

令和 4 年 6 月 4 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14615

研究課題名(和文) 固液可変セル構造流体を用いたフレキシブルな衝撃吸収メカニズムの創成

研究課題名(英文) Creation of a flexible impact absorption mechanism using solid-liquid variable cell structure fluid

研究代表者

立山 耕平 (TATEYAMA, KOHEI)

立命館大学・理工学部・助教

研究者番号：70837096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：普段は柔軟でありながら、衝撃荷重が加わった際には高い衝撃吸収特性を有する「負荷荷重に対してフレキシブルな衝撃吸収メカニズム」を見出すことを目的とし、流体でありながら衝撃負荷時に固体化する特性を持つ「固液可変流体」を用いた「セル構造体」の作製を試みた。この際、固液可変流体の配合を変化させることによってその応力波伝播特性および衝撃吸収特性を評価した。検討の結果、本研究で作成した固液可変流体は、ある一定の速度域において衝撃吸収特性が大きく変化する速度依存性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、固液可変流体を用いたセル構造体の作製について検討した。この際、固液可変流体の波動伝播特性、特にその速度依存性に関する知見が得られ、普段は柔軟でありながら、衝撃荷重が加わった際には高い衝撃吸収特性を有する「負荷荷重に対してフレキシブルな衝撃吸収メカニズム」を見出す可能性が示された。この衝撃吸収メカニズムは、従来とは異なる新しい衝撃吸収材料の創成へ応用できると研究代表者は期待している。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to create a material that is normally flexible but exhibits high impact absorption characteristics when an impact load is applied. We attempted to fabricate a "cell structure" by using a "solid-liquid variable fluid" that is a fluid but has the property of solidifying under impact load. At this time, the stress wave propagation characteristics and impact absorption characteristics were evaluated by changing the composition of the solid-liquid variable fluid. As a result of the examination, it was confirmed that the solid-liquid variable fluid created in this study has a velocity dependence in which the impact absorption characteristics change significantly in a certain velocity range.

研究分野：Impact Engineering

キーワード：セル構造体 衝撃吸収

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

「衝撃吸収能力の向上」はモノやヒトの安全といった日常生活に直結する重要な工学課題であり、現在においても盛んな研究報告が行われている。特に、物体の高速衝突等によって生じる衝撃から“対象物”を防護する、といった役割をもった衝撃吸収体に関する研究は、これまでも広い分野において多く行われてきた。従来の衝撃吸収体にもみられる衝撃吸収メカニズムは、(1) 変形・破壊による衝撃荷重の吸収、(2) 受圧面積の増加による衝撃荷重の分散、の大きく 2 種類に分類される。しかし、これらの 2 つの衝撃吸収メカニズムを共存させた衝撃吸収体は存在しない。これは、既存の衝撃吸収メカニズムには原理的なトレードオフが存在するためである。既往の研究においてこのトレードオフは課題とされており、解決に至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、流体でありながら衝撃負荷時に固体化する特性を持つ「固液可変流体」を用いた「セル構造体」を作製することで、従来の 2 種類の衝撃吸収メカニズムの融合を目指す。これによって、普段は柔軟性でありながら、衝撃荷重が加わった際には高い衝撃吸収特性を有する「負荷荷重に対してフレキシブルな衝撃吸収メカニズム」を見出すことを目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、固液可変流体の作製および作製した固液可変流体に対する圧力波伝播特性および超音波伝播特性の評価を行った。固液可変流体の作製には様々な可能性を検討したが、最終的にはウーブレックを用いたシンプルな構成とし、粒子濃度を変更することでその粘度特性を変化させた。ウーブレックの粒子濃度は 40 wt%、50 wt%、55 wt% および 60 wt% の 4 種類とし、水道水に片栗粉を分散させることで試験体を準備した。

