

機関番号：32601

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20560225

研究課題名（和文） エアターンバーで支持されたウェブの自励振動発生メカニズム解明と制振デバイスの開発

研究課題名（英文） Instability Mechanism of Self-excited Vibration of a Web Supported by Air-turn Bar and Development of Vibration Suppression Mechanism

研究代表者

渡辺 昌宏（MASAHIRO WATANABE）

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：40256673

研究成果の概要（和文）：

エアターンバーで支持されたウェブ（フィルムなどのような連続柔軟媒体）に発生する自励振動について、理論解析モデルを構築し、自励振動の発生条件と励振メカニズムを理論解析と実験により明らかにした。エアターンバーから噴出す空気流量とウェブにかかる張力をパラメータとして、自励振動が発生する条件を明らかにした。また、エアターンバー内の空気の圧縮性に起因して、ウェブ作用する空気力が振動変位に対して位相進みとなることで自励振動が発生することを明らかにした。さらに、エアターンバー表面の空気の吹出しスリットの面積を能動的に変化させることで、ウェブに作用する空気力を制御して振動を制振するセミアクティブ制振手法を手案し、実験によりその制振効果を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

This study deals with a theoretical stability analysis of a self-excited vibration generated in a web wrapped around an air-turn bar. Stability of the web wrapped around an air-turn bar is examined theoretically and experimentally. The instability condition of the system is shown as a function of air flow rate and tensile force. The instability mechanism of the self-excited vibration is discussed based on the theoretical model. Moreover, a semi-active control method to suppress the self-excited vibration of the web is proposed. It is experimentally shown that the self-excited vibration is effectively suppressed by the proposed semi-active control device. The suppression effect is clarified by the experiment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・制御

キーワード：エアターンバー、自励振動、励振メカニズム、セミアクティブ制振

1. 研究開始当初の背景

太陽電池パネルや液晶ディスプレイなどで使用されている高機能フィルムは薄膜化・高緻密化が求められる。このフィルムの

薄膜化・高緻密化の過程では、フィルムの非接触かつ高精度ハンドリングが重要なキーテクノロジーである。しかしながら、フィルムを非接触搬送する製造工程において、エア

ターナーで支持されたフィルムに自励振動が発生することが、フィルムの薄膜化・高緻密化の技術的障壁となっている。このため、エアターナーで支持されたフィルム（以下、ウェブと呼ぶ）の自励振動の発生領域と励振メカニズムの解明、また振動を抑止する技術の確立が必要不可欠である。さらに、ウェブに非接触で振動を抑止する手法の確立が求められる。

2. 研究の目的

上述の研究背景を基に、本研究はエアターナーで支持されたウェブの理論解析モデルを構築し、ウェブに発生する自励振動の発生条件と励振メカニズムを理論解析と実験により明らかにすることを目的に行った。特に、振動数が数ヘルツの低振動数モードの自励振動を対象に研究を行った。また、ウェブに非接触で自励振動を抑止するセミアクティブ制振手法の確立と制振デバイスの構築を目的として研究を行った。

3. 研究の方法

本研究は以下の(1)~(3)の順で研究が行われた。

(1) 実験装置を構築し、実験的にエアターナーで支持されたウェブに発生する自励振動の振動特性を調べた。図1に本補助で構築した実験装置の写真を示す。ウェブの振動はレーザ変位計を用いて計測した。ウェブに作用する張力とエアターナーから吹き出す空気の流量をパラメータとして自励振動の振動特性を調べた。特に、発生する自励振動の振動モードと自励振動が発生するパラメータを明らかにした。

(2) 実験で得られた自励振動の支配因子を解析し、エアターナーに巻きつけられたウェブの解析モデルを構築した。そして、解析モデルを基に支配方程式を導出した。摂動法を用いて支配方程式を浮上方程式（定常方程式）と振動方程式（非定常方程式）に分離した。浮上方程式よりウェブの浮上量を求めた。振動方程式をラプラス変換し、ラウスフルビッツの安定判別式を適用することで、不安定条件と振動発生領域を明らかにした。また、ウェブの振動変位と流体励振力（変動空気圧力）の位相関係を調べることで、自励振動の励振メカニズムを解明した。

(3) 励振メカニズムを詳細に解析し、エアターナー表面の空気の噴出しスリットの面積を能動的に変化させることで、ウェブに作用する空気力を制御して振動を制振するセミアクティブ制振手法を提案した。そして、実験によりその制振効果を明らかにした。

