せん断荷重によるしわを有する薄膜フィルムに発生する流れ励起波動*

工藤 岳^{*1}, 渡辺 昌宏^{*2}, 原 謙介^{*2}

Flow-Induced Wave Generated on a Thin Film under Corrugation

Gaku KUDO, Masahiro WATANABE^{*2} and Kensuke HARA^{*2} Aoyama Gakuin University, Dept. of Mechanical Engineering
5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-5258, Japan

This paper deals with an experimental study of flow-induced wave generated on a thin film under shear loading. The experiment is carried out to investigate the deformed shape of the thin film with various values of shear loading, and the wave propagation due to the interaction of the deformed shape of the thin film with the fluid flow in the narrow passage. As a result, it is clarified that the flow-induced wave occurs to the thin film caused by the interaction of the deformed shape of the corrugation due to the shear loading with the fluid flow in the narrow passage. The critical flow velocity of the flow-induced wave drastically decreases caused by the generation of the corrugation on the thin film due to shear loading. Moreover, it is clarified that the traveling direction of the flow-induced wave is determined by the deformed shape of the corrugation and fluid flow direction. The flow-induced wave propagates diagonally, almost across the fluid flow direction.

Key Words : Self-Excited Vibration, Flow Induced Vibration, Flutter

1. 緒 言

液晶テレビや携帯電話で使用する液晶ディスプレイパネル, 太陽光発電等で使用されるエネルギー関連フィルムは, 高機能性薄膜フィルム(以下, フィルムと呼ぶ.)を多層に重ねることで作られている. このフィルム製造工程では, 空気圧力によりフィルムを浮上させ非接触搬送を行い, 乾燥・延伸・塗布等の処理をフィルムに施す. しかし, 薄い二次元構造状のフィルムは, ローラ間のミスアライメントによって生じるせん断力に起因したしわ(図1)が発生する. さらに, フィルム周りの空気流れの影響により, フィルムに流れ励起波動が発生し, フィルムに傷が生じるなどの問題が発生する. 品質不良を低減し, フィルムの生産性の向上を目指す上で, せん断荷

Fig.1 Corrugation generated on the thin film due to shear loading

* 原稿受付 2010 年 9 月 10 日

^{*1} 青山学院大学大学院 理工学研究科 (〒252-5258 神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1)^{*2} 正員, 青山学院大学 理工学部 機械創造工学科

E-mail: watanabe@me.aoyama.ac.jp

重によるしわを有するフィルムに発生する流れ励起波動の振動特性および発生メカニズムを明らかにする必要がある。

これまでに、平行流れにさられた柔軟ウェブに発生する流れ励起振動に関する研究は数多く報告されている⁽¹⁾⁻⁽²¹⁾。例えば、Chang ら⁽¹⁾は、フィルムの自由端に発生する流れ励起振動に対して、非圧縮ポテンシャル流を基にした波動解析を行った。また、フィルムに発生するフラッタを二次元波動から三次元波動へと拡張した臨界流速の計算を行った。渡部ら^{(12),(13)}は、高速気流中に支持した紙の安定性についての研究を行い、発生するフラッタの挙動およびその振動特性を実験的・理論的に明らかにした。

また、柔軟ウェブに発生するしわに関しても、いくつかの研究が報告されている⁽²²⁾⁻⁽²⁵⁾。Gelbach ら⁽²³⁾は、柔軟ウェブに発生するしわを実験的に調べ、ローラ間のミスアライメントで生じるせん断力により、柔軟ウェブにしわが発生することを明らかにした。また橋本⁽²⁵⁾は、フィルムに代表される非等方性ウェブを対象に、線形座屈理論を用いてしわ発生の予測モデルを定式化し、その適用性を実験により検証している。しかしながら、せん断荷重によるしわを有するフィルムに発生する流れ励起波動に関する研究は行われておらず、せん断荷重により発生するしわが、流れ励起波動の振動特性および安定性に与える影響は明らかにされていない。

