

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：55503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04285

研究課題名（和文）超音波振動を用いた物体軟化装置の開発および応用

研究課題名（英文）Development and application of object-softening equipment by applying ultrasonic vibrations

研究代表者

鈴木 厚行（Suzuki, Atsuyuki）

徳山工業高等専門学校・機械電気工学科・准教授

研究者番号：40450142

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）：超音波振動を用いた物体軟化装置として衝撃軽減装置などを開発した。直径 40 mm の超音波振動子を用いて、高張力鋼板（ハイテン）や複数種類の樹脂に超音波振動を印加したときの变形特性や衝撃軽減特性などについて検討し、超音波振動によって变形抵抗や衝撃力が低減することを確かめた。例えばポリアセタールを試料として用いた場合、超音波振動の印加により約 10.5% 衝撃力が低減した。また、実験条件によるが、ボンネット保持する機構を模した構造体に超音波振動を印加した状態でダミーヘッドを衝突させたとき、僅かであるが頭部損傷値が低減した。衝撃力が印加している瞬間の变形量を測定するシステムも構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車歩行者をはねる事故などでは十分に衝撃を吸収できないケースが多い。そこで、衝撃を受けた瞬間に車両を構成する素材に超音波振動を印加することで变形抵抗を低減させ、衝撃吸収度を向上させる方法を考案した。本研究では、高張力鋼板やさまざまな樹脂を变形試料として効果的に衝撃を吸収できる条件などについて検討した。これらの研究成果により、超音波振動による衝撃吸収装置を自動車などの乗り物や精密機器などへ応用できる可能性を示した。また、ダミーヘッドを用いた頭部損傷値の計測システムや衝撃吸収特性計測システムを構築し、超音波振動を用いた衝撃軽減・吸収装置の特性をより明らかにするための基礎が固まってきた。

研究成果の概要（英文）：We have developed impact absorption devices and other devices as object softening devices by applying ultrasonic vibrations. Using a 40 mm diameter ultrasonic transducer, the deformation and shock mitigation properties of high tensile steel plate and several types of resin were investigated when ultrasonic vibrations were applied, and it was confirmed that ultrasonic vibrations reduced deformation resistance and impact force. For example, when polyacetal was used as a sample, the application of ultrasonic vibrations reduced the impact force by approximately 10.5%. In addition, although it depended on the experimental conditions, the head injury value was slightly reduced when the dummy head collided with a structure that imitated a hood holding mechanism of a car while ultrasonic vibrations were applied. A system was also constructed to measure the amount of deformation at the moment the impact force was applied.

研究分野：超音波工学

キーワード：超音波振動 衝撃吸収 高張力鋼板 Blaha効果 樹脂

1. 研究開始当初の背景

物体の硬さは熱などによって変化するものの、基本的には一定であり、瞬時に変えることは難しい。ところが、超音波振動を物体に印加すると、物体の変形抵抗をほぼ瞬時に低減させることができる。超音波振動によって変形抵抗が低減する現象は、曲げ加工などの塑性加工に応用されている。研究代表者らはこれまで、超音波振動による新しい応用例として超音波衝撃軽減装置を開発してきた。

乗り物に関するさまざまな安全技術が開発されているが、未だ交通事故は多い。自動車などはクラッシュゾーンの潰れることなどによって衝撃を吸収するが、歩行者を巻き込む事故など十分に衝撃を吸収できないケースは多い。また、衝突物や衝撃の大きさはそれぞれの事故によって異なるが、従来の技術では瞬時にその衝撃吸収性能を調整することはできない。そこで、超音波を用いて瞬時にその衝撃吸収性能を調整できる衝撃吸収装置を考案した。

