

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 17 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420010

研究課題名(和文) 衝撃生体力学を考慮した高速変形下で硬化するスポーツ用柔軟プロテクターの開発

研究課題名(英文) Development of flexible sports protectors hardening under high speed deformation based on impact biomechanics

研究代表者

樋口 理宏 (Higuchi, Masahiro)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号：50455185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、衝撃負荷時のみ外殻が硬化するスポーツ用柔軟プロテクターを開発する。まず、外殻材料としてアミン系硬化のビスフェノールA型エポキシ樹脂を選定し、主剤・硬化剤の配合比を変更することで圧縮特性に及ぼすひずみ速度依存性を操作するとともに、動的粘弾性試験により緩和弾性率と配合比の関係を明らかにした。次に、弾性率の時間依存性に基づき、スポーツ用柔軟プロテクターを試作した。さらに、同プロテクターと市販のプロテクターに対して、柔軟性と衝撃吸収性を評価することで、本研究で提案した柔軟プロテクターの優位性を示した。

研究成果の概要(英文)：In the present study, we develop a flexible sports protector whose outer shell hardens only under impact due. First, a bisphenol A-type epoxide resin with amine-based curing agent is selected as an outer shell for the proposed protector. The strain rate effect of compressive property were controlled by change the compound ratio of the main and curing agents, and the relation between the relaxation modulus and the compound ratio was clarified by the dynamic viscoelasticity measurements. Next, based on the time dependency of the modulus, a prototype of the flexible sports protector was produced. Experiments on the flexibility and impact absorption characteristic of the protector were conducted, and the results suggested the advantages of the proposed protector.

研究分野：材料力学

キーワード：衝撃工学 高分子材料 エポキシ樹脂 緩和弾性率 時間依存性 ひずみ速度依存性

1. 研究開始当初の背景

野球やサッカー等の多くのスポーツ競技では、ボールあるいはヒト同士の衝突により競技者が受傷することがあり、場合によっては選手生命、人命にかかわる。そのため、硬質な樹脂や複合強化樹脂により構成される外殻を持つスポーツ用プロテクターが古くから利用されている。しかし、このような硬質プロテクターは、スポーツ動作の妨げとならないように、頭部、脛部といった非可動部に装着箇所が限定されている。一方、肘、膝、手首等の関節部には比較的柔軟性のあるプロテクターを装着するケースもあるが、硬質プロテクターほどの防護効果は見込めず、必要以上にプロテクターを装着したがる競技者も多い。

一般に硬質プロテクターは、硬質な外殻と柔軟な発泡体等からなる内殻による積層構造となっており、図1のようにボールや選手同士の衝突により硬質な外殻が局所変形することなく内殻を一樣圧縮させ、衝突エネルギーを吸収し過大な衝撃力がプロテクター装着部である被保護対象物(人体)に作用しないようにすることが、硬質プロテクターに求められる機能である。

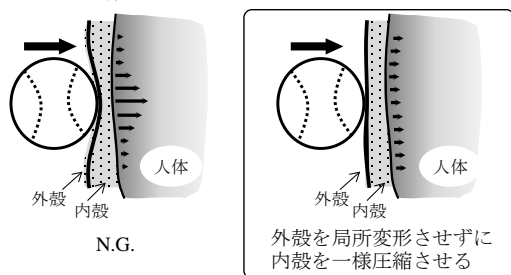


図1 硬質プロテクターに求められる変形

2. 研究の目的

本研究では、通常の運動時には柔軟性を示す一方で、ボール等の衝突による高速変形時のみ外殻が粘弾性特性に起因する時間・ひずみ速度依存性により硬化することで剛性が向上し、高速変形下でも柔軟な内殻を一樣圧縮させ過大な衝撃力を人体に作用させないスポーツ用柔軟プロテクターを開発する。すなわち、頭部等これまで硬質プロテクターが適用されてきた箇所だけでなく、硬質プロテクターでは動作の妨げになるような肘・膝・手首等の可動域の大きい関節部への適用も実現し、衝突による受傷を軽減、受傷頻度を大幅に低減することが可能となる。

3. 研究の方法

(1) 外殻材料の作製と材料特性評価

樹脂材料は主剤・硬化剤の種類、その配合比により、材料特性を操作できる。ここでは、樹脂の配合比の調整により特性の異なる複数の外殻を作製し、各種材料試験により広範囲のひずみ速度領域における材料特性をまとめる。外殻材料として軟質エポキシを選定し、柔軟プロテクターの外殻素材を作製する。

