

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K02218

研究課題名(和文) ラム波を用いた織物の全方位弾性率評価システムの構築

研究課題名(英文) Construction of omni-directional elastic modulus evaluation system using lamb wave for fabric

研究代表者

赤坂 修一 (AKASAKA, SHUICHI)

東京工業大学・物質理工学院・助教

研究者番号：00501066

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、緯糸、経糸を織り合わせた直交異方性材料である織物に、ラム波を用いた力学物性評価法(Dispersion method)を適用し、弾性率の異方性の評価手法を確立することである。音波、超音波によりラム波を励起し、サンプルの面外振動を自動計測するシステムを構築した。緯糸(0度)、経糸(90度)、45度方向の測定結果から弾性マトリックスを得る解析手法を確立した。得られた結果は、動的粘弾性測定(DMA)とよく一致した。また、織物の各方向の弾性率を算出でき、異方性の評価が可能となった。さらに、荷重を印加する治具を作製し、荷重の増加とともに弾性率が増加することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本評価法の確立により、少ないサンプル数でより簡便に、精度よく、織物の面内異方性評価が可能になり、織物の力学物性の面内異方性に関する研究の促進や被服、複合材料の開発への応用が期待できる。また、本評価法は、織物以外の面内異方性材料にも適用が可能であり、飛行機・自動車の省エネルギーで注目される繊維複合材料、IoT分野で研究、開発が進められているスマートテキスタイル(センサやマイクロチップを複合した布地)、フレキシブルディスプレイなど、今後、発展が見込まれる分野(エネルギー、IoT等)の研究、開発の発展に貢献できると考える。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to establish the evaluation method for the anisotropy of elastic modulus (Dispersion method) using Lamb waves to a woven fabric, which is an orthogonally anisotropic material in which wefts and warps are woven. We constructed an automatically measuring system of the out-of-plane vibration by Lamb waves which is excited locally by sound and ultrasonic waves. We have established an analysis to obtain a matrix of an elastic constant from the measurement results in the weft (0 degree), warp (90 degrees), and 45 degrees directions. The results were in good agreement with Dynamic Mechanical Analysis (DMA). In addition, the elastic modulus in each direction of the woven fabric could be calculated, and the anisotropy could be evaluated. Furthermore, an instrument to which a load was applied was prepared, and it was confirmed that the elastic modulus increased as the load increased.

研究分野：高分子の力学物性

キーワード：ラム波 力学物性 弾性率 織物 直交異方性材料

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

織物は、軽量かつ適度な強度、耐久性などから被服地や複合材料の強化材などに用いられている。一次元の繊維である経糸（縦糸）と緯糸（横糸）を織り合わせた直交異方性材料であり、その力学特性は、面内異方性を示す。被服としての要求特性（ドレープ性、フィット性、ストレッチ性、風合いなど）や複合材料の強化材としての要求特性を満足する製品設計を行う上で、織物の力学特性を把握することは重要である。

織物の伸長弾性率の測定では、一般に一軸引張試験や二軸引張試験、動的粘弾性試験が行われる。一軸引張試験や動的粘弾性試験では、試験中にサンプル端部の糸が織物から外れる恐れがあるため、あらかじめ端部の糸を数本外したサンプルを用いる。緯糸、経糸方向の測定は可能だが、それ以外の方向では、サンプル作成、固定、測定が困難である。また、面内異方性を評価するためには、各方向に切り出したサンプルが必要となる。二軸引張試験では、直交する二軸での測定となるため、面内異方性を評価するためには、一軸引張試験、動的粘弾性試験同様、各方向のサンプルでの評価が必要となる。

そのため、織物の弾性率の面内異方性をより簡便（サンプル作成が容易、少ないサンプル数など）、より精度よく（角度依存性の細密化、張力コントロールなど）計測できる、新たな評価法が望まれている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、「ラム波を用いた織物の全方位弾性率評価システム」の構築である。

