

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04157

研究課題名(和文) 快適性を享受させるネックプロテクターの開発

研究課題名(英文) Development of neck protector for comfort

研究代表者

樋口 理宏 (Masahiro, Higuchi)

金沢大学・フロンティア工学系・准教授

研究者番号：50455185

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、エポキシフォームのひずみ速度依存性を活用することで、装着が容易で頭頸部の運動を阻害せず、転倒時に効果的に頸部を保護するネックプロテクターの開発を目的として研究を行った。ネックプロテクターを構成するエポキシフォームの圧縮特性に及ぼすひずみ速度、温度および配合比の関係を明らかにし、ネックプロテクターを構成する上で適切な特性を選択できることを示した。さらに、同エポキシフォームをネックプロテクターとして利用し、転倒衝突を模擬した衝突試験により、同ネックプロテクターは優れた頸部保護性能を発揮することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

跳躍を伴う競技では、跳躍後の着地失敗で頭頸部が激しく動き、頸椎を損傷する可能性があるが、頭頸部の動きを阻害するネックプロテクターの着用を拒む競技者が多い。本研究課題で提案したネックプロテクターは、エポキシフォームのひずみ速度依存性を活用することで、装着が容易で頭頸部の運動を阻害せず、転倒時に効果的に頸部を保護することを可能とする。エポキシフォームは、主剤と硬化剤の配合比を変更することで、圧縮特性のひずみ速度依存性を調整可能であり、装着性に優れたネックプロテクターとしての活用と普及が期待される。

研究成果の概要(英文)：This study was conducted to develop a neck protector that is easy to wear, does not interfere with head and neck motion, and effectively protects the neck in a falling impact by utilizing the strain rate dependence of epoxy foam. The relationship between strain rate, temperature, and compound ratio on the compressive properties of the epoxy foam was clarified. It was shown that appropriate properties can be selected to construct the neck protector. Furthermore, impact tests simulating a fall collision showed that the epoxy foam as a neck protector provides excellent neck protection.

研究分野：材料力学

キーワード：衝撃工学 生体工学 プロテクター 高分子材料 発泡材料

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、スノーボード、BMX といったアクロバティックな競技が人気を博しているが、跳躍後の着地失敗で頭頸部が激しく動き、頸椎を損傷する場合がある。頸椎損傷は後遺症を誘発しやすい危険な怪我の一つである。そのため、頸部損傷を防ぐネックプロテクターの着用が強く推奨されている。しかし、装着を義務化していない競技では、頭頸部の動きを阻害する重厚、窮屈で、不快感が高いネックプロテクターの着用を拒む競技者が多く、着用を促すために、装着性等に優れたプロテクターの開発が望まれる。

2. 研究の目的

本研究では、低速変形時には柔軟性に優れ、高速変形時には剛性が増加する軟質エポキシフォームを応用し、競技時は柔軟で快適性を享受できながら、転倒時には頭頸部の可動域を適切に制限して効果的に頸部を保護するネックプロテクターの開発を目的としている。

3. 研究の方法

(1)エポキシフォームの圧縮特性に及ぼすひずみ速度・温度および配合比の評価

母材にアミン系硬化のエポキシ樹脂 (AXSON, TRANSLUX D150) を用いた。同エポキシ樹脂の化学量論比配合は、主剤・硬化剤の重量配合比にして 100:50 であり、この際に架橋密度が最も高く、硬化剤の割合を多く調整することで架橋密度が減少し、軟質なエポキシ樹脂となる。また、硬化剤過多とした場合、低ひずみ速度下ではゴム状態であるが、高ひずみ速度下ではガラス状態となり、応力 - ひずみ関係のひずみ速度依存性が顕著になる。本研究では、配合比 100:60 ~ 100 の範囲で配合比を変更したエポキシ樹脂を母材として、密度 0.2 g/cm^3 のエポキシフォームを作製した。

