

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 3 月 26 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760075

研究課題名（和文）

ハイブリッド型傾斜機能樹脂材料の開発と不均質変形を利用したエネルギー吸収材への応用

研究課題名（英文）Development of hybrid functionally-graded polymeric materials and their application on energy absorbers in terms of inhomogeneous deformation

研究代表者

樋口 理宏（HIGUCHI MASAHIRO）

豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：50455185

研究成果の概要（和文）：

本研究課題では、エネルギー吸収材として期待されるシントクチックフォームに、密度の傾斜機能性を付与することでより優れた衝撃エネルギー吸収特性を得ることを目的としたハイブリッド型傾斜機能樹脂材料の開発を行った。硬化前の母材中の浮力により中空微粒子を不均一分散させることで傾斜機能樹脂材料を一体成形する手法を構築し、動的粘弾性試験および圧縮試験により傾斜機能樹脂材料の機械的特性は母材の樹脂特性と中空微粒子充填量により操作できることを示した。さらに一次元弾性波動伝ば解析を実施し、開発した傾斜機能樹脂材料は高いエネルギー吸収能を持つと同時に透過衝撃力を緩和できることを示した。

研究成果の概要（英文）：

In the present study, hybrid functionally-graded polymeric material that is syntactic foam having graded density distribution was developed for enhancing impact-energy absorption. Fabrication processes were proposed to produce functionally-graded foams by floating phenomenon of micro-balloons in matrix resin. Dynamic viscoelastic measurements and compression test revealed that the local mechanical properties of the fabricated foams were determined by the properties of the matrix resin and the volume fraction of the micro-balloons. Moreover, one-dimensional stress wave analysis demonstrated that the foams have high-energy absorption capability and can reduce the transmitted force in impact loading.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，機械材料・材料力学

キーワード：傾斜機能材料，発泡材料，衝撃工学，エネルギー吸収，複合材料

1. 研究開始当初の背景

中空微粒子を樹脂材料に充填することにより作製される擬似発泡性の複合材料（シン

タクチックフォーム）は、低密度、低吸水性を示し遮音性に優れることから、海洋探査機の浮力材など海洋船舶産業で幅広く利用さ

れてきた。同時に高い圧縮強度特性を有することから軽量なエネルギー吸収材として応用されてきている。近年では、シタクチックフォームのさらなる高強度化の目的で強化微粒子を母材に追加充填したハイブリッド型のシタクチックフォームが提案されているが、強化微粒子を充填することはシタクチックフォームの粘弾性特性を変化させると予想される。樹脂材料においては、粘弾性特性が材料の変形挙動に与える支配的因子であり、シタクチックフォームの設計および機械的挙動を評価する上で、粘弾性特性の評価ならびに制御が重要となる。

一方、1980年代に熱応力低減のために傾斜機能材料 (FGMs) が発案されて以来、FGMs に関する熱応力解析を主体とした力学に関する基礎的研究と並行して、機械的特性の不均一性を利用した振動低減、衝撃吸収特性などの動的問題にも FGMs の適用が検討されてきている。このように材料特性を空間分布させることは、通常の巨視的にみて均質な材料と異なる変形形態をあえて誘発することになり、さらにその変形形態を積極的に活用することにより、既存材料では得られない機能が得られることが期待される。

2. 研究の目的

本研究課題では、エネルギー吸収材として期待されるシタクチックフォームに密度の傾斜機能性を付与することで、より優れた衝撃エネルギー吸収特性を得ることを目的としてハイブリッド型傾斜機能樹脂材料の設計・開発を行った。

さらに、既存の均質な材料では得られない変形形態を利用したエネルギー吸収特性を有する構造部材への応用について検討を行った。

3. 研究の方法

(1) 傾斜化手法の開発

傾斜機能樹脂材料を成形するための簡便な傾斜化手法の開発を行った。母材樹脂の粘度を温度により制御し、母材中の浮力により中空微粒子を不均一分散させた後、母材樹脂を熱硬化させることで傾斜機能樹脂材料を一体成形する手法を構築し、その傾斜構造の制御法の検討を行った。

(2) 傾斜機能樹脂材料の力学的特性を評価

また、傾斜機能樹脂材料の力学的特性を評価するために、動的粘弾性試験、材料試験機およびスプリット・ホプキンソン棒法試験機による広範囲のひずみ速度下における圧縮試験を実施することで、傾斜機能樹脂材料の局所的な機械的特性と密度の関係式を構築した。また、圧縮荷重下における強化微粒子