ラム波は、平板上の試料中を伝播する弾性波（ガイド波）の一種である。上下の振動面が対称な S モードと反対称な A モードがあり、それぞれ基本モード ( $S_0, A_0$ ) および高次モード ( $S_1, S_2, \dots, A_1, A_2, \dots$ ) がある。材料の一部を加振すると、材料中を縦波と横波が伝播することによって、ラム波を励起する。このラム波の伝播速度は、材料の力学特性（弾性率、ポアソン比）や密度に依存する。材料の振動測定から伝播速度の周波数依存性 (Dispersion curve) を算出し、弾性率をパラメータとして、理論式をフィッティングすることで、材料の弾性率が得られる。この評価手法を Dispersion method という。本研究では、Dispersion method を織物に適用し、1 枚のサンプルから全方位にわたり弾性率を評価する測定・解析手法を検討する。

### 3. 研究の方法

本研究では、「ラム波を用いた織物の全方位弾性率評価システム」を実現するために、以下の項目について、検討した。

#### (1) 織物の評価に適した、面外振動測定システムの構築

過去に行った、等方性材料の評価では、チューブ付きスピーカーボックス、レーザードップラー振動計（手動焦点）、電動ステージを用いて、手動による一次元の面外振動測定（数百点）を行ったが、面内異方性を評価するためには、より多くの点（数千から数万点）での測定が必要となるため、測定の自動化を行った。また、加振源、加振信号等の検討を行った。

#### (2) 全方位弾性率評価のための解析手法の検討

解析は、測定により得られた Dispersion curve に理論式をフィッティングすることで弾性係数マトリックスを得る。直交異方性材料の弾性係数には、9つの独立成分があるが、弾性対称軸（緯糸、経糸方向）の測定からは、それぞれ4つの成分（1成分は共通）しか評価できない。そこで、緯糸方向に対して $\theta$ 度方向の解析を加えることで、9つの成分を解析する手法を検討した。

#### (3) サンプルの評価を実施し、既存の力学測定との比較による妥当性検討

実際にサンプルを評価し、得られた結果の妥当性を確認するため、緯糸、経糸方向の動的粘弾性測定結果との比較を行った。

#### (4) 荷重を印加したサンプルの評価法の検討

サンプルに任意の荷重を印加する治具を作成し、荷重（張力）を印加した状態での評価法について検討した。

#### 4. 研究成果

##### (1) ラム波による面外振動測定システムの構築

図1にラム波によって生じる面外振動の測定システムの模式図を示す。スピーカーまたは、超音波トランスデューサを加振源とし、金属枠に固定したサンプルを局所的に加振し、ラム波を励起する。加振信号には、チャープ波を用いた。ラム波により生じるサンプルの面外振動の振動速度をレーザードップラー振動計で、任意の方向に一定間隔で計測した。信号発生器から、チャープ波とともにトリガ信号を出力し、計測と同期することで、各点での測定の位相を合わせた。

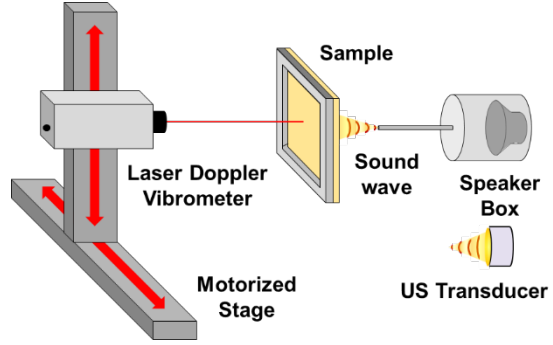


図1 ラム波による面外振動測定システム

図2に解析フローを示す。測定により得られた面外振動の振動速度の空間・時間分布から、二次元フーリエ変換により、波数・周波数分布を得る。解析対象とするモードのラム波（図中では  $A_0$  モード）の波数を読取り、伝播速度に変換することで、Dispersion curve を得た。