そこで、本研究ではせん断荷重によるしわを有するフィルムを対象とし、発生する流れ励起波動の振動特性を実験的に調べた。また、フィルムに発生する流れ励起波動の振動モード形状の時間的変化を測定し、波動の伝搬方向および位相速度を調べた。

2. 実験装置と測定方法

2・1 実験装置

図2に実験装置の概略図と写真を、図3にせん断荷重付加機構の概略図を示す。また、実験で使用した主なパラメータを表1に示す。実験装置はテストセクション、タンク、流量計、ブロワで構成されている。フィルムは流路内に両端支持し、リニアガイドによってねじれを防止し、おもりによって張力を調節する。また、フィルムにせん断変位を付加するために、フィルム上端部を $-20 \sim 20 \text{ mm}$ の範囲で可動する精密ステージに固定し、任意の変位（以下、せん断変位 δ と呼ぶ。）を加える機構を用いた。ブロワで空気を吸入することでテストセクション内に空気流れをつくる。流路長さは 300 mm であり、流量計を用いて流量の測定を行った。フィルムは、長さ 580 mm 、幅 140 mm 、厚さ 0.016 mm の PET フィルムを使用した。

2・2 測定方法

図4に測定システムの概略図を示す。本研究では振動特性として、フィルム中心位置での振動変位をレーザー

(a) Schematic illustrations of experimental setup

(b) Photographs of experimental setup

Fig.2 Experimental setup

Fig.3 Schematic illustrations and photograph of shear displacement addition mechanism

Table 1 Major parameters used in the experiment

Film material	PET
Fluid	Air
Width of film	140 [mm]
Length of film	580 [mm]
Thickness of film	0.016 [mm]
Tensile force	20 – 100 [N/m]

変位センサで測定した。また、フィルムに発生する流れ励起波動の振動モード形状の時間的変化を測定するために、2 台のレーザー変位センサ (Sensor-A, Sensor-B) を用いた。はじめに、センサ A (リファレンスセンサ) をフィルム中心位置に、センサ B (トラバースセンサ) を Point-1 に設置し、フィルムの振動変位を同時に測定した。次に、センサ B を Point-2 へ移動し同様に測定を行った。以上の手順を繰り返し、センサ B を x, y 方向に 10 mm 間隔でトラバースすることで、フィルム各点における振動変位の測定を行った。得られたデータを基に、センサ A での振動変位の任意の位相差における、フィルム各点でのセンサ B の振動変位を求めることで、フィルムに発生する流れ励起波動の振動モード形状およびその時間的変化の測定を行った。

Fig.4 Schematic illustration of measurement system

実験では、テストセクション内の流速を変化させ、フィルムに発生する流れ励起波動の振動変位を測定した。せん断荷重によりフィルムに発生するしわが、流れ励起波動の振動特性に与える影響を明らかにするために、せん断変位 δ および張力 S をパラメータとして実験を行った。また、テストセクション内の流速を増加させ、流れ励起波動が発生する臨界流速 V_c の測定を行った。さらに、発生する流れ励起波動の振動モード形状の時間的变化を測定し、波動の伝搬方向および位相速度を調べた。

3. せん断荷重によるフィルム変形形状

フィルムに発生する流れ励起波動の振動特性を調べる前に、せん断荷重によりフィルムに発生するしわ形状の測定を行った。図5の(a)~(d)に、張力に対するフィルム変形量の変化を示す。これらの図は、測定ライン上におけるフィルム変形量（静的なしわ形状）を表し、それぞれせん断変位 $\delta = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ mm の場合の結果を表している。また、張力 $S = 60$ N/m、せん断変位 $\delta = -1.5, +1.5$ mm の場合の、代表的なフィルム変形形状を図6に示す。これらの図より、フィルムにせん断荷重が作用することで、フィルム対角線方向にしわが発生することがわかる。また、せん断変位の増加とともに、フィルム変形量は増加することがわかる。さらに、張力が増加することで、フィルム変形量は減少していくことがわかる。