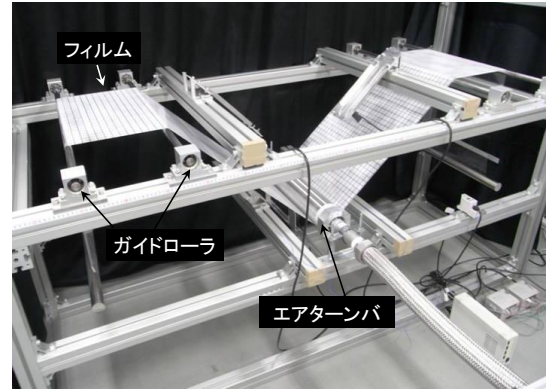


図1 実験装置

4. 研究成果

(1) 自励振動発生条件

実験で得られた自励振動の支配因子を解析し、図2に示す解析モデルを構築した。そして、系の基礎方程式を導出した。

基礎方程式から定常方程式と非定常方程式を求めた。得られた非定常方程式をラプラス変換することで、系の特性方程式は以下のように求めた。

$$(s^2 M_e + s C_e + k_e) \Delta \tilde{H} = \tilde{F} \quad (1)$$

$$\tilde{F} = -\frac{\varepsilon}{1 + \tau s} \Delta \tilde{H} \quad (2)$$

式中の \sim はラプラス変換記号を表し、 \tilde{F} はウェブに作用する非定常空気力を意味する。ここで、式中の変数は以下の様に置き換えた。

$$\varepsilon = \frac{3T_0}{\beta H}, \quad \beta = \theta/2, \quad \tau = \frac{2\bar{P} V_0}{Q_s K} = \frac{2V_0}{r Q_s} \quad (3)$$

式(1)より、空気力は振動変位に対して1次遅れ系の伝達要素を有しており、エアターナー内の空気の圧縮性に起因して自励振動が発生することがわかる。

さらに、ラウスフルビッツの安定判別を適用することで、自励振動が発生する条件（不安定条件）が以下のような式で求まる。式中の変数は系の物性値および寸法から得られる。

$$C_e(1 + \omega_n^2 \tau^2) - \tau \varepsilon < 0 \quad (4)$$

上式から得られる自励振動が発生する安定限界線図（張力-流量線図）を図3に示す。図は、エアターナー半径 75mm、フィルム巻き付け角度 90度、フィルムの材質は PET とし、幅 450mm、厚さ 16 μ m のフィルムを用いた場合の結果である。図中の曲線は計算結果を、●印と×印は実験において自励振動が発生した場合と発生しなかった場合を示している。

図より、計算値と実験値が定性的に一致しており、張力が大きく流量が大きいほど、自

励振動が発生しやすく、臨界流量が低下することが明らかとなった。この結果より、これまで未解明であった自励振動の発生条件を理論解析により示すことができた。

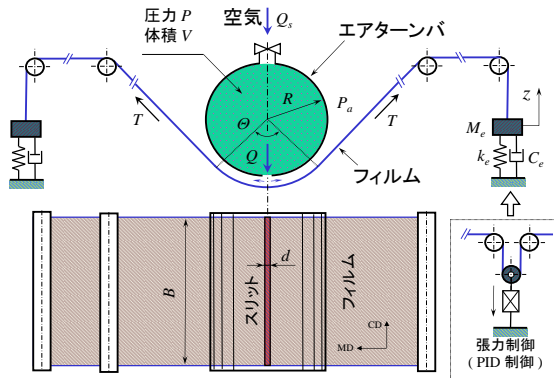


図2 解析モデル

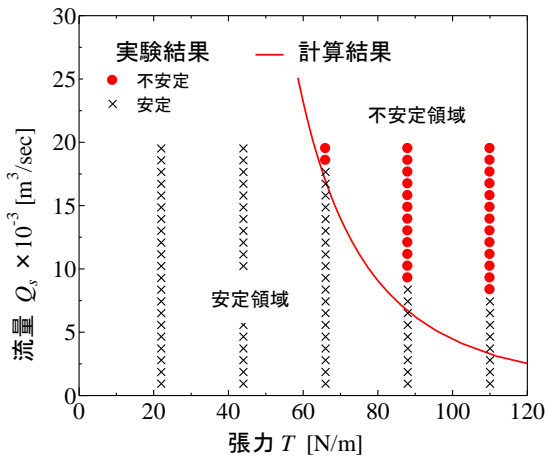


図3 安定限界線図(張力-流量線図)

