

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06048

研究課題名(和文) 軟質エポキシフォームを利用した装着性と衝撃吸収性を両立する頭部保護帽の開発

研究課題名(英文) Development of protective head gear compatible with both wearability and shock absorption by using soft epoxy foams

研究代表者

樋口 理宏 (Higuchi, Masahiro)

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、装着性がよく日常生活で気軽に着用できながら、衝撃吸収性が極めて高く、転倒や飛散物から頭部の損傷を防いでくれる頭部保護帽の開発を行った。

まず、頭部保護帽を構成する軽量なエポキシフォームの成形法を確立した。また、同エポキシフォームの頭部保護帽などの保護具設計のために、圧縮応力-ひずみ関係のひずみ速度と温度の依存性を明らかにした。

さらに、開発したエポキシフォームは、既存の発泡材料と比較して、高い頭部保護性能を発揮することを実験的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で開発したエポキシフォームを用いた頭部保護帽は、軟質エポキシフォームのひずみ速度依存性を積極利用することで柔軟性と衝撃吸収性を両立するものであり、既存の緩衝材料と比較して、頭部傷害基準値を大きく低減させることが可能である。また、特殊で高価な原料や素材を必要とせず、安価で汎用的なエポキシ樹脂により製造可能である。さらに、同保護帽のコンセプト・設計法は、頭部だけでなく、多種多様な保護具への展開も期待できる。このように、本研究課題は学問分野の発展に貢献するだけでなく、医療福祉産業にも寄与するところ大である。

研究成果の概要(英文)：In this study, we developed a protective head gear with flexibility to easily wear in daily life, but has extremely high shock absorption to prevent a damage to a human head.

First, we established a molding method for lightweight epoxy foam that constitutes a protective head gear. In addition, the dependence of the strain rate and temperature on the compressive stress-strain relationship was clarified for the design of protective equipment such as protective head gears of the epoxy foam.

Furthermore, we have experimentally demonstrated that the developed epoxy foam exhibits higher head protection performance than existing foam materials.

研究分野：材料力学

キーワード：衝撃工学 頭部保護 生体工学 エポキシ樹脂 発泡体

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年の自転車用ヘルメット等の急激な普及にみられるように、日常生活での事故に対する安全意識が高まっており、転倒衝突などから身を守る様々な市販保護具が増えている。特に、ファッション性に優れ日常生活で気軽に被れる頭部保護帽が脚光を浴び、需要が高まっている。産業的にも、人体ダミーを用いた衝撃試験に基づき、既存の発泡材料から保護帽の緩衝材として優れたものを選定し、頭部保護帽の製品化がなされている。

しかし、日常生活のための保護帽には、軽量で柔軟、通気性が良いといった装着性が求められるため、硬質外殻と内部の緩衝材・緩衝構造からなる自転車・産業用ヘルメットと比較して衝撃吸収性能は大きく劣る。硬質外殻を持つヘルメットは、一般的な保護帽と比べ、飛散物や床・角が頭部に衝突した際に、外殻が大きく局所変形することなく、緩衝材を広範囲に圧縮することで、頭部への衝撃力を分散するとともに、衝撃加速度を低下させ、頭部損傷を軽減する構造となっている。しかし、頭部への衝撃低減性に優れたヘルメットを日常生活で着用することは現実的ではない。すなわち、日常生活において気軽に装着でき、不慮の事故に備える頭部保護帽が求められる。

2. 研究の目的

本研究では、手や肌への感触はスポンジのように柔らかいが、衝撃変形でのみ高剛性・高強度化する軟質エポキシフォームを開発し、装着性に優れ日常生活で気軽に着用可能で、かつ衝突に対しては高い衝撃吸収性を発揮する頭部保護帽を開発することを目的とする。

本研究で提案する画期的な頭部保護帽は、日常生活で気軽に着用できる上に、ヘルメット程ではないが、既存の頭部保護帽より飛躍的に優れた衝撃吸収性を発揮し、いざという時には頭部を損傷しないように保護することを目指す。

