薄膜フィルムに発生するすきま流れ励起不安定波動* (分散関係と安定性解析)

工藤 岳^{*1}, 渡辺 昌宏^{*2}, 原 謙介^{*2}

Leakage-Flow-Induced Wave Generated on a Thin Film (Dispersion Relation and Stability Analysis)

Gaku KUDOU, Masahiro WATANABE^{*3} and Kensuke HARA

^{*3} Department of Mechanical Engineering, Aoyama Gakuin University,
5-10-1 Fuchinobe, Chuo-ku, Sagami-hara-shi, Kanagawa, 252-5258 Japan

This paper deals with a theoretical stability analysis of an unstable wave generated on a thin film subjected to leakage-fluid flow. In the stability analysis, the structural equation of the thin film in the transverse motion is based on the Kirchhoff-Love's thin-plate model and the basic equations of fluid flow around the thin film are based on Navier-Stokes equations. The governing equations of the thin film motion coupled with fluid flow are obtained. As a result, the analytical results show that traveling-wave type unstable wave occurs to the thin film due to leakage-fluid flow and clarify the dispersion relation of the wave motion, phase velocity (traveling-wave velocity) and growth rate of the wave. Moreover, the analytical results are verified by experiments on the most unstable wave number and critical flow velocity.

Key Words: Vibration Coupled with Fluid Motion, Flutter, Stability Analysis, Self-Excited Vibration, Wave, Flow Induced Vibration

1. はじめに

近年、液晶フィルムやエネルギー関連フィルムの需要の増加に伴い、薄膜フィルム（以下、フィルムと呼ぶ）を非接触で搬送するとともに、延伸・塗装・乾燥・裁断などの付加価値を加える技術が急速に進歩している。しかしながら薄い二次元構造のフィルムは、しわや破損を生じやすいなどハンドリング技術の観点からは極めて扱い難い素材でもある。また、狭いすきま内または壁面近くでハンドリングされるフィルムでは、周りの流体流れの影響により流れ励起不安定波動が発生し、フィルムにしわや破損が生じるなどの問題が発生する。このような場合、フィルムを支持する張力と流体流れの方向は必ずしも一致せず、複雑な支持状態で流れ励起不安定波動が発生することが多い。このため、フィルムの生産効率の向上を進めていく上で、フィルムに発生する流れ励起不安定波動の波動的特性および発生メカニズムを明らかにすることが必要となる。

これまでに、すきま流れ励起振動に関する研究は数多く

報告されている^{(1)~(6)}。稲田ら^{(1)~(3)}は並進1自由度系および並進・回転2自由度連成系を対象として、流体力の評価および不安定の発生メカニズムについて研究を行った。その結果、流路入口にしぼりがある場合、出口にディフューザがある場合、あるいは末広流路の場合には、負減衰による不安定が発生することを明らかにした。長倉ら⁽⁴⁾は平行すき間流路内に置かれた片持ちはりの安定性解析を行い、実験結果との比較からその妥当性を検証した。また山口ら^{(5),(6)}は、高速気流中に支持した柔軟シートの安定性についての研究を行い、フラッタの挙動およびその振動特性を明らかにした。

また、柔軟シートに発生する流れ励起波動についても、いくつかの研究が報告されている^{(7)~(16)}。Chang ら⁽¹⁷⁾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により、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。また、著者らの一人^{(18),(19)}はせん断流れを伴って移動する柔軟シートに発生する不安定波動の安定性解析を行い、柔軟シートに進行波的な不安定波動が発生することを明らかにした。しかしながら、フィルムがすきま流れにさらされ、フィルムに作用する張力が流体流れと直交している系に発生する流れ励起不安定波動の波動的特性は十分に明らかに

* 原稿受付 2009年9月25日。

^{*1} 青山学院大学大学院理工学研究科(〒252-5258 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

なっていない。

そこで、本研究ではフィルムがすきま流れにさらされ、流体流れと直交方向に張力が作用する系を取り上げ、フィルムの曲げ波の運動とその周りの流体流れが連成した物理モデルを構築した。そして構築した物理モデルを用いてフィルム上を伝播する波の波動方程式を導出するとともに、波の波動的性質を特徴づける分散関係式を導出し、フィルム上に発生する波の波動特性（位相速度、成長率）を調べた。また、フィルムに発生する流れ励起不安定波動の波数と流速の関係を明らかにした。