高ひずみ速度下においては SHPB 衝撃試験機、低ひずみ速度下においては万能型材料試験機を用いて圧縮特性を評価する。さらに、動的粘弾性試験により複素弾性率、緩和弾性率を測定することで、弾性率の時間依存性を評価する。

(2) 柔軟プロテクターの設計と試作

軟質エポキシ樹脂の弾性率の時間依存性とスポーツ動作・衝突現象の時間スケールを照らし合わせることで、スポーツ用柔軟プロテクターを設計・試作する。ここでは、関節部への適用を念頭に置き、軟質エポキシ樹脂を外殻としたニーサポーターを試作した。

(3) 柔軟プロテクターの衝撃特性および柔軟性評価

二重振り子式柔軟性評価試験機を設計・製作し、試作プロテクターの柔軟性を評価し、市販のバレーボール用ニーサポーターとの比較を行う。落錘式衝撃試験により、同プロテクターの衝撃特性評価を行う。開発した試作プロテクターが衝撃変形下で硬化することで内殻材を一樣圧縮することで衝撃力を分散するとともに、衝撃力を低減できることを明らかにする。さらに、外殻となる軟質エポキシ樹脂の中立面に強化繊維を挿入することにより、曲げに対する柔軟性を損なうことなく、幅広い温度範囲における高い衝撃吸収性の確保を目指す。

4. 研究成果

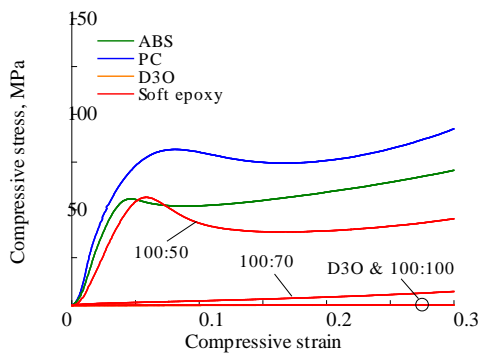
(1) 外殻材料の作製と材料特性評価

スポーツ用プロテクターの外殻材料として、軟質エポキシ樹脂 (AXSON TECHNOLOGIES, TRANSLUX D150) を選択した。このエポキシ樹脂は、主剤 (ビスフェノール A 型エポキシ樹脂) と硬化剤 (アミン系硬化剤) の配合比を変更することで架橋密度を操作し、材料特性を大きく変更可能である。主剤と硬化剤を重量比にして 100:50 から 100:100 の範囲で調整した混合物を十分に攪拌し真空脱泡した後、金型に注型し 25°C で 96 時間かけて硬化させ、板状の試料を成形した。

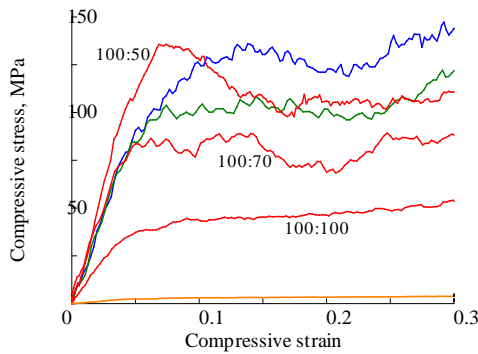
図 2(a) に万能型材料試験機による低ひずみ速度試験、図 2(b) に SHPB 試験機による高ひずみ速度試験により得られた応力-ひずみ線図を示す。ここでは同軟質エポキシ樹脂の比較対象として、ダイラタンシー現象により衝撃変形で硬化する D30 および ABS 樹脂、PC (polycarbonate) を試験片として供した。図 2(a) より、低ひずみ速度において配合比 100:100 および 100:70 のエポキシ樹脂は明確な降伏点を示さずゴム状の挙動を示しており、配合比 100:100 については D30 と同等に低い応力値で圧縮変形が進行していることがわかる。一方で配合比 100:50 のエポキシ樹脂はひずみ 0.05 付近で降伏し、ガラス状態の挙動を示し、ABS や PC に及ばないものの高い応力値で圧縮変形が生じる。このように

