

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：16301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21022

研究課題名（和文）ソフトマター薄膜中の超音波の伝搬特性の解明と非破壊検査技術への応用

研究課題名（英文）Study on wave propagation in a soft and thin material and its application to nondestructive evaluation

研究代表者

中畑 和之（Nakahata, Kazuyuki）

愛媛大学・理工学研究科（工学系）・教授

研究者番号：20380256

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ソフトマター薄膜は、様々な工業材料に使用されているが、外部からの衝撃等によって損傷が生じる。本研究では、膜材料を使った構造部材を効率よく非破壊検査するために、波動と振動の適用を考える。そのための基礎検討として、膜の張力を変化させたときの膜の振動および波動について調査することを目的とする。研究の結果、ソフトマター薄膜において、膜に作用する応力状態によって、固有振動数と振動の伝搬速度は変化し、それは弦の理論式とよく整合することが示された。しかし、この振動よりも早い時間に微小な波動が計測され、それは膜中を伝搬しているガイド波の可能性があると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ソフトマター薄膜は、構成材料、形成方法、厚さ等によって性能が異なり、建設、航空宇宙、エレクトロニクスなど幅広い分野において、その性能を生かした利用がなされている。供用中の検査として、局所的な目視検査あるいは触診が行われているが、これら従来の方法では効率が悪い。大面積を有する材料を検査する場合、長距離を伝搬する弾性波の適用が効果的だと考えるが、膜材料の弾性波検査に関する研究例はほとんどなく、本研究は新規性を有する研究である。本研究によって、振動よりも速い速度で到達する微小な弾性波が計測された。これは、ガイド波の性質を有している可能性があり、引き続き研究を行い、波動伝搬特性を明らかにしていく。

研究成果の概要（英文）：Soft and thin materials are used in various industrial fields, but they are deteriorated due to external impact or environmental factors. In this study, we consider the application of elastic waves and vibrations for a non-destructive inspection of structural components using soft and thin materials. In experimental measurements, it was shown that the natural frequency and the propagation velocity of the vibration change depending on the tensile stress state acting on the film. The results are in good agreement with the theoretical approach based on the string vibration. Moreover, a wave with a small amplitude was found, which arrived earlier than the vibration propagation. It seems to be a guided wave propagating in the membrane; therefore, we continue the investigation of the property of the wave.

研究分野：非破壊評価

キーワード：非破壊評価 ソフトマター 薄膜 波動伝搬 振動伝搬 ガイド波

1. 研究開始当初の背景

薄くて柔らかい材料はソフトマターとよばれている。中でも、膜状のものを表す用語として、フィルム、シート、膜などがある。JIS(日本工業規格)の包装用語規格によると、フィルムとは「厚さが $250\mu\text{m}$ 未満のプラスチックの膜状のもの」、シートとは「厚さ $250\mu\text{m}$ 以上のプラスチックの薄い板状のもの」とされている。また、膜は自然物から概念的なものまでを含む広い範囲を対象とした包括的な用語である。厚さで分類する場合、数 μm より小さい膜を薄膜、それよりも厚い膜を厚膜として区別しているようである。ソフトマター薄膜はその構成材料、形成方法、厚さ等によって性能が異なり、建設、航空宇宙、エレクトロニクスなど幅広い分野において、その性能を生かした利用がなされている。建設分野で使用する材料として、ガラス繊維にフッ素樹脂をコーティングした膜材料がある。これは軽量かつ高強度な材料であり、透光性を有するため、明るい空間の演出を目的としてドームや駅舎の屋根などに採用されてる。建設で用いられる膜は比較的厚く、膜構造の建築物及びテント倉庫建築物に関する技術的基準によれば、 0.5mm 以上の厚さであることが定義されている。航空宇宙分野では、耐熱性、耐放射線性、耐紫外線性に優れたポリイミド樹脂のシートが、人工衛星の外表面に使用されている。ポリイミド樹脂は電気絶縁性を有するため、エレクトロニクスの分野でも用いられている。