2. 主な記号

C_s	: 外部構造減衰係数
D	: 曲げ剛性($= Eh^3/12$)
E	: ヤング率
E^*	: 内部構造減衰係数
f	: 流体力
f_s, f_w	: 壁面摩擦係数
h	: フィルム厚さ
i	: 虚数単位($=\sqrt{-1}$)
k	: 波数
L	: フィルム支持長さ
W	: フィルム幅
P	: 流体圧力
p, P_0	: 流体圧力の非定常成分と定常成分
S	: フィルム単位幅あたりに作用する張力
V	: 流速
$\Delta v, V_0$	: 流速の非定常成分と定常成分
w	: フィルムの微小面外変位

Fig. 1 Analytical model of thin film subjected to leakage-fluid flow

μ	: 流体粘性係数
ν_f	: 動粘性係数
ρ	: フィルムの密度
ρ_f	: 流体の密度

3. 安定性解析

3.1 フィルムの基礎方程式 本研究では、支持幅 L で支持され、流れ方向に無限の長さを有するフィルムがすきま流れにさらされた系を解析対象とする。図1に解析モデルを示す。 x 軸方向には単位幅当たりの張力 S が作用し、 y 軸方向にフィルム下面と拘束壁面に囲まれたすきま部を流速 V で流体が流れている。また、フィルムは Kelvin-Voigt 形の粘弾性材料(高分子材料)とした。 C_s と E^* はそれぞれ外部および内部構造減衰、 w をフィルムの面外変位とすると、フィルムの曲げの運動方程式は以下の式 (1) のように得られる。

$$\rho h \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + C_s \frac{\partial w}{\partial t} - S \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{h^3}{12} (E + E^* \frac{\partial}{\partial t}) (\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4}) = f \quad (1)$$

ここで、 E はフィルム材質のヤング率を、 ρ と h はそれぞれフィルムの密度と厚さを表す。また右辺の f はフィルム単位面積あたりに作用する流体力を表す。

3.2 流体流れの基礎方程式 フィルムと拘束壁面に囲まれたすきまが狭い場合には、すきま方向の圧力勾配は無視できる。このため、図1に示すフィルム下面のすきまを流れる流体の運動方程式と連続の式は、Navier-Stokes 方程式をすきま方向 (z 方向) にすきま幅 $0 \sim H$ の範囲で積分することにより、式 (2), (3) のように求めることができる⁽¹⁾。ここで、流体は非圧縮性・粘性流体であり、 y 方向に一樣に流れると仮定した。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (HV) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(HV) + \frac{\partial}{\partial y}(HV^2) + \frac{H}{\rho_f} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{12\mu}{\rho_f}(V - V_0) - \frac{1}{2}(f_s - f_w)V^2 = 0 \quad (3)$$

式 (2), (3) において, V はすきま方向に平均化した流速を, V_0 はその定常成分を表す. また, f_s, f_w はそれぞれフィルム表面および拘束壁面上の壁面摩擦係数を表す. ここで, 壁面摩擦係数はフィルム表面および拘束壁面上で等しいとして, 直管の場合の壁面摩擦係数を用いて以下のように置く⁽²⁰⁾.

$$f_s = f_w = \frac{1}{4} \left\{ 1.14 - 2 \log \left(\frac{\varepsilon_w}{D_H} + \frac{21.25}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right\}^{-2} \quad (4)$$

上式において, Re は流体流れの Reynolds 数を表し, $D_H = 2H_0$ として $\text{Re} = VD_H/\nu_f$ で与えられる. ここで, ε_w は表面粗さを, ν_f は流体の動粘性係数を表す.