本研究で用いたエポキシ樹脂は配合比を変更することで低ひずみ変形時においてゴム状からガラス状へと特性を操作することができる。次に図 2(b)より、高ひずみ速度においては、配合比 100:100 および 100:70 のエポキシ樹脂もガラス状樹脂の挙動を示しており、図 2(a)の低ひずみ速度の場合と比較して劇的に応力値が増大していることがわかる。

図 3 に動的粘弾性試験により得られた複素弾性率を基に、線型粘弾性理論に従い算出した 25°Cにおける緩和弾性率の時間依存性を示す。いずれの配合比においても、微小時間における瞬間弾性率は 10^9 [Pa]オーダーであるが、硬化剤過多すなわち架橋密度が低下するほど、弾性率が緩和しゴム状に推移するまでの時間が早くなっていることがわかった。



(b) 低ひずみ速度 3×10^{-3} /s



(b) 2×10^3 /s

図 2 軟質エポキシ樹脂の圧縮応力-ひずみ関係

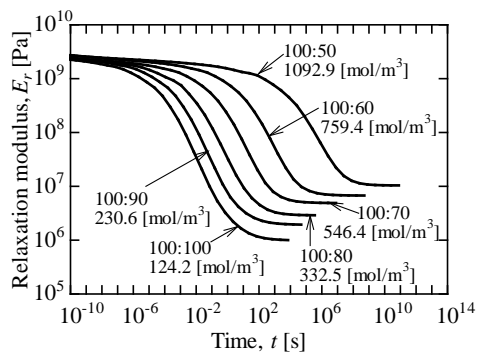
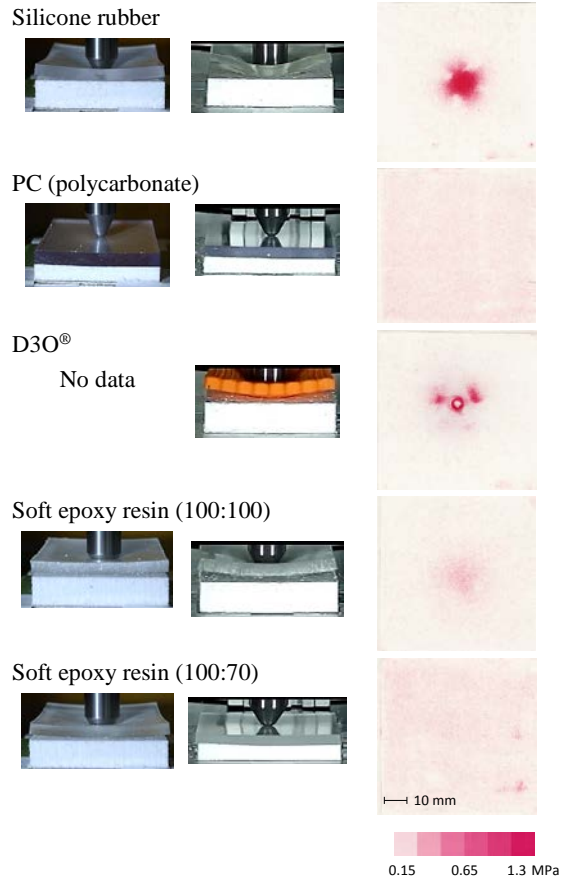


図 3 緩和弾性率の時間依存性



(a) 静的試験 (b) 衝撃試験 (c) 圧力分布
(変位 10 mm) (最大変位時)

図 4 外殻材料としての簡易試験評価結果

次いで、予備試験により、軟質エポキシ樹脂の柔軟プロテクターの外殻としての性能を評価した。本試験では、炭素鋼製インパクトを 2 m の高さから自由落下させ、鋼板上に設置した外殻、内殻材料に衝突させる。この際、内殻・鋼板間に設置した感圧紙により鋼板に作用した圧力分布を測定する。外殻には厚さ 6 mm のエポキシ樹脂、PC、シリコン樹脂および D3O を選定し、内殻には厚さ 15 mm の発泡ポリスチレンを用いた。断面寸法はともに $70 \times 70 \text{ mm}^2$ である。また、低速変形時の柔軟性を確認するために、万能材料試験機による静的試験も実施した。