構造物や人工衛星に使用されている膜材料には、外部からの衝撃等によって欠陥が生じる。これらを長期的に利用することを考えると、破れ/裂け、ピンホールのような空隙等の欠陥が生じた場合には、使用性能に大きく影響するため、早期に発見する必要がある。供用中の検査として、拡大鏡で膜の表面をチェックしたり、膜体を手で押して張力の状態を確認したり等、局所的な目視検査あるいは触診が行われているが、これら従来の方法では効率が悪い。大面積を有する材料を検査する場合、長距離を伝搬する弾性波の適用が効果的だと考えるが、膜材料の弾性波検査に関する研究例はほとんどない。これまで、ポリイミドのある点に衝撃を与えた場合、波動が伝搬することがアコースティックエミッション(AE)センサを用いた基礎実験で確認されている[1]。この波動は、センサ位置毎に時間差を伴って観測されたため、境界内を伝搬するガイド波であると考えられるが、その性質は明らかになっていない。ガイド波の理論は、固体の板やパイプ等のハードマターについては膨大な研究例があるが、ソフトマターに対する研究はほとんどないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、膜材料を使った構造部材を効率よく検査するために、波動と振動の適用を考える。膜材料は一般的に柔らかく、押せば容易に変形するものが多い。膜の振動やその振動が伝搬する理論については、古くから研究されている[2]。膜振動の理論によれば、膜の固有振動は張力、密度、膜の大きさに依存する。また、膜の振動が伝わる速度は、張力と密度に依存する。一方、小林らの研究[2]では、ポリイミド樹脂(厚さ $20\mu\text{m}$)に微粒子を衝突させたときに、応力波(弾性波)がポリイミド面内を伝搬し、圧電素子で計測されることが報告されている。小林らの実験は、膜のたわみが無い状態で測ったものであるが、振動理論によれば膜の張力によって固有振動数や膜振動速度が変化することから、膜の応力状態で弾性波の特性が変化することを調査することは重要であると考えられる。また、薄い材料であれば、波動は図1のようにガイド波となって伝搬するため、分散性を有することも想定される。本研究では、膜の張力を変化させたときの膜の振動および波動について調査することを目的とする。

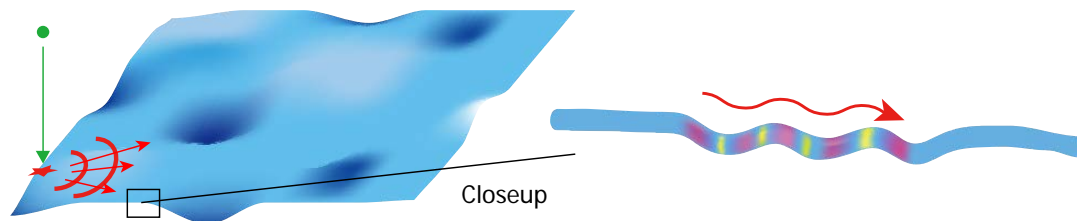


図1: ソフトマター薄膜を伝搬する弾性波(ガイド波)のイメージ

3. 研究の方法

(1) 古典理論による曲げ振動の式

ここでは、ソフトマター薄膜の振動をモデル化するために、1次元の弦の理論から考えてみる。弦の両端が固定されている場合、弦の振動伝搬速度 v と n 次モードの振動数 f_n は次式となる。

$$v = \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (1),$$

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \quad (2)$$

ここで、 T は引張力、 σ は線密度である。また、おもりの質量を W とすると $T = Wg$ である。

(2) ポリイミド中を伝搬する振動計測

被検体としてポリイミドフィルムを使用する。実験では、フィルムの張力を変化させながら計測を行うため、図 2 に示すような計測システムを構築した。ポリイミドフィルムの一辺を固定し、反対側の辺に荷重を与えることによってフィルムに引張応力を作用させる。フィルムの上に直接加速度センサを設置して、シャープペンシル芯の圧折によって加振する。フィルムの振動を、多点に設置したセンサ(富士セラミクス SAR11SCG)で計測した。フィルムの長さ L は 1000mm とし、長手方向に加速度センサを 200mm の間隔で設置した。ここでは、4 つの加速度センサ (1~4) を用いた例を示す。収録した加速度波形を周波数域に変換し、そのフーリエスペクトルについて調べた。