の影響について評価を行った。

(3) エネルギー吸収特性の評価

傾斜機能樹脂材料のエネルギー吸収材としての応用を念頭に置き、密度と圧縮弾性率の空間分布に起因する不均質変形（応力波伝ば）を利用した衝撃エネルギー吸収特性の評価を数値解析により実施した。

4. 研究成果

(1) 傾斜化手法の開発

ビスフェノール A 型エポキシ樹脂を母材とし、アクリロニトリル系中空微粒子（平均粒径 100 μm ）を用いて、傾斜機能樹脂材料の成形プロセスの開発を行った。

図 1 に示すように母材樹脂に中空微粒子を一樣分散させた状態から、樹脂の粘度特性に従って温度制御することで樹脂の粘度を低下させ、時間 t_F の間中空微粒子を浮上分離させる。樹脂をゲル化させることにより中空微粒子の浮上を停止させて、中空微粒子の傾斜分布を得ることができる。また、ゲル化前のエポキシ樹脂内における中空微粒子の運動を Richardson-Zaki の式を用いて有限差分法による数値計算を行い、実験結果との比較を行った。

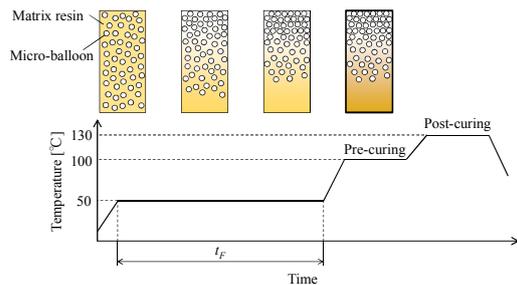


図 1 一樣分散状態からの成形プロセス

一例として、 $t_F = 2 \text{ h}$ の条件下で平均密度を 700 kg/m^3 として作製した傾斜機能樹脂の密度分布を数値計算結果とともに図 2 に示す。密度測定は試料を薄く切り出しアルキメデス法 (JIS Z 8807) により行った。実験結果は数値計算結果と良い一致を示しており、平均密度付近で階段状の分布となる密度の傾斜分布が得られることがわかった。

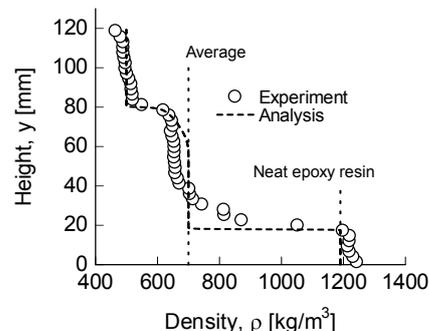


図 2 一樣分散状態から作製した傾斜機能樹脂材料の密度分布の一例

そこでより滑らかな密度の傾斜分布を得るために、中空微粒子が最大充填された層とエポキシ樹脂層に二層分離させた後、金型を上下反転することで中空微粒子が最大充填された下層とエポキシ樹脂の上層に二層分離された状態から中空微粒子が浮上する過程でゲル化・硬化処理を施す一体成形法を開発した(図3)。

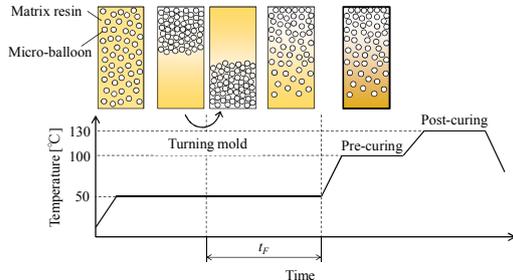


図3 二層分離状態からの成形プロセス

図4に、二層分離状態から $t_F = 50 \text{ min}$ として成形した平均密度 720 kg/m^3 および 930 kg/m^3 の傾斜機能樹脂材料の密度分布を示す。密度が約 500 kg/m^3 の中空微粒子が最大充填された上部から密度が約 1200 kg/m^3 の下部のエポキシ樹脂の領域まで、中空微粒子の充填量の変化に伴い傾斜機能樹脂材料の密度が連続的かつ広範囲にわたって傾斜分布していることがわかる。また、平均密度が小さい場合には、上部と下部で密度の勾配が変化する傾斜分布が得られ、平均密度が大きい場合には、線形的な傾斜分布が得られることがわかった。すなわち、二層分離状態から中空微粒子の浮上分離現象を誘起させることにより、平均密度をパラメータとして広範囲の傾斜分布を制御することが可能となった。

