

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560272

研究課題名(和文)エアフローティング搬送ウェブに発生するフラッタの励振メカニズム解明と非接触制振

研究課題名(英文) Instability Mechanism and Non-Contact Suppression of a web-Flutter in an air-floating system

研究代表者

渡辺 昌宏 (WATANABE, MASAHIRO)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号：40256673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：ウェブやシートなどの柔軟媒体に発生するフラッタの解析モデルを構築した。流体の支配方程式には、非定常揚力面理論に基づくクスの積分方程式を用いた。流体構造連成方程式を導出し、安定性解析と実験によりフラッタの発生条件を示した。また、流体力仕事を求め励振メカニズムを考察した。さらに、アクチュエータである可動板の角度を能動的に変化させて流れを制御し、フラッタを非接触で抑止する制御システムを提案した。解析と実験によりフラッタ抑止効果を調べた。また、実験によりフラッタを非接触で制振できることを示し、フラッタ制御に重要なパラメータを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study deals with a flutter analysis of a rectangular flexible sheet subjected to axial fluid flow. The unsteady fluid force acting on the sheet surface is calculated by using Doublet-point method, which is based on the unsteady lifting surface theory. The equation of motion of the sheet coupled with the fluid flow is derived by employing finite element method. Flutter velocity and frequency are measured in experiment. Flutter characteristic is clarified by comparing the analysis with the experimental results. The local work by fluid force on the sheet surface, and instability mechanism are clarified. Moreover, an active feedback control to suppress the sheet flutter is proposed. The sheet flutter is actively controlled and suppressed the movable plates change the fluid flow around the sheet. It is theoretically and experimentally indicated that the flow induced sheet flutter is suppressed by the proposed active control.

研究分野：工学

キーワード：フラッタ 制御

1. 研究開始当初の背景

高機能性フィルムなどの柔軟媒体（ウェブ）は、燃料電池や太陽光発電パネルなど省エネルギー社会の実現に必要不可欠な機器に多用されているが、エアフローティング搬送ウェブに発生するフラッタ（空気の流れに起因した自励振動）が生産効率向上の大きな障壁となっている。このため、フラッタの発生条件と励振メカニズムを解明することが必要である。また、ウェブに非接触で振動を抑止する技術の確立が必要不可欠である。

2. 研究の目的

上述の研究背景を基に、本研究はフラッタ発生条件と励振メカニズムを理論解析と実験により解明する。さらに、ウェブ周りに配置した可動板の角度を能動的に制御して空気の流れをコントロールすることで、フラッタを非接触で抑止する新しい制御手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究は、以下の(1)～(4)の順で、研究を行った。

(1) フラッタ解析モデルの構築とフラッタ解析： エアフローティング搬送ウェブ周りの流れ場は非常に複雑な流れ場となる。このため、フラッタの基本的な励振メカニズムを調べるために、一様流中の（上流端固定）柔軟媒体（以下シートと呼ぶ）に発生するフラッタの解析モデルを構築した。ここで、シート周りの流体の支配方程式には、非定常揚力面理論に基づくクスの積分方程式を用いた。構造系であるシートの面外振動は三次元的なモードとなるため有限要素法により離散化した弾性体要素モデルを用いた。そして、シートの動きと連成した非定常空気力を運動方程式に組み込むことで、流体構造連成方程式を導出し、安定性解析によりシートフラッタの発生条件を示した。また、シート表面の流体力仕事を示し、励振メカニズムを考察した。

(2) フラッタ実験： フラッタ特性を調べるための実験装置を構築し、実験によりフラッタの臨界流速とフラッタモードを調べた。そして、実験と(1)の解析により、フラッタの発生条件を明らかにした。

(3) フラッタ制御のための解析モデルの構築と解析： アクチュエータである可動板の角度を能動的に変化させて流れを制御し、フラッタを非接触で抑止する制御システムを提案した。(1)で導出した解析モデルにアクチュエータの可動板の動作を組み込むことで、フラッタ制御の解析モデルを構築し、解析によりフラッタ抑止効果を調べた。