図 4 に示すように、シリコン樹脂の場合、静的、衝撃試験ともに圧子接触部において外殻に局所変形が生じ感圧紙の中央に高い圧力が作用したことがわかる。逆に、PC の場合は、内殻を一樣圧縮したことで感圧紙の圧力分布が一樣となっている。一方、配合比 100:100 のエポキシ樹脂は、衝突により曲げが生じているものの、シリコン樹脂と比較して感圧紙中央の圧力を低減できていることがわかる。さらに配合比 100:70 のエポキシ樹脂の場合、低速変形時は圧子が食い込むように外殻が局所変形を示し柔軟であるが、インパクト衝突時の時間スケールにおいて高い弾性率を保持することで、内殻を一樣圧縮できていることがわかる。

(2) 柔軟プロテクターの設計と試作

軟質エポキシ樹脂を用いてスポーツ用プロテクターを設計するにあたり、スポーツにおいて生じる各現象の時間スケールに応じて配合比を選択する必要がある。ヒトの各運動における関節部の角速度の変化に基づく、ヒトの運動の時間スケールは 10^{-1} sオーダーである。さらに、ボールがプロテクターに衝突した場合を想定した動的FEM解析により、衝突時の時間スケールは $10^{-4} \sim 10^{-3}$ sオーダーであることがわかった。また、軟質エポキシ樹脂の弾性率には温度依存性があり、考慮する温度範囲を設定する必要がある。熱中症予防のための運動指針によると、WBGT 31°C (気温 35°C)以上となる場合は、運動は原則中止とされている。よって、考慮する温度範囲は気温 35°C 以下とする。

人体の可動部に適応するプロテクターには、ヒトの運動の時間スケールにおいて外殻の弾性率が十分に低下し、一方で衝突の時間スケールにおいては弾性率が高い値を保持している必要がある。図3より、 25°C の環境下においては、配合比100:100が 10^{-1} sオーダーの時間スケールで弾性率が大きく低下している。そこで、 25 ± 10 [$^{\circ}\text{C}$]の温度範囲を評価対象として、配合比100:100のエポキシ樹脂を外殻材料として選定する。

本研究では、可動部に対するプロテクターとして、関節部に使用される一般的なバレーボール用ニーサポーター (ASICS, XWP161) をベースとして外殻材料を加え、図5のように柔軟性プロテクターを試作した。同ニーサポーターに内蔵される厚さ10 mmのTPE (Thermoplastic Elastomer) フォームを内殻とし、外殻には配合比100:100のエポキシ樹脂 (厚さ4.7 mm, 断面寸法 $100 \times 150 \text{ mm}^2$) を用いた。



図5 試作した柔軟プロテクター

(3) 柔軟プロテクターの衝撃特性および柔軟性評価

図6に示す二重振り子式試験機を開発し、プロテクターの柔軟性を評価した。同試験では、関節部にプロテクターを装着した振り子を、最下点より 90° 持ち上げた状態から落下させ、ストッパーにより上腕を停止させることで関節部に回転を生じさせる。なお、同試験機はプロテクターを装着しない状態で

約 1300 deg/s の角速度が生じる仕様となっており、上腕停止までの時間は約 10^{-1} sとなる。また、上腕・前腕に貼付したマーカーにより関節の角速度を高速度カメラ (DITECT, HAS-71D) および運動解析ソフト (DITECT, Dipp-Motion V) を用いて測定し、プロテクターの装着性に関連する柔軟性を評価した。

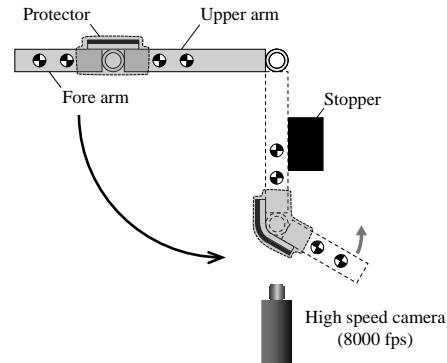


図6 柔軟性評価試験機

試験により得られた角速度と角度の関係を図4に示す。図4には比較のため、外殻なし (Without outer shell) と配合比100:80 (25°C)の結果もあわせて記してある。同図より、配合比100:100のエポキシ樹脂は、温度に関わりなく外殻なしの場合と比べて角速度の減速が大きくなっているが、配合比100:80の場合と比較すると柔軟性が確保できていることがわかる。したがって、 $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$ の温度範囲において配合比100:100のエポキシ樹脂は柔軟プロテクターの外殻として機能すると考えられる。