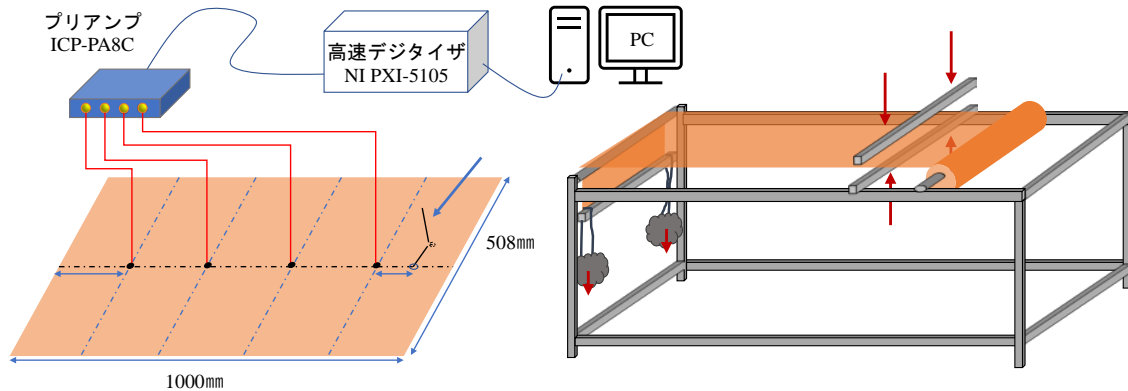


図 2： ポリイミドの張力を変えながら振動と波動を計測するための治具と、センサの設置状況

4. 研究成果

(1) 実験結果

センサ 1~4 で得られた加速度応答とそのフーリエスペクトルを図 3(a) と (b) にそれぞれ示す。この例は、おもりの質量を 10kg にした場合の結果である。センサ 1 は初動の到達が最も早く、センサ位置が加振点から離れるにつれて、振動の到達が遅くなっている。また、フーリエスペクトルは、センサが遠くなるほど基本振動数 (35Hz 付近) のピークの値は小さくなるものの、周波数のシフトは見られない。

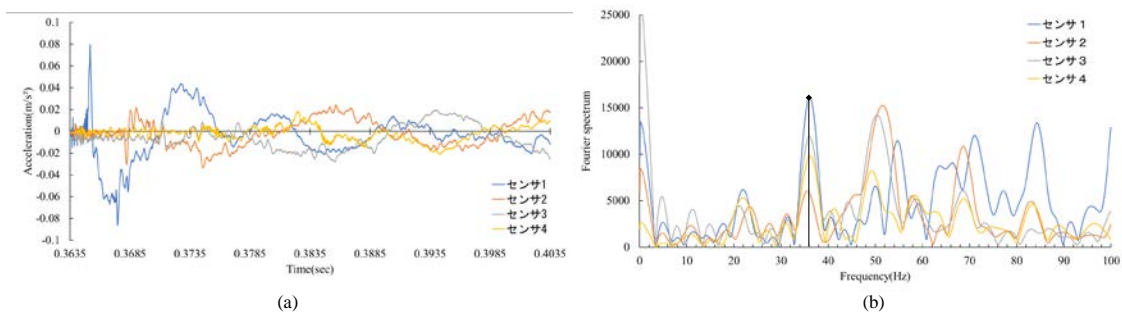


図 3: 質量 10kg のおもりを治具に設置したときの (a) 加速度応答と (b) そのフーリエスペクトル

次に、おもりの質量を 2kg, 4kg, 6kg, 8kg, 10kg, 12kg, 20kg, 30kg と変化させた。各質量において得られた到達時間から、振動の速度を計算した。伝搬速度は、第 1 波目の正の振幅が最初に極大になる時刻を到達時間として求めた。この速度と式 (1) の理論に基づく速度とを比較したものを図 4(a) に示す。この結果から、理論式と実験値は良好に近似する結果となった。また、図 4(b) は、センサ 1 での加速度波形をフーリエ変換して得られたピーク値が示す振動数をプロットしたものである。図 4(b) より、実験値は式 (2) に示す膜の 1 次固有振動数の理論値とよく一致することが分かった。以上より、载荷状態によって固有振動数と振動の伝搬速度は変化し、それは理論とよく整合することが示された。

また、振動が伝搬するよりも早い時間において、微小な振幅を観測することができた。センサごとの微小振幅の第 1 波目の立ち上がり時間から、その到達速度を計算した。結果を図 5 に示す。引張力が変化しても伝搬速度は 1500m/s 程度と一定であることが分かる。ポリイミド樹脂固体中を伝搬する縦波音速は 2450m/s、横波音速は 1060m/s 程度であるので、本研究で得られた音