3.3 波動方程式 フィルムが平衡位置周りで微小運動しているとして, 流体流れとフィルムの波の運動が連成した流体・構造連成系の波動方程式を導出する. ここで, フィルム下面と拘束壁面間のすきま幅 H は, フィルムの面外変位 w と平行状態における定常すきま幅 H_0 を用いて以下のように得られる.

$$H(x, y, t) = H_0 + w(x, y, t) \quad (5)$$

同様に, フィルム下面と拘束壁面に囲まれたすきま部を流れる流体の流速と圧力を, 定常項と非定常項の和として以下のように置く.

$$V(y, t) = V_0 + \Delta v(y, t) \quad (6)$$

$$P(x, y, t) = P_0(y) + p(x, y, t) \quad (7)$$

ここで, 式 (6), (7) における右辺の第 1 項 V_0, P_0 は平衡状態での定常流速および定常圧力を表す. また第 2 項の $\Delta v, p$ は非定常流速および定常圧力を表す.

以上の式 (5) ~ (7) を式 (2), (3) に代入すると, 流体流れの基礎方程式は以下の式 (8), (9) のように線形化できる.

$$\frac{\partial \hat{w}}{\partial T} + \frac{\partial \Delta \hat{v}}{\partial Y} + \hat{V} \frac{\partial \hat{w}}{\partial Y} = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta \hat{v}}{\partial T} + \hat{V} \frac{\partial \hat{w}}{\partial T} + 2\hat{V} \frac{\partial \Delta \hat{v}}{\partial Y} + \hat{V}^2 \frac{\partial \hat{w}}{\partial Y} + \frac{12\hat{\mu}\hat{h}}{\hat{\rho}} \Delta \hat{v} \\ + (f_w - f_s) \hat{V} \Delta \hat{v} + \frac{1}{2}(f_s - f_w) \hat{V}^2 \hat{w} + \frac{\hat{h}}{\hat{\rho}} \frac{\partial \hat{p}}{\partial Y} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここで, 線形化した基礎方程式は以下の無次元数を用いて無次元化した. 式中の D はフィルムの曲げ剛性を表し $D = Eh^3/12$ で与えられる.

$$\begin{aligned} T_0 &= \sqrt{\frac{\rho h H_0^4}{D}}, U_0 = \frac{H_0}{T_0}, T = \frac{t}{T_0}, \hat{V} = \frac{V_0}{U_0} \\ \hat{L} &= \frac{L}{H_0}, \hat{w} = \frac{w}{H_0}, X = \frac{x}{H_0}, Y = \frac{y}{H_0}, \\ Z &= \frac{z}{H_0}, \hat{h} = \frac{h}{H_0}, \Delta \hat{v} = \frac{\Delta v}{U_0}, \hat{\rho} = \frac{\rho_f}{\rho}, \\ \hat{S} &= \frac{SH_0^2}{D}, \hat{p} = \frac{H_0^3}{D} p, \hat{\mu} = \mu \sqrt{\frac{H_0^2}{\rho h D}}, \\ \hat{C}_s &= C_s \sqrt{\frac{H_0^4}{\rho h D}}, \hat{f} = \frac{H_0^3}{D} f, \varepsilon = \frac{E^*}{ET_0} \end{aligned} \quad (10)$$

また, 同様に式 (10) の無次元数を用いると, 式 (1) フィルムの基礎方程式は以下のように無次元化される.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial T^2} + \hat{C}_s \frac{\partial \hat{w}}{\partial T} - \hat{S} \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial X^2} + (1 + \varepsilon) \frac{\partial}{\partial T} \\ \left(\frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial Y^4} \right) = \hat{f}(X, Y, T) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで, 右辺の無次元化された流体力 $\hat{f}$ は, 式 (8), (9) の流体流れの基礎方程式より得られる非定常流体圧力 $\hat{p}$ より, 以下の式 (12) のように得られる.

$$\hat{f}(X, Y, T) = \hat{p}(X, Y, T) \quad (12)$$

以上の無次元化された基礎方程式より, 流体流れとフィルムの波の運動が連成した流体・構造連成系の波動方程式は, 式 (8), (9) を非定常流体圧力 $\hat{p}$ について解き, 式 (12) の関係を用いて式 (11) に代入することにより, 以下の式 (13) のように得られる.