軟質エポキシフォームの圧縮特性に及ぼすひずみ速度と温度の依存性を評価するために、3 種類の試験方法により、低ひずみ速度、中ひずみ速度および高ひずみ速度での圧縮試験を実施した。本試験で使用するエポキシフォームは、主剤と硬化剤の配合比を 100:60 ~ 100:100 とした。低ひずみ速度圧縮試験では、万能材料試験機 (Shimadzu, Autograph AG-100kND) により、ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ の範囲で試験を実施した。中ひずみ速度圧縮試験では、カムプラスチックにより、ひずみ速度 $1 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ の範囲で試験を実施した。高ひずみ速度圧縮試験では、スプリット・ホプキンソン棒法試験機により、ひずみ速度が 10^3 s^{-1} オーダーとなるよう試験を実施した。また、試験片温度および試験空間温度は 15, 25, 35°C となるように管理した。

(2)エポキシフォームの頸部保護具としての性能評価

図 1 に示す転倒衝突試験機により、エポキシフォームのネックプロテクターとしての性能を評価する。同装置は、回転支持された胴体部に、頭部ダミーを肩部と頸部を介して結合した構造としてある。頭部および頸部は人体ダミー (Hybrid III 50th Percentile Male Dummy) の部品を使用し、胴部はアルミフレームとした。頭部と頸部はヒンジで接続されている。また、顎と鎖骨の間にネックプロテクターを挟んで装着することを想定した。試験時には、人力により胴体部の持ち手を把持し解放することで、頭部を 510 mm の高さまで持ち上げ落下させる。衝突時の胴体軸と水平軸のなす角は 20 deg である。

同試験では、主剤と硬化剤の配合比 100:80, 100:90, 100:100, $110 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ の直方体形状のエポキシフォームを頸部プロテクターとして使用する。図 2 に示すように、ダミーの顎と鎖骨部のアルミ板により挟み込むように、頸部保護具を 2 本並べて装着した。また、頭部ダミーの後頭部に 100:100 のエポキシフォームを装着し、頭部保護の効果をあわせて検討する。転倒衝突試験は、室温を約 25 として実施した。また、上位頸部および下位頸部に生じる荷重を測定するための分力計を開発した。分力計は図 2 のように転倒衝突試験機の胴体部分と Hybrid III 頸部の接続部分に設置する。転倒衝突試験では頸部に屈曲が生じることを踏まえ、3 つの荷重 F_x, F_z, M_y を測定する。また、頭部および胴体のマーカを追跡することで頸部屈曲角度を測定するとともに、頭部重心に設置した 3 軸加速度計により頭部傷害基準 HIC を測定する。

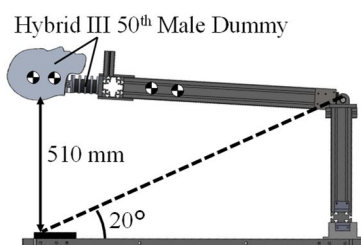


図 1 転倒衝突試験機の概要

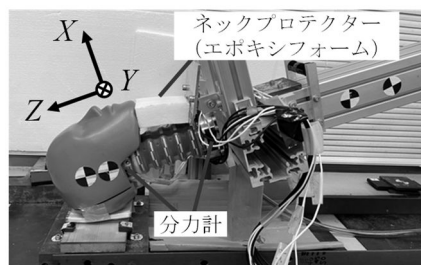


図 2 ネックプロテクターと分力計の装着状態

4. 研究成果

(1) エポキシフォームの圧縮特性に及ぼすひずみ速度・温度および配合比の評価

配合比 100:80 のエポキシフォームを例として、試験温度 15、25 および 35 として場合のひずみ 0.2 における圧縮応力とひずみ速度の関係を図 3 に示す。図 3 より、試験温度が高いほど、同一のひずみ速度下での圧縮応力が低下しており、エポキシフォームは 15~35 の温度範囲において明確な温度依存性を有することがわかる。

ここで、エポキシフォームの圧縮応力に対する温度 - ひずみ速度換算性を確認する。図 3 において、試験温度 25°C を基準とし、15 および 35°C の結果をひずみ速度軸上でシフトさせ、ひずみ 0.2 における圧縮応力のひずみ速度に関するマスターカーブを作成する。その際のひずみ速度軸上における移動量を温度に関するシフトファクター α_T とする。図 4 に、25°C を基準とした、配合比 100:60、100:80 および 100:100 に対するひずみ 0.2 における圧縮応力のひずみ速度に関するマスターカーブを示す。なお、横軸はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に、温度に関するシフトファクター α_T を乗じてあり、シフトファクター α_T は温度と配合比の関数である。図 4 より、いずれの配合比においても、ひずみ 0.2 における圧縮応力は、ひずみ速度とシフトファクターの積 $\dot{\epsilon} \times \alpha_T$ に対して単一の曲線で近似することができ、温度 - ひずみ速度換算性が成立していることがわかる。

