作成した試験片、(c) 高速度カメラのセッティング

(4) 3Dプリンタ用材料のフェイスガードコア材への応用

3Dプリンタは造形精度、速度、コスト、プリントできる材料の種類の改良が目覚ましく工業界だけではなく歯科医療への応用が進められている。FGの作成でも3Dプリンタの活用は十分に考えられる。メリットとして、データを制作者の製作の負担が減ること、インターネット等で送受信可能なことから制作者がその場にいらなくても良いこと、デザインの幅が広がることなどがあげられる。そこで、今回は3Dプリンタ用の材料でFG様試験片を作り、衝撃に耐えられるか調べた。3Dプリンタ (Form 3, Formlabs) を用いて、試験片のコア材用に100×100 mmの角材をDurable Resin (V2, Formlabs) で出力した。厚みは1 mm から4 mmを1 mm刻みで作成した。Durable Resinを選定した理由はFormlabsの提供する3Dプリント用材料として衝撃に強く、変形させても破壊されづらいためである。CADソフトウェアはFusion 360 (Autodesk) 印刷ソフトウェアはPreform (Formlabs) を用いた。出力したコア材はイソプロパノールによる洗浄、紫外線硬化後、両面にクッション材を接着し、衝撃試験用試験片とした。衝撃試験に関しては上記と同じ方法を用いた。

4. 研究成果

(1) 繊維強化熱可塑性樹脂及び衝撃吸収構造を応用したフェイスガードの衝撃試験

FRP-APSはAP32より厚みは薄い部分で1.6 mm減少、重量はクッション材も含めた重量も約70%減少した。衝撃試験結果を図4に示す。試験片を何も置かない場合、ロードセルセンサの測定値から求めた最大荷重は、 5011 ± 111 Nを示した。試験片を置いた場合では、全ての試験片で1000 N以下であり、AP16 > AP32 > AP-APS > FRP-APSの順で小さくなった。圧力測定フィルムの結果では、AP16 > AP-APS > AP32 > FRP-APSであった。AP-APSはAP32よりも悪くなっている理由としては、衝撃吸収構造以上にAPが変形し、衝撃が試験片の下に局所的に伝わったためと考えられた。