(4) フラッタ制御実験： 提案する制御手法による、フラッタ制御の効果を検証するための実験装置を構築した。実験により、提案する制御手法がフラッタ制御に有効であり、ウェブに非接触で、フラッタを非接触で制振できることを示した。さらに、フラッタ制御に重要なパラメータを明らかにした。

4. 研究成果

本研究で得られた成果の詳細は5.「主な発表論文等」に示す文献に記載されており、下記はその中の主な結果を抜粋して示す。

(1) フラッタ解析モデルの構築

図1に解析モデルと座標系を示す。密度 ρ_f の流体が x 軸方向に一様流速 U で流れているとする。解析では、シートの長さ、幅、厚さをそれぞれ L, b, h と定義する。シートは上流側の一端が固定支持されている。12自由度の四角形板曲げ要素を用いて、 N 個にシートを分割する。構造系であるシートの運動方程式は有限要素法で求めた。非定常流体力はダブレット・ポイント法を用いて求め、これらが連成した流体構造連成方程式を導出した。

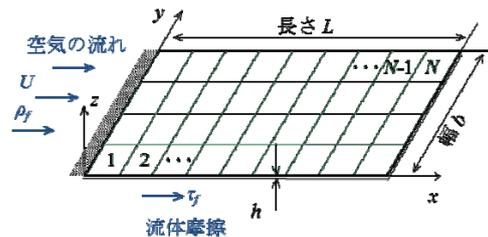


図1 フラッタ解析モデル

(2) フラッタ方程式と安定判別

シートの運動方程式および流体力ベクトルを合わせることで、流体構造連成系の運動方程式は下式(1)のように得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + (\mathbf{K}_s + \mathbf{K}_g)\mathbf{X} \\ = \frac{1}{2}\rho_f U^2 b (\mathbf{A}_e(\bar{s}) - \mathbf{K}_f)\mathbf{X} \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{K}_s は、構造系の剛性行列であり、 \mathbf{K}_f と \mathbf{K}_g はそれぞれ流体摩擦と重力により付加される幾何剛性行列である。左辺は構造系の運動方程式、右辺は、構造系と連成した流体力である。構造系の固有モードを成分とするモード行列 Φ 、モード座標 $\mathbf{q}(t)$ を用いたモード近似により、 $\mathbf{X} = \Phi\mathbf{q}(t)$ と表せる。この関係を用いると、式(2)を得る。

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{q}}(t) + \Gamma\dot{\mathbf{q}}(t) + \Omega\mathbf{q}(t) \\ - \frac{1}{2}\rho_f U^2 b (\tilde{\mathbf{A}}_e(\bar{s}) - \tilde{\mathbf{K}}_f)\mathbf{q}(t) = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、流れがない($U=0$)のときの構造系の i 次固有角振動数を ω_i 、減衰比を ζ_i 、モードの打ち切り次数を m とすると、行列 Ω

と $\mathbf{\Gamma}$ はそれぞれ ω_i^2 と $2\omega_i\zeta_i$ を対角成分とする行列として与えられる。したがって、モード座標に関する特性方程式であるフラッタ行列式が以下の式(3)ように求まる。

$$\det \left[s^2 \mathbf{I} + s \mathbf{\Gamma} - \mathbf{\Omega} - \frac{1}{2} \rho_f U^2 b (\tilde{\mathbf{A}}_e(\bar{s}) - \tilde{\mathbf{K}}_f) \right] = \mathbf{0} \quad (3)$$