3. 研究の方法

(1) エポキシフォームの開発

本研究では、頭部保護帽の緩衝材として、アミン硬化系エポキシ樹脂を母材として用いる。同エポキシ樹脂の主剤と硬化剤の化学量論比配合は重量比で 100:50 であり、配合比を 100:100 までの範囲で硬化剤過多としても、安定した硬化物が得られる。熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂の発泡方法を提案し、配合比によらず安定したエポキシフォームの成形方法を確立する。

(2) エポキシフォームの圧縮特性評価

作製したエポキシフォームのひずみ速度依存性を評価するため、万能試験機による低ひずみ速度試験 (ひずみ速度 $10^{-3} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$)、カムプラスチックメータによる中ひずみ速度試験 (ひずみ速度 $10^0 \sim 10 \text{ s}^{-1}$) およびスプリット・ホプキンソン棒 (Split Hopkinson bar, SHB) 法による高ひずみ速度試験 (ひずみ速度 10^3 s^{-1}) を実施した。

同試験においては、圧縮特性の温度依存性も評価するため、試験温度を 15, 25, 35°C とした。温度範囲は、実生活を考慮して設定した。これら一連の圧縮試験により、エポキシフォームの配合比、ひずみ速度および温度の関係を明らかにする。

(3) エポキシフォームの頭部保護帽としての性能評価

開発したエポキシフォームの頭部保護帽としての性能を評価するために、図 1 の転倒を模擬した衝撃試験、図 2 のボール衝突を模擬した衝撃試験を実施した。

これらの衝撃試験においては、頭部ダミーに設置した加速度計の加速度波形から頭部傷害基準値 (Head Injury Criteria, HIC) を測定し、試験片と頭部ダミー間に挿入した感圧紙による圧力分布を測定する。

転倒衝突試験: 図 1 の転倒衝突試験においては、緩衝材を非装着の状態では HIC が 1000 (重症リスクが約 50% の状態) となるよう、落下高さを 550 mm とした。同試験では、頭頸部に Hybrid III ダミーを用いた。

ボール衝突試験: 図 2 のボール衝突試験においては、硬式野球ボール (質量 148 g, 直径 73 mm) をエアガンにより射出することで約 70 km/h にて頭部ダミーに衝突させる。同試験では、ボールの衝突速度と衝突後の速度を測定し、反発係数も算出する。同試験では、成人男性の頭部質量に一致するように、鋼管により頭部ダミーを構築した。



図 1 転倒衝突試験機

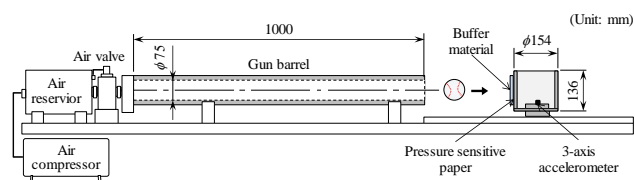


図 2 ボール衝突試験機

4. 研究成果

(1) エポキシフォームの開発

熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を発泡化するために、硬化前の母材樹脂に核剤を混合し、樹脂の硬化後、溶媒中にて核剤を溶解、抽出することにより樹脂を発泡化させる抽出発泡方法を採用した(図3)。本研究では、核剤に塩化ナトリウム、溶媒に水を使用した。同手法では、(1)主剤・硬化剤・核剤の配合、(2)注型、(3)加熱硬化、(4)抽出・乾燥の順でエポキシフォームを成形する。同手法では、主剤・硬化剤の配合比により粘度特性が異なるエポキシ樹脂に対して、配合比によらず安定した発泡化が可能となった。