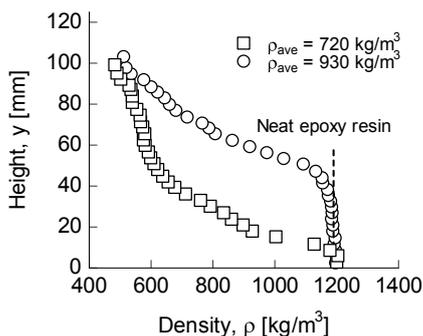


図4 二層分離状態から作製した傾斜機能樹脂材料の密度分布の一例

(2) 傾斜機能樹脂材料の力学的特性を評価

傾斜機能樹脂材料の力学的特性を明らかにするために、図1の成形プロセスに従い作製した傾斜機能樹脂材料の傾斜方向に対して密度勾配の影響が小さくなるように薄い試験片を切り出し、動的粘弾性試験、材料試

験機(Static)およびスプリット・ホプキンソン棒法試験(SHPB)による広範囲のひずみ速度下における圧縮試験を実施した。ここでは、エポキシ樹脂に体積分率で $0 \sim 10\%$ の粒径 $1.56 \mu\text{m}$ の球状シリカ粒子で強化した複合エポキシ樹脂を母材としたハイブリッド型傾斜機能樹脂材料を試料として作製した。

まず動的粘弾性試験(DMA)により測定された複素弾性率をもとに、温度-時間換算則と線形粘弾性理論に従って粘弾性特性の支配的パラメータである緩和弾性率の算出を行った。さらに、定ひずみ速度下での圧縮変形を仮定することで、緩和弾性率から任意のひずみ速度における圧縮弾性率の予測を行い、圧縮試験結果との比較を行った。

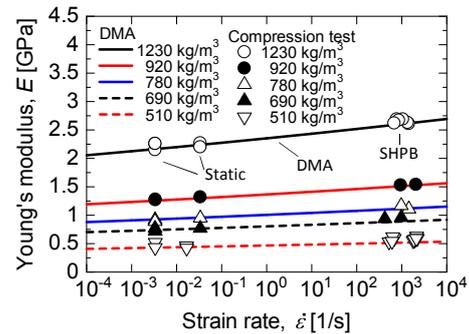


図5 圧縮弾性率とひずみ速度の関係(シリカ充填率0%)

図5に示すように、DMAによる予測値と圧縮試験結果(Static, SHPB)は良好な一致を示しており、傾斜機能樹脂材料の密度低下に伴い圧縮弾性率は低下しており、母材の粘弾性特性によりひずみ速度の増加により弾性率が増加することがわかった。さらに、次式のように傾斜機能樹脂材料の圧縮弾性率は、任意のひずみ速度に対して母材密度を基準とした相対密度の2次関数で統一的に表現できることを明らかにした。

$$E(\rho, \dot{\epsilon}) = \left[C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_{Matrix}} \right)^2 + C_2 \frac{\rho}{\rho_{Matrix}} \right] E_{Matrix}(\dot{\epsilon})$$

ここで、係数 C_1, C_2 はシリカ粒子の充填率に関係なくそれぞれ 0.8 および 0.2 程度の値であった。すなわち、傾斜機能樹脂材料の圧縮弾性率は、母材に対する相対密度の関数と、ひずみ速度依存性を持つ(複合化された)母材の圧縮弾性率との変数分離形という簡便な形式で表されていることがわかる。さらに、強化粒子の充填効果を含む母材の圧縮弾性率は次式のようにひずみ速度のべき乗関数で表現することができ、図6のように強化シリカ粒子の影響 $\alpha(V_p)$ はLewisとNielsenの複合則を用いて予測可能であることを明らかにした。

$$E_{Matrix}(\dot{\epsilon}) = \alpha(V_p) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^\beta$$