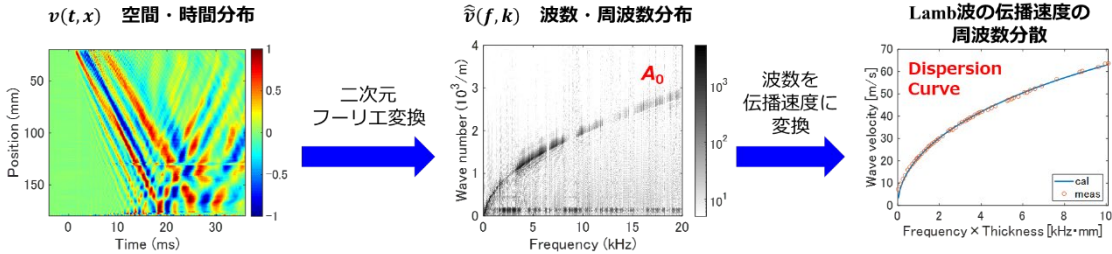


図2 Dispersion method の解析フロー

##### (2) 全方位弾性率評価のための解析手法の検討

上記システムより得られた Dispersion curve に理論式をフィッティングすることで、弾性係数を得る。直交異方性材料中の弾性対称軸（緯糸、経糸）方向、緯糸方向から  $\theta$  度方向に伝播する Lamb 波の理論式<sup>1)</sup>には、以下の式を用いた。なお、本研究では、A モードを用いて解析したため、A モードの式を示す。

対称軸（緯糸、経糸）方向

$$(C_{13} + C_{33}R_3\alpha_3)(R_5 + \alpha_5)\tan\left(\frac{\pi f h \alpha_3}{c}\right) - (C_{13} + C_{33}R_5\alpha_5)(R_3 + \alpha_3)\tan\left(\frac{\pi f h \alpha_5}{c}\right) = 0 \quad (1)$$

緯糸方向から  $\theta$  度方向

$$D_{11}(D_{23}D_{25} - D_{33}D_{25})\tan\left(\frac{\pi f h \alpha_1}{c}\right) + D_{13}(D_{25}D_{31} - D_{21}D_{35})\tan\left(\frac{\pi f h \alpha_3}{c}\right) + D_{15}(D_{21}D_{33} - D_{31}D_{23})\tan\left(\frac{\pi f h \alpha_5}{c}\right) = 0 \quad (2)$$

なお、

$$R_q = \frac{-(C_{11} + C_{55}\alpha_q^2 - \rho c^2)}{(C_{13} + C_{55})\alpha_q}, \quad \alpha_3 = \sqrt{\frac{-M + \sqrt{M^2 - 4N}}{2}}, \quad \alpha_5 = \sqrt{\frac{-M - \sqrt{M^2 - 4N}}{2}},$$

$$M = \frac{\{-C_{13}^2 - 2C_{13}C_{55} + C_{11}C_{33} - (C_{33} + C_{55})\rho c^2\}}{C_{33}C_{55}}, \quad N = \frac{(C_{11} - \rho c^2)(C_{55} - \rho c^2)}{C_{33}C_{55}}$$

であり、 $\rho$ は密度、 $h$ はサンプル厚、 $f$ は周波数、 $c$ は伝播速度、 $C_{ij}$ は弾性係数、 $D_{ij}$ は $C_{ij}$ 、 $\rho$ 、 $c$ から計算される変数である。 $\rho$ 、 $h$ は既知であり、 $f$ 、 $c$ は、Dispersion curve の計算値となるため、 $C_{ij}$ または $D_{ij}$ がフィッティングパラメータとなる。0度（緯糸方向）、45度、90度（経糸方向）のデータを用いて、解析を行った。