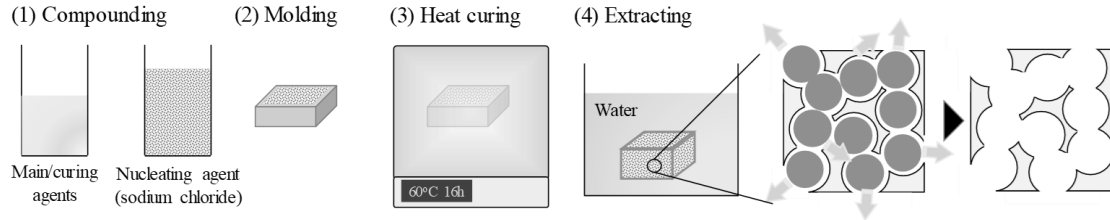


図3 エポキシフォーム成形のための抽出発泡方法

母材配合比を 100:100 に固定した際の主剤に対する核剤の配合比と密度の関係を図4に示す。ここで、図4中の理論値は、母材と核剤の配合比より、母材の体積分率を求め、核剤が溶媒に完全に抽出された場合の密度を示している。図4より、核剤の配合比の増加とともに密度が低下し、主剤、硬化剤および核剤の配合比が 100:100:2500 において最小密度 0.15 g/cm^3 を示し、その後は密度が増加する結果となった。これは、核剤の配合比が大きい場合、抽出・乾燥時に発生する母材の体積収縮の影響が大きくなったことが原因である。また、核剤の配合比が小さい場合、成形されたエポキシフォームの密度が理論値よりも小さくなっているが、これは注型時に混入する空気が原因と考えられる。図1のとおり、抽出法により密度が $0.15 \sim 0.38 \text{ g/cm}^3$ の範囲でエポキシフォームの成形を可能とした。なお、他の配合比においても同様に成形可能である。

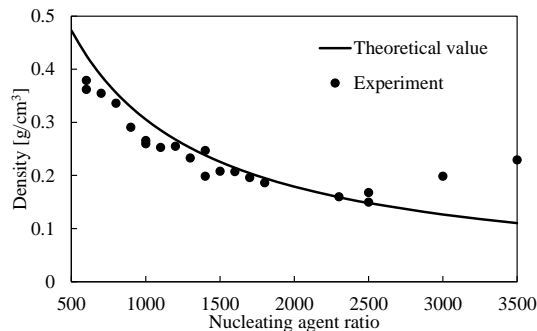


図4 エポキシフォームの密度と核材混合比の関係 (配合比 100:100)

(2) エポキシフォームの圧縮特性評価

主剤と硬化剤の配合比を 100:60, 100:70, 100:80, 100:90 および 100:100 とし、密度を 0.2 g/cm^3 に固定して圧縮試験を実施した。図5に、ひずみ 0.2 における圧縮応力とひずみ速度の関係を示す。図5に示すとおり、硬化剤が過剰になるに従い、同一のひずみ速度での圧縮応力が低下しており、かつ、ひずみ速度の感度が大きくなっていることがわかる。また、 $15 \sim 35^\circ\text{C}$ の範囲において、明確な温度依存性を示すことが明らかとなった。すなわち、使用する温度環境と使用用途により、最適な配合比のエポキシフォームを用いればよい。

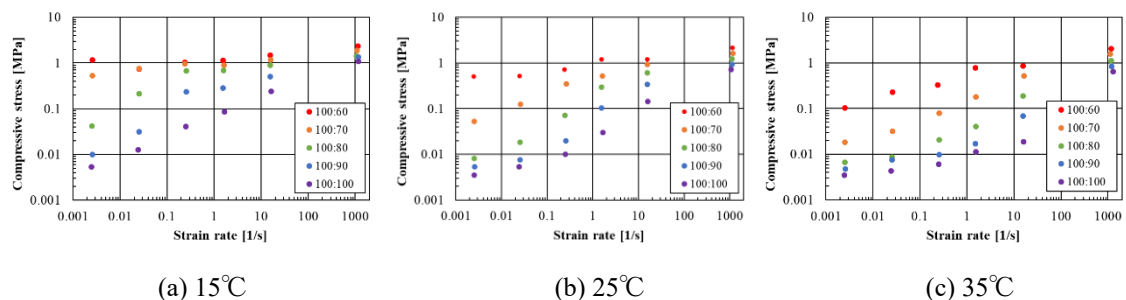


図5 ひずみ 0.2 における圧縮応力とひずみ速度の関係

(3) エポキシフォームの頭部保護帽としての性能評価

転倒衝突試験： 図1の転倒試験機を用いて、エポキシフォームの配合比を 100:100、試験温度を 15、25 および 35℃として試験を実施した。ここでは、保護材なしの場合、EPDM フォームおよびスタイロフォームを保護材として用いた場合との比較を行った。ただし、EPDM フォームおよびスタイロフォームは試験温度を 25℃とした。