流速 U を変化させて、上式を満足する特性根であるラプラス変数を求めて安定性を判別する。得られる特性根のうち一つでも $\text{Re}[s] > 0$ の根があれば、系は不安定となり、 $\text{Im}[s] \neq 0$ の場合にはフラッタが発生する。この時の流速をフラッタ流速 U_{cf} として定義する。また、系が不安定となる流速におけるフラッタモードを求める。ここで、フラッタモードは複素固有モードとして得られる。シート表面に作用する非定常流体力による 1 周期あたりの仕事 E_f は以下の式(4)で得られる。

$$\begin{aligned} E_f &= \oint \dot{\mathbf{X}}^T \mathbf{Q} dt \\ &= \oint \dot{\mathbf{X}}^T \left\{ \frac{1}{2} \rho_f U^2 b \mathbf{A}_e(\bar{s}) \mathbf{X} \right\} dt = \sum_{k=1}^{N_k} E_{local}^{(k)} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで k と N_k は節点番号と全節点数であり、 $E_{local}^{(k)}$ は節点 k における局所的な流体力による仕事を表す。つまり、シート表面上のエネルギー収支分布が得られる。

(3) フラッタ発生条件

一様流中に支持されたシートに発生するフラッタに関して、そのフラッタ流速とフラッタ振動を調べた。図2と図3に質量比 μ に対する無次元フラッタ流速と無次元フラッタ振動数の変化の実験結果および解析結果を示す。図中の曲線は解析結果をプロットは実験結果を示している。

これらの図より、解析結果と実験結果はよく一致していることがわかる。図2より、質量比 μ が1以下では質量比が大きくなると、無次元フラッタ流速が低下することがわかる。しかし、質量比が1以上では、無次元フラッタ流速が局所的に増加する領域と少なからず減少する領域がある。一方、フラッタ振動数は質量比が1以下ではほぼ一定値である。また、無次元フラッタ流速が局所的に増加している質量比付近では、無次元フラッタ振動数は急激に高くなっている。無次元フラッタ流速が局所的に増加する質量比、無次元フラッタ振動数が大きく変化する質量比の前後でフラッタモードは異なっている。したがって無次元フラッタ流速の局所的に増加と無次元フラッタ振動数の急激な変化はフラッタモードの遷移によるものであることがわかる。

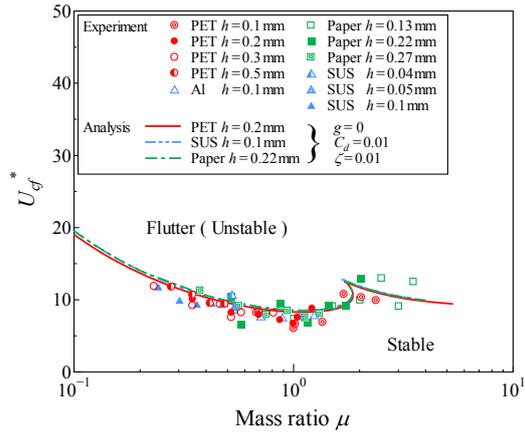


図2 質量比に対する無次元フラッタ流速

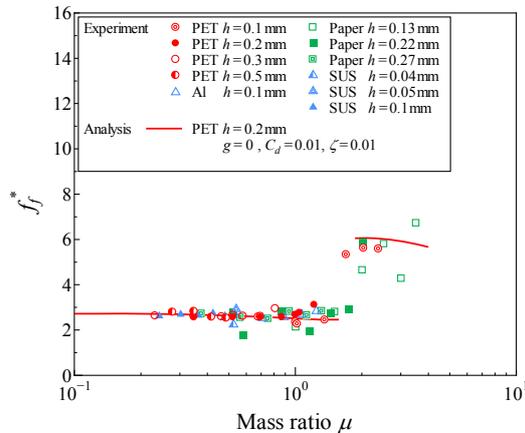


図3 質量比に対する無次元フラッタ振動数

(4) フラッタモードと非定常流体力

図4に質量比 $\mu = 1.0$ におけるフラッタモードとシート表面での非定常流体力の変化の解析結果を示す。非定常流体力の大きさはシート表面上に色で表示しており、その振幅は1周期における最大値で正規化して(最大値を1で)表示している。赤色が上向き、青色が下向きを示している。図より、フラッタモードは流れ方向に波が伝播する進行波モードであることが解析により明らかになった。

