

## 博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

氏名	きた がわ かづ たか 北 川 一 敬 <sup>1</sup>
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博第1号
学位授与年月日	平成7年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
論文題目	衝撃波と軟弾性体の非定常干渉に関する基礎研究
論文審査委員	(主査) 教授 保原 充 <sup>2</sup> 教授 山田 豊 <sup>2</sup> 教授 寺田 耕 <sup>2</sup> 教授 井村 徹 <sup>2</sup> 教授 岡本 弘 <sup>3</sup>

### 論文内容の要旨

#### 衝撃波と軟弾性体の非定常干渉に関する基礎研究

本研究の目的は、気体衝撃波の衝突干渉による軟弾性体の非定常変動の特徴を実験及び数値計算により基礎的に調べることである。これは、また衝撃的な外圧、環境の緩和問題にも資すると考えられる。このために、特に空隙率0%のゴムから各種の空隙率のフォーム状弾性体に到る一連の軟弾性体を取り上げ、衝撃波との基礎的な干渉過程の違いを系統的に調べた。

まず、材料試験(圧縮試験)による個々の供試軟弾性体材料の静的特性を調べた。オープンセル型の各種空隙率のフォームの応力とひずみの関係はゴムとは異なるヒステリシスサイクルが確認できた。オープンセル型の緻密なフォーム(Felt type I:空隙率0.76)の応力とひずみの関係は、ひずみが微小の時にバックリング現象を起こしてしまい、以後、応力とひずみの関係は滑らかな非線形的曲線で表されることを確認した。

オープンセル型で空隙率の高いフォーム(Felt type II:空隙率0.978, Net type:空隙率0.977)の応力とひずみ関係は、加圧初期でかつひずみが小さい段階において線形の弾性領域が存在する。これは緻密なフォーム(Felt type I)には見られなかった特徴である。この線形の弾性領域を越えるとバックリングを起こし、ひずみのみがかなり増して後応力が急増する、特徴的非線形構造が明らかになった。

次に、衝撃波管を用いて、衝撃波管の下流端末に設置した各種空隙率の軟弾性体(ゴムまたはフォーム)と、気体中を伝播する衝撃波との一次元非定常干渉に関する基礎的実験を行なった。固定壁面に緻密なフォーム(Felt type I)を取り付けて、フォームの自由端に衝撃波を入射させると、固定壁面では減衰振動形の応力変動が生じフォーム内部では、ステップ状応力衝撃波は発生せず、緩やかな応力波が伝播する。ただし、弾性体なしの固体壁より過剰な動的応力が発生する。この動的最大応力と一定値に収束した後の準静的応力との比をDLF(Dynamic Load Factor, 動荷重係数)と定義すると、緻密なフォームのDLFは入射衝撃波マッハ数 $M_s=1.7\sim 1.9$ では約3.3を示すことがわかった。空隙率の高いフェルト状のフォーム(Felt type II)のように空隙率が高くなるにつれて、DLFは低下して1に近づき、また往復応力波の周期は短くなることを実験的に確認できた。これに

- 1 愛知工業大学大学院 工学研究科博士課程  
生産・建設工学専攻(豊田市)
- 2 愛知工業大学 機械工学科(豊田市)
- 3 愛知工業大学 応用化学科(豊田市)

対してネット状のフォームの特徴として、フェルト状のフォームのような高いDLF値は見られない。これは、ネット状弾性体がフェルト状弾性体に比べてセルの構造が粗く、気体衝撃波の透過性(Permeability)が大きいために同じ空隙率でも、Baerの二相流近似解析(1992)が示す様に二相流としての性質が強くなることを示している。

実験結果と比較し、また変動の特性を調べるために一連の数値計算を行った。まずゴムと衝撃波の干渉を基礎的に解析するため、ステップ状外圧を印加した場合における弾性体の非定常な変位量、速度や応力等の変動を一次元基礎方程式から求め、ゴムと衝撃波の一次元干渉問題における非定常な変位、応力等の変動を解析的に調べた。その結果、ゴム中を波が伝播し、その波は固定端では圧縮波は圧縮波として、膨張波は膨張波として反射し、自由端では圧縮波は膨張波として、膨張波は圧縮波として反射する等、気体中の波の反射と基本的に同質のものであることが確認できた。一次元干渉解析において本計算でのゴム後端の主応力の変動とゴムの自由端の移動の変動は、Mazor et. al. (1992)の実験での応力変動の大きさや周期とほぼ合致しており、使用した計算法は妥当であることを示している。また、ゴムの側面写真について実験と本計算を比較した場合でも長さや太さの分布もほぼ合致している。従って、ゴム状弾性体の本研究の一次元計算法は実験をほぼシミュレートする事が確認できた。

次に、中密度(290kg/m<sup>3</sup>程度)で空隙率の比較的低いフォーム(空隙率 0.76)と衝撃波との干渉変動について解析するために、フォームを、応力試験から求めた応力-ひずみ曲線に従う単一非線形弾性体であるという仮定をたてて、計算を行った結果は実験とよく全体的に合致することが確かめられた。また緻密なフォーム状弾性体の特徴として、ゴムと比べて、変形の初期に極めてやわらかく、圧力波の伝播速度も小さいが、一気に圧縮された後は急に硬化して、より速やかに小振幅の減衰振動に入る性質のあることが確かめられた。また、静的な応力とひずみ関係が速い現象においても成立すると仮定した計算結果はミリ秒単位の高速変動実験とほぼ合致しており、使用した仮定が成功し本計算の条件下でのフォームの動的な変動特性をよく表している事が確認された。