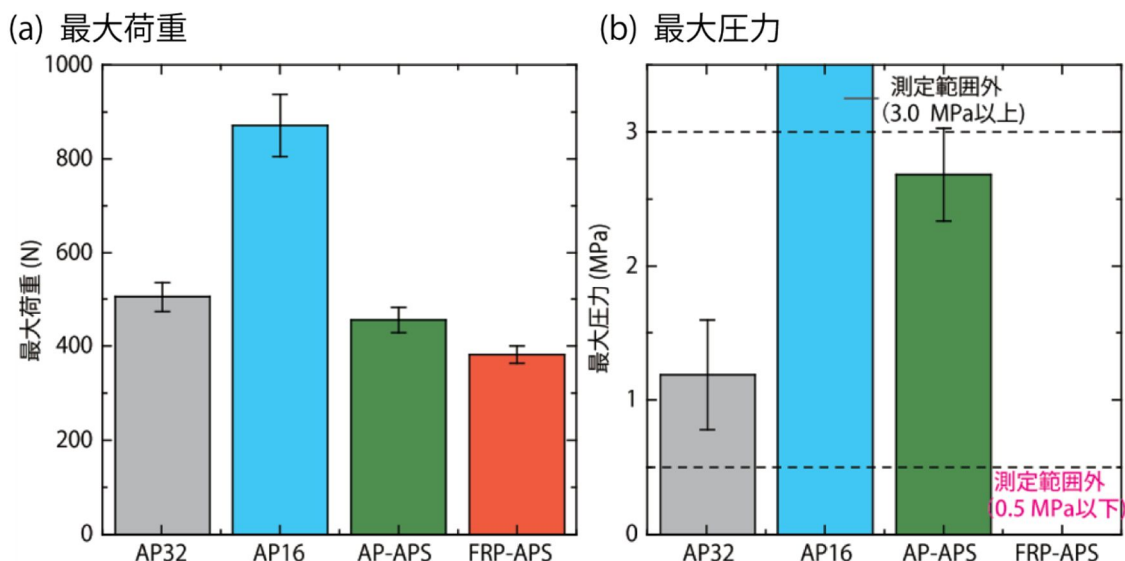


図4 衝撃試験結果 (a) ロードセルセンサから求めた最大荷重値、(b) 圧力測定フィルムから求めた最大圧力値。自作ガラス繊維強化熱可塑性樹脂及び衝撃吸収構造を応用したFRP-APSが一般的な材料で作成したAP32よりも優れた結果が得られた。

以上の結果より、衝撃吸収構造を自作FRTPで強化することでFGの薄型化、軽量化と安全性向上の両立が可能であることがわかった。

(2) カーボン繊維強化熱可塑性樹脂を用いたフェイスガードの衝撃試験

ガラス、カーボン繊維強化熱可塑性樹脂(以下、GFRTF, CFRTF)をFGのコア材として使用した場合、臨床的に広く使用されている熱可塑性樹脂をコア材として用いた場合よりも衝撃分散性が良くなることが分かった(図5(a), (b))。また、厚み、重量に関しては、コア材にCFRTFを使用したFGは臨床で広く使用されているAP32と比較して厚みが2.2 mm減少、クッション材も含めた重量は約40%減少した。

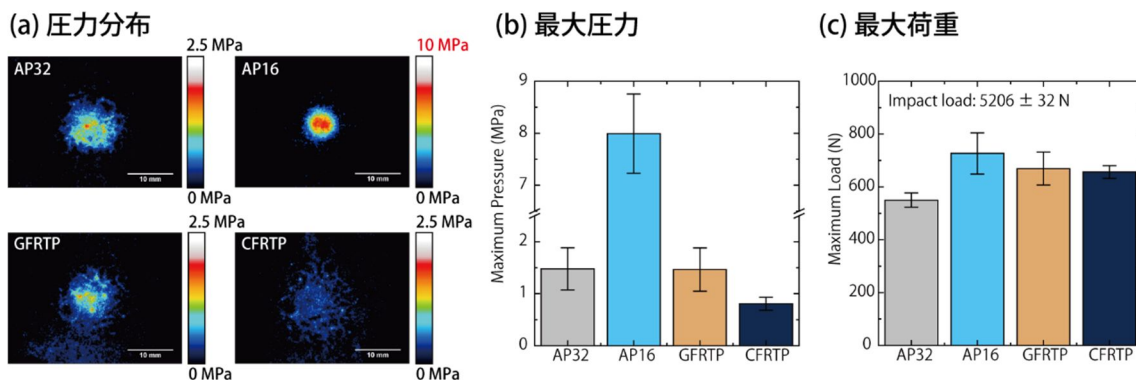


図 5 圧力測定フィルムの解析結果 (a) 圧力分布, (b) 最大圧力, (c) ロードセルの結果 (最大荷重)

以上の結果より、市販の FRTP を使用することでも、安全性を保ちつつ、FG の薄型化、軽量化が可能であることがわかった。

(3) 高速度カメラを用いた衝撃時変形観察

衝撃試験時の高速度カメラでの観察及びその解析結果を図 6 に示した。変形開始から変形が最大になるまで AP32、CFRT 両方とも 0.3 msec と同じであることがわかった。一方、試験片の加撃部と加撃部から約 30 mm 離れた部分では、CFRT のほうが変形量の差が 1 mm 程度少ないことや AP32 の端のほうでは加撃方向とは逆にコア材が移動していることがわかった。