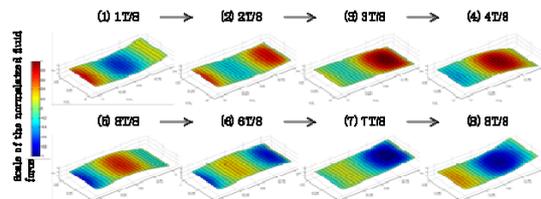


図4 フラッタモードと非定常流体力

(5) 流体力の仕事と励振メカニズム

図5に質量比 $\mu = 1.0$ の場合の非定常流体力による1周期当りの仕事を示す。仕事の大きさは最大値で正規化して(最大値1で)表示している。赤色は流体力の仕事が正の値であることを示し、青色は負の値であることを示し

ている．図より，シートの中央部で流体力が正の仕事をしておりエネルギーが流入していることがわかる．つまり，この領域でのエネルギー流入によりシートにフラッタが励振されていることがわかる．一方，シート下端部付近の振幅は大きい，エネルギーが散逸しており，フラッタの励振には関与しておらず，むしろエネルギーが散逸していることが明らかになった．

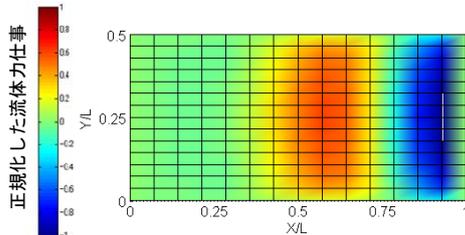


図5 質量比に対する無次元フラッタ振動数

(6) フラッタ非接触制御システムの構築

図6に構築したアクティブフィードバック制御における制御信号の流れを示す．シートの状態量をフィードバックし，コントローラを介してアクチュエータを動かし流体流れを変化させることでフラッタを抑止する．発生したシートフラッタの振動変位 $y(t)$ をレーザ変位計で計測する．なお，計測する振動変位はシート先端部分の変位とする．測定された変位をセンサアンプで増幅し，ローパスフィルタを通してノイズと対象とする振動モード以外のモードの信号を除去する．この信号をA/D変換して，コントローラに取り込む．コントローラにおいて，ゲイン G_c をかけ，位相を ϕ_c ずらす．この信号に対してD/A変換を行い，アンプで増幅しアクチュエータに出力値 $u(t)$ として出力する．制御信号によりアクチュエータを動かすことで，シートを励振させている流れを変化させシートフラッタを制御する．制御系全体ではシート先端部分の変位からアクチュエータ先端部分の変位までのゲインと位相を変化させて制御を行う．

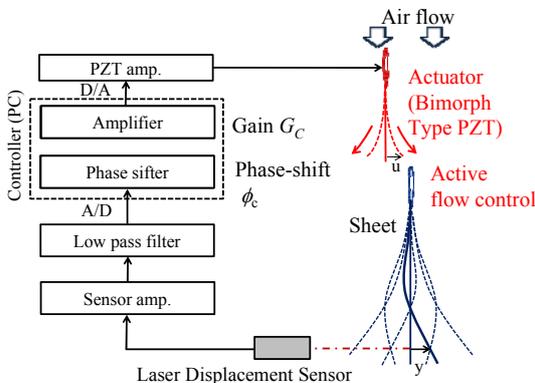


図6 制御システム

(7) フラッタ制御結果

図7にゲイン $G=0.25$ ，位相 $\phi=50\text{deg}$ で制御を行ったときのシートの振動変位，制御電圧の時刻歴波形を，図8に制御時と非制御時の振動スペクトルを示す．制御前はシートにフラッタが発生しており，約30mmの振幅で振動している．約4秒付近から制御が開始され，制御電圧によりアクチュエータが振動することで，フラッタが抑止されており，提案する制御手法の有効性が確認できた．約11秒付近で制御が終了し，再びフラッタが発生している．また，非制御時よりも卓越振動数が低くなり，振動スペクトルは大幅に低減されていることが示された．