## 論文審査の結果の要旨

北川一敬君提出の論文「衝撃波と軟弾性体の非定常干渉に関する基礎研究」は、気体衝撃波が軟質弾性体に衝突して生ずる相互干渉に関する一連の一次元理論研究及び関連実験による比較研究を纏めたもので、流体と弾性体の異相干渉の研究であると共に、衝撃の緩和や胆石の衝撃破砕損傷等、環境や医学の応用にも関連した基礎研究である。

本論文は7章からなっている。第1章は序論で、衝撃波の柔軟弾性体への衝突の結果生ずる変動干渉について従来の研究成果を概観し、本研究の意義と目的を述べている。第2章ではゴムの統計理論的特性とともに、ポリウレタンフォーム(以下略称フォーム)の様に内部に空隙を含む多孔質物体を力学的見地から分類している。第3章では軟質弾性体材料の圧縮試験で得られた応力と歪みの関係を調べ、ゴム類は統計理論式とよく合致する事、一方オープンセル型の空隙を含むフォームは、空隙の上昇とともに応力・歪み関係の非線形性が強くなる模様を明らかにし、特に加圧時と除圧時の応力と歪みの関係にはゴムとは異なるヒステリシスの生じる事を確認している。

第4章では一連の軟質弾性体の衝撃波管による実験について、測定された圧力、応力の変動の特徴を調べている。衝撃波管下流側固定端に管径以下のゴム柱(単軸応力荷重形)、又は管径と同径のフォーム(単軸歪み荷重形)を取り付け、その反対側の自由端に、衝撃波管で発生させた衝撃波を衝突させると、両者の干渉で境界は移動し気体側への反射衝撃波は一部緩和される事、一方弾性体内を気体衝撃波の数分の一の速度の応力波が伝播し、特に固定端では最大の第一波応力を生じて後減衰振動形の応力振動をしながら定常値に向かう事、弾性体の空隙率が高くなると振動がより速やかに減衰する模様を応力測定結果から明らかにしている。次いで、この第一波の動的最大応力値と定常値との比をDLF(Dynamic Load Factor, 動荷重係数)に注目しその値を求めた結果、ゴム類や空隙の少ないフェルト状フォーム(空隙率 0~0.76)では、10~15気圧の強い衝撃圧を受けた場合DLF値は3~3.5に達し、弱い衝撃力を受けた場合の理論値2より大きくなる事、又空隙の多い場合(空隙

率 0.98)にはDLF値は低下し、殊にネット状フォーム構造の時は更に低下して1に近づく等の新しい知見を見出ししている。

第5章では前章の実験で示された非定常変動の内部構造を明らかにする為の一連の数値計算の結果、並びに実験との比較について述べ、得られた動の変動の特徴を明らかにしている。先ずゴム表面にステップ状外力を印加した場合について、一次元基礎方程式において、空間微分を二次精度の中心差分で、時間微分を四次精度ルンゲ・クッタ法で積分するという方法により開発した差分解析プログラムで計算した。その結果、ゴム表面から応力波が伝播して、固定端に達すると圧縮波は圧縮波、膨張波は膨張波として反射し、又波が自由端に達すると圧縮波は膨張波、膨張波は圧縮波、として反射し、気体中の波と同質である事等変動の詳細な構造、特性を確認している。次に気体衝撃波とゴムとの衝突計算結果では、ゴム自由端の時間毎の移動量、固定端での応力変動、ゴムの断面積の変動量等は、Mazor et al.(1992)の実験的測定値と良く合致する事を見だし、解析プログラムの精度を確かめている。更に各種の強さの衝撃波の衝突計算から得たゴム固定端でのDLF値は、弱い衝撃波を受けた時には2に近すぎ、衝撃波が強くなると系統的に増大する事を明らかにしている。

第6章では、衝撃波と空隙を含む弾性体との干渉解析について述べている。空隙率の高いフォーム内では気体と固体が共存する二相流近似のBaer(1992)の計算が実験結果を良く説明しているが、空隙率の低い時(0.76)に管端で実験測定したガスの圧力と、フォームの接触応力を含めた全体の応力とを比較して、フォーム中の気体のモビリティが小さい事を見出し、この事から二相流の計算に

換えてフォームを単一弾性体と近似する計算手法を新たに提案している。即ち空隙率0.76の緻密なフォームと衝撃波の干渉解析では、フォームは材料試験結果の応力-ひずみ曲線に従う単一弾性体であると仮定して計算を行ない、その結果ミリ秒単位的高速変動実験と全体的によく合致し緻密なフォームについての仮定が良い近似を保つ事を見出ししている。又緻密なフォームの変動はゴムと比較して変形の初期には柔らかいが、圧縮された後急激に硬化して応力波伝播速度が上昇し、又応力変動は著しい減衰を受けるという実験結果と一致する事、又弾性体固定端では、衝撃波により発生した圧縮波の到達後反射波が固定端を遠ざかる間応力が上昇を続け、反射波が自由端に達し、再反射膨張波が固定端に到達して、以後応力低下が始まる、といった固定端での応力変動第一波の複雑な干渉変動について、その詳細な内部構造等を明らかにしている。第7章では、本論文の結論を述べている。

以上の様に、本論文は空隙率0~0.98の範囲にわたるゴムからオープンセル形ポリウレタンフォーム迄の軟質材料と衝撃波の異相干渉について、実験的な応力変動特に動荷重係数を系統的に調べ、又数値計算と実験の両面から比較を重ねつつ空隙率0~0.76における基礎的な一次元干渉変動の詳細な内部構造を明らかにし、圧力波、応力波の伝播特性や、動荷重係数の決定要因を始めて系統的に調べる等、各種の新しい知見を加えたもので、学術上、工業上寄与するところが大きい。よって本論文は提出者北川一敬君は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格があるものと判定した。

(受理 平成7年3月20日)