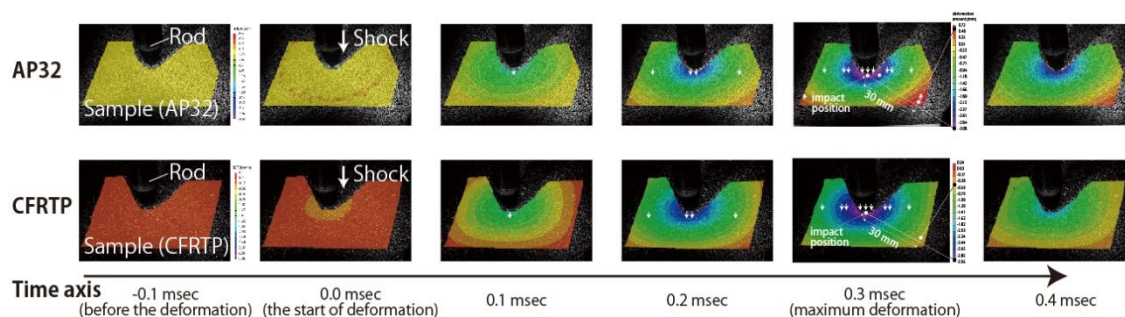


図 6 高速度カメラ・DIC 法による衝撃試験の解析結果。両試料ともに加撃開始から 0.3 msec で最大歪みに達したが、その歪みは CFRT のほうが少なかった。

つまり、CFRT を FG のコア材として使用することで衝撃が伝わる速度の遅延効果はないものの、歪みの減少及び衝撃が広範囲に分散されていると考えられた。

(4) 3D プリント用材料のフェイスガードコア材への応用

図 7 に 3D プリント用材料 (Durable Resin) で印刷したコア材を使用した FG 様試験片の衝撃試験結果を示す。前述の一般的な FG に使用される AP32 では、最大荷重は 500 N 程度であったが、Durable Resin では 500 - 600 N となった。衝撃試験後の試験片を目視すると特に破断等は起こっておらず、破折の心配は少ないことがわかった。(2) で示したように FG の構造に変化を加えることで FG の衝撃吸収・分散能は変わるので今後は物理的な構造なども検討していく必要があると考えられた。