さらに、図 4 において、配合比 100:60 を基準とし、他の配合比を横軸上でシフトさせ、ひずみ 0.2 における圧縮応力のひずみ速度、温度および配合比に関するマスターカーブを作成する。その際のひずみ速度軸上における移動量を配合比に関するシフトファクター γ とする。図 5 に、配合比 100:60、温度 25°C を基準としたひずみ 0.2 における圧縮応力のひずみ速度に関するマスターカーブを示す。なお、横軸はひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ に、温度に関するシフトファクター α_T および配合比に関するシフトファクター γ を乗じてあり、シフトファクター γ は配合比の関数である。図 5 に示されるとおり、ひずみ 0.2 における圧縮応力は、ひずみ速度と温度および配合比に関するシフトファクターの積 $\dot{\epsilon} \times \alpha_T \times \gamma$ に対して単一の曲線で近似することができ、温度、ひずみ速度および配合比の換算性が成立している。

ここで、シフトファクターの積 $\dot{\epsilon} \times \alpha_T \times \gamma$ と、温度および配合比の関係を図 6 に示す。図 6 に示す通り、シフトファクターの積 $\dot{\epsilon} \times \alpha_T \times \gamma$ は温度および配合比に対して単調減少していることがわかる。すなわち、図 5 および図 6 を用いて、所望のひずみ速度下における圧縮応力値を満たすための配合比と使用温度を一意に決定することができ、温度環境に応じたエポキシフォームの配合比を選択することができる。

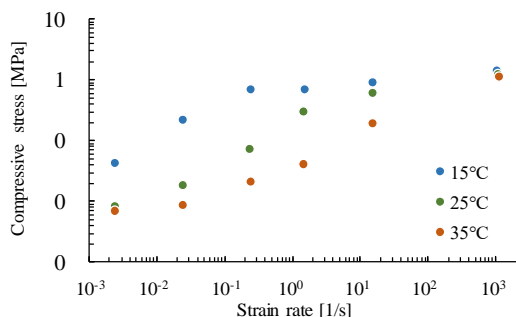


図 3 ひずみ 0.2 における圧縮応力とひずみ速度の関係 (配合比 100:80 のエポキシフォーム)

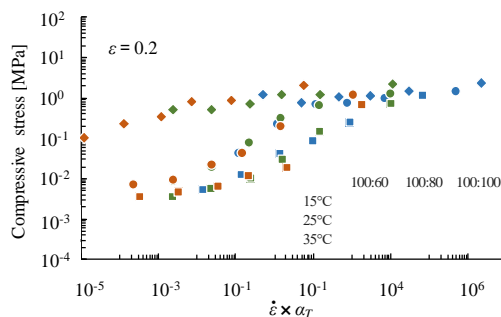


図 4 温度 25 を基準とした場合のひずみ 0.2 における圧縮応力のマスターカーブ

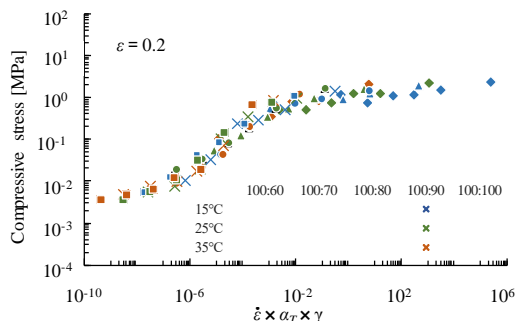


図 5 温度 25, 配合比 100:60 を基準とした場合のひずみ 0.2 における圧縮応力のマスターカーブ

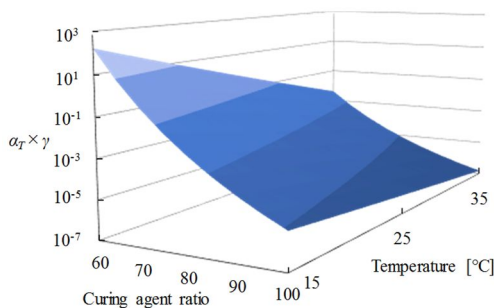


図 6 シフトファクター $\alpha_T \times \gamma$ と配合比および温度の関係

(2)エポキシフォームの頸部保護具としての性能評価

頭部加速度より求めたHICを表1に示す．表1より，頭部保護具を装着することでHICは大幅に減少し，また，ネックプロテクターの配合比や装着の有無による大きな差はないことがわかる．