超音波を金属などの材料に印加すると、その材料の変形抵抗が減少する現象が起きる。金属の場合は Blaha 効果として知られている。衝撃を受けた瞬間に超音波の印加によって車両を構成する金属などを軟らかくすることで衝撃を吸収する。Blaha 効果を利用した曲げ加工の研究などは知られているが、Blaha 効果を利用した衝撃吸収の研究は行われてこなかった。研究代表者らは研究開始時の段階ではアルミニウム合金や高張力鋼(ハイテン)などの金属の他、炭素繊維強化プラスチック(carbon-fiber-reinforced plastic; CFRP)などの試験片に超音波振動を加えて衝撃力やスプリングバック量が低減することなど、基礎的なデータを取得していた。しかし、衝撃力が低減することは示せていたものの、衝撃エネルギーを吸収しているということは示せていなかった。また、ボンネット保持する機構を模した構造体に超音波振動を印加した状態でヘッドインパクト(ダミーヘッド)を衝突させたときの頭部損傷値を測定する実験装置を製作していたが、ノイズが除去できないことなどの課題があった。

自動車は車体を軽量化するため、軽くて丈夫な高張力鋼板が広く使用されるようになってきた。特に 780 MPa 以上の超ハイテンに注目が集まっている。しかし、強度を高めようとするとプレス成形時に「割れ」が発生しやすくなる上、従来のプレス成形機では硬すぎて加工できない問題もあった。素材が高強度化するたびにプレス成形機を交換するのは莫大な費用が掛かる。超音波振動を用いて、素材を軟らかくすればこれらの問題を解決できる可能性があると考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的は超音波振動を用いた物体軟化装置を開発し、衝撃吸収装置およびプレス成形機に応用することである。研究開始時の段階で基礎的なデータを取得していたが、まだ解明されていない基礎研究を継続するほか、超音波振動を利用した衝撃吸収装置を実用化するための基盤となる研究を行うことを目標とした。

自動車のクラッシュゾーンのよう、従来の技術では瞬時に最適な衝撃吸収性能に調整することはできず、十分に衝撃を吸収できないケースが多い。超音波振動を用いてこの問題を解決したいと考えた。普段は車体を構成する上で十分な剛性を保ち、衝撃を吸収したい瞬間にだけ超音波を印加することで構造体を変形しやすくする。考案した衝撃吸収装置の最大の特徴は瞬時に衝撃吸収度を調整できることである。自動車に適用した場合、乗客スペースが潰されるほどの大きな衝撃を受けた時や通常時は必要な剛性を保っているが、歩行者などと衝突した時などには最大限構造体を軟らかくして衝撃を吸収する。つまり、状況に応じて衝撃吸収度を調整できる。従来の自動車は必要な剛性を得るため、事故時には硬すぎるが多い。提案する衝撃吸収装置は、自動車・航空機・鉄道などの乗り物に用いることができると考える。自動車の軽量化は燃費向上のために大きな課題であるが、現在の自動車は衝撃吸収のための構造が車体を重くしている。考案した衝撃吸収装置を搭載するための重量増はあるが、従来の構造を廃止し、軽くて丈夫な素材に変換することで今以上に軽量化できる可能性もある。

また、小さな超音波振動子で熱可塑性樹脂などを溶融させて衝撃を吸収する小型装置の開発にも繋げたい。小型の衝撃吸収装置は精密機器の保護などさまざまな用途が見込める。本研究では自動車のフレーム用だけではなく、ヘルメットやヘッドガードの他、精密機器保護装置などに適用することを目標に、小型タイプの開発にもつなげたいと考えた(今回の研究では小型タイプの開発までには至らず)。特に、高齢者などが転倒したときの頭部保護は死亡事故が多いにも関わらず、技術的にはほとんど対策がなされていないのが現状であり、一石を投じたいと考えた。具体的には衝撃吸収材の使用量を減らし、通気性を確保した蒸れにくいヘッドガードなどを想定した。類似する技術はいまだ開発されていない。