圧力波伝播特性および超音波伝播特性の評価は、様々な周波数帯域において波動の伝播速度だけでなく減衰までを評価するため、試験装置を自作した。作製した装置の概略図を図 1 に示す。また、試料部と圧力センサー設置箇所の詳細図を図 2 に示す。実験装置はストライカー、入力棒、液体試料を充填した円筒容器で構成されている。ストライカーを入力棒に衝突させ、その際に発生する応力波が入力棒を通過し液体試料中を伝播することで任意の平面圧力波を発生させる。このようにストライカー、入力棒を用いて液体に圧力波を入射する実験装置はこれまでの研究でも使用されてきた。その多くは円筒容器の外側にひずみゲージを貼り、円筒容器の周方向ひずみを取得していたが、本実験装置では円筒容器に設置した 4 つの圧力センサーで平面圧力波を直接検知した。そして、その圧力値から伝播速度や圧力波の減衰など圧力波伝播挙動を調査した。入力棒にはプラスチック用箔ひずみゲージ(共和電業社製、KFP-2-120-C1-65)を軸方向に設置し、得られたひずみから伝播する応力を算出した。ひずみゲージはホイートストブリッジ回路を介して差動アンプにつながり、電圧は 200 倍に増幅される。ホイートストブリッジに印加する電圧は 5 V とした。入力棒およびストライカーの材質はポリカーボネートとした。入力棒の長さは 1000 mm であり、ストライカーの長さは 50 mm、100 mm および 200 mm とした。また、入力棒とストライカーの間にはパルスシェイパーとして低密度ポリエチレンの発泡体シートを用いた。入力棒の先端面から 60 mm 地点以降に 30 mm 間隔で 4

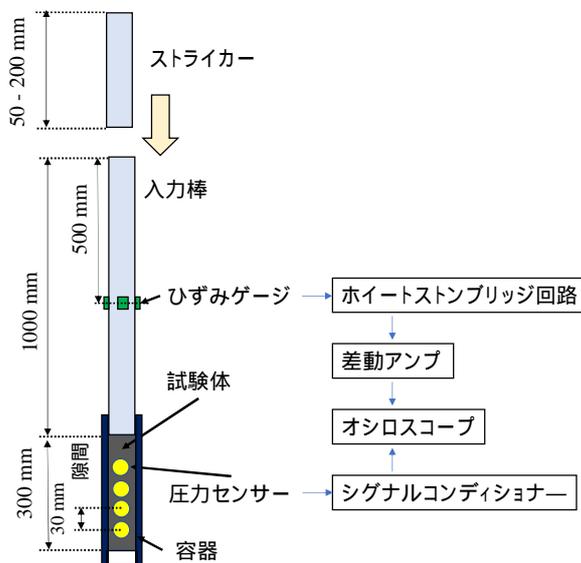


図 1 圧力波測定装置の概略図

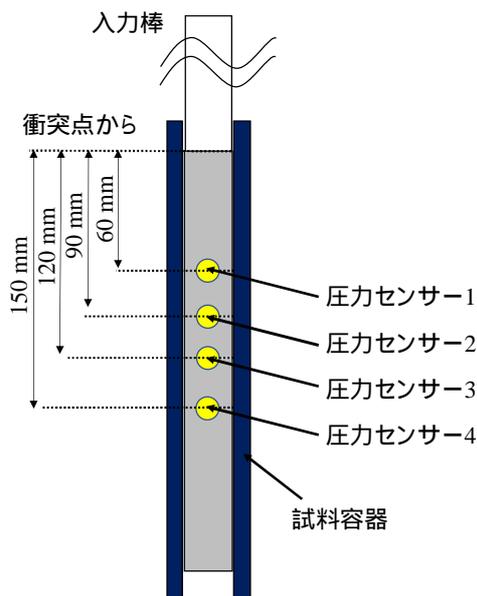


図 2 圧力センサーの詳細

つの圧力センサー (PCB Piezotronics 社製、113B22) を設置した。入力棒の先端面に近い方から

センサー1、2、3、4とする。落下高さを850 mmに統一し全ての実験を行った。一般的な衝撃現象は単一の周波数ではなく複数の周波数が複合した荷重を対象とするが、本研究で作製した固液可変流体がどの周波数に対して減衰を生じるかを詳細に調べるため、超音波を用いた単一周波数における評価も実施した。超音波は250 kHzおよび500 kHzの2種類とした。