Fig.5 Deformation value on measurement line with changing tensile force

Fig.6 Deformed shape of thin film due to the shear loading (without fluid flow)

4. 臨界流速と波動特性

張力 $S = 60 \text{ N/m}$ 、せん断変位 $\delta = 1.0 \text{ mm}$ の場合における、流速に対するフィルム中心位置での振動変位と卓越振動数の変化を図 7 (a), (b) に示す。また、代表的な時刻歴波形およびそのスペクトルを図 8 (a) ~ (c) を示す。ここで、図中にはそれぞれ流速 $V = 3.0, 6.0, 9.0 \text{ m/s}$ の場合の結果を示す。これらの図より、流路内の流速が低い場合には、フィルムに流れ励起波動は発生せず、せん断荷重によりフィルムに発生したしわ形状を保ったまま微小振動していることがわかる。そして、流路内の流速を増加させていくと、臨界流速 $V_{cr} = 5.5 \text{ m/s}$ で流れ励起波動が発生し、フィルム振動変位は急激に大きくなる。さらに流速が増加すると、フィルム振動変位および卓越振動数は、流速の増加とともに徐々に増加していくことがわかる。以上のことから、せん断荷重によりフィルムに発生するしわが、空気流れによって波動へと変化することで、フィルムに流れ励起波動が発生していることが分かった。

図 9 (a) ~ (c) にせん断変位を $\delta = 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 \text{ mm}$ と変化した場合の、流速に対するフィルム中心位置での振動変位の変化を示す。これらの図より、流路内の流速が臨界流速を越えると、せん断荷重によるしわを有するフィルムには、流れ励起波動が発生することがわかる。また、せん断変位 $\delta = 0 \text{ mm}$ の場合、すなわち、せん断荷重によるしわがフィルムに発生していない場合には、本実験の流速の範囲内で流れ励起波動は発生しなかった。つまり、フィルムにせん断荷重によるしわが発生することで、流れ励起波動が発生する臨界流速が急激に低下することが分かった。また、せん断変位が増加すると、流れ励起波動が発生する臨界流速は低下し、フィルム振動変位は増加することがわかる。さらに、張力の増加とともに、流れ励起波動が発生する臨界流速は少し増加

Fig.7 (a) RMS values of thin film displacement
(b) Dominant frequency of thin film
(Tensile force $S = 60 \text{ N/m}$, Shear displacement $\delta = 1.0 \text{ mm}$)

Fig.8 Time histories and spectrum of vibration displacement
(Tensile force $S = 60 \text{ N/m}$, Shear displacement $\delta = 1.0 \text{ mm}$)
(a) Flow velocity $V = 3.0 \text{ m/s}$, (b) 6.0 m/s , (c) 9.0 m/s

(a) Tensile force $S = 20 \text{ N/m}$ (b) Tensile force $S = 60 \text{ N/m}$ (c) Tensile force $S = 100 \text{ N/m}$

Fig.9 Variation of RMS displacement with changing flow velocity V

することがわかる。これは、図 5 に示す通り、フィルムに作用する張力が大きくなることで、フィルムに発生するしわが小さくなるため、臨界流速が少し増加したと考えられる。また、 $S = 100 \text{ N/m}$, $\delta = 0.5 \text{ mm}$ の場合に流れ励起波動が発生していない理由は、せん断荷重によるフィルム変形量が小さく、フィルムにほとんどしわが発生していないため（図 5 (a)）、フィルムに流れ励起波動が発生しなかったと考えられる。