超音波振動をプレス加工機へ応用する独自性は広範囲の成形加工に超音波振動を用いることにある。従来技術には超音波曲げ加工機などはあるが、単純な形状の狭い範囲にしか適用できず、広い範囲には応用されてこなかった。本研究では高張力鋼板を変形試料とし、複数の振動子を用いて「割れ」の発生しやすい箇所を中心に物体を軟化させ、広範囲な成形加工に挑戦した。

3. 研究の方法

超音波振動を利用し、衝撃を軽減・吸収できることを示すために、各種の実験装置を試作した。また、超音波振動を利用したプレス加工機も試作した。超音波振動子はボルト締めランジュバン型振動子(BLT) にステップ型ホーンを接続した構成にした。BLTは金属体で圧電素子を挟んでボルトで締結した構造の超音波振動子であり、強力超音波の分野で広く使われている振動子である。圧電素子のみで構成した振動子と比較し、BLTは大きな振動エネルギーが得られ、振幅拡大用のホーンの設定も容易である。超音波振動子はファンクションジェネレータおよび高周波増幅器を用いて駆動した。

(1) 衝撃における頭部損傷値の超音波振動による軽減

ボンネット保持する機構を模した構造体に超音波振動を印加し、ヘッドインパクトを衝突させる実験を行った。実験装置の構成を図1に示す。実験装置は2本の超音波振動子・ヘッドインパクト・落下装置(スライドガイドほか)・変形試料・衝突板などから概略構成されている。超音波振動子は上記スライドガイドとは別のスライドガイドを用いて上下方向に動かすことができる。変形試料は幅40mm、長さ250mm、厚さ2.3mmの高張力鋼板(WEL-TEN590RE)とした。変形試料の一端をボルトで固定し、他端にはヘッドインパクトを衝突させる衝突板を取り付けた。衝突板は幅270mm、長さ150mm、厚さ10mmで材質はアルミニウム合金である。超音波振動子を変形試料へ押し当てる静荷重はばね定数157N/mmのコイルバネをナットで締め付けることで調整した。ヘッドインパクトは2本のスライドガイドで固定し、上下に動かすことができる。ヘッドインパクトの頭蓋部分はアルミニウム合金であり、外皮部分はポリ塩化ビニルであり、加速度センサを内蔵している。頭部損傷値は加速度センサからの出力をユニバーサルレコーダで測定し、解析ソフトウェアDIAdemを用いて求めた。過去の研究においては超音波振動に起因するノイズが問題となっていたが、本研究では基台を分割することやゴムブッシングを介してヘッドインパクトを固定することなどによって加速度センサに超音波振動が伝搬しないように工夫してノイズを除去した。自動落下装置を途中まで製作していたが、今回の研究では完成にいたらず、ヘッドインパクトを落下させるタイミングは手動による。

(2) 超音波溶融による衝撃軽減特性

先の研究では直径40mm、共振周波数約27kHzのBLTを用いて4種類の樹脂(ボンドガン用の熱溶融型接着剤、ポリプロピレン丸棒、アクリロニトリル・ブタジエン・スチレン共重合(ABS)丸棒、ベークライト丸棒)に超音波を印加し、衝撃の軽減をすることが確認できている。本研究では融点とガラス転位温度が超音波を印加した時の衝撃軽減率に関係していると推測し、この2つの特性がまばらになるように別の4種類の樹脂(ポリエチレン丸棒、ポリエチレンテレフタレート丸棒、ポリカーボネート丸棒、ポリアセタール丸棒)を選択し、これらの樹脂に超音波を印加して衝撃軽減特性について検討した。ポリエチレンテレフタレート丸棒の直径は12mmであり、他3つの樹脂は直径10mmである。実験装置は主に超音波振動子・試料固定用アンビル・衝撃印加重錘から構成され、それぞれは独立してスライドガイドして上下に移動させることができる。超音波振動子は振動減衰を抑えるため、縦振動のノード部で架台に固定した。変形試料は試料固定用アンビルに載せ、超音波振動子を上から押し付けることで溶融させる。試料へ印加する衝撃の大きさは衝撃印加用の重錘を落とす高さで変化させた。なお、圧力型ロードセルは試料固定用アンビルの下にボルトで固定した。圧力型ロードセルに超音波振動が伝達されないように試料固定用アンビルの底面にはゴムを張り付けている。