(2) 励振メカニズムの解明

フィルムに作用する非定常空気力は、以下のように得られる。

$$\Delta F(t) = \frac{\varepsilon\tau}{1+\omega^2\tau^2} \dot{\Delta H}(t) - \frac{\varepsilon}{1+\omega^2\tau^2} \Delta H(t) \quad (5)$$

この振動変位 $\Delta H(t)$ と空気力 $\Delta F(t)$ とのリサージュ図を図4に示す。時定数 $\tau=0$ のとき、空気力 $\Delta F(t)$ は変位 $\Delta H(t)$ に対して逆位相となり、空気力がフィルムの振動に対して励振力とならず、単に復元力(エアクッション効果)として作用することが分かる。一方、時定数 $\tau \neq 0$ のときは、空気力 $\Delta F(t)$ は振動変位 $\Delta H(t)$ に対して位相進みとなり、リサージュ曲線は時計回りに回りながら成長する。このとき、空気力はフィルムの振動に対して正の仕事をしており励振力となる。つまり、エアターナー内の空気の圧縮性に起因して空気力が振動変位に対して位相進みとなるた

め、負減衰力を有するようになり、自励振動が発生することが明らかとなった。この結果より、定性的ではあるが、これまで未解明であった自励振動の励振メカニズムを示すことができた。

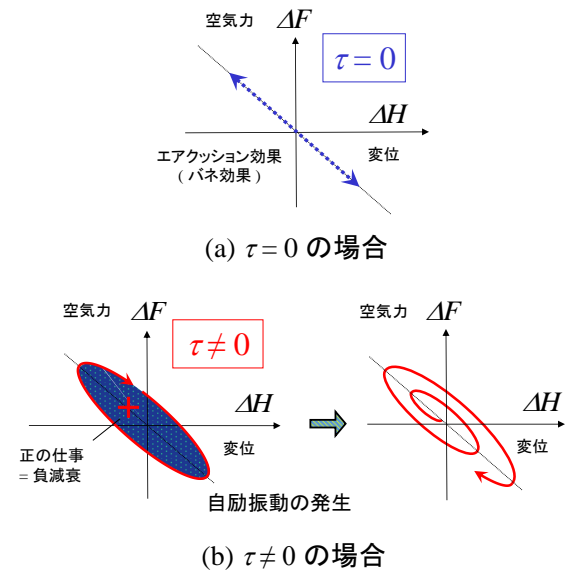


図4 振動変位と空気力との位相関係(励振メカニズムの説明)

(3) 非接触制振手法の構築

図5に構築した制振システムと制御信号の流れを示す。制御システムはレーザ変位センサ、ローパスフィルタ、制御コンピュータ、アクチュエータから構成されている。ウェブの振動はエアターナー最下部(スリットの真上)の位置で計測した。ノイズと高振動数モードの信号をカットするためにローパスフィルタを設けた。制御コンピュータは計測信号の位相をシフトさせて、更にゲイン倍した信号をアクチュエータに出力する。このフィードバックループにより、ウェブの振動に基づき、エアターナー表面の空気の噴出しスリットの面積を能動的に変化させる。そして、ウェブに作用する空気力を制御して振動を制振する。主な制御パラメータは、振動変位に対してスリットの面積を変化させる位相とゲインである。

図6にスリットの面積を能動的に変化させるために制作したアクチュエータを示す。アクチュエータはコイル、板バネ、ネオジウム磁石から構成されており、磁石の吸引・反発力を利用して可動板を動かすことで、スリットの面積を変化させることができる。

図7に代表的な制御パラメータとして、 $\phi = -30^\circ$ 、 $G=10$ における振動変位とエアターナー内部圧力および制御電圧の時刻歴波形を示す。図8に位相とゲインを変化させて制御を行った結果を示す。縦軸は制御前後にお

ける振動変位の RMS 値の比であり、1 以下で振動が安定化、1 以上で不安定化を示している。図より位相が $\phi = -50 \sim -20^\circ$ の範囲で制振効果が高く、ゲイン $G=6$ 以上で制振効果があることがわかる。