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial T} + \hat{V} \frac{\partial}{\partial Y} \right)^2 \hat{w} + \gamma \left(\frac{\partial}{\partial T} + \delta \frac{\partial}{\partial Y} \right) \hat{w} \\ = \frac{1}{\beta} \frac{\partial^2}{\partial Y^2} \left\{ \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial T^2} + \hat{C}_s \frac{\partial \hat{w}}{\partial T} - \hat{S} \frac{\partial^2 \hat{w}}{\partial X^2} \right. \\ \left. + (1 + \varepsilon) \left(\frac{\partial}{\partial T} \right) \left(\frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial X^4} + 2 \frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial X^2 \partial Y^2} + \frac{\partial^4 \hat{w}}{\partial Y^4} \right) \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

上式 (13) において, 左辺第 1 項は流体の連続の式と運動量方程式の慣性項から得られる流体系の波動を表し, 第 2 項は流体の連続の式と運動量方程式の粘性項と壁面摩擦項から得られる流体系の波動を表す. また, 波動方程式の右辺はフィルム上を伝播する構造系の曲げ波の波動を表す. 式中の β, γ および δ は以下の式に示す無次元数である.

$$\beta = \frac{\hat{\rho}}{\hat{h}} \quad (14)$$

$$\gamma = \frac{12\hat{\mu}\hat{h}}{\hat{\rho}} + (f_w - f_s) \quad (15)$$

$$\delta = \frac{\hat{V}\gamma - \alpha}{\gamma} \quad (16)$$

また、式 (16) において α は以下より得られる。

$$\alpha = \frac{1}{2}(f_s - f_w)\hat{V} \quad (17)$$

ここで、 β はフィルム上を伝播する構造系の波動に対する流体系の波動の影響の大きさを表す無次元数であり、振動学的には構造系が運動する際に、流体から作用する付加質量の大きさを表す無次元数である。ここで、 β が十分小さい場合は、式 (13) の右辺が大きくなるため、フィルム上を伝播する構造系の波動が支配的であることを意味する。また、 β が十分大きい場合には、式 (13) の右辺が小さくなるため、流体の波動が支配的であることを意味する。

3.4 分散関係式と安定性解析 フィルムに発生する波の波動特性（位相速度と成長率）を調べるため、式 (13) の波動方程式より分散関係式を導出する。

本解析で対象とする不安定波動は、低流速で最初に発生する波動であり、 x 方向の波数が最も低い場合に発生する。そこで x 方向に半波長を仮定し、フィルムの面外変位 $\hat{w}$ を波動解として以下の式 (18) のように置く。

$$\hat{w} = \hat{w}_0 \sin\left(\frac{\pi X}{L}\right) \exp\{i(\hat{\omega}T - kY)\} \quad (18)$$

流体流れとフィルムの波の運動が連成した流体・構造連成系の波動方程式の分散関係式は、以下のように得られる。

$$\begin{aligned} &(\beta + k^2)\hat{\omega}^2 - 2k\beta\hat{V}\hat{\omega} - i\hat{\omega}[\gamma\beta + \hat{C}_s k^2 + \\ &k^2\epsilon\{(\frac{\pi}{L})^2 + k^2\}^2] + \beta k^2\hat{V}^2 - \hat{S}k^2(\frac{\pi}{L})^2 \\ &- k^2\{(\frac{\pi}{L})^2 + k^2\}^2 + i\gamma\beta\delta k = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

この式 (19) の分散関係式を解くことにより得られる根 $\hat{\omega}$ は一般に複素数であり、その実数部 $\text{Re}[\hat{\omega}]$ は角振動数を表し、またその値を波数 k で割った値 $\text{Re}[\hat{\omega}]/k$ は波の伝播速度である位相速度を表す。ここで、 $\text{Re}[\hat{\omega}]/k > 0$ であれば、波がフィルム上を流体流れと同じ方向に伝播する進行波であることを意味し、 $\text{Re}[\hat{\omega}]/k < 0$ であれば、波が流体流れと反対方向に伝播する後退波であることを意味する。

また、 $-\text{Im}[\hat{\omega}]$ は波の成長率を表し、 $-\text{Im}[\hat{\omega}] > 0$ であれば波の振幅が時間とともに増加し不安定となることを意味する。また、 $-\text{Im}[\hat{\omega}] < 0$ であれば、波の振幅が時間とともに減衰し系は安定であることを意味する。