表1 転倒衝突試験により得られた頭部傷害基準 HIC

頭部保護なし				頭部保護あり			
ネックプロテクターの条件				ネックプロテクターの条件			
なし	100:100	100:90	100:80	なし	100:100	100:90	100:80
1433	1383	1382	1337	470	458	439	431

次に，配合比 100:100 のネックプロテクターを装着し，頭部保護具を装着した場合および未装着の場合の上位頸部荷重 F_X および頸部屈曲角度の時間変化を図7に示す．図7より，頭部保護具を装着した場合と未装着の場合で，頸部屈曲角度に大きな差はなく，頭部保護具は頸部屈曲角度に影響しないことが明らかとなった．一方で，頭部保護具を装着しない場合は，衝突直後に約 1200 N の F_X が生じているが，頭部保護具を装着することで衝突直後の F_X が 680 N 程度に低減されている．したがって，頭部保護具は衝突直後の短時間に発生する頭部加速度および上位頸部荷重を低減する効果があるといえる．

頭部保護具を装着しても頸部屈曲角度に変化はみられないことから，頭部保護具を装着した条件で，ネックプロテクターの条件を変化させた場合の頸部屈曲角度を図8に示す．図8より，頸部屈曲角度の最大値は，ネックプロテクター未装着は 52 deg，ネックプロテクターの配合比 100:100 は 48 deg，100:90 は 43 deg，100:80 は 41 deg であり，ネックプロテクターにより頸部屈曲角度を抑制することが可能となる．また，エポキシフォームの硬化剤配合量を減少させると，低速変形時の柔軟性は損なわれるが，頸部の屈曲は大きく抑えられる．

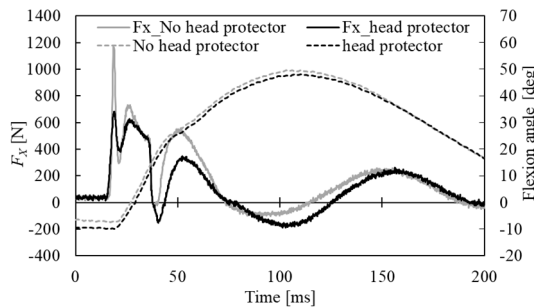


図7 上位頸部荷重 F_X と頸部屈曲角度の時間変化（ネックプロテクター100:100）

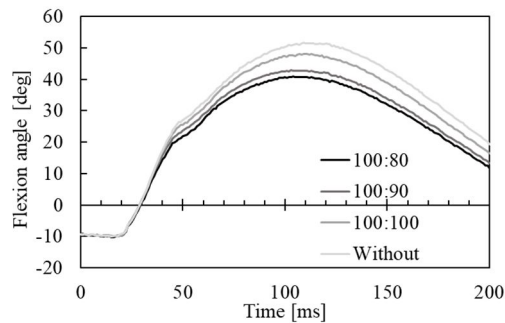


図8 頸部屈曲角度の時間変化（頭部保護あり）

次に，頭部保護具を装着し，ネックプロテクターを装着または未装着とした条件の上位頸部荷重の時間変化を図9(a), (c), (e)に，下位頸部荷重の時間変化を同図(b), (d), (f)に示す．図9(a)から(f)より，衝突直後の時刻 20 ms から 30 ms において，上位頸部および下位頸部いずれも，ネックプロテクターを装着した場合と未装着の場合で，頸部に生じる F_X, F_Z, M_Y に大きな差がないことがわかる．一方，図9(a), (b), (c)および(d)より，時刻 40 ms 以降では上位頸部と下位頸部ともに，未装着と比較して，ネックプロテクターを装着することで頸部のせん断力 F_X および引張荷重 F_Z が増加していることがわかる．特に，図9(b)より，ネックプロテクターを硬質にするほど，下位頸部の F_X が増加する傾向にあることがわかる．したがって，衝突直後の短時間における荷重はネックプロテクターを装着しても変化しないが，頸部屈曲の進展に伴い，ネックプロテクターにより荷重が増加する傾向にある．さらに，頸部のせん断力 F_X と曲げモーメント M_Y より，次式で表される頸部傷害基準 N_{km} を評価した．