(3) 衝撃吸収特性計測システム

これまでの研究では超音波振動によって衝撃の瞬間的な衝撃力が低減することを示しているが、衝撃エネルギーが吸収されることはまだ示せていない。衝撃エネルギーの吸収量を測定するには、変形中の変形量と力を同時かつ連続的に計測する必要がある。そこで本研究では超音波振動による衝撃吸収特性を計測するためのシステムをArduinoとパソコンを用いて構築することを試みた。変形量と力はそれぞれリニアエンコーダと圧電型ロードセルを用いた。

(4) 超音波振動を用いたプレス加工

金属の変形抵抗が低減する効果をプレス加工に適用するために超音波振動を印加することができるプレス加工機を構成した(図2)。金型への負荷を考慮して、まずは変形しやすいアルミニウム合金製(A5052)の曲げ試料や機械構造用炭素鋼製(S50C)の曲げ試料を用いてプレス加工実験を行った。構成した超音波プレス加工機は最大20tの油圧プレス機・BLT・上下凹凸の金型・ロードセル・デジタルピークホルダで概略構成されている。金型は一本のBLTを設置した凸型の金型(上金型)と二本のBLTを設置した凹型の金型(下金型)の二つを用いた。また、各部の振動分布を測定した。

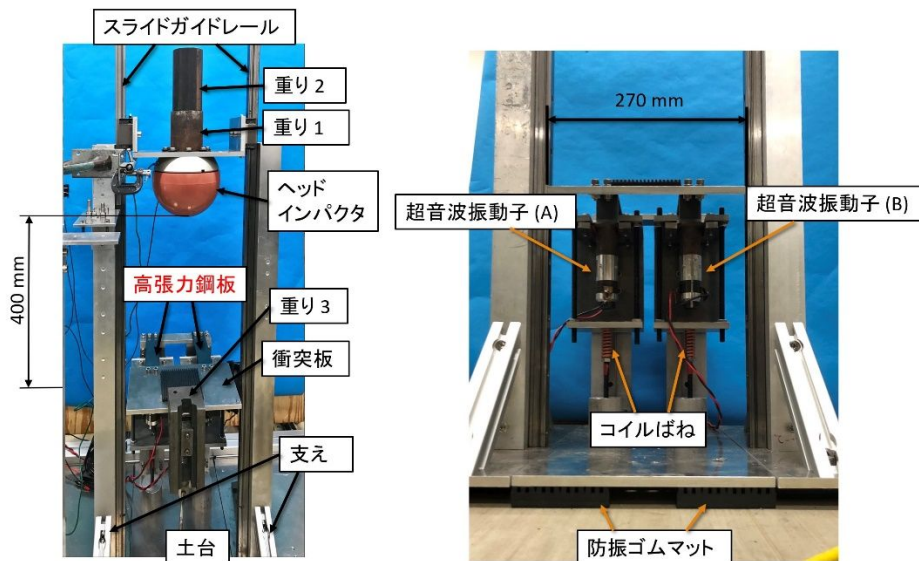


図 1. 頭部損傷値の測定装置

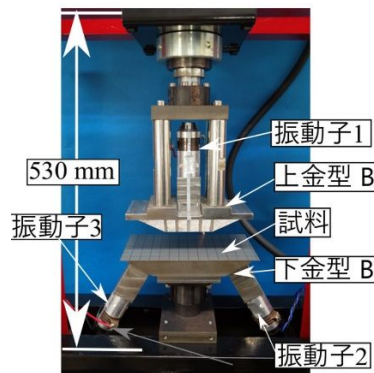


図 2. 超音波プレス加工機

4. 研究成果

(1) 衝撃における頭部損傷値の超音波振動による軽減

ボンネット保持する機構を模した構造体に超音波振動を印加した状態でヘッドインパクトを落下させた際の頭部損傷値や変形特性について検討した。超音波の有無で実験結果に大きな差があったとはいえないが、実験条件によっては超音波振動の印加によって僅かに頭部損傷値が低減した。超音波振動子を変形試料に押し当てる静荷重を 2.1 kN としたときに頭部損傷値は 3 回の実験の平均値で約 3%低減した。このときの加速度の波形を図 3 に示す。過去の研究で測定された波形よりノイズが除去されている。自動落下装置を完成させれば、波形のずれは補正できるはずである。加速度の最大値も超音波振動の印加によって低減している。ただし、静荷重を 1.4 kN としたときには 3 回の実験の平均値で約 11%増加してしまっている。主な測定結果を表 1 に示す。高張力鋼板に低い静荷重をかけた場合でも高い荷重をかけた場合でも超音波を印加した方の曲がり角が大きくなった(図 4)。頭部損傷値を低減させるにはある程度高い静荷重を加える必要があると推測する。超音波振動子は改良の余地がある。試作した超音波振動子は振動源である BLT の共振周波数から若干ずれているため、BLT の共振周波数と合わせるなどによって、より大きな振動振幅が得られるはずである。