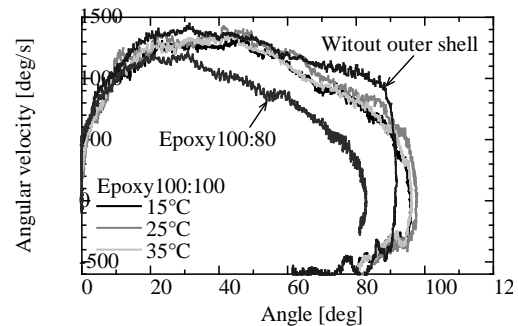


図7 柔軟性評価：角速度と角度の関係

次いで、落錘衝撃試験機により、エポキシ樹脂の外殻材料としての衝撃吸収性を評価した。試験方法は先述と同様であるが、インパクトには衝撃力測定のためのひずみゲージを貼付したアルミ合金丸棒 (A7075-T6, 長さ1 [m], 直径12 [mm], 先端曲率半径6 [mm], 質量380 [g])を用いた。インパクトに貼付した2カ所のひずみゲージからインパクト先端が試験片に負荷する衝撃力を算出する。さらに、インパクト先端の変位を高速度カメラおよび運動解析ソフトを用いて測定した。

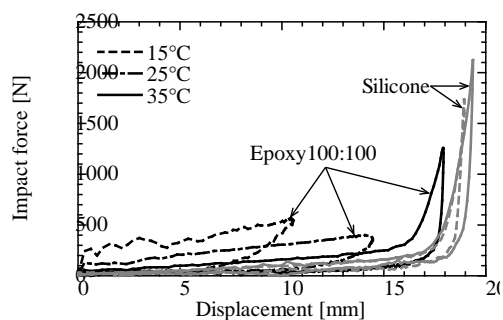


図 8 衝撃力-変位関係

図 8 に衝撃力-変位線図を示す. 同図より, シリコン樹脂の場合は, 温度の依存性は小さいが, 最大衝撃力および, 最大変位ともに軟質エポキシ樹脂より大きな値を示している. エポキシ樹脂の場合, 最大衝撃力は試験片温度 15°C を基準とすると, 25°C では約 3 割小さく, 35°C では約 2 倍となった. 最大変位は, 高温になるにつれて大きくなっている. 試験片温度 15°C では, 軟質エポキシ樹脂の弾性率が高い値を保持することで外殻の局所変形が抑制され, 内殻を一様に圧縮することで衝撃力および変位ともに小さくなったことを撮影動画から確認している. 一方, 試験片温度 25°C では, インパクト衝突位置における外殻の局所変形により変位が大きくなるが, 内殻の圧縮変形に伴う緻密化が生じる前に衝突エネルギーを吸収し終えたため, 衝撃力が小さくなったと考えられる. 試験片温度 35°C の場合では, 弾性率が大きく低下することで外殻の局所変形が大きくなり, 内殻が緻密化することで荷重が大きくなったと考えられる. 以上より, 配合比 100:100 の軟質エポキシ樹脂の場合, 温度 15, 25°C では外殻材料として優れた効果を発揮するといえる.

上記のように, 温度 35°C では配合比 100:100 のエポキシ樹脂では弾性率の低下により衝撃吸収性が低下することがわかった. そこで, エポキシ樹脂の中立面に強化繊維織物を充填することで, 曲げに対する高い柔軟性を維持しつつ衝撃吸収性の温度依存性の緩和を試みた. 本研究では, 強化繊維織物として炭素繊維織物 (東邦テナックス, W1103) を用いた. 作製した試料の厚さは 4.7 [mm] である. 以下, 強化繊維充填エポキシ樹脂を CFRP と表記する. 柔軟性試験により, 強化繊維充填が柔軟性におよぼす影響は小さいことを確認した.

衝撃試験により得られた各試料, 各温度における衝撃力の最大値を図 9 に示す. 図 9 より, 衝撃力の最大値は, 試験片温度 15 および 25°C の場合では, 軟質エポキシ樹脂と CFRP は同程度の結果を示している. 一方, 試験片温度 35°C の場合では, 25°C の場合と比較し, 軟質エポキシ樹脂では約 2 倍, CFRP では約 1.6 倍となり, CFRP のほうが 2 割程度低い結果を示した. このことから, 強化繊維を充填することで, 高温下での衝撃吸収性の低下を軽減できることがわかった.