4. 研究成果

(1) 固液可変流体における平面圧力波の伝播特性

入力棒に設置したひずみゲージによって得られた軸方向のひずみとポリカーボネートのヤング率から入射波、反射波の応力を計算した。また、液体中に伝播する透過については入射波と反射波を足し合わせることで算出した。一例として、図3に水を試験体とした際の入射波、反射波、透過波の応力-時間関係を示す。また、試料容器に設置した4か所の圧力センサーから取得した水中における圧力-時間関係を図4に示す。伝播距離が大きくなるにつれてピーク圧力値が減衰していることがわかる。ここで、ピーク圧力値の減衰について詳しく見るため、衝突点から120 mm離れた位置における各試験体の正規化ピーク圧力をプロットしたグラフを図5に示す。図5における正規化ピーク圧力は、試験体中に透過した透過波のピーク値を基準値として120 mmの位置に設置したセンサーの圧力値を正規化することで算出した。すべての試験体において、ストライカー長さが短いほど正規化圧力波のピーク値が小さいこと、すなわち圧力波の減衰が大きいことがわかる。これは、ストライカー長さが短くなるほど入射される圧力波の周波数成分が高くなることに起因していると考えられる。本研究で使用したストライカーにおいて入射される波形の周波数を高速フーリエ変換によって周波数分析したところ、50 mm、100 mm、200 mmのストライカーで生じる圧力波はそれぞれ2 kHz、1.5 kHz、1 kHzが主成分の波形であった。透過される圧力波形が高周波となるに従い、試験体内の粒子による減衰が大きく作用したものと推察される。また、試験体について見ると60 wt% ウーブレックに対して50 mm長さのストライカーを衝突させた際の正規化圧力ピーク値は大きく減衰していることがわかる。これより、粒子濃度が高くなるほど高周波成分の減衰が大きくなることがわかった。

(2) 固液可変流体における超音波の伝播特性

上記で得られた平面圧力波の伝播特性をさらに詳しく調査するため、ストライカーの長さを短くすることで得られる周波数よりも更に高周波を入射可能な超音波振動子を用いて、超音波伝播特性評価を行った。この際、超音波の伝播距離