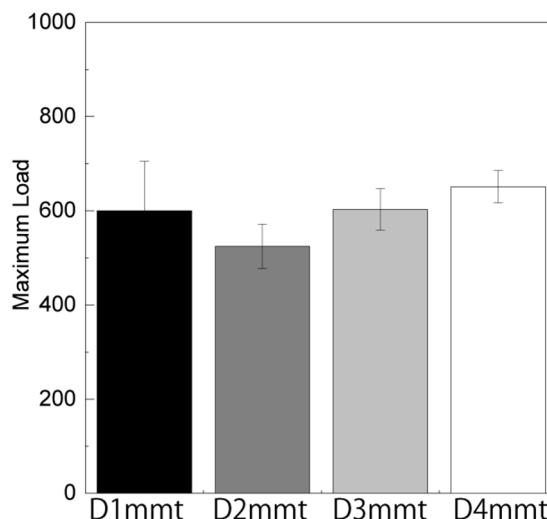


図 7 衝撃試験 (ロードセル) 結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wada Takahiro, Churei Hiroshi, Takayanagi Haruka, Iwasaki Naohiko, Ueno Toshiaki, Takahashi Hidekazu, Uo Motohiro	4. 巻 2018
2. 論文標題 Improvement of the Shock Absorption Ability of a Face Guard by Incorporating a Glass-Fiber-Reinforced Thermoplastic and Buffering Space	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 BioMed Research International	6. 最初と最後の頁 1~8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2018/6503568	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 和田敬広, 中禮宏, 上野俊明, 宇尾基弘
2. 発表標題 炭素繊維強化熱可塑性樹脂を使用したフェイスガードの機械的性質
3. 学会等名 第71回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田敬広, 中禮宏, 田邊元, 金城里於, 上野俊明, 宇尾基弘
2. 発表標題 高速度カメラによる炭素繊維強化熱可塑性樹脂応用フェイスガードの衝撃試験観察
3. 学会等名 第29回日本スポーツ歯科医学会 総会・学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田敬広, 中禮宏, 田邊元, 金城里於, 岩崎直彦, 上野俊明, 高橋英和, 宇尾基弘, 高嶋康人, 南二三吉
2. 発表標題 高速度カメラ・デジタル画像相関法を用いた炭素繊維強化熱可塑性樹脂フェイスガードの衝撃試験時歪分布解析
3. 学会等名 「学際・国際的高度人材育成ライフイノベーションマテリアル創製共同研究プロジェクト」（6大学連携プロジェクト）第3回公開討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名	Takahiro Wada, Hiroshi Churei, Gen Tanabe, Rio Kinjo, Yasuhito Takashima, Toshiaki Ueno, Fumiyo Minami, Motohiro Uo
2. 発表標題	Shock absorption analysis of face guards made of carbon fiber-reinforced thermoplastics using high-speed camera and digital image correlation
3. 学会等名	3rd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (iLIM-3) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	金城里於, 和田敬広, 中禮宏, 林海里, 吉田結梨子, 田邊元, 宇尾基弘, 高橋英和, 上野俊明
2. 発表標題	マウスガード材に内蔵した圧力センサの挙動
3. 学会等名	第71回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	金城里於, 和田敬広, 中禮宏, 林海里, 高橋英和, 宇尾基弘, 上野俊明
2. 発表標題	マウスガード型ウェアラブルセンサ開発に向けたフォースセンサの挙動評価
3. 学会等名	第29回日本スポーツ歯科医学会 総会・学術大会
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Rio Kinjo, Takahiro Wada, Hiroshi Churei, Hidekazu Takahashi, Toshiaki Ueno, Motohiro Uo
2. 発表標題	Evaluating the use of a force sensor for the development of a mouth guard-type wearable sensor
3. 学会等名	3rd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (iLIM-3) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 和田敬広, 中禮宏, 上野俊明, 宇尾基弘
2. 発表標題 炭素繊維強化熱可塑性樹脂を使用したフェイスガードの衝撃分散能
3. 学会等名 第28回日本スポーツ歯科医学会 総会・学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takahiro Wada, Hiroshi Churei, Mako Yokose, Haruka Takayanagi, Naohiko Iwasaki, Toshiaki Ueno, Hidekazu Takahashi, Motohiro Uo
2. 発表標題 Evaluation of the Mechanical Properties of a Faceguard Made of Fiber-Reinforced Thermoplastics
3. 学会等名 2nd International Symposium on Creation of Life Innovation Materials for Interdisciplinary and International Researcher Development (ICMaSS2017 iLIM-2)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 和田敬広, 中禮宏, 横瀬真子, 高柳遼, 岩崎直彦, 上野俊明, 高橋英和, 宇尾基弘
2. 発表標題 繊維強化熱可塑性樹脂のフェイスガードへの応用
3. 学会等名 6大連携プロジェクト 生体・医療材料開発分野 公開討論会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 和田敬広, 中禮宏, 上野俊明, 宇尾基弘
2. 発表標題 炭素繊維強化熱可塑性樹脂を使用したフェイスガードの機械的性質
3. 学会等名 第71回日本歯科理工学会学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高速カメラによる炭素繊維強化熱可塑性樹脂応用フェイスガードの衝撃試験観察
2. 発表標題 和田敬広, 中禮宏, 田邊元, 金城里於, 上野俊明, 宇尾基弘
3. 学会等名 第29回日本スポーツ歯科医学会 総会・学術大会
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
研究協力者	中禮 宏 (Churei Hiroshi) (50431945)	東京医科歯科大学・大学院医歯学総合研究科・助教 (12602)	