図 10 (a), (b) に張力を $S = 20, 40, 60, 80, 100 \text{ N/m}$ と変化させた場合の、せん断変位 δ に対する臨界流速 V_{cr} の変化を示す。ここで、図 10 (a) には、せん断変位を x 軸の負方向に変化させた場合を、図 10 (b) にはせん断変位を x 軸の正方向に変化させた場合の結果を示す。図 10 より、フィルムにしわが発生していない場合には流れ励起波動は発生せず、せん断荷重によりフィルムにしわが発生することで、臨界流速が急激に低下することがわかる。以上のことから、フィルムに発生する流れ励起波動は、せん断荷重によってフィルムに発生するしわと空気流れの相互作用によって発生することがわかる。

Fig.10 Variation of critical flow velocity V_{cr} with changing shear displacement δ

5. 波動モードと伝播方向

図 11 (a), (b) にフィルムに発生する流れ励起波動の振動モード形状の時間的变化を示す。これらの図は、Line - A および Line - B 上における 1/8 周期ごとのフィルム振動モード形状を表し、それぞれせん断変位 $\delta = -1.5, +1.5 \text{ mm}$ の結果を示す。図 11 より、フィルムに発生する流れ励起波動は進行波タイプである。また、Line - B 上の振動モード形状より、波動の伝搬方向がせん断変位の方向によって変化していることがわかる。つまり、せん断荷重によりフィルムに発生するしわ形状によって、流れ励起波動の伝搬方向が決定されることが分かった。図 12, 図 13 に、フィルムに発生する流れ励起波動の代表的な波動伝搬の様子を示す。これらの図は、1/8 周期ごとの波動伝搬形状の時間的变化を表し、それぞれせん断変位 $\delta = -1.5, +1.5 \text{ mm}$ の結果を示す。これらの図より、フィルムに発生する流れ励起波動は、フィルム対角線方向に伝播し、空気流れとほぼ直交方向に伝播することがわかる。せん断変位 $\delta = -1.5 \text{ mm}$ の場合は、フィルム上端部から左斜め下方向に波動が伝播する。逆に、せん断変位 $\delta = +1.5 \text{ mm}$ の場合には、フィルム上端部から右斜め下方向に波動が伝播する。つまり、フィルムに発生する流れ励起波動の伝播方向は、せん断荷重によりフィルムに発生するしわ形状および空気流れの方向により決定されることが分かった。これは、フィルムにせん断荷重が作用することで、フィルムにしわが発生し面外変形モードが固定され、面外変形モードが固定されることでフィルムに曲げ剛性の異方性が発生し、曲げ剛性の弱い方向へ流れ励起波動が伝播するためと考えられる。

これまで、フィルムや紙などの柔軟ウェブに発生するフラッタは、空気流れと同じ方向に伝播する進行波と考えられていた⁽¹⁾⁻⁽²¹⁾。しかしながら、せん断荷重によるしわを有するフィルムでは、必ずしも流れ方向と波動の伝播方向が一致せず、流れ方向とほぼ直交方向に伝播することが明らかになった。これは、せん断荷重によりフィルムに発生するしわ形状と空気流れの方向によって、流れ励起波動の伝播方向が決定されるためと考えられる。

6. 波動の位相速度

図 14, 図 15 に, 流速の変化に対する垂直方向および水平方向の位相速度の変化を示す. ここで図中には張力 $S = 20, 60, 100 \text{ N/m}$ の場合の結果を示す. また, 垂直, 水平方向の位相速度は, 振動数 f と波長 λ を用い, $V_\phi = 2\pi f\lambda$ の関係からそれぞれ計算した. これらの図より, フィルムに発生する流れ励起波動の位相速度は, 流速の増加に伴い増加することがわかる. また, 張力の増加とともに位相速度は減少していくことがわかる.