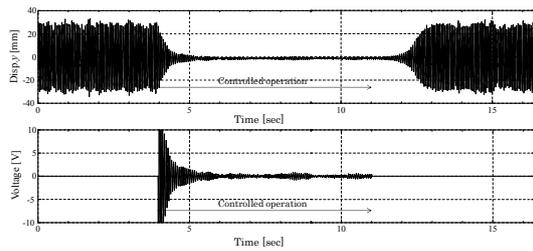


図7 フラッタ制御の時刻歴波形

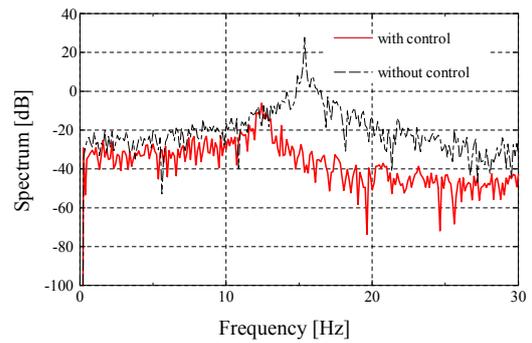


図8 フラッタ制御のスペクトル

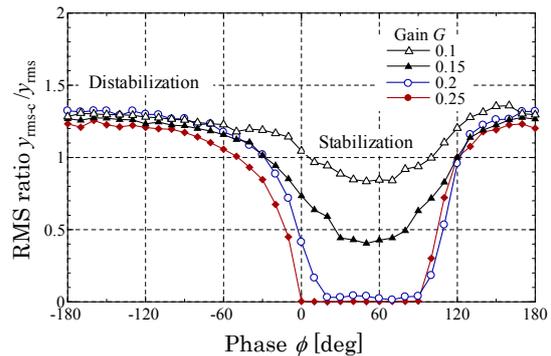


図9 位相に対するフラッタ制振効果

図9にゲイン $G=0.1\sim 0.25$ ，制御位相を $\phi=-180\sim 180\text{deg}$ で変化させた場合の制御による振動振幅 (RMS 値) の変化のグラフを示す．横軸に制御位相，縦軸に振動振幅比を示す．振動振幅比は制御時の振動振幅を非制御時の振動振幅で割ったものであり，1以上で振幅が増加し，1以下で振幅が減少することを表す．グラフより，位相 $\phi=50\text{deg}$ を中心にフ

フラッタ振幅は減少しており位相がフラッタの制振に重要なパラメータであることが明らかになった。

(8) フラッタ流速への影響

図 10 に、ゲイン $G=0.25$ 、位相 $\phi = 50\text{deg}$ で制御を行った場合の制御時、非制御時の流速に対するフラッタ振幅の変化を示している。非制御時のフラッタ流速がおよそ 9.2m/s であるのに対し、制御時ではフラッタ流速が 9.9m/s となり、フラッタ流速を約 8% 増加させることに成功した。

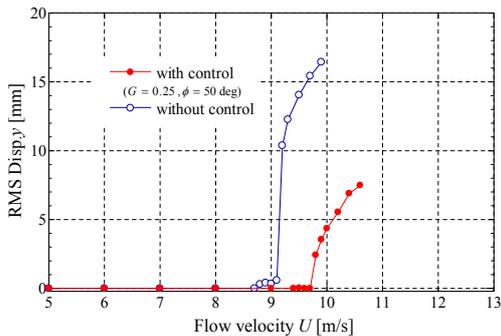


図 10 流速に対するフラッタ振幅

図 11 は、ゲイン $G=0.1, 0.25, 0.45, 0.65$ と変化させた場合のフラッタ流速の比による制振効果の比較を示す。横軸は制御位相であり、縦軸は制御時のフラッタ流速を非制御時のフラッタ流速で割った値 (U_{cr-d}/U_{cr}) である。縦軸の値が 1 以上でフラッタ流速が上昇(安定化)し、値が大きいほど制振効果が高いことを表している。逆に 1 以下ではフラッタ流速が減少し、シートがフィードバック制御によって、励振されることを表す。フラッタ流速が位相 $\phi = 50\text{deg}$ 付近で上昇し、ゲインが大きいほど制振効果が高いことが明らかになった。