速は、バルク波の横波よりも速く、縦波よりも遅い。このことより、バルク波ではなくフィルム内を伝搬しているガイド波の可能性があると考えられる。

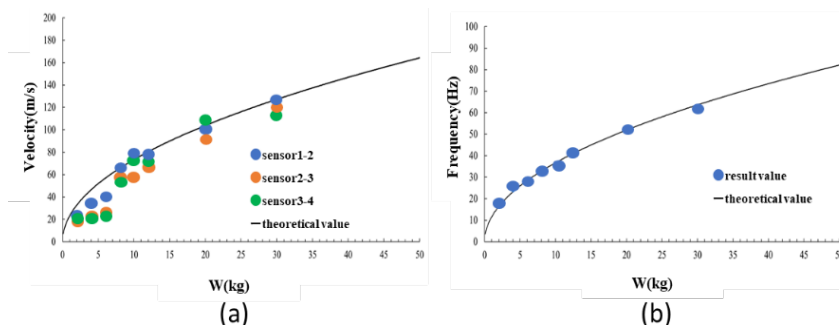


図 4: (a) おもりを変化させたときの振動速度の変化と (b) 固有振動数の変化

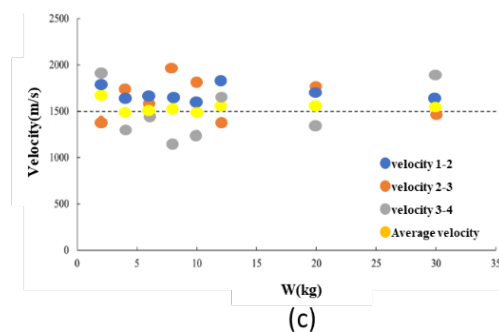


図 5: (a) おもりを変化させたときの薄膜中を伝わる弾性波の変化

(2) まとめ

ソフトマター薄膜において、膜に作用する応力状態によって、固有振動数と振動の伝搬速度は変化し、それは弦の理論とよく整合することが示された。しかし、この振動よりも早い時間に微小な振幅が計測され、それは膜中を伝搬しているガイド波の可能性があると考えられる。

今後の展望として、ポリイミドフィルム中の弾性波が、ガイド波の特徴を有しているか、波動モードや周波数を変化させたときの音速の変化などを調査していく予定である。また、膜材料の非破壊検査、特に、建設で用いられる膜構造部材に対する非破壊検査技術の開発を行いたい。

参考文献

- [1] 小林正規, 奥平修, 黒澤耕介, 岡本尚也, 松本晴久, 長谷川直, ポリイミド膜と圧電素子を利用した大面積センサーの開発, 平成 27 年度宇宙科学に関する室内実験シンポジウム 講演集, SA6000095029, 2017.
- [2] 有山正孝, 振動・波動, 裳華房, 1970.

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 中畑和之 | 4. 巻 76 |
| 2. 論文標題 ガイド波理論のイロハ - 分散関係と伝搬モード - | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 日本音響学会誌 | 6. 最初と最後の頁 712-719 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20697/jasj.76.12_712 | 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4件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 中村蒼嗣, 丸山泰蔵, 牧田陽行, 中畑和之 |
| 2. 発表標題 膜材料の波動伝搬と振動に関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 土木学会四国支部 技術研究発表会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|------------------------------------|
| 1. 発表者名 中村蒼嗣, 丸山泰蔵, 中畑和之 |
| 2. 発表標題 膜部材中を伝搬する波動と振動に関する実験的検討 |
| 3. 学会等名 日本機械学会 2021年度年次大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Kazuyuki Nakahata and Taizo Maruyama |
| 2. 発表標題 Continuous Mode Tracking Method of Guided Wave in Water-filled Pipe Using Finite Element Analysis |
| 3. 学会等名 The 42nd Symposium on UltraSonic Electronics (国際学会) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 中畑和之, 浜田真克, 丸山泰蔵 |
| 2. 発表標題 連続法を用いたガイド波の伝搬モードの追跡解析 |
| 3. 学会等名 日本非破壊検査協会 秋季講演大会 |
| 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 |
|-------|---|--|----|
| 研究分担者 | 丸山 泰蔵 (Maruyama Taizo) (90778177) | 愛媛大学・理工学研究科(工学系)・講師 (16301) | |

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 |
|---------|---------|