Fig.14 Variation of phase velocity in vertical direction with increasing flow velocity V

Fig.15 Variation of phase velocity in horizontal direction with increasing flow velocity V

7. 発生メカニズムの考察

せん断荷重によるしわを有するフィルムに発生する流れ励起波動は, フィルムにせん断荷重によるしわが発生していない場合には, 本実験の流速範囲内で流れ励起波動を確認できなかったことから, 以下 図 16 に示すように, せん断荷重によりフィルムに発生するしわと空気流れの相互作用により発生していると考えられる. フィルムにせん断荷重が作用することで, フィルム対角線方向にしわが発生する (図 16 - (a)). このとき, フィルムにしわが発生することで, 面外変形モードが拘束されるとともに, フィルムに曲げ剛性の異方性が発生する. そして, テストセクション内の空気流れによってフィルムに流体力が作用し, 曲げ剛性の低い方向へしわを押し出すことで, フィルム上を波動が伝播する (図 16 - (b)). 流体力によりしわはフィルム端まで伝播するが, 安定して存在する波数が面外変形モードにより決まっているため, 下流側のしわの消滅とともに, 上流側に新たなしわを形成し (図 16 - (c)), 初期フィルム変形形状を維持する. 以上のように, しわの発生および伝播を繰り返すことで, せん断荷重によるしわを有するフィルムには流れ励起波動が発生していると考えられる.

Fig.16 Generation mechanism of flow-induced wave generated on thin film under shear loading

8. まとめ

本研究は、せん断荷重によるしわを有するフィルムを対象とし、せん断荷重によりフィルムに発生するしわが流れ励起波動の振動特性および安定性に与える影響を実験的に調べた。また、張力とせん断変位をパラメータとし、流れ励起波動が発生する臨界流速の変化を調べた。さらに、流れ励起波動の振動モード形状およびその時間的变化の測定を行い、流れ励起波動の伝播方向および位相速度を明らかにした。得られた主な結果を以下に示す。

(1) せん断荷重により、フィルム対角線方向にしわが発生する。そして、発生したしわが空気流れにより伝播することで、フィルムに流れ励起波動が発生する。

(2) 流れ励起波動の伝播方向は、せん断荷重によりフィルムに発生するしわ形状および空気流れの方向に影響を受ける。これまで、柔軟ウェブに発生するフラッタは、空気流れと同じ方向に伝播する進行波と考えられていたが、せん断荷重によるしわを有するフィルムでは、必ずしも流れ方向と波動の伝播方向が一致せず、空気流れとほぼ直交方向に波動が伝播する。

(3) フィルムにしわが発生した場合、フィルムに流れ励起波動が発生する臨界流速は急激に低下する。

(4) フィルムに流れ励起波動が発生する臨界流速は、せん断変位の増加に伴い低下する。反対に、張力の増加に伴い、臨界流速は増加する。

文 献

- (1) Chang, Y. B., Moretti, P. M., "Flow-Induced Vibration of Free Edges of Thin Film", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16 (2002), pp.989-1008.
- (2) Chang, Y. B., Moretti, P. M. "Interaction of Fluttering Webs with Surrounding Air", *TAPPI Journal*, Vol. 74 (1991), pp.231-236.
- (3) Yamaguchi, N., Yokota, K., Tsujimoto, Y., "Flutter Limits and Behavior of Flexible Thin Sheet in High-Speed Flow (1st Report, Analytical Method for Prediction of the Behavior)", *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 122 (2000), pp.65-73.
- (4) Yamaguchi, N., Sekiguchi, T., Yokota, K., Tsujimoto, Y., "Flutter Limits and Behavior of Flexible Thin Sheet in High-Speed Flow (2nd Report, Experimental Results and Predicted Behaviors for Low Mass Ratios)", *Journal of Fluids Engineering*, Vol.122 (2000), pp.74-83.
- (5) Dowell, E. H., "Flutter of Infinitely Long Plates and Shells, Part I: Plate", *AIAA Journal*, Vol. 21, No. 11 (1966), pp.1370-1377.
- (6) Oyibo, G. A., "Unified Aeroelastic Flutter Theory for Very Low Aspect Ratio Panels", *AIAA Journal*, Vol. 44, No. 8 (1983), pp. 1581-1587.
- (7) Datta, S. K., Gottenberg, W. G., "Instability of an Elastic Strip Hanging in an Airstream", *Journal of Applied Mechanics*, Vol.42 (1975), pp. 195-198.
- (8) Lemaitre, C., Hemon, P., E. de Langre, "Instability of a Long Ribbon Hanging in Axial Flow", *Journal of Fluids and Structures*, Vo. 20 (2005), pp. 913-925.
- (9) Carpenter, P. W., Garrad, A. D., "The hydrodynamic stability of flow over Karmer-type compliant surfaces. Part 1: Tollmien-schlichting instabilities", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 155 (1985), pp. 465-510.
- (10) Carpenter, P. W., Garrad, A. D., "The hydrodynamic stability of flow over Karmer-Type compliant surfaces. Part 2: Flow-induced surface instabilities", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 170 (1986), pp. 199-232.
- (11) Hansen, R. J., Huston, D. L., Ni, C. C., "An Experimental Study of Flow-Generated Waves on a Flexible Surface", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 68, No. 3 (1980), pp. 317-334.
- (12) Watanabe, Y., Suzuki, S., Sugihara, M., Sueoka, Y., "An Experimental Study of Paper Flutter", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16 (2002), pp. 529-542.
- (13) Watanabe, Y., Isogai, K., Suzuki, S., Sugihara, M., "A Theoretical Study of Paper Flutter", *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 16 (2002), pp. 543-560.