3.5 解析条件と実験方法

本研究では表 1 に示す値を用いて安定性解析を行う。表中の値は以下で述べる実験に合わせて定めた。フィルムの材質は PET とし、作動流体は空気とした。フィルムの外部および内部構造減衰係数は $C_s = 10.0 \text{ Ns/m}^3$, $E^* = 1.0 \times 10^3 \text{ Ns/m}^2$ として計算を行った。これらの値を用いると主な無次元数は $\beta = 2.46 \times 10^{-1}$, $\hat{C}_s = 9.50 \times 10^{-3}$, $\epsilon = 9.01 \times 10^{-5}$, $\hat{S} = 2.40 \times 10^3$ となる。

また、理論解析結果の妥当性を検証するために実験を行った。図 2 に実験装置の概略図を示す。実験はフィルム両端をロールバーで支持し、重りにより張力をかけた。流れ方向のフィルム幅 $2W = 0.6[\text{m}]$ であり、発生する不安定波動の波長に対し、フィルムの長さは十分に長い。境界条件の影響は無視できる。フィルム下面と拘束壁面に囲まれたすきま部には、張力作用方向に対して直交方向に空気の流れを、ブロウを用いて発生させた。実験では流速を増加させ、フィルムに不安定波動が発生するときの臨界流速および臨界波数を測定した。すきま部を流れる空気の流速は、流速センサ（カノマックス社製 6332D 型）を用いて測定した。また、不安定波動の波長と臨界波数は、ビデオ画像と装置に固定したスケールにより求めた。

Table 1 Parameters used in the calculation

Material of sheet	PET
Fluid	Air
Gap width H_0	$5.0 \times 10^{-3} [\text{m}]$
Film supporting length L	0.3, 0.4, 0.5, 0.6 [m]
Film thickness h	16.0 [μm]
Tensile force S	50, 100, 150, 200 [N/m]
Film Young's modulus E	$3.0 \times 10^9 [\text{Pa}]$
Film density ρ	$1.4 \times 10^3 [\text{kg/m}^3]$
Fluid density ρ_f	1.1 [kg/m^3]
Fluid viscosity μ	$18.2 \times 10^{-6} [\text{Ns/m}^2]$

Fig.2 Schematic illustration of experimental apparatus

4. 位相速度と成長率

図3 (a), (b) に流速に対する波の位相速度 $\text{Re}[\hat{\omega}]/k$ と成長率 $-\text{Im}[\hat{\omega}]$ を示す。ここで図中には波数 $k=1.2, 1.6, 2.0$ の場合を示す。また、図4 (a), (b) に流速を変化させた場合の波の分散関係を示す。

図3 (a) 及び図4 (a) より、流速が小さい場合には、フィルムには流体流れと同じ方向に波が伝播する進行波と、流体流れと反対方向に波が伝播する後退波が存在することが分かる。そして、流速の増加とともに、後退波の波は進行波の波に変化する。ここで、波数が小さい波ほど低い流速で後退波から進行波に変化し、フィルム上には二つの進行波モードが存在する状態となる。そして、流速が増加すると二つの進行波の位相速度の大きさは近づき、それらの値は流速の増加とともに直線的に増加する。

また図3 (b) 及び図4 (b) より、流速が増加すると、流体流れと同じ方向に波が伝播する進行波的な不安定波動が発生することが分かる。そして図4 (b) から分かるように流速の増加とともに、波数の大きい波ほど不安定波動として成長する成長率が大きくなる。

(a) Phase velocity $\text{Re}[\hat{\omega}]/k$ with changing flow velocity $\hat{V}$

(b) Growth rate $-\text{Im}[\hat{\omega}]$ with changing flow velocity $\hat{V}$

Fig. 3 Variation of phase velocity $\text{Re}[\hat{\omega}]/k$ and growth rate $-\text{Im}[\hat{\omega}]$ with changing flow velocity $\hat{V}$