$$N_{km} = \frac{F_X}{F_{XC}} + \frac{M_Y}{M_{YC}}$$

ここで、 F_{XC} は 845 N、 M_{YC} は 88.1 である。上式により求めた上位頸部および下位頸部の N_{km} の時間変化を図 10 に示す。図 10(a)の上位頸部においてはネックプロテクターを装着した場合と未装着の場合で、頸部傷害基準 N_{km} に大きな差はないことがわかる。一方、図 10(b)の下位頸部においては、ネックプロテクターを硬質にするほど、頸部傷害基準 N_{km} が増加する傾向にあることが確認された。

以上で述べたとおり、頭部・胴体間に装着したネックプロテクターにより、配合比を 100:80、100:90 および 100:100 の順で下位頸部に生じる荷重の増加がみられたが、頸部の屈曲角度を抑制しつつ、頸部傷害の発生頻度が高い上位頸部に生じる荷重およびそれらに基づく頸部傷害基準 N_{km} の増加がないことを確認した。すなわち、エポキシフォームを用いたネックプロテクターは、装着時の柔軟性を確保しつつ、効果的に頸部を保護できる可能性が示された。頸部屈曲の進展に伴う下位頸部の荷重増加を低減できれば、さらなる頸部保護性能の向上が期待できる。