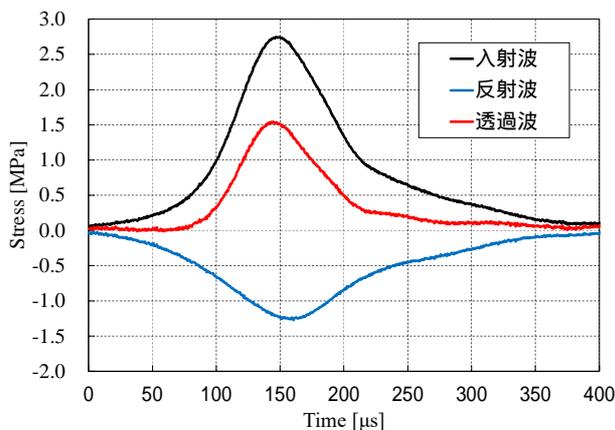


図3 入力棒中を伝播する応力波の時間履歴

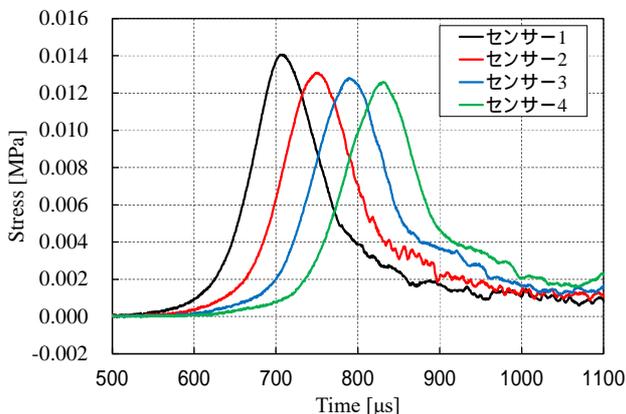


図4 試験体中を伝播する圧力波の時間履歴

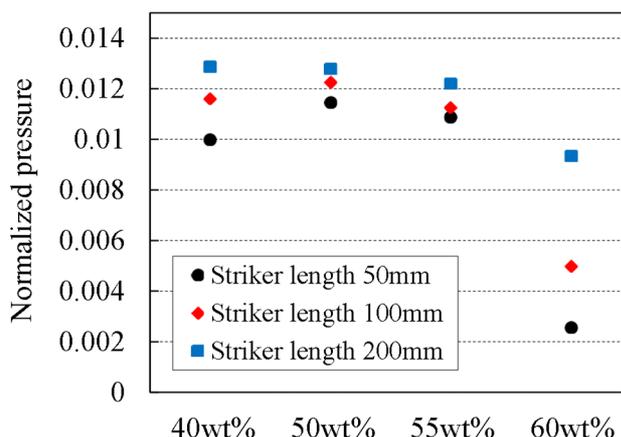


図5 衝突点から120 mm離れた位置における各試験体の正規化圧力値

を

を 10 mm、30 mm および 50 mm とし、各周波数において超音波の伝播による減衰を評価した。一例として、55 wt% ウーブレックに対する超音波の検出電圧 - 時間関係を図 6 に示す。伝播距離 10 mm における波形では、0.01 μ s、0.02 μ s、0.03 μ s においてそれぞれピークが観察されるが、これは端面からの反射波が検出されたものである。伝播距離が大きくなるにつれてピーク電圧値が減衰していることがわかる。ここで、ピーク電圧値の減衰について詳しく見るため、超音波伝播距離 50mm における各試験体の正規化ピーク電圧をプロットしたグラフを図 7 に示す。図 7 における正規化ピーク電圧は、40 wt% ウーブレック伝播距離 10mm におけるピーク電圧値を基準値として伝播距離 50 mm の電圧値を正規化することで算出した。周波数 250 kHz における正規化ピーク電圧値では、平面圧力波の結果と同様に 60 wt% ウーブレックにおいて減衰が大きいことがわかった。しかし、周波数 500 kHz における正規化ピーク電圧値では、平面圧力波の結果と異なり 60 wt% ウーブレックにおいても大きな減衰が確認された。すなわち、低い粒子濃度のウーブレックにおいても高周波数成分において大きな減衰が生じる傾向を示した。これより、ウーブレックにおいてダイラタンシー効果が効果的に発揮される周波数帯域が存在することが明らかになり、この周波数帯域は粒子濃度によって調整が可能であることが示唆された。