5. 波数の不安定領域

5.1 張力とフィルム支持幅の影響 次に、フィルムに作用する張力とフィルム支持幅の安定性に対する影響を調べる。張力を $\hat{S} = 1.2 \times 10^3, 2.4 \times 10^3, 3.6 \times 10^3, 4.8 \times 10^3$ と変化させ、それ以外のパラメータは3.5節で示した値として、流速に対する不安定波動として成長する波の波数領域の変化を図5に示す。図中のプロットは実験値（臨界流速および臨界波数）を示す。また、図6に張力の変化に対する臨界流速の変化を示す。図5より、流速が大きくなると不安定波動の波数領域は広がることが分かる。また、図5と図6より、フィルムに作用する張力が大きくなると、不安定波動の波数領域は狭くなり、不安定波動が発生する臨界流速は高くなることが分かる。つまり張力の増加は系を安定化する。さらに、最も低流速で不安定となる波の臨界波数は約 $k = 0.5$ でほぼ一定値であり、理論解析結果は実験結果と良く一致している。

フィルム支持幅を $\hat{L} = 60, 80, 100, 120$ と変化させ、それ以外のパラメータは3.5節で示した値とした場合の、流速に対する不安定波動として成長する波の波数領域の変化を図7に示す。図7より、フィルム支持幅が広がると、不安定波動の波数領域は広がり、臨界流速は低

(a) Phase velocity $\text{Re}[\hat{\omega}]/k$ with changing wave number k

(b) Growth rate $-\text{Im}[\hat{\omega}]$ with changing wave number k

Fig. 4 Dispersion relation of wave

下する。つまり、フィルム支持幅が広がると、系は不安定化することが分かる。

5.2 構造減衰の影響 本研究で対象とするフィルムは高分子材料であるため、外部および内部構造減衰係数は周りの温度変化などの影響により変化する。このため、外部および内部構造減衰係数の安定性に対する影響を考察する必要がある。図8にフィルムの外部構造減衰係数 $\hat{C}_s = 1, 10, 100$ と変化させ、張力 $\hat{S} = 2.4 \times 10^3$ 、フィルム支持幅 $\hat{L} = 100$ 、それ以外のパラメータを3.5節で示した値として、流速に対する不安定波動として成長する波の波数領域の変化を調べた結果を示す。また、内部構造減衰係数 $\varepsilon = 10^2, 10^4, 10^6$ と変化させた場合の、流速に対する不安定波動の波数領域の変化を図9に示す。これらの図より、外部および内部構造減衰係数の変化に対して、臨界流速の変化は小さいことが分かる。これはフィルムの厚さが薄いために、流体力に比べて構造減衰の影響が小さいことが原因と考えられる。つまり、フィルムが薄い場合にはフィルムの構造減衰を増加させても、流れ励起不安定波動を抑止することが困難であることが分かる。

Fig. 5 Variation of unstable region with changing tensile force $\hat{S}$: (●, ○, ▲, △; experimental results)

Fig. 6 Variation of critical flow velocity with changing tensile force $\hat{S}$: (●, ○, ▲, △; experimental results)

Fig. 8 Variation of unstable region with changing external structural damping coefficient $\hat{C}_s$

Fig. 9 Variation of unstable region with changing internal structural damping coefficient ε

Fig. 7 Variation of unstable region with changing film supporting width $\hat{L}$

6. まとめ

フィルムがすきま流れにさらされ、流体流れと直交方向の分散関係式を理論的に導出した。そして、フィルムに発生する波の波動特性（位相速度と成長率）、および不安定波動の波数と流速の関係を調べた。また、実験により理論解析結果の妥当性を示した。以下に得られた主な結果を示す。

(1) 流速が臨界流速以上となると、フィルム上に流体流れと同じ方向に伝播する進行波タイプの流れ励起不

安定波動が発生する。また、流速が大きくなると不安定波動として成長する波の波数領域は広がる。

(2) 張力が大きくなると不安定波動の波数領域は狭くなり、臨界流速は高くなる。また、フィルム支持幅が広がると不安定波動の波数領域は広くなり、臨界流速は低下する。波数が約 0.5 の波が最も低い流速（臨界流速）で不安定波動として発生する。