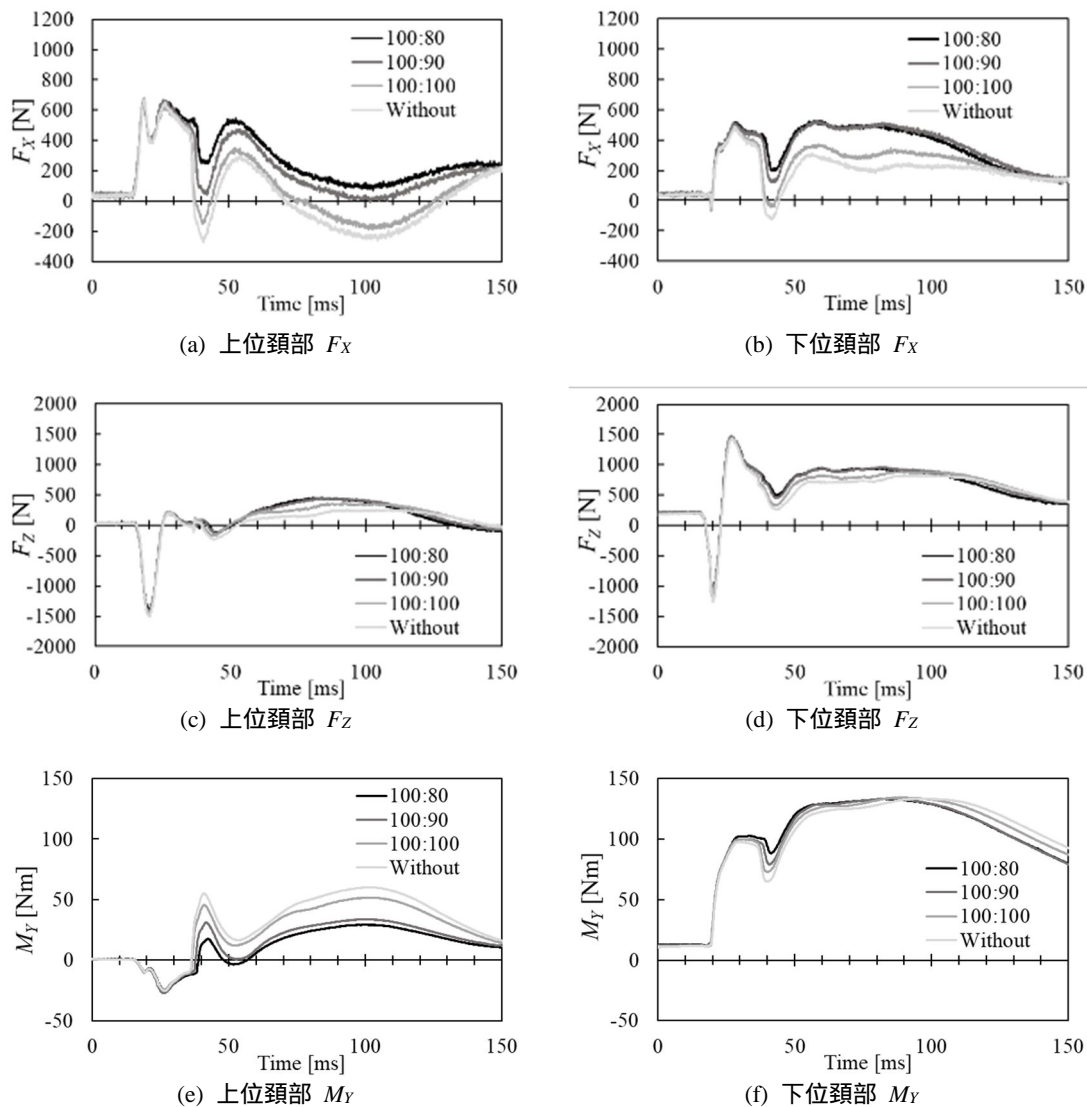


図9 各頸部荷重の時間変化（頭部保護あり）

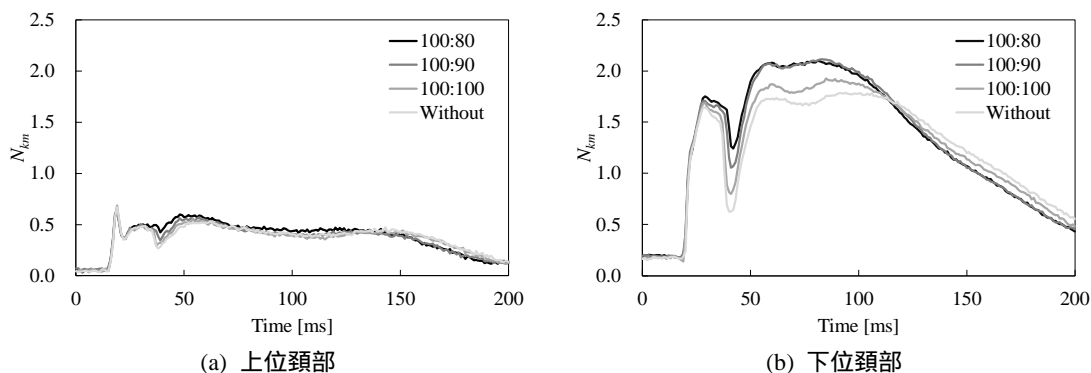


図10 頸部傷害基準 N_{km} の時間変化（頭部保護あり）

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 1件）

1. 発表者名 Masahiro Higuchi, Tomoki Harada, Hiroshi Tachiya
2. 発表標題 Development of soft epoxy honeycomb and its application to impact absorber
3. 学会等名 International Conference on Materials & Processing 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 霜野稜悠, 戸塚祐真, 樋口理宏, 穴田賢二, 立矢宏
2. 発表標題 エポキシフォームを用いた頸部保護具の開発と評価
3. 学会等名 日本材料学会M&M2022材料力学カンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 霜野稜悠, 樋口理宏, 都丸耀平, 立矢宏, 穴田賢二
2. 発表標題 軟質エポキシフォームによる頸部保護具の開発
3. 学会等名 日本材料学会M&M2021材料力学カンファレンス
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋口理宏, 橋本康希, 都丸耀平, 立矢宏
2. 発表標題 エポキシフォームの圧縮特性と温度・ひずみ速度・配合比の関係
3. 学会等名 第13回材料の衝撃問題シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 都丸耀平, 樋口理宏, 橋本康希, 立矢宏
2. 発表標題 軟質エポキシの温度及びひずみ速度依存性評価とその応用
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020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
研究分担者	立矢 宏 (Tachiya Hiroshi) (10216989)	金沢大学・高度モビリティ研究所・教授 (13301)	
研究分担者	穴田 賢二 (Anata Kenji) (30756531)	石川工業高等専門学校・機械工学科・准教授 (53301)	
研究分担者	山田 浩之 (Yamada Hiroyuki) (80582907)	防衛大学校(総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群)・システム工学群・准教授 (82723)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------