(4) まとめと今後の展望

エアターンバーで支持されたウェブに発生する自励振動の発生条件と励振メカニズムを理論解析と実験により示すことができた。この結果より、これまで未解明であった自励振動の励振メカニズムを解明することに成功し、フィルム製造工程で発生する自励振動を回避する設計パラメータの指標を得ることができた。

また、スリット幅を能動的に変化させることで、空気の流れをコントロールして自励振動を抑止するセミアクティブ制振手法を提案し、実験によりその制振効果を示した。このことで、設計段階で回避できない、自励振動の発生を制御技術の導入により抑止できる見通しを得ることができた。この非接触制御技術の導入により、フィルムなどの生産性向上につながると思われる。

以上の結果は、実験室における制約された条件下での結果であり、実機レベルでの検証が必要であるが、今後さらに研究が発展し、本研究の成果が、フィルムなどのウェブの高精度ハンドリングの向上につながることを期待する。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

①渡辺 昌宏, 原 謙介, エアターンバーに巻きつけられたフィルムに発生する自励振動の理論的安定性解析 (低振動数モードの発生条件と励振メカニズム), 日本機械学会 2010 年度年次大会講演論文集 Vol.5, No.10-1, pp.81-82, 2010 年 9 月 6 日, 名古屋市, 名古屋工業大学。

②M.Watanabe and K.Hara, Theoretical Stability Analysis of Self-Excited Vibration in a Thin Film Wrapped around an Air-Turn Bar, CD-Rom Proceedings of ASME FEDSM -ICNMM2010, #30923, 2010 年 8 月 5 日, カナダ, モントリオール。

③K.Hara and M.Watanabe, Experimental Study of Self-Excited Vibration in a Thin Film Wrapped around an Air-Turn Bar, CD-Rom Proceedings of ASME FEDSM -ICNMM2010, #30913, 2010 年 8 月 5 日, カナダ, モントリオール。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 昌宏 (MASAHIRO WATANABE)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号: 40256673

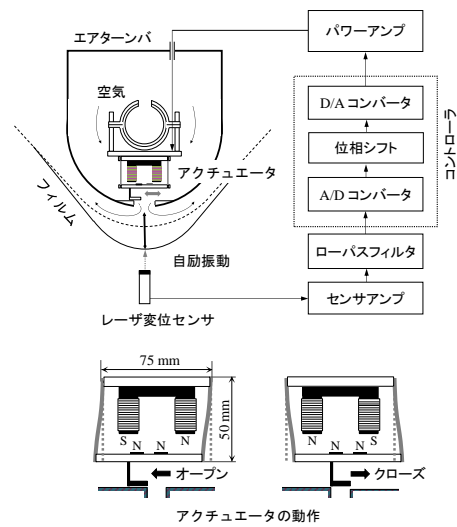


図 5 制御システム

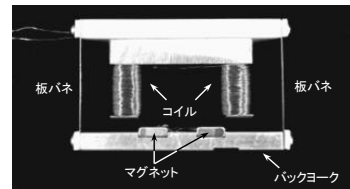


図 6 アクチュエータ

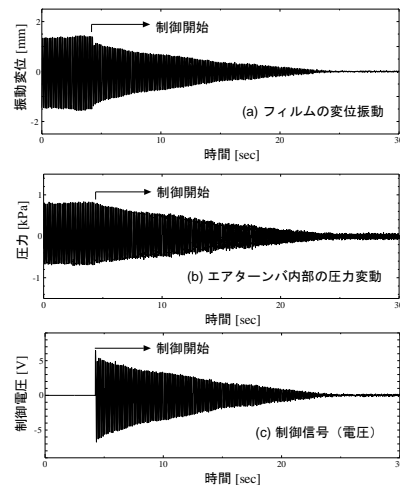


図 7 制御波形

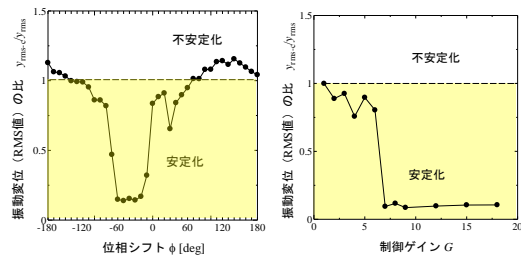


図 8 位相シフトと制御ゲインに対する制振効果