(3) 外部および内部構造減衰係数の変化に対して、臨界流速の変化は小さい。

参考文献

- (1) F. Inada, S. Hayama, "A Study on Leakage-Flow-Induced Vibrations (1st Report, Fluid-Dynamic Forces Acting on the Walls of a One-Dimensional, Narrow, Tapered Passage)": *International Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series III*, Vol.31 (1998), pp.39-47.
- (2) F. Inada, S. Hayama, "A Study on Leakage-Flow-Induced Vibrations. Part 1: Fluid-Dynamic Forces and Moments Acting on the Walls of a Narrow Tapered Passage": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.4 (1990), pp.395-412.
- (3) F. Inada, S. Hayama, "A Study on Leakage-Flow-Induced Vibrations. Part 2: Stability Analysis and Experiments for Two-Degree-of-Freedom Systems Combining Translational and Rotational Motions": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.4 (1990), pp.413-428.
- (4) H. Nagakura, S. Kaneko, "The Stability of a Cantilever Beam Subjected to One-Dimensional Leakage Flow": *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.58, No.546(1992), pp.352-359.
- (5) N. Yamaguchi, K. Yokota, Y. Tsujimoto, "Flutter Limits and Behavior of a 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.
- (6) N. Yamaguchi, T. Sekiguchi, K. Yokota, Y. Tsujimoto, "Flutter Limits and Behavior of a 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.
- (7) Y. Watanabe, S. Suzuki, M. Sugihara, Y. Sueoka, "An Experimental Study of Paper Flutter": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.16 (2002), pp.529-542.
- (8) Y. Watanabe, K. Isogo, S. Suzuki, M. Sugihara, "A Theoretical Study of Paper Flutter": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.16 (2002), pp.543-560.
- (9) C. Shin, J. Chung, W. Kim, "Dynamic Characteristics of the Out-of-Plane Vibration for an Axially Moving Membrane": *Journal of Sound and Vibration*, Vol.286 (2005), pp.1019-1031.
- (10) X. Wu, S. Kaneko, "Linear and Nonlinear Analysis of Sheet Flutter Induced by Leakage Flow": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.20 (2005), pp.927-948.
- (11) L. Huang, "Flutter of Cantilevered Plates in Axial Flow": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.9 (1995), pp.127-147.
- (12) F. Inada, "A Study on Leakage-Flow-Induced Vibrations of a Flexible Structure (A Stability Analysis of One Dimensional Flexible Plate and a Consideration Self-Excited Oscillation Mechanisms)": *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.66, No.645 (2000), pp.1475-1482.
- (13) C. A. Evensen, A. Kalnins, "Response of Compliant Slab to Inviscid Incompressible Fluid Flow": *Journal of Acoustical Society of America*, Vol.78 (1985), pp.2034-2041.
- (14) R. J. Hansen, D. J. Huston, C. C. Ni, "An Experimental Study of Flow-Induced Waves on a Flexible Surface": *Journal of Sound and Vibration*, Vol.68 (1980), pp.317-334.
- (15) P. W. Carpenter, A.D. Garrad, "The Hydrodynamic Stability of Flow Over Kramer-Type Compliant Surface. Part 1. Tollmien-Schlichting Instabilities": *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.155 (1985), pp.465-510.
- (16) P. W. Carpenter, A. D. Garrad, "The Hydrodynamic Stability of Flow Over Kramer-Type Compliant Surface. Part 2. Flow-Induced Surface Instabilities": *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.170 (1986), pp.199-232.
- (17) Y. B. Chang, P. M. Moretti, "Flow-Induced Vibration of Free Edges of Thin Film": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.16 (2002), pp.989-1008.
- (18) M. Watanabe, N. Kobayashi, "Stability Analysis of Flow-Induced Waves of a Flexible Sheet Moving in a Fluid-Filled Narrow Space with Shear Fluid Flow (1st Report, In a Case of Moving Infinity Long Sheet)": *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.67, No.658 (2001), pp.1771-1778.
- (19) M. Watanabe, N. Kobayashi, "Dynamics and Stability Analysis of Axially Moving Web Subjected to Shear Fluid Flow in Narrow Space (in a Case of Finitely Long Space)": *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.67, No.664 (2001), pp.3722-3729.
- (20) F. Axisa, J. Antunes, "Flexural Vibrations of Rotors Immersed in Dense Fluids Part I, Theory": *Journal of Fluids and Structures*, Vol.6 (1992), pp.3-21.