(2) 超音波溶融による衝撃軽減特性

今回測定を行った樹脂全てにおいて衝撃力を軽減することが確認できた。超音波の有無にかかわらず衝撃力が最も低かったのがポリエチレンであり、超音波なしに比べて超音波ありの軽減率が最も大きかったのがポリアセタールで約 10.5%軽減された。このとき、衝撃印加用錘の落下高さは 100 mm であり、試料に印加する静荷重は 200 N にした。超音波振動子の駆動周波数は 24.95 kHz であり、駆動電圧は 200 Vrms とした。このときの衝撃力の波形を図 5 に示す。超音波振動の印加で樹脂が溶融し始めるが、超音波振動を印加しすぎると衝撃力の軽減率が逆に小さくなる傾向が見られた。本研究では手動で重錘を落下させていたが、樹脂が溶融するタイミングに合わせて重錘を落下させるのは難しいため、自動落下装置がほしいところである。

(3) 衝撃吸収特性計測システム

Arduino とパソコンを用いて衝撃力（アナログ信号）と変位（デジタル信号）を連続的に測定するシステムを構築した。計測したデータを CSV ファイルとして出力できる。得られたデータから変形量-衝撃力特性のグラフを作成することもできた。リニアエンコーダと圧電型ロードセルの出力を連続的に測定することはできたものの、瞬間的な計測であり、衝撃力と変位を測定タイミングには大きなずれが生じてしまっている。この問題が解消されれば超音波振動の印加によって衝撃力が低減できるということのみならず、衝撃エネルギーが吸収できることを示せるようになると思われる。

(4) 超音波振動を用いたプレス加工

230 mm×130 mm×1.6 mm の機械構造用炭素鋼製 (S50C) の変形試料を用いてプレス加工実験を行った。プレス荷重は 5 t とした。金型と変形試料の接触する箇所の傷の大きさには若干の差は見られたものの、試料の変形形状に違いはほとんど見られなかった。超音波振動が弱かったことが要因であろう。また、変形応力の大きな箇所へ集中的に超音波振動を印加することもできていないようである。

次に、実験を単純化しアルミニウム合金製 (JIS A5052) の短冊状変形試料 (40 mm×250 mm×2 mm) を用いてプレス加工実験を行った。プレス荷重は 5 t とした。超音波振動を印加してプレスした試料では若干ではあるが超音波印加により変形量が増加した。