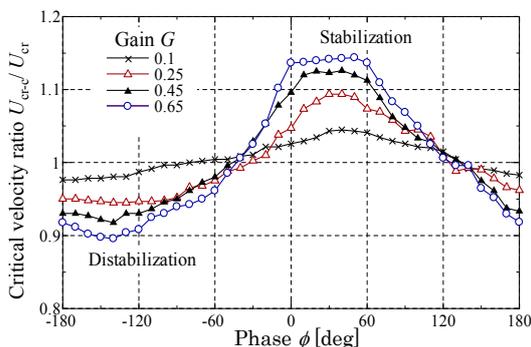


図 11 位相に対するフラッタ流速比

図 12 は、タンデム配置において、オフセット量 Ht を変化させた場合のフラッタ流速の比による制振効果の比較を示す。縦軸はフラッタ流速比 U_{cr-d}/U_{cr} であり、横軸はオフセット量である。全てのオフセット量に対しておよそ 9% フラッタ流速が上昇しており、本

実験で変化させたパラメータ範囲では、タンデム配置の距離を長くしても制振効果はほとんど低下しないことが明らかになった。

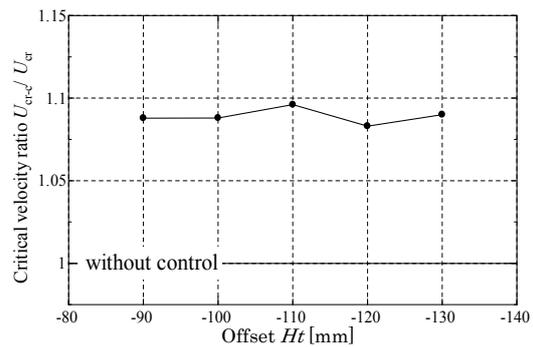


図 12 配置距離に対するフラッタ流速比

(9) まとめと今後の展望

フラッタの基本的な励振メカニズムを調べるために、一様流中の(上流端固定)シートに発生するフラッタの解析モデルを構築した。構築した解析モデルに基づくフラッタ解析と実験により、シートに発生するフラッタの発生条件と励振メカニズムを示すことができた。

また、アクチュエータである可動板の角度を能動的に変化させて流れを制御し、フラッタを非接触で抑止する制御システムを提案し、実験と解析によりその制振効果を示した。このことで、フラッタ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。この非接触フラッタ制御技術の導入により、今後の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、今後さらに研究が進展し、本研究の成果が、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

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

(1) 長谷川亜紀, 渡辺昌宏, 森田亮介, 非定常揚力面理論に基づく矩形シートのフラッタ解析と風洞実験(アスペクト比の影響), 日本機械学会 2014 年度年次大会 CD-ROM 講演論文集 No. 14-1, 講演 No. S1650102, 2014 年, 9 月 10 日, 東京, 北千住, 東京電機大学。

(2) 石見泰啓, 渡辺昌宏, 森田亮介, 可動板を用いたアクティブ空力制御によるシートフラッタの非接触制振, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2014 講演論文集(USB), No. 14-17, Paper No. 218, 2014 年 8 月 26 日, 東京, 上智大学。

(3) 仲田隼, 渡辺昌宏, 原謙介, フィルムに発生する流れ励起波動の非接触制振に関する研究, 日本機械学会 2013 年度年次大会 CD-ROM 講演論文集 No. 13-1, 講演 No.S161012, 2013 年 9 月 10 日, 岡山県, 岡山市, 岡山大学.

(4) 長谷川亜紀, 渡辺昌宏, 原謙介, 非定常揚力面理論に基づく矩形シートのフラッタ解析と風洞実験, 日本機械学会 Dynamic and Design Conference 2013 講演論文集 (USB), No. 13-18, Paper No. 621, 2013 年 8 月 29 日, 福岡県, 北九州市, 九州産業大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 昌宏 (WATANABE, MASAHIRO)

青山学院大学・理工学部・教授

研究者番号 : 40256673