(3) サンプル評価と妥当性の検討

図3に綿ブロード(厚さ:0.23 mm、密度:0.407 g/cm<sup>3</sup>、繊維径:0.2 mm、糸密度:縦糸130本/インチ、横糸70本/インチ)の0, 45, 90度のDispersion curveの測定値と理論式のフィッティング結果(計算値)を示す。どの方向においても、実験値とよく一致している。フィッティングにより得られた、弾性係数マトリックス $C_{ij}$ は、

$$\begin{bmatrix} 33.8 & 12.5 & 9.7 & 0 & 0 & 0 \\ 12.5 & 76.8 & 15.6 & 0 & 0 & 0 \\ 9.7 & 15.6 & 26.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 87.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10.4 \end{bmatrix} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

となった。

妥当性検討のため、弾性係数マトリックスから糸軸方向の弾性率を計算したところ、緯糸方向で29.5 MPa、経糸方向で66.1 MPaとなった。ラベルドストリップ法により、DMAから得られた貯蔵弾性率とよく一致し、本評価法が妥当であると考えられる。

また、緯糸方向から15度間隔で測定したDispersion curveと式(3)から計算した各方向のDispersion curveもよく一致しており、全方位弾性率の算出が可能となった。

図4に本評価法により得られた綿ブロードの弾性率の角度依存性を示す。また、比較のため、綿織物、ポリエステル、毛織物の引張試験から得られた弾性率の角度依存性を合わせて示す<sup>(2)</sup>。

比較データでは、0, 90度に対して、45度付近で弾性率が大きく低下している。一般に織物の引張試験での弾性率は、糸軸方向が大きく、斜め方向は、緯糸、経糸の交差角の変化により、大きく低下する。本評価法では、ひずみが微小のため、交差角変化を生じず、斜め方向でも弾性率の低下を生じなかったと考えられる。

(4) 荷重を印加した状態での測定

織物へ荷重が印加された状態での測定を実現するため、専用治具を作成した。直交する二辺を固定し、もう一方側の二辺に重りをぶら下げる形で任意の荷重を印加し、金属棒に接着した。なお、固定した軸の軸方向には自由に変形できるようにした。

図5に綿ブロードの本評価法により得られた緯糸・経糸方向の弾性率の荷重依存性を示す。なお、比較のため、DMAで測定した各方向の弾性率も示す。荷重の増加とともに弾性率は緯糸・経糸方向ともに増加した。しかし、DMAに比べると荷重に対する変化量が小さかった。これは、金属棒への固定が不十分であり、測定中に荷重が低下したためと考えられる。固定に関して今後改良の必要があるが、荷重印加による弾性率増加は確認できた。