- (14) Bidkar, R. A., Raman, A., Bajaj, A. K., “Aeroelastic Stability of Wide Webs and Narrow Ribbons in Cross Flow”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 75 (2008), pp. 041023:1-041023:9.
 - (15) Filippone, A., “On the Flutter and Drag Forces on Flexible Rectangular Canopies in Normal Flow”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130 (2008), pp. 061203:1-061203:8.
 - (16) Guo, C. Q., Paidoussis, M. P., “Stability of Rectangular Plates with Free Side-Edges in Two-Dimensional Inviscid Channel Flow”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 67 (2000), pp.171-176.
 - (17) Tang, L., Paidoussis, M. P., “On the Instability and the Post-Critical Behavior of Two-Dimensional Cantilevered Flexible Plates in Axial Flow”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 305 (2007), pp. 97-115.
 - (18) Tang, D. M., Yamamoto, H., Dowell, E. H., “Flutter and Limit Cycle Oscillations of Two-Dimensional Panels in Three-Dimensional Axial Flow”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 17 (2003), pp.225-242.
 - (19) Wu, X., Kaneko, S., “Linear and Nonlinear Analysis of Sheet Flutter Induced by Leakage Flow”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 20 (2005), pp. 927-948.
 - (20) 長倉 博, 金子 成彦, “一次元平行すきま流路内に置かれた片持弾性はりの安定性”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.58, No.546 (1992), pp.352-359.
 - (21) Axisa, F., Antunes, J., “Flexural Vibrations of Rotors Immersed in Dense Fluids. Part 1: Theory”, *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 6 (1992), pp.3-21.
 - (22) Matsumoto, S., Ohara, S., Watanabe, M., Nakazawa, H., “Development of a Stable Ink-Film Handling Mechanism for Thermal Transfer Facsimiles”, *Advances in Information Storage Systems*, Vol. 6 (1995), pp.445-457.
 - (23) Gehlback, L. S., Kedl, D. M., Good, J. K., “Prediction shear wrinkles in web spans”, *TAPPI Journal*, Vol. 72 (1989), pp.129-134.
 - (24) Good, J. K., Beisel, J. A., “Calculations relating to web buckling resulting from roller misalignment”, *TAPPI Journal*, Vol. 5, No. 12 (2006), pp. 9-16.
 - (25) Hashimoto, H., “Theoretical and Experimental Investigation into Generation of Wrinkling and Slip in Plastic-Films under Transportation”, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, Vol. 4, No. 1 (2009), pp.238-248.
-