図6に、転倒衝突試験により得られた HIC を示す。エポキシフォームを用いることで、いずれの温度においても、保護材なし、EPDM フォームおよびスタイロフォームの HIC を下回っていることがわかる。特に、15℃において優れた HIC 低減性を示した。ここで、図5のひずみ 0.2 における圧縮応力とひずみ速度の関係より、15℃、配合比 100:100 に相当する配合比を求めると、25℃では配合比 100:90、35℃では配合比 100:80 となる。

このように、所定の温度環境や利用条件において適したエポキシフォームの配合比を選定することにより、頭部保護帽として高い性能を発揮することが期待できる。

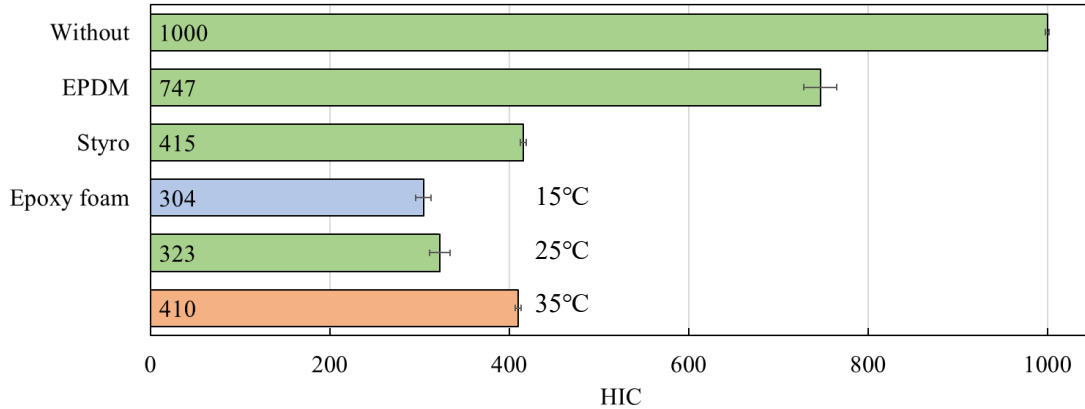


図6 転倒衝突試験結果

ボール衝突試験： 図2のボール衝突試験機を用いて、エポキシフォームの配合比を 100:100、試験温度を 25℃として試験を実施した。ここでは、保護材なしの場合、EPDM フォームを保護材として用いた場合との比較を行った。

図7に、保護材なし、EPDM フォームおよびエポキシフォームに対する圧力分布、反発係数および HIC を示す。まず、保護材なしおよび EPDM フォームの場合、感圧紙の測定上限 10 MPa を超えている箇所があるが、エポキシフォームの場合、圧力が低く一様に分散されていることがわかる。次に、反発係数は保護材なしと比較して EPDM フォームが高い値を示しているのに対し、エポキシフォームは反発係数が低減されている。さらに、HIC は反発係数と同様の傾向となっていることがわかる。以上より、エポキシフォームは、高ひずみ速度下で高いエネルギー吸収能を有するだけでなく、粘弾性特性に起因したヒステリシス特性による低反発性が HIC の低減に寄与していると考えられる。