なお、指数 β はエポキシ樹脂の物性にのみ依存し、本研究で用いたエポキシ樹脂の場合シリカ充填量に関わらず約 0.018 であった。

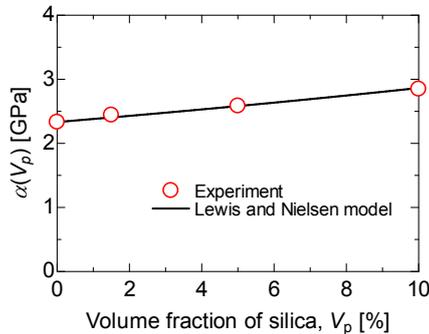


図 6 圧縮弾性率に及ぼすシリカ粒子の影響

また図 7 に示す通り、圧縮降伏応力についても密度低下に伴い圧縮弾性率は低下しており、母材の粘弾性特性によりひずみ速度の増加により圧縮降伏応力が増加し、傾斜機能樹脂材料の圧縮降伏応力は、任意のひずみ速度に対して母材密度を基準とした相対密度の 2 次関数で統一的に表現でき、母材の降伏応力はシリカ粒子を充填することで増加できることを明らかにした。

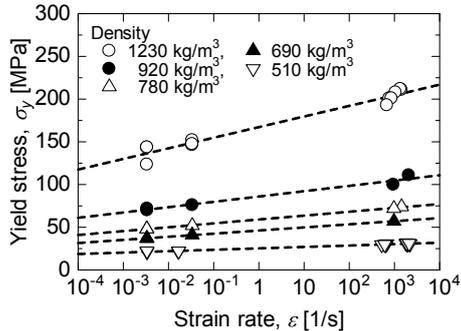


図 7 圧縮降伏応力とひずみ速度の関係 (シリカ充填率 0%)

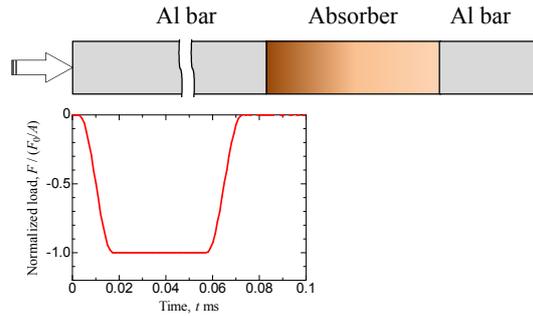
以上の結果より、本研究で開発したハイブリッド型傾斜機能樹脂材料の機械的特性のひずみ速度依存性はエポキシ樹脂の粘弾性特性に大きく支配されており、強化粒子の充填率および中空微粒子の傾斜構造を操作することで、エネルギー吸収材としての設計を容易に行うことができる。

(3) エネルギー吸収特性の評価

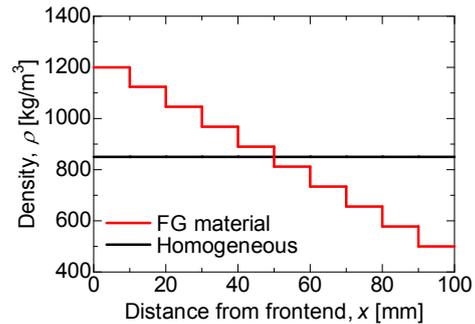
密度と圧縮弾性率の空間分布に起因する不均質変形すなわち特異な応力波伝ば挙動を利用した衝撃エネルギー吸収特性の評価を一次元弾性波動伝ば解析により実施した。

ここでは構造物中の緩衝材を想定し、図 8 に示すような十分に長い 2 本のアルミニウム合金棒の間に長さ 100 mm の傾斜機能樹脂材

料を設置し、片側の弾性棒先端に衝撃圧縮荷重パルスを与えることで緩衝材に貯蔵される力学的エネルギー (運動エネルギーとひずみエネルギーの総和) と反対側の弾性棒に出力される透過応力パルスの評価を行った。なお、解析は 1 次元解析として完全弾性体を仮定して密度と弾性率の関係には実験により得られた結果を用いた。傾斜機能樹脂材料の密度分布を入力側から線形的に減少する場合を積層近似することで解析を実施し、同一の平均密度を有する均質体との比較を行った結果を以下に示す。



(a) 解析条件



(b) 密度分布

図 8 解析モデル

まず、図 9 に示す通り、傾斜機能樹脂材料 (FG material) に貯蔵される力学的エネルギーは同じ平均密度を有する均質体 (Homogeneous) と比較して向上していることがわかる。同時に、傾斜機能樹脂材料から出力される透過応力パルスは均質体と比較して低いレベルに抑えられていることがわかる (図 10)。