また、レーザドップラ振動計等を用い、BLT の軸方向に対して垂直方向の振動分布等を測定した。BLT の両端では振動ノードにはなっておらず、金型部の振動は非常に小さい。共振周波数がずれてしまったことと金型部で振動のエネルギーが広い範囲に分散されているためと推測する。

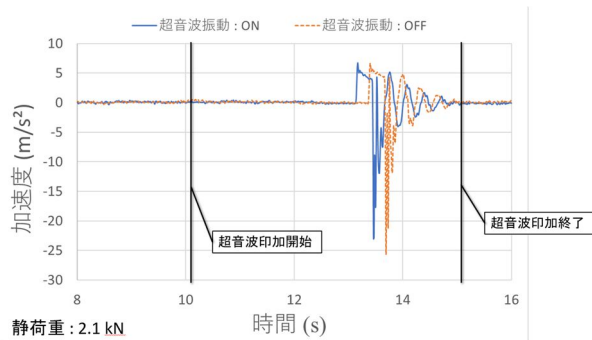


図 3. ヘッドインパクトの加速度波形

	振動子	超音波無し		超音波あり	
		HIC	曲がり角 θ (°)	HIC	曲がり角 θ (°)
低い 静荷重	A	67.15	24.6	74.76	26.6
	B		24.79		26.7
高い 静荷重	A	34.82	24.0	33.77	24.6
	B		24.0		24.2

表 1. 頭部損傷値の測定結果 (平均値)

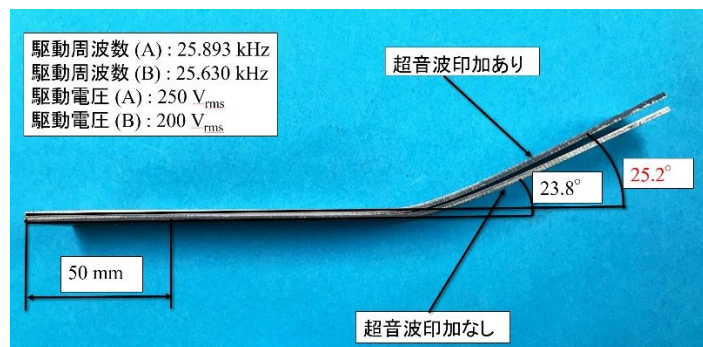


図 4. ヘッドインパクトを衝突させた後の変形試料 (高張力鋼板)

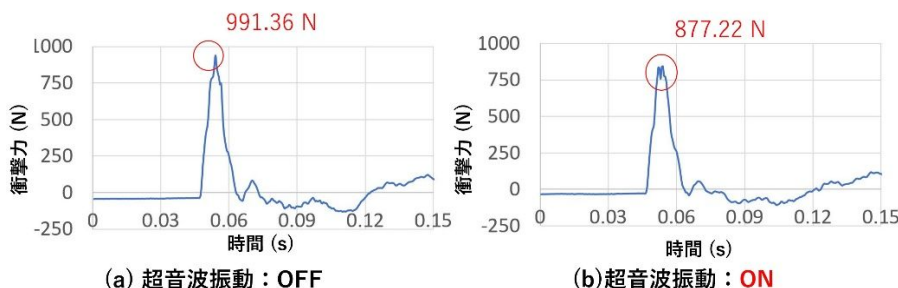


図 5. 超音波溶融による衝撃力波形の違い (ポリアセタール)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木厚行、山崎達矢、辻野次郎丸
2. 発表標題 3本のボルト締めランジュバン型振動子を用いたプレス加工機の構成
3. 学会等名 日本音響学会2020年春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木厚行、久保翔、山崎雄矢、和田宙樹
2. 発表標題 超音波振動を印加させた高張力鋼板にダミーヘッドを衝突させたときの頭部損傷値の低減効果
3. 学会等名 日本音響学会2021年秋季研究発表会
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
---------	---------