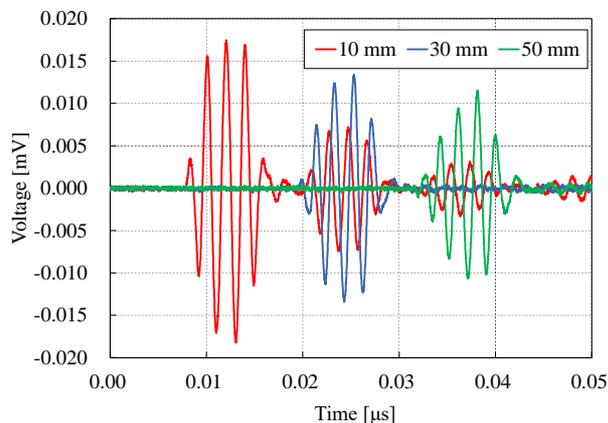


図 6 試験体中を伝播する超音波の時間履歴

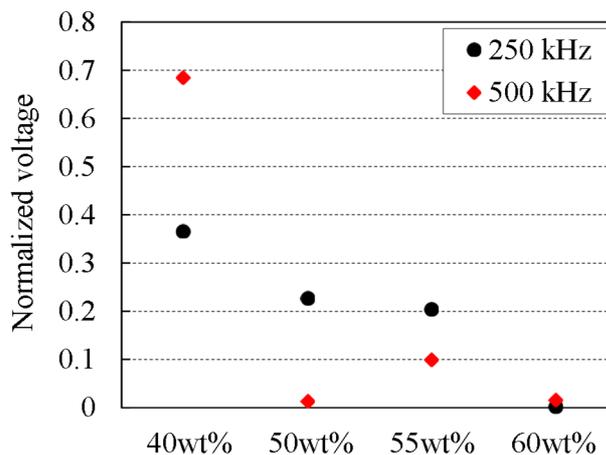


図 7 50 mm 伝播後の正規化ピーク電圧値

(3) 固液可変流体における超音波伝播速度

各試験体宙を伝播する超音波の電圧 - 時間関係において、電圧の立ち上がり時間と伝播距離の関係から超音波伝播速度を算出した。各試験体に対して 500 kHz の超音波を伝播させた際の超音波伝播速度を図 8 に示す。40 wt%、50 wt% および 55 wt% ウーブレックまでは粒子濃度が大きくなるに従い伝播速度も上昇する傾向がみられた。これは、片栗粉の割合増加に伴う密度の上昇に対して体積弾性率の上昇の方が高いためと考えることができる。一方で、55 wt% および 60 wt% ウーブレックにおいては、粒子濃度が大きくなるに従い伝播速度が減少する傾向がみられた。これは、片栗粉の割合増加に伴う密度の上昇に対して体積弾性率の上昇が低くなったためと考えられる。よって、500 kHz の超音波の伝播においては、超音波伝播速度の傾向から間接的に 55 wt% ウーブレックにおける体積弾性率が最大となっていることが示唆された。

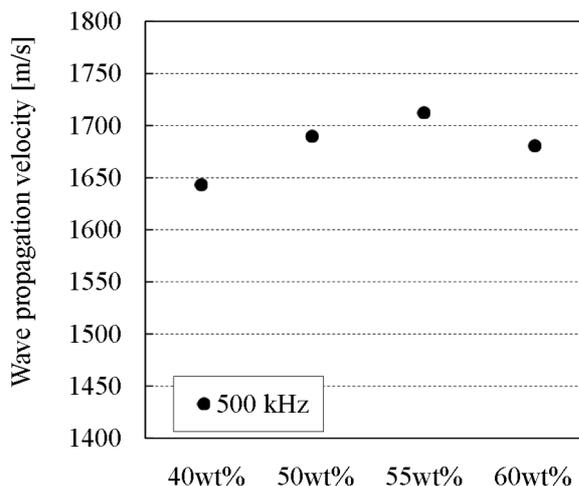


図 8 各試験体の超音波伝播速度

本研究課題では、固液可変流体を用いたセル構造流体の作製について検討した。この際、固液可変流体の波動伝播特性、特にその速度依存性に関する知見が得られ、普段は柔軟でありながら、衝撃荷重が加わった際には高い衝撃吸収特性を有する「負荷荷重に対してフレキシブルな衝撃吸収メカニズム」を見出す可能性が示された。この衝撃吸収メカニズムは、従来とは異なる新しい衝撃吸収材料の創成へ応用できると研究代表者は期待している。

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 Tateyama Kohei, Yamada Hiroyuki	4. 巻 2
2. 論文標題 Nonuniform Deformation of Cell Structures Owing to Plastic Stress Wave Propagation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Mechanics	6. 最初と最後の頁 911 ~ 931
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/applmech2040053	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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Kohei Tateyama
2. 発表標題 Effect of microstructure on mechanical properties in cell materials
3. 学会等名 International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 立山耕平
2. 発表標題 これまでの研究とこれから
3. 学会等名 日本材料学会 衝撃部門委員会（招待講演）
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------