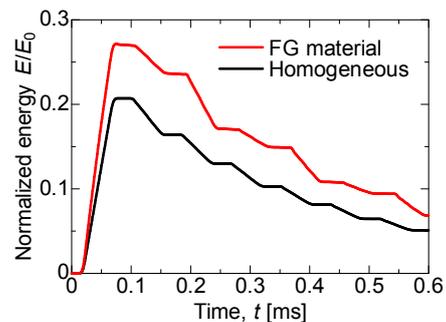


図 9 エネルギー貯蔵量の比較

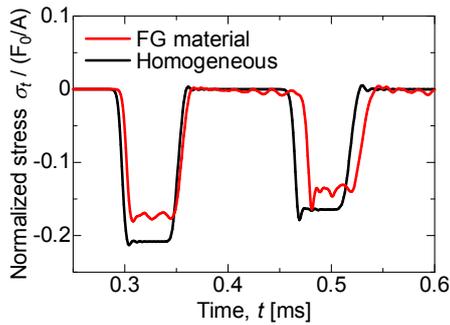


図 10 透過応力波の比較

均質体の場合、高いエネルギー吸収量を得るためには、音響インピーダンス($\sqrt{\rho E}$)を増加させる、すなわち高密度・高弾性化する必要がある、その結果として大きな透過応力を伴うことになり、エネルギー吸収量と透過応力はトレードオフの関係にある。しかし、入力側から密度およびそれに付随する弾性率を低減させることにより、高い音響インピーダンス領域(高密度)から応力波を緩衝材内部に浸透させることで力学的エネルギーを多く吸収できる一方、傾斜材料内部における音響インピーダンスの変化により材料内部で応力波の多重反射が生じ、かつ出力側の音響インピーダンス領域が小さいため低いレベルの応力波が出力される。そのため、傾斜機能樹脂材料を緩衝材として用いることで高いエネルギー吸収量と透過応力の低減(衝撃荷重緩和)の両立が可能となる。

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 2 件)

- ① 樋口理宏, 横地雄斗, 足立忠晴, 傾斜発泡エポキシ樹脂の一体成形法の評価, 日本機械学会論文集 A 編 (掲載決定). (査読有)
- ② M. Higuchi, T. Adachi, Y. Yokochi, K. Fujimoto, Controlling of Distribution of Mechanical Properties in Functionally-Graded Syntactic Foams for Impact Energy Absorption, Materials Science Forum, Vol. 706-709, pp. 729-734, 2012. (査読有)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 樋口理宏, 足立忠晴, 傾斜機能シタックフォームの機械的特性評価, 日本

機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, (九州工業大学, 2011 年 7 月 17 日).

- ② 横地雄斗, 樋口理宏, 足立忠晴, 傾斜発泡エポキシ樹脂の一体成形法の検討, 日本機械学会 M&M2011 材料力学カンファレンス, (九州工業大学, 2011 年 7 月 16 日).
- ③ M. Higuchi, T. Adachi, T. Yoshioka, Y. Kobayashi, Development of Functionally-Graded Syntactic Foams and Evaluation of Their Mechanical Properties, Proceedings of the 2nd Asian Conference on Mechanics of Functional Materials and Structures, pp.25-28, (Nanjing, China, October 23, 2010).
- ④ 吉岡大志, 樋口理宏, 足立忠晴, 小林 豊, 傾斜発泡エポキシ樹脂の一体成形と機械的特性評価, 日本機械学会 M&M 材料力学カンファレンス, (長岡技術科学大学 2010 年 10 月 10 日).
- ⑤ 樋口理宏, 足立忠晴, 吉岡大志, 小林豊, 傾斜発泡エポキシ樹脂の弾性率に及ぼすひずみ速度の影響, 日本材料学会第 89 期学術講演会, (北海道大学, 2010 年 5 月 23 日).
- ⑥ M. Higuchi T. Adachi, Development of Integral Molding of Functionally-Graded Syntactic Foams. Russia-Austria Joint Workshop on Advanced Dynamics and Model Based Control of Structures and Machines, (Linz Austria, April 26-28, 2010).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://solid.me.tut.ac.jp/solid>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口理宏 (HIGUCHI MASAHIRO)

豊橋技術科学大学 大学院工学研究科・助教

研究者番号: 50455185