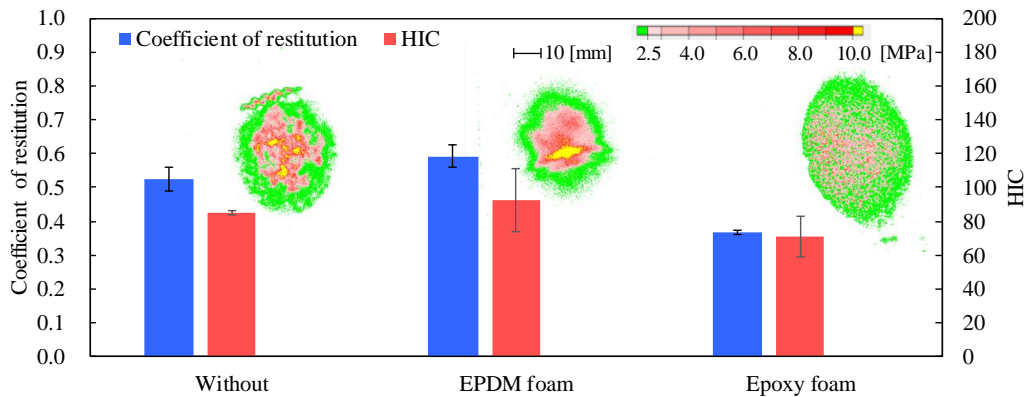


図7 硬式野球ボールの衝突試験結果

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 樋口理宏	4. 巻 67
2. 論文標題 エポキシ樹脂の架橋密度操作に基づく柔軟性保護具の開発	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 82-83
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	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 3件）

1. 発表者名 Masahiro Higuchi, Takahiko Nakamoto, Hiroshi Tachiya
2. 発表標題 Development of flexible shin guards for football using strain rate dependent material
3. 学会等名 International Symposium on Impact Engineering 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口理宏, 中山侑樹, 立矢宏
2. 発表標題 飛翔体衝突における軟質エポキシフォームの頭部保護性能評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 橋本康希, 樋口理宏, 立矢宏
2. 発表標題 抽出法により成形された軟質エポキシフォームの圧縮特性評価
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2019材料力学カンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口理宏, 小長谷敦士, 橋本康希, 立矢宏
2. 発表標題 抽出法による軟質エポキシフォームの成形
3. 学会等名 日本実験力学会2019年次講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiko Nakamoto, Masahiro Higuchi, Yuki Nakayama, Hiroshi Tachiya
2. 発表標題 Development of Flexible Football Shin Guards Using Soft Epoxy Resins and Foams
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山侑樹, 樋口理宏, 立矢宏
2. 発表標題 軟質エポキシフォームの密度と圧縮特性の関係
3. 学会等名 日本実験力学会2018年次講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口理宏, 橋本康希, 立矢宏
2. 発表標題 頭部保護帽のための軟質エポキシフォームの開発
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2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中山侑樹, 樋口理宏, 小長谷敦士, 立矢宏
2. 発表標題 軟質エポキシフォームを用いた柔軟性プロテクターの開発
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masahiro Higuchi, Kimiya Fushie, Masaya Kobashi, Hiroshi Tachiya
2. 発表標題 Development of Protective Headwear with Soft Epoxy Foam
3. 学会等名 3rd International Workshop on Advanced Dynamics and Model Based Control of Structures and Machines (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口理宏, 伏江君也, 小橋真哉, 立矢宏
2. 発表標題 軟質エポキシフォームの圧縮特性に及ぼす ひずみ速度・温度依存性評価
3. 学会等名 日本実験力学学会2017年次講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口理宏, 伏江君也, 小橋真哉, 立矢宏
2. 発表標題 軟質エポキシフォームのひずみ速度依存性に基づく頭部保護帽の開発
3. 学会等名 日本機械学会 M&M2017材料力学カンファレンス
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口理宏
2. 発表標題 軟質エポキシ樹脂を用いた保護具の開発
3. 学会等名 日本実験力学会 分科会合同ワークショップ2017 -実験力学における計測・データ処理の問題点・ノウハウ・工夫-
4. 発表年 2017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・フロンティア工学系・教授 (13301)	
研究分担者	足立 忠晴 (Adachi Tadaharu) (20184187)	豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授 (13904)	