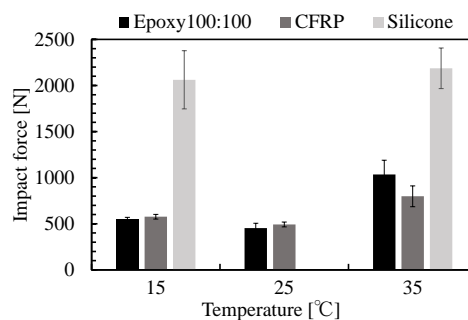


図 9 衝撃力の最大値と温度の関係

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 樋口理宏, 坂拓磨, 足立忠晴, 名木野晴暢, 数値解析による傾斜機能発泡材料の衝撃挙動評価, 材料, 査読有, Vol. 64, 2015, pp. 798-805
DOI: doi.org/10.2472/jsms.64.798

[学会発表] (計 9 件)

- ① M. Higuchi, A. Oba, T. Matsui, T. Nakamoto, H. Tachiya, Development of flexible protector hardening under impact, Asia-Pacific Conference on Fracture and Strength 2016, 2016 年 9 月 22 日, 富山国際会議場 (富山県・富山市)

- ② 樋口理宏, 中本貴彦, 松井俊晃, 立矢宏, 弾性率の時間依存性に基づくサッカー用シンガードの開発, 日本実験力学学会 2016 年次講演会, 2016 年 9 月 1 日, 近畿大学東大阪キャンパス (大阪府・東大阪市)

- ③ 松井俊晃, 樋口理宏, 大葉篤人, 中本貴彦, 立矢宏, 弾性率の時間依存性に基づく柔軟性スポーツ用プロテクターの開発, 日本材料学会第 64 期通常総会・学術講演会, 2016 年 5 月 28 日, 富山大学 (富山県・富山市)

- ④ 樋口理宏, 大葉篤人, 松井俊晃, 立矢宏, 足立忠晴, 弾性率の時間依存性を利用した柔軟性保護具の開発, 日本機械学会 M&M2015 材料力学カンファレンス, 2015 年 11 月 22 日, 慶應義塾大学日吉キャンパス (神奈川県・横浜市)

- ⑤ A. Oba, M. Higuchi, T. Matsui, H. Tachiya, T. Adachi, Time Dependent Elastic Modulus of Soft Epoxy Resins for Flexible Protector, ATEM' 15, JSME-MMD, 2015 年 10 月 8 日, ロワジュールホテル豊橋 (愛知県・豊橋市)

- ⑥ 樋口理宏, 大葉篤人, 松井俊晃, 立矢宏, 足立忠晴, 軟質エポキシ樹脂の弾性率の時間依存性評価, 日本材料学会第 64 期通常総会・学術講演会, 2015 年 5 月 23 日, 山形大学 (山

形県・米沢市)

⑦樋口理宏, 大葉篤人, 丹保卓, 立矢宏, 足立忠晴, スポーツ用プロテクターのための軟質エポキシ樹脂の衝撃特性評価, 日本材料学会第11回材料の衝撃問題シンポジウム, 2014年11月30日, 豊橋技術大学(愛知県・豊橋市)

⑧Atsuto Oba, Masahiro Higuchi, Suguru Tambo, Hiroshi Tachiya, Tadaharu Adachi, Mechanical behavior of soft epoxy resin for flexible protector, ACMFMS2014, 2014年10月11日, 奈良県新公会堂(奈良県・奈良市)

⑨樋口理宏, 大葉篤人, 丹保卓, 立矢宏, 足立忠晴, 柔軟性保護具のための軟質エポキシ樹脂の機械的特性, 日本機械学会 M&M2014 材料力学カンファレンス, 2014年7月20日, 福島大学(福島県・福島市)

[その他]

金沢大学機械機能設計研究室ホームページ
<http://da.ms.t.kanazawa-u.ac.jp/lab>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 理宏 (HIGUCHI, MASAHIRO)

金沢大学・機械工学系・准教授

研究者番号: 50455185

(2) 研究分担者

宮崎 祐介 (MIYAZAKI, YUSUKE)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・
准教授

研究者番号: 70432135

(3) 研究分担者

立矢 宏 (TACHIYA, HIROSHI)

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号: 10216989