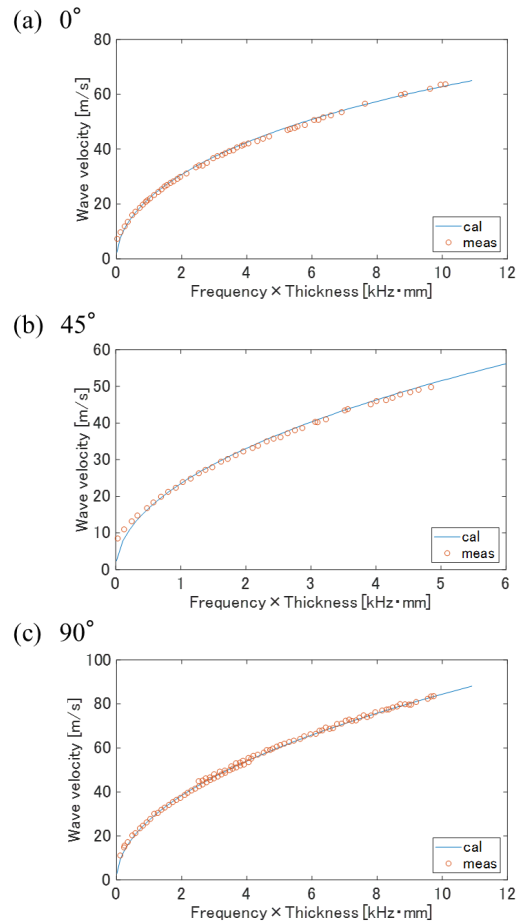


図3 綿ブロードの0,45,90度方向のDispersion curveの測定値と計算値

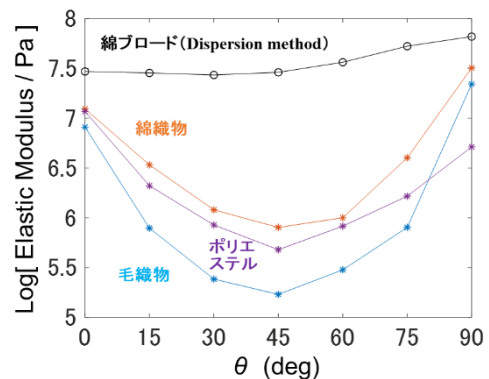


図4 各種織物の弾性率の角度依存性<sup>(2)</sup>

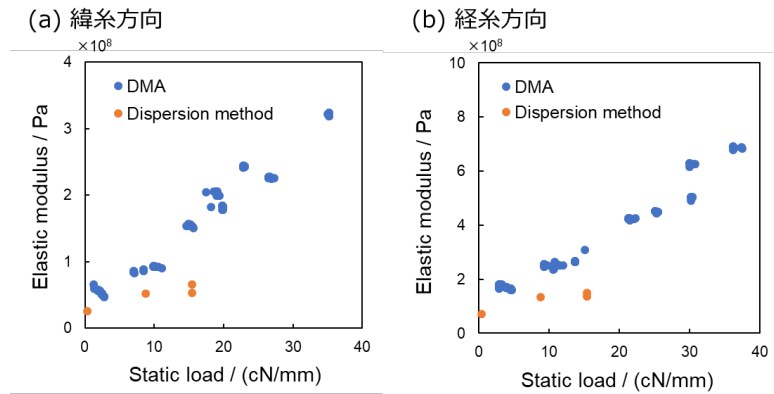


図 5 綿ブロードの本評価手法と DMA から得た緯糸、経糸方向の弾性率の荷重依存性

<参考文献>

- (1) N. Ghandi, "Determination of dispersion curves for acoustoelastic lamb wave propagation", Georgia Institute of Technology, Master's thesis (2010).
- (2) Zeljiko Penava, et. al., "Determination of the elastic constants of plain woven fabrics by a tensile test in various directions", *FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe*, **22**, 57-63 (2014).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤坂修一・西川晃司・浅井茂雄・牛腸ヒロミ
2. 発表標題 ラム波を用いた織物の力学物性評価
3. 学会等名 日本家政学会 第72回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 赤坂修一・西川晃司・浅井茂雄・牛腸ヒロミ
2. 発表標題 Dispersion methodによる織物の力学物性評価
3. 学会等名 日本家政学会 第73回大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西川晃司、赤坂修一、浅井茂雄
2. 発表標題 可聴域のLamb波を用いた織物の弾性率評価
3. 学会等名 日本繊維機械学会第72回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西川晃司、赤坂修一、浅井茂雄
2. 発表標題 可聴域のLamb波を用いた織物の弾性率評価
3. 学会等名 日本繊維機械学会第72回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西川晃司、赤坂修一、浅井茂雄
2. 発表標題 可聴域の Lamb 波を用いた織物の力学物性評価
3. 学会等名 平成31年度繊維学会年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西川晃司、赤坂修一、浅井茂雄、牛腸ヒロミ
2. 発表標題 可聴域のLamb波を用いた織物の弾性率評価
3. 学会等名 第31回エラストマー討論会
4. 発表年 2019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	牛腸 ヒロミ  (Gocho Hiromi)  (80114916)	実践女子大学・生活科学部・教授    (32618)	

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